

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築
のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」

研究課題「エネルギー貯蔵デバイスの新しい応用
方法および負荷側機器の制御手法に必要なとなる
基礎的な理論・モデルの構築」

研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者：馬場 旬平
(東京大学大学院新領域創成科学
研究科、准教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

現在、再生可能エネルギー電源を大量に導入した場合に発生し得る問題の整理とその対応について盛んに研究が行われている。特に我が国では、太陽光発電(PV)の大量導入が検討されており、震災前に策定された数値であるが2020年には27GW、2030年には53GWの導入目標が掲げられている。PV大量導入に伴う問題として「配電線電圧変動問題」「需給バランス維持の困難化(長期・短期)」「保護協調問題」が主として挙げられている。これら問題解決のために様々な研究機関が検討を実施している。大きなプロジェクトとして資源エネルギー庁による「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」が2010年度より開始されていることが挙げられる。このプロジェクトでは2020年断面における問題解決に資する対策の検討を主眼として、事業が進められているが、目標となっている時点までが短いことから、比較的保守的な検討となっている。より革新的な負荷側機器制御・運用手法を構築するには、特に機器の電力制御性や利用者利便性変化のデータやモデルが不足しており、足枷となっている。また、系統側のエネルギー貯蔵装置・制御機器についての再生可能エネルギー電源大量導入対応、今回の3.11のような大災害・事故時における供給支障低減手法については、検討が不十分な状態にある。

家庭用太陽光発電(PV)や風力発電(WT)など分散型の再生可能エネルギー電源が大量に導入された電力系統において、系統側に二次電池などの安定化対策機器が設置され、更に電気自動車(EV)・ヒートポンプ(HP)給湯機など、エネルギー貯蔵装置をもつ可制御負荷となりうる機器が普及した場合における「再生可能エネルギー電源を大量導入した場合におけるエネルギー貯蔵デバイスの新しい応用方法、負荷側機器の制御手法に必要な基礎的な理論・モデルの構築」を行い、更に模擬シミュレータを用いて提案手法の評価を行うことを実施内容としている。

研究期間内に以下のような研究成果が得られた。

1. 需要家の利便性を大きく損ねるような需要家機器制御の導入は困難であると思われる。そこで、需要家機器制御とそれに伴う利便性の変化について、工学的なモデルを構築し、より需要家が受け入れ易い協調制御手法を提案出来るような基盤を構築した。空調システムにおいては、部屋の温度変化と電力変動の抑制量等からパレート最適を求め、各機器の導入容量を最適に設定する手法を構築した。HP給湯機では、消費電力制御の際に需要家利便性に影響するであろう、成績係数等の特性の基礎実験を基に、需要家側利便性に影響を与えない範囲での制御手法を提案し、これによる系統安定化への効果を評価した。EVでは、充電、高速制御、多数台アグリゲーションを同時成立させる制御手法を設計し、EV・充電システムへ実装した。
2. PV、WTなどの不確実性が増大した状況下において、エネルギー貯蔵状態の適切な管理や天候予測の誤差を考慮しながら供給支障を低減化させるように、系統側のエネルギー貯蔵デバイスを最適に運用する手法を提案した。
3. 再生可能エネルギーの静特性・動特性が系統事故時の過渡安定性、電圧安定性に与える影響を解析評価することでそのメカニズムを明らかにし、再生可能エネルギーの連系インバータやエネルギー貯蔵デバイスで安定化させる制御手法を提案した。

(2) 顕著な成果

(CREST 研究で得られた最も顕著な成果を<優れた基礎研究としての成果>と<科学技術イ

ノベーションに大きく寄与する成果>各々3点まで挙げ、それぞれについて200字程度で説明してください。研究成果の科学技術上のインパクトや国内外の類似研究の研究動向・状況に対する位置づけについても説明してください。成果は論文、特許、試作品、展示などが挙げられます。)

<優れた基礎研究としての成果>

1. ヒートポンプ機器の工学的熱系・電気系モデルの構築(成果:電気学会などへの研究論文、国際会議での発表)

概要:(200字程度)

ヒートポンプ機器の消費電力に対するCOP特性、消費電力の変化特性について、実機を用いた試験より近似モデルを構築し、工学的に利用可能なモデルの構築手法の提案と、その実用性について検証を行った。ヒートポンプ機器を系統運用に貢献させる検討は様々な機関にて研究されているが、利用者利便性と消費電力可制御性を検討するために必要な基礎となるモデルは余り提案されておらず、今後、ヒートポンプ機器を利用した系統運用貢献の研究に役立つものとなる。電気系の研究者のみならず冷凍空調学会、応用物理学会などでも注目され招待講演なども行った。

2. EVの電力系統貢献機能の提案(成果:EPSR, IEEEへの研究論文)

概要:(200字程度)

EVの利便性に配慮しながら再生可能エネルギー導入下で必要とされる高速デマンドレスポンス資源となり得るようなEV群の制御体系の設計とEVシステムへの実装まで一貫した研究を行った。電力系統制御を担う発電機に対して、EVの高性能な制御・通信性能を付加的に発揮できることが特徴である。国内外の研究コミュニティにおいて、Vehicle-to-Grid(V2G)を先進的に推進するグループと認識され、論文の引用、査読依頼や後発のV2Gシステムのサポート要請を受けている。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. ヒートポンプ機器の消費電力制御による電力系統運用貢献手法の提案

概要:(200字程度)

ヒートポンプ機器について本来の目的である熱負荷に与える影響を利用者利便性が損なわれない範囲で消費電力制御が可能であるのか実機を用いて実証試験を行い、構築したモデルとの整合性を検証した。近年、国内外にてスマートグリッドの研究や実証事業が進められているが、ADR・FDRなどを実装した際における効果の検討など、近未来の電気エネルギーネットワーク構築に資する結果を得ることができた。

2. EVと電力系統の電気・通信インターフェースの提案(成果:EV実機システムの構築)

概要:(200字程度)

EVから電力系統へ高速な充放電を実施する電氣的なインターフェースと、スマートグリッドの多様なアプリケーションに必要な通信インターフェースについて、日本が国際標準をねらう充電規格に準じて構成した。欧米からは”Smart Grid Ready”なEV充電規格に関する提案が行われてくることが予想されるが、EVのスマートグリッド応用を先んじて構成し、様々なユースケースの研究・試験を実施できる環境構築の知見を得ることができた。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①馬場グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
馬場 旬平	東京大学大学院新領域 創成科学研究科	准教授	H24.10～
横山 明彦	東京大学大学院新領域 創成科学研究科	教授	H24.10～
太田 豊	東京大学大学院工学系 研究科	特任助教	H24.10～H26.3
太田 豊	東京大学大学院新領域 創成科学研究科	CREST 研究員	H26.4～
河辺 賢一	富山大学大学院理工学 研究部	客員助教	H24.10～

研究項目

- ・ エネルギー貯蔵デバイスの新しい応用方法および負荷側機器の制御手法に必要となる基礎的な理論・モデルの構築に関する研究実施

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・特になし

§ 3 研究実施内容及び成果

【A. 需要家利便性を考慮した HP 熱機器の制御及びモデル化】

[H24]

1. ヒートポンプ給湯機(Heat Pump Water Heater:HPWH)の基礎特性の把握

需要家の利便性を損なわずに家庭用ヒートポンプ給湯機の消費電力制御を行う際に必要となる、定常状態と過渡状態における消費電力特性や熱生成特性を測定した。

1-1. 様々な条件下における HPWH の COP 変化の把握

一定消費電力運転での消費電力と生成熱量を長期間に渡って測定することで、定常特性に対して圧縮機動作周波数と外気温、水温、生成湯温といった熱的要因の与える影響を確認した。定常状態における消費電力には圧縮機動作周波数、生成湯温の 2 つの要素が、COP には外気温が大きく影響することが判明した。これらのデータから消費電力制御運転との比較対象となる、現在の利用法でヒートポンプ給湯機を運転した際の特性を得ることができた。

1-2. HPWH の消費電力変化特性の把握

正弦波状に消費電力制御を行いながら運転した際の、消費電力と生成熱量を測定した。その結果から消費電力応答特性と消費電力制御が COP に与える影響を確認した。消費電力応答特性は簡単に一次遅れ系として近似したが、近似モデルと実機の消費電力応答を比較することで、ある程度正確なモデリングが行えたことを確認した。COP に関して、消費電力制御を行った場合、消費電力制御を行わない場合と比較して COP の低下は 10%程度にとどまり、消費電力制御が熱生成効率に与える影響は小さいことが確認できた。

2. 熱的快適性を考慮した HP 空調機器の制御実験

2-1. HP 空調機器制御による短周期電力変動補償実験

商用ビルなどで用いられている熱出力 300kW 級の空調用ヒートポンプの消費電力を負荷及び再生可能エネルギー電源の電力変動に合わせて制御し、電力変動補償を行う実証試験を実施した。実証試験は約 300～400kW の実負荷とガスエンジン・ニッケル水素電池・空調用ヒートポンプ・太陽光発電設備で構成されているマイクログリッド実証試験設備において行った。この実証試験の結果、ガスエンジン出力を一定とした場合において、マイクログリッド内の負荷及び太陽光発電設備で発生する電力変動を補償するために必要となる蓄電池のエネルギー容量を空調用ヒートポンプの消費電力を制御することで大幅に削減できることを確認した。今回行った実験のケースにおいては、空調用ヒートポンプを制御した場合と制御しなかった場合で同等の電力変動抑制能力を維持しつつ、蓄電池の必要エネルギー容量を 50%以上削減することに成功し、空調用ヒートポンプを可制御負荷として用いることの有用性を確認できた。さらに、ガスエンジンについても変動補償制御に組み込み、ガスエンジン・蓄電池・空調用ヒートポンプの3種類の機器で制御を行った場合は、長周期の電力変動についても補償することができ、マイクログリッド連系点の潮流を一定に制御できることを確認した。また、空調用ヒートポンプの消費電力を制御した結果生じるヒートポンプの利用者への影響を評価するために、実証試験時に測定したヒートポンプの熱出力を室温計算モデルに入力し、制御時に発生する室温変動をシミュレーションによって確認した。シミュレーションの結果、空調用ヒートポンプの消費電力を制御した場合でも室温変動は在室者の熱的快適性に影響を与えない程度であることが確認できた。

[H25]

1. ヒートポンプ給湯機(Heat Pump Water Heater:HPWH)の基礎特性の把握

1-1. 様々な条件下における HPWH の COP 変化の把握

HPWH を夏、中間期、冬において複数の消費電力で運転させた際のデータを計測することで、各気温、消費電力ごとの COP を取得した。またこれらのデータから COP を外気温等の条件から求める簡単なモデルを作成した。

1-2. HPWH の消費電力変化特性の把握

各季節の運転結果からまず、圧縮機回転数と消費電力の関係を求めた。運転結果から消費電力には、圧縮機回転数だけではなく、生成湯温も影響を与えることが判明し、これを求めるモデルを作成した。また、正弦波状に消費電力指令を与えた際の応答から、応答特性を一次遅れモデルとして近似した。

1-3. 貯湯槽の特性を含めたモデルの作成

COP 計測と同様に、夏、中間期、冬とタンク側面複数個所の温度を長時間にわたって計測することで、タンクからの放熱の様子を計測した。これによりタンクから外気への熱伝達率を取得することができた。また、タンク内に湯と水が混在する状態においても同様に計測することで、タンクいっばいに湯が貯まっていない状況での水との熱交換も計測ができた。これらの特性からタンク内の熱量、湯温、タンク外への放熱を計算することが可能な熱モデルを作成した。図 A-1 に実験に利用した HPWH の写真を示す。



図 A-1. 実験利用した HPWH と計測系
(左: 電源部と各データ収集用のログー
右: 温度計測用のセンサーをとりつけた貯湯タンク)

2. 熱的快適性を考慮した HP 空調機器の制御実験

空調用ヒートポンプ(HPACS)及び蓄電池を用いた短周期電力変動補償システムにおいて電力変動補償性能・蓄電池エネルギー容量抑制・HPACS 蓄熱槽容量抑制の3つを同時に満たす制御パラメータの決定方法を提案した。提案手法では、電力変動補償システムの伝達関数と電力変動・熱需要変動の周波数スペクトルより、上記の3要素を定量的に表す評価指標を計算している。そしてこの3要素の組み合わせがパレート最適をなす制御パラメータの組み合わせを求め、得られたパレート最適なパラメータ集合の中から適用するパラメータを選択している。

提案手法を用いたパラメータ決定の中で、電力変動補償性能・蓄電池エネルギー容量抑制性能・HPACS 蓄熱槽容量抑制性能の3要素の間にトレードオフの関係があることを、伝達関数モデルを用いた数値計算により確認した。

また HPACS・蓄電池・実負荷等で構成されるテストサイトにおける実証試験を行い、提案手法で得られたパラメータが制御に有効であることを確認した他、上記の数値計算で確認された3要素間のトレードオフ関係の存在についても確認した。

3. HPWH 制御の配電系統電圧への影響評価【CREST 林チームとの FS】

太陽光発電導入にともなう逆潮流による配電系統の電圧の管理値からの逸脱の問題に対して、多数台の HPWH を家庭用負荷の状況に応じて分散的に制御する手法を提案した。フィード構成、負荷電力、そして、配電系統の電圧制御系を模擬した標準的なベンチマークモデルに HPWH モデルを連携させたシミュレーション環境を構築した。そして、提案制御手法が既存の電圧制御系を考慮したベンチマークモデルにおける電圧逸脱の問題に与える影響を評価した。

[H26]

1. HPWH の消費電力制御による需要家利便性への影響と電力系統安定化への効果の検討

H25 年度までに取得した基礎特性、熱モデル等を利用し、HPWH の電力変動補償運転を考えた

際に、需要家利便性に与える影響と系統安定化への貢献能力をシミュレーションで検討した。需要家利便性については、湯の使用に関して湯切れが発生するかどうかと、給湯に使う電力量の変化について検討した。系統安定化への貢献能力については、HPWH の消費電力制御により、変動補償のために系統に導入すべき BESS の容量がどの程度削減できるかを検討した。

2. HPWH の電力変動補償運転による需要家利便性への影響の検討

HPWH を電力変動補償に利用できるよう昼間に消費電力制御を行いながら運転した場合において、一般家庭の給湯需要と気温のデータを用いることで、どの程度の家が湯切れを起こさずに、消費電力制御が可能であるかをシミュレーションで検討した。利用した給湯データにおいて、また、現在一般的に行われている深夜電力を利用した一定消費電力運転(通常運転)と、昼間の電力変動補償をしながらの消費電力制御運転とでそれぞれの HP 給湯機の総消費電力量を比較した。電力変動補償運転においては、PV の出力変動補償を考慮して、8 時に起動するパターン(最速起動)と、18 時に運転終了するパターン(再遅起動)とを考慮し、これらを通常運転と比較した。消費電力制御による効率の低下等を考慮しても、昼間に電力変動保障運転を行うことで、COP の増加や貯湯タンクからの放熱量が削減でき、総消費電力量を最大で 10%程度削減できることを示した。表 A-1 に各運転方式での中間季節期一か月間での消費電力量の比較を示す。

表 A-1. 運転方法の違いによる総消費電力量の変化

運転方法	総消費電力量 [MJ]	総放熱量 [MJ]	運転中平均 COP[p.u.]
通常起動	336[MJ]	264[MJ]	0.78
最遅起動	303[MJ]	213[MJ]	0.84
最速起動	324[MJ]	252[MJ]	0.81

3. HPWH の消費電力制御による系統安定化への貢献能力の検討

HPWH を需要家の利便性を損なわない範囲で、簡単に消費電力制御を行った際に、系統安定化に与える効果について検討した。上位系統を模擬した周波数シミュレーションを行い、HPWH を系統安定化に利用することで、HPWH の消費電力制御可能量により、BESS の容量をその制御可能量分補償できることを示した。図 A-2 に HPWH の消費電力制御の有無の違いによる系統周波数の目標値への滞在率の違いを示す。

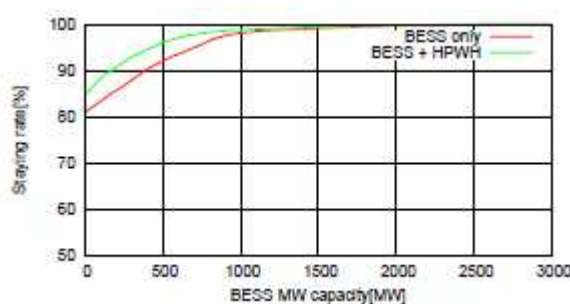


図 A-2. HPWH の消費電力制御の有無による目標周波数への滞在率の違い

【B. 電気自動車(Electric Vehicle : EV)のスマート充電・充放電制御手法の確立と実装】

[H24]

EV の急速充電口経由での充放電制御が可能な EV・充電システムを構成し、その応答性や制御・通信インターフェースの特徴を踏まえた自律分散型の制御手法を設計した。EV 蓄電池の充電

状態を EV から定期的に受信するとともに、電力システムの需給状態を表す周波数をプラグイン端子電圧から検知することにより、自動車ユーザーの利便性を確保しつつ、電力システムの数秒から数分周期での需給変動に対応する周波数制御へ貢献できることを、実験により確認した。電力システムへの放電を含む V2G 制御が可能なパイロットシステムとして、応答、精度、効率などの知見を得ることができた。

図 B-1 には、周波数上昇、降下それぞれに対する EV システムによる充放電のステップ応答例を示す。周波数検出、車外定置型電力変換装置への出力指令、EV とコントローラ間の通信を含んでも、1 秒以内での応答が実現されている。また、夜間の停車時を想定した 8 時間の充放電制御試験の結果を図 B-2 にまとめる。電力システムの需給調整への貢献を行いながら、バッテリー充電状態を朝方の発車予定までに仕上げるような制御が実現できている。充放電極性と部分負荷出力に依存して 100[W]～200[W]程度(定格 3[kW]の 3.3[%]～6.7[%]程度)の損失をとまなうことを、EV システムの実測から明らかにした。

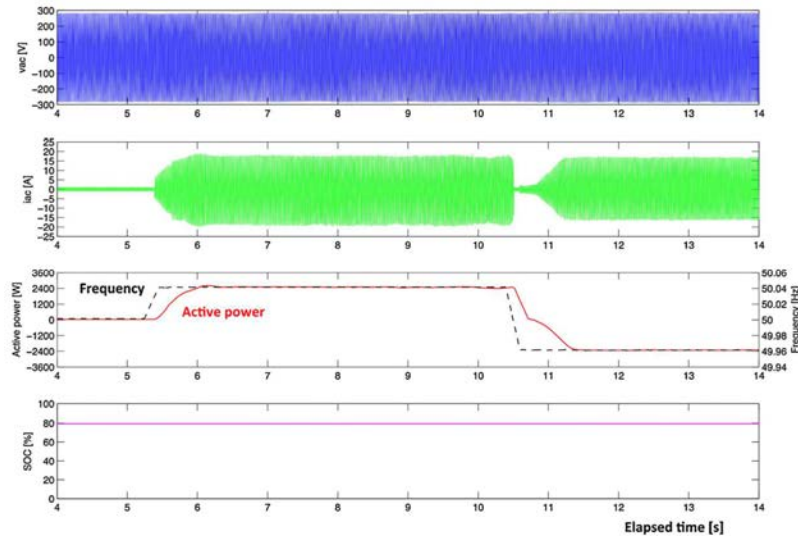


図 B-1. 周波数上昇・下降時の EV システムの充放電応答

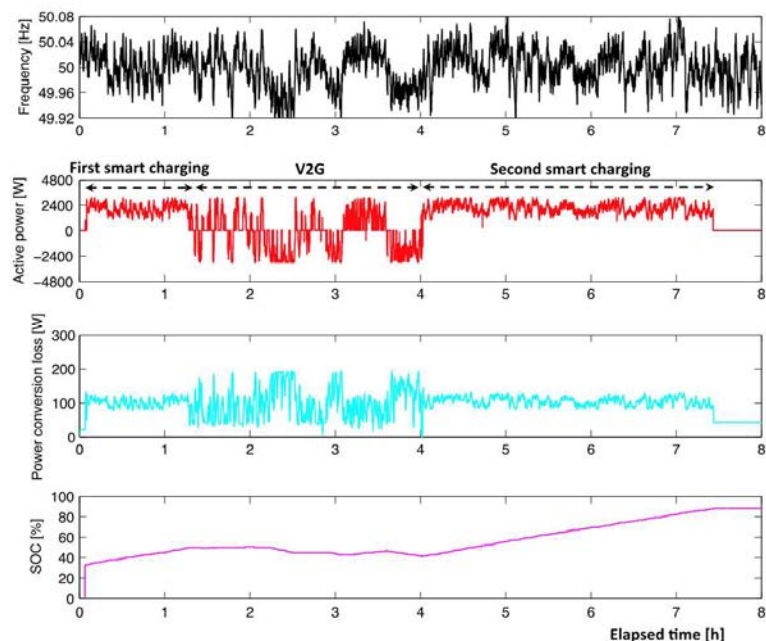


図 B-2. 夜間の停車時を想定した充放電制御の試験結果

[H25]

EV の家庭充電が住宅周辺の配電系統の潮流・電圧制約や上位の電力系統の需給に与える影響を解析するために、走行特性と充電シナリオを考慮した解析モデルを構築した。そして、EV からの一時的な電力供給(Vehicle-to-Grid : V2G)の積極利用と、EV 群を集約蓄電池として一体に運用するバッテリー・アグリゲーションを特徴とした、多数台制御手法を提案した。そして、自律分散型の制御手法とあわせて、多数台 EV のバッテリー・アグリゲーションに対応できるような EV システムの制御・通信インターフェースの検討を行った。

図 B-3 には、CREST 林チームとの FS により構成した配電フィードのモデルを示す。EV 群の走行・充電・停車時制御のロジックをシミュレータ連携させることで、図 B-4 のような制御結果が得られている。家庭用太陽光発電から配電フィードへの発電にともなってフィード末端での電圧上昇が生じているが、EV 間の電力交換(Vehicle-to-Vehicle : V2V)を活用した、昼間時間帯への機動的な EV デマンドレスポンスにより、電圧上昇が緩和されている。もちろん、個別 EV の走行のための充電は確保されている。

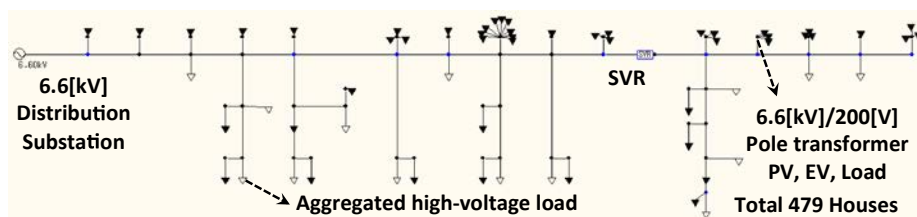


図 B-3. 標準的な配電フィードモデルへの PV と EV の導入

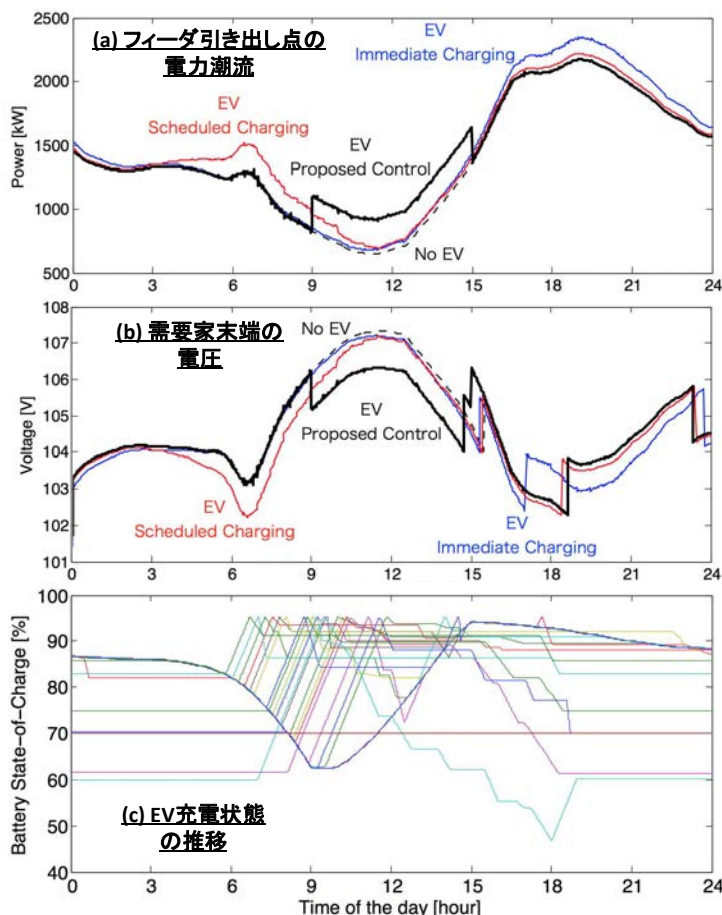


図 B-4. 配電フィードにおける EV デマンドレスポンスのシミュレーション結果

[H26]

EV システムと電力系統シミュレータを連携させる HILS(Hardware-In-the-Loop-Simulation)を構築し、H24、H25 年度に提案した制御手法を統合的に実装できる環境とした。試験環境の概要を図 B-5 に示す。車載充電器に対して交流で連系するサイトと、車外定置型充放電装置に対して直流で連系するそれぞれのインターフェース経由で、自律分散型制御およびバッテリー・アグリゲーション手法を実装し、制御・通信性能を確認している。サイト間の通信については、スマートグリッドにおける標準通信プロトコルとして有望視されている OpenADR2.0B について最終調整中であり、ECHONET(交流充電)、OpenADR2.0B、CHAdeMO(直流充放電)それぞれの通信プロトコルの相互運用を H26 期間内に試みる予定である。また、電力系統シミュレータにより離島マイクログリッドを想定した周波数変動を模擬出力することで、周波数変動環境下での EV システムの応答確認を行っている。

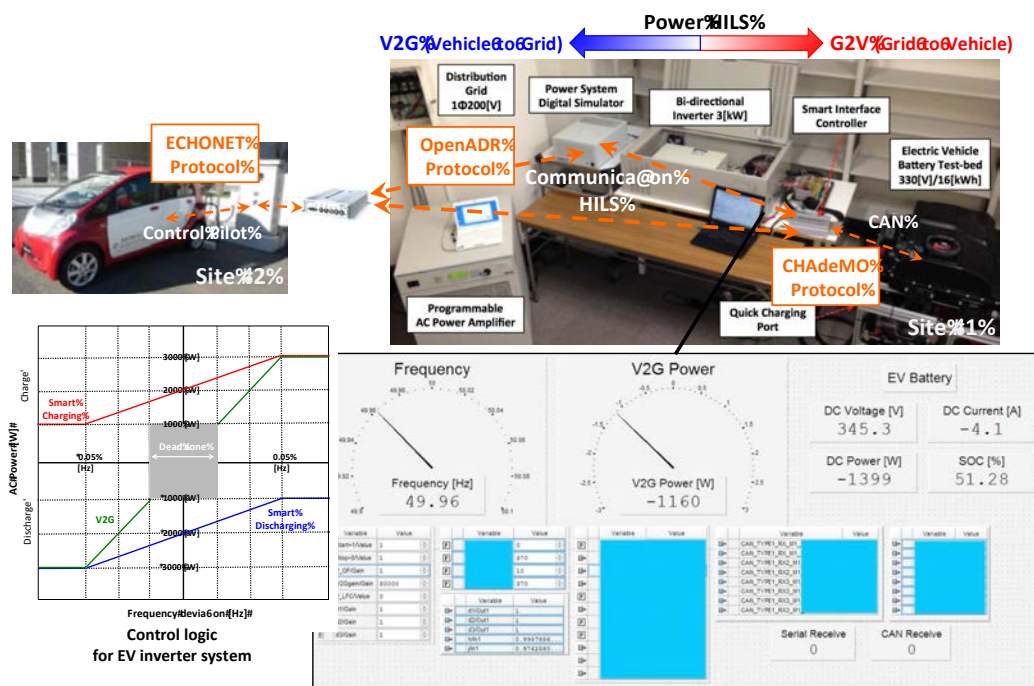


図 B-5. EV システムと電力系統シミュレータによる HILS 環境

【C. 系統側エネルギー貯蔵装置及び負荷機器の革新的運用手法の検討】

[H24]

シミュレーション中に電力需要・PV 出力変動や発電機故障などが発生した場合において、その後の時間断面で N-1 基準を満たす等の明確な基準を考慮したシミュレーションの実施と、供給支障発生の様子の見える化を推進するための検討を行った。その基礎的検討として、週間発電計画を1日ごとに作成しなおすシミュレーション手法及びそれに必要な最適化手法について提案・検討を行った。最適化計算アルゴリズムを先行研究と比較してシンプルな物へと変更する事によって計算時間の簡略化を実現し、新たな週間シミュレーション手法を確立した。また、これまで困難であった発電機故障を考慮した最適発電計画作成手法を提案し、その有用性を示した。これらを踏まえた上で、PV の出力変動に対して運転予備力を考慮したシミュレーション手法を確立し、検討を行った。時間断面毎の最適な予備力の確保量を探索的に求める手法についても検討を行ったが、計算時間が非常にかかるため基礎的な検討のみ留まっている。しかしながら、予備力確保量の最適化を行った場合の結果は、PV 出力の応じた予備力を確保した場合と大差が無く、PV 大量導入時における供給信頼度確保のためには PV 出力に応じた予備力を確保すれば良いという知見が得られた。

[H25]

PVの大量導入という課題に対し、既存の電力貯蔵設備である揚水発電所の運用計画を最適化し、既存の電力系統の設備で最大限対応するための手法を提案した。最適運用計画の評価手法として、不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションによる供給信頼度と燃料費を提案した。またその結果を踏まえ、今後電力系統に導入が進む事が予想される、電力系統用蓄電池の導入を考慮した最適週間運用計画作成手法を提案した。はじめに、PV大量導入時における揚水発電所最適運用計画の作成手法について検討を行った。我が国の電力需要が平日と週末で大きく異なる事に鑑み、週間運用計画作成手法ならびに週間需給シミュレーション手法に焦点を当てた。揚水発電所のみの最適化によってPV大量導入時における供給信頼度の維持は困難であるため、電力系統に新規導入される蓄電池の運用最適化手法について検討を行った。揚水発電所と蓄電池の協調運用手法について、その双方の出力を制御変数とした最適週間運用計画作成手法を提案している。週間需給シミュレーション中において蓄電池の充電状態(SOC)を補正するアルゴリズムを導入することで、シミュレーション中における蓄電池のSOCが運用計画から離れていた場合において、そのSOCの偏差を補正する事によって、同一の蓄電池の導入量に対して週間燃料費と供給信頼度の双方を向上させる事ができた。

[H26]

再生可能エネルギーとして、PVと風力発電(WT)の双方を考慮し、既存の電力貯蔵設備として揚水発電所を、新規の電力貯蔵設備として系統用蓄電池を考慮した運用計画の最適化を行い、これらの設備によってPVやWTによる、余剰電力や供給電力不足への対応を行うための手法を提案した。また、運用計画作成時に天候予測のデータから、PVとWTの発電出力予測を行い、運用シミュレーション時にはPVとWTの実測発電出力のデータを用いることで、実運用に近いシミュレーションを行った。WTの発電出力予測においては、風速予測データのみを用いたが、PVの発電出力予測においては、日射強度の予測データと天候予測のデータといった二通りのデータから発電出力を計算した。そしてシミュレーションにおいて、予測の有無や精度の異なる予測を用いることで、予測を実装することによる系統信頼度への影響を確認することができた。また、シミュレーション期間として、天候変動の大きな春期、天候変動が小さな夏期、風速の変動の大きな冬期といったような、様々な季節のシミュレーションを行うことで、季節ごとの信頼度の差も確認することができた。さらに、これらのシミュレーションによって得られた週間燃料費に、蓄電池のイニシャルコストを合算した総コストと供給信頼度の双方を考慮した、蓄電池の最適導入量を得ることができた。

【D. 系統側エネルギー貯蔵装置による緊急時制御手法の確立】

[H24]

1. シミュレーションにおける負荷供給系統のモデリングと解析ツール構築

PVが系統安定度に与える影響を解析するための準備として、負荷やPVの動的モデルを扱うことのできる負荷供給系統の安定度解析ツールの開発を進めた(図D-1)。負荷は、誘導機負荷と定インピーダンス負荷の並列モデルとした。ここで、誘導機は機械的な過渡現象に加えて電氣的な過渡現象を扱うことのできる詳細モデルで模擬した。PVは、インバータの動特性(電力制御系、電流制御系)や、瞬低時の脱落特性、出力復帰特性を模擬可能なモデルとした。開発した解析ツールを用いて、当該年度はPVのモデル化の違いが過渡電圧安定度に与える影響について検証した^{D-1)}。その結果、PVの動特性を無視した静的モデルを適用した場合には、事故除去後の電圧復帰特性を正確に模擬できず、悲観サイドの結果となることが明らかとなった(図D-2)。また、静的モデルの解析誤差は、PVの変換器定格に対する出力の割合に影響を受け、その割合が小さい条件(変換器余裕が大きい条件、曇天時等)では、特に解析誤差が大きくなることも分かった。

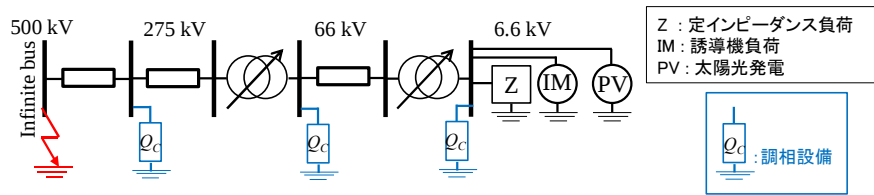


図 D-1. 負荷供給システムモデル

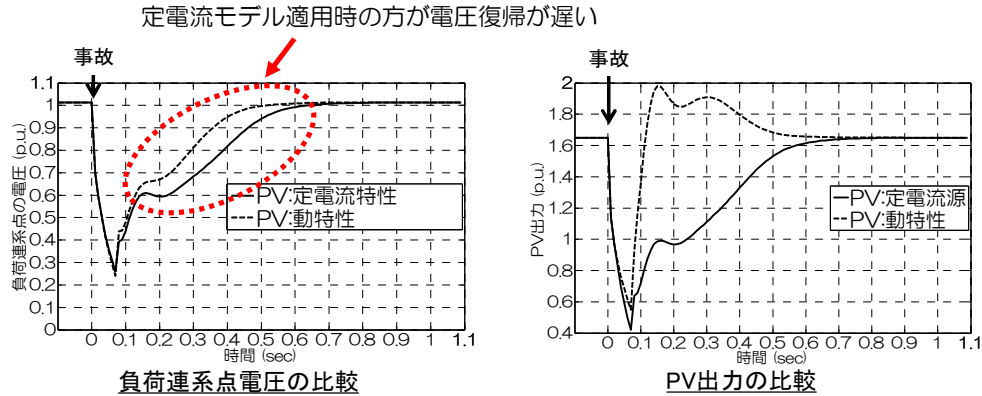
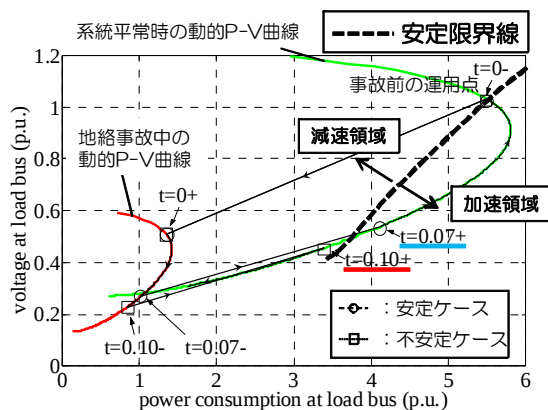


図 D-2. PV モデルの違いが解析結果に与える影響

[H25]

前年度に構築した負荷供給システムモデルを用いて、過渡電圧安定度の新たな解析手法^(D-1)を開発し、PV の連系が過渡電圧安定度に与える影響について明らかにした。負荷供給システムモデルへの提案手法の適用例を図 D-3 に示す。提案手法では、P-V 平面(P:解析対象負荷の消費電力、V:負荷端の電圧)において、誘導機負荷の加速/減速状態を判断できる安定限界線と、電力系統から当該負荷への送電特性を表す動的P-V曲線によって、電力系統の過渡電圧不安定現象の進展過程を明確に説明できる。提案した解析手法を応用して、PV 連系が過渡電圧安定度に与える影響について次のことを明らかにした^(D-2)。

- PV 発電時は調相設備の並列容量が減るため、事故時に PV が運転を停止すると、早い電圧崩壊現象が起こりやすい。そのため、FRT (fault ride through) 機能を持たない PV の連系は、現状よりも過渡電圧安定度を低下させる。
- PV が FRT 機能を持つ場合であっても、瞬停により PV が運転停止した場合には、その後の出力復帰の早さが重要である。負荷端で PV が出力している条件の方が系統から負荷への電力供給能力は高くなるため、出力復帰が遅いと過渡電圧安定度が厳しくなる。(図 D-4)



安定ケースでは事故除去時 (t=0.07+) の負荷運用点が誘導機加速領域 (安定限界線の右側) に位置しているのに対し、不安定ケースでは事故除去時 (t=0.10+) の負荷運用点は誘導機減速領域に位置している。そのため、安定ケースでは電圧が回復し、不安定ケースでは電圧低下が続く。

図 D-3. 提案した安定限界線と動的 P-V 曲線による過渡電圧不安定現象解析

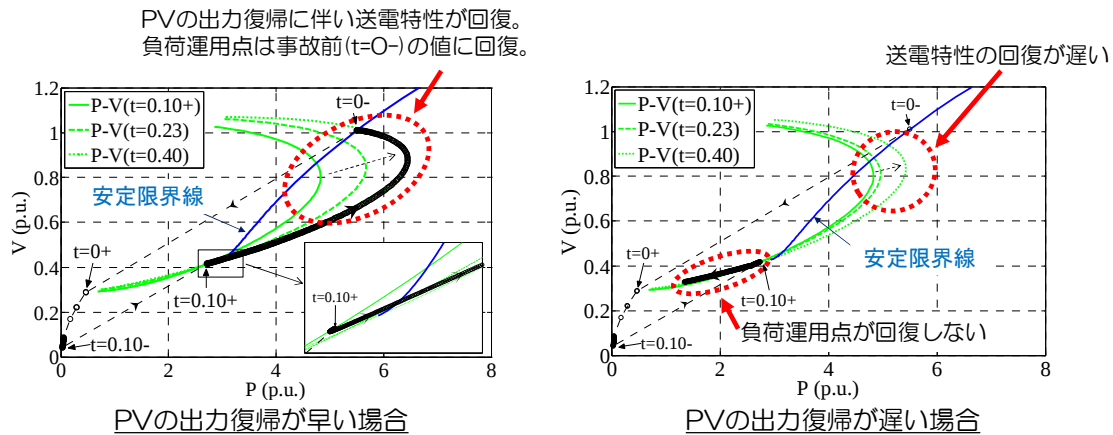


図 D-4. 負荷供給系統における三相地絡事故(継続時間 0.10s)時の負荷運用点の変化

[H26]

負荷供給系統モデルにおいて、一部のPV群が運転停止する場合を想定し、事故時に運転停止しないその他のPV群を利用した無効電力制御による系統安定化制御手法を検討した。過渡電圧安定度の安定化に寄与する方法として次の二つの方法を提案し、シミュレーションにより安定化効果を確認した。

- 常時進み定力率運転: 平常時に進み力率でPVを運転し、遅れ無効電力を常時消費する運転状態にする。これにより、平常時電圧を維持するために並列される調相設備(コンデンサ)容量を増やし、PV運転停止時には負荷への送電特性の低下を緩和する効果をもつ。
- DVS(dynamic voltage support)機能: 系統事故後にPVインバータから遅れ無効電力を発生することで、連系点電圧を維持する機能。系統事故時に運転継続可能な一部のPVにこの機能を持たせることで、その地域全体の送電特性を高める効果をもつ。

上述したDVS機能は、負荷地域に設置されたエネルギー貯蔵装置にも具備できる機能のため、エネルギー貯蔵装置の無効電力制御による系統安定化効果も同時に明らかとなった。

次に、PV連系時の過渡安定度・過渡電圧安定度の解析を目的とした基幹系統モデルの構築を行った(図D-5)。過渡安定度解析を目的とした従来の基幹系統モデルでは、二次系統のインピーダンスや負荷の動特性を考慮していなかったのに対して、本研究ではそれらの構成要素を模擬することで、過渡電圧不安定現象が生じる系統モデルを構築した。この基幹系統モデルにおいて、上述した二つの対策の安定化効果を検証(図D-6, 図D-7)し、以下の知見を得た。

- 基幹系統における系統事故時のPVの運転停止に起因する過渡電圧不安定現象に対して、PVの常時進み定力率運転、DVS機能は高い安定化効果をもつ。
- DVS機能の動作地点が臨界発電機群の近くに位置する場合に、臨界発電機群の加速を抑制し、過渡安定度も高める効果を持つ。
- DVS機能の動作地点によっては、制御動作が却って発電機相差角の動揺を大きくし、過渡安定度を悪化してしまう場合がある。この課題に対しては、事前演算により、事故地点に応じてDVS機能の動作地点を限定することで解決できることを確認したが、不確実性にも対応できる安定化制御システムを構築するという観点からは、広域リアルタイム情報を利用した制御手法について更なる検討が必要である。

負荷供給系統モデルでの検討と同様、上述したDVS機能は、負荷地域に設置されたエネルギー貯蔵装置にも具備できる機能のため、エネルギー貯蔵装置の無効電力制御による系統安定化効果も明らかとなった。

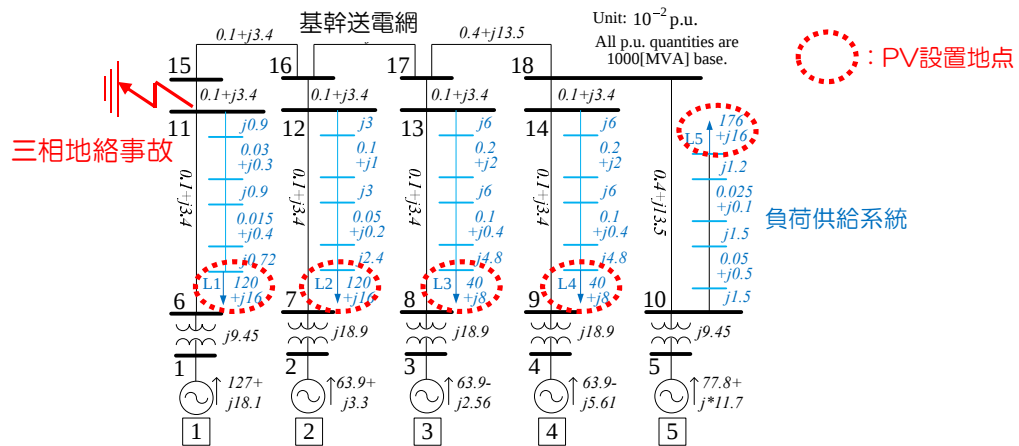


図 D-5. 基幹系統モデル

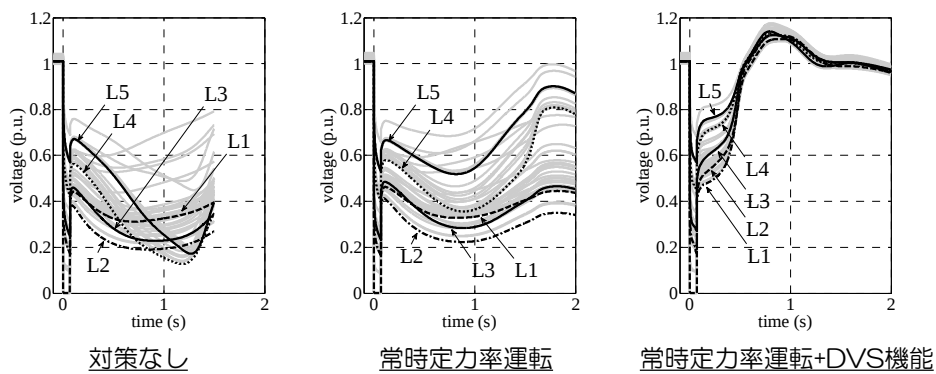


図 D-6. 母線電圧の比較

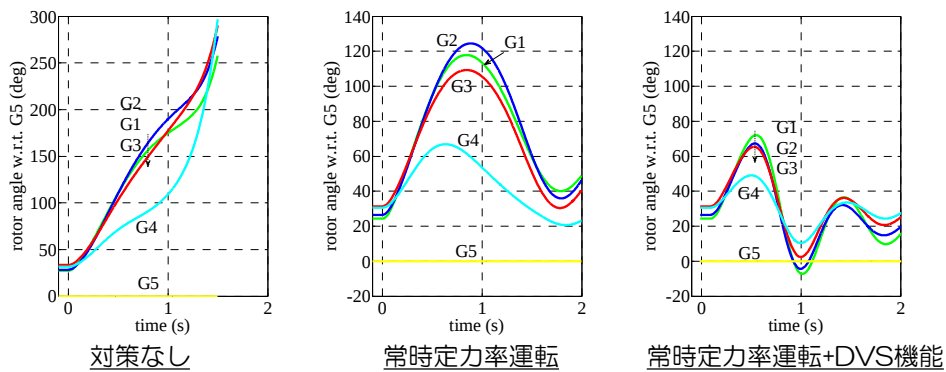


図 D-7. 発電機相差角の変化

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1 件、国際(欧文)誌 13 件)

A-1. S. Kawachi, J. Baba, K. Furukawa, and E. Shimoda, "Experimental Verification of Tie Line Power Flow Control of Microgrid by Use of Heat Pump Air Conditioning System and Energy Storage System" Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol.3, No.1, pp.25-31, 2013 (10.5370/JICEE.2013.3.1.025)

A-2. 河内駿介, 馬場旬平, 古川慧, 下田英介, "業務用空調機消費電力制御による短周期電力変動補償のマイクログリッドにおける実証試験", 電気学会論文誌 B, Vol.133, No.4, pp.358-365, 2013 (10.1541/ieejpes.133.358)

A-3. S. Kawachi, H. Hagiwara, J. Baba, K. Furukawa, E. Shimoda, and T. Nitta, "Experimental Verification of Power Fluctuation Compensation in Microgrid by Use of Heat Pump Air Conditioning System", Proc. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE PEMC), pp.1-6, 2012 (10.1109/EPEPEMC.2012.6397321)

A-4. A. L. M. Mufaris and J. Baba, "Scheduled Operation of Heat Pump Water Heater for Voltage Control in Distribution System with Large Penetration of PV Systems", Proc. IEEE Green Technologies Conference, pp.85-92, 2013 (10.1109/GreenTech.2013.21)

A-5. A. L. M. Mufaris, S. Kawachi, J. Baba, "Voltage Control Using Coordinated Control of Heat Pump Water Heaters with Large Penetration of Photovoltaic Systems", Proc. International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), pp.1-6, 2013 (10.1109/EPECS.2013.6713104)

A-6. A. L. M. Mufaris and J. Baba, "Local Control of Heat Pump Water Heaters for Voltage Control with High Penetration of Residential PV Systems", Proc. IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), pp.18-23, 2013 (10.1109/ICIInfS.2013.6731948)

B-1. Y. Ota, H. Taniguchi, H. Suzuki, J. Baba, and A. Yokoyama, "Aggregated Storage Strategy of Electric Vehicles Combining Scheduled Charging and V2G", Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, pp.1-5, 2014 (10.1109/ISGT.2014.6816409)

B-2. C. Phichian, A. Yokoyama, and Y. Ota, "Suppression of System Frequency Fluctuation by Smart Charging of Electric Vehicles Considering Customer's Convenience", IEEJ Trans. Power and Energy, Vol.134, No.7, pp.579-585, 2014 (10.1541/ieejpes.134.579)

B-3. Y. Ota, H. Taniguchi, J. Baba, and A. Yokoyama, "Implementation of Autonomous Distributed V2G to Electric Vehicle and DC Charging System", Electric Power Systems Research, Available Online, 2014 (10.1016/j.epsr.2014.05.016)

C-1. R. Aihara, A. Yokoyama, F. Nomiya, H. Kihara: "Optimal Operation Scheduling of Pumped Storage Hydro Power Plant Using Efficient Optimization Algorithm", Proc. IEEE International Conference on Power System Technology (PowerCon), pp.1-6, 2012 (10.1109/PowerCon.2012.6401455)

C-2. J. Kumano, A. Yokoyama, "Optimal Weekly Operation Scheduling on Pumped Storage Hydro

Power Plant and Storage Battery Considering Reserve Margin with a Large Penetration of Renewable Energy”, Proc. IEEE International Conference on Power System Technology (PowerCon), 2014

D-1. K. Kawabe, K. Tanaka, “Analytical Method for Short-Term Voltage Stability Using the Stability Boundary in the P-V Plane”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.29, Issue.6, pp.3041-3047, 2014 (10.1109/TPWRS.2014.2313152)

D-2. K. Kawabe, K. Tanaka, “Impact of Dynamic Behavior of Photovoltaic Power Generations on Transient Voltage Stability”, Proc. Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, SP4, 2014

D-3. K. Kawabe, K. Tanaka, “Analytical method for short-term voltage stability using the stability boundary in the P-V plane”, Proc. Power System Computational Conference 2014, ID67, 2014

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

A-1. 馬場旬平, “xEMS への期待-エネルギーマネジメントシステム(EMS)-”, 富士電機技報, Vol. 86, No.3, pp.3, 2013

B-1. 太田豊, “スマートグリッドにおける V2G 制御”, 技術雑誌スマートグリッド, Vol.3, No.2, pp.3-7, 2013

B-2. 太田豊 (分担執筆), “EV/PHEV による V2G の制御手法とインターフェース”, 分散型電源導入システムの電力品質安定化技術, pp.153-163, 2013

B-3. 太田豊, “電力システムと電気自動車の協調”, 電気学会論文誌 B, Vol.133, No.6, pp.497-500, 2013

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 4 件、国際会議 2 件)

(主要な国際会議への招待講演の前に*を付記してください)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

A-1. 馬場旬平, エコキュートと電気自動車を用いた太陽光発電の出力制御緩和, 2013 年度日本冷凍空調学会年次大会, E331, pp. 567-568, 東京, 2013.9.11

A-2. J. Baba, “Introduction of National Project on Optimal Control and Demonstration of the Japanese Smart Grid for Massive Integration of Photovoltaic Systems”, Tutorial 2, CIGRE SC C6 Colloquium 2013 SC and WG Meetings, Yokohama, 2013.10.06

A-3. 馬場旬平, 太陽光発電システムが重要電源となるには?, 太陽光発電協会 PV Japan 2014 専門セミナー, 東京, 2014.7.31

A-4. 馬場旬平, EMSと電力系統, 応用物理学会 エネルギー・システム研究会 夏のセミナー 地産地消のエネルギーシステムを考えよう, 宮古島, 2014.9.3

A-5. 馬場旬平, スマートグリッド実現におけるヒートポンプ機器への期待, 日本冷凍空調学会 年次大会, D341, 佐賀, 2014. 9. 13

B-1. Y. Ota, “V2G Projects and Challenges in Japan”, International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP), Plenary Session2 : Challenges of EV Penetration to Smart Grid, Tokyo, 2013.07.02

② 口頭発表 (国内会議 21 件、国際会議 2 件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

A-1. 河内駿介, 馬場旬平, 木原寛之, 杉本貴之, 仁田旦三, “空調機器の消費電力制御を含むマイクログリッドによる系統周波数制御への貢献能力の実験的検証”, 電気学会全国大会, 愛媛, 2014.3

A-2. 林祐希, 馬場旬平, 中村卓司, 下田英介, 木原寛之, “輻射空調を用いたモデル予測制御による空調制御の実証”, 電気学会全国大会, 愛媛, 2014.3

A-3. A. L. M. Mufaris, Y. Ota, J. Baba, S. Yoshizawa, Y. Hayashi, “Verification of Local Voltage Control Method by Use of Heat Pump Water Heaters with Operation of SVR”, IEEJ Annual Meeting, Ehime, Japan, 2014.3

A-4. 河内駿介, 馬場旬平, 杉本貴之, 木原寛之, “空調機器を可制御負荷として含むマイクログリッドにおける電力変動補償制御の制御パラメータ決定手法提案と実証試験”, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014.9

A-5. 奥谷和也, 河内駿介, 馬場旬平, “家庭用ヒートポンプ給湯機を可制御負荷として利用した際の利用可能熱量に関する基礎検討”, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014.9

B-1. Y. Ota, H. Taniguchi, H. Suzuki, J. Baba, and A. Yokoyama, “Implementation of Load Frequency Control Scheme to Electric Vehicle and Supply Equipment System”, IEEJ P&ES - IEEE PES Thailand Joint Symposium on Advanced Technology in Power Systems, Bangkok, Thailand, March 4, 2013

B-2. Y. Ota, H. Taniguchi, T. Nakajima, K. M. Liyanage, J. Baba, and A. Yokoyama, "Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging", IEEE PES General Meeting (Transactions Paper Session), Vancouver, Canada, 2013.7

B-3. 太田豊, 谷口治人, 鈴木宏和, 馬場旬平, 横山明彦, “集約蓄電池としての運用を可能とする EV・アグリゲータの分散協調制御手法”, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013.8

B-4. 太田豊, 馬場旬平, 谷口治人, 横山明彦, 林泰弘, “電気自動車の充放電制御による配電フィーダの電力潮流マネジメントに関する基礎検討”, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014.9

C-1. 相原良太, 横山明彦, 野見山史敏, 木原秀美, “太陽光発電大量導入時における運転予備力を考慮した揚水発電所最適週間運用計画の基礎的検討”, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 東京, 2012.8.8

C-2. 相原良太, 横山明彦, 野見山史敏, 木原秀美, “太陽光発電大量導入時における運転予備力を考慮した揚水発電所最適週間運用計画”, 電気学会 B 部門大会, 新潟, 2013.8

C-3. 相原良太, 横山明彦, 野見山史敏, 木原秀美, “太陽光発電大量導入時における最適週間計画の更新を考慮した需給運用シミュレーション手法”, 電気学会全国大会, 名古屋, 2013.3

C-4. 相原良太, 横山明彦, “太陽光発電大量導入時における揚水発電所と系統用蓄電池の双方を考慮した週間運用計画評価シミュレーション手法”, 電気学会全国大会, 愛媛, 2014.3

C-5. 熊野純一, 相原良太, 横山明彦, “太陽光発電大量導入時における太陽光発電量の計測値及び予測値を考慮した揚水発電所の最適運用計画手法”, 電気学会全国大会, 愛媛, 2014.3

C-6. 熊野純一, 横山明彦, “再生可能エネルギー発電大量導入時における揚水発電所の最適週間運用手法に関する一考察”, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014.9

C-7. 熊野純一, 横山明彦, “再生可能エネルギー発電大量導入時における揚水発電所と蓄電池の最適週間運用手法”, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014.9

D-1. 河辺賢一, 田中和幸, “過渡電圧安定度解析のための太陽光発電モデルに関する一考察”, 電気学会全国大会, 名古屋, 2013.3

D-2. 河辺賢一, 田中和幸, “過渡電圧安定度解析のための P-V 平面における安定限界線の提案”, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 北九州, 2013.9

D-3. 松田一成, 河辺賢一, 田中和幸, “太陽光発電の事故後出力復帰特性の違いが電力系統の過渡安定度に与える影響”, 電気関係学会北陸支部連合大会, 石川, 2013.9

D-4. 河辺賢一, 田中和幸, “太陽光発電の FRT 特性が過渡電圧安定度に与える影響の定性的考察”, 電気学会全国大会, 愛媛, 2014.3

D-5. 松田一成, 河辺賢一, 田中和幸, “太陽光発電連系が過渡安定度に与える影響解析—誘導機負荷を考慮した場合—”, 電気学会 B 部門大会, 京都, 2014.9

D-6. 河辺賢一, 田中和幸, “太陽光発電の無効電力制御による過渡電圧安定化効果の検証”, 電気学会電力技術・電力系統技術合研, 大阪, 2014.9

D-7. 松田一成, 河辺賢一, 田中和幸, “太陽光発電連系時の過渡安定度影響解析—FRT 機能と誘導機負荷特性を考慮した場合—”, 電気学会電力技術・電力系統技術合研, 大阪, 2014.9

③ ポスター発表 (国内会議 3 件、国際会議 1 件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

B-1. 太田豊, “V2G(Vehicle-to-Grid)の統合制御手法とインターフェース”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 滋賀, 2013.11

B-2. Y. Ota, J. Baba, A. Yokoyama, and H. Taniguchi, “Activation of Electric Vehicle as Fast Demand Response Resource”, International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources (IRED), Kyoto, Japan, 2014.11

B-3. 太田豊, “電気自動車を柔軟で機動的なデマンドレスポンス資源とする制御手法”, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会, 岡山, 2014.11

D-1. 松田一成, 河辺賢一, 田中和幸, “定 PI で模擬した太陽光発電連系時における一機無限大母線系統の過渡安定度”, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013.8

(4)知財出願

①国内出願 (0 件)
なし

②海外出願 (0 件)
なし

③その他の知的財産権
なし

(5)受賞・報道等

《受賞や新聞報道等について、具体的に記入してください。》

①受賞
なし

②マスコミ
なし

③その他
なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

・非公開

§ 5 研究期間中の活動

主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2013 年 3 月 20 日	チーム内ミーティング(非公開)	名古屋大学	4 名	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 10 月 28 日	チーム内ミーティング(非公開)	東京大学	3 名	研究討議
2013 年 11 月 20 日	エネルギー総合工学研究所 次世代電力ネットワーク研究会 シンポジウム	東京大学	150 名程度	“EV 搭載蓄電池の次世代電力ネットワークへの応用”の講演
2013 年 11 月 24-25 日	チーム内ミーティング(非公開)	東京大学	4 名	研究討議
2013 年 11 月 29 日	dSPACE 新エネルギー制御ソリューションセミナー	東京(東京コンファレンスセンター)	120 名程度	“スマートグリッド・EV 連携システムのエネルギーマネジメントと HILS 実装”の講演

2014 年 2 月 18 日	研究に関するディスカッション(非公開)	米国デラウェア大学	5 名	Prof. Kempton との研究コラボレーション検討のため
2014 年 2 月 24 日	研究に関するディスカッション(非公開)	米国ローレンスバークレー国立研究所	4 名	Grid Integration Group, V2G-Sim に関する研究情報交換
2014 年 3 月 20 日	研究に関するディスカッション(非公開)	東京大学	3 名	UCLA Smart Grid Energy Center Director Prof. Rajit からの研究協力依頼
2014 年 6 月 12 日	研究に関するディスカッション(非公開)	東京大学	6 名	University of Hawaii at Manoa, Prof. Reza の訪問, 設備見学も設定
2014 年 11 月 13 日	電気学会産業応用フォーラム	東京(自動車振興会館)	60 名程度	“クルマと電力インフラ間のスマート電力マネジメント”の講演
2014 年 12 月 3 日	九州工業大学寄附講座特別講演会	九州工業大学	80 名程度	“電動自動車を利用したスマートグリッドの応用例と研究課題”の講演

§ 6 最後に

・特になし