

MITSUBISHI

三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.63 No.8

8
1989

電力系統保護・制御技術特集



電力系統保護・制御技術特集

目 次

特集論文

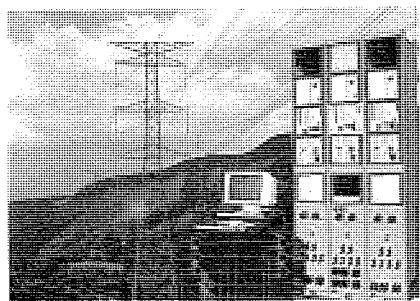
電力系統保護・制御技術特集に寄せて	1
甘粕忠男	
電力系統保護・制御技術の歩みと最近の技術動向	2
鈴木健治・畠田 稔	
電力系統解析技術とシステム	5
鈴木 浩・坂口敏明・野口秀夫	
保護・制御用32ビットマルチCPU基本システム《MULTIFLEX-32シリーズ》	9
畠田 稔・辻倉洋右・東 信一・鈴木 愿・大垣健二ほか	
見えるソフトウェア《VISMAT》	13
辻倉洋右・大垣健二・金子精二・岡田上枝・秋本吉則	
最近の系統安定化システム	17
野口秀夫・合田忠弘・中村正則・長沢 宏・押田秀治	
脱調予測制御システム	22
福田朋悟・熊野彰司・小林 篤・成田利春・中村正則・金田秀明	
基幹系統用PCMディジタル電流差動リレー装置	27
東 信一・大垣健二・服部俊樹・松永完三・木村良一	
高抵抗接地系統用ディジタル送電線保護装置	32
細井真知夫・松永完三・光岡正隆・中川欣之・津久田尚志	
ディジタル母線保護、変圧器保護リレー装置	36
岡田 明・大西公和・磯松信夫・飯塚光男・三宅康明・臼井正司	
全ディジタル保護・制御システム	41
大橋信富美・前田隆文・宮内隆男・石井隆裕・鈴木 愿ほか	

表紙

三菱電力系統保護・制御用基本システム 《MULTIFLEX-32》シリーズ

三菱電力系統保護・制御システムは32ビットマルチCPU《MULTIFLEX-32》シリーズを基本システムとし、高機能化、高信頼度化、マンマシン性の向上を実現している。

写真はディジタル送電線保護装置に搭載した《MULTIFLEX-32》シリーズ基本システムにCRTを接続、見えるソフトウェア《VISMAT》の機能を用いてソフトウェアの動作を絵で見ているところを示している。画面は逆変換された展開接続図の例である。



普通論文

電総研TPE-1 RM15逆磁場ピンチ核融合実験装置（前編）	47
小川 潔・島田寿男・平野洋一・八木康之・大藪 熟ほか	
電総研TPE-1 RM15逆磁場ピンチ核融合実験装置（後編）	54
小川 潔・島田寿男・平野洋一・八木康之・大藪 熟ほか	
京浜急行電鉄(株)納め電車線用フライホイル発電電動機	60
島津登志成・橋 浩司	
製銛原料・焼結工場管理制御システム	64
春川康彦・野村大也・小竹秀次郎・幸山和正・坂本房義	
G4 ファクシミリのためのMHS準拠メッセージ交換システム	70
吉満雅文・三木俊明・戸叶秀晴・荻野義一	
高速・高機能化 1Mビット ダイナミックRAM	74
尾崎英之・平山和俊・大林由和・塚本和宏・赤坂寿三穂	
16Mビット ダイナミックRAM	79
松田吉雄・若宮 亘・有本和民・藤島一康・佐藤真一	

特許と新案

感熱ヘッドの熱制御装置	85
ユニーク・ワード検出器	86

スポットライト

業界最大クラス容量6ドア冷蔵庫“スペシャリテ500”MR-B50F形	84
三菱電力系統解析支援システム《ADAPOS》	87
三菱新形カラープリンタS340/G370	88
浴室換気・暖房・乾燥システムV-130BZD	(表3)

アブストラクト

<p>電力系統保護・制御技術の歩みと最近の技術動向 鈴木健治・畠田 稔 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P2~4</p> <p>電力系統保護・制御システムの構成は、マイクロプロセッサを適用したデジタル形が主流となってきており、デジタル技術の発達は機能向上や小形化を実現するだけでなく、システムの形態までも変革させつつある。本稿では、電力系統保護・制御技術の歩みと最近の技術動向について述べるとともに、当社の開発した32ビットデジタル保護・制御システム《MULTIFLEX-32シリーズ》の概要を紹介する。</p>	<p>脱調予測制御システム 福田朋悟・熊野彰司・小林 篤・成田利春・中村正則・金田秀明 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P22~26</p> <p>脱調予測制御システムは、系統擾乱時の有効電力・無効電力を直交座標平面上で表すことで、位相角差を認識した脱調検知を可能とし脱調予測時には、必要最小限の電源制限を行うなど優れた特長を持っている。また、系統擾乱がしだいに拡大して行く場合には、動搖の発散傾向を捕え、並列リアクトルの開放、及び発電機の出力抑制制御を行い、動搖波及拡大を防止する機能も持っている。本稿では、システムの構成、原理、特長、検証方法などについて紹介する。</p>
<p>電力系統解析技術とシステム 鈴木 浩・坂口敏明・野口秀夫 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P5~8</p> <p>メーカーとして電力系統解析の必要性と、これを実現するために、どのような努力をしつる工具を備えたかを、主に系統安定化システムとの関連に注目し、系統問題の発掘と対策案提示、システムのデザイン／モデル化、試験・検証の観点から述べる。さらに、系統解析技術の今後の方針についても論じる。</p>	<p>基幹系統用PCMデジタル電流差動リレー装置 東 信一・大垣健二・服部俊樹・松永完三・木村良一 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P27~31</p> <p>近年の送電線保護は、デジタル伝送技術を用いたPCMキャリヤリレー方式が主流となりつつある。当社では、更にデータセーブ、モニタ機能等、多くの付加価値を実現するため高性能32ビットマイクロプロセッサを用いたマルチCPU基本システムによるPCMデジタル電流差動リレー装置を実用化した。本稿では、最近特に開発・適用の進んでいるPCMキャリヤリレーの技術動向、適用動向、特徴について事例をあげて詳述する。</p>
<p>保護・制御用32ビットマルチCPU基本システム 《MULTIFLEX-32シリーズ》 畠田 稔・辻倉洋右・東 信一・鈴木 愿・大垣健二ほか 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P9~12</p> <p>電力系統保護・制御システムの高機能化、高性能化、より高信頼度化及びシステムの柔軟性向上などの要求に対し、①各CPU間の独立性を高めたマルチ構成によるシステムの柔軟性、保守性の向上、②CPUの32ビット化による高性能化、③ビジュアル化によるソフトウェアの一層の高信頼度化、④マンマシン インタフェースのよりユーザー指向化、を図った新システムを開発した。</p>	<p>高抵抗接地系統用デジタル送電線保護装置 細井真知夫・松永完三・光岡正隆・中川欣之・津久田尚志 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P32~35</p> <p>高抵抗接地系統用送電線保護装置のデジタル化については、系統特有の問題に対する保護機能の向上はもとより、電力系統の増大に伴う保護装置数の増加に対応するため、装置の小形・縮小化とともに、保守・点検の省力化が求められている。</p> <p>高性能32ビットマイクロプロセッサを用いたマルチCPU基本システムによる高抵抗接地系統用新形デジタル送電線保護装置を開発し、実用化したのでその概要を紹介する。</p>
<p>見えるソフトウェア《VISMAT》 辻倉洋右・大垣健二・金子精二・岡田上枝・秋本吉則 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P13~16</p> <p>《VISMAT》(Visual Software Make and Test System)は、ソフトウェアの内容・動作が絵で見えるシステムである。ソフトウェアの作成は、すべて絵の描画で行う。製品のメモリから、描いたままのソフトウェアの絵をCRTに再生表示し、かつ動作状況をカラー表示する。さらに、ソフトウェア動作の時間変化を、オシロの形で見ることができる。このシステムを、32ビットデジタル保護・制御装置に適用した。</p>	<p>デジタル母線保護、変圧器保護リレー装置 岡田 明・大西公和・磯松信夫・飯塚光男・三宅康明・臼井正司 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P36~40</p> <p>マイクロプロセッサの普及により、保護リレー分野でもデジタル化が進んでいる。デジタル化は、まず送電線保護を中心に始まり、母線保護、変圧器保護等の機器保護に適用拡大された。母線、変圧器等の保護は差動方式を中心とするが、母線保護ではCT飽和対策変圧器保護では励磁突入電流対策が技術上のポイントである。本稿では、母線保護、変圧器保護を対象にデジタル化の実用化例と最近の技術動向について紹介する。</p>
<p>最近の系統安定化システム 野口秀夫・合田忠弘・中村正則・長沢 宏・押田秀治 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P17~21</p> <p>電力系統の大規模・複雑化に伴い、事故波及防止装置、いわゆる系統安定化システムの重要性はますます高いものとなっている。この論文では、安定化システムの機能の中でも特に重要な脱調未然防止、需給バランス制御という二つの側面から、最近の傾向である適応型安定化制御実現のために必要となる技術的手段を述べる。また、その具体的な実用例として“揚水安定化リレーシステム”、“事故中負荷脱落を考慮した新型SSC”の2システムを紹介する。</p>	<p>全ディジタル保護・制御システム 大橋信富美・前田隆文・宮内隆男・石井隆裕・鈴木 愿ほか 三菱電機技報 Vol.63・No.8・P41~46</p> <p>変電所保護・制御システムを、送電線・変圧器等の単位で分散配置し、制御室と相互間を光LANで結合する全ディジタルシステムを実機適用するに至った。光LANは、標準化という観点から、ISOのOSIモデルをベースにIEEE802.4に準拠したトーカンパッシングバスアクセス方式を用いている。また、高精度ディジタルVQ制御装置を開発し、系統電圧安定維持の高精度制御と電圧急変時の高速動作などの高機能化を図ったので紹介する。</p>

Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 22 ~ 26 (1989)

An Out-of-Step Preventive Control System

by Tomonori Fukuta, Shoji Kumano, Atsushi Kobayashi, Toshiharu Narita, Masanori Nakamura & Hideaki Kaneda

This system expresses the active power and reactive power of the power system in Cartesian coordinates. By predictions of out-of-step conditions during power-system perturbations by examining phase-angle differences, power shedding is held to a minimum. When fluctuations associated with the imminent spread of a perturbation are detected, the appropriate shunt reactors are opened and the generator output is limited, effectively preventing propagation. The article reports on the configuration, operating principles, features, and validation of this system.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 27 ~ 31 (1989)

A PCM Digital Current-Differential Relaying System for Trunk-Line Protection

by Shin'ichi Azuma, Kenji Ogaki, Toshiaki Hattori, Kanzo Matsunaga & Ryoichi Kimura

PCM carrier-relay systems are rapidly becoming the preferred method of protecting major power-transmission lines. The Corporation has implemented a PCM current-differential relaying system on a multiprocessor computer employing 32-bit microprocessors. The system implements data saving, data monitoring, and other new functions. The article introduces this system with detailed application examples, and reports on technical trends in the development and implementation of recent PCM carrier-relay systems.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 32 ~ 35 (1989)

Digital Line-Protection Systems for High-Impedance Grounded Power Systems

by Machio Hosoi, Kanzo Matsunaga, Masataka Mitsuoka, Toshiyuki Nakagawa & Hisashi Tsukuda

The article reports on the development and implementation of this system, which is based on a multiprocessor computer employing 32-bit microprocessors. Compact, space-saving digital equipment requiring minimal maintenance and few inspections achieves reliable line protection for high-impedance grounded power systems, as these power systems require sophisticated protective functions and many equipment installations.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 36 ~ 40 (1989)

A Digital Busbar-Protection Scheme and a Transformer-Protection Scheme

by Akira Okada, Kimikazu Onishi, Nobuo Isomatsu, Mitsuaki Iizuka, Yasuaki Miyake & Masaji Usui

Inexpensive microprocessors have made it possible to digitize protective relay equipment. First employed in transmission-line protection, digital protective relays are now being used to protect busbars and transformers. Although the current-differential relaying scheme is suitable for these applications, special measures are required to address the problems of current-transformer saturation in busbar-protection schemes and of inrush-current transients in transformation-protection schemes. The article reports on digitization efforts in these areas, including practical examples and a discussion of recent technical trends.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 41 ~ 46 (1989)

Digital Substation Protection and Control Equipment Employing an Optical-Fiber LAN

by Nobuhumi Ohashi, Takahumi Maeda, Takao Miyauchi, Toshihiro Ishii & Sunao Suzuki

The Corporation has installed an all-digital substation protection and control system with protective equipment for transmission lines and transformers linked to a control room by a optical LAN. The LAN complies with IEEE recommendation 802.4 based on the ISO OSI model for token-passing bus access as regards standardization. The system features a high-precision digital voltage and reactive power regulator developed especially for substation protection. The regulator maintains a precise supply voltage and responds instantaneously to sudden voltage variations.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 2 ~ 4 (1989)

Technical Trends in Power-System Protection and Control Systems

by Kenji Suzuki & Minoru Hatata

Modern power-system protection and control systems rely heavily on microprocessor-based digital technology. Advances in microelectronic technology have done more than just miniaturize the equipment—they have radically transformed system architectures. The article surveys the evolutionary advances of power-system protection and control systems, and discusses current technical trends. MULTIFLEX-32, the Corporation's 32-bit digital protection and control system, is also introduced.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 5 ~ 8 (1989)

Power-System Analysis and Application to Failure-Extension Prevention Systems

by Hiroshi Suzuki, Toshiaki Sakaguchi & Hideo Noguchi

The Corporation has researched tools for power-system analysis and how such tools can be applied in preventing the destructive spread of faults in a power system. The article reports on the design, modeling, testing, and validation of a system that locates power-system faults and proposes failure-extension prevention measures. The article also predicts future trends in power-system analysis technology.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 9 ~ 12 (1989)

A 32-Bit Multi-CPU System for Power-System Protection and Control

by Minoru Hatata, Yosuke Tsujikura, Shin'ichi Azuma, Sunao Suzuki, Kenji Ogaki, Machio Hosoi, Tetsuhisa Oishi & Hiroshi Sato

The Corporation has developed a power-system protection and control system with a multiprocessor architecture. Its features include: independent CPUs for high flexibility and simple maintenance; performance increases through the use of 32-bit microprocessors; visualization of software to reduce errors by design and testing personnel.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 13 ~ 16 (1989)

VISMAT, a Visual Software Make-and-Test System

by Yosuke Tsujikura, Kenji Ogaki, Seiji Kaneko, Hozue Okada & Yoshinori Akimoto

This system provides a software environment in which the software and its operations are represented graphically. Software is developed by drawing diagrams on a CRT. The execution status of the software is then displayed by colors superimposed over this diagram. A time chart is able to show the time flow of the software execution. The VISMAT system has been successfully applied to the development of 32-bit microprocessor-based digital protective relay and control systems.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 17 ~ 21 (1989)

Recent Trends in Failure-Extension Prevention Systems for Power Systems

by Hideo Noguchi, Tadahiro Goda, Masanori Nakamura, Hiroshi Nagasawa & Hideharu Ōshida

Failure-extension prevention systems have an important role to play in protecting large and complicated power systems. The article reports on recent progress in the technical implementation of adaptive systems for out-of-step protection and frequency control. A predictive out-of-step preventive system is introduced along with a new-generation system-stabilizing controller that responds to the dropped load power during faults.

アブストラクト

電総研TPE-1 RM15逆磁場ピンチ核融合実験装置（前編）

小川 潔・島田寿男・平野洋一・八木康之・大藪 熟ほか

三菱電機技報 Vol.63・No.8・P47～53

逆磁場ピンチ (RFP) は、閉じ込め効率が良く抵抗加熱のみで核融合反応の点火の可能性がある。また、プラズマ閉じ込めに必要な磁場は、トカマク等に比べ小さくて済むため、コイル等の構造物にかかる電磁力も小さく経済的な炉の実現性がある。TPE-1 RM15は、RFP閉じ込め性能の向上を目的として建設された実験装置であり、誤差磁場の極小化、外部磁場によるプラズマの平衡制御を特徴としている。また、柔軟性のある装置設計を行った。

電総研TPE-1 RM15逆磁場ピンチ核融合実験装置（後編）

小川 潔・島田寿男・平野洋一・八木康之・大藪 熟ほか

三菱電機技報 Vol.63・No.8・P54～59

TPE-1 RM15の電源系は、トロイダル磁場用電源、ポロイダル磁場用電源、平衡磁場用電源から構成される。ポロイダル電源は、高電圧、大電流コンデンサ電源で、新たに開発した大容量投入器を用い経済性、信頼性に優れたシステムを実現した。平衡磁場電源は、低電圧大電流電源と高電圧パルス電源から構成される。光点弧サイリスタ等を用い電磁ノイズに強い電源系を構成した。以上により、電流190kA、パルス長8 ms、中心電子温度800eVのプラズマが得られた。

京浜急行電鉄(株)納め電車線用フライホイール発電電動機

島津登志成・橘 浩司

三菱電機技報 Vol.63・No.8・P60～63

フライホイールによるエネルギー貯蔵技術の電気鉄道への応用例として、今般、京浜急行電鉄(株)向けフライホイール発電電動機を開発・納入した。本機は、交流機の採用により高速化、小型化されるとともに、破壊力学手法によるフライホイール設計、ヘリウムガスによる冷却、軸受数の最適化などの高信頼性・低損失化が図られている。ここでは本機の概要を紹介する。

製銑原料・焼結工場管理制御システム

春川康彦・野村大也・小竹秀次郎・幸山和正・坂本房義

三菱電機技報 Vol.63・No.8・P64～69

製銑原料・焼結設備における管理制御システムへの要求機能として、①高信頼性の確保、②インターフェースの簡素化、③管理、制御情報の一元化による統合オペレーションの提供、④電気、計装、管理制御の有機的結合などが挙げられる。最近納入した《MACTUS 620》を主体とした焼結工場管理制御システムについて、その概要と効果について紹介するとともに今後の製銑原料・焼結工場統合制御システムの展望について紹介する。

G 4 ファクシミリのためのMHS準拠メッセージ交換システム

吉満雅文・三木俊明・戸叶秀晴・荻野義一

三菱電機技報 Vol.63・No.8・P70～73

国際電信電話㈱の企画設計に基づき、1988年に国際勧告となった通信手順を搭載するG 4 ファクシミリためのMHS準拠メッセージ蓄積交換装置を開発した。勧告制定作業と並行して開発を行い新勧告の実現性を検証した。また、この装置によるメッセージ交換システムの実用性を確認した。メッセージ交換の実例により同報、配達通知、メディア変換など、ビジネス通信に有用な種々の機能を紹介し、併せて新勧告の概要を説明する。

高速・高機能化 1Mビット ダイナミックRAM

尾崎英之・平山和俊・大林由和・塚本和宏・赤坂寿三穂

三菱電機技報 Vol.63・No.8・P74～78

第3世代の1M DRAMを開発した。チップ面積は44.2mm²であり、現在量産中の第2世代をベースに、約90%の縮小率で高性能化を図った。その結果、RASアクセス時間60ns (4.5V, 80°C) という高速化が達成できた。縮小に伴うソフトエラー率などの信頼性上の問題に対して種々のプロセス改善を行い、良好な結果が得られた。さらに、新機能としてライトバーピット機能の導入、及び多品種にわたるDRAMを効率良く生産できる設計上の工夫もした。

16MビットダイナミックRAM

松田吉雄・若宮 亘・有本和民・藤島一康・佐藤真一

三菱電機技報 Vol.63・No.8・P79～83

0.5μmレベルのプロセス技術を使用して16M DRAMを試作した。メモリアレーにはノイズ除去に優れたツイステッドビット線構造を採用し、フィールドシールド分離によるT字型スタックト キャパシタセルの導入と併せて、大きな読出し信号を確保している。また、ワード線1行分のメモリセルを一括してテストできるラインモードテスト機能を搭載し、テスト時間の大幅な短縮を実現している。

Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 70~73 (1989)

A G4 Facsimile Messaging Procedure Based on MHS Recommendations

by Masafumi Yoshimitsu, Toshiaki Miki, Hideharu Tokano & Yoshikazu Ogino

Planned by KDD and developed by Mitsubishi Electric, this system implements internationally recommended communications procedures established in 1988. The system was developed in parallel with these recommendations and was employed to verify their usefulness. The article illustrates the messaging procedure with examples of multiaddressing, delivery notification, and media conversion, and summarizes the functions defined by the latest recommendations.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 74~78 (1989)

A High-Performance 1M-Bit Dynamic RAM

by Hideyuki Ozaki, Kazutoshi Hirayama, Yoshikazu Obayashi, Kazuhiro Tsukamoto & Sumio Akasaka

This third-generation DRAM features higher device performance thanks to its small chip area. The chip occupies 44.2mm^2 —90% of the area of the second-generation chips on which it is based. An RAS access time of 60ns is obtained at $V_{CC} = 4.5\text{V}$ and $T_A = 80^\circ\text{C}$. The wafer processing has been improved to cope with reliability problems, such as high soft-error rates, and the short-channel effect, which result from the small chip area. The third-generation chip is the first to include a write-per-bit mode. It also incorporates special design features to boost mass-production efficiency and to support several product variants.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 79~83 (1989)

A 16M-Bit Dynamic RAM

by Yoshio Matsuda, Wataru Wakamiya, Kazutami Arimoto, Kazuyasu Fujishima & Shin'ichi Sato

A 16M-bit DRAM prototype has been produced using new technology for a $0.5\mu\text{m}$ -scale ultramicrolithography. The memory array employs a twisted bit-line structure with excellent noise immunity and T-stacked capacitor cells with field-shield isolation to maintain satisfactory readout signal levels despite the small cell size. The chip incorporates a line-mode test function that dramatically reduces the chip-test time by supporting the simultaneous test of all the cells on a selected word line.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 47~53 (1989)

The TPE-1RM15 Reversed-Field Pinch Experimental Machine for the Electrotechnical Laboratory (Part I)

by Kiyoshi Ogawa, Toshio Shimada, Yoichi Hirano, Yasuyuki Yagi & Isao Oyabu

Reversed-field pinch machines are capable of confining high temperatures and high-density plasma efficiently and of achieving ignition for nuclear-fusion reaction by ohmic heating alone. Also, since the electromagnetic field required for plasma confinement in an RFP is small in comparison to that of a Tokamak reactor, the electromagnetic force exerted on the coils, supporting structures, and other parts of the machine is correspondingly smaller. These merits indicate the possibility of realizing a low-cost RFP fusion reactor. The objective of this experimental machine is to improve the confinement properties of RFP plasma and its design aims at minimizing various error fields and to achieve precise control of the plasma-equilibrium position with no loss of the machine's high versatility for use in experiments performed under a variety of conditions.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 54~59 (1989)

The TPE-1RM15 Reversed-Field Pinch Experimental Machine for the Electrotechnical Laboratory (Part II)

by Kiyoshi Ogawa, Toshio Shimada, Yoichi Hirano, Yasuyuki Yagi & Isao Oyabu

Different types of power supplies are used for the toroidal-, poloidal-, and vertical-field circuits of the TPE1RM15. That of the poloidal-field circuit is composed of high-voltage (20kV) capacitor banks to obtain high circuit current. A newly developed mechanical closing switch makes it reliable and economical. A low-voltage (28V) thyristor rectifier and high-voltage (5kV) capacitor banks are used for the vertical-field circuit. Light-triggered thyristor switches are used to prevent electromagnetic noise problems. A discharge of 190kA for 8ms and a central electron temperature of 800eV have been obtained using the TPE-1RM15.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 60~63 (1989)

A Flywheel Generator-Motor for Railways

by Toshinari Shimazu & Koji Tachibana

Delivered to the Keihin Electric Express Railway Co., this apparatus employs an AC design because this allows compact dimensions and high-speed operation. Helium-gas cooling and an optimal bearing arrangement minimize energy loss, while a flywheel design based on fracture mechanics theory ensures mechanical reliability.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 63, No. 8, pp. 64~69 (1989)

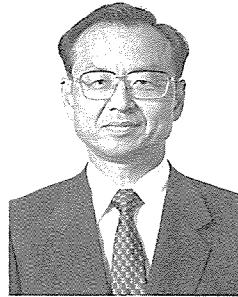
A Total Process Control System for Sintering Plants

by Yasuhiko Harukawa, Hiroya Nomura, Hidejiro Odake, Kazumasa Koyama & Fusayoshi Sakamoto

This system is based on the Corporation's MACTUS 620 supervisory-control system. The system features enhanced reliability, simple interface design, central control, a unitized database for management and control information, and integrated electrical, instrumentation, and computing functions. The system's effectiveness is evaluated and the authors consider the future of similar systems for sintering-process integration.

電力系統保護・制御技術特集に寄せて

常務取締役
機電事業本部副本部長
甘粕 忠男



我が国の経済は、石油ショック、円高の試練を見事に乗り切り順調な発展を遂げつつあるが、この中にあって電力エネルギーの伸びは今後とも総エネルギーの伸びを上回ることが予想され、エネルギー需要の電力シフト化が進むと言われている。特に民生用は、家庭用需要が世帯数の増加、ルームエアコンの急激な普及に見られるようなライフスタイルの変化などにより高い伸びが見込まれること、また業務用需要も高度情報化社会を担うオフィスオートメーションの普及やサービス産業の発展により電力依存度が一層高まると予想される。今や電気は、国民生活や産業活動において欠くことのできないものとなっており、その供給信頼度の確保は社会的使命となっできている。

電力系統は、発電所から変電所を経て各家庭に至る電力エネルギーのネットワーク（骨格系）と系統の保護・制御・監視・計測・通信のネットワーク（神経系）が重なるように構成されており、両系の協調の下に供給信頼度が維持されている。

両系を支える基礎技術としての電力系統解析技術は、電力系統をシステム面から解析する技術で古くは交流計算盤が活躍していたが、現在では大形計算機による各種大規模シミュレーションを主体としている。この技術は、当社が従来から伝統的に得意な分野の一つとしており、これまで電力各社の御指導を得て解析結果に基づく新システムの提案や開発を数多く手がけてきている。今後ますます巨大化、複雑化する電力系統にあって、未知の系統現象を予見する解析技術が求められている。

系統安定化システムは、系統解析の結果得られた安定度上の問題点を解決すべく導入されるシステムで、安定化機器(PSS, SVG等)と、事故波及防止システムに分類される。この特集では、事故波及防止システムを主体に取り上げているが、電力系統ノウハウをベースとした系統のモデル化やシミュレーション技術に加え、各地点の情報を高速、高信頼度に伝送する通信技術との協調が不可欠となっている。

保護リーシステムは、系統事故を高速度に検出判断し、事故区間を遮断するとともに高速度に再閉路するもので、停電時間の短縮と、停電区域の極小化が図られるため電力供給信頼度維持の上から基

本となるシステムである。系統の大規模化、複雑化に伴って初期の電磁形リレーからトランジスタ形リレー、さらにはデジタルリレーと性能、形態は大きく変化してきているが、絶えず電力の供給信頼度向上に貢献してきた。最近のデジタルリレーでは、性能面、信頼度面に加えて無保守、無点検化を指向したシステム作りが進められている。一方、電力各社では電力情報通信網の整備が急速に進められており、デジタルリレー技術と融合して、より高信頼度な新しいリーシステムが追求されている。

監視・制御システムも、従来のワイヤードロジックによる制御盤と監視盤からマイクロプロセッサや計算機によるよりインテリジェントなシステムに変化し、併せて周辺機器のCT、PTも光センサ化される方向にある。電気所内の各機器、システムがデジタル化されるに伴い、構内光LANの開発も進められ、異メーカー接続の標準LANの実用化も間近い。構内光LANの進展とともに各機器の自己診断やシステムの自動復旧などAIを応用した運転支援システムの導入が計画されている。

これら各システムを支える技術に対し、我々がこたえようとしている事項は次のとおりである。

(1) 電力系統システムノウハウの蓄積と活用

電力各社と積極的に共同研究を推進し、併せて設備、体制の強化が必要である。

(2) 最先端技術へのチャレンジ

より高信頼度でより使いやすいシステムを求めて、高度情報・伝送処理、光センサ、AI、32ビットマイクロプロセッサ、ソフトウェアのビジュアル化などの先端技術に果敢に取り組まなければならない。

(3) 品質保証の徹底

システムの高度化に対応した多機能技術者の育成強化と試験検証設備の充実により、高品質なシステムを追求する。

我々は、これらの実現を目指して一層の努力を継続し、よりよいシステムを提供することにより電力各社の御期待にこたえたいと考えており、今後ともより一層の御指導、ごべんたつを切にお願いする次第である。

電力系統保護・制御技術の歩みと最近の技術動向

鈴木健治*
畠田 稔*

1. まえがき

電気エネルギーは、我々の社会生活において重要性を増し、より良質な電力供給が望まれるとともに、電力需要の増大は電力系統を一層複雑化、巨大化させている。電力の安定供給にむけて、電力系統保護・制御システムに課せられた責務はますます厳しくなりつつあり、機能の高度化、高信頼度化、保守運用の省力化を進め、そのニーズにこたえていく必要がある。

電力系統の大規模化は、系統現象の多様化も引き起こしている。従来、発生しないと思われていた異常現象が、現実に現れるようになってきた。このため、現象の予見、対策の提案をするに当たって系統解析技術がますます重要となっている。

一方、保護・制御システムの構成もマイクロプロセッサを適用したデジタル形が主流となってきており、デジタル技術の発達は、機能向上や小形化を実現するだけでなく、システムの形態までも変革させつつある。

ここでは、電力系統保護・制御技術の歩みと最近の技術動向について述べるとともに、当社の開発した32ビットデジタル保護・制御システム《MULTIFLEX-32シリーズ》の概要を紹介する。

2. 保護・制御技術の動向

電力系統保護・制御分野においては、系統現象の複雑化に対応した高性能化、動作信頼度（方式）及び固有信頼度（ハードウェア、ソフトウェア）の向上が求められるとともに、保守・点検・運用の省力化、設備・運用面での経済性の向上が必要となってきており、デジタル技術を適用した新しい原理の保護・制御システムが開発、実用化されている。これらの基本となる技術は、系統問題発掘・対策案提示・設計・試験・検証のすべての段階をサポートする系統解析技術、マイクロプロセッサを主体としたデジタル技術と、光伝送を含む高速伝送技術である。

電力系統保護・制御各分野及びこの分野と重要な関連のある、通信伝送分野の技術動向を図1に示す。

2.1 保護リレー技術

我が国の保護リレーの歴史は電磁形に始まるが、1960年ごろから保護リレーにトランジスタを適用する研究が始まり、以来各種トランジスタ形リレーの開発と信頼性向上への努力が払われ、1970年ごろには全静止形保護リレー装置が適用され、その後基幹系統の保護システムのほとんどが全静止形で構成されるようになった。

トランジスタ形リレーは、高速度、高感度、特殊性能の実現、小形低負担など電磁形と比べて多くの長所を持っているが、数多くの電子部品で構成されるため、部品点数増加による信頼度低下傾向、サージ・ノイズ耐量、ひずみ波による応答不良等の弱点があるため、その対策が必要となる。信頼性向上対策としては、自動監視装置を付加することにより故障の早期発見を実現し、実質的に信頼度の大転向を可能としたが、装置の構成が複雑化するデメリットが生

じている。

ひずみ波に対する対策として、高調波成分を除去するフィルタを入力部に設けるが、このフィルタにはアナログICを使用しており、トランジスタ形に代わってアナログIC形リレーが主幹系統保護システムに採用され、一層の高性能化、小形化を実現した。

一方、電力系統側からのニーズに対応して保護リレーはますます高度化複雑化し、高度な要求性能の実現、システムコストの低減、自動監視装置の簡素化、保守点検の省力化等、保護リレーに課せられた諸課題を解決するものとして、マイクロプロセッサを適用した保護リレーのデジタル化がある。デジタルリレーの研究開発は1970年ごろからスタートし、フィールドテストによる諸性能の実証とマイクロプロセッサの性能・信頼度の飛躍的な向上により、1980年ごろから実用化段階に入っている。デジタルリレーは、第Ⅰ期において各種リレー方式に適用され装置単位での標準化が進められてきたが、高性能32ビットマイクロプロセッサを適用した第Ⅱ期においては、一層の高機能化、高性能化が可能となり、多様なニーズに対応可能なマルチプロセッサ方式で構成している。

また、この間の通信技術の発展も著しく、マイクロ波回線のデジタル化や光伝送路の拡充が、保護リレーシステムの高度化と信頼性向上に果たす役割は大きい。

これからの保護リレーは、事故前情報を取り入れて演算することにより、精度・動作信頼度を更に向上させるなどのインテリジェント化が図られるとともに、メンテナンスにおける入力の自由生成、リレー動作特性のビジュアル化など柔軟なメンテナンスツールによるサポートが実現していくであろう。

2.2 系統安定化技術

系統解析により系統の持つ問題を明確にし、その系統で発生することが予測される設備過負荷・周波数異常・系統動搖・電圧異常、及びその複合異常現象を防止するために系統分離・電源制限・負荷遮断などの対策（制御）を実施する系統安定化システムを多数実用化してきた。これらは、オフラインで重大事故時の安定度計算を実施しておき、そこで得られた安定化制御を事故発生時に実施することにより事故波及を未然防止する方式、又は脱調・周波数異常などを検出したのち制御を実施する方式がほとんどであった。

しかし、近年の系統においては、電源・負荷の集中大量化・硬直化、ケーブル系統の増加、事故中の負荷脱落の増加などが問題となりつつあり、なお一層の高信頼度化、多様な事故様相への対応及びより適切な制御の必要性が高まっている。これらのニーズに対応しオンラインデータを使用して系統の状態を認識し、最適な制御量を高速に決定していく適応形系統安定化システムを開発、実用化した。このシステムの構築に当たっては、系統解析・シミュレーション技術、高速情報処理技術、情報伝送技術が駆使されている。

今後は、既存の系統安定化システムの盲点となっている新しい現象への対策を立案していくのが使命であると考える。

2.3 監視・制御技術

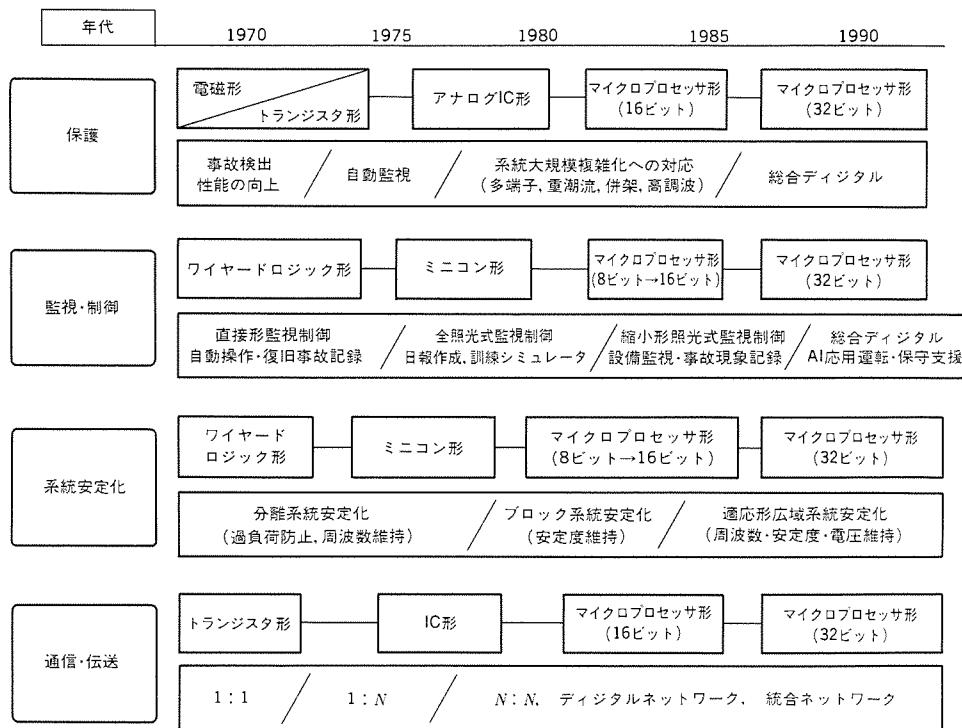


図1. 電力系統保護・制御の技術動向

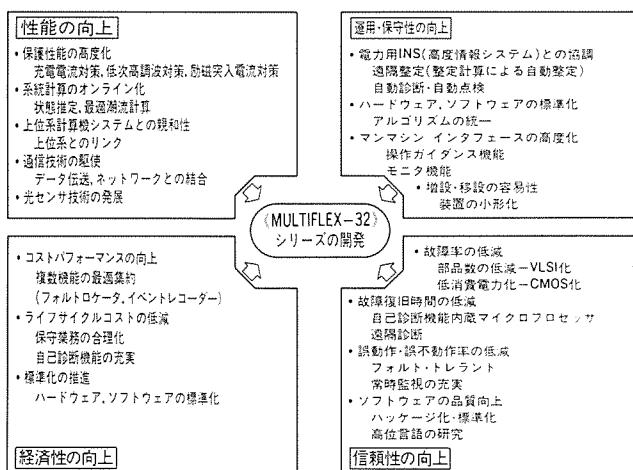


図2. 《MULTIFLEX-32シリーズ》開発の背景

変電所の監視・制御は、無人・有人の運用形態に合わせ直接式、照光式の各種においてマンマシン機能の向上（アナログ・ディジタル表示の最適併用化）、設置スペースの縮減（縮小形監視・制御卓）、高信頼度化（部品点数削減、長寿命化、常時監視）を図り高度化してきた。自動操作・記録装置については、制御特性の向上、大量情報処理性の向上が求められマイクロプロセッサ化が進められている。特にVQ制御装置においては、SVC（静止形無効電力補償装置）との協調を図るための監視・制御機能を付加するなど、システム間協調制御が採用されている。

最近は、システムの拡大・増加の状況のもとで、工事・運転・保守面の簡素化、設置スペースの削減が更に求められている。これに対応したのが屋外分散形全ディジタル保護・制御システムであり、保護・監視制御装置を機器近傍へ分散配置し、これらを異メーカー間標準LANで結合したシステムとして開発され実用化が近い。今後は、光CT・PTやディジタル対応機器との接続、自動処理機能の複合化、AI応用のインテリジェントアラームや復旧操作ガイドンス

に代表される運転・保守支援システムの導入が平行して進められていく動向にある。

3. 32ビットディジタル保護・制御システム

《MULTIFLEX-32シリーズ》の開発

電力系統保護・制御分野においては、ディジタル化技術の進展とともに、各種ネットワークとの接続等、システムの多様化が進み、一層の高機能化、高性能化、高信頼度化、経済性の向上、保守運用性の向上が追求されている。これらのニーズに対して、当社では高性能32ビットマイクロプロセッサを使用した、32ビットディジタル保護・制御システム《MULTIFLEX-32シリーズ》を開発し、実用化を開始した。図2に《MULTIFLEX-32シリーズ》開発の背景を示す。

3.1 マイクロプロセッサ子動向

従来からディジタルリレーに使用されている4ビットスライスのバイポーラ形マイクロプロセッサは、出現以来10余年を経過し、市場の中で比較的安定した実績を蓄積してきている。このプロセッサは、ディジタルリレー以外にも高速演算機能を必要とするコントローラや、高速な信号処理画像処理等の専用プロセッサとして適用されている。

一方、LSI技術の進歩は著しく、汎用1チップマイクロプロセッサが急速に発展してきており、処理能力面、低消費電力面のいずれにおいても従来のものをはるかに上回る性能が期待できる。特に、CMOS形32ビット汎用1チップマイクロプロセッサは、高速処理性に優れるだけでなく、以下のような特長を持っており、将来の更に高度なシステムニーズにも十分に対応できると考えられる。

- (1) 強力なコープロセッサ群とソフトウェアのサポート
- (2) マルチプロセッサ向きのアーキテクチャ
- (3) 自己診断機能内蔵
- (4) 低消費電力による高信頼度化

マイクロプロセッサ子動向を図3に示す。

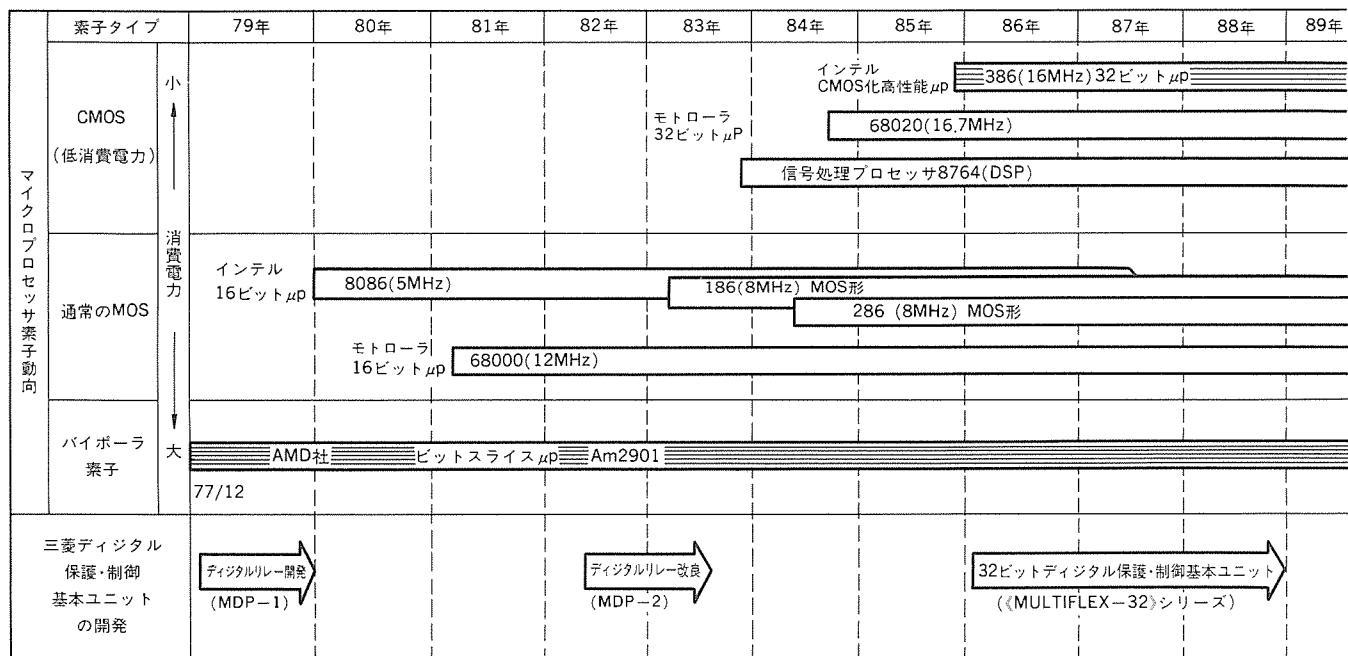


図3. マイクロプロセッサ素子動向

表1. 《MULTIFLEX-32シリーズ》と従来形との比較

項目	従来形MDPシリーズ	MULTIFLEX-32シリーズ	備考
プロセッサ	バイポーラ ビットスライス (4ビット×4個使用)	CMOS 1チップ (32ビット)	
処理能力	1	5~6倍	CPU1台当たり (当社比)
構成	シングルプロセッサ	マルチプロセッサ	
整定	22点	60点	
プログラム言語 (シーケンス)	アセンブラー	図形表現	VISMAT

3.2 《MULTIFLEX-32シリーズ》の特長

(1) マルチプロセッサ方式の採用

性能向上とシステム構成の柔軟性を高めるため、マルチプロセッサ方式を採用した。デジタルリレーにおいては、基本的にプログラムの固定が容易なリレー演算部とシーケンス部のCPUを分割し、システム対応で変化するシーケンス部の変更がリレー部に影響しない構成とした。また、フルトロケータ機能やデータセーブ機能等の機能増設が容易に行え、システムの多様化に柔軟に対応できる。

(2) ソフトウェアのビジュアル化《VISMAT》の採用

従来ブラックボックスになりがちであったソフトウェアの動作を、目に見えるようにする仕組みである《VISMAT》を組み込んだ。これにより、目で確認しながらの設計、試験が可能となり、ソフトウェアのミスを極限化することができる。

(3) 高信頼度設計

各CPUに組み込んだBIST (Built-In-Self-Test) 機能により、自動監視と故障部位の明確化を一層充実した。また、監視情報はデータセーブ機能 (オプション) により凍結され、現象の診断も容易となっている。

(4) マンマシン インタフェース機能の充実

操作表示機能をコンパクトに構成することにより、単体リレー動

作、時刻、装置状態等の広範囲な情報を表示することができる。また、整定点数もフルトロケータ等の機能拡張に対応できるよう、十分な点数を確保した。装置試験に必要となる各種の設定機能と表示出力機能は、表示パネルに組み込み、扱いやすさの向上を図った。さらに、整定操作及び保守操作のガイダンス機能を組み込み、操作の簡便化とマニュアルレス化をねらっている。《MULTIFLEX-32シリーズ》と、当社従来形との性能比較を表1に示す。

3.3 保護・制御システムへの適用

系統保護分野においては、基幹系統用PCMデジタル電流差動リレー装置、母線保護リレー装置、変圧器保護リレー装置、回線選択保護リレー装置等、各機種へ順次適用している。また、電力系統安定化システムへの適用も検討を開始した。

一方、制御分野においては、各種監視・制御装置への適用を展開中であり、さらに全デジタル形保護・制御システムも適用中である。

4. むすび

電力系統保護・制御技術の動向と、当社の開発した32ビットデジタル保護・制御システム《MULTIFLEX-32シリーズ》の概要について述べた。保護と制御の機能は、独立しながらも相互間のインターフェースは今後ますます詳細化・密接化していく一方で、変電所構内ネットワークはよりシンプルな構成が求められていくであろう。このネットワークには、さらにオフライン処理のインテリジェントなメンテナンスシステムも結合され、変電所情報、図面・帳票情報のデータベースを活用した保守支援又は専門家育成へのインストラクションとして使われることが期待される。

技術の進歩とともに、ますます保護・制御システムは高度化していくものと考えられるが、系統解析技術、デジタル技術、光速伝送技術を駆使して、電力の安定供給という観点から信頼性を最優先させたシステムの構築を進めていく所存である。

電力系統解析技術とシステム

鈴木 浩*
坂口敏明**
野口秀夫***

1. まえがき

大規模複雑化する電力系統では、従来論文などの中しか見られなかった現象が発生するようになってきている。こうした異常現象を、電力会社とともに予見し、解析し、対策としての保護・制御システムを提案、開発することがメーカーとして課せられた仕事の一つであろう。

当社では、昭和20年代に我が国では初めての交流計算盤を開発し、数台を電力関係の研究機関に納入したのをはじめ、昭和40年代には、いち早く“電力系統”の名がついた組織化を図っている。その後も、各電力会社と共同で系統問題を解決していく中で、今日のような系統解析のツールや、技術力が培われてきた。

系統解析は、電力系統の計画・運用・制御の各断面において、意志決定のために立てられた仮説を検証するための一手段にすぎない。本稿では、この仮説を作り出すのに必要な直感やノウハウを含めた広い意味での系統解析技術について論じることにする。

2. 系統問題の発掘

電力系統に生じる異常現象を予見したり、その現象を物理的に理解するためには、技術者としてどのような点を心掛けておけばよいのか。現象を理解し得ない限り、その問題に対する真の対策案は提示できないので、第一にこの点を分析する。

異常現象発見において重要なポイントは、大きくまとめると次の3点である。

- (1) 系統機器モデル化の重要性
- (2) 解析手法の理解の重要性
- (3) 線形性への疑問の重要性

これらについて具体的に幾つかの例を、これまで検討された系統問題の中から見付けて紹介する。

2.1 系統機器モデル化の重要性

大規模系統を解析するには、必然的に機器のモデル化において、ある特性を無視することになる。このときに、対象機器の物理的特性を十分に考慮しておかないと現実の現象を再現することができない。

機器のモデル化において、物理性を考えずにその一部を無視したために予知できなかった現象の典型例としては、1970年代に生じたSSR (Subsynchronous Resonance: 低周波共振現象、図1) によるタービン発電機の軸ねじれ共振が挙げられる⁽¹⁾。直列コンデンサ補償系統で生じたこの現象は、今までこそ系統解析を行う者にとって常識となっているが、当時としてみれば、次の二つの視点が欠けていたことになる。すなわち、

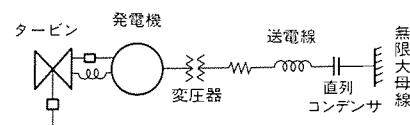
- (1) 商用周波数ベースの解析を中心にしていたので、直列コンデンサを単純にマイナスのリアクタンスでモデル化していた。そのため、系統側に送電系統リアクタンスと直列コンデンサとから生じるLC共振が存在することを認識できなかった。

(2) タービン/発電機系を一体の慣性体で模擬していたため、タービンの各車室と発電機とを結ぶ軸にねじれが生じ、このねじれ共振周波数と、前に述べたLC共振周波数の和が商用周波数に一致した時、軸に大きなねじれトルクが発生しうることに気が付かなかった。

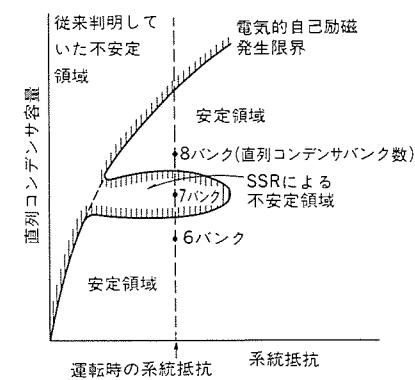
次の例として、地絡事故に対する軸ねじれトルクの解析において、送電系統の一部のモデル化を無視したことによる結果の違いを一つ示す⁽²⁾。非対称故障に対しては、△-Y結線の発電機昇圧トランクを考慮しておかないと、事故タイミングの軸ねじれトルクに与える効果が、トルクの立ち上がり角度で30°変わってくる(図2)。厳しい系統条件下では、この差が大きく影響することがある。

電力系統の解析では、特に発電機のモデル化において、機器の物理性を知らないと結果が現実と違ったものとなる。その例は、容量性負荷を抱えた発電機での自己励磁現象に見られる。自己励磁現象の発生時には、系統側からの充電電流が界磁側に注入され、シミュレーション上では、界磁電流が負になる。ところが、現実の界磁回路では、整流器の作用によって電流がそのまま負になることはあり得ない。界磁電流が負になればブロックされると、端子電圧は急峻に高くなってしまうことになる(図3)。この現象を無視すると発電機や送電系の絶縁レベルの設定を誤ることになる。しかもこの場合、界磁電流には送電系統のリアクタンスと対地容量で決まるLC共振の電流が重複し、現象はより一層複雑となっている⁽³⁾。

また、同じような例としては、大じょう乱後の系統動揺の途中に発電機の無効電力出力がシミュレーション上で負になることがある。しかし、現実には発電機の界磁回路に設けられた最低励磁回路(Minimum Exciting Limitter)により、無効電力がマイナス側に振れるとAVRがロックされ、多くは定力率運転されることになる。そのため、シミュレーション結果から動揺が一層大きくなることがある。



(a) 直列コンデンサ補償系統の単純モデル



(b) SSR不安定領域

図1. 低周波共振現象

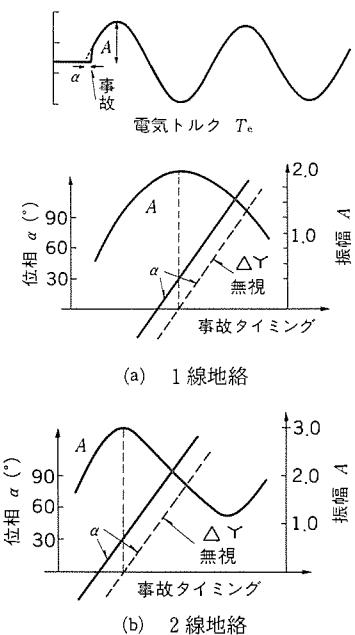


図2. 電気トルクの振幅・位相

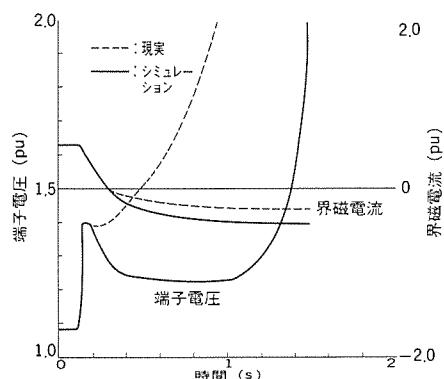


図3. 自己励磁現象

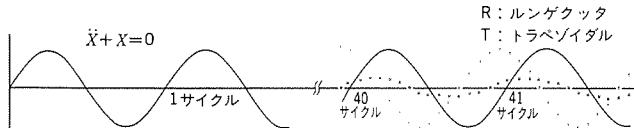


図4. 積分手法の比較

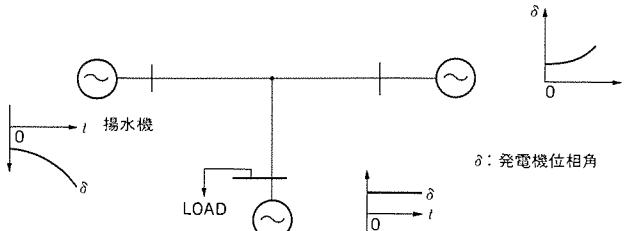


図5. 3機系モデル

り、安定度限界にあるときには注意を要する点である。

2.2 解析手法の理解の重要性

時間領域のシミュレーションでは、偏微分方程式を変分方程式に近似し、繰り返し積分公式を用いて解いている。また、電力系統では本来変数としては電圧、電流を対象とすべきところ、解析上の都合で、電圧の大きさや位相と有効・無効電力を変数として表現して

いる。こうした解析上の近似や便宜さのために、シミュレーション結果が現実の現象と離れてしまうことがある点を考慮しておかなければいけない。

その例としては、時間領域のシミュレーションでは、多くのプログラムが陽関数に基づく積分手法、例えばルンゲクッタ、オイラー法などを用いることが多い。必然的にこの積分手法では、シミュレーション結果にダンピングを与えることになり、現実の系統にあたかもダンピングがあるかのように理解されることがある。図4には正弦波をシミュレーションしたときの陰関数によるトラペゾイダル法との比較例を示す。

また、近年問題となっている潮流多根による電圧不安定現象を解析するときに、有効・無効電力を変数とした潮流計算を繰り返す方法では、その初期値の選び方で望んだような多根による不安定が現れないことがある。これは、潮流計算では、非線形方程式を繰り返し手法で解くため、解が初期値の影響を受けることを認識していないために生じた欠陥である。

このように、シミュレーションによる解析では、どのような手法を用いて解析しているかをブラックボックスにしてはいけない。

2.3 線形性への疑問の重要性

本来非線形である電力系統の特性を線形であると仮定しているために隠れてしまう現象がありうる。現象の非線形性を認識しておく必要がある。従来、発電機は、系統に事故が生じると加速すると思われてきた。しかし、発電機端に大きな負荷がついている系統で、遠方で事故が生じると、故障中に隣接負荷に電力を供給するため、この発電機が減速することがある。当然、故障によって加速する発電機が存在するから、故障除去後に、上記の発電機が減速脱調を起こすことになる。また、夜間に運転される揚水機は、隣接負荷がなくとも系統事故により減速する。そのため、大負荷を抱えた発電機と揚水機とを含む系統では、夜間に減速脱調を生じる可能性が強くなる。これは、従来の常識の延長線上からは発見できない現象の一つの例と言えるであろう。

3. 保護・制御システムへの系統解析の適用

前章で述べた方法で、系統上の問題を見付けた後、これに対する対策を提案し、保護・制御システムを製作していくことになる。

3.1 対策案の提示

対策をたてるときに必要な留意点は、視点を変えてみることである。系統安定化システムの例を以下に示す。

(1) 揚水安定化システム

前述した揚水機の減速脱調を未然に予防する対策としては、設備増強も検討されたが、揚水機の一部を遮断するシステムが設置されることになった⁽⁴⁾。この遮断量の決定のために簡単な3機のモデル系統が想定され、エネルギー関数法によるアルゴリズムが開発された(図5)。しかし、この3機モデルでは、遮断すべき全揚水機量は算出できるものの、その分布をどう配分したらよいかは分からぬ。実際に、揚水安定化システムのデザインに当たっては、上記の集中定数で決まる単純なモデルのほかに、実際の系統を代表する中間規模のモデルと、それを拡張した分布定数に近いモデルを考えて臨むことが肝要である。

今、対象とする系統が、ループを構成しているとし、揚水遮断に伴う周波数変化を見てみる。このとき、系統事故発生後直ちにある揚水機を遮断したとすると、この系統では、系統全体の慣性の大き

系統の周波数変動は、以下の3モードに分けられる。

(1) 0次モード

系統全体の周波数が指指数関数的に上昇していく。

(2) 1次モード

東西系統間の動搖に起因する周期的周波数変動。

(3) 周波数伝搬モード

パルス状の周波数上昇がループ内を伝搬する。

各発電機の周波数は、これらの和となつて表される。

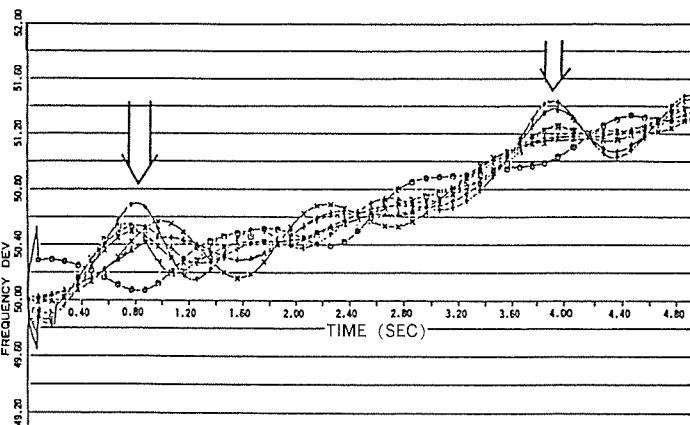
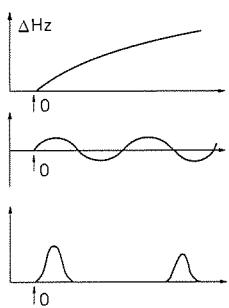


図 6. 周波数の伝搬

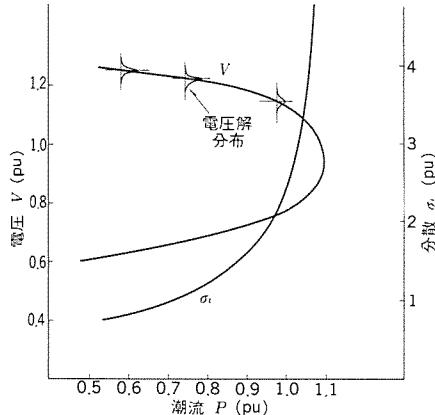


図 7. 潮流解と指標

さて、ダンピング定数によって決まる時定数で周波数が上昇していくと考えられる。これを集中定数のモデルで決まることから0次モードと呼ぶことにする。ところが、周波数の動きには、このほかに中間モデルで代表される系統動搖で決まる周期（このケースでは約1.6秒）の周波数変動が重複する。これを1次モードと呼ぶことにする。次に、発電機が、系統内に連続に分布していると仮定することによって成立する分布定数モデルを考えると、周波数の変化はパルスとなってサージのように、このループ系統内を右、左回りに半分ずつ伝搬していく。この3種類のモデルを考えておかないと現実の周波数の動きを把握できることになる。図6は、具体的シミュレーションの例を示している。

(2) 電圧安定度モニタ

潮流多根による電圧不安定現象を事前に予知し対策をとらせるために、現在の状態をある指標によりモニタすることが必要になる。そのための安定度指標に関しては、幾つかの提案があるが、ここでは潮流計算手法の数値解析的意味を十分に利用したものを紹介する。

潮流計算では、全ノードで有効電力が指定されるが、現実の系統では有効電力が常に変化している。この性質を組み入れ、有効電力指定値が揺らいだときの電圧解の分散を求め、これを指標とするものである。一機一負荷モデルでの電圧根と、それに対応した電圧根の分散 σ の例を図7に示す。この指標は、電圧の大きさの次元を持つ物理的意味を持つものである。

3.2 保護・制御システムの設計・試験

ここでは、系統解析が保護・制御装置の設計・試験のために、どのように使用されているかについて紹介する。

今後の電力系統では、UHV送電や275kV, 500kVケーブル系統の

導入などにより、従来以上に過酷な系統現象が発生することが予想される。これは保護・制御性能面に、解決すべき多くの課題を提起している。その要因の例としては下記事項があげられる。

- (1) 統合の充電容量の増大に伴う系統事故時の振動電流の低周波化
- (2) 充電電流と地絡・短絡電流の区別の困難化
- (3) 突然電流及び事故時直流分電流の増加と長時間化

例えば、振動電流の低周波化が距離リレーの保護性能に与える影響としては、不安定動作域の広がりがあるが、これは系統の安定運用にとって障害となる。このような系統現象は、系統保護・制御装置の開発時に確実に把握しておくことが重要である。さらに、製品の品質を保証するために実系統に対応した試験用電流電圧波形の作成も必要となる。このため、詳細設計段階及び試験段階において、系統解析の役割は重要となる一方である。例えば、保護リレーは電圧電流の瞬時値を扱うため、系統解析手法としては、主としてEMTPが使用される。その解析結果から高調波や直流分の成分・含有率・減衰時定数などの特徴把握が実施される。これが、設計のベースとなるとともに試験入力作成の基準となる。そして、連続系シミュレーション言語などを使用して、フィルタ及び保護アルゴリズムの性能評価を実施し各部の仕様を決定する。保護リレーがデジタル化されてからは特にこの段階が重要であり、かつ設計の有効な手段となっている。

試験段階への適用例は、系統シミュレータである。電力系統の過渡現象のシミュレータとしては、模擬送電系統（ATL: Artificial Transmission Line System）、ハイブリッドシミュレータ及びデジタルシミュレータがある。従来の試験は、すべてATLで実施されてきたが、最近では、自由な試験波形が得られることや試験条件が設定しやすいこと及び大規模系統の試験が可能となることなどにより、デジタルシミュレータの使用頻度が多くなっている。図8はデジタルシミュレータの一例である。図において、大型計算機はEMTPや過渡安定度解析プログラムを用いて、実系統規模での系統解析を実施し、結果をパソコンへ送る。パソコンでは、データの蓄積や必要に応じて実効値から瞬時値への変換を実施する。この瞬時値データは、テストケースごとに波形として出力され、さらにD/A変換器やアンプを通して5A又は1A, 110Vのアナログ信号に変換されたのち被試験システムに供給される。これにより、実系統レベルでの試験を可能としている。

4. 系統解析技術の今後の方向性

今後の系統解析技術の方向をDemand-inducedによる変化と、

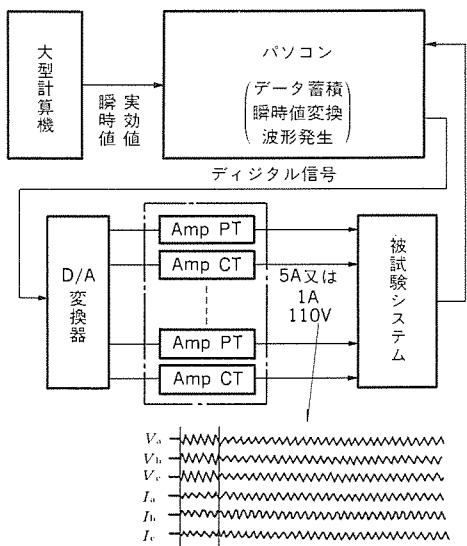


図 8. CPU 模擬送電システム

Supply-pushによる変化という二つの観点から予測する。

Demand-inducedな変化要因には、インテリジェントビルを中心とする都市の文明化の進展、及びエネルギー市場における電力の競争力維持のためコスト低減への努力が挙げられる。こうしたニーズを受けて文明のインフラストラクチャとしての電力は、安定かつ安価な供給が求められる。電力システムは、従来の大規模電源、長距離かつ高密度送電のほか、比較的小規模な分散型電源を並列したホロニックな形態が予想されている。

一方、Supply-pushな要因には、電子技術・情報科学の進展があり、各種システム構築のためであるコンピュータ及びそのネットワークは将来系統のすみずみまで浸透し、新しい機器・システムを実現することになる。さらに、長期的には生命科学の成果が従来にはなかったセンサや情報処理システムを可能にすることが期待される。

4.1 電力系統とシステムのインターフェースとしての系統解析技術

電力系統を一つの物理システムとしてその振舞いを調べる系統解析技術は既に確立されている、と思われるがその運用システムへの導入は、まだ緒についたばかりである。電力系統のように、大規模ではあるが比較的精度の高い数学モデルがたてられるシステムでは、今後様々な局面でシミュレーションの重要性が増していくことが予想される。

例えば、セキュリティ監視システムへの適用。既にエネルギー関数法に代表される解析的手法やパターン認識法に代表される統計的手法などが知られているが、前者は解析的に扱えるモデルと実系統のギャップの克服、また後者はその手法が有効になるほどシステムが大きくないことなどの面でシミュレーション法に対して比較優位にたっているとは言いがたい。むしろ最近は、スーパコンピュータや並列コンピュータの適用に代表されるように、実規模の系統シミュレーションを高速に行うことの優位性が高まっていると言える。現在は、長時間動揺解析に主眼をおいた訓練用シミュレーションが主流であるが、今後は過渡安定度解析をはじめとする一層精密なモデルを高速に処理する解析用シミュレータへと発展する可能性が高く、既にこうしたシステム開発が開始されている。

このほか、系統保護・制御装置や運用監視システムの検証のために、系統解析シミュレータを用いることも検討されている。前述した系統安定化装置にEMTPからの計算結果を用いた装置の検証が

既に実施されている。いずれも実系統に装置やシステムを接続する前に工場などでなるべく実系統に近い環境を再現し、その性能やソフトウェアのテストを行おうとするものである。電力系統の大規模・複雑化、及び保護制御・運用システムの高機能ソフトウェア化に伴い、系統解析シミュレータがシステムの検証に広く用いられることが予想される。

4.2 人間とシステムのインターフェースとしての系統解析技術

情報科学の進歩は、最も劇的な変化を人間とシステムのインターフェースにもたらし、いわば“超環境”とも呼ぶべき新しいインターフェースを実現することが予想されている⁽⁵⁾。すなわち、電力系統の計画・設計・運用・保守の業務に携わるすべての人間の知的で創造的な活動を支援するシステム、つまり創造と協同のネットワークの出現がそれである。こうした人間とシステムの知的ネットワークを構築する要素技術としてのハードウェアは既に実現しており、今後は系統解析など業務の分析とモデル化、系統解析に特有な問題解決の方法など、広義のソフトウェアの開発がますます重要なものとみられる。

現在はその方向への第一歩として、電力系統解析支援エキスパートシステム（当社商標《ADAPOS》Advanced Analyzer of Power Systems）の開発が進み、実用化段階へ入ろうとしている。エキスパートシステムは、十分定義された業務の自動化を通して人間を支援しようとするものであるが、これを一步進めて人間の認知的プロセスから電力系統を一つの複雑なシステムとして見直し、過渡安定度や電圧崩壊などの系統現象に関する人間の理解や創造的思考を支援する新しいソフトウェアの研究が電力分野で始められている。こうした研究の成果が従来の数理的解析手法とリンクして“Automate”から“Informat”な系統解析支援システムとして開花することが期待される⁽⁶⁾。

5. むすび

本稿では、電力系統解析技術に携わるメーカーの技術者の立場から解析上の留意点を中心に述べた。これらのノウハウは、これまでの電力会社との共同研究の中で培われてきたものである。今後も解析技術力のより一層の高度化を目指し、ツールの準備・系統問題の予見、安定化システムの提案、提供を行うことにより、電力系統の高信頼度化に役立てたいと思う。

参考文献

- 1) 加藤ほか：直列コンデンサ補償系統におけるタービン発電機の軸ねじれ共振現象、電学誌、解説（昭52-9）
- 2) 鈴木、上村：△-Y結線を考慮した事故時最大軸トルク、昭50年電気関係学会関西支部連合大会、G4-29
- 3) H.Suzuki, R.Fujiwara, K.Uemura : Analysis and Control for Subsynchronous Resonance Problem, IEEE, PES Summer Meeting A76 485-3 (1976-7)
- 4) Y.Ohura, N.Nagai : Development of a Generator Tripping System for a Transient Stability Argumentation Based on Energy Function Method, IEEE, PWRD-1, No.3, p.68(1986-7)
- 5) 板井：戦略的創造のための情報科学、中公新書、899(昭63-11)
- 6) S.Zuboff : In The Age of The Smart Machine- The Future of Work and Power, Basic Books (1988)

保護・制御用32ビットマルチCPU基本システム 《MULTIFLEX-32シリーズ》

畠田 稔* 鈴木 愿* 大石哲久*
辻倉洋右* 大垣健二* 佐藤 廣*
東 信一* 細井真知夫*

1. まえがき

近年、電力系統保護・制御分野においてもデジタル化技術が進展し、通信のデジタル化と相まって、各種ネットワークとの接続等システムの多様化とトータルシステム化が進んでいる。そして、システムの一層の高機能化、高性能化、高信頼度化及び運用、保守性の向上が追求されている。

これらのニーズに対して、すべてを一つのもので処理し構成するのではなく、処理を適切に機能分割して分散し、システムの要求に応じてCPUを増加させ、並列処理による高性能化と柔軟性を高めたマルチCPUシステムを構築して対応することが可能となった。

32ビットマルチCPUシステムに適用するマイクロプロセッサは、多くの主要機能をVLSI化により1チップに集約したことによる小型、高信頼度の特長に加え、32ビット化により、性能・機能が格段に向上しており、上記システムの高度化要求を十分満足するものとなっている。

今回開発・実用化した32ビットマルチCPU基本システム《MULTIFLEX-32シリーズ》は、上記マイクロプロセッサ技術を活用し、分散システムの基本思想に基づいて構築されており、その柔軟性、経済性及び高速性を生かして、電力系統のローカル機器制御から、従来、ミニコンクラスの計算機で構成されていた処理まで、広い範囲の要求を満たすものである。

以下に、32ビットマルチCPU基本システム《MULTIFLEX-32シリーズ》の開発背景・特長について述べる。

2. 開発背景

電力系統の複雑化に伴い系統特性も複雑化し、電力系統保護・制御システムは、より高度なアルゴリズムの処理など性能の高度化が要求される。また、各種機能の複合化、付加機能の組み込みなどの高機能化及び個々に独立していた保護・制御機能をネットワークで結合し、より高度なトータル保護・制御システムの実現など、保護・制御システムの高度化が望まれている。さらに、高度化した設備の急速な増大に対応するため、保守運用のより一層の合理化及び信頼性の向上が不可欠となってきた。

図1に、これらニーズと32ビットマルチCPUシステムでの対応を示す。

3. 基本システムの特長

32ビットマルチCPU基本システムの特長を以下に示す。

(1) 柔軟性に富んだマルチCPU方式

各種ネットワークとの接続を容易とし、分散システムの構築に対応したものである。また、複数のCPUで負荷分散・機能分散する構成とし、性能向上とともに機能拡張性を高め、柔軟にシステムを構築できる。

(2) 32ビットCPUによる高速・高性能化

従来の16ビットCPUの5～6倍（当社比）の処理能力を持ち、より一層の高性能化、高機能化が可能となった。

(3) ソフトウェアのビジュアル化

従来、ブラックボックスになりがちであったソフトウェアの領域を、目に見えるようにする仕組みである《VISMAT》（Visual Software Make and Test System）を開発し組み込んだ。《VISMAT》は、ビジュアルにソフトウェアを作り検証するシステムである。これにより、容易にソフトウェア機能を目で確認しながら設計・試験を行うことができるため、ソフトウェアの一層の高信頼度化が可能となった。

(4) ユーザーフレンドリー指向

ガイダンス機能を付加するとともに、より使いやすさを追求したマンマシンインターフェースを組み込んだ。

4. 基本システムの考え方

4.1 機能分割による独立性の向上

保護・制御対象により、CPUが処理すべき情報量と処理の内容は様々である。1台のCPUは、その処理能力に限界があるため、複数のCPUをマルチに構成することにより、処理能力の拡大を図る。マルチCPU方式の考え方には、負荷分散と機能分散がある。

負荷分散は、処理すべき機能を複数のCPUに分割搭載し、それらの並列処理によりシステムの高速処理性・性能向上を追求するものである。

機能分散は、異なる機能をそれぞれ対応したCPUに割り当てマルチ構成とし、機能単位の独立性を高め、他の機能に影響を与えないシステムとすることができるものである。例えば、

- (1) 保護システムにおける故障点標定機能などの付加機能の搭載
- (2) 各種伝送系との接続
- (3) 機能拡張によるハードウェア的、ソフトウェア的な機能追加・改善

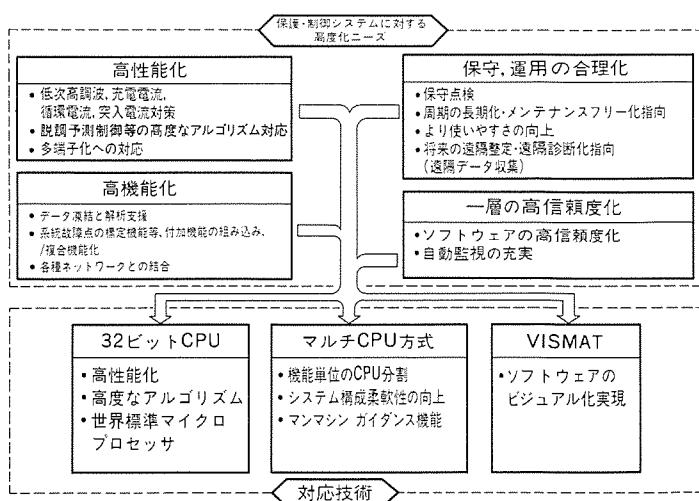


図1. 32ビットマルチCPU基本システムの開発背景

などが容易に可能となる。今後、これらの要求は更に多様化し、高度化すると考えられる。また、伝送系との接続は様々な形態があり、機器の操作、監視の遠隔化などの将来動向にも対応できることが必要である。

これらの要求に対し、マルチCPU基本システムでは、各機能単位にCPUを割り当てマルチCPUとして構成する機能分散方式を採用した。図2に保護システムの適用例を示す。

4.2 32ビットCPUによる高性能・高機能化

このシステムでは高い処理能力を得るために、CPUは32ビット化している。この結果、従来の5～6倍（当社比）の処理能力を持つものとなっている。

ソフトウェアで実現する機能の高度化と、多機能化を図っていくには、プログラムや処理するデータを格納するメモリ空間の拡張が必要である。メモリ空間は、今後のますます増大する高機能化要求に対応可能とするため、最大4Gバイトと大容量化し、実用上メモリ空間の制限をないものとしている。

また、メモリ管理機構、プロテクト機構、高速タスクスイッチ機構など大型計算機で発展してきた機能も具備しており、将来、高度なOSの搭載も可能で、今後の機能強化への対応を容易としている。さらに、搭載素子のCMOS化による、より一層の低消費電力化を進め、自然空冷（ファンレス）環境下で安定して動作するものとなっている。従来形（16ビット）との比較を表1に示す。

5. 基本システムの機能と構成

32ビットマルチCPU基本システムの機能と構成について以下に説明する。

5.1 機能

32ビットマルチCPUシステムは、以下に示す機能を必要に応じて搭載することが可能で、さらに高い拡張性により、他の種々の機能の追加も容易である。

(1) データセーブ機能

系統の電圧・電流情報や装置の動作情報等を時系列的に記憶し、遮断器トリップなど、あらかじめ設定された条件が成立した時点の前後の情報をセーブする機能である。この機能を搭載し、外部装置でセーブした情報を読み出すことにより、遮断器トリップ時などの系統入力や装置の応動を、時間の流れに沿って容易に解析できる。

(2) モニタ機能

時々刻々と変化する装置内部の各種演算データ等を、簡単な操作で表示出力するモニタ機能の搭載を可能としている。

(3) ガイダンス機能

マンマシン部の操作を、間違いなく、容易なものとするため、ガイダンス機能を搭載している。ガイダンス機能は、ガイダンス表示により、操作する人に正しい操作手順を示すとともに、スイッチに内蔵したLEDを表示制御し、正しいスイッチ操作を分かりやすく表示する。そして、正しい操作と誤った操作を確実に識別し、誤った操作に対しては応動しないよう構成している。また、表示やスイッチの配置、大きさ等は、人間工学に基づいた配慮を行い、数値入力は、一般に広く使用されている電卓と同様に操作できるように構成している。これにより、操作の機会の少ない人でも、操作要領書等を参照する必要なく、簡単に誤りなく操作できるよう構成している。図3に保護リレーシステムの整定パネル例を、図4と図5にガイダンス表示例と操作入力部例を示す。

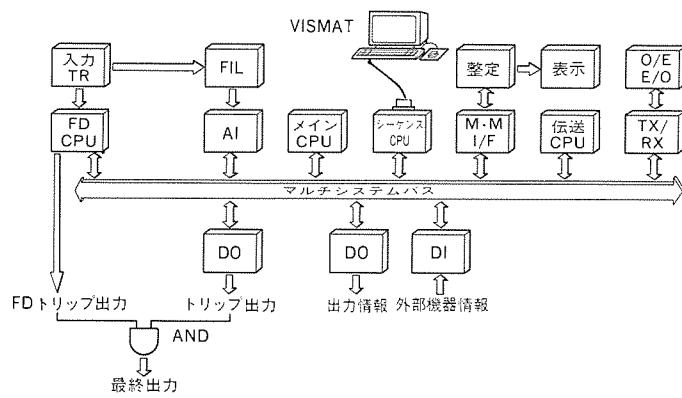


図2. 32ビットマルチCPU基本システムの適用(例)

表1. 従来形(16ビット)と32ビットとの比較

項目	従来形 (16ビット)	32ビット
プロセッサ	バイポーラ ビットスライス	CMOS 1チップ
構成	シングルプロセッサ CPU	マルチプロセッサ CPU---CPU
プログラム言語 (シーケンス)	アセンブラー 言語	図形表現 (VISMAT)
メモリ空間 (CPU1台)	128Kバイト	4Gバイト
処理能力比 (CPU1台)	1	5～6

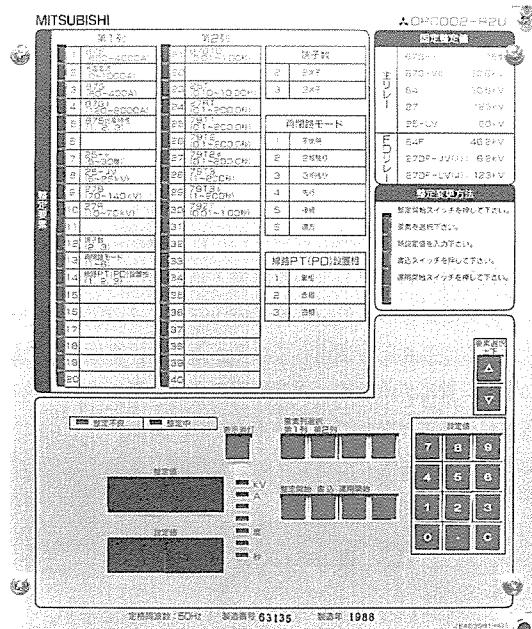


図3. 整定パネル例

(4) システム試験機能

システム試験に必要な機能を装置前面に、操作性を配慮して収納し、外部からの試験用ユニット等の接続を必要としないなど、試験の容易性を高めている。図6に保護リレーシステムの表示パネル例

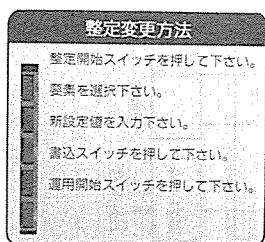


図4. ガイダンス表示例

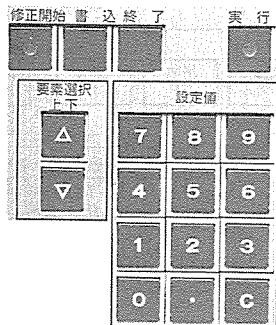


図5. 操作入力部例

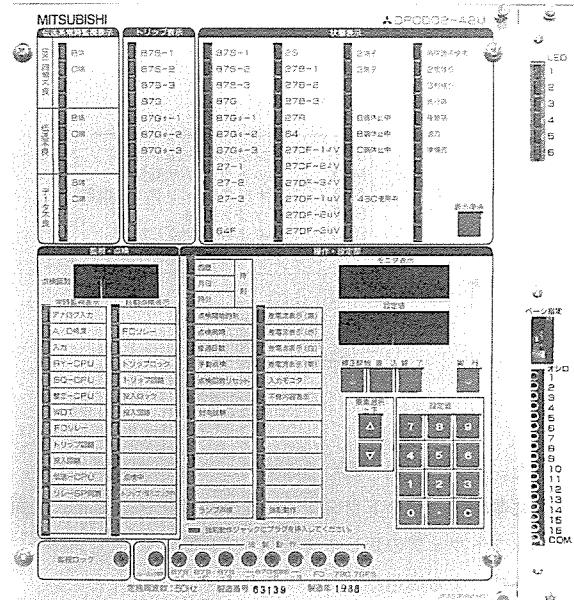


図6. 表示パネル例

を示す。表示パネルは、自動点検機能やシステム試験のためのリレー要素単体・トリップ表示、オシロ出力、強制操作などの機能を、十分な点数を確保した上で、使いやすいよう機能ごとに整理し、コンパクトに搭載している。

5.2 演算処理部の構成

演算処理部は、以下に述べるユニットから構成される。

(1) アナログ入力ユニット (FIL/AI)

フィルタ (FIL) は、系統入力に含まれる高調波成分など、演算処理に不要な信号成分をカットする。AIは、フィルタからのアナログ信号を入力し、AD変換器でデジタル変換処理を行う。

入力点数を拡張する場合には、必要に応じてAI, FIL等の増設を行う。

(2) メインCPU

システムの中で中心となる演算処理を実行する32ビットCPUである。システムの高機能化などにより、演算処理能力の向上が必要である場合は、CPU台数を拡張していくことが可能である。保護リレーシステムにおいては、AIでデジタル変換された系統入力情報を電気角30°間隔で入力し、リレー要素の演算処理を行う。

(3) シーケンスCPU

処理の分割の考え方から、メインCPUと分離独立して演算処理を行い、主にシーケンス/論理演算を行うCPUで、ハードウェア的には、メインCPUと同一のものである。

保護リレーでは、メインCPUからの演算結果を入力し、外部機器条件や運用上の設定条件を含めたシーケンス演算処理を行う。シ

ケンス処理の規模・速度に応じてCPU台数を拡張することが可能である。

このCPUは、《VISMAT》で作成された図形によるソフトウェアで演算が実行されている。

(4) マンマシン インタフェース ユニット (M·M I/F)

主として、装置の様々なマンマシン インタフェースの制御をつかさどる部分である。システムの動作表示や装置の操作・設定機能を制御する。保護リレーシステムでは、リレー動作や装置の状態の表示、各リレー整定値を設定する機能などが搭載されている。

このシステムでは、整定点数もフォルトロケータ機能の組み込み等、機能拡張に対応できるよう、十分な点数を確保したものとしている。

(5) 伝送CPU

適用するシステムにおいて、各種ネットワークと接続するための各種送受信データの入出力機能と伝送制御機能を持っている。そして、各々対応する伝送インターフェースなどを必要に応じて追加することにより、複数のネットワークと接続可能である。

これらネットワークの種類に応じた送受信部 (TX/RX) や、光モデム (O/E, E/Oを含む) を組み合わせてシステムを構成する。

5.3 入出力部の構成

入/出力部は以下に述べるユニットから構成されている。

(1) 入力変換ユニット (入力TR)

系統の変成器 (PT, CT) からの入力電圧・電流を取り扱いやすい信号レベル (電圧) に変換する部分で、外部との絶縁をとる。

(2) デジタル入出力ユニット (DI/DO)

外部とデジタル信号の入出力をを行うもので、外部と内部処理部とをフォトカプラ等で光絶縁し、サージ、ノイズの進入を防いでいる。

(3) 静止形トリップユニット

パワー素子により遮断器を制御するもので、より高速な動作を可能としている。

5.4 事故検出部

事故検出部 (FD-CPU) は、メインCPUとハードウェアレベルで

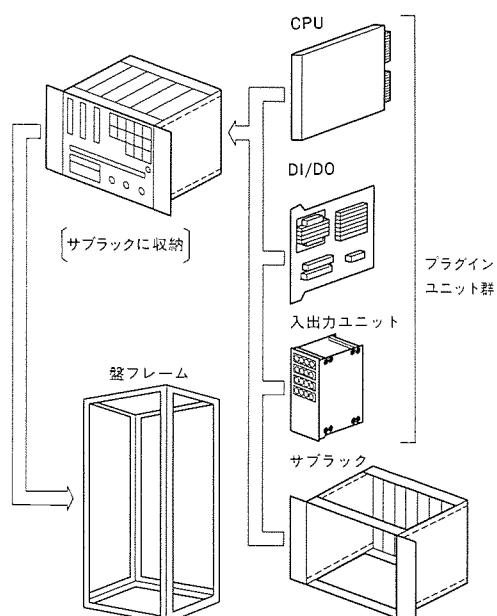


図7. ハードウェア構成

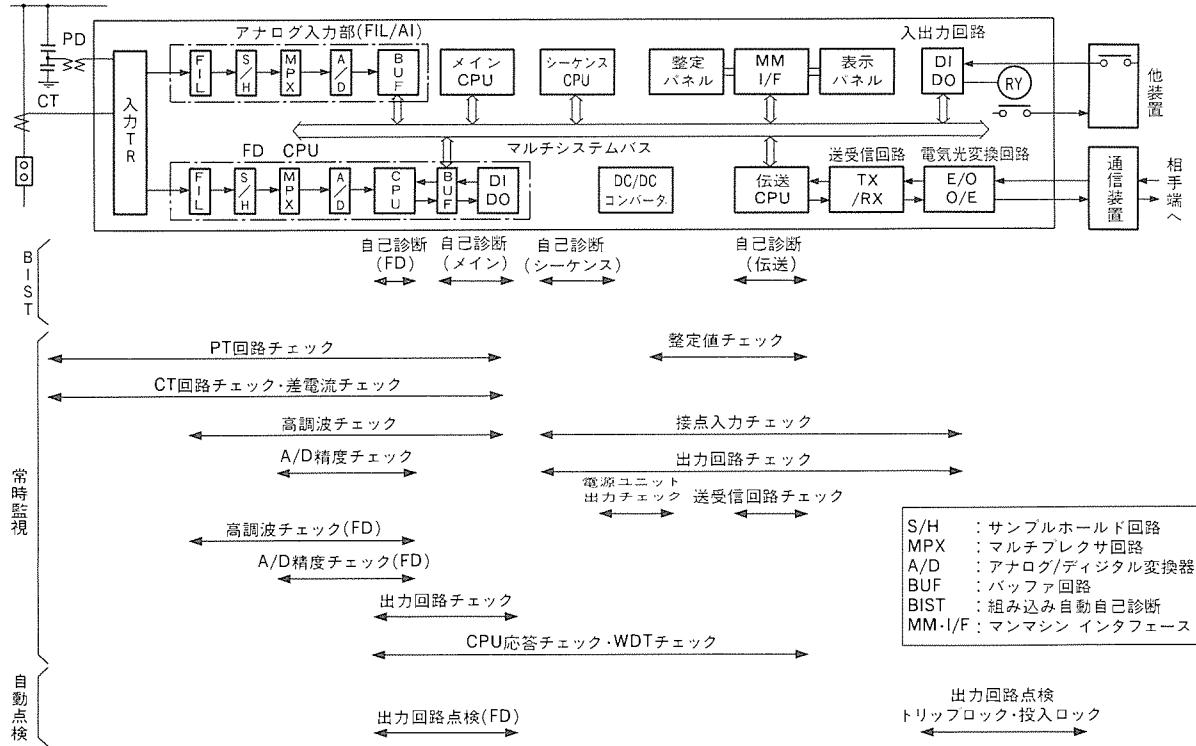


図 8. 自動監視の範囲

独立させる思想から、アナログ入力からCPU、ディジタル入出力(DI/DO)までを一体化して構成したものである。最終トリップ出力は、メインCPUとFDの両者が動作と判定したときのみ出力するよう構成している。

図7に上記の各ユニットから構成した32ビットCPU基本システムのハードウェア機構を示す。

6. 高信頼度化技術

6.1 ハードウェアの高信頼度化

32ビットCPUをはじめとし、周辺ハードウェアのVLSI化により大幅に部品点数を削減するとともに、信頼性に大きな影響を持つ接続部を大幅に削減している。さらに、設計に十分なディレーティングを持たせており、かつ素子のCMOS化による低消費電力化により、ハードウェアの固有信頼性をより一層高いものとしている。

RAS (Reliability, Availability, Serviceability) 機能としては、マイクロプロセッサ内部自己診断機能、CPUをはじめとする各ユニットに搭載した“組み込み自動自己診断機能”(BIST (Built in Self Test)機能)、装置レベルの自動点検、監視機構など、各レベルにおける自動監視機能を充実させ、システムの高信頼度化を図っている。

さらに、不具合時のセーブデータの内容充実と合わせ、不良部位はCPU単位で明確化するようにしている。図8に自動監視の範囲と項目を示す。

6.2 ソフトウェアの高信頼度化

(1) VISMATによる高信頼度化

従来、専門的知識を必要とする計算機用語で作成されていたソフトウェアを、容易に理解できる図面(图形=絵)という形態でソフトウェアを表現し、生産・試験する《VISMAT》で、ソフトウェアをビジュアル化し、ソフトウェアの不良検出・高信頼度化を図って

いる。また、図面(图形=絵)そのものがソフトウェアであり、図面と実際に動作するソフトウェアの完全一致性を保証でき、図面の正しさがソフトウェアの正しさを証明している。

(2) 分散構成による高信頼度化

ソフトウェアの固定化可能な部分とシステムごとに変化する部分を分離するなど、機能単位でソフトウェアをハードウェアで明確に分割し構成することにより、ソフトウェアを適切な規模にでき、高品質なソフトウェアの標準化を行い、高信頼度化している。

(3) CPUアーキテクチャによる高信頼度化

CPUは、各プログラムごとに使用するメモリ領域の正当性をハードウェア的に常時監視するプロテクト機構を搭載している。この機構により、不正な処理を確実に検出し、不正動作を防止している。

7. むすび

電力系統保護・制御システムは、電力供給の社会的使命の増大と情報化社会の進展に伴い、電力品質と供給安定性の向上のために、ますます重要なものとなっている。同時に、より経済性を高めるため、自動化による設備運用の効率化や投資寿命の確保も求められている。

これら要求にこたえるものとして、32ビットマイクロプロセッサによる分散マルチCPU基本システムを開発し、ここに紹介した。今後、通信技術の応用拡大により、処理の分散化が進み、このシステムの有用性がますます高まるものと考えられる。

参考文献

- (1) 辻倉ほか：新形32ビットディジタルリレーシステムの開発、平成元年度電気学会全国大会、No.1332
- (2) 辻倉ほか：ディジタルリレー ビジュアルソフトウェア生産・検証システム VISMAT、平成元年度電気学会全国大会、No.1333

見えるソフトウェア《VISMAT》

辻倉洋右* 岡田上枝*
大垣健二* 秋本吉則*
金子精二*

1. まえがき

新開発32ビットディジタル保護・制御装置《MULTIFLEX-32シリーズ》は、高性能化・高信頼度化に加えて、使いやすさ、分かりやすさ、システムの拡張性・柔軟性を特長としている。本稿では、ソフトウェアの分かりやすさと、信頼性向上を目的として開発し、保護・制御装置に適用した「見えるソフトウェア《VISMAT》(Visual Software Make and Test System)」について紹介する。

2. 《VISMAT》開発の背景

ソフトウェアで実現している機能の表現は、従来、計算機用言語で記述されていた。このため、ソフトウェア機能の全内容を確認することは、計算機用言語を熟知していない限り事実上困難であった。また、ソフトウェア動作の分析とソフトウェアの改良には、計算機の専門知識と技術が必要であった。

このブラックボックス的なソフトウェアの世界をビジュアル化し、ソフトウェアの内容及び動作がだれでも一目りょう然に分かるホワイトボックスにし、ソフトウェアの信頼度向上を図ることを目的として、開発されたのが《VISMAT》である。ビジュアル化の概念を図1に示す。

この目的を実現するために、《VISMAT》を保護・制御装置に適用するにあたり、展開接続図で使用している表現形式を、ソフトウェア言語として採用した。そして、ソフトウェア作成段階から検証段階までの全ソフトウェア環境を、展開接続図表現で統一した。特に、ソフトウェアの動作解析も、展開接続図又はソフトウェアオシログラフなど、容易に分かる表現で行える設計とした。

《VISMAT》の特長は、次のとおりである。

- (1) 展開接続図がソフトウェアである。
- (2) CPUが実行するソフトウェアを、展開接続図表現でCRT画面上で見ることができ(逆変換展開接続図)、ソフトウェアの内容が分かりやすい。
- (3) CPUが実行中のソフトウェアの動作を、CRTに表示された展開接続図上で、カラー表示等により分かりやすく見ることができる。
- (4) ソフトウェアの特定タイミングでの動作結果を、CRTに表示された展開接続図上のカラー表示信号線で見ることができ、動作解析が容易である。
- (5) ソフトウェア動作の時間変化を、オシログラフ形式で見ることができ、ソフトウェア演算の流れが分かりやすい。
- (6) 展開接続図に対するマウス操作を基本とし、操作が簡単である。

3. 《VISMAT》の概要

マルチCPU方式を採用している32ビットディジタル保護・制御装置においては、シーケンス演算を実行するCPU(シーケンスCPU)のソフトウェア作成・検証システムとして、《VISMAT》を適用した。

リレー演算を実行するCPU(メインCPU)に搭載されるソフトウェアは、検証・確認済みのリレーアルゴリズムを実現するソフトウェアとして固定化されるため、システムごとに異なるソフトウェアの主体は、シーケンス機能の部分となる。シーケンスには、いろいろな情報が集中しているため、ソフトウェアの動作状況がよく分かる《VISMAT》を適用することは、システム検証において大きな効果がある。

以下、《VISMAT》の概要について説明する。《VISMAT》は、二つの機能を持っている。

(1) ソフトウェア作成機能

展開接続図を描画することにより、ソフトウェアを自動作成する。

(2) ソフトウェア検証機能

逆変換展開接続図、ソフトウェアオシロ等を使用して、ソフトウェアの動作を検証する。

この二つの機能により、ソフトウェア生産・検証の高信頼度化と省力化が図られる。従来との工程比較を図2に示す。従来の保護・制御装置のソフトウェア生産・検証では、展開接続図に従ってソフトウェアの仕様書を作成し、この仕様書に基づいて計算機用言語を用いてコーディング・デバッグを行った後、総合試験を行っていた。《VISMAT》では、展開接続図そのものがソフトウェアであるため、この工程が非常に簡略化される。

この《VISMAT》を使用したソフトウェアの生産・検証のフローを図3に示す。まず、《VISMAT》ソフトウェア作成機能で、CRT上で展開接続図(ソフトウェア)を作成しチェックする。これをプリント出し、承認申請図として提出する。改訂が必要な場合は、展開接続図を変更する。確認の済んだ展開接続図を保護・制御装置のメモリに搭載し、これを実際に動作させる。検証は、《VISMAT》検証機能の逆変換機能を使用して、図面どおりのソフトウェアが実装

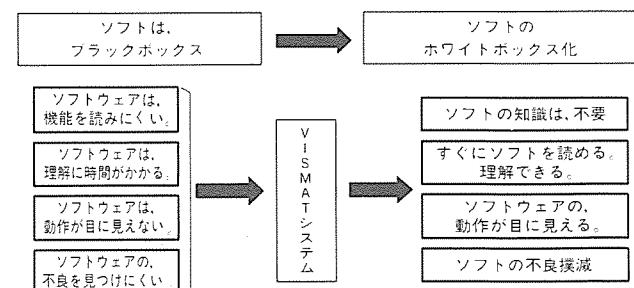
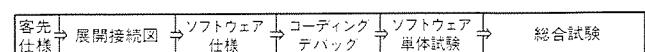


図1. 《VISMAT》によるソフトウェアのビジュアル化



(a) 従来のソフトウェア工程例



(b) 《VISMAT》によるソフトウェア工程例

図2. ソフトウェアの工程比較例

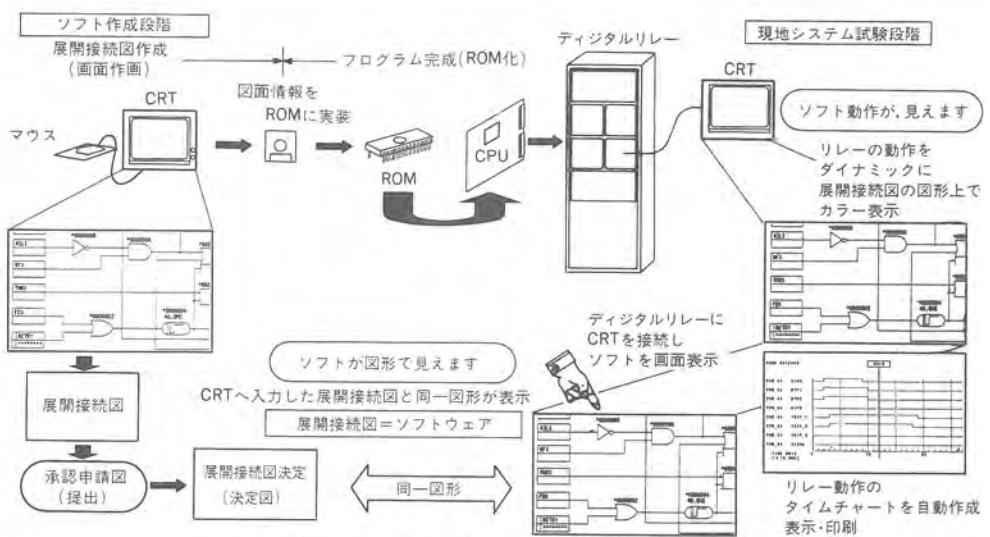


図3. 《VISMAT》によるソフトウェア生産・検証フロー

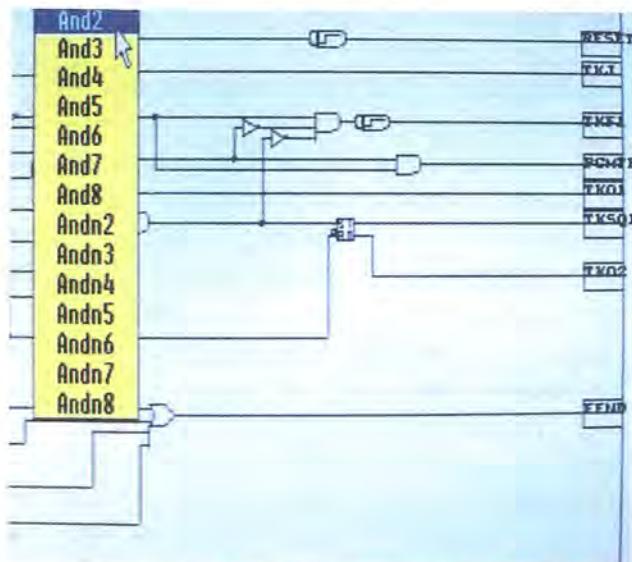


図4. 《VISMAT》による展開接続図作画の画面例

表1. 《VISMAT》のソフトウェア機能例

機能	内容
AND	2~8入力の論理積を演算する。
OR	2~8入力の論理和を演算する。
NAND	2~8入力の論理積を演算し、結果を反転して出力する。
NOR	2~8入力の論理和を演算し、結果を反転して出力する。
NOT	論理を反転する。
XOR	入力論理の不一致を検出する。
ON DELAY TIMER	動作遅延タイマ
OFF DELAY TIMER	復帰遅延タイマ
ONE SHOT TIMER	入力論理が0から1に変化後、一定期間論理1を出力する。
FLIP FLOP	論理を記憶する。

されていることを確認し、信号線のカラー表示、ソフトウェアオシロ等により、ソフトウェア動作が保護・制御装置として正しいことを総合的に確認する。

以下に《VISMAT》の各機能について説明する。

4. 《VISMAT》ソフトウェア作成機能

《VISMAT》ソフトウェア作成機能を使用すると、展開接続図をCRT画面上に描くのみでソフトウェアが完成するため、計算機用言語を使用する必要が全くなく、その結果、ミスが少なく信頼性の高

いソフトウェアを作ることができる。

4.1 ソフトウェアの作成

《VISMAT》によるソフトウェアの作成は、展開接続図をCRT画面上に描くことにより行う。

操作は、まずメニューから展開接続図で使用する機能(シンボル)をマウスで選択し、マウスで指定したCRT上の任意の位置に配置する。このシンボルの入出力を線で結ぶことにより、図面をなわちソフトウェアが完成する。展開接続図作画の画面例を図4に示す。図面描画に関しては、コピー機能など効率良く図面を作成するための機能を種々用意している。作成する展開接続図(ソフトウェア)の機能としては、表1に示すように保護・制御装置で使用するのに必要なシーケンス機能を備えている。

4.2 図面チェック機能

図面チェック機能は、描いた展開接続図をチェックする機能である。例えば、信号の結線に誤りがあると信号の流れが正しくなくなり、ソフトウェアは機能しない。チェックの結果、結線が正しくない箇所には、展開接続図上にマークがつく。図面チェック結果例を図5に示す。この図の例は、シンボルの入力への結線がシンボル入力まで届いておらず、結線が開放状態となっているためにエラーになった例である。この部分を修正することにより、正しいソフトウェアを得る。保護・制御装置に実装する展開接続図は、必ずこのチェックの段階を通過したものである。

従来は、計算機用言語(ソースコード)の誤りのチェック、及び計算機用言語上ではエラーと判定できない誤り(例えば、信号を展開接続図とは異なる機能と接続している等)のチェックが必要であった。《VISMAT》では、図面チェック機能により、図面どおりに動作するソフトウェアを得ることができる。

4.3 チェック済み図面の流用

過去に作成・使用した試験済み展開接続図の図面を、ページのコピーの概念で流用できる。これにより、更にソフトウェアの信頼性の向上が図れる。

4.4 図面のプリント

チェック済みの展開接続図をプリントすると、結線等に誤りの無い図面を紙上に得ることができる。プリント出力例を図6に示す。

4.5 図面の保護・制御装置への実装

4.2節のチェックにパスした展開接続図を保護・制御装置のメモリ

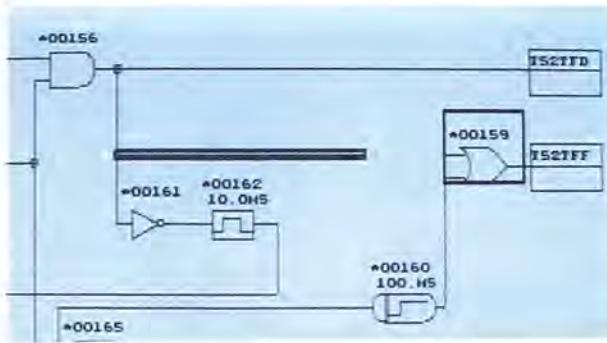


図5. 《VISMAT》による図面チェック結果例

て開発されたものであり、《VISMAT》の中心となる機能である。最大の特長は、操作・確認の作業を、すべて《VISMAT》ソフトウェア作成機能で作成した展開接続図を通して行うことである。これにより、検証の分かりやすさと同時に、展開接続図の良否を直接検証することができるため、検証結果の信頼性が極めて高くなる。検証機能は、リアルタイム検証を基本としており、実際にソフトウェアを動作させながら検証ができる。

操作は、マルチウインドウ形式を採用しており、親画面及び子画面に対してマウス操作を行う。各画面は、操作の分かりやすさを十分配慮し、またカラー表示を有効活用しており、視覚的にも分かり

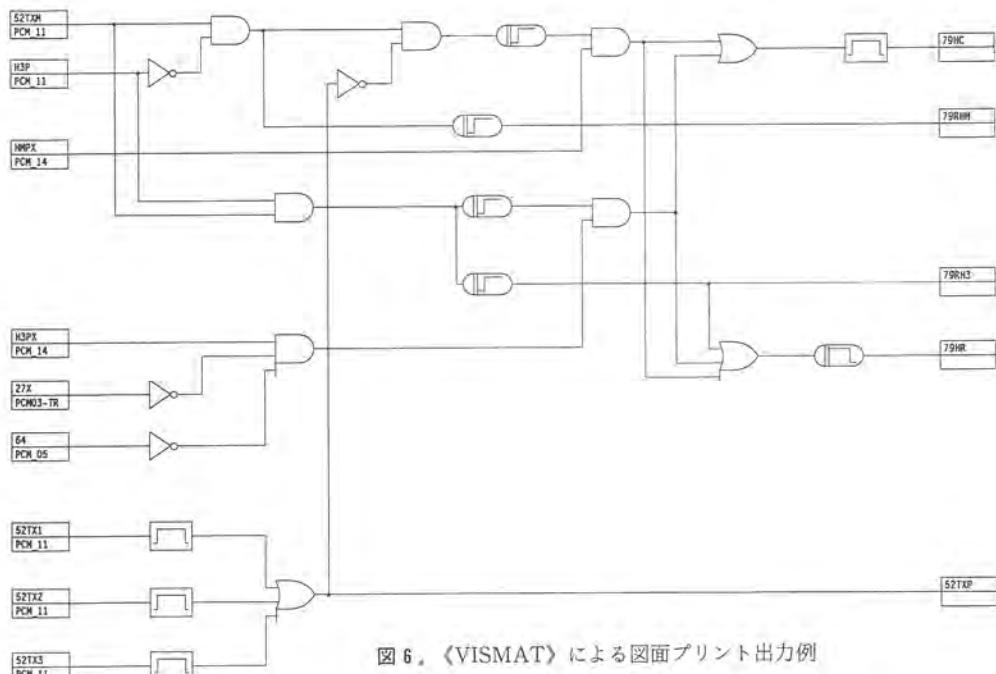


図6. 〈ViSMAT〉による図面プリント出力例

すい設計としている。

CRT上の描画スピードの高速性も重視しており、標準的な展開接続図1ページ当たりの描画時間は、約1秒である。

5.1 検証システム構成

検証機能は図7に示すように、保護・制御装置とCRT、マウスを通信ケーブルにて接続することにより作動する。検証機能の制御は、マウス操作による検証機能作動指示が、通信ケーブルを通して保護・制御装置に送られ、その指示に基づいた結果をCRTに表示することにより行う。

5.2 展開接続図の逆変換表示機能

保護・制御装置のメモリ上でCPUが実行に使用する展開接続図データ (CPU側から見れば、実行コード) から展開接続図を再生し、CRT上に表示する機能である。CPUが実行に使用する展開接続図は、《VISMAT》ソフトウェア作成機能で作成した図面と同一である。このため、展開接続図作成時と全く同じ図が再生され、ソフトウェアとして所望の機能がメモリに実装されていることが、容易に確認できる。特に、検証中に改良した内容が確実に反映されていることを、一目りょう然にチェックできる。

この再生した展開接続図の信号線上に、CPUが展開接続図を実際に演算した結果（論理データ）を色で表示する。表2に使用する色の例を示す。また、図8は実際の表示例である。この方式により、ソフトウェアの演算結果を展開接続図と結びついた形で確認することができるため、CPUの演算の確認が非常に分かりやすくなる。

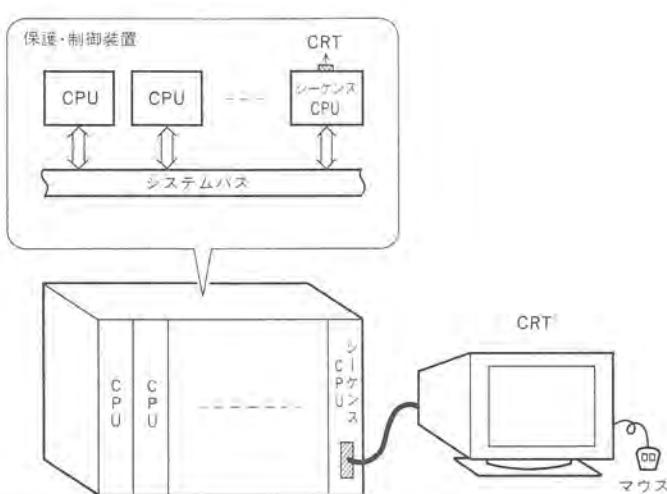


図7. 《ViSMAT》ソフトウェア検証機能のシステム構成例

に搭載すると、CPUは図面どおりの演算を実行する。演算を実行している様子は、《VISMAT》検証機能で見ることができる。

5. 《ViSMAT》ソフトウェア検証機能

《VISMAT》ソフトウェア検証機能は、保護・制御装置上のソフトウェアの内容、ソフトウェアの動作が分かりやすいことを目的とし、

表2. 信号線のカラー表示例

論理1	ピンク
論理0	グリーン
強制動作	レッド
強制復帰	ブルー

従来の計算機用言語の検証においては、展開接続図の機能と演算結果の対応が瞬時に分かりにくく、かつ大量の演算結果を同時に分かりやすく表示することは、非常に困難であった。《VISMAT》は、この点を大きく改良したものである。

5.3 強制動作・強制復帰機能

展開接続図上の任意の信号線に対して、強制動作・強制復帰の操作を行う機能である。これを活用して、外部インターフェースの確認、入力の模擬設定などが行える。操作は、CRT上に表示されている展開接続図を通して行うため従来のように該当信号のアドレスを調べて操作する必要がなく、操作が容易かつ正確である。

5.4 ソフトウェア実行結果の解析機能

系統事故応動時など、トリガ条件が成立したタイミングでのソフトウェア演算結果の解析と、ソフトウェア演算の時間変化の解析などをサポートする。

(1) トリガ条件成立時のソフトウェア演算結果の解析

トリガ条件が成立した場合のソフトウェア演算結果を、逆変換展開接続図上で、信号線の色を用いて解析する機能である。例えば、色表示されている信号の論理を追跡することにより、原因となる信号線のルートを特定するのに有効である。

条件設定、原因追跡とも展開接続図上で行えるため、従来のように該当信号のデータアドレスを調べるなどの作業は不要となり、操作・分析が容易かつ正確である。

(2) ソフトウェア演算の時間変化の解析

展開接続図上の任意の信号線のソフトウェアオシロ（タイムチャート）を時間軸上に作成する機能である。図9にオシロ表示例を示す。トリガ条件の設定により、所望のタイミングでのソフトウェア演算の流れをオシロ形式で表示して解析することができるので、例えばタイマ動作の時間協調分析等に効果を發揮する。

従来は、ソフトウェアの信号線をオシログラフに取るために、特別にハードウェア（D/O）端子に信号を出力したり、計算機用言語の検証ツール（デバッガ又はモニタ）を用いて行っていた。《VISMAT》では、CRT上に表示されている展開接続図に対する操作により、今までなかなかデータ採取ができないソフトウェア信号のオシログラフを自由に取ることができる。

5.5 ソフトウェアの改良

以上説明した《VISMAT》ソフトウェア検証機能を用いての検証の結果、改良すべき点が発見された場合は、《VISMAT》ソフトウェア作成機能を用いて展開接続図を改訂する。検証機能では、逆変換展開接続図により図面の改良すべき箇所を知ることができるために、展開接続図の改訂は、容易かつ正確に実施できる。

6. 《VISMAT》のソフトウェア管理

ソフトウェアでは、仕様書（ドキュメント）の内容と作成したソフトウェアの内容とが、絶えず一致するように管理することが重要である。

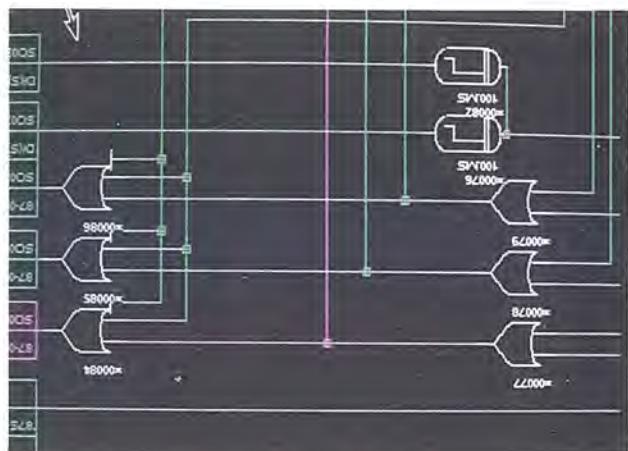


図8. 《VISMAT》展開接続図の逆変換表示例

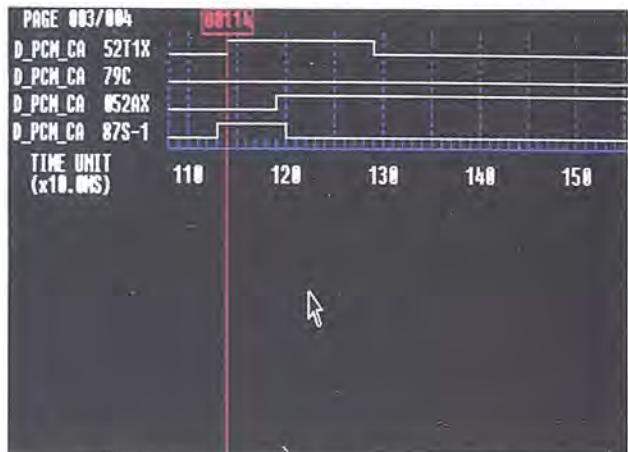


図9. 《VISMAT》ソフトウェアオシロの表示例

《VISMAT》では、以上説明したように、展開接続図として作成した図面をそのまま保護・制御装置のメモリに搭載し、CPUがこれを実行する仕組みを採用している。すなわち、保護・制御装置のシステム仕様書である展開接続図から保護・制御装置上のメモリまで、一元化されたデータでソフトウェアを管理することができる。

7. むすび

以上のように《VISMAT》は、ソフトウェアの内容・動作がよく見え、よく分かることを基本とし、ソフトウェアの作成段階から検証段階までの全領域を網羅するシステムである。分かりやすさのポイントは、ソフトウェアが人間が考えやすい表現で見えることであり、このシステムでは、保護・制御装置で通常用いる展開接続図の表現を採用した。

また、ソフトウェア作成段階から、保護・制御装置上のメモリまでのデータを一元化したこと、保護・制御装置のメモリから描いたままの展開接続図が再生できることは、今までにない試みであり、《VISMAT》の大きな特長である。

ここで紹介した《VISMAT》は、電力系統関係のいろいろな分野で応用・活用できるとともに、計算機を使用する各方面的システムにも活用できると考えている。

参考文献

- 1) 辻倉ほか：新形32ビット ディジタルリレーシステムの開発、平成元年度電気学会全国大会No.1332
- 2) 辻倉ほか：ディジタルリレービジュアルソフトウェア生産・検証システムVISMAT、平成元年度電気学会全国大会No.1333

最近の系統安定化システム

野口秀夫* 長沢 宏*
合田忠弘* 押田秀治*
中村正則*

1. まえがき

電力系統の安定化対策は、PSS (Power System Stabilizer) に代表される安定化機器によるものと事故波及防止装置、いわゆる系統安定化システムによるものとに大別される。前者は、ダンピングの向上など系統の体質強化を目的とし、制御によって系統構成が変化しないことから内科的な対策といえる。後者は、短絡、地絡等の系統事故が発電機脱調や周波数異常など二次的なじょう(擾)乱に拡大・波及するのを未然に防止するもので、電源制限、負荷遮断等の安定化制御によって系統構成が変化することから外科的な対策といえる。

内科的処置で治癒しない場合は、外科的手段に頼るのと同じように、安定化機器によって波及防止が困難な事故に対しては、安定化システムによる緊急時制御が実施される。近年の電力需要増大や立地難に伴う電源の集中・大容量化、基幹送電線の長距離化等に起因して、系統事故時に安定化システムが必要となるケースが増加する方向にある。また、電気エネルギー依存型の社会傾向が強まるに従い、その供給信頼度に対してますます高いものが要求されてきている。これらを背景として、最近ではより高度な機能を持った安定化システムが実用化されている。それらに共通する特徴は、系統からのオンラインデータを積極的に利用することにより、様々な条件変化に適応して最適な安定化制御が実施できる点である⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

安定化システム自体、その目的によって幾つかに分類されるが、本稿ではその中でも特に重要な、

- (1) 同期面での安定度維持を目的とした“脱調未然防止システム”
 - (2) 周波数面での安定度維持を目的とした“需給バランス制御システム”

の二つについて、最近の傾向である適応型安定化制御実現のために導入した技術的手段を述べる。また、その具体的なシステム事例についても紹介する。

2. 脱調未然防止システムにおける

適応型安定化制御方式⁽¹⁾⁽²⁾

脱調未然防止システムは、従来ほとんどが事前演算方式で、オフラインのシミュレーション計算によって、想定事故パターンに応じた安定化制御量をあらかじめ決定していた。しかし、系統構成の大規模、複雑化及び多相再閉路の採用など保護方式の高度化によって、対象とする系統現象が多様化し、この方式では最適制御が難しい状況となっている。そこで、オンラインデータを利用して系統状態、事故条件に適応した最適な安定化制御が求められるようになってきた。ここでは、そのうち揚水発電機群と電源発電機の過渡安定度維持を目的に開発、実用化した安定化制御ロジックを例にとり、適応型制御実現のポイントとなる技術的手段について述べる。

2.1 対象とする不安定現象

図1に示すように夜間時においては、電源発電機群から揚水用動力が供給されるため、基幹送電線には大きな潮流が乗る。この重潮流

流送電線上で事故が発生すると、一時的に揚水機は減速、電源発電機は加速する。そして事故の厳しさによっては両者間の同期が維持できず、図2(a)のシミュレーション波形（発電機位相角）のように過渡的に脱調していく。

この不安定現象は、図2(b)に示すように揚水機の一部を早期に遮断することによって未然に防止できるので、その最適遮断量をオンラインで決定するロジックが構築できれば、適応型安定化制御が可能となる。そのためには、過渡安定度を定量的に予測する必要がある。

2.2 エネルギー法の適用

過渡安定度を事故クリア直後にエネルギー量の形で評価できるエネルギー法は、上記ロジックを構築する上で有力な技術的手段となる。すなわち、事故による発電機群（揚水機群を含む。）トータルの運動エネルギーを V_K 、それに対応した臨界エネルギーを V_c とするとき、

$$\left. \begin{array}{l} V_k < V_c \rightarrow \text{過渡的に安定} \\ V_k \geq V_c \rightarrow \text{過渡的に不安定} \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad (1)$$

なる簡単な式によって安定判別が行える。

ただし、エネルギー法を実シス
記問題点を解決する必要がある。

(1) エネルギー量の計算には原則的に全発電機の情報が必要なので、

- これを実際のシステムで実現しようとすると、装置構成が大規模・複雑化し、システムの運用、保守が困難となる。

(2) V_k のオンライン計算は比較的容易だが、 V_c をオンライン的に把握するのは非常に難しい。また、その値は潮流状態や事故条件の影響を大きく受けるので、事前設定値を用いたのでは適応制御が実現できない。

そこで、以下に示す手法の導入により上記問題点の解決を図り、最適安定化制御量決定ロジックを実用化した。

2.3 エネルギー法の個別・分散化（問題点(1)の解決策）

対象とする現象が基本的には、減速グループ（揚水発電機群）と加速グループ（電源発電機群）の2機系的な現象である点に着目し、図3に示すモデルに対してエネルギー法を適用する。図において代表電源とは、加速グループの中で特に容量の大きな発電機を選んだものである。また、揚水機iは、ある揚水発電所で運転中のユニットを並列インピーダンス法で1台に等価集約したものである。この2機系モデルについて、位相角中心 δ_{0i} を、

と定義し、 δ_{01} に対する同期平衡の立場でエネルギー関数を導くと、個別運動エネルギー V_{ki} と個別臨界エネルギー V_{ci} は図 4 のように与えられる。代表電源と各揚水発電所のペアがそれぞれ独立して図 3 のモデルで表現されると仮定すれば、エネルギー量の計算は図 4 から分かるように当該ペアを構成する発電機（揚水機を含む。）の情報だけで行える。したがって、例えば各揚水発電所に演算制御装置、代表電源に末端装置を設置した分散型のシステム構成が可能となる。

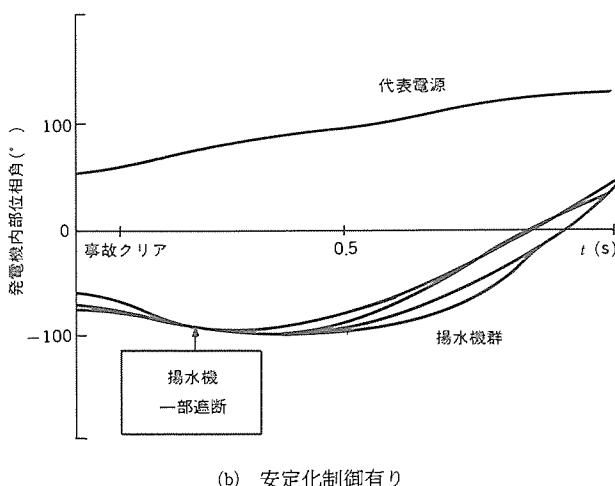
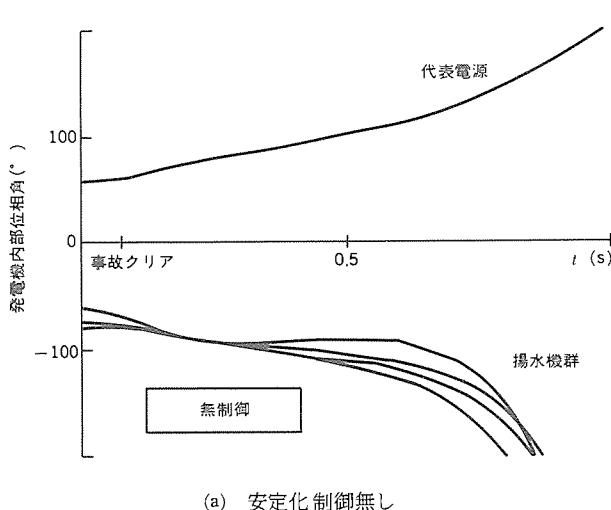
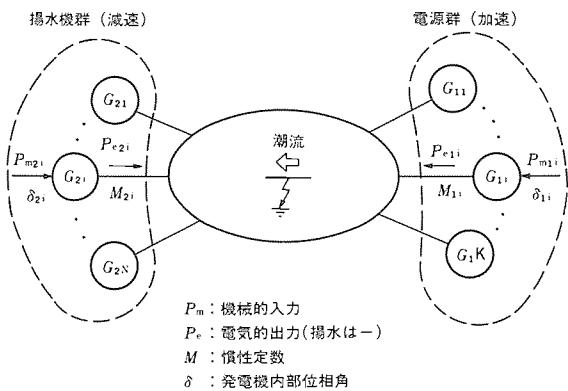


図2. 重大事故を想定したシミュレーション波形

これは各ペアごとに見れば、一般的の対向型送電線保護リレーと同等な装置構成となっている。

なお、個別運動エネルギー V_{ki} については、

$$V_{ki} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_1 M_{2i}}{M_1 + M_{2i}} (\dot{\delta}_1 - \dot{\delta}_{2i})^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる。ここで、 M は事前のオンラインデータ、 $\dot{\delta}$ は事故発生直後から発電機の電気的出力（揚水機は電気的入力）を数値的に積分していくことによって求められる。したがって、 V_{ki} のオンライン算出は比較的容易に行える。

2.4 V_{ci} のオンライン算出手法の開発（問題点(2)の解決策）

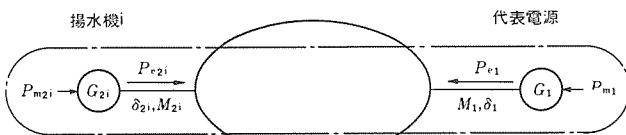
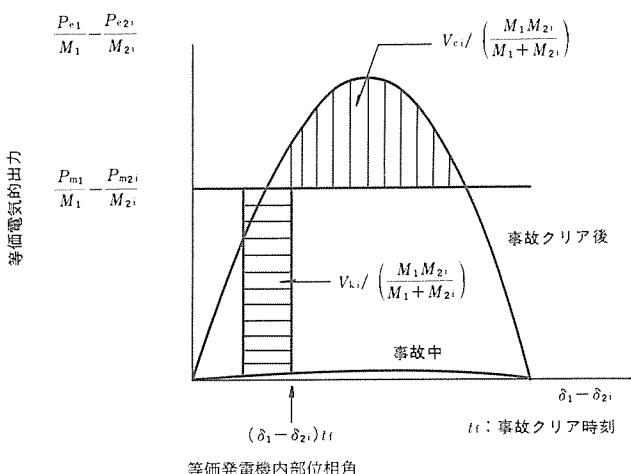


図3. エネルギー法の個別・分散化モデル



V_{ki} と異なり V_{ci} については、直接その値をオンライン決定するのが困難である。そこで、適応制御の一環であるモデルリファレンス法を採用して、 V_{ci} の値を間接的に決定する手法を開発した。

まず、オフラインのシミュレーション計算によって、全揚水発電所が不安定となる現象を模擬する。このシミュレーションデータを用いてリファレンスとなる臨界エネルギー $V_{ci(m)}$ および図5に示した時間対等価電気的出力平面（以下、 $P-t$ 平面と称する。）上の面積 $S_{l(m)}$ をそれぞれ求めておく。

図4に示したように V_{ci} は、実際には等価発電機内部相角對等価電気的出力平面（以下、 $P-\delta$ 平面と称する。）上の面積であるが、オンラインでこの特性カーブを決定するのは困難なので次の仮定を設ける。

$$(P-\delta \text{ 平面上の面積}) \propto (P-t \text{ 平面上の面積}) \quad \dots \dots \dots (4)$$

この仮定の下で、実現象に対応した臨界エネルギー $V_{ci(r)}$ を次式から算出する。

$$V_{ci(r)} = \{S_{l(r)} / S_{l(m)}\} \cdot V_{ci(m)} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $S_{l(r)}$ はオンラインデータを数値的に積分して求めた実際の現象に対する $P-t$ 平面上の面積である（図5参照）。

2.5 安定判別、安定化制御量決定原理

式(3)、式(5)から求めた V_{ki} 、 V_{ci} を用いて各ペアごとに、

$$\begin{array}{ll} V_{ki} < V_{ci} \rightarrow \text{代表電源と揚水発電所 } i \text{ は過渡的に安定} \\ V_{ki} \geq V_{ci} \rightarrow & \text{不安定} \end{array} \quad \dots \dots \dots (6)$$

と安定判別する。ここで不安定と判別されたペアにおいては、

$$V_{ki}' < V_{ci}' \quad \dots \dots \dots (7)$$

を満足する最も少ない揚水機遮断量を安定化制御量と決定する。式(7)で V_{ki}' 、 V_{ci}' は揚水機の一部遮断を想定して再計算した運動エネルギーと臨界エネルギーの値である。

以上述べてきた安定化制御量決定ロジックは、詳細シミュレーション及び模擬送電線による検証試験の結果、潮流状態や事故条件に

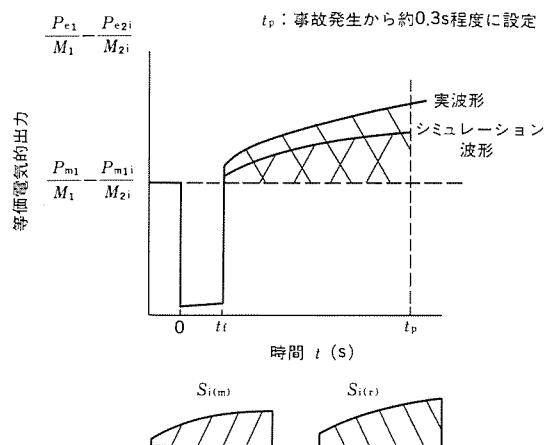
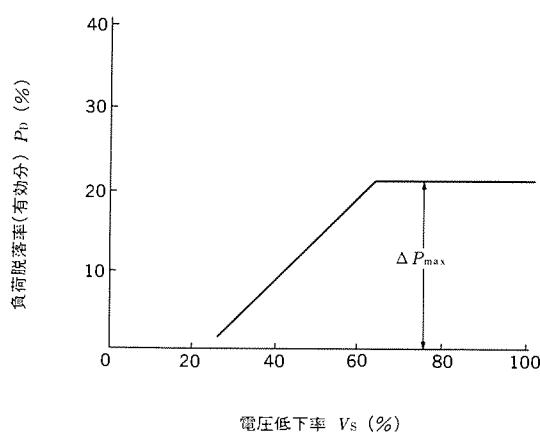
図 5. V_{ci} のオンライン算出手法

図 6. 事故中電圧低下に対する負荷脱落特性

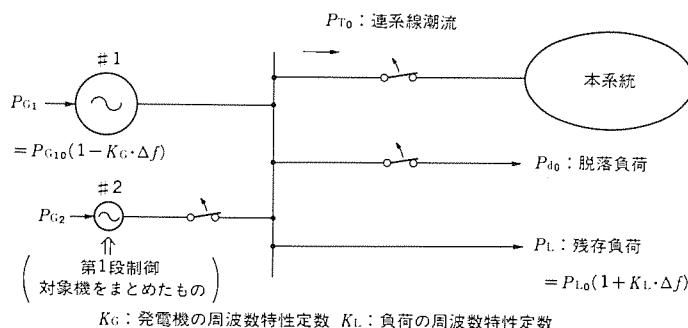


図 7. 周波数変動を利用した負荷脱落量推定手法の基本モデル

適応して妥当な制御量を算出することが確認できた。

3. 需給バランス制御システムにおける適応型安定化制御方式⁽³⁾⁽⁴⁾

需給バランス制御システムの目的は、電源脱落や連系線ルート断事故等に伴う需給アンバランスに起因した周波数異常現象を未然に防止することにある。したがって、その制御量は原則的に事故前の連系線潮流など需給アンバランス量に基づいて決定される。このため、脱調未然防止システムと比べて、系統安定度などの不確定要素を考慮する必要のない分制御量決定ロジックは簡単になる。

しかし、需給アンバランスが生じる一次的原因が系統事故の場合、事故中電圧低下による負荷脱落量が不確定要素として制御精度に影響を与えてくる。最近、コンピュータ等電圧変化に敏感な精密機器

が増えており、その結果事故中脱落する負荷量も増加の傾向にある。したがって、これを考慮しないと最適な需給バランス制御効果が得られにくい状況となってきた。

ここでは、適応型需給バランス制御実現に不可欠な事故中電圧低下による負荷脱落量のオンライン推定方式について述べる。

3.1 事故中電圧を利用した方式

事故中の電圧低下による負荷脱落は、負荷の種類、事故条件、さらに地域・時間帯等いろいろな要因の影響を受けるため、従来その特性の把握は甚だ困難とされてきた。しかし、最近の実測を含めた研究の成果として、かなりその特性が明らかなものとなってきている⁽⁴⁾。

図 6 は、実測結果に基づいて近似した電圧低下率対負荷脱落率の特性である。この特性は、ややばらつきがあるものの、対象とする系統によってほぼ一義的に決まり、事故種別による影響もあまり受けない。したがって、この特性と事故中電圧のオンラインデータから、負荷脱落量を推定することが可能である。

この方式は、事故中のオンラインデータを使用するので、非常に速応性がある。したがって、その推定結果は、需給バランス制御システムの第1段制御量（電制又は負荷遮断量）に反映できる。

3.2 周波数変動を利用した方式

連系線ルート断による分離系統内の需給バランス制御を例にとる。対象となる系統を図 7 のようにモデル化すると、ルート断発生後の分離系統内の需給アンバランス率 R_u は次式によって与えられる。

$$R_u = (P_{\text{To}} + P_{\text{do}} - P_{\text{G20}}) / (W_o - P_{\text{G20}}) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 W_o は状変前の分離系統容量で次式から計算される。

$$W_o = P_{\text{G10}} + P_{\text{G20}} \quad \dots \dots \dots (9)$$

分離系統の周波数変動を解析すると、状変後ある時点 t の周波数偏差 $\Delta f(t)$ と式(8)の R_u とはほぼ線形の関係にあることが確認できる⁽⁴⁾。すなわち、次式が成立する。

$$R_u = K \cdot \Delta f(t) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ただし、

$$K: \text{定数}, \Delta f(t) = f(t) - f_0, f_0: \text{基準周波数}$$

定数 K は、系統によってほぼ一義的に決まる量である。また、式(8)右辺の P_{To} 、 P_{G20} 、 W_o はいずれも状変前のオンラインデータとして把握しておくことができる。したがって、 $\Delta f(t)$ のオンラインデータと式(8)、式(10)の関係から負荷脱落量 P_{do} を推定演算することができる。

この方式は、事故発生直後には系統周波数に事故中加速の影響が残るので適用は困難である。そのため、速応性は期待できないが、前述した事故中電圧を使う方式に比べて、かなり高い精度で脱落量を推定できる。したがって、その推定結果は、需給バランス制御システムの補正制御量（第1段制御の不足分を補う電制又は負荷遮断量）に反映させることにした。

以上述べてきた負荷脱落量推定方式の導入によって、負荷脱落量に応じた最適な需給バランス制御が実施できることを、各種検証試験から確認した。

4. システム事例

前章で述べた適応型安定化制御方式を適用した安定化システムの実用化例を以下に紹介する。

4.1 揚水安定化リレーシステム⁽¹⁾⁽²⁾

1 ペア分のシステム構成を図 8 に、揚水発電所 8 箇所分の演算制

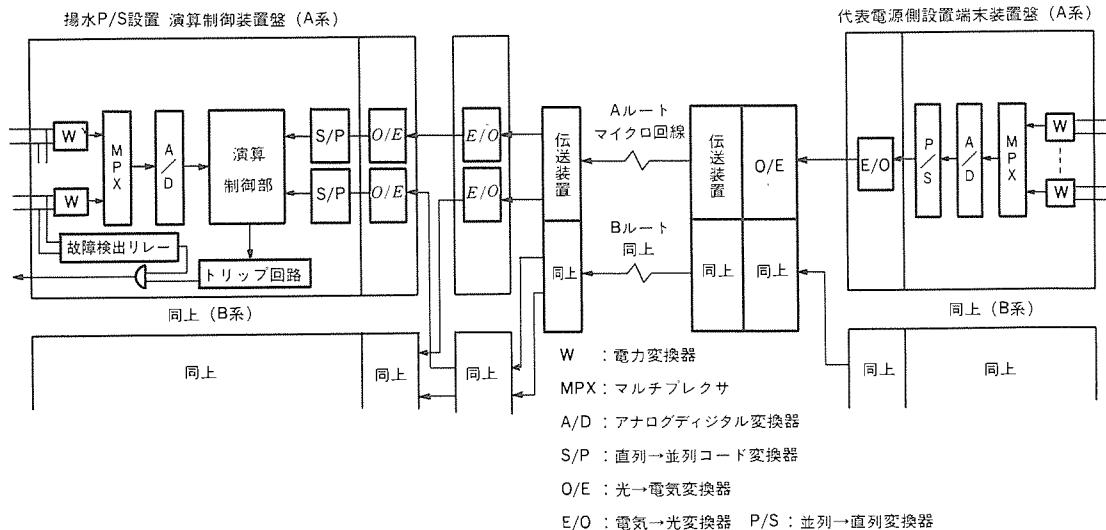


図8. 揚水安定化リレーシステム (1ペア分のシステム構成)

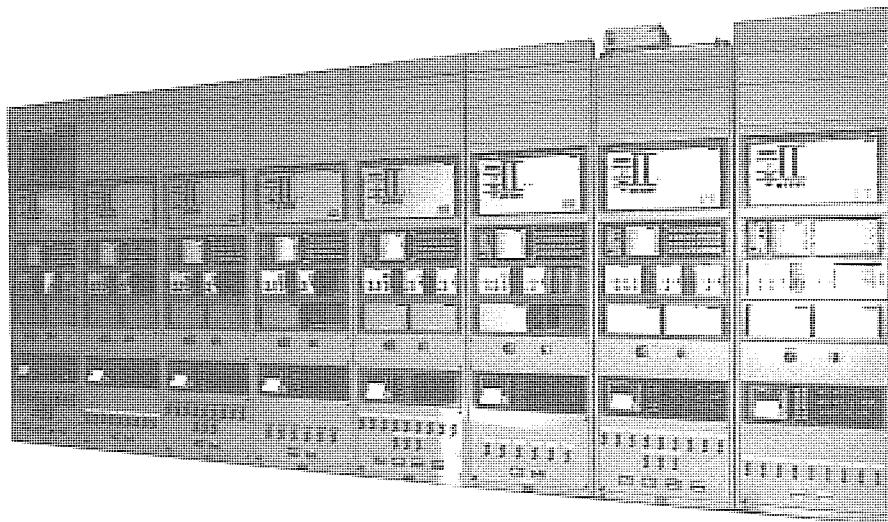


図9. 揚水安定化リレーシステム (8発電所分の装置外観)

御装置の盤構成を図9にそれぞれ示す。演算制御装置は、デジタルリレーを中心に構成され、代表電源端との間は54KbpsのPCM伝送回線で結ばれている。各揚水発電所のペアごとに完全2系列のシステム構成をとり、高い信頼度を確保している。

系統に事故が発生しシステムが起動すると、代表電源端からの電気的出力情報と自端の揚水機電気的入力情報を用いて、2章で述べたロジックに従って、各ペアごとに独立して安定判別、安定化制御量の決定が行われる（2系列中1系列については別のロジックが採用されている）。不安定と判別されたペアの揚水発電所では、算出制御量分の揚水機が遮断され安定化が図られる。

なお、このシステムでは、制御上の信頼度を確保するために、代表電源と揚水間の周波数差を利用した補正制御のロジックも備えている。

4.2 事故中の負荷脱落を考慮した新型SSC⁽⁴⁾

システム構成を図10に、盤構成を図11にそれぞれ示す。中央演算制御装置は、デジタルリレーを中心に構成され、各端末装置との間はCDT伝送回線で結ばれている。このCDTは、このシステム専用のものが使用されている。完全2系列のシステム構成で、特に演算制御装置は2CPU構成をとり、一つのCPUでは電圧情報を用いた周波数演算が行われ、他方のCPUでは最適制御量演算、制御対象の

選択等が行われる。

常時、中給計算機からは系統容量、その他端末装置からは発電情報、連系線潮流等がCDTを介して中央装置に入力されている。これら事前のオンライン情報と3章で述べた負荷脱落量推定方式をベースに最適制御量が決定され、連系線ルート断をキックとして制御対象発電機又は負荷に対して転送遮断が実施される。

なお、このシステムには大幅な需給アンバランスにも対応できるように緊急補正制御の機能も備えている。これは、周波数の大幅な上昇又は下降に対して、事前に設定しておいた量分の制御を瞬時に実施するものである。

5. むすび

過渡安定度、事故中負荷脱落量といった電力系統における不確定要素を、オンラインデータを積極的に活用することによって的確に把握し、条件変化に適応して最適な安定化制御を実施するための技術的手段について述べた。また、それらを適用した実用システムの例について紹介を行った。

最近の系統安定化システムには、この適応型制御の機能を持ったものが数多く見られるようになったが、今後電力系統の大規模・複雑化に伴い、この傾向はますます強まるものと考えられる。

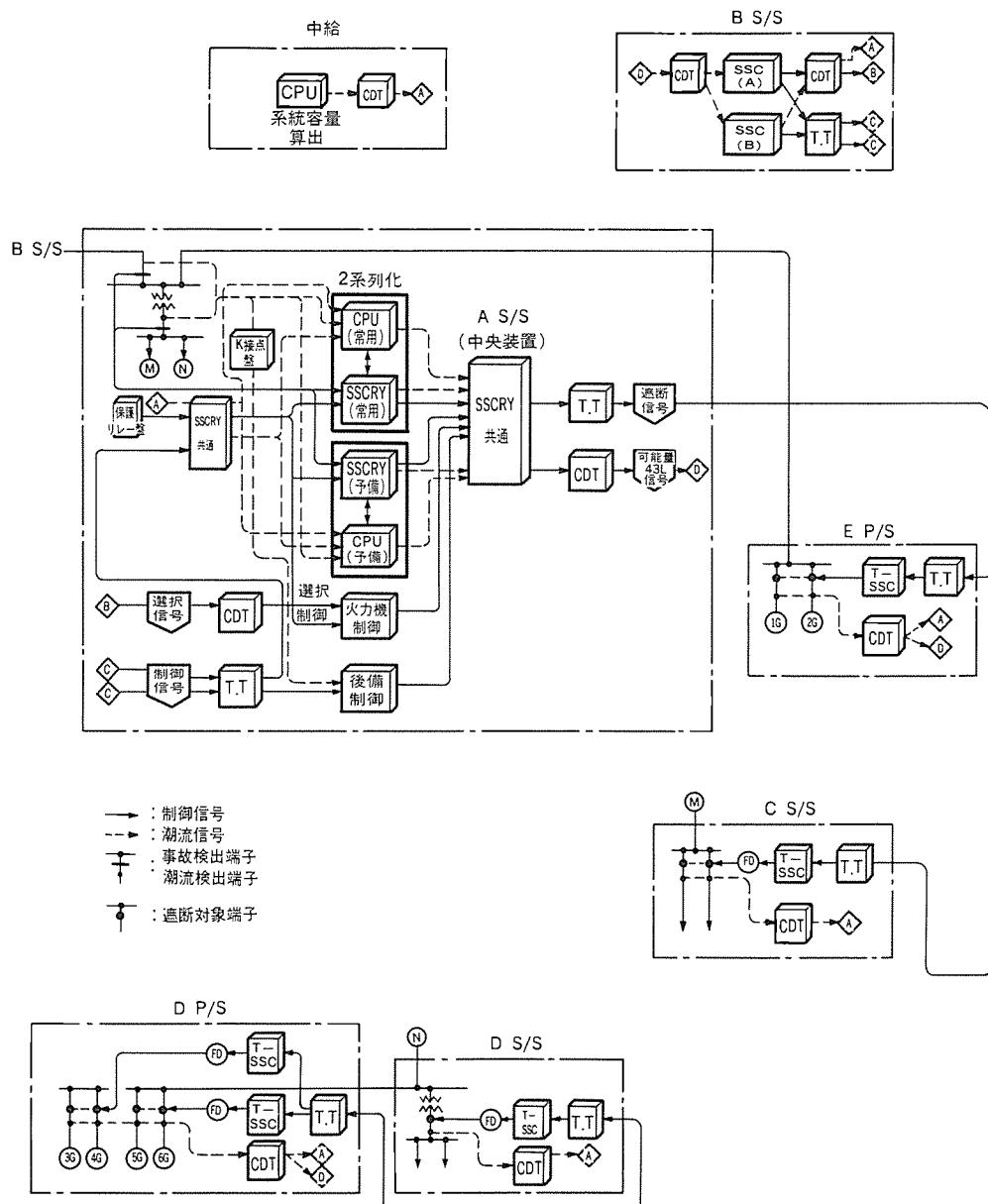


図10. 事故中の負荷脱落を考慮した新型SSC（システム構成）

最後に、これらのシステムの開発・実用化に当たり、多大なる御指導と御尽力をいただいた関係者の方々に深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 大浦ほか：基幹系統安定化装置の開発と実用化、昭和61年電気学会電力技術研究会資料、PE-86-111
- (2) 大浦ほか：適応型基幹系統安定化リレー装置（I, II）、昭和62年電気学会全国大会、No.1366, 1367
- (3) 小林、安藤：負荷脱落を考慮した系統安定化装置の開発、昭和60年電気学会全国大会、No.981
- (4) 福田ほか：事故中の負荷脱落を考慮した新型SSCの開発と実用化、昭和62年電気学会電力技術研究会資料、PE-87-152
- (5) M. Takahashi, et al.: Development of Predictive Failure Extension Protection Systems For Electric Power Systems Using Dynamic State, CIGRE 1988 Session, 34-06

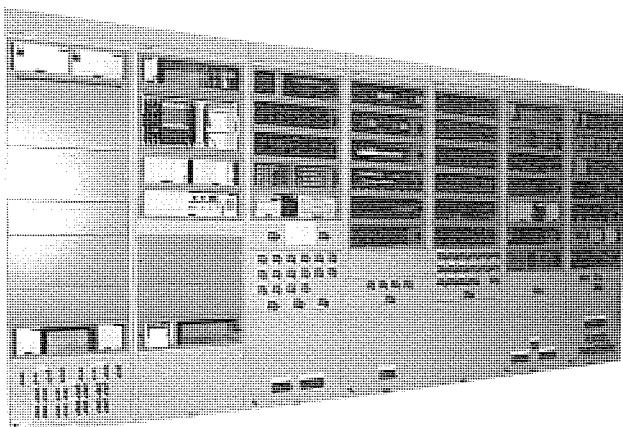


図11. 事故中の負荷脱落を考慮した新型SSC（装置外観）

脱調予測制御システム

福田朋悟* 成田利春**
熊野彰司* 中村正則**
小林篤* 金田秀明**

1. まえがき

近年、電力系統は電力需要増大に伴い巨大化、複雑化し、さらに、その電源は立地上の制約から集中、偏在化して系統安定度の低下が問題となっている。一方、社会的には電力の高信頼度供給に対する要求がますます高まり、広範囲、長時間停電の防止が電気事業の重大な使命となっている。

このような状況の下で、最近、国内外において新安定化システムの開発が進められている。これまでにも電源制限、制動抵抗の投入、タービン高速バルブ制御など装置の動作条件を想定した事前のシミュレーション計算結果を答として制御を行う、いわゆる事前演算制御方式の安定化装置を適用していたが、①保護リレーや遮断器、安定化装置の不動作、②短時間における連続的な系統事故、③変則系統を構成しているときの系統事故等は比較的稀頻度ではあるが、万一発生すれば大停電に発展する可能性があるため、これらの想定外条件下でも安定化対策を講ずることが必要となってきた。

昭和63年6月に運用を開始した中部電力㈱東部変電所及び中央給電指令所納めの脱調予測制御システムは、これら盲点に対しても安定化制御を可能とし、さらに電力動搖抑制機能も付加し、基幹系統の安定化対策を図ったもので、以下にシステムの概要、原理、特長、検証方法などについて紹介する(図1)。

2. システム概要

このシステムは過渡安定度対策として緊急制御を行う脱調予測制御装置と、定態安定度対策として緩慢制御を行う電力動搖抑制装置から構成され、総合的な安定度対策を行っている。その概要を表1に示す。緊急制御は系統事故時、発電機群のふるまいが一団となって加速する電源系統と安定な本系統とに区分される系統において、その加速状況に応じて高速に、最適量の電源制限を行うことにより、基幹系統の安定化を図るものである。一方、緩慢制御は、電圧、有効電力及び無効電力の実効値変動により動搖の発散傾向を捕え、発散時には、並列リアクトルの解放及び水力発電機の出力抑制を行うことにより、系統の安定化を図るものである。

3. 脱調予測制御方式の原理

3.1 緊急制御

系統事故時、一団となって加速される電源系統と安定な本系統とが形成される場合、この電源系統は等価一機で表現でき、さらにその発電機の内部相角が90°以内の動搖である場合、系統は安定と判定することができる。したがって、脱調に至るか否かの判定は、90°を基準として行い、その原理は脱調判別を起動する内部電圧位相角90°検出部と脱調判別、及び脱調時の最適電源制限量を算出する電制論理部から構成している。

(1) P-Q直交座標平面を用いた位相角90°検出

図2の等価一機系モデルにおいて、無限大母線と発電機内部位相

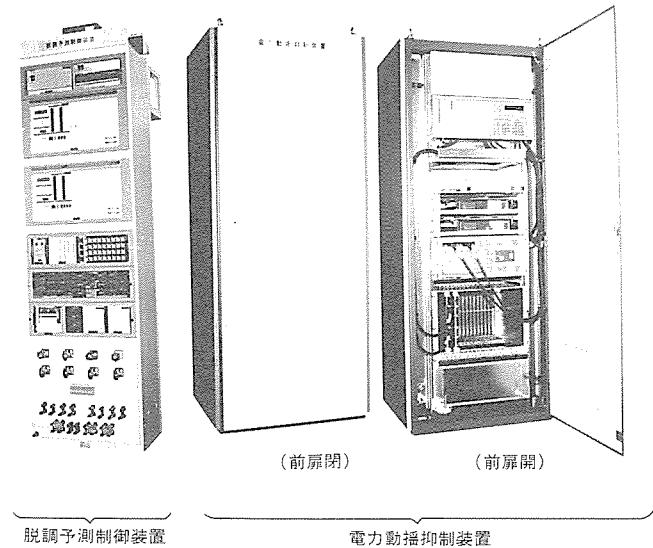


図1. 脱調予測制御システムにおける各装置の外観

表1. 脱調予測制御方式

方 式	緊 急 制 御	緩 慢 制 御
制御目的	系統事故発生後の脱調未然防止(過渡安定度対策)	微小擾乱等による動搖波及拡大防止(定態安定度対策)
検出条件	位相角差90°点における $Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}$ から算定した電制量算出値が正となつたとき	幹線における P, Q, V の動搖波形が発散傾向となつたとき
制御内容	●電制(電源制限) 電制量算出値から制御対象となる発電機の現在出力値に応じた最適となる組合せを遮断	●第一段制御 並列リアクトルの開放 ●第二段制御 水力発電機の出力抑制(第一段制御後更に発散時)
仕上がり時間	170ms以内	23s以内
装置名	脱調予測制御装置	電力動搖抑制装置

注 P : 有効電力, Q : 無効電力, V : 電圧
 P, Q は発電機背後に補正した電圧から算出したもの。

角 θ とA端の有効電力 P 、無効電力 Q の関係は、図3(a)で表される。

系統事故等で送電電力が急減するとGeAは加速するため、発電機内部相角は大きくなる。さらに、このときの P, Q 値を $P-Q$ 直交座標平面上で表すと、図3(b)のように円軌道上を移動することが分かる。このように位相角90°検出は、脱調時、発電機端の $P-Q$ 軌跡が円軌道を呈することを基本原理としている。

しかしながら、 P, Q を計測する箇所は、発電機等価一機とみなせる連系点の電気所であり、そこで P, Q 軌跡は円軌道とならないため、図4に示すように、発電機背後の電圧の大きさを一定とみなし、

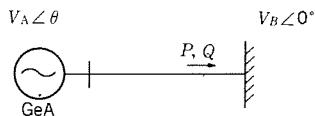


図2. 基本系統モデル

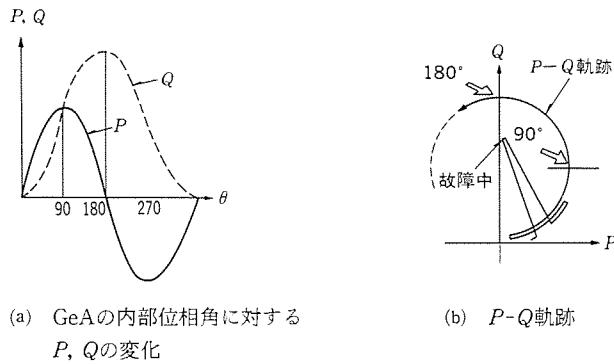


図3. 系統脱調時のP-Q軌跡

入力電圧、電流及び計測点から等価一機発電機までのインピーダンスに相当するラインアンダルから背後電圧を求め、この背後電圧と入力電流により算出した P, Q を用いることにより、装置設置箇所に関係なく脱調時の $P-Q$ 軌跡が真円となるようにしている。

次に、この円軌跡から位相角 90° 検出の方式について述べる。図5に示すように、一定時間間隔でサンプリングした V, I データから P, Q 座標値をプロットし、1サンプル前のデータと現在サンプルデータの間でできる線分を連結させることにより弧を作成する。図に示すように、弧が一定長 L_{SET} となった点でデータ連結をやめ、弦ベクトル \vec{D} を求める。系統脱調時の弦ベクトルの象限方向は、 $P-Q$ 軌跡が反時計回りの場合、図6に示すように第1象限→第2象限→第3象限→第4象限と遷移する。

以上のように、 90° 検出方式は、軌跡移動に伴う弦ベクトル \vec{D} の象限変化に着目し、加速脱調時のみを捕えるよう象限方向1から2の変化で行うようにしている。

象限方向の判定は、図7に示すように、XY座標を δ だけ時計回りに回転させた新規座標軸 $X'Y'$ で判定することにより、象限1から2への変化点を早め、 90° 検出を可能としている。 δ は 90° 点から一定長 L_{SET} までの弧に張る弦ベクトルの傾きで決定され、これを補正角と呼んでいる。

(2) 最適電制論理

$$\Delta T = k \cdot \frac{1}{Q} \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{n}{2\pi} \cdot \frac{\left(\frac{1}{Q} \cdot \frac{dQ}{dt}\right)^2}{1 - \frac{n \cdot td}{\pi} \cdot \frac{1}{Q} \cdot \frac{dQ}{dt}} \quad (\text{MW}) \quad \dots \dots (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{M}{\omega_0} \times \text{系統容量} = \frac{\sum MiPoi}{\omega_0} \times \sum Poi \\ = \frac{\sum MiPoi}{\omega_0} \quad (\text{MW} \cdot \text{s}^2/\text{rad}) \end{array} \right\}$$

$$\frac{M}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \Delta T, \quad \frac{M}{\omega_0} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \int \Delta T dt \quad \dots \dots (2)$$

M : 等価一機の慣性定数 (系統容量ベース) (s) = $\frac{\sum MiPoi}{\sum Poi}$
 ω_0 : 基本角周波数 $2\pi f_0 = 2\pi \times 60(\text{Hz}) = 377(\text{rad/s})$

Mi : 運転中の各発電機における自己容量ベースの慣性定数 (MW · s/MVA)

Poi : 運転中の各発電機における定格容量 (MVA)

n : オーバーシュート許容量

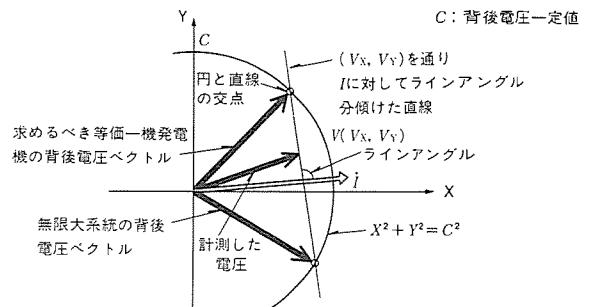


図4. 背後電圧の求め方

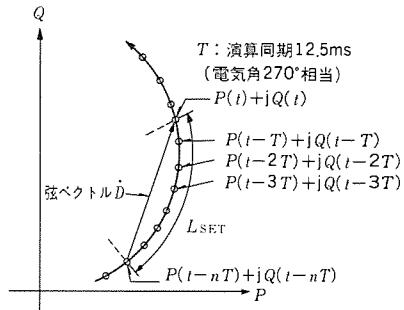


図5. 弦ベクトルの作成

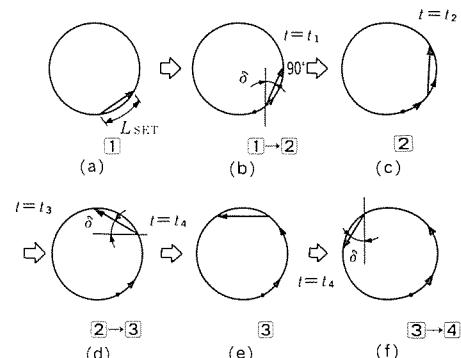
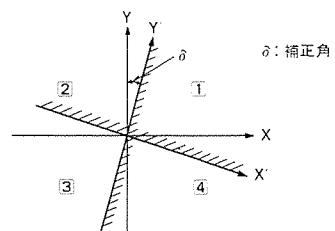


図6. P-Q軌跡の経時変化と弦ベクトルの象限値

図7. 新規座標軸 $X'Y'$ による弦ベクトルの象限方向判定

td : 電制遅延時間 (s)

ΔT : 必要電制量 (MW)

θ : 等価一機の内部電圧位相角 (rad)

最適な電制量を算定する算出式は式(1)で表される。この電制量の算定式は、発電機が一団となって加速する場合、この加速トルクの増加分を必要電制量として式(2)の動搖方程式から導出したものである。ここで、動搖方程式における等価一機とみなした発電機の内部位相角は、計測の容易な無効電力に置換している。また、装置実現上、不可避的に生ずる位相角 90° 検出遅れ、伝送遅延、及び遮断器の動作時間等の遅れを考慮したパラメータ td 等を組み入れ電制遅れ時間に対する遅延量増大分を含めた算定論理としている。

式(1)から、位相角 90° 検出された時点で計測される無効電力、無効電力の一次並びに二次変化率から必要電制量を算定し、この値が正

となった場合、電制対象となる発電機の現在出力値に応じて最適となる組合せを遮断し、系統の安定化を図るものである。

3.2 緩慢制御

系統において、微小じょう(擾)乱等による動搖が発生した場合、一般に、その動搖が発散傾向であれば、脱調に至ると判定でき、その基本原理となる動搖の発散検出は、動搖時に変動する電力、電圧の実効値を基に、図8に示すような方式で行っている。図は、動搖時の電力と電圧の実効値に対する時間的変化を示した動搖波形を示し、この動搖波形に対する発散条件として隣り合う3波の振幅が動搖とみなせる振幅値以上であり、かつ波形の上下包絡線の一方が発散傾向であることを条件としている。また、正動作への信頼度を向上させるため、脱調予測制御装置から伝送されるP、Q及びVデータの3波形を用いて発散検出を行い、図9に示すブロック図に基づき既設の中給自動給電システムに制御指令送出を行っている。

制御は、第1段として並列リクトルの解放を行い、制御後、更に動搖発散傾向となる場合を考慮して、水力発電機の出力を抑制する第2段制御とにより、電力動搖を抑制し、系統の安定化を図るものである。

4. システム構成

脱調予測制御システムは、図10に示すように脱調予測制御装置、電力動搖抑制装置及び既設の中給自動給電システムから成り、これらを9,600bpsの高速伝送回線で結合している。さらに、電源制限対象の発電所には端末装置が設置され、脱調予測制御装置との間を転送遮断装置で結んでいる。

脱調予測制御装置は、本系統と電源系統の連系線の電圧、電流の瞬時値を入力する入力トランスユニット、P、Qの演算、脱調検知及び端末装置への遮断指令送出等を行う演算ユニット、電力動搖抑制装置へのP、Q、Vデータ送信等を行う伝送装置、動搖時の電圧変化を捕えるフェイルセーフリレーなどから構成されている。

一方、電力動搖抑制装置は、脱調予測制御装置から伝送される12.5msごとのP、Q、Vデータを基に行う動搖発散検出及び中給自動給電への制御指令送出等を行う計算機“M50/A2200”，脱調予測制御装置へ中給受信データである電制量算定・遮断選択に必要なオンラインデータの送信等を行う通信制御装置、電力動搖発生時、P、Q、Vデータをセーブする固定ディスクなどから構成されている。

5. システムの特長

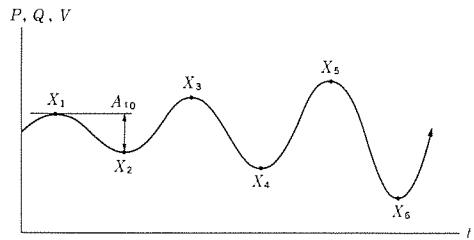
このシステムの特長は以下のとおりである。

5.1 脱調予測制御装置

(1) 脱調予測制御装置設置の電気所での電気角30°ごとにサンプリングされたV、Iを基に算出したP、Q値と、中給から5秒ごとに受信する主要発電機の慣性定数、並びに定格出力合計値のオンラインデータのみで全系脱調検出が可能で、発電機個別に設置して全系脱調を検出するものに比べシステム構成が簡易化でき、システムの信頼度向上が図れる。

(2) 位相角90°を通過する動搖の速さに応じてリアルタイムに最適となる電制量を算定する論理を適用したことにより、事前演算型安定化装置の動作制約条件とされる系統運用条件や系統事故条件とは無関係に系統の安定化が可能となる。

(3) P-Q座標平面を用いて、動搖過程における位相角差を認識する検出原理を構築したことにより、第1波脱調だけでなく第2波以降



$\alpha \leq A_{10}$ かつ $X_1 < X_3 < X_5$
又は、
 $\alpha \leq A_{10}$ かつ $X_2 > X_4 > X_6$

図8. 電力動搖発散検出方式

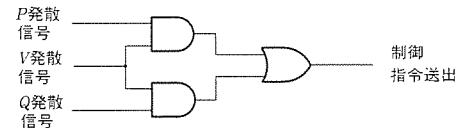


図9. 制御指令送出のブロック図

の脱調に対しても、同様の精度で脱調検出が可能である。

- (4) P-Q軌跡の同一象限方向の移動量に応じて、ベクトル長(L_{SET} 長)を自動的に補正することによりP-Q軌跡の円の大きさにかかわらず90°点でのベクトル方向が補正角一定となり、加速する電源系統の系統容量に無関係に同一精度での脱調判別を可能としている。
- (5) この原理の検出対象外となる発電機群内のローカル脱調時には、P-Q軌跡として小円ループが描かれ、この小円ループ内に張る弦ベクトル長と弦に対する弦の長さの比率(曲率)が低下する条件で脱調検出をロックし、ローカル脱調に対する不要応動を防止している。
- (6) 系統事故時のP-Q軌跡は、急激な変化により軌跡が移動し、方向不確定な象限ベクトルが作成されるため、事故発生時の有効電力の急激な落ち込みと無効電力の急激な増加傾向を捕え、また事故除去時には有効電力の回復を捕え、発生から除去される間を系統の事故中として脱調検出をロックし、系統事故中に対する不要応動を防止している。

5.2 電力動搖抑制装置

- (1) 電力動搖検出において、動搖波形に重複する微小負荷変動による短周期の脈動分(フリンジ)を動搖とみなさないよう、振動周期が基準周期より短い周期の振動は無視することとし、系統の動搖が2~3sであること、またフリンジの周期が100~200msオーダーであることで大波のみを正確に捕えることを可能にしている。
- (2) 系統事故中の変化は、動搖の振幅とみなさないよう、前述の脱調予測制御装置で行っている系統事故中のロック情報を、P、Q、Vデータとともに同一時系列で伝送することにより動搖発散検出をロックし、振幅検出に対する誤判定を防止している。
- (3) 電力動搖発散検出に用いる12.5msごとのP、Q、Vデータを系統事故発生時、並びに動搖発生時に自動的に固定ディスク装置へ保存し(最大11分間×100件分保存が可能)このシステムの動作解析を可能としている。

6. システムの検証

6.1 大規模デジタルシミュレーションの適用

系統の脱調現象を模擬するに当たり、大規模デジタルシミュレーションを適用した。今回、この大規模シミュレーションで得られる装置設置箇所の電圧、並びに電流の実効値、両者の位相差、及び周波数データをデジタルアナログ変換し、交流の電圧・電流波

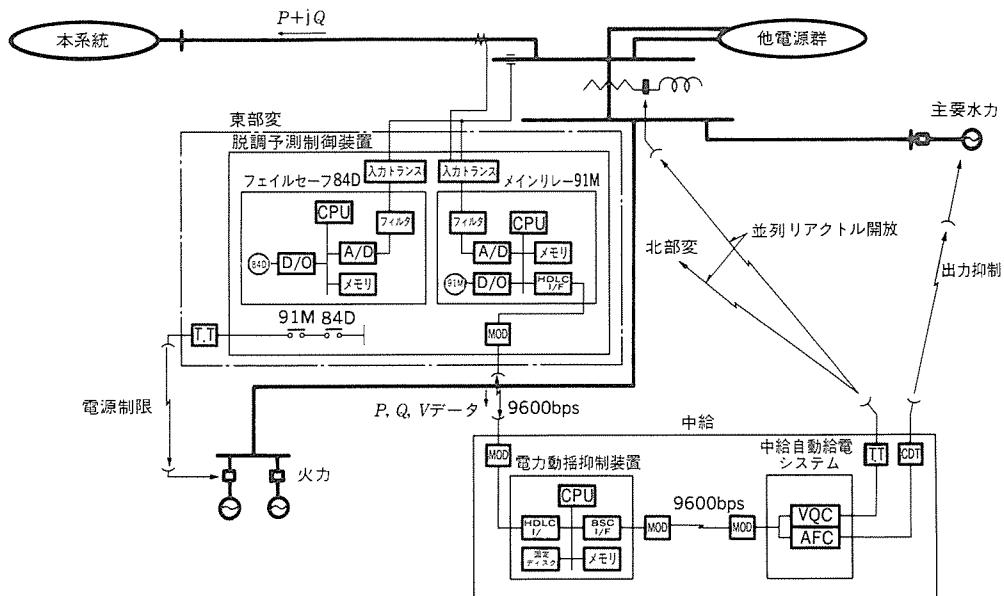


図10. 脱調予測制御システムの構成

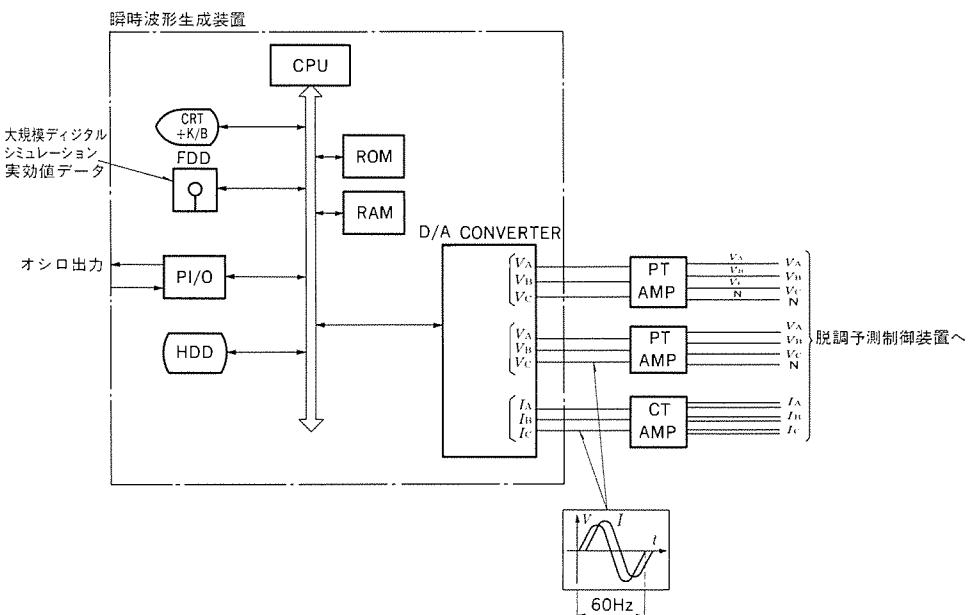


図11. 試験装置の構成

形で装置への実系統入力を模擬する試験装置を開発した。図11にこの試験装置の構成図を示す。

次に、システム動作試験は、この試験装置を用いて図12のフローに基づき行った。この試験方法の特長として以下のことがいえる。

- (1) フロッピーハードディスク化された実系統シミュレーションデータを用いて、パソコンで同一アルゴリズムをプログラム化することにより、評価基準である装置応動の解を試験実施前に容易に得ることができ、装置の精度検証に対する評価を可能としている。
- (2) 装置への実入力後、得られる動作時間・電制量に基づき、オンラインではあるが、実系統シミュレーションで発電機遮断等の制御条件を設定し、再計算を行うことにより実系統の安定か、不安定かの確認を可能としている。

以上により、安定化制御機能検証のポイントである装置の精度検証、及びアルゴリズム検証を実系統そのものの特性で確認することができた。

6.2 システム動作試験結果

次に、試験結果の一例を紹介する。表2は、連系線の重潮流断面で3φ4LG事故発生時、系統が脱調となった大規模ディジタルシミュレーションデータを入力したときの緊急制御の応動結果を示す。試験ケースは、この条件下で動作する既設電制装置の電制量が不足した場合を想定している。表2により、動作時間及び電制量算出値の測定値は、事前に求めた理論値と一致しており、良好な結果と判断できる。

次に、測定結果に基づき、動作時間(0.74s)において電制量算出値に対し、電制対象の発電機出力値が上回る最小の組合せとなる発電機((700MW+500MW) \geq 1,081MW)を遮断した場合の結果を表3に示す。表において電制不実施時は、P-Q軌跡が円軌跡を呈し、脱調しているのに対し、電制実施時にはP-Q軌跡が安定領域で移動し、P-t曲線も次第に収束傾向となり、系統は安定化されていることが分かる。

その他、CB不動作、重複事故、変則系統時の事故ケース等を模擬したシミュレーションに対しても同様に安定化でき、実系統に対す

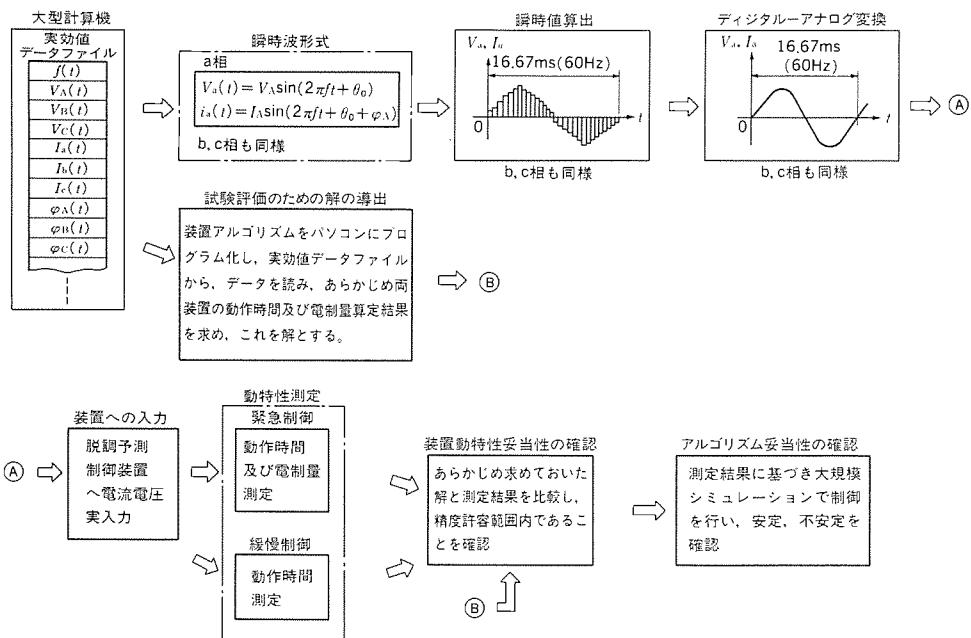


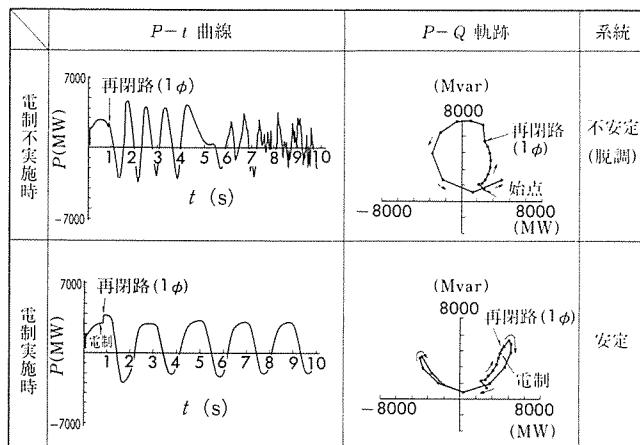
図12. システム動作試験フロー

表2. システム動作試験結果の一例 (緊急制御)

安定化目的	外乱	動作時間	電制量算出値	電制発電機	電制実施後
既設電制装置の電制量不足想定	連系線3#4LG + 事故発生後120msで375MW機電制 + 1φ高速再閉路	0.74s/0.75s (事故発生から)	1,081MW/1,169MW	発電機A 700MW 発電機B 500MW 計 1,200 (≈1,081MW)	事故発生後0.74sで電制し安定

注：動作時間、電制量算出値において上段は測定値、下段は理論値

表3. 装置応動結果の妥当性



る装置応動の妥当性を検証できた。

また、緩慢制御については、正動作の確認及び緊急制御が対象とする急速に位相角が増大する場合での正不動作の確認、さらに実系統上予期できない事故等による動作確認については、2機系モデル

動揺時の電圧、電流の瞬時式を用いて任意の動揺波形を入力し、動揺発生検出、制御送出仕上がり時間等の動特性の確認などを行い、装置応動の妥当性を検証できた。

7. むすび

今後、更に巨大化、複雑化する電力系統において、電力高信頼度供給を維持するに当たり、このシステムのように比較的稀頻度ではあるが、既存の安定化システムで盲点となる系統事故に対しても対策を講じていくことが必要で、新アルゴリズムを具備した安定化システムが、今後一層、提案、実用化されていくことが予想される。

また、システムを実現するに当たり、デジタルリレー技術、デジタル伝送技術を駆使した、多機能、高信頼度型の安定化システムが要求されており、電力分野でも最先端技術の導入が更に促進されていくものと確信している。

最後に、このシステムの開発に当たり、多大な御尽力をいただいた関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- 坪井ほか：脱調防止制御における最適電制論理の開発と検証、電力技術研究会（昭61）
- 杉山ほか：脱調予測分離方式の開発研究、電気学会全国大会、1133（昭59）
- 西口ほか：系統安定化制御の最適化、電力中央研究所報告 185516（昭61）
- 福田ほか：脱調予測制御方式の開発、CIGRE、SC39（昭62）

基幹系統用PCMディジタル電流差動リレー装置

東 信一* 松永完三*
大垣健二* 木村良一*
服部俊樹*

1. まえがき

送電線は、電力系統設備の中でも事故発生件数が最も多く、また電力の安定供給にも重要な責務を負っている。したがって、その送電線を保護する送電線保護リレーは、その動作責務として高速、高信頼性が要求されており、そのニーズに対し最新技術を適用した開発が進められ、今日のPCMディジタル電流差動リレー（以下、PCMキャリヤリレーという。）の実用化に至っている。すなわち、PCMキャリヤリレーは、送電線保護リレーの頂点ともいべき方式であり、従来リレーの成熟されたリレー技術と最新のディジタル通信技術がみごとに融合されたものである。

従来から電流差動リレー方式は、事故区間を特定する性能に優れているため、変圧器保護、母線保護等に多く使用されてきたが、送電線保護にその方式を適用する場合、電流情報の伝送方法が大きな障害となっていた。しかしながら、近年の通信技術の発展はその障害をとり除き、さらに光ファイバの実用化はPCMキャリヤリレーの発展を劇的に加速させ、既に他の送電線保護方式を性能面で凌駕したと言っても過言ではない。

ここでは、そのPCMキャリヤリレーの技術動向、適用動向、特徴について最新の32ビットマイクロプロセッサを適用したシステムを含めて紹介する。

2. PCMキャリヤリレー開発の歴史

2.1 保護リレーのデジタル化

PCMキャリヤリレーの開発とリレーのデジタル化との間には密接な関係がある。PCMキャリヤリレーの伝送形態は、文字どおりPCM（パルスコード モジュレーション）である。すなわち、デジタル伝送を基本としており、伝送されるデータがデジタル値のためそれを用いるリレーがアナログ形では整合性に劣り、当然デジタルリレーの方が効率が良い。デジタルリレーは、1974年に初めてミニコンによるフィールドテストが行われた後、ビットスライス形の16ビットCPU、1チップ形16ビットCPU、そして1988年には32ビット形のデジタルリレーもついに実用化されるなど、成熟期を迎えており、PCMキャリヤリレー発展の土壌は既に整ってきている。

2.2 通信技術の発展

一方、PCMキャリヤリレーでは、リレー装置間で電流データを送りあうため、何らかの信号伝送路が必要である。したがって、それを構築する通信技術もPCMキャリヤリレーの開発に大きな影響を与えてきた。電力保護用通信媒体は、図1に示すような変遷を遂げてきたが、近年PCM伝送に適した大容量、高信頼度の光伝送が急速に普及してきており、この面からもPCMキャリヤリレーの実用化に拍車がかけられている。

2.3 送電線保護リレーの発展

送電線保護リレーは、系統の電圧、構成及び重要性により図2に

示す各種リレー方式が適用されてきた。なかでも、送電線の各端子における電気量を比較するキャリヤリレー方式は、事故点の選択性能に優れており送電線保護方式の主流となっている。

近年、電力系統の発展は目覚ましく、送電線の多端子化、重潮流・長距離化に加え、情報化社会を支えるエネルギー源として電力の高信頼度、高品質供給に対する要求は年々高まっている。これらの要求に答えるため送電線保護リレーでは、マイクロ無線回線を用いたFMキャリヤリレー、PCMキャリヤリレー、そして伝送路に光ファイバを使用した全ディジタルPCMキャリヤリレーが開発され、電力の安定供給に大きく寄与している。

2.4 最新形32ビットPCMキャリヤリレー

電力系統のニーズにこたえるため開発された32ビットPCMキャリヤリレーには、次のような特長がある。

(1) マルチCPU基本システム

必要に応じてCPUを追加できるため拡張性に富む。図3にPCMキャリヤリレーにおけるマルチCPU基本システムの構成例を示す。サンプリング同期、データの送信タイミングの制御を行うPCM CPU、送受信のインターフェースであるTX/RXカード及び通信系と光ファイバにより結合するための光モジュール（E/O, O/E）が接続される。

(2) 《VISMAT》(Visual Software Make and Test) システム

送電線保護リレー独特の複雑なトリップシーケンス、再閉路シ

通信媒体	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	適用リレー方式
電力線搬送							→	方向比較リレー 位相比較リレー
パイロット ワイヤ							→	表示線リレー
マイクロ アナログ形						→	位相比較リレー FMキャリヤリレー	
無線 デジタル形						→	PCM キャリヤリレー	
光ファイバ						→	PCM キャリヤリレー	

図1. 電力分野への通信技術の導入

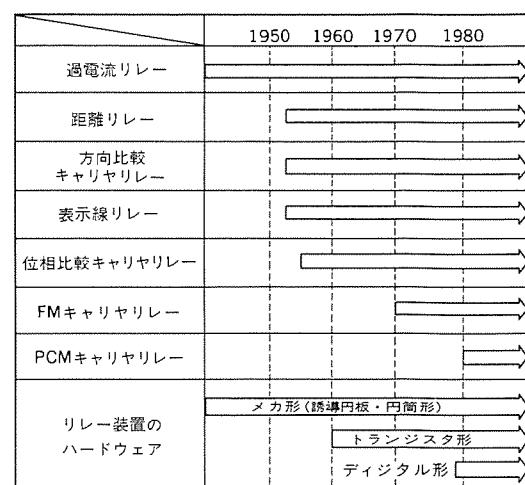


図2. 国内における各種送電線リレー方式の変遷

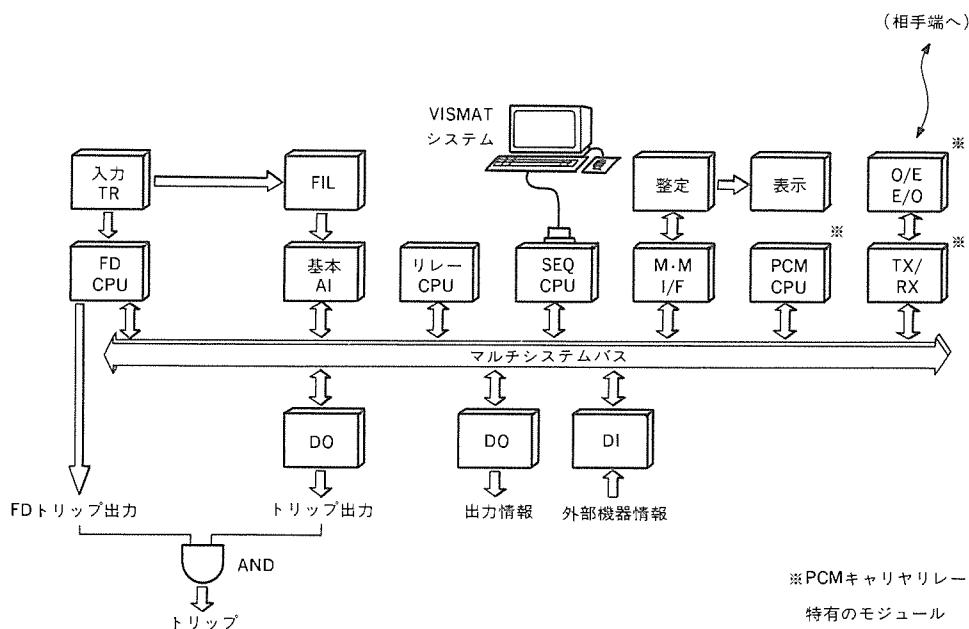


図3. 32ビットPCMキャリヤリレー システムの構成例

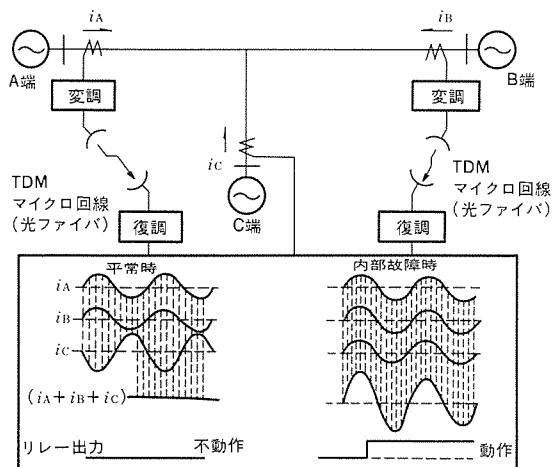


図4. PCMキャリヤリレーの原理図

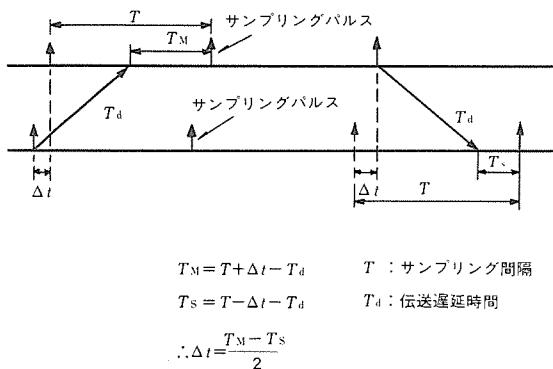


図5. SP同期制御の原理

ケンスのソフトウェアを图形で容易に入出力できるため、ソフトウェアのバグがなく高信頼度が確保できる。

(3) モニタ機能

系統の電圧、電流、位相等をモニタできるため、試験時の確認が容易となる。

(4) データセーブ機能

系統事故時及び装置不良時の各種データをセーブすることにより

事後解析が容易となる。

以上のように最新形32ビットPCMキャリヤには多くの特長があり保守、運用性に富み、かつ高信頼度の送電線保護リレーが構成できる。

3. PCMキャリヤリレーの技術動向

3.1 基本原理

キルヒホップの第一法則により、送電線の各端子電流の総和 ΣI は、送電線内部事故の有無により次式のとおりとなる。

- (1) 内部事故有りの場合 $\Sigma I \neq 0$
- (2) 内部事故無しの場合 $\Sigma I = 0$

すなわち、 ΣI の値がある値より大きい場合に、内部事故と判定することを基本原理としているが、各端子電流を伝送する場合、その瞬時値を電気角30°ごとにパルス符号変調(PCM)して相手端へ伝送する。図4においてC端では、A、B端から伝送されたPCM信号を復調して自端電流瞬時値と差動演算を行い、その差動電流値がある値を越えた時に内部事故と判定する。リレーからの伝送速度は、必要ビット数等の条件から54Kbpsとしているが、それをPCM 1次群信号(1.544Mbps)に多重化するCR MUX(キャリヤマックス)を用いることにより、標準TDM(時分割多重)伝送系に直接つなぐことができる。

3.2 サンプリング同期 (SP同期)

相手端へ伝送する電流データは、ある時刻でサンプリングした瞬時値であり、リレーではその瞬時値と自端の電流瞬時値をそのまま用いて差動演算を行うため、相手端と自端のサンプリングタイミングを全く同一時刻にしなければ差動演算結果に誤差を生じることとなる。このため、SP同期制御を行う必要がある。一例として図5によりその方法を説明する。

図5において、両電気所のSPタイミングは Δt だけずれている。この Δt を計測するため以下の処理を行う。

子局からサンプリングと同期して信号を伝送し、親局では信号受信時から次のサンプリング時刻までの時間 T_M を計測し、この計測値を子局へ伝送する。子局も同様に親局からの信号受信時から次のサ

表1. SP同期方式の得失比較

	リレー側SP同期方式	信端側SP同期方式
長 所	(1)信端が不要となりトータルコスト、信頼性にメリットあり。 (2)伝送路がトランスペアレントになり送受信仕様の制約が少ない。 (3)リレー装置だけで試験可能。	(1)伝送不良部位の限定が可能。 (2)広域SP同期システムへの拡張性あり。
短 所	(1)不良部位は、リレー内カリレー外のみの限定となる。	(1)信端からリレーにSP同期信号を渡し、かつその監視を行う必要あり。 (2)リレーの工場内試験時に信端、若しくはSP模擬信号発生装置が必要。 (3)伝送路がトランスペアレントでなくなる。

表2. 伝送系監視項目

項目	内 容
S P 同期 不良	各端子のサンプリング同期が $20\mu s$ 以上ずれた場合
(デーティ不良)	(信端のあるシステムの場合、信端にてデータ検定実施)
S A フラグチェック	SAフラグのパターンチェック不良が連続した場合 (1スープラームごと)
C R C チェック	リレーの受信データにCRCエラーが発生した場合
固定ビットチェック	リレーの受信データに固定ビットエラーが発生した場合
フレーム同期チェック	リレーの受信データにフレーム同期パターン不良が連続した場合

SP: Sampling

SA: Sampling Address

CRC: Cyclic Redundancy Check

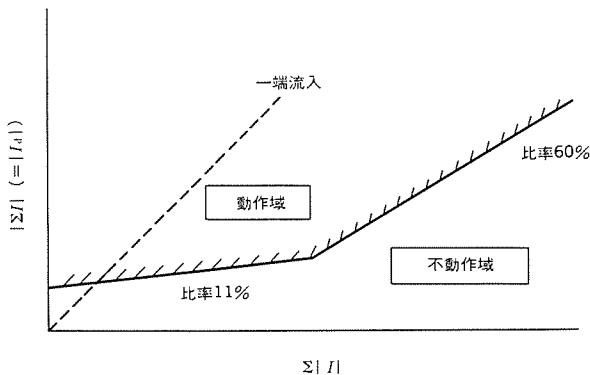


図6. 超高圧系統用87S比率特性例

サンプリング時刻までの時間 T_s を計測する。この T_m 、 T_s 及び Δt の間には次式の関係が成り立つ。

$$T_m = T + \Delta t - T_d \dots \dots \dots (1)$$

$$T_s = T - \Delta t - T_d \dots \dots \dots (2)$$

$$\therefore \Delta t = \frac{T_m - T_s}{2} \dots \dots \dots (3)$$

ここで T : サンプリング間隔、 T_d : 伝送遅延

したがって、子局において、 $\Delta t \rightarrow 0$ となるようにサンプリングタイミングを変化させることによりSP同期が実現できる。このSP同期機能は、リレー装置側に設ける場合と通信装置側に設ける場合があり、それぞれ表1に示すような得失がある。

3.3 伝送データ監視

リレーのハードウェア、ソフトウェアに対する自動監視方式は、他のデジタルリレーと同様の方式を実施しているが、PCMキャリヤリレー独自の監視として表2に示すとおり伝送データの監視を行い、伝送路障害によるデータ誤りを検出し、不要応動を防止してい

る。

4. PCMキャリヤリレーの適用例と特長

4.1 超高圧系統用PCMキャリヤリレー

超高压送電系統は、中性点が直接接地となっているため、短絡事故と地絡事故で事故電流は同程度の大きさとなる。したがって、通常の事故を検出するための主検出リレーは短絡・地絡を区別する必要がなく、各相電流を用いた差動リレー(87S)を使用する。また、微地絡事故を検出するため、零相電流を用いた零相差動リレー(87G)を追加する場合でもソフトウェアのみで対処できる。差動リレーは、大電流域でのCT誤差を考慮し、図6に示す比率特性をもたせている。また、次の各機能も標準的に具備している。

(1) 区間内充電電流補償(自端100%)

(2) 脱調検出(各端電圧位相比較)

(3) 再閉路(高速多相、及び中(低)速三相再閉路)

伝送フォーマットは、50Hz系と60Hz系とでは電気角30°に相当する時間が各々1.67ms、1.38msであり、その中に伝送速度54KbpsのPCM信号を乗せ込むため、自らビット数が異なってくる。図7に50Hz系と60Hz系の伝送フォーマット例、図8に構成例を示す。

4.2 UHV系統用PCMキャリヤリレー

基本構成は、超高压用PCMキャリヤリレーと同一であるが、系統電圧が高いため、当該相の充電電流は自相の大地に対する充電電流だけでなく、自回線他相電圧による充電電流も無視することができない。したがって、自回線三相補償を行う必要がある(図9)。さらに、補償値算出時の電圧微分も事故時の低次高調波を考慮し、式(4)の修正微分方式としている。

$$\frac{dV}{dt} = K_1 (V_{(-2)} - V_{(-4)}) + K_2 (V_{(-1)} - V_{(-5)}) + K_3 (V_{(0)} - V_{(-6)}) \dots \dots \dots (4)$$

ここに $V_{(-n)}$ は n サンプリング前のデータ、 $K_1 \sim K_3$ は定数

また、高速再閉路時に二次アーケを強制的に消滅させ、再閉路するまでの時間を短くするため、高速自動接地方式も検討されている。

4.3 高抵抗接地系統用PCMキャリヤリレー

PCMキャリヤリレーは、超高压系統中心に実用化が進められてきたが、光ファイバ等信号伝送路の整備に伴い低位系にも適用されはじめている。既に、1987年に16ビットCPU、1989年には32ビットCPUを使用した154kV PCMキャリヤリレーが実用化されており、ここではそれら154kV PCMキャリヤリレーについて述べる。

超高压系統と異なるのは、中性点が高抵抗により接地されており、1線地絡事故時に事故電流が短絡事故電流に比べ非常に小さいことである。したがって、相電流に比べフルスケールを圧縮した零相電流を図10に示すフォーマットに乗せて伝送し、各端子で零相差動リレー(87G)演算を行って地絡事故を検出している。また、低位系ではCT特性が同一とは限らないため、図11に示すように87Sリレーの比率特性を選択可能としている。

伝送フォーマットに三相電流と零相電流を乗せているため、事故相検出が容易となる。したがって、遮断器が各相遮断可能な場合は、超高压系統用PCMキャリヤリレー同様高速多相再閉路方式が適用できる。1線地絡事故時にも、87Sより高感度の地絡事故相検出リレー(87Gφ)と87Gとのアンド条件により事故相のみ遮断可能である。

一方、遮断器が三相一括遮断器の場合は、地絡事故電流が小さいことを利用し、ルート断を極力防止できる優先遮断再閉路方式も開

(1) 50Hz系 (90ビット/フレーム)

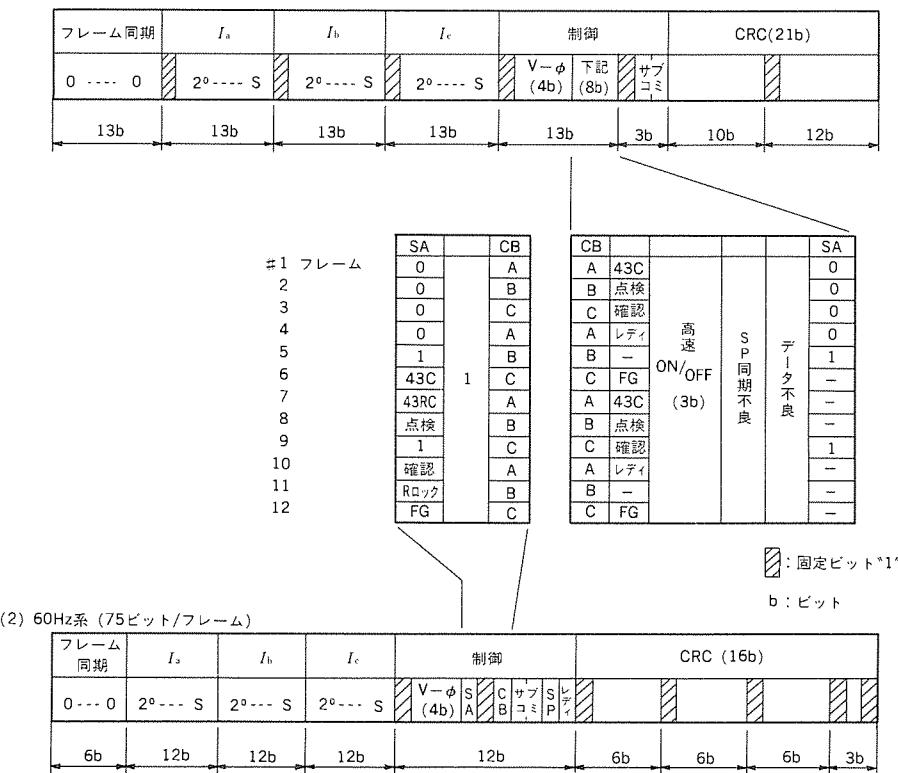


図 7. 伝送フォーマット例 (超高压系統用)

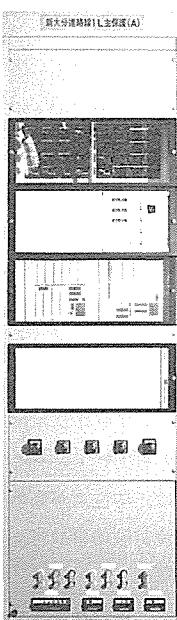
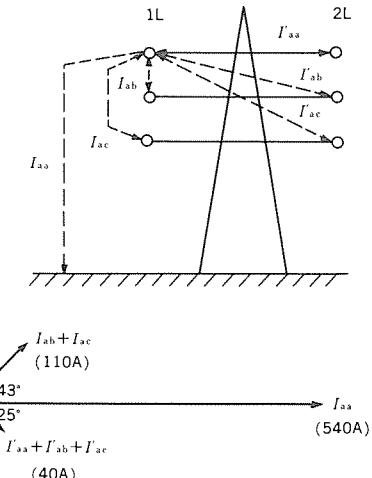


図 8. 超高压系統用PCMキャリヤリレー装置の構成例(主保護)

発されている。これは2回線同時事故時、少なくとも1回線が1線地絡事故の場合、その回線の遮断を待機させ、まず優先回線のみ遮断、高速再閉路を実施する。引き続き待機回線を遮断、再閉路させることにより2回線同時事故時にもルート断が避けられるわけである。このとき待機回線では、優先回線の高速再閉路が終わるまで1線地絡事故が残ったまま連系をとることになるが、事故電流が小さいため問題とならない。この方式は、事故相検出をいかに高信頼度に行えるかがポイントであるが、PCMキャリヤリレーの各相電流差動演算により十分高い信頼性が得られる。



(): こう長250kmの場合の値

図 9. UHV系統における充電電流例

以上のように、高抵抗接地系統にPCMキャリヤリレーを適用した場合、従来以上に電力の高信頼度、高品質供給に寄与できるものと考えられる。図12に構成例、表3に仕様例を示す。

5. むすび

電力系統における様々な要求にこたえるための一つとして、PCMキャリヤリレーの開発・実用化を行ってきたが、今後もますます高まると考えられるこのような要求に対し、その時々の最新技術又は将来技術を駆使して多くの付加価値を伴い、PCMキャリヤリレーの適用拡大が図られていくものと考えられる。また、伝送系の充実に伴い、基幹系のみならず低位系にも広く普及していくものと期待される。

(1) 50Hz系 (90ビット/フレーム)

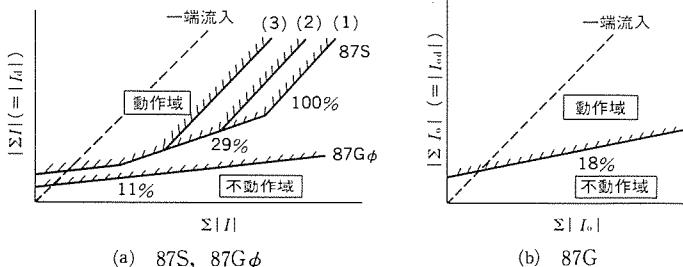
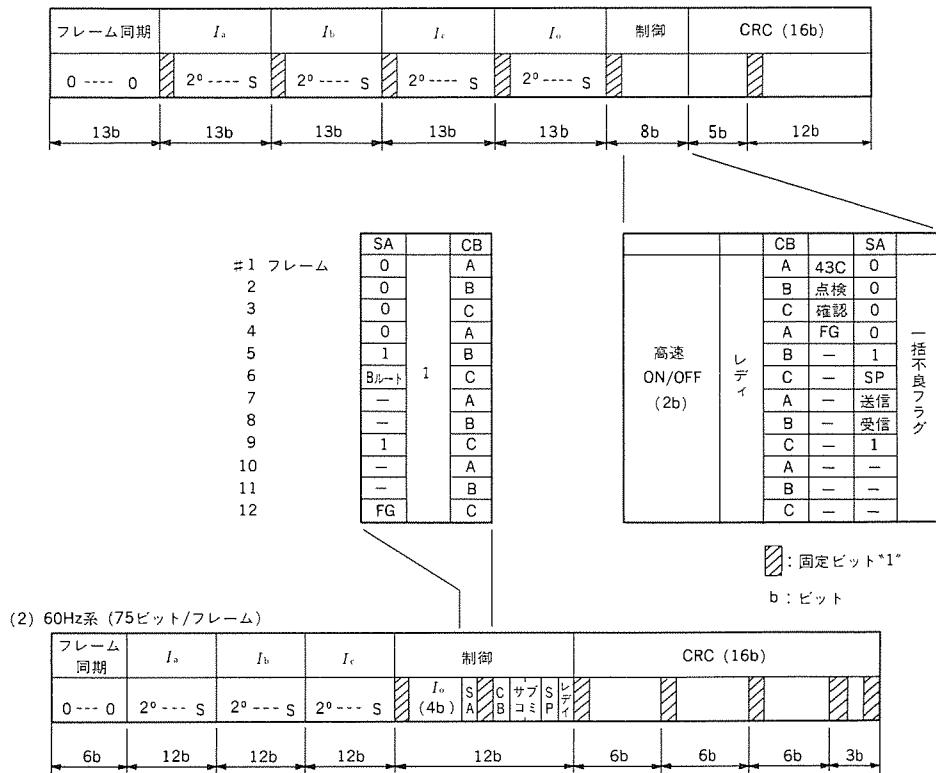
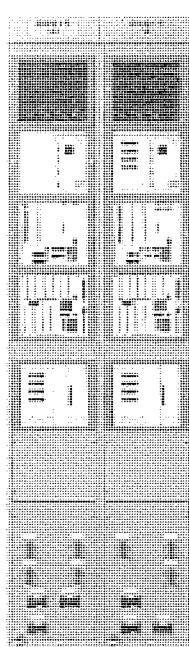


表3. 154kV PCMキャリヤリレー装置の仕様例

主保護	構成	○ 350mm幅 ○ 標準3端子仕様、最大5端子まで拡張可能
	リレー方式	○ 各相+零相電流差動方式 ○ 高速多相又は優先遮断+中速三相先行・後続再閉路方式
伝送方式	構成	○ 54Kbps PCM光伝送方式 ○ 信号端局装置による自動同期サンプリング方式
	リレー方式	○ 350mm幅 ○ FL機能内蔵(自動起動方式) FL: フォルトロケータ
後備保護	構成	○ 短絡距離4段方式 ○ 地絡方向、過電圧方式
	リレー方式	



(主保護、後備保護)

る。

参考文献

- (1) 畑田ほか: OPGWを使用したPCMディジタル電流差動リレーのフィールドテスト結果, 電気学会全国大会, No.1358(1987)
- (2) 松崎ほか: 超高圧送電線保護用PCM電流差動リレー装置, 三菱電機技報, 62, No. 5 (昭63)
- (3) 吉野ほか: 新形32ビットCPUを適用したPCMディジタル電流差動リレー装置の開発, 電気学会全国大会, No.1307 (1989)

高抵抗接地系統用デジタル送電線保護装置

細井真知夫* 中川欣之*
松永完三* 津久田尚志*
光岡正隆*

1. まえがき

高抵抗接地系統用送電線保護装置のデジタル化については、系統特有の問題に対する保護機能の向上はもとより、電力系統の増大に伴う保護装置数の増加に対応するため、装置の小形・縮小化とともに、保守・点検の省力化が求められている。

保護機能の充実と付加機能の搭載に容易に対応でき、なおかつ装置信頼度を低下させないようなシステムを構築するため、高性能32ビットマイクロプロセッサを用い、マルチCPU基本システムによる新形デジタル保護リレー装置を開発し、実用化を進めている。ここでは、高抵抗接地系統用回線選択継電装置、後備保護用距離継電装置と現在開発中の多端子電流差動保護システム、多端子送電線事故点標定システムの概要を紹介する。

2. システム構成と特長

高抵抗接地系統用保護リレーシステムでは保護機能の向上とともに、システムの小形化と保守の省力化が必要であり、このため当社では高機能LSIを高密度実装したCPUボードを複数枚収納可能としたマルチCPU方式の新形デジタルリレー装置を開発し、以下の特長を実現した。

(1) 盤幅の縮小

ハードウェアの高密度実装により、リレーユニットを小形化し、盤幅を従来の700mmから350mmへの縮小を容易とした。

(2) 機能追加が容易

送電線事故点標定機能のような付加機能の追加の場合、同一ユニット内にCPUボードを増設することにより簡単に実現し得る。

(3) 入力部の常時監視

高調波監視方式の標準採用により、アナログ入力部の自動点検を廃止し、異常発見の確度を向上させるとともに、点検中の事故に対するリレー動作時間を高速化した。

(4) シーケンス処理の分離

シーケンスの改造・変更に対処するため、リレーシーケンスを専用CPUで処理し、ソフトウェアも当社独自の《VISMAT》を使用することにより変更点の確認が容易になった。

3. 回線選択継電装置

回線選択継電方式は、平行2回線送電線の回線間差電流を入力とし、系統事故時に事故回線側の電流が大きく、インピーダンスが小さくなることを利用したリレー方式で、自端の電流・電圧のみにより事故回線が判定でき、経済的であることから高抵抗接地系統用として広く用いられている。

(1) 装置構成

回線選択継電装置は、主保護機能と後備保護機能からなるが、この主・後備を盤として分離・独立した構成、主・後備をユニットとして分離した構成、主・後備を一体として回線ごとに盤を分離した

構成が実用化されている（表1）。

保守運用上の点では、それぞれの特徴があるが、当社の32ビットマルチCPU基本システムでは、いずれの構成も信頼度上問題なく対応が可能である。図1に主・後備分離方式の装置外観を示す。

(2) リレー機能

回線選択継電装置に実装する保護機能は表2に示すとおりである。地絡回線選択リレーには、零相循環電流対策がオプションとして用意されており、事故時の零相差電流の変化分を検出する方式と、事故時の健全相電流から零相循環電流を求めて除去する方式がある。零相循環電流の除去アルゴリズムを図2に示す。

このほかの機能として、低速度三相再閉路の実装も可能である。

4. 距離継電装置

高抵抗接地系統の送電線主保護としては、方向比較キャリヤリレー、PCM電流差動キャリヤリレー及び表示線保護リレーが一般に用いられているが、これらの後備保護として方向距離継電方式が採用されている。この方式は自端後備保護機能のほか、その動作範囲と動作時間の整定による保護協調が容易であるため、遠端後備保護としても用いられる。

(1) 装置構成

この装置は、送電線の1回線ごとの保護を行うため、基本的に1回線1面の構成となる。ただし、ハードウェアの縮小化により350mm幅の盤が適用でき、2回線分で従来の700mm幅1面相当の盤スペースとなる。また、オプションとして送電線の事故点標定を行う

表1. 回線選択継電装置の構成例

装置構成	主・後備分離構成		回線分離構成
	(盤分離) (ユニット分離)		
保守運用	1 L 後 備 保 護	2 L 後 備 保 護	主保護 1 L 後 備
	主保護 1 L 後 備		1 L 主 ・ 後 備
主保護・後備保護を単独で保守運用することができる。			回線ごとに保守運用することができる。

フォルトロケータ機能の実装も可能である。装置構成の例を図3に示す。

(2) リレー機能

距離継電装置に実装する保護機能は、表3に示すとおりである。

(3) 送電線事故点標定機能

送電線の事故がどの地点で起こったかを自端の電流・電圧から標定する機能であり、従来のパルスレーダ方式、サーボ受信方式のようにブロッキングコイルや通信装置を必要とせず、経済的なシステムとなる。

演算原理は基本的に、短絡・地絡事故時の事故点までのインピーダンスにより標定する方式と、平行2回線送電線における零相電流の各回線分流比により事故点を標定する方式の組合せとしている。それぞれの原理を表4に示す。

標定結果は、デジタルリレー正面のモニタパネルに表示するとともに、伝送装置を用いて制御所などへ伝送することも可能である。

5. 多端子送電線電流差動保護システム

高抵抗接地系統においては電力需要の増加に伴い、送電線の多端子化が増える傾向にある。多端子送電線は、上記のような通常の保護方式では適用に限界があり、電流差動保護の適用が望ましいが、各端子間の電流情報の伝送が必要であり、伝送路の構築方法と総合

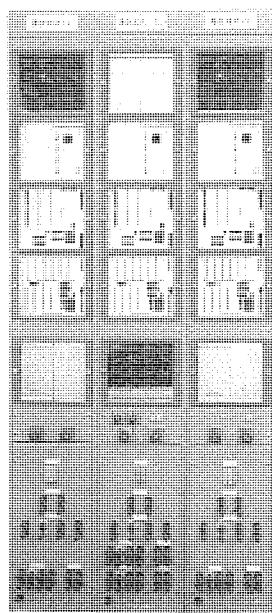


図1. ディジタル回線選択继電装置の外観

表 2. 回線選択繼電装置実装保護機能

		保 護 方 式
主 保 護	短 絡	短絡回線選択継電方式
	地 絡	地絡回線選択継電方式 零相循環電流対策（オプション）
後 備 保 護	短 絡	3段階方向距離継電方式
	地 絡	地絡方向過電流、地絡過電圧継電方式

的な経済性の問題から実用化が遅れていた。最近の光ファイバを用いた大容量通信技術の普及に伴い、今後は77kV以下の多端子系統にも電流差動保護が適用されるものと考えられる。

5.1 システム構成例

このシステムを4端子系に適用した場合のシステム構成を図4に、システムの仕様を表5に、システムの外観を図5に示す。このシステムは、リレー演算を行う親端装置と親端装置に対し電流情報を伝送するとともに、親端装置からの転送遮断指令により遮断器を引き外す子端装置、及び親端装置・子端装置間を接続する光ファイバにより構成される。

送電線各端に設置された装置は、1心の光ファイバケーブルによりループ状に接続されており、各端の電流情報は、この光ファイバを通して時分割直列伝送される。まず、親端から電流データの書き込まれていない、空のデータフレームが子端1に対して伝送される。子端1では、光・電気変換、直列・並列変換の後、データフレーム中の子端1用フレームに電流データを書き込み、並列・直列変換、電気・光変換を行い、子端2へデータフレームを転送する。以下の子端についても同様の動作が行われ、親端には、すべての端子の電流データが書かれたデータフレームが伝送される。親端のCPUでは、これらの子端電流情報と自端電流情報とを用い電流差動演算を行う。演算結果により内部故障と判定した場合、親端は自端の遮断器を動作させるとともに、データフレーム内の親端用フレームに転送遮断用データを書き込み、子端遮断器を動作させる。

5.2 リレー機能

差動判定には、大電流域でのCT誤差の増大を考慮し、抑制を付加した特性を採用している。動作判定式の一例を次に示す。

$$\text{小電流域動作判定: } |\sum I_i| - \frac{1}{2} \sum |I_i| \geq \frac{8}{9} K \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで $|\Sigma I|$ は各端子電流のベクトル和

$\Sigma |I_i|$ は各端子電流のスカラー和

K は最小動作値, K_0 は定数

小電流域特性は、CT誤差・リレー誤差による誤動作を避けるとともに、負荷電流の流出がある場合にも、高感度に故障を検出できるものとしている。また、大電流域特性は、CT誤差の増大を考慮したものとし、全体として流出電流を伴う内部故障に対して確実に動作でき、CT飽和を伴う外部故障に対しては、不動作となるようにしている。さらに、これら二つの特性は、各々独立に整定できるため、系統条件、適用CT条件に対して、フレキシブルな対応が可能である。

また、低位系多端子送電線においては、すべての端子でCT比を統一することは困難である。このため、電流差動リレーを適用するためには、各端の電流情報に対してCT比整合処理を実施する必要がある。このシステムでは、親端のデジタルリレーにおいて、親端・子端の各CT比を入力し、ソフトウェア処理によりCT比整合を行うことができる。

5.3 多端子送電線事故点標定機能

多端子系統にデジタル形事故点標定装置を適用する場合、自端判定方式は各端子の事故電流や分岐負荷への分流潮流等の影響により精度が低い。それに対し、本線上事故・分岐線上事故を区別できる点で、自端判定形より多端子の情報を用いた多端子判定形の方が有利であるが、事故点標定装置専用の伝送路・伝送装置を設けるこ

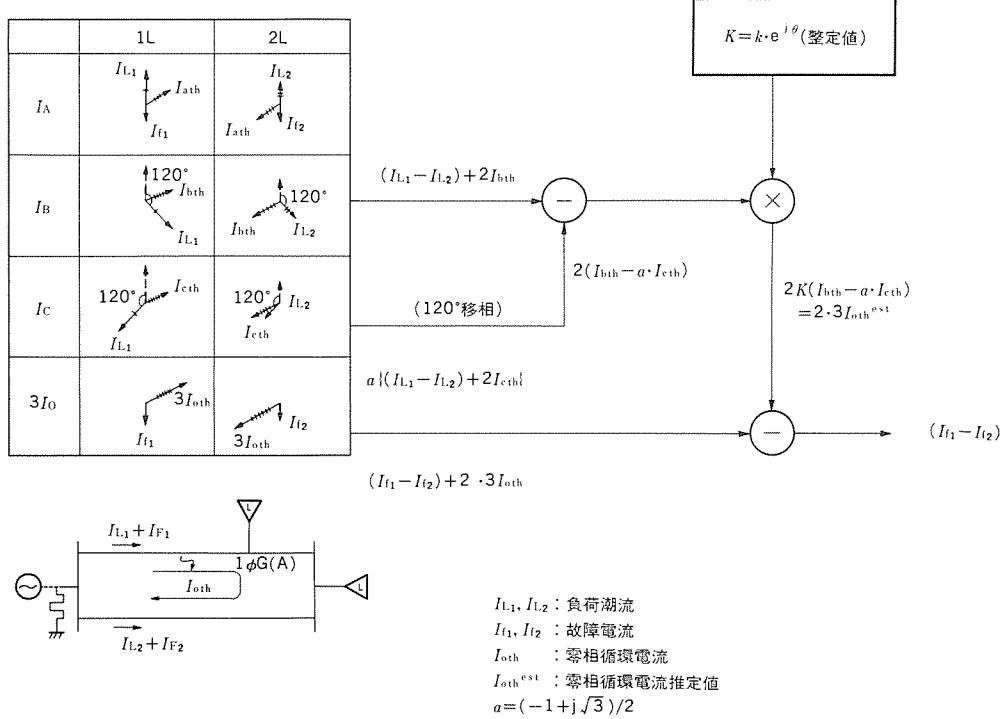


図2. 零相循環電流除去アルゴリズム

表 4. 事故点标定原理

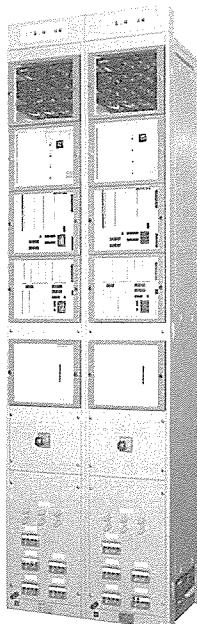


図3. ディジタル距離継電装置の外観

表 3. 距離繼電裝置實裝保護機能

保 護 方 式	
短 絡	3段階方向距離繼電方式
地 絡	地絡方向過電流, 地絡過電壓繼電方式

とは経済的でない。

そこで、上記多端子電流差動保護システムで得られる全端子の電流情報により、多端子系統に適用可能な事故点標定方式を開発した。この方式は、平行 2 回線の各端子電流の回線分流比により事故点を求めるもので、前記自端判定方式を拡張したものである。

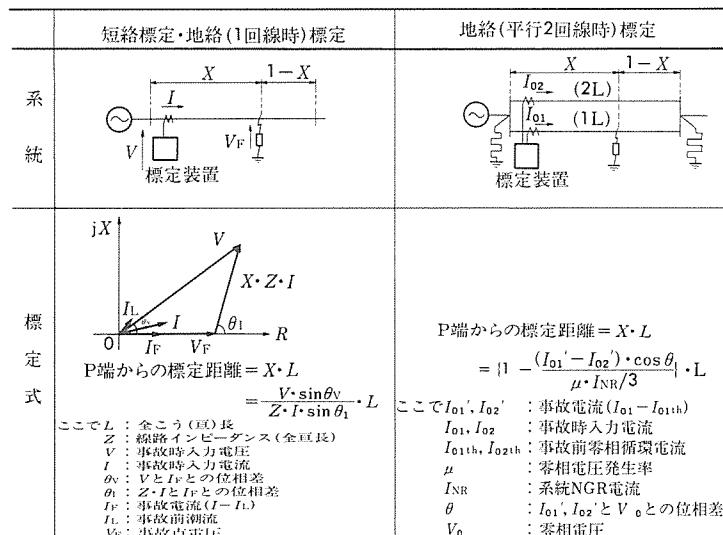


図 6 に、平行 2 回線 3 端子系統におけるシステム構成図を示す。P 端（自端）の多端子電流差動保護システム親端装置内に全端子の電流情報を蓄積しておき、事故点標定装置は専用インターフェースを介してデータを取り込み、下式に示す各相差電流標定を用いて演算する。また、事故点標定装置は自端の電圧・電流情報も取り込み、單回線運用時、伝送不良時、又は同各相多重事故時など各相差電流標定が適用できない場合は、インピーダンス演算による自端判定に切り替えて標定を行うことも可能な構成としている。

3端子系統対応の各相差電流標定の演算式を以下に示す。

$$x = \frac{C \cdot (I_{Q1} - I_{Q2}) + (2I_{P2} + I_{Q1} + I_{Q2} + I_{R1} + I_{R2})}{I_{P1} + I_{P2} + I_{Q1} + I_{Q2} + I_{R1} + I_{R2}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで ℓ_p は P 端～分岐点 T 端間距離, I_{Pi} , I_{Qi} , I_{Ri} ($i = 1, 2$) は P, Q, R 端子の 1, 2 号線の事故電流

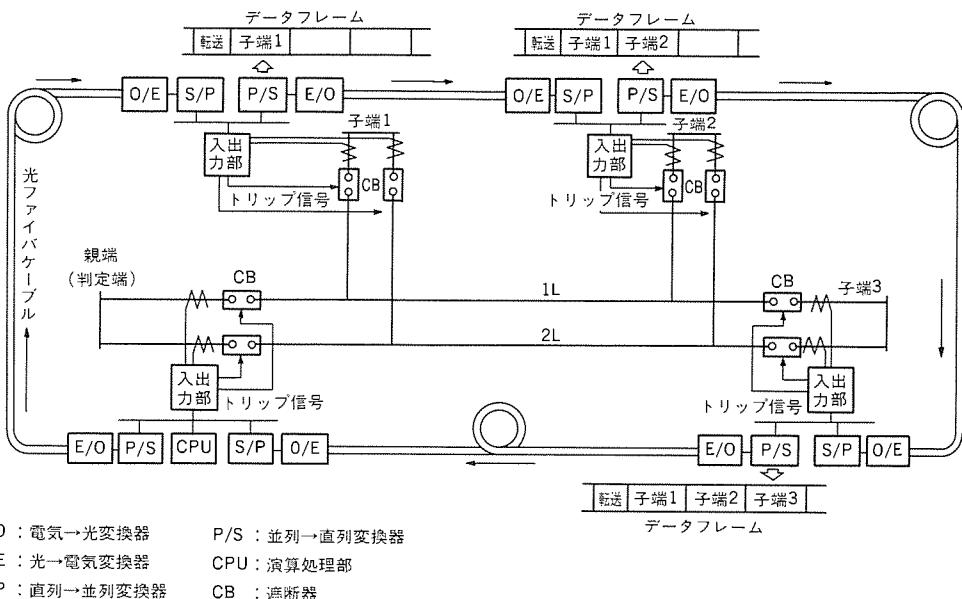


図4. 多端子送電線電流差動保護システムの構成

表5. 多端子電流差動保護システムの仕様

保護方式	絶電方式 判定方式 適用系統	デジタル式各相・零相電流差動絶電方式 代表端判定 + 転送遮断 (又は全端判定) 最大8端子×2回線 (16端子)
伝送方式	伝送速度 多重化方式 サンプリング周期 サンプリング同期制御	1.544Mbps 時分割多重タイムスロット方式 720Hz (電気角30°相当) 固定同期 (又は自動同期)
光伝送部	発光素子 発光波長 発光レベル 受光素子 最低受光レベル	レーザダイオード (LD) 1.3μm -6.5dBm アバランシェ フォトダイオード (APD) -50dBm

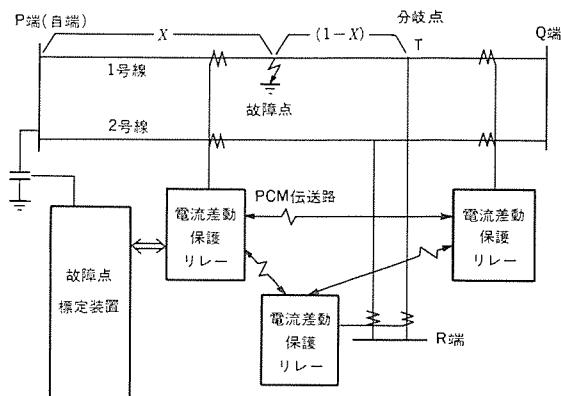


図6. 多端子送電線事故点標定システムの構成

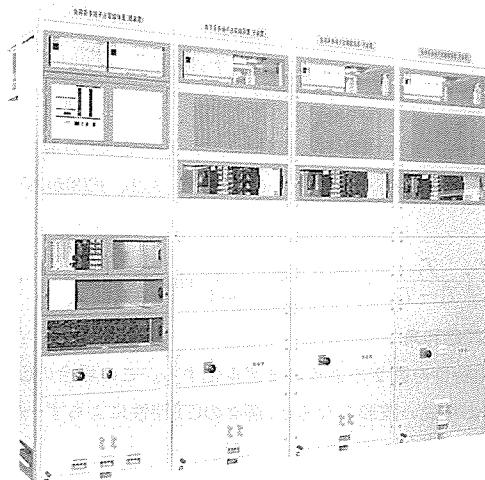


図5. 多端子電流差動保護システム装置の外観

$$C = \frac{T \sim Q \text{間インピーダンス}}{P \sim T \text{間インピーダンス}}$$

この方式は、多端子保護用の電流データのみを用いるため、専用の伝送回線、伝送装置が不要であり、容易に付加できることが特長である。

6. むすび

新形32ビットデジタルリレーのシリーズ化として実用化した、高抵抗接地系統用送電線保護装置と、近々実系に適用される予定の多端子保護システムについて述べた。今後は、高性能32ビットマルチCPU基本システムの応用として、種々の高機能を付加し、なおかつ小形化・省力化されたリレーシステムを開発していく予定である。

参考文献

- (1) 東ほか：負荷系多端子送電線保護システムの開発、昭和62年電気学会全国大会、No.1356
- (2) 東ほか：負荷系多端子送電線保護システムの開発、昭和63年電気学会全国大会、No.1230
- (3) 松永ほか：デジタル形多端子送電線故障点標定装置の開発、平成元年電気学会全国大会、No.1319

デジタル母線保護、変圧器保護リレー装置

岡田 明* 飯塚光男*
大西公和* 三宅康明*
磯松信夫* 白井正司*

1. まえがき

電力系統の設備増大に伴い、保護リレー装置に対する要求性能も高度化し、1980年以降デジタル保護リレー装置が急速にその適用範囲を拡大してきている。従来から母線保護及び変圧器保護には差動方式が広く適用されているが、母線保護では外部事故時の流出端CTの飽和対策、また変圧器保護では変圧器投入時の励磁突入電流対策が技術上のポイントとなっている。デジタル化は、これら機能向上の有効な手段である。

当社では、デジタル保護リレーに32ビットマルチCPU基本システムを適用し、その演算処理能力を生かし各種要求仕様に柔軟に対応している。以下、母線保護、変圧器保護におけるデジタル保護リレー装置の実用化例と最近の技術動向について紹介する。

2. 母線保護リレー装置

国内では母線の保護に高インピーダンス差動(電圧差動)、電流差動の両方式が使われており、デジタル母線保護でも両方式が実用化され、1986年以降実運用に入った。特に電流差動方式では、CT飽和対策の新しいアルゴリズムが開発され、高インピーダンス差動と同等の性能を確保することができた。

2.1 デジタル母線保護の特長

32ビットマルチCPU基本システムの適用により、リレー演算処理とシーケンス処理をCPUカード単位で分離し、リレー演算処理部を固定化した。また、シーケンス処理部ではソフトウェアをCRT画面に展開接続図の形で表示する《VISMAT》を採用し、母線の端子増設等にも容易に対応可能なシステム構成としている。

さらに、母線保護にデジタルリレーを導入したことにより、以下の特長も得ている。

(1) CT 2次切替回路のソフトウェア処理

二重母線における各回線の母線選択時のCT 2次切替えは、従来断路器のON-OFF条件により接点回路で構成していたため、多数の接点を必要とし信頼度低下の原因となっていた。デジタル母線保護では、各回線の電流入力を直接A/D変換し、別に入力した断路器ON-OFF条件を利用して電流データの選択をソフトウェアで処理している。これにより、CT 2次切替用の補助リレーが削減され小形化されると同時に無接点化による信頼度向上を実現した。

(2) トリップ出力選択回路のソフトウェア化

二重母線における事故母線の選択トリップシーケンスは、従来は上記と同様に接点回路で構成していた。デジタル母線保護では、この選択トリップシーケンスをソフトウェアで処理しており、回路の簡素化と信頼度向上を実現した。

(3) システム構成の柔軟性

デジタル化によりCT負担の低下が実現され、他リレー装置とのCT共用が可能となった。また、電圧、電流データ、断路器のON-OFF条件等を共用化し遮断器不動作対策機能等の付加機能の追加も容易

である。

2.2 CT飽和対策

以下にCT飽和と電流差動方式での対策について説明する。

2.2.1 CT飽和波形の解析式

図1はCTの等価回路を示したものであり、CT 1次電流*i₁*と2次電流*i₂*の間には次式が成立する。

$$M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} = R_2 \cdot i_2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

系統事故時の1次電流*i₁*を下記とすれば、

$$i_1 = I \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos \omega t \right) \quad [t \geq 0] \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし ω : 基本波の角周波数 T_1 : 過渡直流分の時定数式(1)、式(2)から2次電流*i₂*は下記として求め得る。

$$i_2 = \frac{MI}{L_2} \left\{ \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(\frac{e^{-\frac{t}{T_1}}}{T_2} - \frac{e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1} \right) - \left(\cos \omega t - \frac{1}{\omega T_2} \sin \omega t \right) \right\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{ただし } T_2 : \frac{L_2}{R_2} \quad \frac{M}{L_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{CT比に相当})$$

また、事故発生から時刻t後の磁束は下記となり、

$$\begin{aligned} \phi &= \int_0^t R_2 \cdot i_2 dt + \phi_0 \\ &= \frac{V_m}{\omega} \left\{ \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \sin \omega t + \frac{1}{\omega T_2} (1 - \cos \omega t) \right\} + \phi_r \quad \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

$$\text{ただし } V_m = \frac{MR_2 I}{L_2} \quad \phi_r : \text{残留磁束}$$

CT飽和以前では、 $T_2 \gg T_1$ が成立することから式(4)を簡略化すれば、汎用的な次式を得ることができる。

$$\phi = \frac{V_m}{\omega} \left\{ \omega T_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) - \sin \omega t \right\} + \phi_r \quad \dots \dots \dots (5)$$

また、励磁回路へ流れる励磁電流*i₀*は、1次電流*i₁*の $M/L_2 (N_1/N_2)$ 倍から2次電流*i₂*を引いたものであり、式(2)、式(3)から下記となる。

$$i_0 = \frac{MI}{L_2} \left\{ \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \frac{1}{\omega T_2} \sin \omega t \right\} \quad \dots \dots \dots (6)$$

2.2.2 CT飽和角

CT磁化特性を図2のようにモデル化する。この場合のCT 2次電流は実際より鋭い波形となるが、個々のCT特性によらず一般的な評価を行なうことができる。

(1) 第1波CT飽和波形

図2に示す磁化特性の ϕ_s は、CT 2次回路の飽和電圧 V_s から $\phi_s = \frac{V_s}{\omega}$ として求め得るので、 $\phi = \phi_s$ として式(5)を t について解けば、第1波のCT飽和角を求めることができる。ここで、CT適用条件を示すパラーメータとして下記を定義すれば、

$$K_{CT} = \frac{V_s}{V_m} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ただし $V_s = (\text{CT定格負担}) \times (\text{CT 1次定格電流}) \times (\text{過電流定数})$
 $V_m = (\text{CT実負担}) \times (\text{CT通過電流})$

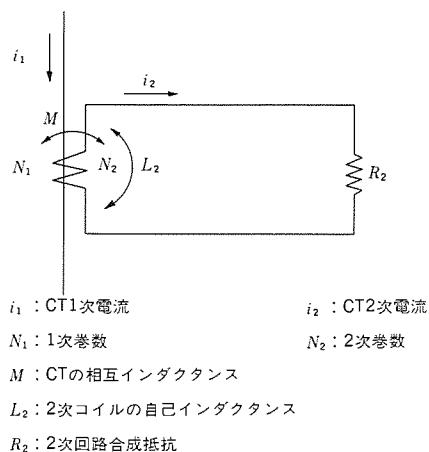


図1. CT等価回路

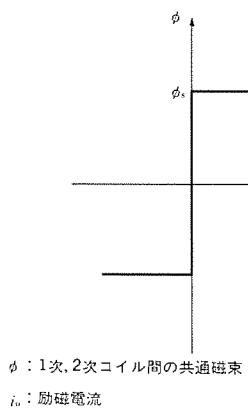


図2. CT磁化特性

式(5)は次式となる。

$$\omega T_1 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \sin \omega t = K_{CT} (1 - \phi_r') \quad \dots \dots \dots (8)$$

K_{CT} を変化させてCT飽和角 $\theta_s = \omega t_s$ を求めた結果を図3に示す。なお、計算条件は最悪ケースとして下記を選択した。

1次回路の過渡直流分時定数 $T_1 = 0.1s$

$$\text{残留磁束率 } \phi_r' = \frac{\phi_r}{\phi_s} = 0.8$$

ただし、残留磁束の極性は第1波の励磁の極性と同一とした。

(2) 第2波目以降のCT飽和波形

第2波目以降のCT飽和は残留磁束に関係せず、過渡直流分時定数 T_1 により一意に決まる。最悪ケースとして、 $T_1 = 0.1s$ としたときの第2波目以降のCT不飽和期間は、電気角100°以上を確保する。なお、図4に示す斜線部分の面積 S_1, S_2 は、1次電流が負になった時点からCT飽和が回復し、1次電流が正となり負側の電圧積分値に等しくなった時点から再び飽和することにより $S_1 = S_2$ となる。

2.2.3 実用化されたリーアルゴリズム

図4からCT飽和波形の特徴として以下が示される。

- (1) CT2次出力は第1波目から飽和するが、飽和開始までの一定期間はCT不飽和である。
- (2) 第2波目以降では1周期ごとにCT飽和、CT不飽和の期間が交互に繰り返される。
- (3) 外部事故のケースではCT不飽和期間中は、差動出力が極端に小さく、またその変化率も小さい。

したがって、CT不飽和期間中に高速で内外部事故判定し、外部事

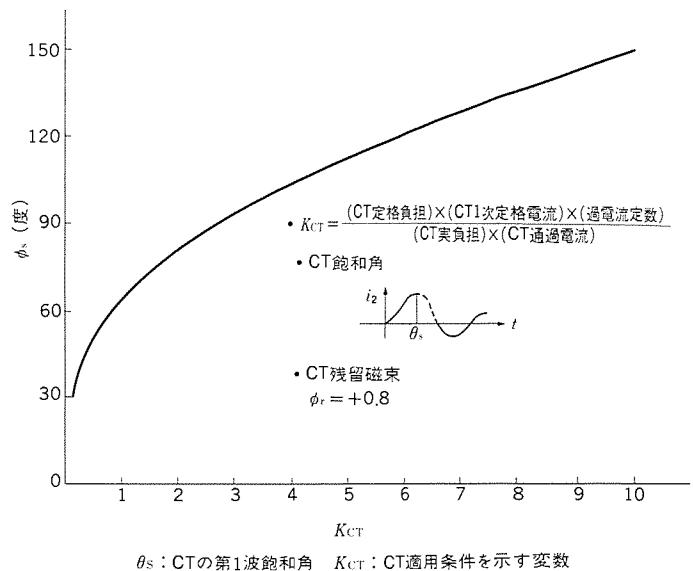
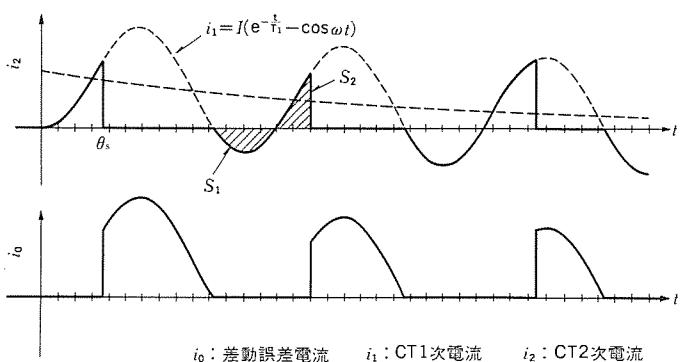
図3. CT飽和角 $\theta_s(\omega t_s)$ 

図4. CT 2次出力波形

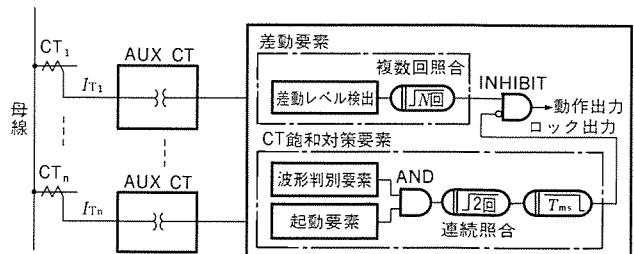


図5. 電流差動リレー機能ブロック図

故判定した場合、その結果を統いて発生するCT飽和期間中保持すれば、連続した外部事故判定が可能である。このアルゴリズムでは、CT不飽和期間中に必要とする内外部判定処理が行えるか否かが問題となる。CT適用条件として $K_{CT} \geq 2$ を選択すれば、第1波、第2波目以降を問わずCT不飽和期間80°以上を確保することができ、デジタルリレーで汎用的に使用している30°サンプリングで処理可能である。実用化されたリレーは、 $K_{CT} \geq 1.5$ (第1波CT飽和角70°以上) で正しく内外部事故判定する性能を持っている。

図5は、実用化された電流差動形母線保護リレーの機能ブロック図であり、差動要素とCT飽和対策要素の2要素から構成されている。

(1) 差動要素

リレー最小動作値を決めるもので、一般の振幅値演算で実現している。

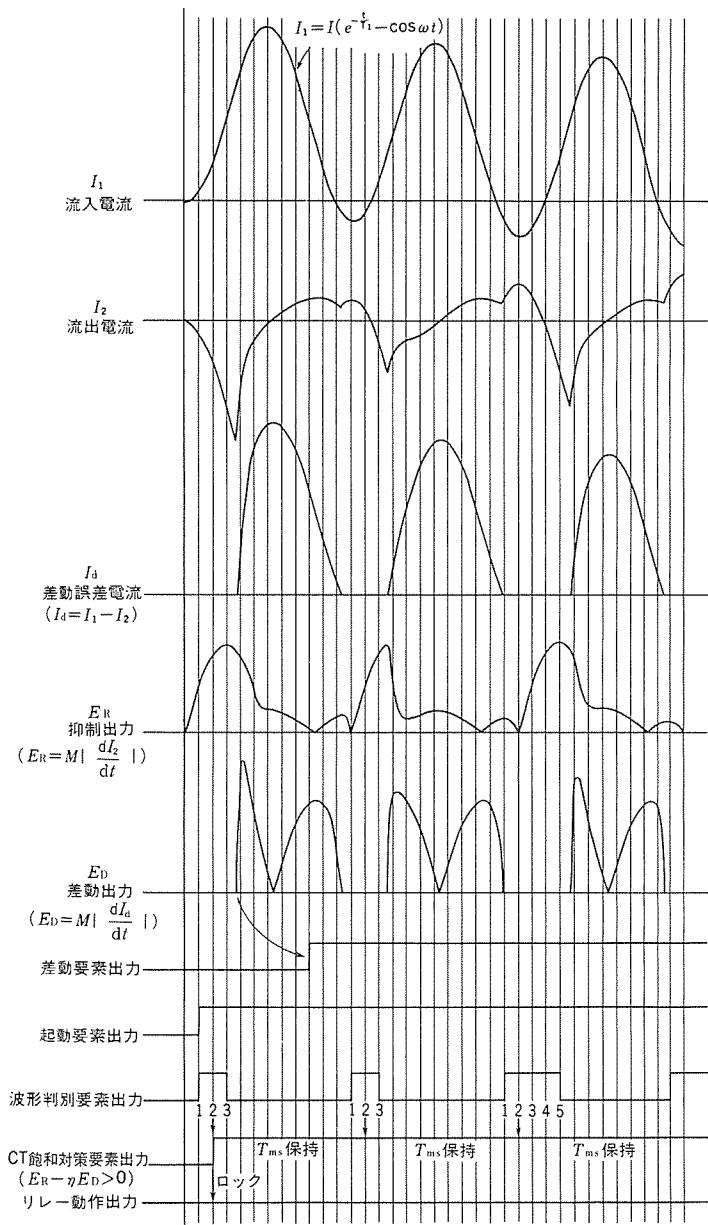


図 6. CT飽和を伴う外部事故時のリレー応動

(2) CT飽和対策要素

波形判別要素と起動要素から構成され、外部事故検出時は差動要素出力をロックする。また、このロック信号は連続化のため T_{ms} 引き延ばされる。

(a) 波形判別要素

比率演算により外部事故判定を行うもので、CT飽和を伴う場合ではCT不飽和期間に正しく外部事故判定し、 T_{ms} の引き延しタイマにより判定結果が連続化される。

(b) 起動要素

事故発生前の常時潮流で波形判別要素が動作するのを防止するためのもので、各端子電流の変化分が一定値以上又は差動電流が一定値以上で動作する。

図 6 は、計算機シミュレーションによるCT飽和波形を用いて外部事故時のリレー応動を示したものである。また、図 7 に実用化された電流差動形ディジタルリレー装置の外観を示す。

2.3 空心形CT適用の母線保護

空心形CTは、通常のCTから鉄心を除去したもので、CT飽和の問題は完全に解決される。空心形CTを適用した母線保護のディジタル

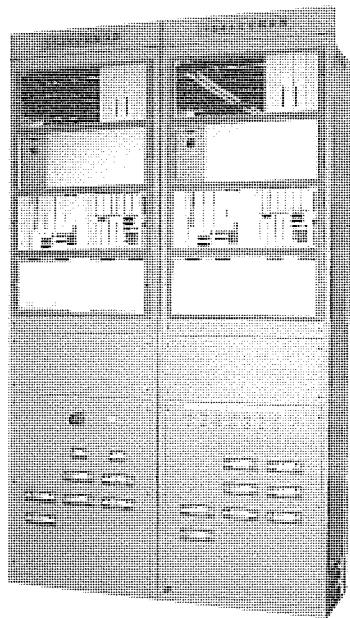


図 7. 電流差動形ディジタル母線保護装置の外観

化も進められ、1989年から実運用に入っている。

2.3.1 空心形CTの特徴

外観はブッシング形CTと全く同じで、構造も鉄心がない点を除き同一である。空心形CTの特徴を列記すれば次のようになる。

- (1) 鉄心を使用しないので飽和することがなく、2次出力は1次電流の微分値に比例した電圧値となる。
- (2) 相互インピーダンスは、商用周波で0.005Ω程度と小さく（変成比は1,000A／5V）2次出力開放でも過大電圧を発生することがない。
- (3) ヒステリシスがなく、誤差は全電流域で1%以下である。
- (4) 過渡特性付きCTに比べ小形、軽量である。
- (5) 2次出力が1次電流の微分値のため、1次電流中の高調波はその高調波次数倍として2次側に伝達される。

空心形CTを適用する場合には、この高調波の問題に留意する必要がある。

2.3.2 実用化された母線保護

リレーの機能ブロック図を図 8 に示す。リレーは、差動要素と比率要素から構成されている。リレーアルゴリズムは、CT飽和対策が不要のため一般に用いられている振幅演算で実現しており、サンプリング周波数も一般的な電気角30°である。

また、このディジタルリレーに適用されたフィルタは、アナログフィルタとディジタルフィルタにより構成しており、1段フィルタはサンプリング定理による折り返し誤差対策、また2段フィルタは巡回形フィルタで構成し、低次高調波の除去を目的としている。実用化されたリレーの高調波性能は、従来の電流差動リレーに対し同等以上を確保している。

また、従来アナログリレーでは、空心形CT 2次出力を直列に接続した単純差動方式が標準であったが、ディジタル化により各端子電流を直接A/D変換する方式が採用可能となり、空心形CT 1コアで比率差動演算が可能となつばかりでなく、一括、分割の二重保護も実現可能となつた。

図 9 は、大電流試験設備で実施した外部事故時の性能検証結果の一例である。また、装置動作時間はCT飽和対策が不要なことからリレーアルゴリズムがシンプルとなり、実力1.5サイクル以下を確保で

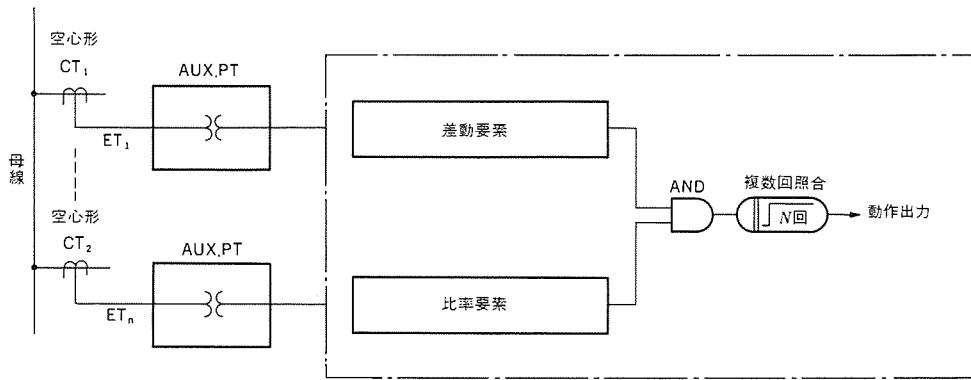


図8. 空心形CT適用のリレー機能ブロック図

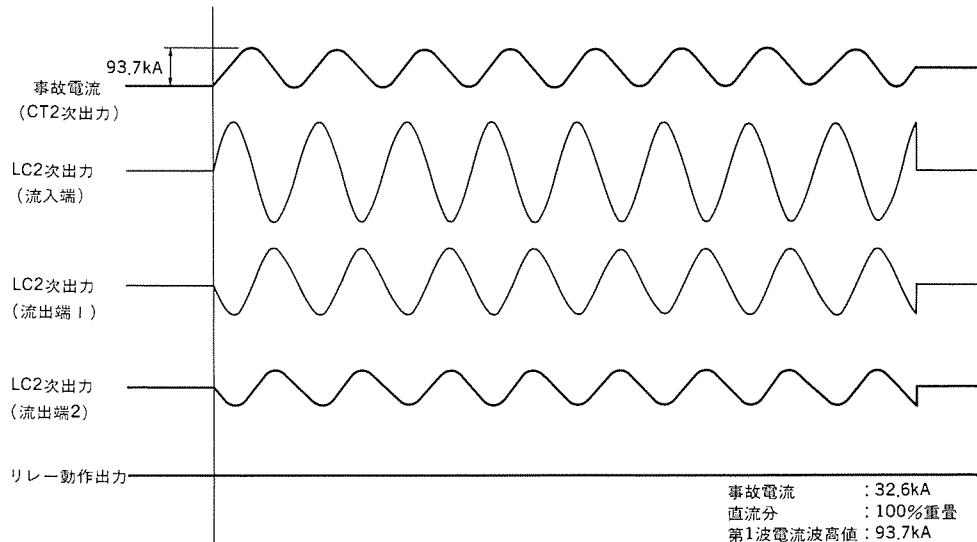


図9. 大電流試験設備による外部事故時のオシロ

きる。

3. 変圧器保護リレー装置

変圧器保護のデジタル化は、1981年以降実施され現在まで多数の装置が実運用されている。以下、最近の動向として励磁突入電流対策及び予測演算による過負荷保護の実用化について紹介する。

3.1 励磁突入電流対策

励磁突入電流対策としては、差動電流中の第2高調波に着眼した方式が一般的であり、デジタル装置でも基本的には同じアルゴリズムが適用されている。しかし、最近の大容量ケーブル系の増大に伴い、変圧器内部事故時に第2高調波付近の低次高調波が増加する傾向にあり、励磁突入電流対策の見直しが必要になってきている。系統で発生する高調波に影響されない対策として、並列コイル間差動、変圧器モデル回路によるモデルリファレンス方式等がある。これらは、いずれもデジタル化による実用化が検討されている。

(1) 第2高調波による励磁突入電流対策の方向性

将来の大容量ケーブル系(充電電流10,000Mvarまで考慮)を模擬したEMTPによる500kV変圧器の内部事故シミュレーション結果では、500kV側口出し事故においては第2高調波含有率が100%程度と大きくなるものが、事故点が変圧器内部に移るにつれ第2高調波含有率は小さく抑えられることが示されている。

変圧器保護リレーでは、HOC要素(励磁突入電流対策なしの高速差動リレー)とDf要素(励磁突入電流対策付きの比率差動リレー)の2要素から構成されており、大電流事故をHOC要素主体として保

護協調をとれば、第2高調波による励磁突入電流対策は十分にその性能を確保することができる。

また、変圧器内部事故時の1次、2次、3次端子電流、変圧器中性点電流、差動電流の第2高調波含有率の比較では、変圧器中性点電流中の第2高調波含有率が最も小さくなる。直接接地系での変圧器中性点には励磁突入時、この励磁突入電流の60%が分流する。また、2相以上の励磁突入発生では、変圧器中性点電流中の第2高調波含有率が大きく見えることから、これに着眼した性能向上策も有効である。

(1) 並列コイル間差動方式

大容量変圧器では、コイルが並列回路で構成されることが多く、外鉄形変圧器では並列コイルを鉄心に対し左右対称に配置することができ、磁気回路上も全く等価とすることができる。したがって、変圧器投入時の励磁突入では、並列コイル間の電流分布に不均衡を生じない。一方、変圧器内部事故時では並列コイル間の電流分布に不均衡を生じるので、励磁突入と内部事故を識別することができる。

並列コイル間差動は、電気及び磁気回路上等価なコイルについて適用可能であるから、並列コイルの組合せを最適なものとし並列コイル間差動のネットワーク化を図れば、変圧器の全コイルに対し1ターンレアの検出も可能となる。また、この方式は励磁突入電流対策が不要となることから高感度化に加え高速化も同時に実現することができる。なお、実機500kV変圧器による励磁突入試験の結果、最小検出感度を変圧器定格電流の3.5%としてリレー性能上問題のないことが確認されている。

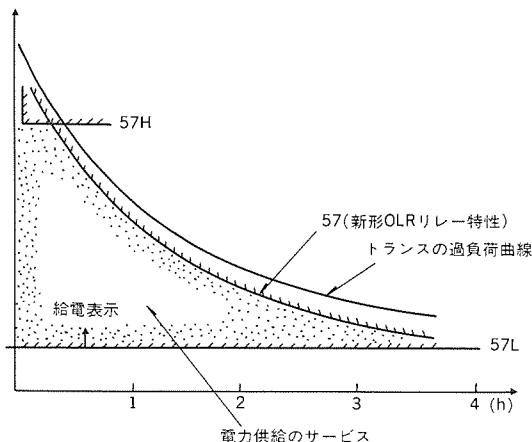


図10. 過負荷保護協調曲線

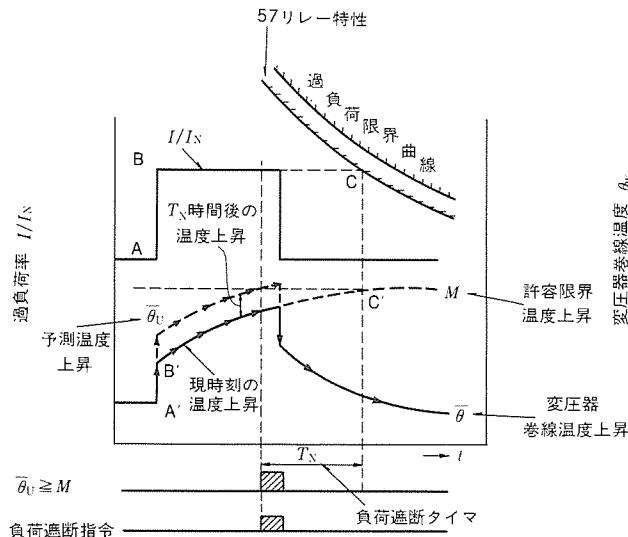


図11. 温度上昇予測の考え方

(3) モデルリファレンス方式

変圧器回路をモデル化し、このモデル回路での状態量変化を実機変圧器と比較する方式である。状態量としては、電圧、電流、回路定数の3量を選択することができる。方式として電圧(磁束)比較形、電流比較形、回路定数比較形の3タイプが考えられる。また、変圧器のモデル回路は、常時及び励磁突入時を記述するものでなければならないが、常時の変圧器励磁電流は変圧器定格電流の0.1%以下であることから励磁突入と内部事故を識別する意味からは、励磁突入時(変圧器空心状態)のみのモデルとしても実用上は問題ない。

3.2 予測演算による過負荷保護

従来の変圧器過負荷は、過電流リレーによる段限時特性で保護していたが、この方法は比較的余裕のある過負荷での過剩遮断又は過電流リレー検出レベル限界付近での動作、復帰の繰り返しによる過負荷解消不可等の欠点があった。デジタル変圧器保護では、過負荷保護機能の向上及び電力供給サービスの向上のため、新しい過負荷保護リレーアルゴリズムが導入された。図10に実用化された新しい過負荷保護リレー特性図を示す。

(1) 変圧器巻線温度と過負荷曲線

変圧器の寿命は、変圧器巻線温度により決まり、変圧器過負荷曲線もこの巻線温度をもとに算出される。変圧器巻線温度 θ_v は、周囲温度(外気温度) θ_a に周囲温度からの油温上昇 θ_o 及び巻線-油温度差 θ_g を加えたものとなる。油温上昇 θ_o 及び巻線-油温度差 θ_g は、負荷電流から求め得るので、巻線温度 θ_v は負荷電流の関数となる。また、油温上昇率 $\frac{d\theta_o}{dt}$ 及び巻線-油温度差の上昇率 $\frac{d\theta_g}{dt}$ は、負荷電流の1次遅れとして求め得る。

(2) 変圧器巻線温度の予測演算アルゴリズム

予測演算の考え方を図11で説明すると、過負荷率がA→Bに任意変化した場合、変圧器の巻線温度上昇(θ)は、A'→B'に上昇変化するが、そのままで運転を続けるとC'に達し、許容限界温度上昇(M)を超えることになる。そこで、 T_N (s)後の温度上昇(θ_U)を予測演算し、 T_N (s)後の温度上昇(θ_U)が M を超えるかどうかを判定し、 M を

超えた時点で負荷遮断指令を発し過負荷の解消を図る(これは、過負荷率Bで運転を続けると巻線温度上昇(θ)は、 T_N (s)後にはMに達するものと予測し、 T_N (s)前に負荷遮断指令を発する形となる。)。

この方式により、過負荷許容時間にほぼリンクした保護特性が実現できるとともに、現状の時間協調不十分による過剩遮断が改善される。また、変圧器の巻線温度上昇を近似した特性を用いているため、過負荷率の変化に対しても適正な保護が期待できる。さらに、従来の過電流リレーのタップ値限界付近の過負荷についても改善されることになる。

4. むすび

以上、母線保護、変圧器保護を中心にデジタル化の概要及び技術動向について紹介した。デジタル形保護装置は、その特長を生かし今後とも急速に実運用実績を増やしていくものと思われる。また、各リレー装置のデジタル化が一とおり完了したことにより、総合デジタル化の新しい展開も期待される。

参考文献

- 前田ほか: Digital Busbar Protective Relay System, CIGRE '89 Bournemouth Symposium (1989)
- 前田ほか: デジタル形母線保護装置の開発, 平成元年電気学会全国大会
- 渡辺ほか: 空心変圧器を適用したデジタル形母線保護装置の開発, 平成元年電気学会全国大会
- 松崎ほか: 110kV以下デジタル母線保護装置(CB不動作対策付)の開発, 昭和62年電気学会全国大会

全ディジタル保護・制御システム

大橋信富美* 石井隆裕* 安斎俊夫**
 前田隆文* 鈴木 愿** 五嶋民生**
 宮内隆男* 柳瀬秀史** 岩丸明史**

1. まえがき

変電所の保護システムは、高性能化、高信頼度化のより一層の要求により、従来のアナログ形からディジタル形へと急速に変化してきた。また、制御システムは、総合自動化等への対応から情報伝送量の拡大と制御機能の高度化が図られてきた。しかしながら、これらシステムのディジタル技術導入の進展に伴い、装置の増加、多様化が進み、工事・運転・保守面での複雑さの増大、設置スペースの拡大等から保護・監視制御を統合したより合理的なシステム構築が望まれている。

これに対応して、保護・制御装置を屋外の開閉機器近傍へ分散配置し、これらを光LAN(Local Area Network)で効率的に情報結合する屋外分散形全ディジタル保護・制御システムを、東京電力(株)と3メーカー合同で開発し、実機適用されるに至った。

また、電力の安定供給確保のため、より一層の高精度な電圧安定維持を図ることを目的として、きめ細かな常時電圧制御と、急激変化への高速応動機能を備えたVQ制御装置を東京電力(株)と開発した。以下にこれらの概要を述べる。

2. 屋外分散形全ディジタル保護・制御システム

システム構成は図1に示すとおり、送電線や変圧器等の設備単位

ごとに、屋外の開閉機器近傍に端末装置と保護リレーを分散配置し、制御室内の集中監視制御装置、オシロ装置などとスター形の光LANで結合する構成となっている。また、母線保護システムは、独自のLANを持ち、各端末装置のバスプロ入出力端末部とリレー演算部を結合している。制御システムと保護システム間は、制御端末装置と各保護リレーごとに1対1の専用光伝送路で結合されている。これらすべてのシステムは、実際には完全2系列となっている。

このシステムの機能は、表1に示すとおり、変電所構内機器並びに系統状態の監視・計測と故障表示、機器制御操作、保護の各機能を持っており、仕事量の均等化、伝送効率向上の面から機能分散を図っている。

2.1 制御システム

制御システムは、主回路機器近傍に設置された制御端末装置と制御室に設置された集中監視制御装置、オシロ装置との相互間を光LANで結合し、機器状態監視、計測、故障表示、機器制御操作、電流電圧波形記録等を行うものである。端末装置は、信号・情報の入出力とLANとの結合を行うもので、図2に示す構成となっている。光LANは、2.3節で述べるトーカンパッシングバスアクセス方式を用いており、端末局数が多いこと、リアルタイム性をあまり必要としないことから、後述するデータ送出権割当方式を適用している。監視制御システムの各機能は、以下の方で構築されている。

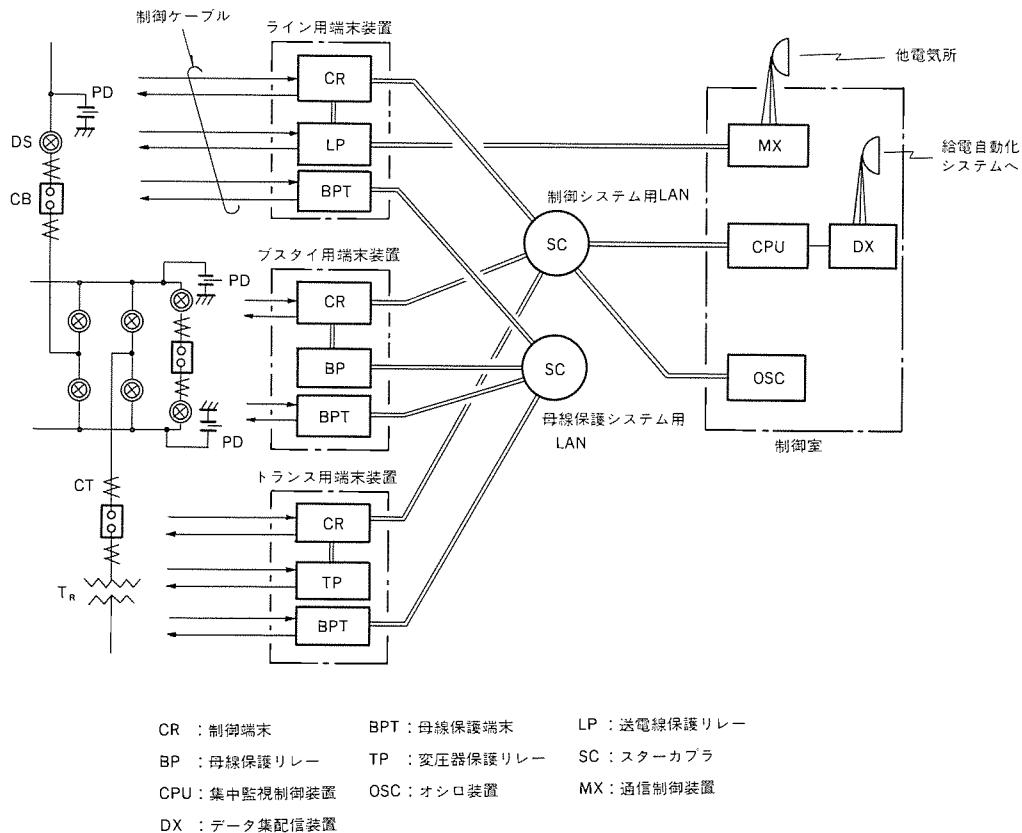


図1. システム構成

表1. システム各部の機能

項目	機能
集中監視制御装置	<ul style="list-style-type: none"> ● 状態監視 主回路開閉状態、母線電圧、潮流 (I, P, Q)、保護リレー動作、設備異常 ● シーケンス制御 ● 機器操作 (主回路機器、補機など) 指令 ● 保護リレー等の使用、ロック ● 保護リレー整定、VQプログラム設定 ● 故障点標定記録
自動オシロ	<ul style="list-style-type: none"> ● 自動オシロ (出力) ● 記憶部制御 (起動、停止)
分散形保護装置	<ul style="list-style-type: none"> ● 送電線、母線、機器の保護 (AD変換、事故検出、再閉路) ● 保護リレーの自動監視 (常時監視自動点検) ● 保護リレー整定 ● 保護リレー使用、ロック ● 保護リレートリップロック ● 故障点標定
分散形制御装置 (制御端末)	<ul style="list-style-type: none"> ● 計測データ作成 (AD変換, I, V実効値, P, Q, f演算) ● 同期検定 ● 自動オシロ (データ記憶) ● データの編集、伝送制御 ● 機器操作 ● 保護リレー等の使用、ロック (中継) ● 母線無電圧検出 ● 線路無電圧検出 ● 欠相検出 (母線) ● LS/ESインターロック (ソフトにて作成)

(1) 制御操作

機器制御並びに43スイッチ切替操作は、集中監視装置からの選択・操作の2挙動方式で、制御端末からの選択完了アンサ受信後、操作指令を出すシェークハンド方式としている。CB(遮断器)投入操作時は、端末装置内の自動同期投入機能で演算し、最適投入点でCB投入が図られるようにしている。

(2) 計測

系統の電流・電圧などの計測は、LANに同期したサンプリングタイミングで、各端末に取り込まれるCT・PT 2次値を端末装置で実効値演算した後、計測値として伝送され、表示される。

(3) 状態監視・故障表示

機器開閉状態、43スイッチ切替状態等の状態表示情報や故障表示情報は、接点を直接取り込むか又は保護リレーからの専用伝送路を介した情報伝送により、端末装置で集約・伝送され、表示・印字される。

(4) 波形記録 (自動オシロ)

リレートリップ及び母線電圧低下等オシロ起動要因が発生すると、オシロ装置から全端末局に一斉同報で起動信号が送信される。端末装置では、CT・PT瞬時値を記憶し、全端末からオシロ装置へ向け、数データずつ分割して伝送する。オシロ装置では、各端末情報を受け取り、時間軸合わせを行った後、波形再成印字を行う。

(5) 遠方整定・遠方点検

このシステムでは、保護リレーが分散配置されているため、運用

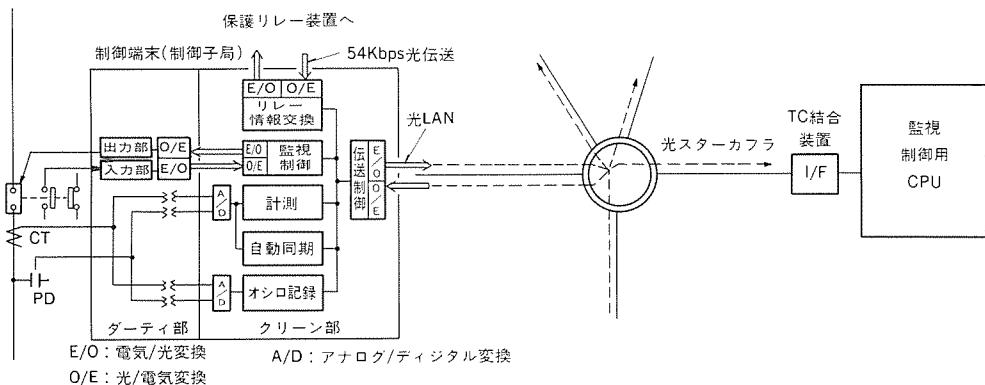


図2. 制御端末の構成

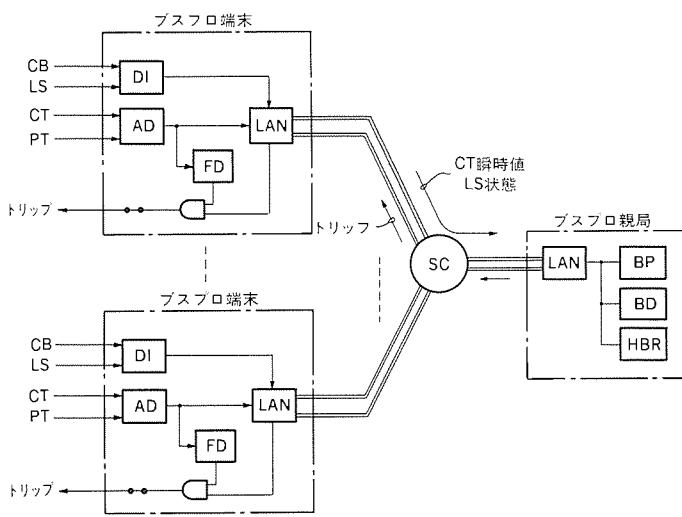


図3. 母線保護システムの構成

保守の容易性を考慮して、制御室からリレー整定、装置点検ができるようになっている。整定は、集中監視制御装置でオフラインで準備された整定値を、端末装置を経由して保護リレーに伝送するもので、従来の整定方法と同一の手順で行える。点検は点検起動信号を与え、保護リレー自体の自動点検機能で結果判定を行うようにしている。

2.2 保護システム

保護システムは、現状のデジタルリレーをキュービクル内に収納し、開閉機器近傍に分散配置して、同じく機器近傍に設置した制御端末と専用の光伝送路で結合している。このうち母線保護システムについては、各開閉設備ごとにCT入力、開閉器条件、CBトリップを必要とするため、データ入力部を各開閉設備ごとにバスプロ端末として分散配置し、母線連絡遮断器近傍に設置されたバスプロ親局と光LANで結合している。母線保護システムの構成を図3に示す。

光LANは制御システム同様、2.3節で述べるトーカンパッシングバスアクセス方式を用いているが、全端末リアルタイム情報が必要

表 2. 光LAN基本仕様

項 目	仕 様
最大端局間距離	2km (端局—スターカプラ間1km)
伝 送 路 媒 体	光ファイバケーブル
伝送路トポロジー	光スターカプラによるバス形
伝 送 制 御 方 式	IEEE 802.4 トーカンバス方式
伝 送 速 度	10Mbps

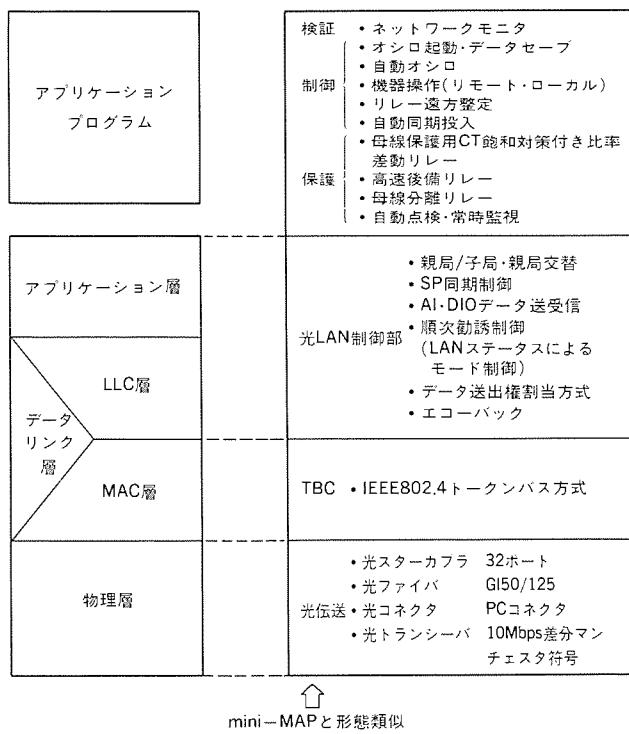


図4. OSIモデルとトーカンバス方式光LAN

なことから、1サンプリング間隔の間に、全端末の情報更新がなされないようにトークンを巡回させている。

母線保護システムは、各バスプロ端末がLANを基準としたサンプリングタイミングで得たCT情報、CB・LS（断路器）情報を、遅滞なくバスプロ親局に伝送し、リレー側で同一時間断面の全端末データを用いて事故検出演算を行い、母線事故と判定した場合は事故発生と同時に全端末に対し、CBトリップ指令を送り、各端末からCBトリップを行う。バスプロ親局には、CT飽和対策付き比率差動式母線保護リレー（BP）（一括・分割とも）に加え、母線分離リレー（BD）、高速後備リレー（HBR）の機能も収納されている。また、フェイイルセーフとして、各端末に事故検出リレーを分散配置し、母線保護リレー（BP）からのトリップ指令と事故検出リレーの論理積で、CBトリップ出力を送出することとし、一層の信頼性向上を図っている。

2.3 情報伝送方式

このシステムで用いたLANの仕様を表2に示す。変電所保護・制御用光LANは、全端末サンプリング同期がとれ、リアルタイム情報が得られることが必要である。このことから、トポロジーとしては、1局の障害が全系に波及せず、増設が容易で、なおかつ伝送遅延がほぼ一定となり、サンプリング同期に有利である点で、スターカプラーを用いたスター形とした。

表 3. 物理層仕様

項 目	仕 様
発 光 素 子	LED 中心波長 850 ± 40 nm ファイバ内入力電力 -13~-15dBm
受 光 素 子	APD 受光電力範囲 -28~-45dBm
符 号 形 式	差分マンチェスタ符号 伝送速度 10Mbps \pm 100ppm 光波形 幅ひずみ \pm 5ns以下 立ち上がり 10ns以下 立ち下がり 10ns以下
光ファイバケーブル	GI 50/125 伝送損失 3dB/km以下
光スター カプラ	32×32形 挿入損失 17~21.2dB

伝送方式は、標準化の観点からOSI (Open System Interconnection:国際標準化機構=ISO提唱の開放形システム) モデルを基本とした。図4にOSIモデルとこの方式との対比を示す。特にMAC (Media Access Control) 層には、IEEE802.4準拠のトーカンパッシング バスアクセス方式を採用した。トーカンパッシング バスアクセス方式は、GM (ゼネラルモータース) の提唱したMAP (Manufacturing Automation Protocol) で世界標準となりつつある方式であり、アドレスの大きい局から小さい局へ送信権 (トーカン) を順次受け渡していく、トーカンを得た局が情報送出できる権利をもつ方式で論理的にはリング状となる。また、IEEE802.4では、物理層は同軸ケーブル上のブロードバンド又はキャリアバンドで規定されているが、変電所構内における機器開閉操作に伴うサーボ・ノイズの影響や強電界下での使用に支障がないようにするために、光ファイバを採用し、光伝送とした。表3に物理層仕様を示す。加えて、サンプリング同期機能を追加することにより、保護・制御システムに適した伝送方式を実現している。図5に伝送方式を示す。

さらに、前述したように制御システムでは、データ量が多く局数も多い反面、比較的低速でもよいことから、データ送出権割当方式を採用している。データ送出権割当方式は、高速情報と低速情報が同一LAN上に存在する際に有効な手段であり、図6に示すように、高速情報を持つ局は、毎回データを送信し、低速情報のみの局は、30回に1回データを送信するものとしている。各局は、親局情報を受信するたびに、自局のRGHTカウンタを減じていき、自局アドレスとRGHTカウンタの値が等しくないときは、トークンをバスするのみとし、等しくなったときはデータを送出する。

保護リレーと制御端末間の情報伝送は、図7に示すとおり各端末ごとに専用の伝送路で、2系列の保護リレー、2系列の制御端末相互間をそれぞれ結合している。伝送仕様は、PCMディジタル電流差動リレーと同様の54Kbpsサイクリックシリアル伝送方式を用い、光ファイバで結んでいる。

3. VQ制御装置

VQ制御装置は、変電所の母線電圧、変圧器通過無効電力を監視

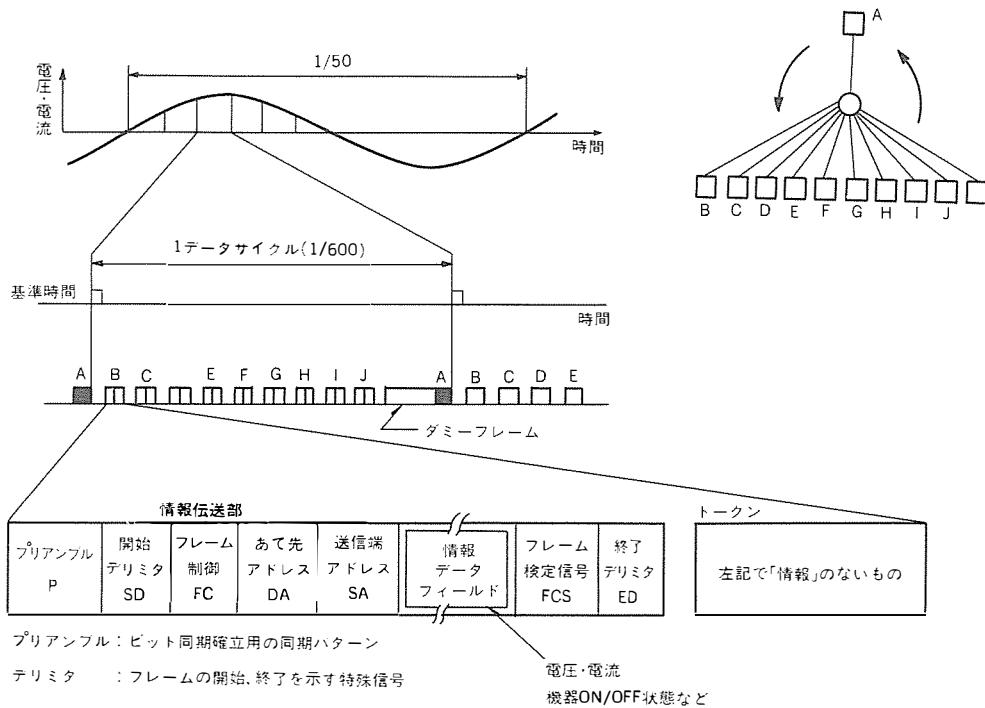


図5. 伝送方式

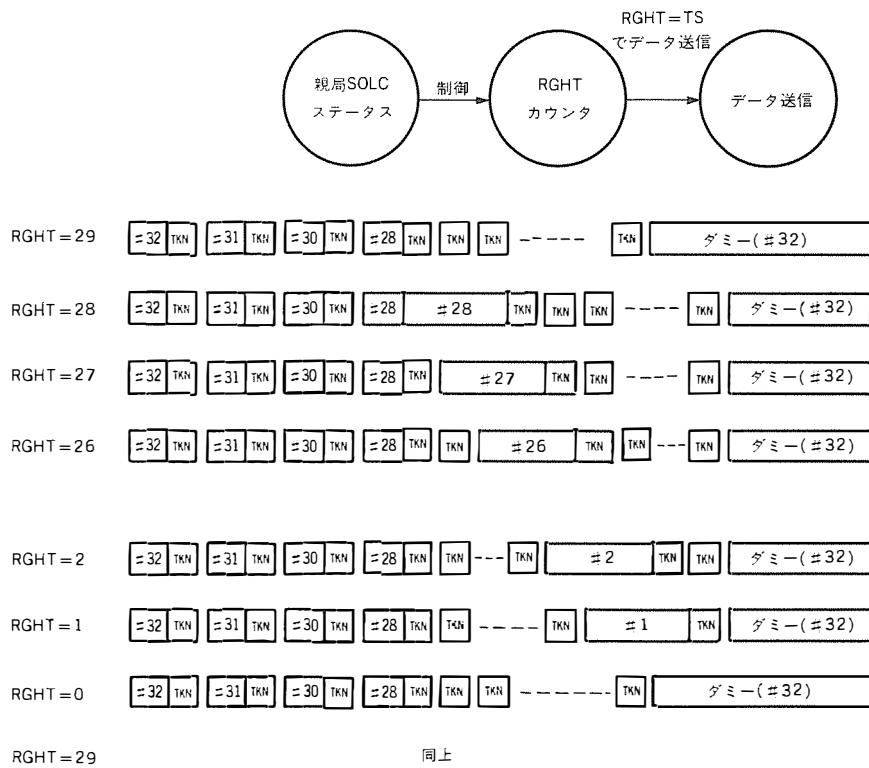


図6. データ送出権割当方式

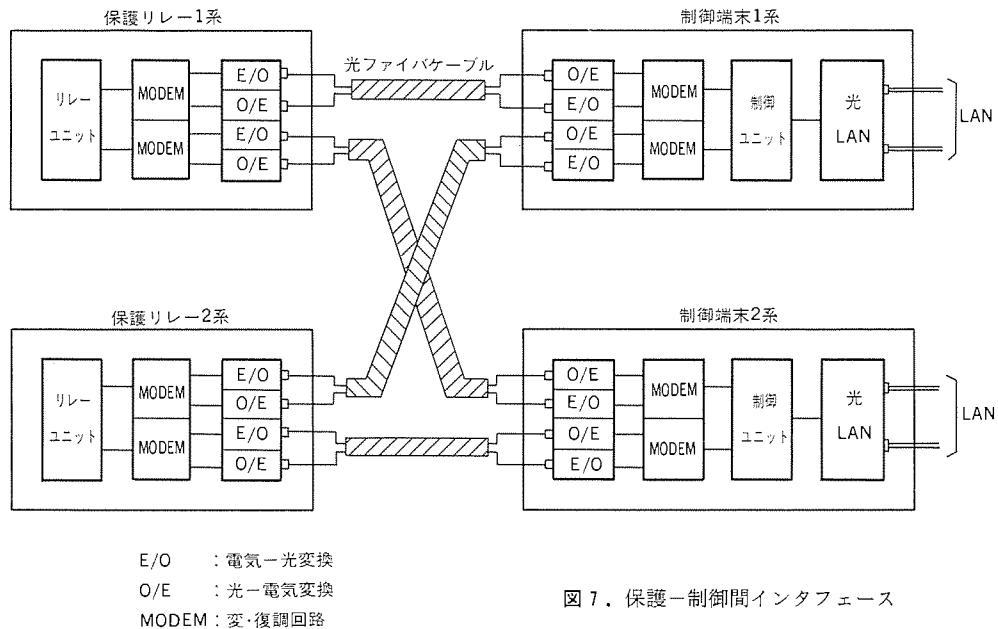


図 7. 保護-制御間インターフェース

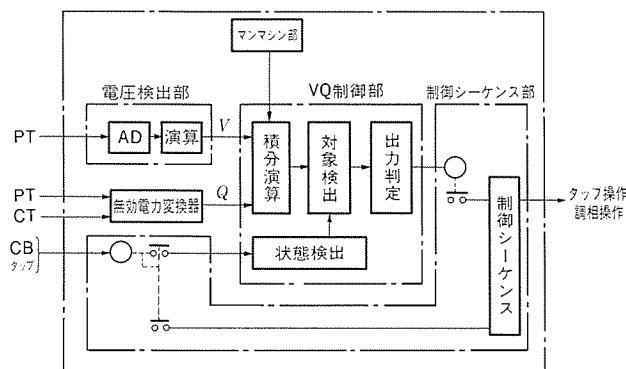


図 8. VQ制御装置の構成

し、あらかじめ設定された目標値と比較し、その偏差積分量が一定値に達したとき、系統に接続された調相設備（進相コンデンサ、分路リアクトル）及び変圧器タップを最適制御し、電圧及び無効電力の適正值維持を図り、系統電圧安定を図るものである。システム構成は図8に示すように、電圧検出部、VQ制御部、無効電力変換器、制御シーケンス部、マンマシン部から成っている。電圧検出部は専用のプロセッサを用いて、高精度な電圧計測演算を行う。VQ制御部は、電圧検出部、無効電力変換器から系統情報を、また制御シーケンス部から、CB・LS開閉状態を受け取り、目標値との偏差を積分し、その結果で制御指令を制御シーケンス部に送出する。制御シーケンス部では、CB・LSの入力インターフェース、タップ制御シーケンス、調相操作シーケンスを各々行っており、リレーで構成されている。マンマシン部は、専用プロセッサで、整定・表示を制御している。VQ制御装置の基本機能は、調相設備、変圧器タップの制御による電圧・無効電力の制御であるが、主な機能として以下の機能を持っている。

(1) 電圧・無効電力維持制御

一次電圧 (V_1)、二次電圧 (V_2)、無効電力 (Q_1) の各々について、各5パターンのスケジュール設定が可能で、選択されたスケジュールを目標値として、積分制御を行う。制御方式として、 $V_1 - V_2$ 、 $V_2 - Q_1$ 、 $V_2 - Q_1 - V_1$ 、 V_2 各々の変数を対象とした4方式が選

択できる。このうち、 V_1 と V_2 は総合精度0.3%以内の高精度となっている。また、一次電圧だけが目標値から逸脱した場合に、二次電圧を維持しつつ一次電圧が制御できる適正な機器選択ができるよう、制御特性を図9に示すようにしている。

(2) 電圧急変時制御

電圧に急激な変動があった際には、全系にわたって速やかに電圧安定が図られるように、図10に示すとおり、電圧レベルに応じて積分制御出力を待たずに高速で制御出力を出すこととしている。

(3) 静止形無効電力補償装置 (SVC) との協調制御

SVCは、常時の系統変動に即応するものであるが、変動の度合いによっては、SVCの出力が、進み／遅れいずれか片側にはりつく時間が長くなり、本来の効果が発揮されない現象が生じる。これに対応するため、SVCの発生する無効電力 (Q_{svc}) を監視し、SVC発生無効電力 (Q_{svc}) を一次電圧 (V_1) 又は無効電力 (Q_1) に対して補正することで、VQ制御装置として、SVCの効果を無視してSVCが常時動作余力を確保できるように、調相設備を制御するようにしている。図11に、一次電圧補正を行った制御ブロック図例を示す。

(4) その他

その他、系統電圧監視 (OV, UV)、制御対象判定などを備えており、母線構成の運用状態及び変圧器、CB・LSの状態により、制御しうる変圧器タップ及び調相設備を自動的に選択する。調相設備の選択は、各変圧器が均等な調相設備投入量となるよう、既投入数をみながら、次操作候補を決定する制御方式としている。また、整定操作の簡素化を行えるよう、項目選択がランプ指示によって順に行えるガイド方式とし、スケジュール目標値に対しては、5パターン相互でコピーができるようにして、運用性の向上を図っている。

4. む す び

以上、全ディジタル保護・制御システム並びにVQ制御装置について述べた。これらのシステムを適用することにより、建設時コストの低減、保守運用業務の省力化、合理化、設置スペースの縮減、高性能化、高信頼度の確保が図られる。また、これらのシステムは、変電所用として紹介したが、その応用範囲は電力関連の全分野をはじめとして、産業分野に広く適用可能である。我々はフィールドに

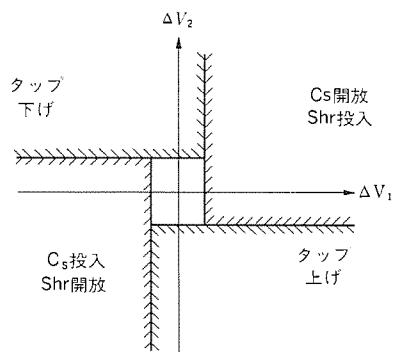


図9. VQ制御特性

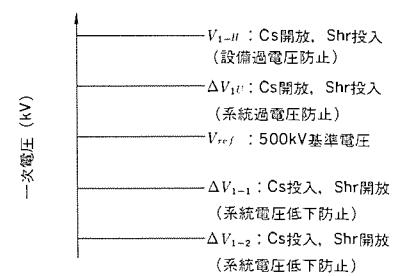


図10. 電圧急変時高速制御の概念

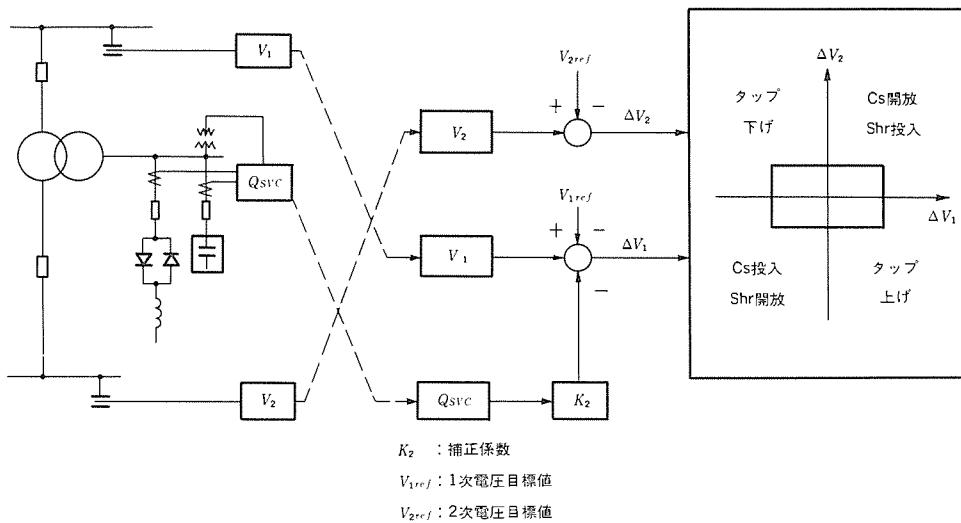


図11. SVC補正の例

おいて、その有効性を確認しているが、今後より一層の高機能化・高性能化を図っていく所存である。

最後に、これらのシステムの完成に、御指導、御協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 大浦ほか：光LANによる変電所全デジタル保護制御システムの動向、OHM (1987-9)
- (2) 鈴木ほか：変電所全デジタル保護制御システム用トーケンバス方式光LAN、昭和63年電気学会全国大会論文
- (3) 高橋ほか：屋外分散形変電所全デジタル保護制御システムの開発(2)母線保護リレーシステム、昭和63年電気学会全国大会論文

- (4) 大橋ほか：屋外分散形変電所全デジタル保護制御システムの開発(3)制御システム、昭和63年電気学会全国大会論文
- (5) 吉田ほか：屋外分散形変電所全デジタル保護制御システムの開発(4)送電線保護リレー装置、昭和63年電気学会全国大会論文
- (6) 野極ほか：光LANを適用した新しい変電所保護制御システムの実証試験結果について、平成元年電気学会全国大会論文
- (7) 鈴木ほか：デジタル形電圧-無効電力制御装置の開発、昭和62年電気学会全国大会論文
- (8) 鈴木ほか：基幹系統用変電所電圧・無効電力制御装置の高性能化対策、平成元年電気学会全国大会論文

電総研TPE-1 RM15逆磁場ピンチ 核融合実験装置（前編）

小川 潔* 島田寿男* 平野洋一* 八木康之** 大藪 勲*** 山口作太郎† 山根 実*** 池田和郎++ 久野和雄++ 村上昇太郎++

1. まえがき

将来のエネルギーを求めて、太陽エネルギーを地上で実現すべく、核融合の研究が進められている。高温プラズマの閉じ込めを必要とする核融合発電炉を実現するために、現在磁気閉じ込め方式が主流となっており、世界中にトカマク方式、逆磁場ピンチ方式、ヘリカル方式、ミラー方式などの装置が建設されている⁽¹⁾。通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所（電総研）の逆磁場ピンチ実験装置 TPE-1 R (M) は、逆磁場ピンチ方式としては1981年当時、世界最高の電子温度（600万度）を達成し、世界の核融合研究に大きな衝撃を与えた。英國原子力公社カラム研究所から2名の研究者が日本へ派遣され、電総研と共同研究を行いデータの再確認を行った。比較的高温でのRFP概念の実験的確認とその後のRFP研究発展の基礎を築いた。TPE-1 R (M) の成果を基に、1983年度から電総研エネルギー基礎部プラズマ研究室に新しい構想の基に、後継機として中型逆磁場ピンチ実験装置TPE-1 RM15の製作が開始され、1985年12月に主要部分が完成し、プラズマの着火に成功した。その後、1986～1988年度に一部装置の改造と増設を行った。

この論文は、TPE-1 RM15装置の基本思想・設計・製作・試験について概説したものである。個々の部分の詳細並びにプラズマ実験については参考文献を示した。前編に負荷系、後編に電源系及び試験について述べる。前編は、逆磁場ピンチ方式の特徴、電総研におけるRFP実験の経緯と成果、TPE-1 RM15の基本的目標、装置設計の基本的考え方及びTPE-1 RM15の負荷系について述べる。TPE-1 RM15の外観写真を図1に示す。

2. 逆磁場ピンチ (RFP) の原理及び特徴

RFPによるプラズマ閉じ込めの原理を示す模式図を図2に示す。RFPは、高温プラズマをその容器（真空容器）の壁から絶縁して閉じ込めるため、トロイダル方向(ϕ)の磁場及びポロイダル方向(θ)の磁場の二つの磁場の組合せを使用する。トロイダル磁場、すなわち大円周方向の磁場は、容器の周りに巻かれたトロイダルコイルにより誘起される。ポロイダル磁場、すなわち小円周方向の磁場は、容器と同円周方向に巻かれたポロイダルコイルにより、トランスの原理によって容器内のプラズマに誘起される電流（プラズマ電流）により作られる。このポロイダル磁場によってプラズマが圧縮され（ピンチ現象）、その結果プラズマ中のトロイダル磁場が同時に圧縮され中心部のトロイダル磁束が増加する。これらのトロイダル磁場とポロイダル磁場の組合せにより、ねじれた網状筒形の磁力線が容器内部にそって形成され、その中に高温プラズマが保持され容器の壁に接触せずに保たれる。この閉じ込め原理は、トカマクと同じであるがRFPとトカマクの決定的な相違点は、図2 RFP及びトカマクの磁場プロファイルから分かるように、RFPにおいてはトロイダル磁場(B_ϕ)をプラズマ内面と外周面で反転させることにより、トカマクではポロイダル磁場の数倍を要するトロイダル磁場をRFPで

は同等に抑えることができる。これが逆磁場ピンチと呼ばれるゆえんである。

最近、RFP研究は、温度、密度、閉じ込め時間等のプラズマパラメータの向上、有望なスケーリング則（装置の大きさ、プラズマ電流値、磁場強度等に対するプラズマパラメータの比例則。大型装置設計の指針となる。）の達成等、閉じ込め物理の実験的成果が理論的成果と相まって、急速に注目を集めてきた。それと同時に、RFPの基礎概念の理解が進んだこと、及び核融合炉計画の中でトカマクに対する代替路線としての評価が一層高まってきたことは重要なことである。RFP研究の現状を概観するとき、今日の研究の進歩は急激であり、これまで多くの機会に多数の著者により、それぞれ異なった観点からレビューがなされている⁽²⁾⁽³⁾。

RFPは、トロイダル方向の磁場(B_ϕ)及びポロイダル方向の磁場(B_θ)の組合せで、高温プラズマを発生し安定に閉じ込める軸対称トーラス系（ドーナツ形プラズマ閉じ込め装置）である。以下に述べ

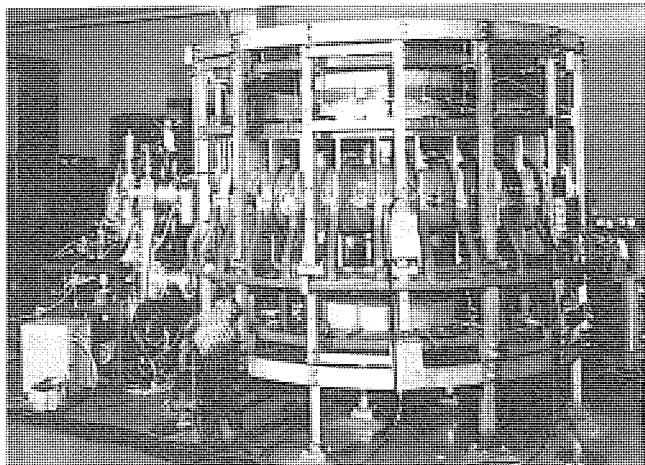


図1. TPE-1 RM15逆磁場ピンチ核融合実験装置の外観

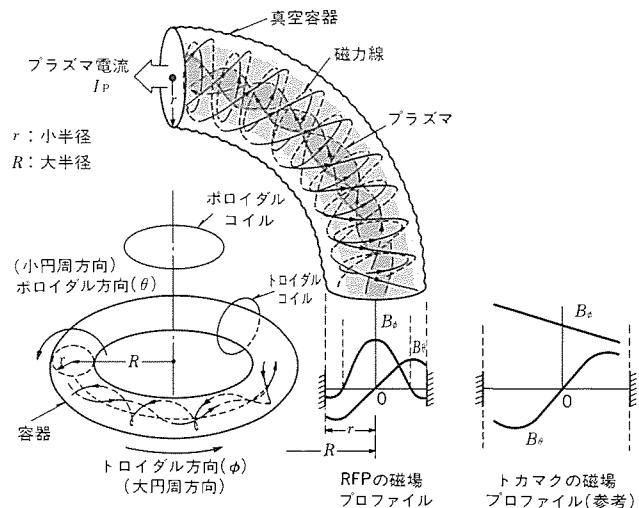


図2. RFPによるプラズマ閉じ込めの原理を示す模式図

るようRFPは、他と際立って異なる特徴がある。

(1) 磁場プロファイル(配位)は、トロイダル磁場 B_ϕ がプラズマ柱の内外で逆転している。そしてパロイダル磁場 B_θ は、トロイダル磁場 B_ϕ と大略同程度の大きさであり、 B_ϕ はトカマクのトロイダル磁場に比べてかなり小さい。磁場の安全係数 $q(r)$ 〔 \equiv (小半径 r /大半径 R)・(B_ϕ/B_θ)〕は、軸上で1以下の値(～0.2)をとり、半径に沿い外側にいくに従い減少し、 $q=0$ を通りプラズマ外周で負となる。このため、磁場のシェア(磁力線のねじれの変化率)[(r/q)・(dq/dr)]は大きく、局所的MHD(電磁流体力学)モードは安定化の傾向にある。

(2) プラズマの平衡は、原則として金属シェル又は外部からかける垂直磁場、あるいは両者の組合せで制御する。小半径より大きい波長の不安定MHDモードは、金属シェルで安定化される。

(3) プラズマ電流は、ほとんど磁場に平行で、その径方向分布はプラズマの安定性及び閉じ込めの性格を決めている。そして、電流にトカマクでは、トロイダル磁場強度に対応してプラズマ電流をそれ以上大きくするとプラズマが不安定になる限界値(K-S(Kruskal-Shafranov)リミット)が存在する。RFPでは、K-Sリミットに対応した限界値は存在しない。現在RFP炉に適したベータ値(プラズマ圧力と磁場の圧力の比)(～10%)を抵抗加熱のみで達成している。

(4) プラズマのMHD不安定性は、アスペクト比(R/r)に強く依存しない。

核融合炉実現の観点から考えてみると、

(1) アスペクト比は、物理より主に装置建設の工学的要求から決定することができる。

(2) ベータ値は、種々のMHD不安定性により制限されるが、実現される値は大きい(～10%)。したがって、閉じ込め効率が良い。

(3) $|q| < 1$ であるから、抵抗加熱のみで核融合反応の点火(イグニション)に達する可能性があり、他の複雑で高価な加熱装置を附加する必要がない。

(4) プラズマの閉じ込め磁場は、トカマクやヘリオトロンに比べて値は小さく、しかもトロイダル磁場はプラズマ外周にいくに従い減少し、壁で極めて小さい値である。従って、トロイダルコイルなど負荷系や装置の構造物などにかかる電磁力は小さくなる。

等々他の磁場閉じ込め炉に比べて有利な点が多く、技術的に制限の少ない、より簡単で小型の経済的な炉の実現が期待できる⁽⁴⁾。RFPは、トロイダルプラズマ閉じ込め研究にとり、多くの興味ある問題を提供している。その基本概念の理解、閉じ込め実験結果の解釈及び閉じ込め向上の方策等々、トカマク及びヘリオトロンとともに、

それぞれ異なる側面からトロイダルプラズマ閉じ込め物理を理解する点でお互いに相補的である。RFPで最も重要なことは、基本的平衡配位がプラズマ自身が逆磁場を作りつつ自然に緩和して落ちていく先、すなわちエネルギー最小の状態(緩和状態)⁽⁵⁾となっていることである。さらに、逆磁場配位は、プラズマ電流が流れる限り拡散で崩れるのをちょうど補うように、逆磁場を作りつつ維持され続ける(ダイナモ機構)⁽⁶⁾。これは今日、電流を流すあらゆるト拉斯プラズマに共通に見られる現象で、恐らくRFPが物理的内容において、緩和現象、ダイナモ現象などの最もよい具現であろう。表1は、現在世界で稼働中又は建設中の代表的なRFP装置で、日本は研究の主要な役割を果たしていると言える。

3. 電総研におけるRFP実験の経緯と成果 (TPE-1, TPE-1R, TPE-1RM)

1975年以来、電総研では磁気閉じ込め方式核融合の一つとして、逆磁場ピンチ配位方式によるプラズマ閉じ込め実験をTPE-1及びTPE-1R装置⁽⁷⁾⁽⁸⁾で行ってきた。1979年電総研の筑波移転を機会にRFP研究の大きな発想の転換と、それに基づく装置の改造(TPE-1RからTPE-1RMへ)を行った。すなわち、プラズマ電流の立ち上げ時間をTPE-1Rの5μsから500μsへと100倍長くした。RFPは、電流立ち上げ時にプラズマが不安定になる領域を通過するため、従来はこの不安定性が成長する前(数μs以内)にRFP配位形成を行う必要があると考えられていた。しかし、その後の理論的な解析で、幾つかの条件のもとではRFP配位がエネルギー最小の状態であり、プラズマはこの状態へ自発的に移って行きRFP配位が自然に形成されることが示された。また、TPE-1Rの実験においても、プラズマ電流を流し続ける限りRFP配位がプラズマ抵抗による磁場の減衰を自ら補正しつつ永続的に維持されることが示され、プラズマが自発的にエネルギー最小状態に落ち着くという上記の理論に対する実験的な根拠を与えた。したがって、実験でのRFPの配位形成は、プラズマが自発的にRFP配位を作り出せる条件を設定するとともに、この働きを助長するように外部の状態を制御してやればよいことになる。

それにより、従来用いられてきた速い電流の立ち上げを必要としなくなり、装置技術に大きな変化が起こり、結果的にプラズマパラメータの大幅な向上をもたらした。特に、高真空が得られ不純物の混入を防ぐ対策が容易に行えるステンレススチール製の真空容器の採用が可能となったことの意義は大きい。TPE-1RMの実験は、1980年5月から開始され、遅いプラズマ電流立ち上げ方法を用いて

表1. 現在世界で稼働中あるいは建設中のRFP装置

装置名	所在地	大半径 R (m)	小半径 r (m)	プラズマ電流 I_p (kA)	最大温度 (eV)	備考
TPE-1RM15	電総研(日本)	0.7	0.14	200	800	運 転 中
REPUT-1	東京大学(日本)	0.82	0.2	240	—	
STP-3M	名古屋大学(日本)	0.5	0.1	170	800	
HBTX-1B	カラム研究所(イギリス)	0.8	0.26	430	450	
ETA-BETA-II	パドバ大学(イタリア)	0.65	0.125	200	200	
ZT-40M	ロスアラモス研究所(アメリカ)	1.14	0.20	440	500	
MST	ウイスコンシン大学(アメリカ)	1.50	0.52	400	—	
OHTE 1	GA(アメリカ)	1.24	0.18	500	500	
ZT-H	ロスアラモス研究所(アメリカ)	2.15	0.4	2,000	2,000	建設 中
RFX	パドバ大学(イタリア)	2.0	0.5	2,000	2,000	

もRFP配位の形成が可能であることを実験的に示し、先の理論を検証した。さらに、世界の同種の装置が同様の実験を試みていた中で、外部磁場のプログラミングにより形成した逆磁場ピンチ配位実験装置として世界で初めて1千万度 (keV) に近いプラズマパラメータを得て、逆磁場ピンチプラズマの有効性を示し、以後のこの分野での研究の発展の礎を築いた。

TPE-1 RM装置でのもう一つの先進性は、トカマク装置で成功したリミッタ（真空容器内部に突起部を設け、プラズマが容器の壁にあたる前に阻止するための真空容器保護装置）を最初から採用したことである。金属（ステンレス鋼）リミッタの採用によりプラズマと真空容器壁との相互作用を防ぎ、世界の他の逆磁場ピンチ装置が、高プラズマ電流実験で真空容器を損傷し実験中断に追い込まれた間にも順調に高電流密度実験を遂行した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

4. TPE-1 RM15の基本的目標⁽¹²⁾⁽¹³⁾

これらのTPE-1 RMの成果を基礎にRFP研究を更に進展させ、大型RFP装置への展望を開くため、1983年から次の中型装置TPE-1 RM15の設計と製作を開始した。装置設計に当たり、以下に述べる六つの基本的目標を定めた。

- (1) TPE-1 RMと同じ高電流密度領域 ($\sim 450\text{A/cm}^2$) のRFP閉じ込め物理を研究し、パラメータ領域の拡大を図る。
- (2) プラズマの位置制御によるプラズマ-壁相互作用の制御。
- (3) プラズマパラメータの向上。
- (4) スケーリング則の確立。 $(100\text{kA} < I_p < 250\text{kA})$ とRFP閉じ込め物理の解明。
- (5) プラズマ密度、温度の分布計測。
- (6) RFP配位の形成と維持の物理的機構の解明。

5. TPE-1 RM15のプラズマパラメータ

TPE-1 RM15の目標とする主要パラメータを表2に示す。

5.1 TPE-1 RM15の構造

TPE-1 RMやその他、諸外国での実験からRFPの閉じ込めるプラズマは、ベータ値 β_p がほぼ一定 (~ 0.1) であることが知られている。 β_p は、プラズマの圧力のプラズマ電流の作る磁場（ポロイダル磁場と呼ぶ。）の圧力に対する比であり、プラズマがどの程度効率良くプラズマを閉じ込めているかの指標となる数値である。プラズマ圧力は、プラズマの粒子密度と温度の積で与えられるので、 β_p 一定とは低密度であれば高温の、高密度であれば低温のプラズマが得られることを意味している。また、両者共に増加させるにはプラズマ電流値を増加させるか、若しくはプラズマの半径を小さくしてポロイダル磁場を大きくする以外に方法はない。一方、プラズマの閉じ込めは、一般的に言ってプラズマの小半径の2乗に比例すると考えられる。閉じ込め性能の向上とスケーリング則の確立という観点に立てば、プラズマ小半径をTPE-1 RMより大きくすることが必要である。また、プラズマパラメータの空間分布の計測を行うためにもTPE-1 RMの小半径 (9 cm) ではポートのサイズや、数に技術的困難が伴うため、大きな小半径が必要である。これらの点を考慮してプラズマの小半径は、TPE-1 RMの1.5倍の13.5cmとした。これにより真空容器の小半径は、外径15cm、シェルの内半径は放電容器との絶縁及び組立て上のクリアランスを考えて16.2cmとした。

プラズマの小半径を1.5倍にしたのに伴い、プラズマ温度、密度の向上を図るために、目標プラズマ電流値はTPE-1 RMの約2倍の250

表2. TPE-1 RM15の主要パラメータ

プラズマ電流 (I_p)	200~250kA	ポロイダルベータ値 (β_p)	$\geq 10\%$
放電時間	$\sim 10\text{ms}$	エネルギー閉じ込め時間 (τ_E)	$\sim 0.2\text{ms}$
電子温度 (T_e)	600~1,000eV	大半径	0.7m
イオン温度 (T_i)	$\sim T_e$	プラズマ小半径	0.135m
電子密度 (n_e)	$10^{19} \sim 10^{20} / \text{m}^3$		

kAと設定した。これにより、プラズマ圧力で1.6倍程度の向上が得られるものと考えられる。また、プラズマ中の電流密度は、ほぼTPE-1 RMに近い値 ($\sim 4.5\text{MA/m}^2$) となる。

RFPにおいては、トカマクやヘリオトロンとは違ってプラズマのアスペクト比に対する物理的な制限がないため、装置製作上の技術的な観点と建設コストの点からアスペクト比を決めることができる。一般に、大半径を大きくすると装置建設のコストはその2~3乗で増大する。一方、不整磁場の低減、トロイダル磁場のリップル、ポロイダルコイルの電磁力（最大使用磁場）、装置の組立て等に対しては大半径が大きい方が望ましい。TPE-1 RM15では、建設計画全体の予算規模、装置設置場所の広さ、ポロイダルコイルの磁束が1ボルト・秒 (V·s) 程度必要なこと、ポロイダルコイル中心の磁場を2テスラ (T) 以下に抑えたいこと、さらにアスペクト比をTPE-1 RM ($R/r = 50\text{cm} / 9\text{cm}$) とは大きく変えたくないことから大半径として70cmを選択した。

5.2 プラズマ温度、密度のスケーリング則

TPE-1 RMの実験では、プラズマ中心の温度はプラズマ電流値に比例して増加した [T_{eo} (eV) = $4 \times I_p$ (kA)]。この比例則によれば $I_p = 250\text{kA}$ では $T_{eo} = 1\text{keV}$ となるが、TPE-1 RM以外の実験で小半径が大きい装置では、比例係数が小さくなっていることが示されている。RFPでは、小半径に対する確立した比例則はないのでプラズマ温度を明確に予想することはできないが、TPE-1 RMの実験ではプラズマ密度もプラズマ電流に比例して増加すること、 β_p 一定であることを考えて、先のプラズマ圧力の増加がプラズマ温度、密度に等分配されるとすると $T_{eo} \sim 700\text{eV}$ となる。プラズマの密度は、真空容器の壁の状態、プラズマの閉じ込め特性、プラズマの変位や整磁場の影響によるプラズマ-壁相互作用の強さ、容器壁の温度等々によって複雑に変化するため、その値を予測することは難しい。しかし、TPE-1 RMの実験では $(2 \sim 4) \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ であったこと、TPE-1 RM15はTPE-1 RMと同じ材質の真空容器とリミッタを用いていること、TPE-1 RM15では平衡制御を行うことによりプラズマの変位はTPE-1 RMより小さいこと、小半径が大きくなつたためプラズマの閉じ込め時間が大きくなると予想されること等を考えてTPE-1 RMと同程度の密度になると予想した。この場合 T_{eo} は、800eV程度になる。

5.3 エネルギー閉じ込め時間

エネルギー閉じ込め時間 τ_E は、プラズマの加熱方式がプラズマ電流による抵抗加熱であるRFPでは $\tau_E = W_p / I_p V_\ell$ で与えられる。ここで、 W_p はプラズマの持つ熱エネルギー、 I_p はプラズマ電流、 V_ℓ はトロイダル方向の一周期電圧である。プラズマの抵抗を R_p とすると、 $V_\ell = I_p R_p$ となる。 R_p はプラズマの温度、プラズマ中の不純物の効果、プラズマ電流がヘリカルに流れる効果及びRFP配位を維持するために必要なプラズマの緩和過程の効果等の関数である。TPE-1 RM15は、TPE-1 RMと同じリミッタ材料を用いているので、 τ_E

ラズマ中の不純物の効果は大きく変化しないと考えられる。また、プラズマ電流がヘリカルに流れる効果は、RFPにとって装置に依存しない本質的なもので、この変化もほとんどないと考えられる。温度として先の値 $T_{eo}=800\text{eV}$ をとるとプラズマの抵抗は、平均プラズマ温度が $T_{eo}/2$ であると仮定して $R_p \sim 60\mu\Omega$ 、 $\tau_E \sim 0.15\text{ms}$ と見積もれる。プラズマの位置制御により、不純物の効果がTPE-1RMより小さくなることを期待して、 τ_E の目標値としては $\tau_E \sim 0.2\text{--}0.5\text{ms}$ を設定した。また、このときに必要な一周電圧は、 $V_E \sim 40\text{V}$ であるが、必ずしも最適の条件のみで実験するのではなくので設計値としては、最大 $V_E \sim 100\text{V}$ が可能であるようにした。

5.4 装置設計の基本的考え方

上記の目標を実現するための装置設計の基本的考え方を、以下にまとめた。

- (1) 金属真空容器と金属リミッタを用い、寸法をTPE-1RMの1.5倍にする。プラズマ電流密度をTPE-1RM装置と同程度にするため、250kA以上のプラズマ電流を実現する。
- (2) 誤差磁場がプラズマ閉じ込めに与える悪影響を考慮し、誤差磁場を可能な限り減少させる。
- (3) 金属シェルがある場合のプラズマの平衡制御方法を実験的に確立するため、外部から印加した垂直磁場による平衡制御を行う。

立するため、外部から印加した垂直磁場による平衡制御を行う。

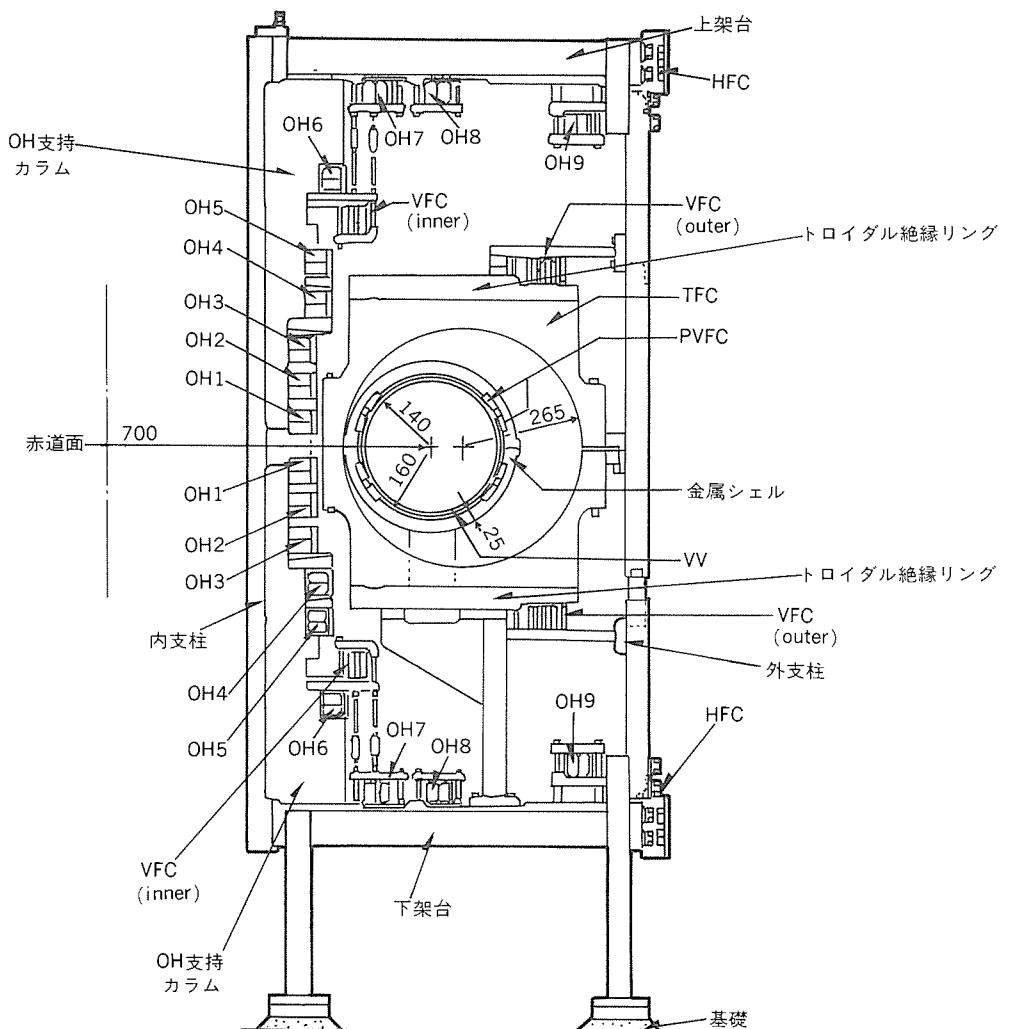
(4) 金属シェルと直流垂直磁場を併用し、真空容器内のプラズマ位置を制御し、プラズマ壁相互作用を減少させる。

(5) 実験装置としての柔軟性をできる限り大きくする。具体的には、電源及び負荷系の接続（直列、並列）を変えることにより、プラズマ電流の立ち上げ時間、一周電圧、平衡制御磁場の波形、トロイダル磁場の逆転時間等が容易に変化できる構造とする。

(6) 中型装置の特徴を生かした各種の新しい試みを行なうために、装置の分解組立ての機会が比較的多いことを考慮し、分解組立てを容易に行える構造とする、などである。

5.5 TPE-1RM15装置の平衡制御システム

TPE-1RM15装置の平衡制御システムは、①厚さ25mmの銅製シェル。②直流垂直磁場、制御垂直磁場を発生するための垂直磁場コイル及びそれらの電源。③パルス垂直磁場を発生するためのパルス垂直磁場コイルとその電源。④サドルコイルとその電源から構成される。直流垂直磁場は、金属シェル内のプラズマの位置制御、制御垂直磁場は金属シェルカット部の不整磁場の補正を行う。パルス垂直磁場は、プラズマ着火時に直流垂直磁場があるとプラズマの生成が妨げられるので、これを打ち消すために用いられる。サドルコイル



OH1～OH9：ポロイダル磁場コイル PVFC：パルス垂直磁場コイル
 TFC：トロイダル磁場コイル HFC：水平磁場コイル
 VFC：垂直磁場コイル VV：真空容器

単位：mm

図3. TPE-1RM15負荷系組立図

表 3. 磁場コイル定格表

	ポロイダル磁場コイル OHC	トロイダル磁場コイル TFC	垂直磁場コイル VFC (OUT)	垂直磁場巻もどしコイル VFC (IN)	パルス垂直磁場コイル PVFC	水平磁場コイル HFC	サドルコイル SDC
磁束 (密度)	0.8V・s	バイアス部 0.2T 反転部 -0.3T フラットップ部 -0.1T	直流 制御 0.02T -0.1T	—	-0.02T	—	—
コイル数	9×2=18	32	2	2	4×2=8	2	2
ターン数	2/コイル	1/コイル	3/コイル	3/コイル	1/コイル	5/コイル	1/コイル
最大電流 (kA)	60	バイアス部 21.9 反転部 10.0	62	50	60	4	15
インダクタンス (μH)	519/129.4 (120Hz)	72.1 (300Hz)	88.5 (120Hz)	—	11.1 (300Hz)	—	—
抵抗 (mΩ)	14.3/2.6 (120Hz)	28.4 (300Hz)	1.2 (DC) 9 (120Hz)	0.453/コイル (設計値)	9 (300Hz)	38 (設計値)	—
立ち上げ時間 (ms)	1~4	バイアス部 2 反転部 0.5~1	1.8±0.3	制御 1.8±0.3	制御 1.8±0.3	0.9	— 0.7~0.8
持続時間 (ms)	5	10	制御 10	10	1.9~2.9	10	3.5
対地耐電圧試験 DC1分間 (kV)	工場 30	15	30	36	3.5	—	—
端子間最大発生電圧(kV)	2.3	0.32	5	5	1.75	5	5

表 4. コイル、プラズマ間のインダクタンス マトリックス
(μH) (計算値) 単位: μH

	OHC ポロイダルコイル	プラズマ	VFC垂直磁場コイル	
			OUT	IN
ポロイダルコイル	538.1	-14.4	89.2 (11.6)	-77.6
プラズマ	-14.4	2.5	-4.9 (-2.0)	2.3
VFC	OUT	89.2	-4.9	92.9 (-103.2)
	IN	-77.6	2.3	-16.1 42.5

注 () 内は、IN, OUT直列時の値

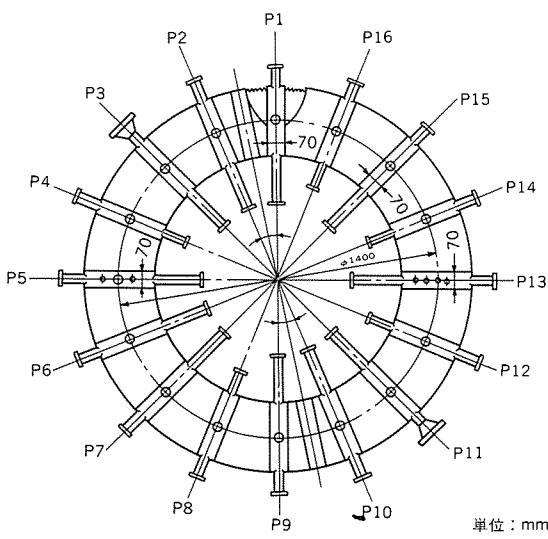


図 4. 真空容器の外形

ルは、金属シェルカット部の不整磁場の精度の高い補正を行うために設けた。

6. TPE-1 RM15負荷系

TPE-1 RM15実験装置負荷系の組立図を図3に示す。負荷系は、その中に不純物の少ないプラズマを生成するための真空容器、プラズマを発生及び閉じ込めるための各種コイルと金属シェル、及び架

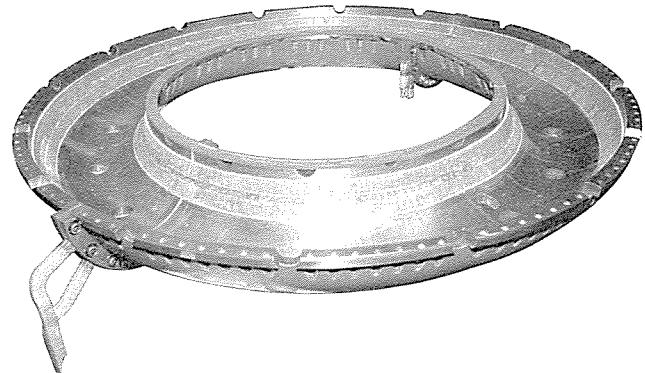


図 5. 金属シェルの下方半分

台から構成される。磁場コイル定格表を表3、各コイルプラズマ間のインダクタンス マトリックスを表4に示す。また、放電の間隔は5分間に設定した。

6.1 真空容器

真空容器は、ステンレス鋼やインコネル等の真空特性が良く電気伝導率の小さい金属の薄板から作られ、内面にプラズマと真空容器との直接的な接触を防止するためリミッタが設けられている。RFPでは、真空容器にプラズマ電流の立ち上げ及び維持するために必要なトロイダル電界によりトロイダル方向に電流が流れが流れるだけでなく、トロイダル磁界逆転時にポロイダル方向の電流も誘起される。したがって、真空容器のポロイダル方向一周抵抗のトロイダル方向一様性を確保する必要があり、これが真空容器設計上の大きな制限となっている。

真空容器の外形図を図4に示す。真空容器は、18個のベロ一部と18個の直線部分から成るステンレス鋼製 (SUS316L) 容器である。その大半径及び小半径 (真空容器の内部半径) は、それぞれ0.7mと0.14mであり、体積はポートを含めて0.31m³である。ベロ一部分は、厚さ0.8mm、コンピリューション ファクター (壁面の長さと直線距離の比) 2.38、高さ12mmであり、直線部分は厚さ2mm、幅70

mmであり、内部表面に88個の固定リミッタ（SUS316L）が取り付けられている。固定リミッタの内部半径は0.135mである。各磁場に対する真空容器の浸透時定数（外部からかけた磁場が真空容器内に浸透する時定数）は、ポロイダル磁場150 μ s ($L_t=1.4\mu$ H, $R_t=9.5$ m Ω), トロイダル磁場240 μ s ($L_p=20$ nH, $R_p=81\mu$ Ω), 垂直磁場75 μ s ($L_v=2.2\mu$ H, $R_v=33$ m Ω)である。真空容器は、金属シェルに組み込まれる前に220～320°C, 83時間のベーキングがなされており、2台のターボモレキュラーポンプにより0.17m³/sのスピードで真空引きが行われ、到達真空度は3×10⁻⁶Pa（約2×10⁻⁸Torr）を目標としている。真空容器と金属シェルの間は、ポリイミドシート（0.05t 6層）で絶縁をほどこし耐電圧1kV以上を確保している。

6.2 金属シェル

金属シェルの下方半分を図5に示す。金属シェルは、プラズマを安定化させると同時に、プラズマ平衡を維持するために使用される。金属壁は磁場を通さないため、プラズマの一部が壁に近づくとプラズマと壁に挟まれた部分の磁気圧が強くなりプラズマを押し戻すからである。金属シェルは、25mm厚さのクロム銅鑄物でできており、外周面は保護のため絶縁膜で覆われている。大半径及び小半径（内部表面において）は、それぞれ0.7mと0.162mであり真空容器の支持及びパルス垂直磁場コイルの支持を行っている。シェルは上下方向に赤道面で、またポロイダル方向には180°離れた断面で各々2分割され、合計4分割されている。これは、真空容器を金属シェル内に組み込むため及び分割部を電気的に絶縁し、トロイダル方向及びポロイダル方向の電場を金属シェル内部に誘起するためである。金属シェルの垂直磁場の浸透時定数は約90msであり、これは放電持続時間の設計値に比べ10倍長い。金属シェルの分割部の誤差磁場がプラズマの閉じ込めに悪影響を与えると考えられる。そのため、外部垂直磁場による補正を行って誤差磁場の発生を抑える方法を用いている。

6.3 ポロイダル磁場コイル

ポロイダル磁場コイルは、水素ガスをイオン化しプラズマ電流を生成し維持するための磁束変化を作り出す。TPE-1 RM15では、ポロイダルコイルの発生するプラズマ生成領域の不整磁場を極力抑えるため、コイルは真空容器から離れた位置に分散配置されている。各コイルの位置は、プラズマ領域での不整磁場を最小にするようコンピュータによる数値計算を基にして決定した。ポロイダルコイルは、18個の2ターンのコイルから成っており、OH1～OH9は断面24×50の2ターンの銅コイルである。図3に示すように、組立て上の目的から赤道面で上下に分割可能となっている。上下のコイルは互いに対称の位置に配置され、上OH1～上OH9コイルを直列に、下OH1～下OH9コイルを直列に接続しており、フィーダ切換えで各上下コイルを直列接続と並列接続の切換えを可能としている。ポロイダルコイルの実測値は、インダクタンス519/129.4 μ H（測定周波数120Hz）、抵抗14.3/2.6m Ω （120Hz）（並列/直列）、プラズマとの相互インダクタンス13.6 μ H（120Hz）、フッククススイング0.78V・s、アンペアターン2.0MAT、コイル間絶縁2.3kV、対地絶縁30kVである。

6.4 トロイダル磁場コイル

トロイダルコイル電流により作られるトロイダル磁場（ B_ϕ ）とプラズマ電流により生ずるポロイダル磁場（ B_θ ）により、らせん状のドーナツ形磁力線が形成される。逆磁場ビンチでは、らせんのビンチを小半径方向に大きく変化させることによりプラズマを安定化さ

せている。トロイダルコイルは、20mm厚さのアルミ平板1ターンコイルを11.25°ごとに32個トーラス状に配置したものにより構成され、すべて直列接続されている。プラズマ領域において磁場のリップルを0.4%以下に抑えるため、トロイダルコイルの外径を余り大きくできないことを考慮し、プラズマ中心位置をトロイダルコイルの中心位置より内側に偏心させて、トロイダル磁場の一様性が確保されるよう最適化した。トロイダルコイルの全アンペアターンは、0.7MAT、インダクタンス実測値72.1 μ H（300Hz）、抵抗28.4m Ω （300Hz）、巻線間絶縁320V、対地絶縁10kVである。

6.5 平衡磁場コイル系

プラズマの平衡は、金属シェル及び外部から印加した平衡磁場により維持される。TPE-1 RM15の平衡制御システムを図6に示す。平衡磁場コイル系は、直流及び制御垂直磁場コイル（VFC）、パルス垂直磁場コイル（PVFC）及びサドルコイル（SDC）から構成される。直流垂直磁場（DCVF）は、シェル中のプラズマ位置を制御するための磁場であり、持続時間がシェルへの垂直方向の浸透時定数より、かなり（約20倍）大きく作られている。VFCは、赤道面を挟んで上下対称の各1個のコイルであり、断面45×8の銅パンケーキを3ターン2並列で巻いたパンケーキコイルである。パルス垂直磁場（PVF）は、プラズマ着火時に垂直磁場があるとプラズマの着火が妨げられるため、着火時に直流垂直磁場（DCVF）を打ち消すために使用される。このPVFは、速い応答が要求されるため、シェルの内部に取り付けられた上下対称の各4個のコイルからなっている。各々のコイルは長辺32mm、短辺30mm、高さ6mmの台形断面をした銅製1ターンコイルである。コイル支持は金属シェルに加工された溝に2本のコイルを組み込み、その間を、くさび形の抑え板及びボルトで固定している。制御垂直磁場（CVF）は、金属シェルカット部の誤差磁場の補正のために用いられる。DCVFとCVFは、スペース上、同じコイル（VFC）を兼用して発生させるため、コイル電流がオーバラップする。VFCの電流波形は、全放電時間中、この誤差磁場をできる限り小さく保つためにプレプログラムによって調整されている。さらに、この不整磁場の高精度の補正を行うためサドルコイルによる磁場が、その2次補正として用いられる。

6.6 装置架台

架台は図3に示すように、下架台、上架台、内支柱及び外支柱から構成され、各コイルと金属シェルの自重及び運転中の電磁力に耐える構造とした。また、架台に誘導電流が流れることを防ぐため大円方向、上下方向に分割して絶縁を行った。架台材質はSUS304を用いた。上下架台は、スパーク状架台で一周絶縁抵抗をとるため、外リングとスパーク間の絶縁及び内リングと外リング間の2箇所の絶縁及び下架台と基礎との取合部の絶縁を行った。内支柱は上下架台をつなぐ4本の支柱である。外支柱は上下架台をつなぐ8本の支柱である。架台は上下2分割構造として装置の分解組立てが容易に行える構造とした。

6.7 床工事

TPE-1 RM15のポロイダルコイルは、空心コイルのため、装置本体の周りに大きな磁場を作る。このため、鉄筋コンクリート床中の鉄筋が電気的に閉じていれば、大きな渦電流が流れ、プラズマ領域に誤差磁場が生ずる。鉄筋は13mm ϕ で約200mmピッチで2層構造に配列されており、床の厚さは300mmである。装置の下部中心に柱があり柱の太さは、500mm×500mmである。計算機シミュレーションの結果に基づきプラズマ領域で誤差磁場を1mT以下に抑えるた

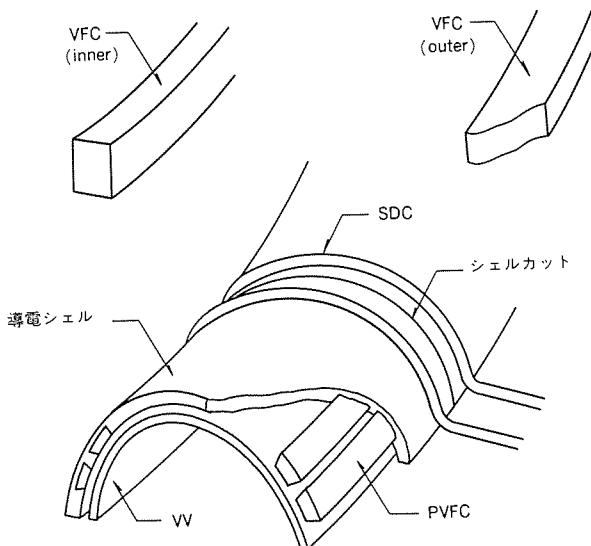


図 6. TPE-1RM15 平衡磁場システム

め、本体を中心として約 6 m × 6 m の床部分及び本体直下の柱 1.5 m の部分の鉄筋の交差部を、すべて絶縁した。

7. TPE-1 RM15 負荷系の工場、現地試験検査

負荷系は工場において仮組立てを行い、組立精度の測定、コイル抵抗値測定、インダクタンス測定、絶縁抵抗測定及び対地耐電圧測定を行い分解輸送の後、現地で再組立て及び確認試験を行った。工場組立てでは、組立作業性の面から上 OH ブロック、下 OH ブロック及び TF コイルブロックに分割し、部分組立て、精度調整の後、ブロック間組立てを行った。OH コイル位置精度は、OH 支持カラムに設けた据付け基準面と、コイル絶縁部厚さのばらつきを避けるためコイル導体に直接取り付けられた絶縁ピンによる基準面とを測定し、ライナ調整により OH 1～3 は ±0.6 mm 以内、OH 4～7 は ±2 mm 以内、OH 8、OH 9 は ±3 mm 以内に調整した。トロイダルコイル位置及びピッチ精度は、トロイダルコイルと絶縁リングの径方向はめあい及びピッチ方向けがき線合せにより位置決めし ±0.5 mm 以内に調整した。DCVF コイル位置精度は、内側コイルに関しては OH 支持カラムに設けた据付け基準面との間を、また外側コイルに関してはトロイダル絶縁リング据付け基準面との間を測定し、ライナ調整により内側コイルは ±1.5 mm 以内、外側コイルは ±3 mm 以内になるよう調整した。分割面には組立再現用にけがきマークを入れた。絶縁抵抗は、1,000 V メガーで測定し 2,000 MΩ 以上であることを確認した。

現地組立ては、輸送後の再組立てによる寸法変化を確認するため赤道面上にトランシット（土木用レベル測定器）を置き、各コイル高さの測定、各基準面間の寸法測定、けがきマークのチェックを行い、工場組立て時と変化のないことを確認した。現地試験についても工場組立て時と同様の試験を行い同様の試験結果が得られた。コイル抵抗値、インダクタンス測定値及び対地耐電圧試験値を表 3 に示す。

8. むすび

逆磁場ピンチ装置のプラズマ閉じ込め原理及び特徴につき概説し、電総研における現在までの RFP 実験の経緯と成果、装置設計の基本的考え方、負荷系の真空容器、金属シェル、各種コイル、架台及び床工事に関し、設計の主な仕様・構成・特徴について述べた。種々の実験方法に柔軟に対応できるフレキシビリティのある負荷系を作ることができたとともに、後編（この特集の p.54）で述べる電源システムとともに電流 190 kA、パルス長 8 ms、中心電子温度 800 eV のプラズマが得られた。今後、抵抗性シェルと垂直磁場フィードバックシステムによるプラズマ閉じ込め性能の向上を目指して研究を進める予定である。

参考文献

- (1) 富永ほか：三菱電機技報 核融合特集, 58, No. 4 (1984)
- (2) Bodin, H.A.B., Newton, A.A. : Nuclear Fusion, 20, 1255 (1980)
- (3) Bodin, H.A.B. : Nuclear Instruments and Methods, 207, 1 (1983)
- (4) R.W.Conn, F.Najmabadi, et al. : Proc. 12th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Nice (1988)
- (5) Taylor, J.B. : Phys. Rev. Letters, 33, 1139, (1974)
- (6) Moffatt, H.K. : Magnetic field generation in electrically conducting fluids, Cambridge Univ. Press (1978)
- (7) Shimada, T., Hirano, Y., Maejima, Y., Ogawa, K. : Proc. 6 th. Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Berchtesgaden, 1976, 1, IAEA, Vienna, 463 (1977)
- (8) Tamaru, T., Shimada, T., Hirano, Y., Ogawa, K., Maejima, Y. : Proc. 7 th. Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 2, IAEA, Vienna, 55 (1979)
- (9) Ogawa, K., Maejima, Y., Shimada, T., Hirano, Y., Yagi, Y. : Nuclear Fusion, 25, No. 9, 1295 (1985)
- (10) Ogawa, K., Maejima, Y., Shimada, T., Hirano, Y., et al. : Proc. 9 th. Int. Conf. on Plasma Physics and Nuclear Fusion Research, Baltimore, 1982, 1, IAEA, Vienna, 575 (1983)
- (11) Hirano, Y., Maejima, Y., Ogawa, K., Shimada, T., Yagi, Y., et al. : Proc. 10th. Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion Research, London, 1984, 2, IAEA, Vienna, 475 (1985)
- (12) T. Shimada, Y. Hirano, Y. Yagi, K. Ogawa, et al. : Proc. of 14 th Symp. on Fusion Technology, Avignon 1, 665 (1986)
- (13) T. Shimada, Y. Hirano, Y. Yagi, K. Ogawa, et al. : Proc. 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 2, IAEA, Kyoto, 453 (1986)

電総研TPE-1 RM15逆磁場ピンチ 核融合実験装置（後編）

小川 潔* 島田寿男* 平野洋一* 八木康之** 大藪 黙*** 山口作太郎† 山根 実*** 池田和郎++ 久野和雄++ 村上昇太郎++

1. まえがき

後編は、電源システム及び試験について述べる。電源システムを設計するにあたって、負荷系と組み合わせて総合的に実験装置としてのフレキシビリティを高めるため、以下の点を設計上のポイントとした。

(1) ポロイダルコイルを上下に2分割し、それぞれを直列若しくは並列に切り換えて電源と接続が可能となるようにした。
(2) ポロイダル電源（コンデンサ電源、スタート10kV若しくは20kV, 600kJ, フラットトップ3.3kV, 400kJ）についてもスタート用のコンデンサを直、並列に切り換えることにより10kVと20kVの運転が可能となるようにした。上記(1), (2)の組合せによりプラズマ電流の立ち上がり時間は、1, 2, 4msの3通りが可能となり、電源電圧、立ち上げ後フラットトップになった時点での一周電圧も50Vと100V以上の2通りが可能となるようにした。

(3) 垂直磁場コイルと電源とのつなぎを切り換えて、
(a) 卷き戻しコイルを使用。
(b) 卷き戻しコイル不使用。
(c) 制御垂直磁場電源だけ巻き戻しコイルを使用。

の3通りの接続が可能となるようにした。

(4) 制御垂直磁場電源のL, R, Cの接続を変え、プラズマ電流に対応した波形整形を容易に行えるようにした。

また、負荷系からの要望により、この電源システムは以下の工夫がなされている。

(1) ポロイダルコイル電流は、120kAと大きいためスタートスイッチとして金属接点スイッチとイグナイトロンを用いる新しいシステムを開発した。
(2) 垂直磁場コイルの設計上、直流電源と高電圧パルス電源を並列運転し、同一コイルに通電する構成とした。
(3) 高電圧により発生するノイズによる誤動作を防ぐため光信号回路を用いた。

2. 電源システム⁽¹⁾

TPE-1 RM15の電源システムは、トロイダルコイル電源、ポロイダルコイル電源、垂直磁場コイル電源、パルス垂直磁場コイル電源及びサドルコイル電源から構成される。これらの電源は、プラズマを発生させ、逆磁場ピンチ特有の磁場配位で安定にこれを閉じ込めるためのものである。図1にその通電パターンを示す。これらの電源は、パルス的な大電流をコイルに通電するために、そのエネルギー供給源にはコンデンサバンクが用いられる。図2及び表1は各電源の構成、仕様をまとめたものである。

これらの電源システムの設計には、主に三菱電機(株)の回路網解析コードCASP-II⁽²⁾によるコイル間の相互インダクタンス結合を考慮した全系シミュレーションを重ね、システムの最適化、機器定格の決定を行った。そして、システム全体としては、特に以下の点に

ついて配慮して設計を行った。

- 耐電磁ノイズ：イグナイトロン、大容量投入器、光直接点弧サイリスタ等のトリガ信号は0.5mWの高光パワーの光伝送回路を採用し、高電磁ノイズ環境に設置される受光回路の利得を下げて、システムの信頼性を高めた。
- 大容量半導体素子の使用による回路の分離：高電圧・大電流ダイオードを回路に取り入れ、電流方向を規定することにより、回路を分離し構成を簡素化した。
- 不整電流振動の防止：電源回路中の浮遊インダクタンスの影響を考慮し、主回路中に抵抗素子を配置することにより不整電流振動を除去した。
- 光直接点弧サイリスタの使用：電磁ノイズ環境下での動作の信頼性の向上等からスイッチング素子に光直接点弧の大容量サイリスタを使用した。電力用素子構成及び素子の通電波形を表2に示す。

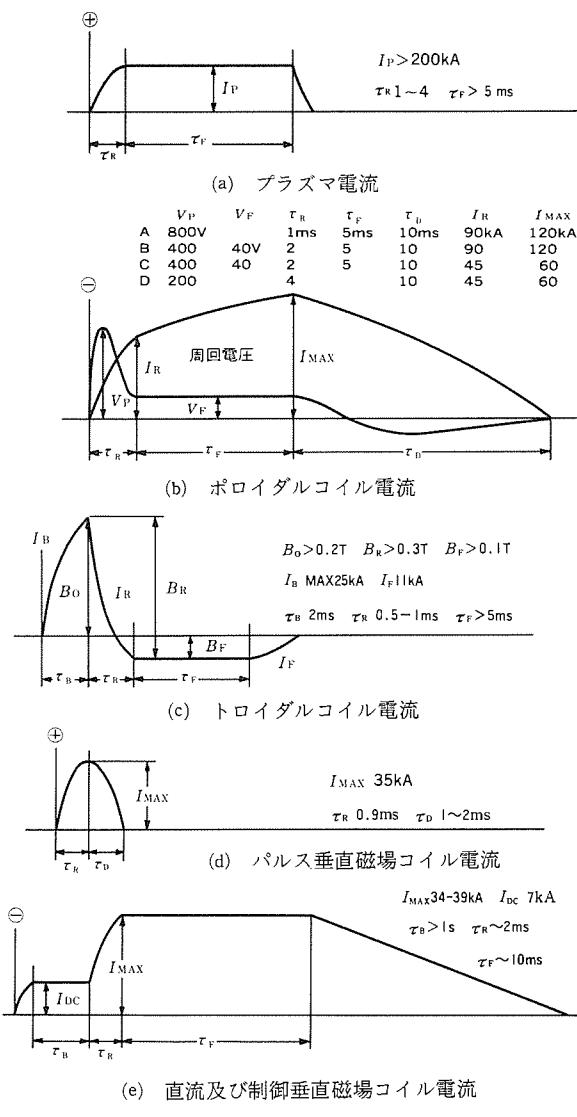


図1. TPE-1 RM15電源の通電パターン

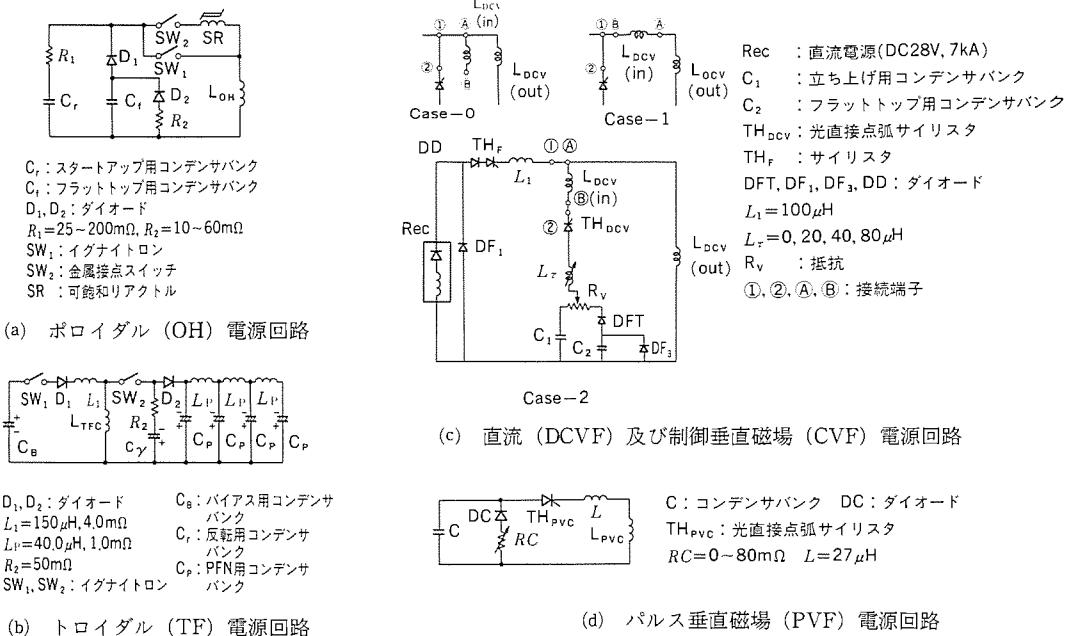


図2. TPE-1 RM15電源の構成

表1. TPE-1 RM15電源の仕様

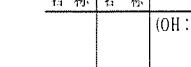
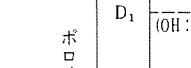
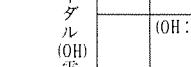
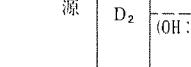
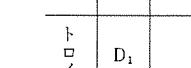
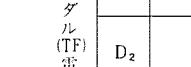
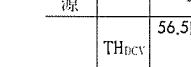
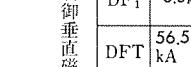
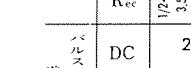
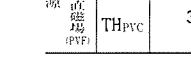
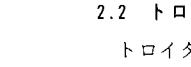
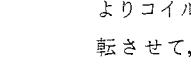
		エネルギー(kJ)	電圧(kV)	最大電流(kA)	立ち上げ時間(ms)	フラットトップ時間(ms)
OH	スタートアップコンデンサバンク	624	10/20	$I_{MAX}=60/120$	1	5
	フラットトップコンデンサバンク	400	3.3		2	4
TF	バイアスコンデンサバンク	100	5	$I_{BMAX}=25$	2	—
	反転コンデンサバンク	25,50,100	5		0.5~1	—
	フラットトップコンデンサバンク	64	0.8	$I_{FMAX}=11$	—	10
VF	直流垂直磁場電源	—	26V	$I_{DCMAX}=7$	—	>1sec
	制御垂直磁場立ち上げコンデンサバンク	120	5	$I_{MAX}=39$	1.8±0.3	—
	制御垂直磁場フラットトップコンデンサバンク	128	0.8/1.5		—	10
	パルス垂直磁場コンデンサバンク	34	2.5	$I_{MAX}=35$	0.9	1.9~2.9

2.1 ポロイダル電源

ポロイダル磁場(OH)コイル電源(図2(a))は、スタートアップコンデンサバンクにより2ms以下の短時間にコイル直列時で~40kA、並列時で~80kAまで電流を立ち上げ、この電流変化によりプラズマ電流を変圧器と同一の原理で励起させる。次に、フラットトップコンデンサバンクにより、さらに電流をコイル直列時で~60kA、並列時で~120kAまで上昇させることにより、プラズマ電流を維持させるものである。そして、コンデンサバンクのエネルギー放出後は、抵抗器により構成されるクローバ回路に電流を転流させ、電源回路内のダイオード素子、スイッチ素子の通電容量が過大とならないよう電流を減衰させる。この電源は、TPE-1 RM15の電源設備の中でも最も高電圧、大電流を扱い、そのためスイッチング素子は大容量のものが要求される。サイリスタのような半導体素子では、素子の直並列数が非常に多くなり高価なものとなる。

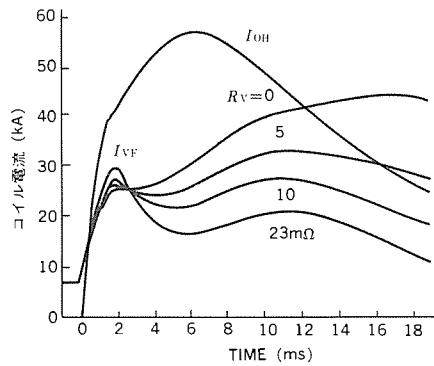
一方、イグナイトロンのような放電管でも1本当たりの許容通過クーロン数は約200クーロンであり、やはり台数が多くなるために信頼性・保守性の問題がある。そこで、このシステムではイグナイトロンにより高精度のスイッチングを行い、その後機械式の大容量高速投入器に電流を移すような複合システムを開発した。これにより、イグナイトロンの台数を3台に抑え、電流バランスを各々6mΩの直列抵抗により確認し、経済性・信頼性・保守性の面で優れた構成とした。大容量高速投入器については3章に詳細を述べる。

表2. TPE-1 RM15電源電力用半導体素子構成、波形一覧(設計値)

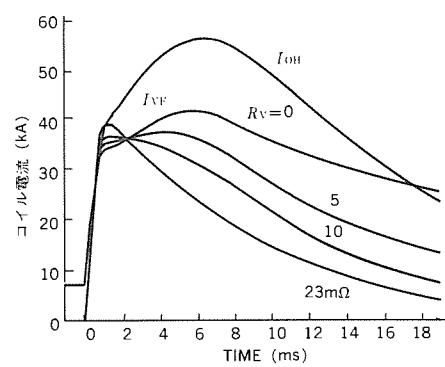
電源名	整流器名	電流波形(最大値)	素子形名、構成	素子当たり定格 $I^2t(A^2sec)$	素子当たり実用 $I^2t(A^2sec)$	冷却方式
ポロイダル(OH)電源	D1	(OH: S-S)  (OH: P-P) 	FD3500AH-56 10S×2P	2.0×10 ⁷	1.3×10 ⁷	空冷
	D2	(OH: S-S)  (OH: P-P) 	FD3500AH-56 2S×4P	2.0×10 ⁷	0.7×10 ⁷	空冷
トロイダル(TF)電源	D1	35kA 	FD3500AH-56 5S×1P	2.0×10 ⁷	2.2×10 ⁶	空冷
	D2	22kA 	FD3500AH-56 3S×1P	2.0×10 ⁷	2.6×10 ⁶	空冷
直流及び制御垂直磁場(VF)電源	TH _{DCV}	56.5kA 	FT1500FV-80 2S×3P	3.7×10^6 (16.7ms) 5.1×10^6 (30ms)	1.66×10^6	空冷
	DD	7kA 	FD3500AH-56 5S×2P	2.0×10 ⁷	$DC7kA + 0.58 \times 10^6$	水冷
	DF ₁	3.5kA 	FD3500BP-10 1S×1P	1.25×10 ⁷	$DC3.5kA + 1.63 \times 10^6$	水冷
	DFT	56.5kA 	FD3500AH-56 3S×2P	2.0×10 ⁷	8.9×10^6	空冷
	DF ₃	53kA 	FD3500AH-56 1S×2P	2.0×10 ⁷	1.3×10^6	空冷
	R _{cc}		FD1600BP-10 1S×2P×6A	1.7×10 ⁶	—	水冷
	DC	20.3kA 	FD1600CV-80 1S×1P	4.3×10 ⁶	0.85×10^6	空冷
	TH _{PVC}	35kA 	FT1500FV-80 1S×2P	3.7×10 ⁶	0.5×10^6	空冷

2.2 トロイダル電源

トロイダル磁場(TF)コイル電源(図2(b))は、バイアス回路によりコイルをバイアス励磁した後、反転回路により急速に電流を逆転させて、RFP配位を形成する。そして、その後PFN(Pulse Forming Network)回路によりコイル電流を~10ms間ほぼ一定に維持させる。この電源では、電圧の異なる3種類の回路を運動して動作させるため、イグナイトロン(SW₁, SW₂)及び大容量ダイオ



(a) コイル結線 Case-0



(b) コイル結線 Case-1, 2

OH: フル放電 $L_T = 0\mu\text{H}$

VF: フル放電 $I_{DCV} = 7\text{kA}$

図 3. 直流及び制御垂直磁場電源のシミュレーション波形

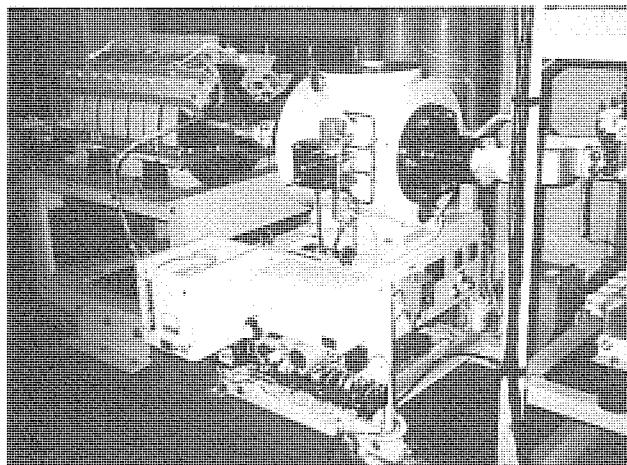


図 4. 大容量高速投入器の外観

ード (D_1, D_2) を用いて回路を分離し構成を簡素化している。また、電源の動作は複雑であるため、回路シミュレーションにより各部回路定数の最適化を行った。

2.3 平衡磁場電源⁽³⁾

平衡磁場電源は、直流及び制御垂直磁場 (VF) 電源 (図 2(c)), パルス垂直磁場 (PVF) 電源 (図 2(d)) から構成される。直流及び制御垂直磁場コイル電源は、プラズマ励起直前に直流電源 (R_{ee}) により 2 秒間プラズマ位置制御のための直流電流 (直流垂直磁場) を流し、これにプラズマ励起と同時に不整磁場を打ち消す目的でパルス電流 (制御垂直磁場) を重畠させる。この電源は、28V, 7kA の

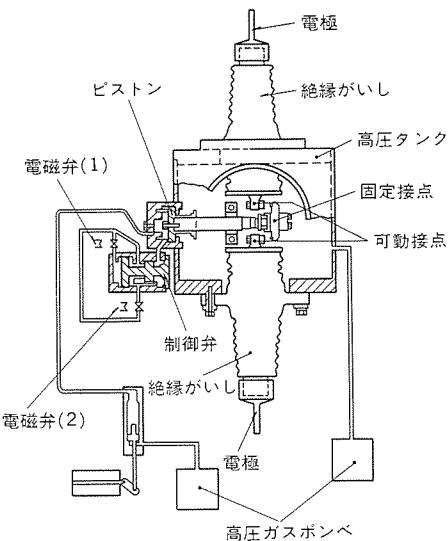


図 5. 大容量高速投入器の構成

表 3. 大容量高速投入器の仕様

接点容量: 25kV, 60kA, 3秒 又は 25kV, 150kA, 1秒

接点仕様:

●接点圧力 3kg/mm²

●接点重量 712g × 8

●接点材質 Ag-W合金 母材銅

(アーク損傷後も表面研磨により再使用可)

通電電荷量: 20,000クーロン

動作時間: 約20ms

動作時間のばらつき (ジッタ): ±0.35ms以下

タンク動作圧力: 10kg/cm² (窒素又は空気)

ガス消費量: 5ℓ · atom/回

機械寿命: 15,000回

低電圧直流電源 (R_{ee}) と、5kV (C_1) 及び800V (C_2) の高電圧パルス電源の電圧が極端に異なる二つの系から構成されている。5kVのパンクのスイッチには耐電磁ノイズの点などから1,500A - 4kVの光直接点弧サイリスタ (TH_{bcv}) (FT-1,500FV-80) が用いられている。この5kVパンクの投入時には、前述の低圧直流電源 (R_{ee}) に高電圧がかかるのを防止するため、保護用の大容量ダイオード (DD) によって電圧のブロックを図っている。

この電流及び制御垂直磁場コイル電源の波形は、プラズマのパラメータを大きく左右させるため、広範囲にわたる波形調整の能力が要求される。このため、垂直磁場コイルと巻き戻しコイルの接続方法を垂直磁場コイルのみを接続した場合のCase 0及び巻き戻しコイルを接続した場合Case 1, Case 2 (接続方法は図 2(c)に示す。) の3種類の実験を可能とした。各々の場合のシミュレーション波形を図3に示す。Case 1, Case 2の場合、垂直磁場コイルとOHコイルとのカップリングが大幅に低減され、OHコイル電流にはほとんど依存しなくなることがシミュレーションにより示されている。また、これには、立ち上げ時定数調整用リアクトル L_T 、電流減衰時定数調整用可変抵抗器 R_v 及び各コンデンサパンクの充電電圧の調整によって対応できる構成になっている。特に、可変抵抗器については、電動式プラグタイプのタップチェンジを採用し、制御室からの頻繁な設定変更を可能とした。

パルス垂直磁場コイル電源 (図 2(d)) も、スイッチ素子には光直接点弧サイリスタを用い、信頼性を高めた。

3. 大容量高速投入器⁽⁴⁾

このような投入器を用いた核融合の電源システムは新しい試みであり、ここで詳しく述べる。TPE-1 RM15のポロイダル電源の投入スイッチとして電流120kA、電圧20kV容量が必要である。このスイッチは、容量が大きくサイリスタ等、半導体スイッチで構成すれば高価となり、イグナイトロンで構成すれば多くの本数を必要とする。そのため、イグナイトロン（3本）と金属接点スイッチ（大容量高速投入器）を並列使用し、ポロイダルコイル電流のスタートタイミングは、イグナイトロンにより決定し、その数ms後に投入器を投入し、通過電荷量の大部分を投入器にトランスファする構成とした。この投入器の接点は、高速電磁弁を用い窒素ガスにより駆動され、動作開始から接点が閉じるまで約19msかかるが、そのジッタは180μsと非常に小さい。トリガ系では、まず投入器を駆動し、その動作を確認してからイグナイトロンを適当なタイミングで点弧するようインターロックを設けている。接点のチャタリングは、コンタクトの後、約1msあり、このときのアーク電流を阻止するため可飽和リクトルが使用されている。図4に大容量高速投入器の外観写真、図5に大容量高速投入器の構成を示す。この投入器の仕様を表3に示す。

大容量高速投入器の開発試験及びTPE-1 RM15での実用試験結果は以下のとおりである。

（1）小型コンデンサバンクによる試験

立ち上げ用コンデンサ10/20kV、52kJとフラットトップ用コンデンサバンク3.3kV、34kJと並列接続された電源から、イグナイトロンと並列接続された投入器により、2mHの負荷に投入される回路構成において、投入器はイグナイトロン投入後1.5ms後に投入されるようにセットし、投入器の上部にガラス窓を付け、高速度カメラで接点部を観察した。露光時間8.4μs、写真間隔166.7μsで7こま撮影し、アークはほとんど観測されなかった。負荷電流18kAで99回放電試験を行ったが、損傷はほとんどなかった。イグナイトロンを動作させず、投入器のみにより投入した場合は、高速度カメラにより接点間にアークの発生が見られ接点が損傷した。

（2）短絡発電機による大電流通電試験

短絡発電機により、60kA又は120kAの大電流で合計112回、通電試験を行った。動作時間、ジッタ等の投入特性は、特に変化は認められなかった。投入初期の電流増加率3.1A/μs、9.6A/μs、15.4A/μsの3種類の放電を行った。後2者は、前者で110回通電後、それぞれ1回通電したのみであるが、損傷は急に大きくなかった。しかし、実用上問題ない程度である。120kA級の通電でも投入初期の電流増加率を3A/μs以下にすれば、接点の高寿命化が図れることがわかった。

（3）TPE-1 RM15、1MJバンクによる実用試験

装置試験時120kA、数十回通電試験を行い正常であることを確認した後、プラズマ実験では45kA、通電回数4,000回（ただし、無負荷動作回数10,000回）の運転を行ったが異常は認められなかった。

4. TPE-1 RM15試験

4.1 装置試験

TPE-1 RM15装置は、現地に据付け完了後、以下の手順で試験を行った。①外観検査、結線チェック、制御系シーケンスチェック、トリガタイミング試験等、一連の単体及び接続部の試験。②主回路一括部と大地間の絶縁抵抗試験（1,000Vメガで1分間）及び絶縁耐力試験（それぞれの指定電圧により1分間）。③電源充電試験では

充電電圧を徐々に上げ、定格電圧まで充電し異常のないことを確認。コンデンサーの計測及び直列使用されているダイオード、サイリスタの静分圧の計測。④コイル単独通電試験では低圧通電、パルス通電を行い異常のないことを確認。一定の通電パターンによる放電試験、ダイオード、サイリスタ、イグナイトロンの電流分担の計測、ダイオードの逆電圧分担の計測。通電コイルの電圧、電流波形を測定しサージ等、波形に異常がないことを確認。⑤総合通電試験（各コイル同時通電）により各コイルの電圧、電流波形の計測。

上記の一連の試験により、次のとおり良好な結果が得られた。

- （1）全システムの総合通電試験において、TPE-1 RM15装置は良好に動作した。電源、コイル、架台、ケーブル及びその他機器に異常は認められなかった。
- （2）RFP装置特有の高電圧（最大20kV）大電流（最大120kA）通電において、全制御系は良好に動作した。光ファイバ信号伝送によるノイズ誤動作防止対策が効果を発揮した。
- （3）ポロイダルコイル電流投入用に3本並列使用したイグナイトロンの各分流値（1本当たりの通過クーロン数は、80クーロン以下）は、ほぼバランスしており大容量高速投入器への転流は良好であった。
- （4）ポロイダルコイル電流は、コイル、コンデンサバンク、フライホイール ダイオード及び充電器において、各々、直列及び並列接続の切換えが可能である。それぞれの接続の通電試験（最大電圧20kV及び最大電流120kA）において、各部波形及び機械的振動に異常が認められなかった。
- （5）並列接続された半導体素子のロゴスキーコイルによる電流分担の測定値は許容値内にバランスしており、導体配置の設計が適切であったことが確認された。
- （6）半導体素子を直列接続して用いる場合、素子の電圧分担が定常的にも過渡的にも良好になるよう、素子の特性値の選別及びスナバ回路の設計に注意した。これについては、光絶縁アンプを用いた各

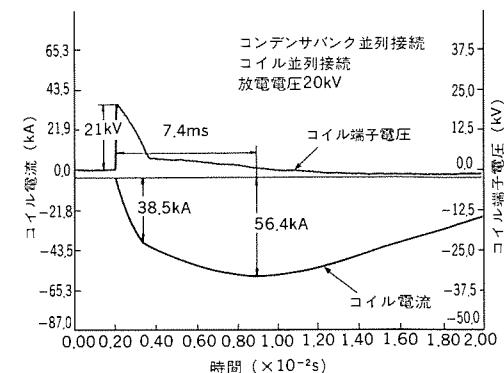


図6. ポロイダルコイル電流波形

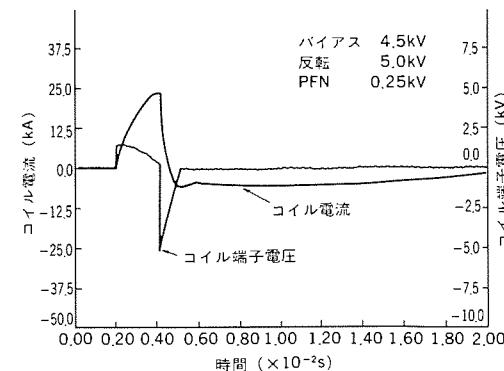


図7. トロイダルコイル電流波形

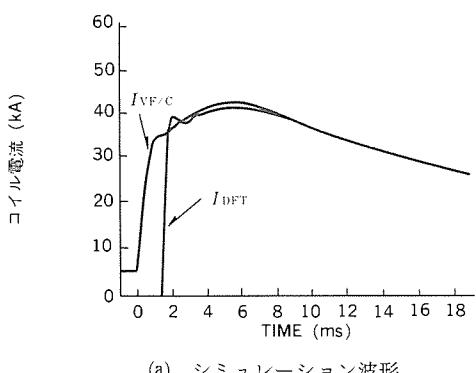
素子の静分圧、ダイナミック分圧、逆阻止サージを測定し、許容値内に納まることを確認した。

(7) ポロイダル系において、電源とコイルのインピーダンスの不整合により、コイル両端に速い振動電圧(260kHz、充電電圧の180%P-P)が発生した。サージアブソーバを追加することにより、15%以内に減少させることができた。

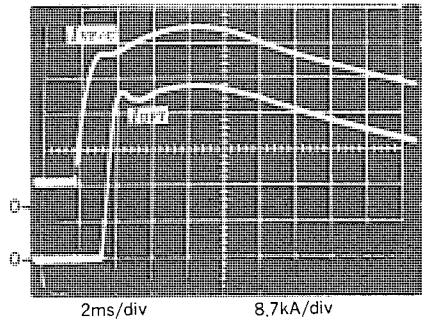
第1期(1985年)工事では、ポロイダルコイル電源及びトロイダルコイル電源を据え付け、現地調整試験において電源設備の全負荷試験を実施し、図6、図7に示すように計算どおりの電流・電圧波形が得られた。平衡磁場電源は、第2期(1986年)工事で据え付け、第3期(1987年)工事では垂直磁場コイルの巻き戻しコイルの追加に伴い、コイル系の結線切換によるオペレーションモードの多様化と、電源回路の波形調整能力の改善を行った。これらについても、現地調整試験においてシミュレーションによく一致した結果が得られた(図8)。

4.2 TPE-1 RM15プラズマ試験⁽⁵⁾⁽⁶⁾

装置完成後テイラー放電洗浄やグロー放電洗浄により、放電容器内面などに付着した不純物(酸素、水)を追い出し、壁の条件出しを行った。到達真空度が 10^{-6} Pa(約 10^{-8} Torr)台の低い領域に到達後、本格的なプラズマ実験が開始された。実験に使用したガスは、主に重水素で、封入圧力領域は 10^{-1} Pa台(数mTorr)であった。ポロイダル方向にカット面を持つ金属シェルは、そのカット部に大きな垂直磁場(誤差磁場)を発生する固有の欠点を持っている。二重シェル構造により、自動的に誤差磁場を緩和する方法もあるが、TPE-1 RM15装置では、装置の項で詳しく述べたように一重シェルにあらかじめプログラミングにより波形整形された外部磁場を加えて、誤差磁場の補正を行った。金属シェルカット部に発生する誤差磁場の影響は予想どおり厳しく、補正によりこれを減少させないと放電の持続や逆磁場ピッチ配位の形成すら困難になることが明らか



(a) シミュレーション波形



(b) 実測波形

図8. 垂直磁場コイル電流シミュレーション波形と実測波形の比較

になった。この様子を図9に示す。

補正による誤差磁場の減少とともにプラズマ電流は持続し、最適補正近くでパルス長は約7ms以上となる。補正を最適化する方法は、シェルカット部に置いたピックアップコイルでカット部の垂直磁場成分を観測しながら、この成分を減少させるようにプログラミングで波形を調整し、カットアンドトライにより最適補正を得る。誤差磁場の大きさは、プラズマ電流にほぼ比例して変化するため、7ms近くで一周電圧が不足しプラズマ電流が減少し始め、プログラミング補正では応答しきれず補正が不十分となり、プラズマ電流の

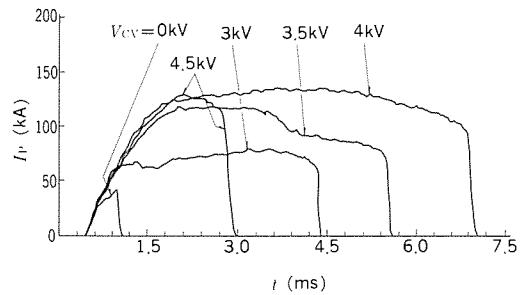


図9.(a) 垂直磁場による金属シェルカット部の補正とプラズマ電流の関係

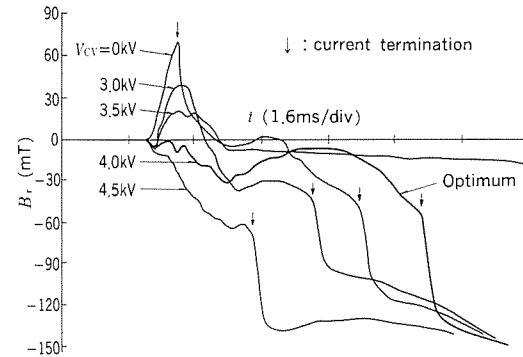


図9.(b) 金属シェルカット部のピックアップコイルによる垂直磁場成分の測定値

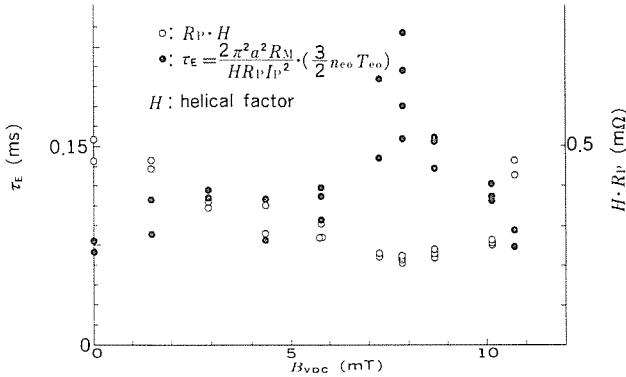


図10. 直流垂直磁場とエネルギー閉じ込め時間の関係($I_p = 135$ kA)

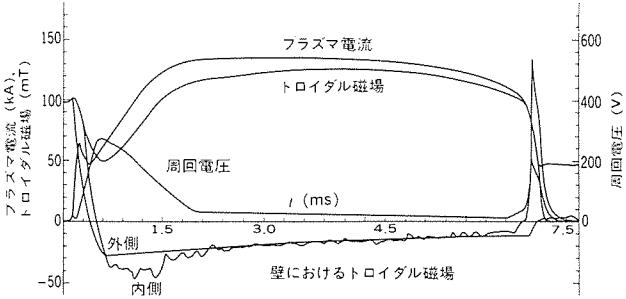


図11. 最適平衡位置制御と誤差磁場補正を最適化したときのプラズマ電流波形

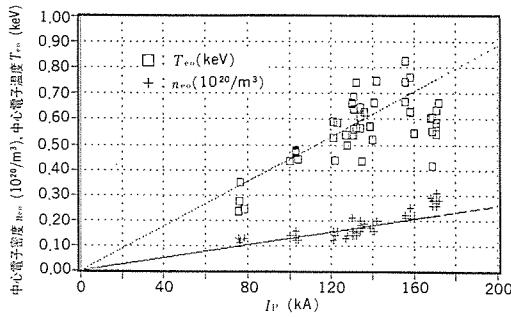


図12. プラズマ中心電子密度 (n_{ee})、電子温度 (T_{ee}) とプラズマ電流との関係

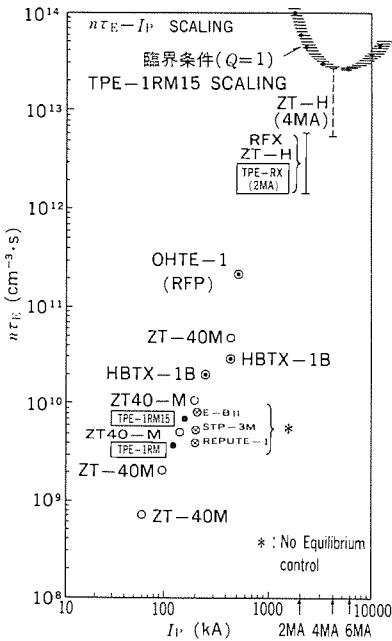


図13. 逆磁場ピンチ装置における $n\tau_E$ のプラズマ電流スケーリング

急速な遮断が生じると考えられる。現在計画中のフィードバック補正の採用により、急速な遮断は避けられるものと思われる。

次に、金属シェルカット部の誤差磁場補正を最適化しながら、直流垂直磁場によるプラズマ平衡位置を制御する実験を行った。実験の目的は、トロイダルシフトによるプラズマと真空容器壁との相互作用を局所的で激しいものから、平衡位置を動かすことにより、この相互作用を壁全体での穏やかなものに変え、壁からの不純物の流入を極力抑え、プラズマの閉じ込め特性を改善することである。

直流垂直磁場の存在は、プラズマ生成の妨げとなる。そのため、プラズマ生成時のごく短時間だけ垂直磁場を消すパルス垂直磁場が用いられた。これにより、直流垂直磁場の可変領域が大きくなり、この装置の大きな特徴となっている。

図10にプラズマ電流135kAのときの平衡位置制御実験の結果を示す。直流垂直磁場の大きさとともにエネルギー閉じ込め時間が変化し、最適磁場強度の位置で閉じ込め時間は0.2msとなり、平衡位置制御をしない場合に比較して約2倍大きくなっている。最適平衡位置制御と誤差磁場補正を最適化したときのプラズマ電流波形を図11に示す。電流に対するスケーリング則を見い出すため、プラズマ電流を変化させてプラズマパラメータの変化を調べた。

図12は、ステンレス鋼真空容器にステンレス鋼リミッタを使用し

たときの、プラズマの中心電子密度 (n_{ee}) と中心電子温度 (T_{ee}) をプラズマ電流に対してプロットしたものである。高い電流値を除けば電流値に対して直線的に増加している。高電流側で温度が飽和傾向を示し、一方電子密度は比例係数よりも早い増加を示す。逆磁場ピンチ実験では、ポロイダルベータ値は比較的の変化が小さく、一定に保たれる傾向がある。高電流値で何らかの原因で電子密度の急激な増加が生じ、電子温度の飽和として表されていると考えられる。電流値135kAで電子温度600eVを得ている。比例係数は、各々 $1.48 \times 10^{17} / \text{m}^3 / \text{kA}$ と $4 \text{ eV} / \text{kA}$ である。同じ電子温度600eV得るのに必要な電流は、前のTPE-1 RM装置で130kAであった。プラズマの半径は、各々 0.09m と 0.135m であるから、電流密度としてはTPE-1 RM装置の場合約2.2倍大きい。

小さな電流密度で高い電子温度を得ることができたのは、負荷系の製作精度や設置精度まで配慮して、できるだけ誤差磁場の少ない装置を完成させたことが第一の原因と考えられる。今までのところ得られているプラズマパラメータは、最大電流値190kA、パルス長約8ms、中心電子温度800eV、平均電子密度 2×10^{19} 、イオン温度400eV、ベータ値10%以上、エネルギー閉じ込め時間～0.2msである。

5. む す び

この論文の前編、後編を通して逆磁場ピンチ閉じ込めの基本原理から始め、TPE-1 RM15装置の設計、製作、建設及びその運転試験について記述した。特に、研究の位置付け及び目標を明確にし、基本的設計思想を基にそれらを具体化することにより良好な実験成果が得られた。装置は設計どおりに完成し、既に逆磁場ピンチ閉じ込めについて重要な実験結果を多く提供し、RFP研究の発展に寄与している。

図13に逆磁場ピンチ装置における $n\tau_E$ のプラズマ電流スケーリング則を示す。逆磁場ピンチ方式による核融合反応（臨界条件）を実現するためには、6 MA以上のプラズマ電流が必要と考えられる。現在の実験結果を基に外挿するには大きなギャップがあり、プラズマ電流 2-3 MA級の大型装置によるスケーリング則の確認が必要である。逆磁場ピンチ研究を更に進めるため、TPE-1 RM15装置での研究を次期大型装置TPE-RXの研究へと発展させる必要がある。

参 考 文 献

- (1) T.Shimada, Y.Hirano, Y.Yagi, K.Ogawa, et al. : Proc. of 14th Symp. on Fusion Technology, Avignon, 1, 665 (1986)
- (2) 塚本ほか：スイッチを含む線形能動回路網の解析法とプログラムについて、電学論C, 106, 6号, p.87 (昭61)
- (3) T.Shimada, Y.Hirano, Y.Yagi, K.Ogawa, et al. : Proc. of 15th Symp. on Fusion Technology, Utrecht (1988)
- (4) 山口ほか：長寿命高速金属接点投入システムの開発、電学論B, 108, 10号, p.443 (昭63)
- (5) T.Shimada, Y.Hirano, Y.Yagi, K.Ogawa, et al. : Proc. 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 2 IAEA, Kyoto, 453 (1986)
- (6) Shimada T, Yagi Y, Hirano Y, Ogawa K, et al. : Proc. 12th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Nice (1988)

京浜急行電鉄(株)納め電車線用フライホイール発電電動機

島津登志成* 橘 浩司*

1. まえがき

近年、フライホイールを利用したエネルギー蓄放勢技術は、種々の産業分野でその応用が試みられている。電気鉄道架線系統における余剰電力の貯蔵と、本系統末端での架線電圧補償への適用もその一つである。当社では、昭和54年度にこの電車線電力の効率的運用を目的として、直流発電電動機を用いたシステムの開発・試作を行ったが⁽¹⁾、今般、京浜急行電鉄(株)逗子線に実用機として定置形25kWh交流駆動式電車線電力蓄勢装置(フライホイールポスト)を製作・納入した。この装置の中枢部であるフライホイール発電電動機(図1)は、次の特長を持っている。

- (1) 発電電動機に交流機を用いて高速化し、機械の小型化を図った。
 - (2) 冷却媒体としてヘリウムガスを採用し、風損の低減を図った。
 - (3) 軸配置は横軸とし、2軸受軸系にして軸受損の低減を図った。
 - (4) 高信頼性を確保すべく、フライホイールを始めとする回転部には破壊力学に基づく損傷許容設計を導入した。

本機は、昭和63年8月に官庁検査を終え実運転を開始したので、この機会にその概要及び試験結果の主なものについて紹介する。

2. フライホイール発電電動機の概要

2.1 電力蓄勢装置の設置目的

近年、省エネルギーの観点から、エネルギー回生の可能なチョッパ制御の回生制動車（チョッパ車）の採用が一般化してきている。この車両は、従来利用されていなかった制動時のエネルギーを電力に変換（電力回生）し、架線を通して電力を必要とする他の力行車にそれを供給するものである。しかしながら、チョッパ車の比率が増加するに伴い電車線に回生電力の余剰が生じ、回生能力があってもそれができない、いわゆる回生失効の傾向が生じてきた。これに対し、余剰電力を吸収貯蔵する電力蓄勢装置を設置することにより、チョッパ車による電力の効率的運用を促進させることが可能となる。また他方、ピークロード時に蓄勢した電力を電車線に放熱することにより、特に支線などの電車線系統末端において、変電所の代替としての架線電圧救済効果がある。

以上のような機能を持つ電車線電力蓄勢装置の単線図を図2に示すが、フライホイール発電電動機に交流機を用いたため、変換装置(並列12相インバータ及び両方向昇降圧チョッパ)を介して直流の電車線系統に接続されている。

2.2 仕 様

このフライホイール発電電動機は、この用途の機械としては初の実用機であり、前述の開発・試作機に対して次の意図のもとに計画された。

- (1) 蓄勢エネルギー、出力の増加
 - (2) 交流機採用による高速・小型化とメンテナンス性の向上
 - (3) 実用機としての高信頼性化
 - (4) 空転損失の低減

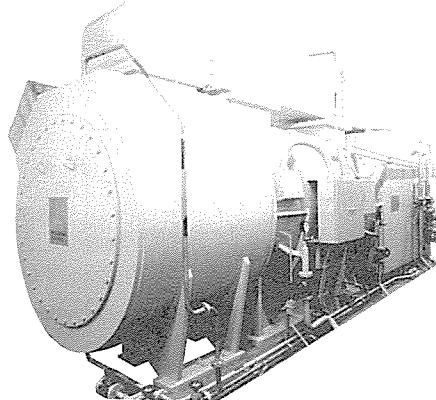


図1. 電車線用フライホイール発電電動機の外観

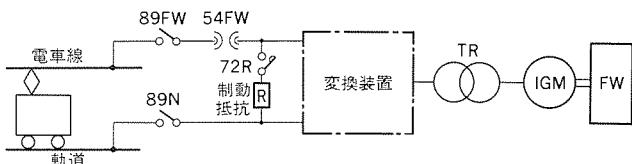


図2. 電車線電力蓄勢装置の单線図

蓄勢エネルギーは、フライホイール発電電動機の最も重要な仕様項目であり、本機においては負荷側の要求から開発機に比べてより大きな蓄勢エネルギーが必要となった。一方、回転部は車両効率 GD^2 は、機械の体格（大きさ）を決定する要素で、両者の間には次の関係式が成立する。

ここで、 E はエネルギー、 N は回転速度である。この式から明らかなように、機械を高速にして GD^2 、ひいてはその体格を小さくすることが可能である。本機では、発電電動機に交流機(かご形誘導機)を採用することにより高速化を可能にし、機械の小型化及びブレーキレス化によるメンテナンス性の向上を図った。

フライホイール発電電動機の主な仕様は次のとおりである。

- (1) フライホイール

蓄勢エネルギー 25kWh (2,100~3,000rpm間)

回転速度 2,100~3,000rpm

過速度 3,150rpm

$$GD^2 \quad 14.3t \cdot m^2$$

- ## (2) 交流発電電動機

形式 かご形誘導機

出力 蓄勢時 1,800kW

放勢時 3,000kW

電圧 936V

電流 蓄勢時 1,260A

定格	反復定格
相数	三 相
極数	2 極
周波数	35~50Hz
絶縁	F種
冷却媒体	ヘリウムガス
制御方式	0~35Hz 可変電圧可変周波数方式 35~50Hz 一定電圧可変周波数方式

フライホイール発電電動機の運転は、電車という負荷の性格上常に定まったパターンとはならず、またその頻度も電車運行ダイヤによって左右される。したがって、上記の電力に関する仕様及び機器設計に必要な定格負荷パターンは、本機が接続される電車線系統の電力シミュレーション結果をもとに決定した。シミュレーション結果の一例を図3に、発電電動機の定格負荷パターンを図4に示す。

2.3 構成と構造

本機は、フライホイール発電電動機本体とその補機類から成る。

2.3.1 本 体

図5に本体の構造断面図を示す。軸配置は横軸形で、回転部は発電電動機主軸と一体で鍛造されたNiCrMoV鋼製フライホイールと、その先端に焼きばめされた発電電動機回転子からなり、フライホイールの両側においてスリーブ軸受により支承されている。発電電動

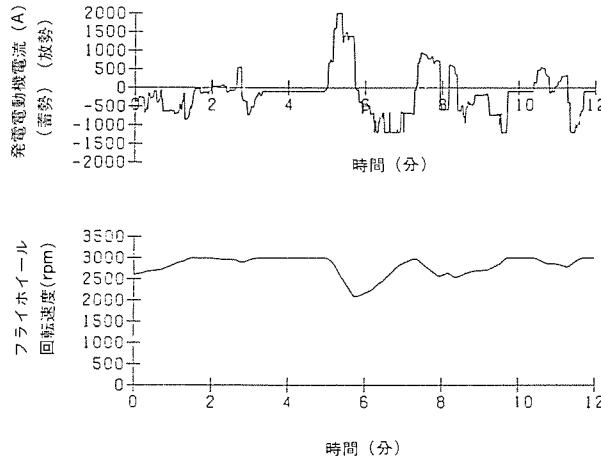


図3. 電車線系統の電力シミュレーション結果

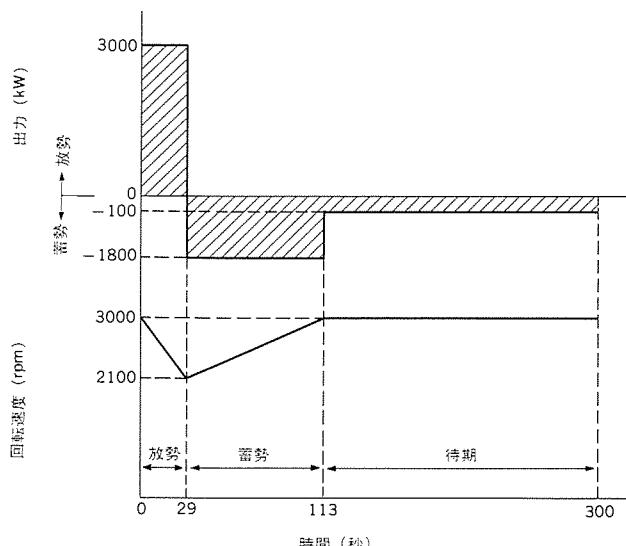


図4. 定格負荷パターン

機にはブラシッシュ(摺)動部がなく、構造的にも堅ろうなかご形誘導機を採用した。固定部は発電電動機固定子のほか、万一のフライホイール破壊に備えてその外周位置に防護壁を設け、通風ダクトとともに全体としてヘリウムガス容器を形成している。本機は、回転速度が120rpm以上では制動抵抗を負荷とした回生制動を行うが、低速域では確実な制動を図るため電磁式ディスクブレーキによる機械制動方式を採用している。また、スリーブ軸受部には非接触式の軸振動計を設置し、軸振動の常時監視を行っている。

2.3.2 ヘリウムガス系統

フライホイール発電電動機の冷却媒体は、ヘリウムガスを用いているが、それにかかる補機として、高効率の遠心式ガスプロワ、水-ヘリウムガス熱交換を行うガス冷却器(これらは本体内に設置される)及びガスを本体へ補充するためのガス供給装置から構成されている。

2.3.3 潤滑油系統

軸受には後述のように振動抑制効果の大きい油膜軸受を用いているが、その潤滑油関係の補機として、軸受に油を供給する潤滑油給油装置、水-油熱交換を行う油冷却器、頻繁な起動停止に対し軸受を保護するとともに起動トルクを低減するオイルリフト装置及び停電などの異常時に給油を行うためのアクチュエータから構成されている。

2.3.4 冷却水系統

フライホイール発電電動機の発生損失は、ガス冷却器及び油冷却器により水と熱交換され、最終的には大気中に放散される。その空気-水熱交換には、機器の寸法及びランニングコストも考慮して湿式のクーリングタワーを採用した。このクーリングタワー及び冷却水供給装置は、屋外に設置されるため特に低騒音形のものを用いた。

3. 設計上の特徴

3.1 フライホイール強度と冷却媒体

フライホイールの回転速度は、エネルギー蓄放勢のたびに変動し、本機においては電力シミュレーションの結果、所要運転回数として、起動停止5,000回、3,000~2,100rpm繰り返し 10^6 回に耐える強度を持つことが要求された。フライホイールの材質としては、製作実績及び品質管理の面から合金鋼を採用したが、このような大型鍛鋼品では製造過程で発生する材料欠陥の存在が不可避であり、高頻度繰り返し運転下ではそれを起点としたき裂進展がその寿命を支配することになる。このため、このフライホイールの設計においては、通常の安全寿命設計はもとより非破壊検査などを駆使した材料の品質管理に基づく損傷許容設計を導入した。その結果、フライホイール形状は、遠心力による応力の大きい中空構造では強度上十分な信頼性は確保できず、中実構造とする必要性が確認された。

一方、冷却媒体の選定に関しては、風損低減の点から空気よりも密度の小さいヘリウムガス、又は水素ガスの両案を検討した。水素ガスは、風損低減の点では有利な反面、欠陥の疲労き裂進展速度を加速するという欠点がある。このため、フライホイール強度検討に際してヘリウムガス及び水素ガス雰囲気中での疲労き裂進展特性試験を実施し、その結果をもとに検討を行った。表1にその結果を示すが、水素案の場合、ヘリウム案と同等の寿命を持つには遠心力による応力を低くするためフライホイール径を小さくする必要があり、結果、所期の GD^2 を確保するにはフライホイール重量はヘリウム案より約30%増加することがわかった。このため、軸受損は水素ガス

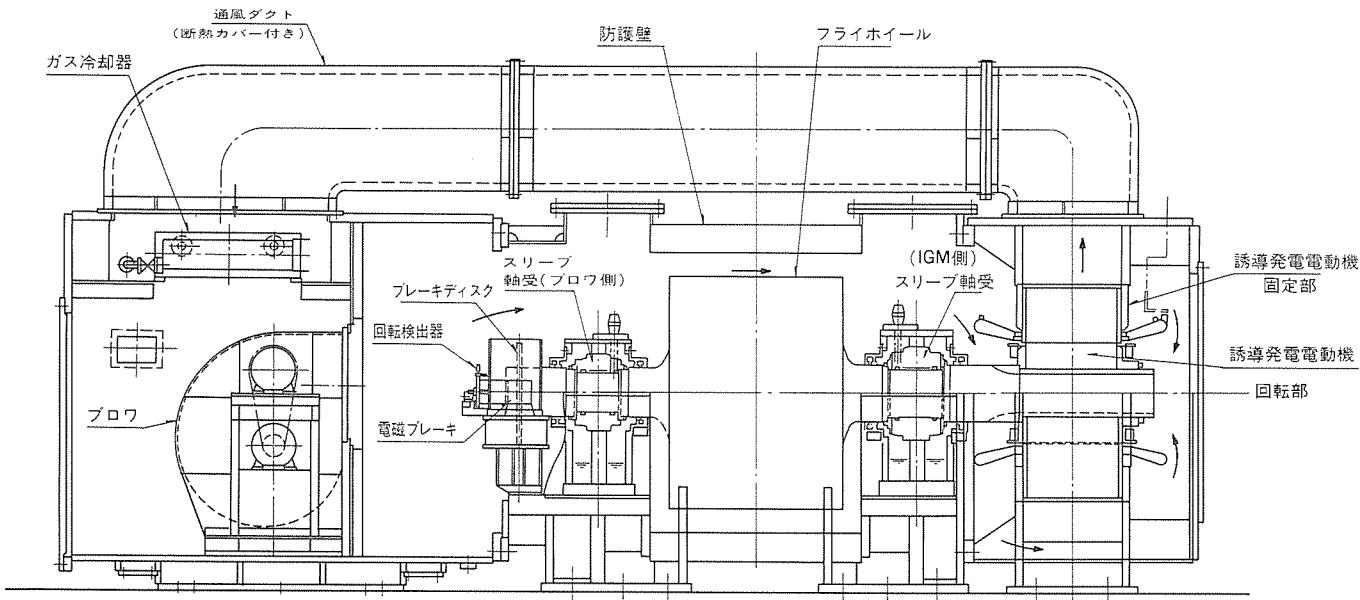
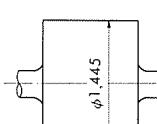


図5. フライホイール発電電動機の断面図

表1. 冷却媒体によるフライホイール設計比較 ($GD^2 = 14.3 \text{t-m}^2$)

冷却媒体	ヘリウムガス	水素ガス
フライホイール		
寸法 (mm)		
重量 (t)	13.7	18.0

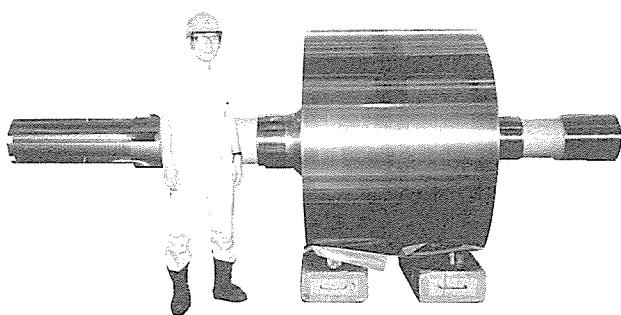


図6. フライホイールの外観

案の方が大きくなり、空転損失全体では両案の差はわずかなものとなり、最終的には安全性・保守性の点からヘリウムガス案を採用することにした。以上の経緯のもと、設計・製作されたフライホイールの外観を図6に示すが、その重量は約13.7t、3,000rpm時の外周速度は230m/sにも及ぶ記録品である。

3.2 軸 系 振 動

フライホイールの高速化と蓄勢エネルギーの増加という要求は、軸系曲げ振動特性を悪化させる要因となり、本機においては軸危険速度を越えての運転を余儀なくされた。このような弾性ロータにおいては、共振点通過時の振動応答倍率を小さくすることが必ず(須)条件となるが、転がり軸受などの減衰作用の小さい軸受では軸危険

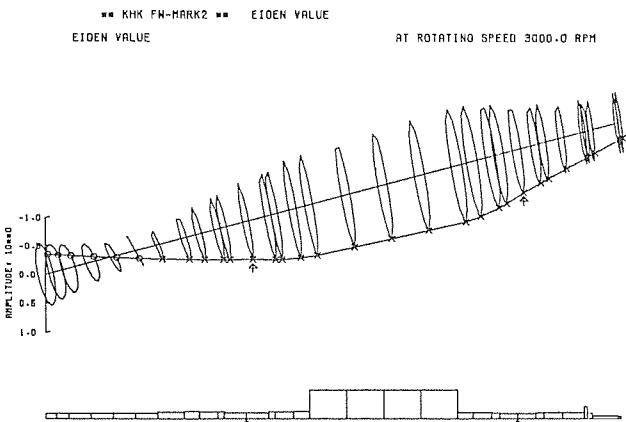


図7. 軸振動解析結果

速度通過時に大振動を発生する危険性があり、採用は不可と判断した。本機においては、振動減衰効果が良好であり、かつ軸受負荷容量、経済性及び製作性の面から総合的に判断して油膜軸受を採用した。また、軸配置は軸受損の点で有利な横軸形とした。

通常、この種の回転部構成では3軸受方式が採用されるが、今回、詳細軸振動解析（図7に固有値解析結果の例を示す。）を行った結果、フライホイールの両側にのみ軸受を配する2軸受発電電動機オーバハンジング軸系においても、良好な振動特性が得られることが判明した。そのためこれを採用し、軸受個数最適化による軸受損低減を図った。

この発電電動機は、変換装置に接続されているため整流器負荷が発生する高調波電流が常時発電電動機固定子に流入し、脈動トルクを発生する。他方、軸系はフライホイールと発電電動機の二つの慣性質量が両端に付着したばね系を構成し、そのねじ(捩)り固有振動数と脈動トルク周波数が一致する点で共振現象が発生する。本機の場合、その起動停止過程において共振点を通過することになったが、軸系捩り振動固有値解析及び共振点通過時応答計算などの事前検討を十分に行うとともに、変換装置との工場組合せ試験において実機の安全性を確認し出荷した。

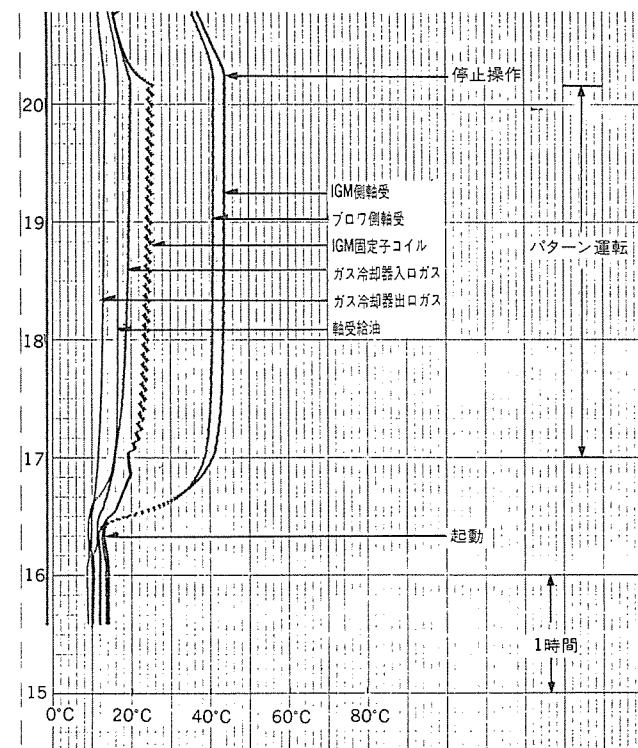


図 8. 温度試験結果

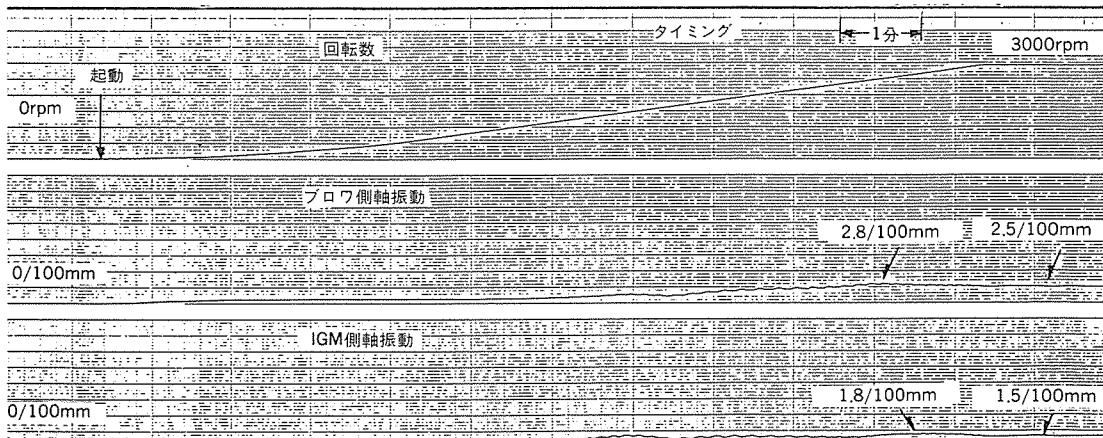


図 9. 軸振動測定結果

3.3 補機異常時のバックアップ

本機の実用化に当たっては、本体はもとより各種補機の異常に対しても十分な注意を払った。

(1) 補機の故障

フライホイール発電電動機の円滑な運転のために必要な潤滑油給油装置、オイルリフト装置、ガスプロワ及び冷却水供給装置のポンプモータセットにおいては予備機を設け、常用機の万一の故障に備えた。

(2) 電源喪失

補機電源は多重化されており、万一の電源喪失時には最終バックアップとして非常用ディーゼル発電機を運転し、その電源を確保し

て本体の安全な停止を期している。しかし、電源喪失からディーゼル発電機電圧確立までの約10秒間は全くのブラックアウト状態となる。本体軸受への給油は、この程度の中止でも大きな障害を引き起こすため、この間のバックアップとして潤滑油給油回路にアクチュエータを設置し、補機電源確立までの給油を行うシステムとした。

4. 現地試験結果

以下、フライホイール発電電動機-変換装置組合せ試験結果の主要なものについて紹介する。

(1) 温度試験

図4に示した定格負荷パターン運転を繰り返し、温度試験を行った。その結果を図8に示すが、軸受温度、誘導発電電動機(IGM)固定子コイル温度ともに十分に低く、夏場でも余裕ある運転が可能であることが確認できた。

(2) 振動騒音測定

起動過程における軸振動測定結果を図9に示すが、軸危険速度通過時においても、振幅は3/100mmp-p程度と許容値に対して十分に小さく、良好な結果が得られ、前述の設計検討結果の妥当性を確認することができた。また、騒音については、本体のごく近傍で約80dB(A特性)と良好であった。

5. むすび

以上、電車線用フライホイール発電電動機の概要について紹介したが、本機の設計・製作により得られた技術はこの種のシステムのみならず広く回転機全般に適用可能と考えられる。

最後に、このプラントの完成にあたり、種々有益な御指導をいただいた京浜急行電鉄(株)の関係各位に深く謝意を表する。

参考文献

- (1) 丸山ほか：三菱電機技報, 55, No.7, p.494 (昭56)

製銑原料・焼結工場管理制御システム

春川康彦* 野村大也* 小竹秀次郎* 幸山和正* 坂本房義*

1. まえがき

製銑原料・焼結設備は、品質の高い高炉原料を安定供給することを主目的とする設備であり、この設備の稼働状態が高炉、更には製銑所全体の安定操業を大きく左右する重要なプロセスである。鉄鋼プラントにおいては、ユーザーの各設備の電気設備、計装設備、生産管理設備ごとの分割発注方針により、当社はその優れたプラントコントローラ応用技術、交流機可変速制御技術などを基盤技術とし、特にコークス・焼結設備の電気監視制御システムにおいて数多くの実績を重ねてきたが、昨今ユーザーサイドから電気設備、計装設備、生産管理設備間の機能重複を排除し、設備運用効率の向上を可能とする統合制御システムの提供を要請する声が高まっている。

本稿では、このたび受注・納入した焼結工場電気・計装監視制御システム、生産管理システム及び通信システムからなる管理制御システムについてその構築例と効果を紹介するとともに、今後の製銑原料・焼結工場統合制御システムの展望について紹介する。

2. 製銑原料・焼結設備の特徴と管理制御システムへの要求

製銑原料設備は多くの軌条機械、長大コンベヤなどのヤード設備を持ち、コークス設備、焼結設備及び高炉設備の主原料である鉄鉱石、石炭や各種副原料を入荷・在庫管理するとともに下流の各設備への安定供給を担当する設備である。焼結設備は、製銑原料設備から供給される鉄鉱石・けい(硅)砂・生石灰など、さらにコークス設備から供給されるコークスなど諸原料を所定の比率(配合比)で配合し、適切な水分に調整後高炉設備から要求される品質の焼結鉱を需要に応じて焼成し供給する設備である(図1参照)。したがって、鉄鋼プラントにおいては高炉の24時間安定操業が最も重要な命題であることから、高炉設備へ各種原料を品質を確保しつつ過不足なく供給する責務を負う製銑原料・焼結設備は、鉄鋼プラントのうちでも最も重要な設備の一つと言える。

製銑原料・焼結設備に共通し、かつ各設備の性能を大きく左右する制御として原料配合制御が挙げられる。焼結設備における原料配合制御の概要を図2に示す。生産管理システムは、焼結成晶サンプラーで採取された焼結鉱の成分・粒度・強度などの分析データ、及び製銑原料設備から提供される各種原料データを基に、原料最適配合比、原料水分率を算出・更新し、高炉設備が要求する焼結鉱供給量とともに計装監視制御システムへ提供する。計装監視制御システム

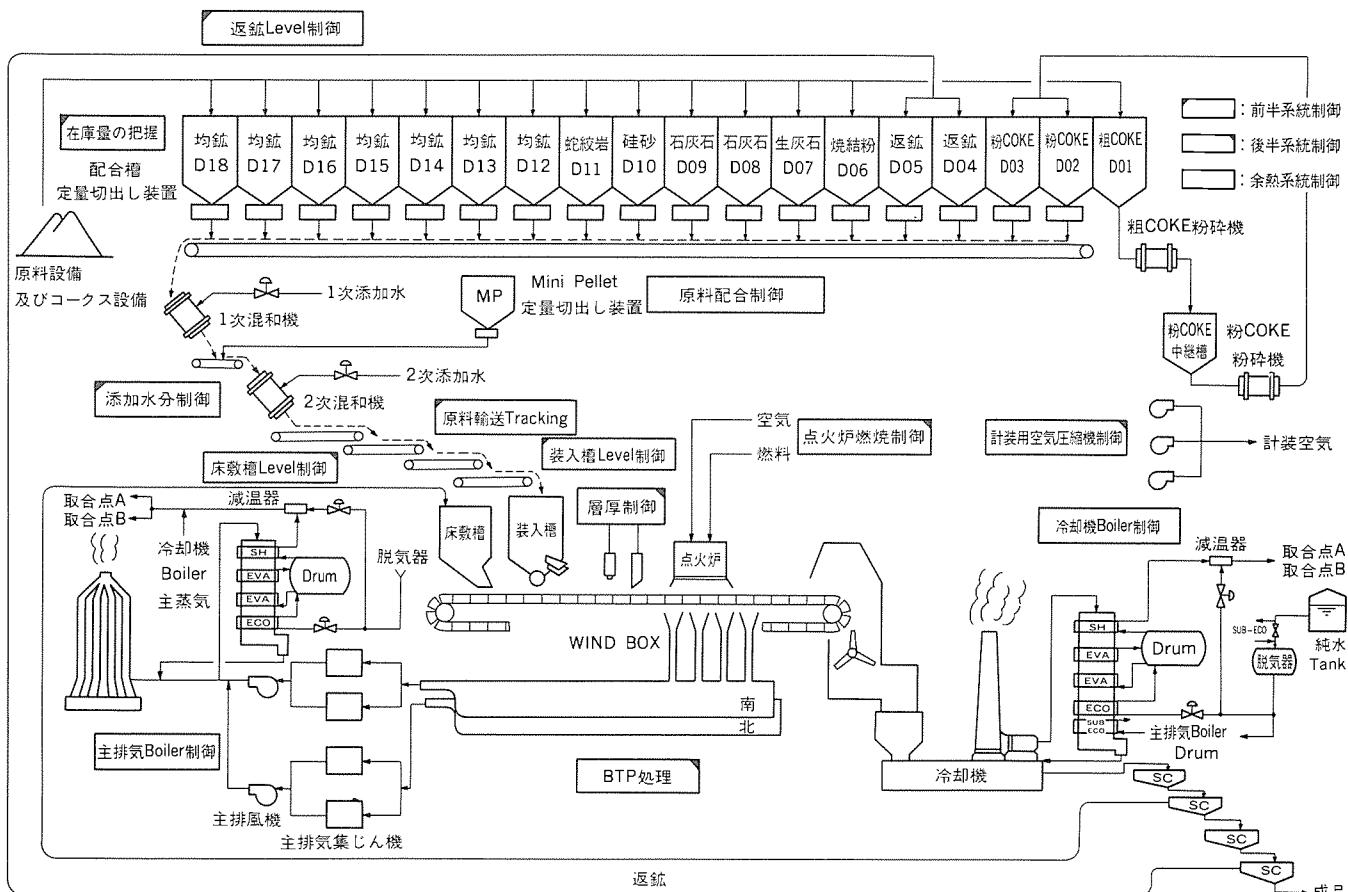


図1. 焼結設備フロー

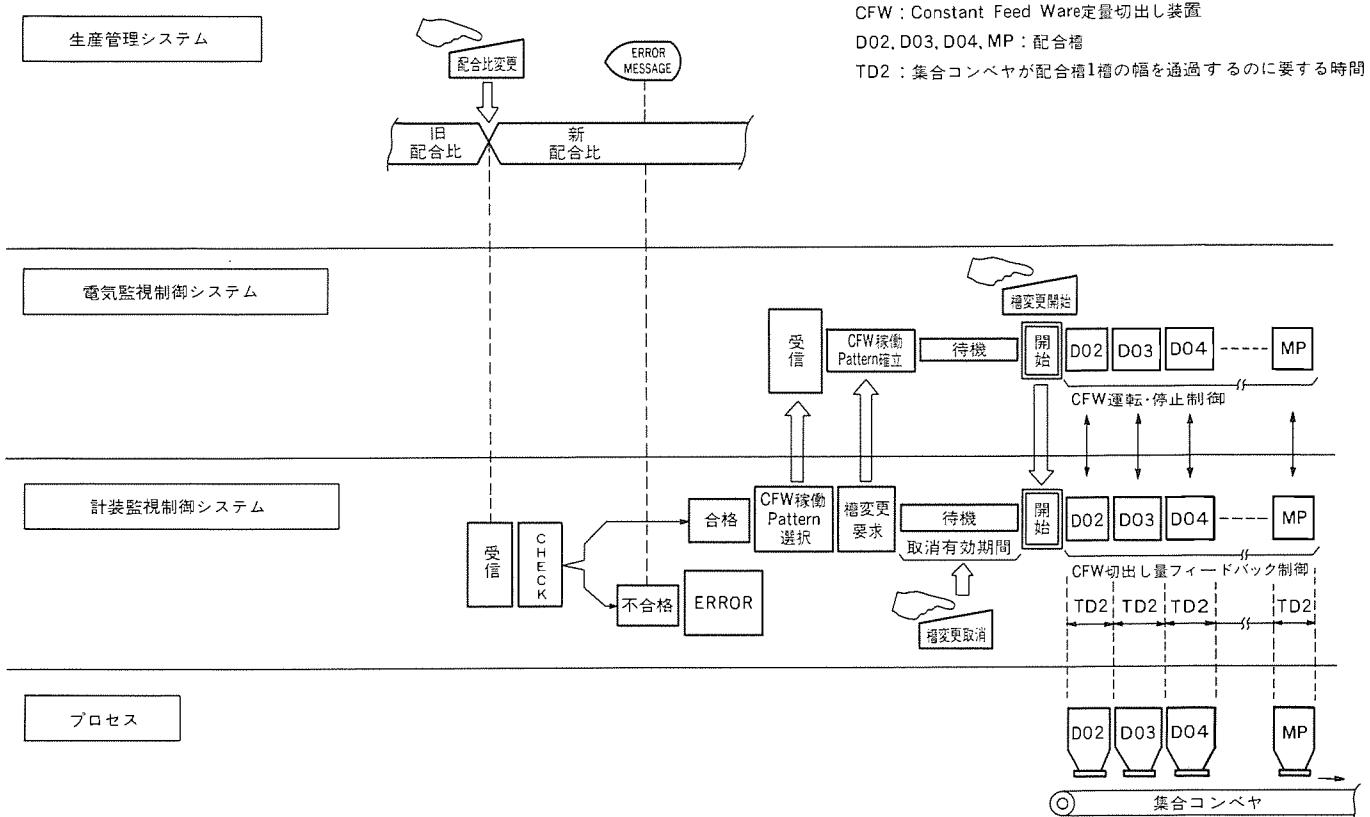


図2. 焼結設備原料配合制御の概念

ムにおいては、上記の原料最適配合比、原料水分率、及び焼結鉱供給要求量と電気監視制御システムから送られてくる各配合槽下に設置された定量切出し装置 (Constant Feed Ware : CFW) の運転可否情報により、各配合槽ごとの切出量目標値並びにCFW稼働パターンを算出し、さらに電気監視制御システムの担当するCFW運転・停止制御と時間協調をとて各CFWの切出量フィードバック制御を行う。また、電気監視制御システムは、計装監視制御システムから提供されるCFW稼働パターン情報及び集合コンベヤ速度に基づくCFW運転・停止制御を担当している。

焼結設備においては上記原料配合制御と同様、集合コンベヤから装入槽に至るまでのコンベヤ群に対する原料輸送トラッキング制御、焼成工程における層厚レベル制御、点火炉燃焼制御、パレット速度制御などに関してもシーケンス制御、アナロググループ制御、及びデータ処理の有機的結合が必要であり、高信頼性の確保とともに焼結工場管理制御システムに対する主要な要求機能である。

3. 最近の納入システムとその特長

焼結工場管理制御システムの構築に際しては、上述の要求にこたえるため、特に電気監視制御機能、計装監視制御機能間を効率良く有機的に結合でき、質の高い制御と情報を提供するとともに、信頼性・保守性の高い機種を選定することが重要である。《MACTUS 620》は、プロセス制御を担うシーケンス制御・アナロググループ制御・データ処理、さらにこれらを融合した高度な制御も可能であること、容易なシステムメンテナンス機能、充実したマンマシン インタフェース機能、冗長化機能を装備していること、さらに規模、用途に合わせて制御機能の分散・危険分散・地域分散と管理・監視・操作の集中をフレキシブルに実現できるとともに、《MELSEC-A》、"HC形コンビネーション スタータ"、"V形モータ コントロールセンター"

及び上位計算機と容易に結合しトータルシステムを構築できることなどにより、焼結工場管理制御システムの中核部である電気・計装監視制御システムとして最適な機種と言える。以下に、最近納入した焼結工場管理制御システム (図3参照) を例に、その特長を紹介する。

3.1 高信頼性の確保とインターフェースの簡素化

3.1.1 システムの高信頼性の確保

電気・計装監視制御システムにおいては、《MACTUS 620》の持つ充実した冗長化機能を全面的に採用して、複数台のオペレータステーションに同一機能のソフトウェアを搭載し、相互バックアップシステムを実現するとともに、コントローラステーション、伝送路には図4に示す全二重システムを適用し高信頼性を確保している。

また、"MMバス"に接続されるすべてのステーションの状態を表示するシステムモニタ画面、コントローラステーションの制御基本部 (CPU部) の動作状態と伝送路を含むプロセス入出力部 (I/O部) の実装状況・動作状態を表示するCNSシステムモニタ画面及びモータコントロールセンターの各ユニットごとの運転・停止・故障状態を表示するモニタ画面 (図5参照) を提供して電気・計装監視制御システム全体の一貫集中監視を可能にしている。さらに、プラントの操業を停止することなく機能の修正・変更ができるソフトウェアオンラインメンテナンス機能、プロセス入出力カードのオンライン着脱機能、カード単位の自己診断・故障表示機能、プロセス入出力ユニット単位の入出力状態表示機能などを提供し保守の容易化を図っている。

3.1.2 インタフェースの簡素化・高信頼性化

焼結工場管理制御システムの中核部である電気・計装監視制御システムを担当する《MACTUS 620》は、図3に示すように、次の専用通信インターフェースを採用している。

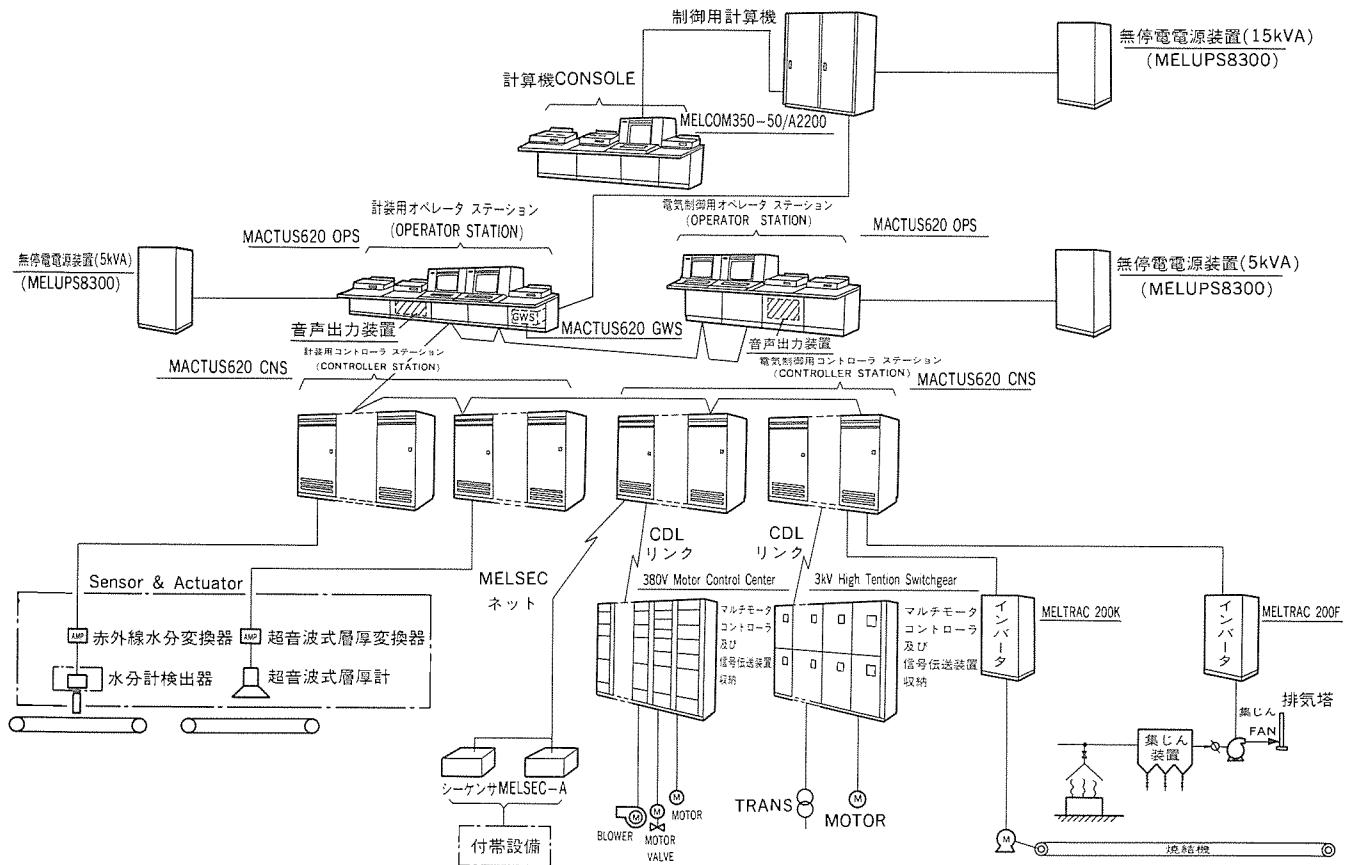


図3. 焼結工場管理制御システム（納入例）

- 必要に応じた二重化構成
- オペレータステーションでの稼働情報の集中化

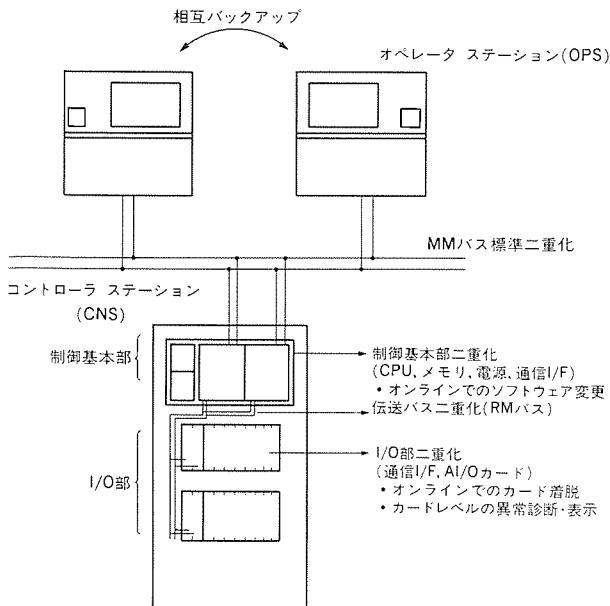


図4. 信頼性と保全性の向上

- (1) ゲートウェイステーションによる、生産管理システム《MELCOM 350/50 A2200》とのリンク
- (2) MMバスによる、余熱回収設備用《MACTUS 620 コントローラステーション》とのリンク
- (3) 《MELSEC-NET》による、付帯設備用《MELSEC-A》とのリンク

(4) “CDLリンク”による、高低圧モータコントロールセンター及び機側操作盤とのリンク

以上のようにこのシステムは、従来のシステムに不可欠であったプロセス入出力信号によるインターフェースを通信インターフェースに置き換えることにより、通信に必要な最小限の信号線ですみ、配線費の縮減、配線工事時間の短縮を図った。さらに、各用途・機種に対応した専用通信インターフェースを採用することにより信頼性が高く、保守・増設も非常に容易なものにしている。

3.2 統合オペレーションの提供

焼結設備は、各構成設備の規模が大きく設備全体の敷地面積は数km四方に及ぶとともに、各構成設備間は長大コンベヤで接続されており数多くの時間遅延要素が内在し、中には数十分に及ぶものもあることから、特にオペレータの空間把握・時系列把握・イベント把握を強力に支援するマンマシンインターフェースが要求されている。

図3に示すシステムにおいては、《MACTUS 620》の高い誘目性と視認性を備えた監視機能、及び高速応答と充実した操作機能（図6参照）を駆使することにより、必要な情報を多面的な切口から提示するユーザーフレンドリーな統合オペレーションを提供している。

図7はプラント全体の状況表示画面であり、37インチの大画面CRTに表示することにより、複数のオペレータによるプロセス同時監視が容易になり、パネルレスオペレーションを実現している。また、CRT表示面積の2倍画面のパンニング機能を併用することにより、プロセスの詳細かつ広範囲な把握を可能としている。図8は焼結設備上流系統用統合オペレーション画面であり、CFW及び輸送コンベヤの運転状態など電気制御状況を監視するとともに、配合槽・装入槽のレベル、原料切出し輸送トラッキング制御状況及び添加水

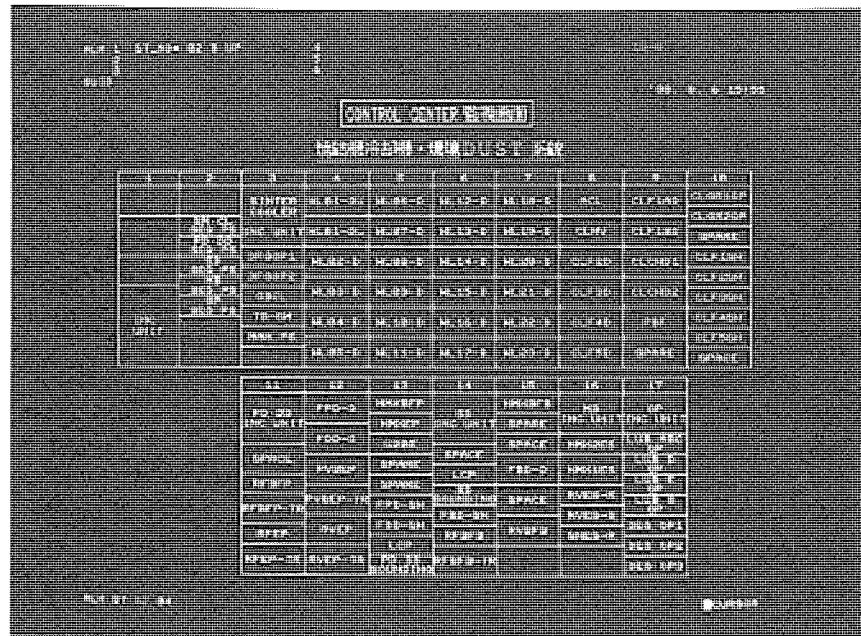


図 5. モータコントロールセンター監視画面例

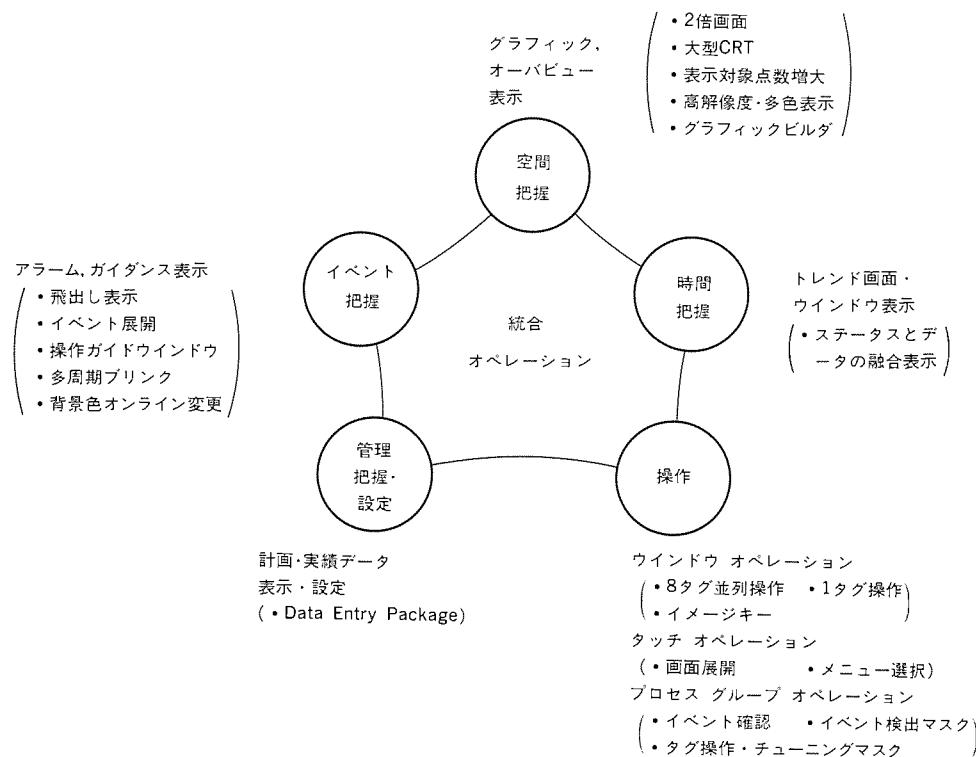


図 6. マンマシン インタフェース要求に対する《MACTUS 620》の対応

制御状況の監視、さらに原料水分の監視・設定など計装監視制御も可能としている。また、この画面にトレンドウインドウを呼び出し、CFW・輸送コンベヤの運転タイムチャートや各種計装データの推移を表示することにより、プロセスの空間把握と時系列把握を同時に可能としている。

イベント発生時には、図6に示す《MACTUS 620》の機能により迅速かつ的確にオペレータにその内容を知らしめることができるが、さらに音声出力装置“VO-01”(図9参照)採用により聴覚監視機能を強化してCRTの常時監視を不要とし、オペレータに与えていた過度の緊張感を和らげるよう配慮している。なお、“VO-01”はオペレ

ータステーションとは独立してコントローラステーションに直接接続し、視覚監視機能と聴覚監視機能の危険分散を実施している。

図10は焼結設備において最も重要な処方せん(箋)データである原料配合比の設定画面で、生産管理システムにおける設定値、原料配合比と原料水分率との演算結果により求まる実使用配合係数を表示するとともに、生産管理システムのバックアップのため独自に配合比設定を可能にしている。

画面展開や図10のような設定画面のカーソル移動には全面的にタッチオペレーションを採用し、図6に示すウインドウオペレーションと併せ迅速かつ容易な操作を提供するとともに、操作の可否範囲

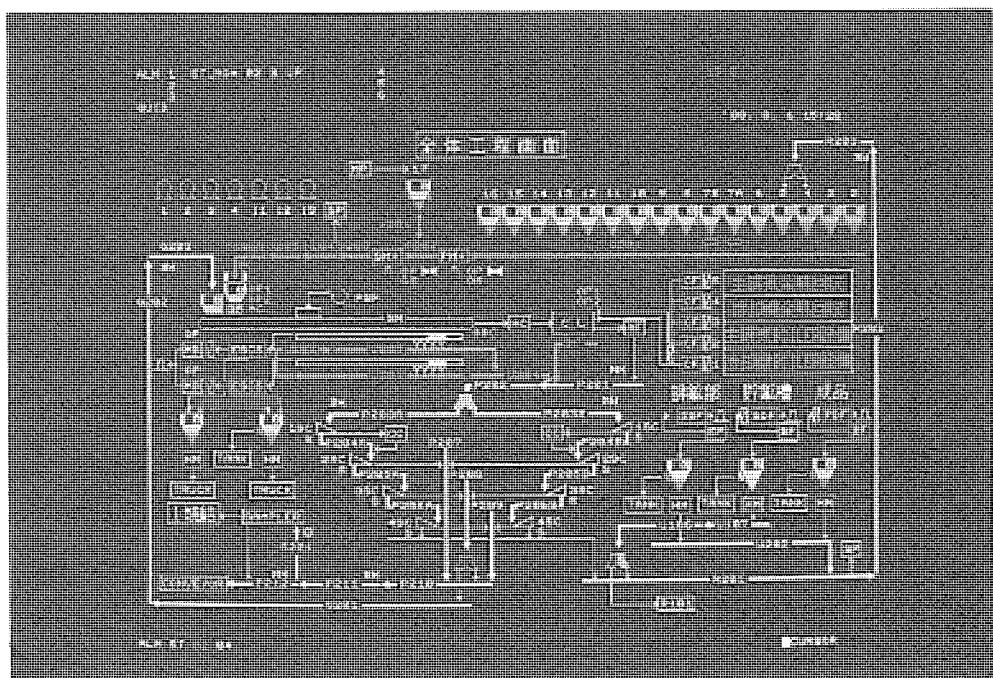


図 7. 烧結設備全体の工程画面例

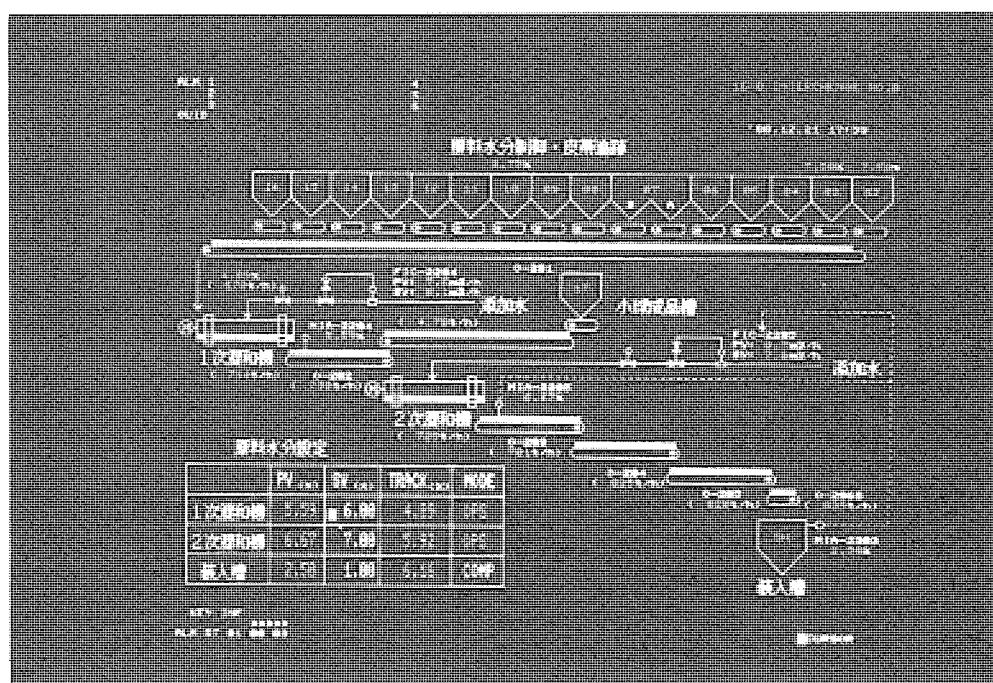


図 8. 烧結設備上流系統用画面例

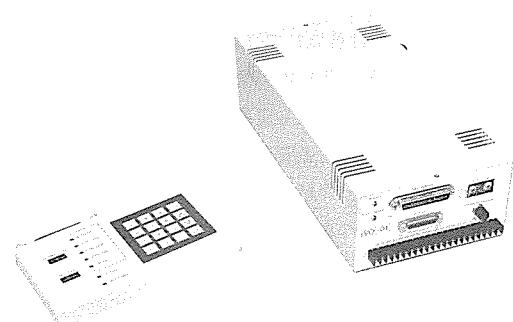


図 9. 音声出力装置 “VO-01”

をオンラインで選択できるタグ操作・チューニングマスク機能、カバー付き押しボタンのイメージで誤操作防止可能なスイッチカバー機能並びに設定値合理性チェック機能などCRTオペレーションにおいて最も大切な要素であるヒューマンエラーに対する配慮も十分実施している。

3.3 電気・計装エンジニアリングの一元化

図3に示すシステムにおいては、電気及び計装監視制御システムを《MACTUS 620》に統一することにより電気・計装間の境界をなくしており、電気・計装監視制御用ソフトウェアのアプリケーションソフトを含む一元管理、エンジニアリングツール及びRAS機能の一元化、予備品の共用化・数量削減などの効果を提供している。さらに、《MACTUS 620》は、用途・機能に応じた言語及び各言語

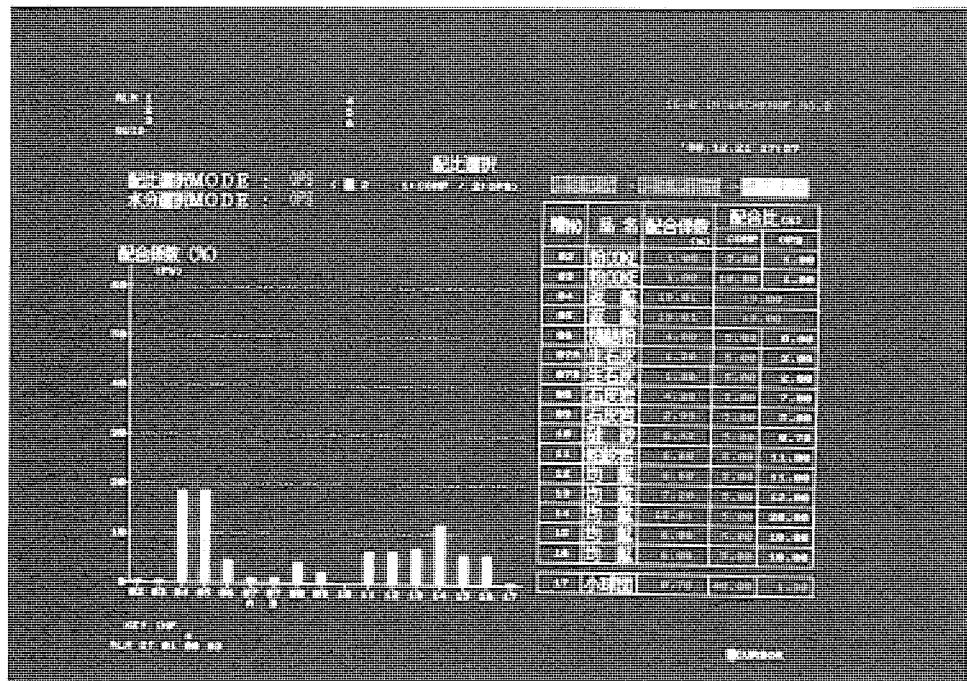


図10. 原料配合比設定画面例

OPS : オペレータ ステーション
 EI : 電気・計装制御用コントローラ ステーション
 C : 計算機制御用コントローラ ステーション
 IOS : 共通入出力カステーション
 PNA : ベリフェラル ネットワークアダプタ
 FEP : フロントエンド プロセッサ
 PIO : プロセス入出力
 LAN : ローカルエリア ネットワーク

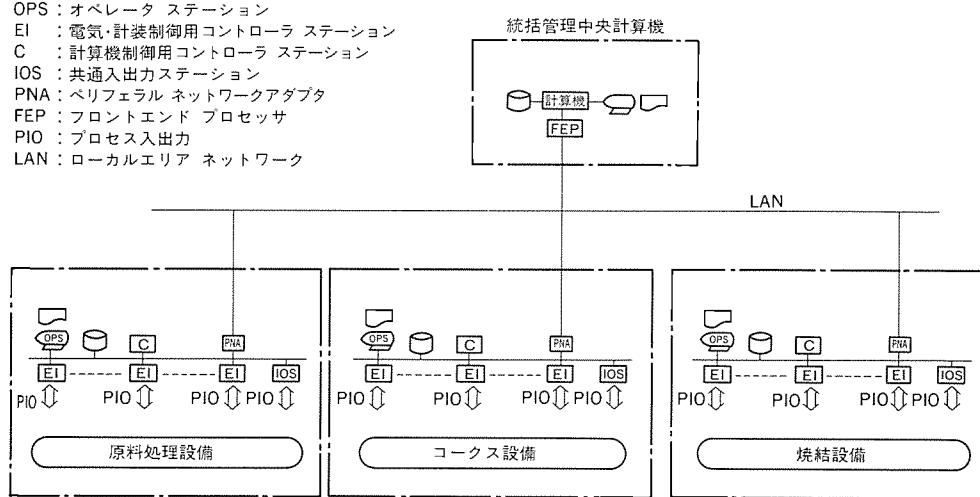


図11. 製銘原料・焼結工場の統合制御システム

に適したエンジニアリング機能を豊富に装備していること、またオペレーション機能は機能単位にまとめられ空欄記述方式(FIF方式)によりデータ登録・画面構築ができるとともに、設定画面・グラフィック画面はFIF方式及びCRT対話方式により生成・変更できるため、ユーザーエンジニア及びオペレータで容易にソフトウェアの生成・改善・変更・保守・増設ができるという効果も提供している。

4. む す び

以上、当社焼結工場管理制御システムは、電気及び計装監視制御システムに《MACTUS 620》を使用することにより、①統合オペレーションの提供、②電気・計装監視制御用ソフトウェアの一元管理、③電気・計装関係RAS機能、エンジニアリングツールの一元化、④システム機能、ソフトウェアなどの機能重複の防止、⑤工事費用及び保守費用の削減などを実現しており、ユーザーの高い評価

を得ている。しかしながら、高炉原料の安定供給及び品質向上を図るためにには、原料処理設備・コークス設備・焼結設備各設備間の有機的な情報交換を一層リアルタイムに実現する必要があり、そのためには各設備の管理制御システムにおいて生産管理・監視制御システム間の境界を取り去り、管理制御システムにおける、①システムリソースの一元化、②マンマシン インタフェースの一元化、③エンジニアリングの一元化を実現する必要がある。

今後、各工場の管理制御システムに、《MACTUS 620》の優れた電気・計装監視制御機能を継承・向上するとともに計算機処理機能を大幅に強化した統合制御システム《MELTAS》を適用して上記の課題を解決し、さらに各工場管理制御システム間を有機的に結合したユーザーフレンドリーな製銘原料・焼結工場統合制御システム(図11参照)を構築し提供する所存である。

G4 ファクシミリのためのMHS準拠メッセージ交換システム

吉満雅文* 三木俊明* 戸叶秀晴** 萩野義一**

1. まえがき

デジタル通信の普及に伴い、従来のTTY(テレタイプライタ)やG3 Fax(グループ3ファクシミリ)に代わりTTX(テレテックス:通信機能を持つワードプロセッサ)やG4 Fax(グループ4ファクシミリ)などのテレマティック端末が普及し始めている。テレマティック端末は、OSI 7階層に従うプロトコル(通信規約)を装備し、高速で誤りの少ない通信が可能であるとともに、送信途中で障害が出てても残りの電文を継続して送信する再同期機能など高度な通信制御機能を備えている。

このような高機能端末のメッセージ交換処理は、CCITT(国際電信電話諮詢委員会)のマルチメディアメッセージ交換システムMHS(Message Handling System)勧告X.400シリーズのうちX.430として制定されていた。これに加えて1985年からテレマティック端末が、MHSによってメッセージ交換を行うための勧告の検討が行われ、1988年11月にT.330勧告として新たに制定された。

国際電信電話機(KDD)は、CCITTにおける勧告化検討と並行してこの機能を実現するためのMHS準拠メッセージ蓄積交換装置(G4 Fax/ミクストモード端末接続変換処理装置とよぶ。)の技術開発を企画設計し、これを受けて三菱電機機器がG4 FaxMHS装置を開発し1988年4月に完成した。

この論文では、G4 FaxMHS装置の構成と機能について実例を交えて紹介する。なお、任意のレイアウトの文章と画像を効率良く通信するマルチメディア端末であるミクストモード端末は、通信プロトコルがG4 Faxと同一であるので特に区別せずまとめてG4 Faxと呼ぶことにする。

2. システム構成

システム全体のネットワーク構成を図1に示す。G4 FaxMHS装置は、パケット交換網を介してTTX、G4 Fax及びMHS蓄積交換装置と接続され、メッセージ交換機能を提供する。TTX、G4 Faxを加入端末として直接収容するほか、MHS蓄積交換装置とG3 Fax電文やテレタイプ電文を交換する。また、複数のG4 FaxMHS装置の間で、G4 Fax電文、TTX電文を交換することもできる。これら4種類のメディアは、装置内で変換し異なるメディアの端末間でもメッセージ交換を可能にしている。

G4 FaxMHS装置の構成機器を図2に示す。ハードウェアは、中央処理装置(CPU)に32ビットスーパーミニコンピュータ《MELCOM 70 MX/3000 II》を採用し、パケット通信制御装置やファクシミリ画像変換処理装置など専用装置を搭載して処理性能の向上を図った。システムコンソール、加入者データ更新用のキャラクタディスプレイ装置、ラインプリンタ装置、磁気テープ装置を装備し、運転運用管理に使用する。

24時間稼働の設備として必要な信頼性の確保は、ハードウェア、ソフトウェアの両面から追及しており、以下の機能を持っている。

(1) ディスク装置の二重化

電文や課金統計情報など紛失の許されない情報は、2台のディスクに書き込む。万一、片方に障害が起きた場合でも情報を紛失しない。さらに、障害ディスクに予備ディスクを自動的に割り当てる、直ちに二重化を再開する。これにより更に信頼性を向上している。

(2) ジャーナル取得による回復処理

電源断やCPUの障害により、装置の運転に一時停止が発生しても蓄積された電文の交換処理を矛盾なく再開継続できる。このために、ジャーナル情報によるチェックポイントリカバリ方式のトランザクション処理を行っている。

(3) 二重系システムへの拡張

今回開発した装置は一重系であるが、待機予備方式の二重系構成をとることができる。運転系のダウン時は自動的に待機系が運転を引き継ぎ、蓄積された電文の交換処理を再開継続する。また、二重系の場合、両系で共用するディスク装置は運転を停止することなく取り替えられるので無停止運転が可能である。

また、電文疏通状況の把握、制御とユーザーのサービス機能を代行するための制御用装置としてテレタイプライタ端末が接続される。この端末は、パケット交換網を介してユーザーの近傍に設置され、運用される。

3. 蓄積交換機能

MHS勧告に準拠したG4 FaxMHS装置の特長である電文の同報機能と配達証明の機能について図3に示す実例をもとに説明する。

(1) 加入者の属性

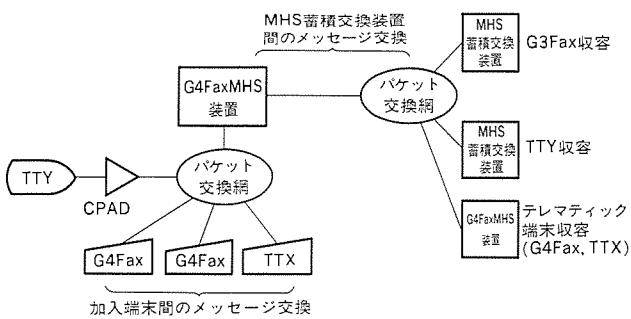
G4 FaxMHS装置の加入ユーザーを識別する名前をO/R名(Originator/Recipient Name)という。国名(CN)+主管管領域名(ADMD)+ユニークUA識別子(UAID)の組合せを用いる。自由形式名(FN)という副次的な名前も使うことができる(他の組合せもあるが説明は省略する。)

ユーザーはメールボックスと呼ぶ蓄積領域を持つことができる。図3の例では、G4 Fax#1のユーザーのみがメールボックスを持つものとする。

(2) 電文の送信

電文の送信は、CCITT勧告T.330に規定されるアクションユニットの形式で、あて(宛)先名など電文の配信に必要な情報を記述したコントロールドキュメント(CD)を作成し、電文本体(ノーマルドキュメント:ND)とともに送信することによって行う。コントロールドキュメントは、図4から図7に示すように文字で書かれた文書の形式で、番号:キーワード:パラメータの並びで構成される。なお、以下の説明では、()内に図中のパラメータの番号を示し、対応付けている。

図4の発信コントロールドキュメントにより、TTX端末から二つの宛先G4 Fax#1に優先度#3が至急(URGENT)の電文を送る(同報機能)。いずれの宛先も配信の成功/失敗が配信状況通知により報



G4Fax : グループ4ファクシミリ端末

TTX : テレテックス端末

G3Fax : グループ3ファクシミリ端末

TTY : テレタイプライタ端末

CPAD : キャラクタ端末パケット集線装置

図 1. ネットワーク構成

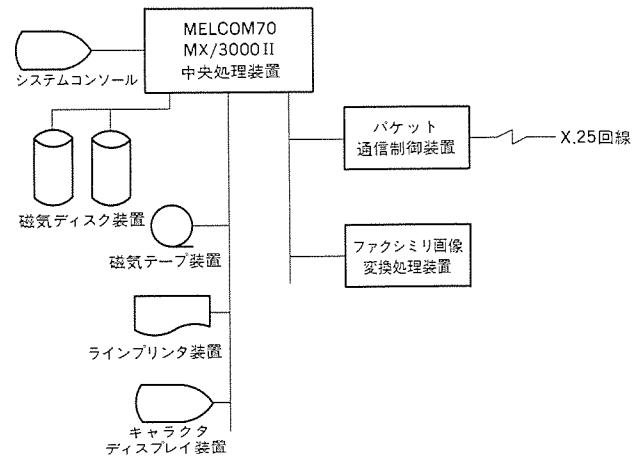
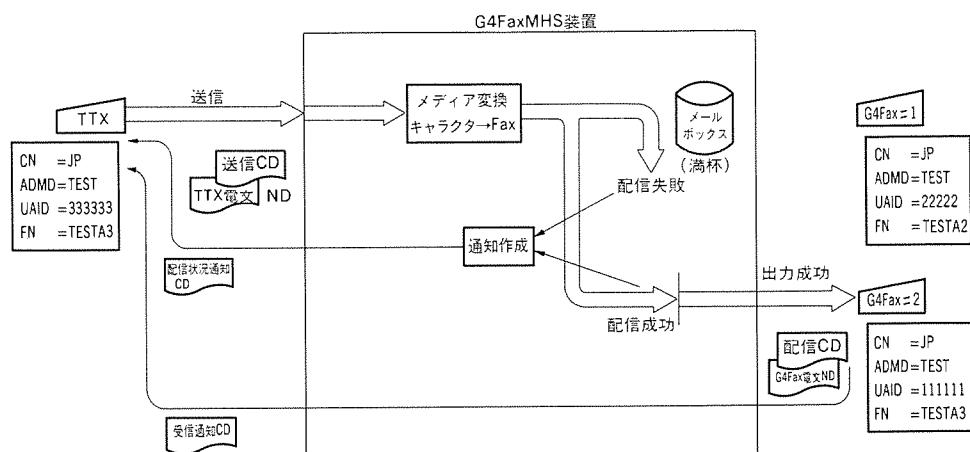


図 2. ハードウェア構成



CN : 国名 ADMD : 主管庁領域名 UAIID : ユニークUA識別子 FN : 自由形式名
CD : コントロール ドキュメント ND : ノーマルドキュメント

図 3. 電文の流れ

```

3.1: SEND:
15: PRIORITY: URGENT
14: ORIGINATOR:
  <CN=JP;ADMD=TEST;UAID=333333>
15: RECIPIENT:
  <CN=JP;ADMD=TEST;UAID=111111>
  =DN
  <CN=JP;ADMD=TEST;UAID=222222>
  =DN
20: FROM:
  <CN=JP;ADMD=TEST;UAID=333333><PN=TESTA3>
22: TO:
  <CN=JP;ADMD=TEST;UAID=111111><PN=TESTA1>
  =RN, NRN
23: CC:
  <CN=JP;ADMD=TEST;UAID=222222><PN=TESTA2>
  =RN, NRN
26: SUBJECT: TEST MESSAGE FROM TTX TO G4FAX

```

図 4. 電文送信コントロール ドキュメント

告される (=DN)。

ビジネス文書の慣行を踏襲するために、種々の情報を伝えることができる。これらはヘッダ情報として、宛先に配信する電文上に表示される。自由形式名を伴った送信者(20)を伝達表示できる。二つの宛先を、一方は本来の宛先(21)とし、他方は本来の宛先に電文を送ったことを周知するために写しを送る宛先(23)として区別できる。これら宛先の端末への電文出力動作の成功/失敗は、受信通知により報告される(=RN, NRN)。主題(26)は、電文に表示されるだけでな

く、メールボックスに配信された電文の内容を調べるときに表示されて内容の把握が可能となる。

このほかに電文の秘密などを伝達、表示できる。

(3) 電文の配信

TTX文字列の電文が送信されると、G4Fax画像の電文に変換した後宛先へ配信する。配信はメールボックスを持つユーザーに対しては、メールボックスへの格納により、またメールボックスを持たないユーザーに対しては、装置内部で端末への電文出力準備をしたことにより完了する。

図3の例は、G4Fax#1のメールボックスが満杯であったときに新たな電文の配信をしようとして失敗したが、G4Fax#2への配信が成功したことを示している。これにより、図5に示す配信状況通知が書かれたコントロールドキュメントが作られ、送信者(TTX)に出力される(図5において黒塗りされた部分にはパケット網のアドレスが表示されている。)。

UAID=111111のG4Fax#2には配信が成功(43:DELIVERY)し、UAID=222222のG4Fax#1にはメールボックスが満杯であるため(46:MAILBOX-OVERFLOW)配信が失敗(43:NON-DELIVERY)したことが示される。

(4) 電文の出力

配信に成功したG4Fax#2へは図6に示す電文配信コントロー

```

+ 3.4: DELIVERY STATUS NOTICE:
+ 1: CORRELATION INFORMATION:
4407-[REDACTED]=GMHS /4408-[REDACTED]=ttx /88-11-04-22:02/005/
+ 1016: OUTPUT TIME: 88-12-15-14:53
+ 1017: OUTPUT ID: 333333/001
+ 65: SUBMISSION ID: 333333/001
+ 33: SUBMISSION TIME: 88-12-15-14:52

+ 43: NOTIFICATION TYPE: DELIVERY
+ 3: REPORTED RECIPIENT:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=111111>
+ 4: TIME OF DELIVERY: 88-12-15-14:52

+ 43: NOTIFICATION TYPE: NON-DELIVERY
+ 3: REPORTED RECIPIENT:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=222222>
+ 46: NON DELIVERED INFO:
MAILBOX-OVERFLOW

```

図 5. 配信状況通知コントロール ドキュメント

```

+ 3.3: DELIVER:
+ 1016: OUTPUT TIME: 88-12-15-14:53
+ 1017: OUTPUT ID: 111111/004
+ 13: PRIORITY: URGENT
+ 14: ORIGINATOR:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=333333>
+ 39: THIS RECIPIENT:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=111111>
+ 33: SUBMISSION TIME: 88-12-15-14:52
+ 4: TIME OF DELIVERY: 88-12-15-14:52
+ 35: DELIVERY ID: 333333/001
+ 42: CONVERSION INDICATION: TTX
+ 44: CONVERTED INFORMATION TYPE: G4FAX
+ 1020: OUTPUT PAGES: 02
+ 18: CONTENT INDICATORS: PERSONAL
+ 20: FROM:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=333333><
FREE FORM NAME=TESTA3>
+ 22: TO:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=111111><
FREE FORM NAME=TESTA1>
+ 23: CC:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=222222><
FREE FORM NAME=TESTA2>
+ 26: SUBJECT: TEST MESSAGE FROM TTX TO G4FAX
+ 27: THIS IPM: 333333/001/88-12-15-05:52

```

図 6. 電文配信コントロール ドキュメント

```

+ 3.5: RECEIPT STATUS NOTICE:
+ 1016: OUTPUT TIME: 88-12-15-14:54
+ 1017: OUTPUT ID: 333333/002
+ 43: NOTIFICATION TYPE: RECEIPT
+ 71: SUBJECT IPM: 333333/001/88-12-15-05:52
+ 69: IPN ORIGINATOR:
<COUNTRY NAME=JP;ADMD=TEST;UAID=111111><
FREE FORM NAME=TESTA1>
+ 1011: RECEIPT ID: 111111/004
+ 47: TIME OF RECEIPT: 88-12-15-14:53
+ 44: CONVERTED INFORMATION TYPE: G4FAX
+ 1020: OUTPUT PAGES: 02
+ 1021: OUTPUT MESSAGE ATTRIBUTE: G4/A4.FF/MMR/400

```

図 7. 受信通知コントロール ドキュメント

ドキュメントとG 4 Fax電文（ノーマルドキュメント）が連続して出力される。電文送信時に指定した宛先などの情報が表示されているほか、G 4 FaxMHS装置が付与した管理用の情報や発信、配信、端末出力の各時刻などが表示される。また、TTXからG 4 Faxへの変換が行われたことが示される（42, 44）。

G 4 Fax#2は、文字コードのコントロール ドキュメントを受信し、また印字することが可能な端末である。G 4 FaxMHS装置は、この機能がない端末に対しての電文出力も可能なように、電文配信

表 1. 主なユーザーサービス コマンド

分 類	コマンド	機 能
電文照会	入力電文レポート	システムに入力された電文の処理状況を調べる。
	出力電文レポート	システムから出力された電文の処理状況を調べる。
メールボックス	走 査	メールボックスに配信された電文の発信者、主題などを調べる。
	読出し	メールボックスに配信された電文を読み出す。
	消 去	メールボックス内の電文を消去する。
	登録／登録読出し	メールボックスに配信させるか、直接端末に出力させるかを切り替える／現在設定を読み出す。
掲示板	格 納	掲示板に電文を格納する。
	読出し	掲示板から電文を読み出す。
	消 去	掲示板から電文を消去する。
出力制御	出力停止／停止解除	自端末への電文出力を一時停止する／再開する。

コントロール ドキュメントをプリンタで印字する如く画像（ノーマルドキュメント）に変換した後で端末に出力する機能を備えている。これにより、G 4 FaxMHS装置の加入者でない一般のG 4 Fax端末に対しても電文の送信が可能である。

電文の出力が成功したことにより、図 7に示す受信通知が書かれたコントロール ドキュメントが作られ送信者（TTX）に出力される。電文が出力された時刻(47)と、A4 サイズ、400 ドット／インチの解像度(1021)で2ページ(1020)のG 4 Fax電文(44)に変換されて出力されたことが示される。

4. サービス機能

ユーザーがメッセージ交換機能を利用するため必要な機能をサービスコマンドとして提供する。表 1 に主なサービスコマンドの種類と機能を示す。いずれのコマンドもユーザーの端末から投入する。

(1) 電文照会

電文が配信され、更に宛先の端末に出力されたことを配信状況通知処理、受信通知処理とは別個に記録する機能を持ち、コマンドにより電文の処理状況を確認できる。

(2) メールボックス

走査コマンドにより、メールボックスに配信された電文の送信者

表2. メディア変換 レパートリー

	テレタイプ電文	テレテックス電文	G3Fax電文	G4Fax電文
テレタイプ電文	—	○	×	○
テレテックス電文	○	—	○	○
G3Fax画像	×	×	×	○
G4Fax画像	×	×	○	○

注 ○: 変換する, ×: 変換しない

や主題を確認し、読み出しコマンドにより電文を読み出す。読み出し後、電文を保存するか消去するかの指定ができる。保存されていた電文は消去コマンドにより消去する。

登録コマンドにより、自分宛の電文をメールボックスに格納せず直接端末に出力するよう切替えができる。また、現在メールボックスが使用されているか否かは登録読出しこマンドで確認する。

(3) 揭示板

G 4 FaxMHS装置は、すべてのユーザーが読み出せる掲示板を備えている。不特定多数のユーザーに知らせたい内容は掲示板に登録する。特定の端末のみ電文を掲示板に格納でき、また消去できる。

(4) 出力制御

端末に電文の出力をしないように指示することができる。端末への出力を停止しておけば、定期保守などで端末が使用不能となってしまっても電文は装置内に保存され、停止が解除されたときまとめて出力される。

5. メディア変換機能

扱うメディアの異なる端末が混在するMHS蓄積交換では、相互のメディアを変換することによりメッセージ交換を可能とする。G4 Fax MHS装置が取り扱うメディアは、G4 Fax画像、G3 Fax画像、TTX文字列、TTY文字列である。これらのメディアは、使用コード／符号と表示形式／属性という二つの要素が異なっており、共に変換する必要がある。

G 4 FaxMHS装置は、表2に示す変換レパートリーを備えている。他のMHS蓄積交換装置との間でのみ交換するG 3 Fax画像、TTY文字列については変換のレパートリーを一部制限している。なお、画像と文字の混在するミクストモードの電文は変換を行わない。これらの変換は、ファクシミリ画像変換処理装置を利用して効率良く実施している。

各変換の内容は以下のとおりである。

(1) キャラクターファクシミリ変換

TTXで使用する欧文タイプライタと同じ文字パターンを持ち、図8に示すように画像を生成する。なお、図8は図3の例において、TTXが発信しG4Faxが受信した電文の1ページ目である。

(2) ファクシミリーファクシミリ変換

G4 Fax端末、G3 Fax端末は、機種により取り扱える画像の大きさ

図8. キャラクターファクシミリ変換の例

き、解像度、符号化方式が異なる。このため、G4 Fax間の電文であっても変換が必要な場合がある。

次の3種の処理を組み合わせて変換を行う。

- (a) 画像の大きさをB4 サイズからA4 サイズに変換する。
 - (b) 画像の解像度を低下させる。
 - (c) 符号化方式を変換する

(3) 吉山彌久名一吉山彌久名变换

TTXの文字レパートリーは、TTYの文字レパートリーをほとんど包含しているが、文字種が多いことと一部のコードの表記パターンが異なることから、適当な文字の置き換えを施す変換を行う。

6 す す び

G 4 FaxMHS装置の開発により、勧告T.330によるテレマティック端末のMHS蓄積交換システムへの接続が実現できた。G 4 Faxによる美しい画像とMHS勧告に準拠する豊富なパラメータの伝達能力、既設のG 3 Faxとのメッセージ交換を可能にするメディア変換機能により、今後のビジネス文書通信に大きく貢献するであろう。今回使用したG 4 Fax、TTXは、T.330プロトコルを備えた特製の端末であったが、今後このようなCCITT勧告準拠のMHS接続端末が普及していくよう期待する。

G 4 FaxMHS装置は開発完了後、KDDが商用サービスを行っているFポート (G 3 Fax収容) 及びMESSAVIA (TTY等収容) とMHS間通信の接続試験を行い、メディア変換を含めて相方の収容端末間でメッセージ交換に成功していることを付記しておく。

最後に、この装置構築に当たり多大な御指導をいただいた国際電信電話㈱の関係者各位に深く感謝の意を表する。

高速・高機能化 1Mビット ダイナミックRAM

尾崎英之* 平山和俊** 大林由和** 塚本和宏** 赤坂寿三穂**

1. まえがき

MOSダイナミックRAM(以下、DRAMと記す。)は、任意のビットを同時に読み書きできるランダムアクセスメモリであり、構成上の基本単位となるメモリセルは、1個のMOSトランジスタと1個のキャパシタから成っている。そのDRAMの歴史は、1970年に1Kビットのものが発表されて以来、微細化をベースに、ほぼ3年に4倍のペースで大容量化がなされている。当社においても現在1MビットDRAMを量産中で、既に4Mビットが発表されるに至っている⁽¹⁾。しかしながら、一方、同一集積度を持つDRAMも1種類のみが開発され、それがそのまま製造し続けられることはまれであり、世代交替を繰り返すのが一般的である。当社の1MビットDRAMにおいても最初のものとして1985年にNMOS型のものが発表され⁽²⁾、次いで1986年にCMOS型第1世代が⁽³⁾、1988年にはCMOS型第2世代が開発され⁽⁴⁾、現在はこの第2世代が量産されている。このような世代交替が行われる理由として、

- (1) 半導体技術の進展によりDRAM以外の製品(例えばマイクロプロセッサ)も、その動作速度などのパフォーマンスが日進月歩で進歩しており、DRAMのパフォーマンスもそれに対して向上させる必要がある。
- (2) DRAMの応用分野が広がり、今まで必要なかった新しい機能が要求され、それにこたえる必要がある。
- (3) DRAMの宿命である大量生産による低価格化に対応するため、その生産性向上が必要であり、プロセス技術の日々の進展と相まってチップサイズの縮小が必要不可欠である。

などがあげられる。

以上のような要求にこたえるべく、次の世代の1M DRAMとして第3世代品を開発したので、以下にその概要を述べる。

2. 第3世代1M DRAMの概要

2.1 設計のねらい

第3世代1M DRAMの主な設計のねらいを表1に示す。第1の高速化として近年、マイクロプロセッサが10MHzから20MHzへと高速化され、そのためDRAMのアクセス時間も高速化が要求されてきている。また、ビデオ、ワークステーションなどの画像分野への応用が拡大され、このためにも高速化が要求される。これらの要求にこたえるには、第2世代の80nsでは不十分であるので、RASアクセス時間70nsをターゲットとした。第2の低消費電力化については、最近のラップトップ型パソコンのようにバッテリバックアップが必要な機器の普及が著しく、このためにも更に低消費電力化が必要であり、サイクル時間160nsで約40mAの消費電流に抑えることを目標とした。第3の多機能化として、パリティビットを持つメモリシステムや画像メモリへの応用分野に有効な機能として、今までの汎用DRAMにはなかったライトパービット機能を持つものを、第3世代1M DRAMの製品系列に加えることをねらいとした。

2.2 チップ構成

第3世代1M DRAMのチップ写真を図1に示す。また、そのブロック図を図2に示す。メモリセルサイズは、 $2.89\mu\text{m} \times 7.48\mu\text{m}$ ($21.6\mu\text{m}^2$)であり、チップサイズは $3.88\text{mm} \times 11.39\text{mm}$ (44.2mm^2)である。セル面積は、第2世代の約80%，チップ面積は約85%に縮小されている。チップ構成は、基本的には第2世代とほぼ同一である。すなわち、メモリセルアレーは128Kビットの8個のブロックに分割されている。行デコーダはチップの長辺端に配列され、ワード線はチップ上辺から下辺の方向に配線されている。

ワード線は図3のメモリセル断面図に示すように、A₀と第2層ポリシリコンによって形成され、ワード線の立ち上がり時間を短縮するために、ポリシリコンはA₀配線と9箇所で接続されている。列デコーダは4組配置されている。センスアンプは、Pチャネル及びNチャネル共にメモリセルアレーの各ブロックの列デコーダ側に配置されている。また、 $\times 1$ と $\times 4$ 構成品が同一チップ化されているため、ボンディングパッドはそれぞれ共通に使えるような配置となっている。また、SOJ(Small Outline J-lead Package), DIP(Dual In-line Package)とZIP(Zig-Zag In-line Package)ではフレーム形状が大きく異なるため、同一チップですべてのパッケージへのアセンブリを容易にするため、一部の信号入力パッドは2箇所に設けられている。この2個のパッドを持つ入力端子は、そのままでは入力容量が大きくなってしまうために、未使用の方のパッドを電気的に切り離すことを行っている。2個のうちのどちらのパッドを切り離すかは、図2に示すPCパッドにV_{cc}電圧をボンディングにより印加するか、しないかで行っている。

また、大容量メモリにおいて冗長回路構成は、生産性向上のために必要不可欠であるが第3世代1M DRAMでは256Kビットごとに行側に1本、列側に1本配置され、それぞれのブロック内の任意の箇所に使用できる構成になっている。したがって、チップ全体では

表1. 設計のねらい

項目	ねらい
高速化	RASアクセス時間<70ns
低消費電力化	動作時電流<40mA($t_c=160\text{ns}$)
多機能化	ライトパービット機能の導入
生産性向上	ワイヤボンディングオプションの有効利用

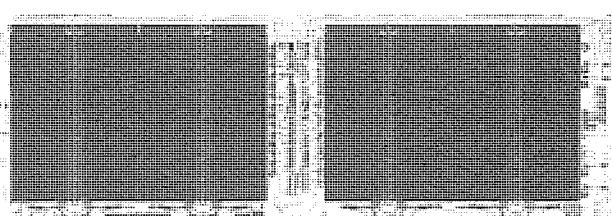


図1. チップ写真

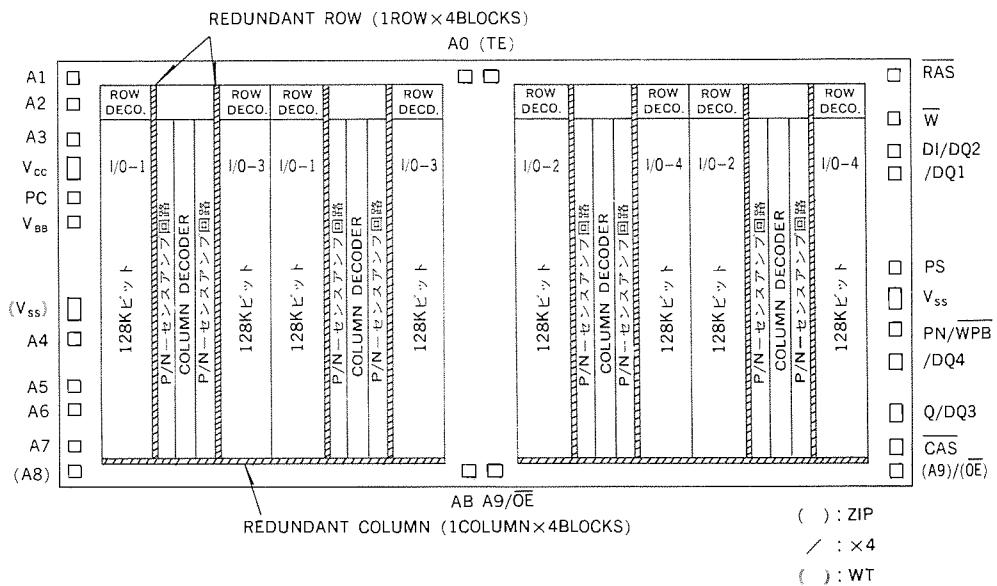


図2. 第3世代1M DRAMのブロック図

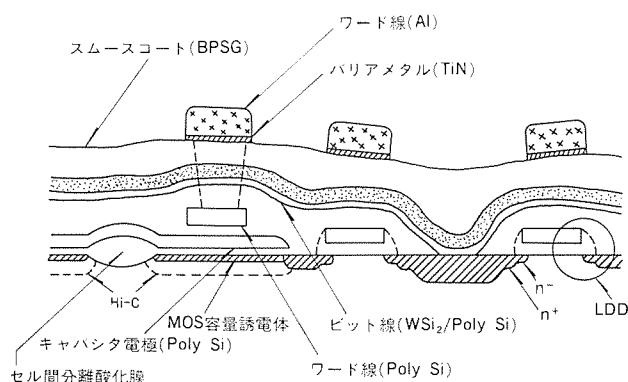


図3. メモリセルの断面図

4行4列の冗長回路を備えていることになる。冗長回路は、レーザによるヒューズ切断方式によっている。

2.3 メモリセル

メモリセルは図3に示すように、第2世代と同じくプレーナ型を用いている。しかしながら、セル面積が第2世代の約80%となっているので、ソフトエラー耐性及び動作安定性確保のため、その蓄積容量(C_s)値を第2世代並にする工夫が必要となる。そのため、第2世代より更にバーズピークを小さくする改良LOCOS分離法を用いている。また、セル間の分離幅は第2世代より更に0.1μm短くし、LOCOS膜厚も約500Å薄膜化した。更に、MOS容量部の誘電体膜厚も75Åに薄膜化している。これらの効果により、第2世代とほぼ同一の C_s 値を得ることができた。

2.4 高速／低消費電力化

第3世代品の高速化は、主にチップシーリングによる効果が大きい。チップシーリングによる高速化の要因として、

- (1) チップサイズ縮小による浮遊容量の低減
 - (2) MOSトランジスタのゲート長の縮小によるトランジスタの高性能化
- が挙げられる。上記(1)として、第3世代品の浮遊容量は第2世代品に比べ約80%に低減されている。また、(2)として第3世代品は第2世代品に比べ、NチャネルMOSトランジスタのゲート長は0.15μm、PチャネルMOSトランジスタのゲート長は0.25μm短チャネル化され

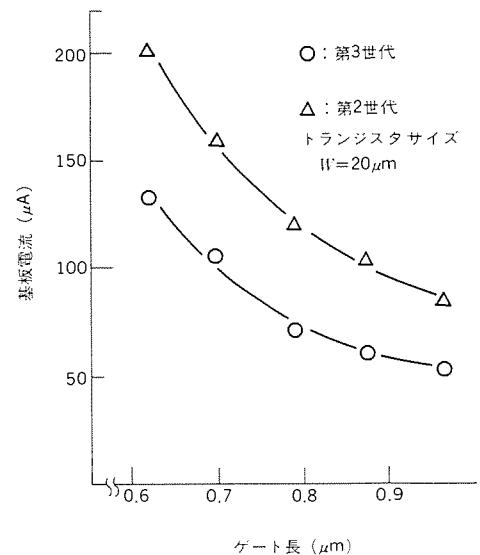


図4. 基板電流の比較

ている。しかしながら、トランジスタの構造を第2世代と全く同一のまま短チャネル化した場合、ショートチャネル効果が顕著となり、ソース／ドレイン間耐圧の劣化が生じる。また、ホットエレクトロンによるトランジスタのしきい値電圧の変動などの問題が生じてくる。そこで、第3世代では、これらの問題に対処するためソース／ドレイン形成熱処理の低温化を行った。また、ウェル及びチャネル領域の不純物濃度プロファイルの最適化を行った。さらに、トランジスタの電流駆動能力向上とも併せて、トランジスタのゲート酸化膜厚を200Åに薄膜化した。

図4に第2世代品の構造によるNチャネルMOSトランジスタと、第3世代品で開発した構造での基板電流を比較した図を示す。図のように、同一チャネル長のトランジスタに対して第3世代品のトランジスタの基板電流は、第2世代品に比べ2/3程度に減少しており、短チャネル化を行っても基板電流を増加させないことが可能になった。

また、回路ロジックは、量産実績のある第2世代品と基本的には同じであるが、再度、新しいトランジスタパラメータを用いた回路

シミュレーションを行い回路定数の最適化をし、高速化を図っている。

一方、低消費電力化についてもチップ縮小による効果が大きい。特に動作時電流はゲート容量及び浮遊容量の充・放電電流による割合が大きく、チップ縮小によりこれらの容量の低減が可能になり、第3世代品の低消費電力化に寄与している。

なお、表2に第3世代及び第2世代の主要プロセスパラメータの比較をまとめた。

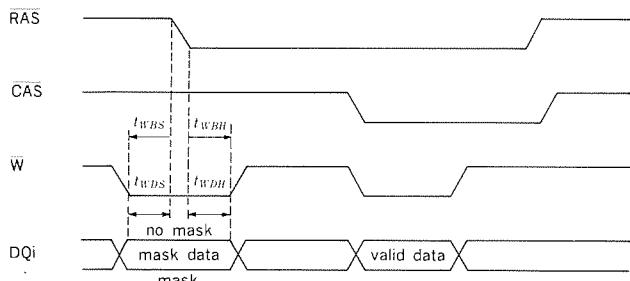
2.5 多機能化（ライトパービット モード）

第3世代の×4構成品に、今までの汎用DRAMにはなかった新しい機能として、ライトパービット機能を採り入れた。この機能は、パリティビットを備えたメモリシステムや、高速データ書換えが要求されるビデオプロセッサなどの応用分野でこの機能の効果が發揮され、DRAMの応用製品の広がりに対応するための新機能である。ライトパービット機能とは、×4構成品の四つの入出力（DQ）端子のうちの任意のDQにのみ書き込みを可能にし、他のDQ端子には書き込みを禁止（マスク）する機能である。

図5にアーリーライトモードでのライトパービットモードのタイミング図を示す。どのDQ端子を書き込みに対してマスクするかは、RAS信号の立ち下がり時にセットされる。すなわち、このときW信号を“L”レベルにし、かつ、あるDQ端子の入力信号レベルを“H”

表2. 主要プロセスパラメータの比較

		第2世代	第3世代
設計基準		1.0μm	0.9μm
トランジスタ	ゲート長	Nチャネル 1.1μm Pチャネル 1.4μm	Nチャネル 0.95μm Pチャネル 1.15μm
	ゲート酸化膜	250Å	200Å
メモリセル	ワード線	ポリシリコン+Al	ポリシリコン+Al
	ビット線	WSi ₂ /Poly Si	WSi ₂ /Poly Si
	ゲート誘電体膜厚	80Å	75Å
	セルサイズ	27.0μm ²	21.6μm ²
チップサイズ		51.8mm ²	44.2mm ²



項目	アクセス	-7	-8	-10
<i>t_{WRS}</i>	0	0	0	
<i>t_{WBH}</i>	10	15	15	
<i>t_{WDS}</i>	0	0	0	
<i>t_{WDH}</i>	10	15	15	

図5. ライトパービット モードのタイミング図

レベルにしたときは、このDQ端子は書き込みが可能になり、“L”レベルにしたときは書き込みが禁止される。このようにして、四つのDQ端子をそれぞれ独立に自由に書き込み可能、又は禁止に設定することができる。また、実際のDRAMへの書き込みは、続くCAS信号の立ち下がり時に行われるので、このときに書き込みデータを、書き込み可能に設定されたDQ端子に与えればよい。また、この設定のリセットは、RAS信号の立ち上がり時になされる。

一方、RAS信号の立ち下がり時にW端子を“H”レベルにしたときは、通常の書き込みモードとなり、四つのDQ端子すべてに書き込みがなされる。

ライトパービット機能はアーリーライト時のほか、ディレイドライト、リードモディファイライト及び高速アクセスモードでの書き込みなど、すべてのライトモードで可能である。

なお、ライトパービット機能を持った×4構成品は、従来からの×4構成品と機能的に完全互換性がないため、従来からの×4構成品と互換性を持ったライトパービット機能を持たない×4構成品も、第3世代の製品系列に備えている。

2.6 生産性向上

第3世代は第2世代に比べ、そのチップ面積が縮小されているので1枚のウェーハ上に形成されるDRAMの個数は約15%増加し、生産性の向上に寄与している。

また、第3世代は第2世代でのワード構成、高速アクセスモード、パッケージバリエーションに加え、2.5節で述べたライトパービット機能も加わったために更に品種数が増え、その数はアクセスアイテムも考慮すると実に63品種に達する。これらの多岐にわたる1M DRAMをいかに効率良く生産できるようにするかが、生産性向上設計のキーポイントである。図6は第3世代1MDRAMの製造フローを示した図である。まず、×1/×4構成はAℓマスクのみによって造り分けられ、他のウェーハプロセスのマスクは兼用できる。また、それぞれ高速アクセスモード（高速ページ、ニブル、スタティックコラム）の造り分けと、2.2節で述べたパッケージ別によるボンディングパッドの選択は、アセンブリプロセス中のワイヤボンディング工程(I)でなされる。さらに、×4構成品のライトパービット機能の有／無の造り分けもワイヤボンディング工程(II)によりなされる。このように、多品種の製品シリーズの造り分けは、Aℓマスクとボンディング工程のみで可能なように設計されており、生産性向上に寄与している。

さらに、×1構成品のテスト工程での生産性向上のため、1M×1ビット品をあたかも256K×4ビット構成品としてテストできるテストモード機能が付加されている。テストモードは、TEピン(DIP, SOJは4ピン、ZIPは8ピン)にV_{cc}+3.5V以上の電圧を印加することにより可能になる。

3. 第3世代1M DRAMの電気特性及び信頼性

3.1 電気特性評価

図7に第3世代1M DRAMのRASアクセス時間のV_{cc}依存性を示す。周囲温度80°C、V_{cc}=4.5Vで58nsのアクセス時間が得られ、70ns品として十分のマージンを持っていることが分かる。図8に周囲温度25°C、V_{cc}=5.5Vでの電源電流波形を、図9に第2世代と第3世代の動作時電流の比較を示す。ピーク電流は約100mAである。また、第3世代は第2世代に比べ、約10%の低消費電力化がなされていることが分かる。

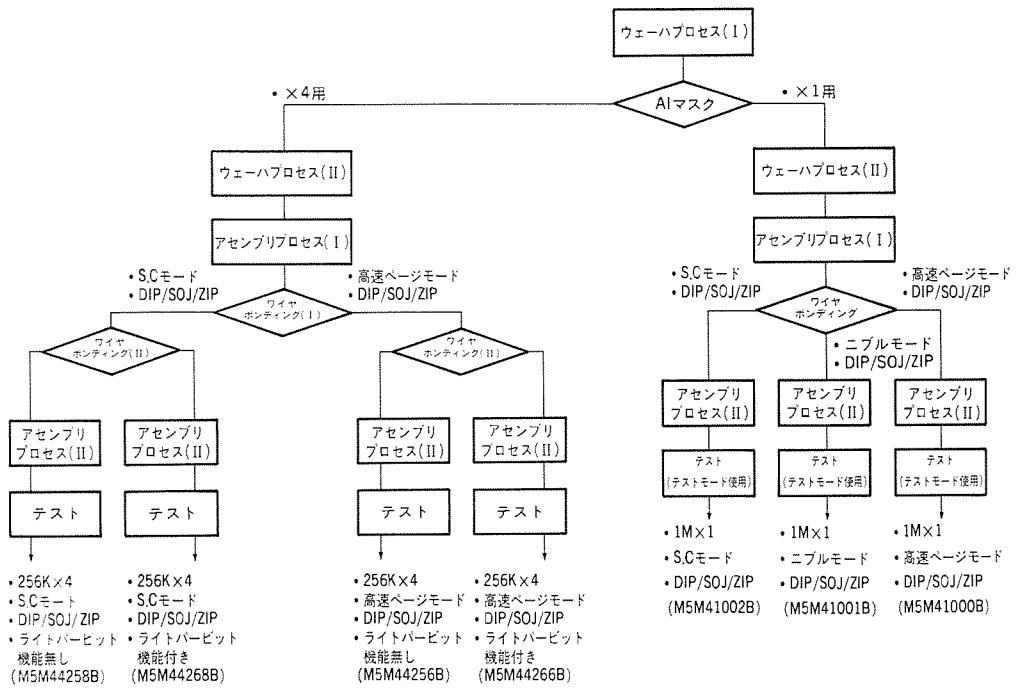


図6. 第3世代1M DRAMの製造フロー

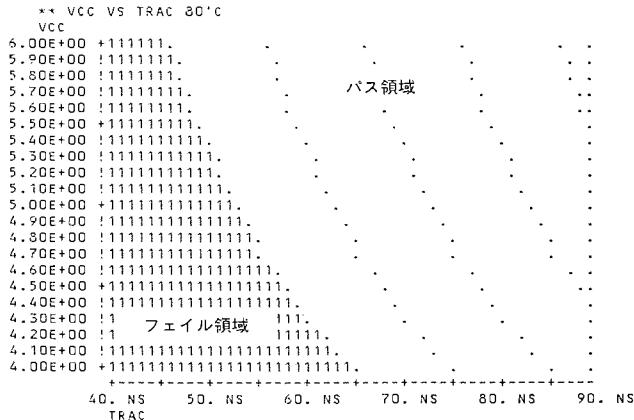


図7. RASアクセス時間の V_{cc} 依存性

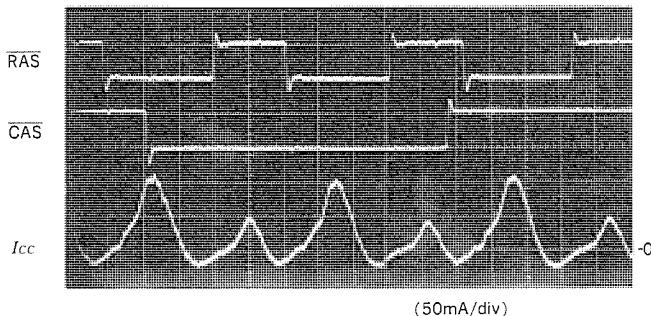


図8. 電源電流波形

図10にライトパービットでの書き込み及び読み出しの入力／出力信号の波形写真を示す。評価では、まずあるアドレス番地に“L”的データをノーマルモードで書き込み、次いで同図(a)に示すように同一番地にDQ₁とDQ₃端子を書き込み禁止、DQ₂とDQ₄端子を書き込み可能になるようにライトパービットモードでセットし、DQ₂とDQ₄に“H”的データを書き込んでいる。次に、同図(b)に示すように同一番地のデータを読み出している。このときのDQ₂とDQ₄端子の出力は、“H”に変化しているのに対し、DQ₁とDQ₃の端子の出力は“L”的ままで

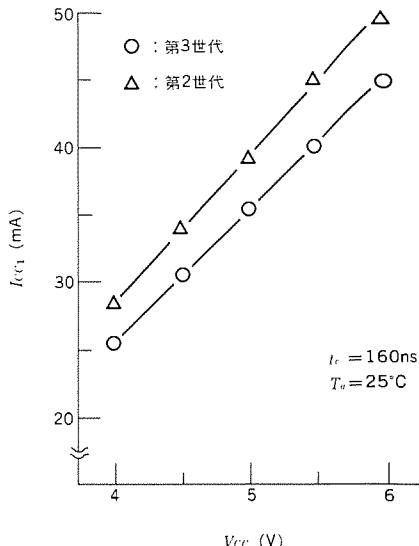


図9. 動作時電流の V_{cc} 依存性

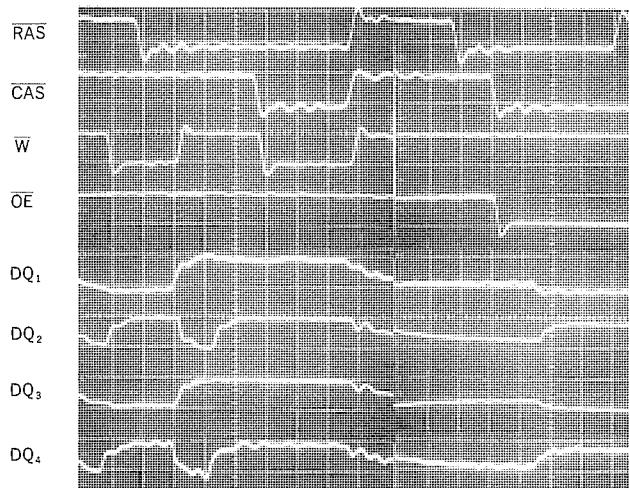
あり、ライトパービット機能が正常に動作していることが確認できる。

3.2 信頼性評価

図11に第3世代及び第2世代1M DRAMのソフトエラー加速試験の結果を示す。アルファ線源として $11\mu\text{Ci}$ の強度の ^{241}Am を用いてソフトエラー率の V_{cc} 依存性を評価した。図のように、第3世代と第2世代とでは、ほぼ同等のソフトエラー率が得られていることが分かる。

図12に、低温・高バイアス下でのMOSトランジスタのしきい値変化によるDRAMのアクセス時間シフトを評価した結果を示す。加速条件は、周囲温度 -20°C 、 $V_{cc} = 8\text{ V}$ である。図のように、測定ポイントでのアクセス時間は測定の誤差の範囲内で一定であり、評価時間の最大値256時間までシフトは見られないことが分かる。

表3に第3世代1M DRAMの主要性能をまとめた。



(a) ライトペーピット モード
での書き込み
（DQ₁, DQ₃…書き込み禁止）
（DQ₂, DQ₄…書き込み可能）

(b) ライトペーピット
モードで書き込み後の同一
アドレス番地の読み出し
（DQ₁, DQ₃…“L” リード）
（DQ₂, DQ₄…“H” リード）

図10. ライトペーピット モード時の入／出力信号波形

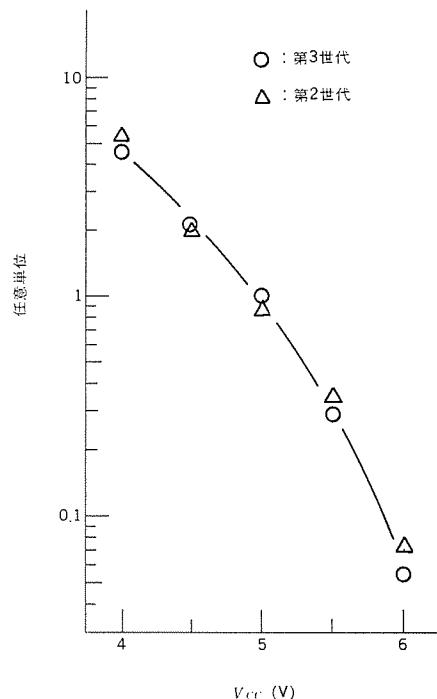


図11. 加速ソフトエラー率の V_{cc} 依存性

4. むすび

DRAMに課せられた市場の期待にこたえるべく、より高性能及び多機能化を実現した第3世代1M DRAMを開発した。

基本的には、現在量産中で実績のある第2世代1M DRAMをベースに、その約85%のチップ縮小率により高性能化を図った。一方、縮小により生じる信頼性上の問題に対処するため、熱処理温度の低温化、ウェル／チャネル領域の不純物濃度プロファイルの最適化、トランジスタのゲート酸化膜の薄膜化によりMOSトランジスタの高信頼性化を行った。また、セル容量の確保のためMOS容量のゲート薄膜化、LOCOS分離形状の改善を行った。これらの対策により、

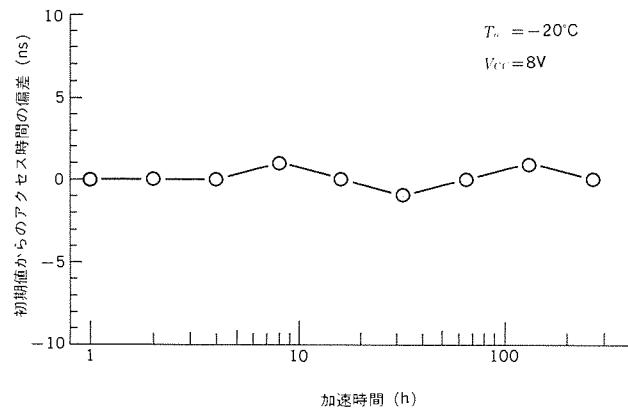


図12. 低温動作によるアクセス時間シフト

表3. 第3世代1M DRAMの性能一覧

ワード構成	1Mワード×1ビット、256Kワード×4ビット (A) マスクオプション)
RASアクセス時間	60ns ($T_a=80^\circ\text{C}$, $V_{cc}=4.5\text{V}$)
動作時電流	40mA ($t_c=160\text{ns}$, $V_{cc}=5.5\text{V}$)
待機時電流 (MOS入力レベル)	50 μA ($T_a=25^\circ\text{C}$, $V_{cc}=5.5\text{V}$)
リフレッシュ方式	512サイクル/8ms
冗長回路	4Row 4Column (レーザプロウ方式)
テストモード	オーバー V_{cc} 方式 (TEピン, ×1構成のみ)
高速アクセスモード	高速ページモード ニブルモード(×1構成のみ) スタティックコラム モード
新機能	ライトペーピット機能 (×4構成のみ、ワイヤボンディング) オプション
パッケージ	18pin DIP(×1構成) /20pin DIP(×4構成) 26pin SOJ 20pin ZIP

RASアクセス時間60ns ($V_{cc}=4.5\text{V}$, 80°C), 動作時消費電流40mA ($V_{cc}=5.5\text{V}$, 25°C , $t_c=160\text{ns}$) という高速・低消費電力化が実現でき、また、低温動作時のアクセス時間シフト、ソフトエラー率などの信頼性上の問題もないことが確認できた。

次に、多機能化に対してライトペーピット機能を実現するロジックを導入し、新しいDRAMの応用分野への対応を図った。

さらに、生産性向上に対して×1/×4構成の造り分けはAℓマスクオプション方式を採用し、高速アクセスモードとパッケージタイプの選択、及びライトペーピット機能の有／無の選択はワイヤボンディング オプションとすることにより、多品種にわたる製品系列を持つ第3世代1M DRAMの生産性向上を実現した。

以上のように、高性能・多機能・高品質の第3世代1M DRAMが、より一層のDRAM応用製品分野の拡大に寄与するものと確信している。

参考文献

- 1) 山田ほか：三菱電機技報, 62, No.8, p.653 (昭63)
- 2) 熊野谷ほか：三菱電機技報, 59, No.9, p.676 (昭60)
- 3) 山田ほか：三菱電機技報, 61, No.7, p.581 (昭62)
- 4) 長山ほか：三菱電機技報, 62, No.7, p.628 (昭63)

16MビットダイナミックRAM

松田吉雄* 若宮 亘** 有本和民** 藤島一康* 佐藤真一*

1. まえがき

高度情報化社会のキーデバイスであるダイナミックRAM (DRAM)は、1970年の1Kの登場以来、実に20年近くにわたり3年で4倍というスピードで大容量化が達成されてきた。現在1Mの量産が本格化する中、4Mのサンプル配布がスタートしており、16M DRAMの市場への登場は1991年ごろと予想されている。当社では、信頼性と生産性の確保を最重点課題とした16M DRAMの開発を進めているが、本稿では、今回試作した3.3V単一電源で動作する16M DRAM⁽¹⁾の特徴を述べるとともに、その電気的性能の紹介を行う。

2. 16M DRAMの開発指針

16M DRAMでは、三次元化されたメモリセルの微細加工のレベルやトランジスタのゲート長がハーフミクロンの領域に達し、5V動作が信頼性上不可能になる。したがって、従来のプロセス技術、設計技術の延長ではもはや安定動作を確保し、高歩留りを維持するのが困難になってきている。

そこで、信頼性と生産性の高い16M DRAMを製造するうえでの問題点を明らかにすることを主な目的に、次のような開発指針をたてて設計を行った。

- (1) メモリセルにスタックト キャパシタセルを採用し、活性領域の分離には新たにフィールドシールド分離を導入するとともに、セルファブライン技術を駆使してメモリキャパシタ容量を確保する。
- (2) アレー構成として、ノイズ除去に優れたツイステッドピット線構造を採用するとともに、ピット線の多分割を行い、読み出し信号を確保する。
- (3) 3.3V動作を前提に周辺回路のトランジスタを微細、高性能化し、さらにデータ入出力線を階層構成化するなど、高速動作に適した設計を行う。
- (4) テストビットの並列度を飛躍的に向上させ、テスト時間の大大幅な短縮を可能にするラインモードテストを開発、搭載する。
- (5) 自由度の大きい冗長回路の採用により、高歩留りを達成する。

3. プロセス・デバイス技術

3.1 メモリセル

メモリセル面積の縮小化に対してメモリ容量を確保するために、当社では4Mから三次元のメモリセル構造を採用しており、16M DRAMにおいても三次元セルの一種であるスタックト キャパシタセル構造を採用した⁽²⁾。図1にメモリセルの断面図を示す。4.8μm² (1.5μm×3.2μm) という微小なセル領域 (4Mの約40%) の中に三次元セルを実現するために、更に次のような新しい技術を導入した。

- (1) キャパシタ部分を当社独自のT字型構造とし、上記のセルサイズでも十分なメモリ容量を確保するとともに、キャパシタの電極パターン (ストレージノード) の加工性を容易にした。
- (2) 素子分離として、従来のLOCOS法にかわってフィールドシールド分離法を採用し、素子分離領域の面積を縮小した。

(3) 高アスペクト比のコンタクトホールに対応するために、選択CVDによるタンゲスティン(W)膜の埋め込み技術を導入した。

スタックト キャパシタセルは、ポリシリコン/誘電膜/ポリシリコン構造のキャパシタをアクセストランジスタ又は素子分離領域上に延在させて形成し、段差を利用してメモリ容量を確保しようとするものであるが、その分段差上部のパターン形成に負担がかかる。特にストレージノードは、その側面部がキャパシタとして使用できるため膜厚を厚くする傾向にあり、加工上最大の難関である。16M DRAMでは、図1に示すようにストレージノードの下に比較的厚い層間絶縁膜を(堆)積して更にその表面を平たん化し、開口部を形成してトレーニング状のストレージノードとした。この構造をとることによって、ストレージノード以降のバーニングが容易となり、また層間絶縁膜の膜厚を変えることにより容易にメモリ容量の拡大が可能となった。例えば、誘電膜として酸化膜換算で6nmの酸化膜/窒化膜の複合膜を用いると、35fFのメモリ容量を確保することができる。

3.2 素子分離

従来のLOCOS分離では、トランジスタのチャネル幅が1μm以下

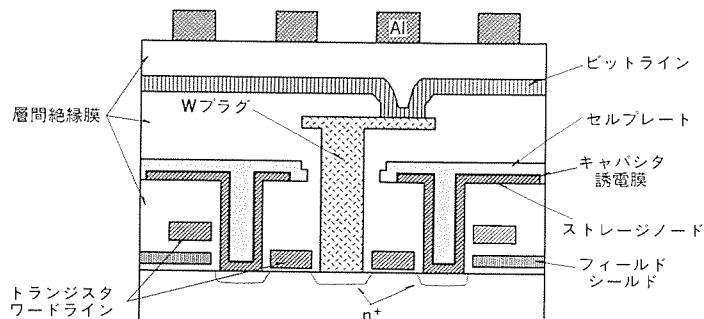


図1. T字型スタックト キャパシタセルの断面図

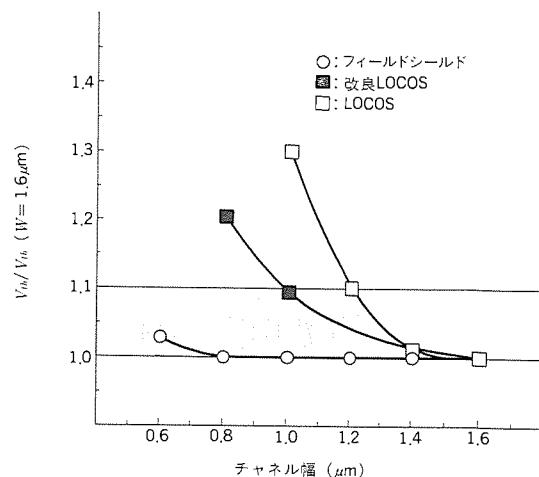


図2. 狹チャネル効果

になるとチャネルカットのボロンのしみだしにより、トランジスタのしきい値電圧 (V_{th}) が上昇する、いわゆる狭チャネル効果が顕著になり実用に耐えられなくなる。それに対し、トランジスタ分離の一種であるフィールドシールド分離では、図2に示すようにチャネル幅が0.6μmでもしきい値電圧の上昇は5%以内に抑えられており、ハーフミクロン デバイスの分離方法として有効である。また、フィールドシールドを、トランジスタとしてみた場合、図3に示す

ようにゲート長に相当するポリシリコン幅が0.6μm、サイドウォール幅が0.15μmの場合でも、フィールドシールドのオフセットゲート構造のため約4Vのしきい値電圧と140mV/けたのサブスレショルド特性をもっており、フィールドシールド プレートを0Vにバイアスすることにより良好な分離特性が得られている。

3.3 Wの埋め込み

高段差を持つスタックト キャパシタセルでは、ビット線コンタク

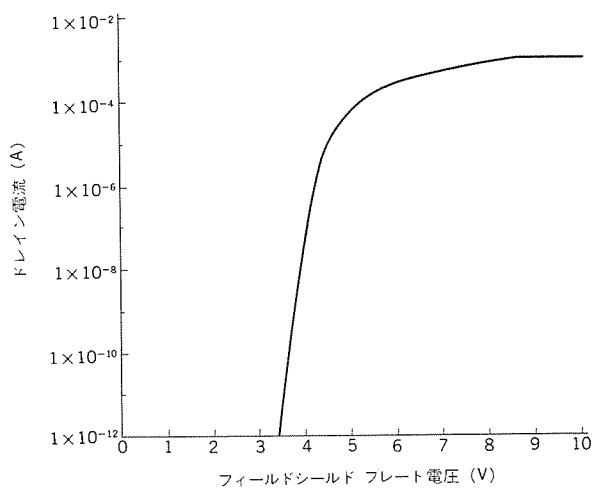


図3. フィールドシールドトランジスタのサブスレショルド特性

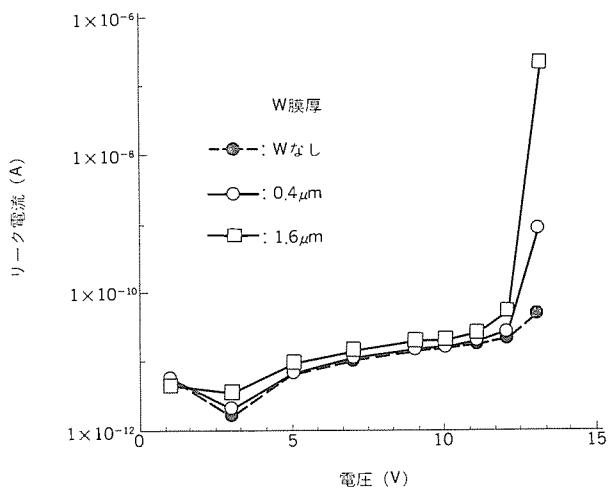


図4. $n^+ - p$ 接合のリーク電流

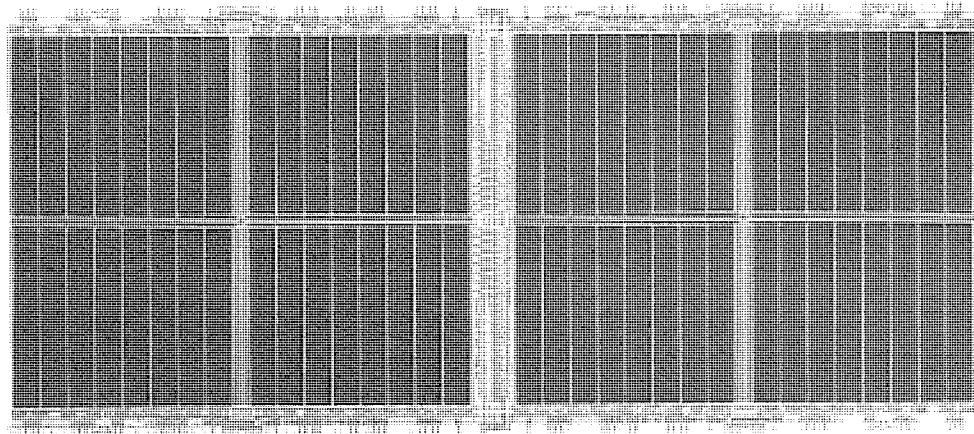


図5. 16M DRAMの顕微鏡写真

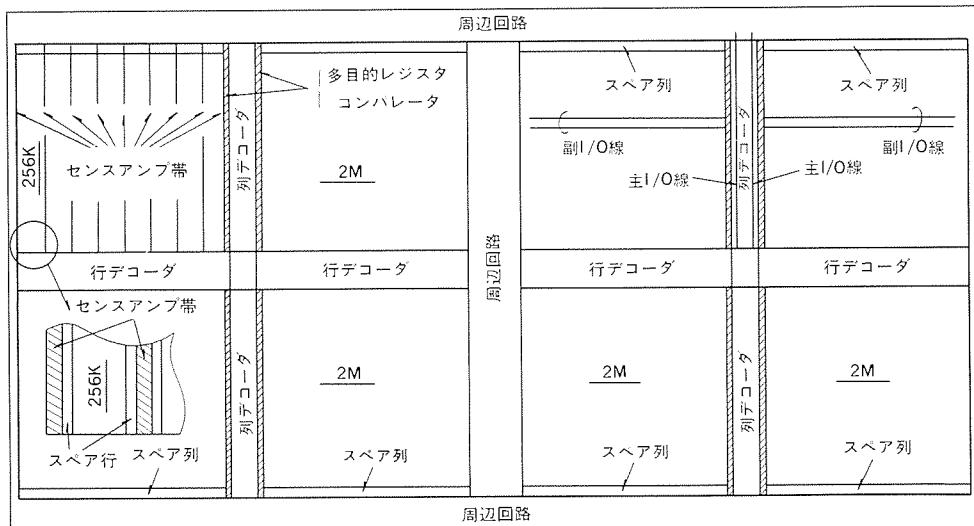


図6. 16M DRAMのチップ構成

トをはじめ各コンタクトホールのアスペクト比が大きく、またデータ化のための面積的な余裕がないため、従来のように上層配線を直接下層の、例えば拡散層に接続することは困難となる。そのため、16M DRAMでは、選択CVD-W膜によるコンタクト埋め込み技術を導入した。W膜の形成方法として、当社独自のWF₆のSiH₄による還元法を用い、W膜下の接合リード電流を低減させた。図4は、n⁺－p接合上に0.4μmと1.6μmのWを成長させたときの接合リード電流を示したもので、いずれの膜厚においてもリファレンスとして示した従来のアルミによるコンタクトと同程度の低い値を示している。

4. 設計技術

4.1 チップ構成

試作した16M DRAMの顕微鏡写真を図5に、その構成図を図6に示す。チップサイズは7.7mm×17.5mmである。メモリアレーは8個の2Mビットのブロックに分割されており、チップの長辺に平行に行きデコーダ、短辺に平行に2組の列デコーダが配置されている。多目的レジスタ(Multi-Purpose-Register: MPR)とコンパレータが列デコーダの両サイドにレイアウトされている。2Mビットのブロックは更に9個の交互配置型シェアドセンスアンプ帶で8個の256Kビットサブアレーに分割されている。階層構成をとるデータ出入力線のうち、副I/O線はメモリアレー上をセンスアンプ帶に直角に第2層目のアルミ配線で走り、主I/O線は列デコーダに沿って走り両サイドの周辺回路領域に至っている。

冗長構成としては、ワード線2本を単位として置換することができるスペア行を256Kビットのサブアレーに2組、副I/O線単位で置換することができるスペア列を2Mビットブロックに2組備え、16M DRAM全体では128行16列の冗長回路を搭載し、高歩留りの実

現を目指している。

4.2 メモリアレー構成

DRAMの読み出し動作は、メモリ容量C_sに蓄えられた信号電荷Q_sを、C_bの容量を持つビット線に転送し、そのときに生じるQ_s/C_bの微小電圧変化をセンスアンプで検知增幅するもので、メモリセルからの読み出し電圧はC_b/C_sの比で決定される。微細化されたメモリセルを3.3Vで動作させ、センスアンプに十分大きい信号電圧を入力するためには、レイアウト的に許されるかぎりビット線を多分割してビット線の浮遊容量を低減することや、メモリ動作に伴って発生するアーノイズを除去することがきわめて重要となる。

図7に2Mビットブロックの模式図を示す。4Mまで標準的に使われてきた折り返しビット線は、アーノイズの除去に有効ではあるが、隣接ビット線間の干渉によるノイズを除去することができず、読み出し信号を損失していた。今回、ビット線対を複数箇所でねじった、当社独自のツイステッドビット線構造の採用により、この隣接ビット線間の干渉ノイズを除去することに成功し、ノイズ耐性に優れた高性能のメモリアレーを実現している。

ビット線は、交互配置型シェアドセンスアンプで8個に分割され、ビット線の浮遊容量を低減している。この交互配置型シェアドセンスアンプの採用は、センスアンプの共通ソース線が充放電すべき負荷容量を半減させ、高速動作に寄与するとともにセンスアンプのレイアウトを容易にしている。

データの入出力線は、主I/O線と副I/O線に分ける階層構成とし、4組のビット線対に1組の副I/O線対を設けた。階層構成による負荷容量の低減、分散の効果に加えて、副I/O線と主I/O線の中間にバッファとしての多目的レジスタを配置することで高速動作に適したアレー構成となっている。

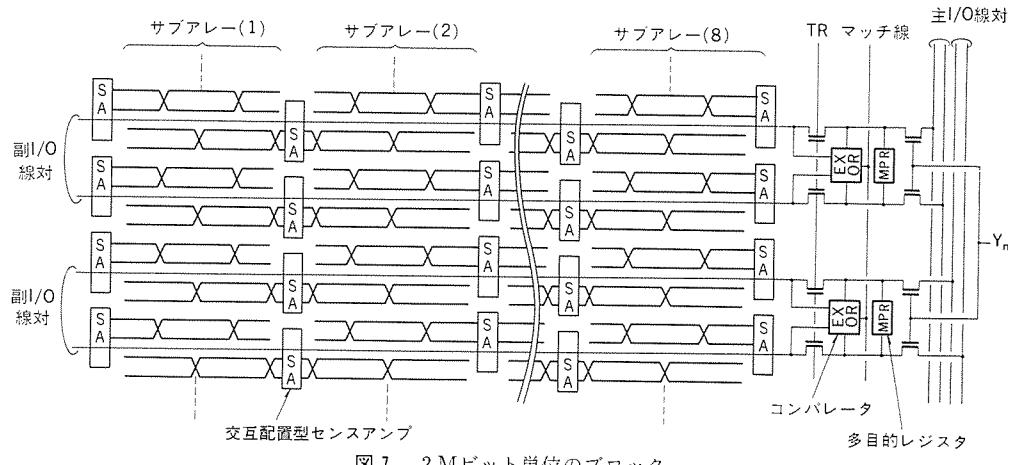


図7. 2Mビット単位のブロック

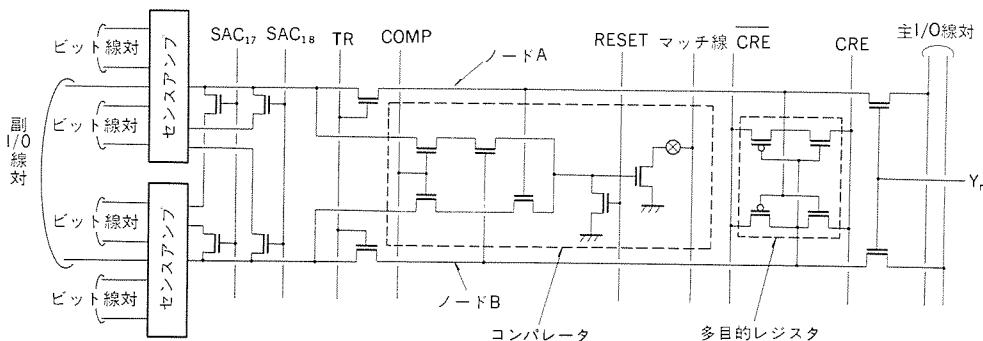


図8. 多目的レジスタとコンパレータ部分の回路図

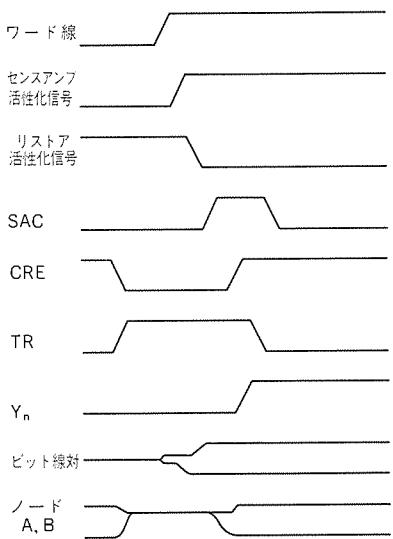
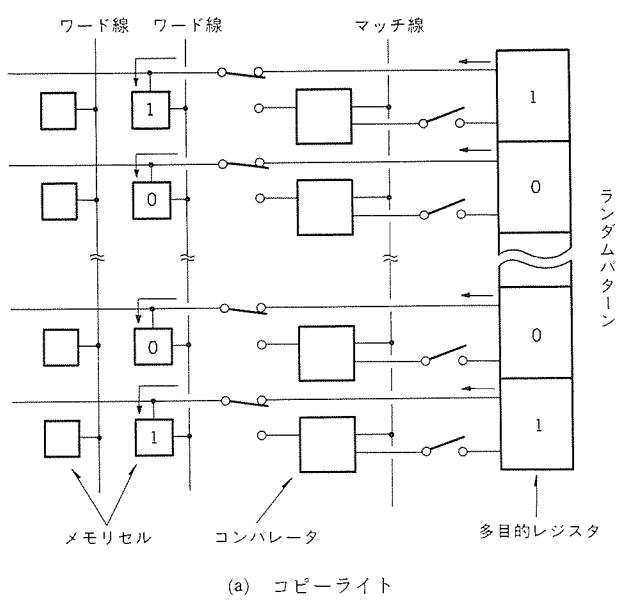
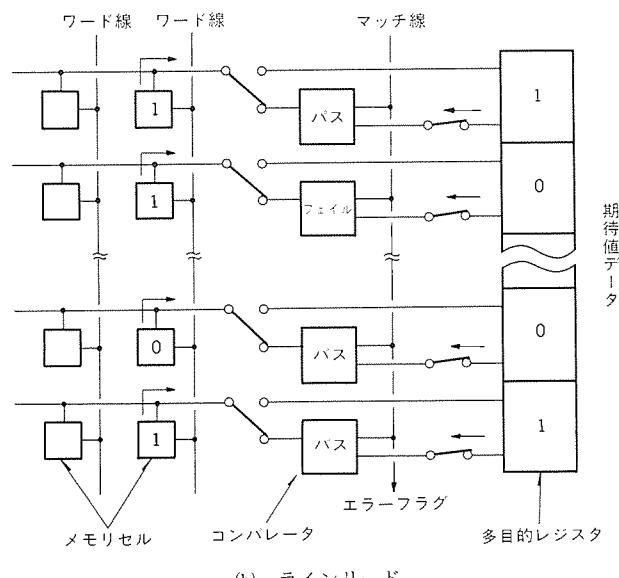


図9. 読出し動作の波形図



(a) コピーライト



(b) ラインリード

図10. ラインモードテストの概念図

図8にMPRとコンパレータ部分の回路を示す。コンパレータ回路は、後で述べるラインモードテストで使用する一致検出回路である。MPRは、副I/O線と主I/O線の中間に配置されている。メモリセル情報の読み出し動作を説明する波形図を図9に示す。ワード線が選択駆動される前にシェアドセンサアンプの非選択側のビット線対が電気的に切り離される。続いてワード線が駆動されるとメモリセルの情報がビット線に伝達され、選択されたサブアレーの両端に位置する交互配置型シェアドセンサアンプが活性化されビット線対のレベル差を検知増幅する。

次に、センサアンプと副I/O線を接続するSAC信号(図8には8番目のサブアレーに対応してSAC₁₇とSAC₁₈が示してある。)と列選択信号Y_nが順次選択駆動され、読み出し情報が副I/O線を通して主I/O線に伝達される。このとき、センサアンプから格段に駆動能力の大きいMPRが、負荷容量の重い主I/O線を駆動するために読み出し速度が加速される。また、MPRの駆動は、並列接続されたセンサアンプを介して自動的にスタートするため、駆動信号CREの微妙なコントロールは特に必要としない。MPRの駆動とほぼ同時にトランジスタゲートが信号TRを低レベルにすることで閉じられ、副I/O線は主I/O線から切り離される。この負荷の切り離しも高速化に寄与している。

4.3 ラインモードテスト

メモリの大容量化はテスト時間の増大をもたらし、コストアップにつながる。テスト時間を短縮する技術に、当社の1M DRAMでまず提案され、4Mで標準化されたマルチビットテスト⁽³⁾⁽⁴⁾がある。これは、4~16ビットのメモリセルに同一データを同時に書き込み、読み出しデータがすべて等しければパスと判定するもので、その並列テストビット数に応じてテスト時間が1/4~1/16に低減できる。

当社の16M DRAMはマルチビットテスト機能に加え、今回新たに開発したラインモードテスト機能を搭載している。ラインモードテストは、1本のワード線につながる全メモリセルを一括してテストする手法で、並列度を画期的に向上することができる。今回の16M DRAMで採用したラインモードテストは、MPRを書き込みデータレジスタと期待値データレジスタとして用い、ランダムパターンがテストできるように構成されており、高い不良検出能力をもつている。

図10(a)は、ラインモードテストにおけるコピーライトの概念を説明する図である。コピーライトに先立ってMPRには通常の列選択による書き込みサイクルで任意のテストパターンをセットしておく。その後、ワード線を逐次選択することでテストデータをMPRからメモリセルに一齊に転送する。図8の回路ではこの動作は、ワード線とともにTR、SACを選択駆動することで実行される。図10(b)はラインリードの概念を示す図で、メモリセルから読み出された1行分のデータがコンパレータに転送されると同時に、MPRからは期待値データがコンパレータに伝達され1行一齊に一致検出を行う。そして、比較結果がマッチ線に現われ、1ビットでも不一致があればフェイブルと判定され、エラーフラグが立つ。

このラインリードは、図8においてはTRを閉じた状態で行われ、センサアンプの状態が確定してから一致検出開始信号のCOMPが立ち上がり、排他的OR回路とワイアドOR結合したマッチラインからなるコンパレータが読み出しデータと期待値データとの比較を行う。このMPRを利用したラインモードテストでは、オール0、1パターンはもちろん、行ストライプ、列ストライプやチェックバードパターン

表1. 16M DRAMの特徴と特性

構成	16M語×1ビット／4M語×4ビット (メタルマスク切替え)
プロセス	0.5μm ツインウェルCMOS
チップサイズ	2層アルミ配線, フィールドシールド分離 7.7mm×17.5mm
セルサイズ	1.5μm×3.2μm
動作モード	ファーストページ, スタティックコラム ニブル, シリアル (ボンディング切替え)
アクセスタイム	T_{RAC} 60ns (3.3V) T_{CAA} 20ns (3.3V, センスアンプから) 15ns (3.3V, MPRから)
消費電流	動作時 90mA (3.3V, 120ns) スタンバイ時 0.2mA (3.3V, CMOSレベル)
リフレッシュ	2,048サイクル／32ms
冗長回路	128行, 16列 (レザプログラム)
テストモード	ラインモードテスト (1,024ビット並列) マルチビットテスト (16ビット並列)
パッケージ	400ミル幅SOJ

ーンなどがアドレスの進め方を工夫するだけで極めて容易に実現でき、いずれの場合もテスト時間はほぼ1/1,000に短縮される。ラインモードテストの開始は、WCBR (Write & CAS-Before-RAS)タイミングとテストイネーブル信号の組合せで制御する方式とし、16ビットのマルチビットテストと区別できるようにしている。

5. 16M DRAMの特性

表1に、試作した16M DRAMの特徴と性能一覧を示す。3.3VでのRASアクセス時間は60nsである。列アドレスアクセス時間 T_{CAA} のうち、センスアンプからあるのは、センスアンプと副I/O線とを接続するSAC信号が変化するアドレス入力の場合であり、MPRからあるのは、レジスタに転送されたデータを直接アクセスする列アドレスが入力された場合である。3.3V動作により、サイクルタイムが120nsにおいて、動作電流90mAで消費電力300mWと高速、低電力化が達成されている。図11に $V_{cc}=3.3V$ 、周囲温度25°Cにおける出力波形を示す。

6. むすび

以上、3.3V単一電源で動作する高速、低消費電力の16M DRAMの紹介を行った。今後はこの試作をふまえて、電源電圧、パッケージサイズなどの標準化動向をにらみつつ、現在サンプル配布がスタートした4Mの次世代汎用メモリとして、信頼性と生産性の高い16M DRAMの完成を目指す。

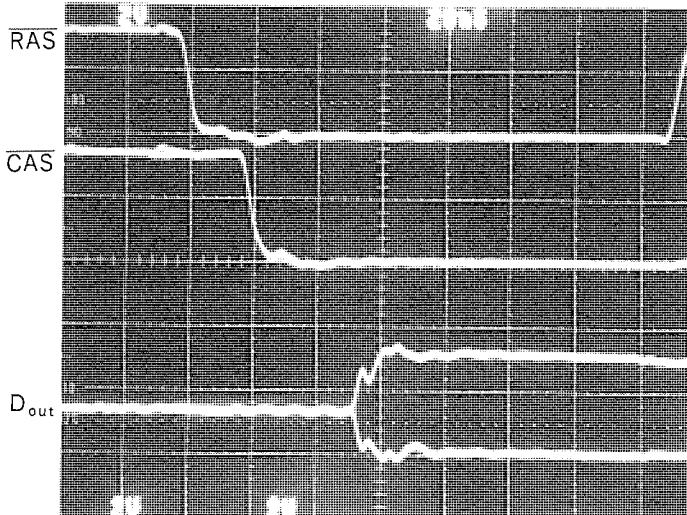


図11. 出力波形写真

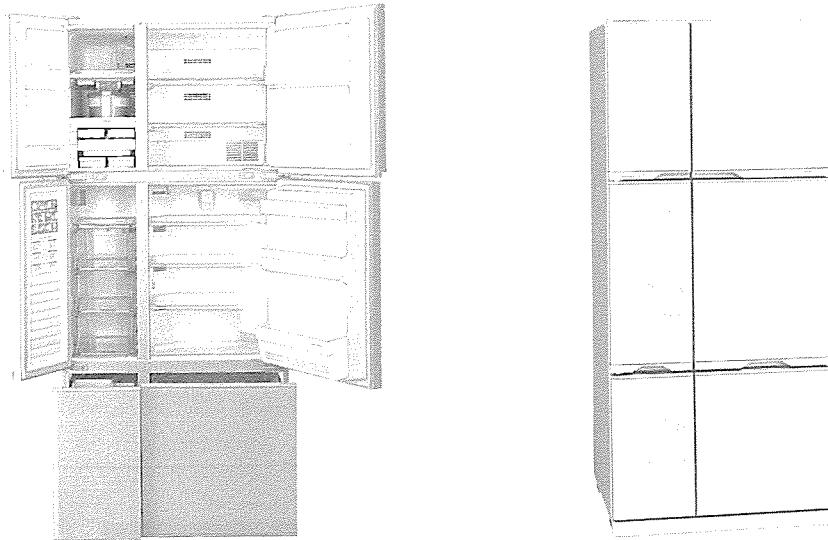
参考文献

- (1) K.Arimoto,et al.: ISSCC Dig.Tech.Papers, p.244 (1989)
- (2) W.Wakamiya,et al.: International Electron Device Meeting Tech.Dig., p.246 (1988)
- (3) 熊野谷ほか: 三菱電機技報, 59, No.9, p.676 (昭60)
- (4) 長山ほか: 三菱電機技報, 62, No.7, p.628 (昭63)

業界最大クラス容量6ドア冷蔵庫

スポットライ

“スペシャリテ500”MR-B50F形



現在、家庭用冷蔵庫は350ℓ～400ℓが主力容量帯として発売されていますが、より大容量化ニーズに応えるべく、高度な食文化を目指した最高級冷蔵庫500ℓ6ドアの“スペシャリテ500”MR-B50F形を開発、このたび新発売しました。冷蔵庫の大容量化欲求の背景には――

①食生活、食品の変化に伴う食品の多品種化、喫食回数の増加

②グルメ・健康志向が強まる中で、チルドなど温度管理精度向上によるおいしさ保存への意識の向上

③クール宅急便など温度帯別輸送システムの発達、食品維持コールドチェーンの整備などから、家庭での冷却保存食品の増加

④食品の質への転化が進み、冷凍・チルド食品の急成長

――などがあり、今後ますます高まる大容量化時代における冷蔵庫のプレステージモデルとして、日本の高度な食文化を満足させるため、現在の冷蔵庫技術を駆使して開発したものです。

6ドアは各々、アイスクリームや透明度の高い氷をつくれるアイスルーム、冷凍食品を安心して保存できる冷凍ストッカー、3段のクリスタルケースのついたチルドルーム、各段ごとに冷気を吹きだすマルチフローの冷蔵室、1升ビンも収納できるボトルストッカー、真四角設計のいきいき野菜室の各部屋に対応し、多種類の食品を部屋別、温度帯別に収納できる整理性の良い使いやすい構成となっています。

特長

●3ドア以上では日本最高の大容量500ℓを実現。

●日本最高の容積効率58%を達成、500ℓの大容量ながら台所に収まりの良い省スペースです。

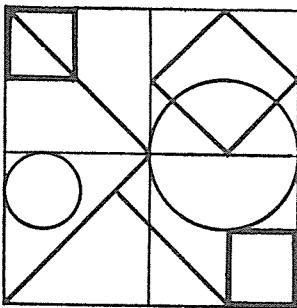
●大形大容量500ℓクラスで業界初の独立チルドルームを採用。

- グルメ・健康志向に応えた業界初の冷蔵庫内蔵オートアイスクリーマを採用、ソフトクリーム・シャーベットも簡単に作れます。
- 冷蔵室・チルドルームなどにマルチフローを採用、大容量でもムラなく冷却します。
- 各棚は透明でフラットなクリスタルシェルフ採用、不安定な食品や小物類も安心して収納でき、こぼれても掃除が簡単です。
- 多ドアで不足がちなボトル、小物類の収納に威力を発揮するボトルストッカー採用、大形の1升ビンなどの収納もできます。
- 透明度の高いおいしい氷ができるピュアアイスシステム、庫内のにおいを除去するマルチフロー電子脱臭を採用。
- 新フラットフェイスハンドルとパールトップ鋼板の採用など最高級冷蔵庫にふさわしい新感覚デザイン。

仕様

種	類	冷凍冷蔵庫
	全体	500ℓ
有効内容積	冷凍ストッカー	82ℓ
	アイスルーム	56ℓ
	冷蔵室	144ℓ
	チルドルーム	82ℓ
	野菜室	84ℓ
	ボトルストッカー	52ℓ
外形寸法	高さ	1789mm
	幅	807mm
	奥行	600mm
重	量(質量)	92kg
定格電圧・周波数		100V・50/60Hz
電動機定格消費電力		150/160W
電熱装置定格消費電力		150/150W(霜取り時)
消費電力量	量	62/62(kwh/月)
電源コード(有効長さ)		2.5m
冷凍室の記号		EXC-1 フォースター

消費電力量は日本工業規格(JISC9607)に定められた方法で測定した値で、年平均1ヵ月当たりの消費電力量を示します。



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 知的財産専門部 TEL (03) 218-2139

感熱ヘッドの熱制御装置 (実用新案 第1699723号)

考案者 畑部 悅生, 加藤 雅敏, 德川 文武, 野沢 俊治

この考案は、プリンタ、プロッタ、ファクシミリ等において高速記録を可能にするための感熱ヘッドの熱制御装置に関するものである。

すなわち、図1に示されたものにおいて、図2(イ)に示した画信号(401)が信号端子(129)から入力され微分器(313)で、図2(ロ)に示した波形(402)に整形された後、S-R.F.F. (セットリセットフリップフロップ)(309)へ送られる。その結果、図2(チ)に示した時刻 $0 \sim T_H$ の間、S-R.F.F.(309)の出力端子Q(314)は図2(ハ)に示したように、「L」→「H」へと変化するので、第1のトランジスタ(120)がON状態となって電源端子(128)から発熱抵抗体(101)へ記録電流が流れ、発熱抵抗体(101)の表面温度(405)は図2(ニ)に示した曲線を描いて上昇する。図2(ホ)は節点(302)の電圧変化を示した図で、(407)はコンデンサ(301)の充電電圧波形である。コンデンサ(301)の充電電圧値(407)は電圧比較器(307)によって端子(308)から入力される基準電圧値(408)と比較され、両者が一致すると図2(ヘ)に示す一致検出パルス(409)がS-R.F.F.(309)のリセット端子(310)へ出力されて発熱抵抗体(101)の通電が停止される。このようにして、発熱抵抗体(101)の最高温度は、温度(210)を越えないように制御される。一方、時刻 T_H 以後、S-R.F.F.(309)の反転出力端子 \bar{Q} (315)は図2(ト)に示したように「L」→「H」へと変化するので、今度は第2のトランジスタ(306)がON状態となる。このため、一たんコンデンサ(301)に充電された電荷が今度は抵抗(304)、コンデンサ(301)で決まる時定数に従って放電されるが、抵抗(304)の値を所定の値に選ぶことによって、コンデンサ(301)の放電電圧波形(411)を実用上十分な精度で発熱抵抗体(101)の温度下降波形(412)に近似させることができる。次に、時刻 $T_H + T_S$ ($T_S < T_c$) から第2ライン目の記録が行われるが、第1ライン目と同様の方法で発熱抵抗体(101)の温度が制御され、「にじみ」のない鮮明な画質が得られる。なお、N個の発熱抵抗体を駆動する場合は、図1に示した各要素をN組用意し、各コンデンサの充放電を対応する発熱抵抗体の通電動作に同期してそれぞれ独立に行う。そして、各コンデンサの電圧値を監視するようにすれば、N個の発熱抵抗体の発熱温度を一定値に制御することができる。

以上のように、この考案は、通電時間を制御して発熱抵抗体の最高温度が一定値となるようにしたので、高速記録時はもちろん、ファクシミリなど原稿の情報量によって記録速度が変化する場合にも、高品位の記録画が得られるという効果がある。更に、この考案によれば、前ライン記録時の余熱を有効に利用できるので、電源の負担を大幅に少なくできるという効果もある。

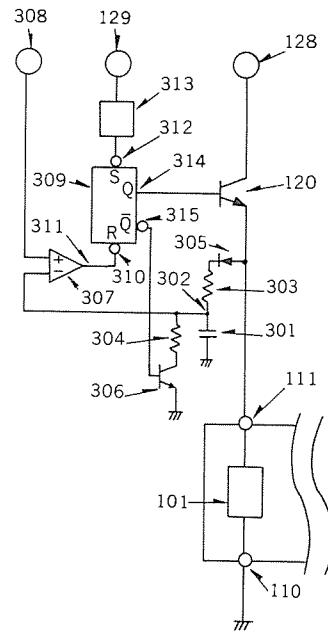


図1.

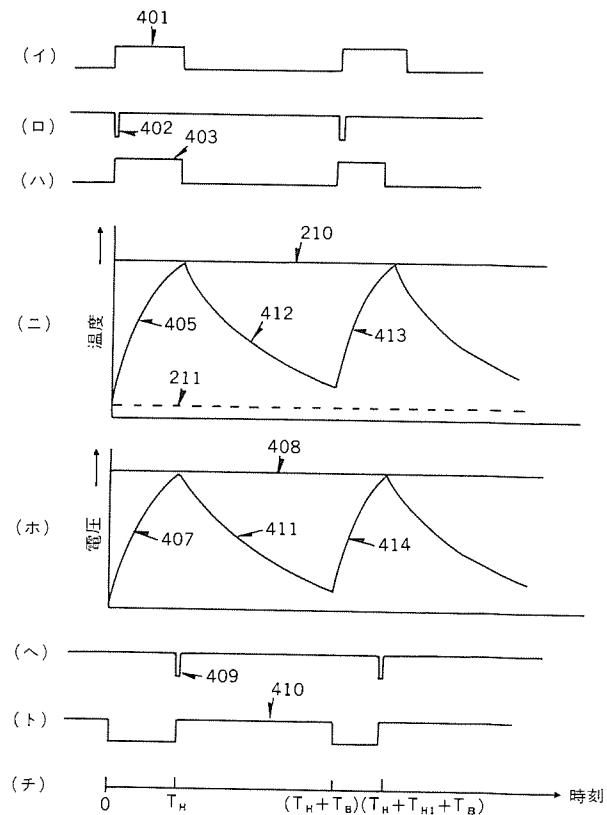


図2.

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 知的財産部 TEL (03) 218-2139

ユニーク・ワード検出器 (特許 第1386949号)

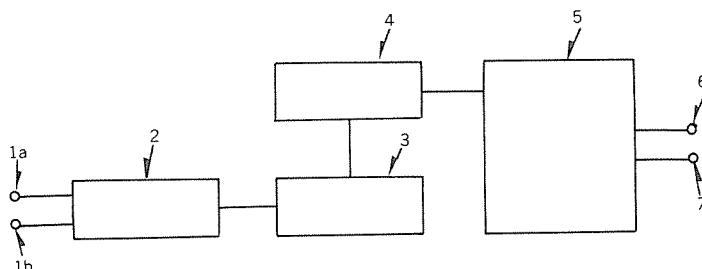
発明者 三宅 真

この発明は、例えば4種類の位相不確定性を伴う4相CPSK-TDMAシステムの受信器において、同期の確立と位相不確定性の解像を同時に行うユニーク・ワード検出器に関するものである。

すなわち、図に示す如く、ユニーク・ワードが2個のチャネルに同一の、あるいは互いに論理否定の関係にあるビット系列を用いているため、相関器(4)は1個だけである。ハードウェアの構成は従来品に比べて簡単になる。そして、一方の受信チャネルのビット系列が入力される入力端子(1a)と他方の受信チャネルのビット系列が入力される入力端子(1b)に入力された受信信号は、並列直列変換

器(2)によって直列信号に変換された後、相関器(4)によって相関検出され、この検出出力が複号マトリクス(5)に入力されて複号される。複号マトリクス(5)は、同期信号と位相不確定性を解像するための信号を二つの出力端子(6)(7)に出力する。

以上のように、この発明によれば、2個のチャネルに、同一の、あるいは互いに論理否定の関係にあるビット系列を有するユニーク・ワードを採用して相関器の個数を半減させることによって、ユニーク・ワード検出器のハードウェア構成を簡素化できる。



〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol.63 No.9 社会情報システム特集

特集論文

- 高度情報化社会システムの新しい都市施設
- 社会情報システムの展望
- 三菱住民情報システム
- 地理情報システム
- 設備情報管理システム
- 医療情報システム
- 三菱図書館システム
- 道路情報システム
- 三菱防災情報システム

●気象庁納め地震活動等総合監視システム

- 広域レーダ雨雪量計システム網
- 京王帝都電鉄向け無線方式バス運行管理システム
- 普通論文
- 東海道新幹線新列車無線システム
- インテルサット標準F型IBS地球局設備
- ISDN端末アダプタ“IOSIS”
- 工業用データウェイシステム《MDWS-70》
- クウェート向け三相250Mvar 275kV分路リアクトル
- 産業用高性能16ビットシングルチップマイクロコンピュータ

三菱電機技報編集委員

委員長 山田 郁夫
委員 峯松 雅登
リ 福岡 正安
リ 尾崎 博規
リ 風呂 功
リ 大原 啓治
リ 松村 恒男
リ 紅林 秀都司
リ 高橋 誠一
リ 鳥取 浩
リ 柳下 和夫
幹事 長崎 忠一
8月号特集担当 畑田 稔

三菱電機技報63巻8号

(無断転載を禁ず)

1989年8月22日 印刷

1989年8月25日 発行

編集兼発行人 長崎 忠一

印 刷 所 東京都新宿区榎町7

大日本印刷株式会社

発 行 所 東京都港区新橋六丁目4番地9号(〒105)

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) 437局2338

発 売 元 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地(〒101)

株式会社 オーム社

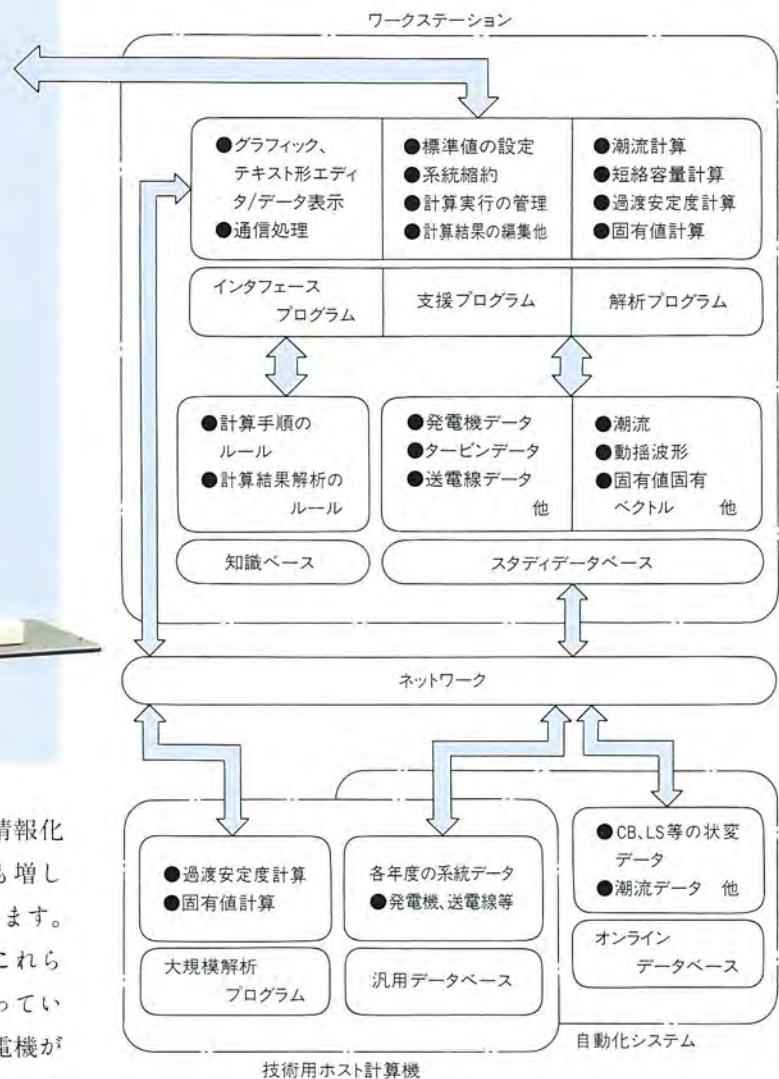
Tel.(03) 233局0641㈹, 振替口座東京6-20018

定 価 1部721円(本体700円) 送料別

年間予約は送料共9,373円(本体9,100円)

三菱電力系統解析支援システム

スポットライト 《ADAPOS》



社会経済を支えるエネルギー基盤として、また高度情報化社会のエネルギー源として、電力システムは以前にも増して経済的で、しかも信頼性の高い供給が期待されています。そのためには系統計画・運用の高度化が必須であり、これらの中核となる電力系統解析の重要度もますます高まっています。電力系統解析支援システム《ADAPOS》は、三菱電機が蓄積してきた系統解析技術、マン・マシン・インターフェース技術、エンジニアリング・ワークステーション技術を結集したもので、電力系統の計画および運用に必要な潮流計算、短絡容量計算、安定度計算を高度に支援する環境を提供します。加えて《ADAPOS》をベースに、各ユーザの要求に合わせた系統計画・運用支援システムを開発します。

特長

●統一データベースによるデータ変更の省力化

各種解析計算に必要なデータが一つのデータベース上で統一的に扱えます。

●系統図によるデータ入力・計算結果表示

系統図上からデータの入力が簡便に行え、各種計算データの系統図表示によって解析計算結果の把握が容易に行えます。

●容易な系統図作成・修正

マウスによるアイコン選択によって、系統図の作成・変更が容易に行えます。

●解析プログラムの操作の簡略化

メニュー選択によって簡単に各種計算を実行できます。

●系統解析の知識をルール化した知的支援機能を構築可能

計算結果の良否判定やレポート作成が容易に行えます。さらに特定業務を対象に、問題発見、対策立案、対策案評価・選択等の高度知的作業を支援する系統計画・運用システムが構築できます。

※ADAPOS : Advanced Analyzer of Power Systems

スポットライト 三菱新形カラープリンタ S340/G370

「プロフェッショナルに、鮮かさで応えます。」



S340形

「CAD/CAMからDTPまで、繊細で高品位プリントを実現します。」



G370形

このほど三菱電機では、本格化するカラープリンタ時代に対応し、高精細・高速タイプのカラープリンタ2機種を発表しました。S340形は熱昇華転写方式を採用した新機種で、1670万色のフルカラーを表現することにより写真同様の高画質プリントが得られ、しかも印刷スピードは約100秒(A4カット紙)と高速化が図られています。またG370形は熱溶

融転写方式を採用したカラープリンタで、300DPIの高解像度サーマルヘッドにより高画質のプリントを可能とした機種です。両機種とも省スペース化推進のためコンパクト性を実現しており、熱転写方式のため高い信頼性が得られ、メンテナンスフリーで使用できます。

S340形の特長

●写真同様の高画質プリント

256階調、1670万色のフルカラーを実現。

●A4昇華形として業界最高速のスピードプリント

サーマルヘッドの熱制御技術の開発により、一層の高速化に成功(約100秒/A4版)。

●忠実な色再現

昇華性インクの色特性を補正する階調補正機能および色補正機能の開発により忠実な色再現が可能。

●ワイドな印画エリア

200mm(横)×297mm(縦)のワイドな印画エリアを実現。

●コンパクト設計

●高信頼性

G370形の特長

●高品質のカラープリンタ

300DPI高密度サーマルヘッドを採用。

●インターフェースの充実

標準はパラレルインターフェース(セントロニクス準拠)、マルチブレクサポート(オプション)を追加することにより、4台の端末に接続可能。

●コンパクト設計

●高信頼性

S340形の仕様

項目	仕様
記録方式	熱昇華転写方式
ドット密度	150dots/inch(5.9dots/mm)
印画速度	約100秒/A4カット紙(データ転送時間を除く)
表現色	1670万色(各色256階調)
印画媒体	質 指定紙または指定OHPフィルム 形 状 カットシート サ イ ズ A4サイズ
給紙方式	カセットタイプ カットシートフィーダによる30枚自動給紙
インクシート	カセットタイプ 3色カラーインクシート100画面/巻
標準インターフェース	パラレルインターフェース(セントロニクス準拠)
外寸法	430(W)×435(D)×288(H)mm
重量	26kg

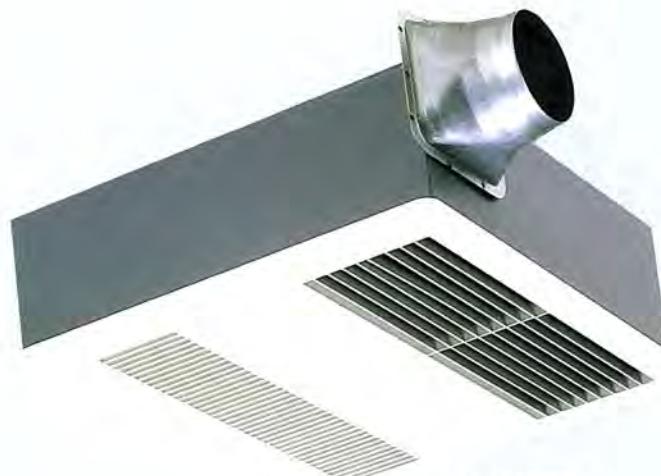
G370形の仕様

項目	仕様
記録方式	熱溶融転写方式
ドット密度	300dots/inch(11.8dots/mm)
印画速度	印画時間 3色カラー印画時 約60秒(当社標準印字パターン) /A4カット紙 モノクロ印画時 約30秒(当社標準印字パターン)
印画色	基本7色(イエロー、マゼンタ、シアン、赤、緑、青、黒)又はモノクロ(黒)
印画媒体	質 指定紙または指定OHPフィルム 形 状 カットシート サ イ ズ A4サイズ
給紙方式	カセットタイプ カットシートフィーダによる100枚自動給紙
インクシート	カセットタイプ 3色カラーインクシート 100画面/巻 モノクロインクシート 300画面/巻
標準インターフェース	パラレルインターフェース(セントロニクス準拠)
外寸法	430(W)×435(D)×288(H)mm
重量	26kg

浴室換気・暖房・乾燥システム

スポットライト

V-130BZD



V-130BZD

〈コントロールスイッチ〉

近年、浴室ゾーンの多用途化に伴ない、衣類乾燥を中心とした乾燥室としての浴室利用が注目され温水コイルタイプ、ヒーポンタイプ、電気ヒータータイプなどの各種機器が発売されています。また、浴室の高級化指向の中での快適性追求も高まっており、寒冷地やシルバー市場を中心とした、浴室の冬季の寒さ対策ニーズがクローズアップされてきています。また建物保全としての強制換気は、結露やカビの発生を防ぐのに有効です。それらの換気・暖房・乾燥の3つの機能を1台で行なえる、浴室換気・暖房・乾燥システム V-130BZD について特長を紹介します。

特長

●浴室を衣類乾燥室として利用

1000Wシーズヒーターを内蔵し、18cmシロッコファンの強循環流により温風乾燥をしますので衣類を傷めずに自然に乾燥します。

●冬季でも洗い場を暖かく保てる暖房機能

900W(450W×2)赤外線クオーツヒーター(耐湿仕様)を内蔵し、輻射暖房と18cmシロッコファンの微風流での温風暖房によりいつでも浴室を暖かく保ちます。

●浴室保全に欠かせない換気機能

9.5cmシロッコファンにより強制換気をしますので、カビや結露による傷みを防ぎます。

●換気、暖房、乾燥はそれぞれ独立して運転可能

同梱しているコントロールスイッチにより3機能の運転制御が独立して行えます。

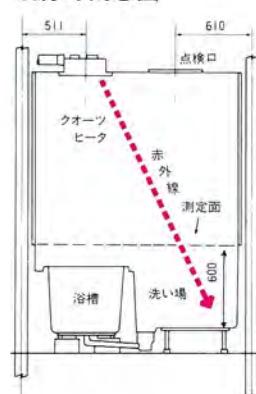
●コンパクト設計

天井内本体枠は42cm角・高さ19.6cm、浴室内グリル厚みは1.5cmと薄形コンパクトで施工性を向上し、浴室内もスッキリしています。

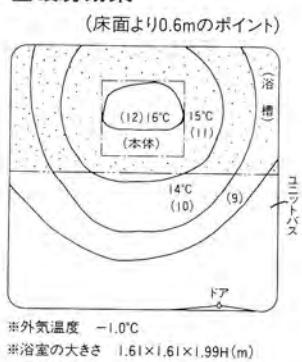
●安全設計

それぞれのヒータに対し温度過昇防止用オートカットと温度過昇防止用温度ヒューズを内蔵。また誤結線などによる過電流保護用として電流ヒューズを内蔵、二重の安全装置付としています。

暖房時概念図



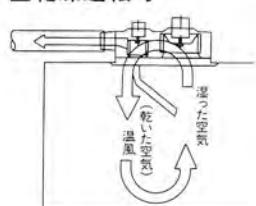
■暖房効果



乾燥時概念図

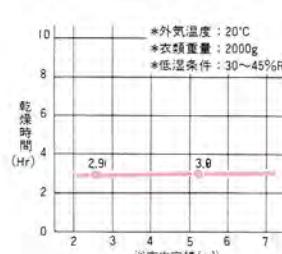


■乾燥運転時



■乾燥時間測定結果

〈バスユニットの大きさと乾燥時間〉



〈衣類重量と乾燥時間〉

