大容量負荷をもつディーゼル発電 システムの動特性*

—断続始動の影響—

松下 邦幸**・ 片木 威***
坂本 研也*** 橋本 武***

Dynamic Characteristics of Diesel Generating System with Large Capacity Load
—The Effect of "Chopping-Start" —

By Kuniyuki Matsushita, Takeshi Katagi, Kenya Sakamoto, Takeshi Hashimoto

This paper presents an approach for the dynamic stability analysis of marine power system. In most cases the marine auxiliaries are driven by electric motor. Recently diesel engines for generators have become compact by applying a high-speed charging system. Momentary speed variations of the power system has been increased because small GD² of the engine and generator rotor.

It is necessary to apply soft starting method on marine auxiliaries.

When motor is started some proficient crew are used to utilize starter switch turned on and off periodically by their experimental knowledge for stabilize electric power system.

We denominate this technique as "Chopping-Start" that a method of electric motor soft starting techniques. It is presented the simplified simulation model of the turbo charged diesel engine driven generator and large capacity induction motor with load.

The analytical model is shown in the form of block diagram and estimated by digital computer using CSMP language.

It's found that the effect of "Chopping-Start" on a performance simulation model system has been studied speed and voltage regulation are smaller than use the method of line start on electric motor.

1. ま え が き

一般に船用大容量補機の多くは誘導電動機により駆動されている。そしてその誘導電動機の発停が発電システムの電源変動に大きな影響を与えている。

大容量の負荷をもつ誘導電動機を始動すると、高過給ディーゼル機関の過給機回転数の追従が遅れて燃料量に対して一時的に燃焼用空気量が不足して煙突から黒煙を発生し、場合によっては優先遮断や選択遮断などの保護継電器の作動も追いつかずに、電動機の始動が直接の原因となって電源周波数異常低下などによって、ブラック・アウトに至ることもある。始動時における電動機負荷の状態やその時に発電機が負っている定常負荷の大きさによっては、過大な瞬時電圧降下や周波数低下を生じることがある。

就航稼働中の船舶においては、ディーゼル機関の運転

条件（整備不良や調整不良、各部摩耗、汚損等）によって発生軸出力は低下する傾向にある。このことは、瞬時に過負荷に陥る可能性があることを意味している。

船級規則¹⁾には発電機用原動機の調速特性は

「①発電機の定格負荷を急激に遮断したとき、瞬時速度変動が定格速度の10〔%〕以下であること。

②発電機の定格負荷の50〔%〕を急激に加え、速度が安定した後、残りの50〔%〕をさらに急激に加えたとき、瞬時速度変動が定格速度の10〔%〕以下であること。また、最終安定速度の1〔%〕以内に回復するまでの時間は5秒を超えないこと。

③無負荷から定格負荷までのすべての負荷において、整定速度変動は、定格速度の5〔%〕以下であること。などが規定されている。また航洋船にては、規定するすべての電気設備に電力を供給するために十分な容量の主電源装置が設けられ、この主電源装置は、少なくとも2組の発電装置より構成されたものでなければならない。そのうえ、この発電装置の容量は、いずれか1組の発電装置が停止した場合においても、船舶の正常な稼働状態における推進と安全を維持するために必要な電気設備及び本会が必要と認めるその他の電気設備へ給電できるもの

* 原稿受付 平成1年1月30日

昭和63年秋期学術講演（昭和63年11月18日）

** 正会員 弓削商船高等専門学校（愛媛県越智郡弓削町下弓削1000）

*** 正会員 神戸商船大学（神戸市東灘区深江南町5-1-1）

でなければならない。」となっている。

通常の船舶では発電機1台でまかなえる負荷を港内、狭水道通過時など安全上2台運転とし、1台故障時の対応策としていることが多い。

発電機1台毎の容量を出来るだけ小さくすることは、イニシャルコスト・ランニングコストを下げるばかりでなく発電機原動機ディーゼルの軽負荷低効率運転を避けることができ、これによるメンテナンスに関わるコストダウンが期待できるが、電源変動の観点からは不利になる。

比較的大容量のかご形誘導電動機の始動法は、従来よりスターデルタ始動、始動補償器始動リアクトル始動などがある。また回転子を特殊かご形構造とした二重かご形・深みぞ形誘導電動機を採用する場合もある。いずれも始動電流をある程度抑さえ、電源系統に与えるショックを和らげる効果をもっている。通常の船舶に搭載されている電動補機において、比較的大形のかご形誘導電動機（空気圧縮機、バウ・スラスト等）を始動するには、装置が簡単なスターデルタ始動法がよく用いられている。

図1は弓削商船高等専門学校の練習船、弓削丸の発電機負荷投入試験の実測データを示す。発電機容量は100〔kVA〕加えた負荷は出力45〔kW〕のバウ・スラストと10〔kW〕の暖房用ヒータの計55〔kW〕、この時の原動機は速度変動は原動機ディーゼル機関の燃料噴射弁が1本不調のため、瞬時に14.5〔%〕ダウンしている。ブラック・アウトには至らなかったものの、蛍光灯はちらつき、エンジンモニタや各計測装置は、電源異常低下の警報を発した。

図1 発電機負荷投入試験

最近の傾向として、発電機ディーゼル機関は省エネルギー対策をするあまり軽量コンパクトな高速、高過給機関となり、その慣性はますます小さくなって来ており、一方発電機はメンテナンス・フリーという利点から、従来の自励複巻方式からブラシなし発電機に代わってしまっ

た。これは、自励直接複巻方式よりも応答が遅れる傾向にあり、電圧回復になお問題を残している。さらに駆動する負荷については一機あたり大形化の傾向にあり、しかも、装置が簡単なじか入れ始動とすることが多い。これらのことは、すべて電源変動にとっては不利な条件となっている。

電源変動を極力小さく抑さえる実用的な始動方法に、実際の船舶では乗組員が経験的に始動の初期に電動機供給電源を断続させながら行う方法がある。この始動方法を著者らは「断続始動法」と名付ける。断続始動法と言うのは始動の初期にSTARTERの始動-停止ボタンを手動にて電圧や原動機回転数を見ながら操作して、瞬時供給電圧を数回遮断して始動する単純な方法である。断続始動において遮断している間は原動機にかかる負荷が軽くなって回転速度が回復する。またこの始動法は、電源供給期間と停止期間の比率を変えると、等価的には印加電圧を加減することになり、このことによって、始動時のラッシュ電流を抑さえ、もって電源系統に与えるショックを和らげることとなる。ディーゼル発電装置や発電機・誘導電動機個々の動特性についての詳細な研究^{2)~6)}は、すでに多くあるが総合的システムとして「原動機+発電機+誘導電動機+負荷」をすべて連結し、過渡時に注目した解析はあまり見当たらない。

著者らは、図2のような発電システムの動特性を考え、負荷として発電機容量の40〔%〕程度である誘導電動機を始動する場合のシミュレーションをおこなった。

その結果、本シミュレーションの範囲では「断続始動法」の有効性が確認されたので報告する。シミュレーションはMCSP言語⁷⁾を使用した。

図2 解析システムの構成

2. 解析システム

表1は本シミュレーションのモデル各系の主な定格値（神戸商船大学練習船、深江丸）を示す。また図2に解析システムの構成を示す。ガバナおよび過給機をもつ高速高過給ディーゼル機関系、AVR装置をもつ交流発電機系、およびバウ・スラスト負荷をもつ誘導電動機系と、断続スイッチSWとに分けられる。表2は時定数を示す。図3はモデル系のブロック線図である。ガバナは、機械油圧式補償ガバナの恒速形を模擬し、トルク制御用にラックリミッタを設けた。機関系では、燃料が燃焼し、ピストンおよびクランクを介してトルクを発生するまでの

表1 系の定格値

変 量	記 号	単 位 量
<機 関 系>		
機 関 回 転 数	N E	1200 [r p m]
出 力	B H P	300 [P S]
ト ル ク	T Q	179 [k g f · m]
燃 料 流 量	B E	160 [g / P S · h]
<発 電 機 系>		
出 力	P G	200 [k W]
電 圧	V T	225 [V]
電 流	I a	642 [A]
周 波 数	F ₁	60 [H z]
<電 動 機 系>		
出 力	P M	79 [k W]
バウ ス ラ ス タ の 推 力	T	1.5 [t o n f]

表2 時 定 数

時 定 数	記 号	値 (S E C)
機関燃焼遅れ	T C	0.056
慣性 (機関+発電機)	T N E	12.0
過給機伝達遅れ	T B	0.60
過給機給気管遅れ	T P S	0.30
A V R 界磁遅れ	T F F	0.07
慣性 (電動機+負荷)	T G I M	12.0

遅れを1次遅れ $1/(1+T_C \cdot S)$ で表わした。過給機回転数変化による制動馬力伝達の遅れを $1/(1+T_B \cdot S)$ で表し、また、給気管内の遅れを $1/(1+T_{PS} \cdot S)$ で表現した。空気流量 P_{os} とガバナからの燃料流量 P_o の選択は空燃比1まで完全に燃料が燃焼するものとして、いずれか少ない方を選択するように切り替え論理を設けた。慣性系は回転系の損失トルクを機関側に含め

ているので、単に積分 $1/T_{NE} \cdot S$ とした。 T_{NE} は機関と発電機を含めた慣性に相当し、定格トルクで加速した場合に速度0から定格速度に達するまでの所要時間である。

発電機の界磁電流に比例した内部誘導電圧 V_o は端子電圧 V_t となって誘導電動機に印加されるとともに A V R にフィード・バックされ界磁電流 I_F が制御される。

発電機+誘導電動機系は、誘導電動機の T 形等価回路の1次側に発電機の過渡リアクタンス X_d' を直列にした図4に示すモデルを用いた。発電機の誘導起電力 V_o を1次側入力とし、内部リアクタンスは、始動から回転数整定までの過渡現象を取り扱っている。過渡リアクタンスを用いた。そしてこのモデルを STEINMETZ 法⁸⁾ (1)~(4)式により各特性値を計算している。

図3 ブロック線図

図4 発電機+誘導電動機のT形等価回路

$$I_1 = V_o (d_1 - j d_2) \quad (1)$$

$$V_T = V_o - j X_d \cdot I_1 \quad (2)$$

$$P_1 = m_1 V_T \frac{b_1 C_1 + b_2 C_2}{C_1^2 + C_2^2} \quad (3)$$

$$Q_{DL} = \frac{m_1 a_1 P \cdot V_T}{4 \pi f 9.8 (C_1^2 + C_2^2)} \quad (4)$$

但し, $a_1, b_1, b_2, C_1, C_2, d_1, d_2$ は機器定数及びすべり s より与えられる. m_1, P は, 相数, 極数, f は周波数 ($f = N_E \cdot P / 120$)

誘導電動機の始動及び停止はスイッチ SW の ON - OFF で表しているが, 1 次抵抗 r_1 の大小によって模擬している. (r_1 または $r_1 \times 10^3$)

誘導電動機に接続する負荷はバウ・スラストを想定し, 慣性系及び所要トルク Q_L で表現した. Q_L は一定損失トルクと電動機回転数 ω_m の 2 乗にはほぼ比例する負荷トルクで表している. ($Q_L \propto \omega_m^2$)

3. 解析結果

解析は, 発電システムの断続始動による電源変動特性を中心に行い, 次いで原動機ディーゼル機関, 及び誘導電動機の各性能に与える影響について検討した.

3.1 断続始動が端子電圧 V_T 及び回転数 N_E に及ぼす影響

3.1.1 じか入れ始動の場合 図 5(a) は, 誘導電動機を, じか入れ始動した時の始動特性を表現している. パラメータとして電動機軸発生トルク Q_{DL} , 負荷トルク Q_L , 機関回転数 N_E および端子電圧 V_T の応答を示した.

同図を用いて始動の様子を簡単に説明する. 発電機始動後 1 秒で誘導電動機が始動する. 機関回転数 N_E は誘導電動機始動直後から徐々に低下し, 2 秒を過ぎたところで最低回転となる. 端子電圧 V_T は始動後発電機の過渡リアクタンスによる瞬時電圧降下の後少し回復しているが, 回転数 N_E の大幅な低下の影響を受けて低下している. 始動時間は 2.5 秒, 速度変動率は 40(%) , 電圧変動率 10(%) , 回転数の整定時間は約 4 秒である. このモデル系では, 速度変動が大きすぎるために始動後 2 秒くらいで優先遮断や選択遮断が作動し始めているか, それでも追いつかずに電源が周波数異常低下によってブ

図 5(a) 始動特性, じか入れ始動

図 5(b) 始動特性, 断続始動(1)

図 5(c) 始動特性, 断続始動(2)

ラックアウトになっていると考えられる。

3.1.2 断続始動(1) の場合 そこで図5(b)は、回転数 N_E を見ながら、手でスイッチSWを操作して乗組員が経験的に断続始動を行った状態を模擬してある。この例では、断続スイッチで 0.3秒2回、0.1秒1回の計3回断続させた。この時の回転数 N_E を(a)のそれと比較すると、速度変動率は最大21〔%〕、また、電圧変動率は6〔%〕と改善された。このモデルでの始動時間は3.5秒とやや長くなったが、回転数の整定時間は(a)とほぼ同じ時間(4秒)で安定状態になっていることが判る。スイッチがOFFとなっている間は回転数 N_E は回復するが、パワースラストは電動機軸発生トルク Q_{DL} が0となっても慣性力のみによって回転している。また、端子電圧 V_T も回転数 N_E と全く同じ傾向である。

3.1.3 断続始動(2) の場合 図5(c)は、さらにこの断続始動による効果を見るためにスイッチSWによる

断続操作を、回転数 N_E を検出しながら自動的に設定したものである。すなわち回転数 N_E 低下が15〔%〕以内になるように断続スイッチングをした例である。この結果回転数 N_E 、端子電圧 V_T ともに変動幅がさらに改善され、両曲線は滑らかになった。

3.2 T_{NE} の大小が電源変動に及ぼす影響 図6は、じか入れ始動の場合の T_{NE} が電源変動に及ぼす影響を検討したものである。この図から慣性が小さくなるほど速度変動が大きくなっていることが判る。発生出力の割合に機関が軽量化されている昨今ではフライホイールの適正な重量の選定が重要と思われる。

3.3 断続始動が機関性能に及ぼす影響 図7(a)は、じか入れ始動、同図(b)は断続始動(1)、同図(c)は断続始動(2)の時の機関系に及ぼす影響をみたものである。

P_o 、 P_{os} 、 P_{oe} はそれぞれ燃料量、過給機空気量、実燃料量である。斜線部分は高速高過給機関の過給機回転数の追従おくれによる不完全燃焼領域であるが、断続始

図6 原動機+発電機の慣性 T_{NE} が電源変動に及ぼす影響

図7(a) じか入れ始動の場合

図7(b) 断続始動(1)の場合

(c) 断続始動(2)の場合

図 7 断続始動が機関性能に及ぼす影響

動の効果によって、この領域は一部遮断されて、ほぼ完全燃焼に近づいている。同図(b), (c)

近年は発電機原動機に高過給ディーゼル機関が採用されている。これは、ガバナからの燃料量の急激な変化(急に負荷をかけた時)に対して高速回転している過給機の追従が遅れて、瞬時に空気量不足を生じ、燃焼不良

となる。このことは図から言うと、 P_{Os} の立ち上がりが P_O に比べて遅れる傾向にある。このことが不完全燃焼領域を大きくし、瞬時速度変動を大きくしている要因である。

3.4 断続始動が電動機に及ぼす影響 図8は、断続始動が電動機の温度上昇に及ぼす影響について調べたものである。なお、モデルシステムにおける計算を簡単にするため、二次銅損のみの比較検討とした。 I_2^2 は二次電流の二乗曲線である。これより二次巻線の銅損 W_{c2} は

$$W_{c2} = 3 I_2^2 \cdot R_2 \text{ (W)} \tag{5}$$

また、 Q_h は、 I_2^2 曲線と時間軸との間の面積つまり、発生熱量[J]である。

$$Q_h = R_2 \cdot I_2^2 \cdot dt \text{ (J)} \tag{6}$$

モデルシステムにおける $t = 1 \sim 4$ 秒間の Q_h の計算

1. じか入れ始動	1955.57	(W)
2. 断続始動(1)	2546.04	(W)
3. 断続始動(2)	2630.47	(W)

断続始動を行うと、じか入れ始動に比べて発生熱量 W_h [W]は上昇する。

3.5 まとめ ここでいう断続始動とは、比較的大容量の誘導電動機が負荷をもったままで始動する時に行い、もちろん電源変動幅が小さい場合は断続始動してもその意味はない。

図9は上から①じか入れ始動、②断続始動(1)(手動スイッチング)、③断続始動(2)(自動スイッチング)の各

図 8(a) じか入れ始動の場合

図 8(b) 断続始動(1)の場合

(c) 断続始動(2)の場合

図8 断続始動が電動機に及ぼす影響

図9 各始動法の違いによる端子電圧及び機関回転数の比較

始動法の違いによる N_E および V_T の比較図である。これらの図から次のようなことが判った。

- ①じか入れ始動では電源がブラック・アウトに至るような大容量の負荷をもつ誘導電動機でもタイミング良く断続始動を行えば発電システムの変動を最小限にすることが出来る。
- ②断続きざみは、短いほど、また断続回数は多いほど電動機はゆっくりスタートする。
- ③手動で行う断続始動は、電磁接触器の作動に要する時間的な遅れが存在するので、その断続きざみに限界がある。
- ④一般に始動時間は断続時間に応じて長くなる。

4. あとがき

今回ここで報告した「断続始動法」というのは従来より船員の間で安全上必要に迫られた時、直感によって行われ、継承されていた経験の一手法であって、断続始動器という始動器が存在するわけではない。この始動方法の応用の一例は、通常航海中に大形電動補機（例えば、ウインチ、クレーンなど）を使用して作業を行う場合、始動時の問題のみで発電機2台並列運転としている場合があるが、発電機単独運転でも、発電機原動機の回転数（または周波数）を監視しながら電動機を始動し、適時断続操作すれば系は安定し、無駄な並列運転を避けることが出来るというものである。

著者らはこのことに着目し、シミュレーションを行ってみた。本シミュレーションは、断続始動の効果を推定するには充分機能しており、発電機原動機に与える影響（不完全燃焼改善）、また電源系統に与える影響（端子電圧、周波数変動改善等）では、断続始動法によってかなりの好結果を得た。

現在一般商船で用いられているスターデルタ始動器や抵抗始動器などで始動している電動機に次に挙げのような「断続始動器」と置き替えることが出来れば、始動器の必要スペースの減少のみならず、インシヤル・コストを低くすることが期待出来る利点がある。

断続始動器として考えられる方式は大別して次の2つである。

①電磁接触器そのものに機械的に断続させるようにしたシーケンシャル・スイッチ

②発電機の端子電圧、周波数または原動機の回転数などを検出しフィードバックさせて断続操作をするもの。

今後は断続始動の実験装置（簡易断続始動器）を試作して実験の上、実証する予定である。

文 献

- 1) 日本海事協会, 鋼船規則 H 2.4.2 (調速機) 及び H 3.2.1 (主電源装置)
- 2) 三木他, 発電機用ディーゼル機関の負荷変動時のシミュレーション, 内燃機関, 17-9, 1978. 8.
- 3) 松本他, 船用過給ディーゼル発電装置の動特性, 内燃機関, 19-3, 1980. 3.
- 4) 武田他, 過給機付ディーゼル発電装置のシミュレーション, 船機誌, 16-4 (昭56-4).
- 5) 坂本他, 交流-直流電気推進システムのシミュレーション (III), 船機誌, 17-11 (昭57-11).
- 6) 坂本他, 交流-直流電気推進システムのシミュレーション (IV), 船機誌, 18-1 (昭58-1).
- 7) 松坂知行著, 動的システムとシミュレーション, 工学図書, (昭61-4).
- 8) 中島他, 標準電気機器講座・誘導機, 東京電機大学出版局, (昭42).

〔質 疑 応 答〕

質問者 西芝電機 谷口 元

〔質問〕

DG^2 の大きい負荷の断続始動の場合、始動時、電動機の熱耐量も考慮に入れる必要はありませんか。

〔回答〕

おっしゃる通り、 DG^2 の大きい負荷の断続始動の場合、電動機の熱耐量を考慮に入れる必要があります。

本文の中で「3.4 断続始動が電動機に及ぼす影響」でも述べていますように本シミュレーションによって二次巻線導体内のオーム損 ($Q_h = I_2^2 R_2$) を算出することは可能です。

本シミュレーションモデルでの発熱量をじか入れ始動と断続始動にて比較しましたところ、

断続始動 (1) 30.2 [%] 増加

断続始動 (2) 34.5 [%] 増加

となりました。

一般に、船用電動補機の多くは冷態始動となりますので、巻線の温度上昇は十分規定以内に納まると考えています。