

サイリスタチョッパ電源で運転される直流他励電動機の アナログシミュレーション

知 野 照 信

1. ま え が き

サイリスタチョッパ電源で直流他励電動機を運転する場合、電動機速度を迅速精密に、広範囲に、電気信号によって制御でき、制御電力も少なく、回路全体の効率もよい、かつ、保守も容易であるなどの利点があるため現在まで研究が盛んに行われ、今後さらに応用分野が広がるものと期待される。

さて、現在のように工業が発展した段階においては電動機の静特性を知るだけでは不十分で動特性を知る必要があるようになってきている。このような観点にたって、今までに、微小変動入力に対して線形化を行い、伝達関数を導出した仁田氏らの論文⁽¹⁾、電圧およびトル平衡微分方程式の境界条件を周期ごとに順次接続しある状態から任意周期目の諸量を求めた藤井氏らの論文⁽²⁾および状態方程式を用いてせん移点のみの値を求めた松井氏らの論文⁽³⁾が発表されている。これらはいずれも数値解析を試みたもので計算はかなり煩雑であると思われる。サイリスタチョッパ電源で運転される直流他励電動機の特性は、よく知られているように半導体の逆方向電流阻止特性のため、動作条件によって電機子電流連続および不連続の二つの状態が生じ非線形系となる。したがって、その動特性は非常に複雑となっている。このような非線形系の動特性の解明には、アナログ計算機の使用がたいへん有効な方法となってくる。

そこで、筆者は本論文において、アナログ電子計算機を用いてサイリスタチョッパ電源で運転される直流他励電動機のアナログシミュレーションを行い、その結果非線形系の複雑な動作をする直流他励電動機の動特性を、たいへん簡単な構成で、容易に、短時間で解明することができた。かつ、始動時の過渡特性に対して、実測結果とアナログシミュレーション結果との比較を行いよい一致をみアナログシミュレーションの妥当性を確かめた。さらに、電機子回路に直列にそう入したリアクトルの始動時間に及ぼす効果についても論じた。その報告である。

2. 直流他励電動機の基本式とブロック線図

サイリスタチョッパ電源で運転される直流他励電動機のアナログシミュレーションを行うにあたって、まず、図1に示される直流他励電動機の基本式とブロック線図を求めておこう。図1において励磁電流を一定とすれば、次のような電圧方程式が成立する。

$$v = L \frac{di}{dt} + Ri + e_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 e_c は逆起電力で $e_c = K_v \omega$ である。
一方、回転系の運動方程式は次のようになる。

$$\tau = K_t \cdot i = J \frac{d\omega}{dt} + f_o \omega + \tau_o + T_o \quad \cdots (2)$$

ここで、 v ：電機子電圧、 i ：電機子電流
 R ：電機子回路抵抗、 L ：電機子インダクタンス、 J ：電機子慣性モーメント、 ω ：回転子角速度、 K_t ：トルク定数、 K_v ：逆起電力定数、 τ ：電動機の発生トルク、 T_o ：電動機の出力トルクまたは負荷トルク、 f_o ：粘性摩擦係数、 τ_o ：クーロン摩擦トルク

(1)、(2)式において $d/dt = P$ とおけば、直流他励電動機のブロック線図は図2のように表される。図中のスイッチ S は静止摩擦トルク

τ_o' による不感帯発生用のスイッチで、電動機始動後 $(\tau - \tau_o') = 0$ までは接点を開いており、 $(\tau - \tau_o') > 0$ となったとき接点を閉じる。その後接点を閉じたまま維持される。

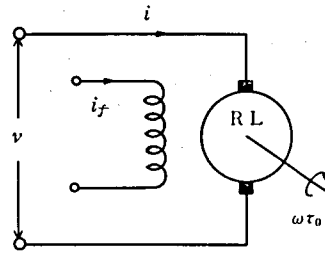


図1 直流他励電動機

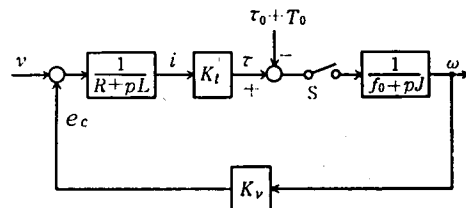


図2 直流他励電動機のブロック線図

3. サイリスタチョップ電源で運転される直流他励電動機のアナログシミュレーション

3-1 直流他励電動機の動作とブロック線図

図3に示されるサイリスタチョップ（点線で囲まれた部分）電源で運転される直流他励電動機の電機子電流は、動作条件⁽⁴⁾により電機子電流不連続（モードⅠ）および連続（モードⅡ）の二つの状態が生じ、モードⅠの電流通電期間の算定がむづかしく、一般に解析的には求められないとされている⁽²⁾。ところで、アナログシミュレーション法によれば、後述のように電流通電期間は自動的に決まり、モードⅠとモードⅡを統一的に扱うことができるので解析が容易となる。図4にモードⅠの電機子電圧および電流波形を示す。ただし、 α はチョップオフ時点、 β は電機子電流 $i=0$ となる時点、 T はチョッパー周期を表す。

アナログシミュレーションを行うにあたり、チョップの波形は転流によるひずみのない理

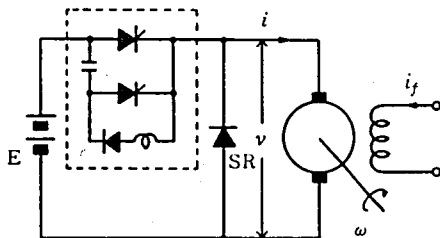


図3 サイリスタチョップ電源で運転される直流他励電動機

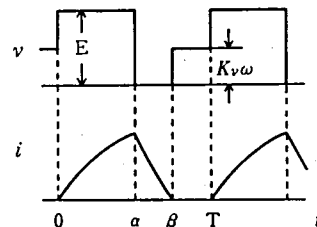


図4 電機子電圧および電流波形

想的な方形波とし、サイリスタ、ダイオードおよびブラシの電圧降下は無視する。

一般の直流他励電動機のブロック線図は、すでに、図2に示した。図2のブロック線図を基に、サイリスタチョッパ電源で運転される直流他励電動機のモードIにあるときのブロック線図をまず求めてみよう。

図4からわかるようにチョッパ一周期は電機子電流について次の三つの期間から成立っている。時間 t が $0 \leq t < \alpha$ の期間Iは、電動機が電源から電力を供給され駆動される期間で、(1)、(2)式が成立する。 t が $\alpha \leq t < \beta$ の期間IIは、電動機が電源から切離され、期間Iで電機子に蓄えられた電磁エネルギーがフライホイール・ダイオードSRを通じて放出される期間で、次式が成立する。

$$0 = L \frac{di}{dt} + Ri + e_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau = J \frac{d\omega}{dt} + f_0 \omega + \tau_0 + T_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

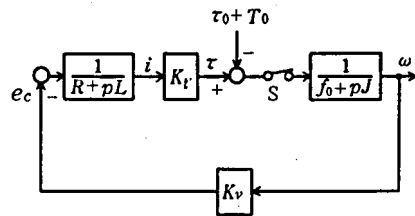
t が $\beta \leq t < T$ の期間IIIは、電動機自身の有する運動エネルギーによって、電動機は惰行運転している期間で、次式が成立する。

$$i = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

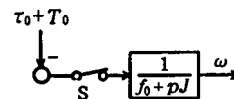
$$0 = J \frac{d\omega}{dt} + f_0 \omega + \tau_0 + T_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上(1)~(6)式よりモードIにある電動機のブロック線図は、期間I、II、IIIについてそれぞれ図2、図5(a)および図5(b)のように表すことができる。つぎに、モードIIにある電動機のブロック線図を考えてみよう。モードIIは、図4において期間IIIの状態が生じなく期間Iおよび期間IIからチョッパ一周期が構成される場合である。したがって、モードIIの電動機のブロック線図は、 t が $0 \leq t < \alpha$ のとき図2となり、 t が $\alpha \leq t < T$ のとき図5(a)となる。

上述のように電動機のブロック線図は時間に応じて切換わる。その切換わりをスイッチを用いて示すと、サイリスタチョッパ電源で運転される直流他励電動機のブロック線図は図6となる。同図において、スイッチ S_1 、 S_2 は時間 t について次のように動作する。



(a) 期間IIの直流他励電動機のブロック線図



(b) 期間IIIの直流他励電動機のブロック線図

図5

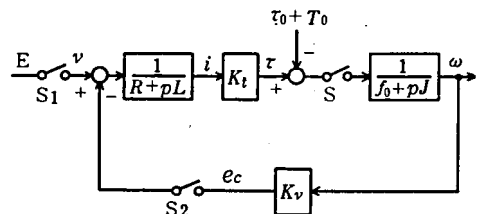


図6 アナログシミュレーションのための直流他励電動機のブロック線図

モード I

 $0 \leq t < \alpha$ S_1 オン, S_2 オン $\alpha \leq t < \beta$ S_1 オフ, S_2 オン $\beta \leq t < T$ S_1 オフ, S_2 オフ

モード II

 $0 \leq t < \alpha$ S_1 オン, S_2 オン $\alpha \leq t < T$ S_1 オフ, S_2 オン

3-2 スケール変換

実際のチョッパ周期の動作は短時間で行われるのでアナログシミュレーションではタイムスケール変換をする必要がある。また、電機子電流および回転子角速度に対しても計算機の誤差を少なくするためスケール変換を行う。

時間、電機子電流および回転子角速度に対する変換係数をそれぞれ、 a 、 b 、 c とし、電動機の基本式(1)、(2)にスケール変換を行うと次の演算方程式が得られる。

$$\frac{di_0}{dt_0} = -\frac{R}{aL}i_0 - \frac{bku}{acL}w_0 + \frac{b}{aL}v \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\frac{dw_0}{dt_0} = \frac{ckt}{abJ}i_0 - \frac{f_0}{aJ}w_0 - \frac{c}{aJ}(\tau_0 + T_0) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $t_0 = at$ 、 $i_0 = bi$ 、 $w_0 = cw$

3-3 アナログシミュレーション

図6のブロック線図をアナログシミュレーションする場合、切換えスイッチの動作をアナログ計算機上でプログラムしなければならない。そのため切換回路および比較器を用いて次のように実現される。

図6における S_1 の動作は簡単なリレーにより模擬することができる。このような模擬が可能となる場合は、リレーのスイッチング時間が計算機上の周期に比べて無視できるときである。これは時間変換係数 a の値を、リレーのスイッチング時間が計算機上の周期に比べて無視できる程度に選ばばよい。一例として、チョップ周波数を $100H_z$

の場合を考えて a の値を250に選ばば、計算機上の周期は2.5secとなり、リレーのスイッチング時間(約10msec)は無視できる。

図6における S_2 の動作は電流 i_0 を比較器で比較し、 $i_0 > 0$ の状態ではリレーを動作させスイッチの接点を閉じ逆起電力帰還ループを接続し、 $i_0 = 0$ となった時点で逆起電力帰還ループを切離すようにプログラムすることによって模擬できる。このようにプログラムすれば、電流通電期間は自動的に決定され、 $i_0 > 0$ のときは逆起電力帰還ループは切離されることは

表1 電動機諸定数

電機子回路抵抗	$R=10.9\Omega$
電機子インダクタンス	$L=0.0991H$
逆起電力定数	$Kv=0.466V/rad/S$
トルク定数	$Kt=0.461N\cdot m/A$
慣性モーメント	$J=4.36 \times 10^{-4}kg\cdot m^2$
クーロン摩擦トルク	$\tau_0=0.0529N\cdot m$

ないのでモードⅡの、 $i_0=0$ となったとき逆起電力帰還ループは切離されモードⅠのアナログシミュレーションとなる。したがって、モードの移行は自動的に行われ統一的解析ができる。

不感帯発生用スイッチ S の動作は、 τ を比較器で比較し $(\tau-\tau_0') > 0$ となった時点でリレーが動作し接点を閉じるスイッチと、 w_0 を比較器で比較し $w_0 > 0$ となった時点でリレーが動作し接点を閉じるスイッチを並列に接続することにより模擬できる。

以上述べたことを考慮して、実験で使用する直流他励電動機の表 1 に示す電動機諸定数(実測値) および変換係数を $a=250$, $b=10$, $c=0.25$ として、(7), (8) 式の係数を計算し、サイリスタチョップ電源で運転される直流他励電動機のアナログシミュレーションを行うと図 7 となる。ただし、粘性摩擦トルクはクーロン摩擦トルクに比べ非常に小さいので無視されている。図中、図 6 のスイッチ S_1 の動作をする電圧切換用リレー R_e は次節のリレー駆動回路により駆動される。

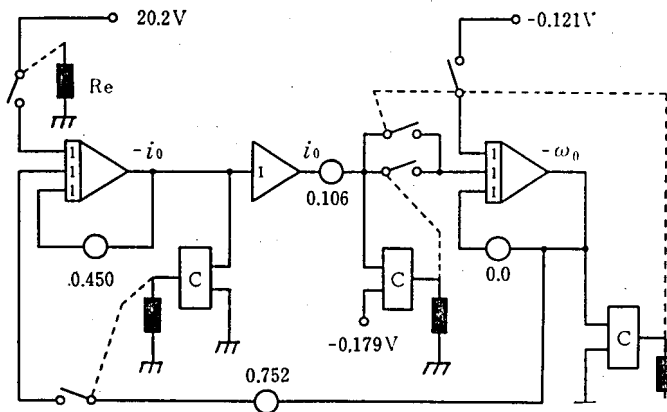


図 7 サイリスタチョップ電源で運転される直流他励電動機のアナログシミュレーション

3-4 電圧切換用リレー駆動回路

図 8 に電圧切換用リレー駆動回路を示す。同図の回路の構成は、フリップ・フロップ (F・F) 回路、演算回路およびユニジャンクシ

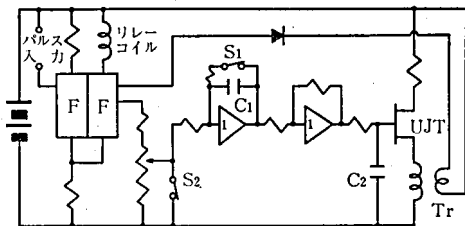


図 8 電圧切換用リレー駆動回路

ョン・トランジスタ (UJT) パルス発生回路からなる。図中のスイッチ S_1 , S_2 は電圧切換用リレーで制御し、 S_1 はクランプ、 S_2 はリセットスイッチである。この回路の動作は、いま、F・F 回路に入力パルスが入れば状態が反転して、 S_1 , S_2 は開放となり積分器に電圧が印加され積分を開始する。

コンデンサ C_2 は充電されその充電電圧が UJT のトリガー点に達すればトランス

T_r にパルスが発生し、 $F \cdot F$ 回路を反転し始めの状態に戻る。再び入力パルスが入れば前と同様の動作を行い電圧切換用リレーをオン、オフさせる。計算機上のチョッパ周期は入力パルスの周期を、Duty factor は演算回路の可変抵抗を変えることにより任意に変化することができる。入力パルスは電子シーケンスタイマー（泉電気製）により発生させている。

4. 実測結果とアナログシミュレーション結果

ここでは、始動特性の実測結果とアナログシミュレーション結果およびシミュレーション実験結果について述べる。実験に使用した直流他励電動機の仕様は次のようである。

原電気製 定格出力 100W 定格電圧 100V 定格電流 1.4A
極数 2 定格回転数 1800R. P. M.

電動機諸定数は表1に示した通りである。一般に、電動機諸定数は電流、チョッパ周波数および回転速度の状態によって変動するが、この変動を考慮してアナログシミュレーションを行うことは困難であるからここでは一定であるものとした。

電動機駆動用のチョッパ回路は図3に示したカソードパルス形チョッパ回路を用いて実験を行った。電動機の始動特性実測では、電流波形測定用として電機子回路に 0.25Ω の抵抗をそう入したので、アナログシミュレーションでは電機子回路抵抗に 0.25Ω を加算した値を電機子回路抵抗とした。回転子角速度測定には速度発電機（33.8V/1000r. p. m.）を使用した。回転子角速度および電機子電流の波形記録には横河電機製の直記式電磁オシログラフを、アナログシミュレーションの記録にはX-Yレコーダをそれぞれ用いた。

図9は、チョッパ回路の電源電圧 $E=50V$ （安定化電源）、周波数 $f=100Hz$ とし、Duty factor $df=0.6$ と 0.4 について、直流他励電動機を無負荷運転した場合の回転子角速度 ω および電機子電流 i の始動特性で、実測結果 (a) とアナログシミュレーション結果 (b) である。 ω 、 i とともに実測結果とアナログシミュレーション結果とはよく一致している。電動機始動後数サイクルにおいて波形がやや異なっているが、これは電機子電流が定格値をはるかに越えているため、電機子回路抵抗の変化および電機子磁気回路の飽和などにより電動機諸定数が変動したためと思われる。

図10は、 $E=50V$ 、 $f=100Hz$ とし、Duty factor、電源電圧および負荷がステップ状に急変したときの ω および i の変化をシミュレーション実験した結果で、(a) は $0.15N-m$ の負荷時に $df=0.2$ の定常状態から df が 0.8 、 0.2 と変化したときの、(b) は $df=0.8$ の無負荷定常状態で、 E が $50V$ から $40V$ に変化したときの、(c) は $df=0.8$ の無負荷定常状態で、 $0.2N-m$ の負荷が加わったときの結果である。これより変化の様子が一見してわかりアナログシミュレーションの有効性を示しているといえる。

5. リアクトルのそう入効果

電動機の始動時間は、始動状態がモードⅡのみで完了する場合は、電池のような純直流電源で始動した場合に等しいが、始動状態がモードⅠをとる場合は、純直流電源で始動した場合に比べて長くなる。ここでは、始動状態がモードⅠをとる場合の電動機の始動時間に及ぼ

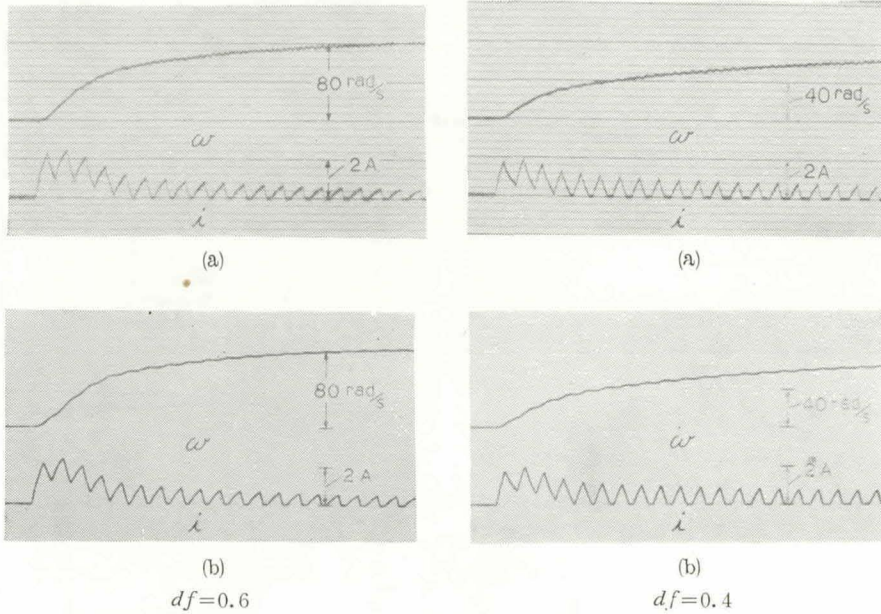


図9 サイリスタチョップ電源で運転される直流他励電動機の始動特性

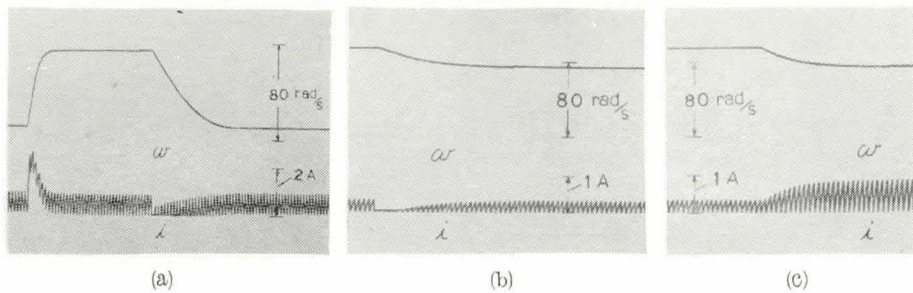


図10 シミュレーション実験結果

すリアクトルのそう入効果について述べる。

そう入リアクトルのインダクタンス La と 電機子インダクタンス L との 合成インダクタンスの電機子インダクタンスに対する比を x とすれば次のようになる。

$$x = \frac{La + L}{L}$$

図11は、 $df=0.8$ と 0.6 について、 x を変化したときの始動時より電動機速度が最終速度の $\pm 2\%$ に最終的に達する時間 t_0 を示したもので、実線はアナログシミュレーションより、実測値はオシログラフよりそれぞれ読みとった値である。最終速度の $\pm 2\%$ に達する時間を選んだ理由は読みとりを正確とし、かつ始動時間を比較できるようにするためである。図12は、 x をパラメータとして $df=0.8$ のときの電動機始動特性をアナログシミュレーションし

たものである。

図11から、リアクトルをそう入することにより x のある範囲内 ($df=0.8$ のとき $x < 2.3$, $df=0.6$ のとき $x < 3.5$) において t_0 を短縮する効果があることがわかる。さらに、 $df=0.8$ のとき $x=2.0$ に、 $df=0.6$ のとき $x=2.9$ に最小値が存在し、 $x=1$ に比較してそれぞれ約 $1/3$, $1/6$ に短縮されていることが認められる。 t_0 に最小値が生ずる原因は、 t_0 が最小値に達する x 以上の値になると、図12における $x=2.8$ の応答からわかるように、電動機は L および L_a に蓄えられた電磁エネルギーにより最終速度以上に加速されいわゆる行き過ぎ現象が生じ、最終速度に達する時間が長くなるためである。図12において $x=2.0$ のときは速指状態でこのとき電動機の始動時間が最小となる。

図13は、 f をパラメータとして、Duty factor を変化したときの始動時間が最小となる x_0 の値を示したものである。同図より、 f が高くなれば x_0 は小さく、電流不連続となりやすい Duty factor の近辺で x_0 は大きくなっていることがわかる。図14は、Duty factor をパラメータとして、負荷を変化したときの x_0 を示したもので、負荷が増せば x_0 は小さくなることわかる。同図で $x_0=1$ となるときから電機子電流は電流連続状態となる。図13, 14から、 x_0 の値はチョップ周波数、Duty factor および負荷によって変ることがわかる。したがって、チョップ周波数、Duty factor および負荷が与えられれば、電動機の始動時間を最小とする x の最適値を求めることができ、最短時間で電動機を始動することが可能となる。

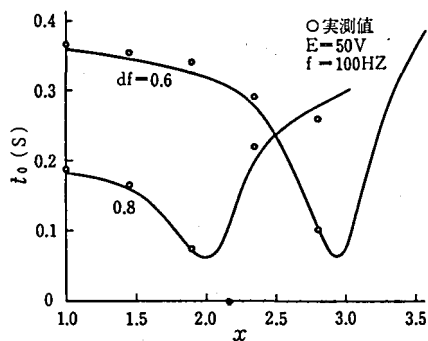


図11 x と t_0 との関係

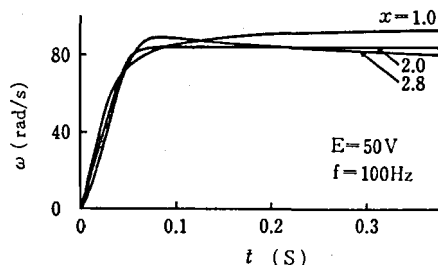


図12 リアクトルそう入時の始動特性

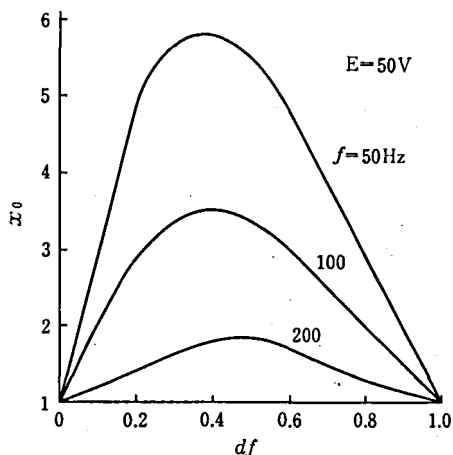


図13 Duty factor と x_0 との関係

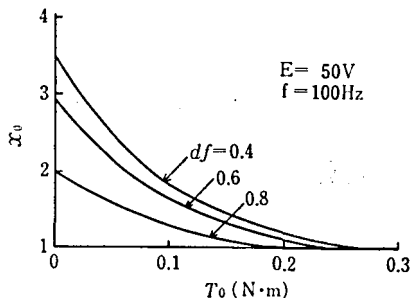


図14 負荷と x_0 との関係

6. あ と が き

本報告では、サイリスタチョッパ電源で運転される直流他励電動機の動作のアナログシミュレーションを行った。その結果は電動機始動特性の実測結果とよい一致をみた。また、シミュレーション実験を行い、Duty factor, 電源電圧および負荷の各変動パラメータがそれぞれ急変したときの、電動機の動作の全容を求めた。従来、この種の系は非線形動作となるためたいへんむずかしいとされているが、この方法によれば、簡単な構成で、容易に、短時間で解明することができた。

さらに、電機子回路に直列にリアクトルをそう入することにより、電動機の始動時間を短縮することができ、そう入リアクトルのインダクタンス値に電動機の始動時間を最小とする最適値があることがわかった。他方、このようなアナログシミュレーションは、強制転流回路の設計上およびサイリスタ素子の選定上、電機子電流のピーク値を知る必要があることから有用である。

最後に、日ごろご指導いただいている、信州大学小木曾敏三郎教授ならびに有益なご助言をいただいた、名古屋大学佐藤則明教授に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 仁田, 沖津, 鈴木, 木内: 電学誌, Vol. 90, 1970, P. 1577.
- (2) 藤井, 石崎: 電学誌, Vol. 93-B, 1973, P. 113.
- (3) 松井, 松村, 足立: 電学誌, Vol. 93-B, 1973, P. 121.
- (4) 入江, 藤井, 石崎: 電学誌, Vol. 88, 1968, P. 675.