保護リレー技術革新の歴史

正 員 大浦 好文

The history of the protective relaying technology innovations
Yoshifumi Ooura, Member

As for the protection relay, the innovations of relay technology was accomplished for 30 years leaping-ly. This relay technology innovations corresponded to the expansion of the electric power system are accomplished by the foresight.

In the composition of the protection relay equipment, it improved from the mobile contact-type relay of electromagnetic power to the solid state-type relay and moreover the technology was innovative at the digital-type relay by MPU. Then, the innovations of this hardware technology could be achieved by the establishment of the technology which make relay systems a high degree of the reliability by automatic and watching over equipment itself. On the other hand, because the innovations of this relay hardware technology could leave out the limitation of the protection relay function, it brought about the innovations of the software technology which protect bulk power systems to a high degree.

The protection relay technology in Japan is the technology which have been most advanced in the world and is the technology which fitted in with the Japanese state of the affairs.

As for this paper, it introduces the outline about the contents of the technology innovations and the big results of the technology innovations.

キーワード：電磁型リレー、全静止形リレー、自動監視技術、2系列化、高信頼度化技術、デジタルリレー、高速事故除去機能、多相再閉路、保護機能高度化、広範囲系統事故波及防止局限、系統セキュリティ、設備形成効率化

1. まえがき

我が国の総需要1億8千万kw以上に達する電力を安定に供給する電力系統は、数千台の発電機、延べ亘長9万kmに達する1万回線以上の送電線、1千箇所以上の送電変電所、5千箇所以上の配電用変電所、6万回線以上の配電線からなる巨大なシステムである⁽⁴⁾。

保護リレーシステムは、この巨大な電力系統について隅から隅まで全ての範囲を十数万のリレー装置により保護する広範囲の理論・技術・技能を駆使するシステム技術により維持している。そして、この保護リレーシステムは、年間平均およそ特別高圧系統で千数百件、配電系統で2万件発生する故障に対して、故障から供給支障事故や設備事故に波及するのを防止し、このうち約20ないし30%程度以下の電気事故件数（省令で定められた事故）に局限している⁽⁵⁾。と同時に、広範囲に波及する大停電事故も皆無に止めてきている⁽⁵⁾。

この保護リレーシステム技術は、電力系統の拡大と社会的要請に対応して先見的に技術革新を図ってきており、30年間で飛躍的に進歩してきた⁽⁶⁾。

本論文は、その技術革新の概要と、技術改革の成果の概

要について述べる。

2. 保護リレー技術革新の概要

もともと保護リレー（継電器）は、本来の言葉、リレーの意味の通り「中継」そのものが、保護リレー機能のシンボルであった。

初期の保護リレーは、発電機や変圧器、送電線等の電力機器・設備に故障が発生した際、異常に変化する電流、電圧を故障からの「中継」をすべく、その電流、電圧による電磁力で鉄心の吸引力やアラゴの円盤の原理によるトルク等で電気接点を閉じる「中継」によって保護リレーの機能を形成した。この「中継」から、さらに制御電源励磁による確実な電磁力鉄心吸引力を作り、通電容量の大きな1ないし複数の接点開閉「中継」により、最終的に必要な遮断器をトリップさせるものであった。

この一連の「中継」によって電力機器・設備故障による異常電流を遮断し、異常電流等による波及被害や災害を防止し、保安確保に努めていた。

初期の保護リレーは、電力系統が、放射状のシンプルな構成であり、電力機器・設備の故障を判別するにあたり異常電流、電圧の電磁力による大小比較など単純な演算量比

較で十分であるし、また電力機器・設備故障による停電も社会的に許容される範囲であることから、その設備規模は電力設備の中では極めて小さく低価格であり、技術的にも電力設備の単純な故障現象の応用と単品の製造技術ならびにそれを単純な組み合わせ配線回路で構成し使用する程度であった。

その後、保護リレーは、電力系統の多電源連係やループ構成が進み、電力系統事故による社会的、系統的影響が増大するにともない、電力機器・設備の故障を判別する異常電流、電圧を誘導円筒の電磁誘導トルクに置き換える高度・高速な演算量比較する「中継」に発展した。そしてこの「中継」を複数行い、これに送電線ではさらに対向端子における演算量比較の通信回線を介した「中継」も含め、これらを補助電気接点で複雑な論理構成の「中継」に置き換えることによって所用機能の確保を図る大幅な技術改善を図ってきた。

それでも、さらに旺盛な電力需要の増大に伴う系統規模の拡大にともない上記の「電流電圧の電磁力」と「中継」の応用では、その機能の制約が足枷となり、高信頼度の保護機能の確保が困難となってきた。

‘60年代後半に入るとトランジスタを応用したトランジスタリレーが世界的に単体リレーとして製品化されつつあり、保護リレーの機能面では、大幅向上が期待された。

図1 電力システムにおける保護リレー技術の変遷
Fig 1 The change of the protection relay technology in the electric power system

しかしながら、信頼度面では、部品数の著しい増加から、

大幅な低下が懸念され、大電力系統への本格的適用が困難な問題に直面していた。

折しも国内外の大停電事故が発生し、保護リレーの重要性が強く認識され、大学、研究所の参加と、電力会社、製造会社協同による全国的な保護リレー技術の改善検討⁽¹⁾が行われた。

その大きな成果の一つとして、保護リレーシステム自身の故障を自動で監視する自動点検・常時監視機能の適用見通しが得られたことである。これは、電力系統のセキュリティ確保の見地から、過ちが許されない遮断器の引き外し回路の自動点検も可能とする手法であり、世界に先駆けた保護制御システムの高信頼度化を確保する技術革新である。

この自動監視機能を保護リレーシステムに適用することにより、保護リレーの保守点検業務を省力化しつつ大幅信頼度向上が図れる見通しが得られ、さらにリレーのトランジスタ化・全静止形化による大幅機能向上も期待⁽²⁾されることとなった。

これを基とした電力会社・製造会社共同研究を行い、次章で述べる自動監視付き全静止形リレーの開発を経て、「電流電圧の電磁力」と「中継」の応用の制約の全くない第1世代デジタルリレー、第2世代デジタルリレーへの開発と保護リレーの飛躍的な技術革新⁽³⁾を図った。

また、保護リレーの役割についても電力機器・設備故障の保護のみならず、電力系統の擾乱による事故波及を防止局限する機能、ならびにその神経的機能を生かして電力系統設備を合理的に形成する大きな役割も持った電力システムの一環として不可欠な重要なシステムに拡大してきた。

これは、もはや保護リレーの語源である個別機能の「中継」的要素は全く姿を消し、あらゆる電力系統現象をデジタル情報化し演算処理する事によって電力系統を適切に保護・制御するソフト技術と、これを普遍的に支えるマイクロコンピュータ・デジタル回路の高信頼度維持を可能としたハード技術とによって構築されるものとなった。正に、「リレー」から電力システムシステムの一環としての「保護リレーシステム」への技術革新である。

この保護リレーシステム技術は、広範囲のしかも高度専門的な電力系統技術、系統解析技術、系統保護制御技術、高信頼度システム製造技術、装置運用保守技術・技能を緻密に体系的に駆使する業務により成り立つものであり、それぞれ個々の業務は多くの他部門を横断した的確な業務運営が必要不可欠となる極めて高度専門的な電力システム技術となってきた。

3. 保護リレーシステム技術革新とその成果

< 3. 1 > 基幹系統保護リレー技術革新の成果

1970年代に世界的に使用されていた、電磁型リレー・電力線搬送による方向比較キャリアリレーから、高信頼度化、保守の省力化を指向した自動監視付き全静止形リレー・マイクロ波回線による各相位相比較リレーの全面的な適用、ならびに1980年代後半からの多端子送電線に

も普遍的に適用可能で完成度の高いデジタルPCM電流差動リレーの適用は、従来、年当たり数件発生していた基幹送電線保護リレーの不正動作による広範囲波及事故を皆無にするとともに、従来は不可避であった雷害および風雪等による基幹送電線の2回線同時遮断事故をこの新リレーの有する極めて優れた多相再閉路機能により首都圏供給エリア系統の例では、1975年から今までに500kV送電線で9件、275kV送電線で33件も未然に防止し、これにより生じる広範囲波及事故を防止してきている。

一方、まれに発生する遮断器の事故や直下型地震等による設備の多発事故発生時等の極めて厳しい系統事故が発生した場合でも、確実に事故箇所を最小範囲で除去する系統後備保護リレーについても、上記の基幹送電線主保護リレーの改革と合わせ、大幅な性能向上を図った。これは、当時の世界的最高水準の誘導円筒形電磁形リレーを静止形リレーさらにデジタルリレーへの我が国独自の改革によって、系統電力潮流増大や系統の多分岐化への対応、ならびに事故除去のスピードアップ等の大幅な性能向上を達成したものであり、この技術改革により、幾多の設備事故および、複雑な系統事故発生時の広範囲事故波及を防止し系統のセキュリティ確保に確固たる実績を上げてきている。

また、一方では、系統に生じる故障を除去する保護リレーの技術革新とは別に系統に生じる擾乱からの波及事故を防止する保護リレーについても抜本的な技術革新を図ってきている。

電力系統には、局所的な系統事故から、広範囲の系統事故波及拡大原因となる次に示す1)～4)項の系統異常が発生することがある。

このような場合、事故波及の拡大を確実に防止・局限するため、電力系統特性の変化に適切に対応しつつ電源遮断や負荷抑制等を行い事故の波及を防止する保護リレー、すなわち系統事故波及防止リレーシステム技術を革新した。

この技術革新には、系統技術・系統解析技術・保護リレー技術を集結した我が国独自のものであり現在電力系統の要所要所に広く適用してきている。

- 1) 系統周波数異常低下、異常上昇
- 2) 大規模電源系統同期安定度崩壊、系統間同期安定度崩壊(脱調現象)
- 3) 重負荷系統電圧崩壊、単独系統の過電圧
- 4) 大規模流通設備の過負荷

これらの事故波及防止リレーシステムは、系統の異常を原因事故発生と同時にあるいはオンラインの系統状態から、予測し適切な処置を行うとともに複数の系統異常でもそれぞれの波及防止リレー機能が協調して事故の波及を局限を図れるなど、大電力送電系統、多重ループ連係系統、大電源系統、広域連係系統等で、重大事故発生時に、広範囲波及事故を未然に防止してきている。

例えば、首都圏供給275kV送電線2回線が、墜落飛行機の直撃により切断され広範囲の都市電力供給がブロックされた際、0.5秒の短時間内に、湾岸火力と近傍重要

系統を高速自動分離し、有効・無効電力ともに極端なアンバランスから安定運用可能なバランスに高速制御した。

この緊急制御処置により、重要地域の安定供給継続を成功・維持し、広範囲停電地域への復旧を迅速化することができた。

この例など、幾多の重大事故を局限し、系統のセキュリティ確保を果たすとともにこれら技術の活用による設備形成の効率化を促進してきている。

これらの高度な基幹系統保護リレー技術は、我が国における電力系統および社会的ニーズから電力系統システム技術として生まれたものであり、世界的に見ると他国ではまだ極、一部に使用されている段階である。しかし、今後は先進国においても、開発途上国においても、設備形成の効率化と系統信頼性との両立の見地から、積極的にこのような保護リレー技術が取り入れられていくものと見られる。

<3. 2> 154kV以下系統保護リレー技術革新の成果 1980年代後半から、従来の電磁型リレーとコストの面でも有利なデジタル・リレー技術が確立したのを契機として、我が国ではいち早くデジタル・保護リレーが広く全面的に採用されてきており、現在では半数以上に普及してきている状況にある。

この低コスト、デジタル保護リレーの開発導入により、従来、高性能保護が不可能であった77kV、66kV、

図2 保護リレー機能強化と電力システム信頼度

Fig 2 The reinforcement of the protective relay function and the degree of the electric power system reliability

22kV級の供給系統について、高性能・高機能PCM電流差動リレーを低コストで適用することが可能となり、停電事故の防止や瞬時電圧低下の0.5秒程度から0.1秒への継続時間短縮による影響軽減等に大きく寄与してきているとともに、デジタルリレーの自動監視機能の活用による無保守化が進み、リレー試験のための送電線長期停止

回避による系統信頼度向上、設備運用保守業務の合理化に寄与してきている。

< 3. 3 > 多端子リレー開発による設備形成の効率化

1970年代以前は不可能であった基幹送電線の3端子構成について、前述の位相比較リレーの応用改良により、送電線直下のT分岐3端子構成を可能とした。

これにより、引き込み遮断器の減数、引き込み線および母線の通電容量の軽減等により、一分岐変電所当たり数億円以上の投資節減を図れるようにするとともに、

表1 保護リレーシステム信頼度向上例

Table 1. The improvement example of the protective relay system reliability

年 代	不具合 動作件数	不 具 合 動 作 原 因 別 内 訳		
		機能不備	偶発故障	取扱不備
1960年代後半	235(10)	95	96	44
1970年代前半	48(2)	10	28	10
1970年代後半	18(0)	5	10	3
1980年代前半	13(0)	1	12	0
1980年代後半	11(0)	1	6	4

() の数値は、直接接地系統の分の内数を示す

1980年代後半からはさらにデジタルPCM電流差動リレーの適用により、より普遍的に超高压送電系統の3端子構成や数端子構成が可能となり、275kV6端子送電線の例では200億円に達する設備投資の削減を図ることが出来るなど、送変電設備形成の効率化に大きく寄与してきているとともに、今後一層このような設備形成の効率化に資することが可能となった。

< 3. 4 > 高性能脱調未然防止リレー開発による大容量電源送電系統のスリム化

送変電設備は、単一故障等により一設備停止状態となっても系統的、社会的に大きな支障を生じないようにすることを基本に総合的に検討し設備形成してきている。しかしながら系統規模の拡大等に伴い、500kV大容量電源送電系統等では、設備の通電容量の面からは設備裕度があるにもかかわらず、同期安定度維持の面から設備形成の強化が必要となる厳しい傾向が見られてきている。

このような中であって、500kV大容量電源送電系統等では、2回線同時、同相の1線地絡故障の発生頻度は、例えば1回線の3線地絡故障の頻度より多いので、この事

故の対応を考慮する必要が生じてくるのが一般的である。しかしながら、このような系統では、2回線同相1線地絡事故発生時に、故障線の一時遮断後、1秒で再閉路するまでの間に大電源が脱調し、再閉路で2回線とも健全に戻っても脱調事故が広範囲に波及する恐れが生じる。これを送電設備増強で対応することは大幅な設備投資の増大を伴うとともに設備形成上の制約から対応が困難な場合が多い。

このような状況から、前述の高性能オンライン予測演算脱調未然防止リレー等の適用により、2回線同相1線地絡事故発生時に、大電源系統の脱調を未然に防止するため再起動の容易な1電源ユニットないし最小台数の電源ユニットを選択遮断し、早期に復旧する対策が実際的かつ有効である。

この方策は、電源の規模が拡大し、送電系統が多ルートとなった場合においても、さらに過酷な1ルート遮断事故、後備リレー遮断事故発生時等には、大電源の同期安定度崩壊による広範囲波及事故の防止を図ることができるので、送電電力を大きく運用し、設備稼働率の向上による設備形成の効率化に資することが可能となる。

このような見地から、設備形成に当たっては、系統計画段階から、この脱調未然防止リレーの活用も前提として考慮し、総合的整合を推進して効率化に多くの実績を上げてきている。

< 3. 5 > 系統安定化制御と脱調未然防止リレー高度化による電源運用の効率化促進

大規模原子力電源・火力電源の遠隔化、ならびに揚水電源の大容量化に伴い、基幹送電系統の送電電力が昼夜間を通して増大してくるとともに、同一方向の電力潮流が、連係系統をまたがり長距離化するなどによる系統特性の変化により、大規模系統間の送電電力に同期安定度面から制約が生じ、燃料費の軽減を図る電源の効率運用ならびに、供給確保のための電源運用に足枷を生じる状況が顕在化してきた。このような電源運用に重大な支障をもたらす系統間同期安定度面の送電電力制約を解消するため、従来、局所電源系統にしか適用出来なかった発電機安定化制御方式

(PSS)を、大規模系統間の安定化にも個々の発電機が足並みを揃えて安定化する系統間動揺抑制・発電機励磁制御方式(新PSSとサイリスタ励磁の全面採用)を確立し、さらに夜間、大容量揚水運転中の系統単一故障による揚水同期電動機の同期安定度崩壊を未然に防止する脱調未然防止リレーの開発適用し、系統の特に厳しい時期には、系統間可能送電電力の200万kW以上増大した例など電源運用の効率化に大きく寄与してきている。

< 3. 6 > 系統電圧制御高度化による設備形成効率化

超過密大電力需要地域系統等では、電力需要増大とそれに伴う大電力送電系統増大に伴い、基幹送電線系統の受電端側の電圧変動幅増大が顕著となってきた。この系統特性変化は、需要変動や電力潮流分布の変化が、時間的、系統的な運転電圧のばらつきを増大するとともに、従来の変圧器LTCによる電圧制御と調相器開閉による潮流力率制

御のみでは、基幹系統電圧を安定に維持することが困難となるほか、系統同期安定度低下や電力系統損失増大を派生させる状況となってきた。この問題の抜本的改善を図る見地から、高信頼度デジタル保護リレー技術を全面的に活用し、基幹変電所調相開閉による一次側電圧高精度一定制御、変圧器LTCによる二次電圧高精度一定制御を行う高精度、高信頼度デジタルVQCを超過密供給地域500kV変電所に開発適用した。この新VQCの導入と、これを活用した系統電圧運用技術の確立により、基幹系統の運用電圧を全ての系統機器の最高使用電圧に正確に合わせる事が可能となり、系統電圧の安定維持を強固にするとともに、同期安定度の最大維持、ならびに電力系統電力損失の最小維持に資するとともに、基幹系統の送変電設備や調相設備の形成効率化に大きく寄与してきている。

< 3. 7 > 設備過負荷事故波及防止リレーの活用による設備形成の効率化

設備有効活用、設備形成効率化の見地から、設備の稼働率を高め、かつ、設備故障時の過負荷による設備損傷波及を防止し安定供給の継続確保を図ることが極めて有効である。このような見地から、1970年代から、設備過負荷事故波及防止リレーを適用し、設備形成の効率化、ならびに系統運用の効率化に寄与してきた。しかしながら、従来は、単なる過電流の検出と時限による簡易制御過負荷リレーであったため、設備の過電流耐量の活用が設備の形成や系統運用に十分に反映出来ない状況にあった。この改善を図るため、1980年代後半から、デジタルリレー技術を活用し、設備の通電電流から設備温度上昇を演算類推し設備過負荷の度合をオンラインで把握できる設備過負荷事故波及防止リレーを開発適用し、一層の設備稼働率の向上に資するとともに、現段階では、設備部門による設備過負荷運用限度の徹底見直しと協調を進め、この系統保護リレー技術と、設備保全技術を徹底活用した一層の設備効率化、系統運用の効率化を推進している。

4. むすび

このような中で、行政改革の促進、国際化、経済自由化促進の一環として電気保安自己責任体制の確立、電力自由化推進等の観点からの電気事業法の見直しが大幅に進められ、電力供給システムについての設備形成・運用についても抜本的なコストダウン方策の確立が急務となってきた。中でも電力系統・流通設備は、小売り自由化託送料に対する一層の低減要請の強まり、分散電源との関係増大等とともに、流通機能の体質変化が避けられない状況にある。このため、設備形成のスリム化と広範囲系統大停電事故防止の両立の要となる保護リレーシステム技術の活用が、今後一層重要となってくる。かかる情勢に鑑み、保護リレーシステムについても今後の変化に対応し一層活用すべき技術と総合コストダウン方策をさらに推進していく必要がある。

本論文が、電力関係者の参考に資すれば幸甚である。

(平成12年3月1日受付、平成12年9月25日再受付)

文 献

- (1) 主幹系統保護施設委員会「主幹系統保護施設」
社団法人 電気協同研究会 第25巻4号
- (2) 保護リレー自動監視専門委員会「保護リレー自動監視」
社団法人 電気協同研究会 第28巻1号
- (3) 第二世代デジタルリレー専門委員会「第二世代デジタルリレー」 社団法人 電気協同研究会 第50巻1号
- (4) 大浦 好文:「保護リレーシステム技術」によせて
電学論B、114巻7/8号、平成6年
- (5) 保護リレーシステム基本技術調査専門委員会
「保護リレーシステム基本技術体系」電気学会技術報告
第641号 1997年7月
- (6) 保護リレーシステム工学の体系化調査専門委員会
「保護リレー調査システム工学の体系化と技術者育成」
電気学会技術報告 第717号 1999年2月
- (7) 系統脱調・事故波及防止リレー技術調査専門委員会
「系統脱調・事故波及防止リレー技術」電気学会技術報告
第801号 2000年10月

大浦 好文 (正員) 1935年1月6日生。

1954年 福島工業高等学校卒業。

同年 東京電力(株)入社。

1962年 電験第1種。1992年 工学博士。
系統運用部において系統保護制御システムの開発系統技術に関する部門を担務、同部部長。2000年退職、総合研修センター講師。1987年 論文賞。1989年 進歩賞。
1992年 IEEE/PES Prize Paper Award。
1994年 業績賞。