インバータレスFPP電気推進システムの開発*

- 基本システム

章ふえいふえい**
鈴木 龍 詩***伊 藤 雅 則**
細 川 孔 太***佐 藤 寛****
三 田 重 雄***
生 川 杏 子**Development of Inverter-less FPP Electric Propulsion System
- Basic System

Feifei Zhang, Masanori Ito, Hiroshi Sato, Ryuji Suzuki, Kota Hosokawa, Shigeo Mita, Kyoko Narukawa

Electric propulsion is thought to be a more effective propulsion system and with government support the number of ships applying this type of system has increased in past years. However the conventional system requires inverter to change propeller revolution, thus making it very complex and expensive. This is because the system is constructed with basic concept that generator engine should be operated with constant revolution.

The authors found that the output frequency and generator voltage are proportional to the generator engine revolution, which is the same phenomena as that of the inverter. With this idea, the authors constructed the “Inverter-less FPP electric propulsion system” and confirmed the effects with simple experiments. Furthermore the system was applied to the model ship “Shioji-Maru”(training ship of TUMSAT). Static performance was confirmed with water tank test.

1. はじめに

昨今、船舶、特に内航船の分野において、推進システムとして電気推進を用いるものが増加している。その最も大きな要因は、タンカーについて、環境に配慮する安全運航の観点から、外航船と同様に二重底が義務づけられることである。これは、載貨量の減少すなわち運送効率の低下となるため、機関室配置の自由度の大きい電気推進により機関室を小さくし、載貨量を確保することをねらいとしている。しかし、そのためのシステムとして、プロペラ回転数変更のため非常に高価なインバータを使用するか、やはり高価な可変ピッチプロペラ(CPP)を使用することとなり、それらによるコストアップが電気推進の適用を阻害していた。

本研究は、発電機出力をプロペラ駆動用電動機に直接接続し、発電機駆動用エンジンの回転数を変更することにより電動機の回転数を変えることが出来るという原理に着目し、インバータを用いない固定ピッチプロペラ(FPP)による電気推進システムの確立を目指すものである。本報では基本概念とその実験による検証について紹介する。

2. 電気推進方式

2. 1 既存システム 既存電気推進システムの典型として、固定ピッチプロペラによるものを図1aに、可変ピッチプロペラによるものを図1bに示す。いずれも発電機は一定回転数で運転され、一定周波数一定電圧の電力を電動機に供給する。前者は、船速をプロペラ回転数により変えるため、インバータを用いて、回転数設定値に合わせるよう、電源周波数を変化させる。また、後者は、船速をプロペラピッチにより変えることができるため、電動機回転数は一定で良く、インバータは不要となる。しかし、両者とも付属設備として、過剰電力を消費する抵抗器や推進用電動機用変圧器・電力分配用配電盤を装備しなければならない。

図1(a) FPP式電気推進システム (b) CPP式電気推進システム

*原稿受付 平成23年8月30日。

**正会員 東京海洋大学(東京都江東区越中島2-1-6)。

*** 東京海洋大学(同上)

**** 第一電気株(神奈川県藤沢市大鋸町)

2. 2 新システム 一方、新システムは、インバータが電源周波数と電圧を操作して電動機の回転数を変えることに注目し、発電機の回転数を変えることにより発電周波数と電圧が変わることを利用すればインバータと同じ効果が得られるという考えを原点とする。これは、従来、一定回転数に制御していた発電機用エンジンの回転数をエンジン推進と同様に動かすことで、それに対応したプロペラ回転数が得られることとなる。

したがって、新システムでは、一例として、図2に示すように、航行時には、主発電機の電力を推進用電動機に注入し、照明やポンプ類運転用には小容量補助発電装置を使用し、停泊時には主発電機によりクレーンなどの大容量負荷を賄う構成が考えられる。

図2 新システム構成例

3. 基本特性

3. 1 予備実験システム この原理を確認するため、本研究では、図3、図4に示す実験装置を用いて発電機の回転数とこれに直結された電動機の回転数の対応を調べた。すなわち、可変速発電機エンジンの代わりにインバータ駆動の3相誘導電動機を用い、これにより3相同期発電機を回転させた。発電電力は直接負荷である3相誘導電動機と同期電動機に給電し、発電機回転数を変化させたときの負荷電動機の回転数を非接触回転計により調べた。

図3 予備実験システム

図4 予備実験システム構成

表1 予備実験システム主要目

発電機駆動用誘導電動機	3.7kw×1200rpm
同用インバータ	5.5kw×9.2kVA×24A
同期発電機(PM型)	3kw×1500rpm
負荷用誘導電動機	1.5kw×1420rpm
負荷用同期電動機(PM型)	3kw×3000rpm

3. 2 実験結果 図5は、発電機の回転数を停止状態から定格回転数まで段階的に変化させたときの発電電圧と周波数である。いずれもほぼ線形的に変化しており、出力電圧と周波数を電源周波数に比例した回転数の得られるインバータ出力と同等の特性の得られることが予想される。この結果を踏まえ、実際に電動機を回転させた結果が図6である。

発電機負荷として、誘導電動機と同期電動機のそれぞれについて、上記と同用に、発電機回転数を段階的に上げて行き、再び停止状態に戻した。誘導機・同期機のいずれも、ヒステリシスのない、ほぼ線形の良好な対応関係を示している。誘導機と同期機の回転数の相違は、極数の違いによるものである。なお、この実験は、負荷用電動機が無負荷の状態で行われたもので、電気推進用としての可能性を見極めるにはプロペラ負荷を与える条件での実験が必要となる。

図5 発電機回転数と発電電圧および周波数

図6 発電機回転数と電動機回転数の対応

4. 自航実験

4. 1 実験システム 実験は、図7に概要を示す本学の曳航水槽(L:50m, B:10m, D:2m)にて実施した。実験船としては、本学の練習船「汐路丸」の1/17模型を用い、これに基礎実験で用いたプロペラ駆動電動機、自航動力計、6自由度運動計測装置を搭載し、喫水を本船バラスト条件に合わせた。実験船の要目について、表2および表3に示すとともに、運動計測装置による電車と実験船の取り付け状況を図8に示す。

発電装置は予備実験のシステムを走行電車上に置き、模型船に電力を供給し実船とフルード数を合わせた条件で航走、定常状態におけるプロペラ回転数、船速、プロペラ推力、プロペラトルク、発電機回転数、発電電圧・発電周波数・消費電流の関係を調べた。

特に、船速については、発電機から供給された電力によって自航している模型船の動きを運動計測装置でとらえ、前後揺れが無くなるよう電車の速度を同調させることで、電車の速度計により計測している。

これらの実験システムの系統を図9に示す。

図7 実験用曳航水槽

図8 汐路丸模型による自航試験

表2 汐路丸模型関連要目

	本船	模型船
垂線間長さ(m)	46.0	2.700
幅(m)	10.0	0.587
深さ(m)	6.1	0.358
船央喫水(m)	3.0	0.176
排水量(t)	785	0.1549
浸水面積(m ²)	530.1	1.8262
重心船央距離(m)	0.283	0.0166
方形係数	0.555	
縮尺率	1/17.04	

表3 模型船プロペラ関連要目

	本船	模型船
型式	CPP	FPP
直径(m)	2.2	0.1291
展開面積比		0.5720
ピッチ比		1.1120
ボス比		0.264
翼断面形状		MAU
翼数		4
回転方向		右

図9 実験システム系統図

4. 2 実験および実験結果 実験では、前進と後進の状態、発電機回転数を、プロペラ回転数 10rps を上限として上げ下げし、定常状態における各状態量を計測した。

実験結果として、エンジン回転数に相当する発電機回転数を横軸としてプロペラ回転数との関係を図 10 に、発電周波数との関係を図 11 に、発電電圧との関係を図 12 に、船速との関係を図 13 に、スラストとの関係を図 14 に、プロペラトルクとの関係を図 15 に、給電電力との関係を図 16 に示す。

図 10 発電機回転数とプロペラ回転数

図 11 発電機回転数と発電機出力周波数

図 12 発電機回転数と発電機出力電圧

図 13 発電機回転数と船速

図 14 発電機回転数とスラスト

図 15 発電機回転数とプロペラトルク

図 16 発電機回転数と給電電力

これらの結果について、図 10 より、有負荷状態でも発電機回転数によりプロペラ回転数が線形的に操作できること、それは図 11、図 12 より、発電周波数および発電電圧が発電機回転数に比例することから保証されることが示された。また、図 10 および図 13 から得られるプロペラ回転数と船速の関係を用いれば、実船定格条件相当の結果すなわち、10rps での船速が 1.2 m/s であることより、フルード数を求めると約 0.23 となり、実船の定格である 170rpm (2.8rps) での船速 11kt (5.6m/s) について求めたフルード数が約 0.29 であることから、この実験が推進性能の観点から見て、実船の運転に拡張しうるものであると考える。一方、動力特性については、上記船速を得るモータ出力と実船の出力の関係から議論する。図 16 に示す電力は、三相交流の相間電圧と線電流の積として求めたもので、実電力はその $\sqrt{3}$ 倍となる。発生動力についての実船との相似性に関して、以下のような観点から結果の拡張性が示されたものとする。すなわち、実験におけるプロペラ回転数・船速・推進動力およびエンジン（発電機）出力の関係は、定格条件において、前進定数(J)が、模型・実船とも約 1.0 と等しくなり、プロペラ単独性能曲線より求まるトルク係数(K_Q)および、スラスト係数(K_T)も共に等しくなる。この結果、模型のプロペラトルク(Q_{pm})は、海水密度を ρ 、プロペラ回転数を

n_m 、プロペラ直径を D_m として

$$Q_{pm} = \rho K_Q n_m^2 D_m^5 \quad (1)$$

で表される。

実船のプロペラトルク(Q_p)は式(1)の符号 m を外して

$$Q_p = \rho K_Q n^2 D^5 \quad (2)$$

で表され、さらに、

$$K_{Qm} = K_Q \quad (3)$$

であることから、

$$T_p / T_{pm} = (n^2 D^5) / (n_m^2 D_m^5) \quad (4)$$

となる。

動力(P)としては、それぞれの角速度 $\omega (=2\pi n)$ 、

$\omega_m (=2\pi n_m)$ を考慮して、

$$\begin{aligned} P/P_m &= (n^2 D^5 \omega) / (n_m^2 D_m^5 \omega_m) \\ &= (n^3 D^5) / (n_m^3 D_m^5) \end{aligned} \quad (5)$$

の関係が成り立つ。図 16 でほぼ定格に近い運転条件で推進用電動機の動力として 26.2W の消費があることから、式(5)より実船相当出力 P は 871KW となり、汐路丸の主機関が、最大出力 1400PS (1050KW) $\times$ 750rpm のディーゼル機関であることより、動力の観点からも、模型実験と実船との相似性が示されたものとする。なお、この動力は、図 14 のスラストと船速から求めた動力が、定格条件で 9.8W であること、また、図 15 のプロペラトルクと回転数から求めた動力が定格条件で 13.8W であることから、所定の損失を考慮すれば妥当性を持つものとする。

図 17 新システムと既存システムの比較¹⁾ (太枠線は新システムで不要となる機器)

5. 実用化への課題

模型実験により、インバータを用いない固定ピッチプロペラ用電気推進システムが定常航行において使用でき、その結果は実船まで拡張しうるものであることが示された。本章では、この結果を踏まえて、本システムの実用化のための課題について考える。

第2章において、現在実用化されているシステムの概略を示した。その具体的な機器構成および配置の標準的な例を図17に示す。

この図は、新システムでは、発電機と推進電動機を直結するため、推進用インバータが不要となるほか、変圧器や抵抗器、さらに推進電動機に給電する配電盤も不要となる可能性を持つことを示している。一方、新システムに必要となる機能として、先述のとおり、一般電力の供給装置が挙げられるが、推進電動機の正逆転切り替え機能、危急逆転停止操作に伴う推進用電動機が発電機化による発生電力の処理機能、港内航行のような推進動力が下がり、船内動力が増加する場合や、停泊時の大きな船内負荷への対応等の過渡的な運転への制御方法を含めた検討、さらに、船舶の種類による運航条件への対応等、エンジニアリング的な課題も含め具体化のための要件を解決する必要がある。これにより、新システムの経済的効果、あるいは、配置上の効果が明確となり、本システムの有用性を論じることができる。その上で、新しいシステムを含めた電気システムについて設計指針として整理する必要がある。

6. おわりに

本研究では、新しい原理に基づく電気推進システムが、推進動力として既存の設計に基づく発電及び推進システムの仕様に於いて十分成立するものであることを示した。本研究の範囲は未だその基本特性を確認した段階で、実用化のためには、航海中の一般電源確保の問題、危急逆転・停止操作のような過渡的操船時に推進用電動機がプロペラにより回され発電機となる場合への対応、発電システムの構成と運用制御の確立等多々問題が残されており、続報において順次成果を報告させていただく。これらの技術の確立により本方式が実用化された暁には、従来の電気推進システムに比べ船価の約10%の削減を可能とするばかりか、機関室容積のさらなる削減、ノイズ問題の解消、システムの信頼性の向上という非常に有用なシステムとなるものと考えている。本学ではその早期確立のため、具体化に向けた開発を加速させており、豊かな操船経験をお持ちの船社、システムの設計・建造経験をお持ちの

造船および船用機器メーカー各位のご協力をお願いするものである。

参考文献

- 1) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構資料，電気推進船ガイドンス，(平20-3)。