

分散電源系統における需給制御システム技術

Supply and Demand Control System for Power Systems with Distributed Power Supplies

勝野 徹 KATSUNO Tohru

飯坂 達也 IIZAKA Tatsuya

林 巨己 HAYASHI Naoki

太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーを利用した分散電源は、自然条件に応じて出力が変動するため、離島や電力過疎地域など脆弱な電力系統では需給バランスの維持が難しいという問題が懸念される。

富士電機ではこの問題を解決するために、需給運用計画、経済負荷配分制御、負荷周波数制御という制御周期の異なる三つの需給制御機能を備えた階層型需給制御システムを開発した。システムに対してシミュレーションによる性能検証を実施し、需給運用計画および負荷周波数制御の有効性を確認した。

The output of renewable energy sources such as solar and wind power fluctuate frequently. Therefore, it is concerned that maintaining the supply-demand balance in a rural area or an isolated island is difficult. To solve this problem, Fuji Electric has developed a hierarchical supply and demand control system with different control cycles for supply and demand planning, economic load dispatching control and load frequency control. The above functions of the developed system have been verified by digital simulations with promising results.

1 まえがき

世界的に太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを利用した分散電源に対する関心が急速に高まっており、導入拡大に向けた取組みが強化されている。わが国においては、エネルギー政策の基本である3E（エネルギーセキュリティ、温暖化対策、効率的な供給）の実現を図る上で、再生可能エネルギーの導入拡大が急務であると指摘されている。

2010年6月に改定された政府の「エネルギー基本計画」においても一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーを利用した分散電源の割合を2020年までに10%にするとの高い目標が掲げられた⁽¹⁾。この目標に対して、2020年に2,800万kWの太陽光発電、490万kWの風力発電が導入される計画である。しかし、再生可能エネルギーを利用した分散電源は、日射量、風速などの自然条件に応じて時々刻々と出力が変動するため、離島などの脆弱（ぜいじゃく）な電力系統では系統の周波数に変動を生じさせ、負荷に悪影響を与えることが懸念されている⁽²⁾。

この問題を解決する技術としてマイクログリッドが注目されている。特に、再生可能エネルギーの導入により周波数変動の増大が懸念される離島では、エネルギーマネジメントシステム（EMS：Energy Management System）を活用した需給制御システムの早期普及が期待されている^{(3),(4)}。

本稿では、分散電源に対応した需給制御機能を中心に、開発した階層型需給制御システムの概要およびシミュレーションによる性能の検証結果について述べる。

2 階層型需給制御システムの概要

図1に、階層型需給制御システムの概要を示す。太陽光

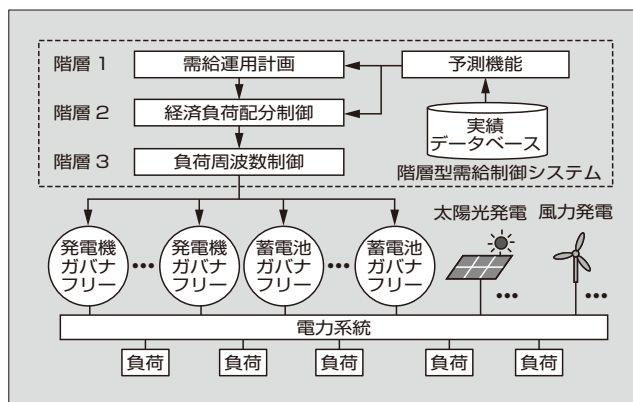


図1 階層型需給制御システムの概要

発電や風力発電などの分散電源の出力、および負荷の変動周期に応じた各種周波数制御によって、時々刻々と変化する負荷（需要）と発電（供給）を常にバランスさせるように発電機・蓄電池の出力調整を行う。日単位のゆっくりとした変動に対しては、需給運用計画により経済性を考慮して発電機・蓄電池の起動停止および出力配分を計画する〔図1（階層1）〕。次に、60分程度の変動に対しては、経済負荷配分制御（EDC：Economic Dispatching Control）で需給運用計画が決定した発電機・蓄電池の起動停止状態の下で出力配分の微調整を行う〔図1（階層2）〕。20分程度の変動に対しては、負荷周波数制御（LFC：Load Frequency Control）により周波数が規定範囲内に収まるように出力を制御する〔図1（階層3）〕。最後に、1分程度の速い変動に対しては、発電機・蓄電池に搭載したガバナフリー運転機能により出力を制御する。

2.1 需給運用計画⁽⁸⁾

需給運用計画は、発電機・蓄電池の起動停止状態とその

出力配分を決定する混合整数計画問題で定式化される。この混合整数計画問題は、計画対象の発電機や蓄電池の台数が増えたとその組合せが爆発的に増加する。このため、起動停止の組合せ全てに対して目的関数を評価することは実用上不可能である。そこで、発電機や蓄電池の起動停止パターンの決定に次の処理を導入することで処理時間の短縮を図っている。

- (a) 計算時間短縮のため制約条件を緩和し、二次計画法により発電機の起動停止状態を近似的に仮決めする。
- (b) (a)で仮に求めた発電機の起動停止状態にあらかじめ定めたロジックを適用し、発電機起動停止状態を最終決定する。
- (c) (b)までの処理で決定した発電機の起動停止に対して、発電機・蓄電池の出力配分を二次計画法で決定する。

本手法における目的関数は式(1)のとおりである。発電機運用コストと起動コストからなる経済コストの最小化とする。発電機運用コストは出力の二次関数で近似した。

$$Obj_{UC} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N (a_k P_k^2(t) + b_k P_k(t) + c_k u_k(t)) + \sum_{k=1}^N \Delta u_k K_k \dots\dots(1)$$

- Obj_{UC} : 需給運用計画の目的関数
- P_k(t) : 発電機 k の時刻 t における出力
- u_k(t) : 発電機 k の時刻 t における起動停止変数
(0 : 停止, 1 : 運転)
- a_k, b_k, c_k : 発電機 k の燃料費特性の係数
- Δu_k : 発電機 k の起動の有無
- K_k : 発電機 k の起動費
- N : 発電機の台数
- T : 現在からの時刻 T までの計算時間帯

考慮した制約条件は、需給バランス、発電機出力上下限、発電機出力変化率上下限、発電機最小連続停止時間、発電機最小連続運転時間、予備力、蓄電池充放電電力上下限、蓄電池最大充電電力量である。なお、蓄電池の充放電ロスも併せて考慮している。

2.2 経済負荷配分制御 (EDC)^{(9), (10)}

需給運用計画で算出された起動停止計画に基づき、経済負荷配分制御 (EDC) により、発電機の出力の配分を計算する。EDC は、将来の一定期間において、発電機出力の上下限と変化率に関する制約を考慮してコストを最小化する。これを実現する手法として、等λ法を応用した準最適化法を用いている。次に EDC の定式化を示す。

$$Obj_{EDC} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N (a_k P_k^2(t) + b_k P_k(t) + c_k) \dots\dots(2)$$

制約条件を次に示す。

$$\sum_{k=1}^N P_k(t) = P_{load}(t) \dots\dots(3)$$

$$P_{k_lower}(t) \leq P_k(t) \leq P_{k_upper}(t) \dots\dots(4)$$

$$-\delta_k \leq P_k(t+1) - P_k(t) \leq \delta_k \dots\dots(5)$$

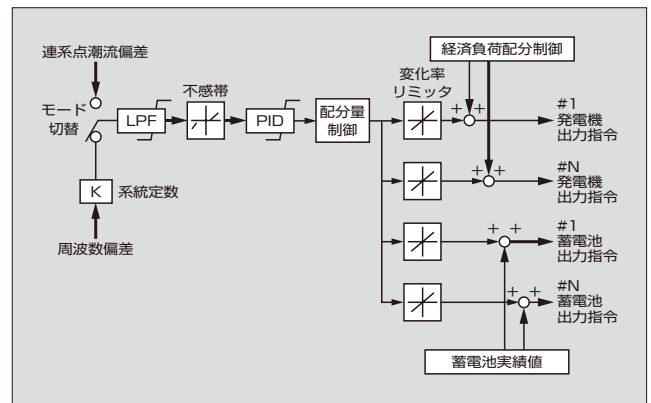


図2 負荷周波数制御のブロック図

- Obj_{EDC} : 経済負荷配分制御の目的関数
- P_{load}(t) : t 時点の総需要予測値
- P_{k_lower}(t+i), P_{k_upper}(t+i) : 発電機 k の出力上下限値
(各時刻で上下限値の設定が可能)
- δ_k : 発電機 k の最大出力変化率 (絶対値)
- N : 発電機の台数
- T : 現在からの時刻 T までの計算時間帯

なお、制約条件の式(3)は需給バランス制約、式(4)は発電機出力上下限制約、式(5)は発電機出力変化率上下限制約を示している。

2.3 負荷周波数制御 (LFC)^{(11), (12)}

図2に、負荷周波数制御のブロック図を示す。負荷周波数制御は、制御対象となるシステムが他のシステムと連系している場合と、自立システムになっている場合で入力値が異なる。すなわち、他システムと連系している場合は入力値として連系点潮流偏差を、自立システムの場合は周波数偏差を入力値として、それぞれの偏差を最小にするように発電機および蓄電池の出力を制御する。負荷周波数制御は、系統連系の場合と自立システムの場合で入力値を切替えてできるようになっている。

負荷周波数制御の制御方法は、最初に最も応答速度の遅い発電設備が制御を担い、制御しきれなかった分については応答順に制御を担っていく方法とした。しかし、このような制御方法では、分散電源が対象システムに多数連系した場合、応答速度が最も早い蓄電池にしわ寄せが生じて、蓄電池残量が底をついてしまう可能性がある。そこで、応答速度の遅い発電設備に余裕がある場合、その発電設備の余力を使い、蓄電池の充電量 (SOC) を目標値に近づける制御機能を付加した。この制御機能を活用することで、分散電源が対象システムに多数連系した場合でも、蓄電池残量が底をついてしまう可能性を低減することが期待できる。

3 シミュレーションによる性能検証

階層型需給制御システムに対する有効性の確認は、需給運用計画、負荷周波数制御の性能検証および経済負荷配分制御の性能検証⁽¹¹⁾が必要である。開発した階層型需給制御システムに対してシミュレーションを実施し、需給運用計画

および負荷周波数制御の性能を検証した。なお、経済負荷配分制御の性能検証結果については、参考文献(1)を参照されたい。

3.1 需給運用計画の性能評価

提案手法の有効性を確認するため、発電機と蓄電池からなるモデルシステムを対象として、1日48点分(計画時間間隔30分)のシミュレーションを行った。なお、負荷については、“京都エコエネルギープロジェクト”^(注1)での負荷実績値から太陽光発電と風力発電の実績値を差し引いた値を基に、発電機の台数に合わせて適宜加工したものをを用いた。使用したPCは、CPUがPentium4 3GHz、メモリは1GBである。

(1) 厳密解法との比較

発電機台数を5台として、開発した需給運用計画機能により求めた計画と、混合整数二次計画法(厳密解法)により求めた需給運用計画を^(注2)図3に示す。厳密解法は最適化パッケージソフトウェアのLINGOを用いた。表1に、提案手法と厳密解法の経済コスト(発電機の燃料費+起動費)と処理時間の比較を示す。なお、経済コストは厳密解法を100%とした相対値で示している。提案手法は厳密解法に比べて処理時間は約1/1000であるのに対し、経済コストは約0.3%増加にとどまっている。計画結果を比較す

表1 経済コストと処理時間の比較

解法	経済コスト	処理時間
提案手法	100.31%	13秒 (0.13%)
厳密解法	100.00%	9,907秒 (100.00%)

表2 提案手法における発電機台数と処理時間の比較

発電機台数	5台	10台	15台
処理時間	13秒	51秒	114秒

ると、負荷の立ち上がり時間帯において、提案手法では停止していた2台の発電機(G1, G2)を起動させ、余った電力を蓄電池に充電している。これにに対し、厳密解法では新たに起動した発電機は1台(G1)だけと違いはあるが、提案手法による計画結果は制約条件を満たしており、経済コスト・処理時間の観点から実用上問題ないことを確認した。

(2) 発電機台数と処理時間

発電機台数を変化させた処理時間を表2に示す。発電機台数が15台で処理時間114秒であり、マイクログリッドで30分ごとに需給運用計画を立案することを想定すると、十分な処理時間であることを確認した。

3.2 負荷周波数制御の性能評価

提案手法の有効性を確認するため、発電機、蓄電池、太陽光発電、負荷で構成されるシステムをリアルタイムシミュレータ上に構築して検証を行った。

(1) システムモデル

システムモデルは上位システム(無限大電源)と連系しているシステム容量500kWのシステムを対象とし、連系点での電力潮流一定制御を実施した。シミュレーションに使用したシステムモデルを図4に示す。システムモデルは発電機が2台、ならびに蓄電池、太陽光発電、負荷がそれぞれ1台で構成される。需給制御システムは、連系点潮流の計測値を入力とし、連系点潮流が目標値となるように発電機および蓄電池の有効電力を制御する。なお、本検証では、連系点潮流の目標値は0kWとした。図5に、検証で使用した太陽光発電の出力および電力需要を示す。なお、太陽光発電の導入率はシステム容量の30%とし、蓄電池の出力は太陽光発電出力の30%、容量は定格出力で30分放電できる値とした。本検証では、蓄電池SOCを60%に制御するように設定した。

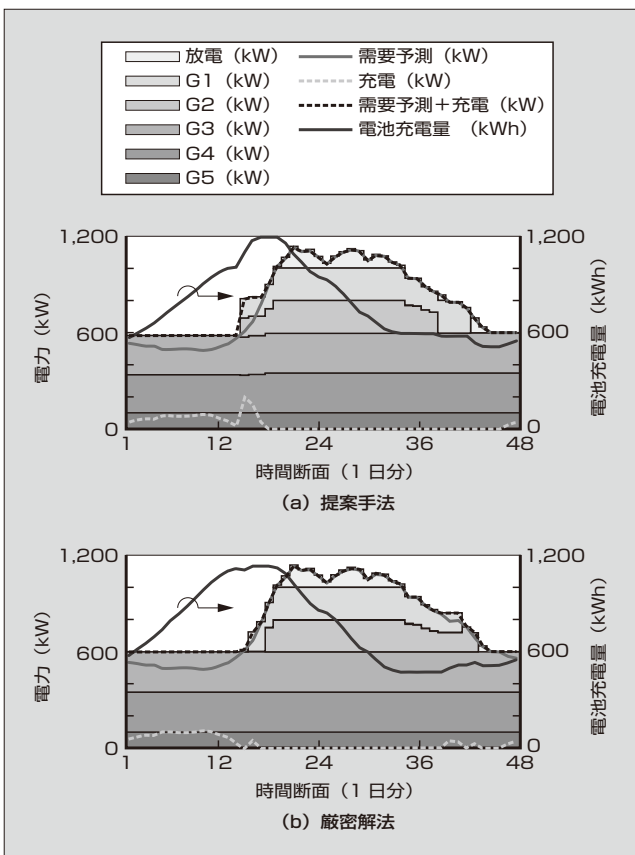


図3 需給運用計画の比較

<注1> Pentium4 : Intel Corporation の商標または登録商標

<注2> LINGO : LINDO SYSTEMS INC. の商標または登録商標

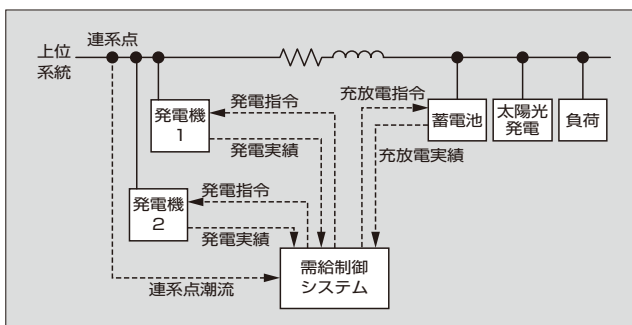


図4 システムモデル

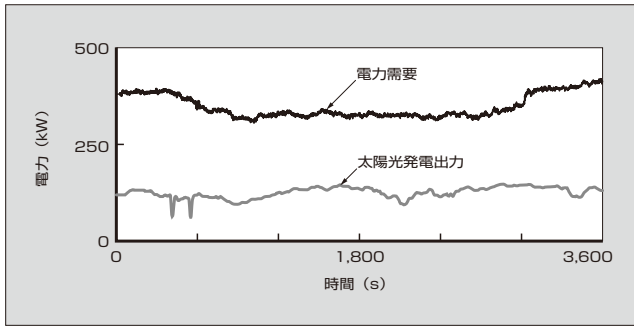


図5 太陽光発電の出力と電力需要

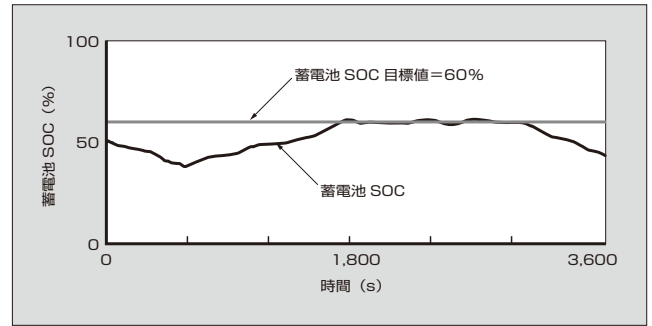


図8 太陽光発電の出力と電力需要

(2) 検証結果

蓄電池 SOC を制御する機能を持つ負荷周波数制御に対して、上記システムモデルを用いてリアルタイムシミュレータにより性能評価を実施した。なお、連系点潮流制御の制御目標は、30分間で発電電力量と負荷電力量の誤差が3%以内と規定されている30分同時同量を考慮し、これよりも厳しめの目標として、5分間移動平均誤差で3%以内と設定した。図6、図7、図8に検証結果を示す。シミュレーションの結果、5分間移動平均は最大でも約0.1%となり(図6)、連系点潮流制御の評価目標である3%以内を満足できている。次に、蓄電池 SOC 制御機能の検証結果について考察する。

図8から、1,800秒から3,000秒の間では蓄電池 SOC を目標値である60%に制御できていることが確認できる。しかし、600秒以前と3,000秒以後は目標値の60%から遠ざかっている。これらの時間帯は太陽光発電や負荷の変動が大きいため、蓄電池の本来の機能として変動吸収を行った結果である。これに対し、600秒から1,800秒の間では

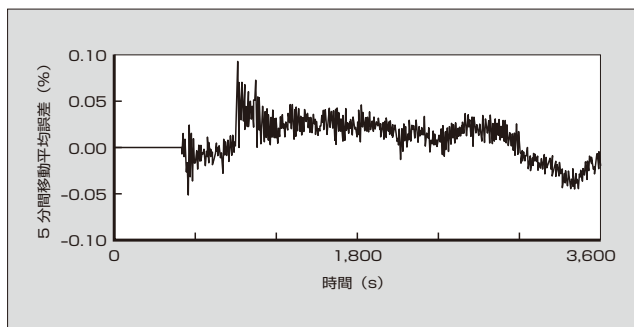


図6 5分間移動平均誤差

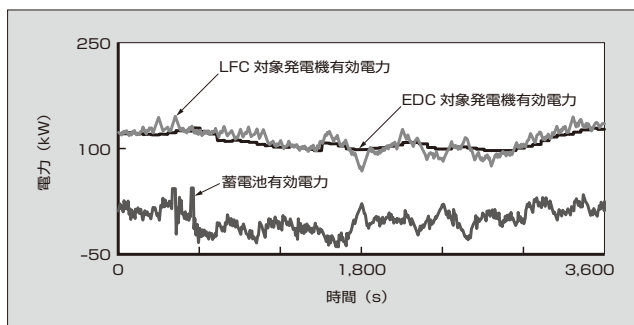


図7 発電機と蓄電池の出力

太陽光発電や負荷の変動が小さく、発電機のみでこれらの変動に対応できる時間帯が多い。この時間帯は発電機出力を大きめに出力し、蓄電池に充電指令を出すことにより、全体としては需給バランスを維持しつつ、蓄電池 SOC を60%に近づけており、開発した機能の有効性が確認できた。

4 あとがき

本稿では、分散電源連系システムを対象とした需給運用計画、経済負荷配分制御および負荷周波数制御で構成する階層型需給制御システムの概要、ならびにシミュレーションによる性能検証結果について述べた。今後は、本システムの実システムへの展開を図っていく所存である。

参考文献

- (1) エネルギー基本計画. 資源エネルギー庁. 2010.
- (2) 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. IAE-051544. NEDO, 一般財団法人エネルギー総合工学研究所. 2006.
- (3) 離島における新エネルギー導入グランドデザインの策定について～離島での新エネルギー導入促進のために～. 経済産業省. 2009.
- (4) 今吉忠利ほか. 小規模離島への再生可能エネルギー導入時のシステム構成の検討. 電気学会電力・エネルギー部門大会. 2009, no.161.
- (5) 電気学会技術報告. 電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御. 2002, no.869.
- (6) 電気学会技術報告. 電力系統の需給制御技術. 1989, no.302.
- (7) 柳父悟, 加藤政一. 電力系統工学. 東京電機大学出版局. 2006.
- (8) 近藤英幸ほか. 離島マイクログリッド向け需給運用計画. 電気学会電力・エネルギー部門大会. 2010, no.227.
- (9) 餘利野直人ほか. 変化率制約を考慮したELD問題のオンライン時間準最適化法の提案. 電気学会論文誌 B.1988, vol.108, no.4, p.141-148.
- (10) 村上賢哉ほか. 離島マイクログリッド向け経済負荷配分. 電気学会電力・エネルギー部門大会. 2010, no.225.
- (11) 山田越生ほか. 離島マイクログリッド向け負荷周波数制御の検討. 電気学会電力・エネルギー部門大会. 2010, no.106.

- (12) 鳥崎祐一ほか. スマートグリッド向け需給制御システムのリアルタイムシミュレータによる検証(2)－蓄電池容量制御の検証－. 電気学会全国大会. 2012, no.6-119.
- (13) 伊原木永二郎ほか. 分散型エネルギーシステムを支える技術. 富士時報. 2005, vol.78, no.6, p.423-430.



飯坂 達也

電力・エネルギー分野のインテリジェントシステムの適用研究・システム開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所制御技術開発センタースマートグリッド開発部マネージャー。博士（工学）。電気学会会員。



林 巨己

電力・エネルギー分野の解析・制御アルゴリズムの開発業務に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所制御技術開発センタースマートグリッド開発部主任。電気学会会員。



勝野 徹

電力・エネルギー分野の解析・制御アルゴリズムの開発業務に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所制御技術開発センタースマートグリッド開発部長。電気学会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。