U.D.C. 621.316.925.2:621.311.1.052.4
621.317.312:621.376.3:621.398

FM電流差動キャリヤリレー装置

Current Differential Carrier Relaying Equipment Using Frequency Modulation Technology

杉山　剣* *Sugiyama Tsutomu*
瀬尾一夫** *Seo Kazuo*
野村精志** *Nomura Seiji*
森　茂*** *Mori Shigeru*
酒勾栄三郎**** *Sakou Eizaburô*

超高圧多端子系統用の主保護方式として，周波数変調による波形伝送技術を用いた電流差動キャリヤリレー方式を開発し，約3年間にわたるフィールドテストを経て昭和52年6月から275kV系統で実用化した。

この方式は電力系統での適用上の制約がほとんどないこと，高速・高感度の性能が得られること及び従来の主流である位相比較キャリヤリレー方式と全く同一の伝送回線を使用できることが大きな特長である。

この論文では，開発の動機，方式の概要，伝送路で発生する雑音の検出方法及び実用装置の性能について述べる。

1 緒　言

電力需要の増大に対処するため，拡張強化が進められている超高圧系統の主保護方式は，マイクロ波回線を伝送路として用いた各相位相比較キャリヤリレーが主体である。しかし近年，環境保全や用地の取得難などの社会情勢から，送電線の新設が容易ではなくなってきており，このため，大容量送電線や既設送電線からの分岐による3端子送電線が建設される気運にある。このような系統を保護方式の面から見た場合，内部事故が発生しているにもかかわらず流入電流の一部が流出する現象が生じ，現在採用されているキャリヤリレー方式（位相比較方式，方向比較方式）では原理上及び系統事故検出感度上から，十分に保護しきれない場合が生じてくる。

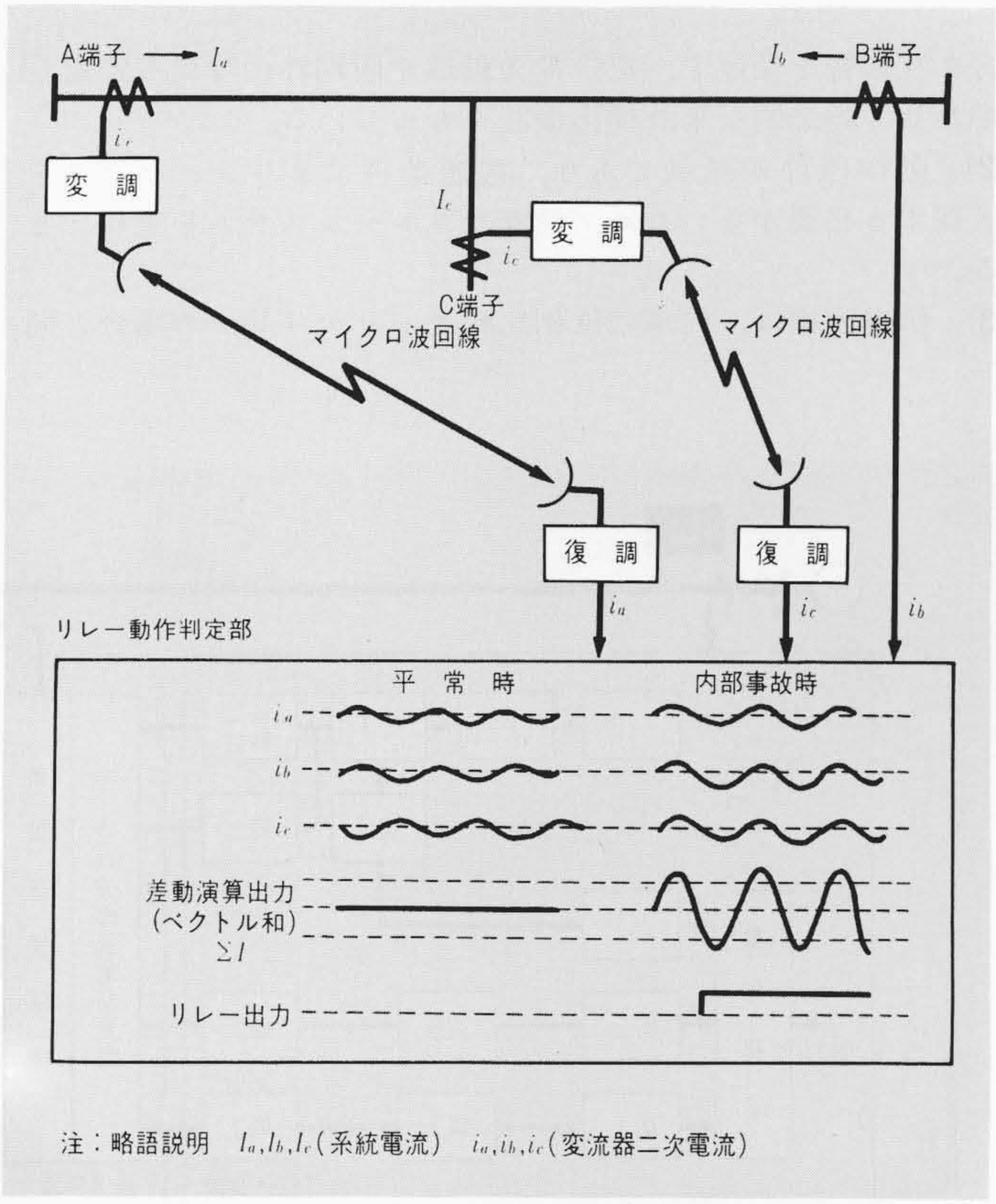
このような問題に対処し，従来方式に代わって適用可能範囲を拡大し，保護性能を向上させるための新しい方式として，周波数変調方式を用いた電流差動キャリヤリレー方式を開発した。この方式は電流差動原理であるので適用範囲が広く，保護性能が優れている特長がある。実用化に当たっての最大の課題は伝送路での雑音対策にあったが，約3年間にわたるフィールドテストによって実用的な方式を開発し，性能が確認されたため，昭和52年6月には50/60Hzの連系線である275kV3端子送電線で最初の実用機の運転開始を行なった。現在までに区間内事故1件，隣接区間外事故7件を経験したが，いずれも良好な応動を示している。これらの実績によりFM電流差動キャリヤリレー2系列から成る実用2号機（昭和55年5月運転開始予定）を製作中であり，今後は位相比較キャリヤリレーに代わる主幹系統用の主力リレー方式として，本格的な実用期に発展するものと期待される。

2 FM電流差動キャリヤリレー方式

2.1 動作原理と特徴

電流差動キャリヤリレー方式の原理は，保護区間にキルヒホッフの第1法則を適用し，各端子での電流ベクトルの総和$\sum I=0$のとき内部事故なし，$\sum I \neq 0$のとき内部事故ありと判定するもので，この原理構成図を**図1**に示す。同図に示すように，系統の平常運転時又は外部事故時は，区間内充電電流に相当した小さな値であるが，内部事故時には各端子電流がほぼ同相となり，ベクトル和電流$\sum I$は事故電流に相当する大きな値となる。したがって，このレベル差を検出して内・外部事故の判定を行なうものである。また，この方式は従来の位相比較キャリヤリレー方式が電流の位相だけを比較しているのに対して，各端子の電流瞬時値を各端子ごとに総合比較判断して，事故の有無を検出する方式であるため下記のような特長をもっており，**表1**に示すように極めて適用範囲の広いリレー方式である。

(1) 差電流の有無により事故判定を行なうので，送電線の端子数に関係なく，また流出電流，負荷電流の通過があっても

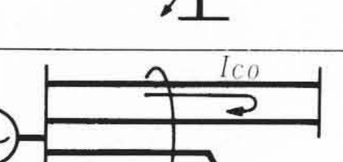
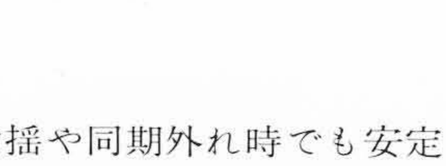
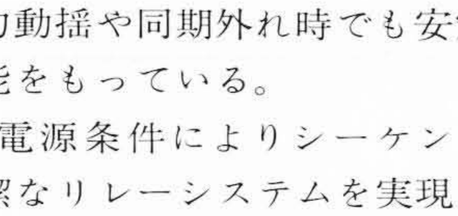
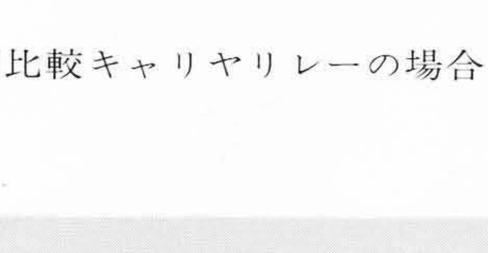


注：略語説明　I_a, I_b, I_c（系統電流）　i_a, i_b, i_c（変流器二次電流）

図1　FM電流差動キャリヤリレーの動作原理　電流波形を周波数変調して，マイクロ波回線により相互に伝送し合い，差動原理により各端子の電流値を総合比較判断して，事故の有無を検出する。

* 中部電力株式会社工務運営部　** 日立製作所大みか工場　*** 日立製作所那珂工場　**** 日立製作所日立研究所

表 I　FM電流差動継電装置の適用効果　超高圧3端子系ほか，広い適用範囲をもっている。

No.	区　分	構成と問題点	FM電流差動継電方式の適用効果			
			背後電源条件の制約(両端可変)	高調波電流	電流流出	充電電流
1	2端子送電線(架空)		◎			
2	同上，長距離重負荷	負荷電流の流出	○		◎	○
3	2端子送電線(ケーブル)	 高調波電流の流入	○	◎		○
4	3端子送電線	 事故電流の流出	○		◎	
5	同上		○		◎	
6	共架多回線		○		◎	

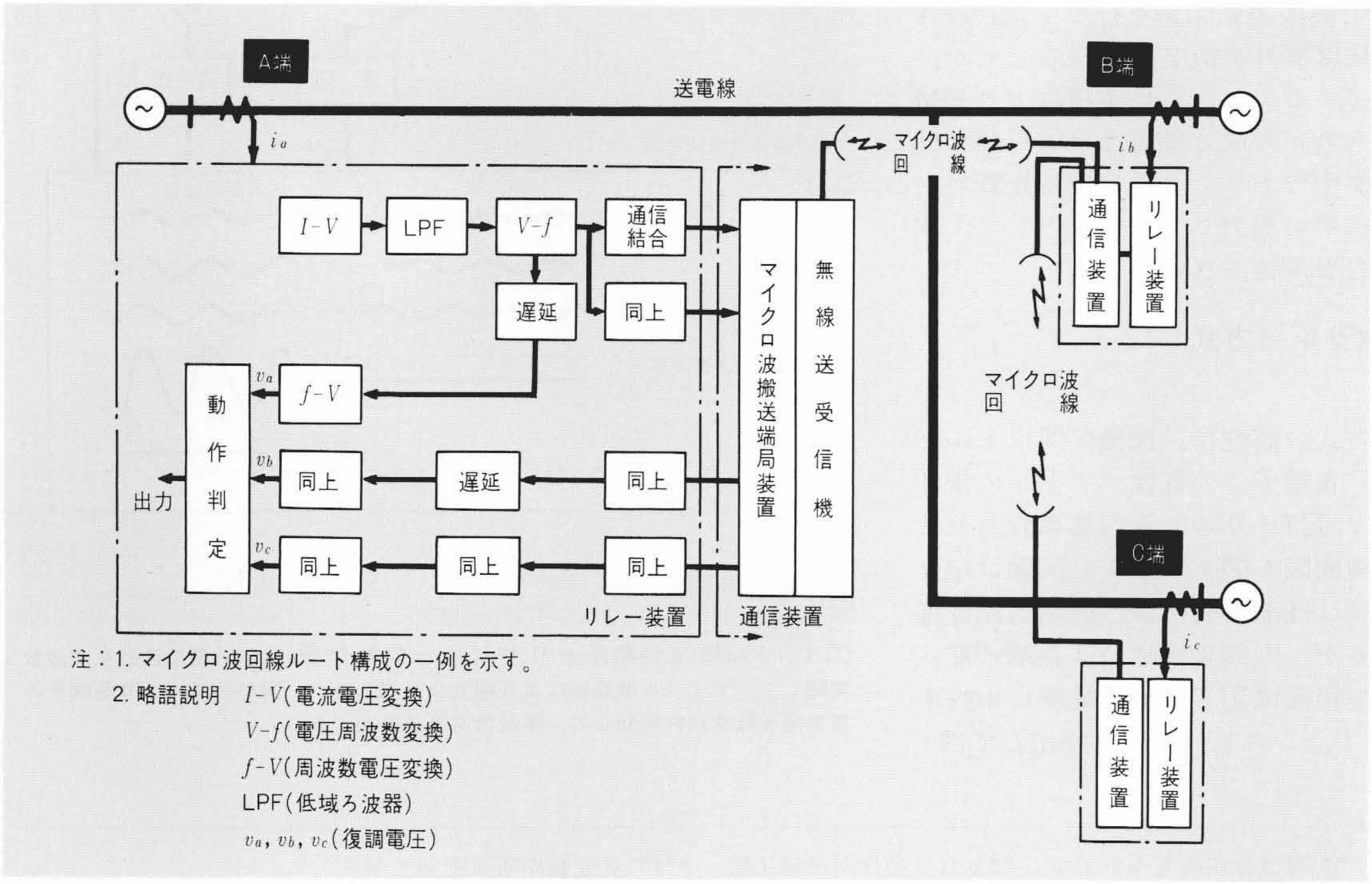
注：◎は適用効果が特に著しい。　○は適用効果あり。

あまり影響を受けず，更に電力動揺や同期外れ時でも安定しており，理想的な事故検出機能をもっている。

(2) 動作原理が単純であり，電源条件によりシーケンスを区別する必要がないため，簡潔なリレーシステムを実現できる。

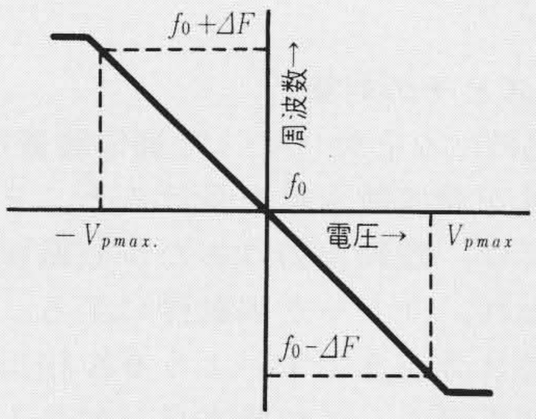
(3) 伝送回線は，従来の位相比較キャリヤリレーの場合と同様，送電線1相当たり音声帯域(0.3～3.4kHz) 1チャネルで十分な特性が得られる。

図2に機能ブロック図を，**図3**に電圧－周波数(V-f)変換特性を示した。通信伝送するFM信号とこれを復調したf-V(周波数－電圧)出力波形との対比は同図(b)に示したとおりである。電流差動特性としては，従来から母線保護リレー方式

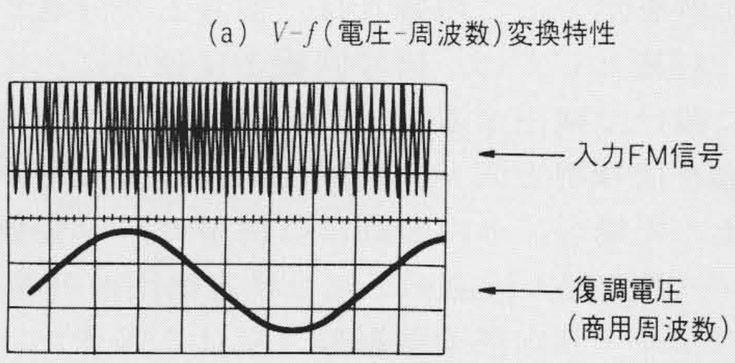


注：1. マイクロ波回線ルート構成の一例を示す。
2. 略語説明　$I-V$(電流電圧変換)
$V-f$(電圧周波数変換)
$f-V$(周波数電圧変換)
LPF(低域ろ波器)
v_a, v_b, v_c(復調電圧)

図2　FM電流差動キャリヤリレーの構成
自端，相手端共に同一特性の遅延部，f-V部を置き，過渡特性の向上を考慮している。



(a)　V-f(電圧-周波数)変換特性



(b)　f-V出力波形

注：略語説明　ΔF(偏移周波数幅)
V_{pmax}〔最大電圧値(入力電流に比例)〕
f_0(中心周波数)

図3　V-f(電圧-周波数)変換特性と出力波形　中心周波数f_0を中心に，入力電圧に比例した周波数に変換する。

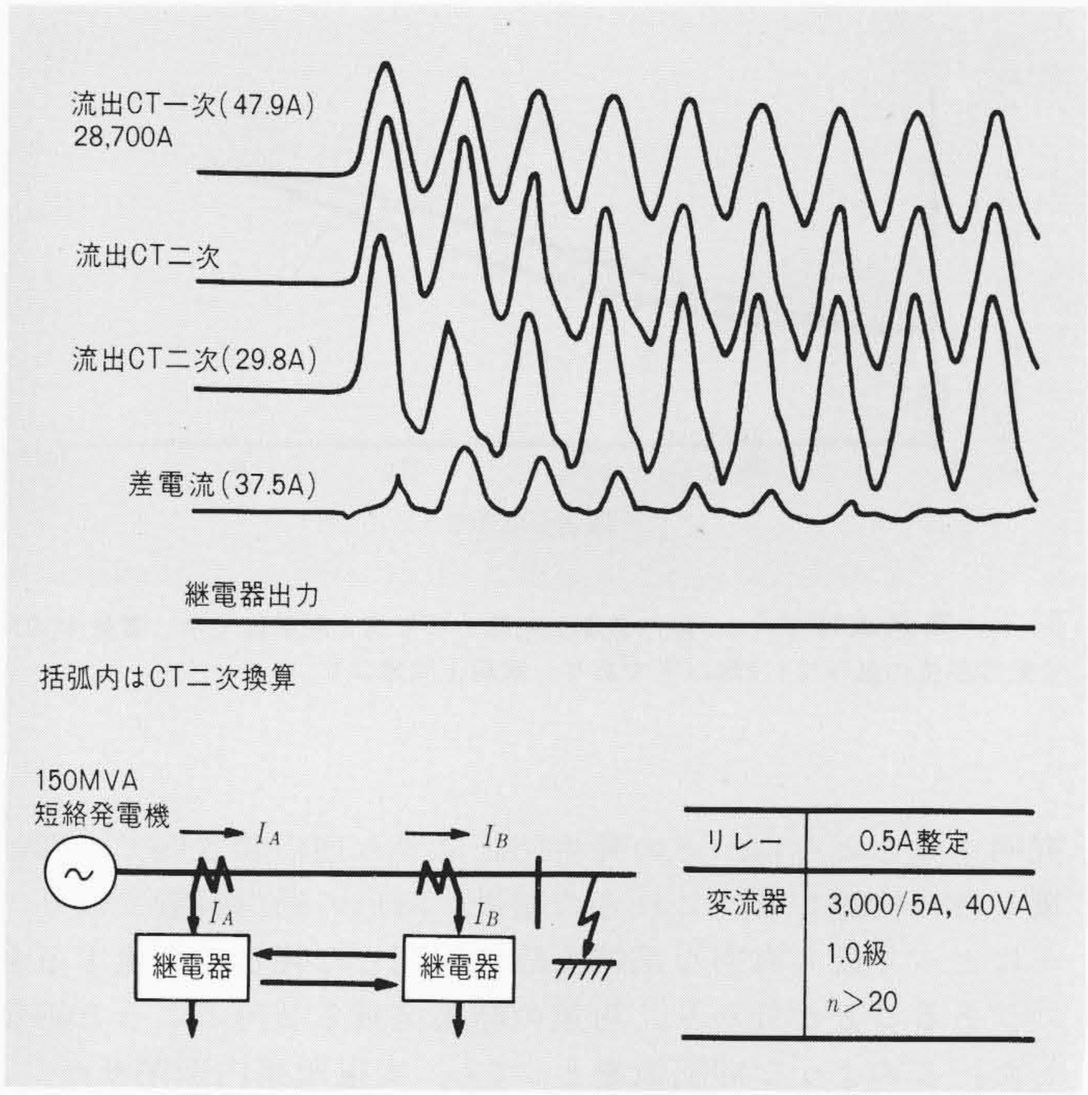


図5　大電流試験結果の一例　大電流領域での抑制効果による誤差対策が，大きな効果を与えている。

で実績のあるスカラー和抑制方式を基本とし，**図4**に示すような比率差動特性としている。**図5**は実際の変流器と組み合わせ大電流試験設備で試験した結果のオシログラム例であって，大電流域での誤差対策が大きな効果を与えていることが分かる。この方式は，変復調部をリレー自身で行なうため，従来方式のように信号伝送装置を外部に設置する必要がない。

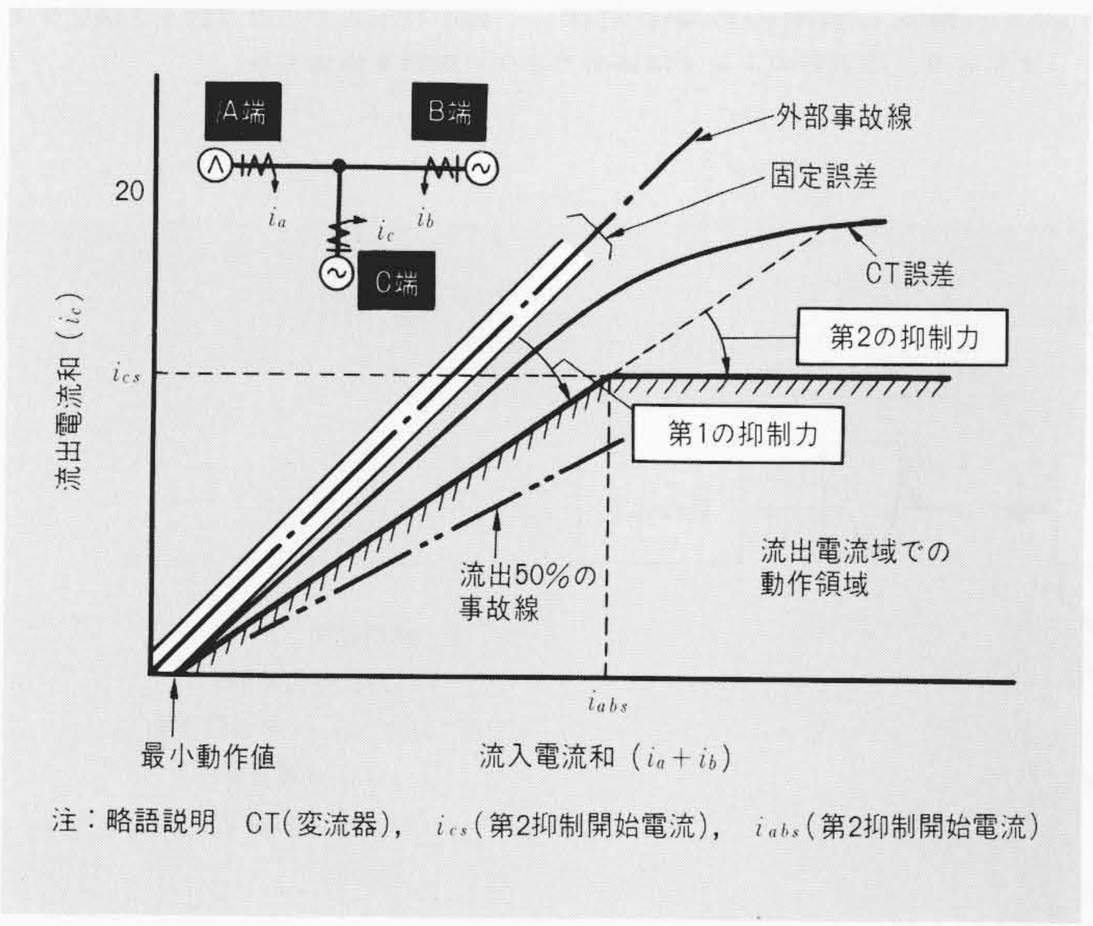
2.2　高調波対策

FM電流差動リレーは，入力部に高調波除去用のフィルタを設けているほか，信号の変復調部が高調波に対して減衰性としてあること，差動原理のため1端子で高調波成分が多く含まれても他端子に基本波成分が多ければ支障がないことから，誤動作，誤不動作共に対高調波性能は高い。**図6**に入力回路から出力回路までの総合した高調波減衰特性を示す。第3調波で47%，第5調波で11%に減衰するため高次高調波による影響は無視してよい。低次高調波に対しては，**図7**に示すように第2調波30%重畳時でも動作感度の低下は基本波だけの場合の1.2倍以下であり，実用上問題はない。

3　伝送路雑音対策

3.1　雑音対策の考え方

フィールドテストでは，伝送路雑音について特に重点を置き，雑音の発生原因，発生パターン，その頻度などについて



注：略語説明　CT(変流器)，i_{cs}(第2抑制開始電流)，i_{abs}(第2抑制開始電流)

図4　比率差動特性　低電流域では，抑制力を小さくすることにより流出電流域での動作領域を広げる一方，大電流域では抑制力を大きくして，変流器誤差による誤動作を防止する特性としている。

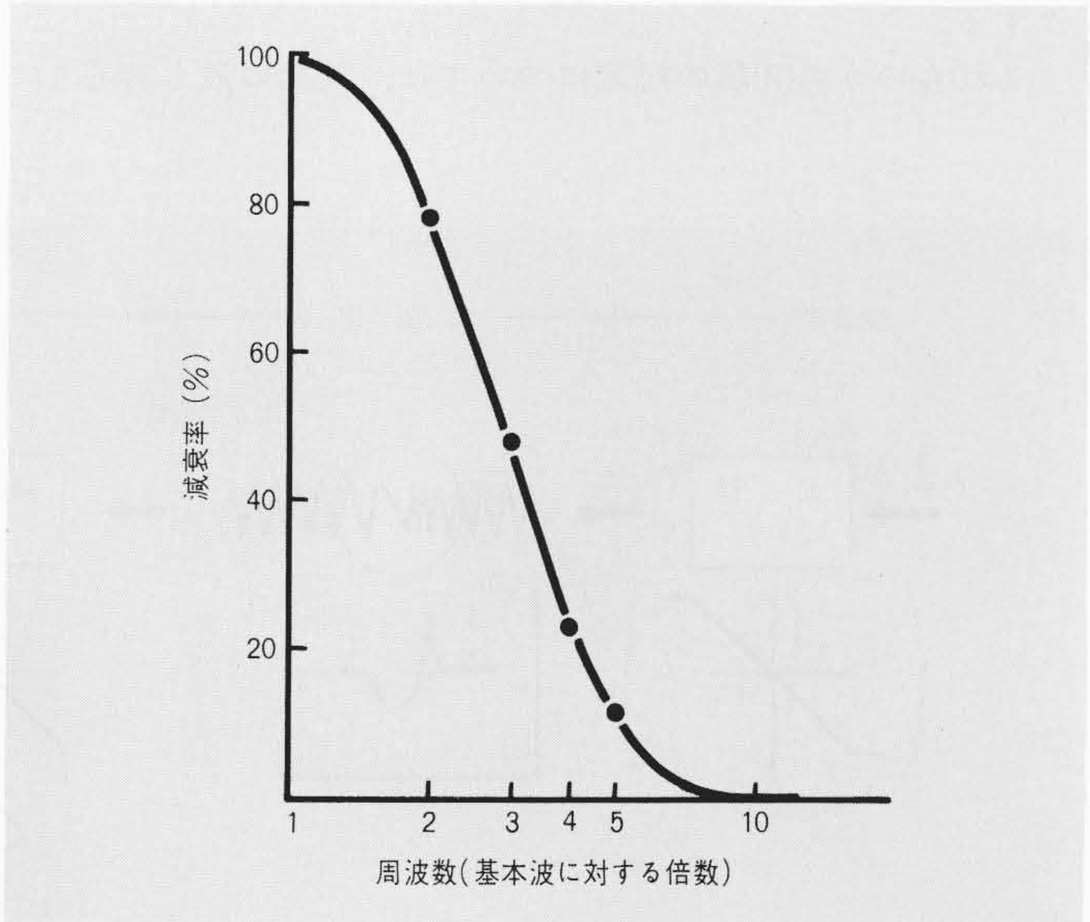


図6　高調波に対する総合減衰特性　入力部フィルタ及び信号の変・復調部の減衰特性により，高次高調波の影響は無視できる。

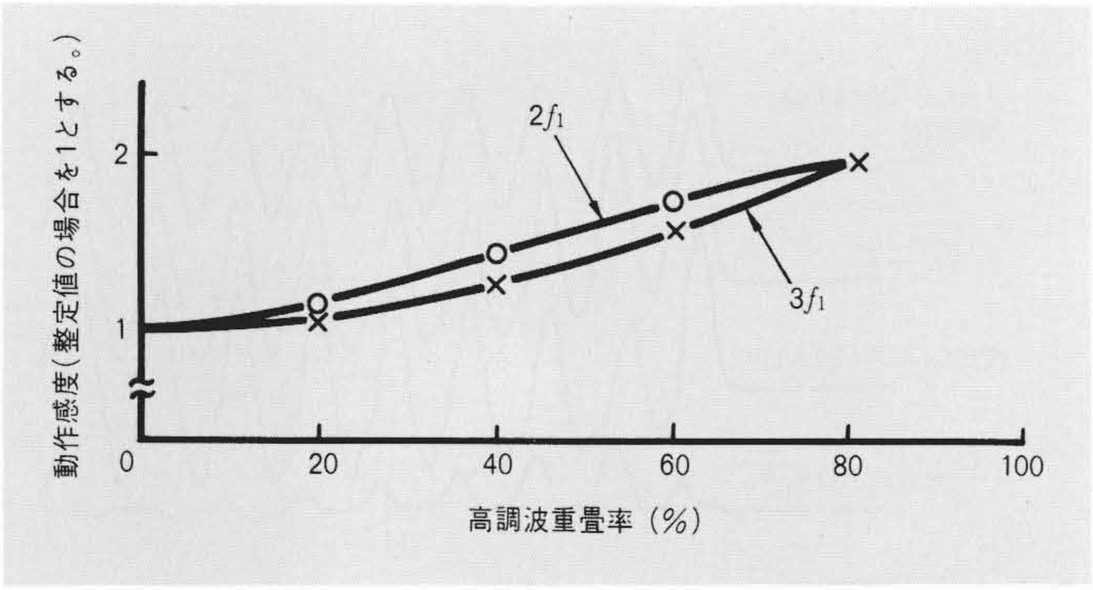


図7　高調波特性　動作感度上問題となる第2高調波では，重畳率30%で動作感度の低下は1.2倍以下であり，実用上問題はない。

究明するとともに，その発生防止につき通信装置側での抑制策も含め検討した。これらの結果，旧形の通信装置ではリレーにとって最も有害な系統事故に同期した雑音を発生するものがあることが分かり，対策の結果消滅させ得ることを確認した。このような抑制策をとっても，変電所構内開閉サージ，無線機切替，フェージングなどによる雑音が発生するため，リレー側では雑音の性質を見極めた上で，これに適合した雑音対策を実施することとし，次のような考え方によることとした。

(1)　伝送路雑音としては単発的な瞬断現象が多い。この場合，$f-V$入力は周波数が低下したと見なすため$f-V$出力には負波信号が現われるが，この程度の軽微な雑音に対しリレーロックを行なわなくても誤動作しないよう，リレー動作判定回路を正波側と負波側のAND方式によることとした。

(2)　リレーを誤動作させる雑音としては周波数変動（以下，FMノイズと略称する。）及び繰返し瞬断の影響が強いため，このような雑音は高速・高精度で検出し，リレー出力を不動作側にロックする。

(3)　FM信号の受信入力端子で，信号レベルに対し雑音レベルを極端に大きくすると，$f-V$出力にこの雑音が脈流分として現われ，リレー動作値の誤差が増大する。したがって，許容誤差範囲を越えるような雑音を検出し，リレー出力をロックする。

これらのうち(2)項の対策については，開発に最も苦心した点であり，雑音対策の特長であるため以下に具体的に説明する。

3.2　FMノイズとその対策

通信装置の過渡的な応動(例えば，通信装置電源電圧の急変)によりFM信号が周波数変動を受けると，その変動周期及び大きさによっては，差動出力にあたかも系統内部事故時と同様の波形が現われ，リレーが誤動作に至る。**図8**にこの様相を示す。同図では分かりやすいよう0A相当の信号に周波数変動が生じた例を示す。この雑音は，信号との分離が不可能であるので，対策としては，信号回線とは独立にパイロット回線を専用に設けて検出する。この回線で一定の周波数を送信し，受信部を信号用と同一の構成とすれば，伝送系でFMノイズが発生した場合，その変動は監視用の$f-V$変換部で検出でき，リレー判定部と協調のとれた雑音検出が可能となる。この方式は，リレー判定部が悪影響を受ける雑音だけを検出する選択性があり，保護リレーに特に要求される過剰なリレー動作ロックの防止が図れる特長をもつ。

3.3　繰返し瞬断の影響とその対策

瞬断の検出は，周期を測定する方法が最も簡単で確実であるが，FM信号は時々刻々に周期が異なるため，瞬断検出設定

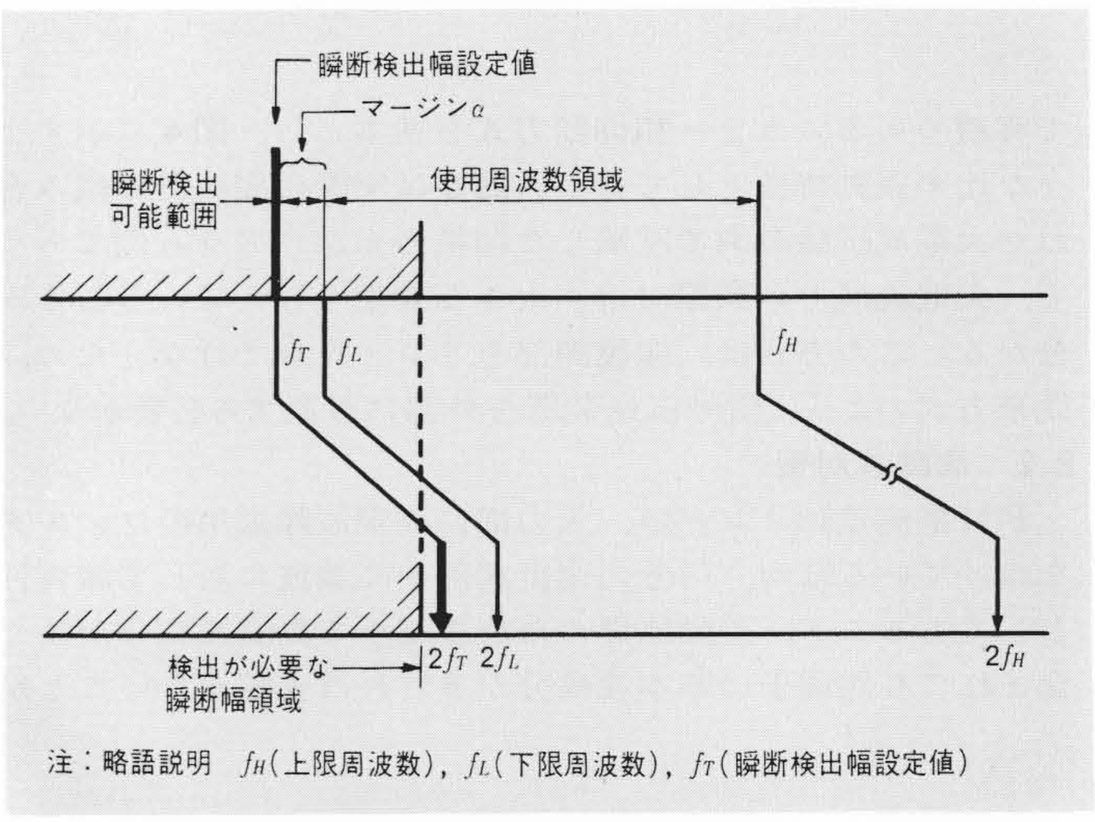


図9　繰返し瞬断の影響と対策　瞬断検出入力の周波数を2倍にすることにより，原波形のままでは検出できない瞬断を検出する。

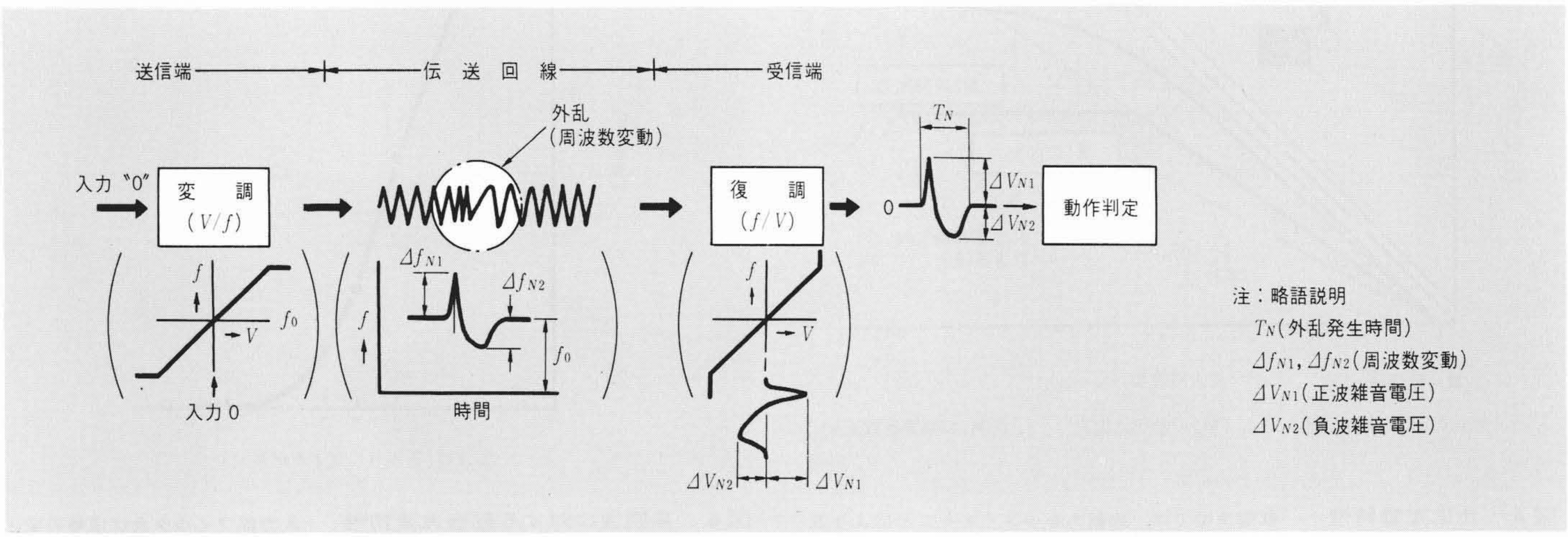


図8　周波数変動の影響　FM信号が周波数変動Δf_{N1}，Δf_{N2}を受けると，f/V(復調)出力に雑音電圧ΔV_{N1}，ΔV_{N2}が生じ，継電器が誤動作するおそれがある。

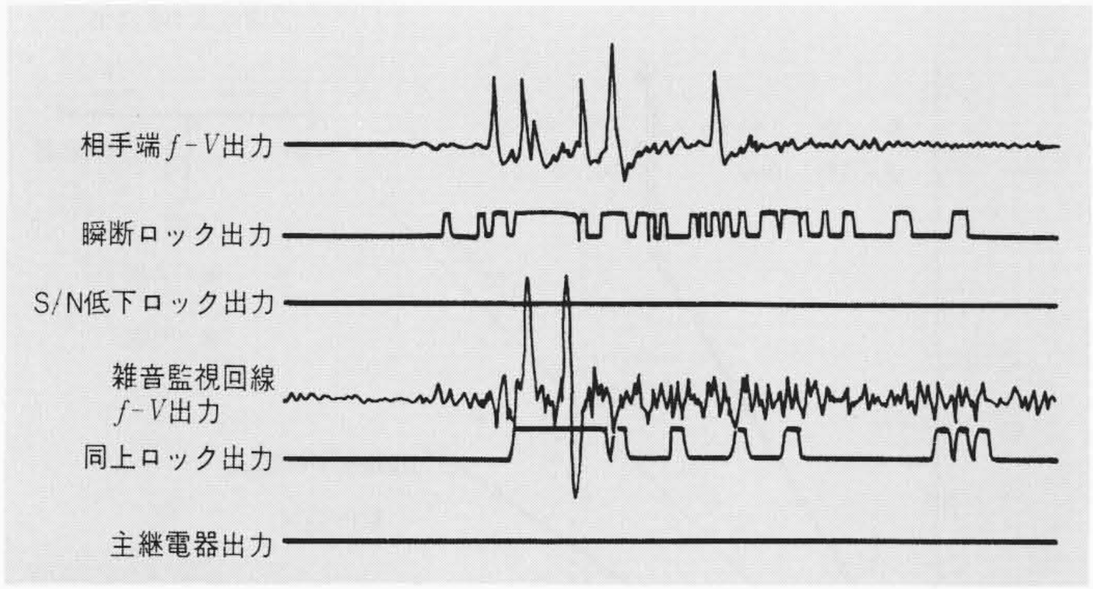


図10　伝送路雑音実測例　瞬断が繰返し生ずるとf/V波形が乱れるが，三つの雑音検出回路が相補って主継電器の誤動作を防止する。

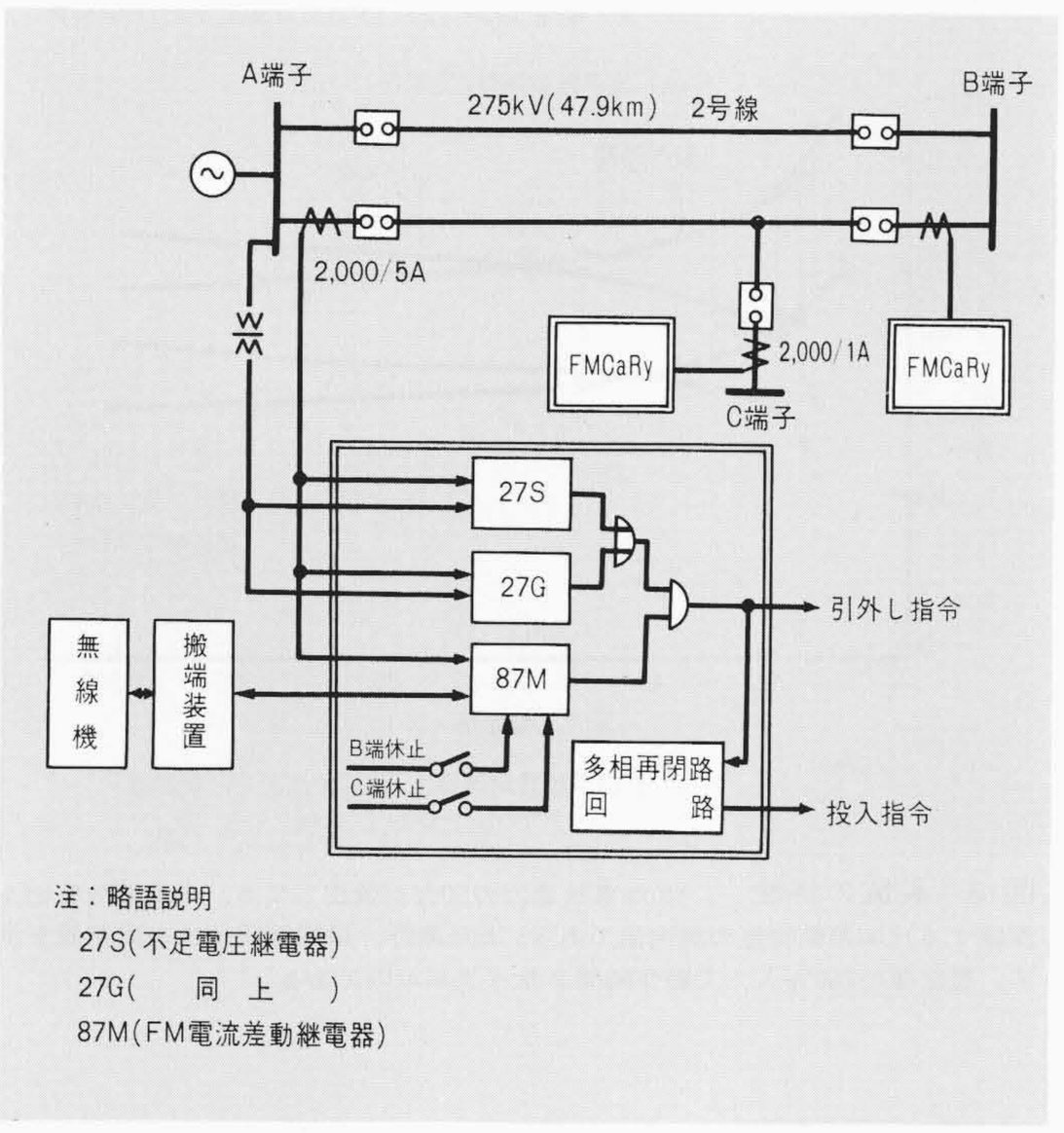


図11　適用系統と装置ブロック図　電流補償付不足電圧継電器(27S，27G)を事故検出用として組み合わせている。

値は，**図9**に示す周波数軸上の使用周波数帯域の下限（f_T）以下にしか限定できない。リレーにとって有害な瞬断は，図中の斜線で示すように使用周波数領域まで伸びており，この部分に相当する幅をもつ瞬断が繰返し生ずると，FM信号とビート現象を起こし，周波数変動が生じたように回路が応動し，リレーが誤動作するおそれが生ずる。この対策として開発した方法が，2倍周波検出方式である。この方法は，受信したFM信号を2倍しても，瞬断幅はそのまま据え置かれることに着目したもので，この方法によれば同図に示すように，検出すべき瞬断幅と信号周波数とは分離され，瞬断検出幅の設定限界を向上させることが可能となり，周波数急変を生じさせるような瞬断を確実に検出することができる。**図10**はフィールドで観測された繰返し瞬断時のオシログラム例であり，各機能が目標どおり動作していることを示している。

4　実用装置の性能

実用化1号機は50/60Hzの連系線である275kV 3端子系の大容量送電線及び3端子送電線の保護が可能な仕様としている。

表2　FM電流差動キャリヤリレー装置の仕様

項　　目	仕　　様
定　　格	1A又は5A（50Hz及び60Hz）
直　線　性	比率特性の比例部分最大値/最小動作値＝10倍
整　　定	1A：0.1　0.14　0.2　0.28　0.4A 5A：0.5　0.7　1.0　1.4　2.0A
動　作　時　間	最小動作値の200%入力で2サイクル以内 （伝送路遅延時間4msを含みリレー装置出力端子で）
信号伝送方式	周波数変調方式，中心周波数 f_0＝1.9kHz 最大周波数偏移 Δf_{max}＝1.0kHz
再閉路方式	多相再閉路方式
内部事故時の流出電流所要伝送路（1回線当たり）	流入電流の50%まで保護可能。 音声回線1チャネル/相×3相＋パイロットチャネル1 ＝4チャネル
通信装置とのインタフェース	(1) 送信レベル：＋4～－27dBm (2) 受信レベル：0～－22dBm (3) 受渡しインピーダンス：600Ω±20%平衡 (4) S/N（副搬送波受信レベル/ノイズレベル）：20dB以上
伝送路雑音対策	(1) 各信号回線：2倍周波検出による瞬断検出部及びS/N低下検出部を付加 (2) パイロット回線：3相一括でFMノイズ検出部を付加
装置電源入力	DC 110V（90～140V）

主保護装置として適用した。**図11**に適用系統と実用化1号機のブロック図（A端一相分）を示す。図中の休止端条件は系統運用上からの要求などで3端子から2端子運用に移行しても，リレー動作に支障を生じないようにするためのものである。給電指令により該当する休止端子を手動で設定することにより，f-V変換出力を強制的に0A相当にするとともに，雑音検出出力をロックして休止端側からの外乱が健全端子に悪影響を及ぼさないよう考慮した。また，変流器としゃ断器の間で生ずる盲点事故に対しては，母線保護リレーの動作信号によりV-f変換出力を強制的に0A相当とすることにより相手端に動作力を発生させ，自動引外しを行なうようにした。**表2**に装置仕様を，**図12**に装置の外観（1端子分）を示す。また，**図13**(a)は比率差動特性の実測結果を，又同図(b)は動作，復帰時間特性を示すものであり，いずれも仕様を十分に満足している。この装置は昭和52年6月の営業運転開始以後極めて好調であり，区間内事故1件，区間外事故7件に対していずれも好結果を得ている。**図14**は内部一線地絡の実事故に対するリレーの応動オシログラムであり，動作時間はしゃ断器を含め3サイクルであった。**表3**に隣接区間外部事故の詳細と応動結果を示す。この成果を踏まえ，現在275kV 3端子用の実用2号機を製作中であり，昭和55年5月運転開始の予定である。

5　結　　言

以上，今後の超高圧系統で発生する保護上の諸問題に対処できる保護方式として，波形伝送技術を用いFM電流差動キャリヤリレー方式の開発とその実用化について述べた。この方式は，

(1)　電力系統での適用上の制限がほとんどない。
(2)　装置が簡潔でかつ高速・高精度の性能が得られる。
(3)　使用伝送路は，従来から用いられている位相比較キャリヤリレー方式と全く同一の周波数帯域と品質でよい。

ことが大きな特長である。また，適用上の問題点とされた伝送路雑音も，長期間にわたる調査と試験によってリレー装置へ及ぼす影響が明確となり，保護方式と協調のとれた雑音検

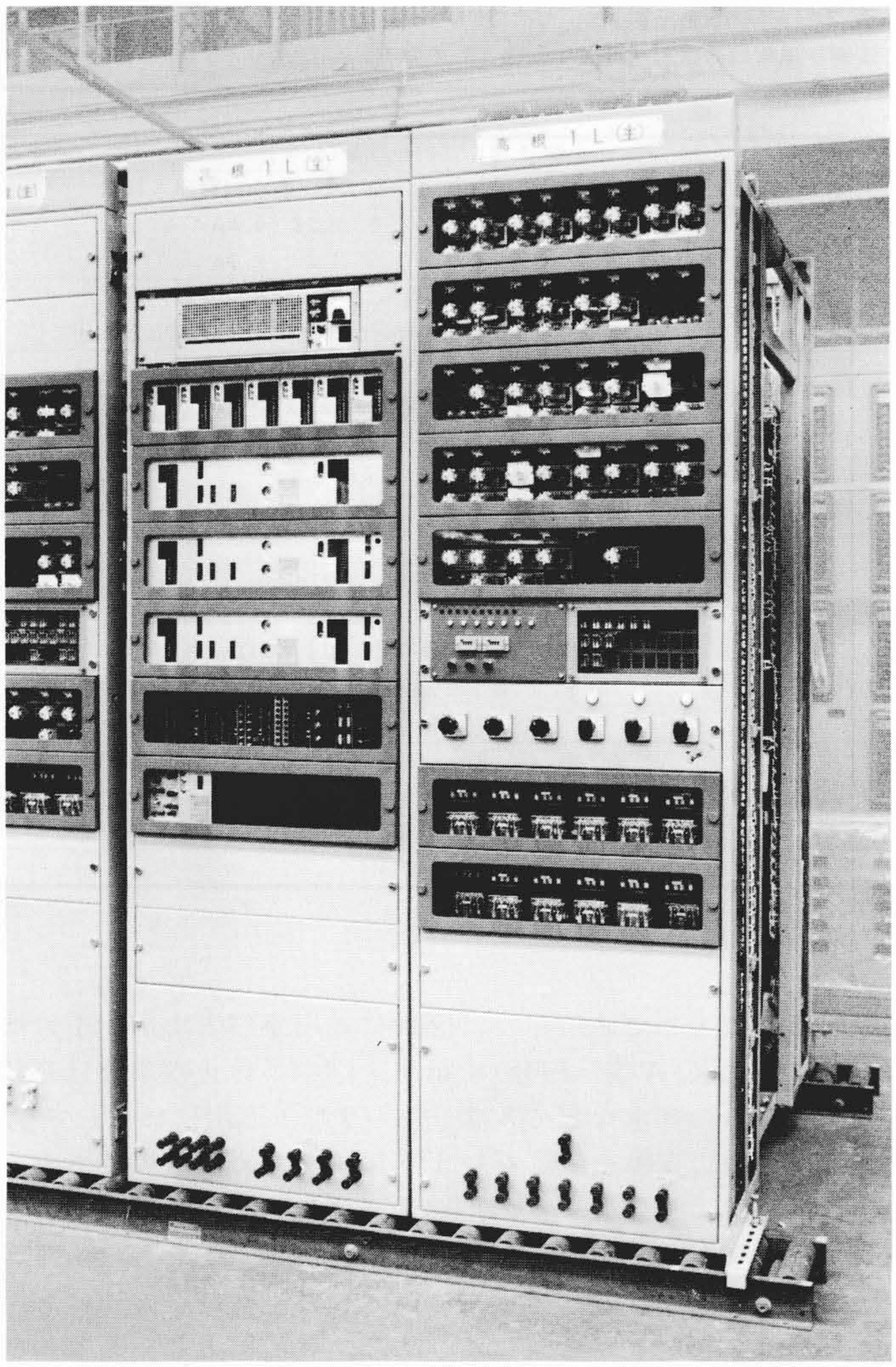


図12　実用化1号機の外観　主リレー(FMリレー)は1段一相で構成しており，単体特性試験に便利なように，電流-周波数変換試験器を具備させている。

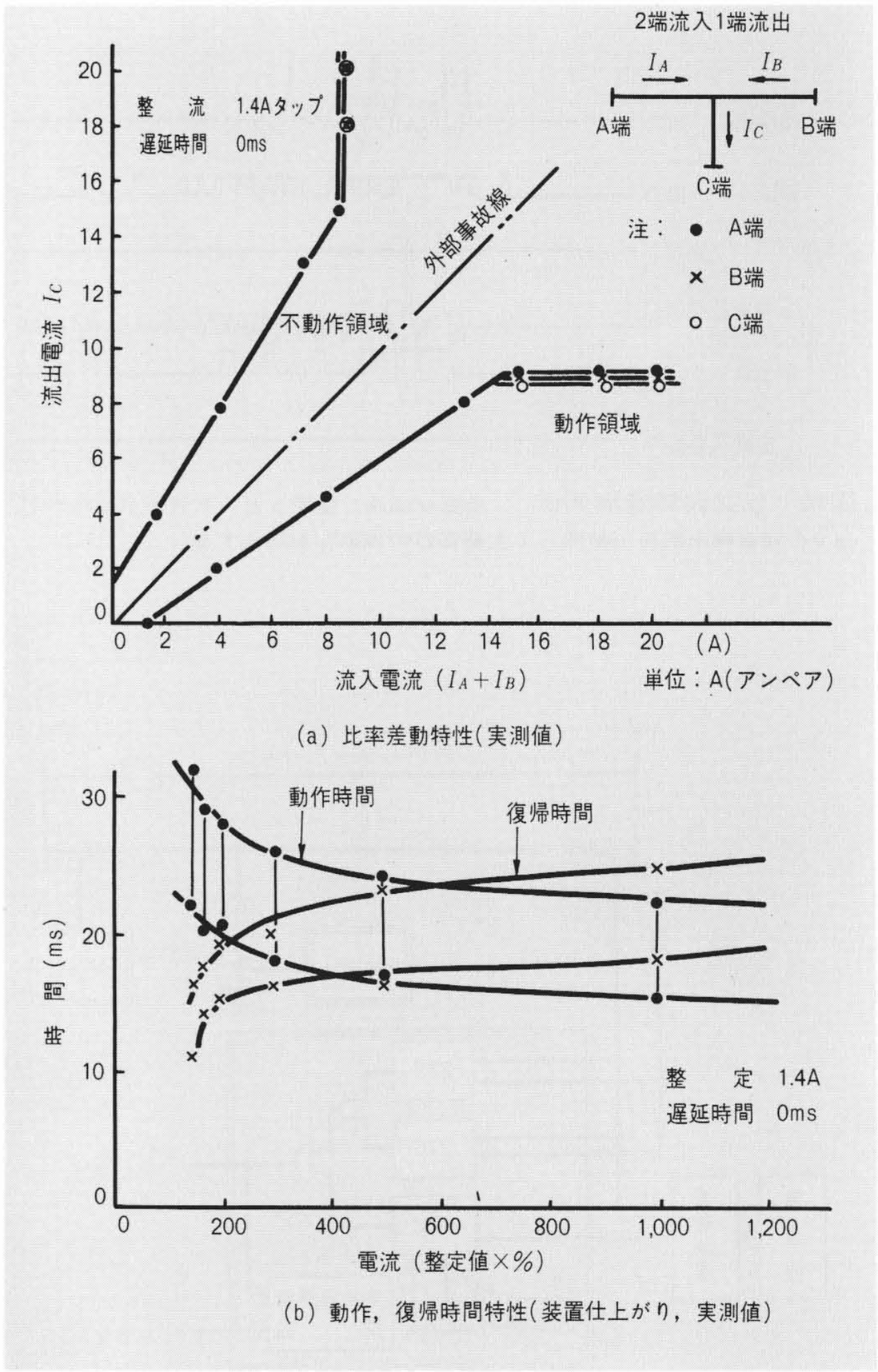


図13　装置の特性　(a)は事故電流の50%が流出しても，内部事故検出を保証する比率差動特性の実測値である。(b)は動作，復帰時間特性の実測値を示す。整定値の200%入力で動作時間2サイクル以内である。

表3　区間外事故時の応動　7件の区間外事故に対し，いずれも正不動作である。

事故種別	発生件数	装置応動結果
一線地絡	5	正不動作
二線地絡	1	同　左
三線地絡	1	同　左

注：(昭和52年6月～昭和54年9月現在)

出方式を確立し，実用化することができた。

以上述べたように，このリレー方式は主保護リレーとして優れた性能をもっており，今後超高圧基幹系統をはじめとする広範囲な系統に適用されていくものと考えている。

終わりに，この装置の開発，実用化に御尽力と御協力をいただいた関係各位に対し，厚く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

1) 大坪，志賀，瀬尾，外：FM差電流キャリヤリレー装置，日立評論，**57**，41～46（昭50-8）
2) 志賀，杉山，野村，外：FM電流差動キャリヤリレー装置，昭和52年電気学会全国大会No. 1441，p. 1948（昭52-7）
3) 森永：移動通信，p. 17，電子通信学会編(昭48-7)
4) マイクロ波技術研究会：マイクロ波通信工学，p. 178，電気通信協会，(昭47-3)
5) 中山：保護継電システム，p. 116，電気書院，(昭49-2)

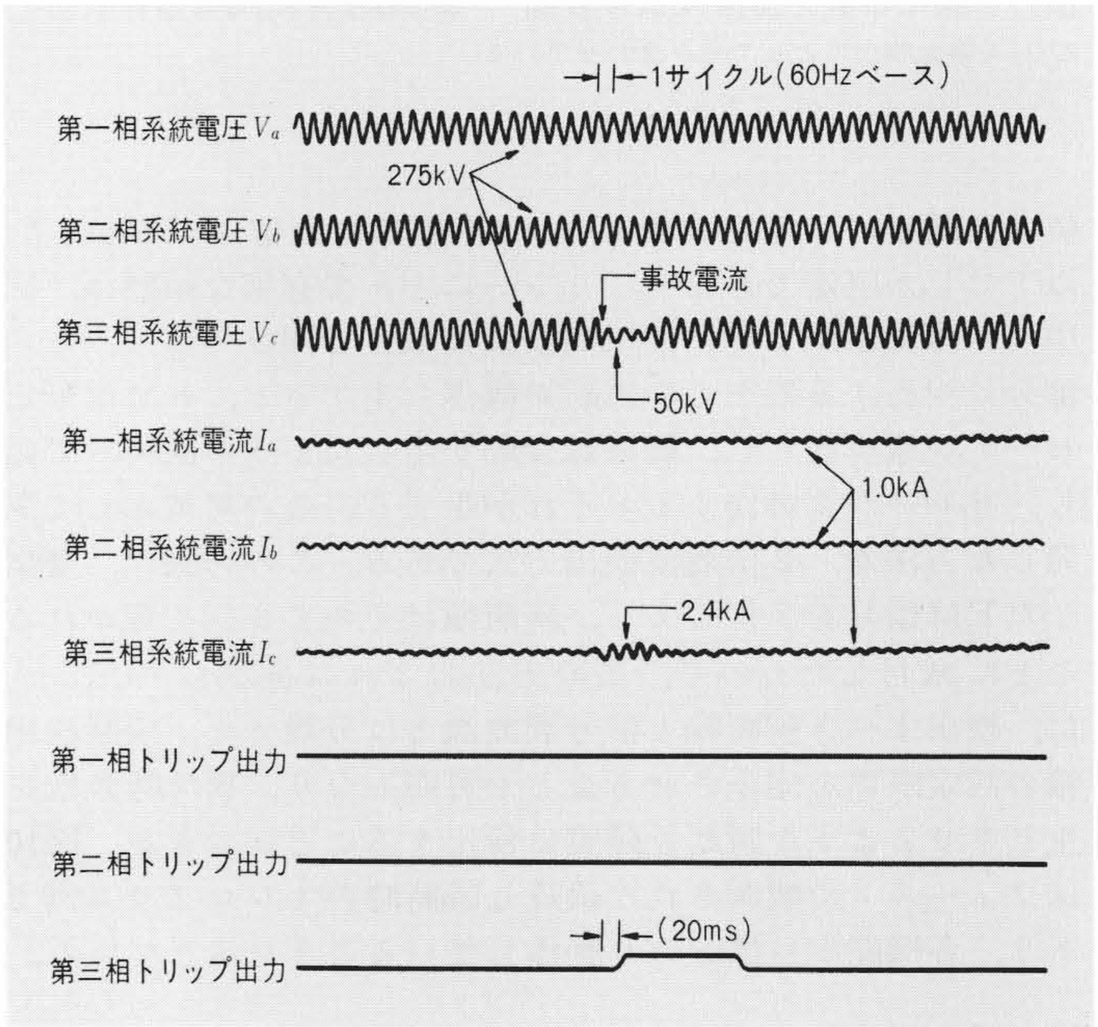


図14　内部事故時の応動例　営業運転系統で発生した内部一線地絡事故に対し，約1サイクルの高速動作の実績を得た。