

SCR を用いた交流サーボ増幅器

A-C Servo Amplifier using SCR

原島文雄*・内田克己*

Fumio HARASHIMA and Katsumi UCHIDA

最近、静止形スイッチ素子が著しく発達したことからスイッチ素子を用いて2相サーボモータを駆動する試みが行なわれている。スイッチ素子は、本質的に内部損失が少ないので、サーボモータを駆動する電力増幅器として、高効率、小形なものが期待できる。本論では、リレー要素の線形化の手法を用い、電力増幅器として SCR インバータを用いた高性能の交流サーボ増幅器について、その考え方と実験結果を述べる。

1. はじめに

交流サーボ増幅器として通常用いられる線形増幅器は本質的に内部損失が大きいため、増幅器や、その電源が大形になり、設計や使用上やっかいなものの一つである。特に、サーボ増幅器の最終段の電力増幅器においては、負荷である2相サーボモータとの複雑な相互干渉により、多くの問題を生じる。この増幅器の部分に内部損失のほとんどないスイッチ素子を応用することができれば、効率のよい増幅器を構成することが期待される。

サーボ増幅器にスイッチ素子を応用した場合に考えられる利点は次のようなものである。

i) スイッチ素子は、本質的に内部損失が少ないので電力増幅器が、小形、高効率のものとなる。

ii) スイッチ素子の on 状態においては、インピーダンスがきわめて小さいので、その期間においては、出力インピーダンスは十分小さい。

iii) スイッチ素子は、通常、電力増幅度が非常に大きいので、前置増幅器が簡単になる。

しかしながら、スイッチ素子を用いた電力増幅器は次のような欠点を有している。

i) 増幅器の非線形性の問題

ii) 増幅器内での時間遅れと、これによって生ずる位相差の問題

iii) スイッチ素子が off の状態では、出力インピーダンスがきわめて大きくなるので、これがサーボモータの制動特性などに及ぼす悪影響

iv) 電力増幅器の出力電圧の中に含まれる高調波によるサーボモータの発熱や振動

これらの欠点は、すべて、スイッチ素子を用いたサーボ増幅器においては、スイッチ素子によって電源電圧の on, off のみを行なうのみであることに起因する。

すでに開発されている多くのスイッチ素子を用いた回路の中には、サーボ増幅器として最も重要な低出力時における出力インピーダンスが大きく、制動特性の悪いものが多い。

長所、欠点の項では述べなかったが、スイッチ素子を用いた電力増幅器の特徴は、それが前段に変調器を伴うことである。すなわちスイッチ素子は、電源電圧の on, off を行なうのみであるので、入力信号はすべて on, off の時間として与えられる。しがたって通常、電圧として入ってくる入力信号は、変調器において時間としての信号に変換されなければならない(ただし磁気増幅器においては、それ自体が変調器の役割も果している。)

先に述べたスイッチ素子の長所を生かし、欠点を補うためには、スイッチ素子の on, off を制御する信号を発生する変調器としては、次のような性質をもつことが望ましい。

i) 変調器の入力と電力増幅器の出力との関係は、線形であること。特に、入力のゼロ付近において線形性がよいことがサーボ増幅器として重要である。

ii) スイッチ素子の on, off の周波数を高くとること。これは、増幅器の応答を高くするためと、基本周波数に近い高調波を少なくするために有効である。

iii) スイッチ素子のいずれかを常に on 状態に保つこと。これは、増幅器の出力インピーダンスを下げるために有効である。

以下、本文においては、リレー要素の線形化の手法を用いた上記の目的にかなう交流サーボ増幅器について、その考え方と、実験結果について述べる。

2. リレー要素の自励振動を用いた変調方式

リレー要素に適当な帰還を施すとリレー系は発振し、リレーは、周期的動作を行なう。この発振機構を利用して、リレー要素の入出力関係の線形化を行なうことができる。

図1に示される最も簡単な自励振動系について考える。この回路はヒステリシスをもつリレー要素において、1次遅れ要素をとおして負帰還をかけたものである。図1において、まず入力信号 e_s が一定の場合について考える。 e_s の値がある一定値以下の場合には、この系は発振し、リレーは周期的動作を行なう。このときの各部波形は、図1に示すとおりである。図1(d)の波形からリレー

* 東京大学生産技術研究所第3部

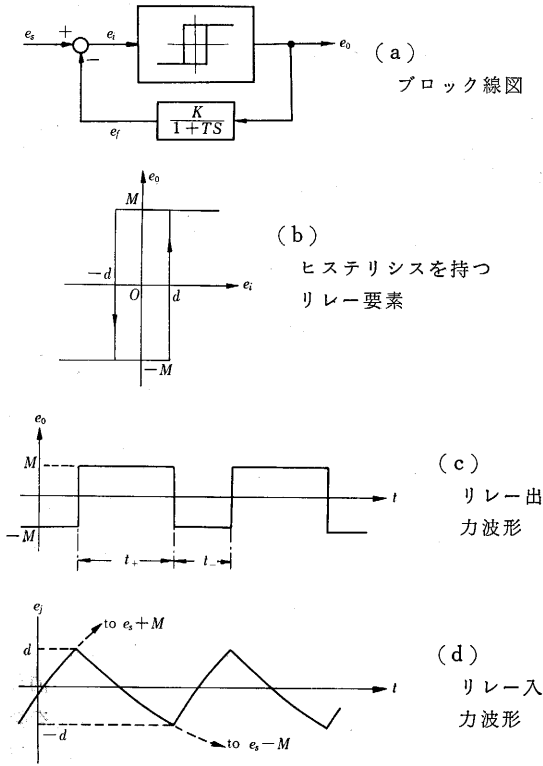


図1 自励振動によるリレー要素の線形化

が $+M$ にある状態と、 $-M$ にある状態について、それぞれ方程式を立てると、リレーが $+M$ にある期間 t_+ と $-M$ にある期間 t_- を求めることができる。

$$\begin{cases} (KM+d-e_s)(1-e^{-t_+/T})=2d \\ (KM+d+e_s)(1-e^{-t_-/T})=2d \end{cases} \quad (1)$$

(1)式より t_+ , t_- を解くと、

$$\begin{cases} t_+ = -T \ln \left\{ 1 - \frac{2d/KM}{1+(d-e_s)/KM} \right\} \\ t_- = -T \ln \left\{ 1 - \frac{2d/KM}{1+(d+e_s)/KM} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

リレーの出力の平均値 \bar{e}_0 およびリレー系の発振角周波数 ω_c は、次式ようになる。

$$\bar{e}_0 = \frac{t_+ - t_-}{t_+ + t_-}, \quad \omega_c = \frac{2\pi}{t_+ + t_-} \quad (3)$$

リレー系の発振の条件は、(2)式の \ln の中を正とする範囲であり、次のように求められる。

$$|e_s| < KM - d \quad (4)$$

$|e_s| \geq KM - d$ の場合には、リレー系の発振は停止し、リレーの出力は、 $+M$ 、あるいは、 $-M$ に固定される。(2), (3)式を用いて計算した e_s と \bar{e}_0 の関係、および e_s と ω_c の関係を、それぞれ、図2、図3に示す。

次に、 e_s が振幅変調された正弦波 ($e_s = E_s \sin \omega_s t$) として与えられる場合について考える。この場合、リレー系の発振周波数 ω_c を入力信号の周波数 ω_s に比べて十分

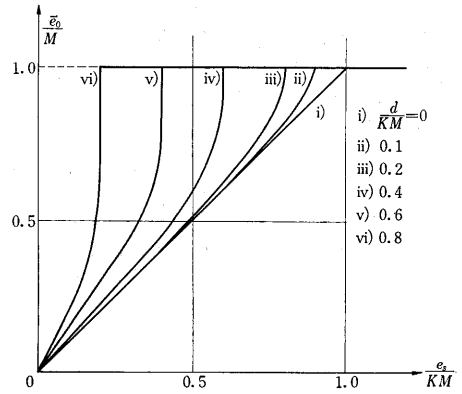


図2 e_s と \bar{e}_0 の関係

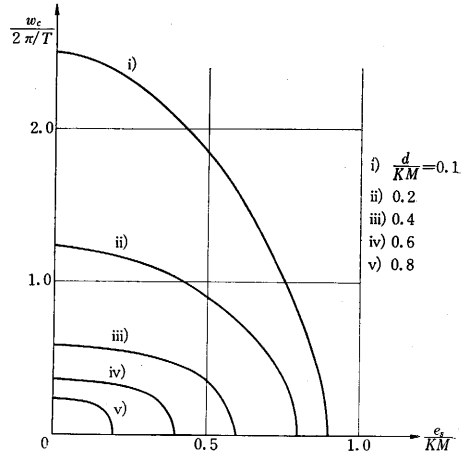


図3 e_s と ω_c の関係

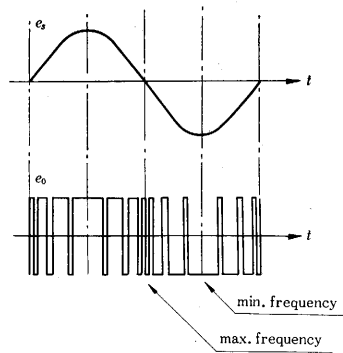


図4 変調器入力为正弦波の場合のリレー出力

大きくとることにより、入出力の記述関数を近似的に計算することができる。ただし、入力信号の大きさによって、発振周波数が変化するので注意を要する。すなわち図4に示すごとく、入力信号が正弦波として与えられた場合、発振周波数が、入力半サイクルの間に変動し、入力電圧がゼロの付近では、周波数は高く、正弦波のピークの近くでは、発振周波数が低くなり、発振が停止することもある。このように、入力信号の一周期にわたっ

て、 $\omega_c \gg \omega_s$ の条件を満足させることはできない。しかしながら、信号が正弦波として与えられる場合、信号の時間変化率が最大の所（入力信号がゼロの所）で発振周波数が最大となり、時間変化率が最小の所（入力信号のピーク）において発振周波数が最小になるということにより、この回路の記述関数を、図2で示される特性をもつ非線形要素に対する記述関数として計算しても誤差は小さい。このようにして計算した記述関数 K_{eq} を図5に示す。

図1(a)のブロック線図は、適当に変形することにより、図6のように書きかえることができる。すなわち図1(a)において、

$$\frac{K}{1+TS} = K - \frac{KTS}{1+TS} \quad (5)$$

と書きかえ、 $KM-d=a$ とおくと、図6(a)の右図の

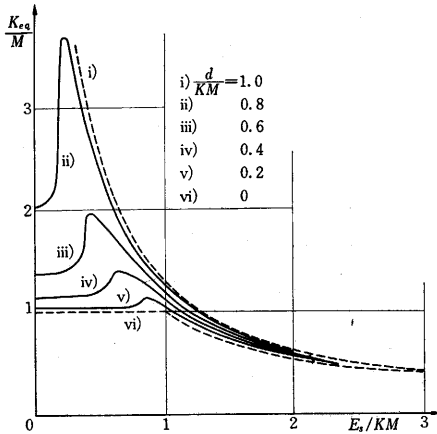


図5 近似記述関数

ようなブロック線図が得られる。次節において述べるように、変調器を電子回路によって構成する場合には、このような表示をとる方が回路の設計が容易である。

3. SCR インバータを用いたサーボ増幅器

前節において述べた変調方式を用い、電力増幅器として SCR インバータを用いた交流サーボ増幅器の構成を図7に示す。変調器に入ってくる交流信号は、変調器によって矩形波状に変調され、その出力によって SCR 方形波インバータを駆動し、このインバータによって電力増幅され、負荷の2相サーボモータに電力を供給する。SCR 方形波インバータは、電力増幅器として働いているわけで、その出力波形は、原理的には、変調器の出力と同じ波形をもつ。

変調器は、図6に示されるブロック図を用いて構成され、その回路図は図8に示すようなものである。この回路においては、飽和増幅器としては差動増幅器を用いており、 C_f を通じて出力から入力へ正帰還をかけている。この回路の発振周波数は、入力電圧の瞬時値によって変

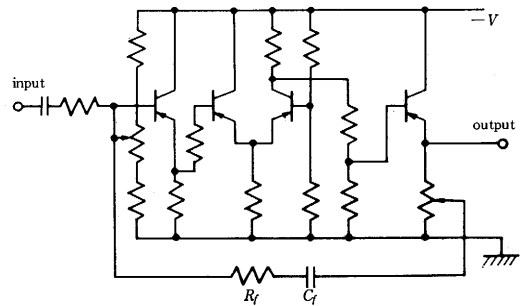


図8 変調器回路図

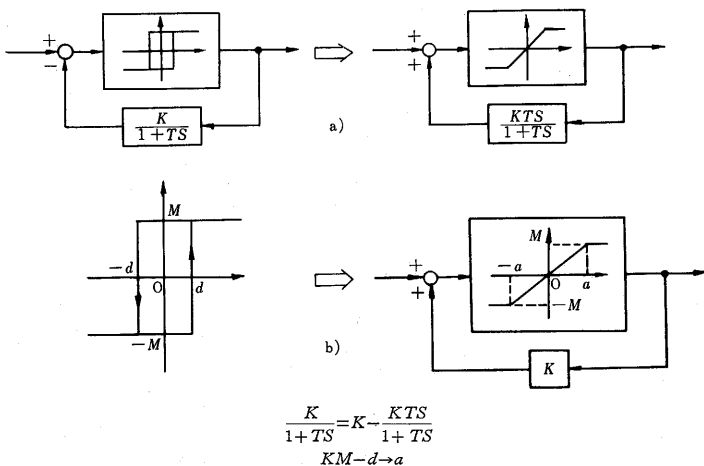


図6 ブロック線図の変形

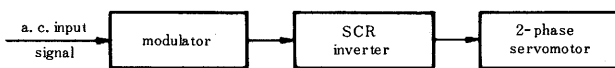


図7 交流サーボ増幅器およびサーボモータ

化するが、入力電圧がゼロの場合において入力信号の周波数 (50 c/s) の十倍程度なるように設計すれば十分である。

電力増幅器として用いる SCR 方形波インバータの回路図を図9に示す。SCR インバータは、図8に示した変調器の出力によって駆動される。この回路を用いると、二つの SCR、あるいは、二つのダイオードの中どれか一つは常に on 状態にあり、また、負荷から電源への電力回生も可能であるので、出力インピーダンスは常に低い値に保たれ、サーボ増幅器として有利である。

SCR 方形波インバータの出力電圧波形は、変調器出力電圧と同じであり、50 c/s を基本波として、高調波を含む矩形波状であるが、負荷の2相サーボモータは、基本波分だけをとりだす相関形フィルタと考え

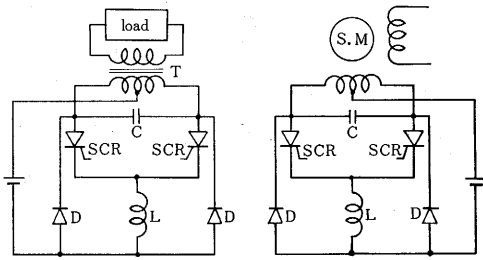


図 9 SCR インバータ回路図

られるので、インバータの出力電圧波形を直接モータの制御巻線に加えて駆動する。2相サーボモータの制御巻線が中間タップを有する場合には、インバータトランスを省略することもできる。このときの結線は図9(b)に示すとおりである。この場合、制御巻線の利用率は半分となる。

モータの制御巻線に、直接、高調波を含む電圧を印加することは、モータの温度上昇の原因となる可能性がある。インバータの出力を適当なフィルタをとおしてモータに印加することも考えられるが、フィルタの中における遅れ、および、フィルタの寸法だけ装置が大きくなることを考えると不利である。モータにインバータ出力電圧を直接印加して長時間運転した結果、問題となるような温度上昇がみられなかった。高調波成分による鉄損は確かに増加すると思われるが、2相サーボモータ自体の効率が非常に悪いので、(たとえば、5Wのサーボモータにおいて1次巻線からの入力32Wにも達する)多少の鉄損の増加は、温度上昇にそれほど寄与しないものと思われる。

電力増幅器として SCR インバータを用いた場合、変調器の出力パルス幅がある一定値以上の時間幅がないと SCR インバータは、転流失敗を起こし、電源短絡となる。転流失敗の原因は、SCR の順電圧阻止能力の回復時間に起因するインバータの上限周波数によるものである。SCR の順電圧阻止能力回復時間は、回路状態、動作温度により変動するが、最小で 10μs、最大で 100 μs にも達する。本実験において用いた SCR インバータでは、上限周波数は 7 kc であるので、最小パルス幅は、約 70 μs となる。したがって、インバータの転流失敗による電源短絡事故を防ぐためには、出力パルス幅が一定値以下にならないように、変調器を構成しなければならない。この最小パルス幅の存在は、リレー系の発振周波数 ω_c の上限をきめる要素となるが、ω_c が大きくなると SCR インバータの転流損が増加し、効率が減少することも考えられ、また、リレー要素の線形化の目的は、ω_c が基本波周波数の 10 倍程度で十分達せられるので、入力ゼロのときの発振周波数は、500 c/s 程度が適当であり、これ以上高い周波数を用いる必要はない。

図1(a)で示される変調器出力の最小パルス幅は、次

のように計算される。図1(c)において、t₊ を大きくしていき、t₋ は単調に減少する。したがって、t₊ → ∞ としたときの t₋ の値が最小パルス幅として計算される。すなわち、最小パルス幅 T_m は、

$$T_m = \lim_{t_+ \rightarrow \infty} t_- = \lim_{e_s \rightarrow KM-d} -T \ln \left(1 - \frac{d}{KM} \right) \quad (6)$$

(6)式を図示すると図10のようになる。

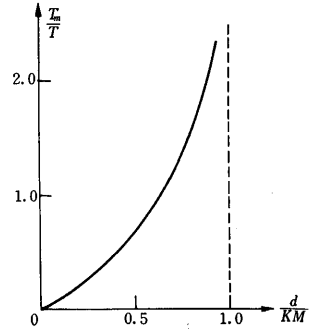


図 10 変調器出力の最小パルス幅

4. 実験結果

リレー系の自動振動を用いた変調器の入出力特性の実測値を図11に示す。また、変調器入力から SCR インバータ出力までの入出力関係を表す記述関数の実測値を図12に示す。入力信号は、50c/s 正弦波であり、SCR インバータの負荷は、抵抗負荷である。記述関数の測定は、インバータ出力の 50 c/s 成分を電力計を用いてとりだすことによって行なった。

このサーボ増幅器によって駆動した場合のステップ入力に対する2相サーボモータの応答速度を図13に示す。2相サーボモータの制御特性は、それを駆動する増幅器によって大きく影響されるので、インピーダンスゼロの

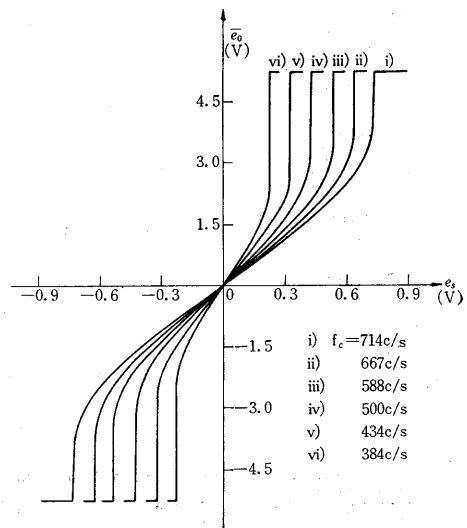


図 11 e₀ と e_s の関係の実測値

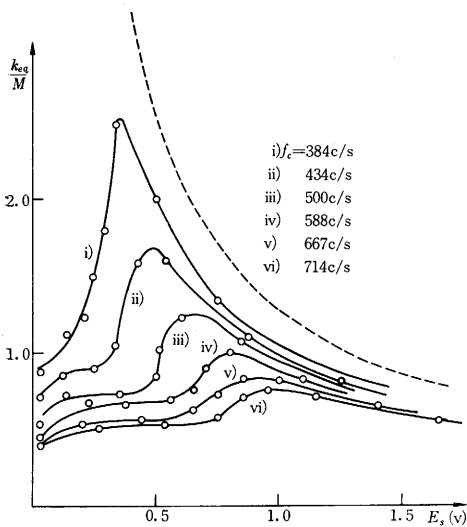
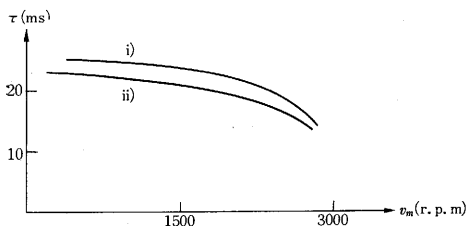


図 12 記述関数の実測値



i) SCR インバータによる駆動
ii) インピーダンスゼロの正弦波電源による駆動

図 13 ステップ入力に対するモータの応答速度

2 相電源によって 2 相サーボモータを駆動した場合と対照させて、ステップ入力に対する応答速度を示してある。図 13 の横軸は、ステップ入力を加えたときの 2 相サーボモータの最終速度であり、縦軸は、最終速度の 63% に達するまでの時間である。この結果から、本方式により 2 相サーボモータを駆動した場合、インピーダンスゼロの正弦波 2 相電源により駆動した場合とほぼ同じ応答速度が得られることがわかる。

5. 結 び

以上、リレー要素の線形化の手法を利用した変調器とそれと SCR 方形波インバータを組み合わせた交流サーボ増幅器について述べてきた。この方法により、簡単な回路により高性能のサーボ増幅器を構成することができた。このサーボ増幅器の特徴をあげると次のようになる。

i) 出力段に SCR インバータを用いているので、電力増幅器内での損失が少なく、電力増幅度は大きい。

ii) 出力インピーダンスは十分小さく、2 相サーボモータを駆動した場合、インピーダンスゼロの正弦波電源によって駆動した場合とほぼ同程度の応答速度が得られる。

iii) 出力電圧の実効値は、いかなる入力に対しても常に一定であるが、入力ゼロの場合でも高周波成分が存在するので、2 相サーボモータ内における鉄損は多少増加する。50 c/s サーボモータにおいて実験した結果では、定格電圧をかけた状態において、問題となるほどの温度上昇はみられなかった。

iv) 入力電圧をゼロから上げていくと、途中、増幅度にピークを生じ、最終的には飽和特性となる。このことは、サーボ系にとって悪影響をもたず、むしろ、大振幅入力に対して、サーボ系の応答を速くするために積極的に利用することも考えられる。

v) 500 c/s 程度のリレー系の発振を用いているので、増幅器内における遅れは十分小さい。しかしながら、その周波数は可聴周波数であるので、多少音を発する。

vi) 電力増幅段においてスイッチ素子を用いているので、電源を通して、あるいは、誘導により、noise を発生する可能性がある。本実験においては、この影響は現われなかったが、今後、自動制御系において、インバータなどの回路は数多く使用されるようになると思われるので、この回路の問題にかぎらず、一般的問題として考える必要があると思われる。(1967 年 7 月 26 日受理)

正 誤 表 (9 月 号)

ページ	段	行	種 別	正	誤
9	右	下 2	本 文	図 3 (a)	図 3 (b)
18	左	下 10	〃	6 秒	3 秒