

# 距離継電器からみた送電線のインピーダンス

## Impedance of Transmission Line Observed by the Distance Relays

高林 乍人\* 柴田 満男\* 磯野 昭\*  
Hayato Takabayashi Mitsuo Shibata Akira Isono

### 内 容 梗 概

送電線の同一回線内故障時または並行2回線の両方にまたがる異相地絡故障時に短絡距離継電器および地絡距離継電器からみたインピーダンスを、模擬回路により実験的に求めた。

引続き並列2回線にまたがる異相地絡保護のため、異回線間に短絡距離継電器を用いる方式を検討し、距離測定誤差は数%程度であるという計算結果をえた。

### 1. 緒 言

わが国の重要な送電線の保護には距離継電器を主体としたキャリアリレー方式が広く用いられ、最もすぐれた方式の一つに数えられているが、なお技術的未解明の問題がある。

距離継電器の原理は、送電線のインピーダンスが距離に比例することを利用したもので、継電器に導入された電圧、電流の比からインピーダンスを求め、このインピーダンスがある一定範囲内であれば動作するようになっている。したがって同一回線内同一点の故障では故障相の継電器は故障点までのインピーダンスを測定し正しく動作するが、健全相の継電器がみるインピーダンスは種々の条件により変化し、動作する必要のないそれらの継電器が動作することがある。また並行2回線の両回線にまたがる異相地絡は、通常短絡距離継電器により保護されるが、この場合短絡距離継電器は故障点までの正確な距離を測定できない。

このように距離継電器からみたインピーダンスは故障種類により複雑に変化し、また負荷の影響もあり動作すべき継電器が故障点までの距離に比例するインピーダンスを正しく測定できない場合や、動作する必要のない継電器が動作する場合があるので、種々の故障時に距離継電器がみるインピーダンスが距離に関連してどのようなかは継電方式決定上重要な問題である。これらはある程度まで数式的に解きうるがなかなか難解である。また図式解法により求めた文献<sup>(1)(2)</sup>や、交流計算盤を用いて実験的に求めたもの<sup>(3)</sup>もあるが、前者は1回線無負荷、後者は無負荷で地絡距離継電器に補償のないものである。

ここでは二つの模擬回路を用い、負荷電流の影響も考慮に入れて行った各種故障時の実験結果について述べ、さらに最近問題視されている並行2回線の両回線にまたがる異相地絡に対する保護方式の一案を述べる。

なお本文中に用いる記号を下記に示す。

#1L: 第1号線

#2L: 第2号線

$\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0$ : 送電線の各対称分インピーダンス (ただし  $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2$  とする)

$\dot{Z}_M$ : 送電線の回線間の相互インピーダンス

$L_e$ : 送電線の自己インダクタンス

$L_e'$ : 同一回線内の線間の相互インダクタンス

$L_e''$ : 回線の異なる線間の相互インダクタンス

$\dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c$ : 各相電圧

$\dot{V}_{ab}, \dot{V}_{bc}, \dot{V}_{ca}$ : 各線間電圧

1φ-G, 2φ-S, 2φ-G: 1線地絡, 2線短絡, 2線地絡

以下#1Lのみを示す。#2Lは#1Lの記号に「'」を付す。

$a, b, c$ : #1Lの各相

$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ : #1Lの各相電流

$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ : #1Lの各対称分電流

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_0$$

$\dot{Z}_a, \dot{Z}_b, \dot{Z}_c$ : #1Lの各相の地絡距離継電器からみるインピーダンス

$\dot{Z}_{ab}, \dot{Z}_{bc}, \dot{Z}_{ca}$ : #1Lの各線間の短絡距離継電器からみるインピーダンス

「・」のあるのはベクトル量, 「・」のないのはスカラー量

### 2. 同一回線内故障時のインピーダンス

ここでは模擬送電線を用いて送電線を模擬する。ただし2回線を構成したとき回線間の結合がないので並行2回線ではなく完全に別ルートを経過するループ系を模擬したことになる。

#### 2.1 想定送電線(1)とその模擬回路

想定送電線は2機系で考えて、互長250kmの送電線の両端には電源があるとし、電源の容量は一方をこの送電線で送れる限界程度にとり、他方をこの2倍の容量にとった。

第1図は想定送電線(1)を示す。すなわち

電圧: 275kV (送電線275kV, 受電端250kV)

距離: 250km

系統構成: 1回線または2回線

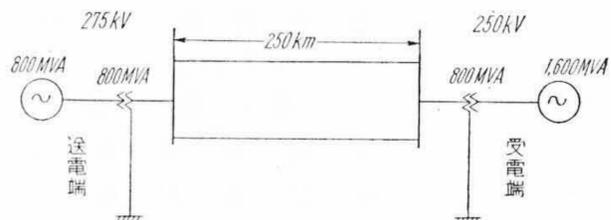
中性点接地方式: 直接接地

発電機: 送電端に容量800MVA } の発電機があると  
受電端に容量1,600MVA } する。

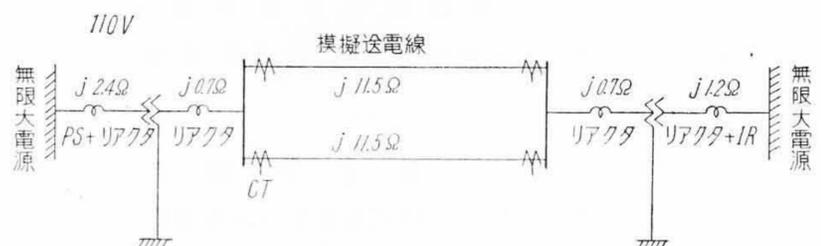
変圧器: 送電線の両端に800MVAの変圧器があるとす  
る。

故障時のインピーダンスは発電機の正相, 逆相が各25%, 変圧器の正相, 逆相, 零相はひとしく10%とする。

第2図は模擬送電線, リアクタ, 誘導電圧調整器(IR), 移相器

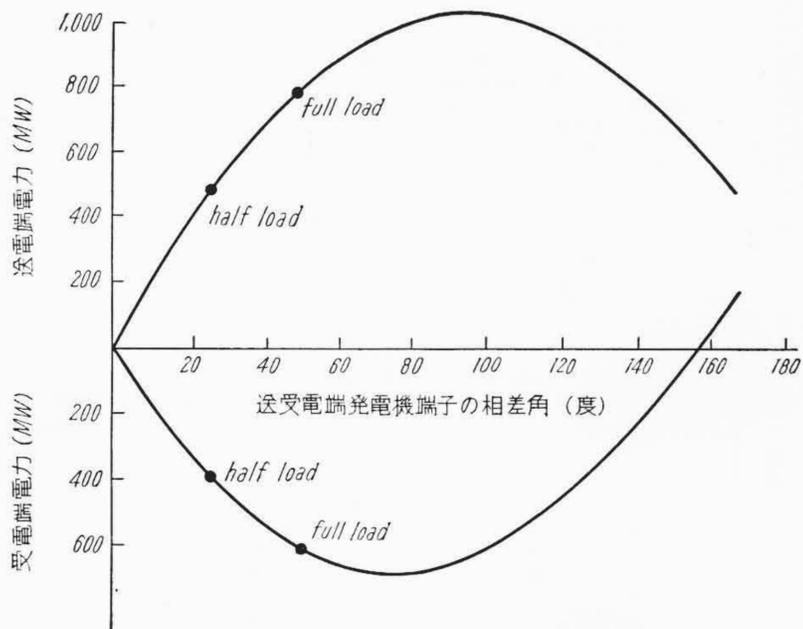


第1図 想定送電線(1)

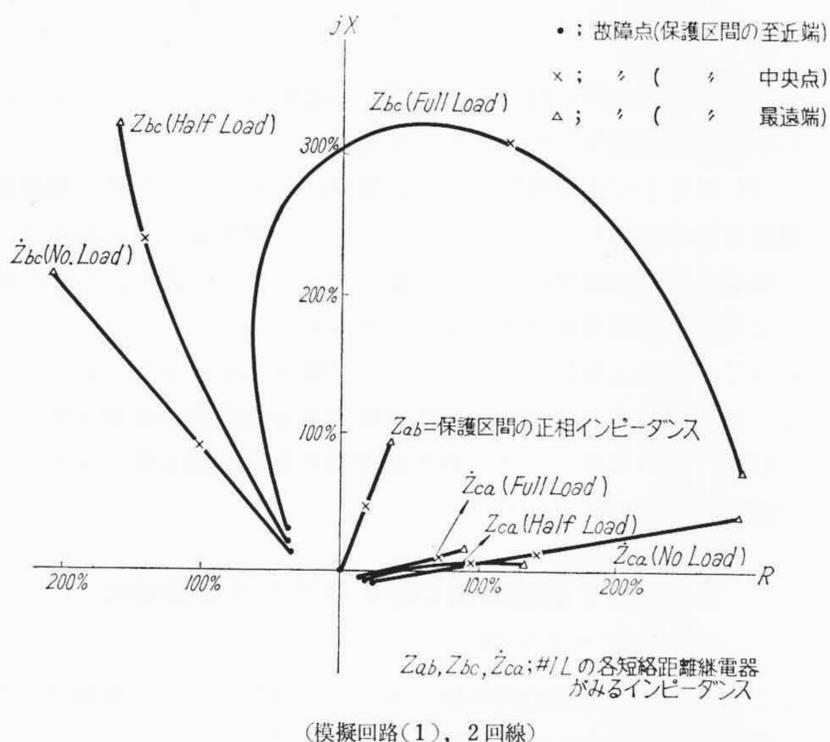


第2図 想定送電線(1)の模擬回路

\* 日立製作所日立研究所



第3図 想定送電線(1)の送電電力(2回線時)



第4図 ab 2φ-S時に送電端#1Lの各短絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路(1), 2回線)

(PS) を用いて第1図を模擬したものである。模擬回路と実回路の換算比は

$$\text{模擬回路と実回路の電圧比} = \frac{275,000}{110} = 2,500 \quad \dots (1)$$

$$\text{模擬回路と実回路のインピーダンス比} = 10 \quad \dots (2)$$

$$\text{模擬回路と実回路の電流比} = \frac{2,500}{10} = 250 \quad \dots (3)$$

$$\text{模擬回路と実回路の電力比} = 2,500 \times 250 = 625 \times 10^3 \quad \dots (4)$$

2.2 想定送電線(1)の送電電力

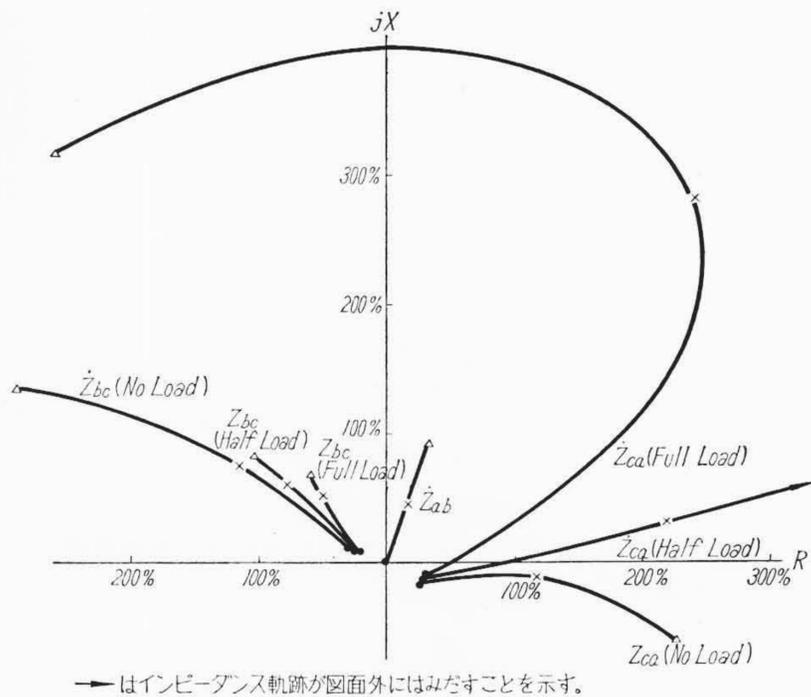
第3図は2回線の模擬回路での両端の発電機の位相差と送電線両端の送受電力を示すもので送電線両端の発電機端子の電圧比を1:1.1に保ちながら移相器により発電機間の位相差を変えて測定した。実験は位相差が0°, 25° および送電限界と考えられる50°の3点で行った。送電電力と受電電力の差が模擬回路での送電損失を示す。

2.3 インピーダンスの測定法

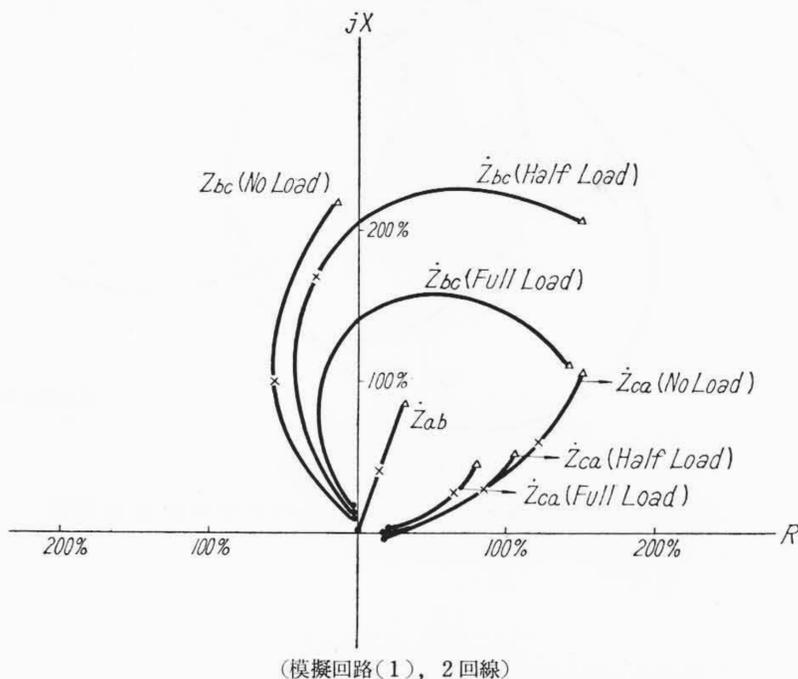
電圧および電流を電圧計および電流計から直読し、インピーダンスはその絶対値を電圧、電流の比から求め、インピーダンス角は位相計から直読した。

2.4 距離継電器がみるインピーダンス

地絡故障を起したときに故障相の電流補償型地絡距離継電器がみ



第5図 ab 2φ-S時に受電端#1Lの各短絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路(1), 2回線)



第6図 ab 2φ-G時に送電端#1Lの各短絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路(1), 2回線)

るインピーダンスは、a相を例にとり静電容量、漏えいコンダクタンス、故障点抵抗を無視すれば

$$\frac{\dot{V}_a}{\dot{I}_a + \frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{\dot{Z}_1} \dot{I}_0} \quad (1回線) \quad \dots (5)$$

$$\frac{\dot{V}_a}{\dot{I}_a + \frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{\dot{Z}_1} \dot{I}_0 + \frac{\dot{Z}_M}{\dot{Z}_1} \dot{I}_0'} \quad (2回線) \quad \dots (6)$$

により故障点までの正相インピーダンスを読むことができる。ここでは模擬回路に回線間の結合がないので2回線であっても(5)式を用いればよい。また  $\frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{\dot{Z}_1}$  はベクトル量であるが  $\dot{Z}_0$  と  $\dot{Z}_1$  はほぼ位相がひとしいので、スカラー量としてあつかう。

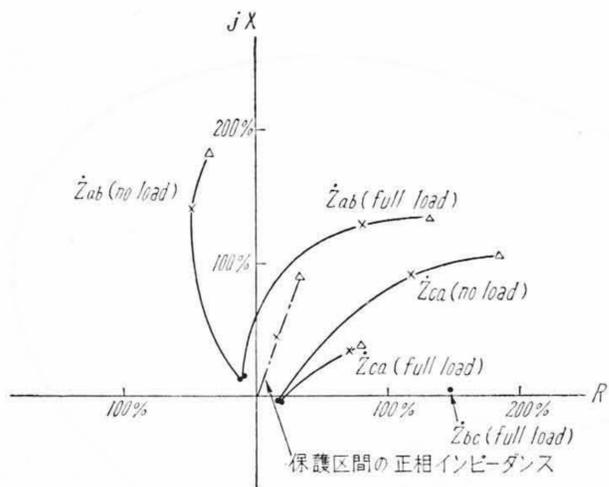
同様に故障相の短絡距離継電器がみるインピーダンスは ab相を例にとれば

$$\dot{V}_{ab} / \dot{I}_a - \dot{I}_b \quad \dots (7)$$

により故障点までの正相インピーダンスを読むことができる。

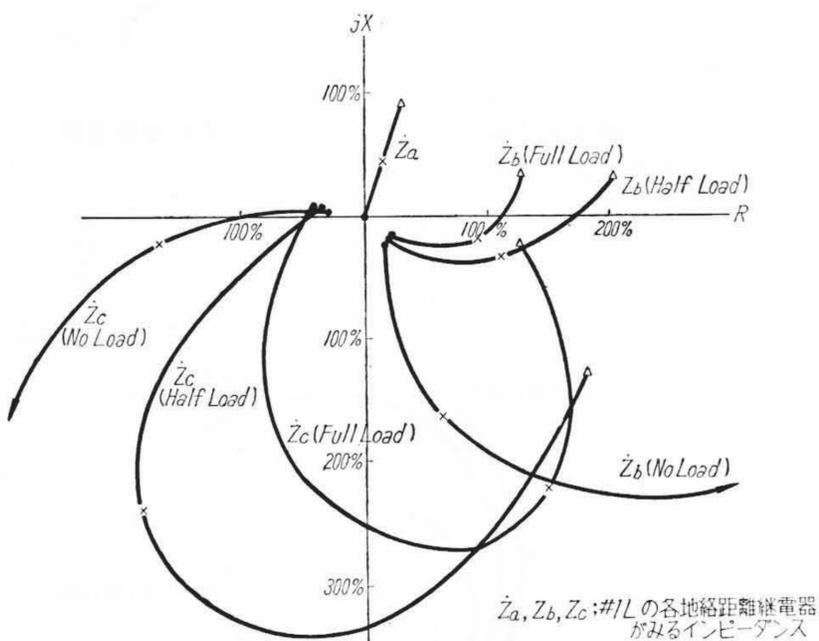
模擬回路(1)で2回線の場合に距離継電器がみるインピーダンスの例を第4~9図に示す。図で no load とは送電電力零の時を、half load とは送電線両端の発電機端子の位相差が25度の時を、full load とは発電機端子の位相差が50度の時を示す。

距離継電器がみるインピーダンス軌跡の例は2回線の場合だけを示したが、1回線の場合にもほぼ同様になる。これらの測定結果に



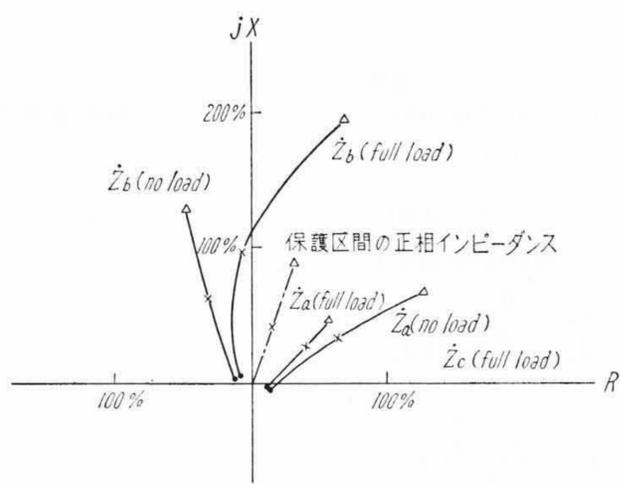
(模擬回路(1), 2回線)

第7図 a1φ-G時に送電端#1Lの各短絡距離継電器がみるインピーダンス



(模擬回路(1), 2回線)

第8図 a1φ-G時に送電端#1Lの各地絡距離継電器がみるインピーダンス

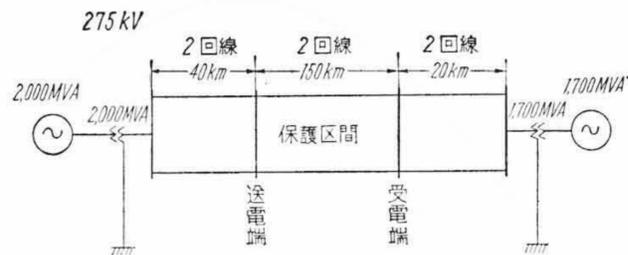


(模擬回路(1), 2回線)

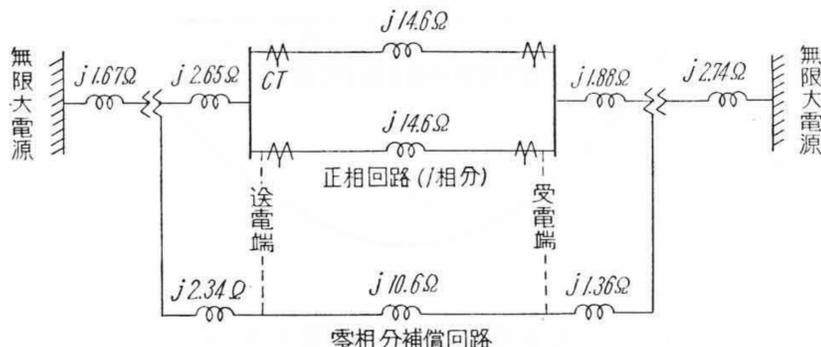
第9図 ab 2φ-S時に送電端#1Lの各地絡距離継電器がみるインピーダンス

よれば、

- (1) 送電電力零の時に比べ送電電力を増したときは故障相の継電器以外の継電器からみたインピーダンスが継電器の動作範囲にはいってくるが多くなる。
- (2) この場合動作する必要のない故障に動作する可能性のあるのは
  - (A) ab 2φ-S, ab相 2φ-G時のbc相およびca相の短絡距離継電器
  - (B) ab 2φ-S時のa相およびb位の地絡距離継電器
  - (C) a1φ-G時のab相およびca相の短絡距離継電器である。



第10図 想定送電線(2)



第11図 想定送電線(2)の模擬回路

(A)の2相故障に対しては通常3相遮断するから方式上はこれらの継電器が動作してもさしつかえない。

(B)に対しては保護区間内の故障時にa相およびb相の地絡距離継電器が動作してもさしつかえないが、第9図にみられるように保護区間外の故障時にも延長動作するおそれがあり、2φ-S時には地絡距離継電器は鎖錠する必要がある。

(C)の場合は单相故障に対し3相遮断する時はさしつかえないが、单相遮断する時には短絡距離継電器を鎖錠する必要がある。

(B), (C)に対して単に距離継電器の動作範囲を狭くするだけで誤動作を避けることはむずかしい。

### 3. 並行2回線の両回線にまたがる故障時のインピーダンス

ここでは並行2回線の両回線にまたがる故障について実験するため、回線間の結合をもつ模擬回路を採り上げた。

#### 3.1 想定送電線(2)とその模擬回路

第10図は想定送電線(2)を示す。

図の送電線部分のインピーダンスは

$$\dot{Z}_1 = j\omega(L_e - L_e') \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{Z}_0 = 3.10 \dot{Z}_1 = j\omega(L_e + 2L_e') \dots\dots\dots (9)$$

$$\dot{Z}_0 + \dot{Z}_M = 5.00 \dot{Z}_1 = j\omega(L_e + 2L_e' + 3L_e'') \dots\dots\dots (10)$$

$$\therefore j\omega 3L_e' = \dot{Z}_0 - \dot{Z}_1 = 2.10 \dot{Z}_1 \dots\dots\dots (11)$$

$$j\omega 3L_e'' = \dot{Z}_M = 1.90 \dot{Z}_1 \dots\dots\dots (12)$$

程度であるが保護区間の送電線は同一回線内の2線の結合と、異回線間の2線の結合をひとしく、

$$j\omega 3L_e' = j\omega 3L_e'' = \frac{2.10 + 1.90}{2} \dot{Z}_1 = 2.00 \dot{Z}_1 \dots\dots\dots (13)$$

とし、実際の送電線の1/5のインピーダンスを用いて第10図を第11図のように模擬する。

模擬回路と実回路の換算比は

$$\text{模擬回路と実回路の電圧比} = \frac{275,000}{110} = 2,500 \dots\dots (14)$$

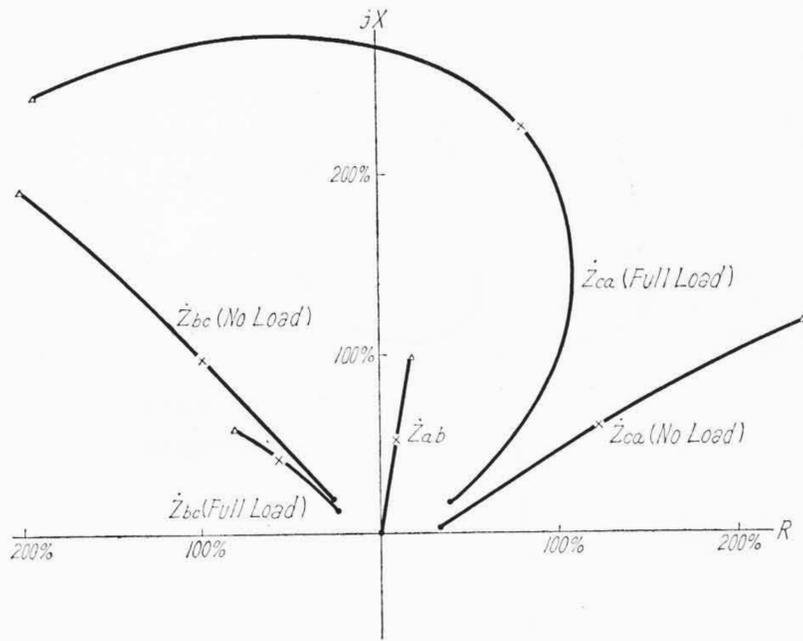
$$\text{インピーダンス比} = 5 \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{電流比} = \frac{2,500}{5} = 500 \dots\dots\dots (16)$$

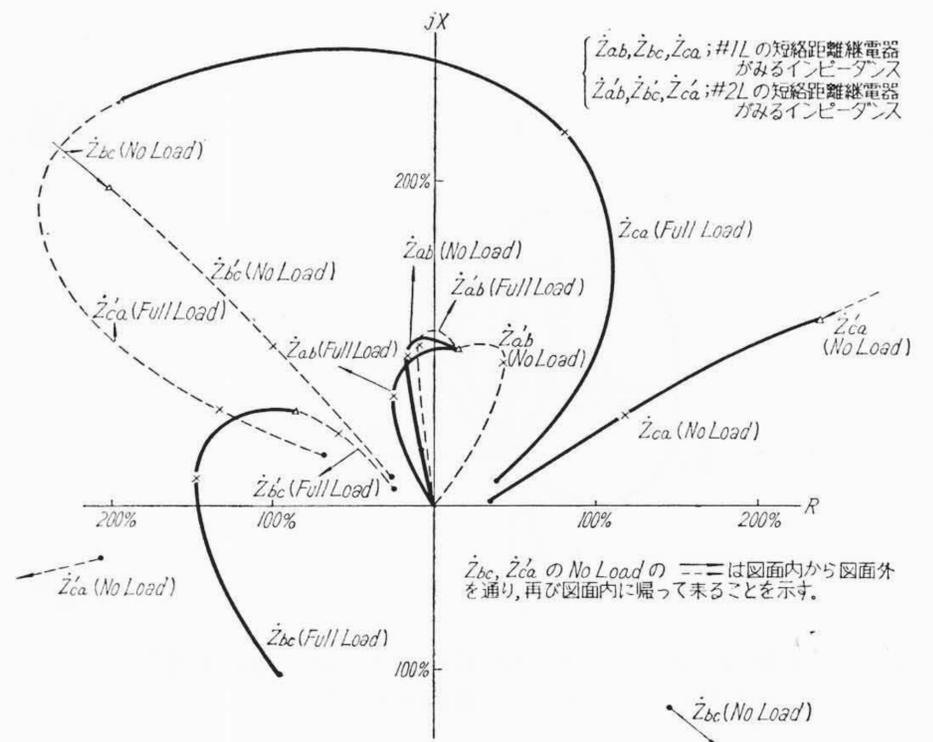
$$\text{電力比} = 2,500 \times 500 = 125 \times 10^4 \dots\dots\dots (17)$$

#### 3.2 距離継電器がみるインピーダンス

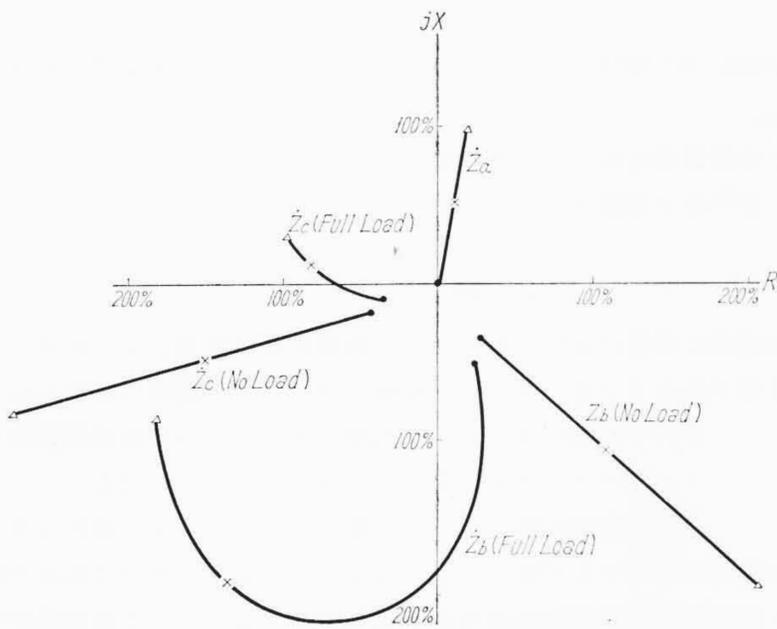
地絡距離継電器に対しては前章の(6)式を用いる。模擬回路は  $L_e' = L_e''$  として構成してあり、インピーダンスは第11図のように



第12図  $ab$  2 $\phi$ -G時に#1Lの各短絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路 (2))



( $a$  1 $\phi$ -G- $b'$  1 $\phi$ -G……#1La相, #2Lb相同時1線地絡)  
第14図  $a$  1 $\phi$ -G- $b'$  1 $\phi$ -G時に各短絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路 (2))



第13図  $a$  1 $\phi$ -G時に#1Lの各地絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路 (2))

なるから零相電流の補償は

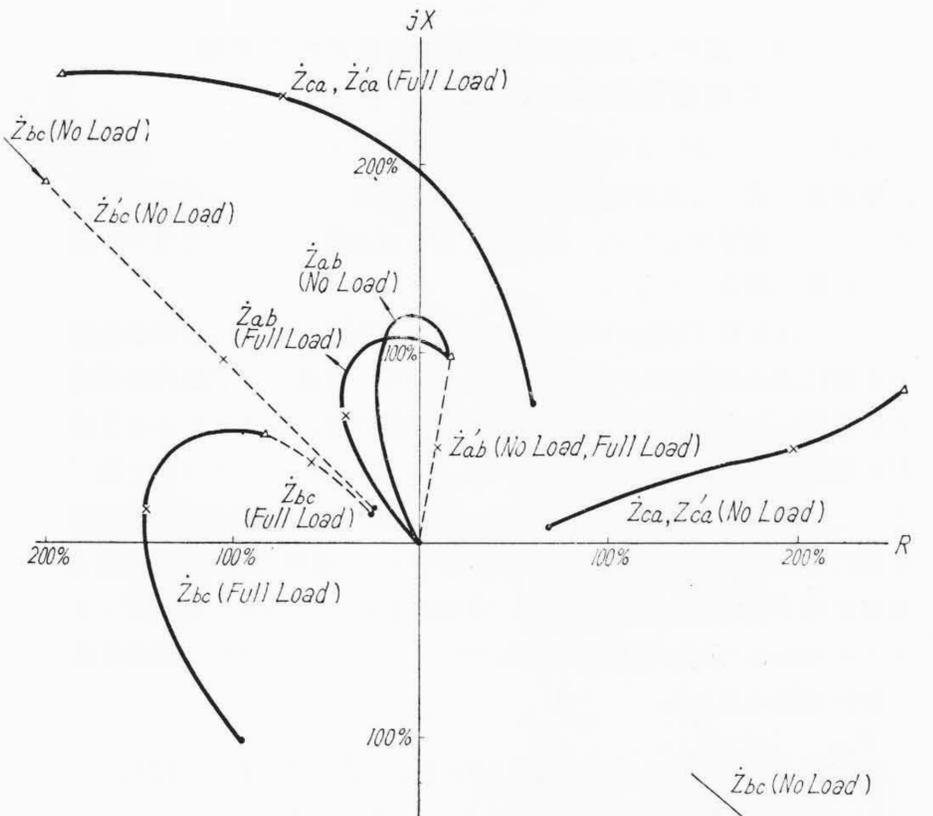
$$\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} = \frac{Z_M}{Z_1} = 2.18 \dots (18)$$

となる。

回線数はすべて2回線の場合、継電器は受電端側のみを示す。この回路では並行2回線の両回線にまたがる異相地絡時の結果を主とするが、その前に第12, 13図に同一回線内同一点での故障例を示す。図で no load とは送電電力零の場合を示し、full load とは両端の発電機端子の位相差が $50^\circ$ になる点である。full load では受電端の受電電力が約800 MW(2回線分)になる。実際にはこのような大きな電力を送る例はほとんどないが、想定送電線(1)の場合と同様両発電機間の位相差を送電限界まで開いたためである。

異相地絡故障には次に述べる並行2回線の両回線にまたがる同一地点の故障のほか、故障点を異にする故障も考えられるが、故障点を異にする故障が同時に起ることは少ない。特に故障相が高速遮断され、また健全相の電圧上昇の小さい直接接地系の送電線ではほとんどなく、落雷を考慮しても事実上同一接点の故障とみなしてさしつかえない程度の距離を隔てた点でしか起らないと考えられる。したがってここでは並行2回線の両回線にまたがる同一地点の故障に対して検討する。

第14~17図は並行2回線の両回線にまたがる同一地点故障の例を示す。図で  $a$  1 $\phi$ -G- $b'$  1 $\phi$ -G と記したのは#1Lの  $a$  相と#2Lの  $b$  相が同時におのおの1線地絡したことを示す。 $a$  1 $\phi$ -G- $a'b'$  2 $\phi$ -G,  $a$  1 $\phi$ -G- $b'c'$  2 $\phi$ -G も同様の意味である。

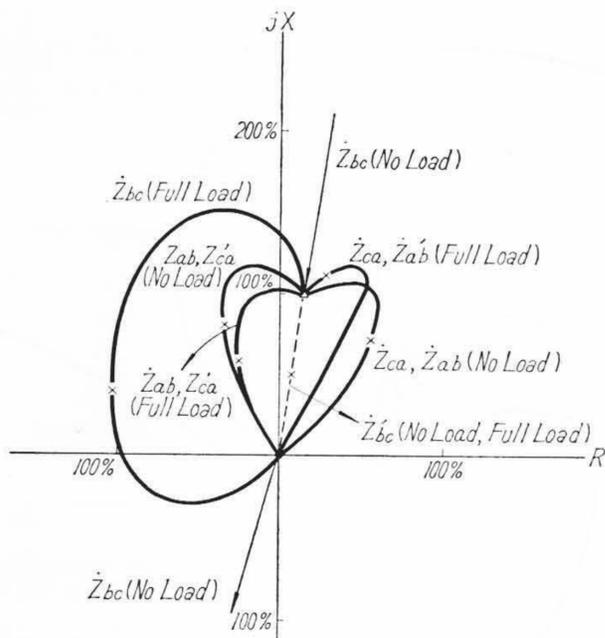


第15図  $a$  1 $\phi$ -G- $a'b'$  2 $\phi$ -G時に各短絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路 (2))

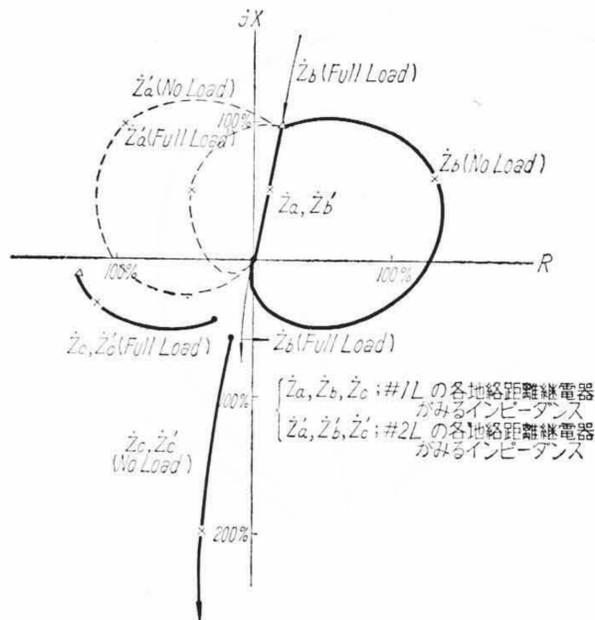
送電電力が零の時、 $a$  1 $\phi$ -G- $b'$  1 $\phi$ -G故障時の  $ab$  相および  $ab'$  相の短絡距離継電器のように一方の相が自回線で他方の相が他回線で故障した時の短絡距離継電器がみるインピーダンスは、形は故障種類により多少異なるが、第14図に示すようにハート形を送電線の正相インピーダンスを中心に分割した右半分または左半分の形となる。送電電力があればこの継電器がみるインピーダンスは左側に移動する。これは受電端の継電器からみた場合で、送電端の継電器からは右側に移動してみえる。

地絡距離継電器がみるインピーダンスは、同一点故障で故障点抵抗を考慮していないから故障相の継電器は正しく故障点までの距離を測定している。しかしながら故障点に抵抗があれば送電線の2相で起った故障に対し、よく知られているように遅れ相の地絡距離継電器は短縮動作し、進み相の地絡距離継電器は延長動作するため、2相故障に対しては地絡距離継電器の動作を鎖錠するのが普通である。

このため並行2回線の両回線にまたがる故障に対し、短絡距離継電器の動作により遮断するので、従来の距離継電方式では両回線と



第 16 図  $a1\phi-G-b'c'2\phi-G$  時に各短絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路 (2))



第 17 図  $a1\phi-G-b'1\phi-G$  時に各地絡距離継電器がみるインピーダンス (模擬回路 (2))

もに 3 相遮断し、しかも第 1 段の動作により遮断できるのは保護区間の 30~50% という狭い範囲になる。

#### 4. 並行 2 回線の 2 線間に接続された短絡距離継電器がみるインピーダンス

前述のように並行 2 回線の両回線にまたがる故障に対し、従来の距離継電方式では通常地絡距離継電器を鎖錠し、短絡距離継電器の動作により遮断するため、両回線とも 3 相遮断し、故障点までの正しい距離を測定できない。

ここでは並行 2 回線の両回線にまたがる故障の故障点までの距離を正確に求め故障相だけを遮断する目的で、従来同一回線内の 2 線にのみ用いた短絡距離継電器を並行 2 回線の両回線にまたがる 2 線間に用いる時に、その継電器がみるインピーダンスについて述べる。この継電器がみるインピーダンスは  $ab'$  相間の短絡距離継電器を例にとり、静電容量、漏えいコンダクタンス、故障点抵抗を無視し、線路抵抗を省略して計算すれば、 $a$  相と  $b'$  相を含む同一点故障 ( $a$  相と  $b'$  相以外の相の故障が共存していてもよい) に対し、抑制電圧と動作電流の比から

$$\frac{\dot{V}_{ab}}{\dot{I}_a - \dot{I}_{b'}} = j\omega \left\{ \dot{I}_a L_e + (\dot{I}_b + \dot{I}_c) L_e' + (\dot{I}_a' + \dot{I}_b' + \dot{I}_c') L_e'' - \dot{I}_{b'} L_e - (\dot{I}_a' + \dot{I}_c') L_e' - (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) L_e'' \right\} / \{ \dot{I}_a - \dot{I}_{b'} \}$$

$$= j\omega \left[ L_e - L_e' + \frac{(L_e' - L_e'') \{ (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) - (\dot{I}_a' + \dot{I}_b' + \dot{I}_c') \}}{\dot{I}_a - \dot{I}_{b'}} \right]$$

$$= j\omega (L_e - L_e') + j\omega (L_e' - L_e'') \frac{\dot{I}_N - \dot{I}_N'}{\dot{I}_a - \dot{I}_{b'}} \dots \dots \dots (19)$$

となる。

(19) 式の第 1 項、 $j\omega(L_e - L_e')$  は故障点までの正相インピーダンスであるから、第 2 項  $j\omega(L_e' - L_e'') \frac{\dot{I}_N - \dot{I}_N'}{\dot{I}_a - \dot{I}_{b'}}$  が異回線間に用いたための誤差となる。

並行 2 回線では  $L_e \doteq 2L_e'$ 、 $L_e'' = 0.9L_e' \sim 0.99L_e'$  (超高压送電線では  $L_e'' = 0.9L_e'$  程度) と考えられるから<sup>(4)</sup>、(18) 式の第 2 項による誤差は小さい。また故障点を短絡距離継電器の実用上問題となる第 1 段の動作範囲である保護区間の 85% にとって考えれば  $\dot{I}_N \doteq \dot{I}_N'$  となり、故障点の正相インピーダンスに対する (19) 式の第 2 項の誤差は数% 以内と推定できる。前章の送電線を  $L_e' = 2.2L_e$ 、 $L_e' = 0.89L_e''$  として模擬回路を作り、実験により求めた受電端の継電器からみて保護区間の 85% の点に対する距離測定誤差は送電電力の有無に無関係に、 $a$  相および  $b'$  相を含むあらゆる故障に対し、最大 3% 程度であった。

なお、並行 2 回線の両回線にまたがって用いる短絡距離継電器は

$ab'$  相間、 $bc'$  相間、 $ca'$  相間、 $a'b$  相間、 $b'c$  相間、 $c'a$  相間の 6 個となる。

この継電器を用いた距離継電方式はすでにその原理図が発表されている<sup>(5)</sup> ので省略する。

#### 5. 結 言

送電線に各種の故障が起った時に短絡距離継電器および地絡距離継電器がみるインピーダンスを模擬回路により実験的に求めた結果および、並行 2 回線にまたがる異相地絡保護のための短絡距離継電器のみみるインピーダンスを計算した結果は次のようになる。

(1) 送電電力零の時に比べ送電電力を増した時は故障相以外の継電器が動作する可能性が多くなる。この場合不都合のあるのは 2 線短絡時に地絡距離継電器が延長動作することと 1 線地絡故障時に短絡距離継電器が動作することで、単に継電器の動作範囲を狭くするだけでは避けることができず、2 線短絡時には地絡距離継電器を鎖錠でき、1 線地絡故障時に単相遮断する場合は短絡距離継電器を鎖錠できるように故障相の選別をする必要がある。

(2) 送電電力が零の時、並行 2 回線にまたがる異相地絡に対し、故障相間の短絡距離継電器 ( $a1\phi-G-b'1\phi-G$  を例にとれば  $ab$  相間および  $a'b'$  相間の短絡距離継電器) がみるインピーダンスは第 14 図のように、ハート形を送電線の正相インピーダンスを中心に分割した右半分または左半分の形となる。送電電力があれば受電端からみるインピーダンスは左側に送電端からみるインピーダンスは右側に移動する。継電器からみるインピーダンスがこのようになるので、従来の距離継電方式では両回線ともに 3 相遮断し、しかも第 1 段の動作により遮断できるのは保護区間の 30~50% 程度の範囲になる。

(3) 並行 2 回線にまたがる異相地絡に対する保護のため、従来同一回線内で用いていた短絡距離継電器を追加して、異回線間に適用すれば、その継電器からみるインピーダンスは (19) 式になる。保護区間の 85% の点を故障点とした実験例では、距離測定誤差の最大は 3% 程度であって実用上問題ない。この継電器を用いれば両回線にまたがる異相地絡に対し故障点までの距離を正しく測定でき、故障相のみの高速度遮断が可能になる。

#### 参 考 文 献

- (1) 福田監修：保護継電器便覧 91 (オーム社)
- (2) A. R. von C. Warrington: TAIEE 68, 608 (1949)
- (3) 三上：電研継電方式委員会資料 No. 266 (昭 31-6)
- (4) 電気学会：電気工学ハンドブック 1199
- (5) 中山、日立評論別冊 36, 19 (昭 35-5)