

大容量発電電動機及びサイリスタ始動装置 (パルミエット揚水発電所向け)

奥野 貴之(おくの たかゆき)

相場 茂(あいば しげる)

氏家 隆一(うじいえ りゅういち)

① まえがき

パルミエット (Palmiet) 揚水発電所は、203.5MW フランス形ポンプ水車・発電電動機2台の純揚水地下式発電所であり、火力発電所との合理的運用を図るため、系統のピーク負荷、周波数及び電圧の調整を目的とし1号機は1987年12月、2号機は1988年3月に運転を開始する。

富士電機は最近の例として、韓国電力(株)向け清平 (Chongpyong) (206MW フランス形ポンプ水車・発電電動機2台)、同じく三浪津 (Samrangjin) (376MW 発電電動機2台) など、それぞれ特長をもつ揚水発電機器の納入実績があるが、パルミエット揚水発電所用機器として250MVA 発電電動機2台のほか、サイリスタ始動装置及び主機制御装置 (プログラマブルコントローラ MICREX-PS) 一式を納入した。

パルミエット向け発電電動機は、上述した実績の成果と経験に新たな技術を結集したものであり、富士電機の最新技術を集大成したものと言っても過言ではない。

更に、最近注目されているサイリスタ始動方式を採用し、その制御装置として DDC (Direct Digital Control) システムを適用した点が大きな特徴である。

これらの機器は、十分な成果をもって工場試験を終え、無事納入を完了したので、ここに主要機器である発電電動機とサイリスタ始動装置の概要を紹介する。

② 定格と仕様

発電電動機の定格と仕様を表1に、サイリスタ始動装置の定格と仕様を表2に示す。

③ 発電電動機

3.1 主要部の構造

この発電電動機の体格決定に際しては、発電電動機に要求されるはずみ車効果を満足させ、かつポンプ水車上カバを一体で発電電動機の固定子内径から吊り出す構造とす

表1 発電電動機の定格と仕様

台数	2	
形式	立軸全閉内冷形三相交流同期発電電動機、空気冷却器付	
定格事項	(発電機)	(電動機)
容量	250,000kVA	200,000kV
電圧	16.5kV	16.5kV
周波数	50Hz	50Hz
回転速度	300rpm	300rpm
力率	0.8(遅れ)	0.8(進み)
はずみ車効果	9,700t-m ²	
軸受配置	準傘形、磁気軸受装置付	

表2 サイリスタ始動装置の定格と仕様

台数	1	
定格事項	(順変換装置)	(逆変換装置)
出力	21.8MW	21.8MW
直流電圧	15.7kV	15.7kV
直流電流	1,391A	1,391A
周波数	50Hz	50Hz
交流電圧	16.5kV	16.5kV
加速/減速時間	150(秒)/150(秒)	
時間定格	連続(始動・停止回数 37回/1日)	
冷却方式	純水水冷却	
素子構成	三相純ブリッジ、16S-1P-6A、4kV-1,000A、光間接点弧	
同期方式	低圧同期方式	

ることを前提として、回転子の強度、剛性を慎重に検討し、固定子鉄心内径及び鉄心長を決定した。

発電電動機の本体断面を図1に示す。軸受配置は準傘形構造とし、上部軸受部には防振ステーを放射状に配置した。通風方式としては、ロータリムに設けられた半径方向スリットの回転時におけるファン作用を利用したリム通風方式を採用し、電動ブローを省略した。

3.1.1 固定子



奥野 貴之

昭和53年入社。水力発電プラントの取りまとめ業務に従事。現在、川崎工場水力技術部。



相場 茂

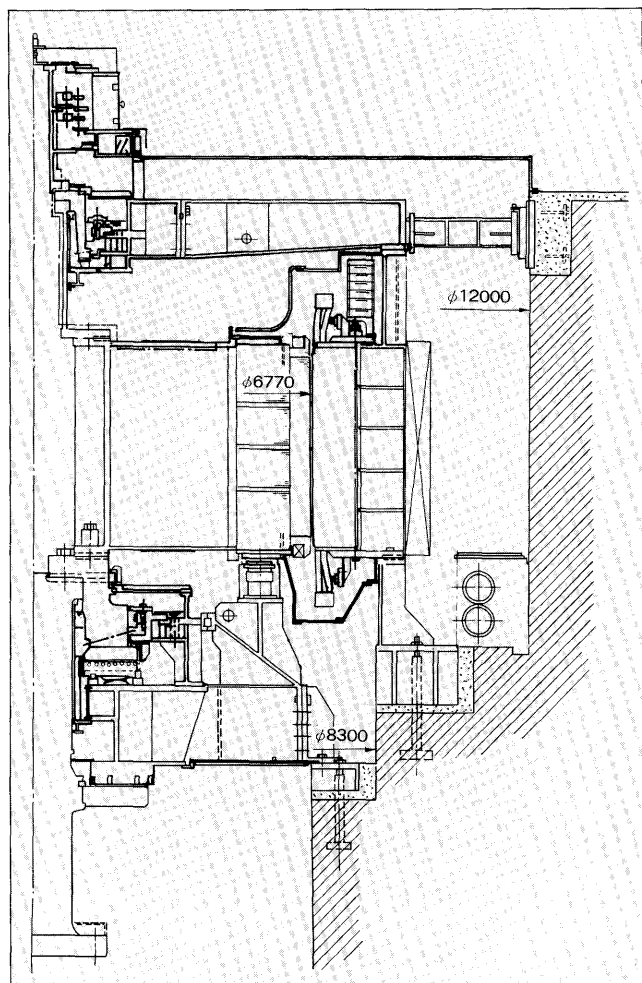
昭和50年入社。発電プラント制御・保護システムの設計に従事。現在、電力システム技術統括部システム技術部。



氏家 隆一

昭和49年入社。水車発電機の構造設計に従事。現在、川崎工場回転機設計部。

図1 発電電動機断面図



固定子鉄心は合せ目なしの現地積み方式とし、固定子枠は輸送制限などを検討の上、二分割構造とした。

固定子巻線はレーベル転位を施した1ターンコイル波巻きの四重星形結線とし、絶縁は富士電機のFレジ-ン-Fを採用した。固定子各部の構造は、約600回/月の運転モード切替に伴う過酷なヒートサイクルの対策として、可能な限り熱膨張収縮を吸収しうる構造を採用し、鉄心巻線及び固定子枠は無理な熱応力疲労にさらされない設計とした。また振動対策上、上部ブラケットの剛性が必然的に高くなることに着目し、固定子全体の吊込みには同部品を吊りビームとして兼用し、専用の吊りビームを省略した。

3.1.2 回転子

回転子は鋼板溶接構造のロータセンタ、薄鋼板積層構造のロータリム及び磁極から構成される。ロータリムは現地にて1リングに積層された後、ロータセンタに焼ばめにより取り付けられる。

3.1.3 軸系

軸系は主軸、スラストブロック、ロータセンタ、上軸及び補機軸から構成される。主軸には磁気軸受回転部を、また補機軸先端にはサイリスタ始動装置用磁極位置検出装置をそれぞれ配置した。

3.1.4 軸受

スラスト軸受は9個のセグメントで構成し、各セグメン

トが二重円板スプリングにより支持されるミッチェル形軸受とした。また、案内軸受は軸受支持剛性強化のため、コッタ支持によるセグメント方式とした。

油循環は上下部軸受共セルフポンプ方式とし、別置式油冷却器を採用した。

また、下部ブラケット下側には磁気軸受を配置した。更に発電所の運用上、ブラックアウトスタートの要求があるので、軸受高圧油装置のバックアップとしてアキュムレータシステムを採用した。

3.2 主要設計事項

3.2.1 振動対策

揚水機の場合、ポンプ始動時及び入力遮断、負荷遮断などの過渡時にポンプ水車ランナに過大な横方向の動的水スラストが作用する。この機械の設計では、通常行われる危険速度の検討に加え、ポンプ水車の類似機にて得られた横方向水スラスト波形をもとに振動応答解析を実施し、更にランダム振動応答解析を行うことにより、両者を比較しながら軸系各部の振れ及び軸受反力、上下部ブラケット及び防振ステーの必要剛性、基礎への伝達荷重などを分析した。

3.2.2 強度剛性

主要部分の強度剛性については解析及び実験をもとに念入な検討を実施した。

図2に磁極及びロータリム部の有限要素法による解析例を示す。この機械は約600回/月の運転モード切替が行われるため、疲労強度上特に厳しい条件にさらされることになる。したがって、疲労強度上最も厳しい条件にある同部については、有限要素法により応力集中を含めた応力分布と変形を求め、更に実際に使用する材料について疲労限度を実験により確認しながら、低サイクル疲労強度の検討を行った。その結果、磁極取付部には極端な応力集中のない台形ヘッドを採用した。

図2 磁極及びロータリムの変形並びに応力分布解析結果

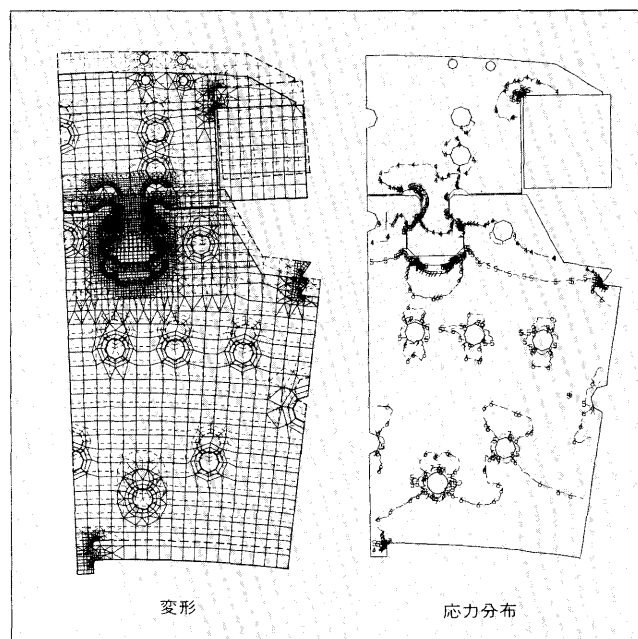
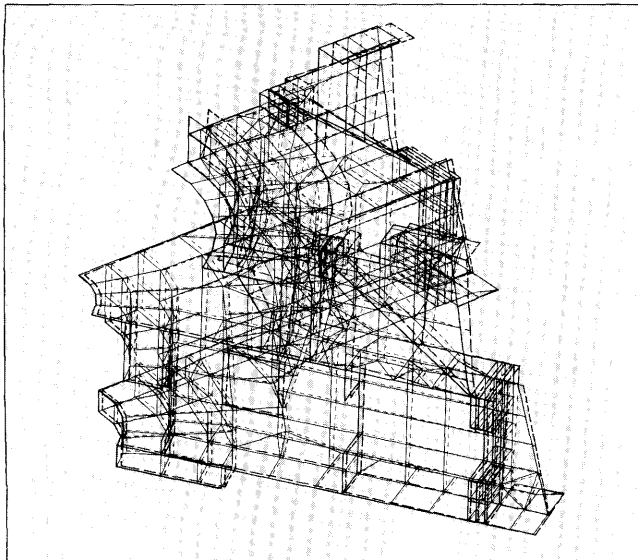


図3 下部ブラケット半径方向荷重に対する変形解析結果



更に、磁極及びロータリムについては実験により座屈強度の確認を行った。

積層物の座屈強度は、積層面圧、鋼板1枚1枚の厚さ、寸法、形状など種々のファクタに影響されるため、解析的なアプローチのみでは正確な把握が困難である。したがって、応力レベルの高いこの機械においては磁極取付部、磁極片部などの実物大モデルによる座屈実験を行い、鋼板厚さ及び積層方法を決定した。図3は下部ブラケット剛性解析の例を示す。下部ブラケットについては、水車上カバークラム吊出し構造であるため水車ピット径が大きく、その剛性確保の上で厳しい制約がある。したがって、有限要素法による剛性解析を実施し、有効な部材配置を追求しつつ最適構造を決定した。

3.2.3 磁気軸受

磁気軸受は、固定部にあるリング状の励磁線に直流電流を通電することにより、電磁力で回転子に浮力を与えスラスト荷重を軽減するためのものである。この発電電動機では図1に示すように下部ブラケット部に磁気軸受を配置した。磁気軸受は、主機の運転効率を高めるのに有効であるばかりでなく、この発電電動機のような過酷な始動停止頻度に対しては、特に軸受の信頼性の向上を図る上でも有効である。

図4に水スラスト変化に対応する磁気軸受吊上げ力モードを示す。

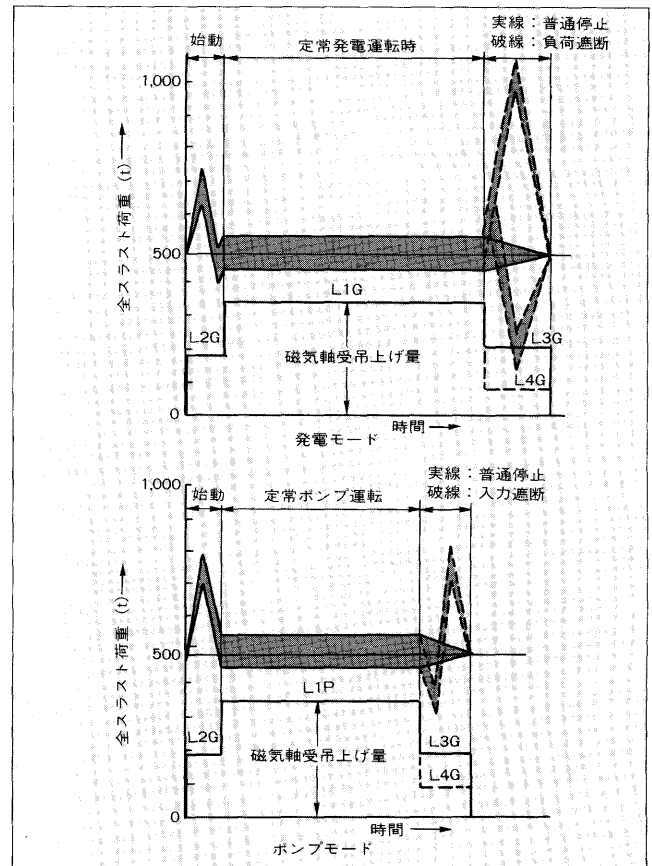
磁気軸受の吊上げ力の制御は、水スラストの変化する時点に対応するシーケンス条件により磁気軸受の励磁電流（吊上げ力）をプログラマブルコントローラを用いて行う方式を採用したため、すべての運転状態において最適な吊り上げ力を設定することを可能とし、軸受損失の大幅な低減を実現した。

更に上向きのスラスト荷重に対しては、負荷容量の大きなセグメンタル逆向きスラスト軸受を設けている。

3.2.4 アキュムレータシステム

発電所内電源喪失時のブラックアウトスタートの要求に

図4 磁気軸受吊上げ力制御モード

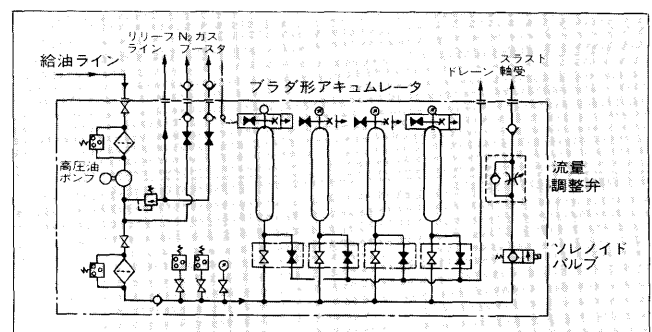


対応するため、スラスト高圧油アキュムレータシステムを採用した。アキュムレータシステムは4本のブラダ形アキュムレータから構成され、主機始動時に電源なしで高圧油を一定時間スラスト軸受面に供給する。高圧油蓄積量は、ポンプによる圧力補給なしに3回の主機始動が可能のように選定した。

図5にアキュムレータシステムの系統図を示す。アキュムレータシステムへの圧力補給は、システム内に設置された高圧ポンプにより行い、スラスト軸受への圧油供給は、DCソレノイドバルブにより行う。

なお、高圧給油側には流量調整弁を設置し、外部の流路抵抗及び油温などに関係なく一定流量を吐出することが可能な設計をし、システムの安定的な運用を実現した。

図5 アキュムレータシステム



4 サイリスタ始動装置

揚水発電所の始動方式として、従来、大容量機に対しては、直結電動機始動方式が主流を占めていたが、パワーエレクトロニクスの進歩と相まって、最近ではサイリスタ始動方式が採用されている。

サイリスタ始動方式は、直結電動機始動方式に比べて次のような利点がある。

- (1) 主機が複数台の場合、1台の始動装置で切り換えて始動できるため経済的である。
- (2) 装置が静止形であるため保守が容易である。
- (3) 発電電動機の構造が簡単になる。
- (4) 直結電動機の空転損失がない。
- (5) 回生制動による省エネルギー効果がある。

4.1 始動回路の構成

主回路構成を図6に示す。構成は始動装置1台で2台の発電電動機に対して切り換えて使用できる方式とし、電源側のPT、CB、ACリアクトルの異常時には、一方の発電電動機を他方の系統電源により始動するクロスフィードも可能とした。また、始動装置の異常時には、発電電動機側の母線を使用して、同期始動を行うことも可能である。

始動装置は、順変換装置、逆変換装置、DCリアクトル、ACリアクトル、アレスタ、遮断器、断路器、CT、PT及び制御・保護装置から構成されている。

変換器には、十分な耐圧と直列枚数を持ったサイリスタバルブを使用している。また、変換器に移行するサージ電

圧を制限するためにアレスタを設け、短絡電流を抑制するためにACリアクトルを設けている。始動用変圧器がないので、系統並入時の循環電流を抑制するためにDCリアクトルをP側、N側に分けて設置している。

4.2 変換器の構成と冷却方式

始動装置の容量は、水面押下げを行った状態で、主機の反抗トルクに打ち勝ちながら、はずみ車効果をもつ主機を150秒(2.5分)以内に定格回転速度まで加速する条件から21.8MWとした。

4.2.1 構成

逆変換装置の外観を図7に示す(順変換装置の外観も同一である)。順変換装置と逆変換装置は、富士大容量高圧サイリスタ(形式EGS03-40、4kV-1,000A)を使用しており、それぞれ16S-1P-6Aの三相純ブリッジで構成した。サイリスタバルブは図8に示すように、最小単位8S-1Pのサイリスタモジュールからなり、1アーム当たり二組のモジュールで構成されている。

モジュールは、サイリスタスタック部、光信号受発光回路部、点弧回路部、RC並列回路部、冷却水取水部などで構成されている。このモジュールは、点検や故障時の修理を容易に行えるように簡単に着脱できる構造とした。

サイリスタ点弧方式には、光間接点弧方式を採用し、変換装置の高圧部と制御装置部との信号の受渡しを光信号により行い、高圧部と制御装置部は完全に絶縁している。また、高圧部の一対の点弧ユニットのそれぞれがハードウェア的に別個の電気/光信号変換回路から信号を受け取るよ

図6 始動装置主回路単線結線図

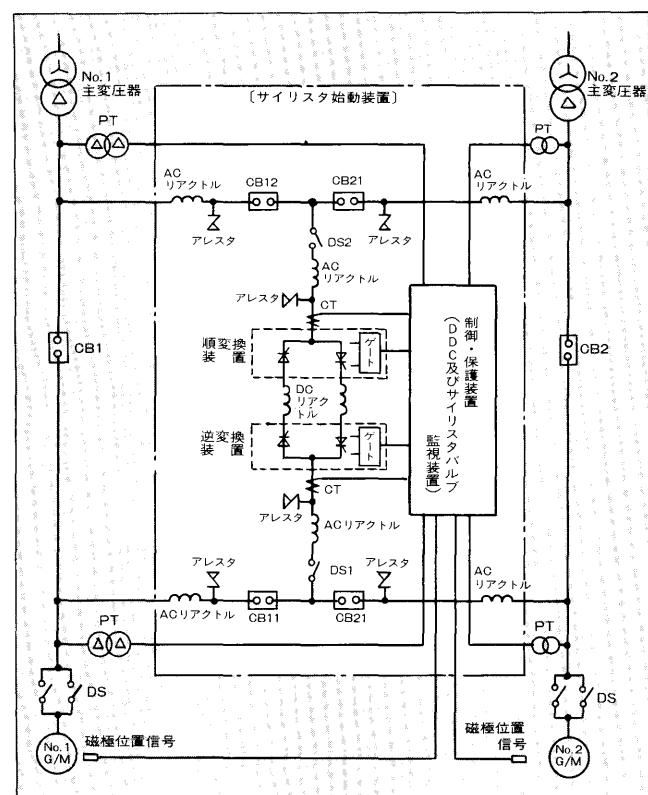


図7 サイリスタ始動装置(逆変換装置)外観

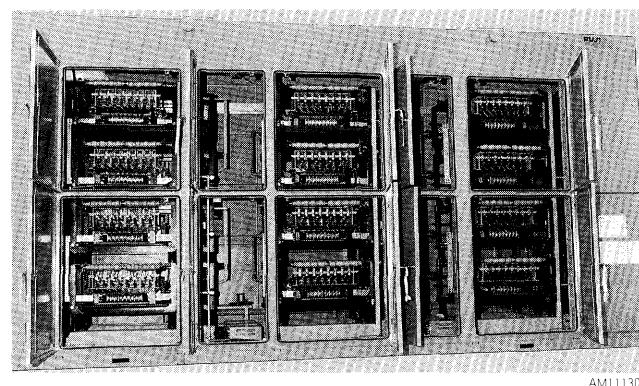
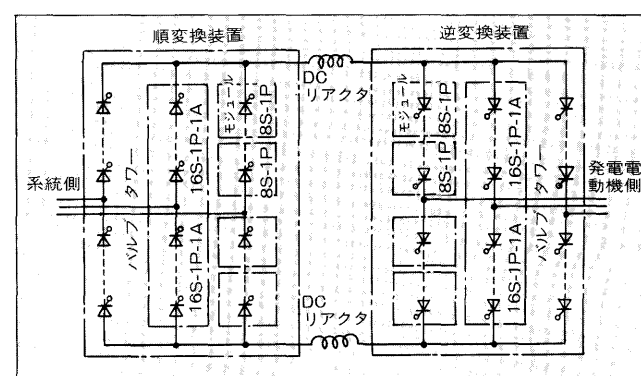


図8 順変換及び逆変換装置のアーム構成



ードウェア故障などがある。これらの故障のうち変換器の損傷につながるものについては、直ちに変換器動作を停止する。

一方、変換装置は複数のサイリスタ素子による直列接続(16S)構成になっており、部分的な素子の故障が他の素子へ波及する可能性があるため、全素子の状態を常時監視する必要がある。この監視装置(サイリスタバルブ監視装置)にはマイクロコンピュータを使用し、更にサイリスタ素子の故障演算の信頼性を高めるために、3台のマイクロコンピュータの多数決判断の結果を出力する2 out of 3冗長システムを採用した。この監視装置は、サイリスタ素子の異常検出時、異常信号をDDCに出力して安全に変換器の動作を停止させるとともに、異常な素子番号及び異常発生前

の素子状態のデータをプリンタに出力し、保守の効率化を図っている。

5 あとがき

本稿では、パルエミット揚水発電所主要機器の概要を紹介したが、発電電動機とサイリスタ始動装置について採用した技術は、揚水発電電動機が高速大容量化するに従い不可欠なものとなっており、今後の揚水発電技術に大いに寄与しうるものと確信する。

終わりに、本発電所向け機器の計画・製作にあたり、関係各位から有益な御指導と御協力を賜ったことに深く感謝の意を表する次第である。

技術論文社外公表一覧

題 目	所 属	氏 名	発 表 機 関
高気圧低温プラズマ(オゾナイザ放電)を用いた(Si ₂ H ₆)の生成	富士電機総合研究所	井関 昇 虎口 信	昭和62年電気学会全国大会
SF ₆ 中スパーサの直流直面帯電の測定	富士電機総合研究所	高野 哲美	
6kV、2500A 光サイリスタ	富士電機総合研究所	渡辺 雅英	
くら形の浮上用地上コイルを用いた超電導磁気浮上車の浮上特性	富士電機総合研究所	山口 仁	
屋内閉鎖配電盤の温度、湿度特性	富士電機総合研究所	宮本 昌広	
三相一括形 GIS 用避雷器の熱安定特性	富士電機総合研究所	志賀 悟	
開閉装置制御回路の電子化	富士電機総合研究所	畠山 吉文	
遮断器動作特性測定器の開発	富士電機総合研究所	金高 康彦	
屋外機器温度監視に関する研究(赤外線映像装置による監視方式)	富士電機総合研究所	磯崎 優	
進み小電流試験方法	富士電機総合研究所	森田 公	
酸化亜鉛形避雷器の漏れ電流監視	富士電機総合研究所	岩井 弘美	
GIS 内部アーク検出装置の開発	富士電機総合研究所	小野 浩志	
ZnO バリスタの急峻電流に対する制限電圧の検討	富士電機総合研究所	高尾 宣行	



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。