

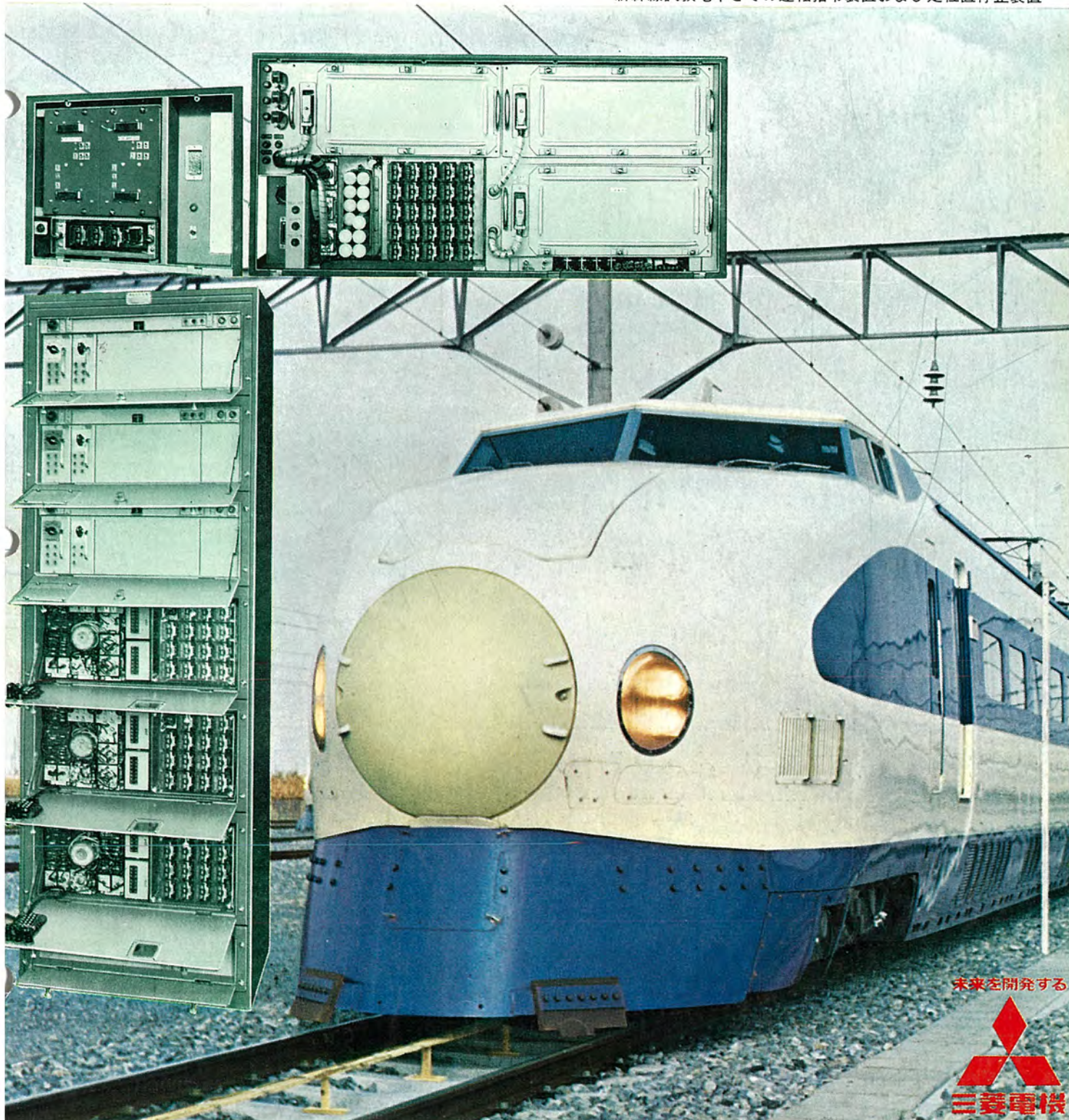
MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.44 February 1970

電鉄用電機品特集

2

新幹線試験電車とその運転指令装置および定位置停止装置



未来を開発する



三菱電機



電鉄用電機品特集

目次

《特集論文》

最近の電気車用主電動機	河村寿三・久山研一	225
電気車用 WN カップリングの歯面強度について	重浦淳一・古田俊久	232
帝都高速度交通営団向け回生ブレーキ付き第二次試作チョッパ制御電車		
	北岡隆・久山研一・芦谷正裕・赤松昌彦・古田俊久・成戸昌司	237
新幹線試験電車用運転指令装置	北川和人・六藤孝雄・金子弘美	245
最近の車両用高圧インバータ	白庄司昭・太田幹雄・田原先	253
電鉄変電所用油冷式シリコン整流器	小林凱・上岡康弘・冬広力	260
海外における三菱電鉄変電所の実績	鈴木敏夫	268
通勤車冷房装置	坪山宏・西部敏夫	277
電鉄変電所負荷のシミュレーション	大野栄一・今村純寿	282
列車のプログラム自動運転と計算機制御	田村坦之	288

《普通論文》

SL 形ラッチ式 電磁接触器とその適用	丸地 謙二・岡戸弘行・長尾良章	297
網目高分子における分子鎖のからみ合い効果	柴山恭一・鈴木康弘	303
符号伝送試験装置とその実測例	前田良雄・平沢茂一・酒井勝也・山内戈胤	309
変圧器のさい断波試験	岩崎晴光	314
電動ばね操作機構付き DHE 磁気しゃ断器	桜井武芳・浅田正敬	322
エポキシ樹脂の耐トラッキング性	草川英和・橋本 修	328
真空中の金属電極間の絶縁破壊現象(1)	秋葉稔光・高倉康一・上田孝寿・磯貝文彦	333

《技術講座》

最近の磁気記憶装置	織田博靖	339
-----------	------	-----

《新製品紹介》

航空機用電動バルブシリーズ・UL-150 形ヘリウム液化装置・三菱 Hi/Re/Li プラインクロー(BCL 形)・三菱けい光灯器具 “録音シリーズ” 発売	344
---	-----

《ニュースフラッシュ》

万国博三菱未来館・万国博会場納め三菱昇降機完成・電子式速度計、速度検知用 F-DC 変換器・中部電力西名古屋火力発電所向け屋 外形タービン発電機完成・配電線用静止形高感度地絡方向継電器 TWG-1 形完成・高速大容量立軸水車発電機完成・コロンビア国ガ ターベ発電所向け・八幡製鉄所向け 7,300 kW かご形誘導電動機完成・ネットワーク用 FLK 形限流ヒューズの完成・超高 速運転に成功、超高速リニヤモータ試験装置完成・三菱エレベット R 形住宅用エレベータ完成	348
--	-----

《特許と新案》

重複表示装置・数値制御装置における円弧内挿近似方式・系統分離装置・電圧周波数変換装置	295
--	-----

《表紙》

新幹線試験電車とその運転指令装置および定位置停止装置

新幹線試験電車は、現東海道新幹線電車の次期モデルチェンジ車の開発のため
国鉄当局はもちろん国内各関係メーカーの全知を結集、最新の技術を取り入れ製
作された世界に冠たる車で、昭和44年3月完成、現在詳細な現車性能試験が行な
われている。

この車の中樞神経系ともいえる運転指令装置および定位置停止装置は、ATC
制限速度のもとで、各種の外乱に対して列車走行速度を一定目標値に追従させる
一方、駅での停止にあたっては、ホームの所定位置に自動的に停車する機能を有
するもので、IC によるデジタル制御、多重化システム構造の採用等により高
い精度と高い信頼度を有しており、当社が原設計メーカーとなり設計製作を担当
したものである。





SPECIAL EDITION OF ELECTRICAL APPARATUS FOR ROLLING STOCK

CONTENTS

SPECIALLY COLLECTED PAPERS

Recent Traction Motors for Electric Rolling Stock.....	T. Kawamura · K. Kuyama...	225
Tooth Contact Stress of WN Gear Coupling for Electric Car.....	J. Shigeura · Y. Furuta...	232
The Second Prototype Chopper Controlled Car with Regenerative Braking for The Teito Rapid Transit Authorities	T. Kitaoka · K. Kuyama · M. Ashiya · M. Akamatsu · Y. Furuta · M. Naruto...	237
Automatic Train Operating Equipment for Experimental Cars on the New Tokaido Line of J. N. R.	K. Kitagawa · T. Mutô · H. Kaneko...	245
Recent High Tension Static Inverters for Rolling Stock.....	A. Shirashôji · M. Ôta · S. Tahara...	253
Oil Cooled Silicon Rectifiers for Railway Substations.....	G. Kobayashi · Y. Ueoka · T. Fuyuhiko...	260
Experience with Overseas Railway Substation Equipment gained by Mitsubishi.....	T. Suzuki...	268
Air Conditioners for Commuters' Trains.....	H. Tsuboyama · T. Nishibe...	277
Simulation of Electric Load in Railroad Substations using Electronic Digital Computer.....	E. Ohno · S. Imamura...	282
Programmed Train Control and Computer Control of Traffic Schedule.....	H. Tamura...	288

TECHNICAL PAPERS

Type SL Latched Magnetic Contactors and Their Application.....	K. Maruchi · H. Okado · Y. Nagao...	297
Effect of Entanglement of Molecular Chains on Network Polymers.....	K. Shibayama · Y. Suzuki...	303
Deta Transmission Testing Equipment and Example of Its Application	Y. Maeda · S. Hirasawa · K. Sakai · J. Yamauchi...	309
Chopped Wave Impulse Test of Transformers.....	H. Iwasaki...	314
Type DHE Magnetic Blow-out Air Circuit Breakers with Stored Energy Mechanisms.....	T. Sakurai · M. Asada...	322
Tracking Resistance of Some Epoxy Resins.....	H. Kusakawa · O. Hashimoto...	328
Breakdown Phenomena between Metallic Electrodes in High Vacuum (1)	T. Akiba · K. Takakura · K. Ueda · H. Isogai...	333

TECHNICAL LECTURE

State of Art of Digital Magnetic Recording Memory.....	H. Oda...	339
--	-----------	-----

NEW PRODUCTS

NEWS FLASH.....		348
-----------------	--	-----

PATENT AND UTILITY MODEL

		295
--	--	-----

COVER :

Experimental Electric Car on the New Tokaido Line and Its Automatic Train Operating Equipment and Fixed Point Stop Equipment

An Experimental car running on the J. N. R. New Tokaido line is the fruit of allout cooperation of the J. N. R. authorities and domestic manufacturers concerned built based on the latest technique and with an aim of replacing the present car in the next term. This new model is unrivalled by any of the existing ones of the kind in the world. Completed in March, 1969, it has been now under the strict field test to confirm its excellent performance in every respect. The automatic train operating equipment and the fixed point stop equipment are, so to speak, the nerve center of the system. They function to have the train follow a scheduled speed with ATC limit speed against external disturbances and also to stop automatically the train at a predetermined position of the station with high accuracy and high performance through the digital control working with integrated circuits and multiplex system construction. The construction was proceeded according to the original disgn and manufacture of the Mitsubishi Electric Corporation.

UDC 621.333

最近の電気車用電動機

河村寿三・久山研一

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P225~231

電気車用主電動機的设计・製作上の最新の技術について述べた。主電動機の容量と特性の決定のための大形電子計算機を用いた実路線ランカーブシミュレーションの手法についてふれ、高脈流率で使用される主電動機の整流性能の考え方、新しい有機耐熱絶縁材料を使用した新絶縁システムの紹介、さらにメンテナンスフリー化の考え方とそのための具体的な技術について述べた。



UDC 621.314.57:621.337

最近の車両用高圧インバータ

白庄司 昭・太田幹雄・田原 先

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P253~259

車両用高圧インバータは電動発電機に代わるものとして登場したもので、保守点検・性能面などにおいてすぐれた特長を有している。

当社は車両用としての特殊な問題点解決のため、回路方式の形究のほか、高耐圧サイリスタの開発など構成部品の改良を重ねた結果、高信頼度の標準インバータを完成し各方面に納入している。

本文ではインバータの問題点とその解決策について現状を紹介し、あわせて最近製作した名古屋市交通局納めの600V地下鉄用、および西武鉄道納めの、1,500V用を中心に当社インバータの方式・特性・試験結果について述べる。



UDC 621.333.26

電気車用WNカップリングの歯面強度について

重浦淳一・古田俊久

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P232~236

電気車の駆動装置に用いられているWNギャップカップリングは入出力軸の相対変位を許容するためにエキスターナルギヤに大きなクラウニングを施している。このクラウニングは、従来歯面全体に一律に施していたが、最近大容量のものが要求されるようになってきたので、歯の中央部のクラウニングと両端部のクラウニングを区分したいわゆる2段クラウニングを採用して容量増大にともなう寸法、重量の増大を避けている。本論文はこのような2段クラウニングWNカップリングの変位、歯面圧の計算および実験について述べたものである。



UDC 621.314.63:546.28

電鉄変電所用油冷式シリコン整流器

小林 凱・上岡康宏・冬広 力

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P260~267

シリコン整流器は電鉄変電所用直流電源としての地位を確立しているが、技術の進歩はその発展の過程において大容量素子の適用と同時に、新冷却方式により小形化、信頼性、騒音、屋外設置など従来からも要求されていた変電所用の理想的な形に大きく貢献してきたといえる。当社は、昭和40年に最初の電鉄変電所用レクチフォーマを納入して以来、油冷式整流器については最大の実績をもって各種の用途に対応してきた。この過程において、国鉄のご指導のもとに完成された油浸式密封形シリコン整流器、あらたに開発された新絶縁冷却液SK-2を用いた通油自冷式シリコン整流器など、各種の応用条件に対応した整流器が完成するにいたった。



UDC 621.337

帝都高速度交通営団向け

回生ブレーキ付き第二次試作チヨッパ制御電車

北岡 隆・芦谷正裕・古田俊久・成戸昌司・赤松昌彦

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P237~244

昭和43年に完成したチヨッパ方式による本格的試作車は予定通りの性能をもつことが1年にわたる長期の試験の結果確認された。このデータを基として量産先行車とも言うべき第二次試作車が完成し、その性能試験が実施された。この試作車の特長とするところは、チヨッパ制御方式の特長である高粘着特性を利用して電動車の比率を少なくして経済性を高めるとともに、全界磁電動機方式の採用により高回生率をもたせて消費電力を在来車より格段に少なくして実用性を高めようとする点にある。この結果はきわめて良好で、チヨッパ方式の実用化は可能になったと考えてよい段階に到達したと言っても過言ではなからう。



UDC 621.314.4

海外における三菱電鉄変電所の実績

鈴木敏夫

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P268~276

当社はオーストラリア、南アフリカ共和国、スペインなど海外で電鉄変電所の実績を築いているが、これらはいくつかの記録品あるいは従来わが国ではみられなかった新しい技術面が多くみられる。NSWR向け5,000KW単器大容量の完成、SAR向けDC3,000V変電所の完成、12相整流方式およびその保護協調方式、SAR向け3,000KW2台内蔵の屋外油冷自冷整流器の完成など特筆すべき点が多くみられる。本文はこれら新しい技術面を中心に当社の海外における電鉄変電所実績の概要を紹介する。



UDC 621.337.1

新幹線試験電車用運転指令装置

北川和人・六藤孝雄・金子弘美

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P245~252

新幹線試験車に搭載された運転指令装置はATC制限速度のもとで、各種の外乱に対して列車走行速度を一定目標値に追従させる機能を持った自動制御装置である。

この装置の主要演算素子として、半導体集積回路素子(IC)を採用し、各種の演算ではデジタル制御を行ない高い精度を得ている。また多重化システム構成により高い信頼度を有している。

これらにより新しい形式の運転制御機器としての役割を十分はたすことができると思われる。



UDC 656.2.021.8:625.2:628.82

通勤車冷房装置

坪山 宏・西部敏夫

三菱電機技報 Vol. 44, No. 2, P277~281

オフィスにおいてはビル空調が、また家庭においてもルームクーラが普及しつつある現状から、通勤形車両にも冷房装置を設備する動きがたかまってくるものと考えられる。

そこで通勤車に冷房装置を設備するについてユーザとメーカーが協力して種々の観点から検討を加え、このたび通勤車冷房用CU12形ユニットクーラを開発したのでその概要について述べ、併せて現車試験結果を紹介する。



UDC 621.337.1:621.337.5

電鉄変電所負荷のシミュレーション

大野栄一・今村純寿

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P282~287

列車のランカーブによる負荷電流特性と路線、駅、変電所よりなる回路条件および運行ダイヤとを組合わせることにより、正確な変電所負荷を求めることのできるデジタル計算機によるシミュレーション手法を開発した。運転間隔、上下線の負荷の始発時差、乗車効率などを入力として与えることにより、各変電所の時々刻々の負荷電流、平均電力、せん頭出力、実効出力のほか、線路損失、架線電圧変動などを求めることができる。本報告では、シミュレーションの手法を述べ、実際に帝都高速度交通営団用に開発されたチョップ制御式試作車を対象として適用した結果について紹介する。

UDC 621.391:621.395.345:654.152

符号伝送試験装置とその実測例

前田良雄・平沢茂一・酒井勝也・山内才胤

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P309~313

近年、高度に発展したIDPSとして、データ伝送技術とデータ処理技術とが一体化したデータ通信システムの活躍がめざましい。

データ通信システムにおけるデータ伝送のしめる役割はきわめて重要であり、特にシステムとしての誤り発生割合、見のかし割合など特有の問題点を含んでおり、十分な検討が必要である。試作符号伝送試験装置は伝送回線に擬似符号パターンを送信しこれを受信して比較、生じた誤りの分類・計数を自動的にこなうものである。

この装置を用いた実測例として、移動体（たとえば列車など）通信として応用される誘導無線伝送路の品質を測定した結果、誘導無線方式による列車自動運転は使用可能という見通しが得られた。

UDC 621.337:656.25

列車のプログラ自動運転と計算機制御

田村坦之

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P288~294

列車運転システム自動化の一方式として車上制御方式をとりあげ車上プログラム式列車自動運転における時間制御系の最適設計法および地上の制御用計算機による列車群の一制御方式を論じる。

列車をプログラム運転する場合、従来は各サンプリング区間ごとのlocalな制御方式がとられていたが、ここで提案する方式は、定時運転からの偏差を全区間にわたってsum upしたものを最小にする、globalな制御方式である。一方、列車群制御方式に関しては、地上制御機能と車上制御機能を合理的に配分し、地上制御のアルゴリズムを簡略にまとめた。本方式によれば、地上設備（計算機、情報伝送装置・端末機器）の規模はきわめて小さくてすむ。

UDC 621.314.22:621.317.333

変圧器のさい断波試験

岩崎晴光

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P314~321

電力用変圧器は雷その他の異常電圧をうけるので、その絶縁強度の検証のため衝撃電圧試験が行なわれる。その項目のうちに、さい断波試験がある。変圧器のさい断波試験条件の規定化は行われていない。本論文は、変圧器のさい断波試験条件によって変圧器に与える過酷度が異なることを検討するため、さい断波形の定義、さい断波形、さい断波試験条件と変圧器の過酷度、さい断波形と変圧器印加端の電位傾度について述べ、さい断までの時間と印加電圧波尾長の影響についても論及した。よって、変圧器のさい断波試験条件を規定化するための問題点を明かにしその方向を示唆した。

UDC 621.316.545

SL形ラッチ式電磁接触器とその適用

丸地謙二・岡戸弘行・長尾良章

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P297~302

産業界における最近の自動化、省力化の傾向は著しく、これに使用される制御器具として、電磁開閉器も伸長をとげている。

当社も一昨年10月にMSシリーズ電磁開閉器を発表し、好評裏に伸長を続けているが、このたびSL形ラッチ式電磁接触器シリーズの開発を完了し、MSシリーズの拡充を行なった。このラッチ式接触器は、瞬時停電における保持、電磁石の騒音防止、電力節約などの特長をもち、照明用または分電盤器具としてもすぐれた特性を発揮し、種々の回路に今後需要増大が期待されるものである。本文にはこのSL形の構造、特性、試験結果および適用方法などを取り上げて紹介した。

UDC 621.316.57.067

電動ばね操作機構付きDHE形磁気しゃ断器

桜井武芳・浅田正敏

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P322~327

大容量火力発電所では、高速母線切換えを行なうことが多くなり、しゃ断器には高速投入が要求されるようになった。従来の磁気しゃ断器はソレノイド操作機構が用いられていたが、これは投入時間が0.3秒~0.4秒を要するので、電動ばね投入機構をもつ磁気しゃ断器を開発し、投入時間を0.1秒とした。この電動ばね操作機構は、電動機または手動により投入ばねを蓄勢し、その機械的エネルギーを解放して接触部を投入し、その投入行程中に、引きはずしばねを蓄勢するもので、引きはずしは従来のソレノイド機構とどうように、引きはずしばねを解放することによってなされる。これにより小形で、投入容量の大きい磁気しゃ断器が得られた。

UDC 541.68:621.215

網目高分子における分子鎖のからみ合い効果

柴山恭一・鈴木康弘

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P303~308

網目高分子の性質におよぼすトポロジカルなからみ合いの効果を明らかにするために多重網目構造体について研究した。多重網目構造はすでにでき上がった第一段の網目の上に第二段の網目を形成させ二つの網目がからみ合いによって互いに入り組むことにより形成される。スチレン-ジビニルベンゼン系について粘弾性と膨潤性を調べた結果、多重網目構造体としての特長が示された。第一段の網目を微粒状とし、多官能性プレポリマに分散した系においてもこのような構造が出現し、粒子の網目密度によって興味ある力学的性質を示すことが認められた。多重網目構造はからみ合いを人為的に調節することが可能であり高分子材料の改質手段として有効である。

UDC 678.67:537.529

エポキシ樹脂の耐トラッキング性

草川英昭・橋本 修

三菱電機技報 Vol.44, No.2・P328~332

電気学会の絶縁材料耐トラッキング性試験法専門委員会がまとめた「トラッキング現象と耐トラッキング性試験法の動向」を紹介すると同時に、電気機器によく用いられているエポキシ樹脂のトラッキング性について報告した。


トラッキング現象は炭化反応であるにもかかわらず、化学的立場よりみた報告が少ない。これはこの現象が複雑なためと、試験法が確立されていないことに帰因する。しかし最近トラッキングに対する基本的な提案がなされ、試験法についても検討されている。トラッキング現象を化学反応として、化学組成との関係を明らかにすることにより絶縁材料の耐トラッキング性は大きく改善される。

UDC 621.3.015.5.537.525

真空中の金属電極間の絶縁破壊現象 (I)

秋葉稔光・高倉康一・上田孝寿・磯貝文彦

三菱電機技報 Vol. 44. No. 2. P333~339

清浄な 10^{-8} Torr台の真空中で、1~5mmギャップでの暗流と平均絶縁破壊電圧を測定し、極値統計処理法で金属電極間の実用的な絶縁破壊限界を求めた。金属電極は、陽極側平面形状・陰極側半球形状で構成される。平均絶縁破壊電圧は、1mmギャップでは、無酸素銅電極で約70KV、ステンレス電極で約100KVを得た。極値統計処理法で計算したコンディショニング後の飽和値での50%絶縁破壊電圧は、平均絶縁破壊電圧によく一致している。0.05%破壊電圧（絶縁破壊限界）は、約10%の精度で決定される。絶縁破壊直前のマイクロな電界強度は、電極形状が一定なもの  では、絶縁破壊電圧によらずほぼ一定値 ($\sim 1 \times 10^{18}$ V/cm) であった。

UDC 681.142 Others

最近の磁気記憶装置

織田博靖

三菱電機技報 Vol. 44. No. 2. P340~343

電子計算機の発達とともに成長してきた一連のデジタル情報の処理技術が他の多くの機器に導入され始め効果を上げている。

本講では数万ビット以上の情報をすぐれた信頼性と経済性をもって記憶し、処理できるデジタル形磁気記憶装置について紹介する。

具体的に扱っているのは磁気ディスク、磁気ドラム等の電気・機械式のランダムアクセスメモリについてであり、終始導入者の指針になることを念頭においている。



最近の電気車用主電動機

河村 寿三*・久山 研一*

Recent Traction Motors for Electric Rolling Stock

Itami Works Toshimi KAWAMURA・Kenichi KUYAMA

Traction motors used for electric cars are mostly DC series wound machines. Though they may look a little old fashioned, they have a distinctive feature which other types of motors can hardly equal to. This is excellent control ability of the machine. But high reliability is another factor which shall not be overlooked. The study on irregular loads imposed on the motors has been untiringly made by various ingenious methods. A typical run-curve process stands out among them to have simulation of the electric car operation. The latest application of the electronic computers to this study is the most outstanding.

This article describes consideration on the rectifying function of traction motors operating with a high pulsating factor, a new system with organic thermostable insulation materials and concrete technique for maintenance-free design.

1. ま え が き

電気車駆動用の主電動機には、直流直巻電動機が主として使用されている。この古典的な電動機が、現代の都市および都市間交通の重大な使命を果している理由を考えるに、制御性のよいことを挙げるには異論の余地がないが、もう一つ重要な要素がある。それは信頼度がきわめて高いことである。すなわち、直巻であるために制御要素は1回路における電圧（または電流）だけでよく、また回路は簡単である。このような特長を有する主電動機を選定するに当たってはシミュレーション技術を用い、いわゆるランカーブという手法によって、特性をいくつか設定して実路線を与え、電子計算機によって容量その他の検討を行なう。本論文ではこのほか主電動機の最新の技術をいくつか紹介して、さらに高性能・高信頼度・高保全度のレベルを追求し、また従来の固定概念を打ち破った技術を取り入れようとする姿を浮き彫りにして、当社の技術陣の志向する方向を示したい。

2. ランカーブ シミュレーション

一般に、機械の設計にあたってはその使用状態を知って、その条件に合うように設計しなければならないことは明らかであるが、電気車用主電動機の場合は、その負荷はほかの機械では見られないほど時間とともに絶えず変化している。このように起動・惰行・制動が不規則に繰り返される電気車の負荷を正確に予測することは、多大な労力を要するため、従来はこれにかわる簡便法として、平均的な一駅間の路線条件を設定して、その区間を電気車が走行した場合のシミュレーションを行なう、いわゆるティピカルランカーブの手法が一般に行なわれてきた。しかし、実際の路線上の複雑な運転状態を一駅間の運転で近似することには無理があり、十分な精度も得られないため、実際に採用される主電動機の容量は、ティピカルランから得られた最適容量よりも、かなり大きく余裕を持たせるのが常であり、また急行や特急のように駅間距離の長い列車については、この手法を用いることは困難であった。

最近では大形電子計算機が利用できるようになり、従来困難視されていた電気車の実路線走行シミュレーションが可能になり、主電動機の容量・特性の決定のためにかならず用いられるようになってき

た⁽¹⁾。この実路線ランカーブシミュレーションは与えられた路線条件の下で、与えられた仕様の電気車が走行した場合の算定到達時分・RMS電流・電力消費量・主電動機その他の温度上昇などを求める手法であって、得られた結果を比較しながら最適の主電動機容量と特性を決定する。このシミュレーションを電子計算機で行なうために、当社では早くから専用の大形プログラムを開発して、ルーチン的にきわめて高密度で使用している。

プログラムの内容は次のとおりである。

インプットデータ

路線条件——こう配、制限速度、停車駅

車両仕様——編成、車重、荷重、主電動機特性、加速減速条件
走行コントロール条件——ブレーキ初速、時間合わせ条件、走行ノッチ

計算内容

計算は距離ベースで行ない、駅間をステップに細分し各ステップにおける車両速度・こう配・走行ノッチなどから、ニュートンの法則をもとにして次のステップの速度を計算する。列車が力行するか惰行するかあるいは制動を行なうかは、駅との近さ、制限速度、ブレーキ初速などから計算機内部で判断する。

アウトプットデータ

各距離程における次の各値をプリントアウトする。

時間、速度、電流、RMS電流、主電動機温度上昇、消費電力、回生電力

このうち、速度・電流・温度上昇を距離基準でプロットした図形をプロッタによって描き出すことができる。一例を図2.1に示す。

主電動機の容量を選定するにあたっては、以前はRMS電流が大きな評価尺度であったが、最近では走行シミュレーションにおける各巻線の温度上昇から直接判定できるようになった。主電動機の各巻線の温度を予測計算する手法もだんだんと確立されつつあり、各巻線を1個の発熱体とみなす最も簡単な方法から、最近では電機子コイルについては、これをコイルと鉄心の2個の発熱体として計算する方法、さらに進んでコイルエンドや整流子も分離して5～6個の発熱体の集合として解く方法も開発されている。

この実路線ランカーブシミュレーションのプログラムは、

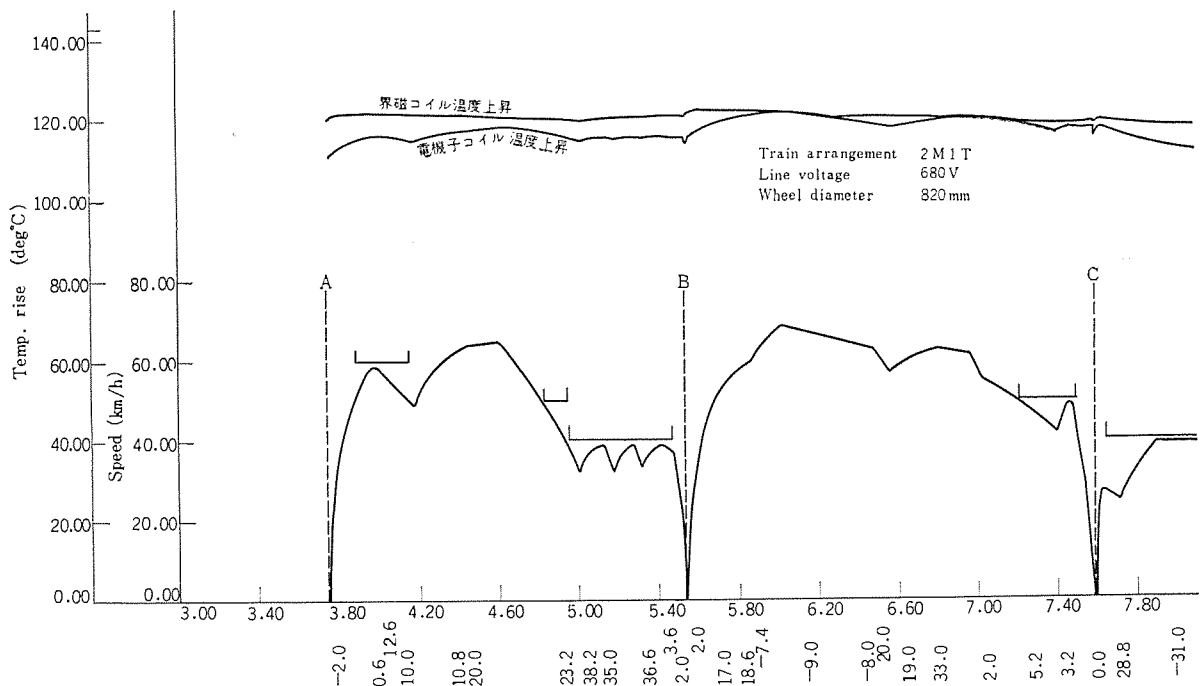


図 2.1 ランカープロッタアウトプットの一例

Example of runcurve plotter output.

- (1) 既設路線に投入する新設計車両の主電動機の設定
 - (2) 新線における車両性能、運転計画および主電動機の設定
 - (3) 現用車のスピードアップ、運用あるいは編成の変更における主電動機容量のチェック
 - (4) 回生ブレーキ計画時の回生電力の推定
- などの用途に大いに活用されている。

3. 高脈流率主電動機

直流電動機を脈流で使用した場合は、直流の場合に比べて整流が悪化する。これは補極磁束の追従が不十分なことと、変圧器起電力が生ずることがおもな原因となっている。変圧器起電力は主極磁束の脈動によって電機子コイルに誘起されるが、主極を純抵抗で分路することによって相当に低減することが可能であって、従来から脈流主電動機では必ず主極の永久分路がなされている。補極磁束の遅れは、補極磁束の通路（とくにヨーク）にうず電流が発生するのが原因であるから、ヨークの一部を積層することによって相当に改善することができる。

しかし、積層ヨークはかなり高価につくので、とくに脈流率を大きくとる必要のあるとき以外は、ソリッドヨークで許容できる程度に脈

流率をおさえて使用するのが一般的であって、表 3.1 に示すように日本国有鉄道在来線の交流車はすべてこの方針で設計されている。ソリッドヨークで許容できる脈流率は一般に約 30 % (60×2 Hz の場合) といわれているが、最近製作した 在来線高速車両用 MT 58 X 形主電動機では、これより若干脈流率を上げる試みがなされたが、工場試験においてきわめて優秀な整流性能を発揮し、さらに高脈流率化できる可能性を示した。

新幹線用主電動機の場合は、東海道新幹線の MT 200 形⁽³⁾を製作時に、できるだけ交流側電流の高調波を少なくするために、主電動機脈流率を 50 % と定め、これに耐えるために積層ヨークが採用されたが、この考え方が山陽新幹線試験電車用 MT 916 形主電動機まで踏襲されている。ところが最近交流側電流のひずみによる誘導障害の防止が大きく取り上げられるようになり、種々のシミュレーションを行なった結果、図 3.1 に示すように直流側の脈流率を 75 % 程度とするのが誘導障害を最も少なくできることが判明した。一方、高脈流主電動機の整流作用をベクトル的に解析する手法を確立し、図 3.2 に示すように MT 200 形主電動機では定格状態において、リアクタンス電圧と変圧器起電力との合成である火花電圧が、補極磁束による補償電圧によってほぼ完全に打ち消されていること、また設計

表 3.1 脈流主電動機一覧表
List of pulsating current traction motor.

形 名	定 格						ヨーク	永久分路率 %	脈 流 率 %	
	種 類	出 力 kW	電 圧 V	電 流 A	回転数 rpm				50×2 Hz	60×2 Hz
国 鉄 在 来 線	MT 52	1 時間	475	900	570	1,070	ソリッド	2	24	20
	MT 53	1 時間	650	1,500	465	830	ソリッド	5	27	23
	MT 54, 54 B	1 時間	120	375	360	1,680	ソリッド	10	36	30
	MT 54 A	1 時間	150	500	330	2,275	ソリッド	5	36	30
	MT 58 X	1 時間	110	375	330	2,500	ソリッド	2	38	32
国 鉄 新 幹 線	MT 912	連 続	170	415	450	2,200	ソリッド	2	—	30
	MT 200	連 続	185	415	490	2,200	積 層	10	—	50
	MT 915	連 続	275	650	460	2,400	積 層	10	—	50
	MT 916	連 続	250	650	420	2,500	積 層	10	—	50
	MT 917	連 続	250	650	420	2,500	積 層	10	—	75

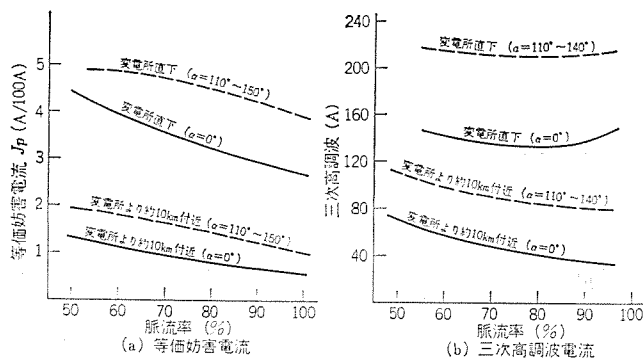


図 3.1 脈流率と誘導障害の関係
Pulsating factor and inductive interference.

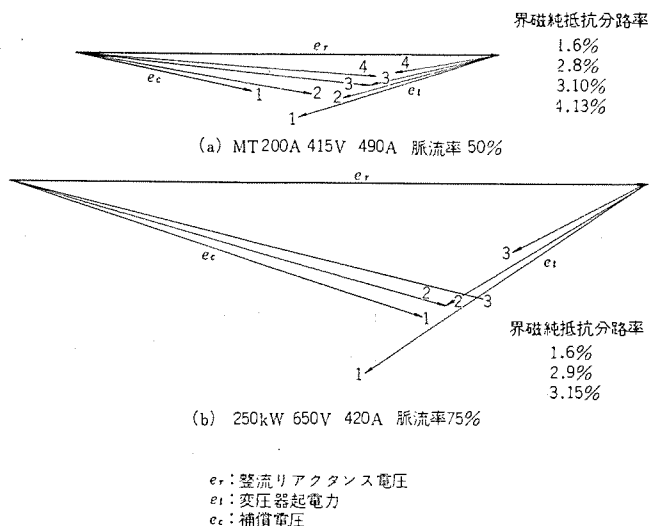


図 3.2 脈流電動機の整流ベクトル図
Vector map of commutation.

上の考慮をばらえば、脈流率 75% でも同様のことが可能であることが明らかとなったので、脈流率 75% を許容する MT 917 形主電動機が開発された。

MT 917 形主電動機は、高脈流率に耐えるために次のような対策がほどこされている。

- (1) ベースとなる直流整流性能を向上させるために、電機子コイル数は小さめに選び、整流リアクタンス電圧を下げている。したがって、若干鉄機械の傾向となっている。
- (2) 主極のアンパターンを大きくとって、整流安定度を向上させるとともに変圧器起電力を低減させている。
- (3) ヨークの積層部分を増して補極磁束の遅れをできるだけ少なくしている。
- (4) 脈流のピークでの磁気飽和をできるだけ少なくするため、各部の磁束密度は低く設計している。
- (5) とくに、補極コイルには脈流がそのまま流れるため、電流密度を低く設計している。

なお、最近サイリスタを使用したチョップ制御が直流電気車に採用されはじめていますが、この場合も主電動機には脈流が流れる。脈流に対する基本的な考え方は、上記の交流整流器式車両用主電動機の場合と同じでよいが、脈動周波数が高くなるのでこの点への配慮が必要である。これについては特集論文中の「帝都高速度交通営団二次試作チョップ制御電車」の中でふれている。

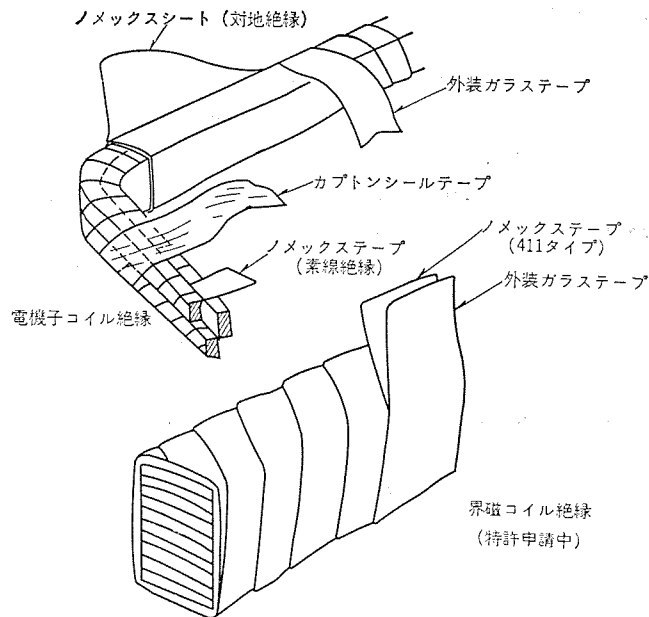


図 4.1 三菱新耐熱絶縁システム
New thermostable insulation system.

4. 新しい絶縁技術

4.1 耐熱絶縁材料

近年合成化学の分野における耐熱性高分子材料の研究の急速な進歩に伴って、従来の耐熱性高分子材料よりも一段とすぐれた耐熱性と機械的特性を有し、しかも加工性のよい耐熱ポリマが出現し、電気車主電動機用として注目されているが、当社ではこれらの耐熱絶縁材料のうち、絶縁工作に適しているノメックス (NOMEX, デュボン社商品名) を使用して、業界にさきがけて耐熱主電動機の開発に成功した。

ノメックスとは米国デュボン社の開発した耐熱ナイロン紙で、芳香族ポリアミド樹脂と呼ばれていて、材料の耐熱性は H 種にランクされる。現在市販のものは紙状を呈し、芳香族ポリアミド樹脂の繊維と粉末とを抄紙したものといわれていて、カレンダーがけしたじょうぶな紙状のもの (410 タイプ) とカレンダーがけしない吸取紙状のもの (411 タイプ) がある。410 タイプの耐電圧性はマイカとほぼ同じであり、耐水性がきわめて良好である。

このほかに、デュボン社はカプトン (KAPTON, 商品名) を市販しており、これは耐熱ポリイミド樹脂のフィルムであって、ノメックスよりはさらに耐熱性がすぐれて 220°C にランクされるが、フィルム状のために若干絶縁工作上難点があり、当社では補助的な絶縁に使用して効果をあげている。

4.2 新耐熱絶縁システム

これらの新しい絶縁材料を使用した当社の標準的な耐熱絶縁システムを図 4.1 に示す。

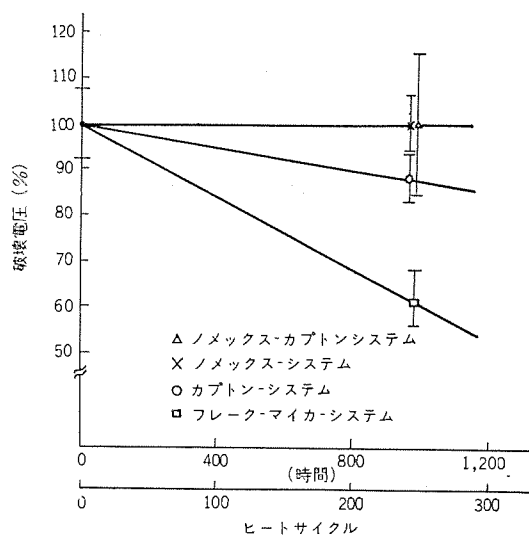
電機子コイルは一般に比較的薄い絶縁壁を持っているので、高密度のほうの 410 タイプのノメックスで素線絶縁およびスロット絶縁を施し、さらにコイルエンドの補強とワニスの保持のために、カプトンテープをコイル全周にわたって巻いている。外装テープには通常のガラステープを用い、ワニス処理は F 種無溶剤形エポキシ樹脂を真空圧入含浸して完全ボイドレスに仕上げています。ノメックスの耐電圧はほぼマイカと同じであるが、マイカの場合のようにガラスバックが不要なので、絶縁壁

はマイカ絶縁の場合より薄くできる。これは電機子コイルのスロット内スペースファクタの向上に多大の効果があり、電機子のようにスロット内スペースファクタで機械の大きさが左右される場合には、それだけ機械を小さく設計しうるか、あるいは同一容積で大容量化が可能となる。同一寸法に収めしうる電動機容量は、新耐熱絶縁システムの場合に従来のマイカ絶縁より約20%大きい。表4.1に東海道新幹線電車用MT 200形主電動機のスロット内スペースファクタを新耐熱絶縁システムの採用によって改善し、山陽新幹線試験電車用MT 916形主電動機として大容量化した例を示す。

界磁コイルの絶縁にも、従来のマイカテープに代えてノメックステープを用いている。界磁コイルの場合は、電機子ほどスペースファクタが問題ではなく、絶縁壁がある程度厚くてもよいので、低密度のほうの

表 4.1 溝内スペースファクタ改善例
Improvement of slot space factor.

形 名	MT 916	MT 200A
絶 縁	ノメックス-カプトン	マイカ
スロット寸法		
導体寸法	3.4×5.7	3.0×7.1
導体断面積mm ²	18.831	20.571
みぞ内スペースファクタ	62.5%	55.3%



(a) モートル試験結果

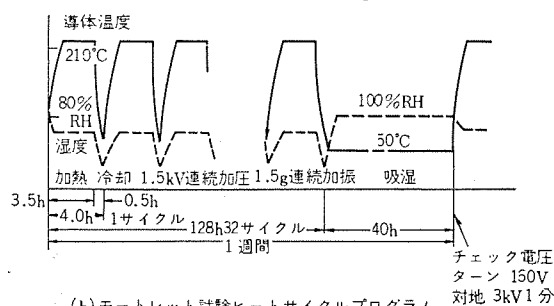


図 4.2 モートル試験の条件と結果
Condition and result of motorette test.

411タイプのノメックスを使用してワニスの含浸性の向上をはかっている(特許申請中)。界磁コイルの場合は、とくにノメックスの特長である耐水性の良いという長所が発揮され、浸水しても絶縁抵抗・耐電圧とも低下しないので十分に運転に耐えることができる。

4.3 耐熱性の評価

ノメックスそのものはH種、またカプトンはそれ以上の耐熱性を有するが、これらの材料を用いた上記の絶縁システムは、現在のところF種無溶剤形エポキシ樹脂で真空圧入含浸されているため、従来の考え方ではシステムとしての耐熱性もF種にランクされることになる。しかし、米国電気学会では、モートル試験の結果からこの種の絶縁システムはH種であるという結論を出そうとしており、わが国でもそれに追随する方向へ進むものと思われる。

図4.2に当社で実施したモートル試験結果の一例を示す。加熱・振動・吸湿を加えるモートル試験における絶縁破壊電圧の変化をみると、約1,000時間の劣化試験後もノメックス-カプトンシステムは劣化の傾向を示さず、従来のマイカシステムは劣化の傾向が大きい。カプトンだけのシステムは若干劣化の傾向があるが、これはカプトンとエポキシの適合性の問題があるものと見られている。いずれにしてもノメックスを主絶縁としたものは、在来のF種に比較してきわめてすぐれた絶縁システムで、マイカを用いたものによく見られた初期故障的なトラブルも絶無となり、卓越した信頼度が得られる。

今後はF種よりもさらに耐熱性のある無溶剤形の樹脂の開発に重点が置かれ、完全ボイドレスの名実ともにH種の高信頼度絶縁システムも現われてくるものと思われる。

5. メンテナンスフリー技術

5.1 メンテナンスフリー化の考え方

最近車両用機器についてメンテナンスフリーを重視する風潮にあり、これは主として保守回帰の延長と日常保守における省力化を意味していることが多い。それはそれとしてきわめて重要なことであるが、メンテナンスフリー化と機器の信頼度とは表裏一体のものであるから、両者を関連づけて考えなければならない。

図5.1に示すように、製品(たとえば主電動機)の状態を正常と機能を失った状態(故障)とに分けて考えると、正常から故障へ移行しない能力が、いわゆる信頼度(reliability)であって、故障状態になった場合に、正常状態へ戻しやすさがいわゆる保全度(maintenability)である。ただしここでいう故障とは必ずしも物がこわれることでなく、機能が失われたり低下して不満足な状態におちいることである。このように考えると、メンテナンスとは故障になったり、故障になる前に正常へもどす処置をとることで、したがってメンテナンスフリーとは、故障(非正常)状態になりにくくすることと、故障状態からあるいは故障になる前に正常に戻す処置のやりやすさを指すことになる。

一般の産業用機器の故障率の推移は図5.2に示すような曲線で示される。この曲線は初期故障曲線、偶発故障曲線および老化故障曲線の三つの部分から成る。

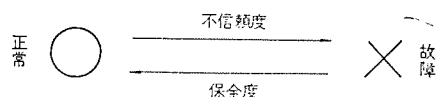


図 5.1 正常と故障状態
Normal and failure state.

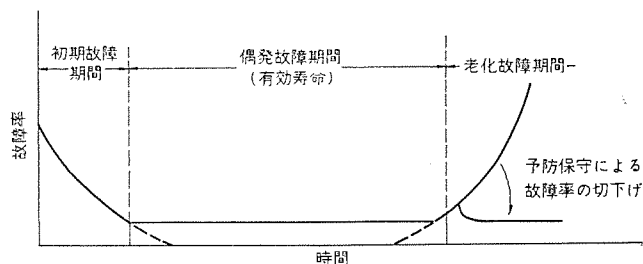


図 5.2 故障曲線
Failure curve.

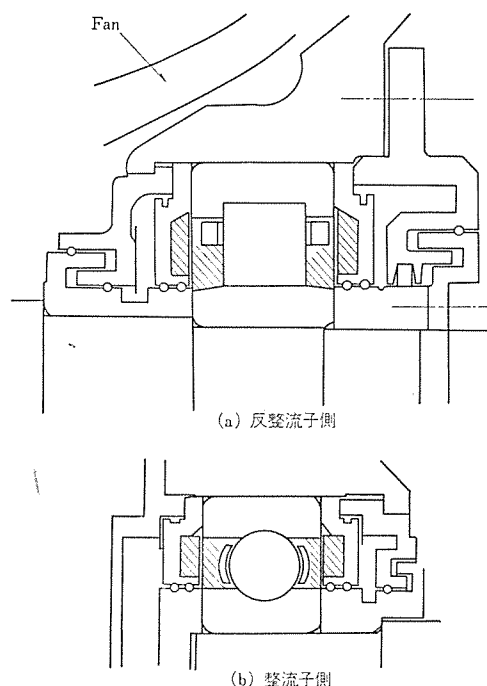


図 5.3 密封軸受構造
Packed type bearing construction.

初期故障期間は、設計の不具合や材料または作業上の欠陥によって初期的な故障が発生する期間であって、主電動機の場合は初期故障は非常に少なく、この期間が明確でないのが普通である。

この期間が過ぎると故障率は時間的にほぼ一定で、低く安定し、故障の起こり方は偶発的となる。この期間は製品を使う方にとって最も望ましい時期であるので、この期間の長さを有効寿命と呼んでいる。信頼性は故障率の大きさと有効寿命の長さで評価されるが、実際には有効寿命に達するまでにならず予防保守が行なわれ、これによって故障率の増加を食い止めて有効寿命をのばすことができる。主電動機の場合、ブラシの交換、整流子の手入れ、さらには絶縁更新などメンテナンスのほとんどすべてはこの予防保守である。この期間では偶発故障率の低減のためには予防保守は効果がなく、むしろ製品を作る側での信頼性の向上をはかるべきであるから、メンテナンスフリーのためには、予防保守周期の延長と予防保守を要する部分の減少および保守作業の簡易化が重要となる。

機器の使用年数が寿命に近づいてくると故障率が時間とともに増加するようになる。この期間は老化故障期間と呼ばれ、故障は構成部品の摩耗や老化に起因する。しかし、摩耗や老化が始まる前に、あるいは始まりかけたときに部品の取り換えや加修を行なうと、上昇してくる故障率を切り下げ、耐用寿命を延長できる。これが上に

述べた予防保守である。

5.2 メンテナンスフリー技術

主電動機のメンテナンスフリー化のために行なわれている技術は、具体的に次のようなものである。

(1) 予防保守そのものをなくすための技術

(a) ライザ接続の TIG 溶接化⁽³⁾：ライザハンダゆるみなどのチェックを不要にする

(b) 電機子バインドのガラスバンド化：バインドゆるみなどのチェックを不要にする

(c) 風取りフィルタの無保守化：フィルタ清掃を不要にする

(2) 予防保守周期を延長するための技術

(d) 絶縁システムの改良⁽⁴⁾：絶縁更新周期を延長する

(e) 長寸ブラシの使用：ブラシ交換周期を延長する

(f) 軸受の密封構造化：グリス交換周期を延長する

(g) ブラシ保持器絶縁スピンドルの改良：清掃交換周期を延長する

次に主な項目について詳述する。

5.3 密封軸受構造

主電動機の軸受はグリスで潤滑されるが、使用条件はグリス潤滑としては過酷なほうに属するので、定期検査の中間で主電動機を分解しないでグリスの補給ができる軸受構造として、いわゆるグリスパルプ方式が開発されて一般に使用されてきたが、最近では中間の補給もなくし、1年半ないしは3年間無給油で使用するための軸受構造を開発し、すでにならかなり広範囲にわたって使用されている。

無給油期間の延長を実現するためには軸受の密封化が必要であるが、そのために2種類の方法が実用化されている。一つは軸受の両側に密封板を置く密封軸受箱方式で、この例を図5.3に示す。軸受の両側にセクタ付の密封板をもうけ、グリスの飛散防止、軸受側面にあるグリスの強制かくはんの防止、グリスたまりから軸受内部への補油、防じんおよび油もれ防止の各機能を持たせている。密封板の外側にはエアポケットをもうけて軸受内外の気圧差のダンパとし、ラビリンスギャップはできるだけ狭くしてダストの浸入と油の漏出を防いでいる。もう一つはシールド軸受を用いる密封軸受方式で、シールド板が組み込まれた軸受を使用する。

前者は標準の軸受が使用できるので従来の構造から移行しやすいという利点を持つ反面、構造がやや複雑化する。後者は構造が簡単であり、シールド軸受の標準化が進めば将来は広く使用されるものと思われる。また、いわゆる使い捨ての方向に容易に進むこともできる。

一方、これに使用するグリスも従来の Ca-Na 石けん基のものにかわって、Li 石けん基のグリスを使用して安定性を高め、グリス寿命の延長をはかっている。最近のグリスの進歩もいちじるしく、きわめて長寿命を期待できる新しいグリスもすでに一部で試用されている。

5.4 風取り装置

自己通風式主電動機の通風は整流子側に設けた風取口から風を取り入れ、反整流子側に設けたファンによって吸い出す方式とするのが普通である。当社では風取入口からの雨水およびゴミの浸入をなくするため防じん・防水効果のすぐれた遠心風取り装置を開発し、電車で主電動機の標準として広く使用している。この方式は風取り口のスクリーンによって一応ごみと水滴を取りのぞいたうえ、カバー内部の遠心効果と比重の差によってさらにろ過する構造であるが、う

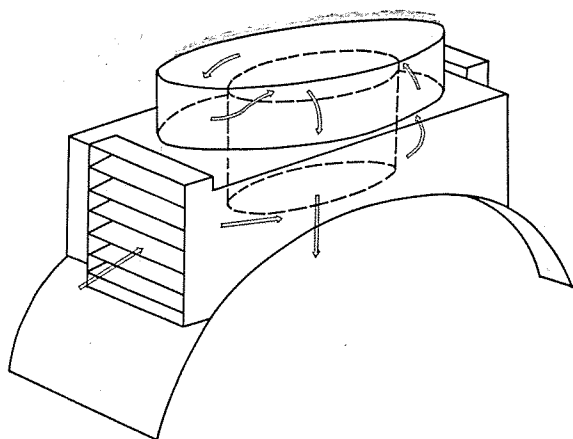


図 5.4 無保守遠心式風取装置
Maintenance-free air inlet cover.

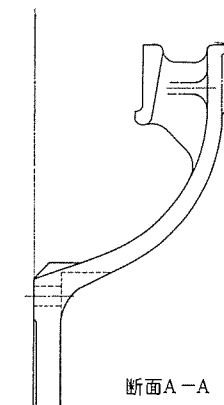
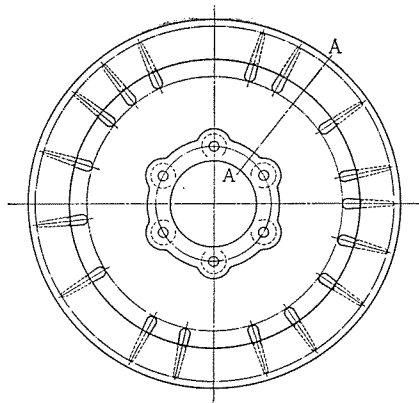


図 5.5 不等ピッチファン
Scrambled blade fan.

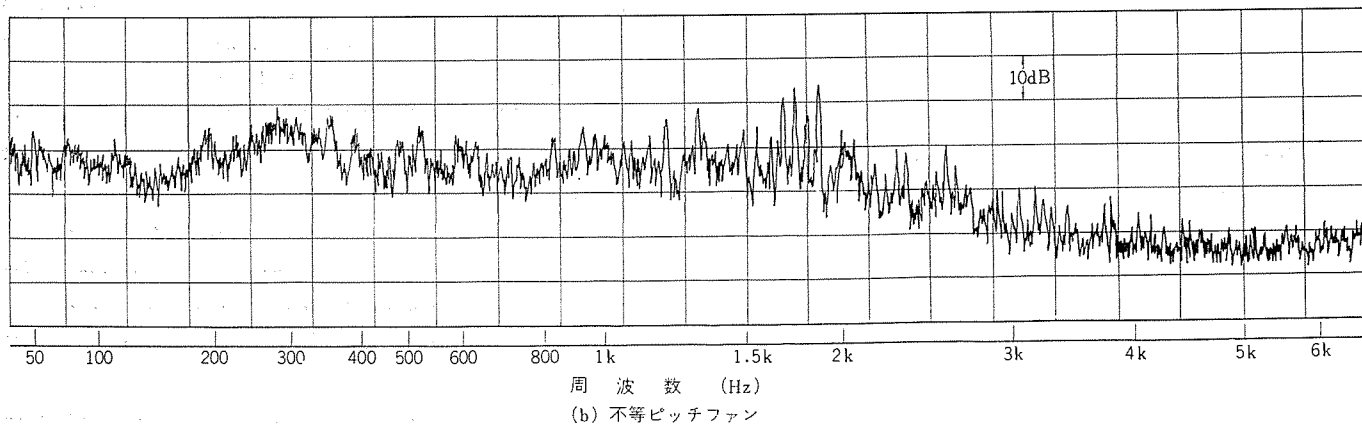
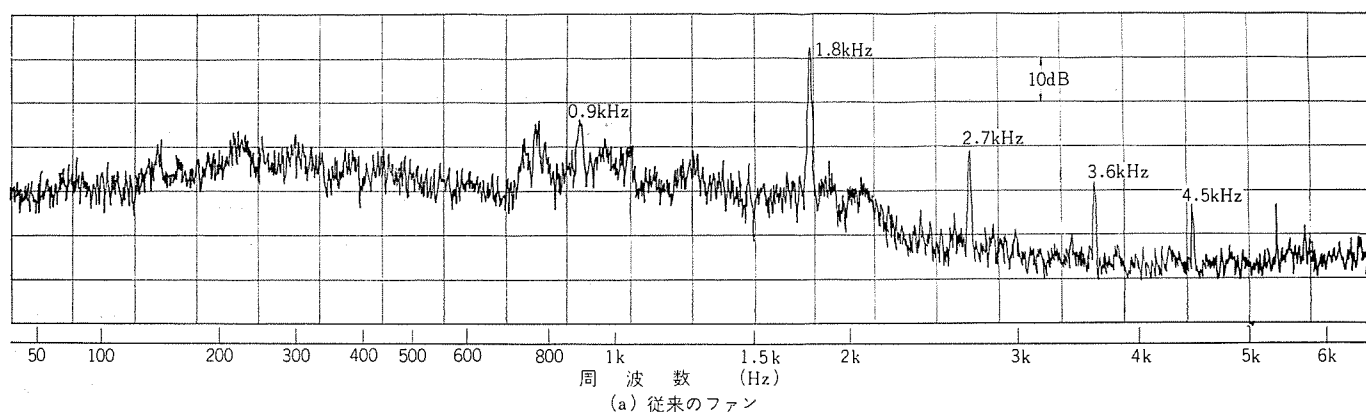


図 5.6 主電動機騒音スペクトラム
Spectra of traction motor noise.

ず巻き効果がきわめてすぐれているためにスクリーンはほとんど必要がなくなっており、スクリーンの目づまりを放置すると通風量が少なくなると時に重大なトラブルを招くことがあった。このため、図 5.4 に示すようなスクリーンを廃してルーバ構造とした風取り装置が開発され、まったく保守の不要な風取りとして良好な実績をあげている。

将来の方向としては絶縁の信頼度あるいはブラシおよびブラシホルダの耐じん性との関係もあるが、やはり風取りカバーのメンテナンスフリー化の方向へ進むべきものと考えられる。

5.5 ブラシおよび整流子

整流子ライザと電機子コイルの接続の溶接化はすでに一般的になっ

ており、従来一時的な過負荷で異常温度上昇した場合、ライザのはんだが溶けて引き起こしていた故障が絶無となった。当社ではライザの溶接は TIG 溶接で行なっており、工作の信頼度もきわめて高い。

カーボンブラシについては品質の安定化をはかるとともに、さらに電気車用主電動機に適した材質の開発に努力がはらわれている。一方、ブラシの長さを長くしてブラシ交換の周期を延長する試みもなされており、従来の長さ 50 mm にかわって長さ 64 mm のブラシが電車用にも使用されつつある。このための新しいブラシホルダも開発されている。

ブラシ保持器絶縁スピンドルは合成樹脂製が一般化してきたが、当社

ではジアリルフタレート樹脂製を開発するとともに、耐アーク性および機械的強度の増加に努め、他の合成樹脂スピンドルの持つ欠点を一掃することに成功した。また、耐雪性・耐汚損性にすぐれたひだつきスピンドルも多数使用されている。

ブラシおよび整流子は、直流電動機の宿命として最後まで完全なメンテナンスフリー化が困難な部分であるが、現在この部分の保守に要している手数は大きいものであるから、今後ともブラシおよび整流子関係の改良には多大の努力をはらっていく考えである。

5.6 ファン

メンテナンスフリー化とともに低騒音化の研究も進めており、騒音周波数の分散をはかった不等ピッチファンが開発されて一部に使用されている。外形を図5.5に、従来の等ピッチファンと比較した騒音の周波数特性を図5.6に示す。従来、主電動機騒音の主成分であったファンの羽根による円周周波数が分散され、耳ざわりな騒音を取り除くことができる。設計的には、従来等ピッチに配置されていたファンの羽根を不等ピッチとすればよいが、ピッチの選定においては各ピッチがすべて異なること、ベクトル的に力のバランスがとれていることなどの条件が必要で、多大の開発努力を要する。一般には不等ピッチとすることによって通風量が減少するので、これをカバーするために羽根の形状にはとくに注意をはらい、従来の等ピッチファンよりむしろ通風量の多いものが得られている。

6. む す び

以上、ランカー・ブシミュレーションの手法および主電動機の最新の技術について概論的に述べた。直流機としての主電動機の原理そのものは古典的なものであるが、技術上の進歩はいちじるしく、常に最新の技術を率先して取り入れ、面目を新たにしている。今後は絶縁技術のなおいっそうの発展が期待されるとともに、メンテナンスフリー化が強力におし進められるであろう。当社としても顧客各位のご要望を実現できるように最大の努力をはらい、高信頼性に加えて使いやすく、保守に手のかからない主電動機の実現を目指したい。

末筆ながら国鉄・私鉄はじめ関係者のかたがたのご理解、ご支援に深く感謝して稿をおわる。

参 考 文 献

- (1) 北川・河村・久山：電子計算機による電気車走行計算，三菱電機技報 39, No. 2 (昭40)
- (2) 河村：東海道新幹線量産車用主電動機，三菱電機技報 38, No. 3 (昭39)
- (3) 浅越，河村：最近の車両用主電動機，三菱電機技報 41, No. 2 (昭42)
- (4) 河村：最近の電気車用主電動機，電気計算 昭44年11月号

電気車用 WN カップリングの歯面強度について

重 浦 淳 一*・古 田 俊 久*

Tooth Contact Stress of WN Gear Coupling for Electric Car

Itami Works Jyunichi SHIGEURA・Yasuhisa FURUTA

In order to permit large movement of an input and output shaft, WN gear coupling used for the driving equipment of electric car is provided with large crowning at its external gears. The crowning used to be made uniformly all over the surface of the tooth, but owing to the recent demand of large capacity one the so called two stage crowning which divides it into a central crowning and both ends crownings are employed to avoid the increase of the dimensions and the weight accompanying the increase of the capacity.

This paper describes, in connection with this two stage crowning WN coupling, the movement, the calculation of the tooth surface pressure and experiments on it.

1. ま え が き

東海道新幹線をはじめ多くの電気車の平行カルダン駆動装置に用いられている WN カップリングは、一般に産業用に用いられているギヤカップリングに比較して変位条件がきびしく、入出力軸の相対変位を許容するためにエキスターナルギヤに大きなクラウニングを施している。このクラウニングは、従来歯面全体に一樣に施していたが、最近電車用主電動機が大容量化し、また電気機関車用 WN ドライブが開発されるにいたり、WN カップリングも大容量のものが要求されるようになったため、運転時の負荷状態における変位のためのクラウニングと、台車に組み込む際に必要な無負荷状態における変位のためのクラウニングを区別した、いわゆる 2 段クラウニングを施して負荷状態におけるトルク伝達容量を大きくして、いたずらにカップリング寸法、重量が増大するのを避けている。

本論文ではこのような 2 段クラウニング WN カップリングの変位、歯面強度の理論計算および実験の一部について実用的な見地から述べる。

2. エキスターナルギヤ歯面とインターナルギヤ歯面の相対的変位

WN カップリングの断面を図 2.1 に示す。WN カップリングの変位は図 2.2 のような 3 種類の変位に大別できる。これらのうち軸方向変位については、インターナルギヤがクラウニングのない平歯車となっているためにとくに考慮する必要がない。角度変位、平行変位はいずれもエキスターナルギヤとインターナルギヤの角度変位を誘起するので、基本的にはこの角度変位だけを考えればよい。

インターナル、エキスターナルギヤ歯面の相対変位は、インターナルギヤを基準とするエキスターナルギヤの歯基準点の変位と歯基準点に対する歯面の

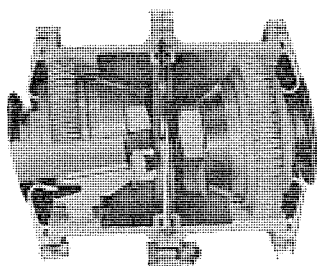
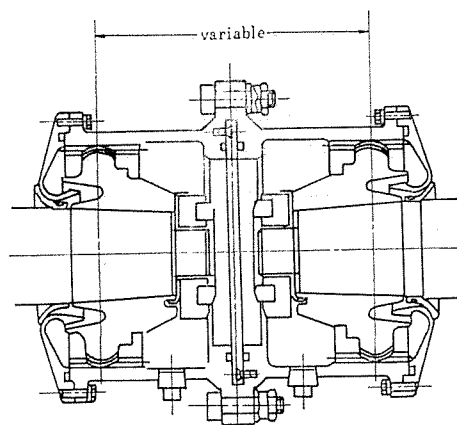
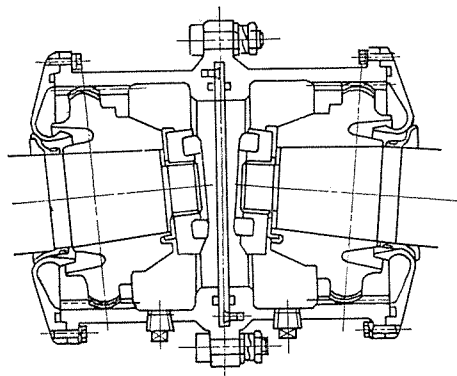


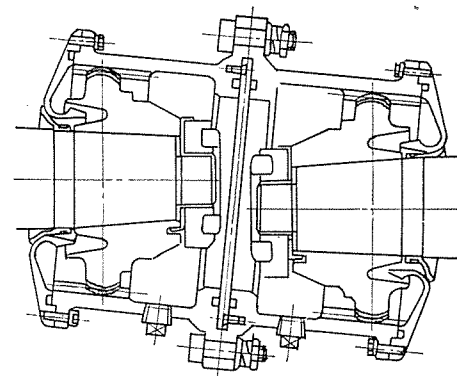
図 2.1 WN カップリング 断面
Longitudinal section of WN coupling.



(a) 軸方向変位



(b) 角度変位



(c) 平行変位

図 2.2 WN カップリングの変位
Movement of WN coupling.

変位の和になる。

2.1 歯基準点の軌跡

図 2.3 はエキスターナルギヤがインターナルギヤに対して微小角 α だけ傾いている状態を示す。図 2.3 において

N, N': エキスターナルギヤピッチ 円, インターナルギヤピッチ 円の交点

O: ピッチ 円中心

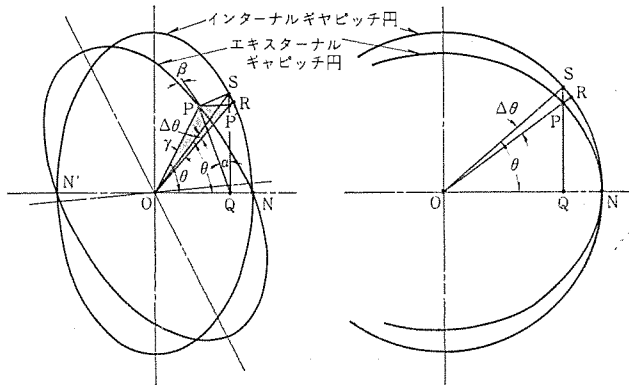


図 2.3 歯基準点の軌跡
Loci of teeth basic points.

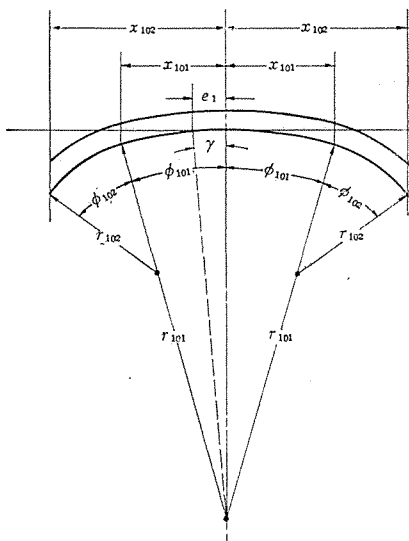


図 2.4 歯側面図 Side view of tooth.

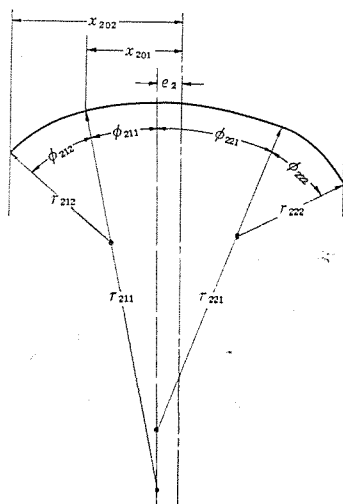


図 2.5 歯断面図 Section of tooth No. 1

P: エキスターナルギヤピッチ 円上の任意の点

θ : $\angle PON$

S: インターナルギヤピッチ 円上 $\angle SON = \theta$ の点

β : 点 P, 点 S を通る接線のなす角

γ : $\angle POS$

P': P より インターナルギヤ 面上におろした垂線の足

δ : $\angle P'ON$

とすると次式が成立する。

$$\tan \beta = \tan \alpha \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

$$\tan \gamma = \tan \alpha \cdot \sin \theta \quad (2.2)$$

$$\tan \delta = \cos \alpha \cdot \tan \theta \quad (2.3)$$

エキスターナルギヤピッチ 円上基準点 P の インターナルギヤピッチ 円 上基準点 S に対する円周方向変位は

$$X = -\frac{1}{2} d_p \sin \theta \cdot \cos \theta (1 - \cos \alpha) \quad (2.4)$$

ただし d_p : ピッチ 円直径

となる。

2.2 歯の形状

2.2.1 歯の加工

インターナルギヤは一般的なインボリュート平歯車であるが、エキスターナルギヤはホブカッタをギヤ軸方向に移動させると同時に半径方向にも移動させて切削し、大幅なクラウニングを施すためにやや複雑な形状となる。図 2.4 はエキスターナルギヤ歯側面の図で歯の中心線は $x < x_{101}$ の範囲では曲率半径 r_{101} , $x_{101} < x < x_{102}$ の範囲では曲率半径 r_{102} のクラウニング曲線上にある。

2.2.2 歯断面

2.2.1 節のような加工を行なったエキスターナルギヤの歯断面の形状を求める。

図 2.5 はエキスターナルギヤの歯を図 2.3 の点 P を通り インターナルギヤと同心の円筒で切った断面である。

e_2 : P 点と歯中心の距離

x_{201} : 1 段目 クラウニング 領域

x_{202} : 2 段目 クラウニング 領域

r_{211} , r_{221} : 1 段目 クラウニング 領域の断面平均曲率半径

r_{212} , r_{222} : 2 段目 クラウニング 領域の断面平均曲率半径

α_c : 工具圧力角

として ϕ_{211} , ϕ_{221} , ϕ_{212} , ϕ_{222} を図 2.5 のように定めると次式が成立する。

$$e_2 = r_{101} \tan \gamma \quad (2.5)$$

$$x_{201} = \frac{x_{101}}{\cos \gamma} \quad (2.6)$$

$$x_{202} = \frac{x_{202}}{\cos \gamma} \quad (2.7)$$

$$r_{211} = \frac{(x_{201} - e_2)^2}{2y_{211}} \quad (2.8)$$

$$r_{221} = \frac{(x_{201} + e_2)^2}{2y_{221}} \quad (2.9)$$

$$r_{212} = \frac{\{(x_{202} - x_{201}) / \cos \phi_{211} + w_{212} \tan \phi_{211}\}^2}{2w_{212}} \quad (2.10)$$

$$r_{222} = \frac{\{(x_{202} - x_{201}) / \cos \phi_{221} + w_{222} \tan \phi_{221}\}^2}{2w_{222}} \quad (2.11)$$

ただし $w_{212} = \{y_{212} - y_{211} - (x_{202} - x_{201}) \tan \phi_{211}\} \cos \phi_{211}$

$y_{211} = \{r_{101} (1 - \cos \phi_{101}) - (x_{101} - e_1) \tan \gamma$

$$\begin{aligned}
& -r_{101}(1-\cos \gamma)\} \tan \alpha_c \cos \phi_{101} \\
y_{212} &= \{y_{102} - (x_{102} - e_1) \tan \gamma - r_{101}(1-\cos \gamma)\} \tan \alpha_c \\
& \quad \cdot \cos (\phi_{101} + \phi_{102}) \\
y_{102} &= r_{101}(1-\cos \phi_{101}) + (x_{102} - x_{101}) \tan \phi_{101} \\
& \quad + r_{102} \cos \phi_{101} - (x_{102} - x_{101}) \tan \phi_{101} \\
& \quad - \{r_{102}^2 \cos^2 \phi_{101} - 2r_{102}(x_{102} - x_{101}) \sin \phi_{101} \\
& \quad - (x_{102} - x_{101})^2\}^{\frac{1}{2}} \\
w_{222} &= \{y_{222} - y_{221} - (x_{202} - x_{201}) \tan \phi_{211}\} \cos \phi_{221} \\
y_{221} &= \{r_{101}(1-\cos \phi_{101}) - (x_{101} + e_1) \tan \gamma \\
& \quad - r_{101}(1-\cos \gamma)\} \tan \alpha_c \cos \phi_{101} \\
y_{222} &= \{y_{102} - (x_{102} + e_1) \tan \gamma - r_{101}(1-\cos \gamma)\} \\
& \quad \tan \alpha_c \cdot \cos (\phi_{101} + \phi_{102})
\end{aligned}$$

また図 2. 6 のような歯断面上において 歯中心と歯面の距離 τ は次式のようになる。

1 段目 クラウニング 領域：

$$\tau_{211} = r_{211} - \left\{ r_{211} - \frac{t_p}{2} + \frac{\pi r_{101}(1-\cos \gamma)}{z} \right\} \cos \beta$$

2 段目 クラウニング 領域：

$$\tau_{212} = r_{212} - \left\{ y_{211} + r_{212} \cos \phi_{211} - \frac{t_p}{2} + \frac{\pi r_{101}(1-\cos \gamma)}{z} \right\} \cos \beta$$

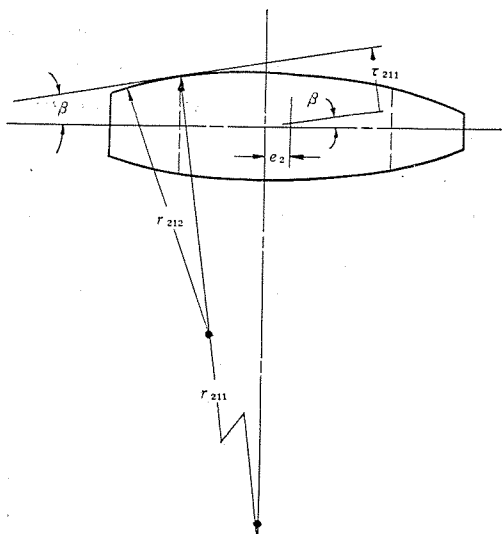
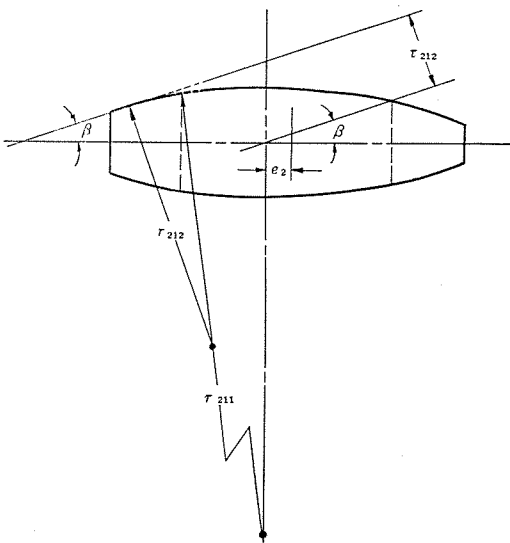


図 2. 6 歯断面図 Section of tooth No. 2.



ただし z : 歯数
 t_p : ピッチ 円上の歯厚

2. 3 歯面の相対位置

エキスターナルギヤ 歯面の インターナルギヤ 歯面に対する 相対変位は 2. 1, 2. 2 節より下記のような (1) ~ (4) の要素から求められる。

(1) エキスターナルギヤ の傾きによる 歯基準点の進み遅れ

$$X = -\frac{d_p}{2} \sin \theta \cos \theta \dots \dots \dots (2. 12)$$

(2) エキスターナルギヤ 歯中心と歯面の距離

$$Y_1 = \tau_{211} \text{ (1 段目 クラウニング 領域)} \dots \dots \dots (2. 13)$$

または

$$Y_2 = \tau_{212} \text{ (2 段目 クラウニング 領域)} \dots \dots \dots (2. 14)$$

(3) エキスターナルギヤ 歯中心の歯基準点に対する変位

$$Z = e_2 \sin \beta \dots \dots \dots (2. 15)$$

(4) エキスターナルギヤ の歯の半径方向変位による エキスターナル, インターナルギヤ 歯面間距離の変化

$$W = -\left(\frac{d_p}{2} - r_{101}\right)(1-\cos \gamma) \tan \alpha_c \dots \dots \dots (2. 16)$$

(1) ~ (4) の合計

$$\xi = W + X + Y + Z \dots \dots \dots (2. 17)$$

は インターナルギヤ みぞ中心と エキスターナルギヤ 歯面の距離を示す

2. 4 最大傾き角

WN カップリング は平均乗車率において 変位がほぼ 0 となるようにセッティングするので、変位が最大になるのは車体上げ時に軸ばねの伸びが最大になった場合である。

エキスターナルギヤ の インターナルギヤ に対する最大傾き角 β_{\max} はバックラッシを C_0 とすると次式より求められる。

$$C_0 = 2\xi(\beta_{\max}) - t_p \dots \dots \dots (2. 18)$$

上式は無負荷状態における最大傾き角を求める式であり、歯面は 2 段目 クラウニング の領域で接触している状態であるが、負荷状態では最大常用変位角において 1 段目 クラウニング 領域内で接触するように次式の条件を満足しなければならない。

$$x_{201} - e_1 - r_{211} \sin \beta > 0 \dots \dots \dots (2. 19)$$

2. 5 計算例

東海道新幹線用 QD 250-B 形カップリングについて傾き角 α , 歯の位

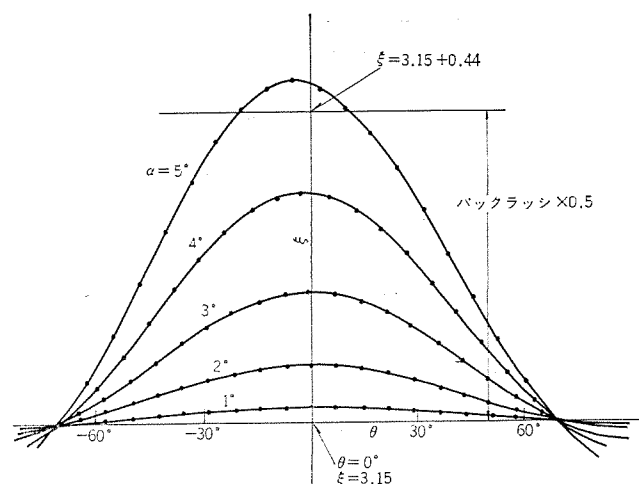


図 2. 7 QD 250-B 形カップリングの歯厚
 Thickness of every tooth of type QD 250-B coupling.

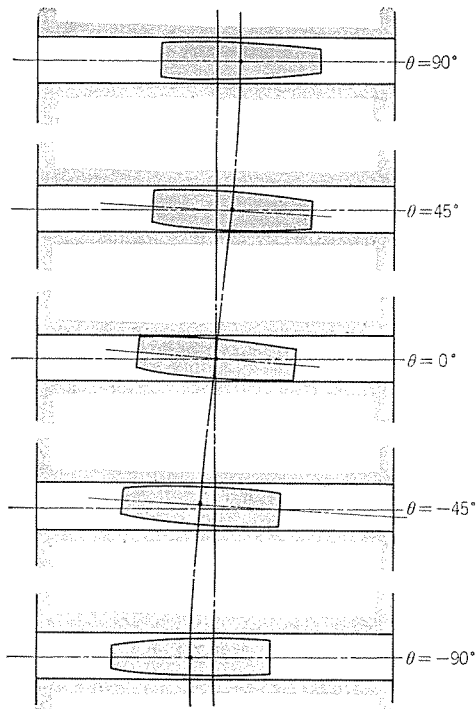


図 2.8 歯断面展開図
Development of tooth section on pitch circle.

置 θ と歯面の相対変位 δ との関係を図 2.7 に示す。QD 250-B 形カップリングの最大傾き角実測値は約 4.4° であり、計算値とほぼ一致している。

図 2.8 は歯の位置 θ を変化させた場合のエキスターナルギヤ歯断面概念図である。

3. カップリング歯面の応力

カップリングの強度はおもに歯面の強度によって決定される。歯の曲げ強度など、その他の部分の強度については安全率が大きく十分余裕がある。

3.1 歯の変形

歯面圧を計算するためには、まず歯の荷重分担、荷重と変形量の関係を知る必要がある。WN カップリングの歯は一般の歯車と異なり、クラウニング量が著しく大きいために変形量の厳密な計算が困難なので計算式自体はできるだけ簡単な形とし、実測により補正するという方法をとる。

3.1.1 歯面の接近量

図 3.1 のように歯面を円筒で近似し、エキスターナルギヤ歯断面曲率半径を円筒半径として Lurdberg の式により歯面の接近量 δ_A を求める。

$$\delta_A = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \cdot \frac{p}{b} \cdot \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \ln 2 + \ln \frac{b}{2a} \right) \quad (3.1)$$

$$a = \sqrt{\frac{8}{\pi} (1-\nu^2) \frac{p}{E} \cdot R}$$

ただし E : ヤング率

ν : ポアソン比

p : 荷重

l : 有効接触長さ

R : 近似円筒半径 (r_{211} , r_{221} , r_{212} , r_{222})

3.1.2 歯のたわみ

エキスターナルギヤの歯は大きくクラウニングされているので、歯幅方向

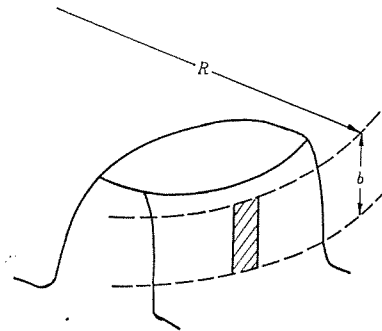


図 3.1 エキスターナルギヤ歯円筒
Cylindrical tooth for calculating
contact stress.

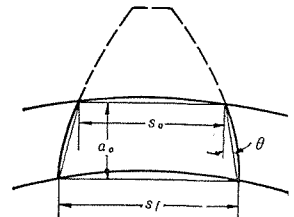


図 3.2 たわみ計算用台形歯
Trapezoidal teeth for
calculating deflection

に関して荷重は均一ではなく、実際には有限幅の片持はりに対する集中荷重(幅方向に関して)と考えるべきであるが、ここでは簡易化して有効歯幅、有効高さを仮定して単純な片持はりとして取り扱う。

歯の断面を図 3.2 のような台形で近似すると、次のようなたわみの式が得られる。((1)~(4)は三菱重工長崎造船所の式による)。

(1) 曲げによるたわみ

$$\delta_B = \frac{3}{4} \left[\left\{ 1 - \left(2 - \frac{s_0}{s_f} \right)^2 + 2 \ln \frac{s_f}{s_0} \right\} \cot^3 \theta - 4 \left(\frac{a_0}{s_f} \right)^2 \tan \theta \right] \frac{p}{Eb} \quad (3.2)$$

ただし s_0 , s_f , θ , a_0 : 図 3.2 の寸法

b : 有効歯幅

(2) せん断によるたわみ

$$\delta_C = \frac{6(1+\nu)}{5} \ln \frac{s_f}{s_0} \cot \theta \frac{p}{Eb} \quad (3.3)$$

(3) 歯基の傾きによるたわみ

$$\delta_D = \frac{12 a_0}{\pi s_f^2} \left(a_0 - \frac{1}{2} s_0 \tan \theta \right) \frac{p}{Eb} \quad (3.4)$$

(4) 歯基のせん断変形によるたわみ

$$\delta_E = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \ln \frac{s_f^2}{4t^2 - s_f^2} - \frac{t}{s_f} \ln \frac{2t + s_f}{2t - s_f} \right\} \frac{p}{Eb} \quad (3.5)$$

ただし t : 歯ピッチ

(5) ねじれによるたわみ

有限歯幅であることを考慮し、荷重の偏心を補正するために歯のねじれによるたわみ δ_F をつけ加える。

$$\delta_F = \frac{c^2 + d_2}{\pi c^3 d^3} \frac{p \varepsilon^2}{G} \quad (3.6)$$

ただし $c = x_{102}$

$$d = \frac{1}{4} \pi m$$

$$\varepsilon = r_{201} \alpha$$

カップリングの歯を模擬して試験片を作り、たわみ、応力の測定を行ない実験的に有効歯幅を求めた結果によれば

$$\frac{\text{有効歯幅}}{\text{歯たけ}} = 0.8 \quad (3.7)$$

である。

3.1.3 歯の変形と接触応力

3.1.1, 3.1.2 項より歯の変形の総和は

$$\delta = \delta_A + \delta_B + \delta_C + \delta_D + \delta_E + \delta_F \quad (3.8)$$

である。 δ はほぼ荷重 p に比例し、近似式

$$\delta = k p \quad (3.9)$$

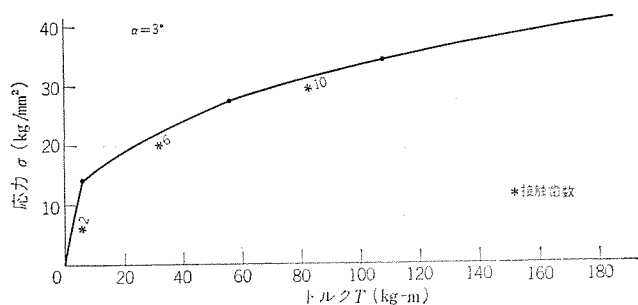


図 3.3 QD 250-B 形 カップリング トルク—歯面応力曲線
Torque—teeth surface stress curve of type QD 250-B coupling.

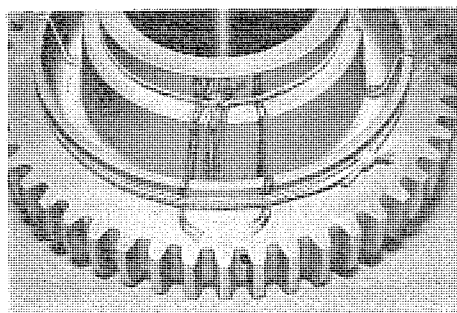


図 3.4 ストレインゲージの位置
Position of strain gauge.

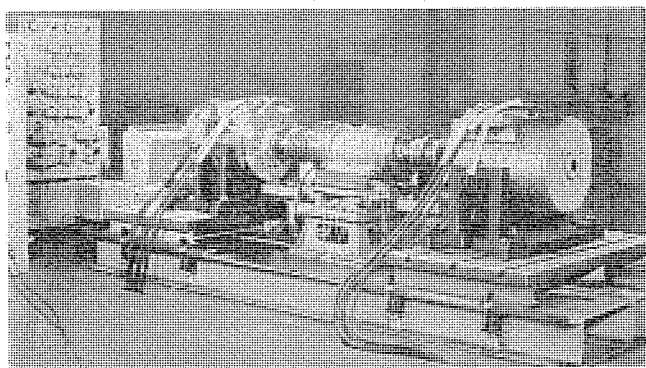
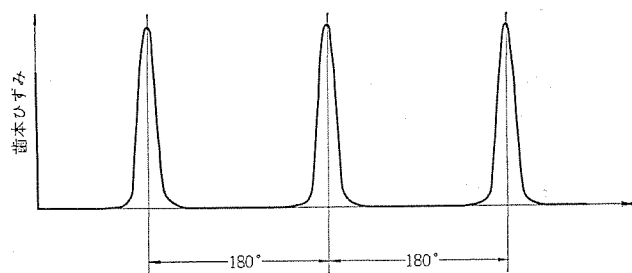


図 3.5 ギヤカップリング 試験装置
Gear coupling test machine.



トルク : 75 kg · m 回転数 : 300 rpm 変位角 (α) : 3°

図 3.6 QD 250-B 形 カップリング 歯本ひずみ
Teeth root strain of type QD 250-B coupling.

で示される。

カップリングの各接触歯の変形量を δ_i とすると、伝達トルクは次式のようにになる。

$$T = \frac{d_p}{2} \cdot \sum p_i = \frac{d_p}{2} \cdot \frac{1}{k} \sum \delta_i \quad (3.10)$$

2.3 節によれば δ_i の各項は独立ではなく、相関性があるので、エキスターナルギヤの傾き角 α 、伝達トルク T を与えればくり返し計算を行なって δ_i , p_i , δ_{\max} , p_{\max} を求めることができる。

荷重 p_i に対する接触応力 σ_i は Hertz の式により計算する。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{0.175 p_i E}{b R}} \quad (3.11)$$

図 3.3 は東海道新幹線用 QD 250-B 形 カップリングについてエキスターナルギヤの傾き角 3 度の場合の トルク—応力曲線を計算したものである。歯面応力は使用範囲で十分限度内にある。

3.2 接触歯数、荷重分担についての実験

カップリングの接触歯数、荷重分担はインターナルギヤに対するエキスターナルギヤの傾き角、荷重の関数である。この関係を定量的には握して計算結果を確認するため、東海道新幹線用 QD 250-B 形 カップリングについて歯の応力測定を行なった。

3.2.1 測定方法

ストレインゲージは図 3.4 のようにエキスターナルギヤの歯本端面にちょうど (貼) 付した。試験装置は図 3.5 のように電動機 2 台を試験カップリングで結合し、返還負荷法によって運転してカップリングにトルクをかけ、ストレインゲージの抵抗変化をスリッピングを通して取り出し記録した。

3.2.2 試験条件

試験条件は次のとおりである。

トルク : 75 kg · m

エキスターナルギヤ 傾き角 : 3°

回転数 : 300 rpm

3.2.3 試験結果

試験結果を図 3.6 に示す。最大荷重が作用するのは $\theta = 0^\circ$, $\theta = 180^\circ$ の近傍であり、接触角度は約 33° (接触開始、終了部の広がり省く) で計算値とだいたい一致している。

4. む す び

電気車用 WN カップリングについて、その変位、歯の変形、および歯面圧を理論計算し、またその結果について実験によって確かめることができた。さらにカップリングの歯面圧は 2 段クラウニングの採用により著しく減少し、同一外形 1 段クラウニングの場合の $2/3 \sim 3/4$ 程度になる。歯面圧は接触部の曲率半径のほかに歯の剛性、接触歯数に大きく影響されるので、歯面圧を低下させるためには歯たけは大きく、歯厚は小さくするほうが有利であるが、その反面、歯の曲げ強度については十分な安全率が必要で、したがってバランスのとれた歯形設計としなければならない。

電気車用 WN カップリングは簡単な構造でしかも比較的小形で大きなトルク伝達容量を持っているが、今後さらに研究を重ねてメンテナンスフリー技術とともにより高性能高信頼度を追求していきたい。

参 考 文 献

- (1) 機械設計 ハンドブック(昭32), 共立出版
- (2) 仙波 : 歯車 第3巻(昭36), 日刊工業新聞社

帝都高速度交通営団向け 回生ブレーキ付き第二次試作チョップ制御電車

北岡 隆*・芦谷 正裕*・古田 俊久*・成戸 昌司*・赤松 昌彦**

The Second Prototype Chopper Controlled Car with Regenerative Braking for the Teito Rapid Transit Authorities

Itami Works Takashi KITAOKA・Masahiro ASHIYA
Yasuhisa FURUTA・Masashi NARUTO
Central Research Laboratory Masahiko AKAMATSU

A full scale trial car on the chopper control built in 1968 has undergone the tests for one year and expected performance has been obtained. Based on the information thus made available, the second prototype car—so to speak one of the quantity production cars—has been completed. The features of this car are : by making the use of high adhesive power, one of the advantages of the chopper control, the ratio of motor cars to trailers is reduced to improving the economy ; and though the employment of the full field motors system, a high regenerative factor is given to it so as to decrease the power consumption very much below that of old cars and to elevate the practicability. It may not be exaggerating to say the chopper control has reached a stage of practical operation.

1. ま え が き

サイリスタチョップ方式による直流電車の制御は近年になって急速に進歩し、実用化の第一歩を踏み出した。国外においても実用化の可能性を確認するため、数年前より試作試験車が作られて各種の試験が行なわれている。このもっとも大規模な例としてサンフランシスコ湾岸鉄道があるのは衆知のことである。わが国でも、この開発が行なわれてきたが、当社は車両用としてはもっとも早くから開発に着手し研究を進めてきた。

さきに本格的なチョップ制御による第一次試作電車を昭和43年4月に帝都高速度交通営団に納入、好成績で現在同営団東西線で耐久試験中で、この内容についてはさきに発表した⁽¹⁾。さらに、この第一次試作車の経験を基にして第二次試作電車を完成した。この試作車は量産先行車に相当するもので、6両の電動車よりなり、これに4両の付随車を連結して営業運転可能なように設計されている。この第二次試験車は44年6月完成し、営団東西線で誘導障害測定を含む各種性能試験および耐久試験が行なわれ、好結果を得たのでその詳細を述べたい。

2. 特 長

この第二次試作車用チョップ装置はさきに製作した第一次試作車⁽¹⁾の実績をもとにチョップ装置の一般的特長を十分に生かせるように改善を加えたもので、次のような特長を有している。

(1) 高粘着性能を発揮できるチョップ制御方式の特長を生かして、大容量高性能主電動機およびチョップ装置によって、動力集中化のために6M4T編成として経済性を高めた。

(2) 全界磁電動機方式を採用して回生率の向上をはかり、電力消費を抵抗制御方式に比べてほぼ半減させている。

(3) 多相多重方式と結合リアクトルの採用により、フィルタおよびDCLを小形軽量化するとともに効率の向上をはかっている。

(4) 平形大容量サイリスタおよびダイオード素子を採用し、素子数

を軽減している。

(5) 制御回路にIC演算増幅器を採用し、小形軽量化と信頼度の向上をはかっている。

3. 車両性能および主電動機容量

次のような10両編成電車を想定して性能検討を行なった。

編 成	6M4T
自 重	M : 33.5 t, T : 26 t (2両), 23.5 t (2両)
架線電圧	1,500 V DC
車輪直径	860 mm
荷 重	定員 : 8 t/車, 満員 : 20 t/車

従来、地下鉄用電車は安全性および高加速度、高減速度性能がとくに要求されるために大多数がオールM編成であったが、最近一般的な傾向としておもに経済的な理由からT車(付随車)を追加し、その比率を増す傾向にあった。しかし、営団路線では先行故障列車を後続車でこう配(35%)押上げ可能、高加速(起動200m 22秒以内)という条件があるため、抵抗式制御車では粘着の点で東西線8M2T編成が限界であり、第一次試作チョップ制御電車でも主電動機を抵抗式制御電車に合わせたため8M2T編成としていた。また、主電動機特性も抵抗器損失を少なくし、架線電流ピーク値が限度を越えないように定格速度を低くせざるを得なかった。今回の第二次試作チョップ制御電車では以上のような制約を離れ、チョップ制御電車としての性能を十分に発揮するように設計されている。

第二次試作電車の設計にあたっては、(1)消費電力の低減、(2)機器重量の軽減、が主目標として打ち出された。これらの二つの目標は互いに無関係ではなく、電力消費量の低減をはかるためには回生率の向上も重要ではあるが、車両重量の軽減による力行消費電力の減少も考慮に入れて、総合した電力消費量(力行消費電力一回生電力)の低減をはかることが大切である。したがって、回生率の向上はもちろんのことであるが、回生率向上のためにいたずらに機器重量が増すことは極力避けるようにし、個々の機器について重量軽

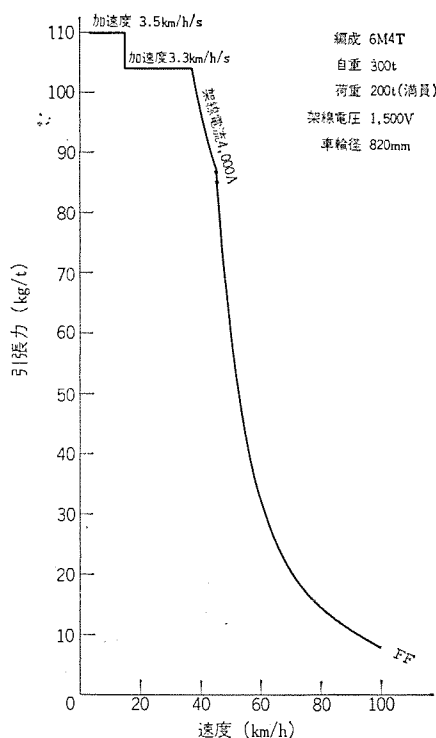


図 3.1 電車性能曲線
Performance curves of electric cars.

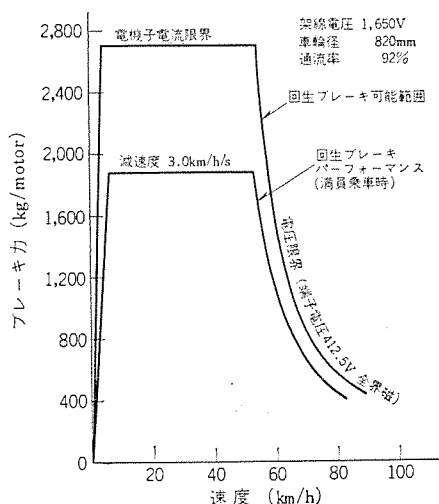


図 3.2 回生ブレーキ特性
Regenerative braking performance curves.

表 3.1 ランカー・シミュレーション
Simulation of run-curves.

	地下線	地上線
区間	綾瀬一代々木上原 (営団路線)	綾瀬一取手 (国鉄常磐線)
編成	6 M 4 T	
総重量	500 t (満員)	
架線電圧	1,500 V	1,350 V
車輪径	820 mm	
加速度	3.3 km/h/s	
減速度	3.0 km/h/s	
表定速度	34 km/h	52.5 km/h
停車時分	25 s	
こゝ配	営団および国鉄路線図による	
速度制限	営団および国鉄基準による	
最大運転速度	70 km/h	100 km/h
R M S 電流	362 A	314 A

と電力損失の減少をはかるだけでなく、電車を駆動するシステム全体として車両重量を軽減し、電力消費量を減少させることを目標とした。

この目標の実現のために、(1)チョップ制御電車の高粘着性能を利用し、高性能 6 M 4 T 編成電車として車両重量の軽減をはかる。(2)定格速度を高く選び、全界磁主電動機とする。(3) 6 M 4 T 編成で走行可能な大容量主電動機とする。ことを基本方針とした。(2)のようにした場合、従来車に比較して電圧制御範囲が増すが、抵抗器損失がないので問題はない。また、弱界磁制御を行わなくても必要な力行パフォーマンスが得られるので弱界磁用機器が不要となり、機器重量が軽減されるとともに高速からの全界磁回生ブレーキが可能となって回生率が向上する。

3.1 車両性能

車両はアルミ車体の軽量車とし、冷房を取り付けるものとして重量を設定し、車両性能を検討した。また、車輪直径は地下路線における曲線通過の容易さから 860 mm と決定された。

車両性能要目は次のとおりである。

出力	一時間定格 3,480 kW (145 kW 主電動機×24 台)
加速度	3.3 km/h/s
減速度	4.0 km/h/s (常用最大)
最高運転速度	100 km/h
定格速度	55 km/h

性能曲線を図 3.1 に示す。中速域では架線電流 4,000 A の定電流制御を行なっている。

3.2 回生ブレーキ性能

チョップ制御電車の回生ブレーキは原理上、主電動機の発生電圧が架線電圧より低い範囲内でしか利用できないので、高速から有効な回生ブレーキをかけるためには、主電動機定格速度をできるだけ高くとったほうが有利である。

第二次試作電車の回生ブレーキ可能限界と実際の回生ブレーキ時のパフォーマンスを図 3.2 に示す。回生ブレーキの可能限界は高速域では架線電圧・主電動機特性から定まり、中速域・低速域では許容電機子電流の制限によって定まる。今回の試作電車は地下鉄線内ではほとんど全界磁回生ブレーキだけで全ブレーキをまかなうことができる。

3.3 主電動機容量

第二次試作電車用として車両性能の面から 3.1 節のような 1 時間定格 145 kW の主電動機を仮定したが、実際に熱的に十分な主電動機容量であることを確認するために、電子計算機による実路線ランカーブのシミュレーションを行ない、主電動機 RMS 電流を計算した。計算結果を表 3.1 に示す。

地下線内における主電動機 RMS 電流は 362 A で、1 時間定格電流の 85 % に相当して適当な値を示している。地上区間では駅間距離が長いので RMS 電流が小さく、地下区間に比べてずっと熱的余裕が大きい。

4. 結合リアクトル式多相多重チョップ

4.1 主回路

結合リアクトル式多相多重チョップ方式⁽¹⁾を採用したこの装置の主回路つなぎを図 4.1 に示す。力行運転および回生運転時はそれぞれ図 4.2 に示すようになり、その概要および特長は次のとおりであ

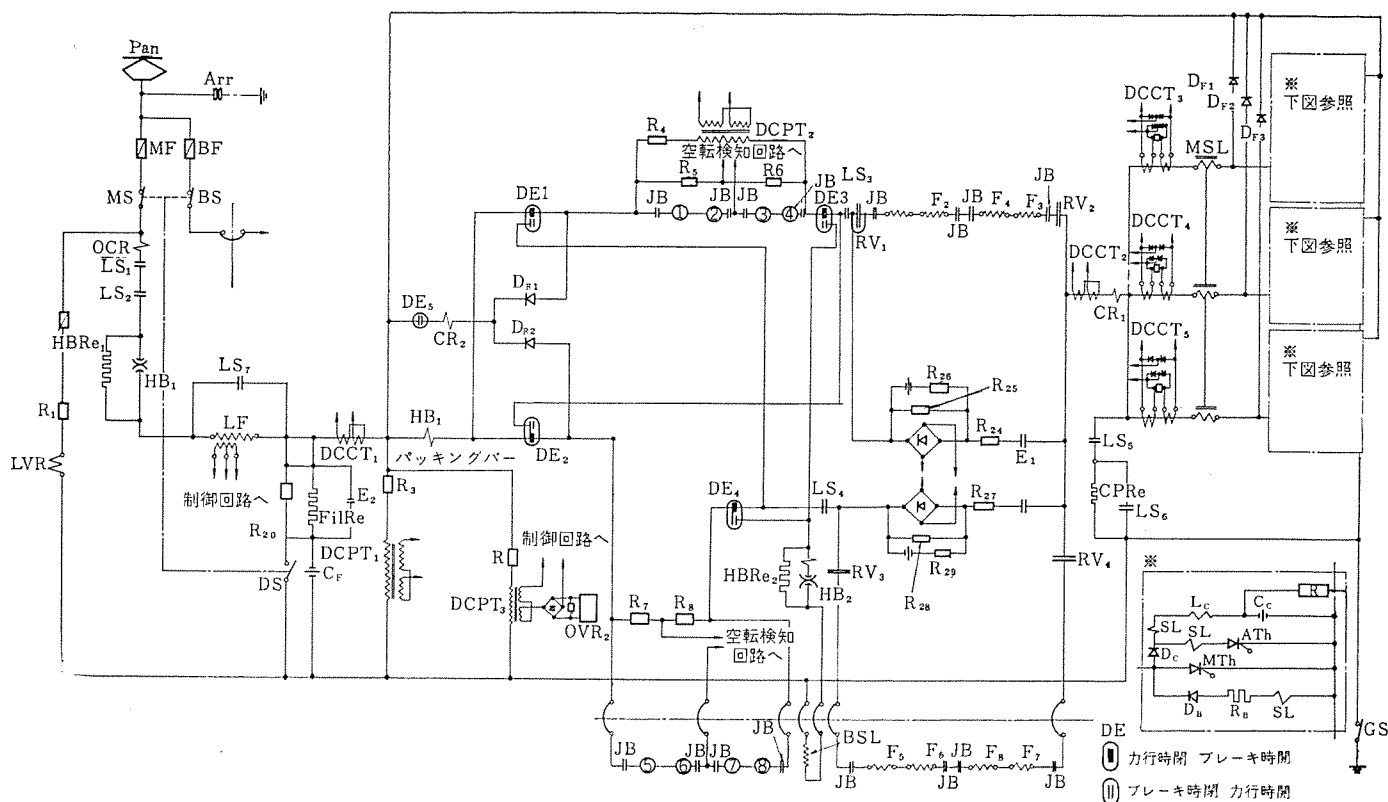


図 4.1 主回路つなぎ Schematic diagram of the power circuit.

る。

(1) 力行・回生ともに 4S-2P に永久接続された電動機を三相 3 重 チョップ 制御で運転している。

(2) 全界磁電動機を使用しているために弱界磁制御が不要で、回路を単純化している。とくに高速域での回生ブレーキの制御はきわめて安定した性能が得られる。

(3) 電動機電流は三相 3 重結合 リアクトル 方式であるため、周波数は 660 Hz となって、脈流率は非常に小さく、しかも DCL はきわめて小形軽量で損失も少ない。

(4) 電車線電流は三相 3 重のチョップ制御されるため、総合周波数は 660 Hz となって脈流率は非常に小さく、そのうえ、フィルタ装置の平滑効果も大きいので実用上問題にならぬほど小さくなる。

(5) 三相 3 重方式であるため、2, 3, 4 ノッチの定常通流域では通流率を 1/3, 2/3, 3/3 としたので架線電流・主電動機電流ともに脈流のない完全な直流となる。

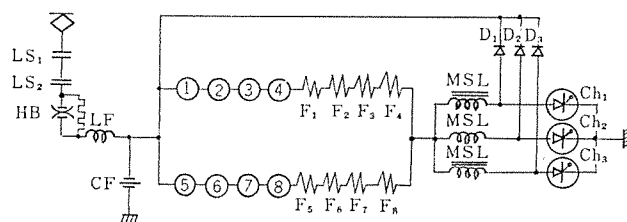
(6) 高速回生ブレーキ時の主電動機の保護のため、バイパスダイオードを設けて電機子電圧を制限している。また、限流リアクトルを設けてチョップ転流失敗時の主電動機電流を制限している。

(7) チョップ通流率が最大となったとき、チョップ、DCL およびフィルタリアクトルを短絡するスイッチ $LS_{5,6,7}$ を設けている。

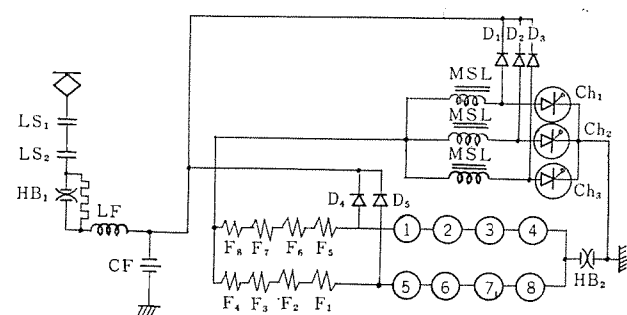
(8) 過電流・過電圧に対する保護は HB_1 , HB_2 , OCR , OVD , CR_2 等で検出して、 HB_1 , HB_2 , LS_1 , LS_2 , LS_3 , LS_4 で回路を開放する。

4.2 制御方式

この装置は前記のように、三相 3 重 チョップ 方式としたので、3 組の単位チョップは 1 台の発振器より分配器を介して 120° ずつの位相差を持って運転するよう制御される。このブロック図を図 4.3 に示す。各 チョップ には平均値が等しくなるように バランス 制御回路が付



(a) 力行



(b) 回生

LS: 断流器 Ch: 単位チョップ HB: 高速電流減流器
D: ダイオード LF: フィルタリアクトル MSL: 結合リアクトル
CF: フィルタコンデンサ

図 4.2 力行および回生時の主回路 Power circuit of powering and braking.

加されており、常に全電流が等しくなるように位相制御される。各ノッチの定常運転状態および回生ブレーキの高速域では架線電圧に比例した電圧パターンに等しくなるよう、主電動機電圧が制限されるようになっている。また、限流値制御および電圧制御系にはそれぞれオフセット補償回路を設けて制御精度を上げている。この装置は誘導

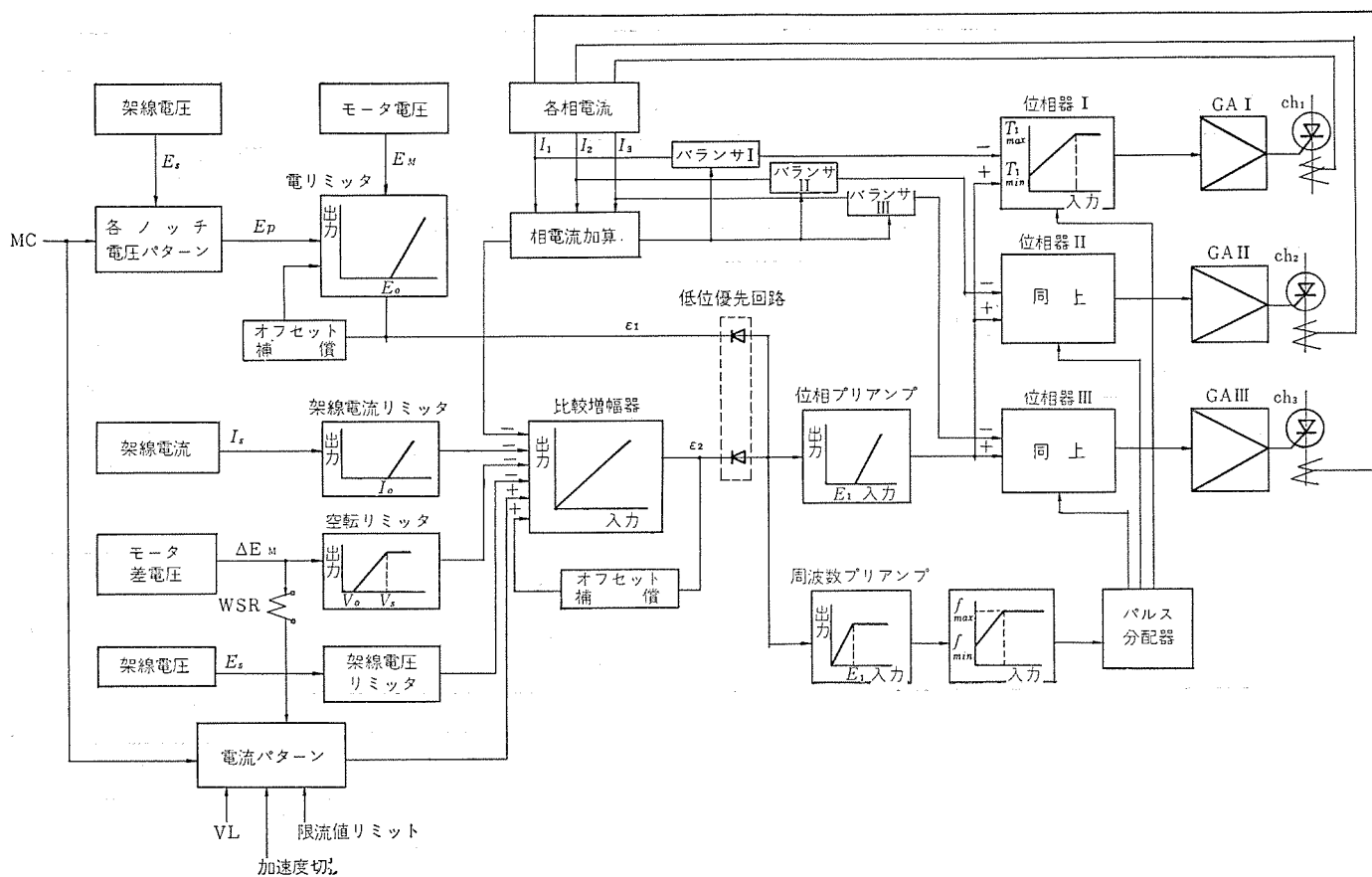


図 4.3 チョップサイリスタゲート制御回路ブロック図

Block diagram of the chopper control circuit.

障害を減らすために定周波数制御方式を採用しており、単位チョップは 220 Hz、総合周波数は 660 Hz で運転する。ただし、起動時の電車が動き始める瞬間だけ周波数をわずかに低下させるようになっている。

加速中、空転を起こした場合には主電動機の電圧差をアナログ量で検出して、自動的にチョップの位相を絞って、粘着係数に応じた限流値で運転できるようにしている。また、回生負荷変動およびしゃ断対策として、架線電圧が上昇すると限流値を絞り、異常に上昇するとチョップを止める回路を設けるとともに力行時に架線電圧が大幅に下降した場合には限流値を下げて転流失敗を防ぐ回路等を設けているので、すべての外乱に対してきわめて安定に運転できる。

一方、誘導障害および主回路異常振動が起こった場合の対策として、架線電流リップル検出器を設けている。これはフィルタリアクトルに主巻線と結合したサーチコイルを取付けて電流のリップル成分を検出し、これに周波数選択特性を持たせたもので、フィルタコンデンサオープン、欠相運転および架線側事故による異常振動などが万一起こってリップル電流が大きく増大すれば動作して障害を防止する。

4.3 電力消費

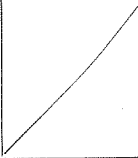
3.2 節で述べたような回生ブレーキの使用によってどの程度の回生率が期待できるか、また電力消費量をどの程度減少できるかをティベカルランカーブ、現車試験によって求めた。計算結果を第一次試作抵抗式制御電車と比較して表 4.1 に示す。

チョップ車の回生率は約 38 % で、抵抗式制御電車と比較して電力消費量が 56 % 程度になる。

4.4 リップル電流による障害対策

チョップ制御を行なった場合、これにより発生するリップル電流が架

表 4.1 電力消費量 (計算値)
Electric power consumption (calculated value).

制 御 方 式		チョップ制御 (二次試作車)	抵抗式制御 (一次試作車)
編 成	成	6 M 4 T	8 M 2 T
総 重 量	量	340 t	320 t
加 速 度	度	3.3 km/h/s	3.5 km/h/t
減 速 度	度	3.0 km/h/s	3.5 km/h/s
架 線 電 圧		1,500 V (力行)	1,350 V
		1,650 V (回生)	
平 均 駅 間 距 離		1,200 m	
表 定 速 度		34 km/h	
停 車 時 間		25 s	
等 価 こ う 配		0 %	
電力消費 (単位 kWh)			
力 行	力行消費電力	15.02	16.53
	{ 主電動機消費電力 平滑リアクトル損失 フィルタリアクトル損失 回路配線損失 チョップ損その他の漂遊損失	14.23	16.28
		0.03	—
		0.44	—
		0.11	0.25
		0.22	—
回 生	回生電力量	5.67	
	{ 主電動機発生電力 平滑リアクトル損失 フィルタリアクトル損失 回路配線損失 チョップ損その他の漂遊損失	5.95	
		0.02	
		0.09	
		0.06	
		0.11	
総 合 電 力 消 費 量 (抵抗式を 100 としたときの割合)		9.35 56.5	16.53 (100)
回 生 率 %		37.7	—

線を通るための影響について十分考慮を払う必要がある。この装置ではチョップ制御周波数およびフィルタ装置の定数選定にあたって、おもに次の装置に与える障害を避けるよう考慮している。

- (1) 信号関係
 - (a) ATC 用 AF 軌道回路
2,850, 3,150, 3,450, 3,750 Hz
 - (b) 商用周波軌道回路 50 Hz
 - (c) 列車番号情報装置 422~515 kHz
- (2) 通信関係
 - (a) 誘導無線 100~250 kHz
 - (b) 電気保安電話
音声周波帯
 - (c) ケーブル 回線
障害の判定は従来どおり J_p で行い、
 - (d) 電々公社電話回線
この値を十分小さくするよう考慮している。

$$J_p = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (S_n \cdot I_n)^2} (A)$$

S_n : 聴覚感度係数

I_n : n 次高調波電流

- (3) 変電所機器関係
 - (a) ΔI 形選択継電器 チョップのリプル電流を小さくする。
 - (b) 変電所共振フィルタの温度上昇
150, 300, 600, 900 Hz の共振周波数を避ける。

この装置においては(1)―(a)項および(3)―(b)項の条件より 660 Hz をチョップ周波数として選定し、このリプル率が十分小さく、また、(2)項の影響をカム車並みに押えるよう、フィルタの定数を選定した。その結果、チョップによって発生する脈動電流の大きさは J_p が 0.03 A/100 A、リプル率が 0.03 % 以下となるようにしてあるので、実用上問題ないと考えてよいだろう。

5. 主要機器

5.1 主電動機および駆動装置

5.1.1 要目

(1) 主電動機

形名	MB-3164-A
形式	直流直巻補極付き、台車装架式、自己通風式
1時間定格	145 kW 375 V 425 A 2,300 rpm (全界磁)
高速試験回転数	5,300 rpm
絶縁	F 種
重量	665 kg
特性曲線	図 5.2

(2) 駆動装置

ギヤユニット形名	WN-1028-GM 形
歯車比	98/15=6.53
重量	400 kg
ギヤカップリング形名	WN-2525-FR 形
重量	25 kg

5.1.2 特長および構造

(1) 主電動機

6 M 4 T 編成チョップ制御電車に適した大容量主電動機ではあるが、最新の技術を駆使し、狭軌用 WN ドライブ主電動機として台車内に十分余裕をもって収容できる大きさに設計されている。

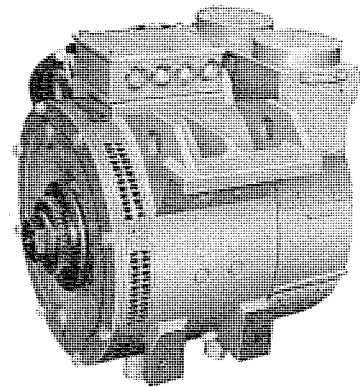


図 5.1 MB-3164-A 形主電動機
Type MB-3164-A traction motor.

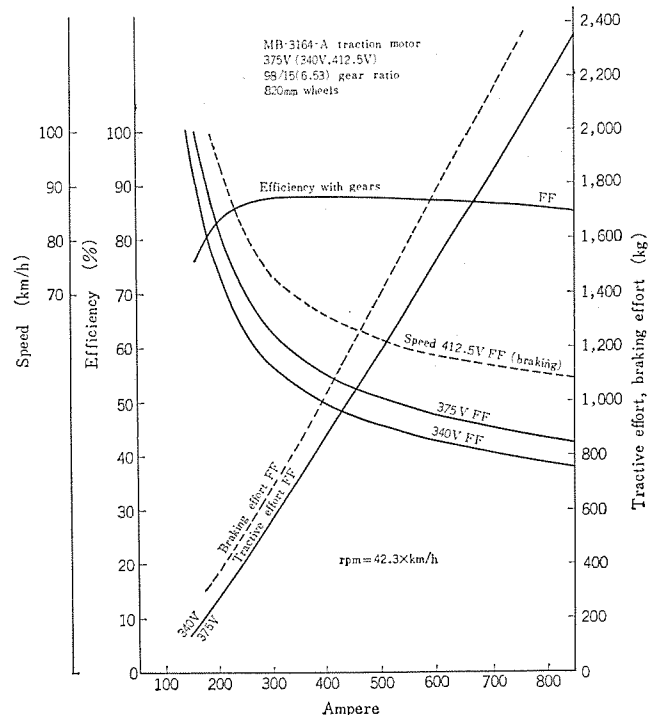


図 5.2 主電動機特性曲線
Type MB-3164-A traction motor characteristics.

表 5.1 主電動機温度試験結果
Temperature test result of traction motor.

試験条件 315 V, 405 A, 全界磁		
	直 流	脈 流
電機子コイル	128	130
主軸コイル	121.5	132.5
補極コイル	96	107

単位 : deg°C

絶縁はノメックス® (耐熱ポリアミド絶縁紙)、カプトン® (耐熱ポリイミド絶縁フィルム) など耐熱絶縁材料を使用した新しい絶縁システムを採用して導体のスペースファクタ向上、耐熱性の向上によって主電動機の大容量化を行なっている。また、整流子ライザの TIG 溶接、密封軸受構造、64 mm ブラシの採用などにより信頼性の向上、メンテナンスフリー化をはかっている。その他、チョップ制御電車用主電動機としては脈流対策が問題になるが、今回の試作電車においては脈流率をおさえて 10 % 以下とし、とくに脈流対策を行なわない方針で設計を行なっている。表 5.1 に直流および脈流で比較した温度試験結果を示す。(®米デュポン社商品名)

脈流運転時の主電動機回定子コイル 温度上昇の増加は 直流運転時 に比較して 10 %程度である。電機子コイル についてはほとんど差が ない。また、整流もこの程度の脈流率では大きな影響はない。

(2) 駆動装置

ギヤカップリングは従来のつる巻きばねを廃し、軸端ナットに埋めこんだゴムクッションをストッパとして使用している。これによりばねによるアンバランスがなくなり、高回転での振動特性が向上した。

5.2 主チョップ装置

主チョップ装置のおもな仕様は表 5.2 に示すとおりである。主サ

表 5.2 チョップ装置 要目
Particulars of chopper control device.

回 路 方 式	新 モ ル ガ ン 回 路
定 格 電 圧	DC 1,500 V
定 格 電 流	1,600 A (最大加速電流)
相 数	三相 3 重
制 御 周 波 数	220 Hz×三相=660 Hz
制 御 方 式	定周波平均値制御方式 (起動時周波数制御)
サイリスタ 定格	1,300 V, 400 A, ターンオフ時間 40 μs, 平形
ダイオード 定格	3,000 V, 600 A, 平形
素 子 構 成	
主 サ イ リ ス タ	4S-2 P-3 A
転 流 サ イ リ ス タ	4S-1 P-3 A
転 流 ダイ オード	2S-1 P-3 A
フ ラ イ ホ イ ル ダイ オード	2S-1 P-3 A
バ イ パ ス ダイ オード	2S-1 P-3 A
回 生 補 助 ダイ オード	2S-1 P-2 A
冷 却 方 式	強制風冷式
素 子 劣 化 検 出	電圧比較式劣化表示ランプ付き
制 御 装 置	IC 演算増幅器式

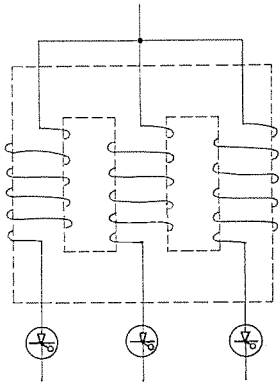


図 5.3 結合リアクトル 巻線
Coils of mutually coupled reactor

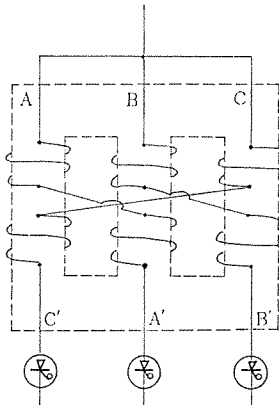


図 5.4 第二次試作車用結合 リアクトル 巻線
Coils of mutually coupled reactor for the second proto-type car.

イリスタ、ダイオードは平形素子を使用しているが、冷却の簡単な強制風冷式を使用している。スタックはサージ吸収器とともにユニット構造としてユニットごとに組立および取りはずし可能にして取扱いを容易にしている。また、素子の劣化に対して故障検出装置を設けている。一方、サイリスタを冷却した排風を利用して主フィルタリアクトルを冷却しているので電動送風機は1台ですんでいる。

制御回路には IC 演算増幅器を採用しているため、小形軽量化とともに信頼度が高くなっている。

5.3 結合リアクトル

結合リアクトルは原理的にリアクトルの巻線を図 5.3 のように配置することによって各コイルによる直流分起磁力を相互に打消し、直流分起磁力による鉄心の飽和をふせぐもので、鉄心には交流分起磁力だけが作用するのでリアクトルが小形軽量化される。結合リアクトル要目は次のとおりである。

形 名	RT-42 A
形 式	三相結合 リアクトル
冷却方式	乾式自冷式
連続定格電流	810 A (270 A/相)
重 量	750 kg

リアクトル巻線は実際には図 5.4 のように配置されている。これは図 5.3 のようなコイル配置では鉄心内での各脚間の直流分起磁力は打消せてもリアクトル全体としては直流で励磁されて空間にもれる磁束が多くなり、鉄心の磁束密度が高くなるためである。

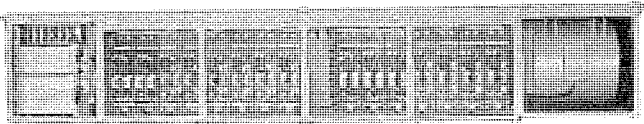


図 5.5 主チョップ装置箱
Main chopper control box.

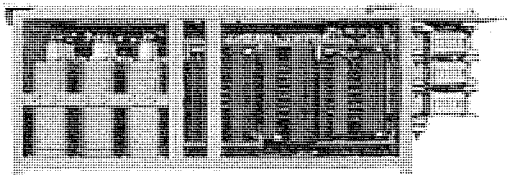


図 5.6 転流装置箱
Commutation box.

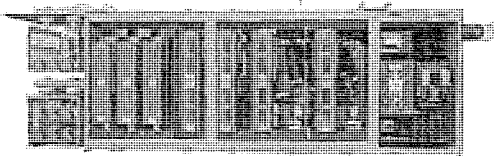


図 5.7 断流器箱
Line switch box.

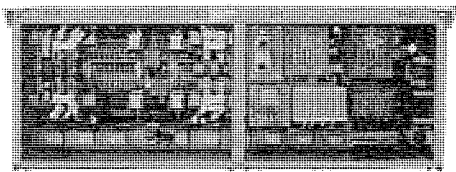


図 5.8 転換器箱
Change-over switch box.

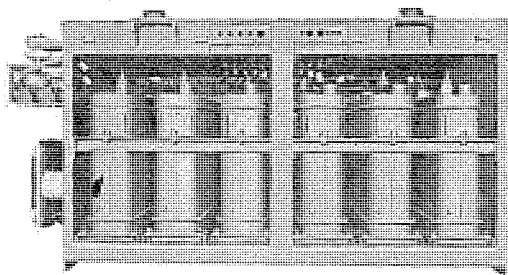


図 5.9 フィルタコンデンサ箱
Filter condenser box.

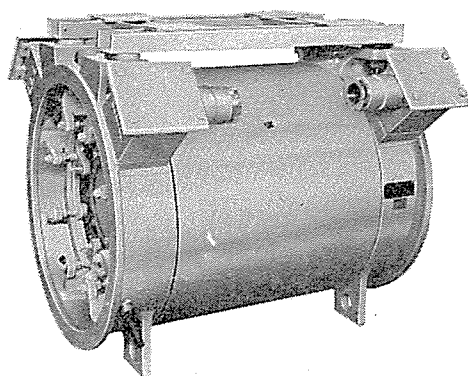


図 5.10 フィルタリアクトル
Filter reactor.

今回は図 5.4 のような コイル 配置を採用したので直流分起磁力が完全に打消されて、もれ磁束、鉄心磁束密度が低下し、さわめて良好な結果を得た。

5.4 その他機器

その他機器として、次のものがある。すなわち フィルタリアクトル、フィルタコンデンサ箱、転流装置箱、断流器箱、転換器箱、チョップ短絡用スイッチ箱および限流リアクトルに分かれている。

6. 現車試験結果

6.1 定常運転特性

この装置は結合リアクトル式多相多重方式を採用しているが、試験の結果きわめて安定な動作を行なうことが確認された。また、各相電流の不均衡率は $\pm 1\%$ 以下でよく平衡しており、主電動機の脈流率はノッチ間加速中の最大 5% 以下、2, 3ノッチ定常運転中はほとんど直流であり、整流上の問題は全然なかった。各相電流の脈流率

および断続限界もきわめて小さく、結合リアクトル方式のすぐれていることが確認された。限流値のオフセットは $\pm 3\%$ 以下であり、起動電流立上がり、減流シャ断時の電流立下がり、追ノッチおよび再ノッチともに設定パターンによく沿って円滑な制御が行なわれ、ショックのない運転が行なわれた。また、4ノッチでのチョップ短絡運転およびその後のチョップ戻し減流シャ断も問題なかった。

回生ブレーキは全速度範囲に対して安定な動作を示し、ブレーキ力パターンに対して精度よく、速応制御されて、きわめて円滑な減速特性が得られた。高速からの回生ブレーキ立上がり制御も電圧パターンに沿って電圧制御をしながら立上げることによって制御精度をよくなり、回生限界を有効に利用しているため、回生率を大幅に向上することができ、全界磁電動機方式の特長を十分発揮することができた。

6.2 空転試験

35%こう配上で2M4T編成にして、空転試験を行なったが、レール乾燥状態では満員の場合の限流値に上げてでも空転せず、レールに水を散いた状態でも満員の20%増の限流値に上げて、チョップによる自動絞りを行ないながら加速することができた。このとき、空転速度は2 km/h~5 km/hに平衡しており、レールと車輪の粘着係数が有効に利用されていることがわかった。粘着係数は5 km/h空転時、15.2%、最大30.4%、平均値は21.2%であった。図 6.2 にそのオシログラムを示す。

6.3 回生負荷変動試験

回生ブレーキの全速度範囲において、次の試験を行なった。

- (1) 負荷なし回生試験
- (2) 負荷変動試験
- (3) 負荷シャ断試験

この装置は回生ブレーキ中の負荷の変動およびシャ断に対して、1,650 V~1,800 Vの電圧上昇に対してチョップ自動絞りを、1,800 V以上の上昇に対して過電圧検出器によるチョップオフおよび回路開放を行なっており、それでもなお上昇した場合は3,000 Vの過電圧検出器によってチョップを強制点弧させてチョップ装置を保護するようにしているが、これらの動作は良好で、負荷なしで高速から回生しても自動的に限流値が絞られてCRのセット値以下になるまで平衡して電流制御されている。また、負荷が減少した場合には負荷の大きさに応じた回生電流で平衡して運転しており、負荷シャ断した場合にも過電圧検出器が瞬時に動作するためにチョップオフとなって、負荷シャ断時の電圧上昇は抑えられている。したがって、この試験

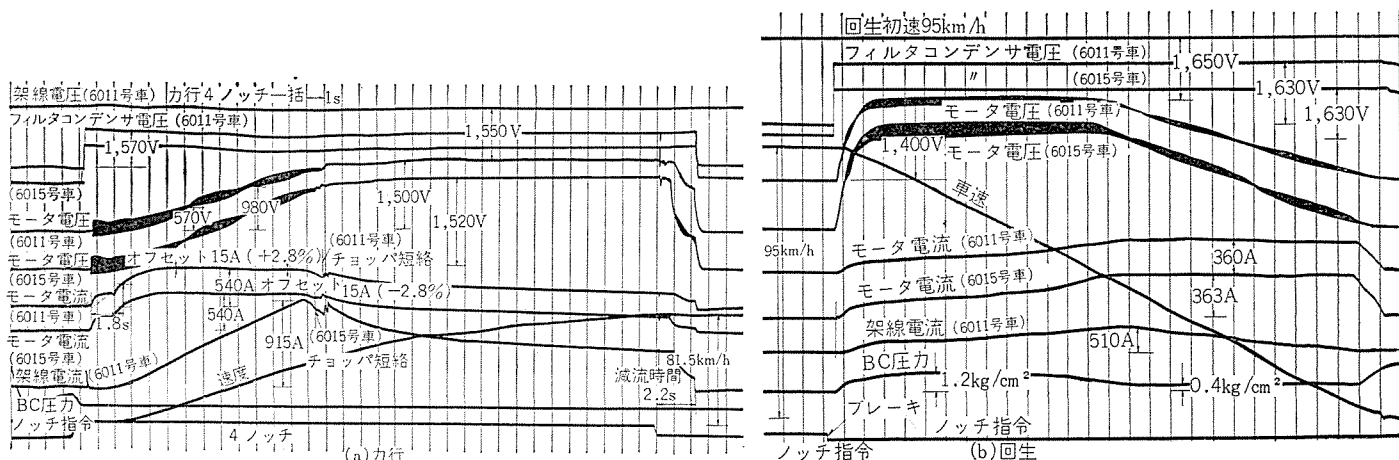


図 6.1 現車走行試験オシログラム
Oscillogram of the chopper controlled car at the trial run.

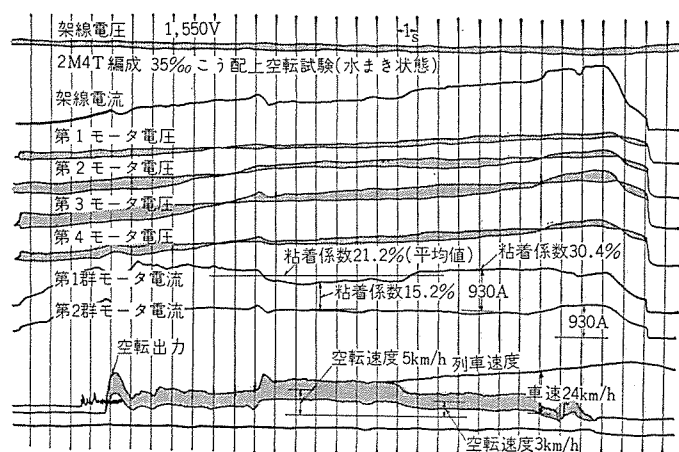


図 6.2 空転試験オシログラム
Oscillogram at the wheel slip test run.

時には回生負荷しゃ断時過電圧を検出して瞬時に負荷抵抗をそう入する回生負荷装置を設置するまでもなかった。これらの試験によって、チョッパによる回生ブレーキは安定に実施できることが確認された。

6.4 電力消費測定試験

電力消費量はチョッパ装置の大きな特長の一つであるため、実運転曲線に近い運転を行なって電力消費量を測定した。その結果、回生率は38.6%~46.1%ときわめて高い値であった。

6.5 誘導障害試験

チョッパ装置が他の設備に与える障害については前にも述べたが、これらについて試験の結果は次のとおりである。

(1) 各高調波成分測定結果

カム式制御車および先に製作報告し、問題のないことが確認された一次試作車に比べて、チョッパ周波数成分による高調波電流および架線電圧リップルによる高調波電流のすべてにおいて小さかった。

(2) 信号に与える影響

チョッパの制御周波数は前に述べたように、AF 軌道回路および商用周波軌道回路については信号周波数を避けており、軌道信号回路に対してはフィルタコンデンサ共振周波数も31.5 Hz に選んであり、フィルタコンデンサの突入電流も制限抵抗に押えられて94 A と小さい値で問題なかった。また、DCL の漏えい磁束によるレール磁化の問題も結合リアクトル方式であるために、本来漏えい磁束のない構造になっており、その磁束は実測困難であった。なお、列車番号情報装置については、使用周波数がきわめて高いのでフィルター装置の設計、ぎ装配線などについて特別な配慮が必要であることがわかった。また誘導無線も列車番号情報装置と同様な配慮が必要である。

(3) 通信誘導障害

音声周波帯通信線に与える障害の判定基準として J_p の値を測定したが、この結果、 J_p の値は通流率その他の条件によって異なってくるが、架線のリップル成分によるものを除き、チョッパだけによって発生する値は0.025/100 A 以下で、きわめて良好な結果が得られた。

6.6 その他の試験

その他の試験として次のものを行なった。

- 力行 架線電圧急変試験
- 停電再開路試験(瞬時停電)
- 架線電圧異常低下運転試験
- 過電流事故試験
- フィルタコンデンサオープン 模擬試験

回生ブレーキ

- 架線電圧急変試験
- 瞬時停電および停電試験
- ブレーキパターン 急変試験
- 電空併用ブレーキ 特性試験

この試験の結果、いずれも速応性が良好で主電動機およびその他の機器に有害な影響はなく、特性上も問題がないことが確認された。

7. む す び

以上述べたチョッパ試作車は量産先行車とも言えるもので、予期どおりの成果を得ることができた。これによりチョッパ方式を実用化するための条件は一応みたされたと考えてよからう。今後に残された問題としては重量、価格の低減と装置の信頼性向上という点があげられるが、これらは今後の実用結果より得られたデータを参考として改善されていくものと思われる。とくに、通信、信号に対する障害とその対策が確立されればかなりの改善余地が生れるものと考えられる。これらの諸問題を早く解決してメンテナンスフリーで、かつ高性能なチョッパ車の実用化を完成し、日本の技術を海外にも誇りたいものである。

この試作車用電機品を設計製作するにあたり、多大のご指導をいただいた帝都高速度交通営団の関係者のかたがたに深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 北岡, 大野, 芦谷, 赤松: 回生ブレーキ付き新方式チョッパ装置, 三菱電機技報, 42, No. 11 (昭43)
- (2) 浅越, 久山: 主電動機および車両性能, 三菱電機技報, 42, No. 11 (昭43)

新幹線試験電車用運転指令装置

北川 和人*・六藤 孝雄**・金子 弘美***

Automatic Train Operating Equipment for
Experimental Cars on the New Tokaido Line of J. N. R.

Head Office Kazuto KITAGAWA

Itami Works Takao MUTÔ

Kamakura Works Hiromi KANEKO

Automatic train operating equipment carried on the experimental cars in the New Tokaido Line is an automatic control device provided with function of having the train running speed follow a definite standard against external disturbances under the condition of ATC limiting speed.

Semi-conductor integrated circuits are used for the main operation elements. Digital control is made in various kinds of operation to obtain high accuracy. Also high reliability is made available by composition of multiplex system. All these new types are believed to discharge fully the duties as operation control equipment of a new system.

1. ま え が き

新幹線試験電車は現東海道新幹線電車の次期モデルチェンジ車の開発のため、現在のわが国における最新の技術を取り入れ製作された車で、設計にあたっては国鉄主催の「高速車両研究会」がもたれ国鉄当局はもちろん、各関係メーカーの全知能を結集してつくられた世界に冠たる車両である。この車両の電機品のうち運転の中枢神経ともいえる運転指令装置について、当社が原設計メーカーとなり設計製作を担当した。

250 km/h という最高運転速度となれば、普通では定時運転のための運転操作など、運転士の労も繁雑化するが、これを簡易化するため運転指令装置としては従来と異なった新しい自動制御技術が採用された。すなわち運転台の目標速度設定器（従来の主幹制御器相当のもの）を希望速度位置に設定するだけで種々の外乱、たとえば

- (a) 列車の走行抵抗の変化
- (b) 路線のこう(勾)配の変化
- (c) 架線電圧の変動
- (d) 車両の制御機器特性の変動

などに対して力行トルク、ブレーキトルクを自動的に調整して所定速度で走行できる機能をもっている。またこのように機能が複雑化すればするほど、高精度・高信頼度・保守の簡素化を考えねばならないが、この装置では従来のアナログ式の演算に代わり、デジタル回路を基本とする周波数比較式の演算を採用し、これらの要求を満足するようにしている。

この装置はさきに詳細な現車試験により、その性能が確認され、現在東海道新幹線の線路で、引き続き試運転中である。

(装置の写真は表紙参照)

2. 装置の機能と構成

2.1 性能、定格

本装置の性能、定格は次のとおりである。

(1) 電源電圧

AC 100 V \pm 5 % 400 Hz

DC 100 V \pm 10/30 %

(2) 制御信号

260, 210, 160, 110, 70, 30, 0₁, 0₂, 0₃

(3) 速度演算能力

0~317.5 km/h

(4) 照査精度

速度発電機換算 2 パルス

(5) 速度制御特性

0 km/h ~ -3 km/h

(6) 手動ブレーキ指令段数

7 ステップ 制御

(7) ATC ブレーキ 制御

常用 ブレーキ 1 段

非常 ブレーキ 1 段

(8) 抑速ブレーキ 指令

抑速 ブレーキ 1 段

(9) 力行指令

比例制御による連続トルク指令

(10) 多重化方式

2.5 重系

(11) 伝送方式

電流伝送 +100 mA ~ -100 mA

(12) 保安機能

(a) 速度発電機断線検出

(b) 列車後退検出

(c) 速度に応じた粘着ブレーキ制御

(d) 自己故障検出と自動故障開放

(e) 指令線断線短絡検出

2.2 構 成

運転指令装置の全体の構成を図 2.1 に示す。この装置の本体は演算部、論理部それぞれ系列別に構成され計 6 ブロックに分けられている。系列 1 と 2 はまったく同一に構成されていて互換性を有している。系列 3 は系列 1, 2 との比較に使用されて故障系の検出に役

演算部は受信器、目標速度設定器、速度発電器等の入力を得てATC制御ならびに速度制御をおこなう部分で、主要演算素子として半導体集積回路素子(IC)が使用されている。演算はすべてデジタル的におこなわれ精度の高い制御が可能である。

本装置によって速度入力信号源である速度発電機は誘導子形のもので、駆動装置の大歯車のギヤケースに取り付けられていて、90°位相の異なる正弦波を二相3線出力として4組の巻線で列車速度に比例して発生する。

論理部は演算部から指令された微弱なトルク指令を各車に伝送できるレベルまで増幅するために信頼性の高いマグアンプとサイリスタから構成されている指令変換器、各系列の動作を監視して故障系を判別ならびに開放するためのPB故障検知回路、非常ブレーキ同期指令回路ならびに指令線の故障検知回路等から成立っている。論理部からの出力は1組の往復線により+100 mAから-100 mAの電流値

にて力行 トルク 最大指令から プレーキトルク 最大指令までを伝送している。このほか継電器接点で指令線の断線検出指令および非常 プレーキ指令を出している。

照査部の演算はすべて周波数を演算量とする周波数演算方式を採用し、すべてデジタル演算回路で構成されている。

- (1) 高精度
- (2) 無調整
- (3) 経時変化がない

(4) 電源変動、周囲温度の影響を受けにくい
個々の単位回路が十分な動作マージンを持って設計されており、アナログ回路におけるような特性の変化として影響が出ない。

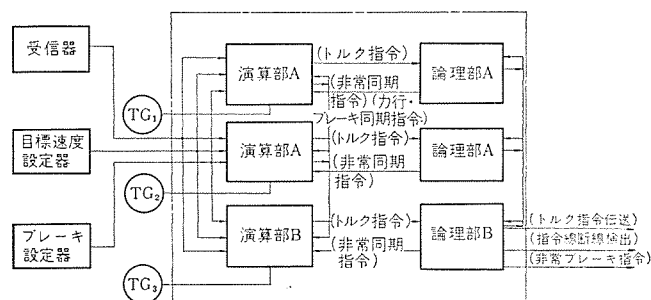
(6) 保守が容易
互換性が完全であり、故障も [1] または [0] とデジタル的にはつきりするので保守・点検が容易である。

小形化のほかに高精度な演算が行なえるため、多重化しても各系列間のばらつきが少なく、構成が容易となる。

照査部における演算機能を次に列記するとともに図 3. 1 にそのブロック図を示す。

ATC 制限速度は先行する列車との間隔、カーブやポイントなどの軌道条件により後続列車の許容最高速度を指定し、車速を常に制限以下に保って列車の安全を期すために与えられる。

ATC 制限速度照査は列車速度が ATC 制限速度を越えているか否かを比較判別する機能で、制限速度を越えて走行しているときは ATC による常用または非常ブレーキが列車に指令される。



```

graph TD
    S1[系列 1] <--> S2[系列 2]
    S1 --- S3[系列 3]
    S2 --- S3
  
```

Figure 1 is a block diagram of the control system for a vehicle with a manual transmission. The diagram illustrates the flow of signals and control logic between various components.

Inputs and Control Signals:

- ATC制限速度信号 (ATC Limit Speed Signal):** Connected to the **5km/hボタン発生器 (5km/h Button Generator)**, **ATC非常ブレーキ照査ボタン発生器 (ATC Emergency Brake Check Button Generator)**, and **ATC常用ブレーキ照査ボタン発生器 (ATC Common Brake Check Button Generator)**.
- 目標速度設定器 (Target Speed Setting Device):** Connected to the **目標速度ボタン発生器 (Target Speed Button Generator)**.
- 力行オフ指令 (Power Off Command):** Connected to the **力行制御器 (Power Control Device)**.
- 手動ブレーキ指令 (Manual Brake Command):** Connected to the **ブレーキトルク周波数変換器 (Brake Torque Frequency Converter)**.
- 速度発電機 (Speed Generator):** Connected to the **波形整形 (Waveform Shaping)** block.

Internal Processing and Control Logic:

- The **5km/hボタン発生器**, **ATC非常ブレーキ照査ボタン発生器**, and **ATC常用ブレーキ照査ボタン発生器** are connected to the **周波数比較器 (Frequency Comparator)**.
- The **周波数比較器** outputs a **5K** signal to the **周波数比較器 (Frequency Comparator)**.
- The **ATC非常ブレーキ照査ボタン発生器** outputs an **ATC非常ブレーキ指令 (ATC Emergency Brake Command)**.
- The **ATC常用ブレーキ照査ボタン発生器** outputs a **力行トルク指令 (Power Torque Command)**.
- The **目標速度ボタン発生器** outputs a **比例制御器 (Proportional Control Device)**.
- The **力行制御器** outputs a **力行オフ (Power Off)** signal to the **ブレーキ優先 (Brake Priority)** block.
- The **ブレーキ優先** block outputs a **ブレーキ優先 (Brake Priority)** signal to the **ブレーキリミット (Brake Limiter)**.
- The **ブレーキトルク周波数変換器** outputs a **ブレーキトルク指令 (Brake Torque Command)** to the **ブレーキリミット**.
- The **ブレーキリミット** outputs a **後退検知出力 (Reverse Detection Output)** to the **後退検知器 (Reverse Detection Device)**.
- The **後退検知器** outputs a **後退検知出力 (Reverse Detection Output)** to the **速度発電機**.

Outputs and Final Control:

- The **速度発電機** outputs a **速度発電機 (Speed Generator)** signal to the **波形整形** block.
- The **波形整形** block outputs a **速度発電機 (Speed Generator)** signal to the **速度発電機**.
- The **速度発電機** outputs a **速度発電機 (Speed Generator)** signal to the **速度発電機**.

図 3.1 照査部ブロック図
Block diagram of speed checker.

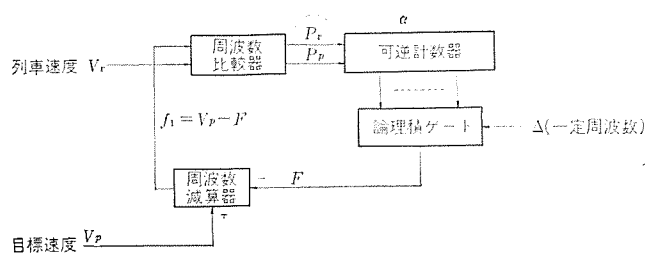


図 3.2 比例制御器ブロック図
Block diagram of proportional controller.

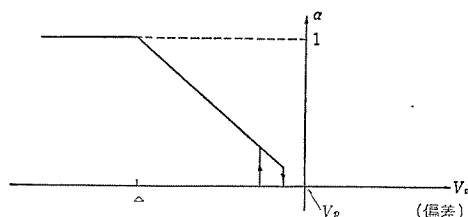


図 3.3 速度偏差と比例制御器出力
P. controller output signal.

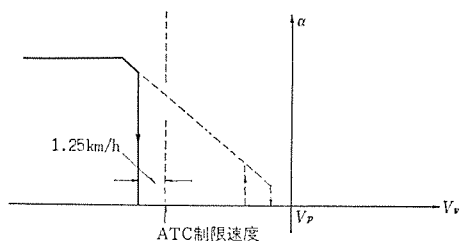


図 3.4 ATC 制限速度と力行との関係
Notching off speed by the ATC speed limit.

照査原理を図 3.1 で説明する。安定な発振周波数をもった基準発振器の出力信号を ATC 制限速度信号に応じて分周して ATC 制限速度に相当するパタン周波数信号 V_{ATC} を照査速度パタン発生器で作成する。他方電車の車軸の回転速度に比例した周波数を発生する速度発電機出力信号を波形整形し適当なく(矩)形波信号に変換し、周波数比較器において上述の制限速度パタン信号 V_{ATC} と比較する。

3.1.2 力行制御のためのトルク指令演算

力行トルク指令は比例制御器を用いて目標速度と列車速度の偏差に比例したトルク量を演算する。目標速度はディジタル7ビットの交番2進信号で 2.5 km/h ステップで 0~317.5 km/h が自由に与えることができる。照査部においてこの7ビットで与えられた目標速度信号を周波数信号 V_P に変換し列車速度との偏差に比例したトルク指令を指令する。

比例制御器の動作を図 3.2 比例制御器ブロック図を用いて説明する。目標速度を V_P 、列車速度を V_r とする。可逆計数器は加算、減算を行なうことのできる計数器を示し、その値を α 、($0 \leq \alpha < 1$) とする。 α は式 (3.1) のように表わすことができる。

$$\alpha = 2^{-1}\delta_1 + 2^{-2}\delta_2 + \dots + 2^{-n}\delta_n \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3.1)$$

一定周波数信号 Δ を $1/2$ 系列に分周して $\Delta/2$, $\Delta/2^2$, $\Delta/2^3$, ..., $\Delta/2^n$ なる信号を作成し、図 3.2 の論理積ゲートにおいては式 (3.1) の δ_j 値が“1”のとき対応する $\Delta/2^j$ 信号を加えて F 信号とするように構成する。 F は次式で表現される

$$F = \Delta \cdot \alpha \quad (3.2)$$

目標速度 V_P から F の値を減算したものを f_1 とする。次に f_1 と列車速度 V_r を比較し

$$V_P > f_1$$

のときは P_P として加算パルス可逆計数器に与える。

$$V_P < f_1$$

のときは P_D として減算パルスを計数器に与える。

今 $f_1 > V_r$ とときは加算パルス P_P が計数器に与えられ、 α の値は増加するため F が大となり f_1 は小となる。このようにネガティブフィードバック動作が働き、常に $V_r = f_1$ でこの演算回路は停止状態となる。したがって次のように考えられる

$$V_r = V_P - \alpha \cdot \Delta \quad (3.3)$$

ゆえに

$$\alpha = (V_P - V_r) \frac{1}{\Delta} \quad (3.4)$$

となり α の値は V_P と V_r の偏差を示していることになる。

力行トルク指令はこの偏差 α に比例したトルク指令を発する。この関係を図 3.3 に示す。力行トルク指令は速度偏差が Δ km/h までは比例的に α が増加し、一定値 Δ 以上となると飽和した特性となっている。これは力行駆動系の出力に上限があるため指令値においても制限をつけたものである。またトルク指令の小さな部分においてはヒステリシス特性を持たせてある。これは列車の制御方式が、先頭車においてトルク指令演算を行ない、先頭車から列車の各車両にトルク量をアナログ量で伝送するような形式をとっているため、力行、だ行、ブレーキの制御モードの変化を明確にする必要があるため、指令トルク量“0”と区別を容易にする目的で、指令トルクの最小値をもたせるようにしたものである。力行トルク指令のヒステリシス幅は、下りこう配軌道等における力行、だ行の繰り返し周期を考慮して設定されている。

また比例制御ゲイン(速度偏差と指令トルク量の比)の設定については試験車の性格上、各種設定値に対する試験を容易に行なうことができるように切換スイッチで設定変更が可能となっている。

力行トルク指令部においては、運転士が ATC 制限速度を越えて目標速度を設定したような場合、列車速度が上昇し ATC 制限速度を越えてしまうことがある。このような運転においてはもちろん制限速度を越えた時点で ATC 常用ブレーキが指令され、トルク指令系においてはブレーキ優先となってブレーキが働くが、保安上 ATC 制限超過を防ぐことおよび、力行から直接ブレーキに変化したときの乗心地などを考え、ATC 制限速度の 1.25 km/h 以下まで車速が上ったときは力行をオフするような機能を持たせてある。この関係を図 3.4 に示す。

3.1.3 粘着ブレーキパターンに沿ったブレーキ制御

列車が減速する場合、運転時分の短縮・停止までのブレーキ距離の短縮のため、乗りこちを害しない範囲で、できるだけ大きなブレーキ力を働かせることが望ましいが、一方レール、車輪間には粘着係数の制限がある。粘着係数はこの車のような高速車両においては速度の関数として考えなければならない。そこで粘着係数をおかさない程度で、できる限り強いブレーキ力がえられるような粘着ブレーキパターンを作り、強いブレーキのときはこのパターンでブレーキ力を制限する必要がある。

すなわち ATC 常用ブレーキ、手動ブレーキ指令などのブレーキ指令が発せられると列車速度に応じて、粘着ブレーキパターン $B(v_r)$ の値以下のときはそのまま指令し、 $B(v_r)$ を越えているときは制限を与える。粘着ブレーキパターン $B(v_r)$ は 2~3 本の直線で十分近似することができる。2 本で近似した場合を図 3.5 に示す。図 3.5 における 2 本の

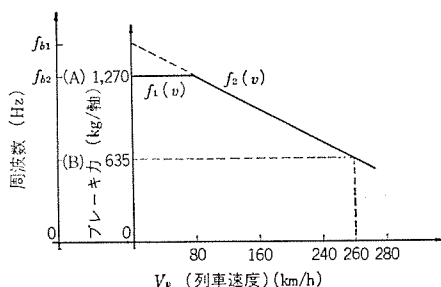


図 3.5 粘着ブレーキパターン形状
Maximum brake diagram.

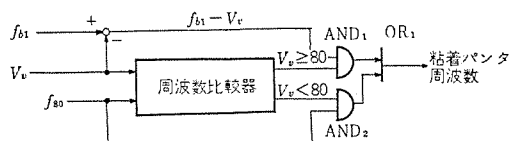


図 3.6 粘着パターン発生器ブロック図
Maximum brake function generator.

近似直線をそれぞれ $f_1(v)$, $f_2(v)$ とすると, $f_1(v)$ は定数値であり, $f_2(v)$ は速度に関して一次式の関数である。この演算を図 3.6 で述べる。周波数比較器において, 近似 2 直線の境界となっている 80 km/h の速度を検知し, 列車速度が 80 km/h (80 P) 以下のときは一定周波数 f_{80} を AND 2 および OR 1 のゲートを通して粘着パターン周波数として与える。速度が 80 km/h 以上のときは一定周波数 f_{b1} から列車速度周波数 V_r を減じたものを AND 1 および OR 1 の各ゲートを通して粘着パターン周波数として与える。 f_{b1} の周波数は次のようにして与える。ただし図 3.5 において, 80 km/h 以下の粘着ブレーキパターの 1 軸あたりのブレーキ力換算値を A kg/軸, 速度 265 km/h のときの値を B kg/軸とし, 速度 80 km/h, 265 km/h に相当する速度周波数 V_r をそれぞれ f_{80} , f_{265} Hz とする。

$$\frac{f_{b1} - f_{80}}{f_{b1} - f_{265}} = \frac{A}{B} \quad (3.5)$$

したがって式 (3.5) より f_{b1} を求めると式 (3.6) となる。

$$f_{b1} = \frac{A \cdot f_{265} - B \cdot f_{80}}{A - B} \quad (3.6)$$

式 (3.6) で f_{b1} を与えて図 3.6 の構成とすれば粘着ブレーキパターンが周波数で与えられる。手動ブレーキ, ATC 常用ブレーキ等演算部ではその大きさを周波数で扱い, 図 3.1 におけるブレーキリミッタは上述した粘着ブレーキパターンとの周波数低位優先をとることで行なうことができる。

3.1.4 5 km/h 検知

5 km/h 検知は, 列車速度が 5 km/h より大か小かを判定する機能を有している。この演算は単に列車速度周波数が, 5 km/h 相当の周波数より大か小かを周波数比較器で比較判定して行なう。

3.1.5 後退検知

列車は正常な運転においては, 構内などにおける入れ換え運転を除いて後退運転は行なわない。後退の必要なときは「入れ換え運転」の条件を設定して運転する。上りこう配地点等における停車中なんらかの原因で列車が後退を始めたとき, 車速 5 km/h 以上に達すると「異常状態」として非常ブレーキ指令を自動的に指令する方法を採用している。

後退検知は速度発電機の出力信号を用いて行なう。速度発電機から二つの出力が得られるようにし, 2 出力間の電気的な位相関係が

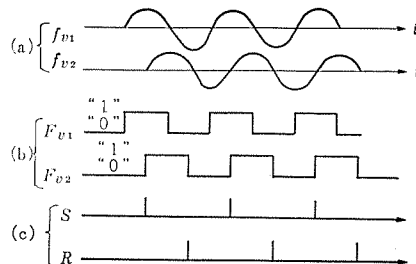


図 3.7 後退検知タイムチャート(前進)
Timing chart of reverse revolution detector (ordinary).

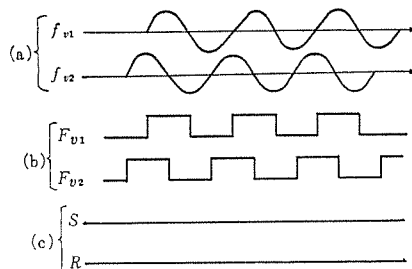


図 3.8 後退検知タイムチャート(後退)
Timing chart of reverse revolution detector (reverse).

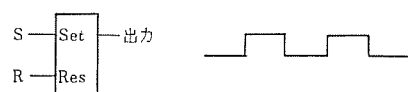


図 3.9 フリップフロップ
Flip flop.

約 90° ずれており, 車輪の回転方向でこのずれが正, 負の方向に変化するように構成する。この関係を図 3.7(a) に示す。この図は前進状態で f_{v1} が進相となっていることを示している。この信号をそれぞれ波形整形して形波に変換したものが図 3.7(b) である。 F_{v2} の信号の立上り条件と, F_{v1} が高いレベル [1] である条件をとり S 信号, F_{v2} の立下り条件と F_{v1} が低レベルの条件をとり R 信号とすると図 3.7(c) となる。この S, R 信号を図 3.9 で示したセット, リセットフリップフロップに与えると, 出力端子には, SR 信号に同期したく形波が得られる。

他方列車が後退した場合について同様に図 3.8 で示している。 f_{v2} が f_{v1} に対して 90° 進相である。 F_{v2} の立上りと F_{v1} の [1] 条件, F_{v2} の立下りと F_{v1} の [0] 条件はいずれも成立せず, S, R 信号はなんら与えられない。したがってこの S, R 信号では, 図 3.9 のフリップフロップの出力端子には, [1], [0] の交番信号が与えられない。以上によりこのフリップフロップを眺めることで, 前進, 後退が判定される。具体的には図 3.9 図の信号を論理部において交流増幅し, リレーを励磁しており, 前進中はリレーが引上り, 後退時は引下るようになっている。

4. 論理部

論理部は演算部から指令される力行トルクならびにブレーキトルク指令を各車に伝送するための増幅機構である指令変換部, 各系列の故障を判定するための PB 判別部, その他演算部の微小出力を増幅して論理継電器の駆動部, 指令線の断線検知部ならびに論理継電器部等から構成されている。以下これ等各部について述べる。

4.1 指令変換器と指令線断線短絡検出器

指令変換器は図 4.1 のブロック図に示すように加減算部, 増幅部

および検出部から成り立っている、加減算部はマグアンプの巻線を使用した点弧回路で増幅部のサイリスタのゲート制御に使用されている。この変換器は交流 400 Hz の電源を使用して応答の改善と回路の小形化がはかられている。本変換器の構成部品は車両制御機器として電流電圧とも十分余裕が取れる マグアンプ、サイリスタダイオードを使用し高信頼が得られている。本回路において 400 Hz 交流波の (+), (-) 両波の点弧角を独立して制御し +100 mA から -100 mA までの伝送電流を発生している。出力は電流検出部である抵抗器の電圧降下を利用した電流制御が行なわれる。図 4. 2 は電源波形において制御点弧角と力行ブレーキトルク指令との関係を示す原理図である。すなわち力行トルク指令は交流波の内 (+) 側の制御角が (-) 側制御角より大になった状態で平均電流としては図 4. 2 の (a) において点線にて示したように (+) 側の成分が得られる。またブレーキトルク指令は力行トルク指令の逆で (-) 側の成分が平均値電流として得られる。これを図 4. 2 の (c) が示している。図 4. 2 (b) はこの両者の中間で力行状態を示し直流成分は零の状態である。

以上 (a), (b), (c) の波形の状態から明らかのように力行トルク指令からブレーキトルク指令にわたって伝送電流の中には交流分が含まれているが、これは指令線の断線短絡検知に使用される。すなわち指令線の断線短絡検知は図 4. 3 に示す構成にて行なわれているが指令線が断線または指令線の往復線が短絡するとこの交流分がなくなるのでこれにより検知することができる。この検出器はトランスを使用した交流結合の無接点回路で回路自身の故障に関しては断線・短絡検知側、すなわちフェイルセーフに作用するように構成されている。

指令変換器は系列 1 と 2 に設けられ、系列 1, 2 とも正常な場合は両者の出力は伝送電流値の 1/2 をそれぞれ分担している。どちらかの系列が故障し、開放されると残った正常の系列の変換器の増幅率を 2 倍して正規の伝送電流を供給することができる。

また断線短絡検出器は系列 3 に設けられ指令線の監視のため、常時電源を使用してどちらの運転台が使用されても作用している。

4. 2 PB 判別器

この判別器はマグアンプを使用した比較器で指令変換器の伝送電流により動作する。感度レベルは図 4. 4 PB 判別器特性に示すように力行トルク指令に相当する最小指令電流値より低い値 (+) I_A 電流にて出力状態が [1] となり力行モード P を検出判定する。この状態は伝送電流が (+) I_A の値より増加する領域では保持されるが、指令電流が減少してもこの判別器につけられたヒステリシスの幅の領域において保持されている。そして伝送電流がブレーキトルク指令に相当する負の伝送電流 (-) I_B の値にて出力状態が [0] となりブレーキモード B を検出判定する。この判定は系列 1, 2 においておこなわれる。系列 3 においては演算部の P, B 指令に対応して動作する。このようにして各系列の出力は P または B の状態として各系列の PB 判別器により検出、判定されるので、各系列の P, B の判定動作を比較して動作の一致・不一致をみることで故障の系が検出される。この PB 判別器においてヒステリシス幅を設けることにより P, B 両者の動作点を一つの比較器にて検出することが可能となり、故障検知回路の簡素化に役立っている。

4. 3 常用ブレーキ、非常ブレーキ

常用ブレーキおよび非常ブレーキの動作領域は現新幹線 ATC 装置と合わせているが、260 信号に対する動作が追加されている。表 4. 1 に動作を示す。常用ブレーキ出力は指令変換器により常用ブレーキトルクが各車に指令されるので、従来の ATC 装置に使用されている常用ブレーキ出力継電器は使用されていない。非常ブレーキ出力は従来の装置と同様に出力継電器を使用している。しかし非常ブレーキ指令は常用ブレーキ系とは別の専用の照査器を持っている点から従来の ATC と異なる。非常ブレーキが一度作用すると非常指令補助継電器が落下したことにより非常の動作点を常用の動作点まで下げ、常用ブレーキが解除される速度に減速するまで作用させる。30 信号にて常用ブレーキが作用した場合は、ブレーキ照査点を 0 km/h に下げ 30 km/h 以下に減速したのち確認操作を行えばブレーキ指令は解除される。

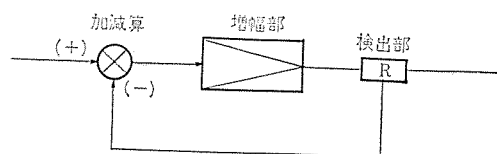


図 4. 1 指令変換器ブロック図
Schematic diagram of command transducer.

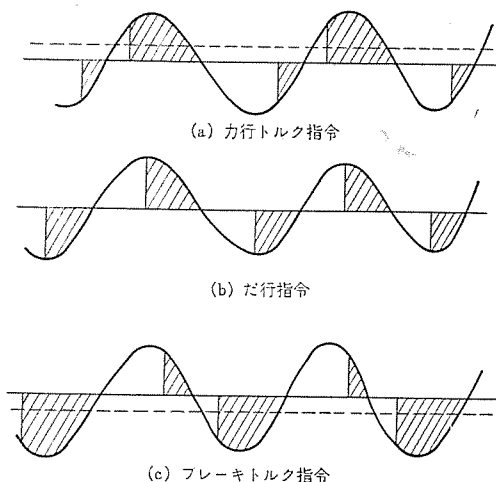


図 4. 2 伝送波形
Transmission wave form.

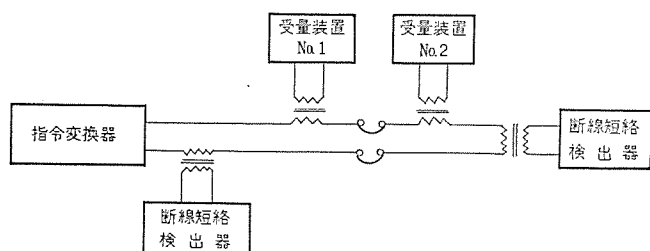


図 4. 3 指令線と監視系の構成
Schematic diagram of transmission line and fault detectors.

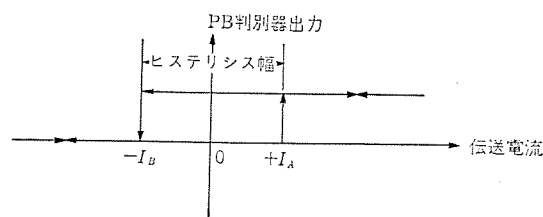


図 4. 4 PB 判別器特性
Characteristics of PB detector.

表 4.1 常用非常ブレーキシーケンス
Normal and emergency brake sequence.

km/h 列車速度	信号	260	210	160	110	70	30	0	
								0 ₁ 0 ₂	0 ₃
270以上	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
270—260	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
260—210		○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
210—160			○	◎	◎	◎	◎	◎	◎
160—110				○	○	○	◎	◎	◎
110—70					○	○	◎	◎	◎
70—30						○	◎	◎	◎
30以下							○	◎	◎

0₁, 0₂にて非常ブレーキが作用すれば列車速度が5 km/h以下にて確認操作をしなければブレーキ指令は解除されない。0₃信号(絶対停止)を受けると常用ブレーキ照査点を0 km/hにして非常指令継電器を強制的に落下させて非常制動を作用させる。これは列車速度ならびに取扱いに無関係に作用させ、0₃信号が解除されるまでブレーキは緩解しない。0₃信号以外の信号で入れ換え運転の場合は「入れ換え運転」操作を行なうことにより入れ換え継電器を励磁し内部で30信号を発生させて30 km/h制限を行なう。

4.4 偏差検出器

前述のPB判別器は各系列の状態をPとBの両者のモードにて故障を検出していたが、とくにブレーキトルク指令において指令されたトルク量が不足することはブレーキ距離の点で問題がある。そこで差検出器でもって系列1と2の指令変換器出力を比較してこの両者の間に偏差が発生しないよう監視する。

この検出器はマグアンプの巻線を比較器として使用し、増幅部にはサイリスタを使用している。監視機能として、系列1と2がPB判別器にて正常と判定され、ブレーキ指令の時のみ作用する。

5. 操 作 器

5.1 目標速度設定器

本設定器は運転士が列車の走行目標速度を設定するための機器で従来の主幹制御器に代わるものである。この設定により0~300 km/hの範囲の速度が2.5 km/h刻みにてセットにされる。

この機器はハンドル操作を容易にし、運転士の足まわりを広く取るため本体は逆L字形で、主ハンドルは前後方向操作とし手前に引くほど列車の目標速度が高くなるよう人間工学的に考慮されている。構造は大別してハンドル、歯車、カム軸、スイッチ、わくおよびカバー等からなる。

ハンドル部は主ハンドルと逆転ハンドルの2本でそれぞれハンドル軸、逆転軸に取付けられている。スイッチ部は7ビットの交番二進数が使用され、スイッチの渡りを容易にしている。

隣接する速度においてつぎの速度へ指令の状態が変わるときはかならず7ビットの内1ビットだけ状態が変わるので、スイッチの渡りを容易にしている。

5.2 ブレーキ設定器

この設定器は運転士のハンドル操作角度に応じて7ステップのブレーキ力を指令するものである。これは従来のブレーキ弁に相当するもので3ビットの電気接点にて構成され空気配管は不要となっている。3ビットの電気接点は表5.1に示す交番二進数にて制御され機器の製作を容易にしている。本設定器の形状は大別するとハンドル、カム

表 5.1 ブレーキ設定器電気接点信号とステップ
Signal and step of brake controller.

接点 ブレーキステップ	B ₃	B ₂	B ₁
ゆるめ(運転)	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	1
3	0	1	0
4	1	1	0
5	1	1	1
6	1	0	1
7	1	0	0



図 5.1 目標速度設定器とブレーキ設定器の配置図
Arrangement of speed setting apparatus and brake controller.

軸、スイッチ、わくおよびカバー等から構成される。ハンドル操作はカム軸の下部に星形車を取付けハンドル取はずし位置、運転位置、常用ブレーキ(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)位置および非常ブレーキ位置をノッチ刻み方式としている。

図5.1は目標速度設定器、ブレーキ設定器を含む運転室の写真である。

6. 速度制御特性

目標速度が運転士または自動運転のための目標速度指示系から与えられた場合の速度制御特性について述べる。

6.1 列車速度制御系

速度制御系を図6.1に示す。指令装置は先頭車におかれた速度制御装置であり、指令装置から与えられるトルク指令を伝送系を通して各車に送り、各車における受量装置で各車の駆動系に与える信号に変換し、駆動装置を働かせる。駆動装置より与えられるトルクで列車は走行する。他方列車速度を速度発電機で検知し、指令装置にフィードバックする。

6.2 列車運動方程式

列車の運動は式(6.1)で与えられる。

$$28.35(1+\gamma)W\frac{dV}{dt}=F-R \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

γ : 回転部等価質量の割合
 W : 車両重量 [ton]
 V : 車速 [km/h]
 F : 駆動力 [kg]
 R : 走行抵抗 [kg]

なお R は次の式 (6.2) で与えられる

$$R = (1.2 + 0.022V)W + (0.013 + 0.00029V)V^2 \quad (6.2)$$

l : 列車長 [m]

ここで今回の試験電車の定数を次によって代入すると式 (5.3) を得る。

$$\gamma = 0.1$$

$$W = 64 \times 2 = 128 \text{ [ton]}$$

$$l = 25 \times 2 = 50 \text{ [m]}$$

$$\frac{dV}{dt} = 2.51 \times 10^{-4} F - \frac{1}{31.1} (1.2 + 0.022V) - 0.691 \times 10^{-5} V^2 \quad (6.3)$$

今列車速度 V を $V_0 + U$ とおき V_0 の近傍で線形近似すると F と U との間の伝達関数が式 (6.4) となる。 $U(s)$, $F(s)$ は U , F についてラプラス変換を施した関数をあらわす。

$$U(s) = \frac{2.51 \times 10^{-4}}{s + (7.07 \times 10^{-3} + 1.38 \times 10^{-3} U_0 \times 10^{-3})} F(s) \quad (6.4)$$

速度 200 km/h 付近の伝達特性を調べると V_0 を 200 として代入

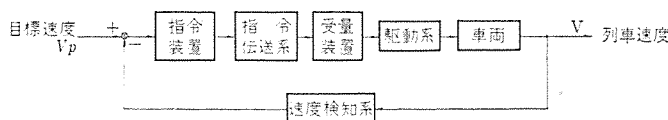


図 6.1 列車速度制御系
Train speed control system.

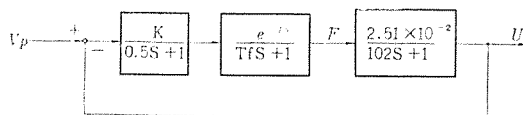


図 6.2 等価列車速度制御系 ブロックダイアグラム
Block diagram of train speed control system.

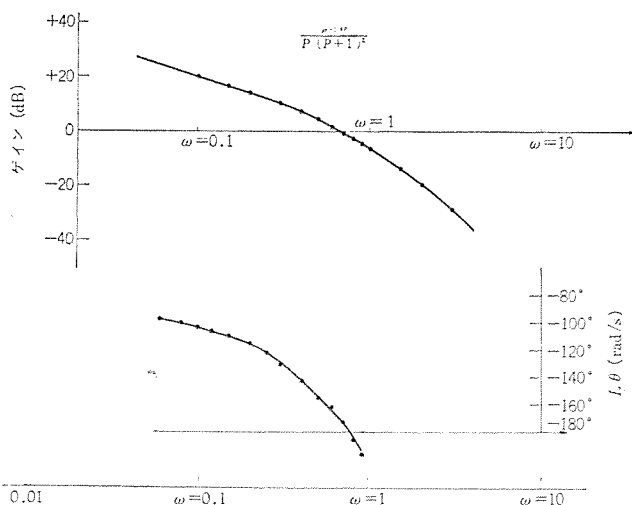


図 6.3 ボード線図
Bode chart.

する。

$$U(s) = \frac{2.51 \times 10^{-4}}{s + 9.83 \times 10^{-3}} F(s) \quad (6.5)$$

したがって駆動トルクに対する列車の伝達関数は

$$U(s) = \frac{2.51 \times 10^{-2}}{102s + 1} F(s) \quad (6.6)$$

列車速度制御における伝送系、受量装置、駆動系の伝達関数を含めてその伝達関数を $e^{-Ls}/(Tfs+1)$ とおく。図 6.1 で示した制御系は式 (6.6) を用いて図 6.2 で表わされる。 K は指令装置制御器に与える比例ゲインを示す。

ここで $L=0.2$

$$T_f = 0.5$$

を与えて系の解析を行なう。

図 6.2 の一巡伝達関数は次式となる。

$$\frac{2.51 \cdot K e^{-0.2s} \times 10^{-2}}{(0.5s+1)^2 (102s+1)} \quad (6.7)$$

周波数特性において $\omega > 0.1$ の部分を考えると式 (6.7) は近似式として

$$\frac{2.51 K e^{-0.2s} \times 10^{-2}}{(0.5\zeta+1)^2 (102s+1)} \cdot \frac{1.26 K e^{-0.4p} \times 10^{-4}}{p(p+1)^2} \quad (6.8)$$

ただし $p=0.5s$

式 (6.8) の右辺において $1.26 K \times 10^{-4}$ を 1.0 と仮定して一巡伝達関数のポット線図を描くと図 6.3 となる。

図 6.3 においてこの制御系の等価 2 次近似としたときの⁽¹⁾対数減衰率を 1.0 近くに選ぶ比例制御におけるゲイン定数 K をもとめると次のようになる。

図 6.3 においてゲイン図で -18.0 dB 変化すると

$$-18.0 \text{ dB} = \frac{1}{7.95} \quad (6.9)$$

したがって

$$1.26 K \times 10^{-4} = \frac{1}{7.95} \quad (6.10)$$

$$K = 1,000 \text{ [kg/km/h]} \text{ (2 両編成車)} \quad (6.11)$$

主電動機の加速性能を 1.2 km/h/s とすると最大力行トルクは約 $4,620 \text{ kg/8 軸}$ (577 kg/軸) となる。したがって 3 章で述べた最大トルクを指令する速度差に換算すると $4,620/1,000$ となりこれは 4.6 km/h の比例帯を示す。

なおこのときの対数減衰率 ζ を求めると -18.0 dB 補正をしたときのゲイン図 0 dB にあたる角速度 ω が 0.125 rad/s において位相余裕 73° を読みとる。 ζ を概略求めると

$$\zeta = \frac{73}{3 \times 21} = 1.16 \quad (6.12)$$

この特性による応答は現車試験を行なった結果、速度制御系としては非常に近い応答となった。しかし制御系における力行トルクを与える主電動機電流の変化がいま少し安定化したものとするため、さらにゲインを -3 dB ($1/2$ の値) 変化したものをを用いている。

7. 試験結果

本装置は昭和 43 年 6 月に納入されるまで工場において動作試験、特性試験について静特性試験が行なわれ、その後日本国有鉄道研究所において長期にわたり台車試験装置によって新幹線各種機器との

組合せ総合試験が行なわれ、動特性試験において速度制御特性が $\pm \frac{0}{2}$ km/h というすぐれた性能を確認された。またその後試験車に艤装され現在現車試験に供されているが、あらゆる信号変化、速度変化のときでも速度制御特性、精度、動作の安定度、乗りこころなど所期の性能を満足することが確認されている。

8. む す び

新幹線試験電車の運転指令装置の大略について述べてきたが、この装置と一体となり働く定位置停止制御装置については、紙面の都合上ふれることができなかった。定位置停止制御装置についても当社が製作を担当し、昭和44年10月現車試験が行なわれ、所期の停止精度が得られていることを付記する。

このように新幹線試験電車の運転指令装置は、今後ますます取り

いれられるであろう列車自動運転方式検討のベースになるであろうことを確信している。

最後にこの装置の設計・製作ならびに試験にあたり終始ご指導いただいた日本国有鉄道の車両設計事務所ならびに鉄道技術研究所その他の関係各位に深く謝意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) 「自動制御入門」(オーム社) p. 183~192
- (2) 石山, 井上, 北山: 「第6回鉄道におけるサイバネックス利用国内シンポジウム予稿集」
- (3) 鳥井ほか: 三菱電機技報, 43, No. 9 (昭44)
- (4) 北岡ほか: 三菱電機技報, 38, No. 3 (昭39)

最近の車両用高圧インバータ

白庄司 昭*・太田 幹雄*・田 原 先*

Recent High Tension Static Inverters for Rolling Stock

Itami Works Akira SHIRASHÔJI・Mikio ÔTA・Susumu TAHARA

High Tension inverters for use with rolling stock have made their appearance in the place of motor generators with excellent features in the maintenance, inspection and function.

For the solution of special problems concerning the apparatus, Mitsubishi has made efforts to improve the component parts such as development of high tension thyristors in addition to the study of the circuit system, which has resulted in the completion of standard inverters of high reliability and the delivery of the new products to various customers.

This article introduces the present state of the means of settlement as well as the problems on the inverters. Mention is also made on the system of Mitsubishi inverters, characteristics and test results of those supplied to the Nagoya Municipal Communication Bureau for its 600 V subway and those for 1,500 V use of the Seibu Railway.

1. ま え が き

600 V, 1,500 V などの直流電圧を受電して、車両照明、車内扇風機、制御用などの低圧（交流）電力を供給する車両用電力変換装置としては、従来電動発電機が広く用いられてきた。しかし、電動発電機は回転機であるために機械的摩擦部分の保守点検に手を要し、また騒音があるなどの欠点がある。これらの欠点を除くものとして登場してきたのが静止形高圧インバータである。

静止形インバータは、1958年にサイリスタが発表されて以来、そのすぐれた特性を生かした技術として急速に発展してきたものであるが、車両用高圧インバータとして使用する場合は、電気的にも環境的にもきわめてきびしい条件のもとで高い信頼度を保持するものでなければならず、その実用化には解決すべき多くの問題点があった。当社は早くから研究に着手して、これらの問題点を逐次解決し、昭和41年にいち早く実用化第1号機を製作納入して以来、各方面に多くの納入実績を有している。その間、回路方式の研究とともに、高圧インバータに適する高性能・高耐圧サイリスタの開発を含む構成部品の改良を重ね、高い信頼度を有する使いやすいインバータとして標準設計を完成し、好評を得ている。

以下車両用高圧インバータの問題点とその解決策についての現状を紹介し、あわせて最近製作した名古屋市交通局納めの600 V地下鉄用および西武鉄道納めの1,500 V用を中心に、当社高圧インバータの方式・特性・試験結果を報告する。

2. 高圧インバータの問題点とその解決策

一般の静止形インバータに比べ、車両用高圧インバータにおいては、架線から侵入するサージ電圧・入力電圧が高いために必要となるサイリスタの直列接続、走行中のパタグラフによる瞬時電力中断などの特殊条件があり、また電動発電機ではとくに問題とならなかった誘導障害・出力波形などについても解決すべき多くの問題があった。これらの問題点については、工場および現車における各種試験をもとに解決を図った結果、長期実用試験においても十分その効果が確認されている。

2.1 サージ

車両のサージとしては雷サージおよびスイッチングサージの二つがある。

架線電圧 DC 1,500 V の場合、雷サージ電圧は一般にきわめて高く、また、そのサージ幅は短いのに対し、スイッチングサージは自車・他車のノッチオフ時に発生するもので、電圧は最大 3,000 V 程度であるが、サージ幅は 10~15 ms にも達する⁽¹⁾。

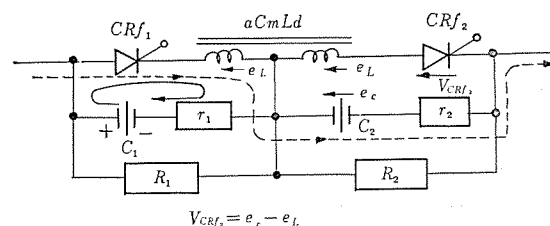
これらのサージに対しては高圧入力側に抵抗およびリアクトルを直列に、コンデンサをインバータに並列に設けることにより、インバータに影響のない範囲に減衰させることが可能である。この L-R-C フィルタはあとで述べるように、高調波電流がき電回路に流入するのを防止する役目を兼ねている。さらに、抵抗はインバータの転流失敗など事故電流を制限する役目も果している。

2.2 サイリスタの直列接続

高圧インバータの場合は、サージ電圧の高い架線につながっているうえ、インバータの回路動作上、サイリスタに過渡電圧がかかるために、サイリスタ素子を1個で済ませることは不可能で、通常複数個の直列接続が必要となる。サイリスタの直列接続法としてはつぎのような方法があり、これを採用することにより、定常および過渡電圧アンバランスを 10% 以内に押えることが可能となった。

(1) 転流リアクトル分割法⁽²⁾

転流リアクトルを素子の直列数だけ分割し、分圧コンデンサを図 2.1 のように配置する方法がある。図 2.1 において、たとえば 2 個直列の場合に CRf_1 が早く点弧すると、 CmL の a 巻線に分圧コンデンサの電圧が誘起され、同様に b 巻線も同一の電圧 (e_L) が誘起される。したがって、 C_2 が点線の回路で充電され、過電圧になっても電圧 e_L が補償効果として働くためにサイリスタ CRf_2 には過電圧がかかることがない。



R : 分圧抵抗

r : 充放電制銀抵抗

図 2.1 転流リアクトル分割直列接続
Series connection of thyristors with divided
commutation reactor.

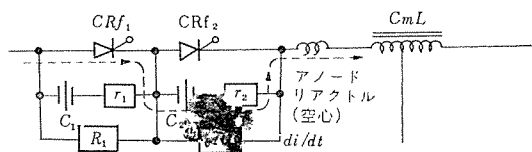


図 2.2 アノードリアクトルによる直列接続
Series connection of thyristors with anode reactor.

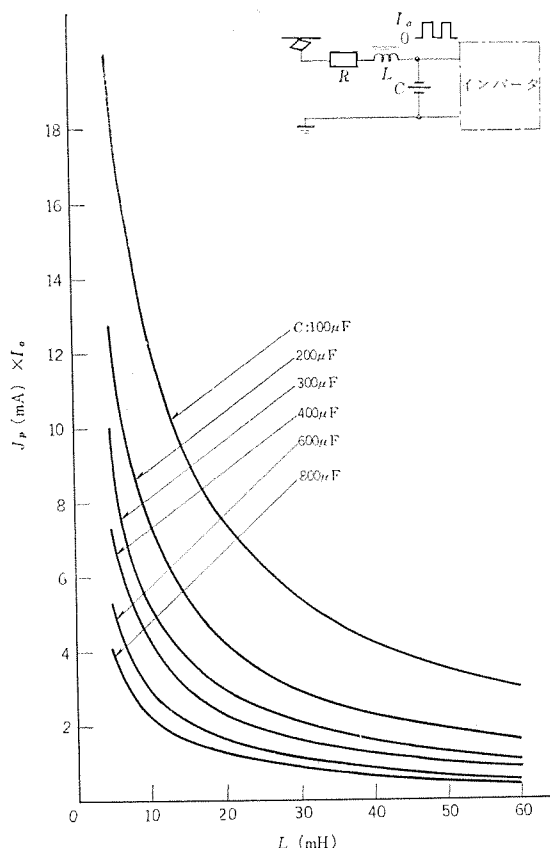


図 2.3 フィルタ定数と J_p の関係
Calculated J_p value as a function of filter constants.

(2) di/dt 抑制直列接続法

サイリスタが点弧したときの di/dt を抑制するアノードリアクトルをそう入する方法で、たとえば図 2.2 において CRf_1 が早く点弧したとすると、点線の電流が流れるが、アノードリアクトルによりこの di/dt が押えられるために点弧の遅いサイリスタ (CRf_2) の両端の分圧コンデンサ C_2 の充電を遅らせて過電圧がかからないようにする。

アノードリアクトルとして専用の空心リアクトルを用いる代わりに、当社の場合は転流リアクトルにリークageをもたせ、このリークageインダクタンスを利用する方法を採用して部品数の減少を図っている。

(3) ばらつきが少ないけわしいゲートパルス

直列点弧を容易に行なうためには、上記のような直列接続法を採用するとともに、各素子に与えるゲートパルスは立上りのばらつきが少なく、かつ急しゅん(峻)なものとせねばならない。このため、ゲートトランスの巻き方は一次・二次間の結合の良いものとするともに、各二次巻線を一次巻線に対して対称な関係となるように配列する必要がある。さらに、ゲート回路はスイッチングタイムの早いものとするのが望ましい。

2.3 瞬時停電

パンタグラフの離線により走行中に入力が瞬時中断されることがあ

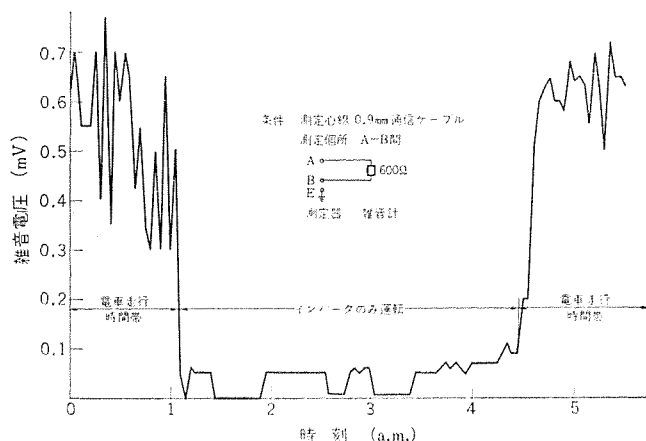


図 2.4 通信ケーブル雑音測定結果
Measured value of noise voltage on cable.

るが、この場合再印加時の位相によっては過電流が流れるか、または転流失敗することがある。これを防止するため、当社では架線電圧を無接点で検出する電圧検出器 (DCPT) を設け、電圧が一定以下にさがればすみやかにゲート回路をオフにしてインバータを停止させ、再び電圧が印加されるとゲート回路を一定のシーケンスで動作させる。起動は出力電圧を徐々に上げるソフトスタート方式として、出力トランスの飽和および励磁突流による転流失敗を防止している。電力中断の時間がどのように短くても正常に再起動させることが可能である。

2.4 誘導障害

インバータの入力電流の高調波成分については、通信および信号関係についてその影響を検討する必要がある。

(1) 通信

一般に各高調波電流成分に雑音評価係数 Sn を乗じ、2乗和して平方根した等価妨害電流 J_p をもって通信障害度を評価する。

$$J_p = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (Sn I_n)^2}$$

J_p の大きさはインバータの相数・周波数・負荷電流・制御角によって大幅に変化するが、商用周波インバータ (60 Hz) における L , C フィルタと J_p の最大値の計算結果は図 2.3 に示すようになる。これから、たとえば DC 600 V 8 kVA インバータにおいて、 $C=400 \mu F$, $L=20$ mH とすると $J_p=2 \times I_0$ mA となる。電流は $I_0=30$ A 程度であるので、 J_p は絶対値で 60 mA となり、きわめて少ない。

(2) 信号




商用および特殊軌道回路 (50, 60, 83.3, 100, 120 Hz など), AF 軌道回路、その他踏切保安装置などへの影響はインバータ入力電流が主回路電流と異なっていくわすかであるうえに、 $L-R-C$ フィルタによって MG 以下に減衰させることが可能である。現車で実測した結果、機器は誤動作など全くなく、すべて正常であった。

また、DC 1,500 V 10 kVA インバータを3台同時に運転したときに通信ケーブルにあらわれた雑音電圧を測定した結果は図 2.4 に示すとおりで、雑音電圧は 0.5 mV 程度ときわめて小さいのに対し、電車走行時間帯では 600~700 mV 程度の雑音電圧がある。主回路の影響に比べインバータのほうは無視できるほど小さいことがわかる。

2.5 出力波形

インバータの出力波形は位相制御されたく(矩)形波であり、このまま負荷に与えるとなつぎのような問題があるので、フィルタによって正

表 2.1 正弦波とく形波のけい光灯特性
Fluorescent lamp characteristics and applied
voltage wave forms.

波 形	電 圧 (実効値) V	管 電 流 A	光 束 比 %
正弦波 	198	0.427	100
く形波 (I) 	200	0.21	49.3
く形波 (II) 	270	0.415	90.6

弦波としそのひずみ率を 10 % 以内に押えるようにしている。

(1) けい光灯

く形波で点灯させた場合つぎのような不具合がある。

(a) 正弦波とく形波で点灯させた表 2.1 の比較結果から、く形波出力の場合は、その実効値を一定としてもパルス幅 θ によって光束が大幅に変化する。また光束を一定にしようすると過電圧となる。

(b) 電圧の立上がりがかわしいために陰極物質の消耗が激しくランプ寿命の低下を招く。

(c) 一般用安定器では温度上昇が 150°C にも達するうえに、ピーク電圧が高いので耐圧上問題がある。

(2) ファン

ファンをく形波で駆動した場合は、トルクリプルによる回転のむら、高調波による温度上昇が問題となる。温度上昇はく形波の場合は正弦波に比べ 130~140 % になるので、一般品の使用は困難である。

3. 三菱高圧インバータの仕様と特長

当社の補助電源用高圧インバータの標準仕様は表 3.1 のとおりであり、つぎのような特長を有している。

3.1 回路

インバータの主回路および制御回路の構成は図 3.1 に示すとおりである。

(1) 変流器帰還 PWM インバータ

主回路方式は転流改良形ブリッジインバータである⁽³⁾。出力電圧調整はパルス幅変調 (PWM) により、また転流エネルギー、無効電流の帰還は変流器 (CT₁, CT₂) によって行なっているので安定な動作で高効率である⁽¹⁾。

(2) 保護

サージに対する保護および高調波電流の抑制は 2.1 節で述べたように Re98, L₁, C₈₀ のフィルタによって行なっている。また、転流失敗あるいは過負荷に対しては、過電流継電器 (OCR) によって検出し、大電流しゃ断性能のすぐれた接触器 (LB) ですみやかに回路を開放する。なお、ヒューズ (FS) は保護回路のバックアップ用である。

(3) 起動回路

インバータの起動および制御は図 3.2 に示すような順序で行なっている。すなわち、転流コンデンサの充電を確実なものとするために入力電圧が十分に立上がった後に最初から正規の幅をもつパルスを与える。さらに、起動初期にはく形波出力のパルス幅をしばっておき、徐々にその幅を広げて出力電圧を漸増させるソフトスタート方式をとることにより、トランスの飽和などによる突入電流を防止する。瞬時停電時は図 3.2 の点線で示すようなループをたどり、起動時と同様に安定した動作が確保される。

表 3.1 高圧インバータ標準仕様
Standard specification of Mitsubishi high tension inverters.

方 式	変流器帰還 PWM ブリッジインバータ
入 力 電 圧 定 格 変 動 範 囲	DC 1,500 V または 600 V -40% ~ +10%
出 力 電 圧 定 格 変 動 範 囲	AC および DC の任意電圧 AC 定格電圧の $\pm 5\%$ DC 定格電圧の $\pm 10\%$
周 波 数 定 格 変 動 範 囲	60 Hz $\pm 5\%$
相 数	単 相
交 流 出 力 電 圧 波 形	正弦波 (波形ひずみ (歪) 率 10% 以内)
冷 却 方 式	自然冷却
周 囲 温 度	-10° ~ +40°C

表 3.2 サイリスタ、ダイオード仕様
Specification of thyristor and diode.

サイリスタ	CR 100 CX-36
形 名	
せん頭順阻止および逆耐電圧	1,800 V
過渡せん頭順阻止および逆耐電圧	1,900 V
電流量 (正弦半波平均)	100 A
瞬時過電流	2,000 A
臨界順電流上昇率 (di/dt)	100 A/ μ s
臨界順電流上昇率 (dv/dt)	100 V/ μ s
最小点強ゲート電流	100 mA
最小点強ゲート電圧	3 V
代表的ターンオン時間	1~3 μ s
最大ターンオフ時間	30 μ s
ダイオード	SR 70 B-36
形 名	
せん頭逆耐電圧	1,800 V
過渡せん頭逆耐電圧	2,100 V
平均順電流	70 A

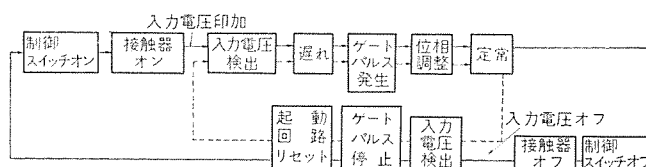


図 3.2 起動停止シーケンス
Sequence chart of starting and stopping.

(4) 発振、位相調整回路

トランジスタと可飽和トランスで構成されるロイヤ発振器を採用しているので、回路構成は簡単で動作は安定である。発振回路の電源は定電圧化しているために周波数の変動はきわめて少ない。

位相調整回路は信頼度が高くサージに強い磁気増幅器式としている。

3.2 高耐圧サイリスタ ダイオード

1,500 V インバータにおいては、スイッチングサージおよび転流時の過渡電圧を考慮すれば、1 μ m のサイリスタ電圧は 5,000 V 程度が必要となり、従来の 1,000 V 素子の場合には 5 個直列に使用していた。直列数を少なくするためには高耐圧素子が必要で、たとえば 4 個直列の場合は 1,300 V 程度、さらに 3 個直列にする場合は 1,800 V 程度の素子を用いねばならない。

高速スイッチング用サイリスタの場合、そのターンオフ時間を短くすると、もれ電流および順電圧降下が増大する傾向にあり、高耐圧になるほどその度合は著しいため、高速・高耐圧、かつ大電流量の素子の製作は困難で、ターンオフ時間が 30 μ s 程度 (以下)、電流量 100 A 級では 1,000 V 程度が最高のものであった。CR 100 CX-36

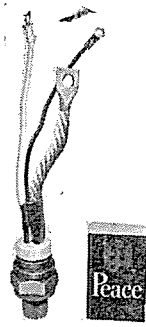


図 3.3 CR 100 CX-36 形 サイリスタ
Type CR 100 CX-36 thyristor.

形は製造技術上の問題点を解決し、その耐圧を一挙に 1,800 V 以上に高めたもので、同クラスの高速スイッチング用サイリスタとしては電流・耐圧とも記録的な特性をもっている。表 3.2 に素子の仕様を、図 3.3 に外観写真を示す。

この素子の出現により、従来はサイリスタを各アーム 5 個直列接続で使用していたのに対し、新サイリスタでは 3 個直列で十分となり、同時に開発された耐圧 1,800 V のダイオード SR 70 B-36 形と併用することにより、全素子数を一挙に 3/5 に減少できるだけでなく、これに付属した部品数も減少でき、回路の簡素化と同時に信頼度の向上を図ることが可能となった。そのほかこのサイリスタは di/dt 、ターンオフタイム、残留蓄積キャリアなどについてもすぐれた特性を有しており、これによって分圧回路用部品、転流装置の小形化なども推進された。

3.3 構造

(1) 耐振、防じん

耐振性の強い構造とするとともに、防じん(塵)については半導体部分と、比較的ちに強いリアクトル、トランス、コンデンサなどの部品とは仕切りを設けるか、または別箱にするようにしている。半導体部分は密閉構造とし、他の部分は半密閉あるいは室内取り付けの場合は網カバー付きとして放熱効果を上げている。また、個々の構成部品については防じん・防水を考慮した設計としており、小形部品はモジュール化し、フィルタ回路部品などは、その端子構造および配置を車両用に適したものとしている。

(2) ゲート制御回路のユニット化

制御回路はすべて一箱にまとめて完全にユニット化しており、保守・点検が容易である。

(3) 専用試験器

インバータの出力特性および制御回路単体特性の測定・検査ができるインバータ専用試験器と、コネクタで容易に接続できるようになっている。

(4) サイリスタの点検

サイリスタには故障表示ランプを設けてあり、素子故障が発生すると外部から確認できるようになっている。

4. 西武鉄道納めのインバータ(入力 DC 1,500 V)

西武鉄道秩父線の E 851 系電気機関車用低圧補助電源として高圧インバータを納入した。このインバータは 1,500 V 用、連続定格容量 4 kVA で、表 3.1 の標準仕様によるものであり、構造は機関車の機械室に積載するのに適したものとしている。図 4.1 にカバーを取りはずしたサイリスタスタック部分を示す。

つぎに、この装置の試験結果について述べる。

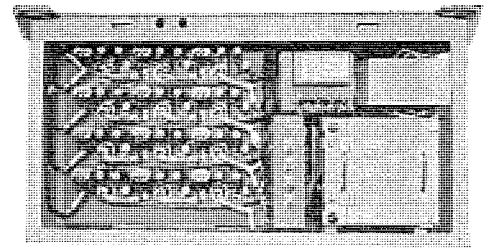


図 4.1 西武鉄道納め SIV-4 A 1 形 高圧 インバータ
Type SIV-4 A 1 high tension inverter for Seibu Railway.

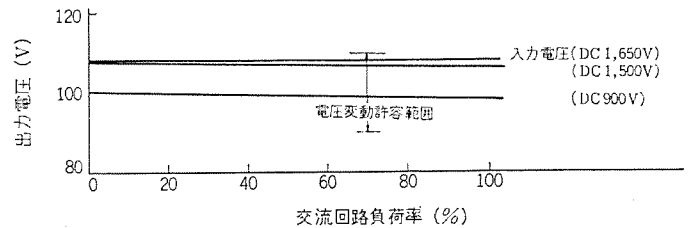


図 4.2 交流出力特性
AC output voltage regulation curves.

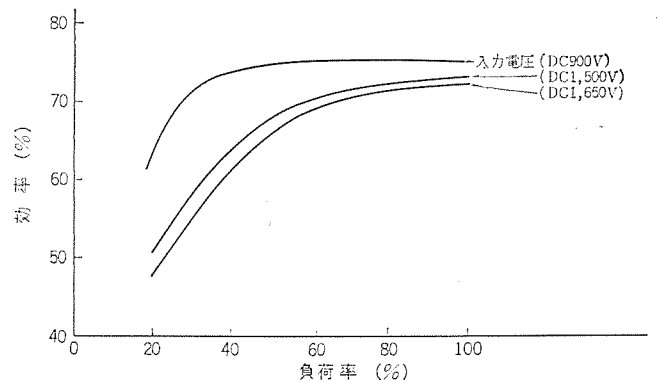
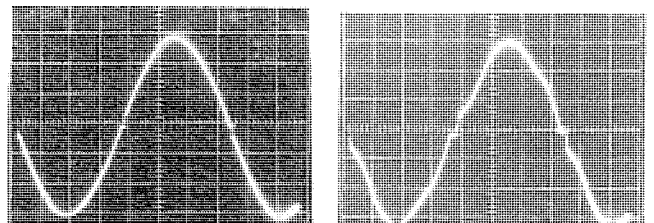


図 4.3 効率特性
Efficiency curves.



(a) 無負荷 (b) 定格負荷

図 4.4 交流出力波形(入力 DC 1,500 V)

Waveforms of AC output voltage
(input voltage : DC 1,500 V).

4.1 定常特性

(1) 交流出力特性

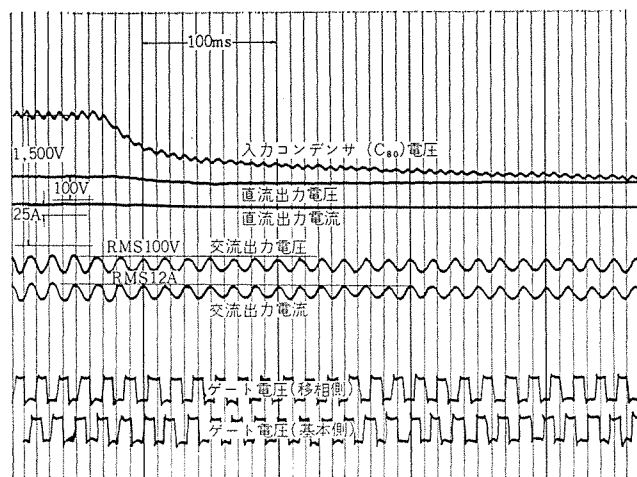
図 4.2 に示すように入力電圧の変動およびいかなる負荷変動に対しても、出力電圧は定格の 100 V に対して $\pm 5\%$ を越えることはない。

(2) 効率特性

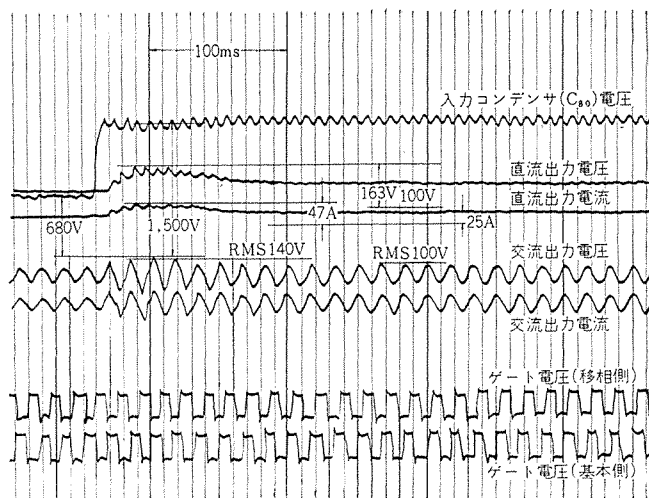
図 4.3 に入力電圧を変動させたときの負荷に対する効率特性を示す。

4.2 出力波形

図 4.4 に入力電圧 1,500 V 時の定格負荷および無負荷時の交流出力電圧波形を示す。波形わい(歪)率は入力電圧 900~1,650 V の電圧変動、および無負荷~定格負荷の負荷変動に対して 10% 以内



(a) 降下時 (1,500V→680V)



(b) 上昇時 (680V→1,500V)

図 4.5 入力電圧急変試験

Test for sudden change of supply voltage.

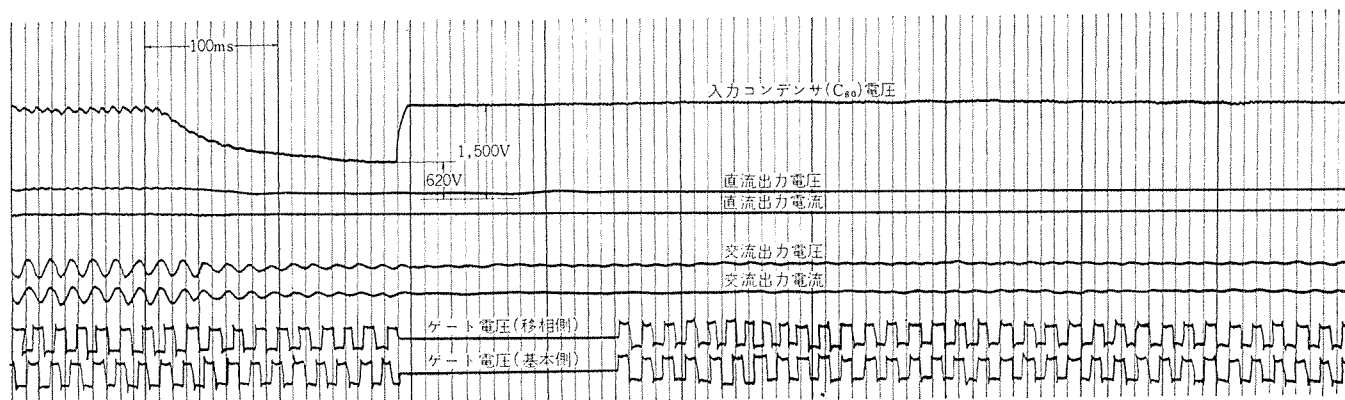
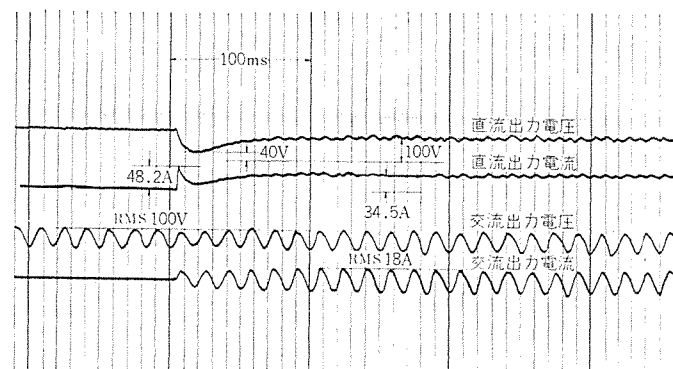
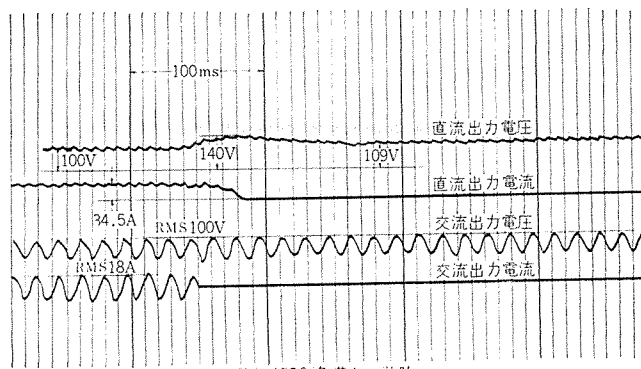


図 4.6 瞬時停電試験

Instantaneous supply voltage interruption test.



(a) 150%負荷投入時



(b) 150%負荷レバ断時

図 4.7 負荷急変試験

Test for sudden load change.

である。

4.3 入力電圧急変試験

実際の架線電圧変動範囲は900～1,650Vであるが、680～1,500Vに電圧急変に対してゲート波形の乱れもなく、安定した動作で約150ms後に定常状態となる。

4.4 瞬時停電試験

図4.6は電圧検知回路が停電を検知してゲートパルスの発振が停止した瞬間に、再び架線電圧が印加された状況を示す。いかなる瞬時停電に対しても動作上異常は認められない。

4.5 負荷急変試験

交流および直流負荷を同時に150%負荷と無負荷の間で急変させ

た場合の各部の波形を図4.7に示す。この負荷急変に対して、約150ms後に定常状態に落ち着き、その間の動作は安定しており、いかなる負荷変動に対しても問題はない。

4.6 その他

素子の直列点弧時の電圧分担測定の結果、そのアンバランスは10%以内で良好であり、転流余裕時間についても200%負荷時50μsあり、素子のターンオフタイム30μsに対して十分余裕がある。その他サージ発生試験・過負荷試験・連続通電温度上昇試験・周囲温度変化試験を行なったが、いずれも好結果が得られた。

5. 名古屋市交通局納めのインバータ(入力DC600V)

名古屋市交通局に納入した高圧インバータは、地下鉄第3軌条方式

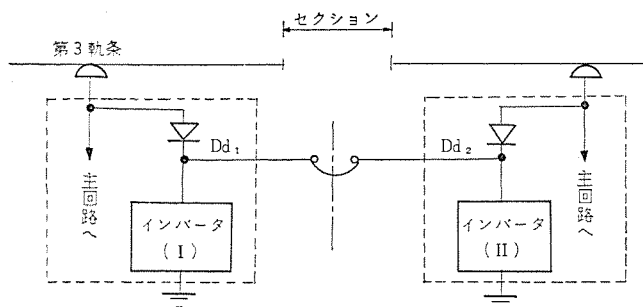
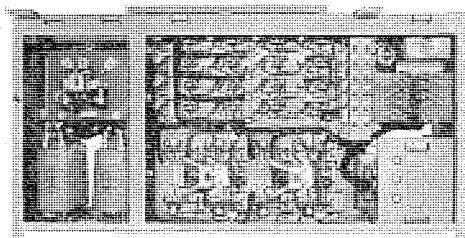


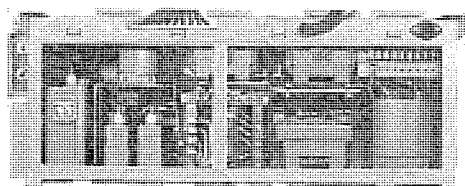
図 5.1 セクションでの無停電化
Circuit connection avoiding power supply
interruption at third rail gaps.

表 5.1 名古屋市交通局納めインバータ仕様
Specification of high tension inverter for Nagoya Subways.

形 名	SIV-8B1
入力電圧 (定格)	DC 600 V
入力電圧変動範囲	DC 400 V~DC 750 V
容 量	AC 100 V 6.3 kVA DC 100 V 1.4 kW DC 24 V 0.4 kW
過負荷耐量	200% 1分間
サイリスタ	CR-100 BX-20 100 A 1,000 V, ターンオフタイム 30 μs 構 成……2S1P4A
ダイオード	SR-30 B-24 35 A 1,200 V 構 成……2S1P4A2G



(a) サイリスタ箱



(b) フィルタ箱

図 5.2 名古屋市交通局納め SIV-8B1 形 高圧 インバータ
Type SIV-8B1 high tension inverter for Nagoya Subways.

としてはわが国初めての量産品であり、3章に述べた事項に加えてつぎのような特長を有している。

(1) 無停電化

インバータは電動発電機と異なり、入力がなくなると出力も急速に消滅する特性を有するが、第3軌条地下鉄では駅間などに多くのセクションがあるため、走行中にひん繁に停電することになり、乗客に対するサービス上好ましくない。これを無停電化する方法の一つとして DC-DC コンバータにより DC 1,500 V をいったん低圧直流に変換してバッテリーを浮動充電し、これを電源とする低圧インバータにより

DC-AC 変換する完全無停電方式が考えられる⁽⁴⁾。しかしスペース上の制約などから、さらに簡単に行なえる図 5.1 のような方式を採用した。

この方式は入力を編成電車の両端車からとり、ダイオードを経て引き通すことにより、セクション通過時も入力が中断しないようにするものである。引き通し用ダイオードは圧縮機用電動機などから発生する高いサージ電圧を受けるので、高耐圧素子を使用するとともに、バリスタによってサージ抑制を図った。

(2) 補助電源の集中化

従来の車両は各車に1台の電動発電機が装架されていたが、今回は3両の負荷に対し1台のインバータで給電する方式とした。これにより補助電源の台数が減少し、インバータ化による利点に加えて合理化・簡易化が促進された。また、その容量はインバータとして適切なものを選定し、先に述べた電源集中化と相まってインバータ化によりぎ装スペースが大幅に減少し、従来の電動発電機1台のスペース内にインバータが取り付け可能となった。重量の面においても電動発電機が660 kg 3台であったものを一挙に800 kg 1台に減少させることが可能となった。このインバータの仕様および回路方式は3章の標準仕様とほぼ同一であるが、相異点は表 5.1 のとおりである。

防じんに対してとくに留意する必要のある半導体部品を収納したサイリスタ箱(図 5.2-a)と、さほど神経を使う必要のないリアクトル、コンデンサ類を収納したフィルタ箱(図 5.2-b)とに分けることにより、それぞれに最も合理的な箱構造としている。

6. む す び

車両用高圧インバータは、数年にわたる試験および試用期間を経てその性能・信頼性が認められ、また誘導障害など外部に及ぼす影響の点でも問題がないことが確かめられた結果、本格的な採用がようやく緒についた段階であるが、制御・照明・換気装置などの補助電源装置として急速に普及してゆくものと期待される。

大容量の高圧インバータとしては、日本国有鉄道 EF 81 形電気機関車に積載される客車の電気暖房電源用 320 kVA 単相く形波インバータを製作しているが、今後各方面において電車の冷房化が進められる機運にあり、その電源として電動機負荷の大容量インバータが必要となろう。また、将来は主電動機のブラシレス化を図るために可変周波数・可変電圧出力の大容量インバータやサイリスタモータへと発展することが予想される。これらについては、三相出力が要求されるが、多相化するにはインバータ基本回路数が相数だけ必要となり、現状では構成部品数の増加により、価格・寸法・重量などの点で不利となることは避けられない。これをいかに解決するかが今後の課題であろう。

参 考 文 献

- (1) 宮内ほか：三菱電機技報 41, 331 (昭 42)
- (2) 小原ほか：三菱電機技報 40, 346 (昭 41)
- (3) 大野：三菱電機技報 39, 824 (昭 40)
- (4) 北岡ほか：車両用無停電インバータ，電気四連大，799 (昭 42)

電鉄変電所用油冷式シリコン整流器

小林 凱*・上岡 康宏*・冬 広 力*

Oil Cooled Silicon Rectifiers for Railway Substations

Itami works

Gai KOBAYASHI・Yasuhiro UEOKA・Tutomu FUYUHIRO

Silicon rectifiers for use in railway substations have made a great stride since the introduction of the first rectifier in the world by Mitsubishi, having set up a steady foothold in the railway engineering.

Later developments have added such a new model as oil cooled sealed ones and natural cooled one provided with new coolant SK-2. These new apparatus permit installation outdoor, having maintenance free operation and contributing a great deal to the modernization of the railway substations.

This article describes briefly the oil cooled silicon rectifiers built by Mitsubishi in reference to their characteristics and the constructional features.

1. ま え が き

シリコン整流器は電鉄変電所用直流電源としての地位を確立しているが、技術の進歩はその発展の過程において大容量素子の適用と同時に新冷却方式により小形化、信頼性、騒音、屋外設置など従来久しく要求されていた変電所用の理想的な形に大きく貢献してきたといえる。

当社は、昭和40年に最初の電鉄変電所用レクチフォームを納入して以来、油冷整流器については最大の実績をもって各種の用途に対応してきた。この過程において、国鉄のご指導のもとに完成された油浸式密封形シリコン整流器、あらたに開発された新絶縁冷却液 SK-2

表 1.1 製作実績
List of manufactures.

風 冷 式	341,536 kW (142 台)
レ ク チ フ ォ ー マ	137,500 kW (53 台)
通 油 自 冷 式	57,200 kW (27 台)
油 浸 送 油 自 冷 式	121,000 kW (28 台)
そ の 他	3,400 kW (2 台)

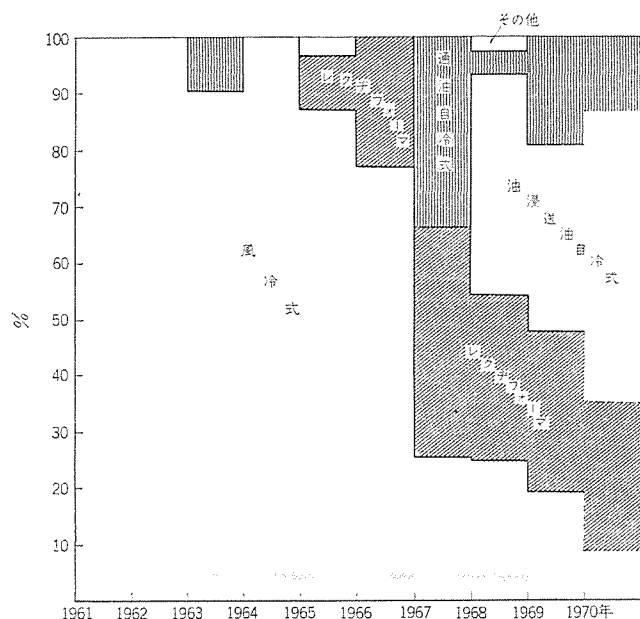


図 1.2 冷却方式による製作実績比較 (台数比)
Comparison of manufacturing experience on various type of cooling.

を用いた通油自冷式シリコン整流器など各種の応用条件に対応した整流装置が完成するにいたった。

本文では、この各種油冷式整流器の概要を紹介して変電所を計画される関係各位のご参考にしたいたいと考える。

2. 整 流 素 子

2.1 整流素子発展の経過

シリコン整流器が電鉄変電所に採用されてすでに10年を経過し、初期に論じられた素子の信頼度、寿命などに代わって経済性、新冷却方式の導入などの実使用面において大きな進歩が見られるに至った。しかし、この発展の過程において近年とくにその進歩がいちじるしい大容量高耐圧素子の導入、平形素子の実用化がこの新しい変電所用整流器としての油冷式シリコン整流器の発展と完成に大きく貢献している事実をみのがすことはできない。

表2.1に示される素子構成は、これらの進歩の状況を如実にものがたっている。当社における素子の容量、ならびにその構成はこ

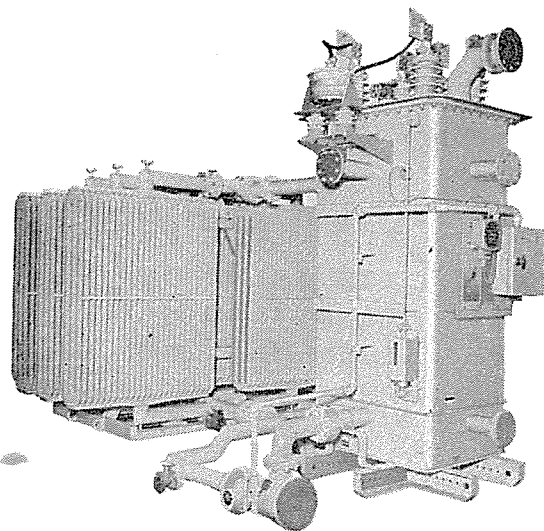


図 1.1 油浸式シリコン整流器
Oil-immersed type silicon rectifier.

表 2.1 素子構成
Series and parallel number of diodes.

出力 素子形名	SR 200 F	SR 200 H	SR 300 A	SR 400 C	FD 500 C	FD 1000 A
2,000 kW	6S×8P ×6A 288	6S×7P ×6A 252	5S×5P ×6A 150	3S×5P ×6A 90		
3,000 kW	6S×12P ×6A 432	6S×10P ×6A 360	5S×7P ×6A 210	3S×7P ×6A 126	3S×4P ×6A 72	
4,000 kW		6S×14P ×6A 504	5S×10P ×6A 300	3S×10P ×6A 180	3S×6P ×6A 108	3S×4P ×6A 72
6,000 kW					3S×8P ×6A 144	3S×6P ×6A 108

注 1 出力電圧 1,500 V, 定格 D 種結線三相ブリッジ
2. 1 素子短絡での連続運転を条件とし直列数 1 個の余裕を含む。

の方面における最もすぐれたものであることは、すでに周知のとおりである。これが回路構成要素の個数の減少と相まって油冷式整流器の設計内容をより簡素なものとし、完成された装置の実現に貢献しているわけである。電鉄変電所用整流器の素子構成を決定する要素はすでに確立されて久しいものであるが、これを理論式化した基本条件をつぎに示す。

$$N_s \leq (E_a \cdot \alpha / E_p) + \beta$$

N_s : 整流素子の直列個数

E_a : 各アームに加わる異常電圧

α : 整流素子にかかる分担電圧の不平衡率

E_p : 整流素子の定格くり返しピーク逆電圧

β : 余裕分 (最低 1 個)

この条件を用いるかぎりにおいて常に整流素子直列数は、1 個の余裕を要求されるわけである。したがって、現在用いられている直列数 3 の設計は当分の間標準として採用されるであろう。

すなわち、余裕率 50 % の設計であり、直列数を 2 にするには素子耐圧 6,000 V 級のものとなるが、余裕率 100 % となって経済性も含めた検討が必要となるであろう。

当社では大容量整流素子として、スタッド形 SR 400 シリーズと平形 FD 1000 シリーズが用いられている。整流素子は定格容量の増大だけでなく、その内部構造においても大きな進歩が見られた。その中心をなすものは、スタッド形、平形両系列において適用されている圧接構造である。これは電鉄負荷における熱サイクル動作に対し、常に安定した信頼性を確保するために (当社においては以前よりソフト溶ダ—素子是用いられていないが) ろう付け構造にかわり、さらに電流容量の増加、ならびに短絡過電流の飛躍的増大を心として作られたものが圧接構造であり、熱サイクルに対する信頼性も格段に向上している。

整流素子の電流定格、あわせてそのサージ電流耐量は、すでに現在用いられている変電所容量に対して十分満足しうる状態に達している。たとえば、6,000 kW 油浸形整流器において使用されている素子数はわずか 108 個であって、数年前における 3,000 kW 風冷式整流器の 400 個をこえる素子数と比較してみるとその進歩のはげしさがうかがわれる。

2.2 大容量整流素子

当社において現在標準シリーズとして量産化されている大容量高耐圧素子には、SR 400 シリーズと FD 1000 シリーズがある。これらの整流素子は 4,000 V にいたる各種電圧クラスが量産されているが、2.1 節で説明したように電鉄変電所用として使用されているのは、



図 2.1 SR 400 C シリコン整流素子
Silicon rectifier cell
(type SR 400 C).

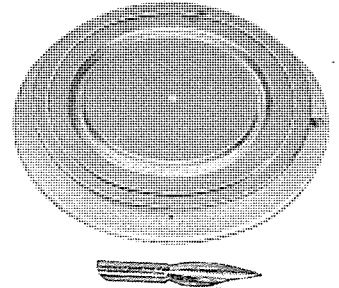


図 2.2 FD 1000 シリコン整流素子
Silicon rectifier cell
(type FD 1000).

表 2.2 SR 400 C 素子定格表
Ratings of SR 400 C.

項 目	記 号	単 位	SR 400 C -40	-50	-60
せん 頭 逆 電 圧	VRRM	V	2,000	2,500	3,000
過渡せん頭逆電圧	VRSM	V	2,300	2,800	3,300
平 均 順 電 流	IF(AV)	A	400	(商用周波, 単相半波, 抵抗負荷, ケース温度 89°C)	
サージ電流	IFSM	A	10,000	(商用周波, 単相半波 1 サイクル, 波高値, 非繰り返し)	
電流二乗時間積	I²T	A²s	2.7×10 ⁵ (60 Hz 半波 1 サイクル)		
動作接合部温度	Ti	°C	-40~150		
保 存 温 度	Tstg	°C	-40~150		
使用周波数	f	Hz	1,000		
締 付 ト ル ク		kg・cm	550		
重 量		g	850		

表 2.3 FD 1000 A 素子定格表
Ratings of FD 1000 A.

項 目	記 号	単 位	FD 1000 A			
			-40	-50	-56	-60
せん 頭 逆 電 圧	VRRM	V	2,000	2,500	2,800	3,000
過渡せん頭逆電圧	VRSM	V	2,300	2,800	3,050	3,300
平 均 順 電 流	IT(AU)	A	800	（方形波 120° 通電, ケース温度 101°C）		
サージ電流	ITSM	A	14,000	（商用周波, 单相半波 1 サイクル, 波高値, 非繰り返し）		
電流二乗時間積	I²T	A²s	5.1×10⁵ （60 Hz 半波 1 サイクル）			
動作接合部温度	Ti	°C	-40～150			
保 存 温 度	Tstg	°C	-40～150			
使用周波数	f	Hz	1,000			
圧 接 力		kg	1,500 （推奨値 1,200）			
重 量		g	300			

このうち 3,000 V にいたる各種耐圧クラスの素子である。

SR 400 シリーズはスタッド形であって、同じ形状において SR 400 C (L) 形があり、これは 1,200 V までの各種電圧定格があり、過去に使用された SR 300 A シリーズとの互換性を有し、将来における保守の問題も考慮している。

ほかに、SR 200 P シリーズが生産されており、これは SR 200 F, H シリーズに対する互換性をもち、既設機器に対する予備品の問題を考慮している。

(1) SR 400 シリーズ

図 2.1 は SR 400 C の外観を示し、表 2.2 にその主要定格を示す。スタッド形であるが、内部は圧接構造が用いられていて信頼性は高い。レクチフォーマ、および通油自冷式整流器にはこの素子が 3 個直列に使用されている。極性は SR 300 シリーズと同じくリードカソードである。

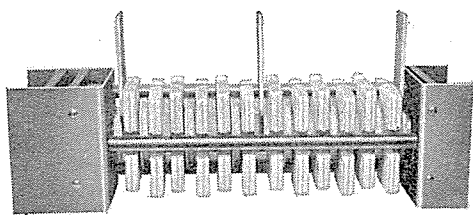


図 2.3 FDS 1000 シリコン 整流 スタック
Silicon rectifier stack (type FDS 1000).

(2) FD 1000 シリーズ

図 2.2 は FD 1000 A 形大容量平形素子の外観を示す。これは現在わが国において使用されている最大の電力用整流素子である。

その基本設計は 1,000 A 定格をベースとして決められているが、電鉄用途としての各種改良を考慮して 800 A 定格としている。これは三相全波結線において確保される値である。

平形素子は、両側より放熱ブロックとともに 1,500 kg の圧力で圧接されて完全な素子としての機能を発揮する。油浸密封整流器用として開発された大容量平形素子スタックを図 2.3 に示す。これはきわめて小形のかつ高性能の放熱片とともに組み立てられて油経路の中へ取付けられる。6 素子形スタックが標準となっている。この 6 素子形スタックは三相全波結線における 1 相分 2 アームを構成する設計である。平形素子の採用により素子電流定格は大幅に向上した。それは素子の両面から放熱が行なわれる根本的理由のほかに、伝熱経路における抵抗要素を極端に減少しうるからである。

この FD 1000 A 形平形素子は、その前の段階として使用されていた FD 500 C 形平形素子シリーズとともに、すでにその実績は製作中も含め 3,000 個以上に達するが、SR 400 シリーズとともに整流素子故障は皆無の好調な実績をほこっている。

3. 油冷式整流器

3.1 各種油冷式の変遷とその検討

当社においてはすでに説明したように、3 種の油冷式シリコン整流器を電鉄変電所用標準シリーズとして完成している。

このほか、すでに油冷方式として各種の試みが行なわれているが、これらとの相互比較においてわれわれが方式を設定した過程の基本的考慮について述べてみたい。電鉄用シリコン整流器において風冷式整流器は今後一部の特殊ケース以外製作されないであろう。この変遷の過程においてとりあげられた基本的考慮を要約すると次のことが考えられる。

- (1) 変電所敷地建屋の縮小と据付工事簡略化による建設費の低下
- (2) 冷却システムを中心とした機器の保守、とくに絶縁に対する信頼性の向上、および建屋の設計上の簡素化
- (3) 腐食問題に対する長期の安定なる設計
- (4) 屋外設置に対する雨水、雪などの浸入対策とそれによって生じた風冷式整流器における必然的な機器コスト上昇の低下
- (5) 騒音対策とその解決に対する経済的な方法

上記問題点の解決に各種の努力が行なわれた訳であるが、その過程において本質的な要求と若干相反する性格を持った装置が導入されているケースがある。それは従来の油入自冷式整流器用変圧器の概念をたんに整流器に拡大した油浸形整流器で、整流器発展の本質と矛盾する各種の要素を含んでいる。すなわち、冷却効果の低下にともない必然的に小形の素子を大量に使用する必要が生じる。これ

は素子大容量化の傾向と矛盾するほか、油浸式において本質的に要求される内蔵機器の信頼性向上に対して多数の分圧回路そのほか保護回路を内蔵しなければならない問題、および私鉄向け変電所において法規上必要とされている劣化検出装置の内蔵と、その多数の口出し線の油密構造に対して機器全体としての信頼性を低下させている。

また、その据付面積においても決して小さくはなっていない。この方式における唯一の利点としてあげられていた完全静止機器は後述する通油自冷式においてすでにカバーされているところである。また、この油浸式整流器において各回路ブロックをいくつかのタンクに収容し、これを送油する方式もタンク構成の複雑さと製作費の増加などの問題をかかえているといつてよいであろう。整流器用変圧器に近接して別の冷却システムを持つ送油形シリコン整流器を近接設置する方式も考えられたが、これはその本質的特性においてレクチフォームに吸収されるべきものと考えられる。これらの点を考慮してわれわれが基本的選択の考慮としてあげられるものは次の点に要約される。

レクチフォームはその完成以来すでに 5 年間を経過しているが、その後考慮されたあらゆる形式に対しておとらぬ基本的理由をここで再度考えてみたい。これは変圧器も含めた整流装置として最も小形であり、かつ電力変換のながれに対し合理的な形態をとっている。その共通油冷却方式は電鉄変電所用の変動負荷に対し変圧器もふくめた大きな熱容量が加算されること、また油循環によって生ずる乱流は変圧器、整流器をふくめた共通の冷却システムの放熱効果をいちじるしく向上させることが知られており、放熱器に付属した補助冷却扇も実際の運転ではほとんど動作しないことが知られており、実質上無騒音機器としての評価を得ているわけである。したがって、整流器用変圧器もあわせて設置される新設の私鉄向け変電所においては、そのすぐれた特性は今後なお続くものと考えられている。整流器部分の基本構造は開発以来変わっていないが、これはきわめて慎重な検討の結果導入に踏み切った成果と考えられる。しかし、その内部構造においては高耐圧・大容量素子の導入、そのほか改良によりきわめて余裕あるコンパクトな設計が可能となっている。

油浸形密封式整流器は先にふれた油入自冷式整流器とは本質的に異なるものと考えられる。それは大容量平形素子の導入が強制冷却により可能となった事実である。すなわち、FD 1000 A クラスの大容量素子が効果的に冷却される結果、その内部構造はあとで紹介されるようにきわめてコンパクト、かつ高信頼度のものとなっている。これが密封式とくにいわれる理由は国鉄において採用されているように、素子の劣化検出装置が省略されるという事実である。すなわち、油タンクと外部との導通は、主回路のブッシングだけとなり、補助回路に対する複雑な口出し部はまったく用いられていない。これが長期にわたる高信頼性の確保のうえにおいてきわめて重要な要素をしめると考えられる。したがって、このような条件が満たされる場合に、整流器用変圧器と別途に設置される整流器においては、今後の一つの主軸をなすものと考えられている。

通油自冷式整流器は、前二者における設定条件にカバーしきれない範囲の問題点を解決するものとして完成されている。すなわち、この方式は以前においてほかに試みられたことがある一般鉱油を使用した通油自冷式においては、その冷却効果の点からかならずしもスペース、ならびに経済性の問題において満足しうるものではなかった点を解決し、不燃性絶縁冷却液 SK-2 の採用により近代的整流器

としての要素を備えたものである。この方式においては、整流素子はレクチフォームとどのように油冷導体に外部から装着されるので整流素子、ならびに回路構成要素はすべて気中にあり、素子劣化検出装置、そのほか保護装置の追加、ならびに信頼性、保守に対する問題も解決されている。また、整流器キュービクルは密閉されて外気とシャ断されていることはおなじではあるが、その冷却方式は完全な静止機器である。したがって、この方式は整流器用変圧器がほかのものと流用が要求される場合、あるいは設置条件から変圧器との別置が必要になる場合においてとくに有効である。SK-2 は不燃性であって、乾式変圧器との組合せにおいて従来風冷式整流器の採用が必要とみられていた使用条件に対しても有効な解決方法を与えるものである。

なお、当社ではこのほか 600 Vクラス 数百 kW の電鉄変電所にシステムとしての合理化をあわせとりれたパッケージ形変電所を完成しており、すでに多数の納入実績を有している。この方式についてはすでに本紙上でも紹介されているのでここでは省略する。

3.2 レクチフォーム

レクチフォームは通油形シリコン整流器と整流器用変圧器を共通ベース上に一体に組み立てて、整流器部の冷却は変圧器絶縁油を循環し両者の発生熱を変圧器のほかの面にとりつけられた放熱器により一括して放散する機器方式であり、53 台の実績が示すように広く電鉄変電所用整流装置の一形式を確立しているものである。標準形式のレクチフォームの構成は変圧器部と整流器部から構成され両者はおのの別個に組立てられるが、最終段階で結合され、一体の装置として試験されてそのまま放熱器などすべての付属装置とともに組み立て輸送されるのが特長である。この全装可搬形レクチフォームは、すでに単器で 4,500 kW あるいは 70 kV 受電の定格まで広く適用され、電鉄変電所のほとんどの用途を満たしている。整流器キュービクル内部にはアルミ押し出し形の油冷導体が、たてに配列され各相の直並列構成に対応した素子配列となり、正極側・負極側が上下に整然と分離されている。このキュービクルの側面のセクションに劣化検出装置、温度計、そのほか付属保護装置が収納されている。整流器は完全な屋外構造として製作され、すでに 5 年間の実績において 1 号器以来完全無事故の運転実績をほこっており、なお新設される変電所においても、その特長を十分ご認識のうえ、採用されている実情である。

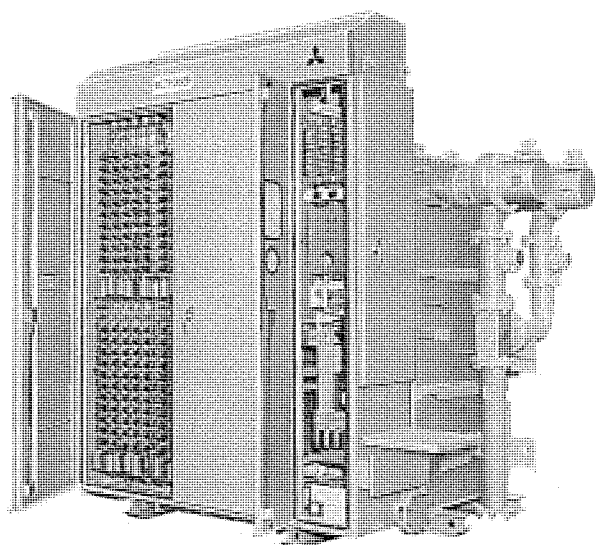


図 3.1 1,500 V 4,500 kW レクチフォーム
1,500 V 4,500 kW Rectifier.

この特長は海外においても認められ、すでにオーストラリアの NSW の 5 箇所の変電所において、レクチフォームが好調運転を行なっている。

素子の冷却として強制通油を行なうため、その冷却部分の構造はきわめて小形かつ簡略なものとなっている。

この方式を採用することにより従来の公共企業体鉄道あるいは、私鉄電鉄変電所は下記のようなすぐれた特長を与えられることとなった。

- (1) 変圧器・シリコン整流器の完全一体化の電力変換装置が得られた。
- (2) 全体の形状は変圧器単独とかわらない方式が得られている。
- (3) あらゆる用途に全装可搬組立輸送が可能で、単に置くだけで変換機器が完成する。
- (4) 屋外設置に全く安全であり、単一冷却系は機器の信頼度とともに経済的な装置を可能とした。
- (5) 大きな熱容量は電鉄負荷に適合し、かつわずかの放熱器でも効果的な冷却が与えられるため、実際運転上補助冷却扇の運転はなく騒音問題を解決した。
- (6) 整流素子ならびにそのほかの保護回路要素は直接保守が可能であり、油冷口出し構造が不要である。

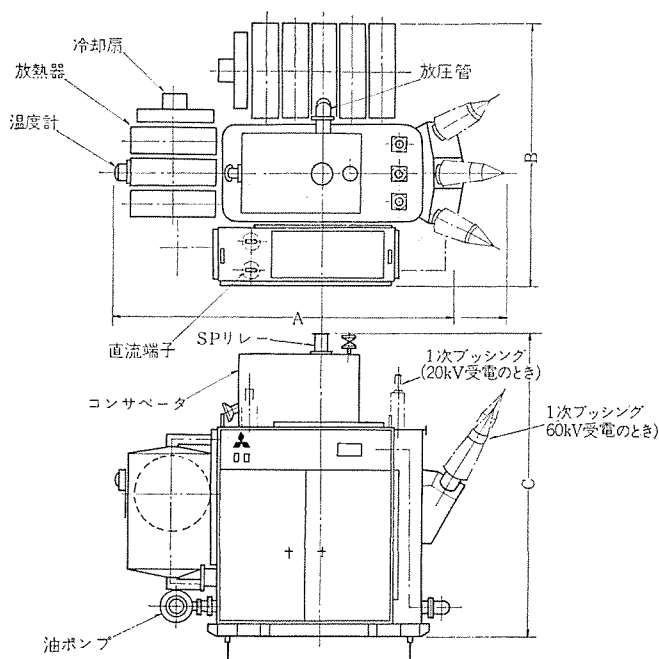


図 3.2 レクチフォーム外形図
Outline of Rectifier.

表 3.1 レクチフォーム寸法・重量表
Dimensions and weight of Rectifier.

受電 kV	出力		寸法 mm			総重量 kg
	電圧 V	容量 kW	A	B	C	
6	1,500	1,000	2,600	2,700	2,950	8,700
20	600	1,500	3,150	2,850	3,250	13,800
		2,000	4,400	2,850	3,450	16,800
	1,500	2,000	3,500	2,750	3,200	11,800
		3,000	3,600	2,850	3,500	14,400
60	600	1,500	4,600	2,950	3,300	19,000
	1,500	2,000	4,900	2,750	3,300	18,500
		3,000	5,000	2,800	3,500	20,100

注 出力電圧 600 V のものは、2 重星形結線と相間リアクトル内蔵、1,500 V のものは、三相ブリッジ結線

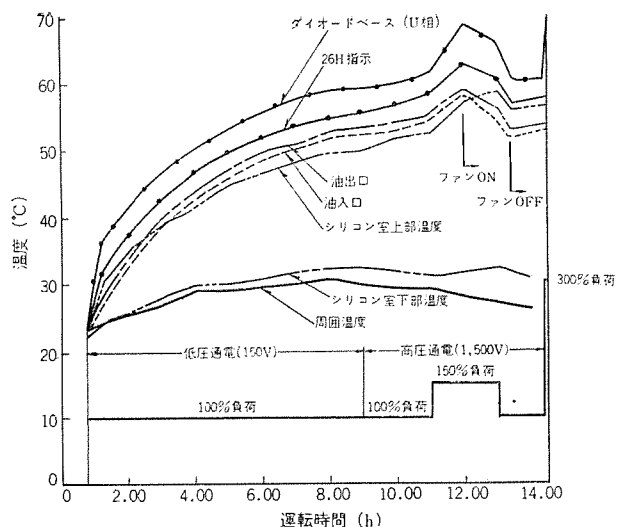


図 3.3 レクチフォーマ温度試験結果
Temperature-rise test data of Rectiformer.

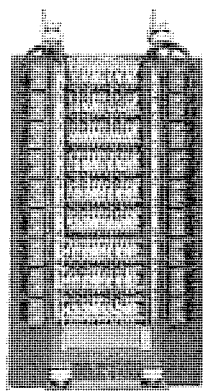


図 3.4 1,500 V 6,000 kW 油浸シリコン整流器中身
1,500 V 6,000 kW oil immersed silicon rectifier assembly.

レクチフォーマ形整流装置における温度試験結果の一例を図 3.3 に、また標準系列の寸法を表 3.1、図 3.2 に示す。

3.3 油浸密封式シリコン整流器

国鉄変電所を主体とし、最近急速にその実績がのびているものが油浸密封式シリコン整流器である。これは先述のとおり単なる油入自冷式とは異なり、大容量平形素子を油浸構造に配列してこれを特殊な設計による強制通路の内部に配列することにより、効果的な冷却が可能である。この設計により 6,000 kW の大容量シリコン整流器も可能となった。図 3.4 は油浸密封式シリコン整流器の内部構造を示す。これは強固な溶接わく構造の両側に平形素子スタックが取り付けられ、また分圧回路兼異常電圧保護装置もあわせて最短距離に配列された合理的な構造となっている。すべての外部回路との接続は、上部フラッシュ板に設けられたブッシングだけである。したがって、素子劣化検出装置は国鉄向け変電所においては全く用いられていない。この整流装置における素子構成は表 2.2 から知られるように、きわめて少なく、これが油浸密封式としての決定的な要素ともなっている。この方式においては油循環ポンプを付属し、冷却油は整流器内を強制的に流通して、外部への放熱は別置した放熱器バンクにより行なわれる。この放熱器バンクは整流器の横に設けられることもあり、あるいはその配置建屋構造などにより適合した別置形式も用いられる。

この方式は油浸密封式とよくいわれているとおり外部とのシャ

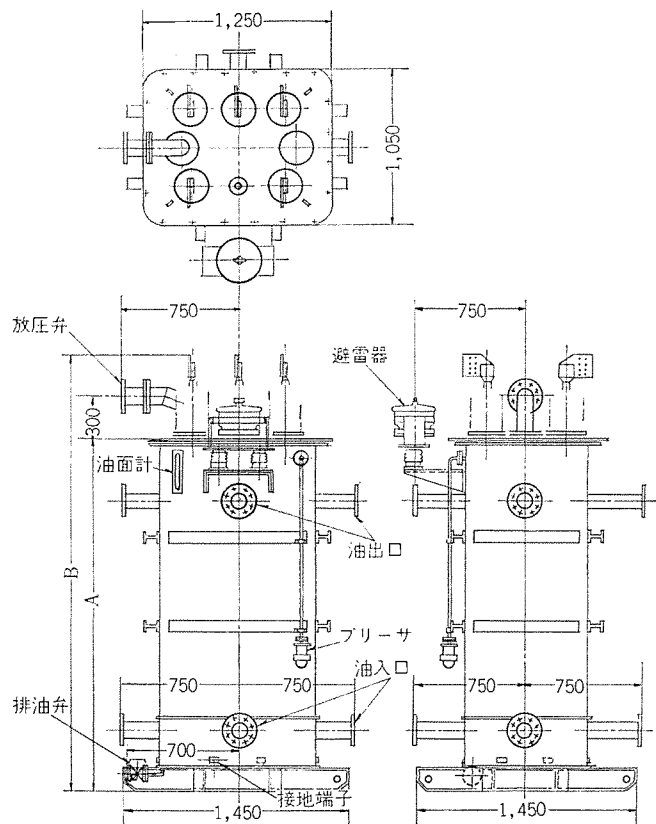


図 3.5 油浸式シリコン整流器本体外形
Outline of oil immersed silicon rectifier.

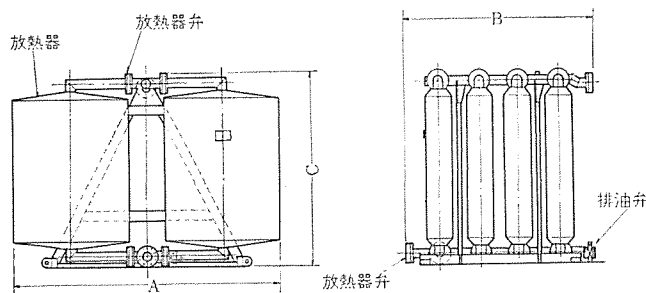


図 3.6 油浸式シリコン整流器用放熱器
Radiator unit of oil immersed silicon rectifier.

断が特に重要な要素である。したがって、この内部の点検などは、全体の中身をつり出さないと行なうことができない。したがって、内部に使用する部品は特に信頼度が高いことが必要で、かつその個数は最小限にすべきであることが必要な設計条件である。同時に、その内部組立においては、いささかのゆりみ、あるいは接触不良などは許されないから、とくに厳重な品質管理工程をへて試験される。組立てられた中身はまず気中においてすべての動作が正常であることを確認したうえ、油タンク内に封入され、ここで温度試験などが形式試験として行なわれる。

この油浸密封式シリコン整流器は、すでに 28 台 121,000 kW の実績を有しているが、すべての装置において完全な運転実績が得られていることは以上の根本的な製作上の条件が確立されているからにほかならない。

この整流器は内部の状況をすえ付後全く知ることができない、したがって外部よりその状態を点検する方法が考案された。これは交流側および、直流側の端子を外部接続とせよはなすことにより、外部より電源を与えてそこに流れる電流値の状況からその内部状況を

表 3.2 油浸式 シリコン 整流器寸法・重量表
Dimensions and weight of oil immersed type silicon rectifier.

容 量		寸 法 mm			総重量
		A	B	C	
6,000 kW	本 体	2,450	3,210		4,200
	放 熱 器	3,200	2,400	2,200	5,000
4,000 kW	大 体	2,450	3,150		3,900
	放 熱 器	2,800	2,000	2,200	4,000

注 1,500 V, D 種, 三相ブリッジ結線

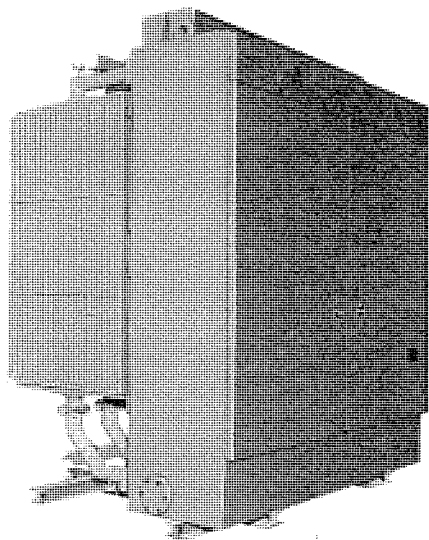


図 3.7 1,500 V 3,000 kW 通油自冷式 シリコン 整流器
1,500 V 3,000 kW natural oil cooled type silicon rectifier.

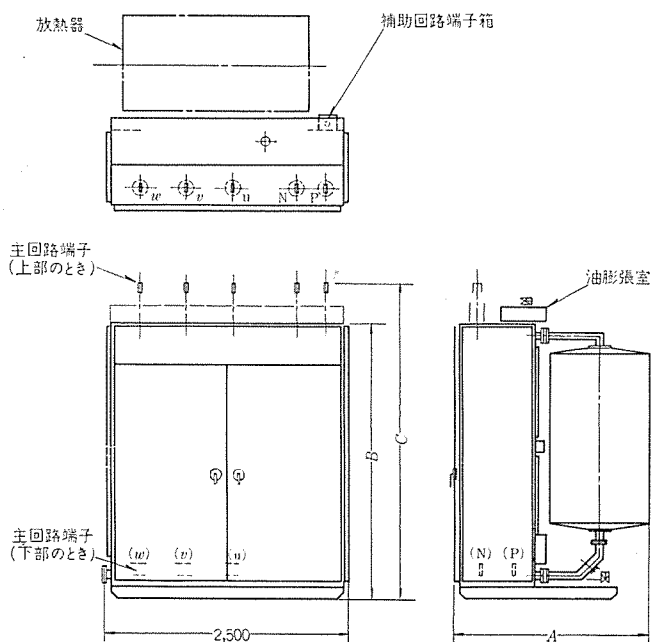


図 3.8 通油自冷式シリコン整流器外形
Outline of natural oil cooled type silicon rectifier.

表 3.3 通油自冷式 シリコン 整流器寸法・重量表
Dimensions and weight of natural oil cooled type silicon rectifier.

容 量	寸 法 mm			総重量 kg
	A	B	C	
2,000 kW	2,000	2,200	2,650	4,100
3,000 kW	2,000	2,600	3,100	4,900
4,000 kW	2,400	3,250	3,750	7,900

注 1,500 V, D 種, 三相ブリッジ結線

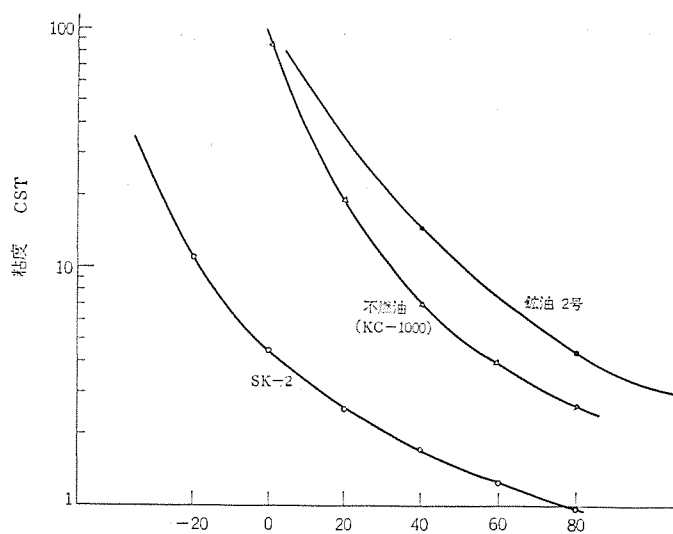


図 3.9 絶縁油の粘度特性
Viscosity of insulation oil.

知るものである。

この装置の保護としては、一般に用いられる過電流保護のほかは、素子の劣化検出はなく、油流指示器および温度継電器だけである。油循環ポンプはレクチフォームと同様、油浸形式で、標準化されたポンプがすべての容量に対して用いられていることも特長である。

また回路保護用アレスタが整流器上部にマウントされ、それ自身で外部サージに対する完全な保護ユニットを形成している。

以上の基本的考慮におけるところから明らかなように、この油浸密封式シリコン整流器は、以前にほかにおいて用いられた油入自冷式整流器と異なり、一般鉄道用においても、その複雑な保護装置が完全に廃止された場合には、広く用いられる可能性を有していると思われる。

3.4 通油自冷式シリコン整流器

この方式は絶縁冷却油を特殊な冷却導体の内部を自然対流の力だけによって流通させ、近接して設けられた放熱器を介してもとに循環する完全な自然冷却系が特長である。これは以前において一般鉱油を使用した装置が製作された報告も行なわれているが、その意とすると異なり、きわめて大きな装置となり、かつ、経済的にも問題を有するものであったと考えられる。これはとくに素子容量が増大することにもない、集中して効果的な冷却を行なう必要性が高まるにさいし、さらに深刻な問題を与えることになる。そこで、当社において開発された新形式は、一般鉱油に比べて著しく粘度の低い絶縁冷却液の開発におうところが大きい。この整流器においては原則として変圧器と整流器は別個の設置形態がとられる。整流器キュービクルは基本的構造はレクチフォームの整流器部と類似しており、アルミ合金製の特殊冷却導体に整流素子を外部より装着されている。素子の熱はこの冷却導体を通じて SK-2 に伝えられ、変圧器と同様な放熱器内部を自然対流に循環する。したがって、ポンプ冷却も用いない、完全な静止形変換機器として形成することができる。

整流器キュービクルの側面セクションには故障検出装置、温度計など必要な付属装置が設けられている。交・直端子とも上下に配置できるように考慮しているので、各所の変電所機器配置に対応することができる。また端子はブッシングを使用することが可能であり、キュービクルは完全密封されており、屋外設置に適している。

SK-2 の粘性を一般鉱油ならびに不燃性油と比較したのを図 3.9 に示す。これから知られるように、きわめて低い粘性を示す。また、

温度上昇にともない粘性の低下する特性はこの装置の冷却としても効果的なものである。

SK-2 を使用することにより可能となったこの装置も、それが完全な自然対流によるため、冷却導体の放熱面積はレクチフォームのような強制通油に比べ大きなものを要する。したがって、整流器キュービクル寸法は強制通油形に比べて若干大きくなっている。しかし、この絶縁冷却液は不燃性であり、かつ、上記使用温度に対してきわめて安定した絶縁特性を示すために、各種の新しい設置条件に対する応用が広がるものと考えられる。

4. 各種油冷整流器の適用

4.1 機種選択と必要条件に対する考察

以上に紹介された各種油冷式整流器は、その基本的構成と、またその適用に対してはその基本的設計条件に対する考え方において説明されたものである。さらに、各種の電鉄変電所の計画に対して生じてくる種々の設置条件に対し、各種の柔軟性ある構成が適用されている。

図 4.1 はレクチフォームにおいて、その放熱器を別置した一例を示すものである。すなわち、市街地の密接した周囲条件において、コンパクトな変電所を計画する際、しばしば変電所建屋が他の条件から使用されることが多い。この場合には開閉機器ならびに変換装置など主回路機器が、補助装置、制御盤などの構成機器とともに、2階（あるいは3階）の変電所建屋内に設置されることがある。これは、また騒音に対する過酷な条件に対しても必要とされる場合がある。この場合、レクチフォームの基本的構成である油強制循環の利点を利用することにより、その放熱器部分を変電所建屋の壁面に屋外設置として内部に発生する熱を有効に外部へ移動することが可能である。この方式の利点として、騒音が完全に外部とシャ断されること。また、一体の共通油冷却を使用することにより、この送油系統は、全体に対し一組ですむという利点がある。また、レクチフォーム自身が最も少ない据付スペースを有することがこの変電所建屋に対する要求を最小のものとし、その経済的設計に貢献していると考えられる。

レクチフォーム形整流装置はすでに多数の変電所で実施されているように、特高キュービクルとの組合せがきわめて容易であり、増設工事も含めてバランスのとれた変電所機器構成を行なうことが知られている。これは 20 kV~70 kV の特高受電設備において、すでに多数の実例をみている。その基本的構成は列置にされた特高キュービクルにレクチフォームがそのシャ断器キュービクルに対応して並列設置されるわけであるが、レクチフォームの基本的設計が一方より高压入力があり、その反対側の整流器側より直流出力がとりだされていることによって、きわめて容易に変電所構成が得られることによる。

4.2 移動変電所

レクチフォームはその標準設計自体が、全装可搬完全組立輸送を目的として設計されており、かつ、その交・直端子位置が、電力変換の流れに合致しているという基本的特性を利用することにより、きわめて興味ある移動変電所が製作される。図 4.2 は南海電鉄納め移動変電所である。従来の水銀整流器移動変電所に比べて大幅に機器構成が簡略化されている。特高キュービクルに 20 kV 電源を接続することにより、直流側キュービクルよりただちにき電することが可能であって、容易に変電所を設けうる利点を有する。付属する制御車には操作盤ならびに遠制盤、バッテリー装置、および居住室がコンパクトなスペースにうまく設けられている。

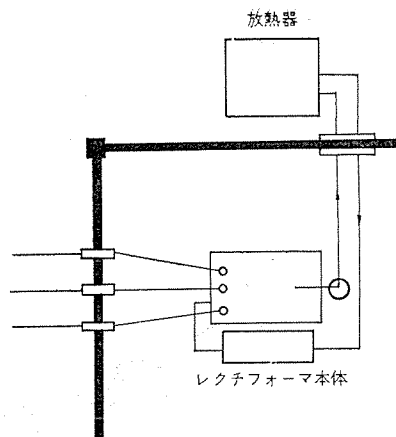


図 4.1 レクチフォーム配置例
Layout example of Rectifier.

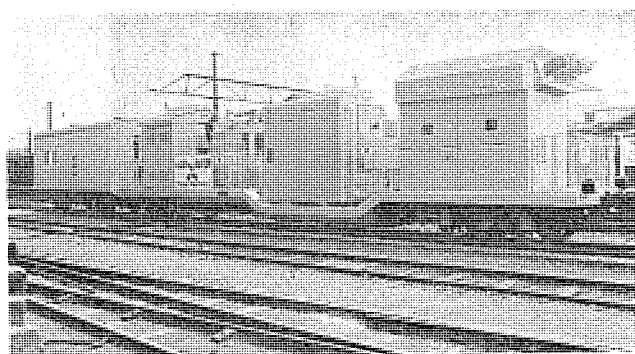


図 4.2 レクチフォーム形移動変電所 20 kV/DC 1,500 V 3,000 kW
Rectifier mobile substation 20 kV/DC 1,500 V 3,000 kW

4.3 油冷式サイリスタの導入

電鉄変電所用整流器としては、従来すべてダイオード方式の整流器が使用されていた。しかし、列車ダイヤ編成の特殊条件から、き電線の電圧をその負荷に応じて補正する要求が生じる。ここで新しくサイリスタ整流器が電鉄変電所に登場することとなった。

当社ではこの初めての試みを、国鉄のご指導のもとに実施することになり、大容量平形サイリスタ素子を油冷方式で導入する設計方式を用いて製作している。ここに用いられた方式は、既設の変電所に直列にサイリスタの可変電圧整流器をそう入することにより、直流出力の電圧調整範囲を与え、架線電圧を補正するものである。したがって、ある線区を考えると、そのき電線に対し並列にき電している変電所の負荷容量を適当に分散させる効果を有し、ピークシフトの名称も与えられている。この基本的回路構成を図 4.4 に示す。従来、車両積載用の制御整流器、インバータなど限られた負荷に高度の制御を要する用途に限定されていたサイリスタが直流電化区間の高压回路にも登場してきたことに大きな意義を有する。

サイリスタ整流器に必要なとされる電圧は、その電圧補正分だけであるから、直列数 1 のサイリスタ整流回路が使用され、この保護にはヒューズが使用されている。また、サイリスタ整流器が停止しても変電所の機能を、失ってはならないので、フライホイールダイオード回路が並列に用いられている。

サイリスタ整流器における根本的な相異は、必要な条件としてサイリスタ素子のゲート回路へ毎サイクル適確なパルスを与えるゲートパルス制御回路が各素子ごとに付属されなければならないことである。また、保護ヒューズが各素子に直列に接続されており、これらは油浸構造に

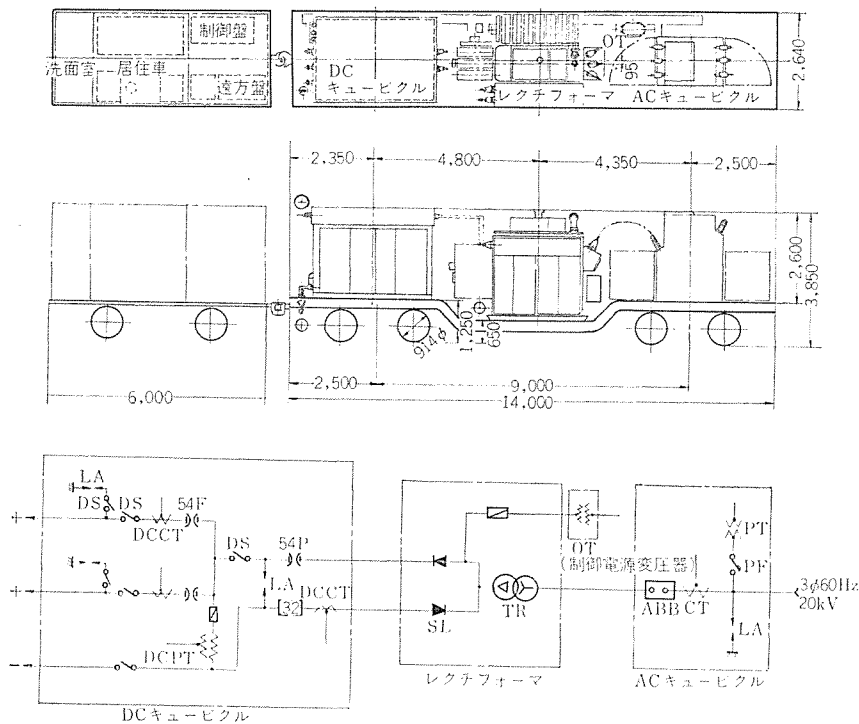


図 4.3 レクチフォーマ形移動変電所外形と単線結線図
Rectifier mobile substation (layout and single diagram).

対し大きな制約条件を与えることになる。また、装置が製作されたあとの試験などにおいても、ダイオード方式と異なり、各制御回路の動作、ゲートパルス状況などについても詳細な試験が適確に行なわれることを要求される。これらの条件を考慮して、当社においては新しく油冷平形サイリスタスタックが開発された。この基本構造は、すでに電気化学用途において世界最大容量器も含めて多数の使用実績があるものである。この平形サイリスタスタックの詳細はまた別の機会にゆずることとして、サイリスタ素子はそれをサンドイッチにはさむ特殊な冷却ブロックにより冷却される。冷却液体はこのブロック内部を循環するだけであるから、サイリスタ素子はまったく冷却液とは無関係におかれており、したがって保護ヒューズあるいは制御回路の設置、多数の制御配線に対してもなんらの制限条件は与えられていないことが特長である。この油冷サイリスタスタックにはSK-2が使用されている。これは油循環ポンプにより冷却ブロック内を強制通流され、放熱器により外部へ放散される。したがって、キュービクル自身は完全に外気に対し密封されており、屋外使用に対してもその制御回路も含めて完全に保護されている。この平形サイリスタスタックのユニークな構造はそれがダイオード方式においてもまったく同様に適応しうるものである。新しい形式のコンパクトな油冷形整流器の出現にもつながるといえる。

5. む す び

以上に紹介したように、油冷式シリコン整流器は、電鉄変電所用変

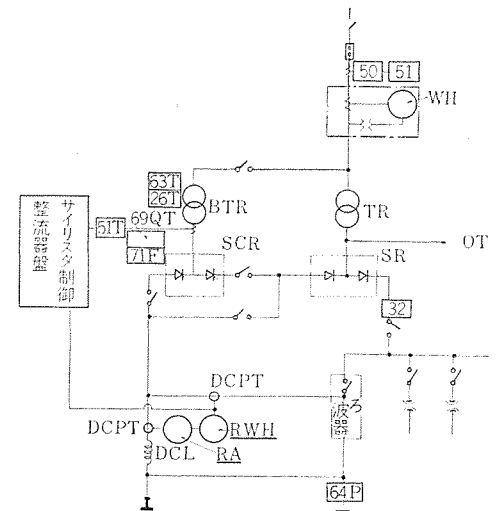


図 4.4 き電電圧補償用サイリスタ装置主回路単線結線図
Single line diagram of DC booster with thyristor converter.

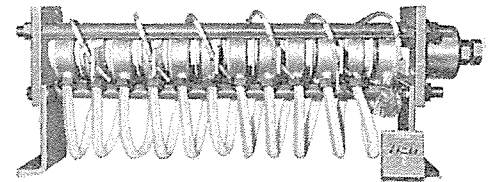


図 4.5 油冷平形スタック
Oil cooled type stack.

換装置の重要な地位を確保したといってもさしつかえない。また、その5年間を越える運転実績が示すように、この冷却方式は電鉄変電所の合理化に対して大きく貢献することが実証されている。当社ではこの技術の変化の方向に即応して各種の油冷式整流器を完成し、そのいずれの分野においてもわが国で最も進歩した設計内容と装置を提供している。このようにご使用者側の満足いく運転を多数の装置において1号器より一貫して得ていることは、非常な幸運であると考えるが、当社においては今後もさらに改良と新しい技術の導入に加え、さらに進歩してやまない高耐圧大容量素子あるいはサイリスタの発展などを含めて、今後の電鉄変電所の進歩に貢献したいと考えている。

最後に、以上の各種新方式の油冷式シリコン整流器の採用にあたり、その特長をご理解いただたく使用者側各位、ならびに油浸密封式整流器の開発に対して終始ご指導いただいた国鉄関係者各位にここで厚くお礼申し上げるしだいである。

海外における三菱電鉄変電所の実績

鈴木敏夫*

Experience with Overseas Railway Substation Equipment Gained by Mitsubishi

Itami Works Toshio SUZUKI

Taking the lead in the circles, Mitsubishi has manufactured a large number of silicon rectifiers for use in railway substations. For the past three years, the Company has extended its activities in this field to foreign markets overseas such as in Australia, South Africa and Spain. Rectifiers for the above countries include a record of single unit capacity or new technique never set-up within this country. Those noteworthy are : a 5,000 kW unit for NSW, Australia, substation equipment of 3,000 V DC for SAR, South Africa, 12 phase rectification and the techniques on short-circuit and overvoltage protection with it, an oilcooled outdoor rectifier for SAR containing two 3,000 kW units and rectifier isolating facilities.

This article deals with the Company's experience in silicon rectifiers delivered overseas for use in railway substations, introducing the outlines of the equipment with its technical features.

1. ま え が き

わが国で電鉄変電所にシリコン整流器が採用されはじめて約10年を経過し、今日ではすでに技術的には安定期にあるといえる。しかし、一方海外においてはオーストラリアあるいは南アフリカ共和国など、これまでに欧州メーカーが整流器の歴史を築いてきた国々においては、仕様面あるいは技術面で従来わが国ではみられなかった点がいくつかあげられる。

最近のわが国の大容量電鉄変電所では直流電圧1,500ボルト、整流回路6相整流が採用されているが、海外ではさらに直流電圧3,000ボルトまた単器12相整流回路など、これまでわが国の電鉄変電所ではみられなかった仕様、回路などがみられる。当社ではこれらの技術面をいち早く完成させ、欧州メーカーとはげしい競争のうへいくつかの実績を築いてきた。

ここではこれらの新しい技術面の紹介を中心にして、最近の海外における電鉄直流変電所の実績とその概要を紹介する。

2. 製 作 実 績

表2.1に製作実績を示す。オーストラリアは州鉄道、南アフリカ共和国、スペインは国鉄で、とくにオーストラリア、南アフリカ共和国において

表 2.1 海外向けシリコン整流器製作実績
Manufacturing experience of silicon rectifier for overseas railway substation.

納入先	台数	定 格			冷却方式	製作年度	備 考
		出力 kW	電圧 V	電流 A			
N. S. W. R (オーストラリア)	2	5,000	1,500	3,334	風冷	1967	
N. S. W. R (オーストラリア)	5	2,500	1,500	1,667	油冷	1967	レクチフォーマ 12相整流
S. A. R (南アフリカ共和国)	12	3,000	3,000	1,000	油冷	1967	屋外自冷式 12相整流
RENFE(スペイン)	2	3,000	3,000	1,000	風冷	1968	12相整流
HELIOPOLIS (アラブ連合)	2	1,200	600	2,000	風冷	製作中	
V. R (オーストラリア)	5	1,500	1,500	1,000	風冷	製作中	

は技術面でも欧州メーカーと非常に競争のはげしい所である。

3. オーストラリア New South Wales Railways 向け
整流装置

ここで計画された変電所は、既設の回転変流器変電所のシリコン化と完全な新設変電所の2種類である。前者においては変電所の容量アップも同時に行なわれ、既設回転変流器撤去後5,000kWダブルユニット変電所とされた。当社ではこの後引続いて国内向けに単器6,000kWユニットを完成させてすでに運転にはいっているが、当時の電鉄変電所用としては単器で最大容量のものであった。一方、新設変電所については2,500kWダブルユニットで計画が進められ、客先においても変電所全体の観点に立って、スペース、据付工事、変電所建屋および運転開始後の保守、信頼性などあらゆる観点より検討された結果、レクチフォーマの採用が決定された。整流回路は5,000kWユニットは6相整流が、また2,500kWユニットは単器で12相整流が採用された。

3.1 変電所構成

図3.1および図3.2に5,000kWユニットおよび2,500kWユニット変電所の単線結線図を示す。変電所構成は基本的には両変電所とも同じで、供給範囲は変圧器、整流器、直流リアクトル、ろ波器、および整流器制御盤である。また、同変電所の直流高速度しゃ断器は同時に別入札が行なわれたが、やはり当社が受注し変電機器とともに納入された。

5,000kWユニットの変電所では既設の回転変流器建屋を利用するので整流器は屋内風冷式とした。一方変圧器は油入自冷式として屋外の、変電所建屋側面に仕切られた回転変流器用変圧器のあとに据付けられた。また、ろ波器用直列リアクトルは屋外油入自冷式とし、前記整流器用変圧器仕切の中に変圧器と一括して設置された。ろ波器は整流器2台に対して1台設けられ、屋内設置として変電所直流母線に接続された。整流器制御盤は計測、操作、表示、保護リレー等いっさいを整流器キュービクル側面部に設けて制御盤と本体部を一体化した。

2,500kWユニットの変電所はまったくの新設であり、レクチフォーマ変電所としてすべてが計画された。すなわち、レクチフォーマとろ波器用

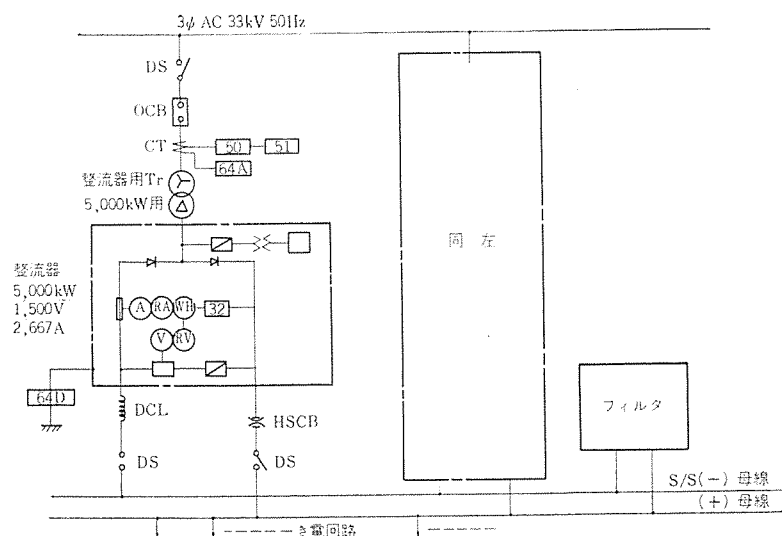


図 3.1 NSW 2×5,000 kW 変電所単線結線図
Single line diagram of NSW 2×5,000 kW substation.

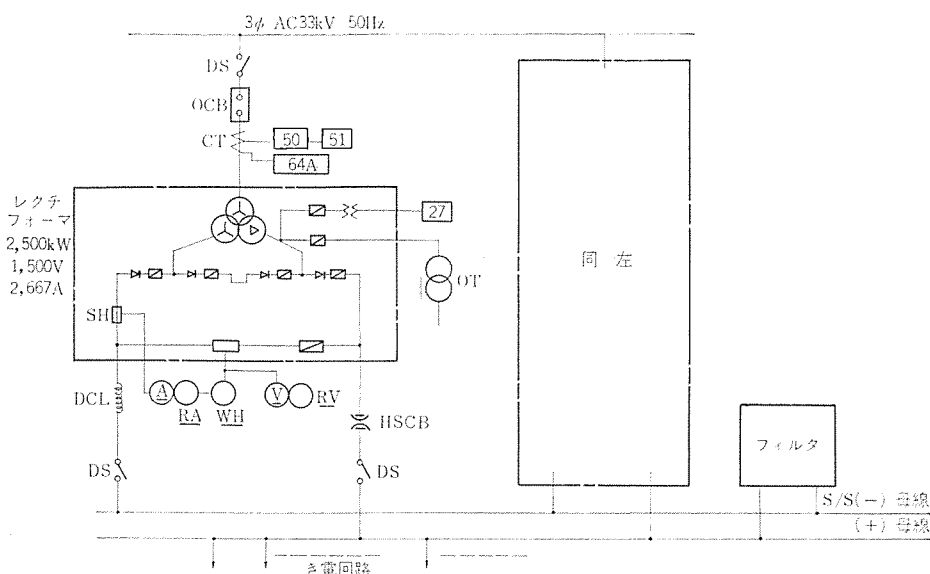


図 3.2 NSW 2×2,500 kW 変電所単線結線図
Main circuit diagram of NSW 2×2,500 kW substation

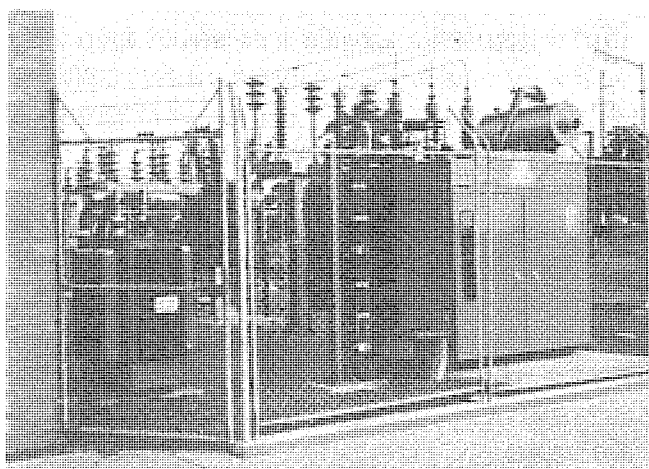


図 3.3 NSW 2,500 kW レクチフォーマ 変電所外観
Exterior view of NSW 2,500 kW Rectifier substation.

直列リアクトルは、2,500 kW ごとにそれぞれ屋外に設置され、変電所建屋は整流器制御盤、ろ波器および高速度しゃ断器などの電回路機器だけを収納するための小さなものが設けられた。整流器本体は屋外設置のため、この変電所では整流器盤は本体から切りはなされて屋内に設置された。ろ波器は2×5,000 kW 変電所の場合とどのようにして整流器2台に対して1台設けられ、変電所の直流母線に接続された。図 3.3 はこのレクチフォーマ 変電所の現地の状況を示している。

3.2 整流装置

3.2.1 定格

整流装置は IEC に準拠して製作され、そのおもな定格事項はつぎのとおりである。また、図 3.4、3.5 に 5,000 kW 整流器と 2,500 kW レクチフォーマ の外観を示す。

(a) 5,000 kW 装置

形 式	変圧器	屋外油入自 冷式
整流回路	整流器	屋内風冷式
		3 相全波 6 相整流
入 力	相 数	3 相
	周波数	50 Hz
	電 圧	33 kV
出 力	容 量	5,022 kW
	電 圧	1,550 V
	電 流	3,240 A
	定 格	IEC G 種 (100 % 連 続, 150 % 2 時間, 200 % 30 分間, 300 % 1 分 間)

(b) 2,500 kW 装置

形 式	レクチフォーマ	屋外油冷自冷
整流回路		3 相全波直列 12 相整流
入 力	相 数	3 相
	周波数	50 Hz
	電 圧	33 kV
出 力	容 量	2,511 kW
	電 圧	1,550 V
	電 流	1,620 A
	定 格	IEC G 種 (100 % 連続, 150 % 2 時間, 200 % 30 分間, 300 % 1 分間)

3.2.2 整流回路

直流 1,500 V であるところから、変圧器も含めた整流装置として

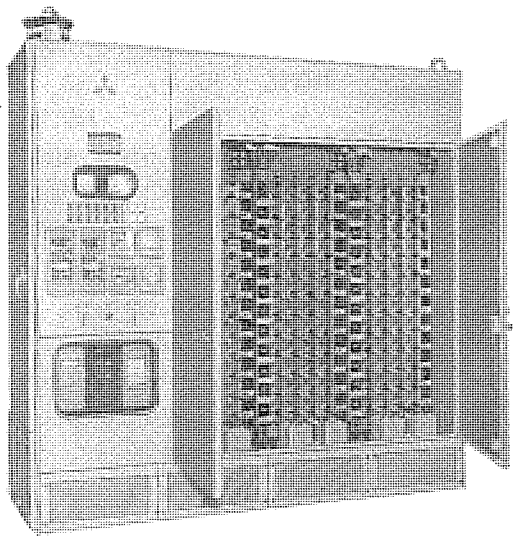


図 3.4 5,000 kW 1,500 V 3,334 A 整流器盤内蔵屋内風冷式シリコン整流器 (NSWR)
5,000 kW 1,500 V 3,334 A forced air cooled indoor type silicon rectifier with control equipment on the side of the cubicle (NSWR).

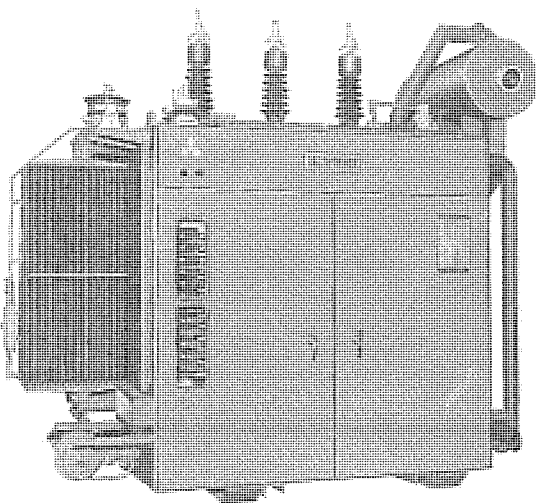


図 3.5 NSWR 向け 2,500 kW 1,500 V 1,667 A 屋外レクチフォーマ
2,500 kW 1,500 V 1,667 A outdoor rectifier for NSWR.

の経済性を考えて 3 相全波結線とした。また、整流相数については 6 相案と 12 相案について計画し、客先において経済面もあわせて検討した結果、5,000 kW ユニツは 6 相整流が、また 2,500 kW ユニツについて 12 相整流の採用が決定された。

電源系統は 33 kV であるが、整流器負荷の増大に伴い、すでに電源に第 5 高調波 5%，第 7 高調波 3% が含まれており、組合わせ多相整流の必要性が現実の問題となってきた。このため、当初より単器 12 相整流についての計画もすすめた。回路は整流器用変圧器二次巻線を入および Δ に分割し、30° 位相差をもたせた回路を直流側で直列接続したが、この方式の決定に先だって直流側並列接続による 12 相整流回路と種々の比較検討を行なった。すなわち、並列接続による 12 相整流回路においては

(1) 相間リアクトル

低圧大電流の用途と異なって電鉄用では電圧が高く、並列接続した際の循環電流が負荷電流にくらべて相対的に大きくなり、6 相整流回路間に相間リアクトルが必要となって不経済であるほか、とくに

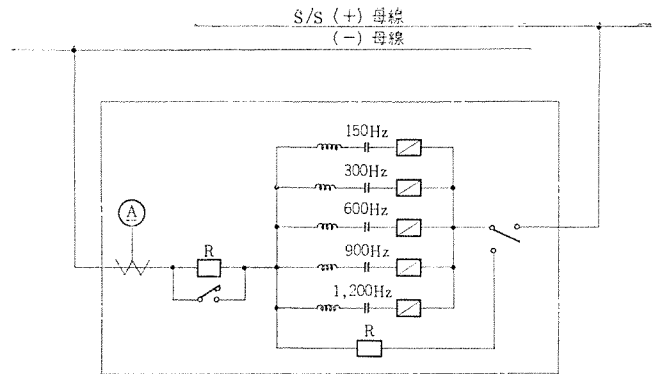


図 3.6 6 相整流回路用ろ波器接続図
Circuit diagram of wave filter for 6-phase rectification.

新設変電所においては機器の増加は変電所全体の計画上好ましくない。

(2) 無負荷電圧上昇

仕様条件として電圧変動率、無負荷電圧上昇がきびしく制限されているため、並列接続における無負荷時の電圧上昇が問題になる。

(3) 並列回路間の不平衡

電源に高調波が含まれない場合は問題ないが、今回の電源系統には 6 相整流による第 5，第 7 調波が含まれるために人側および Δ 側の並列回路間の負荷不平衡が問題になる。

などの点を考慮して直列接続による 12 相整流回路の採用を決定した。12 相整流回路には高耐圧素子を使用され、その特長を十分生かすためにダイオードヒューズが使用された。この変電所では直流電圧変動率が 5% と、わが国の電鉄変電所における標準の 6～8% にくらべて小さいにもかかわらず、直流側短絡に対してヒューズが動作しないように考慮され、工場での短絡試験はもちろん、現地でのくり返しの短絡試験によって確認された。現在のわが国の電鉄変電所では素子ヒューズは使用されていないが、素子がしだいに高耐圧化されるに伴ってヒューズ付き整流器が採用されていることはみのがせない。

3.2.3 構造

5,000 kW 装置は 3 相全波整流回路 1 回路を有する単純風冷式で、前面に (+) 側アームを、背面に (-) 側アームを配列し、両面から保守できる構造とした。整流器盤は本体と一体構造にし、シャント、分圧器も含めて直流側計測機器のいっさいと保護リレー類、表示および警報器類および操作スイッチ類等いっさいを収納し、整流器本体部分より直接変電所の運転操作ができるようにされた。

2,500 kW 装置は通油式冷却導体に素子を取付けた送油自冷式のレクチフォーマタイプで、素子、ヒューズ等主回路部分はすべて前面より保守できるように配列されている。キュービクル内には 3 相全波整流回路が 2 回路収納されており、変圧器部側面よりシリコンキュービクルへ貫通している人側、Δ 側の各交流端子はそれぞれの整流回路に接続され、シリコンキュービクル内で直流側が直列接続されてレクチフォーマ直流端子部分からは、直接 12 相の出力が得られるようになっている。この装置は屋外に設置されるため、整流器盤部分は本体より切り離されて建屋内に設置され、本体にはシャントおよび電圧分圧器だけが収納された。また、主回路の絶縁については今までのレクチフォーマとどうように二重絶縁方式とし、信頼性の点では細心の注意が払われている。

3.3 ろ波器

ろ波器は B. S 規格に準拠して製作され、ダブルユニット変電所に対して 1 台設けられた。6 相整流変電所には 300 Hz, 600 Hz, 900 Hz,

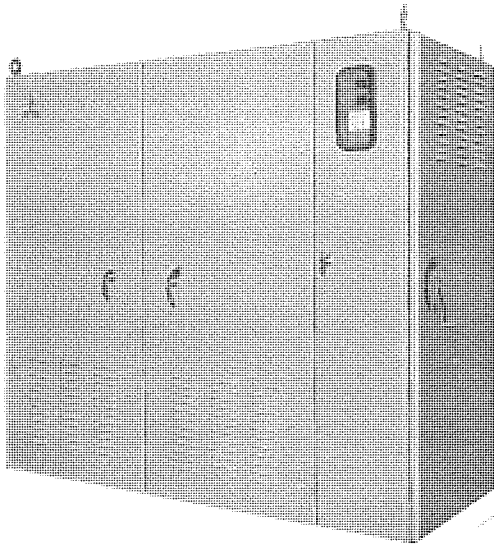


図 3.7 6 相用ろ波器
Harmonic filter for 6-phase operation.

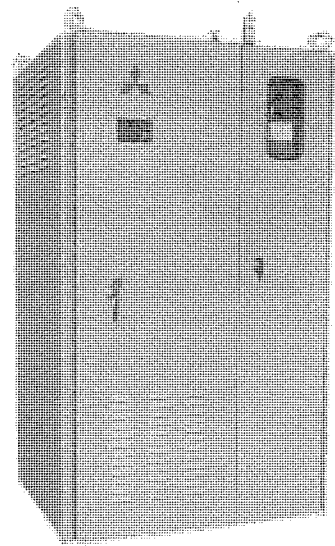


図 3.8 12 相用ろ波器
Harmonic filter for 12-phase operation.

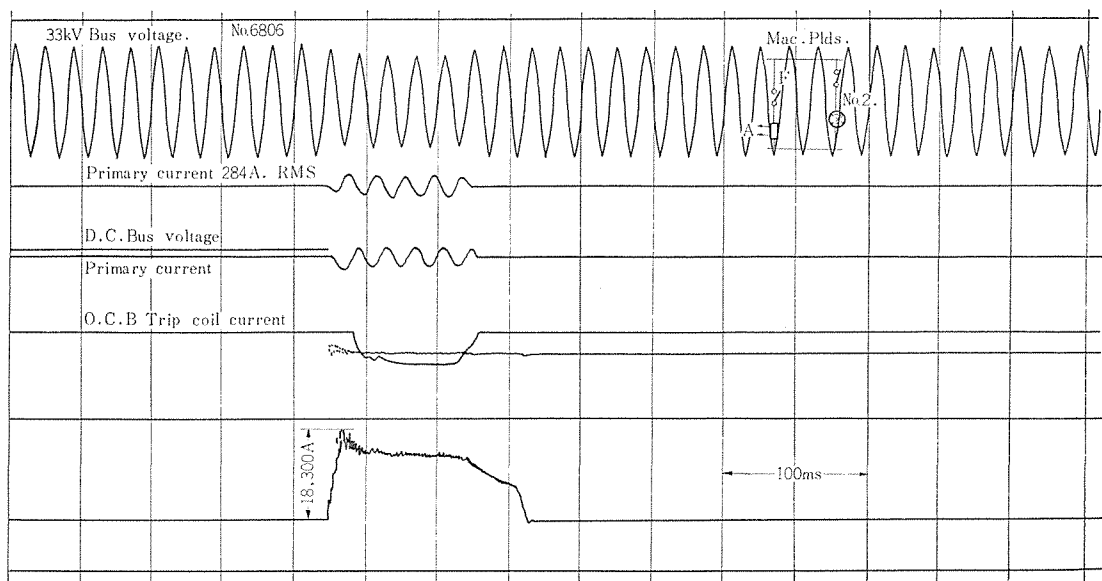


図 3.9 2,500 kW レクチファーマの現地短絡試験 オシログラム

Oscillogram of short-circuit test on 2,500 kW Rectifier.

1,200 Hz が、また 12 相整流変電所には 600 Hz, 1,200 Hz 分路が設けられたが、さらに 150 Hz 分路もそれぞれ追加された。各分路はそれぞれヒューズで保護されている。このほか、図 3.6 の接続図に示すようにろ波器内に切換断路器、放電抵抗、ダンピング回路およびフィルタ電流計測回路が含まれている。図 3.7 に 6 相用のろ波器、図 3.8 に 12 相用ろ波器の外形を示すが、それぞれのキュービクルとびらはコンデンサ放電後でないと開放できないように断路器とインターロックがとられている。

3.4 保護

整流器の保護は、基本的にはわが国で現在採用されている方式と同じであるが、直流側過電流に対する考え方はいっそうきびしい条件が要求された。

過電圧に対する保護としては各整流アームに C-R アラームが設けられ、スイッチングサージなどの内部サージや雷などの外部サージに対処したほか、直流側正負極間に避雷器を接続して万全を期した。過電流の保護は A. C 側にそう入された瞬時過電流リレー (#50)、反限時過電流リレー (#51) と交流側シャ断器 (#52) によった。これは現在わが国で多く採用されている直流側高速度シャ断器による保護にく

表 3.1 NSW R における変電所保護連動
Protection of NSW R rectifier substation.

故障原因または動作断電器	30による表示	動作開閉器	鎖錠の有無	故障区別
変圧器ブッフホルツリレー	96 P-2	52, 54	○	重故障 (1)
整流器断風 (油流) リレー	43 B (69 Q)	52, 54	○	重故障 (1)
起 動 渋 滞	48	52, 54	○	重故障 (1)
制 御 電 源 異 常	8 A	52, 54	○	重故障 (1)
整流素子故障 (2素子)	71 ET	52, 54	○	重故障 (1)
逆 流 リ レ ー	32	52, 54	○	重故障 (1)
直 流 接 地	64 D	52, 54	○	重故障 (1)
再 閉 路 失 敗	79	52, 54	○	重故障 (1)
変 成 器 系 短 絡	50	52, 54	○	重故障 (2)
交 流 過 負 荷	51	52, 54	○	重故障 (2)
交 流 開 接 地	64 A	52, 54	○	重故障 (2)
制 御 電 源 欠 相	47 C	52, 54	○	重故障 (2)
54 自 動 し ゃ 断	54	52, 54	○	重故障 (2)
整 流 器 温 度 上 昇	26 H			軽 故 障
変圧器ブッフホルツリレー	96 P-1			軽 故 障
変 圧 器 温 度 上 昇	26 T			軽 故 障
整流素子故障 (2素子)	71 EA			軽 故 障

らべて全シャ断時間が長く、整流器にとって条件はきびしい。この変電所では実際には別入札で当社の両方性直流高速度シャ断器が採用され、この整流器と組み合わせ運転されているが、基本的には直

流高速度しゃ断器は、逆流保護で直流側短絡に対しては交流側しゃ断器によるものとし、現地においてもくり返し短絡試験が行なわれて交流側しゃ断器による保護が確認された。図 3.9 はこの現地試験におけるオシログラムの一部を示す。

冷却系統の保護は、従来の風冷式あるいはレクチフォーマとどうよう温度リレーが用いられた。また、レクチフォーマの場合はさらに油流リレーが追加される。

このほか、素子は1素子余裕をもたせており、1素子故障でも運転は継続され、同一アーム内で2素子故障したときに運転を停止するようにした。変電所全体の保護連動は表 3.1 に示すとおりである。

4. 南アフリカ共和国 South African Railways 向け整流装置

南ア国鉄 South African Railways (SAR) は Johannesburg を



図 4.1 南ア国鉄路線図
Sketch map of the SAR system.

中心として幹線が放射状にのびており、Cape Town, Durban の港を結ぶ幹線は旅客輸送の中心でもあり、すでに電化がかなり進められているが、一方では主要産物である鉱石の輸送を中心に輸送力強化の計画も進められている。

今回、当社が納入した変電所は、鉱山で有名な Kimberley から Hotazel 間 (図 4.1) の電化計画の一部で、この線は Johannesburg と Cape Town を結ぶ幹線からの支線になる。この支線は鉱石を Durban などの主要港へ運び出すのを目的に設備の強化がはかられており、Johannesburg-Cape Town 間を結ぶ幹線の一部未電化区間をあとにして電化を進めるものである。Kimberley から Postmasburg までの約 220 km はすでに電化が完成しており、今回の計画は Postmasburg から Hotazel までの約 100 km 区間の電化で、この間に 6 変電所が新設され、ここに一括して当社の変電機器が納入された。

電化はすべて DC 3,000 ボルトで、1変電所あたり 4,500 kW 用変圧器 1 台に 3,000 kW 整流器が 2 台接続された特殊形態のダブルユニット変電所である。SAR の購入仕様では過負荷耐量、レギュレーション、短絡耐量に対し非常にきびしい条件が与えられているほか、気温の大幅な変化、砂じん、雷等の気候周囲条件がわが国にくらべて非常に悪い。変換装置はこれらの条件を考慮し、さらに経済的な変電所とするため AC スイッチギヤ、変圧器および整流器は屋外設置とし、整流器は通油自冷式、回路は 12 相整流回路を採用した。

4.1 変電所構成

この変電所は荒野の中に設置される完全な無人変電所で、主回路の変換装置のほか、AC 補助電源設備、バッテリー等から構成される。図 4.2 に変電所単線結線図を示す。主回路は三相、132 kV, 50 Hz で受電され、4,500 kW, DC 3,000 V に変換されるもので、変電所出力としては 4,500 kW である。

高圧受電用スイッチギヤ、整流器用変圧器、シリコン整流器および補助電源用変圧器は屋外設置とされ、シリコン整流器は砂じん等の周囲条

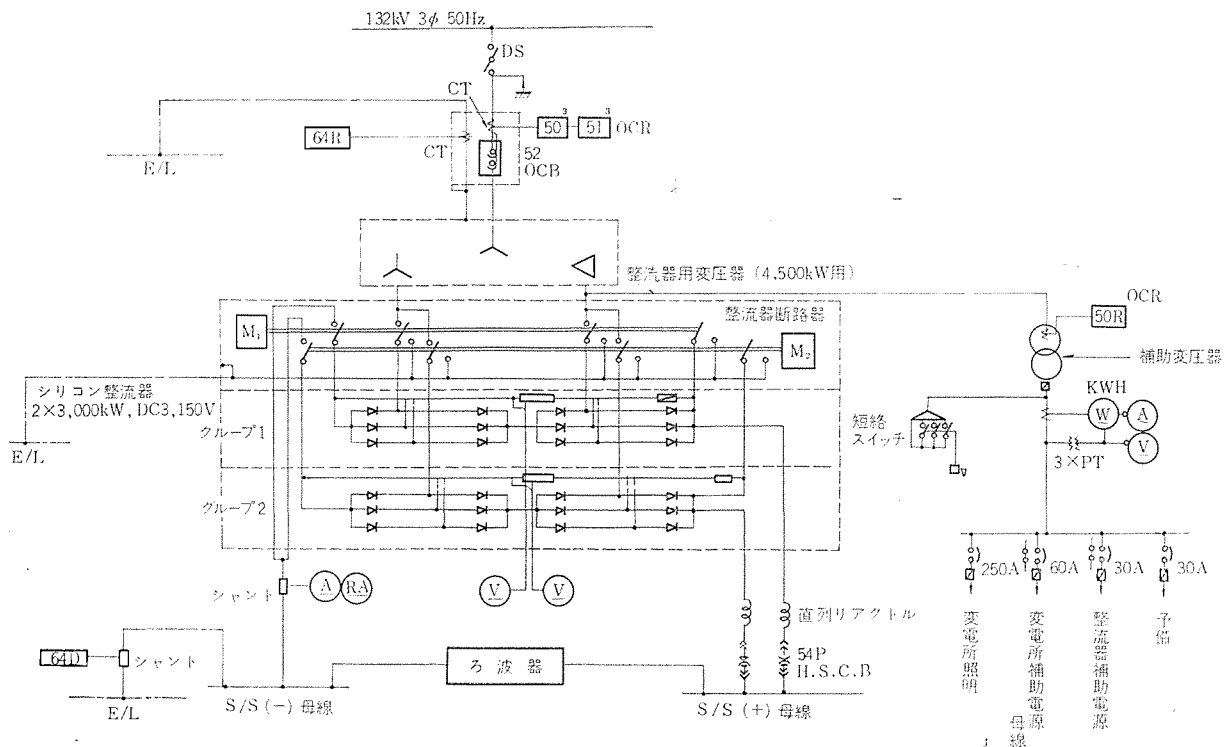


図 4.2 SAR 4,500 kW 3,150 V 変電所単線結線図
Single line diagram of SAR 4,500 kW 3,150 V rectifier substation.

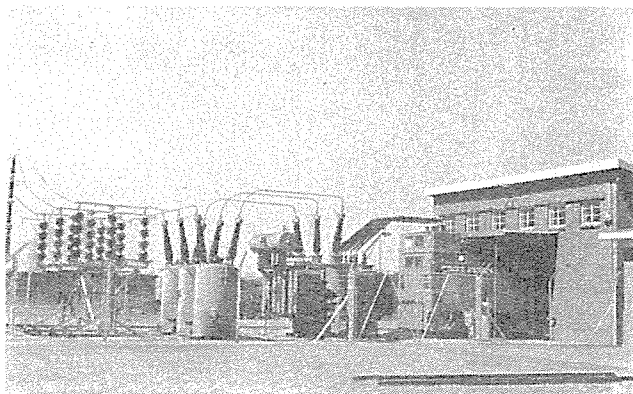


図 4.3 SAR 変電所全景
Exterior view of SAR 4,500 kW substation.

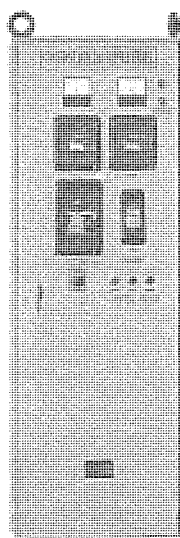


図 4.4 HSCB 保持 コイル および バッテリ 充電用 DC 110 V 定電圧電源
Constant 110 V DC power supply unit for HSCB holding coil and battery charging.

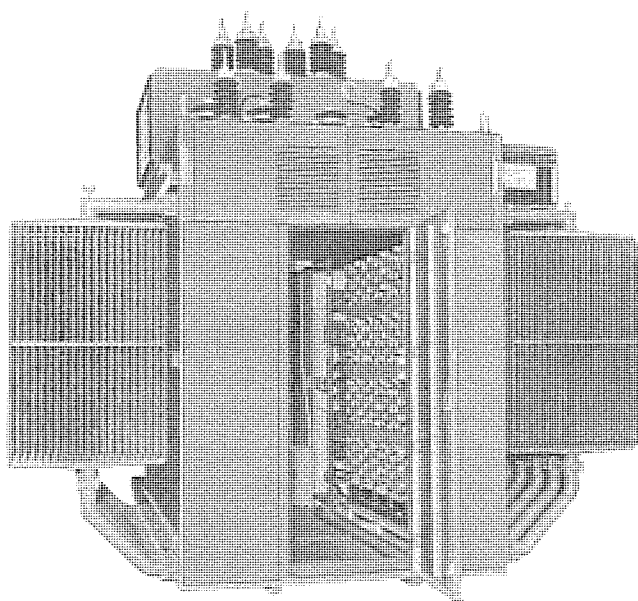


図 4.5 断路器内蔵した 2×3,000 kW 屋外形 シリコン 整流器 (SAR 向け)
2×3,000 kW outdoor type silicon rectifier with isolating switches on the top of the cubicle (SAR).

件を考へてポンプなしの通油自冷方式とした。図 4.3 にこの変電所屋外機器の外観が示されている。この変電所は、4,500 kW 出力で、整流器部分だけダブルユニットの変電所で、常時は、3,000 kW 整流器 2 台が、4,500 kW 用変圧器に接続されており、非常時だけ 67 % の 3,000 kW で運転されるよう考へられている。このため、整流器用断路器が 3,000 kW ユニットごとに設けられ、必要に応じて遠方より切り離しができるように考へられている。これら 3,000 kW 2 組とそれぞれの断路器は、一つの屋外ユニットにまとめて屋外機器の簡素化を図った。

整流器の運転停止、切り離しは直流高速度しゃ断器と整流器断路との組み合わせにより行なえるので、常時高圧側しゃ断器は閉じておき、変電所補助電源は整流器用変圧器の二次側より補助変圧器を通してとるようにして変電所設備のコストダウンが図られている。

変電所建屋内にはパネル類、直流フィルタ、直列リアクトル、直流高速度しゃ断器、バッテリー、バッテリーチャージャ、直流定電圧電源装置が設置されており、このうち直流フィルタ、リアクトル、高速度しゃ断器、それにバッテリーは SAR より支給された。パネルは整流器盤、AC 補助電源盤、DC 補助電源盤の 3 面で、いずれも閉鎖自立形である。直流定電圧電源 (図 4.4) はサイリスタ整流器、制御機器いっさいを内蔵しており、常時直流高速度しゃ断器の保持コイルに給電しており、電源停電時には直流高速度しゃ断器を動作させることなく、自動的にバッテリー電源に切換えられるように考へられている。

4.2 整流装置

4.2.1 定格仕様

整流器には過負荷定格、短絡耐量、周囲条件等非常にきびしい条件が与えられた。装置は IEC に準拠して製作されたが、そのおもな仕様はつぎのとおりである。

形 式	変圧器	屋外油入自冷式
	整流器	屋外通油自冷式 (ポンプなし)
整流回路		3 相全波直列 12 相整流
入 力	相 数	3 相
	周波数	50 Hz
	電 圧	132 kV
出 力	容 量	3,150 kW
		(ただし変圧器は 4,500 kW 相当)
	電 圧	3,150 V
	電 流	1,000 A
	定 格	IEC G 種 (100 % 連続, 150 % 2 時間, 200 % 30 分, 300 % 1 分間, 350 % 10 秒間)
周囲条件	温 度	40°C ~ -10°C
	湿 度	85 %
	風 速	30 m/s, 乾燥期には砂じんが多い、時期によっては塩分を含む。

短絡耐量については、一方では DC レギュレーション 5 % と通常のシリコン整流器にくらべて低い値に制限されているにもかかわらず、くり返しの短絡耐量が要求されており、実際につぎの仕様によって現地でくり返し短絡試験が行なわれ、異常のないことが確認された。なお、短絡は 4,500 kW 用変圧器に 3,000 kW 整流器 1 台接続された最もきびしい状態を想定し、保護はすべて交流側しゃ断器で行なわれる。

(1) 変電所出力端での短絡

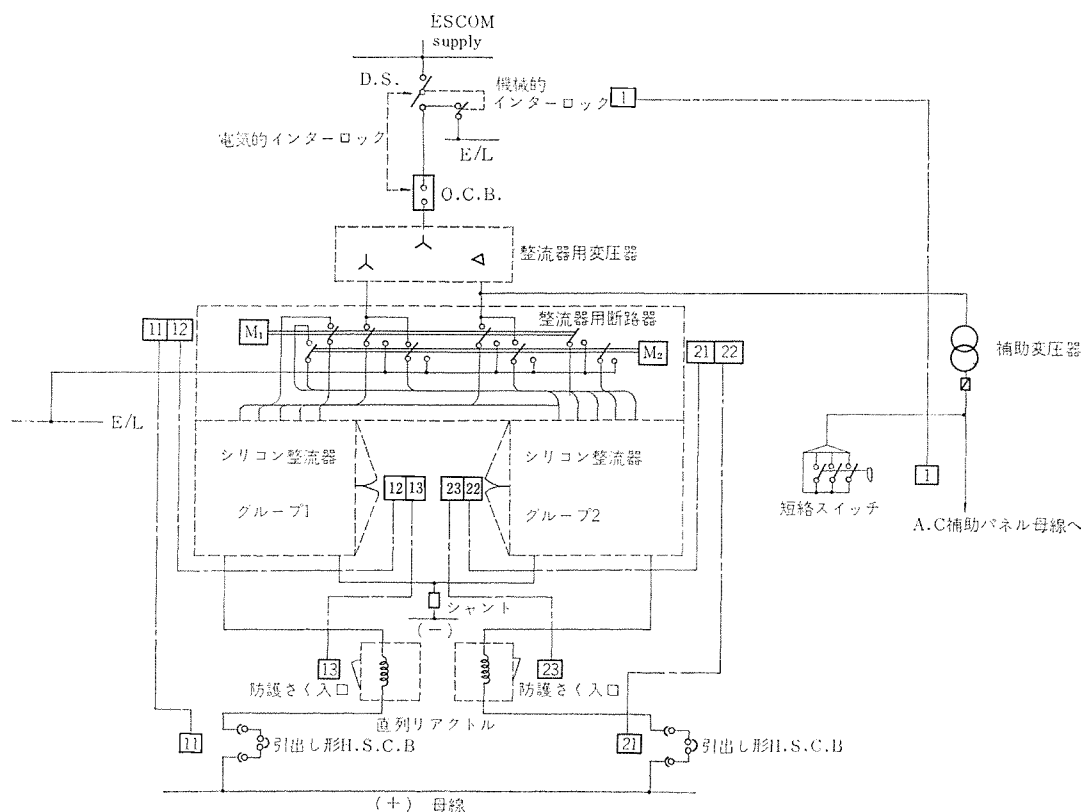


図 4.6 キーインターロック操作 シーケンス

Schematic diagram of key interlock system.

- (a) 100 % 連続後、引続いて5秒間隔で4回くり返し短絡する。
- (b) 150 % 2時間後、引続いて5秒間隔で4回くり返し短絡する。
- (c) 200 % 30分間後、引続いて5秒間隔で4回くり返し短絡する。
- (d) 300 % 1分間後、引続いて5秒間隔で4回くり返し短絡する。
- (e) 350 % 10秒間後、引続いて5秒間隔で4回くり返し短絡する。

(2) 整流器出力端での短絡

- (a) 100 % 連続後、引続いて1回短絡する。
- (b) 150 % 2時間後、引続いて1回短絡する。
- (c) 200 % 30分間後、引続いて1回短絡する。
- (d) 300 % 1分間後、引続いて1回短絡する。
- (e) 350 % 10秒間後、引続いて1回短絡する。

このほか主回路の絶縁耐圧は20,000 V 1分間と高い耐圧がもたせてある。図 4.5 はこのシリコン整流器の外観を示す。

4.2.2 整流回路

レギュレーションおよび短絡耐量が非常にきびしいところから、3相ブリッジ結線を用いた12相整流回路として特殊の考慮が払われた。

また、変圧器二次側、Δ側それぞれに、6相3,000 kW ユニートを接続して直流側で組み合わせて12相にすると整流器、整流器断流器は経済的になるが、事故時3,000 kW 単器運転で6相整流になること、また変圧器4,500 kW 用で整流器3,000 kW のダブルユニット構成であるところから変圧器二次容量が増加する等の理由により、3,000 kW ユニットごとにそれぞれ12相整流とした。

ブリッジ2回路の直並列接続方式については前述の New South Wales Railways の場合と同様、種々検討されたが、今回はとくに DC 3,000 V であるところからも直列接続方式を採用した。DC 3,000

表 4.1 SAR 変電所保護連動
Protection of SAR rectifier substation.

故障原因または動作継電器	30による表示	動作閉路器	鎖錠の有無	故障区別
交流接地	54 A	52, 54	○	重故障 (1)
直流接地	64 D	52, 54	○	重故障 (1)
主変圧器ブッフホルツリレー	96 P-2	52, 54	○	重故障 (1)
補助変圧器ブッフホルツリレー	96 AT	52, 54	○	重故障 (1)
整流器温度上昇	26 H	52, 54	○	重故障 (1)
整流素子故障 (2素子)	71 ET	52, 54	○	重故障 (1)
54 自動しゃ断	54	52, 54	○	重故障 (1)
変成系短絡	50	52, 54		重故障 (2)
交流過負荷	51	52, 54		重故障 (2)
補助電源交流過負荷	51 AT	52, 54		重故障 (2)
主変圧器ブッフホルツリレー	96 P-1			軽故障
主変圧器温度上昇	26 T			軽故障
主変圧器巻線温度上昇	26 WG			軽故障
整流素子故障 (1素子)	71 JEA			軽故障

V 回路における外来サージ条件と回路間の分圧、アラームなど回路諸性についても十分検討されて万全が期された。

4.2.3 構造

整流器部分には、3,000 kW ユニット2組と断流器2組が一体構造にまとめられている。

3,000 kW ユニットは図 4.5 でみられるように保守通路を中央に両面に配置されており、それぞれが完全に独立して運転できるように考慮されている。断流器は片側ユニットを完全に切り離すもので、8極の電動操作として制御盤より操作される。

整流器は屋外で砂じんの多い環境に設置されること、また素子は簡単に交換えられる構造を要求されたことなどにより通油自冷方式とした。素子は油冷式冷却ベースに取付けられてキュービクル内に配列されているので、素子の着脱は油系に関係なく行なうことができる。冷却油は自然対流により循環され、整流器側面に取付けられた自冷ラジエータによって放熱されるようにしてキュービクルは閉鎖構造としたので、過酷な周囲環境に対しても長期間無保守で高い信頼性が得ら

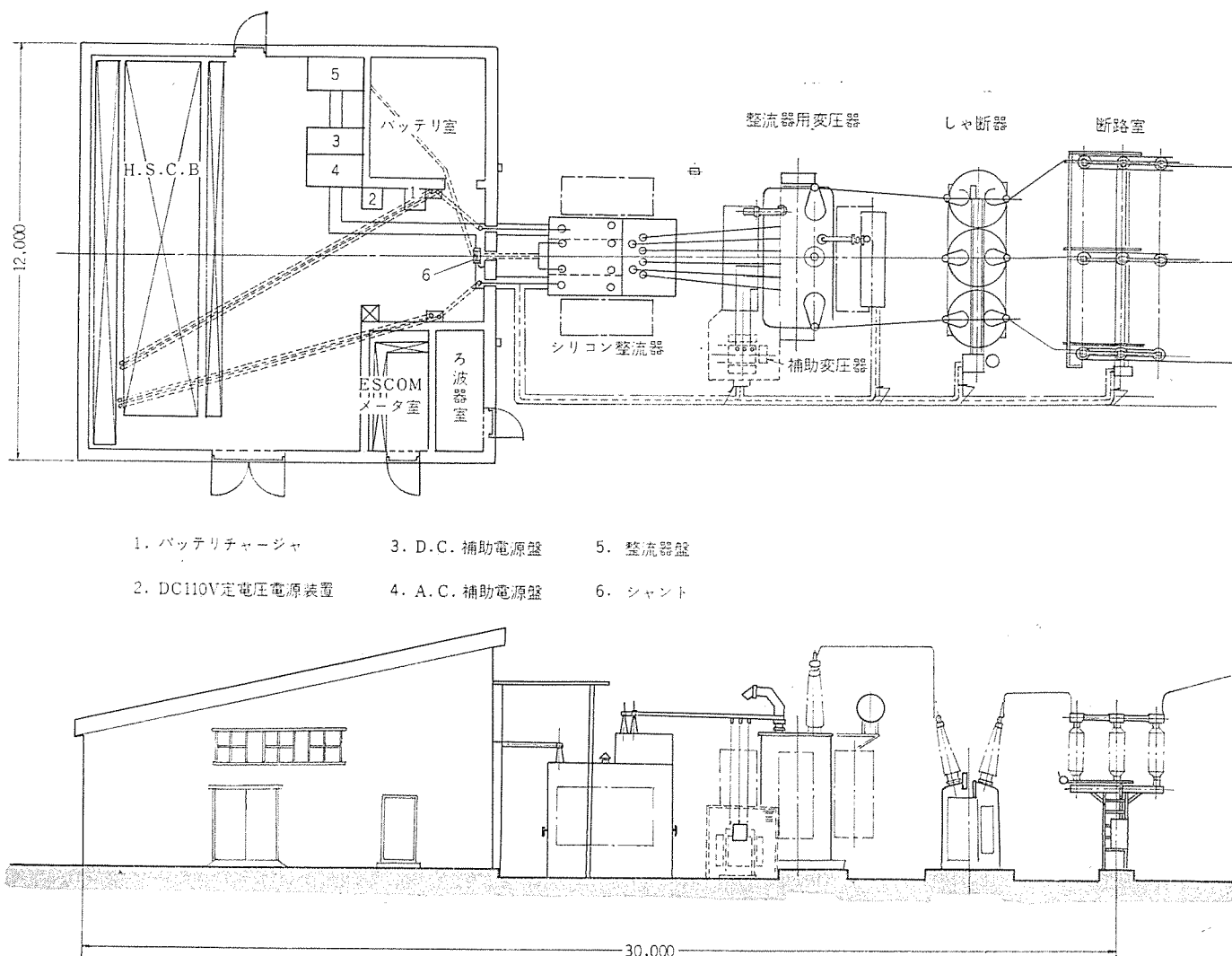


図 4.7 変電所機器配置図

Layout of substation.

れる。

整流器内部は 3,000 kW ユニットごとに 1,500 V 回路が 2 直列に接続されて、それぞれの出力端子で 3,000 kW DC 3,000 V が得られるように構成されている。絶縁については主回路部分耐圧 20,000 V 1 分間、空間沿面距離 100 mm 以上もたせて屋外機器としての信頼性に十分注意が払われている。

4.3 保護

整流器の過電圧、過電流に対する保護は DC 3,000 V であること、きびしい短絡耐量が要求されていることなどから万全を期した。過電圧については、とくに雷多発地区で DC 側の雷サージ条件がきびしいため、直流出力側には直流アレスタと C-R アブソーバが組み合わせて使用され、とくに直列回路間の分圧等についても十分注意が払われた。過電流については直流側短絡も含めてすべて交流側過電流リレーにより保護され、直流高速度しゃ断器は逆方向性のものが使用された。このため、回路方式、機器の設計にあたっては特別な考慮が払われた。

変電所全体の保護方式については SAR 伝統の方式が確立されており、その保護連動は表 4.1 に示されるとおりである。

変電所機器はさらに操作の安全のため、完全なキーインターロック方式が採用されている。これは一連のキーの組み合わせにより所定のシーケンスに従って鎖錠、解錠の操作を行なうもので、直流側高圧機器は完全に開放接地された後でなければ保守点検できないように構

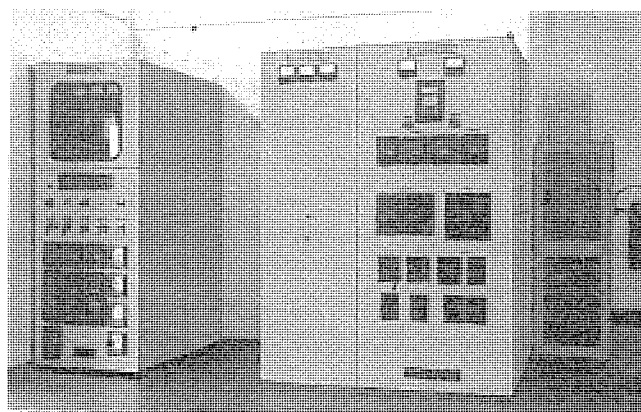


図 4.8 変電所パネル現地据付状況
Panels in the substation building.

成されている。図 4.6 に操作シーケンスを示すが、整流器を停止点検するには次の手順により行なわれる。

- (1) 直流しゃ断器開放、ロック。キー 11 をはずす。
- (2) キー 11 により整流器断路器開放接地、ロック。キー 12 をはずす。
- (3) キー 12 により整流器とびらを開放。キー 13 をはずす。
- (4) さらに、必要な場合にはキー 13 により直流リアクトルの防護さくのとびらを開放できる。

一方、運転を開始する場合は上記の逆の手順で鎖錠を行なう。

4. 4 変電所機器配置

図 4. 7 に変電所配置図を示す。高圧受電機器、整流器用変圧器、シリコン整流器、補助電源変圧器は一括して屋外設置され、防護さくが設けられている。整流器は 3,000 kW ユニートを両面に配置して中央に保守通路が設けてあり、変電所建屋に近接して設置して雨天でも保守点検が簡単にできるように考慮されている。整流器上部には AC 側、DC 側同時に切り離す断路器が設けられており、片側ユニットだけ運転停止点検できるように考慮されている。変電所建屋内には、屋外機器側にバッテリー室、計器室およびフィルタ用のセルがそれぞれ設けられており、中二階には直列リアクトルおよびその防護さくが設けられ、キーインターロックがとられている。整流器盤、AC、DC 補助電源盤およびバッテリーチャージャはバッテリー室の側壁にそれぞれ配置されている。変電所建屋内のほかの一方には直流高速度シャ断器およびフューズ回路機器が設置されている。図 4. 8 はバッテリー室側壁に設置されたパネル類およびバッテリーチャージャを示す。

5. スペイン国鉄 (RENFE) 向け整流装置

3,000 kW 整流装置で変圧器・整流器が RENFE に対する支給範囲に含まれた。直流出力 3,300 V、12 相整流で過負荷定格などの仕様面で、わが国の電鉄変電所で採用されている方式と異なる点が多くみられる。

5. 1 定格仕様

形 式	変圧器	屋外油入自冷式
	整流器	屋内風冷式
整流回路		3 相全波直列 12 相整流
入 力 相 数		3 相
	周波数	50 Hz
	電 圧	46 kV
出 力 容 量		3,000 kW
	電 圧	3,300 V
	電 流	910 A
	定 格	IEC G 種 (100 % 連続, 150 % 2 時間, 300 % 5 分間)

5. 2 整流器構成

整流回路は 1,650 V 回路 2 直列の 12 相整流回路とされ、整流器キュービクル前面・背面にそれぞれ 6 相回路が配列され、内部で直列に接続されている。この装置では整流素子用ヒューズが使用されており、前面および背面の中央部に配置された交流導体にそれぞれ取付けられて冷却面の効果と保守点検の簡単な構造となるように考慮されている。キュービクル側面には制御機器セクションを設け、ここに保護リレー類、冷却とびら操作回路が取付けられている。整流器盤は別途設けられているので、整流器キュービクルには整流器自身の保護制御器具だけが取付けられた。3,000 V、12 相整流方式については、すでに SAR 向け整流器で完成しているが、さらにこの例では素子用ヒ

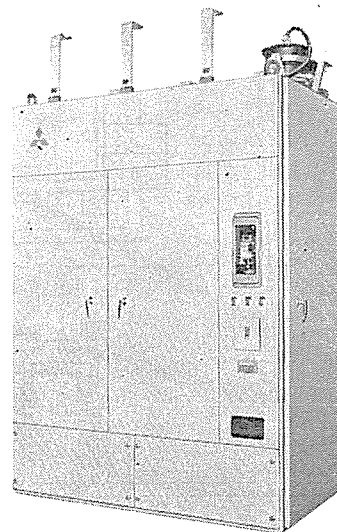


図 5. 1 RENFE 向け 3,000 kW 3,300 V 910 A 風冷式シリコン整流器
3,000 kW 3,300 V 910 A forced air cooled silicon rectifier for RENFE.

ューズを使用した回路についての保護の協調についても十分検討が行なわれた。図 5. 1 にこの整流器の外観を示す。

5. 3 保 護

整流器内部故障の場合にはもちろん、外部の短絡、過電圧などの異常に対してもすべて整流器内蔵の保護機器で検出または保護するように考慮されている。過電圧に対しては C-R アブソーバが設けられているが、さらに雷などの外来サージに対してはサージダイバータが設けられている。

過電流保護は整流器内に CT、過電流リレーが設けられており、過負荷および直流側短絡に対して交流側シャ断器で保護するように考慮されている。整流器内にはこのほか、温度上昇、冷却扇故障、1 素子故障、素子ヒューズ動作に対してそれぞれ検出警報回路が設けられている。

6. む す び

以上、当社の海外における実績の概要を紹介してきたが、これらはいずれも欧州メーカーが歴史を築いている所であり、技術面でもはげしい競争のうえに実績を築いたもので、当社海外における活躍の一部を示すものである。また、同時に特殊定格 5,000 kW 装置といった電鉄変電所としては、大容量装置の完成、あるいは直流 3,000 V 変電所、12 相整流装置の完成など新しい技術面の確立の意義は大きい。とくに 12 相整流器で回路方式、保護協調などについての検討は十分行なわれ、現地においても種々の試験が行なわれてすぐれた性能をうることができたが、わが国においても変電設備の大容量化に伴って将来は多相整流の必要も出てくると思われ、その意義は大きい。

通勤車冷房装置

坪山 宏*・西部 敏夫**

Air Conditioners for Commuters' Trains

Odakyu Electric Railway Co., Ltd. Hiroshi TSUBOYAMA
Mitsubishi Electric Corp., Nagasaki Works Toshio NISHIBE

Following the trend of accommodating office buildings with air conditioners and equipping room air coolers to dwelling houses, it is considered that the time will not be very remote when the commuters' trains are provided with the similar facilities. Considering that most of these cars are packed full in the rush hours, the cooling of the coaches is as necessary as the speeding up of the operation.

Regarding the realization of the idea, study has been made on the air conditioner of the train from various angles in cooperation with the authorities of railways and a type CU12 unit cooler has been developed for the purpose. This article gives the outlines on the construction of the device together with the report on the result of the field test.

1. ま え が き

長距離列車・寝台車・優等車に冷房装置を取付けることはすでに常識となり、誰しもぜいたくとは思わなくなった。ほとんどの職場では冷房装置が完備され、家庭にもルームクーラが普及し、われわれの生活環境は著しく向上したが、この兩者をつなぐ通勤車のみは定員の200%~250%もの詰め込み乗車を余儀なくされ、ことに夏季の利用客は猛暑の中であえいでいるのが現状である。

乗客へのサービス改善と言えば、この混雑緩和が第一番にとりあげられるべき問題点であるが、混雑解消のためには巨額の設備投資を伴うので早急な解決は望めないのが現状である。したがってラッシュ時の乗客サービスを比較的低廉な費用で改善するため、通勤車へも冷房装置を装備すべきであると考えられはじめたのは至極もったもなことである。通勤車に冷房装置を装備すれば、たとえ満員といえども体力の消耗を防ぎ、仕事の能率向上に役立つであろう。

2. 通勤車冷房の問題点

上記のように通勤車の冷房化はラッシュ時の乗客にとっては福音ではあるが、その実現達成についてはいろいろの問題点をかかえていることも事実である。すなわち投資効果を考えないサービスはあり得ないし、この投資効果を無視した技術も存在しない。

通勤車あるいは近郊電車等に冷房装置を装備することの投資効果については、「急行用2等車の冷房化を推進」⁽¹⁾という論文に述べられているので参照願いたい、その論旨を要約すれば、競合線区における冷房装置化は必ずパイするものであり、投資効果は十分期待できるというものである。

また技術的な問題点としては、「通勤車冷房の一考察」⁽²⁾に詳説されているごとく

(1) 優等車に比べて乗客人員が多く、冷房負荷から見て不利である。

(2) 窓・とびら・換気構造・車体防熱構造など通勤車の車体は冷房の逃げやすい点が不適當である。

(3) (1)(2)の理由から大容量の冷房装置が必要となる。

(4) ロングシート構造であり、立席スペースが広く、混雑時には冷風が車内全般に分布しにくい。

(5) 車両重量・電力消費が増加する。

(6) 車両価格が上がる。

以上のように通勤車なるがゆえに冷風の流し方に工夫が必要であると同時に、最大の問題点は大容量の冷房装置を必要とするため、多額の費用と相当の車両重量増加を覚悟せねばならず、車両限界とか車両重心が高いとかの関連で小形軽量化の要請も強いものである。さらに上記の投資効果も勘案して容量を決定する必要がある、関係者の悩みの種である。最終的には現車試験による以外にないが、おおよその見当をつけるために必要な冷房容量を試算してみることも必要である。

3. 通勤車の冷房負荷

通勤車の冷房負荷は一般的に次のように考えられている。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに Q : 冷房負荷 (kcal/h)

Q_1 : 伝熱による通過熱量 (kcal/h)

Q_2 : 日射による加熱量 (kcal/h)

Q_3 : 換気・すきま風による熱量 (kcal/h)

Q_4 : 乗客・室内機器からの発熱 (kcal/h)

伝熱による通過熱量 Q_1 は車内と車外の乾球温度差による伝熱量であり次式で示される。

$$Q_1 = \sum K \cdot A \cdot \theta \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに K : 車体各部の熱通過率 (kcal/m²・h・°C)

A : 車体各部の伝熱面積 (m²)

θ : 車内外乾球温度差 (deg・°C)

日射による加熱量は、ふく射熱量を算定するもので経験的な要素に依存する面が多いが、式で表わせば次のようになる。

$$Q_2 = \sum \alpha \cdot A \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに α : ふく射熱係数 (kcal/m²・h)

A : 車体各部の面積 (m²)

換気・すきま風による熱量は外気が車内に持ち込む熱量であり、空気の有する熱量はいわゆる顕熱と潜熱が混在しているため、全熱量すなわちエンタルピーで表わし次の式で示される。

$$Q_3 = G(i_1 - i_2) \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに G : 換気すきま風の量 (kg/h)

i_1 : 車外空気のエンタルピー (kcal/kg)

i_2 : 車内空気のエンタルピー (kcal/kg)

乗客・室内機器からの発熱は、食堂車以外は室内機器からの発熱は微小であるから省略し、乗客からの発熱について述べる。乗客 1 人当たりの発熱量（顕熱＋潜熱）を β とすれば次の式で示される。

$$Q_4 = \beta \cdot n \dots\dots\dots (3.5)$$

ここに β : 乗客 1 人当たりの発熱量 (kcal/h/人)
 n : 乗客人員 (人)

普通の場合 $\beta=100$ といわれている。

今通勤車の一例として A 車, B 車, C 車の 3 種について冷房負荷を試算してみると表 3. 1 のようになる。

表 3. 1 では換気量として 満員時 1 人当たり 10 m³/h として計算してあるが、長距離旅客列車では 1 人当たり 20 m³/h が適当であるとされている。しかし通勤車という条件を考えれば満員時に 1 人当たり 10 m³/h あればまず大じょうぶであろうと考えられる。車内温度を 28℃ と 30℃ の 2 種類にしたのは、通常車両に冷房装置を取付けた場合の車内温度・湿度条件は 28℃, 65 % RH が用いられているからであり、30℃ を選んだのは、通勤車に車両冷房装置を取付けたときの車内温度は少なくともこれ以下であるべきであろうという筆者の見解によるものである。ただし乗客の快適度という面から詳細に検討するのであれば、有効温度 ($E \cdot T$) ⁽³⁾ という概念を導入しなければならないが、省略しても差しつかえないと考えている。この表で気付くことは、車内温度を 30℃ から 28℃ に下げるとは冷房装置能力を 10～15 % 増せばよいことがわかる。

次に冷房負荷を分析してみると車体の大きさ、乗車効率等で多少の差異があるとはいえ概略表 3. 2 のようになる。

表 3. 2 から定員時でみると伝熱・日射による負荷と換気による負荷と乗客による負荷の割合はそれぞれ約 33 % であるが、満員時

表 3. 1 負 荷 計 算 例
Example of heat load calculation.

車 種			A 車		B 車		C 車	
車 体 長			16 m		17.5 m		20 m	
定 員			117 人		130 人		162 人	
満 員 (率 %)			260 人 (223 %)		279 人 (215 %)		402 人 (250 %)	
(kcal/h)	定 員 時	Q ₁	3,120	1,870	3,290	1,970	4,140	2,480
		Q ₂	9,570	9,570	10,770	10,770	12,480	12,480
		Q ₃	15,500	10,550	16,600	11,300	24,000	16,300
		Q ₄	11,700	11,700	13,000	13,000	16,200	16,200
		合計	39,890	33,690	43,660	37,040	56,820	47,460
	満 員 時	Q ₁	3,120	1,870	3,290	1,970	4,140	2,480
		Q ₂	9,570	9,570	10,770	10,770	12,480	12,480
		Q ₃	15,500	10,550	16,600	11,300	24,000	16,300
		Q ₄	26,000	26,000	27,900	27,900	40,200	40,200
		合計	54,190	47,990	58,560	51,940	80,820	71,460
車 内 温 度			28℃	30℃	28℃	30℃	28℃	30℃
車 内 相 対 湿 度			65 %					
車 外 温 度			33℃, 69 % RH					
換 気 量 (m ³ /h)			2,600		2,790		4,020	

注：車体防熱は皆無ではないがほんのわずかである。

表 3. 2 負 荷 内 訳
Percentage of heat load description.

負 荷 の 種 類	定 員 時	満 員 時
Q ₁ (伝熱による負荷)	5～8 %	4～6 %
Q ₂ (日射による負荷)	23～29 %	16～20 %
Q ₃ (換気による負荷)	31～40 %	22～29 %
Q ₄ (人間による負荷)	29～35 %	48～56 %

では概略 25 %, 25 %, 50 % となり人間の負荷がいかに大きいかかわかる。また合計負荷でみると満員時の負荷は定員時の負荷のおおよそ 35～50 % 増となることもわかる。

以上のように通勤車においては乗車人員が多く、定員時といえども従来の優等車冷房に比べ冷房負荷が大きく、さらに満員時ともなれば優等車の 2 倍以上になる。この満員状態は、1 日のうち朝・夕の通勤ラッシュ時のみで、それ以外の時間帯は定員あるいは定員以下で運行されることが多いから、満員時を想定して冷房装置の容量を決定すると、当然なことながら、それ以外の時間帯では設備過剰となるわけである。通勤車冷房の急速なる普及を妨げているのもこの点であり、この問題解決のため今日まで種々の研究が進められてきたが、まだ最良の方策は見出されていない。その一つの解決策として車内冷風の風速をコントロールすることが試みられている。

車内温度・相対湿度は冷房負荷と冷房装置容量により一義的に決まるが、乗客が快適と感ずる状態はこの車内温度と相対湿度のほか冷風の風速によって影響される。すなわち乗客の快適度は、車内乾球温度・湿球温度・冷風風速の三者で決まる有効温度で評価されるべきであり、ここに冷房装置と扇風機を組合わせたいわゆる冷風冷房あるいはふりかけ冷房という考え方が生まれた。つまり車内冷風風速を高めることにより有効温度を下げた快適度を増そうとするものである。

その意味するところは定員時に適切なる冷房ができる程度の冷房容量をもち、満員時は扇風機を回すことにより有効温度を下げた冷房装置の容量不足を補うものである。これにより冷房容量の面で 35～50 % 節約でき、車体重量や電源容量の増加をおさえることが可能となる。

以上のような考え方にもとづき通勤車に適した冷房装置を開発し、現車試験を実施したのでその概要を紹介する。

4. CU 12 形 ユニットクーラ

4. 1 概 要

この CU 12 形 ユニットクーラは当社が特に通勤車用として開発した安価・軽量・小形・高性能の冷房装置である。主として通勤車の屋根上に 1 両当たり 4～6 台の装置を分散配置して取付けるもので、車内天井に簡単な配風ダクトを設け、扇風機と組合わせて車内を冷房するものである。通勤車の車両限界を考慮して屋根上高さは極力低くし、パンタグラフのある車両には上記配風ダクトによりパンタグラフの下や運転室など従来の天井分散式ユニットクーラでは不可能といわれていた部分へも冷風の送り込みを可能にした。

電源は MG セットよりキャノンコネクタを介して供給され、車室内に設置された配電盤により制御される。車内の空気はユニットクーラの冷却器用電動送風機により、ダクト吸込口を経てエアフィルタにより浄化されたあと、冷却器により冷却・減湿されてダクトの吹出し口より車内に吹き出される。

4. 2 構 造

CU 12 形 ユニットクーラの外観は図 4. 1, 4. 2 に示すように、ユニットは鋼板製の底板と仕切壁により車内側と車外側とに区切られ、車内側に対しては防水構造になっている。

室外側は凝縮器 2 個、凝縮器用電動送風機 1 台を備え、クレーン用つり手があり全体をカバーでおおってある。

室内側には冷却器 2 個、露受けざら 2 個、冷却器用電動送風機 1 台、同用風どう 1 組、分電箱 1 組、キャノンプラグ 1 組および排水機構

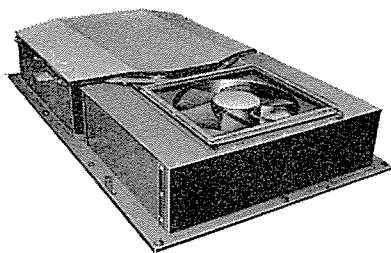


図 4.1 CU 12 形 ユニットクーラ 外觀
Exterior view of model CU 12.

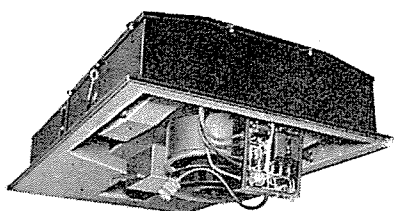


図 4.2 CU 12 形 ユニットクーラ 外觀
Exterior view of model CU 12.

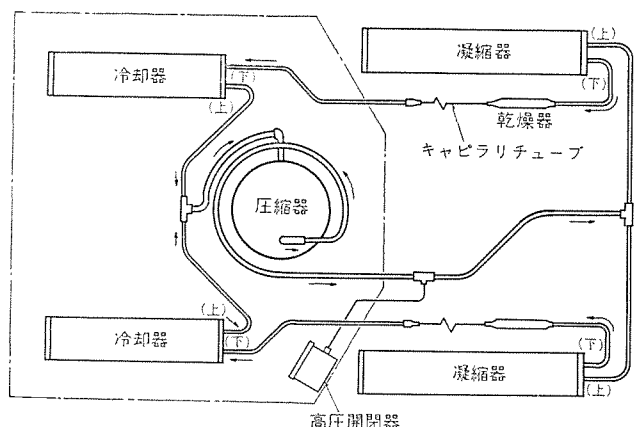


図 4.3 冷媒系統図
Refrigerating cycle.

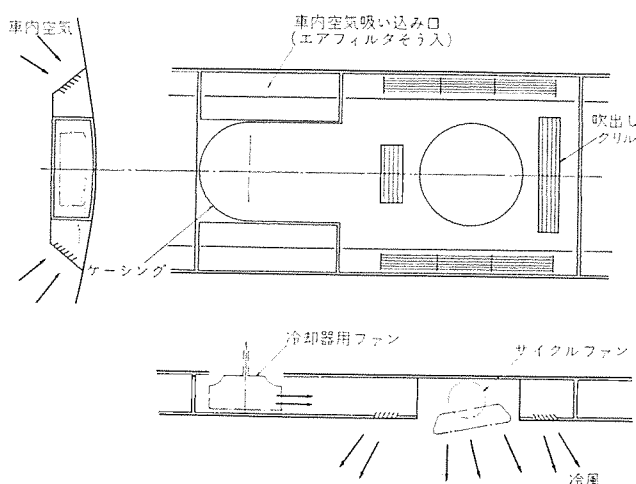


図 4.4 車内配風ダクト
Air delivery duct.

を備えている。分電箱には、圧縮機電動機の電磁接触器 1 個、回路保護のためのサーキットブレーカ 1 個、電動機の過負荷リレー 1 個、ランプなどが収納されている。風どうの横には高圧開閉器が取り付けられており、またさらにその横には圧縮機室があり、その中には防振支持された圧縮機 1 台が納められている。この圧縮機室の下端より排水

ホースが出ており、この排水ホースを車体天井長手方向に設けられている排水管に接続して圧縮機室内に発生した水分はこの排水管より車外に排出される。なお冷却器下の露受けさらにたまった凝縮水はゴムホースを介してユニット側壁の穴より車体屋根上へ排出される。凝縮器用電動送風機は立て形プロペラファンで上方より外気を吸込み、側面の凝縮器へ風を送ってそれを冷却する。一方冷却器用電動送風機は立て形ターボファンで冷却器を通して室内空気を吸込み車内ダクトに冷風を送り込む。

冷凍サイクルは図 4.3 のように圧縮機、凝縮器、乾燥器、キャピラリチューブ、冷却器およびこれらを接続する配管によって構成され、冷媒（フロン 22）を封入してある。圧縮機により吸入された高温・高圧の冷媒ガスは凝縮器に送られ、凝縮器を通る風で冷却され凝縮して常温高圧の液になる。この常温・高圧の冷媒液は乾燥器を通りキャピラリチューブに至り、ここで減圧されて低温低圧の液となり冷却器にはいる。

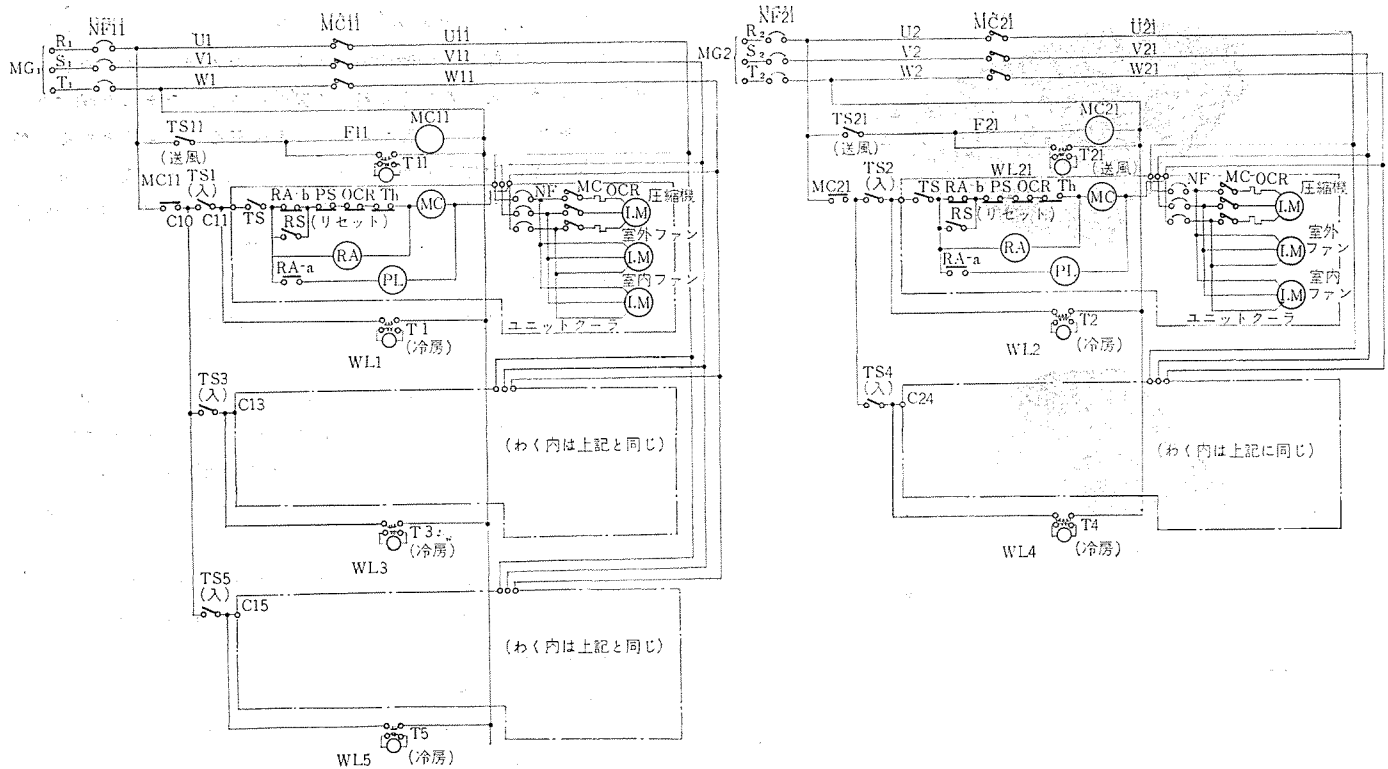
低温・低圧の冷媒液は冷却器を通る車内空気と熱交換しながら次第に蒸発する。蒸発してガスになった冷媒は圧縮機に吸入されサイクル内を循環する。

車内配風ダクトは図 4.4 に示すように、車内空気吸込み口・エアフィルタ・ファンケーシング・吹出しグリル・サイクルファン取付口を備えている。ユニットの冷却器用電動送風機のせん（扇）車はユニット取付時にこのダクトケーシング内にそう入され、冷風はこのせん車より四方に吹出される。しかし図のような形状のダクトを用いると冷風は、矢印の方向に導かれ、吹出しグリル、サイクルファンにより車内へ吹出されることになる。

ユニットの車外側は、保守、サービス時の安全のためならびに意匠的な面から強化プラスチック（たとえば FRP）製の室外ケースでおおわれている。

表 4.1 仕様
Specification of model CU 12.

ユ ニ ャ ッ ト	形 電 名 冷 房 源 能 力	CU 12 三相交流 220 V, 60 Hz 8,500 kcal/h 外気 33±1.5°C 冷却器吸込空気温度 28±1°C 冷却器吸込空気相対湿度 65±5%
	電 製 品 重 力 量	約 4.6 kW 約 200 kg
圧 縮 機	形 冷 式 電 動 機	電動機直結全密閉往復動形 モノクロルジフルオロメタン (CHClF ₂) 三相交流誘導電動機 2.5 kW
凝 縮 器	形 パ イ 式 送 イ ブ 風 ィ ン 電 風 機 動 機	プレートフィン形強制空冷 銅 管 アルミ板 電動機直結軸流形 65 m ³ /min 三相誘導電動機 400 W
冷 却 器	形 パ イ 式 送 イ ブ 風 ィ ン 電 風 機 動 機	プレートフィン形強制通風 銅 管 アルミ板 電動機直結ターボ形 25 m ³ /min 三相誘導電動機 200 W
冷 媒 回 路	冷 媒 配 管 乾 燥 器 冷 媒 抑 制 器	銅 管 乾燥剤ソバビード キャピラリチューブ
制 御 機 器	内 蔵 機 器 高 圧 開 閉 器 インターナルサーモ	サーキットブレーカ、キャノンプラグ、電磁接触器、過電流リレー 圧縮機電動機に内蔵
外 形 寸 法	高 長 幅 さ (屋 根 上) さ	331 mm 1,780 mm 1,100 mm



符 号	名 称	定 格	符 号	名 称	定 格
NF 11	レ ー 断 器	NF-100 E, 75 A	NF	レ ー 断 器	NF-50 B, 30 A
NF 21	レ ー 断 器	NF-100 E, 50 A	MC	電 磁 開 閉 器	M-15 B
TS 11, 21	トグルスイッチ	S-1, SPST	OCR	過電流継電器	16 A
TS 1~5	トグルスイッチ	S-1, SPST	Th	インナサーモ	切 105°C, 入 88°C
MC 11, 21	電 磁 開 閉 器	M-75	PS	高 圧 開 閉 器	切 26 kg/cm ² , 入 18 kg/cm ²
WL 11, 21	ラ ン プ	小角形白色	PL	ラ ン プ	丸形赤色
WL 1~5	ラ ン プ	小角形白色	PA	補 助 継 電 器	
			TS	トグルスイッチ	SPST
			RS	トグルスイッチ	はねかえり式

図 4.5 ユニットクーラ 制御方式 Example control sequence of model CU 12.

4.3 仕 様

ユニットクーラの概略仕様を表 4.1 に示す。

4.4 運転および制御

CU 12 形 ユニットクーラの制御方式の一例を図 4.5 に示す。図において MG セットが運転され、配電盤へ通電されていればサーキットブレーカ NF 11, NF 21 を投入し、さらに「送風」のスイッチ TS 11, TS 21 を投入すると電磁接触器 MC 11, MC 21 によりそれぞれのユニットクーラの室内電動機と室外電動機が同時に運転にはいる。送風表示ランプが点灯し送風機が運転中であることを示す。次に「冷房」のスイッチ TS 1~TS 5 を順次投入するとそれぞれのユニットに内蔵されている圧縮機電動機用電磁接触器が ON となり冷房運転にはいる。

保護装置として高圧開閉器 PS, 過電流 リレー OCR, インターナルサーモ Th が取付けられており、それらのいずれかが作動するとその接点が OFF となって圧縮機電動機を停止させ、パイロットランプが点灯する。PS, OCR, Th はいずれも自動リセット形であるが、特殊リレー RA により電氣的に記憶させる回路にしてある。以上手動制御の場合を示したが、サーモスタットによる自動運転はもちろん可能である。

5. 現 車 試 験

5.1 概 要

通勤車に CU 12 形 ユニットクーラを取付け、定員時、満員時の冷房・換気の諸性能を現車にて調査するため、供試車両として小田急電鉄のクハ 2478 号車 (前述の A 車に相当) を使用し、CU 12 形ユニットクーラを 5 台積載して、特に試験の焦点となる走行試験時は負荷として実際に乗車効率 250 % 相当の人員を乗せ、当年最高気温とい

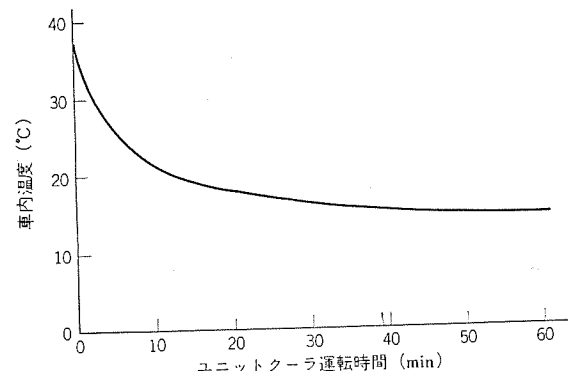


図 5.1 温度降下特性 Temperature fall characteristics.

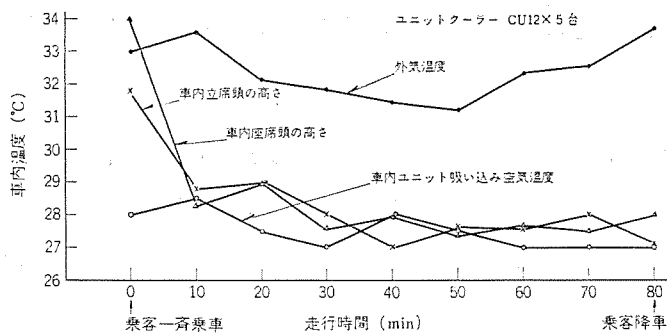


図 5.2 走行試験時温度分布 (250%乗車)
Room temperature balance at running.

う好条件のもとで測定を行なった。

5.2 定置試験

本定置試験では冷房ダクト試験，車内温度分布試験，風量試験，騒音試験を実施した。

冷房ダクト試験においては，定員時を想定してサイクルファンをとめて冷房装置として風の流れが良好であること，すなわちショートサーキット現象が起こらないこと，デッドスペースがないこと，コールドドラフトを感じさせないことを確認しおむね良好であった。

車内温度分布試験においては無負荷時の車内温度降下特性と車内温度のばらつきを調査した。車内温度降下特性は図 5.1 に示すように良好であり，冷房使用前の予冷時間が短くてすむという利点がある。

車内温度分布はバランスした状態で 3.5°C の幅にばらついているがこれは定置テストのためであり，走行中は車内空気が移動するためこのばらつきは平均化されている。

風量試験・騒音試験の結果は設計値どおりであり良好であった。

5.3 走行試験

走行試験では満員時の車内温度分布試験を実施し，乗客にアンケートを求め分析した。

実際の営業運転スケジュールに合わせて，定員の 250% 相当の人員を乗せ，車内各部の乾球温度・外気温度を測定したのが図 5.2 である。当初の設計においては外気温度 33°C，満員（乗車効率 250%）の場合車内温度は 30°C 位になると予想していたが，約 28°C となり予期以上の冷房効果を示した。この場合サイクルファンは連続して運転していたが，吹出し冷風が直接当たるところ以外の車内温度のばらつきはあまりないこともわかった。また定員時の走行試験は実施しなかったが満員時の結果から見て容量は十分満足できるものと考えられる。

この場合の乗客のアンケートを整理したのが表 5.1 である。

6. む す び

以上通勤車冷房の問題点，通勤車専用ユニットクーラ CU 12 形の仕

表 5.1 冷房アンケート集計一覧
Graphic chart of passenger's feeling-enquete.

冷房アンケート集計一覧		立 席	座 席
質 問	回 答		
1. むしむししましたか	a. 非常に b. 少し c. 感じない	31.2 10.4 58.5	10.5 18.7 68.8
2. 風の強さは どうでしたか	a. 強すぎる b. 丁度よい c. 弱い	5.9 35.7 58.4	6.3 31.2 62.5
3. 空気のにごりは ありましたか	a. 大変 b. や、 c. ない	4.5 45.8 49.7	6.3 50.0 43.7
4. 涼しく感じた ところは	a. 顔（頭部） b. 胸（上半身） c. 膝（下半身） d. ない e. その他	5.9 31.4 56.9 1.1 1.1	25.1 37.5 18.7 18.7 1.1
5. 風が当たっている 時間は	a. 長すぎる b. 丁度よい c. 短かい	5.2 40.5 54.3	3.7 62.5 33.8
6-1 汗が出ましたか （顔）	a. ほとんど b. 少し c. でない	23.6 75.0 1.4	6.3 50.0 43.7
6-2 汗が出ましたか （身体）	a. ほとんど b. 少し c. でない	41.6 55.2 3.2	6.3 93.7 0.0
総合的にみて 感じはどうでしたか	a. とても快適 b. 普通 c. や、暑い d. や、寒い	12.5 69.2 17.8 10.7	37.5 62.5 0.0 0.0
(注) 被測定者は作業衣を着用		数字は%	

様・構造および現車試験結果の概要について述べたが，要するに通勤車用としては扇風機併用による冷風冷房方式が適当であり，この方式によれば涼感をそこなわずに冷房容量の節減ができるということが実証されたことになる。

最後に，本試験に参加された関係者のかたがたに深く感謝の意を表するとともに，この小文が，関係者の各位に対しお役に立てば幸いと考えものである。

参 考 文 献

- (1) 石井：JREA 12, No. 3
- (2) 谷：JREA 11, No. 6
- (3) 守安：空気調整工学

電鉄変電所負荷のシミュレーション

大野 栄一*・今村 純寿**

Simulation of Electric Load in Railroad Substations Using Electronic Digital Computer

Central Research Laboratory Eiichi OHNO
Head Office Sumitoshi IMAMURA

A simulation technique by means of an electronic digital computer has been developed to make it feasible obtaining accurate substation loads through the combination of load current characteristics made available from a runcurve, a circuit condition consisting of tracks, stations and substations and an operational diagram. By giving operation headways, difference of starting times of load between the up and down line and efficiency of the passenger load as inputs, line losses and trolley-wire voltage fluctuation are obtained besides load current of each substation at every moment, average, peak and effective value of output current.

This report deals with the simulation technique and introduces actual results applied to a chopper control car developed for the Teito Rapid Transit Authorities.

1. ま え が き

電鉄負荷は数多くの車両のノッチオン・ノッチオフによって非常に変動の多い負荷となるが、これを解析的に扱うことはかなり困難である。しかし最近のように車両密度の増加やサイリスタチョップによる回生制動など新しい制御方式による車両の登場などにより、変電所負荷を正確に求めることが必要になってきた。

われわれは、列車のrun curveによる負荷電流特性と路線、駅、変電所よりなる回路条件および運行ダイヤとを組み合わせることにより、正確な変電所負荷を求めることのできるデジタル計算機によるシミュレーション手法を開発した。

この方法によれば、運転間隔、上り線下り線の始発時差、乗車効率などを入力として与えることにより、実際にその路線に、その運行ダイヤにしたがって列車を運行させた場合の各変電所の負荷電流を時々刻々求めることができ、この結果より各変電所の平均電力、せん(尖)頭電力、実効出力、線路損失、架線電圧変動などを知ることができる。これらの計算結果を使用すれば、変電所建設に先立って、その実動状況を正確に推定することができ、より合理的な変電所設置計画に役立つものである。

今回帝都高速度交通営団では新しく開発された回生制動付きサイリスタチョップ制御による新方式の電気車を本格的に実用される計画であり、このため変電所負荷の推定に対しても従来の場合と異なった要素が多く、ここに開発したシミュレーション手法が大きくクローズアップされるに至ったのである。

以下では電鉄負荷の考え方と、計算手法について解説し、具体的検討結果の一部を紹介することにした。

2. 電鉄負荷の考え方

2.1 負荷電流の流れ方

電鉄変電所の負荷は、実際に線路を走っている電車の状態に応じて時々刻々変化し、複雑な様相を呈する。しかし、これの発生源は個々の電車であるので、まず個々の電車の負荷としての性質を明らかにし、次に多数の電車が時刻表(運行ダイヤ)に従って走った場合

の全体の負荷を考えて行くことにしたい。

図2.1は電車MがA駅からB駅に向かって出発したところである。このとき電車に流入する電流 i_M は図の下方に示したように、最大値 I_M に達した後減少し、a点でノッチオフされてゼロに戻る。

簡単化のため変電所はA、B両駅の外側にX、Yの二つだけが存在するものとする、それぞれの変電所電流 i_X 、 i_Y は

$$i_M = i_X + i_Y \quad (2.1)$$

の関係を保って変化する。また電車Mと変電所X、Yとの間のインピーダンスをそれぞれ z_{M-X} 、 z_{M-Y} とすると、両変電所の無負荷電圧を同じとすれば、 i_X 、 i_Y の分流はインピーダンスの逆比となり

$$i_X/i_Y = Z_{M-Y}/Z_{M-X} \quad (2.2)$$

となる。(2.1)、(2.2)の両式から i_X 、 i_Y が求まるのである。

ここで i_M は個々の車両特性、線路条件、乗車効率などによって変化するが、同一形式の電車については同じ標準電流パターンにより決まる電流源と考えることができる(図2.2)。もちろん、各駅区間ごとに正確な電流パターンを求めて、これを用いればよりよい結果が得られることはいうまでもない。

2.2 移動負荷と固定点負荷

次に電車Mは移動負荷であるために、たとえ i_M が一定であっても上述の各変電所までの距離、したがってインピーダンス(Z_{M-X} 、 Z_{M-Y})が時々刻々変化し、この結果変電所負荷 i_X 、 i_Y は変化する。

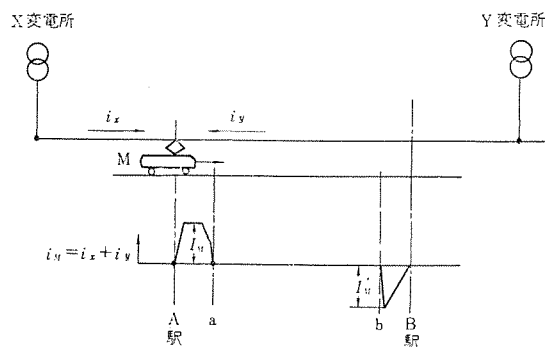


図2.1 電鉄負荷の考え方
Typical diagram of power-supply system.

しかし、実際問題として両変電所 X と Y の距離に比べて、力行電流の流れる区間 A-a の距離は非常に小さいと考えられるので、計算を効率的に行なうためには、A-a 間の負荷電流はすべて A 駅において発生し、時間的にのみ変化する固定点負荷と考えることができる。

このように考えれば、微小移動のたびに電車と各変電所との間のインピーダンスを求めて分流比を計算する必要はなくなり、負荷電流の発生する各駅の点についてあらかじめ分流比を求めておけばよいことになる。

ところで実際には図 2.3 に示すように駅の間においても再力行や抑速制動のために負荷を生じる場合がある。このときには駅との距離もかなり離れていると考えられるので、中間点として M, N を考え、これを駅と同様負荷点とすればよい。(この意味では M, N を停車しない仮想駅と呼んでもよい)。

3. 運行ダイヤとの関係

3.1 周期と位相

前章で個々の電車の負荷としての特性を論じたので、ここでは多数の電車が図 3.1 のような定常的な運行ダイヤに従って走行しているときの全体の変電所負荷について考える。

駅 1 から駅 N までの区間で、等しい運転間隔 t_h で定常運転されているときは、全体の現象も周期 t_h とする繰返し現象となる。したがって、時間々隔 t_h だけの現象を考えればよい。ここでは、1 周期として、ある列車が駅 1 を出発する時刻から、次の列車が駅 1 を出発する時刻までをとることにする。

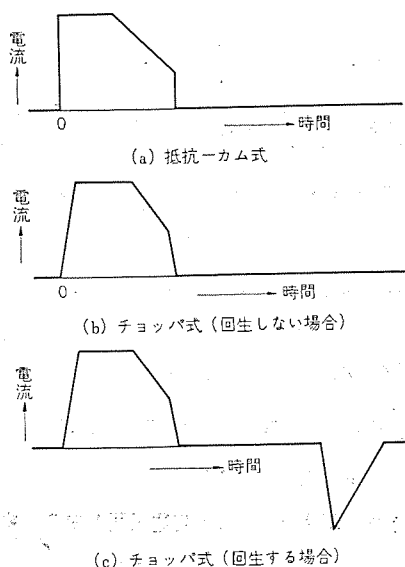


図 2.2 標準電流パターン
Typical current pattern.

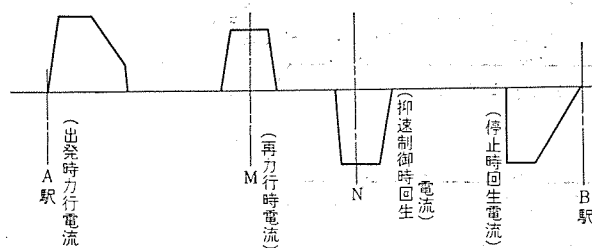


図 2.3 中間点での負荷電流
Load currents in intermediate points between stations.

1 周期の始まりの時刻を計算時間 T の原点にとったとき、列車が各駅を出発する時間をその駅の位相と呼ぶことにする。ただし、終着駅に対しては到着時間をとることにする。1 周期の間に、各駅で上り列車と下り列車が 1 回ずつ出発するから、各駅について上り線の位相と下り線の位相とが存在する。図 2.3 で、○印は上り線の位相、△印は下り線の位相を表わしており、いずれも運転間隔 t_h より小さい値となる。

図 3.1 を参照して、上り線 j 駅の位相は次の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_{P,u}^j &= A_{P,u}^j - \left[\frac{A_{P,u}^j}{t_h} \right] t_h \\ A_{P,u}^j &= T_{P,u}^{j-1} + T_u^{j-1} + T_{S,u}^j \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 $T_{P,u}^j$: 上り線 j 駅の位相

$T_{P,u}^{j-1}$: 上り線 $j-1$ 駅の位相

T_u^{j-1} : 上り線 $j-1$ 駅から j 駅までの所要時間

$T_{S,u}^j$: 上り線 j 駅の停車時間

t_h : 運転間隔

を表わし、 $[X]$ は X の整数部分をとる意である。

同様に、下り線 j 駅の位相 $T_{P,d}^j$ を求めることができる。

3.2 負荷点の電流波形

定常運転時には、ある負荷点の電流は列車の接近、停車、出発の繰返しにより周期的に変動する波形となる。たとえば、チョッパによる回生制御に対し、図 2.2 (c) の標準パターンを使用すれば、負荷点の電流波形は負荷点の種類(中間駅、始発駅、終着駅)により図 3.2 のようになる。

中間駅、始発駅に対しては出発時、終着駅に対しては到着時を時間の原点とするパターン時間を考え、各負荷点の電流をこのパターン時間の関数として表わす。各負荷点のパターン時間は、次式により求めることができる。

$$t_u^j = T - T_{P,u}^j + t_h - \left[\frac{T - T_{P,u}^j + t_h}{t_h} \right] t_h \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 t_u^j : 上り線 j 駅のパターン時間

T : 計算時間

$T_{P,u}^j$: 上り線 j 駅の位相

t_h : 運転間隔

を表わし、 $[X]$ は X の整数部分をとる意である。

同様に、下り線 j 駅のパターン時間 t_d^j を求めることができる。

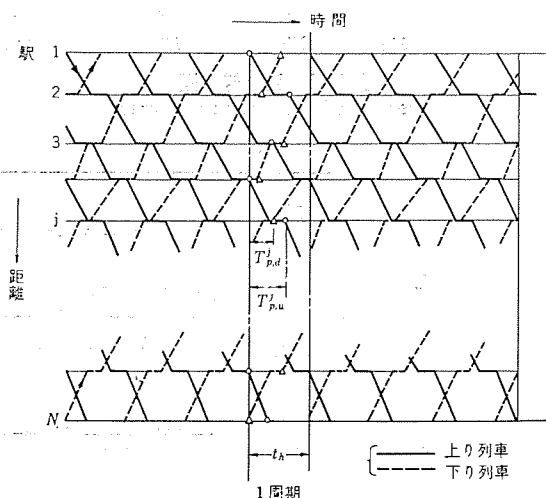


図 3.1 運行ダイヤグラム
Operating diagram.

3.3 変電所電流と架線電流

負荷電流の分布は、線路抵抗、変電所内部抵抗、負荷点および変電所の位置によって異なる。ここでは、 M 個の変電所と N 個の駅および架線とから構成される図 3.3 のような路線について考える。

電流分布を求めるために、この給電系を抵抗回路網と考え、その回路方程式を解くことにする。2.2 節で述べた駅における固定負荷という考え方にしたが、図 3.3 の一変電区間 (i 番目の変電所から $i+1$ 番目の変電所まで) について計算のための記号を入れて書きかえたものを図 3.4 に示す。

図 3.4 において

$R(i)$: i 変電所の内部抵抗

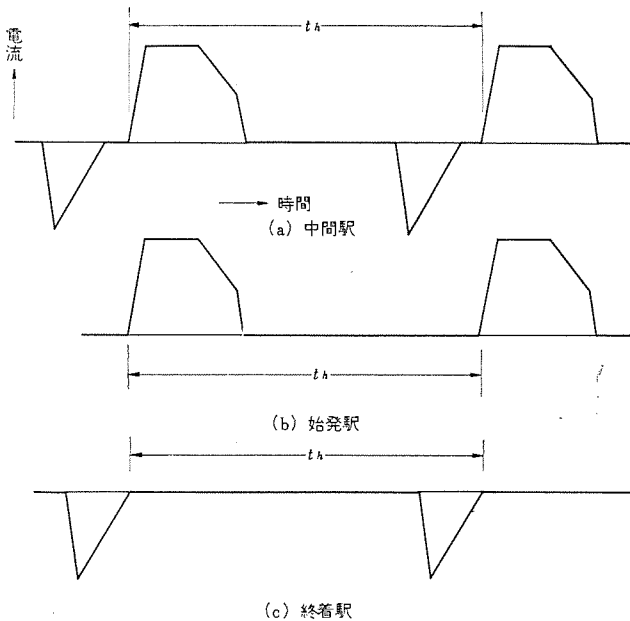


図 3.2 負荷点(駅)における標準電流波形
Typical current wave form at load point.

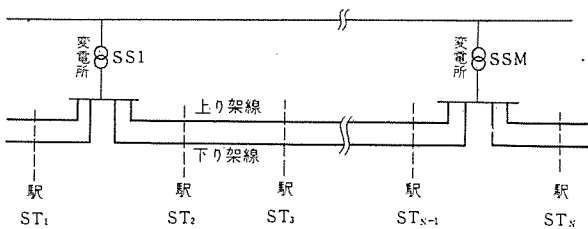


図 3.3 路線図
Power distributing circuit diagram.

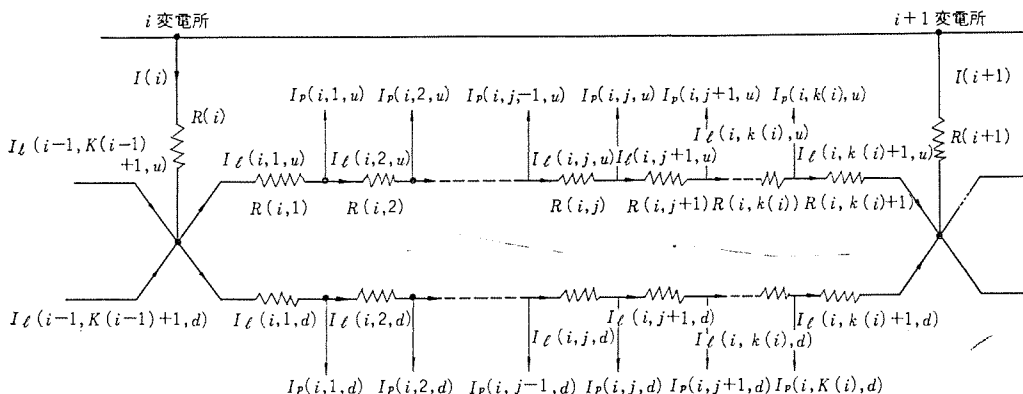


図 3.4 路線模擬回路 Equivalent diagram of power distribution circuit.

$R(i, j)$: i 変電所から $i+1$ 変電所までの区間で
 i 変電所からかぞえて $j-1$ 番目の負荷点と
 j 番目の負荷点との間の線路抵抗

$I_P(i, j, u)$: 上り線 j 負荷点の電流

$I_P(i, j, d)$: 下り線 j 負荷点の電流

$I(i)$: i 変電所の電流

$I_L(i, j, u)$: 上り線 $j-1$ 負荷点と j 負荷点との間の
架線電流

$I_L(i, j, d)$: 下り線 $j-1$ 負荷点と j 負荷点との間の
架線電流

$K(i)$: ($i, i+1$) 変電区間内の駅の数

電流は、すべて矢印の向きを正とする。

図 3.4 から式 (3.3) ~ (3.6) が成立する。

$$I_L(i, 1, u) + I_L(i, 1, d) = I(i) + I_L(i-1, K(i-1)+1, u) + I_L(i-1, K(i-1)+1, d) \quad (3.3)$$

$$(i=1, 2, \dots, M)$$

$$\sum_{j=1}^{K(i)+1} R(i, j) I_L(i, j, u) = \sum_{j=1}^{K(i)+1} R(i, j) I_L(i, j, d) \quad (3.4)$$

$$(i=1, 2, \dots, M-1)$$

$$R(i+1) I(i+1) = R(i) I(i) + \sum_{j=1}^{K(i)+1} R(i, j) I_L(i, j, u) \quad (3.5)$$

$$(i=1, 2, \dots, M-1)$$

$$\sum_{i=1}^M I(i) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{K(i)} (I_P(i, j, u) + I_P(i, j, d)) \quad (3.6)$$

式 (3.3) ~ (3.5) より

$$R(i+1) I(i+1) = \left(R(i) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{K(i)+1} R(i, j) \right) I(i) + \left(\sum_{k=1}^{i-1} I(k) - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^{K(k)} (I_P(k, j, u) + I_P(k, j, d)) \sum_{j=1}^{K(i)+1} R(i, j)/2 \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^{K(i)} ((I_P(i, j, u) + I_P(i, j, d)) \sum_{k=j+1}^{K(i)+1} R(i, k)/2) \right) \quad (3.7)$$

$$(i=1, 2, \dots, M-1)$$

上式のうち抵抗値 R 、負荷点電流 I_P はすべて既知であるから式 (3.6) および (3.7) を M 元連立一次方程式として解き、 M 個の変電所電流 $I(k)$ ($k=1, 2, \dots, M$) を得る。

$$I(k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{K(i)} X(k, i, j) (I_P(i, j, u) + I_P(i, j, d)) \quad (3.8)$$

$$(k=1, 2, \dots, M)$$

式 (3.8) のうち、 $X(k, i, j)$ は i 変電区間の中の j 負荷点の電流

のうち、 k 変電所が分担する割合を表わし、これを分流比と呼ぶことにする。

実際のシミュレーションにおいては、あらかじめ、分流比 X を計算しておき、時々刻々の負荷電流 I_P を用いて、式 (3.8) により各変電所電流 I を求める。

変電所電流 I および負荷電流 I_P から式 (3.3) ~ (3.5) により架線電流 I_L を求めることができる。

3.4 線路損失および架線電圧

線路損失 LL は、線路の抵抗 $R(i, j)$ と架線電流 $I_L(i, j, u)$, $I_L(i, j, d)$ から求めることができる。

$$LL = \sum_i \sum_j R(i, j) (I_L^2(i, j, u) + I_L^2(i, j, d)) \dots \dots \dots (3.9)$$

変電所の内部抵抗による損失 SL は内部抵抗 $R(i)$ と変電所の電流 $I(i)$ から求めることができる。

$$SL = \sum_i R(i) I^2(i) \dots \dots \dots (3.10)$$

負荷点 (i, m) における架線電圧変動 $\Delta E(i, m)$ は、変電所の内部電圧降下 (上昇) と負荷点間の電圧降下 (上昇) から簡単に求めることができる。

4 シミュレーション・プログラム

以上の検討結果から作成したデジタル 計算機による計算のフローチャートを図 4.1 に示す。

駅および変電所の位置、線路抵抗等の線路条件と停車時間、運転間隔、乗車効率等の運転条件および電流パターンを読み込み、時間 T

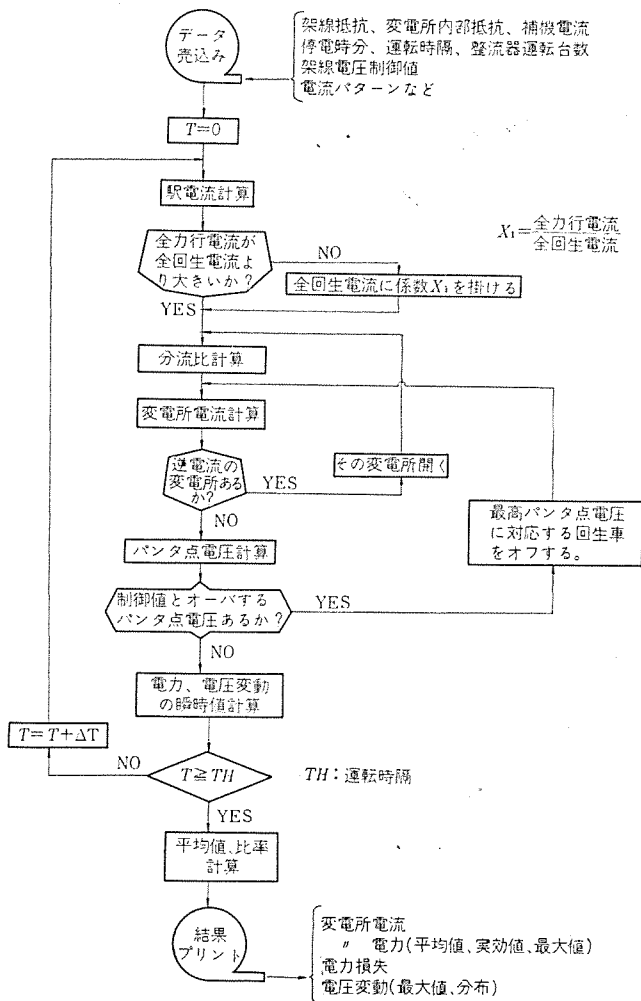


図 4.1 計算フローチャート
Calculation flow chart.

を ΔT ステップで増加して、運転間隔 t_h まで、時々刻々の電流、電力、架線電圧等を計算し、最後に平均電力、回生率等を求める。

変電所への電力回生を行わない場合は、フローチャートに示すように、各変電所電流の符号を判別し、負であれば、その変電所は切離して (モード 切換)、あらためて分流比、変電所電流を計算し直して、変電所電流が正になるまで繰返すことになる。

また、回生を行なった場合、架線電圧が異常に上昇することを防ぐため、各負荷点での架線電圧をチェックして制限値をこえた場合その原因となっている回生中の電車をオフするルーチンが入れてある。

(実際の運行の際にもこのようなときには回生制動を制限して空気制動等に切りかえることになる)。

このフローチャートに従って FORTRAN にてシミュレーションプログラムを作成し、実際の計算を行なった。

また、計算結果は、各変電所電流の瞬時値のほか、最終計算値として各種出力電流、各種電力比率、さらに各点でのパンタ点電圧の最高値 (最低値) およびその分布状態などを求めることができるようになっている。

5. 計 算 例

前述の手法により、帝都高速度交通営団路線について実際にシミュレーションを試みた事例について簡単に紹介する。

5.1 計算条件

- (1) 車種: カム車, チョップ車 (回生なし) および チョップ車 (回生付き) の 3 種類
- (2) 運転間隔: 2.5 分, 5 分, 7 分の 3 種類
- (3) 乗車効率: 上記運転間隔に対応し, それぞれ 100 %, 50 %, 30 %
- (4) 上下線の始発時差: 運転間隔を T とするとき, それぞれについて, 0, $T/3$, $2T/3$ の 3 種類
- (5) 回生時制限電圧: 架線電圧上昇値の制限は 200 V および 400 V の 2 種類
- (6) 変電所内部抵抗: 容量により 0.0263 Ω および 0.0175 Ω の 2 種類
- (7) 線路抵抗: 0.0428 Ω/km

5.2 計算結果

- (1) 変電所電流の瞬時値

図 5.1 に変電所 A, B, C, D の負荷電流を 1 秒毎に計算してプロットした結果の一例を示す。

- (2) 変電所電流の平均値と尖頭値

車種による変化の 1 例を図 5.2 に示す。A. カム車, B. チョップ車 (回生なし), C. チョップ車 (回生付き) と次第に出力が減少している。さらにこまかい点としては, A と B の差はとくにせん頭値に大きく表われ, B と C の差はとくに平均値に大きく生じていることがわかる。

この例は 2.5 分間隔のものについてであるが, 5 分, 7 分間隔についても同様な傾向を示す。図 5.3 は平均値について運行間隔 (t_h) との関係を示したグラフである。

- (3) 架線電圧の分布

各負荷点における架線電圧変動の瞬時値 (1 秒ごとの値) の分布を 50 V ごとに区分して累計した結果の例が図 5.4 である。(a) のカム車では回生がないため電圧変動は常に負となるが, その大半は -200 V 以内にはいることがわかる。

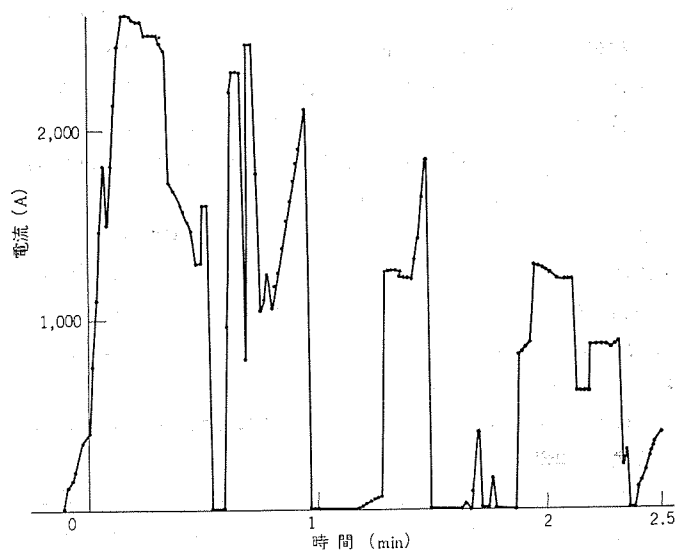


図 5.1 変電所電流の例
Example of substation load current.

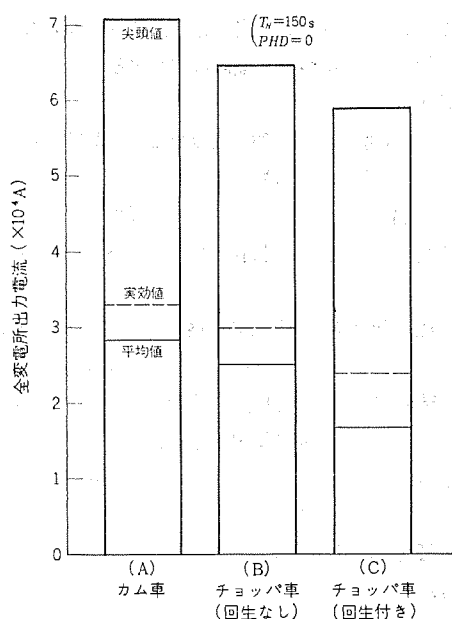


図 5.2 車種と全変電所出力の関係
Total substation power with types of cars.

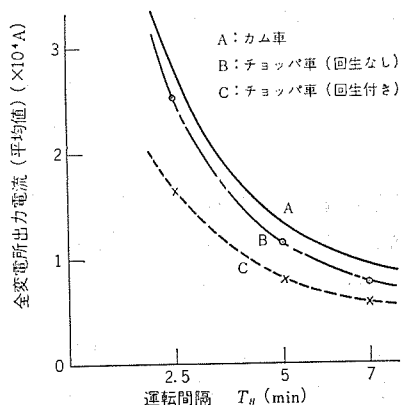


図 5.3 運転間隔と全変電所出力
Total substation power with operational headway.

(b) の回生付き チョップパ車の場合、制限電圧を 400 V としたときは降下側の大半は -200 V までの間に分布するが、制限電圧を 200 V とすると降下側の分布が多くなることがわかる。

(4) 線路損失と変電所内部損失

各車種について、運転間隔を変えた場合の線路損失 (TLL) と変電所内部損失 (SSL) をまとめて図 5.5 に示す。カム車と回生なしのチョップパ車ではいずれも後者が減少しているが、回生付きチョップパ車では回生電流が架線を往復するため TLL はカム車と同じ程度に戻ることがわかる。 SSL は変電所負荷が減少することから当然の結果として最も少なくなる。

5.3 回生付きチョップパ車の効果

(1) 力行電力

まず共に回生のないカム車とチョップパ車の所要電力を比べてみると、チョップパ車は起動抵抗損がないことにより約 12% の電力節減となることがわかった。

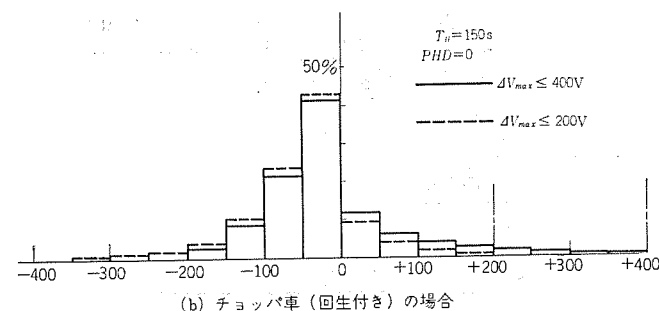
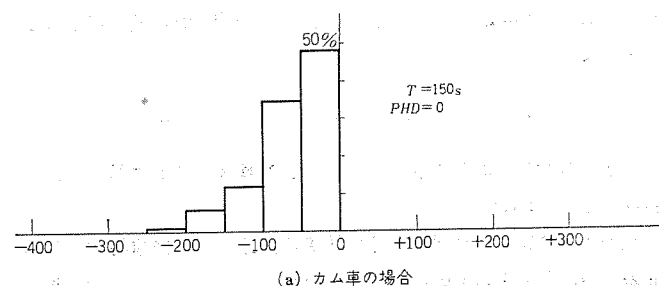


図 5.4 架線電圧変動の分布
Distribution of voltage variation in trolley wire

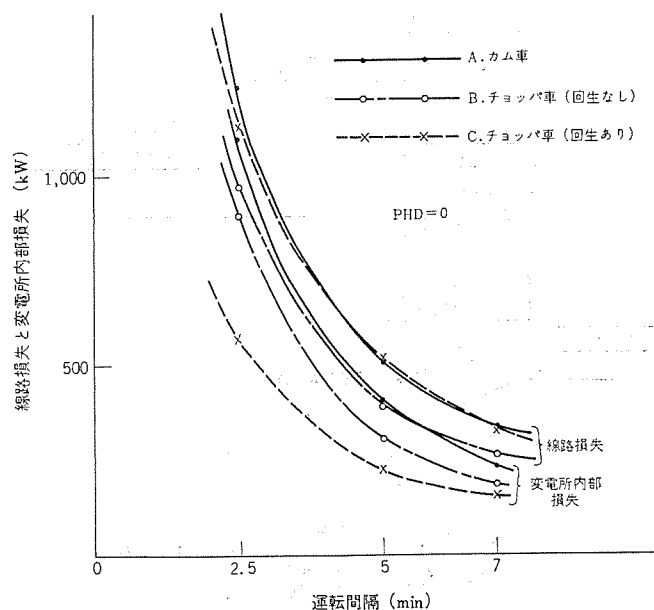


図 5.5 線路損失と変電所内部損失
Power losses in trolley wires and substations.

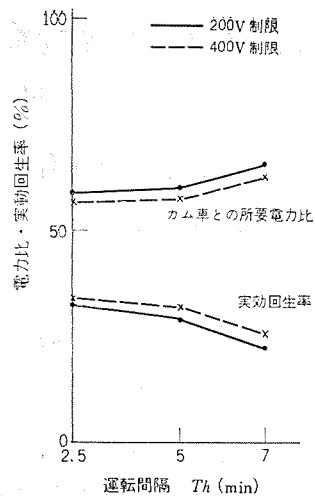


図 5.6 回生付きチョップ車の所要電力比と実効回生率
Power consumption ratio and effective regeneration ratio of chopper cars.

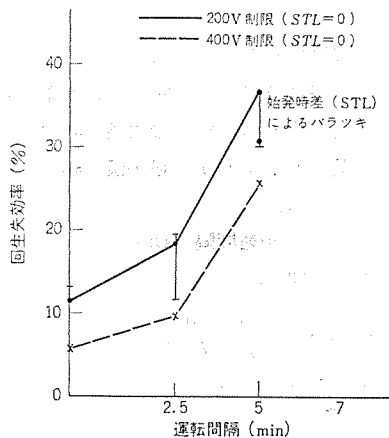


図 5.7 回生失効率
Factor of losing regenerative power.

(2) 回生電力と回生率

次に回生付きチョップ車が全線区を走行したときの力行に要した電力と回生が完全に行なわれたとしたときの制動時の回生電力の比を求めると約40%となっている。これは理想回生率であり、実際には変電所に逆変換器がないため回生電力が回収できない部分や、仮に力行車による回生電力の吸収が可能であっても、架線電圧上昇により制限されて回収不能となる部分がある。これらは運転ダイヤとの関連性があり、運転間隔が短くなるほど理想回生率に近づくことが予想される。図5.6にはこの実効回生率を示しているが、2.5分間隔のとき31~35%、5分間隔で28~32%、7分間隔では22~

26%となっている。

この値は上り下りの始発時差や、架線電圧上昇の制限値などによって、回生電流が制限されるために変動する。これを明確にした指標が回生失効率で、図5.7にこれを示す。ここには架線電圧上昇値を200Vの場合と400Vの場合について示した。一般に運転間隔が長くなると回生失効率は大きくなるが、電圧上昇を高い値まで許容すれば、回生失効率の上昇は押えられることがわかる。

(3) 変電所容量

シミュレーションの結果の1例からは、従来のカム車に比べて、回生付きチョップ車では全変電所の合成最大電力で約60%、全変電所の合成瞬時最大電力で約80%とそれぞれ減少する結果になっている。

実際には個々の変電所の容量は全変電所の合成電力で決まるわけではなく、また車の運用も色々な場合について考慮しなければならないが、少なくとも全車両が回生付きチョップ車に統一された場合相当の動力費の低減が期待できるといえよう。

6. む す び

非常に変動の多い電鉄負荷に対し、駅間走行の電流パターン、回路条件および運行ダイヤを組み合わせることにより、変電所負荷電流、平均出力、尖頭出力、実効出力、各種電力比、線路損失、架線電圧変動などを求めることのできるデジタル計算機によるシミュレーション手法と実例への適用結果について述べた。

本手法は、電流パターンと運行ダイヤが与えられるならば、種々の線路条件、列車制御方式、運転条件などについて、あらかじめ各種のデータを得ることができる。

したがってとくに新路線の建設やチョップ車のような新方式車両の採用のほかに、ダイヤ変更による輸送力の増強などに際しての変電所容量の推定、各種電気設備や車両機器の合理的かつ詳細な仕様決定に対する資料をえることができ、全体の輸送システムの合理的な計画、運用に貢献するものと考えられる。

最後に本方式の開発、適用に際し格別のご援助をいただいた帝都高速度交通営団の石原理事をはじめ、関係各位に厚くお礼申しあげる次第である。

参 考 文 献

- (1) 大野、今村：電鉄負荷のシミュレーションについて、電気関係関西支連大(昭42)
- (2) 大野、今村：電子計算機による電鉄変電所負荷のシミュレーション、第5回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム(昭43)

列車のプログラム自動運転と計算機制御

田村 坦之*

Programmed Train Control and Computer Control of Traffic Schedule

Central Research Laboratory

Hiroyuki TAMURA

An optimal feedback control system with position-varying gain has been developed applying optimal control theory for linear discrete systems and decomposition technique. The optimal position-varying loop gain is obtained by off-line computation. Hardware for this PTC system is realized as a simple logical equipment installed in each train.

Another problem studied in this paper is the control of the traffic schedule in keeping a string of trains with a central computer. A simple algorithm for the central has been developed to maintain headways between the adjacent trains. Since the information from the central computer is transmitted to the trains only at the stations, the data transmission facilities can be economically realized with this system.

1 ま え が き

鉄道輸送は、人と物の流通機関としてますますその重要度を高めており、輸送需要が年々増大している。この需要をまかなうためには、列車密度・列車速度を共に向上させる必要がある。その結果、従来の列車運転システムにおける列車乗務員、中央の運転指令員の負担の増大が著しく、列車運転システムの自動化が、重要な課題として検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。

列車運転システムの自動化の方式には大別して

(a) 車上制御方式

個々の列車の走行制御は車上の制御機器が担当し、中央からは列車群の総合的な制御を行ない、車上制御機能と中央制御機能を合理的に配分することによって、総合システムの自動化をはかる方式。

(b) 地上制御方式

個々の列車の走行制御、列車群の制御等をすべて中央の計算機を通して行なう方式。

があり、その利害得失が種々検討されている⁽³⁾。

本論文では車上制御方式をとりあげ、個々の列車のプログラム運転方式、および列車群制御において中央計算機のもつべきアルゴリズムを検討したので報告する。

2. 列車プログラム自動運転制御系の設計

2.1 問題の設定

車上プログラム式列車自動運転では、車上プログラムとして、

(a) 速度(v)―距離(s)プログラム

(b) 時間(t)―距離(s)プログラム

を持ち、両プログラムとも距離ベースのプログラムである。時間偏差(Δt)の測定および速度変化指令(Δv)は、一定のサンプリング距離(Δs)ごとに行なう。

記号

s : 距離 (km)

s_0 : 出発点の位置

$v(s)$: s 点通過時の列車速度 (km/h)

$t(s)$: s 点通過時の実時刻 (s)

$\tilde{v}(s)$: 標準速度―距離プログラム (km/h)

$\tilde{t}(s)$: 標準時間―距離プログラム (s)

$\Delta v(s)$: $\tilde{v}(s)$ を基準にした速度指令変化値 (km/h)

Δv_{\max} : 許容しうる $\Delta v(s)$ の最大値 (km/h)

Δv_{\min} : 許容しうる $\Delta v(s)$ の最小値 (km/h)

$\Delta t(s)$: $\tilde{t}(s) - t(s)$

Δs : サンプリング距離間隔 (km)

を用いると、これらの間には

$$t(s) = t(s_0) + \int_{s_0}^s \frac{3,600}{v(\xi)} d\xi \quad (2.1)$$

$$v(s) = \tilde{v}(s) + \Delta v(s) \quad (2.2)$$

$$t(s) = \tilde{t}(s) - \Delta t(s) \quad (2.3)$$

の関係がある。式 (2.2), (2.3) を式 (2.1) に代入し、整理すると、

$$\Delta t(s) = \Delta t(s_0) + \int_{s_0}^s \frac{3,600}{\tilde{v}^2(\xi)} \Delta v(\xi) d\xi \quad (2.4)$$

を得る。ここで $\Delta v(s)$ は $\tilde{v}(s)$ に対して十分小とし、1 に対して $(\Delta v(s)/\tilde{v}(s))^2$ 以上の項を無視した。

時間偏差 $\Delta t(s)$ を s に関して連続的に測定し、速度指令変化 $\Delta v(s)$ を s に関して連続的に与える場合には、両者の間には式 (2.4) またはこれと等価な

$$\frac{d}{ds} \Delta t(s) = \frac{3,600}{\tilde{v}^2(s)} \Delta v(s) \quad (2.5)$$

の関係があるが、制御は一定のサンプリング距離 Δs ごとに行なうものとしているので、式 (2.4) または式 (2.5) を各サンプリング地点で満足する関係に変形する必要がある。今サンプリング地点に 0, 1, ..., K なる番号を打ち、式 (2.4) または式 (2.5) を各サンプリング地点で満足する関係になおすと、

$$\Delta t(k+1) = \Delta t(k) + \gamma(k) \Delta v(k) \quad (2.6)$$

$$\gamma(k) = \int_{k\Delta s}^{(k+1)\Delta s} \frac{3,600}{\tilde{v}^2(\xi)} d\xi \quad (2.7)$$

$$k=0, 1, 2, \dots, K$$

をうる。 $\Delta v(k)$ に対する制限として

$$\Delta v_{\min} \leq \Delta v(k) \leq \Delta v_{\max} \quad (2.8)$$

を考慮しなければならない。

制御系の最適設計を行なうための評価関数を

$$J = \sum_{k=1}^K \{q(k) \Delta t^2(k) + r(k-1) \Delta v^2(k-1)\} \dots\dots\dots (2.9)$$

とする。これは、列車走行の始点から終点にいたる間の時間偏差の自乗和と、与えた速度指令変化の自乗和の合計を意味する。ただし $q(k)$, $r(k)$ はおのおの時間偏差と速度指令変化にかかる可重をあらわす。

以上は式 (2.6), (2.7), (2.8) で与えられる変係数離散形線形システム (Time Varying Discrete Linear Dynamical System) において、式 (2.9) の評価関数を最小にする列車自動運転の global な制御に対する数式モデルである。

2.2 線形系の最適制御

本節では、本論文に適用する理論的な結果をまとめる。

(a) 直接法⁽⁴⁾⁽⁵⁾

システムの状態方程式が線形で、

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \Gamma(k)u(k) \dots\dots\dots (2.10)$$

ただし

$x(k)$: n 次元状態ベクトル

$u(k)$: m 次元制御ベクトル

$\Phi(k)$: $n \times n$ 行列

$\Gamma(k)$: $n \times m$ 行列

で与えられるものとする。また評価関数が二次形式で

$$J = \sum_{k=1}^K \{x'(k)Q(k)x(k) + u'(k-1)R(k-1)u(k-1)\} \dots\dots\dots (2.11)$$

ただし

$Q(k)$: $n \times n$ 非負定値対称行列

$R(k)$: $m \times m$ 正定値対称行列

x' : x の転置

とすると、最適制御 $\hat{u}(k)$ は negative feedback の形で次のように求められる。

$$\hat{u}(k) = -W(k)x(k) \dots\dots\dots (2.12)$$

ただし

$$W(k) = [R(k) + \Gamma'(k)P(k+1)\Gamma(k)]^{-1}\Gamma'(k)P(k+1)\Phi(k) \dots\dots\dots (2.13)$$

$P(k)$ は次の Riccati 方程式

$$\begin{aligned} P(k) &= Q(k) + \Phi'(k)P(k+1)\Phi(k) \\ &\quad - \Phi'(k)P(k+1)\Gamma'(k)[R(k) + \Gamma'(k)P(k+1)\Gamma(k)]^{-1} \\ &\quad \times \Gamma'(k)P(k+1)\Phi(k) \dots\dots\dots (2.14) \end{aligned}$$

$$P(K) = Q(K)$$

をみたす $n \times n$ 対称行列である。

(b) 分解原理のアルゴリズム⁽⁶⁾⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \text{Minimize}_{x_k} \{ &\sum_{k=1}^K f_k(x_k) ; \sum_{k=1}^K A_k x_k = b, x_k \in T_k, \\ &k=1, 2, \dots, K \} \dots\dots\dots (2.15) \end{aligned}$$

ただし

x_k : n_k 次元ベクトル

$f_k(x_k)$: x_k について strictly convex で 2 回微分可能

T_k : $T_k = \{x_k : g_k(x_k) \geq 0, g_k = \text{col}(g_{k1}, \dots, g_{km})\}$ とあらわされ、 g_k は concave で 2 回微分可能。 T_k は有界

A_k : $M \times n_k$ 行列

b : M 次元ベクトル

で与えられる線形の制限条件のもとで、非線形な評価関数を最小に

する非線形計画法の問題を、分解原理で解くアルゴリズムは次で与えられる。

(a) サブシステムレベルの最適化

$$\begin{aligned} \text{Minimize}_{x_k} \{ &f_k(x_k) + \lambda_k' x_k : x_k \in T_k \} \dots\dots\dots (2.16) \\ &k=1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

を解いて $x_k(\lambda_k)$ を求める。ここで λ_k は分解原理適用のさいに導入される補助パラメータ (n_k 次元ベクトル) であり、この初期値は任意設定できる。

(b) センタレベルの協調

$$e(\lambda) = \sum_{k=1}^K A_k x_k(\lambda_k) - b \neq 0 \dots\dots\dots (2.17)$$

ならば

$$\frac{d\lambda_k}{d\tau} = A_k' e(\lambda), k=1, 2, \dots, K \dots\dots\dots (2.18)$$

に従ってパラメータ λ_k の値を変更して (a) にもどる。もし $e(\lambda) = 0$ ならば計算停止。

2.3 プログラム運転制御系の最適設計

前節で述べた理論を応用して、列車プログラム自動運転の時間偏差制御系の最適設計を行なう。すなわち式 (2.6), (2.7), (2.8) のもとで、式 (2.9) を最小にする制御 $\Delta v(k)$, $k=0, 1, \dots, K-1$ を求める。

(a) 直接法による設計

2.2 節 (a) の結果を適用すると、サンプリング地点 k において、 $\Delta t(k)$ なる時間偏差を検知したときに与えるべき速度変化指令値 $\Delta \hat{v}(k)$ は、

$$\Delta \hat{v}(k) = -w(k) \Delta t(k) \dots\dots\dots (2.19)$$

で与えられる。ただしゲイン $w(k)$ は

$$w(k) = [r(k) + p(k+1)\gamma^2(k)]^{-1}\gamma(k)p(k+1) \dots\dots\dots (2.20)$$

$p(k)$ は次の Riccati 方程式

$$\begin{aligned} p(k) &= q(k) + p(k+1) \\ &\quad - [r(k) + p(k+1)\gamma^2(k)]^{-1} \cdot \gamma^2(k)p^2(k+1) \dots\dots\dots (2.21) \end{aligned}$$

$$p(K) = q(K)$$

をみたす。式 (2.19), (2.20), (2.21) はおのおの式 (2.12), (2.13), (2.14) に対応している。

式 (2.19) は式 (2.8) の制限条件を無視したときの最適制御を与える。そこで実際に列車に与える速度指令変化値としては、

$$\Delta v(k) = \begin{cases} \Delta v_{\min}, & \Delta \hat{v}(k) \leq \Delta v_{\min} \\ \Delta \hat{v}(k), & \Delta v_{\min} \leq \Delta \hat{v}(k) \leq \Delta v_{\max} \\ \Delta v_{\max}, & \Delta \hat{v}(k) \geq \Delta v_{\max} \end{cases} \dots\dots\dots (2.22)$$

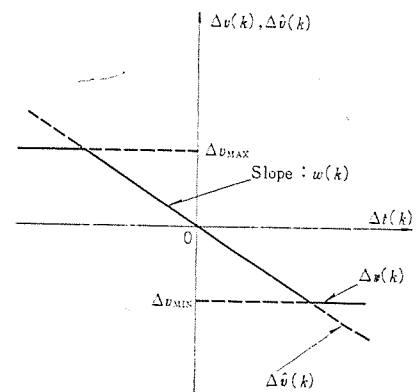


図 2.1 時間偏差と速度指令変化値の関係
Relation between time deviation and velocity control.

を与える。図 2.1 に $\Delta v(k)$, $\Delta v'(k)$, $w(k)$ の関係を示す。

(b) 分解原理による設計

ここでは式 (2.8) の制限条件を考慮して最適設計を行なう。式 (2.6), (2.7), (2.8), (2.9) において

$$\begin{aligned} x_k &= \begin{bmatrix} \Delta t(k) \\ \Delta v(k-1) \end{bmatrix}, \quad k=1, 2, \dots, K \\ f_k(x_k) &= q(k) \Delta t^2(k) + r(k-1) \Delta v^2(k-1) \triangleq x_k' Q_k x_k \\ k &= 1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

$$Q_k = \begin{bmatrix} q(k) & 0 \\ 0 & r(k-1) \end{bmatrix}, \quad k=1, 2, \dots, K$$

$$A_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 1 & -\gamma(k-1) \\ -1 & 0 \\ 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \leftarrow k \text{ 行目}, \quad k=1, 2, \dots, K-1$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 1 & -\gamma(k-1) \end{bmatrix}, \quad k=K$$

$$b = \begin{bmatrix} \Delta t(0) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$T_k = \{x_k : \Delta v_{\min} \leq \Delta v(k-1) \leq \Delta v_{\max}\}, \quad k=1, 2, \dots, K$$

なるおきかえを行なうことによって、もとの問題は式 (2.15) の形におきかわり、分解原理の適用が可能となる。

(i) サブシステムレベルの最適化

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \{q(k) \Delta t^2(k) + r(k-1) \Delta v^2(k-1) \\ & + \lambda_1(k) \Delta t(k) + \lambda_2(k-1) \Delta v(k-1)\}; \\ & \Delta v_{\min} \leq \Delta v(k-1) \leq \Delta v_{\max} \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$k=1, 2, \dots, K$$

ここで $\lambda_1(k)$, $\lambda_2(k-1)$ の初期値を共に 0 に選ぶ。

$$\Delta v'(k-1) = -\lambda_2(k-1)/2r(k-1), \quad k=1, 2, \dots, K$$

とおくと式 (2.23) の解は簡単に求められ、

$$\Delta t(k) = -\lambda_1(k)/2q(k) \quad (2.24)$$

$$\Delta v(k-1) = \begin{cases} \Delta v_{\min}, & \Delta v'(k-1) \leq \Delta v_{\min} \\ \Delta v'(k-1), & \Delta v_{\min} \leq \Delta v'(k-1) \leq \Delta v_{\max} \\ \Delta v_{\max}, & \Delta v'(k-1) \geq \Delta v_{\max} \end{cases} \quad (2.25)$$

$$k=1, 2, \dots, K$$

で与えられる。

(ii) センタレベルの協調

$$\begin{aligned} e(\lambda) &= \sum_{k=1}^K A_k x_k(\lambda) - b \\ &= \begin{bmatrix} \Delta t(1) - \Delta t(0) - \gamma(0) \Delta v(0) \\ \vdots \\ \Delta t(K) - \Delta t(K-1) - \gamma(K-1) \Delta v(K-1) \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} e(1) \\ \vdots \\ e(K) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.26)$$

誤差ベクトル $e(\lambda)$ のノルムを

$$\|e(\lambda)\|^2 = e(1)^2 + e(2)^2 + \dots + e(K)^2 \quad (2.27)$$

とし、十分小さい ε に対して

$$\|e(\lambda)\|^2 > \varepsilon$$

ならば

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} \frac{d\lambda_k}{d\tau} &\triangleq \frac{d\lambda_1(k)}{d\tau} \\ \frac{d\lambda_2(k-1)}{d\tau} \end{aligned} \right\} &= A_k' e(\lambda) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\gamma(k-1) & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(1) \\ \vdots \\ e(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

すなわち

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_1(k)}{d\tau} = e(k) - e(k+1), & e(K+1) = 0 \\ \frac{d\lambda_2(k-1)}{d\tau} = -\gamma(k-1)e(k) \end{cases} \quad (2.28)$$

$$k=1, 2, \dots, K$$

に従って λ_k を修正し (i) にもどる。もし $\|e(\lambda)\| \leq \varepsilon$ ならば計算停止。

(c) 分解原理におけるステップ幅の選び方

式 (2.28) を差分近似し、

$$\begin{aligned} (\lambda_1(k))_{n+1} &= (\lambda_1(k))_n + \{e(k)_n - e(k-1)_n\} \Delta \tau_n \\ (\lambda_2(k-1))_{n+1} &= (\lambda_2(k-1))_n - \gamma(k-1)_n e(k)_n \Delta \tau_n \end{aligned} \quad (2.29)$$

に従って補助パラメータ $\lambda_1(k)$, $\lambda_2(k-1)$ を修正する。ここで n は繰返しステップを示す。

理論的には、ステップ幅 $\Delta \tau_n$ は、 $\|(e(\lambda))_{n+1}\|^2$ が $\Delta \tau_n$ に関して最小になるよう選ぶべきであるが、 $e(\lambda)$ が λ に関する陽関数ではないのでこれは困難である。ここでは繰返し計算の各ステップにおいて、まず $\Delta \tau_n = \Delta \tau$ とする。 $\Delta \tau$ はステップ幅として大きい値を選ぶ、この結果、

$$\|(e(\lambda))_{n+1}\|^2 < \|(e(\lambda))_n\|^2 \quad (2.30)$$

を得れば、この $\Delta \tau$ を n ステップ目のステップ幅に選ぶ。もし式 (2.30) が得られなければ、 $\Delta \tau_n = \frac{1}{2} \Delta \tau$ として再び式 (2.30) を満たすか否かをチェックする。はじめて式 (2.30) を満たす $\Delta \tau_n$ を n ステップ目のステップ幅として採用する。式 (2.28) または式 (2.29) は、誤差ベクトルのノルム $\|e(\lambda)\|^2$ を、各ステップごとに減少させるための最大傾斜法のアルゴリズムを与えている。

2.4 直接法による結果と分解原理適用の結果との比較

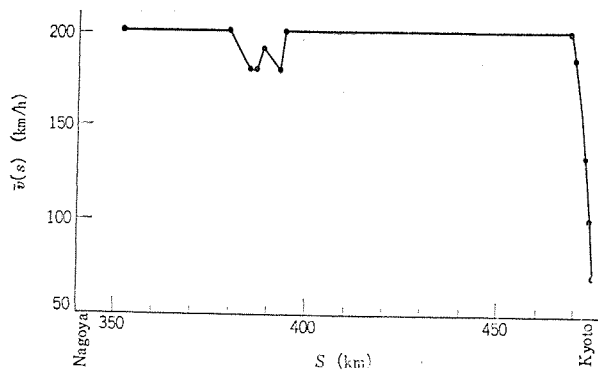
直接法による設計では、

(a) 速度指令変化値に対する制限式 (2.8) を無視して、時間偏差と速度指令変化値の関係を規定する制御系のゲインを求める。

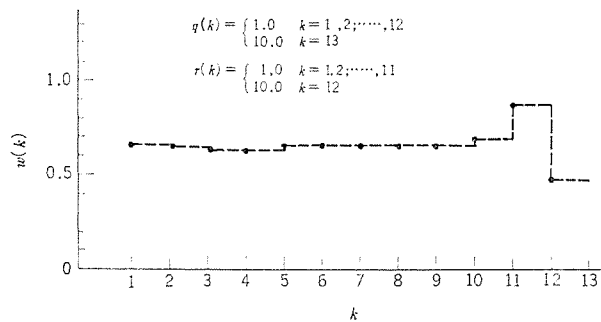
(b) (a) で得たゲインにもとづいて速度指令変化値を順次求め、これが制限値を越えたときは制限値を優先して採用する。という手順に従うので、この結果得られる制御は理論的にはかならずしも最適な制御ではない。

一方、分解原理を適用して得られる結果は、速度指令変化値の制限を考慮して、各サンプリング地点における制御が順次規定され、かつ理論的に最適性が保証される。したがってここでは、直接法によって簡略に得られる結果の最適性を裏づけるために分解原理を適用する。

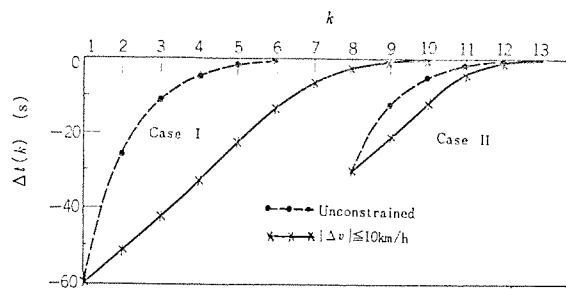
上記の手法を東海道新幹線試験電車に適用して得た結果を、図 2.2 および図 2.3 に示す。図中 (a) に示す標準ランカウに従って走行する列車において、(c) に示す時間偏差を検知したときに加えるべき速度指令変化値を (d) に示す。(b) は時間偏差と速度指令変化値の関係を規定するゲインの値を示している。図 2.2 にはサンプリング距離 Δs を 10 km に選んだ場合、図 2.3 には 5 km に選んだ



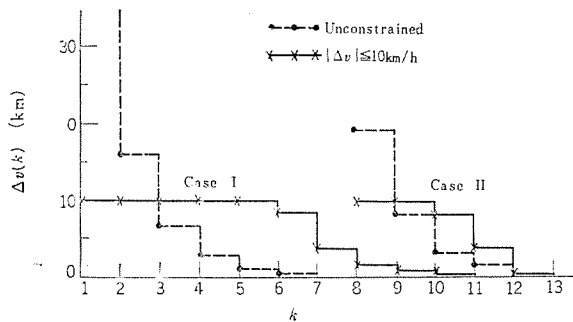
(a) Standard velocity



(b) Gain



(c) Time deviation



(d) Velocity control

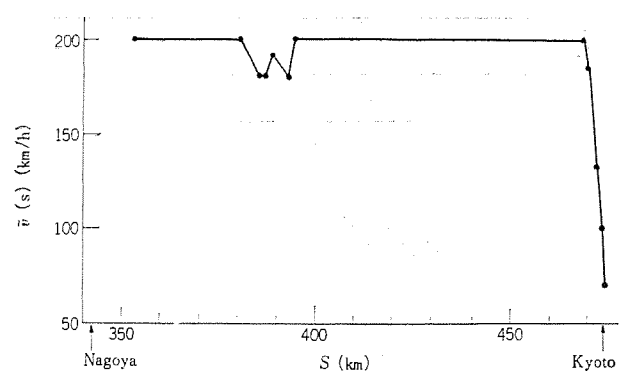
図 2.2 プログラム自動運転システムの最適設計：東海道新幹線例1 $\Delta s = 10$ km

Optimal sampled-data control of programmed train operation (PTO) system : new Tokaido-line, example 1 $\Delta s = 10$ km.

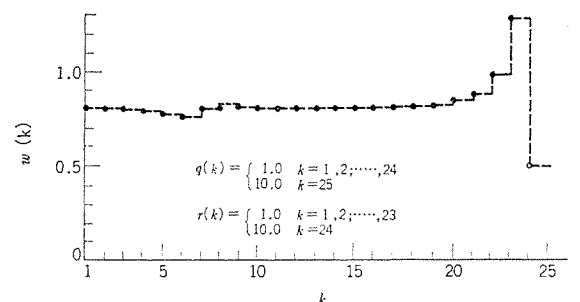
表 2.1 直接法および分解原理によって得た評価関数値の比較 $\Delta s = 10$ km

Comparison of performances obtained by direct method and decomposition technique $\Delta s = 10$ km.

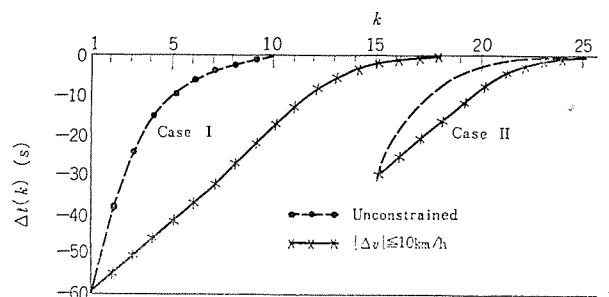
		Direct method	Decomposition technique		
		J	J	$\ e(\lambda)\ ^2$	No. of iteration
Case I	Unconstrained	2.58×10^3	2.58×10^3	6.72×10^{-3}	15
	$\Delta v_{\min} \leq \Delta v(k) \leq \Delta v_{\max}$	6.74×10^3	6.69×10^3	9.58×10^{-3}	147
Case II	Unconstrained	6.48×10^2	6.46×10^2	9.40×10^{-3}	15
	$\Delta v_{\min} \leq \Delta v(k) \leq \Delta v_{\max}$	8.94×10^2	8.87×10^2	9.63×10^{-3}	35



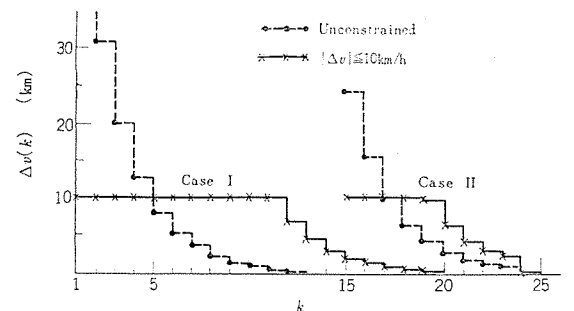
(a) Standard velocity



(b) Gain



(c) Time deviation



(d) Velocity control

図 2.3 プログラム自動運転システムの最適設計：東海道新幹線例2 $\Delta s = 5$ km

Optimal sampled-data control of programmed train operation (PTO) system : new Tokaido-line, example 2 $\Delta s = 5$ km.

場合の結果を示す。時間偏差の収束の様子はよく一致しており、実用的に名古屋～京都間 120 km 程度の線区に対しては、サンプリング距離間隔は 10 km 程度で十分であると言える。図 2.2 および図 2.3 に示しうる範囲において、直接法によって得た結果と分解原理適用の結果はまったく一致した。表 2.1 に両手法を適用して得た評価関数値の値を比較しているが、ここでも両者の結果がよく一致している。IBM 360/50 による計算時間は直接法で約 10 秒/1 case、分解原理で約 60 秒/1 case であった。

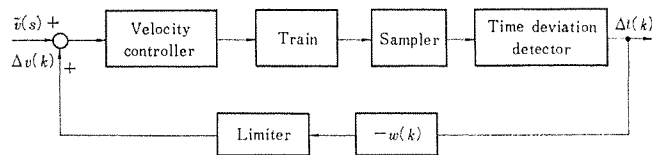


図 2.4 時間制御系のブロック図
Block diagram of a time deviation control system.

以上に示した検討の結果、速度制御に制限のある場合にも、直接法による簡略な設計で十分満足な結果が得られることがわかった。

2.5 プログラム運転制御系の構成

プログラム運転における時間制御系の構成を図 2.4 に示す。標準ラッパのデータにもとづいて、直接法によりゲイン $w(k)$ を off-line で求めておく。s-v プログラム、s-t プログラムを記憶する論理装置をもうけ、同時に $w(k)$ の値を記憶させておく。この論理装置を車上に積載し、地上に設置される地上子（サンプラー）を検知するたびに時間偏差 $\Delta t(k)$ を検出し、論理装置から読み出されるゲインの値を用いて、速度指令変化値 $\Delta v(k)$ を求め列車にフィードバックする。以上に示すごとく時間制御の制御系は、可変利得形比例制御系で構成される。s-v プログラムの代わりに ATC の制限速度を用いると、論理装置に s-v プログラムを記憶する必要がなく、記憶する情報量を減らしうるので経済的に有利であるが、制御性能は低下する。

3. 計算機による列車群制御

列車ダイヤが乱れたときに、これを正常ダイヤにもどす回復運転の問題は、列車群制御の中心課題である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。回復運転のための制御は路線を走行している複数の列車を対象にするので、列車全体の運行をコントロールする機能が必要となる。

本文で述べる回復運転の基本的な考え方として

- (a) 運転ダイヤが乱れたときに、まず全列車の総合的な運転時隔の変動を小さくする。
- (b) 回復余力の範囲内で個々の列車の時間偏差の制御を行なう。をあげることができる。(a)のための制御は、地上に設置する制御用計算機が担当し、計算機から列車への制御指令は駅のみであたえる。(b)のための制御は、車上に積む制御器（たとえば前節で議論したプログラム運転装置）が担当し、個々の列車単位で行なわせる。

3.1 地上計算機の制御機能

列車遅延が生じると駅での乗客が増加し、さらに、遅延を増大させ列車ダイヤをますます混乱させる結果になるので、次駅までに遅れ時分を回復できない遅延列車が検出されたときに、先行列車を故意に駅で待避させ、運転時隔の変動をそろえる。先行列車の駅出発に関する指令を地上の制御用計算機が担当するが、これに必要な計算機の入出力情報は次のとおりである。

(a) 入力情報

- (i) 遅延発生場所
- (ii) 遅延列車名
- (iii) 遅延度合い
- (iv) 遅延発生地点と各先方駅間の走行している列車台数

(b) 出力情報

遅延列車の先方を走行している各列車に対して、どの駅で何分待避させるかに関する情報。

計算機から各列車への制御指令は駅のみで与える。

個々の列車の運転を制御する車上制御機能と、地上の制御用計算

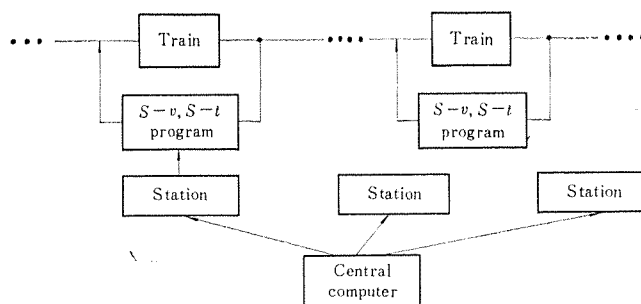


図 3.1 列車群制御システム
Control system for a string of moving trains.

表 3.1 地上計算機の入力情報、 $\Delta T_0=6$ 分、その 1
Input data for central computer, $\Delta T_0=6$ min, case 1.

Station	j	$S_j(\text{km})$	$X(S_0, S_j)$	$\alpha_j(\text{min/km})$
A	0	0		0.06
B	1	50	1	0.04
C	2	60	2	0.05
D	3	90	4	0.04
E	4	100	5	0.04
D	5	110	5	0.05
C	6	140	7	0.04
B	7	150	8	0.06
A	8	200	10	0.04

機による地上制御機能の関係をあらわすブロック図を図 3.1 に示す。

3.2 地上制御のアルゴリズム

はじめに本節に用いる記号を説明する。

s : 位置

s_j : 列車遅延発生地点 (s_0) が先方駅に順次番号をつけたときの j 駅的位置

$f_i(s)$: 地点 s における i 列車 (最初に遅延した列車を 0 列車として、先行列車に手前から順番に番号をつける) の遅延時分

α_j : j 駅と $(j+1)$ 駅区間の単位距離走行中に回復する平均回復時分 (回復能力)

β_j : j 駅における乗客増加による遅延時分の増加率
 ΔT_0 : 初期遅延発生時分

$x(s_0, s_j)$: 列車遅延発生地点と j 駅の間にある列車台数

$\text{Max}(A, B)$: A と B の大きいほうの値

地上制御のアルゴリズムとしては、地上計算機の情報処理量ができるだけ少なく、地上設備 (情報伝送装置・地上計算機) の規模ができるだけ小さく、かつ有効な制御機能を果すものが要求される。

(a) $x(s_0, s_j) \geq j, j=1, 2, \dots$ を満足するとき

列車遅延発生地点 (s_0) と j 駅 (s_j) の間にある列車台数 $x(s_0, s_j)$ が、すべての j に対して j に等しいかあるいは j を上回っているとき、地上制御のアルゴリズムはもっとも簡単になる。この場合には先行列車に対して順次、

$$f_j(s_j) = \text{Max}(0, f_{j-1}(s_j)), j=1, 2, \dots \quad (3.1)$$

で与えられる待避時分を与えていく。ただし

$$f_0(s_0) = \Delta T_0$$

$$f_0(s) = \text{Max}(0, -\alpha_k(s-s_k) + f_0(s_k),$$

$$s_k \leq s \leq s_{k+1}, k=0, 1, 2, \dots \quad (3.2)$$

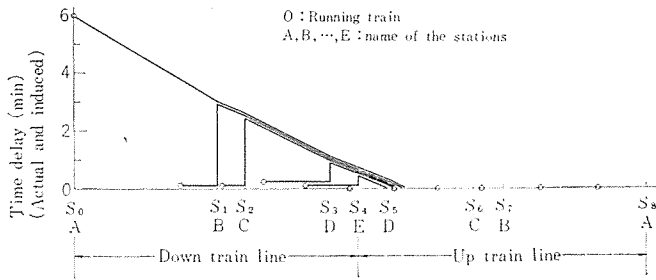


図 3.2 回復運転動作その 1, $x(s_0, s_j) \geq j, \forall j$
Schedule keeping, case 1, $x(s_0, s_j) \geq j, \forall j$.

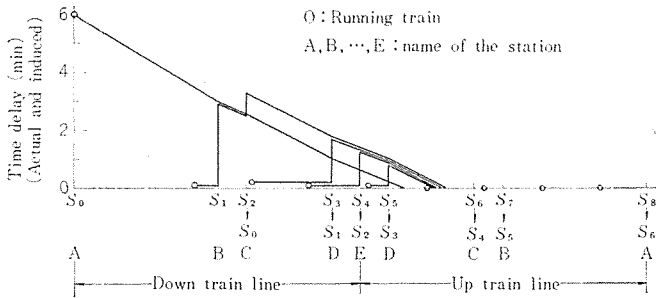


図 3.3 回復運転動作その 2, $x(s_0, s_2) < 2$
Schedule keeping, case 2, $x(s_0, s_2) < 2$.

表 3.2 地上計算機の入力情報, $\Delta T_0 = 6$ 分, その 2
Input data of central computer, $\Delta T_0 = 6$ min, case 2.

Station	j	S_j (km)	$X(s_0, s_j)$	α_j (min/km)	β_j
A	0	0		0.06	0.3
B	1	50	1	0.04	0.2
C	2→0	60	1(<2)	0.05	0.3
D	1	90	2	0.04	0.2
E	2	100	2	0.04	0.3
D	3	110	3	0.05	0.2
C	4	140	4	0.04	0.3
B	5	150	5	0.06	0.2
A	6	200	7	0.04	0.3

$$f_j(s) = \begin{cases} 0, & s < s_j \\ \text{Max}(0, f_{j-1}(s_j)), & s = s_j \\ \text{Max}(0, -\alpha_{j+k}(s - s_{j+k}) + f_j(s_{j+k})), & s_{j+k} \leq s \leq s_{j+k+1}, k=0, 1, 2, \dots \\ & j=1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3.3)$$

式 (3.2), (3.3) を用いて式 (3.1) を順次計算し, j 駅における j 列車の待避時分を求める。

$$f_j(s_j) = 0 \quad (3.4)$$

を得たら計算を停止する。図 3.2 に一例を示す。本計算を実施するのに表 3.1 のデータを用いた。

上記のアルゴリズムは, 各列車の各区間における平均回復余力 α_j を用いて, 遅延列車の各駅到着時刻を予測計算し, 各列車の駅における待避時分を計算するものである。

(b) $x(s_0, s_j) \geq j, \forall j$ を満足しないとき

($m-1$) 駅までは

$$x(s_0, s_j) \geq j, j=1, 2, \dots, m-1$$

を満足し, m 駅ではじめて

$$x(s_0, s_m) < m$$

となった場合, すなわち m 駅において待避させる列車が存在しない

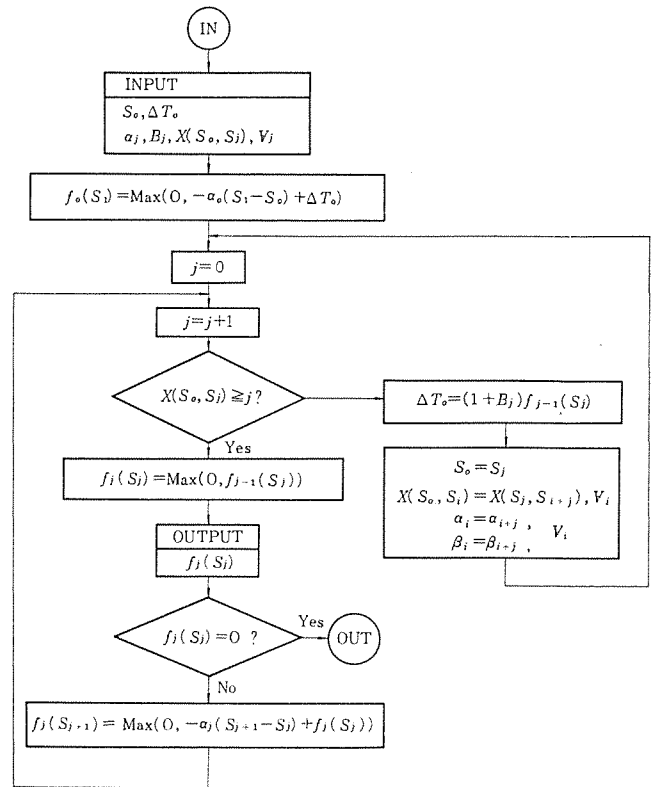


図 3.4 地上制御のための計算のフローチャート
Flow chart of central computation.

場合には, ($m-1$) 駅まで (a) の手順に従って各列車の各駅における待避時分を求める。($m-1$) 列車は m 駅において乗客増加による遅延増大を招く。新たに

$$\Delta T_0 = (1 + \beta_m) f_{m-1}(s_m) \quad (3.5)$$

に設定し, m 駅を初期遅延発生地点とみなし ($m-1$) 列車を 0 列車に設定して (a) に戻る。図 3.3 に一例を示す。ここでは回復完了までに $x(s_0, s_j) < j$ が 1 回起こった場合の例を示している。本計算を実施するのに表 3.2 のデータを用いた。

上記のアルゴリズムは, ある駅において待避させる列車が存在しないときに, その駅における乗客増加による遅延時分の増加率 β_j を用いて列車遅延時分を予測計算し, この駅を新たに初期遅延発生地点と見なして (a) に戻るものである。

(a) および (b) からなる地上制御のアルゴリズムをフローチャートにまとめて図 3.4 に示す。複数個の列車遅延が同時に検出された場合には, 遅延時分の最大値をとる地点を基準にして, うえに示したアルゴリズムをそのまま使うことができる。

3.3 特長

前節に示した地上制御のアルゴリズムは, 地上の制御用計算機の負担をできるだけ軽くし, 地上制御のアルゴリズムを簡略化するという立場で開発したものである。ここで車上の制御器は, 常時個々の列車の遅延時分を検出し走行速度を制御することによって回復動作をとる。遅延時分を次の停車駅到着までに回復しきれないときに, 地上計算機のプログラムが動作し, 先行列車の各駅における待避時分を計算し各駅に指令を送る。

本方式の特長を列挙すると,

(a) 地上制御機能と車上制御機能を合理的に配分することによって, 地上制御のアルゴリズムが簡略にまとめられた。

(b) 地上計算機から各列車への情報伝達が駅のみで行なわれるので, 地上設備 (情報伝送装置・地上計算機・端末機器など) の規

模が小さくてすむ。

(c) 運転ヘッドの小さい列車群制御に適している。
などをあげることができる。

4. む す び

列車運転システムの自動化の一方式として車上制御方式をとりあげ、車上プログラム式列車自動運転における時間制御系の最適設計法、および地上計算機による列車群の一制御方式を論じた。

プログラム運転制御系の最適設計法に関しては、ここで提案した方式を東海道新幹線電車の例に適用した結果、直接法によって設計した結果と分解原理適用の結果はよく一致し、速度指令変化値に制限のある場合にも、直接法による簡略な設計で十分満足な制御が得られることが実証された。速度指令による時間制御系は、可変利得形比例制御系を構成することにより、最適設計を行なえるという結論を得た。

一方、ここで提案した列車群制御方式では、個々の遅延列車の回復運転動作を車上プログラムが担当し、地上計算機は全列車の総合的な運転時隔の変動をそろえるための指令値を計算し、駅を介して各列車に制御指令を送るという簡略な方式である。地上計算機から各列車への情報伝送を駅間でも行なって先行列車を制御すると、駅での列車待避時分を減らすことができ、乗客の心理状態を緩和することができるが、回復性能は改善されない。したがって回復性能の点から、先行列車の制御は駅のみで行なえば十分であると言える。

終わりに、本研究に対して種々のご援助願った国鉄車両設計事務所 井上主任技師、三菱電機社内関係各位、プログラムの作成にご協力いただいた大阪大学基礎工学部 津村和夫君に心より感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 小原, 喜多, 石田, 鳥居: プログラムによる列車の自動運転, 三菱電機技報, 37, No. 9, pp. 1,171-1,177 (昭38)
- (2) L. P. Hajdu, K. W. Gardiner, H. Tamura and G. L. Pressman: Design and Control Consideration for Automated Ground Transportation System, Proceedings of IEEE, 56, No. 4, pp. 493-513 (1968)
- (3) プログラム制御による列車自動運転に関する基本的研究報告書, 日本鉄道サイバネティクス協議会 (昭42-3)
- (4) R. E. Kalman and R. W. Koepcke: Optimal Synthesis of Linear Sampling Control Systems Using Generalized Performance Indexes, Trans. ASME, 80, No. 6, pp. 1,820-1,826 (1958)
- (5) R. E. Larson: Computational Aspects of Dynamic Programming, IEEE International Convention Record, Part 3 Automatic Control, pp. 15-26 (1967)
- (6) P. Varaiya: A Decomposition Technique for Nonlinear Programming, IBM Research Report, RJ-345 (1965)
- (7) 児玉, 馬場: Varaiya 氏の分解原理による線形系の最適制御, 電気学会雑誌, 88-7, No. 958, pp. 1,329-1,338 (昭43)
- (8) W. S. Levine and M. Athans: On the Optimal Error Regulation of a String of Moving Vehicles, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-11, No. 3, pp. 355-361 (1966)
- (9) S. Yamazaki: Train Operation System, IFAC Symposium on Systems Engineering for Control System Design, August 25-28, Tokyo (1965)



特許と新案

重複表示装置

発明者 河野 隆一

この発明は、テレビ画像と計算機等から得られる数値等の文字を同時に同一の画面上に表示する重複表示装置に関するものである。

図はこの発明の重複表示装置の結線図で、発振器Oはテレビジョン受像機Rの受像管の電子ビームが、次々の画素間を移動する時間より短いか等しい周期を有する高周波を発振する発振器で、X(Y)軸カウンタCX(CY)はこの発振器Oの出力波形を計数して、その値が $X_{P1}, \dots, X_{Pn}(Y_{P1}, \dots, Y_{Pn})$ に等しくなるごとに出力パルス $X_P(Y_P)$ を、また画面の画素間隔に等しい時間ごとに出力パルス $X_C(Y_C)$ を発生する。このX(Y)カウンタCX(CY)は、水平(垂直)同期検出器DH(DV)を介して受像機Rの水平(垂直)同期パルスによってリセットされる。

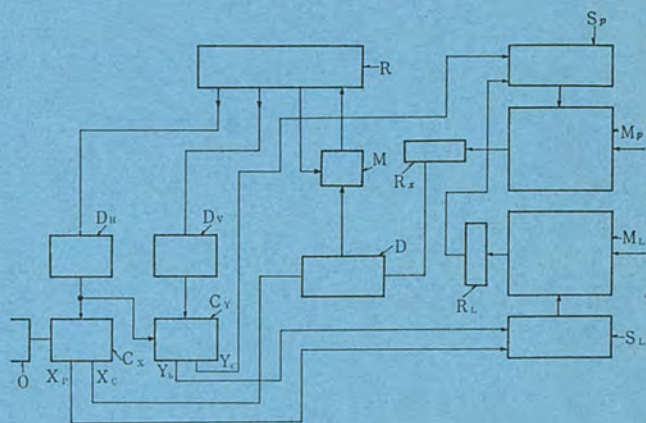
X軸カウンタCXの出力 X_P およびY軸カウンタCYの出力 Y_P は、位置選択装置SLに与えられる。この選択装置SLは、表示記号記憶部MLを上記のパルス X_P, Y_P によって画面と同期して走査し、画面に文字等を表示すべき情報が記憶された位置が走査されたとき、表示すべき文字等の種類を表わす情報Zが記号レジスタRLに送られる。

記号パターン記憶部MPは記号レジスタRLに与えられた情報によりZ方向すなわち文字の種類がその位置選択装置SPにより選択され、そのときの Y_C' に対応する X_C' 方向の蓄積された情報を同時に読

み出す。この信号はXパターンレジスタRXに蓄積され、これがX軸カウンタCXからの入力パルス X_C に応じて順次読み出され、検出器Dにおいて、XパターンレジスタRXの各けたANDに対応して設けられたAND回路を順次に動作させ、XパターンレジスタRXの情報がONであるごとにOR回路を経て出力端に送り出す。

この出力は受像機R中の映像信号を変調器Mによって変調して受像画面上に文字等を表示する。

(特許第532751号) (久保記)



数値制御装置における円弧内挿近似演算方式

発明者 松本 大四・黒田 泰次

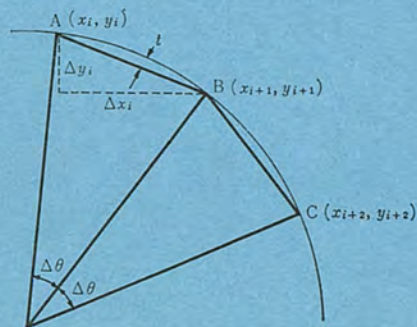
この発明は、たとえば工作機械の輪郭切削において円弧補間をする場合の演算回路を簡単化するための近似演算方式に関するものである。従来、円弧補間をする場合外部計算機によって図に示すような直線近似を行ない、多くの直線指令として制御装置に与えていた。そのためプログラムが非常に複雑であった。そこでこの発明においては、上述の直線近似の演算を簡単な近似式に基づいて制御機内で行なわせるようにしたものであって、ことに上記演算に必要とする円

弧の分割角度を、円弧の半径に応じて自動的に定めるようにしたことを特長とするものである。

図には本来円弧ABCに添って切削を行なうところを、直線AB、BCのように円弧を分割角度 $\Delta\theta$ で分割して直線近似で切削を行なう場合の例が示してある。

この場合点Aの座標 (x_i, y_i) と $\Delta\theta$ から点Bの座標 (x_{i+1}, y_{i+1}) を求めて、その間をパルス分配しようとするものである。今図の $\Delta x_i, \Delta y_i$ を計算すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_{i+1} - x_i = x_i (\cos \Delta\theta - 1) + y_i \sin \Delta\theta \\ &= \left(-\frac{(\Delta\theta)^2}{2} + \frac{(\Delta\theta)^4}{4} - \dots \right) x_i + \left(-\Delta\theta + \frac{(\Delta\theta)^3}{3} - \dots \right) y_i \\ &\doteq \Delta\theta \left(-\frac{\Delta\theta}{2} x_i + y_i \right) \\ \Delta y_i &= y_{i+1} - y_i = y_i (\cos \Delta\theta - 1) - x_i \sin \Delta\theta \\ &= \left(-\frac{(\Delta\theta)^2}{2} + \frac{(\Delta\theta)^4}{4} - \dots \right) y_i - \left(\Delta\theta - \frac{(\Delta\theta)^3}{3} + \dots \right) x_i \\ &\doteq \Delta\theta \left(-\frac{\Delta\theta}{2} y_i - x_i \right) \end{aligned}$$



特許と新案

この場合分割角度 $\Delta\theta$ の選択が問題であるが、図に示す近似誤差 t と上式における近似による累積誤差を考慮して $\Delta\theta \leq \sqrt{\frac{3\tau}{r}}$ の条件を満たすように決定する。ここで τ は近似誤差の許容しうる値、 r は円弧の半径である。この条件式からわかるように円弧の半径 r が大きくなるにつれて $\Delta\theta$ を小さくする必要がある。そこでこの発明に

おいては $\Delta\theta$ を半径 r の大きさにより段階的に変え、かつ $\Delta\theta$ を 2^{-n} の形にすることにより純2進演算における Δx_i , Δy_i のかけ算を含む複雑な計算を単に加算とシフトのみにより行なうようにしたものである。

(特許 第 530928 号) (久保記)

系 統 分 離 装 置

発 明 者 三 上 一 郎

この発明は水力発電系統と火力発電系統とを分離する系統分離装置に関するものである。

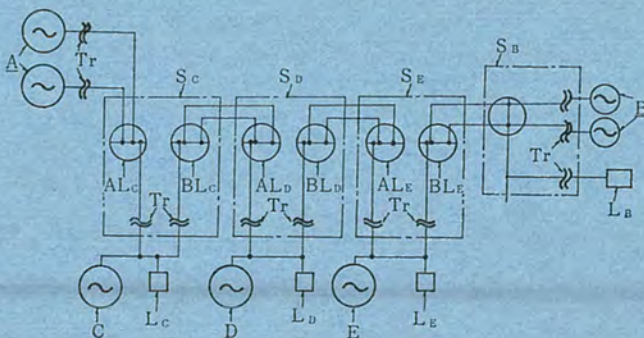
周知のように火力発電機は定格周波数を 60 Hz とすると、58.5 Hz 以下での運転は不可能とされ、水力発電機は一時的には 55 Hz 程度まで運転が可能とされている。このため水火力連けい系統においては、火力発電機が上記運転限界以下に低下する以前に連けいを分離して、両系統を完全に運転する必要がある。

この発明はこのような要望にこたえるもので、系統の周波数-電力特性を連けい線電力偏い(倚)形自動周波数制御装置(以下 TBC)で検出し、系統分離を行なうときの分離個所を決定する装置である。図において、いま水力発電機群 A および火力発電機群 B が、ともに全負荷運転している状態から負荷 L_D が増大したとすると、当然系統周波数は低下する。さて負荷 L_D の増分電力は各発電機 A~E が各自の調定率に従って分担する。このとき変電所 S_C の分離点検出装置 AL_C は、発電機 A と発電機 C~E を 1 機とみたときの 2 系統間の連けい線にある TBC 装置とみなしうるので、負荷 L_D の増大は発電機 C~E からなる合成系統の負荷増大となり、 AL_C は作動する。

一方分離点検出装置 BL_C は、発電機 A・C と発電機 D・E・B との連けい線にある TBC 装置とみなしうるので、負荷 L_D の増大は

発電機 D・E・B からなる合成系統の負荷増大となるが、電力が変電所 S_C から変電所 S_D の方向となり BL_C は不動作となる。同様に分離点検出装置 AL_D , BL_D , BL_E は動作し、他方 AL_E は不動作となる。これら検出装置の動作・不動作から、この場合負荷 L_D が増加していると指定できる。したがって変電所 S_D では、これにより負荷 L_D を水力系統 A に接続し、一時的に低周波運転を行なわせるとともに、系統 A と系統 B との連けいを分離すれば所望の目的を達成できる。

(特許 第 532764 号) (太田記)



電 圧 - 周 波 数 変 換 装 置

発 明 者 田 井 昌 輝

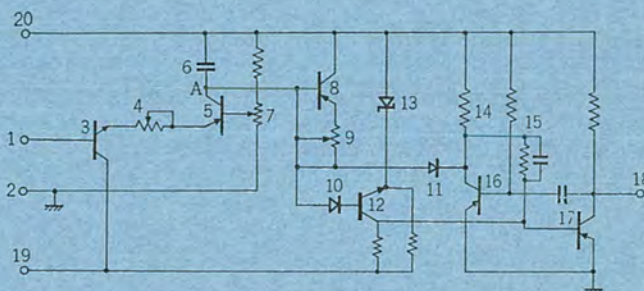
この発明は変換特性および温度特性の良好な電圧-周波数変換装置に関するものである。

図はこの発明の実施例で、入力端子(1)(2)からトランジスタ(3)(5)を介してコンデンサ(6)が充電され、その充電電圧がゼナダイオード(13)のゼナ電圧に達するとトランジスタ(12)が導通して、単安定マルチバイブレータ(15)がトリガされ、端子(18)に出力パルスが生じるとともに、ダイオード(11)、抵抗(4)を介してコンデンサ(6)が放電する。

この装置では、コンデンサ(6)を一定電流で充電して精度の高い電圧対周波数変換を行なうとともに、入力電圧が印加されていないときに、トランジスタ(3)(5)を漏えいして流れる電流によって、コンデンサ(6)が充電されて出力にパルスが生じるのを防止するため、漏えい電流をバイパスするトランジスタ(8)が設けられ、さらに可変抵抗(9)を調整して、温度変化による出力周波数変動を防止している。

なお、抵抗(7)は零点調整用、抵抗(4)は変換特性の調整用である。

(特許 第 546749 号) (太田記)



SL形ラッチ式電磁接触器とその適用

丸地 謙二*・岡戸 弘行*・長尾 良章*

Type SL Latched Magnetic Contactors and Their Application

Nagoya Works Kenji MARUCHI・Hiroyuki OKADO・Yoshiaki NAGAO

Outstanding is the latest trend of automatizing the operation and saving manpower in the industrial world. This has brought about the development of magnetic contactors for control apparatus used for the purposes. Since the announcement of MS series magnetic contactors in October the year before last, the Company's business in this respect has been making a wholesome growth. Now type SL latched magnetic contactor series has been completed to expand the MS series. The latched magnetic contactor has features of holding the line at instantaneous current failure, prevention of magnetic noise and saving of power consumption, which manifests excellent performance for use as an instrument for lighting or distribution boards. It is expected that the demand of the device will increase on the various circuits. This article introduces the construction, characteristics, test results and the application of this product.

1. ま え が き

産業界の設備・機械・ビル設備等、最近の自動化・省力化の傾向は著しいものがあり、これらに使用される制御器具、たとえば電磁開閉器をとっても著しい伸長をとげている。

当社も一昨年10月、MS形シリーズ電磁開閉器を発表し需要家各位から好評を得、順調に伸長を続けているが、このたびSL形シリーズラッチ接触器の開発を完了し、MSシリーズに加え強化拡充を計った。このラッチ接触器は瞬時停電における保持、操作電磁石の騒音防止、電力節約、照明用また分電盤器具として遠方制御等にすぐれた特長を有し、種々の回路に今後需要拡大が期待されるものである。

本文ではSL形ラッチ式の構造、特性、試験および信頼性検討、仕様をのべ、かつ投入、引きはずし動作の特長を生かした適用方法について紹介し需要家各位の参考に供したい。

2. 種類と仕様

SL形ラッチ式電磁接触器はS形電磁接触器を基礎にして、その一部を改造し、機械的ラッチ機構を取りつけたものである。したがって接点まわりの定格仕様はS形電磁接触器と同一であるが、その機

械的寿命の制限から、ひん繁な開閉を行なう用途には適さないが、開閉能力、電氣的寿命には余裕があり、定格はS形電磁接触器のグリッド定格を表示している。表2.1にSL形電磁接触器の種類、定格

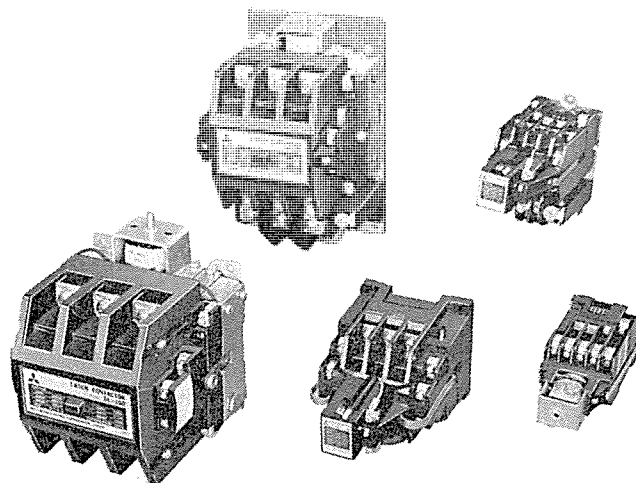


図 2.1 SL形ラッチ式電磁接触器
Latch contactor, SL series.

表 2.1 SLおよびMSO-L形電磁接触器および開閉器の定格と仕様
Ratings and specifications of type SL and MSO-L magnetic contactors and switches.

形 名		SL-11 MSO-L-11	SL-18 MSO-L-18	SL-35 MSO-L-35	SL-65 MSO-L-65	SL-80 MSO-L-80	SL-100 MSO-L-100	SL-150 MSO-L-150	SL-200 MSO-L-200	SL-300 MSO-L-300
定 格 電 流 A	220 V	12	20	48	70	93	125	180	200	330
	440 V	9	15	35	65	85	110	165	220	300
	550 V	7	11	28	55	70	100	150	180	300
定 格 容 量 kW	200~ 220 V	2.5	4.0	11	15	22	30	45	50	90
	380~ 550 V	3.7	5.5	15	30	37	55	90	100	150
定 格 通 電 電 流 A		15	20	48	70	100	130	200	220	330
補 助 接 点	有 効	—	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b
	自己消磁	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b	1 a 1 b
しゃ断閉路電流		定 格 電 流 の 10 倍 以 上								
開 閉 ひ ん 繁 度		1,200 回/時 以 上								
寿 命	機 械 的	50 万 回 以 上			25 万 回 以 上					10 万回以上
	電 氣 的	50 万 回 以 上			25 万 回 以 上					10 万回以上

および仕様を示す。

SL 形ラッチ電磁接触器はコイルを除き、交流操作と直流操作を共用するため自己消磁式コイルを採用した（自己消磁については後述）。この操作コイルの自己消磁用に補助接点を 1a1b 使用しているため、S 形電磁接触器に比べ有効に使える補助接点の数は 1a1b 減少している。

また SL 形電磁接触器は、これに TH 形サマルリレーを取りつけて、MSO-L 形電磁開閉器としても使用する。

3. 構造と特長

3.1 SL 形ラッチ式電磁接触器の構造の動作

SL 形電磁接触器は機械的なラッチ機構が組込まれているが、その組み込み位置は SL-11~35 形では、S 形電磁接触器の上方にラッチ機構を取り付け金具で取り付け、SL-65~200 形では奥行寸法の大きさの点から取り付け台内部に組込む構造としている。図 3.1 に SL-18 形、図 3.2 に SL-100 形の構造図を示す。

SL 形電磁接触器の動作は、投入コイルが励磁されると、電磁石の可動部が吸引され接点が投入されるが、投入コイルは自己消磁用の b 接点を介して、励磁されるので最終投入状態では投入コイルの励磁は自動的に解除されるが、このときには機械的のラッチがかかり、投入状態が保持される。次に接点を開放するときは、ラッチ引きはずしコイルを励磁してラッチを引きはずして開放させるが、引きはずしコイルもまた自己消磁用の a 接点を介して励磁されるので、電磁接触器が落下した時点では自動的に消磁される。

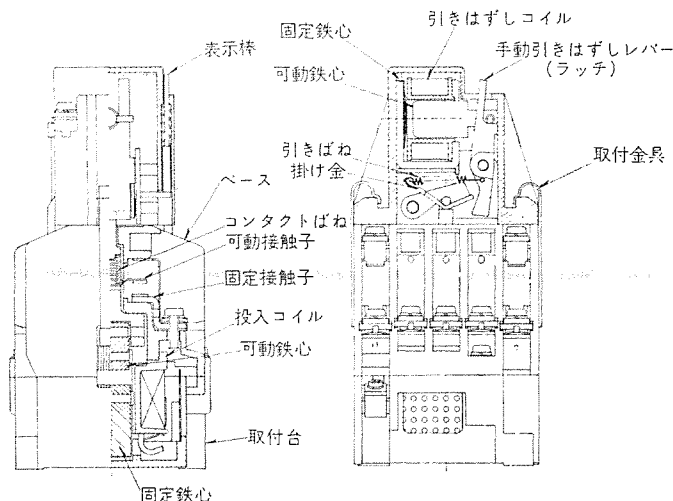


図 3.1 SL-18 形電磁接触器の構造
Construction of type SL-18 contactor.

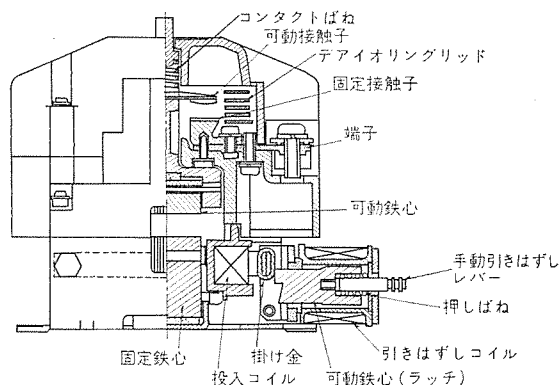


図 3.2 SL-100 形電磁接触器の構造
Construction of type SL-100 contactor

ラッチ式電磁接触器は電磁石の鉄心がさびてもうなりを発生しない特長を生かすため、相当悪環境で使用しても動作の信頼性が高いことが要求されるが、SL 形ではこの信頼性を高めるため、構造上の配慮を行なっている。たとえば機械的のラッチは本質的にしゅう（摺）動部分をもつが、このしゅう動部分は悪環境においても摩擦抵抗の安定性が要求される。SL 形ではこれらしゅう動部は摩擦抵抗の比較的安定しているプラスチックと金属のしゅう動とし、動作の信頼性を向上させている。特に SL-65~200 では、ラッチ部には最高級のテフロン樹脂を使用し、信頼性の向上を計った。

3.2 SL 形電磁接触器の特長

SL 形電磁接触器の特長を要約するとほぼ次のとおりである。

- (1) 高信頼性……新ラッチ機構の採用により動作が確実。
- (2) 長寿命……ラッチ式電磁接触器としては機械的寿命が長く、SL-11~35 形では 50 万回、SL-65~200 では 25 万回を 90 %信頼限界で保証できる。
- (3) 消費電力の節約……投入および引きはずしの瞬時のみ操作コイルを励磁すればよいため、常時の操作コイル消費電力が節約できる。
- (4) 騒音がない……自己消磁接点で瞬時に励磁を断ち、その後は機械的に保持あるいは引きはずし状態を保つため、たとえ鉄心が発しょう（錆）したとしてもうなりがない。
- (5) 手動による操作が可能……手動による動作チェックおよび停電時の手動による引きはずしができる。

4. 試験結果

4.1 動作特性

SL 形電磁接触器の投入コイルおよび引きはずしコイルはそれぞれ自己の特殊 b 接点および a 接点と直列に接続して、自己消磁で瞬時に操作コイルを消磁して、うなりなどの騒音をなくし消費電力を節約しているが、動作を確実にするため S 形電磁接触器の操作コイルに比べて、瞬時入力力が若干大きく、操作回路の電圧降下を考慮し、これを補償するため、動作電圧の変動範囲を JIS 規格の定格電圧の 85~110 % に対して 5 % の余裕をもたせて 80~110 % としている。

SL 形電磁接触器の動作電圧、操作コイルの入力、動作時間、制御トランス容量の特性は表 4.1 に示すとおりである。

表 4.1 SL 形電磁接触器の特性
Characteristics of type SL contactors.

形名	操作電磁コイル瞬時入力 (VA 実効値)				動 作 電 圧		平均動作時間 (ms)				制御トランス容量 (VA)
	AC 操作		DC 操作		投 入	引きは ずし	AC 操作		DC 操作		
	投 入	引きは ずし	投 入	引きは ずし			※1 投 入は ずし	※2 引き は ずし	※1 投 入は ずし	※2 引き は ずし	
SL-11	50	70	100	50	AC 操作 DC 操作 とも 定格の 80~ 110 %	AC 操作 DC 操作 とも 定格の 80~ 110 %	10	15	15	15	20~30
SL-18	200	130	120	45			11	8	16	11	40~60
SL-35	420	130	270	45			17	11	21	14	60~100
SL-65	850	550	240	210			19	15	31	24	150~ 200
SL-80	1,450	550	270	210			21	17	39	30	200~ 250
SL-100	1,750	1,050	400	580			22	18	43	34	200~ 300
SL-150 200	3,300	1,050	650	580			24	19	59	46	300~ 400
SL-300	4,500	1,300	1,000	400			30	22	60	48	1,000~ 1,500

注：※1 投入とは投入コイル励磁から主接点 ON までの時間

※2 引きはずしとは引きはずしコイル励磁から主接点 OFF までの時間

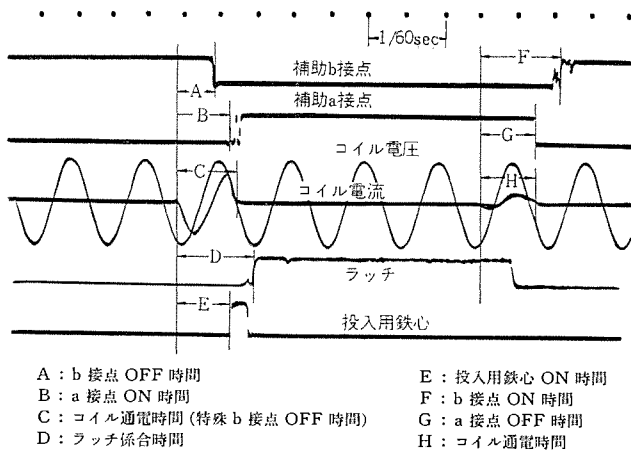


図 4.1 SL 形 電磁接触器の動作 オシログラム
Oscillogram of operations at type SL-35.

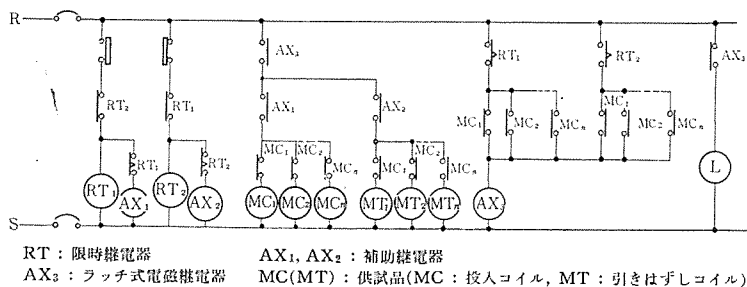


図 4.2 機械的寿命試験回路
Circuit of mechanical life test.

表 4.2 SL 形 電磁接触器の閉路しゃ断電流量
Making and breaking capacity of type SL contactors.

単位 : A

形 名	SL-11	SL-18	SL-35	SL-65	SL-80	SL-100	SL-150	SL-200	SL-300
220 V	120	200	480	700	930	1,250	1,830	2,000	3,300
440 V	90	150	350	650	850	1,100	1,650	2,000	3,000
550 V	70	110	280	550	700	1,000	1,500	1,800	3,000

SL 形電磁接触器の投入コイルは S 形電磁接触器と同一サイズで、起磁力を S 形電磁接触器より増しており、また引きはずしコイルは外形を小形にするため短時間定格 (約 15 秒) にしている。実際の使用にあたっては自己消磁されるためコイル励磁時間は 0.1 秒以下であるので、定格開閉ひん繁度の 1,200 回/時の 2 倍のひん度 2,400 回/時で開閉しても、操作コイルの温度上昇は規格値以下で熱的安全率は十分であることを確認している。

操作コイル自体は上述のように約 15 秒の短時間定格であるが、自己消磁接点をつけているため、制御指令接点が残留接触式の操作スイッチ等で連続して制御指令を SL 形電磁接触器に印加する方式でも使用可能である。

4.2 制御指令時間とミスラッチの確率

図 4.1 は SL 形電磁接触器の投入、落下の動作のオシログラムを示す。この図からわかるように SL 形電磁接触器は投入時投入コイルが自己消磁用の b 接点を介して励磁されるため、投入コイルの消磁される時点 (b 接点が開離する時点) とラッチが完全に係合する時点に時間差、すなわち可動部が外部からエネルギーを全く供給されずに、それまでに蓄積されたエネルギーで動く時間が存在する。このため S 形電磁接触器の動作時間は一般の電磁接触器に比べ若干長くなる

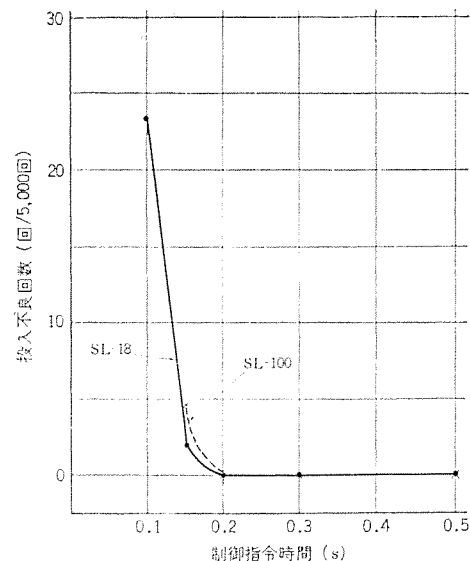


図 4.3 制御指令時間と不良回数
Relations between duration of time of control signal and numbers of faulty operations.

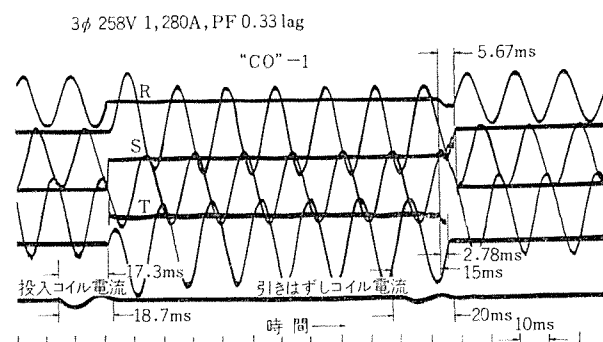


図 4.4 SL-100 形 電磁接触器しゃ断試験のオシログラム
Oscillogram of breaking capacity test of type SL-100.

傾向にあるが、通常は数サイクルを越えることはない。しかし開閉の繰返しによるしゅう動部の摩擦力の若干のばらつき、可動部の動作の仕方、コイル印加電圧の位相の組み合わせなどで、ラッチが完全に係合するまでかなり長時間を要する場合がある。特に最初に蓄積されるエネルギーが少ないほどこの時間が長くなる傾向にある。したがって投入コイルに励磁を指令する制御指令時間がパルス状の信号の場合には、その時間が短かすぎるとチャンスによりラッチが係合しない (ミスラッチ) 場合が発生する。SL 形電磁接触器について、この制御指令時間とミスラッチの発生確率を明らかにするために図 4.2 の回路で試験した結果を図 4.3 に示す。

この試験は可動部の蓄積エネルギーが最も少ない状態すなわちコイル印加電圧を定格電圧の 80 % にして行なったものである。この試験結果を見ると指令時間が 0.2 秒以下になると、ミスラッチの発生確率が急速に増加することがわかる。したがって制御指令時間は若干安全を見て、0.3 秒以上に設定することが望ましいと言える。

図 4.3 のデータはコイル印加電圧が定格の 80 % のものであるが、コイル印加電圧がさらに高ければミスラッチ発生の確率はもちろん減少し、定格電圧印加時には 0.2 秒程度の指令時間でも 10^{-6} 程度となる。

4.3 しゃ断電流容量

電磁接触器のしゃ断電流容量は JIS 規格には、A 級として定格電

表 4.3 SL 形 電磁接触器機械的寿命試験結果

Results of mechanical life test of type SL contactors.

		SL-11	SL-18	SL-35	SL-65	SL-80	SL-100	SL-150	SL-200	SL-300
試験電圧 (V)		220	220	220	220	220	220	220	220	220
周波数 (Hz)		60	60	60	60	60	60	60	60	60
開閉ひん度 (回/時)		2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400
励磁時間 (s)		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
投入電圧 (V) 60 Hz	開始前	142	136	140	145	140	155	156	155	156
	25 万回	—	—	—	142	135	148	150	149	159
	50 万回	148	140	143	136	138	140	147	145	—
	100 万回	149	142	146	—	—	—	—	—	—
引きはずし 電 (V) 60 Hz	開始前	130	80	93	112	130	112	132	134	135
	25 万回	—	—	—	98	112	108	124	125	142
	50 万回	136	88	106	87	100	105	107	110	—
	100 万回	140	93	111	—	—	—	—	—	—
オ ー バ ト ラ ベ ル	開始前	1.5	1.6	2.1	2.7	3.0	3.3	3.6	3.8	3.0
	25 万回	—	—	—	2.3	2.5	2.9	3.0	3.1	2.1
	50 万回	1.4	1.5	2.0	1.8	1.9	2.6	2.2	2.2	—
	100 万回	1.3	1.3	2.0	—	—	—	—	—	—
試験台数		10	10	10	10	5	5	5	5	5
停止回数	投入	2	2	3	2	1	0	3	4	5
	引きはずし	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.4 SL 形 電磁接触器電氣的寿命試験結果

Results of electrical life test of type SL contactors.

試 験 条 件			SL-11		SL-18		SL-35		SL-65		SL-80		SL-100		SL-150		SL-200		SL-300	
			220	440	220	440	220	440	220	440	220	440	220	440	220	440	220	440	220	440
試 験 電 流 (A) 閉路/レ 断			65/12	46/9	100/20	75/15	240/48	175/35	350/70	325/65	470/93	430/85	625/125	550/110	900/180	825/165	1,000/200	1,000/200	1,650/330	1,500/300
試 験 電 圧 (V)			220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
試 験 周 波 数 (Hz)			60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
試 験 力 率 閉路/レ 断			0.61/0.32	0.65/0.34	0.67/0.36	0.61/0.32	0.65/0.34	0.67/0.37	0.62/0.32	0.65/0.34	0.61/0.31	0.63/0.37	0.63/0.32	0.65/0.35	0.67/0.37	0.65/0.32	0.67/0.32	0.68/0.31	0.68/0.38	0.67/0.37
開閉ひん度 (回/時)			1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
使 用 率 (%)			40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
開 閉 回 数 (万回)			80	85	75	95	60	85	45	50	50	50	50	50	40	45	35	30	15	15
接点 消耗 量 (%)	25万回後	可動	6	7	9	12	5	9.5	8.5	7	5	3	8	10	3	8	3	7	—	—
		固定	6	7	8	4	3	6	5	5	7	8	6.5	10	9	8	6	7	—	—
	完了後	可動	16	17	20	25	13	30	15	14	9	7	16	15	7	13	6.5	10	7	5
		固定	13	14	18	10	7	16	8	10	15	13	14	14	15	14	12	16	7	10

流の 10 倍の電流の CO 責務 5 回実施を規定しているが、SL 形電磁接触器では表 4.2 に示す電流を、操作回路電圧を定格電圧の 100 % で CO 10 回、80 % で CO 5 回、110 % で CO 5 回合計 20 回実施し、また閉路電流容量試験では接点を許容消耗量の 3/4 (接点厚みの約 1/4) 削り、表 4.2 に示す電流を、操作回路電圧を定格電圧の 100 % で C 100 回、80 % で C 50 回、110 % で C 50 回実施して性能を確認している。図 4.4 に SL-100 形のシャ断試験のオシログラムを示す。

4.4 機械的寿命

SL 形電磁接触器の機械的寿命はラッチ機械部分によって定まる。SL 形電磁接触器の機械的寿命を判定する基準としては一応次の 4 項目を採用している。

(1) 部品の破損があったとき。

(2) 投入または引きはずしの電圧がコイル定格電圧の 80 % 以上になったとき。

(3) 一定規準以上の投入不良または引きはずし不良が発生するとき。

(4) オートラベルが、ラッチ機構部分の摩耗により 30 % 以上減少したとき。

SL 形電磁接触器では、機械的寿命試験は図 4.3 に示す回路で制御指令時間を 0.2 秒にセットして、保証寿命の 2 倍まで実施し、部品の破損の有無、ミストリップおよびミスラッチの回数、動作電圧の変化、オートラベルの変化を調査したが、機械的寿命はほとんど(4)項により決定されることを確認した。したがって機械的寿命の信頼性は高く、寿命保証の信頼限界は 90 % を越えることが判明している。機械的寿命試験の結果を表 4.3 に示す。

4.5 電氣的寿命

SL形電磁接触器の電氣的な責務は一般の電磁接触器で行なわれている寸動責務は考えられないのでJIS規格に規定されている定格電流の5倍（力率0.3～0.4 lag）を投入し、定格電流（力率0.6～0.7 lag）をしゃ断する標準責務で実施し、S形電磁接触器と同一試験基準で電氣的寿命試験を実施した。その結果を表4.4に示す。この結果はS形のグリン定格の最大適用容量で機械的寿命まで耐えることを示している。

4.6 環境試験

ラッチ式電磁接触器は、ラッチ部分に摩擦箇所があり、この部分の摩擦増加が動作電圧の増加、あるいは投入不良、引きはずし不良の発生原因となるので、この点に関しては特に悪環境と考えられる高温多湿条件での寿命試験を実施し動作に異常のないことを確認した。高温多湿条件と試験内容は次のとおりである。

高温多湿中の機械的寿命試験……周囲温度 50℃、湿度 RH 95～100%，32時間運転、開閉ひん度 2,400 回/h \times 16 h 休止

4.7 振動、衝撃試験

振動・衝撃で問題となることは、接点の誤動作とラッチの誤動作である。振動については、下記の条件で異常ないことを確認した。

共振試験……振動数 10～55 Hz、加速度 1 G 一定

定振動数耐久試験……振動数 16.7 Hz、複振幅 4.0 mm

可変振動数耐久試験……振動数 6～30 Hz、複振幅 2.0 mm

衝撃については、一般的な制御盤に他の大形電磁接触器と列盤で取りつけ、この大形電磁接触器の開閉動作により、接点およびラッチの誤動作のないことを確認した。

5. SL形電磁接触器の適用

5.1 適用上の注意

以上種々の試験について検討したが、これらの試験結果から SL形電磁接触器の適用上の注意事項は、次のごとくなる。

- (1) 制御指令時間は 0.3 秒以上にする。
- (2) 操作電源は定格電圧とし、電圧変動は少なくする。

表 5.1 SL形電磁接触器のコンデンサトリップの静電容量
Capacity of capacitor trip of type SL contactors.

単位： μ F

	SL-11	SL-18	SL-35	SL-65	SL-80	SL-100	SL-150	SL-200	SL-300
1 秒以内	10	10	15	50	80	400	400	400	600
2 分以内	30	30	50	150	200	1,200	1,200	1,200	1,800

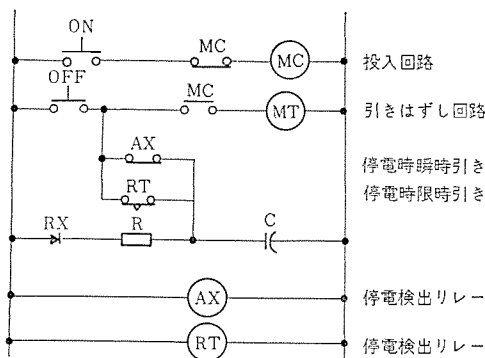


図 5.1 SL形電磁接触器のコンデンサトリップ回路
Capacitor trip of type SL contactor.

- (3) 投入指令と引きはずし指令を同時に与えない。

5.2 コンデンサトリップのばあいの容量

SL形電磁接触器を瞬時停電による電磁接触器の落下を防止する目的で、ある時間保持しておく遅延釈放形電磁接触器として使用するばあいや、停電時遠方操作により引きはずししたいとき、コンデンサにより引きはずすことができる、コンデンサトリップの回路を図 5.1 に、最小コンデンサ容量を表 5.1 に示す。

6. SL形電磁接触器 (MSO-L形電磁開閉器) の応用

SL形ラッチ式電磁接触器は、その特長をいかして停電や瞬時停電および電圧降下で電磁接触器が、開路してはならない記憶回路に、開閉ひん度が少なく常時のコイル消費電力の節約がしたいところに、鉄心の発しようによりうなりなどの騒音を嫌うビル設備の分電盤回路・電熱回路・道路照明の分電スイッチに、電源切換用スイッチなどに適している。以下代表的な使用例を示す。

6.1 分電盤の遠方操作

ビルや住宅あるいは病院などの住宅の近くに設置される分電盤等で、電磁接触器を使用すると鉄心の発しようでうなりなどの騒音が、心配される用途に SL形電磁接触器が適している。一例を図 6.1 に示す。

6.2 照明・電熱回路への適用

1 日に 1 回の開閉で十分な道路照明灯用電磁接触器や、深夜電力利用の温水器用電磁接触器には、投入および引きはずしの瞬時のみ励磁すればよい SL形電磁接触器を使用すれば常時の消費電力が節約できる。これらの用途にはタイムスイッチおよび積算電力計と組み合わせられて使用されるばあいが多くその代表例を図 6.2 に示す。

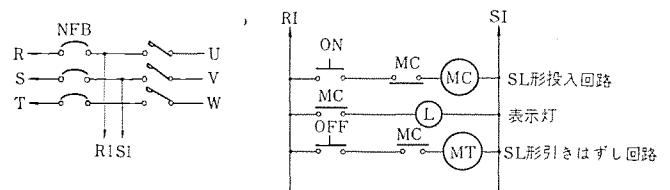


図 6.1 分電盤の遠方操作への適用
Example of application of type SL contactor to remote control of switch boards.

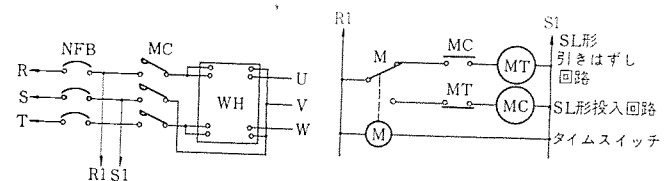


図 6.2 照明・電熱回路への適用
Example of application of type SL contactor to illumination or electric heating circuit.

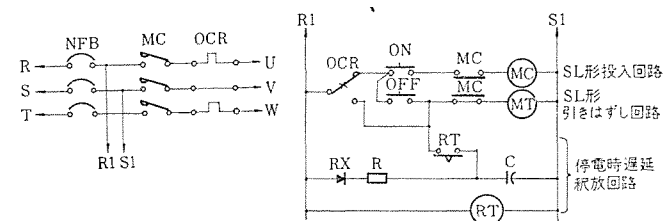
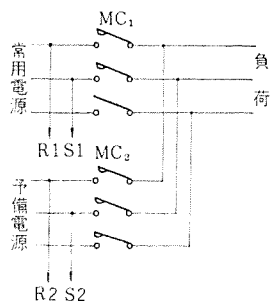


図 6.3 電動機制御への適用
Example of application of type MSO-L magnetic switch to motor control.



6.3 電動機制御への適用

電動機制御への SL 形電磁接触器の適用は、TH 形過電流継電器と組み合わせて MSO-L 形電磁開閉器として使用すれば、電動機の起動停止および過負荷保護が行なえる。1 日数回開閉すればよい。ファン、ブロワに、タイマとコンデンサを組み合わせる停電や瞬時の遅延釈放用に、あるいは停電による落下を防止する記憶素子に使用できる。図 6.3 はこれらの応用例を示したものである。

6.4 電源切り換えへの適用

最近の電力供給の重要性から常時電源のほかに予備電源をもち常用電源が停電すると、予備電源に切り換え、電力供給を継続するところがふえている。このような電源切り換えにも、SL 形電磁接触器は適している。図 6.4 にその適用例の一つを示す。

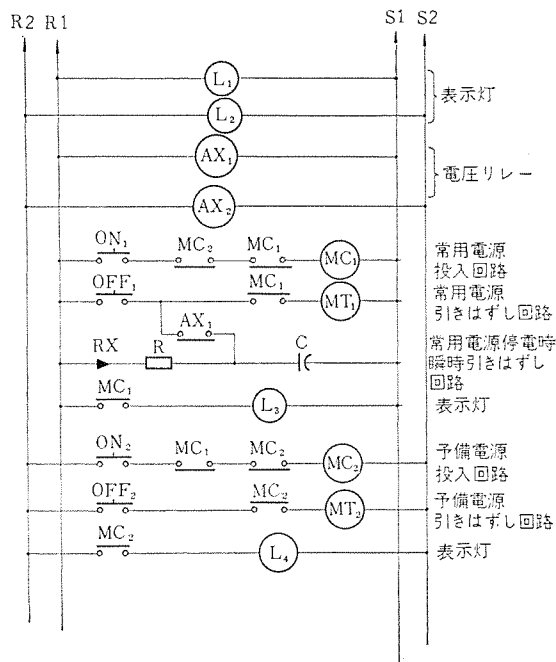


図 6.4 電源切換への適用
Example of application of type SL contactor to
change over switch of sources.

7. む す び

以上、SL シリーズラッチ式電磁接触器の特性、性能、適用上の注意事項および適用例について紹介した。SL 形ラッチ式シリーズは電磁接触器としては特異な製品であり、その用途は構造、特性、寿命等から限定されるが、他のものでは代用できない特長をもつとも言える。したがってここに記載した事項の特長を生かし需要家各位に採用され各方面で利用されることを切望するものである。

参 考 文 献

- (1) 丸地、岡戸、長尾：三菱電機技報、42, No. 9, 1,167 (昭 43)
- (2) 丸地、岡戸、寺尾：三菱電機技報、43, No. 6, 845 (昭 44)

正 誤 表

Vol. 44 No. 1「技術の進歩号」にミスプリントがありましたので、下記のとおり訂正いたします。

ページ・行	誤					正				
	項 目	立上り特性		立下り特性		項 目	立上り特性		立下り特性	
		むだ時間 t_0	定 数 t_1	むだ時間 t_2	定 数 t_3		むだ時間 t_0	定 数 t_1	むだ時間 t_2	定 数 t_3
137 右 図 9.6 の表	MBF ブレーキ	0.17	0.87	0.19	0.87	MBF ブレーキ	0.07	0.30	0.04	0.38

網目高分子における分子鎖のからみ合い効果

柴山 恭一*・鈴木 康弘**

Effect of Entanglement of Molecular Chains on Network Polymers

Central Research Laboratory Kyoichi SHIBAYAMA・Yasuhiro SUZUKI

Investigation has been made on a multiple network polymer to make clear the role of topological entanglement affecting on the properties of network polymers. Multiple network structure is supposed to be produced when a network is entangled with other one. Study has been made on some of the properties of network polymers prepared from styrene and divinylbenzene. The results were coincident with presumed characteristics of the multiple network structure. Another study has been conducted on mechanical behaviours of a polymer network formed by dispersing microgel particles in a mixture of polyfunctional prepolymer and vinyl monomer. The results have revealed that the particles act as restricted domains where entanglement are trapped as shown in the multiple network polymer. It is possible to modify the entanglement feature of a network polymer by the multiple network structure.

The result of study made available are good for basic data in designing material suitable for a specific application.

1. ま え が き

要素的単位(単量体)が、一次元的に成長した分子鎖のところで(化学的あるいは物理的)結節点が導入されると、図1.1に示したように分子鎖が、三次元的に発達した網目構造をもつ橋かけ高分子が形成される。このような橋かけ高分子には、加硫ゴムをはじめ塗料・接着剤さらに注形・含浸などの目的に使用される各種の熱硬化性樹脂など多くの例が見られ、実用上大きな重要性をもっている。線状高分子の多くが分子鎖の規則的な配列に基づく結晶性を示すことから、かなり詳しい構造解析を可能にしているのに対し、網目高分子では橋かけの導入が一般的には分子鎖の集合を無秩序にし、無定形状態になるため、構造的知見を得ることを困難にしている。現段階では橋かけ高分子の存在状態を規定する要因は表1.1のようにまとめられる。いくつかの網目のトポロジカルな条件と分子鎖の種類に固有の要因が組み合って分子鎖が空間を占有する状態を定め、これによって系の巨視的性質が規定される。この最後の段階で重要なのは、分子鎖によって実際には占められていない空間(過剰体積)が分子鎖の運動に与える影響である。

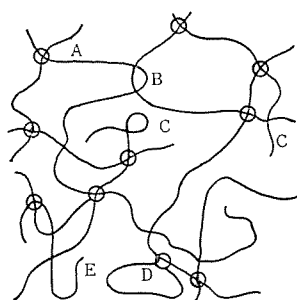
網目構造と性質の関係について最初に調べなければならない問題は、導入された結節点(橋かけ点)が示す効果である。その存在に十分な確証のある化学的な橋かけ点に関し、網目密度と分子鎖の種

類による効果についてはかなりまとまった知識が得られている^{(1)~(4)}。各種の高分子の個性に立ち入って理解を深めるためには、網目の構成に関し表1.1に示したような要因をさらに追求する必要がある。

最近、網目のトポロジカルな条件、とくに網目の中にトラップされたからみ合い結合の効果が注目されている。図1.1に示したように、橋かけ系ではからみ合いは近接した橋かけ結合によって永久化されるものが多いと考えられ、このようなからみ合いはトポロジカルなからみ合いとよばれる。一般に無定形高分子の緩和スペクトルは、短い緩和時間の範囲でくさび形(分子鎖セグメントのミクロブラウン運動の反映)、長い範囲で箱形を示す。緩和時間の長い現象では、分子全体の運動(マクロブラウン運動)に対するからみ合いの影響が力学的性質に反映し、箱形スペクトルの原因となることが知られている。したがって線状高分子では、ガラス転移以上の高温で十分長いタイムスケールの観察ではからみ合いはほどけてしまって効果を示さないが、観測のタイムスケールがからみ合いの平均寿命よりも短い場合には、安定な網目結合としての効果を示すことになる。

観測の温度やタイムスケールにおける制限を取り去った場合にも、化学的な橋かけ結合をもつ系では、トポロジカルなからみ合いやトラップされたからみ合いが問題になる。このようなからみ合いは化学的な橋かけ結合とは異なった効果を示しうると考えられる。その効果はゴム弾性域に見られるであろう。

Ferry⁽⁵⁾⁽⁶⁾らは加硫ゴムの粘弾性において、主分散より長い緩和時間のゴム領域において一つの分散の存在することを見だし、こ



A : 網目結合点
B : トラップされたからみ合い
C : 分子末端端
D : 分子内閉環
E : 低重合物

図 1.1 橋かけ高分子の網目構造
Network structure of crosslinked polymer.

表 1.1 橋かけ高分子の存在状態を規定する要因
Factors determining the state of existence of crosslinked polymers.

平均網目鎖長	トポロジカルな条件	充てん状態→性質 (excess volume の分配)
網目鎖長分布		
非有効鎖 (閉環, 末端)		
トラップされたからみ合い		
分子鎖の対称性	分子鎖の個性	
分子鎖の剛直性		
分子間相互作用		

れはトラップされたからみ合いの再調整 (readjustment) によると考えた。トラップされたからみ合いは、再調整過程の緩和時間より長いタイムスケールでは弾性に対する寄与は小さくなる。ゴムのように一次分子鎖が十分に高分子量の線状高分子の場合は、網目化の前からみ合いは存在している。このからみ合いは加硫 (橋かけ) によってトラップされるわけであるが、低加硫物では完全にはトラップされないからみ合いがかなりのこるであろう。このような低加硫物もゴム域で非常にゆっくりした緩和機構を示すことが認められ⁽⁷⁾⁽⁸⁾、完全にはトラップされていないからみ合いも高度に枝分れした束縛構造上に存在し、低い運動性を示すものと考えられている。

Kraus⁽⁹⁾ らはからみ合いの効果は、理想ゴム弾性理論からのはずれを表わす Mooney-Revin 式の C_2 項に顕著な影響を与えることを示した。一次分子鎖が十分に高分子量であれば存在するからみ合いは C_2 項に寄与するが、一次分子鎖がからみ合いに関する限界分子量 (Mc) であって、末端のみに官能基をもつ場合の加硫物では理想ゴム弾性理論に従うことが示された。

Greene⁽¹⁰⁾, Smith⁽¹¹⁾ らは Berry⁽¹²⁾ らが取り扱った複合網目の弾性に現われる異方性を調べた。複合網目 (Composite network) とはふつうの等方的条件で作られた網目を一軸方向に伸長し、その状態で第二段の橋かけを行なって生じる網目をいう。Green らは複合網目が配向方向に並行の場合と垂直の場合とでは、Mooney-Rivlin 式中の C_2 項が顕著な異方性を示すことを認め、二つの網目の間に存在するからみ合いの分布が一つの要因になることを考えている。

低分子希釈剤の存在下で形成した網目 (前膨潤網目) は、未希釈状態でつくられた網目とは異なった構造を持つであろう。そして、このような網目が示す性質は網目構造のトポロジカルな変化に起因することが期待される。トポロジカルな変化は、網目の膨潤挙動⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾やゴム弾性^{(15)~(17)}に顕著な影響をおよぼすことが多くの研究者によって認められている。たとえば Tobolsky⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ らによれば前膨潤網目はより理想的な網目を形成し、理想ゴム弾性論からのはずれを示すパラメータ (フロントファクタ) が小さくなることとゴム弾性率の低下を認めている。後者はトラップされたからみ合いが少なくなることを意味する。

Cotton⁽²⁰⁾ はカーボンブラックを充てんした橋かけゴムの前膨潤効果を調べた。充てん系でも前膨潤の効果は残存し、橋かけ間の平均セグメント長の増加による Supercoiled network (からみ合いの少ない網目

と同意義と考えられる) が形成され则认为している。

柴山, 児玉⁽²¹⁾ は前膨潤の効果がゴム域のみならずガラス域においても顕著に現われることを示している。

高分子網目のトポロジーの研究を進めるためには、トポロジカルな条件に人為的な改変を加え、その効果を調べることが必要である。上述の複合網目や前膨潤もそのための手段と考えられるが、さらに直接的方法として多重網目がある。多重網目とは図 1.2 のように二つの網目が共有結合で結ばれず、網目と網目が互いに入り組み合った、つまりトポロジカルなからみ合いのみで重ねられたものである。もしこのような構造体がつくられたならばそれは単一の網目とは異なった性質を示すであろう。ゴム状の高弾性状態では、網目密度と弾性率の関係は網目の多重によって大きな改変を受けるであろうし、ゴムからガラス状態への転移のようすもこれに対応して微妙な影響を受けるものと予想される。以下、2 章において多重網目構造体の生成とその特長を示し、3 章において多重の程度と網目鎖の種類効果を調べるために、粒子状の高分子網目の存在下で多官能性 プレリマを重合して得られた系の力学的性質を調べた結果を報告する。

2. 多重網目高分子

2.1 多重網目の調整法

図 1.2 に示したように多重網目構造体は第一段の網目に第二段の網目が重なって生じたもので、さらに第三、第四段と網目が重なる場合をも含む。このような多重網目構造体はすでにでき上がった第一段の網目を多官能性単量体で膨潤させ、次に吸収した単量体を重合させることによって生成すると考えられる。この過程は図 2.1

表 2.1 試料の組成
Composition of sample.

母体ポリマ		合体ポリマ					
M 系 列		S 系 列			D 系 列		
No.	DVB content (10^{-4} mol/g)	No.	DVB content (10^{-4} mol/g)	W_2/W_1	No.	DVB content (10^{-4} mol/g)	W_2/W_1
M-1	1.64	S-1	1.40	2.10	D-1.5	4.04	1.88
M-2	2.30	S-2	2.34	1.53	D-2.4	3.21	1.53
M-3	3.16	S-3	3.24	1.31	D-4.1	2.54	1.05
M-4	3.90	S-4	3.84	1.04	D-4.2	3.11	1.03
M-5	5.30	S-5	5.31	0.77	D-5.1	4.07	0.81

* W_1 一次高分子の重量
 $W_1 + W_2$ 合体ポリマの重量

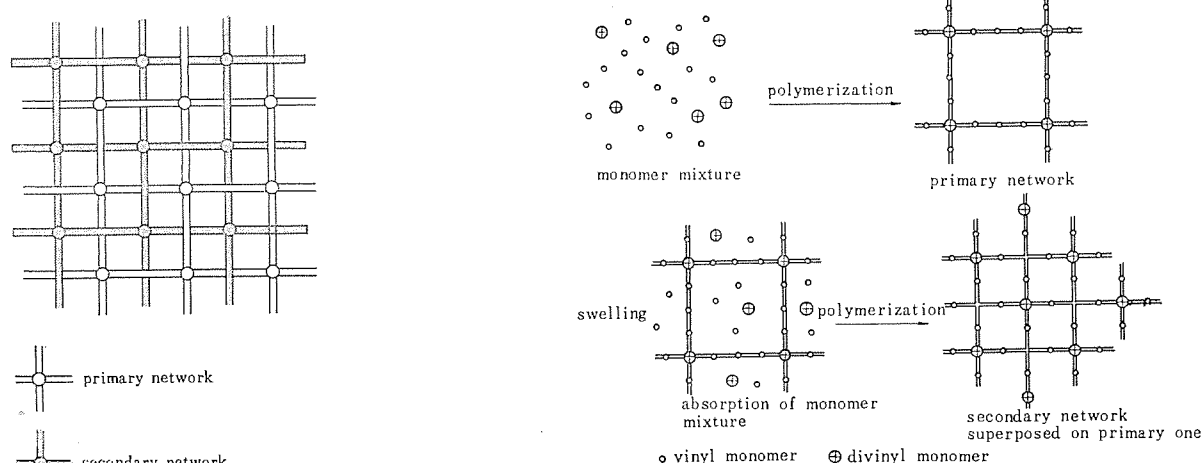


図 1.2 多重網目構造の模式図

Schematic representation of multiple network structure.

図 2.1 ビニルおよびジビニル単量体混合物からの多重網目構造の形成

Schematic representation of the formation process of multiple network polymer from vinyl and divinyl monomer.

のように示される。

表 2. 1 に第一段の網目と第二段の網目が同一分子鎖によって構成された スチレン-ジビニルベンゼン 系からなる試料の組成を示した。スチレン (St) と ジビニルベンゼン (DVB) の各単量体の配合割合を変え、網目密度の異なる第一段の網目高分子を作成した。第一段の網目高分子を以下、母体ポリマと呼ぶ。母体ポリマに単量体混合物を吸収させ再重合したものを以下、合体ポリマと呼ぶことにする。膨潤に用い

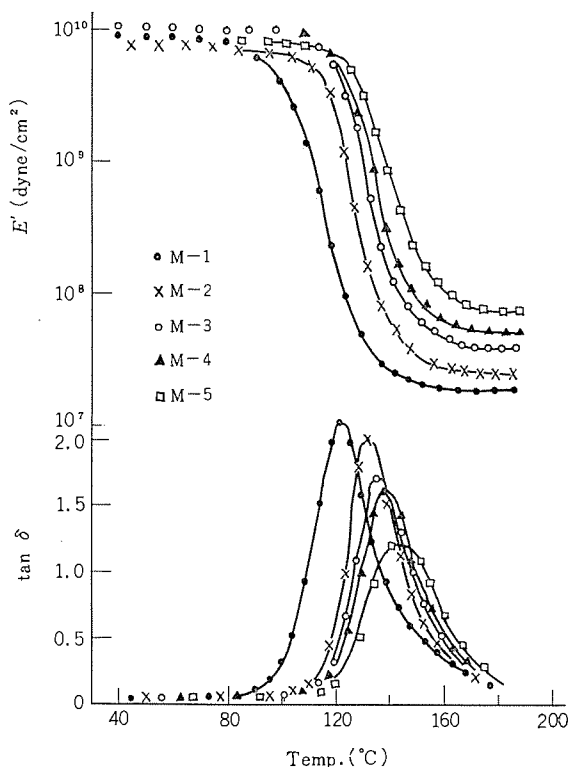


図 2. 2 M 系列の粘弾性温度分散 (138 Hz)
 E' and $\tan \delta$ vs. temperature curves for series M.

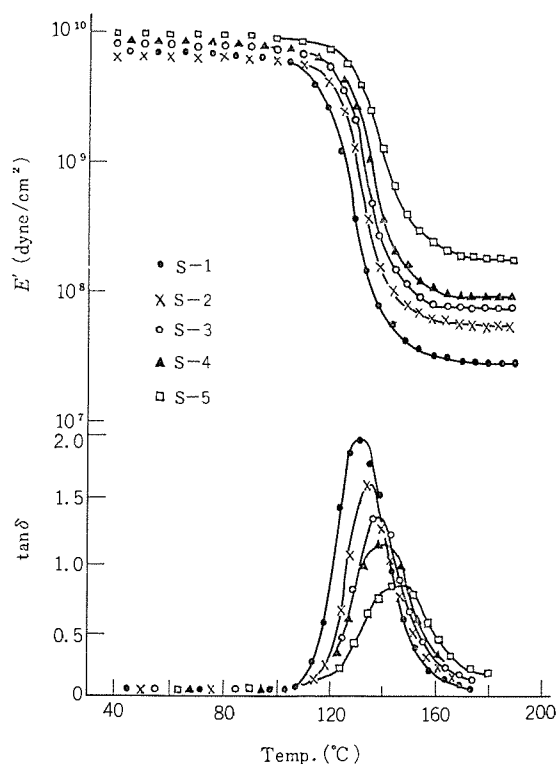


図 2. 3 S 系列の粘弾性温度分散 (138 Hz)
 E' and $\tan \delta$ vs. temperature curves for series S.

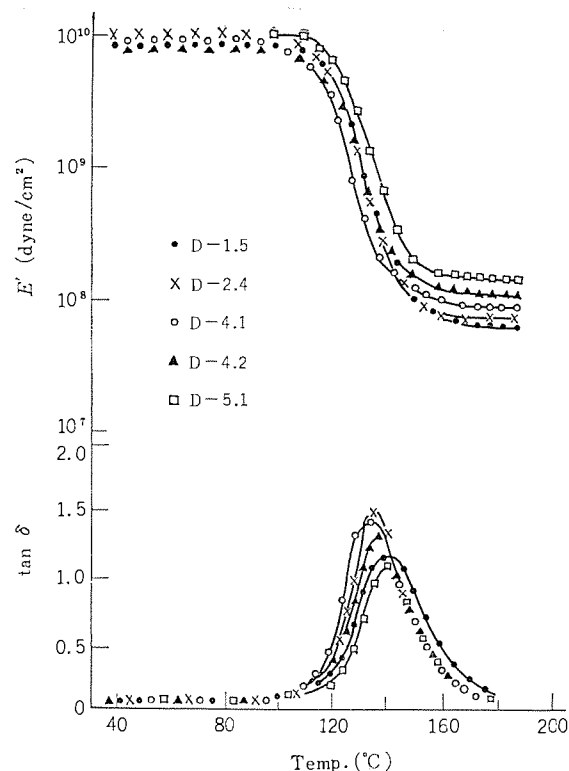


図 2. 4 D 系列の粘弾性温度分散 (138 Hz)
 E' and $\tan \delta$ vs. temperature curves for series D.

た St-DVB 単量体組成は表 2. 1 に示したように母体ポリマとだいたい同一の場合 (S 系列) と、母体ポリマとは異なる場合 (D 系列) について行なった。表 2. 1 でたとえば D-1.5 とは M-1 の母体ポリマを M-5 に相当する組成の単量体混合物で膨潤し再重合したことを示す。

2. 2 多重網目の性質

図 2. 2~2. 4 に粘弾性の結果を示した。母体ポリマと比較して合体ポリマでは ゴム 弾性率の増加が認められるが、そのための分散域の移動は著しくない。これらの結果から粘弾性を特長づける数値として分散の鋭さを示すパラメータ h , $\tan \delta$ の極大を示す温度 T_m , ゴム弾性から橋かけ密度 ρ_E ($\rho_E = E'_2/3dRT$, E'_2 : ゴム 弾性率), 単量体

表 2. 2 実験結果の諸数値
Summary of results.

No.	h	T_m (°C)	ρ_E (10^{-4} mol/g)	ρ_N (10^{-4} mol/g)	d (at 25°C)	V_p (Toluene)	V_p (Acetone)
M-1	0.854	122	1.75	1.64	1.0507	0.31	0.64
M-2	0.874	131	2.17	2.30	1.0480	0.35	0.61
M-3	0.795	137	3.42	3.16	1.0477	0.41	0.66
M-4	0.761	139	4.76	3.90	1.0471	0.46	0.68
M-5	0.680	142	6.99	5.30	1.0484	0.50	0.70
S-1	0.918	131	2.98	1.40	1.0476	0.40	0.67
S-2	0.855	136	5.29	2.34	1.0475	—	—
S-3	0.790	137	7.48	3.42	1.0476	0.54	0.72
S-4	0.747	139	9.77	3.84	1.0476	—	—
S-5	0.582	143	16.73	5.31	1.0476	0.65	0.77
D-1.5	0.609	139	5.72	4.04	1.0480	0.50	0.69
D-2.4	0.763	134	6.32	3.21	1.0482	0.50	0.69
D-4.1	0.793	134	7.72	2.54	1.0478	0.54	0.60
D-4.2	0.763	137	9.47	3.11	1.0473	0.58	0.75
D-5.1	0.655	141	11.20	4.07	1.0480	0.61	0.77

Nomenclature

h : Steepness of dispersion

T_m : Temperature of $\tan \delta$ maximum

ρ_E and ρ_N : Crosslinking density calculated from rubbery modulus and concentration of DVB, respectively

d : Density

V_p : Volume fraction of polymer swollen in solvents

組成から定まる橋かけ密度 ρ_N (=DVB 濃度 mol/g), および膨潤度 V_p , 密度 d を表 2.2 にまとめた。

表 2.2 で明らかなように合体ポリマは母体ポリマに比べて ρ_E が大きい。 ρ_E と ρ_N の関係は図 2.5 に示したように, 母体ポリマ (M 系列) と S 系列では規則的である。そして M 系列では ρ_E と ρ_N は大体等しいが, S 系列では ρ_E は ρ_N の約 2 倍の値を示す。合体ポリマが高い ρ_E の値を示す原因としては, 次の三つの場合が考えられる。

- (1) 吸収された単量体が母体ポリマとの反応によって付加的な橋かけ結合を生じること。
- (2) 第一段の網目が膨潤の際に引き伸ばされた効果が残ること。
- (3) 二つの網目の重なりによるからみ合いの数の増加によることである。

(1) の可能性は, 連鎖移動定数が 10^{-4} 程度の大きさであることから考えて, 明らかに認められる程度のゴム弾性率の増加をもたらすとは考えられない。(2) の可能性については, 多重度を 1 として伸長された第一の網目と未伸長の第二の網目の並列模型による計算の結果, 約 10% 程度のゴム弾性率の増加が期待できるが, 観察さ

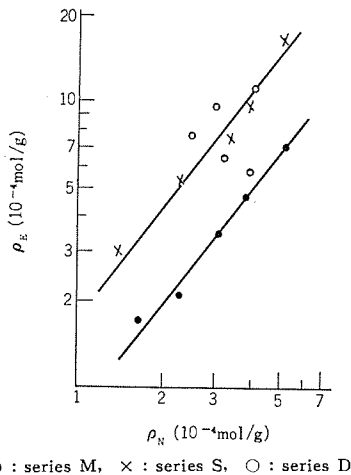


図 2.5 ρ_E と ρ_N の関係

Relation between crosslinking densities ρ_E and ρ_N calculated from rubber modulus and monomer composition, respectively.

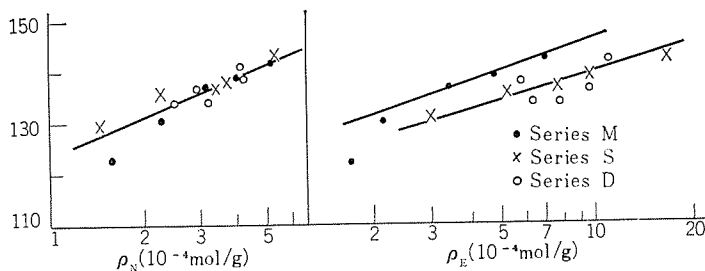


図 2.6 T_m と ρ_N および ρ_E の関係

Relations among T_m , temperature of $\tan \delta$ maximum, and the crosslinking densities.

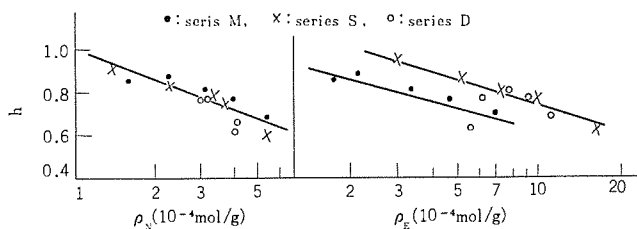


図 2.7 h と ρ_N および ρ_E の関係

Relations among h , steepness of dispersion, and the crosslinking densities.

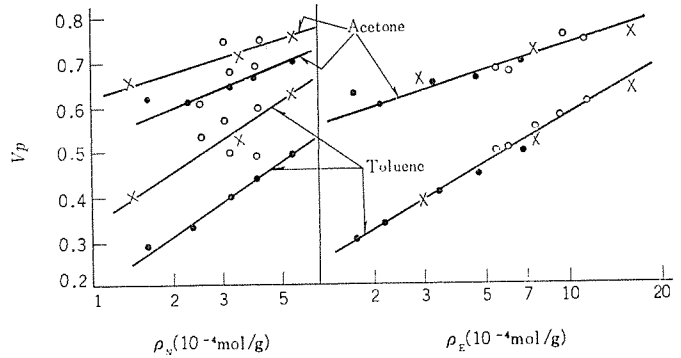


図 2.8 V_p と ρ_N および ρ_E の関係

Relations among V_p , volume fractions of polymer swollen in toluene and acetone, and the crosslinking densities.

れた約 2 倍の増加を説明するには十分でない。したがって合体ポリマにおける ρ_E の増加のおもな原因は, (3) の可能性すなわち網目の重なりによるからみ合い数の増加にあると推定される。

D 系列では ρ_E と ρ_N は規則的な関係になく, ρ_E は母体ポリマの種類によって強い影響をうけるようである。この事実, 膨潤に用いた単量体の組成とポリマに吸収された単量体組成が, 異なる (吸収された単量体組成は母体ポリマの組成に近い) 選択吸収が起こっている可能性を示すものである。

以上のことから一つの推論として ρ_N は化学的な橋かけ結合の数を示し, ρ_E は化学的な橋かけ結合の数に多重による網目のからみ合い数を加算したものを表わすと考えることができる。次にこの 2 種類の網目密度 ρ_E と ρ_N をものさしとして表 2.2 に示した諸性質を調べる。図 2.6~2.8 に T_m , h および V_p をそれぞれ ρ_E と ρ_N に対してプロットした結果を示した。これらの図から次の傾向が認められる。

(a) T_m を ρ_N に対してプロットすると M, S および D の各系列ともほぼ 1 本の直線上にのり, ρ_E に対してプロットすると M と S はそれぞれ別の直線に分かれ, D はいくらか散乱するが S の直線に近い。

(b) h は T_m の場合と同様に ρ_N に対してほぼ 1 本の直線にのり, ρ_E に対しては M と S はそれぞれ別の直線に分かれ, D は散乱する。

(c) V_p は T_m および h とは対照的に ρ_E に対してアセトンおよびトルエンの両方の場合それぞれ 1 本の直線に集まり, ρ_N に対しては M と S は別の直線に分かれる。

T_m は近似的にガラス転移点と一定の関係にあり, その相対的尺度と考えてよい。ガラス転移が分子鎖の再配列を伴う大規模運動が凍結される点と考えられるならば, 全試料を通じて T_m が多重によるからみ合いを考慮しない化学的な橋かけ結合の数 (ρ_N) によって支配されるという事実は, からみ合いが長い緩和時間の分子鎖の再配列運動には大きな影響を与えない, いわゆる long range contour looping⁽²²⁾によって生じていると想像される。

一方, h は筆者らの考慮⁽³⁾によれば, 結合点付近での束縛の集中の程度によって影響を受けるから, T_m におけると同様なからみ合いの形態を想定し, からみ合いは結合点付近の束縛の集中度には影響を与えないとすれば, (b) の傾向は理解される。

また V_p については, 溶剤の自由体積付与効果によって分子鎖運動の緩和時間は十分短くなっているため, 膨潤度を支配するのはからみ合いをも含めた網目の平衡的な弾性復元力であると考えられ, (c) の傾向は理解される。

以上のように化学的な橋かけ結合と網目のからみ合いが、ポリマの物性に対してそれぞれ特長的な効果をもってすれば、ここで得られた合体ポリマは、最初に想定した多重網目構造体としての特長をもつものと考えられる。

3. 微粒状高分子網目分散系の挙動

2章で、二つの網目がトポロジカルなからみ合いによって結ばれた構造をもつ多重網目高分子について述べた。多重網目高分子については、多重の程度や分子鎖の種類の影響をさらに調べる必要があるが、第一段目の網目を通常の巨視的寸法で用いる場合、あとの測定に便利な形状の試料を作成するには、実験的困難が大きく自由に試料系を編成することがむずかしい。この困難を除く方法として、第一段の網目をミクロンでいどの粒子にして充てん剤のように用いることが考えられる。この場合、網目の多重のほかに粒子の大きさに応じた不均一性を新たな要因として取り入れることができると想像される。

図 3.1 にスチレン (St)―ジビニルベンゼン (DVB) からなる粒子を、多官能性プレポリマ (ポリプロピレングリコール・サクシネート・フマラート) の St 溶液に分散し、重合してえられる網目構造の模式図を示した。表 3.1 に試料の組成を示した。試料の系列としては粒子の網目密度 (=DVB 濃度) は一定で、その充てん量を変えた系列 (W 系列) と粒子の充てん量は一定で、その網目密度を変えた系列 (N 系列) に大別される。

図 3.2, 3.3 に粘弾性温度分散の結果を W 系列および N 系列についてそれぞれ示した。W 系列では粒子の量とともにゴム弾性率 (E'_2) は順次増加し、 $\tan \delta$ の極大値 ($\tan \delta_m$) は減少する傾向がある。一方、 $\tan \delta_m$ を示す温度 (T_m) は高温側へわずかに移行する傾向が見られる。このような傾向は、網目高分子において網目密度を変化させた場合に見られるものと定性的には一致しているが、 E'_2 の増加にくらべ T_m がほとんど一定である点が特長である。このよ

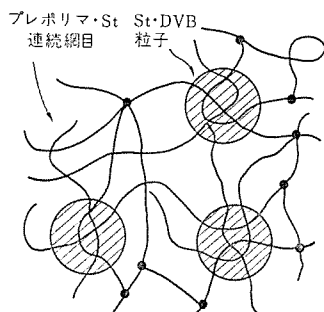


図 3.1 微粒状高分子網目分散系中に形成された多重網目構造の模式図
Schematic representation of polymer network in which microgel particles are dispersed.

表 3.1 試料の組成
Composition of sample.

	Microgel particle (Phr)	DVB content in particle (wt %)
Series W	0	7
	2	
	4	
	8	
Series N	4	3
		7
		20

prepolymer.....50 parts
monomer.....50 parts

うな挙動は 2 章で述べた多重網目の特長 (すなわち網目のからみ合いによって E'_2 は増加するが、 T_m は変化しない) と一致するわけで、現在の系でも多重網目が形成されていることを示すものと考えられる。したがって、粒子はトラップされたからみ合いの形成によって束縛領域として作用するものと考えられる。図 3.4 に各パラメータと粒子量の関係をまとめて示した。

一方、N 系列の場合には粒子の網目密度を変えても E'_2 は変化せず、 $\tan \delta_m$ は粒子の網目密度が増加すると (ふつうとは逆に) 大き

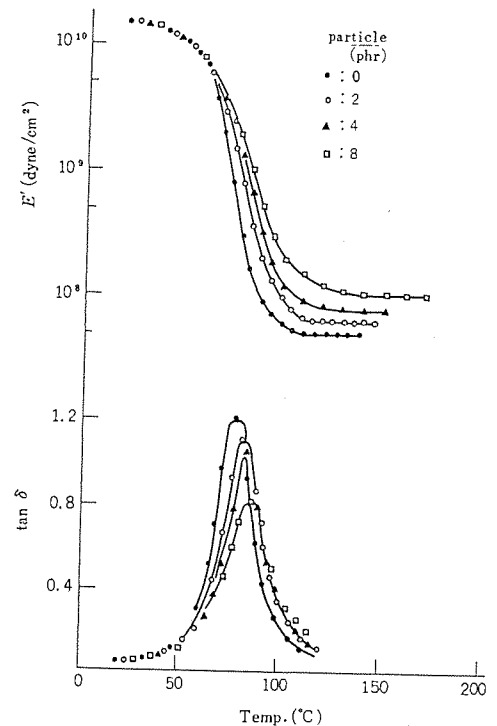


図 3.2 W 系列の粘弾性温度分散 (10 Hz)
 E' and $\tan \delta$ vs. temperature curves for series W

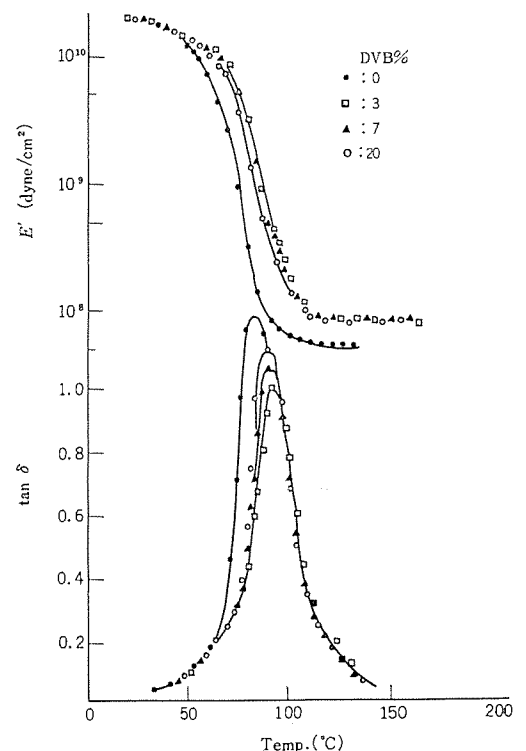


図 3.3 N 系列の粘弾性温度分散 (10 Hz)
 E' and $\tan \delta$ vs. temperature curves for series N.

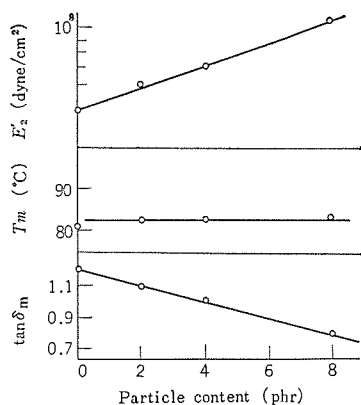


図 3.4 E_2' , T_m および $\tan \delta_m$ と粒子量
の関係 (W 系列) (10 Hz)
 E_2' , T_m and $\tan \delta_m$ vs. particle
content for series W.

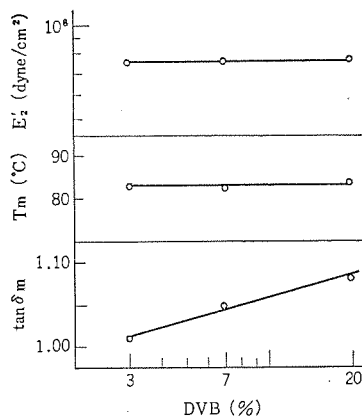


図 3.5 E_2' , T_m および $\tan \delta_m$ と粒子
の網目密度 (DVB %) の関係
(N 系列) (10 Hz)
 E_2' , T_m and $\tan \delta_m$ vs. network density
(DVB %) of particle for series N.

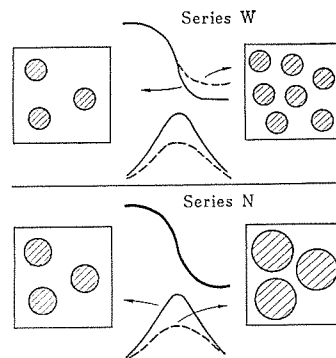


図 3.6 粘弾性に現われた微粒高分子
網目の効果説明
Schematic representation of the
effect of microgel particles.

くなる傾向が見られる。また T_m はほとんど一定である。図 3.5 に各パラメータと粒子の網目密度の関係を示した。粒子の網目密度によるこのような特異な挙動は、微粒網目の系内における広がり相違によってもたらされたものと想像される。試料は同一の方法によって作成されたものであって、粒子の寸法は網目密度によって大きな差はないと考えられるが、プレポリマー-スチレン単量体と混合した場合の膨潤度は網目密度によって支配されると考えられる。

W 系列および N 系列とも測定範囲で分散は単一であって、複数の分散を示すというような不均一系の挙動は明らかではないが、粒子の束縛領域としての作用のしかたが、それぞれの系列において特長のある力学的性質を示すことが認められた。

ここで述べた 2 系列 (粒子の網目密度は一定で充てん量を変えた W 系列, 充てん量は一定で粒子の網目密度を変えた N 系列) の結果を総括して考えると, ゴム弾性率 (E_2') は [平均的なからみ合いの数 + 橋かけ結合の量] となり, E_2' は粒子の重量分率 (粒子の数) によって定まるが, $\tan \delta_m$ の大きさ (分散の鋭さ) は粒子の体積分率によって支配されるものと考えられる。すなわち図 3.6 に示したように同じ網目密度の場合, 束縛領域の数とともに E_2' がふえ (W 系列), 一方粒子の網目密度が異なる場合には, 束縛領域の数は同じでも (N 系列) その広がりが異なるものと考えられる。広がりを見方を変えれば粒子内へのスチレン単量体やプレポリマーの侵入の程度と関係があり, この点については試料系の範囲を広げること, および測定手段に微視的な方法を導入することによってさらに追求してゆかねばならない。

4. む す び

スチレン-ジニルベンゼン系によって網目の重なったと考えられるポリマーを調整し, その力学的性質と膨潤性について調べた結果, 多重網目構造体としての特長が示された。多重網目は複数の網目がトポロジカルなからみ合いによって, 入り組み重なり合った構造として理解される。このような構造は, 第一段の網目を微粒状とし多官能性プレポリマーに分散して得られた系においても形成されることを知った。この場合, 粒子の網目密度によって系内での粒子の広がりが力学的性質に興味ある影響を与えることが示された。一般の単純網目高分

子では, からみ合いを人為的に変化させることは困難であるが, 多重網目構造体ではそれが可能であり, 実用性質に対する影響とあわせて研究を進めることにより, 有効な高分子材料の改質手段となるであろう。

参 考 文 献

- (1) 柴山: 高分子化学, 18, 183 (昭 36)
- (2) 柴山: 高分子化学, 19, 219 (昭 37)
- (3) 柴山: 高分子化学, 20, 221 (昭 38)
- (4) K. Shibayama, Y. Suzuki: J. Polymer Sci., A-3, 2,637 (1965)
- (5) J. D. Ferry et al.: J. Phys. Chem., 68, 3,414 (1964)
- (6) E. Maekawa et al.: J. Phys. Chem., 69, 2,811 (1965)
- (7) N. R. Langly, J. D. Ferry: Macromolecules, 1, 353 (1968)
- (8) R. H. Valentine, J. D. Ferry: J. Polymer Sci., A-2, 6, 479 (1968)
- (9) G. Kraus, G. A. Moczvgemba: J. Polymer Sci., A-2, 277 (1964)
- (10) A. Greene et al.: Trans. Faraday Soc., 61, 2,772 (1965)
- (11) K. J. Smith et al.: J. Polymer Sci., A-2, 1,025 (1964)
- (12) J. P. Berry et al.: Trans. Faraday Soc., 52, 1,137 (1956)
- (13) B. Mukherji, W. Prins: J. Polymer Sci., A-2, 4,367 (1964)
- (14) W. G. Lloyd, T. Alfrey: J. Polymer Sci., 62, 301 (1962)
- (15) J. F. Jackson, S. J. Gill: J. Polymer Sci., A-2, 5, 663 (1967)
- (16) N. R. Langley et al.: J. Polymer Sci., A-2, 6, 1,371 (1968)
- (17) J. Hasa, J. Janacek: J. Polymer Sci., C-16, 317 (1967)
- (18) M. C. Shen, A. V. Tobolsky: J. Polymer Sci., A-2, 2,513 (1964)
- (19) M. C. Shen, A. V. Tobolsky: J. Polymer Sci., A-3, 629 (1965)
- (20) G. R. Cotten: J. Polymer Sci., A-2, 5, 1,177 (1967)
- (21) 柴山, 児玉: 三菱電機技報, 41, 604 (昭 42)
- (22) F. Bueche: J. Polymer Sci., 25, 243 (1957)

符号伝送試験装置とその実測例

前田 良雄*・平沢 茂一*・酒井 勝也*・山内 才胤**

Data Transmission Testing Equipment and Example of Its Application

Central Research Laboratory

Yoshio MAEDA・Shigeichi HIRASAWA・Katsuya SAKAI

Communication Equipment Works

Toshitane YAMAUCHI

When an integrated data system is brought to mind, it is necessary to find a means to master the question of distance. To meet the problem a data transmission system is considered applicable nowadays. This system and a data processing system is often combined together with a new name of a data communication system, in which the function of data transmission plays a very important role. The problem posed in the data transmission technique is not only mere electrical connection of remote points but good efficiency in execution and diminution of transmission errors as the case demands. This makes it necessary to study the quality of the transmission in general, which in turn comes to need appropriate data transmission testing equipment.

Under the circumstances, a type MDT-201 has been designed and built for trial. This device is capable of classifying and counting the errors. An example of the measurement with this device is also given in application to an induction radio data transmission system.

1. ま え が き

今日、各企業においては好むと好まざるとにかかわらず経営の合理化、設備の機械化など、情報の制御・処理に関する技術革新の波に洗われている。

中でも、各種情報の統合処理化がいよいよ活発となり、各方面でデータの集配のために距離を克服しようとする、データ伝送システムがクローズアップされ、処理と一体化してデータ通信という言葉で注目されている。

このようなデータ通信システムを考えると、データの伝送を受けもつ符号伝送は機能的にもきわめて重要である。データ伝送技術の中心は、互いに離れた二点を単に電氣的に結合ということだけではなく、限られた回線特性を用いていかに効率よくかつ誤りを少なく伝送するかということであり、伝送品質に関する一般的な検討が必要である。

たとえば、システム設計に当たり処理装置・端末装置・データ伝送回線などについて、適正な経済投資配分をすることはシステムの有効な運用上、最もたいせつなことであるが、これを決める要素として障害あるいは誤り発生に関する考察、対象を除外しては考えられない。

障害あるいは誤りというのは、通常、障害あるいは誤りの発生割合とその見のがし割合としては(把)握される。

処理装置・端末装置については、ハードウェア的・ソフトウェア的に方式あるいは回路的な対策が考案され、信頼性算出・誤り見のがし割合など各方面で比較的検討されているが、データ伝送回線については種種の原因による誤りが発生し、これを訂正してもなお、見のがし割合を考慮する必要のある場合があり、回線固有の特性を十分検討する必要がある。

一口にデータ伝送回線の誤り原因と言っても、瞬断・パルス性ノイズ・白色雑音・周波数帯域制限・周波数変動・振幅ひずみ・遅延ひずみなど動的・静的なものがいっさい含まれ、これらの要因解析を行なおうとすると、適当な試験装置とばう大なデータの統計的処理が必要となる。

ここではこのような目的のために、伝送品質の誤りの発生特性を

目安には握しようとしたものである。

2. 符号伝送試験システムの構成

符号伝送試験システムは、一般には符号伝送品質を評価するためのものであり、ここでは擬似符号を送信し、生じた誤りを発見し、計数表示・分類・処理などの機能によって構成される。

符号伝送試験を行なう際まず第一に図2.1(a)のような折返し試験、および図2.1(b)のような対向試験が考えられ、さらに誤り制御装置の能力評価(見のがし誤りの発生割合や訂正能力)を含むもの、既設回線を用いに行なうシミュレーションテストなどがある。

以上よりここでは折返し試験の場合を考え図2.2に本システム構

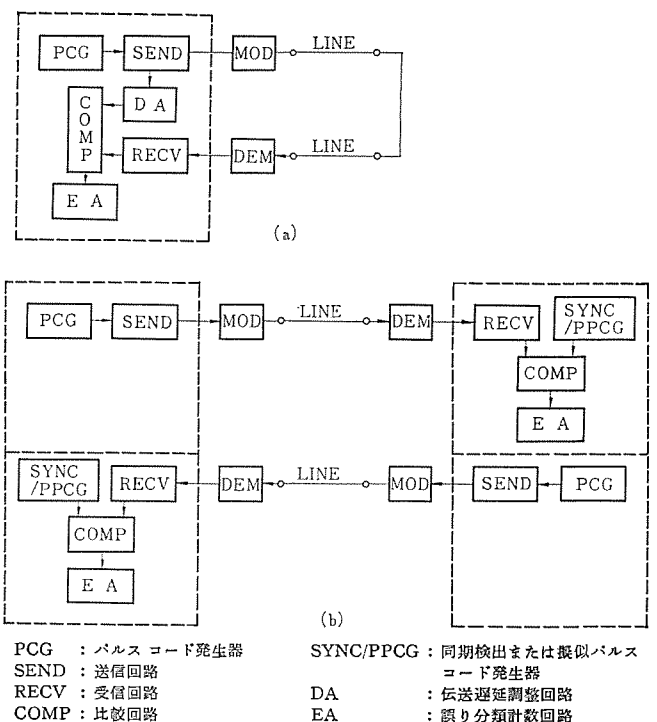


図 2.1 符号伝送試験システム
Data transmission testing system.

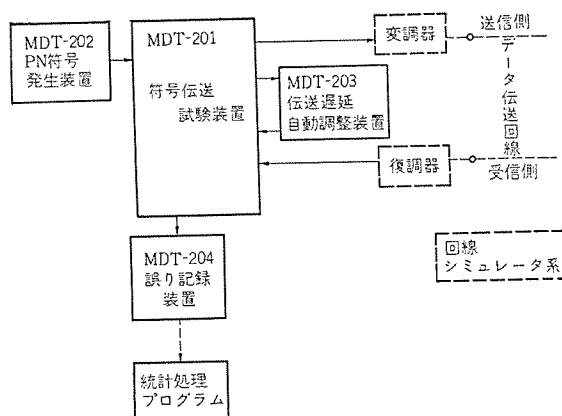


図 2.2 MDT 符号伝送試験システム
MDT Data transmission testing system.

成を示した。

システムは、MDT-201 符号伝送試験装置（本体）を中心として、MDT-202 PN 符号発生装置・MDT-203 伝送遅延自動調整装置・MDT-204 誤り記録装置は必要に応じ付加されるもので、本体のみで一応の試験が実施できるよう考慮されている。

MDT-201 符号伝送試験装置（本体）

MDT-202 PN 符号発生装置

MDT-203 伝送遅延自動調整装置

MDT-204 誤り記録装置

以上のほか、回線の伝送品質を別の立場から評価するために、周波数特性・位相特性などの静的な特性測定、瞬断検出・ノイズスペクトル解析・ノイズレベルなどの動的な特性測定の装置も必要である。今回、MDT-201 符号伝送試験装置（本体）の試作を完了し、移動体間通信に用いられる誘導無線伝送システムの実測データ例を得たので、これを中心に報告する。

3. MDT-201 符号伝送試験装置の概要

3.1 概要

本装置は、調歩同期方式を主として（外部同期方式も可能）外部よりまたは内部でセットした擬似符号パターンを送信し、伝送回線を通して受信したものを語（WORD：32ビット以下）単位またはビット単位で比較し、その誤りを分類・計数する。

3.2 諸元および構造

本装置の構造および諸元は次のとおりである。

- (1) ラック SLF 形標準ラック（パネル構成）
- (2) 大きさ 幅 600×高さ 1,910×奥行 500（単位 mm）
- (3) 消費電力 約 0.3 kVA
- (4) 使用素子 三菱モロトロン（TTL-NAND M 5300 P シリーズ）
約 400 個、その他一部 Tr. Di. R. C. 使用

外観は図 3.1 のとおり

3.3 構成

本装置は機能的に大別して次の 1～4 に 4 分割し、おのおののパネル構成されている。

- (1) 制御パネル（CONTROL）
- (2) 送信パネル（SEND）
- (3) 受信パネル（RECEIVE）
- (4) 誤計数パネル（ERROR COUNT）

さらに、本体の裏面に

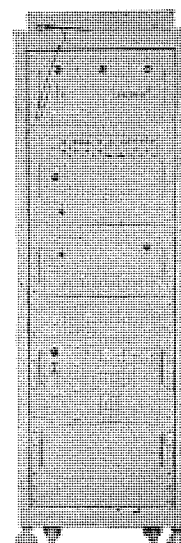


図 3.1 MDT-201 符号伝送試験装置外観
Data transmission tester.

(5) 動作チェックおよび雑機能パネル（OP CHECK and MISC）を配置し動作チェックを容易にしている。

各パネルは機能を満足するよう設計された回路部と対応がつき、

4 章に詳細を述べる。

3.4 主要性能

MDT-201 符号伝送試験装置の主要性能をまとめると次のとおりである。

(1) 通信速度

25 ビット/秒～10 キロビット/秒

（ただしクロックは通信速度の 32 倍が必要）

(2) 制御モード

(a) 調歩同期方式

- (i) Normal mode
- (ii) 1 cycle mode
- (iii) 1 step mode
- (iv) Stop

(b) 外部同期方式

- (i) Bit test mode
- (ii) SCC* test mode

（注）* Shortend Cyclic Code の略

(3) 試験モード

- (a) 自動（誤りを計数表示し、連続的に試験）
- (b) 手動（誤りを計数表示しチャイム鳴動、一時停止後手動によりリスタート）

(4) 送信符号の種類

- (a) 内部符号
 - (i) 32 ビット 試行語カウンタによる自動計数パターン
 - (ii) 手動セットボタンによる任意パターン
- (b) 外部符号
 - (i) 並列入力……リーダーまたはデータコネクタよりの外部セット入力
 - (ii) 直列入力……ビット直列の外部セット入力

（注）1 語は 32 ビット以下の任意の値にセット可能

(5) 送受信インターフェイス

- (a) 高速 電圧：±(8±4)V 可変

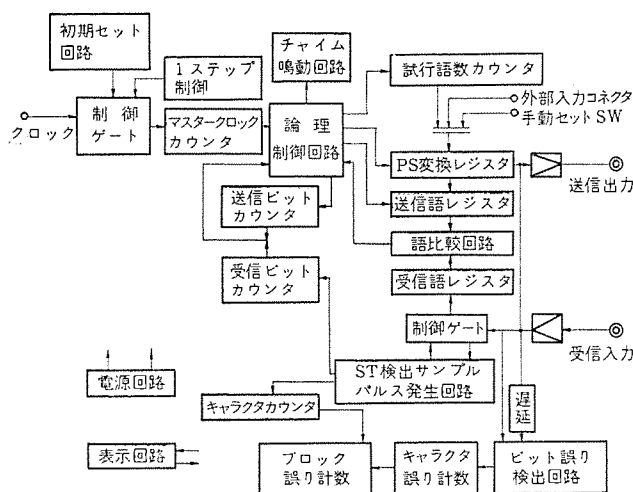


図 3.2 MDT-201 符号伝送試験装置 ブロック図
Block diagram of data transmission tester MDT-201.

出力抵抗: 2 ~ 6 k Ω 可変

(b) 低速 電圧: ± 50 V

または電流: ± 20 mA (1 k Ω にて)

(6) 誤り計数分類

(a) 語誤りテスト

- (i) 試行語数カウンタ (32 ビット)
- (ii) 誤り語数カウンタ (6 ビット)
- (iii) 同期誤り語数カウンタ (6 ビット)

(b) ビット誤りテスト

(i) ビット誤りカウンタ

合計数 (10 ビット)
S \rightarrow M 誤り数 (10 ビット)
M \rightarrow S 誤り数 (10 ビット)

(ii) キャラクタ誤りカウンタ

合計数 (6 ビット)
1 ビット/キャラクタ 誤り数 (6 ビット)
2 ビット/キャラクタ 誤り数 (6 ビット)
3 ビット/キャラクタ 誤り数 (6 ビット)
4 ビット以上/キャラクタ 誤り数 (6 ビット)

(iii) ブロック誤りカウンタ

合計数 (4 ビット)
1 キャラクタ/ブロック 誤り数 (4 ビット)
2 キャラクタ/ブロック 誤り数 (4 ビット)
3 キャラクタ/ブロック 誤り数 (4 ビット)
4 キャラクタ以上/ブロック 誤り数 (4 ビット)

ただし, (ア) キャラクタ長は Bit/character セットスイッチにより 1 語 = 1 キャラクタ (たとえば 8 ビット) にセットする。

(イ) ブロック長は character/Block セットスイッチにより $2^{10}=1024$ 以下の値にセットする。

(7) 伝送遅延補正 (内蔵)

(a) 語誤りテスト

伝送遅延が 3/4 ビット時間以下のときは補正の必要なく 3/4 ビット時間以上のときは 1 ビットを単位として SP 信号を自動的に増加させる。

(b) ビット誤りテスト

内部 4 ビット以下のシフトレジスタおよび外部遅延入出力端子により補正する。

3.5 回路構成

本装置の回路は図 3.2 のように構成されている。

4. MDT-201 符号伝送試験装置の動作説明

4.1 制御部 (CONTROL)

擬似符号パターンの送信・受信・比較・誤り計数等, 本装置のすべての動作につきいっさいの制御を行なう。(ただし, 受信・誤り計数等の一部は独立に動作している部分もある)。

制御部はクロック発生回路・クロック制御回路・制御論理回路に分けられる。

クロック発生回路は, 通信速度の 32 倍の正弦波を発生 (または外部入力) し, これを TTL 論理レベルに変換波形整形する。クロック制御回路はイニシャルスタート, リスタートの各スイッチの開閉によりクロックのゲート制御およびゲートされたパルスをカウントし, デコードして所要のタイミングを発生する。

制御論理部は, 調歩同期モードにおいては図 4.1 のごとく構成され, 上記タイミングクロックを用いてステップの制御を行なう。

これによりチェックが非常に簡単になると同時に, 動作の変更も比較的容易に行なえる。

4.2 送信部 (SEND)

1 語分の送信語レジスタ (S-REG) と並直変換用シフトレジスタ (PS-REG) を持ち, データモード選択スイッチにより所定の符号が, S-REG にセットし記憶しているとともに PS-REG を通して所定のタイミングで伝送回線に送出される。このとき, 線路(変復調器を含む)との結合は所定のインターフェース条件を満足するよう出力整合増幅器 (SA) を用いている。(図 4.2)

なお, 1 語長は 32 ビット以下の任意のビット数がセットできるようになっている。この制御はすべて制御部より行なわれる。

4.3 受信パネル部

受信部は大別して ST 検出回路を含めたサンプルパルス発生回路と, 受信語レジスタ (R-REG) とに分けられる。

非同期通信では, 一般に調歩同期方式 (ST, SP 方式) が多く採用されており, ここでも ST 検出を行なう回路を内蔵している。

ST 検出は 32 倍のクロックを用いて受信マージンも可変になっている。

また, 受信部にもビットカウンタを持っており, このカウンタの内容をデコードして図 4.3 のような受信側の入力整合増幅器 (RA) を経て, 受信符号を R-REG へセットする。

4.4 誤計数部

誤り発生回数の計数については, 主として調歩同期方式における

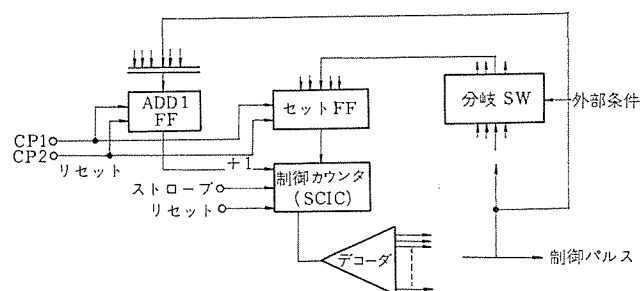


図 4.1 制御論理部ブロック図
Block diagram of control logic.

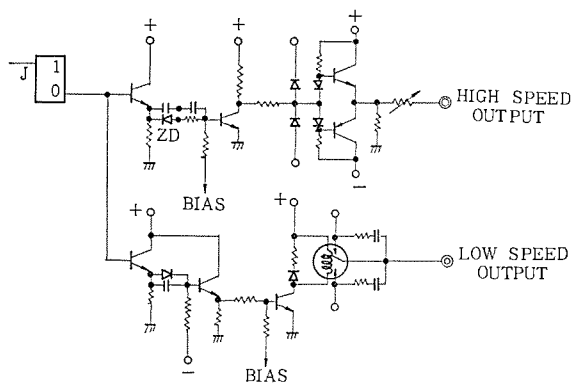


図 4.2 送信出力増幅器 (SA)
Circuit of sending buffer amp.

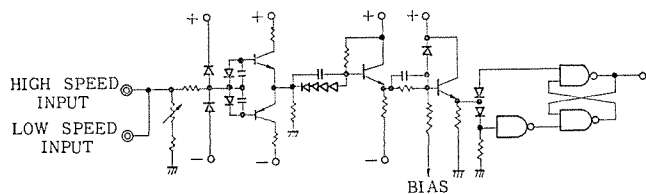


図 4.3 受信入力増幅器 (RA)
Circuit of receiving buffer amp.

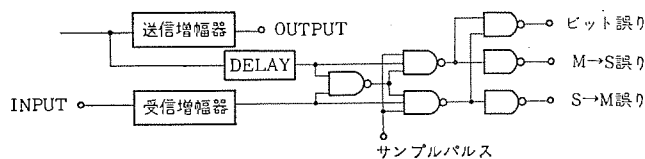


図 4.4 ビット誤り検出部
Circuit of bit error detection.

語 (WORD) を単位とした比較回路の出力による計数と、誤り計数部で単独に動作するビットを単位とした比較出力による分類計数とに分けられる。

前者は語単位で、送信試行語数を計数表示するカウンタ (TDWC) と誤り語を計数表示するカウンタ (NGWC) と同期誤りを計数表示するカウンタ (SEEC) とがあり、おのおの制御部により所定のタイミングで+1される。

後者は、以上とは独立してビット比較をする回路、およびこれらを分類し計数する合計 14 個のカウンタにより構成されている。

なお、このビットを比較するために伝送回線上の遅延を補正する中間端子付き 4 ビットのシフトレジスタを持ち、(さらにこれ以上の遅延

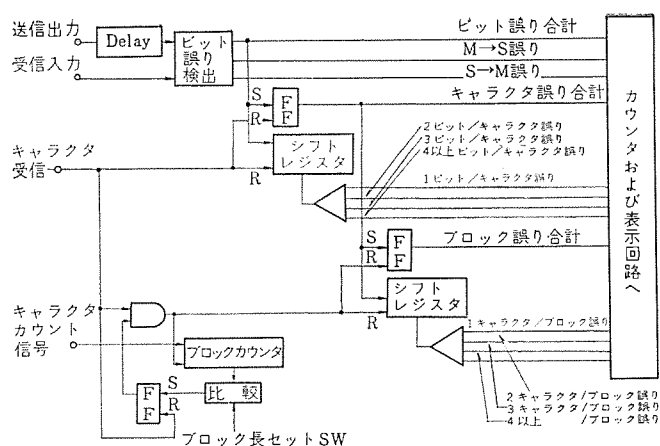


図 4.5 誤り分類計数部ブロック図
Block diagram of error counting circuits.

調整には、1024 ビット以下の調整可能な MDT-203 伝送遅延調整装置を用いる、送信符号の遅延出力と受信符号とを比較するようになっている。

なお、ビット誤り検出部は図 4.5 のとおりで、これを図 4.5 で示した誤り分類計数回路に接続して表示する。

5. 誘導無線伝送路における実測例

移動体間通信において用いられる誘導無線伝送路で符号伝送した際の、誤り特性を MDT-201 符号伝送試験装置を用いて実測した例を次に示す。

5.1 測定方法

測定方法は図 5.1 のとおりで、誘導無線伝送路のおもな仕様は次のとおりである。

- (1) 伝送路 平行 2 線 (間隔 200 mm)
硬銅線 3.2 mmφ 使用
- (2) アンテナ 300×600 mm, 角形 ルーパアンテナ
線材: リッツ線 (外被 ポリウレタン 0.2φ×3×3×3)
- (3) 端局装置 200 ボー モデム 付き 160 kHz 帯搬送装置
- (4) 雑音源 放電雑音 (ネオトランス 二次側 15 kV)

端局装置の標準送受信利得は 47 dB であり、この内約 40 dB~45 dB は平行 2 線伝送路の損失である。ここで 15 kV による放電雑音を受信アンテナの近くに置き、これにより電動機雑音・スパーク雑音など各種の雑音を模擬している。

この雑音線の電界強度周波数特性は図 5.2 のとおりである。

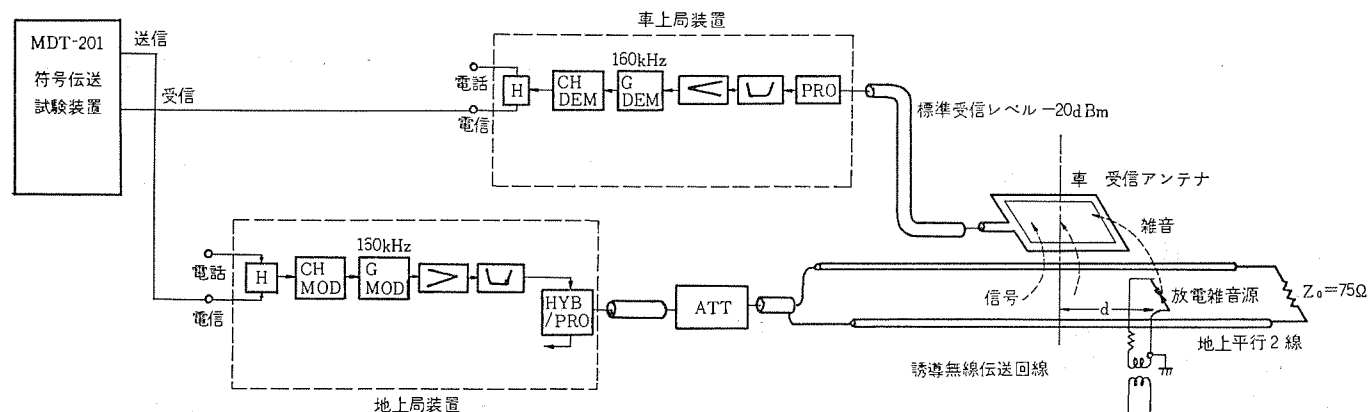


図 5.1 誘導無線伝送システムにおける実測例

Example of induction radio transmission system.

表 5.1 誘導無線伝送路の誤り特性測定例
An example of characteristics of induction radio transmission line.

ATT (dB)	雑音源距離 d (mm)	試 行 語 数	誤 り 分 類															ビット誤り率
			誤り語数	同期誤り	ビ ッ ト 誤 り			キ ャ ラ ク タ 誤 り (ビット/キ ャ ラ ク タ)				ブ ロ ッ ク 誤 り (キ ャ ラ ク タ / ブ ロ ッ ク)						
					合 計	M→S	S→M	合 計	1	2	3	4 ～	合 計	1	2	3	4 ～	
15	0	629	47	1	129	70	59	48	40	5		3	4		1		3	6.4×10 ⁻³
	200	2,028	14		13	6	7	13	13				12	11	1			1.3×10 ⁻⁴
	300	8,192																—
18	0	105	46		116	66	50	48	34	7	1	6	1				1	3.5×10 ⁻²
	200	863	43		72	38	34	45	39	3		3	11	1	2	1	7	2.6×10 ⁻³
	300	966	10		21	9	12	11	10			1	9	7	2			6.8×10 ⁻⁴

測定条件 (1) 通信速度: 200 ビット/秒
(2) 調歩同期方式
(3) 1 語=32 ビット (1 キャラクタ=1 語+ST. SP)
1 ブロック=64 キャラクタ
(4) 語のビットパターン: 00110011000011110000000011111111

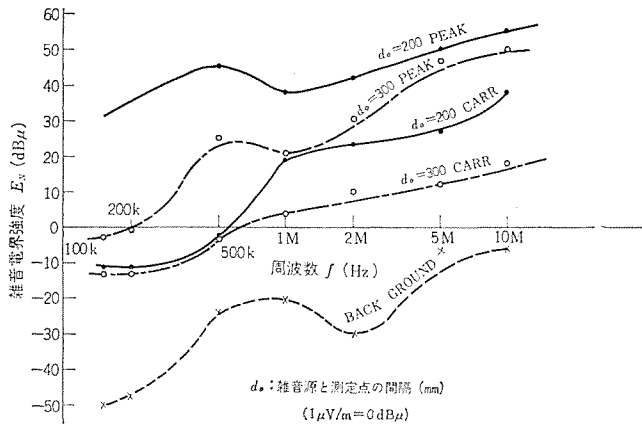


図 5.2 雑音源の特性
Characteristics of noise source.

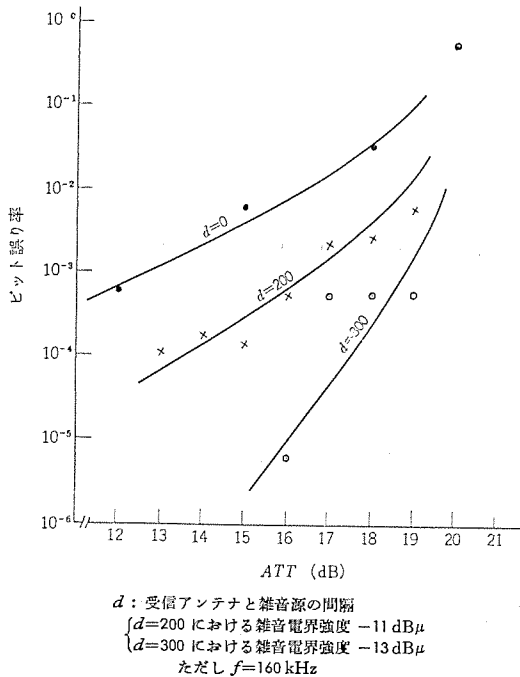


図 5.3 標準結合状態よりの増加結合損一ビット誤り率の関係
Characteristics of coupling loss bit error rate.

5.2 測定結果

上記のような測定方法により実測した結果の一例を次に示す。

図 5.3 は送信レベルをアッテネータで下げた際の誤り発生割合 (ビット誤り率) を雑音電界強度をパラメータにして求めたものである。

この図より明らかなように、信号の送信レベルが下るに従って雑音の影響が現われている。

なお、誘導無線伝送路の符号化復号化装置としては、先に報告した擬似巡回符号を用いた SCED-201 を用い、また、誘導無線伝送路単体の特性については別途まとめる予定であるので、ここでは割愛した。

表 5.1 には、得られた各種の分類結果を示した。

6. む す び

以上 MDT-201 符号伝送試験装置の内容およびこれによる実測例につき述べた。

この種の測定には、測定条件および要因を明確にし、特に測定器類にはそれ自身高信頼性が要求される。

符号伝送試験装置も当初二重化構成を計画したが、電源雑音を極力少くし、布線誘導雑音を減少させる等対策を立て、全面的に IC を用いることにより十分な信頼性を得ている。

ここで MDT-201 符号伝送試験装置の特長をまとめると、

- (1) 操作・取扱い・保守・モニタなどが容易にできること。
- (2) 制御関係に動作機能を集中したために、外部の仕様変更や追加などに比較的容易に応じられること。
- (3) 試験・測定はほとんど人手をかけず自動的に行なえることも考慮したこと。
- (4) 全面的に TTL-IC を用い、長時間の測定で安定した動作を行なえるよう考慮したこと。

最後に本装置試作に当たり、終始ご協力いただいた中研・浅見課・長はじめ、板東・岩谷両技師に感謝いたします。

変圧器のさい断波試験

岩 崎 晴 光*

Chopped Wave Impulse Test of Transformers

Itami Works

Harumitsu IWASAKI

Power transformers are often subjected to lightning impulses and other types of abnormal voltages. In order to attest their insulation strength, impulse voltage tests are given to them, including chopped wave impulse voltage. However there is no standardized regulations for chopped wave impulse tests. This article describes, for the purpose of investigating the differences of severity in the tests of transformers depending on the conditions of chopped wave impulses, the definition of the chopped waveform, the waveform itself, relation between the conditions of chopped wave impulse tests and their severity, and the potential stress at the voltage impressed end and its vicinity of transformer windings in relative to chopped waveforms, referring to the effect of the time to chopping and of chopped wave tail length of impressed voltage. Thus it has clarified the problems in standardizing the chopped wave impulse tests of transformers and the principles of solving them.

1. ま え が き

送配電線に接続される電力用変圧器は、雷その他に基因する異常電圧をうけるので、その絶縁強度の検証のため、衝撃電圧試験が行なわれている。この試験項目のうちに、さい断波試験がある。これは発変電所において、避雷器、保護ギャップの放電、あるいはがい子類の内絡によって、さい断波が発生し、変圧器に印加される⁽¹⁾⁽²⁾ので、このような場合を想定して、さい断波試験が行なわれている。

さい断波試験の条件については、現在十分検討されてはおらず、現行の JEC-176 (静止誘導機器衝撃電圧試験) においても規定化は考えていない。これは、さい断波の条件が変圧器に与える過酷さについて、知られていないことと、試験条件を定めてもその制御が困難なためである。将来規定されることを予想して JEC-171 (衝撃電圧電流一般) において、さい断波形の定義を行なっている。本文はこのような情勢により進めて、さい断波の定義と試験回路の条件を検討し、さらに変圧器に対する過酷度とさい断波形の条件を窮めようと試みた。

2. さい断波電圧波形の定義

さい断波電圧波形の変圧器に及ぼす影響を検討するためには、まずさい断波電圧波形を明確にすることが必要である。さい断波電圧とは、衝撃電圧がその波形上の一点においてさい断されたものをいうが、従来はそのさい断過程についての表現は、明確でなかった。しかし、変圧器のさい断試験に対して用語、定義を定め、定量的に表示することが必要となったので、JEC-171 (衝撃電圧電流試験) 一般によって定められた。図 2.1 (a) のような場合と、さい断波電圧が、図 2.1 (b) のように、零線以下にオーバーシュートする場合とがある。さい断電圧波形を具体的に表現すると、

さい断点 さい断波電圧がさい断しはじめる点をいう。

さい断値 さい断点の電圧の瞬時値をいう。

さい断部分 さい断点からあとの波形の部分のいう。

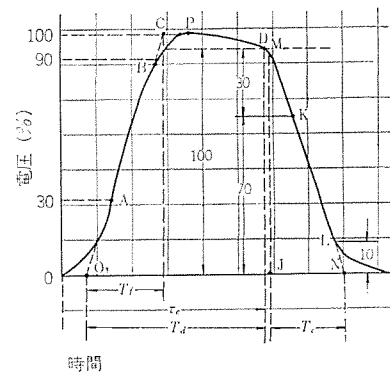
さい断長 さい断部分の継続時間をいう。

さい断までの時間 原点からさい断点までの時間をいう。

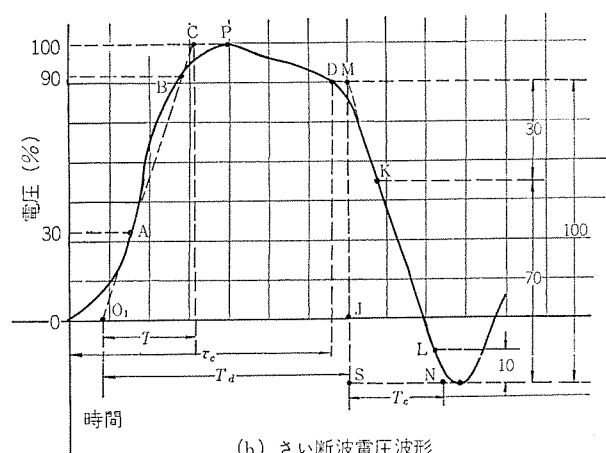
さい断しゅん度 さい断点よりさい断最降下点までの電圧の時間

降下率をいう。

図 2.1 (b) のような場合は、さい断部分において電圧は振動波形となり、零線以下にまで降下する。これは、さい断点において逆電圧を印加したと考えると、その波高値としてさい断降下量を考えることができる。したがって、つぎのように定義する。



(a) さい断波電圧波形



(b) さい断波電圧波形

O₁ : 規約原点
T_f : 規約波頭長
D : さい断点
M : 規約さい断点
T_c : さい断までの時間
T_d : 規約さい断までの時間
T_c : 規約さい断長
MJ : 規約さい断値
MJ/T_c または MS/T_c : 規約さい断しゅん度
MS : 規約さい断降下量
Q : さい断最降下点

図 2.1 さい断波電圧波形
Chopped wave voltage waveform.

さい断最降下点 さい断部分で、さい断点から最大の電位差にある点をいう。

さい断最降下量 さい断値と、さい断最下値との差をいう。

$n\%$ 降下点 さい断点と、さい断最下点との間において、さい断点からさい断降下量の $n\%$ に相当する波形上の点をいう。

実際の波形について、上記の原点、波高点、波頭長、波尾長、さい断点、さい断長、さい断しゅん度等を確認することが困難な場合が多いので、それぞれ下記のような規約を設けて表示する。

規約原点 波頭における 30% 波高点と 90% 波高点を結ぶ直線が時間軸と交わる点をいう。

規約さい断点 さい断点を通り、時間軸に平行な直線と、 30% 降下点と 90% 降下点とを結ぶ直線の交点をいう。

規約さい断長 30% 降下点と 90% 降下点との間の時間を、 0.6 で除したものをいう。

規約さい断しゅん度 さい断降下量を規約さい断長で除したものをいう。

つぎに、さい断波形の定性的な検討を容易にするため規約されたさい断降下量および規約さい断しゅん度を無名数化して表現し、規約されたさい断降下量比 V_{cr} と規約さい断しゅん度比 S_{cr} をつぎのように定める。

規約さい断降下量比 規約されたさい断降下量を規約されたさい断値で除したものをいう。

規約さい断しゅん度比 規約さい断しゅん度を規約されたさい断値で除したものをいう。

したがって、これらはつぎのような関係である。

$$S_{cr} = V_{cr} / T_c$$

規約さい断降下量 $= V_{cr} \times$ 規約されたさい断値

規約さい断しゅん度 $= S_{cr} \times$ 規約されたさい断値

3. さい断波電圧波形

変圧器のさい断波衝撃電圧試験の回路は、変圧器を C_i , L_i , R_i の3定数の並列回路として表わし、さい断ギャップと変圧器との間の漂遊インダクタンスを L_0 として、衝撃電圧発生回路と組み合わせると、図3.1のような等価回路となる。

変圧器端子の電圧波形 e_i は、ギャップ間の電弧電圧を無視すれば、テブナンの重畳の定理によって、さい断しない場合の電圧 e_{i0} と、時間 τ_c でさい断が起るとして、そのときのギャップ間の電圧を零にする逆起電力 V_0 のみをギャップ間にそう入した場合の変圧器端子の過渡電圧 e_i' との和によって表わされる。

すなわち、 $e_i = e_{i0}H(t) + e_i'H(t - \tau_c)$ (3.1)

ただし、 $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$ $H(t - \tau_c) = \begin{cases} 0, & t < \tau_c \\ 1, & t > \tau_c \end{cases}$

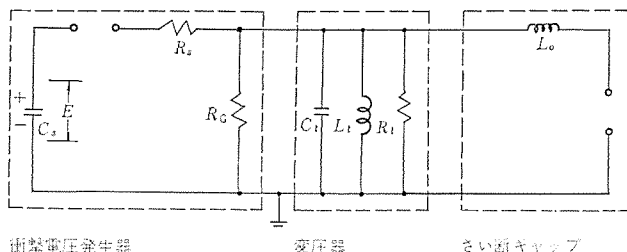


図 3.1 変圧器のさい断波衝撃電圧試験回路
Chopped wave impulse test circuit of transformers.

したがって、 $t = \tau_c$ でギャップが放電した後のさい断電圧波形 e_i は、次式で示される⁽³⁾。

$$e_{i1} = e_{i0}H(t - \tau_c) + e_i'H(t - \tau_c) \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに、 e_{i0} は計算によって三つの形として与えられる⁽⁴⁾。

e_i' は図3.2の等価回路より、ミルマンの定理を用いて次式に示される。

$$e_i'(P) = \frac{\frac{1}{L_0 P}}{\frac{1}{L_0 P} + \frac{1}{L_i P} + \frac{1}{R_0} + C_i P + \frac{C_s P}{C_s R_s P + 1}} V_0 \cdot H(t - \tau_c) \\ = \frac{1}{L_0 C_i} \cdot \frac{P + d_1}{P^3 + a_1 P^2 + b_1 P + c_1} V_0 \cdot H(t - \tau_c) \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに、 $R_0 = \frac{R_s R_i}{R_s R_i}$, $a_1 = \frac{1}{C_i R_0} + \frac{1}{C_s R_s} + \frac{1}{C_i R_s}$

$$b_1 = \frac{1}{C_i} \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_i} \right) + \frac{1}{C_s C_i R_s R_0}, \quad c_1 = \frac{1}{C_s C_i R_s} \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_i} \right), \quad d_1 = \frac{1}{C_s R_s}$$

式(3.3)において a_1 , b_1 , c_1 は正数であるから

$$P^3 + a_1 P^2 + b_1 P + c_1 = 0 \dots\dots\dots (3.4)$$

は三つの負の実根、その二つが等根、一つが負の実根と二つの実数部を負とする共役複素根を有する三つの場合がある。

$V_0 H(t - \tau_c)$ は e_{i0} を示す式に負の記号を付し、 $H(t - \tau_c)$ として示され、三つの場合がある。したがって、 e_i' の波形としては九つの組み合わせがある。おのおの場合について、移項定理、展開定理を適用して計算すると、印加電圧 e_{i0} と同じ形の部分 e_{i0}' と、さい断時の回路条件に主として支配される部分 e_i'' の二つの部分より構成される。したがって式(3.2)の e_{i1} は結果的に式(3.5)で示される。

$$e_{i1} = \{e_{i0}'(t) + e_i''(t - \tau_c)\} H(t - \tau_c) \dots\dots\dots (3.5)$$

一般に、変圧器のさい断波衝撃電圧試験を実施すると、さい断波電圧波形はほとんど振動波形となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なお変圧器に対する過酷度を考察する場合に問題となるこの場合についてとくに検討を行なうことにする。 e_{i0} の印加電圧波形上の $t = \tau_c$ のさい断点においては、 $(e_{i0}/e_{i1})t = \tau_c = 1$ であって、さい断点の電圧、さい断値は求められる。変圧器の過酷度にもっとも影響を与えるさい断降下量とさい断しゅん度を問題にすれば、実用的には $-\rho_2$ を含む指数関数と ω_0 を含む余弦項を重視して、さい断値を E_c として、 $t' = t - \tau_c$ とすれば、近似的に次式によって表わされることになる。

$$e_{ic} = E_c e^{-\rho_2 t'} \cos \omega_0 t' H(t') \dots\dots\dots (3.6)$$

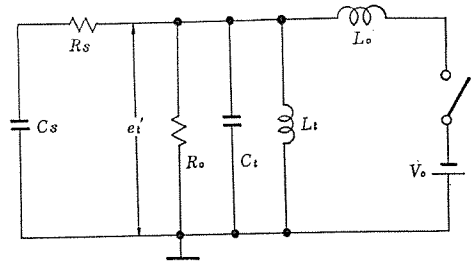


図 3.2 e_i' を求める等価回路
Equivalent circuit to seek for e_i' .

4. 近似式による規約さい断しゅん度および規約さい断降下量の計算

規約さい断しゅん度および規約さい断降下量を求めるには、まず式(3.6)における ω_0 , ρ_2 の数値を回路条件より求めなければならぬ。図3.1の等価回路の各定数が定まれば、式(3.3)の a_1 , b_1 ,

c_1 を求め、 $P^3+a_1P^2+b_1P+c_1=0$ の $P=c_1^{1/3}P'$ と時間変換すれば $a_2=a_1c_1^{-1/3}$, $b_2=b_1c_1^{-2/3}$ とおくと、 $P'^3+a_2P'^2+b_2P'+1=0$ となり、 a_2, b_2 の2定数に変えることができる。実際に用いられる回路定数より a_2, b_2 の範囲を求めると $a_2=0.3\sim 10$, $b_2=0.8\sim 80$ となる。したがって $0.1\leq a_2\leq 20$, $0.5\leq b_2\leq 100$ の組み合わせで、一つの実根と負の実数部を有する共役複素根、すなわち、 $P'=-\rho_1'$,

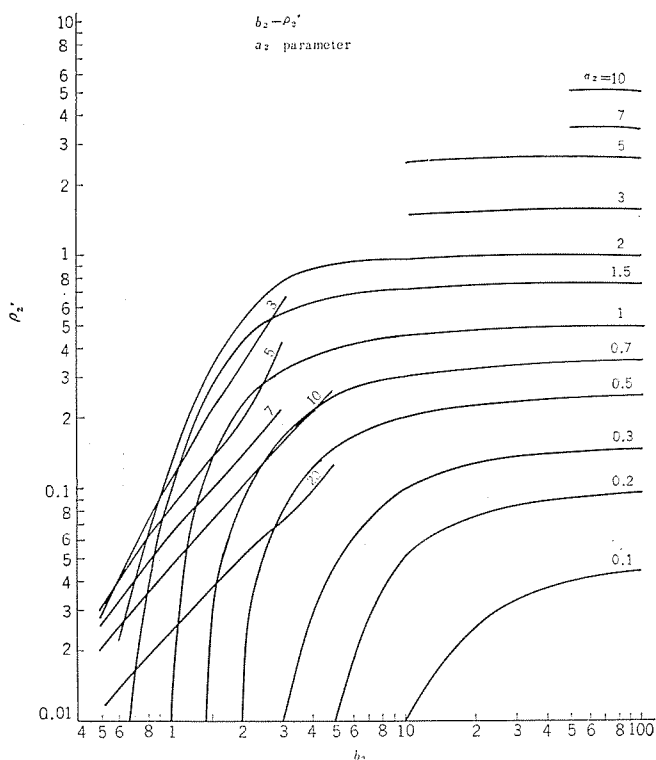
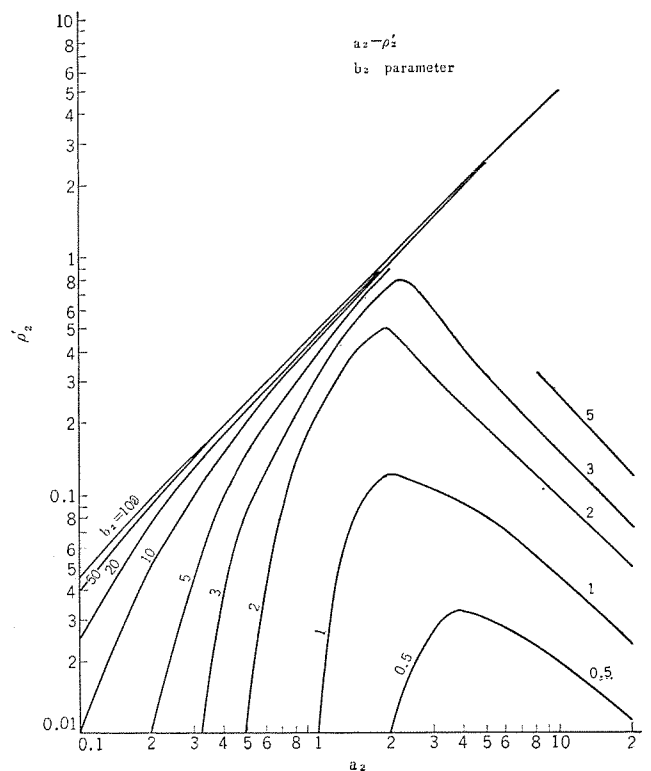


図 4.2 ρ_2' を求める図表 (a)
Chart to seek for ρ_2' (a).

$P'=-\rho_2'+\omega_0'$, $P'=\rho_2'-\omega_0'$ の3根を有する場合の範囲について、 a_2, b_2 と $\rho_1', \rho_2', \omega_0'$ の関係を電子計算機によって計算し、図 4.1 ~ 図 4.4 に示す。これによって a_2, b_2 が与えられた場合、 ρ_2', ω_0' の概数値は内そう法によって求めることができる。さらに、精度を高めるには C. Mack の方法⁽⁷⁾によって図式的に求めるとよい。 ρ_2', ω_0' より $\rho_2=\rho_2'c_1^{1/3}$, $\omega_0=\omega_0'c_1^{1/3}$ として、 ρ_2, ω_0 がえられる。式 (3.6) の ρ_2, ω_0 が回路条件より求められると、図 4.5 において、 τ_c を時間零の基点として、 e_{tc} がさい断最降下点に到るまでの時間 t_s は、 $t_s=\pi/\omega_0$ で与えられる。

規約さい断降下量比 V_{cr} は

$$V_{cr}=1-\cos \pi \varepsilon-\rho_2 \pi / \omega_0=1+\varepsilon-\rho_2 \pi / \omega_0 \cdots \cdots (4.1)$$

と表わすことができる。規約さい断長を求めるには、図 4.5 より $0.7 V_{cr}$ なる e_{tc} の時間 t_7 を $\cos \omega_0 t_7 \cdot \varepsilon-\rho_2 t_7=0.7 V_{cr}-\varepsilon-\rho_2 \pi / \omega_0$, $0 < t_7 < \pi / 2 \omega_0$ の範囲で成立する値として求める。

つぎに $0.1 V_{cr}$ なる e_{tc} の時間 t_1 を、 $\cos \omega_0 t_1 \cdot \varepsilon-\rho_2 t_1=0.1 V_{cr}-\varepsilon-\rho_2 \pi / \omega_0$, $0 < t_1 < \pi / \omega_0$ の範囲で成立する値として求める。 t_1, t_7 が求められれば、規約さい断長 T_c は、 $T_c=(t_1-t_7)/0.6$ として与えられる。いま、 $\omega_0 t_7=t_7'$, $\omega_0 t_1=t_1'$ とおき t_7', t_1' を radian で表わすと radian で表わした規約さい断長 T_c' , 規約さい断しゅん度比 S_{cr}

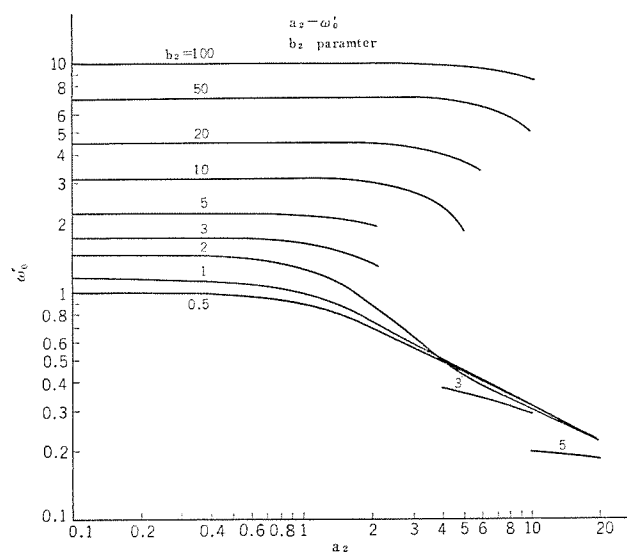


図 4.3 ρ_2' を求める図表 (b)
Chart to seek for ρ_2' (b).

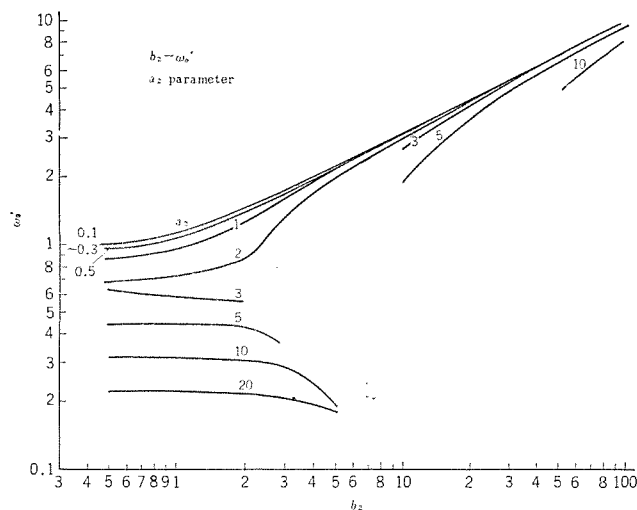


図 4.4 ω_0' を求める図表 (a)
Chart to seek for ω_0' (a).

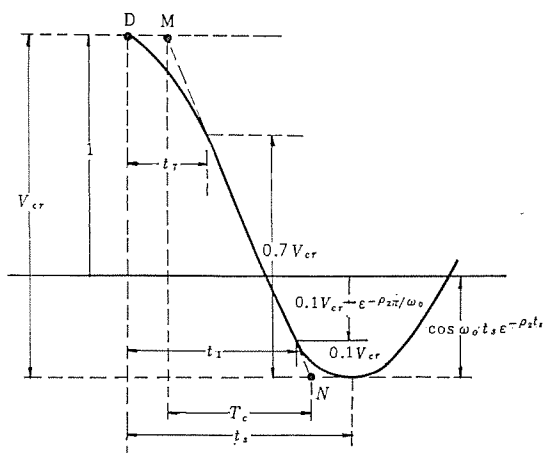


図 4.5 さい断しゅん度, さい断降下量
Steepness in chopping, amount of drop by chopping.

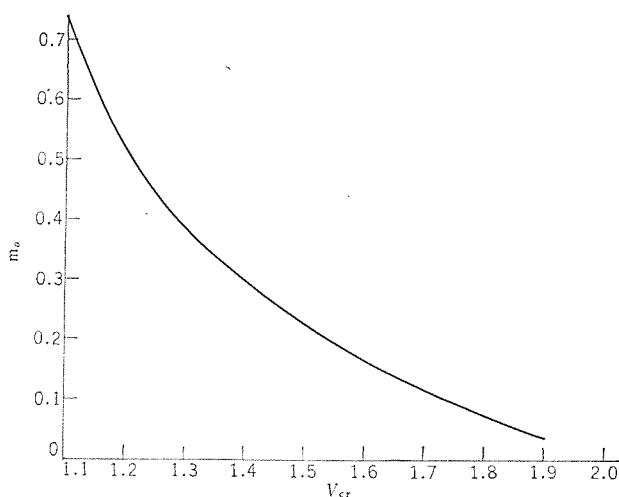


図 4.6 $V_{cr}-m_0$ の関係
Relation between V_{cr} and m_0 .

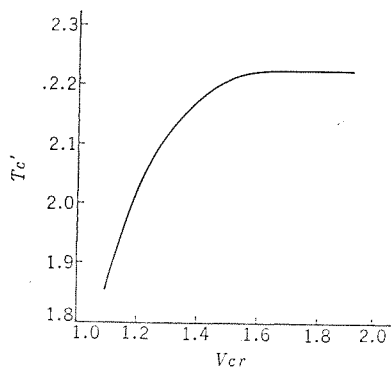


図 4.7 $V_{cr}-T_c'$ の関係
Relation between V_{cr} and T_c' .

は, $T_c' = (t_1' - t_1')/0.6$, $S_{cr}' = V_{cr}/T_c' = S_{cr}/\omega_0$ である。 $\rho_2/\omega_0 = m_0$ の値を与えれば V_{cr} が定まり, $1 < V_{cr} < 2$ であるから, 実用的に $1.1 \leq V_{cr} \leq 1.9$ の V_{cr} の種々の値に対する T_c' をあらかじめ算出しておけば ω_0 が与えられると, 規約さい断しゅん度比 $S_{cr}' = \omega_0 \cdot S_{cr}'$ として求められる。算出した V_{cr} に対する m_0 , T_c' , S_{cr}' の数値を図 4.6~図 4.8 に示す。

5. さい断波試験条件と変圧器の過酷度

印加電圧がさい断することによって, 急激に降下し, 巻線間に過

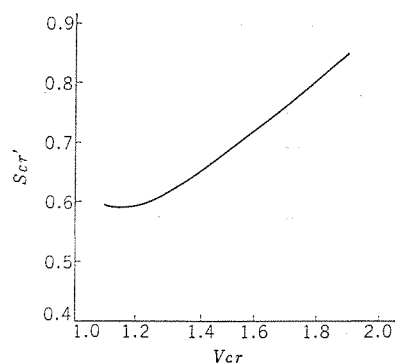


図 4.8 $V_{cr}-S_{cr}'$ の関係
Relation between V_{cr} and S_{cr}' .

大なる過度電圧を発生することは, 周知のことである。変圧器のさい断波試験においては, 急激なさい断波によって, 印加端子近傍の巻線間絶縁を検証することが, おもな目的である。しかし, さい断波形, さい断までの時間のさい断波試験条件によって, 変圧器に与える過酷度が異なる。従来より理想的な直角にさい断される電圧波形の場合についての研究は多く発表されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし, 実際には, さい断ギャップ回路の漂遊インダクタンスによって, さい断以後の電圧波形は式 (3.5) のように, 近似的には指数関数減衰余弦曲線となる。このような実際に起こりうる場合について検討された例はほとんどないようである。ここに, さい断波形を重要視する必要性を理論的に考察し, 実際の変圧器については, 実測に基いて変圧器印加端電位傾度の図式計算を行ない, さい断波形, さい断までの時間等の試験条件を検討する。

6. さい断波形と変圧器印加端の電位傾度

巻線が, 鉄心の軸方向に順次巻かれた損失のない変圧器を考える。

単位電圧 E_c を印加し τ_c でさい断を起こし, さい断以後の電圧波形が式 (3.6) によって表わされる場合, 変圧器の巻線の電位分布は図 6.1 のように, 逆電圧 $-E_c (1 - \cos \omega_0 t' \cdot \varepsilon^{-\rho_2 t'})$ を τ_c において印加した場合と, 重畳することによって求めることができる。

さい断以後の電位分布は重畳の理によって,

$$\begin{aligned} e_c(xt') = & -E \sum_{s=1}^{\infty} A_s \sin S\pi x \{ \cos \omega_s t - \cos \omega_s (t - \tau_c) \} \\ & + E_x \cos \omega_0 t' \varepsilon^{-\rho_2 t'} + E \sum_{s=1}^{\infty} A_s \sin \cdot S\pi x \left\{ \cos \omega_0 t' \varepsilon^{-\rho_2 t'} \right. \\ & \left. - \int_0^{t'} \omega_s \sin(t - \tau_c) \cdot \cos \omega_0 \tau \varepsilon^{-\rho_2 \tau} \cdot d\tau \right\} \\ = & E \cdot x \cos \omega_0 t' \cdot \varepsilon^{-\rho_2 t'} \\ & - E \sum_{s=1}^{\infty} A_s \sin \cdot S\pi x \left[2 \sin \frac{\omega_s \tau_c}{2} \sin \omega_s \left(\tau' + \frac{\tau_c}{2} \right) \right. \\ & + \frac{1}{2\sqrt{\rho_2^2 + (\omega_0 + \omega_s)^2}} \cdot \cos \left(\omega_s t' - \tan^{-1} \frac{\rho_2}{\omega_0 + \omega_s} \right) \\ & \left. - \frac{1}{2\sqrt{\rho_2^2 + (\omega_0 - \omega_s)^2}} \varepsilon^{-\rho_2 t'} \cdot \cos \left(\omega_0 t' - \tan^{-1} \frac{\rho_2}{\omega_0 - \omega_s} \right) \right. \\ & \left. - \cos \omega_0 t' \cdot \varepsilon^{-\rho_2 t'} \right] \dots\dots\dots (6.1) \end{aligned}$$

$\rho_2 = m_0 \omega_0$ とすると, 規約さい断しゅん度比 $S_{cr}' = \omega_0 S_{cr}'$ であって, S_{cr} はさい断降下量比 V_{cr} の関数として図 4.8 に示されるので, $\sigma = V_{cr}/S_{cr}'$ として, 図 6.2 に示される。図 4.6 より m_0 によって V_{cr} が定まるので $\nu = m_0/V_{cr}$ として, ν は図 6.2 に求められる。 $\rho_2 = \nu \sigma S_{cr}'$, $\omega_0 = \sigma S_{cr}'/V_{cr}$ で表わされるので, $\omega_s = \lambda_s \omega_1$ として, 巻

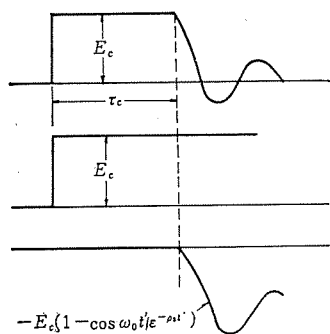


図 6.1 重畳の理によるさい断波形
Chopped waveform owing to the theory of superposing.

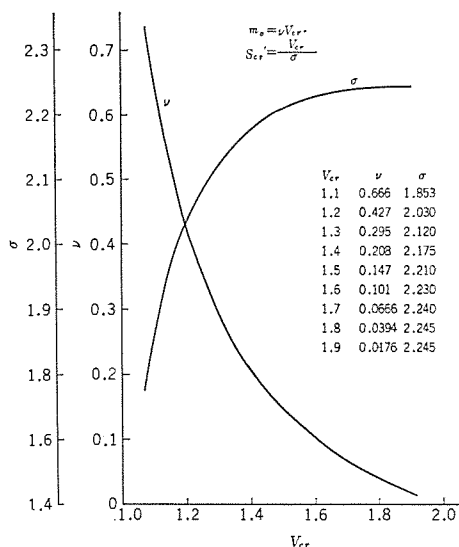


図 6.2 V_{cr} と ν , σ の関係
Relation between V_{cr} and ν , σ .

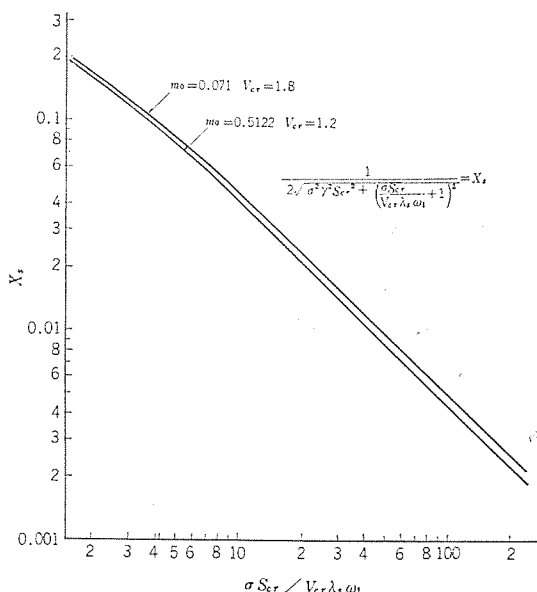


図 6.3 $\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr} \lambda_s \omega_1}$ と X_s の関係

Relation between $\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr} \lambda_s \omega_1}$ and X_s .

線の電位傾度を求めれば、規約さい断降下量比、規約さい断しゅん度比によって表わされ、式 (6.2) になる。

$$\frac{\partial e_c(x \cdot t')}{\partial x} = E \cdot \cos\left(\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr}}\right) t' e^{-\nu \sigma S_{cr} t'} - E \sum_{s=1}^{\infty} S \pi A_s \cos \cdot S \pi x$$

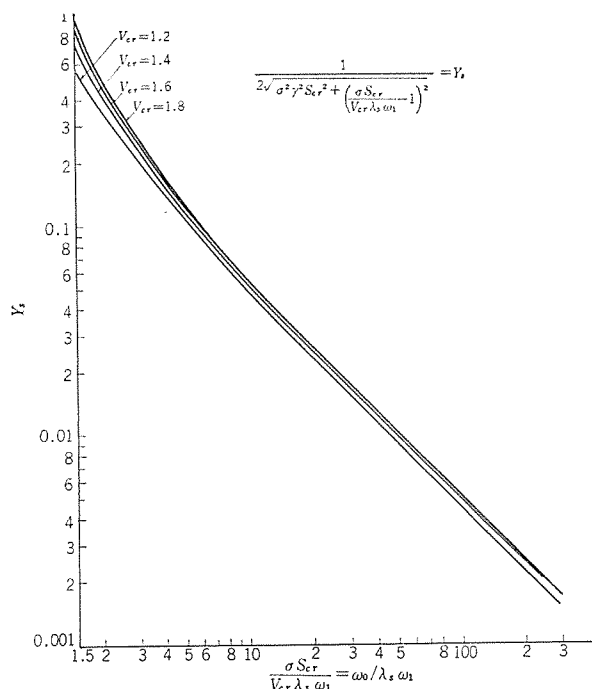


図 6.4 $\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr} \lambda_s \omega_1}$ と Y_s の関係
Relation between $\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr} \lambda_s \omega_1}$ and Y_s .

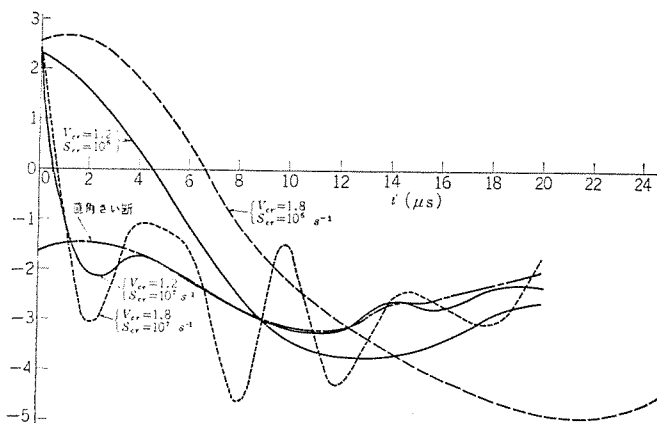


図 6.5 方形波印加電圧各種さい断の印加端における電位傾度の計算例
Example of calculation on the potential gradient at the impressed terminal in chopping various square voltage waves.

$$\begin{aligned} & \left[2 \sin \frac{\lambda_s \omega_1 \tau_c}{2} \sin \lambda_s \omega_1 \left(t' + \frac{\tau_c}{2} \right) + \frac{1}{2\sqrt{\sigma^2 \nu^2 S_{cr}^2 + \left(\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr} \lambda_s \omega_1} + 1 \right)^2}} \right] \\ & \cos \left\{ \lambda_s \omega_1 t' - \tan^{-1} \left(\frac{\nu \sigma V_{cr}}{\sigma S_{cr} + \lambda_s \omega_1 V_{cr}} \right) \right\} - \frac{\varepsilon^{-\nu \sigma S_{cr} t'}}{2\sqrt{\sigma^2 \nu^2 S_{cr}^2 + \left(\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr} \lambda_s \omega_1} - 1 \right)^2}} \\ & \cos \left\{ \lambda_s \omega_1 t' - \tan^{-1} \left(\frac{\nu \sigma V_{cr}}{\sigma S_{cr} - \lambda_s \omega_1 V_{cr}} \right) \right\} - \cos \left(\frac{\sigma S_{cr}}{V_{cr}} \right) t' e^{-\nu \sigma S_{cr} t'} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$x=1$ の場合、式 (6.2) の値は最大となるので印加端近傍の巻線間絶縁がもっとも過酷となる。式中、[] 内第 1 項の振幅は、 $\tau_c = T_s(n-1/2)$ (n は任意の整数) の場合に最大の 2 となることを示し、 $t' = T_s/4 - \tau_c/2$ 後に最大値に達する。[] 内第 2 項および第 3 項の振幅は V_{cr} と $(\sigma S_{cr}/V_{cr} \omega_s)$ の関数として、図 6.3、図 6.4 に与えられるので、基本波に近付くほど減衰は大きい。計算の 1 例として変圧器の電位分布を表わす定数、 $\alpha=5$ ($\alpha=\sqrt{C_g/C_c}$, C_g 各コイルと大地間の静電容量、 C_c 各コイル間の静電容量) として、 $\sin \omega_1 \tau_c/2$

$=1$ になるよう、 τ_c を定め $\omega_1=2\pi\times 10^4$ とし、 $V_{cr}=1.2, 1.8, S_{cr}=1\times 10^{-6}\text{s}^{-1}, 10\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ の各場合、および直角さい断の場合の $S\geq 5$ までについて式 (6.3) の計算結果を図 6.5 に示す。この結果は、実際のさい断波形は理想的な直角さい断の場合に比して過酷な条件が起こること、さい断しゅん度、さい断降下量比に大きな影響をうけることが解かる。

7. 実測に基づくさい断波形、さい断までの時間の検討

変圧器にさい断波試験を課する場合、さい断波形、さい断までの時間によって変圧器に与える過酷度が異なるが、変圧器の内部電位振動の計算は、構造の差異によって困難な場合も多い。実際に即した検討の方法として、実測に基づき重畳の理を図式的に応用して行なうことができる。直角さい断の場合については Gy・Karady 氏⁽¹⁰⁾ によって行なわれている。さい断しゅん度、さい断降下量比が 1 以上の場合について検討してみる。印加電圧波形および、重畳される逆電圧を図 7.1 のように定める。印加電圧によって図 7.2 の零線より上の図のように、変圧器の内部電位分布が時間とともに変わる。波高値に達する時間 t_p を過ぎる t_1 においては、印加端電圧が下がる。 t_2 に至っては内部電位振動のため、巻線の途中において印

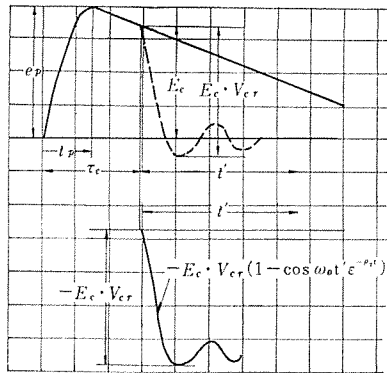


図 7.1 重畳の理による標準波形の場合のさい断波形
Chopped waveform in case of standard waveform
owing to the theory of superposition.

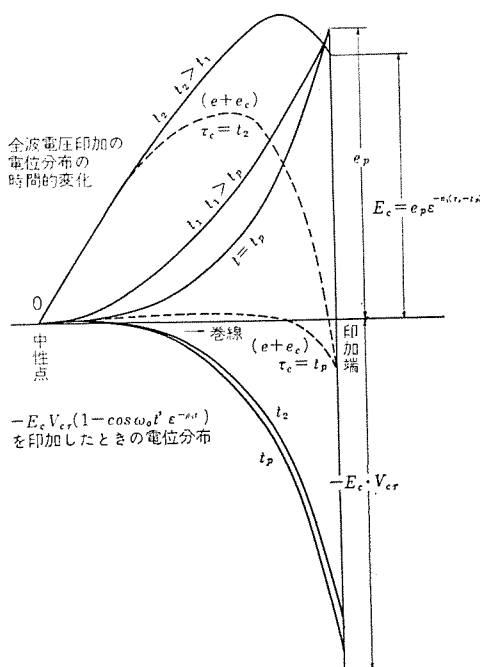


図 7.2 さい断波による電位傾度
Potential gradient owing to chopped wave.

加電圧より高電位となる。 $-E_c, V_{cr}$ なる逆電圧が加えられたときの電位分布は図 7.2 の零線より下に示す曲線となる。さい断波の電位分布は、印加電圧による電位分布と逆電圧による電位分布の和であるから、図の破線に示すようにさい断までの時間によって変化する。 $\tau_c=t_p$ の場合よりも、 t_2 における場合の方が電位傾度は過酷になることがわかる。波尾においてさい断を起こす場合を問題とすべきことが推察されるので、波尾においては式 (7.1) が近似的に成立するものとして、検討する。

$$E_c = e_p e^{-\alpha_1(\tau_c - t_p)} \dots\dots\dots (7.1)$$

印加端付近の電位傾度を $E_c \cdot \alpha_p$ とし、 α_p は印加端の巻線間電圧を実測することによって求められる。さい断までの時間 τ_c によって α_p の値が異なるから、 α_p および τ_c の関数と考えられる。

すなわち

$$\left(\frac{\Delta e(x \cdot t)}{\Delta x} \right)_{x \approx 1} = E_c \cdot \alpha_p = f_p(\tau_c) \dots\dots\dots (7.2)$$

重畳する逆電圧 $-E_c \cdot V_{cr}(1 - \cos \omega_0 t' e^{-\rho_c t'})$ を印加して、波高値が、 $-E_c \cdot V_{cr}$ になったときの印加端付近の電位傾度を、

$-E_c \cdot V_{cr} \cdot \beta_c$ とする。さい断しゅん度比 S_{cr} の大きい場合はこの値は大きく、 S_{cr} の関数として式 (7.3) で示される。

$$\left(\frac{\Delta e(x \cdot t')}{\Delta x} \right)_{x \approx 1} = -E_c \cdot V_{cr} \cdot \beta_c = f_c(S_{cr}) \dots\dots\dots (7.3)$$

β_c の値は、 S_{cr} に相当する波頭しゅん度の印加電圧によって、印加端の巻線間電圧を実測によって求められる。したがって、 τ_c でさい断した場合の印加端近傍の電位傾度 ΔU_c は、重畳の理によって式 (7.1), (7.2), (7.3) より式 (7.4) で求められる。

$$\begin{aligned} \Delta U_c &= \left\{ \frac{\Delta e(x \cdot t)}{\Delta x} + \frac{\Delta e_c(x \cdot t')}{\Delta x} \right\}_{x \approx 1} \\ &= e_p e^{-\alpha_1(\tau_c - t_p)} \cdot (\alpha_p - \beta_c \cdot V_{cr}) \dots\dots\dots (7.4) \end{aligned}$$

式 (7.4) における印加端近傍の電位傾度の大きさ $|\Delta U_c|$ を吟味する。 V_{cr} の値はさい断回路によって定まり、 $1 \leq V_{cr} \leq 2$ である。 ρ_c の値は、問題とすべき時間域においては $\rho_c > 0$ である。したがって、 α_p が負の場合において $|\Delta U_c|$ は大きくなる。 α_p, β_c の値は変圧器によって異なり、おのおのその値の大きいほど過酷となる。さい断が波尾で起ればさい断値 E_c が小さくなるので、波尾の長いほど $|\Delta U_c|$ は大きい。

2,000 kVA 外鉄形変圧器の実測に基づく計算例を示す図 7.3 は α の値を変え、 $S_{cr} \approx 1/T_f$ として β_c を示めたものである。 S_{cr} が $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ 程度になると β_c の値が飽和する。これは S_{cr} が大きくなると、電位分布は主として C_e, C_g の静電容量に依存する

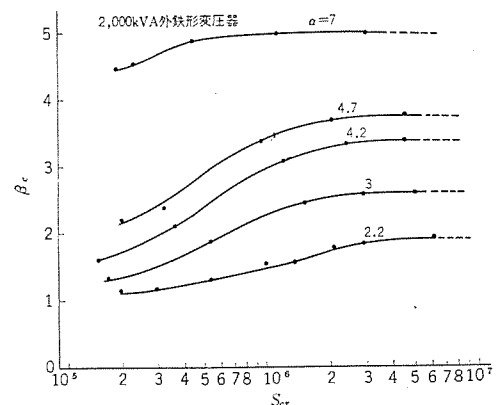


図 7.3 S_{cr} と β_c の関係
Relation between S_{cr} and β_c .

ものと考えられる。 α の大きい場合は飽和が早く、 S_{cr} が小さくなると β_c は 1 に近づく。 α_p の実測値は図 7.4(a) のようになる。 $\alpha = 4.2$, $S_{cr} = 2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ として $V_{cr} = 1.0 \sim 1.8$ に変えて、 ΔU_c とさい断までの時間 τ_c の関係は図 7.4(b) に示される。なお、印加端 10 % の層間にかかる電圧は $0.1 \Delta U_c$ である。 τ_c の変化によって過酷度が大きく変わることは重要視されなければならない。最大の印加端電位傾度を与えるさい断までの時間 τ_{cm} は、波尾において α_p の負の最大になる時間付近 $\tau_{cm} = 10.3 \mu\text{s}$ に起こる。

さい断しゆん度比 S_{cr} , V_{cr} が変わることによって、 τ_{cm} における ΔU_c の値は変化する。図 7.5, 図 7.6 にこの結果を示す。 V_{cr} が大きいほど S_{cr} の効果は大きく、印加端の電位傾度は V_{cr} の一次関数的に増加する。 S_{cr} の値として飽和の傾向を示すことは、そ

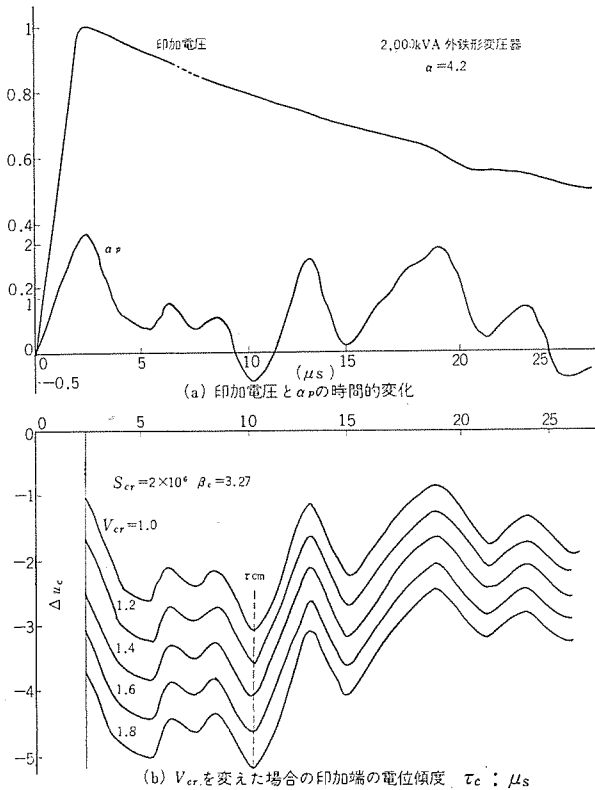


図 7.4 印加端の電位傾度とさい断までの時間、 V_{cr} の図式計算例
Potential gradient at an impressed end and time until chopping, calculation example of V_{cr} .

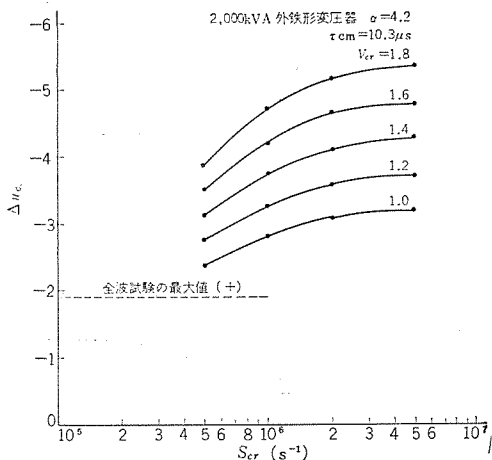


図 7.5 もっとも過酷なさい断までの時間 τ_{cm} の S_{cr} と印加端の電位傾度
 S_{cr} of time until the most severe chopping τ_{cm} and potential gradient of the impressed end.

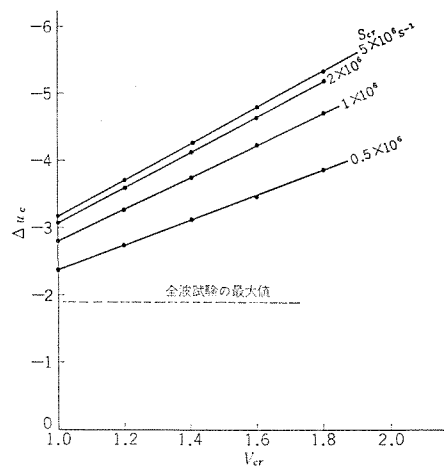


図 7.6 もっとも過酷なさい断までの時間 τ_{cm} の V_{cr} と印加端の電位傾度
 V_{cr} of time until the most severe chopping τ_{cm} and potential gradient of the impressed end.

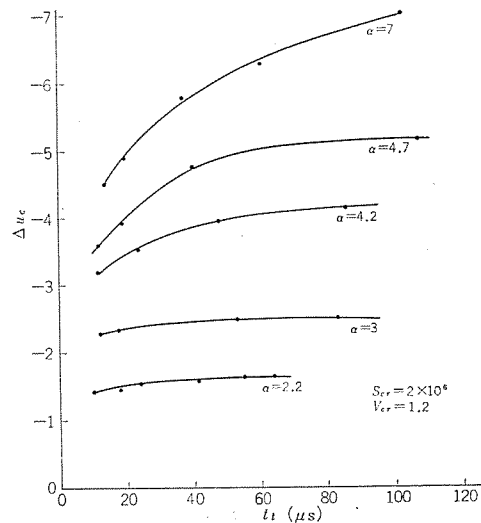


図 7.7 2,000 kVA 外鉄形変圧器の波尾長と $4 U_c$ の関係
Relation between the wave tail length of 2,000 kVA shell type transformer and $4 U_c$.

の許容限界が $2 \sim 5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 程度になることを示唆するものである。

7.1 印加電圧波尾長の影響

式 (7.4) によって、 ΔU_c は α_p が負の最大値になる時間にさい断しても、印加電圧波形が減衰し、さい断値が減少するので ΔU_c の値は最大値とならない。 τ_{cm} は波高値近く移動し、 ΔU_c の値は小さくなる。したがって、波尾長の保持も問題となる。図 7.7 は 2,000 kVA 変圧器について、図式計算した結果を示す。いろいろな α の場合、波尾長が長くなれば ΔU_c の値は大きくなることを示す。図 7.8 は 139.5 MVA の外鉄形変圧器で α が小さい場合は ΔU_c の波尾長に対する影響は少ない。

7.2 さい断までの時間

もっとも過酷なさい断までの時間 $\tau_{cm} - t_p$ について検討を加えてみる。表 7.1 は $V_{cr} = 1.2$ として、各種変圧器の $\tau_{cm} - \alpha_p$, ΔU_c の値を求めた結果である。 $\tau_{cm} - t_p$ の値は波尾長によって異なるが、1 ~ 15 μs 程度である。波尾長の短い場合には、 $\tau_{cm} - t_p$ が早くなるが、所定の波尾長では τ_{cm} は α_p の負の最大値付近において起こる。 α_p の波形は、印加端巻線間電圧波形によって定まり、対象とする巻線間とは、変圧器の構造上より内鉄形では印加端の第 1 ダクト、外鉄形では最初の 1 枚の巻線間であって、全体の 5 ~ 15 % を占め

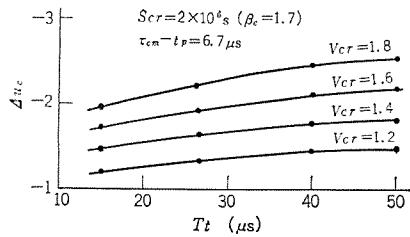


図 7.8 139.5 MVA 変圧器 200 号巻線の波尾長と ΔU_c .
Wave tail length of 139.5 MVA transformer of No. 200 winding and ΔU_c .

表 7.1 各種変圧器の $\tau_{cm}-t_p$, ΔU_c の値
Values of $\tau_{cm}-t_p$ and ΔU_c of various transformers.

変圧器容量 MVA	絶縁階級 号	内・外 鉄形別	T_i μs	$\tau_{cm}-t_p$ μs	ΔU_i
20	140	外	29	1.0	-0.95
93	200	外	19.5	11	-1.04
117.3	200	外	57	4.7	-1.44
30	70	外	30	2.6	-1.13
0.9	70	内	46	3.2	-1.67
0.3	70	内	38	5.1	-1.78
計器用変圧器	70	内	37	31	-5.7

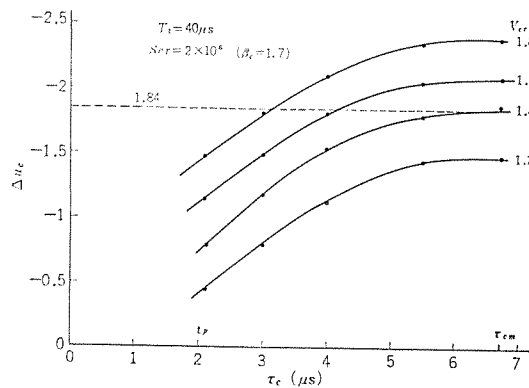


図 7.9 139.5 MVA 変圧器 200 号巻線の τ_c による ΔU_c の変化
Change of ΔU_c due to τ_c of 139.5 MVA transformer of No. 200 winding.

る。したがって、比較的高次の調波が消失するが、 α_p の負の最大値の時間は、振動波形の周波数によって変わる。この周波数は変圧器の容量、電圧、形によって異なり、表 7.1 のように計器用変圧器は $\tau_{cm}-\alpha_p$ の値は大きく、31 μs にもなる。さい断までの時間を t_p より τ_{cm} まで変えた場合、 ΔU_c の変化を 1 例として求めてみる。 α_p の正の最大値は印加電圧の波高点の時間 t_p に起る。 $T_f = 1 \mu s$ の場合 $\alpha_p \approx 1.5$ であるから、さい断試験電圧を 115 % の規定値により、波尾でさい断させるとすれば、時間 t_p においては $\alpha_p = 1.5 \times 1.15 =$

1.84 となる。過酷度は波高値にのみ左右されるので、 $\Delta U_c < 1.84$ の場合には、さい断波試験電圧値が 115 % になったために過酷になるだけである。したがって、 $\Delta U_c > 1.84$ の場合にのみ、さい断波試験の意義が認められる。このような条件は、図 7.9 において、 $V_{cr} = 1.4$ の場合は $\tau_c > 6.5 \mu s$ 、 $V_{cr} = 1.6 \mu s$ では $\tau_c > 4.15 \mu s$ 、 $V_{cr} = 1.8$ では $\tau_c > 3.15 \mu s$ となって、 V_{cr} の大きい場合には波高点 t_p に近づく。

一般の変圧器についても、定性的にこのような傾向が推察されるので、波高点に近い波尾さい断も V_{cr} の大きい場合は、さい断試験の目的を達すると考えてよい。使用状態においては、保護ギャップあるいはがいし類の $V-t$ 特性と回路の漂遊インダクタンスによって起こりうるさい断波形は、波高点を過ぎた波尾においてさい断を生じ、零線以下に振動するさい断波形になるものと考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。試験規定が使用状態の可能性を基準において定められるならば、変圧器の多様性によって τ_{cm} の選定が困難な実情より、波高点に近い波尾さい断で、 V_{cr} の大きいさい断条件は妥当と考えられる。

8. む す び

変圧器のさい断波試験が従来より行なわれていたが、試験の条件についての検討は加えられるに至らなかった。実際にはさい断条件によって、変圧器に与える過酷度が異なるので、これを考究するため、まず、さい断波形を定義し、計算によって、回路定数と波形の関係を明かにし、さい断波電圧波形、さい断までの時間が変圧器の過酷度に与える影響を定量的に検討した。とくに、問題とすべきは零線以下にオーバシュートするさい断波形で、過酷度は大いに異なる。さい断しゅん度は変圧器の分布係数に関係があり、この値が大きくても過酷度には一定の限界があることを明かにした。変圧器に最も過酷なさい断までの時間が存在すること、これが試験規格との関連についても見解を明かにした。

参 考 文 献

- (1) 武居、藤高、法貴、富山、広瀬：電学誌（昭 29-2）
- (2) 山村：関西電力網異常現象研究会資料 56-3（昭 29-8）
- (3) 岩崎、田村：電学連大（昭 36）
- (4) 岩崎：電学誌（昭 35-9）
- (5) B. Gänger : B. B. Review, Jan. (1958)
- (6) L. L. Preston : CIGRE report, No. 131 (1956)
- (7) 乗松：数値計算法（電気書院）
- (8) 法貴、松尾：電学連大（昭 14-11）
- (9) 法貴、松尾：日本工学会（昭 15-4）
- (10) Gy. Karady : CIGRE report, No. 114 (1958)
- (11) E. Elsnér : CIGRE report, No. 101 (1954)

電動ばね操作機構付 DHE 形磁気しゃ断器

桜井 武芳*・浅田 正敬*

Type DHE Magnetic Blow-out Air Circuit Breakers
with Stored Energy Mechanism

Itami Works Takeyoshi SAKURAI・Masanori ASADA

In large thermal power plants, fast transfer of bus-tie circuits is frequently made and high speed closing of circuit breakers becomes necessary. The conventional magnetic circuit breaker has a solenoid operated mechanism, which makes it necessary to take 0.3~0.4 sec. in closing. To improve this time lag, a new circuit breaker with a stored energy mechanism has been developed to cut down the closing time to 0.1 sec. This motor operated stored energy mechanism is to store the energy of closing spring and by releasing its mechanism to close the contacts. During the closing travel, energy of opening springs is stored. The opening is then made by releasing the tripping spring the same as the conventional solenoid mechanism. Accordingly a compact unit with a large closing capacity is made available.

1. ま え が き

小形、軽量化をはかり、対地絶縁部にエポキシレジンをを用いた DHE 形磁気しゃ断器⁽¹⁾が開発され、電力会社をはじめ関係各方面に多数使用されているが、これらのしゃ断器の投入操作は従来よりソレノイド操作機構で行なわれるのが普通であった。この機構は投入行程のうち、接触子が接触して大きな電磁反発力を受ける最終行程のところで最大のけん引力が発生するなどすぐれた特性をもっているが、大きな投入容量のしゃ断器を要求された場合、形状を小さくしようとすれば操作電流が大きくなることはやむを得ない。また、ソレノイド操作機構は投入時間を短くしようとしても、ソレノイドの可動鉄

心の動き始めまでに時間がかかり、大容量のしゃ断器では投入時間を短くできない。

最近の大容量火力発電所の補機回路では、母線切替時間を短くするため、高速投入しゃ断器が要求されるので、これに適合するように投入時間の短い電動ばね操作機構付磁気しゃ断器を開発したので以下に紹介する。

2. 定格および外形寸法

従来のソレノイド操作機構付のものと比較して、定格は表 2.1 外形寸法は図 2.1 に示す。図に示されるように外形寸法はまったく同一である。これはソレノイド操作機構付のものの消弧室・接触部な

表 2.1 DHE 形磁気しゃ断器定格表 (ソレノイド操作機構および電動ばね操作機構付)
Ratings of type DHE magnetic air circuit breaker (with solenoid and stored energy mechanism).

形 名	定 格 電 圧 (kV)	定 格 電 流 (A)	定 周 波 数 (Hz)	し ゃ 断 容 (MVA)	投 入 電 流 (kA)	短 時 間 電 流 (kA)	し ゃ 断 時 間 (サイクル)	再 起 電 圧 周 波 数 (kHz)	開 閉 時 間 (秒)	投 入 時 間 (秒)	投 入 操 作 電 流 (A) 電 流 (A)	引 き は ず し 電 流 (A)	操 作 機 構	重 量 (kg)	絶 縁 等 級 (号)
操作電圧 DC 100 V において															
3-DHE-10	3.6	600	50/60	100	43.7	16	5	20	0.06	0.3	70	4.5	ソレノイド	280	6
		1,200												280	
3-DHE-10 M	3.6	600	50/60	100	43.7	16	5	20	0.06	0.1	5	3.5	電動ばね	280	
		1,200												280	
3-DHE-25	3.6	1,200	50/60	250	109.3	40.1	5	20	0.06	0.3	100	4.5	ソレノイド	330	6
		2,000												355	
3-DHE-25 M	3.6	1,200	50/60	250	109.3	40.1	5	20	0.06	0.1	5	3.5	電動ばね	330	
		2,000												355	
4-DHE-25	4.34	1,200	50/60	250	93.8	37.5	5	20	0.06	0.3	90	4.5	ソレノイド	330	6
		2,000												355	
4-DHE-25 M	4.34	1,200	50/60	250	93.8	37.5	5	20	0.06	0.1	5	4.5	電動ばね	330	
		2,000												355	
6-DHE-15	7.2/3.6	600	50/60	150	65.5	24.1	5	20	0.06	0.3	70	4.5	ソレノイド	325	6
		1,200												325	
6-DHE-15 M	7.2/3.6	2,000	50/60	150	65.5	24.1	5	20	0.06	0.1	5	4.5	電動ばね	350	
		600												325	
6-DHE-25	7.2	1,200	50/60	250	54.8	20.0	5	20	0.06	0.3	70	4.5	ソレノイド	340	6
		2,000												365	
6-DHE-25 M	7.2	1,200	50/60	250	54.8	20.0	5	20	0.06	0.1	5	4.5	電動ばね	340	
		2,000												365	
6-DHE-50	7.2	1,200	50/60	500	109.3	40.1	5	20	0.06	0.4	95	5	ソレノイド	655	6
		2,000												690	
6-DHE-50 M	7.2	1,200	50/60	500	109.3	40.1	5	20	0.06	0.1	12	4.5	電動ばね	645	
		2,000												680	
10-DHE-50	12	1,200	50/60	500	65.5	24.1	5	15	0.06	0.4	90	5	ソレノイド	670	10 A
		2,000												705	
10-DHE-50 M	12	1,200	50/60	500	65.5	24.1	5	15	0.06	0.1	12	4.5	電動ばね	660	
		2,000												695	

形 名	定格電圧 kV	しゃ断容量 MVA	定格電流 A	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R
3-DHE-10 3-DHE-10 M	3.6	100	600	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
			1,200	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
3-DHE-25 3-DHE-25 M	3.6	250	1,200	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
			2,000	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
4-DHE-25 4-DHE-25 M	4.34	250	1,200	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
			2,000	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
6-DHE-15 6-DHE-15 M	3.6/7.2	150	600	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
			1,200	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
			2,000	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
6-DHE-25 6-DHE-25 M	7.2	250	1,200	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
			2,000	555	178	573	463	1,273	19	472.5	418	216	985.5	552.5	196.5	115	35	41	19
6-DHE-50 6-DHE-50 M	7.2	500	1,200	790	254	803	626	1,547	20	650.5	502	254	985.5	769.5	239.5	83	35	41	45
			2,000	790	254	803	626	1,547	20	650.5	502	254	985.5	769.5	239.5	83	35	41	45
10-DHE-50 10-DHE-50 M	12	500	1,200	790	254	803	626	1,547	20	650.5	502	254	985.5	769.5	239.5	83	35	41	45
			2,000	790	254	803	626	1,547	20	650.5	502	254	985.5	769.5	239.5	83	35	41	45

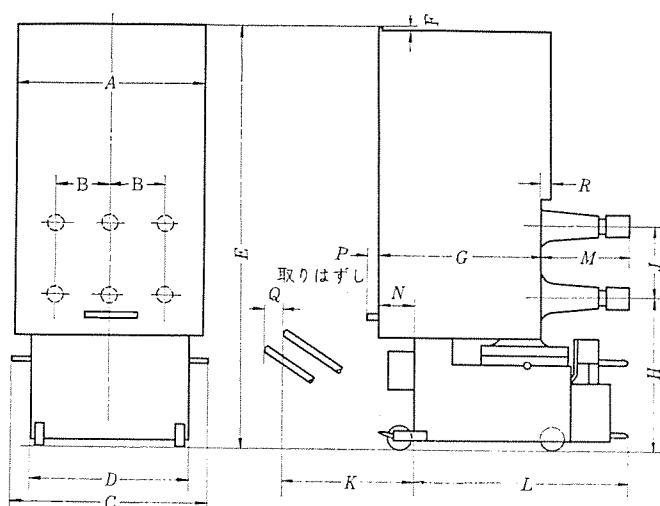


図 2.1 DHE 形磁気しゃ断器外形寸法
Outline dimensions of type DHE magnetic air circuit breaker with solenoid mechanism and stored energy mechanism.

どの各部はすべて同一とし、操作機構のみ電動ばね操作機構としたためである。また、定格表に示されているように投入時間は全定格を通じて 0.1 秒であり、投入操作電流もソレノイド操作機構にくらべて大幅に少なくなっている。図 2.2、図 2.3 に電動操作機構付磁気しゃ断器の外観を示す。

3. 構造および動作

3.1 原理

電動ばね操作機構は手動または電動機により投入ばねを蓄勢したのち投入指令により投入ラッチを解放して、投入ばねのエネルギーにより投入動作を行なうものである。このために操作電源電圧に影響されることなく、常に一定の投入力が得られる。引きはずしは投入行程中に引きはずしばねを蓄勢し、従来と同様に引きはずし指令により引きはずしラッチを解放する。一方、投入ばねと引きはずしばねをそれぞれ別個に蓄勢し、投入指令と引きはずし指令によりいずれかのばねを解放する方式のものもあるが、当社では前者の方式を採用している。すなわち、

- (1) 投入ばねを蓄勢してエネルギーをたくわえる。
- (2) 蓄えられたエネルギーを放出することによって投入動作を行なう。この投入動作行程中、しゃ断用ばねにエネルギーをたくわえる。

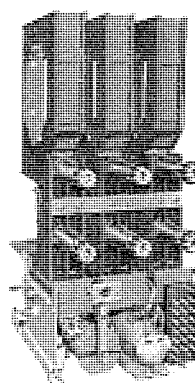


図 2.2 3-DHE-25, 3.6 kV 250 MVA
1200 A 電動ばね操作機構付き
磁気しゃ断器
Rear view of type 3-DHE-25 3.6 kV
250 MVA 1,200 A magnetic air circuit
breaker with stored energy mechanism.

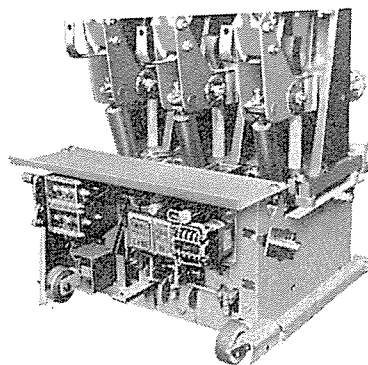


図 2.3 3-DHE-25, 3.6
kV 250 MVA
1200 A 電動ばね
操作機構付き磁
気しゃ断器
Front view of type
3-DHE-25 3.6 kV
250 MVA 1,200 A
magnetic air circuit
breaker with stored
energy mechanism.

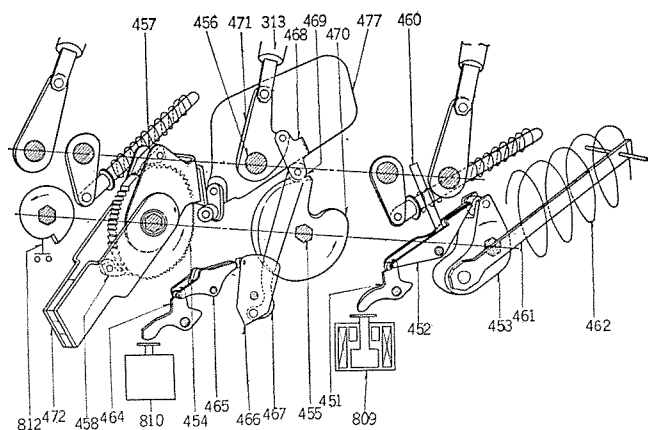
(3) 引きはずし操作は従来のソレノイド操作機構と同じ。
したがってこの投入機構には、次の四つの異なった状態がある。

- (1) しゃ断器“開”投入ばね放勢（引きはずし自由状態）
電動機または手動操作ハンドルにより
- (2) しゃ断器“開”投入ばね蓄勢
投入指令により
- (3) しゃ断器“閉”投入ばね放勢
投入ばね放勢と同時にリミットスイッチにより電動機が回転し
- (4) しゃ断器“閉”投入ばね蓄勢

3.2 構造および動作

図 3.1 にしゃ断器“閉”，投入ばね蓄勢状態における操作機構の構造図を、図 3.2 にこの機構を下部よりみた外観を示す。

図 3.3、図 3.4 にしたがって動作を説明すれば、図 3.3(d) はしゃ断器“開”投入ばね放勢の状態で、この状態より電動機または手動で投入ばねを蓄勢していくと、つめ車 (454) は矢印 (反時計方



313 絶縁操作棒	460 投入防止インタロック	470 投入カム
451 投入トリガ	461 接続棒	471 中自由レバー
452 ばね放勢ラッチ	462 投入ばね	472 手動蓄勢レバー
453 ばねクランク	464 引きはずしトリガ	477 投入ばね蓄勢電動機
454 つめ車	465 引きはずしラッチ	809 投入電磁石
455 クランク軸	466 引きはずしカム	810 引きはずし電磁石
456 主 軸	467 リンク	812 電動機リミットスイッチ
457 駆動つめ	468 主リンク	
458 保持つめ	469 カムローラ	

図 3.1 電動ばね操作機構の構造
Schematic constructional view of stored energy mechanism.

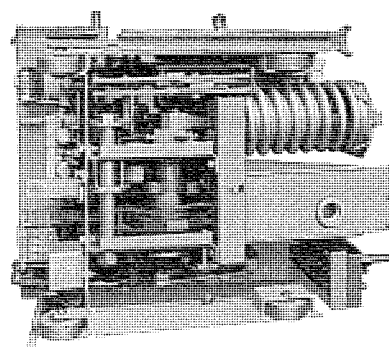
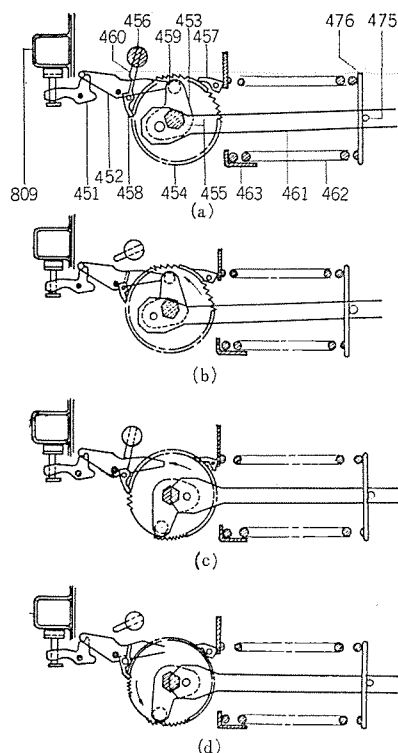


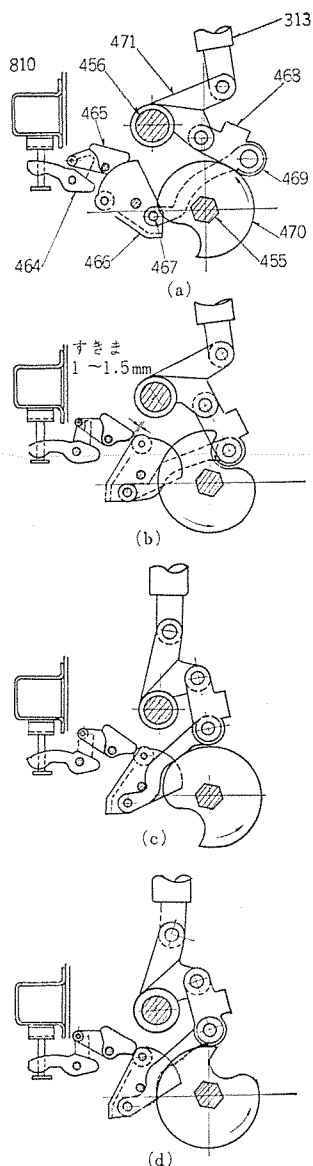
図 3.2 下部からみた電動ばね操作機構
Bottom view of stored energy mechanism.



451 投入トリガ	457 駆動つめ	463 操作機構フレーム
452 ばね放勢ラッチ	458 保持つめ	475 ビン
453 ばねクランク	459 ばねクランクローラ	476 止め板
454 つめ車	460 投入防止インタロック	809 投入電磁石
455 クランク軸	461 接続棒	
456 主 軸	462 投入ばね	

(a) シャ断器“閉”ばね蓄勢 (c) シャ断器“閉”ばね放勢
(b) シャ断器“開”ばね蓄勢 (d) シャ断器“開”ばね放勢

図 3.3 つめ車および投入機構説明図
Schematic constructional view of stored energy mechanism spring charging parts.



313 絶縁操作棒	465 引きはずしラッチ	469 カムローラ
455 クランク軸	466 引きはずしカム	470 投入カム
456 主 軸	467 リンク	471 中自由レバー
464 引きはずしトリガ	468 主リンク	810 引きはずし電磁石

(a) シャ断器“閉”ばね放勢 (c) シャ断器“閉”ばね蓄勢
(b) シャ断器“開”ばね放勢 (d) シャ断器“開”ばね蓄勢

図 3.4 投入カムおよび引きはずし機構説明図
Schematic constructional view of stored energy mechanism closing cam and tripping linkage.

向) の方向に回る。つめ車 (454) と投入カム (470), ばねクランク (453) は, クランク軸 (455) を通して同じ方向に回転して約 1/2 回転した後, 図 3. 3 (b) に示す位置までばねクランクのローラ (459) が, ばね放勢ラッチ (452) を押付けて保持され, さらにばね放勢ラッチ (452) は投入トリガ (451) によって保持される。このとき, ばねクランク (453) と連結されている接続棒 (461) は, 投入ばね (462) の水平方向中心線上にあるデッドポイントを少し越えた位置にあり, 投入ばねは蓄勢完了している。

また, 図 3. 4 で (a) で引きはずし自由位置にあった引きはずしトリガ (464), 引きはずしラッチ (465), 引きはずしカム (466), リンク (467) は, 前に述べたクランク軸 (455) の回転によって投入ばね蓄勢完了の終わり近くで, 投入カム (470) が図 3. 4 (b) の投入ばね蓄勢完了位置になると同時に完全復帰位置にもどる。

図 3. 3 (b) において投入指令が送られると投入用電磁石はプラジャを吸引し, 投入トリガ (451) を持ちあげる。そうするとばね放勢ラッチ (452) は反時計方向に回転するため, ばねクランク (453) は自由になり, 投入ばね (462) の力によって反時計方向に回転し図 3. 3 (c) で示す位置になる。

このときクランク軸 (455) も同時に回転し, 投入カム (470) が主リンク (468) 下端のカムローラ (469) を押しあげ, 主軸 (456) の中自由レバー (471) は反時計方向に回転し, シャ断器 “閉” の位置まで持ち上げられ絶縁操作棒 (313) を通じてコンタクト部は投入状態となる。図 3. 4 (c) がこの状態を示す。投入カム (470) がカムローラ (469) を押しあげるとき, リンク (467) は引きはずしカム (466) により, また引きはずしカム (466) は引きはずしラッチ (465) により, さらに引きはずしラッチ (465) は引きはずしトリガ (464) により保持され, カムローラ (469) は右方へ移動できないようになっている。

投入動作完了と同時に図 3. 1 に示す電動機リミットスイッチ (812) が動作し, 直ちに電動機に通電し, 前に説明したとおり投入ばねは蓄勢され図 3. 1, 図 3. 3 (a), 図 3. 4 (d) に示す位置となる。電動機は投入ばね蓄勢後リミットスイッチ (812) により電流は切られるが, 慣性によりある一定時間の間回転を続ける。この場合つめ車 (454) の歯形のない部分であるので, つめ (457) はから動きし, やがて停止する。

図 3. 4 (d) において, 引きはずし指令が送られると引きはずし用電磁石 (810) がプラジャを吸引し, 引きはずしトリガ (464) を持ちあげる。そうすると引きはずしラッチ (465) は反時計方向に回転し, さらに引きはずしカム (466) も反時計方向に回り, リンク (467), カムローラ (469) が右方へ移動し, 主軸 (456), 中自由レバー (471) はシャ断用ばねによって時計方向に回転し, 絶縁操作棒 (313) は引き下げられて図 3. 4 (b) に示す位置となりシャ断は完了する。

もし投入完了直後, または投入動作の途中で引きはずし指令が送られた場合でも, 投入動作とは無関係に前述の引きはずし動作が行なわれ, 図 3. 4 (a) に示す位置になりいわゆる機械的引きはずし自由となっている。引きはずし自由動作後, 引き続いて投入指令が送られても図 3. 5 に示されるように, ポンピング防止回路となっているので, いったん投入指令を解除しないと投入できないようになっている。図 3. 1 の投入防止インタロック (460) は, シャ断器 “閉” ばね蓄勢状態で誤って投入指令を送った場合に, シャ断器の誤動作を防止するための装置である。

手動操作の場合は図 3. 6 に示すように手動操作棒を用いる。手動操作棒は, 図 3. 1 の手動蓄勢レバーに差込み上下動させれば電動

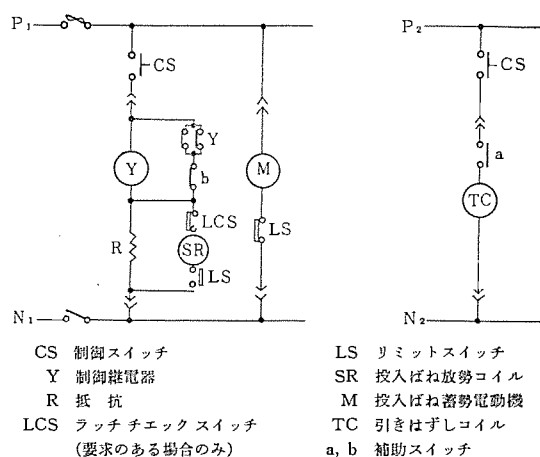


図 3. 5 制御回路の基本接続図
Connection diagram of stored energy mechanism.

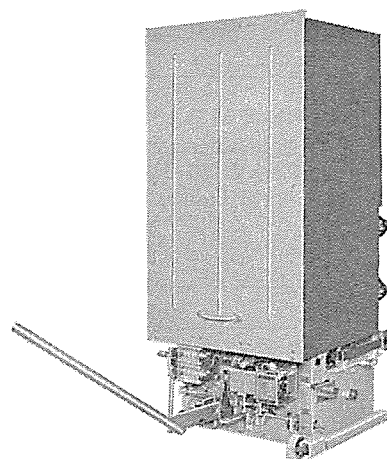


図 3. 6 投入ばね蓄勢用手動ハンドルをそう入したところ
Manual operating handle for closing spring charging.

機の場合とは逆に, 保持つめ (458) が駆動つめ (457) となり, 駆動つめが保持つめとなって投入ばねは電動機の場合と同様にして蓄勢される。

磁気シャ断器はメタルクラッド配電盤に収納して用いられるものが大部分であるが, 点検のため盤内より盤外へ引き出すことがある。このとき安全のためにシャ断器は解放状態であることが望ましい。ソレノイド操作機構付きのものでは, シャ断器投入状態のまま盤外へ引き出そうとしたとき, 盤床面に取り付けられた装置によって引きはずしばねは解放され, シャ断器 “切” の状態となって引き出される。盤外より盤内にそう入するときもどのように引きはずしばねは必ず解放される。

電動ばね操作機構でもどのように盤床面に取り付けられた装置によって, 投入ばね, 引きはずしばねともに解放されるようになっている。

またメタルクラッド盤内試験位置よりそう入位置までそう入される行程では, 投入または引きはずしができないようインタロック装置が設けられている。

4. 試験結果

当社 HPL において種々の試験を行ない, この操作機構の性能を検証した。そのおもな結果を以下にのべる。

4.1 開閉特性

表 2.1 に示されるように、投入時間は定格操作電圧において 0.1 秒以下である。電動機による投入ばねの蓄勢時間は 5 秒であるので、CO-15 秒-CO 責務 (JEC 1452 号) を十分満足させることができる。さらに投入時間が短いので、高速再閉路すなわち 0-0.35 秒-CO-3 分-CO の責務をも容易に果たすことができる。

4.2 短絡電流しゃ断試験および投入容量試験

表 4.1 に 4-DHE-25 M 形の短絡電流しゃ断試験および投入容量試験結果を示し、表 4.3 に 6-DHE-50 M 形のそれを示す。図 4.1 ~ 4.4 はこれらのオシログラムを示している。これらの試験はすべて

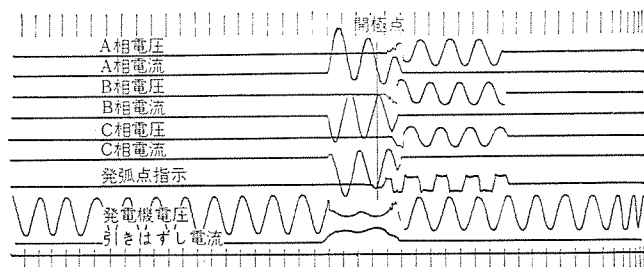


図 4.1 4-DHE-25 M 形 4.34 kV 250 MVA の
しゃ断試験 オシログラム
Oscillogram at 4.34 kV 250 MVA interrupting test
on type 4-DHE-25 M breaker.

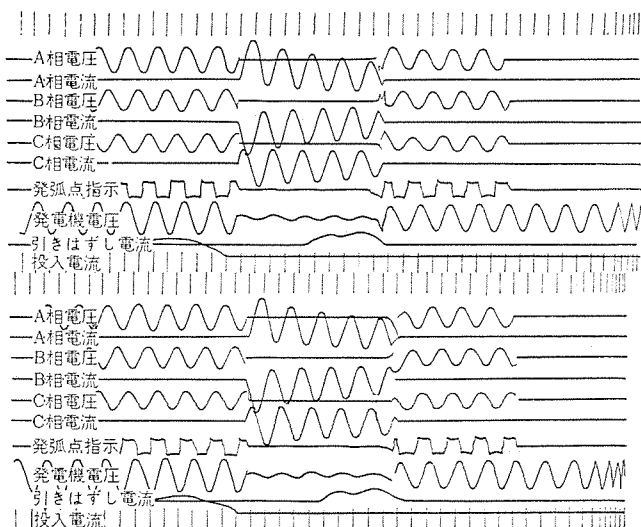


図 4.2 4-DHE-25 M 形投入試験 オシログラム
Oscillograms of closing and latching capability test
on type 4-DHE-25 M breaker.

メタルクラッド内に収納して行なわれた。

4.3 その他の試験

以上のほかに、JEC 145 および電力用規格 B-112 に規定された各種の試験を行ない、いずれも良好な結果を示した。

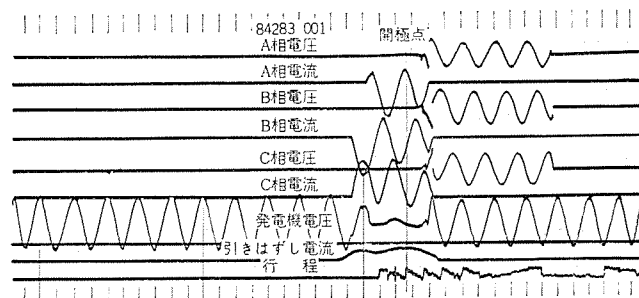


図 4.3 6-DHE-50 M 形 7.2 kV 500 MVA の
しゃ断試験 オシログラム
Oscillogram of 7.2 kV 500 MVA interrupting test
on type 6-DHE-50 M breaker.

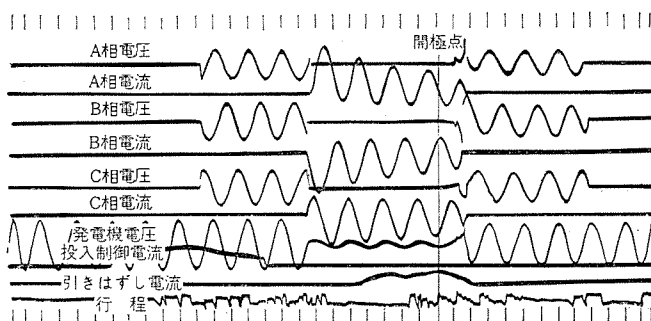


図 4.4 6-DHE-50 M 形投入試験の オシログラム
Oscillograms of closing and latching capability test
on type 6-DHE-50 M breaker.

表 4.1 4-DHE-25 M 短絡電流しゃ断および投入試験結果

Test result of short circuit interrupting and closing and latching capability of type 4-DHE-25 M breaker.

試験番号	動作責務	給与電圧 (kV)	回復電圧 (%)	相 別	しゃ断電流		しゃ断時間			投入電流 (kA)	しゃ断容量 (MVA)
					AC 分 (kA)	DC 分 (%)	開 (サイクル)	アーク (サイクル)	全 (サイクル)		
94293 001	O	4.34 × 1.15	100	A B C	40.0 40.3 39.5	57 4 53	— 1.9 —	0.9 0.75 0.9	2.8 2.65 2.8	—	300
002	C 3分 C	4.34	—	A B C	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	104 92 66	—
003		4.34	—	A B C	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	104 92 66	—

表 4.2 6-DHE-50 M 短絡電流しゃ断および投入試験結果
Test result of short circuit interrupting and closing and latching capability of type 6-DHE-50 M breaker.

試験番号	動作責務	給与電圧 (kV)	回復電圧 (%)	相 別	しゃ断電流		しゃ断時間			投入電流 (kA)	しゃ断容量 (MVA)
					AC分 (kA)	DC分 (%)	開 極 (サイクル)	アーク (サイクル)	全 (サイクル)		
84283 001	O	7.2×1.1	103	A	44	38	2.1	0.6	2.7	—	550
				B	45	18		0.8	2.9		
				C	44	56		0.8	2.9		
002	C 3分 C	7.2	—	A	—	—	—	—	—	122	—
				B	—	—				111	
				C	—	—				77	
003	C 3分 C	7.2	—	A	—	—	—	—	—	88	—
				B	—	—				95	
				C	—	—				120	

5. む す び

以上のべてきたこの電動ばね操作機構付磁気しゃ断器の特長をまとめると、対地絶縁にエポキシを用い、小形軽量化された DHE 形磁気しゃ断器の特長に加えて

(1) 投入時間が 0.1 秒であり、ソレノイド操作機構の 1/3～1/4 に短縮され高速投入が可能である。

(2) 高速再投入ができる。

(3) 操作電流が小さい。

(4) 手動操作でも投入容量が保証できる。

(5) 大きな投入容量を有するにもかかわらず小型であり、ソレノイド操作機構付の縮小形磁気しゃ断器と外形寸法は同一とすることができた。

(6) メタルクラッド配電盤用として用いられるとき、完全なインターロック装置を備えている。

当社では国内各需要家および国外輸出向けとして、図 5.1 に示すように量産を開始している。今後はこの開発および製作経験にもとづき、さらに大容量のものの開発を計画している。末筆ながらこのしゃ断器開発にあたって、ご尽力たまわった関係各方面のかたが

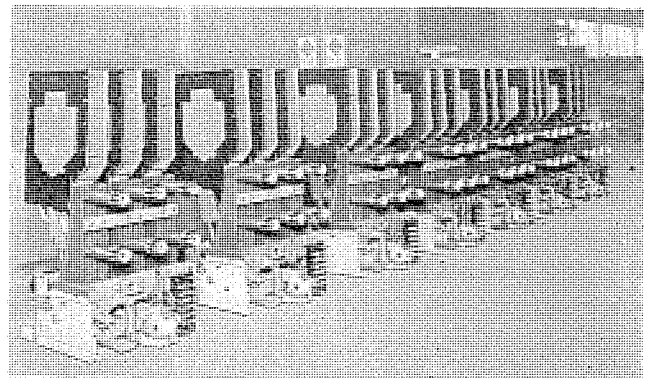


図 5.1 量産中の電動ばね操作機構付き磁気しゃ断器
Magnetic air circuit breakers with stored energy mechanism.

たに心からお礼申しあげる次第である。

参 考 文 献

- (1) 桜井：三菱電機技報 41, 552 (昭 42)

エポキシ樹脂の耐トラッキング性

草川 英昭*・橋 本 修*

Tracking Resistance of Some Epoxy Resins

Central Research Laboratory Hideaki KUSAKAWA・Osamu HASHIMOTO

Described in this paper is "the recent research on tracking phenomena and their testing methods for the electrical insulators" compiled by the Institute of Electrical Engineers of Japan in brief. The tracking resistance of some epoxy resin is also reported herein.

Although the tracking phenomena is one of carbonizing reactance, there are few articles worked out from the viewpoint of chemical research or engineering. This is due to the fact that the tracking on the surface of insulator is too complicated to set up testing methods. Recently one fundamental point of the tracking is suggested and the testing methods have been brought under investigation. It seems that if the research of the tracking phenomena is made to clarify their relationship with chemical structure by taking the phenomena for granted as chemical reaction, the tracking resistance of electrical insulators will be greatly improved.

1. ま え が き

電気機器についてトラッキングが大きな問題となっておりあげられるようになったのはここ数十年ほどのことであるが、この現象が実際上の問題となり始めたのは第2次大戦の前後のことで、イギリスやドイツの軍艦の電気装置（当時はほとんどがペークライト）が絶縁破壊を起こすということからである。まずドイツでは1937年には現在のDIN法の基礎となる試験法ができた。一方イギリスにおいても同じように試験法が考えられていたが、このほうは現在のIEC法に統合されている。現在ではこのほかにもアメリカで規格化されている高電圧小電流アーーク性試験法・Dust & Fogテスト・汚染液傾斜平面試験法・毛細管法、などがあり、最近比較的早く結果の出るDip法などがあるが、このような多くの方法があるのは、いずれの加速試験も実際とは異なった結果を与え、また試験法間の相関性も一様でないためであり、その条件の複雑なためにもっぱら電気工学的側よりの論議が多く、材料の立場よりこれに取り組んだものは、その現象が炭化反応であるにもかかわらず化学側から取り上げられたものが少ない。

トラッキング現象が最近になって特に問題になるようになったのは、電気機器の容量が大きくなったため絶縁物により強い電界がかかるようになったことと、従来は窯業材料でつくられていたものが機械強度・重量・作業性などから有機材料によって置き換えられていったためである。しかしこの有機絶縁材料の利用の発展が大きいため、一つの試験法では複雑な炭化反応を一義的におさえることができず、またその因子の解析も十分に行なわれていない段階では、実験によってえられた結果を、どのように解釈するのかということについてもさらに検討の必要がある。

トラッキングとは電界が存在する二つ端子間の絶縁物表面を流れる微少の漏えい（洩）電流が流れる電路ができ、そのジュール熱によってこの電路が一点で切れると、その切れた部分に電界が集中して、放電が起こり、この放電によって絶縁物表面が熱分解を起こして炭化する。この炭化した部分は電気が流れやすいために、他の部分に絶縁された点ができ、ここで放電が起こって炭化する。このようにつぎつぎに異なった部分が炭化されて、ついには端子間を1本以上の炭化導電路が形成され、（この炭化導電路をトラックという）表

面絶縁破壊することをいう。現在考えられているトラッキング現象の起こる過程を見ると、

- (1) 絶縁物表面の吸湿や汚染
- (2) 汚染による吸湿性の増大
- (3) 汚染物のイオン化
- (4) イオンによる漏えい電流の発生
- (5) 漏えい電流によるジュール熱の発生とこれによる乾燥
- (6) もっとも速く乾燥された部分の絶縁とその部分への電界の集中
- (7) 放電とこれによる絶縁物劣化
- (8) 炭化
- (9) 他の部分の乾燥
- (10) 6～9項の繰り返しによるトラッキングの形成
- (11) トラッキング現象の発生

ということになっている。このときの原因となる汚染物は、塩分・無機質物・繊維質・化学薬品などで、トラッキングの速さを決めるものとしては、汚染の種類・印加電圧の高低・電極の形・電極の材料・電流の大小・放電のしかた・絶縁物の組成・形状・表面の状態（平滑か粗面か）などである⁽¹⁾。

電界が存在する状態での放電とこれによるトラックの形成、絶縁劣化という過程乾湿には二つの場合があり、乾いている状態で起こるものをアーークトラッキング、湿った状態での現象をクリープトラッキング（creepage tracking）と区別していて、前者は炭化温度が、1,500°C以上で行なわれ、後者はせいぜい数百度であろう。そうして現在一般にトラッキングといえばクリープトラッキングのほうを指すことになっている⁽²⁾。

電気施設のうちに特にトラッキングを発生しやすい箇所は、静止器（変圧器など可動部分がないか、あってもそれが主でないもの）では高圧引下げ線、柱上変圧器の高圧側リード線、シャ断器および開閉器のリード線とシールド部、電力ケーブルの端末、スイッチギヤ、成形の変流器であり、回転機（発電機、電動機など）では絶縁部が多いとされている。これらの部分に用いられている絶縁材料の新しい製品の開発が速いために、試験法が材料の多様性についてゆけないのが実状で、これらのことが、トラッキングが一種の化学反応であるにもかかわらず、化学関係の研究者の興味を呼ばない原因と考えられる。

ここでは、このトラッキング現象について現在までに報告されているアウトラインを化学的・材料組成的立場より述べると同時に、電気絶縁材料としてますますその地位を固めつつあるエポキシ樹脂の耐トラッキング性について、すでに報告されたものを要約し、併せてわれわれが実験をして得た結果についても報告する。

2. 絶縁物の化学組成とトラッキング

このような複雑なトラッキング現象を化学的見地からみたものは、Parr らである⁽³⁾。かれらは有機絶縁物の化学構造から炭化されやすい結合と、気化されやすい結合（水、二酸化炭素に成りやすい結合）とにわけ、トラッキングが起こるものと、電食（放電により絶縁物の一部がはく（剥）離される）は起こるが絶縁劣化しない（電食が進み絶縁物がなくなれば短絡する）化合物とにわけた。さらに Billings らは、これを進め熱分解反応の立場からながめ⁽⁴⁾、芳香族を多く含む樹脂や、酸化を受けやすい側鎖置換基をもつものはトラッキングが起こりやすいことを示した。これらのことはつぎの点で重要な意味を持つ、最近開発されている耐熱性樹脂は芳香環や異節環を多く含む⁽⁵⁾。このときトラッキングは熱分解炭化反応であるからと耐熱性樹脂を使用するようなことはむしろ逆で、トラッキングを防ぐためには電食の起こる樹脂がよいことになる。これと同様に放電によって燃える（絶縁物表面が 500~800°C 程度に加熱されて赤く燃える）のを防ぐために、耐熱性有機物（その多くはハロゲン含有樹脂）を用いるとかえってトラッキングが早い。これは放電時の絶縁物の表面温度がこれらの耐熱性樹脂の分解温度より高いためである。

トラッキングは熱分解による炭化反応といっても一般にいわれる熱分解とは異なっている。たとえばポリスチレンを熱分解すると多くの揮発性物質を出して残さ（渣）はあまり残さないが⁽⁶⁾、耐トラッキング性が悪い（図 2.1 参照）。これはトラッキングの熱分解は部分的・局所的であること、汚染物・水分などの触媒作用、荷電粒子によるふんい気中の分子の励起などが併発されるため、これらはちょうどポリスチレンの熱分解時に残留炭素を多くするため、架橋密度を上げ、側鎖に比較的熱分解を受けやすい置換基を入れる⁽⁷⁾のと似た反応が起こっているとみるべきであろう。また実際には必ずしも Parr ら

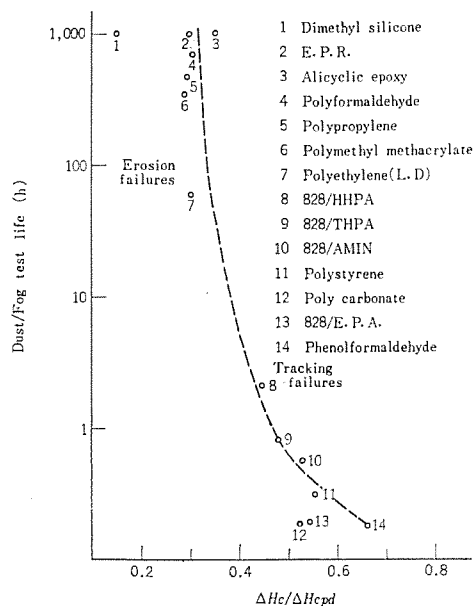


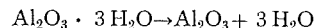
図 2.1 dust/fog テスト結果と絶縁物の炭化傾向⁽¹¹⁾
Relation between dust/fog life and carbon forming tendency of various insulating materials⁽¹¹⁾.

の予想したようにはならず、侵食するはずのものがトラッキングを起こしたり、その逆があったりして、細かい検討の余地があるが、彼等の報告は一応の目安となっている。

3. 充てん(填)剤とトラッキング

前節で述べたように有機絶縁材料の耐トラッキング性は、材料自身の化学構造によっておもに決定されるが、これに添加する充てん(填)剤の種類・量によって、これを改善することも、低下させることもできる。一般に有機絶縁材料に不活性無機物質の充てん剤を配合すると、耐アーク性は改良されることが多いが、耐トラッキング性は複雑で特にシリカ粉末を充てんさせた場合は、シリカの粒度・配合量において耐トラッキング性が最小となることがあるといわれている。この原因として、粒度が大きくなるに従って樹脂層が厚くなり、熱分解時の酸素の供給が少なくなるためといわれている⁽¹⁾。一方充てん剤も含めた系についてのトラッキングの目安となるものの探索も行なわれている⁽⁸⁾。

耐トラッキング性を改良するための充てん剤としてもっともよく知られているのは水和アルミナで、130°C 以上の温度になると内に含まれた結晶水が放出され、



この結晶水と有機絶縁物の分解生成物とがアルミナを触媒として反応し、一酸化炭素とそのほかの揮発性炭化水素となって、絶縁物表面に炭素導電路を形成しないものと考えられている。またこれと同時に結晶水や、揮発性炭化水素が熱によって気体になり、このときの体積の急激な膨張によって表面に付着した炭素粉末を吹き飛ばすという二次効果も期待されている⁽¹⁾。このほか硫酸カルシウムなどがよく用いられている。このように無機質粉体の効果として絶縁物の熱伝導率のよくなることも一因であろう。

一方耐トラッキング性を下げるものにはカーボンブラックがあり、その種類・量などの効果も調べられている⁽¹⁾。

これらの充てん剤をも含めた系についての、トラッキングの目安となるものを見いだす試みも行なわれている。

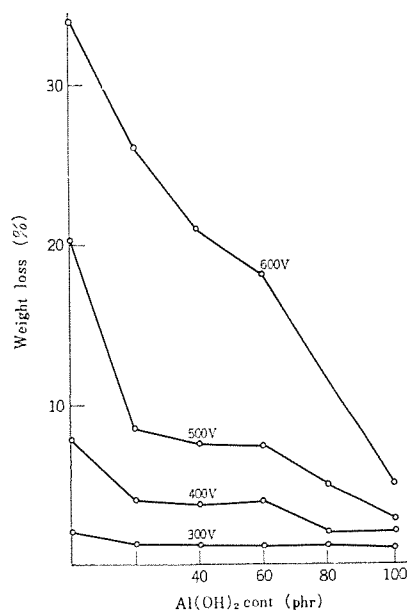


図 3.1 トラッキングに対する充てん剤の効果⁽¹⁾ Al(OH)₃
Effect of filler on tracking⁽¹⁾.

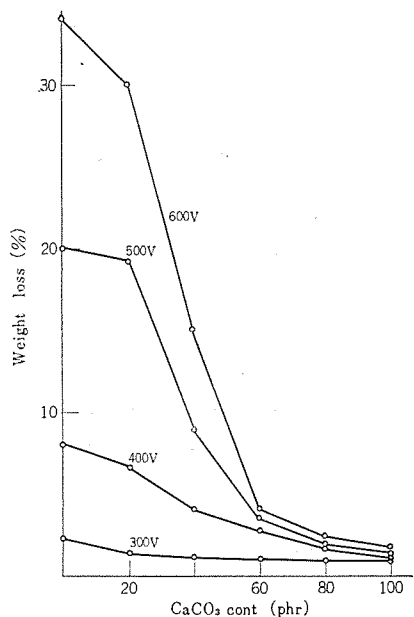


図 3.2 トラッキングに対する充てん剤の効果⁽¹⁾ CaCO_3
Effect of filler on tracking⁽¹⁾.

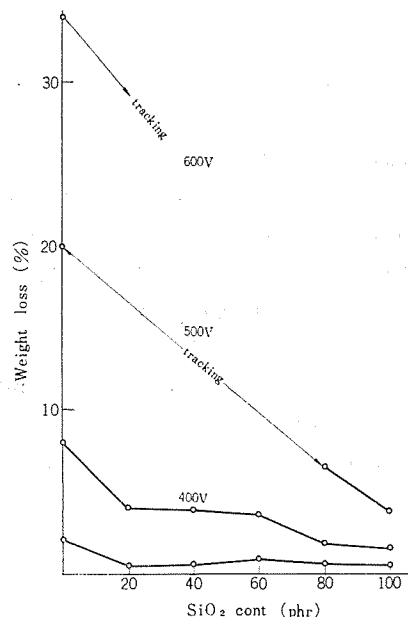


図 3.3 トラッキングに対する充てん剤の効果⁽¹⁾ SiO_2
Effect of filler on tracking⁽¹⁾.

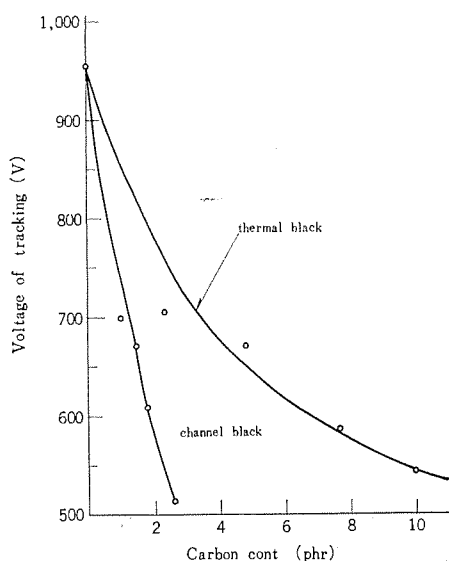


図 3.4 トラッキングに対する充てん剤の効果⁽¹⁾ カーボンブラック
Effect of filler on tracking⁽¹⁾ carbon black.

4. Billing によって行なわれたエポキシ樹脂の耐トラッキング試験⁽⁸⁾

エポキシ樹脂はその機械的強度・耐候性のよさから構造材料・絶縁材料として電気機器への応用がめざましいものがあり、このためそのトラッキング性が大きな問題となってきた。現在のエポキシ樹脂の主流であるビスフェノール系の一連の化合物は、その化学構造から耐トラッキング性があまり期待できないことが予想され、実際上もそのとおりであることがわかった。一方これを解決するためにつくられた脂環式エポキシ樹脂は、機械的強度・耐衝撃性などに問題があり、これらの点の改良について各エポキシメーカーがきそって研究している。そうしてそれらのうちのあるものは機械的性質ではビスフェノール系とほぼ同じで、耐トラッキング性に著しい向上がみられた。

最近英国において長期にわたるエポキシ樹脂を用いた電気機器の屋外暴露試験の結果が発表された⁽⁸⁾。それによると樹脂のみの場合は Parr らによるトラッキングの判定は正しく、充てん剤はいったときには多少初めの予想とは違った結果がでたといわれる。また樹脂分と充てん剤とのなじみが悪いと、表面に亀裂が入りやすく、絶縁劣化が起こりやすいという。これらの結果の一部を表 4.1 にまとめた。

表 4.1 屋外暴露のトラッキング試験結果
Results of outdoor exposed tracking and erosion test.

Sample	at Manchester 1 kV/in		at Cloughster 3 kV/in	
	Time to Fail (day)	Tracking or Erosion	Time to Fail (day)	Tracking or Erosion
828/NMA	6	tracking	>400	slight tracking
828/HHPA $\text{SiO}_2(300)$	350	tracking	>400	excellent
828/NMA $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(360)$	>400	good	>400	excellent
828/HHPA $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(350)$	>400	excellent	>400	excellent
CY 175/HHPA	261	eroded	—	—
CY 175/HHPA $\text{SiO}_2(200)$	>400	eroding	>590	deep surface crack
CY 175/HHPA $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(400)$	>400	excellent	>590	excellent
Porcelain	>400	excellent		
Glass	—	—		
Teflon	>400	excellent		

5. 脂環式エポキシ樹脂のトラッキング性

前節に述べた Billings らによって行なわれた脂環式エポキシ樹脂は、チバ社製のアルライト CY 175 系の樹脂であるといわれる⁽⁸⁾。このほかチバ社ではテトラヒドロフタル酸のジグリシジルエステル、ヘキサヒドロフタル酸のジグリシジルエステル (CY 182, 183) など市販しているが、これらの樹脂的強度・耐トラッキング性は表 5.1 に示したようなものであり、この表から従来の脂環式エポキシ樹脂の機械強度が、ビスフェノール A 系のエポキシ樹脂に比べて悪いこと、CY 182, 183 はそれらの欠点が大幅に改善されていることがわかる。またトラッキング性は、これらのジグリシジルエステルの CY 系はエトキシレン環をもつチソノックス系のエポキシ樹脂である 221 よりやや悪いように見えるが (表 5.1)、これは反応促進剤の影響であり、これを 221 に加えて硬化させると、いずれも優劣がなくなることがわかる (表 5.2)。しかしこの反応

表 5.1 エポキシ樹脂の機械強度と耐トラッキング性
Mechanical strength of some epoxy resin and their tracking resistance.

Sample	E 828 HHPA	CY 175 HHPA	E 190 or CY 182 HHPA	CY 183 HHPA	C 221 HHPA
Accelerator	BOMA	DY 065	DY 065	DY 065	—
Cure condition	80°/3 hr +120°/3 hr	80°/3 hr +120°/16 hr	80°/10 hr +120°/16 hr	80°/10 hr +120°/16 hr	120°/8 hr +160°/6 hr
Tensile strength (kg/mm ²)	4~5	3~4	5~6	4~6	3~4
Impact (kg/cm ³)	14~16	5~6	14~16	14~16	5~6
Weight loss by erosion (mg)	6~9	3~6	13~15	13~15	3~5
	21.6	4.7	5.2	4.7	2.5

表 5.2 硬化促進剤によるトラッキングへの影響
Effect of cure accelerator on tracking.

Epoxy	Cure agent	Accelerator	Cure condition	Weight loss (mg)
221	HHPA	nor	120°/3 hr+160°/6 hr	2.5
221	HHPA	DY 065	80°/3 hr+120°/16 hr	4.1

表 5.3 硬化促進剤のトラッキングへの影響
Effect of some curing accelerators on tracking.

Epoxyresin	Accelerator	Weight loss (mg)
221+HHPA	—	2.5
221+HHPA	BDMA 0.5 (phr)	6.0
221+HHPA	BDMA 1 (phr)	6.2
221+HHPA	BDMA 2 (phr)	6.4
221+HHPA	BDMA 4 (phr)	7.1
221+HHPA	TEA 0.75	6.3
221+HHPA	DMA 0.9	5.1
221+HHPA	DY 065 6	4.1

促進剤（高級アルコラート）の影響はわずかで特に問題とする必要はないようである（表 5.3）。

またエポキシ変性のメタクリル酸樹脂をつくり、これの架橋密度による影響を調べたが、現在のところ架橋密度がトラッキングに与える影響も小さいと考えられる⁽¹⁰⁾。

最近シエルで開発されたエポコート 190 は、分析結果により CY 182 と同じテトラヒドロフタル酸のジグリシジルエステルで、その耐トラッキング性も CY 182 と同じであることがわかった。

6. エポキシ樹脂中に含まれた芳香環数とトラッキング性

ビスフェノール A の芳香環に水素添加した 2-2-ジ（4-ヒドロキシ）シクロヘキシルプロパン（通称水添ビスフェノール A）をエピクロヒドリンと反応させて、水添ビスフェノール A、ジグリシジルエーテル（水添 828）をつくり、これをエポコート 828 とつぎつぎに置換していく。一方硬化剤も無水フタル酸とヘキサヒドロ無水フタル酸とを適当に混ぜ、成形する。こうしてエポキシ樹脂中の芳香環数を変えて樹脂中に含まれる芳香環の数と、トラッキング性との相関性を調べ図 6.1 に示したような結果をえた。試料としたエポキシ樹脂の配合は表 6.1 に示した。

この結果よりつぎのことがわかる。硬化したエポキシ樹脂のトラッキング性は、中に含まれた芳香環の数によって、耐トラッキング性が低いものから高いものまで変えることができる。このとき用いるエポキシ樹脂中の芳香環を減らすのと、硬化剤によって減らすのとは、硬化したエポキシ樹脂に含まれる芳香環の数は同じでも、耐トラッキング性に与える影響は同じではない。すなわちエポキシ樹脂中の脂肪環は耐トラッキング性の向上に、硬化剤中の脂肪環よりも顕著にきく。

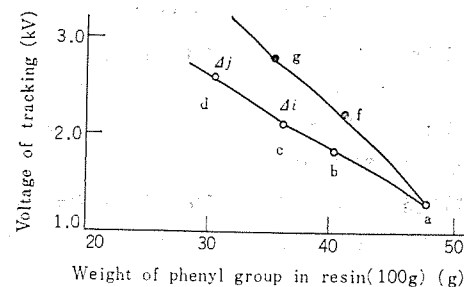


図 6.1 樹脂中に含まれた芳香核数とトラッキング電圧
Plots of tracking voltage vs. phenyl group weight on epoxy resin.

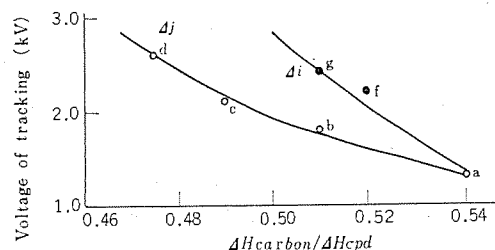


図 6.2 樹脂の炭化傾向とトラッキング電圧
Plots of tracking voltage vs. carbon forming tendency on epoxy resins.

表 6.1 試料のエポキシ樹脂と硬化剤との配合比
Samples and their combination ratio between epoxy and curing agent.

Sample	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Epon 828	100	100	100	100	100	75	50	25	75	75
Hydrated 828						25	50	75	25	25
Phthalic Anhydride	80	60	40	20		80	80	80	60	40
Hexahydro PA		20	40	60	80				20	40

この効果を Parr らが行なったように炭化しやすい原子団グループの結合エネルギーの分子を構成する全結合エネルギーに対する割合との関数関係に直すと、図 6.2 となり、図 6.1 の表示と一致する。すなわち分子中に芳香族核を多数含む絶縁材料は耐トラッキング性が期待できないことがわかる。

7. む す び

絶縁物のトラッキング現象についての解説と、特に最近電気機器に多く用いられているエポキシ樹脂について、系統的に行なわれた実験結果について述べた。このように複雑なトラッキング現象についても統一的なみかたをする試みと⁽⁸⁾、またトラッキングについての評価法についても多くの検討が行なわれている。1967 年のアメリカにおける電気学会で Douglas らが報告した⁽¹¹⁾、絶縁材料のトラッキングの評価基準としてのトラッキングしきい値 (tracking threshold) がその一つで、結局トラッキングは絶縁物表面におけるジュール熱による昇温と、絶縁物を構成する化学構造・組成との関係で起こると考えるわけである。この考えにそくした試験法として現在 Dip 法が考案され、検討されている。この方法は再現性がよく、また他の試験法との相関性も高いといわれている⁽¹²⁾。また実際の屋外暴露による試験結果と Dip 法との結果もよく一致していて⁽¹³⁾、測定に要する時間も少なく、IEC 推奨法などよりも絶縁物の化学組成との相関性もよい⁽¹⁴⁾。

このようにトラッキング現象に理論的背景ができ、これに基づいた試験法が確立されれば、トラッキングと絶縁材料の化学組成との相関性の問題となれば、特殊条件下の炭化反応として化学的立場から研究されるようになり、絶縁物の耐トラッキング性向上のための研究・開発がより進むものと期待される。

エポキシ樹脂の提供には長瀬産業尼崎東工場白井博氏の援助を受けた。ここに同氏に感謝の意を表する。(昭和44-8-18受付)

参 考 文 献

(1) “トラッキング現象と耐トラッキング性試験の動向”，電気学会技術報告 (I 部) No. 86 (昭43)

(2) 能登：最近の絶縁材料試験法，電学誌 88, 802 (昭43)

(3) D. J. Parr and R. M. Scarisbrick : Performance of Synthetic Insulating Materials under Polluted Conditions, Proc. IEE 112, 1625 (1965)

(4) M. J. Billings, A. Smith and R. Wilkins : Tracking in Polymeric Insulation, IEEE Trans. Elect. Insult. EI-2, 131 (1967)

(5) A. H. Frazer : High Temperature Resistant Polymers, p. 38, Interscience Publishers, A division of John Wiley & Son (1968)

(6) S. L. Madorsky : Thermal Degradation of Organic Polymers, p. 26, Interscience Publishers, A division of John Wiley & Son (1964)

(7) F. H. Winslow, W. O. Baker, N. R. Pape and W. Matreyek : Formation and Properties of Polymer Carbon, J. Polymer Sci., 16, 101 (1955)

(8) 能登，河村：熱分解的考察によるトラッキングの機構と耐トラッキング性の評価，電学誌 89, 693 (昭44)

(9) M. J. Billings and K. W. Humphereys : An Outdoor Tracking and Erosion test of Some Epoxide Resins, IEEE Trans. Elect. Insult. EI-3, 62 (1968)

(10) 草川，橋本：未発表

(11) J. L. Douglas and R. M. Scarisbrick : Recent Research on Tracking of Electrical insulation, Proc. 7th Elect. Insult. Conf. 118, IEE 32, C79-41 (1967)

(12) C. F. Wallance and C. A. Bailey : Dip-Track Test, IEEE Trans. Elect. Insult. EI-2, 137 (1967)

(13) 川上：私信

(14) 草川，橋本：未発表

正 誤 表

Vol. 43 No. 12 に掲載の論文，「当社における電力機器の耐震強度の研究状況」と「モールド絶縁材料」に誤記がありましたので，次のように訂正いたします。

ページ・行	誤 り	正
1676 右 図 3. 3 の横軸	時間	周期
1677 左 図 3. 5 の横軸	時間	周期
1680 右 上から 20 行目	ストレンゲージを張架	ストレンゲージをはり付けまたは接着
1680 右 上から 21 行目	どちらも動わい(歪)計	どちらも動ひずみ計
1684 右 上から 20 行目	つまりこのような問題に対して，エポキシ樹脂の各種応力による破壊強度 ⁽¹⁸⁾ は次のように考えられる。	つまりこのような問題に対しては，エポキシ樹脂の各種応力による破壊強度 ⁽¹⁸⁾ と，つぎの(1)および(2)との関係を知る必要があると考えられる。
1684 右 上から 35 行目	との関係を	との関係も
1687 右 下から 23 行目	と相温性があり	と相容性があり

真空中の金属電極間の絶縁破壊現象 (I)

秋葉 稔光*・高倉 康一*・上田 孝寿*・磯貝 文彦*

Breakdown Phenomena between Metallic Electrodes in High Vacuum (I)

Central Research Laboratory Toshimitsu AKIBA・Kouichi TAKAKURA
Kôjyu UEDA・Humihiko ISOGAI

Practical breakdown voltage limits between metallic electrodes have been obtained by measurements on dark currents and average breakdown voltages at 1~5 mm gaps in a clear vacuum of 10^{-8} torr by means of the extreme value statistical treatment.

The metallic electrodes consist of a plate as an anode and a semi-sphere as a cathode.

An average breakdown voltage between oxygen-free copper electrodes at 1 mm gap is about 70 kV and about 100 kV between stainless steel electrodes at the same gap.

A 50% saturated breakdown voltage after conditioning calculated from measured breakdown voltages through the extreme value treatment, agrees well with the average value of breakdown voltages.

A 0.05% breakdown voltage (breakdown voltage) is determined with accuracy of about one part to ten.

The microscopic electric field right before breakdown is nearby of a constant value ($\sim 1 \times 10^8$ V/cm) independent of breakdown voltage between electrodes of definite shapes.

1. ま え が き

真空中の絶縁破壊を究明するため、従来、主として暗流・電界強度・電極材料・電極表面状態などに注目して、多くの研究がなされている^{(1)~(6)}。それら多くの研究の結果、イオンフォトン形成・ウィスカの生成蒸発・陽極金属の加熱蒸発などが、絶縁破壊を引き起こす原因と考えられている。しかし、これら個々の機構のみでは絶縁破壊現象の十分な理解ができない。また、現在までのところ、これら個々の機構を総合して、絶縁破壊現象を定量的に説明できる報告はなされていない。真空中の絶縁破壊現象は、多くの原因が複雑に関係する総合的な現象であると考えられる。

ここでは、絶縁破壊機構の解明を試みるのではなく、現実に電極を工作することから実験が始まるという立場から、絶縁破壊現象についての各種データを得ることを目的とした。すなわち、電極構成材料の加工・仕上げ・処理の問題に重点をおき、真空度・材料・印加電圧その他の外的要素については一定の条件で実験した。この研究は以下の基本的な方針に従って遂行した。

(1) 絶縁破壊機構の解明は主目的でない。一般的に応用できる耐電圧値の実用的な限界値を求める実験に限定する。

(2) 使用する電極形状は、陽極側平面・陰極側半球の最も単純な組合せとする。

(3) 絶縁破壊電圧値のばらつき現象に関しては、初放電値（電圧を印加し始めて最初に記録される絶縁破壊電圧値）・コンディショニング過程・飽和値の3領域に分けて、主として飽和値を確率現象として統計的に処理し、限界耐電圧値を推定する。

(4) 電極表面の付着物は絶縁破壊電圧を変える要素の一つではあるが、真空の質がよければ飽和値には関連しないものと仮定して、表面仕上げ、絶縁破壊による面のあれ、暗流の変化、電界集中度などとの関連性を追求する。

(5) 印加電圧は極性効果をはっきりさせるため直流電圧に限定する。

実験には、イオンポンプによる連続排気形の真空そう(槽)中に、精度よく電極の脱着ができる装置を用いた。 10^{-8} torr 台の、油拡散ポンプのオイルの逆流を無視できる清浄な真空中で、実験を行ない、1 mm ギャップで、平均の絶縁破壊電圧値として、無酸素銅電極では約 70 kV、ステンレス電極では約 100 kV を得た。さらに多くの要素間の関連を追求して、破壊前後の面のあれの様子、コンディショニング効果、電界強度と耐電圧、全電圧効果、ばらつきの統計的処理などについても実験と考察を行なった。以下これらに関して詳述する。

2. 実験の方法

実験中の真空度が 10^{-8} torr 台の高真空中で、陽極側を平面電極、陰極側を半球電極とする組合せで、電極間ギャップ 1~5 mm, DC 電圧 0~160 kV (実効値) を印加した。電極材料としては、無酸素銅とステンレス鋼を用いて、暗流の測定と絶縁破壊電圧の測定をした。

2.1 実験装置

実験装置は、排気装置・暗流・絶縁破壊電圧測定装置・DC 高圧電源 (160 kV 5 mA, 安定度 1×10^{-3} 以下) その他からなり、暗流と絶縁破壊電圧の測定を、同時に連続的に行なえる自動記録系を用いた。以下に、排気装置と暗流・絶縁破壊電圧測定装置の概略を述べる。

2.1.1 排気装置

実験の目的から、多数回電極の交換をすることが考えられ、短時間で 10^{-8} torr 台に達する排気系を設計した。さらに、真空の質の問題として、残留ガスの種類や排気中の電極表面の付着物などによる実験条件の不安定化を防ぐため、イオンポンプ排気部とその補助としての荒引き排気部の2段構成とした。イオンポンプ排気部は、200°C 程度までのバークアウト排気を可能にするため、すべてのフランジ止め部にメタルガスケットを用いた。

荒引き排気部は、5 分間ほどの短時間使用後イオンポンプ排気に切換えられるように、2 インチの高コンタクトスにして、とくにオイルの逆流を防ぐ構造にした。そのため、液体窒素トラップを2段とし、途中の配管の取換え・洗浄が可能な構造にした。その結果、わずか5

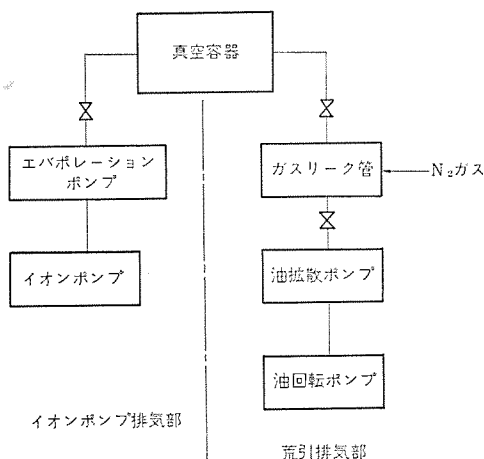


図 2.1 排気装置ブロック図
Block diagram of vacuum apparatus.

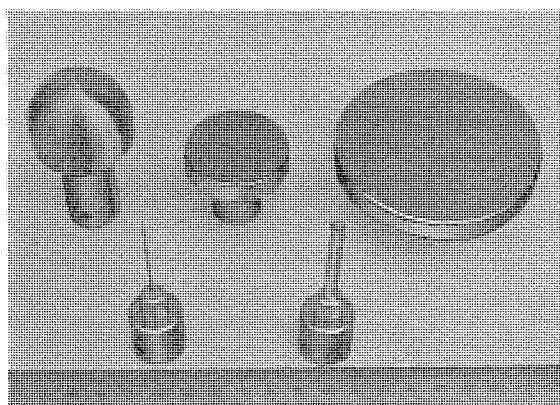


図 2.2 電極 Electrodes.

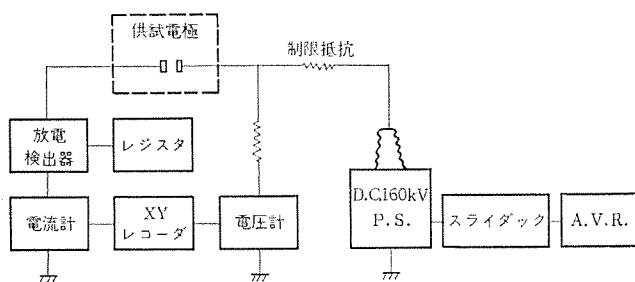


図 2.3 暗流・絶縁破壊電圧測定装置ブロック図
Block diagram of dark current and breakdown voltage measuring apparatus

分間の油拡散ポンプ排気によるオイルの逆流を、ほぼ完全に防ぐことができた。荒引き排気部には、油回転ポンプ (300 l/min)・油拡散ポンプ (400 l/s) を各一台使用した。イオンポンプ排気部は、真空容器に直結するメタルバルブとチタンエバポレーションポンプを経て、排気速度 40 l/s のイオンポンプを用いた。

真空を破る際には、ガスリーク管を通じて、窒素ガスボンベから脱湿浄化器を通して清浄乾燥窒素をリークして、真空容器壁面・電極表面への付着分子を制限した。

以上の排気装置を用いて、 10^{-4} torr まで荒引き排気部で、その後イオンポンプ排気部に切り換えて、直ちにエバポレーションポンプを作動させる排気手順で、4時間で 10^{-8} torr 台に入り、多数回の電極交換を容易に行なうことができた。排気装置のブロック図を、図 2.1 に示す。

2.1.2 暗流・絶縁破壊電圧測定装置

暗流・絶縁破壊電圧測定装置は、電極部・ガラス絶縁容器部・測定

回路部から構成される。

電極に関しては多種類多数回の電極交換をするため、ギャップの再現性を重視して、同一条件で交換可能な構造にした。電極設定は最も簡単で精度のよいはめこみピンどめ方式とした。使用した電極の一例を図 2.2 に示す。半球状電極の直径は 40 mm, 5 mm, 1 mm, 0.01 mm を選び、0.01 mm の場合のみ機械加工に加えて電解研磨法で先端を整形し、拡大投影写真で所期の直径であることを確認した。陽極側上部電極は上部ロッドに、陰極側下部電極は真空容器中絶縁架台上に設定される。ギャップ設定精度はダイヤルゲージを用いて ± 0.02 mm 以内に、電極中心精度はガイド電極を用いて ± 0.1 mm 以内に制限した。

ガラス真空容器は高さ 380 mm, 直径 360 mm のガラス筒を用い、大気中沿面の耐電圧 160 kV は十分に耐えるようにした。ガラス絶縁容器のフランジ止めには内径 282 mm, 厚さ 3.5 mm のメタルガasketを用いた。

暗流は容器側面の絶縁端子から導出され、測定装置で連続的に測定することができる。暗流の測定は直接のメータによる測定と 7 けたの対数増幅器による測定を並用し、印加電圧と暗流の関係を切換えなしで自動記録させた。すなわち、暗流は対数増幅器の出力を X Y レコーダの Y 軸へ、印加電圧は電圧測定用高抵抗の一部から印加電圧に対応した電圧を X 軸に入れた。絶縁破壊が起きると同時に印加電圧電源の一次側スイッチを切るようにして往復を自動記録した。この記録法を用いることにより、短時間で、暗流と印加電圧の関係の測定を多数回にわたり、精度よく行なうことができた。さらに多数回のくり返し測定に関しては、別のレコーダで、印加電圧のみの連続記録をして、統計的変動も直視できるようにした。

絶縁破壊の定義に関しては、電流値・立上がり時間などについてあいまいな点もあるが、ここでは、絶縁破壊直前の連続記録される暗流の上限を電極形状・ギャップなどから 3 mA 程度と考え、余裕を見て 10 mA 以上の暗流が流れたときに、1 回の絶縁破壊を数えるように定義した。この定義の裏付けとして、実際に電極間の現象を望遠鏡で観測して、1 回の計数と観測されるスパークとが必ず一致していることを確認した。

電源回路に用いる制限抵抗値に関して、小ギャップの場合に絶縁破壊電圧値の変化が生じることが報告されている⁽¹²⁾が、ここでは制限抵抗値による変化は認められなかった。この実験を通じて 10 MΩ を使用した。暗流・絶縁破壊電圧測定位置のブロック図を図 2.3 に示す。

3. 放電実験と結果

絶縁破壊現象の定量的測定が困難な理由として、表面現象としての関係要素が多いことと、ひとたび絶縁破壊が起ると表面条件が変化して次の現象に関係してくることがある。電圧を印加した後、最初に経験する絶縁破壊 (初放電値) とその後続いて起きるものと区別して見ると、破壊によって変化していく様子がよくわかる。

今回は電極表面の仕上面程度、電極の幾何学的形状のみによるマクロな電界集中度、小突起先端のミクロな電界集中度に着目して、初放電値・コンディショニング効果・飽和値の測定を行なった。

3.1 初放電値の測定

表面状態を可能なかぎり同一条件にするため、機械加工精度に注意して仕上げには十分に研磨を加えた。電極材料は比較的研磨のしやすい無酸素銅を用いた。陽極側側面に対して、陰極側直径 5 mm,

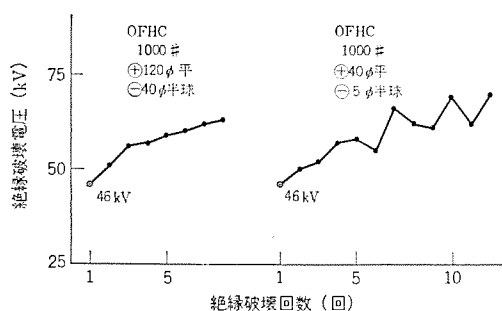


図 3.1 初放電値と連続する絶縁破壊電圧
The first breakdown and following breakdowns.

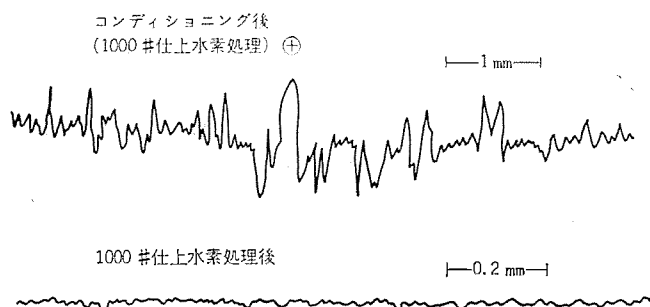


図 3.2 面粗度の変化
Magnified electrode surface profiles before and after breakdowns.

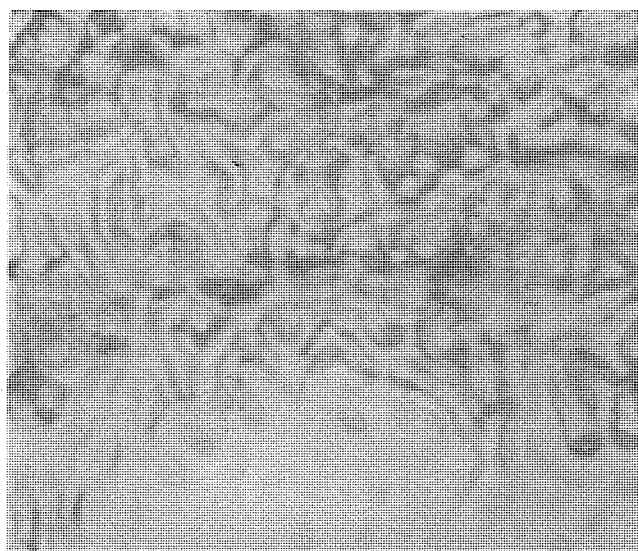


図 3.3 コンディショニング後の陽極表面
Magnified anode surface after conditioning.

40 mm の半球面について、エメリー研磨紙 1000 # 仕上げをして水素処理をした電極を使用した。ギャップは 1 mm で比較実験を行なった。実験の結果、初放電値は変わらず、小ギャップの場合、マクロな電界集中度よりもむしろ表面仕上げが初放電値を決定しているとみなされる。各初放電値とその後の連続する破壊電圧値の変化の様子を図 3.1 に示す。

3.2 面粗度と絶縁破壊電圧

面粗度は、現実に電極を工作する場合、必ず制限を受ける条件の一つであるといえる。1000 # 仕上げ後水素処理を行なった面の面粗度の様子を図 3.2 に示す。また同図に、絶縁破壊を繰返し行なって、飽和値領域に達した面のあれの様子を示す。この測定にはタ

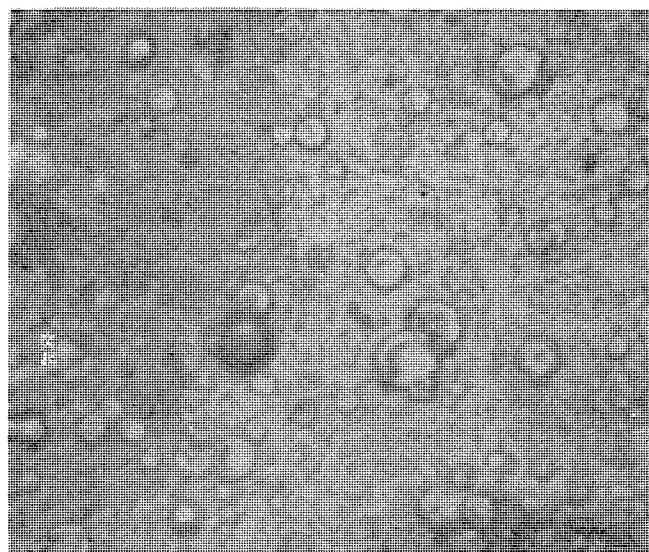


図 3.4 コンディショニング後の陰極表面
Magnified cathode surface after conditioning

リサーフ面粗度測定器を用いた。このあれの振幅と連続破壊による耐電圧値の上昇とは、一見矛盾する現象にみえるが、耐電圧値の上昇は単位面積の突起数が減少して太い突起になっていることから理解できる。放電を繰返した後の電極表面を顕微鏡で見ると、電極形状に関係なく、一般に陽極側は一度熔融した後再結晶し、陰極側には陽極側物質が微粒子として付着している様子がよく観察される。

図 3.3 に連続の絶縁破壊を行なって飽和値領域まで達した陽極表面の写真を、同じく陰極表面の写真を図 3.4 に示す。電極材料は無酸素銅で、写真倍率はいずれも 800 倍である。

3.3 コンディショニング効果

一般に絶縁破壊現象に関して、コンディショニング効果とは、電極設定条件を変化させずに繰返して電圧印加を行なうとき、その前歴が次の破壊現象に影響を残して、次の耐電圧が前のそれよりも高くなる現象をいうものである。実際には絶縁破壊による電極表面の損傷の大小有無などの関係で、前歴の影響は必ずしも一方的に耐電圧を高くするものではなく複雑な立上りを示す。

陽極側平面对陰極側半球の組合わせて、ギャップ一定で半球の直径を変化させた場合、飽和値に達するコンディショニング効果の立上りの速さは直径の小さいほうが早く、表面が半球面から平面に近づくほどおそくなる。5 mm 直径の場合にはほぼ 30 回の連続破壊で飽和値に達するものが、40 mm になると 500 回以上もかかることが実験からわかった。この飽和値とは、さらにコンディショニング回数を重ねても、破壊電圧値は平均値を中心にしてある幅でばらつくのみで、平均値のそれ以上の上昇が見られない状態に達したときの破壊電圧平均値をいうものである。

コンディショニング効果は単に破壊電圧値の変化を示すのみならず、暗流の変化を生じる。一般に、破壊電圧値が高くなると全暗電流の量は増し、より多くの電力を与えないと絶縁破壊を生じなくなるものである。コンディショニング前後の絶縁破壊電圧と全暗電流の量との相関関係を図 3.5 に示す。

3.4 電界強度と絶縁破壊電圧

絶縁破壊に関係する大きな要素としての電界強度は次の二つのものに別けて考えることができる。第一に、電極表面を理想的になめ

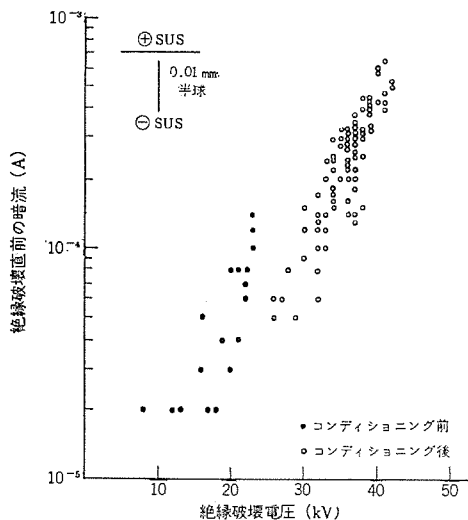


図 3.5 絶縁破壊直前の暗流と絶縁破壊電圧の相関関係
Relativities between dark currents and breakdown voltages.

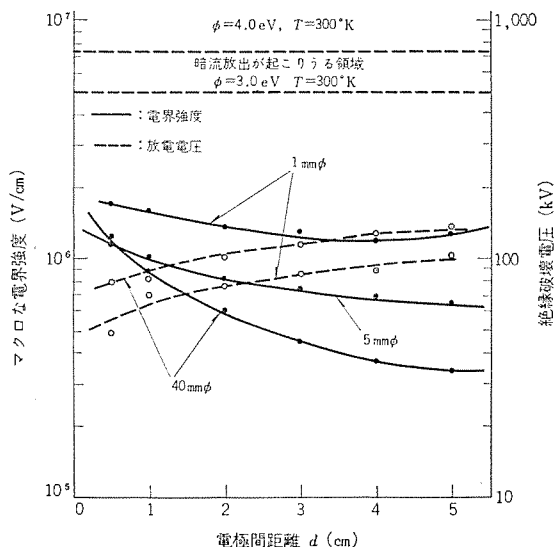


図 3.6 マクロな電界強度と絶縁破壊電圧
Macroscopic field strength and breakdown voltages of various gaps.

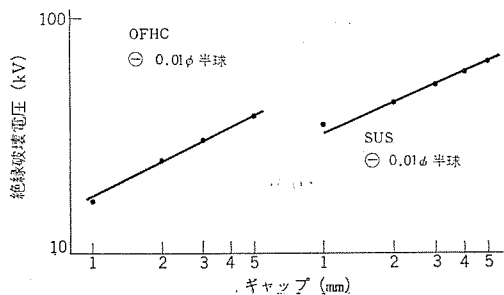


図 3.7 全電圧効果
Total voltage effects.

らかな面と考えた場合の幾何学的形状のみによるマクロな電界集中度と、第2に、電極表面がなんらかの理由であって微少突起が生じた場合の、微少突起先端で形成されるミクロな電界集中度の二つである。前者は、電界分布を測定するかまたは数値計算をすることにより、後者は、暗流の測定値を温度・仕事関数を仮定して単純化した Fowler Nordheim の式⁽⁸⁾で合わせることにより、その値を知ることができる。

実際上のそれらの関連性と表面積の効果も考慮して、実験を行な

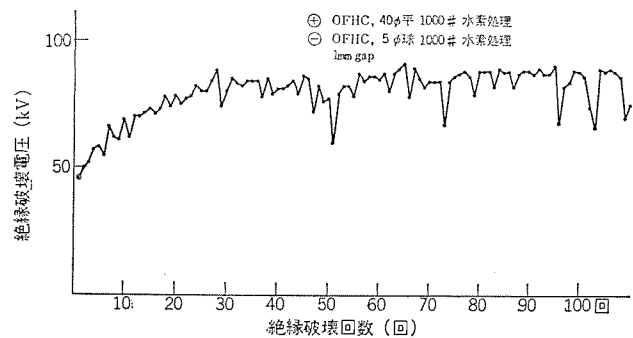


図 3.8 コンディショニング効果
Conditioning effects.

った。実験に当たっては、電界集中度のみを変化要素として残し他の要素による影響をできるかぎりなくするため、電極の加工・仕上処理は厳密に行なった。

陽極側平面・陰極側半球の組合わせて、コンディショニング後、半球の直径とギャップを変化させて、各 100 回の絶縁破壊電圧を測定して、平均値をプロットした。図 3.6 は、絶縁破壊電圧とマクロな電界強度の変化の様子を示す。電極表面の電界集中度をマクロなものミクロなものの積で表わされるときマクロな電界強度を、実験で得た平均の破壊電圧値から算出したものである。

この結果からいえることは、マクロな電界強度に関しては、小ギャップでは、表面状態が要素として大きくきいてくるため一定にならず、同径の電極ではギャップが小さくなるにつれてその変化量も大きくなる傾向を示すことと、電極径が小さいものほど小ギャップでマクロな電界強度が一定に近づくということである。絶縁破壊電圧値については、電極径が小さいものほど低下していくが、これは電極表面のマクロな電界集中度が大きくなっていくことから当然のことと考えられる。

また、全電圧効果に関しては、面積・表面あらさの効果の比較的小さい小直径電極の場合に、1/2 乗則に近い関係を示した。

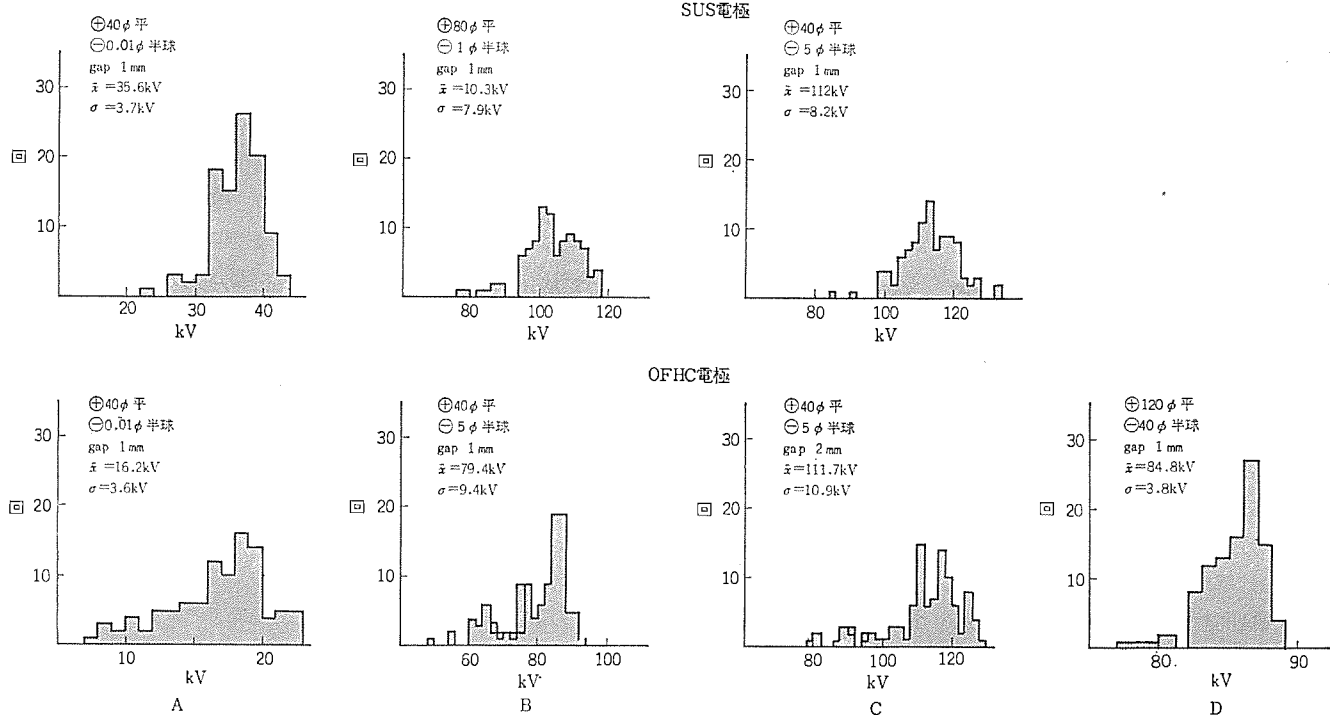
半球電極の直径が 0.01 mm の場合の全電圧効果⁽⁹⁾の様子を図 3.7 に示す。コンディショニング後の平均値として、1 mm ギャップで、無酸素銅の場合約 70 kV、ステンレスの場合約 100 kV、5 mm ギャップで、無酸素銅の場合約 100 kV、ステンレスの場合約 130 kV の実用的な耐電圧値を得ることができた。

3.5 ばらつき

コンディショニング効果と飽和値領域での絶縁破壊電圧値のばらつきの様子を図 3.8 に示す。このばらつきの原因の定量的な説明は困難であるが、コンディショニング後のばらつき幅に関して統計的に処理を行なった結果を次章で詳しく検討する。破壊電圧値の表現に関しては、その適用する状態や目的によって異なり、初放電値が問題になる場合と飽和値が問題になる場合とがある。

前者の場合、統計的処理を行なうにはかなりの実験回数を要するため今回は行なわなかった。図 3.9 には飽和値領域で 100 回測定した場合の絶縁破壊電圧分布を示すが、ギャップ・平均の破壊電圧値・形状などによるばらつきの差を明確にするにはデータ不足である。

これらのばらつきは、安定なものではない。開極の状態で、数十時間放置するだけでも、異常に耐電圧値が劣化する現象がある。また、極端に劣化する例として、電極面の接触によるものがある。これは、接触によって生じる面の損傷が電界集中度を増すかまたはクラックを形成するものとみなされる。これらの劣化した破壊電圧値の統計的処理は、未だ不明確な要素が残るため困難であり、今回の検



1000 回、研磨仕上後水素処理をして、コンディショニング後の絶縁破壊電圧値 \bar{x} は平均値 σ は正規分布を仮定した標準偏差値を示す

図 3.9 絶縁破壊電圧分布の数例

Several examples of breakdown voltage distributions.

討には含めなかった。

4. 極値統計法によるばらつきの解析

絶縁破壊電圧のばらつきを極値統計法⁽⁷⁾を用いて処理することにより、耐電圧値の予測を試みた、その内容と検討結果を以下に述べる。

4.1 考え方

絶縁破壊機構についての仮説は種々提出されているが、ほとんどの仮説は絶縁破壊に先き立って暗流の放出を考えている^{(2), (4)}。

金属（電極材料）の表面にいろいろ処理および加工を施しても、経験によれば必ず Fowler-Nordheim の理論⁽⁸⁾⁽⁹⁾で予言されている（マクロな意味の）電界強度よりも、1 けたないし 2 けた程度小さい電界で暗流の放出が観測される。しかし、この現象は比較的電極径が大きい場合に観測され、針状の電極では Fowler-Nordheim の理論に一致した電界強度で暗流の放出が起こり、Fowler-Nordheim の理論は検証されている⁽¹⁰⁾。

このようなことから、金属表面には極度に電界が集中する微小な突起の存在を仮定しなければ、暗流の放出を原因とした絶縁破壊機構は考えることができない。

この章の議論でも電界の集中が起こる原因を微小突起が金属表面にあることによるという考え方をする。しかし、絶縁破壊機構はブラックボックスとする。

一方、絶縁破壊時の突起先端の電界強度はほぼ一定値になっているという報告がある⁽¹¹⁾。図 4.1 には筆者等が得た電界強度が示してある。

図 4.1 によれば直径 40 mmφ および 5 mmφ の半球状電極のおおのの間での相違は幾分認められるが、おおのの場合ではそれぞれ、約 $1.25 \times 10^8 \text{ V/cm}$ および $9.5 \times 10^7 \text{ V/cm}$ である。

この電界の求め方は報告されている方法によっている⁽¹¹⁾。印加電圧を上昇させ、絶縁破壊に至るまでの暗流の変化を観測し、F-N

ロットとして知られている曲線を求め、突起先端の電界集中係数を求める。その集中係数と絶縁破壊電圧とから、絶縁破壊時の突起先端の電界強度を求めた。この方法は“暗流を放出している突起の集中係数はほぼ一定値のもののみであり、暗流の電界依存性がかなり強いことから、それ等以外の突起からの暗流はほとんど無視できる”の仮定を含んでいる。

4.2 定式化

この議論では次の四つの仮定をする。

(1) 暗流は金属の微小突起から放出され、電界集中係数が大きい突起ほど同じ電圧での暗流放出が多いことから、その突起が他の突起に比べて特殊性を持つと考え、最大集中係数の突起が絶縁破壊に発展する。

(2) 突起が絶縁破壊するときの電界強度は一定であり、したがって、絶縁破壊に発展する突起先端の暗流密度は一定である。

(3) 素性のはっきりした、同じ処理、加工および経歴の N 個の電極があるとき、 N 個の表面にできている突起の数は平均値 n のまわりに集中し、 n が大きいときにはおのおのの突起の数の違いはほとんど無視でき、一定数 n 個の突起があると考える。

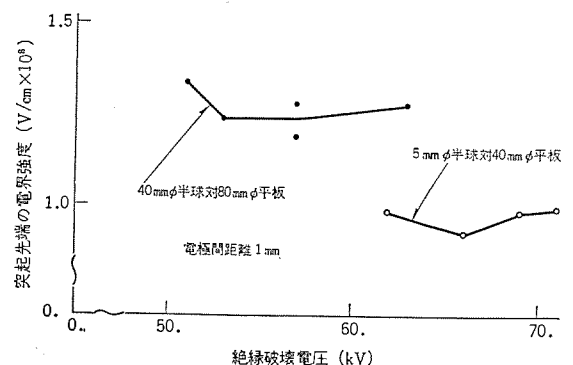


図 4.1 放電時の突起先端の電界強度の様子
Microscopic breakdown field vs. breakdown voltage.

(4) 金属表面にできている n 個の突起は突起が属する母集団の中から n 個の突起を次々と抽出する過程によってできる小集団から成ると考えられる。このようにしてできた小集団の中の最大集中係数を持つ突起が絶縁破壊に発展すると仮定する。すなわち、 N 個の電極から得られた N 個の絶縁破壊電圧の分布は N 個の電極にできている最大の集中係数の分布に対応させる。

1 個の突起を母集団から抽出したとき、集中係数が β_0 を起えない確率 $F(\beta_0)$ は、

$$F(\beta_0) = \int_1^{\beta_0} f(\beta) \cdot d\beta \quad (1 \leq \beta_0 < \infty) \quad (4.1)$$

で与えられる。ここで、 $f(\beta)$ は母分布関数である。

同様に、 n 個の抽出で集中係数が β_0 以下である確率 $G(\beta_0)$ は、

$$G(\beta_0) = \{F(\beta_0)\}^n \quad (4.2)$$

で表わすことができる。

このような過程で抽出された突起の集中係数が $(\beta_0 - \Delta\beta, \beta_0)$ の間にくる確率は最大値が β_0 になる確率に相当し、その表示は最大値確率密度関数 $g(\beta_0)$ に $d\beta_0$ を乗じた形で表わされ、それは式 (4.2) を β_0 について微分した値に $d\beta_0$ を乗じた形になる。すなわち、

$$g(\beta_0) \cdot d\beta_0 = n \cdot f(\beta_0) \cdot \{F(\beta_0)\}^{n-1} \cdot d\beta_0 \quad (4.3)$$

である。

一方、集中係数 β_0 と絶縁破壊電圧 v_B との関係は、

$$\beta_0 = \frac{E \cdot d}{v_B} \quad (4.4)$$

で与えられる。ここで、 E および d はおのおの突起先端の電界強度および電極間距離である。

仮定により E は一定であり、 d を固定した場合には式 (4.4) により β_0 と v_B とは 1 対 1 に対応することになり、式 (4.3) から絶縁破壊電圧の分布関数 $v(v_B)$ が求められる。すなわち、

$$v(v_B) \cdot dv_B = \frac{n \cdot E \cdot d}{v_B^2} \cdot f\left(\frac{E \cdot d}{v_B}\right) \cdot \left\{F\left(\frac{E \cdot d}{v_B}\right)\right\}^{n-1} \cdot dv_B \quad (4.5)$$

が得られる。

式 (4.5) が絶縁破壊電圧の分布関数の一般表示であるが、具体的な表示を得るには $f(\beta_0)$ について陽に表わされた表示を用いなければならない。この報告では、 $f(\beta_0)$ の表示として対数正規分布関数、

$$f(\beta_0) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot (\beta_0 - 1)}} \cdot \exp\left[-\frac{\{\ln(\beta_0 - 1) - \mu\}^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] \quad (4.6)$$

を用いた。ここで、 σ および μ は測定値 (ヒストグラム) から決められる定数である。

式 (4.6) の表示は次の考え方に基づいている。 β_0 について、

$$\ln(\beta_0 - 1) = z \quad (4.7)$$

の変換を施すと、確率素分の保存を考慮することにより、式 (4.6) は、

$$f^*(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \cdot \exp\left\{-\frac{(z - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right\} \quad (4.8)$$

の z に関する分布関数 $f^*(z)$ を得る。式 (4.8) から σ および μ の意味は明らかになる。 μ および σ は正規分布 $f^*(z)$ の中位値および分散になっている。しかも、式 (4.7) は $(1, \infty)$ の変数を $(-\infty, \infty)$ の変数に変換し、 $f(\beta_0)$ をよく調べられている形にする意味を持っている。

σ および μ は一般に用いられている確率紙による方法を用いて求めた。以下に適用結果を示す。

4.3 耐電圧の限界

図 4.2 には図 3.9 の B, C および D に極値統計法の実用例が示してある。C および D の両者の分布は比較的よく近似できている。しかし、B はヒストグラムが二つの分布関数から成る様子を示しており、一致性はきわめて悪い。B の測定はコンディショニング後一晩放置した場合のもので、条件が C および D と異なり、2 種類の母集団から成り、この報告での方法はそのまま使用できない。

一般に、1 種類の母集団の場合には近似は良好で、十分役立つ。

図 4.3 には直径 5 mmφ 半球対 40 mmφ 平板の全電圧効果における耐電圧値の変化として、50 % 絶縁破壊電圧および 0.05 % 絶縁破壊電圧の電極間距離とともに変わる様子が示してある。同時に、測定値の単純平均も示してあるが、単純平均の絶縁破壊電圧と 50 % 絶縁破壊電圧はほぼ一致した値になっている。一方、0.05 % 絶縁破壊電圧の曲線も示してあるが、この曲線は約 10 % 程度の誤差を含んでいる。この曲線を耐電圧値と定義すれば、この線より下の領域は絶縁破壊のない領域になる。

n の値は十分大きく 10^5 個として計算している。理論的には n の大小により分布関数の形状は変わるが、おのおのの σ および μ を適当に選べば耐電圧予想値の差はほとんど認められない。

したがって、 n がある程度の大きさ以上になっていると推定される場合には $n=10^5$ 個程度に選んで満足な結果が得られる。

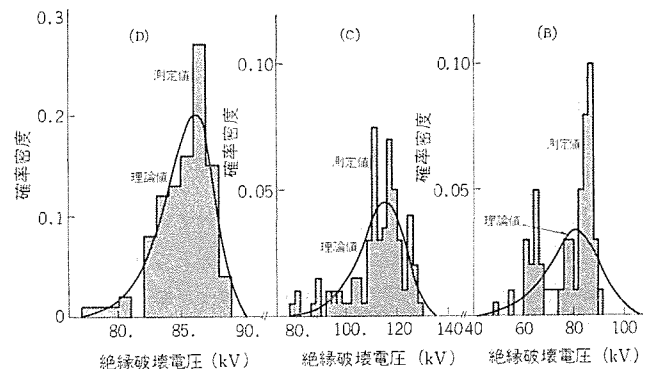


図 4.2 コンディショニングの絶縁破壊電圧の分布
Examples of breakdown voltage distribution after conditioning

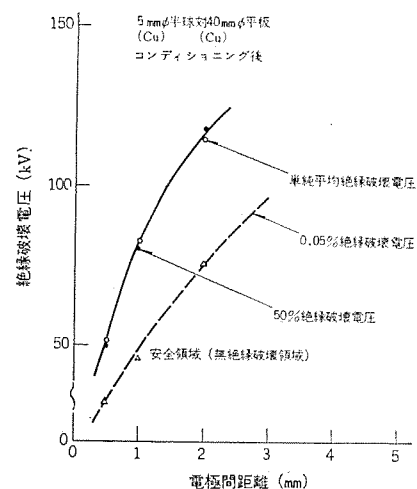


図 4.3 全電圧効果における耐電圧値の変化
50 % and 0.05 % breakdown voltages vs. gap spacings.

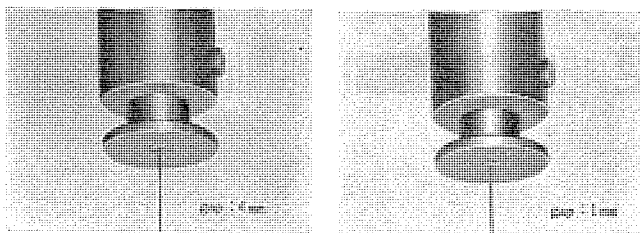


図 5.1 陽極面での暗流のひろがり
Dispersions of dark currents on anode surfaces.

5. 実験の検討

コンディショニング後の全暗流と破壊電圧との関係について得た図 3.5 からわかるように、コンディショニング後には強い相関関係のあることが明らかである。図 3.5 が示しているようなコンディショニング前後の相関関係がつかない理由はよくわからないが、電極表面状態が変形変質することから生じるものと想像される。電極表面状態は、破壊を生じる前では、水素処理後もまだかなりの加工ひずみを残しており、それらがクラックや微小突起として絶縁破壊を起こす。破壊回数を重ねるごとに先端が溶融し、なめらかにされて変質し、全電流量も大きくなり、耐電圧性が高くなるものと解釈される。

コンディショニング過程での電極表面のあれとばらつき現象については、同じ面粗度でも、電極対向面積が大きくなるほどばらつきは小さくなるといえる。コンディショニング前の状態では、仕上面のあれがばらつきを決める主要素であり、破壊するごとにその点のみはコンディショニングされても、同じあれをもつ他の点での破壊が続いて起こり得ることから、面のあれの存在確率の問題ともいえる。コンディショニング後には、3.2 節で述べたように絶縁破壊によって表面は大きく変化して、絶縁破壊による面のあらさでばらつきが生じ、仕上面のあらさによる影響はうすくなるものとみなされる。

実験で測定した暗流は、電極表面全体に流れる全電流である。実際、直接に絶縁破壊に関係するのは、微小突起部分に集中する電流密度であろう。実験の結果、全電流・電流密度・電界強度・絶縁破壊電圧値などに関して、次のように説明できる。

ギャップが小さい場合には、陰極上の微小突起から放出される全電流は陽極上の小面積に集中して、陽極上の小面積内に分布する微小突起の暗流密度は高くなる。

ギャップが大きくなると陽極上に全電流が流れる面は大きくなり、したがって暗流密度は低くなる。この場合、微小突起によるミクロな電界集中度は一定と仮定している。

陰極上微小突起からの暗流放出については、先端の形状に従う電界分布による放出角度を持つことからギャップとともに陽極面での分散が大きくなり、ミクロな暗流密度も低くなって、絶縁破壊電圧が高くなるものであろう。

今回の実験では、ギャップが開くに従って暗流放出面積が陽極面上で広がっていく様子を直接観測することができた。図 5.1 にその一例の写真を示す。直径 0.01 mm の半球形状の陰極から放出する全暗流が、陽極の平面電極に集中して赤熱している面積を、ギャップを変えて観測したものであるが、写真の場合、1 mm ギャップで直径約 7 mm、4 mm ギャップで直径約 14 mm を示した。ギャップと陽極表面の全暗流の広がりとの関係を定量的に説明するにはまだデータ不足であるが、おもな要素としては、放出表面上のミクロな電界強度と分布・全電圧・放出暗流密度などが考えられる。

金属電極間の絶縁破壊現象に関して、実用的に応用できる立場でのデータを積み重ねたが、まとめると以下になる。

(1) 面のあれは、小ギャップの場合、初放電値を決める主要素の一つである。

(2) 小ギャップの場合、ミクロな小突起による電界集中度が重要である。

(3) コンディショニング効果としては、電極対向面積の大きいものほど、多数回を必要とする。

(4) 破壊前の面のあれは、陽極側ではもぎとられた形のあれであり、陰極側では付着した形のあれであり、破壊前に比較して相当にあれる。

(5) 破壊による損傷は、コンディショニング後でも、初放電値に近い極端な耐電圧劣化を起こすものもある。

(6) 陽極側平面・陰極側半球の組合わせで、コンディショニング後の 1 mm ギャップの平均値として、無酸素銅の場合約 70 kV、ステンレスの場合約 100 kV を得た。

(7) 直径 0.01 mm の細い陰極の場合、全電圧効果の 1/2 乗則に従う。

(8) 絶縁破壊時の小突起先端の電界強度は、ほぼ一致している。

(9) コンディショニング後の飽和値について、絶縁破壊電圧を極値統計法で処理して、50 %耐電圧値が平均耐電圧値に一致すること。約 10 %の精度で耐電圧限界値を推定することができる。

6. むすび

以上述べたように、真空中の絶縁破壊現象は、独立に分析することの困難な多くの要素のため、現象説明にはまだほど遠い現実である。今回の実験で得た知識は、基礎データの一部に過ぎないが、これを手がかりにして、さらに実用性のある実験を発展させていく予定である。

最後に、実験のための電極の工作・研磨・処理に関して、終始ご協力いただいた中研製造課の関係各位に深く感謝します。

(昭和 44-8-12)

参考文献

- (1) W. D. Kilpatrick : Rev. Sci. Instr., 28, 824 (1957)
- (2) F. M. Charbonnier, C. J. Bennetie, and L. W. Swanson : J. Appl. Phys., 38, 627 (1967)
- (3) C. J. Bennetie, L. W. Swanson, and F. M. Chabonnier : J. Appl. Phys., 38, 634 (1967)
- (4) P. A. Chatterton : Proc. Phys. Soc., 88, 231 (1966)
- (5) J. T. Maskrey and R. A. Dugdale : J. Sci. Instr., 42, 284 (1965)
- (6) L. Cranberg : J. Appl. Phys., 23, 518 (1952)
- (7) たとえば, B. Epstein : J. Appl. Phys., 19, 140 (1948)
- (8) R. H. Fowler and L. Nordheim : Proc. Roy. Soc. (London), A-119, 173 (1923)
- (9) L. Nordheim : Proc. Roy. Soc. (London), A-121, 626 (1928)
- (10) R. Klein and L. B. Leder : Phys. Rev., 124, 1,046 (1961)
- (11) D. Alpert, D. A. Lee, E. M. Lyman, and H. E. Tomaschke : J. Vac. Sci. Tech., 1, 35 (1964)
- (12) 善多村, 板垣 : 電気学会雑誌, 89-4, 683 (昭 44)

技術講座

最近の磁気記憶装置

織田博靖*

1. ま え が き

情報が発生した時点とその情報を使用する時点に時間的な遅れがあるときには、この情報を何らかの形で保持しておかなければならない。この保持作用を記憶ないしは記録と称している。電子計算機の発達の一つにはこの記憶にあずかる「記憶装置」の発達に負うところが大きかった。最近では電子計算機により育成された一連の情報処理技術が、他の多くの機器に導入され始めその勢いたるや野火のごときものがある。その中にあって集積回路論理素子の使用技術は、関係者の努力もあってかなり広く普及している。しかし「記憶装置」のほうは、取扱いがややめんどろなせいであったか、重要なものでありながらやや普及不足の感がある。そこで本講では相当量の情報をきわめて安価に記憶し、処理できるデジタル形磁気記憶装置について紹介する。ここで具体的に考えるのは磁気ディスク、磁気ドラム等の電気機械式のランダムアクセスメモリについてである。装置名称の違いは、記憶媒体を保持する基体の形状の相違があるのみであわせ考察できる。

2. 磁気ディスク等の守備範囲

記憶装置を扱う場合にはいつでも、どれだけの情報量(単位:ビット)を記憶させるか、どれだけの時間(単位:秒)待てば所望の情報が呼び出せるかを考えなければならない。すなわち記憶装置の記憶容量と待ち時間に着目しなければならない。各種のデジタル情報記憶装置の標準的な使用範囲を表2.1に示した。この図よりわかるように各装置はおおの守備範囲を異にしており、用途により十分なる選択を要する。磁気ディスク、磁気ドラム等の電気・機械式磁気記憶装置は待時間10ms~100msでかなり遅いが、記憶容量は数万ビットから10億ビットくらいまで大きなものが得られている。ビット当たりのコストは以下に述べるように、容量・待時間によって大幅に変わるが1円以下になる場合が多く、他の装置に比べてきわめて経済的である。したがって待時間が10ms程度まで許せる場合は、一度はかかる磁気記憶装置の導入を検討すべきであり、1万ビット以上の容量を要するならば、たいいてい経済的に最も望ましいものであることがわかるであろう。

表 2.1 各種記憶装置の典型的守備域

素 子 名 称	待 時 間 (sec)	ユ ニ ッ ト 容 量	ビ ッ ト コ ス ト
集 積 回 路	10~50×10 ⁻⁹	1~10 ³	10 ¹ ~1×10 ²
磁 気 コ ア	0.5~10×10 ⁻⁶	10 ⁴ ~10 ⁵	10~10 ²
高速ディスク、ドラム	8~20×10 ⁻³	10 ⁵ ~5×10 ⁷	0.1~2
交換形ディスク	5~10×10 ⁻²	10 ⁷ ~2×10 ⁸	0.03~0.1

3. 磁気記憶装置の特長

磁気ディスク等電気機械式の磁気記憶装置は衆知のように、リング形磁気ヘッドとヒステリシスループをもつ強磁性の連続した薄膜の2要素からなっている。ヘッドの先端ギャップからの強力な漏れ磁界 H によって薄膜に情報を書き込み、この情報が残留磁化 B_r の形で記憶される。これを書き込み記憶動作である。読み出しは、磁性膜を走行移動させることにより、ヘッド中に磁束変化を誘起し、これにより発生する電圧を検出して行なわれる。

このような原理で動作するので次のような特長をもっている。

(1) 情報を保持しておくには何等エネルギーを要しない。したがって電源を切っても情報は消失しない。これを非揮発性 (Non Volatile) であるといい、集積回路フリップフロップ磁わい(歪)遅延線メモリ等には期待できない特質である。この性質は記憶の安定性、記憶密度の向上、装置の大容量化に寄与している。

(2) 読み出し動作によって情報が消失することがない。これを非破壊読み出し (Non Destructive Read Out) が可能であるといい、コアメモリ等には期待しがたい特長である。このような性質があるため万一読みまちがいがあっても、誤りを何等かの手法で検知できれば、何度でも読み直しがきくわけである。磁気テープ、磁気ディスク等ではある確率で読み誤りがあっても、再読出しによってカバーをして、システム動作には支障をきたさなくふうがしてある。このような性質は書き込みと、読み出しが異なる物理現象によって行なわれているためにでてくるものである。

(3) 大容量の記憶体をわずかな周辺電気回路で制御できる。これは磁気ヘッドが記憶膜上を機械的に走査し、記憶番地の順次探索を行なっているので、電気的な番地選択系がきわめて簡単になることに原因している。また記憶細胞よりの情報の読み取りは機械的運動により行なわれるので、記憶容量が増加しても S/N が低下することがなく、一つの弁別系で大きな容量を信頼度良く読み取れる。この性質はコアメモリ等と比べると明確になってくる。

(4) 記憶情報の更新が際限なくしかも容易かつ高速に行なえる。磁気記録には疲労現象がなく、書き込みも読み出しと同一ヘッドで容易に行なえる。

(5) 記憶密度がきわめて高く、大容量の装置が小形・安価に入手できる。また記憶膜は連続した薄平面で一括生産ができる。

(6) 磁気ヘッドと記憶膜とは分離しており、本質的には記憶媒体のみの取りはずし、交換が可能である。磁気テープ、磁気ディスクパックはこれを具体化したものであり、処理内容が変わった場合には、記憶媒体をハンディに取り換えて、装置への新情報のそう(挿)入(ダンプ)を容易にしている。

(7) 磁気ヘッド、磁性膜等の磁気記憶等そのものは印加磁界（したがって駆動電流）や温度・湿度に対し動作余裕が大きく、取り扱いが簡単である。主たる注意は回転機構等の機械系に払えばよい。

4. 現 状

ここでは各種メモリの構造等に余りとらわれなくて、マクロに現状をは（把）握して、その動向を探ってみる。

現状は“現状地図”によりよくは握できる⁽¹⁾。

4.1 機能領域図

主要性能である記憶容量と待時間について市場に存在する装置の位置を図4.1に示した。記憶容量は数十億～百億ビットに達しており、待時間は数msまでのものがある。中心線をみると10msで1千万ビット、100msで10億ビットの線にのっている。すなわち待時間を10倍とれば記憶容量は100倍のものが得られることがわかる。

4.2 コスト

図4.2に1装置当たりの記憶容量と装置コストの関係を示した。1億ビットのものを1千万円程度から得られ、装置コストは装置容量の平方根に大略比例していることがよめる。すなわち記憶容量が4倍になって、はじめてコストは2倍になるといった傾向がある。

図4.3にビットコストと待時間の関係を示した。装置の規模によりかなりの相違がみられるが、待時間10msでビットコスト1円程度、100msで0.1円程度となっており、ビットコストは待時間に逆比例する傾向にあることがわかる。

4.3 技 術

この種装置の機能は、記憶容量を支配する記憶密度と待時間を決定する機械系の移動時間で決まる。

記憶密度はビット密度とトラック密度の相乗積で決定される。両者をバランス良く上げていく必要がある。ビット密度は100～3,000ビット/インチ、トラック密度は20～128トラック/インチの範囲に分布している。

磁気ディスク、ドラム等の回転記憶装置では、その回転数が最終的な

待時間を決定する。一方この回転数は風損等のために直径の大きいものでは一定値をこえることは困難である。図4.4は回転数と回転体直径について製品のプロットを行なったものである。12インチでは、3,600rpm、20インチでは1,800rpm程度が標準であり、周速約60mの線にのっている。トラックごとくにヘッドをもったドラム、ディスクではこの回転待時間がそのまま情報の待時間になる。

ディスクパックドライブのようにヘッドの移動を伴うものでは、この移動

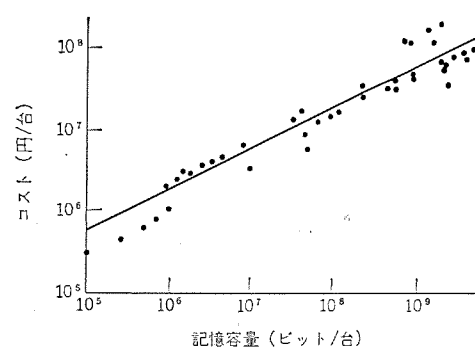


図 4.2 装 置 コ ス ト

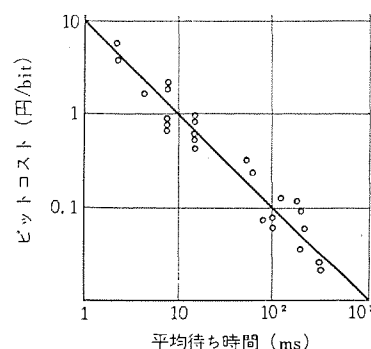


図 4.3 待時間とビットコスト

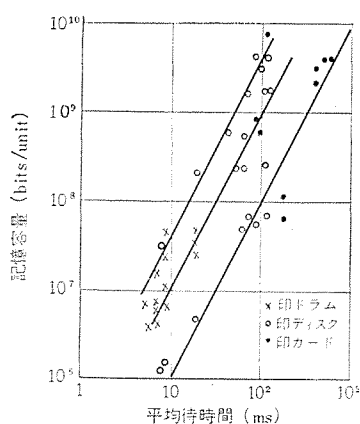


図 4.1 機 能 領 域 図

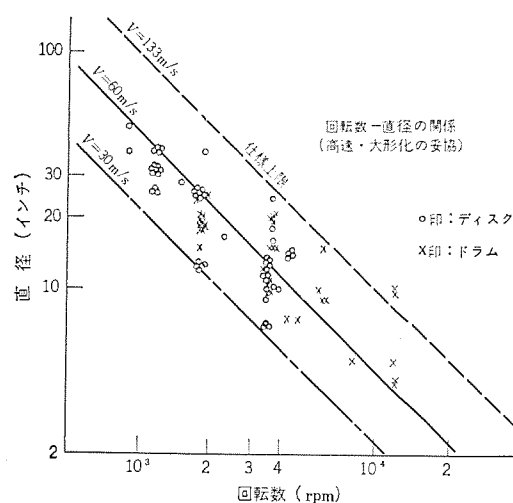


図 4.4 回転数と直径の関係

表 4.1 各種装置の信頼度 (1例)

項 目	高速ドラム・ディスク	交換形ディスク	磁気テープ
MTBF (時間)	4,000	1,000	1,500
MTTR (時間)	2	2	2
ビット・エラーレート	10^{-11}	10^{-10}	10^{-5}
環 境 条 件			
温 度 (°C)	10~40	18~27	16~32
湿 度 (%)	20~90	30~70	20~80
振 動 (mm) (5~60 Hz)	±0.2	±0.1	±0.1

時間が問題になる。現在最大移動時間は 45 ms~600 ms くらいのも
のがあり、85 ms 程度のものが多い。

4.4 信頼性

各種項目に対する具体例を表 4.1 に示した。この種装置はさき
に述べたように非破壊読み出しが可能であるので、回復可能なエラ
ー (Recoverable Error Rate) の発生を許容し、エラー検出を行なっ
て再読み出し等を行なえるのが特長的である。

5. 現在の動向、すう勢

装置の大容量化・高速化、さらには高信頼度化・コストダウンがどの
ように進められているか要点を述べる。

5.1 大容量化

装置 (1ユニット) の大形化は行なわれていない。もっぱら図 5.1
(a)(b) に示すように記録密度を上げることにより大容量化が進め
られている。すなわちビット密度は大略 5 倍/5 年、トラック密度は
 $\sqrt{5}$ 倍/年したがって面密度として 10 倍/5 年以上の向上がみられ
た。

このようなめざましい進歩を具体化したのは、回転体に対向する
ヘッドを空気流で浮動させる、いわゆる“浮動ヘッド技術”の実用化
である⁽²⁾。これによりヘッドと記憶膜との距離は 2~3 μ に近づけ
られるようになり、ビット密度の向上と読み取り効率の改善が一挙に
可能となった。さらに磁性膜を従来の数 μ の厚みの磁性塗装膜から
1けた厚みの小さな金属メッキ膜にすることが可能になり、今後製
造コストの低減をまけて広く普及し、高密度化に寄与すると思われ
る⁽³⁾。このように高密度化はもっぱら磁気記録系の幾何学的寸法を
比例的に極限する手法にのみ依存してきたが、最近やや延び悩みの
感がある。

5.2 高速化

機械系を含むので顕著な進歩はみられない。トラックごとにヘッド
をもつ形のものではもっぱら回転体の小形化により高速化を計るほ
かにはなかった。同一トラックに複数個のヘッドを配置する手法もある
があまり実用されなかった。ヘッドが移動する形のものでは、移動
体駆動系をトルク/慣性比の大なものにして高速化を計る一方、ヘッ
ド数を増す等の方法で、ヘッドの移動距離を小さくしている。ヘッド

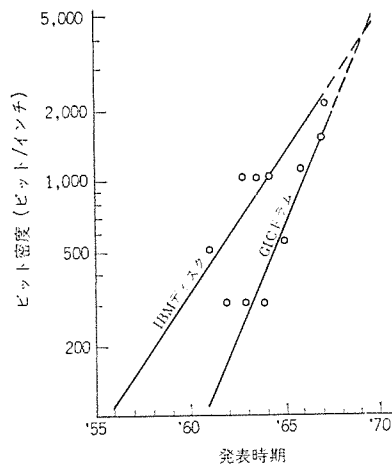


図 5.1(a) ビット密度の向上

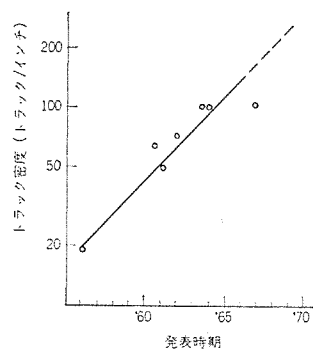


図 5.1(b) トラック密度の向上

が複数個ある場合には、1回の移動で数トラックがアクセスできる。
できるだけこのトラック群内で情報を処理すれば、実質上ヘッド移動
時間をなくすることができることになる。これをシリンダーオペレーショ
ンと呼んでディスクバックドライブ等では広く用いられている。また方式
的な手法として装置を並置し、ある装置が読み出し/書き込みを行な
っている時間に他のものが位置決めを行なう等の動作をして、平
均的な位置決め時間を小さくしている。これを多重アクセスと呼んで
いる。

5.3 高信頼度化

磁気ヘッドの主要構成部品 (ヘッドコア、ギャップスベサ、浮動スライダ)
の線膨張係数や硬度をそろえた高信頼度ヘッドが表われてきた。超
高密度フェライトのギャップ部をガラス溶着した磁気ヘッドをセラミックスラ
イダに入れたものがこれである⁽⁴⁾。またヘッドリード線の断線防止策、
浮動スライダの支持法の改善等地道な改良により実用上十分な信頼
度を得られるようになってきた。記憶磁性膜についてはヘッドのヒ
ッティングや接触に強くするため、酸化鉄分磁性膜のものではバインダ
と塗装法にくふうがこらされている。金属メッキ膜のものでは表面
を Cr 等の硬い合金で保護する手法⁽⁵⁾と、マイラ等の柔らかい膜でコーテ
ィングする方法⁽⁶⁾が共存している。浮動ヘッド方式のものではじんあ

いが侵入するとヘッドの墜落事故を招くことがある。これを防ぐために、記憶媒体を交換しないものでは外気とシャ断する方法が、交換形ディスク等では外気の完全なフィルタリングとパック面の清掃が自動的に行なえるような処置をしている。また最近、濃度を計測して警報を発することも考えられている。

使用技術としては、読み出し情報の中に同期信号を入れる自己クロック方式 (Self Clocking 方式)⁽⁷⁾ の実用化、読み出しレベルの変動に強いビーク弁別方式⁽⁸⁾等の開発、磁気記録読み出し波形の特長をとらえた適応補償回路⁽⁹⁾等の考案があり、かなり品質の悪い信号も安定に読み取り・弁別ができるようになった。また読み取りエラーの検出確度を上げるためのサイクリックチェックの導入⁽¹⁰⁾や、不良アドレスないしは不良ユニットの自動切換等の冗長性による系信頼度の向上策等がとられて、全く安心して使えるものとなった。これらについては次回以後に紹介する。

システムのか(稼)動率を上げるためには信頼度の向上と同時に保守度の向上が必要である。系統的な保全設計を行なって⁽¹¹⁾ 高い稼動率を実現したものもある。

5.4 コストダウン

高密度化とともにビットコストは年ごとに低下している。大まかにいって、コストはビットに対してではなく、記憶面積に対して支払われる観がある。今後大幅な需要増加があつて量産方式の適用ができるようになれば、この面からのコストダウンも見込まれる。

6. 将来

現在採られている記録密度向上策はもっぱら系の幾何学的寸法を小にすることにより行なわれているため、5,000ビット/インチ、200トラック/インチをこえる2～3年後に一つの壁が感じられる。この壁は浮動ヘッドの可能最小ギャップと、記憶細胞の極小化によるS/Nの低下である。しかし高品質磁性膜と高精度位置決め技術の開発により、トラック密度は原理上さらに向上できる。ビット密度は符号化方式等の使用技術の研究により実質情報量を増すことが可能である。かくてここ数年は順調な進歩が期待できる。

待時間は現在のような機械系を含む限り大きな期待はかけられないので、どうしても高速化が必要ならば根本的に考え直す必要がある。しかしすべての記憶装置が高速である要もないので、独自の用途がありうる。

数年前から電子ビーム、レーザ等による書き込み、読み出しの研究、

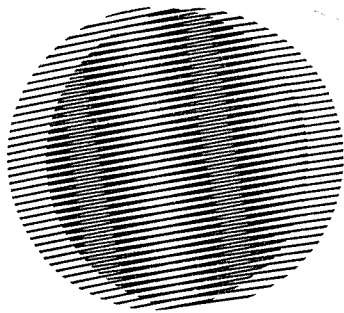
最近、ソフトウェアメモリの提案⁽¹²⁾も行なわれているが、現在の磁気記録装置が3章で述べたような数々のすぐれた特長をもつので容易には置換されないであろう⁽¹²⁾。

7. むすび

ここで述べた磁気記憶装置は、10年ほど前には磁気ドラム等の形で電子計算機の内部記憶装置として用いられていた。その後磁気テープ、さらに最近では磁気ディスク、磁気カード等の形で電子計算機の外部記憶装置はすべてこの種のもので占められるようになった。電子計算機のシステムコスト中に占める比率も1/3程度になっており、将来は1/2にも達するといわれる。生産高の年度比伸び率も200%に達し全産業中最高の値を示し、1,000億(国内)産業に成長するものも時間の問題である。また最近産業界の省力化・自動化が急速に進み電子計算機外の自動機に広く導入され始めており、真の量産化が実現すれば家庭用機器への浸透も考えられる。このように広い意味での情報産業のちょう(寵)児としてこの種記憶装置が育つことを予見して、ここに若干の解説を試みた次第である。以後本講座では装置の具体的使用技術に重点をおいて、約3回にわたり入門的解説を続けていく。

参考文献

- (1) 織田、重徳：昭44電気四学会連次予稿 No. 3,186
- (2) W. A. Gross et al : IBM Jour., pp. 237~255 (July 1959)
- (3) S. Duinker : Philips Res. Report 15, pp. 342~367 (1960)
- (4) 通研：特公昭41-10746
- (5) NCR：特公昭44-1127
- (6) L. D. Seader : IBM Jour., pp. 181~184 (April 1957)
- (7) IBM：特公昭36-17311
- (8) IBM：特公昭43-27778
- (9) W. W. Peterson : IRE, pp. 228~235, (Jan. 1961)
- (10) 織田：電子通信学会、電子計算機研究会資料 EC69-30 (昭44-11)
- (11) A. H. Bobeck et al ; 1969 Intermag Conf. April 15-18 1969 Amsterdam.
- (12) L. C. Hobbs : IEEE Trans. on EC, EC-15, No. 4 (August 1969)



新製品紹介

航空機用電動バルブのシリーズ

当社では、昨年より航空機用電動バルブの開発を進めていたが、このほど管径1, 1 $\frac{1}{4}$, 1 $\frac{1}{2}$ および2インチまでシリーズ化し、すでに量産を開始している。これらの電動バルブは主として、航空機の燃料系統の流量制御に使用されるため、特に高い信頼度が要求され、その性能は最新のMIL規格を適用した認定試験により確認している。

今後は、これら航空機用としての小形・軽量の特長を生かし、一般民需用の電動バルブも製作できるので、一般産業の各分野においても、各種流体の流量制御の自動化および合理化のために、役立つものと期待される。

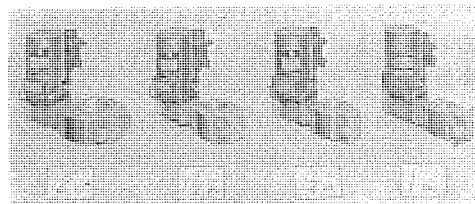
■ 特 長

- (1) 航空機で使用するすべての燃料、エンジンオイルおよびハイドロリックオイルの流量制御ができる。
- (2) 最新のMIL規格を満足し、飛行中に遭遇するあらゆる飛行条件においても性能を十分保証している。
- (3) 誤信号防止装置を設けているので、誤動作による不測の事故を防止できる。
- (4) 手動でも容易にバルブを開閉することができる。
- (5) テフロンシールを使用しているので、シール効果が完全で、耐久性もすぐれている。
- (6) 小形・軽量で取付け、保守などが容易である。

■ 仕 様

仕 様 形 式	バ ル ブ 特 性							モータ特性		重 量 kg
	管 径 in	使用流体	定格圧力 psi	保証圧力 psi	破壊圧力 psi	サーマル リリーフ	動作時間 s	電 圧 VDC	ストール 電 流 A	
MDK-133415-11	1	燃 料	60	120	180	付	0.5~1	18~30	5以下	0.87
MDK-138985-64	1 $\frac{1}{4}$	ハイドロ リック オイル	120	180	300	付	0.5~1	18~30	5以下	0.90
MDK-138995-14	1 $\frac{1}{2}$	燃 料	60	120	180	付	0.5~1	18~30	5以下	0.93
MDK-148965-14	2	燃 料	60	120	180	付	1.5~3	18~30	5以下	1.08

[名古屋製作所]



航空機用電動バルブ

UL-150 E 形ヘリウム液化装置

大阪大学（工学部）極低温センタ施設として、44年4月、UL-80 H 形水素液化装置を納入したが、引き続き今回、UL-150 E 形ヘリウム液化装置を納入した。

同装置は、先に、工業技術院電気試験所に納めた UL-300 E 形に次ぐマルチシリンダ方式による大容量機で、これによって、UL-20 形から UL-300 E 形までのシリーズが完成したこ

とになる。

■ 仕様

方式： マルチシリンダ方式による外部JT

液化速度： 15 l/h

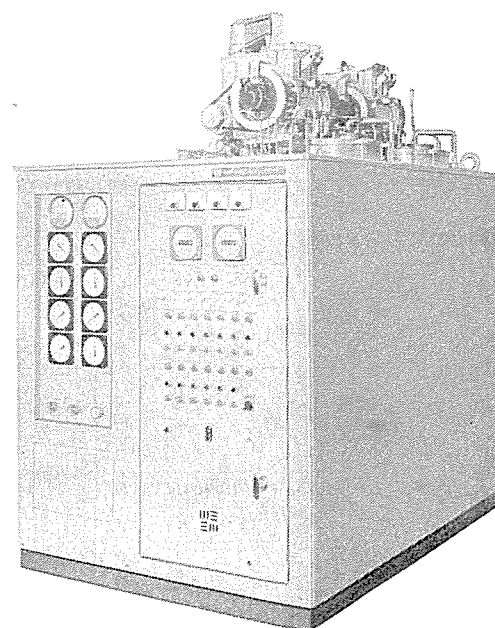
外部コンテナ容量：250 l

■ 特長

(a) 液化機単位ユニット2組を低温配管により一体化したマルチシリンダ方式で、単位ユニットは、それぞれ定格の50%容量運転が独立に行なえるため、液化機としての信頼性が高い。

(b) 液化機主要部品は、すでに多数納入しているUL-80形と互換性を有しており、小形であるため、液化機として非常にコンパクトな設計にまとめられている。

[長崎製作所]



UL-150 E 形 ヘリウム 液化装置 (液化機本体)

三菱 Hi/Re/Li ブラインクーラー 〈BCL 形〉

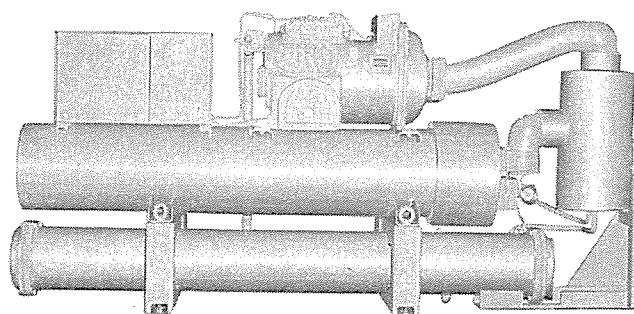
三菱 Hi/Re/Li ブラインクーラーは、当社が独創的なアイデアに基づいて開発した全く新しい形式のユニット形ブラインクーラーである。

従来、この種の冷却装置は、開放形圧縮機・電動機・凝縮器・ブライン冷却器・制御装置などの機器をそれぞれ製作し、これらを現地において一つのプラントにまとめあげていたのであるが、この方式では、性能・コスト・工期・スペース・取扱いなど多くの点に改善すべき問題があった。

本機は機器全体をユニット化することにより、従来の問題点を一挙に解決したもので、省力化時代にふさわしい新形ブラインクーラーといえよう。

■ 特長

- (1) エチレングリコール、プロピレングリコールおよび塩化カルシウムなどのブラインを使用することができる。
- (2) 三菱独得の Hi/Re/Li システム〈特許〉を採用しているため、低温運転における冷却効率が最大で、いかなる温度においても安定した運転を行なう。
- (3) 半密閉形圧縮機・乾式冷却器の採用により、油チャージや軸封装置、電動機の保守などめんどろなメンテナンスから開放される。
- (4) スイッチ一つで運転できる全自動運転方式を採用しているため操作が容易である。もちろん全機種作業主任者は不要である。
- (5) 通常の保護装置のほかに、モータ巻線温度保護サーモ・吐出ガス温度保護サーモ・水銀式過電流リレーなど最新の保護装置を完備している。
- (6) 小形・軽量であることは言うまでもなく、冷却器まわりの熱絶縁、冷媒のチャージ、



三菱 Hi/Re/Li ブラインクーラー 〈BCL-40 形〉

新製品紹介

冷凍機油のチャージなどすべて工場ですませているので、現場における据付が容易で、工期を大幅に短縮することができる。

用途

野菜・果実・穀類・魚・肉・乳製品、その他加工食品の低温貯蔵製氷およびアイススケートリンク製氷用、ならびに化学薬品の低温貯蔵および化学プラント用など。

仕様

形 名		BCL-20	BCL-30	BCL-40	BCL-60	BCL-80	BCL-120
使 用 ブ ラ イ ン		エチレングリコール プロピレングリコール 塩化カルシウム					
温 度 範 囲		-15℃～+4℃					
*冷 凍 能 力 (日 本 冷 凍 トン)		9	14	18	28	37	55
電 源		三相 50/60 Hz 200/220 V					
コンプレッサ	形 名	半 密 閉 MX 形			半 密 閉 MZ 形		
	最大出力 (50/60 Hz、kW)	14/15	20.5/22	28/30	42/45	56/60	84/90
	起 動 方 式	直 入			パ ー ト ワ イ ン デ ィ ン グ		
コンデンサ	形 式	シェ ル ア ン ド チ ュ ー ブ					
	接 続 (FPT ね じ)	2	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	3	4	4
チ ラ ー	形 式	シェ ル ア ン ド チ ュ ー ブ (乾 式)					
	接 続 (ヴ ァ イ ク ト リ ッ ク ジ ョ イ ン ト)	2	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	3	4	4
容 量 制 御 (%)		100, 50	100, 67	100, 50	100, 67 50, 33	100, 75 50, 25	100, 67 50, 33
制 御 方 式		全 自 動					
冷 媒 (チャ ー ジ 済 み)		R-22					
冷 凍 機 油 (チャ ー ジ 済 み)		ス ニ ソ 4GS					
外 形 寸 法	高 さ mm	1,208	1,227	1,280	1,340	1,435	1,555
	幅 mm	2,719	2,724	2,724	3,596	3,621	3,654
	奥 行 mm	600	600	640	776	825	825
製 品 重 量 kg		780	875	985	1,390	1,860	2,490

* クーリングタワー使用でブライン出口 -5℃ 60 Hz の場合

[長崎製作所]

三菱けい光灯器具 “鎌倉シリーズ” 発売

当社では先に画期的なけい光灯器具「ルミタワー」を発売し好評を得たが、さらに当社けい光灯器具の器種充実を計るべく、和風器具の決定版として「鎌倉シリーズ」18器種を発売することになった。

当社けい光灯工場の大船製作所の所在地である史都「鎌倉」の名をとったこのシリーズは、デザイン的にも伝統工芸の鎌倉彫や木組みの妙をうたった格調高いもので、低発泡スチロール樹脂の採用により、木質感をよりリアルに表現している。「七草」では鎌倉彫の刀こん(痕)をそのまま再現し、さらにウルシステインとカラークリヤーによる塗装で漆塗りを表現して伝統

ある鎌倉彫をみごとに生かした。その他各器種とも気品ある日本の美をテーマにした高級純和風のけい光灯器具である。

明るさも従来の 30 W, 60 W, 62 W に新しく高照度 75 W を加えて、大きな部屋にも合うように充実させた。

■ 品 名

三菱けい光灯器具「鎌倉シリーズ」

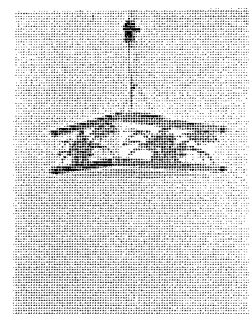
■ 特 長

- (1) 飾りわくは低発泡 スチロール 樹脂を全面的に採用して、木質感を表現した。
- (2) セードは乳白色 カレンダーシート (硬質塩ビ板) を使って、飾りわくとの調和を計った。
- (3) 62 W 以上の器具は下面カバーをつけてソフトな照明効果を出した。
- (4) FCL-32 円形ラップを用いて、明るさ 40% up の高照度形安定器を採用した。
- (5) 包装は木目プリントの化粧箱を利用して、和風の感じを強調した。

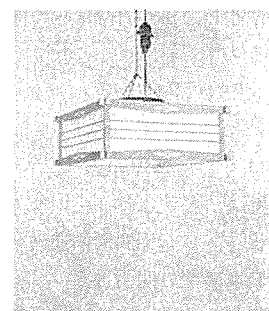
■ 形名、愛称、仕様、価格

愛 称	形 名	ワット数 W	仕 様	正 価 ¥
桐 小 町	FCK-3641	30	チェーンペンダント	3,200
	FCK-3641 CPA	30	コードペンダント	3,500
	FCK-3642	60	チェーンペンダント	4,580
	FCK-3642 CPA	60	コードペンダント	4,880
小 町 格 子	FCK-3652	60	春慶塗 チェーンペンダント	4,850
	FCK-3652 CPA	60	春慶塗 コードペンダント	5,150
	FCK-6221	62	春慶塗 チェーンペンダント	6,550
	FCK-6221 CP	62	春慶塗 コードペンダント	6,850
武 家 造 り	FCK-6231	62	チェーンペンダント	6,350
	FCK-6231 CP	62	コードペンダント	6,650
七 草	FCK-3662	60	ウルシ塗 チェーンペンダント	4,980
	FCK-3662 CPA	60	ウルシ塗 コードペンダント	5,280
	FCK-7501	75	ウルシ塗 チェーンペンダント	7,900
	FCK-7501 CP	75	ウルシ塗 コードペンダント	8,200
重 ね 松	FCK-3672	60	チェーンペンダント	4,750
	FCK-3672 CPA	60	コードペンダント	5,050
	FCK-7511	75	チェーンペンダント	7,400
	FCK-7511 CP	75	コードペンダント	7,700

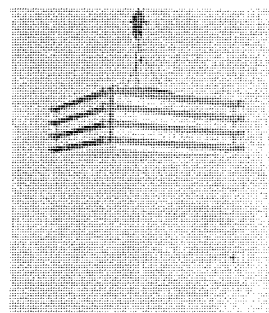
[大船製作所]



(a) FCK-7501 形 (七草)

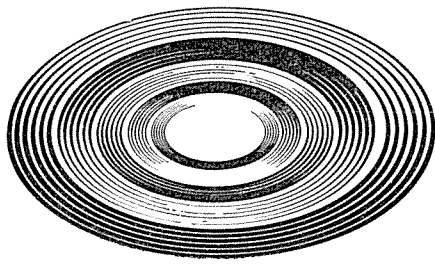


(b) FCK-3642 形 (桐小町)



(c) FCK-6231 形 (武家造り)

三菱けい光灯器具「鎌倉シリーズ」



NEWS FLASH

万国博三菱未来館

三菱万国博総合委員会（三菱系 35 社より成る）は、本年 3 月 15 日から大阪で開催される万国博の会場に、三菱未来館の建設を完了した。本パビリオンは日本の自然と日本人の夢をテーマとしたもので、館内の展示は第 1 部より第 5 部にわたって、日本の自然（嵐と火山）、日本の空（台風コントロール）、日本の海（海底開発）、日本の陸（未来都市と環境）、あなたも参加する（大空間とレクリエーション）の順に構成し、万国博向けに開発した観客輸送装置、映写装置、音響装置、照明装置、駆動装置、光学装置、制御通報装置および特殊材料ならびに工法を大量に採用した。

(1) 本パビリオン建物は、会場正面ゲートからお祭り広場に向って右側の最初の取り付きの場所に位置し、かつ月曜広場に面した敷地に建設された。会場内屈指の至便で目抜き

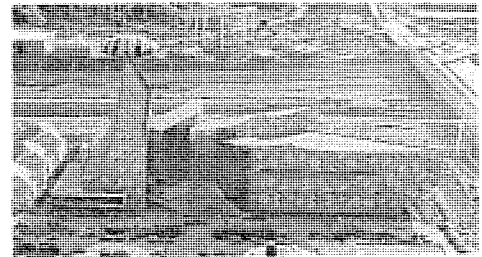


図 1 万博三菱未来館の全景

敷地面積： 9,600 m² 建物面積： 5,666 m²
 床面積： 8,117 m² 最高高さ： 50 m
 間口： 140 m 立体トラス構造
 外壁： プレスボード、FRP および ハーフミラー張り
 屋根： 全面曲面構造（一部傾斜平面あり）
 庭園および屋外照明付き 受電容量 1,300 kVA

(2) 建物内の観客通路は、展示部の起点から終点までを単主線通路とし、枝線通路は非常出口とした。主線通路の総延長は約 320 m で、その約 63 パーセントが三菱トラベータ 4 基（本技報 Vol. 43・No. 5, 昭 44, P. 758 参照）およびエスカレータ 1 基を直列に設置して、毎時およそ 4,000 人を搬送する。本トラベータには、冷房吹出し装置を全延長にわたって両側に付帯設置してある。なお観客が本トラベータを乗り継ぎながら、館内を一巡するのに必要な時間はおよそ 30 分である。

このほかに、身体障害者のために手押車を用意し、エレベーター 2 基を設置した。障害者は歩行しないで、館内を巡回できる。

(3) ホリミラースクリーンは、本パビリオン第 1 部（日本の自然）に採用した特殊の映写装置であり、はじめて公開するものである。本装置は嵐・火山の 2 基を設置し、各基とも 70 mm ワイドスクリーンと大形可動ミラーとを組み合わせ、指向性音響装置を併用して、特殊映画フィルムを映写するものである。大形スクリーンに映写するにもかかわらず、映写機光源を至近距離におくため、超広角度レンズ（焦点距離 47 mm、画角 64 度）を採用した。音響装置には AS 3021 による高感度スピーカを採用した。

本装置の諸元および仕様の概要は次のとおり

広さ

A 室（嵐）： 18.83 m（長）× 21 m（幅）
 × 12.7 m（高）
 B 室（火山）： 18.83 m（長）× 21 m（幅）
 × 12.7 m（高）
 A、B 両室を長手方向に三菱トラベータが貫通

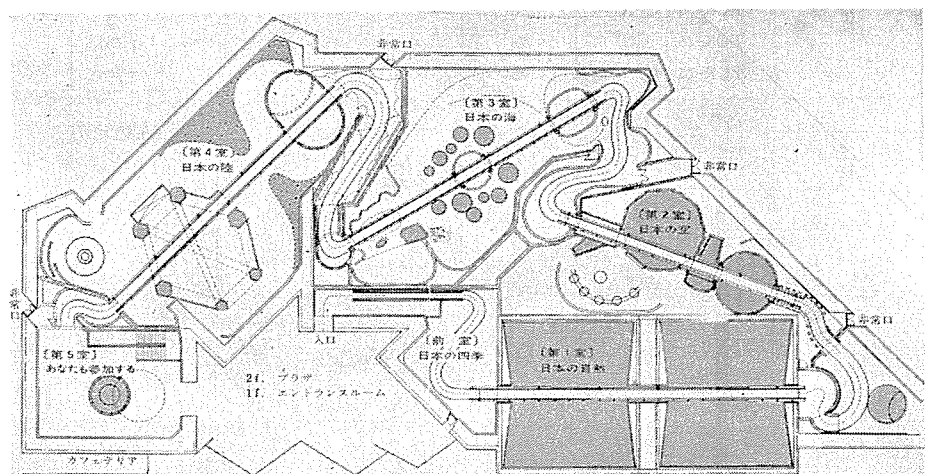


図 2 万博三菱未来館の見取図

構造、装置

トラベータ 進行方向に向って左右両壁面はそれぞれ ワイドスクリーン (A, B 室とも)

前方壁面、後方壁面は超大鏡面 (A 室は固定式, B 室は可動式)

天井は A 室は固定式超大鏡面, B 室は可変照明付き非鏡面, 床は A 室は固定式超大鏡面, B 室は舞台式照明付き造形構造

映写 スクリーン 寸法

A 室用 9 m (高) × 16.65 m (幅) (左右とも)

B 室用 8 m (高) × 15 m (幅) (左右とも)

材 料 樹脂製 ホワイトスクリーン

鏡面寸法 (面積)

A 室 天井 291.6 m², 床面 262.4 m², 壁面 311 m² (前面, 後面同寸法計)

B 室 壁面 311.8 m² (同 上)

映写機

台数 8 基, 70 mm 用, 磁気トラック 6 本

レンズ

明るさ F 2, 投影倍率 15 万 (面積) 倍, 映写距離 18 m (軸線)

投光器

エフェクト 6 基, ドラム 20 基

音響装置

超音質 ステレオ 15 基, トーンズイレ 6 基

(4) スモークスクリーンは本パビリオン第 3 部 (日本の海) の終端部に採用したもので, 薄い煙の層流を両側から別の空気層流にはさんで送り出すサンドウィッチ状の 3 層流を室内に流し, これに映写機から映像をうつすものである。一般の布または板状のスクリーンの代わりに煙スクリーンを使用する映写技法で, 映像は反射側および透過側のいずれからみることができ, また映像の中を人が通り抜けることができる。煙に使用する原料はエチレングリコールで, これの微粒子がまん中の空気層流に拡散される。なお人畜には無害である。

送風容量: 360 m³/分, 画面寸法: 2.4 m (高) × 4 m (長), 煙発生能力: 200 l/分

(5) 球体スクリーンは第 5 部 (あなたも参加する) に設置のもので, 直径 2.5 m のアクリライト製球体の内部下方から 220 度の超広角レンズを使用して映像を投影し, 観客は外側から球体全面にひろがる映像をみるものである。従来の平面画像とは全くちがった表現効果を生む。レンズはプロニコール 2 mm, F 2.0 である。

三菱未来館に設置の各装置は, いずれも三菱系各社の最新の技術を投入して製作したものであることを付記する。

〔三菱万国博総合委員会事務局〕
次長 新田孝義

万国博会場納め三菱昇降機完成

「人類の進歩と調和」をテーマとした日本万国博の会場施設, および内外展示館向けに受注した数多くの三菱エレベータ・エスカレータ・トラベータの据付工事も無事完了し, 開会を待つばかりとなった。

機種別内訳は, エレベータ 15 台, エスカレータ 25 台, トラベータ 5 台で, これら昇降機設備は入場者の輸送という単なる目的だけでなく, 多彩な展示, 催し物とも密接な関係をもって計

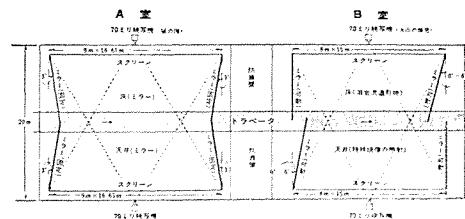


図 3 ホリミラースクリーン 平面図

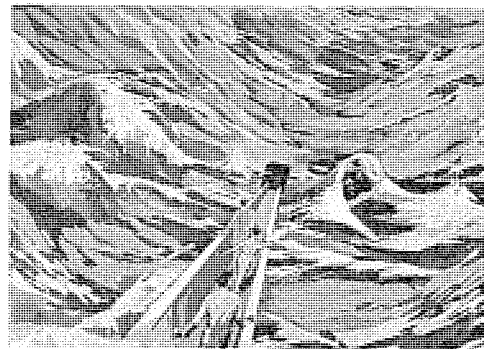


図 4 ホリミラースクリーン 映像想定図

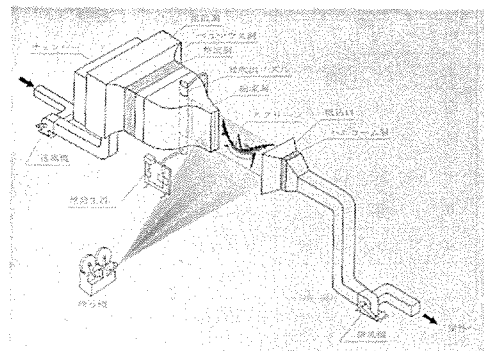


図 5 スモークスクリーン 構造図

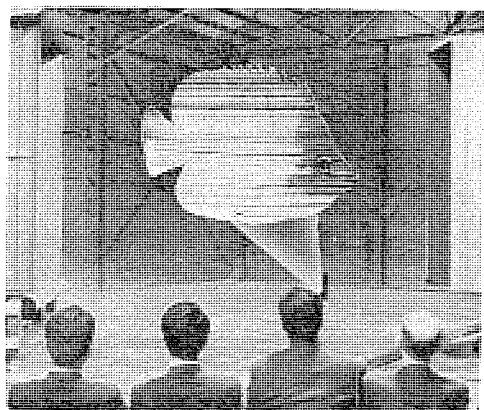


図 6 スモークスクリーン 映像テスト
(中津川製作所において)

画されており、万国博成功の一役をになう重要な役割を課せられている。

なかでも、高さ 120 m のランドマークタワーの展望用エレベータは、ユニークなかご室形状（菱形立方体展望窓付き）のみならず、屋外設置では最高速（180 m/min）のエレベータであり、万国博シンボルタワーにふさわしい高性能設備といえよう。

下表に万国博会場納め三菱昇降機の仕様概要を示す。

万国博会場納めの三菱昇降機一覧表

仕 様 バビリオン	機 種	(注1) 容 量 (定員) kg (人)	速 度 (m/min)	(注2) 停止個所または 揚程等	台 数
三 菱 館	エレベータ	400(6)	45	2 および 3 個所	2
	エスカレータ	800 形	30	6.5 m	1
	トラベータ	1200 形	16	32.5~42.8 m	4
政 府 館	エスカレータ	800 形	30	6.9 m	1
	エスカレータ	1200 形	30	5.1 m	1
	エスカレータ	1200 形	27	10.05 m	1
電 力 館	エレベータ	750(11)	45	4 個所	1
住 友 館	エレベータ	1,800(27)	90	6 個所	1
	エレベータ	950(14)	45	2 個所	1
	エスカレータ	800 形	30	3.3 m	1
	エスカレータ	800 形	30	6.1 m	1
	エスカレータ	800 形	27	16.8 m	1
ア メ リ カ 館	エレベータ	400(6)	30	3 個所	1
	エレベータ	600(9)	30	3 個所	1
	エレベータ	1,000	30	2 個所	1
	トラベータ	1200 形	30	25.0 m	1
ランドマークタワー	エレベータ	1,950(30)	180	3 個所	2
お 祭 広 場	エスカレータ	1200 形	27	5.45 m	1
	エスカレータ	1200 形	27	13.56 m	1
メ イ ン ゲ ー ト	エスカレータ	800 形	30	5.85~6.16 m	4
中 央 口 駅	エスカレータ	1200 形	30	4.9 m	4
オ ラ ン ダ 館	エレベータ	1,400(21)	45	2 個所	4
西 ド イ ツ 館	エスカレータ	1200 形	30	3.6~4.55 m	5
E E C 館	エスカレータ	1200 形	30	7.0 m	1
中 華 民 国 館	エレベータ	750(11)	60	5 個所	1
ガ ス 協 会 館	エスカレータ	800 形	27	3.6 m	1
ガ ラ ス の 城	エスカレータ	800 形	27	4.1 m	1
計					45

(注1) エレベータ……容量(定員), エスカレータ, トラベータ……形名を示す

(注2) エレベータ……停止個所数, エスカレータ……揚程, トラベータ……移動距離を示す

[稲沢製作所]

電子式速度計, 速度検知用 F-DC 変換器

F-DC 変換器は回転計・速度計用の変換器,あるいは回転数制御系の回転数検出装置等に使用できるものである。ここに紹介する F-DC は同一動作原理のものが,従来電車の速度計装置・ATS 装置等に 1,000 台以上使用されてきたが,今回電力・鉄鋼・一般工業用等に応用することを目標に標準化したものである。この F-DC 変換器を使用した速度検出装置には,次のような特長がある。

(1) F-DC 変換器は,速度発電機の発生周波数をこれに比例した直流信号に変換し,発生電圧には影響されない。したがって速度発電機の劣化による発生電圧の低下等の問題を考慮する必要がなく,長期間安定した精度を保つことができる。

(2) F-DC 変換器は,入力信号をトランジスタ増幅回路で長方形波に整形し,可飽和トランスを励振し,その二次巻線より周波数に比例した信号を導出するものである。二次巻線

の出力電圧は鉄心の最大磁束・二次巻線数・周波数に比例し、原理的にトランジスタ回路の特性には無関係であるので安定性が高い。

(3) 周波数-直流信号変換の直線性がよく、指示計との組み合わせ目盛を必要としない。

(4) 直流信号の電力レベルを高く取れる。

(5) 必要に応じて直流信号回路を他から絶縁できるので応用範囲が広い。

標準化された F-DC 変換器の定格表・特性表をそれぞれ表 1、表 2 に示す。図 1 は MF-010 形電子式速度計で、内部に F-DC 変換器が組み込まれている。図 2 は MF-133 形 F-DC 変換器を示す。全回路が 180 mm×125 mm のプリント基板に納めてある。使用者の要求により図 2 のようなプリント基板の形でも、また適当なケースに収納して納入することができる。

表 1 F-DC 変換器定格

形 名	定格周波数 Hz	指示計用出力		制御用低(リップル)出力		基 本 要 素 構 造
		出力電流 mA	負荷抵抗 max kΩ	出力電圧 V	負荷抵抗 kΩ	
MF-010	25~10,000	1	1	—	—	LM-11 に内蔵
MF-111	25~10,000	1	1	10	10	プリント基板カード、アンプ、ブレード 35 P 接せん付き
MF-132	100~10,000	5	1	10	5	"
MF-133	100~10,000	5	1	24	5	"
MF-134	100~10,000	5	1	48	5	"
MF-235	100~10,000	5	1	120	5	プリント基板カード、アンプ、ブレード 35 P 接せん付き、前面パネル付き

(注) MF-010 は指示計用出力

表 2 F-DC 変換器特性

定 格 周 波 数 系 列		1, 1.2, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7.5, 8
入 力 電 圧		0.5~30 V rms
入 力 電 圧 の 波 形		正弦波またはマーク対スペース比 1 : 1 の長方形波
入 力 抵 抗		5 kΩ 以上
直 線 性		± 1 % F・S 以内
制御用出力 リップル	MF-111	定格周波数の 10 分 1 以上で 1 % (P-P 値) F・S 以内
	MF-132~235	20 Hz 以上で 1 % (P-P 値) F・S 以内
温度 特 性	精 度 保 証	20±20°C で出力の変化 ±0.5% 以内
	動 作 保 証	-10~+50°C
制御用出力 応 答 速 度	MF-111	0.05~1.8 秒 (定格周波数により異なる)
	MF-132~235	0.05 秒
制 御 電 源	MF-010・111	AC 100 V 50/60 Hz 2 VA
	MF-132~235	DC 24 V 0.15~0.5 A (形名により異なる)
	精 度 保 証	制御電圧 ±10% で出力の変化 ±0.5% 以内

【神戸製作所】

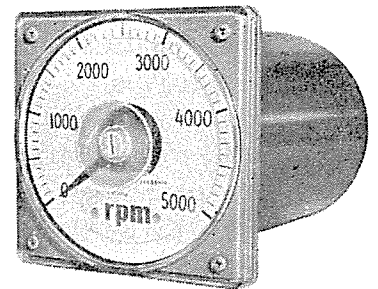


図 1 MF-010 形電子式速度計

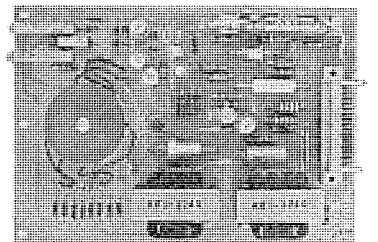


図 2 MF-133 形 F-DC 変換器

中部電力西名古屋火力発電所向け屋外形タービン発電機完成

神戸製作所では、このたび中部電力がピーク負荷用として建設中の西名古屋発電所に納入する 3,600 rpm 250 MVA タービン発電機と、1,200 kW ブラシレス励磁機を完成したので紹介する。

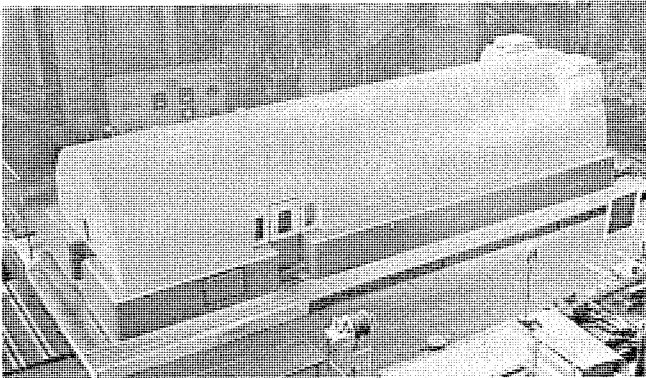
本機はブラシレス発電機として最初の屋外形であり、タービン製作担当の三菱重工業(株)と当社の意匠専門家が協力して屋外形としての外形形状を詳細に検討した。その結果、発電機と励磁機の外径寸法を同一にし、通常は発電機だけに用いられる化粧カバーを励磁機ハ

ウジングまで伸ばして一体感をもたせた。

色彩についてもハウジング部は淡青色、化粧カバーは濃青色のツートンカラーが採用されるなど国内はもちろん海外においても例を見ない新しい試みがとり入れられた。機器自体も1日1回の急速起動停止を行なうピーク負荷用としての要求を満足するよう、くり返し応力を受ける部分の構造、材料につき検討を加え、ひん繁な加減速により機器へ悪影響を及ぼさないよう配慮した。

今回完成した機器は西名古屋発電所1号機として納入され、下記定格を有するが、引き続き同発電所向け同一定格の2号機も6ヶ月遅れで完成される予定で鋭意製作中である。

- タービン 定格： 220 MW
- 発電機定格
- 出力： 250 MVA
- 電圧： 17,000 V
- 力率： 90%
- ガス圧： 3 kg/cm²
- 短絡比： 0.58
- 回転数： 3,600 rpm
- 冷却方式： 固定子・回転子とも内部冷却
- 励磁機定格
- 形式： ブラシレス
- 出力： 1,200 kW
- 電圧： 375 V
- 回転数： 3,600 rpm



工場試験中の250 MVA 3,600 rpm 屋外形
ブラシレスタービン 発電機

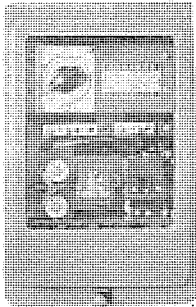
[神戸製作所]

配電線用静止形高感度地絡方向継電器 TWG-1-D 形完成

本継電器は JEC-143 による零相変流器と組み合わせて、非接地系配電線の地絡方向保護を行なうもので、静止形による高感度化で対地静電容量が大きくて V_0 の発生しにくい系統でも十分な保護ができる。ケーブル配電線の地絡故障時の V_0 、 I_0 はケーブルの絶縁回復特性のため著しいひずみ波となるが、本継電器はこれらにも確実に応動できる。

■ 形 式

形 名	形 番	定 格				整 定 範 囲	そ の 他
		周 波 数	電 圧	電 流	制御電圧		
TWG-1-D	PE 652	50 Hz	AC 190 V	AC 2 A	DC 110 V	$I_0=1, 2, 3 \text{ mA}$ $V_0=5, 10 \text{ V}$ 最大感度角 $\theta=45^\circ$ $T=0.2\sim 2 \text{ s}$	ケース D-B ICS 0.1/1 A
	PE 653	60 Hz					
	PE 667	50 Hz	AC 110 V				
	PE 668	60 Hz					



TWG-1-D 形 継電器 (正面)

■ 特 長

- (1) 高感度である。 $(V_0=5\text{ V}$ で 1 mA ZCT 一次換算約 120 mA)
- (2) 振動に強い。
- (3) PT 消費 VA が少ない。
- (4) ケーブル 配電線地絡故障時の著しいひずみ波にも確実に応動する。

[神戸製作所]

高速大容量立軸水車発電機の完成

——コロンビア国ガターペ 1 発電所向け——

コロンビア国ガターペ発電所向けとして受注し、当社神戸製作所において鋭意製作を進めてきた高速大容量発電機 2 台が、このほど完成し、工場における電気性能試験・無拘束速度試験を好成績裏に終了した。

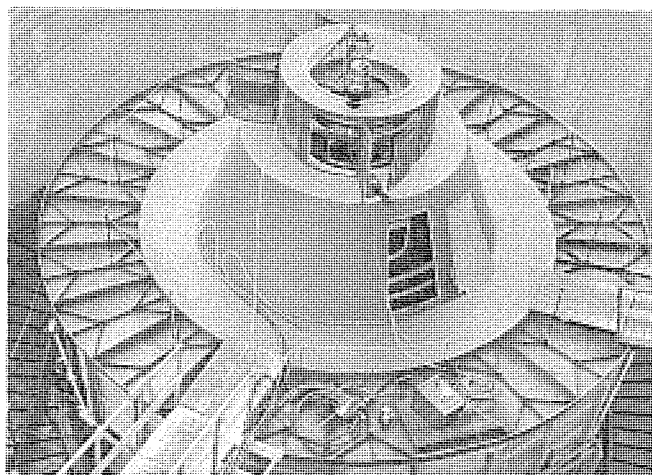
本機は、立軸ペルトン水車に直結される記録的な高速大容量機である。特に、無拘束速度 975 rpm における最大周速は 170 m/sec におよび、また発電機下部案内軸受がないため、その構造設計にあたっては、慎重に検討し、計画を進めた。発電機の仕様および特長は下記のとおりである。

■ 仕 様

形 式：	立軸普通形回転界磁全閉内冷形
容 量：	77,400/89,000 kVA
温度上昇制限：	$60^{\circ}\text{C}/80^{\circ}\text{C}$ B 種絶縁
電 圧：	13,800 V
力 率：	85% おくれ
周波数：	60 Hz
回転数：	514.3 rpm (無拘束速度 975 rpm)
直軸過渡リアクタンス (不飽和値)：	$0.27\text{ p} \cdot \text{u}$ (77,400 kVA ベース) 以下

■ 特 長

- (1) 発電機下部案内軸受がないため、上部案内軸受と水車軸受との軸受間隔を小さくするように、発電機全体の構造をできるだけ低く小形にした。
- (2) 主軸は、高い無拘束速度に十分耐えうるように軸径を大きくし、鋼板溶接構造を採用した。
- (3) 現地組立・輸送制限等の条件より、主軸およびこれに焼ばめされたリムを横方向に二分割とし、ボルトにより結合した。
- (4) 磁極は非連続形の制動巻線を採用し、回転子をつり出すことなく、1 極ずつ分解可能な構造とした。
- (5) 励磁機の冷却は発電機本体の冷却風の一部を循環させた全閉内冷方式とし、整流子・スリップリング部のみ刷子点検を容易にするため開放形とした。



工場試験中の コロンビア ガターペ 発電所向け
77,400/89,000 kVA 発電機

[神戸製作所]

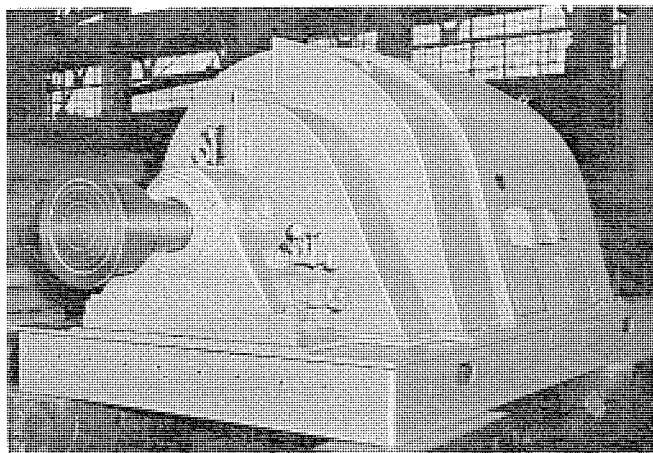
八幡製鉄(株)戸畑製鉄所向け 7,300 kW かご形誘導電動機完成

かねて八幡製鉄(株)戸畑製鉄所向けとして鋭意製作中であった、7,300 kW 4P かご形誘導電動機を44年9月完成し、好成績をもって工場試験を完了した。

本電動機は、神戸製鋼所製のコンプレッサと直結されるもので、国内のかご形誘導電動機の最大容量である4,000 kWを大幅に上回る記録品である。

周知のようにかご形誘導電動機を始動すると、回転子バー、エンドリングには遠心力による応力と同時に熱損失による熱応力が発生する。したがって大容量高速機で負荷の慣性モーメントが大きいほどその値は大きくなる。本電動機では、回転子の構造、材料等に特に考慮を払い、新しいくふうを盛込んでいる。

電 圧： 11,000 V
周波数： 60 Hz
極 数： 4 P
回転数： 1,760 rpm
台 数： 1 台
用 途： 原料空気圧縮機用



7,300 kW かご形誘導電動機

[長崎製作所]

ネットワーク用 FLK 形限流ヒューズの完成

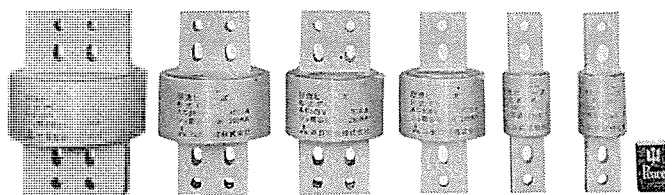
最近の都市の集中化、近代化に伴い、著しく増大する電力需要に対処するため、ネットワーク配電方式が多く実施されるようになってきたが、今回当社ではこれらネットワーク受電設備のプロテクティブおよびテイクオフヒューズとして使用される大容量の FLK 形限流ヒューズの全シリーズを完成した。

従来より数多く製作している限流ヒューズにおける高度な技術と実績をベースとして、日本電設工業会作成の「スポットネットワーク受電設備技術指針」に従い開発したものである。

FLK 形限流ヒューズの外観を図に示す。

ヒューズの仕様はつぎのとおりである。

形 式： FLK 形限流ヒューズ (溶断表示装置付き)
定格電圧： AC 500 V
定格電流： 500 A, 1,000 A, 2,000 A, 3,000 A, 4,000 A, 5,000 A
定格しゃ断容量(対称)： 200 kA
準拠規格： JEM-R-2040 (1964)
JISC 8314 (1968)



FLK 形限流ヒューズ外観図

(左より 5,000, 4,000, 3,000, 2,000, 1,000, 500 A)

[伊丹製作所]

三菱エレベット R 形 住宅用エレベータ完成

三菱エレベットとして好評を博している規格形乗用エレベータに今回、高層住宅向けのR形を完成、エレベットシリーズにつけ加えた。

三菱エレベットR形は、次々と建設される高層住宅の縦の交通機関として、居住者の皆様に快適な生活を楽しんでいただきたいという願いから、広範な居住者意見調査に基づいて開発された。日常生活の場で子供から老人までが使用するエレベータとして、細かい心使いが盛られたわが国では最初の本格的な住宅用エレベータである。

おもな特長は

(1) 6人乗りのR-6-2S形では、小形エレベータながら大部分の家具が運搬できる。9人乗りのR-9-2Sではピアノ、ダブルベッドまで運搬可能で、従来の11人乗りと同等の機能を持つ。これらのかご室寸法は新JIS-A 4301 1970に準拠している。

(2) R-9-2S形ではかご室後部にトランクを設ければ、担架や棺も運搬することができる。

(3) 超高層住宅の出現に備えて高速エレベータ(90 m/min)も用意した。

(4) かご操作盤は新設計のニュータイプで、一段と使いやすくなった。

(5) 三菱エレベットR形の乗場は、プリアハ化したフロントパネル形式で、現場での据付作業が容易になり、工期の短縮ができた。かご室・機械室のプリアハ化も建物の状況によっては可能である。

三菱エレベットR形住宅用エレベータの仕様は次のとおりであり、1号機はすでに据付を開始し、近々実動する予定になっている。(有楽土地・大成建設 西八王寺ハイム 7台)

	R-6-2S形	R-9-2S形
定員	6名	9名
積載量	450 kg	600 kg
速度	45, 60, 90 m/min	45, 60, 90 m/min
かご寸法	間口 1,050×奥行 1,150	間口 1,050×奥行 1,520
出入口寸法	幅 800×高さ 2,000	幅 800×高さ 2,000

[稲沢製作所]

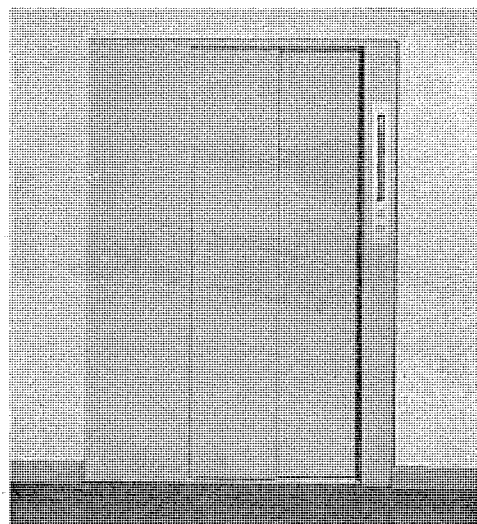


図1 エレベットR形住宅用エレベータA形のりば

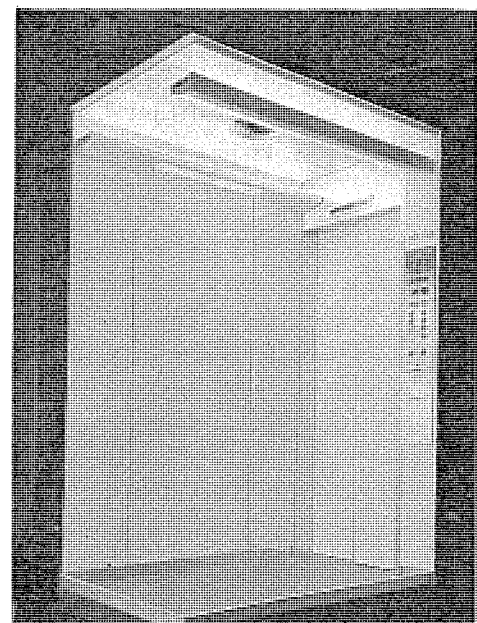


図2 エレベットR形住宅用エレベータかご室

超高速運転に成功!!

超高速リニヤモータ試験装置完成

夢の新幹線—超高速鉄道の駆動源として、非粘着駆動方式の一種であるリニヤモータ (Linear Induction Motor) が、わが国をはじめ米英仏等の諸外国で脚光を浴びている。特にアメリカでは、HSGT (High Speed Ground Transportation) と称する産学協同の大形プロジェクトの下で、势力的に基礎検討が進められている。

わが国でも数年前から低速用リニヤモータについて種々試験が進められてきたが、このたび当社長崎製作所で超高速リニヤモータ試験装置が完成し、世界で初めて実物大リニヤモータによる超高速運転に成功した。

今回の試験装置は、無限長リアクションレール (回転円板形のリアクションレール) を採用しており、その材質は、強度上の点から特殊鋼板を採用している。また電源としては、完全な正

弦波形電圧が容易に得られる回転式の高周波電源を採用し、低速から高速まで自由に任意の周波数で運転できる。さらにリニアモータの電動機領域のみならず逆相および再生制動領域での特性も測定できるように負荷吸収装置リアクションレールがに直結されている。

試験装置の概要は次のとおりである。

(1) リニアモータ

出力： 300 kW
電圧： 550 V
周波数： 300 Hz
極数： 6 P
速度： 350 km/h
同期速度： 432 km/h

(2) リアクションレール

直径： 3,500 mm
材質： 特殊鋼板

(3) 高周波発電機

出力： 500 kVA
電圧： 380 V
極数： 30 P
周波数： 120 Hz
(35~350 Hz)
回転数： 480 rpm
(140~1,400 rpm)

[長崎製作所]

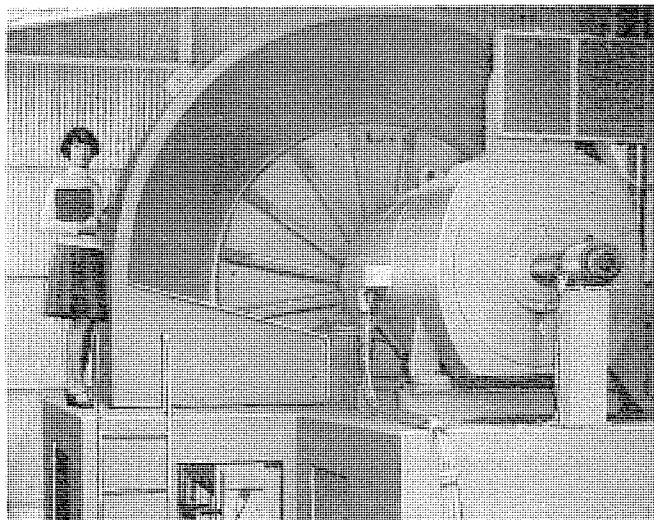


図 1 リニアモータ 試験装置全景

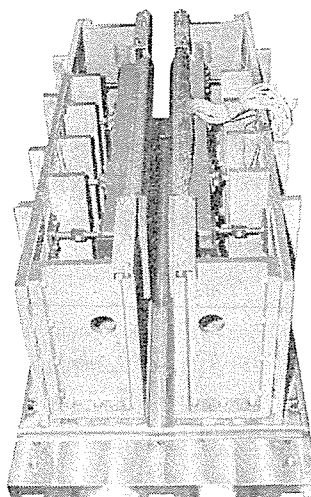


図 2 リニアモータ 固定子

本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

本 社	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル)	(電) 100	(電) 東京 (03) 218局 2111番
大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル)	(電) 530	(電) 大阪 (06) 312局1231番
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)	(電) 450	(電) 名古屋 (052) 561局5311番
静岡出張所	静岡市伝馬町16の3番地(明治生命静岡支社)	(電) 420	(電) 静岡 (0542) 54局4681番
福岡営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	(電) 810	(電) 福岡 (092) 75局6231番
長崎出張所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 850-91	(電) 長崎 (0958) 23局6101番
札幌営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)	(電) 060-91	(電) 札幌 (0122) 26局9111番
仙台営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル)	(電) 980	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号	(電) 930	(電) 富山 (0764) 31局8211番
広島営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)	(電) 730	(電) 広島 (0822) 47局5111番
岡山出張所	岡山市駅前町1丁目9番地(明治生命館)	(電) 700	(電) 岡山 (0862) 41局0331番
高松営業所	高松市鶴屋町2番1号	(電) 760	(電) 高松 (0878) 51局0001番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル)	(電) 100	(電) 東京 (03) 218局2111番
城北家電営業所	東京都文京区大塚3丁目3番1号(新茗溪ビル)	(電) 112	(電) 東京 (03) 944局6311番
城南家電営業所	東京都世田谷区池尻3丁目10番3号(三菱電機世田谷ビル)	(電) 154	(電) 東京 (03) 411局8181番
城西家電営業所	国分寺市南町2丁目16番14号(秀美ビル)	(電) 185	(電) 国分寺 (0423) 22局1881番
横浜家電営業所	横浜市中区富士見町3番地4	(電) 232	(電) 横浜 (045) 251局2226番
千葉家電営業所	千葉市新宿町2丁目49番地(三菱電機千葉ビル)	(電) 280	(電) 千葉 (0472) 42局5486番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 530	(電) 大阪 (06) 344局1231番
洲本出張所	洲本市上物部2丁目6番33号	(電) 656	(電) 洲本 (07992) 2局0631番
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)	(電) 450	(電) 名古屋 (052) 561局5311番
静岡出張所	静岡市小島162番地	(電) 420	(電) 静岡 (0542) 85局6141番
福岡商品営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	(電) 810	(電) 福岡 (092) 75局6231番
札幌商品営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル)	(電) 060-91	(電) 札幌 (0122) 26局9111番
仙台商品営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル)	(電) 980	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
富山商品営業所	富山市桜木町1番29号	(電) 930	(電) 富山 (0764) 31局8211番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)	(電) 730	(電) 広島 (0822) 47局5111番
高松商品営業所	高松市鶴屋町2番1号	(電) 760	(電) 高松 (0878) 51局0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目12番地(北陸ビル)	(電) 950	(電) 新潟 (0252) 45局2151番
関東商品営業所	与野市上落合後原842番地	(電) 338	(電) 与野 (0488) 33局3181番
東京機器営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル)	(電) 100	(電) 東京 (03) 218局2111番
大阪機器営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1	(電) 530	(電) 大阪 (06) 344局1231番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号	(電) 247	(電) 鎌倉 (0467) 46局6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目10番地の1	(電) 652	(電) 神戸 (078) 67局5041番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
三田工場	三田市三輪町父々部85番地	(電) 669-13	(電) 三田 (07956) 局 4371番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号	(電) 852	(電) 長崎 (0958) 23局6211番
稲沢製作所	稲沢市菱町1番地	(電) 492	(電) 稲沢 (0587) 32局8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地	(電) 640-91	(電) 和歌山 (0734) 23局7231番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地	(電) 247	(電) 鎌倉 (0467) 46局1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
北伊丹製作所	伊丹市大鹿字主ヶ池1番地	(電) 664	(電) 伊丹 (0727) 82局5131番
熊本工場	熊本市竜田町弓削720番地	(電) 862	(電) 熊本 (0963) 62局7211番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地	(電) 461	(電) 名古屋 (052) 721局2111番
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地	(電) 819-01	(電) 福岡今宿 (09295) 6局0431番
福山製作所	福山市緑町1番8号	(電) 720	(電) 福山 (0849) 21局3211番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地	(電) 670	(電) 姫路 (0792) 23局1251番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号	(電) 229	(電) 相模原 (0427) 72局5131番
世田谷工場	東京都世田谷区池尻3丁目1番15号	(電) 154	(電) 東京 (03) 414局8111番
静岡製作所	静岡市小島110番地	(電) 420	(電) 静岡 (0542) 85局1111番
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号	(電) 508	(電) 中津川 (05736) 5局7151番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号	(電) 247	(電) 鎌倉 (0467) 46局6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号	(電) 963	(電) 郡山 (02492) 2局1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地	(電) 370-04	(電) 尾島 (02765) 2局1111番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地	(電) 375	(電) 藤岡 (02742) 2局1185番
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字図所1番地	(電) 617	(電) 京都西山 (075) 921局4111番
長野工場	長野市大字南長池字村前	(電) 380	
ラジオ工場	尼崎市南清水字中野80番地	(電) 661	(電) 大阪 (06) 491局8021番
札幌営業所	札幌市北2条東12丁目98番地	(電) 060	(電) 札幌 (0122) 23局5544番

次 号 予 定

三菱電機技報 Vol. 44. No. 3

音 響 機 器 特 集

《特集論文》

- 音響再生の現状の改善の方向
- 最近のダイアトーンステレオ
- 最近の V カット式ステレオキャビネット
- 最近のダイアトーンレコードプレーヤ
- ステレオアンプの技術的問題点
- ダイアトーンスピーカーシステム
- 三菱テープレコーダ
- 音響施設用スピーカーシステム
- 三菱 IC ラジオ
- カーラジオの最近の動向

- カーステレオの最近の動向

- 三菱自動音声通報装置

《普通論文》

- MDF-1 形機上用方向探知機
- MELCOM-9100-5 のソフトウェア
- 18 MHz 帯半導体直接発信器
- テレビジョン受信機のサービス性評価法
- レーダブライイトディスプレイ装置
- 東京電力安曇発電所 111,000 kW 水車 11,000 kVA 水車発電機および運転制御装置

三 菱 電 機 技 報 編 集 委 員 会

委員長	仙 石 廉	常任委員	祖 父 江 晴 秋
副委員長	神 崎 邇	"	湊 武 雄
常任委員	明 石 精	"	山 田 栄 一
"	石 川 理 一	委 員	尾 畑 喜 行
"	上 田 重 夫	"	北 垣 成 一
"	宇 佐 見 重 夫	"	南 日 達 郎
"	大 野 寛 孝	"	林 昇 寿
"	北 川 和 人	"	松 元 雄 蔵
"	小 堀 富 次 雄	"	和 田 義 勝
"	鈴 木 正 材		(以上 50 音順)

昭和 45 年 2 月 22 日印刷 昭和 45 年 2 月 25 日発行「禁無断転載」定価 1 部金 100 円(送料別)

編集兼発行人

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号

仙 石 廉

印刷所

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地

大日本印刷株式会社

(郵便番号 162)

印刷者

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地

高 橋 武 夫

発行所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号(郵便番号 100)

三菱電機株式会社内 「三菱電機技報社」

(電) (03) 218 局 2323 番

発売元

東京都千代田区神田錦町 3 の 1 (郵便番号 151) 株式会社 オーム社書店

(電) (03) 291 局 0912 番 振替東京 20018