2ビット伝送による脱調検出リレーの開発と検出能力向上策

非会員 栢木 正弘* 正員 山田 員己*
 正員 森田 義昭** 正員 福嶋 和人**
 正員 松井 仁*** 非会員 松下 浩延***

Development of Digital Step Out Relay for 2 bit Transmission System and the Improvement Way of Limit Detection

Masahiro Kayaki*, Non-member, Kazumi Yamada*, Member, Yoshiaki Morita**, Member,
 Kazuto Fukushima**, Member, Tadashi Matsui***, Member, Hironobu Matsushita***, Non-member

We selected the way of "56V" system, which have the ability of high performance of section detected function, as the step out detection system for 500 kV connective transmission line. Conventional "56V" system was using 4 bit on transmission format of PCM relay. This time, we have developed new "56V" system which is using 2 bit. It is confirmed that this 2 bit system has the equal ability to 4 bit system.

On the other hand, the "56V" system has the limitation to detect step out with high slip frequency or low voltage. We have developed combination system, which have the ability of section detected function of "56V" system and "56Z" system, and we confirmed the high performance of step out detection system by verification test of the system.

キーワード：電圧位相比較，区間判定能力，脱調検出機能，検出限界，PCM，2ビット

Keywords: voltage phase comparison, ability of section detective, step out detection system, detection limit, PCM, 2 bit

1. はじめに

脱調を検出する方式には，距離継電器を用いたインピーダンスローカス方式（以下，56Z）と，PCMリレーの伝送空きビットを利用した電圧位相比較方式（以下，56V）がある⁽¹⁾。関西電力の500 kV系統用PCMリレーでは伝送フォーマット上に4ビットを確保できないことから56Vが使えず56Zのみが採用されていた。

今回，関西電力では500 kV系統の運用変更に伴い，外輪線に脱調分離リレーを設置することとなったが，従来設置していた56Zでは整定上，脱調検出範囲が重なり，脱調

時には複数箇所で遮断されることになる。このため，脱調検出区間を限定することができる56Vの採用について検討し，関西電力の500 kV系統用PCMリレーの伝送フォーマット上最低限確保できる2ビットを用いて，現行4ビット伝送による正相電圧瞬時値伝送方式と同等の性能を確保できる正相電圧位相値伝送方式の56Vを開発した。

一方，56Vは脱調時に両端の電圧位相差が180°反転することに着目したリレーであることから，脱調の電氣的中心点が区間外部にある場合には不要検出しない反面，区間内部であっても母線の近傍にある脱調や，入力電圧が小さくスリップ周波数が高い脱調では検出できず，検出能力上の問題があった。この問題を解決する手段として56Vと56Zを組み合わせることにより，検出能力が高く区間判定能力も優れた脱調検出システムを今回合わせて開発したので，その内容についても報告する。

2. 56Vと56Zの特徴比較

56Vと56Zの特徴を以下に示す。

〈2-1〉検出原理 56Zは，リレーが見るインピーダンスローカスにより脱調検出を行う。リレー特性上で示すと，図1においてA→B→Cの方向の場合，AゾーンにT1滞

* 関西電力（株）
 〒530-8270 大阪市北区中之島 3-3-22
 Kansai Electric Power Co.
 3-3-22, Nakanoshima, Kita-ku, Osaka 530-8270
 ** (株) 東芝
 〒105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1
 Toshiba Co.
 1-1-1, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105-8001
 *** ティー・ディー・システムテクノロジー（株）
 〒183-0057 府中市晴見町 2-24-1
 T.D-System technology Co.
 12-24-1, Harumi-cho, Fuchu 183-0057

図1 56Z 検出原理

Fig. 1. Detection principle of 56Z.

図2 56V 検出原理

Fig. 2. Detection principle of 56V.

在したあと、B (T2 滞在) → C と領域を通過したことにより脱調検出する。C → B → A についても同様で、C ゾーンに T3 滞在したあと、B (T2 滞在) → A と通過したことにより脱調検出する。

56V は、相手端と自端の正相電圧位相を比較し脱調検出する。両端の位相差が 180° となった時は必ず区間内部に電気的中心点があることを利用するものであり、図 2 に示すように、 α 領域に一定時間滞在した後、 β 領域に移動したことにより脱調を検出する。

〈2・2〉区間内部の脱調検出 56Z は、脱調時のインピーダンススローカスに着目しており、整定値（前方整定・後方整定）によって検出範囲が決定されるため、これを適正な値とすれば区間内部の脱調時には確実に検出できる。方式上、検出不可能な範囲（無検出範囲）はない。

56V は、電気的中心点が母線近傍である場合など入力電圧が極端に小さい場合に、演算誤差の関係で相手電圧との位相比較ができない。このような場合には演算をロック（UV ロック）しているため、方式上の無検出範囲が存在する。

〈2・3〉区間外部の脱調検出 56Z は、前項で述べた通り、整定によって検出範囲が決定されるため、対象区間よりも検出範囲が広がる。また、図 3 の様な検出範囲で A 端 56Z と B 端 56Z の検出範囲が重複される区間に電気的中心点が入った場合は、両方の 56Z が検出する。

56V は、検出原理で述べた通り、両端子の電圧位相差に着目し脱調を判定しているため区間外部では検出せず、検出区間を限定することができる。

〈2・4〉スリップ周波数の検出限界 56Z は、R 分の整定及び各ゾーン（A/B/C）を通過する時間（T1/T2/T3）によって一義的に決定される。

56V は、入力される電圧の大きさによってスリップ周波数の検出限界が決定される。これは、図 4 に示す通り $\alpha \cdot \beta$ 領域に滞在する時間が、入力電圧の大きさにより異なっ

図3 56Z の検出範囲

Fig. 3. Detection range of 56Z.

図4 56V の検出限界

Fig. 4. Detection limit of 56V.

いるためである。

以上、これらからわかる通り、56V は原理的に区間判定能力においては優れているが、脱調検出能力は UV ロックにより無検出範囲が存在すること、入力電圧が小さくスリップ周波数が高い脱調時には検出できないことが特徴として挙げられる。これに対し、56Z は整定により検出範囲およびスリップ周波数検出限界が決定されることが特徴として挙げられる。

3. 2ビット伝送における 56V

現行の 4 ビット伝送方式では、互いの電圧瞬時値データを伝送していた。本方式を 2 ビット伝送にてそのまま実施すると伝送データ量が少なくなるため、従来同等の性能を確保することはできない。しかし、本来 56V は脱調時の両端電圧位相差が 180° になることに着目しているリレーであることから、位相値さえわかれば脱調現象を正確に捉えることが可能である。このことから、2 ビット伝送で 56V を実現するために、各端子において正相電圧の位相値を算出し、 $0^\circ \sim 360^\circ$ を 8 ビットで表現（1 LSB = 1.5° ）して 4 フレームに分割伝送する正相電圧位相値伝送方式を適用することとした。

伝送される相手端の位相値は、自端の位相値と差し引きされ、両端の位相差 θ が求められる。各端での位相値 ϕ の算出方法については、正相電圧が零点をクロスしたポイントから現時点までのサンプリング数を計測することにより実施している。この方式の演算原理を図 5 に示す。

本方式は入力周波数が定格周波数に対して変動した場合、1 サンプリング間に進む電気角 λ が変化する。定格周波数が 60 Hz の場合では、 ± 10 Hz 入力で $\pm 20^\circ$ 以上の誤差が

図 5 演算原理
Fig. 5. Calculation principle.

図 6 補正方法
Fig. 6. Revision method.

発生するため、入力周波数に応じた補正を実施し、誤差を低減させることとし、以下にその方法を示す。

電圧瞬時値の零クロス点から次の零クロス点までのサンプリング時間 (1/2 サイクル時間) を計測し、(1) 式により 1 サンプル時間あたりの電気角 γ を算出する。

〈例〉

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= V_{m-7} / (V_{m-7} - V_{m-8}) \\ t_2 &= V_{m-2} / (V_{m-1} - V_{m-2}) \\ T &= (5 + t_1 + t_2) \\ \gamma &= 180^\circ / T \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

図 6 において、現時点の電圧瞬時値を V_m とすると、現時点の電圧位相 ϕ_m は、零クロス点から現時点までのサンプリング時間に、(1) 式により算出したサンプリング時間あたりの電気角 γ を乗算して求めることができる。

$$\phi_m = (7 + t_1) \times \gamma \quad (\text{図 6 の例})$$

この方式にて、 $\pm 20^\circ$ 以上の誤差が $\pm 5^\circ$ 程度以下にまで低減できることを確認した。

4. 検出機能向上策のシステム構成

我々が脱調検出機能として要求するものには次の 3 点が挙げられる。

- ① スリップ周波数の高い脱調でも検出可能なシステム
- ② 区間判定能力の高いシステム

(a) System model

(b) Simulation model

図 7 モデルシステム

Fig. 7. Model system.

表 1 56Z 整定値

Table 1. 56Z setting value.

Case①	RI:1.9Ω	XF:50.0Ω (Maximum)
	RO:5.7Ω	XB:1.0Ω (Minimum)
	56ZT:0.04s	
Case②	RI:3.0Ω	XF:50.0Ω (Maximum)
	RO:9.0Ω	XB:1.0Ω (Minimum)
	56ZT:0.02s	

③ 無検出範囲がないシステム

これらの機能を満足するシステムを構築するため、以下のステップで検討を進める。

〈4・1〉 56Z と 56V の検出限界能力比較 図 7 のモデルシステムにおいて 56Z・56V のスリップ周波数検出限界値を検討した。

(1) 検討条件 実システムにおける脱調の様相は様々であり、リレーに入力される電氣量もこれに併せて変化する。このため、互いの方式の検出限界値を比較する上で、この電氣量を変化させる様なモデルシステムにてシミュレーションを実施した。

このシミュレーションでは、56V と 56Z の検討条件を合わせるため、関西電力の 500 kV 最短線路インピーダンス (リレー換算 1.77Ω) が 56V の UV ロックレベルになる割合 0.7% の線路インピーダンスとなるような系統全体インピーダンス (リレー換算 252.77Ω) とした。これを 100% として検出区間となる線路インピーダンスを可変させることで、リレーに入力される電圧の大きさを変化させ、両方式の検出限界を確認した。なお、56Z の整定値については、実際の整定値相当であるケース①と、CT 定格潮流 (リレー換算 11.54Ω) を考慮した R 分最大整定と滞在時間最小整定としたケース②の 2 ケースで実施した。使用した 56Z 整定値を表 1 に示す。

(2) 結果 56V・56Z の検出限界値を比較したグラフ

図 8 検出限界

Fig. 8. Detection limit.

表 2 方式比較

Table 2. Comparison of each system.

Item	5 6 V	5 6 Z
Ability of section detected function	○	△
Detection limit	Input high V	△
	Input low V	○
Non detection range	×	○
43C lock/Transmission fault	×	○

を図 8 に示す。

(3) 考察 56Z のスリップ周波数の検出限界は、全系のインピーダンスと R 分の整定の比率で決まることが、56Z の検出限界①と②の比較でわかる。これは R 分の整定によって各領域の大きさが決まり、ここに滞在する時間が異なるためである。また、X 分の整定によって決められた検出範囲内に電気的中心点があれば、入力される電圧の大きさには関係がなく、R 分整定及び 56ZT の整定によって決まる領域に脱調時のインピーダンスローカスが滞在する時間が同じとなるため、スリップ周波数の検出限界は一定であることがわかる。56V は、入力される電圧が小さくなることで、検出可能となるスリップ周波数の限界が低くなり、56Z よりも劣る部分があることが判る。

〈4・2〉システム構成検討 56V と 56Z の特徴比較や、検出限界値シミュレーションの結果から、システム構成を検討した。

(1) 各方式の優劣比較 各方式の優劣比較を表 2 にて実施する。

これから、56V は原理上検出区間を限定することができるが無検出範囲があること、56Z は整定により検出範囲を決定するため無検出範囲はないものの、56V より検出区間を限定する能力は劣ることがわかる。このためシステム構成としては 56V と 56Z の特徴を活かしたものが望ましく、その方法について検討した。

(2) 検出能力と区間判定能力の組み合わせ 56V は、入力電圧が小さくスリップ周波数が高い脱調時には検出で

図 9 脱調時の電圧位相

Fig. 9. Voltage phase of step-out.

図 10 各方式における範囲

Fig. 10. Limits on 56Z and 56V.

きない。その反面 56Z はこのような脱調時にも検出可能であるが、そのままでは区間判定能力が劣るため採用できない。このため区間判定機能のみ 56V の優れた能力を用いることを検討した。

脱調時には両端の電圧位相差が 180° を越えて変化することから、図 9 に示すように両端の電圧位相差が $90^\circ \sim 270^\circ$ の範囲内にあれば、検出区間内部にある脱調の事前現象としている捉えることができる。

この状態は、56V の $\alpha \cdot \beta$ 領域確認を用いて容易に判断することができる。56V は、系統事故と脱調の判別を行うため、 180° 反転する前の領域にある一定時間の滞在確認しているが、区間判定機能のみを利用する場合は滞在確認をする前の $\alpha \cdot \beta$ 領域判定 (位相差演算) 部出力を用いれば良い。

区間内部に脱調が存在する時の両端電圧位相差 $90^\circ \sim 270^\circ$ の範囲は、56V、56Z の特性上において図 10 のような関係にあるため、脱調の検出は 56Z、区間判定機能は 56V を用いることで、56V では検出できない様な脱調時にも検出できる区間判定能力の高いシステムを構築することができる。

また、電気的中心点が母線近傍にあるような脱調では、入

図 11 システムブロック図
Fig. 11. Block diagram of system.

図 12 検証結果とシミュレーション結果
Fig. 12. Result of verification and simulation.

力電圧が小さくなり 56V は検出できないが、56Z であれば検出することが可能であるため、UV ロック以下の入力電圧となったときには 56Z を出力させる様に構成することで無検出範囲をなくすることができる。

(3) システム構成 これまでの検討のほか、伝送不良や 43C ロック時を含め 56V が検出できない脱調に対しては、56Z との組み合わせにより我々の要求を満足するシステムを構築することができる。そのシステムブロック図を図 11 に示す。

5. 試作機による検証結果

図 11 に示したシステムブロック図にて試作機を製作し、検証試験を実施した。

検証結果はすべて机上検討通りの応動を示しており、システムの有効性を確認することができた。各々の機能に関する結果は以下の通りである。

〈5・1〉各方式の検出限界 モデル系統と同一の構成にて検証試験を実施し、図 12 に示す通り、シミュレーションと同等の結果を得た。

〈5・2〉区間判定能力 56V が検出できない場合に、56Z によってトリップすることの確認を図 13 に示す試験回路にて実施した。

試験結果を表 3 に示す。No1 は背後および母線近傍の脱調時を模擬したものであり、背後では 56Z が動作するもののトリップしないこと、母線近傍では UV ロックで 56V が

図 13 試験回路
Fig. 13. Test model.

表 3 検出要素とトリップ要素
Table 3. Relay of detection and trip.

No 1

Installing point of Ry(%)		Slip Frequency	Operation Element		UV Lock	Trip element
RY1	RY2		56V	56Z		
59	90	1.0Hz	×	×	×	—
58	90	1.0Hz	×	○	×	—
52	90	1.0Hz	×	○	×	—
51	90	1.0Hz	×	○	○	5 6 Z
50	90	1.0Hz	×	○	○	5 6 Z
48	90	1.0Hz	○	○	×	5 6 V

No 2

Installing point of Ry(%)		Slip Frequency	Operation Element		UV Lock	Trip element
RY1	RY2		56V	56Z		
49	59	3.0Hz	×	○	○	5 6 Z
48	58	3.0Hz	×	○	○	5 6 Z
47	57	3.0Hz	×	○	×	5 6 Z
46	56	3.0Hz	×	○	×	5 6 Z

動作できないが 56Z によりトリップしていることがわかる。また、No2 は入力電圧が小さくスリップ周波数が高い脱調時を模擬したものであり、いずれも 56V は動作できないが 56Z によりトリップしていることが確認できた。

これらの結果より、メイン機能を 56V とし、56V が検出できない場合のみ 56Z を機能させることで、スリップ周波数の高い脱調や母線近傍に電気的中心点がある脱調でも検出可能なシステムが構築できたことを確認した。

6. あとがき

本論文では、従来の 4 ビット伝送による電圧瞬時値方式の 56V と同等の性能を有する 2 ビットでの正相電圧位相比較方式の 56V を開発し、さらに 56V が検出できない場合における検出能力向上策として、56V と 56Z を組み合わせることにより、検出能力が高く区間判定能力に優れたシステムを開発した。

また、試作装置による検証試験を実施し、我々が要求する脱調検出機能をすべて満足するシステムであることが確

認できた。

(平成14年11月15日受付, 平成15年4月22日再受付)

文 献

- (1) 大浦好文: 保護リレーシステム工学, pp.262-265, 電気学会 (2002)
- (2) 吉川元庸・小泉 廣・阿部正之・池見周治・黒沢保広・小牧友義: 「1.1/2CB の和 CT 対策付デジタル電流差動リレー方式」, 昭和63年電気学会全国大会, 1231 (1988)
- (3) K. Yamashita, M. Kayaki, K. Yamada, Y. Morita, K. Fukushima, T. Matsui, and H. Matsushita: "Development of Digital Step-out Relay for 2bit Transmission System of PCM Current Differential Relays", The Papers of Technical Meeting on System of Protection Relays, IEE Japan (2000-2) (in Japanese)
山下勝彦・栢木正弘・山田員己・森田義昭・福嶋和人・松井 仁・松下浩延: 「PCM デジタル電流差動リレー・2ビット伝送を用いた脱調検出リレーの開発」, 電気学会保護リレーシステム研資 (2000-2)
- (4) K. Yamashita, M. Kayaki, K. Yamada, H. Saito, Y. Morita, K. Fukushima, T. Matsui, and H. Matsushita: "Development of Digital Step-out Relay for 2bit Transmission System of PCM Current Differential Relays", Proc. of 2000 Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan (2000) (in Japanese)
山下勝彦・栢木正弘・山田員己・西藤弘次・森田義昭・福嶋和人・松井 仁・松下浩延: 「PCM デジタル電流差動リレー・2ビット伝送を用いた脱調検出リレーの開発」, 平成12年電気学会電力・エネルギー部門大会 (2000)
- (5) M. Kayaki, K. Yamada, K. Fukushima, and T. Matsui: "Limit detection and Improvement way of Step-out Relay by Voltage phase comparison", The Papers of Technical Meeting on System of Protection Relays, IEE Japan (2001-9)
栢木正弘・山田員己・福嶋和人・松井 仁: 「電圧位相比較方式脱調分離リレーの検出能力限界とその向上策」, 電気学会保護リレーシステム研資 (2001-9)

森 田 義 昭 (正員) 1956年11月2日生まれ。1975年3月大阪府立東住吉工業高校卒業。同年4月株式会社東芝に入社。現在に至る。主として保護継電装置・制御装置に関するエンジニアリング業務に従事。

福 嶋 和 人 (正員) 1969年12月3日生まれ。1995年3月大阪産業大学電気電子工学科卒業。同年4月株式会社東芝に入社。現在に至る。主として保護継電装置・制御装置に関するエンジニアリング業務に従事。

松 井 仁 (正員) 1967年1月31日生まれ。1987年3月東京都立航空工業高等専門学校卒業。同年4月東芝システムテクノロジーに入社, 2002年8月ティー・ディー・システムテクノロジー株式会社に出向。現在に至る。主として保護継電装置の設計に関する業務に従事。

栢 木 正 弘 (非会員) 1966年12月8日生まれ。1985年3月京都府立田辺高校卒業。同年4月関西電力株式会社に入社。現在に至る。主として保護継電装置の研究・開発に関する業務に従事。

松 下 浩 延 (非会員) 1961年6月10日生まれ。1985年3月戸工業大学電気学科卒業。同年4月東芝エンジニアリング株式会社に入社, 2002年8月ティー・ディー・システムテクノロジー株式会社に出向。現在に至る。主として保護継電装置の設計に関する業務に従事。

山 田 員 己 (正員) 1970年3月25日生まれ。1988年3月三重県立津工業高校卒業。同年4月関西電力株式会社に入社。現在に至る。主として保護継電装置の研究・開発に関する業務に従事。