

水素エンジン荷役機器における出力制御の最適化に関する研究

○南園 卓成 ・ 中山 真敏 (株式会社三井 E&S)

Research on Optimizing Power Control in Hydrogen Engine-Powered Cargo Handling Machine

* Minamizono, Takunari ・ Nakayama, Masatoshi (MITSUI E&S Co., Ltd.)

Abstract—Hydrogen is being explored as a promising option for achieving carbon neutrality in port cargo-handling equipment such as Rubber Tired Gantry Cranes (RTG). Although fuel-cell RTGs have been developed, they require highly purified hydrogen. Hydrogen engines, in contrast, can operate with lower fuel purity, but exhibit slower load-response performance. This study presents a power-control method for a newly developed RTG equipped with a hydrogen engine. To mitigate impact loads, a boost chopper was added to maintain constant engine load during regenerative phases. Field tests confirmed stable generation performance and demonstrated a 37% improvement in hydrogen consumption through intermittent operation.

1 はじめに

Rubber Tired Gantry Crane (RTGC) は、Fig. 1 のような港湾コンテナターミナル (CT) でコンテナの積み下ろしや移動、保管 (蔵置) に使われる大型の門型のクレーン (Fig. 2) である。その特徴は、レールを必要とせずゴム製のタイヤで、ディーゼルエンジン発電機 (DEG) によって自走できる点にあり、ヤード内を柔軟に移動し、効率的にコンテナの荷役作業をすることが可能である。主な用途として、Ship to Shore Crane (STSC) との間でコンテナの受け渡しを行う構内トラックに対して、蔵置コンテナの受け渡しを行う役割を担っている。

近年、カーボンニュートラル (CN) 化の推進が活発になってきているが、港湾においてもCN化の検討が加速している。その中でCTの主力荷役機械であるRTGCの水素駆動化は喫緊の課題である。これまで水素駆動型RTGCとして燃料電池 (FC) 搭載型の開発を進めてきたが、使用する水素純度の観点から、既存の内燃機関技術を応用できる水素エンジン搭載型への期待も高まっている。こうした背景のもと、国土交通省は神戸港において港湾CN化推進の一環として、水素エンジンを搭載した水素駆動型RTGCの現地稼働実証試験を実施²⁾した。本実証は、国土交通省が計画している「水素を燃料とする荷役機械の導入ガイドライン (仮称)」³⁾の策定に資する重要な位置づけであり、実運用データに基づいた技術的・運用上の課題を抽出し、その解決策を検討することを目指している。

しかしながら、DEGを水素エンジン発電機 (HEG) へ単に置き換えるだけでは、水素燃焼の特性 (燃焼速度や負荷追従性など) により、急激な荷役負荷変動に対してエネルギー効率の低下や動作不安定を招く恐れがある。一般的に、ディーゼルエンジンのように直接燃焼室内に噴射して燃焼する燃焼方法が拡散燃焼方式であることに対し、予め燃料と空気を混ぜてから燃焼室内に供給する燃焼方法は予混合燃焼方式と呼ばれる。本研究で採用したエンジンはiLabo社製水素専焼エンジンであり、燃焼方法は予混合燃焼方式である。このため、従来搭載していたディーゼルエンジンから水素エンジンへ換装することで生じる燃焼方式の違いによる影響を考慮したRTGC側のシステム設計が必要となる。

また、軽油と比較して水素燃料が高価であることから、ランニングコスト (水素燃料消費量) 抑制のため、

水素エンジン出力制御の最適化も求められる。

すなわち、水素駆動RTGCの実現のためには、水素エンジンの特性を考慮した適切なエネルギーマネジメントと出力制御が不可欠である。

以上の背景を踏まえ、本研究では、実証試験で取得された実荷役データに基づき、HEGの運用課題を示し、その上で、HEGの特性を考慮した電源システムの構成を検討し、RTGへのHEG実装に向けた技術的な解決策を提示することを目的とする。また、水素エンジンのON/OFF制御を行うことで、連続運転制御からの燃料消費量低減効果を定量的に示す。



Fig. 1: 港湾コンテナターミナルの風景



Fig. 2: RTGCの全景

2 従来のRTGC電源システム構成

従来の環境対応型DEG搭載型RTGCの電源システム構成についてFig. 3に示す。

主要な構成機器としては、DEG、主機モータ、インバータドライブ (INV)、プログラマブルコントローラ (PLC)、補機機器、リチウムイオンバッテリー (LIB) がある。

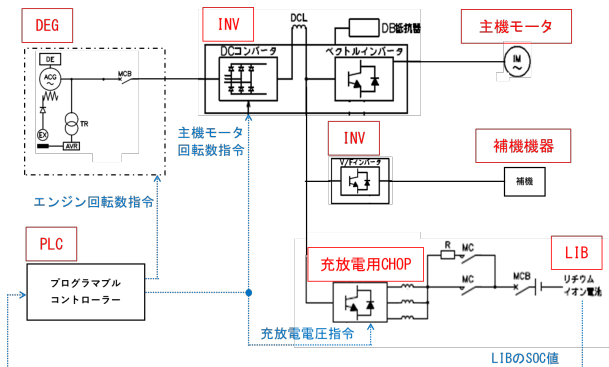


Fig. 3: DEG搭載型RTGCのシステム構成図

DEGの発電容量は 100kVA～500kVAまでラインナップされ、搭載するLIB容量によって選択される。例えば、LIBを搭載していないLIB非搭載型RTGCでは500kVAのDEGである。一方、最新の環境対応型RTGCでは大容量LIBとのハイブリッド化により 100kVAの小容量のDEGで環境負荷の低減を実現している。

LIB非搭載型RTGCでは、DEGの同期発電機で発電された交流電源は、INVのDCコンバータ回路を介して一度直流に変換される。その後、要求動作速度などに基づいて、PLCで演算することにより得られた主機モータ回転数指令値をINVへ与えることで、INV出力が可変出力となり、接続されている主機モータを任意の速度で制御している。一方、環境対応型RTGCでは、LIBを搭載していることからDCコンバータ回路で直流に変換された後の構成機器に違いがある。LIB非搭載型RTGCでは直流変換後のコモンバス（直流中間電圧）に何も接続されていないが、環境対応型RTGCではLIBの充放電を制御する充放電用チョップユニット（充放電用CHOP）を介してLIBが接続されている。PLCから充放電用CHOPを制御することにより、DEGとLIBの負荷バランスを最適化することでDEG発電容量の低減を実現している。これにより、CO₂ 排出量および軽油消費量の削減を実現している。

3 HEG搭載型RTGCの電源システム構成

3.1 システムの概要

本実証のRTGCは、100kVAのDEGを搭載した最新の「環境対応型RTGC (LIB搭載)」をベースモデルとし、そのDEGをHEGへ換装したシステムある。従来のDEGでは燃料タンクがエンジン本体に隣接する一体型であったが、HEG化にあたり、燃料となる水素ガスを貯蔵する「70MPa高圧タンクユニット (HTANK)」を別置きとする構成に変更された (Fig. 4)。

HTANKを別置きとした理由は、「RTG稼働時間の

確保」と「安全性」の二点にある。具体的には、16時間の連続稼働に必要な燃料量を確保すること、および水素ガスの密度は最も小さいことから、漏えいを考慮してエンジンより上方に配置することで安全性を担保している。水素ステーションでHTANK内に最高70MPaで充填された水素は、減圧弁で0.8MPaに減圧しエンジンへ供給され、エンジンに接続した同期発電機で交流電源へ変換する。発電後のエネルギーフロー自体は従来のLIB搭載型と同様である。

ハードウェアだけでなく、始動および燃料供給の制御ロジックも従来機 (DEG搭載機) とは異なる。従来のDEGは燃料供給をエンジン側で制御しておりRTGC側は関与していなかったが、HEGシステムでは燃料供給ユニット (HTANK) とエンジン制御が分離されている。そのため、RTGC側のPLCが燃料供給の制御権限を持ち、タンクの弁開閉やエンジンの始動指令を統括する構成となっている。

この制御構成に基づき、具体的な始動シーケンスは以下の手順である。まず運転室のキースイッチ操作でLIBシステムとRTGCを起動させ、PLCとHTANK間の通信を確立した後に、PLCがタンクバルブを開放する。次に、RTGC側からHEGへ始動信号を送り暖機運転を開始させるが、発電開始には冷却水温の上昇を待つ必要がある。最終的に、HEG側からの「定格運転可能信号」を受け取ったRTGCが「定格運転指令」を送ることで、発電が開始される仕組みとなっている。



Fig. 4: 水素エンジンおよび高圧水素タンク

3.2 水素エンジン制御の課題

3.2.1 インパクト負荷の発生メカニズム

RTGCの荷役作業では、コンテナの巻上、巻下動作を交互に繰り返すことから、出力変動が非常に激しいという特徴がある。この変動に対応し、安定して電力を供給できるよう、LIBとDEGを協調制御するシステムを構築している。巻下動作中や減速動作時には再生エネルギーが発生するため、発電システム側の負荷が0となる。この状態から巻上動作などの力行側の操作を行うと瞬時に力行エネルギーに移行するため、発電システム側に必要負荷が瞬時にかかる。この急激な負荷がかかる状況がインパクト負荷である。Fig. 5の例では 600msec以内に必要負荷が 0→100kWに変化している。インパクト負荷は発電システムの発電応答性能に影響する。

3.2.2 HEG特有の応答遅れ要因

DEGではインパクト負荷が入った場合でも追従することができる。拡散燃焼方式のディーゼルエンジンは、常に最大量の空気を吸い込み、ガバナシステムにて検知した負荷量に応じて、瞬時に燃料噴射量を調整することで出力を調整可能であることが大きな理由である。加えて、噴射された燃料がすぐに燃焼することも急峻な負荷変動にも追従が可能となる理由の一つである。一方、HEGでは燃料となる水素と空気を予混合した後に燃焼させるため、要求出力を発生させるまでに一定の時間が必要となる。すなわち、インパクト負荷に対して、まずスロットルバルブを開けて空気量を増やし、その後に燃料となる水素量を増やすという段階的な制御が必要になる。この空気量の変化には時間遅れが生じるため、従来のDEGのように燃料噴射量を増やすだけで瞬時の負荷変動に対応することが難しい。なお、FCでも化学反応速度の制約により、要求出力を発生させるまでに一定の時間が必要である。また、HEGは交流電源を搭載しているため、回生動作時にはインバータ内のコンバータ回路によって交流側へのエネルギーがブロックされる。これに伴い、HEGに掛かっていた負荷が完全に0となる。インパクト負荷時にはLIBからも動力を供給するが、一瞬ではあるが制御応答遅れなどによるエネルギー供給遅れが発生し、発電システム側にFig.5に示すインパクト負荷が掛かってしまう。なお、FCでは、FCユニットに対する出力要求指令の加速度をRTGC側で制御していることに加え、FC出力が直流電源であることから、RTGCのコモンバスに直接接続されているため、回生時に負荷が0になることは無い(=インパクト負荷が掛かることはない)。この時、RTGC負荷に必要なエネルギーは、同一のコモンバスに接続されているLIBにて補完される。結果として、HEGに対してインパクト負荷を掛けた場合、エンジンストールもしくは定格電圧以下の発電出力となってしまうという問題が発生する。

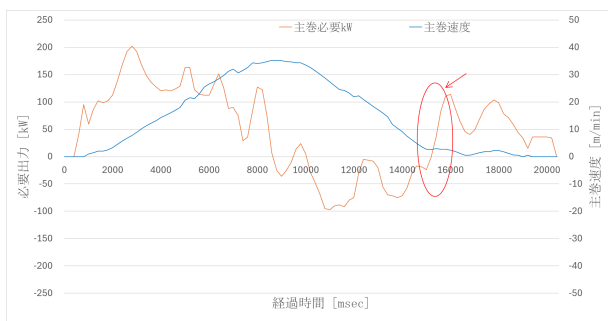


Fig. 5: RTGC 動作におけるインパクト負荷例

その他にもDEGとHEGでは暖機運転のアイドル時間にも大きな違いがある。例えば、DEGでは発電機セットメーカーによっても異なるが、外気温に係わらず3分以内で発電可能とするケースが多い。しかし、水素エンジンでは冷却水温が規定値温度まで到達しなければ発電可能とならない。これは外気温が低いほど暖機運転のアイドル時間が長くなることを意味する。実際に外気温が10℃前後の場合、最大15分程度のアイドル時間が必要となり、荷役時間にも少なからず影響を及ぼす。

3.3 水素エンジンの出力制御

前節で述べたとおり、HEGは混合燃焼方式で負荷変動への追従性能が低いため、インパクト負荷に対応出来ない。その主要な要因は、回生側に移行した際にHEG側の負荷が0になることである。これは交流を直流に変換するインバータ内のフロントエンドダイオード回路(DCコンバータ回路)にて回生エネルギーがブロックされ、回生エネルギーが行き場を失い直流中間電圧が上昇することで発電システム側の負荷が0になることが理由である。

この解決策として、RTGC側のインバータドライブに昇圧チョップユニット(昇圧CHOP)を追加した。INV入力の直流変換電圧が、直流中間電圧よりも小さい場合でも、昇圧CHOPを追加することで直流中間電圧まで昇圧し、設定された電流を出力する定電力制御が可能となる。そのため、回生動作時やインパクト負荷時のようにHEG側の負荷が0になる場合でも、昇圧CHOPを追加することで、HEG側の負荷が0になることを防ぐことが可能である。また、HEGはインパクト負荷以外にも、Table1に示すように、規定時間内に定格負荷を掛けられないという制約条件があるため、規定の印加負荷特性カーブが定められている。HEGに対して任意の負荷を印加できるように、PLCにランプアップ回路を設け、昇圧CHOPから特性カーブに沿った定電流指令値を出す制御とした。実際のHEG搭載型RTGCのシステム構成図をFig.6に示す。

Table 1. HEG 負荷出力制限表

HEG 負荷 [kW]	出力制限 [kW/sec]	ランプアップ時間 [sec]
0 ~ 25	25	T1 = 1
25 ~ 55	5	T2 = 6

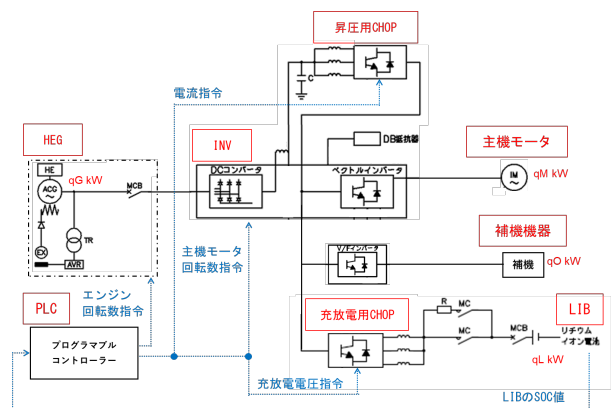


Fig. 6: HEG 搭載型 RTGC システム構成

HEGで発電された出力は、RTGCが必要としている負荷量に応じて動作負荷として使用するか、LIBに充電するかをRTGCに搭載しているPLCにて制御している。

RTGCの利用可能電力 q は、式(1)で示される。

$$q = qG - qO \quad (1)$$

q RTGCの利用可能電力[kW]
 qG HEGの発電出力[kW]
 qO 常時消費する補機負荷[kW]

RTGC負荷 qM と q の関係により、以下の制御を行なう。

- ・ $qM < q$ の場合；RTGC負荷はHEGで発電されたエネルギーで賄われ、余剰分がLIBに充電される。
- ・ $qM > q$ の場合；HEGで発電されたエネルギーではエネルギーが不足する為、不足分は充放電出力 qL としてLIBから補完される。

RTGC待機中の電力バランスは式(2)で示される。

$$qM = qO \quad (2)$$

このため、 q は全て qL としてLIBへ充電される。但し、 qG はLIBの充電量SOC (State Of Charge) 値によって変化させるため、 q もLIBのSOC値によって変化する。

また、DEG型RTGCのエンジン制御方法には大別すると、以下の2種類があり、 qG はこの制御方式により異なる。

- ・ エンジン可変速 (=出力可変)

RTGの動作によりエンジン回転数を変化させ、DEG出力kWを変化させる制御。

- ・ アイドリングストップ (=出力一定)

LIBへの充電を主目的とした制御方法で、規定SOC値まで充電する間のみエンジンを稼働させ、到達するとエンジンを停止させる制御。

次に、昇圧CHOPへの指令出力について、具体的なブロック図をFig. 7に示す。制御に使用するデータ主に2つあり、HEG出力電圧とRTGCがHEGへ要求する出力kW値である。

一つ目のHEG出力電圧は、HEG出力信号にはアナログ出力が無いことから、RTGC側に電圧検出回路を追加して、HEGからの交流出力電圧をPLCに取り込む。

二つ目のHEGへの要求出力kW指令は、上記で説明したようにLIBのSOC値やRTGC負荷によって変化する。今回採用したHEG仕様は最大出力 55kWであることから、0~55kWの範囲で可変させる。

要求出力に対する指令値を、いきなりHEGに入力するとインパクト負荷が掛かるので、昇圧CHOPに出力指令を出して、これを回避する。昇圧CHOPへの電流指令値は、式(3)~式(4)により算出する。式(3)で分母を $3Vdc$ としているのは、 qG が三相であるのに対して、昇圧CHOPは1相あたりの電流指令となるためである。

$$Ic = \lambda / 3Vdc \quad (3)$$

$$Vdc = Vg \cdot 1.35 \cdot \alpha \quad (4)$$

Ic 昇圧CHOPへの電流指令値[A]
 Vdc 直流電圧に換算したHEG出力電圧[V]
 Vg HEG出力電圧[V]
 α 係数(実験値より得る)
 λ 予め規定した出力制限の出力値[W]
 T 出力制限のランプアップ時間[s]

なお、 T はTable1に示す通り、25kWを分岐点に2種類の値に切替える。

この結果により、昇圧CHOPへの定電流指令値 κ [A]が算出されるが、最終段で制限値を掛けることで万が一異常な値が算出されてもHEGへ55kW以上の負荷が掛からないよう保護を設けている。今回のシステムではHEG出力が最大55kWであることから、昇圧CHOP電流制限は100Aとした。

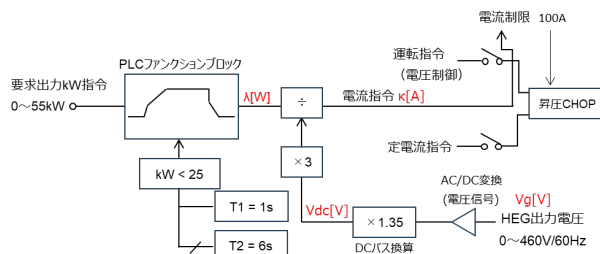


Fig. 7: 昇圧 CHOP 電流指令ブロック図

4 実機検証および結果

4.1 実荷役使用における試験条件

実荷役環境下で、回生から力行へ急転するインパクト負荷が発生した時でも、昇圧 CHOPを追加したシステムにより、HEGの発電が失速・降圧せず安定するか、確認することを実機検証の主目的とした。具体的には、主巻の回生状態(qM がマイナス)から力行状態(プラス)への遷移において、HEG側の発電状態(出力・電圧)が影響を受けないことを確認し、有効性判断を行った。あわせて、昇圧 CHOPによる定電力制御下での負荷平準化を評価した。評価指標としては下記のように規定した。

- ・ HEGの連続運転性：
 - 定格電圧を維持している (=ストール発生の有無)
- ・ RTGC性能：
 - 主巻速度が規定値に到達・維持できている
 - 最高速度 52m/min が規定値
- ・ 出力追従性：

RTGCの急峻な負荷変化に対し、HEG出力・電圧が安定的に供給されている

急峻な負荷変化とはFig. 5で示したような主巻動作の必要kWがマイナスとなっている回生負荷状態から、プラスの力行負荷状態に変化した状況において、HEGの発電状態に影響を及ぼしていないことを確認することで昇圧CHOPの有効性を判断した。

実荷役試験における運用は、以下の4パターンで実施した。運用パターン1では、初のHEG搭載型RTGCであったことから、故障発生が無く安定稼働できることを確認するため、この期間を確保した。その後、各パターンに移行しデータ取得を実施した。

- ・ 運用パターン1：(1ヶ月間)
 - 故障・燃料欠乏などのリスクを避けるため
 - 水素充填エリア近傍での運用
 - ※夜間運用無し
 - HEG連続運転かつRTGC低~中負荷にて運用

- 運用パターン 2 : (1 週間)
本船荷役など実稼働に近い環境での運用
※夜間運用無し
→HEG 連続運転かつ RTGC 低～中負荷にて運用
- 運用パターン 3 : (2 週間)
本船荷役など実稼働に近い環境での運用
※夜間運用あり
→HEG 連続運転かつ RTGC 高負荷にて運用
- 運用パターン 4 : (3 週間)
本船荷役など実稼働に近い環境での運用
※夜間運用あり
→HEG 間欠運転かつ RTGC 高負荷にて運用

4.2 負荷変動対策の検証結果

実荷役試験で取得した各運用パターンにおける実荷役時の時系列データをFig.8～15に示し、運用パターン毎に評価指標を基に考察を行う。

運用パターン 1 におけるRTGCの時系列データ、HEGの時系列データをFig. 8, Fig. 9に示す。出力追従性を確認する為に、インパクト負荷が掛かったタイミングを確認すると、約 19 秒付近 (95 点目×200msec)にて 200msecの間に必要負荷が-19kW→60kWに変化している。この時のHEG出力および発電電圧を確認すると、出力は要求の 40kWに対して 42kW付近で安定しており、発電電圧も定格AC420V設定に対してAC410Vと安定している。共に指令や設定値から 2～5%の変動はしているものの、エンジンストールも発生していないことが確認できる。

また、主巻動作速度も 52m/minに到達している為、RTGC性能も満足していることも確認できる。

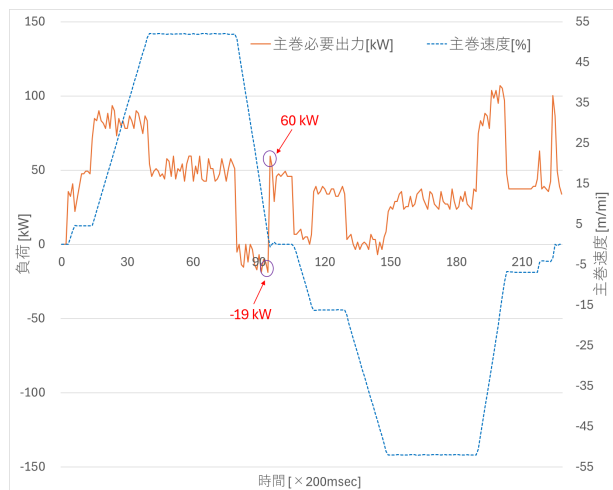


Fig. 8: 運用パターン 1 における RTGC 時系列データ

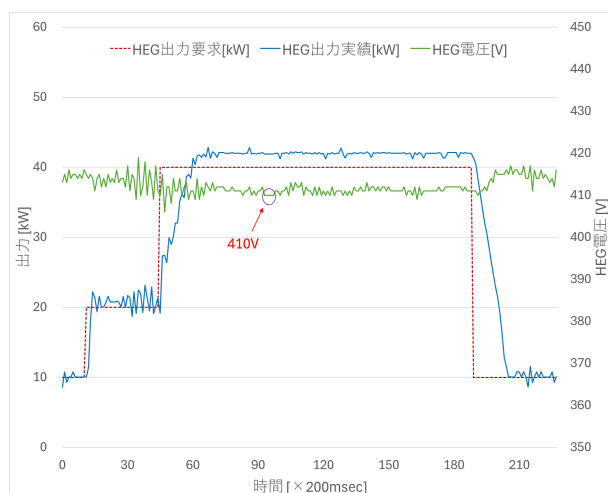


Fig. 9: 運用パターン 1 における HEG 時系列データ

運用パターン 2 におけるRTGCの時系列データ、HEGの時系列データをFig. 10, Fig. 11に示す。インパクト負荷が掛かったタイミングを確認すると、約 5 秒付近 (25 点目×200msec)にて 400msecの間に必要負荷が-3kW→87kWに変化している。この時のHEG出力および発電電圧を確認すると、出力は要求の 20kWに対して 22kW付近で安定しており、発電電圧は瞬間的にAC408Vまで降下しているが、AC415V付近で安定していることから、エンジンストールは発生していないと判断できる。

また、主巻動作速度もパターン 1 同様に 52m/minに到達している為、RTGC性能も満足していることも確認できる。

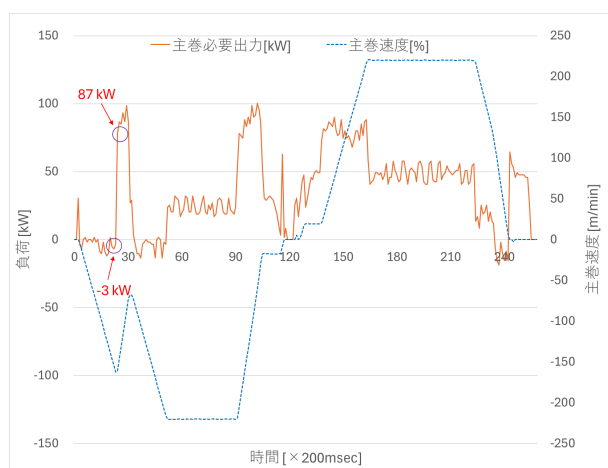


Fig. 10: 運用パターン 2 における RTGC 時系列データ

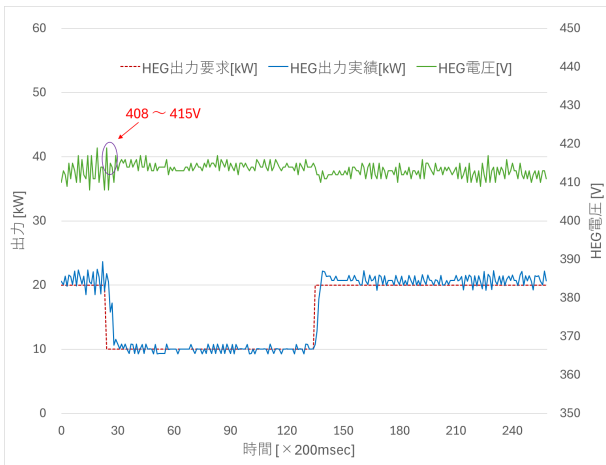


Fig. 11: 運用パターン 2 における HEG 時系列データ

運用パターン 3 における RTGC の時系列データ、HEG の時系列データを Fig. 12, Fig. 13 に示す。インパクト負荷が掛かったタイミングを確認すると、約 20 秒付近 (100 点目 \times 200msec) にて 200msec の間に必要負荷が $-9\text{kW} \rightarrow 32\text{kW}$ に変化している。この時の HEG 出力および発電電圧を確認すると、出力は要求の 45kW に対して 47kW 付近で安定しており、発電電圧は AC410V 付近で安定しているため、このパターンについてもエンジンストールは発生していないと判断できる。

また、主巻動作速度もパターン 1,2 同様に 52m/min に到達している為、RTGC 性能も満足していることが確認できる。

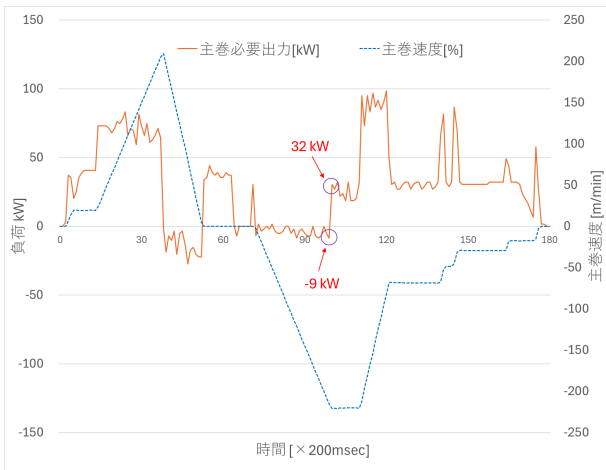


Fig. 12: 運用パターン 3 における RTGC 時系列データ

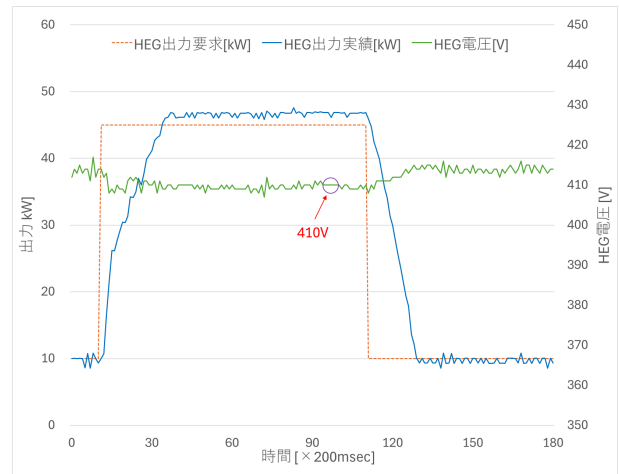


Fig. 13: 運用パターン 3 における HEG 時系列データ

運用パターン 4 における RTGC の時系列データ、HEG の時系列データを Fig. 14, Fig. 15 に示す。

インパクト負荷が掛かったタイミングを確認すると、約 36 秒付近 (182 点目 \times 200msec) にて 800msec の間に必要負荷が $-22\text{kW} \rightarrow 71\text{kW}$ に変化している。この時の HEG 出力および発電電圧を確認すると、出力は要求の 55kW に対して 57kW 付近で安定しており、発電電圧は AC408V 付近で安定しているため、このパターンについてもエンジンストールは発生していないと判断できる。

また、主巻動作速度もパターン 1,2,3 同様に 52m/min に到達している為、RTGC 性能も満足していることが確認できる。

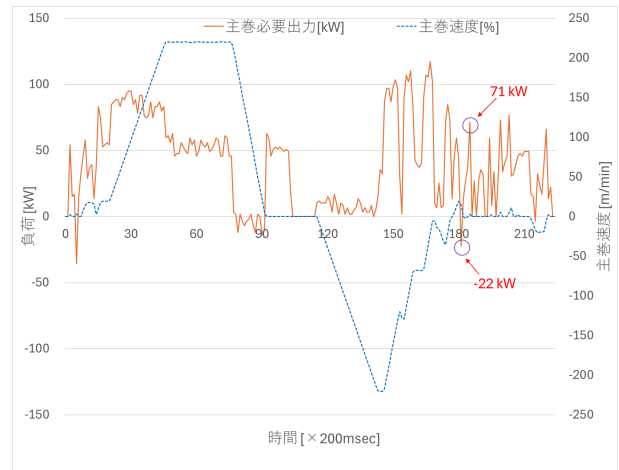


Fig. 14: 運用パターン 4 における RTGC 時系列データ



Fig. 15: 運用パターン 4 における HEG 時系列データ

以上より、すべての運用パターン例において、主巻要求出力の大きな変動が発生しても、HEG はストールせず、出力は安定を維持した。RTGC速度も規定値を達成しており、性能要件を満たした。これは、昇圧CHOP の導入により、回生時でも発電システム側の負荷が 0 とならないよう定電力で HEG に負荷を与え続けられた結果である。回生相から力行相への急峻な負荷遷移に対して、HEG 出力は乱れず、LIB と協調して所要電力を確保できていることが、Fig. 8~15 にて確認された。

HEG出力に関して、指令と検出値で全ての領域で約 2kWの乖離があるが、これは電圧および電流検出器の計測精度やオフセット値の調整誤差によるものが大きく、ピーク負荷が 300kW必要なRTGCにおいては影響を及ぼさない範囲である。本実証試験は出力の安定性が重要なポイントであることから、安定性の面では問題無いことが確認されている。

昇圧CHOPによる定電力制御とHEG出力制御の機能確認について考察する。昇圧 CHOP は直流中間電圧まで昇圧しつつ設定電流を出力できるため、発電システム側の電圧変動や RTGC負荷状態に依存せず HEG に一定負荷を付与できた。これにより、回生でコンバータが交流側をブロックし HEG 負荷が完全に 0 となる課題を回避した。エネルギー制御については、RTGC側の PLCでは、 q_G , q_O , q , q_M をパラメータとする充放電エネルギー制御を行っている。このエネルギー制御により、 $q_M < q$ ではLIBへ充電、 $q_M > q$ ではLIB から補完、待機中は q を 全量を充電する動作を成立させている。SOC に応じ q_G を可変し q を制御するロジックを動作確認できた。

また、約 3 か月の実証試験期間を通じて故障も発生しなかった為、従来のDEG搭載型RTGCと同じ運用が可能であり、HEG搭載型 RTGC としての信頼性要件を満たすことも確認できた。

4.3 水素消費量の検証結果

最後にHEG制御方法の違いによる水素消費量の差を確認するために取得した、各運転パターンにおける水素消費量のデータをTable2 に示す。昇圧CHOPを追加することでRTGC負荷に係わらずHEG負荷制御が可能となったことから、RTGC全体の制御方式を 2 種類

実施した。

1 つ目はHEG出力を可変とする制御であり、LIBの補充充電に必要な電力を状況に応じて供給するエンジン停止させない連続運転（運用パターン 1~3）である。

2 つ目は HEG 出力を一定とする制御であり、LIB を規定の SOC 値に到達するまでフル充電した後にエンジンを停止させ、LIB の SOC が規定値以下まで低下すると再度エンジン始動させる間欠運転（運用パターン 4）である。

Table 2. 各段階における実荷役の集計データ一覧

運用パターン	平均運転時間 [Hr/日]	平均 H2 消費量 [kg/日]	H2 燃費 [kg/Hr]	HEG 平均出力 [kW]
1	6.6	15.6	2.4	14.4
2	9.7	22.4	2.3	12.7
3	10.6	28.8	2.7	19.4
4	8.1	13.6	1.7	17.7

運用パターン 3 の停止なし制御では 2.7 kg/Hr、運用パターン 4 の間欠運転制御では 1.7 kg/Hr と、時間当たりの水素消費量が約 37% 改善した。運用パターン 3 と 4 は同一条件での比較であり、アイドリングストップ制御で運転した運用パターン 4 の方が水素消費量を削減できていることから、アイドリングストップの導入が有効であることを示している。

水素消費量が改善した背景要因として、HEG設計が定格出力（今回は 55kW）の最高負荷において高効率となるよう設計されているため、間欠運転により高出力帯の使用比率が増え、燃費が向上したと整理できる。

その他にもTable2 の結果より、運用パターン 1~3 はHEG出力可変制御で制御条件が同一であれば、自明であるがHEG運転時間内平均出力が低い（=負荷が軽い）荷役ほど平均水素消費量は少ないことも確認出来る。

5 結論

水素エンジン搭載型RTGCの課題であるインパクト負荷に対応するための制御システムを検討し、実荷役にて有効性の確認を実施した。その結果、以下の内容が確認された。

- ・昇圧チョップユニットをシステムに組み込むことで、HEG を定電力制御することが可能となり、従来の DEG 搭載型 RTGC と同等の性能を満たすことが確認された。
- ・3 ヶ月の試験期間中に故障無く運用することが出来た為、水素エンジン搭載した場合でも RTGC としての信頼性を満たすことが確認された。
- ・荷役状況および水素エンジン制御方法を変更して試験した結果、燃費が 37%改善したことから、水素消費量を改善する為にはアイドリングストップ（間欠運転）機能の追加が有効であることが確認された。

今回、技術的な課題を解決することが出来たが、暖機運転時間の長さが課題として残っている為、今後は RTGC として暖機運転時間の最適化ロジック検討も必

要である。

また、長期的な耐久性や周囲の環境条件への対応については限定的であり、長期使用する為にも水素供給インフラ拡充・法規制の課題なども必要であると考えている。

6 謝辞

本研究は、国土交通省および阪神国際港湾株式会社との共同実証事業の成果を活用しており、深く謝意を表す。

参考文献

- 1)市村欣也, 浅見織音: 水素駆動型 RTG の開発, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN (咸臨), 108 巻, 7/10, (2023)
- 2)<https://www.pa.kkr.mlit.go.jp/file/pdf/press/r7d/250417-1.pdf>
- 3)https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk4_000107.html