

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 30 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420430

研究課題名(和文) 多量の太陽光発電が導入された配電系統における需要家自律EMSの研究

研究課題名(英文) The demand-side independent EMS of distribution network with large quantity of solar cells

研究代表者

高木 康夫 (Takagi, Yasuo)

大同大学・工学部・教授

研究者番号：70578658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では配電系統のEMSとして(1)HEMS(2)BEMS(3)電力貯蔵の3種類を取り上げた。(1)HEMSでは2030年までにすべての家庭に普及を目指して、既存家電の運用状況を見える化する技術を研究した。これにより家庭の多量の太陽光発電との独立協調が可能となる。(2)BEMSでは再生可能電源との協調動作を実現するデマンドレスポンスの高精度化に向け、ビルの動的な詳細モデルの構築を行った。これにより、ビルの蓄熱機能の評価やデマンドレスポンスの応答を定量的に把握できる。(3)電力貯蔵では可変速揚水発電を取り上げ、太陽光発電と協調動作可能となる制御方法の検討をシミュレーションにて行い、提案した。

研究成果の概要(英文)：HEMS, BEMS and energy storage control are investigated. (1)HEMS: HEMS is supposed to prevail in all households till 2030. For the goal, operation visualization method for not-connected home appliances using current harmonics and effective values are developed. The method controls home appliances accordance with solar generation. (2)BEMS: The building dynamic model is developed to design demand-response for the co-operation control with renewable generations. The model consists of statistical approximate model and the precise building walls and windows heat loss evaluations. (3)Energy storage control: The dynamic model of variable-speed hydro turbine generator is developed to design high speed power control to co-operate solar panels. The new control strategy is proposed.

研究分野：制御技術

キーワード：エネルギー管理 電力 再生可能エネルギー スマート社会 HEMS BEMS

1. 研究開始当初の背景

固定価格買取制度(FIT)の導入により、配電システムには多量の太陽光発電が連系されつつある。これにより、需要とは無関係に供給される電力が増加することとなる。これに対応するためには、(1)家庭の電力需要を制御する HEMS(ホームエネルギー管理)、(2)ビルの需要を制御する BEMS(ビルエネルギー管理)、(3)系統側で過不足を調整する制御が重要となる。まず、HEMS の背景について述べる。HEMS の基本的な機能は、消費エネルギーの見える化により、電力を消費する人の「気づき」を誘導して、消費エネルギーの削減を目指すことにある。この消費電力の見える化を実現する方法には、各々の家電機器に計測装置を取り付ける方法(これをスマートタップ・スマートコンセントと呼ぶ)や、家電機器自体にエネルギー消費量の計測機能を取り付ける方法(ECHONETLite™規格に準拠した家電など)がある。しかし、コストがかかる上、情報を収集するネットワーク構築が必要なため普及が進んでいない。これに対し、BEMS に関しては大型ビルを中心に普及が進みデマンドレスポンスにも活用されている。しかし、さらに進んでゼロエミッションビル(ZEB)を目指すためには、ビルのエネルギー性能そのものの見える化が必要であるが、そこまでは進んでいない。最後に、系統側の電力の過不足の調整機能について、特に蓄電池を中心に試験が行われていたが、寿命、コストなど課題が明らかであった。

2. 研究の目的

HEMS、BEMS および系統制御についてそれぞれ記述する。

(1)HEMS HEMS を普及させ、家庭を電力需給制御に参加されるためには、既存の家電にも幅広く適用できる消費電力計測手段、計測器設置が低コストかつ小さな労力で実現可能である必要がある。この技術の候補として従来から電力分野でロードサーベイ技術として開発されてきた、家庭の給電口の電力の特徴から家電の種類を推定する技術に着目し、実用的な家電状態判別方法を確立する。さらに、電力システムに貢献する自律制御型の HEMS の開発を目的とする。

(2)BEMS ビルの ZEB 化を目指した省エネルギー実現に貢献する BEMS 技術の確立を目指す。本研究では空調エネルギーの見える化を対象とし、従来の BEMS の監視範囲であった熱除去システムの監視・制御の他、部屋の熱損失そのものの見える化技術の確立を目指す。特に、ビル躯体や窓からの熱損失を簡易に見える化する技術を開発する。これにより、数多くの省エネ改善の対策の中から、効果的かつ低コストな対策を選ぶためのスタートとする。

(3)系統需給制御 太陽光発電の高速な変動に対応でき、かつ、大容量の需給調節が可能で、長寿命・低コストな手段として、本研究では、可変速揚水発電を取り上げ、これを

いた高速電力制御の可能性を調査した。水力発電なので、比較的安価長寿命であり、大容量の需給調整に向いている。また、可変速揚水発電には、発電機として巻線型誘導機が採用され、巻線にはパワエレ装置により交流が供給される。この結果、高速な電力制御が可能と予想されるが、この制御の水理系への影響が未知である。これを推定し、高速制御の道を開くのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1)HEMS データ解析を遠隔で行うクラウド型 HEMS サービスを対象に、既存の非ネットワーク家電まで含めた消費電力見える化機能実現を目標とし(図 1)、クラウド上の HEMS サーバーに置くことのできる家電識別フィルタを検討する。特に、家電の消費電流波形には、それぞれ特有の波形が観測されるので、その波形に基づいた家電の認識技術を提案する。振動周波数と時系列を保存する Wavelet 変換を用いた家電認識技術を開発し、実際に家電製品に適用してその性能検証を行う。また、従来からある FFT 解析による高調波分析との比較を行う。

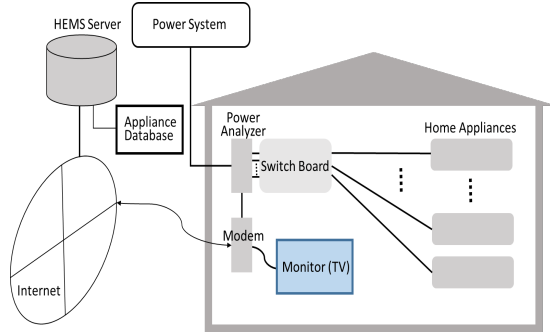


図 1 クラウド HEMS と家電識別フィルタ

(2)BEMS 既存ビルの熱損失そのものの見える化技術の確立を目指し、壁や窓の熱伝達による熱損失推定方法を提案する。本手法の特徴は、ビルの熱伝達損失を伝熱工学の知識を用いて簡易に推定する点にある。このために、ビルの熱伝達を表すデータオリエンテッドなモデルを提案し、このパラメータを BEMS の情報およびサーモカメラによる壁温度により推定し、熱伝達係数を求めて熱伝達損失に見える化する。また、弱い自然対流場における伝熱工学の式は誤差を含んでいることが知られているので、実験により補正係数を求め、精度良く窓や外壁の熱伝達を推定する。これら提案手法および熱伝達の測定は、大学の研究棟の実測データにより検証する。

(3)系統需給制御 可変速揚水発電プラント(図 1)の特長を生かした高速な出力制御を設計・評価するため、ガバナと励磁制御を組み合わせた制御系を評価できる動特性モデルを提案する。従来に比べて速い応答を評価するので、モデルは水撃現象を含む水理系と巻線型同期発電機の特性を組み合わせる。提案動特性モデルは、発電機モデルとして標準的な d-q 軸変換による巻線型同期機(DFSG)のモデルを、水理モデルは水圧評価のため特性計

算法を用いたモデルを採用した。特に、水理モデルの応答は文献に報告された実機応答と比較することによりモデルを検証した。次に、本モデルの有効性を示すために、励磁・ガバナ制御による揚水動作時と発電時の出力制御応答を従来のガバナ制御のみによる応答と比較・考察する。従来の揚水発電の応答と比較して、大幅な速応性実現の見通しが得られることを示す。

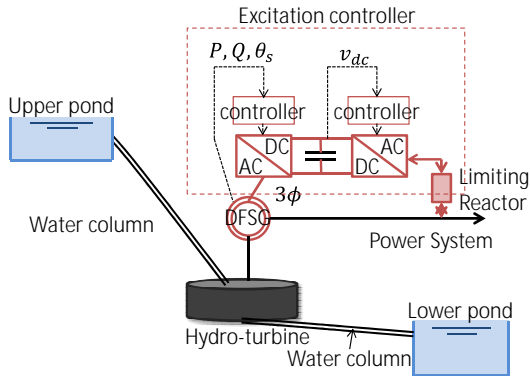


図2 可変速揚水発電の構成

#### 4. 研究成果

(1)HEMS 電源電流をサンプリング周波数10kHzで1000サンプル測定しCWT(Continuous Wavelet Transform)係数のデータベースを作成した。次に、これらの家電の電流波形をWavelet変換判定アルゴリズムにより家電の種類を判定した。その結果を表1に示す。第2列は正しく推定できた割合である。結果はPCとTVを除き、100%正しく認識した(試行回数は5回)。インバータ家電は複数の動作モードを持つものが多いので、それに対応したCWT係数を準備しておく。これにより、学習や調整することなく、容易に在来家電の機種を特定することができる。なお、PCにおいて機種推定が正しくできなかった原因は、PCが様々な電気機器の組み合わせであり、その動作がPCの動作状態により時々刻々変化することにあると考える。TVにおいて、失敗ケースの理由は検討課題である。10kHzサンプリングにより1000サンプル取得する時間は、0.1秒である。短時間でCWT係数を準備することができ、短時間で家電の種類を推定できるのが特徴である。

表1 Wavelet変換を用いた家電認識の結果

Home Appliance	Correct Recognition Ratio	Comments
Refrigerator (manufactured in 2013)	1	Refrigerator has 2 mode, ON and OFF.
Refrigerator (old)	1	
TV	4/5	The reason for incorrect recognition is not clear
PC	2/5	PC current waveform depends on operating states, such as start up, pause, or calculating.
LED Light	1	LED Light has plural modes.
Micro wave oven	1	
Vacuum cleaner	1	
Water heater	1	

次に、Wavelet変換による波形認識とFFTによる解析との差について示す。Wavelet変換を用いた波形認識が、周波数と基本波に対する相対時刻により特徴付けているのに対して、FFTによる家電認識は、電流高調波の大きさを用いる。60Hzの商用電源では、3倍高調波は180Hz、5倍高調波300Hz、7倍高調波420Hzなどであり、1kHzまで使ったとして7個のデータの組み合わせとなる。一方、Wavelet係数は、scaleの種類×サンプル数であり、情報量が大きい。FFTにより精度良く高調波を測定するためには、(1)十分なデータ量の確保、(2)A/Dコンバータの分解能を有効に使う、(3)ノイズの低減、が重要である。特性を確認するために、基本波の他、3倍、5倍、7倍の高調波を含む波を仮定し、10kHzサンプリングにて10000個のデータを使って求めた複素フーリエ係数を図3に示す。

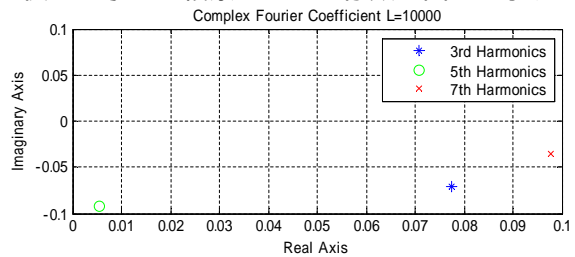


図3 複素フーリエ係数

すべての高調波の複素フーリエ係数は、仮定より1+j0であるが、図3の誤差を生じる。原因はFFTアルゴリズムが2^nのデータ長を仮定したアルゴリズムであり、高調波の周波数に厳密に合わない近似周波数における係数を高調波の係数としているためである。一方、Wavelet変換を用いる場合、簡単なアルゴリズムで家電の種類を推定できる。波形の振幅と時刻を含む形状情報を利用していることが特徴である。

(2)BEMS ビルの熱伝達による主要な熱損失チャネルには、図4に示すように、(1)窓ガラス、(2)窓サッシ、(3)外壁がある。

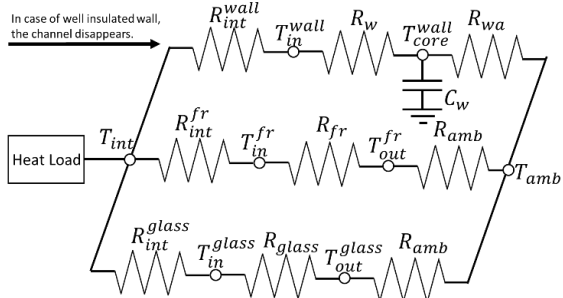


図4 ビルの熱損失モデル

窓ガラスと窓サッシは熱伝達の時定数が小さいので、伝熱工学の伝統的な静的方法により、実験で求めた補正係数を用いて熱損失を求める。また、対象としたビルの窓ガラスとサッシの温度に有意な差がなかったため、まとめて取り扱った。次に、外壁の熱伝達損失は、動的な伝熱モデルにより求めた熱伝達率で計算する。この中で、外壁本体の熱抵抗は動的な熱伝達特性の同定により求める。本研



究の検証では標準偏差 22%を持つ推定値が得られた。一方、外壁内表面の熱伝達抵抗は、伝熱工学の伝統的静的方法により求める。この熱伝達率は、外壁内側の表面温度に依存し、概ね、 $2.5 \sim 3.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ であるので、外壁内面の熱抵抗は  $0.286 \sim 0.4 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$  となる。本研究の検証では、外壁の本体の熱抵抗  $=0.532 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$  であるので、外壁の総括熱伝達への寄与は、壁本体の熱伝導と表面の熱伝達が同程度である。すなわち、対象としたビルに関しては、外壁の熱損失を推定するには、壁本体の熱抵抗のみならず壁表面の熱伝達を考慮する必要のあることが示された。

本研究では大量のストックがある既存ビルの空調エネルギーの見える化を取り上げた。ビルのエネルギー見える化はビルエネルギー管理システム(BEMS)が担っている。従来の BEMS は空調エネルギーや照明、コンセントの消費電力見える化を実現している。一方で、ビルの熱伝達による熱負荷そのものの見える化は実現されていない。そこで、本研究では、先行研究で報告された空調システムの状態のみでなく、ビルの躯体の熱性能まで含んだビルエネルギー性能の見える化に貢献する BEMS を目指して、ビルの熱損失係数の推定方法を提案した。特に、既存ビルを対象にビルの熱伝達損失を伝熱工学の知識を用いて簡易に推定する手法を提案した。ビルの熱伝達を表すデータオリエンテッドなモデルを提案し、このパラメータを BEMS の情報と壁温度を用いて推定することにより、熱損失性能を評価する。また、弱い自然対流場における伝熱工学の式は誤差を含んでいることが知られているので、実験により補正係数を求めた。以上の方法を、大学のキャンパスビルの 1 部屋に適用して、実用的な方法であることを確認した。

(3) 系統需給制御 可変速揚水発電プラントの高速制御を検討するため、DFSG モデルと特性計算法による水理モデルを組み合わせた可変速揚水発電プラントの動特性モデルを提案した(図 5)。このモデルの特徴は、DFSG の高速負荷追従制御による水理系への影響、特に、水圧の変化を評価できる点にある。次に、この提案モデルにガバナ制御と励磁制御を加え、揚水時および発電時の急速目標値変化に対する応答を評価した。

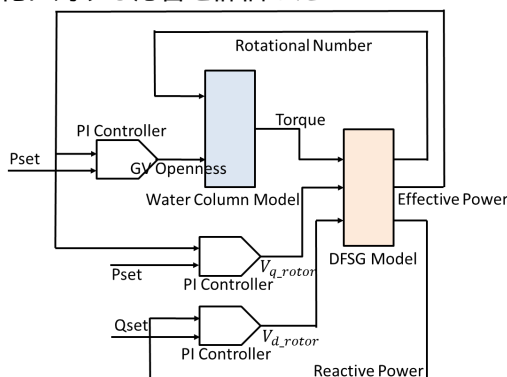


図 5 可変速揚水発電モデル

シミュレーションの結果、水理系がゆっくりした応答を示す中、励磁制御により発電機はその出力を急速に変化させることがわかった。このときの水撃による圧力変化は、負荷遮断時より十分小さく、許容範囲内と判断される(図 6a)。また、この時の水車回転数とガイドベーン開度を図 6b に示す。以上の制御系の検討により、従来の水力発電動特性モデルでは困難であった励磁制御とガバナ制御の協調による高速制御の検討が可能であることを示し、提案動特性モデルの有効性を示した。

今回の解析で設定した可変速揚水発電プラントの制御系は、暫定的なものである。特に発電時には最終的には、発電機回転数は同期回転数に制御され、出力はガイドベーン開度により制御される必要がある。このような仕様を考慮した協調制御系の検討を進める。

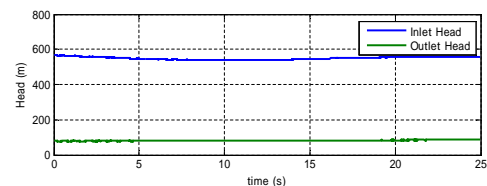
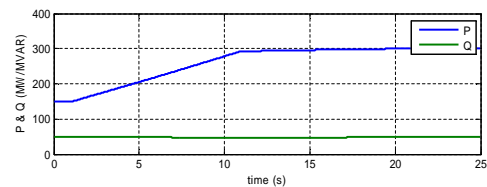


図 6a 提案制御による可変速揚水発電出力と水圧

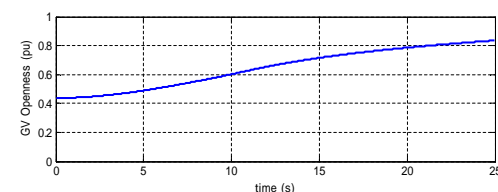
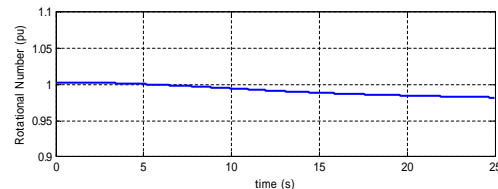


図 6b 提案制御による水車回転数とガイドベーン開度

#### < 引用文献 >

K. Fujino, 'Water hammer analysis by the algebraic method and its application to conduits of pumped storage power plants', Doctoral dissertation, No.215301, Tokyo University (2002)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

高木康夫, 'BEMS エネルギー見える化範囲拡大のための既存ビル熱伝達損失評価手法', システム制御情報学会論文集, Vol. 30, No.6, 2017, pp. 244-252

高木康夫, '制御系設計のための可変速揚水発電プラント動特性モデル', システム制御情報学会論文集, Vol. 29, No. 11, 2016, pp. 506-517

Yasuo Takagi, 'The characteristic analysis of a university building: dynamic modelling by grey box approach', SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 8, No. 5, 2015, pp. 328-333

〔学会発表〕(計 5件)

青木優太, 高木康夫, '家電判別アルゴリズムの検討', SCI '17, (Kyoto, Japan) (2017年5月25日)

高木康夫, '電源高調波による HEMS 向け家電判別アルゴリズムの検証', 平成 27 年度電気学会 電力エネルギー部門大会、(名古屋、日本) (2015年8月27日)

Yasuo Takagi, 'Q-Value Evaluation for a Campus Building', SICE Annual Conference 2015 (Hangzhou, China) (2015年7月30日)

Yasuo Takagi, 'The Characteristic Analysis of a University Building - Time Lag Constant and Q-Value Estimation -', SICE Annual Conference 2014 (Sapporo, Japan) (2014年9月12日)

Yasuo Takagi, 'The State Estimation of Existing Home Appliances Using Signal Analysis Technique', SICE Annual Conference 2014 (Sapporo, Japan) (2014年9月12日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 康夫 (TAKAGI, Yasuo)

大同大学・工学部・教授

研究者番号: 70578658