
トランジスタリレー特集

保護継電器のトランジスタ化.....	63
日立トランジスタ距離継電器.....	68
全トランジスタキャリアリレー装置.....	73
共架多回線送電線用差電流特性キャリアリレー装置.....	78
電源抑制・系統分離装置.....	83
SDB形母線保護継電器	88

保護継電器のトランジスタ化

Transistorized Protective Relays

渡井三夫* 高林乍人**
Mitsuo Watai Hayato Takabayashi

内 容 梗 概

トランジスタ継電器の特長から保護継電器のトランジスタ化の目的を述べ、さらに動作原理、構造、特性、影響値、信頼度など製品化における具体的問題点について説明した。

1. 緒 言

従来電磁形でのみ製作されてきた保護継電器を、電子管回路を使用した静止形で得ようとする試みは、各方面で研究されてきたが^{(1)~(4)}、これが実用に至らなかったのは信頼度その他の点で致命的欠陥があったためであるが、最近におけるトランジスタ、回路部品の発達により問題点はしだいに解決され、いわゆるトランジスタ継電器が実用されるようになってきた。

トランジスタ継電器は従来の電磁形継電器と極端にかけ離れているので、一面では技術上の限界を破るものとして大きな期待を持たれるとともに、反面においては種々の欠点があげられ、その長所、短所について必ずしも正当な評価がなされず、実用に当たって過度の期待と危惧がもたれているように見られる。

これは保護継電器のように特に信頼度に重点をおく製品では当然のことで、基礎的研究と使用実績の集積により逐次解決されなければならない問題である。

本文においてはこれら保護継電器のトランジスタ化における諸問題について説明する。

2. トランジスタ継電器の特長

トランジスタ継電器を電磁形継電器と比較すると種々の特長がある。第1表はこれらを要約したもので、一つの項目についても長所と短所が同時に考えられ、トランジスタ継電器が無条件にすぐれているとはいえない。したがって現状では長年の経験と技術をもっている電磁形継電器を、単にトランジスタ化するだけではまったく無意味で、電磁形では満たし得ない要求、性能の継電器の場合にトランジスタ化を検討すべきものと考えられる。この意味からトランジスタ継電器の長所を生かした適用として次のようなものが考えられる。

- (1) 高速度動作を要求される継電器： 広範囲の入力に対して1サイクル程度の高速度動作を必要とする場合。
- (2) 高感度、高性能を要求される継電器： 消費VAが小さくかつ高感度を要求される非接地系統の地絡過電流継電器、短距離送電線用距離継電器および高精度の限時継電器などがその例である。
- (3) 特殊特性を要求される継電器： 電磁形では実用上製作不可能であった新しい特性をもったもので、変化率検出継電器、位相比較継電器、変形特性距離継電器など。
- (4) 可動部、接点をきらう継電器： 飛行機、列車などのように振動、衝撃の多い場所、ゴミの多い場所などに使用するものおよびフリッカー継電器や負荷時電圧調整変圧器の制御用電圧継電器のように、長期間にわたって高ひん度動作を要求される継電器。

* 日立製作所那珂工場

** 日立製作所日立研究所 工博

第1表 トランジスタ継電器の特長

No.	項 目	長 所	短 所
1	可動部がない。	動作、復帰時間を短縮でき、その時間は電気入力的大小による変化が少ない。	基本波分以外の高周波、直流分などに対し、電氣的に誤動作防止対策が必要で、メモリ効果をもたせにくい。
2	高感度である。	消費VAが小さい。電気入力小さい場合にも良好な特性が得やすい。	外部からの誘導サージなどにより誤動作する可能性がある。またトランジスタ回路用の電源を必要とする。
3	電気回路網で動作判定を行なう。	融通性が大きく、特殊特性をもった継電器の製作が可能である。	電気回路部品数が多いため信頼度をそこなおそれがある。
4	構造と耐環境性の関連。	接点機構がないため接点障害がなく、振動、衝撃、ゴミなどに強く、さらに高ひん度動作に耐えやすい。	トランジスタは温度による特性変化が大きいため、継電器としての特性に影響を与えぬように注意が必要である。各回路部品は小形で熱容量が小さいので電氣的熱的耐量が小さい。

- (5) 装置として小形を要求される継電器： いく種類かの継電器を複合して小形化を図る場合に適している。

このようにトランジスタ継電器は用途に応じ期待される長所を最大限に発揮するようにしなければならないが、短所については長所以上に慎重に考慮しなければならない。

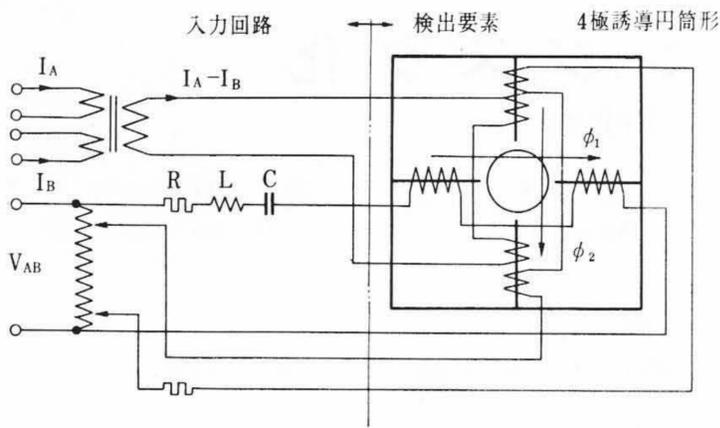
3. トランジスタ継電器の動作原理

トランジスタ継電器といっても電磁形に各種の動作原理があるように非常に多数の方式が考えられる。特に継電器のトランジスタ化の目的の一つとして電磁形では不可能な技術分野の製品という点から考えると、電磁形との対比のできない独特の原理も考えられる。

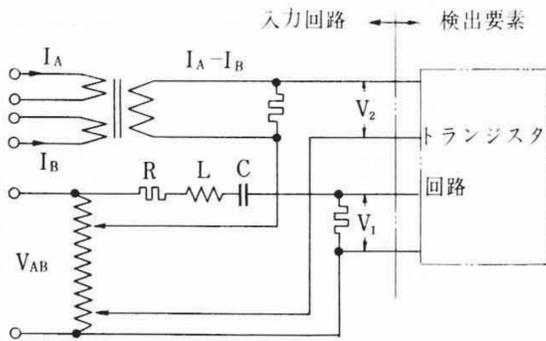
ここでは主として保護継電器を中心として代表的動作原理について説明する。

トランジスタ継電器も、PT、CT二次回路の電圧、電流を入力とし、その大きさあるいは位相差を判別して、電圧、電流、方向、距離などを測定する基本原理は電磁形と変わるところはない。

第1図(a)は誘導円筒形モー距離継電器の回路図であるが、電圧 V_{AB} と電流 $(I_A - I_B)$ を入力とし、 V_{AB} によって4極誘導円筒形要素の一对の磁極に磁束 ϕ_1 を、 V_{AB} と $(I_A - I_B)$ の差によってもう一对の磁極に磁束 ϕ_2 を生ぜしめると、 $\phi_1 \times \phi_2$ に比例した回転力が誘導円筒筒に生じて継電器が動作する。これに対し第1図(b)はトランジスタ形モー距離継電器で、 V_{AB} によって電圧 V_1 を、 V_{AB} と $(I_A - I_B)$ の差によって電圧 V_2 をつくり、両者の位相差をトランジスタ回路で判定動作するものである。以上モー距離継電器に例をとって電磁形とトランジスタ形を対比説明したが、一般にトランジスタ継電器は電磁形の入力回路はそのまま検出要素をトランジスタ回路におきかえたものと考えてよい。したがって交流側から見た継電器特性には相当の類似性が成り立つ。

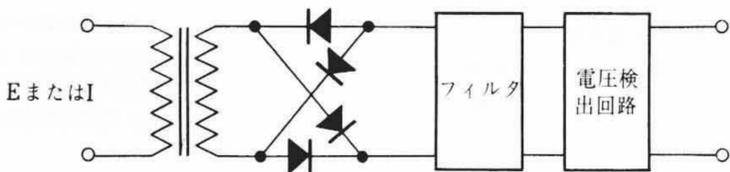


(a) 電磁形モー继电器

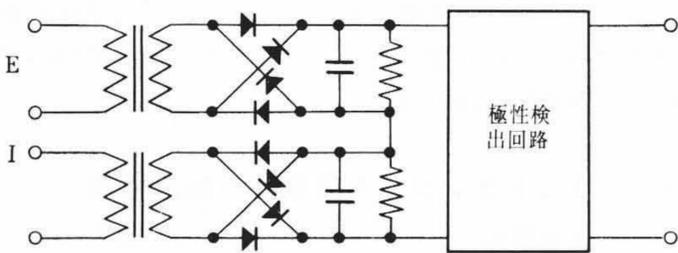


(b) トランジスタ形モー继电器

第1図 電磁形およびトランジスタ形モー继电器



(a) 整流形単入力继电器



(b) 整流形二入力比較继电器

第2図 整流形トランジスタ继电器

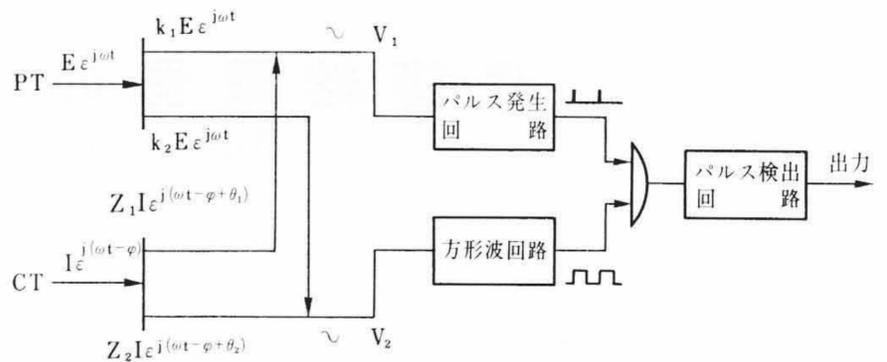
つぎにトランジスタ继电器の代表的動作原理について説明する。

3.1 整流形

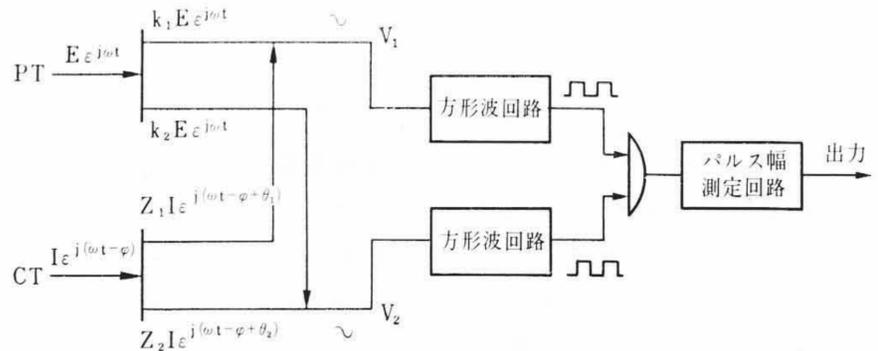
交流继电器を構成するのにもっとも簡単な方式で、交流入力を整流し直流レベル検出回路で検出動作するもので第2図は単入力、二入力比較继电器の回路を示したものである。この原理のものは可動鉄心形继电器と同様に原理的には一入力検出で、二入力の積(方向性)の検出能力を持たない。

3.2 位相比較形

位相比較形⁽⁵⁾はPT, CTの二次電圧、電流をベクトル合成して、二つの電圧 V_1, V_2 をつくり、それらの位相関係により動作するものである。第3図(a)はパルス位相比較形で、 V_1 の交流特定位相角においてパルスを発生させ、一方 V_2 の半波を方形波としてゲートの開閉を制御し、パルスがゲートを通りかかるとして位相差を測定(通常位相差90度以内を動作範囲とする)するものである。第3図(b)は直接位相比較形で V_1, V_2 の半波を方形波とし、極性の



(a) パルス位相比較方式



(b) 直接位相比較方式

第3図 位相比較形トランジスタ继电器

一致する期間(たとえば90度以上)をパルス幅測定回路で測定し動作条件を検出する。パルス幅の測定にはCR積分回路を利用し、レベル判定で動作判定を行なう方法が一般に採用されている。

いま继电器の入力電圧、電流を $\dot{E} = E\epsilon^{j\omega t}$, $\dot{I} = I\epsilon^{j(\omega t - \varphi)}$ とし、これを入力回路でベクトル合成して

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_1 &= k_1 E \epsilon^{j\omega t} + Z_1 I \epsilon^{j(\omega t - \varphi + \theta_1)} \\ \dot{V}_2 &= k_2 E \epsilon^{j\omega t} + Z_2 I \epsilon^{j(\omega t - \varphi + \theta_2)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

とし、 \dot{V}_1, \dot{V}_2 の位相差が90度となる条件とし $(\dot{V}_1 \times \dot{V}_2) = 0$ を求めると

$$k_1 k_2 E^2 + \{Z_1 k_2 \cos(\varphi - \theta_1) + Z_2 k_1 \cos(\varphi - \theta_2)\} EI + Z_1 Z_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) = 0 \dots \dots \dots (2)$$

となり、继电器の一般特性式が得られる。(2)式において定数 $k_1, k_2, Z_1, Z_2, \theta_1, \theta_2$ の選定により各種特性の继电器が得られる。

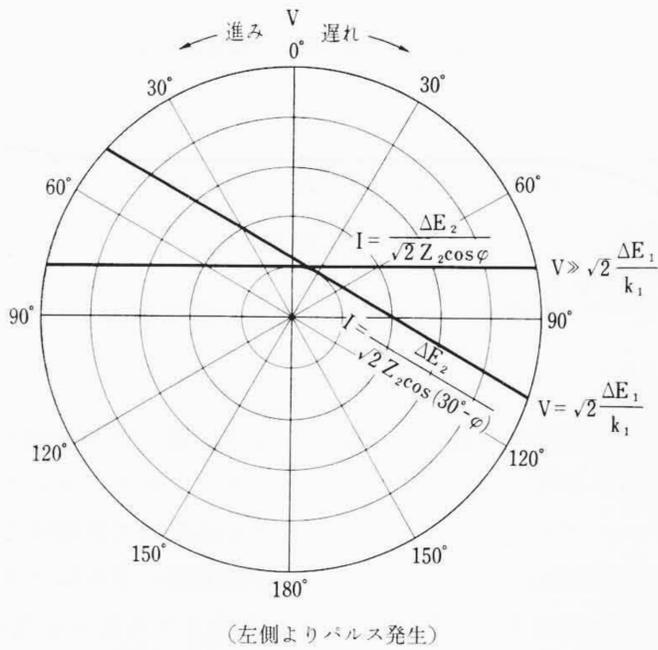
位相比較形は原理的に方向性を備えている点誘導形继电器と同様で、高速度動作に適しているなどの利点があり、もっとも広く用いられている。しかしパルス位相比較形は元来サージ、波形ひずみなどに対して不安定であるため高速度继电器としては直接位相比較形のほうが適している。

4. トランジスタ继电器の製品化における問題点

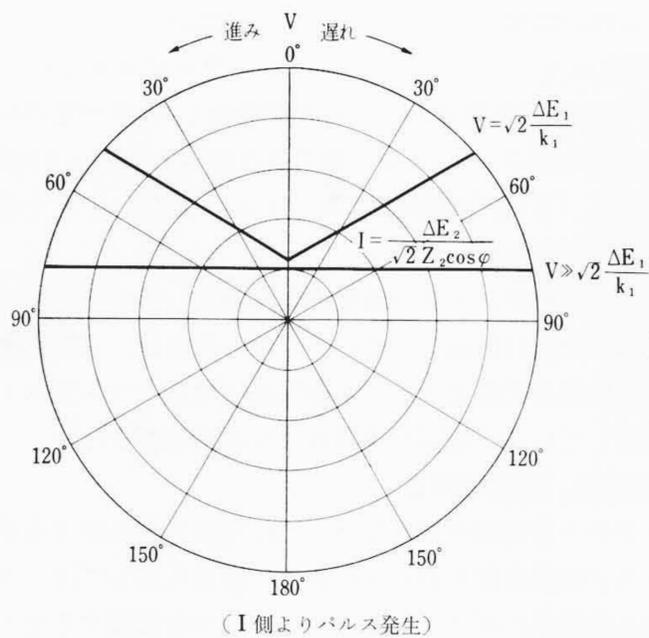
4.1 構成

トランジスタ继电器は電磁形继电器と併用されるか、全トランジスタ装置として構成されるかにより、出力を接点にするか信号にするかに分かれる。それに伴い继电器の取付、配置、外形も大幅に変わるが、現状ではむしろ前者が多く電磁形继电器の構造を踏襲することが多い。無接点式ではトランジスタ继电器独自の構造が考えられる。以下構造において注意すべき点につき述べる。

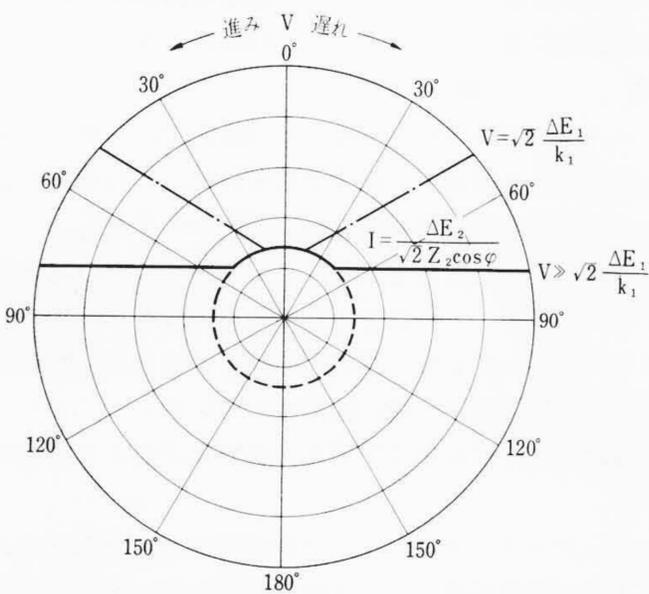
- (1) PT, CTの二次回路は電磁形继电器とまったく同等の条件にあるので不用意に小形化してはならない。特に引出形继电器の接触部は注意を要する。
- (2) トランジスタ回路は微小電流を扱い、高温にさらすことは避けなければならないのでトランジスタ回路と変成器類とは電磁的および熱的に遮へいされた構造にすべきである。
- (3) 一般にトランジスタ回路はプリント板に配置され、ジャックを介して交流回路に接続されるが、ジャックは接触不良



第4図 パルス位相比較方式による方向継電器の位相角特性



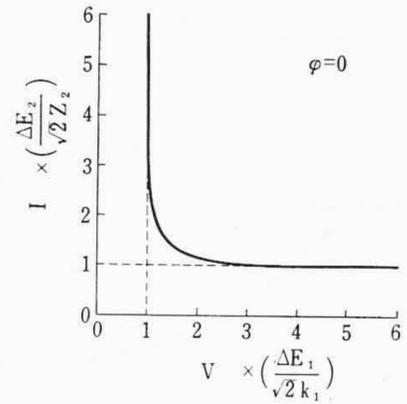
第5図 パルス位相比較方式による方向継電器の位相角特性



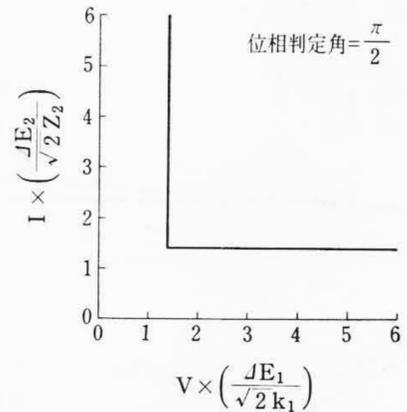
第6図 直接位相比較方式による方向継電器の位相角特性

の要因となることがあるのでジャック使用の得失を考えるべきである。

- (4) 電磁形に比し配線が多く作業誤りの可能性が多い。これを防止するためにはトランジスタ回路に限らず全回路をプリント配線し、作業誤りを生じ得ないようにするのが得策である。
- (5) 電磁形継電器における部品は機械的構成と電気的性能に関係し一つの部品が多くの機能に関係することが多い。トランジスタ回路においては原則として一機能に対し一回路を



第7図 パルス位相比較方式による方向継電器の感度特性



第8図 直接位相比較方式による方向継電器の感度特性

必要とするが、これらの組合せにより極端な言い方をすればどのような要求にも応ずることができる。しかし装置の信頼度は部品数の積に逆比例するので機能性能に不必要な条件をつけて信頼度を低下させることは厳に慎まなければならない。

4.2 静特性⁽⁵⁾

電磁形継電器においては本質的に積回転力を生じ、制御力で動作値を規定するが、位相比較式トランジスタ継電器では合成二電圧の位相関係により動作を決定し、動作すべき位相角の範囲は位相判別回路の検出感度によって影響される。したがって動作特性は電磁形継電器とは本質的に異なっている。

第4,5図はパルス位相比較式方向継電器の位相角特性例で、電圧側でパルスが発生させるか、電流側でパルスが発生させるか、さらに位相判別回路の V_1 側または V_2 側のスイッチング感度電圧 ΔE_1 , ΔE_2 の大小により位相角特性が影響を受ける。第6図は同じく直接位相比較式の場合の特性例である。

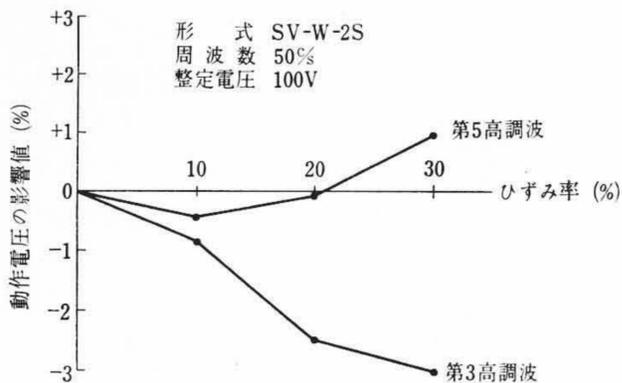
第7,8図はパルス直接位相比較式方向継電器の電圧-電流感度特性例を示す。

これらよりわかるように製品の特性管理上位相判別回路がきわめて重要な意味をもつ。それとともに特性上では方向性をもつとともにある特定の位相角範囲では一定感度をもち、あるいは入力電圧に関係なく一定感度をもつというように電磁形継電器では考えられない特性を得ることも可能である。

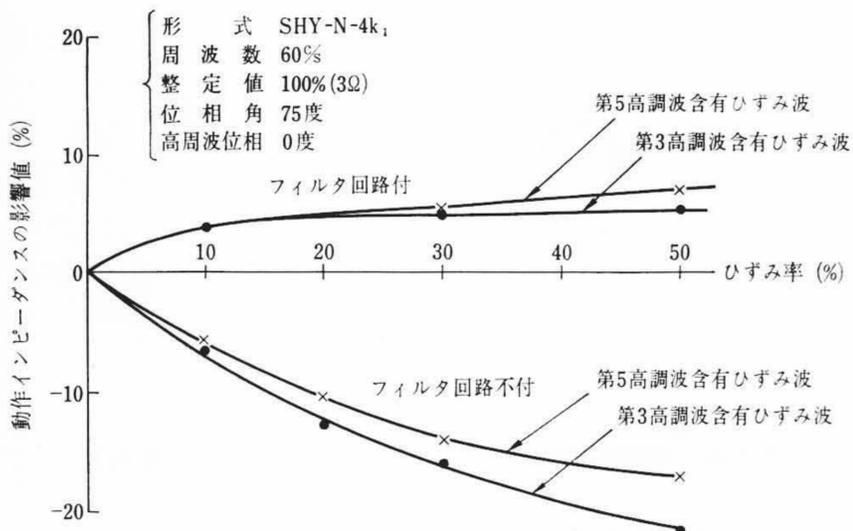
さらにたとえばリアクタンス継電器で、電磁形では接点協調というむずかしい問題をもっているが、トランジスタ継電器では本質的に接点協調が不要なので、多角形特性をもつ距離継電器の製作も可能である。

4.3 過渡特性

トランジスタ継電器は原理的には電磁形継電器の検出要素をトランジスタ回路に置き換えたものである。過渡特性については電磁形継電器の考え方を適用することができるが、電磁形継電器では可動部の慣性モーメントが可動部の運動に大きく作用しているのに対し、トランジスタ継電器ではこれが存在しない。したがって動作時間、メモリ効果、電氣的過渡入力への処置などにおいて電磁形継電



第9図 電圧調整継電器の波形ひずみの影響



第10図 モー継電器の波形ひずみの影響

器と同一視できない点がある。

4.4 波形ひずみの影響

トランジスタ継電器は整流式でも、位相比較式でもその動作判定を直接電流量で行なうため、入力波形の影響を受けやすい。

整流形ではフィルタ、負荷抵抗によって影響値が異なるが、影響値を小さくするためにはフィルタの時定数を適当に選定する必要がある。したがって継電器としては目的用途により時定数を選定し、あるいは入力電圧を移相して多相交流にしたうえで全波整流する速応整流回路を採用するなどの配慮が必要になる。第9図は整流式のLRA用電圧調整継電器の波形影響の測定例で、この継電器ではフィルタの定数を適当に選んでいるので影響値はほとんど無視できる。

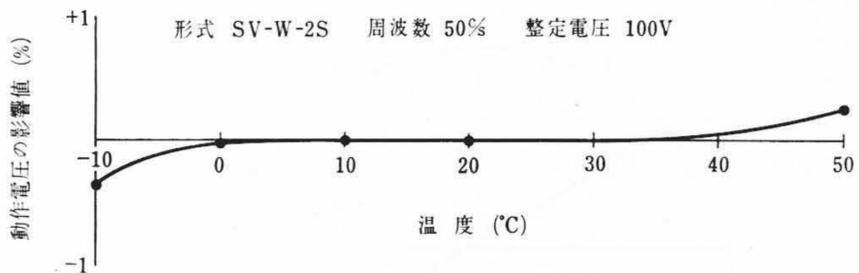
位相比較式では入力電圧を方形波回路で整形するので整流形に比べ影響は少ないが、入力が基準値を上下したこと、または上下する時間幅をもって動作を決定するので、入力の基準値付近の波形が特性に微妙な影響を与える。第10図は直接位相比較式のモー距離継電器の波形ひずみの影響で、入力回路にフィルタ回路を設け影響値を小さくしている一例である。

4.5 温度の影響

トランジスタ回路の直流動作値点をきめるトランジスタのパラメータで温度による変化の大きいものは

- (1) I_{CO} または I_{CEO} (エミッタ開放のコレクタ遮断電流)
- (2) V_{eb}' (特定のコレクタ電流に対するベース・エミッタ間電圧)
- (3) V_{eb}'' (特定のベース電流に対するベース・エミッタ間電圧)
- (4) $\beta = h_{fe}$ (エミッタ接地の電流増幅率)
- (5) Z_{out} (定電流駆動時のエミッタ接地回路の出力インピーダンス)

このうちでもっとも影響の大きいものは I_{CO} と V_{eb} である。たとえば I_{CO} の変動はベースを定電流駆動した場合の動作点をきめるのに重要で、 V_{eb} は定電圧駆動した場合の動作点をきめるのに支配的



第11図 電圧調整継電器の温度影響

役目をする。

コレクタ遮断電流の温度依存度はかなり正確に同一傾向を示し、温度変化20~30°Cで10倍になり、ゲルマニウムトランジスタでは値も大きい。ゲルマニウムトランジスタを高温域で使用するためには(1)温度補償回路を設ける(2)差動増幅器にさらにツウイントランジスタを使用する(3)ベース抵抗をあまり大きくしない(4)遮断時の逆バイアスを深くとるなどの考慮が必要である。シリコントランジスタではゲルマニウムトランジスタの10ないし100分の1程度で、これが問題になることはほとんどない。

V_{eb} の変化はゲルマニウム、シリコントランジスタとも2mV/°C程度で I_C および温度範囲にほとんど関係なく、ほぼ一定である。これを避けるためには(1) V_{eb} に無関係な動作とする(2)温度補償回路を設ける(3)動作基準値に対し V_{eb} の変化を小さく選定するなどの対策がなされる。

上記のようにパラメータの温度変化は安定しているので、温度補償は安定に行なわれ製品によるバラツキも少ない。第11図は電圧調整継電器の温度影響を示し、本継電器ではゲルマニウムトランジスタを使用しているが電磁形継電器より影響値が少ない。

4.6 過負荷、過電圧耐量

トランジスタ継電器の過負荷としては交流入力に対する過負荷とトランジスタ回路自体の過負荷がある。前者に対してはトランジスタ回路の入力端子にダイオード、コンデンサを接続するなどの対策がなされ、後者は部品の定格容量に対し十分な余裕をもった回路設計により過負荷を防止できるが、この選定は信頼度と直接関係するので部品の特性に見合ったものでなければならない。

4.7 電 源

トランジスタ回路の電圧は一般に6~48Vで、ステーションバッテリーから供給される場合が大部分であるので、これをどのようにするかはトランジスタ継電器の大きな問題の一つである。

電源の供給のしかたとして、全トランジスタ装置の場合には装置に対して一つの電源より供給する集中供給方式が、電磁形継電器と併用されその数が一定しない継電器の場合には各継電器が電源回路を有する個別供給方式が一般に採用されている。

この電源はほとんどの場合安定化が必要で次のようなものが用いられる。

- (1) ツェナーダイオードまたは整流器の順方向降下による方法
安定化率、効率が良くなく大容量が得にくい最も簡単な方法で継電器内蔵電源として広く用いられる。
- (2) トランジスタを主体としたDC-AC-DC変換器
大容量のものが得やすく効率、安定化率も良いが回路が複雑になり、それだけ故障の要因が多くなる。集中供給方式に適している。
- (3) トランジスタを用いたDC-DC変換器

上記(1),(2)の中間的性能を持つもので集中供給、個別供給のいずれの場合にも適用可能である。

4.8 信 頼 度

トランジスタ継電器適用上の最大の問題点は、使用経験が短期間であるためまだその信頼度が完全に実証されていない点である。

トランジスタ継電器における故障としては

- (1) 製造工程の不備, 不適当な部品や材料を使用したことによるもの
- (2) 設計が不良で, 部品を電氣的, 熱的に無理な状態で使用したことによるもの
- (3) さらに研究を要する真に基礎的な不良

に大別することができよう。

このうち(3)は各分野の技術水準に関係する問題ですぐ解決することはむずかしい。(1)にあげた事故は設計上部品の選定に誤りがなく, 材料, 部品の検査が厳密に行なわれればこれに起因する故障はごくわずかになる。(2)は設計者の技術によって生ずる問題で, 設計者は過去の実績, 故障についての技術的蓄積によって回路の設計基準を明確にしておくことが必要である。

このように見た場合トランジスタ継電器の信頼度は当然のことではあるが使用部品の信頼度と設計技術水準によってきまるといえることができる。そこでまず考えなければならないことは電磁形継電器の場合と同様継電器の設計と保守をいかに単純化するかということである。これは単に回路部品数を減らすだけでなく, 継電器に要求される必要機能に寄与していない部品を除去し装置の複雑さを軽減し生産, 保守を容易にするという重要な意味をもっている。個々の部品の故障率についてはいろいろ発表⁽⁵⁾されており, それらの数値は使用, 環境条件によって大幅に変わることが示されている。これら条件のうちでトランジスタ継電器でもっとも考慮しなければならないのは温度であろう。継電器の特性に及ぼす温度の影響については既述のとおりで対策は十分可能であるが, トランジスタの故障率は大略接合温度が20°C変化すれば1けた変化すると言われている。このことは逆に保護継電器のように高信頼度を要求される製品ではできるかぎり定格低減をはかった使用法が望ましいことになる。これはその他の半導体製品, 抵抗器などにも言えることでトランジスタ継電器設計上の第一条件となる。

それとともに回路構成のうえではスイッチング回路を基本にして, 各回路とも入力を量として扱わず信号の有無によって動作判定を行なわせることが好ましい。これは各常数が所定の制限値を越した場合をもってトランジスタの故障率を表示している⁽⁷⁾ので, スwitchング回路によればこれを越えた場合でも回路の動作は十分可能な回路設計を行なうことができるからであり, 実質的に故障率を低減させたことになる。

次にトランジスタ継電器がなにがしかの故障率で故障を生ずると

いうことを前提としてその対策を考えてみると

- (1) 回路の主要点に表示装置をつけて常時監視する。
- (2) 点検回路を設け簡単な操作で随時総合動作の点検ができるようにする。
- (3) 継電器内に独立に所期の機能をみたす複数個の回路を内蔵し, それらのオア, アンドまたは m 個中 n 個の動作によって動作判定を行なわせる(冗長系の利用)。
- (4) 複数の継電器(たとえば故障検出継電器と主継電器)を併用し, 継電器の故障が直ちに誤動作にならないようにする。

などの方法がある。しかしこれらの対策も技術, 経済上の制限があり実施できる場合とできない場合がある。

結局トランジスタ継電器の信頼度については数値的に扱える段階にいたっておらず今後に残された問題が多いが, 一般にトランジスタ回路素子の劣化は初期にあらわれやすい点より, 当初は電磁形継電器なみの保守点検を行ない実績に応じてほしいにその回数を減らしていくような実際の運用が望ましい。また筆者らの5年以上にわたる現地試験や納入実績ではトランジスタそのほかの回路部品に障害を発生したことはなく, 特性の経年変化も認められていない。

5. 結 言

継電器および継電装置をトランジスタ化することにより一段と進んだ技術分野が開けてくる。しかし適用に当たってはトランジスタ化の目標を明らかにするとともにその長短については正しい技術的判断の下に製作および使用することが必要である。本文では製品化についての重要な問題点, 信頼度の現状について述べたが, トランジスタ継電器はすでに試用の段階から実用の域に達しているものと考えられる。特にトランジスタ継電器は電磁形では考えられないような可能性をもっており, 今後急速な発展が期待される。

参 考 文 献

- (1) H. T. Seeley: AIEE Trans. Vol. 73, pt. III, April, 1954, pp. 161~69
- (2) H. C. Barnes: AIEE Trans. Vol. 73, pt. III, April, 1954, pp. 170~73
- (3) H. F. Hodges: AIEE Trans. Vol. 73, pt. III, April, 1954, pp. 174~86
- (4) W. S. Price: AIEE Trans. Vol. 73, pt. III, April, 1954, pp. 187~95
- (5) 三木: 日立評論 46, 日立研究所記念論文集 38 (昭39-11)
- (6) たとえば, 藤沢, 齋藤訳: 電子装置の信頼性 (近代科学社)
- (7) 杉山, 大塚: 日立評論 47, 1486 (昭40-8)