Development and Evaluation of Control System for Microgrid Supplying Heat and Electricity

Yasuhiro Kojima Senior Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Masanobu Koshio Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Shizuka Nakamura Senior Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Keywords: microgrid, load dispatching control, renewable energy, weather-dependent energy, dispersed generators

Photovoltaic (PV) and Wind Turbine (WT) generation systems are expected to offer solutions to reduce green house gases and become more widely used in the future. However, the chief technical drawback of using these kinds of weather-dependent generators is the difficulty of forecasting their output, which can have negative impacts on commercial grids if a large number of them are introduced. Thus, this problem may hinder the wider application of PV and WT generation systems. The Regional Power Grid with Renewable Energy Resources Project in Hachinohe, funded by New Energy and Industrial Technology Development Organization, was launched to seek a solution to this problem.

The scope of the project is to develop, operate, and evaluate a Dispersed Renewable Energy Supply System with the ability to adapt the total energy output in response to changes in weather and demand. Such a system would reduce the impact that PV and WT generation systems have on commercial grids and allow the interconnection of more Dispersed Energy Resources (DER). In other words, the main objective of this project is to demonstrate an integrated energy management system, or a type of microgrid, as a new way of introducing DERs. The system has been in operation since October 2005 and will continue operation until March 2008. Through the project period, the data on power quality, system efficiency, operation cost, and environmental burden will be gathered and a cost-benefit analysis of the system will be undertaken.

In this paper, firstly we introduce the concept of microgrid for reducing negative impact of natural energy. Secondly we illustrate the structure of electric and thermal supply control system for microgrid. To ascertain the optimum solution, it is necessary to consider many variables including long-term factor such as efficient operation of thermal plant and short-term factor such as flat control of tie-line power flow. Therefore we develop the control system consists of four stages; weekly operation planning, economic dispatching control, tie-line control and local frequency control. The operation planning and the economic dispatching control are formulated as combinatorial optimization problem including continuous valuable optimization problem, and a Problem Space Search method and QP method can be applied. For the tie-line control and frequency control, basically PID control theory can be applied. And finally demonstration results and evaluation results are shown. The Fig. 1 shows a example of the operation planning in a typical winter weekday. Proposed method can obtain appropriate operation plan for generators, battery, boilers and purchased power satisfying

given constraints. Figure 2 shows the analysis result of relation between fluctuation cycle and strength as electric power quality, that achieved by cooperative control of the economic dispatching control and the tie-line control in online operation phase. The figure shows that, in short cycle region, fluctuation of “demand” is dominant, on the other hand in long cycle region, impact of weather-dependent energy’s fluctuation expands (noted as “PV”), and our proposed control system can effectively reduce impacts of weather-dependent energy fluctuation (noted as “controlled”).

Fig. 1. Example of the operation planning

Fig. 2. Relation between fluctuation cycle and strength

マイクログリッド向け需給制御機能の開発と実証検討

上級会員 小島 康弘* 正員 古塩 正展**

上級会員 中村 静香**

Development and Evaluation of Control System for Microgrid Supplying Heat and Electricity

Yasuhiro Kojima*, Senior Member, Masanobu Koshio**, Member, Shizuka Nakamura**, Senior Member

Photovoltaic (PV) and Wind Turbine (WT) generation systems are expected to offer solutions to reduce green house gases and become more widely used in the future. However, the chief technical drawback of using these kinds of weather-dependent generators is the difficulty of forecasting their output, which can have negative impacts on commercial grids if a large number of them are introduced. Thus, this problem may hinder the wider application of PV and WT generation systems. The Regional Power Grid with Renewable Energy Resources Project was launched to seek a solution to this problem.

The scope of the project is to develop, operate, and evaluate a Dispersed Renewable Energy Supply System with the ability to adapt the total energy output in response to changes in weather and demand. Such a system would reduce the impact that PV and WT generation systems have on commercial grids and allow the interconnection of more Dispersed Energy Resources (DER). In other words, the main objective of this project is to demonstrate an integrated energy management system, or a type of microgrid [1], as a new way of introducing DERs. The system has been in operation since October 2005 and will continue operation until March 2008. Through the project period, the data on power quality, system efficiency, operation cost, and environmental burden will be gathered and a cost-benefit analysis of the system will be undertaken.

In this paper, firstly we introduce the concept of microgrid for reducing negative impact of natural energy, and secondly illustrate the structure of electric and thermal supply control system for Microgrid, especially for the Hachinohe demonstration project. The control system consists of four stages; weekly operation planning, economic dispatching control, tie-line control and local frequency control. And finally demonstration results and evaluation results are shown.

キーワード：マイクログリッド，需給制御，自然エネルギー，再生可能エネルギー，分散型電源

Keywords: microgrid, demand and supply control, renewable energy, weather-dependent energy, dispersed generators

1. はじめに

近年、CO₂削減など環境負荷低減の要求が高まっており、燃料電池、バイオマス発電、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギーの開発・実用化が進められている。しかし、太陽光、風力などの自然エネルギーは、出力が不安定で予測制御も困難なため、今後大量の自然エネルギーが商用系統と連系した場合には、系統の安定性や信頼性に対

して悪影響が及ぶことが懸念されている。一方、これまで大量の電気の安定供給を目的として大規模集中型発電所が整備されてきたが、計画から運用開始までのリードタイムが長く、また大規模発電所の立地条件を満足する地域は需要地から遠い場所が多いため熱回収効率まで含めた総合エネルギー効率の向上には限界があった。このため、需要家側で電熱併給可能な分散型電源の導入が進んでいるが、系統運用側から見ればこれらも不可観測・不可制御であり大量導入による影響が懸念される。これらの課題を解決する手段の一つとして、近年マイクログリッドという考え方が注目されている。マイクログリッドとは、分散型電源と需要設備から構成される小規模系統を商用系統と一点で連系、あるいは商用系統から独立させて、この中で電熱需給制御を行うことが可能なシステムのことをさす⁽¹⁾⁽²⁾。

これまでに、マイクログリッドに関しては、たとえば分散

* 三菱電機（株）先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
Advanced Technology R&D center, Mitsubishi Electric Corp.
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661

** 三菱電機（株）神戸製作所
〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-7-3
Kobe works, Mitsubishi Electric Corp.
2-7-3, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310

型電源の需給調整手法の検討⁽³⁾、電力変動抑制効果に関する検討⁽⁴⁾などの理論検討や、世界各国でマイクログリッドの実証試験が行われている⁽⁵⁾が、自然エネルギー変動抑制効果に関して実際の制御機器を用いた実証試験結果の報告は少ない。このような背景のもと、我々はマイクログリッドのための需給制御技術の開発と実証試験による検証を実施している^{(6)~(8)}。そこで本論文では、まずマイクログリッドによる自然エネルギー出力変動の抑制と分散型電源の運用の考え方と、われわれの構築したマイクログリッド実証試験設備の概要について説明する。次に自然エネルギーの出力変動安定化とシステムの経済運用を目的としたマイクログリッド向けの4階層需給制御機能について説明する。最後にマイクログリッド実証試験の結果について、提案するマイクログリッド向け需給制御の効果を自然エネルギー出力変動抑制の観点から評価し、有効性を示す。

2. マイクログリッドと需給制御

〈2・1〉 マイクログリッドの構成 一般的にマイクログリッドの構成要素として、ガスエンジン・燃料電池等のコージェネレーション電熱源、太陽光発電・風力発電・バイオマスボイラ等の再生可能エネルギー電熱源ならびに電熱需要を考える。このうち、太陽光発電や風力発電については出力を精度よく予測する事は困難であるが、エネルギー効率の面からは出来るだけ有効に利用する必要がある。これらの電熱源を用いて負荷設備の需要に対して経済的かつ安定的に運用するためには、二次電池や蓄熱槽等の電熱貯蔵設備の利用が不可欠となる。これらの設備間は配電線や熱パイプラインで接続されるとともに、通信網を介したシステム化が必要である。

〈2・2〉 八戸マイクログリッドの概要 我々は、NEDO技術開発機構の委託事業「新エネルギー等地域集中実証研究」における「八戸市水の流れを電気で返すプロジェクト」においてマイクログリッド向け需給制御システムを開発し、2005年10月から実証試験を実施している。

実証試験における機器構成を表1に、エネルギー供給の概略を図2に示す。総電力需要610[kW]に対し、電源は総供給力710[kW]のうち自然エネルギー100[kW] (2007年

3月以降はさらにPVを50[kW]増設、図表中*部)を含む機器構成となっている。また、熱需要に対しては消化ガスボイラ、木屑ボイラ、ならびにガスエンジンの排ガスボイラにより熱供給を行う。実証試験に導入したエネルギー(燃料)は、太陽光、風力、下水汚泥消化ガス、木屑(パルク)の4種類であり、いずれも再生可能エネルギーである。

〈2・3〉 需給制御機能 マイクログリッドを経済的に運転するためには、需要の変動以外に自然エネルギーや場合によっては昼夜間の負荷シフト等も考慮して分散型電源の運転を適切に行う必要がある。需要には、電力需要と熱需要が存在するが、分散型電源は電熱併給が一般的であり両者を分離して考える事はできない。このため、地域をまたいだ融通が困難な熱のバランスを主として考え、電力については商用系統から買電(もしくは売電)することが一

表 1 実証試験の設備一覧
Table 1. Equipments list of demonstration project.

	Equipment	Rating	Remarks
Electric power supply	Gas engine	170 [kW] x 3	Digestive gas
	Battery	±100 [kW] 1440 [kWh]	Lead-Acid
	PV(1) *	50 [kW]	
	PV(2)	10 [kW] x 3	
	WT(1)	8 [kW] x 2	
	WT(2)	4 [kW]	
Heat supply	Gas boiler	4 [t/h]	Digestive gas
	Wood boiler	1 [t/h]	Woody debris
Electric power demand	City hall, Office Bldg, Schools	610 [kW]	
Heat demand	Digester chamber	10 [Gcal/day]

図 1 マイクログリッドの構成
Fig. 1. Structure of microgrid system.

図 2 八戸プロジェクトにおけるエネルギー供給の概念図
Fig.2. Schematic view of energy supply in Hachinohe project.

般的である。このように、各種の運用制約のもとで最適電熱利用を行うことを最適経済負荷配分と呼ぶ。

また、マイクログリッドが商用系統と連系されていれば、予測・制御が困難な自然エネルギーの出力変動は、商用系統が吸収する。しかし、今後このような自然エネルギーが増大すると、商用系統に与える影響は無視できなくなる。また、商用系統と連系しない運用形態（非常時や離島）を考えれば、周波数を一定に保つためには電力の需要と供給が一致している必要がある。このような制御を需給バランス制御と呼ぶ。以下ではこれら2つの需給制御について、八戸プロジェクトにおける実証試験で開発したマイクログリッド向け需給制御機能の実現方法について記述する。

3. 最適経済負荷配分

〈3・1〉 基本的な考え方 マイクログリッド内の電熱需要に対して、各種制約のもと経済性・環境性等を考慮した評価関数値が最小となるよう、電熱源ならびに電熱貯蔵設備を最適に制御する。この制御には、燃料や蓄電設備など1週間程度の効率運用を考慮すべき項目と、時々刻々変化する電力需給バランスなど、時間レンジの異なる項目が混在している。このような全ての項目を必要となる最も短い計算刻みで最適化する事は計算効率が悪いいため、電熱併給の計画は30分刻み1週間分の計画を毎日立案し、時々刻々の計画からのずれを数分周期で補正制御するよう最適経済負荷配分問題を階層化する。本稿では、前者を需給運用計画、後者を経済負荷配分制御と呼ぶ。

〈3・2〉 需給運用計画 需給運用計画では、過去の実績および気象予報情報から求めた電熱需要予測に対して、

1週間先までを考慮した電熱需給の最適計画（時間刻み30分）を立案する。計画立案にあたっては、需給バランス、燃料（消化ガス、木屑）の消費量、蓄電設備容量、ならびに需要予測誤差や自然エネルギーに対する変動対応予備力量を制約条件として、電熱源の起動停止状態、出力調整可能な電熱源の出力値、および商用系統との連系線潮流（買電量・売電量）を、目的関数（燃料コストや環境コスト等）が最小となるよう決定する。以下に需給運用計画で扱う最適化問題を定式化する。

【目的関数】

$$\min(aF_1 + bF_2)$$

$$F_1 = (\text{制御対象機器の経済コスト} + \text{買電経済コスト})$$

$$F_2 = (\text{制御対象機器の環境コスト} + \text{買電環境コスト})$$

【制御変数】

- ① 制御対象機器の時間帯別運転状態（離散値）
- ② 制御対象機器の時間帯別出力（連続値）
- ③ 連系点における時間帯別買電量（連続値）

【制約条件】（優先順位順）

- ④ 制御変数②③の上下限制約
- ⑤ 最短運転／停止時間制約
- ⑥ 起動／停止時パターン制約

- ⑦ 汚泥消化槽温度上下限制約
- ⑧ 汚泥消化槽熱供給日量制約
- ⑨ 燃料消費量制約
- ⑩ 燃料貯蔵設備容量制約
- ⑪ 蓄電電力量制約
- ⑫ 電力需給バランス制約
- ⑬ 買電量設定変更回数
- ⑭ 運転予備力制約

ここで、目的関数における F_1 は燃料費（木屑購入費）、起動費（助燃用重油）、買電の経済コスト、 F_2 は CO_2 排出量などの環境コストに関する目的関数であり、 F_1 と F_2 にそれぞれ重みを付けて、その合計値を1つの目的関数として最小化する。買電単価は時間帯ごとに設定可能としているが、本実証試験では契約の実態に合わせて昼夜一定とした。①はガスエンジンの運転/停止状態、二次電池の充放電/均等充電状態、消化ガスボイラの運転/停止状態、木屑ボイラの停止/弱燃焼/中燃焼/強燃焼状態、また②はガスエンジン・二次電池の出力である。上下限值④について、二次電池出力②の上下限制約は通常運転時と均等充電時で異なる。また買電量③の上下限制約は、マイクログリッドから系統への逆潮流が発生しないための下限制約と自営線に系統からの電力が流れ込まないための上限制約を設定した。⑤、⑥は設備毎に①の状態遷移に関連する制約条件である。発生した熱は汚泥消化槽の加温に使われるが、⑧で与えられる一日に決められた熱量の投入制約とともに各時間帯で温度上下限制約⑦を考慮した。ガス使用量はガスエンジン、ガスボイラの出力から従属的に決まるが、本システムでは消化ガスの日発生量予測値に対する使用量の制約⑨ならびにガスタンクの上下限制約⑩を考慮する。蓄電池の蓄電残量は蓄電池出力②と充放電効率から従属的に決まり、その上下限制約が⑪である。ここで対象期間の最終蓄電量は初期蓄電量と等しいという制約を与えた。⑬は連系点潮流を極力一定にするために買電量変更回数を1日2回とする制約条件を設定可能とした。運転予備力⑭は、需要予測の誤差考慮分として需要予測の10%と、自然エネルギー変動分として、自然エネルギー出力が0になる場合と、季節・時間帯ごとの想定最大出力になる場合とを考慮し、これらの変動を変動吸収可能なように設定している。

この需給運用計画問題は、制御対象機器の状態を決定する離散値問題と、運転中機器の出力値および買電量を決定する連続値問題からなる混合整数計画問題となる。離散値問題の解法としてタブサーチ法を取り入れた問題空間探索法⁹⁾を適用し、各機器の運転状態の評価は、各機器の制御量（連続値）を二次計画法により最適化することにより行う。なお、制約条件に対する違反量は、優先順位に応じた係数を乗じてペナルティとして目的関数に加算した。

〈3・3〉 経済負荷配分制御 経済負荷配分制御（EDC）は、3分周期で将来2時間先までの需給バランスを考慮した最適化計算（時間刻み3分）を実施し、ガスエンジンの起動停止と出力、蓄電池の充放電量を制御する。これを需

給運用計画と同様に以下のように最適化問題として定式化する。

【目的関数】

$$\min(aF_1 + bF_2)$$

F_1 = (制御対象機器の経済コスト)

F_2 = (制御対象機器の環境コスト)

【制御変数】

- ① 制御対象機器の時間帯別運転状態
- ② 制御対象機器の時間帯別出力

【制約条件】(優先順位順)

- ③ 制御対象機器出力上下限制約
- ④ 最短運転／停止時間制約
- ⑤ 起動／停止時パターン制約
- ⑥ 汚泥消化槽温度上下限制約 (最終時刻)
- ⑦ 燃料消費量制約 (最終時刻)
- ⑧ 蓄電電力量制約 (最終時刻)
- ⑨ 電力需給バランス制約
- ⑩ 運転予備力制約

ここで、買電量については前日通告運転を前提としたため制御変数から除外する。1 週間の長期トレンドを考慮して最適化すべき項目 (燃料消費計画、熱需要供給計画、蓄電池運用計画) については、前述の 1 週間を対象とした需給運用計画で得られた当該期間最終時点の計画値を制約条件⑥⑦⑧として与えた。この問題についても、運用計画問題と同じく組合せ最適化手法と連続値最適化手法を適用する。

4. 需給バランス制御

〈4・1〉 連系点電力制御 3 分周期で動作する経済負荷配分に対して、本機能では、需要変動および自然エネルギー変動によるアンバランスを補正するために、1 秒周期で連系点潮流の一定制御を行う。また、この 1 秒周期制御の累計誤差を吸収するため、6 分を目安とした同時同量制御も合わせて行なっている。

同時同量制御には、PPS の同時同量制御の考え方を 6 分に短縮しその時間帯の中で電力量を合わせる方法と、制御周期ごとに制御誤差の 6 分移動平均を評価する方法がある。前者は例えば 6 分間の前半で発生したアンバランス量を後半で調整して総量をあわせるような場合、自然エネルギーの変動周期によっては変動が拡大される可能性がある。このため本実証試験では後者の移動平均方式を採用した。本実証試験では、需給バランスの目標制御精度として、前日計画買電量と連系点電力実績値の 6 分間移動平均誤差を、各時刻の需要の 3% 以内に抑える事とした。

連系点電力制御は、図 3 に示すように、目標値と実績の偏差に対して比例積分制御を 1 秒周期で実施し、EDC 指令値に対する補正指令として扱った。制御対象の応答特性 (蓄電池は 1 秒) と伝送遅延 (最大 2 秒) を考慮して比例制御は $T_1 = 10$ 秒程度の一次遅れフィルタ、積分制御は長周期の需給バランス制御には EDC が対応することから $T_2 =$

図 3 連系点電力制御と経済負荷配分制御

Fig.3. Tie-line control and economic dispatching control.

図 4 階層型需給制御方式

Fig.4. Hierarchy of load dispatching control.

6 分の一次遅れフィルタで実現した。各制御対象機器のゲイン K は、制御対象の応答特性を考慮して、応答の速い二次電池は主として比例制御を、ガスエンジン (時定数約 1 分) は主として積分制御を分担させるようを決定した。これに対して、経済負荷配分制御では計算タイミングにおける各制御対象機器の出力合計値を、経済性を考慮して再配分することで、経済性と応答性の両方を満足する制御が可能となる。

〈4・2〉 ローカル周波数制御 マイクログリッドを商用系統に連系している場合、マイクログリッド内の有効・無効電力の過不足は系統から供給されるため周波数問題や電圧問題は発生しないが、非常時や離島での自立運用を考えるとこれらの問題についても検討する必要がある。例えば、本実証試験で採用した 200 kW 級ガスエンジンの慣性定数は小さく、100 kW の需給アンバランスが 0.1 秒継続すれば、周波数変動は最大約 3 Hz に及ぶ。すなわち連系時は問題にならない需要変動が自立運転系統では問題となる。

このような自立運転系統時の周波数変動を抑えるために、蓄電池のインバータを 10 msec 周期で高速に制御する方式を採用した。本稿では、この制御をローカル周波数制御と呼ぶ。自立運転時は、本ローカル周波数制御が微分制御と比例制御の一部を担い、中央では連系点電力制御が周波数制御として比例制御の一部と積分制御を担うことで、応答性と制御精度の両立を実現している⁽¹⁰⁾。

以上で述べた需給運用計画、経済負荷配分制御、連系点電力制御、ならびにローカル制御の 4 階層で構成される需給制御機能を図 4 に示す。

5. 実証試験による検証

本章では、八戸マイクログリッドにおける需給運用計画結果、需要変動や自然エネルギーの出力変動に対する負荷追従特性について、実証試験中に得られた結果を報告する。なお、今回の実証期間中では目的関数としては F_1 :経済コストのみを用いている。

〈5・1〉 需給運用計画 需給運用計画における計画対象期間は将来7日先までであるが、ここではそのうち経済負荷配分制御に引継ぐ翌日の1日分に着目して計画結果を考察する。図5に電力需給計画を、図6に熱需給計画を示す(いずれも(a)冬季平日, (b)春季平日, (c)夏季平日である)。

図5, 図6(a)の冬季平日の需給計画では、冬季は電力需

図5 電力需給計画例

Fig.5. Examples of the electric power operation planning.

要が大きく、電力需要の大半をガスエンジンで供給するには燃料(消化ガス)が不足するため、昼間帯に買電量を増やした計画が得られている。買電量の変更回数は2回に設定しているが、優先順位の高い燃料制約を満足するために21時以降の買電量が徐々に変化している。二次電池については充放電ロスが存在するため、運転効率面からは充放電を抑えた計画となることが望まれる。計画では二次電池が18時前後に放電する計画が得られているが、ガスエンジンの部分負荷効率、買電量一定制約、燃料制約、蓄電量制約を考慮した妥当な計画値となっている。なお、ガスエンジン3台は同一特性であり運転時間の均等化を図るために起動停止優先順位を日々変更している。この結果、早朝は2号機のみが運転しているが、3台運転から2台運転となった時点で2号機を優先して止める運用となっている。

熱需給計画に関しては、冬季の熱需要は電力需要と同様

図6 熱需給計画例

Fig.6. Examples of the thermal operation planning.

に大きくなるが、消化ガスを電力供給に使用するため熱供給は主に木屑ボイラで行う計画が得られている。また、熱需給計画では、ガスエンジンの排熱を利用してボイラへの給水予熱を行うため、ガスエンジンの運転台数が増加する昼間帯に多くの熱供給を行い、消化槽温度が制約範囲の52度～55.5度の範囲となる計画が得られている。

図5、図6の(b)の春季平日の需給計画は、鉛蓄電池の均等充電を実施する日の計画例である。春季は冬季に比べて電力需要が少なく、消化ガスの残量に余裕生まれるため、電力需給計画では買電量を下限値一定とした計画が立案されている。また、均等充電期間に必要な蓄電量もガスエンジンの出力増発で対応できている。熱需給計画につい

ては、主に燃料費が発生しない消化ガスボイラにより熱供給を行い、不足分を木屑ボイラによる熱供給で補う計画が得られていることが分かる。

図5、図6(c)の夏季平日の需給計画は、木屑ボイラが定期点検で停止する日の計画例である。夏季も春季と同様、冬季に比べ電力需要が小さい。また、夏季は一年を通じて最も熱需要が小さい時期となる。木屑ボイラの定期点検停止により、熱供給を消化ガスボイラだけで行う必要があるため、消化ガスの貯蔵設備容量制約を満足するよう、買電量を増やした電力需給計画が得られている。

〈5・2〉 オンラインの自動需給制御 オンラインでは、経済負荷配分制御と連系点電力制御の協調制御による自動需

図7 制御結果例

Fig. 7. Examples of control result.

図8 急激な負荷変動への追従

Fig. 8. Control result with rapid demand change.

図9 制御精度の分布

Fig. 9. Histogram of control error.

給制御が行われる。自動需給制御結果の一例を図 7 に示す。上から順に蓄電設備蓄電容量 [kWh] (Battery capacity: 通常は設備容量の 60~90%に相当する 864~1296 kWh で運用), 各発電機出力 [kW] (GE1, GE1+2, Battery, PV+WT) および需要家受電電力合計 [kW] (Demand: 自然エネルギーを負の負荷として含む), 6 分間移動平均制御 [%] (Control error) を示している。ガスエンジン 1 台の出力可能範囲は 85~170 kW であるが, 図から需要および自然エネルギーの変動に対して蓄電池の充放電とガスエンジン運転台数を適切に切り替えながら追従制御し, 買電量を計画値の 5 kW で一定に制御できている事がわかる。

また, 図 8 には図 5(b) に示す休日で太陽光発電が急激に変動をしている時間帯を拡大表示したものである。急激な太陽光出力変動に対しては, 連系点電力制御の機能により, 急峻な変動には蓄電池が対応, 緩やかな変動にはガスエンジンが対応している様子が分かる。

図 9 に 6 分間平均制御誤差の度数分布を示す。ここでは, 2006 年 4 月から 9 月までと, 運用実績に基づき連系点電力制御における比例ゲイン, 積分ゲインをハンチングが発生しない範囲で増大させた後の 10 月から 12 月のデータをプロットしている。6 分間平均制御誤差の目標精度 3% に対する滞在率は, 4 月から 9 月は 99.0% (平日: 99.5%, 休日: 97.8%), 10 月以降は 99.99% であり, 目標を達成できていることがわかる。

6. 結果の分析

本章では, マイクログリッドの目的である自然エネルギー変動の抑制効果の検討を行う。マイクログリッド内の変動成分は, 大きく分けて次の 3 つの要素から構成される。

- (1) 周期の長い需要変動・自然エネルギー (PV) 変動
- (2) 数分程度の需要変動・自然エネルギー変動
- (3) 負荷特性による数秒程度の需要変動

このうち, (3) については, 系統全体の規模から見れば変動周期に相関性はなく大数の法則により平滑化され系統に与える影響は少ないと考えられる。したがって, (1), (2) の変動に対する抑制効果でマイクログリッドの需給制御の効果を評価することが望ましいと考えられる。

そこで, 1 秒周期計測データをウェーブレット変換することによりマイクログリッド内の各変動要素を変動周期成分ごとに分離し分析を行った。図 10 は, 12 月の日中 8 時から 16 時までの各変動成分に関して, 横軸を変動周期 [秒], 縦軸を 2 乗平均変動振幅 [kW] としてプロットしたものである。図中の「Demand+PV」は需要家が自然エネルギーを無対策で導入した際に系統に与える変動, 「PV」は自然エネルギーの変動, 「Demand」は PV 導入前の変動, 「Controlled」はマイクログリッド化後の変動である。したがって「Demand+PV」から「Controlled」を差し引いたものがマイクログリッド導入による需要を含めた変動削減量となる。さらに, PV 導入後の制御結果「Controlled」から PV 導入前の需要変動分「Demand」を差し引くことで, マイ

図 10 変動周期毎の変動抑制効果

Fig. 10. Relation between fluctuation cycle and control efficiency.

クログリッド化した PV を導入したことによる変動増加分「PV Outflow」(需要変動も抑制している場合は負になるがここでは 0 としている) が得られる。

図 10 から, 以下のことがわかる。

- 本システムにおける自然エネルギー導入量は全需要の約 16% であるが, 1 分以上の領域では自然変動の影響が全変動の約 50% を占める。一方 30 秒以下の領域ではその影響は少ない。したがって, 自然エネルギー抑制マイクログリッドの需給制御としては 1 分以上の変動成分の抑制が特に重要である。
- 本システムでは, マイクログリッド化した自然エネルギー導入に伴う変動成分の増加 (図 8 の PV_Outflow) がほぼ 0 に抑制できている。このことから, マイクログリッド化による自然エネルギー変動抑制の効果が確認できる。

なお, 10 秒付近ならびに 100 秒付近で自然エネルギーの変動が増加している。前者は連系点電力制御で短周期成分を一次遅れフィルタにより除去していることならびに計測誤差の影響と考えられる。後者については主として積分制御を分担するガスエンジンの追従する時間領域で発生していることから, ガスエンジンの指令値に対する制御不感帯が原因と考えられる。

7. おわりに

本稿では, 「八戸市水の流れを電気で返すプロジェクト」において開発したマイクログリッドの需給制御について, 需給制御問題構造を階層構造化した制御方式を提案し, 実証試験実績により目標とした制御性能が得られることを確認した。また, マイクログリッドの導入の目的である自然エネルギー変動抑制に関しては, 各要素の周期成分に着目した分析を行い, 自然エネルギー流出抑制の効果を確認した。

今後の本プロジェクトでは 2008 年 3 月までの実証期間で, 以下の点について検討を行う予定である。

- (1) 長期にわたるデータ収集により、経済性、効率性に関する分析
- (2) 導入設備の一部の運用を抑制することなどで電力品質と経済性のトレードオフの確認
- (3) 系統から切り離れた自立運転
- 最後に、本研究を進めるにあたりご協力・ご支援いただいた、NEDO 技術開発機構、三菱総合研究所ならびに八戸市の方々に感謝の意を表します。
- (平成 19 年 1 月 30 日受付、平成 19 年 7 月 6 日再受付)

文 献

- (1) “Integration of Distributed Energy Resources The CERTS MicroGrid Concept”, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS), LBNL-50829 (2003-10)
- (2) T. Goda, Y. Takuma, Y. Izui, Y. Kojima, E. Takeuchi, and K. Takasaka: “Microgrid”, ISBN: 4902553074 (2004) (in Japanese)
合田忠弘・田熊良行・泉井良夫・小島康弘・竹内英次郎・高坂 幹：「マイクログリッド」, 日本電気協会新聞部 (2004)
- (3) K. Takahashi, H. Kita, E. Tanaka, and J. Hasegawa: “A Method for Balancing between Supply and Demand Based on Distributed Autonomous Operation of an Isolated System in FRIENDS”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.10, pp.1039–1048 (2006-10) (in Japanese)
高橋一仙・北 裕幸・田中英一・長谷川淳：「FRIENDS における自律分散運用に基づく自立系統運転時の需給調整手法」, 電学論 B, **126**, 10, pp.1039–1048 (2006-10)
- (4) T. Shinji, T. Sekine, A. Akisawa, T. Kashiwagi, G. Fujita, and M. Matsubara: “Discussion on Reduction of Power Fluctuation by Distributed Generation in Micro Grid”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.1, pp.14–20 (2006-1) (in Japanese)
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」, 電学論 B, **126**, 1, pp.14–20 (2006-1)
- (5) M. Barnes, G. Ventakaramanan, J. Kondoh, R. Lasseter, H. Asano, N. Hatziairgyrios, J. Oyarzabal, and T. Green, “Real-World MicroGrids — An Overview”, IEEE System of Systems Engineering Symposium (2007)
- (6) Y. Fujioka, H. Maejima, S. Nakamura, Y. Kojima, M. Okudera, and S. Uesaka: “Regional power grid with renewable energy resources: A demonstrative project in Hachinohe”, CIGRE, C6-305 (2006)
- (7) M. Kosho, Y. Kojima, and M. Kataoka: “Control system for Micor-grid supplying heat and electricity”, *Mitsubishi Electric Giho*, Vol.80, No.3 (2006) (in Japanese)
古塩正展・小島康弘・片岡道雄：「マイクログリッド需給制御システムの開発」, 三菱電機技術報告, **80**, No.3 (2006)
- (8) Y. Kojima and M. Kosho: “A Demonstrative Research on a Micro-Grid ~A Online Demand and Supply Control Method for Micro-Grid~”, Proc. of 2006 Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan (2006) (in Japanese)

- 小島康弘・古塩正展：「マイクログリッドの実証による検討」, 平成 18 年電気学会 B 部門大会 (2006)
- (9) 中村静香：「最急降下法を用いた問題空間の探索—電力系統復旧への適用」, 電気学会電力技術研資, PE-91-33 (1991)
- (10) K. Temma, Y. Kono, M. Shimomura, M. Kataoka, T. Goda, and S. Uesaka: “Proposal and Development of Power Quality Improvement Method under Islanding Operation in a Micro-Grid”, *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.10, pp.1032–1038 (2006-10) (in Japanese)
天満耕司・河野良之・下村 勝・片岡道雄・合田忠弘・上坂 真：「マイクログリッドの自立運転時の電力品質維持手法の提案と開発」, 電学論 B, **126**, 10, pp.1032–1038 (2006-10)

小 島 康 弘 (上級会員) 1966 年 1 月 10 日生。1990 年 3 月大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月、三菱電機 (株) 入社。現在、先端技術総合研究所にて、主として電力流通システムをはじめとする社会インフラシステムに対する知的情報処理技術の適用に関する研究に従事。IEEE 会員。

古 塩 正 展 (正員) 1970 年 2 月 22 日生。1992 年 3 月筑波大学第一学群自然科学類物理専攻卒業。同年 4 月三菱電機 (株) 入社。主として、最適化技術を適用した電力系統の運用計画・制御システムの開発に従事。

中 村 静 香 (上級会員) 1949 年 3 月 31 日生。1973 年 3 月成蹊大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月三菱電機 (株) 入社。主として、電力系統への最適化技術の適用に関する研究・開発に従事、現在に至る。工学博士 (東北大学)。1990 年オーム技術賞。情報処理学会会員。