

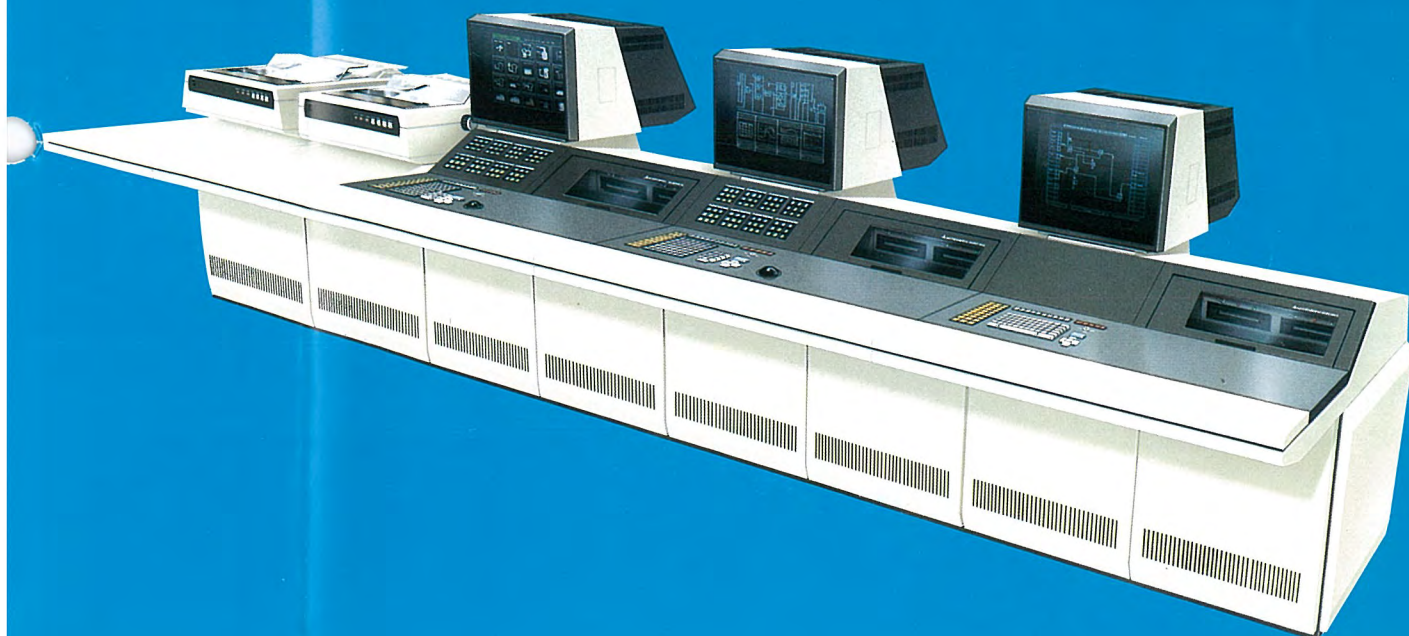
MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報



▲ガス絶縁交直変換所モデルプラント

▼《MACTUS 880》



Vol.57 No.10

直流送電技術開発特集
計測・制御特集

 未来を開発する
三菱電機

10
1983

直流送電技術開発，計測・制御特集

目次

直流送電技術開発特集論文

新しい直流送電技術の開発.....	1
松村 晋・富永正太郎・桑原 宏・永井信夫	
直流送電用ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ.....	5
田邊忠夫・大沢喜信・山本吉彦・丸谷朋弘・佐志田伸夫	
ガス絶縁交直変換所用機器.....	13
川越英二・今滝満政・東横良旺・本田義勝・光庵豊一	
直流送電の制御・保護.....	22
春本容正・甲木莞爾・下村哲朗・長沢 宏	
ガス絶縁交直変換所モデルプラント.....	27
阿部陽一郎・矢野昌雄・多田一彦・林 成男・西尾 功	
直流ガス絶縁技術.....	30
長谷川 清・渋谷義一・仲西幸一郎・荒畑吉邦・吉岡昭義	
直流送電用サイリスタ.....	34
中川 勉・大滝 要・庭山和彦・清原豊彦・小久保吉裕	

計測・制御特集論文

総合計装制御システム《MACTUS》の概要.....	40
橋本健治	
分散形総合計装制御システム《MACTUS 800》ファミリー.....	42
山上信太郎・河合一洋・志岐紀夫	
総合計装制御システム《MACTUS 710》.....	46
古木寿人・浅野光雄・古屋健司・今田達裕・石崎 貴	
総合計装制御システム《MACTUS 600》ファミリー.....	51
松本公雄・清宮忠昭・安居院憲彰・片岡猪三郎・大久保龍二	
1 ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリー.....	57
土屋輝彦・森 俊吾・成原弘修・安藤 隆・古谷悦一	
光ファイバセンサの原理と応用.....	62
久間和生・田井修市・布下正宏・佐藤 建・吉永 淳	
トランスミッション用異音検出器.....	67
深田浩一	
特許と新案.....	39, 70
低温倉庫	
制御操作卓	
スポットライト	
石油ガス化ファンヒーターKD-25/32FTD形.....	(表3)

表紙

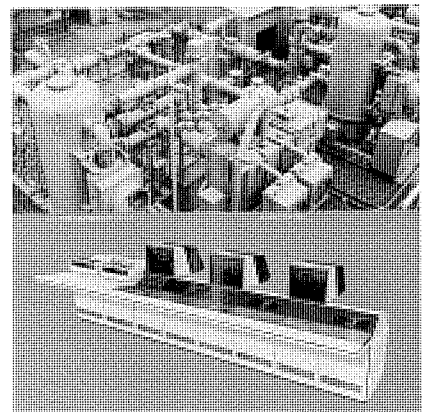
ガス絶縁交直変換所モデルプラント

関西電力㈱と三菱電機㈱は直流送電技術について共同研究を行い、ガス絶縁交直変換所への適用を目標に、まず第一段階として125kV用のガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ（ガスバルブ）をはじめ、ガス絶縁形の直流開閉装置、酸化亜鉛形直流避雷器、直流変成器、直流変流器と油浸形の直流利アクトルなど、変換所用機器と直流送電基本制御用ディジタル制御装置を開発した。

写真は開発機器を組み合わせ、三菱電機㈱伊丹製作所内に設置したBack-to-Back構成のガス絶縁交直変換所モデルプラントの全景で、手前左はガスバルブである。既に、このプラントによる運転試験や他の試作機器での一連の諸試験を終え、将来の高信頼度、小形、経済的なガス絶縁交直変換所に対する見通しを得ることができた。

《MACTUS 880》(マンマシンインタフェース)

分散形総合計装制御システムにおけるプラントの運転、操作、監視、あるいはメンテナンス、稼働管理などの機能を集約したマンマシンインタフェースとして《MACTUS 880》を開発、製品化した。《MACTUS 880》は、高解像度20インチグラフィックCRTを中心に、計装用キーボード、画面移動用トラックボール、エンジニアリングキーボード、プリンタ装置などにより構成され、制御操作画面、監視用グラフィック画面、トレンドグラフ画面など、豊富で高度な機能を持たせたため、優れた計装制御用マンマシンインタフェースを提供することができる。



アブストラクト

新しい直流送電技術の開発

松村 晋・富永正太郎・桑原 宏・永井信夫

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P1～4

将来の系統問題に対する一方策として直流送電があり、関西電力㈱と三菱電機㈱では昭和54年からこの面の共同研究を行っている。その重要課題の一つは高信頼度、小形、経済的な交直変換所の開発であり、このため絶縁と冷却を共にSF₆ガスによったサイリスタバルブをはじめ直流ガス母線など新しい直流機器の研究を進めているが、このほど、将来の±500kV級に対する第一段階として±125kV機器の試作と諸試験を終了したので、その成果の概要を報告する。

ガス絶縁交直変換所モデルプラント

阿部陽一郎・矢野昌雄・多田一彦・林 成男・西尾 功

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P27～29

信頼性の向上、小形化、コストの低減を目指した大容量交直変換所の開発の第一ステップとして、①全密閉形であること、②変換器の制御にデジタル制御を適用したこと、を特色とするDC125kVの交直変換所モデルプラントを建設し、総合的な機能検証試験を実施してきた。この建設過程及び一連の試験を通じて、貴重な経験と多くのデータを収集することができ、今回の方式による高電圧・大容量変換所の実現の見通しと自信を得ることができた。

直流送電用ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ

田邊忠夫・大沢喜信・山本吉彦・丸谷朋弘・佐志田伸夫

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P5～12

将来のガス絶縁交直変換所に使用されるサイリスタバルブとしては、絶縁及び冷却を共にSF₆ガスによった屋外全密閉形的方式（ガスバルブと略称す）が有望であろうとの見通しのもとに、関西電力㈱と三菱電機㈱は共同研究を進めているが、このほど125kV600Aの開発を終えたので、電気回路設計、冷却設計、構造設計について設計上の留意点、試作ガスバルブの概要、試験結果及び将来の500kV級への見通しを述べる。

直流ガス絶縁技術

長谷川 清・渋谷義一・仲西幸一郎・荒畑吉邦・吉岡昭義

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P30～33

SF₆ガス中において固体絶縁体に直流電界を印加すると絶縁体表面には電荷が蓄積し、最悪の場合には蓄積電荷は絶縁体の沿面せん（閃）絡特性を低下させるように作用する。この電荷蓄積は直流電界下特有の現象で、本稿では電荷蓄積の基礎特性を円柱形、円すい形スペーサを用いて実験し電荷の蓄積特性や機構を検討している。また、種々の形状のモデルスペーサを用いて電荷蓄積特性のほか極性反転効果・導電性粒子の影響などを調べスペーサ形状を検討した。

ガス絶縁交直変換所用機器

川越英二・今滝満政・東植良旺・本田義勝・光庵豊一

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P13～21

交直変換所を構成するサイリスタバルブ、変換器用変圧器、直流リアクトル、直流開閉装置及びこれらの接続母線のすべてを信頼性向上及び縮小化を目的として全密閉化することとし、必要な機器開発を行った。

本稿ではSF₆ガス絶縁の125kV直流開閉装置とその構成機器並びに油浸絶縁の変換器用変圧器及び直流リアクトルの開発試作結果について紹介する。これらの試作機器は個別試験終了後に組み合わせ、1年間の直流長期課電試験を実施した。

直流送電用サイリスタ

中川 勉・大滝 要・庭山和彦・清原豊彦・小久保吉裕

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P34～38

直流送電用の耐圧6,000V、電流容量1,500A、ターンオフ時間400 μ s以下の特性定格をもつ電気トリガサイリスタと、これと同じ特性定格で最小光トリガパワー7mW以下の特性をもつ高耐圧大容量の光トリガサイリスタを開発した。同時に、この光トリガサイリスタを十分にハイゲートドライブ可能なバンドルファイバ端光出力100mW以上が得られるLEDアレーモジュールも開発した。本稿では、それらの構造、特性について述べる。

直流送電の制御・保護

春本容正・甲木莞爾・下村哲朗・長沢 宏

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P22～26

近年、長距離大容量送電や系統連系などに直流送電の適用が検討されている。このような場合、その制御・保護装置には高い信頼性が要求される。

本稿は関西電力㈱と三菱電機㈱の共同研究の一環として開発したガス絶縁交直変換所モデルプラント用の高信頼度デジタル制御装置について、その基盤となる系統解析技術、装置の概要、試験結果について述べる。

総合計装制御システム《MACTUS》の概要

橋本健治

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P40～41

高品質、高付加価値製品の生産への転換、エンジニアリングパワーの効率化といった社会的ニーズ、またマイクロプロセッサ、カスタムLSI、ネットワークなどの技術シーズを踏まえ、従来の《MACTUSシリーズ》のハードウェアの更新、エンジニア機能の充実、及びマンマシンシステムの機能拡張を行うとともに適用分野の特質に適合するファミリー化を図った。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 27~29 (1983)

A Model SF₆-Gas-Insulated Converter Station

by Yoichiro Abe, Masao Yano, Kazuhiko Tada, Shigeo Hayashi
& Isao Nishio

A model 125kV DC SF₆-gas-insulated converter station has been developed to increase reliability and compactness and reduce costs, and overall performance tests have been carried out. The station, which is a fully metal-enclosed type and features digitalized converter control, represents the first step to the HVDC converter stations of the future. Valuable experience was acquired, and much important data obtained, both in the course of construction and during the series of overall performance tests. The results were very encouraging for the prospects of practical, high-tension, large-capacity converter stations.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 1~4 (1983)

The Development of a New HVDC Converter Station

by Susumu Matsumura, Shotaro Tominaga, Hiroshi Kuwabara
& Nobuo Nagai

High-voltage direct-current (HVDC) power transmission represents one solution to the problems of future power systems. The Kansai Electric Power Co. and Mitsubishi Electric have been jointly engaged in HVDC research since 1979. One major objective of this research is the development of a highly reliable, compact, low-cost converter station. It also involves research into new DC equipment, including novel thyristor valves using SF₆ gas for insulation and cooling, and gas-insulated DC buses. The trial manufacture and testing of a ± 125 kV thyristor valve, which represent important first steps toward future ± 500 kV-class equipment, were recently completed. The article introduces the new valve and the test results.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 30~33 (1983)

Gas-Insulation Techniques for DC Power Apparatus

by Kiyoshi Hasegawa, Yoshikazu Shibuya, Koichiro Nakanishi,
Yoshikuni Arahata & Akiyoshi Yoshioka

The application of DC stress to solid insulators in SF₆ gas causes electric charges to accumulate on the insulator surface. In the worst case, the accumulated charges may degrade the flashover characteristics of the insulator. The article describes an experimental investigation of charge accumulation, focusing on the basic characteristics and mechanism of charge accumulation using post and cone spacers. In addition, model spacers of various shapes were used to investigate the effect of spacer shape on charge accumulation, the effects of polarity reversal, and the influence of conductive particles.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 5~12 (1983)

An HVDC Thyristor Valve Insulated and Cooled by Compressed SF₆ Gas

by Tadao Tanabe, Yoshinobu Osawa, Yoshihiko Yamamoto,
Tomohiro Marutani & Nobuo Sashida

Metal-enclosed outdoor-type thyristor valves using SF₆ gas for insulation and cooling hold promise for the SF₆-gas-insulated converter stations of the future. As a result of joint R&D of thyristor valves by The Kansai Electric Power Co. and Mitsubishi Electric, a 125kV, 600A HVDC (high-voltage direct-current) thyristor valve has recently been developed. The article discusses the design considerations for the electric circuits, cooling system, and structure of the thyristor valve; gives an outline of the trial valve, citing the test results; and examines the prospects for future, 500kV-class valves.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 34~38 (1983)

Thyristors for HVDC Transmission

by Tsutomu Nakagawa, Kaname Otaki, Kazuhiko Niwayama,
Toyohiko Kiyohara & Yoshihiro Kokubo

Mitsubishi Electric has developed an electric trigger thyristor that provides a blocking voltage of 6,000VDC, a current capacity of 1,500A, and a turn-off time of less than 400 μ s. The Corporation has also developed a high-voltage, large-capacity optical trigger thyristor having the same electrical characteristics as the electric trigger thyristor and a minimum light-triggering power of 7mW. At the same time, the Corporation developed an LED array module with a minimum optical output of 100mW using bundled fibers that enables satisfactory high-gate drive of the optical trigger thyristor. The article discusses the construction and characteristics of these items.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 13~21 (1983)

Equipment for SF₆-Gas-Insulated Converter Stations

by Eiji Kawagoe, Mitsumasa Imataki, Yoshio Higashimaki,
Yoshikatsu Honda & Toyokazu Koan

The developments described in the article were made to improve the reliability and reduce the size of fully metal-enclosed thyristor valves, converter transformers, DC reactors, DC switchgear, and their connecting buses, for use in converter stations. The article introduces a 125kV, 600A HVDC thyristor valve, its components, an oil-insulated converter transformer, and a DC reactor, which were manufactured on a trial basis as part of the development. It also gives the results of a long-term DC voltage-endurance test performed after assembling the individually tested prototypes.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 40~41 (1983)

The Extended Range of MACTUS Integrated Instrument and Control Systems

by Kenji Hashimoto

To meet the demand for products with higher quality and higher added value, Mitsubishi Electric has completed a thorough upgrading of our MACTUS line-up by adding microprocessors, custom-made LSIs, etc. and improving the technical requirements. The series has been strengthened in terms of its hardware, engineering capabilities, and the expanded functions of its man-machine systems. The result is a complete line suited to meet the demands of the widest variety of applications.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 22~26 (1983)

A Control and Protection System for HVDC

by Yoshinobu Harumoto, Kanji Katsuki, Tetsuro Shimomura
& Hiroshi Nagasawa

Attention is being given to the potential application of DC transmission to long-distance and bulk power transmission and to the interconnection of power-transmission systems. One of the key problems of dealing with high-voltage direct current (HVDC) is how to develop highly reliable control and protection equipment. The article describes a highly reliable digitalized control system for a model SF₆-gas-insulated converter station jointly developed by the Kansai Electric Power Co. and Mitsubishi Electric. The article focuses on the basic power-system analytical techniques, gives an outline of the equipment, and introduces the test results.

アブストラクト

分散形総合計装制御システム《MACTUS 800》ファミリー 山上信太郎・河合一洋・志岐紀夫

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P42～45

近年のエレクトロニクス技術の進歩によって、ディジタル計装制御システムも分散形を中心として発展してきた。当社も《MACTUSシリーズ》として、既に多くの納入実績を誇っているが、この度これらの経験をもとに、更に進歩した《MACTUS 800》ファミリーを開発したので紹介する。

1ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリー 土屋輝彦・森 俊吾・成原弘修・安藤 隆・古谷悦一

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P57～61

1ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリーは、汎用形2機種、高機能形2機種、合計4機種をシリーズ化しディジタル計装システムへの適用を図っている。

本稿では各機種の機能、仕様、を紹介するとともに、カスタムLSIなどの新技術の採用による高信頼性、及び高度な制御理論に基づく適用例の概要などを紹介し、ディジタルの持つ機能を最大限に発揮した最新の1ループコントローラについて述べる。

総合計装制御システム《MACTUS 710》

古木寿人・浅野光雄・古屋鍵司・今田達裕・石崎 貴

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P46～50

三菱マルチコントローラ《MACTUS 710》は、三菱総合計装制御システムの中核機種として、大幅な機能アップを図り新登場した。シーケンス制御、DDCをはじめ、高級な制御を実現するために開発した高機能マルチコントローラである。ユーザー各位の要求にそって、各種命令語の充実、浮動小数点演算、リモート入出力、大容量化、RAS機能の充実などを実現し、《MACTUSシリーズ》の中核として幅広い活躍が期待されている。

光ファイバセンサの原理と応用

久間和生・田井修市・布下正宏・佐藤 建・吉永 淳

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P62～66

光ファイバセンサは、高絶縁性、無誘導特性、本質防爆安全性など優れた特長をもっている。本稿では、筆者らが開発したGaAsの光吸収特性の温度依存性を利用した光ファイバ温度センサ、鉛ガラス、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶の光ファラデー効果を利用した光ファイバ磁界センサ、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のポッケルス効果を利用した光ファイバ電圧センサの原理、性能、及び変圧器をはじめとする電力機器への適用例について紹介する。

総合計装制御システム《MACTUS 600》ファミリー

松本公雄・清宮忠昭・安居院憲彰・片岡猪三郎・大久保龍二

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P51～56

エレクトロニクス技術及びソフトウェア技術のめざましい進歩は、我々の社会システムに一大変革をもたらしている。プロセス産業の分野では、生産性の向上のための自動化から新製品生産のための高度な自動化、更には情報技術を駆使した企業の合理化、省力化が広範囲にわたり、いわゆる生産ラインからデータ管理室に至る企業全体の企業オートメーションへの変遷が予測される中で、有機的なトータルシステムをねらった《MACTUS 600》ファミリーの概要を述べる。

トランスミッション用異音検出器

深田浩一

三菱電機技報 Vol.57・No.10・P67～69

自動車用トランスミッションの生産ラインでは、最終検査で聴感による異常音チェックを行っているが、これを自動化するための自動検査装置を開発した。この装置は、発生音の周波数スペクトルを、良品から得られた基準データと比較する方法を採用している。

本稿では、この装置の構成、概要などについて紹介する。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 57~61 (1983)

MACTUS 200 Single-Loop Controllers

by Teruhiko Tsuchiya, Shungo Mori, Hironobu Narihara, Takashi Ando
& Yoshikazu Furutani

The MACTUS 200 series includes two general-purpose types and two high-performance types applicable to digital instrumentation and control systems. The article describes the four types, discusses how technical advances, including the use of custom LSIs and some applications of sophisticated control theory, have boosted their reliability, and gives details of the functions and specifications of these latest single-loop controllers.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 42~45 (1983)

MACTUS 800 Distributed Instrumentation and Control Systems

by Shintaro Yamagami, Kazuhiro Kawai & Norio Shiki

Recent advances in electronic technology have encouraged the intensive development of distributed digital instrumentation and control systems. Based on a wealth of experience in supplying the MACTUS series, Mitsubishi Electric has recently developed the new MACTUS 800 family of improved distributed instrumentation and control systems. The article introduces the members of this new family of systems.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 62~66 (1983)

The Principles and Applications of Fiber-Optic Sensors

by Kazuo Kyuma, Shuichi Tai, Masahiro Nunoshita, Ken Sato
& Kiyoshi Yoshinaga

Fiber-optic sensors are characterized by excellent insulation and noninductive characteristics and are inherently explosion-proof. The article describes how the authors developed fiber-optic temperature sensors using the temperature-dependent optical absorption characteristic, fiber-optic magnetic-field sensors employing Faraday's effect on flint glass and single crystals of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, and fiber-optic voltage sensors utilizing Pockels effect on single crystals of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. The article goes on to describe the principles, and the performance of these fiber-optic sensors and their use in high-voltage power machines, especially transformers.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 46~50 (1983)

The MACTUS 710 Integrated Digital Instrumentation and Control System

by Hisato Kogi, Mitsuo Asano, Kenji Furuya, Tatsuhiro Imada
& Takashi Ishizaki

The Mitsubishi multicontroller MACTUS 710 has recently been marketed as the key control equipment in the Corporation's overall instrumentation and control system line-up. In addition to significantly upgraded capabilities, the MACTUS 710 provides a variety of sophisticated functions, including sequence control and direct digital control. This user-oriented control equipment meets the demand for improvements in instructions, floating-point calculations, remote input/output, large capacity, reliability, availability, and serviceability, and is expected to play a leading role in full-scale instrumentation and control systems.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 67~69 (1983)

A Transmission-Noise Tester

by Koichi Fukada

This equipment was developed for automatic testing of transmissions for noises at the final phase of inspection on automobile transmission assembly lines. The noise-testing system compares the frequency spectrum of the noises generated with reference data from satisfactory products. The article introduces the mechanism and gives an outline of the equipment.

Mitsubishi Denki Giho : Vol. 57, No. 10, pp. 51~56 (1983)

MACTUS 600 Integrated Instrumentation and Control Systems

by Kimio Matsumoto, Tadaaki Kiyomiya, Kensho Agui, Isaburo Kataoka
& Ryuji Okubo

Remarkable developments in electronic and software technologies are having a revolutionary effect on modern society. These developments are also profoundly affecting industrial process lines, whether it is in automation to improve productivity, advanced automation to produce new products, or even in the use of information-processing technology to rationalize business operations and reduce labor requirements. The Mitsubishi MACTUS 600 series features integrated instrumentation and control systems that span all these areas, from the production line to the electronic data-processing department, and comprises an organic total system for the foreseeable implementation of corporation-wide automation. The article introduces the MACTUS 600 series.

新しい直流送電技術の開発

松村 晋*・富永正太郎**・桑原 宏***・永井 信夫†

1. ま え が き

我が国では、昭和48年に500kV送電時代を迎えたがこれと期を同じくして、次期電力輸送問題が審議され電気事業共通の課題として1,000kV級のUHV交流及び直流送電の技術開発の検討が始められた。その後UHV送電特別委員会が設置され、学識経験者、官庁、電力会社及び電機メーカーから構成される全国的組織のもとに、更に活発な研究が推進されている⁽¹⁾。

これと並行して関西電力(株)では、大容量電源の遠隔化に伴う長距離大電力送電、他社連系、短絡容量の増大など、将来の系統問題に対する諸方策の検討を始めたが、直流送電技術の導入が一つの有力な解決手段になり得ようとの期待のもとに、新技術開発を含めてこの面の研究を推進することになった。もちろんこれには、我が国を含む世界各地で、既に多くの直流送電が実施されており、また変換装置の中核であるサイリスタバルブとその制御装置に用いられている各種の電子部品や補助部品などが、ここ数年のうちに格段と改善され、変換システム全体としての信頼性、経済性が、以前の水銀バルブ時代のものと比べて飛躍的な向上を遂げ、今後更に急速な進歩が見込まれていることも要因になっている。

一方、三菱電機(株)では、既に昭和45年140kVの直流送電用サイリスタバルブを試作⁽²⁾し、この分野に先鞭をつけたが、この経験のほか多数の一般用直流機器製作の実績に見られるように、その優秀な技術をいかすべく、新しい直流送電用機器開発に強い意欲を持っていた。

このような背景から、関西電力(株)と三菱電機(株)は、昭和54年に直流技術開発に関する共同研究契約を結び、変換装置についての自励式と他励式の比較など、まず基本的問題について研究を行った。次いでこの成果に基づいて翌年「関西電力(株)直流技術研究会」が発足し、研究組織が拡大するに伴って、更に系統解析面についても共同研究の域を広げ、電力系統上から見た諸問題について幅広く検討を加えることになった。これらは将来の±500kV級を目標としたものであるが、特に変換所関係では、新しい交直変換所の開発を重要課題として精力的に研究を進め、このほどその第一段階である±125kVのガスサイリスタバルブをはじめとする直流機器の試作と試験など基礎研究を終了し、将来に対する見通しを得ることができた。これを機会に以下に新しく開発した直流送電用機器を中心に成果の概要を紹介する。

2. 重点課題とその検討

直流送電においては、送電線の所要相数が交流の場合の2/3でよく、鉄塔など送電設備の簡素化、小形化が図れる反面、交直変換所においては、送電容量相当の交流変換機器のほかに、交直変換のための変換機器とその付属設備が必要になる。したがって一般の交流変換所と比較した場合、機器の種類や数が多く所要面積も非常に大きくなり建設費も多額となる。更に変換装置そのものは、サイリスタを始

め各種の電子部品から構成され、またその制御には複雑な論理回路を形成する多くの電子装置が用いられている。このため従来の交直変換所では、その運転信頼度は必ずしも満足できるものではなかったことが報告されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

したがって直流送電の適否を論じる場合、変換所の問題としては、まず第一に交流変換所と同等の高水準の信頼度を期待し得るか否かが最も重要な問題であり、次いで変換所全体の所要面積の縮小化及び経済性に対する見直し、また、運転保守、事故時対応、周辺環境との調和等々について多面的に検討を進めることが必要である。

そこで共同研究では、将来の±500kV級大容量交直変換所を目標に、信頼性、小形化及び経済性の追求を重点課題とし、これらを満たす一つとして直流母線などをもSF₆ガス絶縁としたガス絶縁交直変換所が交流の場合⁽⁵⁾と同様に有望であろうとの観点から研究を進めることにし、具体的にサイリスタバルブとその他の関連直流機器について、以下のような方式や仕様の検討を行い、それらの実現性を確認するため、次章以下に述べる基礎研究と機器の試作及び諸試験を行うこととした。

2.1 変換方式

転流機能を自らの装置内に内蔵する自励式と、転流を連系される交流系統の電圧に依存する他励方式とが考えられる。前者は無効電力を任意に制御できるので運転の安定性が高く、また調相設備を大幅に削減できるなどの特長があり、優れた方式であることが判明したが、高電圧大電流用で自励方式に要求される高速のサイリスタの実現には長時間を要する見通しであったことなどから、現在全世界の通例となっている他励方式を採用することにした。

2.2 サイリスタバルブの方式

サイリスタバルブには従来から内部構造をモジュール積み上げ式とし、絶縁と冷却を空気絶縁と水又は空気冷却、あるいは油浸絶縁油冷却によった方法が実用されているが、ガス絶縁交直変換所に使用されるとの立場から、現時点で適用可能な最新技術や将来の発展性を含めて、改めて色々な方式について幅広く検討を行った。その結果、内部構造については絶縁設計面からモジュール積み上げ式とし、サイリスタバルブの絶縁と冷却の媒体としてSF₆ガスを使用する新しい方式(以下、ガスバルブと称す)が以下に述べるように有効であろうとの見解に達した。

今回のガスバルブとすれば、①絶縁信頼性が高い、②有効な冷却性能も期待することができる。また、屋外形の接地タンク構造となるので、③バルブ収納建屋が不要となり、④小形化、⑤環境との調和、⑥安全性に優れ、⑦ガス母線との接続が容易である。また、タンク内にサイリスタモジュールを堅固に取り付けることにより、⑧容易に高い耐震性能も賦与できるほか、⑨工場で組立て試験されたそのままの状態で現地に設置する全装可搬式として信頼性を高め、同時に建設時の現地工事を簡単にすることも可能である。万一事故の場合にも、⑩不燃性ガスであるため防災上有利であり、⑪バルブ間の接続構造を工夫することにより、取替時間の短縮を図りうるなど、多くの特長

* 関西電力(株)(工博) ** 三菱電機(株)本社(工博) *** 同伊丹製作所(工博) † 同制御製作所(工博)

表 1. 各種サイリスタバルブの比較

		空気絶縁水冷却方式	油浸絶縁油冷却方式	SF ₆ ガス絶縁ガス冷却方式
基本性能・構造	絶 縁	絶縁距離大	絶縁距離小 重量 大	絶縁距離小 高電圧化有利
	冷 却	冷却性能大 大電流化最適	冷却性能大 大電流化適	大電流化可能
	構 造	積み上げ構造 屋内形	接地タンク構造 屋外形	接地タンク構造 屋外形
	耐 震 性	片端支持のみなので対策要	大	大
	GIS との接続	バルブホール高所引出部への接続対策	油-ガスプッシングによる接続	接続容易 GIS との適合性大
	コンパクト化	バルブホール必要	適合性大	高電圧化でコンパクト化顕著
信頼性		バルブホールの性能により周囲環境の影響受ける。	周囲環境影響無し 高信頼度	周囲環境影響無し 高信頼度
保守・その他		交換ユニット小 (モジュール) 空気清浄化 除湿, 水質管理必要 バルブは現地組立	交換ユニット大 (バルブ) 絶縁油の劣化管理要 可燃性, 油取扱い不便 バルブは現地組立	交換ユニット大 (バルブ) 点検保守簡便 バルブは工場組立 全装可搬 変換所建設時間短縮
総合評価		実績有り, 高電圧化 大電流化可能 現状の主流方式	実績有り	高電圧化有利 高信頼度 ガス絶縁変換所への適合性高く将来性大

をもつほか、⑩構造が簡単であり一般変電所用機器に多数実用され、既に定着したと見られる SF₆ ガス技術により実現性も容易である。などである。以上を他の方式と比較して示せば表 1. となる。

サイリスタバルブとその点弧方式については、将来の光トリガサイリスタの実用を前提に検討を進め、個別トリガ方式や光貫通気密板などの技術課題についても同時に解決しておくことにした。しかし、光トリガサイリスタの実用化には、なお若干の年月を要する見込みであり、また本質的な問題とはならなかったため、125 kV の試作バルブでは、現在の実用サイリスタによる光間接点弧方式を使用し、ガスバルブとしての基本性能と将来性に対する見通しを調べることにした。

サイリスタバルブでは、直列接続するサイリスタ数は、侵入雷サージの値に左右され、この低減が直ちにコストダウンに連なることもあって、雷サージに対する最も効果的な保護方式を考えることにし、これまでの方式と異なって個々の素子と並列に酸化亜鉛素子とその非常用短絡装置をもつ過電圧保護装置を取り付けた方式（これを個別保護方式と名付けた）を考案して、各素子にかかる過電圧を直接抑制し、かつ均等化することにした。

サイリスタの制御に関しては、従来の交直変換所の故障の多くが制御系に起因していたことを重要視し、多重化の容易性、演算の高速高精度化、部品点数の小形化、簡素化などを考慮して、ディジタル化を行うことにし、これを基本制御部に適用することにした。これらの技術は、進歩が極めて早く、集積化の発展など、とともに今後更に広範囲に使用されることによりバルブの ON-OFF 制御、正負の極

制御、及び系統を含めた交直変換所全体の制御などの各段階についてそれぞれ独立に最適設計が可能で、これらの組合せにより小形、経済的で最も信頼度の高いシステムを構成することが期待できる。

2. 3 その他の直流機器

直流回路に用いられる断路器 接地開閉器、母線などは交流開閉装置で実績のある圧力 4 気圧の SF₆ ガスで絶縁するガス絶縁開閉装置方式とした。

また、交直変換所経済設計の基盤である絶縁設計の合理化には、優れた避雷器が必要となるが、この直流回路保護用の避雷器は、ガス絶縁方式のギャップなし酸化亜鉛形としたが、一般の交流用酸化亜鉛素子を直流回路に用いた場合には劣化特性上好ましくない傾向があったため、直流専用の酸化亜鉛素子の開発を行うこととした。なお変換器用変圧器及び直流リアクトルに関しては、従来の油浸絶縁油冷方式を用いることにした。

3. 直流ガス絶縁機器に関する基礎研究

前章に述べたように、サイリスタバルブの絶縁と冷却に SF₆ ガスを用いることにした背景には、交流での SF₆ ガス応用の技術が確立している点が挙げられるが、直流への適用に先立って、以下のような基礎的検討を綿密に行った。

3. 1 固体絶縁物

直流課電では交流の場合と異なり単純な抵抗分圧で電界分布が定まるが、交直変換所用機器としては極性反転時の蓄積電荷の影響や、微小残留異物の挙動についての検討が必要で、これらに対する実験を重ね、固体絶縁物の寸法や形状を決定するための基礎とした。また同時にガス循環による流動帯電の問題についても研究を進めた。

3. 2 SF₆ ガスによる冷却

サイリスタを効果的に冷却するためには、発熱源であるサイリスタに効率の高い冷却フィンを取り付けることと、多数の冷却フィンを SF₆ ガスの流れが効果的に冷却するように、サイリスタモジュールを構成することが重要である。基礎的な計算はもとより、ゲッチェン 形圧力風洞、ガス流実測用の 1/2 モデル、更には試作ガスバルブと等大の冷却モデルなどを作成し、これにより根気よく実用的な解明を積み重ねて、最適な冷却構造の検討を進めた。

この場合、ガス圧力が高いほど大きな冷却効果が得られるが、絶縁特性、ガスの物理特性、耐圧容器との関係などを検討し、結局、従来の GIS (Gas Insulated Switchgears) と同様、ガス圧力は 4 気圧とし、3,000 A 程度まで十分冷却可能であることを確認した。一方、ガス循環を行うためのガスブロウについても、これが SF₆ ガス中に設置されることと、長期間の無保守運転の必要性から、ガス中のベアリング部の潤滑の実用性能について、長期間にわたり多くの実験を行い安定運転のための解決策を見出した。

3. 3 ガスバルブの耐震性

一般にサイリスタバルブは、多数のサイリスタモジュールを順次積み上げて形成されるので、我が国では特にその耐震性に注意する必要がある。ガスバルブでは、容器の中に一括してモジュールを堅固に取り付けることができるので、本質的に高い耐震性を期待できるが、全装可搬の可能性をも含め効果的な支持方法を得るために耐震特性について計

算モデルによる綿密な解明を行った。

4. 試作と試験

以上に述べた方式の検討と基礎研究の結果に基づき、表 2. に示すように将来の ± 500 kV 級に対する手頃なモデルであることなどを考慮して、その 1/4 である 125 kV、600 A 定格のガス絶縁交直変換所用の直流機器を試作し、以下の諸試験を実施した。

4.1 ガスバルブの性能試験

スイッチング試験の必要性から、同一仕様のガスバルブを2本作成し、(図 1. 参照) これにより 2,000 時間の連続試験を実施した。

ガスバルブに対する電圧試験は、詳細な絶縁協調解析を行った後、個別保護方式であることを考慮の上、IEC-Pwb. 700 のほか、諸外国での多数の実施例を検討し、これらを満足する方法により実施した。また、モジュール間、素子間の雷サージ電圧分布について綿密な実測を行い、妥当であることを確認した。

その他、冷却に関する諸試験、耐震性及び全装可搬に対する検証の

ための実地震波による加振試験や、トレーラでの実走行試験などを行った。

4.2 長期課電試験

ガスバルブを除く直流機器全体に対しては、それぞれの単体試験完了後、30 年間の等価課電ストレスを与えるため極性反転機能のある直流電源に接続して、定格電圧の 1.3 倍を課電し、これを 1 日に 2 回極性反転させながら 1 年間の長期課電試験を行った。また、直流リアクトルと直流避雷器及び接続母線の一部に加える電圧には実交直変換所のリップル効果を考慮し、360 Hz の高調波を重畳させた。図 2. にこの長期課電試験の状況を示す。

4.3 モデルプラントによる変換機能試験

交直変換所用機器を総合して、機能を全体として検証するために、ガス絶縁交直変換所モデルプラントを昭和 55 年 12 月、三菱電機(株)伊丹製作所構内に設置した(図 3. 参照)。

このプラントは、モジュール 6 個をグレッツ接続し、125 kV 用と同一のタンク内に収納したガスバルブ 2 台を中心とする 16 kV、600 A、9.6 MW の Back-to-Back 構成の交直変換設備であり、制御基本部にはデジタル制御が採用されている。試験は起動、停止、潮流反転などの基本機能はもちろん、人工故障による異常動作試験など可能な限

表 2. 試験用機器及び装置一覧

機 器 名 称	方 式	定 格	製作 台数
サイ リ ス タ バ ル ブ	SF ₆ ガス絶縁ガス冷却方式 シングルバルブ、屋外形	125 kV, 600 A	2
長 期 課 電 試 験 用 供 試 器	直 流 開 閉 装 置 (断路器、接地開閉 器、接続母線)	SF ₆ ガス絶縁	1 式
	直 流 避 雷 器	SF ₆ ガス絶縁 ギャップなし酸化亜鉛形	2
	直 流 電 圧 変 成 器	SF ₆ ガス絶縁 抵抗分圧器形、直流増幅器付き	1
	直 流 リ ア ク ト ル	油浸絶縁油冷	1
	ブ ッ シ ン グ	油浸形及びガス封入形	各 1
ガ ス 絶 縁 交 直 変 換 所 モ デ ル プ ラ ン ト 用 供 試 器	変 換 装 置	SF ₆ ガス絶縁ガス冷却方式 サイリスタモジュールの 6 相グ レッツ結線	2
	変 換 器 用 変 圧 器	油浸絶縁送油風冷式	2
	直 流 リ ア ク ト ル	油浸絶縁送油風冷式	2
	直 流 ガ ス 絶 縁 開 閉 装 置 (断路器、接地開閉 器、接続母線)	SF ₆ ガス絶縁	1 式
	直 流 変 成 器	SF ₆ ガス絶縁 抵抗分圧器形、直流増幅器付き	2
	直 流 変 流 器	可飽和リアクトル直列形 可飽和リアクトル並列形 ホール素子形	8
	制 御、保 護 装 置	直流制御盤、直流保護盤 監視盤、交流保護盤、LRTC、 AQC 盤	1 式
	受 電 設 備	交流開閉器 調相設備、交流フィルタ	1 式

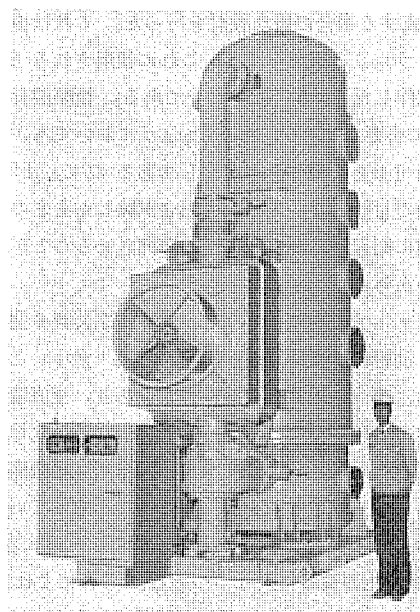


図 1. 125 kV、600 A SF₆ ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ (ガスバルブ)

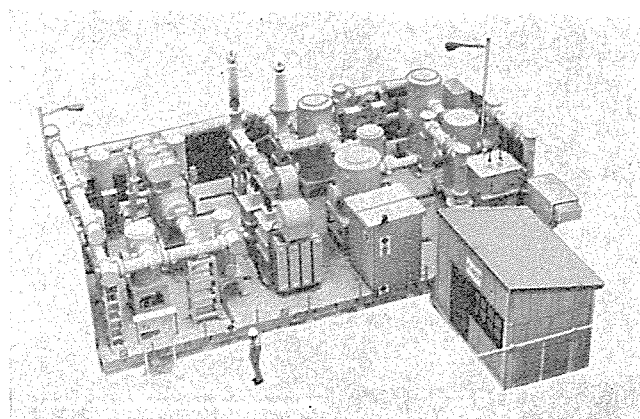


図 2. 125 kV 長期課電試験設備とその状況

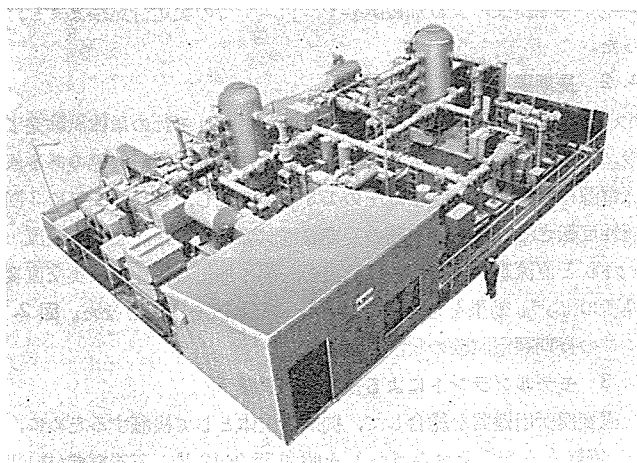


図 3. ガス絶縁交直変換所モデルプラント
(DC 16 kV, 600 A, 9.6 MW, Back-to-Back 構成)

り広範多岐にわたって行い、いずれも良好な結果が得られた。

5. む す び

以上述べた試作試験を含む成果に基づいて、 ± 500 kV 級変換所をガスバルブで構成する場合の概念設計を行った。これは直列接続された 250 kV 級ブリッジ 2 組からなり、これに使用されるガスバルブは基本的に今回試作した 125 kV 級と同一である。概略設計によれば、 ± 750 kV 級に必要な 250 kV 級のガスバルブにおいても、寸法、重量の面とも全装可搬を実現できる見通しであるので、 ± 500 kV 級においては所期の目標通り、工場内で組立試験したままの状態で全装運搬し、現地に据付け、高い信頼性を発揮させることが十分可能であることがわかった。

またサイリスタバルブのみならず、その他の開閉装置や関連機器をもガス絶縁し、油絶縁の変換器用変圧器や直流リアクトルと直結することに関しても、交流の場合と同様に容易であり、交直変換所全体の小形化に対する確信が得られた。経済性に関しては、立地条件その他に左右される要素が大きいが、交流におけるガス絶縁開閉装置の普及率などからも明るい見通しを得られるものと考えている。なおサイリスタ素子の進歩は当初の予想よりも急速であり、大容量の光トリガサイリスタが実用化の段階に入りつつある。これによれば、高電位部のゲート回路が不要となり、更に素子電圧の向上に伴って直列数

が減るのでバルブの高信頼度化、小形化及びコスト低減が同時に進展して行く見通しである。

以上のとおり、将来の ± 500 kV 交直変換所に対する基礎研究の第一段階として行った各種の検討や、125 kV 直流機器とモデルプラントの試作及びそれらに対する試験を好成績のうちに終了し、多くの技術データを蓄積することができた。その詳細については本誌別稿⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に譲るが、これにより目標に対する技術的基盤を固め得たと考えている。なお今後ともサイリスタ素子その他の技術の進歩を取り入れ、更に創意と工夫をこらし、より優れた変換所を目指して研究を進めたいと考えている。

最後にこの研究の推進に御尽力いただいた「関西電力(株)直流技術研究会」及びその他関係各位に、深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 山田：「特集：UHV 交流送電 I 総論」電学誌，102，(昭 57-11)
- (2) 大野ほか：油冷・油浸構造による屋外形サイリスタ高圧バルブ，三菱電機技報，45，No. 6 (昭 46)
- (3) Rumpf E et al：Survey of the Performance HVDC Systems Throughout the World during 1975~1978 CIGRE 1980 Report 14-08
- (4) J. Kundsén et al：A survey of the Reliability of HVDC Systems Throughout the World during 1979~1980 CIGRE 1982 Report 14-06
- (5) ガス絶縁変電技術，電気共同研究，第 36 巻，第 3 号，P. 15 (昭 55-10)
- (6) 松村ほか：「SF₆ ガス絶縁交直変換所の開発」S 58 電学会全大，S 10-3-5
- (7) S. Matsumura et al：New Approach to SF₆ gas insulated HVDC Converter Station，IEEE/PES 1983 Winter Meeting
- (8) 田辺ほか：直流送電用ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ，三菱電機技報，57，No. 10 (昭 58)
- (9) 川越ほか：ガス絶縁交直変換所用機器，三菱電機技報，57，No. 10 (昭 58)
- (10) 阿部ほか：ガス絶縁交直変換所モデルプラント，三菱電機技報，57，No. 10 (昭 58)

直流送電用ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ

田 邊 忠 夫*・大 沢 喜 信**・山 本 吉 彦***・丸 谷 朋 弘***・佐 志 田 伸 夫**

1. ま え が き

関西電力(株)と三菱電機(株)は直流技術の開発について共同研究を行っているが、将来のガス絶縁交直変換所に使用されるサイリスタバルブについて各種方式の比較検討⁽¹⁾を行い、高気圧のSF₆ガスを絶縁媒体としこのガスを強制循環させてサイリスタ素子などの発熱部品の冷却を行うSF₆ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ(以下、ガスバルブと称す)が、表1.のように信頼性をはじめ多くの特長を持ち有望であろうと研究を進めている。

今回、ガスバルブの基礎設計技術を確立し、将来の500kV級への見通しを得るため、125kV、600Aのガスバルブを試作し、各種の試験を行い好成績を得ることができた。以下にその概要を紹介する。

表 1. ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブの特長

項 目	特 長
信 頼 性	<p>○SF₆ガスで絶縁されているので、環境の影響などを受けず絶縁の信頼性が高い。</p> <p>○絶縁及び冷却の媒体がSF₆ガスで一元化され冷却系が簡素な構成となる。</p> <p>○絶縁及び冷却の媒体であるSF₆ガスは不燃性のため火災の危険がない。</p> <p>○密閉構造で組立後全装輸送ができるため、輸送及び据付け時における雰囲気の影響を受けず、工場試験時の品質を保つことができる。</p> <p>○電子部品が均質なSF₆ガス中に収納され、酸化、汚損の影響が低減されるため高信頼度化が図れる。</p> <p>○接地タンク形で耐震性が高い。</p> <p>○他のガス絶縁直流機器との組合せも簡単である。</p>
コ ン パ ク ト 性	<p>○SF₆ガスの優れた絶縁特性のため、絶縁距離が短くてすみ、高電圧化に有利である。</p>
経 済 性	<p>○密閉構造で屋外設置が可能なので、サイリスタバルブを収納する建屋が不要となり、敷地面積を縮小できる。</p> <p>○組立後全装輸送が可能なたため据付けが簡単で短期間となる。</p>

2. 設計上の留意点

ガスバルブは今回初めて開発するものであり、これに必要な事項のほか、今後の一般的設計指針を得るため、将来の技術進歩を十分配慮の上、綿密な検討を行った。以下、その主な事項について述べる。

2.1 基本方針

高信頼度、小形、経済性などの基本条件についてはいうまでもないが、設計の検討に先立ち、具体的に基本方針とした事項を挙げると次のとおりである。

①サイリスタ素子としては、近い将来、実用化が予測されている光トリガサイリスタの採用を前提とする。②屋外設置全天候形としバルブホールは設けない。③工場て組立、試験後全装のまま現地へ輸送できること。④簡易な運転と無保守無点検化を図る。⑤事故時には簡単な作業により、迅速に復旧が可能ること。⑥内部点検に対しては、

作業の簡易化、部材の互換性を図る。⑦工場生産時の作業能率の向上、標準化について配慮する。

2.2 電気回路設計

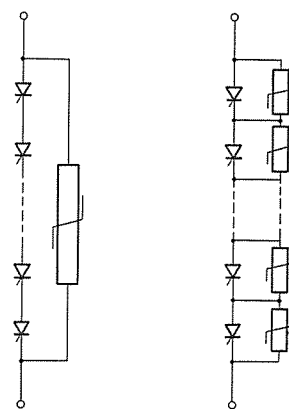
ガスバルブでは、SF₆ガス中の直流絶縁特性の検討が基本的課題であることはいうまでもないが、これについては本誌別稿⁽²⁾⁽³⁾に詳しく紹介しているので、ここでは電気回路設計から述べることにした。この場合、主回路の事故防止対策が信頼度の上から最も重要であり、また使用サイリスタ素子数の決定が経済性の面にも大きな影響を与えるので、これらを中心に綿密な検討を行った。

2.2.1 主回路事故防止対策

サイリスタバルブにおいては、サイリスタ素子の事故が重大事故に進展するので、サイリスタ素子個々の事故防止が最も重要である。直流送電用サイリスタバルブの事故原因を大別すると、まず第一に雷サージなど素子に加わる過電圧によるもの、次いで点弧回路の故障からの発展によるものが挙げられる。これらに対する設計上の要点は次のとおりである。

(1) 耐雷設計

雷サージに対する保護としては、従来から基本的には避雷器の設置によっているが、これまでは、図1.(a)に示すように避雷器をサイリスタバルブの端子間に設置する一括保護方式が採用されてきた。しかし、今回は更に保護効果の向上を図るための検討を重ね、次に述べる理由から、同図(b)に示すとおり、個々のサイリスタと並列に避雷器を設置する個別保護方式ともいべき新しい方式を考案し採用した。①避雷器は被保護機器に近接して設置するほど効果的である。②ギャップなし酸化亜鉛形避雷器の適用を考えると、ギャップの微妙な調整が不要な上、放電のばらつきが小さく安定した保護効果が期待できるので、この面についてガスバルブ内に内蔵する上での不安はない。③現状でも部品配置を工夫することにより、占有率よく十分内蔵可能であるが、将来はサイリスタ素子の定格電圧の上昇による直列数の低減に伴い、更に容易に収納できると考えられる。



(a) 一括保護方式（アームアレスタ方式） (b) 個別保護方式

図 1. サイリスタバルブの過電圧保護方式

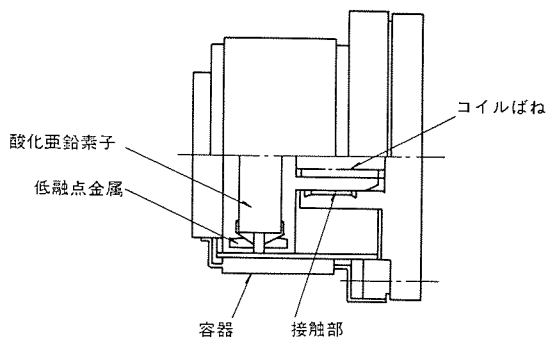


図 2. サイリスタ 個別保護用過電圧保護装置内部構造

この個別保護方式によると、次の利点がある。①各サイリスタ素子に加わる過電圧は酸化亜鉛素子の制限電圧で決まるので各素子には、ばらつきの小さい均等な電圧が加わる。更に、素子故障でサイリスタ直列数が変わった場合でも各サイリスタに対する保護効果に変化がないので、サイリスタ直列数が低減できる。②モジュール分圧コンデンサが省略できる。③次項で述べるように強制点弧回路の電圧検出用として活用できるなどである。

図 2. は、個別保護用に開発したサイリスタ過電圧保護装置の構造図で、酸化亜鉛素子をセラミック容器内に収納し、更に被保護サイリスタに不点弧が生じ、連続して負荷電流が流れた場合、酸化亜鉛素子が熱破壊するおそれがあるので、この防止のため逆にこの熱を利用して周囲の低融点金属を溶解し、短絡するよう工夫している。

(2) 点弧回路設計

先にも述べたように点弧回路の故障は、サイリスタ素子故障に発展するので、次の三つの回路を採用し、この防止に万全を期した設計とした。

(a) 個別点弧回路

これは一つの点弧回路が故障しても、他の素子の点弧に影響がないよう、大地電位にあるバルブ制御回路の発光部からサイリスタ素子までの回路をすべて独立させる方式で、将来光トリガサイリスタ実用の場合にも、そのまま適用可能である。

(b) 冗長点弧回路

これは隣接するサイリスタの点弧回路間で点弧信号を互いに送受信し、自ら点弧できない場合は、相手側の信号で点弧できるようにした回路である。

(c) 強制点弧回路

万一点弧系に故障が生じ、サイリスタが点弧できない場合、その素子には過電圧が加わるので、この電圧に比例して流れる過電圧保護装置の電流を検出し、サイリスタを点弧する回路である。

図 3. はこれら点弧回路の構成である。なお、サイリスタの点弧用エネルギーはスナバー回路を通して自給する一方、点弧エネルギーの節減と発光素子の長寿命化を図るため狭幅パルスを採用した。

(3) 使用部品への配慮

サイリスタバルブでは、サイリスタ素子のほか多数の抵抗、コンデンサ、その他の電子部品類を使用するが、これら個々について高い信頼度が必要なことはいうまでもない。特にガスバルブの場合、ガス容器内に収納される部品は、その交換に極めて手数がかかるほか、ガスバルブの寸法、重量、性能などに大きな影響を与えるので、これらには、信頼度が高く小形で高性能な部品の選択に努めた。特に抵抗器は抵抗値の安定性のほか、発熱量も大きいので冷却性能の優れたものとし、コンデンサについても真空引き、高圧ガスに耐える構造とした。将来

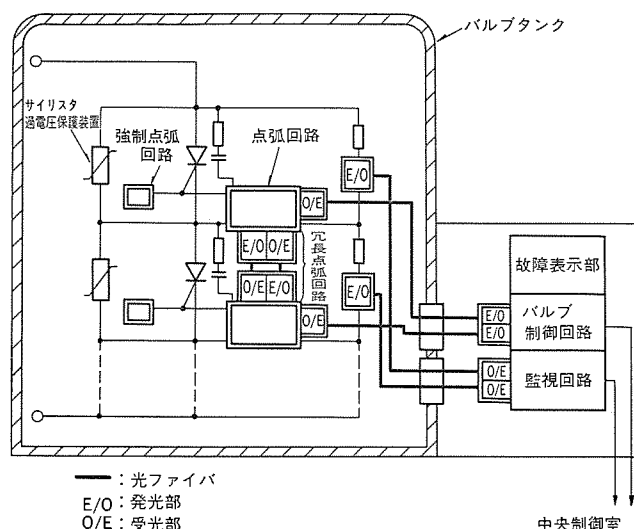


図 3. 点弧回路ブロック図

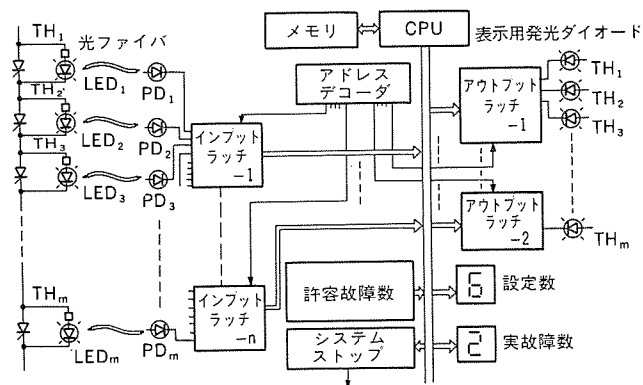


図 4. 監視回路

は、必要に応じてこれら部品のモールド化、一体化を図り、更に高度化を図りたいと考えている。

2. 2. 2 監視回路

サイリスタバルブの正常な運転のためには、健全なサイリスタ素子の数を常時正確に把握しておくことが必要であり、このため個々の素子状態を常時監視する方式を採用した。その回路構成を図 4. に示す。素子の故障判別には複雑な論理演算が必要なため、マイクロプロセッサを使用し、素子故障数を常時表示するほか、設定数以上の故障が生じた場合は、警報信号を発し、直ちに運転を停止するなど適切な処置を行うことができたようにした。

2. 2. 3 信号伝送系

大地電位の制御回路と高電位にあるサイリスタ間での点弧信号を含む信号伝送には、発光素子(LED)、光ファイバ、光コネクタなどを使用しているが、将来光トリガサイリスタに直ちに適用できるよう発光素子には、小形で高出力、高信頼度のGaAs系のものを、また光ファイバには、高い電気絶縁性能をもち、少ない損失で光伝送を行う高性能のシングルファイバと、各種光コネクタを開発して採用した。この場合、タンク壁を気密を保ったままファイバを貫通させる必要があるが、光ファイバをエポキシ樹脂でモールドした図 5. に示す光貫通気密板を開発した。

2. 2. 4 サイリスタ直列数の検討

サイリスタ直列数は、サイリスタバルブのコストに直ちに影響するので、必要な信頼度を確保し、極力低減を図った適正な個数の決定が必要で

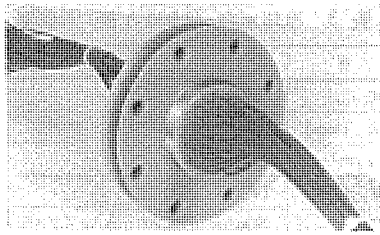


図 5. 光貫通気密板

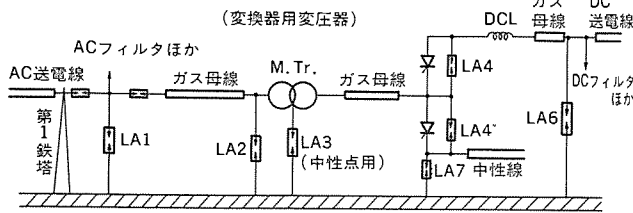


図 6. 雷サージ解析用交直変換所モデル

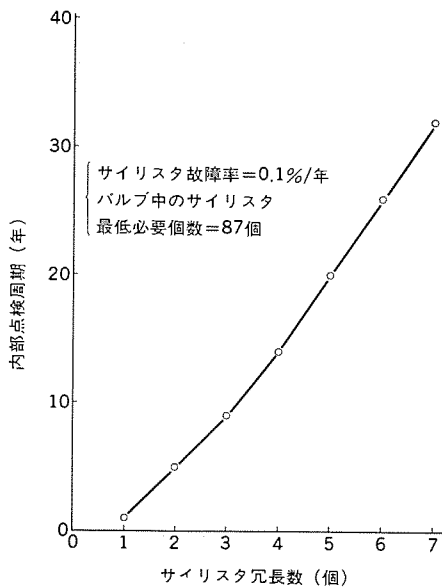


図 7. サイリスタ素子冗長数と内部点検周期

ある。

まず、直列数の基本は外雷サージに対し、耐雷設計上必要な個数の検討である。これには、例えば図 6. に示す雷サージ解析用回路によって交流側あるいは直流側の雷撃を考え、それぞれによるサイリスタバルブへの侵入過雷圧を計算し、その最大電圧を素子耐電圧で除して必要な直列数を求める。試作した 125 kV のガスバルブの場合には、必要直列数は定格 4 kV 素子で 87 個となったが、これは個別保護方式を採用した結果、従来に比べ 10 % 以上素子数の少ない値となっている。

次に、サイリスタ素子が事故の場合、直ちにサイリスタバルブを停止して素子の取替えを行う必要がないように、適当な冗長素子数を加算するのが通例である。冗長素子数は、内部点検周期と関連するが、従来これが詳しく検討された例は見当たらない。そこで今回は次のような考えによって検討することにした。これは、二項分布モデルを用いてサイリスタバルブの寿命計算を行うもので、サイリスタ素子直列数とサイリスタ当りの部品故障率から冗長数に相当する素子故障が発生するまでの時間を求め、これをサイリスタバルブの寿命と考えることとし、この寿命の期待値から逆に必要冗長数を決定する方法である。

サイリスタ素子あたりの故障率は、アメリカ軍用規格 MIL-HDBK-

217 C の値を基本に、三菱電機(株)の実績データとも照合して想定した。MIL の値は大気中で得られたものなので、大気中での故障発生要因中に占める酸化や汚損など、 SF_6 ガス中では起り得ない要因による分だけを差引いて故障率を修正し、その値を 0.1 %/年とした。

図 7. は、今回の 125 kV ガスバルブを対象に、冗長素子数と内部点検周期の関係を求めた結果で、ガスバルブの計算上の寿命が 25 年以上あれば、その内部点検周期が現行の交流ガス絶縁開閉装置の 12 年と同等であろうと考え、冗長数を求めると 6 個となる。以上から、今回の 125 kV ガスバルブの全直列数は $87+6=93$ 個となった。

なお、冗長数については、今後更に部品の長寿命化、制御回路の強化などにより大幅に節減できるものと考えている。

2. 3 冷却設計

(1) SF_6 ガス冷却の特質

サイリスタバルブ内では、体積の小さいサイリスタ素子個々に比較的大きな熱発生があるので、これらを効率よく冷却し、サイリスタ素子のジャンクション温度を一定限度内に抑えることが必要である。このためには、まず冷却媒体の熱輸送能力が問題になるが、 SF_6 ガスは、単位体積当りの熱容量で比較すると表 2. に示すように水の約 1/200、空気の約 20 倍の熱輸送能力をもっている。したがって、サイリスタ素子冷却用フィンの流路断面積は、水冷却の場合より大きくとる必要があるが、冷却媒体が 1 個の素子を通過した後の温度上昇を低くとることができるので、水冷却の場合と同様に直列に複数個の素子を冷却する直列フロー方式を採用することができる。

(2) サイリスタ素子冷却用フィンの検討

小形で冷却効率の高い冷却フィン設計するため、図 8. に示すゲッチェン形圧力風胴を用いて SF_6 ガスの強制循環冷却に対する種々の冷却フィンの特性を測定した。図 9. は、この結果をフィンの体積と熱抵抗の関係として示したもので、ほぼ設計どおりの結果が得られている。

表 2. 各種冷却媒体の比較

冷却媒体	空 気	水	SF_6 ガス (3 kg/cm ² ・g)
項 目			
比 熱 C_p (kcal/kg・°C)	0.241	1.00	0.172
比 重 量 γ (kg/m ³)	1,091	983	24.9
熱 輸 送 能 力 比 (単位体積当りの熱容量比)	約 1/20	約 200	1

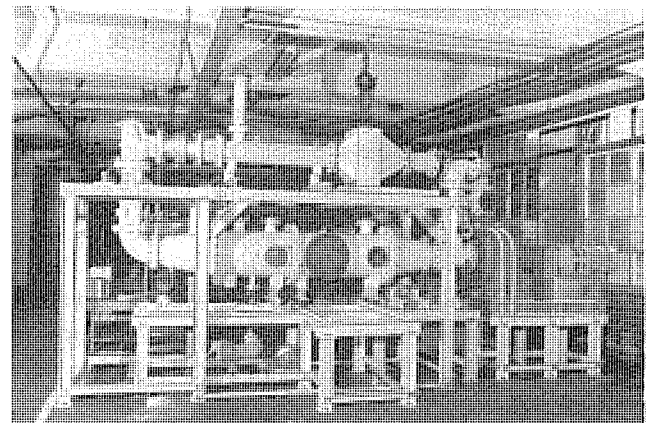


図 8. ゲッチェン形圧力風胴

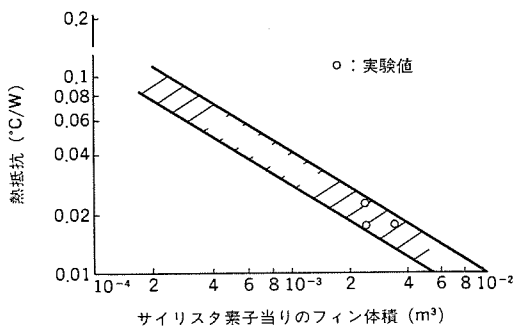


図 9. SF₆ ガス冷却におけるフィン体積と熱抵抗の関係

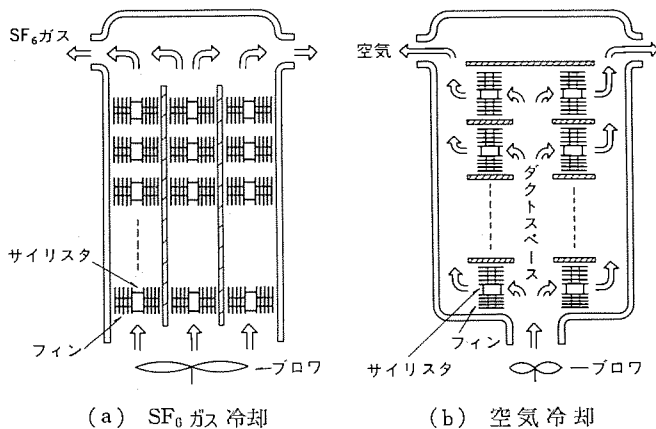


図 10. 各種冷却方式における冷却構造の概念図

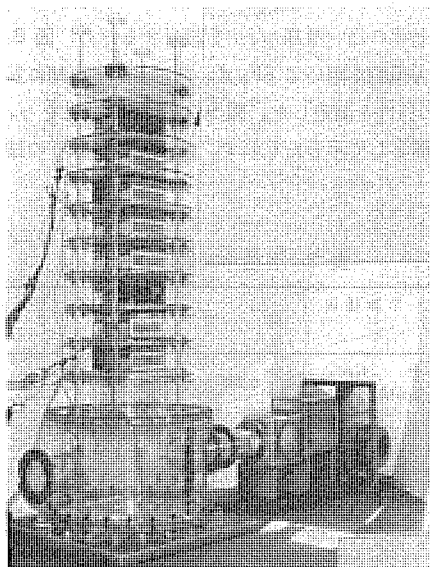


図 11. 冷却実験用 1/2 スケールモデルの測定状況

一般的に、大電流用サイリスタを冷却するには、フィンの熱抵抗として $0.01^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 程度とする必要があるが同図より、これに対するフィンの体積を求めると 0.006 m^3 程度となり、十分実用的な範囲にあることがわかる。

(3) 冷却構造

図 10. (a) は、前項(1), (2)を勘案して今回の試作バルブに適用した冷却構造を概念的に示したもので、SF₆ ガスはタンク下方のブロワより流入し、モジュール内にあるサイリスタ素子を並列に冷却する。一つのモジュールを冷却したガスはその上段のモジュールに入り、順次モジュールを直列に冷却する構造である。図 10. (b), (c) は、比較

表 3. 冷却モデル (3,000 A 級) の仕様

項 目	仕 様
形 式	加圧密閉循環方式
外 形 寸 法 (mm)	1,800(W)×2,800(L)×6,000(H)
使用圧力 (kg/cm ² ・g)	最大 5.5
熱 交 換 量 (kW)	75
ブ ロ ワ	30 m ³ /min 1,200 mmHg (ガス圧 4.0 kg/cm ² ・g)
模擬ヒータ発熱量	最大 2,000 W×28 個
抵 抗	最大 300 W×84 個

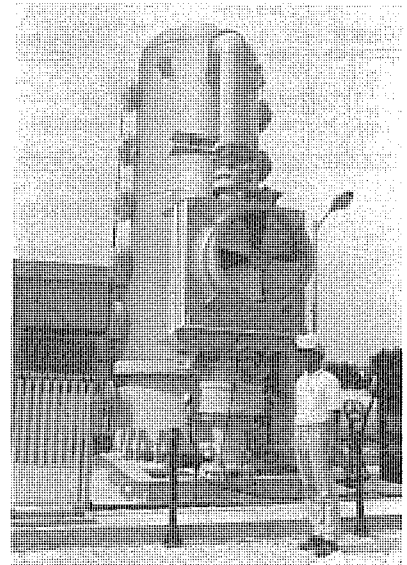
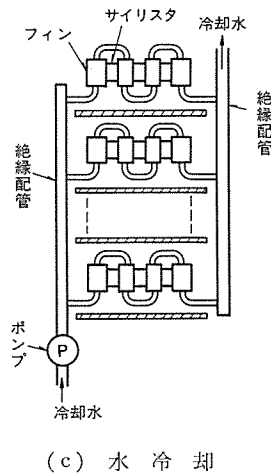
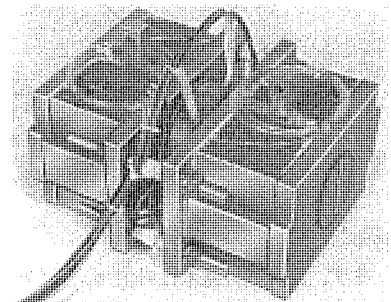


図 12. 冷却モデル (3,000 A 冷却試験実施状況)

図 13. 3,000 A 級サイリスタ冷却用試作フィン



のために空気冷却及び水冷却バルブの冷却構造を示した。検討にはガスの流れ、圧力分布や温度分布と構造の関係を、研究の進捗に合わせてより高度なモデルを使って進め、コンピュータを用いた理論解析も行いその結果の精度を高め補強した。

第一段階では、ガスバルブの断面を切り取った形状の二次元モデルで基礎検討を行ったうえ、次に図 11. に示すようにアクリル製のガスバルブの 1/2 スケールモデルを作り、合理的なガスの流れを得るための構造について研究した。

一方、ガスバルブの冷却性能の向上と大電流化に対する可能性を研究するため、表 3. に示す仕様の実物の冷却モデル (図 12.) を作り試験を行った。このモデルは、図 13. に示すような 3,000 A 級素子を対象とした冷却フィンと発熱要素を模擬した円板状ヒータをスタック状にして積み上げた直列フロー構造で、これによりフィン及びガスの温度、ガス流速分布、圧力分布など多くの測定データを得ることができた。

(4) 熱交換器の検討

ガスバルブでは、 SF_6 ガスを強制循環し温度上昇した ガスを空気と熱交換するため、ブロワ、熱交換器が必要である。ブロワは高気圧 SF_6 ガスの送風用として、気密構造に特別な配慮を行い電動機内蔵形を開発した。また、無保守化の面で問題となる軸受け及びその潤滑剤の寿命については、 SF_6 ガス圧力、温度、荷重の組合せを数レベル選定できる規模の長期寿命試験設備を用いて加速試験を行い、 SF_6 ガスに適合し約30年間の連続運転を可能とする方法を決定した。

(5) 最適設計法

ガスバルブの冷却系は、冷却フィン、熱交換器、ブロワとそれらの間を接ぐ配管などで構成するが、それら各機器の形状、寸法などを、温度、ガス流量、補機動力などをパラメータにして全系として最も効率的に選定する設計法について研究し、計算機を用いてこれを行うプログラムの開発を行い、最適設計を行う手法を確立した。

2.4 構造設計

今回の125 kV ガスバルブは、光間接点弧方式で試作せざるを得なかったが、ガスバルブの構造上、将来基本的な問題を生ずることがないよう十分考慮して検討を行った。

(1) 内部構造と配置の検討

サイリスタバルブでは、電気的に多数のサイリスタをその付属部品を含めて直列接続しなければならないが、これを構造的にいかに組み上げるかがまず重要な問題である。これについては、電界の集中がなく、できるだけ電位分布を均等にして絶縁上有利な配置にするとともに、製作面でも能率的であることなどを配慮し、モジュール積み上げ方式を採用することにした。

モジュールは組立や取替えに際し、取扱の軽量化と作業の簡便化を図るため、小形軽量とすることに努め、支持用架台から簡単に引き出せるようにスライド構造とした。この際、取替えの必要がないと考えられるアノードリアクトルは支持用架台上に固定することとしたので、引出し部のモジュールの重量は200 kg以下となった。

モジュールと収納容器との形状の関係については、再三検討を重ねたが、結局モジュールの形状はサイリスタのスタッキングと付属部品の取付け上、角形が有利であり、一方バルブタンクの断面形状は圧力容器のため円形が有利であった。そこで角形のモジュール周りへの積み上

げ構造部材や電界シールドなどの配置を工夫して円形タンク内の占有率の向上を図った。

(2) 耐震設計

モジュールの積み上げ構造を採用する場合、一般的に耐震強度が問題となるが、ガスバルブは密閉タンク構造なのでモジュールを一括してタンク上下で強固に支持できるため有利である。しかし、我が国では耐震性について十分な注意が必要なことから、図14.に示すような構造モデルを対象に計算機による解析を行い各部の変位や応力を求めた。

(3) 全装可搬の検討

ガスバルブでは工場での組立、試験の後、そのままの形状で現地に輸送し、高い信頼度と現地建設作業の簡易化並びに時間短縮が期待できる全装輸送として設計することが可能である。このため、形状寸法と重量を輸送限界内に納めるほか、横積み輸送時の動荷重に対する防振や強度面の検討を行った。更に組立作業性も配慮した上で、±750 kV 級に必要なガスバルブの概略設計を行い、それが現状の輸送限界内であることの見通しを得た。なお、今後サイリスタをはじめその他技術の向上によりガスバルブの小形軽量化が進むに従い、ますます有利になるものと期待される。

(4) 事故時の処理

サイリスタ素子など内部部品が故障し、その取替えが必要な場合、ガスバルブでは、バルブ単位の取替えにならざるを得ないため、極力取替え時間の短縮を図ることを考え、レッカ車などを用い1時間程度でそれをなし得るための構造を検討した。図15.はその概要を示しており、ガス処理時間の短縮をねらい、ガスバルブと外部ガス母線の間に小容積のガス処理区間を設け、ガス処理はこの区間に限定し、他はガスを充てんしたまま作業することにした。また、ガスバルブの移動時、バルブ端子とガス母線の端子間を接続あるいは切り離す必要があるが、ここにチュアリップコンタクトを設け、この作業を容易とした。

(5) その他実用性

ガスバルブは高気圧の SF_6 ガスを使用しているので、ガス漏れに対する配慮や特に屋外設置に対応して防湿、防滴に対する配慮が必要である。バルブタンク本体については、実績の多いガス絶縁開閉装置と同様の設計・製造法を適用し、これを解決し、バルブ制御箱については、多くの電子回路を収納し特に高い信頼性を要求されるため、これまでの一般用屋外形機器での経験の上に、防湿、防滴、温度変化に対し高性能部品を適用したほか、シールド、コーティングなどの密閉化構造に万全を期した。更に厳しい環境が想定される場合には制御箱内の空調も考慮する必要がある。

また、点検については、各種メータ類を制御箱内に集中し、監視

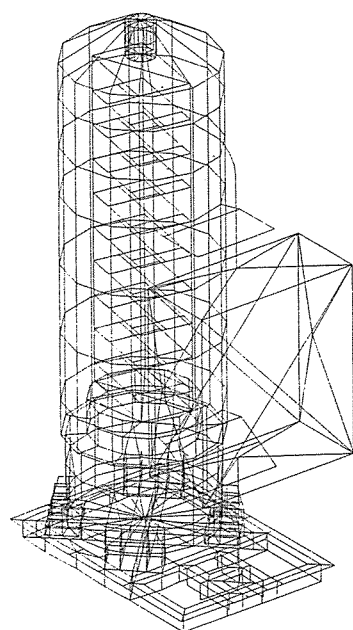


図 14. 耐震解析用構造モデル

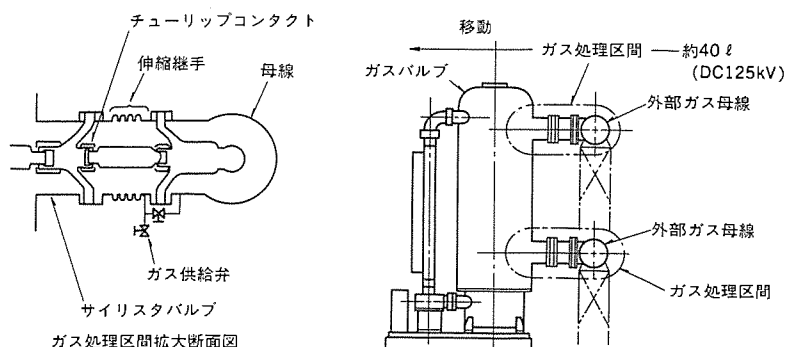


図 15. ガスバルブ取替作業時の作業区間

を容易としたほか、制御箱をバルブ接続端子取出側と反対方向に設け、通路側とすることで点検巡視を容易にした。サイリスタ素子故障数の表示と設定数を越えた場合の警報の出力以外に、ガス圧低下、ブロー、ファン停止、制御電源断などに対しても警報を出力し、ガスバルブの異常に対し迅速に対処できるよう配慮した。

3. 試作ガスバルブ (125 kV, 600 A) の概要

現状では、先にも述べたようにサイリスタ素子としては光間接点弧方式を採用せざるを得なかったが、ガスバルブの評価と 500 kV 級への発展の可能性調査に対しては、将来光トリガサイリスタ素子の実用時にも本質的問題を生ずることはないで、これにより 125 kV, 600 A のガスバルブを試作することにした。

(1) ガスバルブの構造

表 4. ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブの仕様

	項 目	仕 様
1. 定 格	(1) 容 量 (MW)	75
	(2) 直 流 電 圧 (kV)	125
	(3) 直 流 電 流 (A)	600
	(4) 定 格	100 % 連続
	(5) 冷 却 方 式	SF ₆ ガス強制循環風冷却方式
	(6) 定格交流電圧 (kV)	110
	(7) 周囲温度 (°C)	-20~40
2. 絶 縁	(2) 交 流 耐 電 圧	230 kV 1 分
	直 流 耐 電 圧	±230 kV 30 分
	雷 イン パ ル ス	±550 kV
	開 閉 イン パ ル ス	±460 kV
	(3) 交 流 耐 電 圧	192 kV 15 秒
	直 流 耐 電 圧	±214 kV 1 分
	雷インパルス及び開閉インパルス	±327 kV
3. 主回路	(1) 絶 縁 方 式	SF ₆ ガス 圧力 4 kg/cm ² ・g
	(1) 使用サイリスタ	FT-800 FV-80
	(2) 素 子 構 成	93 S×1 P 冗長素子数 6 S
4. 構 造	(3) ゲート点弧方式	光間接点弧方式
	(1) 構 造	1 アーム構成 接地タンク形
	(2) 外形寸法 (mm)	2,650(W)×3,700(D)×6,250(H)
5. 耐 震	(3) 重 量 (t)	16
	(1) 動 的	0.3 G 共振正弦 3 波安全率 1.5 以上

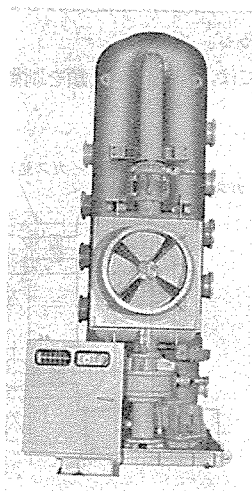


図 16. ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブの外観

試作したガスバルブの仕様を表 4. に、また外観と構造を図 16. 及び図 17 に示す。このガスバルブの寸法は、2.65 m (W) × 3.7 m (D) × 6.25 m (H) で、全重量は 16 t である。バルブタンクは上下に分割でき、下タンク上に絶縁台を取り付け、その上に 8 個のモジュールを絶縁支持柱を介して順次積み上げ、上部タンクからも絶縁支持柱で固定する構造である。これにより上から下まで一線上に配置された角形断面をもつ風胴を形成し、この中をタンク下部へブローによって吹き込まれた 30 m³/min の SF₆ ガスが下から上へ吹き抜けサイリスタと分圧用抵抗器を順次直列に冷却する。バルブ上部から吹き出した SF₆ ガスは熱交換器で空気と熱交換される。最上下段のモジュールからバルブアノード、カソード接続端子をタンク外部に引き出している。バルブ端子の反対側に熱交換器やブロー、バルブ制御箱を設けた。

各モジュールには 4 kV 定格のサイリスタ素子 12 個からなり、モジュールはすべて実装したので、全サイリスタ直列数は必要数 93 個より 3 個多い 96 個となっている。また、ガス圧はガス絶縁開閉装置と同一の 4 気圧である。

(2) モジュールの構造

モジュールの外観と構造を図 18. 及び図 19. に示す。またモジュールの回路構成を図 20. に示す。注型した絶縁風胴内に、素子 6 個を冷却フィンと共に組み上げたスタックとして収納し、その上に分圧抵抗器を配したほか、風胴の側面には、分圧コンデンサとゲートユニットを各々上下に 6 個ずつ固定し、このセット 2 組でモジュールを構成した。各モジュールには円形のシールドを設置した。また、2 組のセットの中央には、個別保護用の過電圧保護装置計 12 個が設置されていて、全体として非常にコンパクトで簡素な形状となっている。

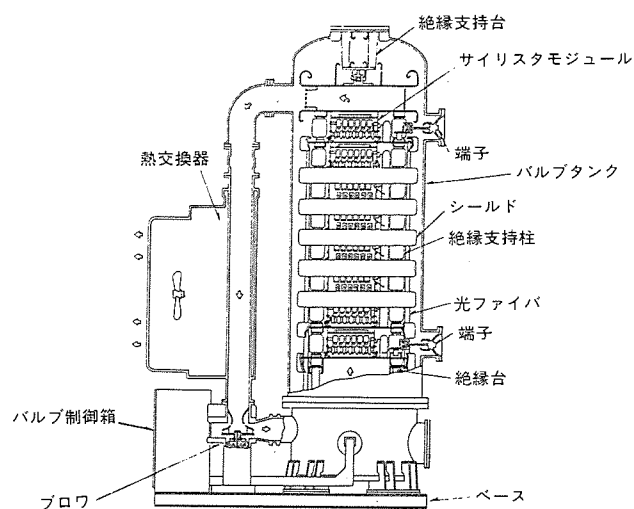


図 17. ガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブ組立構造

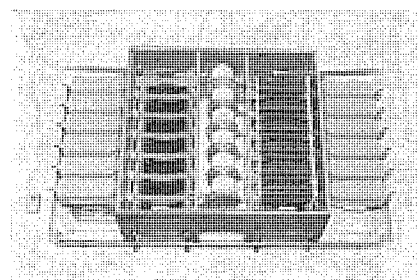


図 18. サイリスタモジュールの外観

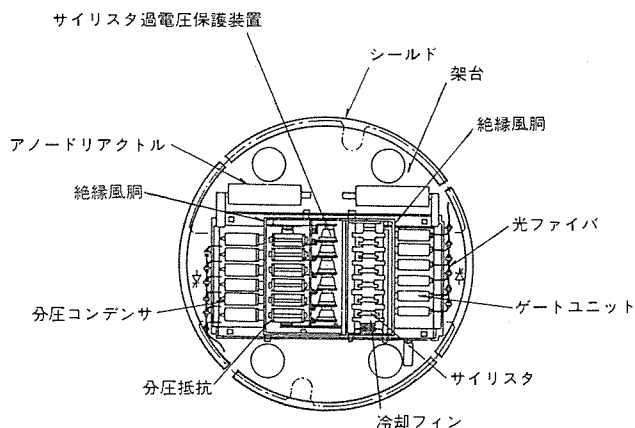


図 19. サイリスタモジュールの構造

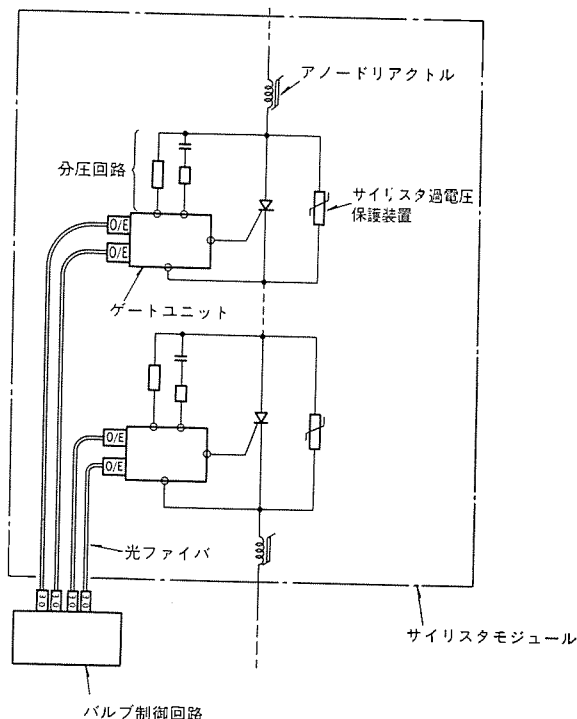


図 20. サイリスタモジュール 回路構成

4. 試作ガスバルブの試験

試作したガスバルブについて、設計の妥当性を評価するため各種の試験を実施した。試験は、IEC-Pub. 700 の直流送電用サイリスタバルブ試験規格を基本とし、国内外で論議されている各種の試験法⁽⁴⁾⁽⁵⁾を勘案して試験仕様を決定した電気試験(表 4.)のほか、耐震試験及び輸送試験などの機械試験を実施した。

サイリスタモジュールは、サイリスタバルブの構成単位であるため、サイリスタバルブと同一項目の電気試験を実施した。また、アーム短絡時の過電流責務に対する性能を検証する短時間電流試験のように、サイリスタバルブでの検証が困難なものについてはモジュールによる試験で見通しをつけた。主要内容を次に述べる。

4.1 電気試験

電気試験は、サイリスタ素子の実装数が設計値より多い96個となっているので、これに相応した電圧値を印加した。

(1) 対地絶縁試験

交流、直流、雷インパルス、開閉インパルス及び極性反転の各種電圧波

形について対地絶縁性の検証を行い、すべて良好な結果を得た。これらの中で極性反転試験については、通常直流電界下特有の現象である絶縁物表面の電荷蓄積の現象が問題となるが、今回のガスバルブでは基礎研究に基づき支持絶縁物形状の最適化を図っており、問題となることはなかった。

また、冷却ガスの循環による流動帯電については、ゲッチングン形圧力風胴によって実用のガス流速範囲内では、問題ないとの実験結果を得ていたが、今回のガスバルブでも実際にそれを確認した。

(2) 極間耐電圧試験

今回のガスバルブでは、個別保護方式としたので、過電圧保護装置を内蔵した状態で試験を行うことにした。したがって、雷インパルス、開閉インパルス試験とも極間にはこの制限電圧に相当する電圧が印加されることになるので、従来の一括保護方式の場合の試験電圧よりも低い値となることが特長である。図 21. は、開閉インパルス試験時の測定結果で、電源電圧の上昇とともに漏れ電流は急激に増加するが、極間電圧はほぼ一定値に制限されていることがわかる。これらの試験結果はすべて良好であった。

(3) 連続スイッチング試験

図 22. (a) に示す転流等価試験回路を用いて、2,000 時間にわたり、

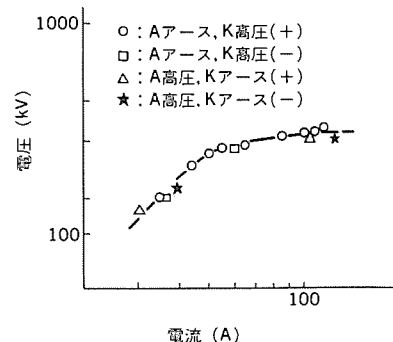
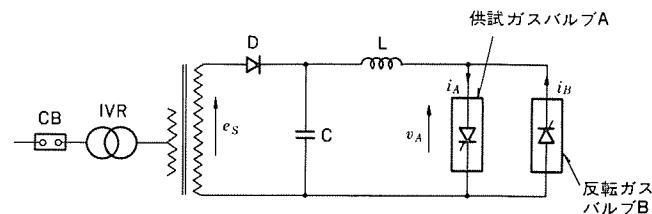
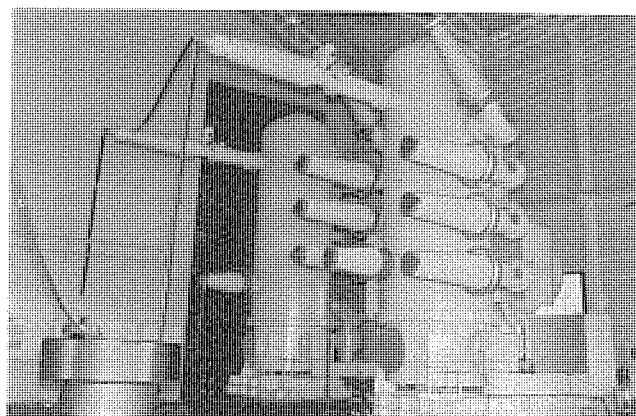


図 21. 開閉インパルス耐電圧試験時の印加電圧 - 漏れ電流特性



(a) 転流等価試験回路



(b) 試験実施状況

図 22. 連続スイッチング試験

試験電圧 100 kV から繰返し周波数 60 Hz でターンオンさせ、ピーク値 600 A、通電幅 1 ms の正弦波電流を流す連続スイッチング試験により長期安定性を検証した。試験中、異常は認められず、安定した性能を示した。図 22. (b) に試験実施状況を示す。なお、この試験で使った 2 台のガスバルブの内、1 台 (図 22. (b) の右) には、アノード及びカソード用ブッシングのほか、ガスバルブ内部の電位分布を測定するため、8 本のブッシングを設けた。

4. 2 温度上昇試験

ガスバルブの冷却性能を検証するため、サイリスタ素子に実動作時と等価な電力損失を与える正弦半波電流を通電して試験した。その結果、十分な冷却性能をもっていることが確認できた。更に、ガスバルブ内のガスの温度分布についても良好な特性が得られ、冷却設計の妥当性が確認できた。

4. 3 耐震試験

ガスバルブに 0.3 G 共振正弦 3 波のほか、エルセントロ地震及び宮城県沖地震の各種地震波を加え、加速度及びびびりなどガスバルブの応答を調べた。その結果、ガスバルブは、これらの各種地震波に対して十分な耐震強度をもつことが検証できた。

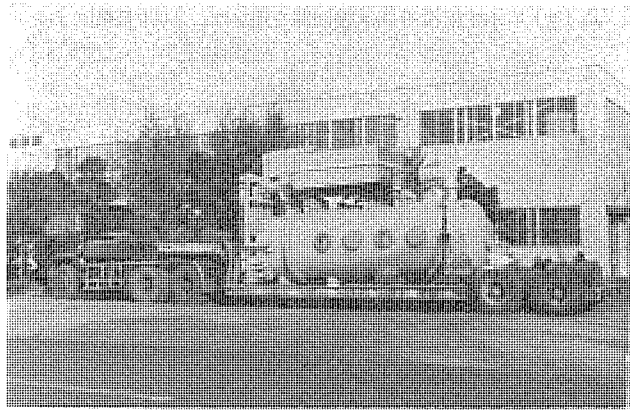


図 23. 輸送試験実施状況

4. 4 輸送試験

図 23. に示すようにガスバルブを全装状態でトレーに横積みし、約 200 km の輸送試験を実施した。試験の結果、輸送中の各部のびびり、応力などは小さく内外部とも破壊、変形、接続部のはずれ等もなく良好な結果が得られた。

5. ± 500 kV 級ガスバルブの見通し

直流 500 kV 級に対するガス絶縁については、既に固体絶縁物の試験モデルを製作し、直流電圧と電荷蓄積の関係、蓄積電荷量と絶縁破壊電圧との関係などについて、試験を繰返しデータを集積し絶縁設計の基礎を確立している。

ガスバルブの大電流化については、3,000 A 級まで試験済みであることは、既に 2. 3 節(3)項において述べた。これらの結果から、500 kV、2,500 A のガスバルブの概念設計を行った結果、図 24. に示すようにタンク直径 3 m、高さ 9.8 m 程度で実現できるという見通しを得ている。今後、光トリガサイリスタの実用化が急速に進み、動特性や高耐圧化などの特性向上によって、10 kV 級素子の実現も予想されているので、更に部品数の減少と構造の簡素化については小形化が進むものと期待される。

6. む す び

将来の 500 kV 級を目標とし、その第一段階として綿密な基礎検討の後、125 kV、600 A 定格のガスバルブを試作し、諸試験を行い、ガスバルブに関する設計基盤を整えることができた。しかし、最近の光トリガサイリスタやエレクトロニクスは予想された以上に早く、サイリスタバルブへの応用に当っても冗長サイリスタの要否などの論議も聞かれるように変遷が著しい。今後は、これまでの成果を踏まえ、更に将来の技術進歩の動向をよく把握し、改良進歩を図りたいと考えている。

最後にこの共同研究の推進にあたり、御尽力いただいた「関西電力(株)直流技術研究会」の関係各位に対し厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 松村ほか：新しい直流送電技術の開発，三菱電機技報，57，No. 10，(昭 58)
- (2) 川越ほか：ガス絶縁交直変換所用機器，三菱電機技報，57，No. 10 (昭 58)
- (3) 長谷川ほか：直流ガス絶縁技術，三菱電機技報，57，No. 10 (昭 58)
- (4) J. HENGESBERGER, et al.: Testing of Thyristor Valves for Bioisole 2 of the Manitoba HVDC System, CIGRE Paper 14-03 (1978)
- (5) R. E. Harrison, et al.: A Proposed Test Specification for HVDC Thyristor Valve, IEEE Vol. PAS -97, No. 6, Nov./Dec. (1978)

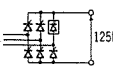
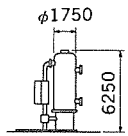
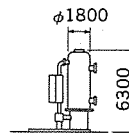
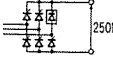
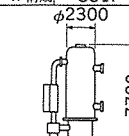
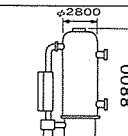
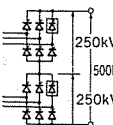
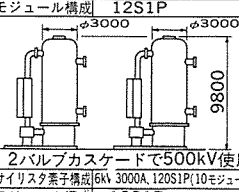
定格電流 定格電圧	600A	1200A	2500A
125kV 	 サイリスタ素子構成 4kV 800A, 93S1P(8モジュール) モジュール構成 12S1P	 サイリスタ素子構成 6kV 1500A, 60S1P(8モジュール) モジュール構成 8S1P	
250kV 		 サイリスタ素子構成 6kV 1500A, 120S1P(10モジュール) モジュール構成 12S1P	 サイリスタ素子構成 6kV 3000A, 120S1P(10モジュール) モジュール構成 12S1P
500kV 			 2バルブカスケードで500kV使用 サイリスタ素子構成 6kV 3000A, 120S1P(10モジュール) モジュール構成 12S1P

図 24. 各種ガスバルブ概念設計例

ガス絶縁交直変換所用機器

川 越 英 二*・今 滝 満 政**・東 槇 良 旺**・本 田 義 勝**・光 庵 豊 一***

1. ま え が き

将来の高電圧大容量の直流送電技術を開発するに当たって、変換所用機器に関しては、その直流に対する絶縁信頼性をいかに高めるかが最も重要な技術課題であり、機器に対する小形化及び経済性への要求と合わせてこれを解決する必要がある。関西電力(株)と三菱電機(株)は、共同研究によってこの課題に取り組んでいるが、 SF_6 ガスで絶縁する方式が有望な手段であろうと考え、その検証を目的としてガス絶縁交直変換所用機器の試作を行った。

まず直流電圧の絶縁を SF_6 ガスで行うための基礎的検討を行った後、そのデータを用いて断路器、接地開閉器、避雷器、直流変成器、直流変流器及び接続母線などをすべてガス絶縁方式として設計した。一方、変換所用変圧器や直流リアクトルについては、従来通りの油浸式とすることにしたが、これまでの製作経験⁽¹⁾の上に、更に新たに研究を重ね設計の合理化を行った。

研究の目標は、将来の500 kV級の変換所用機器であるが、第1段階の試作としては、電圧125 kV、定格電流600 Aを基本定格として選定した。以下にこれらの試作機器とその試験結果の概要を述べる。

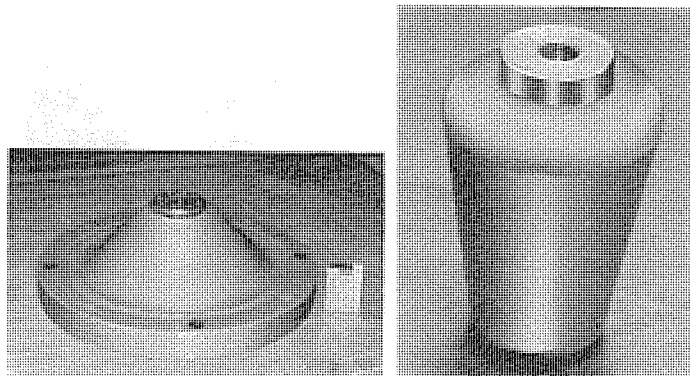
2. ガス絶縁直流開閉装置

2.1 直流高電圧機器のガス絶縁化

SF_6 ガスを絶縁媒体とするガス絶縁方式は、交流の開閉装置に適用され既に多くの実績があり、非常に高い信頼性が得られているが⁽²⁾⁽³⁾、これを直流の機器に適用すれば、架空線路への引出しブッシングを除いてすべての課電部が、接地タンクに収納されていることから、更に汚損など環境条件の影響を受けないことが期待される。

高気圧 SF_6 ガス自体の絶縁特性は、印加電圧波形に影響されることはほとんどないので、直流の場合も交流で蓄積された技術データを適用することができる。しかし、ガス中に高電位部を接地タンク内に機械的に保持するためのスパーサなどの絶縁支持物や、開閉機器を接地電位から操作するための絶縁操作棒などの固体絶縁物を設けると、その絶縁特性は、交流と直流とは本質的に異なる。その第一は、固体絶縁物に直流高電圧を連続印加すると、絶縁物上に電荷の蓄積が生じて、電界分布に乱れを生ずるが特に直流送電では、潮流方向を変えるために電圧極性の反転を行うので、このときに蓄積電荷が絶縁特性を著しく損なうおそれがあることであり、第二は、タンク内に混入する微小金属粉の絶縁に及ぼす影響に関するもので、これらの金属粉が課電通電時に電磁界の影響を受けて運転し、特に直流課電下では一種の集塵作用により絶縁特性を損なうものである。更に、冷却などのために、強制的に SF_6 ガスの循環を行う場合には、この循環ガスによってスパーサなどの絶縁物表面に電荷が蓄積する流動帯電現象についても注意を払う必要がある。

したがって、まずこれらの直流ガス絶縁に特有な問題点について本誌別稿⁽⁴⁾に述べているように徹底的な基礎研究を行い、その成果



(a) 円すいスパーサ (b) 柱状スパーサ

図 1. 125 kV 用絶縁スパーサの外観

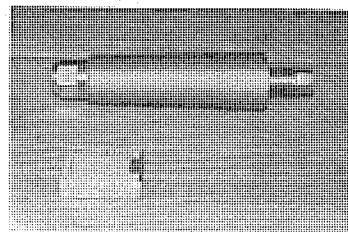


図 2. 絶縁操作棒の外観

表 1. 開発機器の仕様

定 格 事 項	仕 様
定 格 直 流 電 圧	±125 kV
定 格 直 流 電 流	600 A
定 格 ガ ス 圧 力	4 kg/cm ² ・g
警 報 ガ ス 圧 力	3 kg/cm ² ・g
<試 験 電 圧>	
直 流 耐 電 圧	±230 kV, 30 分
交 流 耐 電 圧	230 kV, 1 分
雷 インパルス耐電圧	±550 kV

に基づいて試作機器である125 kV用の直流用スパーサや絶縁操作棒の設計製作を行った。これらの外観をそれぞれ図1.及び図2.に示す。今回の設計に当たっては、新しく開発した直流電界解析用プログラムを用いて、直流電圧印加時や潮流反転における極性反転直後の電界を解析し、最適な絶縁物の形状を求め、これに応じて各種形状の絶縁物モデルを試作し、それらを試験することによって最終的に形状を選定した。すなわち、同軸形スパーサについては大きな開口角をもつ円すい形とし、柱状スパーサと絶縁操作棒は逆円すい形とした。

これらの基礎技術の開発の後に試作した今回のガス絶縁直流開閉装置の基本仕様は、表1.に示すとおりである。

2.2 断路器、接地開閉器及び接続母線

断路器、接地開閉器の外観を図3.に示す。また、その内部構成を図4.に示す。これらの操作方式は、遠方操作すること、及び併架系統では誘導電流開閉能力を持たせるために高速操作が必要なことを考慮し、空気操作方式とした。断路器及び接地開閉器は、使用した固体絶縁物の違いを除けば本質的に交流用の機器との差が余りな

* 関西電力(株) ** 三菱電機(株)伊丹製作所 *** 同赤穂製作所

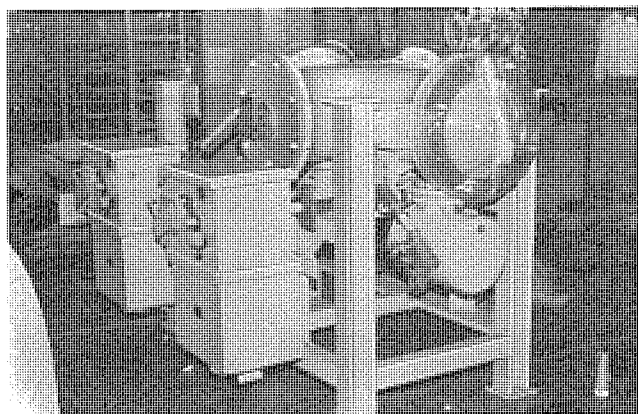


図 3. 断路器, 接地開閉器の外観

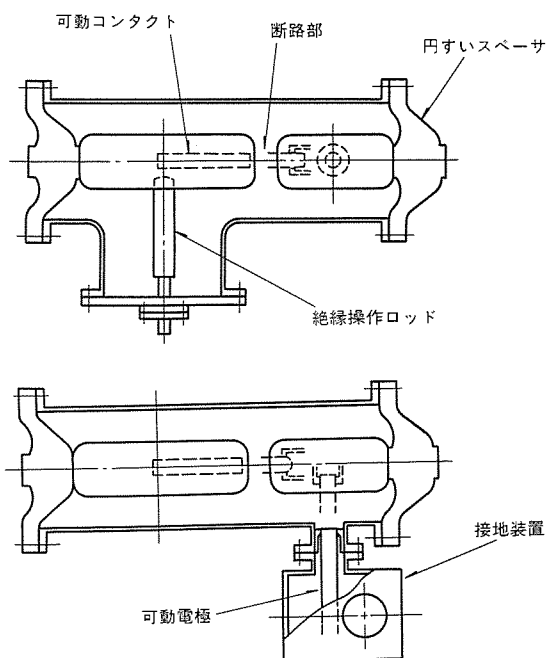


図 4. 断路器, 接地開閉器内部構成

いが、直流絶縁上の信頼性を確保するため次のような配慮を払っている。

- (1) 開閉操作は、蓄積電荷の影響を低減するため、絶縁操作棒の直線運動を避け、絶縁操作棒ねん(捻)回式の駆動方式を採用した。
- (2) 開閉動作時の金属粉の発生を抑制した接触子構造とした。更に、断路器を水平配置するとともに電界緩和を兼ねたシールド内に機構部を収納し、万一機構部で金属粉が発生してもシールドから外に出にくい構造とした。

接続母線は、交流ガス絶縁接続母線の基礎技術を基に設計した。開発した接続母線の外観及び内部構成をそれぞれ図 5. 及び図 6. に示す。接続母線の絶縁スペーサには、柱状スペーサとガス区分用に円すいスペーサを適用した。直流系統では直流リアクトルなどのため、短絡電流が交流系統に比べて小さく、絶縁スペーサに必要な機械強度が軽減されることから、導体支持用として従来の三脚スペーサの代りに柱状スペーサを使用した。また、柱状スペーサはタンク上部から導体を支持し、金属粉が絶縁物表面に付着しにくい構造とした。

円すいスペーサは、特に混入金属粉の影響を受けやすいので、混入した金属粉を絶縁上悪影響を及ぼさない所に集める不純物捕捉装置を開発し、円すいスペーサの近傍にこれを適用した。断路器、接地開

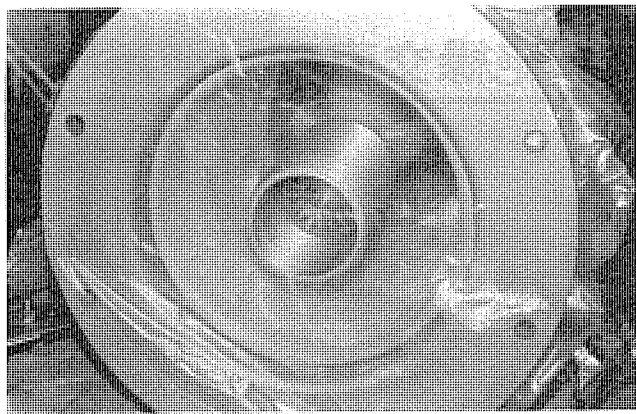


図 5. ガス絶縁接続母線の外観

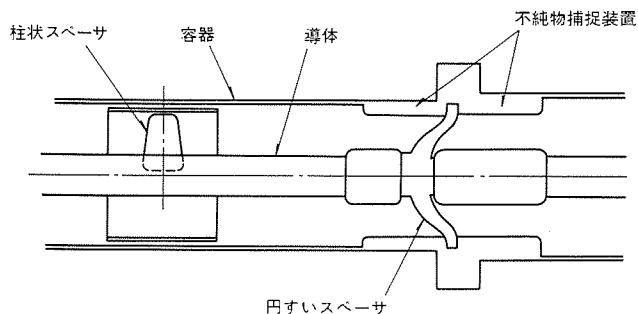


図 6. ガス絶縁接続母線内部構成

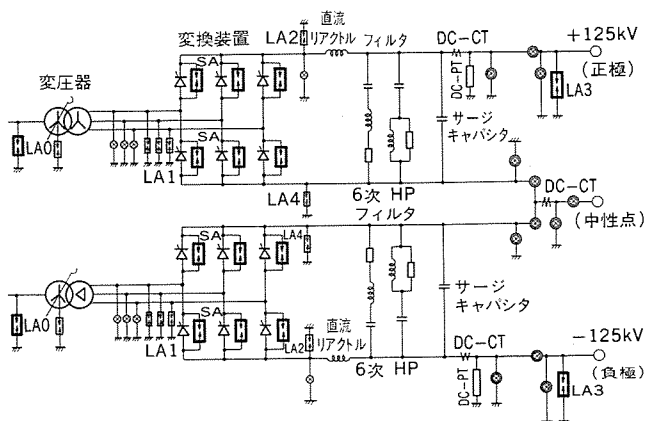


図 7. 交直変換所単線結線図

閉器及び接続母線の各開閉機器の性能を検証するため、絶縁性能試験、開閉試験(断路器、接地開閉器のみ)、温度試験及び短時間電流試験の各種試験を実施し、良好な結果を得た。断路器の開閉試験(10⁴回連続開閉)の結果では、金属粉の発生は微量で、かつシールド内に納まっており、タンク内面への落下は認められず、金属粉の影響を抑制する効果が確認できた。柱状スペーサについては、短時間電流試験を実施し、電磁力に対する機械的強度を検証した結果、十分余裕のあることが確認できた。

2.3 直流避雷器

2.3.1 変換所用避雷器の仕様

交直変換所の絶縁協調の主要課題は、サイリスタパルプの過電圧保護であり、既設の交直変換所では図 7. に示す避雷器配置が採用されている。今回、直列ギャップを用いない酸化亜鉛形避雷器の適用を前提に、それらの並列動作を考慮し、ガス絶縁交直変換所に適した絶縁

表 2. 定常時の避雷器端子電圧波形

記号	避雷器の名称	定常時電圧波形
LA1	直流巻線低圧側対地避雷器	
LA2	直流母線避雷器	
LA3	直流線路避雷器	
LA4	中性点避雷器	
SA	サイリスタ過電圧保護装置(バルブ内収納)	

表 3. 直流避雷器の定格事項

形 式	酸化亜鉛形避雷器		
常 規 使 用 電 圧	DC ± 125 kV		
公 称 放 電 電 流	10,000 A		
制 限 電 圧	470 kV crest 以下 (8×20) μ s 10,000 A にて		
耐 電 圧	直 流	± 230 kV	正負各 30 分間
	商用周波 (60 Hz)	230 kV rms	1 分間
	雷インパルス (1.2×50) μ s	± 550 kV crest	正負各 3 回
SF ₆ ガ ス 圧	定格ガス圧	4 kg/cm ² ・g (at 20°C)	
	警報ガス圧	3 kg/cm ² ・g (at 20°C)	

協調を検討した。直撃雷がないことも念頭におくと、図 7. 中の S A, LA 0, LA 3 が基本的に必要な避雷器で、他は個々のシステムに応じ適宜設置することで対応可能との結果を得た。また、SA は従来のバルブ避雷器でなく、個々のサイリスタに並列に接続された個別保護装置である。

表 2. は、図 7. の各避雷器の定常時の端子電圧波形を示す。LA 1 と SA の電圧波形は、電圧零点が存在するが直流成分を持っている。LA 2 は直流電圧にリップルが重畳しており、避雷器の酸化亜鉛素子の電圧分担の均等化にあたって、容量成分の影響を考慮する必要がある。LA 3 は、フィルタ F により平滑化された直流を端子電圧とする避雷器である。LA 4 は中性点避雷器で、定常時には非常に小さな電圧しか加わらない。

今回は、DC ± 125 kV 変換所に適用する SA, LA 2, LA 3 を開発した。一連の絶縁協調設計の結果、LA 2, LA 3 に要求される共通定格事項は表 3. のとおりであって、この定格を目標に開発を行った。

2. 3. 2 直流用酸化亜鉛形避雷器開発上の問題点

酸化亜鉛形避雷器は、①急しゅん波に対する応答が速いこと、②放電耐量が大きく重責務に適しており、ギャップなしで用いる並列接続された避雷器が責務分担に寄与しうること、③優れた非直線性によって無統流化が図れることなどの特長を持つ⁽⁶⁾反面、直列ギャップを持たないため避雷器には常時直流電圧が印加されるので、長期の直流課電に対する安定性が要求される。

このために、交流系統に使用される酸化亜鉛素子の組成、製造プロセスなどを全面的に見直して、直流課電特性の優れた直流用の酸化亜鉛素子の開発に成功した。今回この直流用素子を用いて ± 125 kV 用直流避雷器の開発を行うと同時に、更に高課電率での使用に適した DC ± 500 kV 用系に適用可能な酸化亜鉛素子実現の見通しを得た。

避雷器の構造は、汚損問題の解消とコンパクト化を目的として、交

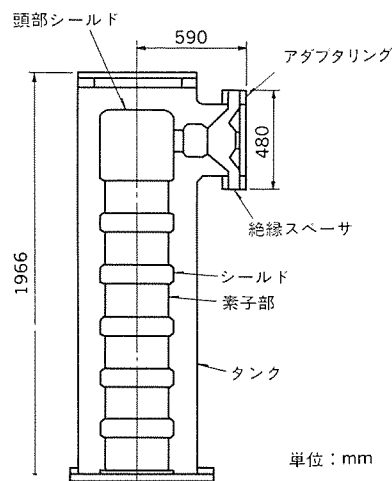


図 8. 125 kV 直流避雷器の内部構造

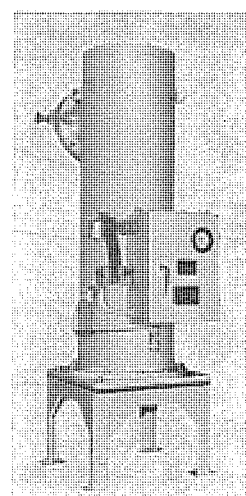


図 9. 125 kV 直流避雷器の外観

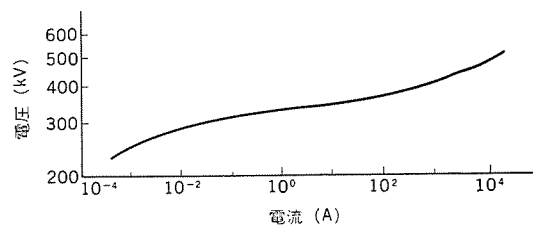


図 10. 直流避雷器の V-I 特性

流用で多数実績のあるガス絶縁方式とした。内部構造は図 8. に示すような構造で、避雷器の高さを適正なものとするため、酸化亜鉛素子配置は構造的に 3 柱配設（電気的には直列）とした。絶縁支持物には、直流耐電圧特性を考慮してエポキシ注型品を使用した。

今回開発した直流避雷器の外観写真を図 9. に示す。また、直流避雷器の代表的な V-I 特性を図 10. に示す。開発試験として、動作責務試験、電圧分担試験、耐震輸送試験、耐電圧試験、長期課電試験などを実施し、いずれも良好な結果を得た。動作責務試験としては、最も重責務になると想定される逆変換器側開放、順変換器側全電圧起動時の動作試験を実施した。供試器は直流 125 kV 用避雷器の分割区分（直流 10 kV）を使用し、架空線 200km を想定した試験回路で試験を実施し、これも良好な結果を得た。

2. 3. 3 直流用酸化亜鉛素子の開発

直流と交流の酸化亜鉛素子の劣化機構が異なるため、直流独自の素子の開発が必要である。このため、種々の配合実験と焼成実験を重ねて、直流に適した素子を開発した。この酸化亜鉛素子の長期課電の安定性を評価するため加速劣化試験を実施した。その結果を図 11. に示す。試料 A 及び B は、比較のために供試した従来の交流用素子である。試料 C は今回開発した直流用素子である。課電電圧は、サイリスタの端子電圧を模擬して図 12. の波形とした。この結果、今回の直流用素子は、課電率 90 %、素子温度 80°C の過酷な使用条件でも十分な安定性をもつことがわかった。

この試料 C の素子は、個別保護方式のサイリスタ過電圧保護装置として、サイリスタバルブ内の各サイリスタ素子と並列に接続されている。同一組成の素子は、直流母線避雷器、直流線路避雷器にも適用されている。

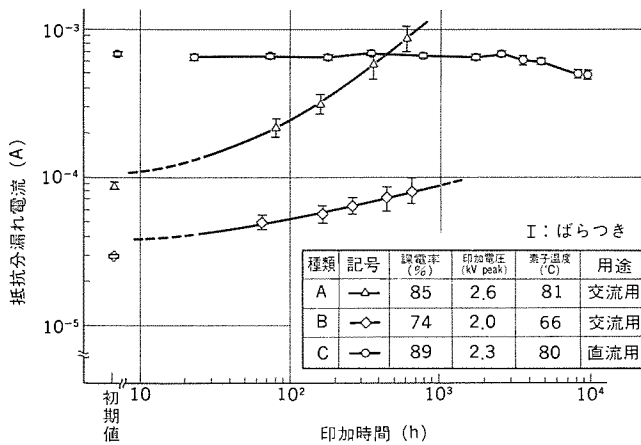


図 11. 酸化亜鉛素子の直流課電時の安定性試験結果

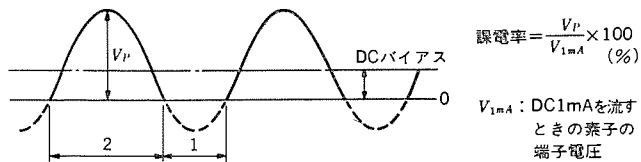


図 12. 課電電圧波形

2. 4 直流変流器及び直流変成器

直流変流器と直流変成器は、交直変換所の制御や直流送電線を含めた保護に使用される。本誌別稿⁽⁶⁾で述べるガス絶縁交直変換所モデルプラントでは、直流変流器及び直流変成器をデジタル制御と波形観測用の入力として使用するため、信頼性の向上及び小形化の目標に加えて 1 ms 程度の過渡応答特性を持たせることを目標に開発した。

2. 4. 1 直流変流器 (DC-CT)

可飽和リアクトル形 DC-CT 2 種類及びホール素子形 DC-CT の計 3 種類を製作した。これらの原理は既知のものであるが、前述の高速応答が得られる構成とし、各々の誤差特性、応答性能などを機器単独及び前述のモデルプラントでの実使用状態で比較した。3 種類の DC-CT の仕様を表 4. に示す。

2 種類の可飽和リアクトル形 DC-CT は直列形及び並列形であり、外観を図 13. に、回路構成を図 14. に示す。直列形 DC-CT は交流電源半サイクルごとに 2 個の鉄心が交互に非飽和状態になり、非飽和状態になっている鉄心で電流変成を行う。出力は矩形波の交番電流で、整流によりほぼ平坦な直流電流が得られるが、鉄心のヒステリシスにより半サイクルごとにスリットを生じる。今回製作した DC-CT は 4 個の鉄心を使用し、出力電流の最大値を取り出して平坦な出力電流を得た。直列形 DC-CT は平坦な出力を得るのに 4 個以上の鉄心を要するという欠点を有するものの、出力電流が交流であることから盤側に補助変流器を設けることにより盤内機器との絶縁ができ、制御・保護用機器個々に最適の出力に変換できるという特長をもっている。並列形 DC-CT は、各鉄心の飽和時間が短く平坦な出力電流が得られるという特長をもつ半面、鉄心飽和時に過大な電流が交流電源回路を流れるため、電源容量が大きくなるという欠点がある。今回製作した DC-CT は、抑制抵抗の抵抗値を大きくして鉄心飽和時の電流を抑え、これに対応して直流電流が零のときでも鉄心の拘束状態を保つため出力回路にダイオードを挿入して対処した。

ホール素子形 DC-CT の外観を図 13. に、回路構成を図 15. に示

表 4. DC-CT の仕様

形 式	可飽和リアクトル形		ホール素子形
	直 列 形	並 列 形	
変 成 比	DC 600 A/AC 1 A	DC 600 A/DC 0.5 A	DC 600 A/DC 0.1 A
負 担	1~8 Ω	2~12 Ω	10~44 Ω
誤 差	±1% (I_n) ±10% (0.1 I_n , 5 I_n)	±1% (I_n) ±10% (0.1 I_n , 5 I_n)	±1% (I_n) ±10% (0.1 I_n , 5 I_n)
応 答 速 度	1 ms	1 ms	1 ms
補 助 電 源	三相 200 V 60 Hz	単相 200 V 60 Hz	単相 100 V 60 Hz
台 数	2 台	4 台	2 台

注 I_n : 定格電流

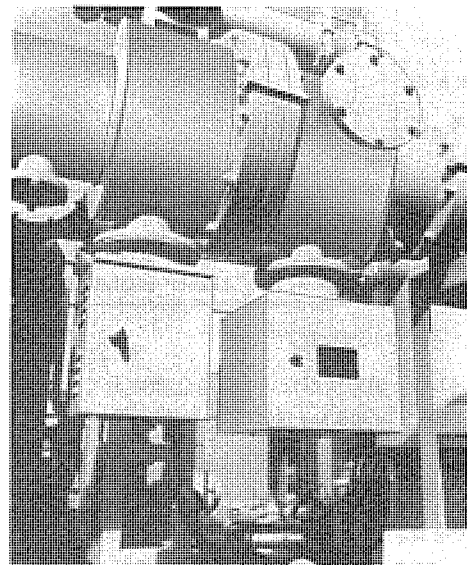


図 13. DC-CT の外観 (左: 可飽和リアクトル形 DC-CT, 右: ホール素子形 DC-CT)

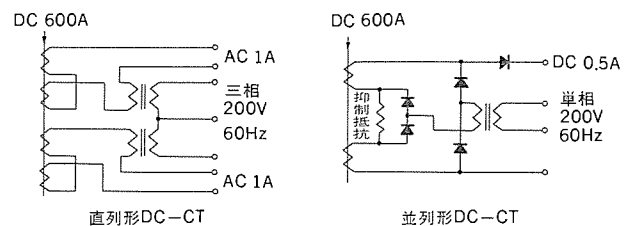


図 14. 可飽和リアクトル形 DC-CT 回路構成

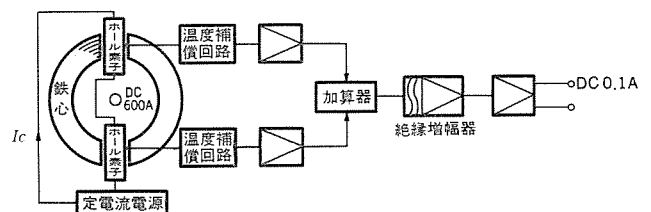


図 15. ホール素子形 DC-CT 回路構成

す。ホール素子は磁電変換素子の一種で、この素子を用いた DC-CT は既に実用化されているが、今回変換所用として適用するに際し素子の温度特性の補償、外部ノイズの除去並びに電氣的及び機械的信頼性の向上に主体をおいた開発を行った。具体的内容は次のとおりである。

(1) タンク内部の素子に近接して温度補償回路を設け、ホール素子

出力の $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$ における温度特性をほぼ零にした。

(2) ホール素子口出部から接地シース付き2心ツイスト電線に接続し、更に全体を金属ケースでおおって外部ノイズを除去した。

(3) ホール素子と接続電線を一体で樹脂モールドし、機械的に強固なものとした。

(4) ホール素子の出力電圧が小さく、ノイズの影響を受けやすいため出力回路を極力短くし、増幅器をタンクに直結した。

(5) 増幅器は屋外形で異常電圧を受けやすい位置に付くため、耐候性、絶縁耐力に十分留意した設計を行った。

直流電流誤差試験の結果は、いずれの方式も定格負担内及び定格電流の20～200%の範囲にて誤差 $\pm 1.5\%$ 以内、定格電流の10～500%の範囲にて誤差 $\pm 5\%$ 以内であった。総合的な性能では並列形DC-CTが最も優れた性能を示した。なお、応答特性については、必要性は1ms程度であるが、この方式では増幅器を使用しないため、10 μs 以下の性能が検証された。

2. 4. 2 直流変成器 (DC-PT)

従来高電圧用DC-PTに採用されている抵抗分圧器と、可飽和リアクトル形DC-CTを組み合わせる方式は、過渡応答特性の良いものが得られないため、抵抗分圧器と増幅器を組み合わせる方式を採用した。DC-PTの仕様を表5.に、外観を図16.に、回路構成を図17.に、抵抗分圧器の外観を図18.に示す。抵抗分圧器は抵抗の

表 5. DC-PT の仕様

形 式	増 幅 器 形
変 成 比	DC $\pm 125\text{ kV}$ / DC $\pm 0.1\text{ A}$
負 担	10～44 Ω
誤 差	$\pm 1\%$ (V_n) $\pm 5\%$ ($1.8 V_n$)
応 答 速 度	1 ms 以内
補 助 電 源	単相 100 V 60 Hz
試 験 電 圧	直 流 $\pm 230\text{ kV}$ 1 分間 商用周波 230 kV 1 分間 雷インパルス $\pm 550\text{ kV}$ ($1.2 \times 50\text{ }\mu\text{s}$) 正負各 3 回 開閉インパルス 460 kV ($250 \times 2,500\text{ }\mu\text{s}$) 正負各 3 回
台 数	長期課電試験用 1 台、直流送電モデルプラント用 3 台

注 V_n : 定格電圧

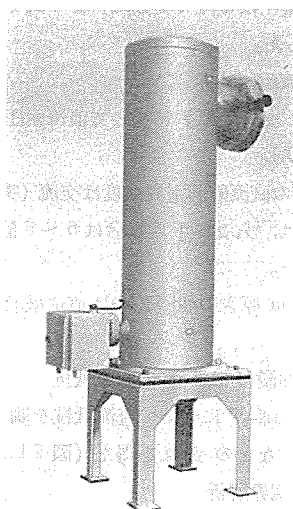


図 16. DC-PT の外観

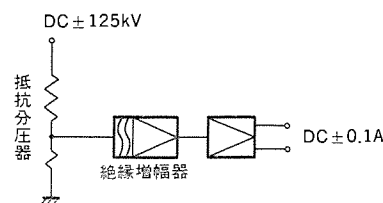


図 17. DC-PT 回路構成

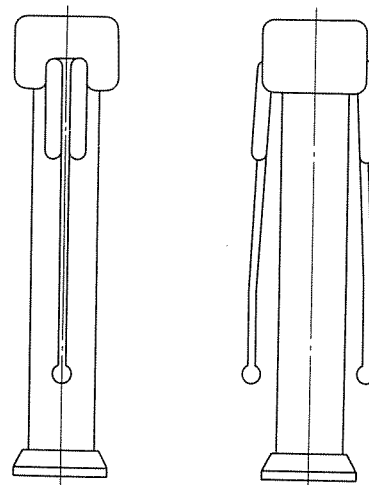


図 18. DC-PT 用抵抗分圧器の外観

温度係数がほとんど零で、信頼性の高い金属皮膜抵抗を使用した。接地タンク密閉形であり、従来のがいし形に比べ抵抗体の対地静電容量が大きく、高周波における分圧特性が低下するため、特殊なシールドを用いて抵抗体と対地間、及び対シールド間の静電容量分布を調整できる構造とし、高周波特性を改善した。この結果、直流から10kHzまでの分圧比誤差が $\pm 6\%$ 以内の性能を得た。増幅器には高耐電圧の絶縁増幅器を使用して、高電圧側と二次側を絶縁するとともに、接地構造を強化して、高電圧側及び交流電源から侵入するサージ電圧に耐える構造にした。

抵抗分圧器と増幅器を組み合わせた直流電圧誤差特性は、定格電圧の5～180%の範囲にて $\pm 1\%$ 以内を得た。また、過渡応答特性は分圧器単体で10 μs 以内、増幅器を含む総合応答特性は、100 μs であった。

3. 変換器用変圧器及び直流リアクトル

変換器用変圧器及び直流リアクトルでは、交流専用の変圧器やリアクトルに比べて表6.に示す特殊性があるため、十分な配慮が必要である。我が国では、佐久間周波数変換所を始め3箇所の交直変換設備があり、変圧器、リアクトルは順調な運転実績があるが、海外の設備では変圧器、リアクトルに起因する運転停止が生じている。ここでは、海外での実情も踏まえ、将来の高電圧大容量直流送電にも対応できるように、変圧器、直流リアクトルの高信頼度化及び小形化を図って実施した次の2項目の研究内容を紹介する。

(1) 変圧器及び直流リアクトルの油中直流絶縁

(2) リアクトルとして大容量器である直流リアクトルの小形軽量化

3. 1 油中直流絶縁開発

変換器用変圧器や直流リアクトルの絶縁は、交流系統用の変圧器やリアクトルと同様に油中絶縁が採用されているが、直流絶縁では、交流に比べて次のような現象を考慮する必要がある。

表 6. 変換器用変圧器, 直流リアクトルの特殊性

機 器 項 目	変 換 器 用 変 圧 器	直 流 リ ア ク ト ル
絶 縁	<ul style="list-style-type: none"> ・パルプ側は全絶縁となる。 ・パルプ側巻線には常時直流高電圧が加わる。また極性反転により電圧の極性を変える。 	<ul style="list-style-type: none"> ・巻線は全絶縁となる。 ・常時直流高電圧が加わる。また極性反転により、電圧の極性を変える。
巻 線 電 流	<ul style="list-style-type: none"> ・高調波電流が流れる。 ($6n \pm 1$ 次) ・アーム短絡などによりパルプ側巻線が短絡され、過電流が流れることがある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・直流が主成分であり、リップル成分は少ない。 ・直列機器であるため常時電流の値は大きい。 ・直流線路事故時に過電流が流れる。
鉄 心 (磁気シールド)	<ul style="list-style-type: none"> ・パルプ点弧角の不揃いなどにより巻線に直流電流が流れ、鉄心が直流励磁されることがある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・振動の問題はほとんどないと考えられる。
インピーダンス (インダクタンス)	<ul style="list-style-type: none"> ・一般に高インピーダンスである。(20%前後) 	<ul style="list-style-type: none"> ・インダクタンスが大きい。 (50 mH~2 H) ・通電電流に対する直線性が要求される。

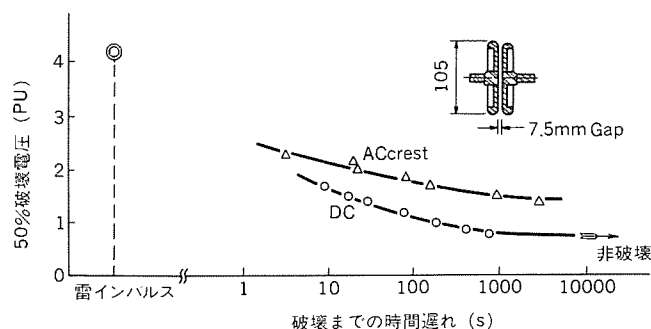


図 19. 油ギャップの直流 V-t 特性

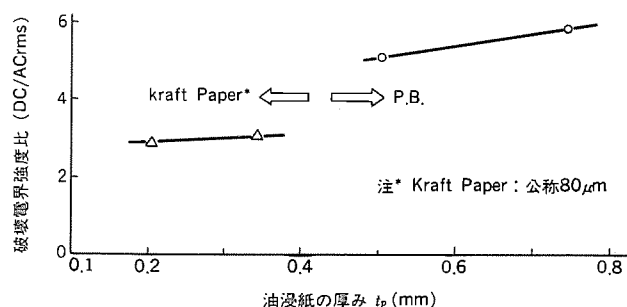


図 20. 油浸紙の直流耐圧特性

- (1) 絶縁物の電圧分担が、定常状態では抵抗率比で決定される。
- (2) 絶縁物の抵抗率には、温度依存性、電界依存性がある。
- (3) 極性反転時に電荷が瞬時に移動できないため、電圧分担の急激な変化を生じる。

これらのことから、絶縁油及び油浸紙について直流耐圧特性などの基礎試験を行うとともに、直流過渡電界計算プログラム⁽⁷⁾を開発して、内部電界を把握できるようにした。これらをもとに DC ± 125 kV 用の絶縁構造についてモデルを製作し、絶縁耐力を検証した。

3. 1. 1 油中直流絶縁基礎試験

(1) 油ギャップの直流 V-t 特性⁽⁸⁾

油ギャップの直流 V-t 特性について試験を行い図 19. の結果を得た。この図から次のことがいえる。

- (a) 直流 V-t 特性の傾きは、交流に比べて 1,000 秒程度までは大きく、それ以降は飽和する傾向を示す。

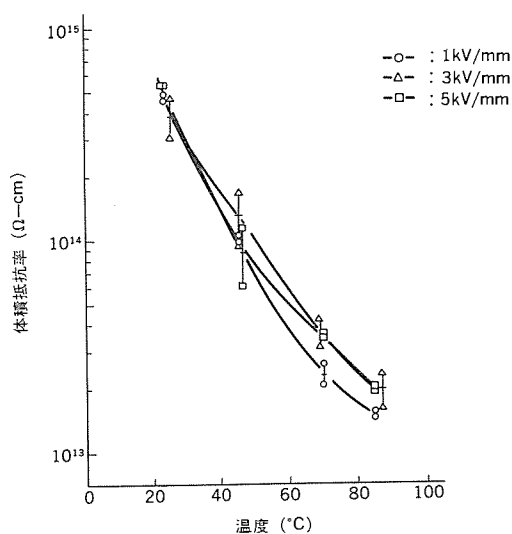


図 21. 油の抵抗率の温度特性 (30 分値)

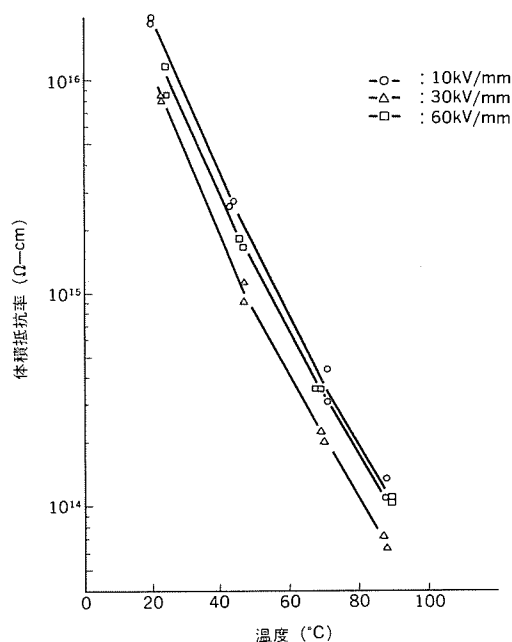


図 22. 油浸プレスボードの抵抗率の温度特性 (30 分値)

- (b) 直流破壊電圧は交流 (実効値) より低く、1 分値の比較では約 0.9 倍となった。
- (2) 油浸紙の直流耐圧特性
油浸紙 (プレスボード、クラフト紙) について直流耐圧試験を行い、次の結果を得た (図 20.)。

- (a) プレスボードの直流破壊電界強度は交流 (実効値) より高く、1 分値の比較では、プレスボードの場合は 5~6 倍、クラフト紙の場合は約 3 倍となった。
- (b) 0.2~0.8 mm 厚さの油浸紙では直流破壊電界強度は変らない。

(3) 絶縁油及び油浸 プレスボード の直流抵抗

絶縁油及び油浸 プレスボード について直流抵抗を測定し、抵抗の温度依存性、電界依存性などのデータを得た (図 21., 図 22.)。

3. 1. 2 直流過渡電界解析

絶縁油と油浸紙からなる複合絶縁系における過渡電界の振舞いを把握するために、絶縁物の抵抗の電界依存性を考慮できる直流過渡電

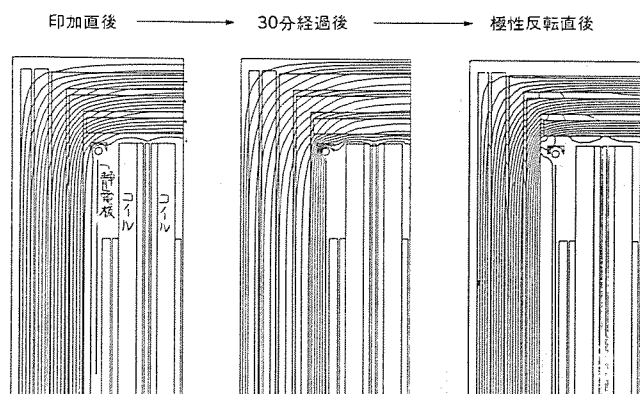


図 23. 直流電界の時間変化

表 7. 絶縁検証モデルの試験項目と結果

項 目	結 果	備 考
絶 縁 抵 抗 測 定 (Ω)	モデル A 2.5×10^{10} モデル B 2.6×10^{10}	超絶縁計 1 分値
$\tan \delta$ 測 定 (%)	モデル A 0.22 モデル B 0.23	シェーリングブリッジ
交流耐電圧試験	良 好	230 kV 1 分間
雷 インパルス 耐電圧試験	良 好	550 kV
閉閉インパルス 耐電圧試験	良 好	460 kV
直流耐電圧試験	良 好	338 kV ($225 \text{ kV} \times 1.5 E$) ま で試験, 30 分印加
極性反転模擬試験	良 好	DC 162.5 kV ($125 \text{ kV} \times 1.3 E$) に負極性閉閉インパルス 325 kV を重畳

界計算プログラム(有限要素法による)を開発した。このプログラムを用いて、125 kV 直流絶縁モデルの電界解析を行った結果を図 23. に示す。図から電圧印加直後では、油げき(隙)が大部分の電圧を分担しているが、時間の経過とともに電圧分担が油浸紙に移行し、更に、極性反転直後には油隙に大きな電圧が加わることがわかる。

3. 1. 3 油中直流絶縁検証

基礎試験、電界解析をもとにして直流絶縁構造について検討し、絶縁耐力を検証するための実規模大のモデルを製作した。モデルの絶縁レベルは、雷インパルス・550 kV、直流試験電圧・ $\pm 225 \text{ kV}$ (30 分)、交流試験電圧・230 kV (1 分) である。試験は表 7. のとおり行い、結果はいずれも良好であった。なお、極性反転に対する検証としては、直流電圧に負極性閉閉インパルスを重畳させて模擬した。

3. 2 直流リアクトルの小形軽量化

直流リアクトルは通電電流の値が大きいことから、リアクトルとして大容量であるため、大形になる傾向がある。したがって、小形軽量化が大きな課題であり、これを中心に検討した。

3. 2. 1 リアクトルの形式

リアクトルには、ギャップ鉄心形と磁気シールド付き空心形の 2 種類があるが、直流リアクトルでは、通過電流に対するインダクタンスの直線性が要求されることから、空げき長の長い磁気シールド付き空心形が有利である。

3. 2. 2 小形軽量化の方策

直流リアクトルでは、磁界のほとんどが静磁界となるため、空間及び磁気シールド内の磁束密度を高くすることによって、小形軽量化が可

表 8. 実器及びモデルの定格

	実 器	今回製作したモデル
電 圧 (kV)	125	—
電 流 (A)	1,200	435
インダクタンス (H)	1	0.12

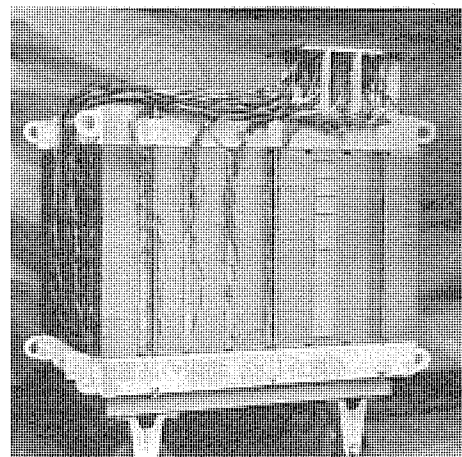


図 24. モデルの中身の外観

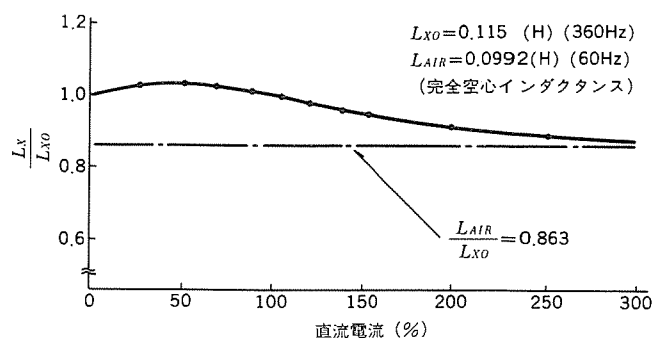


図 25. 直流電流とインダクタンスの変化

能であると考えられる。磁束密度をどの程度まで高くできるかにについては、過電流に対するインダクタンスの直線性などから決定される。

3. 2. 3 モデルリアクトルによる特性の検証

空間磁束密度及び磁気シールド内の磁束密度を高くした場合の直流リアクトルの特性を確認するために、1 H、1,200 A 定格のリアクトルのスケールモデルを製作し試験を行った。

(1) モデルの概要

表 8. に想定した実器及びモデルの定格を示す。モデルによる試験の目的は、磁束密度を上げて小形軽量化を図ったリアクトルの特性確認であるため、モデルにおいても磁束密度は実器と同程度にした。図 24. にモデルの中身外観を示す。

(2) インダクタンス特性

図 25. にモデルの通電電流に対するインダクタンスの変化を示す。図から、この設計例では、100 % 以上の電流域ではインダクタンスが低下し、300 % 電流でほぼ完全空心インダクタンスに近い値となることがわかった。

(3) 磁気シールド内磁束分布

図 26. にモデルリアクトルの磁気シールド内磁束分布を示す。図に示すように、小電流域では、磁気シールド内の磁束分布はコイルの起磁力に相当した分布となるが、120 % 電流付近からはほぼ一様な分布となることがわかった。このことと、インダクタンスの特性から磁気シ

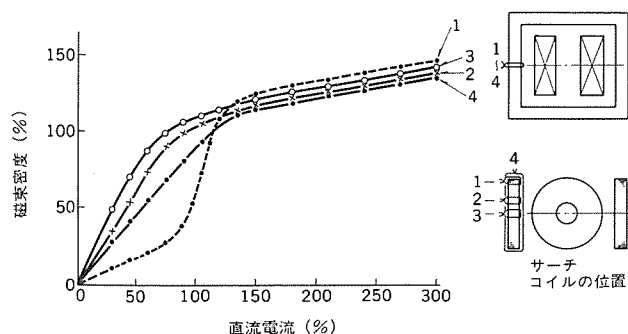


図 26. 直流電流と磁気シールド内磁束分布

ルドの断面積は、平均磁束密度で設計し、体積を縮小できることがわかった。

以上、変換器用変圧器と直流リアクトルについて、技術開発の概要を紹介したが、これらを総合して、将来の高電圧化と大容量化に対しても一連の技術開発成果を波及的に適用して、より一層の高信頼度化、小形化を図りうる見通しを得た。

4. 長期課電試験

上述の開発した変換器用各種機器について、長期信頼性を検証するため、各機器が実フィールドで遭遇する極性反転、リップル電圧重畳効果の検証なども含めた長期課電試験を約1年間実施した。

以下にその概要を紹介する。

4.1 試験設備

試験設備は表9.にその能力を示し、図27.に結線図、配置図を示すように、全波整流回路方式を採用し、最大発生電圧は±200kV、電圧の極性反転は供試器である断路器と接地装置の各2台を使用して実施し、また供試器のリアクトルにリップル重畳用の変圧器を内蔵させて、リアクトルの一方の端子ではリップル電圧を重畳させた直流電圧が得られる構成となっている。

4.2 試験内容

4.2.1 供試器

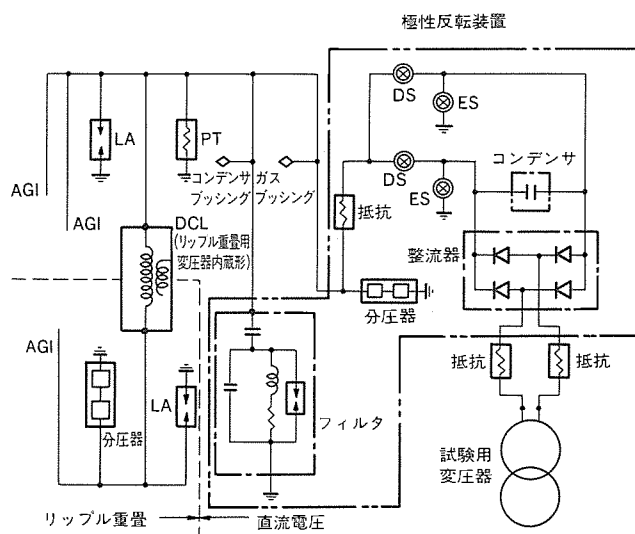
供試器は、今度開発した密閉形の直流125kV用リアクトル、ブッシング、断路器、接地装置、避雷器、電圧変成器及び接続母線である。なお、関西電力(株)と日新電機(株)の共同研究で試作されたフィルタについても同時に試験した。

4.2.2 試験項目

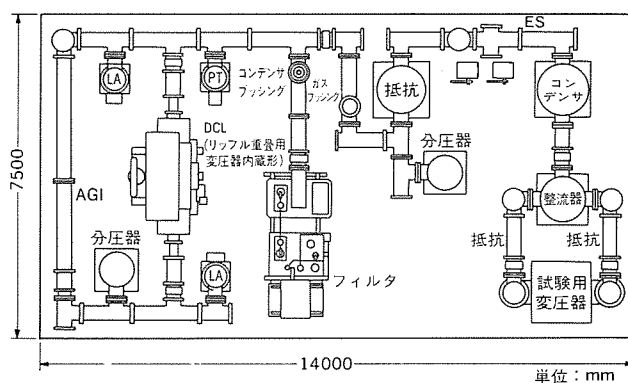
上記の各供試器に、1年間の課電で30年間の等価課電ストレスを加えるため、 $1.3E(125\text{ kV}(=1.0E) \times 1.3=162.5\text{ kV})$ の直流電圧を印加した。供試器のうち母線については、多数個の絶縁スパーサの長期性能を検証するため、供試器を増やしている。また実変換所におけ

表 9. 試験設備の能力

発 生 電 圧	DC	0~200 kV
	DC	0~200 kV
極 性 反 転	最 大	200 kV→200 kV
	最 大	200 kV→200 kV
	間 隔	1~24 時間
リップル重畳用変圧器によるリップル重畳電圧	周 波 数	360 Hz
	電 圧	0~20 kV
定 格 ガ ス 圧		4 kg/cm ²



(a) 結線図



(b) 配置図

図 27. 試験設備と供試器

るリップル重畳効果を検証すべく、直流電圧のみが印加される部分のほかにリップルが重畳される部分を設け、この部分にリアクトル、避雷器、母線を接続して、16kV、360Hzのリップル重畳電圧(直流母線部の電圧模擬用、表2.参照)を印加した。

なお、全供試器に実フィールドを模擬して、500ms以内の極性反転電圧を印加した。測定項目としては、各供試器の印加電圧、漏れ電流及び温度の連続測定を実施した。供試器及び試験項目を表10.に示す。

4.3 試験結果

長期課電試験は、昭和56年10月より約1年間行った。電圧の総印加時間は約7,500時間、総極性反転回数は約600回で、このうち1.3E課電における印加時間は約6,500時間、極性反転回数は約500回である。試験中の極性反転時のオシログラムの一例を図28.に、試験状況の写真を図29.に示す。

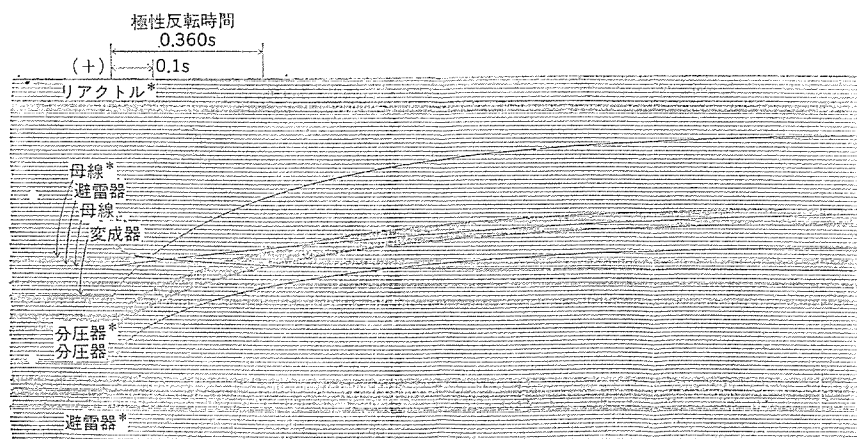
試験中は、各供試器の印加電圧、漏れ電流及び各部の温度を連続測定し、各印加電圧と漏れ電流の関係、日照と温度上昇の関係などを調査したが、初期特性との顕著な差は認められなかった。長期課電試験後の解体前には、ガス分析、油分析、ブッシングのがい管表面の付着物の分析などを行った。ガス分析と油分析の結果は、長期課電試験による変化はなかった。またブッシングの付着物は、主として炭素で、イオン成分は微量、等価塩分付着量も0.01mg/cm²以下の軽汚損状態であり、ブッシング沿面の絶縁抵抗の低下は認められなかった。

表 10. 供試験及び試験項目一覧表

供 試 器	試 験 内 容			測 定 項 目		備 考
	直流電圧 —	リップル 重畳 —	極性反転 —	電 流	温 度	
リアクトル	○	○	○	○	○	リップル発生用 変圧器を含む
ブッシング	○	—	○	—	—	油浸形、ガス形 各1本
断 路 器	○	—	○	—	—	
接 地 装 置	○	—	○	—	—	
選 電 器	○	—	○	○	○	
	—	○	○	○	○	
母 線	○	—	○	○	—	
	—	○	○	○	—	直流電圧のみ 印加される部 分は2本
フ ィ ル タ	○	—	○	—	—	日新電機特製
計器用変圧器	○	—	○	○	○	
備 考	1.3E	リップル電圧 16kVrms 360Hz	反転時間 500ms以内	印加電圧はCR 分圧器で測定		

注 ○印は実施項目

—印は未実施項目を表す



(一) 印加電圧 1.3E 電圧波形 分圧器
電流波形 リアクトル、避雷器、母線、変成器
*印なし：直流電圧のみ印加部分
*印あり：リップル電圧重畳部分

図 28. 極性反転時の波形例 (⊖→⊕)

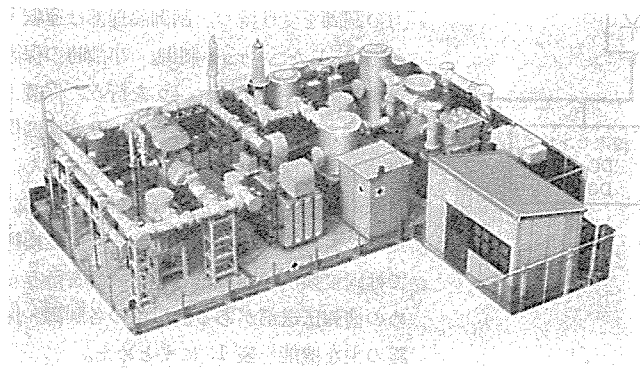


図 29. 試験状況

解体時には、絶縁スペーサの帯電電圧の測定、ダスト図形による蓄積電荷分布の観測、断路器の金属粉のたい積状況などを測定した。スペーサの帯電電圧は3kV程度であり、またトナーによっても鮮明なダスト図形は得られず、今回開発したスペーサ上への蓄積電荷量は、スペーサの絶縁特性に影響を与えるものではないことが検証できた。なお、断路器の開閉に伴って発生する金属粉も、断路器の接点部を覆う金属カバー中に極く微量存在するだけで、このカバーの外へ飛散するものではなく、絶縁特性に影響を与えないものであることを確認した。

解体後、各供試器の絶縁特性試験としては、直流耐電圧試験、インパルス耐電圧試験などを実施した。酸化亜鉛形避雷器に関し、リップルの有無にかかわらず安定な課電特性が得られたほか、すべての供試器とも、長期課電試験による耐電圧性能の変化は認められず、十分に信頼性の高い絶縁性能をもっていることが検証できた。

5. む す び

SF₆ ガスを採用した直流開閉設備も含めたガス絶縁交直変換所の実現を目指し、各種の検討及び基礎開発を経て、直流125kV、600A級の機器試作による能性検証及び長期課電試験を行った。その結果、将来の高電圧大容量交直変換所の実用化に資するための貴重なデータを得ることができた。今後は、今回の機器開発を基にして、更に将来の500kV級大容量直流送電用機器の開発に向けて努力したいと考えている。

最後に、この研究に対し御尽力いただいた「関西電力(株)直流技術研究会」の関係各位に対し深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 田村ほか：電源開発佐久間周波数変換所368MVA、353MVA変圧器、三菱電機技報、39、No. 11 (昭40)
- (2) T. Kawamura, et al: Operating experience of gas insulated switchgears (GIS) and its influence on the future substation design, CIGRE paper 23-04 (1982)
- (3) ガス絶縁変電技術、電気共同研究、36、No. 3, p. 15 (昭55-10)
- (4) 長谷川ほか：直流ガス絶縁技術、三菱電機技報、57、No. 10 (昭58)
- (5) 新田ほか：開閉保護装置の今後の諸問題 避雷器技術の将来方向、昭55年電気四学会連合大会
- (6) 阿部ほか：ガス絶縁交直変換所モデルプラント、三菱電機技報、57、No. 10 (昭58)
- (7) 島田ほか：直流電界解析、昭和57年電気学会全国大会、No. 18
- (8) 山田ほか：変圧器油の直流V-t特性、昭和57年電気学会全国大会、No. 243

直流送電の制御・保護

春本 容正*・甲木 莞爾**・下村 哲朗**・長沢 宏***

1. ま え が き

近年、長距離大容量送電や系統連系などに直流送電を適用しようとする検討が行われている。このような基幹系統では、直流送電系の事故は交流系に及ぼす影響が大きいほか、世界の直流送電運転実績から系全体のアベイラビリティの向上のため、特に制御・保護装置の信頼性を増すことが要求される。したがって、以前より、この分野での各種研究を行ってきたが、このたび関西電力(株)と三菱電機(株)は、共同研究の一環として、三菱電機(株)伊丹製作所内に設置したガス絶縁交直変換所モデルプラント用の高信頼度制御装置を開発した。装置の開発に当っては、高信頼度構成・多重化の容易性・調整の単純化・演算の高精度化・部品点数の削減をねらい、基本制御部をデジタル化し、基本運転制御試験のほか、人工故障試験などを行い極めて良好な結果を得た。以下に装置の概要と、同時に研究した系統解析技術について述べる。

2. 制御・保護システムの概要

2.1 システム構成

直流送電の制御・保護システムを構成する機能要素と各機能要素間の情報の流れを図1に示す。基本的な情報の流れは、図中の太線に示す直流センサ(DC-CT DC-PT)から基本制御部、ゲートパルス制御部を介しサイリスタバルブまでのフィードバックループである。

2.2 制御・保護機能

基本制御部は直流系運転の主機能をなす制御系(定電力制御、定電流制御、定電圧制御、定余裕角制御)で構成する。この制御部の出力により、サイリスタバルブの点弧位相を決定し所定のパルスを出力するゲートパルス制御部、更にバルブ点弧回路網を経由してサイリスタバルブに

表 1. 制御・保護機能

制 御・保 護 種 別		機 能
基 本 制 御	定 電 流 制 御 ACR	直流電流が一定となるよう点弧角を制御する。
	定 電 圧 制 御 AVR	順変換器側又は逆変換器側の直流電圧が、一定となるよう点弧角を制御する。
	定 余 裕 角 制 御 AγR	逆変換器の転流余裕角が一定となるよう点弧角を制御する。
	定 電 力 制 御 APR	直流電力が一定となるよう点弧角を制御する。
系 統 制 御	周 波 数 制 御	周波数を一定範囲内に納めるため直流系の潮流を制御する。
	緊 急 応 援 制 御	周波数の低下に応じ健全系統から事故系統へ直流系を用いて、電力を融通する。
	パ ワー モ ジ ュ レー シ ョ ン	交流系統の事故等による電力動揺を抑制するように直流系統の潮流を制御する。
補 助 制 御	タ ッ プ 切 換 制 御	変換器用変圧器のタップを制御する。
	無 効 電 力 制 御	変換器の運転に必要な無効電力を制御する。
制 御 論 理	起 動 ・ 停 止	直流系の起動・停止・再起動などのシーケンス処理を実行する。
	潮 流 反 転 制 御	直流系の潮流が逆向きとなるよう制御する。
	保 護 連 動	変換器保護、機器保護、線路保護による事故検出後の保護連動シーケンスを実行する。
ゲートパルス制御		交流系の位相に同期し基本制御の出力に応じて点弧位相を制御する。
バルブ点弧回路網		複数個直列に接続されたサイリスタバルブを同時に確実に点弧させる。
変 換 器 保 護		変換器本体を保護する。 アーム短絡検出、転流失敗検出などがあり、検出後変換器を停止させるものと再起動を行うものがある
直 流 線 路 保 護		直流送電線の事故を検出し、事故除去後、再起動を行う。
交 流 系 保 護		変換器用変圧器、ACフィルタ、AC母線、AC送電線の保護を行う。

制御信号が伝達される。

系統制御部は、周辺の交流系統側からの要請により、指令値を基

本制御部に出力し、直流送電機能を利用して系統の維持、安定を図る上位レベル制御部である。補助制御部は調相設備、変圧器タップなどを制御して、交流電圧、無効電力の制御を受け持つ。制御論理部は運転モードに応じたシーケンス制御、事故時の保護連動制御、各種インタフェースを行う。保護システムについては、保護対象により変換器保護、送電線保護に分けられる。もちろん、実際のシステムには交流関係の保護がある。更に、直流送電線で連系される交直変換所では両変換所で協調をとった制御を行うための情報伝送部がある。以上の各制御・保護の主な機能を表1.にまとめた。

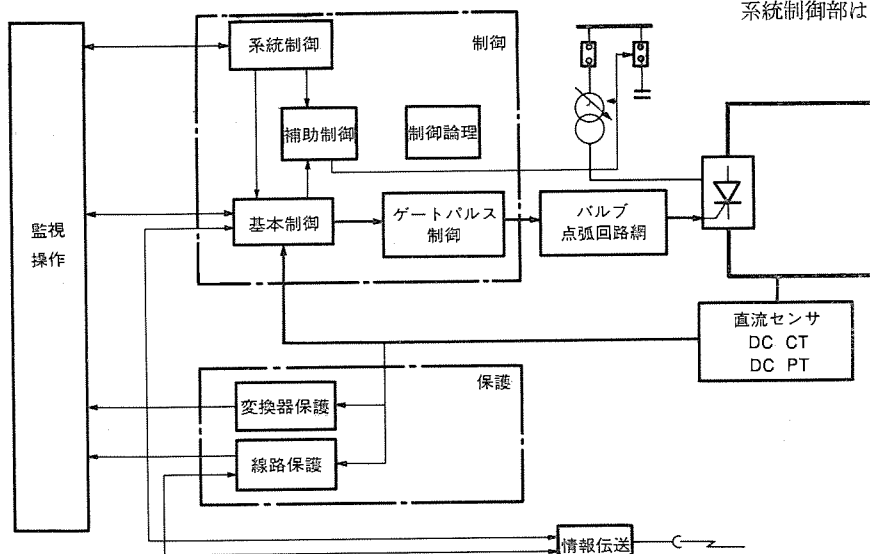


図 1. 制御保護システム情報系

3. 系統解析技術

3.1 系統解析の必要性

直流送電は交流送電と異なり、送電距離、送電内容による安定度上の制約が無い場合、長距離大容量送電に適している。しかし交流系統との接続点で電圧、電力、周波数を介して相互に作用するため直流を含む交流系統全体の安定性を検討する必要がある。特に直流送電システムの送電容量が大きい場合、送電停止などの電力変動の影響が大きく交直系統全体として、システムを評価し再起動時間を短縮するなど、影響を極力抑制するような直流制御系の設計を行う必要がある。また、直流の制御性の良さを有効に利用することにより、交直併用系統の安定度を改善することが考えられ、交流系統の電圧、電力特性を考慮した制御系の設計が要求される。このように直流システム設計に直流を含む交流系統の解析は不可欠である。

3.2 系統解析項目

直流送電は、サイリスタのスイッチングによって交流／直流の変換をしており、交流電圧低下、波形ひずみの影響を受ける。また、交流系からみると交直変換器設置点では電力が入り出すため、有効電力、無効電力の電圧特性及び変動状況は交流系の安定度などに大きな影響がある。交直系統の解析には次のような項目が挙げられる。

- (1) サージ、共振現象、高周波の影響、波形ひずみの影響など瞬時値レベルの現象の解析
- (2) 直流系を含む交流系の定態安定度、過渡安定度、電圧安定度など実効値レベルの現象の解析
- (3) 直流非同期系における周波数制御、特に直流単独送電系統における発電機ガバナ系との協調制御などやや長い時間領域の実効値レベルの現象の解析

図 2. に示すように系統解析の対象は時間領域が広く項目は多岐

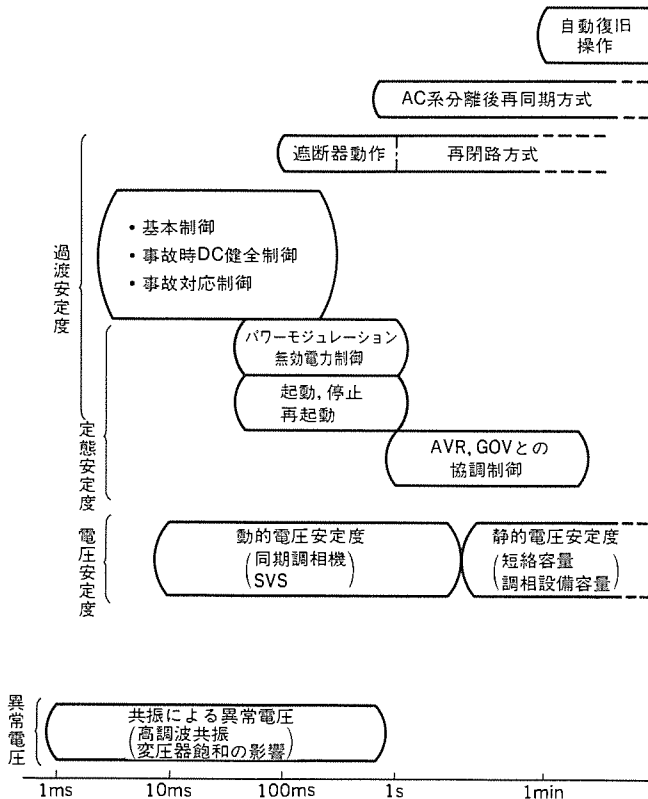


図 2. 系統解析項目と解析対象時間領域

表 2. 解析手法の分類

解析手法			用途
アナログシミュレータ			制御動作の確認
デジタル シミュ レータ	時間 領域	瞬時値 領域	サージ現象、共振現象の解析
		基本周波 数領域	定態安定度、過渡安定度などのダイナミックシミュレーション
	周波数 領域		固有値を求めて系統の安定性を判別する。制御系の設計に適している。

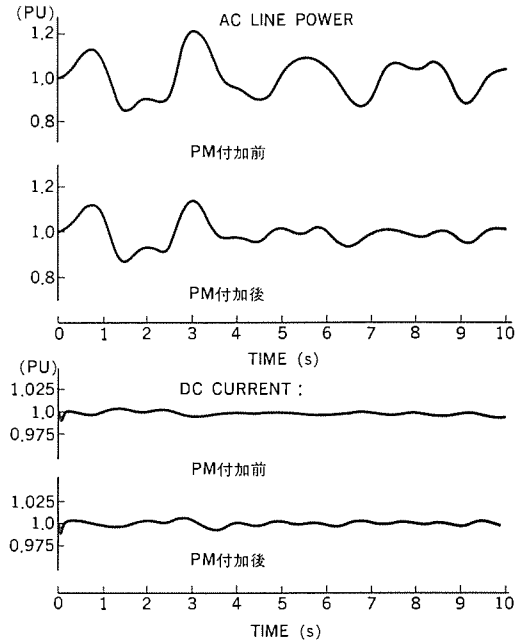


図 3. シミュレーション解析結果

にわたっているため、目的に応じて解析手法を使い分けねばならない。

3.3 系統解析手法

上記項目の解析手法は、表 2. のようにアナログシミュレータ及びデジタルシミュレーションに大別される。直流送電はスイッチング現象の連続であるため制御保護系の検証、事故などによる瞬時波形変化の影響の検討などアナログシミュレータによる解析は不可欠であるが、基本的な性能の確認、系統制御方式の効果検討、大規模交流系での動作の検討にはデジタルシミュレーションが有効であり両者を併用している。特に交直併用送電系統の定態安定度面では、発電機、AVR、などの交流系諸特性及び直流送電システムを考慮した系の固有値によって安定性を判別し制御系定数を決定する手法が有効である。

系統解析例として交直併用送電系統における直流送電の POWER MODULATION 制御 (PM) の検討例を図 3. に示す。併用交流送電線の有効電力潮流を検出し動揺を減衰させるように直流電力を変化することによって、交流系の安定度を向上し全体の送電能力向上を達成している。

4. 制御・保護・装置の構成

4.1 ガス絶縁交直変換所モデルプラント構成

ガス絶縁交直変換所モデルプラントは、Back-to-Back の主回路構成（直流送電線のない直流連系システム）とし、実系統と同一定格電流を通電し、変換装置間で電力融通運転を行い主回路機器の運転機能検証

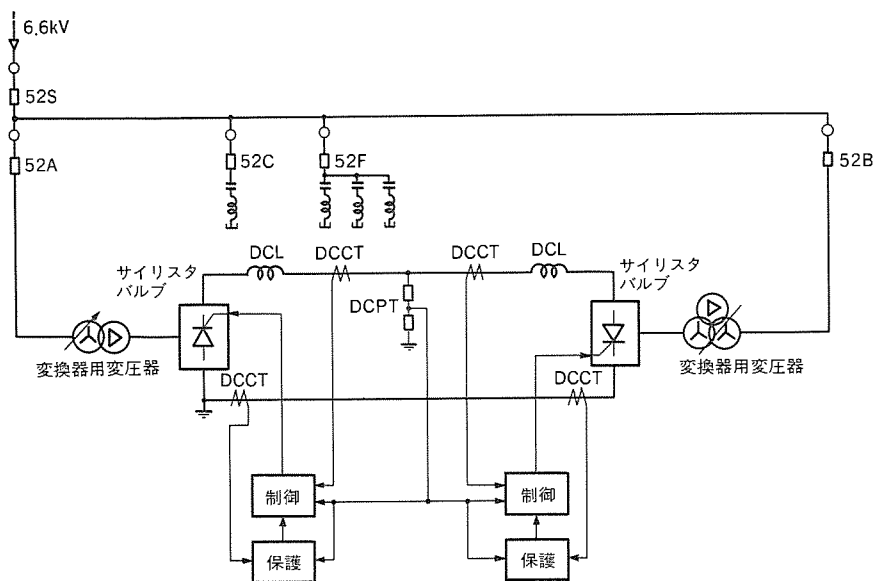


図 4. ガス絶縁交直変換所モデルプラント概略構成

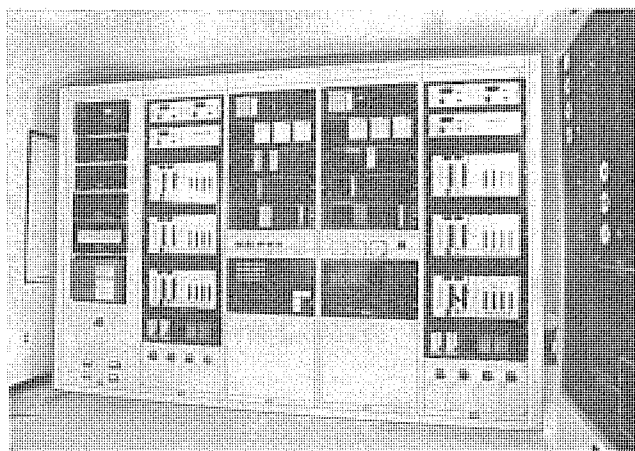


図 5. 直流制御盤

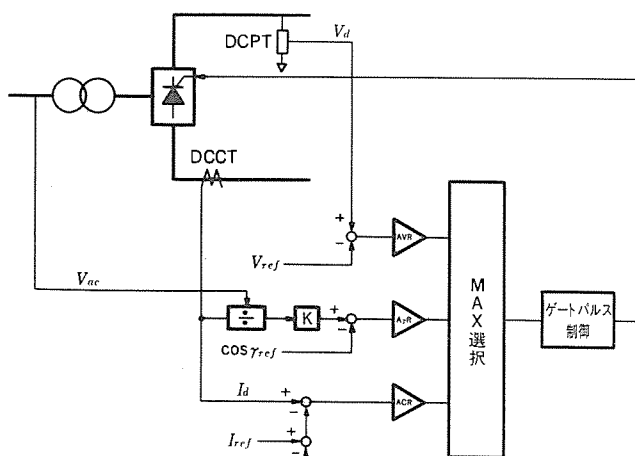


図 6. 制御ブロック図

をはじめとして、あらゆる制御・保護機能の試験を実施することができる。図 4. にガス絶縁交直変換所モデルプラントの概略構成を示す。モデルプラントの規模は、変換容量 9.6 MW、直流電流 600 A、直流電圧 16 kV の 6 相整流方式で、両変換器には変換器用変圧器、直流

リアクトル、直流センサを設置し、交流系にはフィルタ、無効電力供給設備（スタコン）を備えている。

4. 2 制御・保護装置の構成

直流制御盤は変換器 1 台につき 2 面で構成し、直流制御盤 1 は定電力制御（APR）及び起動・停止シーケンスなどの機能を、直流制御盤 2 は基本制御、常時監視などの機能をそれぞれ収納している。基本制御機能はデジタル制御ユニット 3 台によりその機能を実現している。

直流保護盤は変換器保護を中心に構成し、アーム短絡保護リレー、転流失敗検出リレー、直流過電圧リレー、不足電圧リレー、及び交流過電圧、不足電圧リレーを収納する。ほかに監視・操作盤、高性能オシロ盤、交流保護盤、LRTC・AQC 盤などモデルプラント

運用上必要な各装置を用意した。図 5. に直流制御盤の外観を示す。

4. 3 制御方式

制御方式のブロック図を図 6. に示す。定電流制御（ACR）は直流電流を検出し、電流設定値になるよう点弧角を制御する閉ループ制御を実施する。定電圧制御（AVR）は直流電圧を検出し、電圧設定値になるように同様な制御を実施している。余裕角制御（A_γR）は余裕角設定値（ $\cos \gamma_{ref}$ ）、直流電流（ I_d ）、交流電圧（ V_{ac} ）を用いて、 $\cos \alpha_{\gamma} = K \cdot \frac{I_d}{V_{ac}} - \cos \gamma_{ref}$ の演算を実行し点弧角を求める開ループ制御を行っている。これら三つの制御量の最大値が選ばれゲートパルス制御部を経由して、サイリスタバルブに出力される。潮流反転制御は順変換器、逆変換器、それぞれに与える電流設定値の電流マージン ΔI を切り換えることにより実行する。更に、直流線間電圧が大幅に低下した場合に直流電流設定値を制限し、転流失敗を予防する機能も付加している。

補助制御としては変圧器タップ切換制御（LRTC）と無効電力制御（AQC）を備え、変圧器のタップとスタコンの開閉を制御している。

5. 制御装置の特長

5. 1 デジタル化

開発した制御装置は高信頼度化、調整の単純化、自己診断機能による故障の早期発見、保守点検の簡略化を目指し、基本制御部をデジタル化した。図 7. に開発したデジタル制御ユニットの外観を示す。

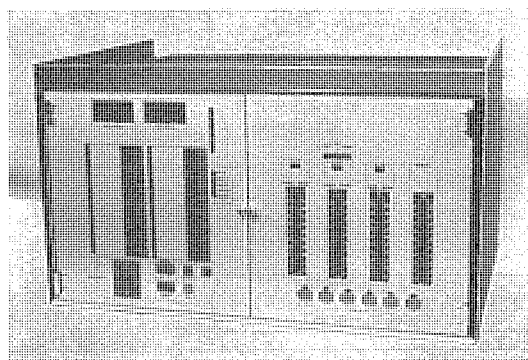


図 7. デジタル制御ユニット

制御装置のデジタル化において、制御系の設計手法は、従来アナログ式の伝達関数を差分方程式に置換するのが一般的であった。一方、直流送電に用いられる制御系は信号入力部に設けられたリップルを除去するフィルタの時間遅れや演算の無駄時間が存在するため、従来のアナログ式の伝達関数では高精度、高速度かつ安定性の良い制御方式の実現が困難である。このため、今回用いた手法は制御システム全体を離散値システム平面（Z平面）に写して目標とする制御特性を満足するような伝達関数を決定するようにした。

一例として、基本制御の中の定電流制御について説明する。図8. に定電流制御系のモデルを示す。設定値（ I_{ref} ）と入力センサを経由した直流電流実測値（ I_d ）とを比較し、その偏差値が定電流制御系の伝達関数 $H(Z)$ に導入され、演算の無駄時間を考慮し、制御量が出力される。制御出力量を決定する伝達関数 $H(Z)$ は設定値のステップ変化に対し、直流電流が一次遅れで追従するように構成した。図9. に設定値のステップ変化に対する直流電流の応答波形を、図10. に直流地絡事故時の応答波形を示す。いずれも高速かつ安定な制御特性を得ている。

5.2 多重化

直流系運転中は、所望の電圧、電流を得るため変換器に対する点弧信号を常時制御していなければならない。したがって、制御装置が機能を停止すれば送電電力は零にまで低下するため、系統に対する影響も大きく制御装置に対する重要度は非常に高い。このために制

御の主要部分である基本制御を多重化構成とした。なお、システム全体の信頼性向上のためには、センサ、インタフェース部を含めた多重化構成を検討する必要がある。図11. は基本制御の多重化構成図を示す。各制御ユニットは電源装置を含め互いに独立に三重化されており、3台の制御ユニットからのゲートパルスは、2 out of 3の論理により、一つに集約されサイリスタパルプに送られる。このように構成することにより、1台の制御ユニットが誤出力又は停止した場合でも他の2台で全く平常通り運転を継続することができる。

5.3 ビジブル化

運転中の制御系の状況を表示するため、デジタル制御ユニット前面に各制御種別ごとの設定値、実測値及び点弧角をバーグラフ表示している。更に、ACR、AVR、A γ Rの内、現在選択されている制御方式の表示、REC（順変換器）/INV（逆変換器）表示も実施している。各制御系のパラメータについても、パネル前面に表示するとともに、容易に変更可能のように考慮している。

5.4 監視

3台のデジタル制御ユニットから出力する点弧パルスを常時監視し、パルス不一致、パルス欠相、パルス放しの状態になった際、表示するとともに、2台以上異常となった場合には、直流系に停止信号を送出する。

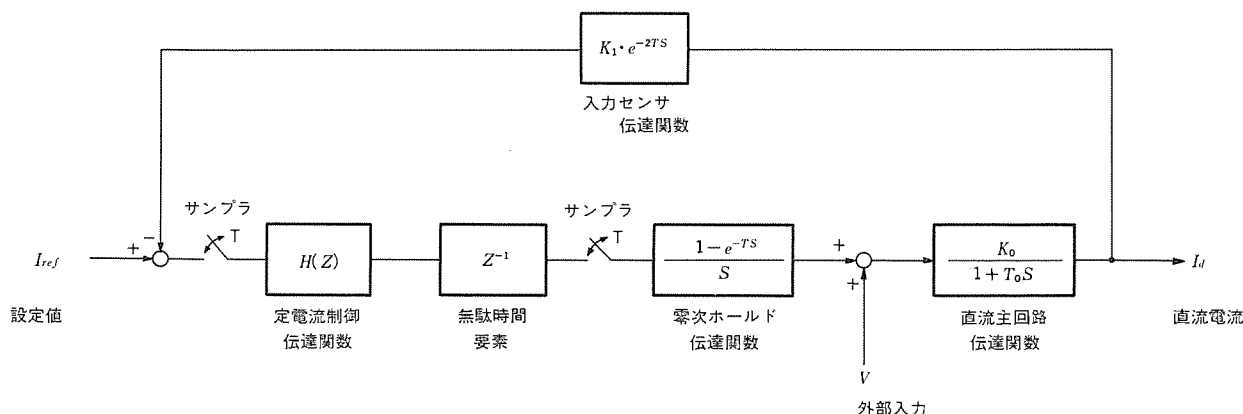


図8. 定電流制御系のモデル

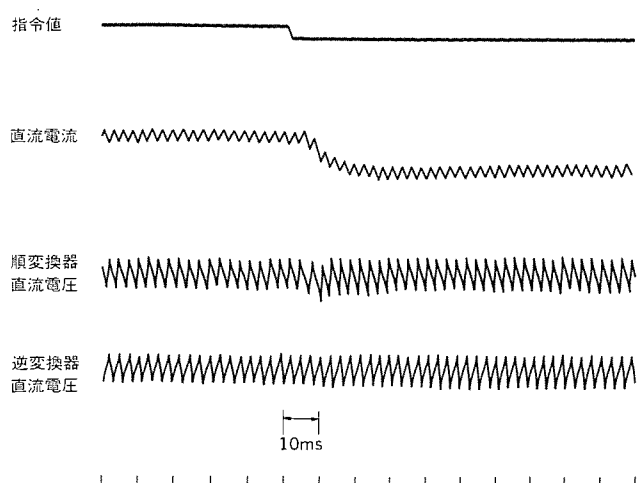


図9. ステップ応答

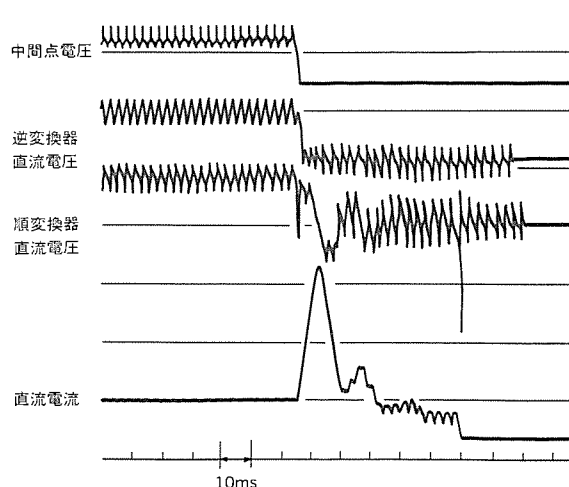


図10. 事故応答

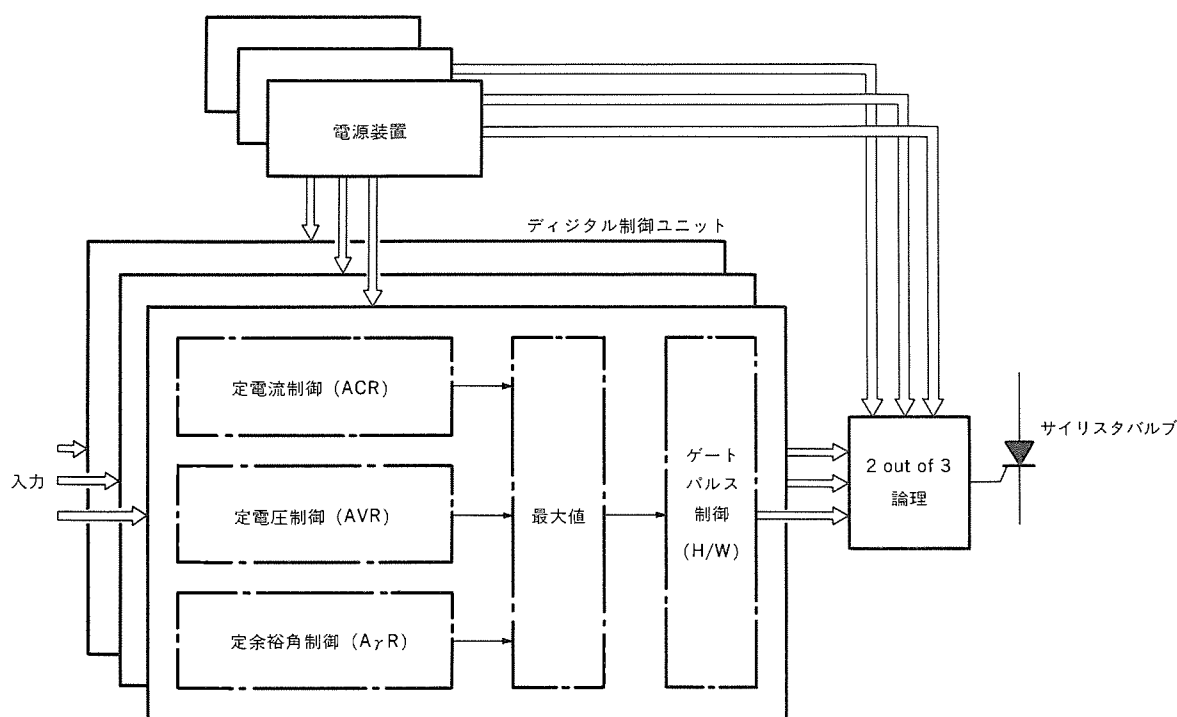


図 11. デジタル 制御装置構成 (三重化)

6. む す び

第である。

以上、直流送電用として開発した制御・保護装置について紹介した。高性能化を目標にした デジタル 制御装置は ガス 絶縁全密閉形交直変換所モデルプラントの長期運転試験において、通常の運転状態及び事故状態に対して満足する制御特性が得られ、制御・保護の実用化について十分な見通しを得ることができた。

今後、直流送電の適用分野が広がり、系統からの要求も複雑化するに従って、制御・保護システムに課せられ要求もふえてくると思われるが、今回開発したシステムを基本に、多重化、デジタル化、監視方法を含めた合理的なシステムの構築及び更に高信頼度、高性能な制御・保護装置の研究を重ねていく所存である。

最後に、このシステム設計、製作にあたり多大な御尽力をいただいた「関西電力(株)直流技術研究会」の関係者各位に謝意を表す次

参 考 文 献

- (1) 松村ほか：直流送電用 デジタル 制御への期待，電気学会 シンポジウム (昭 58)
- (2) 南浮ほか：直流送電用変換装置への デジタル 制御への適用，電気学会・半導体電力変換研究会 (昭 57)
- (3) 湯木ほか：直流送電多重化 デジタル 制御 システム，電気学会全国大会 (昭 58)
- (4) 湯木ほか：直流送電定電流制御の デジタル 化の検討，電気学会全国大会 (昭 58)
- (5) M. Yuki et al : DEVELOPMENT OF DIGITALIZED CONTROL EQUIPMENT FOR THE HVDC TRANSMISSION SYSTEM, IEEE/PES. 1983 Summer Meeting

ガス絶縁交直変換所モデルプラント

阿部陽一郎*・矢野昌雄**・多田一彦***・林成男***・西尾功***

1. ま え が き

関西電力(株)と三菱電機(株)が実施している直流技術の開発に関する共同研究では、信頼度が高く、コンパクトで経済的な交直変換所の開発が一つの重要課題であり、これに対し、交直変換所の全密閉化、及び変換器制御へのデジタル制御の適用が、問題解決のかぎ(鍵)になり得るものと期待されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。したがって、同方式の変換所についてその性能を検証し、将来性に対する見通しを得るべく、今回共同研究の一環として DC 125 kV の実規模相当のモデルプラントを三菱電機(株)伊丹製作所構内に建設し、人工故障試験を含む広範囲の性能検証試験を実施した。以下、設備の概要、試験内容及び結果⁽⁵⁾などについて述べる。

2. モデルプラントの概要

2.1 システムの仕様・特長

表 1. にモデルプラントのシステム仕様を、図 1. に主回路構成を示す。
このモデルプラントの直流回路には、直流バイアス電圧発生器により大地に対して直流電圧が印加されており、また変換器によって 600 A

表 1. モデルプラントのシステム仕様

項 目	定 格・仕 様
試 験 回 路	Back-to-Back
変 換 電 力	9.6 MW
変 換 器 直 流 電 圧	16 kV
定 格 直 流 電 流	600 A
対 大 地 定 格 直 流 電 圧	125 kV
直 流 バ イ ア ス 電 圧	109 kV
交 流 回 路 電 圧	6.6 kV

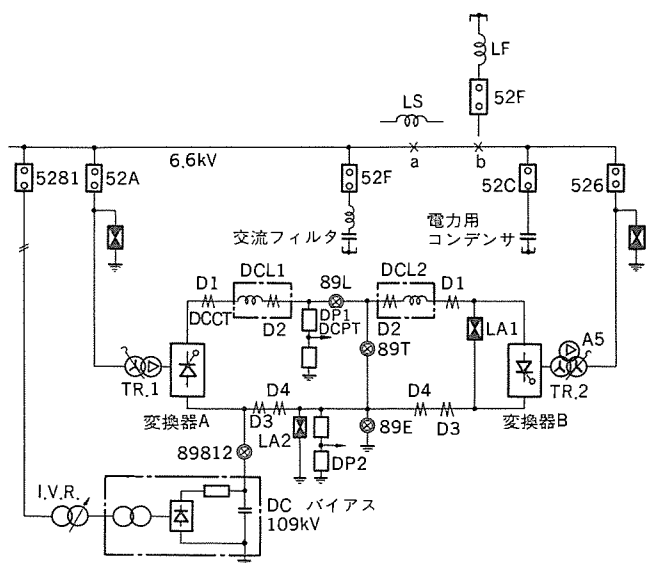


图 1. 回路構成図

の電流を通電する構成となっている。すなわち、変換器の定格直流出力電圧は 16 kV であるため、109 kV の直流バイアス電圧を重ねさせることにより、直流回路の構成機器には 125 kV の対地直流電圧が印加されるようになっている。

2 台の 16 kV, 600 A の変換器 A, B は, 2 台の 直流リアクトル DCL 1, DCL 2 及び ガス絶縁開閉装置を介して, Back-to-Back 構成となるように接続している。また交流回路側では 2 台の変換器用変圧器 TR. 1, TR. 2 を並列接続しており, 一方の変換器で交流から直流に変換された電力は, 他方の変換器により直流から交流へ逆変換されて再び交流回路へ戻されるので, 試験に要する電力は試験回路の損失分だけであり, 効率の良い動作試験が行える構成となっている。

図 2. にこの モデルプラント の 機器配置を, 図 3. に全体の外観を示す。

2.2 機器の特長

表 2. にモデルプラントの主要構成機器の仕様を、図 4. にこれらの機器が実際に組み合わされている様子を示す。なお、表 2. に示している機器以外に、交流フィルタ、シャントキャパシタ、直流バイアス電圧発生器、交流開閉装置などを設置している。

125 kV 定格のガス絶縁ガス冷却サイリスタバルブでは、サイリスタモジュ

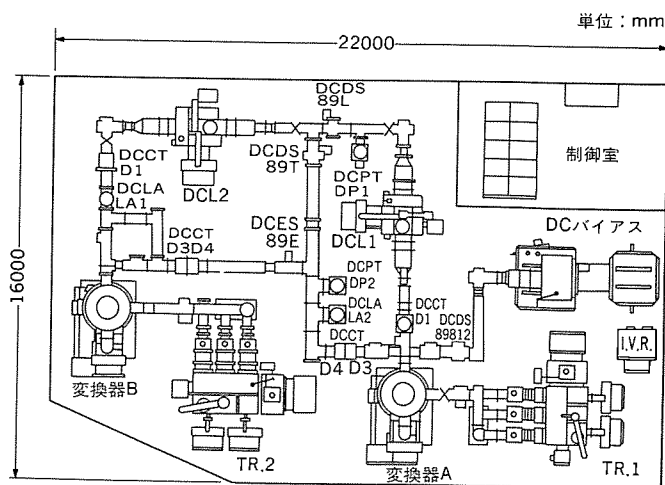


図 2. 機器配置図

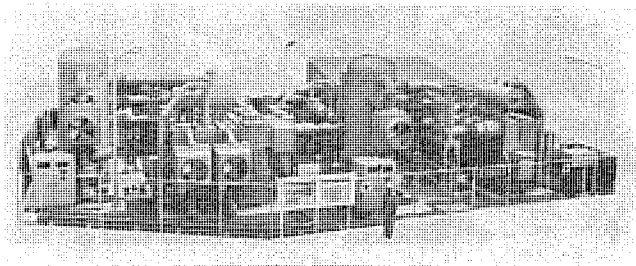


図 3. ガス 絶縁交直変換所 モデルプラント 全景

表 2. 主要機器の仕様

機 器 名	項 目	仕 様
変 換 器	形 式	ガス絶縁ガス冷却屋外設置形
	定 格 直 流 電 圧	16 kV
	定 格 直 流 電 流	600 A
	結 線 方 式	三相全波整流
	サイリスタ素子定格	4 kV, 800 A
	素 子 構 成	12 直列 1 並列 / アーム
	絶 縁 方 式	SF ₆ ガス絶縁 (4 kg/cm ²)
	冷 却 方 式	SF ₆ ガス強制循環風冷
変換器用変圧器	構 造	6 アーム・1 タンク収納形
	絶 縁 階 級	100 号
	形 式	屋外用送油風冷式外鉄形
	周 波 数	60 Hz
	電 圧	交流側 / 直流側 = 6.6 kV / 14 kV
直流リアクトル	容 量	12 MVA
	直 流 巻 線 絶 縁 階 級	100 号
	形 式	屋外用送油風冷式空心形
	定 格 直 流 電 圧	125 kV
	定 格 直 流 電 流	600 A
直流ガス絶縁開閉装置	インダクタンス	0.07 H
	絶 縁 階 級	100 号
	形 式	SF ₆ ガス絶縁形
	構 成 機 器	直流母線, 断路器, 接地開閉器, 直流ブッシング, 避雷器
	定 格 直 流 電 圧	125 kV
直流変成器 (DC-PT)	定 格 直 流 電 流	600 A
	定 格 ガ ス 圧	4 kg/cm ²
	絶 縁 階 級	100 号
	方 式	直流増幅器式 DC-PT
直流変流器 (DC-CT)	変 成 比	125 kV / 0.1 A
	誤 差	1.0% 以下
	絶 縁 階 級	100 号
	方 式	(1) ホール素子形 (2) 可飽和リアクトル直列形 (3) 可飽和リアクトル並列形
	変 流 比	(1) 600 A / 0.1 A DC (2) 600 A / 1 A AC (3) 600 A / 0.5 A DC
直流変流器 (DC-CT)	誤 差	1.0% 以下
	絶 縁 階 級	100 号

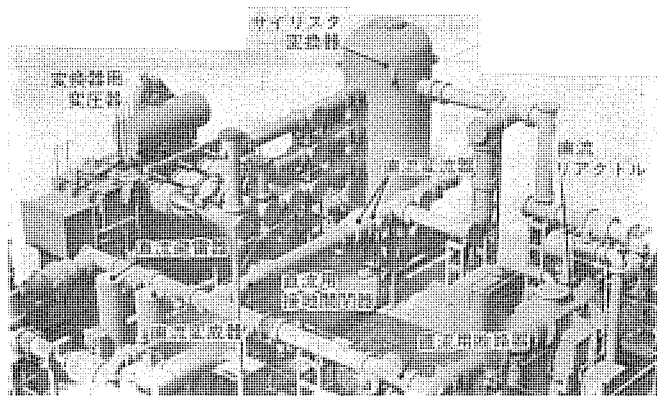


図 4. 主要機器の外観

ール 8 台を直列接続した構造を採用しているが、モデルプラントでは、同じサイリスタモジュール 1 台を変換器の 1 アームとして用いており、1 タンクの中に 6 台のサイリスタモジュールを収納して三相全波整流回路に結線されているので、1 台のタンクが直流電圧 16 kV、直流電流 600 A の交換器となっている。また変換器用変圧器の容量、あるいは直流リアクトルのインダクタンスは直流 16 kV、600 A の変換器出力に対応したものであるが、対地絶縁に関してはこれらの機器だけでなく、断路器、接地装置、直流変成器、避雷器など、すべての直流回路の構成機器が DC 125 kV 相当の絶縁設計が行われており、直流用ガス絶縁母線によって各機器間が接続されている。

なお、動作中の各部の波形を観測するため、あるいは人工的に地絡、短絡などの事故を発生させることができるように、変換器用変圧器と変換器の接続部及び直流回路の途中に、試験用のブッシング端子が取り付けられる構造となっている。

変換器の基本制御にはマイクロプロセッサを用いたデジタル制御を適用しており、全く同じ制御装置を 3 台並列に用いて 2 out of 3 の冗長構成として信頼性の向上を図っている。

表 3. 試験項目と試験結果

試 験 項 目		試 験 結 果
基 本 動 作 試 験	起動・停止試験	起動・停止に伴う異常な電圧、電流の発生、過渡的な電圧ひずみの発生はほとんど無し。 変換動作開始から最大出力まで 100 ms で立ち上げても安定。
	潮流反転試験	反転時間が 100 ms 程度まで安定に潮流反転可能。
	保護連動試験	定常運転中に保護リレーを強制動作させ、各保護シーケンス(ゲートシフト→ゲートブロック→再起動など)の動作を確認。
	制御特性試験	基本制御系の動作特性試験(ステップ応答)に関してはアナログ方式に遜色無し。 制御精度に関してはデジタル方式の優位性を確認。
	高調波特性試験	変換器から発生する非理論高調波電流は少なく、変換器の相間バランスが良好であること、デジタル制御・点弧装置の精度が良いことを確認。
試 験 結 果	ラジオノイズ測定試験	変換器より 20 m 地点ではラジオ聴取に影響無し。 ノイズ成分は 1 MHz 以下が主であり、変換所の密閉化で高周波ラジオノイズ成分を大きく低減可能。
	温度上昇試験	定格連続運転において、変換器のガス温度上昇は外気温に対し、18~20 deg であり、これからサイリスタ素子の温度上昇は外気温に対し最大 38 deg と推定され、ガス冷却方式で十分な冷却効果が得られることを確認。
	騒音試験	設備より 20 m 地点で 61 dB (A カーブ) の騒音。 補機(冷却プロフ)が最大の騒音源。
	電流断続試験	電流断続状態ではサイリスタ素子のゲート点弧回数が最大 4 倍になったが、機器には異常無し。
	小容量系統試験	インバータを定電圧制御モードで運転すると短絡容量比が 2 近くまで安定。定余裕角制御モードでは短絡容量比が 3 以下になると不安定。
人 工 故 障 試 験	直流回路短絡	直流リアクトル出力端での変換器短絡では、定電圧制御により短絡発生後約 7 ms で増大した電流(増分は定格電流の約 2 倍)を絞り始め、約 20 ms 後に元の電流値に戻ることを確認。
	変換装置異常	単発の通弧、失弧では電流失敗が発生するが、直ちに自復して運転継続可能。直流回路の電圧責務は全電圧起動事故が約 2 pu と最も厳しく、パルプの電流責務は整流器運転時のアーム短絡事故が最も厳しい。
	交流系異常	この設備は中性点非接地であり、1 線地絡は運転に影響しない。2 線短絡、3 線短絡では、電圧低下が小 (40% 低下) のときは運転を継続し、電圧低下が大 (70% 低下) のときは、停止→再起動となることを確認。 インバータ負荷遮断時に交流電圧が 1.8 pu 程度まで上昇する可能性がある。

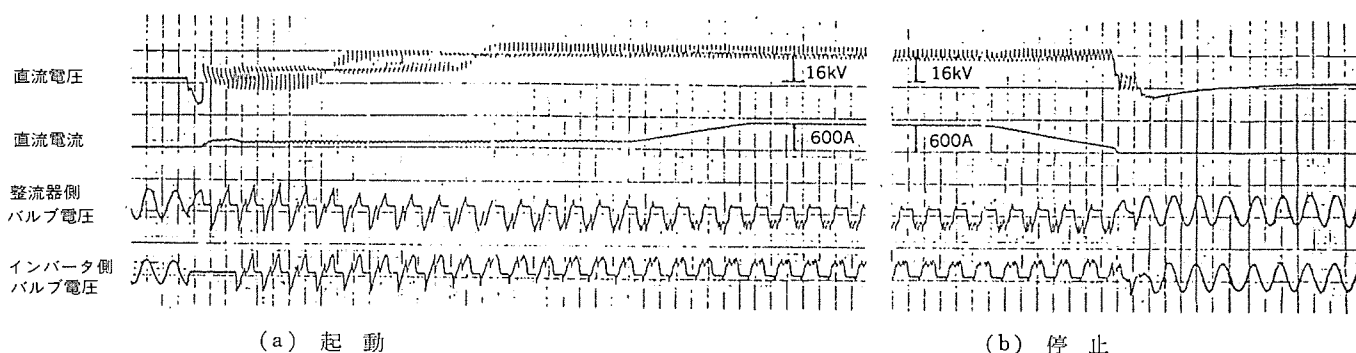


図 5. 起 動・停 止 試 験

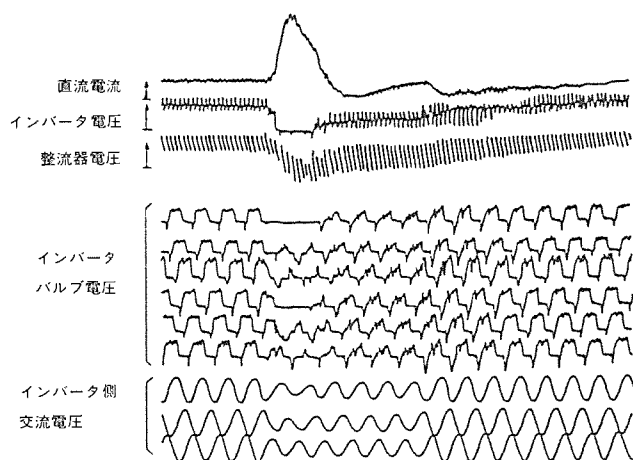


図 6. 交流 3 線短絡試験

3. 実施した試験の概要

システム全体の総合的な機能、性能を確認するために、Back-to-Back 構成の電力変換プラントとしての基本動作、基本特性の確認試験だけでなく、人工故障を含む数多くの試験を実施した。実施した試験の項目及び結果の概要を表 3. に示す。

試験結果の例として、図 5. に連系運転の起動・停止時の各部波形を、図 6. にインバータの交流系統で 3 線短絡を発生させたときの各部波形を示す。起動においては、電力変換動作の開始後、まず直流電圧を立ち上げ、続いて直流電流を立ち上げるようにしており、停止においては、直流電流を絞った後に変換器の動作を停止するようにして、変換器が交流系統との間で授受する有効・無効電力が、できるだけ滑らかに変化するように設定している。

交流系統の人工故障試験を実施するときは、図 1. に示した基本回路の a 点に直列に限流リアクトルを挿入して連系運転を行い、b 点において残留電圧調整用リアクトルを介して 2 線短絡、あるいは 3 線短絡事故を発生させることにより、事故模擬を行った。図 6. は、

図 1. に示す変換器 B がインバータ運転を行っているときに、交流電圧が約 40% 低下する交流 3 線短絡事故が発生したときの変換器の各部の波形を示しており、事故発生直後に転流失敗が発生するものの直ちに回復し、事故期間中においても変換器は電力変換を継続している様子を示している。

4. む す び

信頼性の向上、小形化、コストの低減を目指した大容量交直変換所の開発の第一ステップとして、①全密閉形であること、②変換器の制御にデジタル制御を適用したこと、を特色とする DC 125 kV の交直変換所モデルプラントを建設し、総合的な機能検証試験を実施してきた。この建設過程及び一連の試験を通じて、貴重な経験と多くのデータを収集することができ、今回の方式による高電圧・大容量変換所の実現の見通しと自信を得ることができた。なお、このモデルプラントは引き続いて連続運転を行っており、長期にわたる信頼性の実証試験を実施中である。

最後に、この研究推進に御尽力いただいた「関西電力(株)直流技術研究会」及びその他関係各位に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) S. Matsumura et al : New approach to SF₆ gas insulated HVDC converter station, IEEE/PES 1983 Winter Meeting
- (2) 松村ほか：SF₆ガス 絶縁交直変換所の開発、電気学会全国大会（昭 58）
- (3) 松村ほか：直流送電用 デジタル 制御への期待、電気学会 シンポジウム（昭 58）
- (4) M. Yuki et al : Development of digitalized control equipment for the HVDC transmission system, IEEE/PES. 1983 Summer Meeting
- (5) 松村ほか：SF₆ガス 絶縁全密閉形交直変換所 モデルプラント による試験、電気学会全国大会（昭 58）

1. ま え が き

直流送電の技術開発を行うに当たっては、機器の絶縁方式を決定することが、開発の成否を左右するほどの重大な要素であるが、このたびの関西電力(株)と三菱電機(株)との直流送電技術開発に関する共同研究では、慎重な検討の結果、 SF_6 ガスを直流機器の主絶縁材料として用いることが提案されたので、その可能性と現実的な設計手法を確立するための基礎研究を行った。

直流電界下における SF_6 ガスの絶縁特性は、支持絶縁体が存在しない場合には交流電界下の絶縁特性と変わらない。しかし、システム内に絶縁支持体が存在する場合には、絶縁体表面に電荷が蓄積するという直流電界下特有の現象が現れ、これらの蓄積電荷は電圧極性反転時には絶縁体の沿面せん(閃)絡電圧を低下させるように作用する可能性がある⁽¹⁾。

この報告はモデルスペーサを用いて調査したスペーサ上への電荷蓄積の基礎的特性・電荷蓄積機構について述べる。また、種々の形状のモデルスペーサを使用して電荷蓄積特性のほかにも、沿面閃絡特性に与える電圧極性反転効果、導電性粒子の影響などを観察し、直流ガス絶縁開閉装置に適したスペーサ形状についての検討結果を述べる。

2. 円柱形モデルスペーサ上への電荷蓄積

2.1 静電ブローブによる蓄積電荷の測定

図1. に示すモデル円柱スペーサ、電極構成を用いて、 SF_6 ガス中で絶縁体の表面上に蓄積する電荷の基礎的な特性を調べた。蓄積電荷量

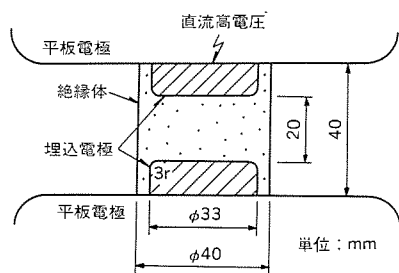


図1. モデル円柱スペーサと電極配置

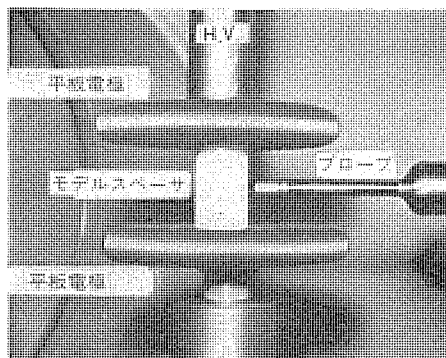


図2. 試験容器内に設置された静電ブローブ

の測定は、直流電圧除去したのち図2. に示す試験容器内に設置した静電ブローブを用いて行った。

スペーサ表面上に Q の蓄積電荷が存在しているとすれば、ブローブ先端には図3. に示しているように $-q$ の電荷が誘起される。電荷 q は振動容量形電位計に内蔵された容量 C により、 q/C という電位に変換されて増幅、出力される。電荷 Q が表面に分布して存在している場合には、誘起電荷 q は表面蓄積電荷密度に比例する。しかし、その比例係数はスペーサ形状に依存し、図3. のような電極構成ではブローブの垂直位置によって変る。ブローブ上に誘起された電荷量をスペーサ上の蓄積電荷密度 σ の形に変換するためには、 q と σ の関係がブローブの垂直位置の関数として与えられる必要がある。

図4. には σ/q とブローブの垂直位置 x との関係を3次元の有限要素法計算プログラムを用いて計算した結果を示す。この計算では、スペーサ表面上に σ なる密度の電荷が一様に存在していると仮定している。ブローブに誘起される電荷 q はブローブの相対するスペーサ表面上に蓄積した電荷密度には強く依存するが、ブローブの相対する以外のスペーサ表面に蓄積した電荷量に影響される度合は、比較的少ないことが確かめられているので、上述の換算方法は適切であろうと考えられる。

2.2 モデルスペーサ表面上の電荷蓄積分布と表面処理の影響

表面が未処理の試料に180 kVを10時間印加してのち、静電ブローブ及びダスト図形によって蓄積電荷分布を測定した結果を図5. に示

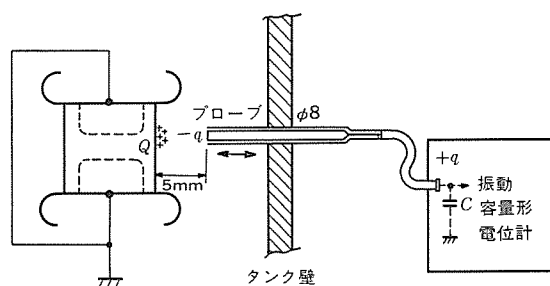
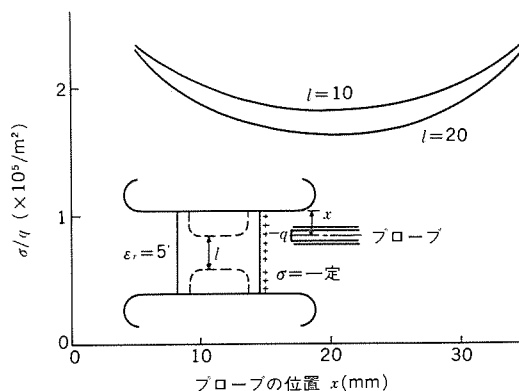


図3. 静電ブローブによる蓄積電荷の測定方法

図4. σ/q とブローブの垂直位置 x との関係

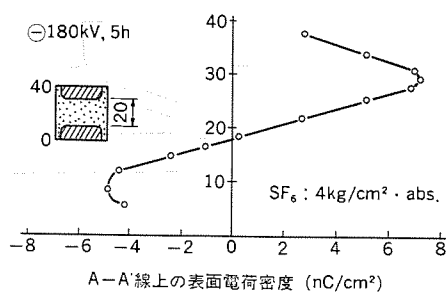


図 5. 未処理 モデルスペーサ 上の蓄積電荷分布

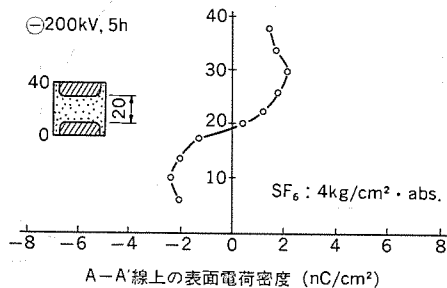
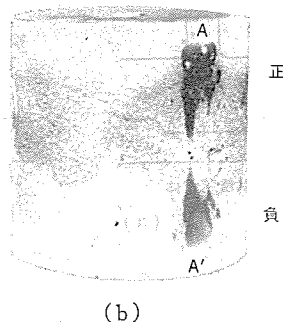


図 6. ホーニング 処理 モデルスペーサ 上の蓄積電荷分布

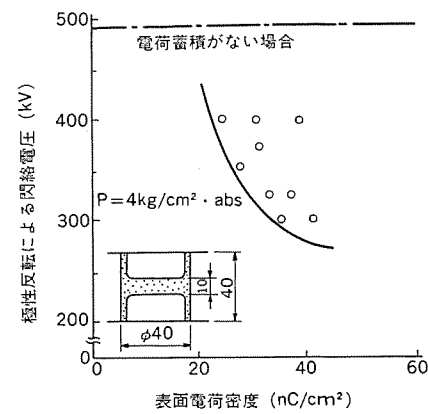
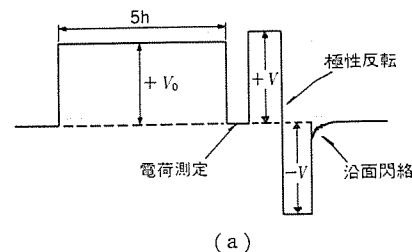
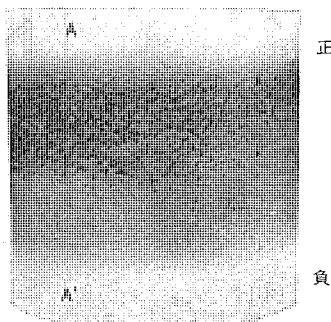


図 7. 極性反転試験の方法と蓄積電荷の沿面閃絡特性に及ぼす影響

している。図 5. (a) はヘテロ電荷が対称的に分布していることを示している。また、ダスト図形によって観察すると図 5. (b) のように電荷は局所的に蓄積しており、この局所的な蓄積パターンが表面未処理スペーサ上で観察される電荷分布の特徴である。一方、表面をホーニング処理した試料では、図 6. に示しているように電荷蓄積量は未処理試料よりかなり少なくなり、ヘテロ電荷がスペーサ表面上に一樣に蓄積するようになる。このように電荷の蓄積はスペーサ表面状態に大きく依存するが、一般に印加電圧が増すと蓄積電荷量も増加する。電荷の蓄積は印加電圧値のほかに課電時間にも依存するが、図 1. のモデルスペーサの場合、約 5 時間で飽和することが確認されている⁽²⁾。

表面が未処理のスペーサ上には電荷が局所的に蓄積する。このことは、表面が均一な状態でないことを示しており、表面が未処理のスペーサ上には表面電気伝導率のかなり高い部分が局所的に存在していると考えられる。つまり、局所的な電荷の蓄積はスペーサ表面上で電気伝導率の高い不均一領域で生ずると考えられ、以下この仮定の下に蓄積電荷密度を求める理論式を導くことにする。

E_z をスペーサ表面上の沿面方向の電界成分だとすると、エポキシの表面電気伝導率 σ_s は式 (1) のように表現されることが実験的に確認されている⁽¹⁾。

$$\sigma_s = \sigma_0 \exp(\alpha |E_z|) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで σ_0 は定数、 α は表面電気伝導率の電界依存係数である。スペーサ表面上に電気伝導率の高い領域が不均一に存在すると仮定したが、それは σ_0 の値の高い領域がスペーサ上に局所的に分布していることを意味する。スペーサ上を流れる表面電流密度 J_z は次式のように表される。

$$J_z = \sigma_s E_z = \sigma_0 E_z \exp(\alpha |E_z|) \quad \dots \dots \dots (2)$$

したがって、スペーサ表面上に時間 T_0 に蓄積する電荷密度を q_z とすると、

$$q_z = \int_0^{T_0} -\frac{\partial J_z}{\partial z} dt = \int_0^{T_0} -\frac{\partial}{\partial z} [\sigma_0 E_z \exp(\alpha |E_z|)] dt \quad \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。蓄積電荷密度が小さく当初の電位分布を乱さないとすれば、式 (3) は式 (4) のように表現される。

$$q_z \approx (\sigma_s \alpha T_0) E_z \cdot \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad \dots \dots \dots (4)$$

式 (4) から明らかなように、電荷は E_z と $\partial E_z / \partial z$ の積が大きく、かつ電気伝導率の高い領域上に蓄積する。

2. 3 蓄積電荷の沿面閃絡に及ぼす影響

埋込電極間の距離が 10 mm のモデルスペーサの開閉インパルス沿面閃絡電圧は、ガス圧 4 kg/cm² · abs のとき 490 kV である。直流の沿面閃絡電圧値も同程度であろうと推察される。

モデルスペーサ沿面に電荷が蓄積した状態で直流電圧の極性を反転させ、蓄積電荷の沿面閃絡電圧に与える影響を調べたのが図 7. である。図 7. (a) に示しているように、まず正極性の電圧 V_0 が 5 時間印加するが、この課電中に電荷がスペーサの沿面に蓄積する。5 時間後課電を中止して、スペーサ上の電荷密度分布を静電プローブによって測定する。その後、正極性電圧 V を試料に 10 分間印加した後、電圧の極性反転を行い沿面閃絡電圧を求めた。沿面閃絡は極性反転後 2, 3 秒以内の時間で生じた。沿面閃絡が生じないときは、電圧 V を 20 kV ずつ上昇させ破壊が起るまで繰返し試験を行った。蓄積電荷密度が 40 nC/cm² 程度に達すると、極性反転時の閃絡電圧は 270 kV 程度まで低下する。この閃絡電圧の低下は、沿面に蓄積したヘテロ電荷が極性反転時にはスペーサ沿面中央部の電界を強めるように作用したことによってもたらされたと考えられる。

3. 円すいスペーサ上への電荷蓄積

同軸円筒電極 (内径 60 mm, 外径 140 mm) 間に設置したモデル円すいスペーサについて電荷蓄積現象を調べた。円すいスペーサは図 8.

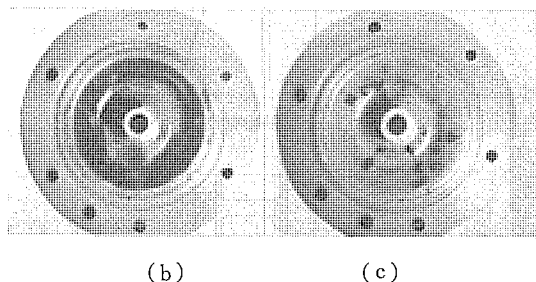
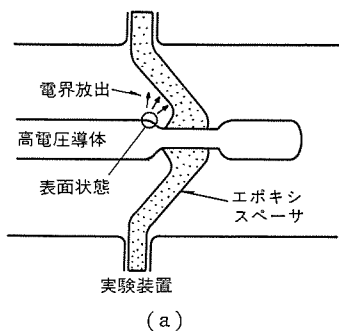


図 8. 同軸円筒電極間に取り付けられた円すいスペーサ(a)と円すいスペーサ上に蓄積した電荷のダスト図形(b), (c)

(a)のように取り付けており、中心導体の表面粗さの効果を調べるために2種類の表面粗さをもつ中心導体を用いた。一つは表面粗さが20~30 μm に研磨された導体であり、他方はエメリー紙(#2000)によって表面粗さが5 μm 程度にまで滑らかに研磨された導体である。

表面が粗である導体に負極性の直流電圧150 kVを5時間印加すると、図8.(b)に示しているように円すいスペーサの凹部表面上に環状に負極性の電荷が蓄積する。しかし、正極性の直流電圧を印加した場合は負の電荷蓄積は観察されない。一方、表面が滑らかに研磨された中心導体に負極性150 kVを5時間印加すると、図8.(c)に示しているように円すいスペーサの凹部に局所的にヘテロ電荷が蓄積し、図(b)のような多量の負の電荷の蓄積は観察されなかった。

このような実験事実から円すいスペーサ上に蓄積した負電荷は、負極性に充電された中心導体上で生じたField Emissionによってもたらされたと考えられる。すなわち、負の電荷は粗表面をもつ中心導体上の微小突起から電界放出された電子により供給される。電界放出された電子は、すぐに分子に付着して負イオンを形成し、負イオンは電界方向に沿ってガス中を移動し、図8.(b)に示したように円すいスペーサの凹面に蓄積する。電界放出が生じた箇所は、図8.(a)に示した中心導体のシールド曲線部であろうと推察される。

同軸外部導体の内面も粗表面であったが、中心導体に正の直流電圧を印加しても円すいスペーサの凸面には負の電荷の蓄積は観察されなかった。これは外部導体上の電界が電界放出を生ずるほど高くなかったためであろう。また、電界放出による表面電荷の蓄積は、高電界部分に表面が滑らかに研磨された導体を用いることによって抑制される。

4. スペーサ形状の検討

4.1 同軸形スペーサの形状

同軸形スペーサとして図9.に示した円板形及び2種類の円すい形スペーサを図8.(a)の同軸円筒電極間に設置して、直流電圧破壊特性、

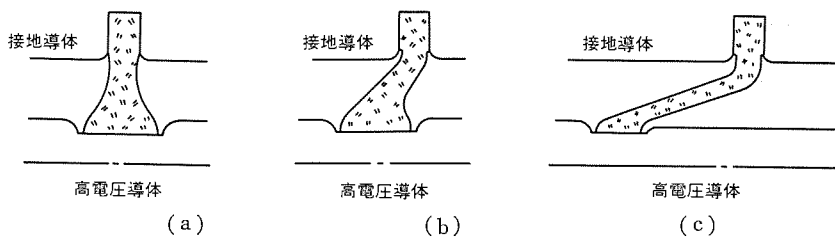


図 9. 同軸形スペーサ形状

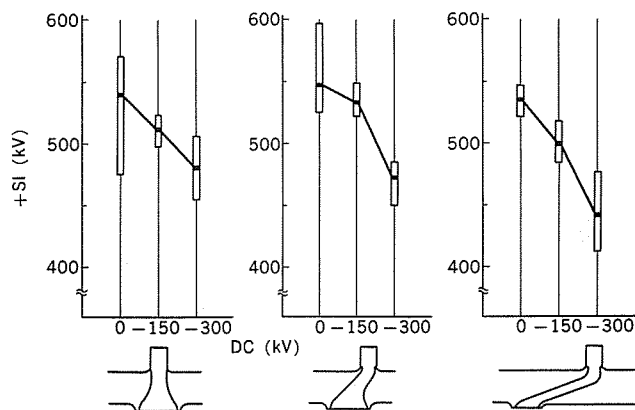


図 10. (負)直流前課電による(正)開閉インパルス印加時の同軸形スペーサの絶縁特性 (ガス圧力 $P=4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$)

開閉インパルス破壊特性、極性反転試験及び金属粒子の破壊に及ぼす影響について実験を行い、スペーサの基本形状について検討した。

短時間の直流電圧破壊特性を求めると、3種類のスペーサ間の破壊特性には形状による差は認められず、破壊電圧は400 kV前後で電圧極性による差もなかった。電荷の蓄積について比較すると、中心導体に負極性電圧300 kVを印加したとき図9.(c)に示した開き角度の小さい円すいスペーサの凹面に電荷が最も多く蓄積し、円板形スペーサ上には電荷の蓄積はほとんど観察されなかった。この蓄積電荷が正極性の開閉インパルス電圧印加時にスペーサの沿面閃絡特性に対してどのような影響を与えるかを調べたのが図10.である。直流前課電として-150 kV及び-300 kVを1時間課電した。電荷の蓄積形態から予想されるとおり、図9.(c)のスペーサが最も極性反転の影響を受け、破壊電圧は直流前課電が-150 kVのときでも著しく低下し、その低下は25%にも及ぶ。一方、図9.(b)のスペーサは-300 kV前課電時の場合に影響を受けるが、-150 kVにおいては破壊電圧の低下は少ない。図9.(a)のスペーサが極性反転の影響が最も少ない。

一方、金属粒子をスペーサの中心電極近傍、接地タンク近傍及びその中間の表面上に固定し、正極性の直流電圧を印加して沿面閃絡特性を求めた。金属粒子の影響を最も受けるのは円板形スペーサで、開き角度の小さい円すい形スペーサでは金属粒子の影響が最も少ない。このように金属粒子に対しては沿面長が長いスペーサほど影響が少ないことがわかる。

以上のような結果から、直流用同軸形スペーサの絶縁特性上からみた基本形状としては、図9.(b)のような開き角度の大きい円すいスペーサが適している。

4.2 柱状スペーサの形状

図11.に示すような基本形状の柱状スペーサを図8.(a)の同軸電極間に設置して、直流電界下で使用するのに適すると考えられる柱状

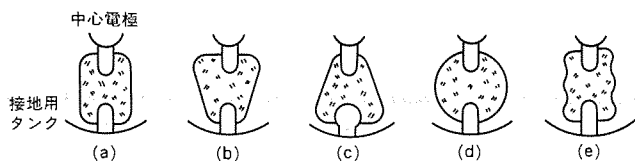


図 11. 柱状 スペース形状

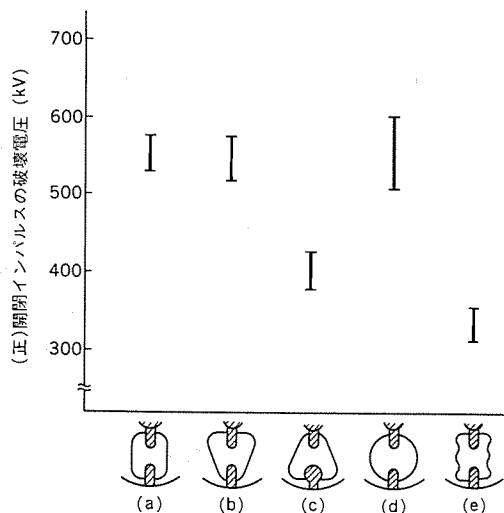


図 12. (負)直流前課電による(正)開閉インパルス印加時の柱状スペースの絶縁特性 (ガス圧力 $P=4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{abs}$)

スペースの形状の検討を行った。

直流破壊電圧特性は、同軸形スペースの場合と同様に柱状スペースの場合も、5種類のスペース形状間には差異は見られず、正負両極性において破壊電圧は400 kV以上であった。300 kVの直流電圧を印加して電荷蓄積量を5種類のスペース間で比較すると、図11.(e)に示したヒダ付きスペースに最も多く正負の電荷が交互に蓄積した。次いで、電荷の蓄積量が多いのは図11.(c)の円すい形スペースであり、(a)、(b)、(d)のスペース形状では比較的電荷の蓄積は少ないという結果が得られた。更に、負の直流前課電ののち正の開閉インパルスを印加して蓄積電荷の沿面閃絡に与える影響を調べると、図12.に示しているように、その影響は図11.の(b)と(f)の形状のスペースにおいて著しく、ヒダ付きスペースでは閃絡電圧が350 kV程度まで低下する。一方、(a)、(b)、(d)のスペース形状では極性反転の影響が小さい。

また、金属粒子をスペースの中心電極近傍、沿面の中央部及びその

中間に固定して、直流沿面閃絡特性を調べたところ、その閃絡電圧はスペース形状による差はなく400 kV前後の電圧値であった。このように、柱状スペースでは同軸形スペースに比べて金属粒子によって受ける影響が少ないことがわかった。

直流用柱状スペースの絶縁特性上からみた基本形状としては、図11.(a)、(b)、(d)のスペース形状が適していると考えられる。

5. む す び

以上の結果から、直流電界下におけるスペースへの電荷蓄積現象、スペースの基本形状に関して次のような結論が導かれた。

(1) 基礎的なモデル円柱スペース上にはヘテロ電荷が蓄積し、表面処理の影響を強くうける。また、蓄積した電荷は電圧極性反転時には沿面閃絡特性を低下させるように作用する。

(2) 表面未処理のスペース上には局所的に電荷が蓄積し、この電荷蓄積は表面上に局在する電気伝導率の高い不均質領域での電気伝導によって生ずると考えられ、表面電気伝導を基にした理論と実験との間にはよい一致が見られた。

(3) ホーニング表面処理を行うと、表面未処理試料に比べて蓄積電荷量は減少し、また電荷は表面に一樣に蓄積するようになる。これはホーニング処理によって表面に局在した不均質領域が取り除かれたためと考えられる。

(4) 同軸円筒電極間に設置された円すいスペース凹面上には、負極性に充電された粗表面をもつ中心導体からの電界放出により、負電荷が蓄積することが観察された。

(5) 電荷蓄積特性のほかに直流前課電開閉インパルス試験や金属粒子から受ける影響などを検討し、絶縁特性上から見れば直流用の同軸形スペースとしては開き角度の大きいスペースが、また柱状スペースとしては円柱形・逆円すい形・球形のスペースが適していることが判明した。

以上の研究結果から直流高圧機器の絶縁に関しても、適切な設計面での配慮を行うことによりSF₆ガス絶縁方式が極めて有効であることが分かった。

最後に、この研究推進に御尽力いただいた「関西電力(株)直流技術研究会」及びその他関係各位に深く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) K. Nakanishi, A. Yoshioka, Y. Arahata & Y. Shibuya : IEEE '83 PES Summer Meeting, 83 SM 306-8
- (2) 仲西ほか：絶縁材料研究会資料, EIM-82-34

1. ま え が き

直流送電用交直変換装置に使用されるサイリスタバルブの高圧化・大電流化に伴い、これに使用する素子数を低減し、装置の小形軽量化・高信頼度化を図るため、サイリスタの高耐圧大容量化が求められてきた。この要請に対し、最近では耐圧 4,000 V、電流量 1,500～3,000 A の高耐圧大容量サイリスタが実用化されている⁽¹⁾。これら高耐圧大容量素子の光トリガ化は、主回路と制御回路間の電氣的絶縁が容易で、耐ノイズ性に優れ、制御系の簡素化を図れるという回路上大きな利点を生むことから、特に直流送電用などの超高压電力変換装置の分野で、高耐圧大容量素子の光トリガ化に対する強い要請がある。

今回、この要請にこたえ得る直流送電サイリスタバルブを対象とした耐圧 6,000 V、電流量 1,500 A、最小光トリガパワー 7 mW 以下、ターンオフ時間 400 μ s 以下という特性定格をもつ高耐圧大容量光トリガサイリスタ(形名: FT 1500 FU) とこの光トリガサイリスタを十分にハイゲートドライブできるバンドルファイバ端光出力 100 mW の特性をもつ大出力 LED アレーモジュールを開発した。同時にこの光トリガサイリスタと同じ特性定格の電気トリガサイリスタ(形名: FT 1500 DU) も開発した。図 1. に今回開発した FT 1500 FU とそれをトリガするための大出力 LED アレーモジュール及び FT 1500 DU の外観を示す。

ここでは、主として高耐圧大容量サイリスタと高耐圧大容量光トリガサイリスタの設計・構造・特性について述べ、次に光トリガサイリスタをトリガするための LED の設計・構造・製法・特性について述べる。

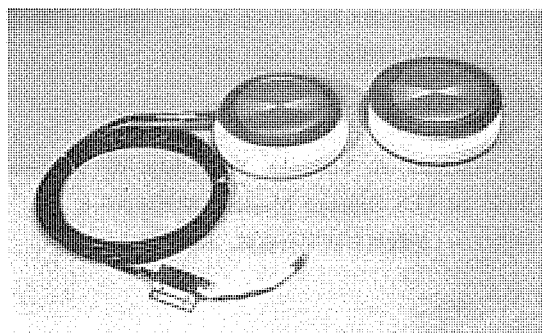


図 1. FT 1500 DU (右) 及び FT 1500 FU と LED アレーモジュールの外観

2. 高耐圧大容量素子の設計と構造

サイリスタの高耐圧化は、オン電圧の増加をもたらし、電流量の低下をひき起こす。このため、電流量を増やすには、サイリスタを大口径化することが必要であるが、サイリスタを構成するシリコンウェーハを大口径化するほど、電氣的に均質な接合や良好なオーミック接触を得ることが困難になる。これらの問題に対しては、先に開発したウェーハ直径 100 mm、耐圧 4,000 V、電流量 3,000 A の特性定格をも

つ高耐圧大容量サイリスタ(形名: FT 3000 AV) の製造技術がウェーハ直径 85 mm の FT 1500 FU と FT 1500 DU に適用された⁽¹⁾。ここでは、まず電気及び光トリガサイリスタの高耐圧大容量化に伴う問題とその対策という観点から、素子の設計と構造について述べ、次に高耐圧大容量光トリガサイリスタ特有の設計と構造について述べる。

2. 1 高耐圧大容量サイリスタの設計と構造

サイリスタは、高耐圧化に伴いベース層の厚みが増加し、電流量やスイッチング特性などが低下するという性質がある。今回開発した素子では、中性子線ドーピングウェーハ(NTD)を用いて、ベース層の厚みを最適化設計することにより、従来素子に比べてオン電圧とスイッチング特性の改善を図っている。また、オン電圧を低減するには、ベース層の少数キャリアライフタイム(τ)が、できるだけ長いことが望ましいが、長すぎる τ は、ターンオフ時間(t_q)の増加や逆回復電荷(Q_{rr})の増加をもたらし、実用上問題となる。

FT 1500 DU と FT 1500 FU では、接合形成のための不純物拡散プロセスで長いキャリアライフタイムを実現した後、サイリスタの J_1 , J_2 接合近傍の少数キャリアライフタイムを短く、しかもベース層中央部付近においては比較的長くする金を用いたライフタイム制御技術を開発し、これを適用した⁽²⁾。これらの素子では、この技術の適用によって 400 μ s 以下という短かいターンオフ時間を実現しながら、オン電圧、逆回復電荷、漏れ電流の低減を図ることが可能となっている。また、ショートエミッタの幾何学的配置の適切化と高密度化をこれらの素子に適用することにより、オン電圧とターンオフ時間の改善を図っている⁽³⁾。

また、一般に大口径サイリスタでは、大口径シリコンウェーハの全面積を有効に使うために、主サイリスタのゲート周縁長を大きくした構造の増幅ゲートが用いられる。主サイリスタのゲート周縁長が大きくなるにつれ、主サイリスタのエミッタ周縁を均一に、しかも一斉にターンオンさせるための電流も大きくなる。それに伴いターンオンスイッチング時に補助サイリスタの初期点弧領域の電流密度が高くなり、この領域の温度上昇をもたらし結果、初期点弧長に比べ主サイリスタのエミッタ周縁長が大きいサイリスタでは、 di/dt 耐量が低下する傾向がある。この傾向は、サイリスタの耐圧を高くするほど顕著になる。

このような高耐圧化に伴う di/dt 耐量の低下を改善するため、FT 1500 DU では図 2. に示す指形の 2 段増幅ゲート構造を採用している。また、6,000 V 以上の耐圧を実現し、しかもオン電圧の低減を図るため、従来のポジティブベールとネガティブベール構造の組み合わせによる表面安定化構造に比べて、大きな有効カソード面積を得ることができ、しかも高耐圧化を図りやすいダブルポジティブ形状の表面安定化構造を採用している。その形状と電界分布の関係を数値解析により求め、形状の最適化が図られている。これらの製造技術、設計方法の開発により、高耐圧大容量化に伴う問題に対処して、FT 1500 DU-120 と FT 1500 FU-120 を実現した。

2. 2 光トリガサイリスタの設計と構造

光トリガサイリスタでは、受光部に入射した光により、受光部下の中央接合近傍で電子-正孔対が生じ、電気トリガサイリスタのゲート電流と

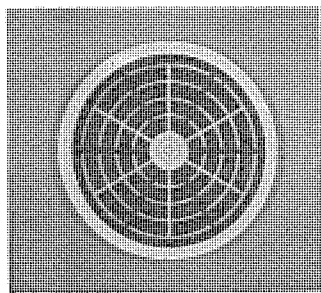


図 2. FT 1500 DU の
ベーシックエレメント

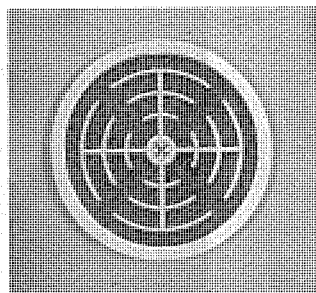


図 3. FT 1500 FU の
ベーシックエレメント

同じ作用をする励起電流となり、光トリガサイリスタをターンオンさせる。光トリガサイリスタの励起電流は、光源の光出力の制約から、電気トリガサイリスタのゲート電流に比べ約2けた(桁)程度小さい。このため光トリガサイリスタでは、電気トリガサイリスタに比べ、ゲートトリガ感度を2桁程度高くすることが必要となる。

一方、 dv/dt による変位電流は、この励起電流と同じ作用をするため、光トリガ感度と dv/dt 耐量の間には、光トリガ感度を高くすれば di/dt 耐量が低下するといういわゆるトレードオフの関係がある⁽⁴⁾。このトレードオフの関係を改善するためには、小さな受光部に光を集中的に入射させる方法があるが、小さな受光部構造をもつサイリスタは、初期ターンオン領域も小さくなるため、先に述べたような di/dt 耐量が低下する傾向が一層顕著になってくる。これに対して FT 1500 FU では、図 3. に示す小さい受光部構造と3段増幅形のゲート構造を組み合わせることにより初期点弧領域における電流集中を軽減してこの di/dt 耐量の低下を防ぎ、光トリガ感度と dv/dt 耐量、 di/dt 耐量間のトレードオフの改善を図っている。

先にも述べたように、受光部の面積は、光トリガ感度と dv/dt 耐量との間のトレードオフを改善するために、できるだけ小さい方が好ましい⁽⁵⁾。一方、パッケージの外側から入射する光信号を受ける内部ライトガイドの入射端の直径は、高い入射効率を得るために、できるだけ大きい方が好ましいが、小さな受光部への入射効率を低下させてしまう。この相矛盾する課題を解決するため、図 4. (a) に示すように内部ライトガイドの形状を光入射端では太く、光出射端に向って順次細くなるテーパ状にし、その先端部分をライトガイドの直径に対し大きな曲率半径で直角に曲げる形状とした。また、この形状は光の無損失伝送路となるよう数値解析により決定された。

図 4. (a) に示すパラメータを用いたとき、無損失条件を決定するそれぞれのパラメータの関係は、図 4. (b) のようになる。図 4. (b) は、その線群による曲面内に囲まれた範囲にパラメータを採ればライトガイドに入射した光は、無損失で出射端まで伝送できることを示している。このように設計された内部ライトガイドを用いたパッケージ内の光伝送系は、入射端や出射端での反射損失や入射端と光伝送系の位置ずれによる損失を含んでも、光伝送効率70%以上という高い値を実現している。図 5. に示す内部ライトガイドをパッケージ側面から貫通させる部分の気密封止については、パッケージと内部ライトガイドそれぞれの熱膨張係数の差による応力を緩和する構造を開発して、リークレート 1×10^8 cc/s 以下という気密封止を実現して、光トリガサイリスタの高い信頼度を実現することを可能とした。

3. 特性と定格

前節に述べた種々の製造技術と、設計方法を適用することにより実

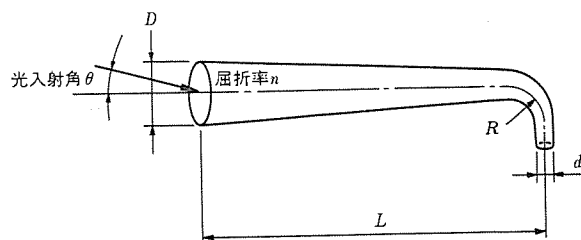


図 4. (a) ライトガイドの形状

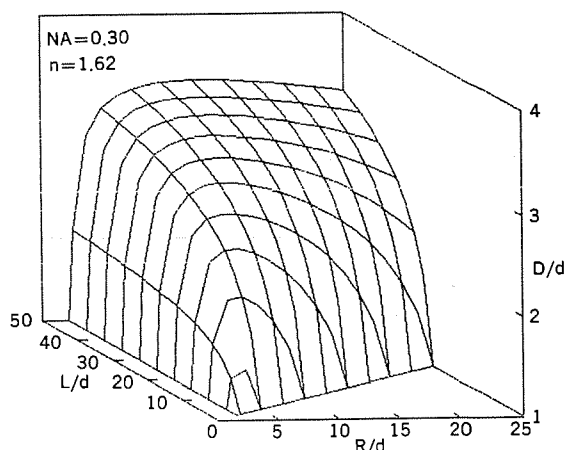


図 4. (b) ライトガイドの無損失条件 (ただし、 $NA = \sin \theta$)

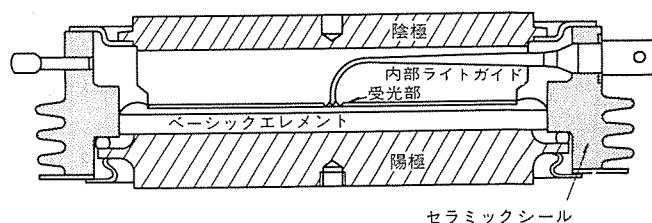


図 5. 光トリガサイリスタの断面構造概略図

現された FT 1500 FU-120 と FT 1500 DU-120 の主な最大定格と特性の概略を表 1. に示す。次に主な項目について説明する。

3. 1 電圧阻止特性

定格ピーク繰返しオフ電圧、定格ピーク繰返し逆電圧は、FT 1500 FU-120 と FT 1500 DU とも 6,000 V である。FT 1500 FU-120 の順逆阻止特性の例を図 6. に示す。

3. 2 di/dt 特性

高耐圧化を図る上で課題となっていた di/dt 耐量は、FT 1500 FU については、3段増幅ゲート構造の採用で、FT 1500 DU については、指形の2段増幅ゲート構造の採用で、200 A/ μ s 以上を実現している。図 7. に FT 1500 FU-120 の di/dt 耐量試験時の電流—電圧波形の一例を示す。

3. 3 最小光トリガパワーと dv/dt 特性

FT 1500 FU-120 の最小光トリガパワーは、室温、陽極—陰極間電圧 6 V の条件下で、7 mW 以下を実現し、しかも dv/dt 耐量は 2,000 V/ μ s 以上という大きな値を得ている。このため、 dv/dt を抑制するための CR スーパーを小さくすることができる。

3. 4 ターンオン特性

図 8. に FT 1500 FU-120 の光トリガパワーとターンオン遅れ時間の関係の一例を示す。この図から光トリガパワーが、最小光トリガパワーの5倍以上あればターンオン遅れ時間はほぼ飽和状態に達し、その時間も2

表 1. FT 1500 FU 及び FT 1500 DU の
最大定格と電気的特性

最大定格

記 号	項 目	条 件	定格値	単位
V_{RRM}	ピーク繰返し逆 電圧		6,000	V
V_{DRM}	ピーク繰返しオ フ電圧		6,000	V
$I_{T(AV)}$	平均オン電流	商用周波数 正弦半波 $T_J=67^\circ\text{C}$	1,500	A
di/dt	臨界オン電流上 昇率	$V_D=\frac{1}{2}V_{DRM}$, $I_{TM}=3,000\text{ A}$, $P_L=70\text{ mW}$ $T_J=125^\circ\text{C}$, $C=1\text{ }\mu\text{F}$, $R=20\text{ }\Omega$	200	A/ μs
T_J	接 合 温 度		-40 ~+125	$^\circ\text{C}$

電気的特性

記 号	項 目	条 件	定格値	単位
I_{RRM}	逆 電 流	$T_J=125^\circ\text{C}$, V_{RRM} 印加	300	mA
I_{DRM}	オ フ 電 流	$T_J=125^\circ\text{C}$, V_{DRM} 印加	300	mA
V_{TM}	オ ン 電 圧	$T_J=125^\circ\text{C}$, $I_{TM}=4,800\text{ A}$	3.0	V
dv/dt	臨界オフ電圧上 昇率	$V_D=\frac{1}{2}V_{DRM}$, $T_J=125^\circ\text{C}$	2,000	V/s
(注) P_{LT}	最小光トリガバ ワー	$V_D=6\text{ V}$, トリガパルス幅 200 μs $T_J=25^\circ\text{C}$	—	7 mW
(注) t_{gt}	ターンオン時間	$V_D=\frac{1}{2}V_{DRM}$, $I_{TM}=1,500\text{ A}$ $P_L=70\text{ mW}$	6	μs
(注) t_d	ターンオン遅れ 時間	ターンオン時間に同じ	—	2 μs
t_q	ターンオフ時間	$I_{TM}=1,500\text{ A}$, $di/dt=-2.5\text{ A}/\mu\text{s}$ $dv/dt=20\text{ V}/\mu\text{s}$, $V_{DM}=\frac{1}{2}V_{DRM}$ $T_J=125^\circ\text{C}$	400	μs
Q_{rr}	逆回復電荷	$I_{TM}=1,500\text{ A}$, $di/dt=-2.5\text{ A}/\mu\text{s}$ $T_J=125^\circ\text{C}$	3,000	μC

注 定格値の欄で、電気トリガサイリスタ (FT 1500 DU) は左側、光トリガサイ
リスタ (FT 1500 FU) は右側に記す。

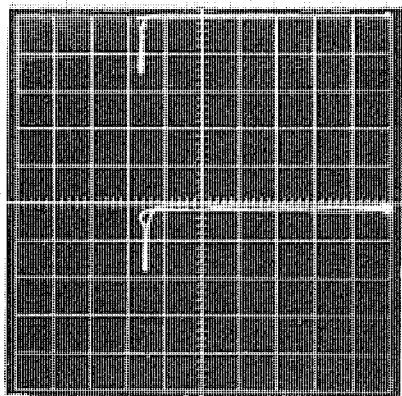


図 6. 順逆阻止特性 (上はオウ電圧, 下は逆電圧,
縦軸 10 mA/div, 横軸 1 kV/div)

μs 以下という非常に短い値となることがわかる。

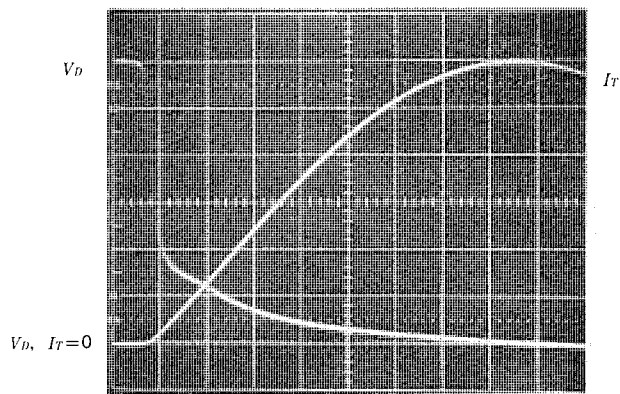


図 7. ターンオン時の電流—電圧波形 (縦軸 I_T : 500 A/div,
 V_D : 500 V/div, 横軸 時間: 2 $\mu\text{s}/\text{div}$)

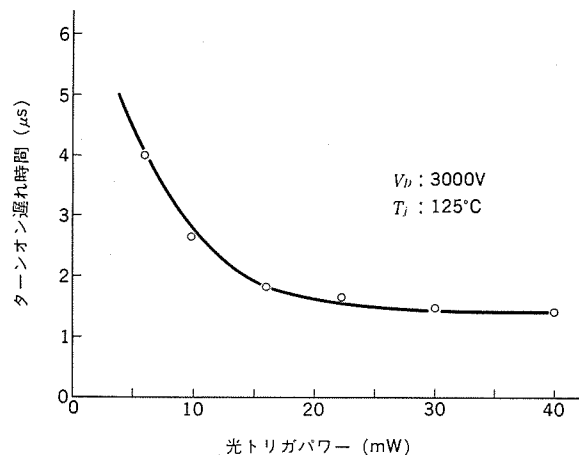


図 8. 遅れ時間の光トリガパワー依存性

4. 光トリガサイリスタ用 LED

光トリガサイリスタ用 LED に要求される基本的な要件として、次の点をあげることができる。

- (1) 発光波長がシリコンの受光波長域に一致していること。
- (2) 光ファイバとの結合が容易で、高効率の結合が可能な構造であること。
- (3) 大出力であること。
- (4) 高信頼度であること。

当社には、光通信、計測などの分野で既に実績のある当社独自の構造をもった光出力 1 mW クラスの高放射輝度で、高信頼度の AlGaAs 系 LED がある。今回我々は、この技術を基盤にして、光トリガ用 LED のキーポイントである高出力化を図るため、発光部を分割配置する方式を採用し、3 点発光形高出力 LED を開発した⁽⁶⁾。

4.1 構造及び製法

図 9. (a) に 3 点発光形高出力 LED のチップ上面図を示す。3 点の発光部を分散配置すれば、発光部での発熱を分散できるため、その分だけ熱的に有利になる⁽⁷⁾。したがって分散配置した 3 点発光形の構成をとることによって、熱による光出力の飽和限界を上昇させ、高出力化を図ることが可能となる。図 9. (b) に球レンズを装着した状態での断面構造図を示す。

四層構造は、液相エピタキシャル成長法によって形成されている。エピタキシャル成長層の結晶の良否は、LED の特性はもちろんのこと、

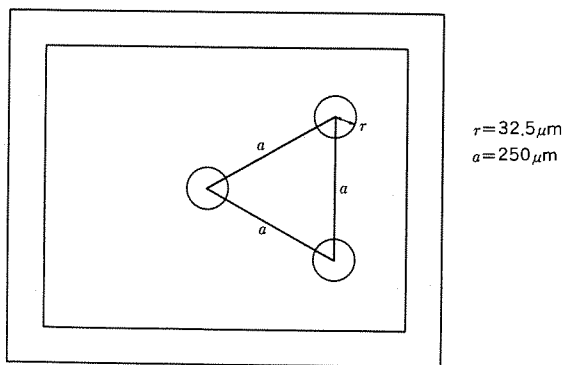


図 9. (a) 3点発光形高出力LEDのチップ上面図

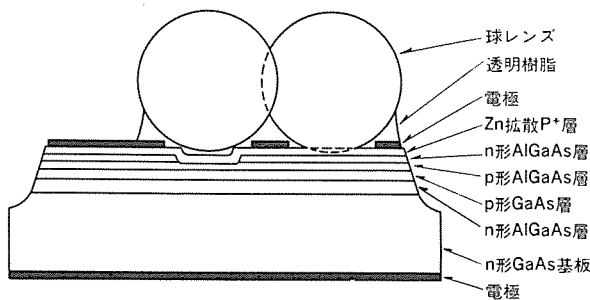


図 9. (b) 球レンズを装着した状態での断面構造図

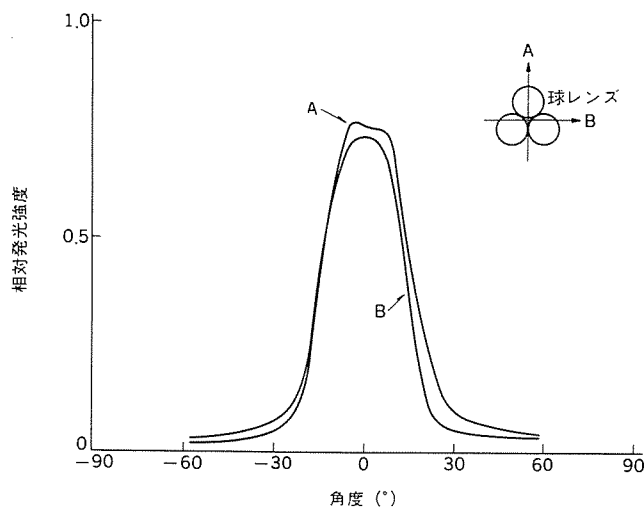


図 10. 3点発光形高出力LEDの遠視野像

その動作寿命を決定する重要な要因である。成長炉内の雰囲気ガスである水素中に含まれる酸素は、非発光再結合中心生成の原因となるため、炉内酸素濃度は0.01 ppm以下に抑えられている。

n形GaAs基板上に順次形成されたn形AlGaAs層、p形GaAs層、p形AlGaAs層はダブルヘテロ構造を構成している。そのため発光部をp形GaAs層に限定することができ、高い内部発光効率を得ることができる。

Zn拡散p⁺層とp形AlGaAs層とで挟まれたn形AlGaAs層は、動作時には電流を阻止する働きがあるので、電流はZn拡散p⁺層とp形AlGaAs層が直接接している凹部へ集中的に流れる。したがって高電流密度の動作が可能となり、凹部より高輝度発光を得ることができる。高電流密度動作では、電流分布の発光面内不均一は電流の局所的な集中を招き、LEDの出力限界を低下させる原因ともなる。電流分布の均一化を図るために、凹部を均一に掘り込むエッチ

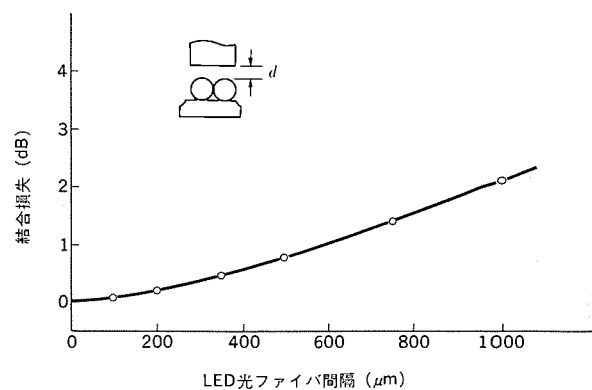


図 11. 3点発光形高出力LEDと光ファイバの結合特性 (I)

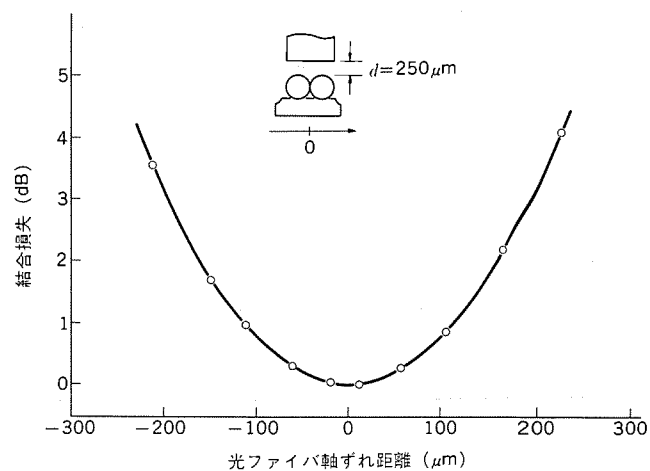


図 12. 3点発光形高出力LEDと光ファイバの結合特性 (II)

ング方法、及び電気抵抗の低いZn拡散層の得られる拡散技術が使われている。

4.2 特性及び定格

図10.に3点発光形高出力LEDの遠視野像を示す。半値全角は約33°であり、球レンズの光集束効果により鋭い指向性が得られている。

図11., 図12.に3点発光形高出力LEDと光ファイバ(コア径500 μm, 開口数0.30)との結合特性を示す。図11.はLED・光ファイバ間隔に対する結合損失を示しており、間隔が350 μm以内の範囲では結合損失は0.5 dB以下である。図12.はLED・光ファイバ間隔を250 μmで一定にしたときのLEDの中心からの光ファイバの軸ずれに対する結合損失を示しており、軸ずれが85 μm以内の範囲では、結合損失は0.5 dB以内となっている。このように、LEDと光ファイバとの結合における許容位置ずれが大きいので、LEDのアレー化と光ファイバのアレー化を行えば、結合損失の少ないアレー形LEDモジュールの製作が容易になる。

図13.に7個構成によるLEDアレーを繰返し周波数60 Hz, パルス幅20, 50, 100 μsでパルス駆動したときの光出力対電流特性、及びこのLEDアレーを光ファイバアレーに結合したLEDアレーモジュールによる光ファイバ端での光出力対電流特性を示す。LED・光ファイバ結合効率は約23%であり、駆動電流11 Aでファイバ端光出力は100 mWが得られている。光トリガサイリスタをハイゲートドライブするには最小光トリガパワー7 mWの5倍程度の光出力が必要とされているので、このファイバ端光出力は十分満足できるものである。

光出力の立ち上がり時間は0.1 μs以下で極めて速い。

5. む す び

今回開発した高耐圧大容量光トリガサイリスタ(形名:FT 1500 FU-120)と、それをトリガするための高出力LEDの設計、構造と特性定格を中心に述べた。今回の素子開発において、新たに開発した製造技術、設計技術を基盤としてオン電圧、ターンオフ時間、逆回復電荷、 di/dt 耐量、 dv/dt 耐量など諸特性の改良が可能となり、またLEDについても高出力化高信頼度化が推進されたことから、8,000 V 級光トリガサイリスタの実現も可能である。

また、サイリスタの動特性を損なわずに高耐圧化を可能とする諸特性の改良、設計・製造・適用技術など関連技術開発は、今後更に進展することが期待され、10,000 V 級光トリガサイリスタの開発の見通しが出てくるものと考えられる。

これらの高耐圧大容量光トリガサイリスタの開発は、今後直流送電用サイリスタバルブの進歩に大きく貢献するものと期待される。

最後に、この開発にあたり、開発推進の機会とごべんたつを賜った「関西電力(株)直流技術研究会」の関係各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) K. Kamahara et al : 4,000 V, 2,500 A High Voltage High Power Thyristor, IEEE, IAS Annual Meeting, p. 1022 (1977)
- (2) A. Tada et al : Improvement in Trade-off between Turn-off Time and Other Electrical Characteristics of Fast-Switching Thyristor, JPN, JAP Vol. 21, No. 4, pp.617 (1982)
- (3) A. Tada et al : High Voltage High power Reverse Conducting Thyristor For High Frequency Chopper Use, IEE of JPN IPEC-Tokyo pp. 585 (1983)
- (4) D. Silber et al Progress in Light Activated Power Thyristor, IEEE Trans. on Electron Device, Vol. ED 23, No. 8, pp. 899 (1976)
- (5) V. Temple et al : High Power Dual Amplifying Gate Light Triggered Thyristor, IEEE Trns. on Electron Device, vol. ED 23, No. 8. pp. 893 (1976)
- (6) 小久保ほか : 3点発光形高出力LED, 昭和57年度電子通信学会光電波部門全国大会予稿 446
- (7) 小久保ほか : 複数個の発光部をもつLEDの熱抵抗, 第29回応用物理学会関係連合講習会予稿 p. 646 (昭57)

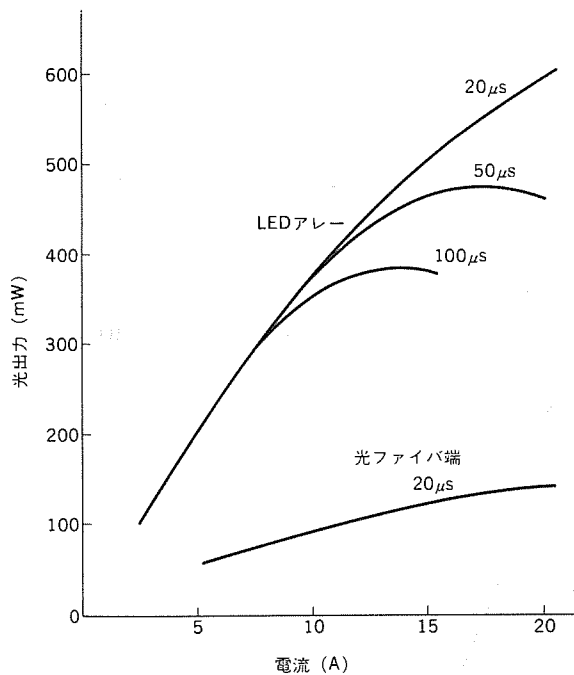


図 13. LED アレー及び光ファイバ端での光出力対電流特性

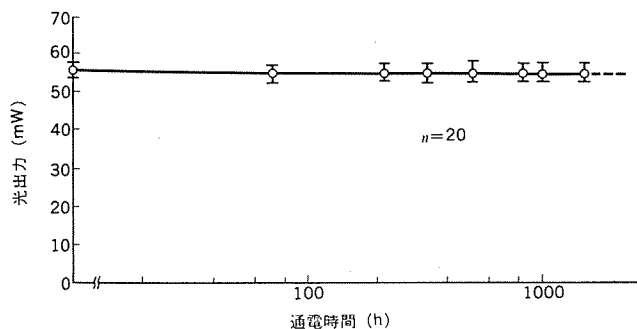


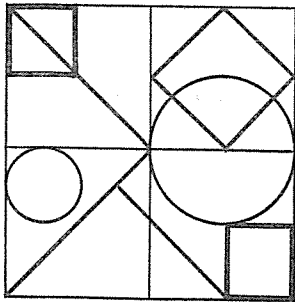
図 14. 3点発光形高出力LEDのパルス通電による光出力の経時変化

4. 3 寿 命

図 14. に 3 点発光形高出力LEDのパルス通電による加速寿命試験結果を示す。試験条件は、周囲温度 140°C、繰返し周波数 1 kHz、ピーク電流 1.5 A、パルス幅 50 μs である。通電時間 1,500 時間を経過しても、光出力の変動はほとんどなく、長寿命の達成が期待できる。

特許と新案 有償開放

有償開放についてのお問合せ先 三菱電機株式会社 特許部 TEL (03) 218-2136



低温倉庫 (特許 第1025834号)

発明者 茶谷三郎・西村正雄

この発明は、低温倉庫内の温度制御に関するもので、広い倉庫内に複数の冷却用クーラユニット、攪拌用ファン、温度分布検出用の温度計を設置し、電子計算機により冷却負荷計算を行って目標温度に室温を保つための負荷計算を行ない、各冷却用クーラユニットに供給する冷媒の温度、量を制御するとともに、温度分布を均一化するよう攪拌用ファンを起動、停止制御することにより、庫内各部の温度を目標温度に正確で均一に、しかも経済的に保つことのできる自動倉庫を実現するものである。

目標温度が設定されると、計算機(24)は各所に設置された室内温度計(8)、室外温度計(9)により現在の温度を読み取り、設定温度と室内温度との差、前もって設定されている断熱特性、庫内熱容量等より冷却負荷を計算し、クーラユニット(4)に供給される冷媒の温度B、冷媒の蒸発温度Dを設定し、冷凍機の運転指令Gを発し冷却運転を行なう。フィードバック信号である温度計(8)の室内温度信号Aが一定周期で読取られ、室内平均温度が設定温度になるようまた消費電力量を最小にするよう温度制御、運転台数制御を行

なうと同時に、室内温度分布を検知し、室内各所に設置された攪拌用ファン(11)を必要に応じて運転させ、室内全体の温度を自動的に均一に保つことができ、経済的な自動倉庫が実現できる。

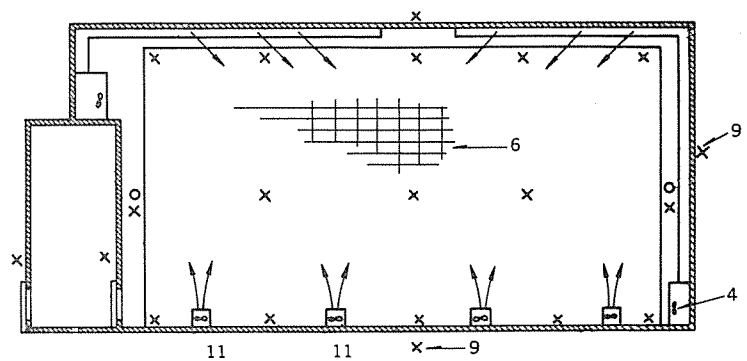


図1

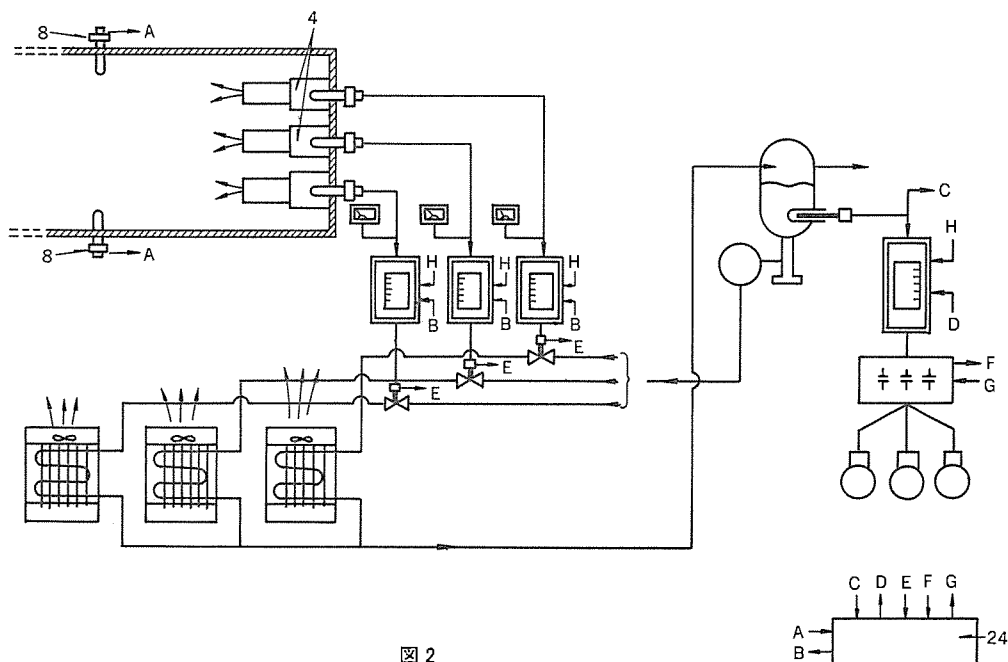


図2

総合計装制御システム《MACTUS》の概要

橋本 健治*

1. ま え が き

総合計装制御システムを中核とするプラントシステムに対し、省力化に加え、エネルギーコストの削減、仕掛低減、製造設備の有効利用、安全性の一層の向上、周囲環境保全、など総合的高品質生産や高付加価値製品への傾斜といった社会的ニーズが高まっている。一方技術的シースとしてマイクロプロセッサ、大容量メモリ素子などの半導体技術の期待通りの速度での進歩、カスタム LSI (Large Scale Integrated circuit) の実用化にみられる高度な設計技術、効率的な分散処理システムを構築するネットワーク技術、などデジタル技術を核とした要素技術、設計技術、システム技術が活用されている。

更に応用技術面では先端的ユーザーにおいて数十台のプロセッサコンピュータ、プログラマブルコントローラを結合した鉄鋼熱延プラントのトータルシステムや大容量火力発電所の毎日起動停止運用に伴うワンタッチスタートストップシステム、などの高度な自動化が達成されている。《MACTUS シリーズ》はこのような状況を踏まえ、更に一段の発展を期し新シリーズの開発を行った。その各論については本誌「計測・制御特集」の各論文で述べ、ここではその全体の概要について述べる。

2. 総合計装制御システム《MACTUS》の位置づけと構成

プラント全体を管理・制御するシステムは、大別すると図 1. に示すように生産計画情報システム、効率や品質の管理情報システム、及びプロセスの運転管理、制御をつかさどる総合計装制御システムからなるといえる。生産計画情報システムや効率、品質管理情報システムは、計画立案、実績の評価、対策など経営レベルの意思決定を支援するシステムで、最近の TQC (Total Quality Control) 活動の活性化に伴って導入機運が高まっている。

総合計装制御システム《MACTUS》は、単にプロセスの運転管理・制御の役割りを果たすのみでなく、このトータルシステムへの有機的結合、すなわち他の情報システムへのプロセスの稼働情報の提供や、他の情報システムからの生産計画指標や管理情報のリンクなどのプラントデータベースとしての役割りを果たしつつ、本分とするリアルタイム情報処理、プロセス制御を行うもので図 2. に示す構成と表 1. に示すような開発のねらいをもったものである。以下その構成要素について設計思想を中心に概要を述べる。

(1) エンジンコンソール、プログラミングパネルデジタル計装において、その開発、運用、保守にあたって長年アナログ、ワイヤ

ードロジック技術をベースにしてきた制御エンジニアのノウハウを、これにどう参画させ有効活用を図るかは重要な課題である。プラントの運転制御・監視の機能の構築と保守が計算機のプログラムに限定されることは、プラントエンジニアにとってブラックボックス化されたシステムの機能の正しさへの不安をいだかせ、またシステムの開発への参加を困難にし、かつ現場での機能修正に柔軟に対応できないなどの問題があり、このため特にデジタルコントローラの領域では、問題向言語 (POL) によってプログラミングの知識がなくても、制御アルゴリズムを構築できるように考えられている。

《MACTUS》では更にこの概念を進め、制御アルゴリズムの設計図面に対応した図式表現でプログラムが可能となるツールとして、CRT (Cathod Ray Tube) を採用したエンジニアコンソール、あるいはプログラ

表 1. 新《MACTUS シリーズ》開発のねらい

1. エンジン機能の充実
 - 開発、運用、保守のライフサイクルサポート
 - 設計図面ベースのプログラミングツール
 - セントラルエンジニアコンソールの概念の導入
2. マンマシンシステムの機能拡張
 - 制御システムの判断過程、演算過程のビジュアル化
 - 関連パラメータの集約、抽象化表示などのアドバンスドコントロールルーム
 - 対話形監視画面作成
3. 伝送バスの拡充
 - 制御に適した高速サイクリック伝送
 - 光ファイバ伝送
 - 伝送プロトコルのハードウェア化
4. ハードウェアの更新
 - 高速バイポーラマイクロプロセッサ、16 ビット汎用マイクロプロセッサの採用
 - CMOS ゲートアレーカスタム LSI 素子の採用
 - ループ対応の機能プロセス入出力
 - 高密度、フルグラフィック CRT の導入

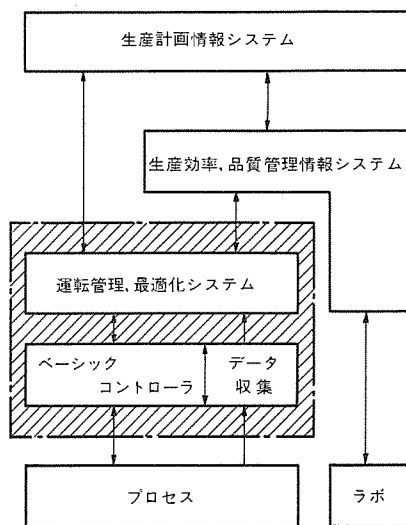


図 1. 総合計装制御システム《MACTUS》の位置づけ

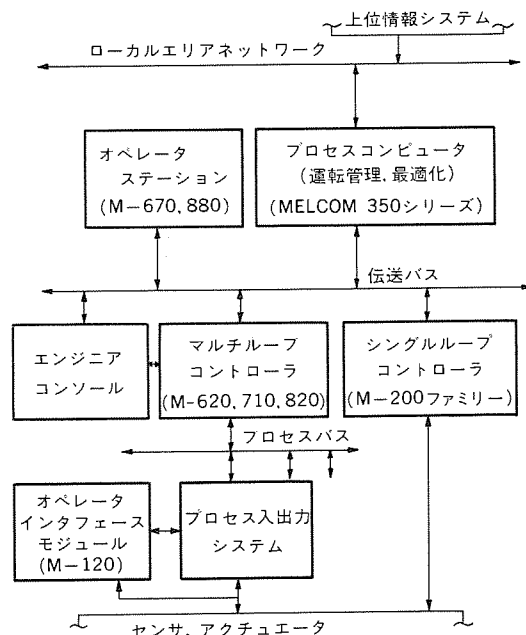


図 2. 総合計装制御システム《MACTUS》の構成

ミングパネルを用意した。また、これらはデジタルコントローラのプログラミング、チューニング、メンテナンスなどのオフライン機能に必要なソフトウェアを内蔵しており、これによりコントローラは制御の実行のみを行えばよく、オフライン機能に必要な容量的、性能的負担を軽減し、ハードウェア固有の信頼性を上げるとともに、オンライン制御系とオフライン系が混在することによるプログラムの実行制御の複雑化をさけ、機能の検証性を高めることに寄与している。

(2) オペレータステーション

高度な自動化や大規模プラントの集中監視では、とするとオペレータにとって制御装置や保護装置の動作がブラックボックス化しがちで、正常運転状態ですら心理的不安を誘引したり、また異常時の対応に必要な過程情報を潜在化しがちである。《MACTUS》では、CRTの物理スペースの制約が少く、かつ多様な情報の表現力を生かし、制御の論理判断過程や演算過程を必要に応じオペレータに図式表現で提示できる機能をもたせた。また、高密度、フルグラフィックCRTを採用し、関連パラメータの集約表示、プロセス状態の抽象化表示、和文メッセージ表示、など一層高度なマンマシンシステムに対応できるオペレータコンソールをレポートリーに加えた。

(3) デジタルコントローラ

コントローラは基本的に2種類のアーキテクチャ、すなわち並列独立形プロセスの制御用としてのシングルループコントローラと、相互関連をもつプロセスループの制御用としてのマルチループコントローラがあり、それぞれ適用分野の特質を考え前者で4機種、後者で3機種用意した。マルチループコントローラは、いずれも信頼性の要求に応じ冗長構成がとれるようにしている。自動化の程度が高くなると必然的にフィードバック制御に対するシーケンス制御の割合が大きくなるが、汎用のマイクロプロセッサはこの目的には必ずしも適合しない。このため専用のカスタムLSIのシーケンス制御プロセッサを採用(《MACTUS 710》)するか、あるいは高速なビットスライスのマイクロプロセッサとシーケンス制御用マイクロプログラム(《MACTUS 620》、《MACTUS 820》)でシーケンス制御の高速化を実現している。また、対象プロセスの解析が進むにつれ、より優れた制御性を得るために予測制御や先行制御要素をループに組み込むことが多いが、これらの高度な演算を高速に実行させる浮動小数点プロセッサを装備し、また関数などの演算マクロをもっている。

(4) 伝送バス

総合計装制御システムの各機能階層を流れる情報には大別して、プロセスデータやコントロールデータ、あるいは冗長系を構成したときの相互のトラッキングを行うコントローラの内部データなどのオンラインリアルタイム情報とパラメータチューニング、イニシャルプログラムローディング、エラー情報などメンテナンスに必要なオフライン情報がある。前者の伝送には厳密な定周期性が要求され、これが後者の伝送によって乱されることのないよう配慮する必要がある。また、伝送のために個々のプロセッサが伝送手順を制御することもオンライン実行系の処理の大きなオーバーヘッドになったり、プログラムの実行制御を複雑化するので好ましいことではない。

このため《MACTUS》では2種類の制御専用の伝送バスを開発した。一つは上位伝送バス(MHバス)と呼び光ファイバ、又は同軸ケーブルのループ伝送方式によって、長距離、高速伝送を行うもので前述のオンラインデータはすべてのステーションにサイクリック伝送され、オフライ

ンデータは別のタイムスロットを使ってバーストモードのファイル伝送を行うものである。もう一つは中位バス(Mバス)と呼び、同一制御室内などの比較的短距離の伝送を同軸ケーブルを通して、マルチドロップ形式で経済的に実現するものである。いずれも各ステーションコントローラにマイクロプロセッサを内蔵し、データ伝送の手順の制御をここで行わしめているため、それを経由して伝送バスに接続された各デジタルコントローラの伝送のためのオーバーヘッドは最少化されている。

以上の各構成要素には機能的、性能的なレパートリーがあるが、新しい《MACTUS シリーズ》ではこの組合せ構成を四つのファミリー構成に展開し、それぞれが主に目的とする適用分野の機能的、性能的な特質に合わせた総合計装制御システムとして提供できるようにした。すなわち、

(1) 《MACTUS 600》ファミリー

中小規模の特にバッチプロセスを対象としたシステムで、シーケンス制御は高度な能力を備えているが、フィードバック制御は典型的なPID制御あるいは比率制御を主体としており、その目的に沿ったエンジニア機能としている。ローカルなオペレータコンソールとエンジニアコンソールを一体化し、小規模システムあるいはスタンダードシステムでの経済性を追求したものとなっている。

中位バスを經由して上位のプロセスコンピュータ(《MELCOM 350-50, 60 シリーズ》)とリンクするシステムである。

(2) 《MACTUS 700》ファミリー

連続プロセスに汎用的に適用することを目的としたもので、予測制御や先行制御などのアドバンスコントロールも適用できるよう問題向言語を拡張している。広域分散配置への適用を考慮し、エンジニア機能はコントローラに専属するプログラミングパネルとして実現した。上位バスあるいは中位バスでプロセスコンピュータとリンクする。

(3) 《MACTUS 800》ファミリー

従来プロセスコンピュータで実現していた広範囲で、かつ複雑なカスケードコントロールに対応するもので、複数のコントローラ、オペレータステーションを集中管理する独立したセントラルエンジニアコンソールを採用している。エンジニアコンソール、オペレータステーションともに高密度、フルグラフィックCRTを採用するなど特にマンマシンシステムの拡充を図ったシステムである。

(4) 《MACTUS 200》ファミリー

並列独立形プロセスに適用するシングルループコントローラで、中位バスを經由して上位のプロセスコンピュータや他の《MACTUS》ファミリーとリンクする。

3. む す び

以上、新《MACTUS シリーズ》の設計思想を中心にその概要を述べた。デジタル制御システムが導入されて久しいが、長い計装制御の歴史や、2章の冒頭に示したような、プラント全体システムへの発展を考えるとまだ緒についたばかりともいえる。内容が高度になるにつれ、当該分野での実績のみでなく広く他分野からの技術トランスファを求めるべきと考え、広く分野をカバーするメンバーによって技術委員会を組織し開発の推進を図った。その過程で数多くのユーザーから貴重な御意見をいただいた。引き続き拡充開発に取り組む所存であるが、ユーザー各位の絶大な御支援を賜るようお願いする次第である。

分散形総合計装制御システム《MACTUS 800》ファミリー

山上信太郎*・河合 一 洋*・志 岐 紀 夫**

1. ま え が き

最近の計装制御のねらいは単なる省力化、自動化だけではなく、省エネルギーや品質向上面でのものも多くなりつつある。このようなねらいを実現するためには、複数プロセスにまたがる協調制御や最適制御、広域に広がる監視やオペレーションなどの機能が必要となってくる。このような機能は、これまでにはプロセスコンピュータで実現されていることが多い。しかし、分散形計装制御システムが主流となり、今後発展が見込まれる中で、上記の機能を分散形システムの構想の中で実現することがこれから望まれよう。

本稿で紹介する《MACTUS 800》ファミリーは、中大規模でかつ高度な監視制御機能を分散形デジタル計装制御システムとして展開した新製品であり、様々な分野に適用できるものである。

2. 開発のねらい

新しい《MACTUS 800》ファミリーは、次のようなねらいを持って開発した。

(1) 制御分散構成

制御機能を分散する考え方としては、故障箇所の局所化を企てた危険分散指向、制御対象単位の機能分散指向などがある。制御のデジタル化における最大のメリットは、複雑な制御演算機能やアナログでは不可能であった高級演算機能が、容易にかつ高速、高精度にて実現できることにある。しかも今後の動向として、このような高級制御演算が可能な制御性の優れたコントローラに対する要求が、ますます高まってゆくものと考えられる。

このシステムでは、上記の観点から機能分散を指向し、分散の規模を2,000ブロックとした。また制御周期は最小50ミリ秒とすることによって制御の安全性の追求を図った。

一方、信頼性の面からは、リング式バックアップ方式などをとることによって、最小のハードウェアによってシステム信頼度を確保することができた。

(2) CRT オペレーション

デジタル化のメリットのほかの側面として、データ加工のしやすさがあり、CRT (Cathode Ray Tube) ディスプレイ装置による運転監視操作の実現がその好例であるが、その表示内容はプラント状態や制御状態を容易にオペレータが把握できるような新たな表現方法が求められよう。そのためにはCRTディスプレイの機能、性能とも高度なものが必要となるが、このシステムでは20インチ高解像度フルグラフィックCRTディスプレイを開発するとともに、操作員になじみやすいキーボード及びトラックボールを備えることによって操作性を追求した。

(3) メンテナンス性の充実

分散指向の進み中で、システムがある規模を越えるとシステムの生成、保守をどうするかというメンテナンス性が深刻となるが、情報の集中管理によって解決することが可能である。すなわちシステムの構成要素やその結合を意識することなく、全システムの生成が可能で、シ

ステムの故障監視、稼働記録が行えることが重要である。

このシステムではメンテナンス性の充実を図るため、エンジニアコンソールの独立を試み、固有のハードウェアを与えると同時に、設計図面ベースでのシステムコンフィギュレーションを可能とする各種ビルダをはじめ、豊富なソフトウェアを完備した。

(4) システムの拡張性

分散形デジタル計装制御システムにおいては、上位計算機との接続はもちろん、ロガーシステム、故障診断プロセッサなど、多様な分散構成要素との有機的な結合が要求される。加えてシステムの増設要求はプラント規模の大きさ、複雑さに比例して大きくなっていく。こうした背景のもとに、システムの拡張性は極めて重要な項目となってきた。このシステムでは分散構成要素を互いに有機的に結合するため、伝送プロトコルをファームウェア化した、高速伝送情報系を開発、実用化した。

この高速伝送情報系の実用化により、システムの拡張が容易となったばかりでなく、数多く分散されたシステムを一つの制御系として一体化した協調のとれたものとして構築することができる。

(5) システムの柔軟性

デジタル計装の分野でも各電子機器のLSI化が進み、その信頼性は従来機器に比べ、飛躍的に向上している。しかし、システムによってはその信頼性は不十分で、冗長化構成、危険分散などの手法により、システム全体の信頼性の向上対策が必要なものもある。またこれら冗長化構成、危険分散の手法も、システムのトータルコストの面から、2 out of 3 に代表される多重化、同期形二重化、待期形二重化、部分二重化、N対1バックアップ、手動バックアップ、能縮退形バックアップなど多様な手法が要求されている。

このシステムでは、システム全体の信頼性を向上し、なおかつトータルコストからみたシステム特有の冗長化構成に、柔軟に対処できることを主眼としている。まず信頼性の面では、分散制御システムのかなめである伝送バス、PIOバスの伝送系を完全二重化し、多重化構成も可能にして、システム全域に及ぶ故障の追放に全力を挙げた。また危険分散の面からは1ルーチン単位の入出力装置を始めとして、《MACTUS 800》ファミリーの各構成要素を、それぞれ完全に独立させ、一構成要素の故障が他に影響しないようにした。

一方、冗長化の面では、高速伝送バスの特長を十分に生かし、すべての制御ロジックに対し、そのバックアップがどのコントローラでも可能にしているので、如何なる冗長化構成でも対処できる柔軟性を持ったシステムを実現している。

3. システムの詳細

3.1 全体システム構成

《MACTUS 800》ファミリーは、図1に示すように、それぞれ機能的に特長を持つ、六つの構成要素を柱としてシステムを構成している。次に六つの構成要素を挙げる。

(1) セントラルエンジニアコンソール (CEC)

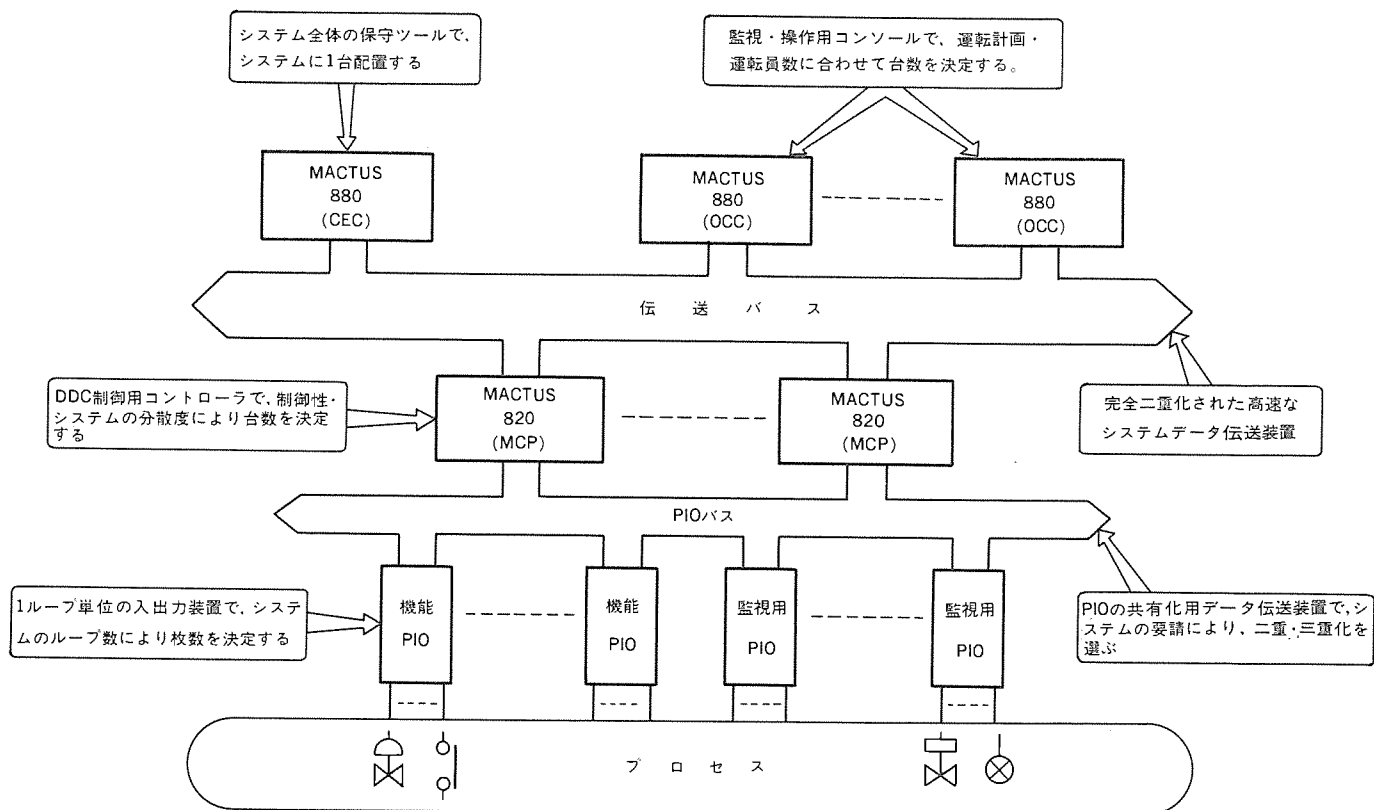


図 1. 《MACTUS 800》ファミリーシステム構成

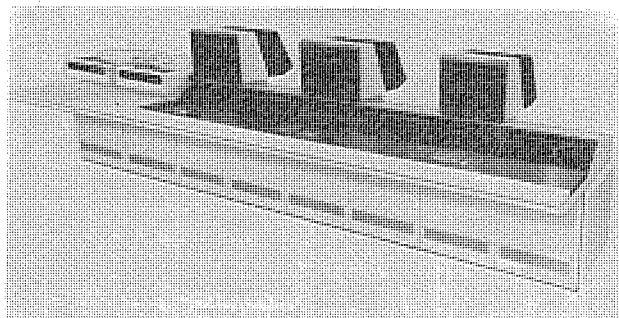


図 2. CEC 及び OCC

- (2) オペレータコントロールコンソール (OCC)
- (3) マルチループコントローラ (MCP)
- (4) データ伝送バス
- (5) PIOバス
- (6) 1ループ単位の入出力装置 (機能PIO)

これらの構成要素は、CECを除き、すべて多重化構成を基本としており、ユーザーの要求する信頼度に応じて、部分二重化から完全二重化、多重化までシステムを組み合わせ、構築することができる。(図2.)

3.2 セントラルエンジニアコンソール (CEC)

セントラルエンジニアコンソールは、分散形制御システム全体の構成要素のメンテナンスと稼働管理を一括して行う。

メンテナンス機能としては、システム内のすべてのコントローラとコンソールのハードウェア、ソフトウェア構成の定義、変更がCRTとの対話形式により設計図面ベースで行え、操作終了時の画面がそのままドキュメントとして使用できるようになっている。稼働管理機能としては、システム内のすべてのコントローラのリモート IPL (Initial Program Load)

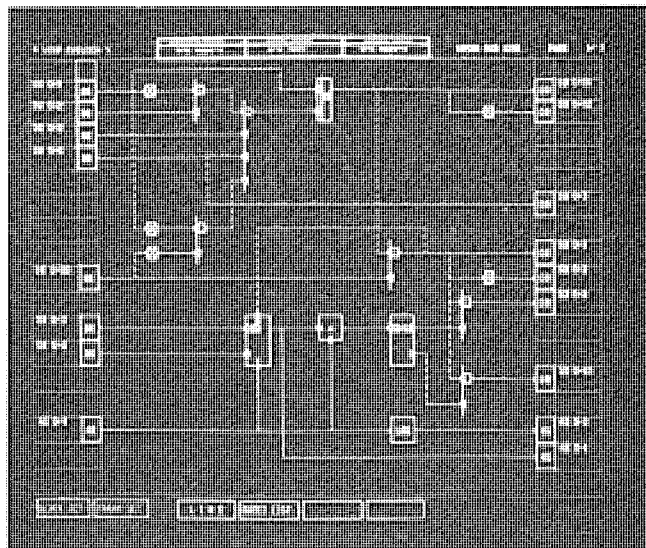


図 3. ループビルダ画面

ding) 機能、カード単位での故障表示・記録機能及び制御ロジックの動作監視・パラメータチューニング機能がある。セントラルエンジニアコンソールはメンテナンス専用であるので、自身の故障が制御システム全体の動作に影響を及ぼすことはない。

次にセントラルエンジニアコンソールの構成要素を述べる。

- (1) ループビルダ
計装図面と同様のフォーマットで制御ロジックの作成・変更を行う。入出力信号及び各制御ロジック間信号はすべて信号名称で結合されている。図3.に画面例を示す。
- (2) ビュービルダ
運転・監視用のCRT画面をCRTとの会話によって、作成、変更

を行う。

(3) ロギングビルダ

ロギング用画面を作成し、印字する信号名称、変換式を定義することにより作表を行う。

(4) ハードウェアビルダ

実装図ベースでシステムのハードウェア構成を定義する。伝送パスによる各コントローラの結合及び各コントローラ内の入出力信号名称の定義を行う。

(5) システムビルダ

各ビルダで作成された制御ロジック、画面などをハードウェアビルダで定義された入出力アドレスを割り当て、システムの各コントローラ内で動作するための直接実行形オブジェクトを作成し、各コントローラにロードする。

(6) オンラインモニタ

任意の制御ロジックの動作状況を、ループビルダで作成した画面の形式で表示及び連続監視を行う。また制御ブロックのパラメータ変更も可能である。また、ハードウェアビルダで作成した実装図上で、コントローラ単位でカード単位までの故障監視を行う。制御ロジックの動作とハードウェアの状態の記録も行う。

3.3 オペレータコントロールコンソール (OCC)

オペレータコントロールコンソールは、プラントの運転監視操作を行うコンソールで、表1.に示す要素で構成するが、中心となるのはグラフィックCRTで次の特長を持っている。

- (1) 3,000種の漢字サポート
- (2) トラックボールによる画面移動
- (3) 大画面・拡大・縮小・多重画面表示
- (4) 押ボタンランプの点消灯による操作ガイド表示

CRT操作はワンタッチオペレーションを主体とし、1回の押ボタン操作で目的の画面が表示される。また上記の特長を生かして、オペレータにとって最もわかりやすい画面を表示し、誤操作を最小限に抑えている。また各運転操作ごとに最適な画面を準備できるように、表示画面枚数も最大140枚と豊富である。(表2.)

表 1. OCC ハードウェア仕様

C	形 式		カラーグラフィック CRT
	画 面 サ イ ズ		20 インチ
	表 示 色		標準: 7 色 (赤・青・緑・黄・水・桃・白) 最大: 64 色
R	表 示 容 量		英数カナ文字: 5,440 文字 漢 字: 1,344 文字 ドット表示: 1,024×1,368 ドット
	画 面 制 御		画面移動 拡大/縮小: 256 倍〜1/256 倍
T	キ ー ボ ー ド		専用キーボード (オペレータ用)
	ト ラ ッ ク ボ ー ル		画面移動用
ブ リ ン タ	印 字 方 式		ドットインパクト方式
	ハ ー ド コ ピ ー	印 字 時 間	約 80 s/画面
		印 字 寸 法	145×300 mm
	漢 字 プリンタ	印 字 速 度	英数カナ文字: 225 文字/s 漢 字: 75 文字/s
		印 字 数	英数カナ文字: 136 文字/行 漢 字: 90 文字/行
	フレキシブル デ ィ ス ク		容 量
		台 数	2 台
アラーム出力 (オプション)			ブザー, チャイム, トレモロ 照光式ランプ表示

表 2. OCC 機能一覧

監 視 / ア ラ ー ム 機 能	プロセス状態表示	プロセス状態グラフィック表示 (オプション) 測定値ポイント、グループ、リスト表示 設定値ポイント、グループ、リスト表示
	プロセスアラーム表示	上・下限警報表示 変化率警報、偏差警報表示 (オプション)
	システムアラーム表示	センサアラーム表示 デバイスアラーム表示
	選 択 機 能	上・下限警報選択・除外 データ設定
制 御 操 作 機 能	コントロールパネル表示	制御操作ユニット集中表示 制御盤表示 (オプション)
	操 作 機 能	MV INC/DEC SV INC/DEC AUTO/MANUAL/LOCAL 切換 操作ユニット選択
ト レ ン ド 機 能	トレンドグラフ表示	リアルタイムトレンドグラフ表示 ヒストリカルトレンドグラフ表示
	選 択 機 能	トレンド点選択 ヒストリカルトレンド点選択
ロ ギ ン グ 機 能	プ リ ン ト 機 能	定時ログプリント アラームタイプ 運転記録
	選 択 機 能	運転記録点選択 ロギングポイント選択
表 示 画 面 枚 数		標 準: 70 枚 最 大: 140 枚
画 面 更 新 ス ピ ー ド		標 準: 1 s 最 大: 0.25 s
冗 長 系 構 成		相互バックアップ方式 (2台以上のとき)

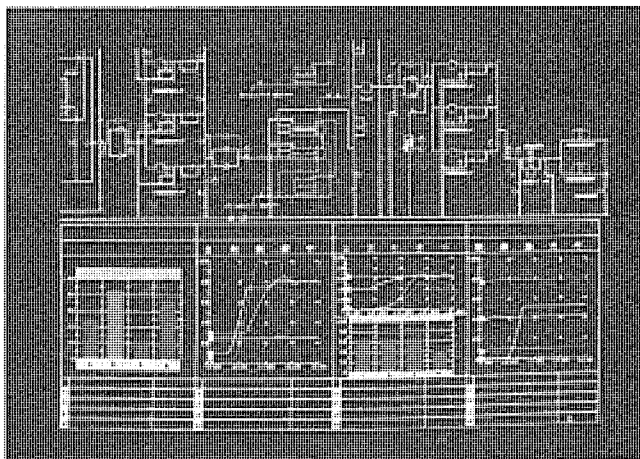


図 4. 計装用画面

(1) 監視・アラーム機能

プラント内の各プロセス (バルブ開度、オン/オフなど) の状態をグラフィック画面上に表示する。また、各プロセスで発生している異常、あるいはシステム構成要素の異常を警報表示する。異常状態にあるプロセスへのデータ入力の中止、復帰も可能である。

(2) 制御操作機能

制御操作ユニットを集中的に表示する。この画面を見ながらオペレータは操作量や設定値を変更するが、この操作はCRT操作卓の押ボタンによりアナログタッチで行う。また図4.に示すように操作画面と監視画面の多重表示が可能であるので、オペレータの運転操作の効率向上が図れる。更に画面更新速度は、250ミリ秒を実現しているので、アナログ計装の操作に慣れたオペレータでも違和感なくCRTの操作ができる。

(3) テレンド機能

プラントの任意の信号値をトレンドグラフで表示する。ある瞬間の信号を次々と表示するリアルタイム表示と、ある時間幅での信号値の変動状況を表示するヒストリカル表示とがある。

(4) ロギング機能

定時ログ、アラーム及び運転記録をプリントする。オペレータコントロールコンソールが2台以上ある場合、相互バックアップ方式により信頼性を向上させている。

3.4 マルチループコントローラ (MCP)

(1) 制御の充実

マルチループコントローラは、豊富で高性能・高精度の制御演算ブロックを装備しており、フィードバック制御、シーケンス制御及びこれらを融合したパッチプロセスの制御、更により高度なアドバンス制御に至るまでデジタルの特長を生かし切った強力な制御性を持っている。制御ループ間の接続は、コントローラ内のソフトリンクあるいは伝送バス経由にて行われるため、複雑な制御も簡単に行うことができる。また、プラントのどのような状況に対しても制御周期を一定に保つよう動作するため、安定な制御性を得ることができる。

(2) 制御ロジック作成の容易性

マルチループコントローラの制御ループは、すべてCECから容易に定義・作成することができる。またその変更、チューニング、更に制御ループの状態確認もCECよう行うことができる。

(3) 制御ループ対応のプロセス入出力ユニット

制御ループ対応の危険分散及び制御性の向上を図るため、ループ対応に十分な入出力点数を持つ制御ループ対応のプロセス入出力ユニットを用意した。

(4) プロセス入出力ユニットの遠隔化

マルチループコントローラは伝送バスにより適度に分散配置されるが、それに接続されるプロセス入出力ユニット、更に分散配置され融通性に富んだ配置設計が可能である。

(5) 高信頼性の実現

マルチループコントローラは、リング式バックアップ方式や多重化方式などシステムに応じた冗長構成が可能である。

リング式バックアップ方式とは、図5.に示すように通常プロセスAは、MCP・AのCPU・Aから制御されているが、万一CPU・AがダウンしてもMCP・BのCPU・Bからバックアップ制御される。同様にプロセスBはCPU・Bから主に制御されCPU・Cからバックアップ制御され、更にプロセスCはCPU・Cより主に制御され、CPU・Aからバックアップ制御される。このようにマルチループコントローラは通常は一つのプロセスに対し制御しているが、故障時には他のプロセスの制御も行うことにより確実なバックアップ制御を行うことを可能にしている。

更にプロセス入出力ユニットには豊富な自己診断機能及び万一の故障時には活線挿抜が可能であるため、システム的に高信頼性を実現している。表3.にMCPの機能一覧を示す。

3.5 データ伝送バス

伝送バスは、分散形計装制御システムのためのインテリジェントな伝送装置で、次に述べる特長を持っている。

(1) 伝送機能の独立

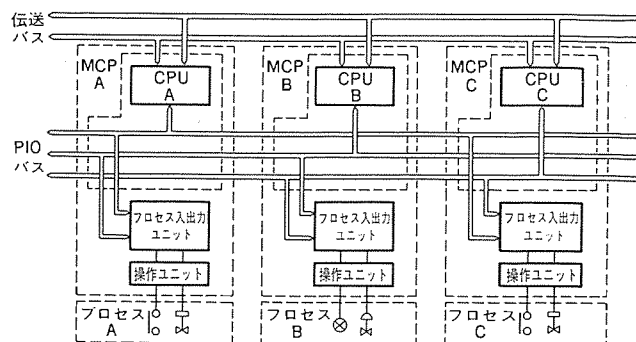


図5. リング式バックアップ方式

表3. MCP機能一覧

制 御 容 量	最大2,000ブロック (ループ換算 約40ループ)
制 御 演 算 ブ ロ ッ ク	標準: 70種 (入出力処理, PID, 加減算など) 最大: 120種 (オプション)
演 算 周 期	標準: 0.05/0.25/1.0/10 s (ループ単位に設定可能)
演 算 ス ピ ード	アナログ演算: 平均 200 μs/ブロック シーケンス演算: 平均 10 μs/ブロック
冗 長 構 成	リング式相互バックアップ (無瞬断) プロセス入出力ユニットの二重化可能
診 断 機 能	入力チェック, 出力リードバックチェック 演算チェック など
モ ニ タ リ ン グ	CECよりループのモニタリング可能
プ ロ セ ス 入 出 力 ユ ニ ッ ト	遠隔化可能: 最大 1 km プロセッサとのインタフェースバスの多重化可能

従来は伝送路に結合した各コントローラが行っていた伝送制御プロトコルを、すべて一括してこの装置が行っている。これによりシステム内のすべてのコントローラのメモリ上のデータは、実際にそのデータを持つコントローラとは無関係に、あたかも自分のメモリの一部として各コントローラは扱える。

(2) 高速・確実な伝送

伝送バスは各コントローラの要求に対し、確実にかつ必要な時間内で、データ転送されるように高速データウェイと、時分割多重伝送方式、ブロックマルチプレックス方式により、N対Nのデータ交換を40 KW/sの実効伝送速度で行う。

(3) 高信頼性

伝送バスは標準として完全二重化を採用しており、故障時は相互に無瞬断バックアップを行い、また故障したステーションの自動バイパス、故障カードの活線挿抜など、システムとしての高信頼化、故障規模の局所化を図っている。

4. む す び

《MACTUS 800》ファミリーの特長とその概要について紹介した。デジタル計装制御の分野は、上位機能とも有機的な関連を持ちつつ今後ますます発展してゆくことが予想される。

今後も最新技術を積極的に取り入れて、更にこのファミリーを発展させていく所存である。

では、加工、組立 試験などの自動化率向上、ビルディングブロック 方式の徹底、占有面積の縮減化を図り、システム 全体としてのコストパフォーマンス 向上を実現している。

2.1 CPU

高速シーケンス制御と高精度演算制御を同時に実行するマルチコントローラの心臓部に当る CPU では、16ビットマイクロプロセッサ、演算プロセッサ及び高速論理演算用 CMOS ゲートアレーを使用することで、数多い要求機能を実現している。以下、《MACTUS 710》の CPU がもつ特長を述べる。

(1) 汎用 16 ビットマイクロプロセッサの採用

高級演算用 プログラム 作成の効率化及び デバッグ を含む メンテナンス 性向上を考慮している。

2. ハードウェア

《MACTUS 710》の開発に当り、現機種《MACTUS 700》の機能を徹底的に検討分析した。特に最適システムの構築をめざして利用者側の要望を多く採用し、大幅な機能アップを図ることになった。その主なものは次のとおりである。

- (1) プログラム 命令語の拡充と浮動小数点演算
- (2) リモート 入出力装置
- (3) メモリ 容量, 入出力点数の拡張
- (4) 入出力 カード の高密度化
- (5) CRT 付き プログラミングパネル の採用
- (6) RAS 機能の充実

このように多くの機能を向上させながら、一方

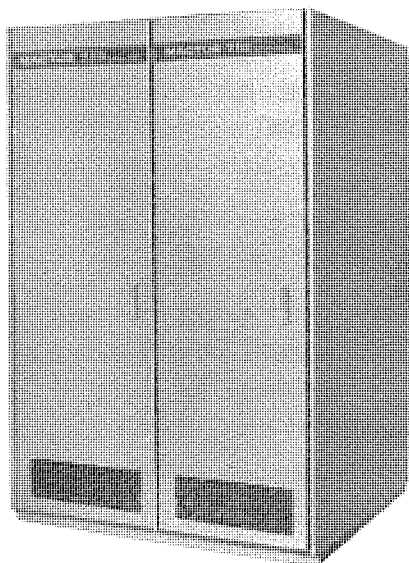


図 1. 《MACTUS 710》の外観

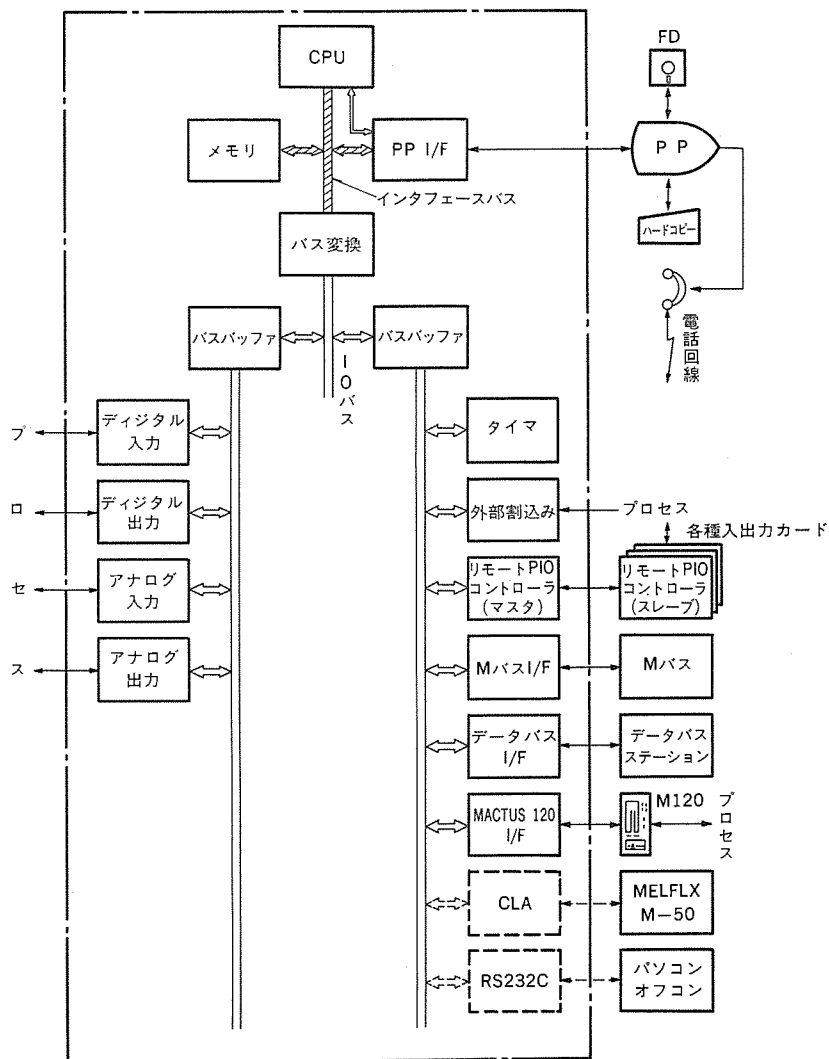


図 2. 《MACTUS 710》システム構成

表 1. 《MACTUS 710》の主仕様

項 目	仕 様
プログラム容量	標準 8 Kstep, 最大 16 Kstep
演 算 速 度	6 μ s/step
語 長	16 ビット 浮動小数点 32 ビット
言 語	POL 77 種
サブルーチン	5 重ネストまで可
割 込 み	内部 6 レベル, 外部 1 レベル—64 点
内 部 レジスタ	512 W
インデックスレジスタ	6 W
ディジタル入力	標準 1,024 点, 最大 2,048 点
” 出力	” 1,024 点, ” 2,048 点
アナログ入力	” 256 量, ” 512 量
” 出力	” 256 量, ” 512 量
一 時 記 憶	約 15 KW, 全領域ビット指定可能
タ イ マ	$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ ms} \quad 4 \text{ 点} \quad \text{最大} \quad 16.383(\text{s}) \cdots \text{割込み付き} \\ 10 \text{ } \mu \text{ s} \quad 12 \text{ } \mu \text{ s} \quad \text{ } \quad 163.83 (\text{ } \mu \text{ s}) \\ 100 \text{ } \mu \text{ s} \quad 208 \text{ } \mu \text{ s} \quad \text{ } \quad 27.305(\text{min}) \\ 10 \text{ s} \quad 32 \text{ s} \quad \text{ } \quad 45.511(\text{h}) \cdots \text{積算形} \end{array} \right\} 256 \text{ 点}$
タイムスイッチ	128 点
付 属 品	CRT 付きプログラミングパネル, フロッピユニット, グラフィックプリンタ(ハードコピー), 音響カブラ

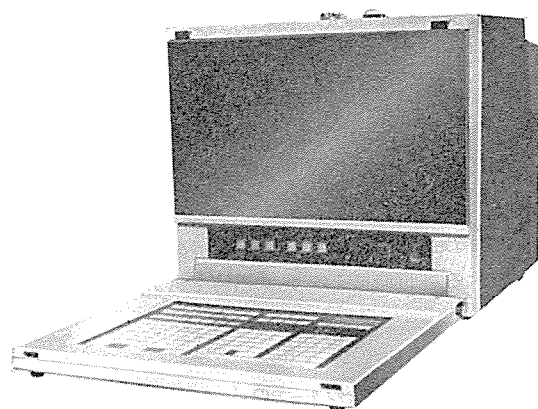


図 3. PP の外観

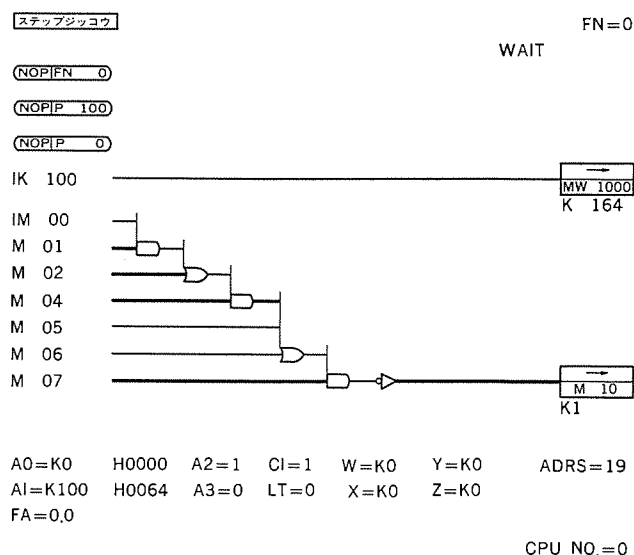


図 4. プログラム表示例

(2) 演算プロセッサの採用

高精度演算を実現させるために高速演算プロセッサを使用し、浮動小数点演算の高速化、プログラミングの簡略化を図った。

(3) 高速論理演算用 ゲートアレーの採用

高速性を要求されるシーケンス制御に対応するため、高速ビット、論理演算の実行及び POL 命令の効率的実行を可能にした。

(4) RAS 機能の充実

システムの高信頼性確保のため、エラーリトライ、エラー発生状況のトレス及びハードウェア(H/W)エラー検出回路の充実を図った。

(5) マンマシンインタフェース機能の充実

プログラミングパネル(以下、PP と称す)との接続により、CPU の状態監視、プログラミング、デバッグ機能の充実を図った。また、PP インタフェースカードとの情報交換専用バスをもたせ、エラー時の冗長を考慮している。

2.2 プログラミングパネル

《MACTUS 710》の PP は、CPU、プロセス入出力(PIO)とエンジニアのマンマシンとして使用され、主な用途は次のとおりである。

- (1) プログラムのデバッグ
- (2) プラント運転のモニタ
- (3) CPU の H/W (運転, 故障) のモニタ

図 3. に PP の外観を示す。

PP として要求されるのは、操作性及び視認性に優れ、マシンやプラントの情報を幅広く提供する豊富な機能をもつことである。それを

実現するため種々の配慮がなされており、その主な内容について述べる。

(1) CRT を標準装備し、多量の情報量を同時に認識することができる。また、プログラム表示は論理記号(図 4. 参照)を使用しており、効率よいビジュアルなデバッグ及びメンテナンスが可能である。

(2) 周辺機器としてグラフィックプリンタ、フロッピ、音響カブラを用意している。そのため、CRT 画面をそのままコピーでき、更にデバッグ又はプラント調整結果を直ちにフロッピでデータファイルできるなど、データ保存の効率向上を図っている。音響カブラの使用により、リモートメンテナンスも可能である。

(3) PID 制御はトレンド表示、シーケンス制御はタイムチャート表示を行い、プラント運転時のモニタ機能を充実させた。また、トラブルシューティングを容易にするため、PIO の故障発生箇所、リモート PIO の故障ステーションなど、豊富な RAS 情報を CRT 上に表示する。

次に機能の代表的なものを説明する。

(1) プログラム読出し

《MACTUS 710》では、プログラムをブロックごとに分割し『フロー NO. (FN)』と呼ぶ番号を割り当てる。プログラムの読出しはその FN によって行い、従来のプログラムアドレスの意識は不要である。プログラム読出し中は、そのプログラムで使用しているソースデータも同一画面上に表示し、CPU の RUN 中はその実行結果をある周期で更新する。ま

た、プログラムの書換え、挿入、削除のサブモードがあり、分岐先アドレスは自動的に修正される。

(2) ソース読出し

ソース NO. を指定するとその内容を画面上に表示する。このサブモードで、指定したデータをタイムチャート表示することが可能である。

(3) DDC モニタ

ループ NO. を指定すればそのループのプログラムを画面上に制御ブロック記号で表示する。同時にそのデータ内容をパラメータ名称に対応させて表示する。

(4) チューニング

ループ NO. を指定すればそのループのパラメータ内容と名称を表示する。パラメータの変更もこの画面を介して行える。また、サブモードとしてトレンド表示（設定値、測定値、操作量、ほか1量）が可能である。

(5) ガイダンス

このモードは H/W のトラブルシューティングに有効な機能で、多くのサブモードを持っている。例えば、エラーガイダンスではエラー発生の内容と発生箇所が同時にわかるような情報を画面上に提供する。PIO ステーションモニタでは、リモート IO の接続状態及び故障状態を表示する。

その他多くの機能をもっているが紙面の都合上割愛する。

2.3 入出力装置

制御対象のプロセスと接続される入出力装置は、使用量が最も多くシステムのコスト、スペースファクタ、信頼性などを大きく左右する。その上、外部からのサージ、ノイズなど厳しい条件下で使用されるため耐ストレス性が最も要求される。以下、入出力装置の概要を述べる。

2.3.1 入出力カード

信頼性、保守性、経済性を向上させることに主眼をおいて、次のような特長をもたせている。

- (1) カード形状の大形化、使用部品の厳選で収納実装効率をあげ、システム全体の小形化を図った。
- (2) 外部との接続はすべてコネクタとし、配線工事の短縮、システムの標準化を行った。
- (3) 全入出力の状態、カード異常をカード前面にランプ表示し、プラント状況の監視、異常の早期発見を容易にした。

表 2. に PIO カードの仕様を示す。

2.3.2 DDC ループインタフェース

DDC を行う場合、各ループごとに独立したアナログ入出力の接続、チューニング、モニタリングが可能なループインタフェースユニット《MACTUS 120》を接続することを基本とする。そのため《MACTUS 710》に《MACTUS 120》インタフェースカードを用意している。このインタフェースカードには、1枚当たり4ループ分の《MACTUS 120》が接続でき、各ループとの会話処理、フォーマット変換処理、優先判断処理などを行い CPU の負荷軽減を図っている。また、信頼性向上のため《MACTUS 120》は常用、予備両 CPU 系に用意されたインタフェースカードに同時接続可能とした。これにより、一方の CPU がダウンしても制御は連続して実行される。

3. ソフトウェア

プロセス制御の高度化、複雑化に伴い、高速、高性能なコントローラが要求されている。それに付随して、ソフトウェア(S/W)の量的増大、複雑化が進み、増設、改造に対する柔軟性や難解で保守性の悪さなどが指摘されつつある。《MACTUS 710》は、これらの問題に対処すべくその命令語を企画する段階で十分な配慮がなされている。表

表 2. PIO カードの仕様

種 別	電 圧	電 流	点数/枚	特 徴	用 途
ディジタル入力	DC 48 V	10 mA	32	チャタリング防止回路付き (10 ms)	プロセス用
	"	"	32	割込機能付き (内 8 点)	"
	DC 24 V	"	32	高 速	他機種インタフェース
	"	"	64	多点入力	コンソールプロセッサ
ディジタル出力	DC 12~48 V	150 mA (max)	32	オープンコレクタ	プロセス用
	DC 12~24 V	"	64	"	ランプ、ミニチュアリレー用
	AC 125 V	0.3 A (max)	32	リレー接点	ランプ、リレー用
表示出力	DC 24 V		128	シリアル出力	LED, LCD
アナログ入力	DC 1~5 V	DC 4~20 mA	16	高抵抗絶縁	DC 0~5V } 可 DC 0~20mA }
	"	"	4	完全絶縁	"
アナログ出力	"	"	4	"	"
パルス入力	DC 48 V		16	メモリ付き	パルスカウント

3. に命令の一部を紹介する。以下、《MACTUS 710》S/W の特長について述べる。

3.1 高機能化

CPU の処理速度向上には 2 通りのアプローチがある。その一つは H/W 的アプローチであり、CPU のサイクルタイムを速くすることである。もう一つは S/W 的アプローチであり、一つの命令で処理する情報の量を増大させ、同一プロセスを制御するならばより少ない命令語で済ますことである。《MACTUS 710》の命令語は、このような見地からプロセス制御に必要な情報処理を分析、最適化し、なるべく大きな単位でまとめるように工夫している。このことは同時に S/W が量的に減少し、明解になるという効果も生みだしている。また DDC において、複雑な関数による制御にも十分適応できるように関数演算機能の充実を図った。

更に命令数の低減と使用頻度の観点から、正規の命令以外に 1 命令で広範囲の情報を処理し得るマイクロサブルーチンを用意している。表 3. にその一部を示す。

3.2 高精度化

《MACTUS 710》では、DDC 命令、関数演算命令を精度よく実行させるために、浮動小数点演算を採用した。これによって、パラメータチューニングは工学値のままでも極めて高精度に実施できるようにしている。なお浮動小数点のフォーマットは IEEE 規格に準拠するもので 32 ビット表現となっており、とり得る値の範囲は $8.43 \times 10^{-37} \leq |X| \leq 3.37 \times 10^{38}$ である。特に前述の DDC 命令や関数演算命令においては、数学的に不能あるいは不定となる場合を除いていかなる

表 3. 《MACTUS 710》命令一覧 (抜粋)

分類	シンボル	機 能	ビット	ワード	浮動	分類	シンボル	機 能	ビット	ワード	浮動
転送	;	Load	○	○	○	特殊		その他 2 命令			
	→	Store	○	○	○		CI	Common Interlock	○		
		その他 6 命令 (Set, Reset...etc)					PLS	Positive Differential	○	○	
論理演算	AND	Logical And	○	○		ブロック転送		その他 11 命令 (Lamp Test, No Operation...etc.)			
	OR	Logical Or	○	○			TO	Distination Pointer Set	○	○	○
		その他 7 命令 (Exclusive Or, Not...etc)					#	Transfer To Distination Point	○	○	○
分岐	B	Unconditional Branch				D		その他 3 命令			
	BY	Branch if Yes					IN	Analogue Input			○
		その他 4 命令 (Branch if No, Subroutine Call...etc)					PIDP	Position Type PID			○
比較	<	Compare Less Than		○	○	D	OUT	Analogue Output			○
	=	Compare Equal		○	○			その他 11 命令 (Ratio, Dead Band...etc)			
	>	Compare Greater Than		○	○	関数	DTB	BCD TO Binary		○	
算術演算	+	Add		○	○		SQRT	Square Root			○
	-	Subtract		○	○			その他 9 命令 (Absolute, Sine...etc)			
	*	Multiply		○	○	マイクログラプ	(DTR)	Degree To Radian			○
	/	Divide		○	○		(ATN)	Arc Tangent			○
シフト	SL	Logical Shift Left		○				その他 6 種 (e^X , $\log_{10} X$...etc)			
	SR	Logical Shift Right		○							

変数値に対しても、それが上記の範囲内にあるならば有効数字 6 けた (桁) の結果が得られる。

3.3 互換性

H/W においては永年使用され、実績のある回路はそれだけ信頼性が高いといえる。S/W でもそれは例外でなく、CPU が変わっても従来のアプリケーション S/W はそのまま使用できることが望ましい。《MACTUS 710》は、従来の《MACTUS 700》と同一の POL 命令体系を踏襲しており、《MACTUS 700》用に作られたアプリケーションプログラムは、ごく一部を変更するだけで《MACTUS 710》上でも動作するように配慮されている。

4. システム構成と周辺装置

近年のプラントは高機能、高信頼性を追求し、更にマイクロプロセッサのコストダウンなどの周囲環境もあって、システムの分散化、階層化の傾向が強くなっている。《MACTUS シリーズ》も例外ではなく、なかでもシリーズの中核として各階層への適用が要求される《MACTUS 710》は、幅広いニーズに対応すべく利用者側からみた機能追求がなされている。そのため次に述べる周辺装置が用意され、最適な制御シ

テムの構築をねらいとしている。

(1) 各コントローラ間の情報交換及びバックアップシステムを構成するための装置

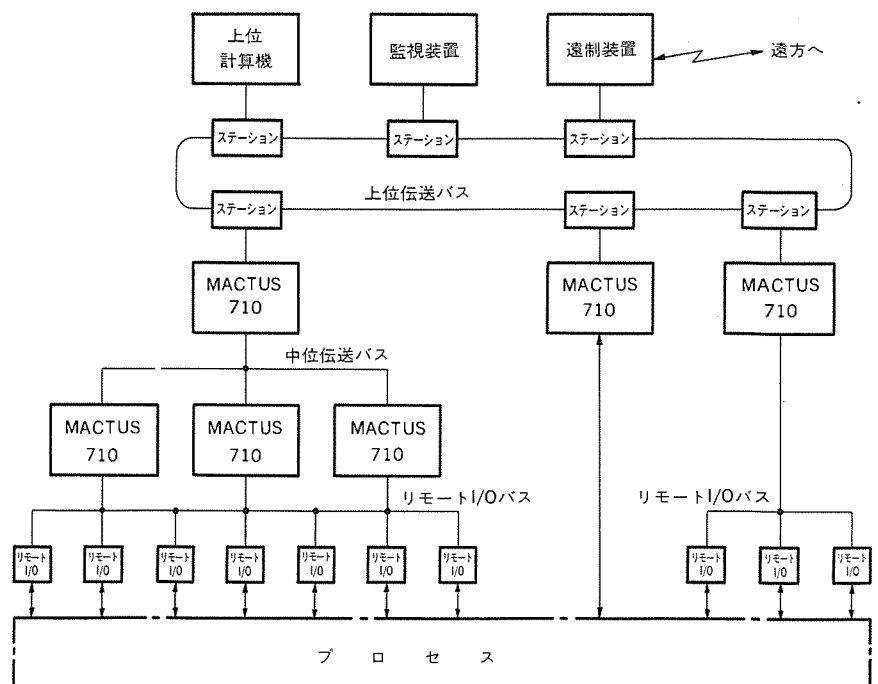


図 5. プラント階層システム例

- (2) プラント全体を監視・制御するための伝送バス
 (3) 必要な入出力情報を効率よく収集するリモート入出力装置
 これらは、大規模から小規模にいたるシステムを構築するうえで、その規模・構成により適宜選択することができ、最適なコストパフォーマンスが実現できる。上記各装置を接続した場合のプラント階層システム例を図5.に示す。

次にシステムとしての特長について述べる。

4.1 マルチ CPU

内部バスにより各CPU間を結合する方法も考えられるが、特にメンテナンスなどを考慮した使いやすさに注目して伝送回線を使うことで実現を図った。この伝送回線は、高速で $N:N$ 通信を実行できるため、次のような適用が考えられる。

- (1) CPU二重化システム
 (2) 複数CPUの機能分担による分散システム

一方、伝送回線を使用したことにより、各CPUが回線異常や他CPUの状態をモニタすることができる。そのため、故障発生時に自動的にあらかじめ定めたシステムに再構成して運転を継続でき、従来システムより高信頼、高機能化が図られている。

4.2 リモートIO装置

コントローラでの処理内容の高機能化に伴い、扱われるプロセス信号の数も増大している。このため、配線工事費の占る割合が増大するとともに、増設、改造にも多大の影響を与えている。これらの問題を解決するため、多重伝送によるリモートIO装置を実現させた。リモートIO配置例を図6.に、主仕様を表4.に示す。

この装置の主な特長は次のとおりである。

- (1) 伝送装置の存在を意識しないで、従来のIOと同様に扱える。
 (2) 伝送路は標準的に二重化が可能で、伝送路が1本切断されても健全側回線に自動的に切り換わり、連続して通信を継続できる。
 (3) 情報の共有化を図るために複数CPUを同一バス上に接続でき、システム構成や増設改造要求に対する柔軟性がある。

4.3 伝送バス

大規模なプラントでは、接続されるコントローラの台数並びに扱われるデータ量もばく大である。一方、分散化が進むことにより、資源の共有化、コントローラ間の情報交換が密となり、これらの要求に合致する伝送バスが必要である。この伝送回線には階層間及び階層内の各コントローラ、計算機、監視装置など異種装置間のデータリンクを高速に実行するため、次のような基本思想に基づいて開発されている。

- (1) サイクリック伝送により、定周期でかつ高速の伝送を行う。
 (2) コントローラ間の伝送は、 $N:N$ 伝送により行う。
 (3) テストツールの充実により、故障部位の追求が容易に行えるよう、診断機能、モニタリング機能の向上を図った。

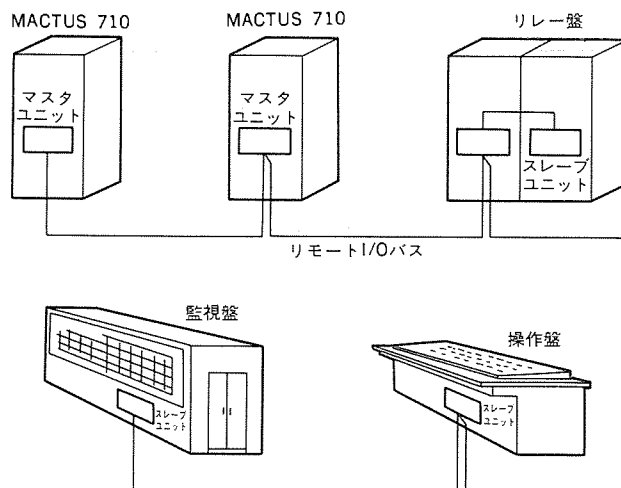


図6. リモートIO配置例

表4. リモートIOの主仕様

項 目	仕 様
伝 送 方 式	半二重ビットシリアル（二重化可）
伝 送 方 式	サイクリック方式
局 数	カード増設により最大64局
伝 送 速 度	1 Mb/s
伝 送 路 形 態	線状マルチドロップ
伝 送 ケ ー ブ ル	同軸3C2V又は5C2V
総 伝 送 路 長	最 大 2km

5. む す び

システムの高信頼性を維持するため、機能分散、階層化が進んでおり、この傾向は今後も強まるものと予測される。プラントの要求に応じた最適システムを構成するには、必要な機能をビルディングブロック式に構築できることが重要である。各種の情報バス、プロセス周辺機器などの豊富なインタフェースメニューをもつほか、高機能なS/W、優れたマンマシンインタフェースなどが必ず（須）条件となっている。本稿で紹介した《MACTUS 710》は、これらの条件を十分に満たした高機能マルチコントローラとして、各種プラントに適用できるものと考えている。今後も使用者側ニーズを常に吸収し、更にシステムアップを図る所存であり、関係各位の建設的な御意見を期待するものである。

総合計装制御システム《MACTUS 600》ファミリー

松本公雄*・清宮忠昭*・安居院憲彰*・片岡猪三郎**・大久保龍二**

1. ま え が き

近年のエレクトロニクス技術とソフトウェア技術のめざましい進歩は、我々の社会システムに一大変革をもたらしている。プロセス産業の分野では、生産性の向上のための自動化から製品の多様化、高付加価値製品生産のための高度な自動化、更には個々のプロセスの最適化から情報技術、通信技術を駆使したプロセス間の協調制御、生産管理までトータルシステムとしての自動化、省エネルギー、合理化、省力化に変革している。いわゆる製造ラインからデータ管理に至る企業全体の企業オートメーションへの変遷が予測される中で、有機的なトータルシステムをねらった三菱総合計装制御システム《MACTUS 600》ファミリーの概要について説明する。

2. 《MACTUS 600》ファミリーの基本設計思想

プロセス監視制御は生産工程の自動化、省力化省エネルギーをめざして、ますます多様化、高度化されてきており、従来の押ボタン、アナログ計器、リレー・ケネックスなどによる制御から、より融通性、拡張性、保守性、信頼性に優れた分散形DDC (Direct Digital Controller) 装置による制御が主流になってきた。更に計装制御システムは単にスタンダード的な使われ方より、工場トータルの自動化システムの中で、どのように組み入れていくかの基本的構想が重要になっている。一

方、プラントオペレーションにおいても、CRT (Cathode Ray Tube) を積極的に導入する形態に変革している。

《MACTUS 600》ファミリーはこのような産業界の動向を踏まえ、プラントの安全、安定操業を前提として、生産コストの低減と省エネルギー化、運転維持管理の省力化と簡素化、製品の多様化・高機能化の対応、生産規模に合わせた拡張と改良の容易性を追求して製品化したものであり、以下その基本設計思想を述べる。

2.1 フレキシブルなシステム計画の追求

今後、伝送装置を中心とした分散処理ネットワークシステムが経済的に構築でき、地域的にも機能的にもますます分散処理の傾向が強まって

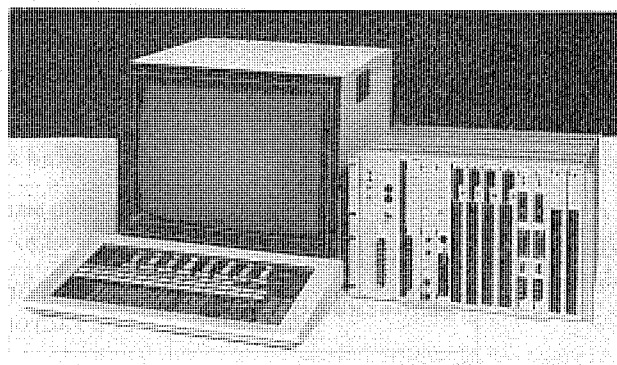


図 1. 《MACTUS 620》+CRT コンソール

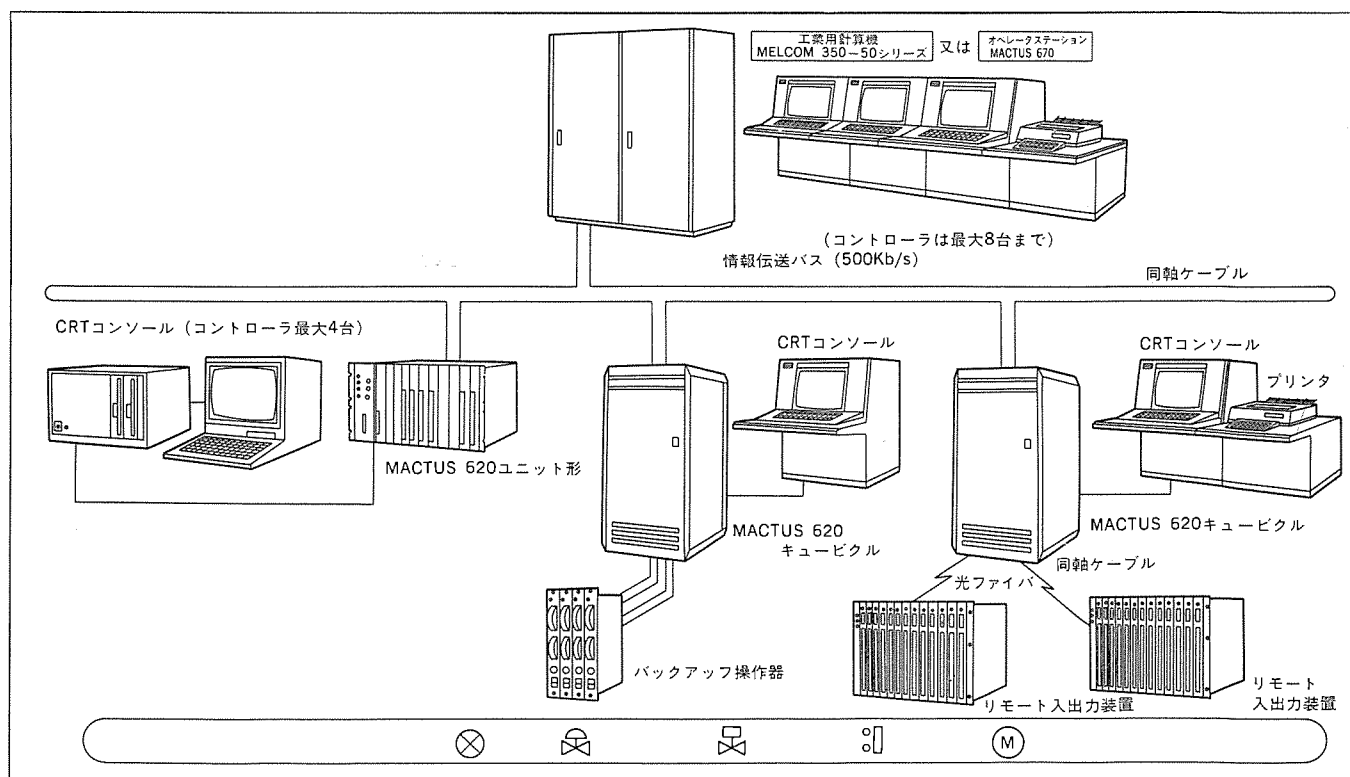


図 2. システム構成図

きている。一方、プラントの自動化が進むに従って、計装制御システムは、単にアナログ計器的な単一ループ制御からループ相互間の協調制御、演算制御、シーケンス制御、データ処理が融合した制御が要求される。

《MACTUS 600》ファミリーは、用途に応じたフレキシブルなシステム計画ができるよう、計装制御に必要な機能を高速に実現できる《MACTUS 620》及び CRT コンソールによる単体システムから、高速伝送バスにプロセスコンピュータを結合した生産管理システムまでの拡張性を有する融通性に富んだシステムを提供する(図 2.)。

2.2 CRT オペレーションの経済性と操作性を追求

省エネルギー、多品種少量生産などの社会的要請から、プラントの高効率運転、高信頼度運転が要求され、プラントのよりち(緻)密な監視操作が必要となる。更に、プラントの複雑化、自動化が進むに従ってプラントの監視範囲の拡大化を招き、情報の集中化、総合的監視がこれまで以上に強く要求されている。これに伴い、従来の計器、操作スイッチを主体としたパネルオペレーションから、数字、文字、記号によるデジタル表示に加えて、図形、棒グラフ、トレンドグラフなどのアナログ的パターン表示を織り混ぜ、より人間が理解しやすい形で情報提

供を可能にするカラー CRT を中心とした CRT オペレーションが主流になっている。

《MACTUS 600》ファミリーは CRT の機能を最大限に発揮し、操作性の向上を図るために、次の機能を実現している。

- (1) 80 文字×50 行 (4,000 文字) の高密度 CRT の採用
- (2) 漢字表示可能な CRT の採用
- (3) アナログ的操作可能なオペレーションキーボードと保守用エンジニアリングキーボードの分離
- (4) 32 個のファンクションキーによる重要画面のワンタッチ表示

2.3 ソフトウェア作成の容易化を追求

プロセス監視制御システムでは、計装制御、シーケンス制御、データ処理、CRT 画面帳票機能が要求され、これらの機能を実現するためのソフトウェア作成及びメンテナンスは、メーカーのソフトエンジニアではなく、ユーザーにおいても容易に取扱えることが要請されている。

《MACTUS 600》ファミリーではその現実を踏まえ、CRT と対話形式でドキュメントに対応したソフトウェア作成・変更ができることをねらって、DDC ソフトウェアのルーブダイアグラム化、シーケンス制御及びデータ

表 1. 《MACTUS 600》ファミリーの特長

基 本 思 想		具 体 的 項 目	内 容
フレキシブルなシステムの適用		計装制御 (DDC)	<ul style="list-style-type: none"> 単一ループ (PID 比率など各種機能)、カスケード、フィードフォワード、多変数制御などアナログ計器からアドバンスド機能まで実現 制御、監視合計 200 ループまでがコントローラの制御範囲
		シーケンス制御とデータ処理の融合化	<ul style="list-style-type: none"> MELSEC, MELPLAC をベースにしたシーケンス処理機能とデータ処理機能との違和感のないシステムの実現 デジタル入力/出力各 2,048 点までがコントローラの制御範囲
		融通性のある階層システム	<ul style="list-style-type: none"> コントローラ (MACTUS 620) の上位へ管理オペレータステーション (MACTUS 670) 及び管理用コンピュータあるいは FACTORY LAND コンピュータの接続により最適な工場のトータル自動化を実現
		豊富なインタフェースの装備	<ul style="list-style-type: none"> リモート入出力 (電気式/光式) による配線工事の削減 情報伝送バスによる並列分散システムの実現 標準インタフェース (RS-232 C, カレントループ) による各種周辺機器の接続
CRT オペレーションによる親密化と即応化	CRT コン ソール	コントローラ (MACTUS 620) のプログラムメンテナンス	<ul style="list-style-type: none"> エンジニアリングキーボードと CRT による対話形でのプログラムメンテナンス
		DDC オペレーション	<ul style="list-style-type: none"> オペレーティングキーボードと CRT による対話形での画面登録と画面表示サポート
		BASIC プログラムメンテナンス	<ul style="list-style-type: none"> エンジニアリングキーボードと CRT でマンマシンとしての各種アプリケーション (グラフィック画面など) をサポート
		上位 MACTUS 670 管理オペレータステーション	<ul style="list-style-type: none"> コントローラ (MACTUS 620) の最大 8 台までの監視、管理サポート最大 1,448 タグ登録が可能
ソフトウェア作成の容易化		DDC のソフトウェア	<ul style="list-style-type: none"> 基本マクロファンクションによるルーブダイアグラムの CRT 表示と対話しながらルーブ構築パラメータチューニングが可能
		シーケンスとデータ処理のソフトウェア	<ul style="list-style-type: none"> プラント制御専用言語 (POL) での論理図及び記述式による CRT 対話形でアドレスを意識させないプログラムメンテナンスが可能
		DDC オペレーションとマンマシンの各種アプリケーションソフトウェア	<ul style="list-style-type: none"> DDC オペレーションでのビルダメンテナンスは空欄記述式 (FIF) アプリケーションは BASIC 言語で容易にサポートが可能
		ソフトウェアデバック効率向上のための各種サービス	<ul style="list-style-type: none"> シングルスステップ、プログラムサーチ、ソースサーチ、分岐トレース、割り込みトレースオンラインプログラムモニタ、ソースモニタ、プログラムトレース、ソーストレースなどの各モードを CRT コンソールでサポート
高信頼性高保守性化		ハードウェア固有の信頼性向上	<ul style="list-style-type: none"> LSI を駆使したシンプルなハード構成と品質管理の強化
		バックアップシステム	<ul style="list-style-type: none"> 経済的なコンポーネントバックアップを実現 (CPU、メモリ、伝送、スプリット入出力カード)
		故障診断	<ul style="list-style-type: none"> ハードウェアのカード対応の故障表示と万一故障時の故障経歴を詳細に CRT へ表示 (CRT コンソールのエラーガイダンス)
		プロセス診断	<ul style="list-style-type: none"> CRT コンソールのオンラインソーストレース及び DDC オペレーションでのアラームディスプレイでプロセス機器の異常を検知可能

処理機能のプラント制御専用言語(POL)の採用, DDC 標準画面生成の空欄記述方式(FIF)化, アプリケーションプログラムの高級言語(BASIC, PL/M)採用を行っている。

2. 4 高信頼性, 高保守性を追求

マイクロエレクトロニクス発展により, ますますハードウェアの高密度化と高速性が可能となった。その結果, 部品点数の大幅な削減を生み, 物理的な信頼性向上へ貢献する。その反面高い専門性を要求され, その信頼性テスト及び保守性の高度化, システムとしての信頼性向上が要求される。このような背景に立って《MACTUS 600》ファミリーは固有の信頼性向上はもちろん, CRT, 伝送装置, CPU, メモリ, 電源などの二重化構成, 故障範囲の極少化, バックアップシステムの充実, 更には保守の面でユーザー自身で万一の故障を発見でき, その故障の履歴も認識できる故障診断機能の充実を図ったシステムを提供するものである。

3. 《MACTUS 600》ファミリーの特長

2章の基本設計思想に基づいた《MACTUS 600》ファミリーの特長をまとめたものが表1.である。

4. ハードウェア

《MACTUS 600》ファミリーでコントローラ役割をもつ《MACTUS 620》のハ

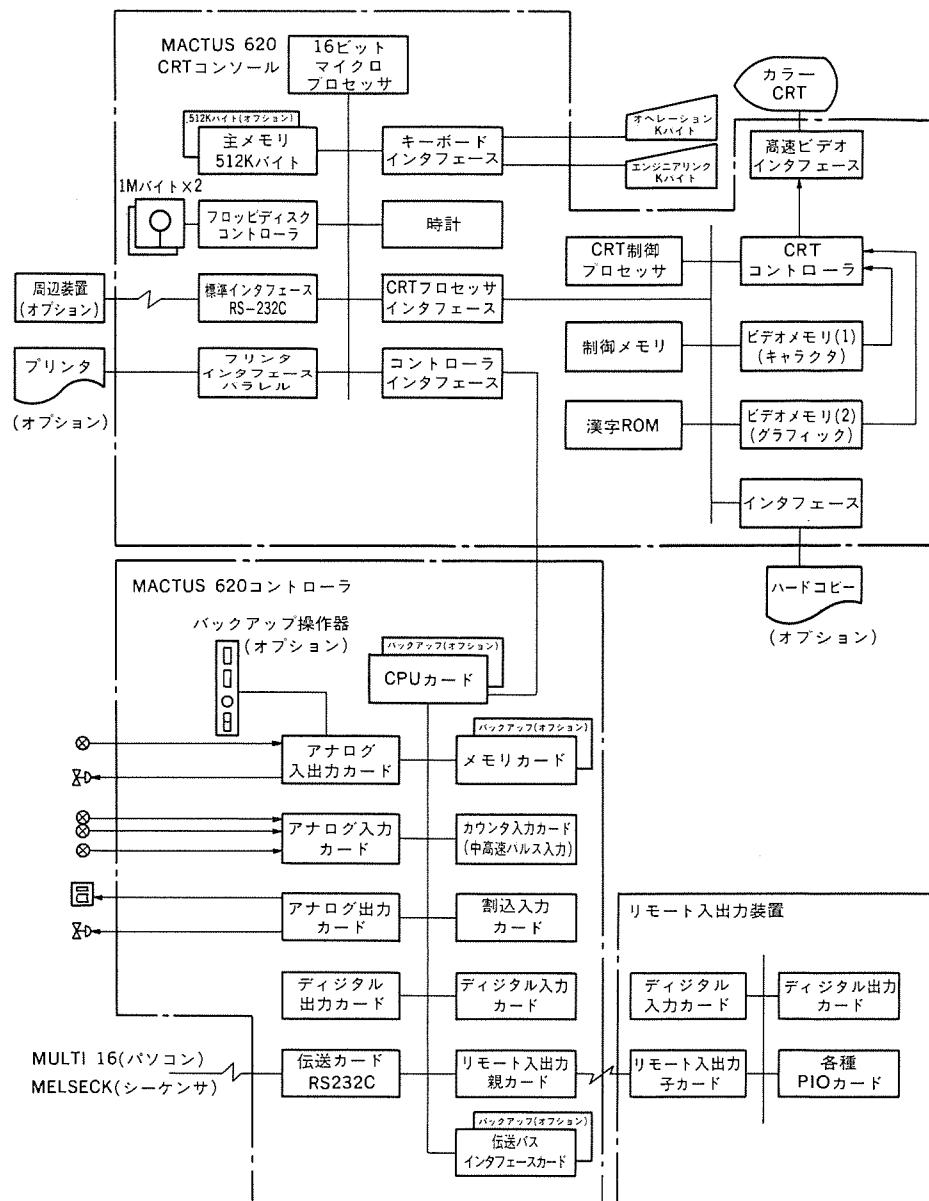


図 3. 《MACTUS 620》ハードウェアブロック図

表 2. 《MACTUS 620》フィードバック制御機能リスト (標準)

分	類	シンボル	機 能
標準機能	基本マクロファンクション	PID	基本PID調節ファンクション
		C-PID	カスケードPID調節ファンクション
		R	比率設定ファンクション
		R-PID	比率PID調節ファンクション
標準機能	注) 基本ソフトウェアパッケージには, 入力処理, 上下限警報, 変化率警報, 偏差警報, PID調節, 出力処理機能など各パッケージに必要な機能は既に含まれている。	ONF 2	2位置オンオフ調節ファンクション
		ONF 3	3位置オンオフ調節ファンクション
		MOUT	手動操作器ファンクション
		MONI	指示器ファンクション
標準機能	機能ユニット	PGS	プログラム設定器ファンクション
		DEAD	無駄時間ユニット
		LDLG	進み遅れユニット
		D	微分ユニット
標準機能	演算ユニット	DBND	不感帯ユニット
		LIMT	リミットユニット
標準機能	機能ユニット	FGEN	折線関数ユニット
		IFG	逆折線関数ユニット
		SQRT	開閉演算ユニット
		TC	温度補正ユニット
標準機能	信号変換ユニット	PC	圧力補正ユニット
		ENG	工学値変換ユニット
		IENG	逆工学値変換ユニット

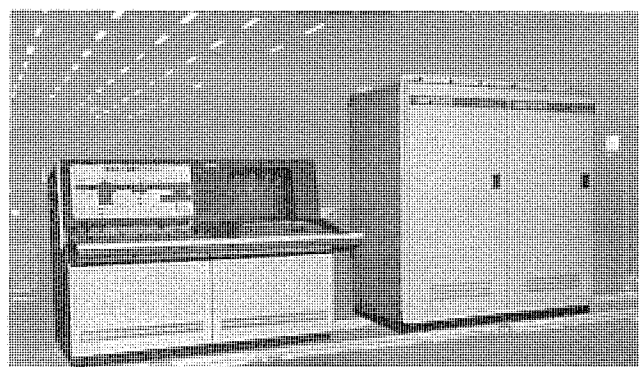


図 4. 《MACTUS 670》制御盤実装例

ドウェア構成を図3.に, 上位の管理オペレータステーションの制御盤実装例を図4.に示す。

4. 1 制御機能

フィードバック制御機能として, 基本PID制御, カスケードPID制御, オ

ソフト制御など9種類の基本ソフトウェアを入力処理、警報チェック、調節機能、出力処理までパッケージ化した基本マクロファンクションのほかに、無駄時間、折線関数、温度・圧力補正など機能ユニットを用意している。表2は《MACTUS 620》フィードバック制御機能をまとめたもの

表3. 《MACTUS 620》ハードウェア仕様

●CRTコンソール本体仕様

サポータ TAG 数	制御ループ+モニターループ: max 400 ループ ステータス監視: max 1,024 点
フロッピーディスク	8 インチ標準フロッピー 2 ドライブ プログラムデータ保存 ・アラーム記録 ・トレンド記録
周囲条件	温度 5~40°C 湿度 20~80%RH(結露なし) 電源 AC 100/110 V+10%~-15% 50/60 Hz
CRT	14 又は 20 インチカラー CRT 8 色 80 文字×50 行=4,000 文字 漢字 JIS 第1水準 2,965 文字 非漢字 453 文字 グラフィック表示
オペレーションキーボード	DDC 標準画面のオペレーション ユーザー開放 BASIC に対応するオペレーション
エンジニアリングキーボード	プログラム作成 (POL, DDC) BASIC プログラム作成

●周辺機器仕様

漢字プリンタ	PR-04 374 W×107 H×305 D インパクトドットマトリクス 漢字モード 20 CPS 60 桁 テキストモード 80 CPS 80 桁 用紙4~10"
簡易プリンタ	PR-07 584 W×161 H×417 D インパクトドットマトリクス(7ピン) 135 字/秒 136 桁 用紙 4~15.5"
ハードコピー	PR-10 374 W×107 H×305 D インパクトドットマトリクス(9ピン) 80 CPS 80 桁 用紙 4~10"

●《MACTUS 620》コントローラ仕様

演算制御部	ソース指定によるワード/ビット処理制御
演算方式	2進並列、固定小数点演算、1語=16ビット
ワード処理	シーケンシャル演算
ビット処理	マイクロプログラミング方式
制御方式	DDC マクロファンクション9種 POL 59 種
命令	加減算 3μs(イミディエイト)
演算速度	5.25 μs(直接ソース) 乗除算 13.25~20.5 μs ビット論理演算 6 μs
割込制御	割込要因自動判別方式
レベル要因	3レベル 6点(H/W 異常処理)エラーレベル 8点(周辺機器用) 16点(カウンタ用) } ローレベル 32点(入力用) 2点(システムクロック)ハイレベル
サブルーチン	4重ネスト処理まで可能
ルーチン数	制御ループ数を N、監視ループ数を n とすると $2N+n \leq 250$ $N+n \leq 200$
インデックス	インデックスレジスタ、2語(X, Y) 装備
周囲条件	温度 0~50°C 湿度 10~90%RH(結露なし) 電源 AC 100/100 V+10%~-15% 50/60 Hz
主記憶部	ICメモリ
サイクルタイム	1 μs
プログラムメモリ	最大 16K 語 1語=24ビット+パリティビット
データメモリ	最大 32K 語 1語=16ビット+パリティビット
入出力部	直接ソース指定方式
タイマ仕様	プリセットダウンカウンタ方式
方式	200点(CPU内蔵)
点数	16,333分 最大
制限値	0.1秒(150点) 1分(50点)
インクリメント	

であり、そのほかに特殊機能がプロセス制御専用言語(POL)でサブルーチンパッケージを作成することによって実現できる。また制御・監視ループのコントロール周期は、基本周期0.1秒及び1秒を単位として各ループごとに任意に設定し制御できる。

なお、シーケンス制御機能及び演算機能は、従来から実績をもつプラントコントローラ《MELPLAC シリーズ》とソフトウェアの互換性を有し、これらで実績をもつ既存のアプリケーションソフトはそのまま《MACTUS 620》に適用できる。

4.2 《MACTUS 620》ハードウェア仕様

4.1 節の機能をもつ《MACTUS 620》のハードウェア仕様について表3.にハードウェアの中核たる演算制御部(CPU)及び主記憶部、更にはマシンとなるCRTコンソール本体、及び周辺機器の仕様を明示

表4. プロセス入出力カード仕様

プロセス入出力部					
ディジタル入力				ビット最大 2,048 点 ワード最大 256 点	
ディジタル出力				ビット最大 2,048 点 ワード最大 256 点	
アナログ入力				最大 256 点	
アナログ出力				最大 256 点	
中高速カウンタ入力 (パルス入力)				最大 256 点	

種別	形 名	入力信号(プロセス側)		実装 点数	特 長	用 途
		電 圧	電 源			
ディ ジ タ ル 入 力	P 12 A	AC 100 V	10 mA	32	AC 入力 トランス絶縁 (マトリクス)	プロセス一般
	P 12 B	AC 100 V	10 mA	32	AC 入力 ホトカブラ絶縁	
	P 15 A-2	DC 24 V	10 mA	64	DC 入力 ホトカブラ絶縁	プロセス一般
	P 15 B	DC 48 V	15 mA	32		
	P 15 C-2	DC 100 V	10 mA	32		
	P 16 C-2	DC 100 V	10 mA	64	ホトカブラ絶縁 (マトリクス)	無電圧接点入力用
ディ ジ タ ル 出 力	PO 1 A	AC 100 V	2 A	16	AC 出力 トライアック出力	プロセス一般
	PO3B-2	AC 100 V DC 100 V	1 A 0.3 A	32	リレー接点出力 (8点単位コモン)	プロセス一般
	PO5A-2	DC 24 V	100 mA	64	ホトカブラ絶縁 (オープンコレク タ出力)	ランプ出力等
	PO 3 C	AC 220 V DC 100 V	1 A 0.3 A	16	リレー接点出力 (各点独立)	プロセス一般
ディ ジ タ ル 入 出 力	PX 21 O	DC 5 V	16 mA	32 (I/O 合計)	ホトカブラ絶縁 (8点毎に D/I, D/Oの変更可)	TTL レベル入出力

種別	形 名	レ ン ジ	精 度	実 装	特 長
ア ナ ロ グ 入 力	PQ 1 B	DC 1~5 V	±0.3%	32	高抵抗絶縁
	PQ 1 C	DC 4~20 mA	〃	32	〃
	PQ 1 D	DC ±10 V	〃	32	〃
	PQ 2 B	DC 1~5 V	〃	8	〃
	PQ 2 C	DC 4~20 mA	〃	8	〃
	PQ 2 D	DC ±10 V	〃	8	〃
	PQ 2 B-P	測温抵抗体	±0.5%	8	ポイント絶縁
	PQ 2 B-T	熱電対	〃	8	〃
ア ナ ロ グ 出 力	PQ 7 A	DC 4~20 mA	±0.3%	8	カード単位絶縁
	PQ 6 A	±10 V	〃	8	〃
	PQ 6 B	DC 1~5 V	〃	8	〃
入 ア ナ ロ グ 出 力	PQ 8 A	入力 4~20 mA 1~5 V (RTD, TC)オプション 出力 4~20 mA	±0.5% ±0.5%	1 1	〃

種別	形 名	入力信号(プロセス側)	周 波 数	用 途
高 速 カ ウ ン タ 入 力 (中)	PC 1 A	回転パルス発振器 (両方向)	1 kHz	位置制御など
	PC 2 A	〃 (〃)	10 kHz	〃
	PC 3 A	DC 24 V, DC 12 V, 10mA (片方向)	4 kHz	中速パルス計測
	PC 4 A	DC 24 V, DC 12 V, 10mA (片方向パルス)	10 kHz	高速 〃

し、表 4. に ハードウェア の 手 足 となる プロセ ス 入 出 力 カード の 仕 様 を 列 記 する。

特長として《MACTUS 620》の CPU 部に高速ビットスライ ス 形 マ イ ク ロ プ ロ セ ッ サ を 採 用 し、マ イ ク ロ プ ロ グ ラ ム ィ ン グ 方 式 に よ る 高 速 演 算 を 行 う。こ れ は プ ラ ン ト 制 御 向 け 高 位 言 語 (POL) に よ る ビ ッ ト 演 算、ワ ー ド 演 算 の 同 時 処 理、D D C 演 算、シーケ ン ス 演 算 は も ち ろ ん マ ン マ シ ン で あ る C R T コ ン ソ ー ル と の 直 接 イ ン タ フ ェ ー ス 機 能 を 受 持 つ コ ン ト ロ ー の 中 枢 部 で あ り、異 常 時 の 再 試 行 機 能 を も ち タ イ マ 200 点、シ ス テ ム ク ロ ッ ク 2 点 を 内 部 に 実 装 し て い る。

な お、C P U 前 面 に は 電 源 O N、ク ロ ッ ク エ ラ ー、温 度 異 常、ア ド レ ス デ ー タ の パ リ テ ィ エ ラ ー、無 応 答 エ ラ ー、ロ ジ ッ ク エ ラ ー、自 己 診 断 エ ラ ー、軽 故 障 発 生 の 有 無 な ど C P U に 関 す る 状 態 が す べ て ラ ン プ 表 示 さ れ、複 雑 な ハ ー ド の 故 障 メ ン テ ナ ン ス で の 早 期 回 復 を 図 れ る よ う に な っ て い る。ま た、マ ン マ シ ン の C R T コ ン ソ ー ル に は デ ー タ ハ ン ド リ ン グ 部 に 16 ビ ッ ト マ イ ク ロ プ ロ セ ッ サ、表 示 制 御 部 に 8 ビ ッ ト の マ イ ク ロ プ ロ セ ッ サ の マ ル チ プ ロ セ ッ サ の ハ ー ド ウ ェ ア 構 成 と な っ て お り、そ れ ぞ れ の 素 子 の 利 点 を 最 大 に 生 か し て 速 応 性 へ 対 処 し て い る。ま た 補 助 メ モ リ と し て フ ロ ッ ピ デ ィ ス ク を も ち、《MACTUS 620》の 各 種 プ ロ グ ラ ム、デ ー タ、更 に は ア プ リ ケ ー シ ョ ン の B A S I C プ ロ グ ラ ム の 保 管 が 可 能 で あ る。こ こ で は、16 ビ ッ ト の マ イ ク ロ プ ロ セ ッ サ で オ ン ラ イ ン ジ ョ ブ (実 時 間 処 理) と B A S I C プ ロ グ ラ ム の 並 行 処 理 を 行 っ て い る。

《MACTUS 620》は C R T オペレーションを追究したものであるが、特に重要な制御ループにはスプリットタイプのアナログ入出力カードを準備しリモート→カスケード→オート→マニュアル→バックアップの多段の階層バックアップシステムをサポートしている。

5. ソフトウェア及びマンマシン

5.1 エンジニアリング機能

(1) シーケンス POL 及び テーブル

シーケ ン ス 制 御 の ソ フ ト ウ ェ ア は、プ ロ セ ス 制 御 専 用 言 語 (POL) を 用 い て、プ ロ グ ラ ム ア ド レ ス の 概 念 を 意 識 せ ず に、図 面 対 応 で C R T 画 面 と 対 話 式 に プ ロ グ ラ ム ィ ン グ 及 び メ ン テ ナ ン ス が で き る (シ ー ト ナ ン バ ー 方 式)。し か も 個 々 の シ ー ト ナ ン バ ー ご と の プ ロ グ ラ ム サ イ ズ (ス テ ッ プ 数) の 制 限 が な く、プ ロ グ ラ ム の 挿 入、削 除 も 自 由 に で き る の で、プ ロ グ ラ ム の 変 更、訂 正 が 容 易 に 実 現 で き る。

ま た シーケ ン ス 制 御 の 中 に 含 ま れ る 演 算、デ ー タ 処 理 ソ フ ト ウ ェ ア は、シーケ ン ス 制 御 の 場 合 と 同 様 に プ ロ セ ス 制 御 専 用 言 語 (POL) を 用 い た シ ー ト ナ ン バ ー 方 式 で プ ロ グ ラ ム 作 成・変 更 が 実 現 で き る。シーケ ン ス 制 御 プ ロ グ ラ ム 画 面 を 図 5. に 示 す。も う 一 つ の 方 法 と し て の シーケ ン ス テ ー ブ ル 記 述 に よ る シーケ ン ス 制 御 は、ス テ ッ プ 的 に 進 行 す る プ ロ セ ス に 適 用 す る 目 的 で 開 発 し た も の で、従 来 の 論 理 図 記 述 で は 表 現 で き な っ た プ ロ セ ス の 進 行 状 況、入 出 力 パ タ ー ン な ど の 監 視 は も ち ろ ん の こ と テ ー ブ ル の “1”, “0” の パ タ ー ン を 変 え る だ け で 簡 単 に ス テ ッ プ の 入 出 力 条 件 を か え る こ と が で き る。テ ー ブ ル の 仕 様 を 表 5. に、主 な 機 能 を 表 6. に 示 す。

(2) DDC ループダイアグラム

フ ィ ー ド バ ッ ク 制 御 機 能 と し て、基 本 P I D 制 御、カ ス ケ ー ド P I D 制 御、オ ン オ フ 制 御 な ど 9 種 類 の 基 本 ソ フ ト ウ ェ ア を 入 力 処 理、警 報 チェック、調 節 機 能、出 力 処 理 ま で パ ッ ケ ー ジ 化 し た 基 本 マ ク ロ フ ェ ン ク シ ョ ン と し て 用 意、ま た こ の ほ か に 無 駄 時 間、折 線 関 数、温 度・圧 力 補 正 な ど 機 能 ユ ニ ッ ト を 用 意 し て、D D C ソ フ ト ウ ェ ア の ル ー プ ダイアグラム化を図り、C R T と 対 話 形 式 に よ り 空 欄 記 述 方 式 (FIT) で 容 易 に D D C 機 能 が 実 現 で

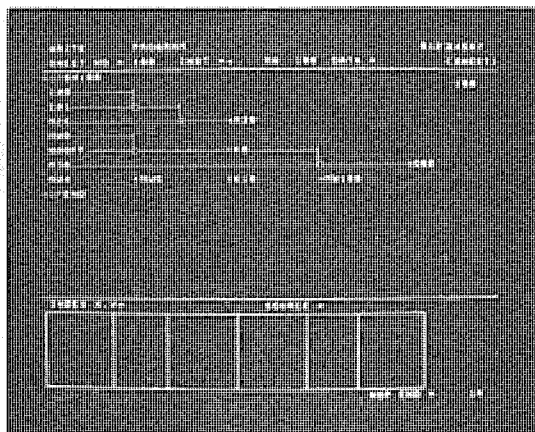


図 5. シーケ ン ス 制 御 プ ロ グ ラ ム 画 面

表 5. テ ー ブ ル 仕 様

項 目	仕 様
(1) テーブル枚数	max 64 枚/CPU
(2) ステップ数	max 96 ステップ/CPU
(3) 出力信号点数	max 128 点/テーブル
(4) 入力信号点数	max 128 点/テーブル
(5) 次ステップ条件信号点数	max 64 点/テーブル
(6) 小工程数	max 16 小工程/テーブル
(7) 許容出力信号ソース※	O, S, M, RO, RM, E, TB
(8) 許容入力信号ソース※	T, C, I, O, S, M, RI, RO, RM, E, TB
(9) 許容次ステップ条件信号ソース※	T, C, I, O, S, M, RI, RO, RM, E, TB

注 ※：ソース及び仕様欄記号の意味は MACTUS 620 プログラミングマニュアル参照

表 6. テーブル 機能概要

モード	項 目	機 能 概 要
メ ン テ ナ ン ス	メニュー画面	下記メンテナンス画面を選択するためのメニュー表示
	テーブル オーバービュー画面	テーブルの使用しているワーキングエリアのソース及びサイズなどの表示、テーブルステータスの表示
	メンテナンス テーブル画面	テーブルの作成、変更及び表示
	・ OUTPUT	出力信号に関する操作
	・ INPUT	入力信号(アンサバック信号など)に関する操作
コ ピー	・ JMP	歩進条件についての操作
	・ TIMER	アンサバックタイマ、ステップタイマの設定、変更
	・ D・PROCESS	小工程及び小工程タイマの設定、変更
モ ニ タ	コピー テーブル画面	テーブルのコピー
	テーブル メッセージ画面	メッセージ(コメント)登録
	モニタテーブル画面 (OUTPUT/INPUT) (JMP)	テーブルのデバッグ・動作表示

きる。D D C ループダイアグラム 画面を 図 6. に 示 す。

(3) BASIC アプリケーション

C R T コ ン ソ ー ル は、高 位 言 語 (B A S I C 言 語) を サ ポ ー ト し て お り、各 種 グ ラ フ ィ ッ ク 画 面、デ ー タ 設 定 画 面、帳 票 な ど の ア プ リ ケ ー シ ョ ン プ ロ グ ラ ム を 一 般 の パ ー ソ ナ ル コ ン ピ ュ ー タ と 同 じ 要 領 で 容 易 に 作 成、変 更 で き る。

5.2 オペレーション機能

《MACTUS 600》ファミリ ー は、プ ラ ン ト の 運 転・監 視・操 作 を 行 う マ ン マ シ ン 機 能 と し て 9 種 類 の オペレーション画面を準備しており、一例を 図 7. に 示 す。そ れ ら の 画 面 を 操 作 す る オペレーションキーボード (図 8.) は、機 能 的 に 関 連 の あ る キー が グ ル ー プ に 分 け て 配 置 さ れ、操 作 性 の 向 上 を 図 っ て い る。ま た、標 準 画 面 だ け で な く 使 用 頻 度 の 高 い ア プ リ ケ ー シ ョ ン 画 面、例 え ば 図 9. の よ う な グ ラ フ ィ ッ ク 画 面 が ワ ン タ ッ チ で

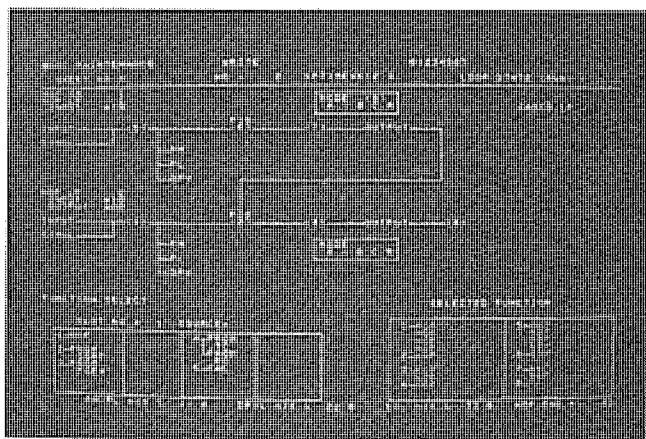


図 6. DDC ループダイアグラム 画面

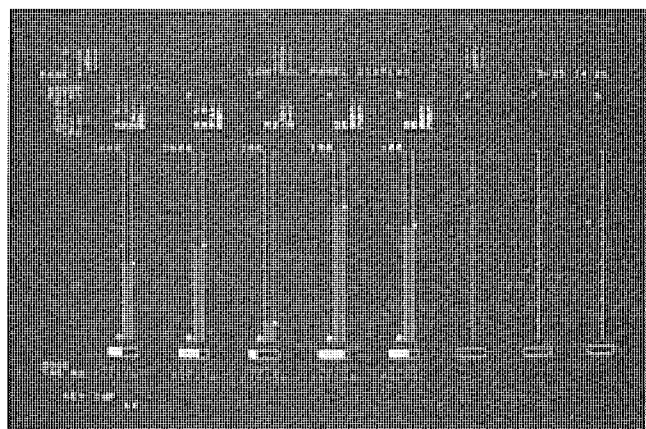


図 7. オペレーション 画面の例

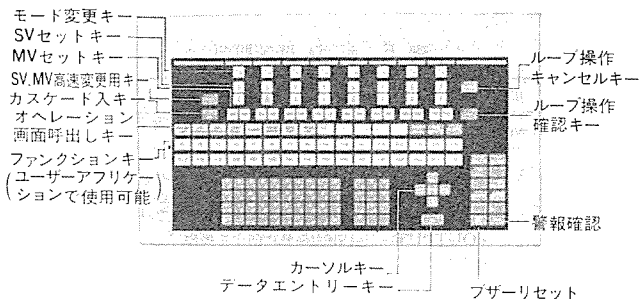


図 8. オペレーションキーボード 配列図

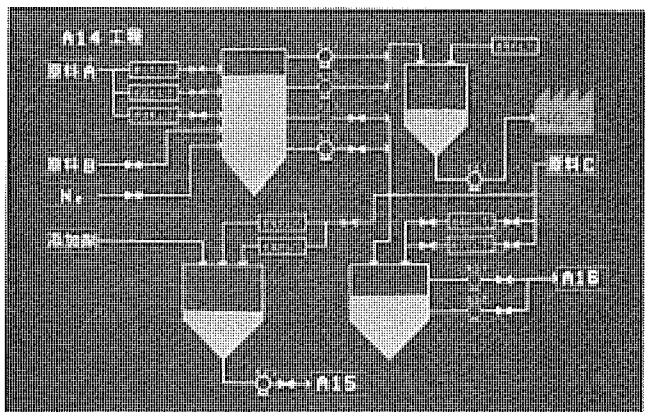


図 9. アプリケーション 画面の例

表 7. オペレーション 画面及びビルダメンテナンス 画面の種類

メニュー	機能概要
TAG NO LIST DISPLAY	TAG NO を一覧表示すると同時に TAG の状態を表示
PV OVERVIEW DISPLAY	PV 値を一覧表示すると同時にプロセス警報を表示
DEVIATION OVERVIEW DISPLAY	偏差値を一覧表示すると同時にプロセス警報を表示
CONTROL PANEL DISPLAY	プロセス状態をアナログ指示計又は調節計に似せて数値とバーグラフで一括表示
PARAMETER TUNING DISPLAY	制御ループあるいは監視ループの全パラメータの TUNING とともにその内容表示
TREND GRAPH DISPLAY	指定された TAG NO の SV/PV/PH/PL/MU/MH/ML/DV のうちから任意に選択された値をパーセント値としてトレンド表示
DATA DISPLAY	PV 値をデジタル値で一括表示
ALARM DISPLAY	全異常発生点を異常発生順に届集し表示
TREND GRAPH LINK DISPLAY	TREND GRAPH DISPLAY で表示する TAG NO/表示色/表示時間などを設定
ANALOG INPUT LIST DISPLAY	システムの制御ループ、監視ループの TAG NO/メッセージを設定すると同時にハードウェアとの結合を定義
STATUS INPUT LIST DISPLAY	システムのステータス入力形式を設定すると同時にハードウェアとの結合を定義
TAG NO LINK DISPLAY	オペレーション画面に表示する配列を制御ループ及び監視ループ、ステータス入力それぞれの TAG NO を使ってグループ(8点/グループ)に分類設定

呼び出せるように 32 個のファンクションキーを配置している。

更に、オペレーション画面の表示形式をユーザー自身で生成できる機能として 3 種類のビルダメンテナンス画面を準備している。ユーザーは、エンジニアリングキーボードとビルダメンテナンス機能画面と対話しながら空欄記述方式 (FIF) で入力情報、CRT 画面の構成を定義することによって生成することができる。オペレーション画面とビルダメンテナンス画面のメニューを表 7. に示す。

6. 今後の展開

《MACTUS 600》ファミリーは、ユーザーの発想を転換させつつある。従来はランプとスイッチの集合で構成されていた監視操作盤は、グラフ・表・シンボル・漢字などを駆使した CRT 画面との対話形式によるオペラトコンソールに変わり、リレー盤やアナログ計器でただ制御機能のみを実現していたものから、大きなメモリ容量とデータ演算命令を駆使した複雑なデータ処理機能を付加できるようになった。

また、ハードウェアは軽薄短小をベースに水平分散及び冗長系階層システムへと発展している。こうした環境は、システム計画者により高い立場からプロセスを見る視点を与えた。つまり、プロセス運用、プロセス管理、更には生産経営管理という側面からシステムを見るように変えたのである。その意味で我々メーカーとしては、プロセス管理やプロセス運用に適したデータベースの構築、オペレーション標準ソフトウェアパッケージの増強と更には生産管理などの工場管理システムとの有機的な結合を図ったトータルシステムへの展開をすすめ、企業全体の生産性向上に寄与すべく努力していきたいと考えている。

7. むすび

《MACTUS 600》ファミリーは、総合分散制御システムのコンポーネントであり、この論文がこれを上手に使っていただくための手引きとなれば幸いである。

参考文献

- (1) 片岡ほか：《MELPLAC-300》制御監視トータルシステム、三菱電機技報、56, No. 7 (昭 57)

1ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリー

土屋 輝彦*・森 俊吾*・成原 弘修*・安藤 隆*・古谷 悦一*

1. ま え が き

昨今のデジタル計装制御システムは、マイクロプロセッサを搭載したデジタル調節計である1ループコントローラの出現を契機として目覚ましい進歩を遂げてきているが、1ループコントローラは経済性、危険分散の要求にこたえプロセス計装制御システムにスムーズにかつ有効に導入が図られている。当社では、1ループコントローラの多数の納入実績と経験をベ

ースに、昭和56年に《MACTUS 200》ファミリーを強化し、汎用形から高機能形まで4機種の1ループコントローラを製品シリーズ化し多数の納入実績を得た。

これらの実績を踏まえ、近年のカスタム LSI 技術などの新技術の採用による高信頼性の追求を進める一方、高度の制御理論の適用展開を図るなど、《MACTUS 200》ファミリーの特長を更に拡大しつつ顧客のニーズにこたえてきている。

本稿では、《MACTUS 200》ファミリーの紹介とともに、新技術の紹介と高度な制御理論への適用例の概要を紹介する。

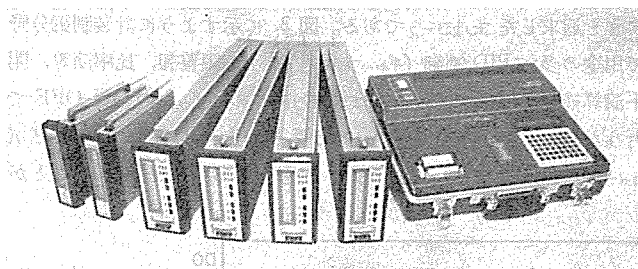


図 1. 1ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリー

2. 1ループコントローラファミリー

1ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリーは、半導体技術、デジタル回路技術及び多年のソフトウェア技術を駆使し、デジタルの持つ特長を最大限に発揮したパネルオペレーション指向のデジタル計装制御装置である。経済性と操作性を重視した汎用形1ループコントローラと、機能を重視した高機能形1ループコントローラを、各々パルス出力形とアナログ出力形の機能を搭載して4機種シリーズ化を図っている。

表 1. 《MACTUS 200》ファミリー仕様

		汎 用 形		高 機 能 形	
特 長		制御機能を用途の多い PID、上下限警報、開平、比率機能のみに限定し更にソフトレスとした汎用タイプの1ループコントローラ		ハイレベルな DDC 機能に加えシーケンス制御機能も装備。従来のマルチループコントローラがもっていた特長をそのまま1ループに縮小した高機能タイプ	
形 名		MACTUS 202	MACTUS 203	MACTUS 204	MACTUS 205
機 能		アナログ出力形		パルス出力形	
入出力	アナログ入力 1~5V DC	3	3	5	5
	アナログ出力	DC 1~5V 1 DC 4~20 mA 1	DC 1~5V 1	DC 1~5V 2 DC 4~20 mA 1	DC 1~5V 2
	デジタル入力 DC 24V 12mA	3	3	4	4
	デジタル出力 DC 24V 100mA	6	6	7	7
	パルス出力 DC 24V 100mA	—	2 (UP/DN)	—	2 (UP/DN)
制御機能	ステップ数	11 ステップ相当		99 ステップ	
	入出力機能	2 種	X, Y	4 種	X, YM, Y, YP
	制御演算機能	2 種	R, PID	11 種	R, PID, SPI, SH, SL, etc.
	補助演算機能	2 種	PH, PL	8 種	PH, PL, TC, PC, SUM, etc.
	算術演算機能	1 種	√	6 種	+, -, ×, /, √, etc.
	特殊演算機能	—	—	4 種	ENG, IENG, NOP, END
	シーケンス機能	—	—	11 種	AND, OR, EOR, NOT, etc.
制御周期		200 ms 以上 (フローティング演算)			
指示操作部		PV, SV………蛍光表示管 1% 精度 MV………指針形指示計 2.5%※			
モード		CAS (カスケード), A (オート), M (マニュアル)			
バックアップ方法		ハードマニュアル (標準装備), ポータブルマニュアル (オプション)			
電源及び周囲条件		電源 DC 24V ±10%, 温度 0~50°C, 湿度 10~90% RH			
上位伝送機能		三菱計装用情報バス (Mバス) に接続可			
停電保護機能		バッテリーバックアップ 1年間			
機能のビルドアップ方法		パネル側面のスイッチで ON/OFF することにより機能選択可能		専用のプログラミングパネル (可撤形アタッチケース収納) により POL 言語でプログラミングする。	

注 ※印 PV: Process Variable, SV: Setpoint Variable, MV: Manipulated Variable

これら4機種はすべて統一されたマンマシンインタフェースと、オペレーションでなっているため、システムの混在適用に際してもオペレータに異和感を与えることなくスムーズに導入されている。《MACTUS 200》ファミリーの概略仕様を表1.に示す。表1.以外に二重系システムを実現可能とする1ループコントローラも準備している。

2. 1 ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリーの特長

1ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリーは、次の特長をもっている。

- (1) 機能の高度化のレベルに適合したコントローラである。
- (2) 分散形 DDC システムのコンポーネントとして使用できる。
- (3) 取扱い、操作、デザインの統一を図っている。
- (4) 万全な故障対策が図られている。
- (5) 停電時のリセット、オートスタート機能をもっている。
- (6) セミカスタム LSI などの半導体を使用し信頼性を上げている。
- (7) モニタ機能などによりメンテナンスが容易となっている。

これらの特長をもち、かつ信頼性を確保すべき各種 RAS (Reliability, Availability, Serviceability) 機能を搭載している。

2. 2 1 ループコントローラ《MACTUS 200》ファミリーの共通機能

汎用形、高機能形共に次の共通機能を標準的に搭載している。

(1) パルス出力機能

インタラプタ機能付きパルス幅出力(最小間隔 10 ms)の機能となっているため、各種のパルス出力制御を実現できる。

(2) 通信機能

三菱計装用情報バス(Mバス)と接続し、

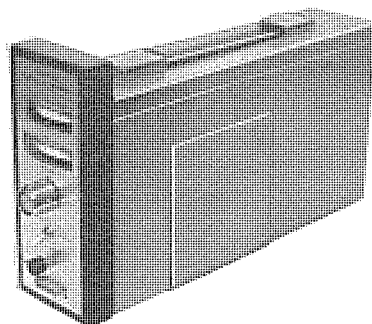
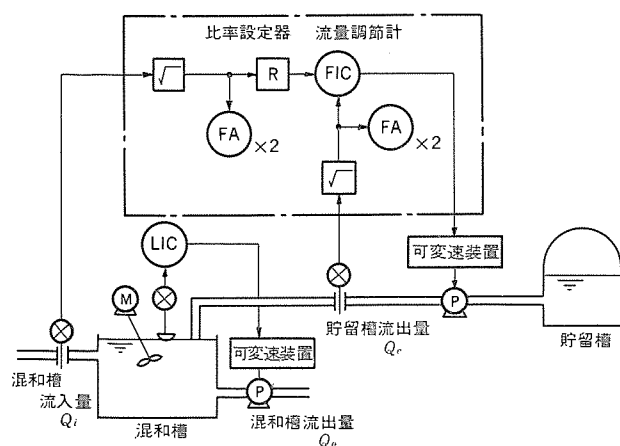
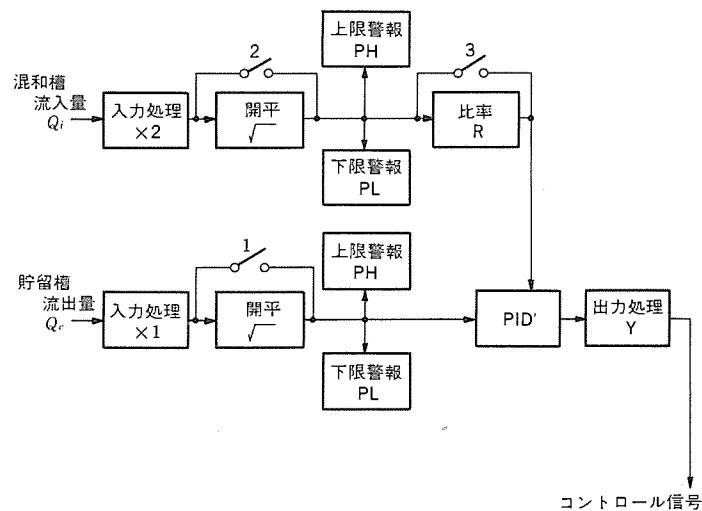


図 2. ポータブルマニュアルの外観



(a) アナログ計装フロー



(b) 汎用形1ループコントローラ

図 4. 汎用形1ループコントローラの適用例

ハイアラキシステムを可能とする。

(3) アナログタッチ操作

パラメータデータの設定操作は、すべてアナログタッチによるデジタル設定を可能としている。

(4) 故障対策

ハードマニュアル機能の標準装備とポータブルマニュアル(オプション)により、パンプレスで万全な故障対策を可能とする(図2.)。

(5) AS/RS モード

オートスタートモード(AS)、リセットスタートモード(RS)により、停電復帰の動作モードを選択できる。パラメータデータはバッテリーにより長期間保持する。

3. 汎用形1ループコントローラ

3. 1 機能

汎用形《MACTUS 202/203》は、コストパフォーマンスの向上と使いやすさを追求したコントローラである。図3.に示すように計装制御分野で用途の多いPID制御(ギャップ付き)、上下限警報、比率演算、開平演算補正ができ、機能選択は側面パネルのスイッチのON-OFFで行うためソフトウェアの知識を一切必要とせず、更にP、I、Dなどパラメータは側面パネルで、アナログタッチで設定あるいはモニタすることが

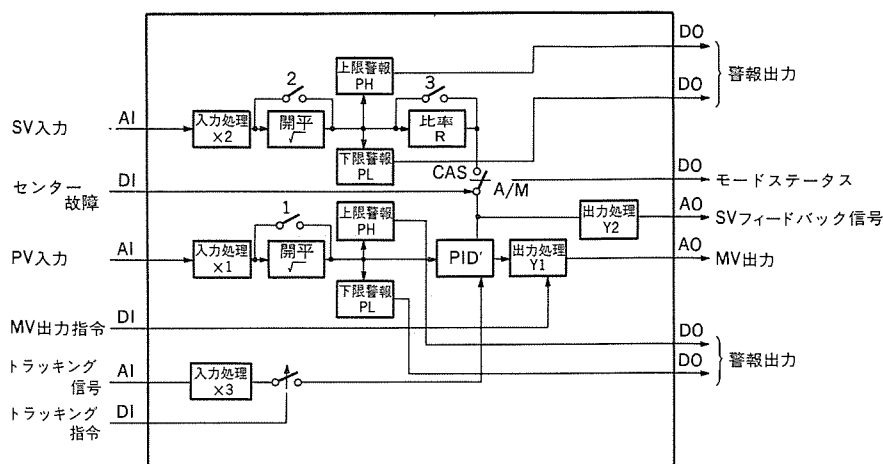


図 3. 汎用形1ループコントローラの制御機能

できるので、オペレーションが非常に容易である。またより使いやすくするために次の機能を付加している。

- (1) 外部 デジタル 入力による出力 トラッキング
- (2) モードステータス と SV フィードバック 出力

この二つの機能付加により上位・下位機種が接続された場合でもモード変更時の パンプレス 切換が可能になり、制御性能が向上する。

3.2 適用例

スタンダードで単一 フィードバック 制御、比率制御が可能で、従来のアナログ 調節計の置換を目的としている。図 4. は、流入水に比率演算を施した値を、PID の目標値とする薬品注入量制御に適用した例である。

3.3 新技術

最新の半導体技術の一つにカスタム LSI があり、各種機器に適用されている。カスタム LSI は、フルカスタム LSI とセミカスタム LSI に大別される。前者は最初から必要としている回路をチップの中に作り上げるものであり、後者は基本回路が既に構成されており、その基本回路を組み合わせて必要としている回路をチップの中に作り上げるものである。いずれの場合も図 5. に示すように、MSI、SSI などいくつかの回路部品とその間の配線をひとまとめにし、1チップの中に実現できるために、LSI 化された機器は次のような数多くのメリットを持っている。

- (1) 小形軽量化ができる。
- (2) 低消費電力化、省エネルギー化ができる。
- (3) 高機能化ができる。
- (4) 高信頼化し、保守も容易になる。

《MACTUS 202/203》のカスタム LSI 化にあたっては、信頼性向上に主眼をおき、フルカスタム方式に比べ開発期間の短いセミカスタム方式を採用した。セミカスタム方式は、更にゲートアレー、PLA (Programmable Logic Array)、マイコン方式などに分類され、内部回路設計の自由度が大きく、既製ゲート回路をそのまま LSI 化できるゲートアレー方式を選んだ。

ゲートアレー化するとき、どの部分をゲートアレーに組み込むかが重要な問題となる。《MACTUS 202/203》のゲートアレーは、ゲート、フリップフロップ、ラッチ、カウンタなどのディスクリート TTL 回路を可能な限り吸収し、機器として最適な回路になるよう設計した。ゲートアレーの主要な機能は、

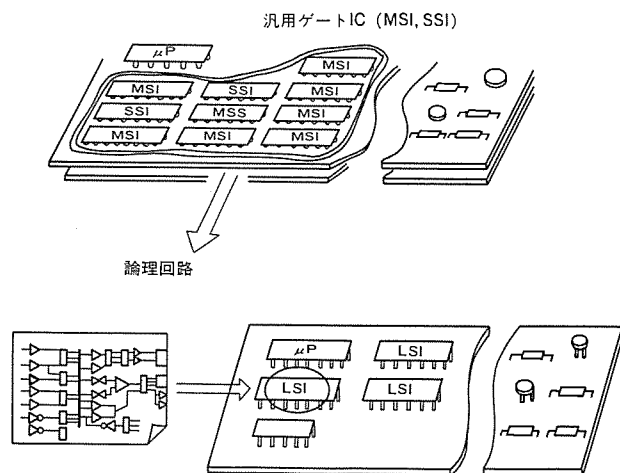


図 5. LSI 化の概念

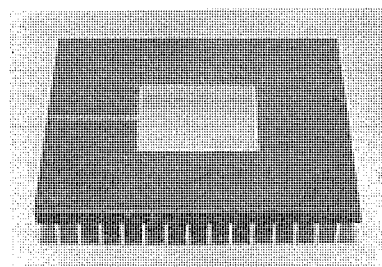


図 6. ゲートアレーの外観

- (1) 通信を安定して行うためのクロック生成やウォッチドグタイム監視などのタイマクロック機能
- (2) CPU 故障時の MV 出力 ホールド 機能
- (3) 表示、操作、入出力、通信機能を制御する論理判断などであり、制御機能の中核はゲートアレーで行われている。

十分な検討をして、ゲートアレーの内部回路設計を終了した後も論理シミュレーション、故障シミュレーション、自動配置・配線によるレイアウト設計など CAD 技術を駆使し、LSI 設計の確実度を高めた。図 6. に使用した 124 ピンセラミックパッケージ CMOS ゲートアレー M 56307-023 の外観を示す。ゲートアレーを含め、今回開発した汎用形《MACTUS 202/203》では、部分的回路の見直し、マイクロプロセッサ、メモリ 他 CMOS 化など最新の技術を採用し、電源の低容量化、部品点数の削減、基板スペースの削減を図ることにより、高信頼性を追求している。

4. 高機能形 1 ループコントローラ

4.1 機能

各種プロセスで要求される多種多様な機能に対して適用可能であることを考慮し、ハイレベルな DDC 機能に加え、シーケンス機能も加味した制御機能ブロックを 44 種類パッケージとして準備しており、制御プログラムはこれらを最大 99 ステップまで組み合わせて構成する。表 2. に制御機能ブロックを示す。

省力化、省エネルギー化に対応した数多くの種類の制御が行われているが、以下高機能形《MACTUS 204/205》の導入が可能な制御方式を保持する機能と共に紹介する。

(1) プログラム制御

目標値などを時間的に変化して制御を行う場合、通常折線機能を使用するが、最大 6 パターン (7 折線/1 パターン) まで内蔵しており、これらを組み合わせて次の使い方が可能である。

- (a) あらかじめ複数のパターンを用意しておき、条件により使用するパターンに切り換える。
- (b) 6 パターンすべてをシリーズとし 42 折線まで拡張する。

(2) 可変ゲイン制御

偏差の大小、外的条件などにより PID 定数及び各制御パラメータを種々変化して、プロセスの安定化を行う場合、最大 16 種類まで記憶可能な可変パラメータ (V パラメータ) 及び PID の基本パラメータをプログラムソースとして扱える 24 ワードのメモリワードソース (MW) と SH・SL・PH・PL などの比較機能、ASW、FG などの選択機能を組み合わせることにより、汎用性に富んだ使い方が可能である。

(3) 無駄時間補償制御

無駄時間が大きいプロセスの制御を行うには、単純な PID では追従性が悪く安定な制御を行えないため、サンプル PI 制御、スミスの無駄時間補償制御、フィードフォワード制御などが採用されるが、これらに対

表 2. 制御機能ブロック

DDC 命令

分 類	ブロックシンボル	制 御 機 能 ブ ロ ッ ク 名
入 出 力	X	入力処理
	YM	A-M 切換
	Y	出力処理
	YP	パルス出力処理
制 御 演 算	R	比 率
	PID	ギャップ形 PID
	SPI	サンプル PI
	SH	ハイセレクト
	SL	ローセレクト
	D	微 分
	LLAG	進み遅れ
	DED	無駄時間
	ASW	アナログスイッチ
	LMT	上下限リミッタ
補 正 演 算	VLMT	変化率リミッタ
	PH	上限警報設定
	PL	下限警報設定
	FG	ファンクションゼネレータ
	IFG	インバートファンクションゼネレータ
	FLT	標準フィルタ
	SUM	積 算
	TC	温度補正
	PC	圧力補正

して、SPI・D・LLAG・DED などの制御機能を用意しており、容易に導入可能としている。

(4) バッチ制御

あらかじめ定められた工程の手順に従って制御を行うには、各種 DDC 命令以外にシーケンス的な命令を必要とし、更に両者を融合した制御機能の構築が望まれる。こうした必要性に対応できるよう AND・OR・EOR・NOT などのシーケンス命令を制御機能として用意しており、またシーケンス命令の論理条件を DDC 命令が容易に取り込める命令体系を実現している。

以上制御方式について述べたが、以下各制御方式で共通的に用意している特長的機能を示す。

(1) トラッキング機能

単なる PID 制御（カスケード PID を含む）の場合は、トラッキング情報を指定するだけでよく、また非リニアなバルブへ出力するとき、あるいはシーケンス的な論理条件をトラッキング情報とするときなどは簡単な制御機能を追加するだけで容易に実現できる。

(2) 工学値モニタ／チューニング機能

PV, SV, PH, PL の各パラメータは、側面パネルの 4 けた(桁)数字表示器により 9999～-9999（最小間隔 0.001）の範囲で工学値でのモニタ／チューニング機能を可能としている。また制御機能として ENG, IENG を用意しており、任意なパラメータの工学値での演算も可能である。

(3) 補正演算機能

移動平均をとる標準フィルタ機能 FLT、温度補正機能 TC 及び圧力補正機能 PC、折線機能 FG 及び逆折線機能 IFG を用意しており、様々な入力形態に対応できる。

分 類	ブロックシンボル	制 御 機 能 ブ ロ ッ ク 名
算 術	+	加 算
	-	減 算
	×	乗 算
	÷	除 算
	$\sqrt{\quad}$	開 平
	ABS	絶対値
特 殊	ENG	工学値変換
	IENG	工学値逆変換
	NOP	無動作
	END	ルーチン終了

シーケンス命令

ブロックシンボル	制 御 機 能 ブ ロ ッ ク 名
;	Load
→	Store
FF	Flip Flop
AND	Logical And
OR	Logical OR
EOR	Exclusive OR
NOT	Logical NOT
TIMR	Timer
>	Compare Greater Than
<	Compare Less Than
PLS	Positive Differential

4. 2 適用側

高機能形《MACTUS 204/205》は保持する制御機能を駆使することにより、複雑高度な制御を行うことができるが、本節では現代制御理論に基づく動的補償器によるフィードバック制御への適用について述べる。

プロセスの動特性は式(1)(2)で定式化される。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \dots\dots\dots (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \dots\dots\dots (2)$$

但し x, y, u : ベクトル A, B, C : マトリクス

またプロセスを制御するためのシステムを式(3)(4)に示す。

$$z(k+1) = Fz(k) + Gy(k) \dots\dots\dots (3)$$

$$u(k) = Ky(k) + Lz(k) + v \dots\dots\dots (4)$$

但し Z, v : ベクトル F, G, K, L : マトリクス

式(1)～(4)より、プロセスと制御システムを含めた全体のシステムは図 7. (a)に示すブロック図となる。この制御は式(3)(4)により $u(k)$ を算出し制御機器の出力とするが、この過程でベクトルとマトリクスの乗算を繰返し行う必要がある。高機能形《MACTUS 204/205》の制御機能のうち、加算／減算命令は、このベクトルとマトリクスの乗算を簡単に行うことができる。加算／減算命令は式(5)に示すように実行する。

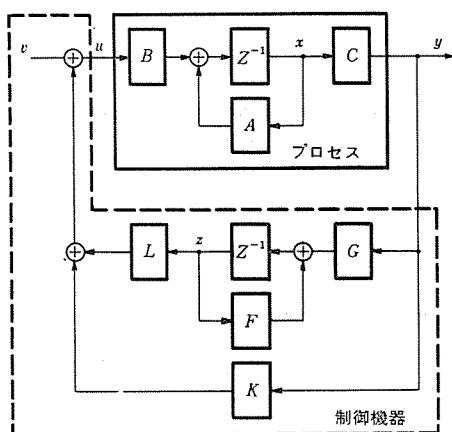
$$(\text{出力}) = k_1 \cdot (\text{入力}) \pm k_2 \cdot (\text{ソース}) \dots\dots\dots (5)$$

但し k_1, k_2 : 係数

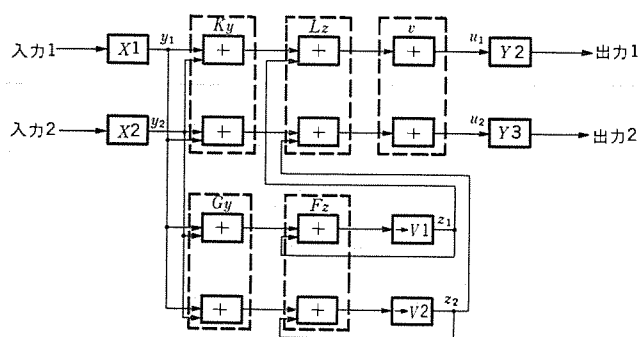
また、ベクトルとマトリクスの乗算は式(6)(7)に示すとおりである。

$$y = Ax \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (7)$$



(a) 制御システム



(b) 制御機能

図 7. ブロック図

式(5)と式(7)を比較して、 $k_1=a_{11}$ 又は a_{21} 、 $k_2=a_{12}$ 又は a_{22} とすると、式(7)の乗算は、《MACTUS 204/205》が保持する係数付きの加算(+)命令又は減算(-)命令を2回使用することで容易に行える。式(3)(4)が2入力2出力の場合、《MACTUS 204/205》では図7.(b)に示す制御機能ブロック図で実現できる。

4.3 プログラミングパネル

高機能形1ループコントローラのプログラムは、専用のプログラミングパネルで作成する。高度な制御プログラムを確実にかつ簡単な操作でメンテナンスできるツールであり、次のような機能をもっている。

(1) 簡単なプログラミング操作

高機能形1ループコントローラのPOL命令シンボルに対応したキースイッチ操作及び表示装置を持ち、簡単にプログラム、パラメータの書込み、読出しができる。

(2) プログラム時のミスを少なくする強力なサポート

プリンタによるプログラム、パラメータの記録のほか、制御プログラムの文法チェックも行え、事前にミスを発見できる。図8.にプログラム及び文法チェックリストの例を示す。

(3) 十分なデバッグ

プログラミングパネル内蔵のRAM上で、プログラムの検証が行え、完成度の高いプログラムが作成できる。

(4) 現地でのROM作成

十分なデバッグ後、即時にROM作成ができる。可搬形アタッシュケースに収納されており、現地でのプログラム変更に対しても柔軟に対応

```

*** PROGRAM PARAMETER LIST ***
BL 1 L04 01
BL 2 L04 02
BL 3 L04 03
BL 4 L04 04
BL 5 L04 05
BL 6 L04 06
BL 7 L04 07
BL 8 L04 08
BL 9 L04 09
BL 10 L04 10
BL 11 L04 11
BL 12 L04 12
BL 13 L04 13
BL 14 L04 14
BL 15 L04 15
BL 16 L04 16
BL 17 L04 17
BL 18 L04 18
BL 19 L04 19
BL 20 L04 20
BL 21 L04 21
BL 22 L04 22
BL 23 L04 23
BL 24 L04 24
BL 25 L04 25
BL 26 L04 26
BL 27 L04 27
BL 28 L04 28
BL 29 L04 29
BL 30 L04 30
BL 31 L04 31
BL 32 L04 32
BL 33 L04 33
BL 34 L04 34
BL 35 L04 35
BL 36 L04 36
BL 37 L04 37
BL 38 L04 38
BL 39 L04 39
BL 40 L04 40
BL 41 L04 41
BL 42 L04 42
BL 43 L04 43
BL 44 L04 44
BL 45 L04 45
BL 46 L04 46
BL 47 L04 47
BL 48 L04 48
BL 49 L04 49
BL 50 L04 50
BL 51 L04 51
BL 52 L04 52
BL 53 L04 53
BL 54 L04 54
BL 55 L04 55
BL 56 L04 56
BL 57 L04 57
BL 58 L04 58
BL 59 L04 59
BL 60 L04 60
BL 61 L04 61
BL 62 L04 62
BL 63 L04 63
BL 64 L04 64
BL 65 L04 65
BL 66 L04 66
BL 67 L04 67
BL 68 L04 68
BL 69 L04 69
BL 70 L04 70
BL 71 L04 71
BL 72 L04 72
BL 73 L04 73
BL 74 L04 74
BL 75 L04 75
BL 76 L04 76
BL 77 L04 77
BL 78 L04 78
BL 79 L04 79
BL 80 L04 80
BL 81 L04 81
BL 82 L04 82
BL 83 L04 83
BL 84 L04 84
BL 85 L04 85
BL 86 L04 86
BL 87 L04 87
BL 88 L04 88
BL 89 L04 89
BL 90 L04 90
BL 91 L04 91
BL 92 L04 92
BL 93 L04 93
BL 94 L04 94
BL 95 L04 95
BL 96 L04 96
BL 97 L04 97
BL 98 L04 98
BL 99 L04 99
BL 100 L04 100
*** LIST END ***

```

```

*** ERROR LIST ***
** SOURCE ERROR **
BL 5 P001 BL 005
** UNEXPECTED ALLOC **
BL 2
BL 7
** DUPLICATE DEFINE **
NO ERROR
*** LIST END ***

```

図 8. プログラムリストと文法チェックリスト出力

できる。

5. 階層システム

《MACTUS 200》ファミリーは、いずれも計装用情報バス(Mバス)と機能選択スイッチにより容易に接続でき、《MACTUS 270》によるパネルオペレーション、《MACTUS 670》あるいは《MACTUS 870》によるオペラステーションを介しての分散形DDCシステムを構築することができる。Mバスシステムを介しての通信情報には、CAS、A、Mなどのモード情報、PID定数などの制御パラメータ、PV、EVなどの監視パラメータ、PHエラー、PLエラーなどのアラーム情報などが含まれ、上位システムからのモニタチューニングを可能としている。

6. む す び

スタンダードの適用はもちろんのこと、計装システムの重要な構成要素として幅広く導入されるなかにあつて近年の半導体技術に呼応したLSI新技術の採用及び現代制御理論の応用などについて記述したが、今後も1ループコントローラの高信頼性化及び適用範囲の拡大を図ると共にユーザー各位の要求にこたえた製品として活躍できるものと確信する。

光ファイバセンサの原理と応用

久間 和生*・田井 修市**・布下 正宏*・佐藤 建***・吉永 淳+

1. ま え が き

光ファイバをセンサ又は計測信号の伝送路に用いた光ファイバセンサは、高絶縁高耐圧性、無誘導特性、本質安全性、低損失広帯域性、軽量、細径、可とう性などの多くの特長をもっているため、従来の電子技術のみでは困難であった高電磁界、引火爆発性雰囲気などの悪環境下でも、安全、高速、高精度な遠隔測定が可能である⁽¹⁾。

当社では、中央研究所を中心に、開閉器や変圧器などの電力機器及び鉄鋼、化学などの工業プラントの計装制御システムへの適用を目的として、電流(磁界)⁽²⁾⁽¹¹⁾、電圧(電界)⁽³⁾⁽¹¹⁾、温度⁽⁴⁾、圧力⁽⁵⁾、振動⁽⁶⁾、速度⁽⁷⁾、流量⁽⁸⁾、回転角速度⁽⁹⁾などを計測する各種光ファイバセンサの研究開発を進めており⁽¹⁰⁾、一部の光ファイバセンサは既に実用化されている。

本稿では、将来、電力機器や電力系統の計装制御システムに不可欠な光ファイバ温度センサ、磁界センサ、電圧センサの原理、現状、応用例について紹介する。

2. 光ファイバ温度センサとその応用⁽⁴⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾

図1. に筆者らが開発した半導体の光物性を応用した光ファイバ温度センサと温度計測装置の構成図を示す。半導体は急峻な光学的基礎吸収端波長 λ_g をもち、 λ_g より短波長の光はほとんど吸収される。また、 λ_g は温度上昇と共に長波長側に移行する。したがって、 λ_g が光源の発光スペクトル内にあるような半導体材料を選び、半導体と光送受信機を光ファイバで連結すれば、半導体の透過光強度は温度上

表 1. 光ファイバ温度計の性能

項 目	内 容
光 源	AlGaAs 系 LED ($\lambda_1 \approx 0.86 \mu\text{m}$) InGaAsP 系 LED ($\lambda_2 \approx 1.3 \mu\text{m}$)
受 光 素 子	Ge-APD
光 フ ァ イ バ	石英ガラス系 SI 形ファイバ
原 理	GaAs 単結晶の光吸収特性
測 定 範 囲	$-30 \sim +300^\circ\text{C}$
精 度	$\pm 0.5^\circ\text{C}$

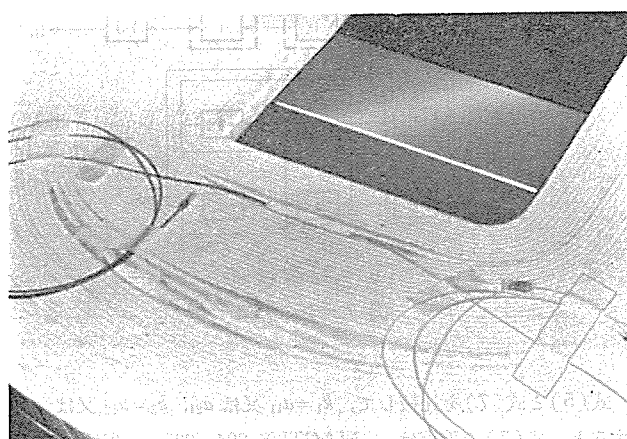


図 2. 光ファイバ温度センサの変圧器巻線取付状況

昇と共に減少するので、光ファイバからの出力光強度から温度を測定できる。

この装置では、半導体材料としては室温における λ_g が $0.9 \mu\text{m}$ 程度のGaAsを、また光ファイバとしては耐熱性の優れたテフロンジャケットをもつ石英ガラス系SI形(コア径 $100 \mu\text{m}$)を使用している。また、この装置では光コネクタ損失や光ファイバの伝送損失の変動などによる測定誤差を除去するために、透過光強度が温度に依存するAlGaAs系LED(中心波長 $\lambda_0 \approx 0.86 \mu\text{m}$)と、透過光強度がほぼ一定のInGaAsP系LED($\lambda_0 \approx 1.3 \mu\text{m}$)からの出射光パルスを交互に光温度センサ部に送り込み、前者を信号光、後者を参照光に用いた2波長方式を採用して

いる。また、光源の発光スペクトル変動による測定誤差を除去するため、LEDは温度制御されている。この光ファイバ温度計の性能諸元を表1.に示す。 $-30 \sim +300^\circ\text{C}$ の範囲の温度を $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以下の高精度で測定できる。また、応答速度が速く、超小形であることも特長である。

この光ファイバ温度センサを、日本国有鉄道在来線交直流電車用変圧器(TM926形)内部の巻線に組み込み、車両走行時の巻線温度

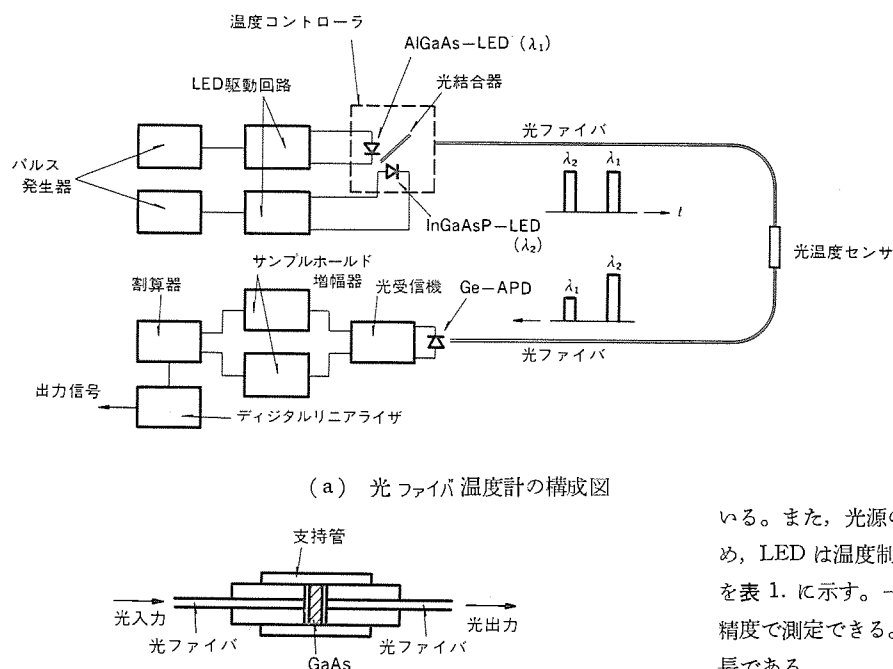


図 1. 光ファイバ温度計及び光温度センサの構成図

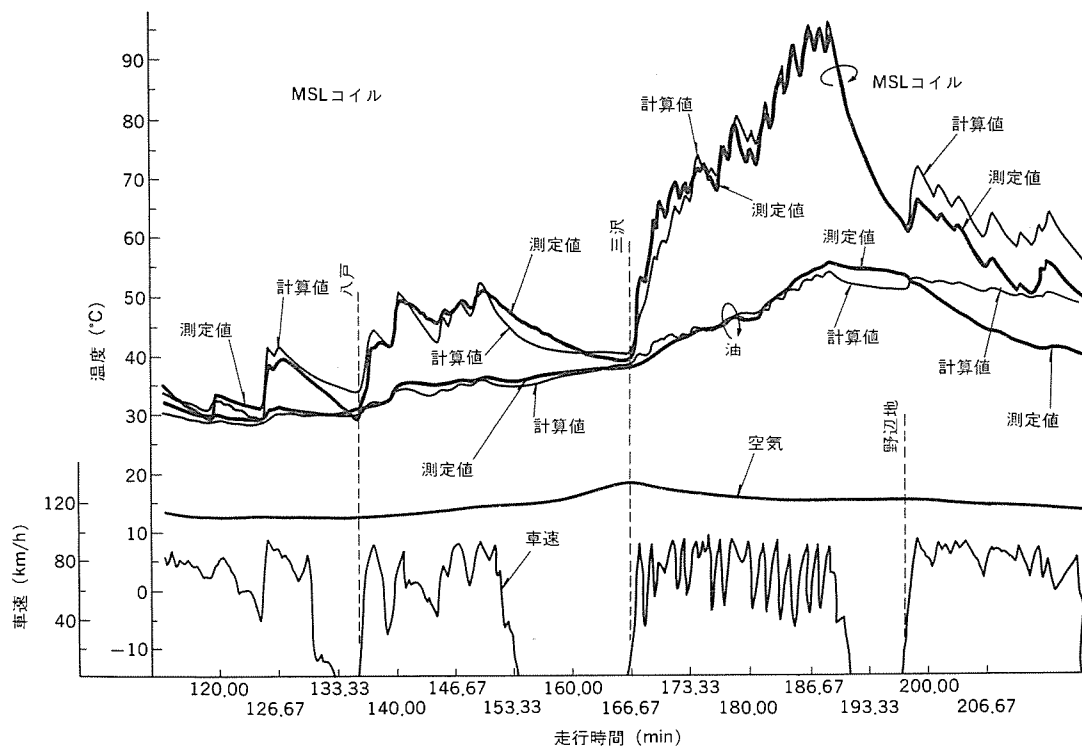


図 3. 車両走行実験の測定例

上昇試験を実施した⁽¹²⁾⁽¹³⁾。この実験では、変圧器設計上重要な巻線最高温度部 (Hot spot) 6 点の温度上昇を測定した。光ファイバ温度センサは、図 2. に示すように巻線の温度測定部に、はり付け、その上に絶縁紙を巻いて固定している。変圧器本体と車内におかれた光温度計本体とは長さ 50 m の多心光ファイバケーブルで連結されている。また、変圧器内外の光ファイバは、変圧器内部を循環する冷却用シリコンオイルのシールを保つ特殊な光ファイバコネクタで結合されている。この光温度計は、前述した 2 波長方式を使用しているの、現地での調整はほとんど必要なかった。日本国有鉄道東北本線の盛岡から青森に至る 204 km の区間で、一次巻線に 23 kV 印加した状態での車両走行時の巻線温度の測定を行った。図 3. に測定例を示す。同図より、光ファイバ温度計による実測値とシミュレーションによる計算値がよく一致していることがわかる。これらの走行実験を通して、従来の抵抗法では実測できなかった巻線の温度上昇差 (巻線最高温度 - オイル平均温度) や最高温度の冷却熱時定数など、変圧器設計上重要なデータが得られた。これらの測定データは、変圧器の設計最適化、小形軽量化に役立つものと思われる。

3. 光ファイバ磁界センサ⁽²⁾

図 4. に光ファラデー効果を用いた光ファイバ磁界センサ及び磁界計の構成図を示す。光源からの出射光は多モード光ファイバによって光センサ部に導かれる。偏光子を通過した直線偏光波は、光ファラデー素子内を伝搬する間に、導体を流れる電流が発生する磁界によってその偏光面が回転される。回転角 ϕ は一般的に次式で表せる。

$$\phi = V_r H l \quad \dots \dots \dots (1)$$

式(1)において、 V_r は光ファラデー素子のヴェルデ定数、 l は光路長、 H は印加磁界である。回転角 ϕ は、検光子によって回転角に応じた光強度に変換される。偏光子と検光子の偏光方向の相対角度を ϕ_B とすると、検光子出力光強度 P は、

$$P = P_0 \cos^2 (\phi_B - \phi) \quad \dots \dots \dots (2)$$

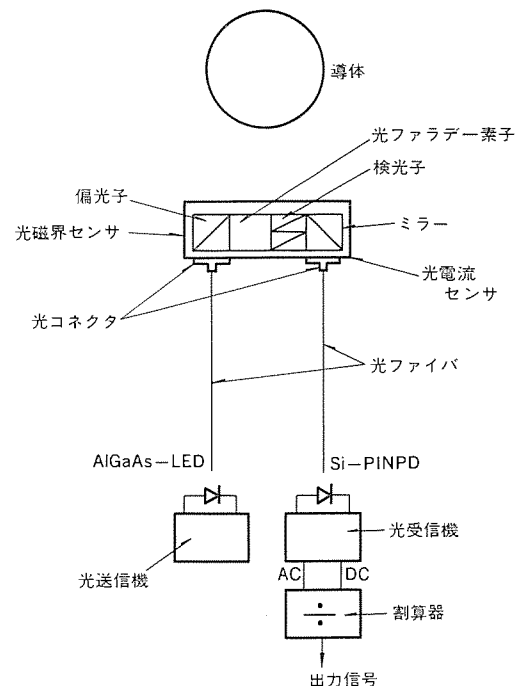


図 4. 光ファイバ磁界計の構成図

となる。 P_0 は光ファラデー素子への入射光強度である。磁界検出感度を最大にし、また直線性が最適になるよう光学バイアス ϕ_B を 45° に設定すると、式(2)は、

$$P = \frac{1}{2} P_0 (1 - \sin 2\phi) \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。被測定磁界として交流磁界 $H = H_0 \sin \omega t$ を仮定し、また $2\phi \ll 1$ とすれば、式(3)は、

$$P \approx \frac{1}{2} P_0 (1 - 2 V_r H_0 l \sin \omega t) \quad \dots \dots \dots (4)$$

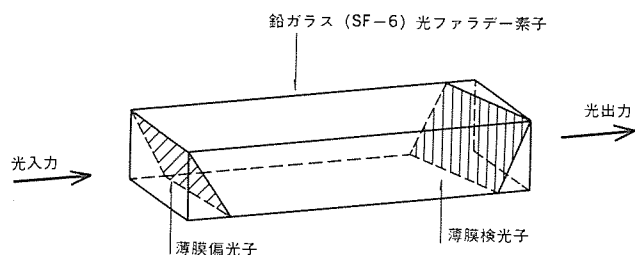


図 5. 光磁界 センサ の構成図

表 2. 光 ファイバ 磁界計 の性能

項 目	内 容	備 考
光 源	AlGaAs-LED ($\lambda=0.85\ \mu\text{m}$)	
受 光 素 子	Si-PINPD	
光 ファ イ バ	石英ガラス系 SI 形ファイバ	
原 理	光ファラデー効果	
測 定 範 囲	$>10\ \text{Oe}$	
ひ ず み 率	$<0.5\ \%$	$H<500\ \text{Oe}$
精 度	$<\pm 0.25\ \%$	$20\ \text{Oe}<H<500\ \text{Oe}$
周 波 数 特 性	出力変動 $<\pm 0.5\ \%$	$30\ \text{Hz}<f<1\ \text{kHz}$
温 度 特 性	$<\pm 0.5\ \%$	$-25^\circ\text{C}<T<85^\circ\text{C}$
セ ン サ 寸 法	$4\times 4\times 30\ \text{mm}^3$	

となり、 P は $H_0 \sin \omega t$ に比例する。検光子からの出射光は多モード光ファイバで光受信機に導かれ、電気信号に変換される。式(4)より、光受信機の交流出力電圧 ($\propto P_0 V_r H_0 \sin \omega t$) を測定することにより被測定磁界 $H_0 \sin \omega t$ を知ることができる。しかし、この電圧は光強度 P_0 に比例しているため、光源の出力強度、光ファイバコネクタ損失、光ファイバ伝送損失、光センサ部の挿入損失などの変動により影響をうける。そこで、この装置では図 4. に示されているように、光受信機において交流出力電圧を直流出力電圧 ($\propto P_0$) で電気的に除算することにより、これらの誤差要因を除去している。

筆者らが開発した光磁界センサの構成図を図 5. に示す。光ファラデー素子としては、温度特性の良好な鉛ガラス⁽²⁾を使用している。また、センサの低価格化、信頼性の向上、高感度化を目的として、図 5. に示すように光ファラデー素子と偏光子、検光子を一体化した新しい構造の光磁界センサを開発した。鉛ガラスの両端面を、法線ベクトルが互いに 45° の角度をなすように切断、研磨し、これらの上に誘電体薄膜偏光子、検光子を作成した。また、鉛ガラスの光路長 l は、磁界検出感度が最大になるよう $30\ \text{mm}$ とした。鉛ガラス上に蒸着された薄膜偏検光子は、いずれも $800\sim 900\ \text{nm}$ の波長域内で消光比 300 以上の良好な特性を示した。

開発した光ファイバ磁界計の性能を表 2. に示す。光源には AlGaAs 系 LED、受光素子には Si-PINPD、光ファイバにはコア径 $100\ \mu\text{m}$ の石英ガラス系 SI 形光ファイバを使用した。20 Oe の磁界に対する出力信号の S/N 比は約 40 dB 程度である。また、実験装置の都合により 400 Oe 以上の磁界に対する測定はできなかったが、10～

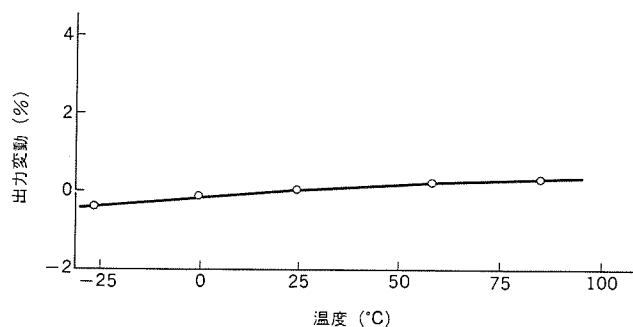


図 6. 光 ファイバ 磁界 センサ の温度特性例

～400 Oe の範囲で振幅誤差 $\pm 0.25\ \%$ 以下、位相角誤差 ± 20 分以下の良好な特性が得られている。図 6. は、温度変化に対する出力電気信号の変動測定例を示したものである。 $-25\sim +85^\circ\text{C}$ の温度変化に対する鉛ガラスセンサの出力変動は $\pm 0.5\ \%$ 以下である。

4. 光ファイバ電圧センサ⁽³⁾⁽¹⁴⁾

図 7., 図 8. は、筆者らがチョコラスキー法によって育成した $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) 単結晶のポッケルス効果を用いた光ファイバ電圧センサ及び電圧計の構成図を示したものである。結晶中では、一つの光波伝搬方向に対して二つの独立した直線偏光モードが存在する。ポッケルス効果とは、これらの二つのモードの偏光方向 (主軸) に対する屈折率が

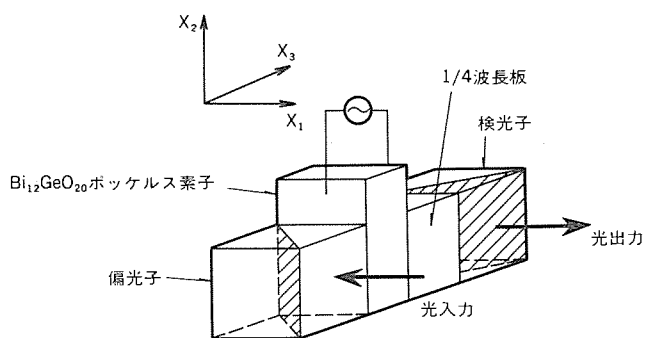


図 7. 光電圧 センサ の構成図

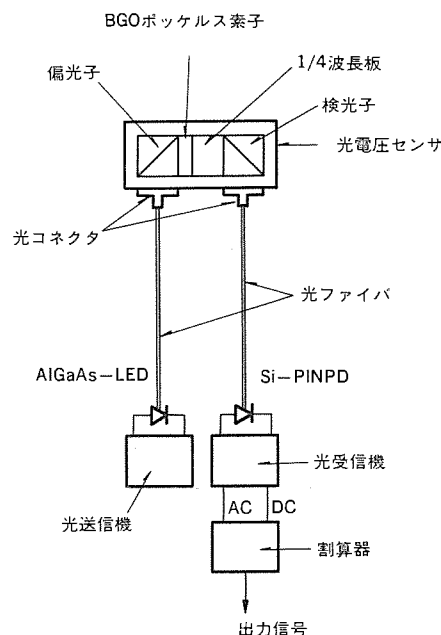


図 8. 光 ファイバ 電圧計 の構成図

印加電界に比例して変化する現象をいう。図 7. に示すように、BGO の (001) 面を光入射面とし、[001] 方向に電界を印加したとき、二つの主軸 ([110], [1 $\bar{1}$ 0] 方向) に対する屈折率 n_1' , n_2' は、

$$\left. \begin{aligned} n_1' &\simeq n_0 - \frac{n_0^3 \gamma_{41} V}{2l} \\ n_2' &\simeq n_0 + \frac{n_0^3 \gamma_{41} V}{2l} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。ここで、 n_0 は電界が存在しないときの BGO の屈折率、 γ_{41} は電気光学係数、 l は光路長、 V は印加電圧である。光ファイバ、偏光子を通過した直線偏光の LED 光が電圧を印加された BGO 結晶内を伝搬するとき、BGO の二つの主軸方向に振動する直線偏光モードは、式(5)に従って異なった位相速度をもつとともに、BGO の旋光性により偏波面の回転をうけながら伝搬する。したがって、BGO からの出射光はだ円偏光波に変換される。このだ円偏光波は、光学バイアス用 1/4 波長板を介して検光子で光強度に変換され、光ファイバで光受信機に導かれる。このとき、偏光子からの直線偏光波の偏光方向と二つの結晶の主軸の相対角度を 45°, また偏光子、検光子の偏光通過方向を平行にしておくと、検光子からの出射光強度 P は、

$$P \simeq \frac{1}{2} P_0 \left(1 + \sin \pi \frac{V}{V_\pi} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$V_\pi = \frac{\lambda_0}{2 n_0^3 \gamma_{41}} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし、BGO ポッケルス素子の厚さ l は十分薄いものと仮定した (具体的には 1 mm 程度以下)⁽¹⁴⁾。 P_0 は BGO 単結晶への入射光強度、 V_π は BGO の半波長電圧 ($\simeq 9.8$ kV, $\lambda_0 = 0.85 \mu\text{m}$)、 λ_0 は光の波長である。被測定電圧として、 $V = V_0 \sin \omega t$ を仮定して、 $V/V_\pi \ll 1$ とすると、式(6)は、

$$P \simeq \frac{1}{2} P_0 \left(1 + \pi \frac{V_0}{V_\pi} \sin \omega t \right) \dots\dots\dots (8)$$

となり、 P は $V_0 \sin \omega t$ に比例する。したがって、光受信機に導かれ、Si-PINPD で光/電気変換された電気信号から被測定電圧 V を知ることができる。光ファイバ磁界計の場合と同様に、光源の出力変動や光ファイバの伝送損失の変動による測定誤差は、光受信部において、交流出力電圧を直流出力電圧で除算することにより除去している。

表 3. (a) に筆者らが開発した BGO 単結晶の物性定数を示す。BGO は点群 23 に属する立方晶系の酸化物単結晶で、従来から研究されている LiNbO_3 や LiTaO_3 などの三方晶系の結晶と比較して、原理的に自然複屈折がなく、温度に対して安定していることが大きな特長である。表 3. (b) に厚さ (光路長) 1 mm の BGO 単結晶を用いた光ファイバ電圧計の性能を示す。光受信機の帯域を 1 kHz としたとき、5 V 以上の印加電圧に対する出力電気信号の S/N 比は 40 dB 以上である。また 200 V 印加時の出力電気信号の直線性のひずみは 0.5 % 以下で、計算値 0.3 % とよく一致している。5~200 V の印加電圧範囲における振幅、位相角誤差は、それぞれ ± 0.25 % 以下、 ± 2 分以下である。図 9. に、温度変化に対する出力電気信号の変動を示す。-25~+85°C の温度範囲での測定誤差は ± 0.5 % 以下であり、BGO 単結晶を用いた光ファイバ電圧計が温度に対してきわめて安定していることがわかる。

表 3. $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶の物性定数及び光ファイバ電圧計の性能
(a) $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶の物性定数

結 晶 系		bcc-23**
磁 抗 率 ρ		反 磁 性 体
光 吸 収 端 波 長 λ_g		$10^{11} \sim 10^{13} \Omega\text{cm}$
屈 折 率* n_0		0.48 μm
電 気 光 学 係 数* γ_{41}		2.41
旋 光 性* θ		$3.1 \times 10^{-10} \text{ cm/V}$
		9.6 deg/mm

注 * 波長 0.85 μm での測定値
** 体心立方晶系

(b) 光ファイバ電圧計の性能

項 目	内 容
光 源	AlGaAs-LED ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$)
受 光 素 子	Si-PIN PD
光 フ ァ イ バ	石英系 SI 形ファイバ
原 理	$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶 電気光学効果
測 定 範 囲	3~200 Vrms
精 度	$< \pm 0.25 \%$
ひ ず み 率	$< 0.5 \%$ (200 V)
周 波 数 特 性	30 Hz $< f < 1$ kHz で出力変動 $< \pm 0.5 \%$
温 度 特 性	-25~+85°C で $\pm 0.5 \%$ 以下
セ ン サ 寸 法	25×16×13 mm ³

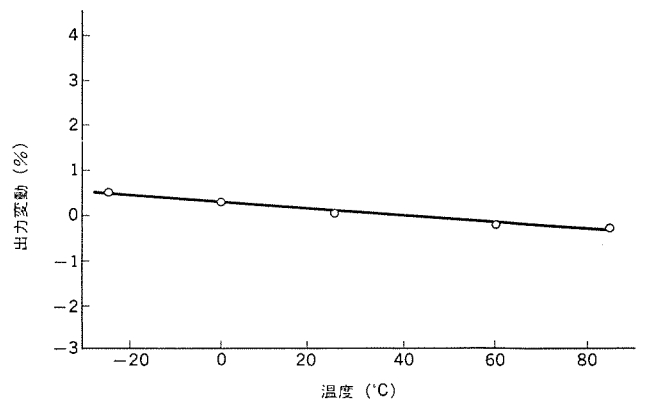
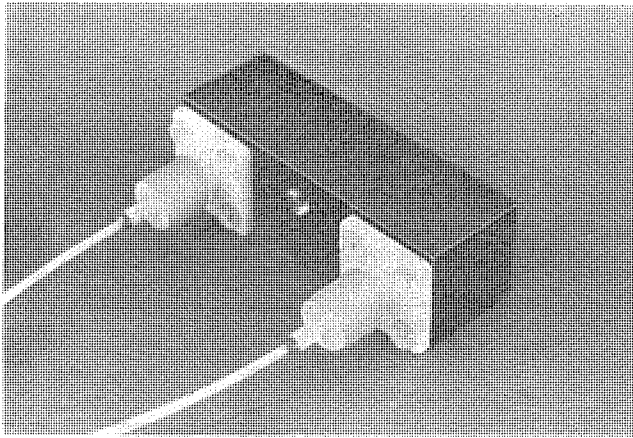


図 9. 光ファイバ電圧センサの温度特性例

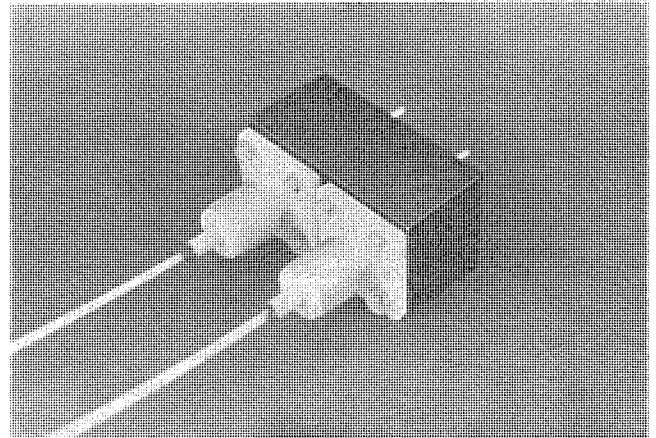
5. 光ファイバ電圧/磁界センサの応用

開発した光ファイバ電圧/磁界センサの外観を図 10. に示す。これらの光ファイバセンサは、前述したように、高耐圧絶縁性 無誘導特性、本質防爆安全性、軽量小形などの特長をもっているため、今後、次のような分野での応用が期待される。

- (1) 高電圧化された電力機器の保護・制御に必要な電圧、電流情報集収用センサとしての応用
- (2) 電力機器の碍子分担電圧測定 (不良碍子の検出) への応用
- (3) 電界強度分布解析への応用
- (4) 雷波形などサージ電圧測定への応用



(a) 光ファイバ磁界センサ



(b) 光ファイバ電圧センサ

図 10. 光ファイバ磁界／電圧センサの外観

(5) 電磁誘導雑音の大きい各種工業プラント、また本質安全性が望まれる各種化学プラントなどのプロセス、発電設備の計測制御への応用

このように、光ファイバ電圧／磁界センサを使用することにより、従来、測定が困難であった場所の電圧（電界）や電流（磁界）の計測が可能になる。また、従来の電気式計測法と比べて、センサ自身及び機器の小形化が可能になる利点があるため、これらの実用化が期待されている。

6. む す び

本稿では、筆者らが開発した光ファイバ温度、磁界、電圧及びそれらの計測装置の原理、性能、電力機器への適用例について述べた。紙面の都合上、速度、流速、圧力センサなどについては述べなかったが、これらのセンサも既に実用化段階にあり、今後光ファイバセンサが全面的に採用される気運にある。光ファイバセンサの特長は、高電磁界、爆発性雰囲気など悪環境下で計測物理量を高精度、安全に測定できることであり、電力機器や電力系統ばかりでなく、今後各種工業プラント、医療機器、軍用機器、産業用ロボット、自動車、家電などあらゆる産業分野に浸透すると思われる。

本稿では、多モード光ファイバを信号の伝送路に利用したセンサについて述べたが、今後は光ファイバジャイロのように単一モード光ファイバ自身をセンサに用いた超高感度な光ファイバセンサの開発も必要と思われる。また、将来の光計測システムの Key Device である計測用半導体レーザの高品質化、集積化が達成されれば、光ファイバセンサは

ますますインテリジェント化、高性能化されるものと思われる。

最後に光ファイバ温度計の車両用変圧器への適用に当たり、御指導いただいた日本国有鉄道関係者各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 久間ほか：電気学会誌，102，No. 5，p. 380（昭57）
- (2) K. Kyuma et al：IEEE J. Quantum Electron.，QE-18，10，p. 1,619（1982）
- (3) 久間ほか：第2回「センサの基礎と応用」シンポジウム講演予稿集 A2-3（昭57）
- (4) K. Kyuma et al：IEEE J. Quantum Electron.，QE-18，4，p. 676（1982）
- (5) 田井ほか：昭和57年電子通信学会総合全国大会 No. 913
- (6) 田井ほか：電子通信学会技術研究報告，OQE 81-110（昭56）
- (7) K. Kyuma et al：Appl. Opt. 20，4，2,424（1981）
- (8) 田井ほか：昭和56年電子通信学会総合全国大会，No. 905
- (9) 田井ほか：第3回「センサの基礎と応用」シンポジウム講演予稿集，B3-5（昭58）
- (10) 田井ほか：三菱電機技報，56，No. 5，p. 349（昭57）
- (11) 春本ほか：昭和58年電気学会全国大会，No. 1,162
- (12) 佐藤ほか：昭和58年電気学会全国大会，No. 839
- (13) 久間ほか：昭和58年電子通信学会全国大会，No. 1,003
- (14) 滝岡ほか：センサ技術，2，No. 11，p. 51（昭57）

1. ま え が き

回転機械の生産ライン、特に量産ラインでは、製品検査の段階において異常音の有無の判定を行っているが、これは人間の聴感により判断している例がほとんどであり、これを自動化して生産性の向上や省力化を図ることが期待されている。しかしながら、従来の人間の聴感による判定と同様の機能を持つ自動判定装置を実現するには多くの問題点があり、特に生産ライン特有の高レベルの外部騒音の処理、判定のアルゴリズム、異常原因の判別について解決すべき点が多々ある。

今回、自動車用トランスミッション（変速機）の生産ラインでの異常音検査を目的とした自動判定装置の開発を行ったので、その概要について報告する。

この装置は量産ラインに適用され、速い応答が必要なため、従来のFFT（高速フーリエ変換）アナライザによるものとは異なる方式としたことを特長としている。

2. 自動車用変速機の異常音

自動車用トランスミッションは、自動車に搭載される機械ユニットとしては単価の高いものの一つであり、厳しい品質管理が要求される。トランスミッションの生産ラインでの最終検査は、機能動作上のチェックと異常音のチェックが行われる。表1.に検査項目の一例を示す。これ

表 1. トランスミッションテスト項目

トランスミッションの種類	チ ェ ッ ク 項 目
マ ニ ュ ア ル	<ul style="list-style-type: none"> ・シフトセレクタの動き・スムーズさ・確実さ ・ギヤ比 ・シンクロ機能 ・異常音
オ ー ト マ チ ッ ク	<ul style="list-style-type: none"> ・自動変速 ・自動変速の動きの速さ ・トルクコンバータの特性 ・インタロック油圧シーケンス ・ギヤ比 ・異常音

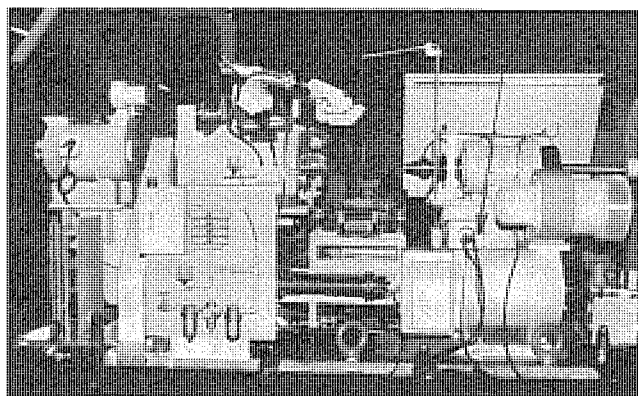


図 1. トランスミッションテストスタンド

らの項目の内、異常音以外については、いわゆるテストスタンドによる自動検査が可能になっている。既に当社は30セット以上のトランスミッション用テストスタンドの納入実績を持っている。図1.は当社製テストスタンドの一例であり、前輪駆動車用マニュアルトランスミッションの試験用として製作したものである。しかし、異常音の判定は人間の聴感による官能検査になっているのが現状である。

一般に自動車用トランスミッションから発生する異常音は、発生原因別に表2.に示すものに分類される。この分類において、項目1, 2, 3, 5, 6のそれぞれの周波数成分は、かみ合っているギヤの歯数で一義的に決まり、項目4の周波数成分は、ケースの材質・形状により決まると考えられる。また項目1, 2, 3, 5, 6は、一種の間欠的な異常音であるといえることができる。

次にトランスミッションの発生音の周波数スペクトルの例を紹介する。

表 2. トランスミッションの異常音

	発 生 原 因	性 質
1	歯 の 欠 け	<ul style="list-style-type: none"> ・パルス的な間欠異常音 ・欠け具合により音に大小がある ・高周波成分大
2	軸 の 偏 心 軸 の 振 れ 回 り	<ul style="list-style-type: none"> ・間欠異常音であるが低周波状変調音 ・異常成分が含まれるのではなく、正常音の成分が周期的に変化する音である
3	ベアリングの玉欠け	<ul style="list-style-type: none"> ・連続的に出る ・玉欠けがショックになって、軸や歯車から音が出る ・周波数成分は一定
4	ケ ー ス の 共 振	<ul style="list-style-type: none"> ・特定回転数で発生 ・量産品ではほとんどない
5	歯 の た た き 音	<ul style="list-style-type: none"> ・いわゆるガラ音である ・軽負荷で歯の隙間大のとき発生 ・負荷がかかると消える
6	軸 受 の 隙 間 ガ タ	<ul style="list-style-type: none"> ・軽負荷のとき、一定周期でビビリ共振 ・同一条件でも出たり出なかったりする
7	フ ェ ー ク の 曲 が り	・摺動音
8	油 量 少	・高域成分増大

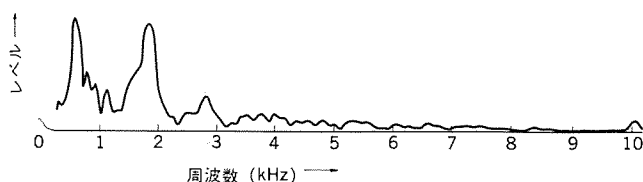


図 2. 良品の周波数スペクトル

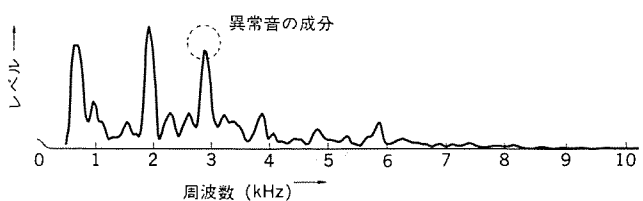


図 3. 不良品の周波数スペクトル

図 2. 及び図 3. は、いずれも小形乗用車用 5 速 トランスミッション の第 2 速加速中の状態で採取した発生音の周波数 スペクトル であるが、図 2. は正常な製品 図 3. はかみ合い異常音を発生する製品である。これらの スペクトル から明らかなように、良品にはない周波数成分が不良品の スペクトル に現れているので、(2.8 kHz 成分) このような成分を含む発生音を周波数分析して、 スペクトル を比較すれば容易に不良であることが判定できる。

3. 異常音の判定法

従来の人間の聴感による官能検査では、人間は音質の変化によって、機械の状態が変化したことを感知しているのであるが、これは単にある異常な音があるか否かを聴くだけでなく、音質の総合的な変化を、記憶にある良品の音と対比しながら検知して良否を判定しているのであり、これを自動化するのは容易ではない。

従来、異常音検査の自動化の方法として、例えば不良品の発生音に含まれる特徴的な周波数成分を抽出し、この成分がある一定値を越えた場合に不良と判定する方法が行われているが、異常音と特徴周波数との関連が必ずしも明確でないという問題があった。この問題を解決するため、この装置では良品の発生音を基準とし、多くの良品から得られる統計的なデータを求め、この基準に対して被試験対象の発生音がどの位ずれているかを検出することにより、良否判定を行う方式を採用した。基準となる統計的データとしては、周波数 スペクトル の各周波数別の平均値、最大値、標準偏差、オールパールの音量レベルなどの値を用い、比較判定には、平均値からの偏差値の 2 乗和を使った。これに加えて、間欠的異常音の検出と変調異常音の監視を行っている。上記の判定は、この装置専用計算機の検査プログラムにより行われる。

4. 検査装置ハードウェア

図 4. にこの装置の外観を示す。この装置は、従来のテストスタンドと組み合わせて使用し、トランスミッションの加減速試験の間に発生音を取り込み、演算処理を行った後 判定結果を出力する。

4. 1 周波数スペクトル・オールパールの検出

図 5. に ハードウェア 構成を示す。被試験機の発生音は、計測用コンデン

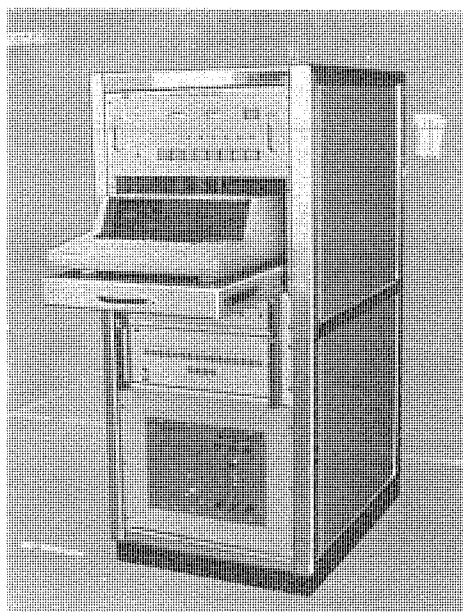


図 4. 異常音検出装置の外観

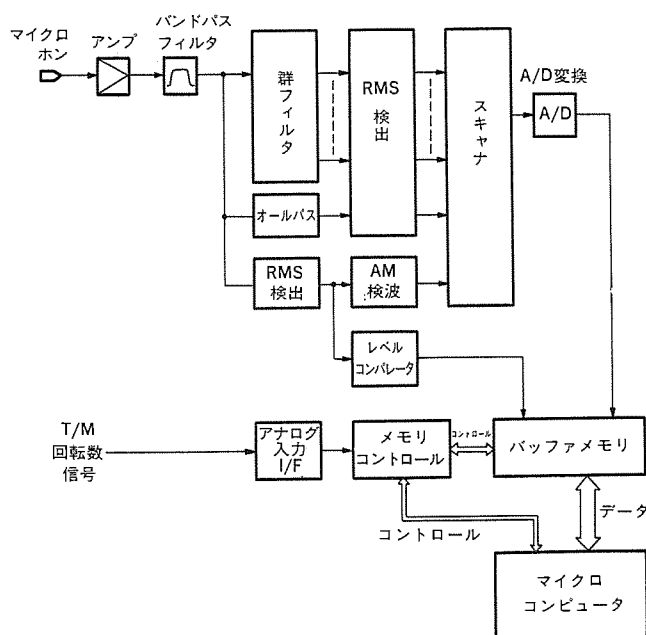


図 5. 異常音検出装置ブロック図

サマイクロホンで捕捉し、マイクロホン出力信号はプリアンプで適正なレベルまで増幅した後、可聴周波数帯域のバンドパスフィルタを通して、不要な周波数成分の除去を行う。なお分析する周波数帯域を可聴周波数範囲に選定したのは、従来の人間の耳による判断を基準として、これと同じ結果が得られるようにするためである。

続いて、この出力信号は、1/3 オクターブ間隔のアナログ式群フィルタにより周波数成分に分解し、また同時にオールパールの検出のため、オールパールの回路も通る。群フィルタ出力及びオールパス出力は、各々 RMS 検出回路に入力され、実効値に比例した直流電圧に変換する。これらの信号は、スキュナにより順次切り換えて、A/D コンバータに入力し、デジタル変換してデータ用バッファメモリに記憶させる。なお、データ取込みのタイミングは、トランスミッションの入力軸回転数によって制御し、一定回転数増加又は減少の度にバッファメモリにデータをロードする。このメモリのデータは、順次マイクロコンピュータへ転送し、検査プログラムにより、あらかじめ登録した良品の基準データと比較する。

ところで周波数分析の方法には、①掃引方式、②群フィルタ方式、③FFT (高速フーリエ変換) 方式、の 3 者がよく知られている。この装置では周波数分析を行うのに、②の方式を採用した。これは、発生音を加速中及び減速中にとらえ、一定回転数ごとの周波数スペクトルデータを求めるのに、リアルタイムの周波数分析が必要不可欠なためである。FFT 方式では、サンプリング時間が群フィルタ方式に比べて長いので、サンプリング中に回転数が大幅に変ってしまい、「一定回転数でのスペクトルデータ」としての意味が失われてしまうという問題がある。

4. 2 間欠異常音

間欠異常音の検出は、前記の周波数スペクトル分析では補そくしにくい現象であるので、専用の検出回路を設けている。すなわち図 5. にあるように、可聴波数バンドパスフィルタ出力の RMS 検出を行い、この出力レベルをアナログコンパレータにより、あらかじめ設定されたしきい値と常時比較して、レベルオーバー時に信号をマイクロコンピュータへ出力する。検査プログラムでは、レベルオーバーの回数により良否の判定を行う。

4.3 変調異常音

変調異常音についても間欠異常音と同様、周波数スペクトル分析では検知しにくい現象であるので、専用の検出回路を設けている。すなわち可聴周波数バンドパスフィルタ出力のRMS検出を行い、これをAM検波器に入力して振幅変調成分を求め、この直流出力をA/D変換してバッファメモリにロードする。次いで前記と同様、順次マイクロコンピュータへ転送して、検査プログラムにて判定を行う。

4.4 データ用バッファメモリ

周波数分析・オーバーオールレベル・変調成分の3データは、すべて一定回転数ごとのタイミングでメモリにロードする。回転数信号は、テストスタンドの駆動側に設けたパイロット発電機により与えられ、0→100%の速度範囲において、5%ステップごとにデータを取り込む。これを各ギヤレンジの加速、減速それぞれのテストについて行うので、例えば5速マニュアルトランスミッションでは後退レンジも含めて6レンジあり、12モードの計測を行う必要がある。一方、群フィルタは25チャンネル設けられているので、変調音データも含めると $(25+1) \times \frac{1}{0.05} \times 12 = 6,240$ のデータ数となる。この装置では、8Kワードのデータメモリを備えて、1回の計測ごとにデータをリフレッシュする方式としている。

4.5 マイクロホン

この装置の重要なセンサであるマイクロホンには、計測用の1/2インチコンデンサマイクロホンを使用しており、周波数帯域40 Hz～10 kHzの間で十分平坦な特性をもっている。発生音の検出にあたっては、周囲騒音の分離が必要不可欠であるが、この装置ではマイクロホンは防音カプセルと一体のものとし、トランスミッションがテストスタンドに装着されると、このカプセルはワークを覆う位置まで移動して外部ノイズを遮断し、高いS/N比を得ている。図6.に防音カプセルを示す。

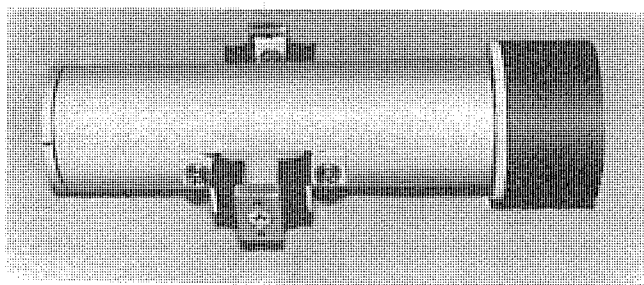


図 6. 防音カプセル

5. 良品データの登録

前述のように、この装置では良品の音を基準とし、被試験対象の発生音がこの基準からどの位ずれているかを検出することにより、良否を判定するので、あらかじめ良品のデータを登録する必要がある。これはこの装置をデータ登録のモードに切り換えることにより行われる。この場合、良品の発生音のアナログ信号処理は、判定モードと同じであるが、採取されたスペクトルやオーバーオールなどのデータは、コンピュータに転送された後、登録プログラムによって統計処理され、基準データが求められてマイクロコンピュータ側のメモリに記憶されるという点が判定モードと異なる点である。

6. 検査プログラム

検査プログラムには次の項目がある。

6.1 オーバーオールレベルテスト

あるギヤレンジにおいて、一定回転数ごとに得られたオーバーオールレベルと良品との比較を行い、その偏差値の2乗和を求めて判定する。これにより、騒音レベルそのものが高い製品をはねることができる。

6.2 スペクトルテスト

同一ギヤレンジにおいて、各回転数での周波数スペクトルと、良品の同一回転数でのスペクトルとを比較し、その偏差値の2乗和を求めて判定を行う。

6.3 振幅監視テスト

間欠異常音検出回路により、設定値以上の振幅が発生した場合、パルス信号が送られてくるのでこれを計数して、その回数により判定を行う。

6.4 変調音テスト

振幅変調成分が規定限度以上ある場合に不良と判定する。

7. む す び

以上、自動車用トランスミッションの異常音検出装置について、その概要を述べた。この装置は、基本的には現場において多量のデータ分析を行い、判定アルゴリズムの検証を進めていくことを目指しており、今後多数のデータを集めて評価することにより精度を高める必要がある。また、現状では良否判定はできるが、異常原因を特定するまでには至っていない。今後この点について、異常音発生 of 物理的解析を中心にして、研究を進めていく所存である。

制御操作卓 (特許 第1060488号)

発明者 橋本健治・加藤彰朗

この発明はデジタル計算機を使用してプラント等を制御する時に運転員が制御指示を与える制御操作卓に関するものである。

従来、同一の制御対象機器を各所に設置した制御操作卓から操作指令を出して計算機を介して制御する場合、操作卓一台当りのデジタル入出力接点数×操作卓台数、の接点数を必要としたが、この発明は、計算機からのデジタル出力を各操作卓に並列に入力するとともに、各操作卓に全ての操作卓を制御できるスイッチを設け、このスイッチの操作によってリレー接点を切換え、(I)各操作卓に現在どの操作卓が使用されているかを表示する、(II)使用中操作卓の出力のみをデジタル計算機に入力する、ことにより一台分のデジタル入出力接点数のみでシステムを構成することができるものである。以下図示の実施例につき説明する、

第一操作卓(1)から制御指令する場合、第一操作卓(1)に設けられたスイッチ(111)を押すと、リレー(6)により接点(61)、接点(66)、

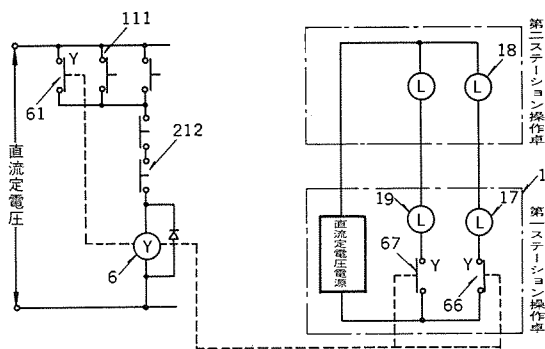


図1

接点(52)がON、接点(67)、接点(53)がOFFとなり、第一操作卓使用中を表示する第一操作卓上のランプ(17)と第二操作卓上のランプ(18)が点灯するとともに、図2.の第一操作卓の押釦より入力された指示のみが、電子計算機のデジタル入力回路(4)に出力される。

第二操作卓より制御指令する場合は、第二操作卓上のスイッチ(212)を押すとリレー(6)が開となり、接点(66)、接点(52)がOFF、接点(67)、接点(53)がONとなり、先の第一操作卓の場合と同様に第二操作卓からの指令が可能となり、システムの簡素化、経費の節減が達成される。

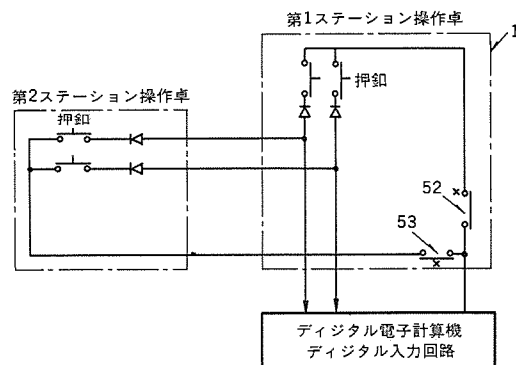


図2

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 57 No. 11 昇降機特集

特集論文

- 高速エレベーター用新制御・駆動装置
- 住宅用小形エレベーター《コンパクト4》
- 輸出向け電子化エレベーター
- 斜行エレベーター
- 車いす用階段昇降装置
- 移動足場工法による中高層ビル向けエレベーターの据付け
- 三菱昇降機の顧客情報管理システム

普通論文

- 複合発電プラントにおけるトータルデジタル監視制御
- 三菱ビル遠隔監視システム《メルセントリー》
- 光技術応用ビル管理システム
- 日本道路公団納め中国自動車道牛頭山トンネル換気制御システム
- 三菱パーソナルコンピュータ《MULTI 16》日本語 CP/M-86の特長と機能
- 高速大容量128 Kビット EPROM
- VHD方式ビデオディスクプレーヤ用信号系リニアIC

三菱電機技報編集委員

委員長	馬場 準一	委員	山内 敦
副委員長	岸本 駿二		柳下 昌平
	三浦 宏		櫻井 浩
委員	峯松 雅登		徳山 長
	翠川 祐		柴山 恭一
	佐藤 文彦		酒井 靖夫
	大年 倉像		武富 大児
	井上 通		瀬辺 国昭
	立川 清兵衛		倉橋 浩一郎
	吉田 太郎		小原 英一
	野畑 昭夫		尾形 善弘
	田中 克介	幹事	諸住 康平
	的場 徹	10号特集担当	宮本 紀男
	野村 兼八郎		荒木 義朝

三菱電機技報 57 巻10号

(無断転載を禁ず) 昭和58年10月22日 印刷
昭和58年10月25日 発行

編集兼発行人 諸住 康平
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
発行所 東京都千代田区大手町2丁目6番2号 (〒100)
三菱電機エンジニアリング株式会社内
「三菱電機技報社」 Tel. (03) 243 局 1767
発売元 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 (〒101)
株式会社 オーム社
Tel. (03) 233 局 0641(代), 振替口座東京 6-20018
定価 1部 500円送料別 (年間予約は送料共 6,700円)

石油ガス化ファンヒーター KD-25/32FTD形

業界に先がけて三菱電機が開発した石油ガス化ファンヒーターは、今年で6年目をむかえ、すでに年間170万台市場に成長しております。単に運べる石油温風暖房機としての位置付けから、より安全に、より簡便に、そして、より快適性に対する要求が年々強まってきました。こうしたニーズに応えるために開発したのが、このたびの新製品KD-25/32FTD形です。室温の温度ムラを大幅に改善した中吹き出し、業界唯一の3℃幅コントロールが可能なセーブ運転を搭載した、名実ともにトップブランドにふさわしい商品であると自負しております。

特長

●温風中吹き

温風吹き出し口を従来の本体上部(上吹き)から本体中央部(中吹き)にすることにより、室温の温度ムラを大幅に改善、室内暖房効果をさらに向上させました。

●セーブ運転

HI-LO-OFF燃焼3段切換えは従来通りですが、燃焼↔消火の温度幅(ディファレンシャル)を従来の5℃幅から3℃幅にすることで、よりきめの細かな室温コントロールができるようになりました。

●マイコンモニター

すべての運転状態、温度、タイマーの時間を鮮明に表示するモニター付きです。これらのモニターにより、すべての消火原因を告知し、サービスコントロールの低減がはかれます。また、室温と設定温度が同時に表示できますから、ムダのない最適室内温度設定ができます。

●操作性向上

すべての操作は、2ボリューム、1スイッチで、本体上面で行なえます。

●マイコン制御による信頼性、品質の向上

マイコン制御により部品構成のシンプル化、各検知装置の高精度化をはかりました。更に、自己診断機能も充実し、市場におけるサービス性の向上もはかっています。

●12時間タイマー

12時間点火タイマーを設け、お望みの時間に着火できます。更に、安全装置として、着火1時間後に自動消火できる機構になっています。

●軽量化

運べる温風暖房器は、やはり軽いほうが有利。このKD-25/32FTD形は、製品重量5.2kgと、石油ガス化ファンヒーターの中では最軽量です。



仕様

形式の呼び方	KD-32FTD	KD-25FTD
種 類	気化式(石油ガス化燃焼方式)強制対流形	
点 火 方 式	高圧放電点火・自動点火	
電 源	単相100V 50/60Hz	
定格消費電力 (強燃焼時50/60Hz)	62/56W	59/53W
点火時消費電力 (初期量大)	530W	
発 熱 量	3,200kcal/h	2,500kcal/h
燃料消費量	最大	0.388ℓ/h
	最小	0.225ℓ/h
タンク容量	4.9ℓ	
外形寸法(置台含む)	470mm(高さ)×642mm(幅)×339mm(奥行)	
重 量	15.2kg	
タイマー	12時間点火タイマー (着火1時間後自動消火機構付)	
使用燃料	白灯油(JIS1号灯油)	
燃 焼 量 調 節	HI/LO/OFF(セーブ運転)3段切換え	
安 全 装 置	炎検知装置、対震自動消火装置 過熱防止装置、停電時安全装置 点火安全装置、自己保持回路	
そ の 他 装 置	水検知装置、給油検知装置、換気検知装置 セーブ運転装置、室温表示装置	
付 属 品	水抜きスポイト、ロシフィルター	