

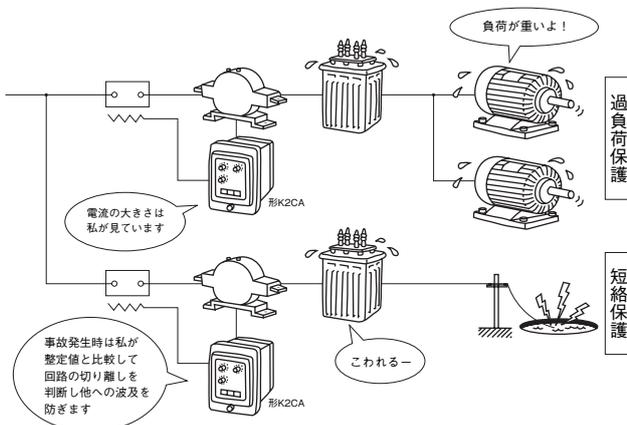
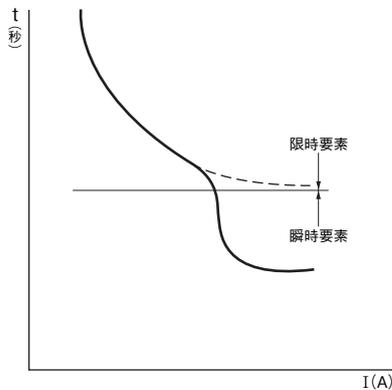
電力・機器用保護機器／電力量センサ 概要

1. 保護機器の概要

■過電流保護継電器とは

過電流継電器(OCR=Over Current Relay)は、電路の短絡や負荷の過負荷による過電流を変流器(CT)により取り出し、その電流値の大きさによって動作する継電器です。一般に、JIS C 4602(高圧受電用過電流継電器)に規定される過電流継電器が使用されます。

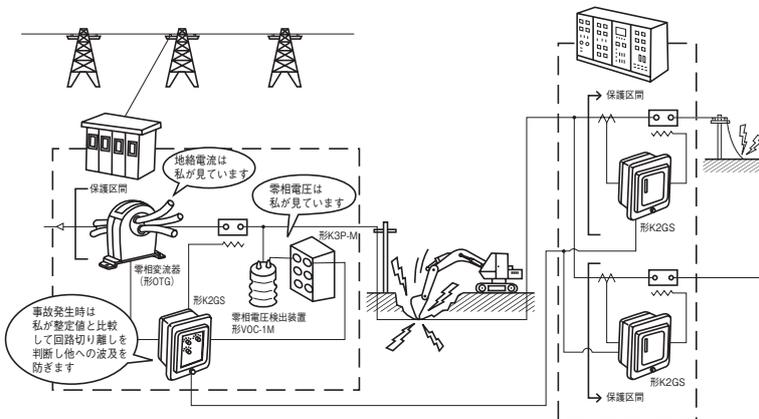
過電流継電器には瞬時要素と限時要素の2つの動作要素があり、瞬時要素は契約最大電力の500~1,500%の電流を検出して動作します。限時要素は、電流の大きさが大きくなるに従って早い時間で動作するように反限時特性をもち、瞬時要素は短時間の定限時特性をもっており、どちらの要素が働いたかは継電器自身が備えている動作表示器で区別がつき、事故処理に役立ちます。



■地絡継電器とは

地絡継電器は電路におけるケーブル・電気機器の絶縁が劣化、または破壊し、アーク地絡・完全地絡を起こし、電路と大地間が接触する事故を検出する継電器です。この継電器は電力の受電側で地絡事故が発生した場合、受電側のみを断して事故を限定化し、上位である配電用変電所への波及を未然に防ぐ目的で使用されます。この保護目的のため上位(電力会社の配電用変電所)との保護協調を必要とします。

継電器としては、事故電流を零相変流器(ZCT)で検出し、その大きさのみで動作する地絡継電器(GR=Ground Relay)と事故電流をZCT、および零相電圧検出装置(ZPD)の組み合わせで検出し、その大きさと両者の位相関係で動作する地絡方向継電器(DGR=Directional Ground Relay)の2種類に大別されております。一般的にはGRが多く使用されておりますが、最近では設備内ケーブル長が長くなる場合が多いため、他回線事故での誤動作防止として、DGRが使われる場合が多くなっています。

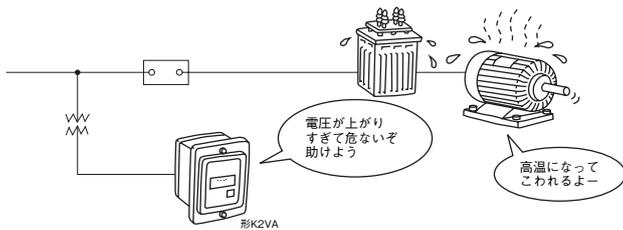


■電圧継電器とは

異常電圧には発電機の故障による電圧の急上昇や、停電または短絡による電圧低下などがあります。電圧継電器は交流回路の電圧変動に応じて、電圧があらかじめ設定した状態に達したとき、これを検出して動作する継電器です。基本的な動作の区別としては過電圧検出、不足電圧検出の2種があります。

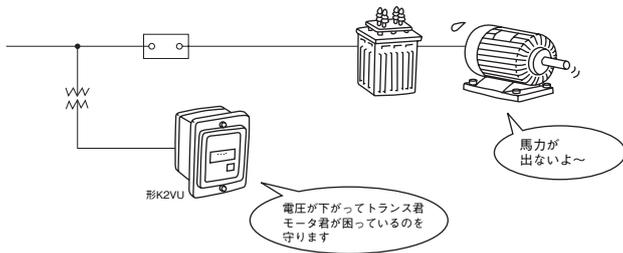
●過電圧継電器(OVR)

電圧が設定値を超えたとき、接点動作を行い、警報あるいは、しゃ断器の引きはずしなどの動作を行う継電器です。



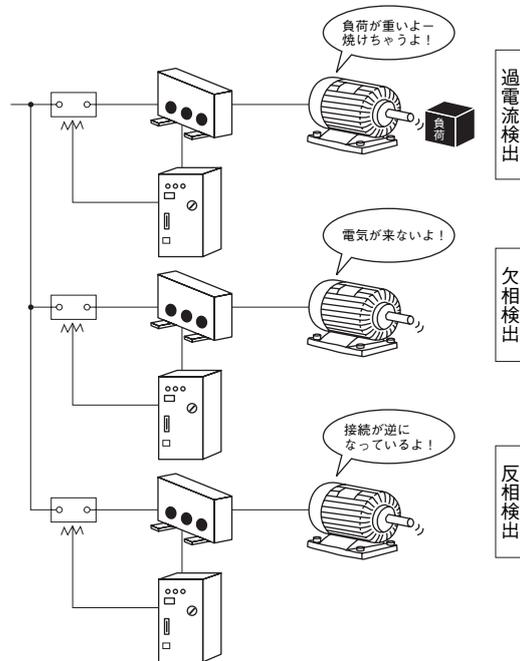
●不足電圧継電器(UVR)

電圧が設定値以下になったとき、動作する継電器です。主な用途としては、電圧低下保護、配電線の短絡故障検出などに用いられます。



■モータ・リレーとは

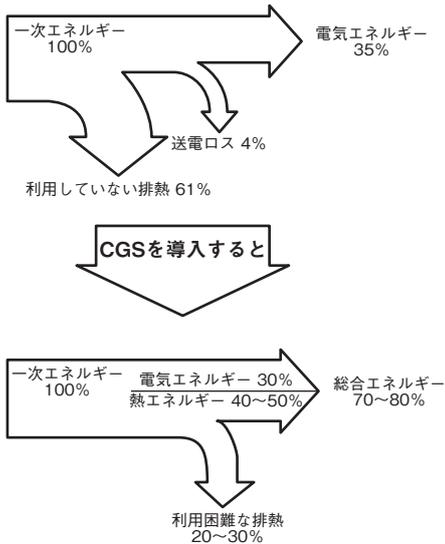
モータといってもたくさん種類がありますが、産業設備の動力用として最も普及しているのは三相誘導電動機で、これを保護するものを単にモータ・リレーと呼んでいます。モータの保護は重要です。異常を早く検出してモータ自身とそれにつながる負荷の被害を最小限にいとめ、深井戸ポンプ用など取り換えに非常に手数のかかるものは焼損しないように保護しなければなりません。モータへの小型化・軽量化などの要求が厳しくなり、重要度が増すにつれて、それを保護するモータ・リレーにもだんだん高性能、高信頼度が要求され、従来の単純なサーマル形から静止形(トランジスタ形)へと移行しています。



■系統連系用保護機器とは

●CGSとは

CGS(Co-Generation System)とは、分散型電源のひとつでガスエンジンやガスタービンなどの原動機により発電機を駆動し、電力を構内負荷に供給すると共に、原動機の排熱を利用して暖房・給湯あるいは冷房を行うものです。エネルギーの総合効率を高めるシステムで、熱併給発電システムと呼ばれます。21世紀に向かっのエネルギービジョンとして、通産省資源エネルギー庁が中心となり、複合エネルギー時代の幕開けと提唱されている自家発電システムです。



●なぜ連系用保護継電器が必要か

従来の受電端の保護システムでは、需要家構内事故(短絡・地絡)のみに対応して、受電端のしゃ断器を動作させていました。

しかし、電力系統に連系される分散型電源においては

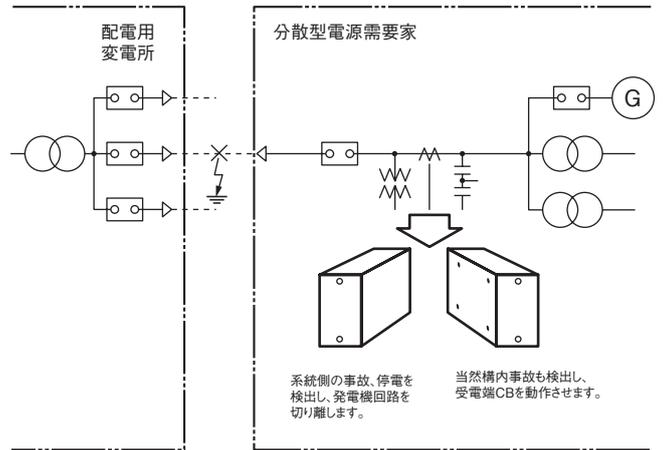
- ①公衆および作業者の安全確保と、電力供給設備または他の需要家の設備に悪影響を及ぼさないこと。
- ②供給信頼度と電気の品質の面で、他の需要家に悪影響を及ぼさないこと。

を実現する必要があります。すなわち、需要家構内事故のみでなく、電力系統側の停電や事故においてもこれを検出し、発電機を系統から解列しなければなりません。

具体的には

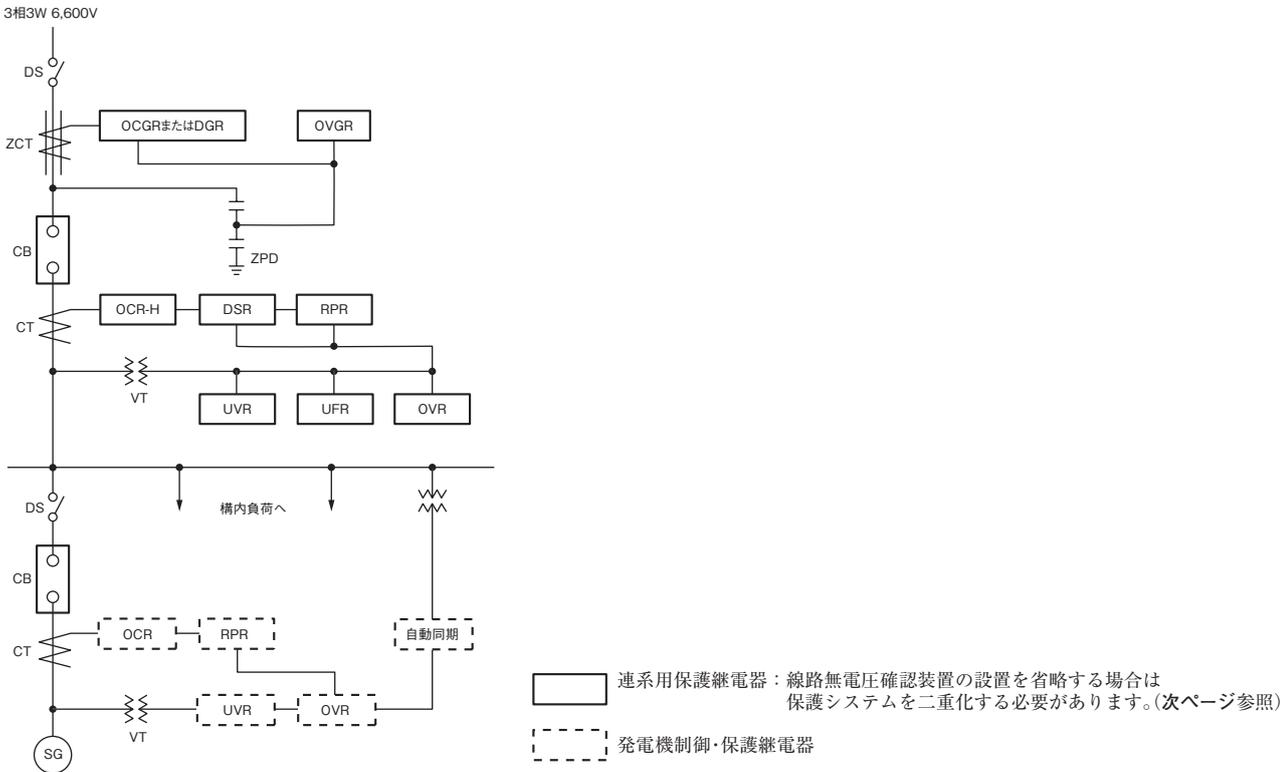
- ①発電機から系統の事故点に事故電流を供給させない。
- ②逆潮流を許容しない場合は、系統側に電力を送出させない。
- ③系統での再開路時に、両者の電圧を非同期状態で結合させない。

などがあげられます。このシステムは、資源エネルギー庁からの「電力系統連系技術要件ガイドライン」に示されており、これに適合している場合に電力系統への連系が可能になります。



連系用保護継電器は、
 連系する系統の種類(高压連系か特高連系か)・分散型電源需要家の発電機の種類(同期発電機か誘導発電機か)・
 系統の重要度によって、
 設置しなければならない機種が決まります。
 あらゆる条件下の系統事故を確実に検出するものでなければなりません。

●連系用保護継電器構成例(高压受電需要家・同期発電機)



●事故形態による継電器の動作

次の表は、それぞれの継電器がどの事故に対して動作するのかを簡単に示したものです。
 このようなマトリックスにより検証を行い、必要な機種を選定します。

機種	名称	保護目的	設置相数等の条件	構内事故		系統側事故			動作させる しゃ断器(例)
				地絡	短絡	地絡	短絡	断線・停電	
OCR-H	過電流継電器	構内設備の過負荷・短絡事故検出	2相	—	○	—	—	—	受電端CB
OCGR	地絡継電器	構内設備の地絡事故検出	1相(零相回路)構内設備の対地静電容量が大きい時はDGR	○	—	—	—	—	
DGR	地絡方向継電器		1相(零相回路)	—	—	—	—	—	
OVGR	地絡過電圧継電器	系統側の地絡事故の継続検出	1相(零相回路)零相電圧検出はコンデンサ形が基本	○ *1	—	○	—	—	発電機CB
UVR	不足電圧継電器	系統側の短絡事故・停電検出	3相	—	○ *1	—	○	○ *2	
OVR	過電圧継電器	発電機の制御異常による系統過電圧検出	1相 発電機自体に保護装置があれば省略できる	—	—	—	—	—	
DSR	方向短絡継電器	系統側の短絡事故検出	3相を基本とする同期発電機の場合に必要	—	—	—	○	—	
RPR	逆電力継電器	系統側への逆潮流検出	1相	—	—	—	○ *3	○	
UFR	不足周波数継電器	上位送電側事故時の周波数低下検出	1相 逆潮流がなく、RPRで高速に保護できれば省略できる	—	—	—	○	○ *2	
OFR	過周波数継電器	電圧低下による負荷脱落時の周波数上昇検出		—	—	—	—	—	
UPR	不足電力継電器	系統側の短絡事故・停電検出	2相	—	—	○ *4	○	○	
Δf	周波数急変検出継電器	系統側の停電検出	1相	—	—	—	—	○	

*1. 継電器は検出しますが、電力系統側(変電所)保護継電器と時間協調をとっているため動作に至りません。
 *2. 発電機容量と系統の負荷のバランスがとれていると動作しないことがあります。
 *3. 電圧が極端に低下(至近端短絡の場合)すると動作しないことがあります。
 *4. 変電所の地絡方向継電器の動作により、系統が停電となり、動作します。
 注. 線路無電圧確認装置省略に伴うシステムの二重化を行う場合は、1つの事故に対して2つ以上の継電器が動作する必要があります。

●各継電器の整定例

次に連系用保護継電器の標準的な整定について示します。

最終的には、電力会社への連系申請時に行う系統故障計算およびそれに基づく協調確認によって決まります。

機種	整定例		背景
	動作値	動作時間	
OCR-H	配電用変電所OCRと協調がとれること		従来の受電端保護と同じ
OCGR	零相電流：0.2A	(JIS C 4601で規定する時間)	
DGR	零相電流：0.2A、零相電圧：5%	0.2s	
OVGR	零相電圧：10%	5s	配電用変電所の同バンク・他フィーダーのDGRと協調をとる
UVR	不足電圧：85V	2s	配電用変電所の同バンク・他フィーダーのOCRとの時間協調をとる
OVR	過電圧：125V	2s	
DSR	電流：*1、不足電圧：90V	0.7s	配電用変電所の同バンク・他フィーダーのOCRとの時間協調をとる
RPR	逆電力：発電機容量の10% *2	0.5s *3	
UFR	不足周波数：定格周波数-1Hz	1s	
OFR	過周波数：定格周波数+1Hz	1s	
UPR	不足電力・契約電力の10%	0.5s	CGS需要家の最小消費電力以下とする

*1. フィーダー送り出し点の2相短絡時に、発電機より流出する電流値以下とする必要があります、次の計算によります。

$$I = \frac{IG \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{(\%x + \%G)} \times \frac{1}{CT比}$$

IG：発電機の定格電流
 %x：CGS需要家から変電所までのパーセント線路インピーダンス
 %G：発電機のパーセントインピーダンス

*2. RPRは受電端CTに接続されますので、逆電力整定値は、 $(\text{発電機容量の10\%} \times \frac{\text{発電機容量}}{\text{定格電力}})$ となります。

*3. 発電機の並列投入時の動揺時間を考慮してください。

●その他連系用保護継電器として要求される事項

「ガイドライン」では、分散型電源設備が系統に与える影響の重要性から、連系用保護システムおよび継電器の機能に次の項目を要求し、信頼度を高めています。

線路無電圧確認装置省略に伴うシステムの二重化

「ガイドライン」では、分散型電源需要家負担で変電所に線路無電圧確認装置(再閉路時、線路の電圧有無を確認する装置)の設置を義務付けています。しかし本装置の設置は、同系統に複数の分散型電源需要家が存在する場合の問題や設置コストの問題で困難な状況です。このため、系統が停電状態である時、発電機を系統から確実に解列させる継電器を二重化することによって、本装置を省略できるとされています。二重化実現のための手段として、UPRの設置も認められています。この場合は、二相に設置することが必要です。

継電器の制御電源は専用の直流回路で供給

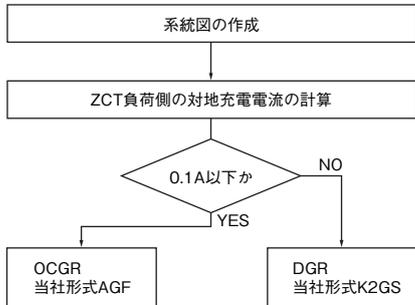
連系用保護継電器への制御電源は、専用の直流回路で供給しなくてはなりません。これは電源の供給信頼性を確保すると共に、系統の短絡事故時にも動作する必要があるからです。(計器用変成器VTの電源では短絡時に、出力電圧がなくなってしまいます。)

2. 地絡継電器の概要

■受電用GRの選択

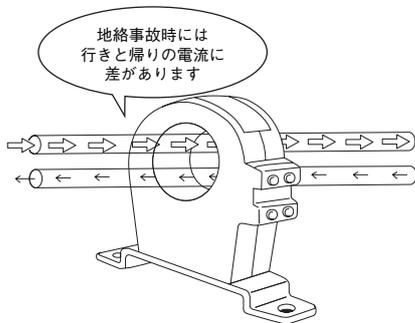
地絡事故点の有効な選択しゃ断のためには、系統条件の相違によって設置するGRをOCGR(地絡過電流継電器)またはDGR(地絡方向継電器)のいずれかを選択します。

継電器の選択手順

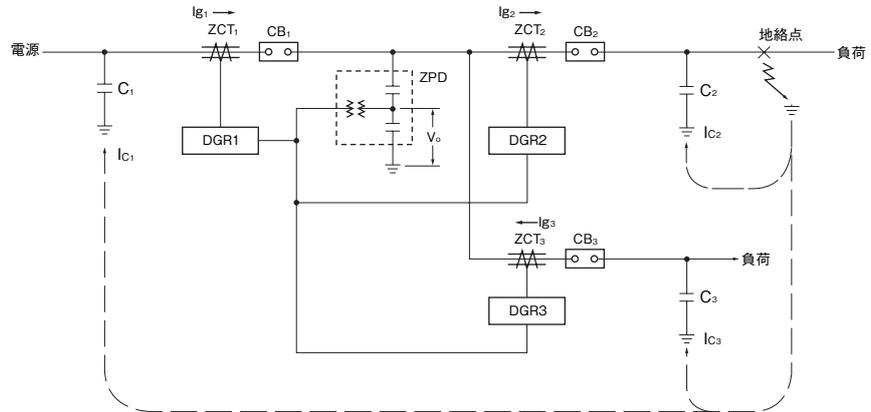


■零相変流器(ZCT)の地絡電流監視

回路に流れる電流の大きさは、単相でも三相でも行き帰りは同じです。地絡事故が起きると、行きと帰りに差ができます。この差により、ZCTに磁束が誘起し二次側に電流が流れます。その電流を継電器が検出し監視します。低圧でよく使用される漏電ブレーカも、この原理で構成されています。



■零相電圧検出装置(ZPD)の電流方向監視



地絡事故が発生しますと、ZPDに発生する零相電圧Voと、ZCTで検出する零相電流Ioの方向(位相)は、自己回線では事故電流が電源側から負荷側に向かって流れます。一方、他回線では、事故電流が負荷側から電源側に向かって流れます。このことを利用して、事故の発生した回線のみを選択しゃ断します。

■地絡保護協調

地絡保護協調は、地絡保護継電装置を運用する上で、最も重要な概念といえます。保護協調とは、回路に事故が発生した場合、事故回路のしゃ断器以外は動作しないよう動作協調を取り、健全回路の給電を維持すること、および負荷機器や回路機器が損傷しないよう各機器の動作特性を調整・配置することをいいます。

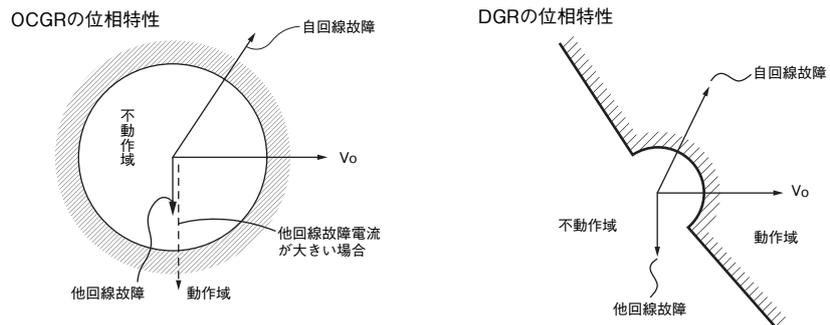
■地絡電流、電圧感度協調

地絡故障は、地絡点の位置、地絡点の形態によって発生する零相電圧、零相電流はさまざまです。

●OCGRの感度協調

ZCTの検出する零相電流の大きさが自回線故障と他回線故障が異なることを原理として、回線選択する方法です。図1はそのようすを示します。

図1. OCGR・DGRの位相特性



この場合、次の関係が満足されなければOCGRは誤動作をおこす可能性があります。

$$I_R \geq 2 I_c$$

I_R: 継電器整定値

I_c: 構内対地充電電流

2: 余裕係数

そして、前式が満足できない場合には、DGRを使用することが必要になってきます。つまり、ケーブルのこう長が長い需要家では、OCGRの協調が無理ということになります。キュービクル受電等での高圧の線路こう長の短い場合には、OCGRで十分保護協調が可能です。

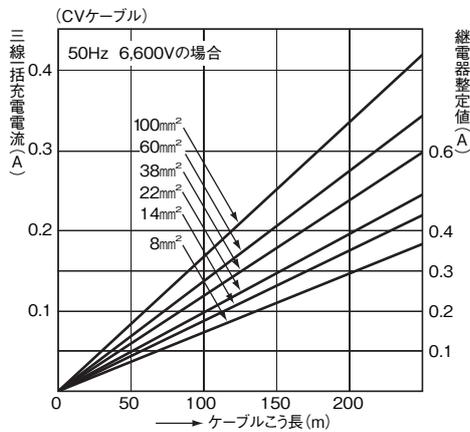
ケーブルこう長と充電電流の関係を図2に、ケーブルの静電容量を表2に示し、継電器整定に対するケーブルこう長の限界を表1に示します。

表1. ケーブルこう長限界目安

公称断面積 (mm ²)	0.2A整定の場合 (m)	0.4A整定の場合 (m)
8	135	270
14	115	230
22	100	200
38	85	170
60	70	140
100	60	120
150	50	100
200	50	100
250	47	95

(CVケーブル 50Hz 6,600V)

図2. ケーブルこう長と充電電流



●DGRの感度協調

DGRの感度協調は零相電圧要素が入ってきます。零相電流の感度協調はOCGRとまったく同じです。

零相電圧の感度は、配電線のどの場所でも、故障時に発生する零相電圧は同じ値です。

短絡電流のように、末端の故障時ほど故障電流が小さいということはありません。したがって零相電圧の感度だけでは多くの場合、故障点を選択し断することはできませんが、末端機器ほど感度を上げる(段協調の一般的通念)という形は軽微な地絡は末端で断し、変電所のGRはその後備保護という形態になっています。ですから、重地絡保護の場合には、零相電圧の感度協調だけではなく、他回線との間では位相判別が必要であり、自回線ではシリーズに入っているGRとの時間協調が必要になります。継電器の零相電圧-零相電流特性上に地絡故障点をプロットしたものが図3です。

■位相協調

通常のケースでは、ほとんど問題にはなりません。また一般に市販されているDGRも位相特性は固定されています。

継電器の位相判別は、自回線か他回線かの方向判断をします。

表2. ケーブルの静電容量一覧表

電圧 (kV)	形状	公称断面積 (mm ²)	高圧架橋ポリエチレンケーブルJIS C 3606-1987 (CV)
			静電容量 (μF/km)
6.6	3芯 (3芯一括~) (アース間)	8	0.63
		14	0.75
		22	0.84
		38	0.99
		60	1.17
		100	1.41
	単芯	150	1.65
		200	1.62
		250	1.77
		8	0.21
		14	0.25
		22	0.28
3.3	3芯 (3芯一括~) (アース間)	38	0.33
		60	0.39
		100	0.47
		150	0.55
		200	0.54
		250	0.59
	単芯	8	0.21
		14	0.26
		22	0.30
		38	0.37
		60	0.38
		100	0.47
単芯	150	0.55	
	200	0.54	
	250	0.59	

*参考

充電電流算出式

$$I_c = 2\pi fCE \text{ (A)}$$

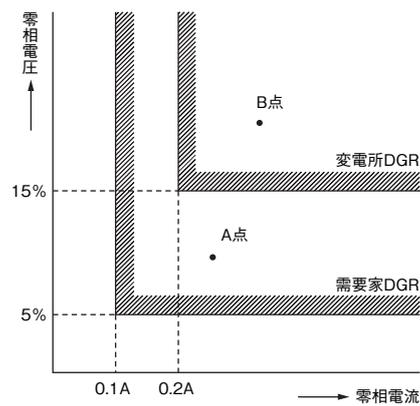
I_c: 3線一括充電電流 (A)

f: 周波数 (50Hzまたは60Hz)

C: 3線一括静電容量 (F)

E: 対地電圧 (V) = 線間電圧/√3

図3. DGRの感度協調例



3. モータ・リレーの概要

■モータ・リレーに必要な機能

モータ・リレーを使用する目的は次の2つに分類できます。

- (1) モータ自身の保護(焼損防止)
- (2) モータにつながる負荷の被害を最小限にとどめる。
(この場合、モータよりもその負荷を念頭においてモータ・リレーの選定をする必要があります。)

以上の(1)および(2)を満足するために、モータ・リレーは次の3つの機能を持っています。

- (1) 過負荷要素
 - 過電流要素
 - 時間要素
- (2) 欠相要素
- (3) 反相要素

次に、この3つの要素についてもう少し詳しく説明しましょう。

●過負荷要素

モータが過負荷になり、過電流が長時間流れるとモータは焼けてしまいます。

したがって、過電流が流れるとただちにこれを検出してモータの電源をしゃ断し、モータを保護しなければなりません。

しかし、誘導電動機は一般に、図1のように起動時に500%程度の過電流が数秒～数十秒の間流れます。もしこの時にモータの過負荷要素がはたらくと、モータを起動するとすぐしゃ断することになってモータの運転ができません。このためモータ・リレーには、モータに流れている電流が定格値を超えているかどうかを検出する“過電流要素”の他に、過電流の継続時間がモータの起動時間内であれば動作せず、それより長く過電流が継続した場合は動作させるための“時間要素”が必要になります。すなわち、モータ起動時にモータ・リレーが誤動作することを避けるための手段として時間要素が必要ということです。

時間要素が必要なもう一つ積極的な理由があります。

図2はモータの過熱特性を示す I^2t 曲線で、この曲線の下側の範囲であればモータは焼損せず、十分使用できることを示しています。この例ですと、モータに500%の過電流が流れても40秒であれば使用可能ですから、もし電流値が半分の250%になれば

$$\left(\frac{500}{250}\right)^2 \times 40 = 160$$

となり、4倍の160秒までOKということになります。同様に100%のときは、上の計算式に従えば

$$\left(\frac{500}{100}\right)^2 \times 40 = 1000$$

となり、1000秒しかもたないことにはなりますが、100%というのは定格電流ですから連続運転可能で、この式は適用されません。ですからこの曲線は正確に I^2t を示すものではなく、ほぼ I^2t ということです。

さて、モータ自身はこのように過電流が流れてもすぐに焼けるわけではなく、ある程度の時間は許されるわけで、少なくとも起動電流、起動時間程度の過負荷には耐えるわけです。したがって、モータをその限界まで使用した方が得策であるという観点にたてば、モータ・リレーが過電流でも直ちに動作するのは好ましくなく、図2の曲線の下側の曲線にそって動作するように、大きな

電流が流れた場合は早く、小さな電流だと長い時間で動作するような、いわゆる反限時特性と呼ばれる時間特性をもつ方が望ましいわけで、これが過負荷要素に時間要素を付加する積極的な理由です。これによって、少しでも過負荷になるとモータ・リレーがすぐ動作して停止してしまうという不要な運転停止が防げるわけです。

ところでこの積極的な理由は、用途によってはない方が良い場合もあります。たとえば、負荷は定まったもので定格電流以上流れるということが負荷の異常状態であることが明確な場合は、過電流が流れると直ちにモータの電源をしゃ断してしまわないと負荷に被害が発生したり、被害が増大してしまいます。こういった、負荷を保護する用途は過負荷要素の動作時間は早ければ早い方が望ましいわけです。もちろん、この場合でも起動時には過大な起動電流が流れますから、起動時は一定時間動作せず、その後は瞬時に動作する機能をもつ過負荷要素が必要で、これを普通、瞬時形と呼んでいます。

さて、いままで過負荷要素には電流値を検出する要素と時間要素の2つの要素が必要なことを説明しましたが、この電流、時間の値はいくらに定めれば良いでしょうか。

・電流値について

JEM 1357「三相誘導電動機用誘導形および静止形保護継電器」の規格には、動作値は、電流整定値の105～125%の範囲内であることと定めてあり、モータ・リレーの各メーカーも大部分がこれに準拠しています。したがって、特に指定のないモータにはこの規格で充分です。

・時間について

同じくJEM 1357の規格には、電流整定値の600%過電流で40秒以下、200%過電流で4分以下と定めてあります。

また、JIS B 8324深井戸用水中モータ・ポンプのモータ保護として「全負荷電流の5倍の電流を通じて5秒以内に動作すること」と規定されています。したがって、一般にモータ・リレーは、500%過電流にて数秒～数十秒の動作時間の種類があります。

図1. モータの起動電流

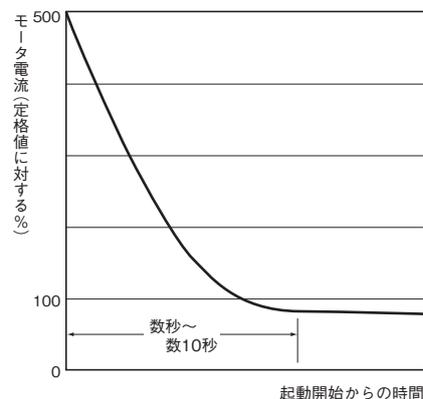
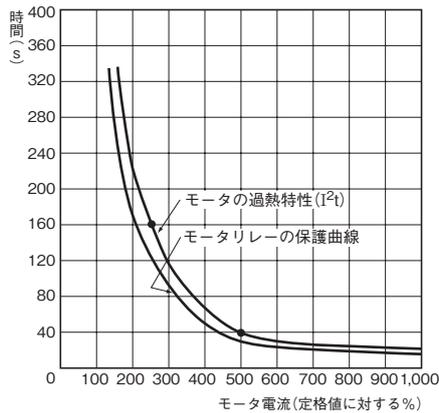


図2. モータの過熱特性と保護曲線



過負荷要素のまとめ

- (1) 過負荷要素の電流要素は定格値で動作せず、125%で動作するよう定めるのが一般的である。時間は、500%過電流時に数秒～数十秒程度でモータの起動時間より長めに選択する。普通は反限時特性といって電流値が大きくなると早く、電流が少ないと長い時間かかって動作するような時間特性である。
- (2) 時間要素は、起動時およびその後の運転時とも同じ時間特性で動作するものと、起動時のみ時間遅れをもち、運転時は瞬時動作としてモータにつながる負荷の保護をねらったものがあり、後者は一般に瞬時形と呼ばれている。

●欠相検出要素

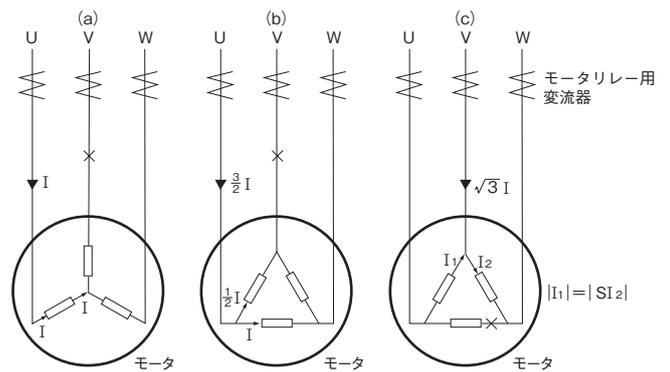
モータの電源線が断線したり、接続部のゆるみ、制御用開閉器の接触不良、モータ内部の断線などによって、本来、三相電圧で運転されるべきモータが単相で運転されている状態を“欠相”と呼んでいます。

停止している誘導電動機は単相では回転を始めませんので、欠相状態で起動すると起動電流がいつまでも流れ続けるために、先に述べた過負荷要素によって検出され、モータ自身の焼損は防止することができます。ところが正常に運転している最中に欠相しても単相状態になると、ご存知のように負荷が軽ければ三相誘導電動機は単相誘導電動機として回転を継続することができます。図3を見てください。Y結線モータの場合と△結線モータの電源相欠相、△内部の欠相の3つの状態があります。このとき電源線に挿入した過負荷要素だけでモータの焼損が防げるかどうかを考えてみましょう。

(1) Y結線モータの欠相

図3(a)のように電源線に流れる電流とモータの巻線に流れる電流はどこで断線しても同じです。したがって、もし欠相を発生して過電流が流れても電源線の過負荷要素が検出するので、モータが焼損することはありません。さらに、またモータの負荷が軽くて過電流に至らない場合は過負荷要素は検出できませんが、モータも電流が小さいため焼損するには至らず、軽負荷運転を継続します。

図3. 欠相時の電流分布



(2) △結線モータの外部欠相

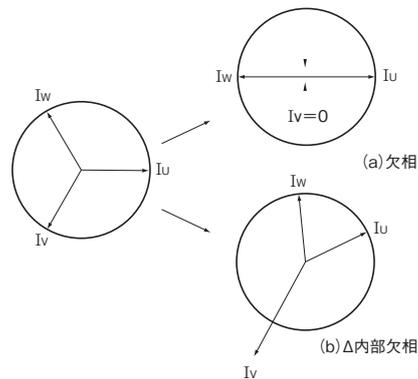
図3 (b) のような場合はどうでしょう。正常時に巻線に流れる電流をIとすれば電源線に流れる電流は当然 $\sqrt{3}I$ 、すなわち、巻線の定格電流が I_n とすれば電源線の定格電流は $\sqrt{3}I_n$ で、過負荷要素は $\sqrt{3}I_n < \sqrt{3}I$ を監視することによって等価的に巻線の電流が $I_n < I$ でないかどうかを監視しているわけです。

ところが(b)の欠相状態となると $I = I_n$ となったときの電源線の電流は $\frac{3}{2}I_n$ で、これは当然 $\frac{3}{2}I_n < \sqrt{3}I_n$ もしくは $1.5I_n < 1.732I_n$ というわけで、したがって、モータの負荷状態によっては巻線は過電流となっても電源線は定格電流以下であるために過負荷要素は動作せず、巻線が焼けてしまう可能性がありますので、このような場合にモータの焼損を防止するためには、別に欠相を検出する要素が必要となります。

(3) △結線モータの内部欠相

図3(c)の場合はどうでしょう。 I_1 と I_2 は正常時と同じく $|I_1| = |I_2|$ 、位相差は 120° ですからV相電源線電流はこれも正常時と同じ $\sqrt{3}I$ となり、またU、W相の電流は各々 I_1 、 I_2 となって電源線から見た場合、巻線に正常時より過電流が流れているように見えますから、過負荷要素が検出し焼損の心配はないでしょう。したがって、(1)のY結線と同様のことがいえます。さて、いまままで述べたのはモータの焼損を防止するという観点からの説明です。

図4. 欠相時の電源線電流ベクトル図



ところで欠相というのは異常状態です。運転中に欠相し、軽負荷でそのまま運転を継続するのならそのままにしておくというのは不適切で、もう少し負荷が増えると停止するかもしれませんし、接続のはずれた導線が外被に接触して感電事故、短絡事故につながる可能性もあります。

異常状態は、直ちに検出して処置をするのが保護の原則ですから、単にモータの焼損を防ぐというだけでなく、この場合もできるだけ早く欠相を検出するのが原則です。

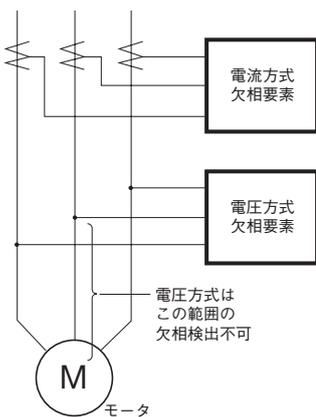
すなわち、単にモータの焼損を防ぐというだけでなく、軽負荷時でも欠相を検出するために、過負荷要素で検出すると非常に時間がかかるので、これを早く行うためなどの理由から図3(a)、(c)の場合でも欠相要素を設けるのが普通です。

欠相要素について、もう一つ注意をしておきましょう。図3(a)、(b)においては正常時U、V、W相の電流が平衡三相電流であったものが、欠相すると欠相した相の電源線電流は完全に零で、他の2相に単相の往復電流が流れます。この場合図4(a)に示すように欠相の前後でベクトル関係は大きく変化します。

ところが、図3(c)の場合ですと、図4(b)のようなベクトル変化となり図4(a)に比べて変化が少ないことが直感的にわかります。実際に図3(c)の場合は図3(a)、(b)に比べて欠相の検出がやりにくくなります。

普通図3(a)、(b)のような状態を欠相、(c)の場合を△内部欠相と呼んで区別しており、一般に欠相検出可能というのは(a) (b)の場合をさしていますので、△結線電動機(1.5kW以上はこの方が多いですが)をお使いの場合、注意する必要があります。

図5. 電流方式欠相要素の優位性



また、図5のように変流器を使わず、モータの電圧で欠相を検出する方式もありますが、この方式だと、欠相検出用の接続点よりモータ側で欠相した場合は検出できず、また、電源側欠相であっても、軽負荷運転中の欠相はモータ端子電圧が、それほど低下しないため検出できない場合があるため、電流検出の方が圧倒的に有利です。

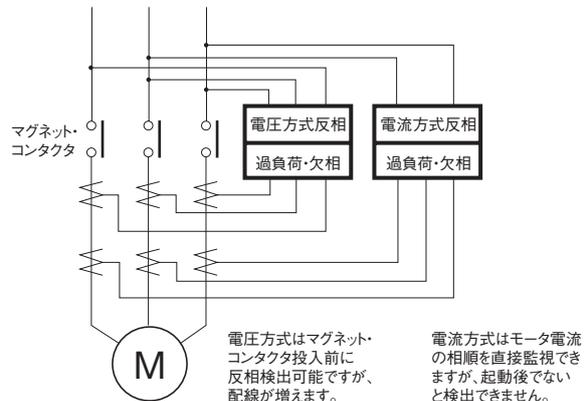
欠相要素のまとめ

- (1) 過電流要素だけでは欠相時、モータの焼損を防止できない場合があり、欠相要素が必要である。
- (2) 軽負荷時には欠相しても過電流といわれるほどの電流が流れないので、過負荷検出ができない。異常を早く検出するためには欠相要素が必要である。
- (3) 一般には、欠相といわれるのは電源線の欠相であり、△内部欠相は検出できない場合が多いので注意が必要である。
- (4) 電圧方式もあるが電流方式が有利である。

●反相要素

三相誘導電動機は、相順が逆になるとモータの回転方向が反対になります。モータがどちらに回ってもかまわないという用途は、まずありませんし、時には一瞬でも逆に回るとモータの負荷に致命的打撃を与える場合があります。このために、モータに加わる電源の相順が逆になると直ちにこれを検出する要素が“反相要素”です。

図6. 反相要素の電圧電流方式比較



この場合にも欠相検出と同じように電流方式、電圧方式が考えられます。図6をみてください。図6のようにマグネット・コンタクタ前に反相要素を接続すると、反相はモータを起動させる前に検出できます。これによって先に述べたモータを一瞬でも逆転させないということが可能になります。この点、電流方式はいくら動作を早くしても0.5秒程度ですから、多少逆転するのはやむをえず、その意味では電圧方式が有利になります。しかし、電圧方式はモータ・リレーへの接続が1本余分になる欠点がありますし、高圧モータなどではVTを1個追加する必要があるなどの欠点もあります。また、電流方式はモータに流れる電流の相順を直接判定することができる利点がありますが、前にも述べたように検出に多少の時間を要する(モータが回転した後の検出となる)欠点もあります。

なお、いずれの場合も反相検出はその接続点(電圧検出の場合は接続した電源ラインの位置、電流検出の場合はCTを挿入した位置)のみの相順検出となりますので設置時にはその点にも注意を払う必要があるでしょう。

ところでモータは、一度設置してしまえば相順が逆になることはきわめてまれで、反相要素が必要でない場合も多いものです。しかし、移動用電源のモータなどで接続変更の頻度の高いもの、保守点検時に接続変更するものなどについては、付加した方が良いでしょう。

反相要素のまとめ

- (1) 反相要素は不要な場合も多い。
- (2) 電圧検出は起動前に検出できる利点があるが、また電流検出はモータの電流相順を直接監視できる利点があるが、それぞれの欠点もある。

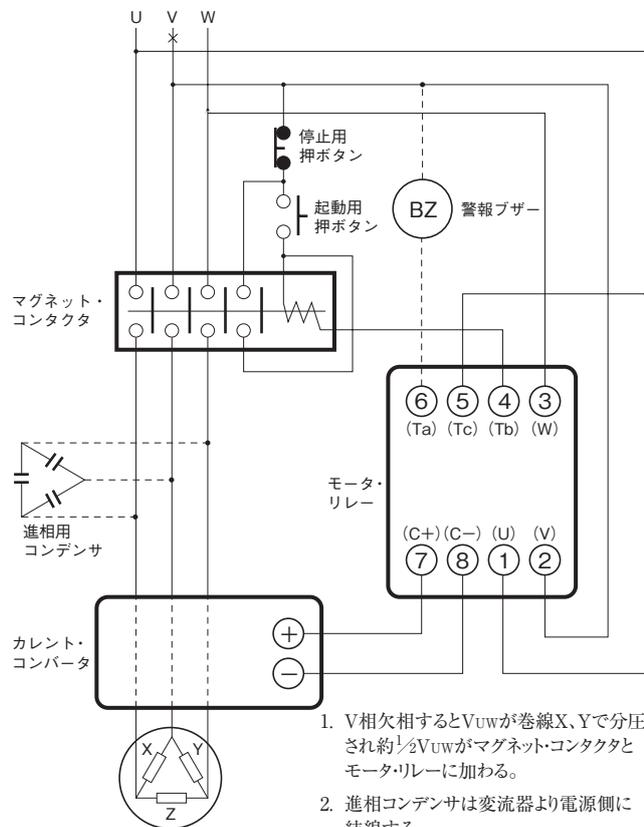
■モータ・リレーの特異点

モータおよびモータ・リレーの使用上で注意しなければならない問題がいくつかありますが、ここでは欠相時の電圧降下、モータ電流波形の歪(ひずみ)、力率改善用コンデンサの配置、モータ電流の不均衡について説明しましょう。

●欠相時の電圧降下(電源接続上の注意)

図7のようにV相で欠相(断線)しても、モータ・リレーおよびマグネット・コンタクタに加わる電圧は零になるのではなく、U、W間の線間電圧 V_{uw} がモータの巻線XとYで分圧され、そして通常、マグネット・コンタクタ励磁コイルおよびモータ・リレーの電源回路のインピーダンスはXとY巻線のインピーダンスに比べてかなり大きいので、ほぼ $1/2V_{uw}$ の電圧が加わります。したがって、この状態でもマグネット・コンタクタがしゃ断するためには、モータ・リレーが定格電圧の半分の電圧でも欠相を検出して動作しようようにするか、それができない場合はマグネット・コンタクタが $1/2$ の電圧では保持できず、自動的に復帰してしまうように選定します。ところが、もしマグネット・コンタクタの電源をモータ・リレーの電源とは別の相、たとえば図7ではモータ・リレー、マグネット・コンタクタとも、U、W相から電源をとっていますが、これをマグネット・コンタクタのみU、W相からとるようにするとマグネット・コンタクタにはV相が欠相しても定格電圧が加わったままで復帰せず、しかも、モータ・リレーには $1/2$ の電圧しか加わらないのでモータ・リレーが動作できない場合は、保護が不可能となります。そのため、モータ・リレーに $1/2$ の電圧でも動作するという条件をつけるか、配線に注意してマグネット・コンタクタに $1/2$ の電圧では必ず復帰するという条件をつけるか、いずれにしても注意を要する事項となります。

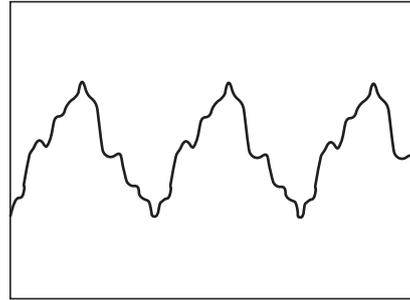
図7. 欠相時の電圧降下、進相コンデンサの位置



注. モータの軽負荷運転中の欠相においては電圧は $1/2$ まで下がりません。モータ側から正常に近い電圧が逆供給されます。この場合にはマグネット・コンタクタの釈放電圧に期待した保護はできません。

●モータ電流の波形歪

送風ファン用モータ電流波形の例



図のように、モータに流入する電流は本来、正弦波のはずですが、水中モータとか使い古したものなどの中には、正常に運転できているモータでも電流波形が極端に歪んでいるものが観測されています。

モータ・リレーは、入力正弦波であるという前提にたって設計されているために波形の歪によって、過負荷要素では動作電流値の誤差が増大したり、また、欠相、反相要素では誤動作の問題などが発生します。モータの電圧波形は一般に歪みが少ないので動作の早い反相要素などはこの点から電流方式より電圧方式の方が無難ということもできるでしょう。しかし、波形歪みの問題は各メーカーとも検討を重ねて最近では方式による差はほとんどありません。

●力率改善用コンデンサの設置位置

モータは、その力率を改善するために図7のようにモータと並列に進相用コンデンサを挿入します。モータの軽負荷時に流れる電流はほとんど無効分で、かなり高調波が混入しています。そして、これにコンデンサを並列接続して基本波成分をうち消すと高調波だけが残る結果となり、これが大きい場合は本来入力 $50/60\text{Hz}$ の正弦波として設計されている欠相、反相回路などが誤動作しやすくなります。もちろん、大部分の場合の高調波電流は小さくて誤動作するようなことはありませんが、誤動作の確率をさげるためには図7のように、モータ・リレーより前にコンデンサを設置する方が無難です。

また、コンデンサをモータ・リレーの後に挿入すると、見かけ上モータ電流が減少することになり、モータ・リレーの過電流動作値はその分を見込んで設定する必要があるので面倒となりますから、この点からもモータに流れる電流だけをモータ・リレーに与える方が望ましいわけです。

■静止形モータ・リレーの構造 (当社 形SEの例で示します)

●カレント・コンバータ

この中には、モータ電流をトランジスタ回路で使用しやすい大きさの電流に変換する変流器と、その変流器二次電流を三相全波整流するダイオードと、その整流された電流を直流電圧に変換する抵抗器が入っています。

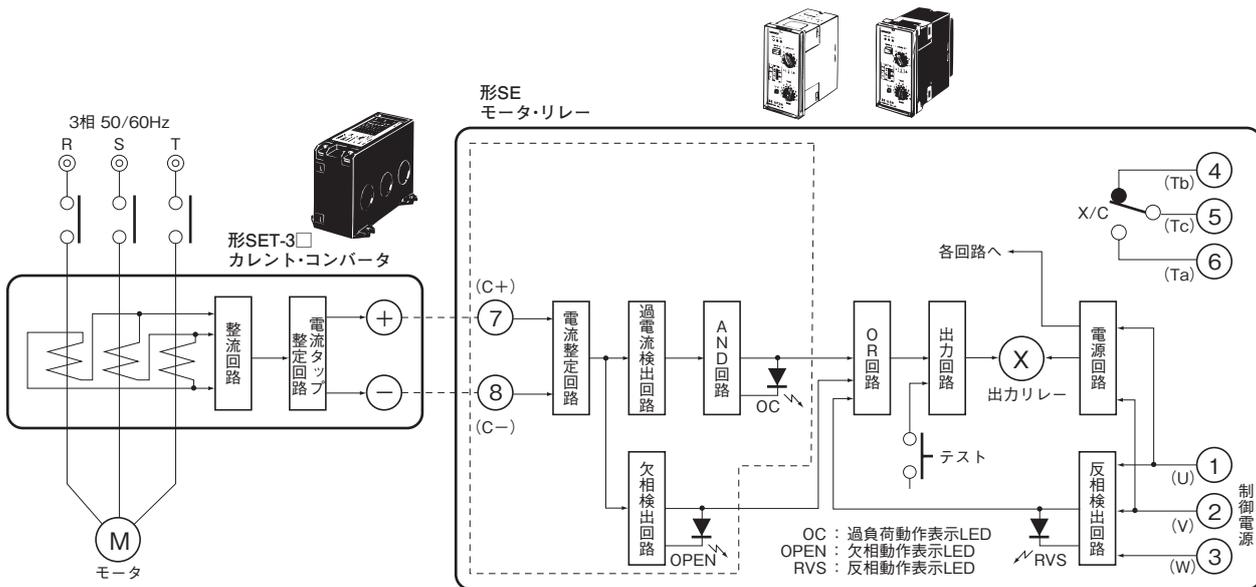
特にこのカレント・コンバータはそれに内蔵されたタップを変更することによって、その抵抗値を3段階に変えることができ、モータ電流の広い範囲で使えるように工夫されています。

たとえばモータ電流が80Aのとき、カレント・コンバータの出力電圧を21Vにするためこの抵抗器が600Ωであったとすれば、40Aのときに21Vにするためには1,200Ω、また、20Aのときには2,400Ωの抵抗を接続することによってカレント・コンバータの出力電圧はいつも21Vになるので、したがって、モータ・リレー本体が21Vで動作するとすればみかけ上、このタップ変更により20A、40A、80Aのいずれでも動作するようにセットできるわけです。

(注. 電圧・抵抗値は一例を示すものです)

また、20Aで動作するようタップを選んだ時でも、カレント・コンバータにモータ電源線を2回巻けば、モータ電流10Aでもカレント・コンバータからみると20A流れているようにみえるので、10Aで動作させることができます。同様に4回巻けば5Aで動作させることができます。

図8. 形SE 静止形モータ・リレー (反限時タイプ) 内部ブロック図



注1. 数字はプラグイン形の端子番号を表示し、()内はパネルマウント形の端子記号を示す。

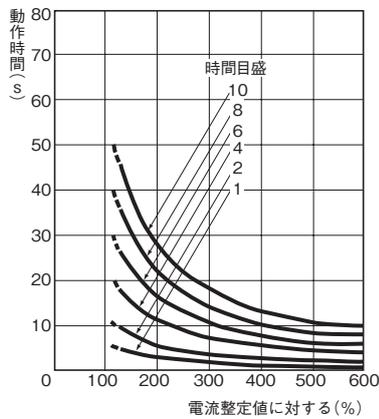
注2. 反相要素「切」で使用する場合は、端子③(W)の配線は不要。

●過負荷要素

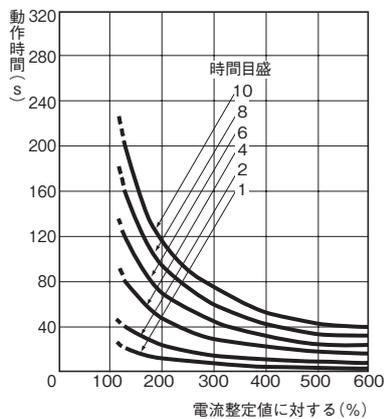
カレント・コンバータの出力は、接続線を通してモータ・リレー本体の7(C+)、8(C-)端子〔数字はプラグイン形の場合の端子番号、()内は埋込形の場合の端子番号です〕に入り、電流目盛整定回路で分圧されて過電流検出回路に入ります。電流目盛整定回路は可変抵抗による簡単な分圧回路で、この分圧比率を変えることにより、電流動作値を変えることができ、この場合カレント・コンバータのタップを20Aとすると、この可変抵抗器のつまみを回すことで8A～20Aの範囲で動作値を整定することができるようになっています。もし、過電流が発生していると、過電流検出回路がこれを検出して次の時間整定回路をドライブします。この時間整定回路は先に述べた反限時特性をもっており、図9のような時間特性です。

図9. 過負荷動作時間特性(参考値)

時間目盛倍率：×1



時間目盛倍率×4



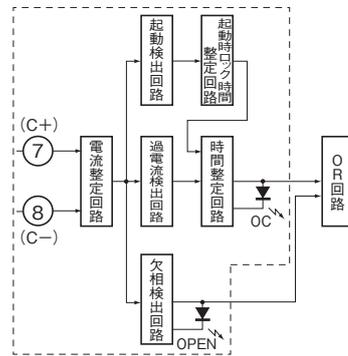
この時間整定回路にも可変抵抗器がついていて、そのつまみを回すことにより電流整定値の600%の電流が流れた時の動作時間が1～10秒の範囲で変えることができます。

この他に時間倍率用スイッチがついて、この4倍、すなわち4～40秒とすることが簡単にでき、1～40秒の広い範囲に時間を整定できる特長があります。

過電流が整定時間以上流れるとOR回路を通じ出力回路により出力リレーⓧが励磁されてその接点X/cが切り替わり、それにつながる警報、しゃ断などの動作を行います。

なお、瞬時形の場合は図10のように、モータ電流が定格値の約30%以上になるとモータが起動したとみなされて、起動時間回路が動作を始めますが、入力電流の大きさに関係なく一定時間は出力を出さないで、過電流検出回路が直ちに動作し出力を出してもAND回路出力はなく、動作しません。そして起動時間が過ぎると、モータ電流は定格値～定格値の50%程度の電流が流れますので、起動時間回路の出力は出たままです。そしてその後、過電流が発生すると過電流検出回路が直ちに動作し、0.5秒以下でⓧリレーが動作します。

図10. 形SE静止形モータ・リレー(瞬時タイプ)内部ブロック図
反限時タイプにおける[]の部分()の部分が下図のようになります。



●ⓧリレーの動作について

(手動復帰形)

形SE..... ⓧリレーは機械的に自己保持して停電しても手動復帰させるまでは動作したままです。

形K2CM.... ⓧリレーはキープリレーを採用しているため、停電してもロックしたままです。復帰には電源が必要です。

(自動復帰形)

整定を下まわれば自動に復帰します。(ただし欠相要素と併用してご使用になる時は、欠相した場合、操作電源が低下するのでU、Vへの供給電源はモータの電源と別電源にしてください。上記の理由により反相要素は使えません)

●欠相要素

図11. カレント・コンバータの出力波形

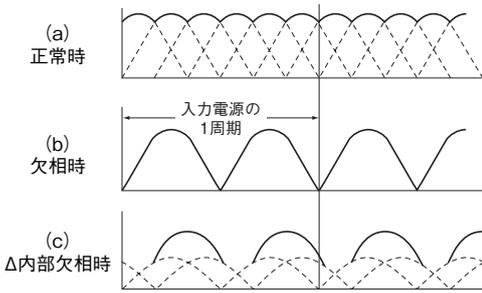
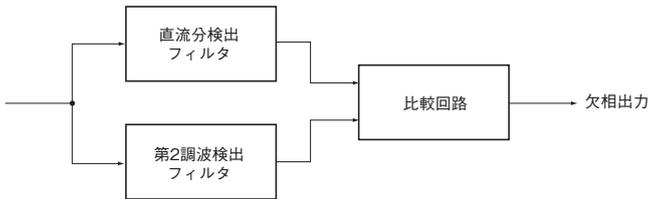


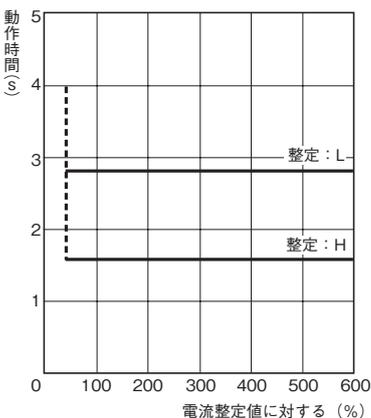
図11(a)は正常時の整流出力波形、(b)は欠相時、(c)は△結線電動機の相内欠相時の波形です。これから正常時は直流分が大で交流分が小さく、しかも第6調波以上で周波数成分が高いことがわかり、欠相時は直流分が小さく交流分が大きく、しかもその交流分は第2調波がもっとも大きいことがわかります。したがって第2調波/直流分もしくは、交流分/直流分の比に应答するように構成すれば欠相検出できることが直感的に理解できます。

図12. 欠相検出回路の構成



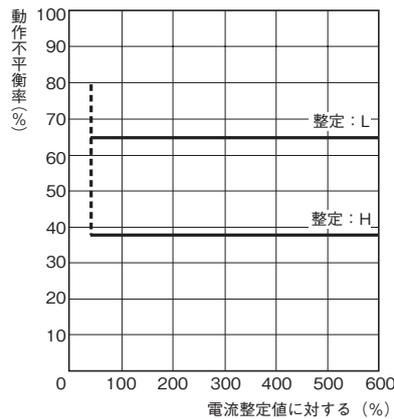
そしてこの静止形モータ・リレーはこの原理を応用したもので、図12のようにカレント・コンバータの出力(正確にはそれを分圧したもの)の中から直流分だけを取り出すフィルタと第2調波成分だけを取り出すフィルタとを設け、その比がある値を超えた時に欠相と判定するようになっています。そしてこの欠相時の動作時間特性は図13に示すように、電流値にあまり関係なく約1.5秒となっています。

図13. 欠相動作特性



ところで、第2調波成分/直流分はほぼ不平衡率の関数であることが確認されています。したがってこのモータ・リレーは、欠相検出というより不平衡検出として設計されており、不平衡率が約35%のとき動作するよう整定されています。この動作不平衡率が電流値によってどう変わるかを図14に示しています。

図14. 不平衡動作特性



横軸の電流値は、3相の電流のうちもっとも大きい相の電流値を示しています。欠相検出回路から出力が出ると図8のOR回路を通して同様にⓧリレーが働きます。

●反相要素

図15に構成図、図16にベクトル図を示します。このように正常時には、d、e間の電圧1.5Vuv、反相時には0Vとなりますので、これをトランジスタに与えることにより簡単に反相が検出されます。反相検出回路の出力はORを通してⓧリレーを動作させます。ところでモータ・リレーの電源はU、V相からとられていますので、反相要素が不要なとき端子3(W)の接続をはずせばいいかという、結果は逆でVuvがRp1とCc1で分圧され、分圧された電圧がトランジスタに加わって動作することがあります。もちろん、入力電圧が小さいと動作しない場合もありますが不確定ですから、この場合は反相要素のないものに変える必要があります。なお、このモータ・リレーは50/60Hz共用ですからVdeは正常時でも完全に零とはなりません、正常時と反相時のVdeの差が大きいために充分安定に動作するようになっています。

図15. 反相検出回路の構成

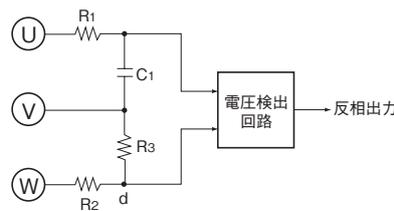
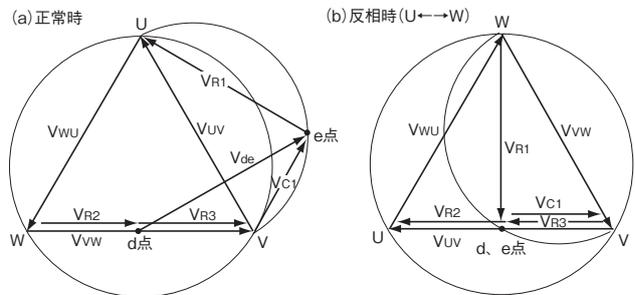


図16. 反相検出回路のベクトル図



●外部接続

図17(a)、(b)に各々の外部接続の一例を示しています。もちろん反相要素を使用しない時は端子3(W)の接続は不要です。

- (1) マグネット・コンタクタの励磁コイルとモータ・リレーの電源端子(U、V)相を同じ相に入れる方がよい。
- (2) 進相用コンデンサはカレント・コンバータより電源側に入れる。
- (3) カレント・コンバータとモータ・リレー本体との接続は極性を間違えないようにする。この接続後に流れる電流は通常数mA、最大数十mAですから接続線の電流容量には特に留意する必要はなく、電圧も通常は数十V以下、過電流時でも400V以下ですから600V絶縁電線でも問題ありません。ノイズなどについても、特に気をつかう必要はありませんが、大電流線とはできる限り分離することが望ましい。
- (4) 電圧端子(U、V、W)への相順を間違えないこと、反相要素が不要の場合(反相要素「切」)はU、Vだけです。相関係ありません。
- (5) U、V、Wへの配線はマグネット・コンタクタの前に入れる方がモータ起動前に反相検出ができて有利です。

図17.(a) 人-△起動モータの場合の外部接続

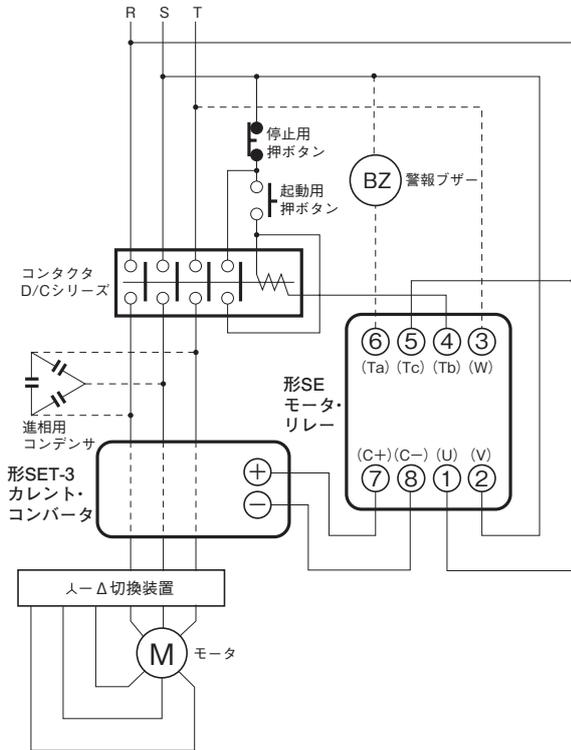
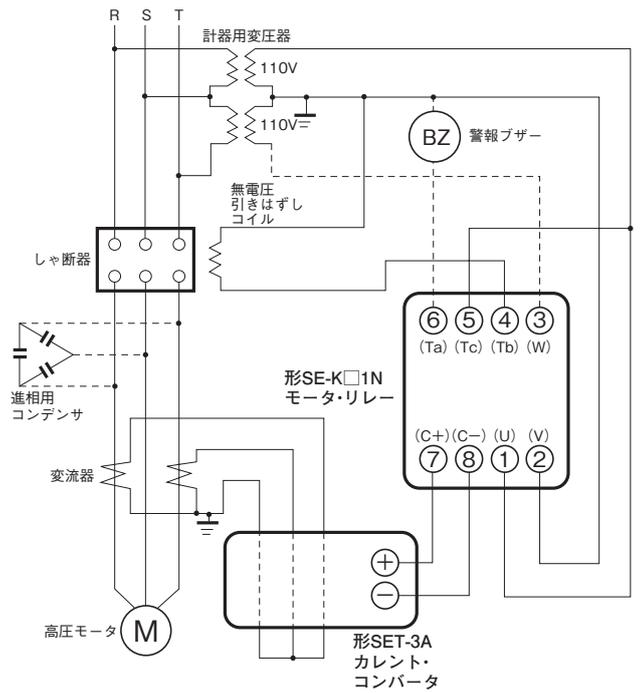


図17.(b) 高圧電動機無電圧引きはずしの場合の外部接続



●モータ電流の不均衡

モータ電流の不均衡率は普通では数%程度ですが、多年使用したものやV結線変圧器を通してモータに電源が供給されている場合などでは10~20%以上の不均衡が観測されています。次ページの参考に簡単な不均衡率の計算法を示していますので、測定してみてください。もし20%をこえる場合は△内部欠相検出は不可能な場合があります。

■参考

不平衡率について

対称座標法によると三相の電流を各々 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c またベクトルオペレータを

$$a \left(= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \text{ とすると}$$

$$\text{不平衡率} = \frac{\text{逆相分}}{\text{正相分}} = \frac{\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c}{\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c}$$

と定義され、三相電流、電圧の不平衡の程度を示す尺度として使用されます。しかし、この計算は面倒ですから次に示す不平衡率計算表を用いると簡単に不平衡率が求められます。

図18は三相入力3つの絶対値を知ってその不平衡率を求めるためのグラフです。

たとえば三相交流入力のA相の電流 $I_A=50\text{A}$ 、B相の電流 $I_B=35\text{A}$ 、C相の電流 $I_C=45\text{A}$ であったとすると、電流 I_A を基準にとり、電流 I_A で他の相の電流を除して、

$$K_A = \frac{50}{50} = 1.0, K_B = \frac{35}{50} = 0.7, K_C = \frac{45}{50} = 0.9$$

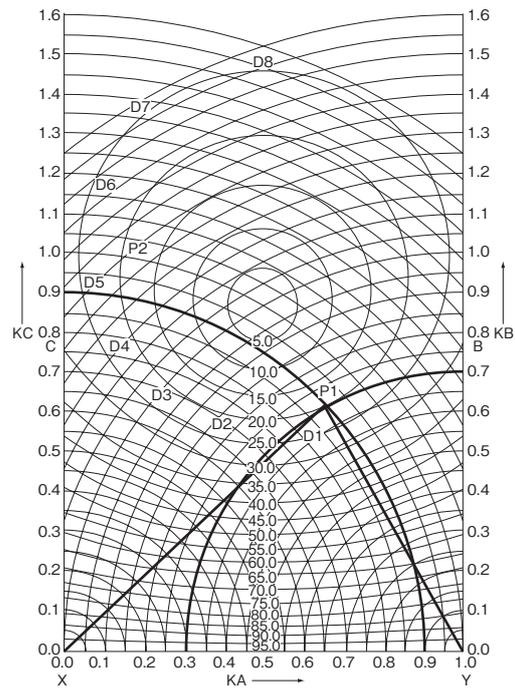
を求めます。そして右側縦軸の $K_B=0.7$ の位置よりでる円弧Bおよび左側縦軸の $K_C=0.9$ の位置よりでる円弧Cとの交点P1を確認します。点P1は不平衡率20%を示す円上に位置するから、この場合の不平衡率は20%と判断されます。

また、 $I_A=50\text{A}$ 、 $I_B=65\text{A}$ 、 $I_C=50\text{A}$ のときは、 $K_A=1.0$ 、 $K_B=1.3$ 、 $K_C=1.0$ となり、この場合、各々よりの円弧の交点はP2であり、この点P2もほぼ不平衡率20%の円上にあるので不平衡率は20%と判断されます。このように K_B 、 K_C からでる円弧の交点が不平衡率の20%の円上にある組み合わせにおいてはすべての不平衡率は20%となり、同一不平衡となる組み合わせは無数にあることがわかります。

同様にD1～D8はすべて不平衡率25%の組み合わせを表わしています。

ここで $\triangle P_1XY$ を考えてみると $\overline{XY} = \dot{I}_A$ 、 $\overline{P_1X} = \dot{I}_C$ 、 $\overline{P_1Y} = \dot{I}_B$ すなわち $\triangle P_1XY$ は \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C のベクトル図を示しています。

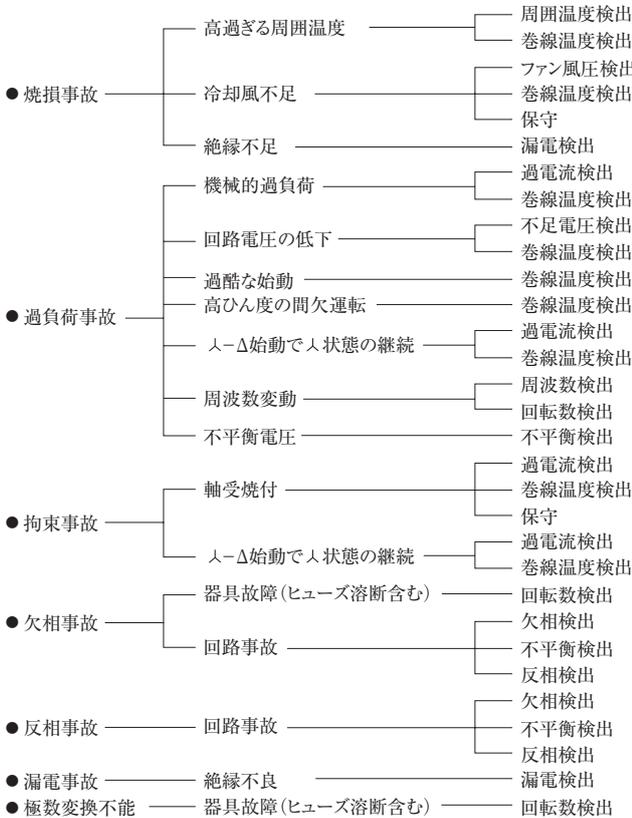
図18. 三相電流、電圧の不平衡率計算図表



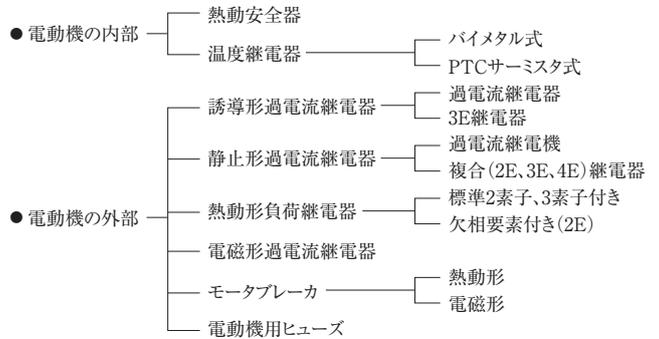
■モータ保護

モータ回路の故障には様々なケースがあり、それらの故障を保護するためには、その目的に適した保護機器を用いなければなりません。モータの事故内容と保護方式を次に示します。

モータの保護機器には、3Eリレー、サーマルリレー、モータブレーカ等種々のものがありますが、それ等をまとめて次に示します。



モータの保護機器は、各々いくつかの特異的な機能を有しています。しかし、それらの機能も正しく運用されなければその能力を発揮することはできません。そのためには、保護目的に合った保護機器を選ぶ必要があります。



●誘導電動機の保護

誘導形のモータも種々のタイプがあり、故障現象も様々です。それぞれのタイプに適した保護機器の一覧表を次に示します。

◎：確実に保護可能
 ○：ほとんどの場合に保護可能
 △：条件付き保護可能
 □：保護不可能な場合が多い
 ×：保護不可

誘導電動機の保護目的と適用保護継電器

保護対策		適用リレー		飽和リアクトル付きサーマルリレー	2E式サーマルリレー	速動形サーマルリレー	静止形3E(4E)リレー		埋込形(PTCサーミスタ式)保護リレー	モータブレーカ	
		2素子付き	3素子付き				一般電動機保護用	水中電動機保護用			
過負荷	標準責務	一般かご形電動機	◎	◎	○	◎	○	◎	△	◎	○
		単相電動機	◎	◎	○	◎	○	◎	△	◎	○
	間欠運転	巻線形電動機	○	○	○	○	○	○	△	◎	○
		水中電動機	△	△	×	△	○	△	◎	◎	□
拘束	一般かご形電動機	単相電動機	△	△	○	△	□	△	△	◎	△
		巻線形電動機	△	△	△	△	◎	△	△	◎	△
		水中電動機	△	△	□	△	◎	△	△	◎	□
		水中電動機	△	△	□	△	◎	△	◎	◎	□
配電系異常	欠相運転(焼損防止)	三相不平衡運転	△	△	□	◎	△	◎	◎	◎	□
		短絡	□	□	△	□	□	□	□	×	○
		過・不足電圧	○	○	○	○	○	○	○	◎	×
		漏電	×	×	×	×	×	◎(4E)	◎(4E)	◎	×
		地絡	△	△	△	△	△	◎(4E)	◎(4E)	◎	○
		反相	×	×	×	×	×	◎	◎	◎	×

■3Eリレーによる保護

モータの保護機器としては、前ページに示すように種々のものがありますが、特に3Eリレー(過負荷要素、欠相要素、反相要素)によるモータ保護について説明します。

●過負荷保護

過負荷要素はモータ保護機能で、この要素が正常に発揮されればモータ保護の大部分がカバーできます。過負荷の確実な保護のためには、3Eリレーの動作値整定、および動作時間整定を正しく行うことが必要です。

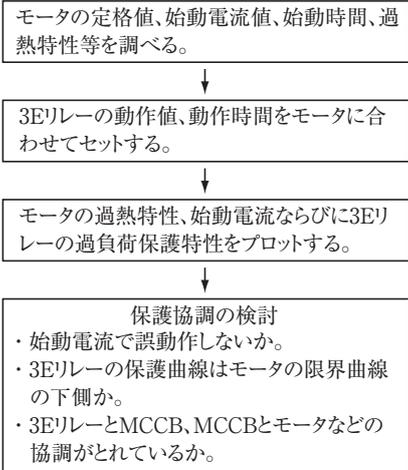
保護機能を発揮させるための保護協調曲線は次の手順で作成します。

●モータ保護協調

モータの保護協調を考える場合、回路に接続されている機器相互の協調を検討することが必要です。以下に検討事項を列記します。

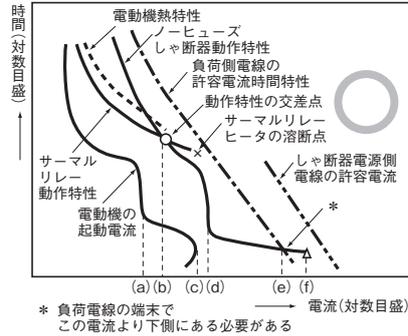
電磁開閉器	<ul style="list-style-type: none"> 開閉容量は必要十分か 短絡電流通電に耐えるか。
ノーヒューズしゃ断器(MCCB)	<ul style="list-style-type: none"> 短絡電流をしゃ断できるか。 モータのラッシュ電流で誤動作しないか。
分岐回路の電線	<ul style="list-style-type: none"> MCCBがしゃ断するまでの時間短絡電流に耐えるか。 MCCB、サーマルリレーまたは3Eリレーの動作するまでの時間、過負荷電流に耐えるか。
サーマルリレーまたは3Eリレー	<ul style="list-style-type: none"> 電動機の過負荷、拘束時の保護ができるか。 MCCBまたはPFと過電流保護協調がとれているか。

保護協調曲線の作成

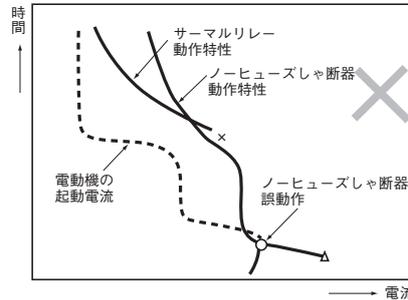


保護協調曲線の正しい例と、正しくない例を図に示します。

正しい保護協調曲線



正しくない保護協調曲線



●欠相保護

欠相状態とは、モータの電源線の断線や接続部のゆるみ、開閉器の接触不良、モータの内部断線などによって、モータが単相運転された状態をいいます。この状態になりますと、モータの線電流の増加と比較して相電流の増加が著しく、巻線の温度上昇が許容値を超えてモータ焼損にいたるケースが発生します。このような場合は、過負荷検出ではなく欠相検出によって保護しなければなりません。欠相事故と電流変化を図に示します。この図のポイントは、図中の2、3、5のケースでは相電流の増加が線電流の増加と比較して大きくなっており、この場合には線電流の過負荷検出では故障を検出できない場合が生じるということです。

欠相検出感度は固定になっていますので、ユーザサイドにおける協調のための動作値整定は必要ないのですが、難しい故障現象ですので一例を紹介しました。

●反相保護

相順が逆ですと、モータの回転方向は逆になります。反相要素は電源の相順を検出し、反相の場合にモータ始動をロックします。相順検出は、一度正しく設置すれば不要となりますので、モータの保護としては副次的な要素ですが、負荷の保護などに有効です。

欠相事故と電流変化

欠相状態	回路パターン	運転状態の欠相電流と負荷率		始動電流 欠相 三相 ×100(%)	欠相時の温度上昇
		線電流	相電流		
電源直接欠相	No.1 		三相平衡時	86.6	
	No.2 		三相平衡時	86.6	
△相内欠相	No.3 		三相平衡時	I ₂ = 100(%) I ₁ , I ₃ = 58(%)	
変圧器一次側欠相	No.4 			I ₃ = 100(%) I ₁ , I ₂ = 50(%)	
	No.5 				
電圧不平衡	No.6 —			—	