ガスエンジンを利用した自然エネルギー電源の出力変動補償*

山崎 由大^{*1}, 小林 大悟^{*2}, 野口 雄平^{*2}, 牛島 宏太^{*2}, 金子 成彦^{*3}

Application of Gas Engines to Compensation of Power Fluctuation from Renewable Energy Generations

Yudai YAMASAKI^{*1}, Daigo KOBAYASHI, Yuehi NOGUCHI,
Kota USHIJIMA and Shigehiko KANEKO

^{*1} University of Tokyo. Dept. of Mechanical Engineering
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

In order to increase the capacity of renewable energy in power systems, it is necessary to reduce power fluctuations. In this paper, the potential of gas engines (GEs) is evaluated by means of dynamic simulation in hybrid power systems consist of GEs and photovoltaic cells (PV) supply power to a large grid. First, basic characteristics of gas engines were investigated for load changes. The small gas engine, its maximum output is 9.9kW, shows quicker response of output and lower generating efficiency than the gas engine of 350kW output. The load response of both engines is influenced by the amplitude and the frequency of the output demand, and not by the bias load. Next, the simulations were implemented using the real power profile of PV. As a result of simulations, 9.9 kW GE is very useful to compensate PV power fluctuation because of its quick response for the load change. The efficient system to use GEs to achieve both the suppression of the PV's power fluctuation and the higher efficiency of the system is also discussed. By combining a larger scale GE with small scale GEs, the system to control preferentially the small GEs shows higher system efficiency at the same output response condition.

Key Words : Distributed Generation, Internal Combustion Engine, Renewable Energy, Power Fluctuation, Dynamic Simulation

1. はじめに

近年, 地球温暖化や化石資源枯渇の問題から, 太陽光や風力といった自然エネルギーを利用した発電を活用する取り組みが盛んに行われている. しかし, これらの電源の出力は天候によって変化し, 現状の商用電力系統に大量に導入された場合には秒から分の短周期の電力変動が生じる. そのため系統電源への影響を小さくするためにマイクログリッド⁽¹⁾の導入が検討されている. 一方, 小規模な電力ネットワークにおいては, なまし効果が小さくなるなどによる電力品質の悪化が懸念されている. この対策としては, 蓄電池によって自然エネルギーを利用した発電装置の出力変動を補うことが有力な手段と考えられている. 蓄電池は応答性が良いため, 急峻な電力変動への対応, また季節による電力需給の調整といった利用も可能であり, その適切な利用方法について多くの研究がなされている^{(2), (3), (4)}. 一方で, 蓄電池には導入コストが高く, 寿命が短いという問題が存在する⁽⁵⁾. また, 蓄電池自体が発電することはできない. 非常時などを考慮すると, 自然エネルギーと蓄電池以外にも多様なエネルギーの協調利用により電力システムの堅牢性を確保しておくことが重要と考えられる.

そこで, 自然エネルギーの変動補償にガスエンジン (GE) やガスタービン等の出力調整可能な分散型電源を利

* 原稿受付 2013 年 1 月 22 日

^{*1} 正員, 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 東京大学大学院 工学系研究科

^{*3} 正員, フェロー, 東京大学大学院 工学系研究科

E-mail: yudai_y@fiv.t.u-tokyo.ac.jp

用することを考える．分散型電源を変動補償に利用できれば，蓄電池導入量の削減が可能となり，また既に設置済みのコジェネレーションシステムなども利用できることからコスト低減が可能となり，結果的に自然エネルギーの普及促進にもつながる．これまでも GE 等を変動する自然エネルギーとの協調利用を検討した研究は存在し，1 台のガスエンジンをベースロードとして利用し，燃料電池と組み合わせて用いた例⁽⁶⁾や，定格出力が 9.9kW と 25kW と小型の範疇で異なる 2 台のガスエンジンと蓄電池とを組み合わせた場合のシステムの過渡特性について調査した例⁽⁷⁾はある．しかし，市販ガスエンジンは他にも，中型（数百 kW 級），大型（MW 級）と異なるものが存在する．マイクログリッド等のエネルギーシステムで自然エネルギーと併用し，かつ変動補償に利用することを考えた場合には，異なるサイズのエンジンそれぞれについて，また，それらを組み合わせて利用する場合の変動補償能力について把握しておく必要がある．さらに，ガスエンジンでは都市ガスなどの燃料を使用するため，その効率も含めて把握，評価する必要がある．しかしながら，先に示したようなエンジンを含んだエネルギーシステムの評価においては，エンジンの出力を 1 次遅れ系等の伝達関数を用いて表現したシミュレーション^{(6),(7),(8),(9)}が主で，効率の評価については十分ではない．

本研究では，GE の電力変動補償能力について，エンジンのダイナミクスモデルを用いたシミュレーションにより効率も含めて評価する．具体的には，市販ガスエンジンの出力の動特性および効率を再現できるモデルを用いて，まず太陽光発電（PV）の出力変動を正弦波形と仮定して，出力が一桁異なる小型と中型の 2 種類のエンジンの変動抑制能力および効率をそれぞれ評価した．その後，実測された PV の出力変動を用いての評価も行った．さらに，異出力エンジンを複数台組み合わせた系での動特性および効率の評価を行った．

2. シミュレーション手法

2・1 想定するシステム

本研究では，PV および GE から成り，商用系統には一定の電力を供給するシステム（図 1）を想定する．このシステムにおいては，PV の出力変動に応じて GE の出力を変化させ，両方の合計出力が一定の目標値となるように制御することとなる．PV と GE の出力合計値と設定した一定目標値との時々刻々の差の積分値を評価することによって，ガスエンジンの電力変動補償能力を評価する．

2・2 評価指標

変動補償の評価指標として，進士ら⁽¹⁰⁾によって提案されている S [%] を採用した． S は式(1)のように定義される．

$$S = \frac{1}{P_{tie,o}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t (P_{tie} - P_{tie,o})^2 dt} \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

ただし， P_{tie} は PV とガスエンジンの出力の合計値， $P_{tie,o}$ は合計出力目標値， T は評価時間（30 min）であり， $S \leq 3 \%$ が許容範囲とされており⁽¹⁰⁾，一般に用いられる 30 分同時同量よりも厳しいものとなっている．

また，本研究では発電効率に関しても評価を行った．発電効率は，GE の発電効率だけでなく，GE と PV を合わせた系全体の発電効率 η_s も式(2)により求め評価した．

$$\eta_s = \int_{t-T}^t \frac{P_{tie}}{Q_{fuel}} dt \times 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Fig.1 Schematic of considered system

Table 1 Specifications of gas engines

Name of engine	CP10V	EP350G
Manufacturer	YANMAR	YANMAR
Grid connection	Inverter	Synchronous
Rated output [kW]	9.9	350
Generating efficiency at rated output [%]	21.9	40.5
Output range [kW]	0 - 9.9	140 - 350
Moment of inertia [kgm ²]	0.5	47.7

Fig.2 Outline of engine dynamic model

ただし、 Q_{fuel} は単位時間あたりにエンジンで使用された燃料の熱量である。

2・3 対象としたガスエンジンおよびシミュレーションモデル

2種類の定格出力の異なるガスエンジンを評価対象とした。評価対象としたエンジンの諸元を表1に示す。CP10Vはインバータ連系方式の小型GEで定格9.9kW、負荷のステップ応答の時定数は1秒程度である^{(7),(11)}。一方、EP350Gは定格350kWとCP10Vの約35倍となっており、後に示すように定格出力では発電効率は小型のCP10Vよりも高いものとなっている。

CP10Vのモデルには、著者らがこれまでに構築してきたエンジン平均値モデル(MVM)を使用した。モデルの概略を図2に示す。このモデルは、エンジンが連続的に予混合気を吸入、シリンダ内への流入予混合気量に応じて発熱量を計算しエンジンの出力を求める。また、フライホイール等を含めた回転慣性を考慮してエンジンの回転数も求めることができるようになっている。従来の研究で用いられている伝達関数や無駄時間の形式で表現されたエンジンのダイナミクスモデル^{(6),(7),(8)}とは異なり、GEの排気量などの諸元を考慮したものとなっており、エンジンの仕様や制御手法の変更を比較的容易に反映できるものとなっている。なお、このモデルは、実機を用いた過渡応答実験との比較において動特性をよく予測できることが確認できており、また、出力の動特性だけではなく効率の予測もできるようになっている⁽¹²⁾。図3には、定常運転時のシミュレーションにより予測されるCP10Vの発電効率を示す。定格では22%ほどの発電効率となり、それよりも下の負荷では発電効率は低下する。CP10Vのモデルおよび動特性の詳細については既報^{(11),(12),(13)}を参照されたい。

EP350Gのモデルは、CP10Vとは実際のエンジンの詳細なメカニズムは異なるが、これまでにCP10V用に構築してきたMVMをもとに、発電効率および動特性をカタログ値^{(14),(15)}および動特性の計測結果⁽¹⁶⁾と合致するように今回新たに構築した。図4には、このモデルにより予測されるEP350Gの定常運転時の発電効率を示す。図中にはカタログ値も併記してあるが、モデルによりカタログ値を再現できていることがわかる。また、図5には、EP350Gの負荷の応答性の予測結果をボード線図で示す。図中には実験結果⁽¹⁶⁾も併記してあるが、動特性に関してもモデルにより概ね再現できていると言える。

2・4 太陽光発電の変動

まずエンジンの基本的な動特性を確認するために、PVの出力変動を仮想的に単純化した正弦波を用いた。その後、PVの実際の変動に対する有効性を確認するために実測データを用いた。使用した実測データは、定格3.08kWのPVにおける30分間の測定値で、サンプリング周期は1秒、出力の分解能は0.01kWである。この実測値には、2009年4月1日から6月15日までの2か月半の間の実測結果の中で特に変動が激しいものを選定した。変動の激しさを評価するために、ある時刻から5秒後に太陽光発電出力が定格の何%分変化したかを算出し、そ

Fig.3 Generating efficiency of CP10V

Fig.4 Generating efficiency of EP350G

Fig.5 Bode diagram of EP350G

Fig.6 PV power fluctuation

の変化が生じた頻度を数えた結果を図 6 に示す。2 か月半の昼間（5:00～19:00）の計測結果では 5 秒間の出力の変化は 5%以内に収まることがほとんどであるが、5 月 27 日の 11:30～12:00 までの 30 分間のデータでは、出力変化の範囲が多様で、エンジンとしてはより厳しい条件で評価されることになる。なお、後述するシミュレーションにおける PV 実変動値は、この定格 3.08 kW の PV での実測値を、パネルの枚数を増やした場合も様な出力が得られるという仮定のもとで、計算で想定する PV 定格値に応じて定数倍することで模擬した。パネル枚数を増やした場合、平準化効果も期待できるが、この条件ではそれを考慮しないため、より厳しい条件での評価となる。

3. GE の変動補償能力の評価

3・1 変動の周波数および振幅の影響

まず、各エンジンの基本的な変動補償能力を把握するため、PV 出力を正弦波と仮定してシミュレーションを行った。計算対象としたシステムを図 7 に示す。制御方法は、同図に示すように、潮流目標値 $P_{tie,0}$ をそれぞれのエンジンの定格出力都市、PV 出力 P_p の差分を出力指令値として与える方法を採用した。なお、図 7 に示すように、CP10V では回転数でフィードバックループを構成しているのに対し、EP350G では出力を用いている。これは、EP350G は同期発電機のため、系統連系時には系統の周波数に固定されるためである。

図 8 に、CP10V の場合について、PV 出力の平均（バイアス）値を $PV_{bias} = 5 \text{ kW}$ 、振幅 $A_{PV} = 3 \text{ kW}$ で周波数を $f_{PV} = 0.05 \text{ Hz}$ および 0.5 Hz として計算した場合の、PV 出力、GE 出力およびその合計値の時間履歴を示す。PV の変動周波数が 0.05 Hz の場合（図 8 左）、PV の出力変動に対して GE が出力を変化させて合計出力をほぼ一

Fig.7 Block diagrams for evaluation of fluctuation reduction ability of (a) CP10V and (b) EP350G

Fig.8 Power profiles of PV and engine (Left: $f_{PV} = 0.05$ Hz, Right: $f_{PV} = 0.5$ Hz)

定に保てていることが確認できる．一方，PV の変動周波数の高い 0.5 Hz の場合（図 8 右），PV 出力変動に対して GE 出力が遅れており，合計出力を 10 kW 一定の目標値と設定しているにも関わらず大きな変動が生じた．

同様に，PV 出力の正弦波のバイアス，振幅，周波数を変化させた計算を行い，その時の CP10V の発電効率，システムの発電効率， S 値をまとめたものを図 9 に示す．PV 出力の正弦波状の変動の振幅と周波数が同じであれば，バイアス値によらず S 値はほぼ一致しており，CP10V の変動補償能力は変動のバイアス値に依らないことがわかった．また， $S \leq 3\%$ を許容範囲とすれば，PV 出力の変動が 0.05 Hz より低い周波数であれば，今回最大の振幅とした 5 kW まで全て変動が補償可能であるといえる．次に，発電効率について見ると，GE の発電効率，系全体の発電効率とともに，バイアス値が等しい条件では振幅や周波数によらずほぼ同じ値となっている．つまり，発電効率はバイアス値のみに依存するという結果となった．系の合計出力を 10 kW 一定に保つことを条件とする時，PV 出力のバイアス値が大きいほど GE の平均出力は小さくなり，図 3 から分かるように GE の発電効率は低下することとなる．一方で PV と GE の合計出力が 10 kW で，PV 出力のバイアス値が大きいほど GE の平均出力が小さくなり，GE に投入される燃料量が低下するために，システムの効率は上昇する．

次に，同様にして EP350G の変動補償能力および発電効率を調べた．その結果を図 10 に示す．ただし，EP350G での計算では，図 7(b)に示すように， $P_{tie,0} = 350$ kW，出力制限を 140 kW~350 kW とし，PV の最大値は，潮流

Fig.9 Reduction effect of CP10V for PV fluctuation

Fig.10 Reduction effect of EP350G for PV fluctuation

Fig.11 Power profiles of PV and CP10V

の目標値とエンジンの最低出力の関係から 210 kW となるようにバイアス値と振幅を設定した. その結果, EP350G の変動補償能力も変動のバイアス値に依らないことが明らかになり, また, $S \leq 3\%$ を満たす PV 出力変動の周波数は, 振幅 105 kW の場合に最大の 0.01 Hz となった. CP10V に比べて, EP350G は負荷の応答が悪いことが分かる. 発電効率に関しても, PV 出力のバイアス値の高い場合に, GE の効率は低下するがシステムの効率は上昇しており, CP10V の場合と同様の傾向となった.

3・2 太陽光発電の実変動の補償

次に, 各 GE について, PV 実変動の補償能力について調査した. まず, CP10V について, PV の最大出力をエンジンの定格出力とほぼ同じ 10 kW として, 変動補償を行わせた場合の各出力の時間履歴を図 11 に示す. PV の変動に対して GE が対称的に出力を変化させ, 合計出力をほぼ一定に維持していることがわかる. 表 2 に, CP10V

Table 2 Evaluation result of PV fluctuation reduction with CP10V and EP350G

	CP10V	EP350G	
PV capacity [kW]	10	140	210
S [%]	1.33	3.26	6.39
Generating efficiency of system [%]	30.6	46.9	50.8

および EP350G における PV 出力変動補償の評価結果を示す。CP10V の場合では、CP10V の定格出力と同等の出力を持つ PV に対して、 $S \leq 3\%$ を満足させることができた。

次に EP350G について同様の検討を行った。PV 最大出力が 210 kW の条件では S 値は 6% を超え、変動補償は十分には行えなかった。変動補償能力の目安となる $S = 3\%$ は、PV の最大出力がおよそ 140 kW の時には満たされることが分かった。なお、系全体の発電効率は CP10V の場合よりも高くなることが確認された。

4. 複数台 GE による変動補償

4・1 検討するシステム

ここまでは GE 単体の基本的な動特性および電力変動の補償能力を評価してきた。小型 GE は中型に比べて早い応答が可能な一方で中型よりも効率は低くなるといった特性を持つことが分かった。そこで、より大きな PV を有する系を想定し、CP10V と EP350G を組み合わせて用いることによる変動補償能力および効率を検討することにした。

検討した系の構成を表 3 に示す。系 A、B は、EP350G だけを用いる系 E に複数台の CP10V を加え、EP350G で発電効率を保ちつつ変動補償を行うことを目指した系である。また系 A と B の違いは、GE への出力指令の与え方で、A の場合は 2 種類の GE に同時に同じ出力指令値を与えている（パラレル方式、図 12）⁽⁷⁾ のに対し、系 B は EP350G の出力を優先的に変化させ、残った変動を CP10V により補償する制御方法（カスケード方式、図 13）^{(17),(18)} を用いた。なお、系 A は、2 種の GE を用いたマイクログリッドの実証研究において採用された制御系⁽⁷⁾で、全体が 1 つのフィードバックループからなる系であり、GE 間で信号をやりとりする必要がない単純な構造である。また、系 B は GE と蓄電池を含むマイクログリッドにおいて、蓄電池の充放電量を低減するため GE を優先的に利用するために考案された制御系^{(17),(18)}で、これを GE の制御に適用することで、効率の高い EP350G を優先的に利用することが可能となるため、系全体の効率向上が期待できる。一方、系 C は、系 D から太陽光発電量を増加させる場合に、CP10V だけを増加させるのではなく EP350G を用いることで、GE の台数を低減したうえで電力変動補償を行うことを目指した系である。なお、系 D、E はそれぞれ CP10V、EP350G のみにより変動補償を行う系であり、比較の基準とする。

それぞれの系について、先述したように PV の実測データを、想定した PV 容量に応じて定数倍したものを変動として与えたシミュレーションを行った。なお、系に導入された PV の容量は表 3 に示す通りである。

計算例として、系 A において CP10V の台数を 15 台とした場合の各装置の出力履歴を図 14 に示す。PV の出力変動に伴い、EP350G および CP10V ともに出力を変化させて、合計出力を目標値の 350 kW に保とうとしているが、EP350G は出力の下限値が 140 kW の仕様となっていること、また CP10V の方が EP350G に比べて出力応答が早いことから、EP350G の出力範囲は 140 kW から 170 kW 程度で動き、また PV 出力が急激に変化した時刻（例えば、400 秒付近など）では、CP10V が主に変動補償装置として動作していることが分かる。

4・2 各システムの変動補償能力と発電効率の比較

先に示した各系における S 値および系の発電効率を評価した。その結果を図 15 に示す。系 A、B において CP10V を 8 台以上導入した場合と系 C、D では $S \leq 3\%$ となっており、表 2 にあるように EP350G 1 台だけでは十分に補償できない PV 導入量についても、CP10V を複数台追加することで変動補償が可能となる。

2 種類の GE の組み合わせ方が同じで、各 GE の出力指令の入力の仕方が、パラレル方式とカスケード方式と異なる系 A と系 B を比較すると、いずれの系でも CP10V の台数の増加とともに、 S 値は小さくなり系の発電効率は低下していくことが分かる。これは CP10V が EP350G よりも過渡の出力応答が早く、発電効率が低いことに起

Table 3 Configuration of system A - E

System	Num. Of EP350G	Num. Of CP10V	PV Capacity	Total output	Control method
A	1	4-22	210 kW	350 kW	Parallel
B	1	4-22	210 kW	350 kW	Cascade
C	1	22	420 kW	560 kW	Parallel
D	0	22	210 kW	210 kW	-
E	1	0	210 kW	350 kW	-

Fig.12 Block diagram of the system A (Parallel method)

Fig.13 Block diagram of the system B (Cascade method)

困している。CP10Vの台数が同じ場合では、 S 値は系Aが最大で2ポイント低く、系の発電効率は系Bが最大2ポイントほど高かった。これは、系Aでは、出力指令がEP350GとCP10Vに同量入ることから、出力応答の早いCP10Vが早く出力を上げることによって、エンジンの総出力に占める割合がCP10Vの方が高くなるため、変動補償の能力は高いが効率が低く、一方、系Bでは、先にEP350Gで補える変動は補った後でCP10Vを動かすような制御を行うために、EP350Gの出力に占める割合が高くなり、変動補償の能力は低くなるが効率は高くなるためである。

系Cは、系AおよびBの結果から判断して、十分なCP10Vの台数を確保できていることから S 値は3%以下となっており、また、系CではEP350Gが1台あるため、システムの効率はCP10Vのみの系Dに比べて、8ポイントほど高いものを実現できている。なお、系Eについては、前章でも示したように十分な補償能力は確保できていない。

Fig.14 Power profiles of PV, CP10V and EP350 (System A, CP10V*15)

Fig.15 Evaluation of various systems for PV fluctuation reduction

さらに、エンジンへの出力指令値の与え方を比較するために、系 A, B について、 S 値と系の発電効率の関係について整理し直したものを図 16 に示す。系 A において CP10V を 8 台とした場合（図中△）と系 B において CP10V を 15 台とした場合（図中●）を比べると、 S 値は 1% 程度でほぼ同じであるが、発電効率は系 A（CP10V 8 台）の方が 4 ポイント程度高くなっていることがわかる。これは、パラレル方式では、応答速度は速いが発電効率の低い CP10V が、カスケード方式に比べて CP10V が変動補償に早く対応し S 値を下げることに貢献し、その結果必要とされる CP10V の台数が減り、結果的に発電に占める EP350G の割合を高くすることができたためである。両システムで、EP350G および CP10V を同じ台数確保できる場合には、エンジンへの負荷指令値の入力方式と S 値およびシステムの発電効率の関係は、パラレル方式が補償能力優先で、カスケード方式は発電効率優先となる。一方、ある一定の S 値を確保するという条件では、パラレル方式の方がシステムの発電効率は高くなり、CP10V の台数もカスケード方式よりも減らすことができることからコストの点でも有利と言える。

Fig.16 Relationship between S index and generating efficiency of system A and B

5. 結 論

太陽光などの自然エネルギーの出力変動補償に対するガスエンジンの有効性について、ガスエンジンの動特性を考慮したシミュレーションにより評価した結果以下の知見が得られた。

- (1) 小型 GE は中型 GE に比べて、出力の過渡応答速度は速いが効率は低くなる。いずれのエンジンも単体での変動補償時には、出力の変動補償能力は、PV 出力のバイアス値には依存せず、PV 出力の変動周波数およびその振幅によって決まる。また、システムの効率は PV 出力の変動周波数およびその振幅によらずほぼ一定となり、PV 出力のバイアス値によって変化することが、物理モデルによって確認できた。
- (2) 現在市販されている定格 9.9 kW の小型 GE では、同規模出力の PV を想定した正弦状の出力変動に対して、0.05Hz より低い周波数の出力変動については、振幅の大きさに関係なく蓄電池を用いずに補償可能であることが分かった。また定格 350kW の GE については、GE の可変出力幅相当 (210kW) の PV 規模の正弦状の出力変動に対しては、0.005Hz より低い周波数では蓄電池を用いずに補償可能であることが分かった。さらに、実際の PV の計測データをもとにエンジンへの負荷指令を決定し変動抑制を行わせたところ、定格 9.9kW の小型 GE では、同じ定格出力の PV の変動抑制が可能であることが確認された。
- (3) 相対的に低応答高効率の中型 GE1 台と高応答低効率の小型 GE 複数台を組み合わせたシステムにおいて、エンジンへの負荷指令値の入力方法が、PV の電力(A1-5-2)変動補償能力に及ぼす影響を調査した。小型 GE が同じ台数の場合は、パラレル方式の方がカスケード方式に比べて変動補償能力は高いが効率は低くなった。一方、小型 GE 台数が異なるが同程度の変動補償能力を確保した条件では、パラレル方式の方が小型 GE の必要とされる台数は少なくよく、その結果システムの発電効率が良くなることが分かった。

文 献

- (1) Lasseter, R. H., "MicroGrids" 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings, Vol. 1, (2002), pp.305-308.
- (2) 町田定之, 谷辰夫, "太陽電池・蓄電池を利用した負荷平準化システムの導入効果", 電気学会論文誌 B, Vol. 123, No.1 (2003), pp.37-46.
- (3) 赤塚元軌, 原亮一, 北裕幸, 伊藤孝充, 植田喜延, 斎藤裕, "大規模太陽光発電所の出力変動抑制用蓄電池容量の試算", 電気学会論文誌 B, Vol.131, No.1 (2011), pp. 87-93.
- (4) Xu, L., Member, S., Miao, Z., Member, S. and Fan, L., "Control of a battery system to improve operation of a microgrid", 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp.1-8.
- (5) Tan, X., Li, Q. and Wang, H., "Advances and trends of energy storage technology in Microgrid", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.44, No.1 (2013), pp.179-191.

- (6) 小原伸哉, “エンジン発電機をベースロード運転する燃料電池マイクログリッドの動特性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.72, No.720 (2006), pp. 2072-2079.
- (7) 佐々木勇太, 坂東茂, 浅野浩志, 田上 誠二, “連系点潮流制御下におけるマイクログリッド内の自然変動エネルギーの導入量評価手法”, 電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 1 (2009), pp. 102-110.
- (8) Ma, X., Wang, Y. and Qin, J., “Generic model of a community-based microgrid integrating wind turbines, photovoltaics and CHP generations”, *Applied Energy* 2013.
- (9) 進士誉夫, 山上哲雄, 秋澤淳, 柏木孝夫, 藤田吾郎, 松原正芳, “分散型電源および蓄電池を用いたマイクログリッドにおける潮流変動抑制”, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, No.16-10 (2006), pp.384-387.
- (10) 進士誉夫, 関根剛史, 秋澤淳, 柏木孝夫, 藤田吾郎, 松原正芳, “分散型電源によるマイクログリッド内の電力変動抑制に関する考察”, 電気学会論文誌 B, Vol. 126, No. 1 (2006), pp. 14-20.
- (11) 山崎由大, 戸松豪, 永田裕樹, 金子成彦, “ガスエンジンの負荷追従特性に関する研究”, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.07 (2007), pp.35-36.
- (12) Nagata, Y., Tomatsu, G., Yamasaki, Y. and Kaneko, S., “Estimation of dynamic characteristic of gas engine using simulation model”, *12th Asia-Pacific Vibration Conference, Dynamics, Measurement and Control (DMC) Division*, JSME (2007).
- (13) 菅野雅信, 赤石誉幸, 山崎由大, 金子成彦, “マイクログリッドにおけるガスエンジンの動特性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.076, No.763 (2010), pp.403-405.
- (14) ヤンマー, “エネルギーシステム EPG シリーズ”,
<http://www.yanmar.co.jp/energy/products/normalGenerator/enePowerGas.html> (参照日 2011 年 2 月 6 日) .
- (15) 柏木孝夫, “天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008”, 日本エネルギー学会, p. 243.
- (16) 下田英介, 沼田茂生, 馬場旬平, 仁田旦三, 正田英介, “マイクログリッドにおける負荷変動解析と電源周波数統制評価を用いた複数分散型電源の制御戦略と設備容量設計法”, 電気学会論文誌 B, Vol.129, No.12(2009), pp.1553-1559.
- (17) 馬場旬平, 下田英介, 沼田茂生, 広橋滋人, 菊池卓郎, 仁田旦三, 正田英介, “マイクログリッドの有効電力統合カスケード制御における計測及び伝送時間遅れの影響”, 電気学会全国大会, No.6-037 (2007), p.64.
- (18) 沼田茂生, 下田英介, 馬場旬平, “複数種類の分散電源によるエネルギーネットワーク構築”, 電気評論, 4 (2008), pp.32-36.