

# 送変電設備の予防保全技術

—劣化診断技術と予防保全システム—

Preventive Maintenance Technology for Substations

丸山勝也\* Katsuya Maruyama 山田 洋\* Hiroshi Yamada  
山極時生\*\* Tokio Yamagiwa 佐藤重勝\* Shigekatsu Satō



東京電力株式会社東山梨変電所納め運転・保守支援システム 超高压, 基幹系の変電所では, 機器の縮小化・ブラックボックス化に対応した新しい保守・点検技術の適用が進んでいる。また, 万一の機器の事故に際し, 系統復旧の迅速化を目指した故障点標定技術の向上も図られており, これらは運転・保守支援システムとして実用化の段階に入った[(a) 機器監視端末, (b) 運転・保守支援マンマシン, (c) CRT表示例]。

長期間停止しての分解点検が容易にできない環境にある送変電設備の安定運用のためには, 機器の運転中にその状態を監視し, 異常や寿命の兆候を把握する予防保全技術が必須(す)である。

日立製作所は, 送変電設備の主器と称されるガス絶縁開閉装置, 変圧器を主体に, 各種センサによる

高感度・高精度の検出技術, 異常発生部位の位置標定技術, 異常信号の経時変化を基にした寿命予測技術, 近年進捗(ちよく)の著しいAIを導入したエキスパートシステムを軸とした予防保全技術を実用化し, いっそうの改善を図っている。

\* 日立製作所 国分工場 \*\* 日立製作所 国分工場 工学博士

## 1 はじめに

高度情報化の進展に伴い、生活環境・社会機能が多様化・高度化し、電力依存度がますます増大している。このため、電力の安定供給・品質向上に対する要請はますます厳しいものとなっている。

一方、送変電機器は長期間停止して分解点検されにくい環境にあり、さらに、機器・装置の縮小化および密閉化といった設備形成の変化に従い、従来の人間の五感を主とした外部診断だけでは、十分な信頼度確保が得られない状況になってきている。このため、運転中での機器の状態監視によって健全性の確認を行い、異常や寿命の兆候を把握する予防保全技術が実用化されている。ここでは、その基本となるセンシング技術および適用例について述べる。

## 2 センサ技術

### 2.1 診断項目と最新のセンシング技術

変電機器の中でもガス絶縁開閉装置や変圧器は主器と称され、絶縁、通電、開閉・切換の各機能に対する高い信頼度が要求される。これらに対する効果的な監視項目は、従来の経験、現在のセンシング技術の完成度などから評価され整理されてきた<sup>1)</sup>。これをガス絶縁開閉装置、変圧器に関するトラブルポテンシャル<sup>2)</sup>との関連で整理すると図1に示すようになる。

実際にすべての項目を自動監視に組み込むことは、経済性の面で困難であり、一般的にはこれらの項目から設

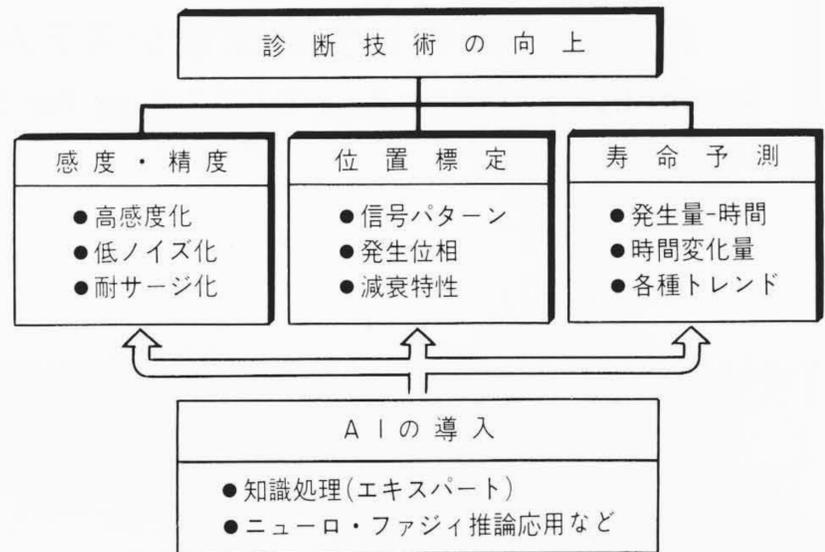


図2 診断技術の向上 的確な保全を行うためには、高精度の診断技術が不可欠であり、AIを導入した感度向上はもちろんのこと、位置標定、トレンドによる寿命診断技術の向上検討が進められている。

備の規模、重要度などに応じてさらに絞り込まれることが多い。

### 2.2 最近の診断技術の向上

高感度の異常検出に加え、次のステップとして、どのように処理すべきかの指針を与える診断技術が重要となる。最近では、このような診断技術の精度向上に力を入れている。

現在進められている診断技術の向上に関する取組みの概要を図2に示す。向上策のポイントとしてはノイズ、サージに強い高感度・高精度の検出技術、異常がどの個所で発生しているかの正確な位置標定技術、異常信号の経時変化(トレンド)を基にした寿命予測技術の確立である。これらの技術に関しては、最近急速に進歩しているAI

部位・要因	効果的な監視項目		
	GIS	TR	
絶縁故障	劣化故障 絶縁油, 絶縁ガス 有機絶縁物(エポキシほか) 無機絶縁物(絶縁紙, Zn-O素子)	●部分放電 ●異常振動, ガス圧 ●LA: 漏れ電流, 動作回数	●部分放電 ●油中ガス ●変成器: 油中水分 (モールド型は漏れ電流)
	突発故障 金属パーティクル 過大サージ	●分解ガス ●微小異物検出	
熱的故障	経時進展故障 緩み, 変形→接触不良 接触面劣化(酸化など)	●局部加熱, 温度 ●異常振動, 異音	●油温 ●油中ガス
	突発故障 接触不良→潮流変化 振動・熱伸縮→接触不良	●開閉特性	
機械的故障	劣化故障 疲労劣化・環境変化 (がい管, パッキン, グリース)	●ガス圧, 油圧・空気圧 ●開閉特性, 動作回数	●油面, 渋滞
	経時進展故障 摩耗, かじり, 渋滞	●制御電流 ●異音・異常振動	●LTC渋滞, 異音
	突発故障 破損, 脱落	●開閉特性	

注: 略語説明 GIS(ガス絶縁開閉装置), TR(変圧器), LA(避雷器), LTC(負荷時タップ切換器)

図1 変電機器のトラブルポテンシャルと効果的な監視項目 各種トラブルポテンシャルに対し、有効なセンシング技術の開発が進められている。

を導入したエキスパートシステムの適用を推進している。

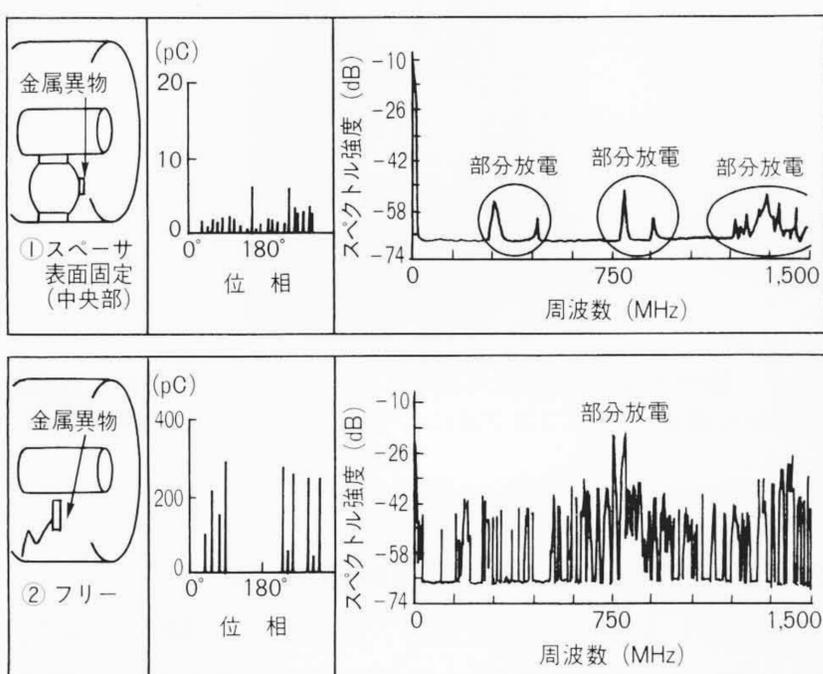
### 2.3 ガス絶縁開閉装置

ガス絶縁開閉装置で、特に異常診断上重要な項目としては、絶縁故障の前駆現象として現れる微小部分放電検出技術、突発故障の要因となる微小異物の検出技術、熱的故障の要因となる通電異常検出技術がある。これらの中から現状での最新の技術について以下に述べる。

#### 2.3.1 部分放電検出による絶縁異常診断技術

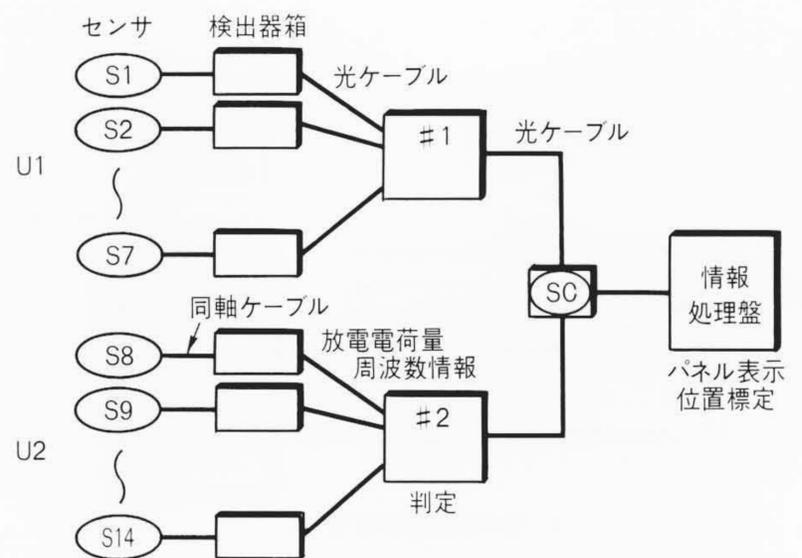
ガス絶縁開閉装置内で部分放電が発生したとき、その大きさおよび発生位置によって有害性が異なる。例えば、放電電荷量が小さくても高電圧側や絶縁物で発生している場合は問題であり、逆に電荷量が大きくても接地タンク上であればさほど問題にはならない。すなわち、部分放電による診断では位置標定がきわめて重要になる。ガス絶縁開閉装置中に金属異物が混入し、部分放電を発生している場合を想定した実験結果が図3である。部分放電に伴い発生する電磁波のUHF(Ultra High Frequency: 超高周波)成分を用いた微小部分放電検出法を適用した場合である。同図中に示すように、部分放電の発生位相と信号スペクトルのパターンにより、異物の状態をある程度推定できる見通を得ている<sup>3)</sup>。これらのパターン認識に関しては現在ニューラルネットワークを応用したAIシステム<sup>4)</sup>の適用を進めている。

また、このようにガス絶縁開閉装置内に発生した電磁波はガス絶縁開閉装置内を減衰しながら伝搬する。この減衰特性を利用して、各センサが検出した信号レベルか

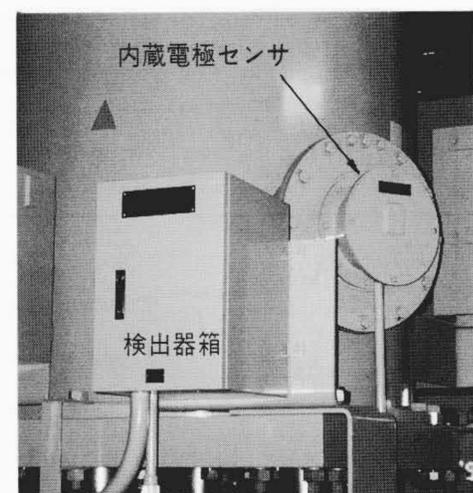


金属異物混入時の部分放電の位相とスペクトル

図3 部分放電検出による絶縁異常診断技術 発生位相および信号のパターン認識により、ガス絶縁開閉装置内部の異常診断が可能になりつつある。



(a) システム構成



(b) センサ・検出器箱取り付け状態

注：略語説明 SC (スターカップラ)

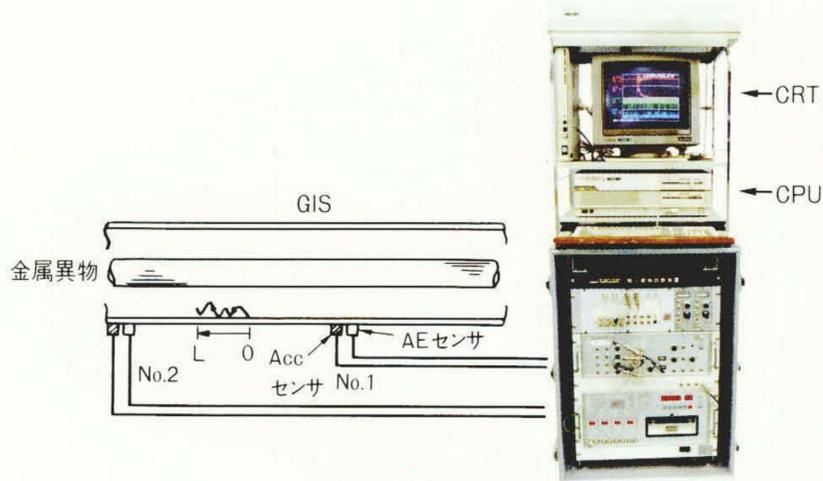
図4 部分放電常時監視システム例 UHF波を検出する高感度部分放電検出技術を用い、位置標定機能などを備えたシステムが実用化されている。

ら、ガス絶縁開閉装置内の部分放電発生部位を標定することが可能である。

この標定機能を利用した部分放電常時監視システムの例を図4に示す。このシステムは、すでに実用化段階に入っている。

#### 2.3.2 微小異物検出における現地ノイズ除去技術

現地でのガス絶縁開閉装置内部の微小異物の検出ではさまざまなノイズから信号を抽出し検出しなければならない。日立製作所が開発したAE(Acoustic Emission: 音響センサ)とAcc(Acceleration: 加速度センサ)の2種類のセンサによる検出技術は、これらのセンサの出力信号の比率からノイズ判定を行っており、単なる出力の大きさだけによる検出に比べて高感度を持っている。これらの診断の信頼性をさらに向上させるため、現地で各種の信号(異物検出の面ではノイズとなる。)の検出を行った。2種類のセンサの同時出力波形例を図5に示す。No.5 金属線の出力信号は、他と比較して異なったパタ



(a) 微小異物診断装置

No.	検出事例	波形既 要および 特徴
1	シース打撃音	AE Acc ●AE信号<Acc信号 ●信号レベルが比較的大
2	シースきしみ音(熱伸縮)	AE Acc ●AE信号<Acc信号 ●AEピーク値よりもピーク値が遅れて発生
3	金属線落下音(φ0.2×5mm)	AE Acc ●AE信号<Acc信号 ●AE, Acc信号ピークは時間的にほぼ一致

(b) 微小異物診断装置の各種信号に対する出力波形例

図5 現地における微小異物診断時のノイズ波形例 実際  
に現地で診断を行う際には、さまざまなノイズが診断装置に侵入す  
るため、これらを除く技術が重要である。

ーンを示している。すなわち、従来の出力比率に加え出  
力波形のパターン認識により、さらに検出の信頼性が向  
上できる。

## 2.4 変圧器

### 2.4.1 油中ガス監視技術

現地に設置した状態で、短時間に高精度の油中ガス分  
析が可能な自動異常監視装置を実用化した。装置の構成  
を図6に、油中ガス分析による診断アルゴリズムを図7  
に示す。この装置は、油中ガス分離法としてバブリング  
法を採用し、6成分のガス(H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>  
およびC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)を分析できる。分析したガスのパターン、成  
分比および発生量によって変圧器内部異常の有無、現象  
の推定を行う。バブリング法は、電磁弁で約100 mlの油を  
油中ガス抽出器に導き、短時間でガス成分の抽出と分析、  
診断ができる。油中ガス分析盤の外観を図8に示す。

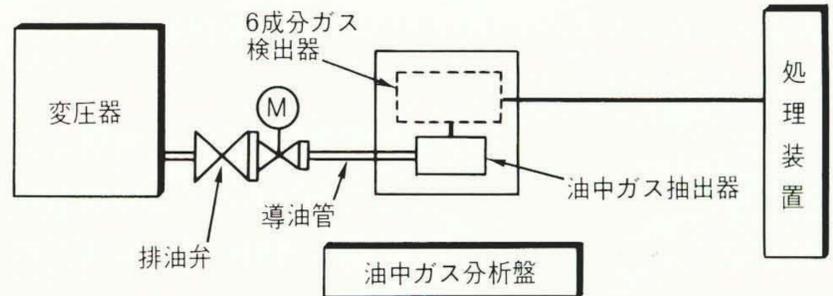


図6 変圧器監視装置構成 排油弁から電磁弁を介して導油し、バブリング法によってガス分離する方式で任意の時間に分析で  
きる。

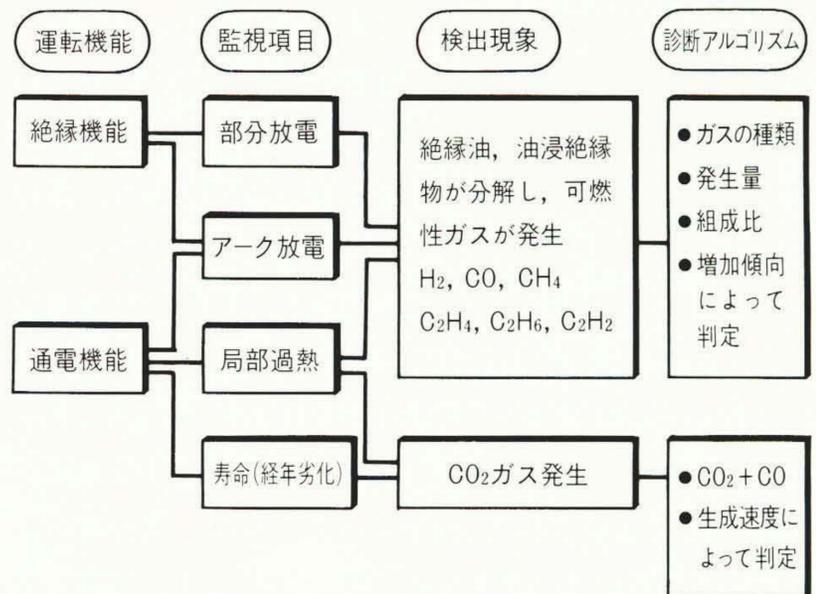


図7 油中ガス分析による監視項目と診断アルゴリズム  
ガス成分パターン、成分比および発生量によって診断する。

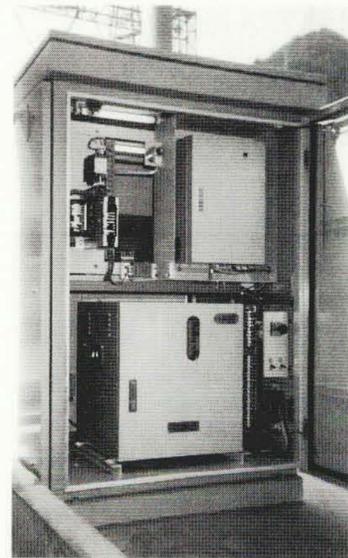
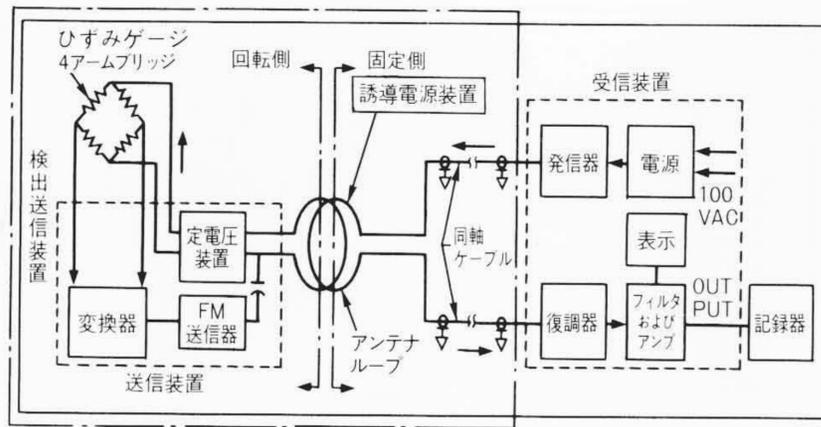


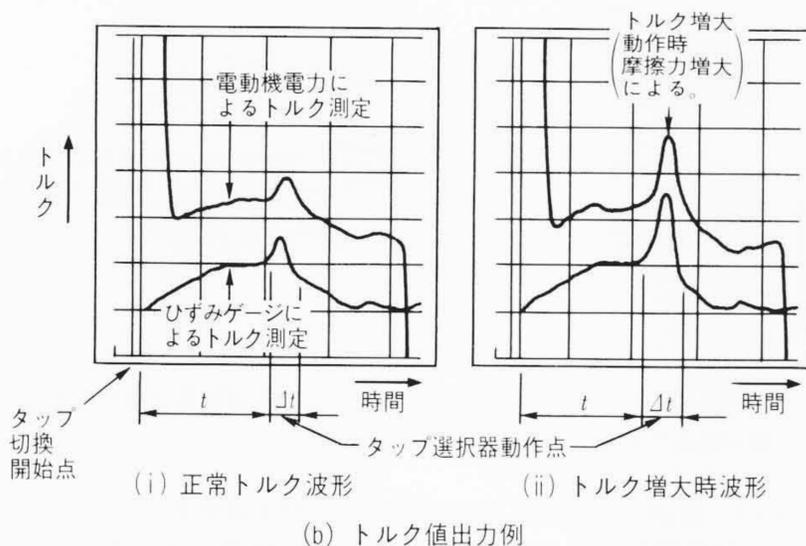
図8 油中ガス分析盤の外観 変圧器排油弁に取り付けた電磁弁から導油し、バブリング法によって油中ガスを抽出後分析する。

### 2.4.2 負荷時タップ切換器運転監視技術

変圧器に使用の負荷時タップ切換器では、駆動トルク、  
動作時間および電動機電流を検出し、異常兆候の早期発  
見が可能な異常監視装置を実用化した。一例として、ト  
ルク測定装置のブロック、センサ取付状態の外観および  
トルク値出力例を図9に示す。



(a) 測定システム



(b) トルク値出力例

図9 LTC駆動トルク測定法と出力例 駆動軸に取り付けた非接触式トルクセンサによって駆動トルクを測定し、トルク増大などの経時的異常の有無と部位の標定を行う。

この装置は、検出部にひずみゲージを用い、回転変圧器方式を使用して、ひずみゲージからの出力をFM波によって取り出す方式である。スリップリングを不要としているため、検出部の摩耗がなく保守の簡略化が図れる。

トルクデータの蓄積により、駆動トルクパターンと不具合現象および部位の標定も可能になってきている。タップ選択部分での摩擦力増加によるトルク増大例を図9(b)に示す。タップ切換器駆動系の変形や、軸と軸受の固渋などに起因して経時的に進展する異常は、駆動トルク値のトレンドおよびパターンを監視することによって検出可能である。

### 3 予防保全システム

変電所を構成する機器の隠蔽(ぺい)化、ブラックボックス化が進むにつれ、従来のような巡視中の五感情報を頼りに異常の兆候を発見することが困難となってきている。これに代わるものとして、センサ技術を用いた機器監視・設備診断装置の適用が増加している。

一方、変電所の運転・監視の面からは、高機能・高信頼度化に加えて運転・保守の高度化、省力化に対するニ

ーズがあり、これらにこたえる新しい運転・監視制御システムの適用が始まった。

新しいシステムは図10に示すように構成され、監視・制御と支援システムの情報ルートは完全に独立となる。また、おのおのの機能は図11のように分担される。このうち機器監視は淡い網目の部分であり、監視項目は図12に示す内容で標準化を図った。

運転支援とは文字どおり変電所の運転員の判断を支援するものであり、特に万一の事故、異常が発生した際に、迅速に対処できるような支援情報を提供しなければならない。最もニーズの高いガス絶縁開閉装置の母線事故の例で見れば、以下のような支援となる。今、運転状態で地絡事故が発生したとき、保護リレーの動作で運転中の線路は停止する。運転員は直ちに停電範囲、動作リレーの情報などをもとに事故部位を予測して現場に急行し、巡視によって事故部位を確認した後、給電所と連絡をとって復旧操作に入ることになる。夜間、悪天候中など、機器の表面に顕著な損傷が見られない場合には、事故部位の特定に多大な時間を費やすことになり応急復旧が遅延する。

新しいシステムは、機器監視情報の一つである事故点

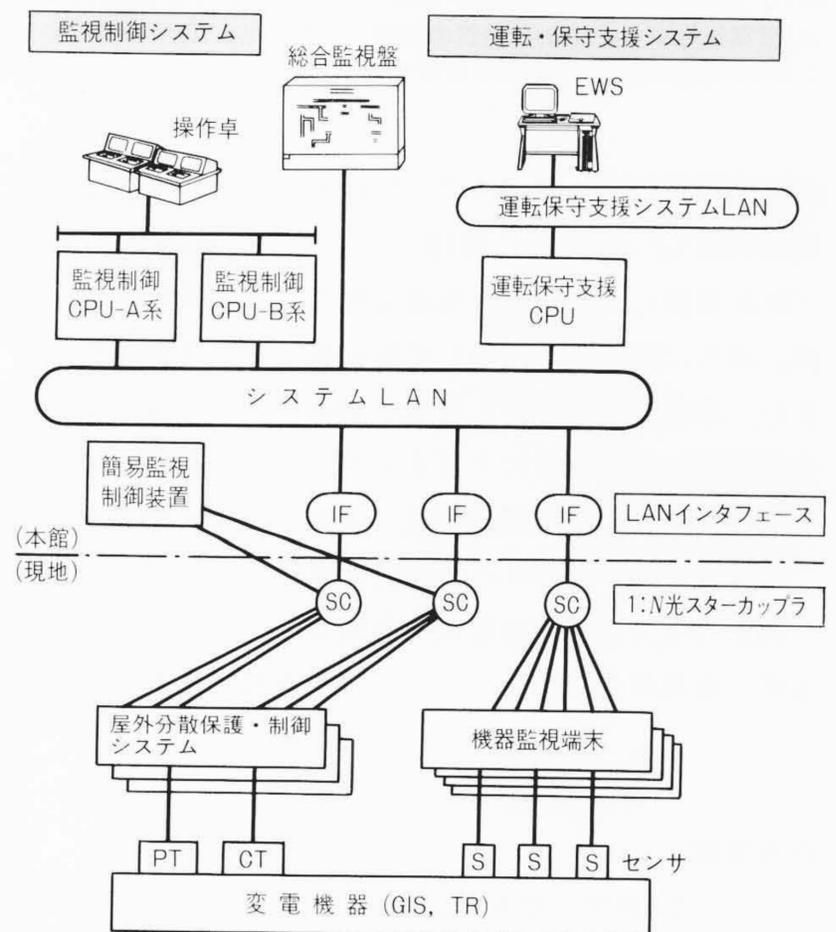


図10 新しい監視制御、運転・保守支援システム構成

センサを用いた変電機器の予防保全技術は、運転・保守支援システムを構成するとともに、直接の運転にかかわる監視・制御システムからの情報と組み合わせることでタイムリーな支援情報の提供が可能となった。

監視制御システム	運転・保守支援システム
(1) 設備運転状態監視 (2) 機器操作(平常時, 事故時, 個別) (3) 運転記録(計測, 操作, 状態変化記録など) (4) データ伝送 (5) 給電配電連系 (6) 操作手順表管理実行 (7) その他	(1) 平常時支援 (2) 事故異常時支援 (3) 記録支援 (4) 操作作業確認表および手順作成支援 (5) 点検停止計画支援 (6) 一搬業務支援 (7) 充電部確認図など図面作成支援 (8) シミュレーション (9) システム管理

図11 監視制御と運転・保守支援の機能分担 変電所の運転にかかわる監視制御システムと、支援を行う運転・保守支援システムは明確に機能が分担される。このうちセンサを用いた予防保全技術は、平常時、事故異常時の支援を行う。

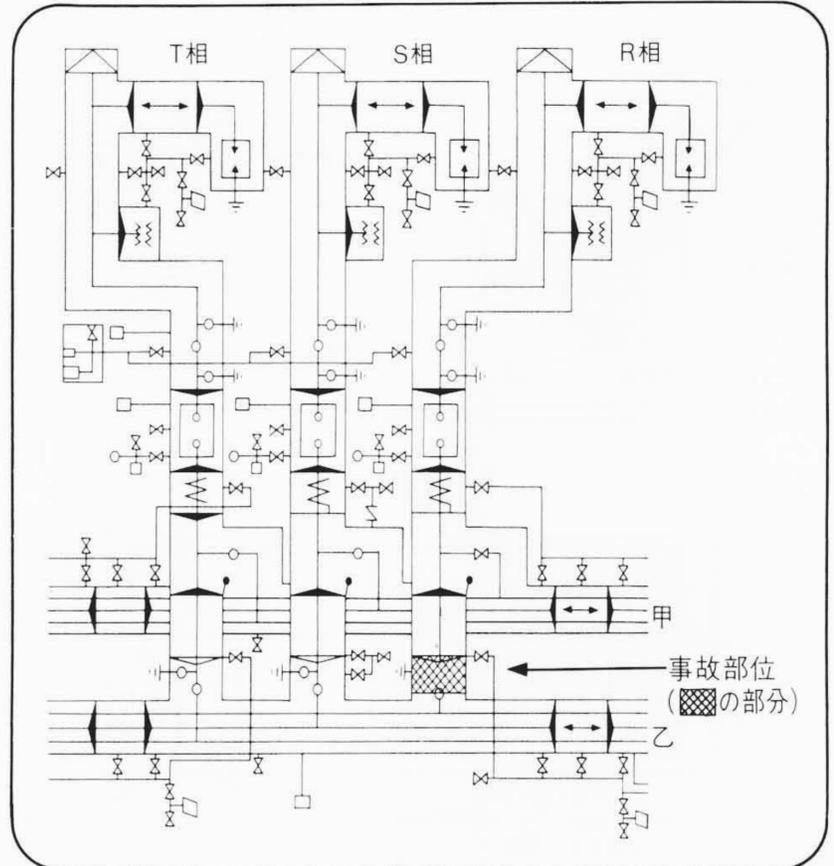
監視項目	
GIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>●CB/DS/ES開閉特性</li> <li>●CB・母線側DS・線路ES遮断・開閉電流</li> <li>●LA漏れ電流・雷サージ電流</li> <li>●ガス密度</li> <li>●油圧ポンプ運転特性</li> <li>●事故点標定(SPリレー)</li> </ul>
TR	<ul style="list-style-type: none"> <li>●油中ガス成分(6成分+CO<sub>2</sub>)</li> <li>●油温・油面</li> <li>●LTC動作時間・電動機電流</li> <li>●トルク</li> </ul>
共通	<ul style="list-style-type: none"> <li>●30F故障情報</li> </ul>

注：略語説明  
 DS (Disconnecting Switch)  
 ES (Earthing Switch)  
 SP (Shock Pressure)  
 30F (30 Fault)

図12 標準監視項目 ガス絶縁開閉装置、変圧器の監視項目は、標準監視項目の中から機器の監視・診断目的に応じて選択することで、経済的なシステムを実現できる。

標定情報を用いて即時にガス絶縁開閉装置の事故ガス区画を判定し、CRT上に図13に示すように表示する(同図下注記参照)。運転員は、現場巡視で当該部位を確認した後、直ちに関係先へ連絡して復旧操作に取りかけられる。また、事故波及で停止した健全回線については、単なる支援情報の提供だけにとどまらず自動的に母線断路器の切換操作を行い、現場確認後に遮断器の投入操作を行うことでいっそうの復旧の迅速化を図ることも可能である。

以上のように、機器監視・設備診断装置は、次世代変電所、変電所のインテリジェント化を目指したトレンド



注：事故によって甲母線保護リレーが動作しても運転員は直ちに甲母線側が健全であることを確認できる。

図13 事故点標定CRT表示例 センサを適用することにより、ガス絶縁開閉装置のガス区画単位での故障部位標定が可能となった。

の中で、基幹系、大容量変電所への標準適用の段階に入ってきた。

#### 4 おわりに

以上、送変電設備の診断技術・センシング技術および予測保全システムの最近の適用例の概要について述べた。電力の安定供給が要請される現状で、変電所を構成する機器の隠蔽化・ブラックボックス化が進むにつれて、各種センシング技術の適用を基本として予防保全システムが、今後ますます増大すると考える。

終わりに、この論文で述べた予防保全技術の実用化にあたり、ご指導いただいた電力会社殿および関係各位に対して深謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 電気協同研究：変電所監視システム，電気協同研究，第42巻，第3号(1987)
- 2) 山極，外：最近の変電設備における予測保全技術，電気学会誌(B)，110巻，5号(1990)
- 3) 内海，外：スペクトル解析とパルス位相解析による部分

- 4) 高橋，外：予測保全，故障診断へのニューラルネットの適用検討，平成4年電気学会全国大会 No.1286(1992)