

最近の電動機制御 ④

東京芝浦電気KK府中工場 尾 山 純 一

5. 電動機制御における特殊の問題

5・1 巻線形誘導電動機の二次高調波と振動

(a) 三相回路における高調波回転磁界

大きさ相等しく基本波に対して同じ位相関係にある高調波を含む三相回路では次の現象が発生する。

(i) $k=3n$ の k 番目の各相の高調波 (3, 6, 9, 12, …) は皆同相になる。故にこれらの高調波は Y 結線の各相電圧には存在するが、線間電圧には現われない。しかし各相を Δ に結線すると、 Δ 回路中には 3 倍の値になって現われる。

(ii) $k=3n-1$ の k 番目の各相の高調波 (2, 5, 8, 11, …) は各自に対称 3 相方式を形成するが、その位相関係即ち相回転方向は基本波と反対になる。

(iii) $k=3n+1$ の k 番目の各相の高調波 (4, 7, 10, 13, …) は各自に対称 3 相方式を形成するが、その位相関係即ち相回転方向は基本波と同じになる。

(b) 二次不平衡電流とトルク脈動滑り s で運転中の電動機は回転子が $(1-s)$ で回転し、二次側正相及び逆相電流は sf の周波数をもっている。故に一次側正相及び逆相電流は、

$$\text{一次正相電流 } sf + (1-s)f = f$$

$$\text{一次逆相電流 } sf - (1-s)f = (2s-1)f$$

の周波数になり、この関係を図27に示す。従って一次回路には周波数 f の正相電流と $(2s-1)f$ の逆相電流とが、それぞれ各相平衡電流として流れるので、合成電流は $2sf$ の脈動分を含むことになる。この逆相トルクは、 $s < 0.5$ では正相トルクと反対のトルクとなり、 $s > 0.5$ では正相トルクと同方向のトルクになって、 $2sf$ の電流

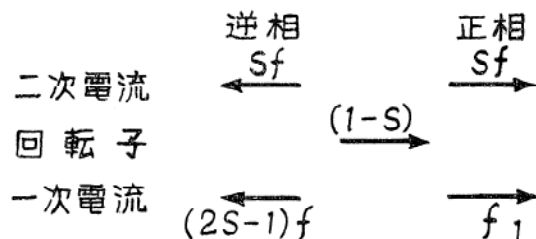


図27 不平衡電流による周波数

脈動はトルク脈動となり、回転系に振動を発生することになる。

(c) 二次電流波形歪とトルク脈動

二次液体抵抗器では電極表面に酸化皮膜が形成されると、皮膜抵抗の非線形性によって電流波形に偶数次の高調波を含むことがある。これは主として電解液中の溶解塩類に不適正な成分が含有された場合の長期間使用後に発生する。この偶数次高調波中の第2高調波電流は前記のように逆方向回転磁界となるので、一次電流には、

$$-2sf + (1-s)f = f - 3sf$$

から、 $3sf$ の電流脈動従ってトルク脈動を発生する。このようなトルク脈動は回転系の異常振動や異常音の発生になり易い。この場合電解液材料を取換えて電極を清掃すれば消滅する。

(d) 整流器による二次高調波電流

誘導電動機の二次励磁制御にて、静止シエルビアスや静止クレマとするため回転子回路に3相全波整流器を接続すると、二次回路には3の倍数を含まない nsf 周波数の奇数次高調波電流が流れる。この二次回転子電流も固定子電流と同様に回転磁界を作り、一次回路には固定子回転磁界と同方向の場合には $\{1-(1-n)s\}f$ 、反対方向の場合には $\{1-(1+n)s\}f$ の周波数となって現われ、一次回路の基本波電流との間に電流及びトルクの脈動を発生する。

$n=(6q+1)=7, 13, 19, \dots$ は基本波と同方向に回転する高調波次数であり、この電流が一次側からみるとその周波数は $(1+6qs)f$ となる。

$n=(6q-1)=5, 11, 17, \dots$ は基本波と反対方向に回転する高調波次数であり、一次側でのその周波数は $(1-6qs)f$ である。図28はこの関係を示す。整流器による普通

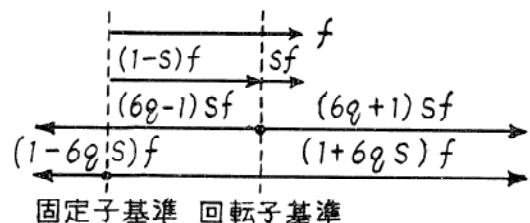


図28 二次整流器による高調波磁界

の高調波成分は第5次が一番多く、10～20%，第7次が5～10%，第11次以上は数%以下である．従って各高調波の一次周波数は、

$$n=5, f_5=(1-6s)f$$

$$n=7, f_7=(1+6s)f$$

$$n=11, f_{11}=(1-12s)f$$

$$n=13, f_{13}=(1+12s)f$$

となり、第5高調波に対しては、

$s=1/3$ の時、 $f_5=-f$ となって、 $s=1/3 \pm \Delta$ の時に $6\Delta f$ の脈動電流となり唸り振動を発生する．

$s=1/6$ の時、 $f_5=0$ となって、 $s=1/6 \pm \Delta$ の時にやはり $6\Delta f$ の脈動電流と唸り振動を発生する．

$s=0$ の時、 $f_5=f$ となり、 $s=0 \pm \Delta$ の時にやはり $6\Delta f$ の脈動電流と唸り振動を発生する．

同様に第7、第11等の高調波電流でも脈動電流が種々の滑りで発生するが、第7次は周波数が比較的高くなり、第11次は電流値が小さいから、主として第5高調波が脈動源とみなされる．

この電流脈動は電源電圧脈動を招来し、異常振動を発生させるので、大容量電動機の二次励磁制御における最大の問題となっている．

5・2 SCR 制御交流電動機の問題点

(a) 無整流子電動機の要旨

無整流子電動機は機械的整流子を格子制御整流機器に置換して直流電動機と同様の性能を得ようとする交流電動機構造の電動機で、次の種類があげられる．

(i) ホール電動機、回転子磁極の磁界にホール素子をさらして、電流と磁界とに直角の方向に起電力を生じ、コイルに電流が流れて電動機作用をする．ホール素子に加える電圧が一定でも N 極と S 極とでコイル電流が逆になり、コイルに回転に応じた回転磁界を生じ、ホール素子が整流子の役目をする．ホール素子で電流値が制限され、出力、効率ともに極めて小さい．

(ii) トランジスタ電動機、トランジスタの開閉作用で固定子コイルを次々に回転に応じて閉路させ、回転磁界を得るもので、同期形は回転子磁極の移動により制御巻線に電圧を誘起させ主巻線へのトランジスタを閉じる作用をなし、誘導形は *Royer* のトランジスタインバータ出力で単相モータを運転し、外部同期形は *Royer* のトランジスタインバータの周波数を外部信号で制御するものである．

(iii) SCR 誘導機形電動機 SCR 制御の直流—交流インバータを使って誘導電動機を運転するもので、周波数は外部から制御される．インバータの形式にて並列形（最近は *Mc Murray* 回路の応用）が比較的低い周波

数（数百 c/s ）にて使用され、ヒステリシスモータや反作用電動機に使用され、反作用電動機では複数個の各電動機周波数比を一定にして速度比一定の可変速度同期運転も行なわれている．直列形インバータは波形がよいが $500c/s$ 以下ではコンデンサ容量が大きくなりすぎるので $1000c/s$ 以上の高速運転に適している．

(iv) SCR 同期電動機、電動機軸直結の分配器で回転数に同期してゲート信号を加えて固定子コイルを逐次励磁する同期電動機で、速度は電圧や界磁電流で制御される．同期分配器には機械的接点、光電トランジスタ、サーチコイル等が利用される．

(b) 無整流子電動機の問題点

現在開発中であり、大形 SCR が製作されているので逐次大容量電動機も研究されつつあるが、根本的に尚次の問題点がある．(i) 電源は DC か AC か、現在主として DC 電源からであるが、AC 電源で直接使用できないか．(ii) 回路方式とトルク特性、特に力率の改善、回生電力の処置、安定運転と能率の向上、波形歪の減少、(iii) 負荷変動と安定性、特に同期電動機における始動トルクと脱調トルクの向上や脱調対策、制動巻線に固定子波形歪による高調波電流の誘導と発熱、速度分配器の構造と動作の安定

(c) SCR による かご形誘導電動機の制御の問題点

可変速度制御のため SCR インバータによる周波数制御の他に、開閉制御（寸動可逆制御）がある．

(1) インバータによる周波数制御 (i) 低周波低電圧における始動トルクの向上、(ii) 逆転及び減速における制動トルクと過電流や回生電力の処置、並列インバータでフィードバックダイオードにより直流側に返還できるが、直流側整流器の場合に制動抵抗器を要し、その適時開閉制御が附加される．(iii) 能率が低く電源波形を歪ませるので、ゲート制御電圧に別の正弦波電圧源（フィルターを通してよい）が必要である．(iv) 周波数制御は自制か他制かと、コンデンサ容量の大きさ．

(2) SCR 開閉制御、交流各相に可逆相通電し得るように SCR を接続し、ゲート信号の制御で相回転を制御すると、通電時間制御と可逆制御とで低速寸動運転ができ、微細速度制御や高速サーボ制御ができる．

(i) 開閉突入電流と SCR の電流容量の選定、(ii) 電磁スイッチとの信頼性と価格との評価、(iii) 交流電圧点弦位相制御による減電圧制御と振動、この場合のサージ電圧吸収と電源波形歪．

5・3 直流電動機の演算増幅器による制御²¹⁾

直流電動機の高速応性高精度制御には多数の信号の演

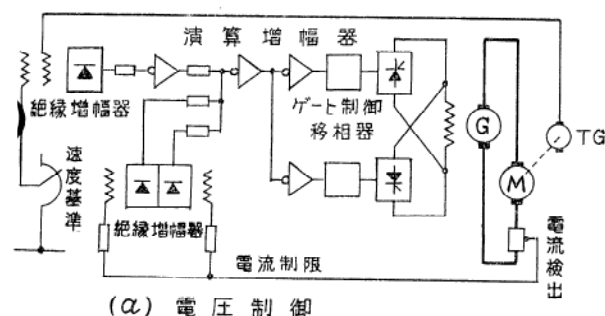
算合成（速度基準と速度フィードバック、電流及び電圧の制限、張力やたるみに対する積分制御、加減速度の制限など）が必要であり、それにはシリコントランジスタによる演算器、電動機電位と演算回路とを絶縁して信号伝達させる絶縁増幅器、演算回路出力による電動機制御のゲート制御回路が必要となる。

(a) 発電機電圧制御と演算増幅器

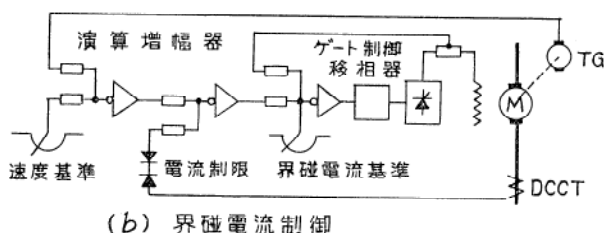
回転レオナードは前記のように電源に対し負荷変動の緩衝作用があり、演算増幅器により数千KW出力の電動機も静止レオナードと同等の制御性能が得られる。図29(a)はその要旨を示し、演算増幅器はプリント基板により単位化して必要に応じて幾組かを組み合わせ、信号の増幅、制限、加減算、積分、符号変換を行ない、速度信号と電機子電流との信号は1000c/s絶縁増幅器を使用する。絶縁増幅器は一種の磁気増幅器で、信号回路を絶縁された制御巻線に加えられている。1000c/s電源は単接合トランジスタを使用した発信器で簡単に得られる。発電機界磁回路はSCR制御とし、そのゲート制御パルスは図25の位相制御回路である。界磁制御はSCR十字結線による3相ブリッジ回路で十倍の強勢励磁を加えている。

(b) 電動機界磁制御と演算増幅器

電動機界磁による速度制御は界磁回路時定数が大きいため比較的緩徐な速度制御に適するものとされているが、演算増幅器とSCR界磁電流制御により極めて高性能の速度制御が得られる。図29(b)はその要旨を示し、SCR界磁回路を図16の定電流制御とし、その定電流基準入力回路に速度誤差信号や電機子電流制限信号を合成している。制御要素は前記電圧制御と同様の演算増幅器を使用



(a) 電圧制御



(b) 界磁電流制御

図29 演算増幅器による速度制御

している。電流検出に直流変流器を使用しているが、これは普通のIR降下の場合には絶縁増幅器を介入する。このようにして全負荷変動にて瞬時速度降下0.67%、回復時間0.2sの高性能を得る。

(c) 速度制御と電流制限制御

電動機速度制御の性能を抑制する大きな要素は電流制限の性能である。電流制限動作が安定で速応性が大である程、急速な速度制御ができる。それには電流制御回路の性能係数（増幅率と時定数との比）が極めて大きいことと検出電流値に脈動分が含まれていないことが必要である。演算増幅器を使用すると、信号入力が小さくてすむので、検出が速く忠実度が大いだが検出回路の時定数が大きくなり易いIR降下検出も容易に利用できる。

直流変流器ではその出力に電源周波数に応じた脈動分が含まれ勝ちであり、これを防ぐためにフィルタを入れると電流値の検出応答が遅くなる。

静止レオナード回路の電機子電流には脈動分を含み勝ちであり、電流制限制御に余分な振動を導入し安定を劣化し勝ちであるから、交流側変流器の二次電流を整流して合成すると、脈動分を小さくでき、応答が速い。

5・4 直流電動機のデジタル制御^{22,23)}

電動機のデジタル速度制御系の例を図30に示す。これは電動機軸に回転検出器を取付けてその回転を電気的パルスに変換し、そのパルスを一定時間だけ計数して回転数を正確に測定し、基準回転数に相当する基準パルス

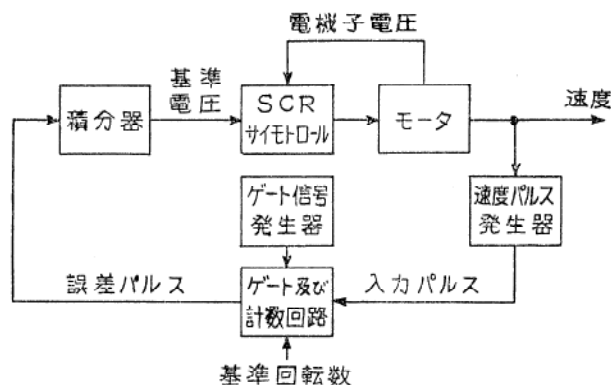


図30 数値制御による速度制御

数との差の誤差パルスを、一定時間毎にゲートを開いて演算して検出し、回転数の増減に応じた数の正または負極性の誤差パルスをアナログ的に積分してSCRなどの制御装置に加えて、電動機速度の基準値を補正し、速度を一定に保つものである。従って速度は一定時間毎に間欠的に測定されるので、一種のサンプル値制御系となり、ゲート信号の基準が時間を規制するので、それには水晶発振器のように周波数誤差の極めて小さいものを使用す

る。このパルス数検出の時間間隔は短かければ短かい程、過渡速度変動を小さくすることができる。

回転パルス検出器（光電的または磁気誘導形）の1回転に発生するパルス数を P 、計数時間を $T(s)$ 、回転数を $N(rpm)$ とすると、時間 T のパルス数 n は、

$$n = PNT/60$$

となり、この n が直接回転数を示すようにするには、

$n = N$ より、 $T = 60/P$ となる。従って、今 $P = 200$ とすると $T = 0.3(s)$ で、この0.3秒毎のパルス数が直接回転数を示すことになる。これは回転数のデジタル表示に利用され、速度制御には1回転に10000パルスの検出器も使用される。

デジタル速度計数では、ゲート信号の立上り時刻がパルス間隔のどの位置にあるかで少くとも±1カウントの誤差があり、速度の変化中には計数誤差が更に大きくなる。パルス数を多くすると、検出器の工作精度、増速すれば歯車のガタ等でパルス間隔が不均一になり易い。従って精密な定速制御を行なう製紙機械、定長切断制御、風洞や船型水槽などの実験設備に應用されている。

5・5 速度発電機の速度誤差

電動機速度制御における速度検出には、簡単なものは逆起電力や IR 降下補償で代用するが、普通は直流や交流発電機が使用され、その検出電圧やその後の処置によっては注意が必要である。

(a) 直流速度発電機の誤差

普通の直流機構造であるが、特に電機子のスロット脈動を小さくし、磁極空隙の不均一による回転脈動をなくしたいと、速度制御精度を高くする程、これらの脈動電圧により電動機速度に脈動を混入する。出力電圧脈動を小さくするため出力回路に CR フィルタを接続すると、応答が悪くなる。更に刷子の接触状況の変化や整流子面皮膜の形成による刷子ドリフトは大きな変動要素であり、負荷電流をとると電機子反作用も加わり、出力電圧が速度に比例しなくなる。故に刷子数を多くしたり、整流子面にスパイラル溝を設けたり、電圧をとり出すが電流を

とらない高抵抗負荷とする。界磁の強さが界磁コイルの温度上昇で変化するのを防止するため、界磁々極を飽和させたり、界磁電流一定制御、永久磁石界磁などがある。

(b) 交流速度発電機の誤差

刷子ドリフトが無いので、交流出力を整流して速度電圧にするか、出力周波数を速度検出値にする。前者では低速で電圧脈動が大きくなり、後者では共振点利用の場合の共振回路定数を可変速度制御で変える面倒がある。負荷電流をとると速度変化は周波数変化従って回路インピーダンス変化となるので、電圧の速度比例性が悪くなる。故に広範囲速度の制御には適しくなくなり、一般に定速度の精密制御に使用される。周波数は数百サイクルとして出力回路器具を小さくし、界磁励磁には直流と同様の考慮を払っている。

(c) パルス発電機の誤差

パルス計数制御に使用するが、低速時におけるパルス波形の立上りが計数誤差になり易く、誘導形では電圧の低下が加わる。1回転パルス数を比較的小さくして、基準パルスとの位相の進み遅れを位相弁別して速度制御を行なうとすると、加減速度の比較的小さく負荷変動の小さい場合に精密な速度制御や同期化制御ができる。

文 献

- ① 宮入、常広：SCRを用いた無整流子電動機の研究 電学誌 37年11月
- ② 宮入、常広：無整流子電動機最近の進歩 電気雑誌 OHM 37年10・11月
- ③ 佐藤：無整流子電動機の研究 電学誌 39年8月
- ④ 林他：超高速電動機用 SCR 高周波インバータ 東芝レビュー 36年5月
- ⑤ 上山他：SCR インバータによる可変速度駆動装置 東芝レビュー 38年1月
- ⑥ 佐藤他：三相 SCR インバータによる誘導電動機の可変速度運転、東芝レビュー 38年7月
- ⑦ 尾山、萩田：SCRを使用した界磁制御による直流電動機の制御、昭和39年電気関係学会関係学会関西支部連合大会 No. S4-2
- ⑧ 伊藤、千原：デジタル方式による速度制御 電気雑誌 OHM 37年10月
- ⑨ 小西：直流電動機のデジタル式低速度自動制御の研究、電学誌 39年4月