

E-0903 再生可能エネルギーの大規模導入を可能とする自律協調エネルギーマネジメントシステム
(3) 分散／集中エネルギーマネジメントの協調に関する研究

東京大学

大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授 横山明彦

平成21～22年度累計予算額：474千円（うち、平成22年度予算額：237千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 近年、電力系統はさまざまな課題に直面しており、我が国でも2030年に太陽光発電を5300万kW設置するという意欲的な目標の下、風力発電や太陽光発電システムなどの再生可能エネルギー電源の導入が今後ますます進むものと推測される。風力発電や太陽光発電システムなどの再生可能エネルギー電源は出力が一定ではなく、火力発電や水力発電のように可制御な電源でもないため、大規模な風力発電および太陽光発電システムを電力系統に連系する際は、その出力変動に伴う配電電圧逸脱問題と系統周波数変動問題の2点が懸念される。これらの問題への対策として蓄電池システムなどの新たな設備投資を行って新しい電力系統制御システムを構築することが必要となる。本研究では、蓄電池や需要家機器を用いた配電線電圧制御手法および系統周波数制御手法を提案し、新たな電力系統制御システムに関する検討を行った。

まず、需要家側の太陽光発電システムに対して配電系統に蓄電池を導入し適切に運用することで余剰電力の貯蔵および配電線電圧を適正範囲内に維持する電圧制御手法について検討した。蓄電池を太陽光発電システム導入箇所に分散的に設置するよりも配電線上の相応しい地点に集中して設置する方が小さな蓄電池容量で電圧逸脱問題を解消できることを確認した。

次に、従来の火力や水力などの可制御電源や蓄電池システムだけでなく、需要家機器であるヒートポンプ給湯機群を系統周波数制御に利用することを検討し、新たな制御システムを提案した。需要家の利便性に配慮して制御時間と制御容量が制限されている場合においても、ヒートポンプ給湯機を適切に制御することで周波数変動を抑制できることを明らかにした。

さらに、系統周波数制御のためのヒートポンプ給湯機群および電気自動車群のモデリングを行った。適切に制御することで、多数台の需要家機器を集約モデルとして取り扱うことができることを示した。

[キーワード] 蓄電池、ヒートポンプ給湯機、電気自動車、周波数制御、電圧制御

1. はじめに

近年、環境問題への対応として風力発電や太陽光発電（Photovoltaics：以下、PV）といった再生可能エネルギーが注目されており、我が国でも2020年に2800万kWのPVシステムを導入するという意欲的な目標が設定されている。風力発電やPVシステムは、温室効果ガスを発電時に排出することがないクリーンな発電システムであるだけでなく、石油や石炭などの化石燃料のように海外からの輸入に頼る必要がないためエネルギー自給率の向上や資源枯渇問題対策としてもメリットがあり、再生可能エネルギーの普及は今後ますます加速していくと考えられる。しかし、風力発

電やPVはその時々天候によって出力が変動するため、配電電圧逸脱および系統周波数変動の問題が懸念されており、何らかの系統安定化対策が必要である。これらの安定化対策としては、蓄電池システム（BESS：Battery Energy Storage System）を電力系統に導入することが一般的であるが、蓄電池システムはその高コスト性から系統全体としてできるだけ小さな設置容量が望ましい。そこで蓄電池システムの代替として、今後導入が進むものと推測される電気自動車やヒートポンプ（以下、HP）給湯機などのエネルギー蓄積装置を持つ需要家機器が注目されており、これらの需要家機器が既存の電力系統の制御システムと協調して系統運用・制御を行う新たな系統運用・制御システムの構築が望まれる。

2. 研究目的

本研究では、系統安定化対策としての蓄電池システムの必要設置容量の適切な評価手法および他の可制御な需要家機器との協調制御手法の確立を目的とした。蓄電池の設置箇所については、各需要家に分散して設置する方法や電力系統側に集中して設置する方法などが考えられるが、本研究では集中型エネルギー貯蔵設備としての蓄電池システムに注目し、電力系統側に蓄電池システムが設置される場合の制御運用方式を検討した。再生可能エネルギー電源の大量導入に伴う電圧逸脱問題および周波数変動問題の対策として蓄電池システムが用いられるとして、配電系統の電圧逸脱問題解消のための蓄電池システム設置容量の適切な評価手法、および電力系統の周波数変動抑制のための蓄電池システムと可制御な需要家機器の協調制御手法について検討を行った。電圧逸脱問題の解消を目的として配電系統に蓄電池を設置する場合、配電系統全体として必要な設置容量をできるだけ小さくすることが望ましく、本研究ではPV大量導入時における電圧問題の解消と蓄電池容量の最小化を図る最適設置場所について検討した。周波数制御については、蓄電池システムの代替として、今後普及することが見込まれる電気自動車やHP給湯機を利用した新たな系統周波数制御手法の確立を図ることとした。

3. 研究方法

本研究では、電力系統モデルを用いたシミュレーションによって蓄電池容量評価手法、周波数制御手法、および需要家機器群のモデリング手法を検討した。

電圧問題については、住宅地域配電系統モデル¹⁾（亘長：4.0km、配電線容量3000kVA）を参考にした配電系統モデルにおいて行った。需要家に設置されるPVに対して蓄電池を導入し適切に制御することで、余剰電力を貯蔵し、かつ配電線電圧を適正に維持する。電圧や潮流などの系統制約のもとで、配電系統全体に必要な蓄電池設置容量の最小化を目的とした最適化問題を解くことで、蓄電池システムのコスト削減を図ることとした。

周波数制御については、需給バランスから周波数偏差を解析する周波数解析モデルを用いた。先行研究²⁾ではすべてのHP給湯機が運転中であると仮定した短時間での制御効果を確認したが、HP給湯機は1台1台がその貯湯槽容量以内に必要な湯量を沸き上げるように運転するため運転時間の制約があり、全体としての制御時間と制御容量は限定される。そこで本研究では、HP給湯機群全体としての総タンク容量を沸き上げる湯量に相当する熱エネルギーを制約として考慮し、限られた湯量を沸き上げる過程におけるHP給湯機群の制御運転による周波数変動抑制効果を検証した。

多数台機器の集約モデルのモデリング手法は、HP給湯機、電気自動車それぞれについて、機器1

台1台の動作を模擬する詳細モデルを多数積み上げた場合と比較して検討した。この際、機器全体の動きを集約できる制御手法を提案し、その手法によって制御される場合の多数台の詳細モデルの動作と1つの集約モデルの動作を評価した。

4. 結果・考察

(1) 配電系統における必要蓄電池設置容量の評価

解析に用いる配電系統モデル（主幹線のみ模擬）を図1に示す。現状の配電系統電圧維持手法をもとに、送り出し電圧は1日ごとに計画され、時間に応じて電圧を調整するものとし、配電線の適正電圧範囲を低圧側換算値で103Vから106Vとした。PVは配電系統の負荷に対して均等に導入され、導入量は配電線容量に対して40% (1200kW) としている。PVのPCS (Power Conditioning System) は積極的に配電線電圧維持に貢献せず、出力制限なく力率1で発電するものとしている。この配電系統の負荷曲線およびPV出力曲線を図2に示す。これらは配電系統電圧維持において最も厳しい条件となる中間期の晴天時を想定したものである。各ノードの負荷とPV出力は図1における配電系統をもとに配分した。蓄電池の設置場所は図3に示すように各ノードに導入量に比例した容量を設置するパターンA、フィーダ末端 (Node 11) に集中設置するパターンB、およびフィーダ中点 (Node 5) に集中設置するパターンCの3通りについて検証した。それぞれの設置パターンにおいて、各ノードにおける電圧と潮流状態を既知としたうえで蓄電池を理想的に集中制御できるものとして、1時間ごとの時間断面において、潮流制約と電圧制約を制約条件とし、必要なkW容量の最小化を目的関数とする最適化問題を解き、そのうち最大のを必要最小kW容量とした。さらに、この計算で得た各時間断面での必要kW容量の総和を必要最小kWh容量とした。

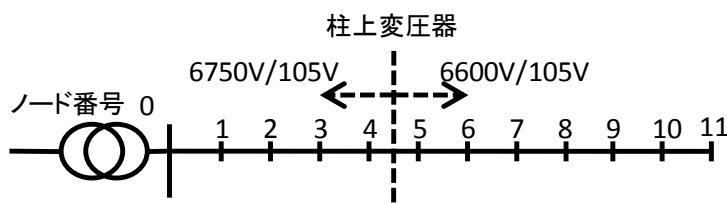


図1 配電線モデル

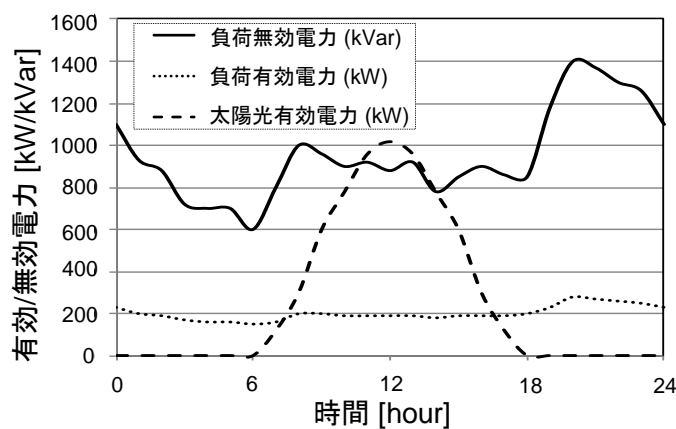


図2 負荷及びPV出力曲線

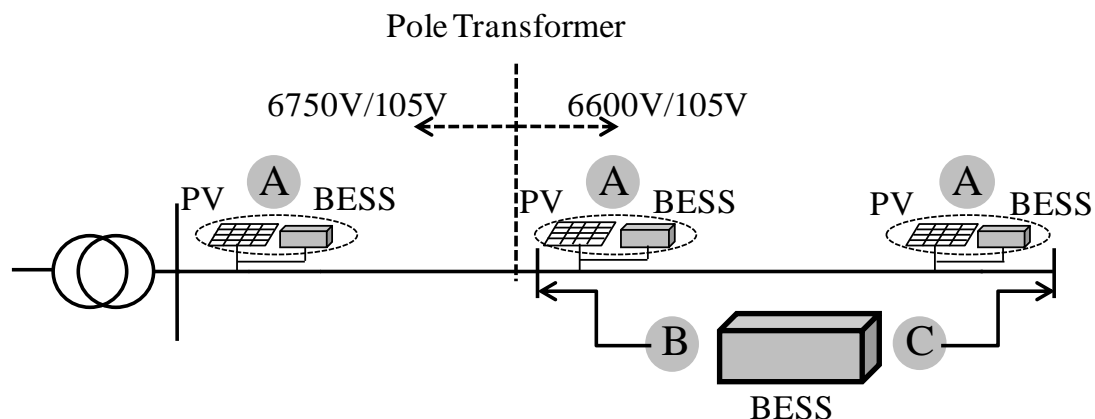


図3 BESS導入パターン

この解析において電圧逸脱問題が発生するのは9時から15時の時間帯であった。3つの蓄電池設置パターンについて、計算された蓄電池の必要最小容量を表1に示す。最小の蓄電池容量で電圧逸脱問題を解消するという観点からでは、パターンBが最も有利だと言える。各ノードに蓄電池を分散設置するパターンAは、一点に集中設置するパターンB、Cと比べてkW容量で1.7倍、kWh容量で1.3倍ほど大きな蓄電池容量が必要になると分かった。また、どのパターンにおいても9時から15時の時間帯に充電した電力量は、それ以外の時間帯において配電線電圧の制約のもとで十分に放電してしまいうことができた。各設置パターンについて電圧管理に最も厳しい12時において配電線電圧（低压側換算値）が適正範囲内に維持されている様子を図4に示す。

表1 蓄電池の必要最小容量

パターン	kW容量[kW]	kWh容量[kWh]
A（分散設置）	708	2,506
B（末端集中設置）	423	1,937
C（中点集中設置）	429	1,943

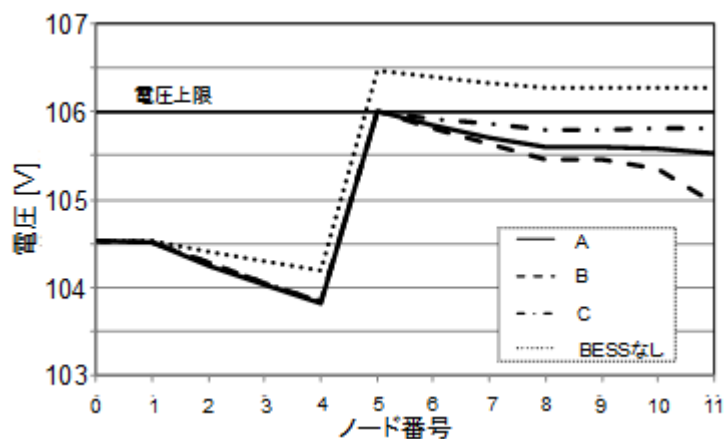


図4 配電線電圧変動上昇抑制の様子

(2) HP給湯機の制御運転による周波数変動抑制効果

系統モデルとして図5に示す電気学会東30機系統モデル³⁾の一部(8機系統モデル)を用いた。夜11時から翌朝9時の期間を想定し、図6に示す負荷変動データおよび図7に示す再生可能エネルギー出力変動データを用いた。負荷変動は休日の日負荷曲線を参考に、再生可能エネルギー出力は風速データや日射量データを基にランダム関数を用いて作成している。HP給湯機は想定エリアの10%の需要家に設置されているとして、合計定格消費電力が504MWの状況を想定した。HP給湯機の起動は、家庭用エアコンが起動から15分程度で消費電力が安定することを参考に、時定数5分の一次遅れで近似している。ただし、全台が一度に起動・停止して大きな外乱となるのを避けるため、本研究では30分で一様に立ち上がるとしている。また、すべてのHP給湯機は定格運転を行ったときに4時間で全量を沸き上げる貯湯槽容量を持つとし、全台がゼロから満量まで沸き上げを行うものとした。HP給湯機の制御手法については変動の周期と大きさに応じて分担する制御手法を用いた。HP給湯機は、制御信号がゼロの時には90%の部分負荷運転を行っており、中央給電司令所からの制御信号に応じて $90 \pm 10\%$ の範囲において消費電力を変化させて制御を行うこととした。つまり、HP給湯機群の制御可能容量は50.4MWとなる。

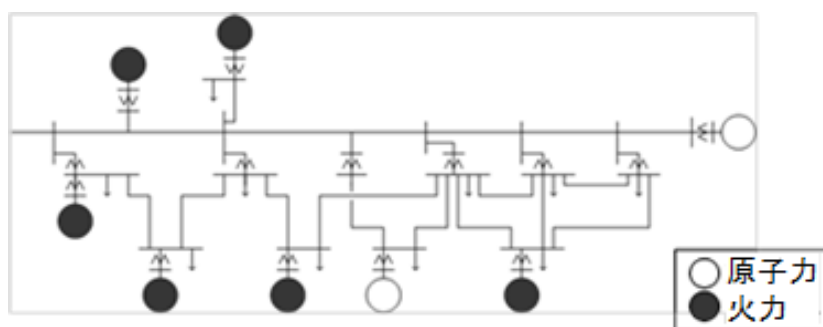


図5 8機系統モデル

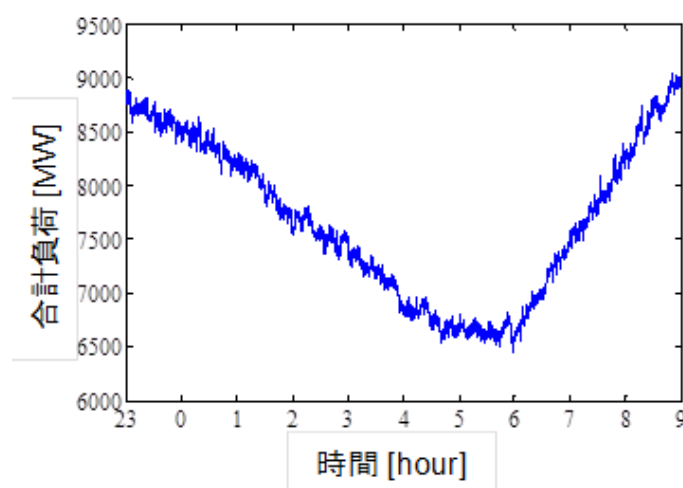


図6 使用した負荷変動データ

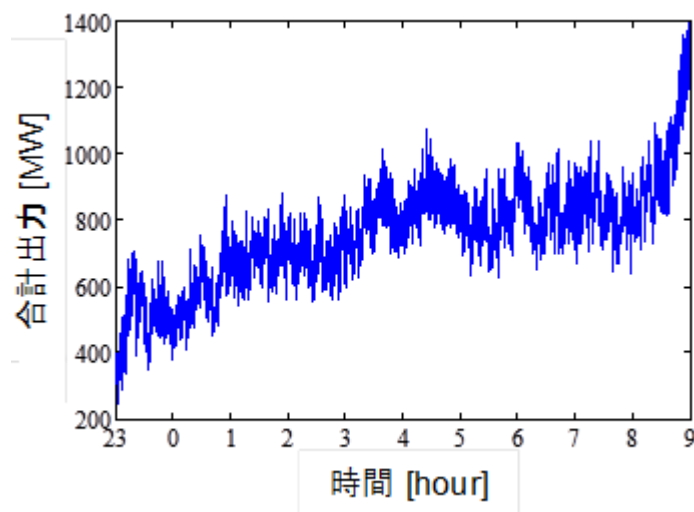


図7 使用した再生可能エネルギー出力変動データ

図8にHP給湯機を導入しない場合、HP給湯機を導入して制御に利用しない場合、そしてHP給湯機を制御する場合の3通りについて周波数偏差の最大値およびRMS値を示す。HP給湯機を導入しない場合と比較して、HP給湯機を導入することで制御運転を行わなくても周波数変動が抑制されていることが分かる。これは、HP給湯機が導入されることによって負荷が押し上げられることになり、電力系統全体の調整容量が増加したためであると考えられる。HP給湯機をさらに制御することで周波数変動がより抑制されていることも確認できた。

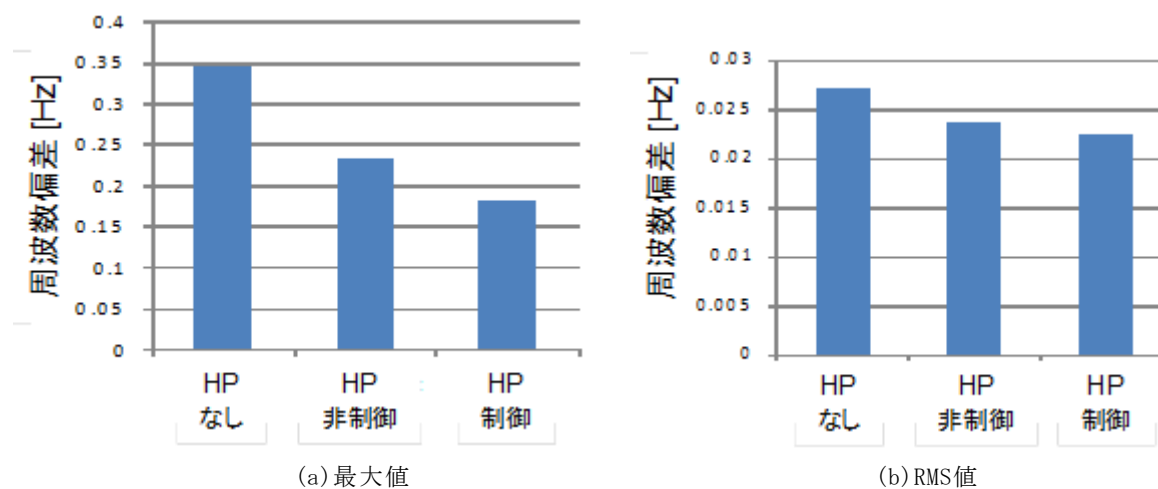


図8 HP給湯機と制御の有無による周波数変動の比較

(3) HP給湯機群のモデリング

図9に本研究で想定するHP給湯機制御システムを示す。制御システムは中央給電司令所と配電用変電所レベルで設置されるローカルコントロール (Local Control : 以下、LC) センターからなる二階層構造となっている。HP給湯機群はLCセンターごとに運転・制御されるとし、ここではLCセンターあたりのHP給湯機群を集約モデルとして設計した。HP給湯機は表2に示す熱出力とタンク

ク容量の異なる2種類が普及しているとした。本研究で提案する集約HP給湯機モデルを図10に示す。LCセンターは毎日変わることはない情報である担当エリア内のHP給湯機の台数（ここでは1000台）および種類を把握しており、中央給電司令所はLCセンターごとのHP給湯機台数および合計消費電力を把握している。LCセンターは中央給電司令所から起動指令と制御信号を受信し、担当エリアのHP給湯機群に送信するものとする。HP給湯機群は30分でランダムに起動するため、起動時のHP給湯機群の合計消費電力はランプ関数を用いて設計している。HP給湯機は必要量を沸き上げたものから停止するため、停止時刻は沸上時間によって決まる。本モデルでは、沸上時間の分布が正規分布であるとして停止時のHP給湯機群の合計消費電力を模擬している。

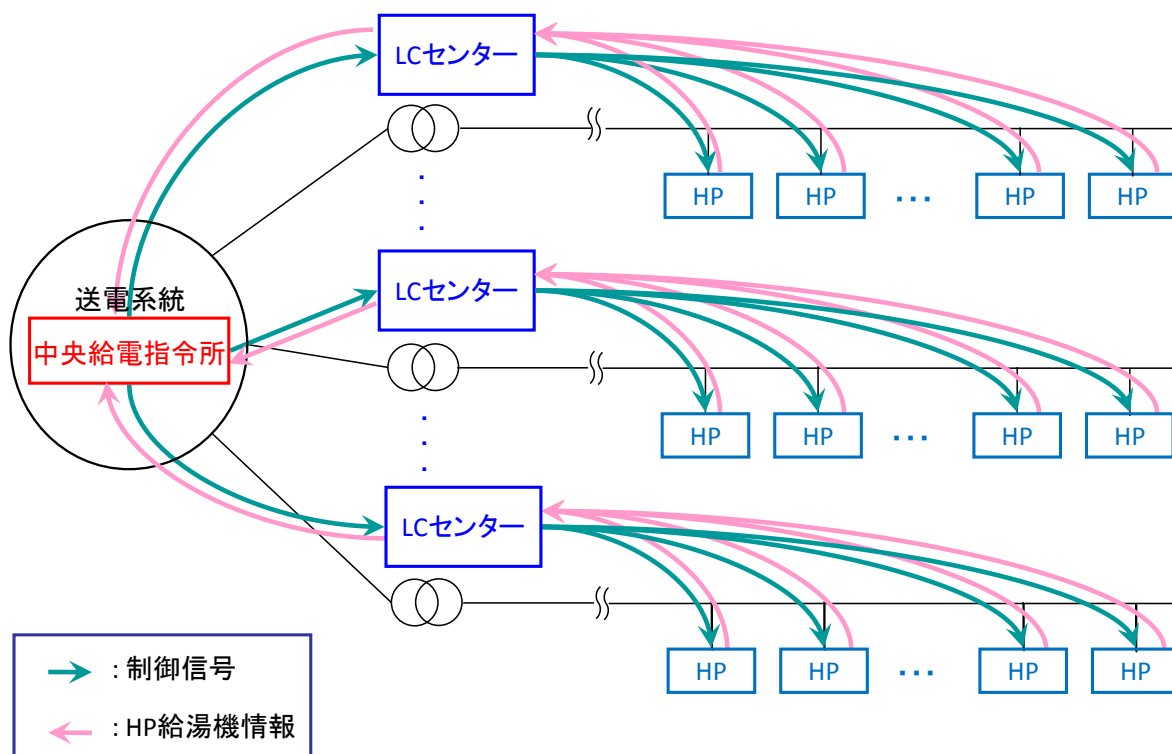
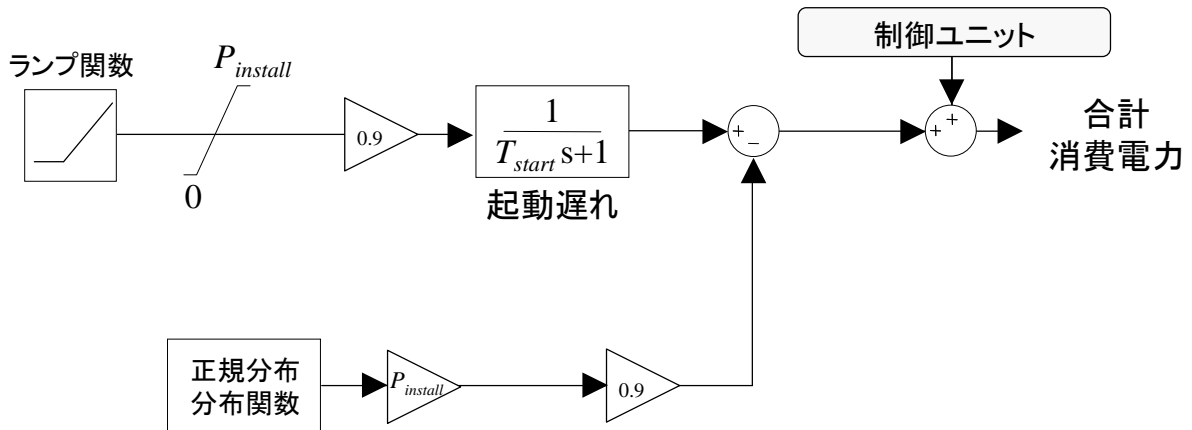


図9 HP給湯機制御システム

表2 HP給湯機データ

	Type A	Type B
定格消費電力[kW]	1.0	1.3
熱出力[kW]	4.5	6.0
貯湯槽容量[L]	370	460
貯湯槽熱容量[kWh]	20	26
台数[台]	700	300



$P_{install}$: 設置されたHP給湯機の合計定格消費電力
 T_{start} : 起動時の一次遅れ時定数

図 1 0 集約HP給湯機モデル

提案する集約HP給湯機モデルと、1000台の詳細HP給湯機モデルに対して、図 1 1 に示す周波数制御信号を入力として与え、その応答をシミュレーションによって評価した。シミュレーション時間は7時間である。合計消費電力と合計制御電力の時間変化を図 1 2 および図 1 3 に示す。合計制御電力とはHP給湯機の消費電力のうち、周波数制御信号によって変動している成分を合計したものである。HP給湯機群の合計消費電力が大きい時間帯 ($t=1\sim 3h$) では、集約モデルが消費電力、制御電力とも一致しているが、シミュレーション後半になると特に消費電力について2つのモデルで差異が生じている。ただし、図 1 3 から分かるように制御電力については差異が小さく、周波数制御信号に対する応答性という点ではよく近似できていると言える。集約HP給湯機モデルは、全体としてHP給湯機群の周波数信号に対する応答性を模擬できることが分かった。

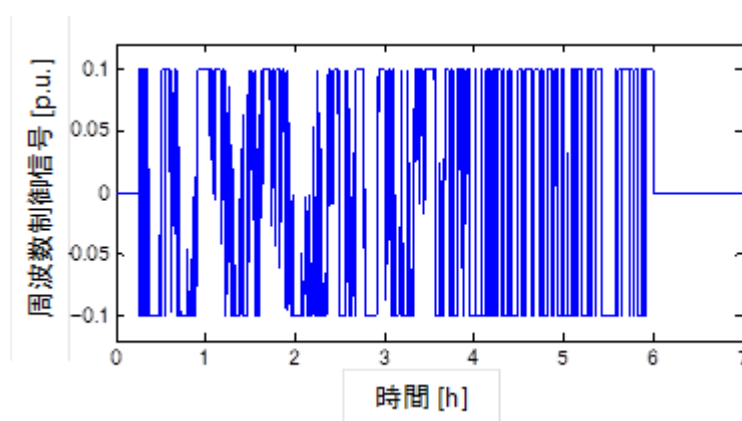


図 1 1 周波数制御信号 (1台あたり)

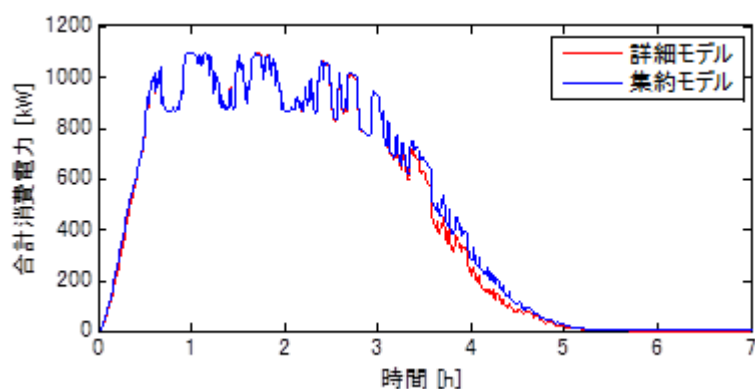


図 1.2 使用した合計消費電力変動データ

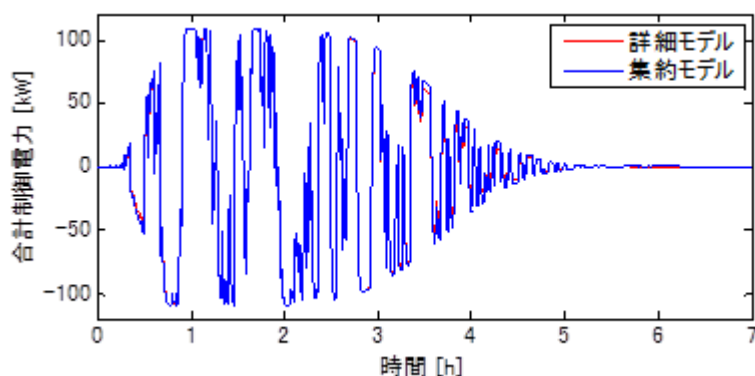


図 1.3 使用した合計制御電力変動データ

(4) 電気自動車群のモデリング

本研究では、電気自動車は走行が終わってプラグインすると充電状態 (State Of Charge: 以下、SOC) が85%になるまで充電し、その後SOCが80~90%の範囲で周波数制御信号に応じて充放電制御を行うとした。電気自動車の制御システムとしては図 1.4 に示すように、HP給湯機の場合と同じく中央給電司令所とLCセンターからなる二階層構造の制御システムを想定し、LCセンター1つあたりの電気自動車群 (ここでは100台) を集約モデルとして設計した。表 3 に示すように、バッテリー容量の異なる2種類の電気自動車が普及するとした。

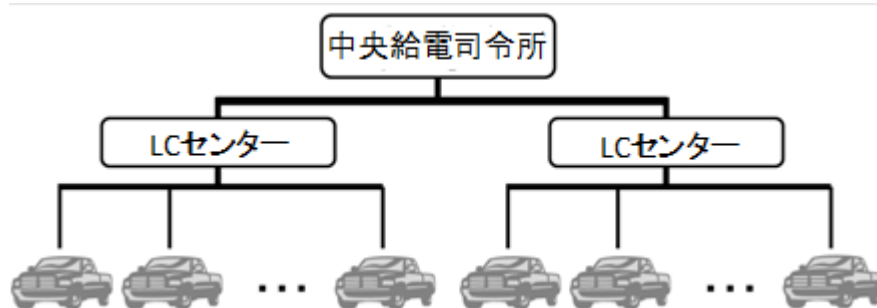


図 1.4 電気自動車制御システム

表3 電気自動車データ

	Type A	Type B
インバータ容量[kW]	3	3
バッテリー容量[kWh]	15	25
台数[台]	34	66

各LCセンターは3秒毎に周波数制御信号を中央給電司令所から受信し、担当エリアの電気自動車群に送信する。制御可能な電気自動車群の充放電電力はインバータ容量制約およびバッテリー容量制約（SOCの80～90%）によって制限される。各電気自動車はコントロールインもしくはプラグアウトする際にLCセンターにバッテリー情報を送信するものとする。また、各電気自動車はSOC情報を30秒毎にLCセンターに送信するものとする。このように、LCセンターは担当エリアの制御可能な電気自動車台数とそのSOC情報を把握している。

LCセンターは以下のように周波数制御信号を割り当てる。30秒毎に受信するSOC情報に基づいて、担当エリアの制御可能電気自動車をSOC順でソートする。中央給電司令所から送信された周波数制御信号が充電信号であればSOCの小さい電気自動車から順に、放電信号であればSOCの大きい電気自動車から順に送信する。このように、充放電に優先順位を設けることで全電気自動車の平均SOCから離れたSOCを持つ電気自動車から充放電され、電気自動車群のSOCのばらつきが小さくなっていく。結果として電気自動車群のSOCが1つに同期し、中央給電司令所はLCセンターごとに電気自動車群を1つの巨大な蓄電池システムとみなして管理できる。この制御手法をSOC同期制御と呼ぶ。周波数制御信号割当の例として、60kWの充電信号または放電信号が送られてきた場合について図15に示す。

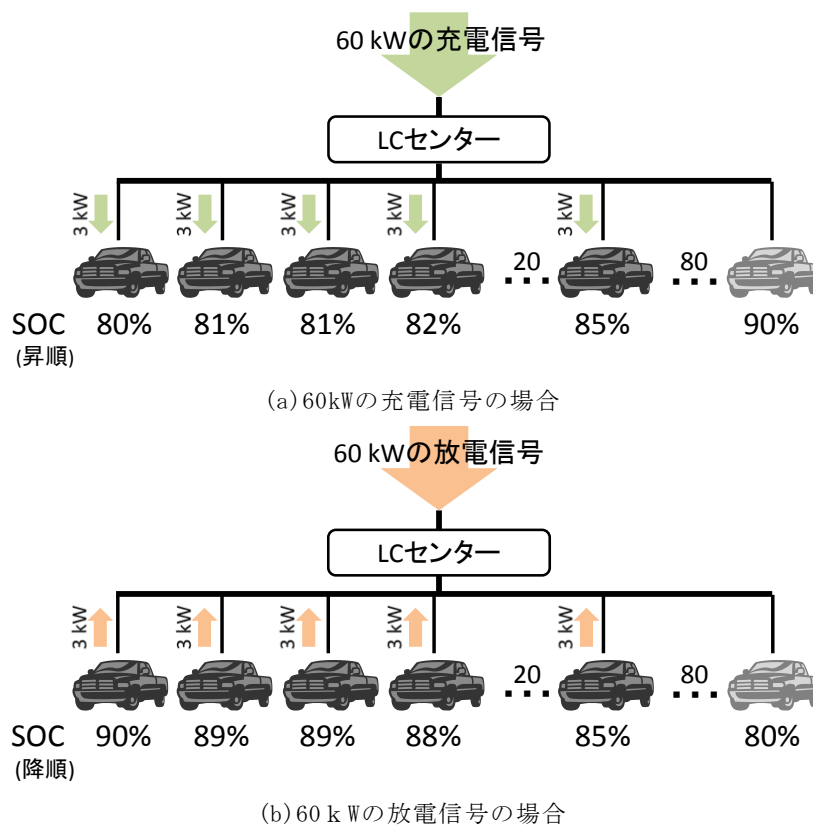


図15 周波数制御信号割当の例

SOC同期制御の効果をシミュレーションによって確認した。SOC同期制御を行った場合の100台の電気自動車のSOCの時間変化を図16に、行わない場合のSOCの時間変化を図17に示す。色の違いはそれぞれが別のEVであることを示し、各図では100台のEVのSOC変化をプロットしている。SOC同期制御を行わない場合では、周波数制御信号をすべての制御可能な電気自動車について均等に割り当てている。図中では、100台すべての電気自動車についてSOCの変化がプロットされている。図16では多数の電気自動車のSOCの線が1つに重なって変化している様子が確認できる。この部分は制御可能状態にある電気自動車群のSOCが同期していることを示している。また、制御開始した各電気自動車（図中、SOC85%からプロットされる線）は同期SOCと4~7分程度の短時間で同期することが確認できる。一方、図17では、新しく制御開始した電気自動車のSOCは同期せず分散している。このようにSOC同期制御によって多数の電気自動車のSOCを同期して変化させることが可能であることが明らかとなった。これにより、電気自動車群を1つの蓄電池モデルとして集約モデル化できることが確認できた。

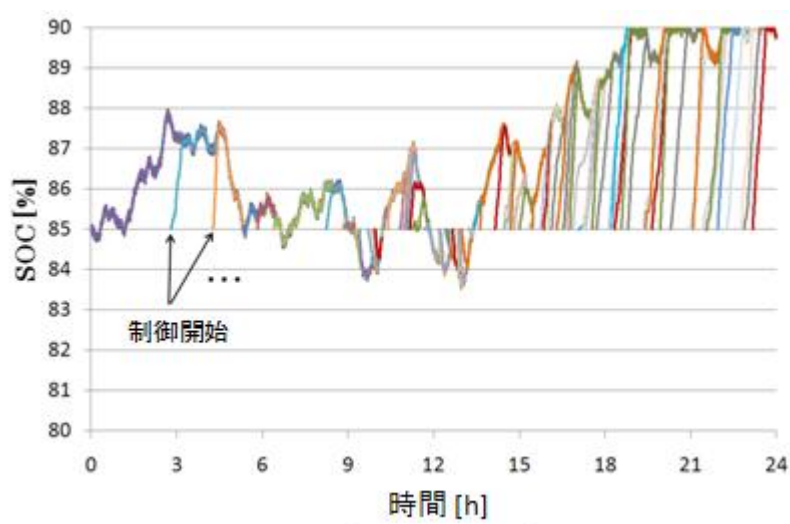


図16 SOC変化 (SOC同期制御あり)

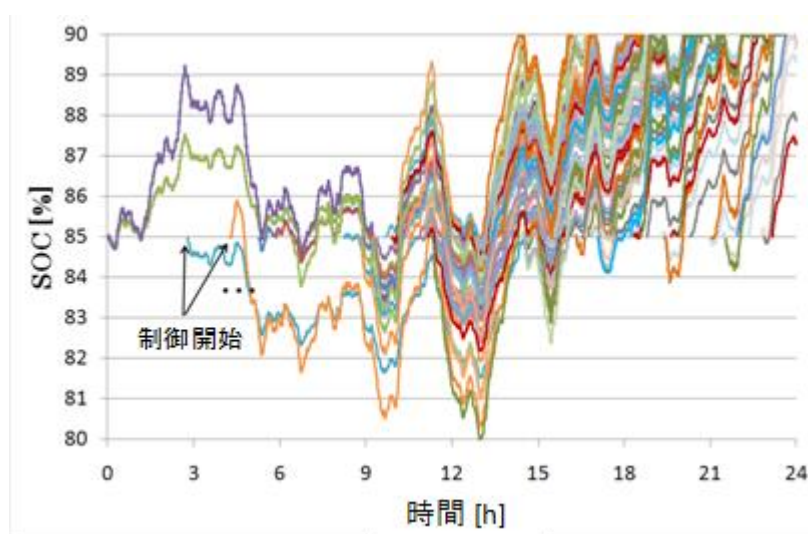


図17 SOC変化 (SOC同期制御なし)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

PVシステムが分散的に導入された配電系統に蓄電池を設置して配電線電圧管理を行う場合には、蓄電池をPV導入箇所に分散的に設置するのではなく、配電線上の相応しい地点に集中的に設置して操作することで、より小さい蓄電池容量でも電圧逸脱問題を解消可能であることを確認した。また、タンク貯湯量に応じて運転時間が制限されても、HP給湯機群を制御運転することで系統の周波数変動抑制効果を高めることができることを明らかにした。

(2) 環境政策への貢献

配電系統に必要な安定化対策としての蓄電池容量の評価手法は、今後の家庭用PVシステム導入に係るコスト試算に際して有効である。また、電気自動車やHP給湯機が単に環境負荷が小さい省エネルギー機器であるだけでなく、系統制御に貢献することで大量の再生可能エネルギー電源導入につながる可能性を明らかにしたことは、機器の環境に与える追加的な効果までを大きくアピールしており、電気自動車やHP給湯機の普及促進という点で期待できる。

6. 引用文献

- 1) 「配電系統の高調波障害防止対策」, 電気共同研究会, Vol.137, No.3 (1981)
- 2) 入江寛, 横山明彦, 多田泰之: 「大容量風力発電導入時における需要家ヒートポンプ給湯器と蓄電池の協調による系統周波数制御」, 電気学会論文誌B, Vol.130, No.3, 338-346 (2010)
- 3) 「電力系統の標準モデル」, 電気学会技術報告, Vol.754 (1999)

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「制御可能台数の不確実性を考慮したヒートポンプ給湯器による周波数制御の基礎的検討」, 平成22年電気学会全国大会講演論文集, No.6-135, 235-236 (2010)
- 2) 郡司掛安俊, 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「ヒートポンプ給湯器の負荷としての特性を考慮した周波数制御の検討」, 平成22年電気学会全国大会講演論文集, No.6-136, 237-238 (2010)
- 3) 木原寛之, 横山明彦, キッシリ・M・リヤナゲ, 佐久間寿人: 「太陽光発電が大量導入された配電系統における蓄電池の最適設置箇所の評価」, 平成22年電気学会全国大会講演論文集, No.6-155, 271-272 (2010)

- 4) 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「系統周波数制御のための多数台の可制御ヒートポンプ給湯機のモデリング」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, 第5分冊, 13-16 (2010)
 - 5) 清水浩一郎, 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「系統周波数制御のための多数台の電気自動車のモデリング」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, 第3分冊, 173-178 (2010)
 - 6) 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「系統周波数制御のための多数台のヒートポンプ給湯機の群制御手法の基礎的検討」, 平成23年電気学会全国大会講演論文集, No. 6-160, 287-288 (2011)
 - 7) 清水浩一郎, 益田泰輔, 太田豊, 横山明彦: 「SOC同期制御における電気自動車のSOC同期効果」, 平成23年電気学会全国大会講演論文集, No. 6-163, 293-294 (2011)
- (2) 口頭発表 (学会等)
- 1) 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「制御可能台数の不確実性を考慮したヒートポンプ給湯器による周波数制御の基礎的検討」, 平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010)
 - 2) 郡司掛安俊, 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「ヒートポンプ給湯器の負荷としての特性を考慮した周波数制御の検討」, 平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010)
 - 3) 木原寛之, 横山明彦, キッシリ・M・リヤナゲ, 佐久間寿人: 「太陽光発電が大量導入された配電系統における蓄電池の最適設置箇所の評価」, 平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010)
 - 4) 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「系統周波数制御のための多数台の可制御ヒートポンプ給湯機のモデリング」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 広島市 (2010)
 - 5) 清水浩一郎, 益田泰輔, 横山明彦, 多田泰之: 「系統周波数制御のための多数台の電気自動車のモデリング」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 広島市 (2010)
- (3) 出願特許
なし
- (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)
なし
- (5) マスコミ等への公表・報道等
なし
- (6) その他
なし