

高圧配電線地絡故障時の電圧, 電流

Fault Voltage and Current of High Voltage Distribution Lines

磯野 昭* 後藤 益雄* 柴田 満男**
Akira Isono Masuo Gotô Mitsuo Shibata

要 旨

高圧配電線の地絡故障時の故障点抵抗による電圧, 電流の変化について, 2線故障を中心に検討した。その結果, 故障点抵抗が大きい場合の零相電圧は1線地絡故障のそれと大差ないことがわかった。また, 2フィーダにまたがる故障時にはみかけ上の零相電流のため零相電圧と電流の位相差は広い範囲に変化する。この場合, 通常の保護方式では多くの場合シリーズトリップになるものと思われる。

1. 緒 言

電力需要が増大し, 各種産業や一般家庭の電力への依存度が高まるにつれて, 電力系統整備の重点が発電から送変電へ, さらに配電設備へと移りつつある。

一方, 配電系統で事故が発生した場合, 停電や電圧降下の影響が直接需要家に及ぶとともに, 道路上などでの線路事故, あるいは異常高電圧が需要家内に侵入することにより, 人畜, 機器に損傷を与えることがあるので, 事故の波及を極力防止し, 復旧の迅速化を図ることが必要である⁽¹⁾。

保護方式からみた場合, 配電線の構成は送電線とはいく分異なったものとなり, 保護方式上必要な電圧, 電流については送電線ほどじゅうぶんには解析されていないきらいがあった。

本稿では, デジタル計算機を用いて, 高圧配電線の同一フィーダ内における2線地絡故障および2フィーダにまたがる地絡故障時の零相電圧, 電流を中心に解析した結果について述べる。

2. 配電線故障検出の原理と問題点

配電線の過負荷および短絡事故に対しては, 過電流継電器で保護する。これについては, 特に問題は生じない。

地絡故障に対しては, 通常零相電圧と零相電流による方向地絡継電器により故障フィーダを検出している。図1はこの原理を示したものである。図1でフィーダ2はいくつかの健全フィーダを一括して示した。フィーダ1の地絡故障により生じた地絡電流 \dot{I}_g はフィーダ1および2の静電容量を流れる \dot{I}_{c1} と \dot{I}_{c2} および接地用 P.T を流れる \dot{I}_n に分流する。故障フィーダの零相 CT₁ には \dot{I}_{c2} と \dot{I}_n との和が, 健全フィーダの零相 CT₂ には \dot{I}_{c2} が流れる。これらの電流のうち \dot{I}_n は通常 $\dot{I}_{c1}, \dot{I}_{c2}$ の数十分の一の大さきであるため, 零相 CT₁ を流れる電流 $3\dot{I}_{01}$ は零相電圧 $3\dot{V}_0$ より約90度遅れ, 零相 CT₂ を流れる電流 $3\dot{I}_{02}$ は $3\dot{V}_0$ より約90度進みとなり方向地絡継電器により故障フィーダの検出ができる。

この $3\dot{V}_0$ と $3\dot{I}_{01}, 3\dot{I}_{02}$ との位相関係はフィーダが抵抗 (アークまたは不良導体など) を通して地絡した場合でも, 同一回線の2線に地絡が生じた場合でも全く同様である。

地絡故障検出の場合の問題点として下記の諸問題がある。

(1) 常時の零相電圧

高圧配電線においては常時零相残留電圧 \dot{V}_R が存在する。図2が常時のフィーダ各相の対地静電容量と残留電圧の関係を示している。図2で $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ を3相平衡電圧, \dot{V}_R を残留電圧, C_{a0}, C_{b0}, C_{c0} をフィーダの対地静電容量とすると,

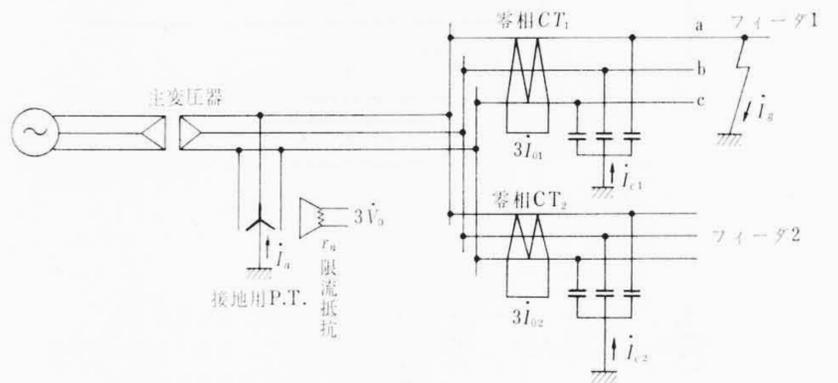


図1 高圧配電線地絡故障時の原理図

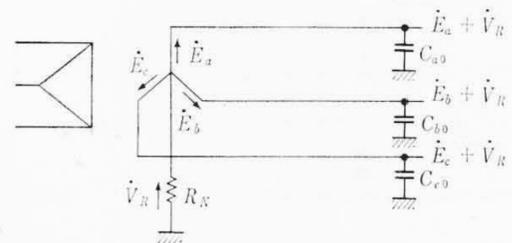


図2 フィーダ各相の対地静電容量と残留電圧

$$j\omega C_{a0}(\dot{E}_a + \dot{V}_R) + j\omega C_{b0}(\dot{E}_b + \dot{V}_R) + j\omega C_{c0}(\dot{E}_c + \dot{V}_R) = -\frac{\dot{V}_R}{R_N} \dots (1)$$

から

$$\dot{V}_R = -\frac{j\omega(C_{a0}\dot{E}_a + C_{b0}\dot{E}_b + C_{c0}\dot{E}_c)}{\frac{1}{R_N} + j\omega(C_{a0} + C_{b0} + C_{c0})} \dots (2)$$

となり, 各相の対地静電容量の不均衡により残留電圧 \dot{V}_R が発生する。対地静電容量の不均衡は3相の導体配置によるほか, 単相の分岐回路によって生ずる。

この残留電圧の大きさは, 大部分の変電所で1線地絡に発生する零相電圧 (接地用 P.T オープン 1/2 次電圧で通常 190V) の3% 以下であるが, まれには5% 以上に達するものもあるとされている。

なお, 図2で接地抵抗 R_N は図1の限流抵抗 r_n を等価変換したもので

$$R_N = \frac{n^2}{9} r_n \dots (3)$$

n : 接地用 P.T の変圧比

となり, 高圧配電線では $1/j\omega(C_{a0} + C_{b0} + C_{c0})$ の数十倍になり, 残留電圧 \dot{V}_R は(4)式で近似される。

$$\dot{V}_R \doteq \frac{\dot{E}_a C_{a0} + \dot{E}_b C_{b0} + \dot{E}_c C_{c0}}{C_{a0} + C_{b0} + C_{c0}} \dots (4)$$

* 日立製作所日立研究所
** 日立製作所那珂工場

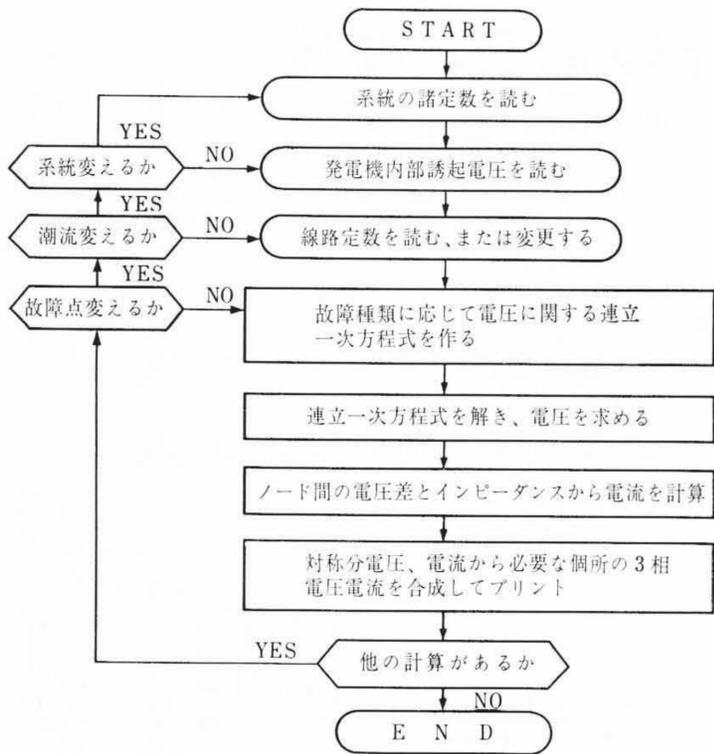


図3 故障計算フロー・チャート

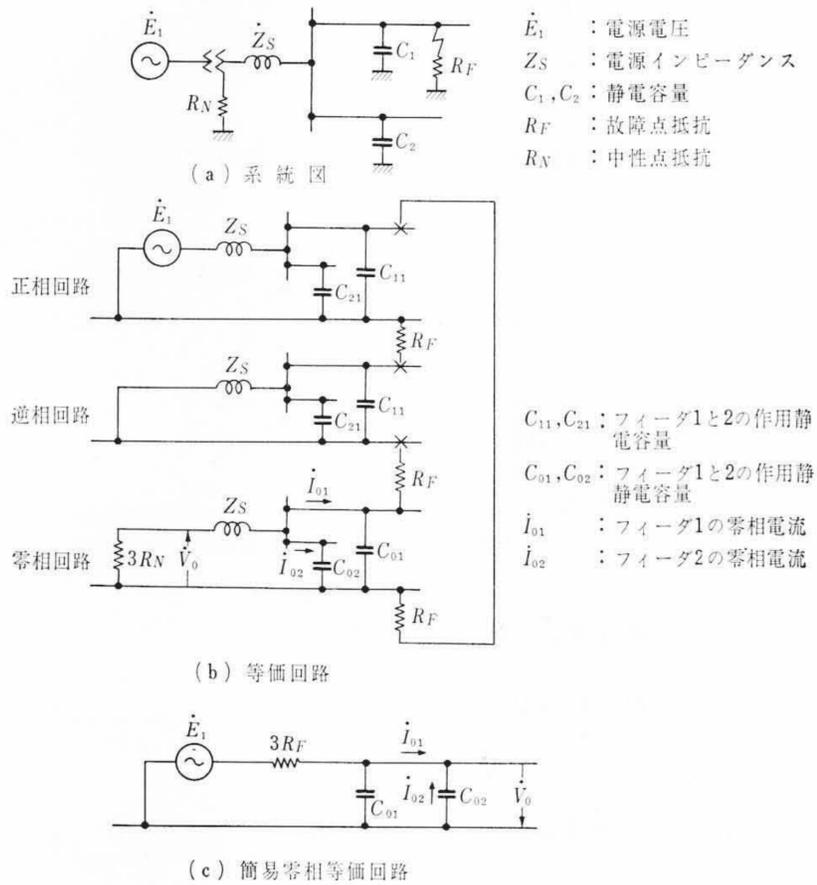


図4 1線地絡故障時の等価回路

(2) 微接地故障

微接地故障すなわち高い抵抗を通しての地絡故障の場合、零相電圧、電流ともに小さくなるが、主として、危険防止の立場からこの場合も故障検出の必要があり、できればフィーダの区別もできることが望ましい。

(3) 2相にまたがる故障

故障点抵抗がゼロの場合、高圧配電線の2線地絡時の零相電圧は1線地絡時の約1/2になることは容易に推定できるが、故障点抵抗が入った場合どのようになるかの検討が不じゅうぶんである。

(4) 2フィーダにまたがる故障

2フィーダで異なる相に同時に地絡故障が発生した場合、2フィーダの故障相間を流れる電流が零相CTからは見かけ上零相電流となるが、これと零相電圧との位相関係はどのようになるか。

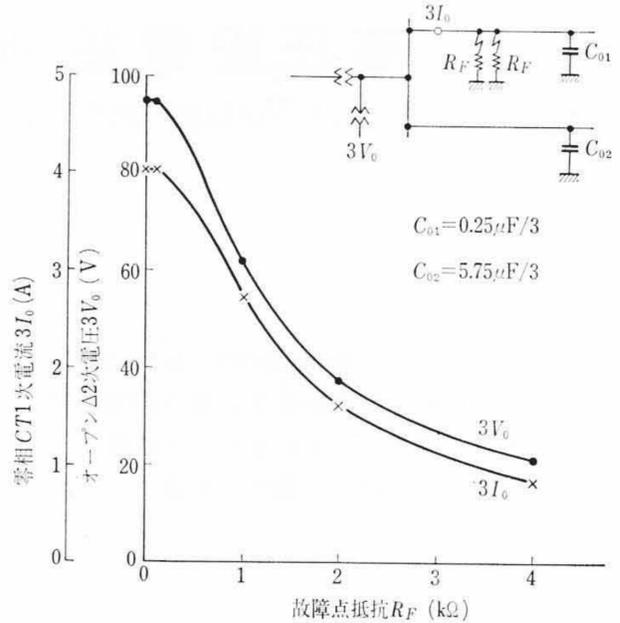


図5 2線地絡故障時の電圧、電流計算例

3. 配電線故障時の電圧、電流

高圧配電線の保護継電器に用いられるのは前述のように、零相電圧、電流であるので、計算結果中3相量については割愛し、ここでは零相電圧・電流のみについて言及する。

3.1 計算法および計算条件

電圧、電流計算のフローチャートは図3に示すとおりで、計算法の原理は参考文献(2)によっている。

計算条件は下記のとおりである。

- (1) 配電線のインピーダンスは省略する。
- (2) 各フィーダ間の電磁結合および静電結合はないものとする。
- (3) 各相の対地静電容量の違いは無視する。
- (4) 作用静電容量は対地静電容量の2倍とする。
- (5) 電源の短絡容量は120 MVAとする。
- (6) 対象配電線の電圧は6.6 kVとする。
- (7) 対象配電線の周波数は60 Hzとする。
- (8) 接地用P.Tの限流抵抗は50Ω(中性点そう入抵抗換算20kΩ)とする。
- (9) 故障点抵抗は0~4kΩとする。
- (10) 負荷の影響は無視する。

3.2 1線地絡故障時

1線地絡故障は従来種々検討されており、図4のような等価回路として取り扱われる⁽³⁾。図4の(C)から近似的に

$$\dot{V}_0 \doteq - \frac{\dot{E}_1}{1 + j\omega(C_{01} + C_{02}) \cdot 3R_f} \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{I}_{01} \doteq \frac{j\omega \cdot C_{02} \cdot \dot{E}_1}{1 + j\omega(C_{01} + C_{02}) \cdot 3R_f} \dots\dots\dots (6)$$

と求められるのでデジタル計算機による計算は省略し、2線地絡故障との比較について後述する。

3.3 2線地絡故障時

図5は故障回線側の対地静電容量が3相当たり0.25μF、健全回線合計の対地静電容量が3相当たり5.75μFのときの故障点抵抗と零相電圧と零相電流の計算例を示したものである。故障点抵抗は同一値とする。ここで電圧はオープンΔ2次の値、電流は零相CT1次換算(3I0)値である。

前述のようにV0とI0の位相は故障点抵抗とは無関係であって、この場合V0に対し-I0(通常継電器入力V0基準に対する-I0の位相で考える)は89度進み位相になる。

次に2線地絡故障時の零相電圧の大きさについて近似計算をし、

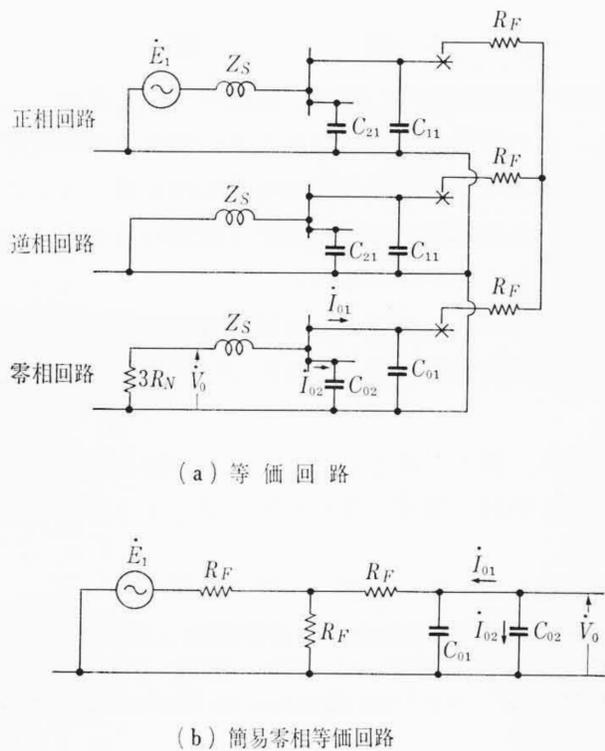


図6 2線地絡故障時の等価回路

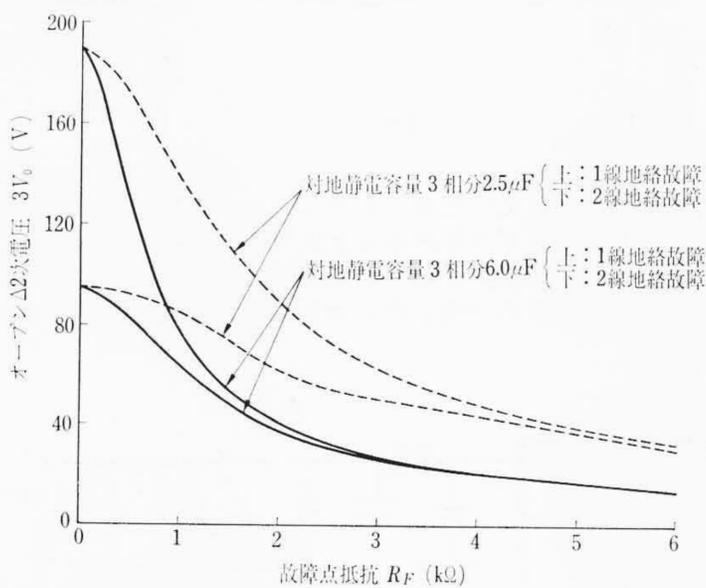


図7 1線地絡故障時と2線地絡故障時との零相電圧の比較

1線地絡故障時と比較しながら検討してみる。2線地絡時の等価回路は図6の(a)のように表わされ、その零相回路に関する簡易等価回路である図6の(b)から

$$V_0 \doteq \frac{\dot{E}_1}{2 + j\omega(C_{01} + C_{02}) \cdot 3R_F} \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。(5)式と(7)式から1線地絡故障時と2線地絡故障時の零相電圧 \dot{V}_0 の大きさは故障点抵抗零のときはほぼ2:1の割合になることがわかる。故障点抵抗が増すにつれて、その差は小さくなり \dot{V}_0 が電源電圧 \dot{E}_1 の数分の一になるような場合には故障点抵抗による1線地絡故障時と2線地絡故障時の \dot{V}_0 の大きさはほとんど変わらない。

図7は故障点抵抗による1線地絡故障時と2線地絡故障時の零相電圧の大きさの比較を示したものである。

3.4 2フィーダにまたがる地絡故障時

図8は2フィーダにまたがる故障時の電圧、電流の計算例の継電器入力ベクトル図を示したものである。電流は位相関係だけを図示し、大きさは適当な値である。ここで3相当たりの対地静電容量は故障フィーダであるフィーダ1、フィーダ2が $0.25 \mu\text{F}$ 、健全相合計であるフィーダ3が $5.5 \mu\text{F}$ で、故障フィーダのうちフィーダ1の故障相はフィーダ2の故障相より進み相であるとする。

2フィーダにまたがる故障時には故障相間を流れる電流が見かけ

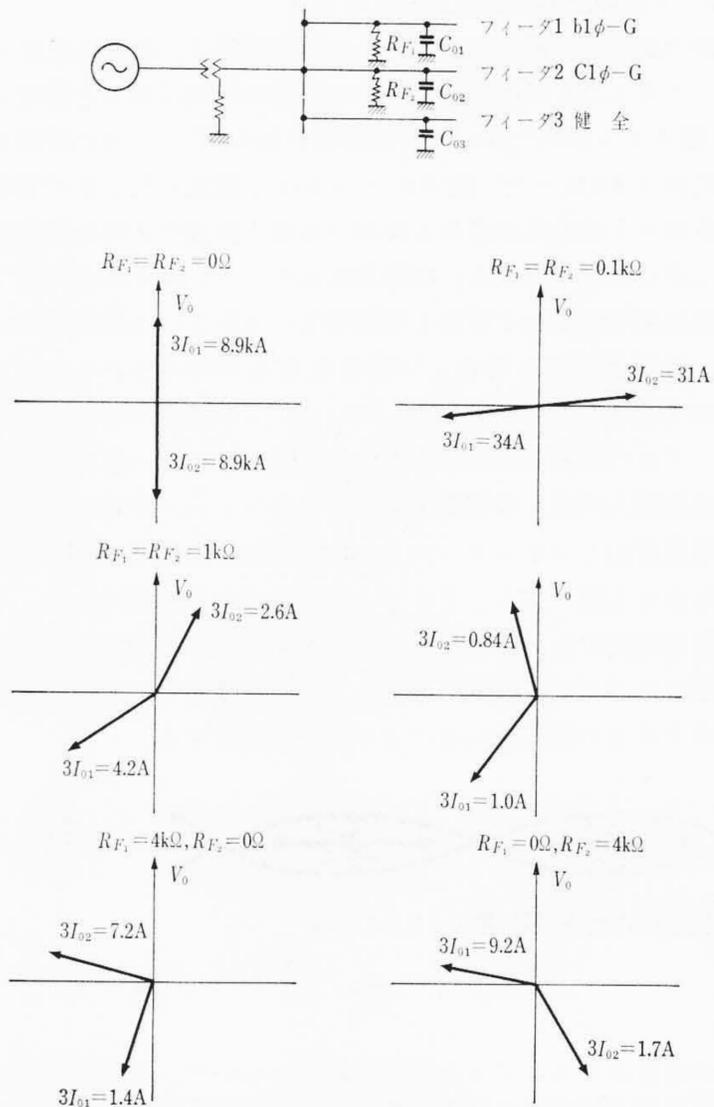


図8 2フィーダにまたがる故障時の継電器入力例

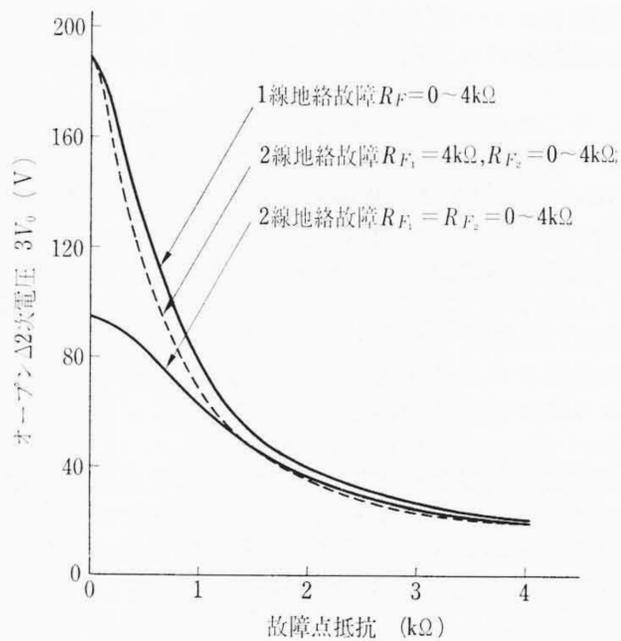


図9 故障点抵抗が異なる2線地絡故障時の零相電圧と1線地絡故障時、2線地絡故障時の比較

上の零相電流となるため V_0 と I_0 の位相関係はきわめて広い範囲に変化する。また、二つの故障フィーダの零相電流の位相差が大きい場合、多くの場合、同時に故障フィーダを検出することは困難で、一方のフィーダを遮断後、残りの故障フィーダを検出することになる。さらに方向地絡継電器の特性によっては比較的低い故障点抵抗であっても二つの故障フィーダがともに故障を検出できない可能性もあるのでじゅうぶん注意する必要がある。

零相電圧の大きさは故障が相の異なる2線で発生した場合、故障が同一フィーダにあっても2フィーダにまたがってもほとんど相違なく、本章のようにフィーダの直列インピーダンスを省略すれば事実上同一とみなせる計算値が得られ、2線の故障点抵抗が等しい場合前述図7の計算例のように変化する。

3.5 2線の故障点抵抗が異なるとき

2線の故障点抵抗が異なるときの零相電圧は、故障点抵抗の小さいほうで考えた1線地絡時と2線地絡時の中間にあると推定できよう。図9は3相当たりの全対地静電容量6 μ Fで一方の故障相の故障点抵抗を4k Ω 一定、他方を0~4k Ω と変化したときの零相電圧の計算例を1線地絡故障および同一故障点抵抗の2線地絡故障と比較して示したものである。故障点抵抗の小さいほうが進み相であるか、遅れ相であるかは事実上零相電圧の大きさには影響しない。一部同一故障点抵抗の場合より零相電圧がやや小さいケースもあるが、ほぼ前述の考えが成り立っている。この場合の零相零流は同一フィード内の故障であれば1線地絡故障および同一故障点抵抗の2線地絡故障と同様、零相電圧および健全フィードの対地静電容量と背後電源零相インピーダンス(大部分は接地用P.Tの限流抵抗)の比からきまる値である。2フィードにまたがる故障時には、みかけ上の零相電流のため、零相電流の大きさおよび零相電圧との位相関係は図8のベクトル図例にもあるように故障相の進み遅れと故障点抵抗の大きさの組み合わせにより複雑に変化する。

4. 結 言

高圧配電線の地絡故障時の電圧、電流について検討した結果について述べた。その結果故障点抵抗が大きい場合の零相電圧の大きさは1線地絡故障でも2線地絡故障でもそれほど差のないこと、2フィードにまたがる故障時には零相電圧と電流の位相差がきわめて広い範囲に変化することがわかった。

今後の問題として、高感度の方向地絡継電器を適用するうえに健全時における零相の残留電圧、電流については検討を行なう必要がある。

終わりに臨み、種々ご助言いただいた日立製作所日立研究所高林部長、奥田室長、那珂工場渡井課長に対し衷心より御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 電気学会編：電気学会大学講座送配工学配電編77(昭26-1)
- (2) 奥田，磯野：電学誌86, 1745(昭38-10)
- (3) F. S. Rothe：An Introduction to Power System Analysis, 100 (1953)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第829047号

電 昭 喜

絶 縁 抵 抗 計

この考案はトランジスタ絶縁抵抗計において、定電圧ダイオードおよび直流高圧回路に分圧抵抗を設け定格電圧判別時において、あらかじめ整定されている定電圧ダイオードによる一定電圧と分圧された所定電圧とを、すでに絶縁抵抗計として内蔵されている電流コイルまたは電圧コイルに逆極性に直列に印加するようにし、その大きさの相互関係により定まる該コイルのトルクにより直流高電圧すなわち、絶縁抵抗計の定格電圧の適否判別をなすようにしたものである。

図についてこの考案を説明すると、まず被測定体の絶縁抵抗を測定する場合には切換スイッチ7を端子72側に接続し、かつテストスイッチ10を端子102側に接続し、抵抗測定端子13, 14間に被測学体を接続することにより絶縁抵抗が測定できる。また絶縁抵抗を測定する直前に絶縁抵抗計の定格電圧適否試験を行なうには、切換スイッチ7を端子71に接続するとともにテストスイッチ10を端子101に接続すれば電圧コイル8には分圧抵抗6の両端に生ずる分電圧と定電圧装置3による定電圧とが差動的に加えられる結果、前記電圧コイル8には差動電流が流れトルクが生じ、差動電流の方向により指針をいずれかの方向に振らせる。

この場合定電圧装置3に電流に方向性を有する温度補償を施したツイン形ダイオードを使用すれば電圧コイル8に流れる電流に方向性をもたせることができ、結局指針が振れるか振れないかということにより容易に定格電圧の適否判別ができる。

この適否判別法としては従来ネオンランプの点滅による定格電圧

の測定法が採用されていたが、ネオンランプの放電開始電圧は経年変化するとともにバラツキが多くネオンランプそのものが信頼性に乏しいものであったが、この考案によれば、きわめて正確に判別できるので、測定精度が一段と向上するという効果が期待できるものである。(西宮)

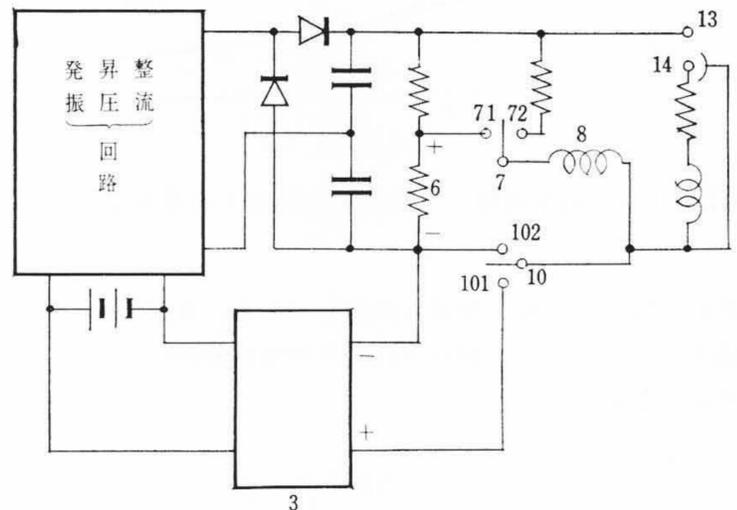


図 1

お わ び

本誌4月号の「一家一言」ご執筆者 埴野一郎氏の読み方を誤って印刷いたしました。次のおおりに訂正いたさんとともに、ここに深くお詫びを申し上げます。

記

訂正いただく個所： 本誌4月号の目次の欄

正	誤
埴 野 一 郎 Ichirô Hano	埴 野 一 郎 Ichirô Ueno