UDC 621.315.1.014.027.8: 621.318.5: 621.316.761.2

論文

60-B21

超超高压系電流差動リレーにおける 充電電流補償方式の検討

正員 福井 千尋 (日立)・正員 山越 幸成 (東京電力)

正員 渡部 篤美 (日立)・正員 大浦 好文 (東京電力)

正員 佐野 和汪 (日立)・正員 松沢 邦夫 (東京電力)

1. ま え が き

最近の超超高压基幹送電線はインピーダンスおよび表面電位傾度の低減のため多導体化され、更に長距離化されているため、充電容量の増大が問題となっている。特に定格電圧が 1,000 kV 以上の送電線では、充電電流の値が常時の負荷電流の値に匹敵することが予想され、系統運用上、種々の対策が必要となってくる。

従来より、超高压系送電線の主保護には電流差動方式のリレーが、その秀れた事故検出能力ゆえに採用されている。この方式はキルヒホッフの電流則に基づき、保護区間に流入する電流の総和をとり、 $\sum I \neq 0$ なら内部事故、 $\sum I = 0$ ならば健全もしくは外部事故と判断する方式である。しかしながら、充電電流の大きい送電線に電流差動方式を適用すると、内部に事故がなくなるとも $\sum I \neq 0$ となり、事故の有無が判断できなくなる。従って、リレーの内部において、充電電流成分を取り除き、正しく事故が判定できるようにする必要がある。

電流差動リレーにおける充電電流補償はケーブル系統用リレーに適用された例がある。また、充電電流補償を行なう新しい保護方式として、波動方程式に基づく進行波差動リレーが提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、これらの進行波リレーの実用式では他線からの

静電誘導を無視して各相ごとの正相充電電流のみを補償する方式を採用している。

ケーブル系の充電電流はそのほとんどが対地充電電流であり、従って各相独立な充電電流補償が可能である。ところが、将来の 1,000 kV 以上の架空送電線では、対地充電電流のみならず線間充電電流(回線内の相間充電電流と回線間充電電流)も大きい。従って、遮断などによる他線の電位の変動により、自相の充電電流が変化をするため、補償にあたっては、他線からの静電誘導を考慮する必要がある。

本論文は、このような特徴をもつ超超高压系に電流差動リレーを適用するにあたり、必要となる充電電流の補償方式を検討したものである。本稿ではまず、1,000 kV、250 km の送電線を例にとり、その充電電流の実態を、健全時、事故継続中、事故相遮断後および接地開閉器による事故相接地後の各ケースについて解析する。次に送受電端の電圧を用いる充電電流の補償法を検討する。

2. 解析モデル

本章では充電電流の解析を行なうためのモデル系統を検討する。

〈2.1〉 分路リアクトルと接地開閉器 送電線には静電容量を補償するために、分路リアクトルが接続されるが、リレー内の充電電流補償にとってはリアクトルの接続される位置が重要な問題となる。分路リアクトルは図 1 に示すように母線に接続される場合と線路に接続される場合がある。リアクトルが線路側に接続された場合、電流変成器(以下、CT と略記する)にはリアクトルに流れる電流分だけ充電電流成分が減少する。一方、母線にリアクトルが接続された場合には CT を通過する充電電流は変化しない。この様に

The Charging Current Compensation Scheme for Differential Relay in UHV Transmission System. By Chihro Fukui, Member, Atsumi Watanabe, Member, Yoshihiro Sano, Member (Hitachi Ltd.) Yukinari Yamakoshi, Member, Yoshifumi Ohura, Member & Kunio Matsuzawa, Member (Tokyo Electric Power Co.)

福井千尋: 正員, 日立製作所日立研究所

渡部篤美: 正員, 日立製作所日立研究所

佐野和汪: 正員, 日立製作所国分工場

山越幸成: 正員, 東京電力

大浦好文: 正員, 東京電力

松沢邦夫: 正員, 東京電力

図 1 CT と分路リアクトルの位置

Fig. 1. Location of shunt reactor.

図 2 接地開閉器の基本構成

Fig. 2. Grounding switches.

リレーの充電電流補償という点から見ると母線リアクトルは効果が小さい。

また、送電線の静電容量が大きくなるほど、事故相遮断後の二次アーク電流が増大し、消弧に時間がかかるので、再閉路時間が長くなる。この対策として、線路直付の零相補償付 4 脚リアクトル⁽³⁾や高速度接地開閉器⁽⁴⁾を用いて二次アークを消弧する手法が提案されている。接地開閉器は図 2 に示すように、事故相を送電線両端の遮断器開放後に接地して、二次アークを消弧する装置であるが、接地により事故相の電位が変化するため、健全相の充電電流が変化する現象が現れる。

以上に述べた様に充電電流補償のためのリアクトル設置方式、二次アークの消弧方式については種々の方式が検討されているが、本論文では保護リレー内の充電電流補償の点で最も過酷な条件を考慮して、分路リアクトルは母線接続とし、接地開閉器が適用された系統を解析対象にとりあげる。

〈2.2〉送電線のモデル 送電線には対地および線間静電容量による静電誘導電流と相互インダクタンスによる電磁誘導電流がある。これらの電流の特徴は、電磁誘導電流は保護区間を通過する方向に流れるのに対し、静電誘導電流すなわち充電電流は送電線両端子から保護区間に流入する方向に流れることである。本論文の対象としている電流差動リレーでは、送電端と受電端からの流入電流の和(以下差電流と呼ぶ)を計算する段階で電磁誘導電流は相殺され問題とはならない。そこで本稿では相互インダクタンスを省略し、対地および線間静電容量と自己インダクタンスのみを考慮したモデルで検討を進める。

〈2.3〉故障計算法 通常の三相 2 回線送電線の故障計算には二相回路理論が用いられるが、本論文の対象とする 1,000 kV 送電線は非撚架不平衡送電線であり、かつ、相ごとの差電流を検討する必要があるの

図 3 6 線 π 形回路Fig. 3. 6-line π -circuit.

図 4 三相 2 回線送電線の相配置

Fig. 4. Line configuration of double circuits.

表 1 図 3 の 6 線 π 形回路のアドミッタンス行列

Table 1. Admittance matrix for the network in Fig. 3.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{16} & Y_{11'} & 0 & 0 \\ Y_{21} & \dots & Y_{26} & Y_{21'} & 0 & 0 \\ Y_{31} & \dots & Y_{36} & Y_{31'} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & Y_{66} & Y_{61'} & Y_{62'} & Y_{63'} \\ Y_{41} & \dots & Y_{46} & Y_{41'} & Y_{42'} & Y_{43'} \\ Y_{51} & \dots & Y_{56} & Y_{51'} & Y_{52'} & Y_{53'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix}$$

で、送電線を多端子網として扱い、そのアドミッタンス行列を用いて故障計算を行なう。

まず、三相 2 回線の送電線を図 3 に示す 6 線の π 形回路で表現する。なお、図 3 では図が複雑になるのを避けるため、対地静電容量を省略してあるが、以下の計算では対地静電容量も全て考慮してある。この 6 線の π 形回路を 12 端子網と考え、図 3 に示す様にノードの番号をつける。三相 2 回線送電線の相配置図は図 4 のようになると思われるので、相順をノード番号順に並べると (a, b, c, c', b', a') となる。このアドミッタンス行列 Y の各要素を示したのが、表 1 であるが、この行列は表 1 の様に 6 次の部分行列 A, B に分割することが可能である。 A と B はいずれも対称行列となり、 C_{mk} を対地および線間静電容量、 L_m を自己インダクタンスとすると、(1) 式と (2) 式で表される。

$$a_{mn} = \begin{cases} \sum_{k=1}^6 j\omega C_{mk} + \frac{1}{j\omega L_m} & (m=n) \\ -j\omega C_{mn} & (m \neq n) \end{cases} \dots (1)$$

$$b_{mn} = \begin{cases} -\frac{1}{j\omega L_m} & (m=n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases} \dots (2)$$

図 5 モデル系統

Fig. 5. Model system.

モデル系統は2機系を考え、図5に示すように事故発生点で送電線を2分し、それぞれを12端子網 Y_S と Y_R で表す。事故点の電圧を v_M 、送電端電圧を v_S 、受電端電圧を v_R とすると、送電端電流 i_S 、受電端電流 i_R 、事故点の送電側の電流 i_{MS} 、受電側の電流 i_{MR} の関係は(3)式、(4)式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} i_{MS} \\ i_S \end{bmatrix} = [Y_S] \begin{bmatrix} v_M \\ v_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_S & B_S \\ B_S & A_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_M \\ v_S \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{MR} \\ i_R \end{bmatrix} = [Y_R] \begin{bmatrix} v_M \\ v_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_R & B_R \\ B_R & A_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_M \\ v_R \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

事故電流 i_f は系統に流入する方向を正とすると、(5)式で与えられる。

$$i_f = i_{MS} + i_{MR} \quad \dots (5)$$

また、各相の差電流 i_d は(6)式で与えられる。 i_d は健全相ならば充電電流、事故相ならば、事故電流と充電電流の合成値となる。

$$i_d = i_S + i_R \quad \dots (6)$$

〈2.4〉 背後電源との接続 背後電源 e_S と e_R を(7)式と(8)式で示す6元の列ベクトルで表現する。

$$e_S = (e_{Sa}, e_{Sb}, e_{Sc}, e_{Sc'}, e_{Sb'}, e_{Sa'})^T \quad \dots (7)$$

$$e_R = (e_{Ra}, e_{Rb}, e_{Rc}, e_{Rc'}, e_{Rb'}, e_{Ra'})^T \quad \dots (8)$$

この背後電源と送電線との接続は背後インピーダンスを考慮した接続インピーダンス行列 S , R を表2のように定義し、(9)式、(10)式で表現する。

$$e_S = v_S + Si_S \quad \dots (9)$$

$$e_R = v_R + Ri_R \quad \dots (10)$$

〈2.5〉 健全時および事故継続中の故障計算

(3)式～(10)式を用いて、事故電流 i_f 、事故点電圧

表 2 背後インピーダンス行列 S
Table 2. Back impedance matrix S .

	a	b	c	c'	b'	a'
a	$j\omega L_S$	0	0	0	0	$j\omega L_S$
b	0	$j\omega L_S$	0	0	$j\omega L_S$	0
c	0	0	$j\omega L_S$	$j\omega L_S$	0	0
c'	0	0	$j\omega L_S$	$j\omega L_S$	0	0
b'	0	$j\omega L_S$	0	0	$j\omega L_S$	0
a'	$j\omega L_S$	0	0	0	0	$j\omega L_S$

表 3 A相遮断後の背後インピーダンス行列 S' Table 3. Back impedance matrix S' after fault clearing.

	b	c	c'	b'	a'
b	$j\omega L_S$	0	0	$j\omega L_S$	0
c	0	$j\omega L_S$	$j\omega L_S$	0	0
c'	0	$j\omega L_S$	$j\omega L_S$	0	0
b'	$j\omega L_S$	0	0	$j\omega L_S$	0
a'	0	0	0	0	$j\omega L_S$

v_M 、差電流 i_d の関係式を求めると(11)式、(12)式が得られる。

$$i_f = Fv_M + B_S H_S e_S + B_R H_R e_R \quad \dots (11)$$

$$i_d = Gv_M + A_S H_S e_S + A_R H_R e_R \quad \dots (12)$$

但し、 H_S , H_R , F , G は E を6次の単位行列とすると(13)式～(16)式で与えられる行列である。

$$H_S = (E + SA_S)^{-1} \quad \dots (13)$$

$$H_R = (E + RA_R)^{-1} \quad \dots (14)$$

$$F = A_S + A_R - B_S H_S SB_S - B_R H_R RB_R \quad \dots (15)$$

$$G = B_S + B_R - A_S H_S SB_S - A_R H_R RB_R \quad \dots (16)$$

(11)式は事故条件を決定する方程式である。健全時の場合は $i_f = 0$ なので即座に v_M が求まる。例えば a 相地絡の場合は $v_M = (0, v_{M2}, v_{M3}, v_{M4}, v_{M5}, v_{M6})^T$, $i_f = (i_{f1}, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ と置いて方程式を解けば良い。

〈2.6〉 事故相遮断後の故障計算 12端子網において、遮断された相の端子電流は零になるので、この端子を内部に組み込んだ新しいアドミッタンス行列 Y_S' , Y_R' を作成する。これらのアドミッタンス行列には健全時と同様に部分行列 A_S' , A_R' , B_S' , B_R' に分割可能である。接続インピーダンス行列 S' , R' は a 相遮断を例にとると表3のように変形される。この場合、事故電流 i_f' は零なので、前節の健全時と同じ式で i_d が算出できる。

〈2.7〉 事故相遮断後に接地した場合の故障計算

接地された相の端子電圧は零になるので、この端子を接地したアドミッタンス行列 Y_S'' , Y_R'' を作成する。あとは遮断時と同じ手法で解くことができる。

3. 充電電流の解析

本章では前章の(12)式を用いて充電電流の解析を行なう。事故電流が非常に大きい場合、事故相の充電電流は無視できる。しかし、事故点抵抗が大きくなると充電電流の相対的な比率が高まり、リレーにとっては無視できなくなる。そこで本章ではリレーが対処すべ

表 4 系統定数

Table 4. Line constants.

(a) キャパシタンス行列						
	a	b	c	c'	b'	a'
a	0.5976	0.2975	0.0880	0.1599	0.0938	0.0427
b	0.2975	0.4222	0.2951	0.0938	0.1206	0.0863
c	0.0880	0.2951	0.6298	0.0427	0.0863	0.1355
c'	0.1599	0.0938	0.0427	0.5976	0.2975	0.0880
b'	0.0938	0.1206	0.0863	0.2975	0.4222	0.2951
a'	0.0427	0.0863	0.1355	0.0880	0.2951	0.6298
$(\mu\text{F}/100\text{ km})$						
(b) 自己インダクタンス						
	a	b	c	c'	b'	a'
L	0.1019	0.1179	0.1204	0.1097	0.1179	0.1204
$(\text{H}/100\text{ km})$						
(c) 背後インダクタンス						
$L_S=0.0969\text{ H}, L_R=0.1770\text{ H}$						

表 5 健全時の各相充電電流

Table 5. Charging current in normal state.

	a	b	c	c'	b'	a'
充電電流	810.4	823.7	801.2	810.3	823.7	801.3
対地充電電流	307.8	217.7	324.3	307.7	217.7	324.2

き最も過酷な充電電流として、事故点抵抗が無限大の場合の充電電流、すなわち、健全相の充電電流を選び、これを解析する。

送電線の条件はこう長 250 km、定格電圧 1,000 kV、周波数 50 Hz とし、線路定数は表 4 に⁽⁵⁾示す。また、事故前の潮流は 4 GW とし、事故点は送受電端間の中間点とする。

〈3・1〉健全時の充電電流 健全時の各相充電電流と対地静電容量から算出した各相の対地充電電流の値を表 5 に示す。各相充電電流は送電線が不平衡なので相ごとに異なっているが、いずれの相も対地充電電流は全充電電流の 26% から 40% の範囲内にあり、線間充電電流の方が対地充電電流よりも多いことがわかる。

また、負荷電流の値は三相 2 回線で 4 GW の潮流が流れたとすると 1 線あたり 1,154 A となるが、 b 相や b' 相の充電電流はこの負荷電流の値の 71% に達していることがわかる。

このように 1,000 kV の送電線の充電電流は非常に大きく、リレーの内部において、これらの充電電流の補償を施さないと充電電流の最大値である 823 A に対して十分大きな事故電流が流れない限り、信頼性の高い事故検出は不可能であることがわかる。

〈3・2〉事故継続中の充電電流 地絡事故継続中と短絡事故継続中の健全相充電電流を、1 線事故から 5 線事故までの全ての相の組み合わせについて解析した。結果を図 6 に示す。同図では、例えば 1 線地絡の

図 6 事故継続中の健全相充電電流

Fig. 6. Charging current of sound phases phase.

図 7 bc 相短絡時のベクトル図

Fig. 7. Phasor diagram in B-C phase short fault.

場合の充電電流は最大の相が 780 A、最少の相が 485 Aであることを示している。

図 6 を見ると地絡事故の場合は事故線数が増すにつれ充電電流は減少してゆくことがわかる。これは事故相の対地電圧の低下に伴い、健全相と事故相との線間電圧が低下し線間充電電流が減少してゆくためである。

一方、短絡事故の場合は 2 線短絡から 4 線短絡の間、充電電流の最大値はほとんど変化しない。これは短絡事故の場合、図 7 に示すように完全短絡の場合でも事故相の対地電圧は零にはならず、事故相の組み合わせによっては、健全相と事故相との線間充電電流が事故前に比しほとんど変わらない場合があるからである。

〈3・3〉事故相遮断後および接地後の充電電流

事故相が遮断された場合と、遮断後接地された場合の健全相充電電流の分布を図 8 に示す。事故は 1 線事故から 5 線事故までの全ての相の組み合わせを考慮した。

図 8 を見ると、1 線事故や 2 線事故の場合には、健全相充電電流の最大値が事故の無い場合に比べて増加することがわかる。これは他回線の同相の遮断や接地

図 8 遮断後および接地後の健全相充電電流
Fig. 8. Charging current after tripping and grounding.

図 9 電流差動リレーの基本構成
Fig. 9. Differential relay system.

により、事故前には存在しなかった b 相と b' 相の間の様な同相間の線間充電電流が発生するためである。

4. 充電電流の補償法

本章ではリレーの検出感度を向上させるための充電電流補償方式を検討する。

リレーが入力として用いることのできるのは図 9 に示すように送受電端の電圧電流値のみであるが、事故点の位置が不定なので補償誤差を完全に零とする充電電流補償は不可能である。従って、事故判定量となる量は事故電流の推定値とならざるを得ない。

本章では、検出感度を現行の電流差動リレーの約 2 倍に向上させることを狙い、最少検出差電流を 400 A とすることを目標にし検討を行なう。そのためには、送電線両端の電圧のみを用いて補償するという方式上、現われる補償誤差を 100 A 以下に抑え、ハード上現われる誤差を含めても、最少検出電流の 1/2 である 200 A を越えない様にする必要がある。

〈4.1〉基本事故判定量 まず、自回線と他回線の全ての電圧を用いて補償する方式について、事故判定量を求める。以下、これを基本判定量と呼ぶ。

(3)式～(6)式を変形すると、リレーが入力として利用できる v_S, v_R, i_S, i_R と事故電流 i_F の関係式を導くことができる。

$$i_F = \{K i_S + (B_S - K A_S) v_S\} + \{K i_R + (B_R - K A_R) v_R\} \dots\dots\dots (17)$$

表 6 K 行列の計算例

Table 6. K -matrix.

	a	b	c	c'	b'	a'
a	-0.9892	-0.0027	-0.0008	-0.0014	-0.0008	-0.0004
b	-0.0025	-0.9880	-0.0027	-0.0008	-0.0011	-0.0008
c	-0.0007	-0.0027	-0.9881	-0.0004	-0.0008	-0.0013
c'	-0.0014	-0.0009	-0.0004	-0.9889	-0.0027	-0.0008
b'	-0.0008	-0.0011	-0.0008	-0.0026	-0.9880	-0.0027
a'	-0.0004	-0.0008	-0.0013	-0.0008	-0.0027	-0.9881

* $\alpha = 0.5$

但し、 $K = (A_S + A_R)(B_S + B_R)^{-1}$

(17)式の係数行列 K, A_S, A_R, B_S, B_R の値は事故の位置により変動するが、リレー内の演算式では定数でなければならない。以下その定数について検討する。

まず、 K の各要素について検討する。 K の各要素 k_{mn} は送電端から事故点までの距離の送受電端間の距離に対する比を α とすると、(18)式で与えられる。

$$k_{mn} = \begin{cases} -1 + \omega^2 \alpha (1 - \alpha) L_m \sum_{k=1}^6 C_{mk} & (m=n) \\ -\omega^2 \alpha (1 - \alpha) L_m C_{mn} & (m \neq n) \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

この K は α が 0 から 1 の場合には対角行列となり対角成分は全て -1 であるが、 $0 < \alpha < 1$ の場合には対角成分は -1 からずれてくるうえに非対角成分も 0 でなくなる。行列の要素の値が -1 および 0 から最も離れるのは、 α の 2 次式である (18) 式からわかるように、 $\alpha = 0.5$ の場合である。しかしながら、この場合でさえ、表 6 に示す様に -1 および 0 からのずれは最大 0.012 程度に過ぎない。そこで、 K の近似として、負号のついた単位行列を用いる。

次に A_S, A_R, B_S, B_R の値であるが、 $\alpha = 0.5$ 、すなわち、事故点が中間点の場合の値をとり、 $A_S = A_R, B_S = B_R$ とする。

このような近似を用い、事故電流の向きを改めて逆にとると、事故電流 i_F の近似値 i_p が (19) 式として得られる。

$$i_p = (i_S - D_0 v_S) + (i_R - D_0 v_R) \dots\dots\dots (19)$$

但し、 $D_0 = A_S + B_S = A_R + B_R$

(19)式において、 $D_0 v_S$ と $D_0 v_R$ の項が充電電流の補償項であり、他の送受電端間の差電流となる。本稿では前述したように (19) 式の i_p を事故判定量として採用し、以下の議論を進める。

〈4.2〉基本事故判定量の誤差評価 事故相の事故判定量の誤差は、事故電流が大きい場合は無視できるが、微地絡のように事故電流が小さくなると問題となってくる。最も極端な場合が事故電流が零の場合、

表 7 健全時の充電電流補償誤差の計算例

Table 7. Compensation error in normal state.

(A)						
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c'</i>	<i>b'</i>	<i>a'</i>
誤 差	5.5	6.2	5.8	5.6	6.1	5.8

表 8 事故継続中の健全相充電電流補償誤差の計算例

Table 8. Compensation error during fault.

(A)							
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c'</i>	<i>b'</i>	<i>a'</i>
1線地絡	最大値	38.7	39.1	38.2	38.7	39.2	38.3
	最小値	9.4	11.2	9.3	9.4	9.6	9.2
2線短絡	最大値	27.3	25.6	27.8	27.3	24.8	28.2
	最小値	3.8	6.2	3.4	3.8	6.2	3.5

すなわち健全相の事故判定量の誤差である。

この誤差は見かけの事故電流となるので、これより十分大きな事故電流しか検出できないことになる。そこで、健全相に現われる誤差を充電電流補償の誤差と定義し、前に述べたようにこの誤差を 100 A 以下とできるか否かについて評価を行なう。

(1) 健全時の場合 事故電流 i_f が零であるので、この条件で(19)式を解けば、健全時の事故判定量 i_{p0} は(20)式で与えられる。

$$i_{p0} = -(A_S + A_S B_S^{-1} A_S)(v_S + v_R) \dots (20)$$

表 7 は i_{p0} の計算値を示したものである。 i_{p0} はそのまま補償誤差となるが、最大の *b* 相でも 6.2 A であり、最も大きい *b* 相の充電電流 823.7 A に対し、1%以下の誤差となる。

(2) 事故継続中の場合 事故点を中間点とし、1線地絡時と2線短絡時の健全相に現われる事故判定量を(19)式により計算した。表 8 は各相に現われる値のうち最大値と最小値を示す。事故継続中の誤差は健全時より増加し、1線地絡時で最大 39 A、2線短絡時で 28 A となる。

次に事故点の位置と事故点抵抗が補償誤差に与える影響を計算した結果を図 10 に示す。事故ケースとし

図 10 事故点の位置と補償誤差

Fig. 10. Fault location and error of compensation.

ては 1 線地絡時に最も誤差の大きかった *c* 相地絡時の *b* 相事故判定量を選んだ。図 10 に示すように、事故点が中間点の場合が最も誤差が大きくなることがわかる。また、事故点抵抗が小さくなるほど、健全相の補償誤差が大きくなることがわかる。

これらの現象は(19)式において、 i_s と i_R にかかる **K** 行列を対角行列に置換したことに起因する。非対角成分を全て 0 にしたため、他相の電流の影響が無視されてしまい、事故電流が大きくなるほど、補償誤差が大きくなる。

従って、事故点抵抗が零でかつ背後インピーダンスが零の場合が、最も事故電流が大きくなり、補償誤差も大きい条件となる。この条件で最大誤差を求めると *c* 相地絡時の *b* 相の場合の誤差が最も大きく、その値は 70 A となる。

(3) 事故相遮断後と接地後の場合 事故相が遮断され、事故電流が零となるので、補償誤差は健全時同様に 6 A を越えない。

以上、送電線の状態別に補償誤差を解析したが、誤差の最大値は 70 A という結果が得られた。この値は最初に設定した補償誤差の範囲内にあるので、基本事故判定量は十分実用になるものと思われる。

〈4.3〉 事故判定量計算式の簡略化 (20) 式の基本事故判定量は三相 2 回線の全ての相の電圧を用いて充電電流補償を行なっている。しかしながら、従来の送電線主保護リレーは回線ごとに設置され、他回線の電圧電流は必ずしも入力情報としていない。

そこで、自回線内の電圧電流情報のみを用いた簡略事故判定式を検討する。方式としては自回線内の電圧を全て用いる方式と、自相の対地電圧のみを用いる方式の 2 方式を検討する。

(1) 自回線内の電圧情報を全て用いる方式 自回線のみ補償であるから、表 9 に示すように他回線との静電誘導を無視した **D₁** 行列を用いれば(19)式がそのまま簡略事故判定式となる。**D₁** 行列の 0 でない要素の値は **D₀** 行列の値をそのまま使用する。この方式を **D₁** 補償方式と呼ぶことにする。

表 9 **D₁** 補償行列Table 9. Compensating matrix **D₁**.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c'</i>	<i>b'</i>	<i>a'</i>
<i>a</i>	$j0.5025 - j0.1168$	$-j0.0346$	0	0	0	0
<i>b</i>	$-j0.1168$	$j0.5167 - j0.1159$	0	0	0	0
<i>c</i>	$-j0.0346 - j0.1159$	$j0.5017$	0	0	0	0
<i>c'</i>	0	0	0	$j0.5025 - j0.1168$	$-j0.0346$	$-j0.1168$
<i>b'</i>	0	0	0	$-j0.1168$	$j0.5167 - j0.1159$	$-j0.0346$
<i>a'</i>	0	0	0	$-j0.0346 - j0.1159$	$j0.5017$	$j0.5017$

(単位 mS)

表 10 D_2 補償行列Table 10. Compensating matrix D_2 .
$$\begin{bmatrix} d_{2a} & d_{2b} & d_{2c} & 0 \\ 0 & d_{2c'} & d_{2b'} & d_{2a'} \end{bmatrix}$$

表 11 簡略補償式による補償誤差の最大値
Table 11. Maximum possible error by simplified compensation.

故障種類	補償方式	a	b	c	c'	b'	a'
1線地絡	D_1 補償	86.2	69.9	75.8	86.2	70.1	75.8
	D_2 "	133.4	133.7	130.6	133.3	132.9	130.6
2線短絡	D_1 "	62.6	26.3	54.6	58.5	27.3	54.4
	D_2 "	54.6	26.7	59.9	54.7	26.7	59.2
1線遮断	D_1 "	80.6	65.9	68.5	80.6	65.9	68.5
	D_2 "	183.3	185.2	181.9	183.3	185.1	181.9
1線接地	D_1 "	73.6	55.8	61.6	73.6	55.8	61.6
	D_2 "	152.7	152.3	151.5	152.7	152.3	151.6

(A)

(2) 自相の対地電圧のみを用いる方式 自相のみの補償であるから、表 10 に示すように対角成分のみの D_2 行列を用いる。各要素の値は健全時の場合に D_0 行列と同じ事故判定量が得られるように (21) 式で算出する。この方式を D_2 補償方式と呼ぶ。

$$d_{2m} = \left(\sum_{k=1}^6 d_{0mk} v_k \right) / v_m \dots\dots\dots (21)$$

但し、 d_{0mk} は D_0 行列の各要素であり、 v_k , v_m は事故前の $\frac{v_s + v_R}{2}$ の各相成分である。

〈4.4〉 簡略事故判定量の誤差評価 D_1 および D_2 行列を用いた場合の健全相に現われる事故判定量を計算する。事故ケースは 1 線地絡時、2 線地絡時、1 線遮断時、および 1 線接地時を考え、事故点は中間点とする。表 11 は各相に現われる誤差の最大値を示したものである。

D_1 補償方式、すなわち、自回線内の電圧情報を用いる方式の最大誤差は 86 A であり、基本補償時の最大誤差 39 A の約 2.2 倍である。背後インピーダンスを 0 とおいても補償誤差は 92 A であり、この手法も補償誤差の面から言えば基本補償方式同様、十分実用になると思われる。

また、自相の対地電圧のみを用いる D_2 補償方式では最大 185 A の誤差が発生する。この値は事故相遮断後に発生するので、背後インピーダンスはほとんど関係がない。この方式は事故前の電圧より (21) 式を用いて補償係数を決定する方式であるが、系統の運転条件により補償係数を変化させる必要があるため、実用化

するためには更に検討が必要である。

5. 系統事故時の過渡応答

電流差動リレーにおける充電電流補償後の簡略事故判定量の事故時過渡応答を EMTP⁽⁶⁾ を用いて解析する。

〈5.1〉 解析条件 送電線定数は 2 章と同じものを使用する。なお、2 章では相間インダクタンスを無視したが、過渡計算では考慮する。事故点は中間点とし、事故種類は b 相 1 線地絡とする。事故は $t=46$ ms で発生し、 $t=117$ ms で b 相の受電側遮断、 $t=127$ ms で b 相の送電側遮断、 $t=217$ ms で b 相を接地する。

リレーはデジタルリレーを想定し、充電電流の補償は A/D 変換後に行なう。従って、前章までの補償項の複素数演算は、デジタルリレーでは電圧瞬時値の微分演算となる。また A/D 変換の前にローパス 1 段 (遮断周波数 73 Hz) とバンドパス 1 段のアナログフィルタを置く。図 11 は D_1 補償の演算ブロック図であり、サンプリング周波数は 600 Hz である。補償項の電圧微分は 3 時点の値を用いて (22) 式で行なう。

$$dv/dt = \{(\sqrt{3} + 1)\Delta v_n - \Delta v_{n-1}\} \dots\dots (22)$$

但し、

$$\Delta v_n = v(t) - v(t - \Delta t)$$

$$\Delta v_{n-1} = v(t - \Delta t) - v(t - 2\Delta t)$$

図 11 D_1 補償の計算ブロック図Fig. 11. Calculation block of D_1 compensation.

図 12 B 相地絡時の過渡電流波形

Fig. 12. Transient current wave at B phase grounding fault.

図 13 D_1 補償式による事故判定量の応動Fig. 13. Transient wave by D_1 -compensation.

〈5・2〉 解析結果 図 12 に健全相 (a 相) の送受電端電流と事故相 (b 相) の送受電端電流の波形を示す。図 13 は D_1 補償による事故判定量 i_f を示したものである。事故判定量はデジタル演算なので、階段状に表示される。

図 13 において、事故相の事故判定量は地絡発生直後に事故電流成分が現われ、良好な追従性を示している。一方、健全相の判定量は基本波成分の他に 600 Hz の雑音が含まれた階段波形となる。この雑音は電圧波形の過渡高調波が原因であるが、基本波に対し、値が小さいので実用上問題はない。基本波成分は雑音を取り除くとほぼ 120 A 程度 (ピーク値) になり、〈4・4〉節で得られた定常値の補償誤差 86 A (ピーク値では 121 A) とよく一致している。

6. む す び

充電容量が非常に大きい超超高压送電線に電流差動

リレーを適用した際に問題となる充電電流について、1,000 kV、250 km の送電線を例にとり、解析を行なうとともにその対策法を検討した。

1,000 kV 級の送電線では対地静電容量のみならず線間静電容量もまた大きい。従って、充電電流の補償を行なう場合は他相からの静電誘導を考慮しなければならない。

解析の結果、前記送電線の充電電流は 800 A に達し、負荷電流に匹敵し、しかも対地充電電流よりも線間充電電流の方が大きいことが判明した。次に送受電端の電圧を用いて送電線電流から充電電流成分を除去する方式の検討を行なった。その結果、三相 2 回線の全ての電圧を用いれば、最大誤差 70 A で充電電流を補償できる事がわかった。また、経済性を考慮して、自回線内電圧のみを用いる簡略補償法を検討した。三相の電圧を用いる場合は最大誤差が 92 A と実用上十分な精度が得られるが、自相の対地電圧のみを用いる場合は誤差が 185 A となり、実用化には更に検討が必要であることがわかった。

(昭和 58 年 12 月 7 日受付)

文 献

- (1) 磯本, はか: 「波動理論による送電線保護 (その 1, 理論)」 電学論 B 98, 79 (昭 53-1)
- (2) 磯本, はか: 「波動理論による送電線保護 (その 2, 実用方式の検討)」 電学論 B 98, 711 (昭 53-8)
- (3) 栗原・関根: 「零相補償付 UHV 平衡分路リアクトル設置時の 2 次アーク電流回復電圧」 電学論 B 102, 87 (昭 57-2)
- (4) R. M. Hasibar, et al: "The Application of High-Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500 kV Power Systems", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-100, 4, 1512 (1981)
- (5) UHV 送電特別委員会系統部会報告書 (昭 57-9)
- (6) 雨谷: 「汎用過渡現象解析プログラム EMTP」 電学誌 102, 23 (昭 57-6)