

系統分離用同期外れ継電器

Out-of-Step Protective Relay Separating Unstable Power Systems

宮崎俊男* 小野邦男** 比良清一*** 中山敬造****
 Toshio Miyazaki Kunio Ono Seiichi Hira Keizo Nakayama

内容梗概

北陸電力株式会社北笹津開閉所に納入した同期外れ継電器は二つの大電力系統の連繫点に設置され、複雑な多機系統の同期外れ現象を電力ベクトルの変化を利用して検出し、すみやかに系統分離を行うためのものである。

本継電器は実系統における同期外れ現象を計算により検討した詳細な資料をもとにして、起動要素および電力方向要素の整定を行い、さらに模擬送電線によつて同期外れを発生せしめ、所期通りの確実な動作を行うこと、およびいかなる点の短絡故障に対しても絶対に誤動作しないことを確認した。

[I] 緒言

電力系統の運営に弾力性を与え、より合理的なものとするためには、個々の系統を相互に連繫し、必要な電力融通を行うことが望ましい。しかし系統容量の増大につれて系統の運転条件は安定極限に近づく場合が多く、そのため一系統内で故障や負荷の急変が発生すると同期外れとなつて、連繫系統全体が潰滅する危険がある。

保護継電器および遮断器の高速化、また再閉路方式の採用などは、系統の過渡安定度向上のための積極的な方法であるが、さらに一旦同期外れが発生した場合には、1滑り以内にこれを検出し適切な系統分離を行い、電力擾乱の影響を極限することが必要である。

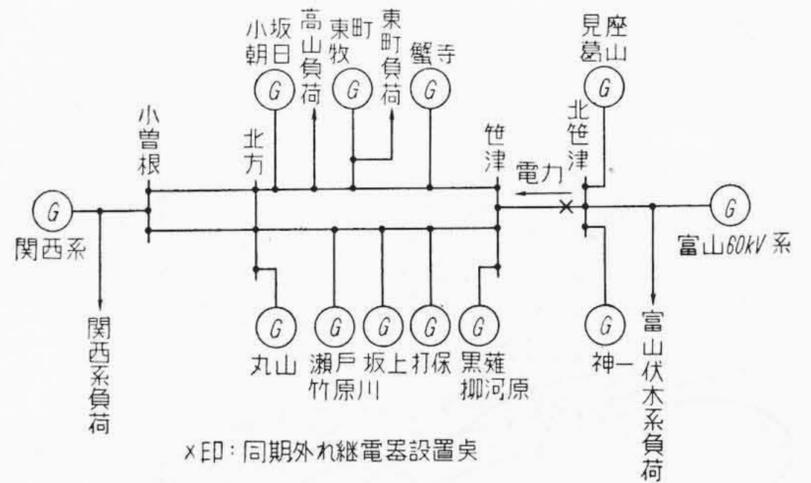
日立製作所は、さきに同期機保護用の同期外れ継電器⁽¹⁾を完成したが、今回上記の目的にそう一般電力系統用のKS型同期外れ継電器を開発し、詳細な試験を実施したのち北陸電力北笹津開閉所に納入した。本稿では、継電器の構造ならびにその整定、および模擬送電線との組合せ試験の結果について述べる。

[II] 計画の概要

北陸電力は北笹津開閉所において関西電力系と連繫し相互に電力融通を行つてきているが、一系統内の事故の影響が他系統に波及して同期外れをおこすことが多く、このため系統連繫点の北笹津開閉所に同期外れ継電器を設置して、適切な系統分離による事故拡大の防止を行うことが計画された。第1図は北笹津開閉所を中心とした関連系統図である。

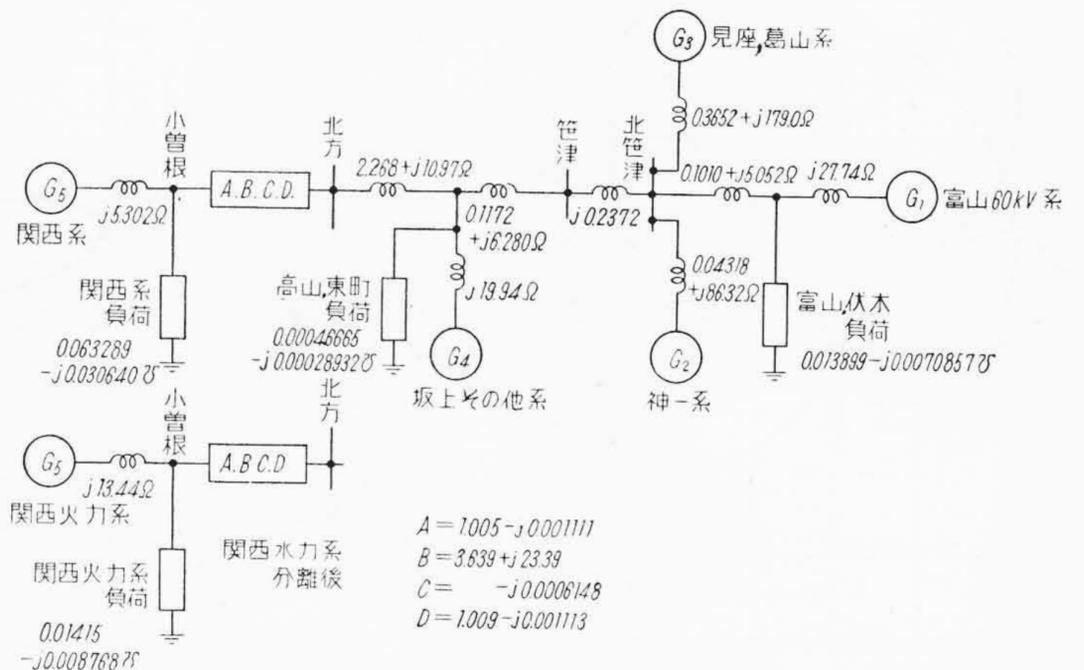
さて、このような多機系統における同期外れ現象は、系統構成、潮流条件、故

* 北陸電力株式会社
 ** 日立製作所日立研究所
 *** 日立製作所多賀工場
 **** 日立製作所日立国分分工場



第1図 系統図

障発生点およびその継続時間など、種々の条件により一義的には定まらず、一般に非常に複雑となることは予想されるところである。したがつて北陸電力では、その実態を把握するために電力中央研究所および早稲田大学に研究を依頼し、詳細な検討結果⁽²⁾を得た。この研究は第1図の系統を簡略化して等価5機系として取扱い、一つの潮流条件の下で、関西系あるいは北陸系で事故が発生した場合の過渡安定度、笹津連絡線における電圧、電流、電力の変化状態などを計算したものである。第2図はこ



第2図 インピーダンスマップ

第1表 計算条件

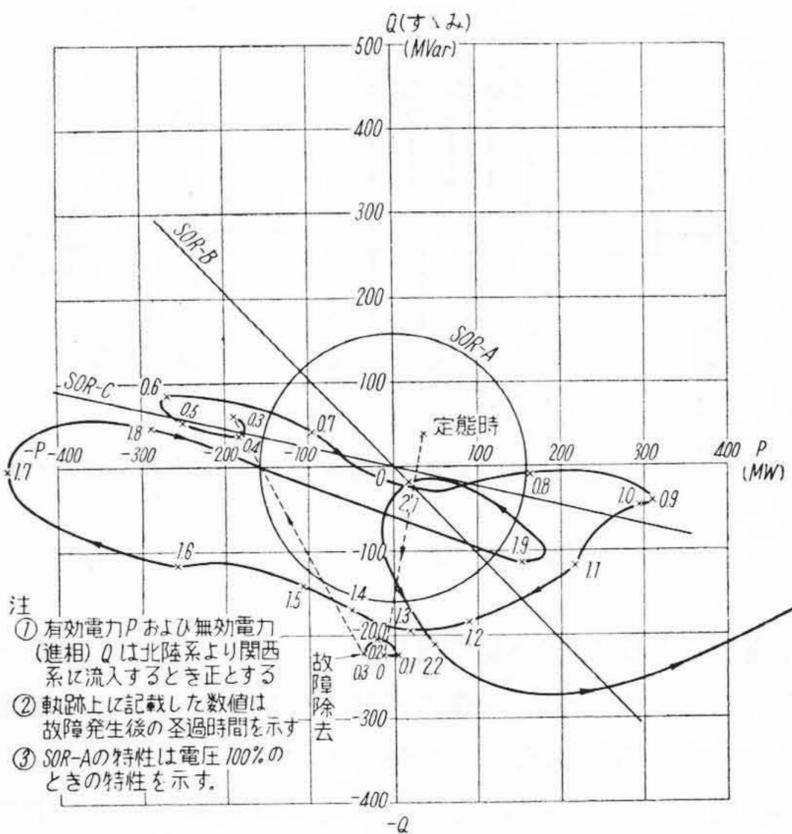
条件	故障点 故障種類	故障除去方法 故障除去時間	継電器設置点	摘要
条件1	北方—岩倉間 3線地絡	1回線選択遮断 0.3, 0.6, 0.8秒	北笹津開閉所	
条件2	北笹津—富山間 3線地絡	1回線選択遮断 0.25, 0.3, 0.5秒	同上	
条件3	同上	同上 0.6秒	同上	関西水力系を0.45秒にて分離
条件4	同上	同上 0.5秒	小曾根変電所	
条件5	再同期問題の検討			
条件6	富山母線附近 2線短絡	1回線選択遮断 0.5, 0.6秒	北笹津開閉所	故障継続の場合および故障除去後、系統分離した場合を検討

の計算に使用されたインピーダンス図であり、また第1表は計算条件を表にまとめたものである。

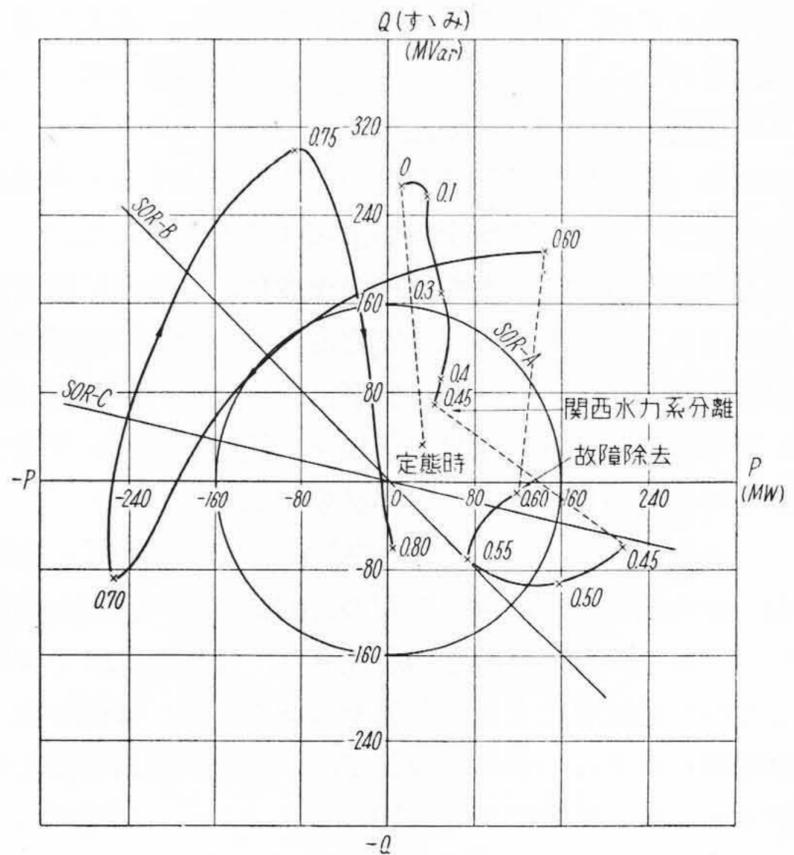
第1表中条件4および条件5は本稿に直接関係ないため割愛し、条件1, 2, 3および6の計算結果を要約すると下記のようになっている。

(1) 条件1:- 北方—岩倉間の3線地絡故障のため、関西系 G_5 は出力を減じて加速し、

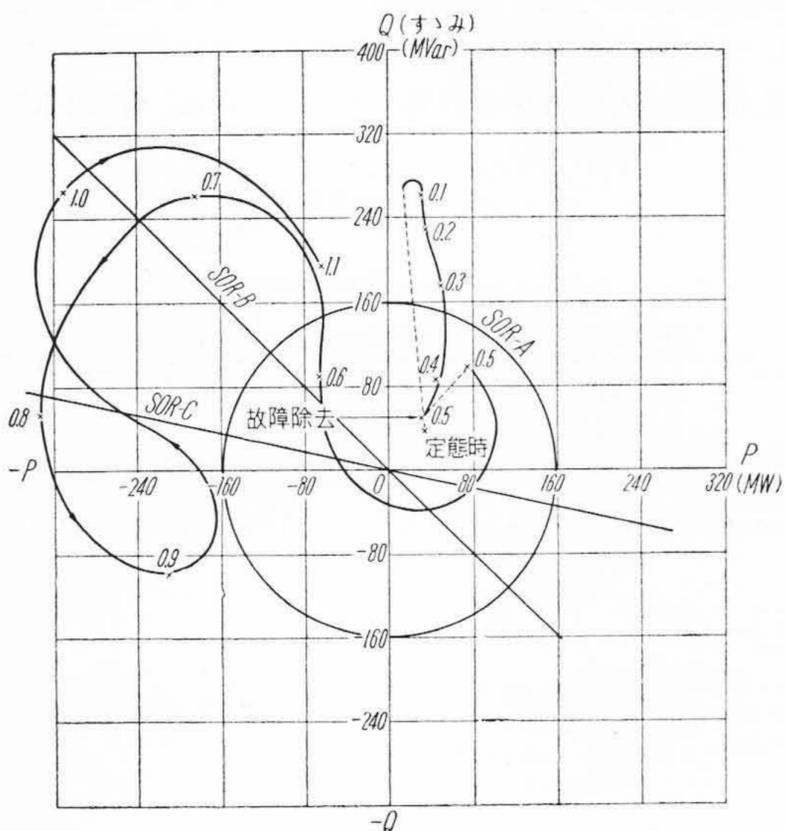
逆にほかの発電機群 $G_1 \sim G_4$ は減速することとなり、約0.8秒で関西側と北陸側の二つの大きな系統間で同期外



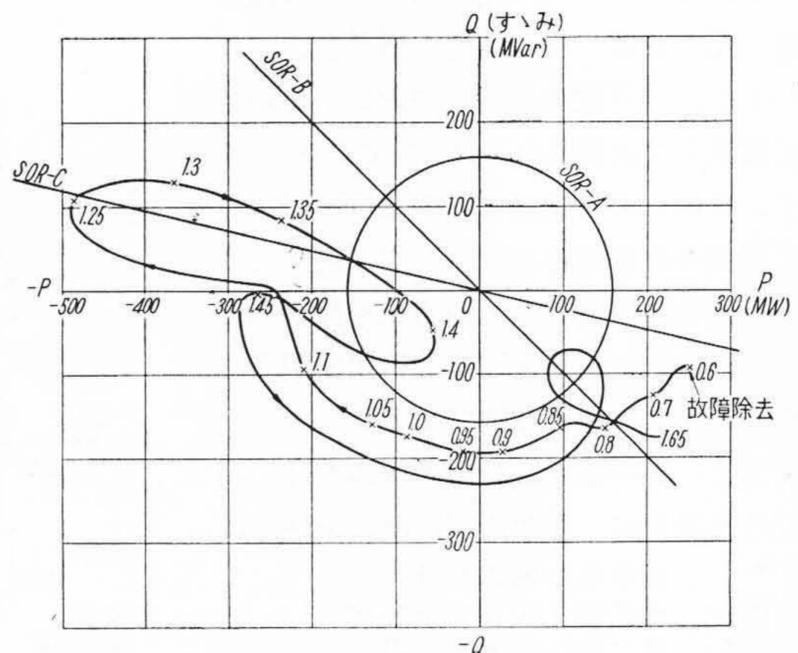
第3図 電力ベクトル軌跡 (条件1)



第5図 電力ベクトル軌跡 (条件3)



第4図 電力ベクトル軌跡 (条件2)



第6図 電力ベクトル軌跡 (条件6)

れを生ずる。

(2) 条件 2:- 富山変電所附近の 3 線地絡故障により $G_1 \sim G_4$ はその出力を減じて漸次加速し、一方 G_5 は $G_1 \sim G_4$ の出力減少のため逆に出力を増加し減速する。この結果条件 1 と同様に関西側と北陸側の間で同期外れを生ずる。

(3) 条件 3:- 富山変電所附近の 3 線地絡故障を想定し、さらに実情に即するよう故障発生後 0.45 秒にて関西水力系を分離した場合について検討したものである。条件 1, 2 においては、いずれも関西側と北陸側が、あたかも 2 機系のごとく相互に同期外れとなつたが、条件 3 では様相は若干異なり、 G_2, G_3, G_4 は一団となつて減速し、 G_1 も減速するがその傾斜は非常にゆるやかであつて、 G_5 との相差角は次第に増加するが、やや同期を保つような傾向にあり、結局全体として 3 機系統のごとき動きを示している。

(4) 条件 6:- 富山変電所附近の 2 線短絡故障により $G_1 \sim G_4$ は加速し G_5 はわずかつつ減速する。0.5 秒程度で故障を除去すれば全系統の安定度は維持され、また故障除去が 0.6 秒程度に長びいて同期外れに到つた場合でも 1 滑りで系統分離すれば、北陸系統としては安定度を害されることはないと考えられる。

上記の条件 1, 2, 3 および 6 において、継電器設置点北笹津開閉所における電力ベクトル軌跡を示したものが、第 3 ~ 6 図である。同図中には後に述べる継電器特性をあわせ記載した。

以上の検討結果から、この系統の安定度を維持するためには、3 線短絡に対しては約 0.25 秒、2 線短絡に対しては約 0.5 秒以内に故障を除去することが必要であると、結論づけられているが一方故障継続時間が若干長びいて同期外れに移行した場合にも、連繋点において速かに系統分離を行えば、少くとも一系統は安定度を維持できる傾向のあることがあきらかにされている。

さて、継電器設置点の北笹津開閉所において上述の同期外れ現象を眺めたとき、電力ベクトル軌跡からもあきらかなように単純な 2 機系の場合とは異なり、かかる多機系においては非常に複雑になるのは止むを得ない。また、条件 1, 2 および 6 は見方を変えれば単に関西系に属する 2 機間の同期外れにすぎないが、本継電器はその目的上、かかる場合にも確実に動作することが要求される。したがつて、これを検出する継電器としては、過電流状態における電力ベクトルの変化を利用することが、もつとも簡単確実な方法である。

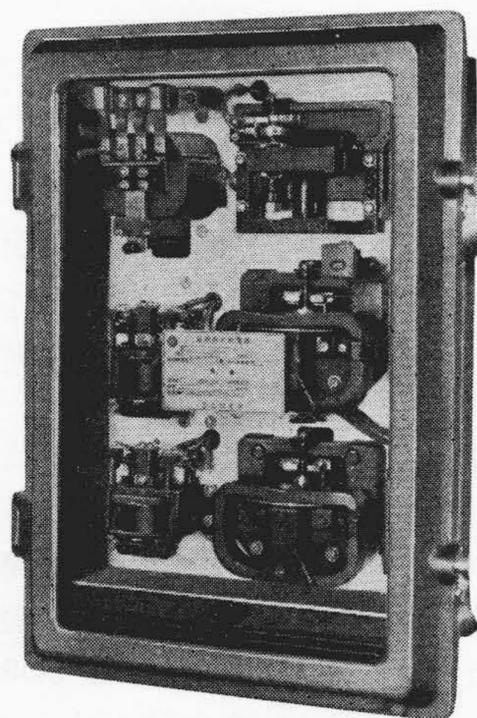
以上の見地から、第 3 ~ 6 図の電力ベクトル軌跡を基礎として、継電器特性とくに電力ベクトルの変化を検出する電力方向要素の力率特性や起動要素の整定を検討することとした。上述のベクトル軌跡は一計算例であり、

条件が異なればもちろんその軌跡を異にするであろうが、この結果は全体の傾向を代表するものであると考えた。

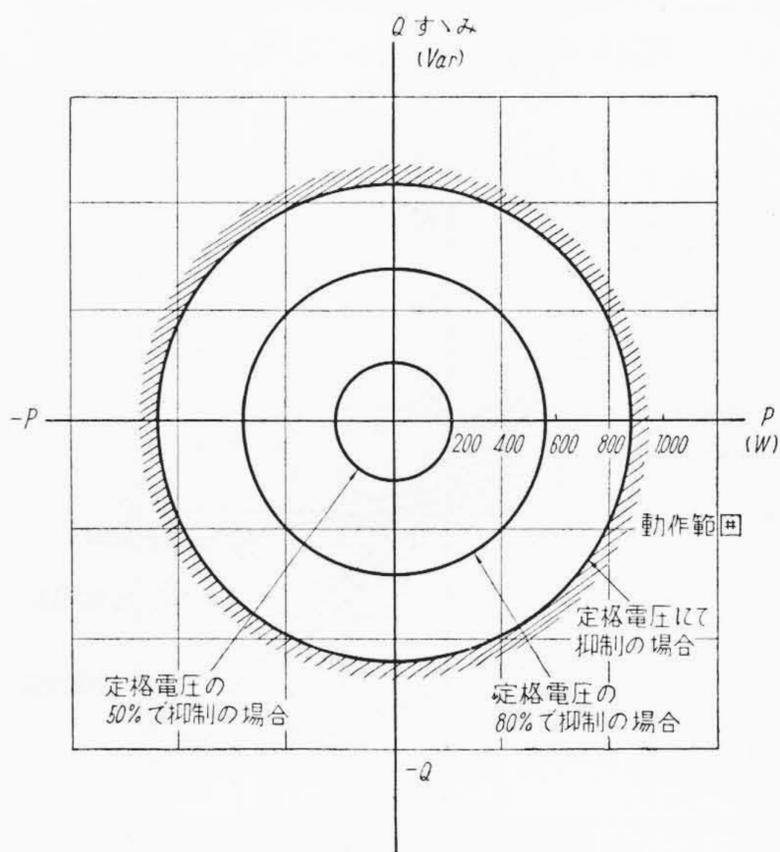
〔III〕 継電器の構造および整定

KS 型同期外れ継電器はすでに発表した同期機用同期外れ継電器⁽¹⁾と、その構成をほぼ同じくするものであるが、電力系統用として

- (1) 継電器設置点における平常運転時の電力はその方向が一定しておらぬこと
- (2) 同期外れの際は継電器設置点の電圧が大幅に低下し、特に電気的中心になつた場合は電圧は零ともなること



第 7 図 KS 型同期外れ継電器



第 8 図 起動要素の動作特性

(3) 継電器設置点からみた両側の系統の大きさが系統運営状況により相当変り、したがって同期外れ時の故障電流も大きく変化すること

などの条件においても十分動作しうるごとく内部要素の構造、特性に検討改良を施したものである。

この KS 型同期外れ継電器(第 7 図)は起動要素、電力方向要素および 3 個の補助要素から構成されている。以下これらの構造、特性につき説明する。

(1) 起動要素 (SOR-A)

起動要素は高速度動作を行わせるために誘導環型電圧抑制付過電流継電器となつている。平常運転時には動作しないようにタップを整定し、短絡故障や同期外れの際の過電流により動作する。その動作特性は動作回転力ならびに抑制回転力を制御バネ力、摩擦反抗力などに比し大きくすることにより次式で示される。

$$I_s \geq k_s E_s \dots\dots\dots (1)$$

ここに k_s : 継電器定数

I_s : 起動要素の電流線輪に流れる電流

E_s : 起動要素の電圧線輪に印加される電圧

この要素の力率特性は独特の補償によつてほぼ円特性に調整されているので(1)式の両辺に E_s をかければ動作特性は

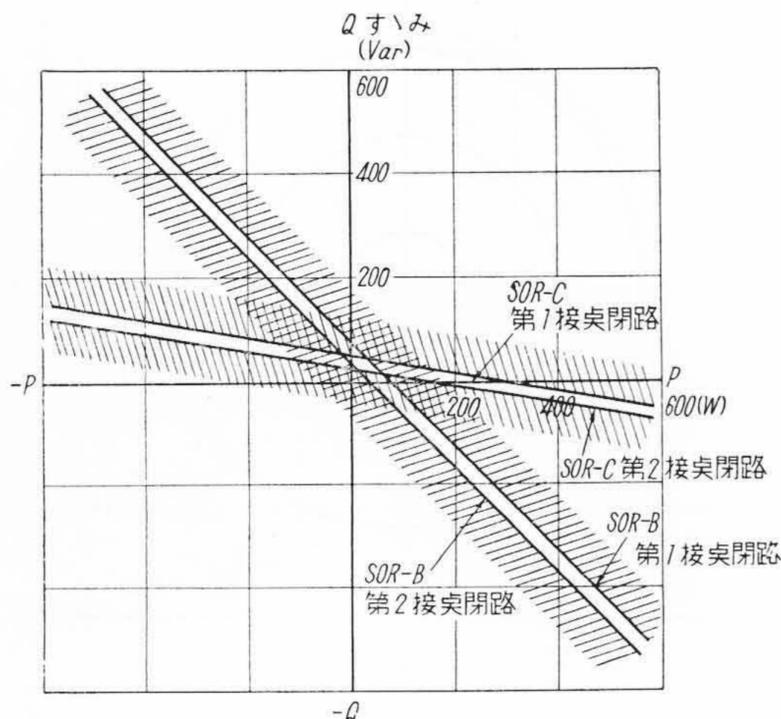
$$E_s I_s \geq k_s E_s^2 \dots\dots\dots (2)$$

となり動作皮相電力が抑制電圧の二乗に比例することとなる。この特性を電力座標上にあらわすと第 8 図となり抑制電圧の降下と共にその動作はきわめて鋭敏となる。

(2) 電力方向要素 (SOR-B および SOR-C)

本要素は二重動作接点付誘導円板型構造で、無励磁のときその一方の接点が接触するごとくバネを張つてある。したがって動作特性は次式で示される。

$$P_1 \geq k_a E_a I_a \cos(\theta - \gamma_a) \geq P_2 \dots\dots\dots (3)$$



第 9 図 電力方向要素の動作特性

ここに k_a : 継電器定数

E_a : 電圧線輪に印加される電圧

I_a : 電流線輪に流れる電流

θ : E_a と I_a との位相角 (電流おくれ)

γ_a : 最小動作電流の電圧よりのおくれ角

P_1, P_2 : 制御バネにより定まる動作電力

本継電器には 2 個の電力方向要素が含まれており、その特性を座標上にあらわすと第 9 図のごとくなる。

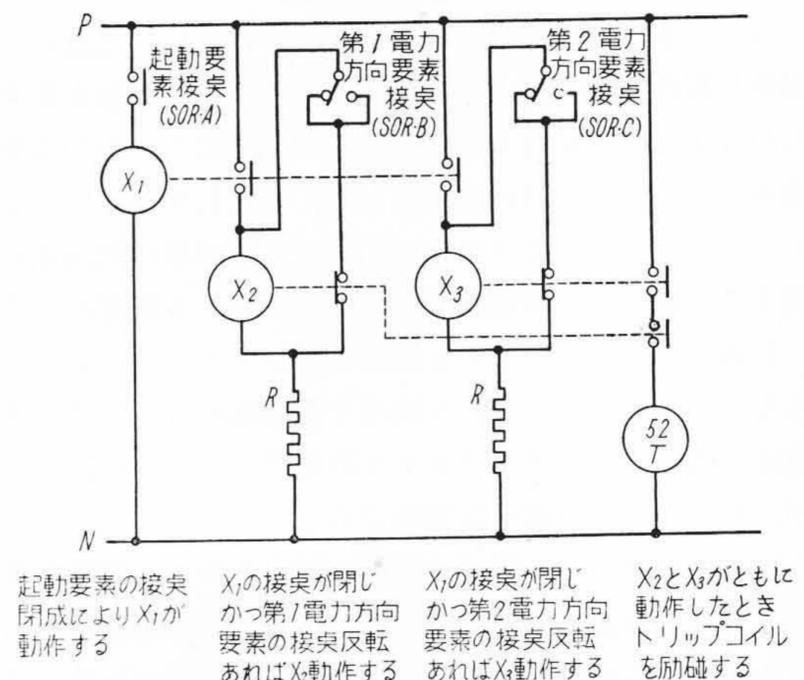
(3) 補助要素との組合せ回路

以上の各要素に適宜位相の電圧、電流を与えると、線路の電圧、電流の変化に応じそれぞれ動作するが、短絡と同期外れを判別する必要があり、3 個の補助要素を第 10 図のごとく組合せ使用する。起動要素用の補助要素 X_1 には適宜の限時をもたせてあり、起動要素が動作したのち一定限時をへて電力方向要素の接点回路を生かすようにしている。短絡故障の際は起動要素と電力方向要素の動作が同時にはじまり、電力方向要素の接点開閉が終つてから X_1 の接点が入るので補助要素 X_2, X_3 は動作しない。同期外れにあつては、起動要素が動作してからある時限をへて電力方向要素が動作し、この間に X_1 がすでに動作しているのでは、 X_2, X_3 はそれぞれ電力方向要素の動作にしたがい動作し、引外し回路を閉成する。 X_2, X_3 の動作時間は非常に早く方向要素の反転切換り時間に対して十分の余裕があるのでその動作は確実である。

(4) 整 定

起動要素ならびに電力方向要素の感度、力率特性、限時およびこれら要素に印加する電圧、電流の位相をいかに選ぶかは本継電器製作上もつとも重要なことであるが、われわれは与えられた外部状況から下記のごとく整定を行つた。

(A) 起動要素の感度は継電器設置点における最大皮



第 10 図 同期外れ継電器直流回路接続

第2表 電力方向要素の整定

	記号	電圧線電圧	電流線電流	力率特性
第1電力方向要素	SOR-B	b-c相	b相	10°すゝみ
第2電力方向要素	SOR-C	a-b相	a相	50°すゝみ

相電力で不動作なるとく選定すれば良く、今回は北笹津開閉所における現在ならびに黒部系増設後の予想電力値によつてタップ値を定めた。

(B) 電力方向要素の感度は鋭敏なる程良いが、その限時は補助要素 X_2 , X_3 の動作が可能なる限り少く、かつ最大故障電流の場合に反跳なきよう調整した。また、無電圧時における動作を確実にするため制御バネに偏倚を与えた。

(C) 電力方向要素の位相特性は、前記した各種故障条件における電力ベクトル軌跡の計算結果たる第3~6図を対象として検討し、同期外れをもつとも容易にかつ高速度で検出できるような位相とするために第2表のごとく整定した。

(D) 補助要素の限時は起動要素ならびに電力方向要素の限時に関連するものであるが、同期機同期外れ継電器の場合と同様に考え選定した。

〔IV〕 模擬送電線による試験

本継電器完成後、その動作を確認するために、模擬送電線を使用して〔II〕に述べた条件1, 2, 3および6の各条件のもとで、故障および同期外れを発生せしめ、継電器の動作を試験、検討した。以下その概略を述べる。

(1) 模擬試験回路の構成

模擬試験は第2図の系統をさらに簡易化し等価的な4機系統に置換して行つた。第11図がその試験回路図である。

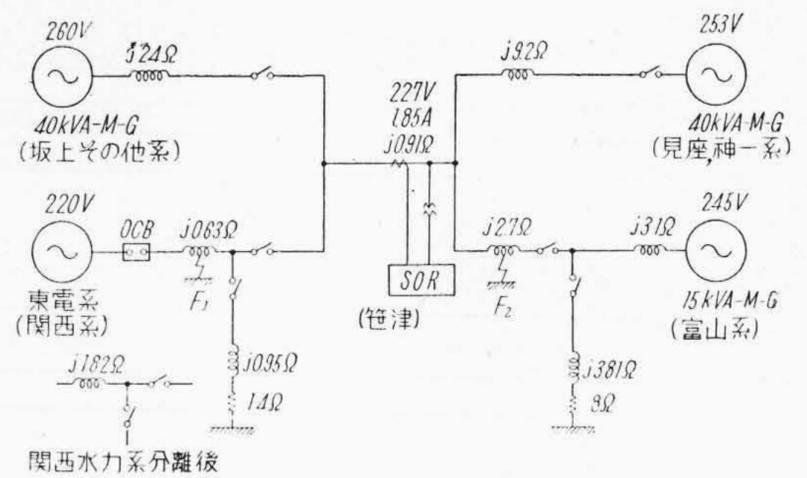
第11図の試験回路は日立製作所日立研究所の模擬送電線を使用して、電圧、電流およびインピーダンスの関係を模擬したものであつて、実系統から模擬系統への電圧、電流、電力およびインピーダンスの変換比は第3表に示したごとくである。

(2) 試験条件および試験方法

常時の運転状態としては第11図に記入したような電圧、電流分布をとらせた。

故障は第11図中の F_1 点および F_2 点を故障点とし、故障発生装置によつて2線および3線短絡を発生せしめた。また同期外れは各同期機の駆動用電動機を速度を上昇または下降させて行つた。さらに関西水力系分離なる操作は、第11図で関西系をその下部に記した回路に切換えることによつて行つた。

さて以上の各操作の組合せにより、第4表に示したような各条件を設定して試験を行つた。第4表にはその結



第11図 模擬試験回路

第3表 電圧、電流、電力およびインピーダンスの変換比

	実系統	模擬系統	変換比
電圧	154 kV	220 V	700/1
電流	185 A	1.85 A	100/1
電力	51 MVA	730 VA	70,000/1
インピーダンス	—	—	7/1

第4表 模擬送電線による試験結果

	試験条件	継電器動作	判定
故障	F_1 点 3相短絡	×	正
	F_1 点 a-b 2相短絡	×	正
	F_1 点 b-c 2相短絡	×	正
	F_1 点 c-a 2相短絡	×	正
	F_2 点 3相短絡	×	正
	F_2 点 a-b 2相短絡	×	正
	F_2 点 b-c 2相短絡	×	正
	F_2 点 c-a 2相短絡	×	正
同期外れのみ	関西系と富山系の間で同期外れ	○	正
故障後同期外れ	F_1 点 3相短絡発生→関西系以外の各機速度上昇→故障除去→同期外れ (条件1)	○	正 正
	F_2 点 3相短絡発生→関西系以外の各機速度上昇→故障除去→同期外れ (条件2)	○	正 正
	F_2 点 3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→同期外れ (条件3)	○	正 正 正
	F_2 点 bc 2相短絡発生→関西系以外の各機速度上昇→故障除去→同期外れ (条件6)	○	正 正

注：継電器動作 ○……動作
×……不動作

果もあわせて記入してある。

つぎに測定には電磁オシログラフを用い、継電器設置点における電圧、電流および接点動作状況を実測した。そしてこの結果より電力ベクトル軌跡を求め、軌跡上での継電器動作状況を追跡した。

(3) 試験結果および検討

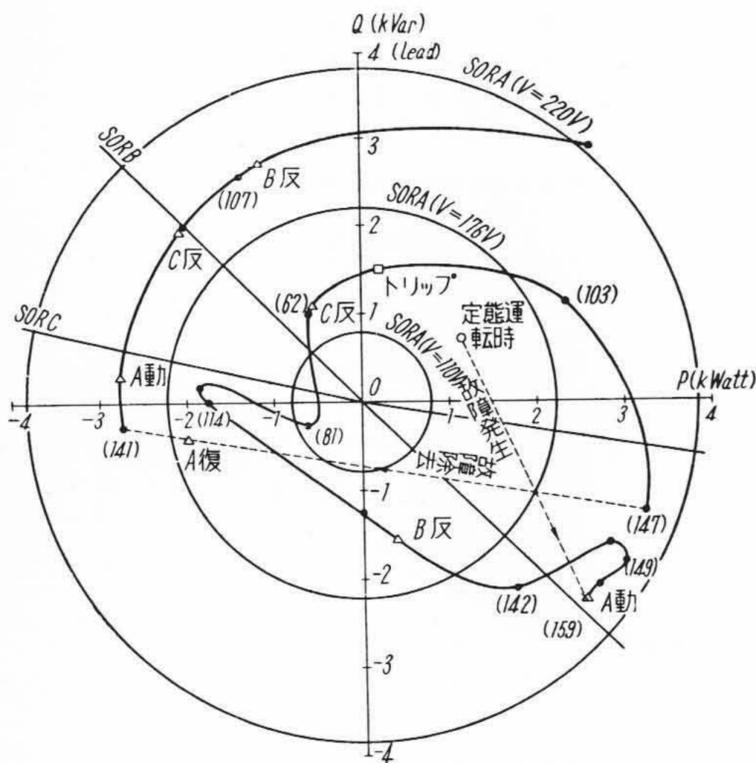
試験結果の概要は第4表に記したが、以下順を追つて



第12図 同期外れ継電器の動作オシログラム

検討する。

故障のみを発生させた場合には本継電器はいずれも不動作であった。すなわち短絡故障による誤動作は皆無であることがあきらかになった。



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。他もこれに準ず。
 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

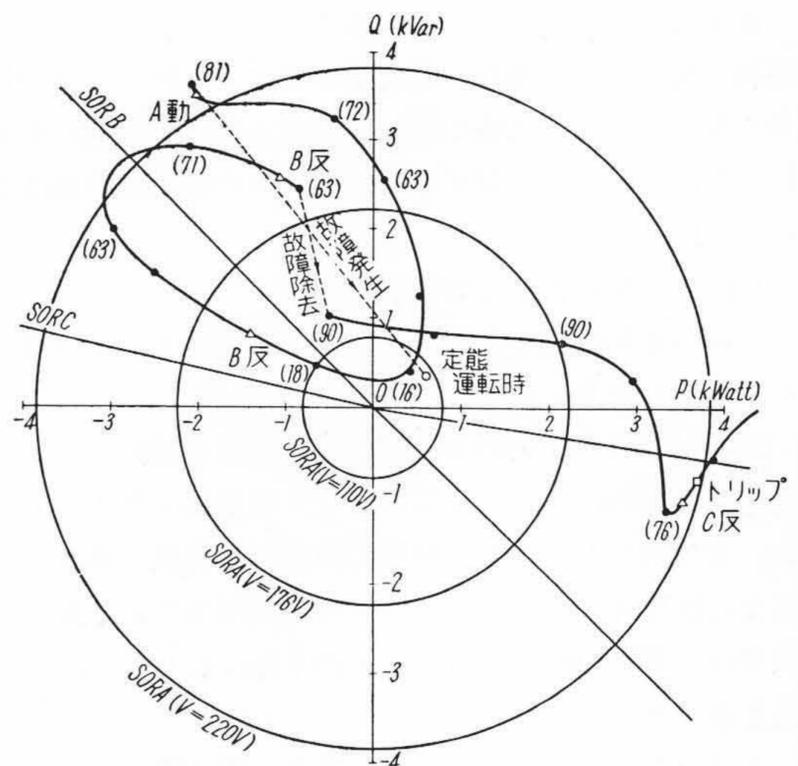
第13図 電力ベクトル軌跡と継電器動作 (条件1)

同期外れのみの継電器動作試験は、本継電器がどの程度速い滑り速度まで追従できるかを試験するために、関西系と富山系の2機間で同期外れを発生させたものである。この場合、滑り同期が50〜ベースにて9〜、すなわち0.18秒まで動作可能との結果をえた。本継電器は同期外れを最初の1滑り中に検出するものであり、実系統における実際の同期外れ現象から考えて十分高速度で確実な動作が期待される。

つぎに〔II〕に述べた各条件に対応して、故障から同期外れに到る場合の継電器動作を検討した。第12図はその動作オシログラムの一例である。これらのオシログラムから電力ベクトル軌跡および継電器各要素の動作点を求めて検討を行った結果が第13〜16図である。

模擬試験における電力ベクトル軌跡は実系統の場合の計算結果(第3〜6図)とはかなり異つたものであるが、これは同期機の慣性定数や時定数を模擬していないことに由来する点が大きいのと考えられる。これらの軌跡を一致させることは困難であるが、試験はこの一致を実現することではなく、起りうる種々の同期外れ現象に対して継電器が理論通り応動することを確認する点に主眼をおいた。この点さえ確認できれば第3〜6図に示したような軌跡を描く場合にも所期通り動作すると考えて差支えない。

第13図(条件1)においては、まず F_1 点に三相短絡



第14図 電力ベクトル軌跡と継電器動作 (条件2)



特 許 と 新 案



最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その2)

(第28頁より続く)

区 別	登録番号	名 称	工場別	氏 名	登録年月日
実用新案	457267	電力用蓄電器保護装置	日立工場	池田正一郎	32. 2. 5
"	457268	分割刷子器	日立工場	滑川清	"
"	457272	タップ切換器付変圧器	日立工場	沢幡寅治	"
"	457278	押釦開閉器	日立工場	桜木忠治	"
"	457279	押釦開閉器の可動子	日立工場	白土忠治	"
"	457280	複動押釦開閉器	日立工場	白土忠治	"
"	457283	過電流引外装置	日立工場	白須田長治	"
"	457288	ボイラードラム内の水面安定装置	日立工場	菅原三	"
"	457289	ボイラードラム	日立工場	菅原三	"
"	457293	逆流装置	日立工場	菅原三	"
"	457296	配電箱扉鎖錠装置	日立工場	前木村重久	"
"	457299	変圧器による周波数変換装置	日立工場	丹白土栄寿	"
"	457300	エレベータ信号装置	日立工場	前川敏明	"
"	457301	自動燃焼制御装置	日立工場	酒井真平	"
"	457302	変圧器巻線	日立工場	吉岡千吉	"
"	457241	ノズル兼用止弁装置	笠戸工場	谷崎義一	"
"	457245	運搬車自動選定遠方操作装置	笠戸工場	中村正信	"
"	457246	運搬車自動選定遠隔操作装置	笠戸工場	田中昭一	"
"	457247	運搬車荷卸し遠方操作装置	笠戸工場	藤井健一	"
"	457248	運搬車荷卸し操作装置	笠戸工場	藤井健一	"
"	457290	嵌込式一体窓の固定装置	笠戸工場	五中昭一	"
"	457250	電気ショベル用送電ケーブルさばき装置	亀有工場	藤岡多喜男	"
"	457253	天井クレンの制御装置	亀有工場	酒井春雄	"
"	457254	シンキングポンプ	亀有工場	安河内春明	"
"	457255	渦巻ポンプの回転軸摺動装置	亀有工場	江守忠哉	"
"	457260	潜水モータ付深井戸ポンプ	亀有工場	江木健三	"
"	457271	パワショベルなどにおけるブーム過巻防止装置	亀有工場	大貫康志	"
"	457273	パワショベル系掘削機の旋回装置	亀有工場	寺田義進	"
"	457284	油圧式回転型倣い削り装置	川崎工場	久保田武雄	"
"	457286	油圧式揺動倣い削り装置	川崎工場	久保寺武雄	"
"	457297	バイトクランプ装置	川崎工場	久保寺武雄	"
"	457298	双物回転式自動旋盤の加工物取立装置	川崎工場	松本源次郎	"
"	457244	平衡型継電器	多賀工場	橋本三男	"
"	457249	限時継電器	多賀工場	阿武芳郎	"
"	457261	油制動装置	多賀工場	広島照裕	"
"	457263	单相誘導電動機	多賀工場	藤野照雅	"
"	457276	電動機取付装置	多賀工場	小島義男	"
"				島田四忠	"
"				安益子三	"

(第56頁へ続く)