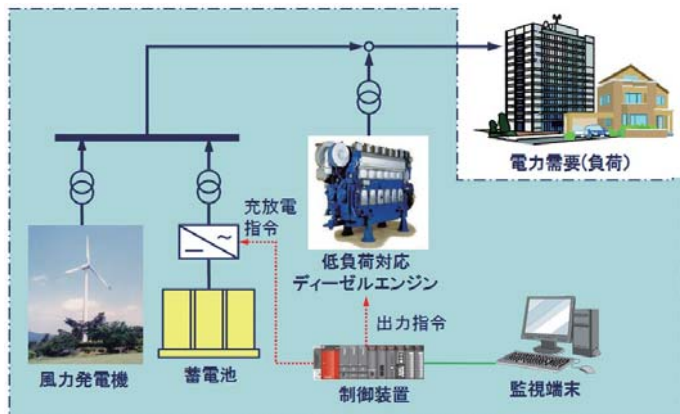


# 低負荷対応ディーゼルエンジンと風力発電のハイブリッドシステム

Hybrid Power System Combining Low Load Diesel Engines and Wind Turbines



三宅 寿英 Toshihide Miyake ①  
江口 知孝 Tomotaka Eguchi ②  
岡崎 泰英 Yasuhide Okazaki ②

## あ ら ま し

当社が扱う低負荷対応ディーゼルエンジンには、約10%の負荷でも連続運転が可能という特長がある。離島など小規模な電力システムに再生可能エネルギーを大量導入するには、その出力変動をいかに補償するかが重要となるが、低負荷対応ディーゼルエンジンであれば運転可能領域が広いこと、電力品質の維持・安定化制御には極めて有利となる。当社とバルチラ社では、実機を用いて8%負荷での100時間連続運転試験を行い、運転トレンド、燃料ノズルやピストンの汚れなどから、長期間の低負荷運転が可能であることを実証した。また当社では、この特長を活かし、離島や新興国内陸部などのマイクログリッドを対象とした、風力発電とのハイブリッドシステムを提案している。

## Abstract

Our low load diesel engines have a strong point in that continuous operation is possible even if under about 10% loads. In order to utilize a large amount of renewable energy in an independent power system on an isolated island, a control strategy to reduce the power variation of renewable energy is of utmost importance. The low load diesel engines have an advantage in maintaining and controlling electric power quality, because they can operate in a wide load range. We carried out a continuous operation test of an actual engine under 8% loads for 100 hours with Wärtsilä Corporation, and verified that the low load diesel engines could operate for a long time under a low load condition. We are proposing a hybrid power system combining low load diesel engines and wind turbines for micro-grids such as the power system of isolated islands and inland regions of developing countries.

## 1. 緒 言

国内には、本土の電力システムと連系されていない有人離島が多数存在し、ここでの電力供給はディーゼルエンジンが主流である。しかし、離島電力システムには、慢性的な原油価格の上昇に伴う燃料費の増加、大型輸送船が入港するための港湾設備の不備による燃料輸送費の増加、まばらな電力需要に対し長距離の送配電設備が必要なことによる設備投資費の増加といった課題がある。また、CO<sub>2</sub>排出量の増加など環境面の問題も顕

在化している。一方で、離島は風況や日照量などに恵まれる場合が多く、より多くの再生可能エネルギーを導入することで、発電コストの削減と環境負荷の低減を両立するシステムの開発が強く望まれている<sup>1)</sup>。

しかしながら、再生可能エネルギーは天候や風況に強く依存するため、発電出力の変動が極めて大きく、電力システムの安定運用には好ましくない。また、一般的なディーゼルエンジンは、1台あたり定格の40%～100%程度の出力調整幅しか持たないため、現状の離島では、複数のディーゼルエンジンを配備し、系統の状況に合わせて台数制御や出力制御が行われている。再生可能エネルギーが大量導入され、その出力が大きく変動した場合には、ディーゼルエンジンの起動停止

① Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部 技術研究所 精密研究室

② Hitz日立造船(株) エンジニアリング本部 プラント・エネルギー事業部 エネルギー計画部

を頻繁に繰り返さなければならない状況が生じると危惧されている。

当社が扱うバルチラ社（フィンランドの船用・陸用ディーゼルエンジンメーカー）の低負荷対応ディーゼルエンジンは、A重油を使用した場合、長期の連続運転が可能な最低負荷が定格出力の10%という特長を有している。他社製ディーゼルエンジンの多くは最低負荷40%までに制限されており、明らかに再生可能エネルギーの導入可能量で優位である。離島の電力需要特性によっては、低負荷対応ディーゼルを用いれば、再生可能エネルギーを大量導入してもディーゼルエンジンの起動停止を必要としない運用方式も可能になると考えられる。

本報では、低負荷対応ディーゼルエンジンの概要と、2010年に実施した低負荷8%（よりエンジンに過酷な条件として定格出力の8%に設定）での連続運転試験の結果を紹介する。また、当社では、低負荷対応ディーゼルと風力発電を組み合わせたハイブリッドシステムを提案しており、そのシステム構成と合計出力一定制御のシミュレーションについても報告する。

## 2. 低負荷対応ディーゼルエンジンの概要

発電用のディーゼルエンジンには、一般的に過給器（ターボチャージャー、TC）付きの4ストローク1サイクルエンジンが用いられている。4ストロークであるから、排気行程から給気行程へ移行する上死点付近においてバルブオーバーラップと呼ばれる排気弁と給気弁が両方とも開いている状態となる。中負荷から高負荷運転時には、過給によって給気に十分なエネルギーが与えられるため、排気が給気弁側へ流れて行くことはない。しかし、低負荷運転時には、排気と給気の圧力差により排気が給気弁を通過して給気管へと流れ込む、逆流現象が発生しやすくなる。このため、多くの発電用ディーゼルエンジンでは、連続運転可能な最低負荷が定格出力の約40%に設定されている。

バルチラ社の発電用ディーゼルエンジンは、連続運転可能な最低負荷について、C重油を使用した場合は定格出力の20%、A重油を使用した場合は10%としている。さらに、A重油を使用した場合には10%以下での連続運転も100時間まで許され、その連続運転後に負荷を70%以上に増加させて排気温度を安定させれば、再び10%以下での100時間連続運転が可能とされている。表1にエンジン主要目、図1にエンジン断面図を示す。バルチラ社のL20シリーズは、シリンダボア200mmクラスのトランクピストン型4ストローク1サイクルディーゼルエンジンで、船用として4,000台以上の、陸用として48プラント、88台の実績がある。バイオ燃料にも対応しており、特に離島系統などのマイクログリッドにおける発電用途としては有力な機種であると考えられる。

表1 エンジン主要目

型式（定格出力）	W6L20 (1, 200kW) W8L20 (1, 600kW) W9L20 (1, 800kW)
シリンダボア	200 mm
ピストンストローク	280 mm
エンジン回転数	900 / 1,000 rpm
平均ピストン速度	6.7 - 9.3 m/s
正味平均有効圧力	22.5 ~ 28.0 bar
シリンダ当たり出力	170 / 180 kW/cyl

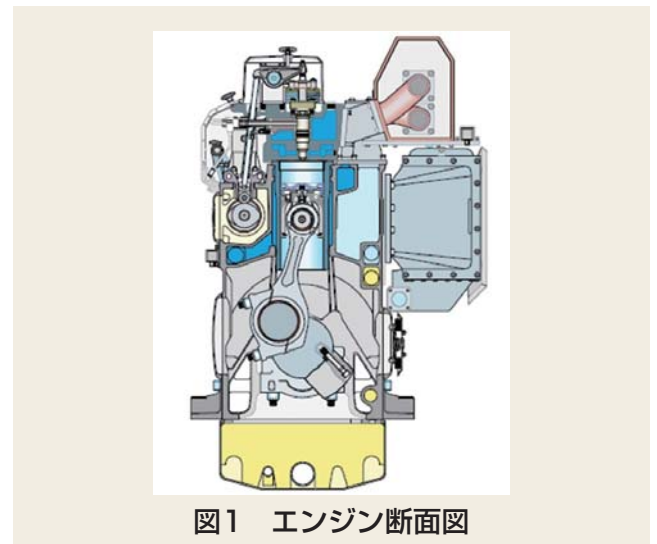


図1 エンジン断面図

燃料ノズルは多孔ノズルであり、カム軸上のプランジャポンプで加圧された燃料をシリンダ内に噴射する。潤滑油はエンジン下部のサンプタンク内に貯蔵し、機付きのポンプにより循環する。冷却水系統は高温冷却水（HT）、低温冷却水（LT）の2系統があり、HTはシリンダジャケットと給気冷却器（CAC）の1段目を、LTは給気冷却器の2段目と潤滑油をそれぞれ冷却する。冷却水のポンプも機付きである。

過給器はABB社製のTPS52を装備している。給気は屋外より給気フィルタ、給気サイレンサを通過して導入され、過給器により加圧された後、2段の給気冷却器で冷却され、給気管を通して各シリンダに分配される。燃焼後の排気は排気弁から集合排気管に行き、過給器にて仕事をした後、排気サイレンサを経て煙突より排出される。

## 3. 低負荷連続運転試験

**3.1 試験方法** 2章に示したディーゼルエンジンについて、低負荷連続運転時の性能を検証するため、バルチラ社のバスキロート研究所にて2010年8月に実機試験を行った。発電用としては発電単価が最も安い直列9気筒のW9L20がベストセラーであるが、便宜上、バスキロート研究所に実験用として常設されている直列6気筒のW6L20を使用した。定期メンテナンス後に合わせて実施したため、燃料ノズルは新品を使用し、ピストン等も十分に清掃された状態で試験は行



われた。潤滑油については、事前に100時間使用された状態であった。燃料としてはJIS規格におけるA重油に相当するLFO (Light Fuel Oil) を用いた。

まず、定格出力の8% (96kW)負荷で低負荷連続運転を行った。ここで、連続運転可能な最低負荷は10%であるが、よりエンジンに過酷な条件で評価を行うために、試験負荷を8%に設定した。期間は8月16日8時から20日12時までの100時間であった。その後、高負荷運転を行うことで、燃料ノズルやピストンに付着したすすが除去されるか確認した。その際の負荷は70% (840kW) とし、20日の14時から15時まで1時間の試験運転を実施した。安定した運転が継続できているか評価するため、全試験期間に渡って各気筒出口の排気温度や給気温度、給気圧力などのトレンドデータを収集した。また、定期的に各気筒の燃焼圧力を計測した。

低負荷運転後および高負荷運転後には、各気筒や過給器の汚れを確認するために開放点検を行った。低負荷運転後の開放点検では、最も気筒出口排気温度が高い気筒の燃料ノズルの目視確認と、ポアスコープによる燃料ノズル穴からのピストン頂面の目視確認を実施した。高負荷運転後の開放点検では、全気筒の燃料ノズル、シリンダヘッド下面、給気弁、ピストン頂面、ピストントップランド側面、ピストンリング、過給器の汚れを点検した。

### 3.2 試験結果

#### (1) 低負荷試験結果

低負荷運転中の出力、給気圧力および各シリンダ排気温度のトレンドを図2に示す。100時間を通して出力に目立った変動は発生せず、安定した運転を継続できた。各シリンダ出口の排気温度も安定しており、低負荷においても圧縮行程後の上死点付近において気筒内が十分に高い圧縮温度となっていると考えられる。試験全期間において、排気、給気、冷却水、潤滑油などの各種温度および圧力の数値は安定していた。間欠的に計測した筒内圧力も各気筒とも安定した値を示しており、気筒毎の大きなバラツキもなかった。これらから、気筒内の燃焼不良による排気温度のふらつきや、それによる負荷の変動が無く、全気筒で安定して燃焼が継続されていたことが確認できた。

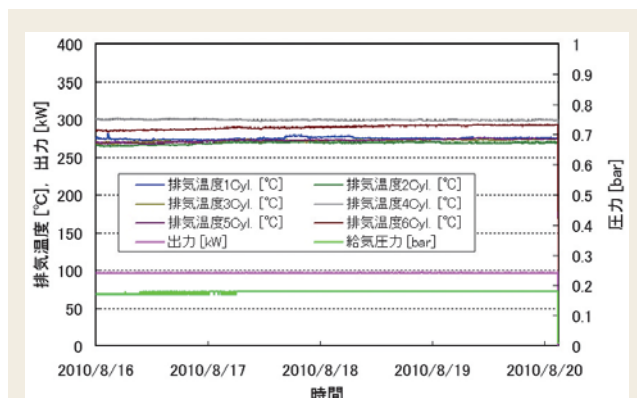


図2 低負荷試験のトレンド①

図3に、給気冷却器入口低温冷却水温度 (LT温度 CAC入口)、給気冷却器出口給気温度 (CAC出口温度)、エンジン回転数、過給器回転数のトレンドを示す。これらからも、安定運転が継続されていたと確認できる。

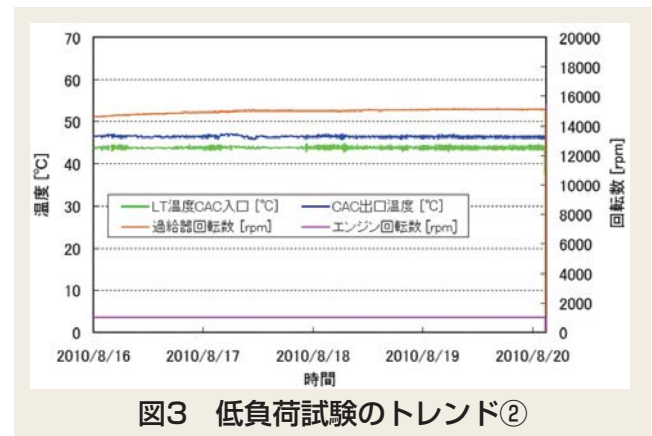


図3 低負荷試験のトレンド②

低負荷でも安定運転が継続できている理由として、まず逆流が発生していないことが挙げられる。これは、低負荷においても排気の逆流を十分に妨げることが可能な180mbarという給気圧力を、過給器により安定して発生しているためである。逆流を起こす他社の同種のディーゼルエンジンでは、過給器の設計に余裕がなく、低負荷では給気圧力が大幅に減少していると推察される。

また、各気筒出口の排気温度が安定していることから、圧縮行程後の上死点付近において気筒内が十分に高い圧縮温度となっていることが予想され、給気温度が低負荷においても常に46°C以上であったことが要因として考えられる。

更に、各気筒出口の排気温度が安定していることから、燃料ノズルのスティックが発生していないことも確認できており、燃料の温度が十分に高く、適切な粘度で噴射されていると考えられる。

#### (2) 低負荷試験後の開放点検

低負荷運転完了後、燃料ノズルの状況を確認するため、すぐに開放点検を実施した。燃料ノズルの写真を図4に示す。



図4 低負荷運転後の燃料ノズル

燃料ノズルにすすの堆積は見られるものの、8ヶ所のノズル穴が完全に見えていることが確認できた。従って、低負荷運転後も良好な状態が維持されており、継続運転が可能であるとみなせる。また、ポアスコープによりピストン頂面を確認したところ、目立ったすすの堆積は見られなかった。

(3) 低負荷運転後の高負荷試験結果 開放点検で取り外した燃料ノズルを復旧し、高負荷運転を実施した。出力と各シリンダの排気温度を図5に示す。排気温度は安定して上昇することが確認された。

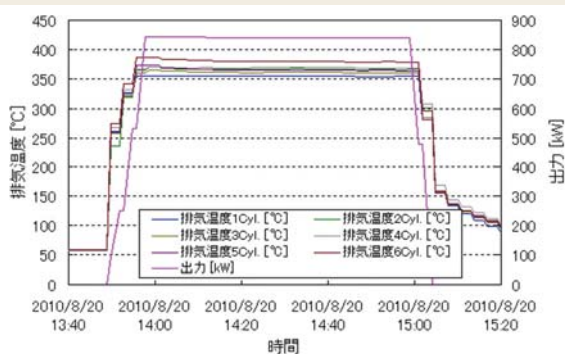


図5 高負荷試験のトレンド

(4) 高負荷運転後の開放点検 全てのシリンダの燃料ノズルを点検したところ、顕著な汚れは見られなかった。燃料ノズルの写真を図6に示す。図4と比較すると、燃料ノズルに堆積していたすすは無くなっており、100時間低負荷運転後より良好な状態とみなせる。このことから、高負荷運転によって燃料ノズルに付着したすすが燃えているといえる。

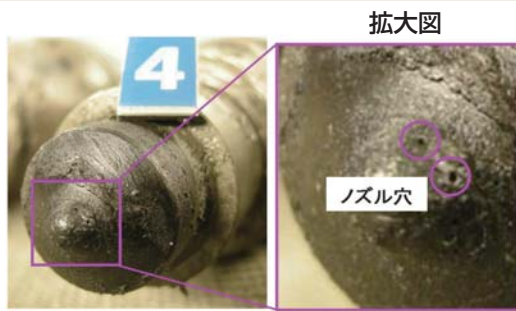


図6 高負荷運転後の燃料ノズル

シリンダヘッドの写真を図7に示す。バルブ付近にもすすの堆積はみられない。



図7 高負荷運転後のシリンダヘッド

図8、図9に開放したピストンの写真を示す。ピストン外縁部およびピストンクラウンに、燃料ノズルの穴(8ヶ所)にしたがって放射状にすすの堆積がみられるが、通常運転と同様のレベルであった。ピストントップランド側面は汚れがみられず、ピストンリングは手で問題なく動かすことができた。これらから、ピストン側面に燃焼ガスが入り込まず、燃焼は燃焼室内のみで行われたことがわかる。



図8 高負荷運転後のピストンリング(頂面)



図9 高負荷運転後のピストンリング(側面)

図10に過給器のロータ、図11にノズルリングの写真を示す。ロータにもノズルリングにも汚れがみられないことから、低負荷運転による過給器への影響はないものと考えられる。



図10 高負荷運転後の過給器のロータ



図11 高負荷運転後の過給器のノズルリング

(5) 試験結果のまとめ バルチラ社のW6L20ディーゼルエンジン実機を用いて、低負荷8%での100時間連続運転試験を行った。運転後、燃料ノズルを点検したところ、堆積物は見られるもののノズル穴を目視にて確認することができ、このまま運転を続けることが可能であると判断された。また、低負荷運転時に排気の給気側への逆流も発生しなかった。低負荷においても給気温度は46℃以上であり、給気圧力は180mbarであったことから、この高い給気温度と給気圧力が排気の持つエネルギーより大きいことから、両方の弁が開いている状態での排気の逆流を防いでいると考えられる。低負荷運転後には、70%の高負荷運転も行い、燃料ノズルの汚れが除去されることを確認した。70%負荷での運転後に開放点検を行った結果、



燃料ノズルに堆積したすすは燃えて無くなっており、100時間低負荷運転後より良好な状態であった。また、燃焼室内の汚れは通常運転と同様のレベルであり、過給器にはロータにもノズルリングにも汚れがみられなかった。以上のことから、バルチラ社のディーゼルエンジンは、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーを利用した発電設備の出力を補償し、安定して高品質な電力を供給する運用形態に適していると考えられる。

## 4. 低負荷対応ディーゼルと風力発電のハイブリッドシステム

**4.1 システム概要** 当社が提案する、低負荷対応ディーゼルと風力発電のハイブリッドシステムの構成を図12に示す。電力システムの安定運用には、出力変動の大きな風力発電が導入されても電力の需要と供給をバランスさせる必要があり、図12では、このための出力指令を低負荷対応ディーゼルエンジンに与えている。ただし、ディーゼルエンジンには機器の保護を目的とした出力変化率の制約があるため、ディーゼルエンジンのみでは風力発電の出力変動に追従できない場合がある。その際には、蓄電池の充放電制御を行って補償するという考え方のシステム構成となっている。

既述の通り、一般的なディーゼルエンジンでは連続運転可能な最低負荷が40%程度であるのに対し、当社が扱うバルチラ社の低負荷対応ディーゼルエンジンは最低負荷が10%と低いことが特長である。

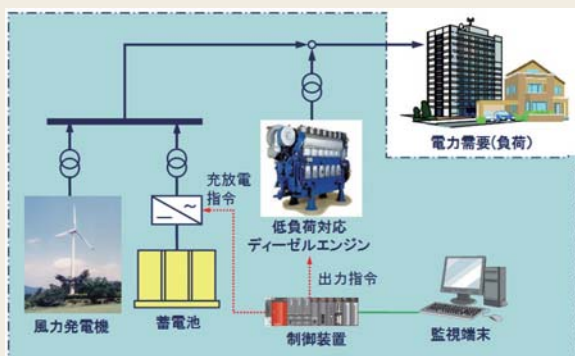
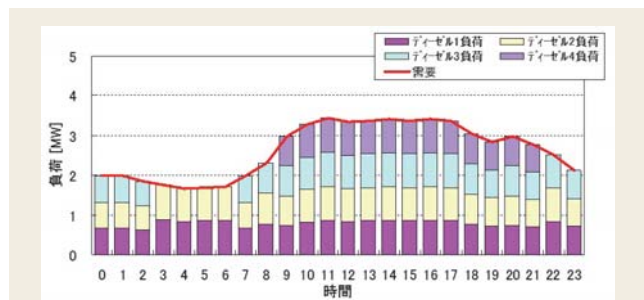


図12 低負荷対応ディーゼルと風力発電のハイブリッドシステム

図13では、中規模の離島システムを例として、一般的なディーゼルと低負荷対応ディーゼルでそれぞれ再生可能エネルギー（例えば風力発電）の導入可能量を求め、結果を比較した。図13の(a)は、日負荷曲線と再生可能エネルギーが導入されていない場合の電力システムの運用例である。この離島には、定格出力1MWのディーゼルエンジンが4基配備されており、これらの台数制御と出力制御を行いながら、電力の需給バランスをとることになる。



(a) 離島システムの運用例(中規模・夏場)



(b) 一般的(最低負荷40%)ディーゼル



(c) 低負荷対応(最低負荷10%)ディーゼル

図13 再生可能エネルギー導入可能量の比較

図13の(b)と(c)では、(a)と同様の運用条件下において、ディーゼルの最低負荷40%と10%の違いにより再生可能エネルギーの導入可能量がどのように変わるかを表している。当社が扱う低負荷対応ディーゼル(最低負荷10%)の場合、一般的なディーゼルと比較して約2倍の再生可能エネルギーを導入できる可能性が示されている。

**4.2 合計出力一定制御シミュレーション** 図12のハイブリッドシステムにおいて、電力の需給バランスをとるためには、風力発電機、ディーゼルエンジンおよび蓄電池の合計出力を需要と一致させるよう制御する必要がある。当社では、そのような制御システムの検討、低負荷対応ディーゼルの応答性検証、最低限必要な蓄電池の容量把握を目的として、動特性シミュレーションモデルを構築した。動特性シミュレーションモデルの概要を図14に示す。ディーゼルエンジンモデル、アクチュエータモデルおよび回転数制御器のパラメータはバルチラ社から入手しており、実機での負荷遮断時の過渡特性とシミュレーションモデルでの特性が一致することを確認している。また蓄電池モデルは、ディーゼルエンジンで補いきれない風力発電の出力変動を補償するよう動作させているが、kW容量に相当する上下限リミッタを設けると共に、一次

遅れ伝達関数によって応答特性を模擬している。

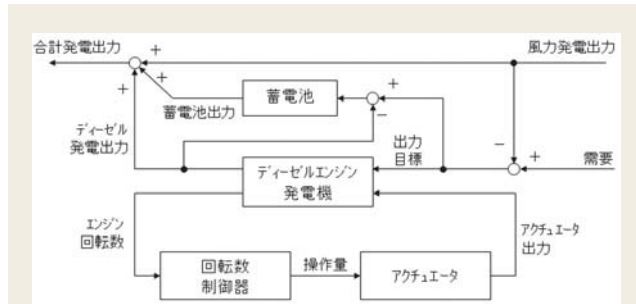


図14 シミュレーションモデルの概要

本シミュレーションモデルを用いた計算例を図15に示す。図15には、60分間の時系列データが示されており、ディーゼルエンジンと風力発電および蓄電池の合計出力を800kWで一定に制御することが目的となっている。ここでは、バルチラ社の直列6気筒ディーゼルエンジンW6L20を想定しているが、エンジンには機器の保護を目的として、以下のような出力変化率制約があるため、これも考慮に入れた。

出力上昇：16kW/s (0%→100%出力まで60秒)

出力下降：65kW/s (100%→0%出力まで15秒)

また、風力発電データには、当社が所有する設備での計測値を参考に作成した模擬データを用いている。制御性能の評価指標は、東北電力殿が示している出力一定制御型風力発電の系統連系技術要件を参考に、出力偏差の1分平均値が設備容量の2%以内を達成することとした<sup>2)</sup>。

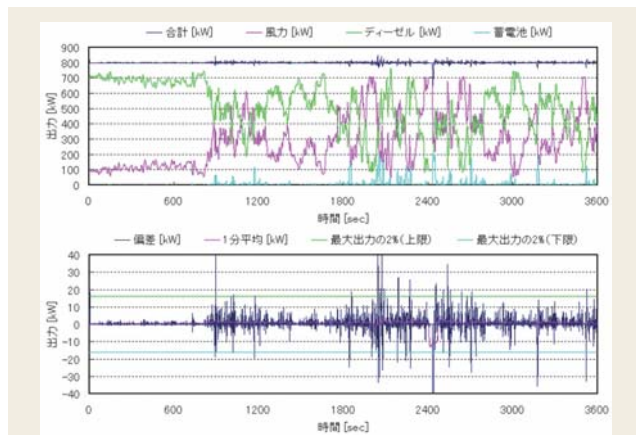


図15 出力一定制御シミュレーション結果

図15の下図より、全期間において合計出力と目標値(800kW)の偏差の1分平均値が許容範囲内であることがわかる。ただし、風力発電出力が急に低下した時に、ディーゼルエンジンの出力を急上昇させる場合、変化率制約が16kW/sと厳しいため、蓄電池による出

力補償を行わなければ許容範囲に収まらなかった。シミュレーション結果より、この時の蓄電池の所要kW容量は200kW(上下限リミッタの値)、60分間の所要kWh容量は8kWh(放電量の積算値)と試算されている。以上のような計算を行えば、蓄電池の瞬時出力および積算出力から、制御目標の達成に必要な蓄電池容量を試算できる。つまり、要求電力品質を実現するために必要な機器の基本設計が可能となった。

## 5. 結 言

当社では、バルチラ社の低負荷対応ディーゼルエンジンを扱っており、実機での100時間の低負荷連続運転試験によりその有効性を実証している。

将来の離島電力系統には、大量の再生可能エネルギーが導入されると考えられるが、その分ディーゼルエンジンの出力は下げる必要があり、従来のエンジンのように最低負荷40%という制約下では、頻繁な起動停止は避けられない。この問題に対し、低負荷対応ディーゼルは、運転可能領域が広いいため、大きなメリットがあると考えられる。当社が提案する低負荷対応ディーゼルと風力発電のハイブリッドシステムは、発電コストと環境負荷の低減が期待されるため、離島に限らず、新興国内陸部僻地などの小規模電力系統においても貴重な技術に成り得ると考えている。

## 参考文献

- 1) エネルギー総合工学研究所：「離島等独立系統における新エネルギー活用型電力供給システム安定化対策実用化可能性調査」報告書，2006。
- 2) 東北電力：出力一定制御型風力発電設備の周波数変動対策に関する技術要件，2009。

### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部

技術研究所 精密研究室

三宅寿英

Tel : 06-6551-9312 Fax : 06-6551-9841

e-mail : miyake\_t@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Business & Product Development

Headquarters

Technical Research Institute

Precision Laboratory

Toshihide Miyake

Tel : +81-6-6551-9312 Fax : +81-6-6551-9841

e-mail : miyake\_t@hitachizosen.co.jp



三宅 寿英



江口 知孝



岡崎 泰英