

変圧器保護継電装置

Transformer Protective Relaying Equipment

最近、変圧器の大容量化、構造の多様化及び鉄心材料として高透磁率の方向性電磁鋼帯の採用などにより、変圧器に電圧を印加したときに生ずる励磁突入電流と故障電流との識別がますます困難になる傾向にある。一方、保護責務としては電力供給の安定化、機器損傷の軽減化の点から、保護継電装置の検出感度の向上、高速度動作及び信頼性の強化が望まれている。このような状況に対して従来のトランジスタ形継電器に代わり、ICを導入した高密度実装の新形保護継電装置を開発し、検出性能の向上、自動監視機能の充実及び回路の簡素化を図った。

この装置は500kV系統の大容量変圧器用をはじめ、配電変圧器用に至るまでそれぞれの目的に応じた機種の開発を完了している。

吉田 彰*
佐々木宏**
宮崎照信***
秋沢安郎****

Yoshida Akira
Sasaki Hiroshi
Miyazaki Terunobu
Akizawa Yasuo

1 緒 言

変圧器保護継電装置は従来から電流差動方式を基本としており、励磁突入電流対策として第2高調波成分による高調波抑制方式を採用してきた¹⁾。

しかし、最近の変圧器では、大容量単相単巻形をはじめ、単相多脚形、三相五脚形など構造の多様化、巻線構造の改善及び鉄心材料として高透磁率方向性電磁鋼帯の採用などにより、励磁突入電流に含まれる第2高調波分が減少する傾向にあり、事故検出感度を向上するためには励磁突入電流による誤動作防止対策を強化する必要がある。一方、変圧器で内部事故が発生した場合に、事故点に流入する電流波形は、接続系統のケーブル、調相用コンデンサなどの静電容量の影響により、過渡的に高調波分が重畳する場合があります、高速度で事故を検出する上で障害要因になる。

これらの問題の解決策として、従来のトランジスタ形継電器をIC化するとともに、特に耐高調波特性の点から性能向

上を図ることとした。新形継電器の開発に当たっては、送電線、母線保護継電装置及び主保護、後備保護継電装置を含めた標準化を図った。

この論文では、新形変圧器保護継電装置の主要素である電流差動形保護継電装置について述べる。

2 変圧器保護継電装置の具備条件と施策の方向

変圧器保護に課せられた責務は、機器の損傷を最小限にとどめ、事故の拡大を未然に防止することであり、超高压系統、配電系統を問わず検出感度、速度の両面で高性能化が要求される²⁾。

したがって、この継電装置の開発に当たっては、すべての電圧階級に対して使用可能なものを前提条件におき、保護継電方式、回路構成、自動点検、常時監視方式などについて検討を行なった。開発の背景、具備条件、施策の方針などをまとめて図1に示す。

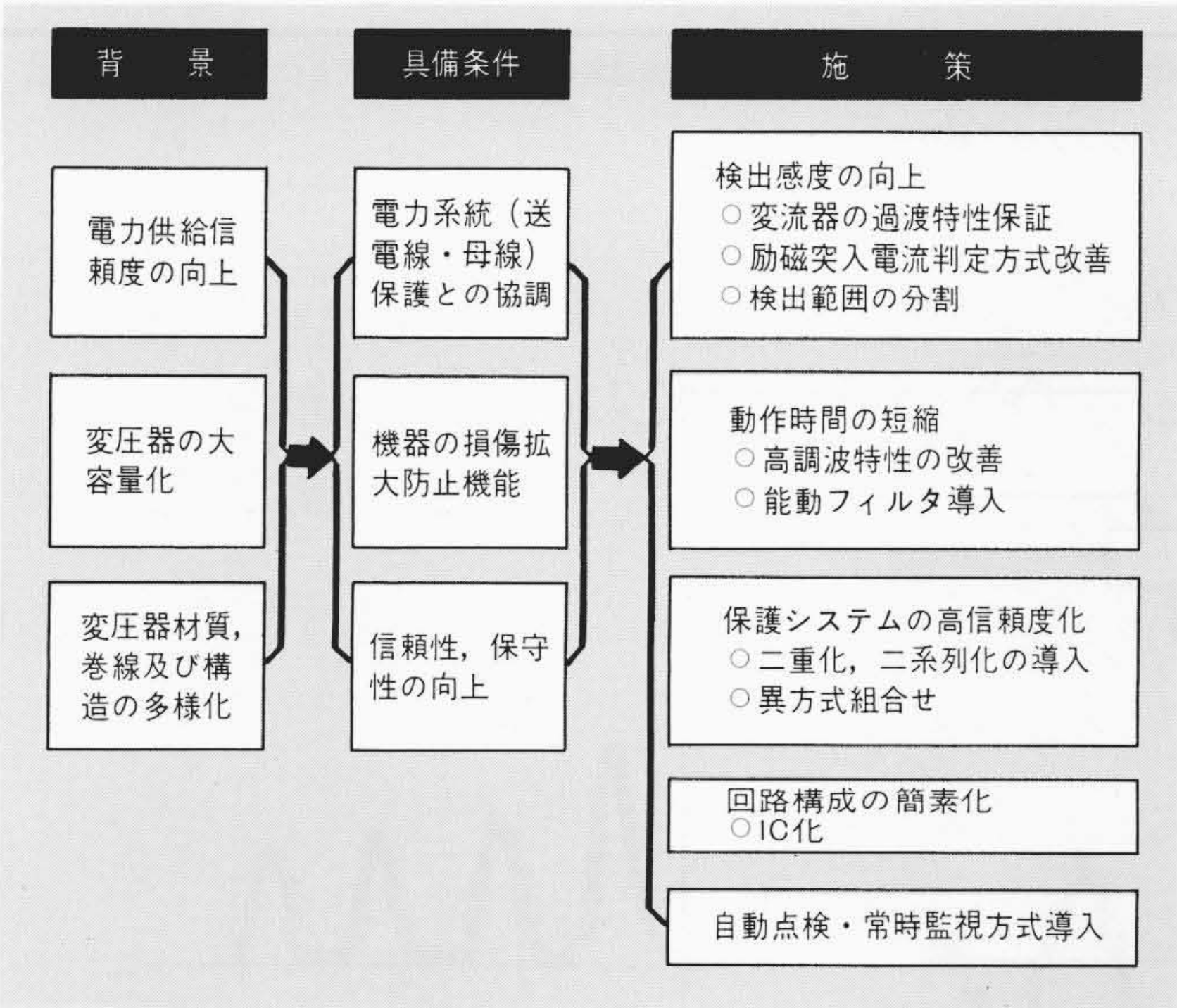


図1 変圧器保護方式の課題と施策 新形変圧器保護継電装置を開発するに当たり、所望の動作責務を満足するための解決策を示す。

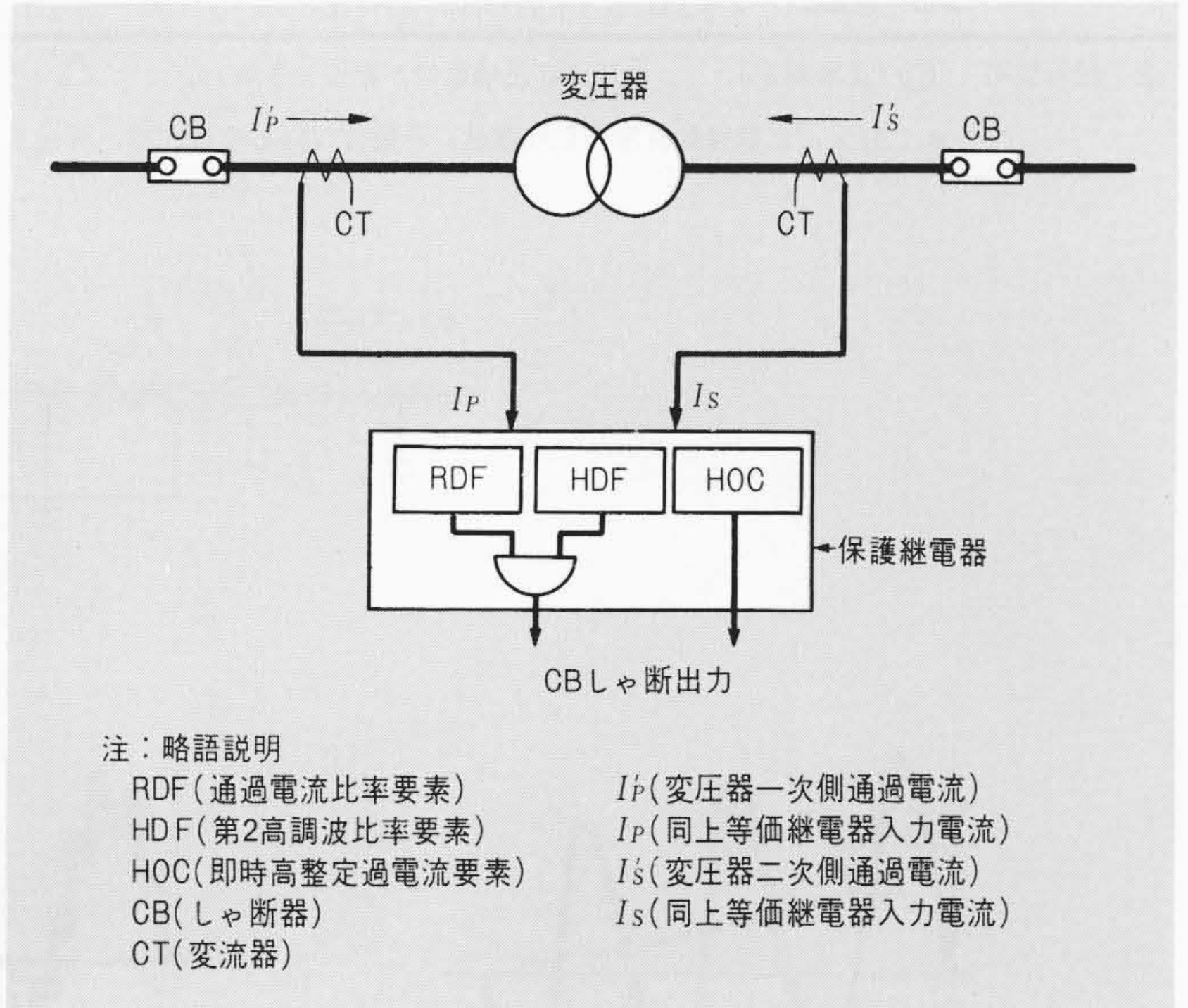


図2 電流差動形継電器の概念図 電流差動形継電器の内部は、励磁突入電流対策付比率要素と即時高整定過電流要素から成る。

* 東京電力株式会社系統運用部 ** 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

3 主継電器単体の構成と特性

電流差動方式による変圧器主保護継電器単体の回路構成、及び特性例について述べる。

3.1 事故検出方式

図2に、電流差動方式による変圧器保護継電器の概念図を示す。この新形継電器の基本的な動作原理は、従来のトランジスタ形継電器と同様であるが、同図に示すように、検出要素ごとに回路を独立化し、調整の高精度化、点検の簡素化及び信頼度向上を合わせてねらったのが特長である。

事故検出要素は高感度用としてRDF(通過電流比率要素)と、励磁突入電流対策用HDF(第2高調波比率要素)の一致条件を用い、重大事故検出用即時要素としてHOC(高整定過電流要素)を用いた。

各要素の動作判定式は、

$$RDF: |I_P - I_S| - k(|I_P| + |I_S|) > P_L \dots\dots\dots(1)$$

$$HDF: |I_P - I_S| f_1 - \frac{1}{\alpha} |I_P - I_S| f_2 > P_L \dots\dots\dots(2)$$

$$HOC: |I_P - I_S| > P_H \dots\dots\dots(3)$$

である。

- ただし $|I_P - I_S|$: 継電器入力電流の差動出力
- $|I_P - I_S| f_1$: 同上差動出力の基本波分
- $|I_P - I_S| f_2$: 同上第2高調波分

- P_L : 判定レベル(低整定)
- P_H : 判定レベル(高整定)
- k : 通過電流スカラ和抑制係数
- α : 励磁突入電流検出第2高調波含有率判定係数

3.2 励磁突入電流対策

継電器の高感度化、高速度化に際しては、変圧器の励磁突入電流による誤動作防止対策との関連を十分考慮に入れる必要がある。図3は、電流差動出力として表われる電流波形の概念図を示したものである。同図で、(a)と(b)が内部事故時の電流波形例、(c)が励磁突入電流波形例である。最近、特に系統の対地静電容量の増加により内部事故時の波形ひずみが増大する傾向にあり、一方では励磁突入電流のひずみ率が小さくなる傾向にあるため、一相だけの出力波形では(c)の励磁突入電流の識別が困難になってきている。無理に第2高調波含有率の検出比率を高感度にすると、(a)や(b)に示す波形に対して動作遅延、あるいは不動作のおそれが出てくる。

以上のような点を考慮して、新たに励磁突入電流対策について方式検討を行なった結果を表1にまとめ示した。同表の内容から見ると、それぞれ一長一短があり、最良の方式を端的には決定できないが、保護対象変圧器の仕様・構造、系統

表1 励磁突入電流対策の方式検討 励磁突入電流対策は、内部事故時の保護性能とのつり合いにより決定することとなる。

項目 No.	方式	判定内容 (動作阻止条件)	整定例	高調波阻止付比率差動要素の性能比較			回路構成 保守性
				励磁突入電流	内部事故電流に 励磁突入電流重畳	内部事故電流に 高調波重畳	
1	各相独自判定 独自阻止	$\left \frac{\sum I_{f2}}{\sum I_{f1}} \right > \alpha$ (各相ごと)	$\alpha = 0.1 \sim 0.15$	◎	△	○	容易
2	各相独自判定 三相一括阻止	同上判定 a相 b相 c相 → 三相一括阻止	$\alpha = 0.15 \sim 0.2$	◎	×	○	やや複雑
3	三相一括判定 三相一括阻止	$\frac{ \sum I_{f2} _a + \sum I_{f2} _b + \sum I_{f2} _c}{ \sum I_{f1} _a + \sum I_{f1} _b + \sum I_{f1} _c} > \alpha$ 三相一括阻止	$\alpha = 0.15 \sim 0.2$	◎	△	○	複雑

注：記号説明 ◎ (正規判定), ○ (ほぼ正規動作が期待できる。), △ (やや動作遅延のケースがある。*), × (動作遅延のケースが多くなる。*)
* ただし、比率差動要素の動作遅延、不動作に対してはHOC、機械式リレーのバックアップを期待できる。

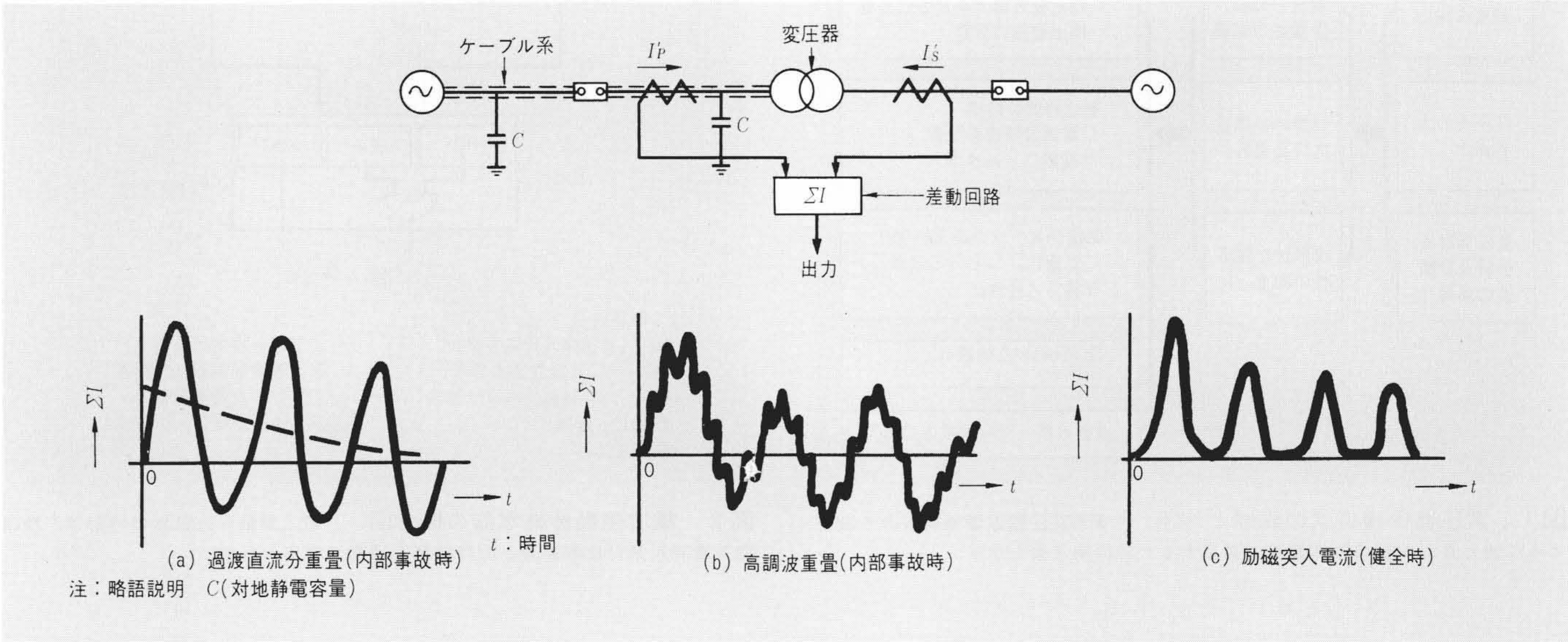


図3 電流差動出力波形の概要 電流差動出力波形は、基本波だけからひずみ波まで種々のケースが考えられる。

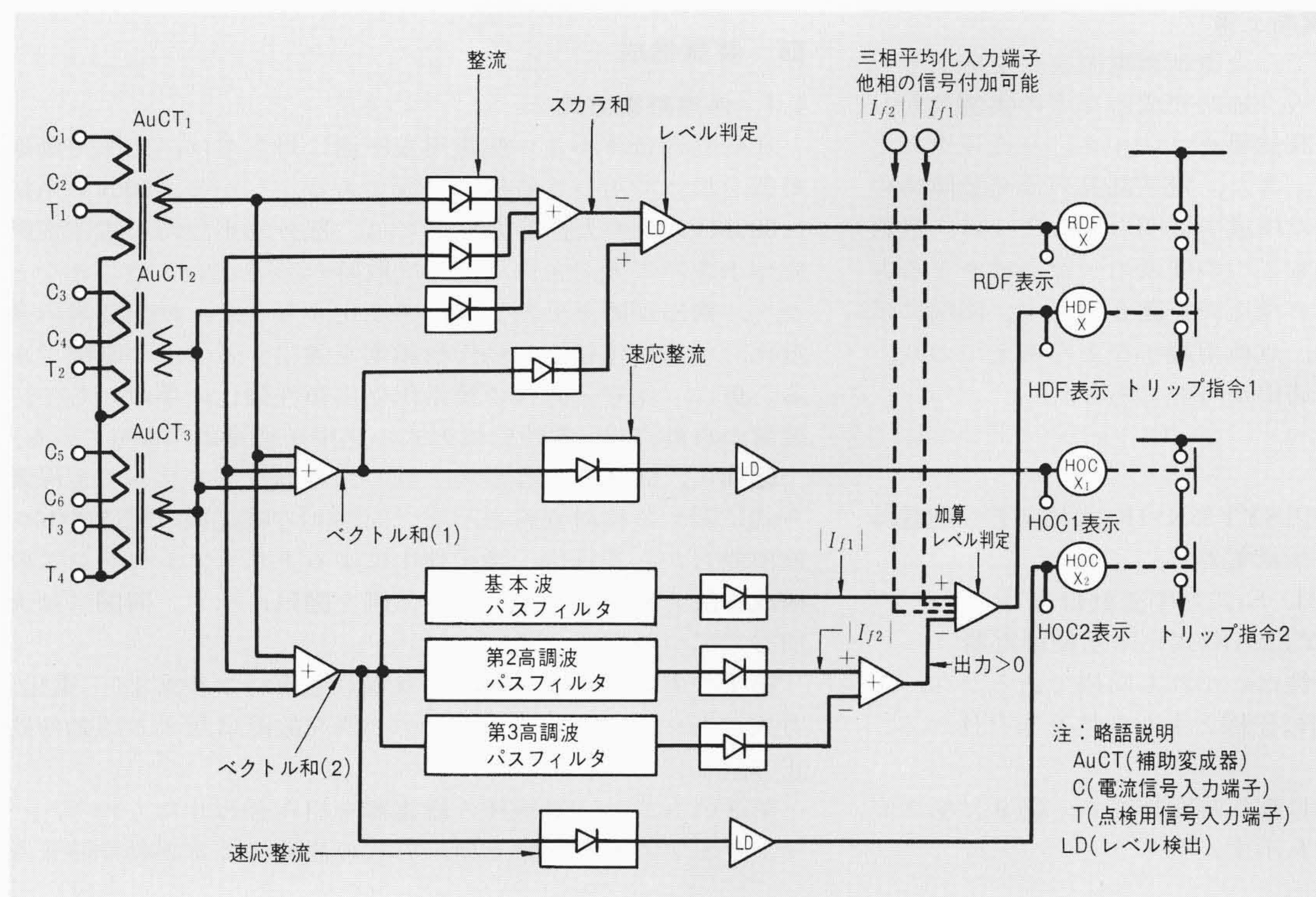


図4 電流差動形主継電器の回路構成 継電器単体でも高信頼性をもつように、二重化、二系列化の考え方を入れた構成とした。

全体の保護システム、装置の規模などを総合的に評価し、実施方式を決定することになる。新形継電器では、検出要素の分割、独立化によりいずれの方式でも実施できる形をとっている。図4に新形継電器の回路構成の具体例を示す。

3.3 高調波特性に対する考慮

内部事故時に発生するひずみ波電流によって継電器が不動作とならないように、抑制力は励磁突入電流の検出に必要な第2高調波を中心にした狭い範囲だけに限定しており、その他の周波数領域では抑制力がかからないようにしている。第3高調波以上の単一周波数の入力に対しては、図5に示すように感度を基本波に対する感度の約 $\frac{1}{5}$ に落としている。

保護区間内にケーブル回路が含まれている場合は、外部故障が発生すると対地静電容量に起因する高調波電流が保護区間の片端子だけに生ずるが、フィルタの減衰効果により誤動作する心配はない。

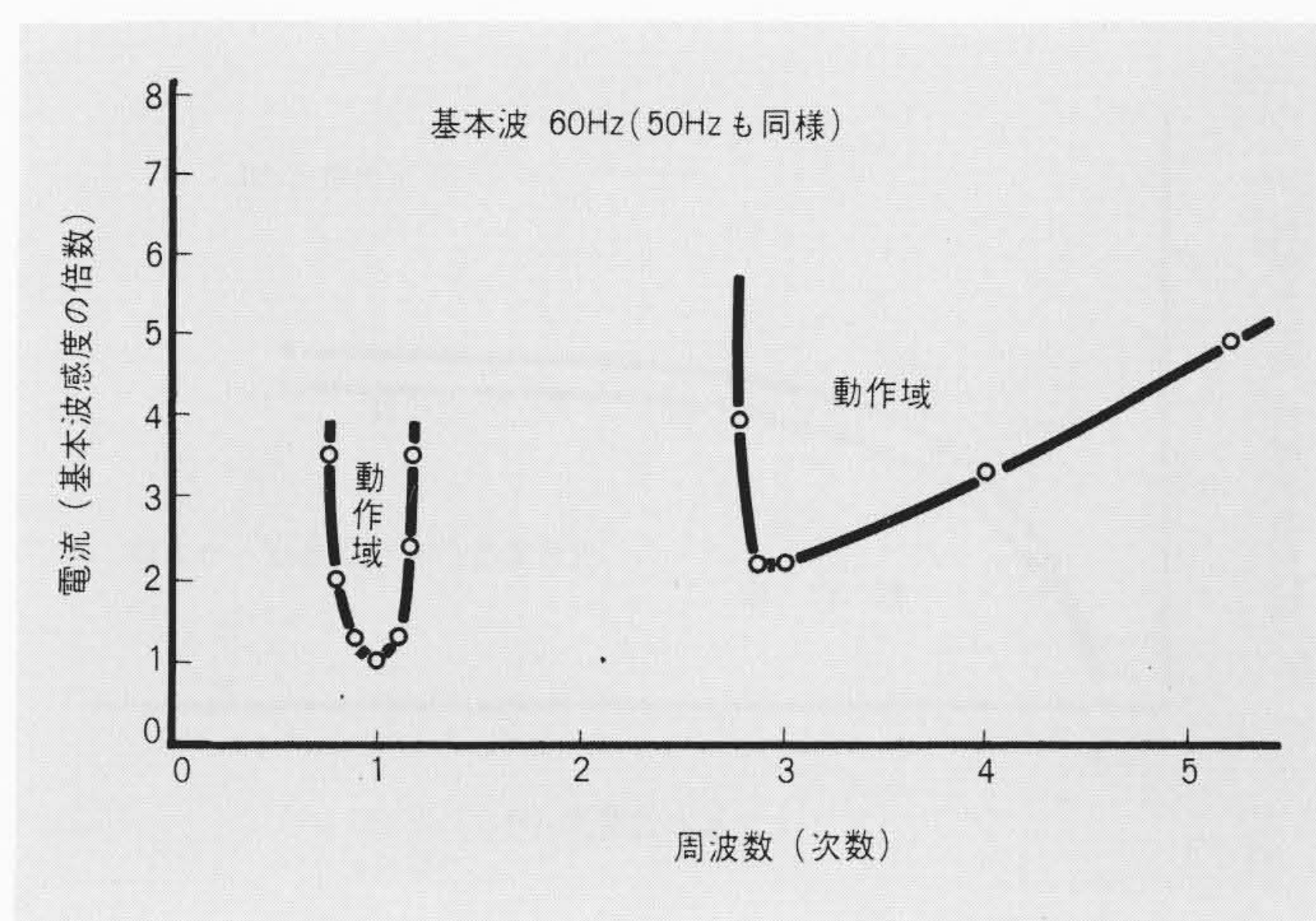


図5 比率要素の周波数特性 励磁突入電流による誤動作防止対策のため、第2高調波を中心に不動作域をもたせてある。

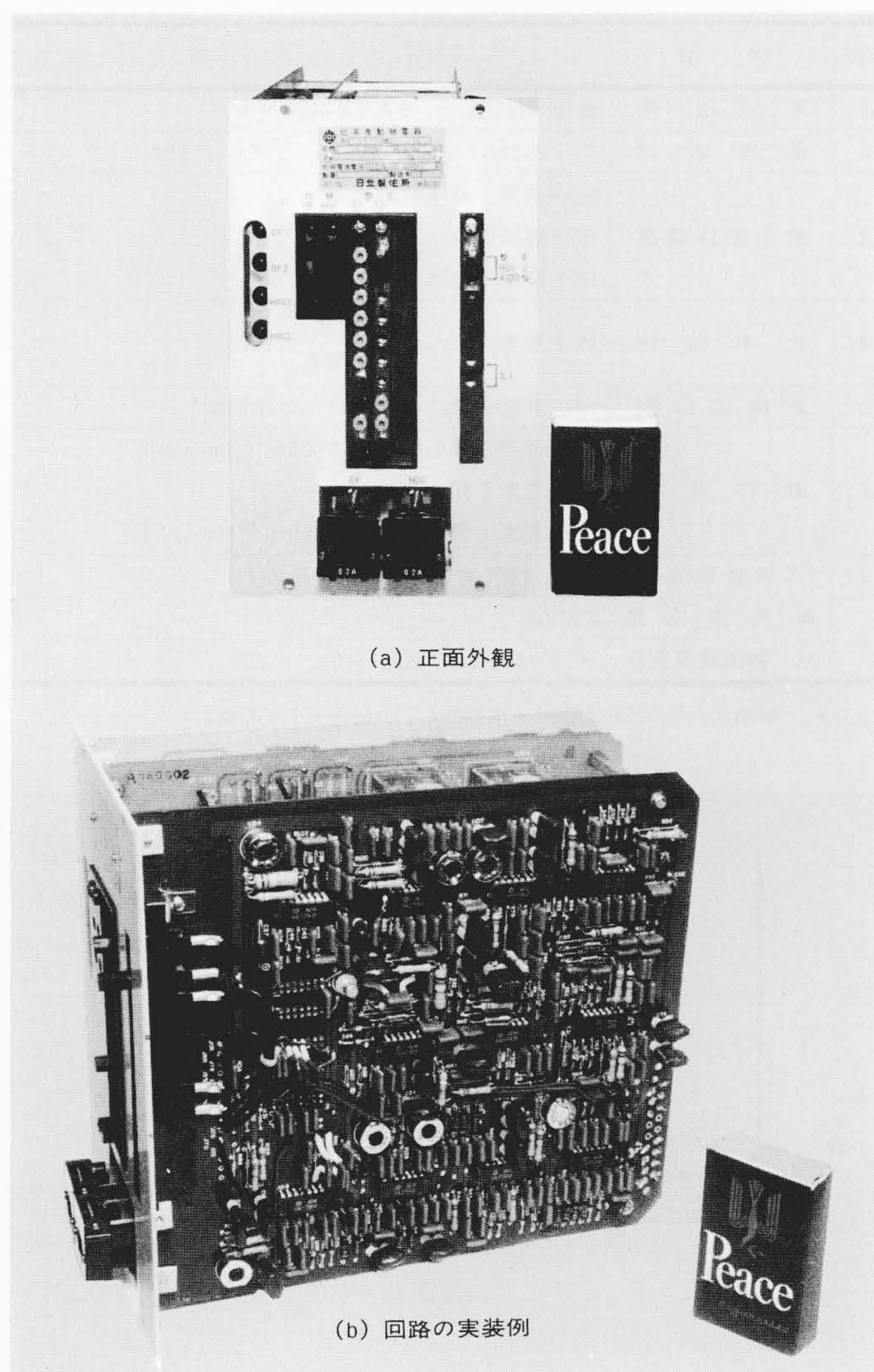


図6 継電器単体の実装例(SYT形IK4式) 単体としての信頼度向上を図るため、四つの検出要素を実装したコンパクトタイプとしている。

3.4 継電器単体での信頼度向上策

電子回路を用いているので、直流制御電源及び交流信号入力回路の配線、プリント基板、補助変成器などの実装に対しては、各部のシールド、高調波阻止フィルタ、リミッタなどによるノイズ対策を施した。また、電子部品の偶発故障時の対策としては、図4で示した構成でも明らかなように、最終出力に至るまでに少なくとも二つの要素の一致条件をとる方式としている。継電器単体の構造例を図6に示す。同図に示すように、動作出力の表示、点検用端子などを備えており、必要により自動監視方式も適用が可能である。

3.5 仕様と特性例

- 開発した継電器には、
- (1) 500kV 系統変圧器保護用SYT形N-1K₅式比率差動継電器及びSDT形N-1K₅式電流平衡継電器
 - (2) 超高压系統汎用SYT形L-E₁式比率差動継電器
 - (3) 配電用変圧器保護用SYT形1K₄式比率差動継電器
- などがあるが、基本的な特性はいずれも同様であるから、(1)のSYT形N-1K₅式を代表例に仕様と主な特性を次に述べる。

表2に仕様を示す。
図7に比率特性を、図8に動作時間特性を、図9に第2高調波比率感度特性をそれぞれ示す。

表2 継電器単体の仕様例 HDFが個別に管理できるのが特長である。

No.	項 目	仕 様
1.	形 式 定 格	SYT-N-1K ₅ 5 A (2 ユニツト)
2.	基 準 電 流	T ₁ : 2.89A T ₂ : 2.62A T ₃ : 2.98A
3.	最小動作電流	RDF要素: 基準電流の30% HDF要素: 同 上 HOC要素: 基準電流の500%
4.	比 率 特 性	RDF要素: $30\% \left(\frac{\text{差電流}}{\text{流出電流}} \times 100 \right)$
5.	高 調 波 抑 制	HDF要素: 第2高調波15%単相抑制*
6.	動 作 時 間	RDF要素: 最小動作値の500%で33ms以下 HDF要素: 同 上 HOC要素: 最小動作値の200%で10ms以下
7.	点 検 巻 線 定 格	1.5A連続(主巻線の20倍巻込み)
8.	負 担	交 流 回 路 1.2VA 制 御 電 源 回 路 DC+15V 2W, DC-15V 1.2W

注: * 単相10%整定及び三相一括判定(平均化方式)も可能。

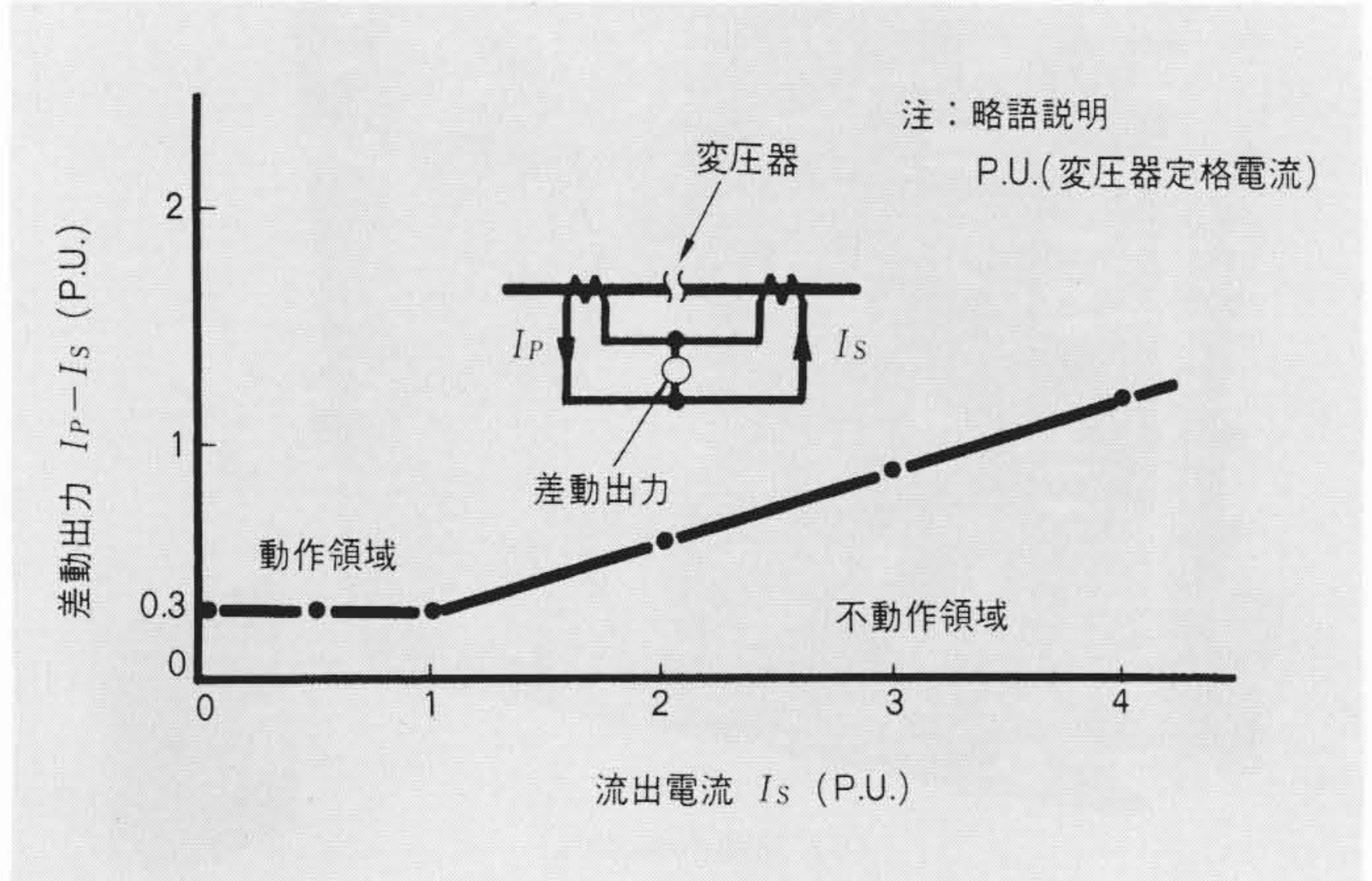


図7 比率特性 負荷電流による感度低下が起らないように、変圧器定格電流以下では通過電流抑制をカットする可変比率特性を具備している。

4 装置構成

4.1 保護継電方式

比較的容量の小さい配電用変圧器に対しては、比率差動継電器を単体で用いても保護可能である。しかし、500kV 系統1,000MVA級の大容量変圧器では、部分的事故時の電流変動幅が小さいこと、主保護動作失敗時の影響が大きいことなどから、検出範囲を分割して高感度化すること、検出要素の多重化、多系列化により動作信頼度を強化することが必要である。更に、保守・点検の簡素化と信頼性強化の手段として、装置の自動点検、常時監視方式の適用が標準的になっている。

図10に、500kV 大容量変圧器の保護継電システムの主保護方式に関する検討資料を示す。同図(a)の継電器の配置と(b)の検出能力から多重化、多系列化によるトリップシーケンスの構成方法を検討した。その具体例を図11に示す。同図には大別して二つの方式を示した。

- 第1の方式は、同一機種の継電器を用いた多重化(二重化)方式であり、主にハードウェアの偶発故障に対する誤動作防止方式と言える。
第2の方式は、異機種の継電器を組み合わせたもので、ハードウェアの不良対策と検出方式の違いによる誤動作防止を

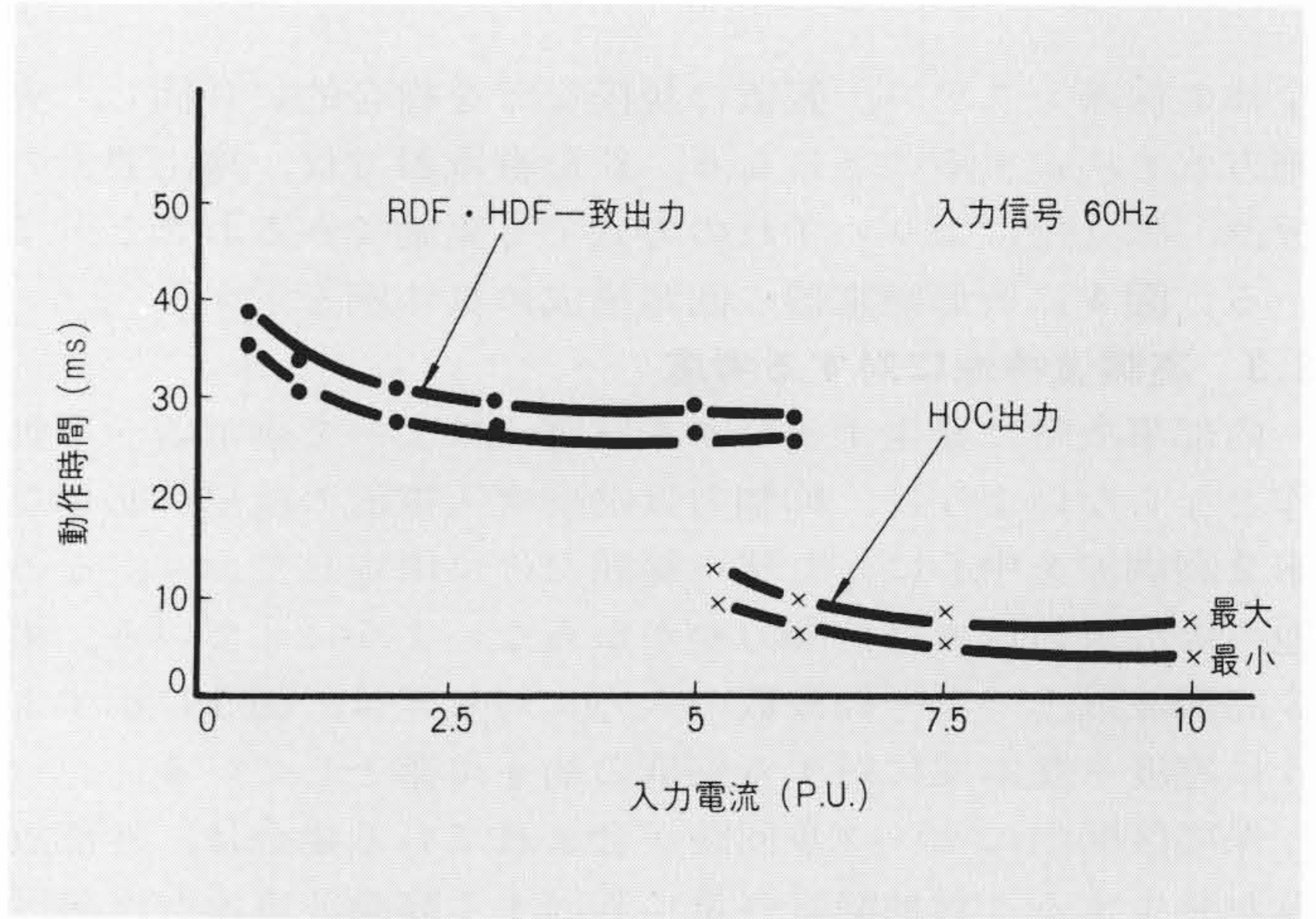


図8 動作時間特性 継電器単体の動作時間を示す。比率要素と即時要素の協調は、十分にとれていることが分かる。

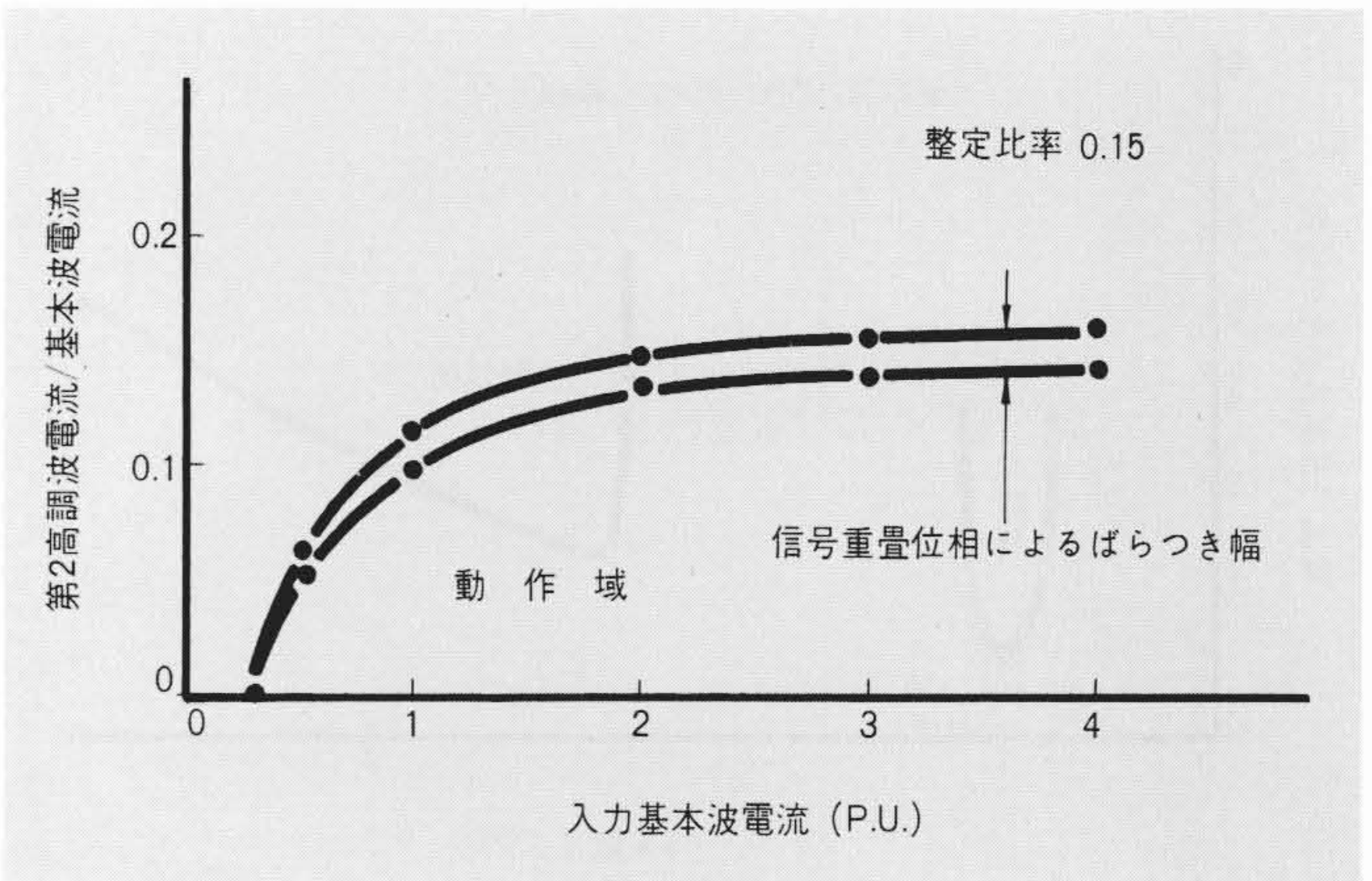
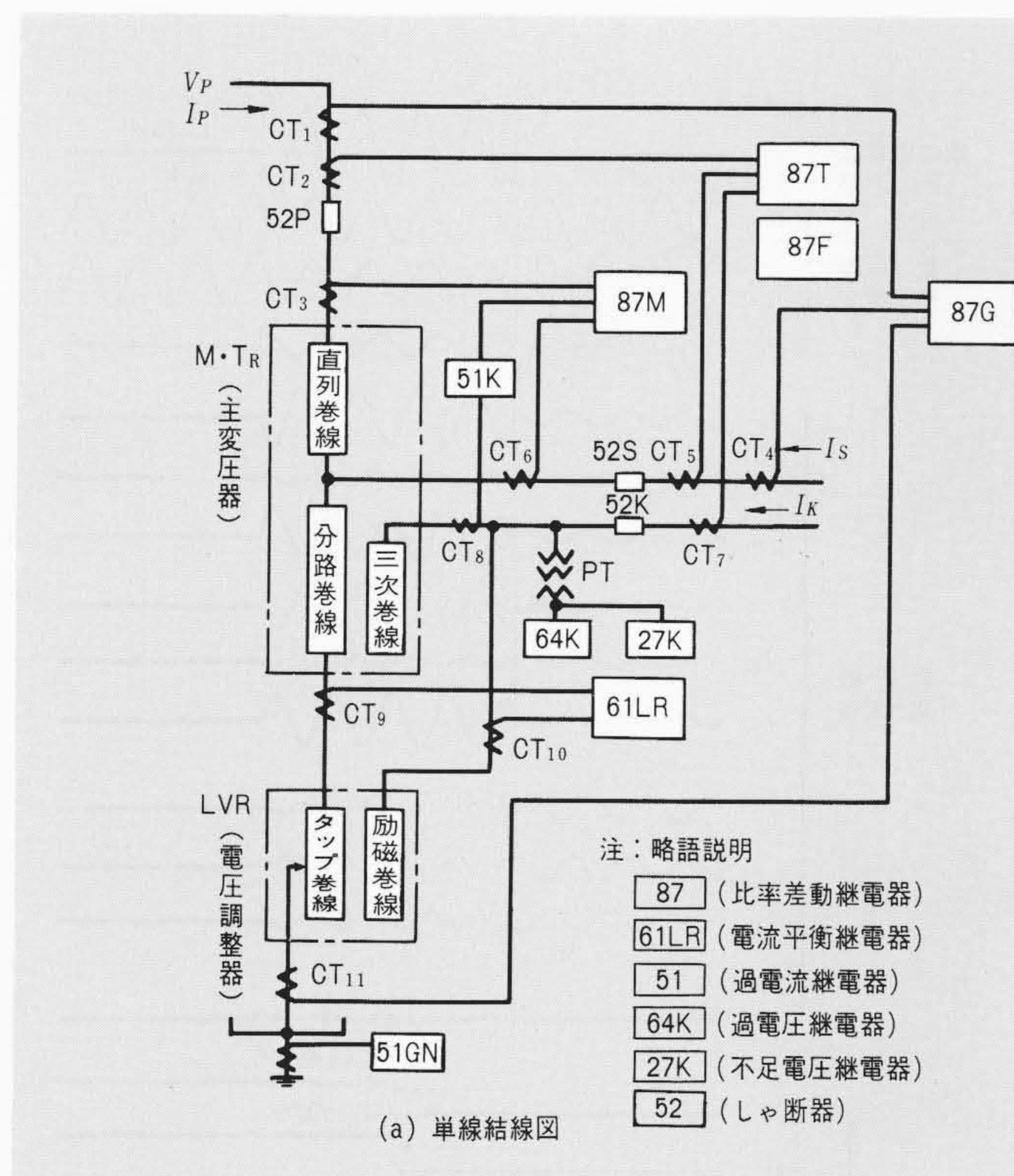


図9 第2高調波比率検出感度特性 励磁突入電流対策用高調波比率要素の感度は、誤動作防止の点から小電流域で動作範囲が拡大しないようにしてある。



事故検出要素		87T (比率差動)	87G* (比率差動)	87M (比率差動)	61LR (電流平衡)
主変圧器しゃ断器間	短絡	○	—	—	—
	地絡	○	○	—	—
主変圧器	直列巻線	短絡	○	—	○
		地絡	○	○	○
	分路巻線	短絡	○	—	○
		地絡	○	○	○
	三次巻線	短絡	○	—	○
		地絡**	—	—	—
電圧調整器	励磁巻線	短絡	○	—	○
		地絡**	—	—	—
	タップ巻線	短絡	○	—	○
	地絡	○	○	—	—

注：記号説明

○ (事故検出可能)

* (励磁突入電流対策高調波阻止不要)

** (非接地系統のため、別途地絡保護継電器を用いる。)

(b) 主継電器の事故検出分担

図10 500kV大容量変圧器の保護継電システム(主保護対象) 主継電器の配置(a)と、検出機能(b)から多重化、多系列化システムの検討を行なった。

方式	検出範囲	継電器の検出範囲	事故検出要素の組合せ			
			主変圧器用	電圧調整器用	一括用	一括用(地絡用)
同種継電器 組合せ多重化方式	一次	M·TR 二次 三次	87M トリップ	61LR トリップ	87T トリップ	87G トリップ
異種継電器 組合せ多重化方式	一次	M·TR 二次 三次	87F トリップ	87F トリップ	27K 51GN 51K トリップ	51GN 51K 87G トリップ

図11 装置信頼度の向上策検討例 500kV系統変圧器の保護方式について高感度・高信頼度化実現のための検出要素組合せ例を示す。

図ったものである。いずれの方式でも、主変圧器と負荷時電圧調整器の事故を分割して検出する要素、及び両器を一括して検出する要素による二系列化を図っている。

4.2 自動監視方式

500kV 系統の変圧器保護継電装置では、構成が複雑なことから信頼度向上策として自動監視方式を全面的に採用している。点検方式でも、特に定期点検に相当する精度の高い点検を行なう場合には負荷電流の影響を除去する手段、点検中に事故が発生した場合の対応策などを考慮して装置構成を決定している。

図12に同一機種の継電器を二重化、二系列化して構成した自動監視付主保護継電装置の外観を示す。

5 試験結果及び検討

5.1 実系統における励磁突入電流試験

新形継電器を用いて、昭和53年6月に77kV10MVA変圧器を対象に、同年10月に154kV150MVA変圧器を対象に励磁突入電流に対する応動試験を実施した。印加電圧の投入位相制御を行ない約30ケースの試験を実施したところ、いずれも正規判定という結果を得た。図13に第2高調波含有率が特に小

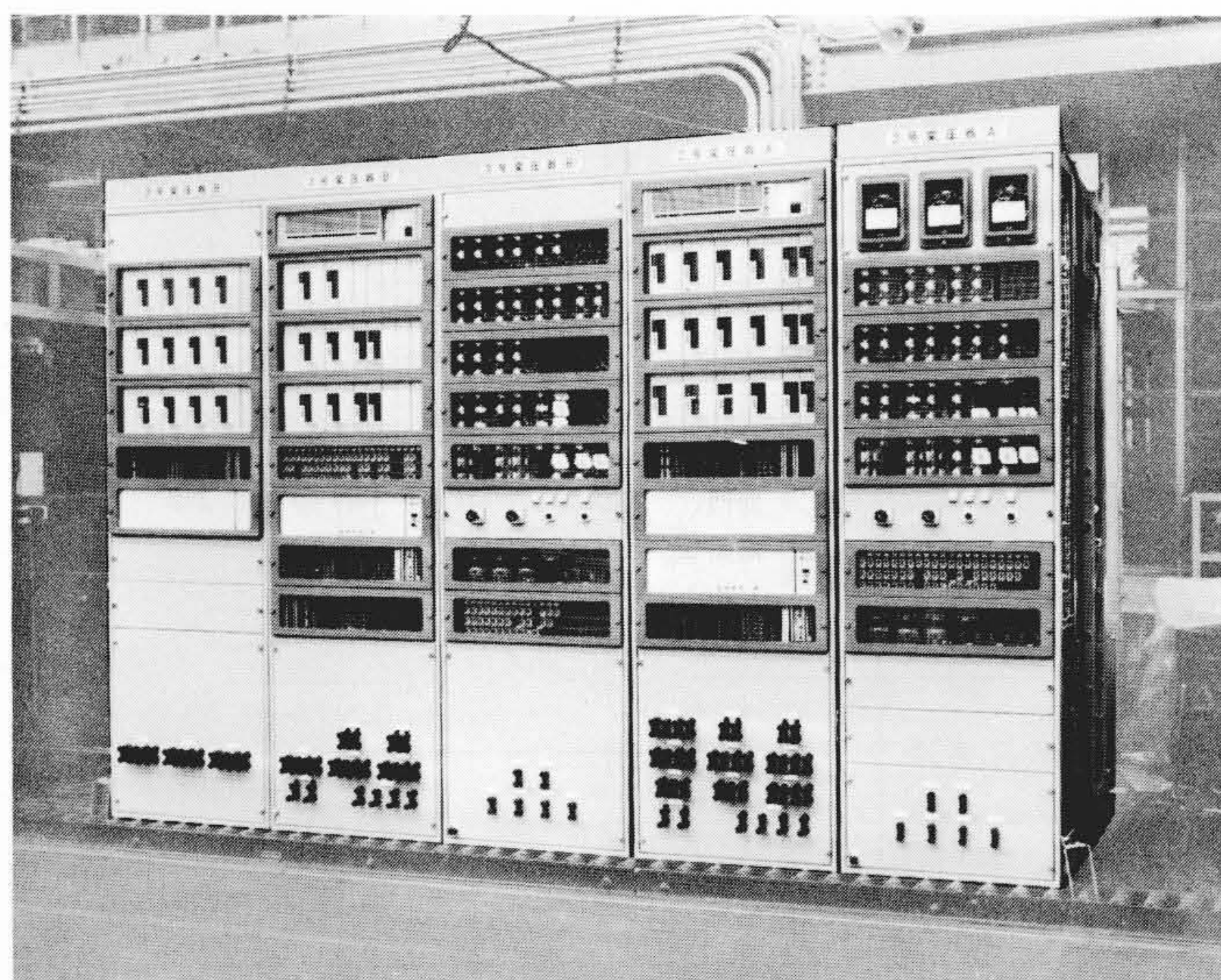
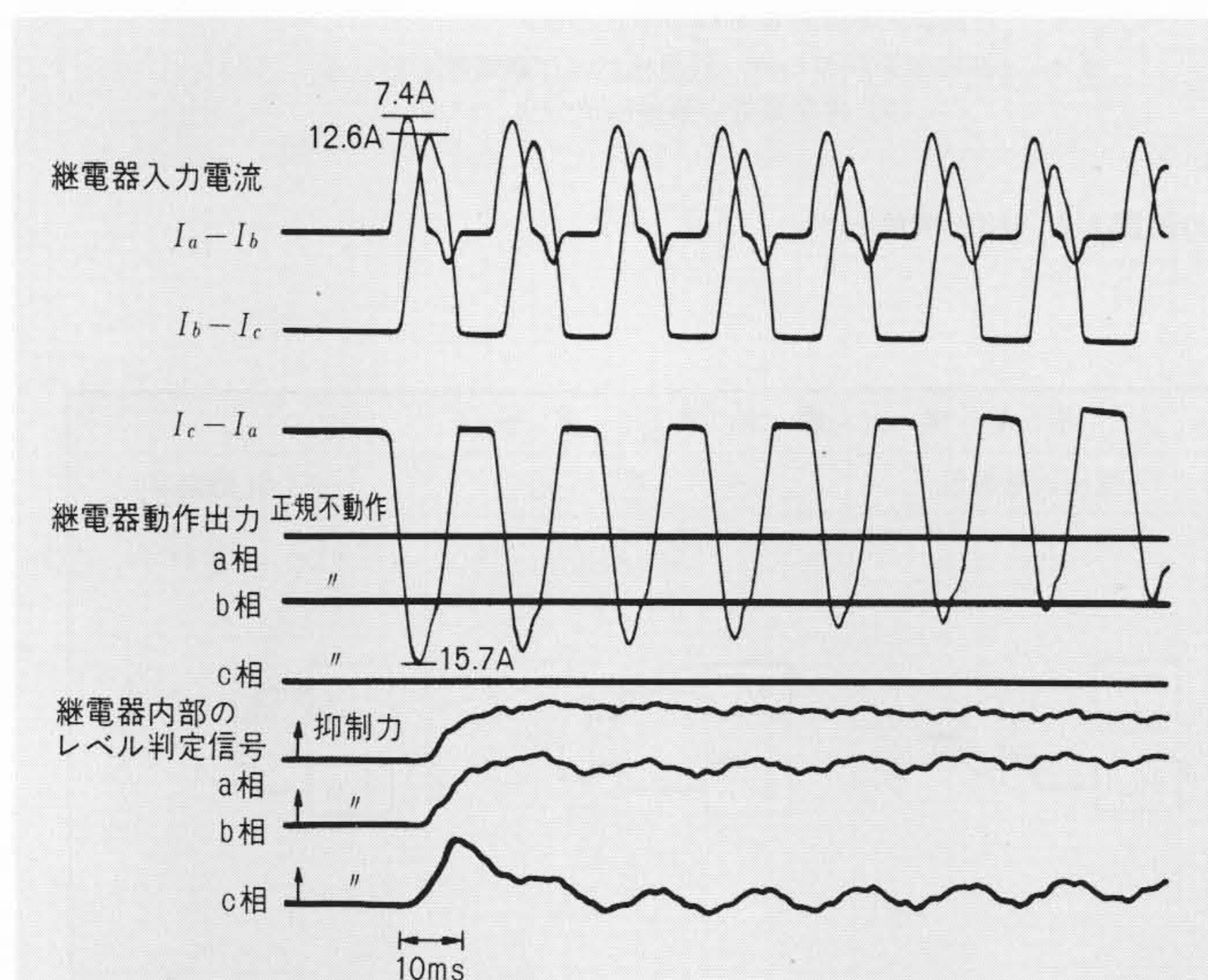


図12 500kV系統用変圧器保護継電装置の外観 主保護継電装置を示したもので、保護システムの二重化、二系列化、それに自動監視方式を採用した。



注：略語説明，その他

1. I_a, I_b, I_c は継電器入力電流a相，b相，及びc相を示す。
2. 電流値はピーク値を示す。
3. 変圧器定格電流3.8A(継電器入力換算)
4. 第2高調波含有率(2サイクル目まで)
 $I_a - I_b$ 57%
 $I_b - I_c$ 29%
 $I_c - I_a$ 15%
5. 整定比率 HDF各相独立 10%

図13 励磁突入電流試験のオシログラム例 154/77kV150MVA変圧器を対象に、実系統での応動試験の結果、正規不動作の判定を得た。

さかった例を示す。同図では、供試継電器の第2高調波検出比率を各相独立で10%にして正規判定した例である。なお、三相入力信号を平均化した高調波抑制方式についても、同時に試験を行なったが十分な抑制力が得られることを確認した。

5.2 変圧器内部事故模擬試験結果

500kV変圧器保護継電装置の内部事故に対する動作試験を模擬変圧器を用いて行なった。図14に、内部事故のうちでも高感度の検出が要求される負荷時電圧調整器の励磁巻線短絡事故に対する応動例を示す。同図で、特に三次巻線電流 $I_{Ka} \sim$

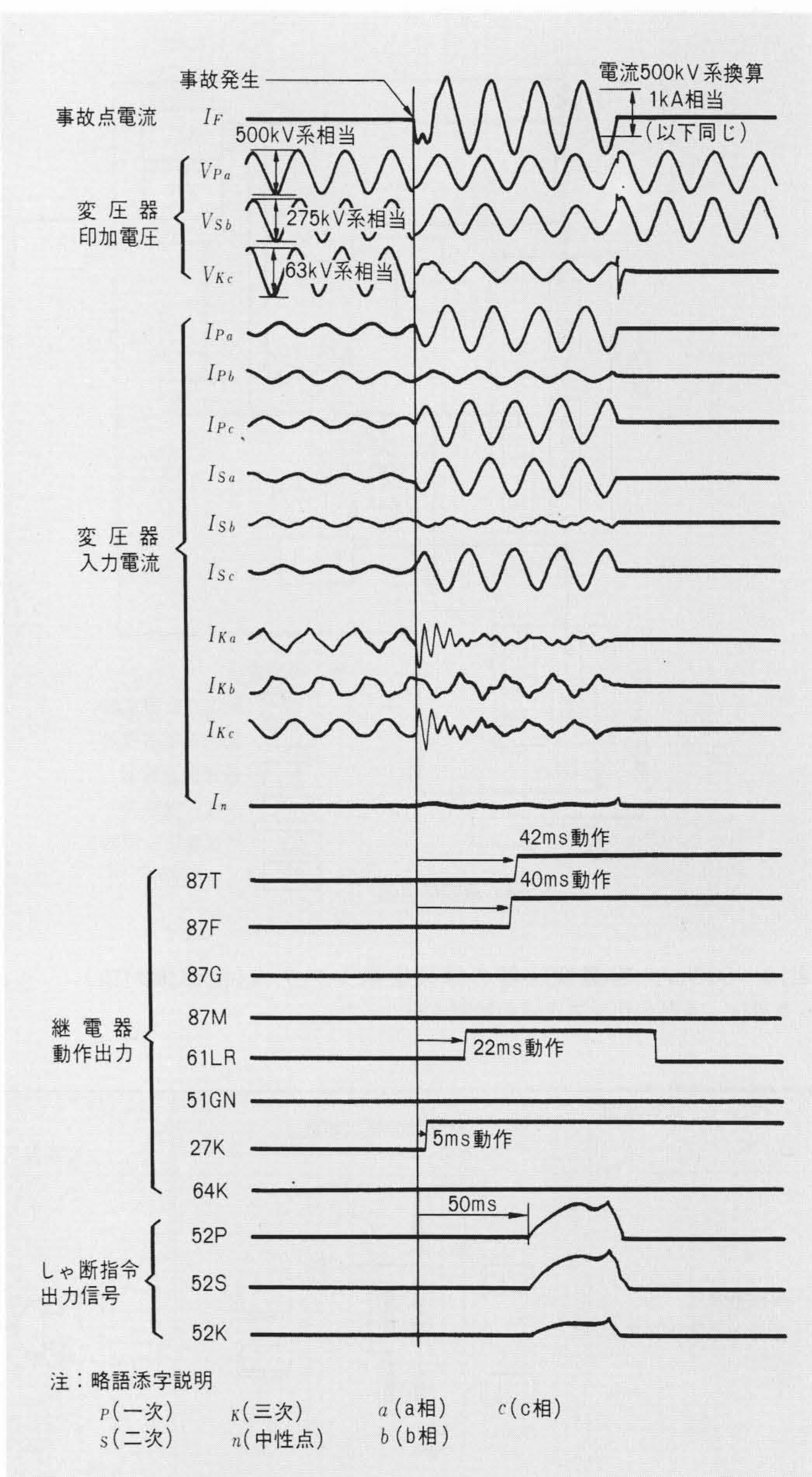


図14 模擬変圧器による内部事故検出試験オシログラム 500kV 1,000MVA変圧器のLVRの励磁巻線短絡事故の模擬試験の結果、デジタルシミュレーションによる判定機能と一致した動作出力を得た。

I_{Kc} は、調相用コンデンサの影響により高調波が重畳しているが、継電器の動作は所期の機能を発揮していることを確認できた。

6 結 言

高調波対策、励磁突入電流の高感度判定機能を付加した新形変圧器保護継電装置の構成、静特性及び過渡特性試験結果について述べた。この論文で述べた継電器は、既に変電所で採用され実運用に入っている。

最後に、この継電装置の開発に当たって種々御協力、御指導をいただいた関係各位に対し、厚く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 瀬尾，外：500kV系統の保護継電方式，日立評論，56，221～226(昭49-3)
- 2) 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，委員会報告No. 177002(昭52-8)