U. D. C. 621.316.825：621.313.333：621.316.9

正特性サーミスタ応用による電動機焼損保護装置

Motor Overheat Protector by Positive Temperature Coefficient Thermistor

石　村　　博*　　小　林　正　巳*
Hiroshi Ishimura　　Masami Kobayashi

要　　旨

一般に電動機は電源の欠相(単相運転)や過負荷，拘束などの異常運転時にはコイル温度が上昇し，コイル焼損事故を招くおそれがあり，これに対する適切な保護装置が必要である。さらに近時，各種産業への広範な電動力応用のすう勢に伴い，一度事故が生ずると生産性疎害への影響も大きく，速応性にすぐれ，安価で的確に動作する電動機焼損保護装置開発の要望が一段と高まりつつある現状である。本報ではこれら焼損事故につながる危険性を事前に解決する方策として開発した正特性サーミスタをコイル温度の直接検出素子とする危険表示，電動機主回路遮断，マグネットスイッチ併用回路などの各方式について基本回路の検討，実用化の問題点などについてその概要を述べた。

1. 緒　　言

正特性サーミスタ (Positive Temperature Coefficient Thermistor，以下PTCサーミスタと略称することもある) は従来のサーミスタとは異なり，ある特定の温度範囲で抵抗値がほぼ2ないし3けたも急変する特長をもち電動機保護装置の温度検出素子としてそのすぐれた特性が期待されている。

筆者らはこの正特性サーミスタの抵抗急変温度が電動機の許容使用温度を検出するに好適な特性を有することに着目し，本素子を用いた電動機焼損保護装置について種々検討を続けてきた。

本報ではその一例として，ネオンランプによる過熱表示，継電器駆動による電動機電源遮断回路について述べ，さらにその設計上の問題，諸特性の検討結果などについて報告する。

2. 各種保護方式の概要

電動機焼損保護装置の必要性はいまさらいうまでもなく，異常温度上昇に基づく絶縁物の焼損，劣化を防止するためのものであるが，電動機の異常温度上昇の原因としては，たとえば次のような事項があげられる。

(A)　拘束運転，またはひん繁な起動，停止の繰返し
(B)　過電圧，または不足電圧など異常な電源事情
(C)　欠　相　運　転
(D)　連続的な過負荷運転
(E)　通風，換気条件の悪い環境での運転
(F)　そ　の　他

したがって，保護装置においては，これら異常温度上昇の原因，またはその結果である温度上昇をなんらかの方法で検知し，警報を出して手動で，あるいは自動的に電動機を停止させる方法がとられる。

そこで保護装置としても何を検知するか，どんな保護の仕方をするか，どんな取り付けの仕方をするかなどによっていろいろな方法が考えられる。表1にそれら電動機保護方式の各種例を示す。

(a)　ヒューズ，各種保護継電器

すでに述べたように異常温度上昇の場合は過電流が長時間流れる場合が多い。したがって，最も簡単な場合にはヒューズが採用されることは周知のとおりであるが，適当な特性がもたせにくく取り替えの手間を要するなど不便な点もある。しかし，最近では起動電流では溶断せず，長時間の過電流が流れたとき，あるいはコイル短絡時のように瞬時的に異常過電流が流れたようなとき溶断するタイムラグヒューズといったものも実用化されつつある。

表1　各種電動機の保護方式とその概要

分類	名称その他	保護方式	適用範囲・容量	備考
バイメタル方式	サーマルリレーおよび類似応用品	間接	一般過電流保護各種	過電流検出MgSwと組合せる
		直接	電流＋温度，一般小容量ほぼ15Aまで	一般的，温度調整に問題(バラツキあり)
		間接	熱膨張(バイメタル以外の)特殊用途小容量	高価，温度調整可能
感温半導体方式	PTCサーミスタ＋小形Ry	直接	一般向・小容量	直接温度検出 応答速度・温度追従性よい
	サーミスタ＋小形Ry	間接	一般向・各種	
	PTCサーミスタ＋MgSw	間接	特殊・大容量	
ヒューズ	ヒューズ(フェライト)	間接	特殊・各種	低価格
その他	各種保護継電器			

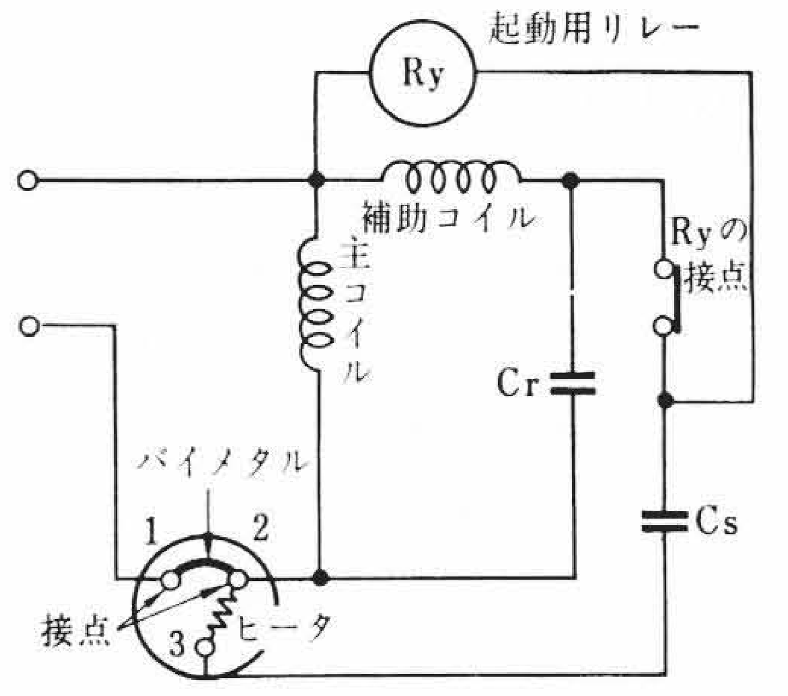


図1　バイメタル方式による電動機過負荷保護回路例

また，過電流，不足電圧，欠相などの諸原因を電気的に検知する各種の保護継電器も使用されているが，これらは一般に高価であり，かつ適当な特性をもたせにくく不便なこともあり，汎用電動機などを対象とした場合用途に制限をうける。

(b)　バイメタル方式

現在，最も広く使用されているものは，サーマルリレーのように過電流によって動作し，やはり間接的に温度を検知する類のものである。そのほか，電流と温度の双方の効果によって動作させる半間接的なものも最近用いられている。この方式によるものはいずれもバイメタルに接点を有し電動機フレームなどに取り付けて使用し直接電流を遮断でき，比較的安価である反面，調整，特性のバラツキなどの面で多少難点がある。

(c)　感温半導体方式(5)~(11)

以上述べた各方式は一部を除き焼損の直接の原因である電動機内部温度を間接的に検知するもので不便な点が多い。それに対し最近サーミスタのような感温半導体を電動機コイル中に埋込み直接温度を検出しコイルの焼損を保護しうるものが採用されつつある。すなわち，サーミスタからの出力によってリレーを動作させ

*　日立製作所習志野工場

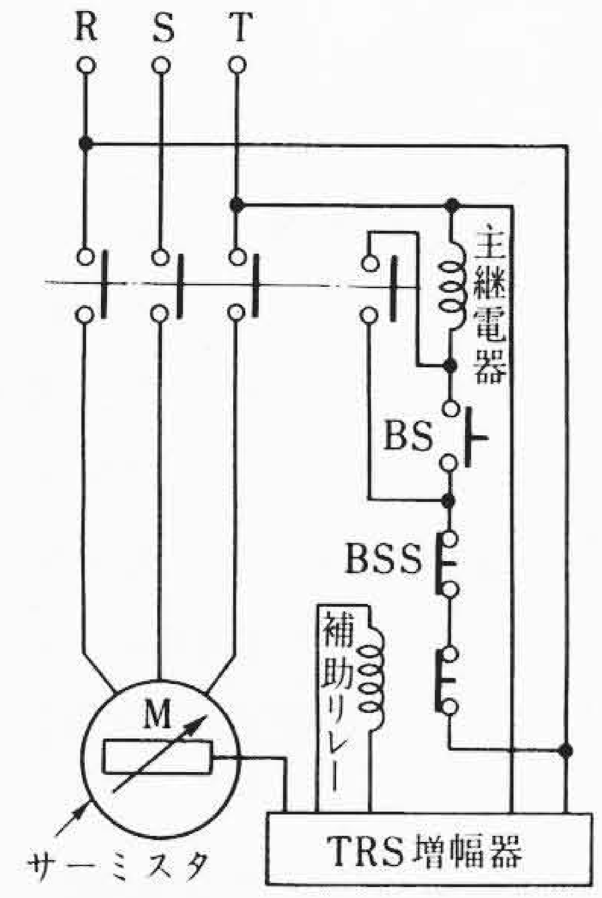


図2　ドイツ某社のサーミスタによる電動機過負荷保護回路例

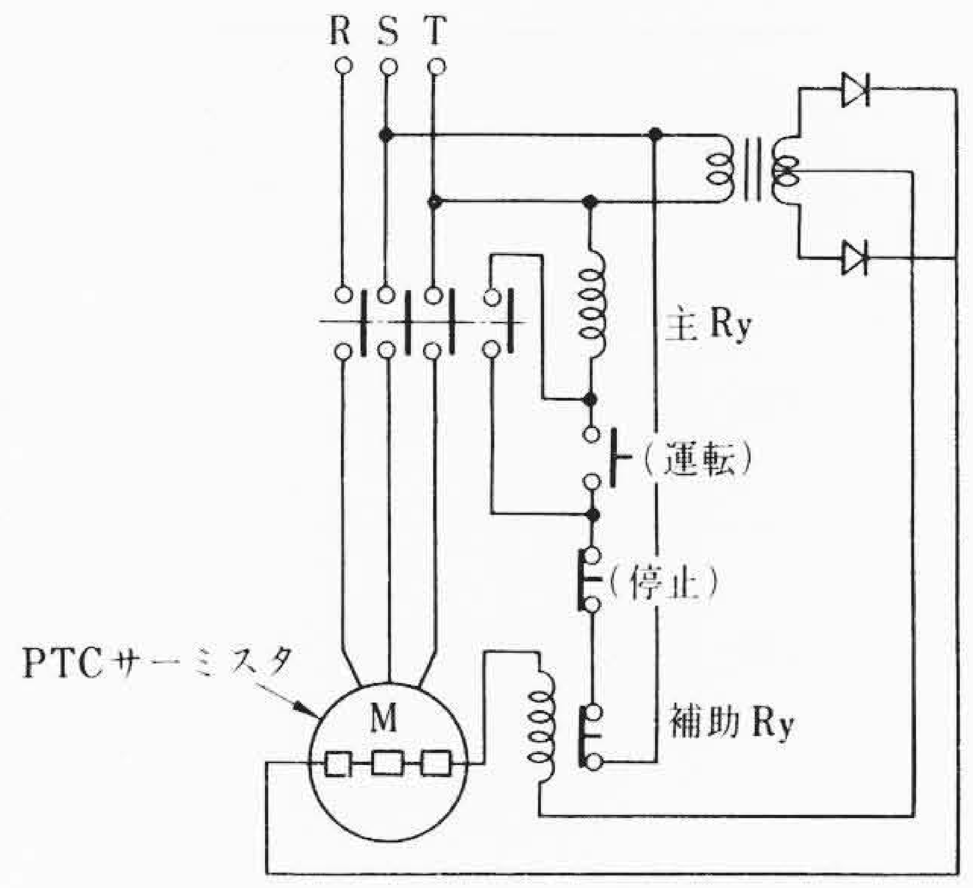


図3　アメリカ某社のサーミスタによる電動機過負荷保護回路例

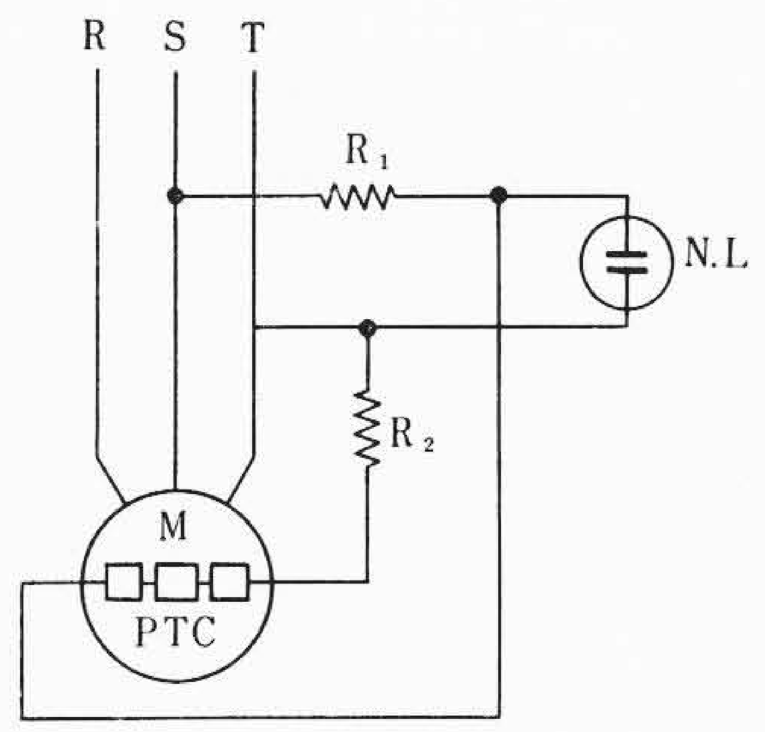


図4　アメリカ某社の正特性サーミスタによる過負荷表示回路例

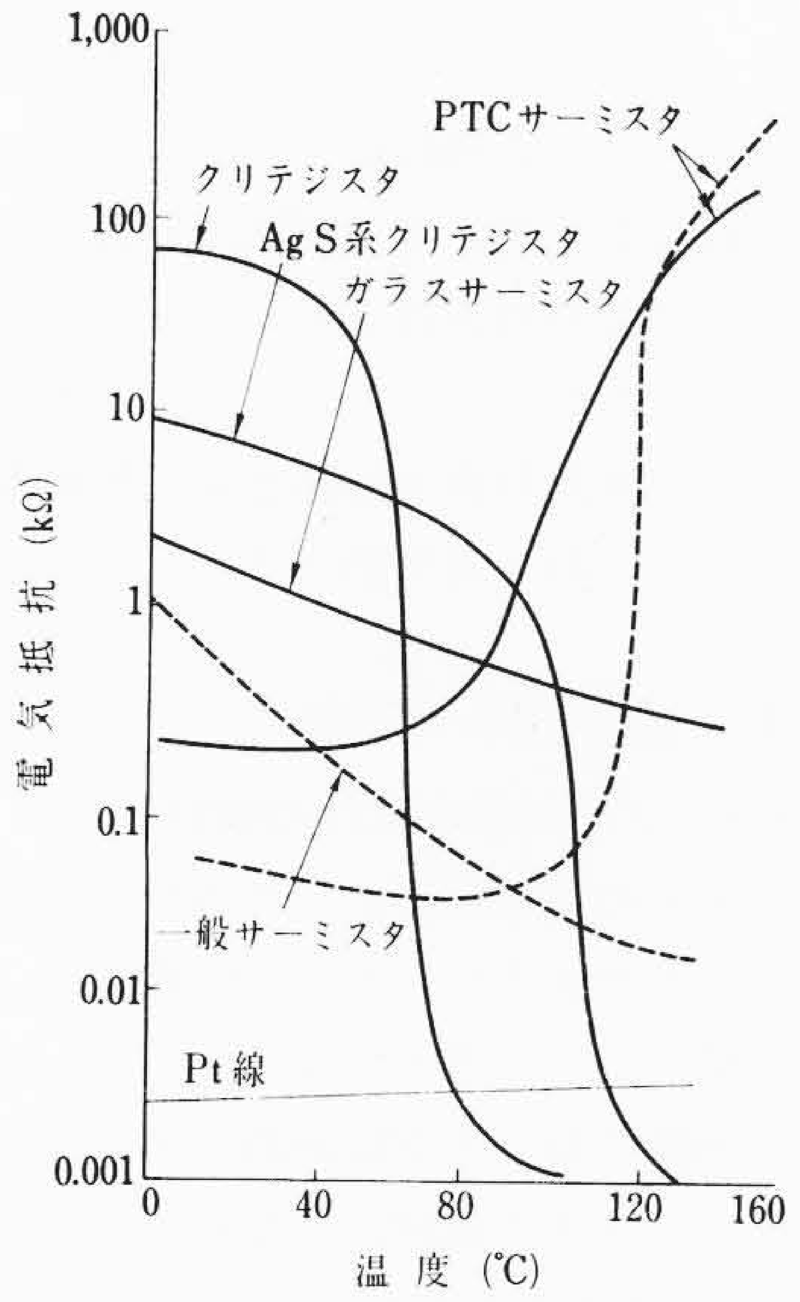


図5　各種感温半導体の温度抵抗特性

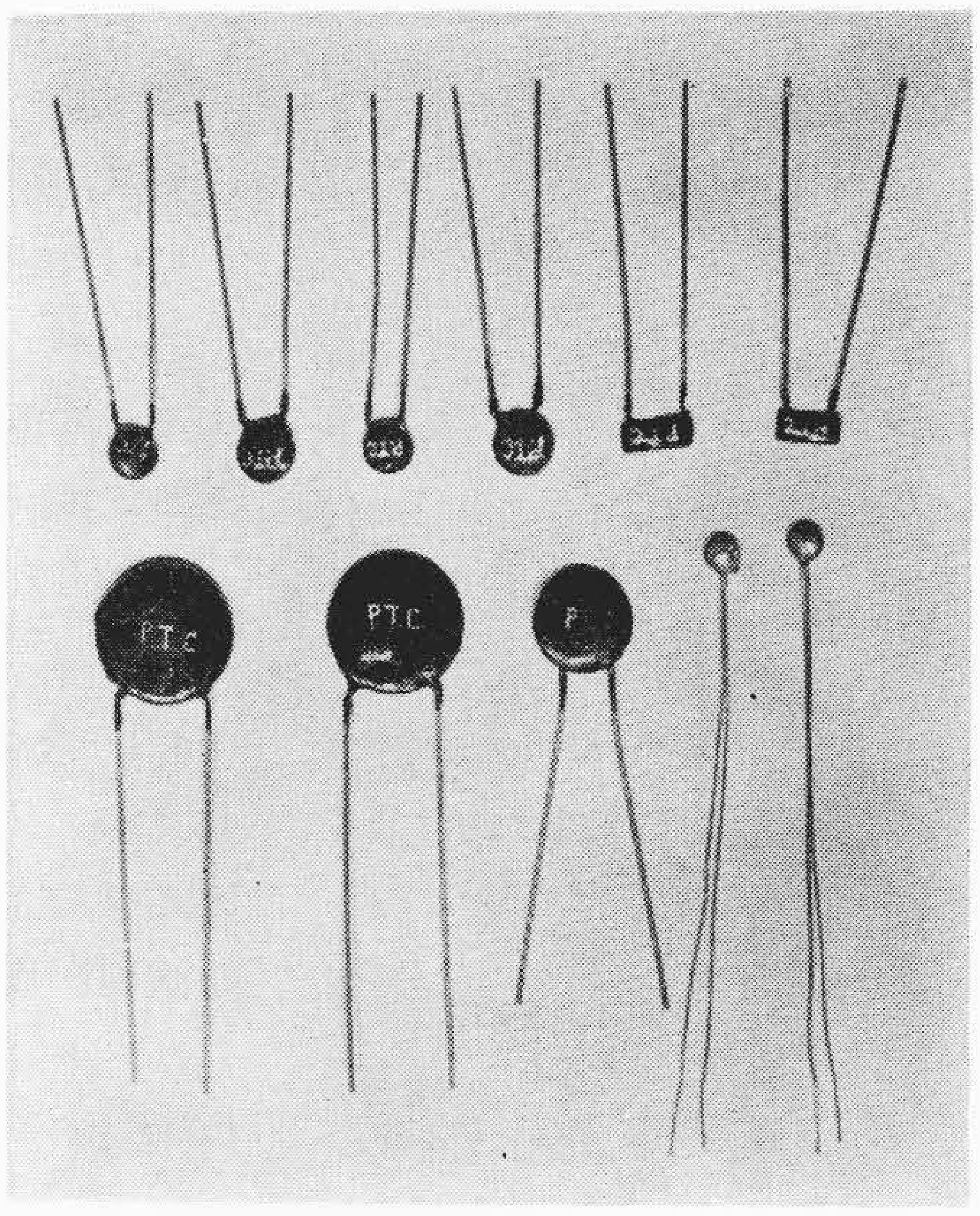


図6　各種正特性サーミスタ

電動機主回路を遮断するものである。一般にこの方式によるものはなんらかの信号増幅が必要であり，高価になると考えられがちである。しかしリレーに機械的増幅の手を施すことにより速応性がよく動作温度の調整が可能な装置を作ることができ，この種用途への応用にきわめて便利である。

3. 特殊サーミスタ応用保護装置

3.1 特殊サーミスタの特性

一般に感温半導体と呼ばれるものは，およそ**図5**に示すようにその材料，組成によって各種特性のものがある。**図6**に各種の正特性サーミスタを示す(1)~(4)。普通のサーミスタは**図5**のように負の温度係数を有している。また，クリテジスタは日立製作所で開発された新しいサーミスタで負の温度特性を有し，ある温度(約70℃)で抵抗値が急激に変化するものである。後者のような抵抗値の急変するものを総称して特殊サーミスタと呼んでいる。

3.2 特殊サーミスタ応用保護回路方式

以上述べた特殊サーミスタを利用した保護回路方式にはいろいろのものが考えられるが特殊サーミスタの種類については動作温度の点から現在では正特性サーミスタに限られ，経済性の点から電気的増幅素子を使用せず直接ランプを表示させたり，継電器を駆動する方式が望まれる。ここでは表示を含めた広義の保護装置について考える。

表2に日立のクリテジスタおよび正特性サーミスタ一覧表を示す。

(1)　ランプ表示

一般に過熱警報の方法としては警報ベルを鳴らす方法なども考えられるが，これらは所要電力が大きいため回路的には後述の継電器駆動回路と同じになる。また，白熱ランプ表示の場合もほぼ同様であるので回路的に多少異なるネオンランプ（以下NLと略称する）表示について考える。このNL表示回路は経済性の点からは整流器が不要な交流が適当である。したがって，実用に当たってはサーミスタをNLと直列にそう入するか並列にするかを選定することが要点になる。これらの回路例を示すと**表3**(a),(b)のようになり，直列の場合は過負荷時にNLがOFFすることになり，並列の場合は逆にONになる。したがって，これらの動作の仕方，つまり仕様に応じていずれかに決定すればよい。しかし，装置電源の断線，NLの故障など事故時を考えると直列形のほうが安全側になるので好適な方式ということができる。

(2)　継電器駆動回路

継電器駆動によって電源を遮断し，電動機を保護する回路も原則的には前述の表示回路と同様であるが，電源の点では継電器動作時のビリツキがなくなるので直流電源回路が望ましい。また，自己復帰と非復帰のいずれを採用するかはそのときの仕様，要求によって異なる。自己復帰方式にするとサーミスタの抵抗変化，すなわち電流(電圧)変化のみによってリレーのON，OFFを行なわせることになり，そのうえ非復帰方式のように引きはずし機構などの機械的増幅手段を用いることができず，サーミスタの許容消費電力との関係でリレーの駆動容量に制限をきたし動作温度の精度の点で不利である。

これを避けるために**図2,3**の例ではリレーを2個使用して接点の遮断容量を増大したり，半導体などによる電力増幅を行ない電動機主回路が遮断できるような方策を講じている。

結果として増幅手段を用いない自己復帰方式では動作温度の精度を考慮する場合，小容量のリレーしか駆動できず応用面の制約などに問題がある。これに反し非復帰方式ではリレーの再投入は手動その他で行なうのでサーミスタ回路はリレーの保持電流を供給できさえすればよく比較的大容量のリレーが使用でき，一般の用途のようにまれにしか動作せず，手動その他によって復帰させても実用上差支えない場合にはこの方式をとったほうが得策である。

また，直列方式と並列方式の相違は動作の仕方が反対になるだ

表2　日立クリテジスタ正特性サーミスタ一覧表

温度感知用クリテジスタ

品名	25℃の電気抵抗(kΩ) min	25℃の電気抵抗(kΩ) max	φ	Tc (℃)	放熱係数 (mW/℃)	最高使用温度 (℃)	形状	備考
CB-46F	9.7	31	2.5 以上	68±1		120	a	
CB-46G							b	
CB-46J					1.0 以上		c	
CB-56F	29	103	2.5 以上	68±1		120	a	
CB-56G							b	
CB-56J					1.0 以上		c	
CB-66F	97	310	2.5 以上	68±1		120	a	
CB-66G							b	
CB-66J					1.0 以上		c	

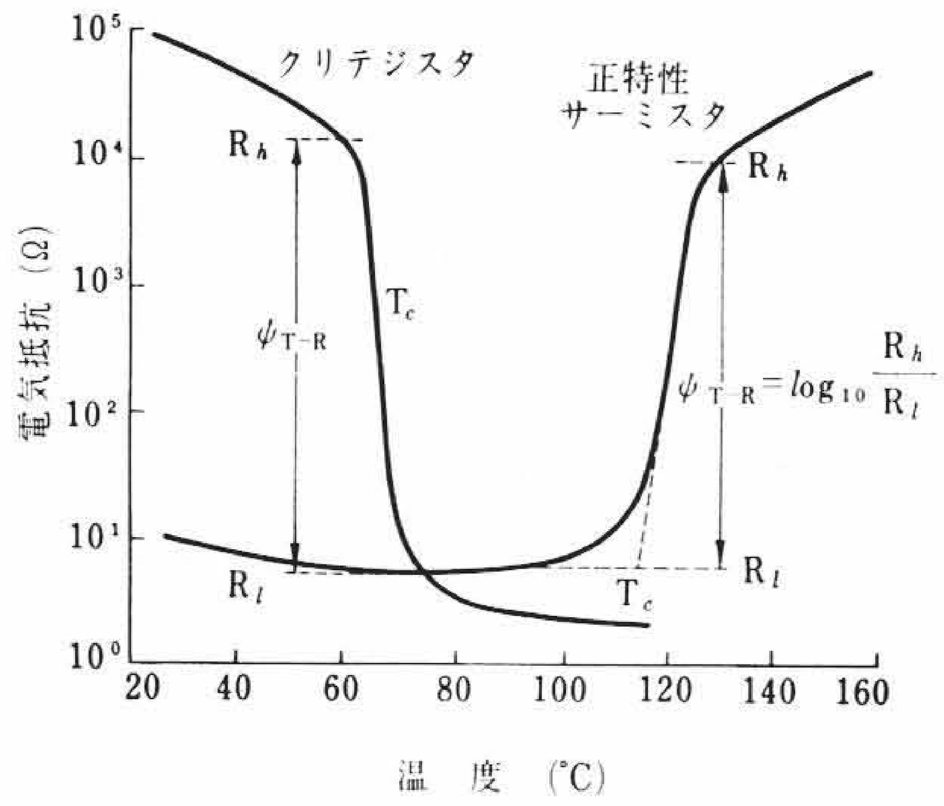
直熱形クリテジスタ（負性抵抗素子）

品名	4mA 通電時の端子電圧 (V)	伸長率 $\frac{d\ln E}{d\ln I}$ (4mA)	最大許容電流(mA) 連続	最大許容電流(mA) 瞬間	形状	備考
CN-2B	2.0±20%	−0.9±0.15	140	250	d	
CN-4B	4.0±20%		100	180		
CN-6B	6.0±20%		70	120		

正特性サーミスタ

品名	25℃の電気抵抗(Ω) min	25℃の電気抵抗(Ω) max	Tc (℃)	φ (T−R)	φ (I−E)	最高使用温度 (℃)	形状	備考
PD-53E	29	103	115±5	2.5 以上	1.5 以上	150	e	$\phi_{T\text{-}R}=\log_{10}\left(\frac{R_h}{R_l}\right)$ (周囲温度変化による抵抗変化率) $\phi_{I\text{-}E}=\log_{10}\left(\frac{R_h}{R_l}\right)$ (サーミスタに電流を流した抵抗変化率)
PD-54E							f	
PD-55E							g	
PD-63E	97	310					e	
PD-64E							f	
PD-65E							g	
PD-73E	290	1,030					e	
PD-74E							f	
PD-75E							g	
PD-83E	970	3,100					e	

温度特性



形状

a (CB-F形)

b (CB-G形)

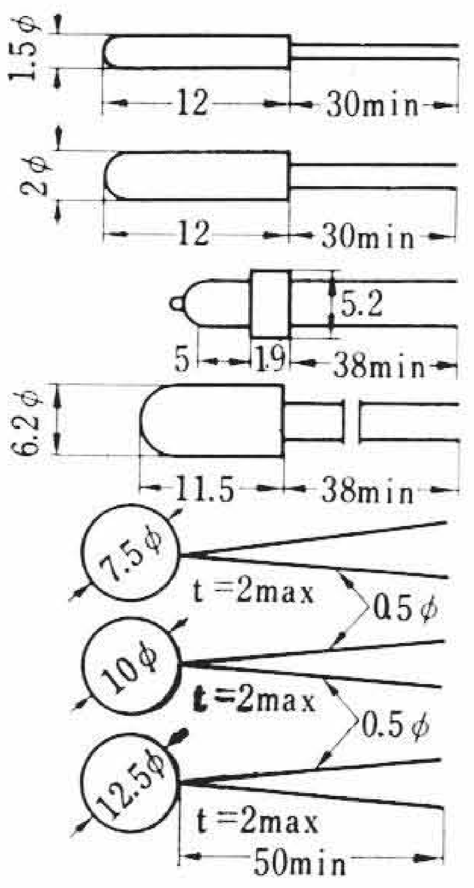
c (CB-J形)

d (CN 形)

e (PD 3形)

f (PD 4形)

g (PD 5形)



けで回路として本質的な相違はないが，リレーの動作も考慮すると後述するように直列形の場合は電源投入のたびに接点が動作し，接点の寿命その他で不利な場合が多い。それに反し並列形は事故時にのみ接点が動作するようにできるので有利である。以上のような点をまとめて具体的回路例を**表3**に示す。

ここで(a)(b)はNL点灯の直列方式の回路例，(c)(d)はリレー駆動方式における自己復帰回路の例で，前述のようにリレー1段では感度の点で困難であるのでリレー2段による遮断容量の増大を行なっている。また，(e)(f)はリレーの動作電流と釈放電流の違いを巧みに利用し，リレー動作時には電源電圧が直接リレーに接続されてこれを付勢し，いったんリレーが動作するとリレー付勢回路を接点により自動的に切り換え，単巻変圧器 (T_r) の中間タップを介してリレーとサーミスタが直列にはいるようにリレーの保持電流を下げて使うよう考慮したもので許容消費電力の小さい正特性サーミスタで比較的大容量の継電器を動作させることができ，電源投入ごとに接点が動作する点を除いては特長ある回路である。なお，電動機駆動用の電磁開閉器が付属している場合には接点が動作する点も障害にならないのでこのような使い方の場合には有用である。

しかし，小形電動機用として電動機と一体化してまとめる場合には(g)(h)の並列形の回路方式が故障時のみ動作する点で有利で，後述するように，ここではこの回路を例に説明する。

そのほか，ネオンランプ表示回路，継電器駆動回路にはいろいろな変形回路方式が考えられるが，結局は直列か並列の基本回路に帰着でき動作の仕方やその他の相違点も大同小異ということができる。したがってここではこの基本回路の応用例として直列形表示回路と並列形継電器駆動回路についての一例を紹介する。

4. 基本回路の検討

4.1 ネオンランプ表示基本回路の検討

ネオンランプ表示の基本回路として各種の回路方式をあげることができるが，ここでは**表3**(a)の直列形基本回路について考えてみる。

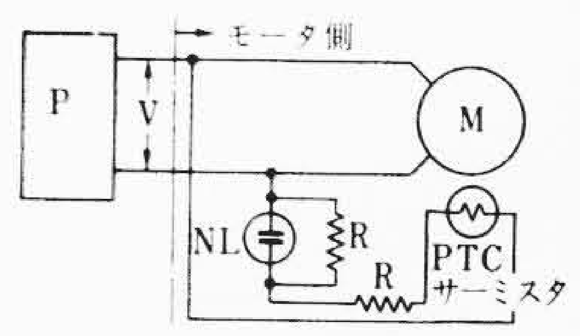
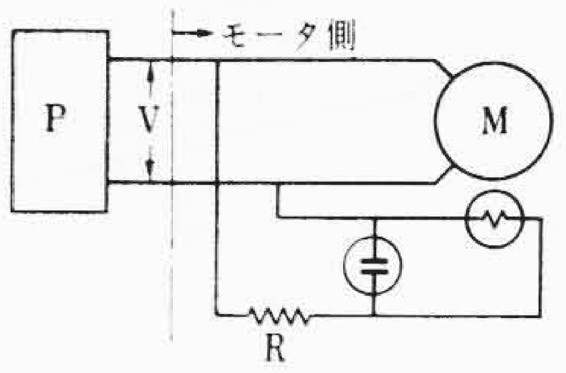
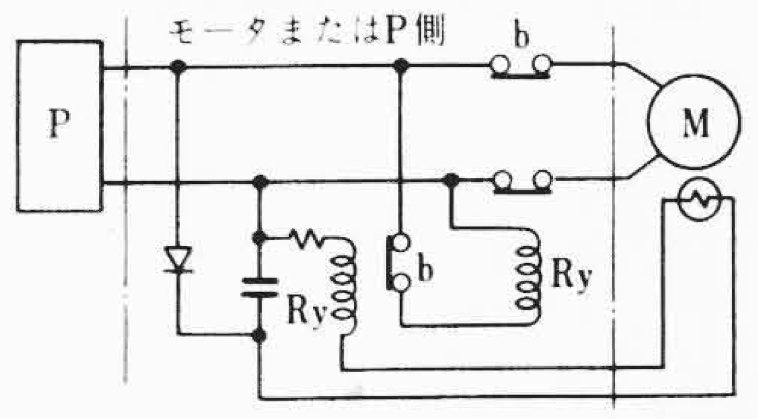
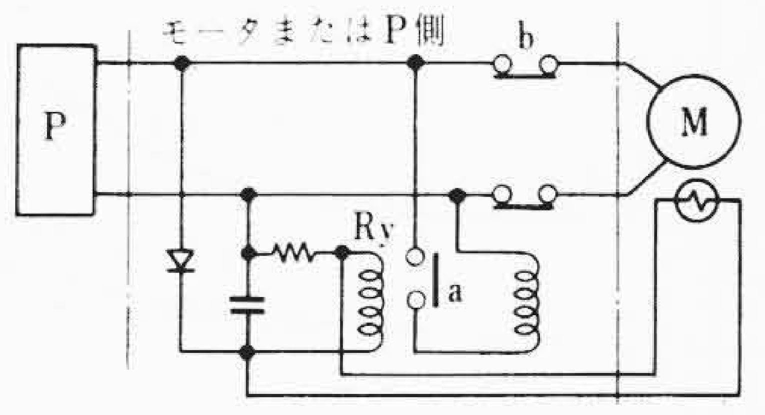
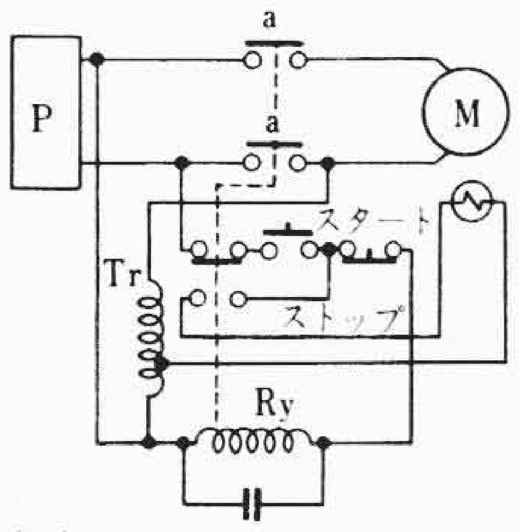
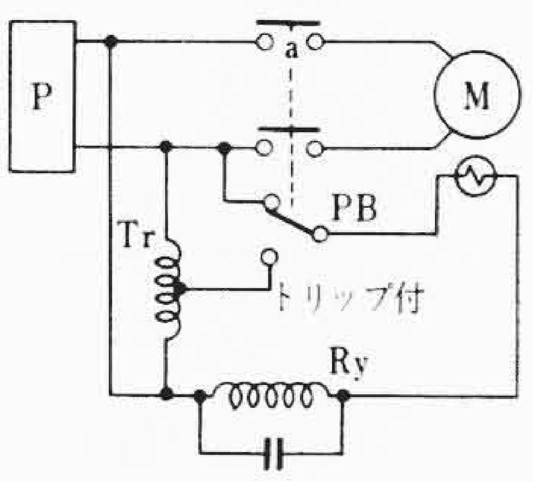
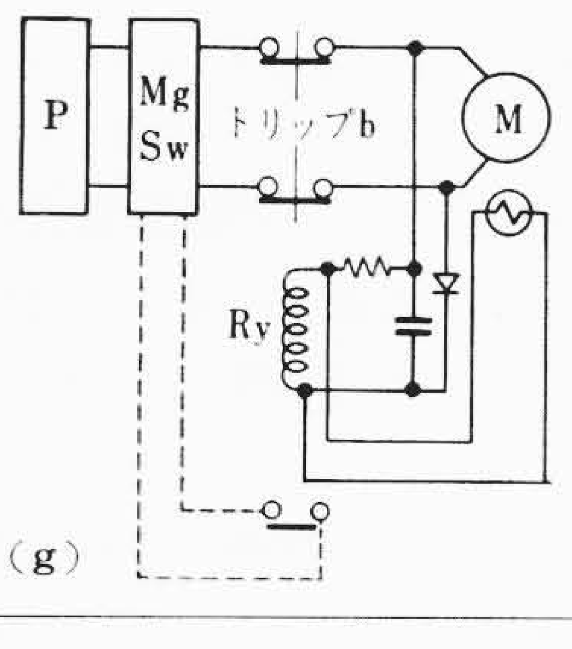
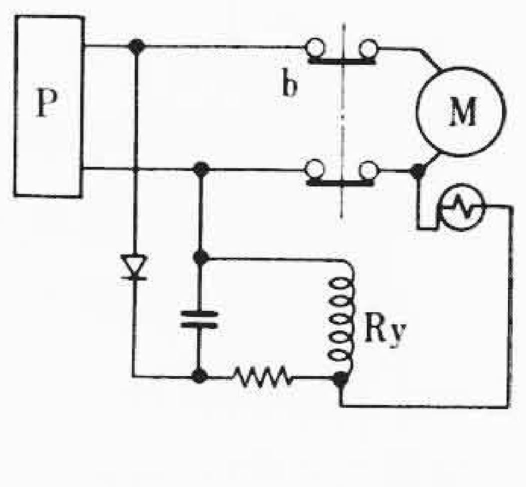
たとえばこの回路においてNLが消灯または点灯するときのサーミスタの抵抗，すなわち，臨界抵抗 R_C の値について考えてみると，この値は厳密には電源電圧 V の変動やNL点灯電圧 V_L のバラツキなどによって変わるので回路設計する場合にはこれら相互の関係を十分吟味してかからねばならない。たとえばこの回路は**表3**(b)の並列形回路に比べ，一般に(1) Ψ_{I-E} が小さくてもよい，(2)特に V/V_L が小さい場合には設計がらくになる，(3)抵抗 R を独立に決めることができる，(4)サーミスタやNLの選定も容易であるなどの特長をあげることができる。

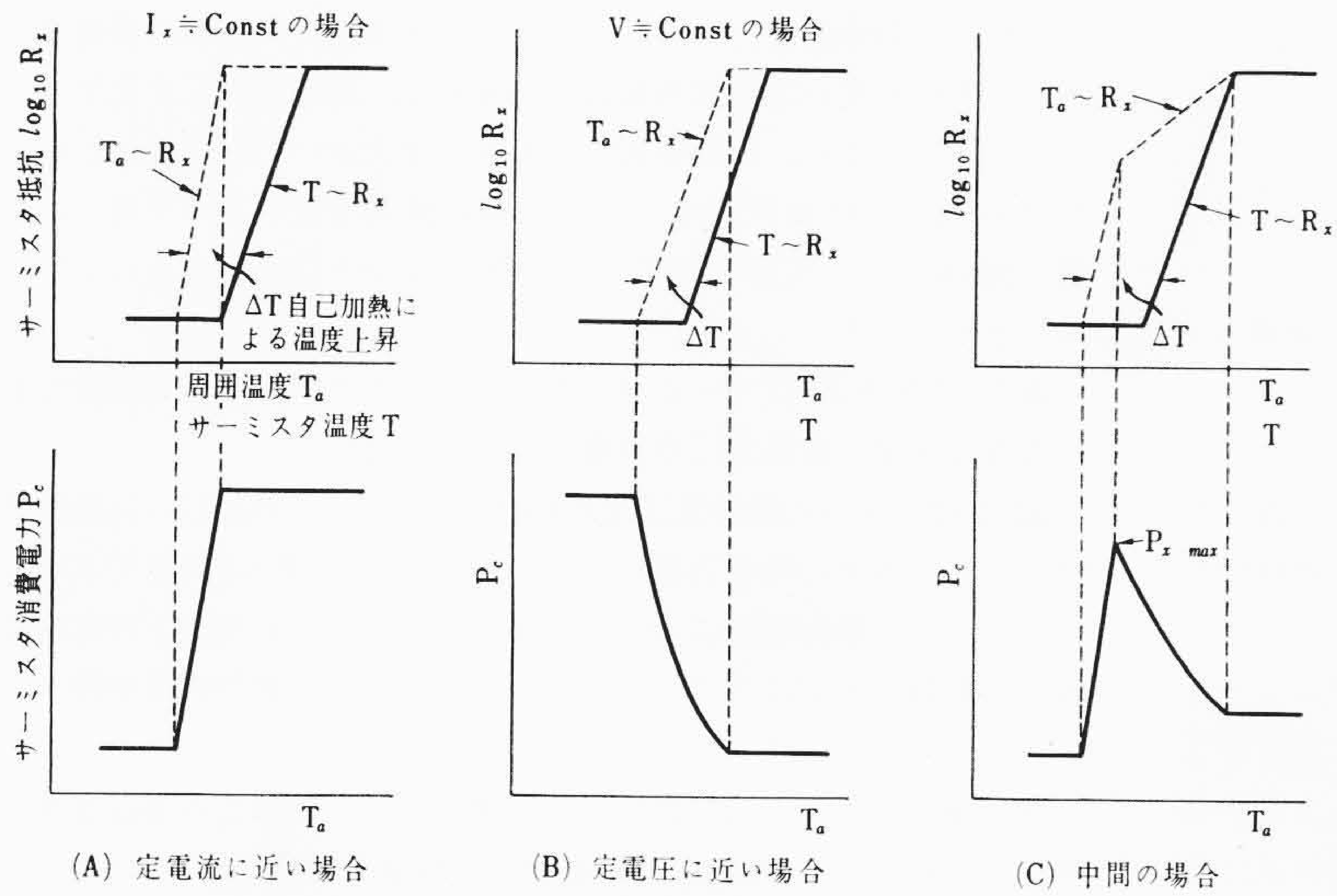
また，NLの電流 I_L についてはあまり小さいとNLが暗くなって点灯の確認が困難となり，大きすぎれば電極の損傷，寿命の短縮を招くことにもなるので I_L を左右する要素，たとえば電源電圧 V や抵抗 R，サーミスタ抵抗 R_x などを適切な値に決めてやる必要がある。

つぎに，正特性サーミスタの消費電力についてもNLがONの場合とOFFの場合とは異なるので両者について検討しておくことが必要であり，またサーミスタの電力損失は電源電圧 V の2乗に比例し増加するので，この V の値はなるべく小さくするほうがよい。このようなことは並列回路についても同様にあてはまる。

上記は正特性サーミスタの形状や取付条件を除外して考えた場合の問題であるが，さらにサーミスタを実装した場合，サーミスタ自体の発熱による影響を考えねばならない。これについては項を改めて以下説明する。

表3　各種過負荷表示および保護回路例

分類			回路例	備考
表示装置	自己復帰	直列	 （a）　過負荷時 NL off P；電源 M；電動機	サーミスタ回路，電源電圧 V=200V 以下 I_L(NL電流)≒1mA PTCの直列接続 断線時一般に危険側
表示装置	自己復帰	並列	 （b）　過負荷時 NL on	サーミスタ回路，電源電圧 V=200V 以下 I_L(NL電流)≒1mA PTCの直列接続 断線または停電時に安全側になる
保護装置	自己復帰	直列	 （c）	リレー1段では感度の点で困難 2段では価格上難点
保護装置	自己復帰	並列	 （d）	リレー1段では感度の点で困難 2段では価格上難点
保護装置	非復帰	直列	 （e）　 （f）	起動時にリレー動作 一般に小さいPTCでよい（リレーの保持電流による） 配線，PBの位置，再起動の点で問題がある
保護装置	非復帰	並列	 （g）　 （h）	異常時のみ接点動作（リレー低価格），かなりの大きさのPTCを要する（リレーのVAによる） 再起動（g）手動（h）電源再投入による 汎用向



(A) 定電流に近い場合　(B) 定電圧に近い場合　(C) 中間の場合

図7　熱的フィードバックの代表的なかかり方

4.2　サーミスタの自己加熱の影響

いま，最も簡単な場合として，PTC サーミスタを定電圧源，定電流源，その中間の性質の電源に接続した場合を考えると定電流源の場合は周囲温度が上昇しサーミスタの抵抗が増すと内部損失 P_c が増加してサーミスタの温度が上昇し，いわゆる熱的なポジティブフィードバックがかかったことになり周囲温度に対する抵抗変化率が大きくなる。定電圧源の場合はその逆で抵抗値が大になると P_c が小になり熱的なネガティブフィードバックがかかり抵抗変化率が小さくなる。中間の場合には，ある抵抗まではポジティブ，その後はネガティブフィードバックの形になり図7に示すような傾向をとることがわかる。

4.3　継電器駆動基本回路の検討

正特性サーミスタを用い，直接リレーを駆動させる場合の回路も基本的考え方はさきに述べたNL点灯の場合と同様，直列または並列の2方式に分けることができる。

この場合，最も問題となるのは許容される正特性サーミスタの許容最大消費電力でどの程度の大きさのリレー負荷まで駆動させ得るかということである。一般に大きなリレーを動かすためには PTC サーミスタの許容消費電力の大きなものを選んでやればよい。しかし，形が大きくなれば本質的に温度追従性が劣ることにもなるので電動機コイルの温度上昇速度が急であるときには必然的に速応性に欠けた特性になるのはやむを得ない。したがって，保護装置としては極力小さな PTC サーミスタが要望される。

また，これに関連する問題としてはコイルへの実装を考慮する必要がある。小さな形のサーミスタは特性面ばかりでなく，扱いやすさという点で作業性も良く，密着性の良い取付が可能となるが，放熱係数 C は取付方法や取付場所などによっても性質が変わるので事前に電動機コイルのホットスポットをは握しておくことはもちろん，電動機によって異なる温度上昇速度と協調させてサーミスタの選択，取付，設計を行なうことが肝要である。

5.　設計の具体例，試験結果および検討

以下，上述の事項を考慮して設計された具体例とその試験結果を述べ若干の検討を加えることにする。

5.1　直列形ネオンランプ表示回路

電気機器の過負荷状態における内部温度上昇の危険表示回路例について筆者らは環境条件のきわめてきびしい炭鉱用コールカッタ電動機に実装し好評を得ている。図8は PTC サーミスタを装着しネオンランプ過負荷表示回路を実装した 200 kW，コールカッタ用電動機の外観写真である。

表示の方式としては NL の配線が振動，衝撃などにより断線したときも必ず安全側になるよう，過負

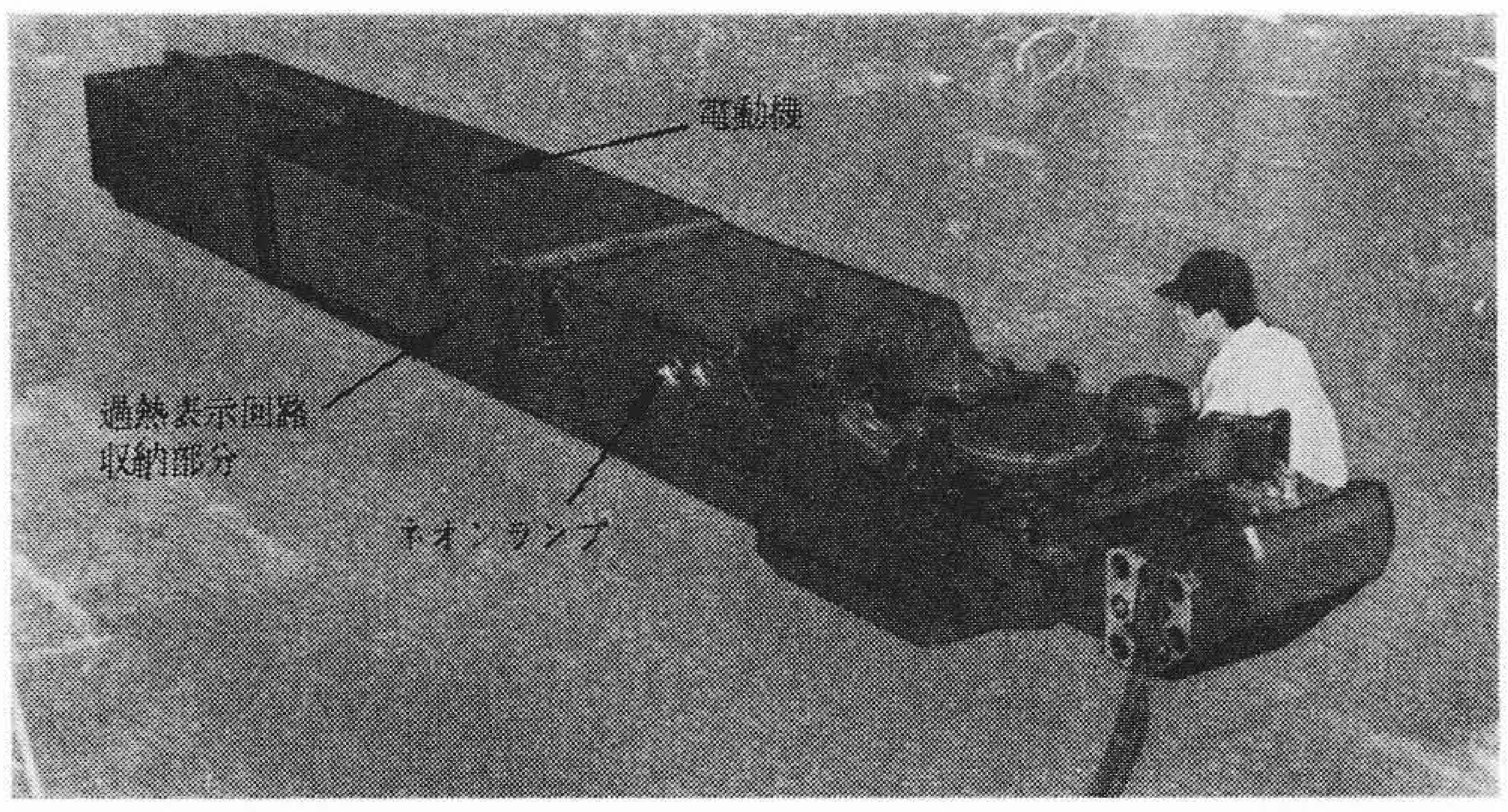


図8　ネオンランプ表示方式電動機過熱保護装置を備えた200 kW コールカッタ

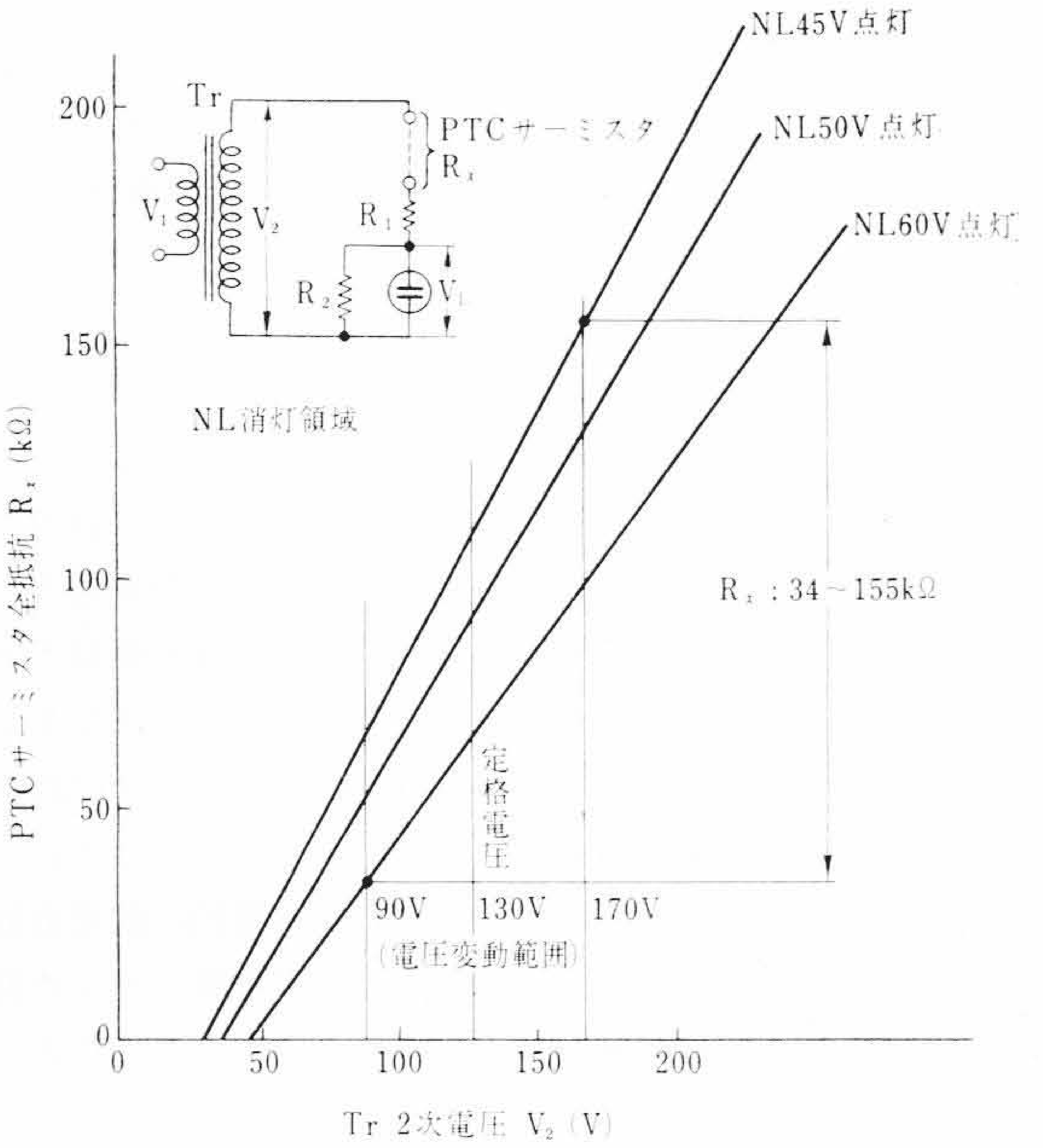


図9　電圧変動特性

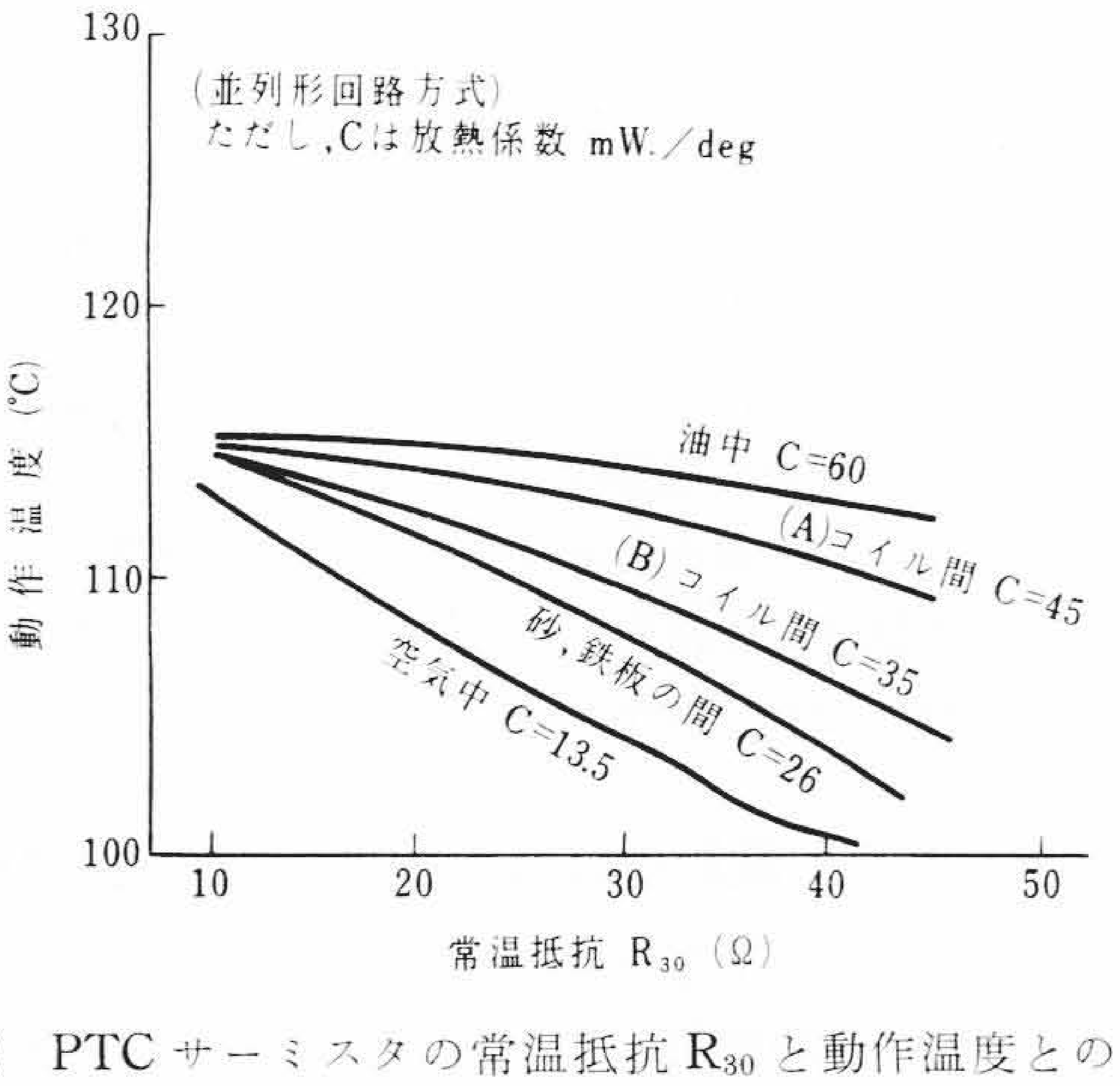


図10　PTC サーミスタの常温抵抗 R_{30} と動作温度との関係

荷時ランプは消灯する直列方式の回路を採用し，外的条件や耐久性を考慮してランプをネオンランプとするなどの方針のもとに設計を行ない，その性能を実験的に確認した。図9はその電圧変動特性の実測例である。

いまNLの点灯電圧が45～60Vの範囲でバラツクときにトランス2次電圧 V_2 が ±30% 変動があった場合，NLが完全に消灯するためにはサーミスタの実効抵抗 R_x (複数個のPTCサーミスタを直列接続した全抵抗の値) は 34～155 kΩ 程度まで増加しなければならないことがわかる。したがって常温抵抗が1.3～2 kΩ ぐらいで抵抗がだいたい100倍増加するPTCサーミスタを使用すればよく，動作温度変動はほぼ2～3 deg 程度に押えられる。

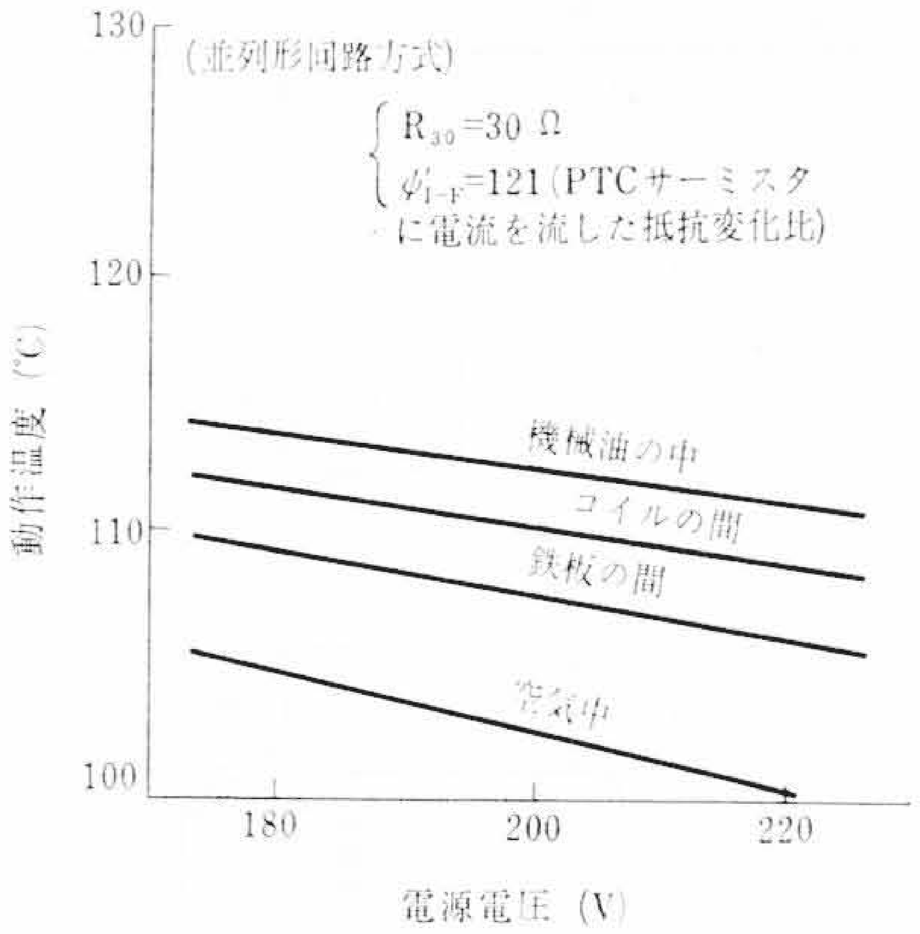


図11　電源電圧変動と動作温度との関係

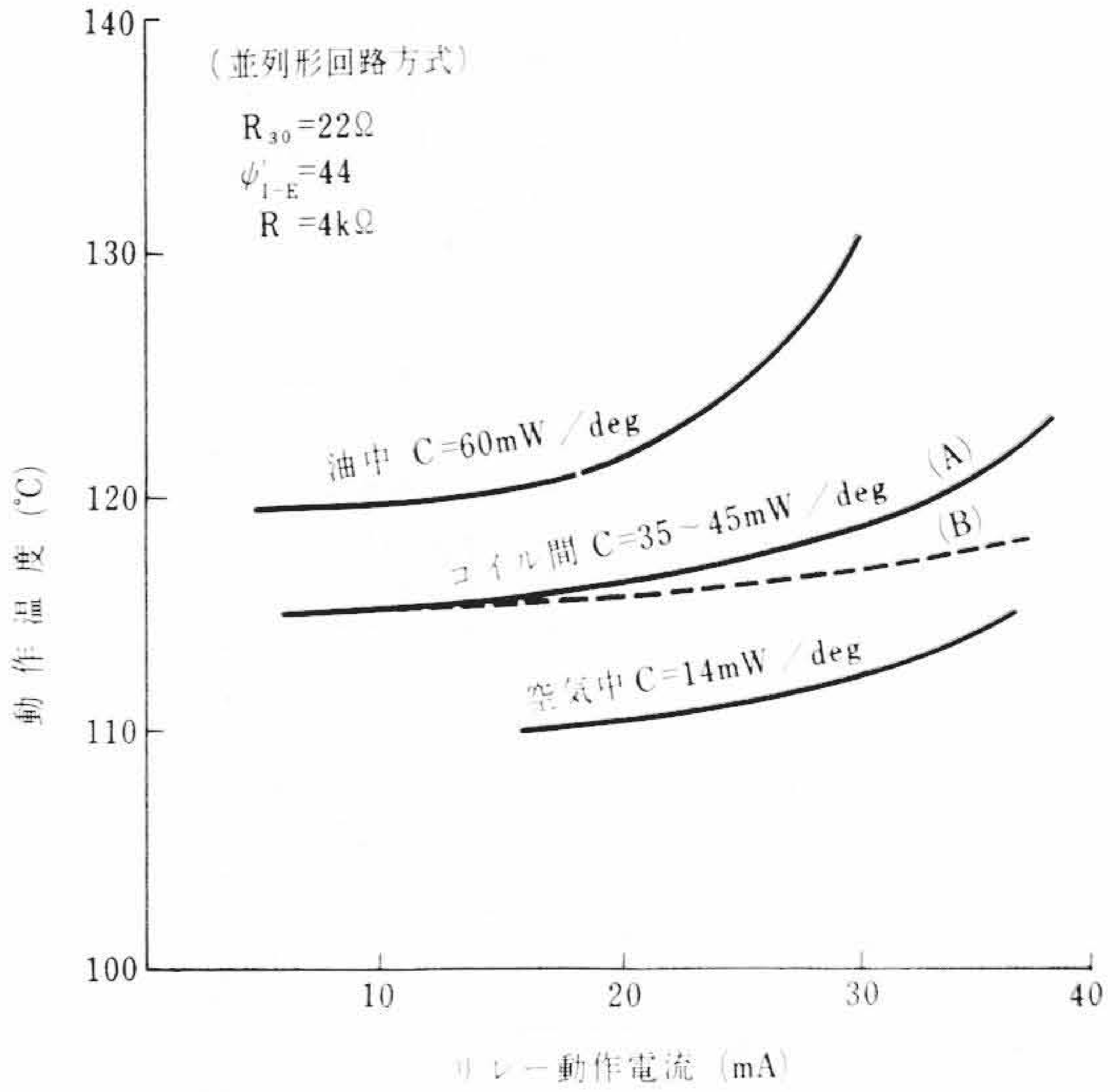


図12　継電器動作電流が動作温度に及ぼす影響

5.2　継電器駆動回路

この場合には電源電圧変動，リレーの動作電流のばらつき，サーミスタの常温抵抗誤差などによる影響を考えねばならない。そしてサーミスタの実装に当たっては取付場所，取付の方法，電動機コイル温度への熱的追従性などを考えねばならない。また，同一回路でもサーミスタから周囲に向かっての放熱係数Cが異なるとリレーの動作温度が変化する。図10はPTCサーミスタの常温抵抗 R_{30} が異なる場合の動作温度との関係で，サーミスタをコイル中に装着する部位や方法が変わると放熱係数 C が変わり，動作温度も変化することを示しているが，放熱係数はできるだけ大きいことが望ましい。放熱係数，約45 mW/deg はある特殊の装着方法によって得られた値で図10によって動作温度への影響がかなり僅少に押えられていることがわかる。

図11はあるPTCサーミスタを用いたときの電源電圧の影響で動作温度はあまり電源電圧の影響を受けていない。

図12はリレーの動作電流との関係を示したものである。改善されたサーミスタの取付方法によれば，コイル間(B)の破線で示すようにリレーの動作電流に多少の幅があったとしても実際上の動作温度への影響は非常に小さくなりきわめて安定した動作特性が得られていることがわかる。

次に実用化に当たって直面する問題について触れてみる。まず差当たり問題になるのは許し得る限り小容量のPTCサーミスタで大容量のリレーを駆動させたいという希望である。この要求は保護装

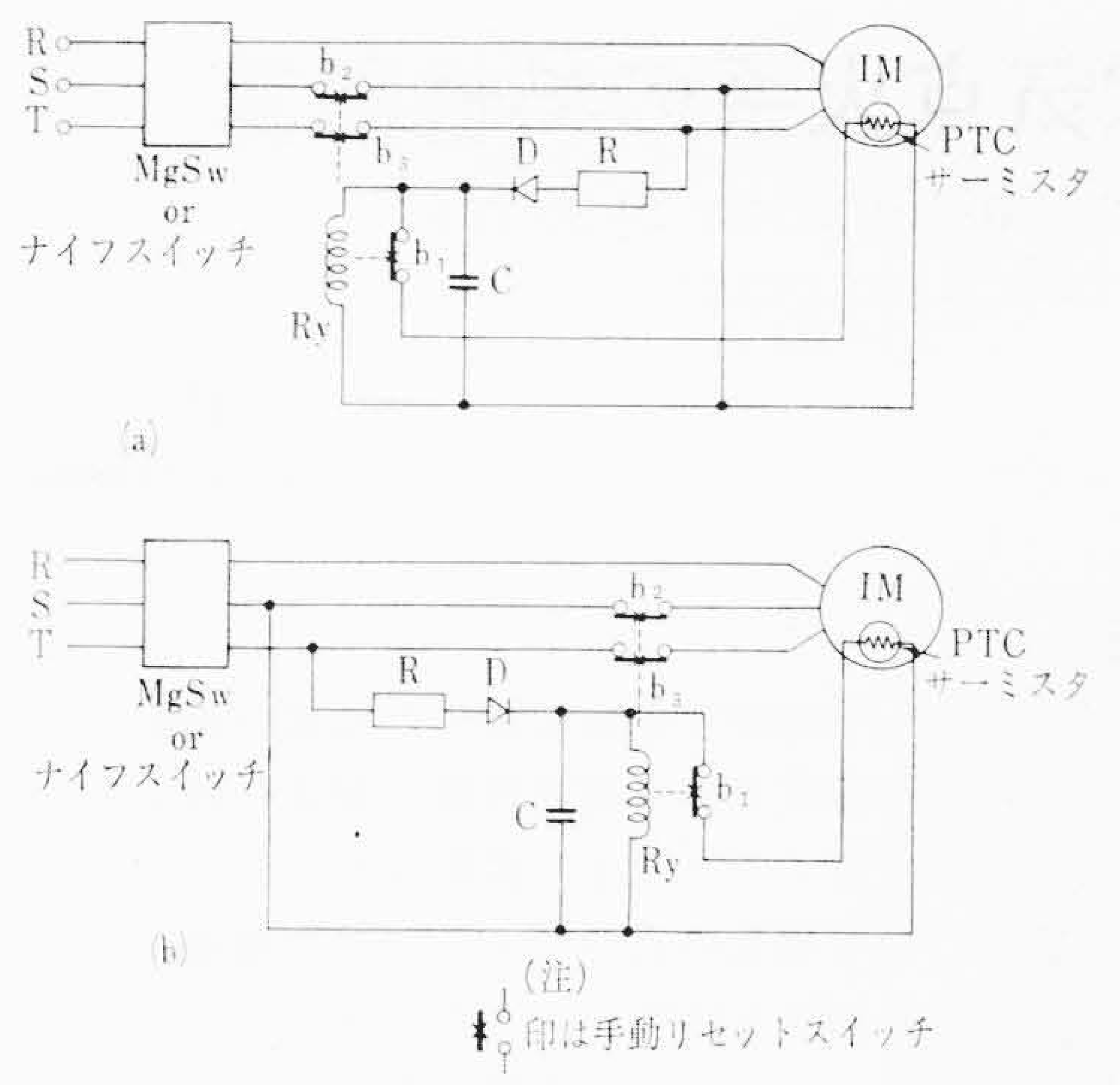


図 13 電動機焼損保護装置の改良形回路例

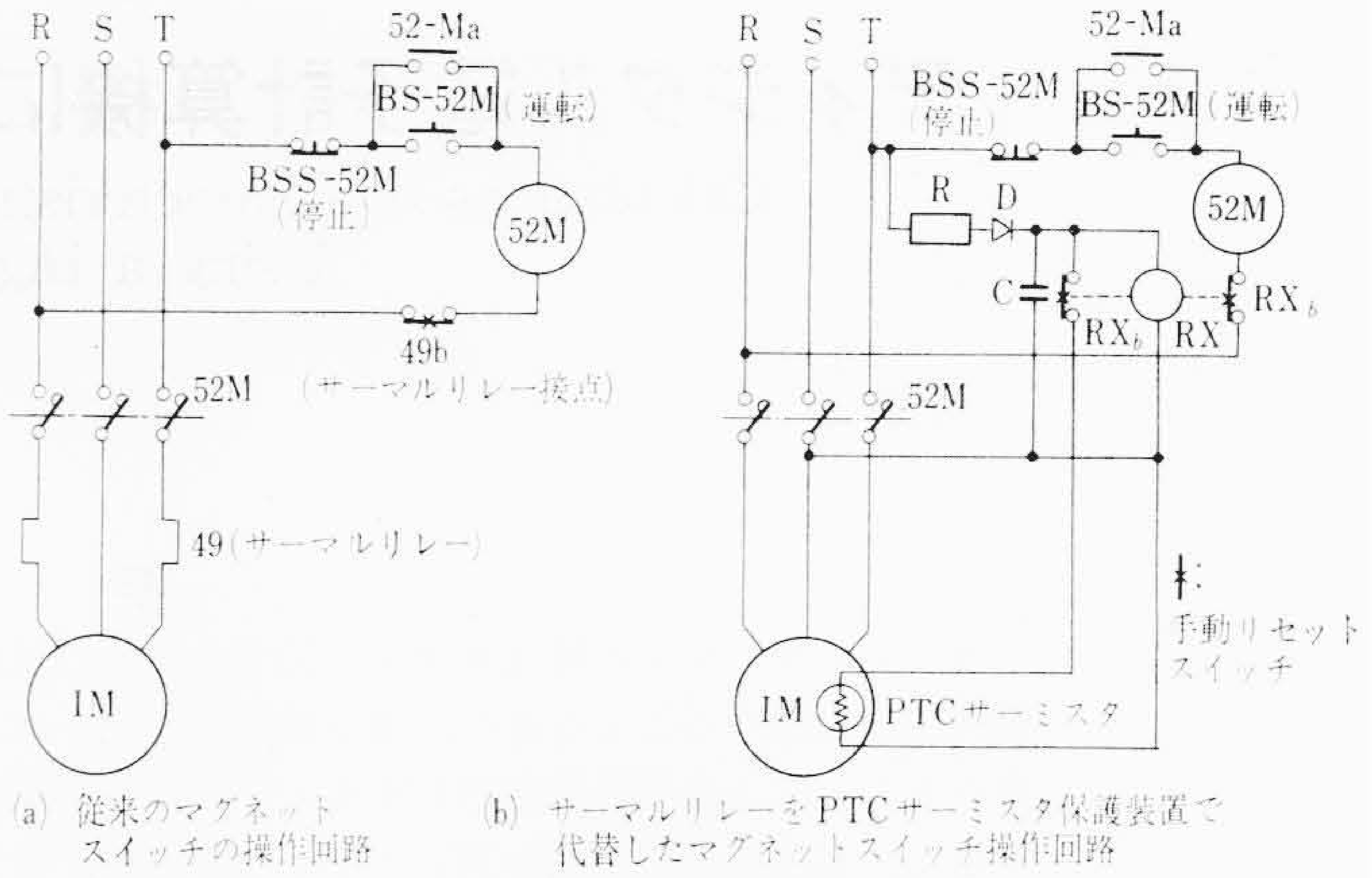


図 14 マグネットスイッチ操作回路例

置全体の価格を低廉に押えるという目的以外に熱的過渡変化にサーミスタの温度を速やかに追従させ，短時間の間に異常状態を検知して電動機を電源から遮断し的確に保護するという両面の目的に合致するものである。しかし，この要求には多くのあい路が存在し完全な解決は困難で，電源整流回路の出力電圧を大にするなどの方法をとってもサーミスタの許容自己消費電力より大きな入力を必要とする継電器の駆動はむずかしい。そこで上記欠点を取り除くよう考慮したのが図 13 (a) (b)[12]に示す回路方式で，価格と特性を一挙に解決することができるものである。

図 13 において電動機の温度が過度に上昇し，サーミスタの抵抗がある程度増加すると，継電器 Ry が投入を開始し，その接点 b_1 が開放し，サーミスタを切り離すので Ry は急速に投入され，その可動極は引きはずし機構をトリップさせて主回路の接点 b_2, b_3 を開き電動機を保護するのである。本方式は手動その他で復帰させる非復帰方式であるうえ，この b_1 接点を採用したことにより，小さなサーミスタを用いてかなり大きな継電器を駆動し，大きな負荷を遮断できる特長が得られている。なお，平滑用コンデンサ C をある程度小さくして，その直流電源のリップルによって可動極に振動を与え，ディザー効果によって引きはずし機構の摩擦の悪影響を少なくしている。また，図 13 (a)，(b)は本保護装置が動作したあと(a)の回路では継電器の復帰ボタンを押すだけで復帰するが(b)の回路ではコイルが付勢された状態にあるので電源スイッチをいったん切ってから復帰ボタンを押す必要がある点に相違がある。

以上は焼損保護装置を電動機自体に内装し，電動機電源を直接遮断する方式であるが，このような考え方はマグネットスイッチと併用する場合にも応用することができる。図 14 (a) は従来のマグネットスイッチによる電動機操作回路であるが，周知のように一般にはサーマルリレーが付属し，主回路の過電流を検出してマグネットスイッチの付勢回路を遮断し，主回路を釈放するものである。しかし，このサーマルリレーの代替物として前記サーミスタによる保護回路を付けてやることにより，今度はマグネットスイッチ内にサーミスタ保護装置を内蔵でき，電動機のコイル温度を直接検出し，マグネットスイッチを開放することによって異常時の保護を行なわせることができる。この組合せ回路の一例を示したのが図 14 (b)[13]である。本方式を採用すると保護装置のリレー容量を非常に小形にできる関係から，PTC サーミスタの容量その他に十分余裕をもたせた設計ができ特性，価格的にも有効である。

6. 結　　言

以上，正特性サーミスタを用いた電動機焼損保護装置の概要として温度危険時にネオンランプを消灯させる方式，およびリレー駆動によって電源を遮断する方式の二～三の回路例につき問題点を明らかにするとともに，応用の一例を述べた。

一般に電動機の保護装置といっても種類が多く，電動機の大小とにらみ保護装置の選択をするのが実情であるが，最終的にはコイル焼損の保護を目的とするものであるにかかわらず従来は温度検出でなく電流検出という間接的な手段がとられてきた，そのため，直接温度を検出し，直接リレーを駆動する正特性サーミスタ素子の出現はこの方面への応用に近時大きくクローズアップされてきたわけで，今後さらに応範囲な応用実用化が進められることが期待される。

最後に本研究を進めるに当たって種々ご援助いただいた日立製作所武蔵工場二木氏，直接のご指導にあずかった千葉大中道助教授，その他関係各位に心からお礼申し上げる。

参　考　文　献

(1) 二木ほか： サーミスタノート (昭 38-11 日刊工業新聞社)
(2) 二木： 電子材料 3-3, (昭 39-3)
(3) 二木： 日立評論 45, (昭 38-1)
(4) 二木： エレクトロニクス 9-8, (昭 39-8)
(5) Willcox, D. F： Plant Engineering 16-11, (Nov. 1962)
(6) J.K. Howell, J.J. Courtin： Westinghouse Engineering 19-6, (Nov. 1959)
(7) J. J. Courtin： Westinghouse Engineering 22-4/5. (July. Sept. 1962)
(8) R. L. Nailen： Plant Engineering 17-3, (March. 1963)
(9) P. B. Greenwood, R. W. Nix： Electrical Review 174-3, (Fri 20. March. 1964)
(10) Kolfertz. G： Siemens ZS, 34-4, (1963)
(11) Jaklitschke. G： Elektrie, 17-9, (1963)
(12) 特許出願中
(13) 特許出願中