系統保護リレー応動解析プログラムの開発

論文

正員 亀田 秀之 (電力中央研究所)
正員 湯澤 源一郎 (東北電力株式会社)
正員 市川 嘉則 (東北電力株式会社)

Development of a Response Analysis Program of Various Protective Relay Systems

Hideyuki Kameda, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)

Gen'ichiro Yuzawa, Member (Tohoku Electric Power Co. Ltd)

Yoshinori Ichikawa, Member (Tohoku Electric Power Co. Ltd)

The response analysis program of various protective relay systems has been developed, which program is able to analyze relay systems' responses against power system faults with high accuracy and also to check the setting values and coordination among relay systems.

Various relay systems are simulated by arbitrarily assembling six kinds of elements (relay, logic, timer, etc.). Relay elements are newly classified into 28 kinds of functions by concerning their principles and characteristics, which are able to cover relay systems installed for 66kV and above transmission system.

Voltage and current distribution on power system are calculated using method of symmetrical coordinates which are expanded from the fault calculation part of the power system dynamic analysis program (developed by CRIEPI).

It is confirmed that this program is useful for operation and has enough accuracy for analysis of relay systems through simulations of real power systems at various complex faults.

キーワード：リレーシステム、事故除去、不具合動作、シミュレーション、二重故障

1. はじめに

電力系統は、需要の増大とともに増強・拡大されてきているが、発電所用地獲得難のために、発電所は負荷の中心から遠方・偏在化するとともに単機容量の増大および大容量化し、更に送電線建設用地難のため、長距離送電線、多端子送電線、併架送電線、重潮流送電線の出現など、保護をとりまく環境は厳しくなっている。

一方、エネルギーの電力シフトなどを背景に安定な電力供給に対する社会的なニーズとともに、保護の高機能・高信頼度化、運用の高信頼度化の要求はますます高まってきた。これに伴って、リレー運用者の負担は増大し、保護リレー整定の精度向上と効率化への要請が非常に大きくなってきている。

本プログラムは、こうした要請に応えるとともに、電力系統で発生した多様な事故に対するリレー応動の妥当性、整定値の妥当性、およびリレーシステム間の協調の検討などを目的として、電力中央研究所と東北電力とで共同開発したものである。⁽¹⁾⁽²⁾

2. 開発したプログラムの機能と構成

〈2・1〉開発にあたっての基本方針 系統保護リレー応動解析プログラムを開発するにあたっての基本方針は、次のとおりである。

- ① 事故発生から事故除去に至る一連の過程を忠実に模擬可能とする。
- ② 解析対象は、66～500kVに適用されている全リレーシステムとする。
- ③ リレー誤動作・不動作や遮断器(CB)不動作などの不具合を模擬できる。
- ④ 任意の構成のリレーシステムの模擬を可能とする。
- ⑤ 大規模電力系統をも対象とするため、データベースとの組み合わせが可能になるよう配慮する。

〈2・2〉開発したプログラムの構成 本プログラムの概略フローを図1に示す。本プログラムは、電中研既開発の動特性解析プログラム⁽³⁾(以下、Y法という)の基本部分(直流系統のシミュレーション、安定度解析部分を除いた潮流計算及び故障計算部)をベースとした全系の電

流・電圧分布を求めるための系統解析部と、今回開発したリレー応動解析を行うリレー応動解析部から構成される。

また、リレー応動解析部への入力を事故時などの電圧・電流ベクトルとして与えることで、リレー要素単体での応動解析も可能である。

図1 概略フロー
Figure 1. General Flow Chart

本プログラムの実行に必要なデータは、系統解析用にはY法データ（系統データ、故障シーケンスなど）が、リレー応動解析用には、

- ①. プログラム制御データ（解析対象系統のノードの電圧階級を含む）
- ②. 各端子に設置されるリレーシステムを表すデータ
- ③. リレーシステムのシーケンス、リレー要素、タイマー要素などの整定値
- ④. CBデータ（接続ブランチ、開極時間など）
- ⑤. CTデータ（接続ブランチ、CT比、極性など）
- ⑥. PTデータ（接続ノード、PT比など）

が必要である。

3. 系統解析部

リレー応動の解析に当たり、系統解析部に適用したY法の基本部分に対して以下の拡張を行った。

- ①. 田中らの開発した故障計算手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾に基づき故障計算機能を拡張した。すなわち、単純故障種類として相間短絡を追加するとともに、異地点での短絡故障を含む表1に示す二重故障を組み合わせた故障計算を可能とした。
- ②. 故障点をノードに限定せず、ブランチの任意地点の故障も対象可能とした。これにより従来はブランチの中間故障の場合、ダミーノードを付加する必要があったが、ここではブランチと位置（1～99%）を指定することにより任意の点で故障を発生することができる。
- ③. 潮流制御用として設置されている移相変圧器についても、Y行列を非対称行列に拡張し、これを含んだ系統の解析を可能とした。

表1 取り扱う故障条件
Table 1. Classification of System Faults

取り扱う故障条件		取り扱う故障条件	
1 LG 1 LO 1 LA	1 LG 1 LO 1 LA	2 LG 2 LO 2 LA	3 LG 3 LO 3 LA
1 LG 1 LO 1 LA	2 LG 2 LO 2 LA	2 LG 2 LO 2 LA	2 LS
1 LG 1 LO 1 LA	3 LG 3 LO 3 LA	2 LG 2 LO 2 LA	3 LS
1 LG 1 LO 1 LA	2 LS	3 LG 3 LO 3 LA	3 LG 3 LO 3 LA
1 LG 1 LO 1 LA	3 LS	3 LG 3 LO 3 LA	2 LS
2 LG 2 LO 2 LA	2 LG 2 LO 2 LA	3 LG 3 LO 3 LA	3 LS
2 LS	2 LS	2 LS	3 LS

〔注1〕 ハッチング部が拡張部分
〔注2〕 G：地絡、O：開放
A：直列コンデンサ短絡、S：短絡

4. リレー応動解析部

〈4・1〉リレーシステム構成要素 本シミュレーションでは、リレーシステムの任意構成が可能のように、その構成要素を表2に示すように、リレー要素、論理要素、タイマー要素、スイッチ要素、外部接点取込要素、系統変更要素の6種類とした。以下に各構成要素の機能の概要を示す。

表2 リレーシステム構成要素の概要
Table 2. Outline of Six Kinds of Elements

リレーシステム構成要素	要素の概要
リレー要素	特性、原理から28種類に分類
論理要素	論理積、論理和など8種類
タイマー要素	限時動作・限時復帰タイマー
スイッチ要素	使用、不使用等を表す43スイッチ
外部接点取込要素	CB情報などを取り込む要素
系統変更要素	トリップなど系統変更要素

(1) リレー要素の分類と動作時間特性

プログラムを開発するに当たり、66kV以上の系統に広く適用されているリレーシステムを調査した。その結果、それらをすべてシミュレーションするために、表3に示すようにリレー特性や原理⁽⁶⁾などから28種類の原理式に分類することで可能とした。なお、発電機、変圧器、調相設備などの機器保護は、シミュレーション対象外とした。

表3 分類したリレー要素
Table 3. Registered Relay Functions Classified by Concerning Those Principles and Characteristics

分類	リレーファンクションとその機能
距離リレー (9種類)	44M (モー特性など)
	44X (リアクタンス特性など)
	44 (インピーダンス特性)
	44L (木の葉特性)
	44T (比例限時特性(1))
	44H (比例限時特性(2))
	44N (比例限時特性(3))
	44A (四辺形特性(1))
	44Y (四辺形特性(2))
単入力リレー (3種類)	51 (過電流、過電圧リレー等)
	51I (反限時特性過電流リレー)
	51D (電流変化幅リレー)
複入力リレー (6種類)	67G (地絡方向リレーなど)
	67S (3相短絡方向リレー)
	27 (電流補償付不足電圧リレー(1))
	27H (電流補償付不足電圧リレー(2))
	64G (地絡相選別リレー(1))
	64H (地絡相選別リレー(2))
電圧抑制付過電流リレー (2種類)	0CV (電圧抑制付過電流リレー(1))
	51V (電圧抑制付過電流リレー(2))
差動リレー、 位相比較リレー (7種類)	87 (電流差動リレー)
	87V (電圧差動リレー)
	87D (デジタル型電流差動リレー)
	78 (位相比較リレー)
	17H (表示線リレー(1))
	17M (表示線リレー(2))
	17T (表示線リレー(3))
その他 (1種類)	25 (同期リレー)

各リレー要素の原理式は(1)式のようなベクトル表現とし、その原理や特性を考慮して28種類に分類した。例えば、(1)式で $\theta = \pi/2$ とすればリアクタンス特性が、 $\theta = -\pi/12$ などとすればオーム特性となる。また表4に示す44Xの例のように、要素細分類パラメータやリレーシーケンス中のリレー設置相データなどから入力量を定めることにより、短絡・地絡検出要素などが模擬できる。

$$D = \{Z \dot{I} \exp(j\theta) - \dot{V}\} * Z \dot{I} \exp(j\theta) > 0 \quad (1)$$

ここで、Z：整定値(Ω)、θ：最高感度角(rad)

$\dot{I}$ ：入力電流ベクトル(A)

$\dot{V}$ ：入力電圧ベクトル(V)

*：ベクトル内積

表4 リレー要素の細分類例(¥44Xの場合)
Table 4. Example of Detailed Classification of Relay Element 44X

No	リレー要素の細分類
1	短絡要素
2	地絡要素(零相補償なし)
3	地絡要素(自回線零相補償のみ)
4	地絡要素(隣回線零相補償つき)

各リレー要素は動作時間特性を考慮するために、図2に示すように「動作判定部+仮想タイマー(限時動作)」という構成でモデル化した。すなわち、定限時特性では入力データとして仮想タイマー整定値を入力し、反限時あるいは比例限時特性では、入力電流の倍数や事故時に測距されるインピーダンスから計算される動作時間を仮想タイマー整定値とすることにより考慮可能となる。

図2 動作時間特性を考慮したリレー要素モデル
Figure 2. Relay Element Model Concerning Time Characteristics

(2) 他リレーシステムからの情報の導入要素と系統変更要素

表2中の外部接点取込要素(EXTNL)は、CB情報、トリップ信号あるいは他リレーシステムの論理要素出力などを自リレーシステムへ取り込むための仮想論理要素である。受信リレーはこの要素によりシミュレーションできる。本要素の使用法の概要を表5に示す。

系統変更要素は、トリップあるいは再閉路指令により遮断器を操作する仮想論理要素である。従って、あるリレーシステムにおける終端要素として、リレーシーケンス中に必ず定義される。なお、応動解析例に示すように、単相遮断可能なリレーシステムに対しては、1端子あたり3つの系統変更要素を定義する。

表5 外部接点取込要素の適用方法
Table 5. Application Method of Imaginary Logic Element "EXTNL"

(3) その他の要素

論理要素は、表6に示すように、全ての基本的な論理要素を考慮した。これにより、シーケンス表現が正論理あるいは負論理のどちらでも対応可能としている。

タイマー要素は、限時動作・限時復帰タイマーとして、動作遅延と復帰遅延を考慮している。タイマーの応動は、前段要素の状態とタイマー自身の状態を記述するフラグからタイマ自身の状態を決定している。

スイッチ要素は、リレーシステムの「使用」、「不使用」など保護リレーの運用に関わるものを対象に、入力データとして、その状態を与えている。

表6 シミュレーション対象論理要素
Table 6. List of Logic Elements

シンボル	要素の内容など
AND	論理積要素 (入力点数は最大4)
OR	論理和要素 (入力点数は最大4)
NOT	否定要素
INHIBIT	禁止要素 (第1入力が否定要素)
NAND	NAND要素 (入力点数は最大4)
NOR	NOR要素 (入力点数は最大4)
EX-OR	排他的論理和
MEMORY	記憶要素

〈4・2〉リレー動作による系統状態の変更 本シミュレーションでは、図3に示すようにリレー要素、タイマー要素などの動作時間特性を考慮して、リレーシステムからのトリップ出力の有無を決定している。もしリレーシステムよりトリップ指令が出力されていれば、当該のCBを開放することにより系統状態を変更し、故障計算、リレー動作解析を順次繰り返す。

これにより、事故発生から事故除去までの一連の過程を忠実に模擬することが可能となり、例えば後備保護リレー動作時の事故除去過程における距離整定協調、動作時間協調を容易に検討することができる。

図3 事故除去までの時間推移
Figure 3. Process of Fault Clearing

〈4・3〉不具合動作の発生方法 電力システムに設置されているリレーシステムに関係した不具合動作として、リレー要素などの誤動作、誤不動作およびCB不動作、CT飽和を対象とした。以下にその模擬方法について述べる。

(1) リレーシステム構成要素の不良模擬

リレーシステム構成要素のどこかに不良動作を発生させる機能として、リレーシステム構成要素の誤不動作と誤動作を想定した。これら不良は、シーケンスデータの中で不良動作を想定する要素にフラグをセットする。例えば、リレー要素に「誤不動作」を指定した場合、「動作」するはずの事故であっても、その出力を強制的に「不動作」とすることにより表現する。

(2) 周辺機器の不良模擬

CBの不良モードとしては、不動作のみを対象とした。この実現方法は、リレーシステム構成要素の誤不動作の実現と同様に、CBデータにおいて不動作とするCBを選択し、その出力状態を書き換えることにより実現している。

CT飽和は電圧差動母線保護方式を対象に考慮⁽⁷⁾したもので、CTの励磁インピーダンスを強制的に0にすることにより、簡易的に模擬している。

5. 応動解析例

図4に示すようなモデルシステムにより基幹系統の主保護として代表的な275kV PCM電流差動継電方式の応動解析例について述べる。

解析対象とするリレーシステムは275kV AB線の1および2号線保護として4端子分設置されている。各端子に設置される275kV PCM電流差動リレーの模擬シーケンスを図5に示す。

各相の電流差動リレー（以下87）へは当該送電線に設置された線路両端のCT（1000A/5A）より、その差電流を導入する。この87は相手端の電流を伝送系を介して取り込むが、本シミュレーションでは、自端87に相手端CTを指定することにより模擬している。電流補償付不足電圧リレー（以下27）へは自端の母線に設置されたPT（275kV/110V）より電圧と、当該送電線のCTより電流を導入する。87の動作時間は20msec、27Sと27Gの動作時間は30msecに、遮断器の開極時間は40msecとしてある。

事故点はAB線のB変電所至近端とし、1号線側がR相1LG、2号線側がS相2LSの同時事故が起こったと想定する。

この時のB変電所側に設置されているリレーシステムの応動解析結果を図6に、事故発生直後、各端子のリレーシステムに入力される電流と電圧を表7に示す。

図6と表7によれば、A変電所とB変電所の母線電圧が3相とも低下するため、事故検出リレーは3相とも動作する。但し、1号線側はR相1LGなのでR相の主検出リレー（87-1）の動作により両端同時に事故相であるR相を選択し、2号線側はS相2LSなのでS相とT相の主検出リレー（87-2、87-3）の動作により両端同時に事故相であるS相とT相を選択している。この結果、1号線側ではR相のCBが2号線側ではS相およびT相のCBが開極時間経過後に開放され事故が除去される。以上1例ではあるが、複雑事故時の各リレーシステムの内部状態を含めた応動と事故除去までの過程が正しくシミュレーションされていることがわかる。

図4 275kVモデル系統
Figure 4. 275kV Model Power System

要素の概要	
87	デジタル型電流差動リレー
27S	電流補償付不足電圧リレー（短絡事故検出）
27G	電流補償付不足電圧リレー（地絡事故検出）
AND	論理積
OR	論理和
43C	スイッチ（「使用状態」としている）
TRIP	系統変更要素（CBヘトリップ指令を送出）

図5 275kV PCM電流差動リレーシステム
Figure 5. 275kV PCM Current Differential Relay System

6. あとがき

以上、開発した系統保護リレー応動解析プログラムについて、機能・特徴、リレーシステム構成要素の考え方、不具合動作の発生方法、応動解析例などについて述べた。

その結果を要約すると以下ようになる。

- ①. 66kV以上の系統に設置されているリレーシステムを抽出し、原理特性から28種類の原理式に分類して、その全てを構成可能とした。
- ②. リレーシステム構成要素を6つの要素に分類することで任意のリレーシステム構成を可能とした。
- ③. 各種動作時間特性を表現するために、リレー要素を「動作判定部+仮想タイマー」としてモデル化した。
- ④. 事故除去過程を忠実にシミュレートすることにより、リレーシステム間の協調の検討などを容易にした。
- ⑤. 不具合動作を含む解析を可能とすることで、複雑事故の解析、リレー運用者の教育・訓練などに役立つシステムとすることができた。

これらにより、充分実用に耐えうるプログラムを開発することができた。

本研究は昭和62年度より始まり、各リレー要素単体試験、プロトタイプの検証と段階的に開発し、実用プログラムの開発に至った。現在までに各種リレーシステムを対象に検証を行い、全て良好な結果を得ている。本プログラムは現在、東北電力の「系統保護リレー整定・管理システム」に組み込まれ試運用されている。

最後に本研究の遂行に当たり、適切な助言などをいただきました電力中央研究所情報研究所坪井副所長、東北電力技術部皆川部長、菅原副部長、さらに電力計算センター、開発計算センターの各位に紙面をお借りして深謝致します。

(平成5年11月26日受付)

文 献

- (1) 亀田秀之他；「リレーシミュレーションシステムの開発」、電力技術研究会、PE-88-64
- (2) 亀田秀之他；「系統保護リレー動作シミュレーションシステムの開発」、電力技術研究会、PE-89-146
- (3) 谷口治人他；「大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発」、電力中央研究所 総合報告 T14 平成2年4月
- (4) 田中和幸他；「系統計画における安定度評価のための多重故障計算方法」、電力中央研究所報告 研究報告 No182044 昭和58年6月
- (5) 田中和幸；「電力系統の動特性解析のための多重故障計算」、電力中央研究所報告 研究報告 No184019 昭和59年9月
- (6) 福田節雄監修；「保護継電器ハンドブック」、オーム社
- (7) 大浦好文；「保護継電技術の常識」、リレープラクティスシリーズ1、電気書院

亀田秀之 (正員) 昭和29年7月31日生。昭和56年3

月成蹊大学大学院前期博士課程電気工学専攻修了。同年4月電力中央研究所入所。現在、電力システム部システム制御グループ所属。系統保護リレーの解析、新型保護、変電所の自動化、超電導機器の保護・制御に関する研究に従事。

湯澤源一郎 (正員) 昭和26年1月27日生。昭和45年

3月黒沢尻工業高校卒業。同年4月東北電力㈱入社。主として電力系統の保護に関する業務に従事。

市川嘉則 (正員) 昭和35年6月8日生。昭和58年3

月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月東北電力㈱入社。昭和62年4月～昭和63年3月京都大学受託研究員。主として電力系統の解析・制御に関する業務に従事。平成4年電気学会進歩賞受賞。