D 最近のドイツ技術

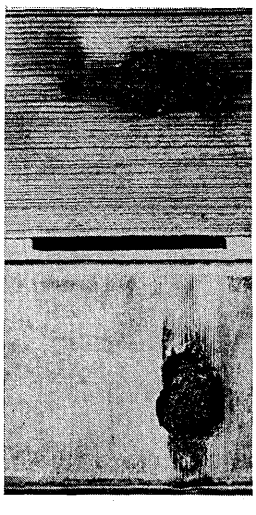
交流発電機の巻線地絡保護

Generator Protection against Stator Earth-leakage Faults

I. まえがき

高圧発電機の固定子における最も一般的な故障は，大地電位にある固定子積層鉄心と相導体間の絶縁破壊である。

中性点非接地方式の場合にはこの種の故障時，対地容量を通して流れる電流のみであるが，消弧リアクトル接地系の場合には発電機に接続される系統の残留有効分電流が流れる．多くの場合，これらの電流値は数Aにすぎない．小さな故障電流が短時間流れても鉄心内部にまで入るような損傷は少しも与えないことが経験によってわかっている．故障が短時間であっても重大な損傷を鉄心に与えるのは 20 A 以上の故障電流のときである．地絡電流が小さくても鉄心自体は相当な損傷を受ける．しかし故障が継続する場合には故障している導体の絶縁物と巻線付近の絶縁物が破壊される．その結果もっと重大な層間短絡や線間短絡にまで発展することになる(第1図，第2図参照)。



第1図　地絡電流 7.5 Aが 10 min 流れた時の影響

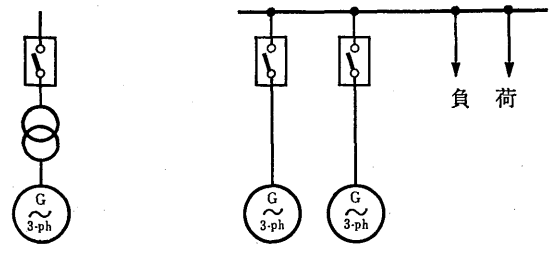
Fig. 1. Effect of a stator earth-fault with 7.5 A earth current for 10 min

(a) 積層鉄心
(b) 絶縁チューブ

第2図　地絡電流 200Aが 0.28 sec 流れた時の影響

Fig. 2. Effect of a stator earth-fault with 200 A earth current for 0.28 sec

(a) 積層鉄心
(b) 絶縁チューブ



第3図　左—発電機/変圧器ユニット接続
右—母線直結発電機

Fig. 3. Left—Generator/Transformer unit connection
Right—Generator directly connected to bus

1線地絡故障時健全相電位が上昇する．これはさらに健全相の絶縁破壊を誘導し，かくして発電機の固定子上で線間短絡と同様の影響を及ぼす2線地絡に発展する。

それ故固定子鉄心や絶縁物を損傷する電流や健全相を破壊する対地電位上昇をもたらす発電機の地絡故障は，発電機に対する重大な事故を防止するためにできるだけすみやかに検出し，そして発電機は消磁されるべきである。

妥当な範囲内で故障点の検出感度を保持するためにはしばしば困難が伴う．シーメンス社により用いられている新しい方式と方法を以下に説明する。

発電機内あるいは発電機に接続された系統のある点に地絡故障が発生した場合にはこの系と大地間に電圧が生じる．ある定まった選択性が回路の変成器類により与えられなければ偏位電圧を検出するだけでは故障地点を決定することはできない。

そこで保護装置を作るに当たり次のような考慮がなされている。

1) 変圧器付のユニットシステム方式における発電機固定子地絡保護装置（第3図左，参照）
2) 間に変圧器を置かず直接母線に接続された発電機固定子地絡保護装置（第3図右，参照）

II. 発電機を変圧器を介して母線に接続する場合

変圧器のある発電機ユニットの高電圧側での地絡故障は導体による接続が無いため直接低圧側には波及しな

い．そこで低圧側における対地電位の偏位は地絡故障を示すことになる。

もし発電機と変圧器との間に接続された5脚鉄心変圧器の開放デルタ巻線が直列抵抗を通して高感度電流継電器に接続されたり，あるいは直接電圧継電器に接続されていれば，故障のない状態では開放デルタ巻線間には何ら電圧が生じない．発電機の端子での地絡故障時は5脚鉄心の相電圧の3倍の電圧に相当する完全偏位電圧が生じる．発電機巻線内の地絡故障時は偏位電圧は故障点における巻線の対地電位に比例する．発電機の中性点の地絡故障時は基本波分の偏位電圧はなんら発生しない。

高圧側の地絡時も変圧器の高圧巻線と低圧巻線との間の相互容量（C）のために低圧側においてある程度の偏位電圧を生じる．この偏位電圧の大きさは低圧側地絡故障の場合に生じる値とは逆に変圧器の容量性抵抗と低圧側の大地に対する全抵抗の比に関係する。

後者は低圧側の対地静電容量（発電機，変圧器—発電機間の導体，変圧器の低圧側巻線）それと5脚鉄心変圧器のインピーダンスよりなっている。

変圧器の静電容量 C に対し低圧側の対地抵抗はもし変圧器と発電機をケーブルを使用して接続している場合には比較的低い．同様に高圧側での地絡の場合に5脚鉄心変圧器に生ずる対地電圧降下，結局その二次電圧も小さくなる．この二次電圧は地絡検出継電器の最低動作電圧よりも小さく保たれねばならない。

この条件を満たすために5脚鉄心変圧器の二次側には負荷抵抗が接続される．この値は高圧側での地絡故障で低圧側巻線に生じる電圧降下が継電器の動作値より確実に小さくおさえられるように，その高圧側ではずっと低抵抗として作用するように選ばれる。

普通使用される地絡継電器は通常の差動保護継電器と組み合わされる高感度で過電流耐量の大きい電流継電器である．測定要素は整流器と補助変流器付の可動コイル形継電器である。

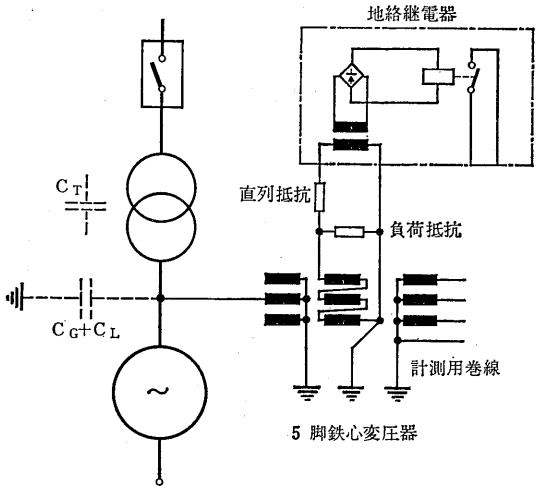
この装置は地絡故障点で完全に地絡した場合，その発生電圧が 10% 以上であれば発電機内，発電機—変圧器導体間および変圧器低圧巻線内の地絡故障を選択する。

別ないい方をすれば保護範囲は約 90% である。

中性点そのものと，その付近の地絡故障はこの方式によっては保護することはできない（第4図参照）。

このような関係にあることからして100%の地絡保護が必要なものかどうか，あるいは 90% の保護では充分と考えられないものかどうかということが問題になる。

経験によれば発電機地絡故障の大部分は端子の近くに



第4図　ユニット方式における発電機/変圧器の地絡保護

Fig. 4. Earth-fault protection of generator/transformer in unit-system operation

発生し，その数は中性点付近に近づくにつれ急速に減少している．きわめてまれに中性点に最も近い発電機巻線の 10 番目，あるいは5番目にも発生している。

これは大低の発電機の巻線の絶縁は中性点に近くても低減されていないためであり，一方中性点に近い巻線の部分は他の部分にかかる電圧の数分の一にすぎないことであることは容易に理解される．さらにユニットシステムの場合には，この種の故障での地絡電流は非常に小さい．この値は対地偏位電圧と対地低電圧側の漏えい抵抗に関係する．ことに長い間流し続けたとしても，この程度の電流は積層鉄心を焼損するほどのことはない。

地絡故障の場合健全相の対地電圧は中性点においては上昇せず，ただ中性点付近でやや上昇するだけであるから他相にフラッシオーバすることは少しもない。

上述のごとくであるが，しかし，欠陥のある巻線の絶縁はひどく破壊され，近くの巻線は影響をこうむることになる．それ故地絡故障が中性点にあることがわかったらいつでも発電機を停止し，この故障を除くことが得策である．このような観点から中性点の保護まで拡大した地絡故障を検出できる方式がある程度までメリットを持つ，しかしこの方式のため価格があまり高くなってはならない。

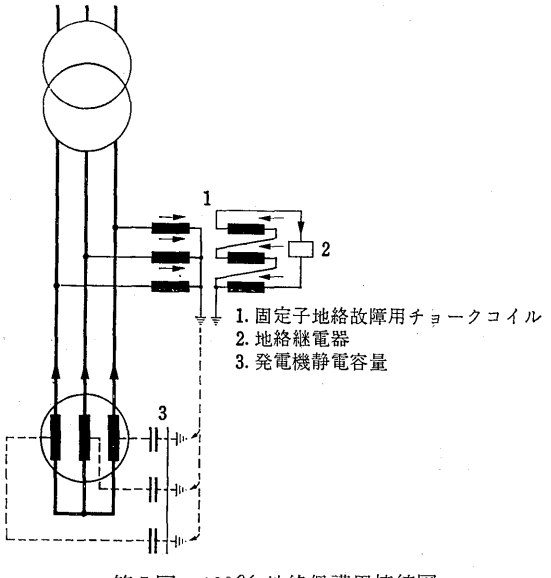
発電機の 100% 地絡保護を行なうために AC，あるいは DC 電圧を発電機の実際の，あるいは人為的に作った中性点に印加されることがある．発電機の中性点またはその近くに地絡故障がある場合には印加電圧によって地絡電流を制御するための電流を作る．この方式は必

要な機器のために相当な費用を必要とする。

以下に述べる100％ 地絡保護方式は 80～90％ 地絡保護方式に若干の費用を追加するだけですむ。

発電機の相電圧は高調波，特に第3高調波を発生している。

第5図に示すように，これは等価的に発電機の静電容量の半分を通って大地に帰る回路を持っているので開放デルタ端子間の高調波は非常に小さくなる．二次側電圧は5脚鉄心変圧器の一次側を流れる高調波電流に関係するから中性点，あるいはその近くでの地絡故障の場合に生じる電圧に比べれば二次測の高調波分は小さい。



第5図　100％ 地絡保護用接続図

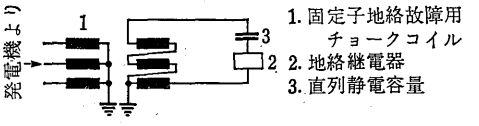
Fig. 5. Schematic diagram of 100% earth-fault protection

中性点における地絡故障の場合には大地帰路で健全時に発電機静電容量の比較的高い抵抗を通して流れていた電流よりもこの電流は相当大きな値になる．もし適当な地絡継電器が静電容量を通して接続されるとすれば既存基本調波電圧に対し高調波に関する感度は通常の値の3倍にまで上昇し得る．その結果100％ 地絡保護が可能となる(第6図)。

この簡単な装置は無負荷時には正確な動作をする．しかし，もし発電機が負荷を負ってくると高調波分は発電機の設計にもよるが増加してくる．高調波擾乱電流も健全時増加してきて継電器が不必要に動作する高い値にまで達し得る。

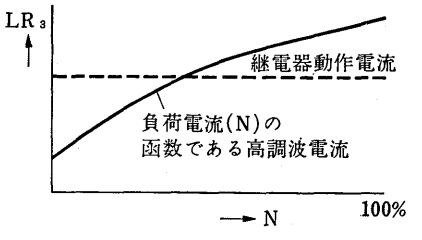
これは防止しなければならない。

継電器を鈍感にすることは多くの場合保護範囲を狭めることになる。



第6図　100％ 地絡保護を行なうための装置

Fig. 6. Arrangement for obtaining 100% earth-fault protection



第7図　負荷電流Nに対する高調波擾乱電流と継電器動作電流

Fig. 7. Harmonic disturbance current and relay operating current versus load current N

第7図に高調波擾乱電流と負荷電流に対し100％ 保護のために必要とする継電器動作電流が示してある。

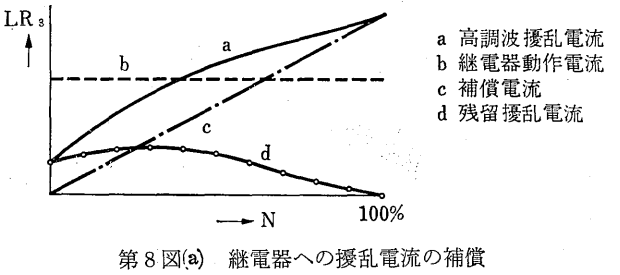
図では擾乱電流が継電器の動作値を相当越えている。

しかし簡単な補償装置を用いて動作電流と反対に継電器に加えることによってこの余計な擾乱電流は完全に補償されている．この補償電流値は負荷電流の大きさに関係する(第8図参照)。

発電機が負荷を負っている場合は高調波は相当増大するが発電機の対地容量は一定なため擾乱電流の増加時中性点，またはその近くに故障のある場合の継電器電流の増加に比べ，比較的小さいから過補償とすることも可能でさえある．これは次のようなことを意味する。

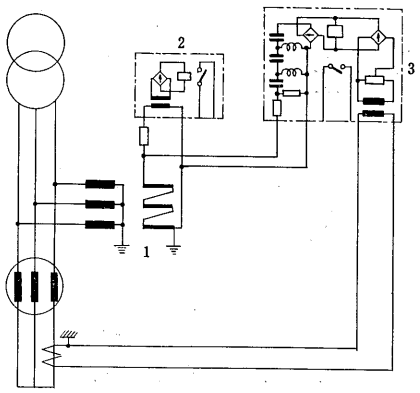
すなわち補償電流はより急しゅんな特性にも作れる。

それによって擾乱電流は無負荷時よりも継電器を開放（抑制）方向に減少することになり，かくて確実な動作を得ることができる。



第8図(a)　継電器への擾乱電流の補償

Fig. 8.(a) Compensation of relay disturbance current



1. 固定子地絡保護用チョークコイル
2. 70～90%の地絡保護用継電器で，しゃ断器を開放し，消磁させる。
3. 中性点近傍の地絡保護用の高域ろ波器付継電器で，表示のみに使用する。

第8図(b) 発電機と変圧器の一体となったユニットシステムにおける固定子地絡保護の推奨方式

Fig. 8.(a) Recommended arrangement of stator earth-fault protective equipment with generator-transformer unit-system operation

高圧側で地絡故障が生じるとさらに擾乱電圧として低圧側に移行してくる基本波電圧がある．中性点の地絡検出のために用いられる継電器に対してこの電圧の影響を防ぐために継電器は基本波電圧を阻止する高調波ろ波回路付となっている。

本稿の最初の部分で述べた装置を用いることによって発電機端子と発電機端子からみて巻線の 90% 以内の地絡故障を包括するには基本波成分の偏位電圧を用いて制御できる．そして中性点付近の残りの 10% 分の地絡故障は第3高調波を用いることによって保護することができる。

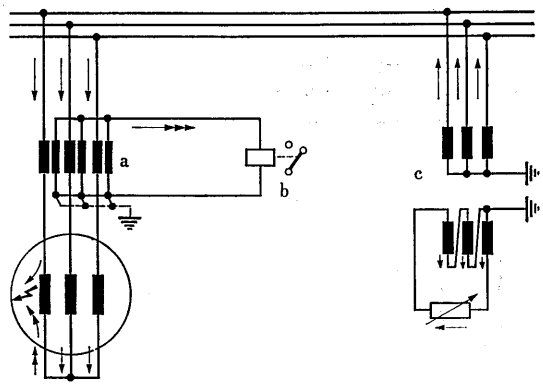
地絡故障はまれに中性点に発生する．そして相当長時間たいした問題も生じない．それ故中性点か，またはその近くでの地絡故障か，他の部分での地絡故障かを判別することが望ましく二つの別々な継電器を置くことが望ましい。

いわゆる 90% 保護継電器は発電機をトリップし減磁する一方，100% 地絡保護継電器は警報のみとすべきである．これはしばらくはなんら障害が無い中性点ないし，その付近の地絡故障で大容量機を突然トリップすることを防ぐために特に大容量ユニットにとって重要なことである。

大抵の場合，中性点ないし，その付近の地絡故障に対する地絡継電器の有効保護範囲は中性点からみて 20～30% にも広げられるから端子から 70～75% の故障も補うためにトリップ継電器2をそして中性点端子の残りの地絡故障を補うために警報継電器3を置くことによって，この特性を有効に利用することが望ましい。

III. 発電機を直接母線に接続する場合

これから述べるように発電機が母線に直接接続されている場合には対地電位の偏位のみをとらえるだけでは地絡故障の位置を選択することは不可能である．しかしはっきりしていることは地絡地点に故障電流が流れることである．基本的な事項としてわれわれは地絡故障点に故障電流が流れることを知っている．この電流は発電機と母線との間に接続された三相CTによって検出できる．このCTの二次側は合成するために共通に接続されて地絡継電器に接続される(第9図)。



a 変流器　b 地絡継電器　c 地絡電流供給源

第9図　母線直結発電機の固定子地絡保護装置の基本接続図

Fig. 9. Basic diagram of stator earth-fault protective equipment with generators directly connected to bus

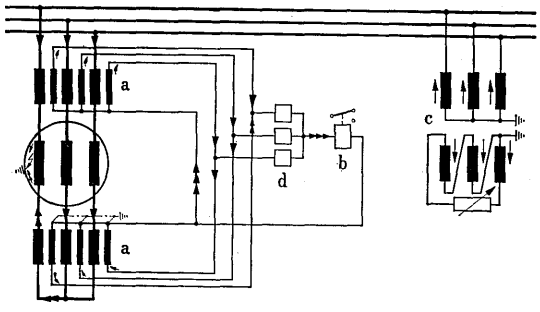
同様な検出が発電機の中性点側と発電機およびその間に入れたCTによって作られる差動結線によっても得られる。

差動保護装置はCTをブリッジ接続し，そして地絡継電器を差動保護継電器の中性点とCTの中性点との間に接続する．このようにすれば地絡故障保護のために特別にCTを置くことは不要である(第 10 図)。

以前使用されていた Watt 形継電器類のかわりに現在は電流継電器が地絡継電器として用いられている。

それらの利点は本章の後で扱うとしよう。

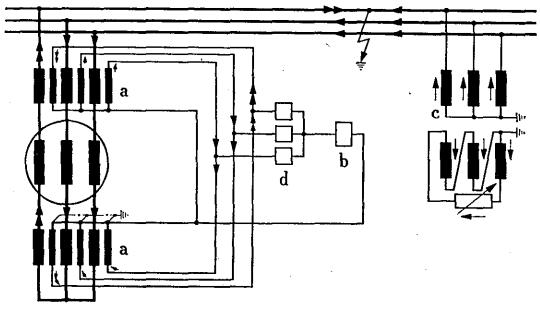
発電機の内部，あるいは発電機からCTの接続線に地絡故障が発生すると，各導体に同相同値の地絡電流が流れCTにより変換されて，その合計したものが二次側に



a 差動保護用変流器　c 地絡電流供給源
b 地絡継電器　d 差動継電器

第 10 図　差動保護継電器と組み合わされた固定子地絡保護

Fig. 10. Stator earth fault control in conjunction with differential protection



a 変流器　b 地絡継電器　c 地絡電流供給源　d 差動継電器

第 11 図　外部故障時の電流分布

Fig. 11. Flow diagram of earth currents with earth-faults outside the generator

流れる。

ＣＴと母線，あるいは発電所外の他の系統内の地絡故障の場合にも故障電流が故障点に流れるけれども発電機の中性点を流れる一部分の電流は単相での合成，あるいは六相の合成でも三相ＣＴの一次，あるいは二次のどちらでも差電流を生じない（第 11 図)。

このようにして地絡故障がＣＴの発電機内か送電系統内かどちらの側にあるかを簡単な電流測定によって選択することができる。

上述の地絡故障の選択方式は地絡電流が充分の値であれば満足な結果をもたらす。

ＣＴからの不可避な誤差電流によって継電器の不必要動作を防ぐため地絡継電器の応答はあまり高感度にすべきでない。

二次電流 5Ａ という普通の変流比で励磁損失としてＣＴの定格電流の約 2‰ の一次電流が必要である。

多くの場合，発電機は大きな進相充電電流，あるいは残留対地電流がある系統に直接接続されている。

そこでこれらの電流は故障地点の検出のために利用でき，その結果，人為的に地絡電流を作るための一切の装置は不要である．しかし中性点にずっと近いところから 50% 程度のところまでの地絡故障では偏位電圧とそれによって生じる進相地絡電流は相対的にずっと小さくなるということを注意しなければならない．もし系統に 10A の充電電流があり変流比が 2,000/5A とすれば地絡継電器は端子から 60% の位置に発生した発電機内の地絡故障に充分応答させられる．その時の電圧偏位は 40% となる．もし地絡故障が中性点に近い位置に発生したとすると継電器は系統に生ずる地絡電流に応答することができない．もし進相充電電流がずっと小さいか，あるいは系統が消弧コイル系か，または変流比が非常に大きい場合には地絡故障検出の条件は相当難しくなる。

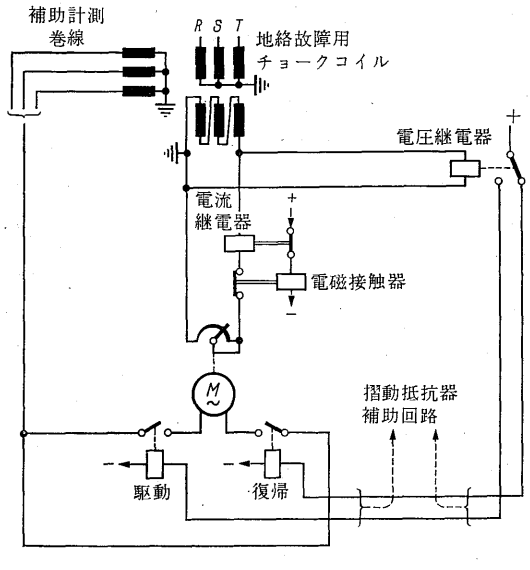
このような場合には適当な二次抵抗を接続した５脚設計の特別な地絡故障用チョークコイルが用いられる．これらは地絡故障が生じると充分な地絡電流を流す。

他方，地絡電流は故障点において重大な損傷を生じるような大きな値にしてはならない．いろいろの観点からこれらの必要に応じるために次に述べるような装置が開発されている。

すなわち電動操作しゅう動抵抗器が固定子巻線地絡保護用チョークコイルの二次側の開放デルタ巻線に接続される（第 12 図)。

地絡故障が無いかぎりデルタ巻線にはなんら電圧は生じない．地絡故障が発生した時のみ偏位電圧が生じる。

全しゅう動抵抗値は 100% 地絡故障電圧で，これのみ



第 12 図　抵抗負荷（電動操作しゅう動抵抗器）付地絡故障用チョークコイル

Fig. 12. Earth-fault choke coil with secondary resistance load (motor-driven rheostat)

で，あるいは進相系統電流，または残留有効分電流と合成されたもののいずれかでも地絡継電器の動作値になるように選ばれる．このような場合に発電機の地絡継電器が応答するならば電動操作抵抗器はスタートしない．そして発電機は漸時後開放される．もし全然充電電流が無かったり少しの残留電流も無い系統に接続されている場合には電動機は偏位電圧によって働く電圧継電器によりスタートし順次負荷抵抗を減少してゆき，それと同時に地絡電流が徐々に増加し，やがて地絡検出継電器が働くことになる．もし継電器が働けば地絡故障は発電機内にあり継電器が働かなければ故障は系統内にあることになる．後者の場合には抵抗は電流継電器と負荷回路にある電磁接触器とによって切り離される．電流継電器は地絡電流検出値を超過した時確実に動作するように調整される．そこで電磁接触器は地絡故障が消滅するまで電圧継電器によって開放され続け，しゅう動抵抗が自動的に最初の位置にもどると再び電磁接触器が閉じる．それ故発電機内部に地絡故障がある場合にのみ系統の地絡電流と共に地絡継電器が働くに充分な大きさの人為的地絡電流が流される．系統の地絡電流が皆無であれば装置は継電器が働くに充分な電流を作る．このような場合と逆に地絡継電器の設定値は補充する電流がいくら必要であるかを調整することになる。

別の形の地絡保護継電装置は系統の地絡電流分が少なかったり，または全然無い場合にも地絡継電器が働くに充分な高い一定した地絡電流を供給する方式である。

他の系統に接がれた場合にはたとえ充電電流が大きくとも，この方式は地絡継電器の動作値に比べ余分な地絡電流をいつも供給することになり，その結果全電流は相当動作電流値を超過することになる。

さらに検出部には発電機の負荷状態，故障相，それと負荷の大きさにより相当変化するＣＴの損失によってプラスになったりマイナスになったりして入ってくるＣＴの誤差電流が人為的に与えようとする地絡電流を計算する時，最も好ましくない値になるに違いない．他方，継電器は好ましくない状態で地絡故障に応答してはならない。

しかしこのような要求は反対に全固定地絡電流に影響し，時には継電器の動作値以上になることもある。

一方，シーメンスの装置は自動的にその動作状態を変更して継電器が働くに必要とする充分な補足地絡電流のみを供給する．この電流は一次側では数Ａにすぎない値いでありＣＴが全負荷電流まで誤差電流が流れないこと，あるいは流れても微少であって継電器が動作しない値であるようにお互に平衡しているようにすることが必要である．多くの場合，正確にＣＴと二次負担を平衡させることは困難であろう。

すでに負荷電流が流れているうえにさらに突流が流れるとＣＴ回路ではよく平衡がとれていたとしてもＣＴの総合誤差電流の平均は零にはならないばかりでなく，地絡継電器の動作電流以上相当の値まで上昇する．これは特に大容量変圧器や，大容量電動機負荷を投入する場合に生ずる．このような高い合成誤差電流は突流電流のＤＣ分，ＣＴの鉄心の特性，またある程度二次負担のためでもある。

以前用いられていた電力形固定子巻線地絡継電器の場合はある決まった位相の偏位電圧が継電器を動作させるためにさらに必要とされるものであった．しかし系統に地絡故障が継続している場合に開閉操作のために電力形継電器の場合は誤動作が生じる．それはＣＴの合成誤差電流の周波数が発電機の周波数と対応し，これはさらに高調波も含んでいる．偏位電圧についてはその位相が地絡継電器を働かすような位相になるためである。

この種の誤動作は継電器がいつも正常である健全時の系統状態では追究するのが難しい。

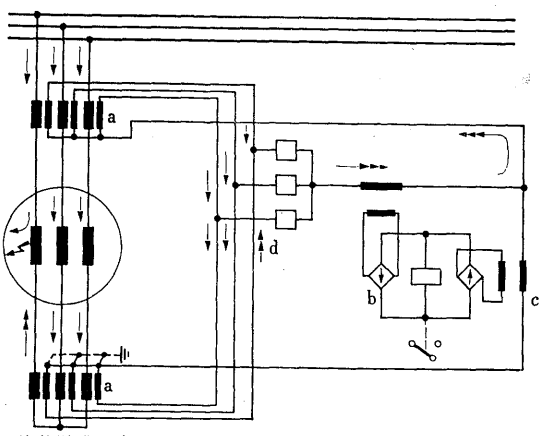
電力形継電器のそれ以上の欠陥はそのトルクが地絡電流と対地電圧の２乗で減少することである．直線関係を得るためには特殊な検出方法が用いられる。

すなわち定電圧装置とか，電圧の選択，あるいは人為的に作った正確な三相回路の個々の相とのチェックとかの方法である。

地絡継電器として用いられる単なる電流継電器ははるかに簡単でより適切である．しかし地絡故障の偏位電圧には無関係に合成誤差電流の値が充分大きければなんであっても応答してしまうため，普通は非常に多くの誤動作がある．こうしたことを防ぐために簡単な抑制方法が採用されている．それは他の目的のために発電機の中性点に設置された変流器の中性点への帰路に接続した補助変流器から構成される．あるいは差動保護用変流器が用いられるならば中性点側に接続される低圧用変流器が用いられる．補助変流器の二次回路は整流され，そのブリッジ接続回路に地絡継電器を接続する．地絡電流は継電器にトリップモーメントを与えるに対し補償電流は阻止方向にトルクを生ずる。

発電機内に故障がある場合には中性点側にある変流器には地絡電流が差電流としてなんら生じないので補償はなんら作用しない（第 13 図)。

地絡故障の時に継電器に動作電流を与えるのは発電機



a 差動保護用変流器
b 地絡継電器
c 補償用補助変流器
d 差動継電器

第 13 図　発電機の中性点側に設置した変流器の残留回路による固定子地絡保護用誤差電流補償方法

Fig. 13. False-current compensation with stator earth-fault protection by means of the neutral current of a set of current transformers arranged in the generator neutral

と母線との間に設置された変流器のみである．しかしもし発電機が系統での突流や，電動機の投入電流を供給する場合には両方のＣＴは負荷を負うことになり継電器は補償装置によって阻止方向に駆動される．変流器の負担を変化したり適当な比の補助変流器を用いることによって，不必要な継電器動作が生ぜぬよう補償効果を調整することができる。

誤差電流の一部はこのように補償分として用い，その抑制効果はトリップ用の効果と等しいか，もっと大きい．保護方式は補償装置を追加したことによって感度の低下を示すようなことはない。

多くの場合，地絡継電器としての単なる電流継電器は発電機の第３高調波によって生じる相偏移のために自動的に 100% 地絡保護を行なうことになる。

負荷時の発電機が相電圧の 4% の第３高調波を含んでおり系統に 20 A の充電電流を供給しているとしよう．中性点あるいはその付近で地絡故障が生じた場合

$$\frac{4}{110}\times 3\times 20=2.4(\mathrm{A})$$

の第３高調波電流が系統のコンデンサを通して流れる．もし発電機用変流器の変流比が 1,000/5 A と仮定すれば発電機が負荷を負っているとき，地絡継電器が動作するために必要な地絡電流は 1.2～1.5A になる．これからして全充電電流が 20A ほどの比較時小系統でさえも 100% 地絡保護を得ることができる。

これは中性点付近の地絡故障はこのような簡単な方法では検出できなかった電力形継電器より簡単な電流継電器で行える点にさらに大きな特長がある。

変圧器を接続せずに直接発電機が母線に接続される場合には中性点付近における地絡故障は極めて危険なものとなる。

発電機／変圧器ユニットの場合，中性点近傍の地絡故障では地絡電流は非常に小さい．これに対し，発電機が直接母線に接続される場合には地絡電流は高調波成分と系統の大きさに関係する．大系統の場合には発電機の中性点付近の地絡故障で 20～30A ないし，それ以上の地絡電流が生ずる．そして鉄心に対し非常に大きな損傷を与えることになる。

中性点付近の地絡故障はまれにしか発生しないところから普通は 100% 保護は行なわれなかった．それは必要な装置に経費がかさむためでもあった。

何ら費用をかけずに 100% 地絡保護を行なうことができる前述の方式は，それ故充分推奨に価するものである。

（原書：BRUNO WESTPHAL: Ständerdschlusschutz von Generatoren, Siemens Z. H. 3 SS. 134～141(1953)
抄訳者：綜合技術部　鈴 木　勇）

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。