

## 砕氷艦「しらせ」の電気推進装置\*

大 野 淳\*\*

### 1. はじめに

新型砕氷艦「しらせ（新しらせ）」は、南極観測行動における隊員や物資の輸送及び観測活動を行うための多目的船であり、先代「しらせ」に代わり 2009 年 5 月に就役した。

砕氷艦は、その名が示すとおり氷を割りながら航行することを前提としており、高出力の推進装置を必要とする。

特に日本の観測隊が目指す昭和基地は、南極海で有数の流水域であるリュツォホルム湾を越えた所にあり、しらせは、艦を後進させて助走した後、氷床に艦を体当たりさせて氷を割るラミング砕氷を繰り返し行いながら航行する。

排水量 1 万トン以上の艦船がこの砕氷を繰り返し行いながら航行するには、急速に前後進できる推進装置が必要であり、さらに、このときプロペラに接触する氷海を砕くために、高いトルク特性（一般産業の電動機では 150%程度に対し、しらせでは、約 170%トルクを要求）をもった推進装置でなければならない。

以上の理由等から、砕氷艦の推進は電気推進装置が採用されている。

### 2. 砕氷艦「しらせ」の電気推進装置について

砕氷艦「しらせ」の電気推進装置は、プロペラを駆動する推進用電動機、推進用電動機を制御する電力変換器、推進電動機用変圧器、初期充電盤、水冷却装置、ポンプ等の補機類、各装置を監視制御する機側制御盤等で構成されている。

新「しらせ」と先代「しらせ」の比較を表 1 に示す。

以下に各装置の特徴を示す。

**2. 1 統合給電方式** 先代「しらせ」は、艦内負荷と推進負荷を別々の発電機を使用して給電する分離給電方式を採用していたが、新「しらせ」では、同じ発電機から全ての負荷（艦内負荷及び推進負荷）に給電する統合給電方式を採用している。電源系統図を図 1 に示す。

なお、発電機が停止となった場合、艦内負荷にも影響がでるため、電気推進装置は、発電機停止要因となる負荷急変や過負荷が起こらないようにするとともに、万一発電機が停止した場合、発電電力に応じて電動機の出力を制限する制御を実施している。

表 1 新しらせと先代しらせの比較

| 項目               | 新しらせ                                      | 先代しらせ                                   |
|------------------|---|---|
| 常備排水量<br>(基準排水量) | 18,500t<br>(12,500t)                      | 17,230t<br>(11,600t)                    |
| 推進方式<br>(最大出力)   | 電気推進方式<br>(30,000PS)                      | 電気推進方式<br>(30,000PS)                    |
| 軸数               | 2 軸                                       | 3 軸                                     |
| 電動機              | 誘導電動機                                     | 直流電動機                                   |
| 電動機台数            | 5,516kW×4 台<br>(2 軸×2 台)                  | 3,680kW×6 台<br>(3 軸×2 台)                |
| 電力変換器<br>制御方式    | AC-R-I-AC 方式<br>(ダクト・コンバータ<br>+PWM インバータ) | AC-R-DC 方式<br>(ダクト・コンバータ<br>+DCM(電圧界磁)) |
| 給電方式             | 統合給電方式                                    | 分離給電方式                                  |
| 母線電圧<br>・周波数     | 6.6kV 60Hz                                | 715V 51.5Hz                             |
| 発電機台数            | 7,400kW×4 台<br>(+補助発電機 1,200kW<br>×2 台)   | 4,050kW×6 台<br>(+主発電機 900kW<br>×4 台)    |

表 1 に示すとおり、先代しらせでは、直流電動機を使用しており、回転数制御は電源電圧を可変することで実施しているため、統合給電とすることはできない。新しらせでは、交流電動機を採用し、回転数制御は周波数を可変することで実施しているため、電源側の電圧を可変する必要が無いことから、統合給電が可能となっている。

**2. 2 プロペラ軸** 新「しらせ」は、プロペラ軸が先代「しらせ」の 3 軸から 2 軸に変更となり、機関区画の減少、重量の低減が図られている。

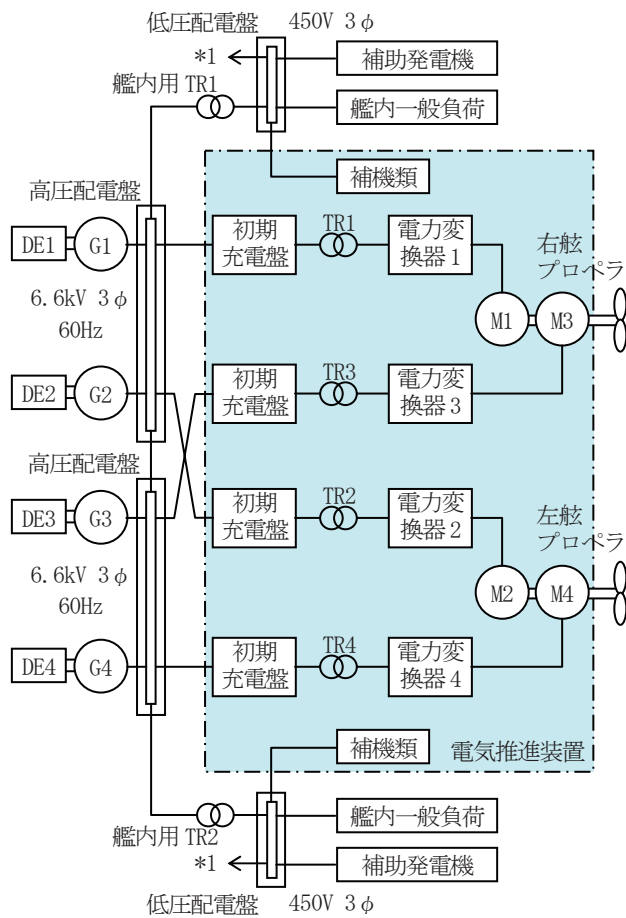
それぞれの軸には、2 台ずつ推進電動機が直結されており、1 台の推進電動機が故障した場合でも、もう 1 台の推進電動機で運転することで、航行を続けるこ

\*原稿受付 平成 21 年 12 月 1 日。

\*\* (株) 日立製作所 (日立市大みか町 5-2-1)。

とができる。

推進電動機の切換えは、制御によりスムーズに行うことができる。



注：DE(ディーゼルエンジン)，G(主発電機)，M(推進用電動機)  
TR(変圧器)

図1 概略電源系統図

**2.3 推進用電動機** 推進用電動機には、電力変換器を通して供給される電源によって、規定の出力、回転速度で運転を行う交流可変速誘導電動機を採用している。

本誘導電動機にはブラシレスのかご形回転子を採用することにより、直流電動機で必要であったブラシ、整流子の保守が不要となり、保守性の向上かつ堅牢化を図ると同時に、アイストルク等による衝撃や負荷変動によるねじり振動を考慮した機械的にも信頼性の高い構造としている。

推進電動機は、1台あたり定格出力が5,516kWで、プロペラ軸に2台ずつ計4台設置されており、最大出力は約30,000PS(馬力)となる。

通常海域では最大20ノットで艦を航行させることができ、氷海域においても厚さ1.5mの氷を砕氷しながら3ノットで航行することができるように設計さ

れている。

1軸分の電動機の外観図は図2に示すとおりであり、1軸分(電動機2台分)の概略寸法は、W 5,000 × L 9,000 × H 5,000で、質量は、約160tである。

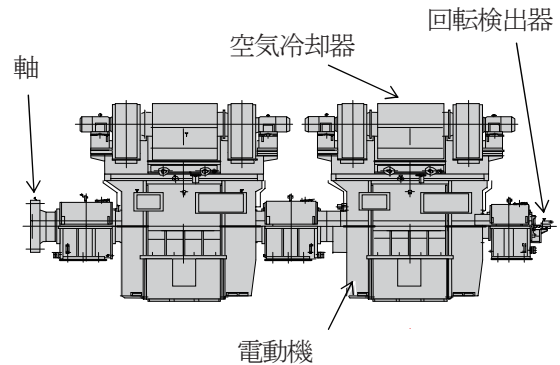


図2 電動機(1軸分)の外観図

**2.4 電力変換器** 電力変換器は、交流可変速制御方式のいわゆるAC-R-I-AC方式であり、主発電機から供給され推進電動機用変圧器で降圧された交流(AC)を受けて、コンバータ(R)により直流に変換し、さらにインバータ(I)で可変周波数、可変電圧の交流(AC)に変換し、推進用電動機に供給し、可変速駆動するものである。

コンバータは、ダイオードを使用した24相整流方式を採用し、電源系統への高調波の影響を抑制するようにしている。

インバータは、半導体素子IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を使用したPWM(Pulse Width Modulation)制御方式の変換回路を採用し、ベクトル制御演算によって推進電動機の迅速な可変速制御を可能としている。

この制御方式は、一般産業の電動機制御で広く使われているが、しらせの発電機容量は電動機容量に近いので、電気推進側で急峻な負荷をとった場合、発電機側が追従できなくなり、エンジンがストールする可能性がある。砕氷時は、プロペラが損傷しないように瞬時にトルクを出して砕氷する必要があるが、瞬時にトルクを上げた場合、発電機から見た負荷変動が瞬時に変化するため、エンジンがストールしないように制限をかけながらトルクを出して砕氷するという相反する要求に答えている。

電力変換器の外観は図3に示すとおりであり、電動機1台を駆動するのに必要な電力変換器の概略寸法は、W 7,000 × D 2,000 H 2,000で、質量は約12tである。



図3 電力変換器の外観

**2. 5 推進電動機用変圧器** 推進電動機用変圧器は、主発電機からの交流入力電力を電力変換器のダイオードコンバータに適した電圧及び位相に変換するものである。

本装置は、無圧密閉形送油水冷式の油入変圧器で、1つのタンクの中に3, 300 kVAの変圧器が2台収納されている。

本装置の冷却油は新幹線「のぞみ」にも採用されている、難燃性、絶縁に優れたシリコン油を採用している。

シリコン油は脱気処理され、振動、衝撃、動揺等による気泡の発生を抑制し、巻線への気泡の侵入を防止している。

温度変化による冷却油の体積変化を吸収するためコンサーバタを装備し、タンク内の圧力を常に無圧状態に維持している。

推進電動機用変圧器の外観は図4に示すとおりであり、概略寸法は、W 3,400 × D 2,500 × H 2,500 で、質量は約 25t である。

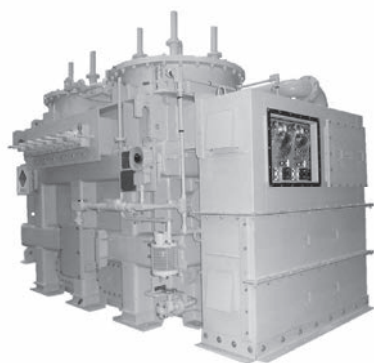


図4 推進電動機用変圧器の外観

**2. 6 初期充電盤** 初期充電盤は、推進電動機用変圧器の励磁突入電流の抑制と電力変換器の平滑用コンデンサの初期充電を行うためのものである。

本装置は、推進電動機用変圧器の励磁突入電流抑制と電力変換器のコンデンサの初期充電のために抵抗を挿入した主回路の真空遮断器（VCB）を投入し、充電完了後、全電圧を投入する2段投入方式を採用して

いる。

また、内部アーク短絡事故により発生した内部圧力放出のため、内部圧力放出弁を天井部に装備している。

初期充電盤の外観は図5に示すとおりであり、概略寸法は、W 1,700 × D 1,700 × H 2,000 で、質量は約 2t である。



図5 初期充電盤の外観

**2. 7 バックパワー吸収抵抗器** バックパワー吸収抵抗器は、電力変換器から回生された電力を抵抗器で熱に変換し、電力を吸収するためのものである。

本装置は主に、クラッシュアスターン時における減速動作時に発生する回生電力の吸収を目的としており、定格は、2,000kW (20MJ) である。

バックパワー吸収抵抗器の外観は図6に示すとおりであり、概略寸法は、W 1,200 × D 1,000 × H 1,650 で、質量は約 2t である。



図6 バックパワー吸収抵抗器の外観

**2. 8 機側制御盤** 機側制御盤は、電気推進装置の監視・制御を行うためのもので、艦橋などの上位システムからの指令を受けて推進電動機の手動指令を電力変換器に送信する。

また、各装置の状況を上位システムへ送信する。

本装置は、右舷用と左舷用がある。

CPU (Central Processing Unit) の故障時の冗長性を向上させるため、制御装置の二重化や、電気推進装置構成品である直流電源盤 (バッテリー付属) からの停電時の電源供給など、異常時にも対応できるように信頼性の高いシステムを構築している。

機側制御盤の外観を図7に示す。



図7 機側制御盤の外観

### 3. 砕氷航行の検証

しらせは南極での航行を主とするため、他の艦船からの補給や援助を受けることがほぼ不可能である。

電気推進装置が停止した場合は航行ができず、氷海に閉じ込められることから、砕氷航行における電動機制御の検証を行うことは、システムの信頼性の面で非常に重要となる。

砕氷航行の検証は国内では困難であるため、シミュレーション及びミニモデルで検証を実施した。

**3. 1 シミュレーションによる検証** シミュレーションは、回路シミュレーションソフトを使用した机上シミュレーションと実際の制御用プリント回路板を使用し、リアルタイムシミュレータで実施するシミュレーションの2種類を実施した。

**3. 1. 1 机上シミュレーション** 机上シミュレーションでは、図8に示すようなモデルを構築し、電気推進装置全体の検証を実施している。

通常航行で電動機にかかる負荷は、船体抵抗、スラスト特性、ロビンソン特性等から計算し、アイストルク

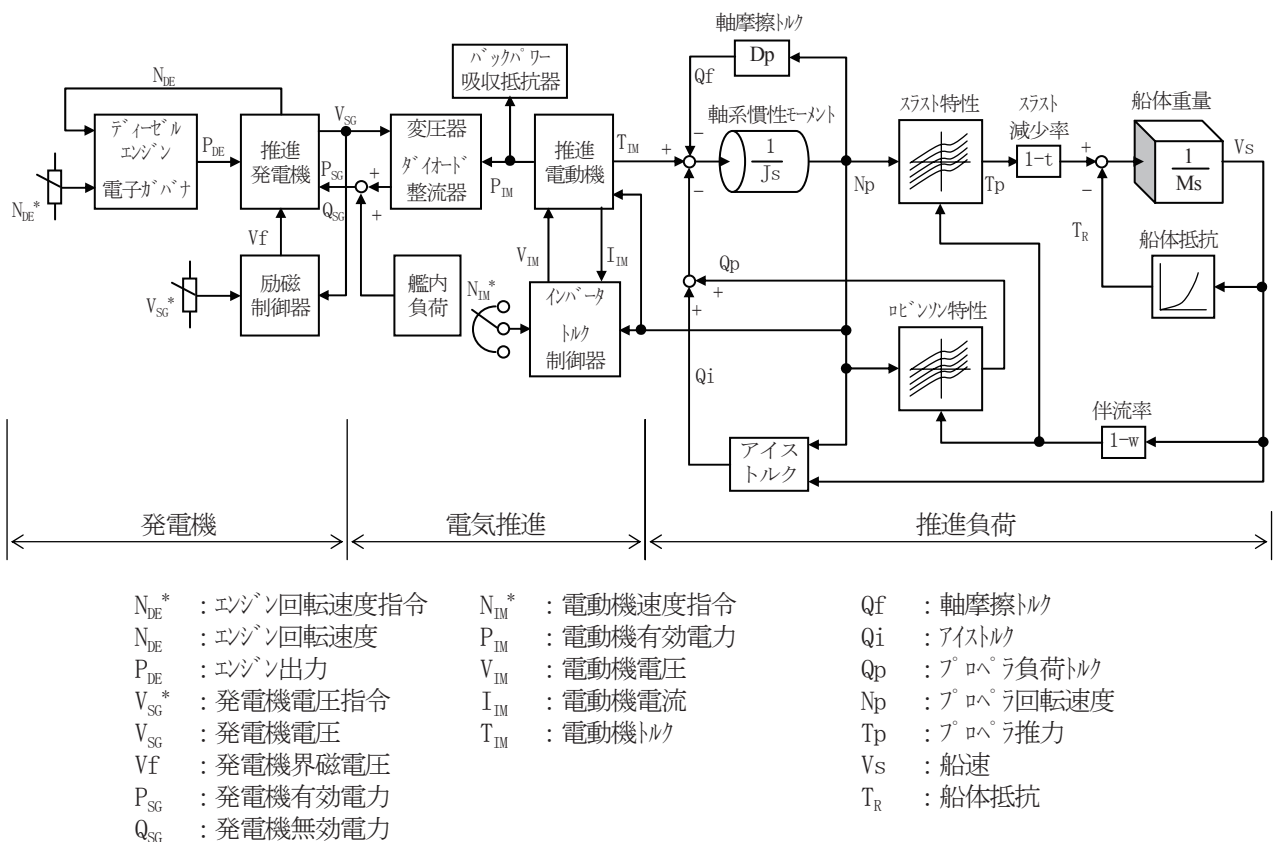


図8 シミュレーションブロック図



クについては、Jack W. Lewis が Naval Engineers Journal に寄稿した「SOME ASPECTS OF THE DESIGN OF DEISEL ELECTRIC ICEBREAKER PROPULSION SYSTEMS」2) に記載の計算式を使用して、プロペラ形状から計算している。

さらに、過去の砕氷データからアイストルクの算出も実施している。

本モデルでは、砕氷時の回転数変動、クラッシュアスターン時の速度増減レートの検討、回生電力の検討、電源系統へ与える影響等について検証している。

**3. 1. 2 リアルタイムシミュレータによるシミュレーション** 実機と同じ定数のシステムモデル（推進発電機、変圧器、電力変換器、推進用電動機、負荷等）をリアルタイムシミュレータに入力し、電力変換器で実際に使用する制御用プリント回路板と組み合わせることで、実際の制御信号でシステムモデルを動作させ、船体運動、プロペラ運動、システム系統電圧等をリアルタイムにシミュレーションしている。

本シミュレーションの構成を図9に示す。

本シミュレーションにより、氷海航行、加減速運転、クラッシュアスターン、負荷制限等の運転状況における制御の確認を実施している。

また、本システムモデルをミニモデルの定数に変更することで、シミュレーション結果と実際の動作の検証を実施し、システムモデルの整合性の評価も実施している。

**3. 2 ミニモデルでの検証** プロペラ負荷を電動機で模擬した電気推進装置ミニモデル（出力換算で実機の約500分の1縮小モデル）を製作し、リアルタイムシミュレーションでの動作との対比を行っている。

ミニモデルの構成を図10に示す。

PLC盤には、机上シミュレーション、リアルタイムシミュレータで製作したモデルを組み込み、砕氷パターンでの動作検証を実施している。

これらの検証を実施することで、氷海航行時のリスクを最小限に抑えている。

## 4. おわりに

しらせは2009年11月10日に晴海ふ頭を出港し、オーストラリアを経由して南極の昭和基地に向けラミングを繰り返し進んでいる。

現在、氷海域においてデータを取得中であり、検証結果の整合については、来年4月の帰港後に実施したいと考えている。

本艦での経験を元に、更なる技術と品質の向上に努めていきたいと考える。

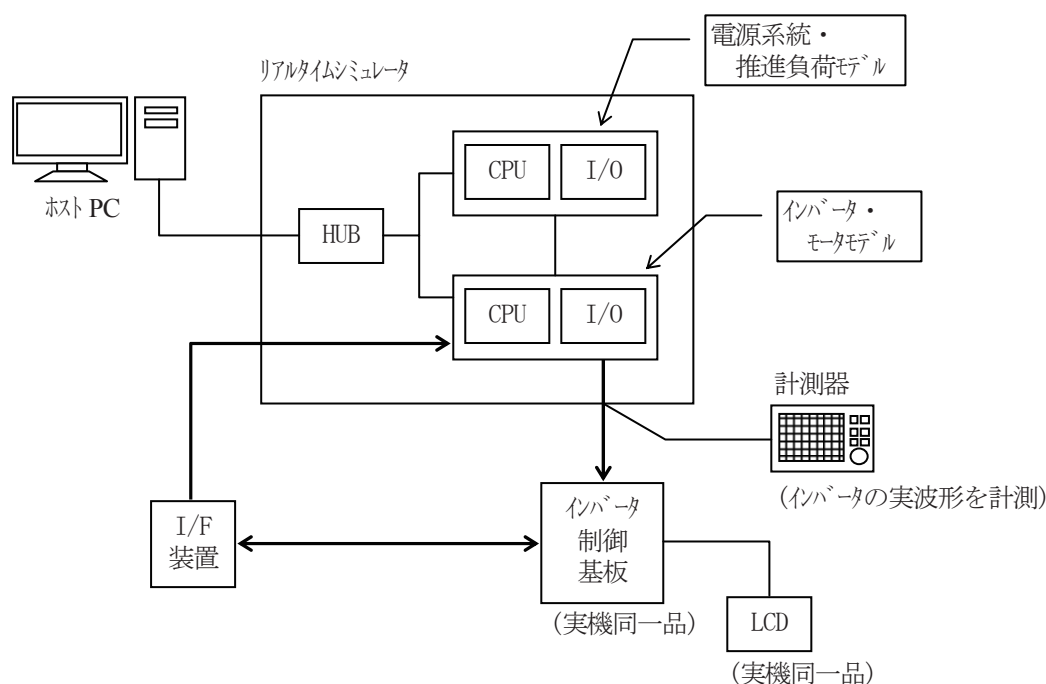
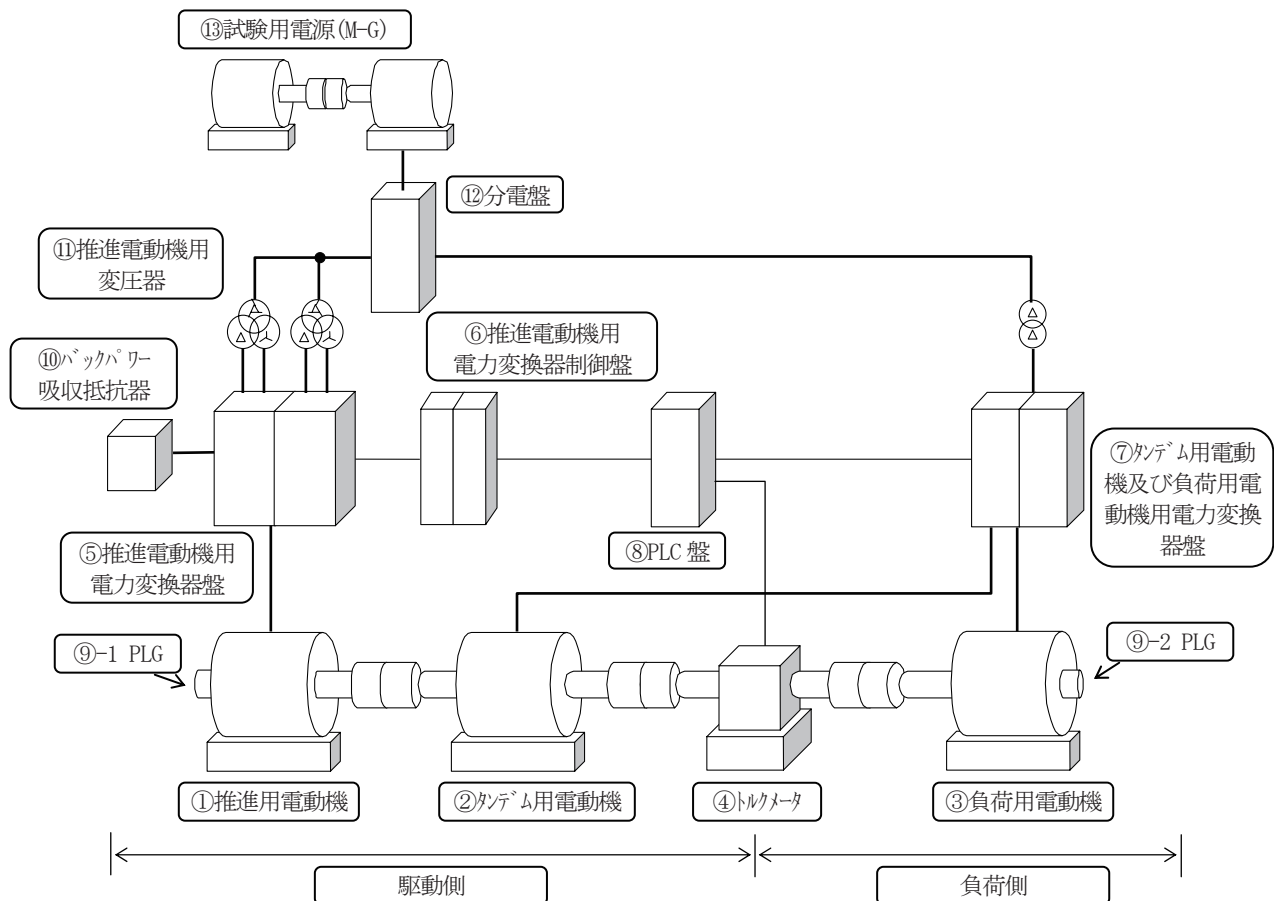


図9 リアルタイムシミュレータの構成



- |   |  |
|---|--|
| <p>①推進用電動機<br/>実機を模擬した電動機</p> <p>②タンデム用電動機<br/>推進用電動機と同一軸に配置した電動機</p> <p>③負荷用電動機<br/>プロペラにかかる負荷を模擬するための電動機</p> <p>④トルクメータ<br/>駆動側のトルクを計測</p> <p>⑤推進電動機用電力変換器<br/>推進用電動機に電力を供給する</p> <p>⑥推進電動機用電力変換器制御盤<br/>⑤の制御を実施（実機と同一品）</p> <p>⑦タンデム用電動機及び負荷用電動機用電力変換器盤<br/>タンデム用電動機及び負荷用電動機の制御を実施</p> | <p>⑧PLC盤<br/>⑥、⑦に指令信号を与えるための装置</p> <p>⑨PLG<br/>回転数を検出（⑨-1の出力は実機相当）</p> <p>⑩バックパワー吸収抵抗器<br/>回生時の電力を吸収するための抵抗器</p> <p>⑪推進電動機用変圧器<br/>推進電動機用電力変換器盤の24相整流用変圧器<br/>（+7.5°，-7.5°の位相ずらし有り）</p> <p>⑫分電盤<br/>試験用電源分岐</p> <p>⑬試験用電源(M-G)<br/>試験用60Hz電源供給</p> |
|---|--|

図10 ミニモデルの構成

## 参考文献

- 1) 西川, 日立評論, (2009-6), 64-65
- 2) Lewis, Jack W., Naval Engineers Journal, (1969-4), 90-105

## 著者紹介

- 大野 淳
- ・1969年生.
  - ・(株)日立製作所 ティーフエンスシステム社.
  - ・明治大学 工学部卒.
  - ・艦艇電気品設計に従事.