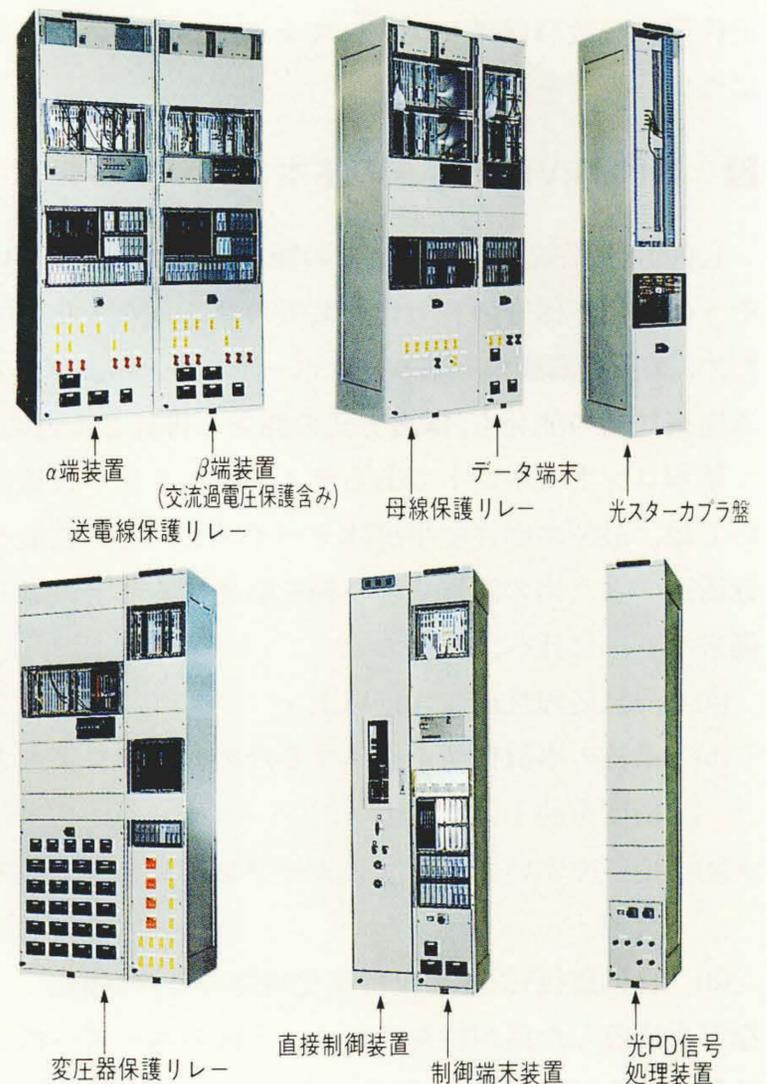
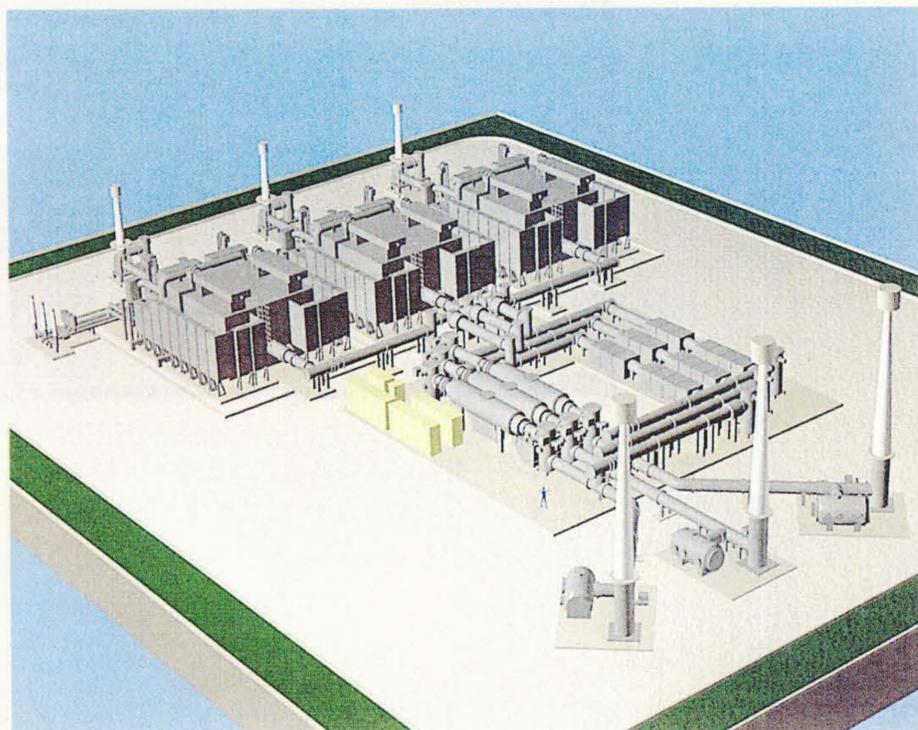


1,000 kV用保護システムの開発

—32ビットデジタルリレーシステム—

Development of Protection System for Ultra-High Voltage

柳橋 健* Ken Yanagihashi 佐野和 汪** Yoshihiro Sano 滝口 裕** Hiroshi Takiguchi
前田隆文* Takafumi Maeda 松井義明** Yoshiaki Matsui 岩谷二三夫*** Fumio Iwatani
山川 寛* Hirosi Yamakawa



1,000 kV用保護制御装置の実証器外観

1,000 kV保護制御装置は、送電線保護リレー、母線保護リレー、変圧器保護リレー、光PD信号処理装置、光スターカプラ盤、制御端末で構成している。これにより、1,000 kV系統の信頼度の高い保護を図ることができる。

電力需要は、景気回復状況、気候などによって左右されるものの、中長期的には生活関連需要を中心に増加傾向が続くものと予想される。このため、大容量電源の積極的開発とともに、基幹流通設備送電能力の飛躍的増大と短絡・地絡電流抑制を図る1,000 kV送電の導入が計画されている。

1,000 kV系統は、送電電圧格上げに伴う充電電流の大幅増大、電線の太径化に伴う事故電流過渡直流分の減衰悪化、事故時電圧・電流のひずみ増大など、既存系統に比べ電気的特性が大きく変化する。

今回開発した1,000 kV用保護システムは、線路保護・母線保護・変圧器保護それぞれについて上記した保護上のさまざまな技術課題の解決を図り、高信頼度な保護を実現したものである。また、本システムは高速32ビットプロセッサによる高度分散処理、高精度アナログ入力部および可搬ツール形ヒューマンインタフェースを備えた次世代デジタルリレー技術、光LAN技術を適用した次世代屋外分散形デジタル保護リレーシステムであり、運用・保守の省力化、コンパクト化を図っている。

* 東京電力株式会社 系統運用部 ** 日立製作所 国分工場 *** 日立製作所 電力事業部

1 はじめに

1,000 kV系統の導入により、周辺系統を含めた系統の電気的特性が大きく変化するので、種々の技術課題に対応する必要がある。そのため、高信頼度な保護方式の開発が要求されている。

ここでは、1,000 kV系統を保護するために開発した次世代屋外分散形保護リレーシステム、および各保護方式について概要を述べる。

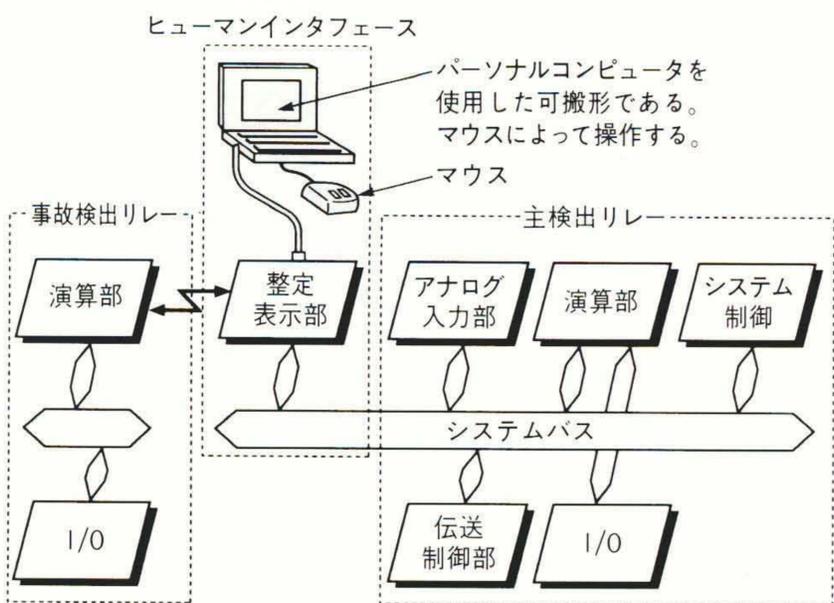
2 1,000 kV保護装置の基本コンポーネント

1,000 kV系統保護システムの開発にあたっては、いっそうの運用、保守の省力化、装置のコンパクト化を図るため、装置を構成する基本コンポーネント、およびシステム構築技術の開発も、保護方式の開発と併行して進めた。

基本コンポーネントであるデジタルリレー技術については、最新の高性能半導体デバイスと、その性能を十分活用するための演算処理技術を駆使することにより、従来リレーに比べ、

- (a) 演算処理性能が10倍以上
- (b) 系統の事故個所を検出するためのアナログ入力部精度を約1けた向上
- (c) 使いやすいざん新なヒューマンインタフェースの実現
- (d) 自動監視(故障部位特定化機能など)の強化

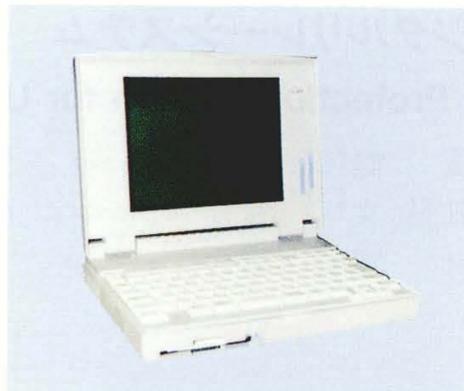
などを達成した点が特長である。今後のニーズへの適性に配慮したこの次世代デジタルリレーの基本構成を



注：略語説明 I/O (Input/Output)

図1 次世代デジタルリレーの基本構成

高速32ビットマイクロプロセッサ(CISCとDSP)を適材適所に配置したマルチプロセッサ方式のシステムを示す。



(a) 外観



(b) 画面表示例

図2 可搬形ヒューマンインタフェース外観と画面表示例

わかりやすいメニュー選択方式であり、対話形で操作できる。随時コネクタで接続替えることにより、各種保護リレー装置に共用できるようにした。

図1に示す。

システム構築には、1990年から500 kV変電所などへ適用している光LANを用いた屋外分散形の基本技術を踏襲した。しかし、これまでの分散形で保護リレー装置自体に具備していた整定表示部などのヒューマンインタフェースは設けない方式とした。これは、分散形の場合、常時の運用での保護リレーの詳細動作・障害情報の確認、整定変更などの業務をすべて遠方から行えるようにしたためであり、このため、竣工試験時や障害の調査時には、可搬形のヒューマンインタフェースを接続して対処できるようにした。可搬形ヒューマンインタフェースの外観と画面例を図2に示す。ノートブックタイプのパソコン(パーソナルコンピュータ)でマウスによって対話形で操作が行え、保守員が容易に取り扱うことができる。しかも、1台で各種リレー装置に共用が可能である。

3 送電線保護リレーシステム

1,000 kV送電線保護リレー装置は、主保護と後備保護を完全2系列構成とし、その1系列分を700 mm幅の標準盤1面に収納した主・後備一体形装置とした。

3.1 高速接地式再閉路

1,000 kV送電線では、送電電圧が高いため、事故相遮

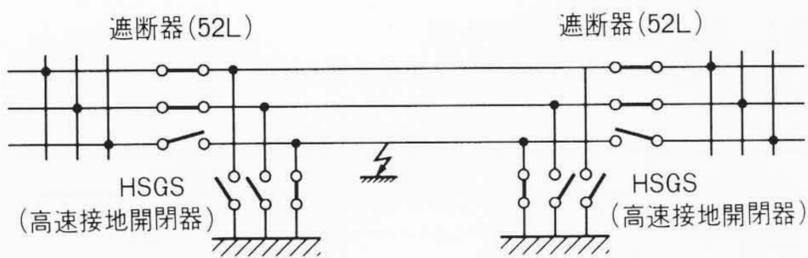


図3 高速接地方式

事故相を遮断器によって系統から切り離した後、HSGSで接地することにより、アークを強制消滅させる高速接地式再閉路方式を示す。

断後自回線の健全相や同一鉄塔の隣回線からの静電誘導によって事故点アークの消弧が遅れたり、風速などの周囲条件によっては消弧しないこともある。

このため1,000 kV送電線の再閉路は、事故相を遮断器によって系統から切り離した後、開放された事故相両端をHSGS(高速接地開閉器)で接地することにより、アークを強制消滅させる高速接地式再閉路方式を採用した。この方式を図3に示す。同図でわかるように、①事故発生→②事故相遮断器開放→③事故相HSGS投入(強制接地)→④(アーク消弧)→⑤事故相HSGS開放(接地開放)→⑥事故相遮断器投入(再閉路)という一連の動作を、高速かつ高信頼度を実施する必要がある。

HSGS制御の信頼度向上策として、HSGSの誤投入による完全地絡事故発生を防止するため、事故相両端遮断器の開放確認(機械的条件)と線路保護リレー復帰(電気的条件)のANDでHSGSを投入し、HSGS投入後は、ハード不良での開放不能を極力避けるため、所定時間経過で、HSGSを強制開放する(図4参照)。

再閉路方式は、多重事故や頻発事故でも極力再閉路が可能となるように、遮断・条件確認・投入ともに各相独立判定・各相独立制御する各相個別構成とした。遮断器、断路器のパレット条件の確認による多相再閉路と、電圧の同期条件確認による同期再閉路方式を併用することで、連系が維持されている間は遮断器の責務の許す範囲で再閉路を実施するようにした。

3.2 充電電流補償

1,000 kV系統では、送電線の多導体化、系統電圧の上昇により、送電線区間内の充電電流が増大する。この電流は電流差動リレーにとって誤差電流となるので事故検出感度を低下せざるを得なくなる。そこで、送電線の3相電圧を導入して充電電流を演算し、高精度で補償する方式(図5参照)を開発した。また、従来装置では、1端子の電圧値から算出した区間内充電電流の100%を各端子で個別に補償していたが、補償する充電電流が大きい

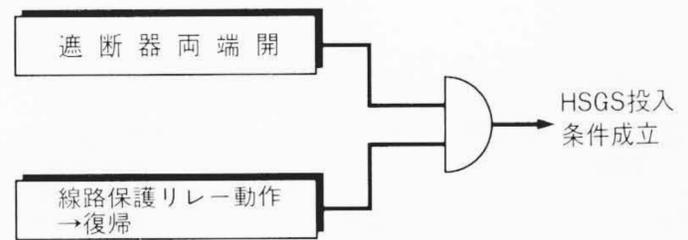


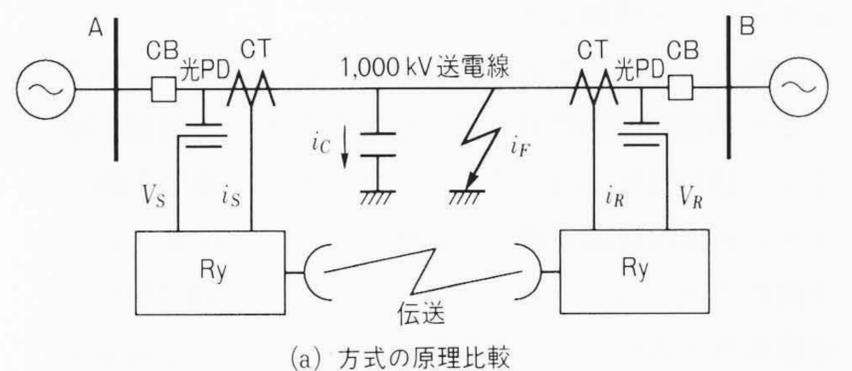
図4 HSGS制御条件

HSGS制御は、機械的条件と電気的条件の論理積とすることによって信頼性向上が図られている。

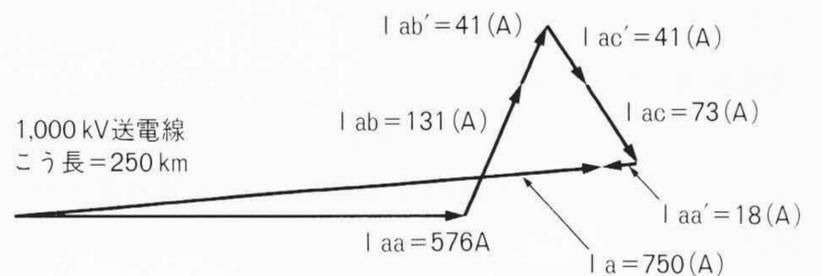
ので、コンデンサ形電圧変成器(PD)断線故障時に、最大で補償していた充電電流の1.5倍の誤差電流が生じる。この影響を軽減するため、この装置では両端の電圧情報を使用し、各端で区間内充電電流の50%ずつを補償する方式とした。

3.3 系統後備保護

現在、500 kV基幹系統に適用している後備保護方式は、送電線のルート遮断を防止するため、母線分離リレーによって事故点側の母線を分離した後、リモート後備保護によって事故点に近い点から多段限時トリップして最小限の停電範囲にとどめるものである。しかし、隣接する系統が短距離線路の場合、図6に示すように長距離線路の距離リレー第2段が短距離線路の対向母線事故で動作となるなど、事故区間の弁別能力に限界が生じる。



(a) 方式の原理比較



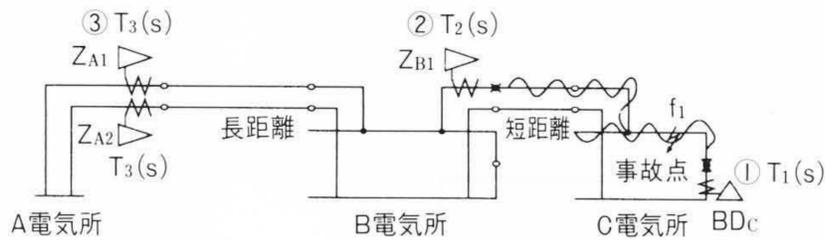
(b) 静電誘導電流例(無補償時)

注: 略語説明

Ry (PCMキャリアリレー), CB (遮断器), 光PD (光電圧変成器)
CT (電流変成器), i_c (充電電流), i_f (事故電流),
 V_s, V_R (リレー入力電圧), i_s, i_R (リレー入力電流)

図5 充電電流補償方式

従来方式では、各端子で電圧情報を用いて100%補償していたため、PD故障時、最大750 Aの影響となる。これを各端子で、電圧情報から50%ずつ個別に補償した電流値を送信することにより、PD故障時の影響を350 Aに軽減している。



注：略語説明 ZA1, ZA2, ZB1 (後備保護リレー)
BDc (母線分離リレー)

図6 現行方式の問題点

f₁事故でルート遮断を防止するため、動作時間をT₂+α=T₃秒遅く設定した。

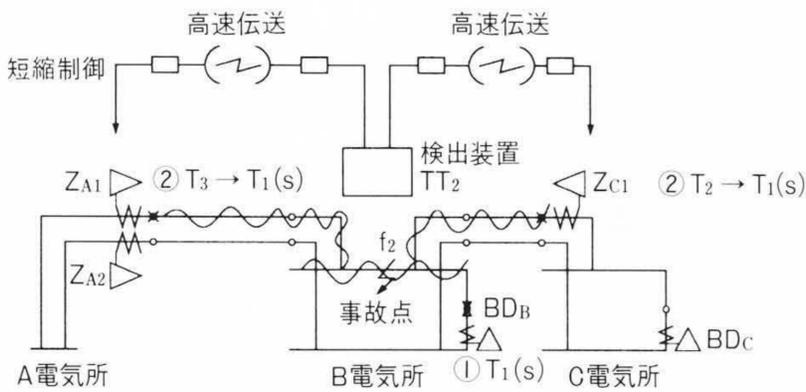


図7 母線事故時の応動例

高速化指令により、T₁へ時限短縮する。

この結果、事故時の不要遮断を避けるため、さらに協調時間を長くする(T₂→T₃)必要があり、事故除去時間が遅延するという問題が生じる。

これに対応するため、本システムは、遮断すべき点のリモート後備保護に対して、伝送系を用いて高速化補正を行う制御機能を持っている。この方式の概要を図7に示す。同図は母線事故(f₂)が発生し、母線保護リレーが不動作の例を示したものである。このときB電気所では、母線事故と識別し、この事故母線に接続される送電線の対向端子のリモート後備保護の動作時間を高速化する指令を送信する。この指令を受信した端子では、リモート後備保護の動作時間をT₁時限へと短縮する。

この方式の採用により、停電範囲の局限化(ルート断防止)とリモート後備保護による事故除去時間の高速化が図れる。

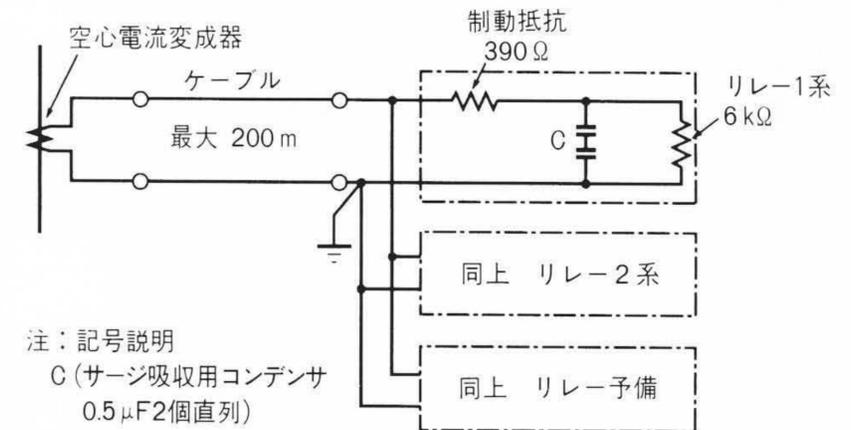
4 母線保護リレーシステム

1,000 kV系統では事故電流に重畳する過渡直流分の減衰時定数が、最大で0.25秒程度まで延びる。従来の鉄心入りの電流変成器で直流偏磁による磁気飽和を生じないようにするためには、ガス絶縁開閉装置(GIS)が大型化するため、原理上磁気飽和のない空心電流変成器を用いた母線保護リレーシステムを開発した。

表1 空心電流変成器の仕様

高調波通電時の過電圧出力抑制を考慮し、各項目の数値が定められている。

項目	数値
定格一次電流	8,000 A
定格二次電圧	20 V
定格周波数	50 Hz
精度 (2~8 kAで)	比誤差 ±1%以下 位相誤差 ±60min以下
出力リアクタンス	10 Ω以下



注：記号説明
C (サージ吸収用コンデンサ
0.5μF2個直列)

図8 空心電流変成器二次側の構成

リレー装置は予備を含み3装置(負担2kΩ)まで考慮してある。高調波通電時の過電圧抑制制動抵抗付きとした。

4.1 空心電流変成器の仕様とリレー装置接続構成

空心電流変成器はガス絶縁開閉装置シース組み込み実装形である。電気的特性に関する主な仕様を表1に示す。

空心電流変成器二次側のリレー装置との接続構成を図8に示す。空心電流変成器の最大負担はリレー装置3台までで抵抗2kΩに相当する。空心電流変成器は高調波電流を増幅する特性があり、高調波電流通電時に空心電流変成器の励磁インダクタンスとサージ吸収用コンデンサの共振により、二次出力電圧が異常に上昇するおそれがあるので、制動抵抗を付加して抑制している。

4.2 リレーの特性

リレーの特性は通過電流のスカラー和抑制付き比率差動特性としている。検出感度は一次側電流換算で1.5 kAである。また、抑制比率は空心電流変成器の直線性の良さを生かして、全領域 $\frac{1}{9}$ の単純比率による高感度化を図った。比率特性の演算アルゴリズムは、基本波の30度ごとのサンプル値による実効値演算方式としている。

4.3 総合動作試験

工場での大電流通過外部事故模擬試験結果を図9に示す。空心電流変成器の差動出力は50 kA通過時で0.8 kA、通過電流のスカラー和に対し0.8%相当であり、リレーは十分抑制側となっている。また、近傍のリレー装置への

誘導影響は上記よりもさらに一けた小さい値となっており、所望の高感度のリレー特性が得られることを検証できた。さらに、内部事故時のリレー動作時間も2サイクル以内に入ることを確認している。

5 変圧器保護リレーシステム

1,000 kV変圧器内部事故電流は系統の充電電流が大きいため、第2高調波を多く含む電流となり、励磁突入電流と類似した波形となる。このため、(1)低次高調波の影響を受けない内部事故と励磁突入現象の弁別、(2)タンク耐圧強度と協調のとれた事故検出機能を具備した変圧器保護リレーを開発した。

5.1 事故検出方式の考え方

1,000 kV変圧器は、電流変成器配置を含む構成概念(図10参照)で示すように、1相2タンクに分離し結線されるので、(1)各巻線の電流分布は通常両タンク間ではほぼ平衡状態にある、(2)内部事故モードとしては、巻線層間短絡か地絡であり、三角結線される三次側を除くと相間短絡は対象外と考えてよい、などの特徴を持つ。

以上の特徴を踏まえ、次の事故検出方式を開発した。

- (1) タンク間巻線の電流比較リレー(直列巻線保護61S、分路巻線保護61C、三次巻線保護61T)
- (2) 直列、分路巻線の地絡検出電流差動リレー-87G
- (3) 三次側相間短絡検出電流差動リレー-87T

いずれの方式とも、基本的には励磁突入電流の影響を受けないものであるが、タンク間で鉄心の磁気特性にばらつきを生じることも考慮して、電流比較リレーの感度は定格電流の20%以上に設定した。

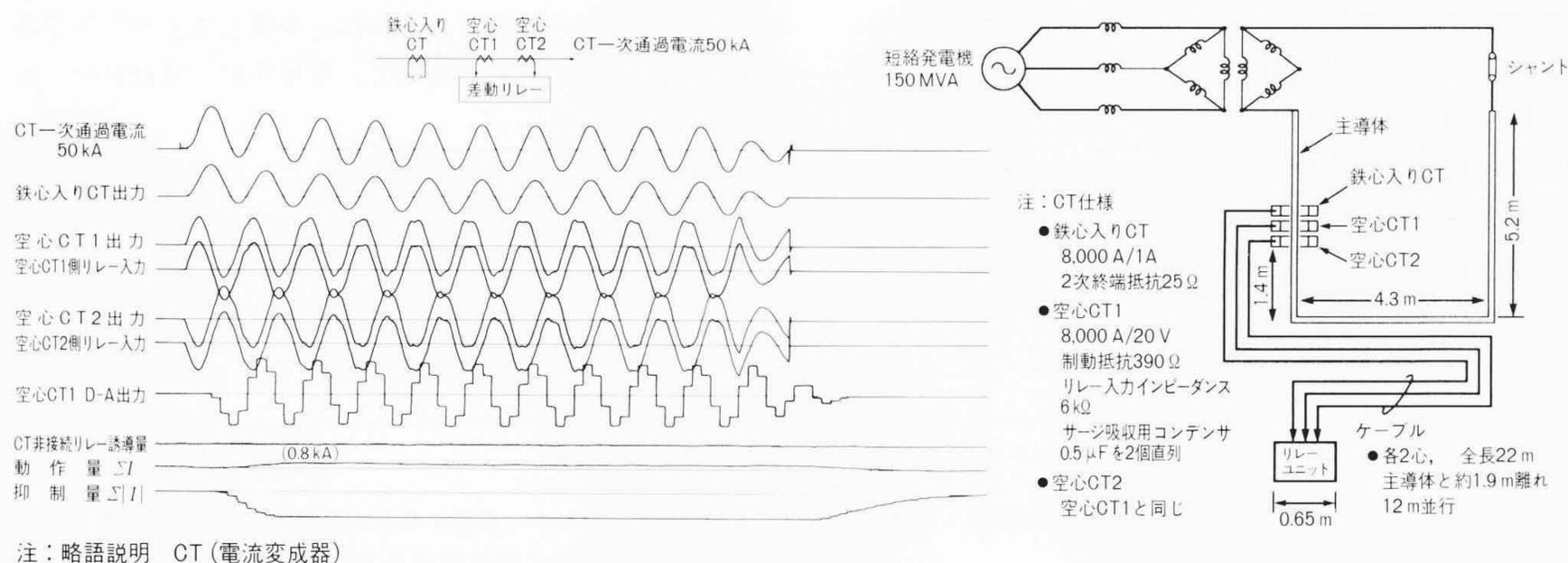


図9 空心電流変成器組み合わせ総合動作試験結果

外部事故模擬通過電流50 kAでの誤差電流、および誘導電流は1%以下で母線保護リレーの高感度化が図れた。概略の試験回路、各電流変成器、およびリレーユニットの配置イメージは図中のとおりである。

また、高信頼度化方策として、前記各検出リレーには電流変成器を別個に用いた事故検出要素を別途備え、両者の一致条件によってトリップ信号を出力する構成としている。

5.2 タンク強度との保護協調

変圧器保護リレーは、事故時にタンク破壊を防止するため、事故検出感度と事故電流遮断時間の両面から保護機能の評価検討を行った。

事故範囲が拡大する進展事故を想定した保護協調特性の検討例を図11に示す。第1事故がリレーの検出感度以下にあり、第2事故に進展後は4サイクル(リレー動作時間2サイクル+遮断器遮断時間2サイクル)以内で遮断が要求されるケースである。61S、61C、61T、および87Tは、いずれも第2事故で4サイクル以下にタンク破壊に至るような第1事故を確実に検出することが可能であり、十分な保護協調が得られていることを確認した。

5.3 総合動作試験

各種内・外部事故時のリレーの動作検証試験は、

- (1) デジタルシミュレーションによる机上検証
 - (2) 上記シミュレーション波形を印加する計算機式模擬系統試験
 - (3) 模擬変圧器による総合動作試験
- などによって行った。

タンク間の磁気特性の不均衡を模擬した計算機式模擬系統試験による最過酷不平衡励磁突入電流に対する検証、および模擬変圧器(模擬容量比3,000 MVA:95 kVA)を用いて実施した励磁突入電流に対する応動試験を行ったが、各電流比較リレー61S、61C、61Tとも正規

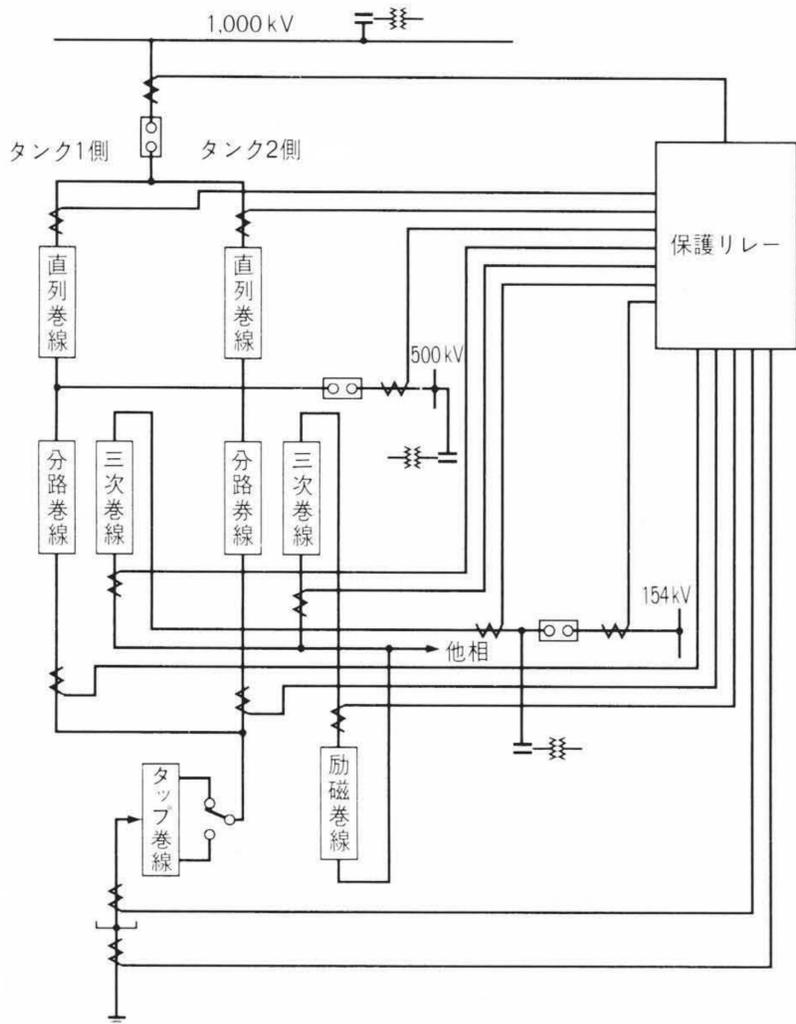


図10 1,000 kV変圧器の構成と保護リレー用電流変成器配置
主変圧器はタンク1とタンク2に分離されている。この図では省略してあるが、各部の電流変成器を主リレーと事故検出リレー用にそれぞれ2個ずつ備えている。

不動作であることが確認できた。

6 持続性交流過電圧保護

一つのルートで10 GWを超える大電力を長距離送電する1,000 kV送電線で、万一何らかの要因でルート断になると、発電機が急激に加速する。これに伴って、500 kV系統が事故波及拡大防止のため脱調分離するようなケースでは、1,000 kV送電線だけが無負荷電源系に接続された単独系統を構成することになる。この状況下では、発電機加速による周波数上昇と1,000 kV送電線の静電容量によるフェランチ効果とが相まって持続性の交流過電圧が発生し、200~300ミリ秒程度で避雷器が熱耐量を超えて破壊に至る。

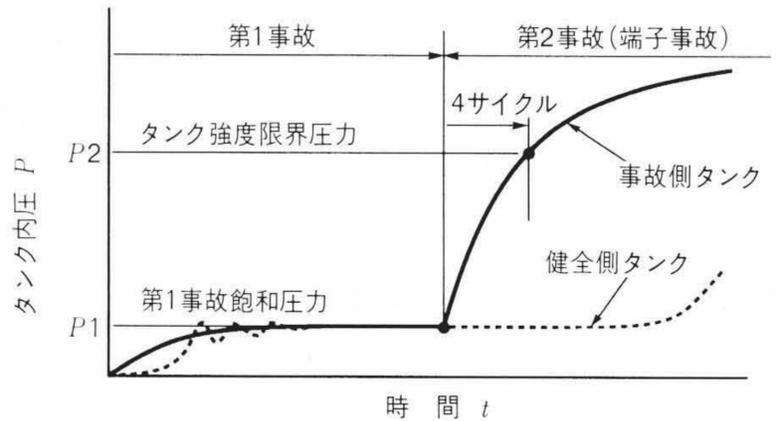


図11 進展事故時のタンク内圧上昇と保護特性の検討
進展した第2事故を4サイクル以内で遮断することにより、タンク破壊を防止できる。

このため、最も過電圧が厳しい1,000 kV送電線の開放端の避雷器の消費エネルギーを検出し、その避雷器が熱破壊に至る前に、1,000 kV無負荷送電線を高速遮断することにより、系統の過電圧解消と避雷器の破壊防止を図った。

このリレーシステムの主検出要素に用いる過電流リレーは、避雷器に流れる電流の積分演算でその消費エネルギーを検出する方式とし、その特性は避雷器の熱耐量カーブに対応した逆限時特性とした。また、高速動作の要求される大電流域では定限時特性とした(ただし、開閉サーージに不要応動しないための確認時間を具備)。

一方、事故検出要素には、過電圧リレーを採用し、万全を期している。

7 おわりに

ここでは、1,000 kV系統を保護するために開発した次世代分散形保護リレーシステムおよび各保護方式について概要を紹介した。

今回開発した保護システムは、今後実フィールドで各種主回路機器と組み合わせて、実用性能の検証を行っていく予定である。

終わりに本システムの開発にあたり、ご指導をいただいた関係各位に対し、厚く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 鈴木, 外: 1,000 kV系統の保護方式の基本検討, 電気学会論文誌B, Vol.114-B, 7/8(1994)
- 2) 柳橋, 外: 100万V高信頼度保護リレーの目ざすもの, OHM, Vol.81, No.10(1994-10)
- 3) 松井, 外: 主・後備一体形送電線デジタル保護リレー装置の開発, 電気学会第5回電力・エネルギー部門, No.382(平6-7)