

電力系統保護制御技術の動向

Trends in Power System Protection and Control Technologies

伊藤 八大 須賀 紀善

■ ITO Hachidai

■ SUGA Noriyoshi

保護リレー（保護継電器）は、電力系統又は電力設備などに発生した短絡や地絡などの異常状態（系統事故）を数十msという短時間で検出し、事故が発生した箇所を、他の健全部からすばやく切り離すよう指令を出す装置である。

1907年に保護リレーが国産化されてから、ことしは記念すべき100年目である。この保護リレーなどを電力系統に配備した電力系統保護制御システムは、電力系統の拡大・発展に伴ってその構成も変化してきた。最近ではデジタル技術の発達によって、マイクロプロセッサを搭載してデジタル伝送を活用するデジタルリレーやデジタル形監視制御システムが主流となり、性能及び機能が高度化し、電力系統保護制御システムに常に要求される信頼度の向上も実現してきた。

今後は、知的処理や通信ネットワーク技術との融合により、電力系統の広域保護制御への発展も見込まれる。

A protection relay is a device that detects abnormalities (system faults) such as short circuits and earth faults occurring in an electric power system or power equipment within several tens of milliseconds, and issues a command to isolate the faulty part from other normally functioning parts without delay.

This year marks the 100th anniversary of the manufacture of Japan's first protection relay in 1907. The configuration and deployment of protection relays and other control devices and systems have evolved during this period along with the development and expansion of electric power systems. Numerical protection relays, which are equipped with microprocessors and digital transmission units, are becoming popular in parallel with the development of digital control and monitoring systems. Protection relays have greatly improved in terms of performance and general features as well as reliability, which is essential for power system protection and control.

In the future, protection relays are expected to play a vital role in the protection and control of wider area power systems based on intelligent processing and communication networks.

保護制御システムの重要性和役割

電力系統保護制御システムは、電力系統に発生した事故を迅速に除去し、事故設備の損傷を軽減するとともに、電力系統を安定に運用するための重要な設備である(図1)。

この保護制御システムは、電力系統の拡大発展に伴う電力の量的及び質的变化に対応してその構成も変化してきている。

一方、最近のデジタル技術の発達とともに、マイクロプロセッサを搭載してデジタル伝送を活用するデジタルリレーやデジタル形監視制御システムが主流となっている。

これらデジタルの素子、回路及び通信伝送技術の発達は、保護リレーや監視制御の性能と機能を向上させるとともに、装置やシステムの形態そのもの

も変革させてきた。

ここでは、電力系統保護制御システムの役割、発達の歴史、技術の進歩、及び将来展望について述べる。

■ 電力系統の重要性

わが国は米国、中国に続く世界第3位の電力消費国であり、電力消費量で世界の7.1%を占めている。また、主要国の一人当たり電力消費量もカナダ、米国に続く世界第3位であり、全エネルギー消費に占める電気エネルギーの比率は約4割となっている^{(1), (2)}。

この電気エネルギーを供給するわが国の電力系統は、6千台以上の発電機、全長約8万8千kmの送電線、約1,200か所の送電用変電所、1万台以上の配電用変圧器、約6万回線の配電線からなる巨大システムである⁽³⁾。

このような統計値を持ち出すまでも

なく、実際の日常生活においても“電気がない生活”は考えられず、その供給システムが重要な社会インフラであることには誰も異論はないものと思われる。

■ 保護制御システムの役割

電力系統や設備の多くは、落雷や暴風雪などの自然の脅威にさらされている。このため、例えば、設備への落雷により絶縁が破られて事故となり、大きな事故電流を生じる場合がある。

電力系統や設備に事故が発生した場合に、事故の影響を防止し局限化するものに、保護リレーシステムがある。保護リレーシステムは、例えば、事故系統や事故設備を、電力系統から迅速に切り離して、電力系統の健全な運転を確保するものである(図み記事参照)。

事故系統や事故設備を放置すると、

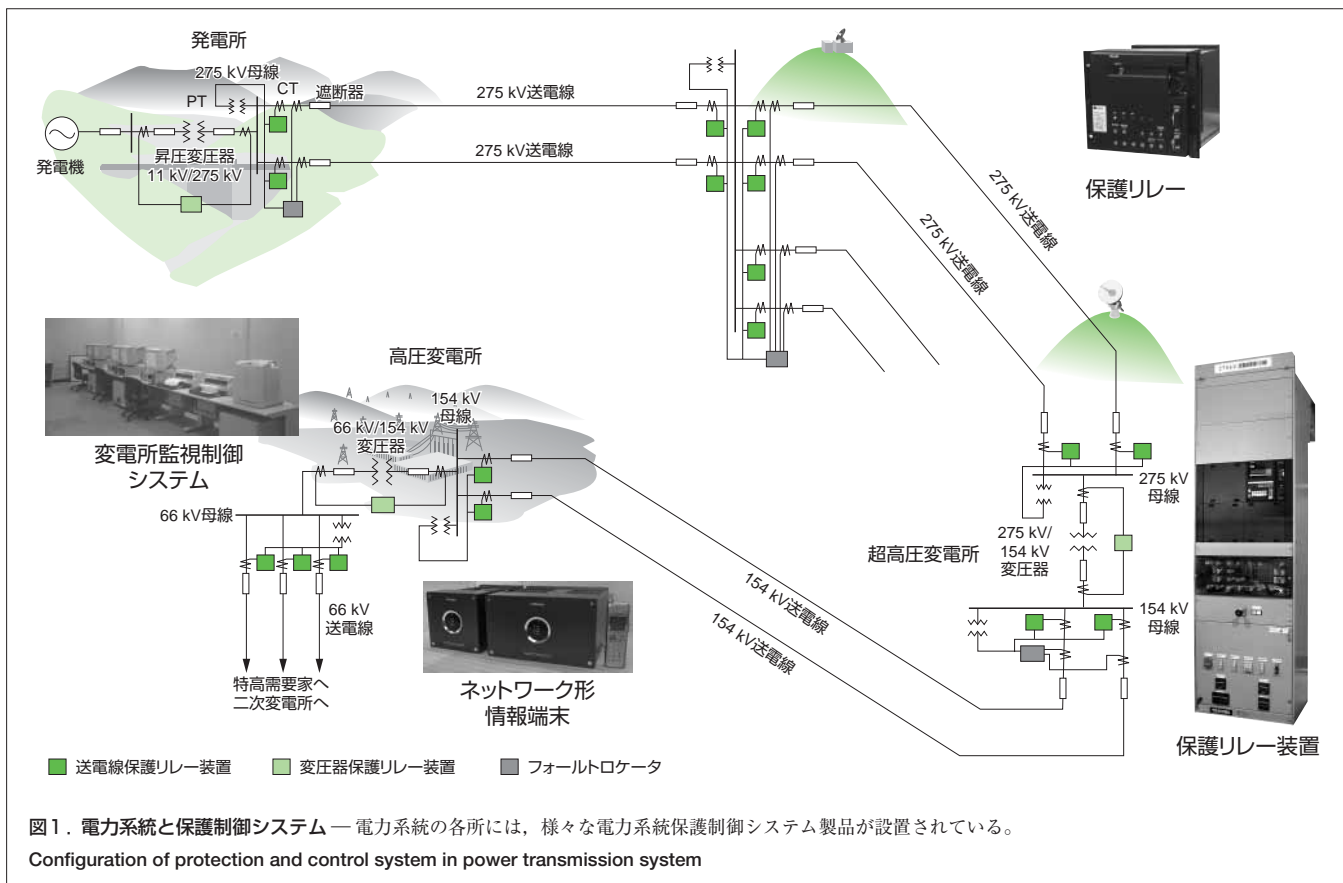


図1. 電力系統と保護制御システム — 電力系統の各所には、様々な電力系統保護制御システム製品が設置されている。
Configuration of protection and control system in power transmission system

電力系統が崩壊したり設備が致命的な損傷を受けたりするので、電力系統に及ぼす影響を少なくするために、保護リレーシステムは0.05秒から0.3秒で動作するように設計されている。

保護リレーシステムには、このほか、事故除去後の系統動揺や事故波及を防止して、安定運転に寄与する事故波及防止リレーシステムも実用に供されている⁽⁴⁾。例えば、有効電力の需給バランスが崩れて周波数が上昇、低下した場合に適切な制御を行う周波数維持システムなどである。

また、送電線の保護リレーシステムに内蔵されることが多い自動再閉路システムは、落雷事故後、電力系統から切り離し絶縁が回復した送電線に、再送電を自動的に行うものである。このシステムは、事故復旧の迅速化だけでなく、高速再閉路により系統の安定度を向上させるなど、大きな役割を果たしている。

■ 保護リレーシステムの信頼性設計

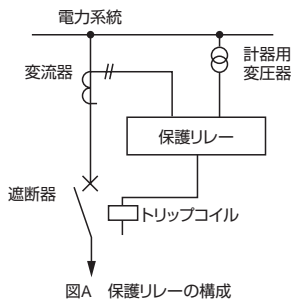
保護リレーシステムの基本的な動作責務は、系統事故の発生などの異常状態と事故点を認知し、適切な遮断器を動作させて事故を除去し、系統を健全な状態に復旧させることである。系統事故が発生したときに、誤不動作で遮断指令を送出せず事故除去を失敗したり、系統事故がないのに、誤動作で遮断指令を送出して健全な系統を遮断したりするようなことがないように、このシステムには、以下に示すような信頼性設計がなされている。

- ・系統保護リレーは、事故遮断を目的にした設備事故除去リレーと系統動揺の拡大防止を目的にした事故波及防止リレーが電力系統内に分散して設けられている。
- ・設備事故除去リレーは、隣接する相互の保護範囲が重なり合い保護の盲点を生じないよう構成されている。

- ・事故を高速に遮断する主保護リレーに加えて、主保護が遮断に失敗した場合に備えた後備保護リレーが設けられている。
- ・主保護リレーや後備保護リレーをそれぞれ2系列化する信頼度向上策も、適用系統に応じて実施されている。
- ・保護リレーは、構成している一つの電子部品だけの不良で誤動作を生じないように、フェイルセーフ要素が内蔵されている。
- ・デジタルリレーは、プロセッサを用いた高度な自動監視機能を備えている。このため、異常を速やかに検出することが可能になった。最近では、故障発見の約70%が自動監視機能によるものである⁽⁵⁾。
- ・最新のデジタルリレーでは、異常状態から異常部位を推定することが可能になっており、この推定結果の活用により、故障部位の交換と復旧の迅速化に寄与している。

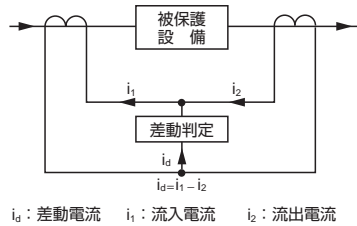
保護リレーの原理

保護リレーには主として、保護リレー設置箇所の電流や電圧を用いる方式(図A)と、保護対象機器の両側の電流を用いる方式(図B)がある。図Aに示す方式は、電力系統に事故が発生したことを、電流が流れすぎたことで検出する過電流リレーや、



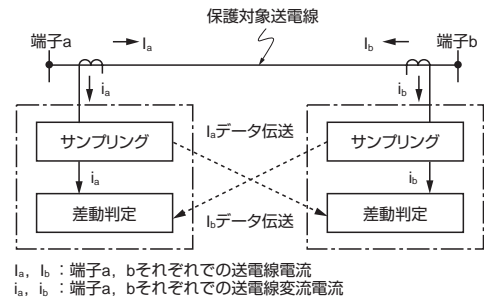
図A 保護リレーの構成

電圧が低下したことで検出する不足電圧リレー、電流と電圧から計算するインピーダンス(事故点までの距離に相当)の変化で検出する距離リレーなどがある。図Bに示す方式は、正常時には保護対象機器に流れ込む電流と流れ出す電流は一致して



図B 差動リレーの原理

いるが、事故が発生すると不一致となることで動作するもので、差動リレーと呼ばれ、送電線や、変圧器、母線などの保護に用いられる。送電線保護の場合は、図Cに示すとおり、両端子の電流データを相互に伝送してその差動判定を行う。



図C 送電線電流差動リレー

・遠隔地間でデータを交換するキャリアリレーなどは、適切な伝送フォーマットを用いるほか、CRC(Cyclic Redundancy Check)によるデータ健全性の確認が一般に行われて、信頼性の向上に寄与している。

保護制御システムのデジタル化の歴史

保護リレーの誕生は1901年であり、電磁機械形リレーであった。電磁機械形とこれに引き続くアナログ形の歴史については既にまとまった文献^{(6), (7)}があるので、ここでは、1970年代に登場したデジタル形保護制御についてまとめておく。

■ デジタルリレーの誕生と実用化

マイクロプロセッサの登場以前のデジタル形リレーは、もっぱら信号の継続時間をクロックで計数する計数形リレーであった。

電子計算機を用いたデジタル演算により保護リレー機能を実現する考えは、1968年に米国のG. D. Rockefeller氏により発表された。

その後、ミニコンピュータ応用のデジタル演算形保護リレーが1972年から米国などで実用に供された。しかし、これらはデジタル演算で保護リレーを実現できることを検証するためのものであった。

1971年に4ビットのマイクロプロセッサが開発され、1974年には処理速度の速いビットスライス形が開発されて、保護リレーに必要な演算処理がマイクロプロセッサで実現できるようになり、デジタルリレーの実用化がわが国で進められた。

デジタルリレーが地絡又は短絡事



図2. 世界初のデジタルPCMリレー — 1980年に世界で初めて、このデジタル形送電線保護用PCMキャリアリレーが実用化された。

World's first numerical differential relay

故を保護する事故除去リレーとして実用化されるようになったのは、1980年になってからである。この年、PCM(パルス符号変調)キャリア差動リレーが東京電力(株)梓川線に、回線選択リレーが同日市場線に設備され、世界に先駆けて、送電線保護としてデジタルリレーの適用が始められた(図2)。

■ デジタルリレーの発展と高度化

1986年に(社)電気協同研究会報告書「デジタルリレー」⁽⁵⁾が発行され、デジタルリレーはいっそう広く電力系統保護に適用されるようになった。16ビットCPUをマルチプロセッサ構成で使い、12ビットのA/D(Analog to Digital)変換器により電力系統のデータを電気角 30° 間隔で取り込んで保護演算を行う、基本的なデジタルリレーの構成が定着した。PCM電流差動リレー、距離リレー、回線選択リレーなどに加えて、多入力を扱う母線保護リレーもデジタルリレーで実用化された(図3)。

1989年には光LAN応用分散形保護制御システムが開発され、適用がなされた⁽⁸⁾。これは、デジタルリレーのハードウェア及びソフトウェアを变电所



図3. デジタルリレー盤 — デジタルリレーを採用することにより、保護リレー盤のコンパクト化が可能となった。
Protection relay panel with numerical relays

制御にも活用したもので、変電所構内に分散配置された装置を当時の最新技術である光LANで結合する画期的なものであった。

1994年に(社)電気協同研究会報告書「第二世代デジタルリレー」⁽⁹⁾が発行され、デジタルリレーの高度化が促進された。実効精度14ビットのAD変換器と32ビットのマルチプロセッサを用いて、電力系統のデータを電気角7.5°～3.75°間隔で取り込んで保護演算を行うことが可能となり、精度向上などの性能面が改善されるとともに新たな保護アルゴリズムが開発された。加えて、ヒューマンインタフェースの改善などによる保守性の向上や機能の統合による装置盤面数の削減などを実現した。また、ソフトウェア開発効率と品質も、C言語などの高級言語を本格的に適用したことにより向上された。

デジタルリレーは、系統事故を除去する事故除去リレーだけでなく、事故の影響が広範囲に波及しないように保護制御する、高度な事故波及防止リレーシステムの実現にも寄与している。

変電所監視制御のデジタル化⁽¹⁰⁾

変電所監視制御装置は、変電所の運用を行う装置であり、電力系統や設備の状態表示や記録、電力系統の構成を

変更するため行う遮断器や断路器などの開閉器への開閉制御、あるいは、系統電圧の調整制御を行うものである。

この監視制御装置も保護リレー装置と同様に、補助リレーシーケンスをハードウェアで実現したものから、マイクロプロセッサを用いて制御機能の高度化などを図ったデジタル形装置の適用へと進んでいる。デジタル形変電所監視制御システムは、信頼性と保守性の向上を意図して、制御端末装置を回線単位に分散させ、LANで結合して構成されている。

1987年に、IEEE802.4(米国電気電子技術者協会規格802.4)トークンバス方式の光LANを適用した分散システムのフィールドテストが開始され、1990年に275 kV変電所に世界で初めて実用されている。最近ではEthernet LANが適用され始めており、そのシステム構成例を図4に示す。

保護制御技術の進歩

電力系統保護制御技術は、機能面においては電力系統現象の解析や、その結果に基づく保護方式の研究開発、すなわち広い意味でのソフトウェア開発

が長年行われてきた。しかし、それを装置として実現するには、ハードウェア技術と信号伝送技術が必須であった。

ハードウェア技術の進歩

保護リレーは当初、電磁石や電磁誘導の原理で動作するものから始まり、デジタルリレー以前では、保護リレーの機能はハードウェアで実現されていた。しかしデジタルリレーでは、保護リレーの機能はもっぱら演算処理部のソフトウェアで実現されており、ハードウェアに対する要求仕様も大きく様変わりした。

最新のデジタルリレーのハードウェアは、①アナログ入力部、②演算処理部、③通信制御部、④入出力部、⑤その他(ヒューマンマシンインタフェース部、電源部など)から構成されている。そのコアの部分は、ソフトウェアを処理する演算処理部とアナログ入力部である。

演算処理部のプロセッサは、20年前には16ビットでクロックスピードが10 MHz程度であったため、多数のプロセッサを並列に動作させて機能を実現する必要があったが、最近では、64ビットでクロックスピード300 MHz程度までに進歩しており、より高度な処理を、

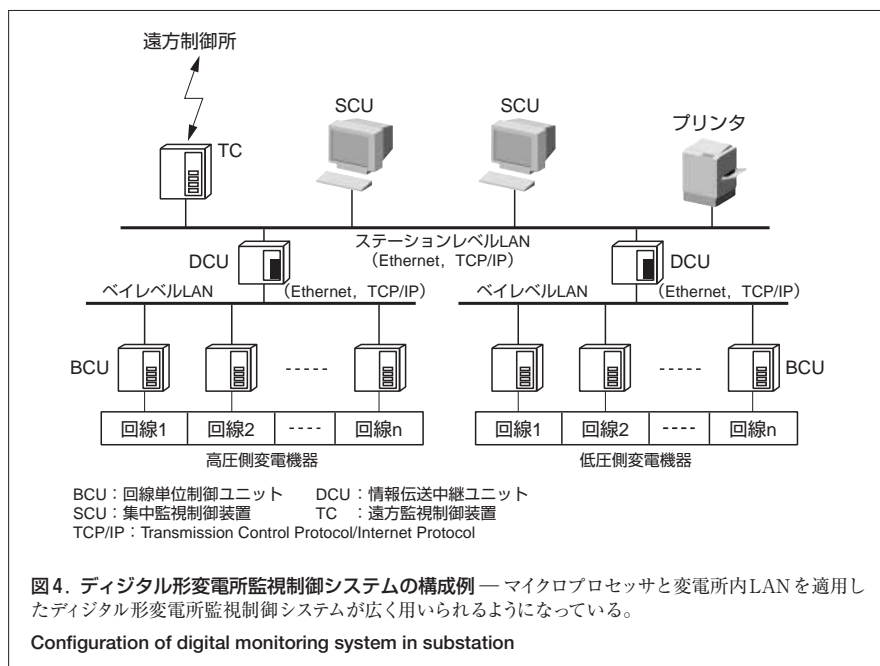


図4. デジタル形変電所監視制御システムの構成例 — マイクロプロセッサと変電所内LANを適用したデジタル形変電所監視制御システムが広く用いられるようになってきている。

Configuration of digital monitoring system in substation

少ないプロセッサで実現することが可能になっている。アナログ入力部は、多数の入力を忠実にかつ高速度にデジタル変換するものであり、実効精度として、14ビットの分解能や電気角 3.75° のサンプリングが標準的に採用されている。

デジタルリレーは、変電所など厳しいノイズやサージが発生する電磁環境のなかに設置される。このため、これらのハードウェアには高い耐ノイズ・耐サージ性能を持つよう、設計面で特別な対策が取られている。

■ 信号伝送技術の進歩

保護制御技術の進歩と信号伝送技術の進歩は密接な関係がある。初期の保護リレーでは保護リレー設置場所の電圧と電流を用いていたが、高い保護性能を実現するために、通信手段の進歩に応じて、送電線に対向する変電所側の情報も利用することが促進された。

現在のデジタルリレーでは、各端子の電流量をデジタル信号化して、デジタルマイクロ回線、電力線、光ファイバ、パイロットワイヤを用いて、伝送することが行われている。また一部に、GPS (Global Positioning System) 技術が時刻同期に適用されている⁽¹¹⁾。

■ 電力系統解析技術の進歩

保護制御システムの開発・設計・試験のために、電力系統現象を深く理解し検討する電力系統解析技術は不可欠である。従来からEMTP (Electro-Magnetic Transients Program) などを用いた解析と、その結果を用いた系統事故模擬試験などが行われてきた。

近年のマイクロプロセッサの高性能化や並列処理技術の進歩などにより、リアルタイムなデジタルシミュレーションを可能にする装置も製品化されており、それらを活用することにより、保護制御システムの検証や試験が効果的かつ効率的に行えるようになってきている。

保護制御技術の将来展望

このようにハードウェア、ソフトウェア、及び信号伝送などの技術の進歩に伴い発展してきた保護制御技術は、長い歴史を持ち、技術的な飽和点に近づいているかに見える。しかし一方で、電力の安定供給に対する要求の高まりや、電力自由化の流れなどに伴う新たな難しい課題が増えてきており、新しい技術の適用による更なる発展が強く望まれるようになってきている。

■ 知的処理の高度化

電力系統は、構成及び、発電や負荷の量など、その状態は常に変化している。保護リレーは、電力系統の状態がどのように変化しても、正常な状態なのか系統事故が発生しているのかを100%正確に、かつ数十msという短時間に判別する能力を持つ必要がある。しかし、電力系統はその構成や運用によって種々の定数や状態が変化し、その判別条件が複雑であったり不明確であったりする場合もある。

したがって、電力系統及び機器の特性や事故判定条件を数式やロジックで表現できない場合など、系統擾乱(じょうらん)時の電流量解析に波形分析技術や画像認識技術を使ったリアルタイム技術が今後議論されていくものと思われる。

また、種々の保護機能について、電力系統状態にとってその時点で最適な状態に自発的に調整するという機能を持つアダプティブ保護の検討が進められており、一部実用化されている。

しかし、保護リレーが系統事故と判断すると即座に供給支障(停電)につながる場合があるため、誤動作率を低く抑える必要がある。このため、こういった知的処理機能を保護リレーに適用する場合の課題として、その判断が正しく行われるか否かを確認するための評価手法が必要となる。そのためにも、電力系統の状態変化に対する深い

理解が重要である。

■ 通信ネットワーク技術との融合

電力系統保護制御技術が伝送技術の進歩と密接に関係してきたことは、前述のとおりである。近年では、Ethernet技術をベースとする、いわゆるIT(情報技術)や通信ネットワーク技術が非常に進歩し、電力系統の分野においてもその利用が容易になってきている(囲み記事参照)。東芝も積極的に、これらの技術を保護制御システム製品に取り込んできている。

また従来は、保護制御システムを構成する各装置間の伝送に、専用の伝送路、伝送媒体、及び伝送プロトコルを用いることが多かった。しかし、通信ネットワーク技術の進歩をより活用していくために、これらの分野においても国際標準の適用が進んできている。近年、国際電気標準会議(IEC)では、変電所における通信ネットワークとシステムに関する標準規格IEC 61850を制定し、欧米を中心として製品化と変電所への適用が始まっている。

■ 変電所データの広域保護制御への適用

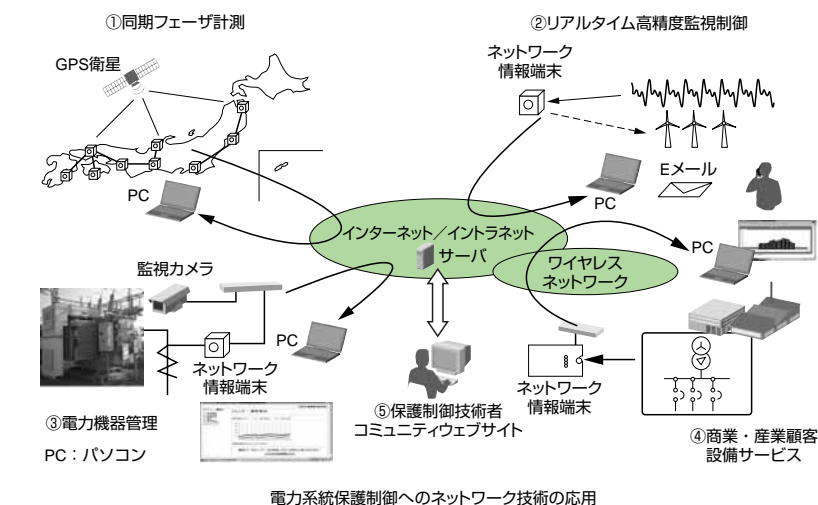
電力系統は絶えず進化している。特に近年の電力自由化の拡大による分散電源やIPP(独立系卸電力供給事業者)の増加に伴い、電力系統は複雑さを増し、系統運用も難しくなりつつある。この対策として、電力系統内の電圧や電流などのデータを収集するように保護制御装置をデータ端末化することや、これらのデータ端末を含め、電力系統に設置された変電所から収集した種々のデータを用いて、その広範囲の状態に最適な保護制御を行う広域保護制御なども検討されている。

更なる発展に向けて

1907年に保護リレーが国産化されてから、今年は記念すべき100年目であ

ネットワーク技術の応用

インターネット技術の発展により、電力システムの各所に設置されて電流や電圧の瞬時値データなどを計測し、また遠隔地とインターネット経由でデータを授受できるネットワーク情報端末 (Network Computing Terminal) や、電圧値や位相などの情報を知ることのできるフェーズ計測ユニット (Phasor Measurement Unit) などの製品が実用化され、利用され始めている。このような装置を用いることにより、電力システムの広範な場所の電流や電圧などの各種情報を容易に知ることができるだけでなく、GPS 利用による高精度の時刻同期機能を利用して、広域電力システムの異地点間の動揺の観測⁽¹²⁾ や、電力系統事故の発生箇所をより高精度に知る事故点標定が可



能になっている。今後様々な用途が提案され、実現されていくと考えられる。

る。わが国の保護制御システムの技術開発の歴史を顧みると、多くの重要な開発は、電力システムを運用する電力会社又は研究機関とメーカーとの共同研究によってなされていることがわかる。また、長年にわたって、(社)電気協同研究会での調査研究活動及び、(社)電気学会での保護リレーシステム技術委員会、調査専門委員会や標準化委員会などによる各種技術活動が、最新技術の普及や技術の体系化及び標準化にとどまらず、専門技術者の育成に大きな役割をもち続けている。

このような諸活動の機会をいただけることは、メーカーとしてたいへんありがたいことであり、当社はこの基本認識を基に、歴史と伝統のあるメーカーとして、電力系統保護制御技術の発展にいっそう貢献し、今後も顧客、更には電力利用者に信頼される価値あるシステムやサービスを提供していく考えである。

文 献

- (1) 電気事業連合会. 主要国の電力事情. <<http://www.fepc.or.jp/now/world/001.html>>, (参照2006-10-20).
- (2) 電気事業連合会. 日本の電力消費. <<http://www.fepc.or.jp/now/spend/001.html>>, (参照2006-10-20).
- (3) 大浦好文. 「保護リレーシステム技術」特集号によせて. 電気学会論文誌B. **114**, 7/8, 1994, p.675.
- (4) 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. 801, 2000-10, 174p.
- (5) デジタルリレー専門委員会. デジタルリレー. 電気協同研究. **41**, 4, 1986, 204p.
- (6) 安藤文郎. 保護リレー発展の歴史的経緯. 電気評論. **3**, 1985, p.312-323.
- (7) 安藤文郎. 日本の保護継電技術の歩み. 電気学会論文誌B. **114**, 7/8, 1994, p.680-683.
- (8) 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. 641, 1997-07, 282p.
- (9) 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. 電気協同研究. **50**, 1, 1994-04, 209p.
- (10) 21世紀変電技術専門委員会. 21世紀の変電技術. 電気協同研究. **58**, 2, 2002-07, 290p.

- (11) Ian Hall, et al. New Line Current Differential Relay using GPS Synchronization. IEEE/PES Bologna Power Tech Conference. Bologna, Italy, 2003-06, BPT03-125.
- (12) 太田 豊, ほか. キャンパス WAMS による広域連系電力システムの電力動揺モニタリング. 電気関係学会東海支部連合大会, 岐阜, 2006-09, S3-1.



伊藤 八大
ITO Hachidai

電力システム社 電力流通事業部 電力系統技術部 主幹。電力系統用保護制御システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会, 電子情報通信学会, IEEE 会員。
Transmission & Distribution Systems Div.



須賀 紀善
SUGA Noriyoshi

電力システム社 府中事業所 電力システム制御部 主幹。電力系統用保護制御システムの開発業務に従事。電気学会会員。
Fuchu Complex