

# 超 高 圧 同 期 は ず れ 分 離 継 電 装 置

Step-out Splitting Relaying Equipment for Extra-high-voltage Power System

大 谷 嘉 能\* 溝 口 強\*\*  
 Kanou Otani Tsutomu Mizoguchi  
 渡 部 篤 美\*\*\* 安 藤 弘\*\*\*\*  
 Atsumi Watanabe Hiroshi Ando

## 要 旨

超高圧系統における同期はずれ現象を詳細に検討した結果、インピーダンス変化率を検出して動作する新方式が必要となりこれを開発した。多機系の同期はずれに対し検討を加え分離点選択方式を決定した。また装置自体の障害を早期に検出するため自動点検、自動監視方式を適用し高信頼化を図った。

## 1. 緒 言

わが国における電力需要の増加は著しく、系統規模は拡大の一途をたどっており、産業界や一般家庭の電力への依存度が高まるにつれて供給信頼度の向上は従来にまして強く要求されている。

電力系統に事故が発生した場合、事故区間を高速度で除去して系統のほかの区間に与える影響を極力小さくするとともに、高速度再閉路を実施して安定度の維持および無停電供給を図るため高性能保護継電装置が適用されているが、万一高速度再閉路の失敗や、後備保護しゃ断となって故障継続時間が長びいた場合には、同期はずれが発生し事故がほかの健全系統に波及して重大事故に進展する恐れがある。

電力系統の供給信頼度を向上させるには超高圧送電線を基幹として系統構成や系統運用の改善により、系統自体の体質を強化するとともに事故の拡大を未然に防止することが必要である。

今回開発した超高圧同期はずれ分離継電装置は、同期はずれをできるだけ早くかつ確実に検出し、系統分離を行なってその影響を局限化しようとするものであり、同期はずれ検出方式、最適分離点の選定および自動点検による信頼度の向上などについて検討したものである。

## 2. 継 電 方 式

### 2.1 同期はずれ分離継電方式

現在採用されている同期はずれ検出方式は、継電器設置点からみたインピーダンス軌跡を利用する方法で、おもに

- (1) インピーダンス継電器の二重円特性を利用する方式(二重円方式)
- (2) モー継電器とオーム継電器を組み合わせる方式(3領域方式)

である。

図1(a)は二重円方式の原理説明図でありインピーダンス継電器  $Z_1$ ,  $Z_2$  より構成され、 $Z_1$  の動作範囲をしゃ断領域とし、 $Z_2$  の動作範囲でかつ  $Z_1$  の不動作範囲を予測領域とする。すなわち継電器から見るインピーダンス軌跡が予測領域をある時間をもって通過し、しゃ断領域にはいったことにより同期はずれを検出する。

図1(b)は3領域方式の原理説明図でありモー継電器  $M$  とオーム継電器  $R_1$ ,  $R_2$  を組み合わせる方式で領域1, 2, 3を設定しインピーダンス軌跡がこれらの領域を一定時間以上を経て順次に

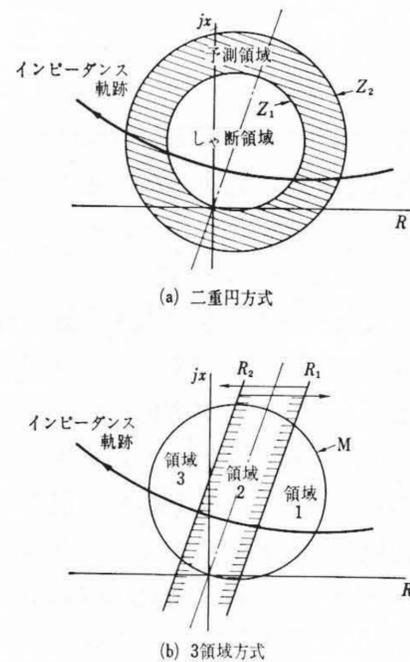


図1 同期はずれ分離継電方式説明図

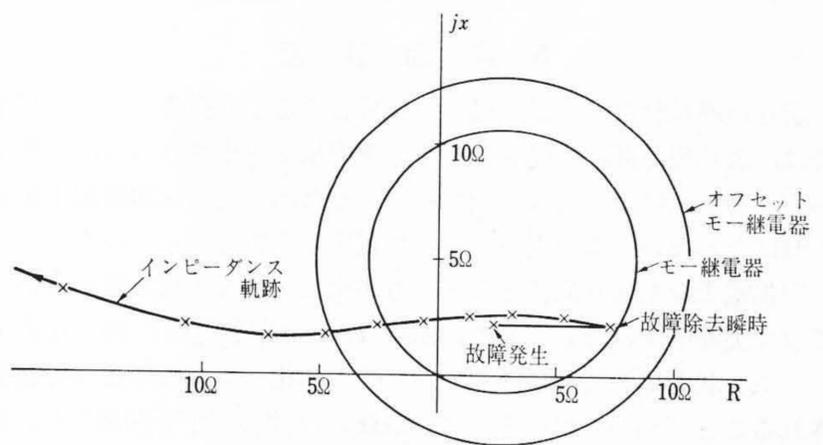


図2 同期はずれインピーダンス軌跡例(1)

通過したことにより、同期はずれを検出しようとするもので、領域1, 2, 3 または 3, 2, 1 と移動したとき領域3にはいった時点で同期はずれを検出し分離しゃ断する。

一般に2機系の同期はずれ現象は比較的単純であるが実際の系統は多機系であり、おのおのの発電機の位相関係によって継電器から見るインピーダンス軌跡は非常に複雑になる。したがって多機系の同期はずれインピーダンス軌跡は、個々の系統について実際に詳細計算を行ない継電器の応動を検討する必要がある。

したがって、中部電力株式会社において中西連系系統を模擬した32機系につき各送電線に3線地絡事故を発生させ過渡安定度計算を行なって同期はずれ現象を解析した。その結果の主要点をまとめ

\* 中部電力株式会社系統運用部  
 \*\* 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

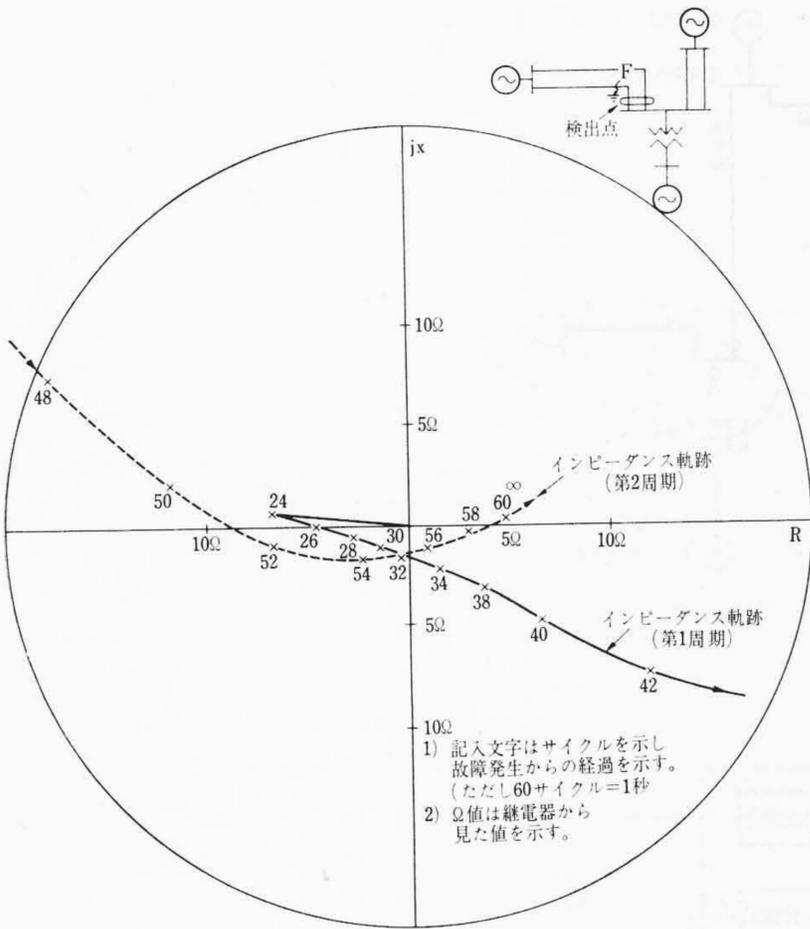


図3 同期はずれインピーダンス軌跡例 (2)

ると下記のとおりである。

- (1) 同期はずれ時のインピーダンス軌跡の初期位置は故障継続時間と発電機の相差角変化との関係から決まり、図2に示すように同期はずれ検出継電器の動作範囲内から始まって外部に移動するものがあり従来の方式では第1周期では検出不能であり検出時点が遅れることがある。
- (2) 同期はずれ時のインピーダンス軌跡の初期速度は図3に示すように継電器設置点の原点付近ないしは接近する以前においては0.17~1Ω/サイクル(二次換算)であるが、原点付近を通過して10Ω付近に至ると0.5~3.3Ω/サイクルと急激に速くなる。また第2周期の速度は一般に第1周期よりも高速度となるため、従来の検出感度では検出不能となることがある。

したがって、従来の方式では同期はずれインピーダンスの初期位置および変化速度の点から超高圧システムの同期はずれ現象を検出できない場合が考えられる。この欠点を補うには変化速度の速い場合や同期はずれインピーダンスの初期位置が保護範囲内にある場合でも、確実に検出できるように同期はずれインピーダンスの時間的変化を連続的に判定し、ある一定値以上となったときに動作するインピーダンス変化率検出方式を新たに適用することが必要である。しかしながらインピーダンス変化が比較的緩慢な場合は変化率検出感度を非常に高くする必要があるため、逆に従来の3領域方式で検出するほうが良い。したがって本装置はインピーダンス変化率検出方式と3領域方式との併用により確実に同期はずれを検出できる複合方式とした。

### 2.2 動作信頼度の向上

インピーダンス変化率検出継電器は、継電器から見るインピーダンスの変化が大きいき動作するため、同期はずれ以外の現象で不必要動作しないように注意する必要がある。すなわち事故発生、回復、しゃ断器の開閉などによる瞬時的なインピーダンスの変化および健全時の系統動揺や負荷変動と同期はずれとを明確に識別する必要がある。

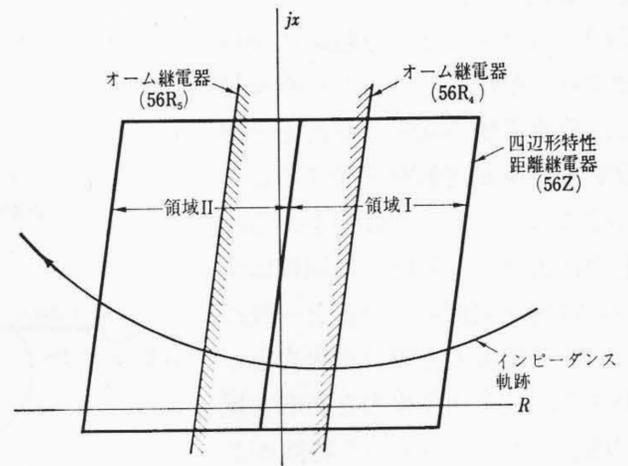
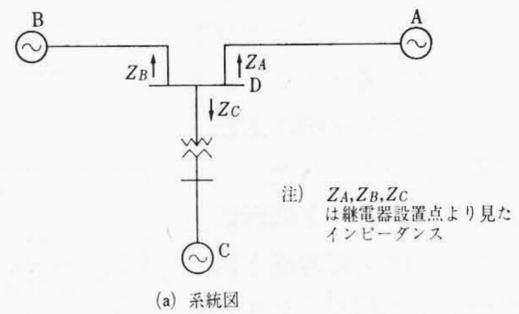
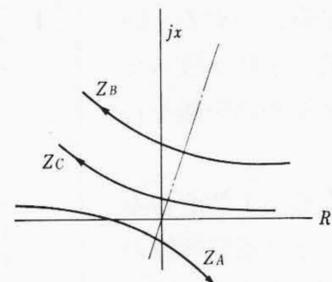


図4 2領域四辺形特性距離継電器



(a) 系統図



(b) 同期はずれインピーダンス軌跡例

図5 3機系の同期はずれ時の現象

上記現象はインピーダンスの瞬時変化、および一定範囲内におけるインピーダンスの変化であり、同期はずれ現象のように3相平衡して時間とともに連続的に変化する現象と異なる。したがって図4に示すように二つの領域をもった四辺形特性距離継電器と組み合わせ次のような対策を施した。

- (1) インピーダンスが四辺形特性距離継電器の領域にはいったときのみインピーダンス変化率検出継電器を起動させることにより不必要動作を防止する。
- (2) 同期はずれインピーダンスが領域1から領域2、あるいは領域2から領域1へ移動したことを検出するようにして系統動揺と識別する。
- (3) インピーダンス変化率検出継電器は複数回判定により出力を出すようにしてインピーダンスの瞬時変化と識別する。
- (4) 四辺形特性距離継電器を3相分設置し、3相とも領域移動したことを確認することにより故障点、故障相の移動による誤動差を防止する。

### 2.3 系統分離点の選択

多機系において同期はずれが発生した場合、同期はずれの中心の現われ方が非常に複雑となる。

図5(a)に示すような3機系においてA機のみB、C機と同期はずれしたときのインピーダンス軌跡は各発電機間の相差角によって異なるが、たとえばB、C機の相差角が小さくてA機のみ加速する場合には図5(b)のようになる。したがって、このような場合は3箇所同時に同期はずれを検出することがあり、B、C機の同期運転系

まで分離する恐れがある。したがって分離点の選択にあたっては、分離後において同期はずれが存在しないような点を最優先とし、分離システムの安定度維持を考慮し系統分離後の単独運転を確保することを最終目標において考える必要がある。

中部電力株式会社の系統では同期はずれ時の各発電機の位相差を見ると一般に尾鷲(おわせ)三田火力と四日市火力の間では小さく、また知多火力と新名古屋火力の間では小さいという特徴がある。すなわち図6に示すように関西開閉所を中心に尾鷲三田火力、四日市火力を一群とする西グループ、知多火力、新名古屋火力を一群とする東グループおよび関西系の3機系にまとめて考えることができる。したがって分離点の選択にあたって次のように優先順位をもたせた。

(1) 同期はずれの中心が2個所以上にある場合、たとえば尾鷲幹線と西濃線にある場合はまず関西系より分離し、西グループでの単独運転の確保を図る。それでもなお尾鷲三田火力と四日市火力との間に同期はずれが残っている場合はさらに両系統間の分離を行なう。

(2) 同期はずれの中心が1個所のみが存在する場合、たとえば尾鷲幹線のみにある場合は尾鷲三田火力が同期はずれを生じているわけであるから尾鷲幹線を健全系統から分離する。

### 3. 装置の構成

#### 3.1 装置の概要

図7は装置のブロック図であり同期はずれ検出部と分離点選択を行なう共通回路より構成される。

同期はずれ現象が発生するとまず第1, 2, 3相とも四辺形特性距離継電器56Zが動作しインピーダンス変化率検出継電器56Dに起動信号を与える。インピーダンスが変化し四辺形特性距離継電器内を領域1から領域2へ、また領域2から領域1へ移動すると領域移動検出を行なう。

一方、インピーダンス変化がある一定値より大きい場合は56Dが動作し同期はずれを検出する。またR-X座標面上に56Z, 56R<sub>4</sub>, 56R<sub>5</sub>により三つの動作領域を作り、この領域をある一定時間以上でインピーダンス軌跡が通過すると3領域通過検出回路により同期はずれを検出する。以上いずれかで同期はずれを検出すると分離点選択回路にSO信号を送る。

多機系における同期はずれ現象は複雑で複数個所で同期はずれを検出する場合

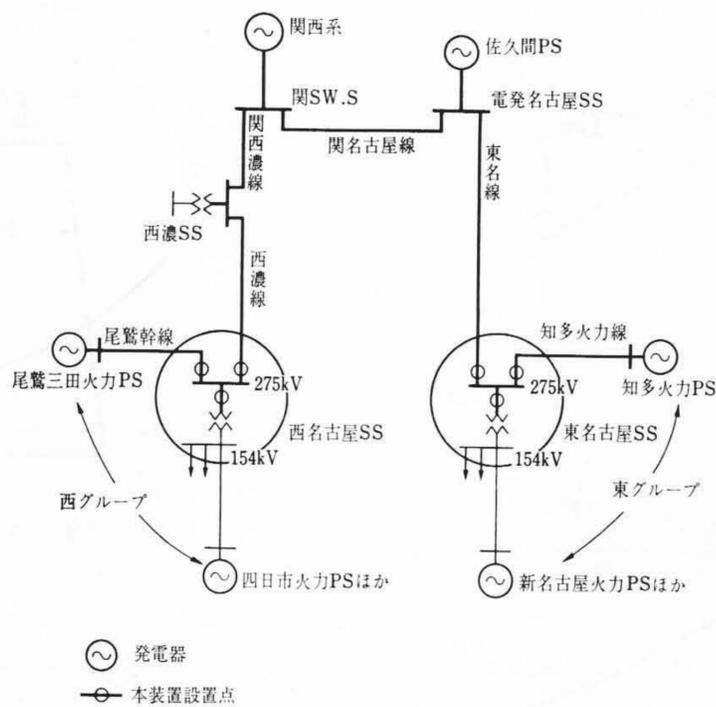


図6 中部電力超高压系統図と継電装置設置点

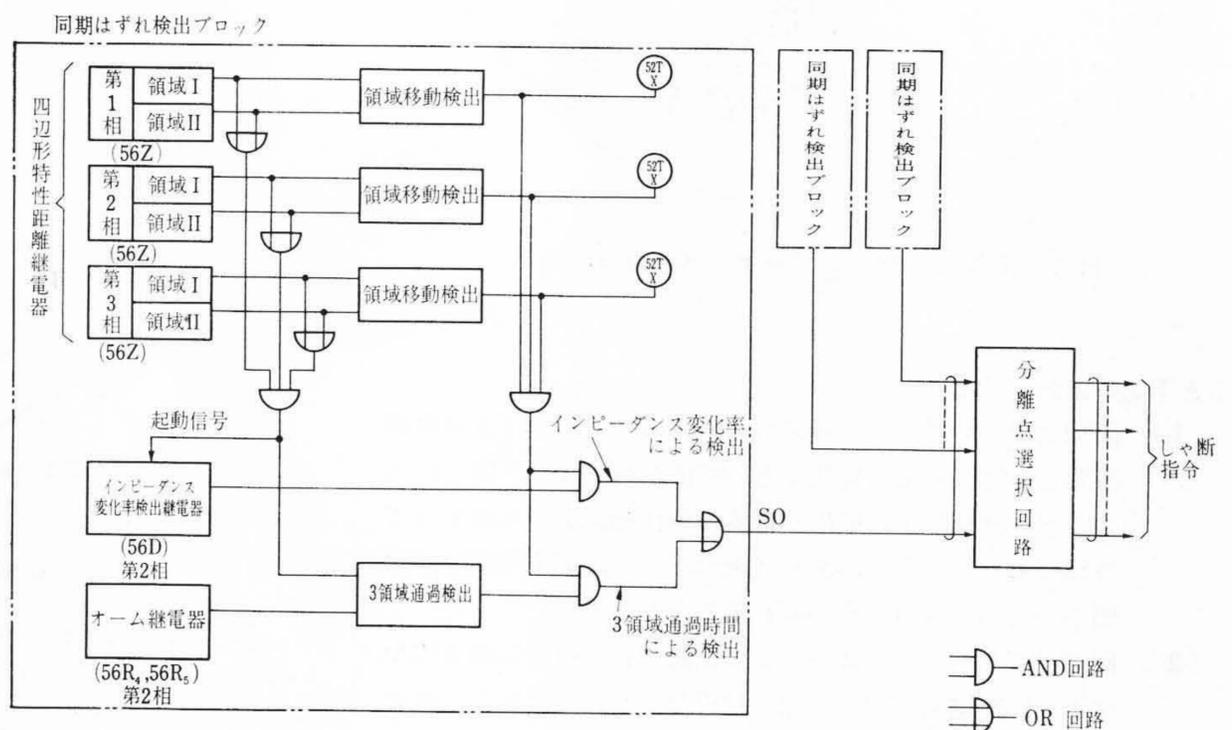
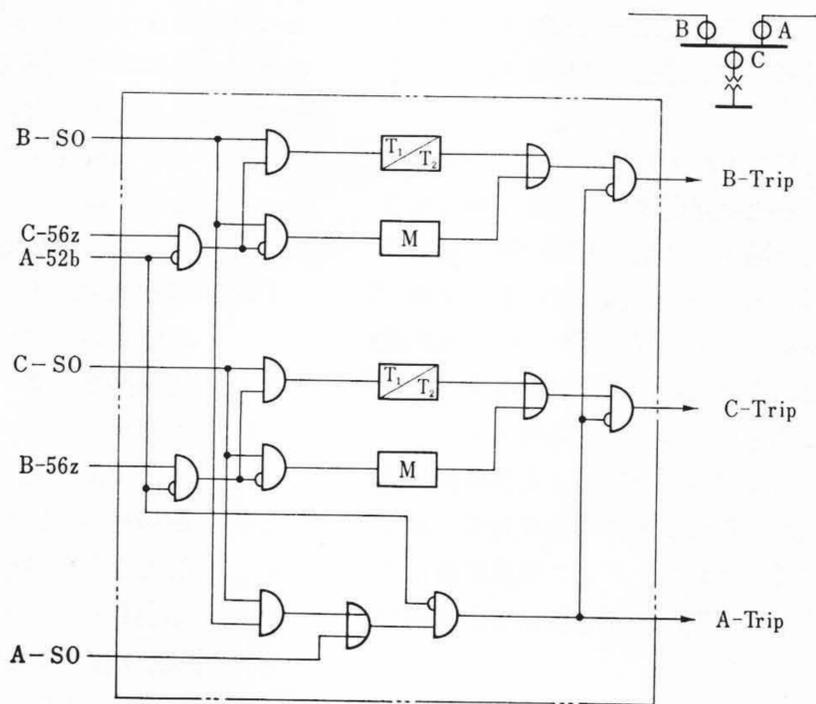


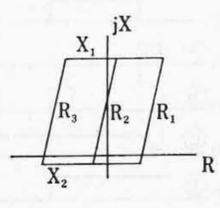
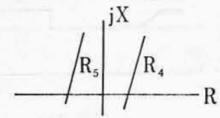
図7 同期はずれ分離継電装置ブロック図



- A, B, C; 分離個所
- SO ; 同期はずれ検出信号
- 56Z ; 四辺形特性距離継電器動作
- 52b ; しゃ断器開路状態
- Trip ; しゃ断器引はずし指令
- $T_1, T_2$  ; 限時回路 動作時間 $T_1$  復帰時間 $T_2$
- M ; 記憶回路
- $\cap$  ; アンド回路
- $\cup$  ; オア回路
- $\neg$  ; インヒビット回路

図8 分離点選択回路

表1 主要継電器仕様一覧

| 名称              | 形式                                | 定格                 | 仕様   | 消費 VA |     | 備考  |   |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------|--|-------|-----|-----|---|
|                 |                                   |                    |  | PT    | CT  |     |   |
| インピーダンス変化率検出継電器 | SZD-N-K <sub>2</sub>              | 110 V 5 A<br>60 Hz | dR/dt: 検出感度 1.0Ω/サイクル以下<br>dX/dt: 検出感度 1.6Ω/サイクル以下   | 固定    | 1.5 | 1.4 | 検出部はIC使用  |
| 四辺形特性距離継電器      | SX-N-K <sub>2</sub>               | 110 V 5 A<br>60 Hz | X <sub>1</sub> : 3~30Ω 1% Step Lag 90度<br>X <sub>2</sub> : 2Ω 固定 Lag 270度<br>R <sub>1</sub> : 6Ω 固定 Lead 5度<br>R <sub>2</sub> : 2Ω 固定 Lag 175度<br>R <sub>3</sub> : 10Ω 固定 Lag 175度 |       | 1.1 | 2.9 |  |
| オーム継電器          | SR <sub>2</sub> -N-K <sub>2</sub> | 110 V 5 A<br>60 Hz | R <sub>4</sub> : 1~10Ω 1Ω Step Lead 5度<br>R <sub>5</sub> : 1~10Ω 1Ω Step Lead 175度   |       | 1.0 | 2.5 |  |

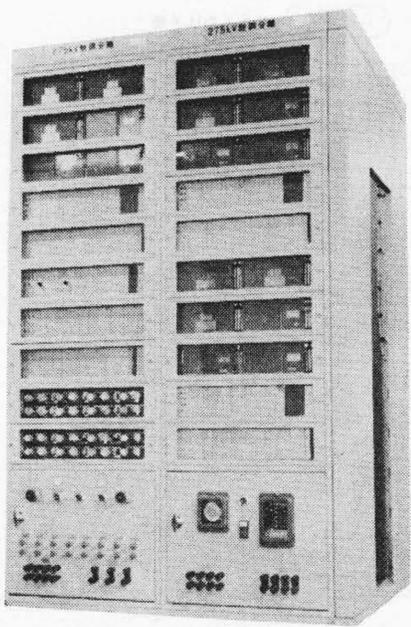


図9 超高圧同期はずれ分離継電装置

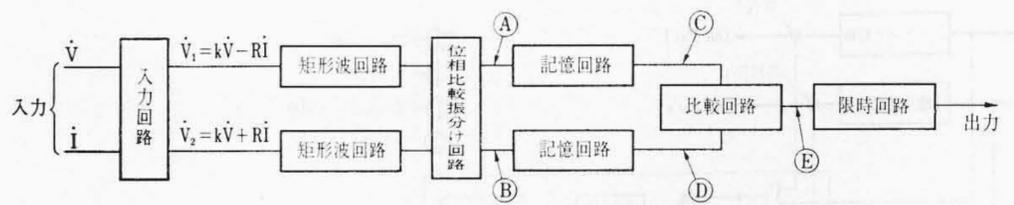


図10 インピーダンス変化率検出継電器ブロック図

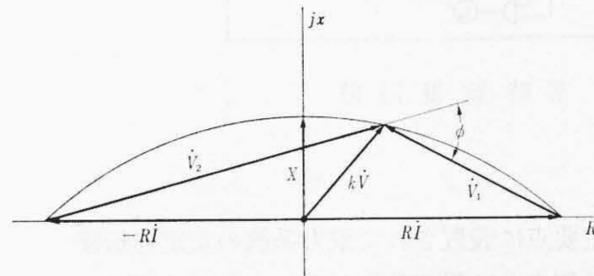


図11 インピーダンス変化率検出継電器ベクトル図

があり、かつ検出には最大30サイクル程度の時間差を生ずることがある。したがって図8は同期はずれ検出の時間差を考慮し、かつB、C間の位相差が小さい系統を対象とした分離点選択回路である。たとえばB点で同期はずれを検出した場合はAおよびC点の状態を確認し、いずれも動作していないときはB点に分離指令を出す。ところがC点の四辺形特性距離継電器(C-56Z)が動作しておればC点も同期はずれを検出する可能性があるため、ある一定時間 $T_1$ (たとえば $T_1 > 30$ サイクル)の間待機する。 $T_1$ 経過してもC点で同期はずれを検出しないときはB点へ分離指令を出す。ところが $T_1$ 内にC点で同期はずれを検出するとB-SO、C-SOのアンド条件によりA点へ分離指令を出す。またA点で同期はずれを検出した場合は直ちにA点へ分離指令を出すとともにB、C点の分離を抑制する。なお記憶回路Mはいったん動作すると確実に分離動作を実施させるためのものである。

図9は本装置の正面外観である。

### 3.2 主継電器

主継電器はすべて半導体素子を使用しており、おもな仕様は表1のとおりである。

インピーダンス変化率検出継電器は本装置の中心的役割を果たすものである。その動作原理を次に述べる。

本継電器はインピーダンスを抵抗分(R)とリアクタンス分(X)に分けて、そのおのおのについて変化率を検出するものであり、図10はリアクタンス変化率( $dx/dt$ )検出継電器のブロック図である。抵抗分変化率( $dR/dt$ )検出継電器も位相角が90度異なるのみで原理

的には全く同じである。各PT、CTよりの入力電圧 $\dot{V}$ 、電流 $\dot{I}$ を入力回路で合成し、 $\dot{V}_1$ 、 $\dot{V}_2$ の二つの電圧を作る。

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= k\dot{V} - R\dot{I} \\ \dot{V}_2 &= k\dot{V} + R\dot{I} \end{aligned}$$

この二つの電圧 $\dot{V}_1$ と $\dot{V}_2$ をベクトル表示したのが図11である。 $\dot{V}_1$ と $\dot{V}_2$ の位相差を $\phi$ とし $\dot{V}/\dot{I} = \dot{Z}$ とすると

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{k\dot{V} - R\dot{I}}{k\dot{V} + R\dot{I}} = \frac{\dot{Z} - R/k}{\dot{Z} + R/k} = Ke^{j\phi}$$

したがって位相差 $\phi$ が一定のときの $\dot{Z}$ の軌跡は円弧の一部となる。いま位相差 $\phi_1$ から $\phi_2$ へ変化したとすると $X$ の変化 $\Delta X$ は

$$\Delta X = R \left( \tan \frac{\phi_1}{2} - \tan \frac{\phi_2}{2} \right) \doteq R \left( \frac{\phi_1}{2} - \frac{\phi_2}{2} \right) = \frac{R}{2} \Delta \phi$$

(ただし  $\tan \phi \doteq \phi$ )

となる。したがって位相差 $\phi$ の1サイクルごとの変化量を測定すればリアクタンスの変化率を検出することができる。いま $\dot{V}_1$ と $\dot{V}_2$ を方形波に整形したのち位相比較回路で $\phi$ に等しい幅の方形波を得、これを1サイクルおきに二つの記憶回路に振り分けて印加する。記憶回路は積分回路であり入力信号のパルス幅を電圧に変換して記憶し2サイクルごとに入力が印加されるためその記憶値を更新する。比較回路は二つの記憶回路の出力を比較し、その差の値がある一定値以上になると出力を出す。比較回路出力は限時回路に印加され、複数回判定したときに最終出力を生ずるようにして確実に期している。図12は本継電器の各部の波形を示したものであり、図13は本継電器の外観である。

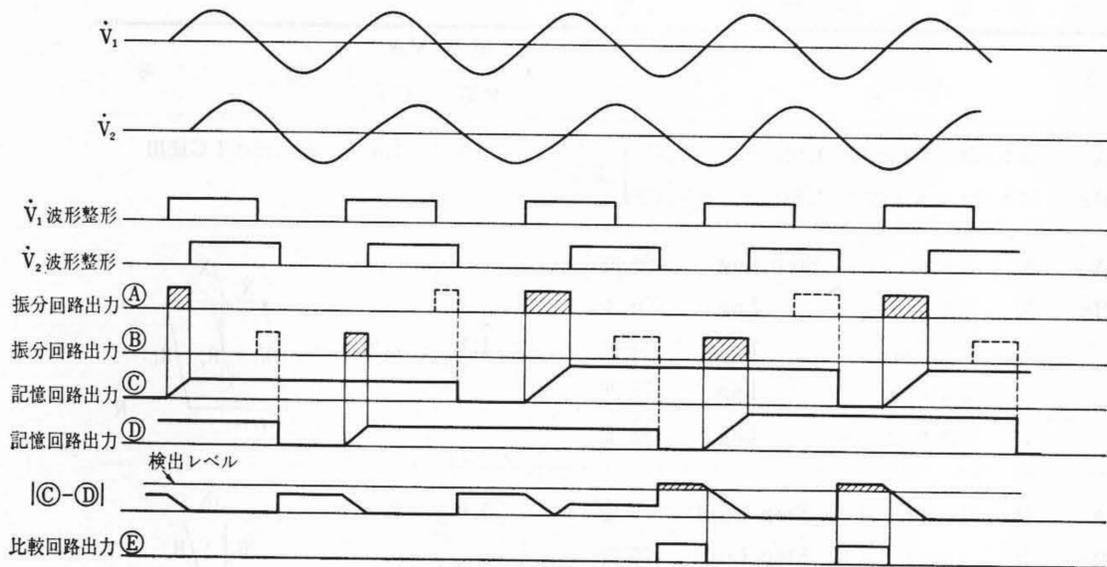


図12 インピーダンス変化率検出継電器各部波形図

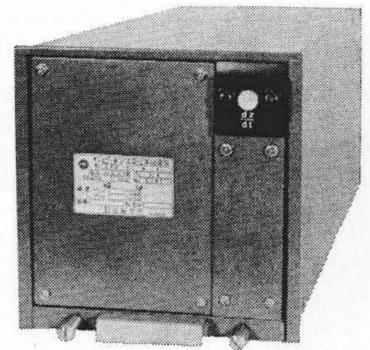


図13 インピーダンス変化率継電器

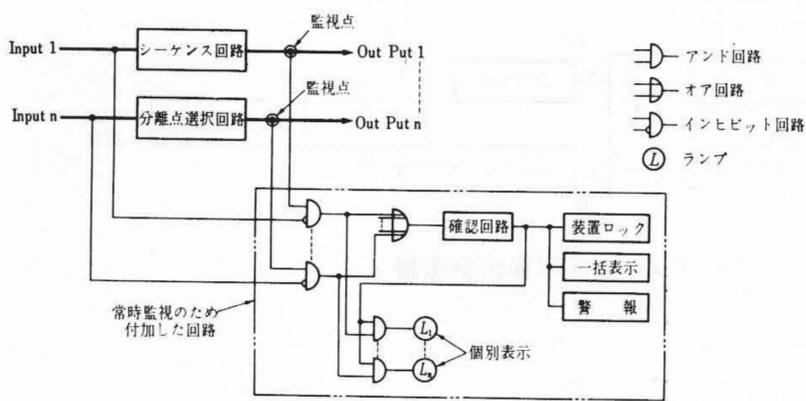


図14 常時監視回路

### 3.3 自動監視

本装置は超高圧系統の主要点に設置されて電力系統の安定運転確保を目的とするため、誤動作または誤不動作が系統に与える影響は非常に大きい。したがって方式上信頼度の向上を図るとともに、さらに装置自体の障害に基づく不正動作をも防止するため、自動監視を適用し装置の信頼度向上を心がけた。

誤動作は常時監視により常時の状態が予想される様相から変化したことで不良を発見するのが有利である。また誤不動作は装置に動作信号を与えて正常に動作するか否かを点検により確認するほうが良い。したがって本装置では半導体部品の異常に基づく誤動作に対しては常時監視、誤不動作に対しては自動点検により対処することを原則とした。

装置に自動監視回路を付加することにより、装置本来の動作の障害やまたは信頼度の低下をきたさないように考慮する必要がある。したがって本装置では本来の動作の流れには自動監視のために付加する回路を直列にそう入することはさけ、監視点の信号のみを取り出し主回路の信頼度の維持につとめた。

このほかに半導体回路はもち論のことPT, CT回路も含めた装置全体の特性面の変化がないことを確認する必要がある。したがって任意に同期はずれインピーダンスを模擬的に作り出すことのできる特性試験装置を作製し、この出力をCT, PT試験用端子より印加することにより特性の確認を行なえるようにした。

#### 3.3.1 常時監視

図14は本装置で採用した常時監視回路のブロック図である。監視対象個所はトランジスタ回路で主継電器を含んだシーケンス回路の主要点である。

監視方法は、同期はずれ現象が発生しない状態すなわち健全状態において各ブロックの出力状態が変わったことにより異常と判定する。したがって本装置が動作したときに異常と判定しないよ

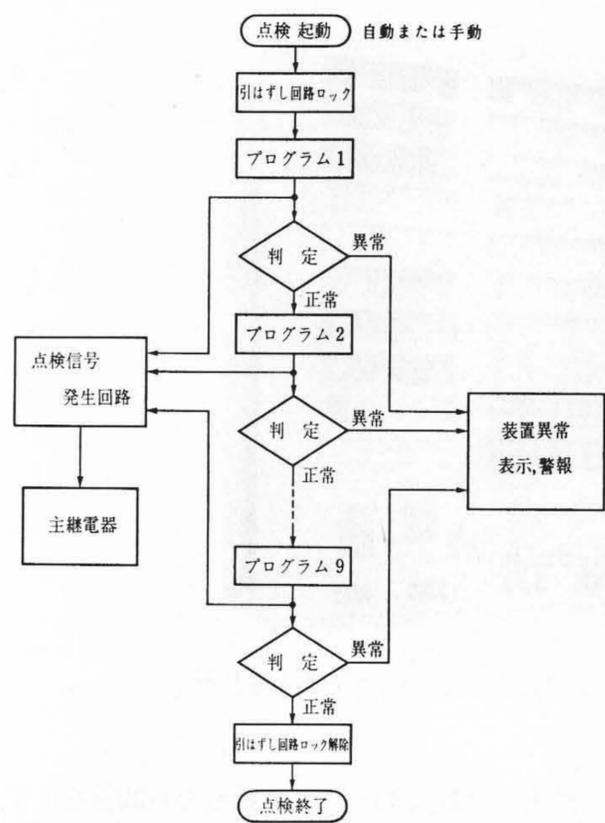


図15 プログラム式自動点検回路ブロック図

うに監視ブロックの入力と出力を取り出し、入力変化のある場合はインヒビット回路により監視阻止する。また本装置が動作したとき復帰に時間を要する回路があるため、入力になくても出力がある一定時間継続する場合がある。このような場合にも異常と判定することがないように、異常確認に若干の時間をもたせじゅうぶんな協調をとっている。さらに多数の監視個所を有するが異常確認は1個所で行なわれ、個別表示により異常個所を容易に発見できるように考慮されている。

#### 3.3.2 自動点検

同期はずれ検出はインピーダンス変化率によるものと、3領域通過時間によるものとの複合方式であり、分離点選択回路は三つの同期はずれ検出点の情報により分離点を選択する。したがってこれらの複数条件の組合せにより応動する回路のおおの動作を確認し、さらに異常個所の発見を容易にするためプログラムにより1ステップずつ順番に確認するほうが有利である。したがって本装置ではプログラム式自動点検方式を採用した。図15はその動作内容を示すブロック図である。

点検は手動または自動で起動すると、まず引はずし回路を完全にロックし、あらかじめ定められたプログラムにより点検を開始する。プログラム1が動作し点検信号発生回路と点検結果判定回

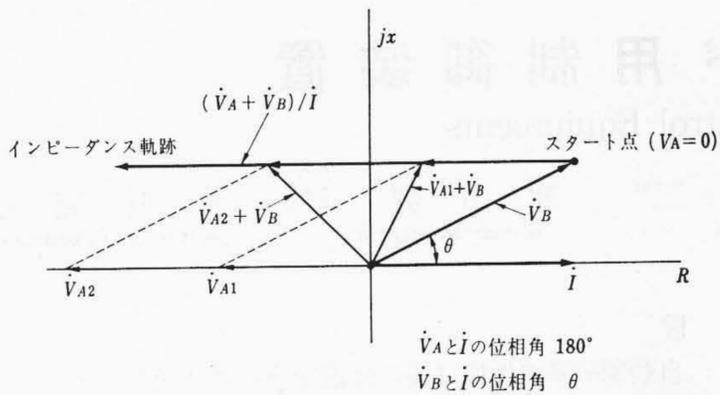


図16 インピーダンス軌跡

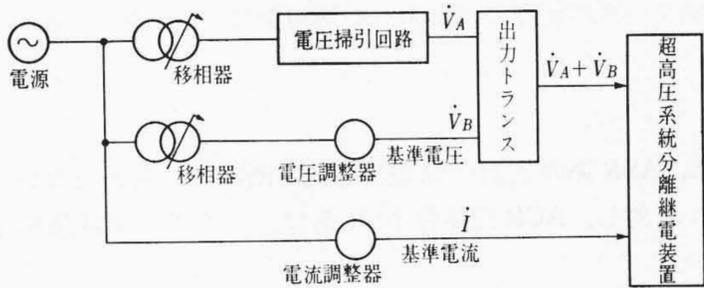


図17 特性試験装置ブロック図

路へ信号を送る。点検信号発生回路からは主継電器へ点検用直流信号が与えられ、その条件にしたがってシーケンス回路が応動し装置全体を一括して点検する。プログラムで定められた状態であるかを一定時限確認し、所期のとおりに応動しておれば正常と判定し次のプログラムに進む。もしどこかに異常があれば直ちに異常警報するとともにプログラムは停止し、異常検出個所、異常発見プログラム番号をランプ点灯継続し、装置が手動で完全にロックされるまで復帰できないようになっている。したがって点検により異常を発見したときは、異常個所をランプにより容易に判別でき、そのブロックだけを詳細試験すればよく修復時間を短縮できる。また点検プログラム番号により主継電器への点検入力信号が異なるため、必ず一度完全に復帰させシーケンスも含めてもとに復したのち、次のプログラム信号を印加するように時間協調をじゅうぶん考慮して構成している。

本点検回路の構成にあたって、特に考慮した点は次のとおりである。

- (1) 自動点検は毎日1回実施するため、点検により絶対誤動作しないように半導体回路および電磁形補助継電器で構成する引はずし回路のロックに注意している。
- (2) 自動点検の目的は装置の健全確認であり対象は半導体回路が主体である。したがって主継電器への点検入力信号は電圧、電流変成器よりの交流入力を切り換えることなく、主継電器入力回路の後段に直流点検信号を印加する。これにより
  - (a) 電圧、電流の主回路の切り換えによる信頼度の低下がない。
  - (b) 主回路の切り換えによる異常電圧の発生などの不具合がない。

などの利点がある。

- (3) 点検に要する時間は極力短くする必要があり、同一プログラムで数箇所同時に点検するとともに判定個所の選別を行ない、かつシーケンス内部の時間協調を考慮してプログラム数9、所要時間20秒とした。

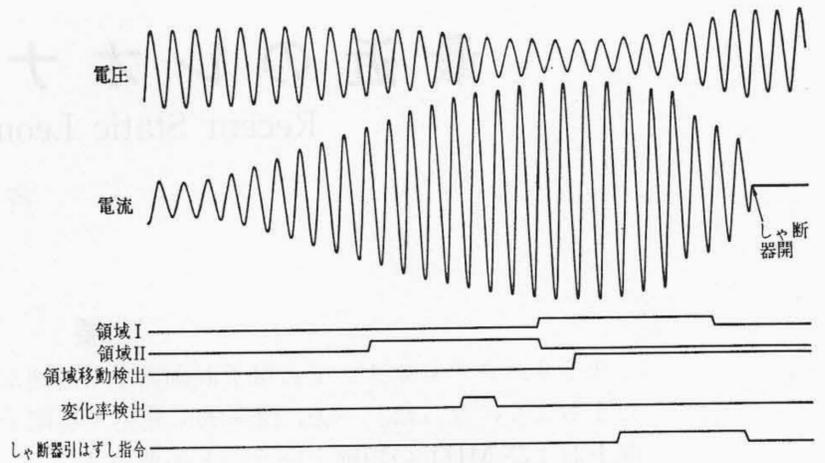


図18 同期はずれ試験オシログラム

### 3.3.3 特性試験装置

本装置は同期はずれ現象、すなわちインピーダンス変化を検出して動作する装置であるため、新たに特性試験を行なうための試験装置を製作した。

図16は本試験装置で作り出す同期はずれインピーダンス軌跡を示したものである。電流*i*は一定電流とし、電圧 $\dot{V}_A$ 、 $\dot{V}_B$ の大きさと位相を変えることによってインピーダンス軌跡を描かせるものである。 $\dot{V}_B$ は固定としてインピーダンス軌跡のスタート点を決定する。

図17は本試験装置のブロック図である。電圧 $\dot{V}_A$ の大きさを変えるのには積分回路の時定数を変えており、これに対応してインピーダンスの変化速度が任意に変えうるものである。

## 4. 試験結果

工場において特性試験装置および模擬送電線と組み合わせて、温度 $-10^{\circ}\text{C}$ ～ $+40^{\circ}\text{C}$ にわたって長時間各種動作試験をくり返し行なったが、いずれも安定な動作を続け、所期の動作特性を得ることができた。

図18は同期はずれ分離試験のオシログラムの一例である。これは模擬送電線電源として使用した1,500 kVA同期発電機と200 kVA同期発電機を強制的に同期はずれさせて試験した結果である。

以上のほか、故障相および故障点の移動試験、操作電源の入、切、点検中の電源の瞬断による応動および入力にサージ電圧を印加するなどの試験を行なったが不良動作は皆無であった。

## 5. 結 言

超高圧系統における同期はずれ現象の解析に基づきインピーダンス軌跡の初期位置、インピーダンスの変化速度などより従来方式では検出できないケースが生ずるため、本稿で述べたインピーダンス変化率検出方式を適用するのが最適である。

本装置は工場における模擬送電線によって試験した結果、良好な成績を収め昭和44年7月、中部電力株式会社東名古屋変電所、西名古屋変電所に設置し現在好調に運転中である。

従来の電力系統に比べますます大容量系統となり、電力依存度が増加する今日、系統の安定運転維持が必要であり本装置が無言の哨(しょう)兵の役を果たすと思われる。さらに自動点検、自動監視の採用は今後の保護継電装置の信頼度の向上対策の一つの方向性を示すものとして、その果たす役割は非常に大きいものと信ずる。

終わりに本装置の開発に際し、終始ご指導いただいた中部電力株式会社関係各位に深く謝意を表わす次第である。