送電線地絡保護リレーの高度化について

正員 犬飼 道彦* 非会員 西田 正**
 正員 野呂 純*** 非会員 松田 明洋****

Advance of the Ground Relay of the Line Protection

Michihiko Inukai*, Member, Tadashi Nishida**, Non-member, Jun Noro***, Member,
 Akihiro Matsuda****, Non-member

This paper describes the advance of the ground relay of the line protection.

First of all, we examined the ground fault in a resistively grounded power system. The protective relay detects the ground fault by the zero phase current in the system. There are two methods for the current input to the relay. One uses the residual circuit of CT secondary winding, and the other uses the CT tertiary winding. When the ground current is insufficient in the residual circuit, the CT tertiary winding is used. In order to omit the CT tertiary winding and to get more reliability, we reviewed the full-scale of relay and evaluating the error of CT. As result, almost all transmission lines could omit the CT tertiary winding.

Next, we examined the ground fault with high fault resistance in a solidly grounded power system. When that fault occurs in the system, the PCM current differential relay acts by fault current. So, this relay possibly mal-operates when the CT secondary circuit is disconnected. Therefore, it uses a special CT to raise the reliability. Nowadays GIS has become small and the CT installation space has been decreased, it is needed to reduce these CT cores. In order to omit the special CT, we utilized the combination of the power relay and the rate of change of relay current. As a result, there is a prospect that the relay would not need the special CT.

These improvements are effective to reduce cost too.

キーワード：地絡リレー，零相電流，CT 三次巻線，PCM 電流差動リレー，微地絡

Keywords: ground relay, zero phase current, CT tertiary winding, PCM current differential relay, ground fault with high fault resistance

1. まえがき

高抵抗接地系統の送電線保護では，地絡故障を検出するために零相電流を使用している。この零相電流の取り込み

方法には，CT 二次巻線の残留回路を用いる方法と CT 三次巻線を用いる方法がある。

CT 三次巻線は，CT 比が大きく残留回路では地絡検出感度が不足する時に使用している。しかも地絡保護リレーは，方向要素を持つものが大半を占めるため，CT 三次巻線を使用する場合には，保護リレーと CT の接続には特に注意を要し，確認試験方法も複雑になる。このため，接続間違いを起こしにくい残留回路の適用範囲拡大のために地絡リレーの高度化手法の検討を行い，ほとんどの系統で適用が可能であることが確認できた。これにより CT 三次巻線の省略が可能となった。

また，超高圧 PCM 保護リレーでは，樹木接触等による高抵抗値の地絡を検出する目的で，51G リレーを設けているが，この 51G リレーは，CT 二次回路断線時でも誤動作する可能性があるため，中部電力では主リレーとは別の CT コアを使用して信頼度を上げている，このため送電線保護リレーを 2 系列設置する場合には，送電線保護リレー用に

* (株) 東芝

〒105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1

Toshiba Cooperation

1-1-1, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105-8001

** 中部電力 (株)

〒461-8680 名古屋市中区東新町 1

Chubu Electric Power Co., Inc.

1, Toshin-cho, Higashi-ku, Nagoya 461-8680

*** (株) 日立製作所

〒316-8501 日立市国分 1-1-1

Hitachi, Ltd.

1-1-1, Kokubu, Hitachi 316-8501

**** 三菱電機 (株)

〒651-8555 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-2

Mitsubishi Electric Co., Inc.

1-1-2, Wadashiki-cho, Hyougo-ku, Kobe 651-8555

CT コアが4組必要となる。近年では、GIS 縮小化に伴う CT 設置スペースの減少やコストダウンの観点から、これら CT コアの削減が望まれている。このため超高压 PCM リレー微地絡保護の高度化手法を検討し、リレー方式を組み合わせることで CT 削減の目処を得ることができた。

2. 高抵抗接地系地絡保護リレーの高度化

〈2・1〉 リレー仕様の検討

(1) 検出目標値の検討 高抵抗接地系統の地絡保護リレーの高度化を検討するために、まず、地絡保護リレーが検出する故障電流の目標値を決定した。

高抵抗接地系統における地絡故障電流は、系統に接続する接地変圧器の中性点抵抗 (NGR) により決まる。

この NGR による地絡電流の大きさは、故障点抵抗がない 1 線地絡故障時には、200 A～400 A 程度の電流となる。

そこで地絡リレーが検出する故障電流の感度は、以下の考え方で決定した。

① 50%地絡故障を検出できること

地絡故障時の電流は、線路インピーダンスや故障点抵抗の影響を受けるため、送電線保護装置としての動作責務として、50%地絡故障を考慮する必要があるため。

② 平行 2 回線送電線における分流を考慮する

故障点においては、送電線相手至近端故障を考慮すると 2 回線均等分流である 50%となるため。

③ 故障を確実に検出できる整定値であること

確実に故障を検出するためには、故障電流の 60%程度のリレー整定値とする必要があるため。

④ NGR 電流は 200 A とする

中部電力における高抵抗接地系統の NGR 電流は最小系統で 200 A であるため。

以上の条件を整理すると整定目標値は下記となる。

$$200 \text{ A} \times 50\% \times 50\% \times 60\% = 30 \text{ A}$$

(2) 検出目標電流と CT 比について 高抵抗接地系統の地絡保護リレーが扱う電流は、前項で決めたとおり、CT の一次側で 30 A という小さな値である。

この検出目標電流と CT 比との関係についてまとめたものを表 1 に示す。

現状の最小整定値は、0.10 A を採用しており、この整定値では、CT 比にして 1500/5 A までしか適用できないことが、上記表 1 よりわかる。

そのため、CT 比の適用拡大を行うためには、高感度地

絡保護リレーの採用が必要となる。

(3) 高感度地絡保護リレー採用による誤差検討 リレーの検出感度を高感度化すると誤差の影響を大きく受ける。この整定値に対するリレー誤差は、フルスケールと A/D 変換ビットで決まり、第二世代デジタルリレーで採用している 16 ビット A/D 変換器を使用した時には、式 (1) にて試算することができる。

$$(I_{FS}/I_T) \times (\varepsilon_q/2^{16-1} + \varepsilon_f) + \varepsilon_p \dots \dots \dots (1)$$

I_{FS} : フルスケール

I_T : 最小整定値

ε_q : 量子化誤差

ε_f : アナログ部固定誤差

ε_p : アナログ部比例分誤差

ここで、量子化誤差を 50%、アナログ部固定誤差を 0.02%、アナログ部比例分誤差を 0.5%とした時のフルスケールと誤差を検討したものを表 2 に示す。

検討結果から、現状のフルスケールのまま検出感度を高感度化しても、リレーの誤差管理値である 5%を超えてしまうため、フルスケールを下げる必要がある。採用するフルスケールの値については、入力変換器などの製造面を考慮すると、現状の 20.48 A の半分である 10.24 A が妥当であると考ええる。

(4) フルスケール変更時の課題

(i) 課題 フルスケールを 10.24 A にした時の課題として、整定範囲の妥当性について評価する必要がある。

現状の地絡リレーの最大整定値は、2.0 A を採用しているが、反限時形リレーでは、次のような問題が発生する。反限時形リレーの動作時間特性を測定するために、整定値に対して 1000%の電流を入力する必要があるが、この電流で、フルスケールオーバーしてしまうことである。

このため、最大整定値を、フルスケールオーバーしない値である 1.0 A 程度まで見直す必要がある。

(ii) 検討結果 この整定値を下げるのが可能であるか検討してみると、整定目標値の最大値は、前項の考え方で試算すると、NGR 最大系統である 400 A で 60 A となる。この 60 A 整定を CT 比の最低値である、 $(100 \times 3)/5 \text{ A}$ で換算すると、1.0 A となり問題ないといえる。

表 2 高感度リレー採用時の誤差検討

Table 2. An error study of high-sensitive relays.

	Actual condition	Study1	Study2	Study3	Study4
Least setting value (A)	0.1	0.075	0.075	0.05	0.05
Full scale (A)	20.48	20.48	15.36	20.48	10.24
Theoretical error (%)	4.909	6.378	4.909	9.317	4.909
Actual value error (%)	3.0	—	—	—	—

表 1 検出電流 30 A の時の CT 比と整定値

Table 1. Setting values and CT ratios at 30 A fault current.

CT ratio	800/5A	1200/5A	1500/5A	2000/5A	3000/5A
Setting value	0.188A	0.125A	0.100A	0.075A	0.050A

〈2・2〉 CT 特性の評価検討

(1) CT の規格について 前節ではリレー側の誤差の検討を行ったが、実際には CT と組み合わせた誤差の評価をする必要がある。まず、CT の特性について検討する。

(i) CT の規格 CT の規格は、JEC1201-1996 (計器用変成器) によって規定されている。これら規定項目のなかで、送電線保護装置の性能に影響を与える項目には、以下のものがある。

- 比誤差
- 位相誤差
- 定格過電流定数

今回検討しているのは、抵抗接地系統における 1 線地絡故障であり、小電流域での CT 特性を検討すれば良いため、定格過電流定数に関する検討は除いている。

保護装置用に使用される CT は、二次の相電流取り込み用として、1PS 級あるいは 1P 級が使用され、三次電流の取り込み用として 3G 級あるいは 5G 級が使用されている。

(ii) CT 特性 CT 二次および三次の誤差に関する規格について、表 3 と表 4 に示す。

(2) 低電流域における CT 誤差の実力評価 ここで扱おうとしている地絡電流は、一次側で 30 A であり、2000/5 A の CT 比において、定格電流 I_n の 1.5% に相当する。この低電流域については、JEC では規定されていないため誤差の判断ができない。

そのため、代表メーカ 3 社の CT において、実力値を調査し、評価することとした。

(i) CT 製造年と比誤差傾向について 各社の CT (CT 比 2000/5 A) において、製造年別に CT 誤差の実力値を調査した結果を、表 5 に示す。データは、25% 負担に対する比誤差の最大値を記載してある。

上記表から、CT の比誤差の実力値は、3 社共に、非常に高い精度と安定した品質を有していることが分かった。また、調査結果から次の特徴があることがわかる。

- ① 比誤差を“マイナス誤差”で管理しているのが 2 社、

表 3 CT 二次の誤差規格 (JEC1201-1996)

Table 3. Error standard for CT secondary windings.

	Ratio error (%)			Phase angle (arcminute)		
	0.05 I_n	0.2 I_n	1.0 I_n	0.05 I_n	0.2 I_n	1.0 I_n
1P class	—	±3.0	±1.0	—	±180	±60
1PS class	±3.0	±1.5	±1.0	±180	±90	±60

I_n : Rated current

表 4 CT 三次の誤差規格 (JEC1201-1996)

Table 4. Error standard for CT tertiary windings.

	Ratio error (%)		Phase angle (arcminute)	
	0.1 I_n	1.0 I_n	0.1 I_n	1.0 I_n
3G class	±6.0	±3.0	±360	±180
5G class	±10.0	±5.0	±600	±300

残り 1 社が“プラス誤差”で管理していた。

② 比誤差がマイナス誤差で管理しているメーカの中で、JEC1201 が策定された 1985 年を境にプラス方向からマイナス方向へ設計変更が行われているところもあった。

(ii) 比誤差の規格値と実力値の関係について 比誤差の JEC における規格値と実力値の関係を、図 1 に示す。これは、2000/5 A および 200/5 A の CT 比における 1PS, 3G, 5G 級の規格値と 1PS, 5G 級の実力値をプロットしたものである。

図 1 から、比誤差の実力値は規格値に対し高い精度であることがわかる。また、重潮流時に残留回路を使用すると、CT 誤差 3 相ばらつきの影響が懸念されるが、近年に製作された CT では、ばらつきは非常に小さく問題はないと判断できる。

〈2・3〉 ま と め これまでの検討結果を纏めると

- ① フルスケールを 10.24 A に見直すことで、リレーの誤差に対する設計値から、3000/5 A まで適用拡大することが可能である。

- ② 3 社のみの確認となったが、CT 比 2000/5 A までは、ばらつきが小さいことが確認できた。

以上のことから CT 二次残留回路の適用範囲は、現在の CT 比 1500/5 A から CT 比 2000/5 A までならば拡大できる見通しが得られた。

これにより、中部電力のほとんどの回線において CT 二次残留回路が適用できることとなった。

表 5 各社の比誤差実力値

Table 5. Comparison of error performance among companies.

	0.05 I_n			0.1 I_n			Note
	A Co.	B Co.	C Co.	A Co.	B Co.	C Co.	
1980	—	—	—	0.20	—	0.75	JEC190
1985	—	—	—	-0.16	-0.07	0.70	"
1990	-0.22	-0.08	0.67	—	—	—	JEC1201
1995	-0.22	-0.29	0.71	—	—	—	"
2000	-0.27	-0.16	0.65	—	—	—	"

図 1 CT 比誤差分布図

Fig. 1. Distribution diagram of CT errors.

図2 ソフト合成による比誤差補正例

Fig. 2. An example of error compensation by software composition.

〈2・4〉さらなる高度化手法の検討 前節までの検討結果により、3社のCTでは、比誤差の実力精度は高く同一製造年では、ばらつきも少ないことがわかったが、他社のCTを使用した時や、CTの単相交換を実施し、CT比3000/5AのCTを適用した時の対策を検討した一例である、ばらつきを補正する手法を図2に示す。

CT各相毎のばらつきを考慮すると、各相毎の入力電流に対し補正をかけて、 I_0 をソフト合成することが効果的である。

しかし、この方法では、補正用の入力変換器を余分に必要とし、補正処理の妥当性について検証しなければならない。

本検討では、各CTの特性から補正係数を定めた補正処理の検証を実施した。また、CT各相のばらつきは、一次側の入力を模擬的にずらして行った。まずまずの結果を得ることはできたが、潮流のアンバランスの影響など実用化に対し、課題は残る。

3. 超高压微地絡保護リレーの高度化

〈3・1〉各電力会社の現状調査 中部電力における超高压PCMリレーの微地絡故障検出回路を図3に示す。

中部電力では、各相比率差動リレー(87P)と微地絡検出リレー(51G)用のCTを別コアとすることで、CT二次断線時における微地絡の誤検出の防止をはかっている。しかし、別コアを設けることは、コスト的に得策ではないため、この別コアを省略するために、まず各電力会社の超高压PCMリレーに採用している微地絡故障検出回路を調査し、その結果を表6に示す。

調査の結果、CT二次回路断線対策を実施している電力会社が、中部電力を含め6社あることがわかる。

そのうち、対策方法として最も多く採用されているのが、他系列の51G動作条件を使用しているわけだが、中部電力では、系列間の分離を基本思想としているため採用していない。

また、中性点51Nや電圧リレーを使用した方式もあるが、中性点51Nは開閉所では適用できないことや、電圧リレーは、中部電力では地絡時の過電圧を検出するための設備(三次巻線付PT)を必要とすることやPT二次電圧の合成 V_0 だと検出感度などの問題から採用は難しい。

図3 中部電力における現状の微地絡故障検出回路

Fig. 3. Detector circuit adopted at Chubu Electric Power for fine ground faults.

表6 各電力会社における微地絡検出回路の実態

Table 6. Present practices of fine ground fault detector circuit by power company.

	Actual method		Remarks column
	Main relay	Fault detector	
A Co.	87or	—	◆ Method exit 6 Co./9 Co.
B Co.	87or	51G(another system)	◆ System
C Co.	87or	Voltage relay	51G(another system).....3 Co.
D Co.	87or	51G(another core)	51G(another core).....1 Co.
E Co.	87G	51G(another system)	51N(Neutral point).....1 Co.
F Co.	87G	—	Voltage relay.....1 Co.
G Co.	87G	—	Total 6 Co.
H Co.	87G	51G(another system)	
I Co.	87G	51N(neutral point)	

以上のことから、新しい対策方法を検討することとした。

〈3・2〉CT二次回路故障時の現象について

(1) CT二次回路断線故障パターン 新たな対策方法を検討するためには、まず、CT二次回路が断線した時に、リレーにどのような電流が入力されるか確認しておく必要がある。

- ① 断線：BWR 相いづれかのCTケーブルが切れ開放するモード
- ② 相間短絡：CTケーブルが相間で接触するモード
- ③ 地絡：CTケーブルが地絡するモード
- ④ 正相N相間短絡：BWR 相いづれかとN相が接触するモード

以上の故障モードからミストリップとなるケースを整理すると以下となる。

この中で、送電線保護装置をミストリップさせる可能性があるのは、残留回路に見かけ上の零相電流が流れる①③④の故障モードである。

また、これら①③④の故障モードでも3相故障の場合は、残留回路に零相電流は流れないことから、1相故障と2相故障が考えられる。

これら故障モードにおいて、リレーに入力する電流をシミュレーションし、その結果の一例を図5および図6に示す。

図4 CT 二次回路の故障パターン

Fig. 4. A fault pattern at CT secondary windings.

図5 送電端子 CT 二次回路 1 相断線故障

Fig. 5. A Single-phase line-breakage fault at CT secondary winding at the sending-end.

図6 受電端子 CT 二次回路 1 相断線故障

Fig. 6. A Single-phase line-breakage fault at CT secondary winding at the receiving-end.

上記シミュレーション結果から、断線故障では、正相の合成ベクトルが残留回路に流れ、故障相電流は“0”となることがわかる。また、送電側と受電側の残留回路に流れる電流の大きさは等しいが、方向が逆向きとなることもわかる。

系統の一線地絡時と、CT 二次回路故障時に保護リレーが見る電流・電圧の様相を纏めると、以下の通りとなる。

① 系統一線地絡時：送電端の故障相に故障電流が重畳し、相電流が増大する。また、受電端では、故障電流と潮流が相殺し、相電流が減少する現象が見られる。

② CT 二次回路断線時：送電端、受電端ともに故障相の電流が無くなり、健全相の合成電流が残留回路に流れる。

③ CT 二次回路の地絡、正相 N 相短絡時：故障相の電流が正相回路と残留回路に分流する。

表 7 各故障モードにおける電圧・電流ベクトル
Table 7. Vector diagrams of voltage and current by fault mode.

①EPS fault vector diagram	
Sending-end	Receiving-end
②Line-breakage fault at CT secondary	
Sending-end	Receiving-end
③Ground fault or normal phase-neutral short-circuit at CT secondary	
Sending-end	Receiving-end

また、以上の内容について、a 相に故障があった場合の、電流・電圧ベクトル分布を表 7 に示す。

上記ベクトルからわかることは、受電端子において、系統故障時の電流ベクトルと、CT 二次回路断線故障時の電流ベクトルが、まったく同じ様相となる場合があると考えられることである。

このため、CT 二次故障と系統故障を電流ベクトルで区別することができないことがわかった。

〈3・3〉新微地絡検出方式 これまで検討してきた現象をもとに、CT 二次回路故障の対策方法として、3 社と共に検討した新微地絡検出方式の対策回路案を表 8 に示す。

A 案は、潮流有りを検出するリレー (91P) と相電流と残留回路の位相ありを検出するリレー (36) を 87 の動作条件を組み合わせ CT 二次回路故障時にロックする方式である。また、微地絡検出用の 51G は、零相電流の変化分を検出するリレー (51DG) に置き換えている。

B 案は、微地絡検出用の 51G を A 案同様に零相電流変化分を検出するリレー (51GD) に置き換え、相電流の増加分を検出するリレー (△51P) と隣回線および相手端子

表 8 新微地絡検出回路 (案)

Table 8. New circuit of ground fault with high fault resistance (proposed revision).

図 7 シミュレーションモデル

Fig.7. Simulation model.

の零相電流を検出するリレー (51GDN, 51GD) の動作条件を組み合わせることで、CT 二次回路故障による誤遮断を防止する方式である。

C 案は、微地絡検出用の 51G に、隣回線の 51G 動作条件や相電流の増加分を検出するリレー (51ΔI(+)) の動作条件、あるいは、相手端子のリレー動作条件 (52TX) を組み合わせることで、CT 二次回路故障時のロックをかける方式である。

(3・4) シミュレーション評価 新微地絡検出方式の検証のために、中部電力系統内で微地絡故障電流が最も小さ

いと考えられる佐久幹線の系統条件 (図 7) にて、各新方式の検証を行った。

上記モデルにて、EMTP を使いシミュレーションを行った。各故障点におけるそれぞれの端子に流れる電流とリレー感度に着眼した検証を行ない、あらゆる故障ケースにおいてリレートリップできることと、CT 二次回路故障では誤動作しないことを確認した。下記に各方式のシミュレーション結果を示す。

① A 案 2 相短絡故障においては、残留回路に電流が流れないため、51DG が不動作となり不要遮断はしないことを確認。

断線故障においては、91P 復帰時間と 87 動作時間の時間協調および 1 相および 2 相地絡故障において、36 の過渡応動によるトリップ条件成立を抑制させるために 87 動作時間と時間協調は 30 ms 程度あれば良いことを確認。

② B 案 いずれかの 1 端子において CT 二次回路が故障しても不要遮断とならないことを確認。

送電端および受電端の至近端故障は、それぞれ故障点に近い端子からシリーズトリップすることを確認。

③ C 案 CT 故障では、隣回線 51G および 51ΔI(+) が不動作となるため、不要遮断はしない。なお、隣回線 51G は整定を高感度化することで動作できることを確認した。

送電端故障時は、送電側は 51ΔI(+) が動作し、受電側は 51G が不動作となりシリーズトリップとなる。

なお、相手 52TX は、バックアップ要素として期待できる。

(3・5) まとめ これまでの検討結果を下記にまとめる。

① 故障時には、受電端子において、零相電流と故障相の相電流が相殺することから見かけ上相電流が減少することに着目し、潮流検出リレー (91P) や電流変化幅リレー (Δ51P(+) や 51ΔI(+) など) をトリップ条件に付加すれば誤動作防止となる。

② 受電端子に近いほど、隣回線の 51G 動作が期待でき、この条件は既に後備保護で取り込んでおり、要素追加の容易性や期待効果は大きい。

③ 相手端子の条件 (51GD, 51GDN) を取り込むことで、相手至近端など、あらゆる故障ケースを想定した確実な保護が期待できるが、伝送データの追加や自端子 51G の高感度化など課題は残る。

また、PCM リレーは、動作原理が単純であり回路のシンプル性が特徴であるリレーだけに、今回の対策をどこまで実用化に反映するか検討する必要がある。

そのため、微地絡故障は故障電流がそれほど小さくなく系統安定度への影響も少ないことから、基本的にシリーズトリップを許容する形であれば、上記①と②程度の対策が得策といえる。

4. 今後の課題

今後、送電線地絡保護リレーの高度化を実用化するにあたり、下記事項について検討をする必要がある。

高抵抗接地系統地絡保護リレーの高度化では、3社のCTと保護リレーを組み合わせて使用する限りは、その実力から判断してCT二次残留回路の適用拡大は可能であるが、今後は、下記事項について検討する必要がある。

- ① 実系統での潮流不平衡による影響の把握
- ② 3社以外のCT誤差ばらつきの調査
- ③ 今回検討した、ソフトによる比誤差補正方法の確立
- ④ 100mA以下という高感度化したリレーを5%精度で管理する試験方法および試験器の調整方法

超高圧微地絡保護リレーの高度化では、机上を中心としたシミュレーション評価にて、適用に対しての日処を得たが、今後は、下記事項について検討する必要がある。

- ① 高精度化する地絡検出リレーの整定の妥当性
- ② 対策における装置複雑化の範囲
- ③ 実装置を製作しての検証

以上のことを検討しながら、今後実用化を進める。
(平成15年1月20日受付、平成15年3月31日再受付)

文 献

- (1) 「Grain-Oriented Magnetic Steel Sheet and Strip」, JIS 方向性けい素鋼帯, C2553-1986
- (2) 電気学会技術報告 (II 部), 第227号 (1986)
- (3) 「Application guide for instrument transformers」, JEMA 技術資料第129号「計器用変成器適用指針」, pp.23-32 (1981)

犬飼道彦 (正員) 1969年01月25日生まれ。1993年3月同志社大学卒業。同年4月(株)東芝に入社。主として電力系統保護リレーおよび制御装置の開発に従事。

西田正 (非会員) 1970年04月18日生まれ。1989年3月四日市工業高校卒業。同年4月中部電力(株)入社。主として電力系統保護リレーシステムの開発に従事。

野呂純 (正員) (正員) 1969年01月01日生まれ。1987年3月弘前工業高校卒業。同年4月(株)日立製作所入社。主として電力系統保護リレーシステムの開発に従事。

松田明洋 (非会員) 1972年04月16日生まれ。1997年3月横浜国立大学大学院工学研究科修了。同年4月三菱電機(株)に入社。主としてGIS, 保護リレーの開発設計, 系統解析に従事。現在, システムインテグレーション部系統解析技術課に勤務。