

トランジスタ継電器の高信頼度化

Progress in Reliability on Transistorized Protective Relays

吉 崎 敦 浩* 拔 山 誠*
Atsuhiko Yoshizaki Makoto Nukiyama
三 木 義 照** 瀬 尾 一 夫***
Yoshiteru Miki Kazuo Seo

要 旨

トランジスタ継電器の信頼度向上について、その考え方を述べ、従来、主として考えられてきた固有信頼度向上のための方法とともに、現用継電器の事故原因分析結果から、使用信頼度向上のための新しい自動監視方式を考案し、その具体例を検討した結果を報告する。

1. 緒 言

保護継電器は過電流継電器に始まり、その動作原理も電磁形から静止形へと、幅広く開発されてきている。これら継電器は、特性面の開発もさることながら、高信頼度化が一貫した主要課題である。特に最近のトランジスタ継電器を主幹系統に適用するに際し、あらためて信頼度に関する諸問題を再検討するに至っている。その結果、常時監視および自動点検を主体とする自動監視方式の採用により、さらに信頼度の向上が期待できる。一方、省力化の効果も加味され、試験の簡略化または自動化の方向にも検討が進められている。

現在、その適用範囲は主幹系統のみでなく、全範囲のリレーシステムにも広がってきており、一部の継電装置に実用化した例もある。

これらの関連については電気協同研究会主幹系統保護施設専門委員会において検討され、現用継電器の問題点と対策の指針が発表されている。また、引き続き自動監視専門委員会においても、現在、検討が進められている。

本稿では、保護継電器を主体に信頼度向上の考え方を述べ、さらに現状の継電器故障の実態を、日立製作所納入品につき調査した結果をもとに、新しい自動監視方式を考案し、各動作原理の継電器への適用の基本体系をまとめた。

2. トランジスタ継電器の信頼度

2.1 信頼度向上の方策

一般に機器の信頼度を論ずる場合、信頼度関数 $R(t)$ を次のように表わして検討している。

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\lambda(t)$: 瞬 時 故 障 率

一般電子部品は、ワイブル分布⁽¹⁾で形状パラメータが1以下の故障率減減形の傾向である。この R の大小は、 λ の大小によっても論じられている。

従来から信頼度向上のために払われた努力は主として λ の減少化であり、メーカーとして当然なすべきことである。これらは製品の固有信頼度向上であり、その成果は後述するように MTBF を著しく増大させている。

しかし主幹系統保護施設専門委員会報告⁽²⁾にも結論されているように、固有信頼度向上のみでは限度があり、あらためて使用状態を考慮した使用信頼度向上策を採用する必要がある。使用信頼度の向上は常時監視または、短周期の自動点検を行ない、 $R(t)$ を改善す

ることにより初めて達成される。

2.2 固有信頼度の向上

保護継電器の固有信頼度向上には、その製造過程において、次のことを考慮する必要がある。

- (1) 部 品 の 選 択
- (2) 回路および定数の決定
- (3) 組込作業の安定化
- (4) 品質管理の手法

これらの問題はすべて、ある基準を設け、それに従って品質が維持されるもので、すでにこれまでの種々の経験、検討の積み重ねのうへに一定の管理を行なっている。トランジスタ継電器開発の初期には前記(2)(3)(4)の管理不じゅうぶんによる製作上の不良の占める割合が大であったが、これらの改善に伴い、絶対値の減少をみたが、比率のうへでは部品不良の示す割合が大きくなる傾向にある。これら部品の不良の発生度合いは温度への依存性が大きく、これに伴って、使用電圧、電流に裕度をもたせ、ディレーティングを考慮した使用基準の設定が高品質を保つ手段として有効となる。

2.3 多重化と信頼度

システム構成については一般に冗長度を加えることによって総合信頼度を向上させることができる。

保護継電器の不良動作は、誤不動作および誤動作の2面がある。誤不動作は事故の除去を遅延させ、系統全体の安定運転をおびやかすものとなり、完全に防止せねばならない。

一方、ある保護範囲を保護する継電装置は保護区間内事故よりも、むしろ保護区間外事故にさらされる機会が多く、したがって誤動作同様完全に防止しなければならない。

図1は実用性を有する範囲において、代表的な構成につき、総合信頼度を求めたものである。図より明らかなように三重化または、四重化を図った場合誤不動作率 P および誤動作率 Q は両者ともに改善することが可能で、多重化により P 、 Q は各単位システムの二乗オーダーで改善することができる⁽³⁾。

2.4 事故例とその解析

表1は日立製作所納入の各種リレーの昭和42年度における過去4年および昭和45年における過去5年に発生した不良の原因別、百分率を示したものである。また各調査時点における MTBF は前者が 10^6 時間オーダーであるのに対し、後者では 10^7 時間オーダーであり、両者の間にはほぼ1けたの改善が見られる。

以上、表1および MTBF の比較から

- (1) 全体的に故障発生率が減少した。
- (2) MTBF の改善には作業不良の減少が大きく貢献している。
- (3) 今後のおもな改善点としては部品不良の減少を図る必要がある。

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

No.	システム構成例	総合信頼度	
		誤不動作率P	誤動作率Q
1	直列二重化方式 A p_1, q_1 B p_2, q_2 AND	$1 - (1 - p_1)(1 - p_2)$ $= p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2$ $\approx 2p$	$q_1 \cdot q_2$ $\approx q^2$
2	並列二重化方式 A p_1, q_1 B p_2, q_2 OR	$p_1 \cdot p_2$ $\approx p^2$	$1 - (1 - q_1)(1 - q_2)$ $= q_1 + q_2 - q_1 \cdot q_2$ $\approx 2q$
3	直並列多重化方式(1) A p_1, q_1 B p_2, q_2 C p_3, q_3 AND OR	$(p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2) \times (p_2 + p_3 - p_2 \cdot p_3) \times (p_3 - p_2 - p_3 \cdot p_1)$ $\approx 8p^3$	$q_1 \cdot q_2 + q_2 \cdot q_3 + q_3 \cdot q_1 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 - q_1 \cdot q_2 \cdot q_3$ $\approx 3q^2$
4	直並列多重化方式(2) A ₁ p_1, q_1 A ₂ p_2, q_2 B ₁ p'_1, q'_1 B ₂ p'_2, q'_2 AND OR	$(p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2) \times (p'_1 + p'_2 - p'_1 \cdot p'_2)$ $\approx 4p^2$	$q_1 \cdot q_2 + q'_1 \cdot q'_2 - q_1 \cdot q_2 \cdot q'_1 \cdot q'_2$ $\approx 2q^2$

注：1. p_n 単位システムの誤不動作率； q_n 単位システムの誤動作率

2. p (q) は p_n, q_n を同一値と仮定した場合

図1 システム冗長度と信頼度

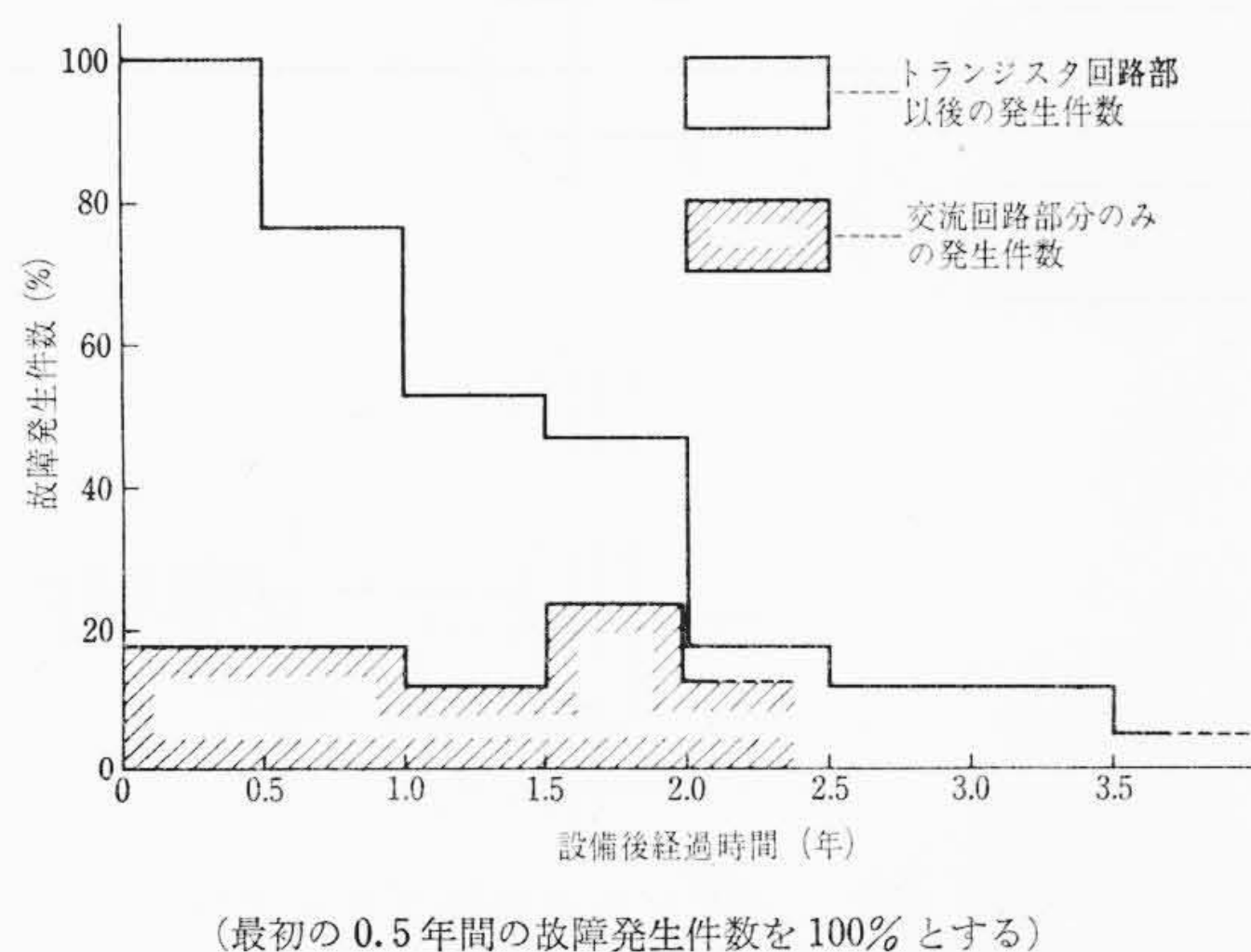


図2 設備後の経過年に対する故障発生件数の推移

特に(3)に関しては部品のスクリーニング、または、高温ふん囲気中での通電状態によるデバッグが有効な手段と考えられる。

一方、これら故障発生は、交流回路部と直流回路部に分けた場合納入後の経過年月とともに、図2のように故障発生傾向に差がみられる。交流回路部は経過年月と関係なく発生しているが反面直流回路部の故障発生件数は、経過年月に従って減少する傾向にあり、3.5年間の故障発生件数の半数以上が1個年以内に発生しその平均は10ヶ月となっている。また、これら故障の発見動機別に分類をしてみると表2の結果となり、故障発生後、比較的早く発見し得た巡視中の発見率は1.5%と非常に少ない。したがって、ほとんどすべての場合が定期点検またはなんらかの不具合動作で発見されている。特に図2の故障発生平均経過時間が10ヶ月である点から、最

表1 原因別故障発生件数の推移

故障発生原因	調査年度	
	故障発生件数 (%)	
	昭和42年調査	昭和45年調査
部品不良	23	55
作業不良	47	27
特性変化	19	13
取扱不良	11	5
計	100	100

表2 故障発見動機別件数

発 見 の 動 機	故 障 発 見 件 数 (％)	
定 期 点 検 中 発 見	48	
不 ぐ あ い 動 作 に よ り 発 見	50.5	52
巡 視 中 に 発 見	1.5	
計	100	

表3 故障種類別発生件数

不良種類	発生件数 (%)
破損不良	90
特性不良	10
計	100

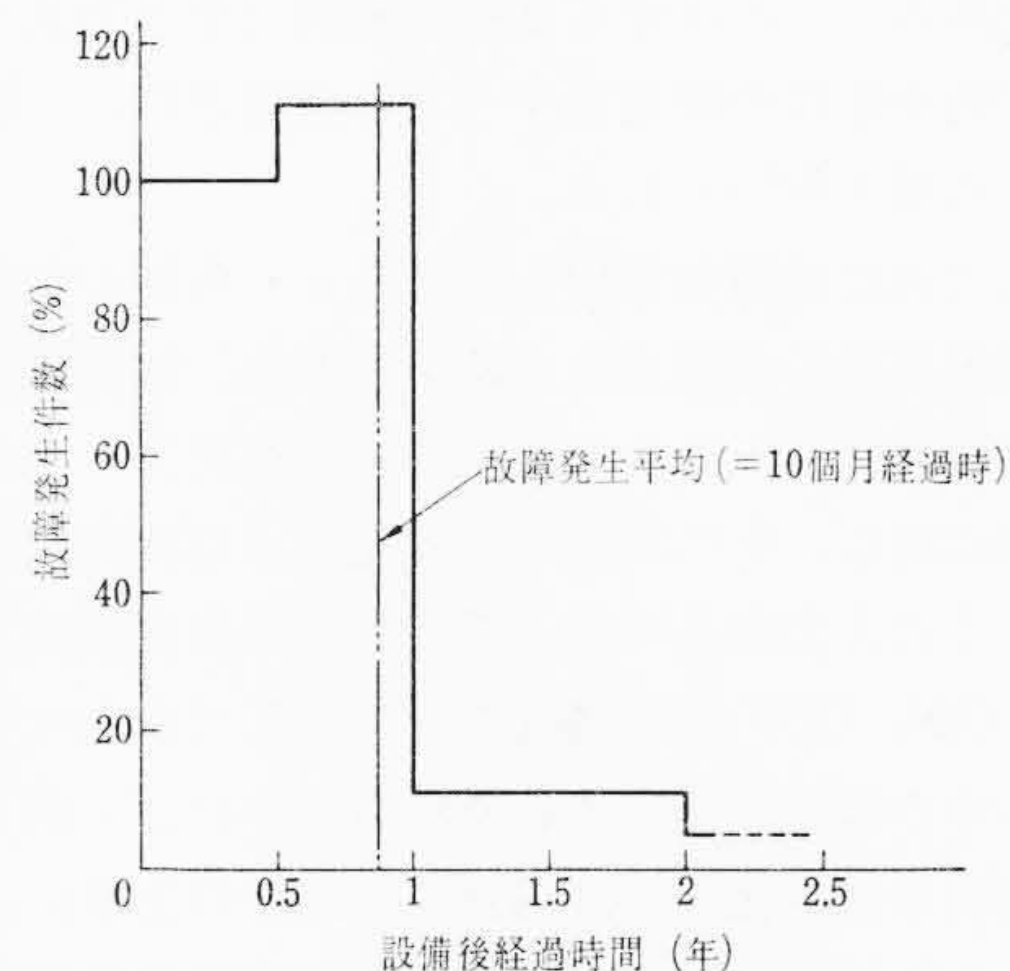


図3 電圧調整継電器の設備後経過年に対する故障発生件数

悪定期点検までの不完全な保護となる時間の短縮には自動監視方式の採用が最も有効であることを示している。また、自動監視の具体的点検内容を方向づけるため前記データをもとに表3のような分類を行なった。この表から誤動作、誤不動作となる破損不良が90%を占め、特性不良は10%に過ぎず、また内容的には軽微な誤差増加で事故までに至らないものである。したがって自動監視を健否チェックのみにとどめても重大事故のほぼ100%に対処できることを示している。

3. 自動監視方式

3.1 使用信頼度向上

自動監視の基本は異常の早期発見であり、その後の処置が直ちになされることが前提で、機器のダウンタイムを極力少なくすることが目的である。現在行なわれている定期検査の間隔が適正か否かを判断するために、負荷時タップ切換器付変圧器に使用される電圧調整継電器を考えてみる。この継電器は不具合が発生した場合、系統電圧に異常をきたすため、自動監視付と全く等価であると考えられる。継電器設置後、経過年に対する故障件数は図3に示すとおり

で、2年間に発生する不良の半数は10ヶ月以内に発生している。さらに表2より不良の48%が定期検査で発見され、またその間隔が1年～2年に1回であることを考え合わせると、ダウンタイムを極力減らすという意味で、故障の早期発見手法を装置に取り付ける必要性を意味している。

一方、前述のとおり、交流回路を含めた点検方式が望ましく、以上を実現する手法として次の2方式が考えられる。

- (1) 常時監視……異常出力を検出する（主として誤動作故障の検出）
- (2) 自動点検……正常動作ができることを確認する（主として誤不動作故障の検出）

これら各方式は複雑にすれば情報量も多く、点検精度も高くなるが、その反面経費の増大、点検信頼度の低下などの相反する面が考えられるので、ある程度の割り切りが必要となる。ここでは2.4で述べたように、定量点検を含めないことを前提とし、以下考え方および具体例をあげる。

3.2 常時監視

常時監視方式は常時の出力により、その機器の状態を判定するため、基本的には図4のように、なんらかの基準量が必要となる。この基準量をどのように考えるかにより次の3方式が考えられる。

- (1) 常時の正常出力が定まっている場合

図5のように期待される出力を基準量と考え、異常出力を検出する方式である。これは最も簡単に構成できる方式で、適用範囲も広く、常時不動作の継電器すべてに適用され、一括して監視する場合などに多く用いられる。

例として方向距離継電器盤を考えると、各相の主保護、後備保護、故障検出要素の各出力をORでまとめ、故障除去時限よりさらに一定時間経過したことを確認して監視出力とする。

- (2) 入力に対し、その出力がある定まった関係にある場合

図6のように入力を基準量と考え、その異常出力を検出する。主として、ON、OFF信号回路などに対して有力な手段であり、シーケンス中の監視に適用される場合が多い。一例としてORシーケンス点検の簡素化があげられる。図7のように三相の主要素の点検を考えた場合、点検の簡素化、点検時間短縮のためには三相を同時に動作させることが望ましい。一方、各要素の個々の出力が正常か、否かは点検できない。この欠点を補うため図7のような方式による監視を併用し、完全な点検とすることができる。

- (3) 同様な動作をすると考える継電器が別にある場合

図8のように、二つの要素の出力の不一致を検出する方式である。この方式は、(2)方式の考え方に類似しており、さらに次の3種類に分類される。

- (a) A継電器とB継電器が同一の場合
- (b) A継電器とB継電器とで一方の動作域が広い場合
- (c) A継電器とB継電器とでは入力または動作原理が異なる場合

(a)は最も理想的な常時監視の形で、完全二重化を行なって出力不一致を検出する方式である。簡単な例として、距離継電器などでは、高速性と安定性を保持するために、正半波の判定出力と負半波の判定出力を用いて判定を行なっている。

この構成は二重化された継電器と同等であり、正負出力の不一致検出による常時監視が可能となる。

(b)は故障検出継電器と主継電器の間で監視する場合に多く用いられ、両者の不一致を検出することにより、異常検出出力とする。この場合、系統の外部事故時、故障検出要素が動作する場合もあり、協調用タイマが必要となる。

(c)の例としては三相の各相継電器のように、入力は異なるが

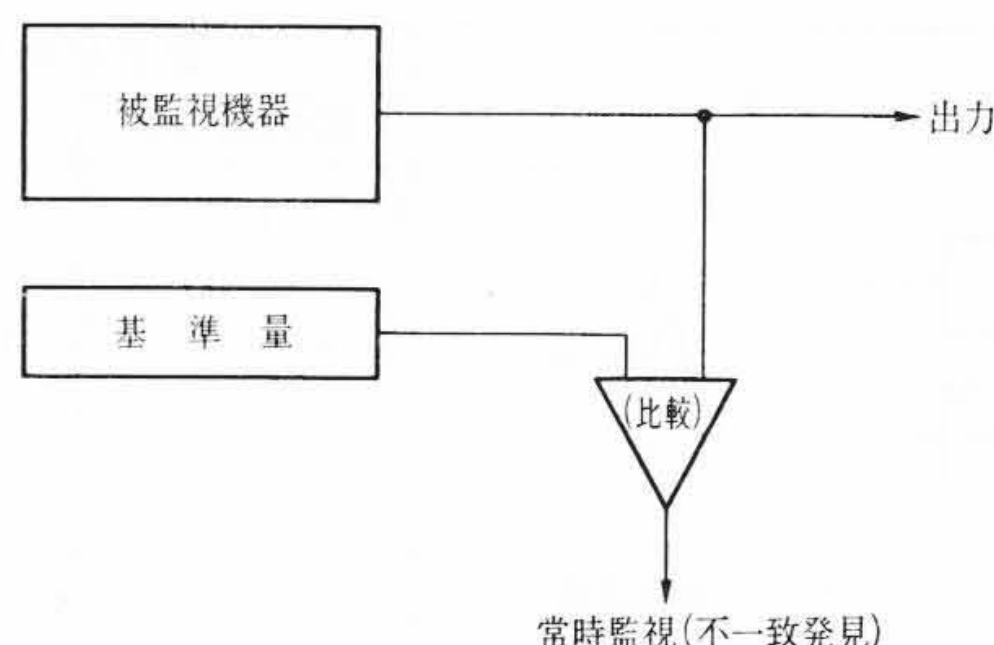


図4 常時監視方式の基本的ブロック図

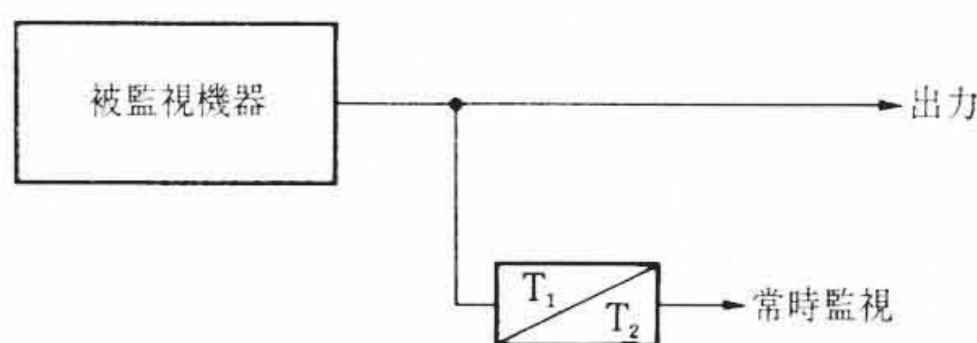


図5 常時の正常出力が定まっている場合の常時監視方式ブロック図

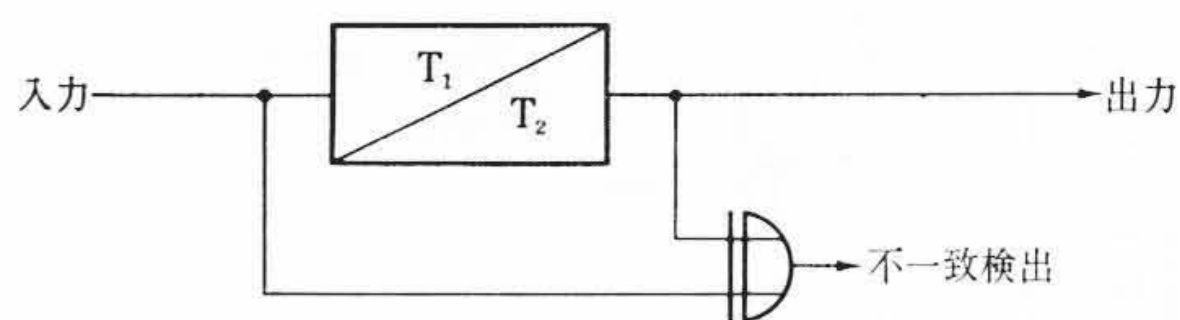


図6 入力に対し、出力がある定まった関係にある場合の常時監視方式ブロック図

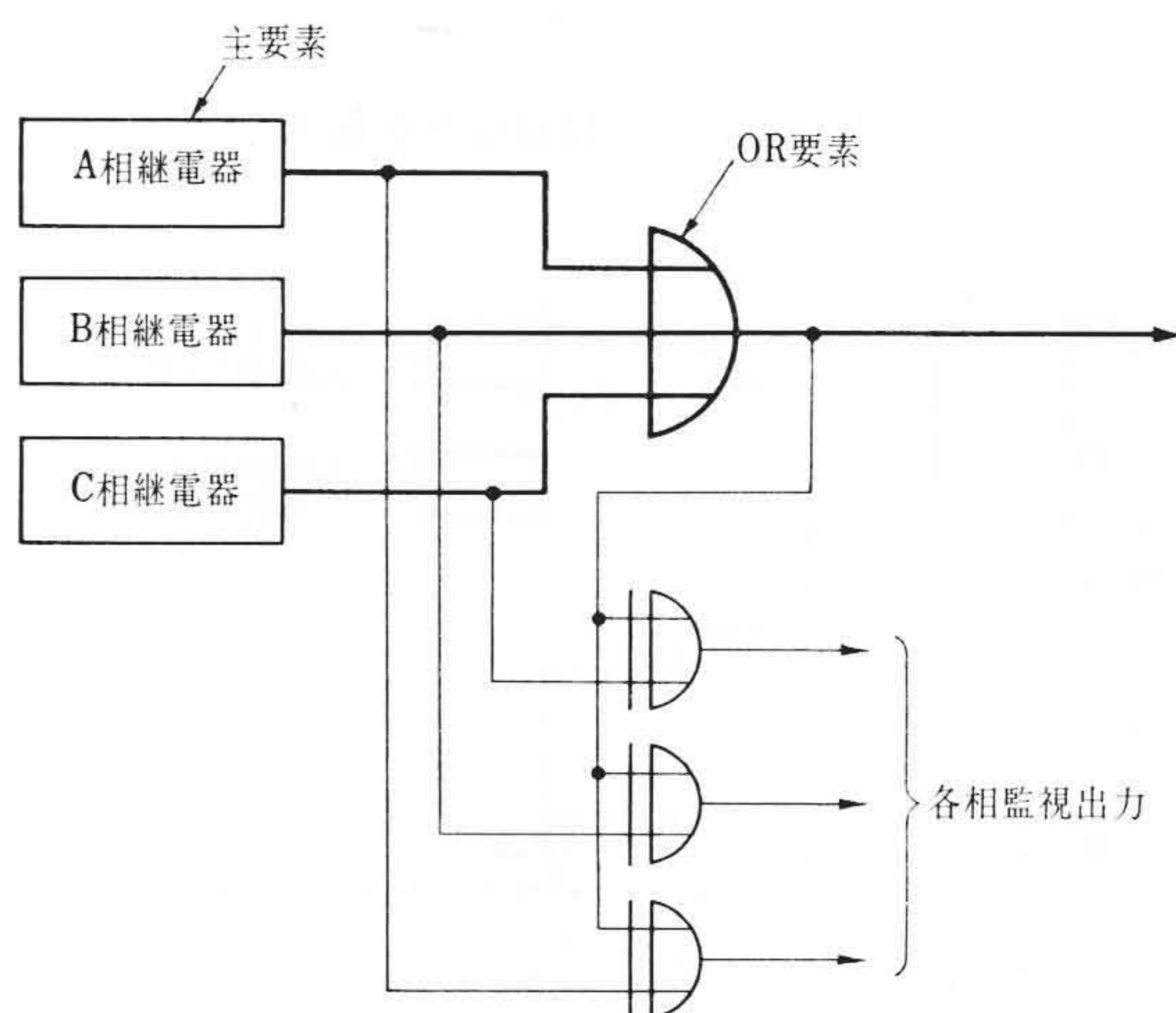


図7 ORシーケンスの点検ブロック図

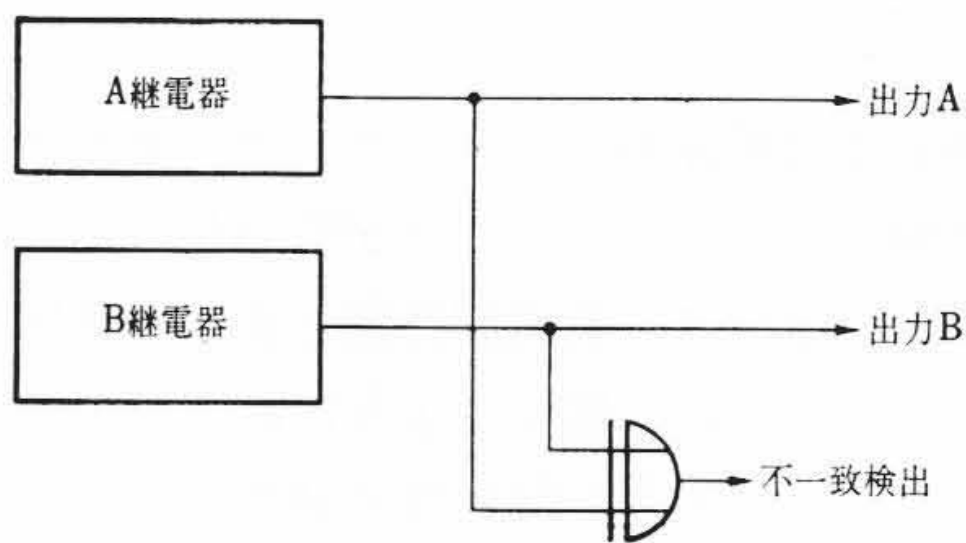


図8 2要素間の常時監視方式ブロック図

常時、三相とも同じ動作が期待できるため用いられる方式であり、内容的には(1)の方式と同様である。

以上の各方式はすでに図9のような、しゃ断器監視、親子PDの電圧バランスの監視、またはDC電源の監視などに適用されている。

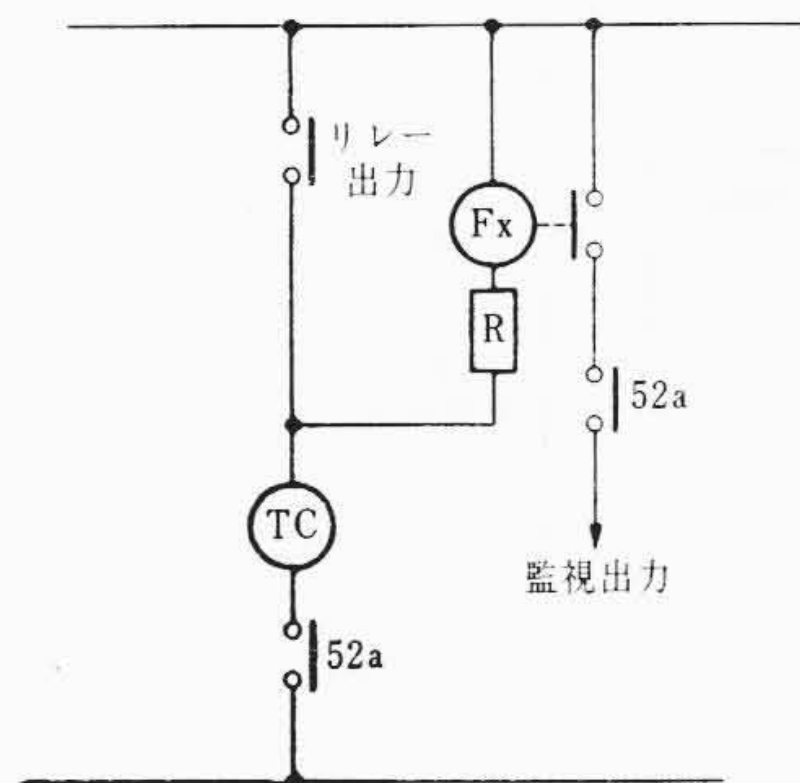


図9 シャ断器の常時監視方式

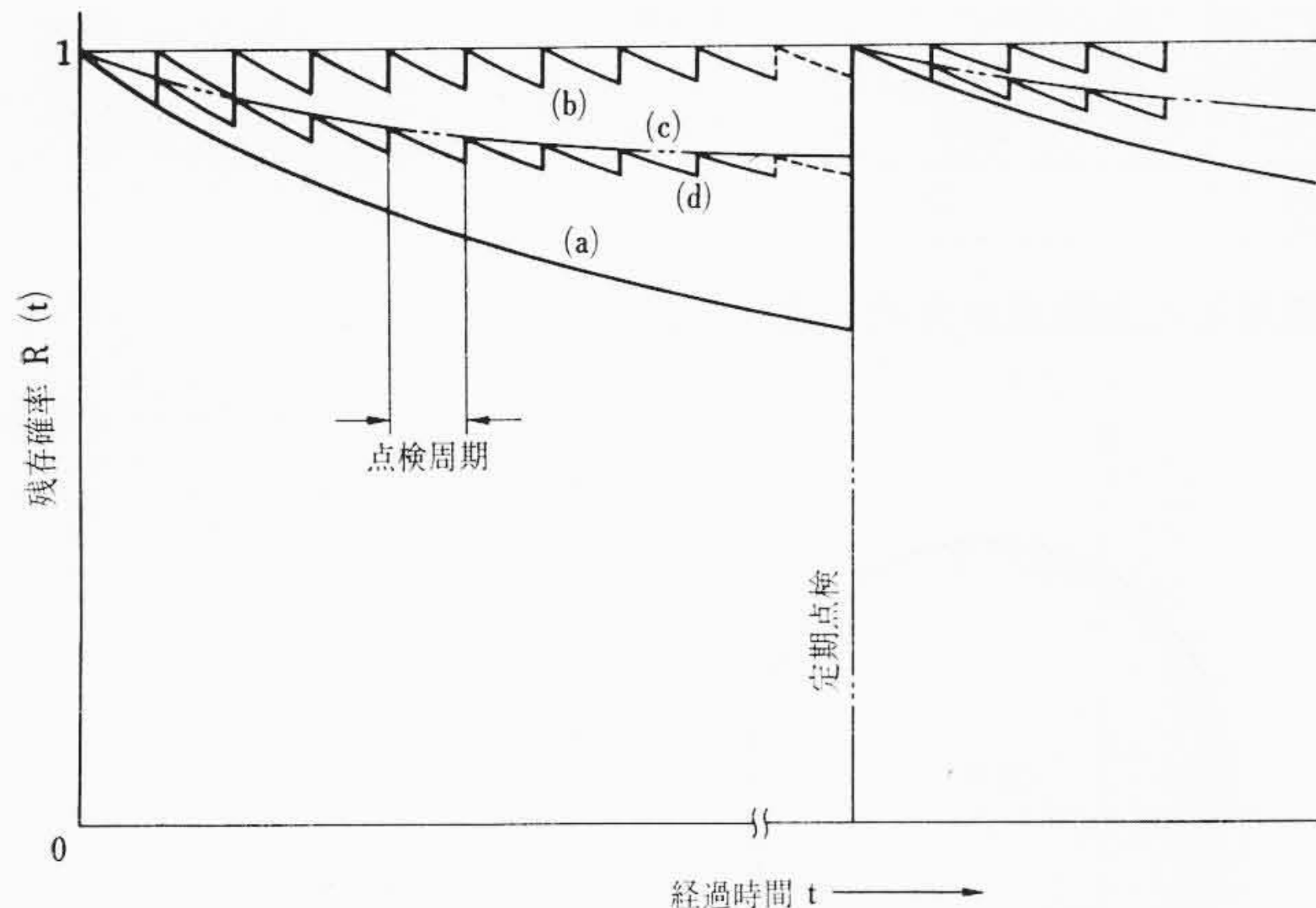


図10 自動点検による残存確率の改善

3.3 自動点検

自動点検は周期的に点検し、主として誤不動作に連なる故障の有無を検出するものである。したがって常時監視で発見できない故障を発見することができる。

その効果を概念的に説明すれば、自動点検は残存確率 $R(t)$ をほぼ1に保つ手段で図10にこの様子を示す。同図で(a)の曲線を装置全体の残存確率とすれば、全回路が点検されている場合(b)曲線のように点検ごとに $R(t)=1$ から始まる鋸歯(ぎょし)状の残存確率に改善することができる。各点検直後の傾斜は $\lambda(t)$ である。一般に $\lambda(t)$ は経過時間とともに小さな値となるため点検ごとに鋸歯状の傾斜は小さくなる。一方、点検が不完全な場合、不完全部の残存確率を(c)曲線とすれば点検による鋸歯状の残存確率は(d)曲線のように(c)曲線以上に改善することはできない。このためできるだけ広い範囲の点検を行なう必要がある。

現在公表されている点検方式は図11①～③までの3方式であるが、新しく④の方式を考案した。表4はその比較である。各方式には一長一短があるが、④の方式が簡単なわりに交流回路を含む広範囲の点検が可能である。以下④の常時印加入力を用い点検を行なう場合につき説明する。

(1) 整流形継電器の例

図12は不足電圧継電器に適用した場合の構成図を示したものである。不足電圧継電器は原理上、常時の入力を抑制力としているため、点検時は抑制力を0Vとすることにより動作状態とすることができる。この点検より次の2点が確認できる。

(a) 点検前の出力が0であることから判定して、抑制力は正常に印加されていたことがわかる。すなわち、PT→ケーブル→Aux. PT→整流回路出力端子までが正常であり、またトランジスタ回路自身にも動作出力ありとなる故障もない。

(b) 抑制電圧を0(V)としたとき、動作することはレベル判定

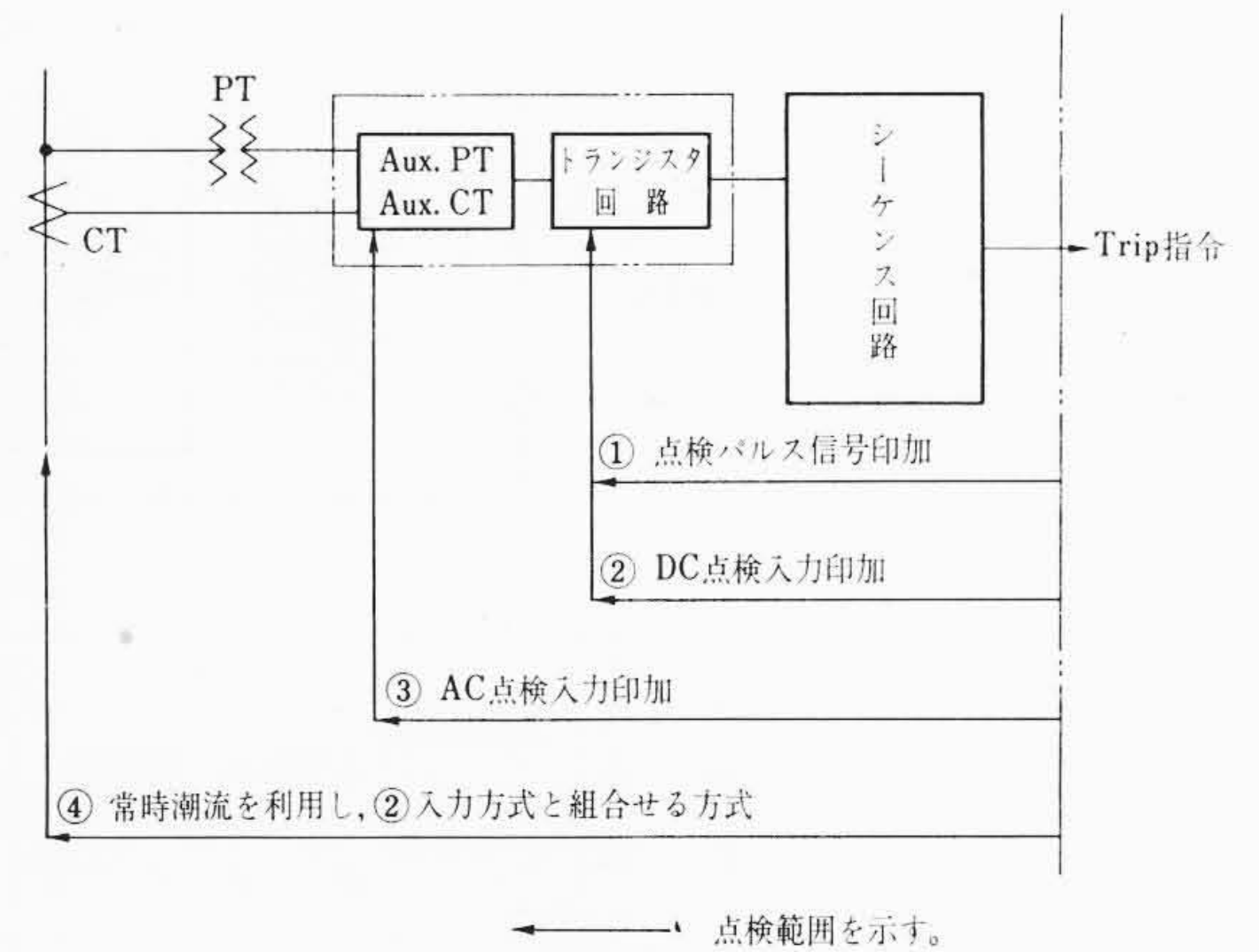


図11 各自動点検方式とその点検範囲

表4 各点検方式の比較

点検方式	長所	短所
① 点検パルスをDC回路に通し、その健否を確認。	トランジスタ回路の接続は確認可能。	AC回路の点検不能、点検装置も複雑。
② DC信号を印加し、PC回路の健否を確認。	トランジスタ回路は確実な点検がなされる。	AC回路の点検不能。
③ AC信号を印加し、動作を確認。	AC回路を含めた定量試験も可能となる。	装置が複雑となり、点検時間も長くなる。Main PT, CT開閉要す。
④ 常時印加入力をそのまま用いDC信号と併用し、動作を確認。	点検装置が簡単、点検範囲はMain PT, CT以後全範囲可能。	常時入力のない継電器では②と同等となる。

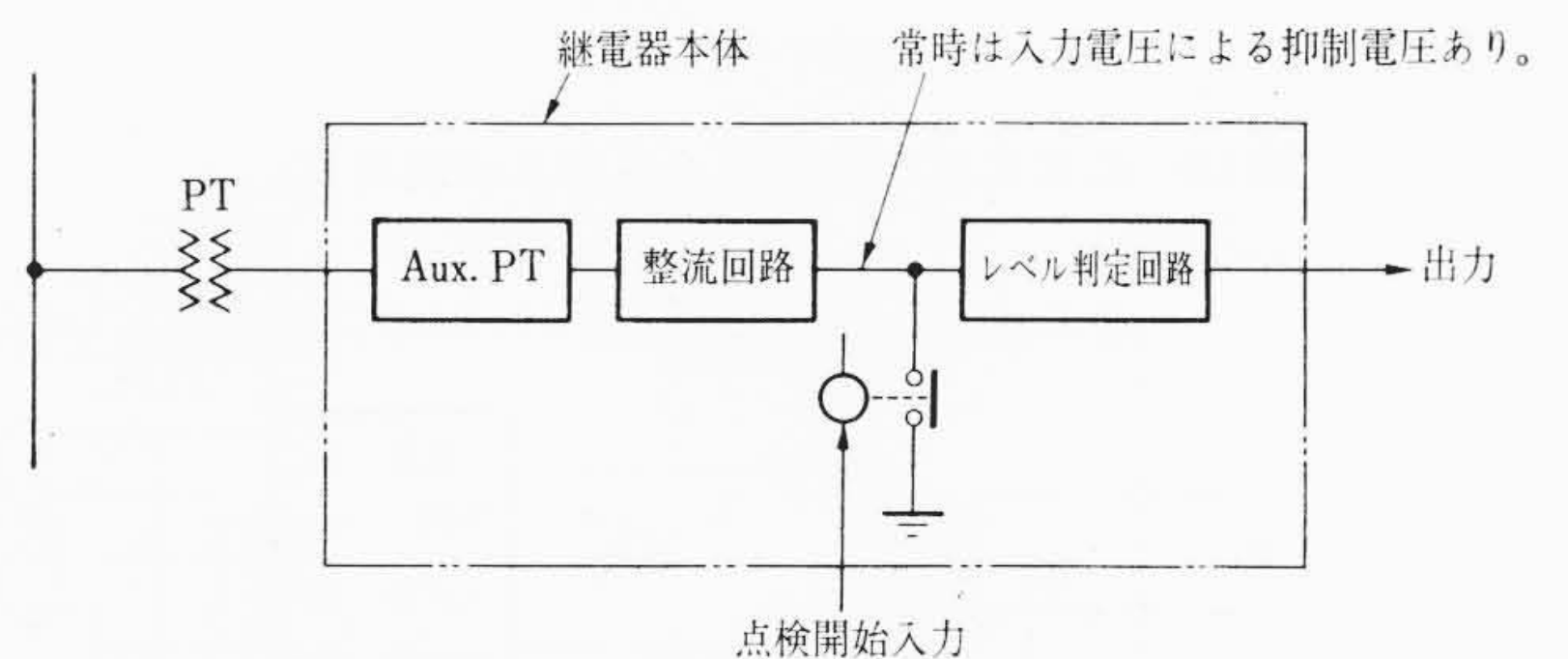


図12 不足電圧継電器の自動点検説明図

回路も正常に動作できることを示している。

この方式を短絡故障検出継電器SV3形UN-6K₂式に適用した場合を図13に示す。ブロック図を3区分し、AC回路整流回路、点検回路および比較出力回路に分類し、表のような故障を起こせば出力より判断して、

(a) 常時監視により検出される故障(常時動作となり、誤動作である故障)

(b) 自動点検時に判明する故障(常時の誤不動作側の故障)の二つが明らかとなることわかる。

また過電流継電器でも同様の適用ができる。すなわち、基準電圧側に点検回路を接続し、点検時は常時の潮流で動作できるまで感度を上げることにより動作を確認する方式である。ただし、整流回路の出力が0Vでも動作するまで感度を上げると交流回路の断線、短絡が発見できなくなるので注意しなければならない。

(2) 距離継電器などの直接位相比較方式継電器の例

位相比較原理の継電器では、PT、CTから印加された入力を二つ以上のベクトル量に変換し相互間の位相差を判定し動作する方式で図14はその構成図である。点検時は一方の交流入力の正負半波方形波の組合せを入れ換えることにより、常時の印加入力による不動作条件からそのまま動作条件に変えることができる。

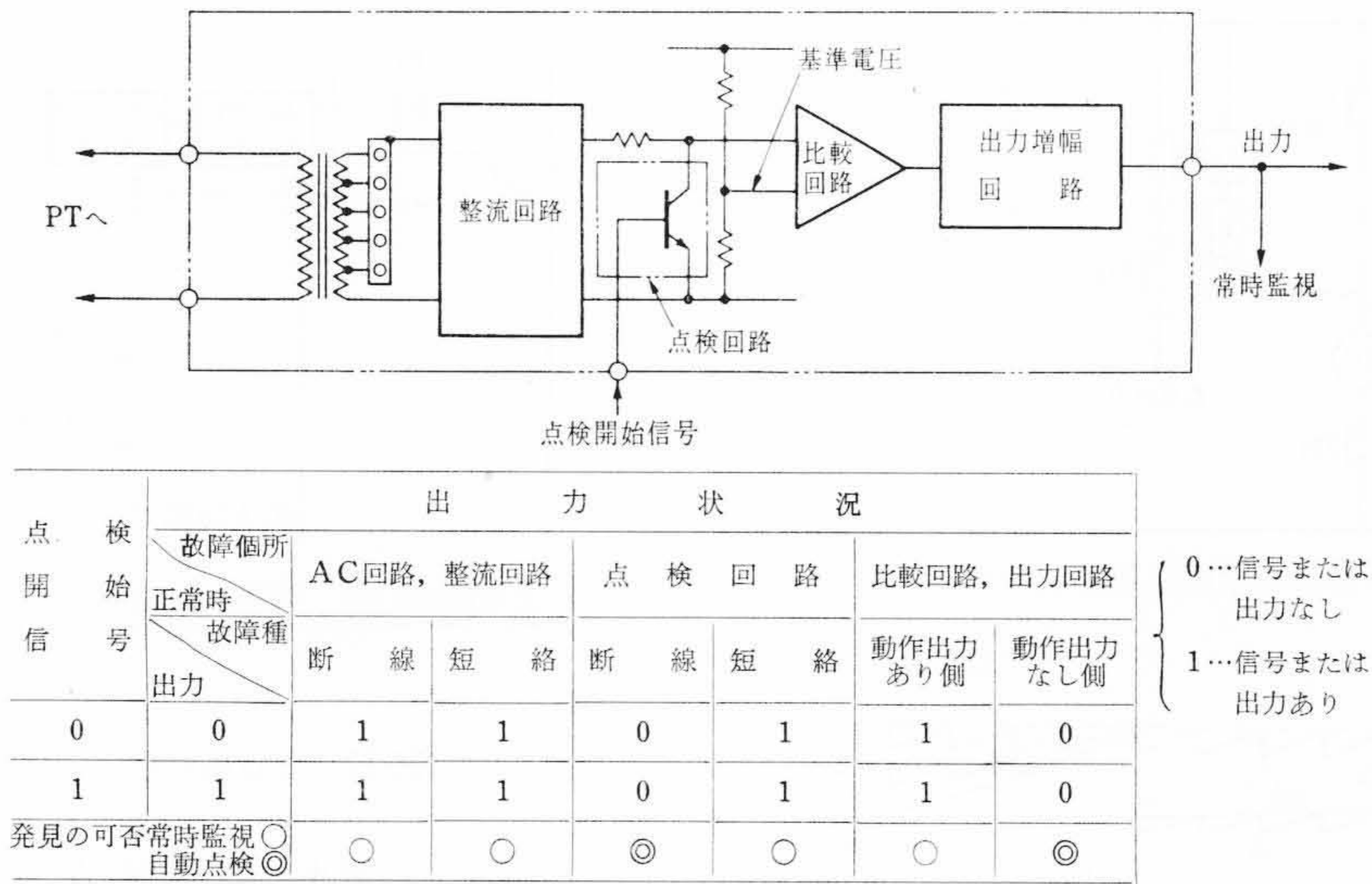


図 13 不足電圧継電器 SV3 形 UN-6K₂ に適用した自動点検方式と点検状況

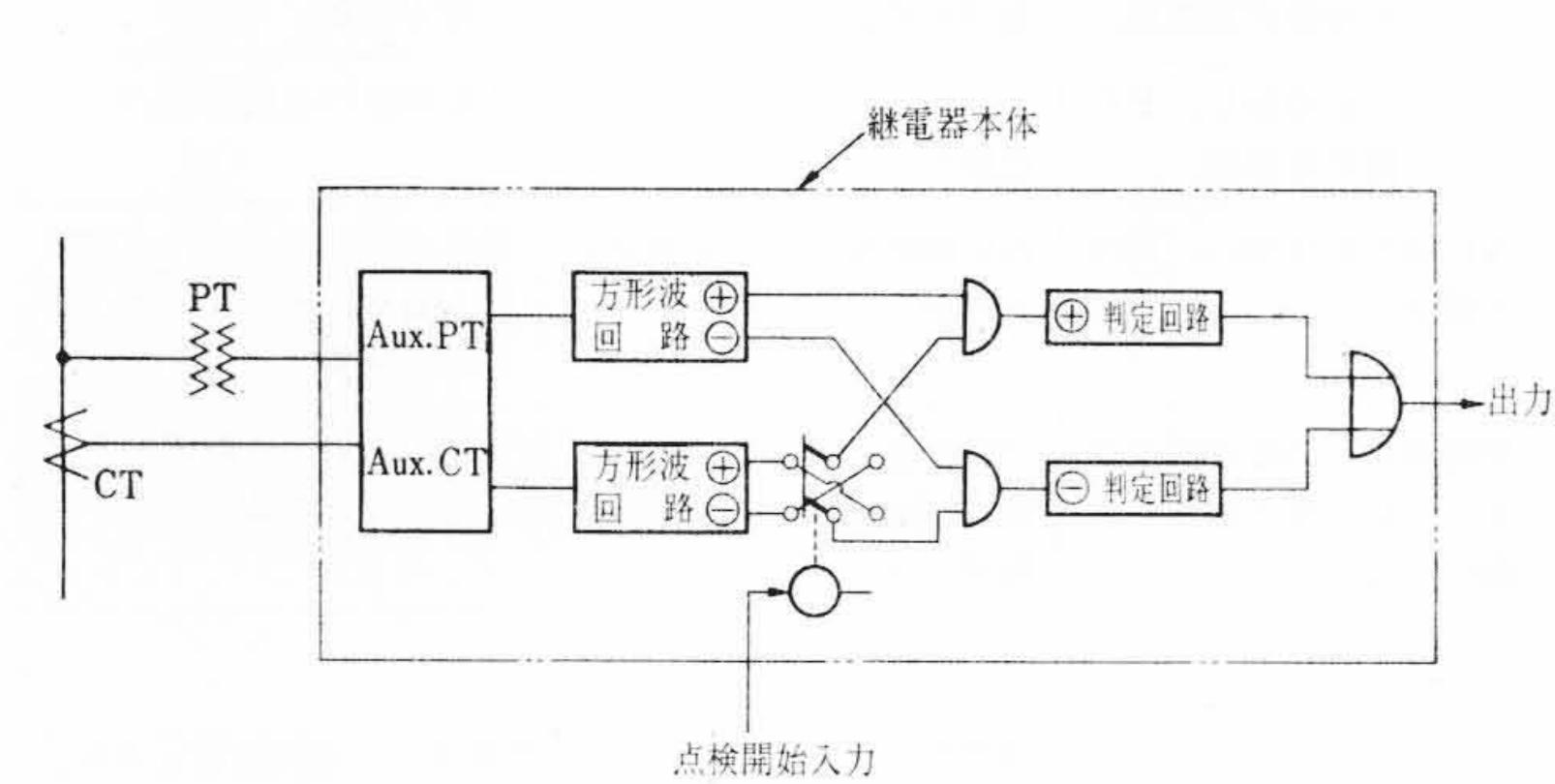


図 14 位相比較形継電器の自動点検説明図

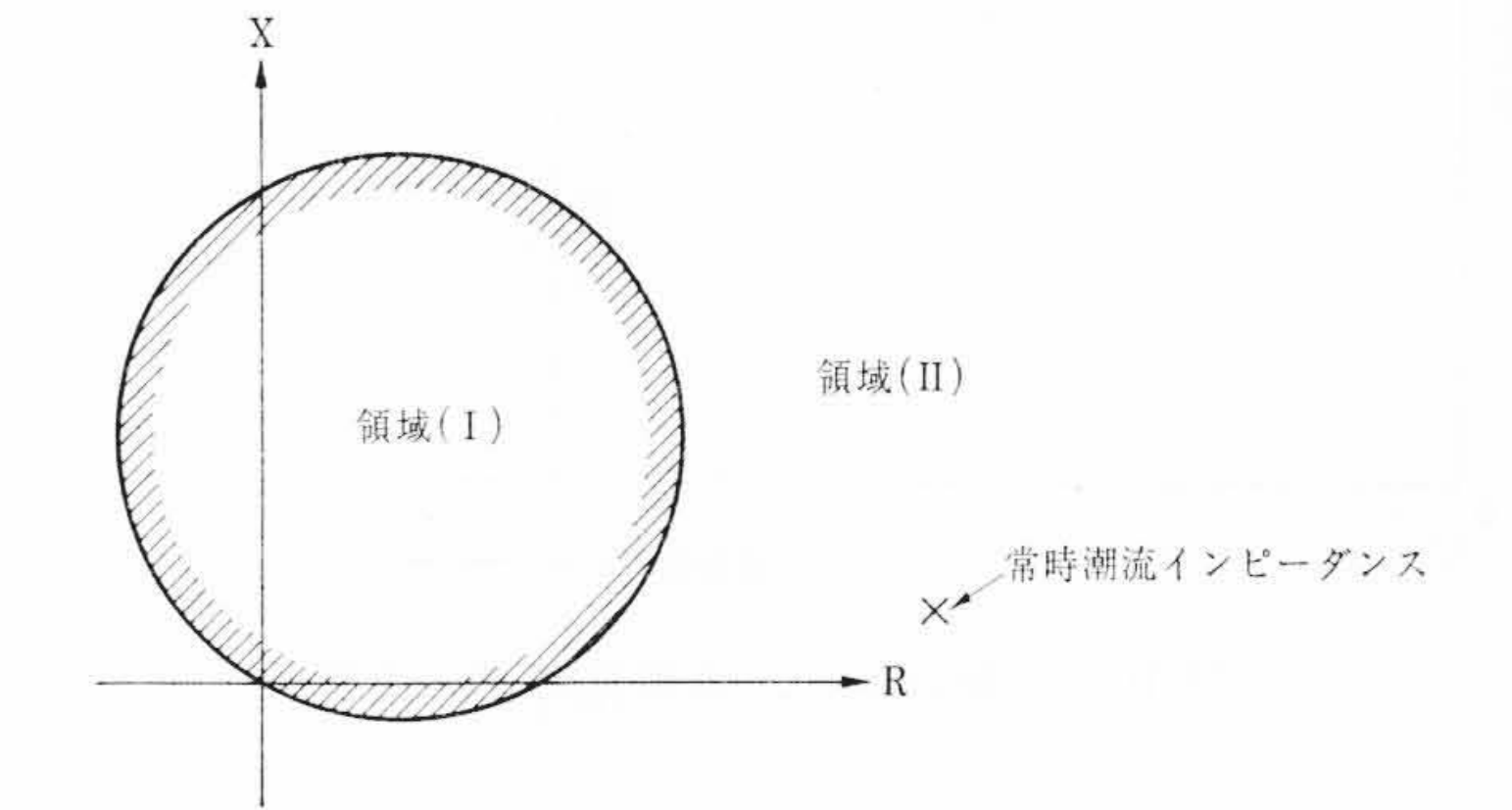
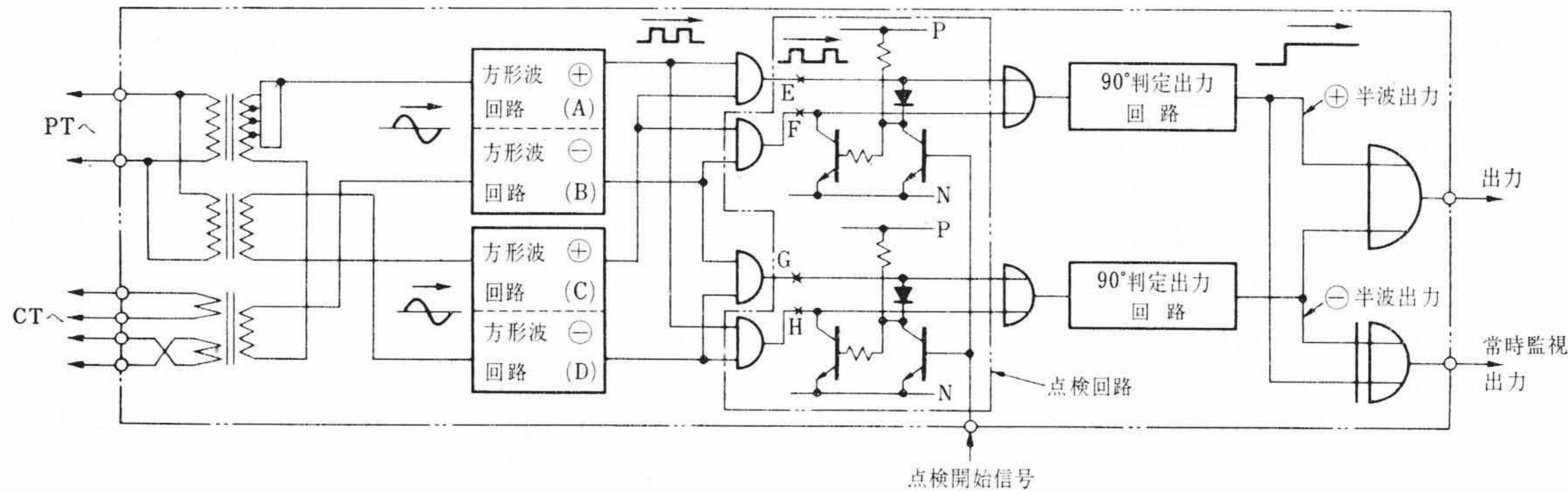


図 15 モー継電器に適用した場合の常時および点検時の動作域



点検開始信号	出力状況											
	故障箇所 正常時 故障種 出力		AC回路		方形波回路 A, B C, D		信号回路 E, G		信号回路 F, H		90度判定出力回路	
			断線	短絡	連続出力	出力なし	連続出力	出力なし	連続出力	出力なし	連続出力	出力なし
0	出力	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
	常時監視出力	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
1	出力	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	常時監視出力	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
発見の可否	常時監視○ 自動点検◎	◎	◎	◎	○	◎	○	◎	不可	◎	○	◎

図 16 モー継電器 SHY 形 N-6K₂ 式に適用した自動点検方式と点検状況

この点検方式も(1)の例と同様交流入力正常に印加されていないときは、点検時にも動作しない。このことは交流回路以前、PT, CT ケーブルを含めた全回路の点検ができることを意味する。
図 15 はモー継電器に適用した場合の動作域を示している。常

時の動作範囲は特性円の内部領域(I)であるが、点検時は前述の反転効果により、特性円外の領域(II)が動作域となるため、常時の潮流インピーダンスにより動作が確認できる。
この方式を適用したブロック図が図 16 で、短絡方向距離継電器

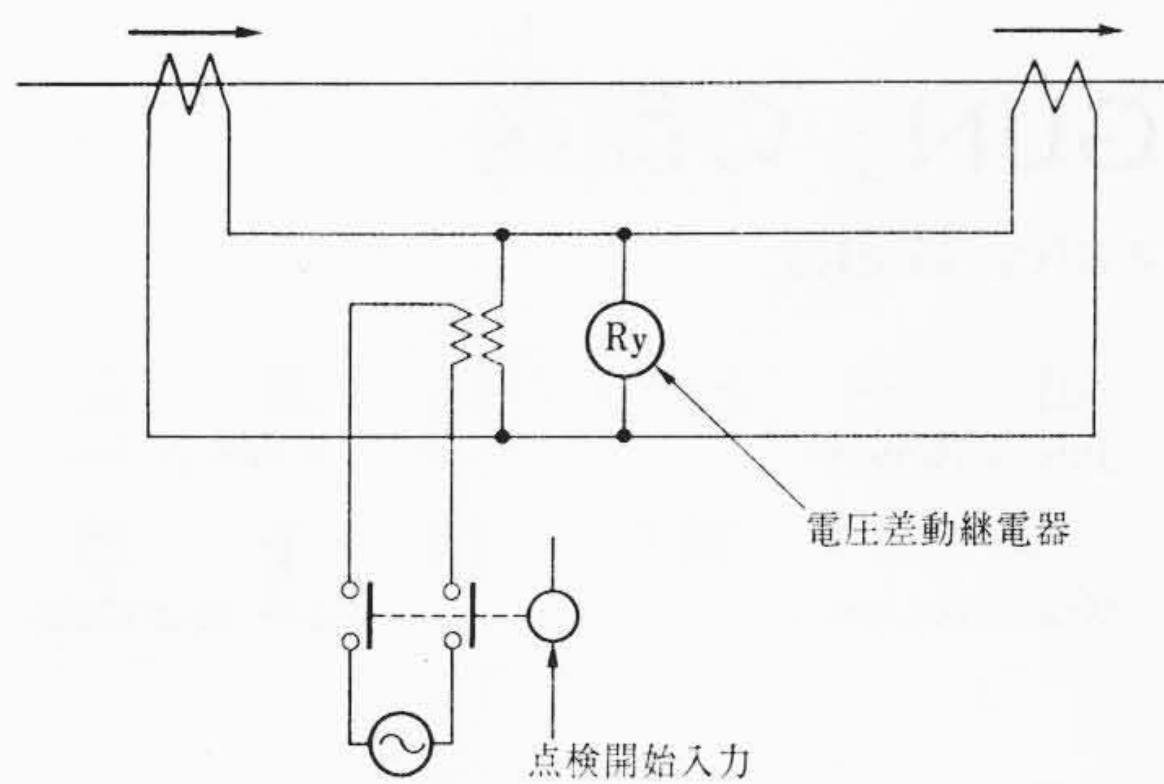


図17 電圧差動継電器の自動点検法

SHY形N-6K₂式に適用した場合を示している。いまAC回路、方形波回路、その他に区分し、同図に示す表の各故障を考えた場合、平常時および点検時の継電器出力と常時監視出力を、正常な場合に期待される出力と比較して故障の有無を判断する。ただしこの例では信号回路F、H点の連続出力故障が検出できない。この回路は点検時のみの信号ルートであるため常時の動作には支障をきたさない。

以上の方式は位相比較形継電器すべてに適用可能であり、方向継電器、距離継電器、位相比較継電器などに広く用いられている。

(3) 常時入力期待できない継電器の例

図17に示すように電圧差動継電器の場合、常時の通過電流では両端CTの出力極性が逆極性となり、継電器入力電圧は0Vである。このため④の考え方が適用できないので、点検用電源より点検入力を印加し、その動作を確認しなければならない。

以上(3)の場合のように、常時入力期待できないものに対しては②または③の方式も考慮される。しかし一般には(1)、(2)の考え方のように定常入力が正常にトランジスタ回路に印加されている場合にのみ動作点検可能な点検方式とすることは、大部分の継電器に適用可能であり、効果的点検が実現できる。特に簡単に短時間で点検できることは装置のダウンタイムとの関連において重要な条件となる。図18は距離継電装置の点検フロー図である。④方式により装置の全回路を約1秒間で点検可能とした例である。

この点検時間は、また、点検周期とも密接な関係がある。いま、点検周期を T_0 とし、そのうち T_c を点検時間とすると、図10のような残存確率の1点検周期間の平均値 $\bar{R}(t)$ を最大にするには、

$$T_0 \doteq \sqrt{\frac{2T_c}{\lambda}} \dots\dots\dots (2)$$

の関係を満足する必要がある⁽⁴⁾。装置全体の $\lambda=5 \times 10^{-5}/h$ とし、点検時間を1秒とすれば、点検周期 T_0 は(2)式より24時間となり1日に1回の点検が最適となる。

さらに図16の継電器につき、自動監視効果の検討を行なった。各部品の $\lambda(t)$ は日立製作所の統計による数値を採用し、設置後1年経過した時点での累積故障確率 $F(t)=1-R(t)$ を試算した。この結果、自動監視が取り付けられていない装置を基準として、各監視方式の $F(t)$ を示せば次のとおりである。

- (1) 常時監視のみ取り付け付けた場合.....(67%)
- (2) 常時監視と交流信号による点検を加味した場合...(13%)
- (3) 常時監視に新しい点検方式を追加した場合.....(2%)

以上の結果、新しい自動監視方式の適用により不具合動作の確率は大幅に改善され、この方式の優位性を明確に示している。



図18 距離継電装置の点検フロー図

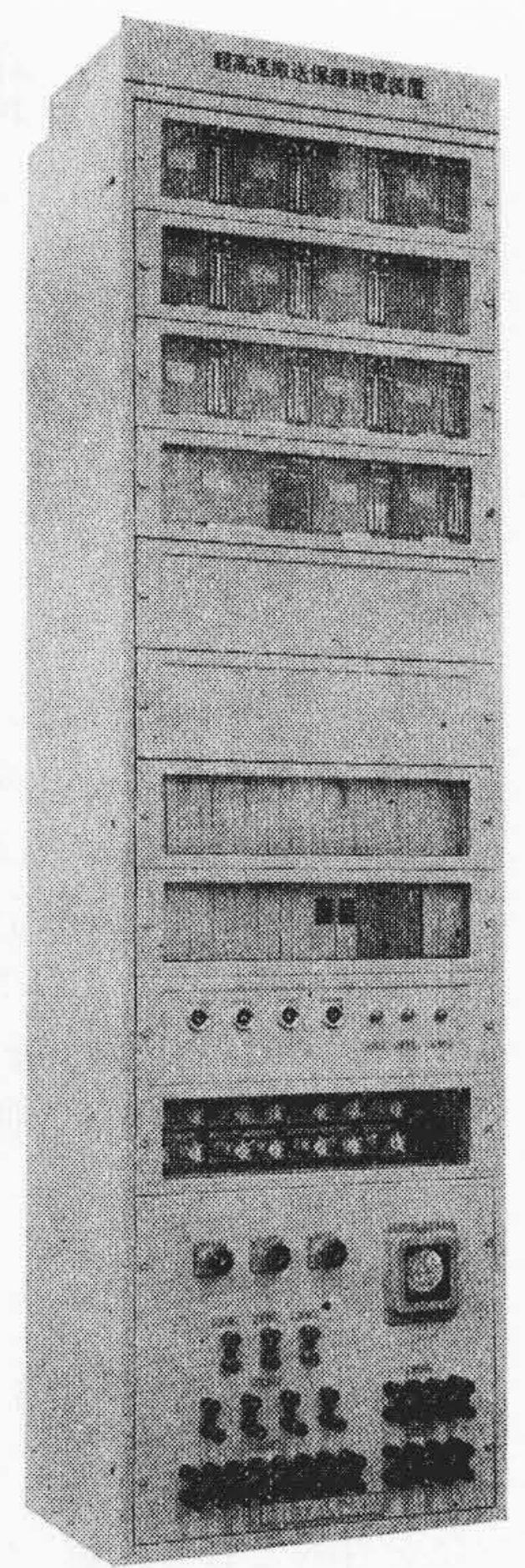


図19 自動監視を装備した継電装置例

図19は以上検討した方式を取り入れ完成した継電装置で、自動監視回路の占める割合は約20%である。現在、自動監視を装備した継電装置は数例あるが、現在のところ各継電器は正常に動作しており、継電器動作の不具合を検出した実績を得るには至っていない。

4. 結 言

以上、トランジスタ継電器の信頼度向上について、現時点における調査をもとに、効果的方策を検討した。その結果、固有信頼度向上とともに、使用状態を考慮した使用信頼度向上策を採用することにより、さらに信頼度向上が期待できる。現在すでに継電器単体固有のMTBFは 10^7 時間のオーダーに達しているが、部品不良の割合が大半を占めており、固有信頼度向上には、部品の初期不良発見に重点を置き改善しなければならない。一方、自動監視方式においては交流回路を含む広範囲の点検が効果的である。これらを考慮した一つの体系として、常時入力を用いた新しい自動点検方式を考案し、実用に供した。今後さらに故障の実態調査をすすめ、引き続きその効果を定量的に把握(はあく)し、方式の拡充を図る予定である。

また、今後のコンピュータ化の動向を考慮し、監視のみにとどまらず、不良検出と同時に自動切換、自動復旧などを含めたフィードバック系のすべてにつき検討を続ける必要がある。

参 考 文 献

- (1) 富士通信機株式会社：信頼性の理論と実際、p.38
- (2) 電気協同研究会：電気協同研究、第25巻、第4号 p.165
- (3) 村上、柴田：日立評論 52, 210 (昭45-3)
- (4) 塩見：信頼性工学入門 p.153