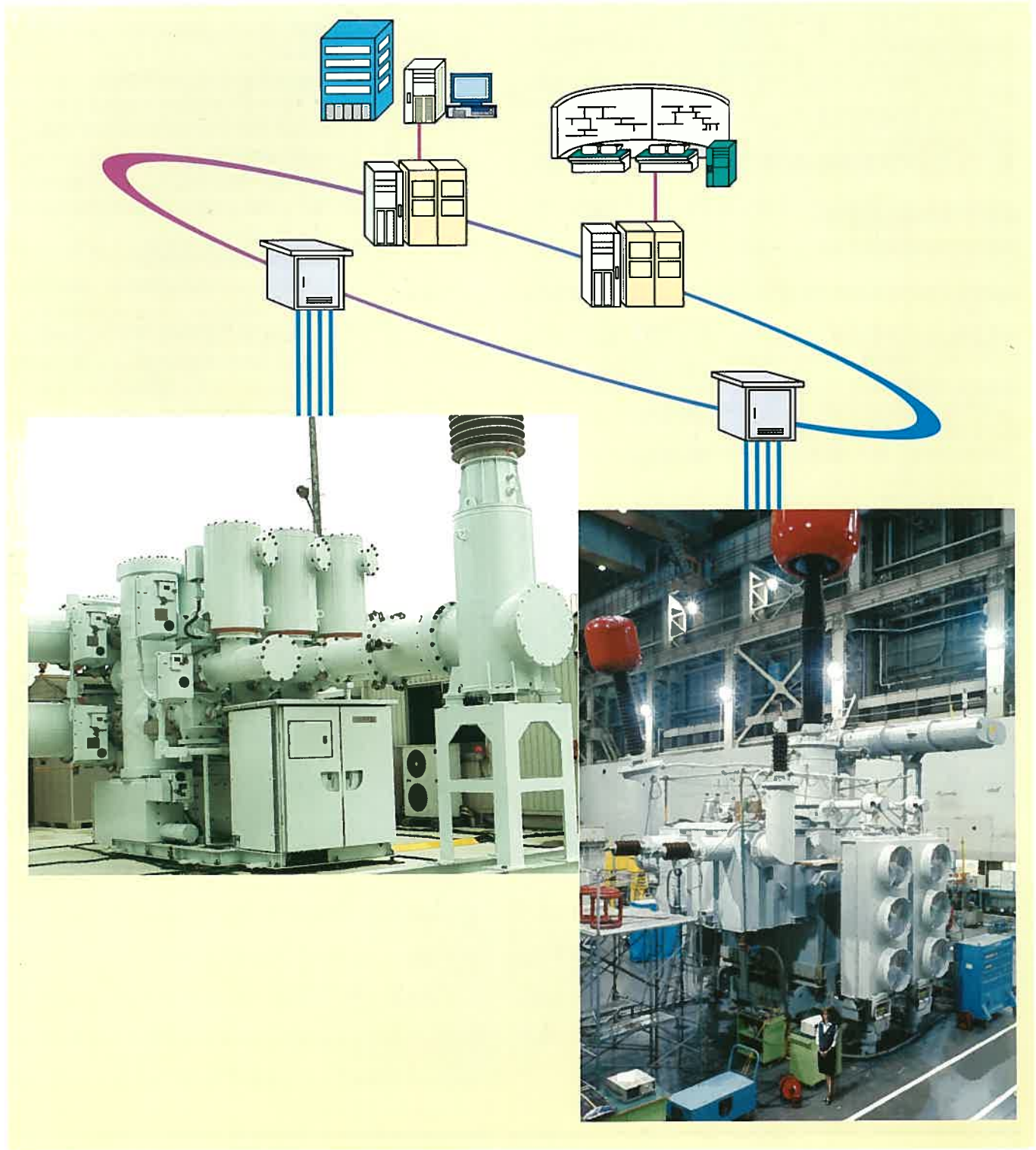


# MITSUBISHI

## 三菱電機技報 Vol.75 No.8

特集Ⅰ「インテリジェント変電所システム」  
特集Ⅱ「新外鉄形変圧器」

# 2001 8



## 目次

### 特集Ⅰ「インテリジェント変電所システム」

変電所から調電所へ 宅間 董	1
変電所インテリジェント化への潮流 鈴木 浩	2
インテリジェント変電所システム 下村哲朗・大垣健二	7
変電所プロセスバスシステム 匹田猛雄・大垣健二・斎藤成一・曾田圭一・徳永雄一	13
インテリジェントGISの開発と実用性能検証 前田恭宏・青木寛英・日比野敦夫・羽馬洋之・藤田重人	19
開閉極位相制御遮断器 香山治彦・林 孝典・杉山 勉・伊藤弘基・葛田広幸	25
新形CT/PD 谷口裕章・前田恭宏・岸本一雄	31
次世代機器監視システム 土井 博・篠原秀雄・山地 勉・塩谷景一	37

### 特集Ⅱ「新外鉄形変圧器」

新外鉄形変圧器開発に寄せて 大久保 仁	41
外鉄形変圧器の技術動向と展望 玉置榮一	42
新外鉄形変圧器プロトタイプ器の完成 岸 章夫・中村史朗・西谷恒夫・中塚昭治	47
新外鉄形変圧器の絶縁・冷却構造 伊藤恵一・古藤 悟・早瀬 岳・石川清之・吉住安二	51
新外鉄形変圧器の耐機械力構造 高野昌宏・谷 周一・瀧川秀記・油井正志・斎木茂俊	55
IT化対応変圧器保守支援システム 篠原秀雄・江草克己・柏野敦彦	59

### 特許と新案

「半導体式流量検出装置」「半導体装置の製造方法」	63
「制御システムの異常検知装置」	64

### スポットライト

MITS(Mitsubishi Information Technology Switchgear)	(表3)
--	------

### 表紙

#### 次世代の電力流通システム

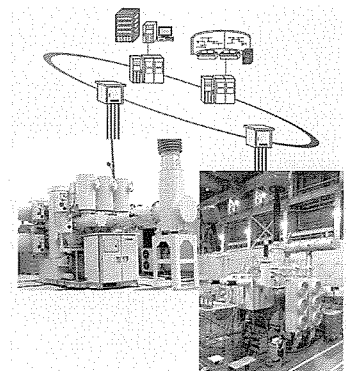
インテリジェントGIS、及び新外鉄形変圧器で構成された次世代の電力流通システムの概念図である。各変電所の制御・保護などの機器情報は、高速ネットワークを介して給電・制御所や設備保守拠点へ送られ、高度な運転・保守が可能となる。

#### インテリジェントGIS(写真左)

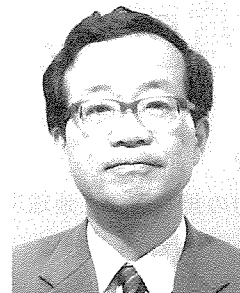
ライフサイクルコスト低減を目指して300kVインテリジェントGISを完成し、耐屋外環境性能、耐サージ性能といった実用性能の検証を完了した。写真は実変電所を模擬した屋外での実用性能検証の状況である。

#### 新外鉄形変圧器(写真右)

従来器に比べ本体体積51%、据付け面積50%と大幅なコンパクト化を達成した新外鉄形変圧器プロトタイプ器(500kV、250MVA単相単巻変圧器)を完成し信頼性検証を完了した。写真は、プロトタイプ器の性能試験状況である。



## ！ 変電所から調電所へ

京都大学  
大学院工学研究科

教授 宅間 董

10年ほど前、ある電力会社の50万V変電所に一般からの見学があった。2、30人の参加者を前に変電所の専門家が、まず“50万Vで送られてきた電気を、この変電所で半分の27万5千Vにして送り出します。”と説明した。一同が静かに聴き入っているのを、担当者はいよいよ調子付き、電力潮流やら融通やら制御を得々と説明して、最後に何か質問はと尋ねた。すると熱心にメモをとっていた一人が質問した。“50万Vの半分を送り出すと言われたが、残った半分はどうなるのでしょうか。”

電力系統の発電・送電・変電・配電の分野のうち、電力の関係者ではない一般の人々の理解と電力会社内部の評価が最も懸け離れているのは変電又は変電所であろう。発電・送電・配電の役割は、一般の人々の理解はそれほど見当外れではなく、およその役割をまず適確に認識している。ところが変電所となると、冒頭に述べた誤解は論外としても、せいぜい変電所を昇圧／降圧する場所としか考えないのが普通である。変圧器1台分のイメージと余り相違しない。

変電所の役割はもちろんそれだけにとどまらない。電力の集中と配分を行うほか、潮流の制御、安定度の向上、さらには送配電線や変電所の保護・保守など多岐にわたっている。いわば電力系統のかなめ(要)の地位にある重要な役目なのであるが、一般には理解されていない。このような認識の違い、又は不十分な理解の原因の一端は変電所という名称にある。英語では変電所はsubstationであり、電気を起こす(それがなければ話が始まらない)発電所のpower

stationに次ぐような名前になっている。電力が発電から消費までの比較的簡単なシステムであった初期のころからsubstation(支局)と名付けられたのは見識であろう。電力系統が大きくなるに従い、系統全体を監視・把握し、調整・制御するいわば神経の役目とその節目である変電所はますます重要になった。系統の上位施設には給電所や制御所があり、昇圧／降圧を行わない場合は開閉所という味もそっけもない名称になるが、せめて変電所でなく“調電所”という名前になれば理解が深まるかもしれない。

自由化、規制緩和など電力分野の環境変化の中で、変電所も一層の高機能と変革が求められている。高機能化の中心はこの特集に述べられているIT技術をベースにしたインテリジェント化であるが、これらにコストダウン、小型化、長寿命化、環境対応、など時代の要請が絡んでいる。さらに将来の電力系統ではどうなるのか。遠い将来には、発電機から昇圧なしに送電線に直結された系統になるかもしれない。分散電源が地域の限られた需要家のみに供給するシステムが中心になるかもしれない。このとき、変電の役目はますます軽くなるか場合によっては消滅するかもしれないが、代わってよりきめ細かい需給を可能にし、双方向の情報伝達を行う監視・制御・情報センターとしての役割はますます重要になるであろう。この特集のインテリジェント化変電所にも既にその展開を伺うことができる。そのときは変電所はもちろん調電所の名前さえ時代遅れで、SSとかCCなどと横文字の略語になるかもしれない。



鈴木 浩\*

# 変電所インテリジェント化への潮流

## 要旨

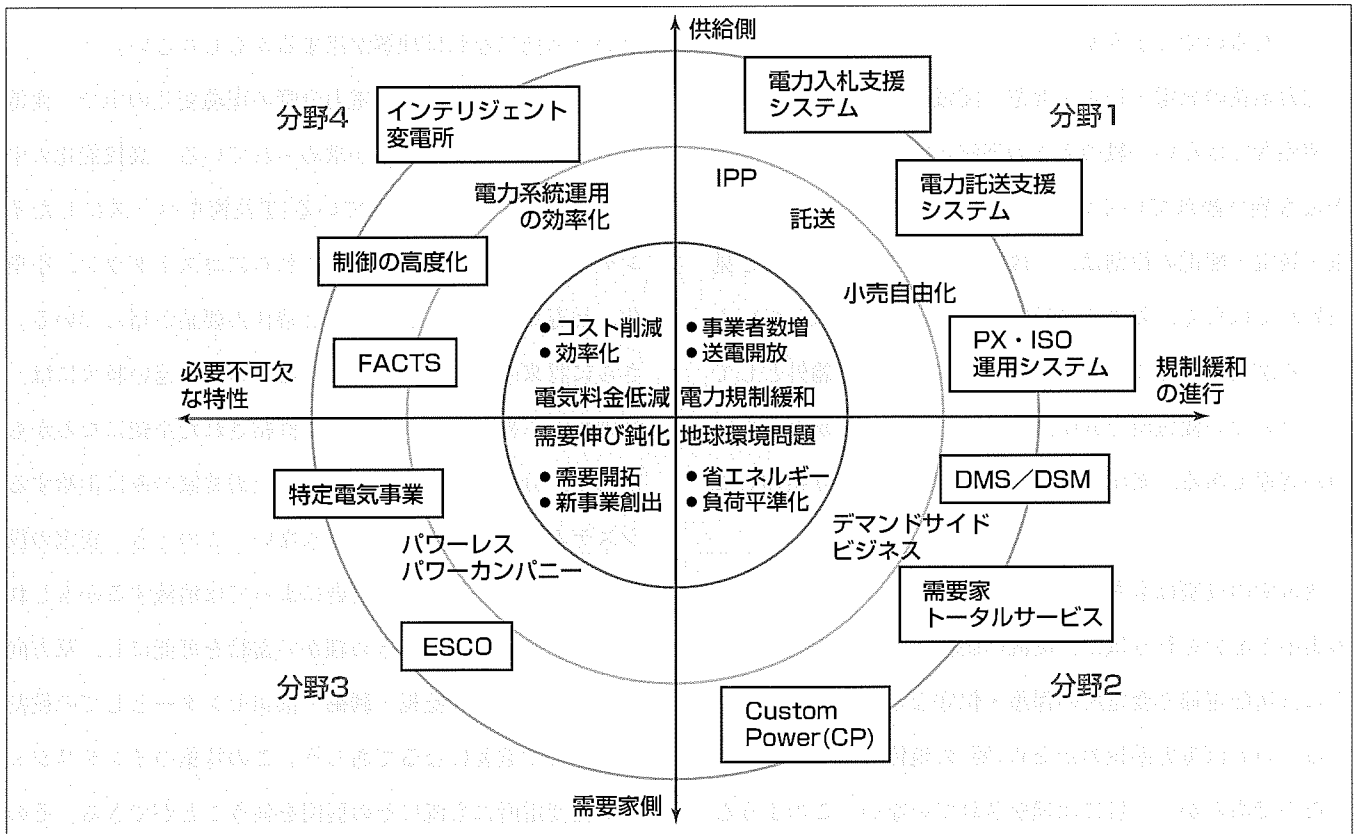
電力の規制緩和、地球環境問題等の社会環境、IT化を始めとする技術革新によって、電力システムを取り巻く環境は大きく変わりつつある。こうした動向を二つの軸で切って分析してみる。一つの軸は社会制度の変化の軸で、もう一つの軸は電力の供給側か需要側かの分類である。この二つの軸で分けられる四つの分野ごとに、新しいビジネス動向とそれに合わせた技術開発の方向性を紹介する。電力取引のためのシステム開発、需要家トータルサービスのインフラ作り、ESCO等の省エネルギービジネス、既設機器のライフサイクルを通じたコストダウンなどが、各分野に対応したニーズであると言える。

こうした中で、電力システムを構成するネットワークの

中のノードに当たる変電所の役割の変革が求められている。社会的ニーズであるライフサイクルを通じたコストダウンを目指した変電所の設計を実施することとした。機器のコストは、与えられた機能の数に対して非線形の特徴を持っている。そのため、機能削減によるコストダウンでは本当のコスト低減には結び付かない。必要な機能のみを積み上げていく設計が必要である。

従来、ハードウェアのみで構成されていた変電所にソフトウェアを導入し、システムとして、インテリジェンスを付加することが求められている。どこまでソフトウェアを増やせられるか、その最適化も検討している。変電所のインテリジェント化のニーズを探ってみた。

特集  
1



## 電力分野におけるビジネス動向

電力システムを取り巻く環境を二つの軸で分類し、各分野での潮流と必要な技術についてまとめた。この中で、インテリジェント変電所の必要性が伺われる。

## 1. まえがき

電力の規制緩和，地球環境問題等の社会環境，IT化を始めとする技術革新によって，電力産業を取り巻く環境は大きく変わりつつある。本稿では，電力産業の向かう方向を探り，新しいビジネス動向とそれに合わせたメーカーとしての技術開発の方向性を紹介する。こうした中で，電力システムを構成するネットワークの中のノードである変電所の役割の変革が求められている。電力システムを人間の脳の神経網に例えるならば，変電所は神経ノードに対応する。その機能をインテリジェント化することが必要となっていることを明らかとしよう。

## 2. 電力システムを取り巻く環境変化

電力システムを取り巻く変化を二つの軸でとらえることができる。

一つの軸は，現在進められている規制緩和，自由化といった社会制度の変化である。各国で電力の規制緩和が進み，そうした中で，米国カリフォルニアでは制度上の失敗による電力危機が生じている。我が国でも電力料金の適正化や新産業の創出のための規制緩和が求められているが，我が国の文化風土に合わせた独自の規制緩和の道を探る必要がある。また，同時に，こうした規制緩和の動向にかかわらず，社会制度がいかに変わっても電力システムが必要とする必要不可欠な特性も存在している。

もう一つの軸は，環境変化の中で，事業展開を電力の供給側（発電から送変電までを含む。）に重点を置くか，需要側（配電から最終需要まで）に重点を置くかといった方向である。これを，縦軸と考える。

この二つの軸によって，電力システムを取り巻く動向及び検討すべき技術開発の分野は大きく四つに分けられる（要旨の図）。それぞれの分野での特徴を見てみよう。

まず，自由化が進む中での供給サイドの分野（要旨の図

の中の分野1)では，送電システムの開放，新たな発電事業者の参入等の規制緩和が，従来の電力システムにはなかった新しい流れとなる。電源新規参入者の増加や，将来的には，電力の取引が始まる可能性がある。そこで必要となる技術開発は，電力取引のための情報関連技術である（図1）。既にこの4月から，中央給電連合指令所では，各電力会社，特定規模電気事業者(PPS)間での電力の経済融通が，インターネット上で開始されている。三菱電機も，このためのシステムを納入し順調に業務が運用されている。

次に，自由化が進む中での需要サイドの分野（要旨の図の中の分野2)）を見てみよう。ここでは，電力会社の需要側での新事業や，メーカーとしては配電側での新しい形での事業支援が発生する。そのための技術開発では，配電変電所での自動化を進めたDistribution Management System (DMS)や，電力会社を中心となって行くと考えられる需要家トータルサービスシステムなどが挙げられる。需要家トータルサービスとは，需要家側の電力に関係するあらゆる情報をリアルタイムで電力会社に伝達し，電力会社側ではこれらの情報を処理して，需要者側にタイムリーな情報提供を行うことによる新事業を創出する仕組みである（図2）。現在，当社も，各電力会社と共同で，こうした

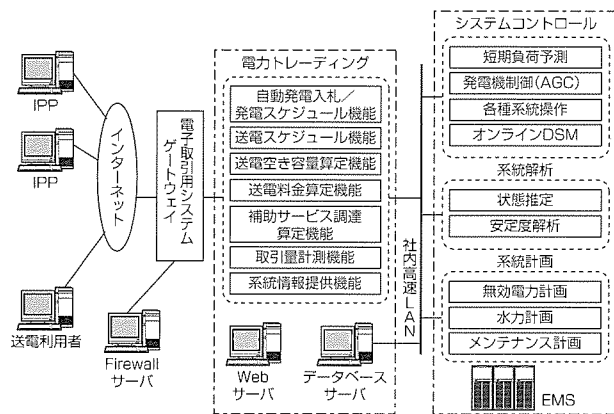


図1. 電力取引機能を取り込んだ電力系統制御システム

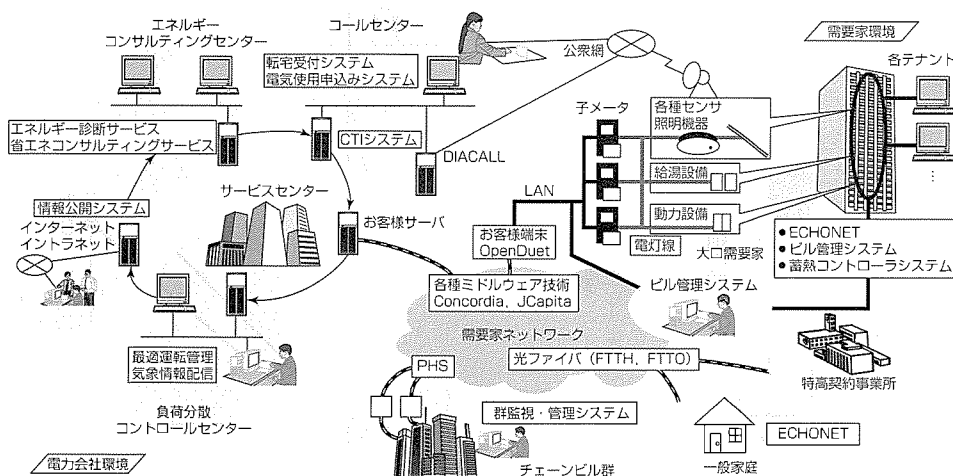


図2. 需要家トータルサービスシステム

システムの開発を行っている。

第3の領域は、電力システムの必要不可欠な特性を持つ需要側の分野である(要旨の図の中の分野3)。この分野では、電力会社は、大きくその事業範囲を変えていくことが予想される。こうした特性は、電力会社のパワーレス・パワーカンパニー化としてとらえることができる。発電部門を外部化することによる、自分で発電しないという意味での“パワーレス”化、省エネルギーを事業とするという意味での“パワーレス”化、それに、従来地域独占によって持っていた権力を失う意味での“パワーレス”化の三つを意味している。こうした中で、新しい事業としては、地球環境対応での省エネルギー事業やESCO等がこれに当たろう。ESCO事業とは、省エネルギー・省資源をコンサルタントとして指導し、省エネルギー設備の供給・設置を行うと同時に、それに必要な資金も提供することで、需要家にも大きなメリットを提供しながら利益を得る仕組みを言う(図3)。そのために必要な技術は多岐にわたっており、省エネルギー技術のほかに、コジェネレーションなどの発電技術も含まれることとなる。当社では、マイクロガスタービンの事業化が順調に展開され始めている。

最後は、電力システムに必要不可欠な特性における、供給側の分野である(要旨の図の中の分野4)。この分野での機器・システム開発は従来の延長線上にあると考えられがちであるが、新しいコンセプトでの開発が必要となっている。規制緩和の状況にかかわらず、必然的に求められる電力機器のコストダウン、特にライフサイクルでの評価がニーズとして取り上げられる。次の章では、この分野での、変電関係に与える影響を見てみよう。

### 3. 変電機器に与える影響

電力システムにとって必要不可欠な特性のうち供給側、送変電分野の技術を、我々は、SMARTというコンセプトで提供しようと考えている。これは、Simple(簡単)、Maintenance-Free(メンテナンス不要)、Autonomous(自律的)、Robust(頑強)、Transparent(透明)の五つの特

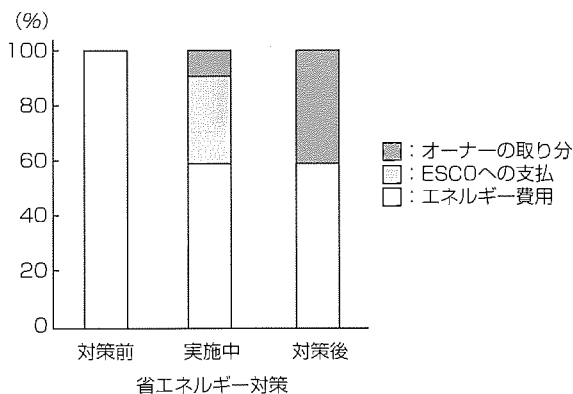


図3. ESCO事業

性の頭文字をつなげたもの(図4)である。こうした概念の下で、提供する装置やシステムを設計・製造することを心掛けていく。こうしたコンセプトに基づきながら、コストダウンへの要求に以下の考え方で取り組んでいる。

機器や制御システムのコストは、与えられた仕様や必要とされる複雑さに対して線形ではない。すなわち、必要な機能が倍増したときにコストは2倍以上になるということである。むしろ、コストは二次曲線的な特性を持つことが明らかとなっている。すなわち、2倍ではなく4倍になるということである。そのために、ある仕様で作られた装置やシステムで仕様を落としてコストダウンを図っても、望ましい廉価な機器やシステムは提供できない。むしろ、もう一度基本から仕様を見直し、必要な機能のみを積み上げた装置やシステムを設計すべきである。この概念を説明したのが図5である。すなわち、必要とされる機器仕様と価格が点Aで与えられるときに、この機器の仕様を減らしてコストダウンしようとして原点を求めていくと、点Cが得られる。一方、基本に戻って必要とされる機能のみを仕様に取り入れていく、すなわち原点からスタートすると点Bが実現でき、このときのコストは前述の点Cに比べて安くできることとなる。こうしたコストダウンをSMARTという概念の下で実現させることが必要である。

現実には、種々の仕様の機器が要求されることがある。これに対応するには、機器やシステムにハイエンド(高機能で高価)とローエンド(合理的機能で廉価)の製品やシステムを準備することが望ましい。その具体例を幾つか見てみよう。

GISでは、大容量・高性能の機器の代表として、UHV



図4. SMARTの概念

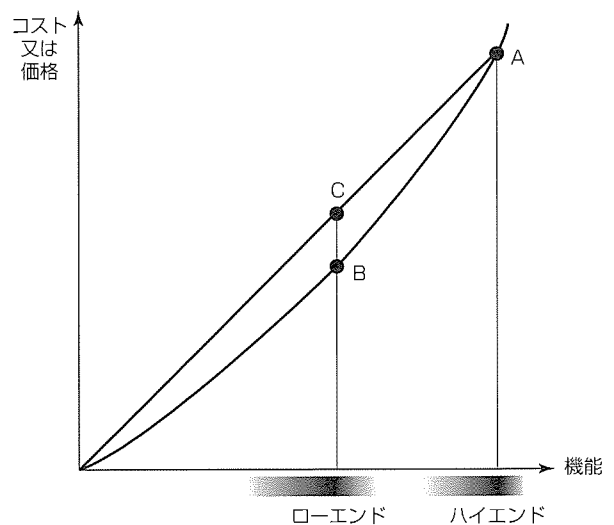


図5. 真のコストダウン方策

(100万V)用の機器が典型として挙げられる。その逆に、機能を合理化して低価格で実現できるローエンドのGISも開発している。これが、超高压向けの縮小形GISである(図6)。

また、直流送電用の技術を見てみると、大容量の系統連系や周波数変換所には、従来形の300MW規模のサイリスタを用いた他励式直流装置が用いられる。一方で、小容量で短絡電流の小さい系統での直流送電では、GTOを用いた自励式の直流装置が使われる。これは、10MW程度のパッケージ化されたバルブの積み上げで実現できる機器である。当社でもHVDCの開発を終えているが(図7)、ABB(Asea Brown Boveri)社はこうした装置をHVDC-lightと命名し製品化している。

次に系統制御領域を見てみよう。ハイエンドシステムとしては、中央給電指令所向けや、系統給電制御所、地方給電指令所向けのシステムなど高機能が要求されるシステムが挙げられよう。現在では、オープン分散アーキテクチャを採用したマルチベンダー型のシステムが、東京電力株の

地方給電指令所向けのシステムや東北電力株の中央給電指令所に導入されている(図8)。一方、同じ考え方で配電用変電所の制御システムとして、DMSが台湾電力向け等に、パッケージ型のシステムとして開発されている。

最近幅広く採用されているFACTS(柔軟な交流送電システム)として、STATCOM(静止型無効電力供給装置)を次に取り上げよう。高機能・多機能型のSTATCOMとしては、関西電力株に納入したSVGと呼ばれる装置が、ハイエンド製品として挙げられよう。これは、水力発電所からの電力を安定に送電するために設けられたもので、80MVAと大容量で、個別設計に基づくものである。一方、可搬型でコンパクトなSTATCOMとして、20MVAのものも開発している。この装置は、必要な容量や設置場所に応じて組み合わせて使うことを目的として開発されている(図9)。

こうしたハイエンドとローエンドの二系列の製品化構想を推し進めて一層の標準化を図ることが必要と考えている。例えば、海外のメーカーでは、完全な標準化を行っているところが多い。その場合に特徴的なのは、標準品の変更の仕方も標準化している点である。すなわち、ある標準製品を開発するとき、客先の要求に応じて仕様変更ができるような機能も最初から標準化して用意しておくのである。こうした考え方で今回開発・設計したのが“インテリジェント変電所”である。

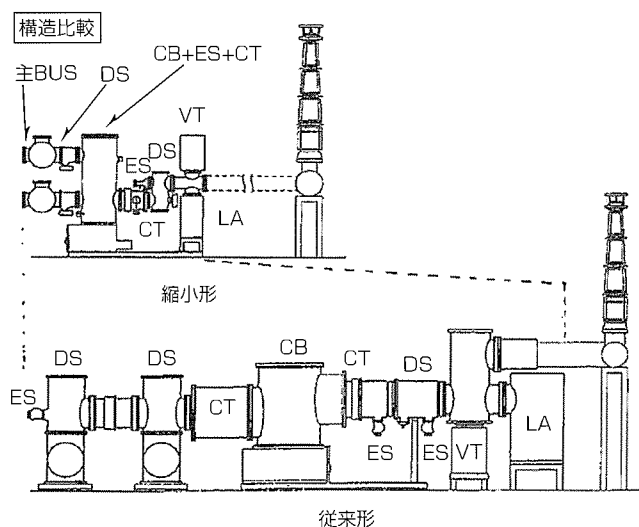


図6. GIS

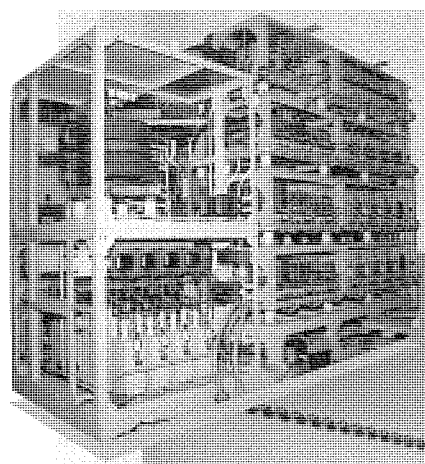


図7. HVDC

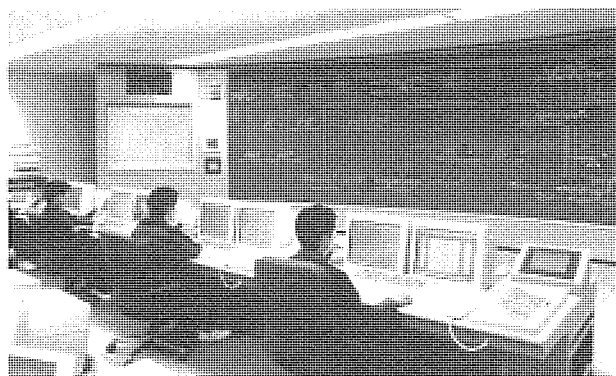


図8. SCADA



図9. STATCOM

#### 4. 変電所のインテリジェント化

こうした電力を取り巻く環境変化の中で、ITが与える技術革新効果大きい。ITとはデジタル技術をネットワーク上で活用することと定義できよう。以上に述べたSMARTコンセプトに基づきITを活用して誕生したのがインテリジェント変電所である。

これは、客先ニーズを先取りし、必要な機能を積み上げて完成した、低コストの、時代に合った機器である。コストの中には、変電所のライフサイクルとしての生涯コスト低減の考え方を取り入れている。すなわち、設計、製造、据付け、運転、保守全体をトータルしたときのコストを最小にする考えである。

インテリジェント化とは、ハードウェアの機器そのものが知的機能を持つことで、当然、ソフトウェアを取り入れたシステム的なものでなくてはならない。インテリジェントはシステムによって実現するのである。さて、システムは、ハードウェアとソフトウェアの和で成り立っている(図10の仮定①)。その割合は幾らが良いのか、ここで検討してみよう。ハードウェアの必要な規模は、そのシステムの規模に比例して要求される。一方、ソフトウェアの規模は、システムの規模の二乗に比例して必要とされることが分かっている(仮定③)。ところで、利益を生むのはハードウェアであるから、これらを図の仮定のように定式化できる。すると、この式から利益最大を求めてみると、ハードウェアとソフトウェアの割合が半分ずつのときということになる。インテリジェント変電所には、規模の半分をソフトウェアで実現することが求められる。これまでの機器はすべての機能をハードウェアで実現することにしていた

仮定

- ① システムの規模  $Q = \text{ハードウェアの規模 } H + \text{ソフトウェアの規模 } S$
- ② システムから得られる利益  $P \propto \text{ハードウェアの規模 } H$
- ③ ソフトウェアの規模  $S = kQ^2$

結論

利益  $P$  を最大にするには  
 $H = S = Q/2$   
 すなわち、ハードウェアとソフトウェアの規模が50%ずつのときが最適となる

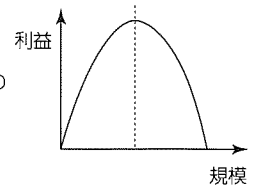


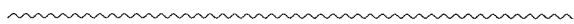
図10. ソフトウェアとハードウェアの割合

ので、こうした発想の転換は大きな技術革新を呼んでいる。

#### 5. む す び

本稿では、電力を取り巻く社会環境、技術環境を広く探索し、その中で、変電所インテリジェント化への必要性を述べた。ハードウェアで実現してきた機能をソフトウェアで置き換えることで、標準化やライフサイクルコストの押し下げができる。環境対策や安全対策も取り入れることができよう。当然、新しいセンサ開発も大事である。次の世代では、一層の技術開発により、光デジタル技術の採用、接地開閉器の省略などを提案していきたい。また、同時に、簡易型の変電所としてMITS(Mitsubishi Information Technology Substation)の開発にもつながっている。これについては別の機会に紹介したい。

新しい機器やシステム開発は、ユーザーにもメーカーにも活気を生む。電力を取り巻く事業環境には厳しいものがあるが、これまではぐくまれてきた良い関係を今後も大事にしながら、時代に合った製品の提供のために技術開発に励みたい。



特集  
I



# インテリジェント変電所システム

下村哲朗\*  
大垣健二\*

## 要旨

近年、電力自由化と規制緩和の動きに電力需要の伸びの停滞が加わることにより、競争激化が予想される。電力流通システムにおいても、コストプレッシャが大きくなり、システム計画と運用・資金計画を総合して経営の効率化を図るアセットマネジメントの考え方がより重視され、設備のライフサイクルコストを考慮した計画・運用が重視される。従来の大容量・高信頼度指向から、環境適合性も含むトータルでの運用を考慮した変電所システムの構築を目的として、情報システムと機器の統合を図るインテリジェント変電所システムを開発した。

開発項目は以下のとおりである。

(1) 電力流通システム運用・管理に適した変電所情報シ

テムの構築

ステーションレベル、ベイレベル、プロセスレベルでのネットワーク構築

(2) 高度設備計画・保全システム

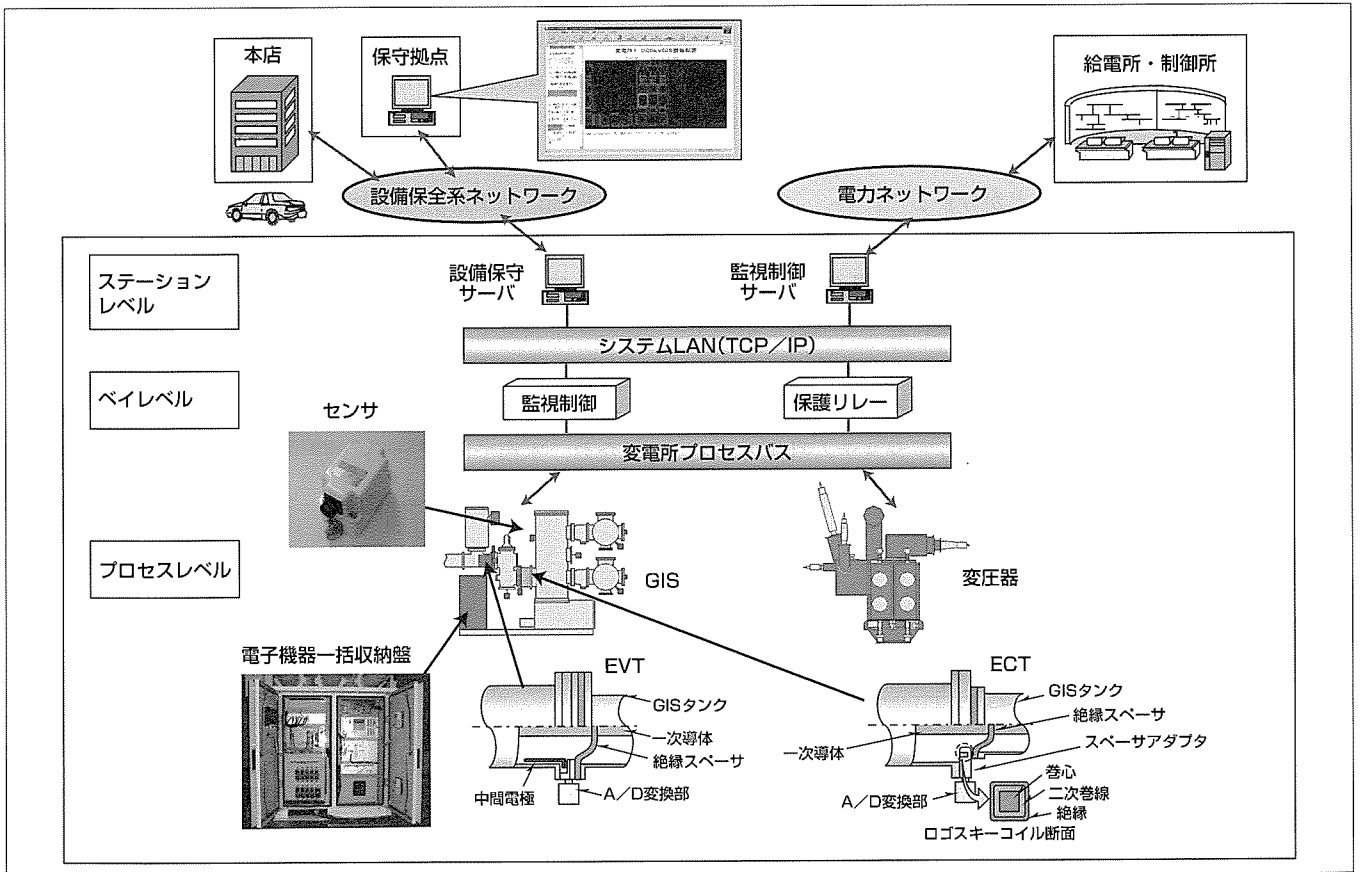
CBM(Condition Based Maintenance)に対応した機器監視システム、設備管理システム

(3) 情報システムに適合した電圧電流センサ・機器センサ開発

変電所内情報のフルデジタル化に対応

(4) コンパクトな機器開発

(5) 電力システム運用効率化に貢献するシステム開発  
機器へのストレスを軽減する開閉極位相制御技術



## インテリジェント変電所システムの構成

変電所内の一次機器に近いレベルにプロセスバスを設置して、機器の電圧電流情報、機器の制御出力とのインタフェースを行う。また、ステーションレベルでは、上位系と広域のネットワークで結合して変電所の監視制御、設備運用保全情報を配信する。機器側には、情報のフルデジタル化に対応して新形のCT(Current Transformer)／VT(Voltage Transformer)、センサ、開閉極位相制御装置を設置している。

1. ま え が き

経済の高度成長期には、電力需要の急増に対応するため、電源の開発と安定に電力を供給する流通システムの構築が最重要の課題であり、大容量送電に対応する大容量機器の開発と系統安定化システムなどの開発が電力流通システム革新の原動力であった。また、需要増加により、既設の機器の定格容量不足などが原因で、機器寿命を待たずに機器が更新されてきた。

最近になって、電力自由化・規制緩和の動きに電力需要の伸びの停滞が加わり、電力システムの計画・運用の一層の効率化が重視されている。従来の大容量・高信頼度指向から、環境適合性も含むトータルでの運用を考慮した変電所システムの構築が重要となってきた。このようなニーズに対応したインテリジェント変電所システムについて、考え方を概説する。

2. 系統を取り巻く環境変化による技術変動

2.1 電力系統の効率運用の重視

需要の伸びの鈍化により、設備投資は抑制傾向にある。電力自由化によってこの傾向は更に加速されている。一方で、高度成長期にあいついで新設された設備が、高度成長期のように容量不足による更新の必要性が生じないため、長期間使用される。GISの場合、1980年代後半から設備数の増加が著しくなり、図1に示すように、'97年度の分布では経年2～6年の比率が減少し、経年17年経過の比率が増加して経年が進んでいることが分かる<sup>(1)</sup>。

機器の高経年化は、CIGREの調査結果<sup>(2)</sup>に示すように、世界的な傾向である。'50年代から機器の設置台数が増加していることから、今後10年間に寿命に達する機器が増加すると考えられている。

電力需要の伸びが鈍化している中での電力システム運営には、コストプレッシャが大きくなり、システム計画と運用・資金計画を総合して経営の効率化を図るアセットマネジメントの考え方がより重視され、設備のライフサイクル

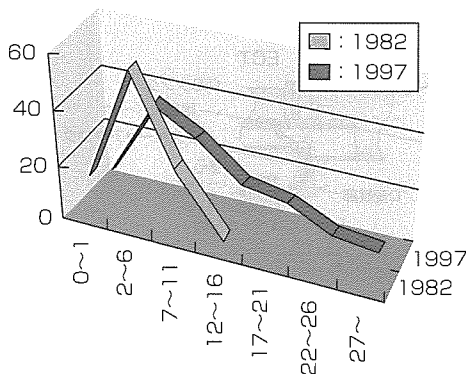


図1. GISの経年分布

コストを考慮した計画運用が重視される。

高経年機器の早期更新は不経済であるし、遅すぎるとアベイラビリティが低下し事故につながる可能性がある。経年機器の扱いを考えることは、基本概念を見直し将来の送配電に適した新しい概念の導入機会と考えられる<sup>(3)(4)(5)</sup>。

図2にインテリジェント変電所システムの概念を示す。

ライフサイクルコストは、初期コストと運転開始後の運用コスト及び更に廃却コストを考慮したものである。運用コストには供給支障による損失コストが含まれることから、供給支障を抑制する保守活動が重要である。

設備保守の考え方も、費用抑制の観点から、定期的に保守するTBM(Time Based Maintenance)から設備の状態に応じて保守するCBM, さらにはRCM(Reliability Centered Maintenance)が提案されてきている。

これらは、寿命延長するために設備の情報を監視し機器の状態・重要度に応じて保守・更新のアクションを効果的に実施する考えであり、機器のモニタリングと情報の管理が今後の有効な解決策になる。

2.2 環境問題

近年の環境意識の高まりを受けて、変電設備も、環境面への配慮としての“周囲への景観調和”と、そしてSF<sub>6</sub>ガスの放出抑制を検討している。

(1) 環境調和

変電所が周囲に威圧感を与える(Visual Impact)のために周囲に調和した建屋への収納、地下変電所などの対策がとられるが、機器のコンパクト化によるボリューム低減は建設費抑制に効果があり有効な対策である。

(2) 温暖化ガス

ガス絶縁機器に採用されているSF<sub>6</sub>ガスは温室効果を持つため、大気中への放出を極力抑制する方針である。この対策として、機器を小型化しSF<sub>6</sub>ガスの使用量を抑制することが有効である。

なお、本稿では触れないが、ガスの回収・再使用についても継続して技術開発を行っている。

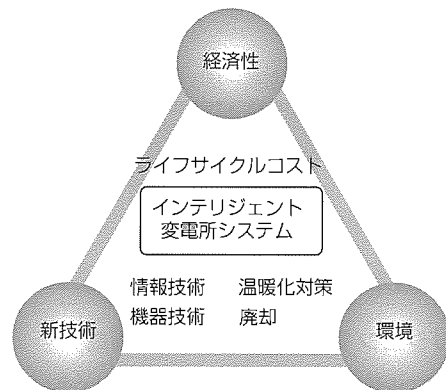


図2. インテリジェント変電所システムの概念

### 2.3 機器・システム技術開発の方向性

これからの変電所システムは経済性・環境適合性を配慮し、技術的にはソフトウェアとハードウェアが統合される。図3に示すように、電力流通システム運用・管理に適した変電所情報システムの構築及び資産運用の最適化を図る高度設備計画・保全システムの構築が必要であり、ネットワーク技術を介して、監視制御・保護と機器レベルの新技術を結び付ける。以下、各項目について概要を述べる。

#### (1) 電力流通システム運用・管理に適した変電所情報システムの構築

広域化・複雑化している電力流通網の運用・保全に関する業務がますます集約化し高度化する動向にあり、業務の迅速な実施には、運用・保全システムに高度な情報を基とする自動化と支援等のシステムが重要となる(図4)。

電力流通網の運用で必要とする監視制御は、変電所の監視制御を通じて遠隔で行う。したがって、遠隔運用の高度化には、変電所情報のデジタル化と、遠隔運用拠点との高度な情報結合が重要となる。インテリジェント変電所システムは、自動化機能などを適切に変電所側に分散させ、システムコストの低減と高度な遠隔運用システムの構築を図ることが肝要である。また、システムには国際レベルの仕様に準拠することが重要となる。

#### (2) 高度設備計画・保全システム

機器の保守・更新を最適に実施するため、機器監視技術を適用したCBMが提唱されている。しかし、ライフサイクルコストを考慮すると、機器監視システムの機能を複合化・統合化してコストダウンを図る必要がある。また、機器監視システムは、変電所の監視制御システムとは独立のシステムとして設置されることが多かった。しかしながら、設備管理・資産管理を総合的に行うには、電力会社全体の設備管理システムとの連携が効果的であり、故障区間の精度向上が求められる。また、復旧操作の迅速化のためには、保護制御情報と機器監視情報の結合が求められる。このために、情報を一元的に管理するシステムの構築が肝要となる。

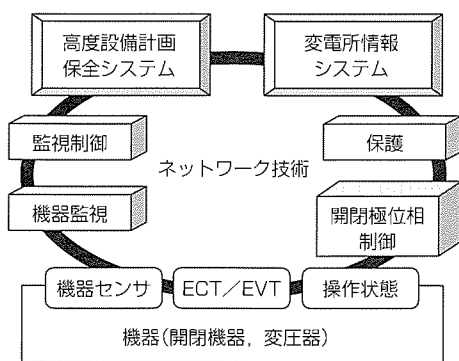


図3. 機器・システム開発の概念

#### (3) 情報システムに適合したセンサ開発(電圧・電流情報を含む)

情報のネットワーク化に対応して変電所内の情報をフルデジタル化することによって変圧器・開閉機器などで機器の1次側、2次側として個別に扱っていたものが統合される。例えばデジタルリレーではリレー動作の演算自体はパワーが不要であるが、リレー入力部まではアナログ信号であるため、CT、VTは数十VAの負担を考慮して設計されてきた。情報のフルデジタル化によって最初からデジタル信号で供給できる場合には、電圧・電流の検出方式もECT/EVT(Electric CT/VT)を適用して小型軽量化を図ることができる。また、構内のネットワークを介してデジタル情報を配信すれば、従来のワイヤ配線を大幅に削減できる。

#### (4) コンパクトな機器開発

従来も機器のコンパクト化を指向してきたが、電力流通システムの効率的運用の時代に機器のコンパクト化は改めて重要な意義を持つ。機器のライフサイクルを考える上で、機器設計の効率化、機器設置、運用期間の短縮が重要であり、機器の単なるコンパクト化にとどまらず、モジュール化、機能の統合化が今後の方向性と考えられる。また環境適合性からもコンパクト化は重要である。

#### (5) 電力システム運用効率化に貢献するシステム開発

機器・システムの有効活用のためには、機器へのストレス軽減も重要な技術となる。開閉機器操作時の周辺機器への電圧・電流ストレス又は開閉機器自体へのストレス軽減

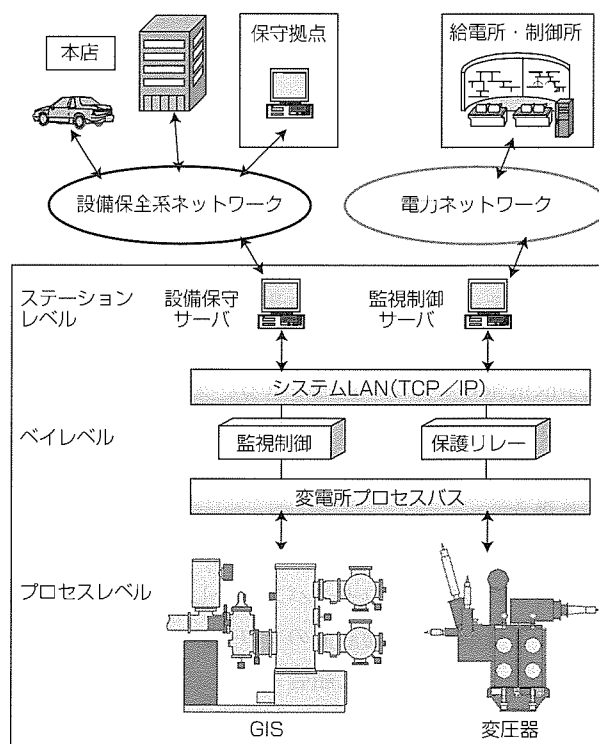


図4. 電力流通システムにおけるネットワーク構成

の方策として、開閉タイミングを制御して電圧・電流の変化を抑制する開閉極位相制御(Control Switching)技術がある。線路投入又は調相設備投入時のストレス抑制に効果がある。この技術は電力品質向上にも貢献する。

### 3. インテリジェント変電所システムの概念

#### 3.1 インテリジェント変電所システムの考え方

制御所などの上位システムが変電所は、“インテリジェントな現地処理機能を持つ小型変電所自動化サーバ”として扱うことができ、各種高度化と自動化機能に関する上位系～変電所のトータルコーディネーションを図り国際レベルの仕様に準拠したものである。

変電所システムは、以下の3階層に大略分類される。

- 変電所全体を扱うステーションレベル
- 送電線等の回線/ユニット単位のベイレベル
- 変電所の一次機器に近いプロセスレベル

この各階層間は、それぞれ必要な情報伝送速度、トポロジーによって適切なネットワークで結合される。

##### 3.1.1 ステーションレベルシステム

変電所の監視制御の中核であり上位系と広域のネットワークで結合され変電所の監視制御、設備運用保全等あらゆる情報は、ステーションレベルのサーバから配信される。そのため、上位システムとの結合には、高度なセキュリティ機能も備えている。

このステーションレベルのサーバは、変電所全体のヒューマンマシン機能も搭載し、有人運転・保守点検時の直接監視制御機能も持っている。さらに、変電所の自動化機能(例えば、自動復旧、故障点標定、自動操作等)を具備できる変電所監視制御システムである。

##### 3.1.2 ベイレベル

変電所の監視制御・保護機能は、装置障害の影響を最小限に抑えてトータルシステム信頼性を高めるため、変電所の機器、回線単位に分割されて構成されベイレベルに設置される。これらのベイコントローラ(BCU)、保護リレー装置は、ステーションレベルのサーバと多重化構成されたステーションLANで結合され、監視制御、設備保全情報、系統事故情報等が上位へ伝達される。また、上位の運用システムからの制御指令や遠隔運用・整定等の指令を受けて、実際の機器とステーションレベルとのインタフェース機能を取り扱う。

ベイコントローラや保護リレー装置は、高速・光伝送技術を適用した変電所プロセスバスを介して、機器とのインタフェース用の機器近傍設置のプロセスI/OノードやRIO(Remote I/O)システムと結合され、デジタルネットワーク技術で機器情報を収集し、制御指令を出力する。したがって、従来の数千本もの制御ケーブルに代わって光ファイバ数本の接続形態となり、大幅なコストダウンが可能な

システムとなる。

##### 3.1.3 プロセスレベル

変電所の一次機器(開閉器、変圧器等)に最も近いレベルに位置し、直接機器とインタフェースする装置でCT/VT等の電圧・電流情報の入力端末、開閉器の制御出力部、各種センサとのインタフェース部が相当する。

このプロセスレベルの装置とベイレベルの装置は従来は数千本の制御ケーブルで接続されていたが、今後の変電所の形態では、光ファイバ等を用いた高速のネットワーク(プロセスレベルLAN)が用いられてくる。その結果、電力機器のきめ細かい情報がデジタル情報として高精度に収集でき、電力システムの高度な運用・保全に有効活用できる。

また、通常変電所建屋に設置される高度な情報制御機能を持つベイコントローラや保護リレーの入出力部を分離し機器近傍に配置することで、建屋スペースの削減、夜間や風雨・雪のときでも装置保守が可能な分散システム構成を適用することができ、さらに設備構築コストの大幅な低減も図ることができる。

このプロセスレベルにはライフサイクル期間の長い一次機器がある既存変電所のリニューアルや高度化アプローチから新設変電所まで様々な高度化アプローチがあり、インテリジェントなRIOシステムからECT/EVTからのデジタル電圧・電流情報などの時間同期機能を持った国際標準IEC準拠の高速プロセスバス(MelPlexus Bus)が適用できる。当然これらは多重化構成も可能で、将来、RIOシステムから変電所プロセスバスシステムへの移行・拡張も容易に可能なアーキテクチャを持っている。

#### 3.2 インテリジェント変電所システム構成

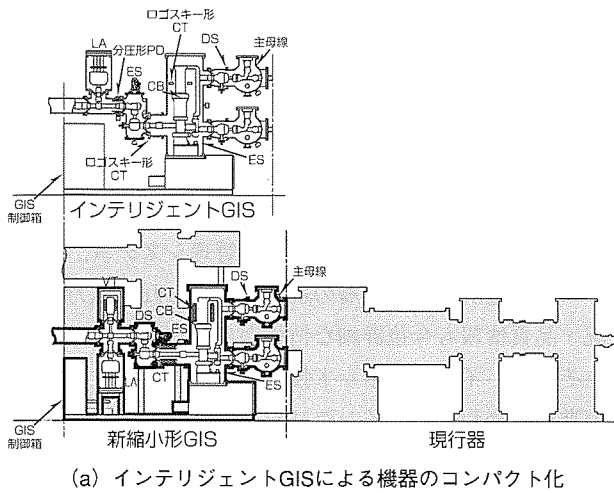
変電所機器と構成電子機器(Intelligent Electric Device: IED)、保護装置、プロセスバス及び変電所自動化システムを組み合わせた統合システムを、新縮小形300kV GISに適用した。外形及び外観を図5に示す。

機器の情報はプロセスレベルでデジタル化され、必要な情報は変電所からコミュニケーションネットワークを通して配信される。変電所の電圧・電流情報、機器の操作状況、異常情報等を要求に応じて加工・発信し、機器の状態に応じて機器の点検時期を適切に決めることによって機器管理コストをトータルで削減できる。

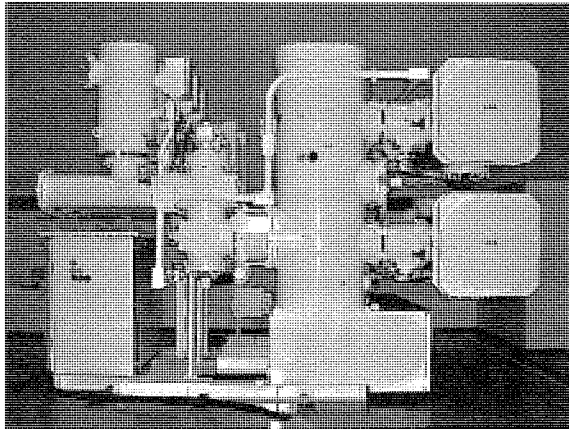
##### (1) デジタルネットワーク対応小型CT/VT

フルデジタル化対応のため、ロゴスキーCT及び分圧形PD(Potential Device)を採用し、CT/PD出力をAD変換してデジタル信号とし、CT/VTの負担の考慮を不要として小型化を達成した。デジタル化された電圧・電流信号を、国際標準の高速汎用ネットワーク技術を適用した“変電所プロセスバス”で監視制御装置・保護装置へ伝送する(図6)。

取付け形態を図7に示す。



(a) インテリジェントGISによる機器のコンパクト化



(b) インテリジェントGISの外観

図5. 300kV GISへの適用形態

(2) 変電所プロセスバス

図4に示す変電所構内のプロセスレベルのネットワークとして、高速の汎用LAN技術を適用した。このネットワークでは、Plug & Play、時間同期機能が可能で、電圧・電流情報、開閉器やセンサ等の情報を自由に配信する。ネットワークは光ファイバで結合され、各装置の耐環境性を高め、装置の配置を機器近傍から制御建屋まで配置の自由度を高めた。今回、保護リレーと組み合わせて動作を確認した。

(3) 開閉極位相制御遮断器開発

遮断器の開閉サージ、変圧器投入時のインラッシュ電流抑制の経済的手段として、遮断器を電圧の特定位相又は電流の特定位相で開閉する開閉極位相制御遮断器を開発した。

(4) 機器センサの小型化

機器の状態監視の情報を設備管理・工事計画に反映するなど、情報を更に活用することによって経営の効率化に貢献できる。機器監視方式として各種のメニューが提案開発されてきたが、経年機器対応を考えると既設機器に容易に取り付けられることが大事であり、既設変電所などで変電所内の情報システムが構築できていない場合に、リモート

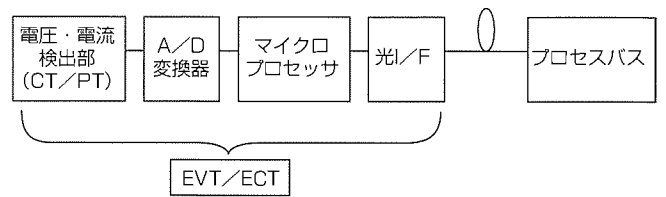


図6. CT/VTの機能図

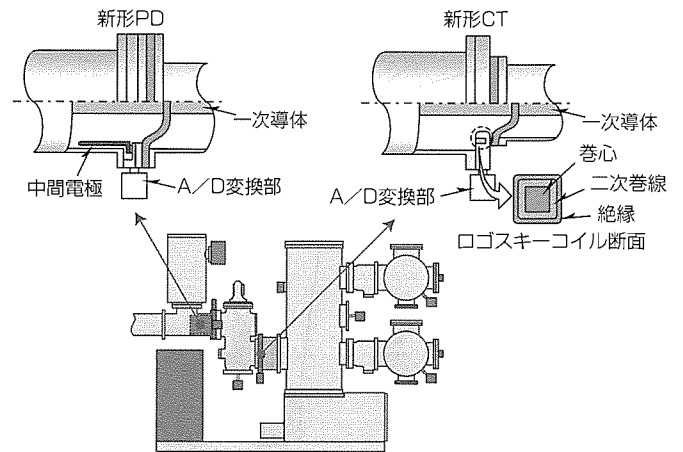


図7. CT/VTの取付け形態

メンテナンスを行えることが必要である。

これらの要求にこたえるため、小型で既設機器にも取付け容易な次のセンサを開発した。

- GIS用ハイブリッドセンサ
- 変圧器用油中ガス分析センサ

(5) 設備管理支援システム

機器モニタリングシステムは、CBM適用によるライフサイクルコスト低減策として有効であるが、さらに機器事故箇所の早期特定にも有効である。事故箇所の認識には、機器図面データなど各種データベースとの結合によって一層効力を発揮する。今回は、モニタリングシステム情報、リレー情報及び図面情報とを有機的に組み合わせ、変電所サーバで機器監視情報をデータベース化する機能とデータを市販のブラウザソフトウェアを用いて表示するデータ生成機能を持つシステムを開発した。図8に示すように、イントラネットを介して遠隔の保守拠点などからCAD図面上への事故区間の標定結果、又はセンサの検出値をブラウザで見ることができ、情報の早期収集と対応の迅速化を図ることができる。また、変圧器の油中ガス分析装置を遠隔から起動して測定値、診断結果を見ることもできる。

(6) ソフトウェアインタロック

従来、機器開閉時などのインタロックは、機械接点の組合せで実現していた。このため、増設等の構成変更時には、補助接点の追加及び結線の追加が必要であった。今回は、RIOによって機器の開閉状況をデジタル情報化すること

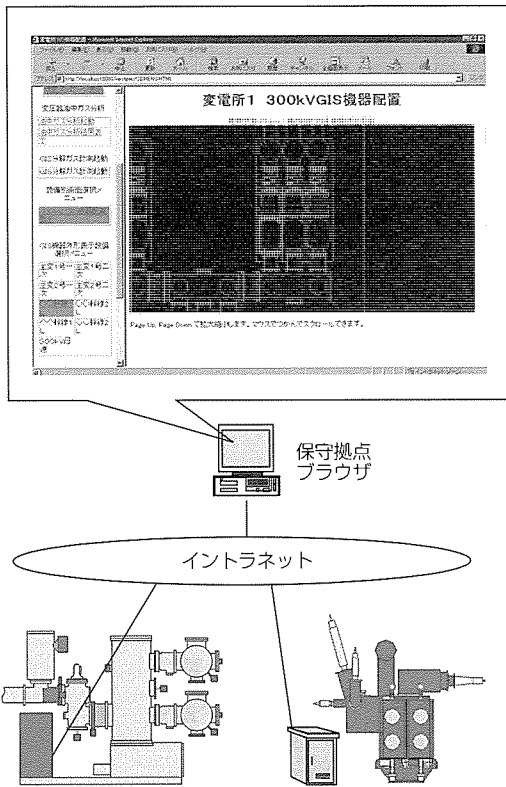


図 8. 事故区間標定図例

により、ソフトウェアでインタロックを構成する方式を採用した。

(7) 電子回路機器の現地制御盤への一括収納

各種の電子回路機器を現地盤に収納することによって結線量の削減と制御建屋スペースの削減を達成できる。

3.3 運用柔軟性

機器の有効活用の方策として、周囲温度条件などを考慮して一時的に過負荷運転を行うダイナミックローディングがCIGREで提案されている。主に変圧器で過負荷運転の可能性が検討されているが、これを実現するためには、負荷の継続時間と周囲条件に対するモデルの構築と、リアルタイムで周囲条件を検出するモニタリングシステムが不可欠である。今回、変圧器のモデル開発とシミュレーション技術によって変圧器の過負荷運転の検討システムを開発した。

4. 今後の動向

今回、イントラネットなどの情報技術とGISや変圧器などの機器技術をトータルで検討したことにより、機器レベルから上位の運用レベルまで一貫した最適なシステムを構築した。電力システムの運用は、アセットマネジメントの観点から、設備管理システム、工事管理システム、経理システムと変電所情報の一層の統合化が図られ、電力の運用状況・品質情報も今後詳細な情報が求められると考えられる。そして、イントラネット技術、ネットワーク技術の今後の進歩に合わせて、インテリジェント変電所システムは、一層効果が出てくる。また、インテリジェント変電所システムで開発した技術を既設機器への部分適用することにより、運用の効率化を図り、既設変電所の高度化を図ることができる。

今回は、GISへの適用を中心に紹介したが、変電所の動向は、開閉機器は世界的に見ればAIS(気中絶縁機器)が多く使用されている。AIS市場への対応として、今回の開発成果をハイブリッド形GISへ適用し、インテリジェント変電所技術の広範な適用を目指している。

参考文献

- (1) 社電気協同研究会：変電設備の点検合理化，電気協同研究，56，No.2，15（2000-10）
- (2) Smith, P. : Aging of the System, Electra, No.193, 42~49（2000-12）
- (3) Wahlstrom, B.H.E., Aoshima, Y., Mino, Y., Mazenc, C. L., Torgerson, D. R., Zommers, A. N. : The Future Substation : A Reflective Approach, CIGRE 23-207（1996）
- (4) Shimato, T., Yonezawa, H., Nakajima, T., Ibuki, K., Yamagiwa, T. : Evaluation of Total Life Cycle Cost of GIS Substation and Development of Portable Diagnosis Devive, CIGRE 23-107（2000）
- (5) Rohsler, H. : Management System for Design, Construction and Maintenance in High-voltage Networks, CIGRE, SC23/39-06（2000）

# 変電所プロセスバスシステム

匹田猛雄\* 曾田圭一\*\*  
大垣健二\* 徳永雄一\*\*  
齋藤成一\*\*

## 要旨

電力自由化等に伴い、電力業界にも競争原理が導入され、電力会社においても更なるコストダウンが求められている。電力会社各社では、電力の供給信頼度を確保しつつ設備構成のスリム化・高稼働化を指向することによって電力システムトータルのコスト削減を図っており、また、IT (Information Technology) を駆使したデジタルシステムに対するニーズが高まっている。

一方、電力自由化の進む欧米では、変電所主機～給電所・制御所間をネットワークで結合するようなシステムが既に実用化段階にあり、IECやIEEE等においても、標準化の動きが活発となっている。

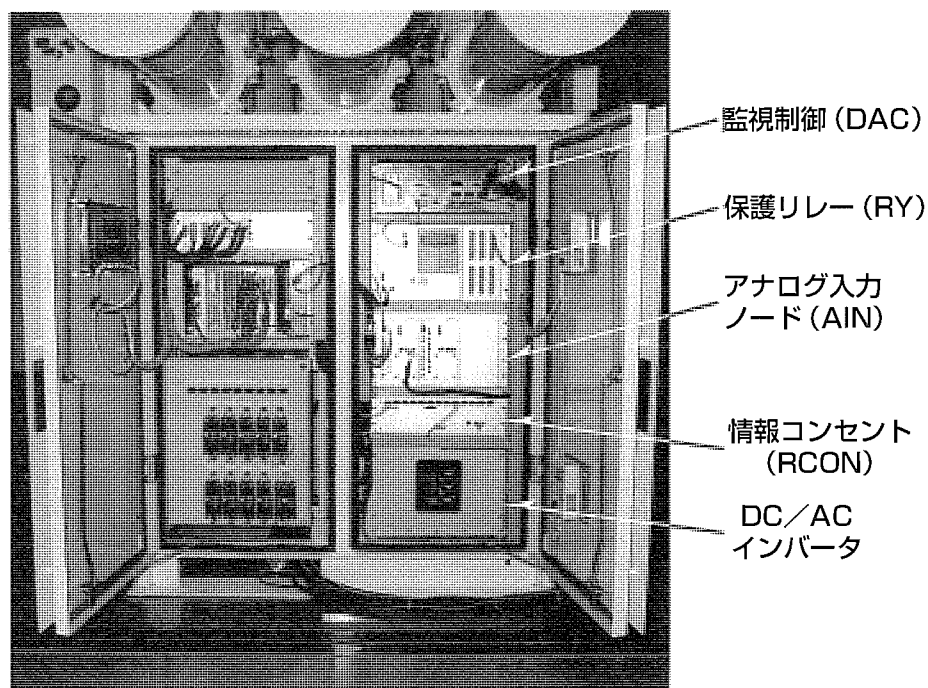
このような状況から、三菱電機では、プロセスレベルのネットワークとして、変電所プロセスバスシステム“Melplexus”を開発し実用化した。変電所プロセスバスシステムは、汎

用のネットワーク技術をベースとしたものであるが、監視制御・保護システムで要求される高精度時刻同期機能やリアルタイム通信機能を具備し、変電所主機の近傍設置を考慮した機器構成となっている。

変電所プロセスバスシステムを適用することにより、GIS (Gas Insulated Switchgear)、変圧器といった変電所主機を小型化できるとともに、変電所構内の制御ケーブルを削減できるため、変電所の建設コストを低減できる。また、電力系統の高度情報化が可能となり、電力システムトータルのコスト低減に寄与できるものと期待する。

本稿では、国際標準化動向及び変電所プロセスバスシステムの概略仕様、構成機器の仕様について紹介する。

(注) “Melplexus” は、三菱電機㈱が商標登録申請中である。



## 変電所プロセスバスシステムの300kV GISへの適用構成例

変電所プロセスバスを構成する電子機器をGISのLCP盤に実装することにより、変電所主機と監視制御・保護リレー装置、さらには制御所・給電所等の上位システムとがデジタルネットワークで結合されることとなり、電力システムシステムの高度情報化が可能となる。また、変電所構内に布設されていた大量のコントロールケーブルを大幅に削減することが可能となり、変電所の建設コストの低減にも寄与する。

1. ま え が き

電力自由化等に伴い、電力業界にも競争原理が導入され、電力会社においても更なるコストダウンが求められている。電力会社各社では、電力の供給信頼度を確保しつつ設備構成のスリム化・高稼働化を指向することにより、電力システムトータルのコスト削減を図っており、また、ITを駆使したデジタルシステムに対するニーズが高まっている。

一方、電力自由化の進む欧米では、変電所主機～給電所・制御所間をデジタルネットワークで結合し、電力システムの情報発信源である変電所内の各設備の情報を取得するようなシステムが既に実用化段階にある。

また、欧州メーカー等が中心となり、IECやIEEE等において、変電所内外のネットワークを標準化する動きが活発となっている。

このような状況から、三菱電機では、汎用のネットワーク技術をベースにIEC規格にも準拠したプロセスレベルのネットワークとして、変電所プロセスバスシステム“Melplexus”を開発し実用化した。

本稿では、国際標準化動向及び変電所プロセスバスシステムのネットワークの概略仕様、構成機器の仕様について述べる。

2. 国際標準化動向

2.1 標準化動向

変電所内のネットワーク標準化は、欧州各国を中心としたIECと米国IEEEでそれぞれ進められている。しかしながら、両規格は共に欧州メーカーが中心となって進めているものであり、細かな点で差異は見られるものの標準化の動向という観点で見た場合の差異はないと言える。本稿では、IEC規格について述べることにする。

IECでは、TC57委員会で変電所構内の通信ネットワークについて標準化を進めており、IEC61850シリーズとして規格化されようとしている。また、TC38委員会では、計器用変成器(CT/VT)と監視制御・保護リレー装置間のデジタルインタフェースについての標準化が進められており、IEC60044-8として規格化されつつある。

両者は互いに協調をとって作業を進めていくことになっており、近年度中に標準化が完了するものと考えられる。

2.2 変電所の階層モデル

IECやIEEE等における標準化作業は、変電所内に設置される各機器・設備を次に示す三つの階層に分類しモデル化するという考え方に基づいて、各階層ごとに標準化・規格化を進めている。

変電所内に設置される各機器・設備は、図1に示すように、GISや変圧器等の変電所主機に対応する“プロセスレベル”、変電所主機の各設備単位・回線単位等に設置され

る監視制御・保護リレー装置に対応する“ベイレベル”，変電所を統括し制御所・給電所等の上位システムとのインタフェースを担う変電所サーバに対応した“ステーションレベル”の3階層にそれぞれ分類される。

2.3 国際規格との対比

変電所プロセスバスに対応する規格として、IECのTC57で審議中であるIEC61850-9-1と、同じくTC38で審議中であるIEC60044-8とがある。

表1に両規格と変電所プロセスバスとの対比を示す。表に示すとおり、変電所プロセスバスは、データリンク層と物理層に関しては、IEC61850-9-1に完全準拠したものとなっている。

また、アプリケーション層においては、IEC61850-9-1は、オブジェクト方式による柔軟なデータ構造を採ってお

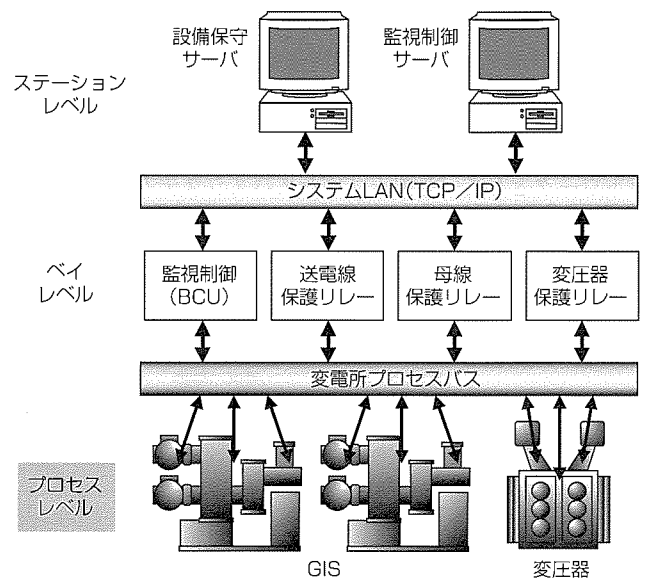


図1. 変電所の階層モデル

表1. 国際規格との対比

		変電所 プロセスバス	IEC TC57 IEC61850	IEC TC38 IEC60044-8
アプリケーション層		独自 (IEC60044-8 のデータ構造 を引用)	オブジェクト方式 (IEC60044-8 のデータ構造 を引用)	独自
プレゼンテーション層		不使用	不使用	不使用
セッション層				
トランスポート層				
ネットワーク層				
データ リンク 層	LLC	IEEE802.2 LLC	IEEE802.2 LLC	IEC60870-5-1 FT3
	MAC	IEEE802.3u (100BASE-FX)	IEEE802.3 (10BASE-FL) 又は IEEE802.3u (100BASE-FX)	独自 (2.5Mbps, Manchester Code)
物理層				



り、オブジェクトの一つとして、IEC60044-8のデータ構造についても引用／定義している。

ただし、これらの規格はいまだ審議中であり、今後の規格策定の動向に注目していく必要がある。

### 3. 変電所プロセスバスの仕様

#### 3.1 要求仕様

プロセスレベルのネットワークに対する要求仕様としては、次の3点が挙げられる。

##### (1) 高精度サンプリングタイミング同期機能

変電所主機から得られる系統の電流・電圧等のアナログデータを監視制御・保護リレー装置等において演算に使用するためには、アナログデータのサンプリング(A/D変換)タイミングの高精度( $\pm 10\mu\text{s}$ 程度)のタイミング同期が必要である。変電所プロセスバスは、従来から送電線保護リレー等で適用されているサンプリング同期方式を応用し、高精度のサンプリングタイミング同期を実現している。

##### (2) 100Mbpsクラス伝送性能

母線保護リレー装置のように当該母線に接続されるすべての回線の情報を収集し演算を実行するような装置に対しては、変電所プロセスバスは、回線(ベイ)単位等に分割して構成するのではなく、一本のネットワークで構築することが必要となる。

このときのデータ量、接続ノード数、伝送遅延時間等を算出すると100Mbpsクラスのネットワークが必要であることが、IECのTC57委員会においても確認されている。

現在実用化されている100Mbpsクラスのネットワークとしては、100BASE-TX/FX, FDDI, ATM等があるが、リアルタイム通信性能や汎用性等を考慮し、100BASE-FX(IEEE802.3u)をベースに開発を行った。

##### (3) 信頼性

変電所建設の低コスト化のためには制御ケーブルの本数を削減し布設コストの低減を図る必要があるが、そのためには、ネットワーク機器を変電所一次機器近傍に設置し、変電所主機と監視制御・保護リレー装置との間はデジタルネットワークによる接続とする必要がある。

言うまでもなく、変電所システムは極めて公共性の高いシステムであることから、変電所プロセスバスシステムを構成する各機器についても高信頼性が必要とされる。

100Mbpsクラスのネットワーク電子機器を変電所主機近傍に設置するためには、部品レベルでの信頼性確保はもちろんのこと、周囲温度環境、GISの開閉時に発生するサージノイズ等を考慮しておく必要がある。

#### 3.2 変電所プロセスバスの仕様

表2に変電所プロセスバスの仕様を示す。前記のとおり、このネットワークは、IEEE802.3u規格をベースにIEC61850-9-1, IEC60044-8の両規格に準拠したものである。

伝送速度100Mbps, 装置間距離2km, 光ファイバ・コネクタ仕様等は、IEEE802.3u規格と全く同一である。

アナログデータのサンプリングについては、国内の最新の保護リレーシステムで標準となっている電気角 $3.75^\circ$ サンプリングとサンプリングタイミング同期誤差 $\pm 10\mu\text{s}$ 以下を実現している。

#### 3.3 構成例

変電所プロセスバスシステムの基本構成例を図2に示す。

図においてRCON(Root Concentrator)/CON(Concentrator)は情報コンセントであり、監視制御・保護リレー等の各装置や各入出力ノードを情報コンセントが具備するプロセスバスI/Fポートに接続することで、各装置・ノードを変電所プロセスバスに加入させることが可能である。

また、RYは保護リレー装置、DACは監視制御装置であり、これらの装置は、一般には、制御建屋内の制御盤室等

表2. 変電所プロセスバスの仕様

項目	仕様
準拠規格	IEEE802.3u, IEC61850-9-1, IEC60044-8
伝送速度	100Mbps
装置間距離	最大2km
フレーム長	86バイト固定長
接続ノード数	最大32台(すべてAIノードとしたとき)
伝送遅延時間	最大2ms
アナログデータサンプリング周波数	電気角 $3.75^\circ$ (5.76kHz/4.8kHz)
サンプリング同期誤差	$\pm 10\mu\text{s}$
物理仕様	光ファイバ(GI62.5/125 $\mu\text{m}$ , 減衰率1.5dB/km) SCコネクタ

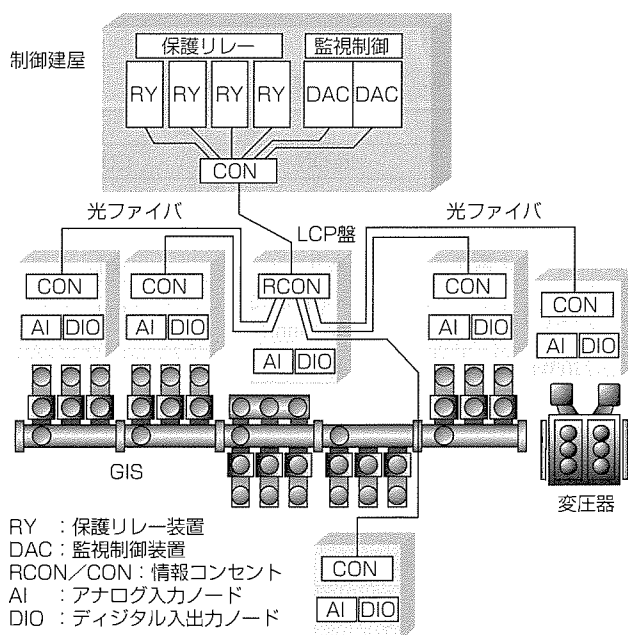


図2. 変電所プロセスバスシステム構成例

に設置されることが多い。

GISや変圧器の近傍には、通常LCP(Local Control Panel)盤と呼ばれる現場制御盤が設置される。したがって、制御ケーブルの数を最小とするためには、これらの設備に対応した変電所プロセスバスの各種ノード、ネットワーク機器は、LCP盤内に設置することがよいと考えられる。

### 3.4 構成要素概要

#### (1) 情報コンセント(RCON/CON)

情報コンセントには、RCONとCONの2種がある。RCONは、前記のサンプリングタイミングの同期制御機能等を具備するネットワークの中核をなす装置であり、変電所プロセスバスシステムにおいて、1台以上設置することが必ず(須)である。CONは、RCONの接続ポートが不足したときのポート拡張用であり、任意に設置して使用することが可能である。

情報コンセントの仕様概要を表3に、機器(RCON)外観を図3に示す。

#### (2) アナログ入力ノード(Analogue Input Node : AIN)

アナログ入力ノード(AIN)は、プロセスバスインタフェースポートを1ポートと、後に示すA/D変換ユニットを接続するためのA/Dインタフェース(光)を9ポート具備する。

AINの主な機能としては、情報コンセント(RCON)から出力されるサンプリングタイミング同期制御信号を受信しA/D変換ユニットに対して同期信号を出力する機能と、A/D変換ユニットでサンプリング(A/D変換)されたアナログデータをIEC準拠のデータフォーマットに編集し変電所プロセスバス経由で保護リレーや監視制御装置等の上位装置へ送信する機能がある。このときのデータの送信周期は、サンプリングタイミングに同期した定周期としてい

表3. 情報コンセントの仕様

項目	仕様	
	RCON	CON
接続ポート数 (プロセスバスI/F)	13ポート	9ポート
SP同期マスタ機能	あり	なし
外形寸法	(W)482×(H)132.5× (D)345 (mm)	同左
消費電力	49W	38W

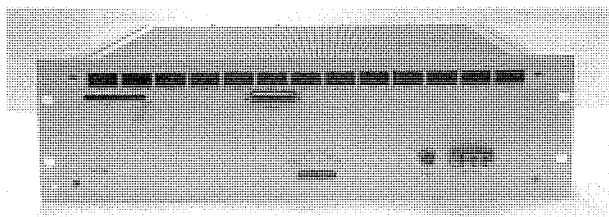


図3. 情報コンセント(RCON)の外観

る。

GIS近傍のLCP盤内への設置を考慮し、電源供給は、DC/ACインバータを使用する。

AINの仕様概要を表4に、機器外観を図4に示す。

#### (3) A/D変換ユニット

A/D変換ユニットは、GISのログスキーCT(Current Transformer)部、分圧形VT(Voltage Transformer)部に直付けされるものであり、AINとの接続のためのA/Dインタフェース(光)を1ポート具備する。

A/D変換ユニットの主な機能としては、AINからのタイミング同期信号に同期してアナログ入力データをA/D変換する機能と、AINに対し、A/Dインタフェースを通じてA/D変換後データを送信する機能がある。

GISへの設置を考慮し、電源供給は、DC/ACインバータを使用する。

A/D変換ユニットの仕様概要を表5に示す。

#### (4) デジタル入出力ノード(Digital Input Output Node : DION)

デジタル入出力ノード(DION)は、プロセスバスインタフェースポートを1ポートと、接点出力(DO)ポートを6点と、接点入力(DI)ポートを12点具備する。

DIONの主な機能としては、上位装置から変電所プロセスバス経由でGIS等に対する制御信号を受信し制御出力を行う機能と、変電所設備等の状態信号等を入力し1ms単

表4. アナログ入力ノードの仕様

項目	仕様
プロセスバス インタフェース	1ポート
アナログ入力 (A/Dインタフェース)	9量(9ポート)
アナログデータ 送信周期	サンプリングタイミングに同期(定周期)
外形寸法	(W)142×(H)265×(D)220 (mm)
消費電力	9W

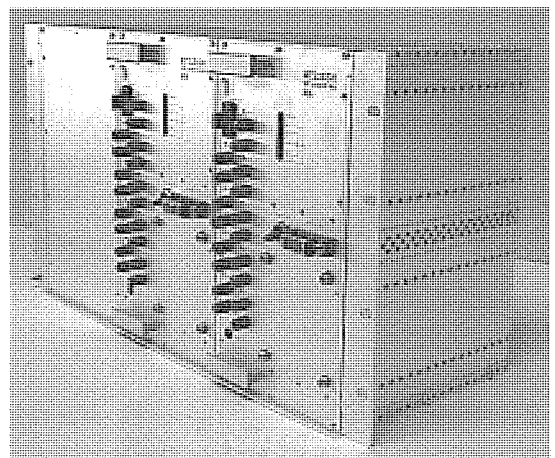


図4. アナログ入力ノードの外観

表 5. A/D変換ユニットの仕様

項目	仕様
入力信号	ロゴスキー形CT×1量又は分圧形VT×1量
A/Dインタフェース	光シリアル(781.25kbps)×1ポート
サンプリング周波数	電気角3.75° (5.76kHz/4.8kHz)
A/D変換精度	14ビット
A/D変換データ送信周期	電気角3.75° 定周期 (208μs/174μs)
外形寸法	(W)225×(H)90×(D)111 (mm)
消費電力	3W

位で状態変化を検出して変電所プロセスバス経由で上位装置へ送信する機能がある。

AIN同様GIS近傍のLCP盤内への設置を考慮し、電源供給は、DC/ACインバータを使用する。

デジタル入出力ノードの仕様概要を表6に、機器外観を図5に示す。

#### 4. サージに対する考慮

前述のとおり、変電所建設コスト低減のために変電所プロセスバスの構成機器をGISや変圧器等の変電所主機近傍に設置する場合には、GIS開閉時等に発生/侵入するサージノイズに対する考慮を十分に施す必要がある。

この変電所プロセスバスシステムの構成機器のうち特にA/D変換ユニットについては、GISのCT/VT部に直付けという極めて厳しい環境に設置される。信号ラインはもちろん、電源供給方式についても考慮が必要である。

##### (1) 信号ラインのサージ対策

A/D変換ユニットとアナログ入力ノード間(=A/Dインタフェース)は、サージノイズの影響を一切受けないようにするために、光ファイバによるシリアル接続とする。データの健全性チェックは、CRC(Cyclic Redundancy Check)によって行う。

デジタル入出力ノードの入出力回路については、主機インタフェースが従来から変更されないため、従来どおり、補助リレーによってインタフェースを行う。

##### (2) 電源ラインのサージ対策

もう一方のノイズ侵入経路である電源ラインについては、変電所内の設備に供給される電源は蓄電池からのDC110V供給が一般的である。

このことから、DC/ACインバータを設置し、DC/ACインバータ内の高耐圧絶縁トランスによって絶縁を行い、電子機器の電源ラインにサージノイズが移行しないような方式とした。

DC/ACインバータの仕様概要を表7に、機器外観を図6に示す。

表 6. デジタル入出力ノードの仕様

項目	仕様	
プロセスインタフェース	1ポート	
DO部	出力方式	トランジスタ出力、フォトカプラ絶縁
	出力点数	6点
	コモン	全点独立
DI部	接点仕様	無電圧接点入力
	入力点数	12点
	絶縁	フォトカプラ絶縁
	コモン	全点独立
SOE*	あり(分解能1ms)	
状態データ送信周期	1ms(定周期)	
絶縁耐圧	AC2kV, 1分間	
インパルス耐圧	5kV(回路相互間, 一次-二次間)	
外形寸法	(W)142×(H)265×(D)220 (mm)	
消費電力	15W	

\*SOE: Sequence of Event

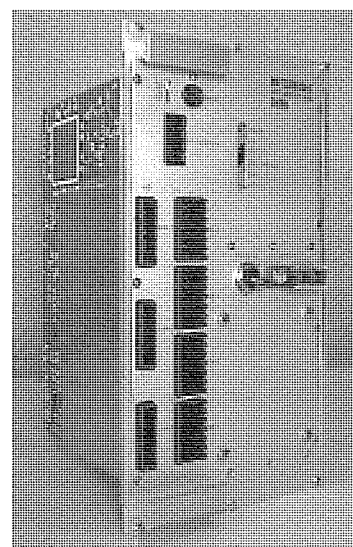


図 5. デジタル入出力ノードの外観

#### 5. 変電所プロセスバスの実用化

上記各種構成機器で構成される変電所プロセスバスシステムを開発し、実際に変電所主機と組み合わせて機能試験・耐環境試験を完了し、実用化した(図7)。

この変電所プロセスバスシステムを適用することでGISや変圧器等の変電所主機~制御所・給電所システム等の上位システム間がデジタルネットワークによって結合され、電力システムシステムの高度情報化が可能となる。

これにより、上位の計算機システムのデジタルネットワークを使用して変電所機器から大量の情報を直接取得することが可能となる。また、取得した情報を有効に活用することにより、電力システムの運用を効率化し、トータルコストの低減を図ることが可能となる。

なお、現在標準化作業が進行中である国際規格(IEC61850シリーズ)の規格化が完了次第、国際規格に完

表7. DC/ACインバータの仕様

項目	仕様
入力電圧	DC110V ± 30%
出力電圧	AC100V
出力電流	最大0.6A
絶縁耐圧	AC2kV, 1分間
インパルス耐圧	20kV
外形寸法	(W)213×(H)265×(D)220 (mm)
消費電力	9W

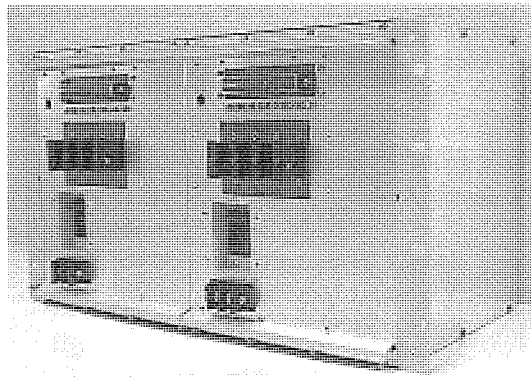


図6. DC/ACインバータの外観

全準拠させる予定である。

## 6. むすび

以上、変電所プロセスバスシステムの構成機器仕様及び構成例を示し、実用化のめどが立ったことを紹介した。変電所プロセスバスシステムは、電力システムシステムの高度情報化、電力システムのトータルコスト低減に寄与していただけるものと期待する。

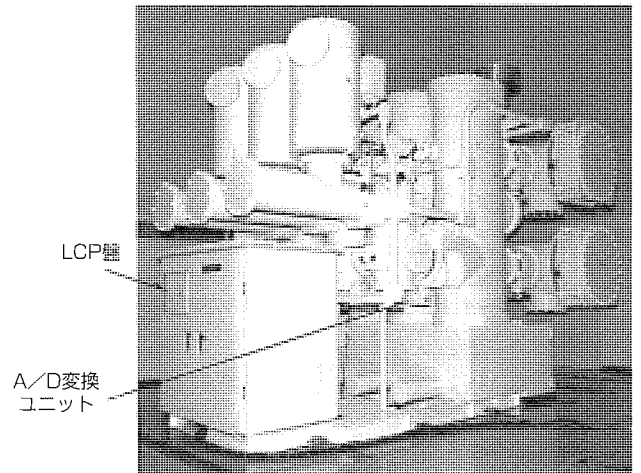
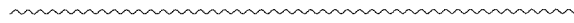


図7. 変電所プロセスバスシステムの実用化例

最後に、このシステムの開発に数々のご協力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- (1) 大垣健二, 羽馬洋之, 匹田猛雄, 下村哲郎: 新しいインテリジェント変電所システムの提案, 平成12年電気学会全国大会, 6-170 (2000)
- (2) Engler, F., Jaussi, A. W.: Intelligent Substation Automation Monitoring and Diagnostics in HV Switchgear Installations, ABB Review, 19~26 (1998-3)
- (3) Kristofersson, O., Cederblad, L., Adolfsson, M.: IAIS Concept for Intelligent Substations, ABB Review, 4~11 (1997-4)



# インテリジェントGISの 開発と実用性能検証

前田恭宏\* 羽馬洋之\*\*  
青木寛英\* 藤田重人\*\*\*  
日比野敦夫\*

## 要 旨

電力事業の規制緩和による市場競争の激化に伴い、初期コストのみならず、運用コスト及び廃却コストを含めたライフサイクルコスト低減への要求が高まっている。この要求に対し、設備構成の簡素化・高効率化を目的とした、電力システム構成機器のデジタルシステムへの移行、電力システムへのIT (Information Technology) 導入が望まれている。このような背景から、三菱電機では、デジタルシステムに対応した300kVインテリジェントGISを開発した。

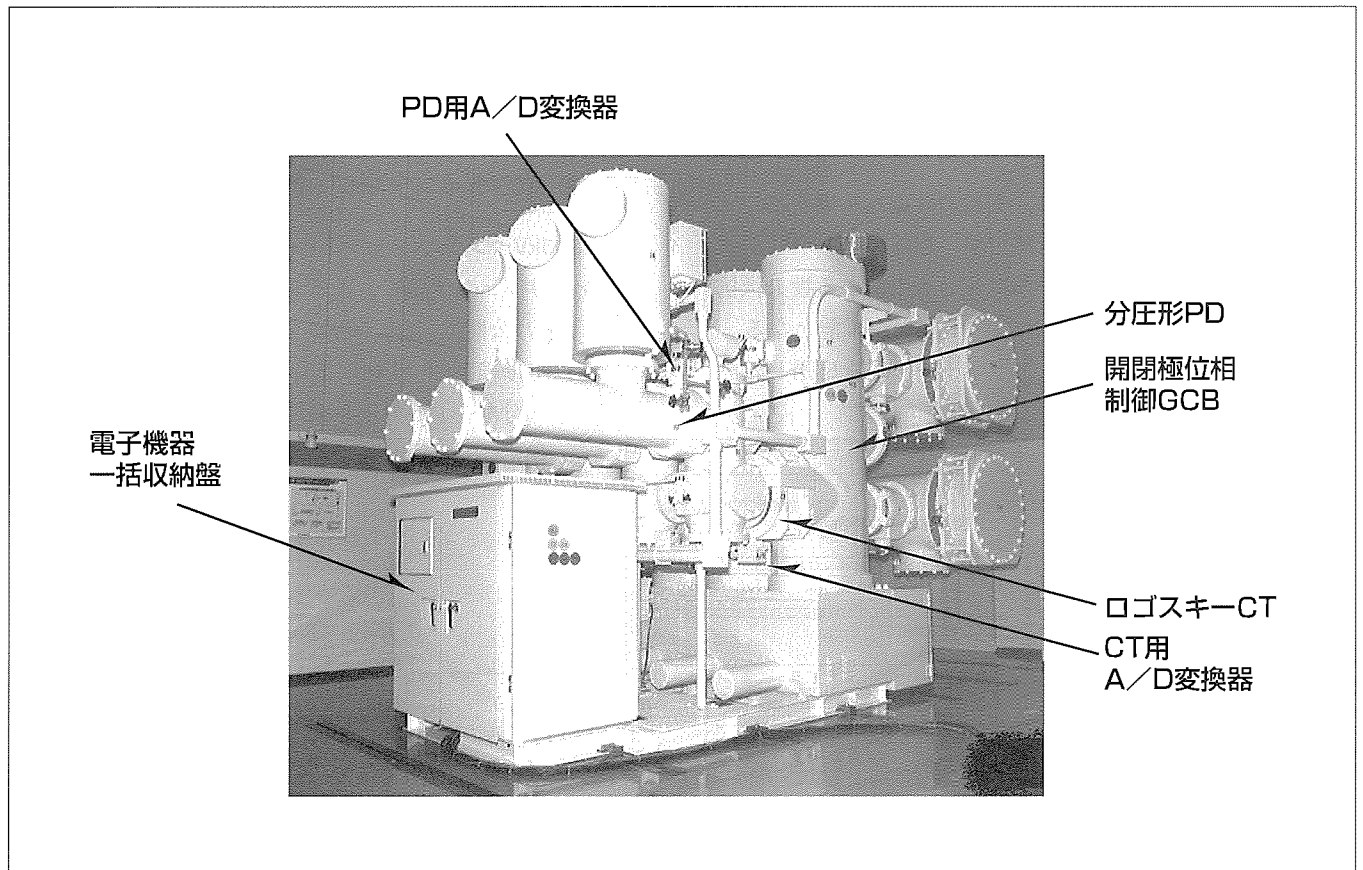
インテリジェントGISシステムの目的は、デジタルシステムの導入によるライフサイクルコストの低減である。これを達成するために、電子機器一括収納盤、開閉極位相制御GCB、ログスキーCT (Current Transformer) / 分圧

形PD (Potential Device)、ハイブリッドセンサなどの最新技術を適用した。

GIS及び構成電子機器は、構内LAN技術活用によって変電所自動化システムと結合する。機器の情報は、プロセスレベルでデジタル化され、変電所からコミュニケーションネットワークを通して上位系へと伝送される。これにより、給電・制御所や設備保守拠点では、各変電所からの情報を一元管理でき、高度な運用・保守が可能となる。

実用性能に関しては、電子機器の適用において課題となる耐サージ性能と耐温度上昇性能に関して検証試験を実施し、実用性能上ともに問題のないことを確認した。

本稿では、上記の項目について詳細に述べる。



## 300kVインテリジェントGISの外観

2000年3月に開催された電力流通システム展示会に出展されたときの300kVインテリジェントGISの外観を示す。変電所操作卓を模擬した端末パソコンからの機器操作、開閉極位相制御、事故発生時の遮断器トリップ、ハイブリッドセンサによる事故点標定などのデモンストレーションを行った。

## 1. ま え が き

電力事業の規制緩和による市場競争の激化に伴い、初期コストのみならず、運用コスト及び廃却コストを含めたライフサイクルコスト低減への要求が高まっている。この要求に対し、設備構成の簡素化・高効率化を目的とした、電力システム構成機器のデジタルシステムへの移行、電力システムへのIT導入が望まれている。これらの要求にこたえるため、三菱電機では、電子機器一括収納制御盤、開閉極位相制御GCB、新形CT/PT、ハイブリッドセンサなどで構成される300kVインテリジェントGISを開発した<sup>(1)~(3)</sup>。

この300kVインテリジェントGISには機器情報を上位系へ伝送するために電子機器がGISの近傍に設置されるので、構成電子機器の耐サージ性能や耐屋外環境性能といった実用性能が課題となる。

本稿では、300kVインテリジェントGISシステムの構成を示し、構成機器の仕様・機能の概要について紹介する。さらに、実使用状態を模擬し屋外環境でのシステムの実用性能検証を実施したのでその結果を述べる。

## 2. インテリジェントGISシステムの構成

### 2.1 システム構成の考え方

インテリジェントGISシステムは、図1に示すように、デジタル技術導入によるライフサイクルコストの低減を目的としている。ライフサイクルコストとしては、主に初期コスト、運用コスト、廃却コストの3要素を取り上げている。初期コストに対しては、機器の大幅な小型化に伴う省スペース化、GIS据付け工期短縮、機器のインテリジェント化(例えば、開閉極位相制御GCB適用による投入抵抗や避雷器の省略)などにより、コスト低減が可能となる。運用コストについては、イントラネット技術を応用した設

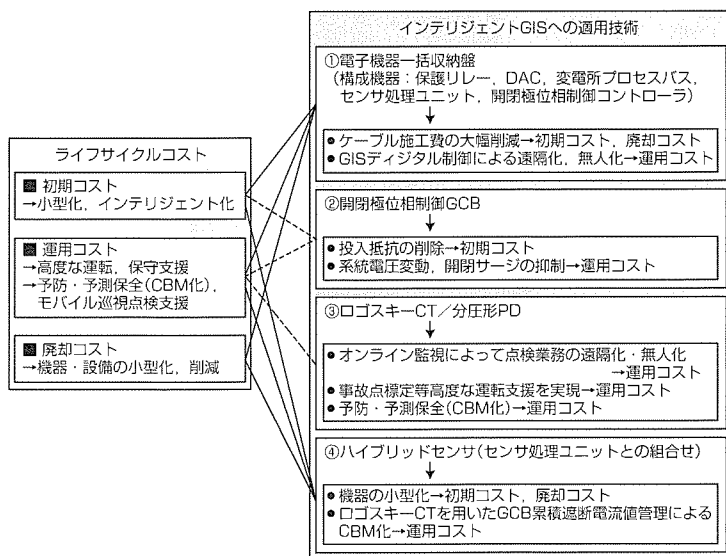


図1. ライフサイクルコスト低減のための取組

備計画/保全管理システムの導入による設備運用情報収集や点検業務の遠隔化(モバイル巡視点検支援)、さらに予防・予測保全をこれまでの定期的に保守するTBM(Time Based Maintenance)からCBM(Condition Based Maintenance)、RCM(Reliability Centered Maintenance)への移行によって業務の省力化や高効率化が可能となり、コスト低減に結び付く。ここでCBMは、設備情報を監視し機器状態に応じた保守であり、RCMは、さらに機器の重要度を考慮した保守のことである。廃却コストに対しては、GISの大幅な小型化とケーブル施工本数の減少により、GIS廃却量が減少し、コスト低減が実現できる。

また、小型化によるSF<sub>6</sub>ガス使用量削減、及び大気中へのSF<sub>6</sub>ガス放出抑制による変電設備の環境調和が可能となる。

### 2.2 システム構成

上記の考えに基づき、変電所機器と構成電子機器(Intelligent Electric Device: IED)の高機能化を図り、構内LAN技術活用で変電所自動化システムと結合する変電所システムとした。システム構成を図2に示す。機器の情報はプロセスレベルでデジタル化され、必要な情報は変電所からコミュニケーションネットワークを通して配信される。変電所の電圧・電流情報、機器の動作状況、異常情報などを、要求に応じて加工し、上位系ネットワークへ伝送する。これにより、給電・制御所や設備保守拠点では各変電所からの情報を一元管理でき、高度な運用・保守が可能となる。

## 3. 300kVインテリジェントGISの機器構成

### 3.1 300kVインテリジェントGISの寸法・構造

インテリジェントGISシステムは、新縮小形300kV GIS(1999年11月公開形式試験実施)を基本として開発した。このGISは主母線三相一括形(主母線のみ三相一括形、他は相分離形)であり、据付け面積で従来の全三相一括形GISの約37%に縮小化が達成されている。こ

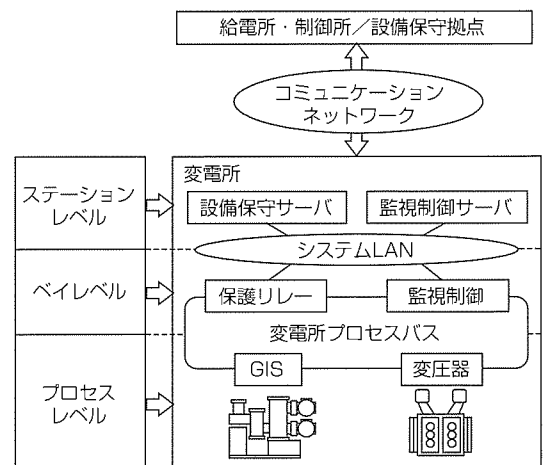


図2. インテリジェント変電所システムの構成

の新縮小形GISに、従来のCT/VT(Voltage Transformer)に代えて、デジタル信号対応で超小型のロゴスキーCT/分圧形PDを適用することにより、GIS本体が更に小型化され、据付け面積で従来機器の32%となった。図3に300kVインテリジェントGISの寸法・構造比較を示す。また、GISの主な仕様を表1に示す。

### 3.2 300kVインテリジェントGISの構成機器

#### 3.2.1 電子機器一括収納盤

GISのデジタル制御・保護を実現するに当たり電子機器のGIS近傍への配置が耐サージ対策や耐候性等の面から大きな課題であったが、これらの問題に対し適切な対策をとることにより、300kVインテリジェントGISにおいて、デジタル保護リレーやDAC(Data Acquisition Control)等の電子機器を現地制御盤(Local Control Panel:LCP)へ一括収納することが可能となった。変電所プロセスバス用電子機器に関しては、高耐サージ性能を持つDC/ACインバータを使用することによって、電源ラインから侵入するサージ電圧を抑制した。電子機器一括収納盤きょう(筐)体に関しては、電子機器を収納するために防じん(塵)・防湿を考慮して完全密閉盤とし、また、日射の影響による盤内部の温度上昇を抑制するために筐体表面に日除け板を設置した。上記対策によって盤を本体ユニットベース上に設置することが可能となり、結線量の削減、制御建屋スペースの削減、盤の一体輸送によるコスト削減等が達成された。

#### 3.2.2 開閉極位相制御GCB

開閉極位相制御装置(Synchronous Switching Controller:SSC)を適用し、目標とする電圧・電流位相にお

いてGCBを開閉極させることで、過電圧・突入電流を抑制することができる。これにより、投入抵抗と避雷器の削減、コンタクト消耗低減による点検周期の延長、過電圧・系統電圧変動抑制、保護リレーと電子機器の誤動作防止等が実現できる。

#### 3.2.3 ロゴスキーCT/分圧形PD

制御・保護のデジタル化による二次側機器の低負担化によって、デジタル信号対応の超小型ロゴスキーCT/分圧形PDの適用が可能となった。これにより、従来のCT/VTを適用する場合と比較して、機器全体の大幅な小型化、省スペース化が達成された。

また、A/D変換器の耐サージ性能向上により、GISタンクへの直付けが可能となった。ロゴスキーCT/分圧形PDからの出力信号は、GISに直付けされたA/D変換器でデジタル/光信号に変換され、上位系へと伝送される。これにより、周囲からのノイズの影響を最低限に抑えることができる。

#### 3.2.4 ハイブリッドセンサMahs (Mitsubishi Advanced Hybrid Sensor) $\mu$ -Cube-I

ハイブリッドセンサは、ガス圧力センサ、温度センサ、分解ガスセンサをコンパクトに一体化したものである。ガス圧センサと温度センサによってガスリーク監視ができ、分解ガスセンサによって主回路接触不良等の通電異常が監視できるため、CBMが実現できる。これにより、巡視点検の省力化と高度化、及び定期点検の延長など、ライフサイクルコスト低減が可能となる。

また万一の内部事故発生時に、ガス圧力センサを用いて事故点標定ができ、ガス放出をすることなく迅速な事故部位の確認も可能である。

あわせて、従来の連成計、ガス密度スイッチ、ガスチェックが不要となる。

### 4. システムの実用性能検証

300kVインテリジェントGISでは、構成する電子機器を機器に直付けにしたり電子機器一括収納盤内に収納するため、耐サージ性能、耐候性能が問題となる。この章では、その中でも特に重要な耐DSサージ性能と耐温度上昇性能に着目して300kVインテリジェントGISの検証試験を実施したので、その結果を述べる。

#### 4.1 検証の形態

上記で紹介したデジタル対応機器が搭載されている300kVインテリジェントGISでシステムの実用性能検証を実施した。試験場には、実変電所の接地系を模擬するため、供試GIS下部に主メッシュ(10mピッチ)及び補助メッシュ(2mピッチ)が敷設してある。また、日射の影響が厳しくなるように、電子機器一括収納盤が南向きとなるようにGISを配置した。図4に屋外検証試験状況を、図5に電子

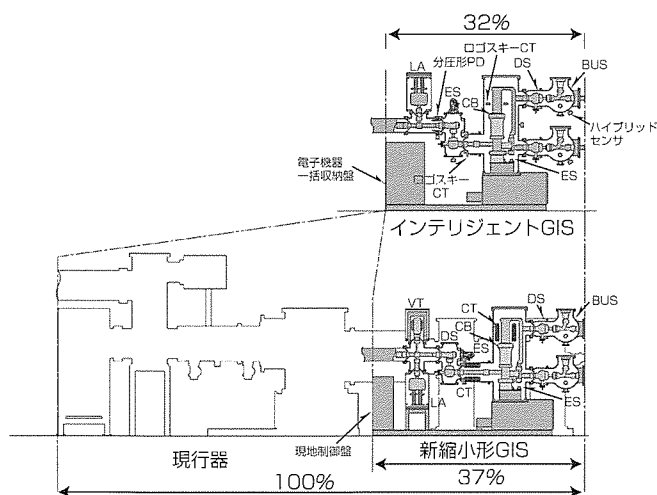


図3. 300kVインテリジェントGISと他機種との比較

表1. 機器の定格・仕様

GIS	
定格電圧 (kV)	300
定格電流 (A)	4,000
定格周波数 (Hz)	50/60
定格ガス圧力 (MPa)	0.5

機器一括収納盤内の電子機器配置を、図6に検証試験システム及び各項目に対する操作内容を示す。これらの図の条件によって各システムを操作させ、測定室内の各パソコンでその健全性の確認を実施した。システムの健全性を確認するため、それぞれの電子機器に検証用のパソコンを接続させている。

4.2 検証条件と結果

4.2.1 耐サージ性能

300kV GIS用DSによる進み小電流開閉試験を実施し、構成電気機器のDSサージに対する健全性の確認を実施した。

(1) 検証条件

試験印加電圧は、300kV GISの最大DS極間放電電圧2 p.u.(=300kV/√3×√2×2=490kV)が発生するまで上昇させ、50kV r.m.s.から50kV r.m.s.ずつ上昇させた。電源印加側(Bsg)と負荷側の静電容量比は十分に大きく、過電圧倍

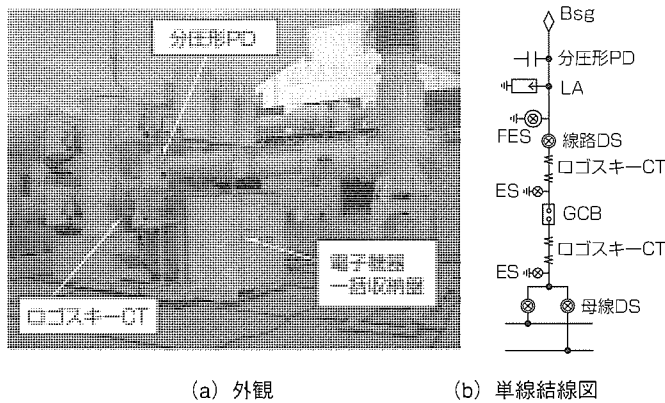
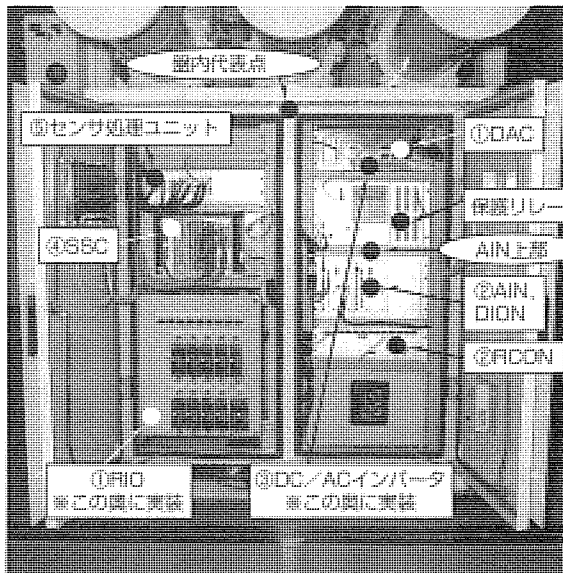


図4. 300kVインテリジェントGIS



- <LCP収納電子機器概要>
- ①DAC, RIO: GISのデジタル制御機器
  - ②AIN, RCON, DION: 変電所プロセスバス機器
  - ③DC/ACインバータ: AIN, RCON, A/D変換器の動作電源供給機器
  - ④SSC: 開閉極位相制御装置
  - ⑤センサ処理ユニット: センサ処理機器

図5. 電子機器一括収納盤内の電子機器配置

数2.5p.u.となっている。実システムを模擬した接地メッシュを敷設した。また、実使用状態を模擬し、電圧印加試験中、各電子機器はアイドル状態とした。

測定には、バッテリー駆動の光ファイバインテリジェントシステムを用いた。測定点は、各電子機器電気信号ライン及び電源ラインである。

各電子機器の健全性確認は、DS開閉ごとに図6の検証試験システムを用いて実施した。

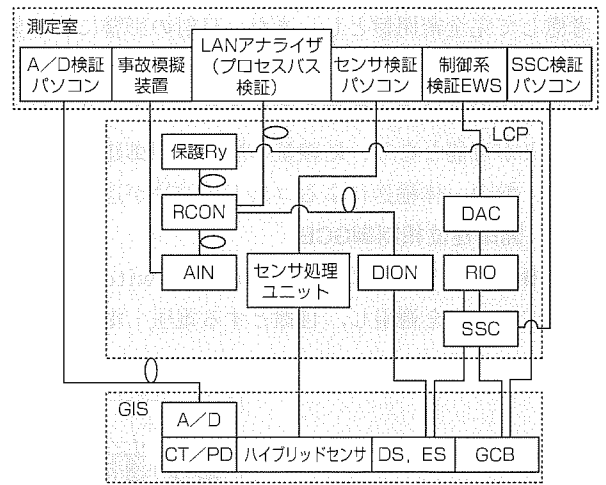
(2) 結果

GIS直付けのためDSサージの影響が最も大きいログスキーCT/分圧形PD部の測定結果につき述べる。

図7に測定点を、図8に測定したサージ波形を示す。同図から、その周波数は10MHz程度以上であり、A/D変換器へ急しゅん(峻)なサージが侵入していることが分かる。

表2に健全性確認結果を示す。各電子機器とも誤動作なく、結果良好で、異常のないことを確認した。

図9に、各測定点における、DS極間放電電圧に対する発生サージ電圧を示す。図から、発生サージ電圧はDS極



項目	操作内容
制御システム	EWSからDAC, RIOを経由してDSを操作
保護システム	事故模擬信号入力装置から事故模擬信号をA/D変換器に入力し、遮断器をトリップさせる
機器監視システム	温度測定中の通信状態、及び圧力センサ、温度センサ計測値を確認
開閉極位相制御GCB	EWSからDAC, RIO, SSCを経由してGCBを操作

図6. 検証試験システム

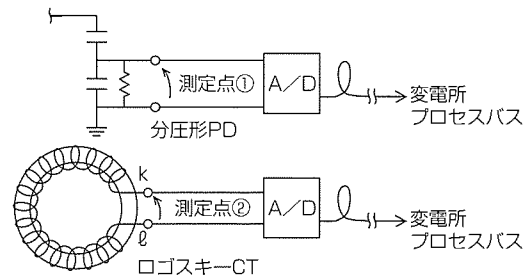


図7. 測定点



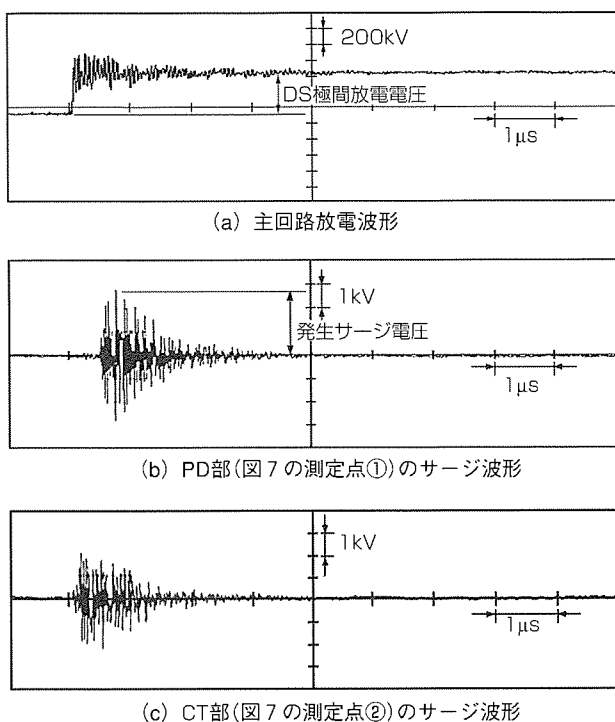


図8. 試験結果

表2. 健全性確認結果

項目	対象機器	耐サージ性能	耐温度上昇性能
制御系統	DAC, RIO	異常なし	異常なし
保護系統	保護リレー, RCON, AIN	異常なし	異常なし
機器監視関係	ハイブリッドセンサ, センサ処理ユニット	異常なし	異常なし
開閉極位相制御	DAC, RIO, SSC	異常なし	異常なし

間放電電圧にはほぼ比例することが分かる。また、CT信号線間に比べ、PD信号線間の発生サージ電圧が2倍程度以上大きい。これは分圧形PD信号線アース側の電位変動によるものと考えられ、CT信号線間では、このアースの電位変動に依存しないためPD部に比べ低い値になっているものと考えられる。上述のDS極間放電電圧と各部発生サージ電圧の比例関係を用いて、550kV GISの最大DS極間放電電圧 2 p.u.(=550kV/√3×√2×2=898kV)発生時の各測定点の発生サージ電圧を推定した。推定値の最大はPD信号線間の8kVであり、A/D変換器の耐サージ電圧設計値15kVに比べ十分低いレベルである。

#### 4.2.2 耐温度性能

電子機器一括収納盤には電子機器が実装されるため、防塵・防湿を考慮して完全密閉盤とした。したがって、盤周囲の温度変化及び電子機器の消費電力による温度上昇が予想される。盤内の温度上昇値を把握しシステムが熱的に健全であることを確認するため、盤内外各点の温度測定、解析及びシステムの健全性確認を実施した。

##### (1) 設計基準(規格)

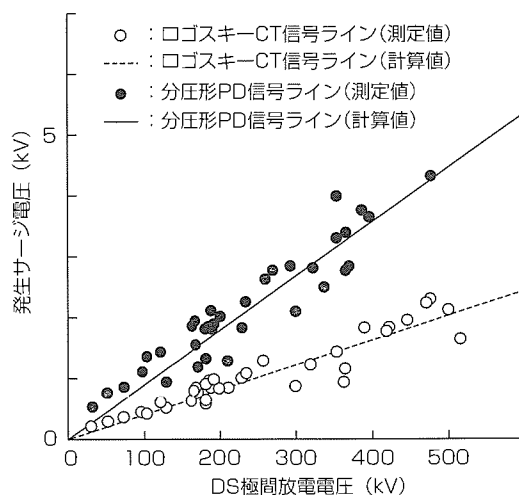


図9. 発生サージ電圧

変電所で使用される電子機器単体の使用周囲温度に関しては、IEC60255-6又は電力用品規格B402を参考とすることが出来る(表3)。しかし、電子機器一括収納盤のように電子機器を密集させた環境ではLCP内に温度分布が発生し、上記規格の基準測定点のみによる熱設計は必ずしも効率的とは言えない。そこで、現在標準化作業が進行中であるIEC61850-3を参考とし、盤内の代表点温度を熱設計基準の一つとした。この規格では、変電所で使用される電子機器に許容される標準的な温度範囲は-25~+55℃(Class C2)と規定している。したがって、盤内の代表点温度がこの温度範囲に収まるような熱設計が必要となる。ここで、盤内の代表点は、収納電子機器からの発熱の影響を受けにくくかつ温度が最も高くなると考えられる上部中央付近に設定した。

##### (2) 検証条件

気温上昇が最も過酷である夏季(2000年8月22日~8月25日)に連続温度測定を行った。

測定点は、約300点(周囲空気、地表、電子機器一括収納盤筐体表面、盤内空気、各電子機器筐体周辺等)である。

測定方法は、実装電子機器電源をすべて投入し、熱電対を測定箇所固定し、得られた信号をA/D変換してパソコンに取り込んだ。

##### (3) 解析条件

解析には熱回路網法を用いた。熱回路網法とは、物体の各部を幾つかのブロックに分割してノードを設定し、そのノードに熱容量を集中させ、各ノード間を熱抵抗で結び、各ノードで成立する熱平衡の方程式を解く方法である。

解析には①周囲温度、②地表温度、③日射量、④電子機器発熱量、⑤周囲風速、の実測値を用いた。

用いた解析ソフトウェアは、プリポストは“Therf-BENCH”(当社の設計システム技術センターが開発)、ソルバは“MelTHERFY”(当社の先端技術総合研究所が開発)

表3. 電子機器使用温度に関する規格

比較項目	規格	IEC 61850-3	IEC 60255-6	電力用品規格 B-402
対象電子機器		変電所内使用 電子機器一般	デジタル 保護リレー	デジタル 保護リレー
基準温度範囲		-25~+55℃	-25~+55℃	温度上昇限度 25℃
基準測定点		LCP内代表点	周囲温度	ユニット上部

である。

図10に、この解析で作成した熱回路網を示す。

(4) 結果

図11に、2000年8月24日における実測及び解析結果を示す。この日の最高周囲温度は35.4℃であり、盤内代表点の最高温度は47.2℃、AIN上部の最高温度は51.5℃であった。AINは実装電子機器の中で最も単位体積当たりの発熱量が大きく温度上昇値も最も高かった。

周囲温度が40℃(IEC517/JEC2350で定められているGIS使用環境の最高周囲温度)まで上昇したと仮定すると、盤内代表点温度は51.8℃まで上昇すると予想される。これは設計基準値である55℃を下回り、約6%の裕度が存在する。

実測値と解析値を比較すると、盤内代表点温度に関しては-6.2~+3.4%、AIN上部に関しては-3.5~+2.9%の誤差が存在する。したがって、この解析ソフトウェアを用いた熱設計を行う際には±10%程度の裕度を見込まなければならない。妥当な裕度については、今後多くの実測結果を基に検討を実施する必要がある。

また、日中の高温時(14:00)に各電子機器を動作させ、誤動作のないことを確認した。操作内容と結果を表2に示す。

以上の結果から、システムが温度上昇に関して健全であることが確認できた。また、電子機器を収納する盤を設計するに当たり解析ソフトウェアを用いることによって以下の変数を考慮に入れた熱設計を行えるめどを得た。

- 周囲温度変化
- 日射量変化
- 各電子機器の消費電力

上記の変数を考慮することにより、温度上昇対策の最適化、電子機器の誤動作防止、長寿命化が図れるとともに、ソフトウェアの活用による設計作業の効率化と、それに伴う設計コストの低減を期待することができる。

5. む す び

以上、300kVインテリジェントGISシステムの基本的な考え方、及び機器構成について紹介した。

また、耐サージ性能、耐温度上昇性能など実用性能検証

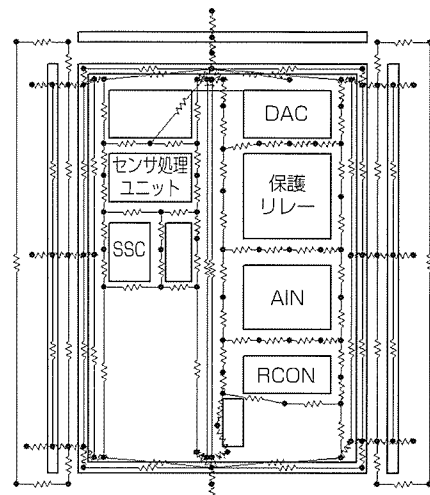


図10. 熱回路網

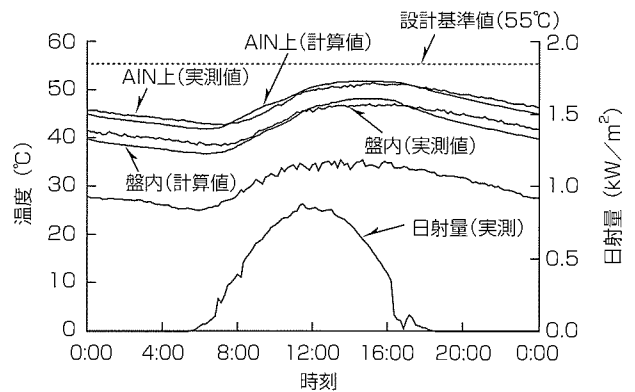


図11. 温度測定・解析結果

を実施し、製品化のめどを得た。

今後、インテリジェントGISシステムの適用がIT導入とともに世の中の主流となり、変電所機器ひいては電力システムのライフサイクルコスト低減、及び高度な運用に大いに貢献するものと期待する。

参考文献

- (1) 大垣健二, 羽馬洋之, 匹田猛雄, 下村哲朗: 新しいインテリジェント変電所システムの提案, 平成12年電気学会全国大会, 6-170 (2000)
- (2) 和田耕太郎, 香山治彦, 伊藤弘基, 平位隆史, 金子精二, 日高幹雄, 杉山 勉: 145kV開閉極位相制御遮断器の開発, 平成12年電気学会全国大会, 6-237 (2000)
- (3) 谷口裕章, 前田恭宏, 岸本一雄, 越智直輝, 羽馬洋之, 石原正彦: インテリジェント変電所システム用新形CT, PDの開発, 平成12年電気学会電力・エネルギー部門大会, 568 (2000)

# 開閉極位相制御遮断器

香山治彦\* 伊藤弘基\*\*  
林 孝典\* 蔦田広幸\*\*\*  
杉山 勉\*

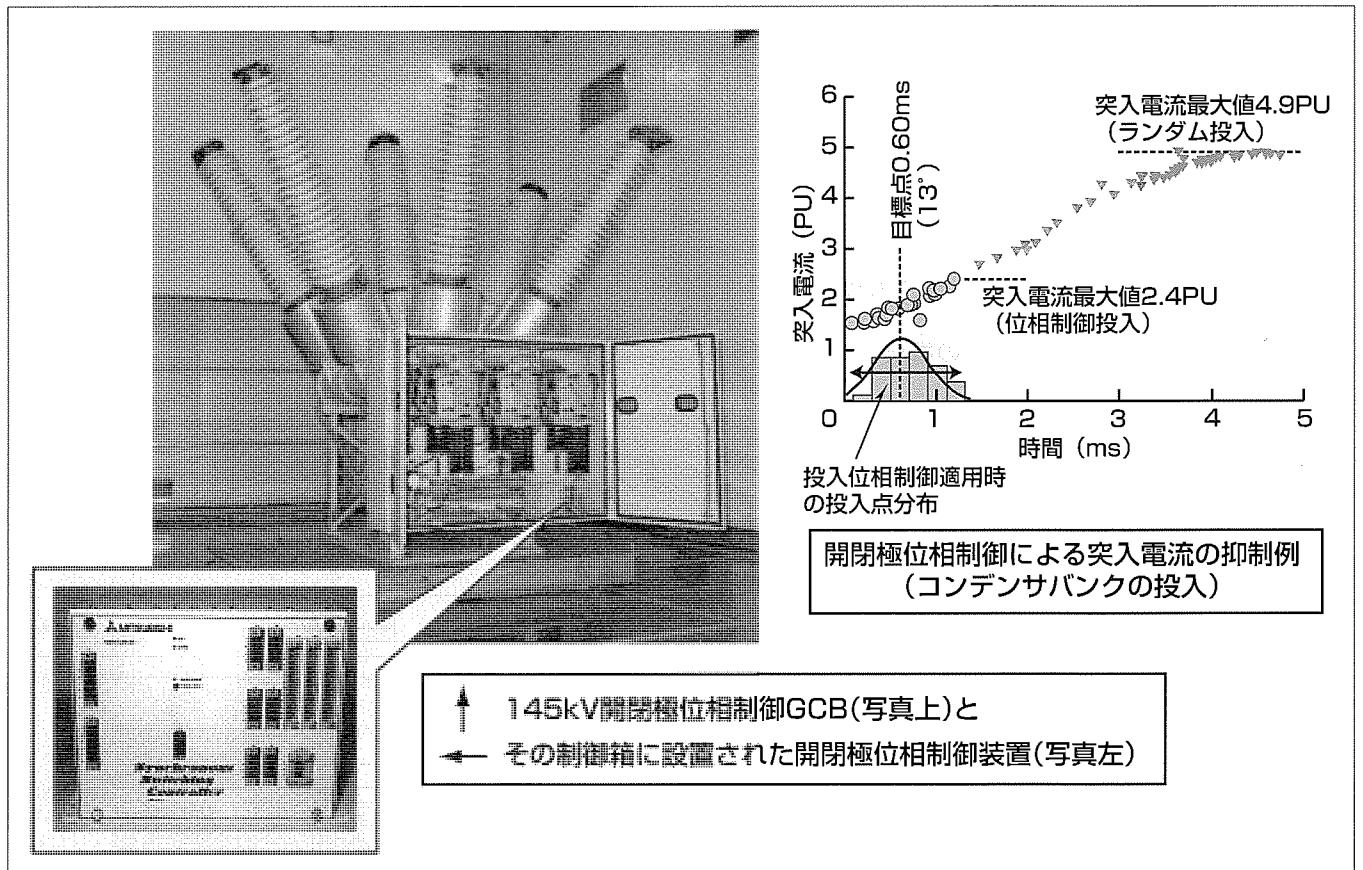
## 要 旨

規制緩和に対応した電力機器の保守周期延長、保全機器への監視診断技術の重要性が高まる一方、電力の品質向上に対する要求が一段と厳しくなっている。電力の品質向上を図るためには、遮断器開閉時に発生する開閉サージ及びこれに起因する機器の故障を防止する必要がある、これまで抵抗投入方式の採用、避雷器の設置等の対策が行われてきた。また、電力の自由化の流れに従う電力コスト削減の要求から、機器費用、保守作業など、システム運用の全般に対する経済性の要求が高まりつつある。一方で、電子技術の進歩に伴い、機器の信頼性、耐環境性向上及びコンパクト化が進み、変電機器の電子制御化が進められている。このような背景の下、遮断器の開閉サージを抑制するための経済的手段として、遮断器を電圧又は電流の特定位相で開閉することによって開閉サージを抑制する開閉極位相

制御遮断器が注目されている。開閉極位相制御遮断器は特に欧米を中心とした海外での適用例が急速に増加しつつあり、これに対するためにCIGRE WG13.07において審議が進められ、技術調査に基づく適用指針の検討、経済性の評価が行われている。

これらの市場動向に対応するため、このたび開閉極位相制御遮断器を開発し、上記適用指針に基づいた実用性能の検証を完了した。検証試験の結果は良好な開閉サージ抑制効果を示しており、既に145kV開閉極位相制御遮断器を米国向けに出荷し、他の電圧階級への展開を順次進めている。

開閉極位相制御遮断器は、従来のシステムのみならず、変電所のデジタル制御化にも適合することができ、インテリジェント変電所のキーテクノロジーの一つとして、高度な系統運用を可能とする。



## 開閉極位相制御遮断器(左)と開閉極位相制御遮断器による開閉サージ抑制例(右)

開閉極位相制御遮断器は、開閉サージを抑制する経済的な手段として適用が拡大しつつある。開閉極位相制御装置は、遮断器操作箱への設置を前提に設計・検証されており、コンパクトなシステムとして、新設のみならず既設機器への柔軟な対応も可能である。

### 1. ま え が き

電力用遮断器の開閉極時には過電圧や突入電流が発生し、機器の絶縁、寿命、系統電圧の安定性に影響を与え、また保護リレーの誤動作を誘発するなど、機器の保全、又は電力系統の運用上の問題を引き起こす場合がある<sup>(1)</sup>。例えば、無負荷変圧器の励磁投入時に、遮断器の投入位相によっては過大な励磁突入電流を生じ、系統電圧の変動、保護リレーの誤動作等が発生する場合がある。また、シャントリアクトル遮断時には、遮断器極間の再発弧によって遮断器接触子の損耗量増加、及び過大な再発弧電圧が発生する可能性がある<sup>(2)</sup>。これらの現象を回避するため、従来から、投入抵抗方式の採用、避雷器の設置、点検周期の短縮など、種々の対策が講じられてきた。

一方で、これらの過電圧や突入電流の発生は、遮断器を系統電圧又は電流の特定位相において開閉することによって抑制できることから、遮断器の開閉極位相を制御する方式が1990年代後半に実用化され、過電圧・突入電流抑制のための経済的な手段として欧米を中心に急速に適用例が増加しつつある<sup>(1)</sup>。

開閉極位相制御方式による過電圧や突入電流の抑制効果は、開閉極時刻の精度に大きく影響を与えるため、開閉極位相制御を適用するに当たっては、遮断器の極間絶縁特性、開閉極動作特性及び位相制御装置の精度を十分に把握し、制御アルゴリズムを構築する必要がある。

本稿では、開閉極位相制御技術の概要を説明し、その基礎となる遮断器の開閉極現象、位相制御アルゴリズムについて紹介する。さらに、実遮断器を用いた各種試験によって開閉極位相制御の実用性を確認した結果について述べる。

### 2. 開閉極位相制御の概要

この章では、開閉極位相制御技術の概要及び適用メリットについて述べる。

#### 2.1 開閉極位相制御の原理

開閉極位相制御遮断器のシステム構成を図1に示す。開閉極位相制御装置は、任意の位相で入力される遮断器の開

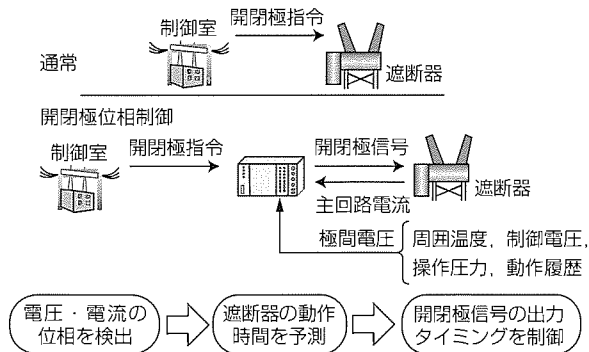


図1. 開閉極位相制御システムの構成

閉極指令に対し、遮断器の開閉極時間を予測し、系統電圧又は電流を参照しながら目標とする位相で開閉極されるタイミングで遮断器に対し開閉極信号を出力する。目標となる開閉極位相は対象となる責務によって異なり、例えば、中性点接地のコンデンサバンクの投入では各相の電圧零点となり、中性点接地の変圧器無負荷励磁投入では各相の電圧最大点となる。

遮断器の開閉極時間は遮断器の制御電圧、操作圧力、周囲温度、及び動作履歴等の動作条件によって変化するため、位相制御装置は、これらの動作条件を常時監視し、計測した各動作条件下における遮断器予測開閉極時間に基づき、開閉極指令入力から開閉極信号出力までの時間(以下“同期遅れ時間”という。)を調整する必要がある。また、閉極位相制御の場合には、目標とする位相によって閉極時の電圧値が異なるため、先行放電発生から遮断器接触子の機械的接触までの時間(プレアーク時間)の変化も考慮しなければならない。閉極位相制御におけるシーケンス及び制御における各過程の時間変化の模式図を図2に示す。

一般的に、周囲温度、制御電圧、操作圧力が低くなると遮断器閉極時間が長くなるため、同期遅れ時間を短く設定する。逆に、周囲温度、制御電圧、操作圧力が高くなると遮断器閉極時間が短くなるため、同期遅れ時間を長く設定することにより、閉極指令を受けてから遮断器が開極するまでの時間を一定に保つよう制御する。

#### 2.2 適用責務と利点

図3に、遮断器開閉に伴って発生する現象を示す。これらは、下記の3項目に分類できる。

- 誘導性負荷の投入(変圧器、シャントリアクトル)  
誘導性負荷投入時の励磁突入電流による過渡的な電圧低下、保護リレーの誤動作等

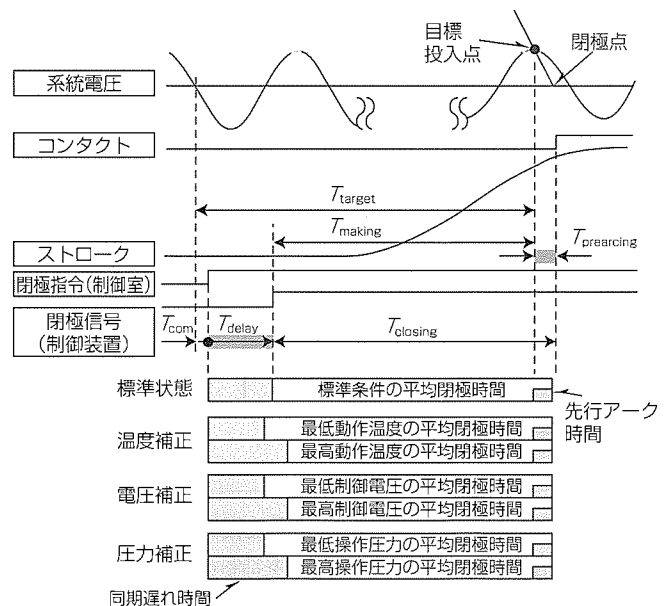


図2. 閉極位相制御のシーケンス

- 容量性負荷の投入(無負荷送電線, コンデンサバンク)  
容量性負荷投入時の過電圧や突入電流による遮断器接触子の損耗増大等
- 小電流遮断(無負荷送電線, コンデンサバンク, ショントリアクトル)  
再発弧, 再点弧に伴う過電圧, 遮断器接触子の損耗増大

これらの責務に開閉極位相制御を適用することにより, 下記のような利点が期待できる。

- (1) 機器コストの低減
  - 投入抵抗, 避雷器の省略
  - 絶縁レベルの低減
- (2) 保守コストの削減
  - GCBコンタクト類の損耗低減による点検周期の延長
  - 過電圧による変電機器劣化の防止
- (3) 電力品質の向上
  - 過電圧, 電圧変動の抑制

- 保護リレー等の誤動作防止  
各責務における適用の目的, 利点及び最適開閉位相を表1に示す。

### 3. 遮断器の特性

開閉極位相制御による過電圧, 突入電流の抑制効果は, 遮断器開閉極時刻の精度に大きく影響を与えるため, 開閉極位相制御の適用に際しては遮断器の特性を詳細に検討する必要がある。ここでは, 閉極動作を例に, 遮断器の特性を説明する。

#### 3.1 遮断器の閉極動作

図4に最小電圧での投入を目標とする場合の現象を表す模式図を示す。正弦波は極間電圧, A点は遮断器接触子の機械的接触点(閉極点), B点はプレアーク発生点を示す。遮断器極間の耐電圧特性は図中の直線ABで表され, 耐電圧値は閉極動作に伴って減少しA点で零となる。この直線の両側に描いた破線は, それぞれ遮断器の閉極時間ばらつき, 及び放電ばらつきを考慮した耐電圧特性の限界線を表し, 実際の投入点は, 図中のC点からDの範囲で正規状の

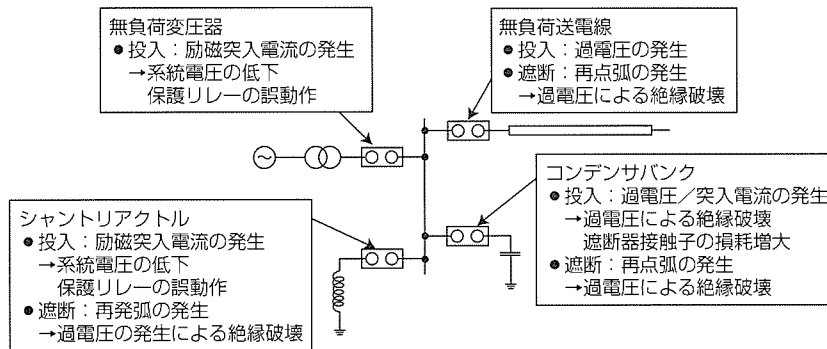


図3. 遮断器開閉に伴う現象

表1. 開閉極位相制御の適用目的, 利点及び最適開閉位相 (CIGRE WG13.07<sup>(1)</sup>)

適用責務	適用の目的	適用の利点	最適開閉位相
無負荷変圧器投入	励磁突入電流の抑制	●投入抵抗の省略 ●電圧の安定性向上 ●保護リレーの誤動作防止	●中性点接地: 各相電圧ピーク ●中性点非接地: 第1相相電圧ピーク, 第2, 3相相間電圧ピーク
ショントリアクトル投入			
コンデンサバンク投入	突入電流の抑制	●遮断器接触子損耗の低減(メンテナンスコストの低減)	●中性点接地: 各相電圧零点 ●中性点非接地: 第1, 2相は相間電圧零点, 第3相は相電圧零点
	過電圧の抑制	●絶縁レベルの低減	
無負荷送電線投入	過電圧の抑制	●投入抵抗の省略 ●絶縁レベルの低減	●各相電圧零点
ショントリアクトル遮断	再発弧の防止	●絶縁レベルの低減 ●遮断器接触子損耗の軽減(メンテナンスコストの低減)	●無再発弧となるアーク時間
無負荷送電線遮断 コンデンサバンク遮断	再点弧の防止*	●進み小電流遮断性能の信頼性向上	●無再点弧となるアーク時間

\* 基本的に遮断器は無再点弧仕様であるが, 信頼性向上の利点が考えられる。

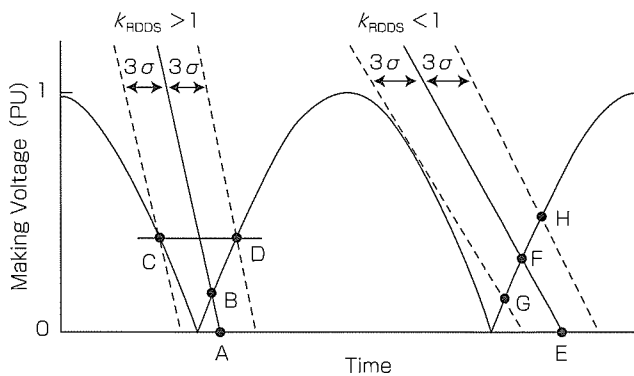


図4. 遮断器の開極過程 (投入電圧最小)

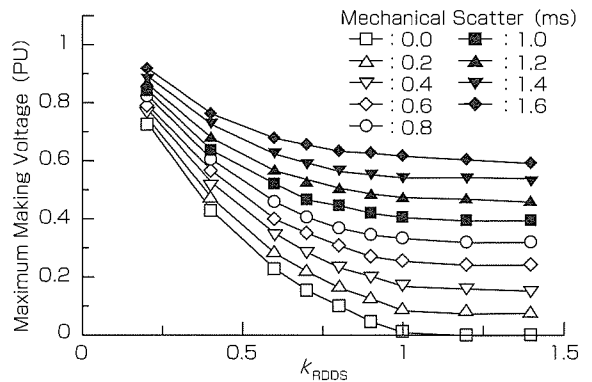


図5. 最大投入電圧と $k_{RDDS}$ 動作ばらつきとの関係 (最小投入電圧目標の場合)

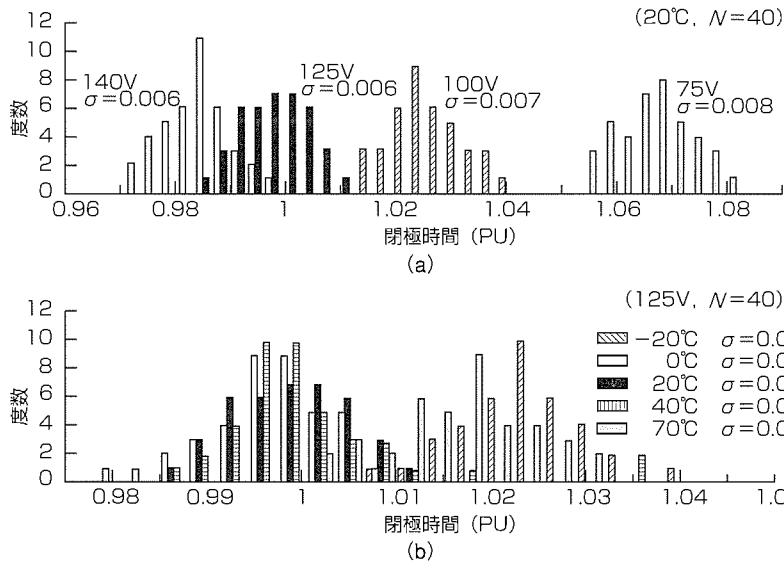


図6. 145kV GCBの投入時間特性

分布を示す。直線ABの傾きは極間絶縁耐力減少率 (Rate of Decrease of Dielectric Strength : RDDS) と呼ばれ、系統の常規対地電圧の電圧零点での傾きとの比 ( $k_{RDDS} = RDDS / \omega V_p$ ) は、遮断器開閉極時間の機械的なばらつきとともに、位相制御を実施する上で重要な量である。

投入電圧を最小とする目標閉極点は次のとおりである。

(1)  $k_{RDDS} > 1$  の場合

図から明らかなように遮断器は電圧零点を含む任意の位相で投入が可能であるため、C、D点の電圧が等しくなるように目標閉極点B点を設定する。

(2)  $k_{RDDS} < 1$  の場合

ばらつきを考慮したRDDSの限界線が電圧零点以前の極間電圧波形に接する場合は最小の投入電圧となり、目標閉極点はF点となる。

以上のような考えに基づいて求めた、遮断器閉極時間のばらつきを変化させた場合の、 $k_{RDDS}$ と最大投入電圧の関係を図5に示す。最大投入電圧を小さくするためには、 $k_{RDDS}$ を大きくするか又は閉極時間ばらつきを小さくする必要があることが分かる。 $k_{RDDS}$ 及び閉極時間ばらつきは

各遮断器に固有の数値であるため、例えば有効接地系コンデンサバンクの投入などのように波高値の1/2以下の電圧での投入を要求される場合には、図5によって適用の可否を判断できる。

3.2 開閉極動作特性

次に、制御電圧、周囲温度を変化させた場合の遮断器開閉極時間特性<sup>(3)</sup>の例を図6に示す。このように、遮断器の開閉極時間は一定のばらつきを持ち、その中心値は動作条件によって変化する。開閉極時間の中心値の変動はGCBの操作力及び可動部構造等によって決定され、同一機種はほぼ同等の特性を示す。このため、事前に特性を把握すれば、動作ごとの条件を測定することによって開閉極時間を予測することができる。

3.3 電気的特性

図7にRDDSの測定例を示す。実系統での投入責務である常規対地電圧の領域では、RDDSはほぼ一定の値を示し、正規分布と仮定した場合の標準偏差は9%程度であることが分かる。また、電圧の極性によるプレーク電圧の相違はほとんどなく、実運用においては電圧の極性は考慮する

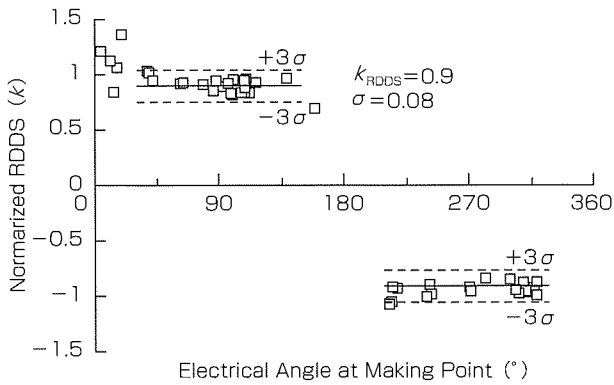


図7.  $k_{RDDs}$ と投入位相の関係

必要がないことを示している。

#### 4. 開閉極位相制御装置

この章では開閉極位相制御装置(Synchronous Switching Controller : SSC)の構成及び制御アルゴリズムについて紹介する<sup>(4)</sup>。

##### 4.1 位相制御装置の構成

図8, 図9にSSCの外観及び内部構成を示す。SSCの主な特長は次のとおりである。

- (1) 1台の制御装置でGCB 1台の開極及び閉極双方の制御を行うことが可能である(全6点の入出力)。
- (2) 32ビットデジタルリレー用CPUを採用し、高い信頼性を確保するとともに、制御演算・動作結果解析等を高速に実行可能である。
- (3) 動作条件を含むGCB各開閉極動作履歴、主回路電圧、電流、GCB動作行程及びアラーム信号をフィールドネットワークを通じて上位系パソコンからモニタリングが可能である。
- (4) 電氣的サージや温度変化等に対する耐環境性の確保により、遮断器操作ハウジング又は現地制御盤への設置が可能である。
- (5) センサを含めた自己診断機能及び位相制御の成否判定機能を持ち、異常検出時にはアラーム出力とともに装置を短絡又は開放で固定可能である。

##### 4.2 制御アルゴリズム

遮断器の開閉極時間変動は、①制御電圧、周囲温度、操作圧力等の動作条件に依存し、同型遮断器に対して共通の変動時間補正が可能である部分と、②接点摩耗、経時変化、微小な個体差等の遮断器個々の状態変化によって変動し、個別に補正を必要とする部分、に分離することができる。

そのため、遮断器開閉極時間の補正を①制御電圧、周囲温度、操作圧力等の動作条件に基づいた補正時間 $\Delta T_{env}$ 、②過去の動作履歴に基づいた補正時間 $\Delta T_{const}$ に分割し、標準条件での平均開閉極時間 $T_{std}$ を補正して予測開閉極時間を式(1)によって求め、開閉極信号の出力タイミングを

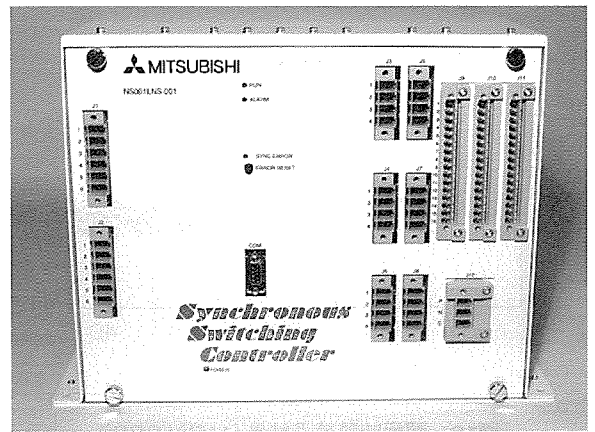


図8. 開閉極位相制御装置の外観

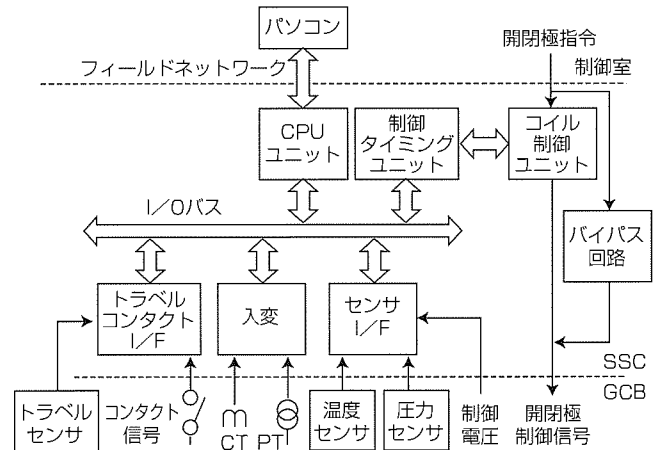


図9. 開閉極位相制御装置の内部構成

制御するアルゴリズムを搭載している。

$$\text{予測開閉極時間} = T_{std} + \Delta T_{env} + \Delta T_{const} \dots \dots \dots (1)$$

補正時間 $\Delta T_{env}$ については、あらかじめ各動作条件において平均開閉極時間を計測しておき、標準条件における平均開閉極時間 $T_{std}$ に対する差をテーブル形式で作成しておく。開閉極指令が与えられた時点で、動作条件における補正時間 $\Delta T_{env}$ をテーブルデータから内挿して算出する。

一方、動作履歴による補正時間 $\Delta T_{const}$ は、過去10回にわたる開閉極時間の実測値と予測値の誤差に基づき算出する。ただし、各データに対しては、最も高い補正効果を得るための重み付けを行っている。

145kV遮断器にSSCを搭載し異なる動作条件における閉極時間を予測した結果を図10に示す。実測値に追従した閉極時間の予測が行われていることが分かる。

#### 5. 検証試験結果

前章までに述べた位相制御システムの妥当性を検証するため、各定格の遮断器の制御箱に位相制御装置を実装した試験を実施し、開閉極位相制御遮断器としての実用性を確認している。

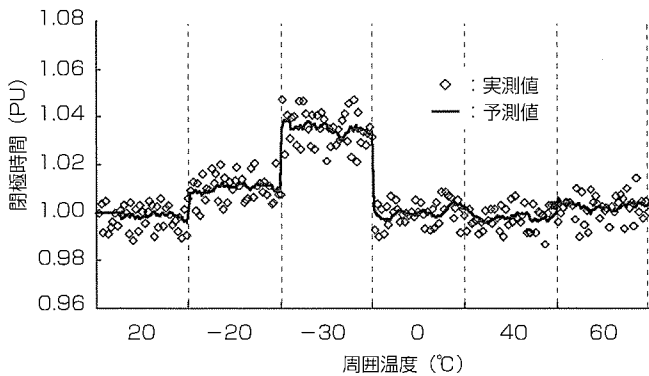


図10. 閉極時間補正結果 (145kV GCB)

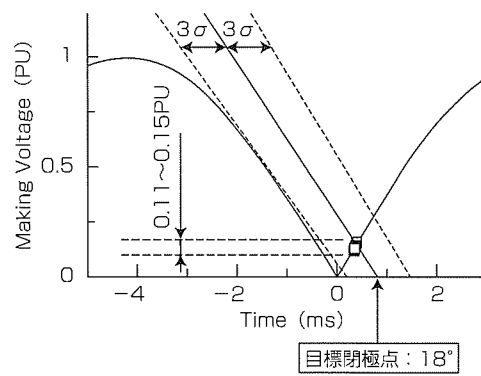


図11. 投入試験結果 (目標閉極点18°)

特集  
I

### 5.1 投入試験結果

輸出向け550kV遮断器を用い、最小電圧での投入を目標としたコンデンサバンク投入試験を実施した<sup>(5)</sup>。

事前の測定によって得られたこの遮断器の閉極時間ばらつき ( $3\sigma = 0.75\text{ms}$ ) と極間絶縁耐力減少率 ( $k_{\text{RDSS}} = 0.9$ ) から、目標閉極位相を  $18^\circ$  と設定した。

10回の位相制御投入動作を実施したときの投入位相とブレイク電圧の関係を図11に示す。試験時の閉極時間ばらつきが事前の閉極試験時に比べ小さかったことから、投入電圧も最小値0.11PU、最大値0.15PUと図5に示す予測値に比べばらつきが小さい結果となったが、期待した電圧以下で投入されていることが分かる。

次に、輸出向け145kV遮断器を用いたコンデンサバンク投入試験における突入電流測定値を図12に示す。位相制御を実施しない投入では最大で約4.9PUの突入電流が発生したが、投入電圧を最小とする位相制御を実施した場合には最大で約2.4PUと1/2以下に抑制できており、開閉極位相制御の有効性を確認した。

### 5.2 位相制御装置の耐環境性

上記に加え、高低温試験、遮断器多数回動作試験などにより、

- 最大550kVの電圧投入時に発生する耐電氣的サージ性能
- 周囲温度  $-40 \sim +70^\circ\text{C}$  での動作健全性
- 10,000回の遮断器動作による耐振動性能

等の実用性能を確認し、位相制御システムとして所期の機能があることを確認している。

## 6. む す び

遮断器開閉時に発生する諸問題の解決策として、開閉極位相制御技術を紹介した。この技術は、機器構成、系統運用及び保守業務面から、ユーザーにとってより魅力的な変電システムを構成することを可能とするものである。将来的には、適用責務を故障電流遮断にまで拡大し、機能の充実に努める予定である。

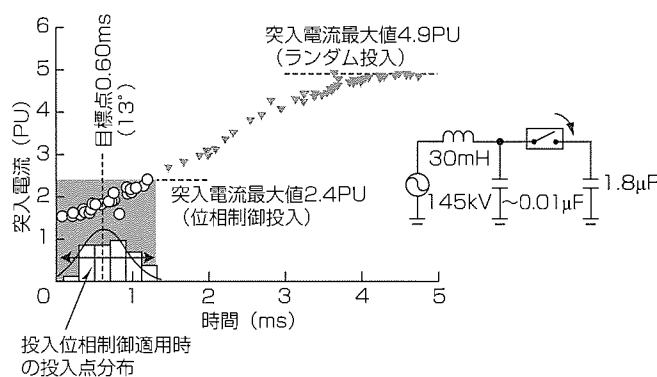


図12. コンデンサバンク投入時の突入電流

## 参考文献

- (1) CIGRE Working Group 13.07: Controlled Switching of HVDC Circuit Breakers, ELECTRA No.183, 43~57 (1999-4)
- (2) Okabe, S., Kosakada, M., Toda, H., Suzuki, K., Ishikawa, M.: Investigations of Multiple Reignition Phenomena and Protection Scheme of Shunt Reactor Current Interruption in GIS Substations, IEEE Transaction on Power Delivery, 8, No.1, 197~202 (1993-1)
- (3) 和田耕太郎, 香山治彦, 伊藤弘基, 平位隆史, 金子精二, 日高幹雄, 杉山 勉: 145kV開閉極位相制御遮断器の開発, 平成12年電気学会全国大会, 6-237, 2908~2909 (2000)
- (4) 葛田広幸, 平位隆史, 香山治彦, 伊藤弘基, 林 孝典, 高島一樹: 開閉極位相制御GCBにおける制御アルゴリズムの検討, 平成12年電気学会全国大会, 6-238, 2910~2911 (2000)
- (5) 和田耕太郎, 香山治彦, 伊藤弘基, 日高幹雄, 杉山 勉: 550kV開閉極位相制御遮断器の動作特性, 平成13年電気学会全国大会, 6-272, 2667~2668 (2001)



# 新形CT/PT

谷口裕章\*  
前田恭宏\*  
岸本一雄\*

## 要 旨

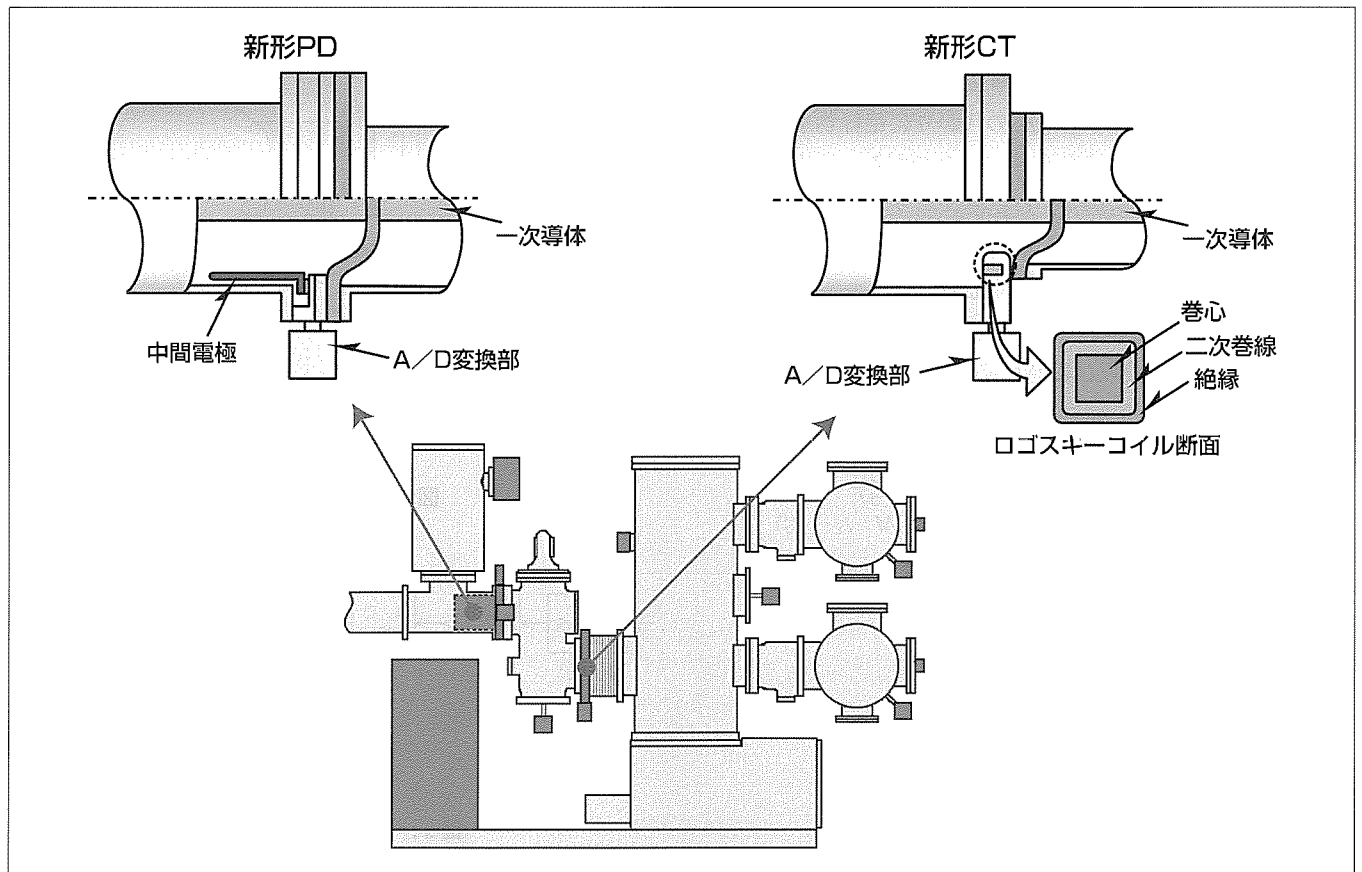
これまで変電所や開閉所では、電流、電圧を計測する手段として、主に鉄心と巻線で構成された変流器(CT)、計器用変圧器(PT, PD)が用いられてきた。近年、二次側の計測器や保護リレーのデジタル化が進み、また、これらをデジタルネットワークで統合したシステム“インテリジェント変電所”の構築が検討されるに従い、デジタルネットワークに対応した新しいCT, PDが求められるようになってきた。

そこで、これらシステムに適合した新形CT, PDを開発した。CTは検出部にログスキーコイルを適用し、PDは検出部に中間電極を用いて分圧する方式とし、それぞれA/D

変換部を接続して光デジタル出力が得られるようにした。二次側機器をデジタル化したことにより、ログスキーコイル及び中間電極部にA/D変換部を直接接続することができるため、負担VAをほとんど必要とせず、小型・軽量化することができた。また、従来のCT/PTに使用されてきたタンク部分を必要としないため、自由度の高いGISの構成が可能となっている。一方、光デジタル出力は、中継器を介して光プロセスバスを通り、保護・制御系へ伝送される。

CT, PDともに誤差、耐電圧を始めとした各種性能評価を行い、良好な結果を得た。

特集  
1



## 新形CT/PTの構成

新形CT/PTの構成は、検出部とA/D変換部とからなり、CTの検出部はログスキーコイル(空心コイル)を採用し、PDの検出部は一次導体とタンクとの間に中間電極を設けて一次電圧を分圧する方式を採用している。A/D変換部は、耐サージ性などを考慮して、光ファイバを介してデジタル信号をデジタルネットワークで統合したインテリジェント変電所システムに伝送している。

1. ま え が き

これまで変電所や開閉所では、電流、電圧を計測する手段として、主に鉄心と巻線で構成された変流器(CT)、計器用変圧器(PT, PD)が用いられてきた。近年、二次側の計測器や保護リレーのデジタル化が進み、また、これらをデジタルネットワークで統合したシステム“インテリジェント変電所”<sup>(1)</sup>の構築が検討されるに従い、これに対応した新しいCT, PDが求められるようになってきた。

本稿では、このようなインテリジェント変電所システムに適合した新しいCT, PDについて述べる。

2. 新 形 C T

2.1 基本構成

新形CTは、図1に示すように、検出部とA/D変換部で構成されている。検出部で一次電流 $I_1$ の大きさに応じた二次電圧 $E_2$ を得て、これをA/D変換ユニットで光デジタル信号に変換している。CTの仕様例を表1に示す。

2.1.1 検出部

検出部には、鉄心を用いず、本質的に飽和のないロゴスキーコイルを適用した。このロゴスキーコイルからは、図1の式(1)に示すように、一次電流 $I_1$ の時間微分に比例した二次電圧 $E_2$ が得られる。

その断面及びGISへの取付け構造を図2に示す。ロゴスキーコイルは、巻心として鉄心の代わりに絶縁物を用い、その巻心の上に二次巻線を巻いたものである。二次巻線出力に高インピーダンスのA/D変換ユニットを直結することにより、ほとんど負担VAを消費しないようにできるため、コイルの小型・軽量化を実現した。

今回開発したロゴスキーコイルは、小型・軽量であるため、従来の鉄心CTの取付け時に必要なCTタンクを用いず、

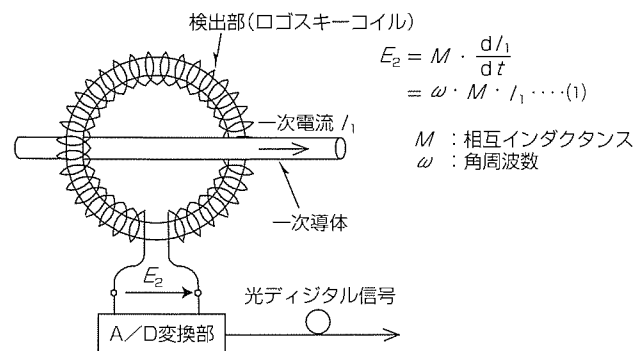


図1. 新形CTの構成

表1. 新形CTの仕様例

定格一次電流 ( $I_n$ )	4,000A
定格周波数	50/60Hz
精度階級	1P級

スパーサアダプタ(絶縁スパーサトリプルジャンクション部の電界緩和シールド)に溝加工を施した部分へコイルを収納している。これにより、非常に自由度の高い、また簡素なGISの構成が可能となった。

2.1.2 A/D変換部

A/D変換部は、ロゴスキーコイルから得られる一次電流の時間微分に比例した電圧信号を積分処理することによって一次電流に比例した電圧信号を得るとともに、電圧信号をアナログ-デジタル変換し、一次電流に比例したデジタルデータを得ている。さらに、GISタンクに直付けすることを前提に事故時のGISタンク電位の上昇に対処するため、電源ラインは高耐電圧トランスによって、デジタル出力ラインは光ファイバによって電氣的絶縁を行った。また、A/D変換部間の同時サンプリングを実現するため、A/D変換部に外部からのサンプリング開始信号を受信するための入力部を設けた。

A/D変換部の構成を図3に、仕様を表2に示す。

(1) デジタル積分器

ロゴスキーコイルから得られる一次電流の時間変化に比例した出力電圧を一次電流に比例した信号に戻すためには、積分処理を行う必要がある。積分器の実現にはアナログ方式とデジタル方式の二種類が考えられるが、経年変化の

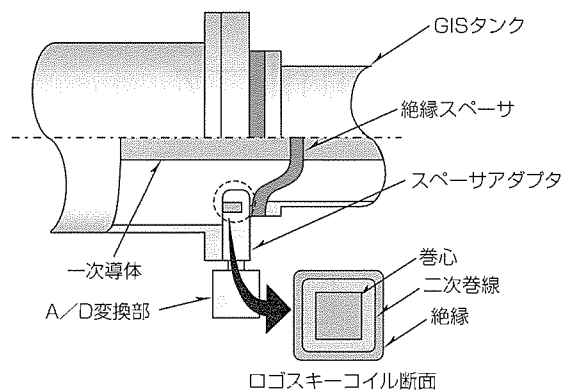


図2. 新形CTの構造

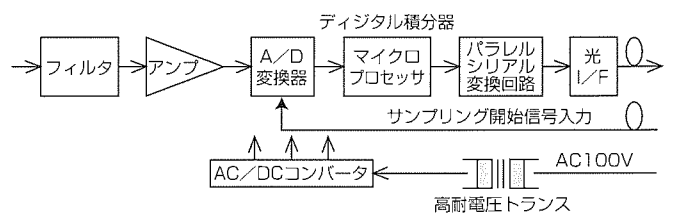


図3. A/D変換部の構成

表2. A/D変換部の主な仕様

A/D変換分解能	16ビット
サンプリング周波数	5,760Hz(3.75°/60Hzベース)
光伝送レート	750k bps

ないデジタル方式を採用した。デジタル積分方式を採用するに当たっては幾つかの課題があるが、代表的なものとして、DCドリフトの抑制及び耐サージ性の向上について以下に述べる。

(a) DCドリフトの抑制

理想的な積分器では、A/D変換器を含め前段の回路でDCオフセットが発生した場合、時間とともに積分値がどんどん大きくなるために暴走してしまう。そこで、図4のような等価回路で示されるDCオフセット除去回路と不完全積分器をデジタル演算で実現し、DCドリフトの抑制を行った。そして、DCが重畳されたCTとしての過渡応答特性を確保するため、不完全積分器の放電時定数は1秒程度とした。

(b) 耐サージ性の向上

ログスキーコイルの出力は一次電流の微分値であるため、A/D変換器の入力部までは、60Hzでは1Vの信号も3kHzでは50倍になり、何らかの電圧抑制対策が必要になる。さらに、主回路の断路器開閉時などには、ログスキーコイルの両端には数kVのサージ電圧が発生するため、何らかのサージ対策が必要になる。高レベルの高周波サージはノイズフィルタと放電ギャップで除去し、比較的低い周波数のサージはA/D変換時に発生する折り返し誤差(エイリアス)を抑制するためのフィルタ(アンチエイリアシングフィルタ)を回路前段に配して除去した。

(2) 電源供給方式

A/D変換部は、ログスキーコイル出力信号の劣化を抑えるため、ログスキーコイル近傍のGISに直付けしている。このため、事故などによってGISタンク電位が大地から浮き上がった場合の入出力ラインの電気絶縁が不可欠となる。デジタル出力ラインは光ファイバで電気絶縁した。一方、電源ラインは、特殊な高耐電圧DC-DCコンバータによる電源供給法等が考えられるが、容易に絶縁性能のステップアップが図れるインバータと高耐電圧トランスによる絶縁電源を適用した。トランスの小型化を図るためインバータの交流側周波数は400Hzとし、また、トランスの絶縁性能

はインパルス耐電圧20kVを実現した。

2.2 検証試験

2.2.1 A/D変換部単体試験結果

A/D変換部単体の仕様を満足することを確認するため、各種試験及び測定を実施した。以下に結果を述べる。

(1) サンプリング周波数測定

A/D変換器は、外部からのサンプリング開始信号を受信してサンプリングを開始している。そこで、このサンプリング開始信号の周波数を測定した結果、5,760Hzであることを確認した。測定波形を図5に示す。

(2) 光伝送レート測定

光デジタル信号伝送レートを試験用データ(01の連続したビット列)を送信し、そのビット幅の時間から光伝送レートを測定した。仕様の750k bpsを満足していることを確認した。

2.2.2 組合せ試験

次に、検出部とA/D変換部とを組み合わせることで各種の試験を実施したので、主な試験結果を示す。

(1) 誤差試験(直線性試験)

定格電流領域における誤差試験の結果を図6に示す。新形CTはデジタル出力のため、従来の比較試験器では測定を行うことができず、デジタル入力の比較試験器<sup>(2)</sup>を用いて測定した。図から、各試験電流に対し、1P級(JEC-1201)を十分に満足していることが分かる。

(2) 周波数特性試験

周波数特性は主にA/D変換部のフィルタによって決定されている。A/D変換部では、サンプリングによる誤差

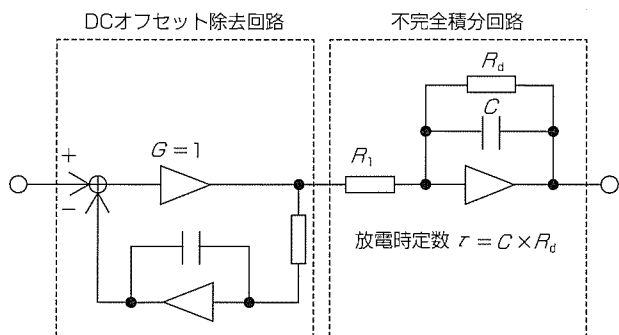


図4. DCオフセット除去回路と不完全積分回路の等価回路

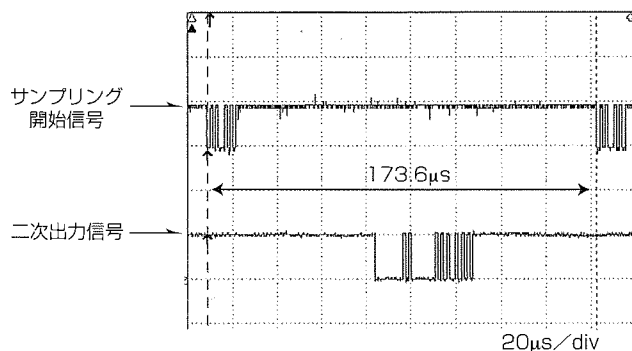


図5. サンプリング周波数測定結果

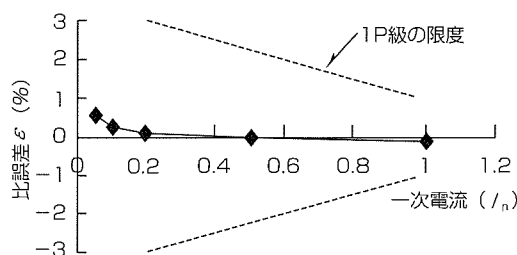


図6. 誤差試験結果

を除去するため、高周波成分をフィルタによって十分小さいレベル(5.760Hzで-60dB以下)に減衰させている。ログスキーコイルへの一次電流の周波数を変化させた場合のA/D変換部出力を図7に示す。

(3) 過渡特性試験

CTの仕様として過渡特性を指定される場合があり、これは、過渡時(短絡電流通電時)における一次電流、一次時定数、誤差保証時間などが規定される。

ログスキーコイルは、従来の鉄心を使用したCTのように飽和することはないが、この出力をフィルタを介してA/D変換し、さらに積分処理を行っているため、回路定数の設定によっては過渡誤差が大きくなる可能性がある。

そこで、図8に示すように、回路を構成し、過渡電流(短絡電流)を通電することによって過渡特性性能の確認を行った。その結果、図9に示すように、表3の仕様の過渡誤差を満足していることが確認できた。

3. 新形PD

3.1 基本構成

新形PDも、CTと同様に、検出部とA/D変換部で構成されている。PDの構成を図10に、仕様例を表4に示す。

(1) 検出部

新形PDは、図に示すように、一次電圧 $E_1$ を一次導体と中間電極間の浮遊静電容量 $C_1$ 、対地静電容量 $C_2$ と外部抵抗 $R_1$ によって分圧しているが、 $C_2$ を十分に小さく設定することにより、二次電圧 $E_2$ は図に示す式(2)で表される。

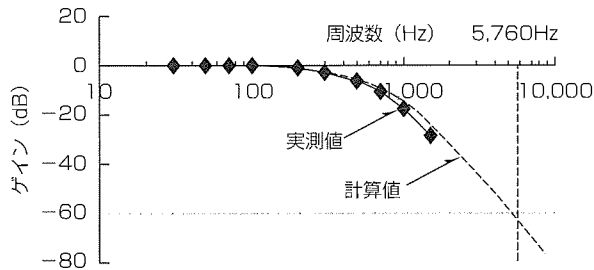


図7. 周波数特性試験結果

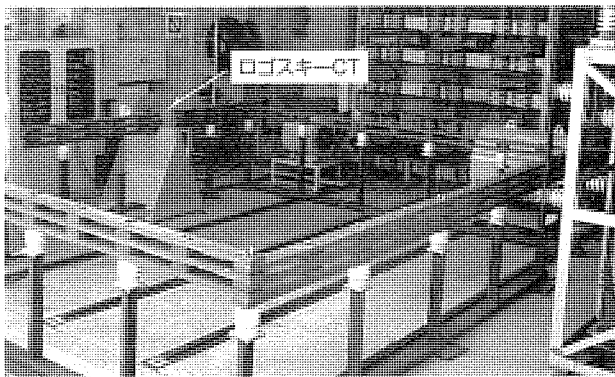


図8. 過渡特性試験状況

新形PDの構造を図11に示す。静電容量 $C_1$ を構成する中間電極は、一次導体と同軸で円筒形の簡易な構造としている。そして、二次側にはCTと同様に高インピーダンスのA/D変換部が接続されるため、負担をほとんど必要としないので、静電容量 $C_1$ を小さく、つまり中間電極をコンパクトにすることが可能となっている。

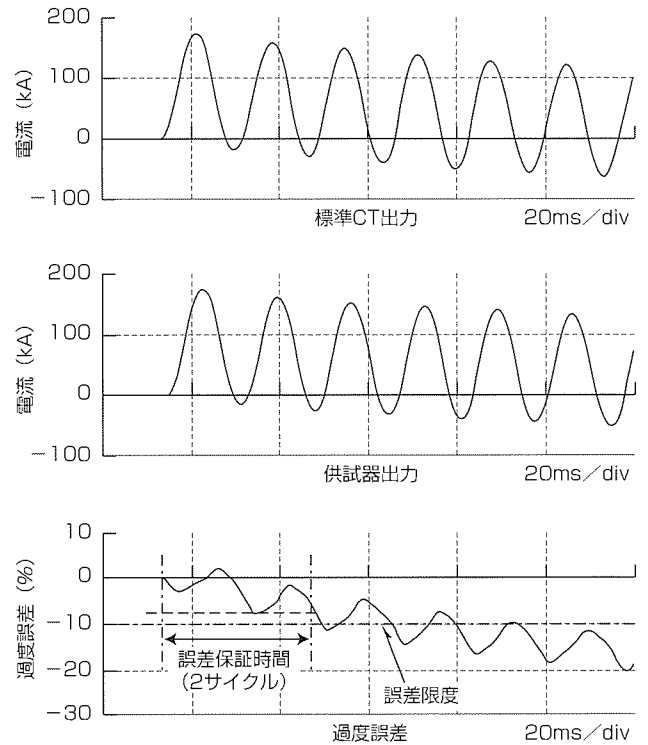
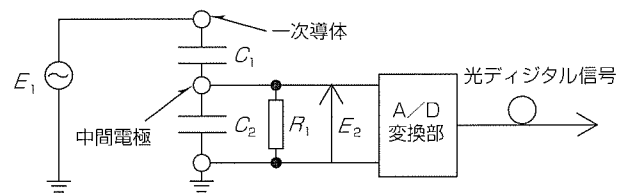


図9. 過渡特性試験結果

表3. 過渡特性の仕様例

定格過渡一次電流	63kA
定格一次時定数	100ms
定格保証時間	2サイクル
DC重畳	100%
過渡誤差	<10%



$$E_2 = C_1 \cdot R_1 \frac{dE_1}{dt} = \omega \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot E_1 \dots (2)$$

図10. 新形PDの構成

表4. 新形PDの仕様例

定格一次電圧 ( $V_1$ )	$275/\sqrt{3}$ kV
定格周波数	50/60Hz
精度階級	1P級

(2) A/D変換部

新形PDの二次電圧 $E_2$ もログスキーコイルの二次電圧と同様に一次電圧の時間微分に比例したものであり、新形PDに適用するA/D変換部は、図3に示すCT用A/D変換部と同一の構成としている。

3.2 検証試験

開発した新形PDの特性を確認するため、検出部とA/D変換部を組み合わせる各種の試験を実施した。主な試験結果を以下に示す。なお、A/D変換部単体試験については、CTのA/D変換部と同様の試験を実施し、仕様を満足していることを確認した。

(1) 誤差試験(直線性試験)

誤差試験の結果を図12に示す。新形PDもCTと同様に従来の比較試験器では測定を行うことができないため、新形CTの試験で用いたデジタル入力の比較試験器を用いて測定した。図から、各試験電圧に対し、1P級(JEC-1201)を満足していることが確認できた。

(2) 周波数特性試験

PDの周波数特性は、CTの周波数特性と同様に主にA/D変換ユニットのフィルタ特性によって決定され、その特性は図7と同様である。

また、定格周波数 $f_n$ の95~105%において、誤差の変化幅がJEC-1201-1996で規定されており、この規定に対して満足していることを確認した。試験結果を図13に示す。

(3) 過渡特性試験

PDについても過渡特性仕様が指定される場合があるが、これは、一次短絡(地絡)時における二次電圧の大きさ(一次電圧に対する二次電圧の追従性)についての規定である。

実回路を構成し一次側を短絡(地絡)させるのは困難であるため、ここでは、EMTP(電磁過渡解析プログラム)によって確認を行った。その解析回路を図14に、計算結果を図15に示すが、規格に定める“1.5サイクル以内に8%以下”を十分に満足している。

また、このほかに、IEC-60044-7では、過渡特性として、線路に残留電圧が存在する条件下で遮断器を投入した場合の二次電圧についても規定がなされている。これは、検出部としてC分圧器を使用していると残留電荷によって再投入時に二次電圧に直流分が重畳し、これが誤差となるためである。解析回路を図16に、解析結果を図17に示すが、二次電圧は一次電圧に比例しており、規格に定める“2~3サイクル以内に誤差10%以下”を十分に満足している。

(4) 耐電圧試験

雷インパルス耐電圧(LIWV=1,050kV)、及び長時間交流耐電圧(250-330-250kV)についても試験を実施し、問題のないことを確認した。

(5) 耐サージ性試験

300kV GIS用DSによる進み小電流開閉試験を実施し、

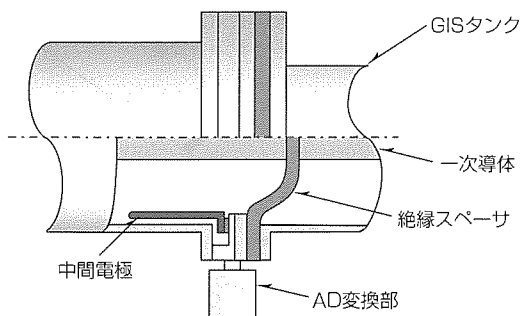


図11. 新形PDの構造

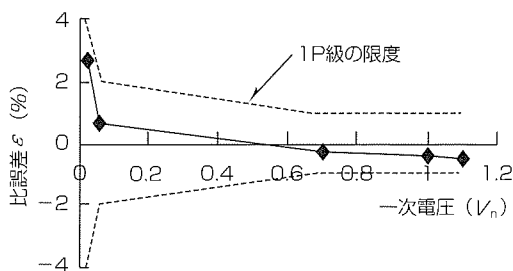


図12. 誤差試験結果

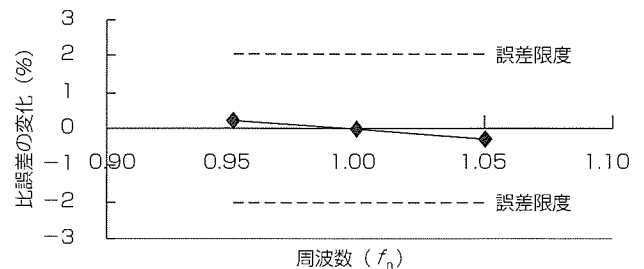


図13. 周波数特性試験結果

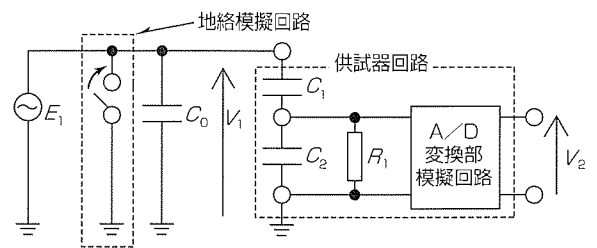


図14. 一次地絡解析回路

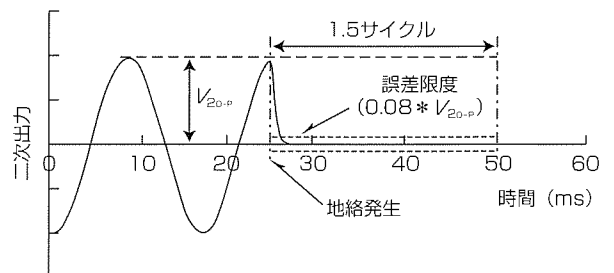


図15. 一次地絡解析結果

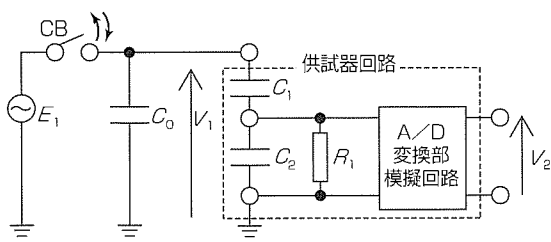


図16. CB再開路解析回路

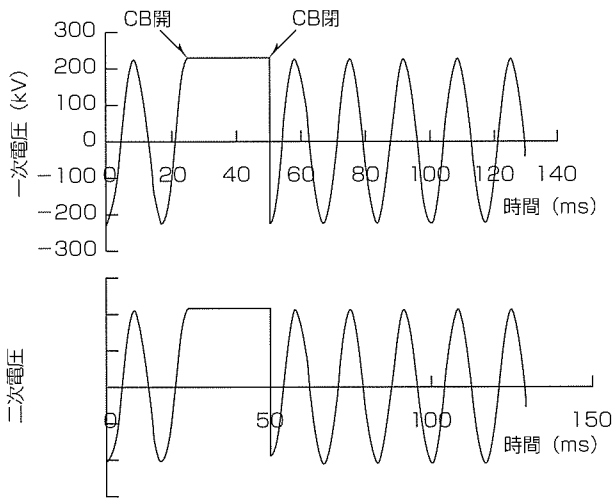


図17. CB再開路解析結果

A/D変換部の耐サージ性につき検証した。

検証試験形態を図18に示す。試験印加電圧は $50/\sqrt{3}$  kVから $350/\sqrt{3}$  kVまで $50/\sqrt{3}$  kVステップで上昇させた。

$350/\sqrt{3}$  kV印加時の測定波形を図19に示す。DS極間放電電圧に対するログスキーCT、及び分圧形PDの信号線間の発生サージ電圧を図20に示す。図20ではログスキーCT、分圧形PDの信号線間にそれぞれ最大2 kV、4 kV程度のサージ電圧が発生しているが、すべての試験電圧に対して、A/D変換部に誤動作等なく、問題のないことを確認した。

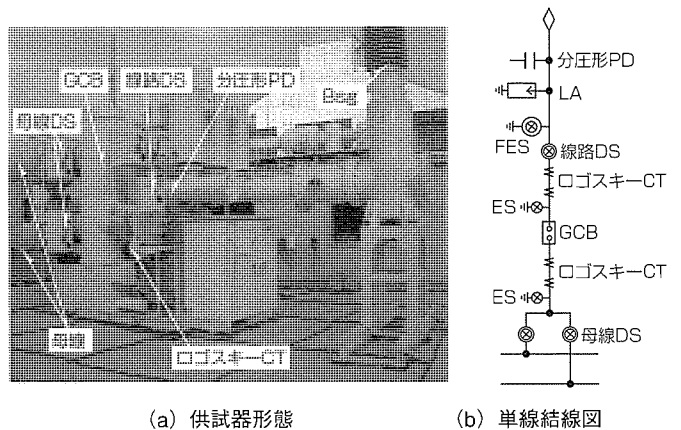
#### 4. む す び

インテリジェント変電所システムに適用されるデジタルネットワークに対応した新形CT、PDを開発した。

CT、PDともに各種試験を実施し、良好な結果を得た。

#### 参 考 文 献

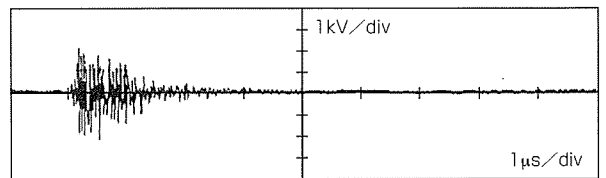
- (1) 大垣健二, 羽馬洋之, 匹田猛雄, 下村哲郎: 新しいインテリジェント変電所システムの提案, 平成12年電気学会全国大会, No.6-170 (2000)
- (2) 石原正彦, 岸本一雄, 羽馬洋之, 椋本裕之: デジタル



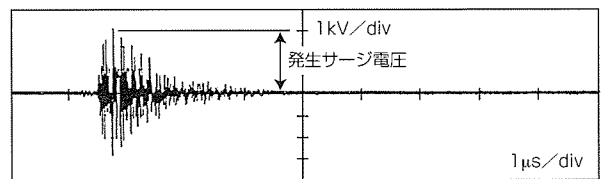
(a) 供試器形態

(b) 単線結線図

図18. 耐サージ性検証試験形態



(a) ログスキーCT信号線間発生サージ波形



(b) 分圧形PD信号線間発生サージ波形

図19. 測定サージ波形

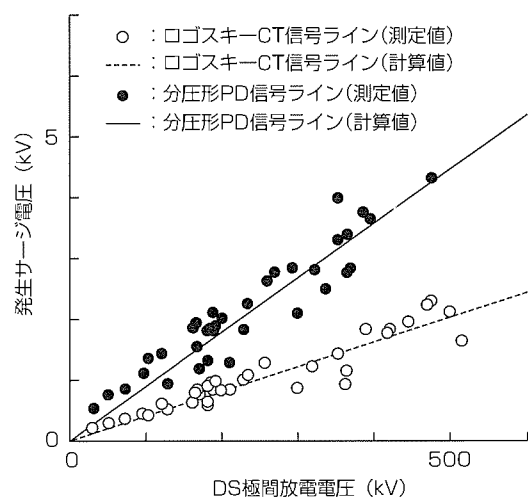


図20. 発生サージ電圧

ル化CT、PDの比較試験方法, 平成12年電気学会電力・エネルギー部門大会, 569 (2000 - 8)

# 次世代機器監視システム

土井 博\* 塩谷景一\*\*  
 篠原秀雄\*  
 山地 勉\*

## 要 旨

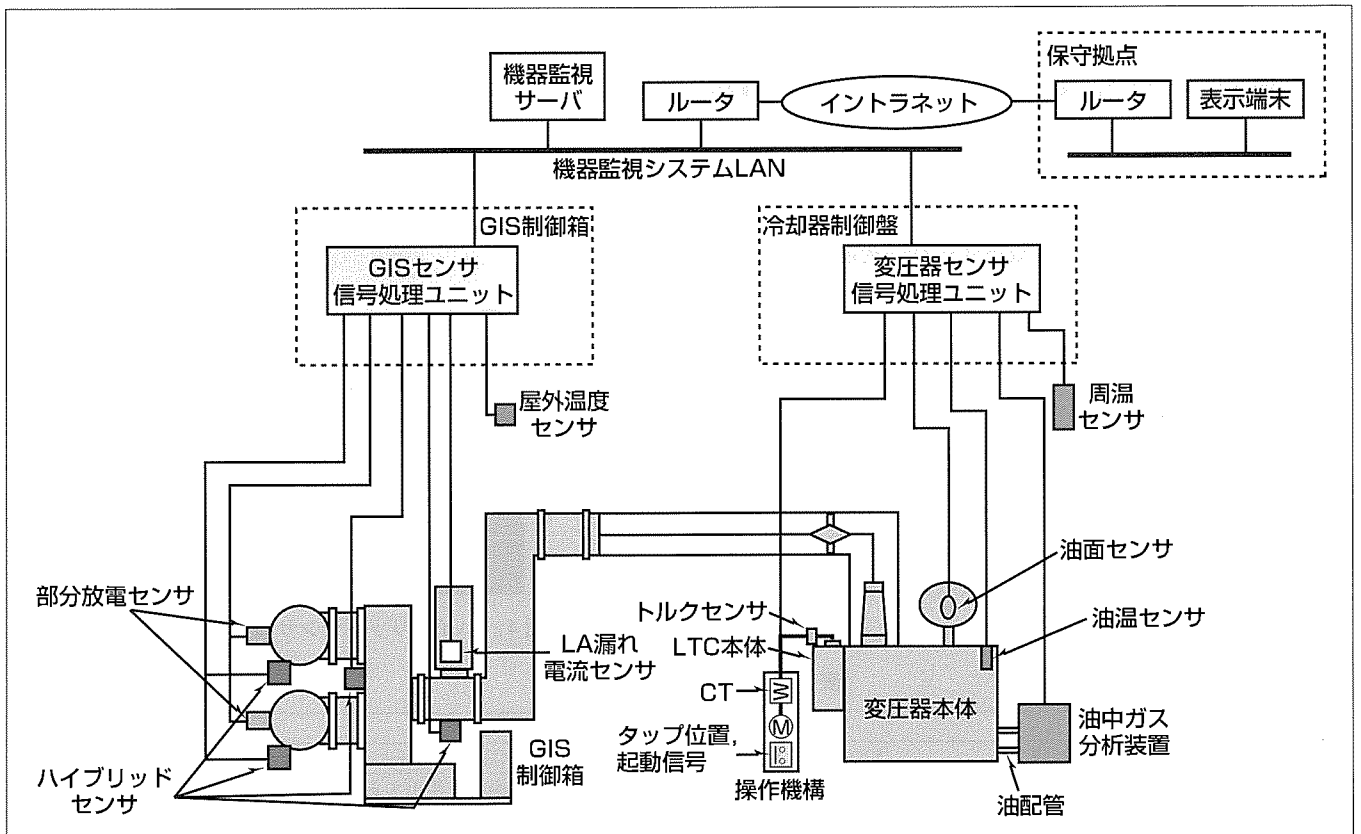
近年、電力設備投資が抑制され、メンテナンスに対する客先ニーズは、設備費用の低減、巡視作業の効率化、設置後25～30年経過した高経年機器に代表される既設機器へのメンテナンス方法の確立、CBM(Condition Based Maintenance)による効率的なメンテナンス等によるコストの削減が要求されている。

今回、次世代機器監視システムとして機器監視専用の盤が不要な小型のセンサ信号処理ユニットを開発し、設備費用の低減を可能に、また既設変電所への適用を容易にした。ユニットに組み込む基板は、100mm×160mmの標準的な3Uサイズを採用した。ユニットは、各種センサに対応した基板を組み合わせるタイプと、多種センサに対応するタイプの2シリーズを開発し、低コストで柔軟なシステム構

築を可能とした。

さらに、機器監視サーバとイントラネットを組み合わせたシステムを開発し、巡視作業の時間低減や、遠隔からセンサを起動し機器状態の的確な把握を行うことを可能とした。機器監視サーバは、機器監視情報をデータベース化する機能と、データを市販のブラウザソフトウェアを用いて表示する画面生成機能を持っている。また、機器監視サーバとセンサ信号処理ユニット間の機器監視システムLANは、今回は10BASE-FL(IEEE802.3に準拠)を採用し、プロトコルはTCP/IPとし、保護・制御用LANと共用の構成でも分離した構成でも可能とした。

今後、CBMを指向した業務の変化や変電所システムのIT化に伴った適用が図られるものと期待する。



## 次世代機器監視システムの構成

センサヘッドによって機器状態を検出し、センサ信号処理ユニットで異常の有無を判定する。変電所本館に設置される機器監視サーバは検出データをデータベース作成機能と画面生成機能を持ち、変電所から離れた保守拠点の表示端末では、機器の異常の確認やセンサを遠隔起動して追加の機器情報を得ることが可能である。

1. ま え が き

これまで、基幹変電所を中心に、電力の高信頼性維持を目的として変電所機器監視システムが導入されてきた<sup>(1)(2)</sup>。しかし、近年、電力設備投資が抑制され、メンテナンスに対する客先ニーズは、設備費用の低減、巡視作業の効率化、設置後25～30年経過した高経年機器に代表される既設機器へのメンテナンス方法の確立、CBMによる効率的なメンテナンス等によるコストの削減が要求されている。

今回、次世代機器監視システムとして機器監視専用の盤が不要な小型のセンサ信号処理ユニットを開発し、設備費用の低減を可能に、また既設変電所への適用を容易にした。さらに、機器監視サーバとイントラネットを組み合わせたシステムを開発し、巡視作業の時間低減や、遠隔からセンサを起動し機器の状態の的確な把握を行うことを可能とした。

本稿では、監視システムの構成、監視センサ等について述べる<sup>(3)</sup>。

2. 機器監視システムの構成

前ページの図は、次世代機器監視システムの構成を示している。このシステムは、監視項目を検出するセンサヘッド、センサヘッドからの検出信号に基づいて異常の有無を判定するセンサ信号処理ユニット、検出データを保存・表示する機器監視サーバ、及び検出データを変電所から離れた保守拠点等で確認し機器の異常を判定できる監視端末で構成される。各構成機器は、センサヘッドは主に機器近傍に、センサ信号処理ユニットはGIS制御箱やクーラー盤といった機器制御盤内に、機器監視サーバは変電所本館に、表示端末は保守拠点等に設置される。

3. 機器監視用センサ

3.1 GIS監視用センサ

表1にGIS機器監視用センサの代表的な監視項目と監視方法について示す。従来のGIS監視は事故を未然に防ぐ“予防保全”や事故発生後の復旧を支援する“事後保全”が目的であったが、最近ではメンテナンスの低コスト化を目指す

CBMや巡視作業の効率化の目的も含めて導入されている<sup>(4)(5)</sup>。センサとして、最近製品化した分解ガスセンサと、現在開発中のハイブリッドセンサ(Mitsubishi Advanced Hybrid Sensor : Mahs,  $\mu$ -Cube-I)の外観と機器取付け例を図1

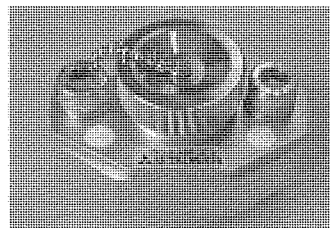


図1. 分解ガスセンサの外観

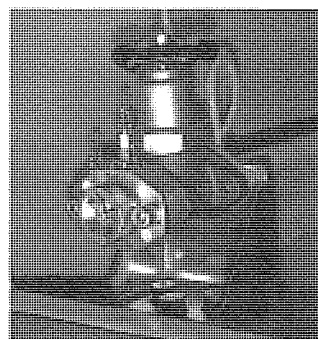


図2. 分解ガスセンサの機器取付け例

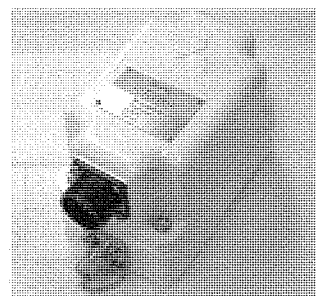


図3. ハイブリッドセンサの外観

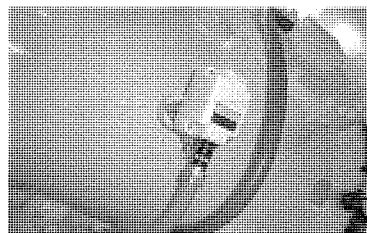


図4. ハイブリッドセンサの機器取付け例

表1. GIS監視項目と監視方法

	監視項目	監視方法
気密性能	ガス漏れ監視	SF <sub>6</sub> ガス圧力を温度によって20℃換算ガス圧力に補正し、ガス漏れの有無を検出する。
絶縁性能	部分放電監視	部分放電に伴い発生する電磁波や機械的振動を検出する。
開閉性能	CB動作時間監視	開閉指令の電流から機構の動作終了までの時間を、CTと接点で検出する。
	CB動作行程監視	エンコーダによって操作機構の動きを検出する。
	CB油ポンプ	操作源の油ポンプの動作回数やバネ蓄勢力を、接点によって検出する。
	CBコンタクト消耗度監視	遮断電流、アーク時間からコンタクトの消耗度を求める。
保護性能	LA漏れ電流	抵抗分漏れ電流や全漏れ電流をCTを用いて検出する。
通電性能ほか	分解ガス監視	事故時や、コンタクトの接触不良時に発生する分解ガスを検出する。
事後保全	事故点標定	ガス圧力の上昇から、地絡・短絡の発生したガス区分を標定する。



～図4に示す<sup>(6)</sup>。

分解ガスセンサは、従来の検知管で実施していたSF<sub>6</sub>の分解ガス測定結果を数値で表示可能であり、基本的にガスの大気放出なしで測定可能等の特長を持っている。また、検知管では運用上困難であった定期的な分解ガス濃度の測定により、コンタクトの接触不良監視が可能である。

ハイブリッドセンサは、ガス圧力センサ、温度センサ、分解ガスセンサの複数センサを一体化している。そのため、従来の連成計やガス密度スイッチ、それに接続されるガス配管の引き回しが不要という特長を持っている。表2にハイブリッドセンサの代表的な性能を示す。

### 3.2 変圧器監視用センサ

表3に代表的な変圧器監視項目と監視方法を示す。

最近ユーザーの要望が高まっているCBM化対応のLTC接触子消耗監視や過負荷監視装置を開発した。これらの監視装置は、機器の負荷電流やLTCの動作監視情報又は油温度・周囲温度など従来の監視情報(センサ情報)を基に演算処理するために、新たなセンサは不要である。

また、機器の内部異常検出や異常の様相と進展具合の診断に有効なオンライン油中ガス分析装置(油中ガス監視装置)を小型・低コスト化し、遠隔地の保守拠点から随時起動可能なりモートセンシング機能を追加した。図5に機器に取り付けた油中ガス監視装置を示す。

### 4. センサ信号処理ユニット

センサ信号処理ユニットは小型化を図り、機器制御盤内に取り付け可能とすることで、ユニットを取り付ける専用盤の費用削減を実現した。また、小型化によって既設機器への適用も容易にした。図6にユニットの外観を示す。

表2. ハイブリッドセンサの代表的な性能

ガス圧力センサ (ガス漏れ監視)	分解能	20Pa
	安定性	±0.2%/年
ガス圧力センサ (事故点標定)	検出感度	0.1kPa
分解ガスセンサ	検出感度	0.2Vol.ppm (0.5MPa-ゲージ換算値)

このユニットは、ワンチップマイコンによる分散処理を採用し、小型・低消費電力を実現するとともに、フロントメンテナンスにも対応した設計とした。ユニットに組み込む基板は、100mm×160mmの標準的な3Uサイズを採用した。図は21スロット425mm幅のユニットの例であり、センサ数の少ないケースでは10スロット233mm幅も用意している。このユニットは、必要入力点数に応じて各種センサに対応した基板を組み合わせるタイプと、入力点数は少ないが多種のセンサに対応するタイプの2シリーズを開発し、低コストで柔軟なシステム構築を可能とした。

また、今回は、機器監視システムLANは10BASE-FL(IEEE802.3に準拠)を採用し、プロトコルはTCP/IPとした。このLANは、保護・制御用LANと共用の構成でも、分離した構成でも可能とした。LANで伝送される情報量は、変圧器1バンク当たりではタップ切換器などの波形データ伝送を考慮して最大8kbps、GIS 1ベイ当たりの情報は4kbpsであり、8ライン、4バンク、2ブスタイ、2ブスセクの標準的変電所システムでは80kbpsとなる。した

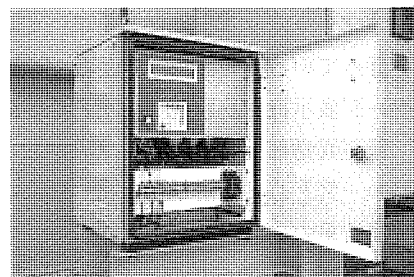


図5. 油中ガス監視装置の機器取付け例

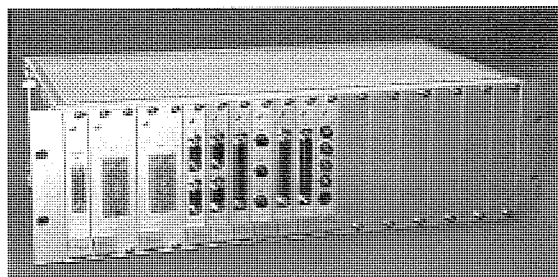


図6. センサ信号処理ユニットの外観

表3. 変圧器監視項目と監視方法

監視項目		監視方法
絶縁性能 通電性能	油中ガス監視	絶縁油中の溶存可燃性ガス成分を自動採油・分析し、内部異常(過熱や放電)の検出及び様相・進展具合を診断する。
絶縁性能 通電性能	油面監視	機器内の油面と油温を検出し、絶縁油の膨張・縮小を補正して漏油を監視する。
通電性能	冷却器特性監視	油温及び周囲温度から油温上昇を検出し、冷却器の冷却性能の低下を監視する。
過負荷監視	運転時及び予測巻線温度	通電電流、油温、周囲温度、冷却器運転状態を入力し、熱等価モデルによって巻線温度をシミュレーションする。 さらに、予測パターンから今後の巻線温度・損失寿命を推定する。
LTC動作特性監視	切換開閉器～駆動機構劣化監視	駆動軸トルク波形・電動機電流波形及び動作モードから、LTC動作シーケンス対応の劣化具合を検出する。
LTC接触子消耗監視	主接点、抵抗接点の消耗及びアンバランス消耗監視	LTC動作時の負荷電流、切換え方向から各接点の累積消耗度を推定することで、詳細点検時期や部品交換時期を予測する。

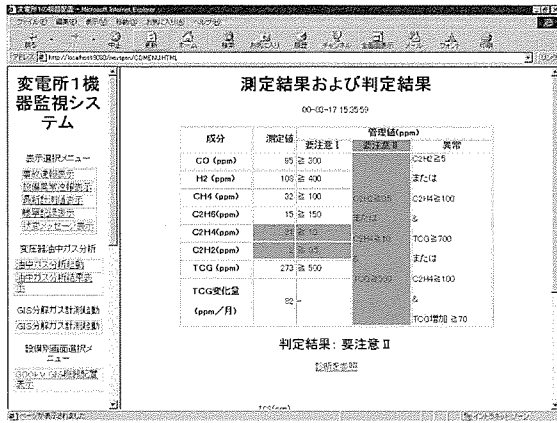


図7. 変電所サーバの画面生成例

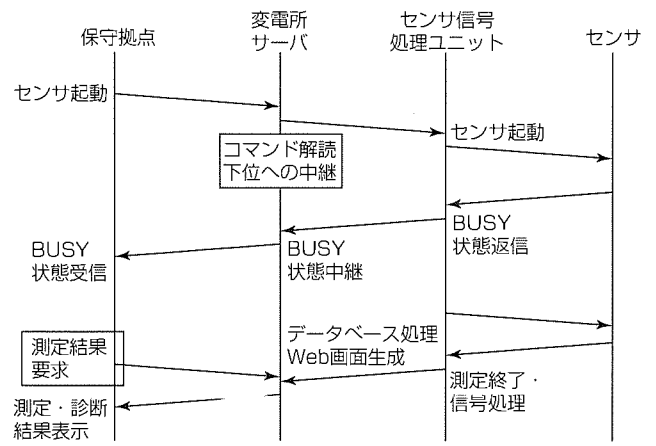


図8. 遠隔地からデータ収集時の情報の流れ

特集  
I

がって、今回採用した10Mbpsの伝送容量で十分であると  
考えられる。

### 5. 機器監視サーバ

機器監視サーバは、センサ信号処理ユニットからの機器監視情報をデータベース化する機能と、データベース中のデータを市販のブラウザソフトウェアを用いて表示する画面生成機能を持っている。画面生成機能としては、機器異常等のメッセージ表示機能、監視データの数値表示とグラフ表示機能、機器異常部位の画面表示機能がある。図7に、画面生成機能の一例として、油中ガスセンサからの計測情報及び異常判定結果の表示画面を示す。

このシステムでは、遠隔地の保守拠点からWebブラウザ画面を介してセンサを起動し、センサデータを収集することが可能である。図8に遠隔地からデータ収集時の情報の流れを示す。このように遠隔地から分解ガスセンサや油中ガスセンサを起動して変圧器やGISの機器状態を的確に把握できることは、メンテナンス業務に重要であると考えられる。なお、機器監視サーバにも市販ブラウザをインストールして変電所本館で機器監視データの確認を行うことが可能である。

### 6. むすび

次世代機器監視システムとして、機器監視専用盤が不要で、既設変電所にも適用容易な小型のセンサ信号処理ユニットを開発した。また、巡視作業の効率化やメンテナンス

コストの低減が可能な機器監視サーバとイントラネットを組み合わせたシステムを開発した。今後、CBMを指向した業務の変化や変電所システムのIT化に伴った適用が図られるものと期待する。

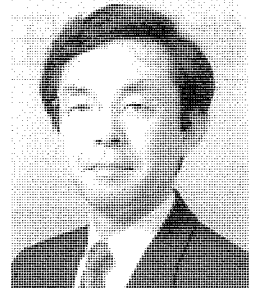
### 参考文献

- (1) 牧野芳弘, 内藤貞夫, 難波貞夫, 今井満夫, 吉川徹: 変圧器の予測保全技術, 三菱電機技報, 66, No.12, 1175~1182 (1992)
- (2) 細川育雄, 小林晴彦, 青木 浩, 石辺信治, 小原正利, 金田佳男: ガス絶縁開閉機器の予測保全技術, 三菱電機技報, 66, No.12, 1183~1188 (1992)
- (3) 前川 洋, 篠原秀雄, 塩谷景一, 土井 博, 喜多純子: インターネット対応の変電所運転保守支援システム, 平成12年電気学会B部門大会予稿, 503~504 (2000)
- (4) 伊藤隆史, 居蔵伸樹, 山岸武史, 亀井光仁: オンライン部分放電監視・診断システムの開発, 平成12年電気学会B部門大会予稿, 225~226 (2000)
- (5) 亀井光仁, 西田智恵子: ガス絶縁開閉機器の状態保全用診断技術, 電気学会誘電・絶縁材料研究会, DEI-01-48, 45~49 (2001)
- (6) 本田義勝, 亀井光仁, 梶田直幸, 前田恭宏: GIS向けハイブリッドセンサの開発, 平成12年電気学会B部門大会予稿, 227~228 (2000)

## 新外鉄形変圧器開発に寄せて

名古屋大学  
電気工学専攻

教授 大久保 仁



変圧器は、1882年に原形が発明されてから約120年の歴史を持つ電力機器である。当初から内鉄形・外鉄形が発明されている。また、開発直後には早くも絶縁・冷却に絶縁油を使用し、絶縁油が絶縁と冷却を両立させ、セルロース系の絶縁紙と絶妙のコンビネーションを示してきた。120年に及ぶ開発で、機器サイズや質量が画期的に小さくなり、今日までに低損失化・大容量化・高電圧化を達成し、ついには1,000kV/3,000MVAのUHV変圧器までほぼ同一のコンセプトで開発してきた。この間、たゆまない技術開発がなされ、絶縁技術/試験技術/絶縁協調に代表される高電圧技術、電界・磁界解析や熱・構造解析などのシミュレーション技術、それに新しい材料技術やその処理技術が次々に投入されてきた。また、絶縁設計技術が高精度化されるとともに、製造技術の向上とあいまって、変圧器技術体系を構築してきた。

現時点で我が国だけでも約680GVAの変圧器が電力システムの中で運転されており、変圧器は現代社会を支える隠れたヒーローである。電力供給のかなめ(要)の機器としてその役目を果たしており、絶縁協調やシステム保護の観点からも最も重要な機器として位置付けられている。

このように、変圧器は電気利用のれい(黎)明期から使用され、現在の情報社会を支え、そして将来社会にまで引き続き使用されようとしている。今回、材料技術やシミュレーション技術、高電圧技術などの最先端技術が注ぎ込まれ、500kV新外鉄形変圧器開発が行われた。基本的コンセプトを変えずに体積で従来の1/2になるという、正に変圧器技術のBreakthroughである。21世紀の始まりとともに新

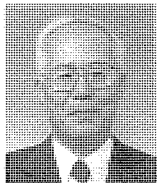
外鉄形変圧器の開発が成功したことは、我が国の電力機器、電力技術分野のグローバル化の象徴であろう。

振り返ってみると、高度成長期におけるこれまでの力づくでの技術開発が、いずれ限界に近づくことはむしろ必然であった。また我が国においては、20世紀最後まで、独自の信頼性追及、慎重なまでの機器開発コンセプトに固執し、次第に世界的潮流から離れてきた。しかし今回、原点に戻り、発想の転換、視点の変換、ソフト的思考の展開を加えることにより、飛躍的發展が得られることが証明された。電界分布の最適化と現象との調和により、絶縁空間の利用率は大幅に上昇し、コンパクト化やコスト低減だけでなく、未来志向の効率向上と環境適合性を達成した。

このことで、技術開発には決して終わりのないこと、ハードの中にも逆転の発想やソフト的技術開発が意味を持つことも明らかになった。また、社会が要請するニーズにタイムリーに対応できたこと、それによって我が国の電力機器技術が世界にグローバル化したことは、特筆すべきことである。

私はこれまで技術開発はそもそも不連続的に達成されるものであると思ってきたし、また、歴史的に見ても事実そのとおりである。今回の新外鉄形変圧器開発は不連続的のものであり、文字どおりBreakthroughというにふさわしい。それは、これまでの変圧器開発のPersistentな技術積み上げがあったからこそ可能となったものである。技術の維持・継続と改革・変革がみごとにバランスのとれた今回の成果に敬意を表する。

今後更なる技術的展開を期待したい。



玉置榮一\*

# 外鉄形変圧器の技術動向と展望

## 要旨

電力用変圧器は、電力輸送に欠かせない機器で、既に100年以上の歴史を持つ成熟機種であるが、現在でもコンパクト化や高効率化等に向けて日々研究開発が続けられている。

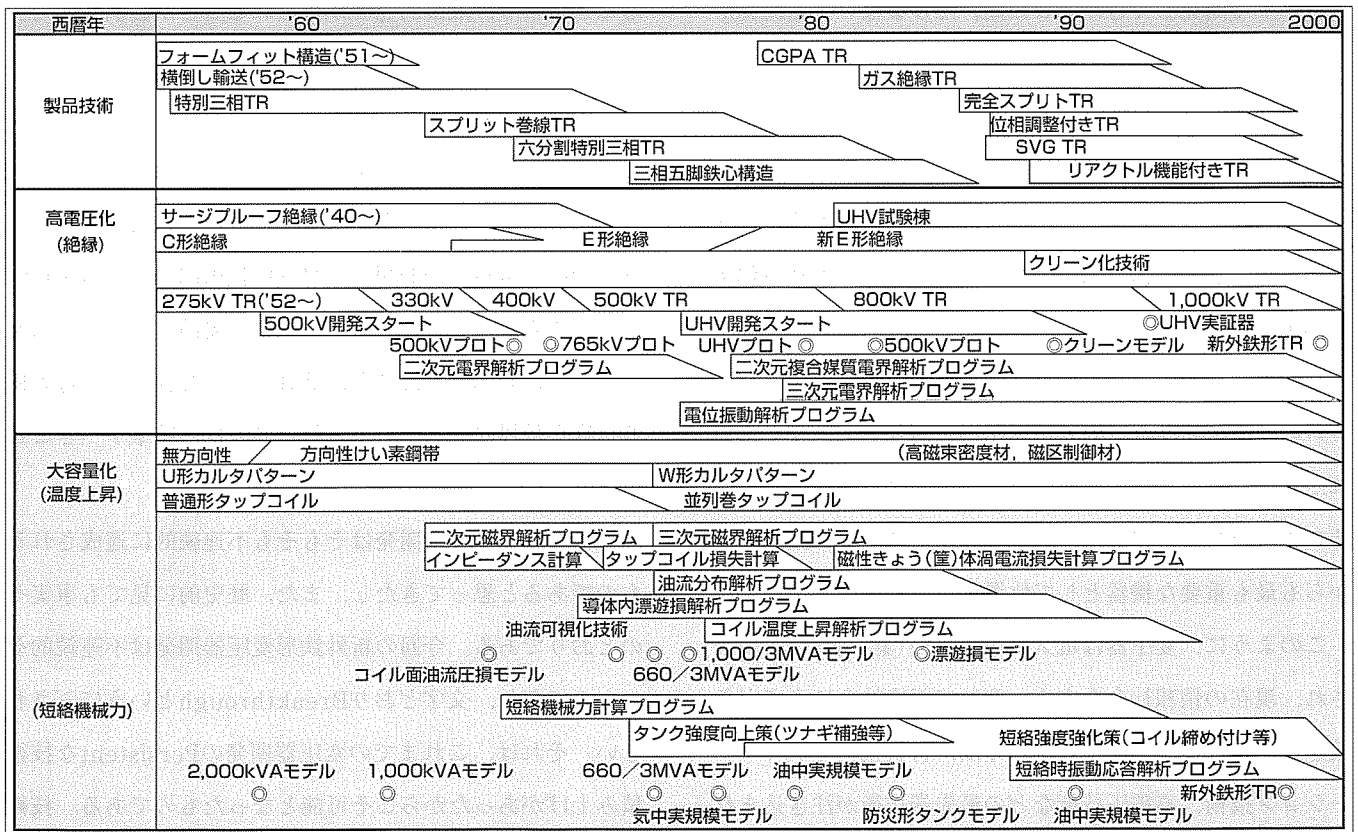
三菱電機では、電力需要の増大に伴う電力用変圧器の高電圧化・大容量化の要請にこたえて、時代を先取りした挑戦を続けて記録的な製品を納入し、電力の安定供給、電力システムの信頼度確保に寄与してきた。

当社では、1923年に米国ウエスティングハウス社と技術提携をして以来、高電圧・大容量変圧器には外鉄形を採用してきた。'60年代からの高度経済成長期以降は、当社独自技術での高電圧・大容量化に取り組み、'98年には総生産容量5億kVAを突破している。大容量器においては、

輸送問題が大きな課題であるがその解決策として、フォームフィット構造、シュナーベルつ(吊)り掛け輸送、特別三相方式、コイルグループをパックして分解輸送するCGPA (Coil Group Packed Assembly)方式など、常に業界をリードしてきた。解析技術の進歩とその適用による実器構造の改善により、本体の高効率化・コンパクト化が図られ、製造・試験技術についても、ライン化・クリーン化への改善・改良が継続的に実施され、品質の安定と製造日程の短縮が図られてきた。今回開発した新外鉄形変圧器は、従来からの改良・改善から更に発想の転換を行って実現させた巻線構造(群数低減)、ハーモニーコンポ絶縁、接着絶縁導体の採用などで大幅なコンパクト化を実現している。

(注) “CGPA”は、三菱電機株の登録商標である。

特集 II



## 当社外鉄形変圧器の技術の変遷

外鉄形変圧器の製品技術の変遷及び主要技術課題である高電圧化・大容量化への取組状況を示す。

## 1. ま え が き

変圧器は、ファラデーの電磁誘導の法則をそのまま具現化したような電気機器であるが、1831年の法則発見から50年もたった'86年に実用化されたと言われている。電力事業のれい(黎)明期には直流方式と交流方式の優劣を巡って激しい競争が行われ、これに終止符を打ったのが変圧器の発明であった。電力用変圧器の構造には、外鉄形(シェル形)と内鉄形(コア形)の二種類がある。この二種類の変圧器は、変圧器が発明されて以来、互いに切さたく(磋琢)磨しながら進歩を遂げてきた。内鉄形は主にヨーロッパで、外鉄形はアメリカで発達した技術である。三菱電機は、高電圧・大容量器には外鉄形が有利であると判断していたこと、技術提携をしていた米国ウエスティングハウス社(W社)が外鉄形を製造していたことから、当初から大型器に外鉄形構造を採用してきており、この技術方針は今日も変わっていない。我が国の変圧器製造事業の初期には他メーカーで外鉄形を作っていたところもあったが、現在では当社のみが製作しており、その意味では独特の技術と言える。ここでは、当社外鉄形変圧器の技術的変遷の概要を振り返るとともに、今後の展望について述べる。

## 2. 当社変圧器事業の歩み

### 2.1 変圧器の誕生と当社変圧器の起源

当社の変圧器の源流をたどると、現在残されている変圧器設計書の第一号は水利事務所向け7.5kVA 3,500/220V単相油入式のものである。三菱電機製品としての第一号は'24年(大正10年)三菱造船所向けの100kVA 3,300/220V変圧器と考えられ、'23年のW社との技術提携まで大同電力向け5,000kVA 55/22kV器などかなりの大容量器を自主技術で製作していた。W社との技術提携後は、その技術の消化と自主技術の研さん(鑽)、国内外の需要の拡大に支えられて順調に生産を拡大した。

### 2.2 製品の進歩

#### 2.2.1 電圧・容量記録

当社外鉄形変圧器の累積生産容量の推移を図1に、単器容量及び最大電圧の推移を図2に示す。

外鉄形の初期の製品では、高・低圧コイルを多くの群に分割し、それらをサンドイッチのように交互に積み重ねる方式がとられていた。これでは雷インパルス電圧の分布が悪く、高電圧の巻線構造としては問題が残った。この点を解決するため、サージブルーフ絶縁と称する方式が'35年ころ考案された。この構造を本格的に用いたのは、'40年に製作した満州電業向け50MVA 220kV単相器<sup>(1)</sup>である。また、この変圧器は、当社では初めて衝撃電圧試験を実施したことで、記録されるべき製品であった。このころは、外国では既に方向性けい素鋼帯が発明されるなど、近代的

変圧器の基礎が固まった時代である。しかしながら、ちょうど日華事変・太平洋戦争と最悪の周囲環境に災いされ、大型変圧器の生産は、戦前から戦後にかけて、苦難の時代が続いた。生産量が戦前の最高レベルにまで回復したのは'52年のことである。その後は、我が国の電力需要の伸びと輸出市場への進出に支えられて、順調に生産高を伸ばし、外鉄形総生産容量は'78年に2億kVAを達成し、さらに'98年には5億kVAを突破した。'52年の関西電力(株)枚方変電所向け275kV変圧器<sup>(2)</sup>の製作をきっかけに、高電圧・大容量化が進み、'71年には東京電力(株)房総変電所向け500kV 1,000/3MVA<sup>(3)</sup>、'93年には東京電力(株)UHV機器試験場向け1,000kV 3,000/3MVA<sup>(4)</sup>を製作した。

#### 2.2.2 鉄心材料の進歩

鉄心に関しては、'55年ころまでは主として3フィート×6フィートの定尺の熱間圧延けい素鋼板が用いられていた。外国では戦前既に方向性けい素鋼帯が使用されていたから、この時点では、少なくとも鉄心材料に関する限り、外国に比べて10年以上遅れていたことになる。当社が本格

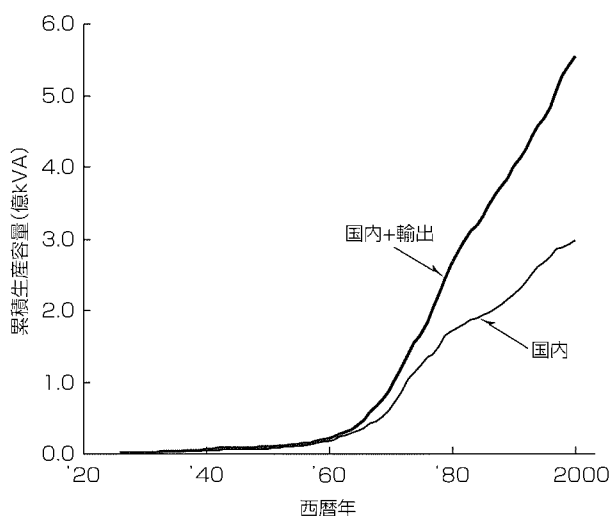


図1. 当社外鉄形変圧器の累積生産容量

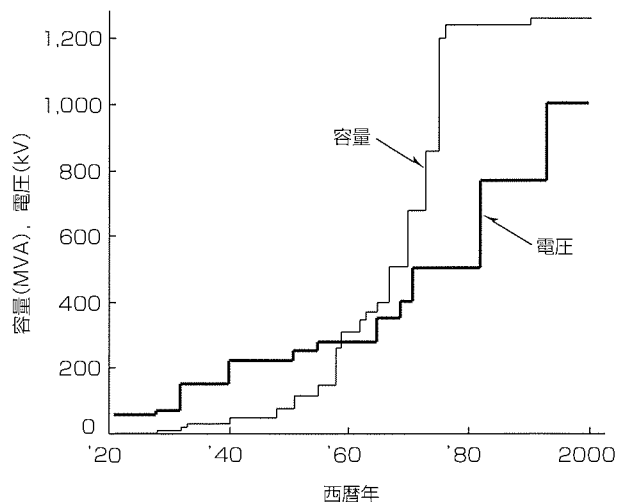


図2. 当社外鉄形変圧器の単器容量及び最大電圧の推移

的に方向性けい素鋼帯を使用したのは'58年の東京電力(株)中東京変電所向け260MVA器<sup>(5)</sup>で、これには米国アームコ社製のものを輸入して使用した。その後、国内製鉄会社によって優れた方向性けい素鋼帯が製造され、'60年ころからはすべての変圧器に用いられるようになり、鉄心構造も短冊から額縁となり、変圧器のコンパクト化・高効率化が図られた。その後のけい素鋼帯メーカーによる薄板化や高磁束密度材、磁区制御材などの改良開発により、方向性けい素鋼帯の特性は一段と向上し、変圧器の高効率化に大きく貢献した。外鉄形変圧器の鉄心構造は、内鉄形に比べ単純であるため、製作過程での材料特性の劣化が少なく、素材特性を生かすのに有利である。

### 2.2.3 輸 送

変圧器の質量・寸法が大きくなると輸送が困難であるため、その解決に多大の努力を払ってきた。'50年ころまで容量30MVA以上はすべて分解輸送であった。これは工場一度組み立てて試験した変圧器を解体して現地へ輸送し再度組み立てる方法で、現地での再組立てに多大の労力を要した。工場組み立てた状態のまま現地へ輸送できることが望ましく、その最初の解決はフォームフィット構造の採用であった。当社は'52年に東京電力(株)東千葉変電所向けの39MVA器をフォームフィット横倒し構造で組立て輸送することに成功した<sup>(6)</sup>。これは当時としては画期的なことで、我が国における大型変圧器の組立て輸送のこうし(嚆矢)となった。その後組立て輸送の有力な武器として種々の大物特殊貨車が登場し、'57年にはシュナーベル吊り掛け式240トン積みの国内最大の重量物輸送貨車シキ400ができた。また'50年に、特別三相方式が登場した。これは、三相変圧器の本体を3分割して輸送した後、現地で共通上部タンクを載せ、ブッシング、リード、タップ切換器などを三相器と全く同じ構造で組み立てられるようにしたものである。この方法をとれば、輸送質量は約1/3になる上に、出来上がった姿や大きさは普通の三相器とほとんど変わらないため据付け面積も縮小され、開閉機器との接続にも便利であった<sup>(7)</sup>。そのため、“特三”の愛称でユーザーから歓迎され、当社変圧器の大きなセールスポイントになった。輸送条件が非常に厳しい場合には、更に分割数を増やした“特六”“特九”などで対応したものもある。しかし輸送条件がますます厳しくなり、このような分割輸送でも対応しきれないことが予想されて、'70年ころから、コイルグループ全体をパックして現地まで輸送し、現地での再組立てを格段に改善したCGPA方式と称する改良形分解輸送、現地組立ての技術開発が本格的に始められ<sup>(8)</sup>、'84年には275kV 300MVA、'93年には500kV 300MVAが製作され、現在では500kV 1,000MVA器<sup>(9)</sup>にまで適用されている。

### 2.2.4 高機能・多機能化

電力系統の拡大や信頼度向上などから、系統運用上の要

求に基づく変圧器に対するニーズも多様化している。このためには、各単独変圧器のコンパクト化を図ることはもちろんであるが、更に効果的な方法として、従来複数台の変圧器で構成していた機能を1台の変圧器で可能とする機能の複合化がある。外鉄形変圧器構造は、これらの多様な要求を無理なく実現するために好適であり、①高压巻線を2並列結線とするとともにバイパス鉄心を設けることによって二分割した低压巻線電圧を独立して調整可能とした独立電圧調整スプリット変圧器、②位相調整器と主変圧器を一体化した完全一体形負荷時電圧位相調整変圧器、③リアクトルと変圧器を一体化したりリアクトル機能付き変圧器などがある<sup>(10)</sup>。これらは、二つの磁気回路の一部を共通化することによって鉄心の使用量の削減を図り、高効率化・コンパクト化を図ったものである。また、外鉄形変圧器はコイル配置の自由度が高いので、これを最大限に活用し3巻線変圧器の各巻線に分離したインピーダンス配分に工夫を凝らし、二次巻線の電圧変動が三次巻線に影響しないフリッカ負荷対応変圧器なども製作された。

### 2.2.5 不燃・難燃化

大都市の電力需要の集中化に伴って都心部における高電圧・大容量変電所が必要となり、このような変電所では、住宅地に近接するため、不燃化・低騒音化などの環境調和性、及び用地の取得難から変電所スペースの有効活用が強く求められる。この要請にこたえるため、当社では'63年からガス絶縁変圧器の開発に着手し、'81年には77kV、40MVA真空スイッチ式負荷時タップ切換器付きガス絶縁変圧器を完成させ、実系統試験を完了し、'84年には世界最初の超高压ガス絶縁変圧器として275kV、200MVAプロトタイプ変圧器<sup>(11)</sup>を完成させ、その後関西電力(株)枚方変電所等で実運用されている。当社で開発した超高压大容量ガス絶縁変圧器は、外鉄形変圧器の特長を生かし、基本構造はほとんど油入変圧器と同様で、コイル表面のみに冷媒であるパーフルオロカーボン(C<sub>8</sub>F<sub>16</sub>O)を流下させることによって少ない冷媒量で効果的な冷却ができ、本体のコンパクト化が図られている。

## 2.3 技術の進歩

### 2.3.1 絶 縁

外鉄形変圧器では、'59年ころから超々高压を目指して絶縁技術開発を始め、1965年に従来のサージプルーフ形の改良構造を完成した。これをコイルの溝形絶縁物の形からE形絶縁と呼び、メキシコ向けに大量受注した400kV変圧器に直ちに採用して良好な結果を得た<sup>(12)</sup>。その後140kV以上の標準絶縁構造として、当社変圧器の声価を高めるのに大きく貢献した。その後、UHV対応絶縁として、E形絶縁構造を基本に、絶縁物折曲部に曲率を設け、一層等電位面に沿った絶縁物配置を採るとともに、静電板、リード口出し部、接地側電界シールドなどに改良を加えた新E形絶縁

構造を標準化し、高電圧器の一層の性能向上に寄与している<sup>(13)</sup>。また、今回開発した新外鉄形変圧器に採用したハーモニーコンポ絶縁では、プレスボードの組合せ構造に工夫を加え、高電界部の油げき(隙)寸法を大幅に縮小して、コンパクト化と高信頼度化を図っている。

### 2.3.2 解析技術

変圧器は電磁界現象応用の機械であり、変圧器発展の歴史の中で電磁界解析技術の果たした役割は大きい。変圧器の機能設計に必要なインピーダンス、磁界、巻線の渦電流損失、電磁機械力などの専用ソフトウェアは、大型コンピュータが汎用的に使われるようになった'60年代に開発された。当時は変圧器の単器容量が飛躍的に増大したことで、その設計精度を大幅に向上させた。さらに引き続いて、タップリードやコイル各部の温度上昇、三次元磁界分布、油流分布、非磁性薄板構造物内の渦電流損失分布などの変圧器内部の詳細を分析できるソフトウェアの開発を進めるとともに、各種の実物大モデルや実器を用いた検証試験との突き合わせによってその妥当性を確認し、実器設計技術の高度化が図られ、大容量器の信頼性確保に大きく貢献した<sup>(14)(15)</sup>。また、電界関係についても、'70年代前半には電位振動解析ソフトウェアが完成し、これによって端子から進入した衝撃電圧がコイル内でどのように分布するかに対して、それまではコイルが出来上がった時点で仮組みし電位分布を測定して確認していたものが、設計時点で克明に把握できるようになった。最近では、計算機の能力も大幅に向上し、計算に要する時間も短縮したため、かなり複雑な形状に対しても三次元での電界・磁界解析も可能となり、変圧器設計の高精度化・効率化が図られてきている。

### 2.3.3 機械技術

変圧器の大容量化に伴い、電氣的諸問題に加え、変圧器の強度、振動・騒音、耐震、冷却などの機械的問題も重要な問題としてクローズアップしてきた。短絡機械力については、'70年代に実規模モデル試験を数回実施するとともに、絶縁物の非線形性や衝突現象を考慮した巻線振動解析から油圧変動及びタンク部品振動までの総合的短絡現象を解明し、外鉄形の優位性を確立するとともに信頼性の向上を図っている。今回開発した新外鉄形変圧器では、コイル導体に接着電線を採用し、漂遊損失の低減、冷却効率の向上に加え、短絡機械力に対しても大幅に強化されている。

また、内部事故の内圧上昇による絶縁油の流出、火災への事故拡大防止対策の要求も高まり、変圧器タンクに対しては、従来から実施していた実規模の静水圧破壊試験に加え、火薬燃焼試験及び三次元構造解析を実施し、弱点部の改善と最適な補強の配置など合理的なタンク設計法を確立している。

変電所の騒音規制は、都市化の進展に伴いますます厳しくなっている。変圧器の低騒音化対策として、本体につい

ては、高磁束密度材けい素鋼帯の適用、鉄心及びコイルの振動解析による形状の最適化と締め付け構造の改善、タンク振動の解析に基づく補強配置の適正化などの対策が採られているが、更に大幅低減が必要な場合には、タンクへの遮音板取付け、鉄板やコンクリート製の防音壁などで遮音や吸音を行う方法も採用している。また、冷却器の低騒音化は、ファン形状を改善した低騒音ファン、低回転ファン、吸音ダクトなどを取り付けたユニットクーラを開発し適用している。このような種々の対策により、大容量器でも45ホンもの低騒音化が可能となっている。

### 2.3.4 製造・試験

当社の外鉄形変圧器製作場所は会社設立から約20年間は神戸で、その後'40年に大阪工場(現在の系統変電・交通システム事業所伊丹地区)に移転したが、変圧器の高電圧化・大容量化に伴って工場敷地面積の制約や輸送制限等解決すべき問題が生じたため、'72年、赤穂に変圧器専門工場が完成し現在に至っている。変圧器の製作は極めて労働集約的であるが、新工場建設を契機に種々の合理化に取り組んできている。例えば、グループ組立ての流れ作業化、組立て・試験のライン化、エアパレットによる重量物棟間輸送などは、常に改善改良が加えられ、効果を上げている。安定した絶縁性能を持たせるには製作段階における徹底的な異物混入防止対策を採る必要があり、中身組立てはすべて空調防じん(塵)工場で行うとともに、クレーン等からの金属異物の落下防止など随所に対策を施している。また、UHV変圧器開発を契機に、絶縁物加工用CO<sub>2</sub>レーザ切断装置やコイルグループ組立て用クリーンルームを設けるなど、各製造工程におけるクリーン化の徹底が図られた。'81年には、UHV機器の開発を進めるため、UHV試験所を建設した<sup>(16)</sup>。設備としては世界最大級の2,200kV試験用変圧器、6,000kV衝撃電圧発生装置はもちろん、ヒートラン試験も含め、変圧器やGISなどUHV送電機器の試験を一貫して行えるよう配慮されているほか、高性能・高稼働率・コンパクト化を図るなど、数多くの特長を備えている。このUHV試験所は、今後の海外ビジネス展開に不可欠な証明書付きの試験成績書の発行が可能となる日本適合性認定協会(JAB)による高電圧試験所の認定を受けている。

### 2.3.5 異常・寿命診断及び監視技術

当社では、変圧器の内部異常検出技術の一つである油中溶解ガス分析による診断技術を'60年代に実用化するとともに、変圧器の状態を必要十分な頻度と精度で継続監視できる実器直結形の自動分析装置も製品化し、重要な変圧器などに取り付けている<sup>(17)</sup>。

油入変圧器は、30年程度の寿命が期待されている。最近では、'60年代から高度経済成長期に製作された30年を超える大容量変圧器が増えている。電力供給の信頼性を確保するためには、これらの機器の劣化程度を正しく判定する

ことが極めて重要である。変圧器の寿命は、絶縁紙の機械的強度に依存すると考えられている。このため、絶縁紙の機械的強度と相関関係にある絶縁紙劣化成分の発生量を求めて変圧器の余寿命を推定する方法の研究が行われている。現在、重合度法、フルフルール法、(CO<sub>2</sub>+CO)法などを用いた余寿命予測技術が確立されつつある<sup>(18)</sup>。

### 3. む す び

交流基幹系統の送電電圧は、現在は500kVで、将来は1,000kVへの昇圧が計画されているが、それ以上の昇圧については、土地の確保や設備建設費などの点から難しいと考えられる。また、大容量化については、変電所用は現在500kV器でバンク容量1,500MVAが最大で、発電所用は発電機の単機容量から決まり、現在次期原子力発電所用として1,600MVA前後が計画されているが、これ以上の大容量化のニーズは明確でない。

近年、電力安定供給の重要性はますます高まり、電力設備の信頼性の向上、維持管理の高度化のニーズが増大している。一方では、高度経済成長期に多くの変圧器が設置され、それらが、運転状況にもよるが、老朽化しつつあり、更新時期の見極めが重要な課題となってきた。また、日常保全業務の省力化も求められている。

今後の変圧器技術の動向として、

- (1) 絶縁破壊メカニズム解明による絶縁構造の改善や使用絶縁材料の耐電圧向上などの絶縁技術向上による更なる小型軽量化
- (2) 磁界・漂遊損解析技術の精度向上と効果的な対策の実用化による負荷損失低減
- (3) けい素鋼板の磁気特性及び実器適用技術の改善による無負荷損失低減
- (4) 騒音発生メカニズムの解明と効果的な騒音低減策の確立
- (5) 変圧器余寿命診断の精度向上
- (6) 高経年化を踏まえた設備保全、監視による保守支援
- (7) 機器劣化評価、延命化、設備更新に関する技術開発などが考えられる。

### 参 考 文 献

- (1) 木村久男：220kV/44kV 50,000kVA単相変圧器，三菱電機技報，17，No.1，79～92（1941）
- (2) 田宮利彦，村上 有：250kV 117,000kVA超高压用変圧器，三菱電機技報，26，No.5，203～210（1952）
- (3) 岩崎晴光，青木俊之，瀬藤憲治，山田雄治，玉置栄一：500kV 1,000MVA単巻変圧器，三菱電機技報，45，No.9，1078～1083（1971）

- (4) 山形芳文，三浦良和，玉置栄一，富永雅久，岸 章夫，新海 拓：東京電力(株)新榛名変電所実証試験設備用1,050kV 3,000/3MVA変圧器（UHV変圧器），三菱電機技報，68，No.4，373～378（1994）
- (5) 村上 有，谷中頼朝：260,000kVA特別三相式超高压変圧器，三菱電機技報，32，No.10，1393～1401（1958）
- (6) 田宮利彦：変圧器，三菱電機技報，26，No.10，380～384（1952）
- (7) 田宮利彦，村上 有：佐久間発電所用特別三相式超高压変圧器，三菱電機技報，29，No.12，656～668（1955）
- (8) 松村 晋，菅 寿郎：CGPA変圧器—変圧器の新しい輸送方式—，三菱電機技報，54，No.11，785～788（1980）
- (9) 玉置栄一，富永雅久，丸岡俊雄，中塚昭治，佐久間隆：関西電力(株)奥多々良木変電所納め500kV 300MVA分解輸送方式変圧器“CGPA変圧器”，三菱電機技報，67，No.8，781～785（1993）
- (10) 祖開克二，石井孝一，新開 拓，矢野 徹：電力系統の効果的運用と三菱外鉄形変圧器，三菱電機技報，62，No.12，1078～1083（1988）
- (11) 栴山論一，吉田良男，三浦良和，玉置栄一，博多哲郎：高電圧大容量ガス絶縁変圧器，三菱電機技報，59，No.3，234～238（1985）
- (12) 菅 寿郎，竹内 実，平井正好，但馬常夫：メキシコ向け400kV変圧器，三菱電機技報，41，No.3，424～431（1967）
- (13) 三浦良和，塩野克巳，祖開克二：変圧器の技術動向，三菱電機技報，63，No.10，804～809（1989）
- (14) 菅 寿郎，渡邊次男，石井敏次，武智盛明，玉置栄一：高電圧大容量変圧器の技術開発（Ⅰ），三菱電機技報，56，No.7，526～530（1982）
- (15) 菅 寿郎，渡邊次男，石井敏次，武智盛明，玉置栄一：高電圧大容量変圧器の技術開発（Ⅱ），三菱電機技報，56，No.7，531～535（1982）
- (16) 富永正太郎，村上卓弥，菅 寿郎，渡邊次男：UHV試験所，三菱電機技報，56，No.2，157～160（1982）
- (17) 前川 洋，上窪康博，平河宏之，篠原秀雄：次期変電所における予測保全と監視制御システム：三菱電機技報，66，No.12，1196～1200（1992）
- (18) 牧野芳弘，内藤貞夫，難波貞雄，今井満夫，吉川徹：変圧器の予測保全技術，三菱電機技報，66，No.12，1175～1182（1992）



# 新外鉄形変圧器プロトタイプ器の完成

岸 章夫\* 中塚昭治\*  
 中村史朗\*\*  
 西谷恒夫\*

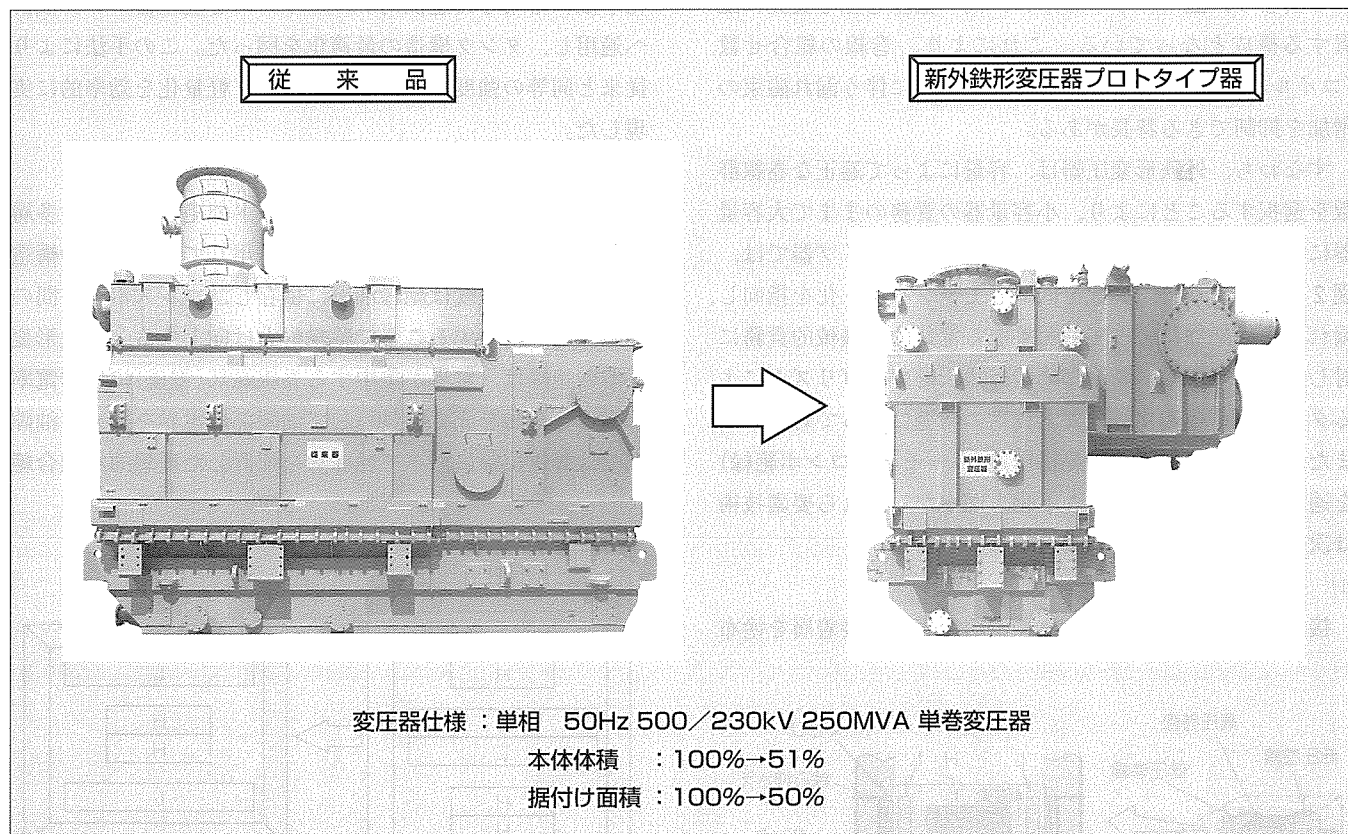
## 要 旨

三菱電機は、これまで大容量変圧器には外鉄形を採用し、豊富な製作・運転実績を持っている。今回、500kV 250MVAクラスの単相単巻変圧器で従来器と比べて本体体積51%、据付け面積50%と大幅にコンパクト化を達成した新外鉄形変圧器プロトタイプ器の製作、信頼性検証を完了した。

このコンパクト化の達成に対してはコイル群数(巻線の組合せ数)を低減してコンパクト化を指向し、漏れ磁束の増加によって厳しくなる電氣的・機械的責務に対しては接着電線、不要油流路閉そく(塞)等の新冷却構造、遺伝的アルゴリズムによるタンク構造最適化等の要素技術の開発によって対応した。また、これらに加えて、新絶縁構造(ハーモニーコンポ絶縁)の適用によって更なるコンパクト化を図った。

信頼性検証においては当社工場にてIEC規格に準拠した基本特性試験、絶縁性能試験、温度試験等によって所定の性能を満足していることを確認した。その後、世界最大の短絡試験設備を備えるKEMA(オランダ)で短絡試験を実施した後、基本特性・絶縁性能試験及び解体点検を行って異常がないことを確認し、2001年1月に認証を取得した。また、プロトタイプ器は、解体点検後に再組立てを行い、長期信頼性検証のため長期課電試験を実施した。これらすべての信頼性検証は無事完了し、新外鉄形変圧器の信頼性を確認した。

今後、開発した新技術の実器適用を拡大し、変圧器の据付けスペース縮小による基礎施工の縮減、質量・寸法の低減による輸送の容易化等の経済性向上に努めていく。



## 新外鉄形変圧器プロトタイプ器の従来形との比較

新外鉄形変圧器の製作と信頼性検証を完了した。図はプロトタイプ器と従来品の比較である。500kV 250MVA単相単巻変圧器で従来器と比較して本体体積51%、据付け面積50%を実現し、長期信頼性を含む信頼性検証も無事完了した。

1. ま え が き

三菱電機は、これまで大容量変圧器には外鉄形を採用し、技術の進歩と新たな社会的要求を反映して独自の技術開発と改良に努めてきた。一方、世界的規模での電力業界を取り巻く社会情勢の変化により、変圧器を始めとした送変電機器には、高品質・高信頼性に加え、経済性の向上が強く求められている。このニーズにこたえるため、1998年から当社変圧器の主力工場である系統変電・交通システム事業所では研究所群とともに500kV 250MVAクラスの単相単巻変圧器の体積半減を目標に据付けスペースの低減による基礎施工の縮減、質量・寸法の低減による輸送の容易化を実現する新外鉄形変圧器の開発に取り組み、プロトタイプ器の製作と信頼性検証を完了した。なお、信頼性検証においては、性能試験と長期信頼性検証に加え、世界最大の短絡試験設備を備えるKEMA(オランダ)での短絡試験を実施し、認証を取得した。

本稿では、この新外鉄形変圧器プロトタイプ器の基本仕様とその信頼性検証結果について述べる。

2. 新外鉄形変圧器の体積縮小

外鉄形変圧器の巻線配置は、内鉄形変圧器の同心円筒配置と異なり、図1に示すように、高・低圧巻線を交互に配置する構成となっている。これにより、巻線の組合せ数(コイル群数)を増加することで容量増大に伴う漏れ磁束の増加を抑制できる特長がある。

すなわち、外鉄形変圧器は、容量によって適正な巻線群数を選択することにより、小容量器の責務のまま大容量器に対応することができる。一方、プロトタイプ器では、図2に示すように、群数を低減してコンパクト化を指向し、漏れ磁束の増加によって厳しくなる電氣的・機械的責務に対しては接着電線、新冷却構造、遺伝的アルゴリズムによるタンク構造最適化等の要素技術の開発によって対応した。また、これらに加えて新絶縁構造(ハーモニーコンポ絶縁)を適用し、更なるコンパクト化を図った。これら要素技術は次稿以降で詳述する。

(1) 接着電線

接着電線は、平角ホルマール銅線の表面に接着層を塗布

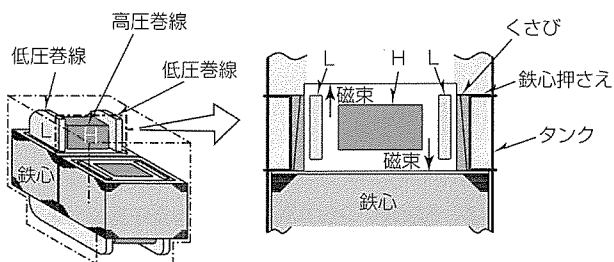


図1. 外鉄形変圧器の基本構造

したものを素線とし、変圧器製作時の乾燥工程において固着化するものである。これにより、機械強度を確保した上で、細線化を図ることができ、漏れ磁束が鎖交したときに発生する漂遊損失を低減した。

(2) 新冷却構造

冷却に寄与しない絶縁物間等の油げき(隙)を柔軟性のあるエキスパンションスペーサ(PPS不織布)で閉塞し、鉄心面など各部の流路を流体流路網解析によって最適化してコイル面への冷却油量を従来器よりも50%程度増量した。なお、不要油流路を閉塞することは、絶縁物間の油流によって発生する流動帯電を抑制する効果もある。また、導体を支持するスペーサにスリットを設けたスリットスペーサを適用してコイル冷却面積を増加した。これらの油流閉塞構造とスリットスペーサにより、絶縁油と巻線間の熱伝導率を従来構造と比較して50%以上向上させることを可能とした。

なお、冷却器についても改善を加え、送油風冷式冷却器の空気側熱伝達率を当社空調器で開発した低圧損スリットフィンの適用によって従来の2.5倍に向上させ、冷却容量を20%以上向上させた高性能送油風冷式冷却器を開発した。

(3) 遺伝的アルゴリズムによるタンク構造最適化

最良の遺伝子だけが生き残る生物界の進化の過程を最適化手法に応用した遺伝的アルゴリズムを変圧器タンク設計へ適用し、タンク構造の最適化を図った。この手法により、従来と同等の強度で20%以上のタンク軽量化を効率的に実現した。

(4) 新絶縁構造(ハーモニーコンポ絶縁)

油入変圧器の絶縁は、プレスボードで絶縁油空間を多層に分割する油-紙複合絶縁構造を採用している。この構造における絶縁強度は絶縁油層に依存し、プレスボード間の油隙寸法を縮小することで絶縁耐力は向上する。外鉄形変圧器の絶縁は、電界が集中する巻線端部(電極)には誘電率が高い絶縁物を充てん(填)して油隙部の電界を抑え、油隙部では等電位線に沿って絶縁物を配置した理想的な複合絶

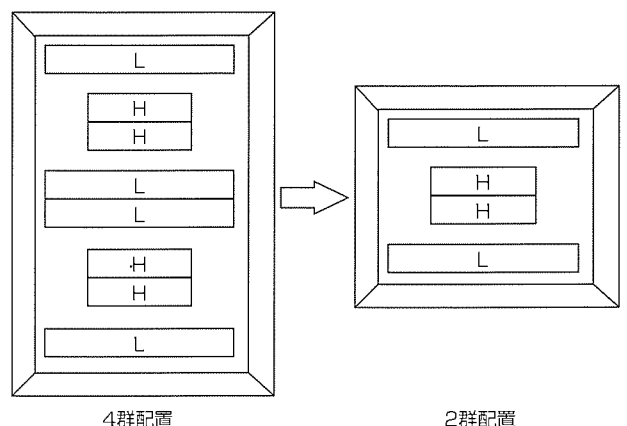


図2. 外鉄形変圧器プロトタイプ器の巻線群数低減

縁構造としている。新絶縁構造（ハーモニーコンポ絶縁）では、この基本構造を踏襲しつつ、新しく開発したテーパラップ接合によって絶縁油層の厚さを縮小・均一化して油隙細分化を行い、従来に比べて1.4倍以上の絶縁耐力の向上を図った。

### 3. 新外鉄形変圧器プロトタイプ器の仕様

新外鉄形変圧器プロトタイプ器の設計に当たり、仕様は500kV変圧器の標準的な仕様を基に表1を選定した。この仕様において、従来は巻線配置を4群設計としていたのに対し、プロトタイプ器では、図2に示すように2群設計として前述の要素技術の開発成果を適用し、表2に示すように従来器に対し本体体積51%、据付け面積50%を実現した。図3にプロトタイプ器の外観を示す。

### 4. プロトタイプ器の信頼性検証

プロトタイプ器の信頼性検証として、IEC規格に基づく性能試験、KEMAでの短絡試験、長期信頼性試験などを実施した。

試験で得られた主要な結果を以下に示す。

表1. プロトタイプ器の仕様

形 式		単相単巻変圧器	
電圧・容量	一次	500kV	250MVA
	二次	230±27.531kV	250MVA
	三次	36kV	80MVA
冷却方式	導油風冷		
周波数	50Hz		
インピーダンス電圧	20%(250MVA基準)		
電圧切換え方式	二次線路端DTC切換え		

表2. プロトタイプ器と従来器の諸元比較

項 目	従来器	プロトタイプ器
主絶縁寸法	100%	70%
本体寸法 (m)	(W)4.2×(L)3.2	(W)2.3×(L)2.9
本体体積 (m <sup>3</sup> )	55.1 (100%)	28.0 (51%)
本体平面積 (m <sup>2</sup> )	13.4 (100%)	6.7 (50%)
空間磁束密度	100%	170%
コイル面機械力	100%	160%
平均損失密度	100%	150%

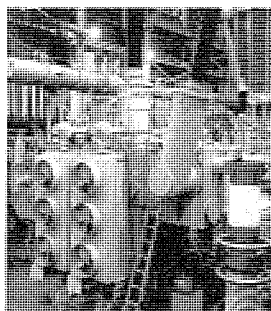


図3. プロトタイプ器の外観

### 4.1 プロトタイプ器の性能確認

IEC規格に準拠した基本特性試験、絶縁検証試験、温度試験等により、プロトタイプ器は所定の性能を満足していることを確認した。

#### 4.1.1 基本特性

変圧比、インピーダンスなどの基本特性は、プロトタイプ器の仕様に対してすべて規格を満足し良好な結果を得た。

#### 4.1.2 損失, 温度上昇

損失の測定結果は、表3に示すように、鉄損・銅損について従来比85%、100%であった。また、油温度上昇・巻線温度上昇とも、表4に示すように、規格値以内であり、新冷却構造の効果を確認することができた。

特に、コイル面の損失密度が従来比150%(表2)にもかかわらず、本体体積縮小により、銅損と鉄損を合わせた総損失は従来器以下とすることができた。

#### 4.1.3 絶縁性能

表5、表6に従ってKEMAでの短絡試験前後にIEC規格に基づく交流耐電圧、長時間交流耐電圧、雷インパルス、開閉インパルスを行い、いずれも良好な結果を得た。また、短絡試験後の解体点検の後に再組立てを行い、従来器と同等の絶縁裕度確認のため表5、表6の1.3倍の電圧を加えた絶縁性能試験を行って異常のないことを確認した。これにより、主絶縁寸法を従来器の70%に縮小したハーモニーコンポ絶縁においても、絶縁性能上、従来器と同様30%以上の裕度を持っていることを確認した。

#### 4.1.4 その他

漏れ磁束増加に伴うシールド部やタンク等の過熱に対し

表3. 損失測定結果

	従来器	プロトタイプ器
鉄 損	100%	85%
銅 損	100%	100%

表4. 温度上昇測定結果

	実測値	規格値
最高油温度上昇	40.2K	60K
平均巻線温度上昇	63.3K	65K

表5. 雷インパルス、開閉インパルス耐電圧試験

	雷インパルス	開閉インパルス
一 次	1.425kV	1.175kV
二 次	950kV	—
中性点	325kV	—
三 次	200kV	—

表6. 長時間交流耐電圧試験

試験電圧	一次	525kV	455kV
	二次	245kV	212kV
試験時間	5分	5秒	30分
部分放電	100pC以下		

ては、熱電対等による温度測定によって過熱箇所がないことを確認した。振動、騒音についても従来器と同等であり、異常振動、騒音がないことを確認した。

また、無課電時に、流動帯電の指標となる巻線、鉄心、シールド部の漏れ電流を測定した。油流閉塞構造により、漏れ電流は、従来と同一流速で約1/5であり、2倍程度の流速でも従来以下となることを確認した。

#### 4.2 短絡試験

上記の試験完了後、短絡試験をKEMAで実施した。短絡試験は、IEC規格をベースとして、非対称、対称電流で計13回実施した。さらに、短絡試験後、プロトタイプ器を工場へ持ち帰り、短絡試験前と同様な基本特性及び絶縁性能試験を実施し、その後の解体点検においても異常部位がないことを確認した。なお、これら工場での基本特性・絶縁性能試験、解体点検はKEMA検査官立ち会い下で実施し、2001年1月に認証を取得した。これにより、従来と比べ短絡電磁力が1.6倍(表2)となっているにもかかわらず変圧器全体として耐短絡機械力上問題ないことを確認した。

#### 4.3 長期信頼性検証

短絡試験後の解体点検終了後、長期信頼性を確認するため、プロトタイプ器を再組立てし、以下の試験を実施した。

##### 4.3.1 絶縁性能の長期信頼性

常規電圧の1.2倍の過電圧を30年と等価以上となる長時間印加して、絶縁性能に問題ないことを確認した。印加時間は、変圧器絶縁のV-t特性から1,200時間とした。

##### 4.3.2 流動帯電の長期信頼性

課電期間中、巻線、鉄心、シールド部の漏れ電流を測定し長期間のトレンドを確認した。長期課電期間中の漏れ電流レベルは安定しており、放電等の異常はなく問題ないことを確認した。

##### 4.3.3 その他

課電期間中、適宜通電を行ってプロトタイプ器にヒートサイクルを与え、振動、騒音及び流動帯電特性に異常のないことを確認した。また、定期的に油中ガス分析を実施し、異常ガス発生のないことを確認してプロトタイプ器の健全性を確認した。

### 5. 実器への適用

プロトタイプ器に採用した巻線群数低減及び接着電線、

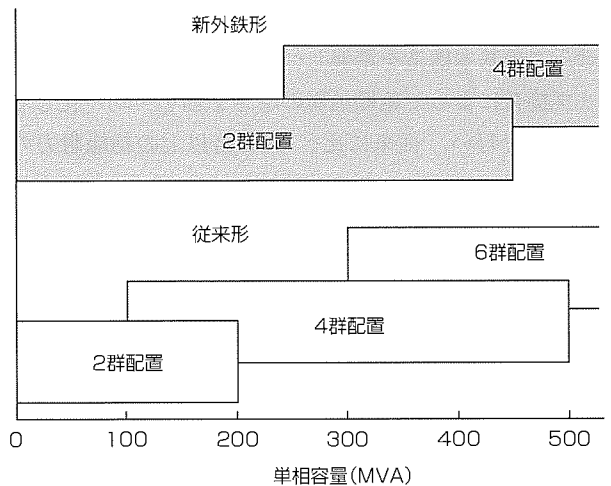


図4. 単巻変圧器の容量と巻線群数

冷却構造、タンク構造の最適化、ハーモニーコンポ絶縁を適用した場合の新外鉄形変圧器と、従来器の群数比較を図4に示す。図に示すように、新外鉄形変圧器では、従来器と比べ、低群数の適用範囲を大幅に大容量側へシフトすることができ、変圧器のコンパクト化だけでなく大容量化への展開にも有利となる。もちろん、各々の新技術は従来器でも個別に適用可能なものであり、今後の実器設計に当たっては、各変圧器の仕様、輸送条件、据付けスペース等を勘案した上で最適化を図っていく。

### 6. むすび

新外鉄形変圧器のプロトタイプ器として500kV、250MVA単相単巻変圧器を製作し、以下の結果を得た。

- (1) プロトタイプ器は、従来器と比べ、本体体積51%、据付け面積50%と大幅なコンパクト化を達成した。
- (2) IEC規格に準拠した基本特性試験、絶縁検証試験、温度試験を行い、各種新技術を適用したプロトタイプ器は所定の性能を十分満足していることを確認した。
- (3) 世界最大の短絡試験設備を備えるKEMA(オランダ)での短絡試験、その後の基本特性・絶縁性能試験及び解体点検によって異常のないことを確認し、2001年1月に認証を取得した。
- (4) 長期信頼性検証のため長期課電試験を行い、長期信頼性上、問題ないことを確認した。

# 新外鉄形変圧器の絶縁・冷却構造

伊藤 惠一\* 石川 清之\*\*\*  
 古藤 悟\*\* 吉住 安二\*\*\*  
 早瀬 岳\*

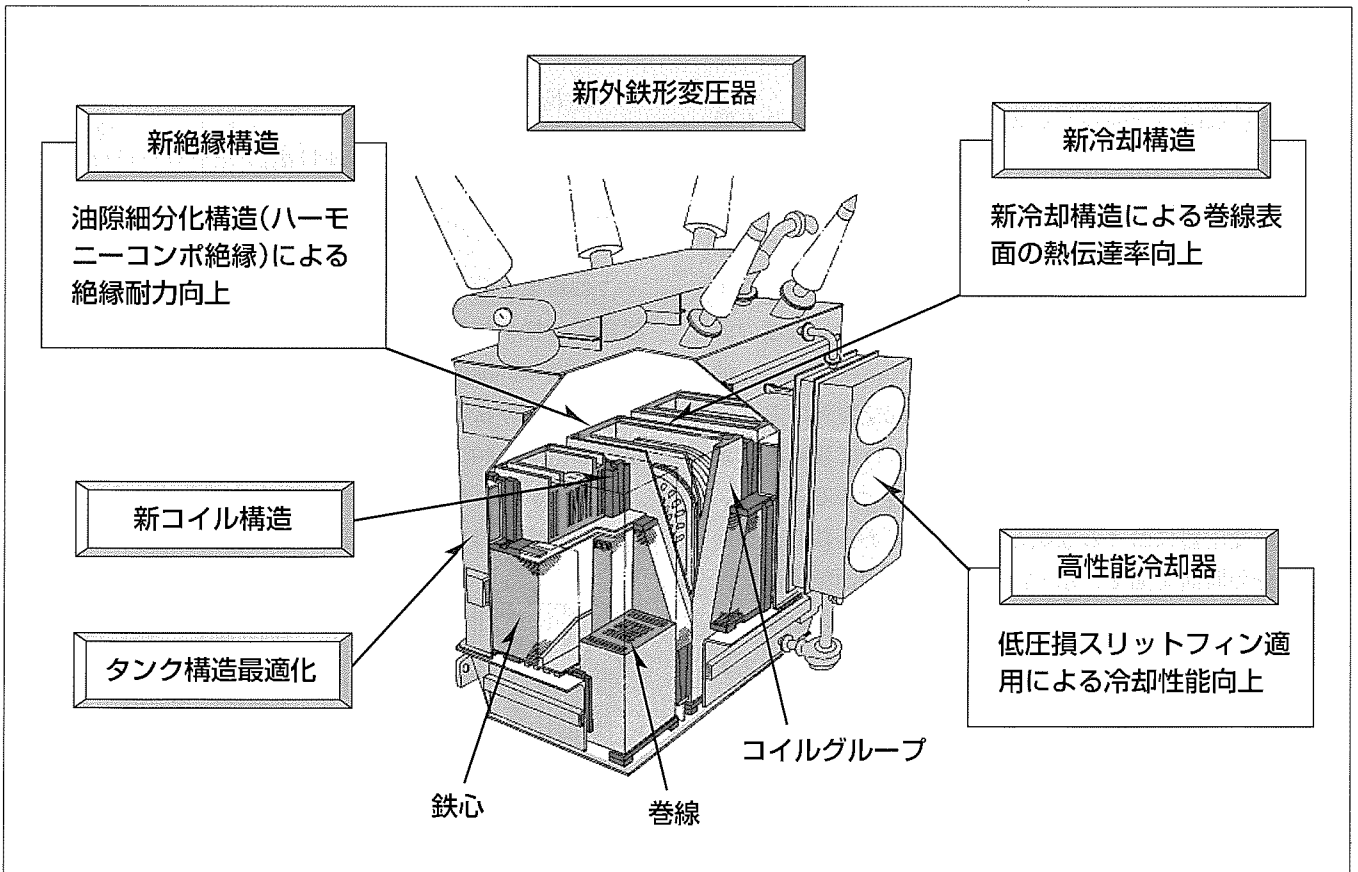
## 要 旨

油入変圧器は、絶縁油と紙(プレスボード)の複合構造で絶縁性能を確保している。また、変圧器の主な発熱源である巻線と鉄心の冷却のため、この複合絶縁構造は冷却流路を兼ねており、絶縁油が冷媒としてこの流路を循環する。絶縁油をプレスボードが多分割する複合絶縁構造では、油げき(隙)の細分化で絶縁構造全体の性能向上が可能である。今回、新絶縁構造(ハーモニーコンボ絶縁)として、プレスボード接続部をテーパ接続とすることで、油隙を均一に細分化して、従来構造と比べて40%以上の大幅な絶縁耐力向上を実現した。

一方、新冷却構造としてコイルグループ内にあったすき

(隙)間油流を柔軟性のあるエキスパンションスペーサ(PPS不織布)で閉そく(塞)し、鉄心面等の各油流路を管路網解析を基に最適化した構造と巻線間隙を確保するスペーサにスリットを設けて巻線と絶縁油との接触面積を増加させたスリットスペーサを開発し、巻線と油との間の熱伝達率を従来構造と比べて50%程度向上させることが可能となった。

さらに、送油風冷式冷却器の空気側熱伝達を向上するため、空調機器の技術を導入して低圧損スリットフィンを採用し、冷却器の冷却容量を20%程度向上させて高効率化を図った。



## 新外鉄形変圧器の絶縁・冷却構造

新外鉄形変圧器は、巻線群数を低減してコンパクト化を指向し、漏れ磁束の増加によって増大する電氣的・機械的責務に対しては冷却・強度面での新技術で対応した。図は、冷却面での新構造及び更なるコンパクトを実現するために開発したハーモニーコンボ絶縁について示した。

1. ま え が き

外鉄形変圧器の絶縁構造は、巻線の周囲を接地電位の鉄心で囲い、その間はプレスボードで油隙を分割する油-紙複合絶縁構造である。一方、主な発熱源である巻線と鉄心に対して、この絶縁構造は冷却油流を供給する構造も兼ねている。新外鉄形変圧器では、絶縁油層の厚さを縮小・均一化した新絶縁構造(ハーモニーコンポ絶縁)を適用し、絶縁耐力を向上させた。また、不要油流路閉塞等による冷却油流路の最適化、スリットスペーサ及び空調機器の技術を適用した高性能送油風冷式冷却器を採用して冷却効率を向上した。

本稿では、新外鉄形変圧器プロトタイプ器の体積縮小のために採用した絶縁及び冷却構造について述べる。

2. 絶 縁 構 造

2.1 ハーモニーコンポ絶縁

油入変圧器は、プレスボードが絶縁油を多層に分割する油-紙複合絶縁構造を採用している。この構造の絶縁耐力は、以下の理由で、プレスボード間の油隙の絶縁耐力に依存する。

- (1) 複合絶縁に交流電圧が印加されたときの分担電圧は材料の比誘電率と逆比例の関係にあり、比誘電率が低い絶縁油の分担電圧が高くなる。
- (2) 油の絶縁耐力は油浸プレスボードの絶縁耐力よりも低い。

絶縁破壊は電気的ストレスである電界強度で決まり、油隙の絶縁破壊電界は油隙の縮小とともに増大する。これは、絶縁破壊の起点となる弱点因子が油隙寸法の縮小で減少するためと考えられている。このため、油隙の絶縁破壊の前駆現象である部分放電開始電界は、図1に示すように、油隙寸法の縮小とともに1/3乗に近い勾配で増加する。この特性を利用すれば、油隙寸法の縮小によって複合絶縁系全体の絶縁破壊電界を向上することが可能となる。

外鉄形変圧器における巻線と接地電位である鉄心が対向する部分の断面を図2に示す。従来構造での油隙寸法は概略7~10mmであり、プレスボードのラップ部にはプレスボード厚さ分の段差がある。このラップ部では、ラップを

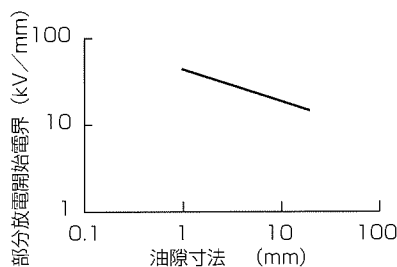


図1. 油隙の部分放電開始電界

構成しない場合に比べて、電界方向のプレスボードの比率が増加するため、油隙部の電界が増大する。また、このラップ部の段差のため油隙寸法の縮小も制限される。

今回開発したハーモニーコンポ絶縁は、プレスボード端部の厚さをテーパ状に変化させたテーパラップ接合によって段差をなくし、油隙寸法を3mmの均一な油隙寸法で構成し油隙を細分化して絶縁耐力の向上を図った。

2.2 ハーモニーコンポ絶縁の性能評価

ハーモニーコンポ絶縁の絶縁性能評価のため、以下の数値検討を行った。部分放電開始電界 $E_{oil}$ は油隙寸法 $d_{oil}$ に依存し(図1)、 $k$ を定数として式(1)で示される。

$$E_{oil} = k d_{oil}^{-\frac{1}{3}} \dots \dots \dots (1)$$

従来構造の絶縁寸法 $d_{total}$ は、プレスボードのラップ部を考慮して、油隙数 $n$ 、油隙寸法 $d_{oil}$ 、プレスボード厚さ $d_{PB}$ によって式(2)となり、ハーモニーコンポ絶縁の絶縁寸法 $d_{total}$ は式(3)となる。プレスボード中の電界 $E_{PB}$ は油とプレスボードの誘電率 $\epsilon_{oil}$ 、 $\epsilon_{PB}$ を用いて式(4)となる。式(1)~(4)により、油隙部の部分放電発生電界となる印加電圧は、従来構造とハーモニーコンポ絶縁で式(5)、(6)で計算される。

$$d_{total} = \sum_{i=1}^n d_{oil} + (2n+1) d_{PB} \dots \dots \dots (2)$$

$$d_{total} = n d_{oil} + (n+1) d_{PB} \dots \dots \dots (3)$$

$$\epsilon_{oil} E_{oil} = \epsilon_{PB} E_{PB} \dots \dots \dots (4)$$

$$V_c = E_{oil} \sum_{i=1}^n d_{oil} + E_{PB} (2n+1) d_{PB} \dots \dots \dots (5)$$

$$V_u = E_{oil} n d_{oil} + E_{PB} (n+1) d_{PB} \dots \dots \dots (6)$$

この結果を図3に示す。図において、縦軸の部分放電開始電圧は従来構造の部分放電開始電圧を100%として示した。図から、油隙寸法を均一にしたハーモニーコンポ絶縁では、油隙寸法が3mmのとき、従来構造に比べて部分放電開始電圧は40%程度向上することが分かる。

ハーモニーコンポ絶縁の絶縁耐力を検証するため、実規模モデル変圧器を製作した。絶縁寸法は従来の500kV変圧

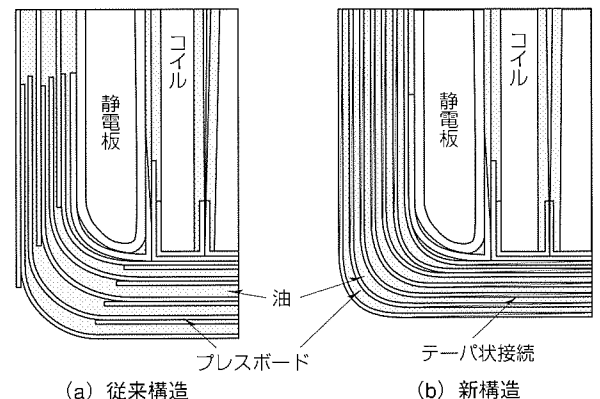


図2. 絶縁構造の断面図

器の1/2とした。交流部分放電試験(電荷量100pC以上の放電開始電圧測定)と雷インパルス試験を実施した結果を図4に示す。交流部分放電開始電圧は、同一絶縁寸法の従来構造と比較して約40%向上し、前述の数値検討とほぼ一致した。

また、雷インパルス試験では最大試験電圧において絶縁破壊せず、従来と比較して絶縁耐力が40%以上向上したことを確認した。

### 3. 冷却構造

#### 3.1 油流閉塞構造の採用

変圧器の主な発熱源は巻線と鉄心である。巻線と絶縁物で構成されるコイルグループは、工作性、乾燥処理時の絶縁物収縮等のために工作上の寸法余裕を持たせる必要があるため、非発熱部である絶縁物間の隙間にも油流路(不要油流路)が形成される。この不要油流路を閉塞すれば、流体管路網解析によって発熱量に応じた冷却油量の配分が容易となる。また、不要油流路を閉塞して巻線表面への油流を増加すれば、巻線表面の熱伝達率向上、熱輸送量増大による油温度の低減を図ることができる。この不要油流路の閉塞材料として、製造工程中の寸法変化に追従できるような柔軟性があり絶縁性・耐油性・耐熱性に優れたエキスパンションスペーサ(PPS不織布)を選定した。なお、この不要油流路の閉塞は、絶縁物間の油流によって発生する流動帯電を抑制する効果も期待できる。

##### 3.1.1 不要油流路の閉塞と管路網解析

プロトタイプ器に対して図5の管路網モデルによって流量分布を解析し、各部の流路断面積を最適化した。なお、巻線の圧力損失は、別途実施した実規模モデルでの結果を使用した。解析結果を表1に示す。油流閉塞によって巻線への油流量は50%程度増大する。これは、熱伝達率で40%程度の向上に相当する。

##### 3.1.2 解析モデルの妥当性確認

前述の解析結果の妥当性を確認するため、プロトタイプ器で、ポンプの運転条件を変えて本体への流入油量と本体上下ヘッドの実測と解析結果の比較を行った。図6に示すように解析と実測はよく一致しており、解析モデルの妥当

性を確認できた。なお、図はケース1での値を1.0として正規化している。

#### 3.1.3 流動帯電

紙で覆われた巻線表面や鉄心に隣接する絶縁物表面では紙と絶縁油が接しており、紙-油界面で電荷が移動し分極する。この電荷が油流で運び去られ、紙と絶縁油は帯電する。これは流動帯電と呼ばれ、その極性は紙が負極性、絶縁油が正極性となる。紙の帯電電荷密度は電荷の発生量と緩和量のバランスで決まるが、このバランスが崩れ帯電電荷密度が大きくなると紙表面での電界が高くなり、絶縁破壊強度を超えると沿面放電が発生する。

プロトタイプ器で無課電時に流動帯電の指標となる漏れ電流を測定した結果を図7に示す。漏れ電流は、従来と同一流速で約1/5、2倍程度の流速でも従来以下となることを確認した。

#### 3.2 スリットスペーサの採用

外鉄形変圧器では、巻線間の油流路を確保し、短絡電磁力に対する巻線支持のためにスペーサを巻線上に配置する。短絡電磁力に対する巻線支持ピッチを確保しながら巻線表面の熱伝達率向上を図るため、各種スペーサ形状、配置に対する冷却性能評価を熱流体数値解析によって実施した。

##### 3.2.1 解析モデル

以下の特長を持つ巻線温度分布解析手法を開発し、スペーサ形状の検討を行った。

- 巻線内(銅、絶縁紙)における複合体の熱伝導特性の異方性を考慮できるバッフル法の適用
- 熱伝達と絶縁油の流れの方向が異なる冷却油流路の対流熱伝達特性を考慮した完全不連続メッシュ技法適用
- 複雑な油流路中に置かれたスペーサ形状をCADデータから解析モデルに変換する手法の適用

##### 3.2.2 スリットスペーサ

スペーサ形状、配置に対する巻線の冷却性能評価を、上述の熱流体数値解析によって実施した。なお、スペーサは様々な形状を対象として検討したが、本稿では、図8に示す現状のフラットスペーサと熱流体解析結果、製作性を考慮して選定したスリットスペーサについて示す。このスリ

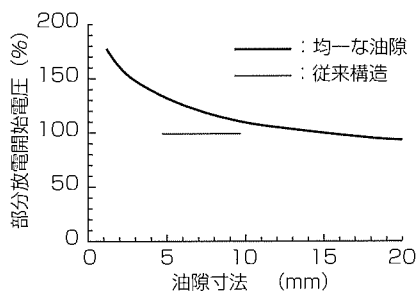


図3. 絶縁構造の部分放電開始電圧推定結果

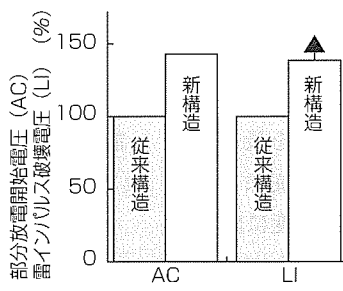


図4. 実規模モデル変圧器の絶縁性能

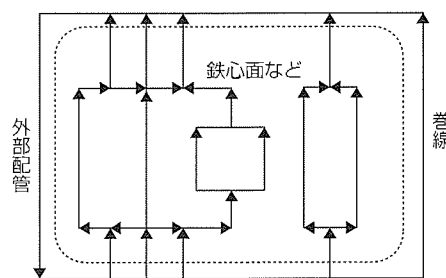


図5. 変圧器内流体管路網モデル

表1. 変圧器内流体管路網解析による巻線への流量

油流閉塞なし	油流閉塞あり
4,950 l/min	7,400 l/min

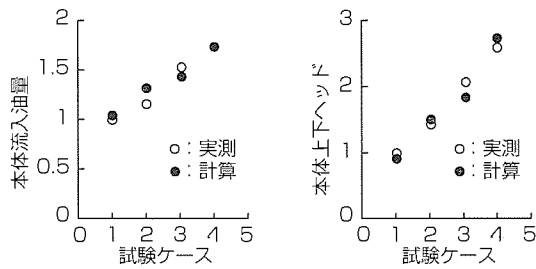


図6. プロトタイプ器による実測結果と解析結果の比較

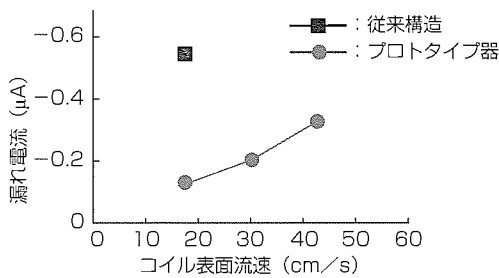


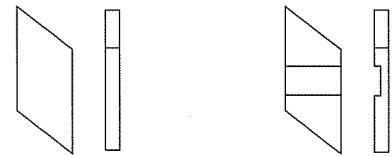
図7. プロトタイプ器の流動帯電特性

ットスペーサは、従来のフラットスペーサにスリットを設けて巻線と油との接触面積を増加させたものである。各スペーサの巻線上への配置及び解析結果を図9に示す。巻線表面温度分布を比較すると、スリットスペーサの巻線-油間熱伝達率は、フラットスペーサに比べて20%程度向上することを確認した。

したがって、前項の油流閉塞に伴う流量増大と合わせて、従来構造に比べ、巻線-油間の熱伝達率を50%以上向上させることが可能となる。

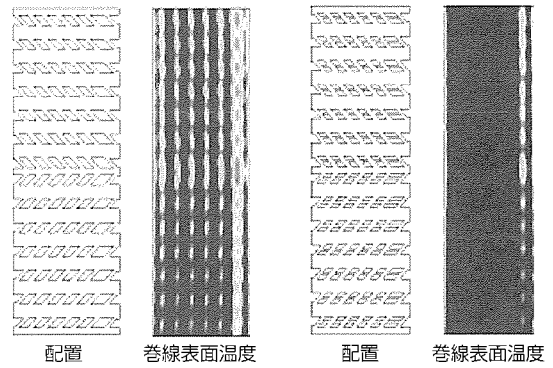
### 3.3 高性能送油風冷式冷却器

送油風冷式冷却器は、冷却管内の油側熱伝達及びフィンからの空気側熱伝達により、絶縁油の熱を外部へ放散する。従来、油側に比べて空気側の熱伝達率は低く、今回、当社空調機器で採用している低圧損スリットフィンを用いて空気側熱伝達率の向上を図った。図10に低圧損スリットフィンを従来のフラットフィンと比較して示す。この低圧損スリットフィンは、フィン上にスリットを切り起こしたときの圧力損失の増大を最小限に抑えて熱伝達率の向上を図るため、フィン上に形成するスリットの数と配置を最適化したものである。これにより、空気側圧力損失を従来と同等とした上で、空気側熱伝達率を従来の2.5倍程度に向上させ、冷却器の冷却容量を20%程度向上させることができた。



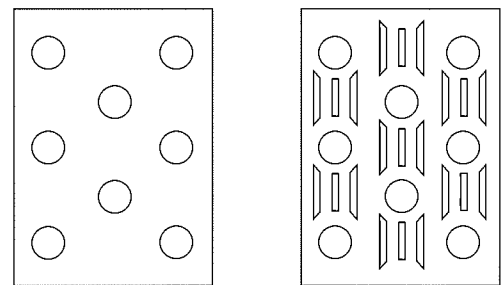
(a) フラットスペーサ (b) スリットスペーサ

図8. スペーサ形状



(a) フラットスペーサ (b) スリットスペーサ

図9. 巻線表面温度分布解析結果



(a) 従来フラットフィン (b) 低圧損スリットフィン

図10. フィン形状

## 4. む す び

新外鉄形変圧器の本体体積縮小のため、絶縁・冷却構造についての検討を行い以下の結論を得た。

- (1) ハーモニーコンポ絶縁は、テーパーラップ接合によって絶縁油層の厚さを縮小し均一化して油隙細分化を図ることにより、従来の絶縁構造と比較して40%以上の絶縁耐力向上を可能とした。
- (2) 新冷却構造は、不要油流路を閉塞して鉄心面等の各流路面積を最適化した結果、巻線へ流れる流量を50%程度向上させることができ、スリットスペーサと合わせて巻線表面の熱伝達率を従来と比べて50%以上向上させることが可能とした。
- (3) 以上の絶縁・冷却に関する新技術を適用し、プロトタイプ器での検証を実施した。結果は上述したように良好な結果が得られ、今回検討した新構造の妥当性を確認した。



# 新外鉄形変圧器の耐機械力構造

高野昌宏\* 油井正志\*\*\*  
谷 周一\*\* 齋木茂俊\*\*\*  
瀧川秀記\*

## 要 旨

新外鉄形変圧器は、コイル群数低減、ハーモニーコンポ絶縁を採用して本体体積縮小を図った。このうち、コイル群数低減に伴う空間磁束密度の増大による熱的・機械的過酷度の増大抑制に対しては、新冷却構造及び以下の耐機械力構造で対応した。

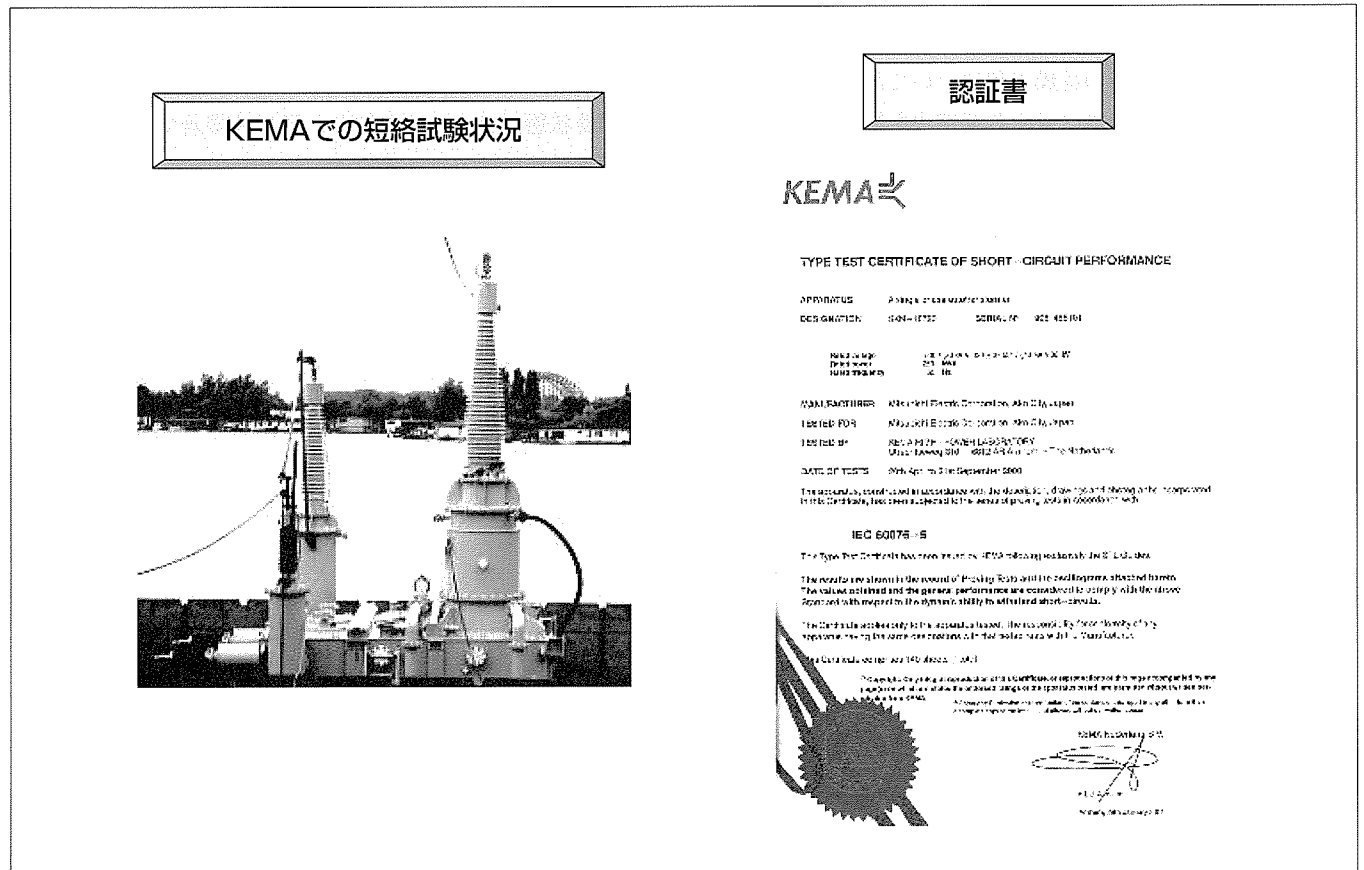
今回、新外鉄形変圧器の短絡電磁力に対して、接着電線の長期信頼性を含めた剛性評価の検討、遺伝的アルゴリズムによる変圧器タンク構造の最適化についての検討を行い、次の結果を得た。

(1) 積層数の異なる接着電線の曲げ試験を行った結果、接着電線の剛性は、固着係数を用いて統一的に表現できるこ

とを確認した。また、加速的に高温の油中に浸せき(漬)させたサンプルを用いた剛性評価試験を行い、長期信頼性を確認した。

(2) 遺伝的アルゴリズムを用いてタンク構造最適化を行った結果、プロトタイプ器で、従来と同等の強度で質量が約20%減の解を得た。この手法により、変圧器タンク構造の軽量化設計を効率的に行うことが可能となった。

(3) 上記を採用した新外鉄形変圧器プロトタイプ器について、世界最大の短絡試験設備を保有するKEMAで短絡試験を行い、強度上問題ないことを確認し、認証を取得した。



## プロトタイプ器の短絡試験状況と認証書

新外鉄形変圧器の耐短絡電磁力検証のため、プロトタイプ器で、短絡試験を、世界最大の短絡試験設備を保有するKEMA(オランダ)で実施した。また、試験後、プロトタイプ器を工場へ持ち帰り、KEMA検査官立会い下でルーチン試験と解体点検を実施し、異常がないことを確認した。図はKEMAでの短絡試験状況及び認証書を示す。

1. ま え が き

新外鉄形変圧器は、コイル群数低減、ハーモニーコンポ絶縁を採用して本体体積縮小を図っている。このうち、コイル群数低減に伴う空間磁束密度の増大による熱的・機械的過酷度の増大抑制に対しては、新冷却構造及び接着電線の採用、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) によるタンク構造最適化で対応した。

本稿では、新外鉄形変圧器の耐短絡機械力性能に関して、接着電線の採用、GAによる構造最適化について述べる。

2. 接着電線の採用

コイル群数低減に伴う漏れ磁束の増加により、コイルに発生する漂遊損失は増大する。漂遊損失は鎖交磁束に直交する導体幅の2乗に比例するので、これを低減するには、導体を細分化して導体幅を低減し、導体本数を増やせばよい。

しかし、導体を細分化すると、コイルの剛性が低下し、短絡電磁力発生時に強度上の問題が生じる。これに対応するため細分化した導体を接着し剛性向上を図ったものが接着電線である。

接着電線は、平角ホルマール銅線の表面に耐油性・耐油汚損性・コイル製作性に優れた接着層を塗布したものを素線とし、変圧器製作時の乾燥工程において固着化する。固着後のコイルの剛性設計に対する評価法を構築することを目的として、剛性に及ぼす素線数の影響、長期油中での剛性変化の評価を行い、設計データを採集した。

2.1 供 試 材

試験に供した接着電線サンプルの寸法及び断面写真を図1に示す。サンプルの積層数は10, 12, 14の3種類であり、剛性比較のために積層数を同数とした非接着サンプルの試験も併せて実施した。接着層の固着は実器と同じ乾燥条件で行った。

2.2 試 験 方 法

試験は3点曲げ試験によって行い、恒温槽を備えた電気油圧式サーボ疲労試験機(容量2トン)によって強制変位を

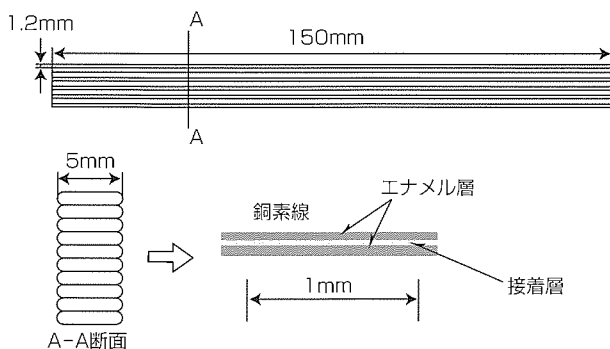


図1. 供試材の寸法及び断面

サンプルに加える変位制御で実施し、試験温度と負荷速度は実器の条件とほぼ合致させた。試験では、荷重及びサンプル最外層に張り付けたひずみゲージで曲げひずみを計測した。また、長期油中での剛性変化を調べるために、加速的に高温の油中に浸漬させたサンプルを用いた剛性評価も併せて実施した。なお、油温と浸漬時間は種々変化させている。

2.3 試 験 結 果

この試験において、接着電線の剛性は、サンプルの最外層のひずみが許容値に達した時点での荷重値で定義した。さらに、積層数の影響を調べるために、接着電線の剛性を同数積層の非接着電線の剛性で除した剛性倍率  $\alpha$  を求めた。

実験から得られた剛性倍率  $\alpha$  と積層数  $N$  との関係を図2に示す。なお、図の縦軸は14本サンプルの剛性平均値で除して正規化している。剛性倍率  $\alpha$  は積層数  $N$  の増加に従って大きくなり、積層数の影響が認められる。接着電線の剛性は接着層による素線間の拘束の程度によって変化し、曲げによって発生する最外層応力  $\sigma$  は次式で近似的に与えられる<sup>(1)</sup>。

$$\sigma = \frac{M}{Z_p} = \frac{M}{N^x \frac{bt^3}{4}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $M$ は曲げモーメント、 $N$ は素線数、 $b$ 及び $t$ は銅素線の幅と厚さである。また $x$ は実験から求まる定数(固着係数)であり、接着層のせん断剛性が無限に大きい完全固着状態では $x = 2$ となり、逆に非接着で素線間が完全に滑る状態では $x = 1$ となる。

実験から得られた剛性倍率  $\alpha$  を基に求めた固着係数  $x$  と素線数  $N$  との関係を図3に示す。

図3では、縦軸を14本サンプルの固着係数  $x$  で除して正規化している。固着係数  $x$  は積層数が変化してもほぼ同じ値であり、積層数の異なる接着電線の剛性を統一的に評価できる係数として有効であると言える。

すなわち、式(1)によって短絡電磁力作用時のコイル強度を評価することができる。

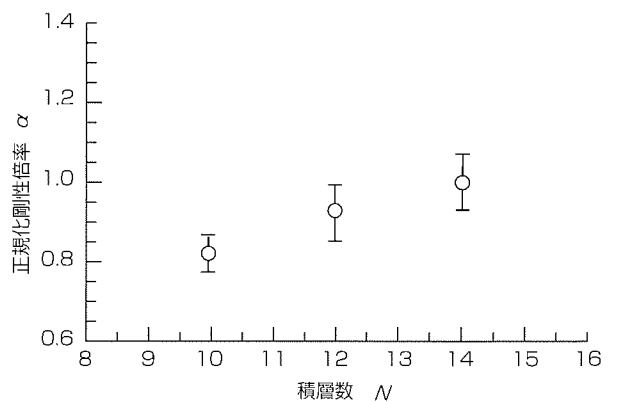


図2. 積層数  $N$  と正規化剛性倍率  $\alpha$  の関係

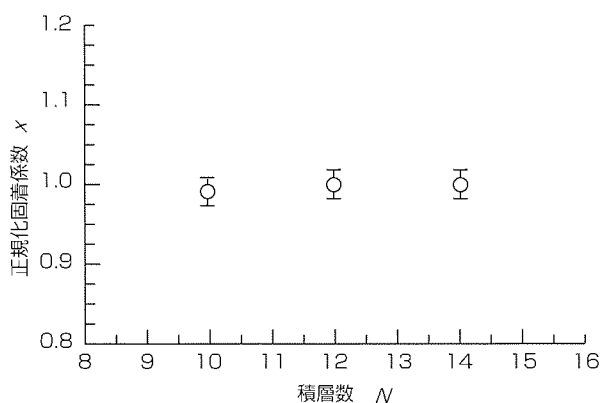


図3. 積層数  $N$  と正規化固着係数  $x$  の関係

一方、実器においてコイルは長期間にわたり高温の油中に浸漬されることから、設計は油中での剛性変化を確認した上で行う必要がある。このため、油温度、時間を変化させて接着電線サンプルを長時間油中に浸漬した後、前述と同様の方法で接着電線の剛性試験を実施した。図4は、接着電線の剛性変化を油中浸漬後のサンプルの固着係数  $x$  と初期サンプルの固着係数の比(正規化固着係数)で表したマスターカーブである。なお、この長期油中浸漬試験において用いたサンプルは14本積層電線である。

また、図4の横軸は実験から求めた活性化エネルギー  $Q$  を用いたOrr-Sherby-Dornパラメータ<sup>(2)</sup>(O.S.D.パラメータ)であり、油中浸漬時の時間、温度を基に次式で与えられる。

$$\text{O.S.D.} = \log t - \frac{Q}{2.3RT} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $t$  と  $T$  はそれぞれ油中浸漬時間(h)、油温(K)であり、 $R$  は気体定数である。

活性化エネルギー  $Q$  は、剛性がある値に低下する油中浸漬時間  $t_e$  と油温  $T$  の関係から、次式を用いて求めている<sup>(3)</sup>。

$$t_e = A e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (A: \text{定数}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

図4に示すように、O.S.D.パラメータが-9よりも大きくなると剛性はほぼ飽和傾向にある。この図で示したマスターカーブにより、任意の時間・温度における接着電線の剛性が評価でき、長期信頼性を考慮したコイルの剛性設計が可能となる。

なお、実コイルでの接着施工のばらつきについても、実工程で製作したコイルを切り出したサンプルを用いて同様な曲げ試験を別途行い、サンプルでの試験結果におけるばらつきと同等であることを確認している。

### 3. GAを用いたタンク構造の最適化

外鉄形変圧器では、短絡電磁力の一部が直接タンクに作用する。このため、耐短絡機械力上、変圧器タンクには、短絡電磁力によってタンクの破壊や残留変形が生じてはな

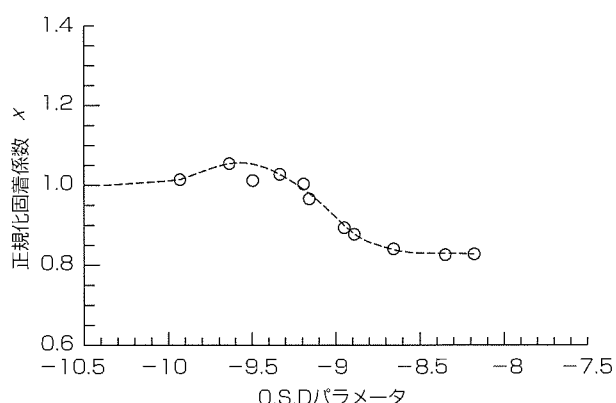


図4. O.S.D.パラメータと正規化固着係数  $x$  の関係

らない。

コイル群数低減に伴い増加する短絡電磁力に対応するには従来設計でも板厚や補強点数の増加等による剛性強化で対応可能であるが、質量増大を最小限に抑えて効率的に軽量化設計を行うため、GAによるタンク設計最適化手法を適用した。

#### 3.1 GAによる構造最適化手法<sup>(4)</sup>

GAは、自然とうた(淘汰)、交さ(又)、突然変異等を繰り返して最適な遺伝子の組合せを持った個体だけが生き残るという生物界の進化を模倣した最適化アルゴリズムで、1975年にJohn Hollandによって提案された。

今回の解析では、このGAを用いて、タンクの発生応力を制約条件としてタンク質量が最小となるように、補強形状、側板厚さを設計パラメータとし、評価関数を式(4)として構造最適化を実施した。

$$E(w, d) = \frac{W}{W_w} + \frac{\sigma_E}{W_o} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\sigma_E = \begin{cases} \sigma_{\max} - \sigma_{\lim} & : \sigma_{\max} > \sigma_{\lim} \\ 0 & : \sigma_{\max} \leq \sigma_{\lim} \end{cases}$$

ここで  $w$  はタンク質量、 $\sigma_{\max}$  はタンクで発生する最大応力、 $\sigma_{\lim}$  は許容応力、 $W_w$ 、 $W_o$  はそれぞれタンク質量と応力に関する重み係数である。

#### 3.2 最適化解析結果

図5に、GAによる最適化計算によって求められた各解析解の質量と最大応力の関係を示す。同図から、オリジナル設計器に比べ、最大応力が同じで、質量が約72%程度の解が存在することが分かる。

最終的には、工作性等を考慮して、22%軽量化の解を採用した。

従来の設計では、これまでの実績から類似の設計を引用し、限られた設計時間内で、経済的な解を求めていた。しかし、板厚、補強形状、補強位置等のパラメータに対し、すべての組合せを検討するのは困難であった。今回、GAを適用することにより、より短時間で、より広範囲の設計ケースを検討し、最適解を求めることが可能となった。

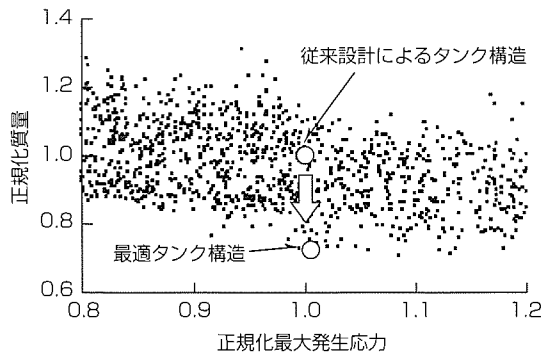


図5. 正規化最大発生応力と正規化質量の関係

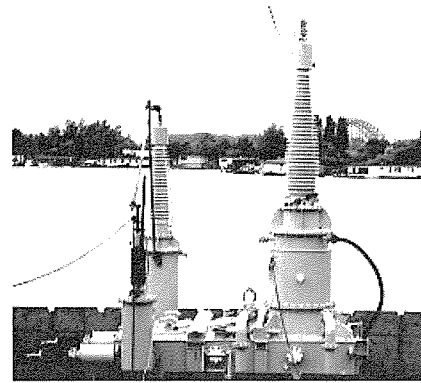


図6. 短絡試験状況(KEMA)

#### 4. プロトタイプ器の短絡試験

耐短絡機械力検証のため、世界最大の短絡試験設備を保有するKEMA(オランダ)で、プロトタイプ器による短絡試験を実施した。試験状況を図6に示す。短絡試験は、IEC規格をベースとして、対称電流、非対称電流で計13回実施した。

短絡試験時に測定したタンク発生ひずみの一例を解析結果と比較して図7に示す。実測は解析結果と良好な一致を示しており、また、永久変形、亀裂等の異常は認められなかった。

短絡試験後、プロトタイプ器は工場へ持ち帰り、KEMA検査官立会い下でルーチン試験を行い、良好な結果を得るとともに、その後の解体点検においても異常部位がないことを確認した(図8)。

これらにより、新外鉄形変圧器の耐短絡機械力性能を確認するとともに、2001年1月にKEMAから認証を取得した。

#### 5. む す び

新外鉄形変圧器の耐短絡機械力について、接着電線の長期信頼性も含めた剛性評価の検討、及びGAによる軽量化タンク構造についての検討を行い、次の結果が得られた。

- (1) 素線本数が異なる接着電線の曲げ試験を行った結果、接着電線の剛性は、固着係数  $\alpha$  によって統一的に表現できることを確認した。加速的に高温の油中に浸漬させたサンプルを用いた剛性評価試験の結果、長期油中における剛性変化のマスタカーブを得た。
- (2) GAを用いてタンク構造最適化解析を行った結果、質量が約20%減の解を得た。これによって、外鉄形変圧器タンク構造の効率的な軽量化設計が可能となった。
- (3) 上記検討を行った新外鉄形変圧器プロトタイプ器について世界最大の短絡試験設備を保有するKEMAで短絡試験を行い、強度上問題ないことを確認し、認証を取得した。

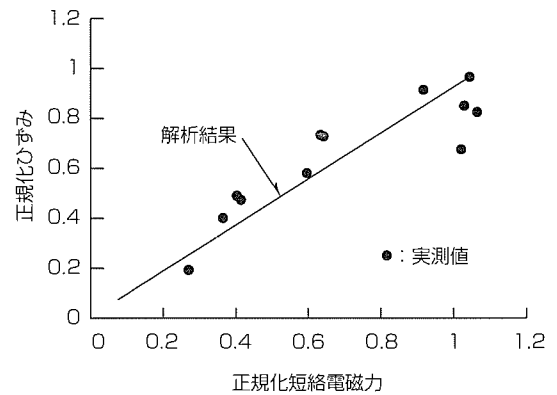
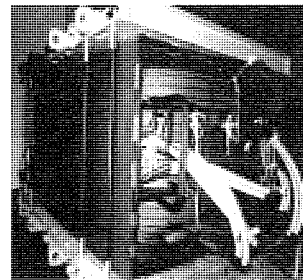
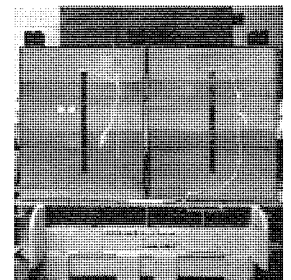


図7. 試験結果と解析結果の比較



(a) コイルグループ



(b) 鉄心

図8. コイルグループと鉄心の外観(短絡試験後)

#### 参考文献

- (1) 変圧器専門委員会：短絡時における変圧器巻線の機械的強度について、電気学会技術報告(I)部, No.89 (1969)
- (2) Orr, R. L., Sherby, O. D., Dorn, J. E. : Trans. ASM, **46**, 113 (1954)
- (3) Juve, A. E., Scorch, M. G. Jr. : Material Research and Standards, 542 (1961)
- (4) 日本機械学会編：構造・材料の最適設計, 71 (1989)

# IT化対応変圧器保守支援システム

## 要旨

近年、設備投資が抑制され、高経年変圧器や過負荷運転条件が厳しくなる変圧器が増加しており、機器の運転信頼性維持と保守のトータルコスト削減が要求されている。

変圧器の運転信頼性を維持するためのセンサ・装置としては、点検・巡視の支援、異常兆候の検出、機器の状態を正確に把握することによる適切な保守(CBM)の支援を目的とするものが製品化されている。

今回、上記変圧器の監視・診断センサ技術とIT(情報技術)を利用したIT化対応変圧器保守支援システムを開発し、工場内の供試実変圧器に取り付け、実用性を確認した。

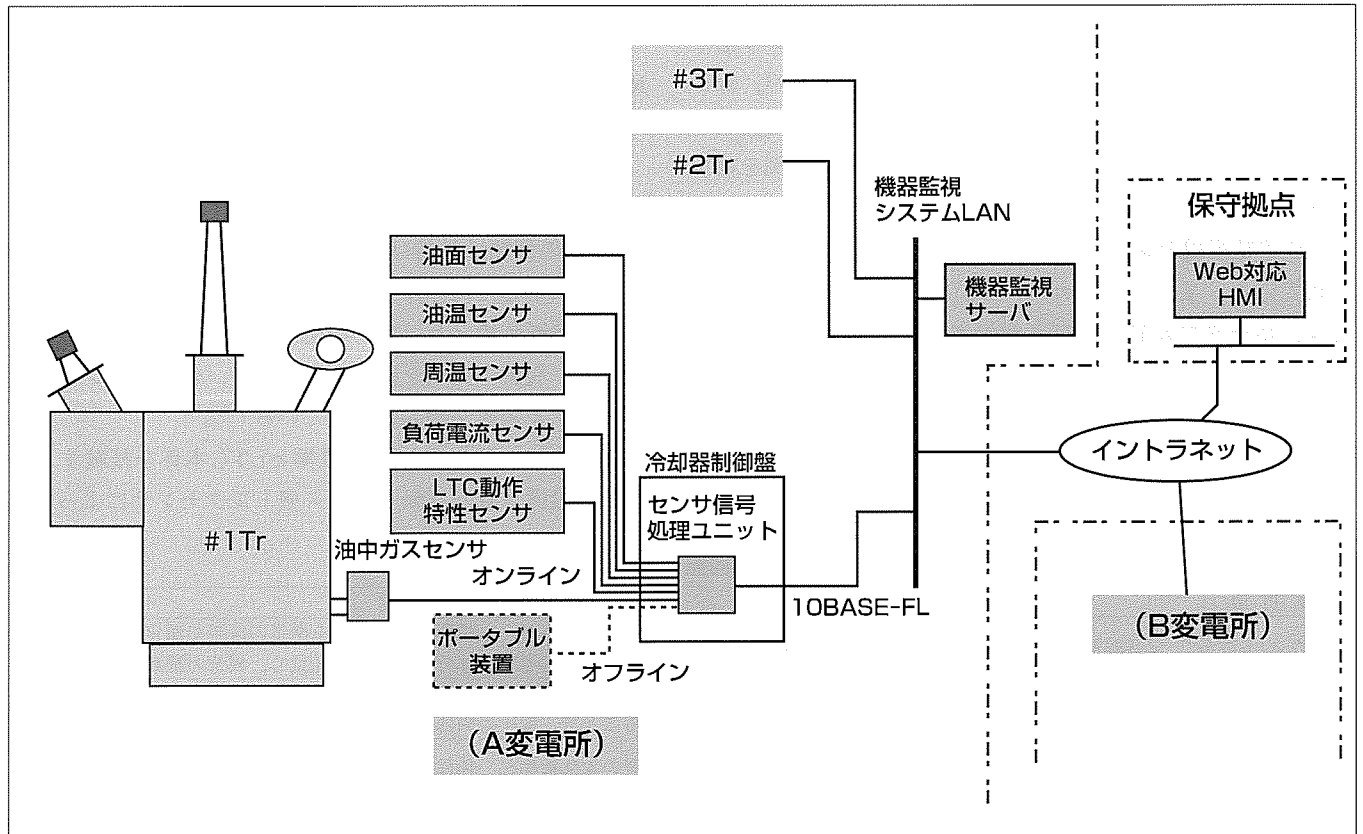
このシステムは、既存の広域ネットワークを用いて保守拠点に居ながらにして遠隔地の変圧器の運転状態や監視・

診断情報を必要に応じてアクセスできるものである。

保守拠点では、機器監視サーバ内のデータや画面を任意にアクセスでき、保守情報の共有化と異常検出時の油中ガスセンサの起動、負荷時タップ切換装置(LTC)のトルク波形表示による早期対応や異常解析・診断精度の向上に効果を発揮できる。

システムは、変圧器の重要性、トータルコストに応じて構築される。このため、センサ、各装置間のデータ伝送については、オンライン、オフライン及び各種I/Fを準備し、システムの選択性・拡張性を考慮している。

今後IT化対応保守支援システムが変圧器運転信頼性維持と保守コスト削減に効果を発揮するものと考えている。



## IT化対応保守支援システムの構成例

変圧器の保守情報を保守拠点等の遠隔地で任意にアクセス可能なシステムで、変圧器に設置した各種センサ、冷却器制御盤に内蔵したセンサ信号処理ユニット、変電所構内に設置した機器監視サーバ、保守拠点とイントラネットを経由して接続したWeb対応HMI (Human Machine Interface) で構成される。

1. ま え が き

基幹系変電所を中心に、重要機器の一つである変圧器の点検の支援、及び機器の異常・兆候を早期に検出し事故を未然に防止する保守支援システムが導入されている。

近年、設備投資が抑制され、高経年変圧器や過負荷運転条件が厳しくなる変圧器が増加する傾向にあり、監視診断技術の重要性は更に高くなっている。

一方、保守管理においては、従来の運転時間・動作回数を基に点検を実施するTBM(Time Based Maintenance)から、各種センサを用いたオンラインモニタやポータブル診断装置を用いた外部点検等によって機器状態を正確に把握して適切な機器保守を実施するCBM(Condition Based Maintenance)への移行による保守コストの削減が検討されつつあり、機器の高信頼性維持と保守コストの削減の二面性が要求されている<sup>(1)</sup>。

2. 変圧器保守支援システムの概要

既存のネットワークを用いて保守拠点において遠隔地のそれぞれの変圧器の運転状態や監視・診断情報にアクセスし管理・活用することで機器の信頼性維持と保守コスト削減を図ることを目的とする変圧器保守支援システムを開発した<sup>(2)</sup>。

このシステムは変圧器に設置した各種センサ、センサ信号処理ユニット、変電所内に設置する機器監視サーバ、保守拠点のWeb対応HMIで構成され、工場内の供試実変圧器に取り付け、実用性を検証した。システムの構成例を前ページに示す。

変圧器監視用センサは、表1に示すオンラインセンサを備えている。また、油中ガス、LTC駆動軸トルクについては、ポータブル装置及び各種伝送I/Fを製品化し、システムに応じて選択可能な構成とした。

センサ信号処理ユニットは、変圧器端子箱、冷却器制御盤に内蔵可能で、センサ信号の変換・異常診断(一次診断)を実施し、測定データ、診断結果を変電所の機器監視

LANを介して機器監視サーバに保存する。

Web対応HMIは、監視サーバのデータ、画面、波形等をイントラネットを経由して任意にアクセスでき、保守拠点でそれぞれの変圧器の保守情報を管理・活用できる。

以下、IT化対応保守支援システムの重要な要素であるIT化対応センサ、及び構成装置の概要について述べる。

3. IT化対応変圧器監視用センサ

IT化対応センサの一例として、特に高経年変圧器や過負荷運転条件が厳しくなる変圧器の内部異常診断に有効な油中ガス(6成分)センサ、及びLTCの異常診断とCBMを指向したセンサを紹介する。

3.1 油中ガス(6成分)監視装置

油中ガスによる異常診断は、変圧器の内部異常の様相や進展度合を検出・特定できることから、最も有効な手段として従来から広く採用されている。

この装置は二種類あり、一つは据置形として変圧器本体に油配管を直結し、周期的(例えば・日ごと)に自動測定し、異常の検出・特定、異常検出時のトレンド管理可能なオンライン装置を製品化している。一方、緊急時の変圧器の健全性の確認、及び不特定多数の変圧器の一次診断を現地において短時間で実施可能なオフライン(ポータブル)も製品化している<sup>(1)(3)</sup>。

また、オンライン装置は、10BASE-T/FL、RS-232C、RS-485、PHSの伝送I/Fを備えており、装置単独でのシステム化に配慮している。

図1、図2に装置の外観を示す。

3.2 LTC動作監視センサ

LTCの信頼性維持は、従来から巡視及び動作回数・動作年数に応じた保守作業(TBM)によって行われてきた。

異常診断装置としては、切換え中の駆動軸トルク波形を測定し、異常の兆候を検出するもので、オンライン装置とポータブル装置が製品化されている<sup>(1)(3)</sup>。

オンライン装置は、操作機構とLTC本体を接続する連結軸に設置された回転トランス型トルクセンサによって駆

表1. 変圧器監視用センサ一覧

監視項目	適用センサ	機能概要
油中ガス(6成分)	熱線形半導体センサ	絶縁油に溶解しているガスを抽出し、6種類のガス成分を微量の段階で測定することにより、機器内部で発生している局部過熱や部分放電を早期発見し、異常の種類を推定する。
油面(漏油)	磁気式ポテンシオメータ	油面を常時監視することで、変圧器の漏油を効果的に検出する。
油温	測温抵抗体(Pt100Ω)	油温上昇を常時監視することで、変圧器内部異常や冷却装置の異常を効果的に検出する。
LTC動作特性	駆動軸トルクセンサ モータ電流センサ 切換え信号、タップ位置信号	負荷時タップ切換え装置の本体機構部、操作機構部の異常の前駆現象を駆動軸トルク・モータ電流波形から検出し、異常の早期検出と異常検出時にその部位を標定する。
LTC切換開閉器 接触子消耗量	負荷電流センサ LTC切換え信号	負荷電流やLTCの切換え信号を測定し、切換開閉器内接触子の累積消耗量を推定することで、接触子残量管理限界や主接点・抵抗接点のアンバランス消耗管理限界に対する裕度の予知を行い、適正な内部点検を支援する。
過負荷監視	負荷電流センサ 油温、周温センサ 油流センサ	負荷電流、油温、周囲温度、冷却器運転状態を入力し、熱等価モデルを用いて巻線温度をシミュレーションし、さらに予測パターンから今後の巻線温度、寿命損失を推定する。

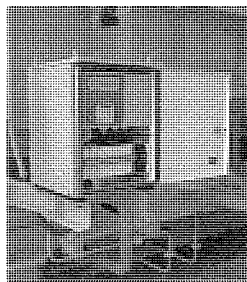


図1. オンライン油中ガス監視装置(C-TCG-6C)の外観

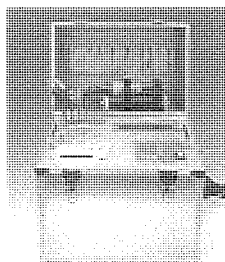


図2. ポータブル油中ガス分析装置(PGA-200)の外観

動軸トルク波形を測定し、センサ信号処理ユニットによって切換えモードごとに抽出されたトルクと動作時間を管理値と比較して異常兆候の有無の判定、異常の部位を標定する。また、抽出データ、診断結果、トルク波形等を監視サーバへ伝送する。

ポータブル装置は、不特定多数のLTCを対象に主に点検の精度向上を目的として製品化したもので、トルクセンサ、解析ユニット、診断用パソコンで構成され、操作機構の手動ハンドル軸にサーボモータ内蔵のトルクセンサを直結し、モータを駆動することでLTCを切り換えながらトルク波形を測定する。

このようにして、測定されたトルク波形から抽出されたトルクや動作時間によって異常判定するとともに、前回測定波形又は型式ごとの基準波形との重ね合わせによる異常の兆候、異常部位の診断を可能としている。

トルク波形及び診断結果は、診断用パソコンに保存され、LANカードを介して監視サーバへ伝送する。

以上のように、トルクセンサは特に分解点検する機会の少ないタップ選択器や転換器の診断に有効で、トルク波形は異常検出時の解析と異常部位の標定に効果を発揮する。

図3にポータブルLTCトルク診断装置の外観を、図4に診断例を示す。

### 3.3 LTC切換開閉器接触子消耗量監視センサ

LTC切換開閉器の開放点検は、動作回数や年数による周期管理によって実施されている。

この開放点検は、主に接触子の消耗量、締付け部の緩みを点検するもので、接触子消耗量監視による内部点検周期の延伸が保守コスト削減の観点から検討されている。

接触子消耗量監視は、LTC切換え時の変圧器負荷電流、LTC切換え方向を測定し、図5に示す計算式(1)を基に累

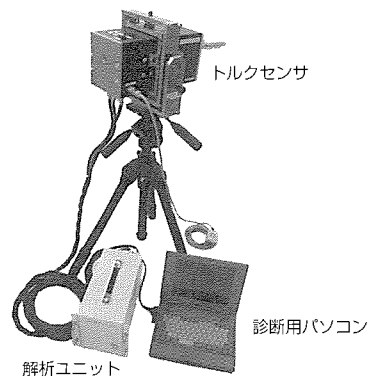


図3. ポータブルLTCトルク診断装置の外観

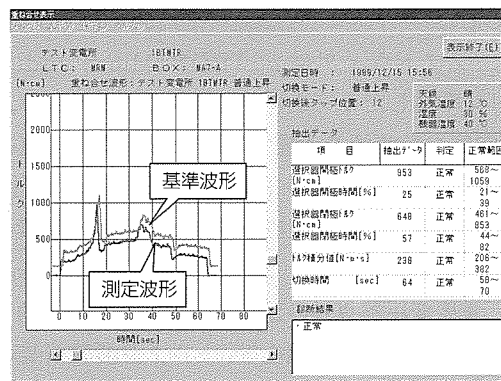
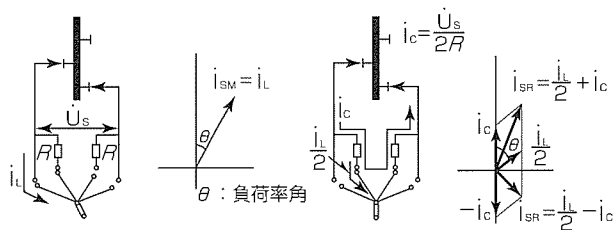


図4. ポータブルLTCトルク診断装置の診断例



$$\sum_{n=1}^N W_i = K \cdot \sum_{n=1}^N i_{SM}^p \cdot T_a \dots \dots \dots (1)$$

(W : 消耗量 N : 切換え回数  
K, P : 定数 T<sub>a</sub> : アーク時間(平均1/4波とみなす))

ここで、 $i_s$  (遮断電流)は以下によって決まる(二次抵抗の場合)。

主接点 :  $i_{SM} = i_L = n \cdot i_R$

抵抗接点 :  $i_{SR} = i_L / 2 \pm i_c = i_L / 2 \pm U_s / 2R$

( $U_s$  : ステップ電圧  $i_L$  : 変圧器負荷電流  
 $n$  : 負荷率  $i_R$  : 変圧器定格電流  
 $i_c$  : 循環電流  $R$  : 抵抗)

図5. 2抵抗式LTCの切換え動作と各部の電圧・電流

積消耗量を推定することで、各接触子の残量限界や主接点、抵抗接点の不均等消耗限界に対する裕度を把握し、消耗進行度に応じた点検周期の調整が可能になる<sup>(1)</sup>。

図5に2抵抗式LTCの切換え動作と各部の電圧・電流について、図6に接触子累積消耗量の変化傾向例を示す。

### 4. センサ信号処理ユニット及び伝送I/F

センサ信号処理ユニットは、3Uサイズの32ビットCPU、A/I, D/I, 伝送I/Fカードで構成され、小型化を図る

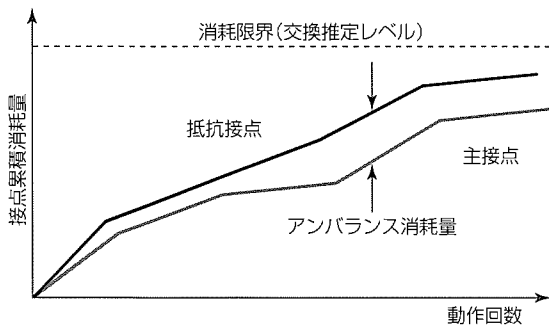


図6. 接触子累積消費量の変化傾向例

ことによって冷却器制御盤又は変圧器端子箱内への取付けを可能とした(サイズ:(W)200×(D)150×(H)150(mm))。

また、ソフトウェアはμITRON(Micro Industrial TRON)に準拠したカーネルを採用することにより、通信I/F機能等の拡張性を考慮した。センサ信号処理ユニットと変電所サーバ間伝送I/Fには光イーサネット(10BASE-FL)、光RS-232C、PHSを準備しており、新設・既設等のシステム形態に合わせた選択を可能としている。

また、重要変圧器以外の保守コスト削減を主目的とするシステムには、油中ガスやLTCトルク診断装置等のポータブル装置を適用し、内蔵の伝送I/Fを用いることにより、上位システムとのデータ伝送を可能にしている。

### 5. 監視サーバ及びWeb対応HMI

監視サーバは、センサ信号処理ユニットからの監視・診断情報を約30年分保存しデータベース化する機能と、表・トレンドグラフ、センサ信号波形を表示する画面を生成する機能を持っている。

Web対応HMIは、イントラネットを経由することによって監視サーバ内のデータや画面にアクセスでき、また任意のデータをCSV形式のファイルでダウンロードすることによって汎用ソフトウェアを用いた作表・グラフ化が可能で、保守情報の共有化と保守業務の支援を実現している。

特に異常検出時には、油中ガスセンサの起動による変圧器の健全性の確認、診断精度の向上、及びLTCトルク波形等を表示することによる詳細な異常部位・様相の診断に効果を発揮できる。また、メーカーに波形等を送信することで専門家による解析が可能で、リモートメンテナンスの観点からも付加価値が高い。

図7に新外鉄形変圧器に設置された油中ガスセンサと変圧器端子箱、図8に変圧器端子箱に内蔵された信号処理ユニットの外観、図9にWeb対応HMIに表示される油中ガス計測データ画面例を示す。

### 6. む す び

変圧器の異常診断やCBMに有効なセンサと装置、及びこれらの情報を遠隔地で有効に活用するためのITを適用

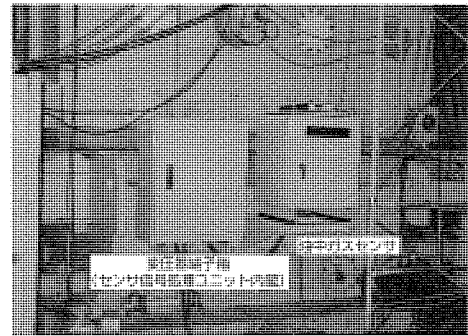


図7. 供試実変圧器への設置例

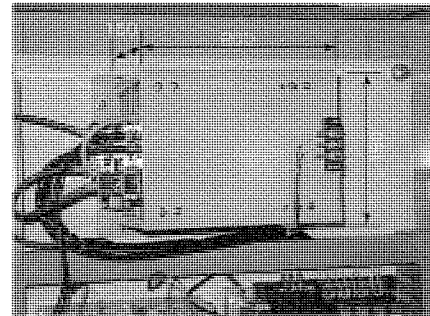


図8. センサ信号処理ユニットの外観

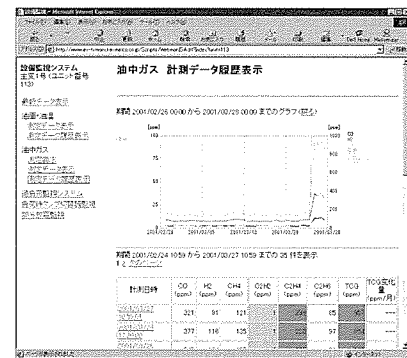


図9. Web対応HMI油中ガス画面例

した保守支援システムについて述べてきた。

今後さらに監視センサやシステムのコスト低減と保守のニーズに対応した履歴管理、点検支援、復旧支援等の支援機能の充実によって適用の拡大が期待でき、変圧器の高信頼性維持と保守コスト低減に大いに貢献できると考える。

### 参考文献

- (1) 前川 洋, 篠原秀雄ほか: GIS・変圧器の設備管理支援システム, 平成12年電気学会電力設備の監視診断技術専門講習会講演論文集 (2000)
- (2) 前川 洋, 篠原秀雄ほか: イン트라ネット対応の変電所運転保守支援システム, 平成12年電気学会電力エネルギー部門大会論文集 (2000)
- (3) 前川 洋, 篠原秀雄: 送変電機器用故障診断システム, 三菱電機技報, 73, No.8, 552~555 (1999)





# 特許と新案 \* \* \*

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

## 半導体式流量検出装置 (特許 第2855885号, 特開平4-369480号)

この発明は、エンジンの吸入空気量を測定する半導体式流量検出装置の構造と取付け方法の改良に関するものである。

従来の半導体式流量測定装置の発熱用半導体チップは、両端を支持されており、発熱素子から基板への熱伝導損失が大きく、また、その流量依存性も大きいいため、感度や応答性を低下させるという欠点があった。

この発明は上記のような欠点を除去するためになされたもので、実施例を図1、図2に示す。図示のように、第1の発熱素子(2)を備える発熱用半導体チップ(12)をその一端で支持部材(36)、(38)に固定し、さらに、チップの支持部と発熱素子(2)の間に第2の発熱素子(9)を形成し、この第2の発熱素子(9)を第1の発熱素子(2)よりも低い温度で、流体温度よりも所定温度が高くなるように電氣的に加熱した。

以上のような構成により、第1の発熱素子(2)から支持部

材への熱伝導損失が低減され、その流量依存性も抑制されるので、感度や応答性が向上できる。

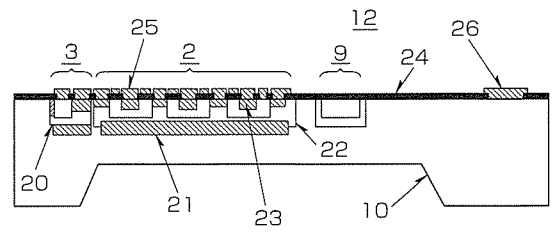


図1

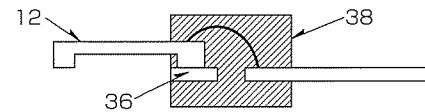


図2

## 半導体装置の製造方法 (特許 第2132010号, 特公平7-24312号)

この発明は、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ(IGBT)に代表される電力用半導体装置の材料となるウエーハ基板の製造方法に関するものである。

図1はパンチスルー形IGBTの断面模式図である。このIGBTの製造に用いる従来のウエーハ基板は、図2に示すように、低抵抗p形シリコン母材(8a)の片面に低抵抗n形エピ層(7)と高抵抗n形エピ層(1)を連続して形成する。(1)層の表面にはMOS制御機能部分(2, 3, 4, 5)が設けられている。

図3に示すこの発明では、高抵抗n形シリコン母材(1a)にまず低抵抗n形領域(7)を拡散法で形成した後低抵抗

p形エピ層(8)を作る。反対側のn形領域(7)を研磨すれば従来のウエーハ基板に相当するシリコン母材が得られる。

厚い高抵抗n形領域が必要な高耐圧IGBT用の従来の基板は、高精度のエピ形成作業を長時間行うために高価である。しかしながら、低抵抗p形領域のエピ精度は低くてもよいので、この発明ではウエーハ基板を廉価にすることができる。

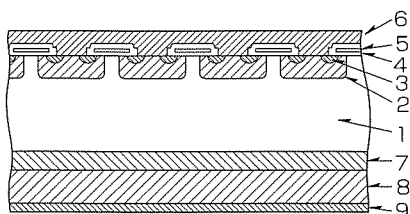


図1

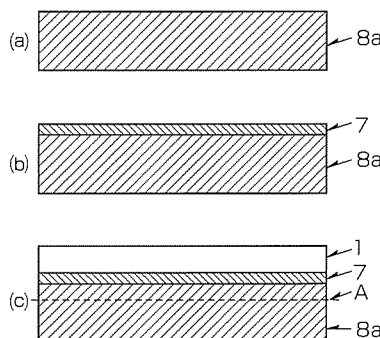


図2

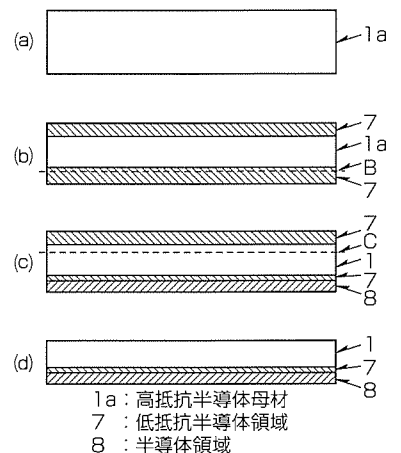


図3

1a: 高抵抗半導体母材  
7: 低抵抗半導体領域  
8: 半導体領域



# 特許と新案\*\*\*

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

## 制御システムの異常検知装置 (特許 第3025421号, 特開平7-147800号)

発明者 佐藤智典, 岩崎隆至

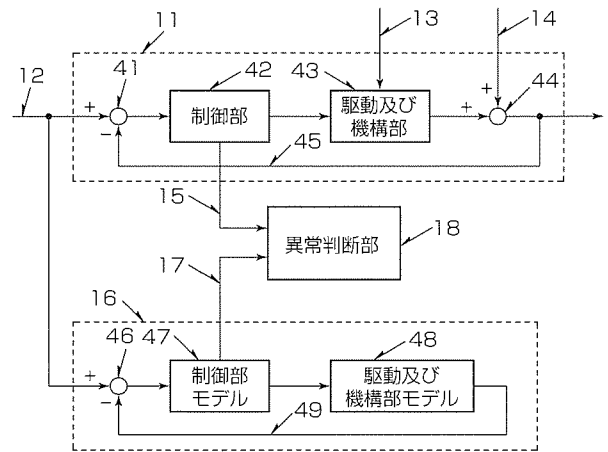
この発明は、工作機械の数値制御などの制御システムにおいて、センサを用いずに加工異常を精度良く検知、予知、又は回避するためのものである。

従来の加工異常を認識するための構造は駆動モータ電流と回転速度の観測値から加工反力を推定するもので、これは、本質的に観測ノイズの影響を受けやすく、誤動作や検知漏れが多かった。また、検出したい信号である加工反力とノイズを区別することが困難なため、ノイズを減らすためのフィルタリング処理によって加工反力の感度も下げることになり、広い範囲の加工には適用できなかった。

この発明は上記のような問題点を解消するためになされたもので、制御部及び駆動系のモデルを備え、実際の制御部の状態量と制御部モデルの状態量を比較することにより、観測雑音や演算誤差等の影響を受けずに正確に異常を検知することを可能にした。これにより、高精度に加工状態が認識できるようになり、ドリル加工、タップ加工、エンドミル加工など各種加工における広範囲な加工におけるモニ

タリングと制御が可能となった。

また、高精度に加工異常を認識できることを利用して、ドリル加工において異常検知後に動作経路を変える適応制御方式、加工プロセスモデルに基づいた加工状態監視及び適応制御方法も併せて考案した。



### 〈次号予定〉三菱電機技報 Vol.75 No.9 「エネルギーソリューション」特集

#### 特集論文

- エネルギーソリューション特集に寄せて
- 三菱電機のエネルギーソリューションへの取組
- 三菱トータル省エネルギーシステム技術
- 三菱コジェネレーションシステム
- マイクロコジェネレーションシステム  
“マイクロエコターボMTG-28”の応用システム
- 分散電源系統連携技術
- ESS事業推進インフラ整備

- エネルギーマネジメントシステム
- 三菱コジェネレーションシステムの遠隔監視システム
- 四国電力㈱の需要家サービスシステム “Open PLANET”
- 電力トレーディングと市場情報技術
- 電力小売託送ルールとPPS向け発電計画
- 電力市場向けリスク管理・ポートフォリオ運用システム
- 系統運用補助サービスの在り方とシステム
- インタラクティブ エネルギーサービスシステム

<p>三菱電機技報編集委員 委員長 井手 清 委員 中村 治樹 畑谷 正雄 吉原 孝夫           榎原 幸志 村松 洋 松本 修           浜 敬三 安福 正樹 西谷 一治           中島 克人 荒木 政敏           河内 浩明 山木 比呂志 幹事 名畑健之助 8月号特集担当 羽馬 洋之                   村上 寛</p>	<p>三菱電機技報 75巻 8号 2001年 8月22日 印刷 (無断転載・複製を禁ず) 2001年 8月25日 発行 編集人 井手 清 発行人 名畑 健之助 発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 ドキュメント事業部 〒105-0011 東京都港区芝公園二丁目4番1号 秀和芝パークビルA館9階 電話 (03) 3437局2692 印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス 発売元 株式会社 オーム社 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話 (03) 3233局0641 定 価 1部735円(本体700円) 送料別</p>
<p>電子文書時刻証明に関するお知らせ 2001年 7月16日 三菱電機株式会社 集約期間：2001年 6月16日～2001年 7月15日 集約ハッシュ値： M3GfmbkT1bWpZMsn8+2zyvbMkzzxMsAILDAAWBRGSb6OFJnz</p>	<p>三菱電機技報に関するお問い合わせ先 cep.giho@ml.hq.melco.co.jp</p>

URL <http://www.melco.co.jp/giho/>

# スポットライト

# MIT S (Mitsubishi Information Technology Switchgear)

限られた資源を有効に活用し質の高い電力を経済的に供給するという市場の要求にこたえるため、長い間培ってきたガス絶縁技術と遮断技術を基に、遮断器(CB)、断路器/接地開閉器(DS/ES)を同一タンクに複合配置しかつログスキーCT(Current Transformer)、分圧形VD(Voltage Divider)などデジタル化対応機器を搭載したインテリジェントスイッチギヤ(MITS)を製品化しました。

MIT Sは、構成機器の複合化による小型・軽量化(従来比約50%)、据付けスペース削減(気中変電所比40%以下)、一体輸送域拡大による据付け工期の短縮(従来比約40%)を図るとともに、ITを駆使することによって開閉機器のライフサイクルコスト低減が可能となります。

## 特長

1. 小型・軽量化, 経済性・信頼性向上

(1) 構成機器の複合一体化

従来は個別のタンクに収納されていたCB, DS, ES, CT, VDを同一のタンク内に収納したため、大幅な小型・軽量化が達成されると同時に、CBの両側にはガス区分絶縁スペースとCTを配置し、従来のGISと同じメンテナンス性、系統保護の信頼性を追求しております。

(2) 一体輸送化

がい(碍)管を除いて一体輸送が可能となり、信頼性の向上と据付け期間の短縮が実現されました。また、碍管には軽量のポリマ碍管を適用し、防爆性・耐震性の向上を図っています。

2. インテリジェント化

(1) 変電所プロセスバス

MIT S本体から得られたデジタル情報を伝送速度100Mbpsの変電所プロセスバス(光ファイバ)によって変電所制御室建屋の保護リレー及びSASサーバへ伝送することができ、さらに、このデジタル情報は、給電制御所や保守拠点等へ伝送されることになります。これにより、高速・大容量のデジタルフィールドネットワークの実現、制御ケーブル敷設コストの大幅削減等が可能となります。

(2) ログスキーCT/分圧形VD

デジタル信号対応のログスキーCT/分圧形VDの開発により、制御・保護のデジタル化が可能となりました。また、従来の巻線CT/PT(Potential Transformer)を適用する場合と比較して、機器全体の大幅な小型化、省スペース化が達成されました。

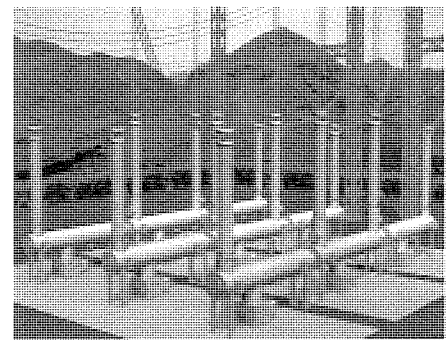
(3) 開閉極位相制御

開閉極位相制御コントローラを適用し、

ある特定の電圧・電流位相において遮断器を開閉することにより、開閉時の過電圧、過電流を抑制します。これにより、投入抵抗、避雷器の削減、コンタクト部分の長寿命化、系統電圧変動の抑制による保護リレーの誤動作防止等のメリットが得られます。

(4) ハイブリッドセンサMahs(Mitsubishi Advanced Hybrid Sensor 愛称:  $\mu$ -Cube-I)

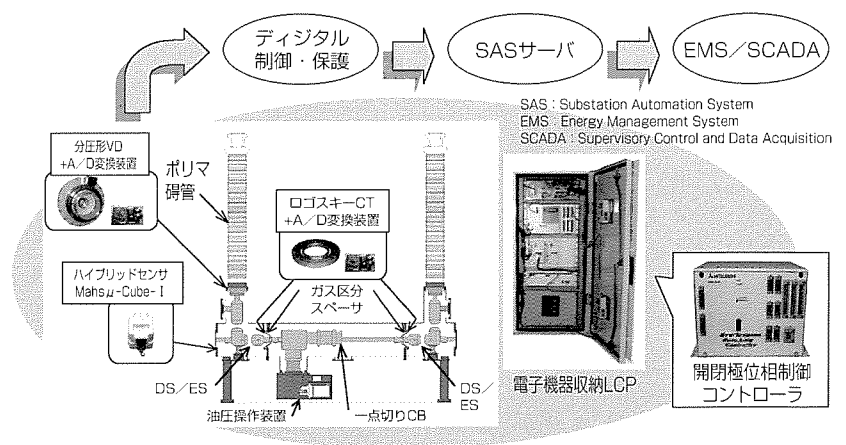
ハイブリッドセンサは、ガス圧力センサ、分解ガスセンサ、温度センサをコンパクトに一体化したものです。ガス圧力センサにより、ガス配管の引き回しが不要になります。また、分解ガスセンサにより、タンク内部の絶縁・通電状態の監視が可能となるため、巡視・定期点検の省力化・延長が可能となります。



MIT S適用変電所の外観 (1-1/2CB方式S/S)

## 機器定格

定格電圧 (kV)	550	300
雷インパルス耐電圧 (kV)	1,800/1,550/1,425	1,050/950
定格短時間対電流値 (kA)	63/50	63/50
定格電流 (A)	4,000/2,000	4,000/2,000



MIT Sの内部構造及びデジタル・モニタリング技術