

ハイブリッド過給機を用いた船用電源システムの開発

Development of Power Supply System with Hybrid Turbocharger for Marine Application

須藤 尚則 SUTO Naonori ジャパンマリンユナイテッド 商船事業本部 基本設計部機関グループ 総括スタッフ
美浪 大樹 MINAMI Hiroki ジャパンマリンユナイテッド 商船事業本部 基本設計部電気グループ 主査

要旨

ハイブリッド過給機は、船用大型ディーゼルエンジンに搭載する過給機に小型の高速発電機を内蔵したものである。ジャパンマリンユナイテッド（以下、JMU）は、この過給機を用いた船用発電システムを他社と共同開発した。推進用エンジンの常用負荷時にこのシステムを利用することにより、ディーゼル発電機を運転しなくても船内で必要な電力を発電・給電できるため、燃料消費量の削減に寄与する。本報告では、開発したシステムの概要ならびに特徴を述べるとともに、JMU が特に注力したハイブリッド過給機の単独運転を可能とした施策について記述する。また、本電源システムは JMU で建造した船舶に実船搭載されており、ここで確認したシステムの健全性の検証結果について示す。

Abstract:

Hybrid turbocharger is a turbocharger with a small, high-speed generator and is installed on marine diesel engines. A power supply system with Hybrid turbocharger for marine application was developed jointly by Japan Marine United (hereafter, JMU) and other companies. Use of the power supply system while a main propulsion engine is under normal load condition enables to produce enough electric power even without running ship's diesel generator engine, and, therefore, reduces fuel usage and cost. Outline and feature of this system are discussed, and JMU's focusing points which make the generator possible to operate stand-alone as a marine generator are also described. In addition, the safety of the power supply system on this development has been also confirmed at the first vessel which the system was installed on, built at JMU.

1. はじめに

近年の地球温暖化対策を巡る動向の中、船舶の機関プラントから排出される温室効果ガス（Green house gas, 以下 GHG）の削減が国際海事機関（IMO）で議論され、規則化・強化されている¹⁾。機関プラントから排出される GHG は、主に推進用エンジン（主機関）やディーゼル発電機で使用される燃料が燃焼する際に発生する CO₂ に起因している。したがって、船舶からの GHG を削減するためには、熱効率の高い機関プラント、すなわち、燃料消費の少ない機関プラントの構築が求められる。

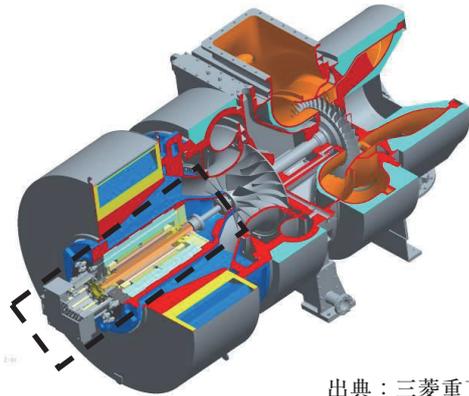
また、主に船舶で利用される燃料は、C 重油を代表とする液体化石燃料であり、これら燃料は原油価格と連動し年々高騰を続けている。船舶の運航費用の多くを占める燃料費の高騰は、運航採算を圧迫し海運業界において大きな問題となっており、燃料消費の少ない船舶の商品価値は飛躍的に高まっている。

船舶の機関プラント効率改善技術としては、主機関の排

ガスエネルギーを利用した排熱回収技術のうち、ターボ発電機と呼ばれる蒸気タービン発電が一般的であるが、比較的小型の船舶においては、十分な排熱量が得られない・スペースの限られた機関室に配置する上での制約が大きいなどの理由で適用されていなかった。

この点で、三菱重工業（株）が開発したハイブリッド過給機は、小型の発電機が推進用エンジンに搭載される過給機に内蔵されており、機関室配置に大きな変更がない点が優れていた²⁾。しかしながら、この発電機単独で電力を供給する船用電源システムは存在しなかった。一般的に船内の電力はディーゼル発電機を運転することで賄われているが、排熱回収を利用した発電機単独で船内電源を賄うことができれば、ディーゼル発電機を運転する必要がなく、燃料費の削減に寄与することができる。

本論文では、当社で建造したバラ積み運搬船を対象として開発・実用化したシステムの概要と特徴を述べる。なお、本システムは、船主、造船所、エンジンメーカー、過給機メーカー、電機メーカーが共同して開発を行なったものであるが、このうち当社が本開発において特に注力したハイブリッド過給機の単独運転を可能とした施策について記述し、実船搭



出典：三菱重工業(株)

図1 ハイブリッド過給機立体断面図

Fig. 1 Section of hybrid turbocharger

載時の検証結果を報告する。

2. 電源システムの概要

2.1 システム原理

図1にハイブリッド過給機の立体断面図を示す。ハイブリッド過給機は、船用大型主機関に搭載される過給機の構造の一部に小型の高速発電機を内蔵させたもの(図1の破線枠内)である。その大きな特徴は、主機関からの排気ガスを駆動源として機関に空気を送る過給機本来の仕事(給気)に加えて、過給機のローター軸に直結された発電機による発電も可能なことである。

近年では過給機の高効率化が図られ、機関への給気仕事に対して、特に機関負荷の高い運転領域では、機関からの排気エネルギーが余剰となる場合がある。過給機を通過後、他に利用することがなければ、排気ガスは棄てられるエネルギーとなることから、この排気エネルギーを発電に有効利用できるハイブリッド過給機は、排熱回収技術の一つといえる。

2.2 主要機器構成

図2にハイブリッド過給機を用いた船用電源システムの構成図を示す。電源システムは、主に、永久磁石発電機(Permanent magnetic generator, 以下PMG)、コンバーター(Converter)、インバーター(Inverter)、主配電盤(Main switchboard)で構成される。以下に、船用電源として利用するまでの流れと各機器の特徴について述べる。

2.2.1 PMG

前述のとおり、PMGの動力源は同軸上に直結された過給機であり、その回転速度は主機関負荷に依存し、0~約10 000 min⁻¹で変化する。これに伴って、PMGから出力される電力は0~400 V、0~670 Hzで変動する三相交流電源となり、このままでは船内用の電源としては適さない。

2.2.2 コンバーター

PMGにて発生する交流電力を一定電圧の直流電力へ変換

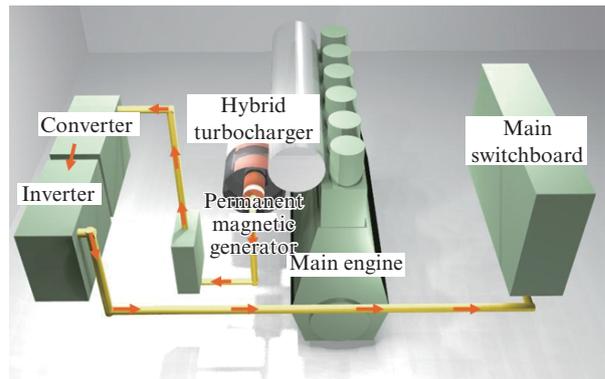


図2 開発した電源システムの構成図

Fig. 2 System configuration of power supply system

する装置であり、高周波の電源に対応できるようにスイッチング素子としては応答性の良好なIGBT(Insulated gate bipolar transistor)を採用した。

2.2.3 インバーター

コンバーターで変換された直流電力を船内電源として利用できるようにAC450 V、60 Hzへ逆変換する装置である。当該機器もIGBTによるスイッチング制御を行なう。

以上のとおり、PMGが出力、変動する交流電力をコンバーターとインバーターを介入させることで、安定した交流電源を取り出せるシステムとした。

一方で受電側から見れば、インバーターが最終給電電源であり、このような静止型電源回路を主電源とし、かつ、他のディーゼル発電機などと並列運転することなく単独で給電するシステムは船舶においては他に例を見ないものである。

ハイブリッド過給機単独で給電を行なうには、3つの大きな課題を克服する必要がある、それぞれ次のとおり対応を行なった。

(1) 電圧および周波数の自律的制御

他の発電機と並列運転することが条件であれば、他の発電機と同調するように交流正弦波を出力すれば十分であるが、単独運転の場合は他に参照する波形がないため、自律的に電圧と周波数を決定しなければならない。このため、通常のディーゼル発電機と同様の電圧特性、周波数特性を演算して出力させることで安定した運転を実現した。また、配電系統での総合電圧波形ひずみ率(THD)が、船級協会規則で要求される5%以内となるように高調波対策を行なった。

(2) 無効電力の供給

無効電力とは、回路中での電気エネルギー消費はないが、電動機や変圧器などの誘導性負荷、コンデンサなどの容量性負荷を接続した場合に流れる電圧と90°の位相差を持つ電流成分による電力である。船内の電力負荷は推進用補機類の駆動用途としての電動機が大部

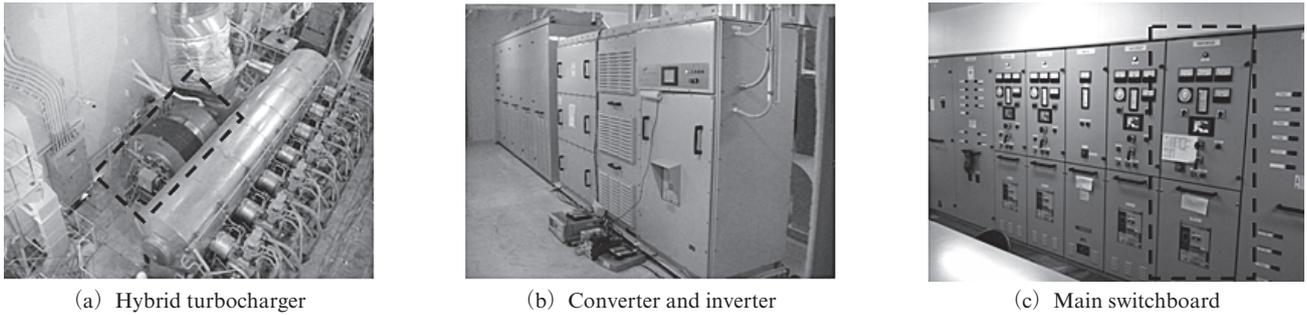


写真1 実船搭載された電源システムの主要構成機器

Photo1 Main component of power supply system on the first vessel

分を占めるため、電動機のような誘導性負荷の運転には無効電力の供給が必要となる。誘導負荷を運転すれば、電圧と電流に位相差が生じるため、インバーターのようなスイッチング回路で正弦波を出力する場合、電圧とは反対の極性の電流を流す必要がある。対策としては、帰還ダイオードをスイッチング素子と逆接続することで、無効電力の供給を可能とした。

(3) 持続短絡電流の供給

通常のインバーターは過電流保護機能として、定格電流の150%~200%の過電流となった場合は保護機能が作動して電流遮断を行なっている。しかしながら、船舶用電源としては、配電系統の事故時でも継続して給電するために、船級協会規則において定格電流の3倍の短絡電流を2秒間持続して供給することが発電機に対して要求されている。短絡事故時の大電流を故障点より上位にある保護装置（ブレーカー）に流すことで、保護装置を作動させ故障回路を切り離すためである。対策としては、インバーターを短絡電流を供給可能な容量とするとともに、給電事故時には定格電流の300%以上の短絡電流を2秒間以上流す制御機能を追加することで対応した。

2.2.4 主配電盤

主配電盤の構造としては一般的なものではあるが、その制御機能としてハイブリッド過給機を含めた船内の電力マネジメントを総合的に行なっている。

ハイブリッド過給機の発電可能量は主機関負荷により変動し、特に低負荷域では船内電力負荷に対して発電量が不足する。また、ハイブリッド過給機から過剰に電力を取り出すと、過給機本来の主機関への吸気仕事が減り、主機関の長期信頼性を損なう恐れがある。そのため、主機関負荷に対する適正発電量を主配電盤内で各パラメータを基に演算し制御させた。

また、船舶の危急制動や主機関の非常停止など、発電能力が突発的に停止するケースも考えられる。このようなケースにおいても給電が継続的に行なわれるよう、予備発電機の自動起動などの保護シーケンスを構築した。

3. 実機検証結果

本開発の船用電源システムは、当社で建造したバラ積み運搬船に世界で初めて実船搭載された。なお、本船は1台の主機関に対して1台の固定ピッチプロペラを直結した推進プラントを有している。

写真1に、搭載された本電源システムの主要機器を示す。これら機器は、船内の機関室区画内に搭載されている。

本電源システムは、過給機単体での試験および推進用エンジンに搭載時の性能検証を経て実船搭載された³⁾。以下では、前述したように単独で給電を可能としたシステムの健全性を検証した例を示す。

3.1 単独給電試験

図3に、本電源システム単独で船内電力を供給した場合の、供給電力、主機関回転数および過給機回転数の時系列推移を示す。船内の電力負荷変動として、大容量の負荷の起動、停止が発生した場合を示している。これら電力負荷変動に追従し、安定して電力を供給可能であることを確認した。また、この時に主機関の回転数に影響を及ぼすことなく給電可能であることも確認した。

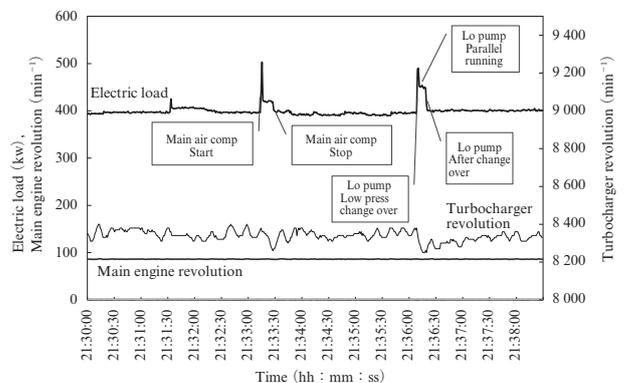


図3 単独給電時負荷変動試験結果

Fig. 3 Result of load variation test with hybrid turbocharger single running

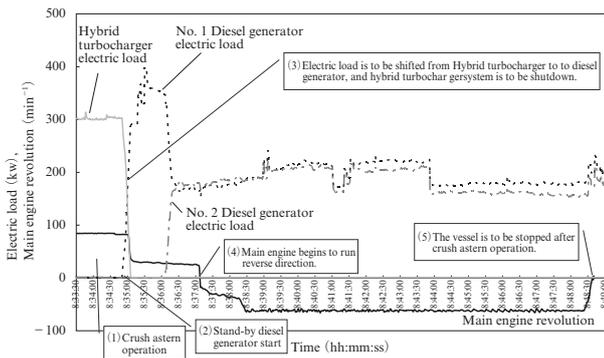


図4 危急停止操船試験結果

Fig. 4 Result of crush astern test

3.2 危急停止操船試験

図4に、危急停止操船時における船内発電機の供給電力、主機関回転数の時系列推移を示す。

船舶においては、危急時の安全性を確保するため、規則で定められた制動距離以内の停止性能を満足する必要がある。このため、危急停止操船時には、主機関への燃料供給を停止し機関負荷を瞬時に下げ、その後ブレーキエアを投入し、主機関の逆転運転に至るまでのシーケンスを遅滞なく行なうことが重要となる。そこで、主配電盤で構築した安全装置の健全性について検証した。

図4に示すように、ハイブリッド過給機単独運転時に危急停止操船を行なった場合(1)、予備発電機の自動起動が確立した後(2)、(3)、主機関の燃料供給を停止し、その後主機関逆転運転(4)から停船(5)に至るまで問題なく制御することによって、規則で要求される制動距離以内に制動停止ができることを確認した。

4. おわりに

当社では、ハイブリッド過給機を用いた船用電源システムを他社と共同開発・実用化した。以下にその特徴を記す。

- (1) ハイブリッド過給機は、小型の発電機が主機関に搭載される過給機に内蔵しており、機関室配置に大きな変更が必要なく、比較的小型の船舶への適用が可能な排熱回収技術である。

- (2) 本電源システムは、ハイブリッド過給機単独で給電を可能とし、船舶において他に例を見ないシステムである。開発にあたっては、電圧および周波数の自律的制御、無効電力の供給、持続短絡電流の供給および主機関と連動した電力マネジメントの構築といった課題を克服した。

- (3) 本開発の船用電源システムは、当社で建造したバラ積み運搬船に世界で初めて実船搭載された。この実機検証試験を通じ、本電源システムを用いて単独運転が可能であること、またその健全性について確認した。

本報告では、システムの特徴と開発・実用化に至るまでの課題とその対策について述べたが、本システムの省エネルギー効果として約2%を確認している。

本船用電源システムの開発にあたり、共同開発者として貴重なご意見、ご支援を頂いた(株)MTIおよび日本郵船(株)、三菱重工業(株)、大洋電機(株)、日立造船(株)の関係各位に心から謝意を表する次第である。

なお、本発電システムの就航実証試験は、国土交通省の「船舶からのCO₂削減技術開発支援事業」の補助対象事業として、また一般財団法人日本海事協会の「国際海運における温室効果ガス削減技術に関する研究開発」の共同研究テーマとして採択されている。

参考文献

- 1) Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto. Resolution MEPC. 203 (62). 2011-07-15.
- 2) 白石啓一ほか. 排ガスで発電する大型船用ハイブリッド過給機の開発. 三菱重工技報. 2010, vol. 47, no. 3, p. 81.
- 3) 小野嘉久ほか. 排ガスで発電する大型船用ハイブリッド過給機の実用化. 三菱重工技報. 2012, vol. 49, no. 1, p. 35.



須藤 尚則



美浪 大樹