U.D.C. 621.316.925.4 : 621.314.21

最近の変圧器用継電器について

Recent Relays for Transformer

渡井三夫*
Mitsuo Watai

内容梗概

最近の大容量変圧器は三巻線式のものが多く，この高速度保護は技術上種々の問題を含んでいる。

日立製作所ではKYT_{13}形三巻線変圧器用高速度比率差動電流継電器，X-KYT形比率継電器補助装置などを完成し，多数の実績をみている。本文ではこれらの原理，特性，過渡試験結果などにつき説明する。

1. 緒言

変圧器の内部短絡保護に対しては，その通過電流によって抑制力，差電流によって動作力を生ずるようないわゆる比率差動電流継電器が使用されるが，これはその製作，実用上次のような問題を含んでおり，これらに対して完全な対策が施されているものでないと給電，系統運営上特に重要な地位にある変圧器の保護継電器として使用することができない。すなわち，

（1） 変圧器の無負荷投入時の励磁突入電流による誤動作を防止する必要がある。

（2） 変圧器の一，二次または三次の各端の変流器はそれぞれ定格，形式を異にし，特に構造上ブッシング形になっている関係上大電流外部故障時に，その特性の不ぞろいにより差電流を生じやすい。

（3） 三巻線変圧器の保護継電器は外部故障に対し，他の二巻線から故障電流がどのように供給される場合でも安定した比率特性が得られなければならない。

（4） 変圧器は故障に際し定格電流の20倍程度の故障電流が流れることを考慮しなければならない。これは単に変流器の不ぞろいにより差電流を流すだけでなく，高速度継電器においては故障除去時抑制力が瞬間にして消滅しその反跳により誤動作を生じやすい。

などの問題がある。

日立製作所では最近これらの点について静特性上も，過渡特性上も十分検討されているKYT_{13}形高速度比率差動電流継電器，X-KYT形比率継電器補助装置を完成し，すでに多数の使用実績を得ているのでこれらについて説明する。

2. KYT_{13}形比率差動電流継電器

この継電器は三巻線変圧器用の比率継電器で，前記継電器の問題点のうち（2）～（4）項については継電器に可飽和変流器を内蔵し，その非直線性により主変流器の比誤差の大きくなりやすい大電流域において動作比率を大にし，かつ外部故障時に必要以上に大きな抑制力を生じないようにしてあり，（1）項については後述するX-KYT形補助装置との組み合わせにより誤遮断が防止されるようになっている。

2.1 動作原理および構造

第1図は本継電器の動作原理説明図で，図においてTrは被保護変圧器，CT_1，CT_2，CT_3は各巻線回路の主変流器，SCT_1，SCT_2，SCT_3はこれら主変流器の二次回路に接続された可飽和変流器，RC_1，RC_2，RC_3は継電器の抑制線輪，OCは動作線輪である。継電器はそれぞれ誘導環形の3個の抑制素子と同じく誘導環形の動作素子より成り，それらの可動部は同一回転軸に取り付けられ，各抑制素子の抑制回転力の和と，動作素子の動作回転力を比較動作するようになっている。

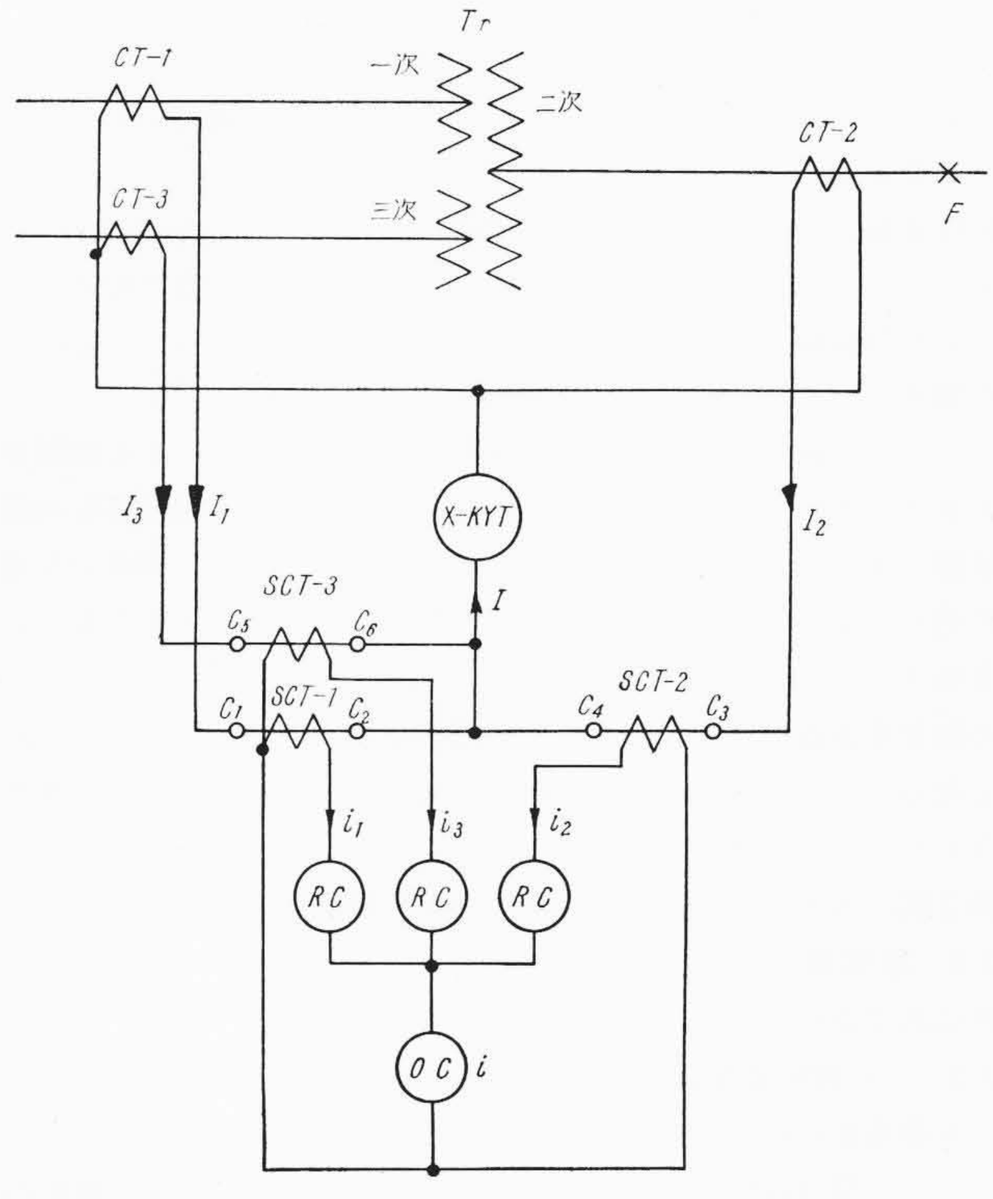
このような構成の継電器においては可飽和変流器の飽和特性，それに伴う波形ひずみと継電器の回転力，分流効果などを考えるとその理論的解析はほとんど不可能であるのでここでは飽和特性により略説する。

各可飽和変流器の一次および二次電流をそれぞれI_1, I_2, I_3およびi_1, i_2, i_3とし，その一次，二次電流特性を**第2図**のOABのようなものとし，継電器は一つのSCTの一次にI_0すなわち二次の飽和電流よりやや小さい電流i_0がRC→OCに流れるとき動作するように調整されているものとする。

このようになっていると内部故障で電源が一つの巻線側のみにある場合はもちろんI_0以上の故障電流に対して動作し，さらに二または三巻線のいずれもが電源に接続されている場合にもそれらから供給される故障電流の和がほぼI_0に達すれば動作する。

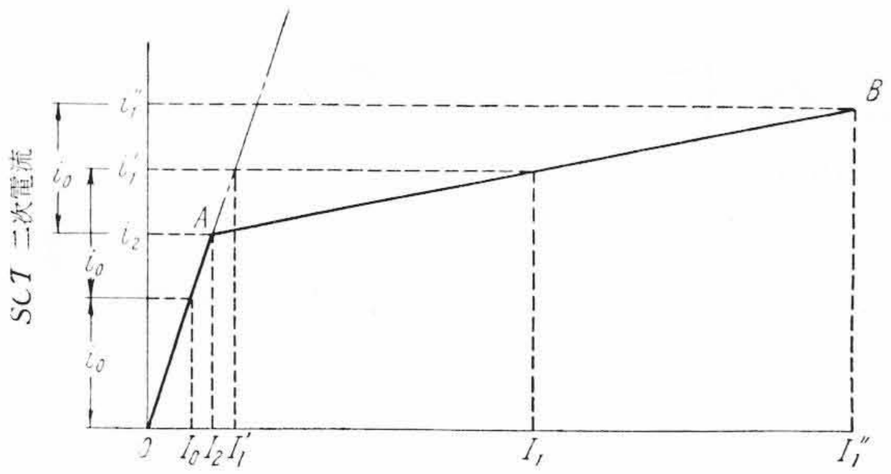
次に外部故障の場合の動作であるがそれには電源が**第1図**の一次巻線側のみにあり二次巻線の外部F点において故障が発生した場合と電源が一次，三次巻線ともにありF点で故障が発生した場合とが考えられる。

まず前者について考えるに主変流器の特性がよく一致する場合に

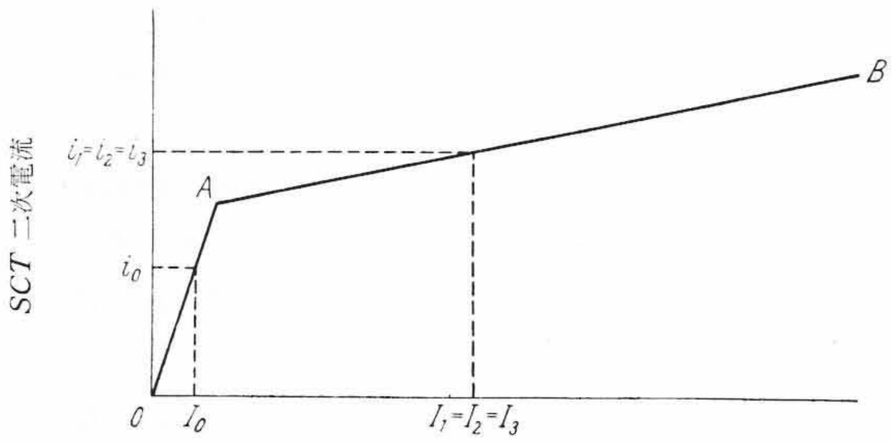


第1図 KYT_{13}形継電器の動作原理説明図

* 日立製作所那珂工場



(A) 一電源の場合



(B) 二電源の場合

第2図　可飽和変流器の特性と継電器の動作の関係説明図

はもちろん継電器は誤動作しない。特性が一致しないために $I_1>I_2$ の場合についてみると継電器は SCT の二次電流 $i_1-i_2=i=i_0$ において動作する。**第2-A図**において I_2 が SCT の直線域たとえば I_0 のようなときにはその二次電流が $i_1-i_0=i_0$ なるような電流 I_1 がその一次に流入しなければ誤動作に至らない。これは SCT の特性が直線の場合二次差電流 i_0 を生ずるような電流 I_1' に比べはるかに大きく，継電器の動作比率 $\gamma=(I_1-I_2)/I_2$ は SCT の特性の飽和点を利用することによりある電流値以上で急激に大きくなる。I_1，I_2 とも飽和点（A）を越すと比率は前者の場合よりさらに大きくなる。それとともに抑制電流も SCT の飽和電流で制限されるので過大抑制力の消滅に伴う反跳動作のおそれもない。

次に二電源の場合についてみるに，理解を容易にするため $I_1=I_3$ すなわち相等しい故障電流が両電源から供給される場合を考える。いま**第2-B図**のように一例として，$I_1=I_3=I_2$ なる場合についてみると動作線輪には $i_1+i_3-i_2=i$ なる電流が流れ，この電流は SCT の飽和二次電流 i_s となりほぼ一定値となる。ここで継電器の抑制回転力は各抑制線輪によって生ずる回転力の機械的和をとっているので各抑制素子の i_s によって生ずる抑制力の3倍になる。

したがって継電器の抑制力と動作力の関係が $3\times$（i_s による抑制要素1素子の回転力）$>i_s$ による動作力になっていれば継電器を不動作状態に保つことができる。このことは逆に抑制要素の抑制力を適当に選定することにより好ましい比率特性をうることができることを意味する。

可飽和変流器の二次差電流はその飽和域においては極端なひずみ波となるので，これを直接動作線輪に流さないで電流—電圧変換器を介しフィルタを通して励磁するようになっている。

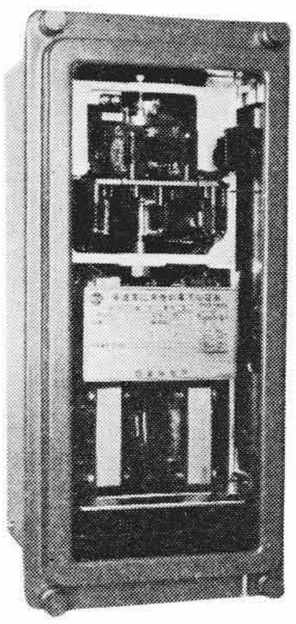
第3図は本器の外観を，**第4図**は内部接続図を示す。

2.2　継電器の特性

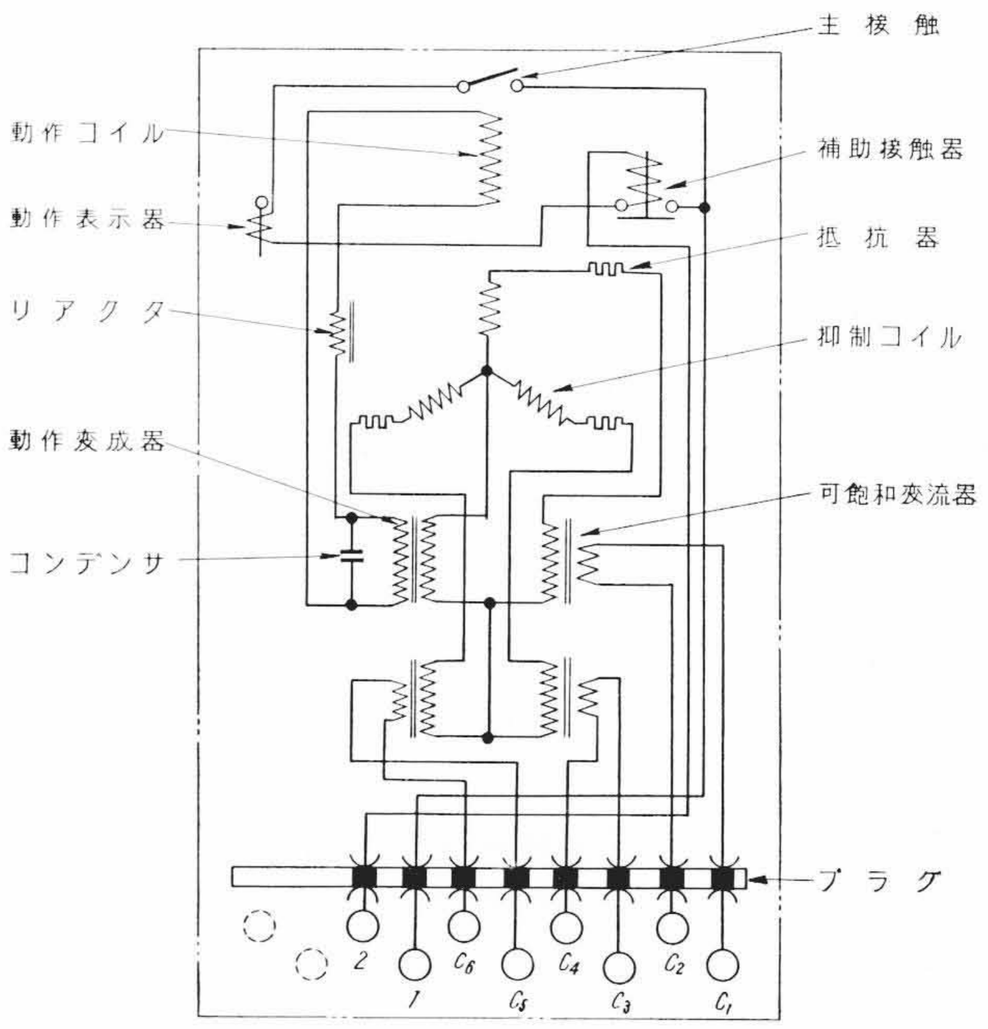
次に継電器の各種特性を示す。

2.2.1　可飽和変流器の特性

本継電器の動作特性は可飽和変流器の非直線性を利用することにより所期の特性を出しているものであるが，この理論的解析がむずかしい点より継電器の基礎的検討は可飽和変流器について負



第3図
KYT_{13} 形高速度比率差動電流継電器



第4図　KYT_{13} 形継電器の内部接続図（裏面図）

担と二次電流，差電流などの関係について実験的検討を行いこれによって継電器としての構成の可否を検討した。

第5図は継電器について各種動作条件に相当するように可飽和変流器の一次を接続しその二次差電流（継電器の動作線輪にて）を測定したもので，この特性に着目しただけでも継電器は十分に内外故障の選択ができることが推定される。

2.2.2　比率特性

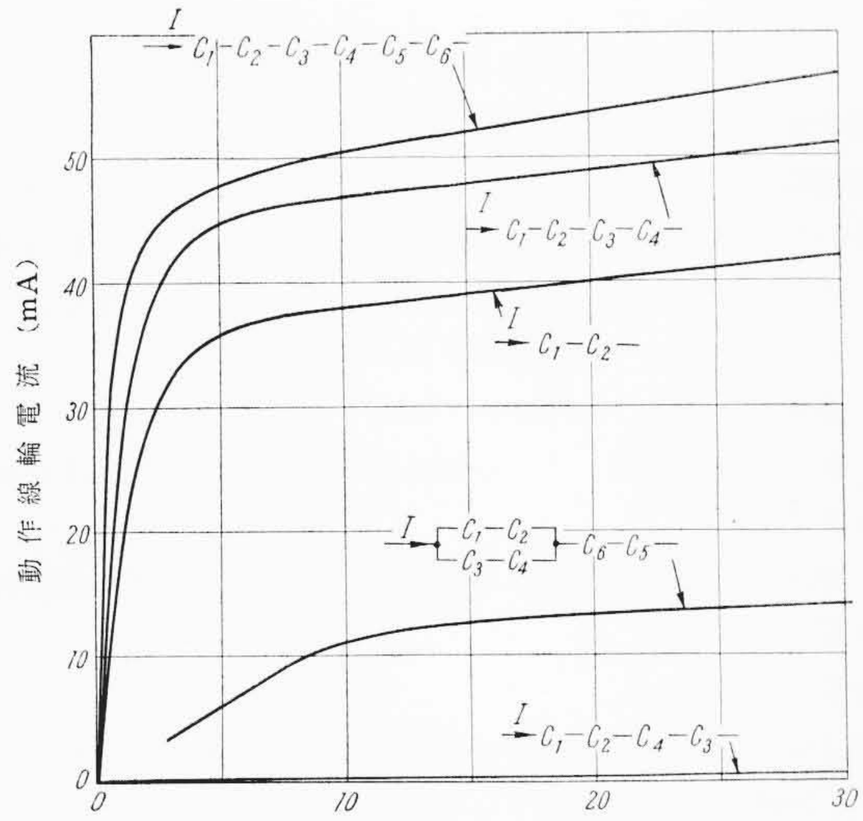
（1）　一電源の場合

第6図に一電源の場合の比率特性を示し，最小動作電流は 1.5 A，比率特性は定格電流以上において急激に増大している。この特性は流入，流出電流の位相角を同相として測定したものであるが，**第7図**は両電流を相等しくしその間に位相差を生ぜしめて動作限界を測定したものである。実際の故障に際して主変流器は比誤差，位相角誤差を生じそれら両者によって差電流を生ずるのであるが継電器は変流器のこれらの誤差に対し十分な余裕をもっている。

（2）　二電源の場合

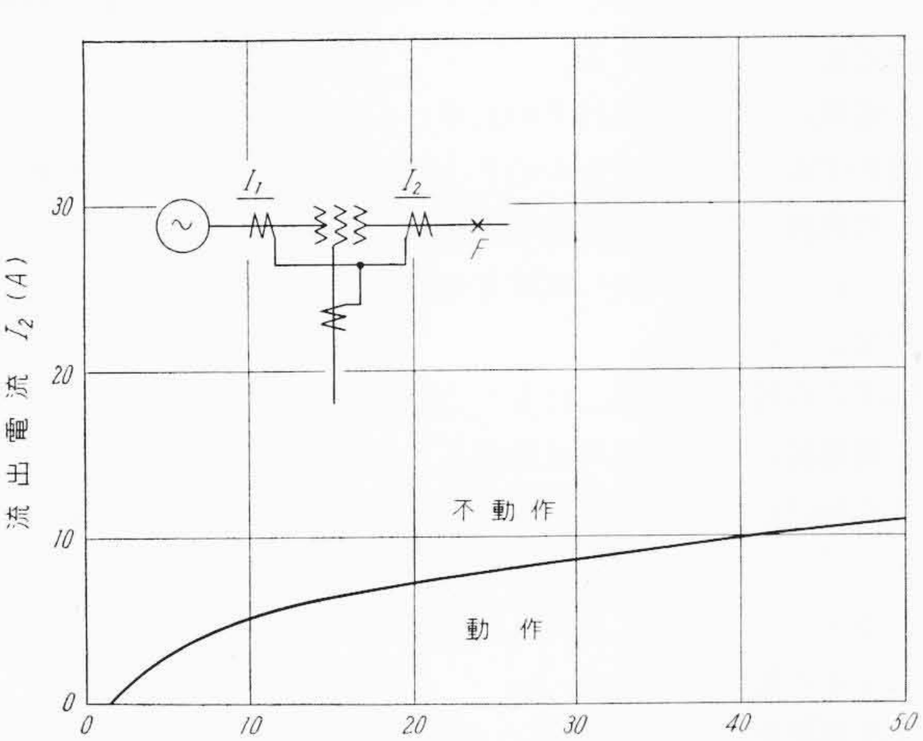
二電源の場合両電源からの故障電流の配分は電源，変圧器の容量などによって変化する訳であるが，その極端な場合としてはその一方が無電源（すなわち一電源）の場合と両電源から等分に供給される場合とを考えればよい訳である。

第8図は両電源より等分に故障電流が供給される場合（$I_1=I_3$），4:1 の割合で供給される場合（$I_1=4I_3$），および全電流が一電源から供給される場合（$I_3=0$ で一電源）の比率特性を示し，これよ



第5図　可飽和変流器の特性

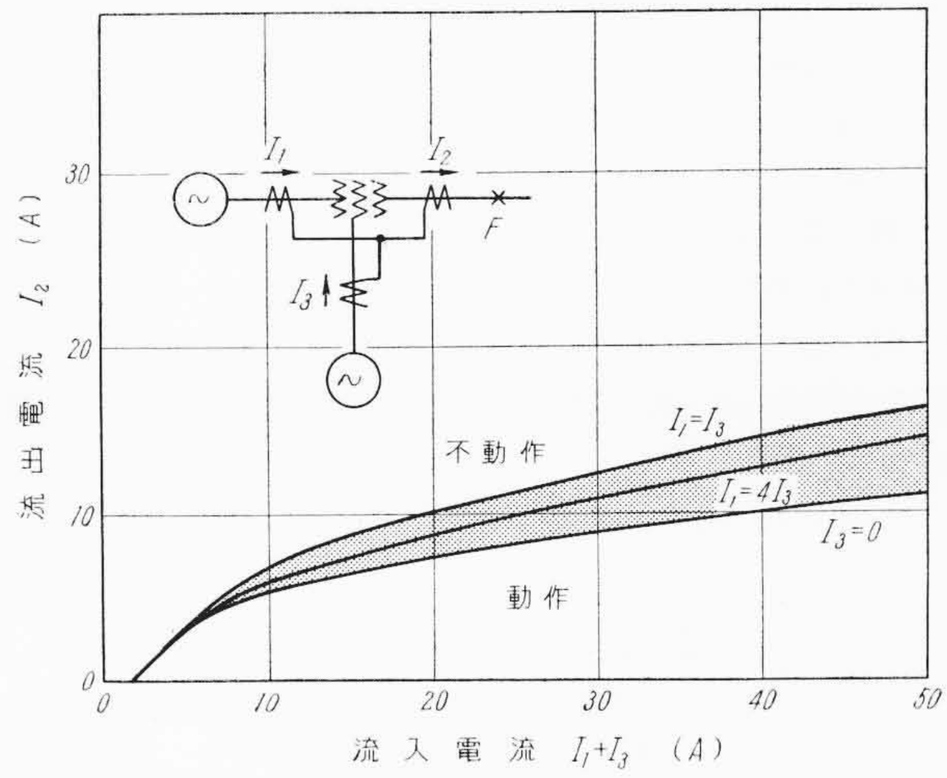
第6図　一電源の場合の比率特性



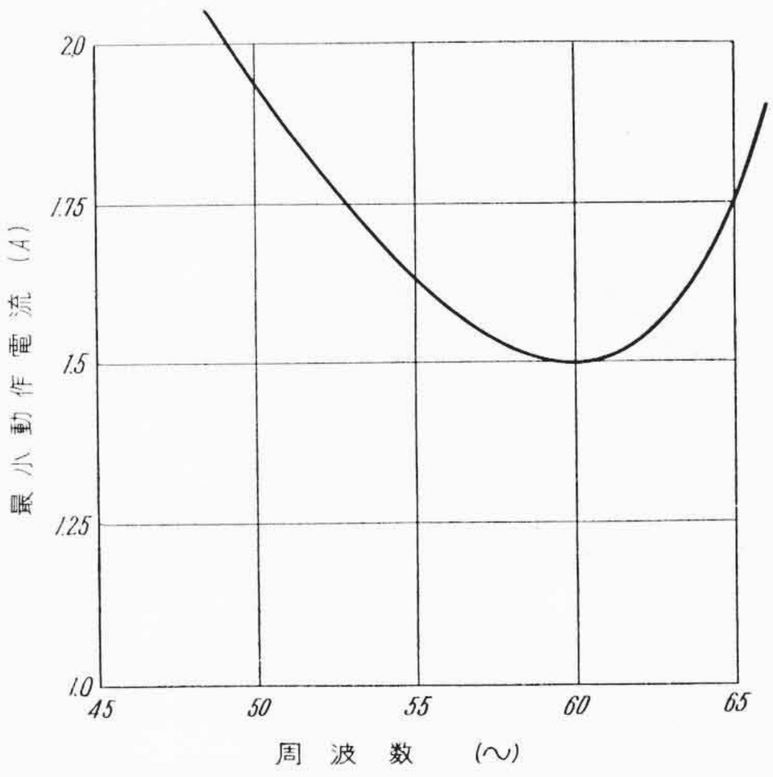
第7図　一電源の場合の位相差特性

り本器はいかなる状態においても比率特性が斜線部内にあることがわかる。

これら比率特性を見るに一電源の場合より二電源の場合のほうが若干大電流域における動作比率が小さくなっているがこれは動作原理でも説明し，また第5図の特性よりもわかるように一電源の場合には飽和変流器の二次に差電流を生ぜしめないようにしたのに対し，二電源の場合には分流効果はあるにしても飽和変流器の二次飽和電流が電動回路に流れるが抑制力との関係で不動作に



第8図　二電源の場合の比率特性



第9図　周波数と最小動作電流の関係

保たれているという動作状態の差異によるものである。

しかし比率特性は定格電流程度で最小比率（35% 以上）を示し，大電流域においては数百%になり使用に際して誤動作のおそれはまったくない。

2.2.3 周波数特性

本器の動作電流は飽和変流器の二次電流によっているので大電流域においては極端な波形ひずみを生じその修正が必要である。そのため動作線輪は電流電圧変換器，フィルタを介して励磁されるようになっており，その周波数特性は電源周波数に共振している。このことは故障時その他において高調波サージの吸収などに効果的である。

第9図は 60 c/s 用の継電器の最小動作電流と周波数の関係を，第10図は周波数による比率特性の変化を示し，50～60 c/s では問題になるような特性変化はない。

2.2.4 動作時間

第11図に動作時間を示し，飽和入力によって動作するため動作時間は最小動作電流に対する入力電流の倍率が比較的小さいところからほぼ定限時になっている。

2.3 過渡特性

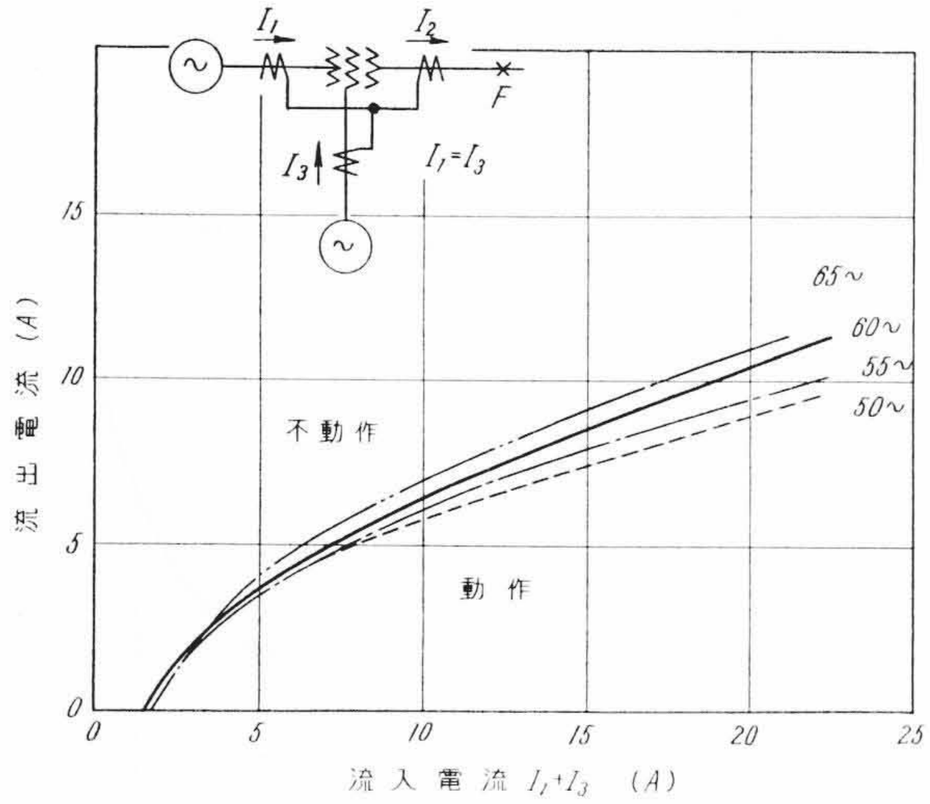
この種の高速度継電器については静特性とともに変流器と組み合わせて過渡特性試験を行うことが必要であり，本器についても原理試作品，製品試作品の二段階にわたって大電流短絡装置により過渡試験を行い内外故障における動作を確認した。

第12図は過渡試験回路で下記条件により内外故障について多数

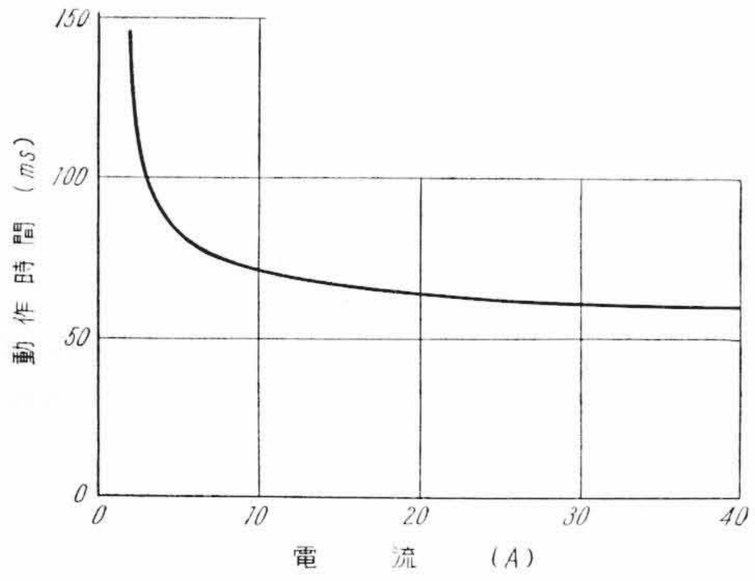
回試験を行った結果内部故障についてはもちろん動作し，外部故障については故障時，回復時とも誤動作はなかった。

変流器	U-1形　20/5 A　過電流定数5以上
電源数	1および2
故障電流	20～500 A
故障発生位相角	0度および90度
故障種別	内部，外部

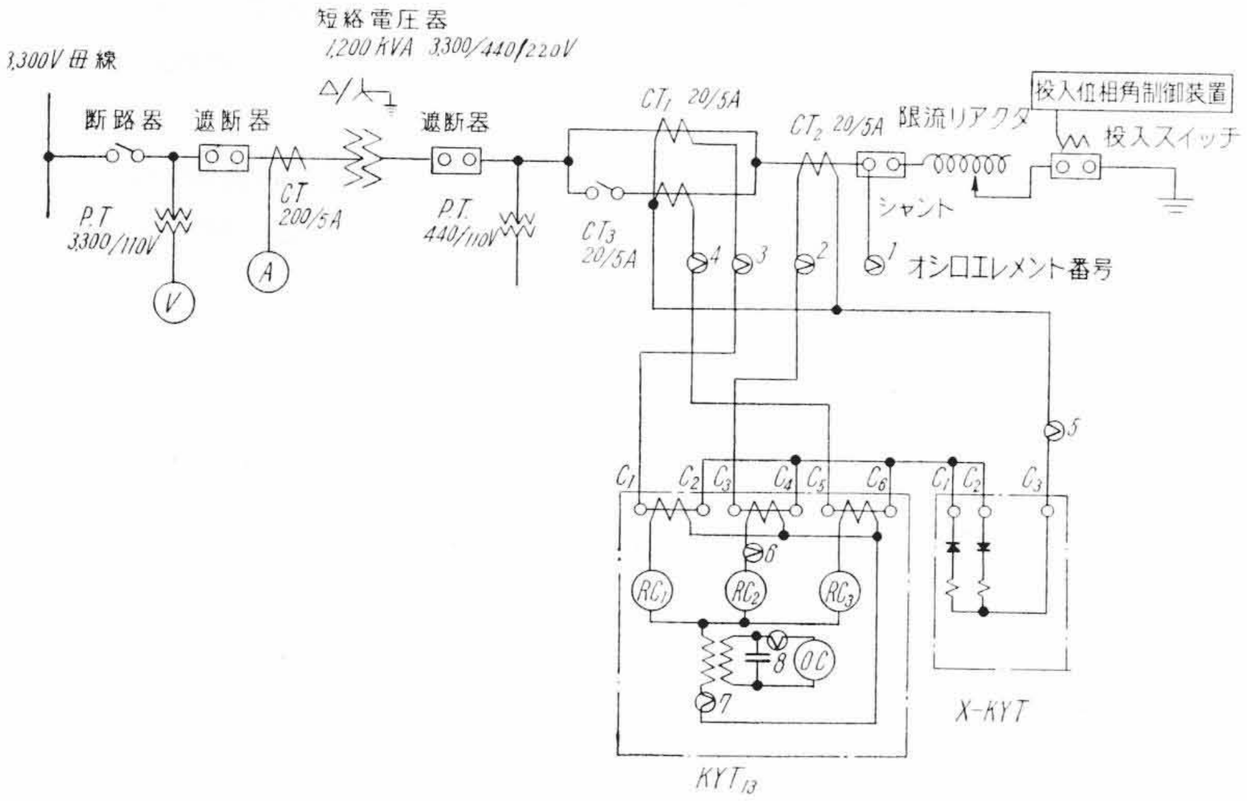
第13-A図は内部故障，**第13-B図**および**第13-C図**は外部故障のオシログラム例を示す。



第10図　周波数と比率特性の関係



第11図　動　作　時　間



第12図　過　渡　試　験　回　路

3. X-KYT 形比率継電器補助装置

変圧器を無負荷投入する際には励磁突入電流を生じ，これはそのまま差動回路に流れる。突入電流は量的にも大きくかつ減衰時間が比較的長いため高速度継電器はもちろん，場合によっては動作時間のおそい誘導円板形の比率継電器さえ誤動作せしめるに至る。

このためになんらかの誤動作防止策が必要で

（1）　感度を下げ動作時間を長くする

（2）　突入電流の継続している間感度を下げまたは引はずし回路をロックする

（3）　突入電流は高調波分が多いのでこれをろ波して高調波抑制をかける

などの対策を講じている。

本装置は突入電流の非対称性を利用してこれを検出しそれによって引はずし回路のロックを行うものである。

3.1　動作原理および構造

励磁突入電流の様相，故障電流，本装置の原理，現場試験結果などについてはさきに報告している[1][2]のでここではその動作原理，構造などについて略記する。

突入電流の著しい特長はその波形にあり，これは鉄心磁束が一方向に飽和するために生ずるもので，単相変圧器では必ず半波整流波状の非対称波をなし，三相変圧器においては二相は同様の非対称波をなしている。これに対し故障電流はほとんど波形ひずみのない正弦波をなしている。

本器はこの特長を利用したもので**第14図**に動作原理を示している。差動電流は互に逆並列に接続された半流整流器によりおのおのの半波に分けられ，電流電圧変換器 Tr_1，Tr_2 の一次側に通電される。したがって突入電流のように非対称波の場合には変成器の二次電圧に差を生じこれが二巻線式差動動作の電話継電器 Ry 1 の感度以上になると動作する。

過電流検出継電器 Ry_2，Ry_3 は各変成器の出力電流で動作するもので上下各半波電流の検出を行う。

各継電器の接点は**第14-B図**のように接続され，励磁突入電流に対しては Ry_1 あるいは Ry_1 と Ry 2 または Ry 3 のいずれか一方のみが動作して引はずし回路はロックされ，故障時にはそれが小さいときにはいずれの継電器も不動作，故障電流が大きくあるいは直流分を含んでいる際には各リレーとも動作し引はずし回路は維持されている。

第15図に本器の外観を示す。

3.2　特　　性

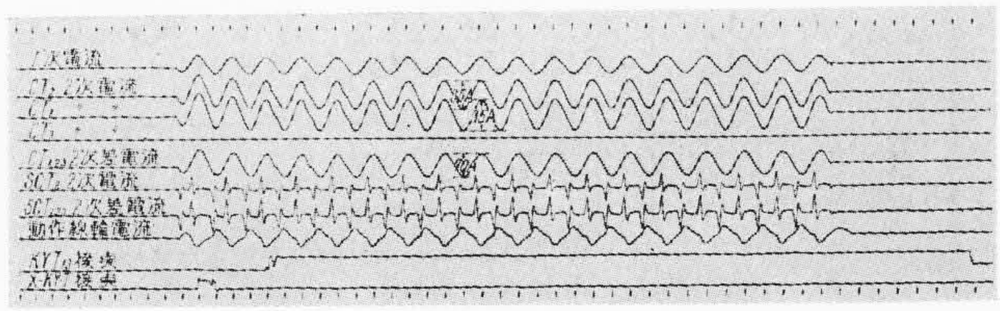
3.2.1　差動継電器

この継電器の感度は比率継電器の感度より高いことが必要であるが突入電流のような半波整流波状の非対称波に対して比率継電器がどのような電流値で動作するかは継電器の原理，構造により相違するのではっきりしたことはいえないが，一つの目安としてはこのような場合でも実効値が正弦波交流の最小動作電流と等しくなれば動作すると考えることができる。これと日立 KYT 形比率継電器についてみると最小動作電流 1.5 A に対し半波整流電流では約2 A（実効値）で動作する。

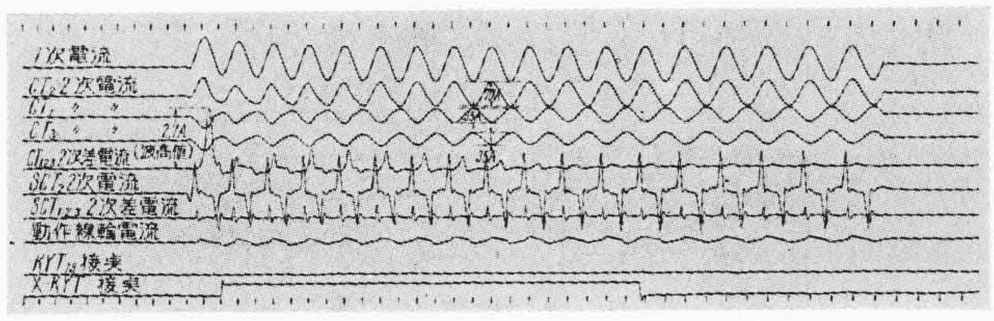
それとともにこのような装置の調整はできるかぎり実際の突入電流類似の波形で調整することが好ましい。これをうる方法として**第16図**に示すような回路によっている。これによれば変流器の二次電流は半波整流波が時間とともに零線より反対方向にずれ，主変流器の二次における突入電流に近い非対称波になる。差動継電器はこ

のような回路により半波整流波の実効値が約1Aで完全に動作するように調整されている。

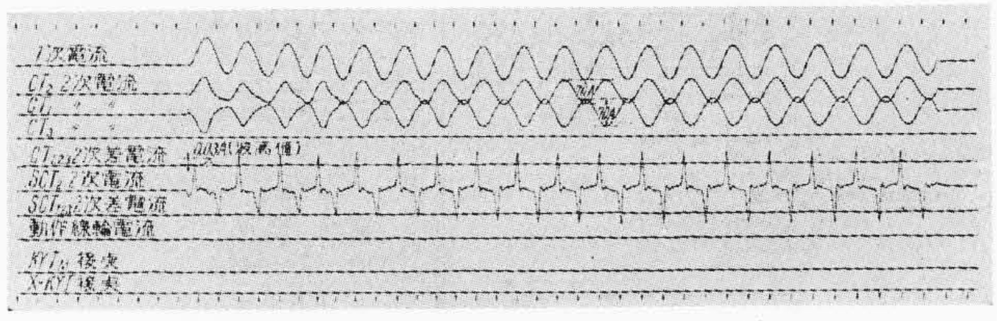
第17図は**第16図**に示す回路により測定した場合の半波整流波実効値と動作時間の関係を示す。**第18図**はこれと組み合わせ実用されているKYT形比率継電器の動作時間で，これを見ると動作時間の重複が見られるが実際の突入電流に対しては差動形継電器の動作時間が若干早く，KYT形比率継電器の動作時間は遅れるため後述の試験結果が示すように十分時間協調が保たれている。



(A)　二　電　源　内　部　故　障

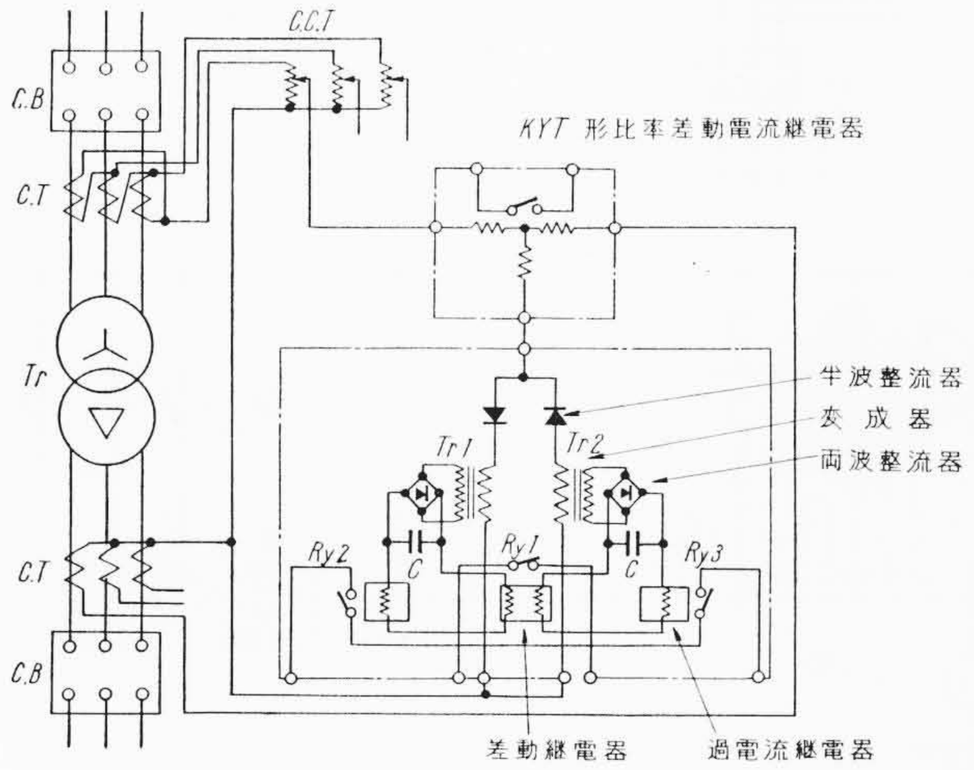


(B)　一　電　源　外　部　故　障

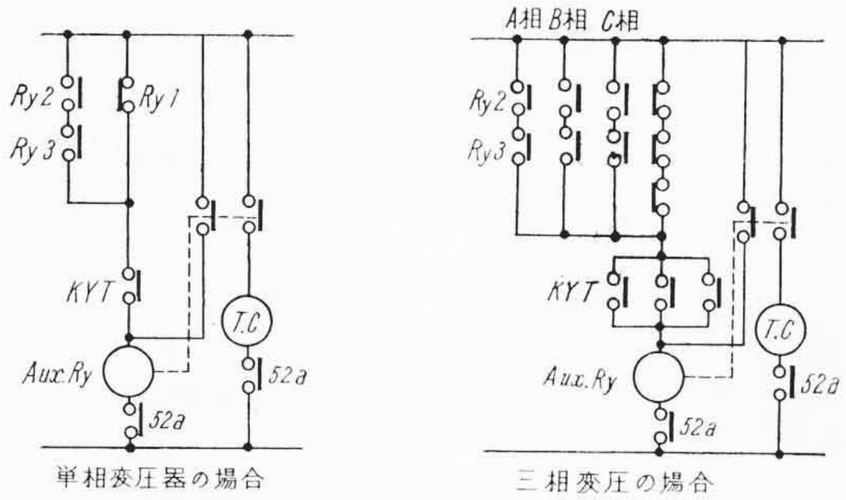


(C)　二　電　源　外　部　故　障

第13図　大電流過渡試験のオシロ例



(A)　回　路　構　成



(B)　接　点　回　路　接　続　図

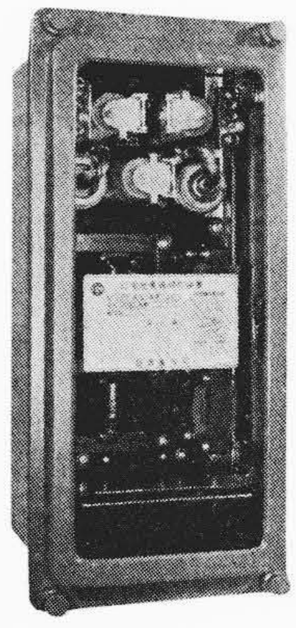
第14図　X-KYT形補助装置動作原理説明図

3.2.2　過電流継電器

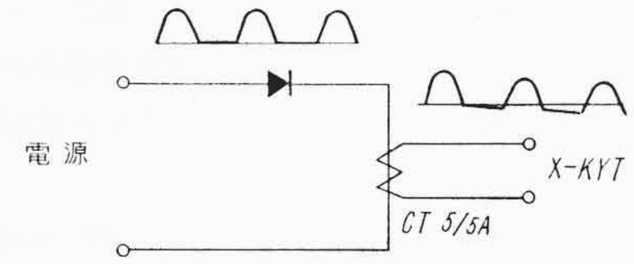
この継電器は故障電流に直流分が含まれた場合，または大電流故障に際し差動継電器の各線輪の励磁開始の時間差によりこれが動作して引はずし時間を遅らせることを防ぐため，上下の各半波とも整定値以上になったことにより故障電流を確認して差動継電器による引はずし回路のロックを解くもので**第19図**にこの動作時間を示す。この継電器は励磁突入電流で両方が動作しない範囲で小さい値に整定することが好ましく正弦波電流に対し5または7Aで動作するようにタップが設けられている。

3.3　変電所における投入試験

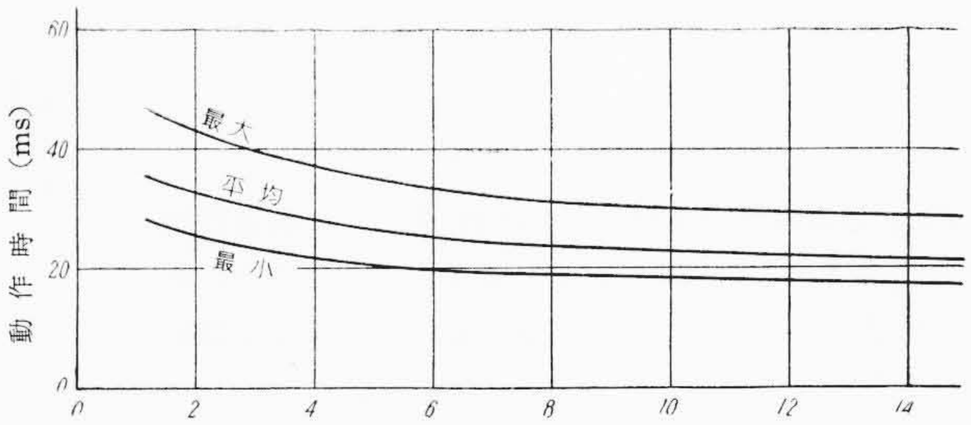
励磁突入電流は模擬変圧器を使用してもその完全な模擬は不可能で特性の確認は実試験によるほかはない。



第15図　X-KYT形比率継電器補助装置

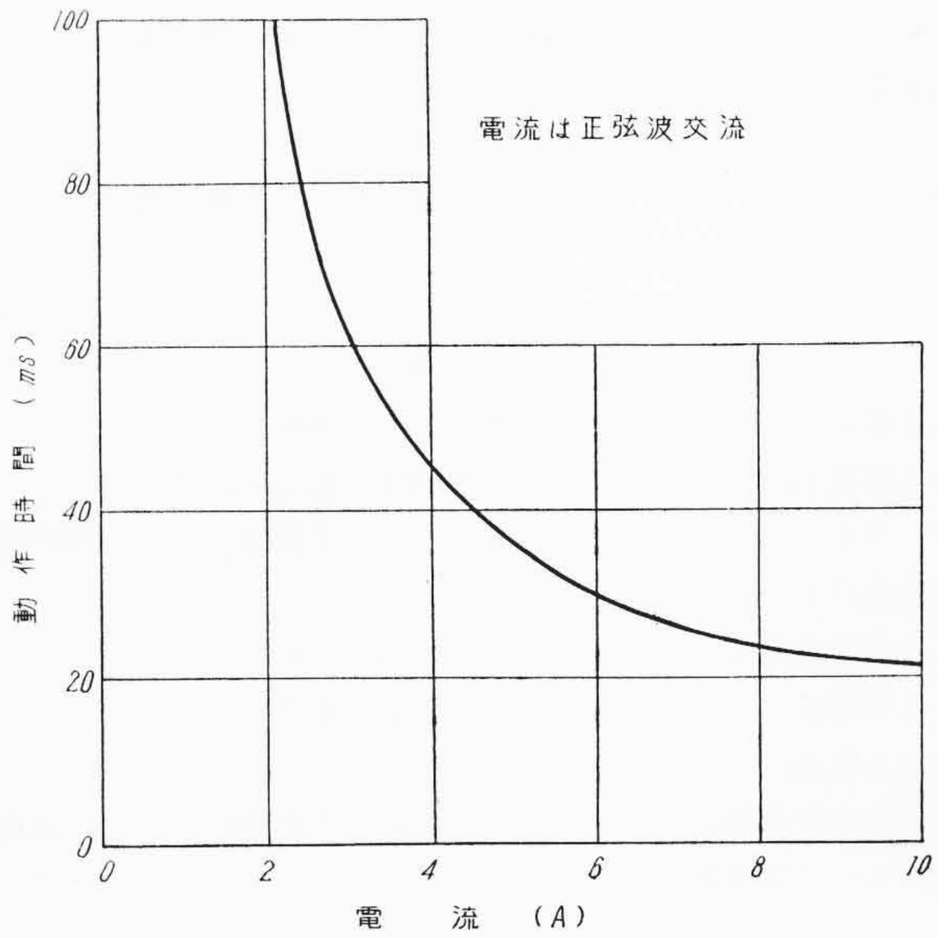


第16図　突入電流類似波発生回路

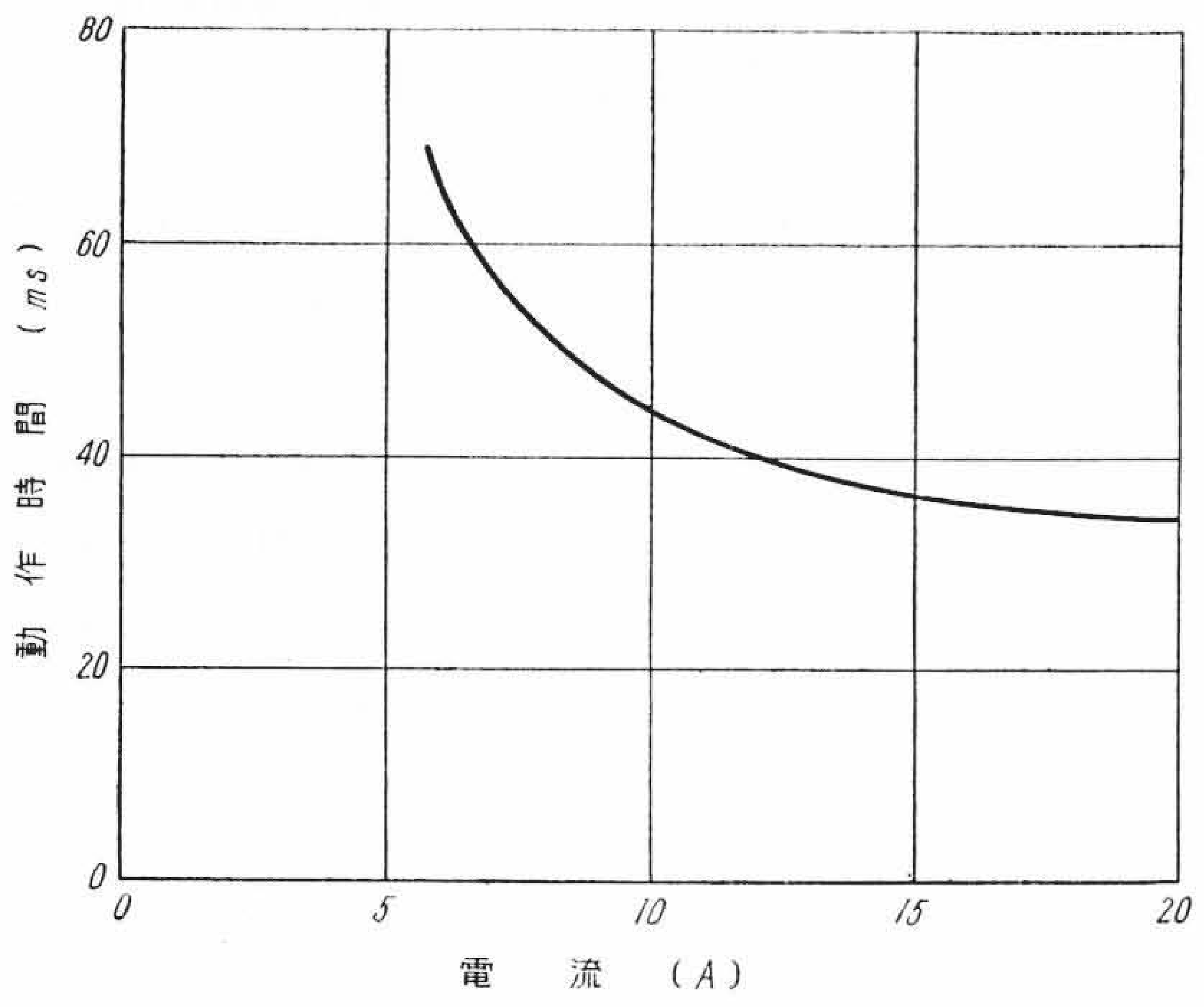


半波整流波実効値（A）
（第16図の回路による）

第17図　差動継電器の動作時間

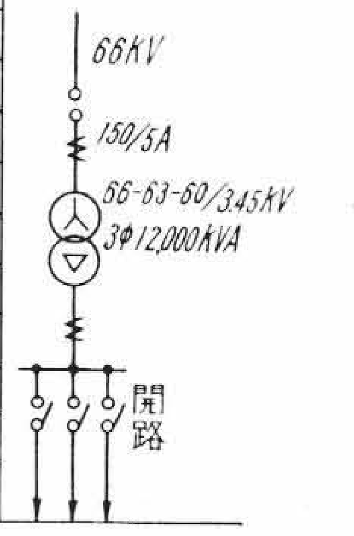


第18図　KYT形継電器の動作時間



第19図　過電流継電器の動作時間

第1表　日立製作所国分工場変電所における投入試験結果

試験番号	励磁突入電流（A） A相 波高値	A相 倍率	B相 波高値	B相 倍率	C相 波高値	C相 倍率	逆方向電流最大値 相	逆方向電流最大値 波高値	継電器動作状況 KYT A相	KYT B相	KYT C相	X-KYT 差動継電器 A相	差動継電器 B相	差動継電器 C相	過電流継電器 A相	A相	B相	B相	C相	C相	動作時間(ms) KYT	X-KYT差動継電器	時間差	回路	試験条件
1	-21.7	4.2	+3.53 / -7.42	1.4	+25.8	5.0	C	4.4	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	27.4	15.3	12.1	×	 66KV, 150/5A, 66-63-60/3.45KV, 3φ12,000KVA, 開路
2	+8.3 / -1.8	1.6	+13.1	2.5	-17.2	3.3	C	2.0	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	24.3	14.8	9.5	×	
3	-20.2	3.9	+1.94 / -10.6	2.1	+23.4	4.5	C	4.4	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	27.2	14.2	13.0	×	
4	+11.1	2.1	-11.3	2.2	+11.7	2.3	A	2.4	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	○	29.5	16.2	13.3	×	
5	-13.3	2.6	+6.0 / -7.4	1.2	+14.1	2.7	B	1.4	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	30.4	18.4	12.0	×	
6	+4.2 / -7.9	1.5	+19.8	3.8	-21.8	4.2	B	3.5	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	○	26.0	15.2	10.8	×	
7	-5.1	1.0	+7.6	1.5	+8.1	1.6	B	1.0	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	50.3	20.3	30.0	×	
8	+1.6 / -1.6	0.3	-6.7	1.3	+7.5	1.4	C	2.0		○	○		○	○	×	×	×	×	×	×	68.8	27.2	41.6	×	
9	+4.0 / -14.5	2.8	+26.5	5.1	-24.5	4.7	B	5.1	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	23.5	14.7	8.8	×	
10	+21.8	4.2	-18.9	3.6	-13.3	2.6	A	3.2	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	26.0	15.6	10.4	×	
11	-23.2	4.5	+21.4	4.1	+10.5 / -1.4	2.0	A	3.6	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	24.1	15.7	9.4	×	
12	-14.7	2.8	+18.0	3.5	-12.9	2.5	—	—	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	26.4	16.4	10.0	×	

注:(1) 突入電流の大きさは第1サイクルの波高値電流値はCT二次電流CT 150/5A
(2) 倍率は定格電流（波高値）に対し，
(3) 極性は右図 +ΛΛ -VV ±ΛV
(4) 逆方向電流 ΛΛΛΛ— この電流の波高値の最大のものを示す
(5) 継電器動作 ○…動作 ×…不動作
(6) 回路 ×…トリップ回路不成立

本装置は原理試作の段階において日立製作所国分工場の12,000 kVA, 三相変圧器により数次にわたる投入試験を，また東京電力神奈川支店稲荷変電所の 30,000 kVA, 三相変圧器について試験を行い所期の結果が得られている。

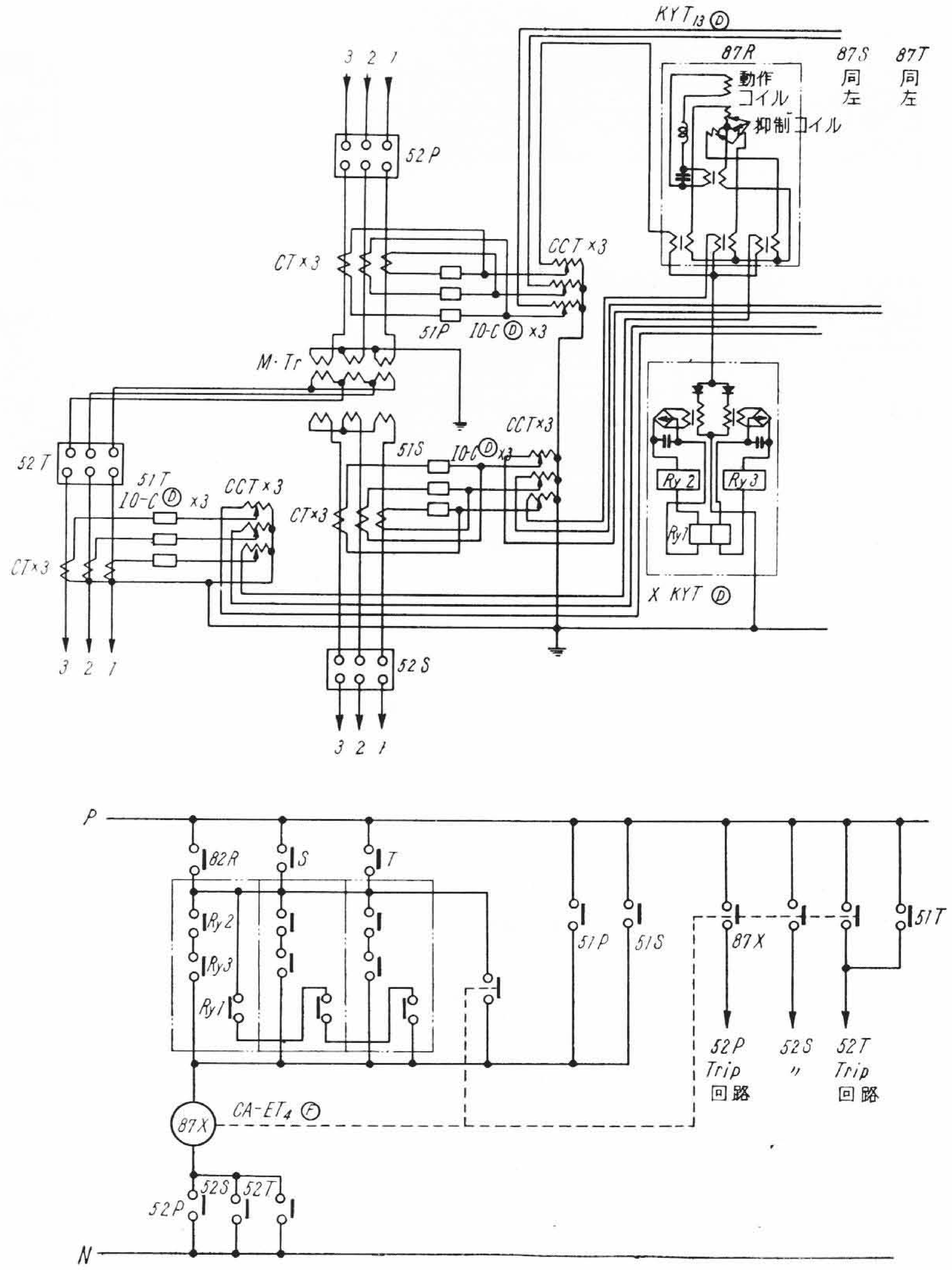
さらに製品試作品について日立製作所国分工場変圧器で試験を行い動作の確認を行っている。**第1表**にこの結果を示し KYT 形比率継電器と約 10 ms 以上の差をもって十分な時間協調を保ち完全に誤動作防止を行っている。また**第13図**に示すオシログラムより大電流故障において本装置の差動継電器が動作しても約 20 ms で過電流継電器が動作し比率継電器の動作に先だち引はずし回路のロックを解いている。

4. 適　　　用

KYT_{13} 形継電器を使用するには普通の比率継電器同様に主変流器の二次電流を容量，変流比に応じて合わせることにより使用できる。この継電器は三巻線変圧器用として製作されているが二巻線変圧器の保護に使用できることはもちろん，その一次または二次電流を合成すれば二つの変圧器をいっしょに保護することもできる。

X-KYT形補助装置は日立製作所の KYT 形（二巻線変圧器用）または KYT_{13} 形比率継電器と組み合わせ使用できるようになっているとともに，既設の比率継電器とも時間協調をチェックすることにより簡単に追加使用することができる。その際**第14図**が参考になろう。

第20図は KYT_{13} 形，X-KYT 形継電器を三巻変圧器に適用した場合の接続例を示す。



第20図　変圧器比率差動保護方式接続図

5. 結　　　言

以上最近の変圧器用保護継電器について説明したが，これら継電器はその誤動作または不動作が及ぼす影響の大きい点よりいずれも大電流試験ないしは実試験を行い，特に過渡特性に重点をおいて検討されている。

これら継電器はすでに多数各方面に納入されて実用にはいっており，その実績からみても過渡試験の結果が確認されるとともにその重大なる責務に十分耐えるものと考える。

変圧器の保護継電器に対する突入電流による誤動作防止は継電器技術において従来最もむずかしい問題の一つで，現在でも必ずしも完全なもののない状況から考えて本器の完成は需要家の要望にこたえるものと確信する次第である。

参　考　文　献

（1） 清水： 日立評論　別冊 23（昭 33） p. 53～57
（2） 石田，岡村，清水，渡井，柴田： 日立評論　41，5（昭 34） p. 27～32