

# 500kV系統の保護継電方式

## Protective Relaying Equipment for 500kV System

Following the growth of power demand as well as resultant expansion of system capacity, erection of large capacity power plants, and extended distance of transmission, the 500 kV system has become the mainstay of power transmission. As a result, its protective relaying system is required to have extremely high efficiency and reliability to comply with the requirements for power system safety which are more exacting than ever before.

Under this situation, Hitachi, Ltd. has succeeded in developing a new protective relaying equipment for 500 kV system service, which incorporates a new relay principle. In this equipment high reliability of operation has been realized through adoption of the newly developed dual system and automatic self monitoring system.

瀬尾一夫\* Kazuo Seo  
 宮崎照信\* Terunobu Miyazaki  
 三木義照\*\* Yoshiteru Miki  
 佐々木宏\*\* Hiroshi Sasaki  
 吉崎敦浩\*\*\* Atsuhiko Yoshizaki

### 1 緒言

500kV系統は系統規模の拡大、電源の大容量化、遠隔地化に対応して電力系統の主幹をなすものであるから、その保護継電方式は従来にもましてきびしい系統条件に適合するよう高性能、高信頼度化が要求される。

日立製作所では昭和40年よりこの問題に取り組み、独自の基礎研究<sup>(1)</sup>、電力会社との共同研究をはじめ、試作装置による工場模擬試験および実系統における実用化試験の実施<sup>(2)</sup>など豊富な経験を生かして、送電線保護継電装置、母線保護継電装置および変圧器保護継電装置など500kV系統用保護継電装置の開発を完了し、すでに実用装置として数多くの製作実績を得ている。

本稿は、500kV系統保護継電方式とその構成について述べる。

### 2 500kV系統保護上の問題点と対策の方向性

電力系統の保護継電方式は他の送変電設備と異なり系統電圧が異なっても基本的考え方の変更は必要としないが、500kV系統では従来にも増してきびしい条件が要求されることから、

今までの実績ある方式を基礎として新たな問題に対応できるよう発展させてゆくことが望ましい。図1は500kV系統用保護継電方式に要求される条件と、その対策の方向性をまとめたものである。

#### (1) 系統条件の変化

発電所の用地確保の困難性から大容量電源が遠隔地に建設される傾向にあり、送電線は大容量、長距離化して安定度上非常に過酷な条件となる。系統安定度を向上するには従来方式に比べてさらに動作時間の短縮が必要であり、具体的には電磁形リレーに代わってトランジスタリレーを適用する必要がある。

また、潮流が増大する反面、事故電流は長距離化による線路インピーダンスや、アーク抵抗、塔脚抵抗などの影響を考えると小さくなる場合がある。このため常時潮流に比べて小さい事故電流にも応動できるよう事故検出能力(感度)の向上が必要となる。

一方、短絡容量増大に伴う事故電流の増大、事故発生直後、

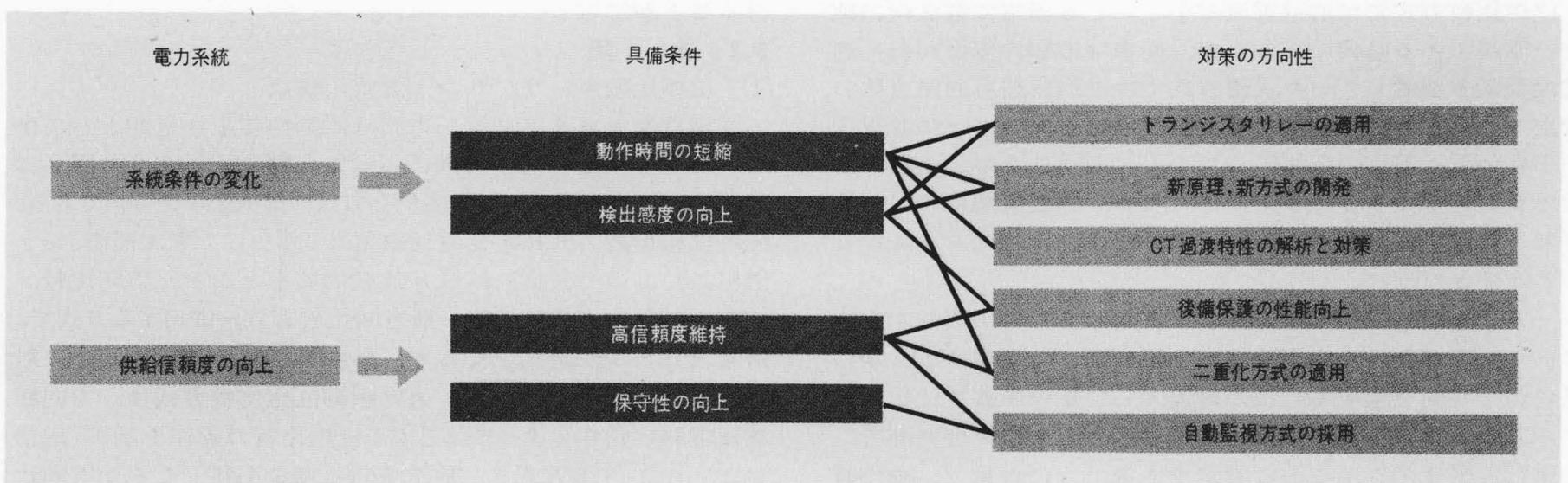


図1 500kV系統保護上の問題点と対策 500kV系統保護継電方式に要求される条件と保護方式上解決すべき方向性を示した。

Fig. 1 Problems and Countermeasures in the Protection of 500kV Systems

\* 日立製作所大みか工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所那珂工場

過渡的に生ずる直流分の時定数が大きくなるなど変流器(以下、CTと略す)にとっては非常に過酷となるため、CTの過渡特性の解析とその対策も前述の高速変化との関連から重要な課題となる。

## (2) 供給信頼度の向上

500kV系統では保護継電装置が万一不具合い動作した場合、その影響は従来系統の場合に比べさらに大きく、最悪の場合、系統崩壊にもつながる。特に安定度面より主保護しゃ断失敗は致命的となりかねないため、何よりも動作信頼度の向上が第一で、具体的には主保護の二重化、自動監視方式の採用が基本となる。

また、しゃ断器不動作に備えて後備保護システムの強化など事故拡大防止も重要な課題となる。

さらに、装置の複雑化、設備数の増加に対し、技術者の不足はますます深刻な問題となり、保守性に対する配慮が強く要望されてきている。

## 3 送電線保護継電方式

### 3.1 保護継電方式

わが国の送電線は供給信頼度の向上を目的として2回線送電線となっているが、2回線にまたがる多重事故時にも両回線しゃ断して系統分断に至ることは極力避ける必要がある。このため、多重事故時でも事故相のみを選択しゃ断して再閉路する多相再閉路方式を採用することが非常に有効であるから、保護継電方式としては多重事故時でも事故相のみを確実に選別できる各相比較方式が要求され、具体的には位相比較キャリアリレー方式を採用している。位相比較方式は従来多用されている方向比較キャリアリレー方式に比べて多重事故時の選別能力がすぐれているほか、電圧回路を必要としないことから電圧変成器(PD)不良、系統動揺、同期はずれなど異常時にも本質的に不具合い動作がないこと、装置構成が簡単になるなど数多くの特長を持っている。

位相比較キャリアリレー方式は送電線両端の電流の位相関係が常時または外部事故時には逆位相になるのに対し、内部事故発生時にはほぼ同位相になることに着目した方式で図2は基本原理の説明を示すものである。500kV系統用として開発した新方式では次のような性能向上を図った。

#### (1) 高速変化

位相比較方式では通過電流が小さいとき両端で電流検出感度の協調をとる必要があるため、従来は方形波変換回路に過電流要素を別置していた。新方式では方形波整形回路自体の検出レベルを変えて両端の電流感度協調を保つようにし電流が小さいとき電流の位相のみでなく、同時にその大きさをも伝えることができるよう工夫したため、感度協調用の過電流要素を別置する必要がなく、その分だけ動作時間を短縮することができた。

一方、一組の位相比較方式では1サイクルに1回しか判定のチャンスがないため事故発生位相によっては半サイクルの見のがし時間を生ずる。この対策として正の半波で位相比較するものと負の半波で位相比較するものとを組み合わせる二重化し、半サイクルごとに判定できるように対策し、動作時間の短縮を図った。

#### (2) 過渡動作の安定化

以上のように高速度化したことによる不安定動作を防ぐため、特に過渡特性の改良が必要となる。このため、伝送遅延補償回路として従来CR積分回路方式が採用されていたが、新たにシフトレジスタを用いたデジタル式の遅延回路を開

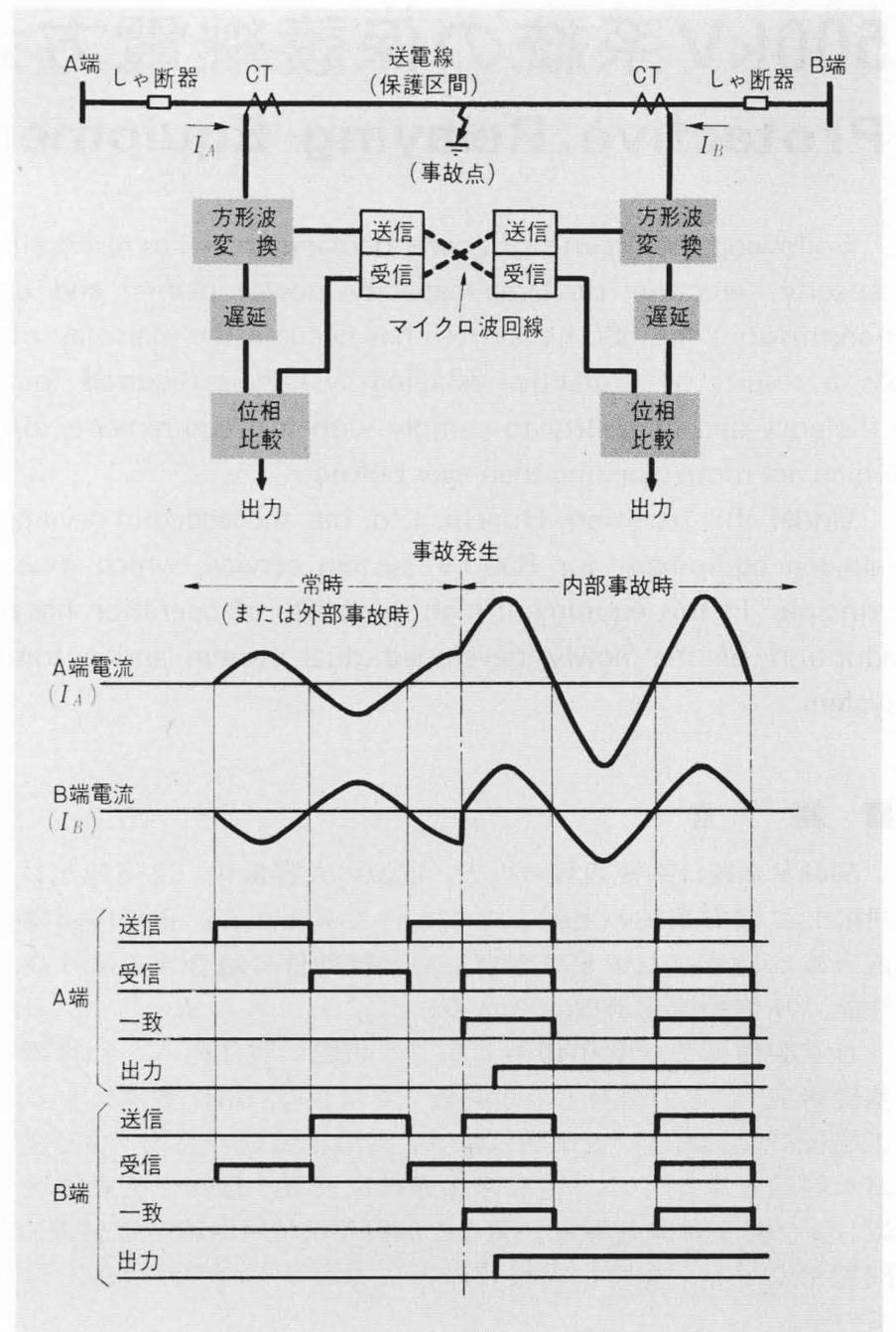


図2 位相比較方式の基本原則 位相比較キャリアリレー方式の基本回路構成と保護区間内部事故発生時の波形を示す。

Fig. 2 Basic Principle of Current Phase-Comparison Relaying System

発した。この方式は幅の小さい方形波でも正しく遅延することができるため、事故発生直後あるいは除去時など過渡的に高調波成分の多い電流波形が生じた場合でも安定した動作を得ることができる。

### 3.2 適用

#### (1) 位相比較キャリアリレー方式の構成

位相比較キャリアリレー方式は誤動作防止を目的として併用する事故検出方式の選択によって分類されており、図3は500kV系統で適用される代表的な方式の構成を示すものである。純粹位相比較方式は不足電圧継電器(主として電流補償形)を併用したもので装置の構成が比較的簡単となる。方向比較、位相比較協力方式は三相一括方向比較方式を併用する方式で、信号チャンネルが追加となるが、外部事故時の誤動作防止に対して非常に安定している。方向制御位相比較方式は、方向距離継電器の動作によってはじめて位相比較の動作を制御(送信および出力)する方式で、動作時間の点で不利となるが方向比較、位相比較協力方式と同様の効果がある。

#### (2) 信頼度向上対策

システムの信頼度向上を図るためには多重化システムが最も効果的であり、具体的には事故検出要素の併用(直列二重化)による誤動作防止、位相比較方式の二重化(正波、負波比較方式の並列二重化)による誤不動作防止を基本対策としている。

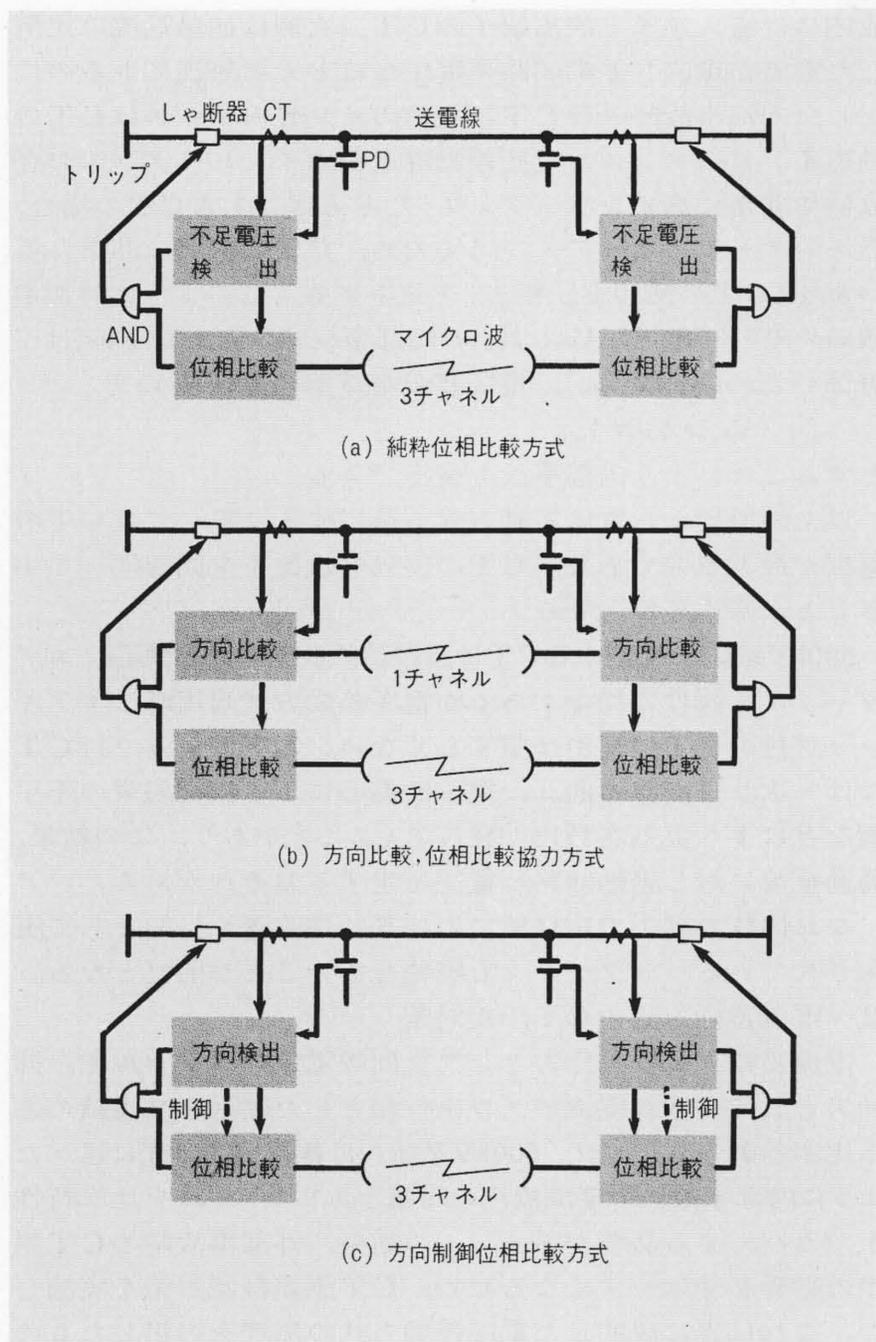


図3 位相比較キャリアリレー方式 誤動作防止を目的として併用する事故検出方式により分類される。本図は500kV系統で採用されている代表的な3方式の構成を示す。

Fig. 3 Current Phase-Comparison Carrier Relaying System

特に後者は高速度化を図るうえでも効果的な対策となることは前述のとおりである。なお並列二重化はCT回路、主継電器回路、しゃ断器引はずし回路のほか、信号伝送回線に至るまで完全な独立構成とすることが基本となる。

保護継電装置において不良を生じた場合、直ちにこれを発見して修復しておけば装置不良と系統事故が同時発生しなから支障はなく、さらに信頼性の高いシステムとすることができる。この装置不良を自動的に発見する自動監視方式<sup>(3)</sup>を適用することは定期点検などの保守業務の省力化、保守点検ミスの防止、点検の質的向上など間接的効果も大きいため500kV系統用保護継電装置ではこの自動監視方式の採用を基本方針としている。

自動監視の手法は装置の動作状態を連続的に監視し主として誤動作側の不良を発見する常時監視方式と、装置の動作が変化するような入力変化を与えてその応動より機能が正常であることを確認する自動点検方式に大別される。

図4は位相比較方式に適用した自動点検の実施例である。常時は自端波形と受信波形は逆位相であるため、位相比較継電器は不動作であるが自端波形または受信波形を外部信号(図中の⑤または⑥)により反転すれば必ず動作することに注目したもので、継電器回路はもちろんのこと、CT回路より信号

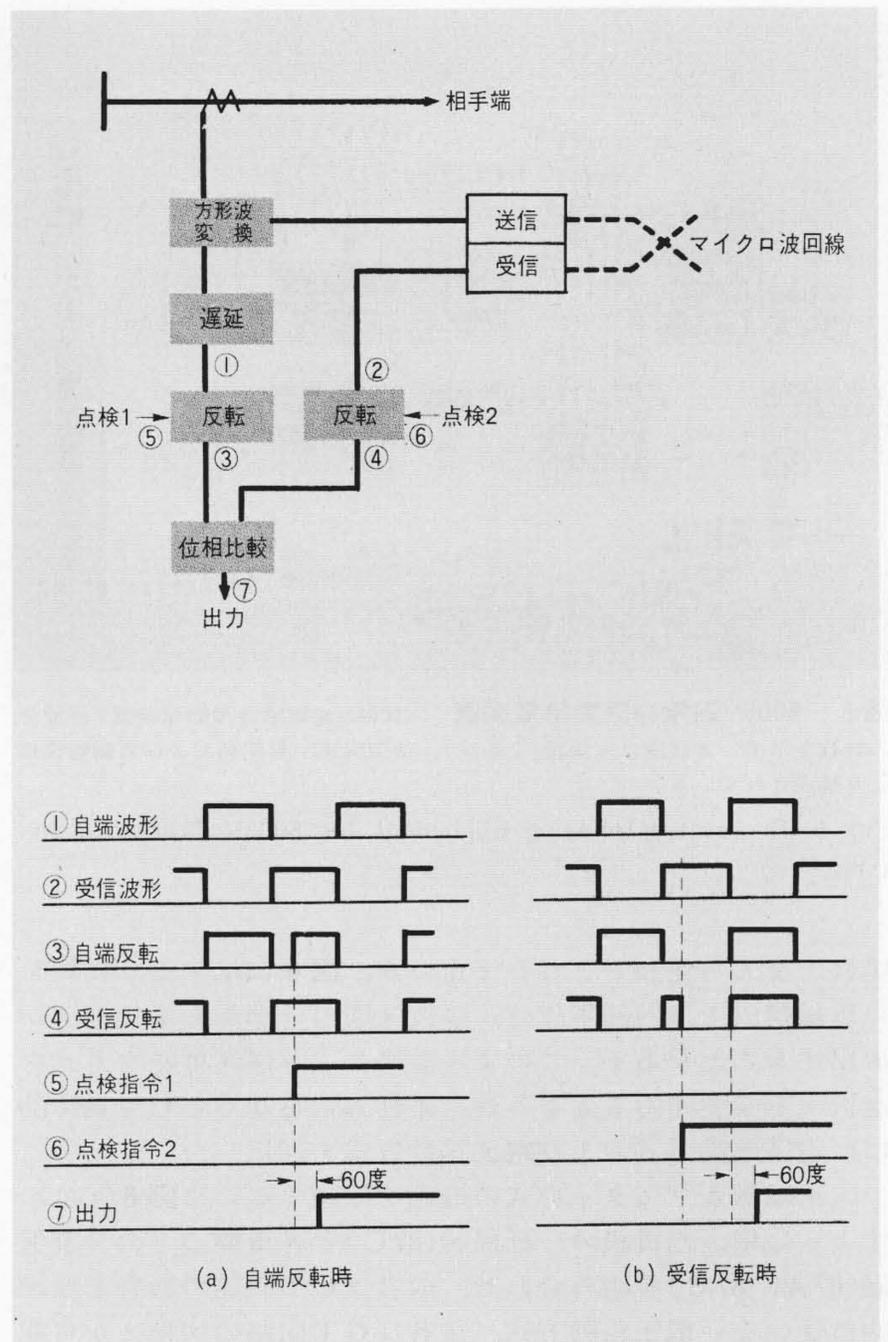


図4 位相比較方式の自動点検方式 自端波形または受信波形を反転することにより動作側となることに着目した自動点検の実施例を示す。

Fig. 4 Automatic Inspection Method for Current Phase-Comparison Relaying System

伝送回線に至るまで幅広い点検ができる。

### 3.3 後備保護継電方式

500kV系統事故時、万一主保護しゃ断に失敗した場合に備え後備保護を行なう必要がある。主保護しゃ断失敗の原因としては、しゃ断器不動作、盲点事故がおもな対象となり、これに対しては距離継電方式によるリモートバックアップ(遠端後備保護)方式が基本となることは従来と同様であるが、1½CB母線方式ではローカルバックアップ(自端後備保護)方式を併用することにより後備保護の高速度化を図り母線構成の利点を失うことのないよう対策している。なお主保護継電装置の不動作に対しては、前述のように主保護の完全2系列化で対処している。

図5は500kV系統適用送電線保護継電装置(1回線分)の外観を示すものである。

## 4 母線保護継電方式

### 4.1 保護継電方式

500kV系統の母線構成は従来の単純な二重母線方式のほか、図6に示す二重母線4ブスタイ方式および1½CB方式など供給信頼度の向上を目的とした新しい母線構成が採用される。これに対して母線保護の基本的考え方は、従来の超高压系の

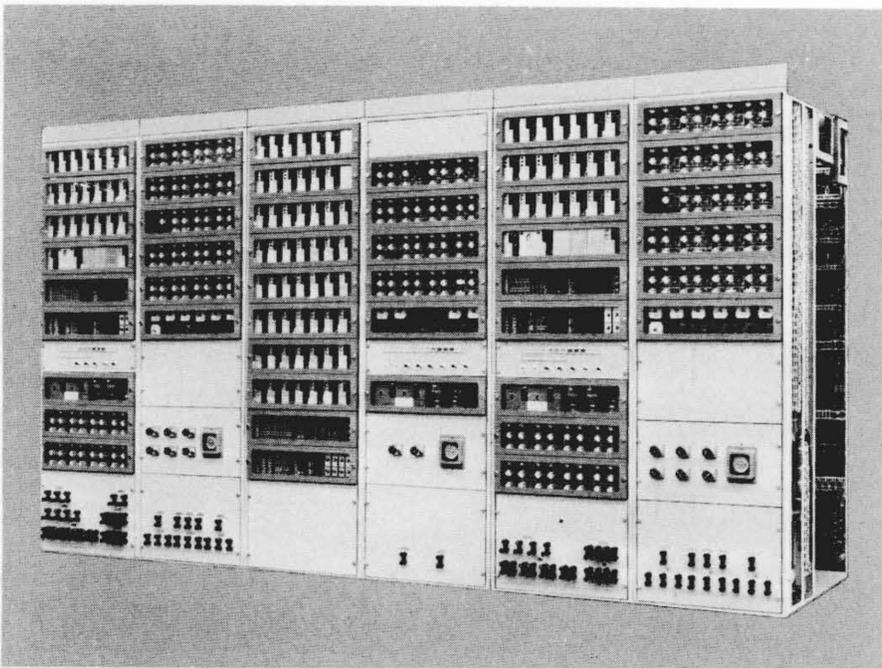


図5 500kV送電線保護継電装置 500kV送電線保護継電装置1回線分の外観を示す。本装置は主保護(2系列)、後備保護、再閉路および自動監視部より構成されている。

Fig. 5 Protective Relaying Equipment for 500kV Transmission Line

場合となんら変わるところはないが、図6に示すように新しい母線構成では内部事故時、事故区間の一部から事故電流が流出することがある。このような場合でも保護可能な方式を選択する必要があるところから差動方式を基本として具体的には電圧差動方式および電流差動方式を選択した。

二重母線4ブスタイ方式の母線を保護するには図6(a)に示すように甲、乙母線の一括保護(87C)と各母線ごとの分割保護(87A, 87B)を組み合わせ、前者はCT誤差の影響を原理的に受けない電圧差動方式、後者はCT回路の切換えが可能な電流差動方式を適用した。

1½CB方式においてはCT回路の切換えが必要ないことから一括保護と同じく電圧差動方式を基本方式とした。

#### 4.2 適用上の留意点

##### (1) 電圧差動方式の適用

電圧差動方式は図7に示すように、保護区間のCT二次回路を差動接続し、その差動回路に高インピーダンス形の電圧差動継電器を接続することで構成される。常時または外部事

故時には流入端子と流出端子のCT二次側は通過電流に比例した電流が環流し差動回路の電圧はほとんど無視できるのに対し、内部事故時にはCT二次側のインピーダンスはCTの励磁インピーダンスと電圧差動継電器のインピーダンスの合成値で非常に高インピーダンス(たとえば、1ACTの場合、数キロオームのオーダー)となるため、CT二次側に非常に高い電圧(CTの飽和電圧相当)を発生する。このように外部事故時の差動回路電圧 $V_{R0}$ に比べ、内部事故時の発生電圧 $V_{Ri}$ は十分高いため( $V_{Ri} \gg V_{R0}$ )、電圧差動継電器の動作値 $V_R$ を、

$$V_{Ri} > V_R > V_{R0}$$

とすることにより内部事故を検出できる。

以上の原理から電圧差動方式を適用するに際してはCTの選択が最も重要であり、CTの実効巻数比を全回線同一とすることが基本条件となる。

500kV系統で採用するCTは過渡特性改善のため鉄心にエアギャップを設ける場合があるが電圧差動方式適用時はエアギャップ付のCTの採用は望ましくない。エアギャップ付CTでは一次リード線の曲り、電磁的偏心による鎖交磁束の不平衡などにより実効巻数比が狂ってくることもあり、この結果、通過電流に対し差動回路に電圧を生ずるおそれがある。

なお同様の理由で定格値での誤差特性改善を目的として実施されているバックターンも実施しないことが前提となる。

##### (2) 電流差動方式のCT誤差対策

電流差動方式は動作力として全回線電流のベクトル和、抑制力として全回線電流のスカラー和とした従来より実績のある比率差動方式とした。500kV系統の母線構成では先に述べたように内部事故時の電流流出の問題があり<sup>(4)</sup>、これを比率特性上でカバーする必要がある。この結果、外部事故時のCT誤差の影響を受けやすくなるため、CT誤差軽減対策を実施した。これは先に説明した電圧差動方式の原理を応用したもので全回線のCT二次回路を差動接続し、その差動回路へ補償用インピーダンスを付加する方法である。この補償用インピーダンスは系統条件およびCTの特性より決定している。

図8は以上の諸対策を実施した500kV系用母線保護継電装置の構成例を示すものである。信頼度向上、省力化を目的とした自動監視方式を採用している。

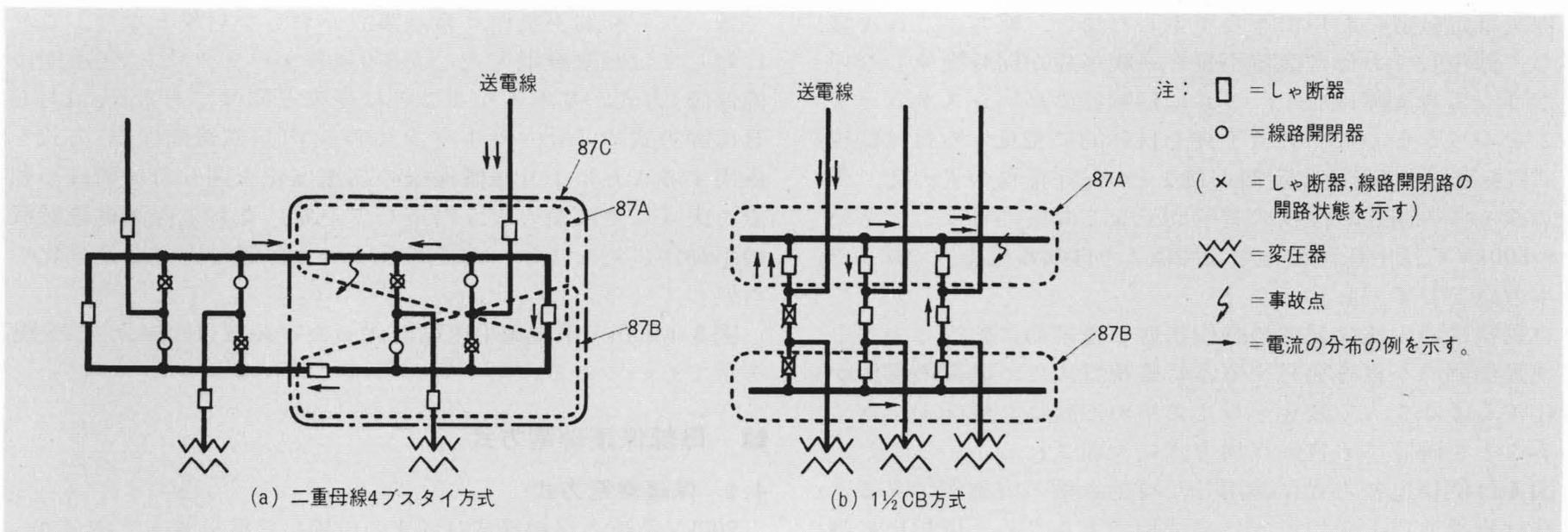


図6 500kV系統の母線構成と保護範囲 500kV系統の母線構成と保護範囲を示す。図中、内部事故時にも保護区間より一部の事故電流が流出する場合の電流分布も示されている。

Fig. 6 Typical Model and Protective Zone of 500kV Bus Bar

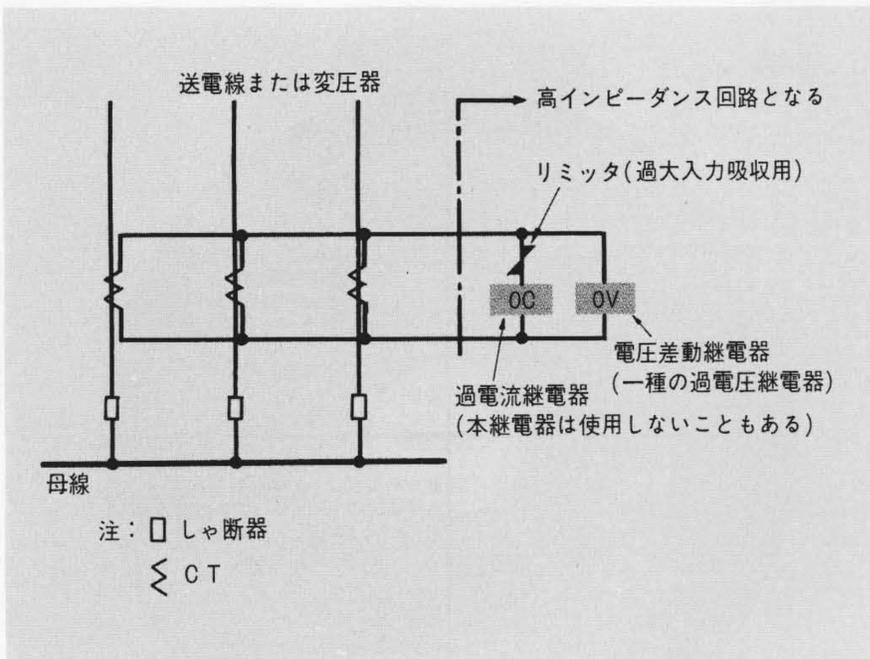


図7 電圧差動方式の基本原則 電圧差動方式はCT二次回路を並列接続し、その差動回路に高インピーダンスの電圧差動継電器を接続することで構成される。具体的結線図を示す。

Fig. 7 Basic Principle of Voltage Differential Relaying System for Bus Bar Protection

### 5 変圧器保護継電方式

500kV変圧器事故で特に問題となるのはタンク破壊による噴油、火災発生の問題であり、これを防止する手段としてタンク強度と十分協調のとれた保護継電方式を確立する必要がある。すなわち、変圧器の保護継電方式は変圧器本体の事故現象と密接な関係があるため、変圧器タンクの強度限界と保護継電器の特性の両面より定量的につめてゆく必要がある。

図9は500kV変圧器保護方式を開発するために行った検討手順を示すものである。

変圧器保護の基本は励磁突入電流対策である。この励磁突入電流対策として従来より使用実績の多い第2高調波抑制比率差動方式を採用した。

図10は  $\frac{525kV}{\sqrt{3}} / \frac{275kV}{\sqrt{3}}$ , 1,000/3 MVA 変圧器保護継電方式

の基本構成を示すものである。従来、変圧器本体と調整変圧器を一括した差動方式を採用していたが、一括差動では調整変圧器のタップの影響を受けるため、検出感度に限界がある。このため図10の例に示すように調整変圧器が主変圧器と別タンクとなる構造の場合には主変圧器と調整変圧器を分割して保護することにした。すなわち、主変圧器単独で差動回路を構成すれば(87M)タップの影響を受けないため、高感度に整定することができる。一方、調整変圧器については、励磁巻線電流 $I_E$ とタップ巻線電流 $I_T$ の比 $I_E/I_T$ に注目した結果、健全時または外部事故時と内部事故時は図11に示すように大幅に変化することがわかった。そこで同図に示す円特性(円外が動作範囲)の電流比較継電器61LRを開発し高感度化を図った。

図12は  $\frac{525kV}{\sqrt{3}} / \frac{275kV}{\sqrt{3}}$ , 1,000/3 MVA モデル変圧器のタンク

強度限界と保護性能の関係を示したものである。タンクの強度は図9の手順に従ってデジタル計算機で算出している。曲線AおよびBは、一括差電流継電器87Tによる事故除去時間(しゃ断器の動作時間2サイクルを含む)を示すもので、この結果より明らかなように避圧弁の効果も大きい。この計算結果より、時間的に余裕の少ないケース(たとえば分路巻線全短絡)については、リード線の絶縁強化およびタンク内圧上昇

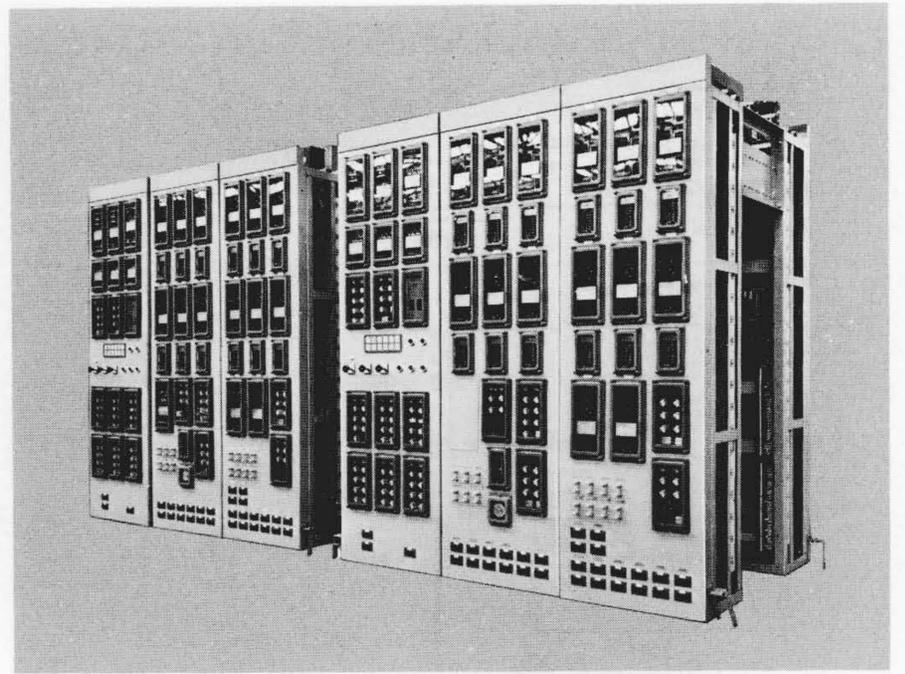


図8 500kV母線保護継電装置 電圧差動方式と電流差動方式の組合せ方式とした母線保護継電装置の外観を示すもので、自動監視方式も採用している。

Fig. 8 Protective Relaying Equipment for 500kV Bus Bar

に対して弱点となりやすいカバー接合部をステーで補強するなど、変圧器自体の強化によってさらに余裕をとった。

一方、分路巻線4ターン短絡など感度面で協調がとれない例については、避圧弁動作でトリップする方法を採用することにした。

以上のように変圧器保護は他の保護方式と異なり、電氣的保護方式だけでは必ずしも十分ではなく、変圧器本体の強化、

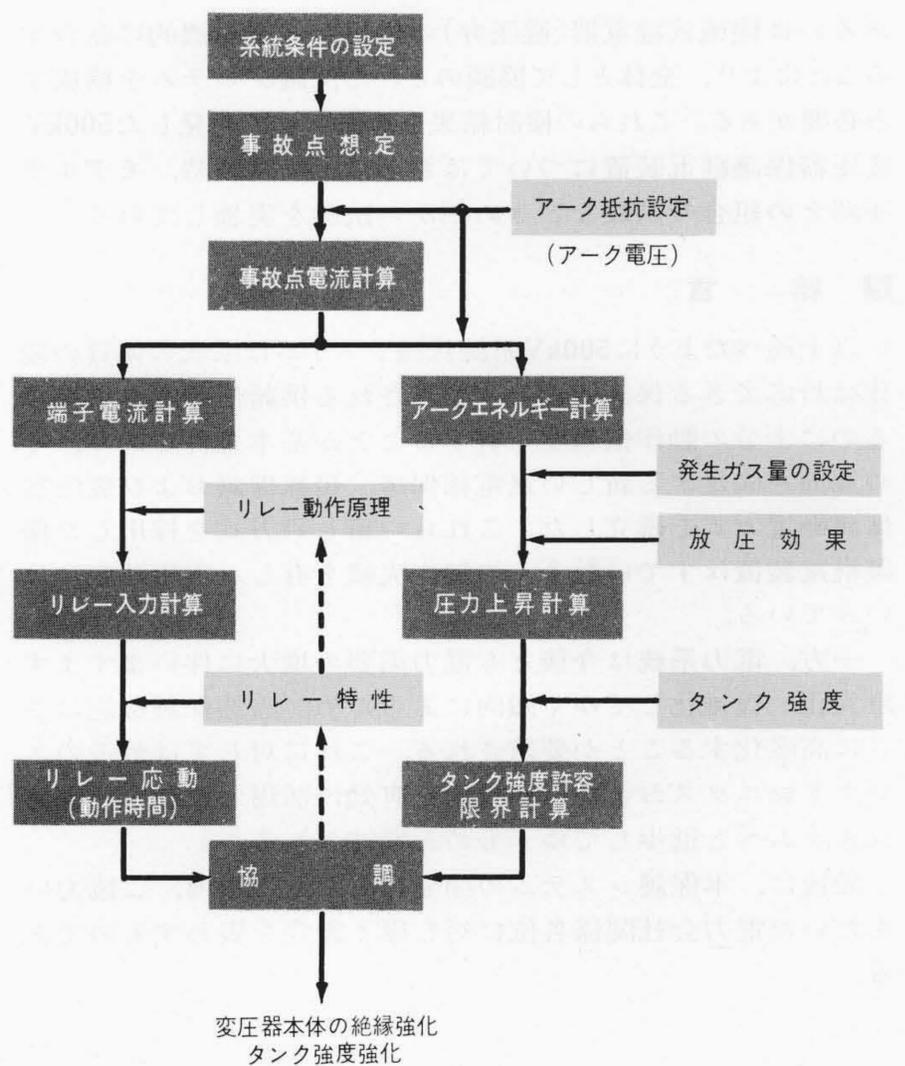


図9 変圧器保護の検討の進め方 変圧器保護継電方式の決定に必要な検討の過程について示した。

Fig. 9 Technical Problems Dealt in the Discussion of Transformer Protection

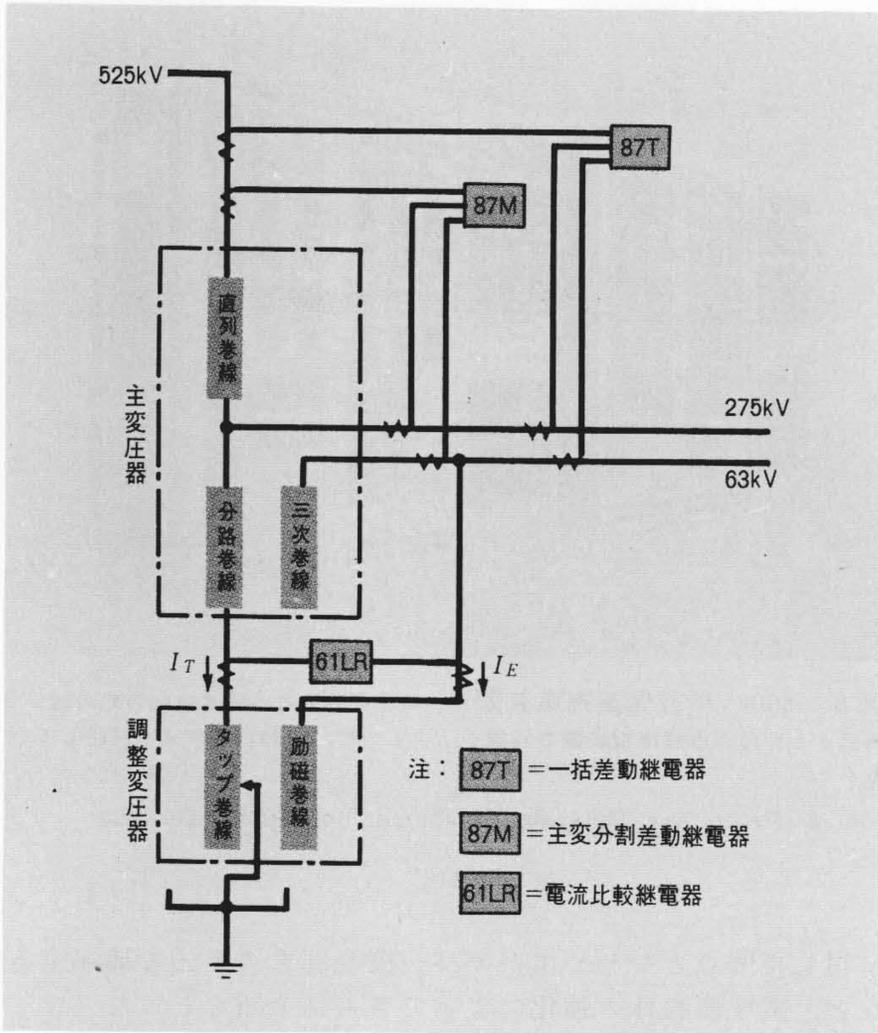


図10 500kV変圧器保護方式の基本構成 主変圧器と調整変圧器を分割して保護することにより高感度化を図った保護継電方式の一例を示す。

Fig. 10 Basic Configuration of Protective Relaying System for 500kV Transformer

あるいは機械式継電器(避圧弁)の併用などを有機的に結合することにより、全体として協調のとれた保護システムを構成する必要がある。これらの検討結果を基礎として開発した500kV変圧器保護継電装置についてはさらに工場試験時、モデル変圧器との組合せ試験などきめ細かい試験を実施している。

6 結 言

以上述べたように500kV系統保護システムは系統の体質の変化に対応できる保護能力と、要求される供給信頼度を維持するのに十分な動作信頼度を有することが基本条件であり、その両面を満足する新しい送電線保護、母線保護および変圧器保護継電方式を確立した。これらの新しい方式を採用した保護継電装置はすでに数多くの製作実績を有し、実用運行にはいっている。

一方、電力系統は今後とも電力需要の増大に伴いますます巨大化、複雑化してゆく傾向にあるため、当然保護機能はさらに高度化することが要求される。これに対しては最近のエレクトロニクスおよび伝送技術を有効に活用した新しい保護システムへと進歩してゆくものと期待される。

最後に、本保護システムの開発にあたりご指導、ご協力いただいた電力会社関係各位に対し厚く謝意を表わすものである。

参考文献

- (1) 三木, 黒木, 抜山:「超高速度方向比較搬送保護継電装置」, 日立評論51, 74(昭44-6)
- (2) 太田, 成田ほか:「超高速度形位相比較キャリヤリレー装置」,

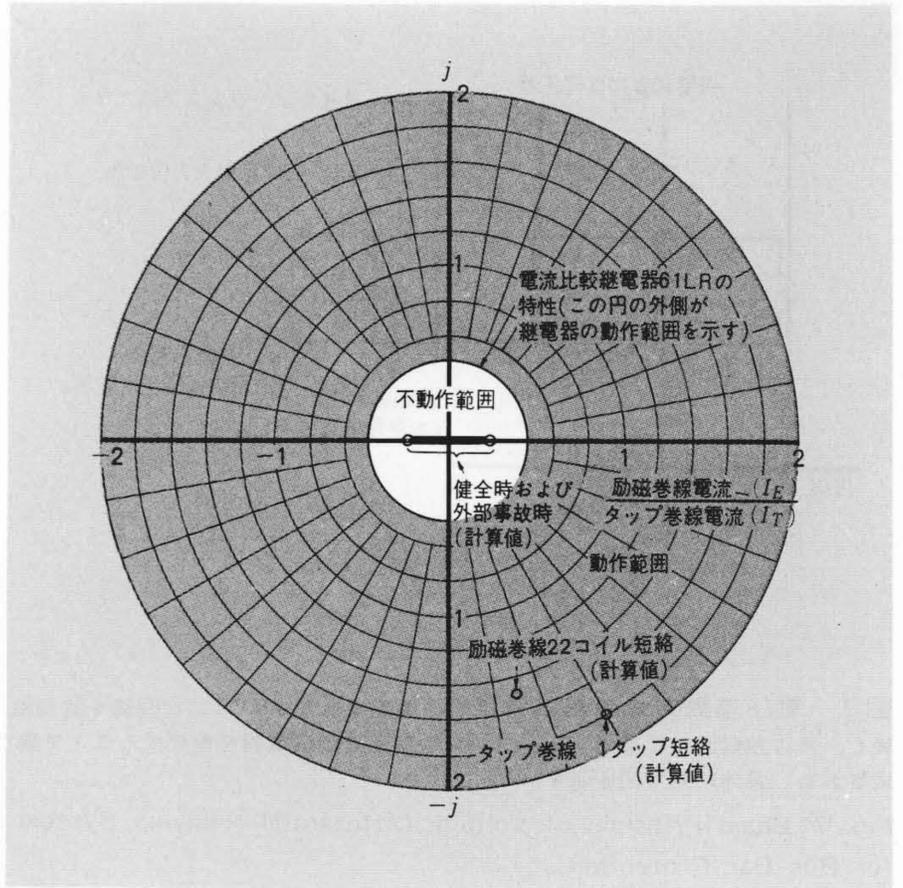


図11 電流比較継電器の特性 励磁巻線電流IEとタップ巻線電流ITの比IE/ITの計算結果と電流比較継電器の特性を示す。

Fig. 11 Characteristics of Current Balance Relay for Transformer Protection

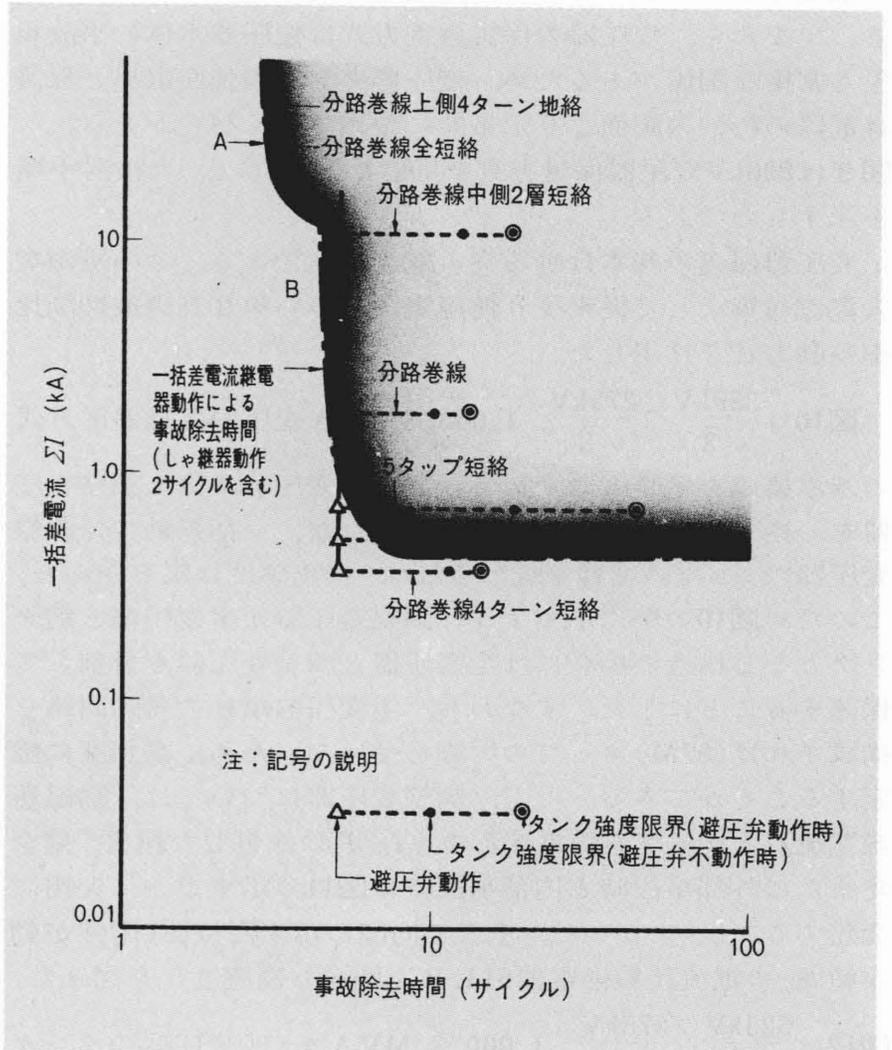


図12 500kV変圧器タンク強度限界の計算結果 変圧器内部事故時のタンク強度の許容限界と一括差電流継電器による保護性能の関係を示す。

Fig. 12 Calculation Results of Strength Characteristics of 500kV Transformer Tank

- 電気四学会東海支部連合大会論文, 20P-E-2, (昭45)
- (3) 「保護リレー自動監視」, 電気協同研究28, No.1 (昭47-7)
- (4) 三木, 佐々木:「母線保護リレー」, 電気評論臨時増刊 (昭48)