

トランジスタ無接点継電器とその応用

Transistor Static Relay System and Its Applications

中道松郎* 藤田茂惟* 角田章*
Matsurô Nakamichi Shigenobu Fujita Akira Kakuta

内 容 梗 概

最近、エレクトロニクス技術を取り入れ、産業用電動力応用の分野にも盛んに用いられるようになってきているトランジスタ無接点継電器の一例の紹介と、その設計および応用の問題点について述べている。

弱電分野で発達してきた広い意味でのトランジスタ無接点継電方式を強電分野に適用する場合には、高速、小消費電力、高信頼性などの本来の特長を生かし、反面、耐雑音性、温度特性などの欠点を補うための経済的な設計法が必要となることを述べ、その適用例として2段電圧帰還回路を用い、バックラッシュ特性を積極的に利用し耐雑音性をもたせやすくした基本回路、パルス性雑音対策を施した記憶回路について述べた。さらに応用上の一般的問題点およびセメント、製鉄工場ならびに工作機械への適用例と具体的な問題点を述べている。

1. 緒 言

最近の制御技術の著しい進歩に伴い、産業用電動力応用の分野にもこれらの技術が導入されて、新しい制御機器⁽¹⁾および制御方式⁽²⁾が実用化されてきている。トランジスタ無接点継電器の採用もその一つの現われとみることができる。すなわち制御に使用される各種制御器具に対する要求も高度になり、高信頼性、高速度、小形化などの要求に応じ、磁気増幅器方式と並んで各社^{(2)~(8)}で開発され、盛んに用いられるようになってきている。

このようなトランジスタなどの半導体素子とその応用は、従来主として弱電の分野で発達してきたもので、高速、高信頼性、小消費電力などに大きな特長をもっている。反面、電動力応用のようないわゆる強電の分野における応用においては欠点になる場合もあり、それらの設計および応用にさいしては、両者の協調をはかる必要がある、その間にいろいろの問題が横たわっている。

日立製作所では、すでに多くの報告^{(1)~(9)~(13)}がなされているが、本報ではさらに特殊仕様の一方式について、電動力応用の面から考えた回路設計および応用上の諸問題を主眼にして述べる。

2. 動作原理と構成

本論にはいる前に説明の便宜上トランジスタ無接点継電器の動作原理と系の構成について、電磁継電器と対応させて簡単に説明する。

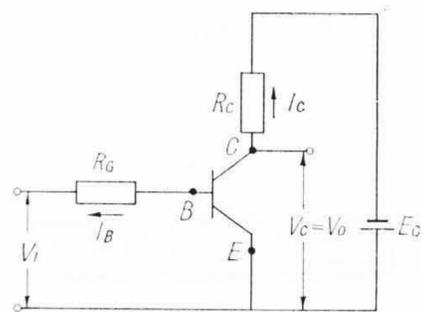
2.1 動作原理

トランジスタ無接点継電器は周知のように、トランジスタの特性を利用して無接点的に制御できる二つの電氣的に異なる状態、すなわち二値状態をもって、電磁継電器のON、OFFに対応させ、さらに接点の直列、並列接続などに対応する各種の論理動作ができるように、ダイオードその他の助けをかりて、入力回路を構成したものである。

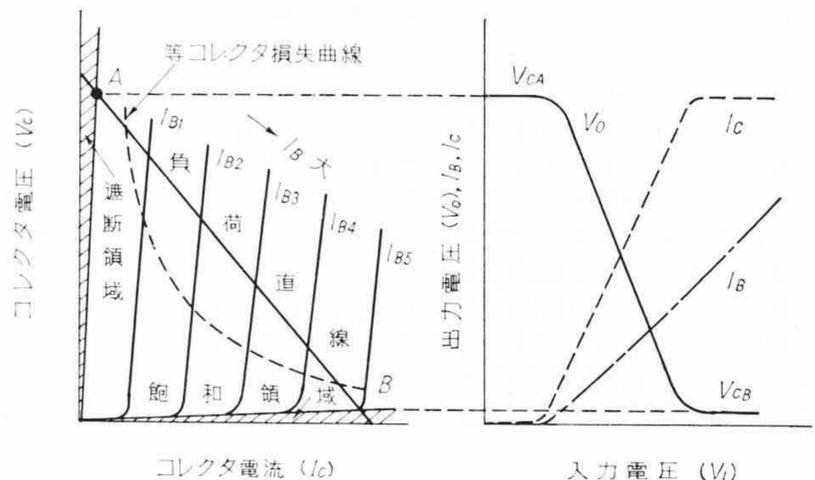
(1) 二値状態の選定

この二値状態は一般には目的に応じ、いろいろの状態が採用できるが、工業用に用いられるものは現在のところ大部分、次に示すようなエミッタ接地方式における飽和および遮断の二領域がとられている。その理由としては、エミッタ接地方式は制御あるいは入力端子としてベースを採用することにより、電流および電圧増幅が可能で入出力数が多くとれること、ならびに飽和、遮断の二領域をとることにより消費電力を少なく、かつ安定な動作を行なわせやすく、したがって設計のマージンがとりやすいためである。

今説明の便宜上 PNP トランジスタを用いたエミッタ接地の基



第1図 基本エミッタ接地回路



第2図 直流出力静特性および入出力特性

本回路を示すと第1図のようになり、またこの直流出力静特性および入出力特性は第2図のようになる。第2図においてA点のようにコレクタ電流 I_C の流れない領域を遮断領域、B点のように I_C が飽和している領域を飽和領域、その中間を能動領域という。図からA、B両領域がトランジスタ内での電力損失 P_C が最も小さいことがわかる。今入力端子に電圧を加えると、トランジスタは遮断領域Aから飽和領域Bに負荷直線に沿って変化し、出力電圧は V_{CA} より V_{CB} に移行し、これらがそれぞれ電圧で考えた場合の二値状態となる。

なお、実際の回路ではさらに工夫をほどこした各種の回路方式^{(4)~(7)}があるが、ここで説明するものはバイアス電源およびバイアス回路を設けて高温の際にも十分良好な遮断状態が保たれるようにし、かつある値以下の入力電圧に対しても遮断状態を保ち、雑音に強くするとともに、このような回路を2段接続し、さらに帰還回路を設けて入出力特性を改善し、スナッチ特性およびバックラッシュ特性をもたせるようにしてある。

(2) 論理動作

以上、トランジスタ無接点継電器の二値状態のとり方を説明したが、これに少なくとも従来の電磁継電器と同等の働きをさせる

* 日立製作所習志野工場

第1表 トランジスタ基本論理素子とリレー回路との対応

種類	回路方式		動作表示																						
	回路方式 (説明用簡略回路)	相当リレー回路	論理式	真理表	動作説明図 (タイムチャート)																				
And (論理積)			$A \cdot B = O_a$ $\bar{A} \cdot \bar{B} = O_b$	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>B</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>O_b</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>O_a</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	A	0	0	1	1	B	0	1	0	1	O_b	1	1	1	0	O_a	0	0	0	1	
A	0	0	1	1																					
B	0	1	0	1																					
O_b	1	1	1	0																					
O_a	0	0	0	1																					
Or (論理和)			$A + B = O_a$ $\bar{A} \cdot \bar{B} = O_b$	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>B</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>O_b</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>O_a</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	0	0	1	1	B	0	1	0	1	O_b	1	0	0	0	O_a	0	1	1	1	
A	0	0	1	1																					
B	0	1	0	1																					
O_b	1	0	0	0																					
O_a	0	1	1	1																					
Not (否定)			$\bar{A} = O_b$	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>O_b</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	A	0	1	O_b	1	0															
A	0	1																							
O_b	1	0																							
Memory (記憶)			$\overline{A \cdot O_a} \cdot B = O_a$	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>O_b</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>O_a</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	0	0	1	0	B	1	0	0	0	O_b	1	1	0	0	O_a	0	0	1	1	
A	0	0	1	0																					
B	1	0	0	0																					
O_b	1	1	0	0																					
O_a	0	0	1	1																					
Time Delay (On-delay) 遅延			$A(T) = O_a$	<table border="1"> <tr><td>A</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>O_a</td><td>0</td><td>1(T)</td></tr> </table>	A	0	1	O_a	0	1(T)															
A	0	1																							
O_a	0	1(T)																							

ためには、いわゆる論理回路を構成できるようにする必要がある。この方法としては現在、抵抗で入力回路を構成する RTL⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽¹⁴⁾ (Resistor Transistor Logic)、トランジスタの直列、並列回路を使用する DCTL⁽¹⁴⁾ (Direct Coupled Transistor Logic) などがあるが、ここではその一例として特性ならびに経済的に有利なダイオードゲートを使用する DTL⁽¹⁴⁾ (Diode Transistor Logic) 方式について説明する。

この方式は、ダイオードの方向性とトランジスタの特性を利用し、リレーの直列、並列接続その他に相当する回路構成ができるようにしたもので、最も基本的な論理動作をするものについて回路例、論理動作表示およびリレー回路との関連性を示すと第1表のようになる。

2.2 系の構成

以上動作原理と論理動作について述べ、その基本回路例を示したが、このようなトランジスタ無接点継電器で電磁継電器と同等以上の働きをさせるためには、前述の基本論理素子のほかに制御回路の構成に便利なように第2表に示すような各種の素子をそろえ、全体で一つの制御系を構成するようにしている。

この分類は各社⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾ 多少異なるが大別すると基本論理回路を構成するに必要な基本論理制御素子と特殊な論理および補助的な役割をする特殊および補助制御素子と電源、表示、入出力素子などから成る付属制御素子に分類することができる。

(1) 基本論理素子

(a) 判断要素：これは後述の記憶素子とともに系の主要構成要素で、判断的な論理動作つまり電磁継電器接点の直並列接続と

第2表 トランジスタ無接点継電器系の構成

分	類	素子名
基本論理制御素子	判断要素	And Or And-Or Or-And
	記憶要素	And-Memo Or-Memo
	遅延要素	On-Delay Off-Delay On-Off Delay
特殊および補助制御素子	特殊制御要素	TH FCその他
	補助制御要素	Amp Out Pnt その他
付属制御素子	電源要素 表示要素 入力要素 出力要素	AVR Ind 各種操作スイッチその他 Amp リレーその他

それらの組み合わせ論理動作を行なうものである。本例の特長は第2表のように単純な And, Or 回路のほかに素子数、部品の節減さらに配線の簡略化を目的とした複合論理要素 And-Or, Or-And 回路を採用し、さらに各素子とも電磁継電器の a, b 接点に相当する互いに極性の異なる2種の出力をとれるようにし、制御回路構成の便をはかっている点にある。

(b) 記憶要素：これは電磁継電器の自己保持回路に相当するものでシーケンス構成の際に重要な役割を果たすものであり、この素子も素子数、部品の節減、配線の簡略化を目的に And, Or ゲートと組み合わせて複合論理素子を標準としている。

(c) 遅延要素⁽¹⁸⁾：これも上記要素とともにシーケンス回路では欠くことのできないもので、緩動速放形、

速動緩放形および緩動緩放形の遅延リレーに相当する On-遅延, Off-遅延および On Off 遅延素子をそろえ実際の使用の便をはかっている。

(2) 特殊および補助制御素子

(a) 特殊制御素子：以上の基本論理制御素子のほかに特殊な制御が可能になるように時間操作の単一パルスおよび繰り返しパルスを発生することができる TH 素子およびフリッカ回路に相当する FC 素子など用途に応じて各種の素子⁽¹⁹⁾も使用できる。したがって電磁継電器では困難であったいろいろの制御も比較的簡単に行なえるようになり、系の特長の一つにもなっている。

(b) 補助制御素子：本質的な論理動作にはあずからないが、論理動作の補助的な役割をするもので、たとえば論理素子の出力数増大をはかり、出力素子へのつなぎとしての役割をする信号増幅素子および特殊制御の際に必要な波形整流素子などで、系の動作を確実にし、かつシーケンス構成の自由度を増し、経済的な回路構成に役だつものである。

(3) 付属制御素子

(a) 電源素子：動作の安定性、素子の保護などを考慮して直流定電圧電源を用意しており、これは要求により事故防止、Fail Proof を考慮した過電流保護回路とか、バイアス電源と主電源の相互関係による事故防止回路などを設けている。さらに保守、検査などを考慮し、素子の特性検出回路(チェツカ)なども付属させることができる。

(b) 表示素子：素子の動作を確認するためのもので、調整、保守の便をはかっている。

(c) 入力素子: 入力信号素子としては押ボタンスイッチ, 切替スイッチなどが価格の面から一般に用いられるが, 特殊な用途を考慮して無接点入力素子も使用できる。

(d) 出力素子: 現在は価格の面からトランジスタとリレーを組み合わせたAmpリレーがおもに使用されているが, 高ひん度, 高信頼性の用途を考え, 磁気増幅器方式, 電力トランジスタ方式のほか各種の直流および交流無接点出力素子も使用できる。

なおこれら各素子は基本論理制御素子を標準とした規定の入出力条件のもとで自由に相互接続できるように計画, 設計されていることはもちろんである。

3. 設計とその問題点

以上のように系の構成は論理設計, すなわち制御回路構成の便利さ, 経済性などを考えて計画されるが, 各要素の回路設計も強電分野への適応を考慮して経済性, 信頼性およびその他の諸特性相互間の協調をはかってなされる。

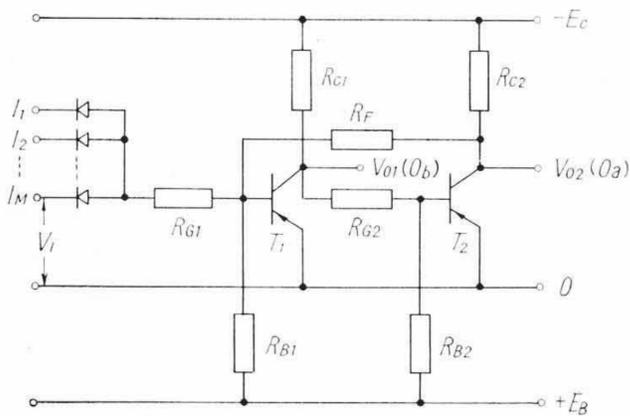
3.1 基本回路の設計

その具体的な例として, 系の根幹となる判断要素の基本回路をとりあげて説明する。

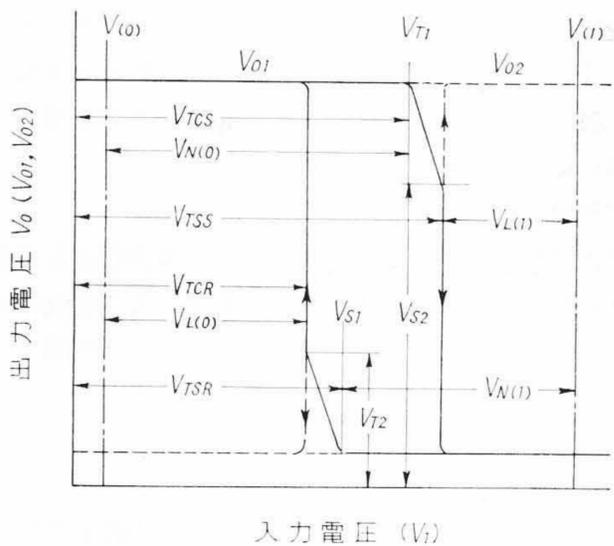
(1) 仕様決定基本式

基本回路はすでに述べたようにエミッタ直接接地のトランジスタ2段増幅回路を基本とするもので, 次段出力より初段入力に正帰還を加えることによって第4図に示すように入出力特性にスナップ特性およびバックラッシュ特性をもたせることにより, 入出力数の増大, 耐雑音性の向上をはかっている。

このような回路は, 一般には回路定数の選定および温度, 負荷条件などにより多少異なった入出力特性を示すが, ここでは強電向きに応答速度をそれほど問題にせず, 安定性, 信頼性および使いやすさを主眼とした場合について考える。すなわち単位信号レベルでは, 許容雑音電圧を考慮した動作レベルで完全飽和または遮断状態とし, スナップ特性, バックラッシュ特性をもたせるよ



第3図 基本回路の一例



第4図 基本回路入出力特性

うにし, いわゆる Worst Case Design⁽¹⁴⁾ の思想に徹して直流的な設計をすることを目標にした場合について述べる。

今, 与えられた条件の範囲内で相互接続を考慮した場合の最悪接続条件をもとにして入出力数, 耐雑音性などと所要トランジスタおよびダイオードの諸特性との関係を求めると次のようになる。

(a) 出力電圧 (単位信号レベル)

トランジスタ無接点継電器系では多くの異なった素子を相互接続するので, 各種素子に共通な二値状態つまり飽和, 遮断状態に対応する単位信号レベルを設定する必要がある。

今, 飽和, 遮断時の出力電圧と各単位信号 (電圧) レベルとの関係を求めると次のようになる。

$$V_{0s1} = V_{0s2} = V_{CES} \leq V_{(0)} \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{0c1} = \gamma_2 E_C \left\{ 1 + (N_1 + n_1) \frac{R_{C1}}{R_{G1}} \right\}^{-1} \geq V_{(1)} \dots \dots \dots (2)$$

$$V_{0c2} = \gamma_2' E_C \left\{ 1 + (N_2 + n_2) \frac{R_{C2}}{R_{G2}} \right\}^{-1} \geq V_{(1)} \dots \dots \dots (2')$$

- ここに V_{0s1}, V_{0s2} : 初段および次段の飽和時出力電圧
- V_{CES} : T_1, T_2 の飽和時の電圧降下すなわち残留電圧
- V_{0c1}, V_{0c2} : 初段および次段の遮断時出力電圧
- $V_{(0)}, V_{(1)}$: “0”(飽和), “1”(遮断) に対応する単位信号電圧レベル
- N_1, N_2 : 初段および次段の許容出力 (分岐) 数
- $n_1 = \frac{R_{G1}}{R_{C2}}$: 初段から次段への等価出力分岐数... (3)
- $n_2 = \frac{R_{G1}}{R_F}$: 次段から初段への帰還量の等価出力分岐数
..... (4)
- γ_2, γ_2' : 係数

たとえば Or 回路相互接続の場合は次のようになる。

$$\gamma_2 = \left\{ 1 - \frac{(N_1 + n_1) V_{BE} + N_1 V_f - I_C' + N_1 (M-1) I_D}{(N_1 + n_1) E_C} \frac{I_C' + N_1 (M-1) I_D}{I_{C1}} \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{(N_1 + n_1) V_{BE} + N_1 V_f}{(N_1 + n_1) V_0} \right\}^{-1} \dots \dots \dots (5)$$

$$\gamma_2' = \left\{ 1 - \frac{(N_2 + n_2) V_{BE} + N_2 V_f - I_C + N_2 (M-1) I_D}{(N_2 + n_2) E_C} \frac{I_C + N_2 (M-1) I_D}{I_{C2}} \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{(N_2 + n_2) V_{BE} + N_2 V_f}{(N_2 + n_2) V_0} \right\}^{-1} \dots \dots \dots (6)$$

- ここに V_{BE} : トランジスタのベース, エミッタ間順方向電圧降下
- V_f : ダイオード順方向電圧降下
- I_C : トランジスタのコレクタ, エミッタ間漏えい電流
- I_D : ダイオード逆方向漏えい電流

(b) 動作電圧 (許容雑音電圧)

次に雑音電圧と関連させて動作電圧つまりトランジスタ T_1, T_2 が各二値領域から他の領域に移行する臨界の入力電圧を求めると次のようになる。すなわち第3図および第4図より初段回路の入出力特性に着目すると, 入力電圧増加時 (Set 時) は

$$V_{TCS} = V_I (I_{B1} = 0) = \frac{R_{G1}}{R_{B1}} E_B + V_{BE} \left(1 + \frac{R_{G1}}{R_{B1}} \right) - R_{G1} I_{C0} + V_f \geq V_{N(0)} + V_{(0)} \dots \dots \dots (7)$$

$$V_{TSS} = V_I (V_{01} = V_{S1}) = V_{T1} + \frac{R_{G1}}{R_{G1}} \frac{E_C}{\beta_1} \left(1 - \frac{V_{S2}}{V_{01}} \right) = V_{T1} + (V_S + n_2 V_{02} - V_{T1}) \left(1 - \frac{V_{S2}}{V_{01}} \right) \geq V_{(1)} - V_{L(1)} \dots \dots \dots (8)$$

また入力電圧減少時 (Reset時) は

$$V_{TSR} = V_I (V_{01} = V_{CES}) \\ = V_{T1} + \frac{R_{G1}}{R_{C1}} \frac{E_C}{\beta_1} - n_2 V_{02} \geq V_{(1)} - V_{N(1)} \dots (9)$$

$$V_{TCR} = V_I (V_{01} = V_{T2}) = V_{T1} + \frac{R_{G1}}{R_{C1}} \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{V_{T2}}{V_{01}}\right) - n_2 V_{02} \\ = V_{T1} + (V_S + n_2 V_{02} - V_{T1}) \left(1 - \frac{V_{T2}}{V_{01}}\right) - n_2 V_{02} \\ \geq V_{L(0)} + V_{(0)} \dots (10)$$

ただし上式はスナップ特性をもたせるため次の条件を満足する場合について求めたものである。

$$n_2 \frac{V_{01} R_{C1}}{E_C R_{G1}} \beta_1 \cdot \frac{V_{02} R_{C2}}{E_C R_{G2}} \beta_2 = n_2 \left(\frac{V_{01}}{V_{01} - n_2 V_{02} - V_{T1}} \right) \\ \cdot \left(\frac{V_{02}}{V_{S2} - V_{T2}} \right) \geq 1 \dots (11)$$

なお、以上の諸式において

$V_{TCS}, V_{TSS}, V_{TSR}, V_{TCR}$: 動作電圧あるいは臨界入力電圧 (第4図参照)

$V_{T1}, V_{S1}, V_{T2}, V_{S2}$: T_1, T_2 の遮断および飽和限界電圧
 $[V_{T1} = V_{TCS}, V_{S1} = V_{TSR}, V_{T2} = V_{01} (I_{B2} = 0), \\ V_{S2} = V_{01} (V_{02} = V_{CES})]$

V_{01}, V_{02} : T_1, T_2 の出力電圧

$V_{N(0)}, V_{N(1)}$: “0” および “1” レベルにおける許容雑音電圧

$V_{L(0)}, V_{L(1)}$: “0” および “1” レベルの許容レベル変動

E_C, E_B : 主電源およびバイアス電源電圧

β_1, β_2 : T_1, T_2 の直流電流増幅率

(c) 入出力数 (許容分岐数)

次に相互接続を考える場合の最悪入出力条件から、この回路のとり得る許容入出力数を求めてみる。

まず初段トランジスタ T_1 の飽和限界電圧におけるベース電流 I_{B1} は

$$I_{B1} \geq \frac{1}{R_{G1}} (V_S + n_2 V_{(1)} - V_{T1}) \\ = \frac{1}{R_{G1}} \{V_{(1)} - (V_{N(1)} + V_{N(0)}) + n_2 V_{(1)}\} \dots (12)$$

一方コレクタ電流 I_{C1} は(2)式を参照することにより

$$I_{C1} = \frac{E_C - V_{CE}}{R_{C1}} \leq \left(\frac{E_C}{R_{G1}} \right) \left(\frac{R_{G1}}{R_{C1}} \right) \left(\frac{1}{R_{G1}} \right) \\ \leq (N_1 + n_1) \frac{E_C}{R_{G1}} \left(\frac{\gamma_2 E_C}{V_{(1)}} - 1 \right)^{-1} \dots (13)$$

したがって飽和条件より

$$\frac{N_1 + n_1}{\beta_1} \leq \left(\frac{\gamma_2 E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left(\frac{V_S + n_2 V_{(1)} - V_{T1}}{E_C} \right) \\ = \left(\frac{\gamma_2 E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left(\frac{V_{(1)} + n_2 V_{(1)} - V_{N(0)} + V_{N(1)}}{E_C} \right) \\ \dots (14)$$

上式をさらに(7)~(10)式を参照にして書き直すと次のようになる。

$$\frac{N_1 + n_1}{\beta_1} \leq (1 + n_2) \left(\frac{\gamma_2 E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left\{ \frac{V_{(1)} - V_{N(0)} + V_{N(1)}}{E_C (1 + n_2)} \right\} \\ \dots (14)' \\ = \left(\frac{\gamma_2 E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left\{ \frac{2 V_{(1)} + \Delta V}{E_C} - \left\{ \frac{(V_{N(1)} + V_{N(0)}) + V_{L(1)} + V_{L(0)}}{E_C} \right\} \right\} \\ \dots (14)''$$

ただし

$$\Delta V = (V_S + n_2 V_{(1)} - V_{T1}) \frac{V_{S2} - V_{T2}}{V_{(1)}} \leq n_2 V_{(1)} \dots (15)$$

また、次段回路においても同様に

$$\frac{N_2 + n_2}{\beta_2} \leq n_1 \left(\frac{\gamma_2' E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left(\frac{V_{S2} - V_{T2}}{E_C} \right) \dots (16)$$

もし、 $V_{S2} = V_{(1)}, V_{T2} \geq V_{T1}$ とすれば

$$\frac{N_2 + n_2}{\beta_2} \leq n_1 \left(\frac{\gamma_2' E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left(\frac{V_{(1)} - V_{N(0)}}{E_C} \right) \dots (16)'$$

となり、これらが仕様決定の際の基本関係式となる。

また、許容入力数 M は次のようになる。

$$M \leq 1 + \frac{I_{C1}}{N_1 I_D} \left\{ \left(1 - \frac{V_{(1)}}{E_C} \right) - \left(\frac{N_1 + n_1}{\beta_1} \right) \left(\frac{V_{(1)}}{V_{(1)} - V_{T1}} \right) - \frac{I_C}{I_{C1}} \right\} \dots (17)$$

したがって、入力数はほとんど I_{C1}/I_D できまるので、 I_D の小さいダイオードを使用し、電流レベル I_{C1} を適当に決めることによって実用上はほとんど問題なく設計できる。

以上の諸関係式から帰還形基本回路の特長として次の点があげられる。

(i) 出力数または許容雑音電圧が大きくとれる。

帰還のない場合には(14)式および(14)'式において $n_2 = 0$ の場合に相当し、許容出力数 N_1 が小さくなることは明らかである。また雑音電圧についても $V_{N(0)} + V_{N(1)} \leq V_{(1)}$ であるが、帰還回路を設けることにより $V_{N(0)} + V_{N(1)} > V_{(1)}$ にすることも可能で、この点にバックラッシュ特性をもたせる意義がある。また2段にすることにより、 n_1, V_{T2}, V_{S2} などを適当に設定し、総合出力数をかせぐこともできる。

(ii) スナップ特性を良好にできる。

帰還をある程度以上とることにより、ジャンプ特性をもたせた設計にすることができるので、スナップ特性が改善され、入力電圧の大きさにより P_C が大きくなる機会が少なく、スイッチング速度も早くなるため平均の P_C が小さく寿命にも好都合となる。

(2) 仕様決定の際考慮すべき事項

前に求めた仕様決定の基本式はどのような回路を相互接続させ、どのような条件で使用するかによって多少変わってくるが、これらをまとめて一般化すると結局次のような形になる。

$$\frac{N}{\beta} \leq k_1 \left(k_2 \frac{E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left(k_3 \frac{V_{(1)}}{E_C} - k_4 \frac{V_T}{E_C} \right) \\ \equiv K_1 \left(\frac{K_2 E_C}{V_{(1)}} - 1 \right) \left(\frac{V_{(1)}}{E_C} - K_3 \frac{V_T}{E_C} \right) \dots (18)$$

ただし

$$V_T = f(V_{N(0)}, V_{N(1)}, V_{L(0)}, V_{L(1)}, \dots) \dots (19)$$

$$k_1 = \gamma_1 \delta_1 \div \gamma_1 \delta t \cdot \delta r_1 \dots (20)$$

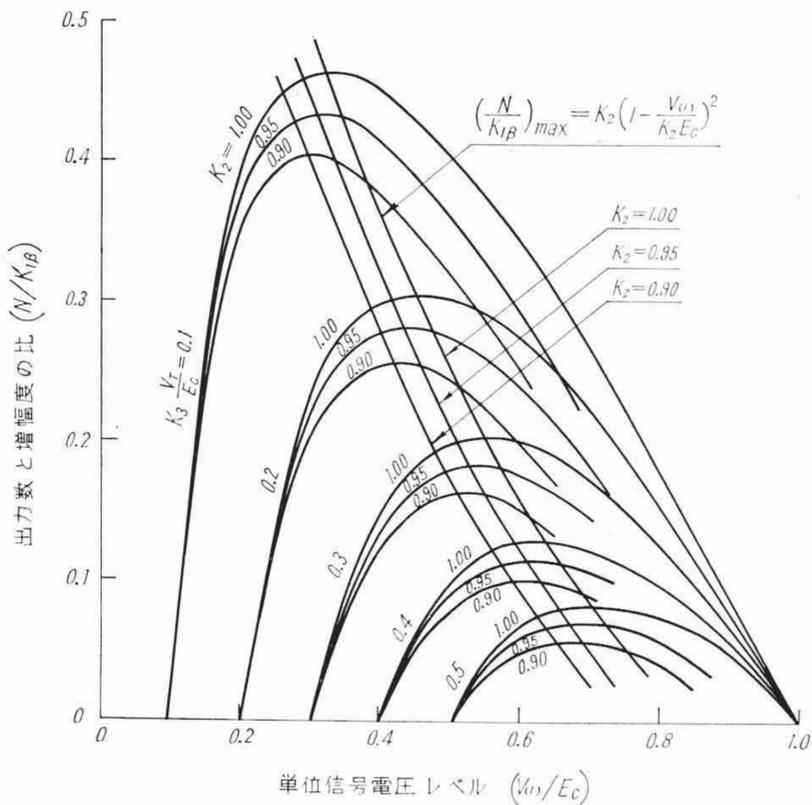
$$k_2 = \gamma_2 \delta_2 \div \gamma_2 \delta t_2 \dots (21)$$

$$k_3 = \gamma_3 \delta_3 \div \gamma_3 \delta v_3, \delta r_3 \dots (22)$$

$$k_4 = \gamma_4 \delta_4 \div \gamma_4 \delta v_4, \delta r_4 \dots (23)$$

上記係数中 $\gamma_1 \sim \gamma_4$ は回路方式と相互接続条件によって決まるもので回路係数と名づけることができる。また $\delta_1 \sim \delta_4$ は温度、電圧、経年変動ならびに回路構成要素の特性のバラツキなどによって決まるもので変動係数と名づけることができる。したがって、これら係数を信頼性、量産性などの面から設定することにより、信頼度設計ができる。

いま(18)式の関係を図示すると第5図のようになり、これから(または計算によっても最大値を求められる)許容出力数 N を最大にする単位信号レベル $V_{(1)}$, あるいは許容雑音電圧 $V_{N(1)} + V_{N(0)}$



第 5 図 基本仕様決定図

を最大にする $V_{(1)}$ を決定することができるので、与えられた構成要素と使用条件内での最も経済的な回路設計が可能となる。

一般には出力数 N と許容雑音電圧などの協調をとる必要があり、その協調のとり方は使用目的によって異なる。産業用電動力応用の分野に使用する低速度工業用無接点継電器の場合には、一般に次のような点を考慮する必要がある。

(i) 電圧、電流レベル：電源容量と関係して小消費電力の特長が阻害されない範囲、使用トランジスタの定格および信頼性、耐雑音性などを考慮して決定する。

(ii) 動作電圧(許容雑音電圧)：耐雑音性の点から低い電圧、電流レベルで十分な耐雑音性をもたせるため $(V_{N(0)} + V_{N(1)})/E_C$ を出力数と調和させてなるべく大きくとる。

(iii) 出力電圧(単位信号レベル)：耐雑音性、入出力数などの関係は考慮して、最も経済的に設計する。

(iv) 入出力数(許容分岐数)：経済性、使いやすさと関係するので耐雑音性などとの協調をはかって、たとえば第 5 図の関係からねらいをつけて設計する。

なお、実際に設計する場合には前述の変動係数に安全性、信頼性、量産性などを念頭に、主として次の各変動を考慮しなければならない。

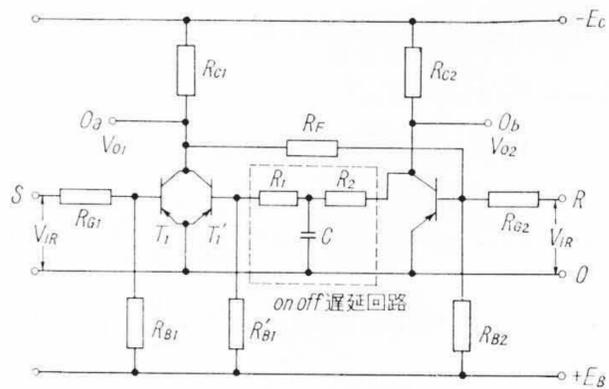
- (i) 電源電圧変動または脈動 (δv , k_3 , k_4 に関係する)
- (ii) 湿度による構成要素の特性変動 (δt , k_1 , k_2 に関係する)
- (iii) 回路定数の許容値あるいはバラツキ (δr , k_1 , k_3 , k_4 に関係する)
- (iv) 経年変動 (δt , δr に含まれる)

基本仕様が決まると、前述の諸関係式をもとにした計算式から構成要素の定数の決定および選択が容易に行なわれる。さらに必要の場合には確認実験が行なわれる。

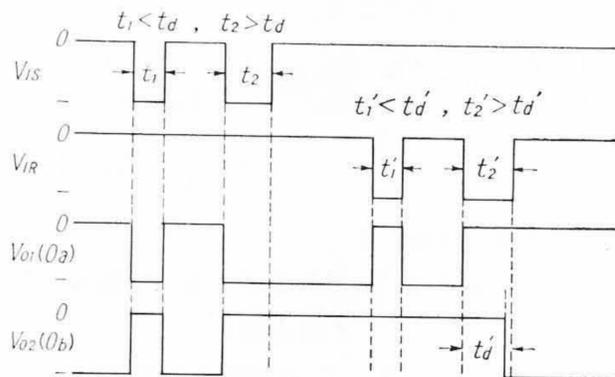
3.2 記憶回路その他の設計

(1) 記憶回路の設計

記憶回路も結局は前述の基本回路において $R_F = R_{C2}$ とし、 T_2 のベースに Reset 入力抵抗を加えたものとなる。つまり入力電圧が低下する場合には動作電圧 V_T が反対極性のほうにのびた対称性の回路とみなすことができ、基本設計は前述の基本回路に準じて行なうことができる。ただし、記憶回路は判断要素と異なり、パルス性入力に対して永久的な記憶動作をするため電動機応用のような強電用の場合には、これら強電機器からの誘導がパルス性の



第 6 図 雑音防止形記憶回路の一例



第 7 図 動作説明図 (タイムチャート)

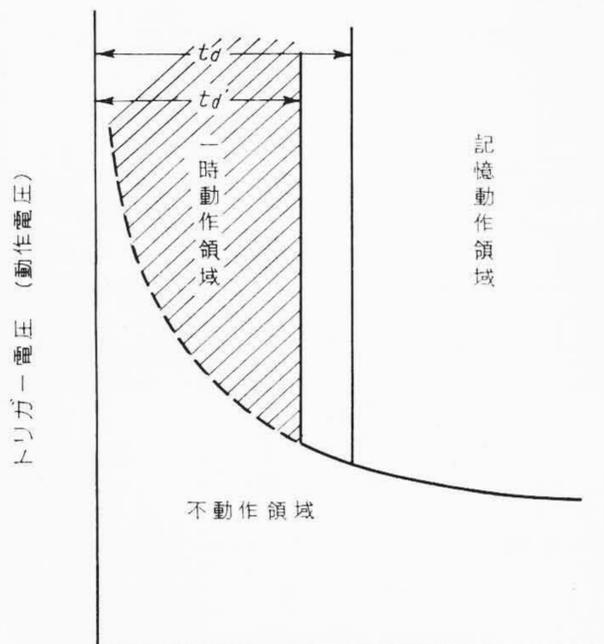
かなり大きな雑音となつてはいつてくる場合が多いので注意しなければならない。したがって、一般には入力回路に適当なフィルタあるいは遅延回路を設け、応答速度を犠牲にしてパルス性雑音を防止している。

そのほか改良回路⁽²⁰⁾⁽²¹⁾の一つとして第 6 図に示すような帰還ループに On Off 遅延回路を設け、応答速度を犠牲にすることなく耐雑音性をもたせたものも用意してある。すなわち Reset 側トランジスタ T_2 のコレクタから Set 側トランジスタ T_1' のベースに On Off 遅延回路が設けられているため、Set 側に電圧が印加されると第 7 図のように出力 O_a , O_b はほとんど遅れず入力電圧の持続時間つまりパルス幅が遅延回路の On 遅延時間 t_d より小さい場合には、パルスの消滅とともに旧状態に復帰してしまう。したがってこの遅延時間 t_d が負荷の応答速度より小さい場合には負荷は実際に誤動作を起こさないで済む。また Reset 側よりの入力電圧によっても O_a は前と同様に遅れず、かつパルス幅が Off 遅延時間 t_d' より小さい場合には記憶動作を行なわない。しかし O_b は t_d' だけ遅れる。したがって出力として O_a を使用することにすれば Set, Reset と遅れることなく許容雑音パルス幅を任意に設定できる。以上は負電圧トリガの場合についてのみ考えたが正のトリガにおいても同様の働きをする。設計に当たっては、直流的な“0”レベル変動に対しても誤動作しないように負および正のトリガ電圧を高くすることはもちろんである。いま、この回路の動作領域を示すと第 8 図のようになる。

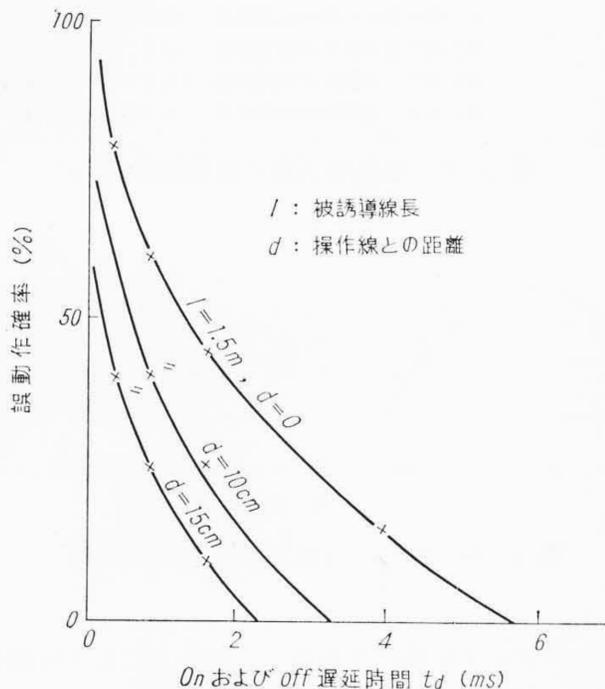
なお、雑音源として電磁開閉器の操作コイル電流の投入および遮断時のパルス性雑音によって実験した結果の一例を第 9 図に示す。これから On Off 遅延回路の効果は明らかである。実際には使用場所の雑音源の大きさ、性質などに応じて t_d , t_d' などを決定する必要があるが、普通の電磁開閉器などの投入遮断時の雑音に対しては 10 ms 程度で間に合う場合が多い。

(2) その他素子の回路設計

系には以上述べた判断要素、記憶要素のほかに各種の素子があるが、これらも各素子の特性のほか接続を考慮し、入出力特性などは基本回路に準じて設計される。設計に際しては、安定性、信頼性を主眼とし、さらに安全性 (Fail Proof) も考慮して設計するようにしている。たとえば電源の過電流保護、事故防止回路など



第8図 パルス応答特性



第9図 耐雑音特性の一例

はすでに述べたとおりで、そのほか各素子間の協調を考えて全体として一つの機能が発揮できるようにしている。

以上回路設計を主眼にして述べてきたが、これら素子の信頼度はトランジスタ、ダイオードなどの構成要素の信頼度⁽²²⁾に負うところが大きいことは論をまたない。われわれはこれら要素として生産および管理技術の安定した製品⁽²²⁾の中からさらに工業用として厳選されたものを使用し、信頼度の向上をはかっている。

また、保守、調整の便利さなどの面からは系の構成、回路設計のほかに構造も重要であるが、この点についてはプリント基板による接栓(せん)接続として組立、調整、配線、保守などの便を与えるほか、一番問題になる接触不良に対しても種々の配慮がなされている。

4. 応用例と使用上の問題点

4.1 応用分野と一般的留意事項

(1) 特長と応用分野

トランジスタ無接点継電器は前に述べたように、可動部である接点のない静止リレーであるということに起因する特長のほかに次に述べるような特長をもっている。

(i) 特殊な環境でも使用できる。

可動部を有する一般の電磁継電器と異なり、引火性ガスや塵埃(じんあい)のある場所でも使用できる。また振動の多い場所また

は騒音をきらう場所などにも好適である。ただし温度、異常電圧などには注意しなければならない。

(ii) 信頼性が高く、保守調整が容易である。

最近のトランジスタは生産技術の進歩により、性能が安定しているため信頼性が高い。そのため保守のひん度も非常に少なく、そのうえ構造その他調整の便を考えて設計されるので組立時の調整、その後の保守も容易である。

(iii) 高速、高ひん度動作に向く。

電磁継電器のような消耗部分がなく動作回数による寿命低下がほとんどなく、かつ磁気増幅器方式よりも容易に高速動作が得られるので、高速、高ひん度動作は最も大きな特長といえる。

(iv) 小形軽量、小消費電力である。

比較的簡便な回路方式、小形部品を採用できるので小形軽量で取付面積も小さくて済む。また消費電力も小さく、小さな電力で複雑な制御が可能である。

(v) 高度な機能が容易に得られ、応用範囲が広い。

基本制御素子のほかに特殊制御素子などを駆使することによりいろいろな制御回路も比較的容易に構成できる。なお(iii)、(iv)の長所は反面雑音に弱くなる恐れのあることを示すが、それに対してもすでに述べたように十分留意しているため、本来の特長を失わずに電動力応用その他工業制御用全般に使用できる。

以上の特長からも察知されるようにトランジスタ無接点継電器は電動力制御を含め、一般工業用特にシーケンス制御全般^{(2)~(8)}に適用できる。たとえば製鉄⁽²⁾⁽⁵⁾⁽¹¹⁾、セメント⁽⁵⁾⁽²³⁾、機械工業(工作機関係^{(4)~(7)})などで総括制御装置⁽⁵⁾⁽¹³⁾、遠隔制御装置⁽⁵⁾および特殊制御装置^{(2)(5)~(7)}などとして、各方面で実用化されていることは周知のとおりである。

特に

(i) 特殊な環境での制御として、引火性ガス、塵埃、振動などの下でセメント工場、炭坑などの適用例があげられる。

(ii) 高信頼性で保守を容易にする必要のある場合としては、故障による生産能率の低下、人命の危険の恐れのある場合とか、複雑な大規模な制御になり、普通の電磁継電器では保守に追われる恐れのある場合にも好適である。

(iii) 以上の要件のほかに、さらに高速あるいは高ひん度で動作させる必要のある場合、特に前者の場合はトランジスタ無接点継電器の独断場といえよう。

(iv) そのほか小形軽量にする必要のある場合とか、特殊な制御方式が必要な場合には容易に回路が作製され、かえって経済的に有利になる場合などがあげられよう。

以上のように、トランジスタ無接点継電器でなくてはならない場合と他の方法でもできるが総合的な経済性、使いやすさなどの点で採用される場合がある。

(2) 応用に際しての一般的留意事項^{(5)~(7)(24)}

すでに述べたように、トランジスタ無接点継電器は、高速、小消費電力、高信頼性などの特長をもっているが、反面これらの特長は使用条件によっては欠点になる。特に電動力応用などの工業用への応用については本質的にその危険が多いので、使用に当たっては規定の定格以内で欠点をカバーし、長所を生かした使い方が望まれる。

(i) 雑音その他電氣的な周囲条件について

トランジスタ無接点継電器はその本来の特長を生かすため、一般に高速、小消費電力になるように設計されているので、過大の雑音が誘導されないように設置状況、電源などに注意する必要がある。

一般に制御回路に影響を及ぼす誘導雑音源としては ① 負荷そ

のほかの大電流または高圧回路, ② 負荷そのほか主回路の開閉サー
 ージ, ③ 制御用の並置電磁開閉器その他の操作回路と内部配線,
 ④ 直流機, 溶接機などの火花放電, ⑤ 水銀整流器などの放電管の
 転流雑音などがある。なお, 不完全接地, 多点接地による電位変
 動, 配線漏えい抵抗などによって異常に大きな電圧が生ずる場合
 があるので注意しなければならない。一般に, これら誘導雑音は
 雑音源およびその配線からの距離によって著しく減少することが
 多いので, まず, これら雑音源からなるべく離すことが有効で,
 素子相互間の配線と電源, 操作用の配線などは密接しないよう
 にしたほうが安全である。なお入力操作回路は場合によっては, 誘
 導を避けられない場合があるので, 伝送レベルを高くし, 雑音防
 止形の特殊な入力素子を選定するなどの留意が望まれる。また設
 計標準値以上の雑音がどうしても避けられない場合には, 許容雑
 音電圧および制限雑音パルス幅を広くした特殊仕様のものを採用
 する必要がある。

そのほか, トランジスタは過大な電流, 電圧に対しては破壊す
 る恐れがあるので, 電気的な環境に対する注意, たとえば電源お
 よび配線に対して, あらかじめ考慮して計画することが望まれる。

(ii) 特殊な環境について

半導体は使用温度範囲が限定されている。Ge トランジスタ,
 ダイオードを主体とするものでは, 安全をみて 50°C, 最高 70°C
 が限度である。環境が 70°C 以上を要求する場合には Si を使用し
 た特殊形のものを採用したほうが安全である。

そのほか, 部品の選定, 制御回路の構成にも十分留意し, 2 重
 に安全をはかることが望まれる。

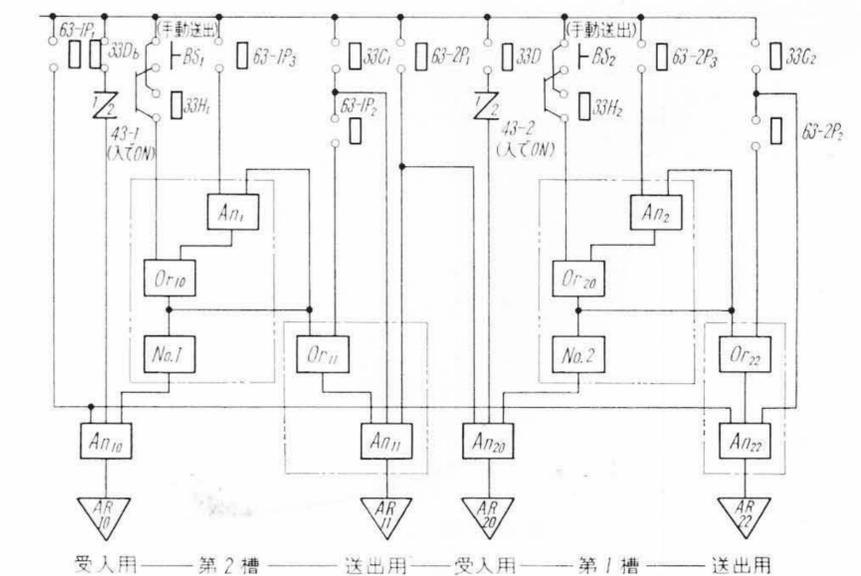
4.2 応用例とそれに関連した問題点(用途による 2, 3 の応用例)
 以上, 特長と適用分野および応用に当たっての一般的な留意事項
 を述べたが, ここでは具体的な応用例とそれに関連した問題点を説
 明する。

(1) 論理回路の構成と応用例

まず最初に, 絶縁性のダストの多い場所への応用の一つである
 空気輸送機用制御装置を例にとって, 理論回路の構成を考えてみる。

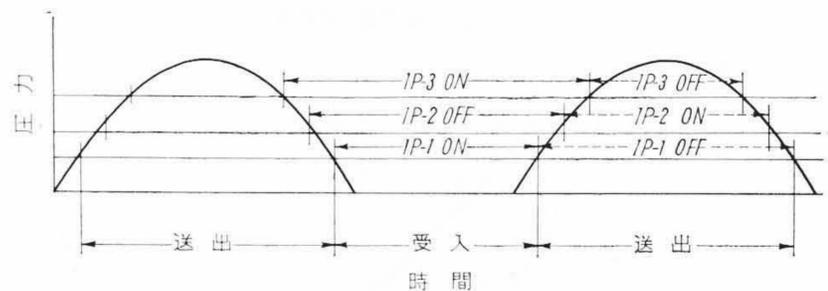
空気輸送機は圧送式と吸収式に大別されるが, 本例は粉末状の
 被輸送体, たとえば小麦粉, セメントなどを槽内に充てんし, 槽
 内圧力を上昇させて空気とともに風胴を通して目的地に圧送する
 圧送式日立双胴形空気輸送機用制御装置に応用したもので, その
 回路は第 10 図のようになる。なお, 主回路および運転準備警報
 回路などの付属回路は省略してある。

その動作は第 1, 第 2 の両槽が空槽であるとすると, 満杯検出
 の 33H₁ (33H₂) が OFF, 槽内圧力が低下しているため 63-1P が
 ON 状態にある。ここで吐出切替弁が第 1 槽に切り替わっていると
 すれば, 33D_b が ON であるため第 1 槽より受槽を開始する。
 すなわち 33H₁ が OFF であるから Or₁₀ の出力がなく, No₁ の出
 力と 63-1P₁, 33D_b の各信号により An₁₀ が動作し, 第 1 槽の受入
 弁が開いて (このとき 33C₁ が OFF となる) 粉体は第 1 槽にはい
 る (槽内圧力開始器 63-P の動作は第 11 図に示すとおりである)。
 受入れが進むと槽内圧力は上昇して, 満杯になると満杯検出ス
 イッチ 33H₁ が動作し, No₁ の出力がなくなるため受入弁は閉じ,
 33C₁ が ON となり受槽が完了する。同時に Or₁₁ が動作し, 圧送
 用の電磁弁で圧縮機よりの圧縮空気を槽内に吸い込み, 粉体は切
 替弁を押し開いて (33D_b OFF となる) 送出する。ここで送出に
 はいると 33H₁ が OFF となるが, 33H₁ の信号により Or₁₀ の出力
 と 63-1P₃ の信号により An₁ が自己保持する。槽内圧力が上昇し
 て圧送にはいれば 63-1P₃ は OFF となり, 自己保持は解かれるよ



記号	用途	説明
33D	吐出中切替弁用制限開閉器	(送出開始で動作)
33C ₁	第1槽コーン弁用制限開閉器	(コーン弁閉じでON)
33C ₂	第2槽コーン弁用制限開閉器	(コーン弁閉じでON)
33H ₁	第1槽満杯検出用制限開閉器	(満杯でON)
33H ₂	第2槽満杯検出用制限開閉器	(満杯でON)
BS ₁	第1槽手動送出用押釦開閉器	(ONで送出開始)
BS ₂	第2槽手動送出用押釦開閉器	(ONで送出開始)
43-1	第1槽受入選択用切替開閉器	(入でON, 切でOFF)
43-2	第2槽受入選択用切替開閉器	(入でON, 切でOFF)

第 10 図 空気輸送機の展開接続図



第 11 図 槽内圧力検出用開閉器動作図

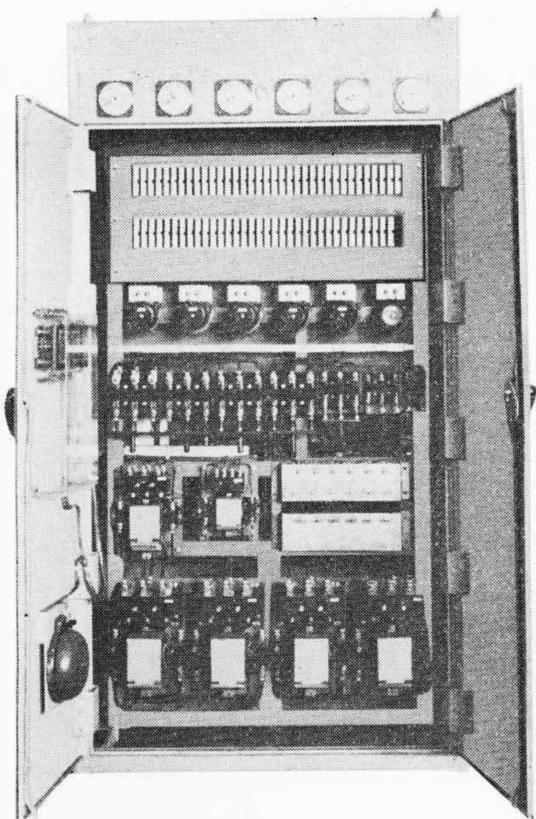
うなインターロックを設けてある。このようにして吐出切替弁が
 第 2 槽に切り替えられ, 第 2 槽への受槽が開始する。したがって
 第 1 槽で送出を開始すると第 2 槽では受入をはじめ, これを自動
 的に交互に繰り返して行く。

第 10 図において, 実線は単一基本論理素子で構成する場合, 点
 線は複合素子を用いた場合の各一個の素子を示しており, これか
 らもシーケンス構成の際は And, Or などの基本論理素子を縦続
 して使用する場合の多いことが知られる。本例では単一基本論理
 素子のみの場合 12 個必要であるが, 複合論理素子を用いれば半分
 の 6 個で間に合わせることができる。さらに素子間の配線も省略で
 きるので配線経費の節減, 制御盤の小形化にも役だつ。このよ
 うな見地からトランジスタとダイオード 2 段ゲートを 1 個の素子に
 組み込んだ複合素子を標準としている。以上のほか複合記憶回
 路, a, b 両出力の採用など使用の便宜さ, 経済性を考えて系の
 構成がなされている。また, ここではきわめて簡単な場合につ
 いて説明したが, 複雑な回路についても構成上の技術とマッチす
 るように計画されている。そのほか, 制御回路の構成については,
 いろいろ工夫されているが, ここでは省略する。

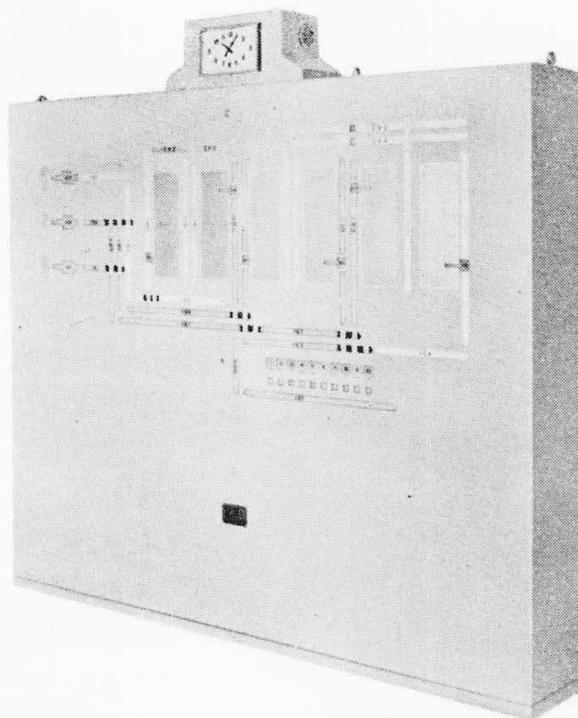
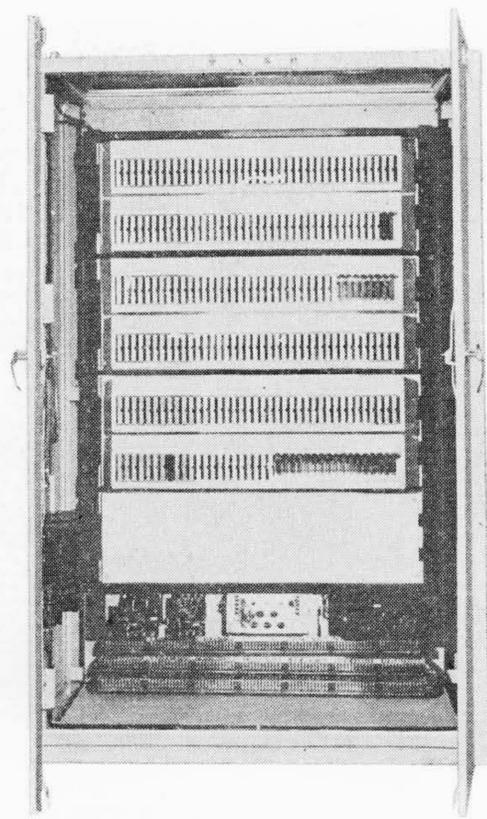
(2) ダストの多い場所への適用と留意事項

次に同じくダストの多い場所への応用例として, セメント工場
 におけるベルトコンベヤ用の電動機制御とその際の留意点につ
 いて述べる。

一般にベルトコンベヤのように多数の電動機を制御する場合,
 いっせいで起動することは電源設備の上から好ましくなく, また距
 離の長い被制御体が各地に分岐している場合, いちいち各機体の



第12図 電磁接触器と一括収納した制御盤

第13図(a) コンベヤ総括制御用
模擬照光盤

第13図(b) コンベヤ総括制御盤

近くに配置された現場操作盤で制御するのは機動性が悪いなどの点から一般に中央操作室を設けて、ここから総括制御する方法がとられる。この場合、中央からの操作指令や監視を行なうため順序起動、停止のほか過負荷時の上流停止、部分停止あるいは非常の場合のいっせい停止などの指令や表示警報装置が設けられる。さらに自動起動の可否を判別する点検回路を設け、すべての装置が中央では握できるようになっている。

このような制御盤の一例として第12図のセメント輸送用ベルトコンベヤ総括制御装置がある。これは出力部として磁気増幅器を用い主電磁開閉器を操作し、ダストの多い場所で故障の恐れが多い接点を有する電磁接触器をできるだけ省き、保守の容易化をはかっている。

(3) 雑音に対する考慮と応用例

比較的小規模で、主回路とトランジスタ無接点継電器が同一箱内に収納される場合は第12図のように主回路と制御回路を区分して配線することが望ましい。これは電動機起動時の大電流ほどの影響を制御回路に受けるからである。しかし、このように分離して配線すれば、すでに述べたようになら誤動作の心配なく実用に供することができる。盤内配線については上記の点のみ留意すれば制御回路内の配線は束線でもよく、その他の点でも特に留意する必要はなく、一般電磁継電器と同様に取り扱うことができる。

次に盤外配線についての問題の一つを実例について述べる。第13図は製鉄工場における磁石輸送ベルトコンベヤ総括制御用模擬照光盤であるが、この装置は照光盤でみるように多くの分岐コンベヤを持ち、それぞれダンパにより系統切替を行ない、実に24系統を数える複雑なものである。もちろん、それぞれ系統運転に関して総括するもので、事故時にも選択系統のみ停止するようすべてインタロックされている。

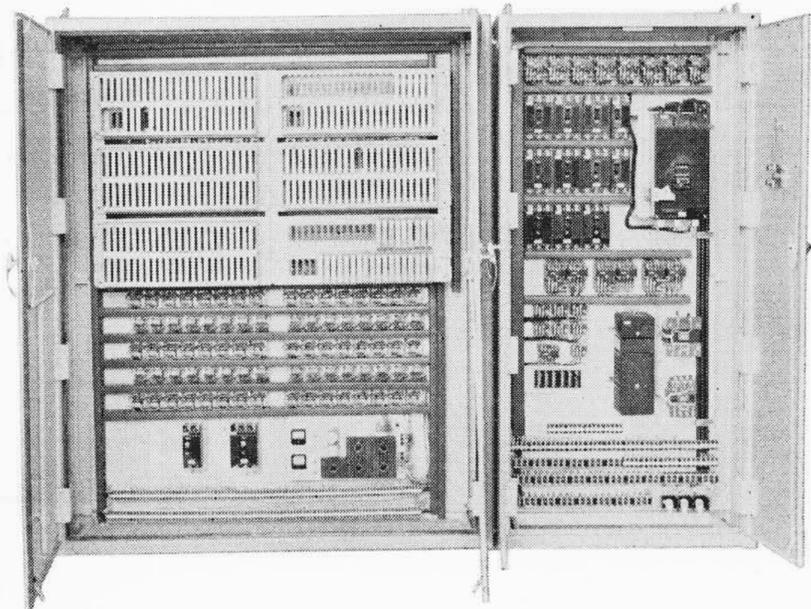
本装置は第13図の模擬照光盤のほかに無接点継電器を収納した制御盤、電動機駆動用のコントロールセンタ、中央よりの机形操作盤、事故種類の表示盤、現場操作スタンドのほか警報ベルなどから構成されている。このように多くの盤より構成されているため盤間配線が多く、加えて操作距離が約1kmに及ぶものがある。したがって、動力線より操作線への誘導が問題になる恐れがあるが、これも盤内と同様操作回路を分けて設置すれば問題はない。

操作機器として有接点の普通のものを用いる場合には、接点の接触抵抗の問題で操作電圧をトランジスタ回路に合わせて低圧にすることは望ましくないので、普通、交流100V以上とし変圧器により通降する交流伝送方式と直流100V以上とし抵抗分圧などによりトランジスタに適した操作信号を供給する直流伝送方式を用い、操作信号伝送時のS/Nを高めるようにしている。この場合、特に操作回路に多心ケーブルを用いると、線間あるいは大地間に静電容量があるため、交流の場合は定常的な漏えい電流により、直流の場合でも電源投入時の過渡電流による誤動作の恐れが十分出てくる。もちろん単心あるいは静電容量の小さいケーブルまたは100m以内の短区間では漏えいの量は小さく誤動作の可能性は少なくなるが、このような静電容量に対する考慮も十分しておく必要がある。なお、絶縁劣化による漏えい電流も同じ効果を及ぼすので注意する必要がある。この対策としてはたとえばバイアスなどで、これら静電容量、漏えい抵抗による電流または電圧を補償し、S/Nを十分とれるようにした入力回路の採用が望まれる。

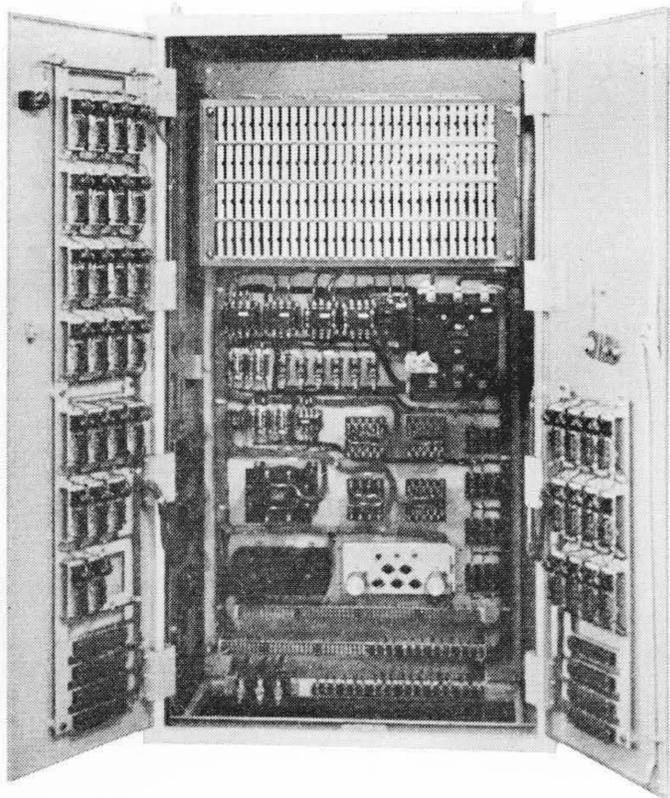
(4) 高ひん度および複雑な制御への応用

工作機のように使用素子数は少ないが高ひん度、高速制御を必要とする応用例について簡単に説明する。

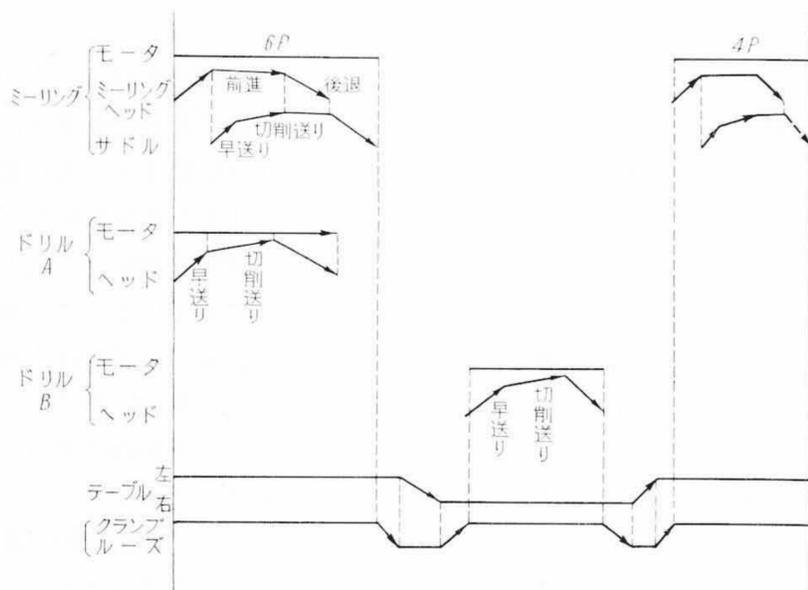
第14図は自動制御トランスファーマシン(ACM)用制御盤で



第14図 ACM用制御盤



第15図 STM用制御盤



第16図 STM サイクル線図

これは電動機のエンドブラケット加工機用で7ユニットから成り、ミーリング、ドリル、タップの各専用機とトランスファーユニットを全自動的に制御するものである。このように大規模の装置では電磁継電器の接点による回路のまわりこみの恐れがなく、回路構成が比較的容易であるという利点もある。

次に電動機ステータ切削用の専用機 (STM) に適用した例を第15図に示す。これは第16図のような早送り、切削送り、主軸の正逆、主軸電動機の極数変換などのサイクルを全自動的に行なうものである。

また、高精度の定寸装置への応用として円筒研削盤用定寸装置がある。これは送りテーブルと連動させた電気的信号を無接点素子の入力として、有接点のものに比較して容易に高精度を実現させた例である。

そのほか、高速、高ひん度動作のものとして電動機巻線止め用

クサビそう入専用機があげられる。これはコア上下、ファイバ送り、プレス送り、クサビ送り、クサビそう入を自動的に行なうもので、以上の1サイクルを短時間でこなわせるためトランジスタ無接点継電器を採用した例である。

5. 結 言

以上、トランジスタ無接点継電器系の一例について、その系の概要と設計の問題点を明らかにするとともに応用例と応用に当たっての留意事項を主眼にして述べた。

広義のトランジスタ無接点継電器は最初弱電の分野で発達してきたもので、それが次第に強電の分野特に制御の分野に適用されるに当たり、強電用として十分適応した形で使用されなければならない。

本報では、強電用に使用する場合、長所を生かし欠点をカバーするための設計の問題点とその解決の一方法を示し、同時に応用上の留意点について検討したものである。

今後、このトランジスタ無接点継電器をさらに発達させるためには製作者側がいっそう努力を重ねるとともに、使用者側のご協力とご援助に負う所が大きいと考えている。使用者からのご意見やご批判を有力な資料としてさらに研究を進めて行きたいと願っている。

最後に、これまで実用に当たってご協力くださった使用者側の関係各位、また半導体の応用に関し、弱電関係者から提供された適切な資料、アドバイスに対し、関係の方々に厚く謝意を表わすとともに常日頃ご指導いただいている日立製作所習志野工場松井部長、鈴木部長、友貞課長および鳴原課長におん礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 佐野, 中村: 日立評論 44, 165 (昭37-9)
- (2) 岩城, 宅間, 齊藤: 日立評論 44, 165 (昭37-9)
- (3) R. A. Mathias: Control Eng., 4, 67 (May 1957)
- (4) S. C. Sturman: Control Eng., 8, 103 (March 1961)
- (5) 茂木ほか: オートメーション 7, 9 (昭37-2)
- (6) 茂木ほか: オートメーション 5, 11 (昭35-7)
- (7) 山本ほか: オートメーション 8, 9 (昭38-2)
- (8) W. Weitbrecht: ETZ-A, 81, 889 (1960)
- (9) 小西: 日立評論 43, 20 (昭36-7)
- (10) 佐野, 吉田: 日立評論 44, 19 (昭37-8)
- (11) 佐野, 宅間, 小西: 日立評論 43, 16 (昭36-10)
- (12) 小西: 日立評論 44, 22 (昭37-7)
- (13) 佐々木: 日立評論 45, 15 (昭33-4)
- (14) Pressman: Design of Transistorized Circuits for Digital Computers (March 1959)
- (15) 吉田, 酒井, 宮: 三菱電機 34, 112 (昭36-12)
- (16) 永江, 中島, 桜木: 富士時報 33, 469 (昭35-6)
- (17) 田中: 安川電機 25, 247 (昭36-7)
- (18) 特許出願中
- (19) 同 上
- (20) 同 上
- (21) 中道, 石村: 和38年度電機4学会連大予稿, 1589 (昭38-4)
- (22) 杉山: エレクトロニクスダイジェスト 50, 99 (昭38)
- (23) 水谷, 桜木: 富士時報 35, 261 (昭37-2)
- (24) 佐野: エレクトロニクスダイジェスト 49, 165 (昭38)