# 変圧器保護継電装置の高性能化

# High Performance Technology for Transformer Protective Relaying Equipment

変圧器保護継電装置の保護責務は、電力供給信頼度の向上及び機器故障時の事故 拡大防止の点からますます重要視されてきている。最近、保護対象変圧器の大容量 化、磁気材料の高性能化、結線、巻線など構造の多様化による励磁突入電流の様相 の違い、及び系統の高調波電流の影響により故障検出が難しくなってきている。こ のような問題の対策として、今回新しい故障検出方式の検討を行ない、各相の差電 流に含まれる第二高調波成分の絶対値和(三相の和)抑制方式が優れていることを明 らかにするとともに、これを用いた新製品を開発した。新形継電装置は、高信頼度、 保守の容易性を考慮した自動点検、随時点検(総合動作点検)システムを具備してお り、超々高圧系統から配電系統用まで新シリーズ化を完了した。

佐々木 宏\* Hiroshi Sasaki
稲垣恵造\* Keizô Inagaki
宮崎照信\*\* Terunobu Miyazaki
秋沢安郎\*\*\* Yasuo Akizawa

# ■ 緒言

従来,変圧器保護継電装置は保護対象変圧器の励磁突入電流による誤動作防止対策として,各相ごとに電流差動出力の第二高調波成分による抑制付比率差動継電器を,故障検出の主要素に用いてきた<sup>1)</sup>。

しかし、最近、電力系統で地中ケーブル線路の拡張、静止 形調相器の大容量化などによって静電容量が増加する傾向に あり、過渡時に生ずる高調波電流が増加し継電器の高感度、 高速度動作特性に悪影響を及ぼすことが懸念されるようにな った。

また、変圧器の鉄心材質、構造、巻線方法、結線方式などが複雑、多様化しており、特に励磁突入電流波形に含まれる第二高調波成分の含有率が低下し、逆に基本波成分が増加するなど故障電流波形との識別がつけにくくなってきている。

更に、保護継電装置の性能検証方法、保守の簡素化、高信

頼度化などについても新しい手法を取り入れたものが要求されるようになってきた。今回,以上のような背景に対して,

- (1) 高調波対策を考慮した新しい励磁突入電流対策
- (2) 三相交流信号を総合的に利用した新方式の開発
- (3) 自動点検,随時点検(総合動作点検)システムの実装による高信頼度化及びメンテナンスフリー化の強化を目的に新形継電装置を開発した。以下,その結果について述べる。

# 2 新形変圧器保護継電装置の開発指針2),3)

変圧器保護継電装置は、機器保護と系統保護の両面の責務 を考慮して、保護対象機器固有の故障時の現象解析、及び隣 接する母線、送電線などの保護継電装置との動作性能の協調 を考慮して開発を進めた。

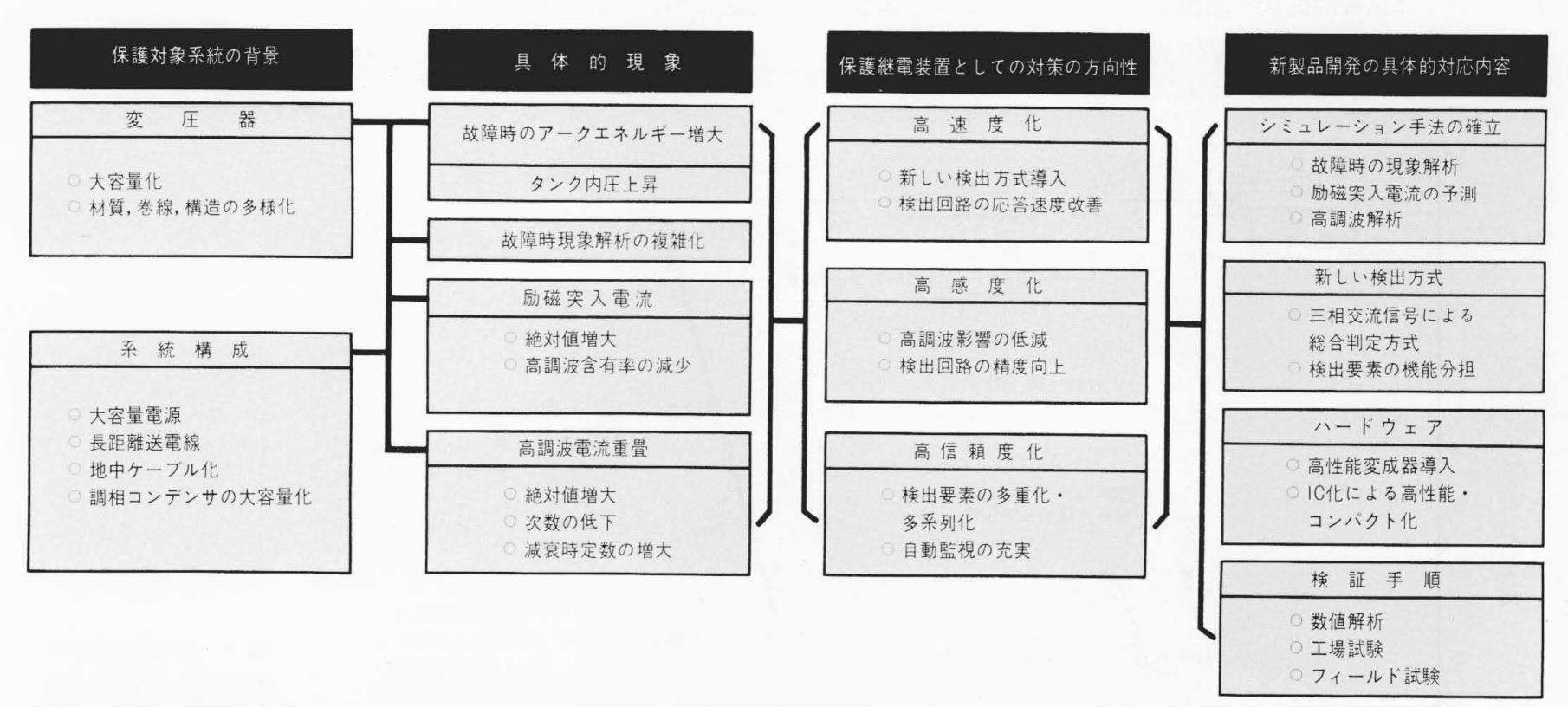


図 | 開発の背景と手順 変圧器保護継電装置に要求される主な項目と現象, 対応策など, 開発のねらいについて示す。

<sup>\*</sup> 日立製作所日立研究所 \*\* 日立製作所大みか工場 \*\*\* 日立製作所那珂工場

図1に,保護機能の分析に必要な各種現象の解析と新製品 開発での対応策を示す。

#### 2.1 現象解析手法の確立

変圧器保護継電装置の新方式の開発,及び機能検証のためには,故障判定用入力情報となる変圧器の入力電流波形の特徴を十分に把握しておくことが必要であり,種々の構造の変圧器を対象に,

- (1) 故障時の電圧電流分布
- (2) 故障によるタンク内圧上昇
- (3) 励磁突入電流
- (4) 高調波電流
- (5) 変流器の過渡特性の影響

などの現象解析プログラムを確立した。

## 2.2 高性能化に対する施策

故障検出感度の向上及び高速度動作を図るために、特に励磁突入電流、高調波電流、及び変流器の過渡特性を考慮した 周波数特性についての対策指針をまとめた。

#### 2.2.1 励磁突入電流対策

基本的には従来と同様に電流差動出力の第二高調波成分の含有率によって、故障電流であるか励磁突入電流であるかの判定を行なうことにした。しかし、第二高調波成分の含有率の判定比率は、高く整定できるほど内部故障時の高調波対策の点で有利であり、従来の各相検出方式にこだわらず、より効果的な方式を開発する方針とした。

#### 2.2.2 高調波電流対策

高調波電流の発生要因として,

- (1) 保護区間外の地中ケーブルの対地静電容量と故障点までのインダクタンスによる共振電流
- (2) 調相用静電容量とインダクタンスによる共振電流
- (3) 保護区間内の地中ケーブルの対地静電容量と外部故障地点までのインダクタンスによる共振電流
- (4) しゃ断器, 断路器などの開閉サージ, その他の雑音などが考えられる。

図2に、高調波含有率の解析結果の一例を示した。前記(1)、(2)については比較的低次の高調波であり、(3)については数キ

ロヘルツ以上の高次周波数となり,更にサージ,雑音についてはそれ以上に高次のものとなることから,励磁突入電流の検出に必要な第二高調波成分以外の高調波は,入力信号としてフィルタによって除外する方針とした。

#### 2.2.3 変流器の過渡特性対策

最近は過渡特性を保証した高性能の変流器を適用する場合も増えてきたが、そうでない場合も考慮して、実際に継電器の入力信号としての波形のディジタルシミュレーションを行ない周波数特性や比率特性を定めることにした。

#### 2.3 高信頼度,保守上の対策

高性能化を図るため、補助変成器の過渡特性保証、検出回路のIC化を実施し、装置自身の信頼度向上策として、検出方式の多重化、多系列化を基本に、必要により自動点検、常時監視及び随時にシステム全体の機能をチェックできる総合点検システムを具備するものとした。

#### 2.4 性能検証方法

性能検証手順として,

- (1) ディジタルシミュレーションによる試験用模擬入力信号 の作成と要素別精密試験
- (2) 工場での模擬変圧器,模擬系統による確認試験
- (3) 現地での変圧器課電時の励磁突入電流,及び開閉サージに対する検証

を実施するものとした。特に、内部故障時の応動については、前記(1)及び(2)に示した方法により、保護対象変圧器の構造多様化に対応できるようにディジタルシミュレーションの応用範囲の拡大、それに各種故障ケースを模擬できるように特別に製作した模擬変圧器を用意した。

#### 3 故障検出方式

変圧器の故障検出方式は、図3に示すように従来から実績のある電流差動方式を基本に、重故障検出用にHOC(高整定即時要素)、軽故障検出用に高感度のRDF(通過電流比率要素)と励磁突入電流対策用HDF(高調波比率要素)を組み合わせるものとした。以下、HOC、RDF、HDF各要素の検出方法について述べる。

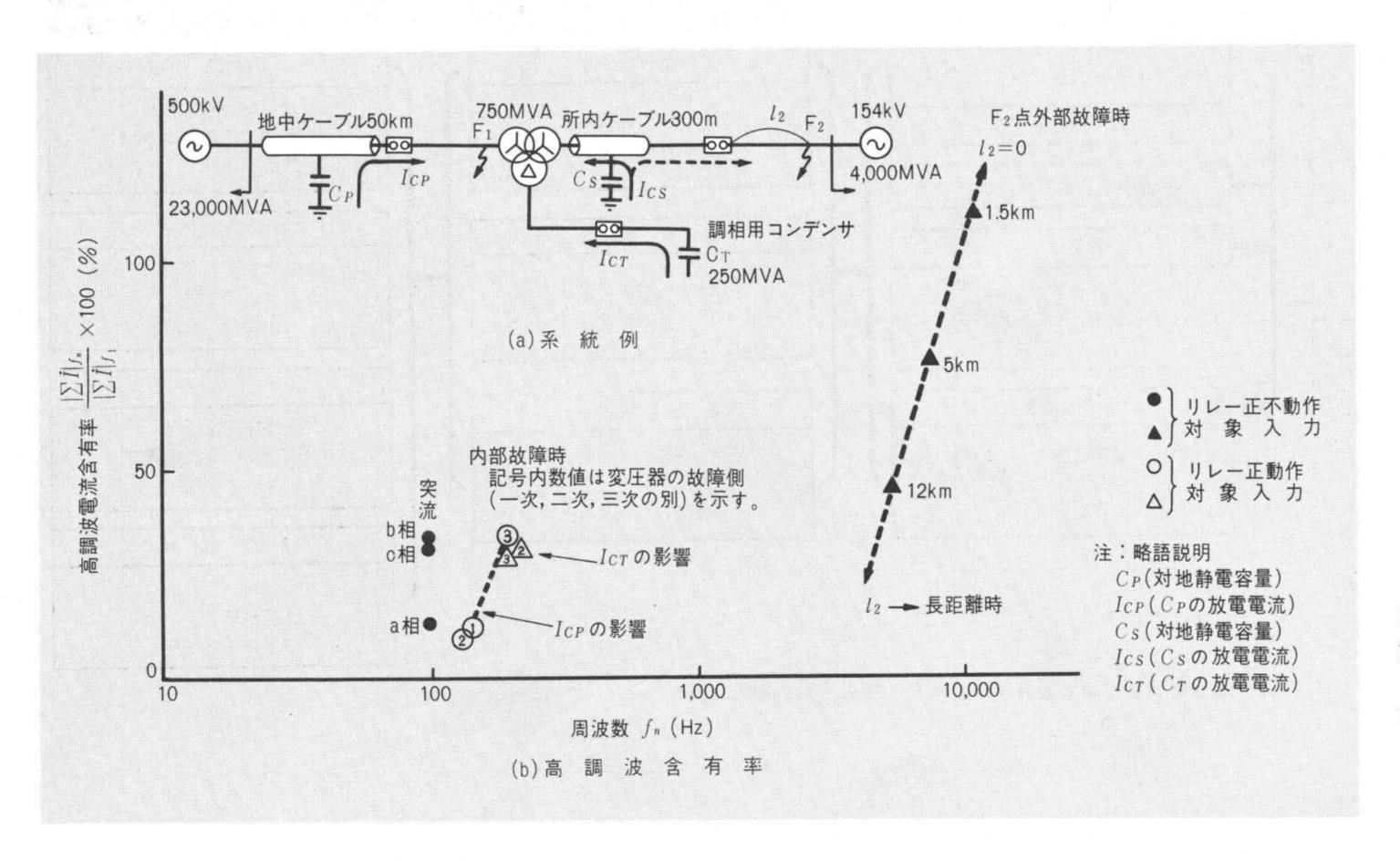


図2 高調波電流の 解析例 地中ケーブ ル及び調相設備の静電容 量と系統のインダクタン ス分によって生ずる高調 波電流の最大値を算出し た例を示す。

図3 継電器単体の基本構成 HOCは重故障検出用であり、RDFと HDFは軽故障を検出するために、突入電流対策付比率差動特性を具備したもの である。

#### 3.1 故障検出要素の原理

#### (1) HOCの動作式

高速度動作を目的に判定方式を簡素化して,各相ごと電流 差動出力の過電流検出を行ない,

$$|\Sigma \dot{I}| > I_{\alpha} \cdots (1)$$

とした。ただし、 $|\Sigma I|$ は電流差動出力、 $I_{\alpha}$ は判定レベルである。 $I_{\alpha}$ の値は、内部故障電流に関係なく表われる電流差動出力、例えば励磁突入電流、外部故障電流通過時の変流比及び変圧比のマッチングに基づいて誤差分などに対して誤動作することのないように、定格電流の500%程度に整定する。

#### (2) RDFの動作式

高感度化を目的に,各相電流差動出力を動作力にした比率 差動方式で,

ただし、 $\Sigma |\dot{I}|$ は通過電流のスカラー和であり、 $k_s$ が抑制係数である。また、 $I_B$ は判定レベルである。

ksの整定は、外部故障時で電流差動出力として表われる変流器、変圧器の負荷時調整タップなどの影響に対して誤動作しないように、通常0.1~0.2程度とする。

Isは定常時の変圧器励磁電流,及び定格負荷時の差動マッチング誤差分に対して動作しないように,定格電流の10~30%に整定する。

#### (3) HDFの動作式

変圧器の励磁突入電流に対して確実に誤動作防止ができることと、一致条件として用いるRDFと同様に高感度化を目的に、

$$|\sum I|f_1 - \frac{1}{k_R}|\sum I|f_2 > I_{\beta} \cdots (3)$$

とした。ただし、 $|\Sigma \dot{I}| f_1$ は電流差動出力の基本波成分、 $|\Sigma \dot{I}| f_2$ は同じく第二高調波成分である。 $k_R$ は第二高調波抑制係数である。 $|\Sigma \dot{I}| f_1$ 、 $|\Sigma \dot{I}| f_2$  は各相ごと入力に限らず後述するよ

うに種々の方式が考えられ、kRの整定値も方式により異なる。

# 3.2 励磁突入電流検出方式

HDFの検出原理は(3)式に示したとおりであるが、三相間の入力信号及び判定出力信号に着目すると、幾通りかの方式が考えられる。

#### (1) 各相独立判定方式

RDFとの動作一致条件を各相ごとに独立して取り込む方式で、最終しゃ断出力は三相オア出力とする。

#### (2) 二相アンド判定方式

三相変圧器の電流信号を三角結線により入力する場合に限り有効な方式で、単相の内部故障時でも二相動作できることから、HDFを三相中の二相アンド動作出力として用いることにより、励磁突入電流対策を行なう。

# (3) 三相オア阻止判定方式

図4に示すように、HDF\*(第二高調波成分を動作力にした高調波比率要素)を各相に設け、三相のうちのいずれか一相でも動作したときには、すべての相のRDFの動作出力を阻止する方式である。

#### (4) 三相抑制加算判定方式

図5に示すように各相ごとの電流差動出力の基本波成分を 動作力として,抑制力だけ第二高調波成分の三相絶対値和を 用いた方式である。

## (5) 三相一括判定方式

先の抑制力の加算と同様に動作力についても基本波成分の 三相絶対値和を用いたもので,三相信号を一括した判定方式 である。

#### (6) 対称分信号判定方式

三相交流の正相分,逆相分及び零相分の電流差動出力について,それぞれ基本波成分を動作力とし,第二高調波成分を 抑制力にしたもので,対称分の組合せ方によって更に種々の 判定方式ができる。

## 3.3 各種方式の性能検討

励磁突入電流波形のディジタルシミュレーション,及び実 測波形例をもとに検出性能の検討を行なった。

図6に、ディジタルシミュレーションによって得た励磁突入電流の波形例を示す。同図は投入時の a 相電圧の位相を零度にした場合であるが、一般的には投入時の電圧位相と残留

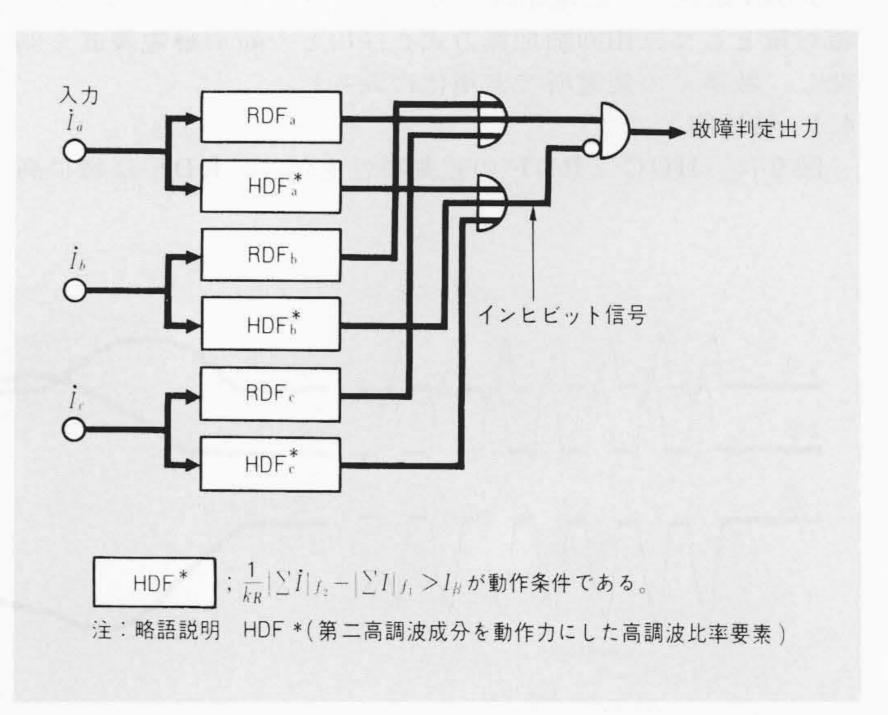


図 4 三相オア阻止判定方式 阻止方式のため、各相独立の電流差動 出力の第二高調波成分を動作力として、基本波成分を抑制力にしている。

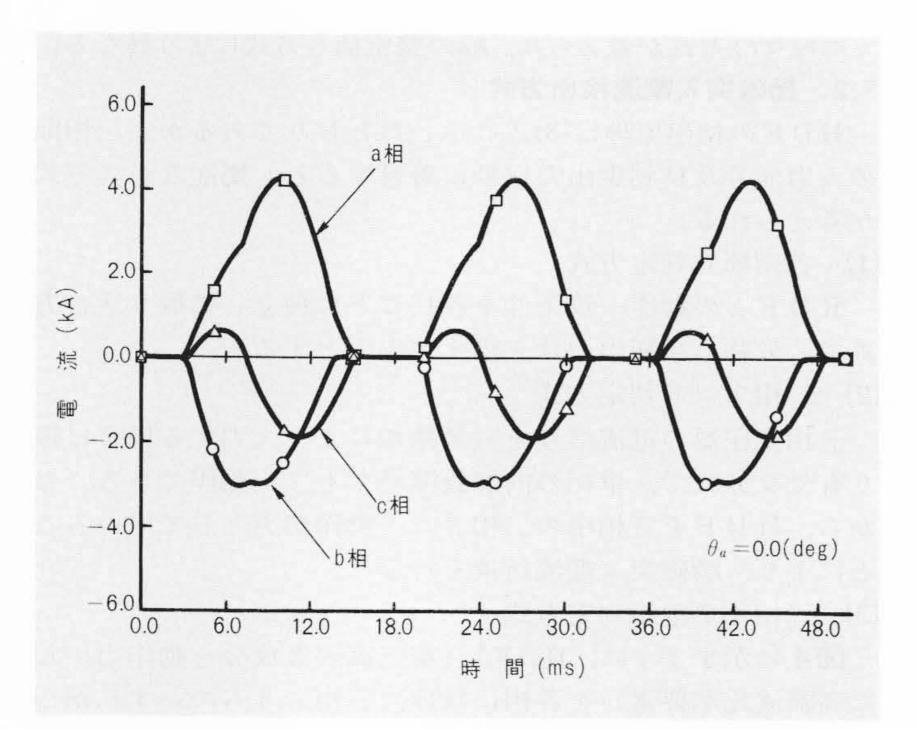


図 5 三相抑制加算判定方式 第二高調波成分の三相分絶対値和により 抑制力を得る方式で、動作力は各相別基本波成分を用いる。動作力も三相分合成したものを三相一括判定方式とする。

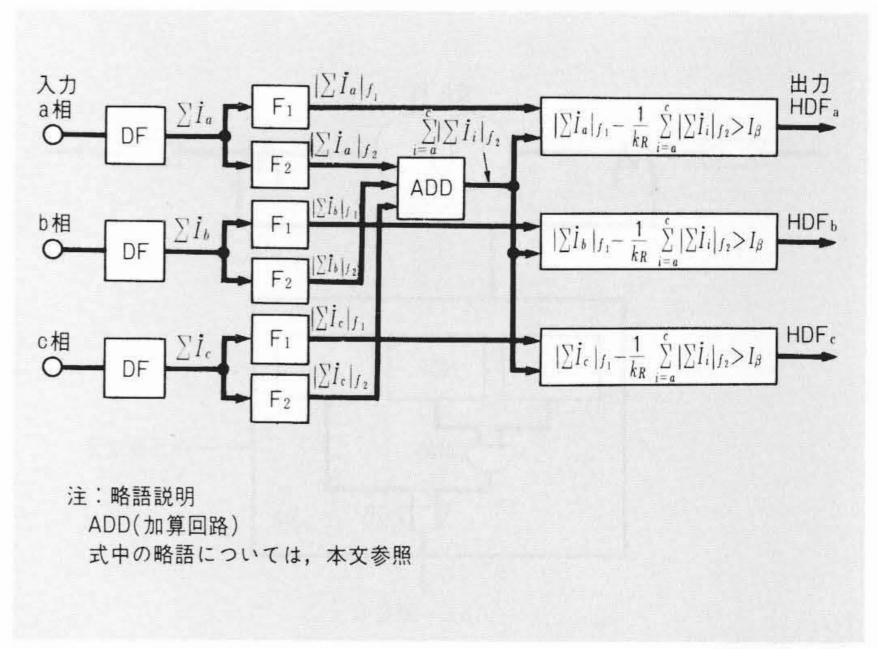


図 6 励磁突入電流のシミュレーション結果 450MVA変圧器の275kV 印加時を想定した解析結果を示したものである。突入電流の最大値は、定格電流の約3倍になっている。

磁気とによって波形が異なる。

図7に、投入時の電圧位相を変えた場合に各種検出方式からみた励磁突入電流の第二高調波成分の含有率を示す。同図で、第二高調波成分の含有率が高く見えるほど検出感度の点から見て有利な方式である。図8に、励磁突入電流の実測波形例を示す。また、表1に、先に示したディジタルシミュレーションによる波形、及び前記実測波形に含まれる第二高調波成分の含有率を各方式別に見た値を示す。両ケースとも同じような傾向にあることが分かった。以上の分析結果をもとに、各種検出方式について行なった総合的な比較検討結果を表2に示す。同表に示すように、各方式ともそれぞれ長所、短所があるが、総合的にみると三相抑制加算方式が優れている。すなわち、三相抑制加算方式はアナログ信号の加算回路が増えるが、回路のIC化及び三相用点検入力信号を用いた自動

# 4 新形継電装置の概要

500kV系統から配電系統の変圧器に至るまで、励磁突入電流対策として三相抑制加算方式を採用した新形継電装置を開発し、数多くの変電所で実用化に入った。

監視方式の採用により, 実施上の問題はない。

#### 4.1 特性例

図9に、HOCとRDFの差動特性を示す。RDFは特に高

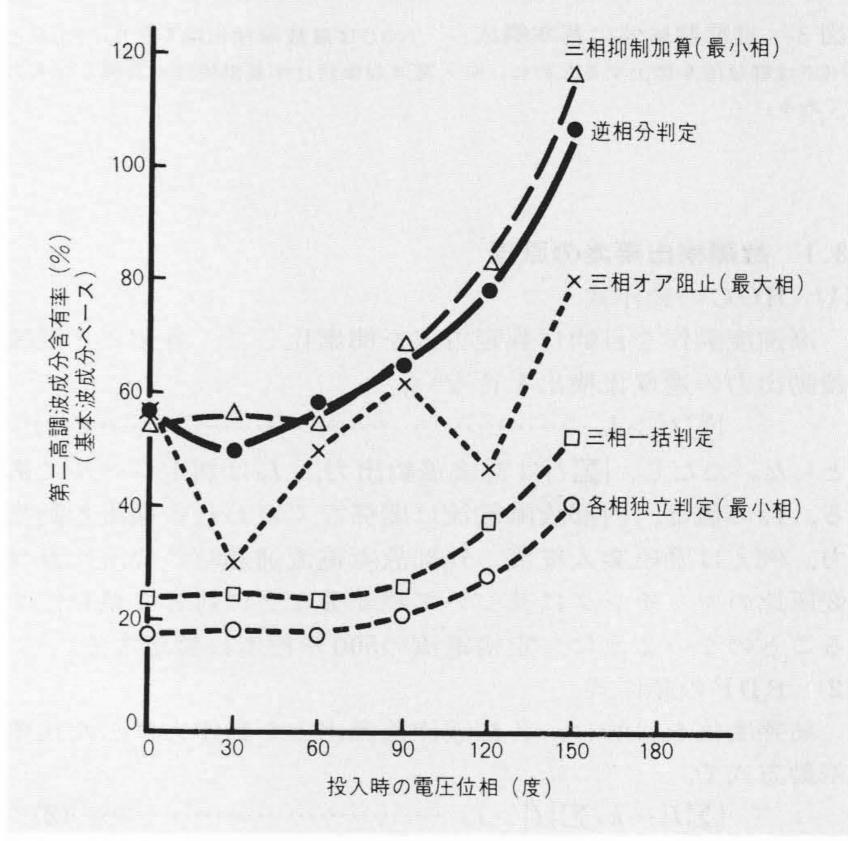


図 7 励磁突入電流の調波分析結果 ディジタルシミュレーションに よる突入電流の I サイクル目を調波分析して、各検出方式別に見た第二高調波 成分含有率を示す。

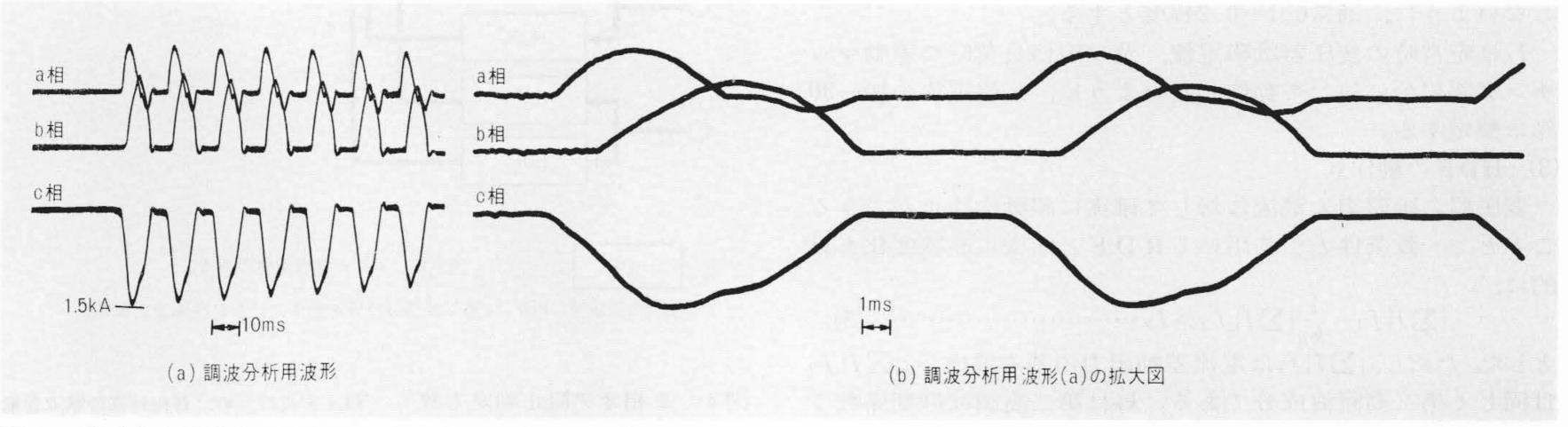


図8 励磁突入電流実測波形例 I50MVA変圧器のI54kV印加時の例で、最大値は定格電流の約2倍になっている。

励磁突入電流検出量の分析結果 各種検出方式別に第二高調波 成分の含有率を求めた。計算例, 実測例ともほぼ同様の傾向にある。

		励磁突入電流の第二高調波成分含有率(%)								
大方		各相独立	三相抑制加算	三相一括	正相分	逆相分				
ケース	式相	$\frac{ \Sigma \dot{I}  f_2}{ \Sigma \dot{I}  f_1}$	$\frac{\sum_{a}^{c}  \sum \dot{I}  f_2}{ \sum \dot{I}  f_1}$	$\frac{\sum_{a}^{c}  \sum \dot{I}  f_{2}}{\sum_{a}^{c}  \sum \dot{I}  f_{1}}$	$\frac{ \sum I_1 f_2}{ \sum I_1 f_1}$	$\frac{ \sum I_2 f_2}{ \sum I_2 f_1}$				
計	a	16.8	54.1	24.3	9.6	56.7				
算例	b	17.1	70.0							
	С	53.0	119.0							
実測例	a	56.9	147.1	29.5		62.5				
	b	30.6	88.2		7.7					
	С	16.9	63.6							

- 注:1.突流波形調波分析は、投入後 | サイクル目について実施した。
  - 2.計算例は、投入電圧位相  $\theta_a=0$  のケース、変圧器モデルは $450\,\mathrm{MVA}$ 、 275kV投入時。
  - 3.実測波形例は、150MVA、154kV投入時。

感度化のため,通過電流が定格電流以下ではスカラー和制御 を行なわない可変比率特性をもたせてある。

図10に、HDFの周波数特性を示す。不動作域は励磁突入 電流対策用として第二高調波を中心に構成した。一方, 直流 分及び第三以上の高次調波は抑制力にならないようにし高感 度化を図った。また、動作時間はHOCがサイクル以下、 RDFとHDFは2サイクル以下である。

# 4.2 構成例

図11に、新形継電器単体の構成ブロックを示す。点検用信 号は, 自己相及び他相からも入力が可能である。

図12に、500kV、1,000MVA変圧器を保護する新形継電装

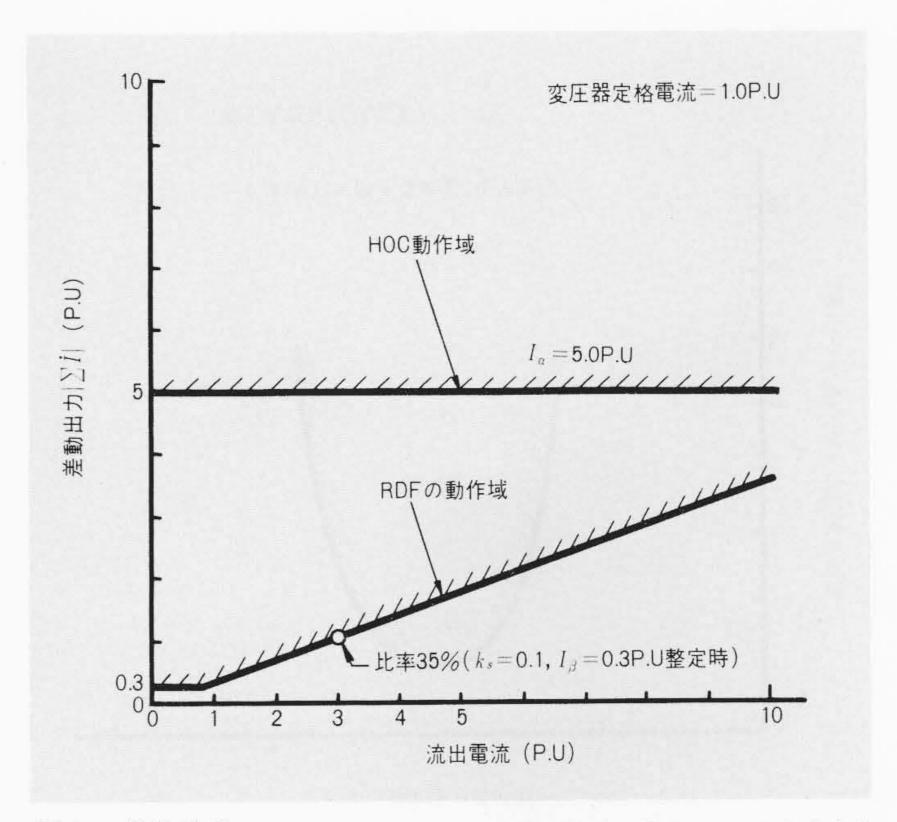


図9 差動特性 HOC及びRDFの故障検出感度を示す。RDFは高感度化 のため、定格電流以下ではスカラー和抑制を除外した。

置の外観を示す。同装置は三相抑制加算方式を採用し、自動 点検, 常時監視及び随時点検(総合動作点検)方式を具備して いる。また、装置は二系列化により高信頼度化を図っている。

# 4.3 新形継電装置の性能検証

新形継電装置は,各種故障ケースに対する保護性能を検証 するため,あらかじめ数値解析によって求めた励磁突入電流, 及び故障電流に対する模擬入力試験を行ない, 更に工場の模 擬変圧器を用いて, 感度, 動作時間など各要素間の協調につ

表 2 励磁突入電流検出方式の総合比較 三相抑制加算方式は性能面からみて有利であり、装置構成を工夫することにより実用性がある。

\			単 相 独 立 信 号			相入力信号の複合化		
項	目	方 式	各相独立	二相アンド	三相オア阻止*	三相抑制加算	三相一括	対称分信号
	対象となる 現象, 項目	動作入力 抑制入力 対策手段 と評価項目	各相ごと差動出 力の基本波分	同左	同左	各相差動出力の 基本波成分	同左三相分 総和	正相,逆相,零相 差動出力基本波分
区			同 上 第二高調波分	同左	同左	同上第二高調波 成分三相総和	同左	同 上 第二高調波分
分	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,		各相独立	二相一致条件	各相独立	各相独立	三相一括	三相一括
健	励磁突入電流	判定比率の高レベル化	Δ	Δ	0		0	<b>©</b>
全	区間内·外高調波 重畳	フィルタの効果 (フィルタの簡素化)	Δ	Δ	0	0	0	Δ
時	過大電流通過	変流器の性能向上** 比率差動特性						
	過渡直流分重畳	動作時間特性   「判定比率   フィルタによる遅れ						
内	高調波重畳		Δ	Δ	Δ	0	0	Δ
部	励磁突入電流重畳	健全相抑制						
故障	故障種別 (短絡・地絡)	高感度	0	Δ Ο		0	0	Δ
時	結線方式 (人・Δ)	高選択性						
5.70	回路規模	簡素化	0	0	0	0	0	Δ
装置	自動点検 常時監視 保守・点検	容易性	0	Δ	0	Δ	Δ	Δ

注:\* 阻止方式では,動作入力と抑制入力を逆に用いる。 \*\* 変流器の過渡特性向上できない場合には,高調波重畳影響と同様。

<sup>◎ (</sup>特に有利) ○ (有利) △ (不利)

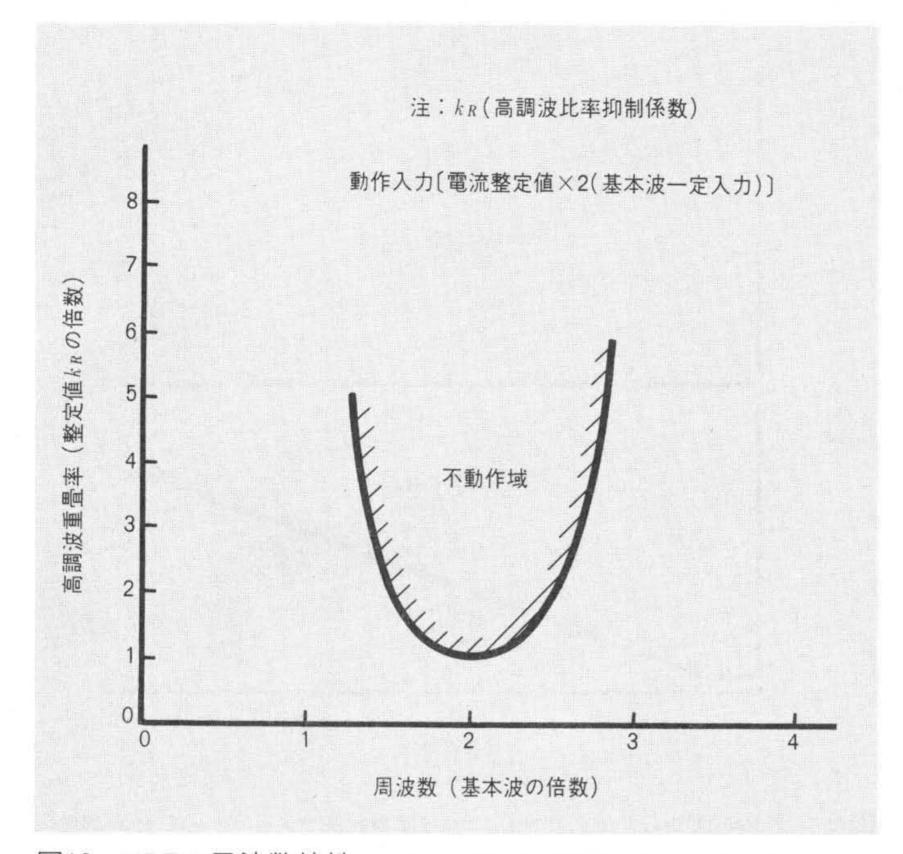


図10 HDFの周波数特性 HDFは第二高調波分に対して不動作域となるが、第三以上の高次調波に対しては、抑制力が働かないようにしてある。

いての総合試験を行なった。

また, 実系統では, 変圧器課電時の励磁突入電流, 及びしゃ断器操作に伴う開閉サージなどに対する検証を終え実用化に入った。

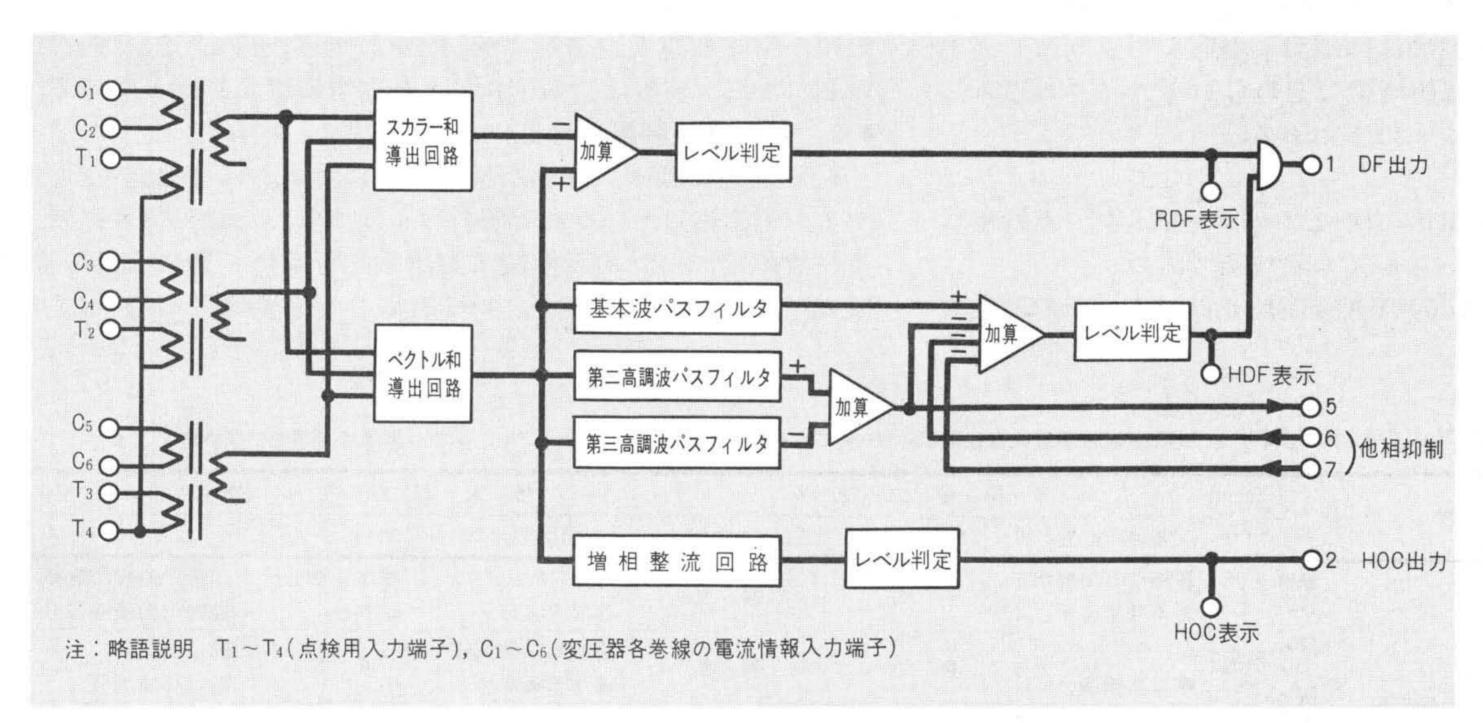
# 5 結 言

以上,変圧器の励磁突入電流及び高調波電流対策を考慮した新形変圧器保護継電装置について述べた。新しく三相分の第二高調波成分の絶対値和を抑制力として用いることにより,従来方式よりも更に高い検出能力を具備できることを明らかにした。

最後に、新形装置の開発に当たり、終始御指導・御協力をいただいた電力会社の関係各位に対し、深く感謝の意を表わす次第である。

# 参考文献

- 1) 中山,外:最近の保護継電技術の動向,日立評論,**61**,761~766 (昭54-11)
- 2) 電気協同研究会:大容量変圧器の事故防止対策,電気協同研究, 30, No.6,62(昭50-3)
- 3) 継電方式委員会:現用変圧器保護継電器の性能と事故拡大防止, No.177002 (昭52-8)



図II 新形継電器の構成例(単相分) 三相抑制加算,自動点検方式を採用したもので,保守・点検用に各要素別の動作表示回路を備えた。

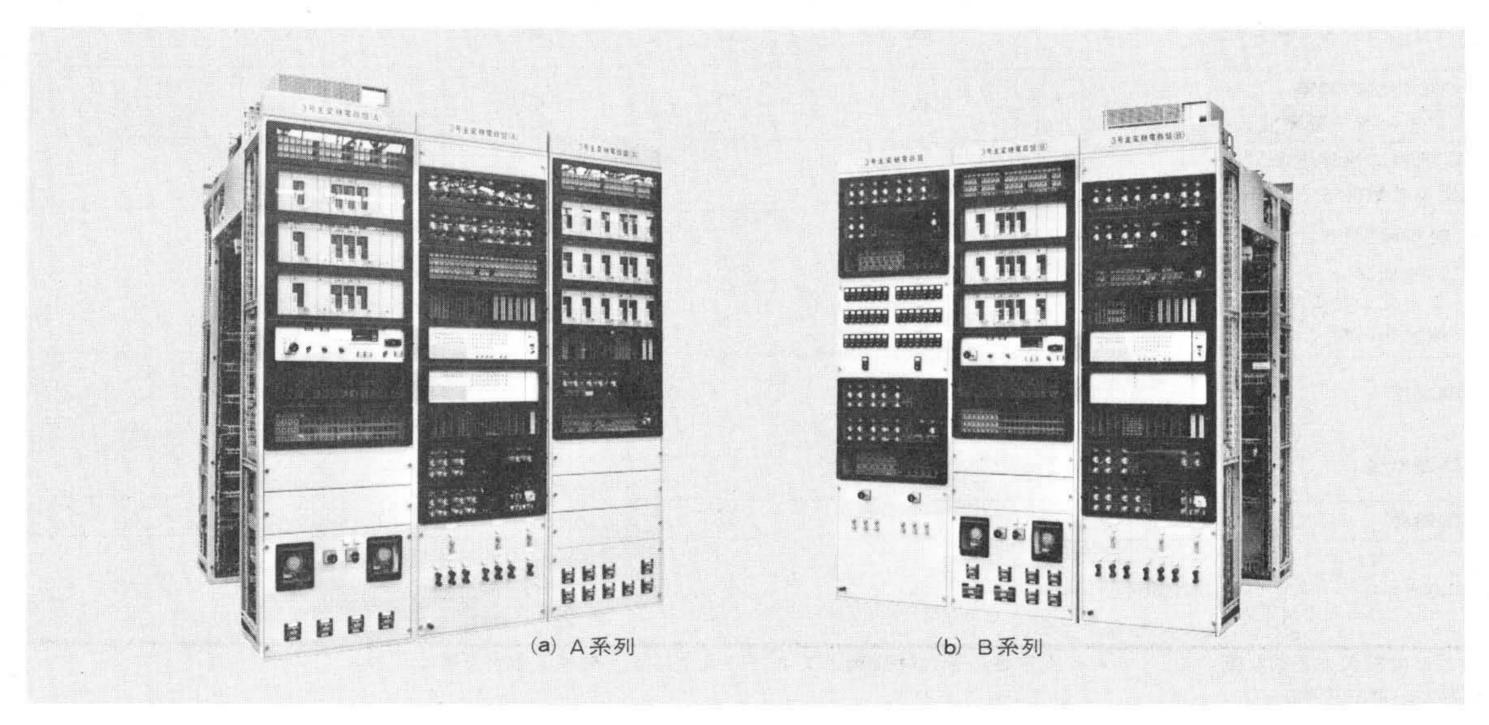


図12 新形継電装置の 外観 500kV, I,000MVA 変圧器の保護用に開発した 三相抑制加算方式で,自動 点検,常時監視及び随時点 検システムを具備し,二系 列化した例である。