交流一直流電気推進システムの シミュレーション(II)*

坂本 研也**・村上 喜光**・武田 幸男**

Computer Simulation of an Experimental
ac-dc Electric Propulsion System (II)

By Kenya Sakamoto, Yoshimitsu Murakami, Yukio Takeda

The block diagram of experimental ac-dc electric propulsion system is obtained containing detailed chopper switching phenomena on the chopper controlled motor which drives the alternator. Dynamic performance of experimental system on crash astern, assuming that ship speed is constant, is estimated by the MISS simulator managed on the multi-microprocessor system. The computed results using observed constants match those obtained from the tests. It is discussed on the analytical response of velocity and shaft torque of the propeller affected by the values of current limit of the propulsion motor, field time constant of the generator and integral gain of the automatic voltage regulator.

1. ま え が き

電気推進方式は、我が国では特殊船に採用されることが多いが、将来の燃料油質低下によるディーゼル主機の定速運転や少人数管理となる商船への採用が期待される。本文で検討した交流直流電気推進方式は、定速ディーゼルで交流発電機を運転し、整流電圧で直流推進電動機を駆動する方式である。ディーゼルの定速運転、交流発電機や直流電動機の構成と電圧制御、静止レオナード制御等は完成された技術として実用化されており、極めて信頼性の高い系が構成できる。

本方式の解析については、先にFORTRAN言語によるシミュレーションを報告した¹⁾。すなわち、小形実験装置について、原動機、整流負荷交流発電機、推進系と、これらの制御系とについて方程式を定め、状態変数解析を行ったものであり、一定流速におけるプロペラ急速逆転時の動特性を計算して、実測と比較検討した。FORTRAN言語で記述したシミュレーションプログラムでは、本方式の実用システムの試設計にあたっての回路方式の変更や定数の最適化のためのプログラムの書き換えがシミュレーションの中心となり、計算結果が効率よく得られにくい。

本報告ではブロック線図で表現した実験システムを、ディジタル化アナログ計算機方式のMISSシミュレータによってシミュレーションを行っている。演算はアナログ計算機と同様、積分を中心に行われ、定数の設定変更や、各ブロックの簡略化あるいは精密化も他の部分のプログラムに影響を与えることなく、容易に行うことができた。

本文は、交流直流電気推進システムの小形実験装置について、先の報告で簡略、線形化していたチョップ駆動電動機系のモデルをスイッチング回路解析とし、更に各部の表現を検討することによって系全体のブロック線図の精度を高め、全速前進時のプロペラ急速逆転時の動特性解析を行ったものである。特に、推進電動機の過電流抑制回路動作、発電機界磁回路時定数、および発電機定電圧制御系の定数などの推進軸トルクの応答に与える影響について検討を加えている。

2. シミュレーション手法

一般に、ディジタル計算機は1台のCPUを持ち、各種の作業を直列に処理する。従って、物理現象の過渡解析では、行列表現した連立微分方程式を解くために莫大な処理過程が必要であり、対象の複雑性に従い、計算時間および記憶容量が指数関数的に増加する。一方、アナログ計算機は並列演算を行うため、対象の複雑性とはほぼ無関係に演算処理ができ、また、パラメータ値の変更も容易で、対話形のシミュレーションが可能である。デ

*原稿受付 昭和55年1月7日
昭和54年秋季学術講演(昭和54年10月24日)

**正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)
(ただし現在 村上喜光:川崎汽船)

ディーゼル主機などの大規模の系の解析には、ブロック線図の表現をアナログ部で、非線形ブロックや論理演算などをディジタル部で行う、ハイブリッド計算機を用いることが多い²⁾。

本文で使用したMISSシミュレータは³⁾、複数台のCPU並列演算機能をもったディジタル計算機システム上で使用できるディジタル化アナログ計算機処理方式のシミュレータで、以下に概要をのべる。

図1はCPU構成例で、主CPU1台、従属CPU8台からなっている。シミュレータ用のMISS言語で表現されたプログラムは、主CPUで機械語とし、従属CPUのメモリ(LM)に各々分配、収納される。演算は、主CPUの管理下で、 Δt 間隔ごとの値を各従属CPUが並列実行する。共有メモリ(SM)は、フラグ、集計記録用で、コントローラ(SMC1, 2)によって主CPUと従属CPU間のタイミングをとっている。

図1 CPUの構成

シミュレータ用のMISS言語は、アナログ計算機と同様、ブロック線図化された対象系をプログラム化しやすいように構成されており、FORTRAN言語に近い表記法をとっている。ここで、計算精度の中心となる、積分関数の精度を求めるために、図2の一次遅れ回路について誤差を求めた。(a)はブロック図、(b)はアナログ要素で構成したものである、これをMISS言語で表現すると表1のようになる。

行1は値を設定すべき変数名、行2~4が一次遅れブロックの入出力の関数形、行5, 6は解析値と演算結果の差を誤差ERRとするものである。行2~6の記述順序は任意でよく、入出力変数の関係が閉じておればよく、

図2 一次遅れ回路

表1 一次遅れの応答精度を求めるプログラム

1	PARAM IC, T	; 初期値, 設定値
2	X=STEP(ϕ)	; 入力, ステップ
3	Z=(X-Y)/T	; 積分入力
4	Y=INTGRL(IC, Z)	; 積分出力
5	ERR=Y-Y ϕ	; 誤差
6	Y ϕ =1.-EXP(-TIME/T)	; 解析値

アナログ計算機のパッチングと同様の処理となる。これらの記述行は、計算機によってならびかえ後、コンパイラを通して各従属CPUが等負荷になるよう、各従属メモリに分配される。演算は、実時間ならびに非実時間ともに、積分時間間隔 Δt と初期値を与えることによって、各従属CPUが並列演算し、 Δt 後の値が全部確立したところで主CPUがこれを取りまとめて、次の Δt 後の計算に入る。

図3 積分時間間隔と誤差

図3は、時定数 $T=1$ secとして Δt を変えたときの誤差で、 $\Delta t/T \leq 2^{-7} = 1/128$ とすれば、誤差は丸め誤差だけになることがわかる。

ここで本シミュレータの容量をまとめると表2のようになる。

表2 MISSシミュレータ概要

形 式	PPS/8 (8並列CPU), 三井造船所製
CPU	MAP 16 P, 16 bit CPU×9
メ モ リ	128 kB+8×16 kB, ディスク5MB×2
数 値	32 bit 固定小数点
積分関数	48, 一次アダムス法
関数発生	フォートラン関数, 任意関数発生20, かかえこみ関数10
ブロック	定数, 乗除算, ステップ, ランプ, ヒステリシス, インパルス, リミット, 不感帯, タイマ各ブロック, 全ブロック数300以下

図4は、シミュレーション対象である交流直流電気推進実験システムである。ディーゼル主機を模擬する定速制御されたチョップ発電機DM1, 過電流抑制回路付定電圧制御交流発電機ACG, 整流回路REC, 推進直流電動機DM2, およびプロペラ系から構成される。ブロック線図は、図5の様に表現され、各々は原動機系DM1, 発電機系GEN, および推進系PROPに大別されている。

図4 実験システムの構成

図5 AC-DC電気推進実験システムの総合ブロック線図

原動機系では、入力として速度設定電圧 V_{C1} 、原動機の負荷としての発電機出力 $V_{A2} \times I_{A2}$ 、および回転系の損失トルク T_{GH} 、出力は原動機回転数 N_1 である。発電機系では、入力は発電機回転数 N_1 (角速度 W_1)、自動電圧調整器設定電圧 V_{C2} 、および推進電動機逆起電力 E_{V2} で、出力は発電機出力電流 I_{A2} (軸トルクに相当)である。プロペラ系の入力は、発電機出力電流 I_{A2} 、出力はプロペラ回転数 N_2 である。

動力部と制御回路とをあわせて積分関数は10、非線形要素はロビンソンカーブを含めて4である。

表3に本シミュレーションで用いた記号および定数をまとめた。

3. 原動機系の応答

電気推進実験装置では、原動機系としてチョップ駆動直流機を用いて定速制御を行っている。チョップ電動機の特性は電動機電流が断続する場合に、連続電流時よりも応答が悪くなるが⁴⁾、ブロック線図は提案されておらず、今回は図6のチョップ電動機をRL回路網として解析に組み込んだ。チョップ(CH)はスイッチで表現し、オンオフ比は T_2/T_1 である。 T_1 の周期は2.5m・sec(400 Hz)でパルス幅制御を行っている。

図7は電機子電流電圧の模式図で、(a)は軽負荷時の断続電流波形を示し、電圧は逆起電力が皮相的に付加さ

図6 チョップ電動機

(a)

(b)

図7 チョップ電動機電流・電圧波形模式図

表 3 定数一覧表

記 号	名 称	値	単 位
原 動 機 系			
V_{C1}	原動機回転速度設定電圧	3.0	V
K_{P1}	偏差増幅回路比例定数	20	Ω
K_{I1}	偏差増幅回路積分定数	42.6	Ω
L_1	偏差増幅回路しきい値	7.8	V
K_{OP}	電圧比例定数	15.4	—
K_{R1}	チョッパ電動機コンダクタンス	2.38	S
T_{R1}	電動機時定数	0.020	sec
K_{T1}	電動機トルク定数	0.060	kg·m/A
K_{M1}	電動機回転機械コンダクタンス	1750	rad/kg·m·sec
T_{M1}	電動機回転時定数	60	sec
K_{V1}	誘導起電力定数	0.60	V·sec/rad
K_{TG1}	回転速度検出回路定数	1.59×10^{-3}	A·sec/rad
T_{C1}	回転速度検出回路時定数	0.20	sec
G	重力加速度	9.8	m/sec ²
V_{B1}	ブラシ電圧降下	1.0	V
T_{AH1}	鉄損トルク	0.050	kg·m
発電機推進系			
		0	
K_{C2}	電圧検出回路定数	0.075	—
T_{C2}	電圧検出回路時定数	0.070	sec
K_{S2}	電圧検出回路コンダクタンス	0.038	S
K_{P2}	偏差増幅回路比例定数	2.2	Ω
K_{I2}	偏差増幅回路積分定数	21.3	Ω
L_3	界磁電圧しきい値	1.2	V
K_3	過電流抑制回路係数	1, 0	—
K_{FG}	界磁回路コンダクタンス	0.067	S
T_{FG}	界磁回路時定数	0.20	sec
K_{CT2}	過電流抑制回路定数	1.16	Ω
T_{D2}	過電流抑制回路時定数	0.056	sec
L_2	過電流抑制回路しきい値	7.8	V
K_{C3}	過電流抑制回路定数	0.93	—
K_9	ダンピング回路定数	-1	—
T_9	ダンピング回路時定数	0.15	sec
K_{GH}	鉄損トルク定数	0.031	kg·m/A
K_X	仮想界磁電動機間相互インダクタンス	0.88	H
K_Y	仮想内部抵抗	0.15	H
K_1	正転, 停止, 逆転指令モード	1, 0, -1	—
K_2	正転, 逆転中の鉄損トルク係数	1, -1	—
K_{R2}	推進電動機コンダクタンス	1.64	S
T_{R2}	推進電動機時定数	0.050	sec
K_{T2}	推進電動機発生トルク定数	0.038	kg·m/A
K_{M2}	推進電動機回転機械コンダクタンス	5.0×10^3	rad/kg·m·sec
T_{M2}	推進電動機回転時定数	6.0	sec
K_N	角速度回転数変換係数	9.55	rad ⁻¹
K_{V2}	誘導起電力定数	0.37	V·sec/rad
T_{AH2}	鉄損トルク	0.050	kg·m

図8 チョップ電動機の電気側ブロック線図

れた波形となっている。(b)は重負荷時の連続電流波形を示す。断続している場合の応答の遅れを正確に表わすには実際にON, OFF期間の各電流を求めることであり、図8にそのブロック線図を示す。

(a)はチョップによって平均平滑電圧がかかるとした連続系のモデル、(b)は矩形波電圧のかかる精密なモデルである。(b)において、電動機電機子電圧 V_{A1} は偏差増幅出力電圧 V_{OP} によりONタイム T_2 を算出し、パルス発生関数に入力し、電源電圧 V_S をかけて求めている。 V_{A1} は短形波であるからON期間中は電動機の内部抵抗とインダクタンスによる一次遅れ要素をもった電流 I_{A11} が流れるとし、OFF期間中はダイオードの仮想の内部抵抗とインダクタンスを加味した電流 I_{AD1} を計算し、両者の和を一周期当りの電機子電流 I_{A1} とした。なお、 X_1 は V_{A1} の値がON期間中は1で、OFF期間中は0を取り、 X_2 はその逆の値を意味する。電圧 V_{14} は入力電圧から逆起電力 E_{V1} とブラシ電圧降下 V_{B1} を差引いたものである。(a)は単純に偏差電圧に比例した平均化された電圧 V_{A1} を算出し、電動機の内部抵抗とインダクタンスによる一次遅れで平均化された電流 I_{A1} を求めている。

表4は、図8(b)のブロック線図をMISS言語によって表わしたプログラムである。ここで、MODINT(IC, A, B, X)はA, Bの値によって計算をホールド、リセットする積分関数である。PROCからENDPRまでは、これを一つのブロックとする宣言であり、この部分以外の一行分に相当する。

図9は、実験モデルの回流水そう中1.5m/sの流速において、急速逆転を行った時の実測値とシミュレーションの比較を行ったものであり、(1)はチョップ駆動原動機回転数 N_1 、(2)はチョップ電動機電機子電流 I_{A1} を示す。aは実測値、bはブロック線図(a)のモデルでチョップを略して連続平均電圧を電動機にかけている場合、そしてcは、ブロック線図(b)のモデルでチョップを考慮したものである。電機子電流波形のaとcは、図7の電流波形を見やすくするため、一次のCR回路によるLPFを通した波形を示している。aとcの応答の遅れは、

表4 MISS言語によるチョップ電動機のプログラム

1	PROGRAM CHOPPER
2	PARAM V_{OP} , T_1 , V_S , E_{V1} , V_{B1} , K_{OP}
3	PARAM K_{R1} , T_{R1} , I_{C2} , K_{RD1} , T_{RD1} , I_{CD1}
4	; PULSE GENERATOR
5	$T_2 = K_{OP} * T_1 * V_{OP} / V_S$
6	$I_P = \text{IMPULS}(0, T_1)$
7	$P_{LV} = \text{PULS}(T_2, I_P)$
8	$V_{A1} = V_S * P_{LV}$
9	; I_{A1} -CHOPPER CONTROL
10	$V_{14} = V_{A1} - E_{V1} - V_{B1}$
11	$I_{A10} = (K_{R1} * V_{14} - I_{A11}) / T_{R1}$
12	$I_{A11} = \text{MODINT}(I_{C2}, X_1, 1., I_{A10})$
13	$I_{AD0} = (K_{RD1} * V_{14} - I_{AD1}) / T_{RD1}$
14	$I_{AD1} = \text{MODINT}(I_{CD1}, X_2, X_3, I_{AD0})$
15	$I_{A1} = I_{A11} * X_1 + I_{AD1} * X_2$
16	PROC ONOFF($X_1, X_2, X_3 = I_{A11}, I_{AD1}, V_{A1}$)
17	IF $V_{A1} > 0.$ 10
18	$X_1 = 0.$
19	IF $I_{AD1} > 0.$ 20
20	$X_2 = 0.$
21	$X_3 = 0.$
22	JUMP 30
23	20 $X_2 = 1.$
24	JUMP 40
25	10 $X_1 = 1.$
26	$X_2 = 0.$
27	40 $X_3 = 1.$
28	30 $I_{C2} = I_{AD1} * X_3$
29	$I_{CD1} = I_{A11}$
30	ENDPR
31	END

11秒当たりまでチョップ電流が断続しているために生じたもので、過給機付ディーゼル機関の過渡特性のようにむだ時間要素をもっている。連続系として解析したbは応答が早く、回転数の変化もあまり見られないが、チョップ動作を考慮したcは、実測値aとほぼ一致してい

(1) チョップ電動機の回転数

(2) チョップ電動機電流

図9 急速逆転時の実測値と計算値

る。なお、急速逆転操作は、時点0.5秒で正転停止、時点4.7秒で逆転投入する。

シミュレーションするに当り、積分時間間隔 Δt はチョップ周期の 2^{-6} 倍、 $\Delta t \approx 4 \times 10^{-5}$ (sec) とした。

4. 推進系の応答

実験機は信頼性の面から交流発電機に三相電流回路を付して直流電源とした。推進電動機は定励磁とし、プロペラの回転数制御は電機子制御すなわち発電機整流出力電圧制御として行っている。推進電動機始動時などの過電流、軸トルクの制限のために、電流制限回路を発電機の自動電圧調整器(AVR)中に組み込んである。従って、電動機の応答は、発電機の応答に左右され、AVR系についても詳細なブロック線図を作成した。プロペラ特性については、流速一定時のロビンソンカーブを実験的に求め、表5のように任意関数発生器で12点の折線近似を行っている。

4.1 電流制御 図10は交流発電機のAVR中のPI制御部分である。入力1は設定電圧 V_{C2} 、2は整流出力電圧フィードバック、3は電機子電流フィードバックである。電機子電流は、直流変流器によって電流を電圧に変換して帰還され、これがツェナー電圧を超過するとオペアンプが急速に飽和して、発電機界磁の混合ブリッジサイリスタ制御の位相をしばって発電機電圧を下げ、過電流抑制を行っている。図4のブロック線図では、過電流抑制部分は左上GENの上半分にある、不感帯プロ

表5 ロビンソンカーブ(流速1.5m/sec)

指定点	プロペラ角速度	プロペラトルク
	W_p (rad/sec)	T_p (kg·m)
1	-43	-0.407
2	-33	-0.333
3	-22	-0.26
4	0	-0.135
5	3.5	-0.13
6	5.0	-0.14
7	7.5	-0.145
8	11	-0.14
9	22	-0.065
10	32	0.015
11	43	0.16
12	54	0.265

図10 電圧制御ブロック図

ックに相当し、オペアンプが線形動作をするとき、飽和したときの方程式は不感帯の出力 V_{DE} によって切り換えられる。

図11は推進電動機過電流抑制を考慮したときの各部波形である。(1)は推進電動機電機子電流 I_{A2} 、(2)はプロペラ軸回転数に相当する電動機回転数 N_2 、(3)はプロペラ軸トルク T_Q であって、各波形において、aは電流制限なしの場合、bは実験機の回路定数を用いた場合、cは精密な電流制限回路を用いたと仮定した場合の計算結果である。電流制限をかけた方が、定電圧制御回路の動的動作域が小さくなり、早い応答を示している。また、軸トルクの動揺はcの場合が3者のうちでもっとも少なくなっている。

4.2 発電機界磁時定数の影響 発電機界磁時定数は系の電氣的時定数のうちで最大であり、速応性に与える影響が大きいと考えられる。図12は、図11、bと同じ条件下で、界磁時定数を実験機の0.5, 1, 4倍とした場合の推進電動機の電機子電流波形である。時定数越大き程、振動振幅が大きき周期が長くなる傾向にあるが、速応性自体への影響は少ない。これはAVR系のゲインが高く、専ら制御系の特性によって応答が決められているためである。

4.3 AVRの積分ゲインの影響 電気推進では、圧延機のような速応性は要求されず、推進電動機およびプロペラ軸系の機械的強度を考慮して制御することが多い。従って、速応性を中心にした従来のPI制御系に対して、過渡トルクの面からかなり遅い応答が適当と考えられる。図13は、図11、bと同じ条件下で、発電機の

図 11 推進電動機過電流抑制時の各部波形

図 13 発電機積分ゲインの各部への影響

図 12 発電機界磁時定数の変化による電動機電流

5. あとがき

交流直流電気推進方式の小形実験装置について、詳細なブロック線図を作成し、MISS言語を使用するデジタル化アナログシミュレータによって、系の精密な解析を行った。前報のシミュレーションでは、原動機としてのチョップモータの動特性を連続系としたため、原動機速度応答に誤差がみられたが、チョップのオンオフによる電動機の電機子電流波形を精密に算出することにより、充分満足な解が得られる様になり、原動機からプロペラ回転数に至るパワーフローおよび制御諸量が正確にシミュレーションできるようになった。

現在、原動機部分をディーゼル機関のブロックに変更し、電気推進を採用したモデル船について、船体運動系を含めたシミュレーションを行っており、今後、報告したい。なお、本シミュレータは昭和53年度特別設備費によって本学に設置されたものである。

おわりに当って、種々御協力頂いた三井造船玉野制御技術センターの方々に謝意を表します。

積分ゲインを変えたときの計算結果である。(1)は電動機電機子電流、(2)は発電機出力電圧、(3)は推進電動機回転数、(4)はプロペラシャフトトルクである。各波形で、a, b, cは実機の設定積分ゲイン値のそれぞれ0.5, 1, 1.5倍にとった場合を示す。シャフトトルクは積分ゲインが小さい程変動が少なくなっており、また、電機子電流が抑えられて、過電流制限回路を設けずにトルク制限ができることが示されている。

文 献

- 1) 武田ほか, 交流-直流電気推進システムのシミュレーション(I), 舶機学会第 25 回春季学術講演会予稿, (昭 54-5).
 - 2) 三木ほか, 発電機用ディーゼル機関の負荷急変時のシミュレーション, 舶機誌, 13-11 (昭 53-11), 827.
 - 3) 青木ほか, 複合マイクロプロセッサ方式による会話形リアルタイムシミュレーションシステム, 自動制御協会昭 54 年度講演会予稿 I-2, A-79-09-1 (昭 54-9).
 - 4) 安藤, 卯本, チョップ回路によって制御される直流他励電動機の動特性, 電気学会回転機研究会資料, RM-77 (昭 52-2).
-