正員 大浦 好文

東京電力(株)

正員 古瀬 溢泰

(株) 明電舎

キーワード

電力系統, 保護リレー, 系統保護リレー, デジタル保護リレー

1. まえがき

電力系統は、発電所、変電所、送配電線および負荷を結ぶ巨大なエネルギーの発生・輸送・消費ネットワークであり、時々刻々と変動する電力需要に応じて常に適正な電力を発生し、また、発電所や変電所等で適正な電圧・無効電力調整を行うことにより、周波数および供給電圧の安定維持を図っている。

電力系統の保護リレー（以下、系統保護リレーと呼ぶ）は、落雷、風雪などの自然の猛威に晒されているこれら電力設備に事故（接地、短絡など）が発生した場合に瞬時にこれを検出して遮断器（事故時の大電流を遮断するスイッチ）に遮断指令を出して不具合箇所を電力系統から切り離し、人身の保安確保と設備損傷の拡大防止ならびに、残りの健全設備による電力の安定供給継続を図るものである。

本稿では、系統保護リレー技術の変遷について簡単に触れ、現状の課題およびその方向性について解説する。

2. 系統保護リレー技術の変遷

わが国の電気事業は 1886 年に始まるが、この頃は事故が発生すると、ヒューズ（事故時の過大電流が流れると溶断）や過電流引外し機構付き遮断器（電力系統の電流を計器用変成器で変換して過電流引外しコイルに流し過大電流が流れた時は遮断器を自動的に開放）で事故電流を遮断するきわめて単純な方法で保護されていた。

1901 年になると米国の G E 社および W H 社が相次いでプランジャー形過電流リレーを開発し、その数年後には我が国にも適用された。これは、過電流引外し機構付き遮断器の中から事故電流検出の機能だけ独立させた電磁機械形の系統保護リレーの原型であり、電流コイルの電磁吸引力によりプランジャーを吸い上げて電流が一定値以上の時に動作するようにしたものである。その後、電力需要の増加に対応して水力電源地域から都市部の電力消費地域まで 154kV 送電を骨格とする放射状電力系統が形成・拡大して行くようになると、系統安定度面の問題等から、より高速な事故除去と事故送電線の高速自動再閉路が重要になり、電磁機械形保護リレーおよびそれを用いた保護方法は大きく発展を遂げた。電力量計でなじみの深い誘導円板形保護リレー（当時は銅の円板を電磁コイルで作り出した移動磁

界により回転）により、動作レベルおよび時間の精度を格段に向上させ、また、複数の電圧や電流入力を導入して事故方向を判定したり入力量の比率で動作判定させるなど、やや高度な機能を実現できるようになった。誘導円筒形保護リレーは、誘導円板形の円板を筒状にして回転力を高め可動部の慣性を低減したもので動作の高速化が図られた。保護方式面では、回線選択リレー、方向距離リレー、電力線搬送方向比較リレーなどがある。回線選択リレーは平行 2 回線送電線の電流が区間内の事故時のみ不平衡になることを利用し両回線の電流を比較して事故回線を判定、方向距離リレーは保護リレー設置点の電圧と電流から事故点までの電氣的距離（インピーダンス）を検出するもので、いずれも通信手段を用いずに保護リレー装置設置箇所の情報だけで高速判定する方式である。電力線搬送方向比較リレーは、保護対象の送電線を通信手段として送電線各端子で検出した事故方向から事故区間を検出する方式であり、事故発生から 6 サイクル（50Hz 系統で 120ms）の高速遮断と高速単相再閉路が可能となり、安定送電の確保に大きく寄与した。

1960 年頃になると、日本経済は高度成長期を迎え、急激な都市需要の増加、電気の質に対する高度化要求から、電源の拡充、275kV 送電線の潮流増大・ループ化が進展した。ちょうどこの頃に、米国北東部などで一つの事故が引き金となって大規模停電に波及する事例が相次ぎ、系統保護リレーの重要性が再認識され、アナログ静止形保護リレーが開発適用された。アナログ静止形リレーは、トランジスタやアナログ IC を用いたレベル検出回路、論理回路、タイマーなどを組み合わせて保護リレー機能を作り出すものである。電磁機械形では不可能な動作特性、高速動作が比較的容易に実現できる。特に、マイクロ波通信と組み合わせた各相電流位相比較リレーは、事故発生から 3.5 サイクル（50Hz 系統で 70ms）の高速事故除去を実現した。また、送電線 2 回線にまたがる複雑な事故でも事故相を確実に検出することができるため、よほど苛酷な事故でない限りは送電を継続しながら事故相のみを一旦遮断し、1 秒程度で再閉路する高速多相再閉路を可能とし、系統安定度の維持・向上を図った。

また、アナログ静止形リレーは、主検出とフェイルセーフの二重化アンド構成による不要動作の防止、自動監視技術の適用とシステムの 2 系列化で機能障害の早期発見・修復により誤不動作の防止を図るなど、信頼度面でも著しい

Future Aspect of Power System Protection

by Yoshifumi Ohura, Member (Tokyo Electric Power Co.) & Mitsuhiro Furuse, Member (Meidensha Corporation)

第1表 電力系統と保護リレーの変遷

年 代	1950	1960	1970	1980	1990	
	(1952)		(1973)			(2000 年代)
	154 kV	275 kV		500 kV		1000 kV
最高電圧と系統構成	(53) 66 kV ケーブル導入 放射状系統での事故遮断の高速化	(58) 154 kV ケーブル導入 系統拡大、ルーブリ化に伴う事故除去の高速化、事故波及の防止	(65) 50/60 Hz 系統連系 (71) 275 kV ケーブル導入 ・事故の局限化 ・装置信頼度の向上 ・低次高調波対策	(90) 短絡・地絡電流格上 (50kA → 63kA) (2000 年) ・1000kV 昇圧 ・500kV ケーブル導入 <系統特性の大幅な変化> 事故時高調波の一層の低次化 事故時直流分減衰時間の悪化 <コストと信頼度の追求>		
系統保護リレー	誘導円板形	誘導円筒形	アナログ静止形-I (真空管→トランジスタ)	アナログ静止形-II (アナログ IC)	デジタル形-I (16 ビット)	デジタル形-II (32 ビット)
リレー方式	(50) 誘導円筒形距離継電器 (51) 電力線搬送方向比較 (56) 標本量位比較 (60) 各相位比較 (マイクロ波) (55) 表示線リレー	(63) 全トランジスタ式方向比較 (69) 全トランジスタ式位相比較 (77) FM 差動 (78) 低次高調波対策付方向比較	(80) PCM 差動 (81) デジタル形距離 (82) デジタル形回線選択 (84) デジタル形変圧器保護 (86) デジタル形母線保護			
周辺技術	(48) トランジスタの発表 <ゲイタ>	(58) IC 技術発表	(65 頃) Si トランジスタ出現	(71) 4 ビットマイコン (74) ビットスライスマイコン	(80) 16 ビットマイコン (84) 32 ビットマイコン	
通信網		(58) アナログマイコン回線		(79) 2 GHz デジタルマイコン回線 (デジタル網→デジタル統合網へ) (78) 光ファイバ導入 (81) OPGW 導入		

向上をもたらし、定期点検周期の延長による保守負担の低減も図ることができた。

1970 年代に入ると、500kV 送電線を骨格とした基幹系統の拡充は一挙に進み、大容量電源の遠隔・偏在化、基幹送電線の潮流増大・多重ループ構成、275kV 地中ケーブルの導入など、事故様相は一段と複雑になった。系統の短絡・地絡電流も一層増大し、万が一、事故除去が遅延すると、系統に与える影響も大きく、状況によっては系統安定度が維持できずに大停電になる場合も考えられるようになってきた。そこで、登場したのがデジタル形保護リレーである。デジタル形保護リレーは、電力系統の電圧や電流の瞬時値をデジタル量に変換して、そのデータをもとにマイクロプロセッサで演算処理して事故判別を行うものである。保護機能は、ほぼ電圧や電流データのデジタル変換精度とマイクロプロセッサの演算処理能力で決まるため、ハードウェア面からの制約が少なく高度な保護機能が実現できる。3 端子送電線を保護できるマイクロ波伝送デジタル電流差動リレー、地中ケーブル増加による事故時電圧・電流波形のひずみ増大に対応した方向距離リレー、多回線併架送電線の常時循環電流の影響を除去する零相循環電流対策付回線選択リレーなど枚挙に暇がないほどである。また、ハードウェアの標準化・量産部品の使用、コンパクト化、自動監視機能のアナログ静止形以上の充実によってコストダウンと保守の省力化が図られた。

3. 最近のデジタル保護リレー技術

デジタル保護リレー技術は、1980 年の初適用以降、既に 15 年余りが経過し、この間、ハード・ソフトウェア

技術、設計技術、製造技術など、著しい進歩を遂げた。

3. 1 デジタル保護リレー基本要素技術

マイクロプロセッサは、当初、4 ビットのビットスライス形プロセッサを 4 個組み合わせて 16 ビットプロセッサを構成していたが、その後、汎用マイクロプロセッサの出現とビット数の増加、クロックの高周波数化が進み、現在では 32 ビット、クロック周波数 25 ~ 33MHz のプロセッサが主流になっている。また、当初はシングルプロセッサシステムであったが、現在は一つのバスを複数のプロセッサで時分割使用するマルチプロセッサシステムが主流になっている。これにより、マイクロプロセッサの単位時間当たりの演算処理能力は、当初の 10 倍程度に向上している。

電力系統の電圧・電流のデジタル変換性能は、事故の検出性能を決める基本的な要素であるが、当初は、マイクロプロセッサの処理能力および基板のノイズ対策技術との関係からサンプリング周波数 600Hz または 720Hz、12 ビット A/D 変換が限界であった。その後、基板の設計・製造技術が進歩し、これとマイクロプロセッサの演算処理能力の向上を組み合わせ、サンプリング周波数 4800Hz または 5760Hz で 16 ビット A/D 変換器によりデジタル変換したデータにデジタルフィルタ等を施すことで、高周波ノイズによる誤差を圧縮することができるようになった。これにより、従来の 10 倍程度の精度で、しかも波形の認識もより正確にできるようになった。

メモリの高集積化は特に著しいものがあり、容量で 100 倍以上、アクセス時間で半分以下になっている。初期のデジタル保護リレーにおいても一部にはリレー動作時や装置障害発生時の内部データをセーブする機能を備えたもの

もあったが、最近ではメモリの高集積化を活かして標準装備するようになってきている。

デジタル保護リレーの動作値を設定したり動作状態を表示したりして取扱者との接点となるヒューマンインタフェースは、当初、発光ダイオード、セグメント表示器、押しボタンスイッチなどで構成されていたが、最近ではフラットディスプレイ表示とタッチパネル操作により対話形のインタフェースや、汎用のパーソナルコンピュータによる別置形のインタフェースなども適用されている。

3.2 装置・システム設計技術

(1) 合理的配置設計が可能な装置

従来、保護リレー装置は温・湿度環境やサージ・ノイズの影響から専用の部屋に設置するのが一般的であったが、これをガス絶縁開閉装置(GIS)等の近傍のデッドスペースに分散設置できれば、より合理的な配置設計が可能となる。特に、大規模地下変電所では建物コストが高いため、このスペース節減効果は大きい。このため、低消費電力部品の採用による温度上昇の抑制、サージ・ノイズが直接侵入する部分とサージ・ノイズの影響を受けやすい微小信号・高速で動作する部分との分離、盤裏面作業がいらすそのための裏面作業スペースが不要になる前面一方向作業形装置などの改善が施された。屋外の変電所においては、温度上昇対策を講じたキュービクルまたはハイム内に上記低消費電力素子の使用で発熱を抑ええた保護リレー装置を収納することにより、GIS近傍への分散設置を可能とした。

(2) 光伝送技術を活用したシステム構築

高度情報化社会の進展に伴い光情報通信網は目覚ましい勢いで整備され、1978年には光ファイバ、1981年にはOPGW(光ファイバ内蔵の架空地線)が導入された。これに伴い、これら光通信網を活用し、多端子の154kVや66kV送電線にもデジタル電流差動リレーが適用可能になった。変電所構内についても、1992年に構内伝送用の異メーカ装置結合可能な伝送速度10Mbpsの光LANが開発され、全国大の大規模変電所制御保護システムに普及してシステムの簡素化、コストダウンが図られた。

(3) 装置構成単位の合理化

マイクロプロセッサの演算処理能力とアナログ入力のデジタル変換性能の向上により、アナログ入力部のハードウェアの統合・共用化、デジタル処理による多機能実現が可能になる。このため、従来、別装置で構成していた装置も一体化によってコンパクト化、コストダウンおよびハードウェア量低減による信頼度向上を図ることが可能になる。送電線や変圧器の主・後備保護一体化がその典型的な例である。また、通信回線を介して構成するシステムの通信装置機能を保護リレー装置に取り込んでシステムの簡素化を図ることも行われている。

3.3 品質管理向上・生産性向上技術

デジタル保護リレーの品質向上を図るためには、ハードウェア部品の故障低減とソフトウェアの品質向上が必要である。ハードウェア部品の故障低減については、低消費

電力部品の採用による温度上昇抑制、高集積部品の採用・装置の統合による部品点数の低減、半導体部品のスクリーニング強化により、初期のデジタル形の約半分、アナログ静止形と比べると約1/4に低減されている。ソフトウェア品質については、OS(Operating System)の搭載、アセンブラ言語から高級言語やPOL(Problem Oriented Language)への移行、ソフトウェアの標準化・モジュール化、シーケンス図面からソフトウェアを自動生成するシステムの導入などにより、ソフトウェアのビジュアル化、ヒューマンエラーの侵入機会の低減を図る対策が講じられている。この対策は、同時に生産性の向上にもつながり、特に標準化、モジュール化はソフトウェア設計だけではなく、その検証も不要となるのでその効果は大きい。

4. 今後の課題と方向性

4.1 電力系統特性の変化に対応した保護機能の確保

わが国の電力系統は、今後さらに拡大して、2000年代初頭には1000kV架空送電や500kV地中送電の導入が予定されている。これに伴い、事故時の過渡的な電圧・電流波形の歪みの一層の増大や(事故電流)/(負荷電流・充電電流)の減少に対応した保護機能の高度化が必要である。また、1000kV送電線固有の課題としては、高速多相再閉路の確保と事故電流の過渡直流成分の減衰悪化がある。前者は、1000kV送電線では、送電電圧が高いため事故相を遮断しても健全相からの静電誘導により事故点に大きな電圧が誘導されてアークがなかなか消滅しないため、事故点の絶縁回復が遅くなり、高速再閉路できないというものである。後者は、送電線の太径化により電気抵抗が小さくなり、事故時の過渡直流成分の減衰定数が長くなるもので、事故電流を検出する計器用変成器の誤差が磁気飽和により大きくなり、母線保護リレーの不要動作などの問題が生じ、対応が必要である。

4.2 設備形成の効率化による投資抑制の推進

電力を取り巻く課題の中で最重要課題は、設備投資の抑制であり、保護リレー技術としては、次のような取り組みをしていく必要がある。

(1) 設備形成の効率化に資する新しい保護機能の創出

基幹送電線の多端子保護方式開発による変電所引込口設備の簡素化・中間開閉所省略、地中ケーブル系統の事故除去高速化によるケーブル防災対策費の低減など、新しい保護機能の創出・適用による主回路設備のコストダウンを図る。

(2) 装置・システム構成方法の合理化、保護対象に応じた機能の整理・適正化の検討の継続推進

装置構成やシステム構成の合理化については、すでに検討実施中であり、引き続き未検討のものについて検討を進める。また、保護対象に応じた必要機能および信頼度レベルを再整理し、適正化を図る必要がある。

(3) 周辺機器の仕様合理化

保護リレー装置の周辺機器の内では、電圧・電流変成器

のコストダウンが期待できる。電圧変成器は、保護リレー装置の入力回路の低消費電力化によって 1000kV 系統用として開発した光 PD 技術の適用が可能になり、GIS 縮小化によるコストダウンが期待できる。電流変成器についても、保護リレーの低消費電力化と保護方式面からの大電流域での誤差制約軽減などにより仕様低減が可能である。

(4) 全国大での仕様標準化、検査方法の合理化による生産性向上

ディジタル保護リレーは、ハードウェア、ソフトウェアを標準化すればするほどコストダウンならびに信頼度の向上が期待できるが、このためには、各電力会社の設備実態は異なっているので様々な課題があるものと思われるが、可能な限り全国大での標準化を推進し、各ユーザがその標準を遵守していくことが重要である。また、当初設計の段階から全国大の標準化を意識して、電圧階級、機種間、ユーザ間の相違を吸収できるような仕様を決定していくことが重要である。

ディジタル保護リレーは、ハードウェアの性能が同じならば全く同じ性能が得られるという特徴を有する。したがって、型式試験ではソフトウェア、ハードウェアを総合した徹底的な検査を実施する必要があるが、その後の商用試験ではこのハードウェアの品質に的を絞った試験で十分であり、思い切った合理化が必要である。

4. 3 無人変電所遠隔化に対応した運転保守の省力化

従来、無人変電所の系統保護リレーが動作したり障害が発生したりすると現地に出向してその内容を確認していたが、数十分から1時間を要しており、道路事情によってはかなり応動が遅れることが懸念される。このため、早期応動の確保ならびに省力化を図るため、系統保護リレーの遠隔運用が望まれている。現在、系統保護リレーのヒューマンインタフェースは、パーソナルコンピュータを RS-232C で接続する形態としているので、マイナーな変更で対応可能である。

4. 4 新技術活用を視野に入れた系統保護技術の模索

近年、ニューラルネットを用いた安定度判別手法の研究、電圧制御へのファジー制御の導入、系統保護リレーへのアダプティブ機能の付加などの試みが行われている。また、系統保護リレーの障害時にエキスパートシステムを使って不良部位を特定する手法もオフラインで取り入れられており、その結果を活用して、系統保護リレーにその障害情報をもとに不良部位を自動的に特定化して表示する機能も内蔵されるようになって、復旧の迅速化に寄与している。今後、このような新しい技術も含めて、広く系統保護リレー技術の方向性について模索していく必要がある。

4. 5 系統保護リレー技術力の維持・向上

系統保護リレー技術においては、電力系統構成の長期計画段階から課題の抽出とこれを解決する対策方針や改善事項を先見的に明らかにし、必要な新保護機能の開発、標準装置化の推進、さらに、施工計画・建設・運用・運転・保守にかかわる実践的技術を確立し、普及・定着させていく

ためのきわめて広範囲な総合技術力が必要とされる。すなわち、開発・総括部門では、安定度、電圧特性等の系統解析や各種故障解析、過渡現象解析など、また、中間・現業部門では対称座標法などの電気基礎理論に、また、それぞれの職務に応じた専門技術として、保護リレー演算アルゴリズム、システム設計技術、マイクロプロセッサなどのハードウェア技術、光伝送などの技術に精通することが必要である。

したがって、これら技術者を育成し技術力を高めていくためには、ユーザ、研究機関、メーカーの系統保護リレーや関連する電力系統技術に携わる技術者同士の技術交流、さらには広く大学や周辺分野から適切な指導・支援を受けやすくする環境作りと、若い意欲のある人々の継続した保護リレー分野への参入と技術継承を図っていくことが肝要である。

5. あとがき

電力系統の保護リレー技術の変遷と技術の現状および今後の課題について述べた。

現在の系統保護リレー技術は、電磁機械形、アナログ静止形、ディジタル形と進歩する中で蓄積してきた総合的技術をベースとしており、今後も、常に時代のニーズを先見的に考慮しながら新技術も積極的に取り込み、着実に発展していくものと思われる。

(平成8年4月19日受付)

文 献

- (1) 安藤, 「保護リレーシステムの歴史的経緯」
電気評論, 1985.3
- (2) 大浦, 「保護リレーシステム技術」特集号によせて
電学論 B, Vol.114-B, 1994.7
- (3) 大浦他, 「系統保護リレーの現状と今後の動向」
電気評論, 1955.6
- (4) 「第2世代ディジタルリレー」, Vol.50 No.1
電気協研報告書, H6.4

大 浦 好 文

(正員) 1935年1月6日生。1954年福島工業高校卒業。同年東京電力(株)入社。1992年工学博士。現在、系統運用部にて系統保護制御システムの開発、管理、系統技術における部門を担務。同部部長(制御システム技術担当)。1987年論文賞、1989年進歩賞、1992年IEEE/PES 'Prize Paper Award' 賞、1994年業績賞、同年論文賞受賞。

古 瀬 滋 泰

(正員) 1940年6月25日生。1959年3月長野県立松本工業高等学校卒業。同年4月(株)明電舎入社。保護制御継電器の研究・開発に従事。1965年3月電気通信大学短期大学部通信工学科卒業。現在、コンピュータ装置工場継電器部部長。1954年オーム技術賞受賞。