# 同期はずれ継電器とその適用

Out-of-Step Protective Relay and Its Application

平井善一郎\* 比良清一\*\* 小野邦男\*\*\* Zen'ichiro Hirai Seiichi Hira Kunio Ono

#### 内 容 梗 概

運転中の同期機が系統からはずれた場合,また連系系統間に同期はずれが発生した場合,これを確実 に検出し同期機を系統から解列し,あるいはまた系統の分離を行つて事故の拡大を防止し,系統の擾乱 を局限する必要がある。

同期はずれ現象は多機系になるに伴い複雑になるが、日立製作所ではこの現象についての理論的解析と実験結果より KS 型同期はずれ継電器を開発し、各電力会社へ納入し好評を博している。

本文においては同期はずれ現象の解析と, KS 型同期はずれ継電器の特性ならびに模擬送電線との組 合せ試験の数例について紹介し, その適用について述べる。

### 1. 緒

電力需要の増大に伴い,電源開発ならびに送配電設備 も着々と整備される一方,これら電力系統の定態安定度 を向上する手段も種々とられている。しかし予期しない 負荷の急増,あるいは系統の故障などにより過渡安定度 が破れると電力動揺は急速に拡大し同期はずれになる。 このようなときに適当に配置された同期はずれ継電器に よつて,系統分離または同期機の解列などの処置を迅速 に行わせ電力擾乱の影響を局限することが必要である。

言



日立製作所では以上の目的に適合した KS 型同期はず れ継電器を完成し、中国電力株式会社汐発電所、北陸電 力株式会社北笹津開閉所そのほかに採用され、幸に好評 を博している。

本継電器は過電流状態における電力ベクトルの変化を 利用しており,原理的にきわめて簡単な方式で複雑な同 期はずれ現象が検出できる。なお模擬送電線と組合せて 種々の条件における動作を等価的に検討し,いずれも満 足すべき結果を得ている。

以下同期はずれ現象の解析,継電器の構造,および模 擬送電線との組合せ試験につき述べ御参考に供したい。

### 2. 同期はずれ現象

2.1 同期はずれ時の同期機の等価リアクタンス 同期機のリアクタンスは定常状態と過渡状態とでかな り異なつた値となるものであるが,同期はずれ現象の場 合にいずれのリアクタンスを用いるのが妥当であるかを

第1図のように端子電圧 Ét なる無限大母線に連系された制動巻線なき同期機が同期はずれした場合にそれより流出する電流 İを求めた結果は次式のとおりである。

\* 日立製作所国分工場
\*\* 日立製作所多賀工場
\*\*\* 日立製作所日立研究所

次に定量的に検討してみる。

第1図 無限大母線につながれた同期機のベクトル関係



$$i_{d}(t) = \frac{E_{t}}{x_{d}} \left\{ \cos \delta_{0} + \cos(\omega_{s}t + \delta_{0}) \right\}$$

$$+ \frac{\omega_{s} E_{t} \left( \frac{1}{x'_{d}} - \frac{1}{x_{d}} \right)}{\left( \frac{1}{T'_{d}} \right)^{2} + \omega_{s}^{2}} \times \left\{ \frac{1}{T'_{d}} \sin(\omega_{s}t + \delta_{0}) - \frac{\omega_{s} \cos(\omega_{s}t + \delta_{0}) - \frac{1}{T'_{d}} \sin \delta_{0} \varepsilon} - \frac{t}{T'_{d}} \right\}$$

$$+ \omega_{s} \cos \left\{ \omega_{s} t + \delta_{0} \right\} - \frac{1}{T'_{d}} \sin \delta_{0} \varepsilon \right]$$

$$(2)$$

----- 15 ------

昭和33年6月

継電器および継電方式特集号

日立評論 別冊第23号



第2図 同期はずれ時の電流ベクトル(小型機の場合)

ここに  $i_a(t)$ : 直軸分電流の過渡分

 $\omega_s$ : すべり速度 (rad/s) また $E_t \ge I$  との位相角 $\theta$ は次のようになる。

$$\frac{E_0 - Et \cos \delta_0}{\theta} + i_1(t) - (\omega_s t + \delta_0) \dots (3)$$



- P円: 等価リアクタンスを x'd, 等価内部誘起電圧を過渡リアク タンス背後の電圧 E' とした場合のベクトル軌跡
- Q円: 等価リアクタンスを  $\sqrt{xqxd'}$  等価内部誘起電圧を過渡 リアクタンス背後の電圧 E' とした場合のベクトル軌跡
- R円: 等価リアクタンスを xd, 等価内部誘起電圧を Eo とした 場合のベクトル軌跡
- 第3図 同期はずれ時の電流ベクトル軌跡(大型機 の場合)

 $E_t \sin(\omega_s t + \delta_0)$  $x_q$ 

次に計算例を示す。

2.1.1 小型機の例

 $x_d = 82\%$  $x_q = 55\%$ 

 $x'_{a} = 21.5\%$   $T'_{a} = 0.02\%$ 

なる 1.5 kVA の小型機について, 端子電圧  $E_t$ を基 準とした同期はずれ時の電流ベクトル軌跡を上式によ り計算した結果と実測した結果を第2図に示す。実測 ではすべり速度は徐々に増加する傾向があるが計算は すべり速度を一定とし、実測の場合のδが180度とな つたときのすべり速度 7 rad/s を選んで行つたので 多少のくい違いはあるがほぼ一致している。図中には xa および x'a を等価リアクタンスとした場合の電流 ベクトル軌跡を描いたが,かかる小型機の場合には Xa を等価リアクタンスとした場合に近いことがわか る。

2.1.2 大型機の例

 $x_d = 115\%$  $x_{2} = 75\%$  $x'_{d} = 37\%$  $T'_d = 1.8$ 秒 なる大型同期機で, 初期運転条件を単位法で

 $I_0 = 1$ PF = 0.9 $E_t = 1$ 

とした場合の同期はずれ時の電流ベクトル軌跡を端子 電圧 Ét を基準として求めた結果は第3図のとおりで ある。同図には x'a を等価リアクタンス, x'a 背後の電 圧 É'を等価内部誘起電圧とした場合の電流ベクトル 軌跡をも示したが、すべり速度が360度/s以上になる と x'aを等価リアクタンスとした場合に接近すること がわかる。

以上2.1.1, 2.1.2の二例から, 等価リアクタンスは 大型機では x'a に小型機では xa に近いことが明らか となつたがこの原因はすべり速度と T'a の大小関係に 由来するものであり,上述の例では,小型機の場合  $\omega_s = 7 \text{ rad/s}$   $T'_a = 0.02$ 秒 ならば  $x_a'$  の影響は小で ほぼ  $x_a$  に一致し、大型機の場合  $\omega_s = 7 \text{ rad/s}$   $T'_a$ =1.8秒 程度ならば x'a にほぼ一致する。そして ws は同期はずれが起つて最初の1ないし2すべりサイク ル目を論ずる場合には数 rad/s ないし十数 rad/s と 考えてよいから,上述の検討は実際の場合に当てはま る。

上記は制動巻線なき同期機の場合であるが制動巻線 のあるものに関しては, x"a の影響が考えられ, これ は  $T''_a$  と  $\omega_s$  との関係によつて決まるが、  $T''_a$  は普 通 0.03 秒程度の値なので,上記小型機の T'a と ws の関係からもわかるとおり、最初の1ないし2すべり サイクル目を論ずるかぎりその影響は小さい。

以上より,本継電器の保護対象とするような大型同 期機では T'a や T"a は各機によりさほど大きい開き はなく,実際上 x'a をもつて同期はずれ時の等価リア クタンスと考えて大きな誤りはない。

同期はずれ継電器とその適用



注: L, M……機系より A, B……機系に流れる有効電力および 進相無効電力を正とする。

第4図 多 機 系 統 図

2.2 多機系統における同期はずれ時の電力ベクトル軌 跡および電圧値

2.2.1 理 論 式

Mr.

第4図のような多機系統を考え継電器設置点Rにおける電力を次の条件のもとに解く。この条件の妥当性は(1)項で論じたとおりである。

 $\dot{E}_{Be} = \frac{\dot{Z}_{e_1}}{\dot{Z}_B} \dot{E}_B$  $\dot{E}_{Le} = \frac{\dot{Z}_{e_2}}{\dot{Z}_L} \dot{E}_L$  $\dot{E}_{Me} = \frac{\dot{Z}_{e_2}}{\dot{Z}_M} \dot{E}_M$  $\delta_{Ae} = \delta_A + \alpha_{e_1} - \alpha_A$  $\delta_{Be} = \delta_B + \alpha_{e_1} - \alpha_B$  $\delta_{Le} = \delta_L - \alpha_{e_2} - \alpha_L$  $\delta_{Me} = \delta_M - \alpha_{e_2} - \alpha_M$  $\delta_{BAe} = \delta_{Be} - \delta_{Ae}$  (以下これに準ず) ここに  $\delta_A$ ,  $\delta_B$ , .....  $\delta_L$ ,  $\delta_M$ , ..... はそれぞれ  $\dot{E}_A$ ,  $\dot{E}_{B}, \dots, \dot{E}_{L}, \dot{E}_{M}$ の位相角  $\alpha_{e_1}$ ,  $\alpha_{e_2}$  は  $\dot{Z}_{e_1}$ ,  $\dot{Z}_{e_2}$  のインピーダンス角  $\alpha_A, \alpha_B, \ldots, \alpha_L, \alpha_M, \ldots, \forall \dot{Z}_A, \dot{Z}_B, \ldots, \dot{Z}_L,$ **Ż**M.....のインピーダンス角 である。 また継電器設置点の電圧値 ER は  $|\dot{E}_{R}| = \left(\frac{Z_{2}^{2}}{Z_{e}^{2}}(E^{2}_{Ae}+E^{2}_{Be}+....+2E_{Ae}E_{Be})\right)$  $\cos \delta_{BAe} + \dots + \frac{Z_1^2}{Z_e^2} (E^2_{Le} + E^2_{Me} + \dots)$ 

 $+2E_{Le}E_{Me}\cos\delta_{MLe}....)+\frac{2Z_1Z_2}{Z_e^2}\Big\{E_{Ae}E_{Le}\Big\}$ 

このとき電圧,インピーダンスおよび相差角により 電力ベクトルを表現すると次式のようになる。

ただし

$$\dot{Z}_{1} = \dot{Z}_{e_{1}} + \dot{Z}_{1'} = \left(\frac{1}{\dot{Z}_{A}} + \frac{1}{\dot{Z}_{B}} + \dots\right)^{-1} + \dot{Z}_{1'}$$

$$\dot{Z}_{2} = \dot{Z}_{e_{2}} + \dot{Z}_{2'} = \left(\frac{1}{\dot{Z}_{L}} + \frac{1}{\dot{Z}_{M}} + \dots\right)^{-1} + \dot{Z}_{2'}$$

$$\dot{Z}_{e} = \dot{Z}_{1} + \dot{Z}_{2}$$

$$\alpha_{1}: \dot{Z}_{1} \quad \mathcal{O} \land \lor \circlearrowright - \swarrow \lor \lor \land \oiint \oiint$$

$$\alpha_{2}: \dot{Z}_{2} \quad \mathcal{O} \land \lor \circlearrowright - \measuredangle \lor \lor \land \varPi$$

$$\dot{E}_{Ae} = \frac{\dot{Z}_{e_{1}}}{\dot{Z}_{A}} \dot{E}_{A}$$

 $\cos(\delta_{LAe} + \alpha_1 - \alpha_2) + E_{Ae}E_{Me}\cos(\delta_{MAe} + \alpha_1 - \alpha_2) + E_{Be}E_{Le}\cos(\delta_{LBe} + \alpha_1 - \alpha_2) + E_{Be}E_{Me}$ 



第5図 2機系における同期はずれ時の電力ベクト ル軌跡

— 17 —

日立評論 別冊第23号

 $\cos(\delta_{MBe} + \alpha_1 - \alpha_2) \bigg\} \bigg]^{1/2} \dots (5)$ 

と表わされる。

W および | E R | の式中,相差角以外の量は定数であ るから、上式の各相差角を 0~360 度変化させた場合 のW および | E R | の値が同期はずれ時のそれになる。 2.2.2 計算例

2 機系の場合

A機およびL機のみの2機系とし、Rの両側のイ ンピーダンス角  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  を相等しく  $\alpha$  とすれば

$$\dot{W} = \frac{Z_1 E_L^2 - Z_2 E_A^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \varepsilon^{-j\alpha} + \frac{E_A E_L}{Z_1 + Z_2} j \varepsilon^{-j\alpha}$$
$$\sin \delta_{LA} - \frac{Z_1 - Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_A E_L \varepsilon^{-j\alpha} \cos \delta_{LA} \dots (6)$$

これは第5図に示すように

中心 
$$\frac{Z_1E_L^2-Z_2E_A^2}{(Z_1+Z_2)^2} \varepsilon^{-j\alpha}$$
  
長径  $\frac{E_AE_L}{Z_1+Z_2}$   
短径  $\left|\frac{Z_1-Z_2}{(Z_1+Z_2)^2}\right| E_AE_L$   
なる楕円である。

また電圧は

$$\delta I = 0$$
 IF  $\sigma > \dot{F} = \dot{F} = Z_2 E_A + Z_1 E_L$ 



- (A) A機のみ同期はずれ B, L, M機は同相
- (B) A機のみ同期はずれ B機は L, M機より 90度おくれ
- (C) A機のみ同期はずれ B機は L, M機より 90度すすみ
- (D) A機のみ同期はずれ B機は L, M機より 45度おくれ
- (E) L機のみ同期はずれ A, B, M機は同相
- (F) L機のみ同期はずれ M機は A, B機より 90度すすみ
- (G) L機のみ同期はずれ M機は A, B機より 90度おくれ
- (H) A, B機対 L, M機が各同相で同期はずれ
- (I) A, L機対 B, M機が各同相で同期はずれ
- (J) A, L機対 B, M機間で同期はずれ ただし A機は L機より また B機は M機より 90度おくれ

$$\delta_{LA} = 0$$
度 ひとさ  $|E_R| = Z_1 + Z_2$   
 $\delta_{LA} = 90 度 および 270 度 のとき $|\dot{E}_R| = \frac{1}{Z_1 + Z_2} \sqrt{Z_2^2 E_A^2 + Z_1^2 E_L^2}$   
 $\delta_{LA} = 180 度 のとき |\dot{E}_R| = \frac{|Z_2 E_A - Z_1 E_L|}{Z_1 + Z_2}$$ 

となる。

(2)4 機系の場合

この場合の解を簡単に表わすことは困難であるか ら一つの具体例をもつて示す。第6図は北陸電力株 式会社北笹津開閉所を中心とする系統を4機系に等 価させた模擬回路であるが、この場合の同期はずれ 時の継電器設置点の電力ベクトル軌跡を(4)式に より計算した結果を示すと第7図のとおりになる。 かように多機系統では条件によつて種々の軌跡が存 在するので2機系の場合のように一義的には定まら



第6図 計算に供した4機系の回路図

- (K) A, L機対 B, M機間で同期はずれれ ただし A機は L機より また B機は M機より 90度すすみ
- 注: (1) L, M機(北陸系)より A, B機(関西系)の方向に流 入する有効電力および進相無効電力を正とする

(2) ( ) 内数字は線間電圧 (V) を示す

4機系における同期はずれ時の電力ベクト 第7図 ル軌跡

ないが,かかる軌跡を基礎として,起りうると考え られる条件を総合すれば実際に電力ベクトルの描き うる領域が推定される。

#### 日立同期はずれ継電器の構造および動作 3.

前項に説明したように2機系または3機系の比較相単 純な系統の場合は同期はずれ時の電力ベクトル軌跡も単 純であるが、多機系の場合には同期はずれの範囲ならび に相互間のインピーダンスによりきわめて複雑不規則と なる。かかる多機系にあつては、同期はずれ検出のほか の方式たとえばオーム継電器と限時継電器との組合せに おいてもオーム要素の整定基準が確定しにくく,同期は ずれ継電器の最もむづかしい点であろう。

日立同期はずれ継電器(1),(2)は以上の基本的な考察に 基いて,従来製作し経験の深い継電器要素を組合せ,短 絡などの故障には動作することなく、目的とする系統ま たは同期機が同期はずれした場合にすみやかに動作する ように構成されている。

本継電器の構成要素は起動要素1個,電力方向要素2



Mr.

第8図 KS型同期はずれ継電器

個ならびに補助要素3個の合計6個の要素から成り、こ れらを第8図のように同一ケースに収め、盤所要面積の 縮小,配線の簡便を図るとともに取り扱い点検に便利な ようにプラグ機構を有している。

起動要素は平常運転と異常状態とを弁別するもので, 電圧抑制付過電流継電器とほぼ同一構造を有し,故障発 生と同時に鋭敏に動作する。同期機用同期はずれ継電器 としては電力方向継電器でも同様の効果をもたせること ができる。これらはいずれも誘導環型構造で 20~30 ms 程度の高速度動作ができる。動作特性を電力座標であら わすと 第9図(A)(B)特性となる。



第10図 同期はずれ継電器直流回路接続

電力方向要素は同期はずれ現象中の電力ベクトルの移 動を検出するもので誘導円板型構造とし,その力率特性 は P.T.および C.T.からの印加位相と線路インピーダ ンス角によつて適宜定めてあり,同期はずれのすべりの 進展に従い順次動作するように調整される。この動作特 性例を 第9図 (C) (D) で表わす。この要素を2個と した理由は、これらの力率特性を変え、しかも入力位相 を別個の相からとり短絡時の誤動作を防ぐ目的である。 補助要素は1個の限時動作瞬時復帰継電器と2個の瞬 時動作継電器であり,前者は短絡と同期はずれを区別す るため故障時の電力要素の反転時間に相当する限時をも たせたものであり,後者は起動要素が動作している間に 電力方向要素が反転したときに動作し, 起動要素が復帰 することなく2個の電力方向要素が引続いて動作した場 合同期はずれとみて引はずし回路を構成する役目を有す るものである。これら補助要素の組合せを第10図に示 す。 以上のように各要素の特性を定め,補助要素と組合す ことにより短絡時にはまつたく誤動作することなく,同 期はずれのときは一すべり以内に検出ができる。ただ同 期はずれのすべり速度が異常に大きい場合,その電気的 現象は短絡と酷似して限時要素による判別ができぬ恐れ もあるので,本継電器に使用する電力方向要素はその限 時をできるだけ小さくする反面,その接点反跳などに特 に注意を払い相当のすべり速度まで追従するよう造られ ている。



(A) 電圧抑制付過電流継電器を起動要素としたものの特性

(B) 電力方向継電器を起動要素としたものの特性

(C, D) 電力方向要素の特性

第9図 同期はずれ継電器内部要素の動作特性

# 4. 実験検討例

#### 4.1 2機系の例

第11図は2機系における同期はずれ時の電力ベクト ル軌跡と継電器動作の実測例である。この場合は,継電 器設置点は電気的中心よりかなりはずれているので起動

— 19 —

昭和33年6月

継電器および継電方式特集号

日立評論 別冊第23号



- 注: (1) LよりAに流入する有効電力および進相無効電力を正 とする
  - (2) ( )内は継電点の線間電圧
- 第11図 2機系における同期はずれ時の電力ベクト ル軌跡と継電器動作

要素としては電力方向継電器を用いた。軌跡はまず起動 要素 SOR A の動作整定範囲に入り二つの電力反転要 素 SOR B および SOR C の整定直線を横切ることによ つて同期はずれを検出しトリップしている。なお故障時 には,故障点および故障種類をとわず不動作なることを 確認した。

第1表 4機系における試験条件

条 件	試 験 方 法	継電器動作
1	F1点三相短絡発生 → 関西系以外の各機速度 上昇 → 故障除去 → 同期系はずれ	IE
2	$F_2$ 点三相短絡発生 $\rightarrow$ 関西系以外の各機速度 上昇 $\rightarrow$ 故障除去 $\rightarrow$ 同期はずれ	Æ
3	F2点三相短絡発生 → 水力系分離 → 見座神 一系,坂上その他系を同時に速度降下 → 同 期はずれ	ĨĔ
4	$F_{2}$ 点 bc二相短絡発生 $\rightarrow$ 関西系以外の各機 速度上昇 $\rightarrow$ 故障除去 $\rightarrow$ 同期はずれ	Æ



4.2 多機系の例

第12回は、第6回と同じく、北陸電力株式会社笹津 開閉所を中心とする4機系統の模擬送電線による試験回 路である<sup>(2)</sup>。この回路により第1表の試験条件で同期は ずれを起させ電力ベクトル図上における継電器動作を検 討した結果を第13~16回に示す。このように、実際の 軌跡は単純ではないが、これはほぼ理論的な推定範囲に 入つており、継電器はその軌跡が起動要素 SOR A の動 作圏内に入つて二つの電力反転要素 SOR B, SOR C の



- 注: 1 北陸系より関西系に流入する有効電力および進相,無効電力を正とする。
  - 2 (147) とあるは・点における継電点の電圧が 147V なることを示す。ほかもこれに準ず。
  - 3 △A動は SORA が動作 △A復は SORA が復帰 △B反は SORB が反転 □はトリップ

第13図 電力ベクトル軌跡と継電器動作(条件1)



第14図 電力ベクトル軌跡と継電器動作(条件2)

- 20 -----

同期はずれ継電器とその適用



盖

第15図 電力ベクトル軌跡と継電器動作(条件3)



整定直線を横切ることによつて動作している。また故障 点 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> に三相短絡および各種二相短絡を起した場合 故障のみでは継電器は不動作であることを確認した。

## 4.3 同期はずれ時のすべり速度と継電器の動作限界

本継電器が同期はずれ時にどの程度のすべり速度まで 応動可能かは軌跡によつて異なるので一概には定まらな いが、2 機系の場合には軌跡がほぼ一定しているのでそ の限界を知ることができる。第17 図は2 機系における 同期はずれ時の継電器動作のオシログラムの例で、第12 図の関西系と富山系のみの間で同期はずれを起させた場 合である。図によればすべり同期が50~ベースで 9~ すなわち 0.18 秒まで継電器は動作している。

# 5. 結

言

日立KS型同期はずれ継電器は,原理的に簡単な方式 によつているが,同期はずれ時の同期機の解列,系統の 分離などを所期どおり確実に行い,かつ高速度であるこ とが確認された。本文中に述べたように継電器設置点か らみた電力動揺の軌跡は多機系になると非常に複雑とな ることは容易に推察できる。したがつてこの種継電器の 設置に当つては設置点からみた電力動揺について十分な 解析を行つておくことが望ましい。

そのほか系統としては電力動揺を起さない考慮を常に 払い,弾力性ある態勢にて運営されるべきで,安定度向 上のため速応励磁方式の採用,自動周波数調整装置の適 用などが積極的に考慮さるべきものと考える。

終りにKS型同期はずれ継電器の開発に対して御協力 をいただいた電力中央研究所,早稲田大学,北陸電力な らびに中国電力株式会社の関係者各位に厚く御礼申し上 げる。

#### 参考文献

(1) 西堀ほか: 日立評論 38, 671 (昭 31-5)
(2) 宮崎ほか: 日立評論 39, 561 (昭 32-5)



第17図 2機系における同期はずれ時の継電器動作 (オシログラムの一例)

第16図 電力ベクトル軌跡と継電器動作(条件4)