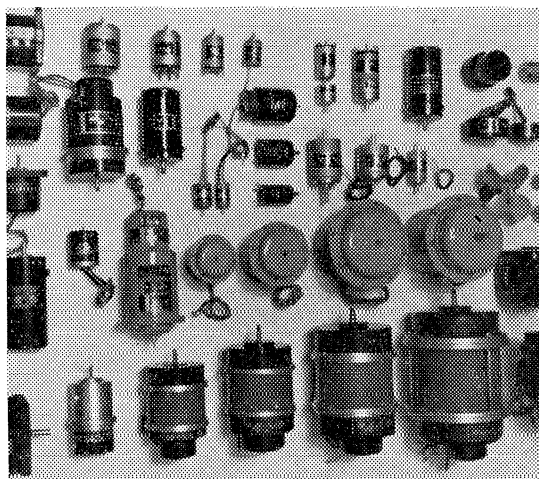


シンクロを用いた回転角度の伝送

多摩川精機KK* 研究課

坪 田

脩



写 1 各種のシンクロ

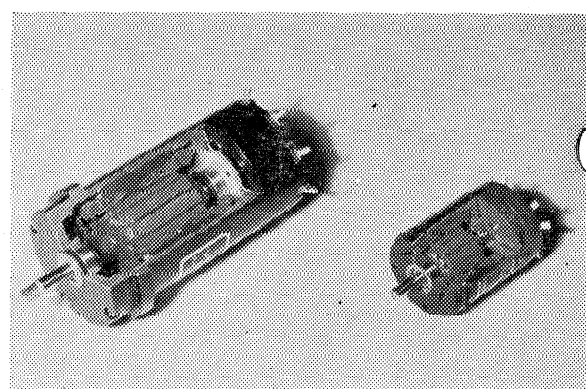
1. 前 書

機械的回転軸の角度を他の回転軸に伝達するという機能は、最近急速に発達しつつある集中管理および遠隔制御方式の採用によりその必要性が認識され、その方法も種々のものが実用に供されている現状である。ここでは、その中でも信頼度が高く伝達精度の良好な一方法として、シンクロを用いた回転角度の伝送方法について紹介し、特に角度伝達系の設計・保守上において参考となる資料を提供したいと考えるものである。

2. シンクロ系の概要

シンクロは既に種々の文献によりその原理・構造・特性等について詳細に解析され説明されているが、その機能により分類すると表1に示すとうりとなる。このシン

クロを用いて回転角度の伝送を行う場合には、通常2個以上のシンクロを組合せて伝送系を構成することになる。この伝送系は原理的にトルクシンクロ系とシンクロサーボ系に大別され、さらにこれらの代表的構成としては図1～図10に示すようなものが挙げられる。



写 2 シンクロの構造の一例

トルクシンクロ系は、基本的には図1に示すようにシンクロ発信機およびシンクロ受信機により構成され、各シンクロの励磁巻線（通常 R_1 , R_2 端子）定格周波数の定格電圧（例えば、100V60c/s）を印加すると、2次巻線（ S_1 , S_2 , S_3 端子間）には、その回転軸の位置により図11に示すような電圧を誘起する。いま、シンクロ発信機および受信機の回転軸の角度位置がそれぞれ θ_X および θ_R とすると、両シンクロの2次巻線（ S_1 , S_2 , S_3 端子）を接続しない状態では、図11に示すように各端子にそれぞれ V_{X12} , V_{X23} , V_{X31} , V_{R12} , V_{R23} および V_{R31} の電圧が誘起している。この状態でシンクロ発信機および受信機の2次巻線 S_1 , S_2 , S_3 をそれぞれ接続すると、

表 1 シンクロの種類

種 類	記 号	機 能	シンクロ系の構成
シンクロ発信機	TX(G)	回転角度 → 電気信号 変換	図1～図5
差動シンクロ発信機	TDX(DG)	回転角度差 → 電気信号 変換	図2
シンクロ受信機	TR(M)	電気信号 → 回転角度 変換	図1, 図2, 図4, 図5
差動シンクロ受信機	TDR(DM)	電気信号差 → 回転角度 変換	図3
制御シンクロ発信機	CX	回転角度 → 電気信号 変換	図6～図10
制御シンクロ差動発信機	CDX	回転角度差 → 電気信号 変換	図7
シンクロ制御変圧機	CT	〃	図6～図10

* 東京都大田区古川町173

各端子間に発生していた差電圧が短絡される結果となり、式1～式3に示す2次電流が流れることになる。

$$I_{31} = \frac{V_{X31} - V_{R31}}{Z_X + Z_R} \dots \dots \dots (1)$$

$$I_{12} = \frac{V_{X12} - V_{R12}}{Z_X + Z_R} \dots \dots \dots (2)$$

$$I_{23} = \frac{V_{X23} - V_{R23}}{Z_X + Z_R} \dots \dots \dots (3)$$

この式において Z_X および Z_R は、それぞれシンクロ発信機および受信機の2次インピーダンスを示すものである。この2次電流と励磁磁界が作用して回転子にトルクを発生し、シンクロ発信機および受信機が同一角度、すなわち2次電流が零（最小）となる位置まで回転し停止する。もちろん、この場合にはシンクロ発信機のみならず、シンクロ発信機の高転子にもトルクが発生するので充分な力で保持する必要がある。トルクシンクロ系では概略以上のような原理により、発信軸の回転角度を受信軸に伝送するのであるが、この方式は構成・原理

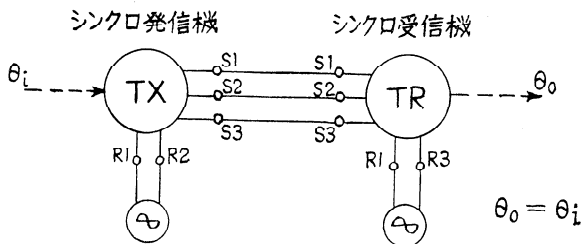


図1 トルクシンクロ系の基本構成

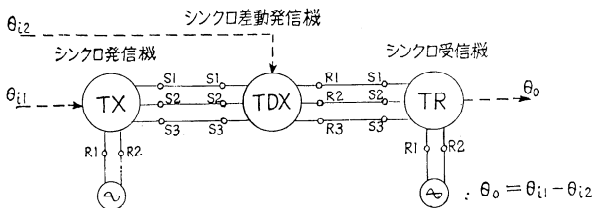


図2 トルクシンクロ系の差動構成I

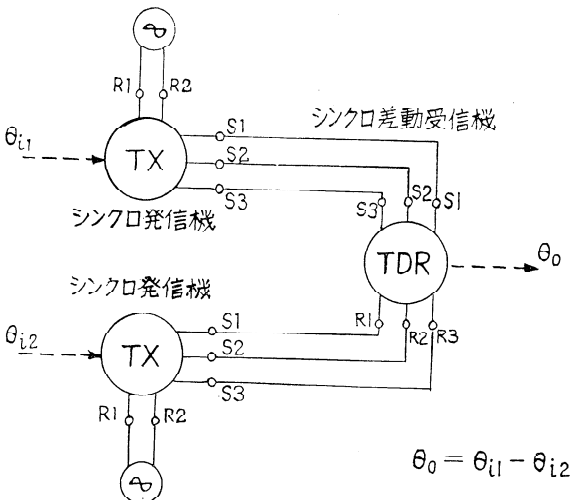


図3 トルクシンクロ系の差動構成II

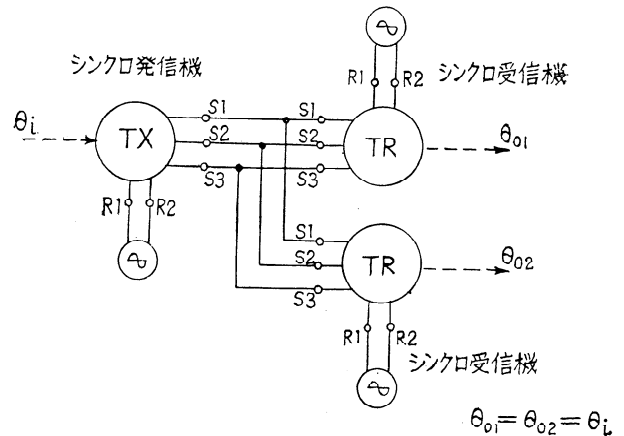


図4 二個所伝達用トルクシンクロ系

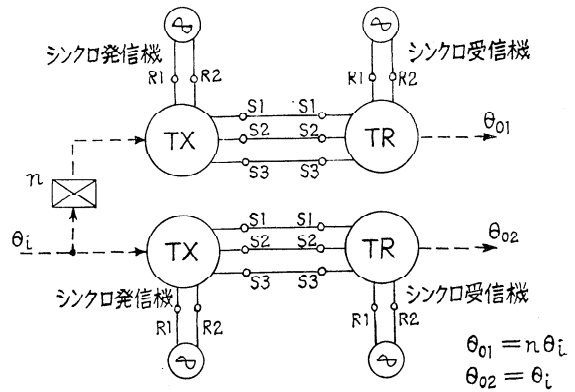


図5 二速伝達トルクシンクロ系

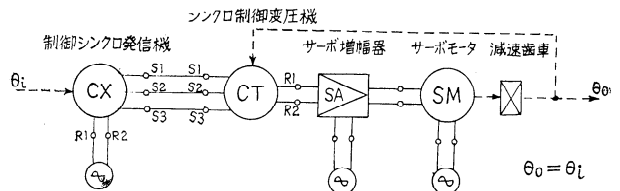


図6 シンクロサーボ系の基本構成

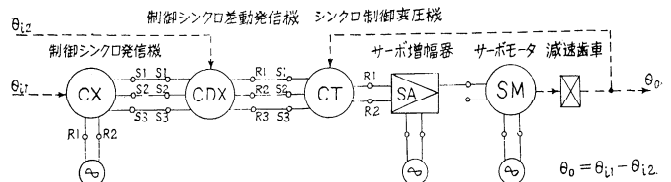


図7 シンクロサーボ系の差動構成

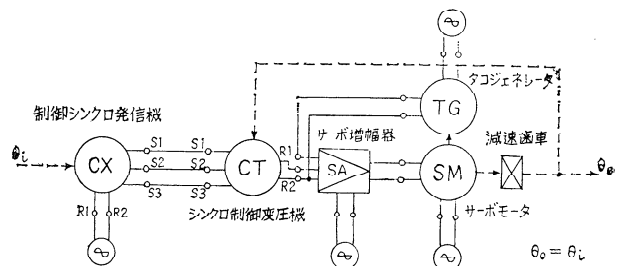


図8 タコジェネレータ補償付シンクロサーボ系

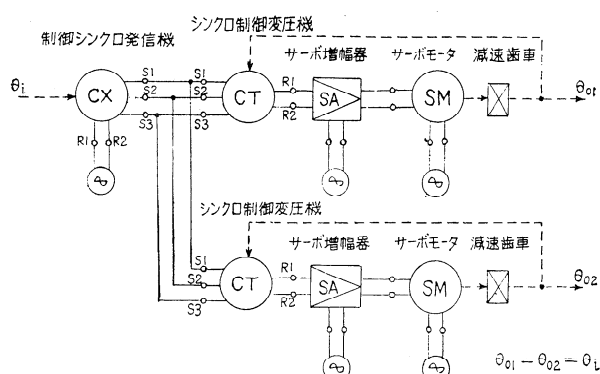


図9 二個所伝達用シンクロサーボ系

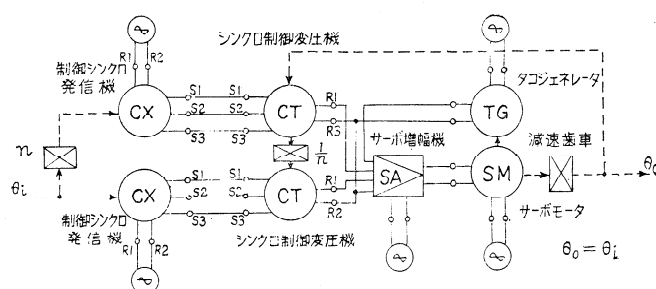


図10 二速度シンクロサーボ系

が非常に簡単であり、容易に設計・保守ができ安価であるが、一方では受信軸の負荷による伝達誤差の増大・応答特性・その他の面で欠点を有し、これらの性能を補う方法としてシンクロサーボ系が普及されつつある。

シンクロサーボ系は、基本的には図6に示すように制御シンクロ発信機・シンクロ制御変圧機・サーボ増幅器・サーボモータおよび減速歯車により構成される。制御シンクロ発信機はトルクシンクロ系に用いられるシンクロ発信機と同一構造を有するものであり、その励磁巻線（通常 R_1 , R_2 端子）に定格周波数の定格電圧（たとえば、100V60c/s）を印加すると、2次巻線（ S_1 , S_2 , S_3 端子間）にはその回転軸の位置により図11に示すような電圧を誘起する。この電圧はそれぞれシンクロ制御変圧機の1次巻線（通常 S_1 , S_2 , S_3 端子）に伝送され、その鉄芯内に発信機の磁界と全く同一の磁界を再現する。したがって、この磁界内に設置されている2次巻線（ R_1 , R_2 端子間）に誘起する電圧は、発信軸と受信軸の角度差により定まった図12に示すような特性を有することになる。このシンクロ制御変圧機により検出された発信軸と受信軸の角度差に対応した電圧は、サーボ増幅器により電力増幅され、同時に飽和特性を付加されて二相サーボモータ（あるいは、他の種類のサーボモータ）の制御巻線に印加される。一方、二相サーボモータの励磁巻線は、基準電圧に対して90度移相された電圧により励磁されているので、制御巻線に印加される電圧の移相の正負により正回転あるいは逆回転を行い、減速歯車を

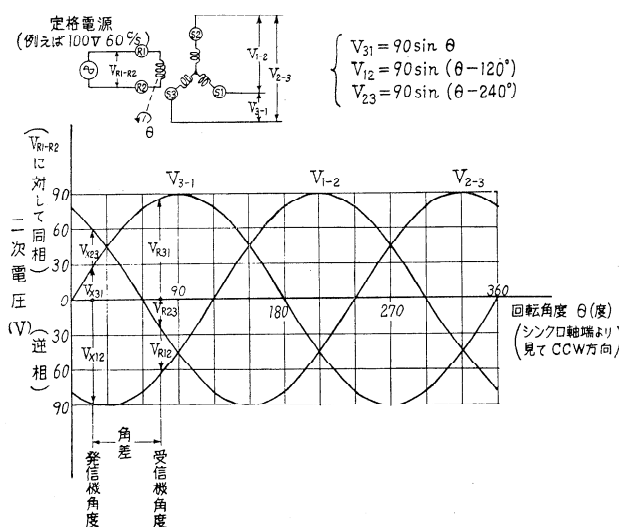


図11 シンクロ発受信機二次電圧特性

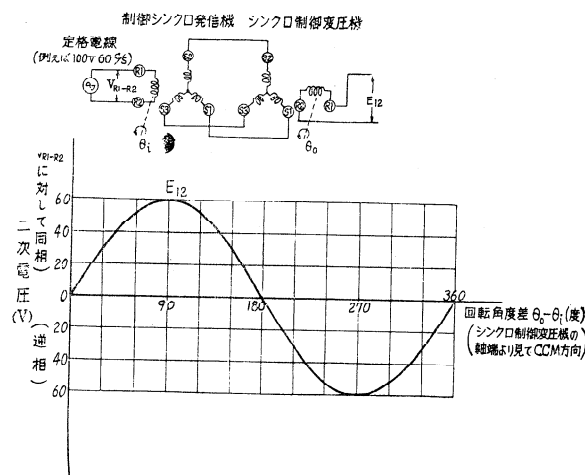


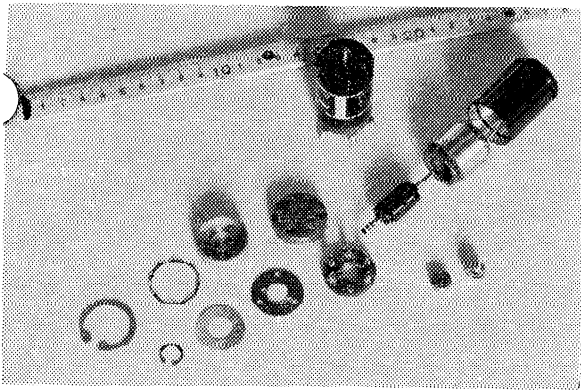
図12 シンクロ制御変圧機二次電圧特性

介してシンクロ制御変圧機および受信軸を回転し、発信軸と受信軸の角度差が零となる位置にて停止することとなる。

このようにトルクシンクロ系では、1個のシンクロ発信機が発信軸と受信軸との間の角度誤差を検出し、同時に追従回転を行うためのトルクを発生していたが、シンクロサーボ系では、角度誤差の検出はシンクロ制御変圧機が行い、一方追従回転を行うためのトルクはサーボモータにより供給するというように分業態勢をとっているため、各部分が単能化され、したがって各部をそれぞれの機能に則して高精度あるいは高能率に設計することができ、その結果これらを組合せたシンクロサーボ系としては、トルクシンクロ系に較べて非常に高度な性能を発揮することができるのである。特に負荷に対して適当な出力を有するサーボモータを任意に選択することができるので、遠隔制御・自動制御の分野において有用である。いま、トルクシンクロ系とシンクロサーボ系の特徴を比較すると概略表2に示すような結果が得られる。

表 2 トルクシンクロ系とシンクロサーボ系の比較

項 目	トルクシンクロ系	シンクロサーボ系
静 止 精 度	0.5~20度	0.3 ~1.0度
使用回転速度	300rpm以下 1200rpm以下 (高速用)	0.03~0.3度(-速度系) 300rpm以下
負荷トルク	小	大
応 答 特 性	振動的	適当な状態に設計調整可
時 定 数	0.3~0.5sec	0.01~0.1 sec
入カトルク	反動トルクあり	反動トルクなし
外形大きさ	概略 大	小
構 造・取 扱	簡単	複雑
価 格	安	高



写 3 シンクロの分解図

3. トルクシンクロ系の性能および設計

3・1 角度偏差—トルク特性

トルク系シンクロは、その平衡位置に対する角度偏差によって定まるトルクを発生し、その1例を挙げると図13に示すような特性を有する。ここで、このシンクロ単体の有するトルクを表現するためにトルク率を用い、平

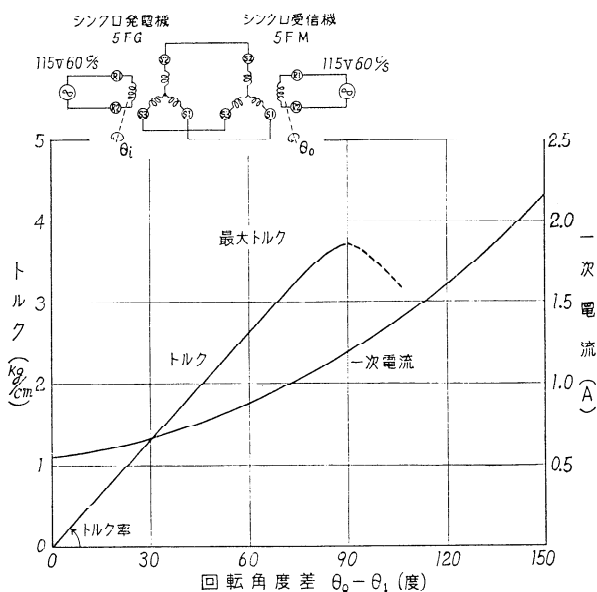


図13 トルク系シンクロの特性例 (5FG—5FM組合せ)

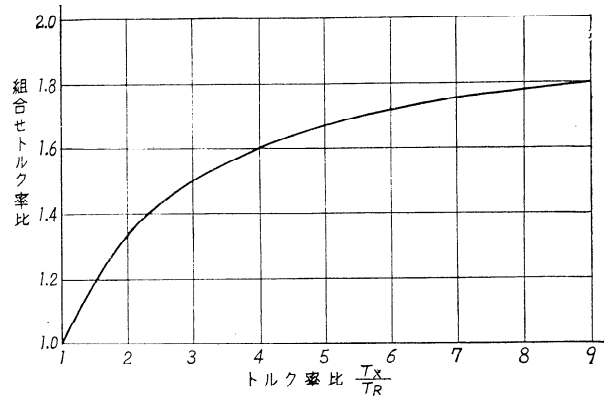


図14 組合せトルク率計算図

衡点付近における角度偏差に対するトルク傾度により定義する。また、カタログ等に最大トルクが記載されているが、これは角度偏差90度付近にて生ずるトルクの最大値を意味するものであり、実用上はこの最大トルクまで利用することはできず、温度上昇その他の制約のために通常±20度の角度偏差に対応するトルクまでしか利用することができない。

3・2 組合せトルク率

トルクシンクロ系は、2個以上のシンクロを組合せて構成されるので、組合せたときのトルク率がどのような大きさになるかが問題となる。2個のシンクロ、すなわちシンクロ発信機および受信機を組合せたときの組合せトルク率 T_{XR} は、シンクロ発信機および受信機のトルク率をそれぞれ T_X および T_R とすると(4)式により表わされる。

$$T_{XR} = \frac{2T_X T_R}{T_X + T_R} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この(4)式も変形すると(4)'式となる。

$$\frac{T_{XR}}{T_R} = \frac{2 \frac{T_X}{T_R}}{\frac{T_X}{T_R} + 1} \quad \dots\dots\dots (4)'$$

すなわち、組合せたシンクロ発信機の受信機に対するトルク率比 T_X/T_R と組合せトルク率比 T_{XR}/T_R との関係は図14に示すとうりとなり、トルク率比が1に近い範囲ではシンクロ発信機のトルク率の大きさは組合せトルク率に大きく影響するが、シンクロ発信機のトルク率を必要以上に大きくとっても無意味であることが明白である。

3・3 伝送線抵抗とトルク率

との関係トルクシンクロ系においては、シンクロ発信機と受信機との間を接続する電線の抵抗により2次電流が減少あるいは制限されるので、組合せトルク率が減少することがある。いま、伝送線の抵抗と組合せトルク率との関係をまとめると図15に示すような結果となり、特に

大きなトルク率を有するシンクロを使用した場合にこの傾向が極端に現われる結果となる。したがって、長距離の伝送を行う場合には、使用する電線の抵抗を充分吟味

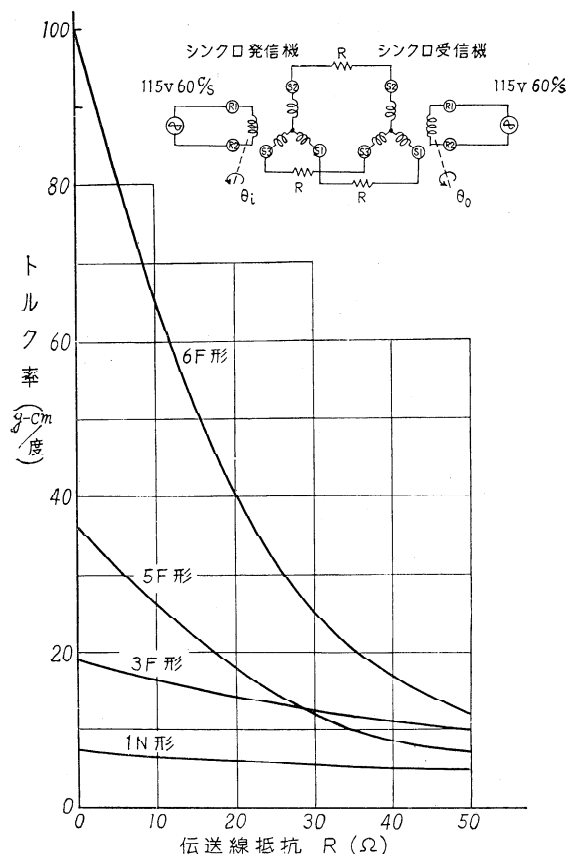


図15 伝送線抵抗によるトルク率の変化

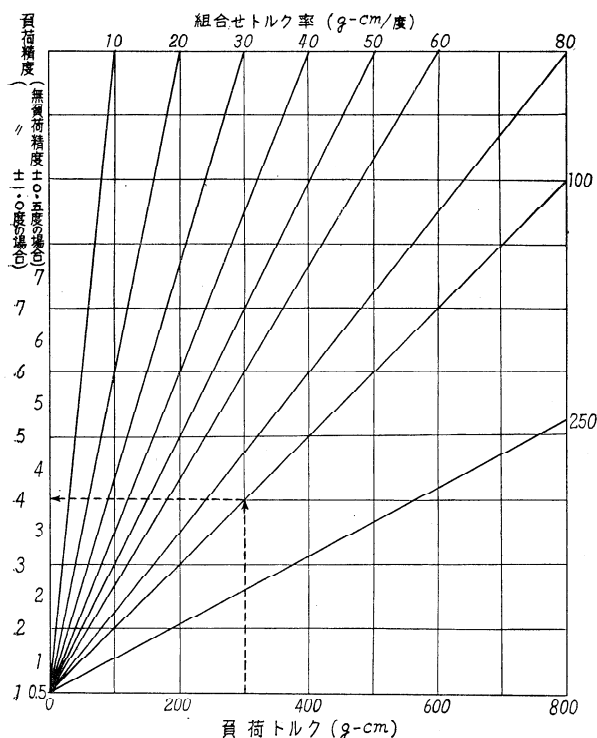


図16 負荷時伝達精度計算図表

する必要がある。

3・4 負荷トルクと伝達精度との関係

トルクシンクロ系を設計する場合にまず仕事として与えられるのは、受信軸を回転させるのに必要な負荷トルクと角度伝達精度である。トルクシンクロ系において発生する誤差の原因を分析すると概略つぎのように分けることができる。

a) シンクロ内部の電氣的・磁氣的あるいは機械的な不平衡によって生ずる誤差。

b) シンクロ内部の機械的摩擦によって生ずる誤差。

c) 外部の負荷トルクによって生ずる誤差。

これらの誤差の中、一般のシンクロのカタログ等に記載されている精度は、上記のa) 項およびb) 項の誤差を含めたもののみであり、シンクロ受信機の外部に負荷 T_L を加える場合には、(5)式により負荷時の誤差 ε_L を計(算)する必要がある。これを計算図表に表わしたものが図16である。

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{XR} + \frac{T_L}{T_{XR}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

この式で ε_{XR} は無負荷時の組合せ誤差であり、カタログ等に記載されているものである。しかし、カタログ等に記載されている無負荷精度は、組合せるシンクロ発信機として受信機の約2倍以上のトルク率を有するものを使用したときの値として定義されているので、実際の設計にあたっては注意する必要がある。

3・5 シンクロ受信機の負荷容量

シンクロ受信機は図13に示すようにシンクロ発信機と受信機間の角度差が大きくなると、2次電流が急激に増加し平衡状態の数倍に達する。このような状態で長時間放置すると内部の温度上昇が甚しく、ついには焼損する結果となる。したがって、シンクロ受信機の負荷として使用可能な最大トルクは、シンクロ受信機の最大トルクにより制限されるのではなく、その温度上昇によって制限されるので、通常(6)式に示す範囲内で使用しなければならない。

$$T_L \leq 20T_{XR} \quad \dots\dots\dots(6)$$

3・6 シンクロ発信機の負荷容量

シンクロ発信機はその温度上昇およびトルクシンクロ系としての追従性能の面より、(7)式に示すようにシンクロ発信機のトルク率 T_X を受信機のトルク率 T_R より大きくとる必要がある。

$$T_X \geq T_R \quad \dots\dots\dots(7)$$

また、図4に示すように1個のシンクロ発信機に2個以上の受信機を接続して使用する場合には、(8)式を満足させるように構成しなければならない。

$$T_X \geq \sum_{i=1}^n T_{Ri} \quad \dots\dots\dots(8)$$

3・7 発信機軸への反作用

トルクシンクロ系を介して受信軸を回転させようとする場合には、シンクロ発信機および受信機の対称性のために、概略(9)式にて表わされる反動トルクが発生する。したがって、トルク平衡軸の回転角度を指示させるような用途の場合には設計を充分注意する必要がある。

$$T = T_L \frac{T_R}{T_X} \quad \dots\dots\dots(9)$$

3・8 回転速度の制限

シンクロは刷子および摺動環により回転子に電流を供給しているので、この刷子の耐久性能により使用可能な回転速度が制限されることになる。一般のものは300rpm以下にて使用することになっているが、特に高速用として設計されたものについては1200rpmまで使用可能である。

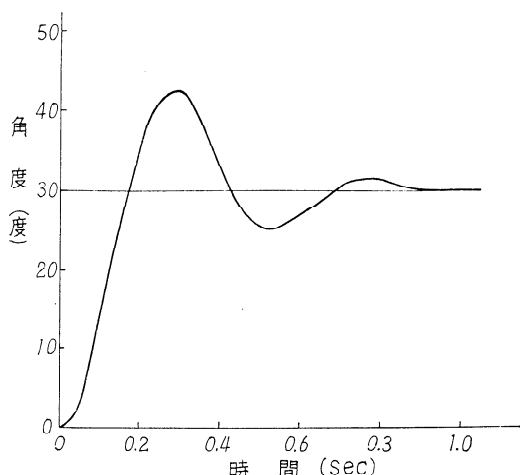


図17 トルクシンクロ系の階段状入力に対する応答特性例

3・9 応答特性

トルクシンクロは負荷を加えない状態では図17に示すような応答特性を有する。この図17においても明らかにようにトルクシンクロ系に階段状の角度入力を印加すると減衰振動を生じ、静止するまでに非常に長い時間を要することになるので、一般のシンクロ受信機には非線形な移相遅れ素子として作用するダンパを付加してあり、これにより振動を急速に減衰させるように設計してある。通常のシンクロ受信機では、175度の階段状角度入力を印加した場合3～6秒、20度の階段状角度入力を印加した場合1～2秒にて静止するように設計されている。

3・10 シンクロの取付

シンクロはその規格、大きさ等により非常に多くの種類のものが市販されているが、特に大形のものを除けばほとんどフランジ取付となっている。このフランジ取付

にも2種類あり、フランジを直接ネジで締付けるもの、および取付爪によりおさえこむものがある。後者は取付ネジをゆるめてシンクロのケースを任意の角度に回転させ零合せあるいは微小調整が可能であるが、後者については取付は容易であるけれど微小調整を行うことができないので、指示計のような用途で指針により簡単に零合せができるような用途に適している。

また、シンクロの軸端形状は円形軸・テーパ軸・キー溝付の軸・ネジ軸・スプライン軸、あるいはこれらを組合せた形状のものがあ、非常に多種類のものが製作されているが、これらの中から用途に適したものを選び、外部の機械軸との結合に際して無理のかからないように、かつ偏芯誤差を生じないように注意する必要がある。特にシンクロの軸端を再加工することは、シンクロの性能に重大な影響を生ずることがあるので避けなければならない。

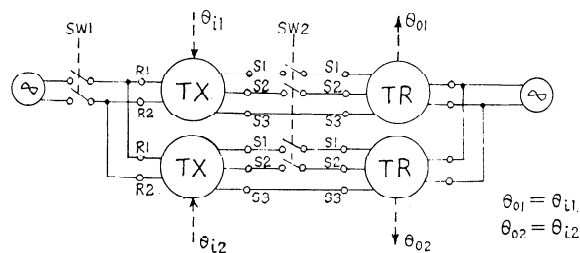


図18 二系列以上使用する場合のスイッチの挿入

3・11 シンクロの接続

トルクシンクロ系を構成するときのシンクロの電気的接続は、その用途により図1～図5に示すとうりに行えば良いが、シンクロ発信機と受信機を逆方向に回転させたい場合には、シンクロ発信機あるいは受信機のS1, S2, S3の接続の中、いずれか一方のS1端子とS3端子を入れかえれば良い。

また、同一装置にトルクシンクロ系を2系列以上使用する場合には、図18のSW1に示すようなシンクロ発信機あるいは受信機のための電源を切断するスイッチを使用することは避け、シンクロ発信機および受信機を同時に切断するような回路構成とする。どうしても片側のみ切断される場合には図18のSW2をSW1に運動させて、電源の切断と同時にトルクシンクロ系の2次側の3線中、少なくとも2線を切断するような方式をとらなければならない。このような処置がとられていないと、シンクロ発信機あるいは受信機のいずれかのみ電源が印加された状態において、何らかの原因により角差を生ずると他方の1次巻線側を低インピーダンスで短絡した形となり、過大電流のため焼損事故が発生することがある。

3・11 シンクロの1次電圧および2次電圧

シンクロの1次電圧は100V, 110V, 115V, 200V, 202V等種々のものが製作されているが、いずれも2次電圧

は90Vに統一してある。シンクロの1次電圧は電源電圧に等しいものを選ぶのが最も効率的であるのはもちろんであるが、いかなる場合にも定格電圧の10%以上高い電圧が印加されないように注意しなければならない。また、シンクロ発信機と受信機との間で2次電圧が異なると平衡状態においても2次電流が流れていることになり温度上昇を生ずるので、同一電源定格のシンクロを組合せて使用しなければならない。

4. トルクシンクロ系の応用

トルクシンクロ系は原理および構造が簡単で取扱が容易であるため、船舶・航空機、産業機械・工作機械・その他あらゆる分野において、特にそのトルク特性により遠隔操作よりむしろ遠隔指示の用途に利用されているが、その代表的な使用法について説明する。

4・1 弁の開度指示

手動弁・電磁弁・電動弁等種々の形のものがあるが、これらの弁の開度を集中管制盤等に遠隔指示させるために使用するものであり、弁の動きを歯車等により適当に拡大して300度程度の拡角指示を行わせると良い結果が得られる。この場合には図1に示す構成を用いれば良い。

4・2 液面の位置指示

貯水槽の水位、その他直接観測することができないような液面の監視を行うのに用いられる。最も簡単な方法としては、浮子等により液面の上下方向偏移を検出し、この上下運動をプーリ等により回転運動に変換してシンクロ発信機を回転させる。特に全移動量が大きく、かつ高精度を要する場合には、図5に示すような2速度系を採用すれば全移動量の0.1%以下の精度も容易に得ることができる。

4・3 液面の位置の自動記録

前項にて説明したように液面の位置を指示させるのみならず、シンクロ受信機によりペンを駆動させて連続記録を行わせることも可能である。

4・4 プレスのラム位置指示

従来のプレスにおいては純機械的な方法によりラムの位置を指示していたが、最近制御盤にて設定・操作・監視を傾向となり、必然的に位置の電氣的伝送方法が採用されている。ラムの上下運動はラックおよびピニオンにより回転運動に変換されてシンクロ発信機を回転させる。この場合にも全移動量に対して厳密な精度を要求される場合には図5に示すような2速度系が用いられる。

4・5 圧延機のロール位置指示

前項にて説明したものと同様の方法にて、圧延機においては上下あるいは左右のロール位置を操作室の制御盤に遠隔指示し、ロールの位置の正確な設定を行うことが

できる。

4・6 巻取量の積算指示

線材あるいは薄板を巻取るときその巻取量を計測する必要を生ずるが、このような場合には検出用のロール軸に適当な歯車比にてシンクロ発信機を取付け、この回転をシンクロ受信機に伝送し、ここで機械的なカウンタを回転させ積算指示させる。通常のもはシンクロ1回転に対し1カウントであるが、1回転に対し10カウントのものも製作可能である。

4・7 計重機の測定重量指示

工業用の計重機においては、その計測値を集中管制室に遠隔指示させ適当な制御を行う必要がある。このような用途においてはシンクロ発信機がトルク平衡軸に取付けなければならないため、発信機軸に生ずる反動トルクのため計測誤差を生ずる可能性がある。高精度の計重機においてはこのような弊害が生ずるので、シンクロサーボ系が多く使用されている。

4・8 船舶用方位指示

これは非常に古くから用いられている用途であるが、ジャイロコンパスにより検出した方位角度を船内の主要部に伝達指示させるものであり、図4に示すような構成にて数十個のシンクロ受信機を用いて指示させることもある。

4・9 船舶用操舵命令伝達指示

船橋より操舵命令を操縦室・機関室等に伝達するのに用いられ、図1あるいは図4の構成となる。

4・10 船舶の舵角指示

船舶の舵の角度を操縦室等に伝達指示させ、舵角を確認するためのものである。

4・11 風向・風速の指示

風向風速計の検出部は通常建造物の影響を受けない所に設置されるので、この検出値を電氣的に室内に伝達指示あるいは記録する必要がある。このために風向はその角度を直接シンクロ発信機軸に与え、また風速は回転力に変換した後スプリングにより平衡させて、回転角度としてシンクロ発信機軸に与えることにより遠隔指示を行う。

4・12 レーダアンテナおよび指示機の同期回転

PPI表示のレーダ指示機の場合、アンテナの方向とブラウン管上の掃引の方向が一致していなければならない。このためにシンクロ発信機をアンテナ軸に取付け、シンクロ受信機により指示機の偏向コイルを回転させる方法が用いられている。

(文献は11頁へ続く)

(39頁より)

- 1) John G. Truxal ; Control Engineers' Handbook, McGraw Hill, pp.17-6~17-9
- 2) John F. Blackburn ; Components Handbook, Radiation Laboratory Series, McGraw Hill, pp.310~345
- 3) W. R. Ahvendt ; Servomechanism Practice, McGraw Hill
- 4) 大隅・茂木 ; 小形回転機ハンドブック, 電気書院
- 5) 茂木 ; シンクロとサーボモータ, 日刊工業新聞社
- 6) 日本工業規格 シンクロ JIS C 4906 (1959)
- 7) 防衛庁規格 シンクロ電機 NDS XXC 5316 (1958)
- 8) " " NDS XXC 5340 案
- 9) " " NDS XXC 5341 (1962)