U.D.C. 621.316.925.1

最近の保護継電技術の動向

Recent Trends of Protective Relaying Technology

中山敬造* *Nakayama Keizô*
三木義照* *Miki Yoshiteru*
谷中雅雄** *Yanaka Masao*
吉崎敦浩*** *Yoshizaki Atsuhiro*

近年，電力需要の増大に対応して主幹系統の拡大強化が行なわれているが，環境保全と用地取得難から電力系統は年々複雑化，多様化し，これに伴って保護継電技術に課せられる要求もますます高度なものとなりつつある。

一方，保護継電技術を支えるハードウェア及びソフトウェア技術でも，IC，マイクロコンピュータ，光伝送及び解析手法などますます多くの新技術が適用できるようになってきた。

以上のような背景を基に，日立製作所は独自の基礎研究及び電力会社との共同研究により，各種の新しい保護継電装置を開発し，実用に供してきた。

この論文は，最近の保護継電技術の動向を電力系統からのニーズ，ハードウェア・ソフトウェア面での新技術，これらのニーズとシーズから生み出された新形保護継電装置，信頼度向上に対する基本的取組み方などを中心に述べるものである。

1 緒　言

我が国の電力需要は，過去10年間に最大発電電力及び電力量共に2倍以上にも達し，その需要増大に対応して設備が拡充され，系統は巨大化の一途をたどってきた[1]。更に，近年環境保全及び用地取得難などにより発電所の遠隔地設置が余儀なくされるなどの社会情勢の変化が加わって，種々の問題が発生してきた。すなわち，電源の遠隔地偏在化による負荷端と電源端の間の長距離化の傾向，大都市部での大容量地中ケーブル化・調相用コンデンサの増大，超高圧系統の多端子化及び多回線併架系統の増大などである。このような問題に対処するために，新しい保護継電方式の開発や従来の保護継電装置のいっそうの高性能化が必要となってきた。

このような新しい保護継電技術の開発に必要なハードウェア技術の進歩も著しく，特にマイクロコンピュータに代表されるように，ICの高集積化，高機能化，高信頼度化及び低コスト化の傾向が著しい。またシステム解析技術でも，大規模電力系統の過渡時の詳細解析や保護継電器の回路解析に対応できる各種計算プログラムの利用が可能となってきた。

2 最近の系統保護上の問題点と新しい保護継電方式

2.1 系統上の問題

図1に，系統保護上からみた電力系統の最近の諸問題と対応策を示す。

(1) 長距離大容量送電化[2]

発電端と負荷端の偏在化により主幹送電線が長距離化し，安定度上非常に過酷な条件となるため，従来方式に比べて一段と高速化が必要となる。また送電線の大容量化，高稼動運用により1回線当たりの送電容量が8～12kAにも増大している反面，事故電流は長距離化による線路インピーダンスや，アーク抵抗，塔脚抵抗などの影響で極めて小さくなる場合がある。したがって，常時の負荷電流よりも小さい事故電流にも応動できるように事故検出の高感度化を図る必要がある。

このような問題に対処するため，事故検出方式の改善による高速化，補助リレーの高速化，逆相距離継電器のような常時の負荷電流に影響を受けない新しい性能の継電器の開発及び検出回路のIC化などの対策が講じられている。

(2) 地中ケーブルの大容量化及び調相用コンデンサの増加

大都市部では，施設上の制約から地中ケーブル化せざるを得ず，しかも大容量のケーブルが必要である。また大容量負荷の力率を改善する目的から調相用コンデンサも増加の一途をたどっている。これらの静電容量は系統事故時にリアクタンス成分と過渡的に共振現象を起こし，比較的低次数の高調波成分を発生させる要因となる。このような高調波が発生すると，従来の静止形保護継電装置が正規に応動できない場合が生ずる。

このような問題に対処するため，大規模系統を集中定数と分布定数で表わした詳細な高調波解析が行なわれ，発生メカニズム，高調波次数及び重畳率を明らかにするとともに，実フィールドで高調波発生の実体が把握された。このような分析を基に，保護継電装置の動作時間にほとんど影響を与えず，かつ高調波成分を効果的に除去できる高性能な能動フィルタを適用した高調波対策付の新形保護継電装置(K5シリーズ)が開発され，静止形保護継電装置の高調波特性が抜本的に改善された[3]。

(3) 超高圧系の多端子化

従来，超高圧基幹系統は2端子構成が主であったが，近年，用地取得難から送電線の中間に分岐線をもつ3端子系統が増加する傾向にある[4]。

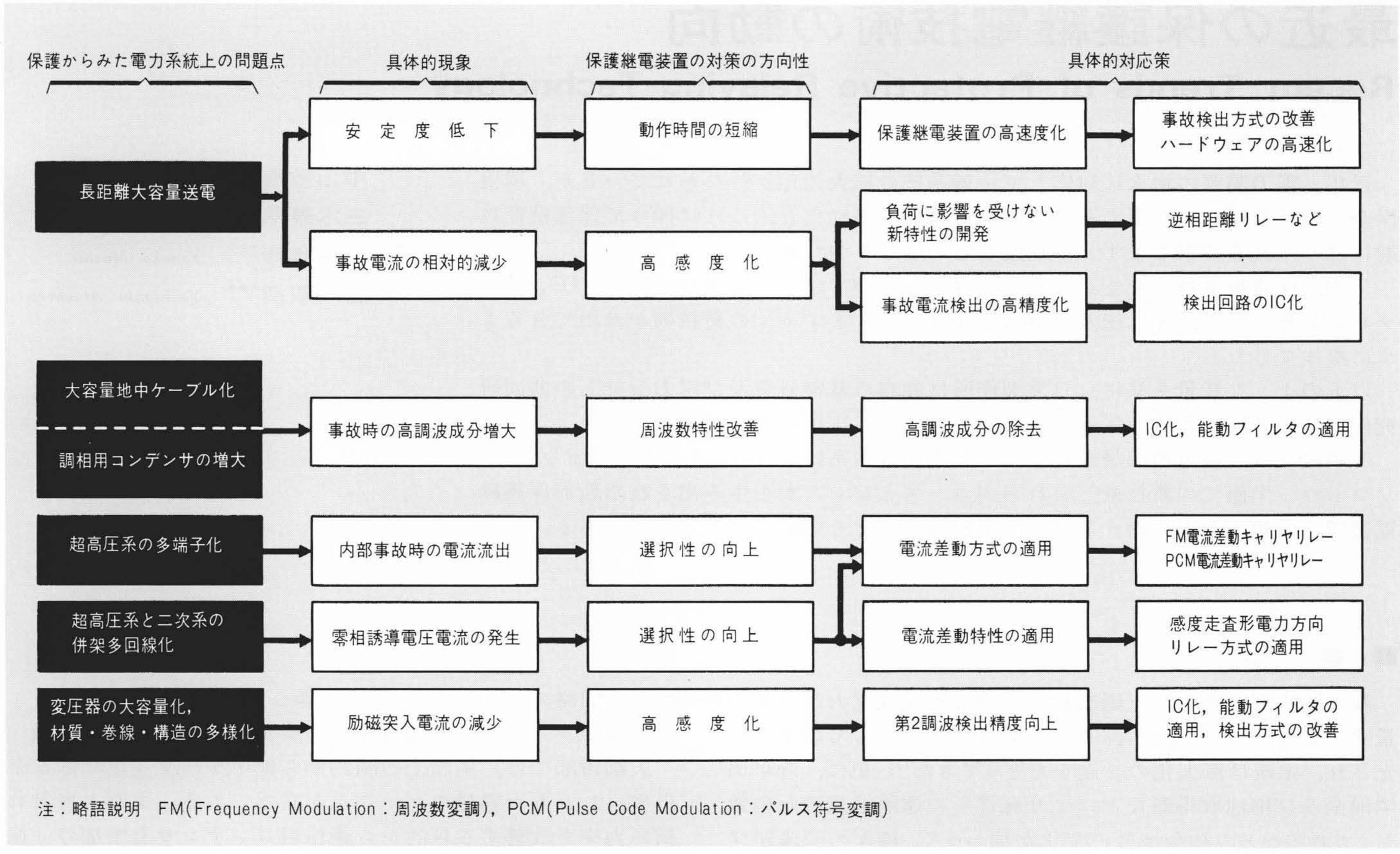
多端子系統の問題点は，系統構成によっては内部事故時に事故電流又は負荷電流が流出する場合が発生する点である。

このような現象に対しては，従来の2端子系の主保護方式である電流位相比較キャリヤリレー方式では保護が困難となる。

この問題に対処するためには，保護継電装置の選択性を向上させる必要があり，このために高速・高精度の電流波形伝送を採用したFM(Frequency Modulation：周波数変調)電流差動キャリヤリレー装置が開発され，275kV 3端子系で実用化されている[5]。

FM電流差動キャリヤリレー装置は，2端子系へはもちろん前記の厳しい高調波が発生する系統にも適用が可能である

* 日立製作所大みか工場　** 日立製作所日立研究所　*** 日立製作所那珂工場



注：略語説明　FM(Frequency Modulation：周波数変調)，PCM(Pulse Code Modulation：パルス符号変調)

図1　系統保護からみた電力系統の最近の諸問題と対応策

近年電力系統の複雑化・多様化に伴って，保護継電技術に課せられる要求はますます高度になっている。

など適用への制約条件が非常に少なく，ほとんどすべての系統に適用が可能である。

(4)　多回線併架系統の増加

前述のように都市周辺の用地取得難のため，多回線を同一鉄塔に併架する系統が増加している。今後，特に超高圧系と二次系(高抵抗接地系)の併架が増大する傾向にあり，電線配置の不平衡のため上位系の潮流や事故電流により，下位系に静電・電磁誘導電圧，回線間及び大地間の零相循環電流が発生し地絡保護が困難になる[6]。

この問題に対処するためには，波形伝送による電流差動キャリヤリレー方式を適用して選択性を向上することが最も望ましい。しかし，二次系の保護では信号伝送に電力線搬送方式が用いられており，波形伝送の実績がない。したがって，現在は感度走査形の方向継電器を採用することにより，電流差動特性と等価な特性を得る方式が適用されている。今後は，多端子の併架系統が出現する傾向にあり，保護がますます複雑化するため広帯域の伝送系を整備，拡充してFM又はPCM(Pulse Code Modulation：パルス符号変調)によって送電線の電流波形を伝送するFM(又はPCM)電流差動キャリヤリレー方式を適用していくことが望ましいと考える。

(5)　変圧器の大容量化，構造の多様化

変圧器の大容量化，構造の多様化及び磁化特性の優れた鉄心材料の使用などにより，変圧器保護継電装置では励磁突入電流と事故電流との識別が困難になりつつある。一方，保護責務としては検出感度の向上，高速動作及び信頼度向上が望まれている。

このような状況に対応するため，保護継電器にICを導入して検出感度及び耐高調波性能を向上するとともに，小形化及び自動監視機能の充実を図り，500kV系の大容量変圧器用をはじめ配電用変圧器用に至るまで各種の新形保護継電装置を開発し，既に実用化している[7]。

2.2　供給信頼度の向上，保守性向上及び省資源・省エネルギー化に対する課題

図2に電力系統からのニーズと保護継電装置の対応策を示す。

(1)　供給信頼度の向上

超高圧系の導入とともに保護継電器はエレクトロニクス化され，信頼度向上のための技術及び信頼度評価手法が確立された。しかし，社会情勢及び系統構成の変化とともに，いっそう高度な信頼度向上対策が必要となってきている。

日立製作所は永年にわたる自動監視装置の実績を基に，エレクトロニクス技術の効果的な導入と，工場での品質管理を徹底させることにより，常に高い信頼度水準を達成すべく努力している。

(2)　保守の効率化・省力化

系統規模の拡大とともに保護継電装置の種類と数が増大し，保守の効率化・省力化が大きな課題となりつつある。

このためには，従来にも増して定期点検業務の大幅削減が必要であり，新技術を導入し自動点検を高性能・高精度化することによりメンテナンスフリー化を図ること，装置の徹底した標準化とマンマシン性の向上により取扱いを容易にすることなどを達成する必要があろう。

(3)　省資源・省エネルギー化に対する課題

資源の有効活用及びエネルギーの節約は，今後の技術の重要なポイントであり，新しいエレクトロニクス技術を導入して装置の小形化，低消費電力化，変成器の負担低減などにいっそうの努力を行なっている。

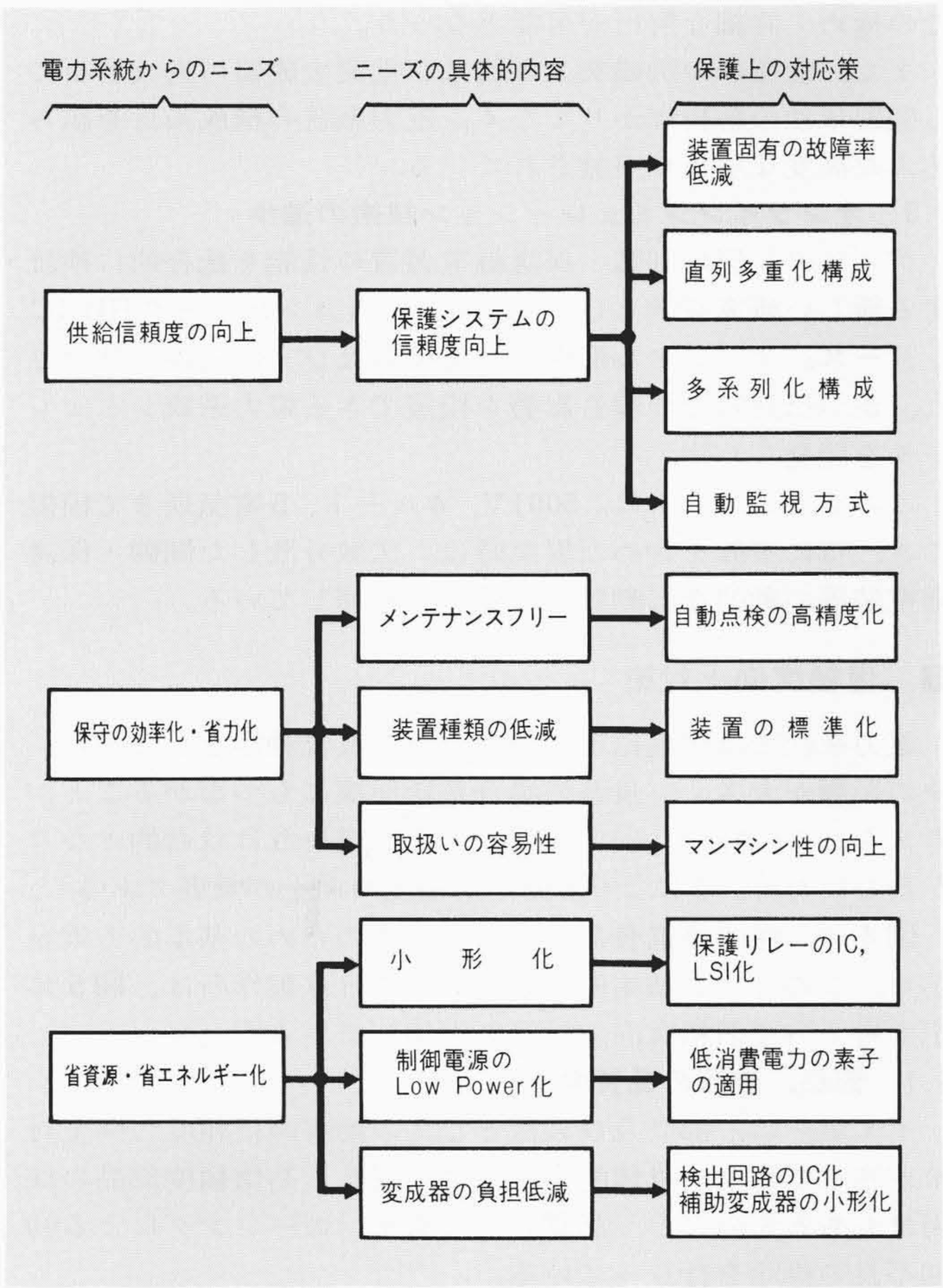


図2　信頼度向上，保守性向上及び省資源・省エネルギー化に対する課題と対応策　信頼度向上と並んで保守性の向上及び省資源・省エネルギー化が重要な課題となってきている。

3　保護継電技術の進歩を支える新しい要素技術の動向

図3に保護継電技術の進歩を支える新しい要素技術と，これらを適用した新しい保護継電装置を示す。

3.1　ハードウェア技術の進歩

以前にはエレクトロニクス化の中心はトランジスタであったが，近年アナログIC及びディジタルICの高性能，小形化及び低価格化が著しく，信頼度面でも系統保護に十分適用できる水準に達している。

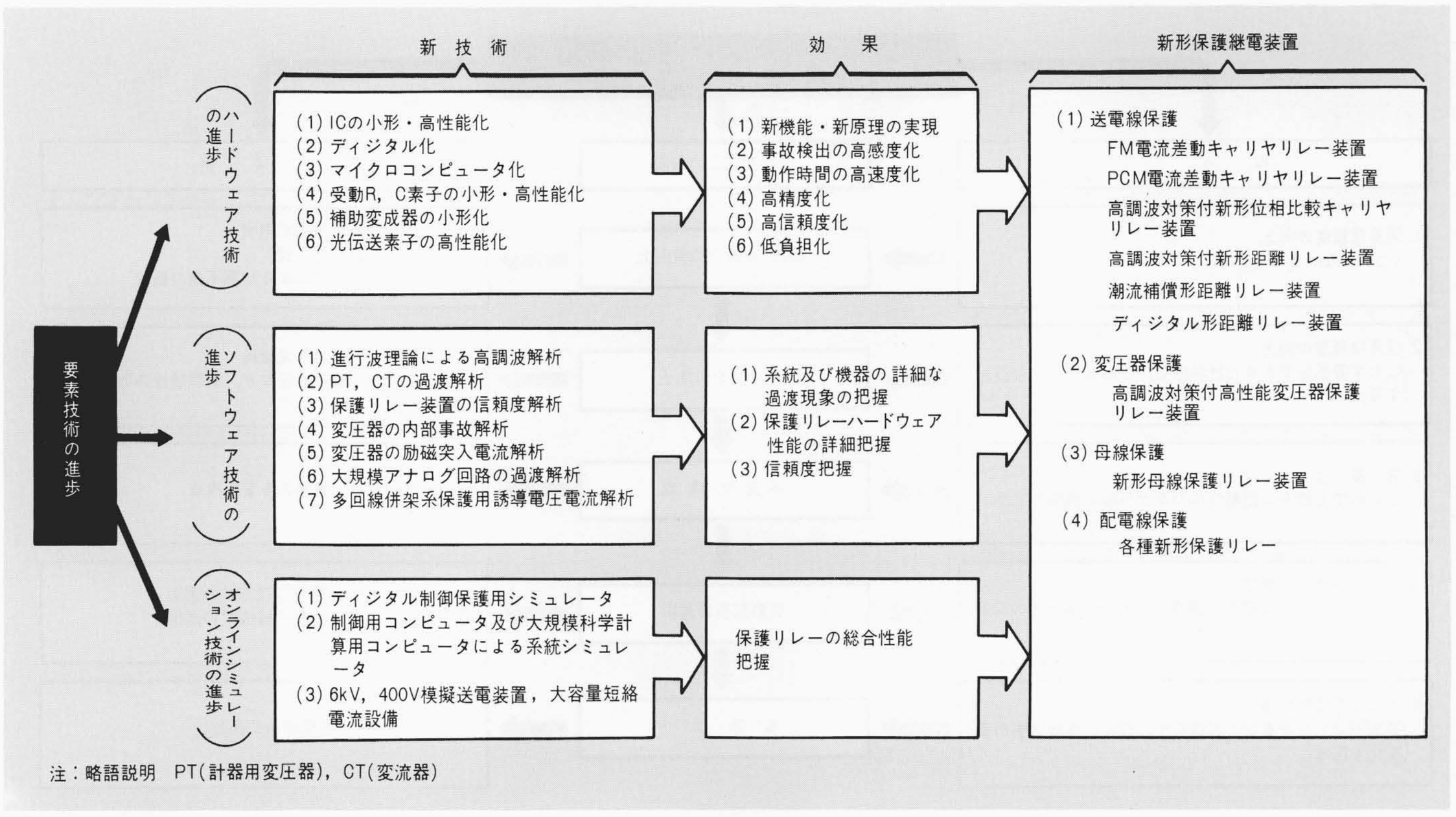
最近の高性能保護装置の検出回路はほとんどがIC化されており，必要欠くことのできない要素となっている。

例えば，FM電流差動継電装置の変調器(V/F変換器)，復調器(F/V変換器)，高調波対策付新形保護継電装置（K5シリーズ）の高性能アクティブフィルタ，ディジタル形保護継電装置のA-D変換器，マイクロコンピュータ及びメモリなどはその典型例である。特にディジタル形保護継電装置は，従来の保護継電装置とはハードウェアが全く異なっており，高速マイクロコンピュータの適用と保護演算のプログラム化により，従来にはない高性能化，メンテナンスフリー化及び小形化が達成でき，保護分野に新しいページを開くものと期待されている。日立製作所は既にディジタル形保護継電装置と構内光伝送装置を開発し，2年間にわたり東京電力株式会社新栃木変電所で保護性能及び耐雑音試験を終了し，十分実用に供し得ることを明らかにした[8]。

現在，更に高性能化，小形化及びメンテナンスフリー化を目的に，超高圧後備保護継電装置及び回線選択保護継電装置のディジタル化をそれぞれ中部電力株式会社及び東京電力株式会社と共同で推進中である[9]。

3.2　システム解析技術の進歩

電力系統過渡時及び機器事故時の系統解析は，保護継電方



注：略語説明　PT(計器用変圧器)，CT(変流器)

図3　新しい要素技術と新形保護継電装置　保護継電技術の進歩は，電力系統及び運用サイドからのニーズとここに示す三つの大きなシーズにより築かれている。

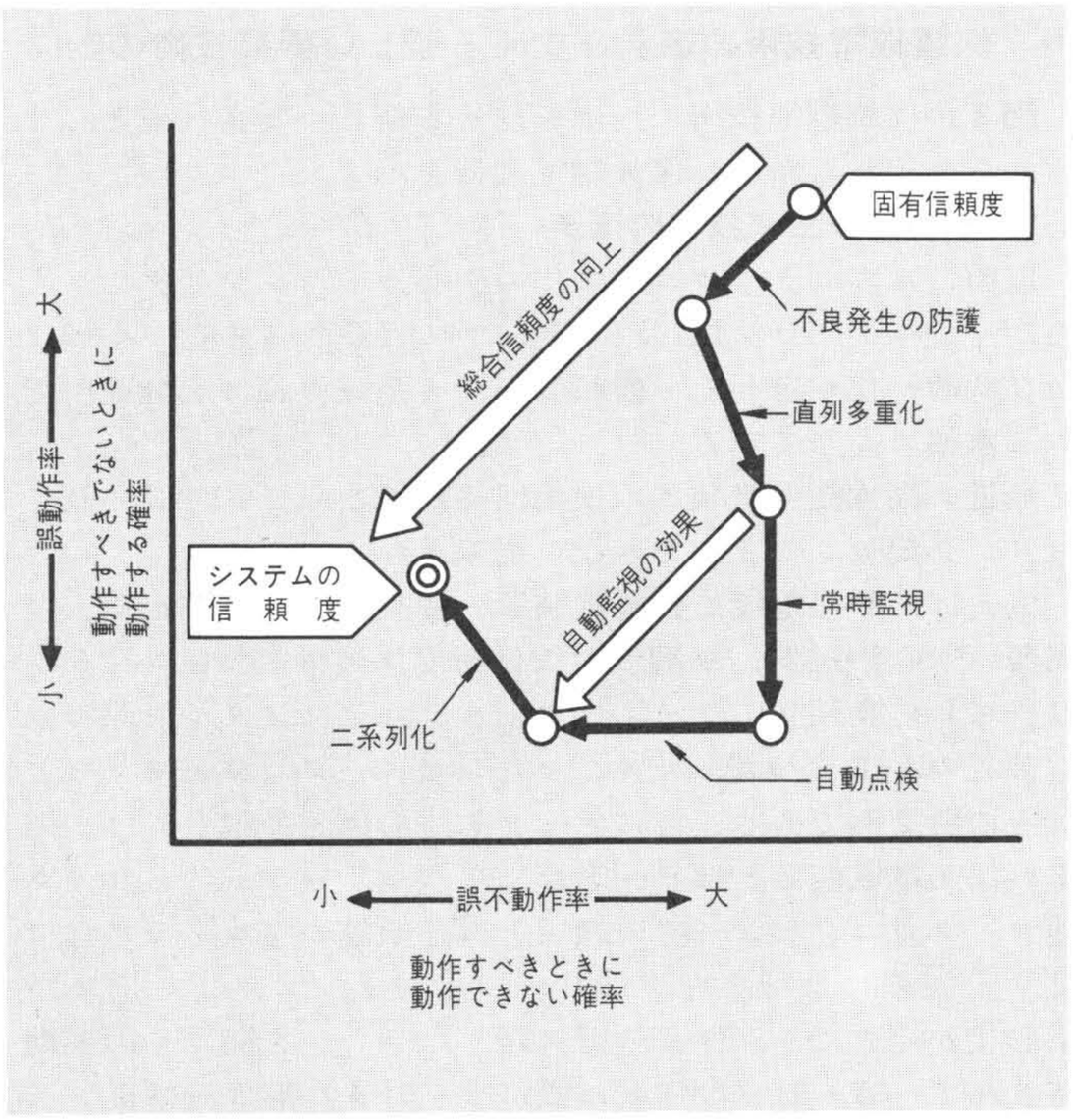


図4　信頼度向上のための基本方策　　保護継電装置の不具合動作は，系統崩壊の要因ともなりかねないので，動作の信頼度向上が最も重要な課題である。

式の決定に欠くことのできないものであり，近年特に大規模かつ詳細な波形解析が必要となってきた。日立製作所はこれに対処するため種々の解析手法の開発を進めているが，特に系統の過渡振動により発生する高調波の解析には進行波理論を適用した新手法を導入し，数ヘルツからメガヘルツ領域までの極めて詳細な解析が可能となった。

また，変圧器の励磁突入電流及び電流変成器の過渡解析でも機器単独の解析ばかりでなく，電力系統の構成条件を組み込んだ高度な解析が実施されている。

3.3　オンラインシミュレーション技術の進歩

ディジタル形の制御・保護継電装置の性能を総合的に検証する新しい研究設備として，日立制御用コンピュータHIDICシリーズ，ディジタル形保護継電装置及び光伝送路と結合され，かつ伝送路での雑音影響を模擬できる電力系統シミュレータを開発した[10]。

このシミュレータは，500kV，4ルート，5電気所まで模擬でき，特に事故を含めた緊急時に，広域分散した制御・保護継電装置の動的な応動解析に威力を発揮している。

4　信頼度向上対策

電力系統では保護継電装置が万一不具合動作をした場合，その影響が大きく，最悪の場合系統崩壊にもつながることが考えられる。特に，安定度面から主保護失敗は致命的となりかねないため，なによりも動作信頼度の向上が重要である[11]。

図4に，保護継電装置の信頼度向上のための基本的方策を示す。このような基本的方策に対して日立製作所は，**図5**に示す考え方で信頼度向上対策を実施している[12]。

4.1　部品，装置の品質向上

まず第一に，部品及び装置としての固有の信頼度の向上対策が基本であり，具体的には特に厳選した高信頼度部品の採用はもちろんのこと，品質管理の徹底，エージングによる初期不良の排除を行なっている。

4.2　不良発生の防止

エレクトロニクス素子は，特に使用条件及び環境条件により故障率が大幅に左右されるため，部品の定格を低減した設

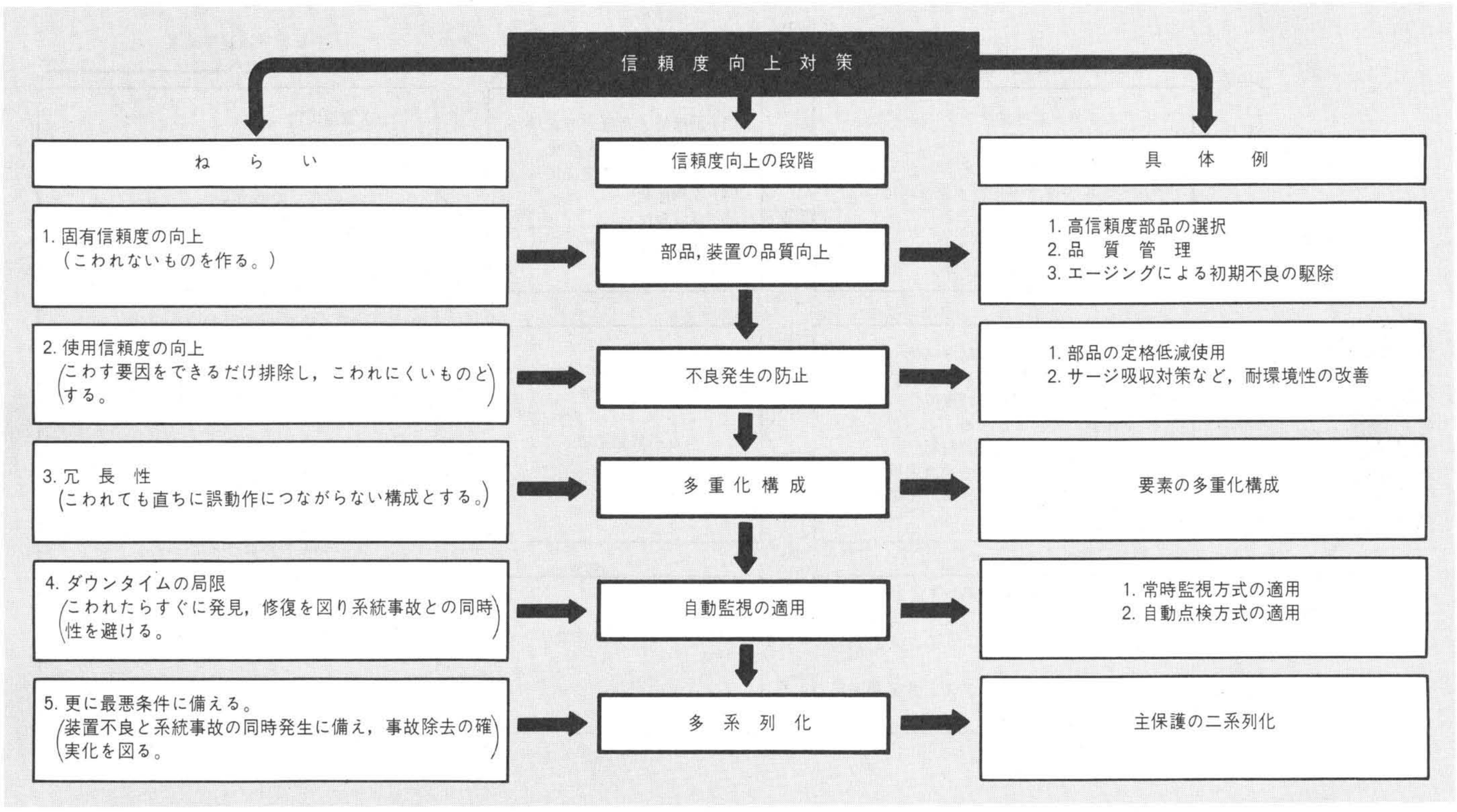
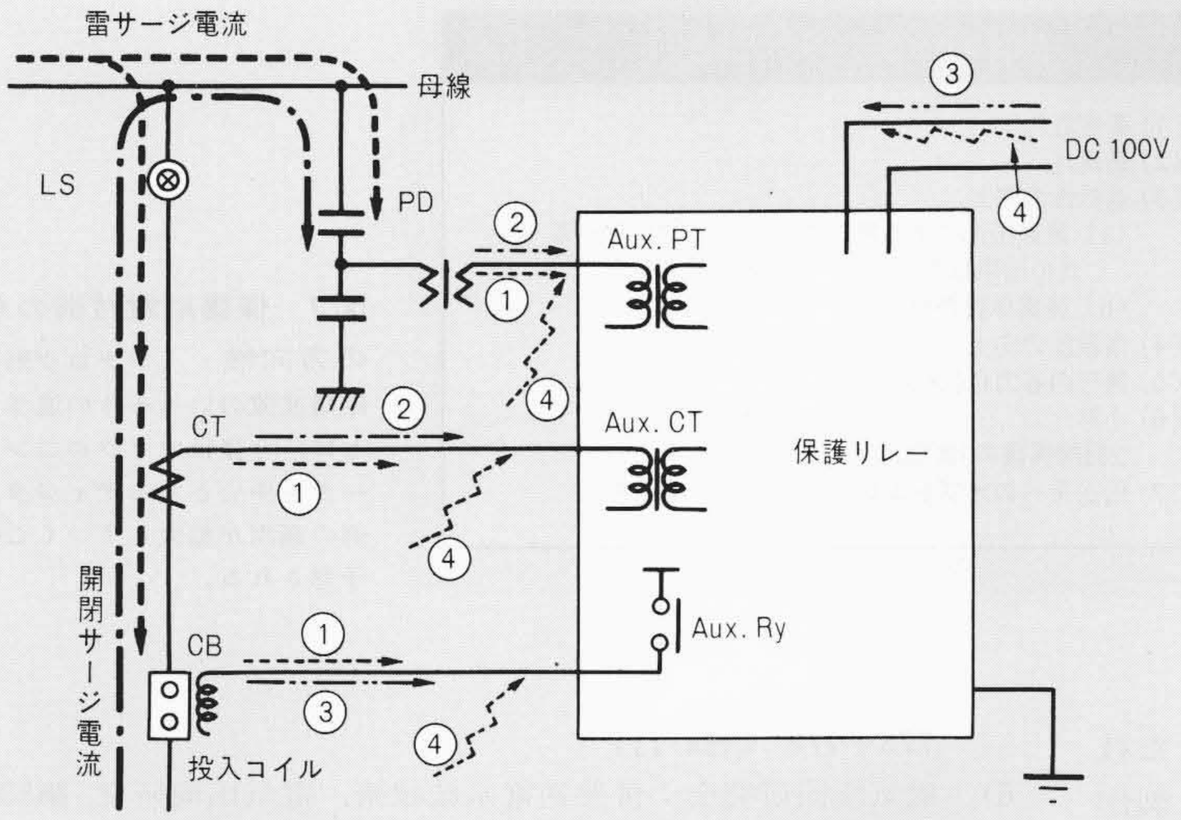


図5　信頼度向上の具体策　　保護継電装置の信頼度向上のための具体策は，永年の実績と新技術の積極的導入によりますます進歩し，高度なものとなってきている。



注：項番説明　① 雷サージの移行，誘導ノイズ，② 開閉サージの移行・誘導ノイズ
③ 投入コイル開放時の誘導ノイズ，④ 各種空間伝搬ノイズ
略語説明　LS(断路器)，PD(コンデンサ形計器用変圧器)，Aux. CT(補助変流器)
CB(しゃ断器)，Aux. Ry(補助リレー)

保護継電器ユニットレベルでの対策	装置レベルでの対策
(1) 補助変成器巻線のシールド化	(1) 強電線・電源線と信号線の分離
(2) 補助変成器のトロイダル化による漏れ磁束の減少	(2) 交流入力回路及び直流電源回路へのノイズ除去用フィルタの設置
(3) 電源，グランドラインの短縮化，太線化及び均一化	(3) 対撚線又はシールド線による配線
(4) 検出回路のシールドカバー化	(4) 接点入出力のホトカプラ化
(5) 信号線配置の最適化によるクロストーク，反射の低減	(5) 接地インピーダンスの低減
(6) ノイズ吸収用コンデンサの設置	(6) 信号アースと筐体アースの分離
(7) IC入力部へのリミッタ用ダイオード及び入力制御抵抗の設置	(7) 装置のシールド・接地化

図6　ノイズ，サージに対する主な対策　エレクトロニクス素子の信号レベルは低いため，装置レベル，保護継電器レベル及びプリント基盤レベル単位で十分なノイズ，サージ防護策が必要である。

計(ディレイティング)により実質的な故障率を小さくすると同時に，サージなど外部からのストレスを緩和させることにより不良発生を防止している。特にサージ対策としては，**図6**に示すように全体装置及び個々の継電器の各入力部などの必要箇所にサージ吸収回路を付加すると同時に，装置内のサージ発生源(主として補助継電器のコイル)にも適切な抑制対策を実施している。

また，電圧・電流変成器の二次回路，直流110V回路など，いわゆる強電回路とエレクトロニクス部を完全に絶縁し，かつ装置内配線の分離，シールド線，対撚線の使用など，サージの移行性についても十分の配慮が払われている。

4.3　直列多重化構成

保護継電装置は，常時待機状態にあるという特殊性により，1個の部品あるいは回路の不良が誤動作の原因とならないよう，保護継電器要素を直列多重化構成とすることが基本である。具体的には，事故検出継電器と主検出継電器を直列多重化構成としている。また，主検出継電器と事故検出継電器の原理を異にし，かつ入力信号も独立させるなど，一つの原因(例えば，取扱い上のミスなど保守面まで拡張して考える。)で同時に誤動作することのない構成としている。

4.4　自動監視方式の適用

以上述べたように，多重化構成としても装置不良を発見できずに放置した場合，系統事故に遭遇すると誤動作あるいは誤不動作につながる可能性が大きいため，装置不良を一刻も早く発見し，いわゆるダウンタイムを局限することが保護継電装置では特に重要となる。この装置不良を自動的に発見する自動監視方式としては，主として誤動作状態を発見しやすい常時監視方式と誤不動作側の不良の摘出に適している自動点検方式との併用が望ましい。

4.5　多系列化

以上述べたように，直列多重化構成とすることと常時監視方式の採用とにより，誤不動作信頼度は著しく改善することができる。

また，自動点検方式の採用により，誤不動作信頼度の向上も期待できるが，更に最悪条件として，装置不良（ここでは誤不動作側の不良）と系統事故が重なった場合に備え，例えば500kV系統保護継電装置では，主保護の二系列化が図られている。

5　今後の課題

以上，保護継電技術の最近の動向について述べたが，今後の技術の方向性についての概観を**図7**に示す。

電力系統は，今後も大規模，複雑化及び多様化の方向をたどり，保護継電装置の高性能化及び高信頼度化はいっそう重要な課題となるであろう。更に今後の特色として，省資源・省エネルギー化及び保守運用の高率化・省力化が大きな要因となってくると思われる。

また保護継電技術を支える新技術の面では，アナログ及びディジタル素子の高集積化，高機能化の進歩が著しく，保護継電技術及び装置の保守運用面に大きなインパクトを与えることは確実であろう。

以上のような背景の下で，保護継電技術の今後の方向は，アナログ形保護継電装置のいっそうの進歩とディジタル形保護継電装置の適用拡大の進展にあると考えられる。また伝送系の整備拡充とともに，電流位相比較リレー方式よりも性能面で優れたFM電流差動リレー方式又はPCM電流差動リレー方式が主保護方式に積極的に適用されていくことが予想される。

6　結　　言

以上，最近の保護継電技術の動向と日立製作所での新しい保護継電技術に対する取組み方，信頼性及び保守・運用性向上に対する基本的な考え方について述べるとともに，今後の方向性についても概説した。

電力系統の保護は，社会情勢及び系統構成の変化によりますます高度な技術が要求されている。日立製作所はこの変化

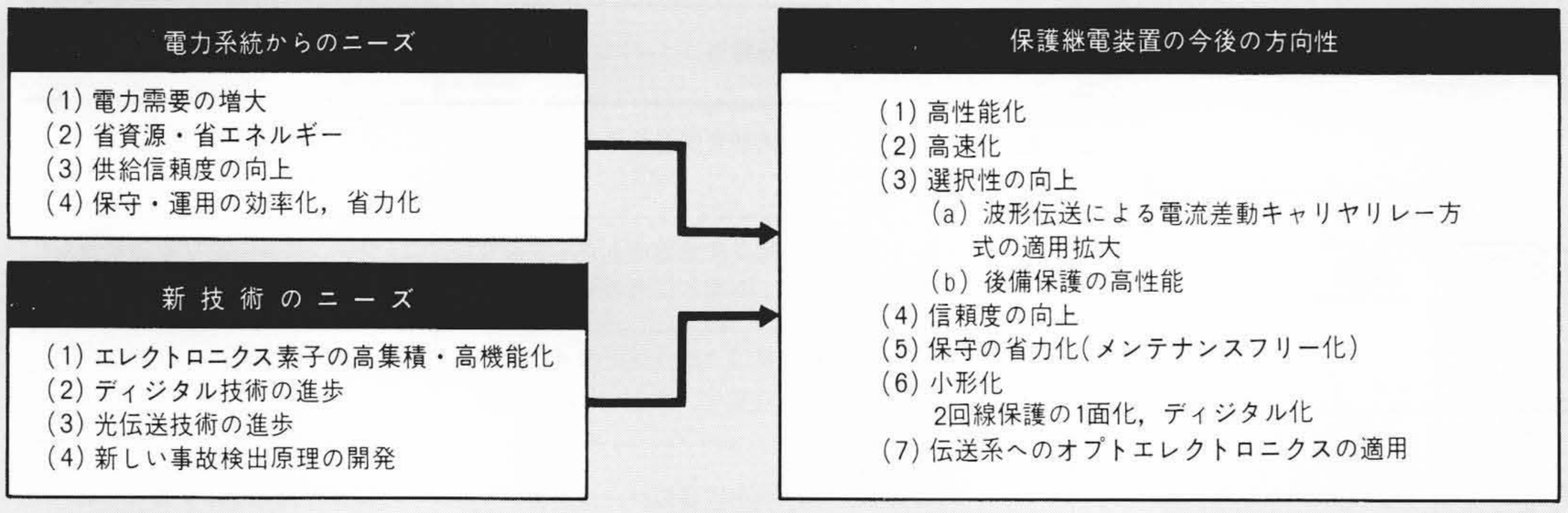


図7　保護継電技術の今後の方向性　アナログ形保護継電装置のいっそうの進歩とともに，今後はマイクロコンピュータを中心とするディジタル技術の適用が拡大していくことが予想される。

を十分理解した上で，今後共電力会社のニーズに適合した技術開発・技術改良を進め，信頼性の高い保護システムを製作していく考えである。

参考文献

1) 二木：最近の電力系統運用の諸問題，昭和53年電気四学会連合大会，講演論文集〔1〕(昭53-10)
2) 瀬尾，外：500kV系統の保護継電方式，日立評論，**56**，221～226（昭49-3）
3) 岩谷，外：高調波対策付新形保護継電装置の開発，日立評論，**61**，767～772（昭54-11）
4) 電気協同研究会：多端子送電線保護リレー，電気協同研究，**第32巻**，第3号，(昭51-9)
5) 杉山，外：FM電流差動キャリヤリレー装置，日立評論，**61**，773～778（昭54-11）
6) 電気協同研究会：併架送電系統技術，電気協同研究，**第33巻**，第6号（昭53-1）
7) 佐々木，外：変圧器保護継電装置，日立評論，**61**，785～790（昭54-11）
8) 黒岩，外：電力用構内光伝送システムの開発，日立評論，**60**，727～732（昭53-10）
9) 杉山，外：ディジタル形保護継電装置，日立評論，**61**，779～784（昭54-11）
10) 山越，外：電力系統保護用ディジタルシミュレータ，日立評論，**60**，291～296（昭53-4）
11) 電気協同研究会：保護リレー自動監視，電気協同研究，**第28巻**，第1号（昭47-7）
12) 瀬尾，外：最近の保護継電装置におけるエレクトロニクス化の動向，日立評論，**57**，325～330（昭50-4）

論文抄録

静止電力変換装置とその応用 ——直流電源用——

日立製作所　川上直衛

電気学会誌　98—5，398（昭和53-5）

直流電源用半導体整流器の代表的な適用分野として，電気化学用，電鉄変電所用及び同期発電機励磁用がある。この分野へは半導体整流器開発の当初から適用されてきたが，素子の大容量化と高信頼度化，冷却方式の改善，変圧器と整流器とを組み合わせた一体化構造の開発，サイリスタの採用による制御性の改善などにより，現在では非常に安定した製品となっている。

電気化学工業では，金属の精錬，ガスやアルカリの製造，金属の表面処理などに直流電力が用いられる。このうち特に容量的に大きいのは，アルミ精錬と食塩電解である。前者では500～1,000V，100～200kAのものが，また後者では100～300V，300～500kAもの大容量設備が使用されている。電気化学用整流器では変圧器と整流器との一体化構造が採用される場合が多い。これは，接続配線の省略により効率の向上や据付配線費の低減が図れるためである。この構造にも多くの種類が考えられるが，変圧器二次ブッシングを整流器キュービクル内に突き出すとともに，両者を機械的に固定し，冷却方式はそれぞれ独立させた方式が，信頼度が高く最適設計が容易な点から広く採用されている。このほか大電流整流器として，素子の冷却方式，並列素子間の電流バランス，漏れ磁束によるキュービクル局部過熱の防止などに注意を払った構造としなければならない。また腐食性ふんい気に対する配慮を必要とする場合が多い。アルミ電解用は電流が多いだけでなく，設備容量(kVA)としても大きいので電源側に発生する高調波低減対策が必要であり，18～48相の多相整流が採用される。近年サイリスタを採用して，負荷時電圧調整器や可飽和リアクトルを省略する方式が，制御性や保守性の点から採用されるようになってきた。

電鉄変電所用整流器に最初に採用されたのは，400V，50Aの素子であった。しかし，その後の素子の大容量化は目覚ましく，現在では3,000V，1,600A級素子が標準となりつつある。整流器の冷却方式も当初は強制風冷方式が専ら採用されたが，素子の大容量化に対応した冷却性能や保守性，耐じん性，低騒音化を目的として各種の油冷方式が開発された。一方，最近では冷媒の不燃化と冷却性能の向上による小形化を目的としたフロン沸騰冷却方式が広く採用されるようになった。フロンとしては素子の許容温度の点から沸点の高いR-113が使われる。電鉄用としては，従来ダイオードだけが使用されてきたが，チョッパ車の普及に伴い回生電力吸収用としてサイリスタインバータが併設されるようになってきた。

同期発電機の励磁用として，直流励磁機方式に比べて経済性，保守性の点で優れた半導体整流器方式が多く使われるようになった。主回路異常時に界磁に発生する過電圧及び過電流には十分な配慮を必要とする。また励磁装置として十分高い信頼度をもたせ，主機の運転に支障ないものとしている。