

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760194

研究課題名（和文）熱負荷制御による系統周波数調整に関する研究

研究課題名（英文）Research on Power System Frequency Regulation by thermal load control

研究代表者

近藤 潤次（KONDOH JUNJI）

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・研究員

研究者番号：20357049

研究成果の概要（和文）：出力変動の激しい太陽光・風力発電を大量導入すると、電力系統の需給バランス維持が困難になり、周波数変動が増大することが懸念されている。そこで、電気温水器のように熱エネルギーのバッファを有する負荷の電力消費パターンを制御し、電力系統の需給バランス維持に寄与させることを検討した。北海道をモデルとした数値解析により、17万台の電気温水器を提案法で制御すれば風力発電導入可能量を約 3 倍にできるという結果を得た。また、製作した制御ボードを実際の電気温水器に組み込んで試運転を行い、期待通りの動作を実証した。

研究成果の概要（英文）：It is a great concern that frequency deviation caused by supply and demand imbalance increases in power systems due to mass installation of intermittent renewable power sources such as photovoltaic and wind power generation. Thus, it was investigated that loads with thermal energy buffer such as electric water heaters (EWHs) contribute to the supply and demand balance by controlling their power consumption patterns. It was evaluated by numerical simulation that the acceptable wind power generation in Hokkaido increases around three times when 170 thousand EWHs are controlled by the proposed method. Furthermore, it was demonstrated that the practical EWH with the manufactured control board operated as well as expected.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気エネルギー・系統周波数・熱負荷・電気温水器・風力発電・出力変動

## 1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーを用いた発電の普及が進んでおり、2004年度末時点、全国で太陽光 113.2 万 kW、風力 92.7 万 kW が導入さ

れた。さらに 2010 年までに太陽光 482 万 kW、風力 300 万 kW、それ以降も大幅な導入を目標としている。これら分散型電源は系統連系されるが、電力系統は分散型電源の連系を想

定せずに構築されてきたため、分散型電源を大量導入すると様々な問題が生じる。中でも特に周波数変動問題から、すでに風力発電の新規導入が制限されている。

従来より、周波数調整は石油火力発電等の負荷周波数制御が担っているが、特に需要の低い深夜時間帯はその担い手の多くが停止し、調整容量が減少する。これに対し風力発電は昼夜を問わず発電し、その出力が激しく変動するので、風力発電の導入増により特に深夜時間帯の周波数調整が困難になる。この対策として現在は主に蓄電池による変動平滑化が検討されているが、電力貯蔵は設備が高価で、かつ充放電損失によりエネルギーの2～3割が失われる。

これに対し、負荷の消費電力を調節する方法もある。具体的には、まず電力系統内の各負荷が系統周波数を測定する。そして、周波数が高い時は負荷が電力消費を増やし、低い時は減らすことで、等価的に調整力として機能する。電力貯蔵と異なり、負荷は熱源・動力源といった他の用途のために需要家が購入し設置するので、周波数計測・消費電力制御機構のみに新たな投資が必要になる。よって、電力貯蔵より少額の投資で同じ調整機能を提供できると考えられる。また負荷の消費エネルギーは、その負荷の用途のために元々必要な分で、追加的損失は発生しない。

負荷制御による周波数調整は、欧州の（小規模独立系統を持つ）離島で採用され、周波数変動抑制効果が実証されている。ただし各負荷は、優先順位に基づき予め割り振られた周波数閾値と計測した周波数を比較してオン・オフ運転するので、負荷の利用者の利便性が犠牲になっている。また小規模独立系統では、周波数偏差が大きいためその計測が容易、および需要家数が僅かなため個々の負荷への周波数閾値の割り振りが容易、という特殊事情がある。大規模系統での実施例はなく、英国本土における家庭用冷蔵庫のオン・オフ制御を想定した研究が発表されているが、数値解析によるモデル系統での有効性を定性的に示すのみにとどまっている。

これに対し研究代表者は、負荷制御による周波数調整を我が国本土のような大規模系統に適用する研究を実施してきた。まず需要家に受け入れられるために、電気温水器・空調機・冷蔵庫といった熱慣性を有する熱負荷の消費電力を、利便性を損なわないように調節する方法を検討した。例えば電気温水器の場合、規定時刻（例えば午前7:00）までに、設定温度までタンク内の湯を沸き上げれば、その時刻までのヒータへの通電パターン（オン・オフの回数やタイミング）を変えても利用者の利便性を損なわない。電気温水器は全国で300万台（1000万kW分）普及しており、風力発電導入の際に問題となる深夜時間

帯において大容量の調整力となり得る。

熱負荷が規定時刻までの時間  $t$  の間に消費しなければならぬエネルギー  $E$  を推定し、将来平均消費電力  $p_{ave}=E/t$  の規格化値  $\gamma=(p_{ave}-p_{min})/(p_{max}-p_{min})$  に基づいて消費電力を調節する方法を提案した（ここに、 $p_{max}$  と  $p_{min}$  はそれぞれ負荷のオン時およびオフ時の消費電力）。 $\gamma$  は必要なオン時間の比率を表すので、 $\gamma$  を常に0以上1以下に維持しつつ消費電力を調整すれば、規定時刻までにエネルギー  $E$  が消費され利用者の利便性を維持できる。また  $\gamma$  に基づき周波数閾値を決めることで、動的に、かつ必要なオン時間比率の大きさの順番に、閾値が各熱負荷に割り振られる。

数値計算により、需要と供給の時間変化を模擬したモデル系統において、熱負荷を制御した場合の系統周波数を解析し、周波数変動を抑制する効果があることを確認した。さらに実験により、電気温水器と空調機における  $\gamma$  の推定方法を検討し、実用的な推定法を得た。

## 2. 研究の目的

これまでの研究では、可制御熱負荷がどれだけ普及すると再生可能エネルギー発電の導入量をどれだけ増やせるのかを、定量的には示していない。また、提案した制御アルゴリズムで動作する可制御熱負荷の試作・動作検証も行っていない。この2つを実施する。

### (1) 適用効果の数値解析

需要と供給の時系列データから、可制御熱負荷群の動作を模擬しつつ、モデル系統における周波数変化を解析する数値計算プログラムを作成済みである。プログラムおよび時系列データを改め、再生可能エネルギー発電の導入量、可制御熱負荷の普及量、および系統周波数変化の関係を定量的に解析する。

### (2) 可制御熱負荷の試作・運転

周波数検出および制御演算を行う制御回路を、PICプロセッサを用いて製作する。また、その制御回路を市販の電気温水器に組み込み、提案した制御法に従い周波数調整のために電力消費パターンを制御する熱負荷を試作する。さらに試作電気温水器を試運転し、利便性維持を維持したまま周波数調整に貢献できることを実証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 適用効果の数値解析

数値解析用入力データの収集・作成

風力発電出力の時系列データを作る。入手するのは、複数の灯台での風速計測データ、および応募者の研究機関で風速計を用いて実測しているデータである。それらを基に、短周期変動成分の平滑化効果を考慮して、系統全体での総発電出力を合成する。

数値解析プログラムの改良

需要と供給の時系列データを入力し、かつ

可制御熱負荷群の動作を模擬し、モデル系統における周波数の変化を解析する数値計算プログラムを作成済みである。ただしその中で用いた熱負荷の制御アルゴリズムでは、全ての可制御熱負荷がオンまたはオフ状態になるような偏りが生じた際に、それを解消できないという問題があった。この偏りは調整容量を確保するために速やかに解消すべきなので、この点を改善した制御法を開発する。

#### 熱負荷制御の効果分析

提案する可制御熱負荷を導入することで再生可能エネルギー発電の導入可能量がどれだけ増加するかを分析し、定量的に示す。

#### (2) 可制御熱負荷の試作・運転

##### 系統周波数偏差測定法の検討

欧州の離島内の小規模系統では周波数偏差が大きい( $\pm 2\text{Hz}$ 程度)ので、その計測は容易であった。大規模系統は小さい偏差( $\pm 0.2\text{Hz}$ 程度)に収まるように運用されているので、欧州の離島での測定法では、電圧波形のサンプリング速度の限界から、微小な周波数偏差を検出するための十分な精度が得られない可能性がある。充分でなければ他の周波数計測法の適用を検討する。

##### 系統周波数測定・制御回路の作成

PIC プロセッサを用いて作成する。実用時には各負荷(家電製品)に取り付けるので安価な制御回路を実現しなければ普及しない。よって、簡易な回路構成を目指す。

##### 熱負荷の試作

市販の熱負荷(電気温水器)の制御回路に、作成した系統周波数測定・制御回路を組み込む。また、提案する制御アルゴリズムの中で、将来平均消費電力を推定するが、そのために必要な温度センサも組み込む。

##### 試作熱負荷の動作試験

試作した可制御熱負荷の動作試験を行う。周波数の変化により消費電力を調整すること、および利用者の利便性を損なわないように動作することを確認する。

## 4. 研究成果

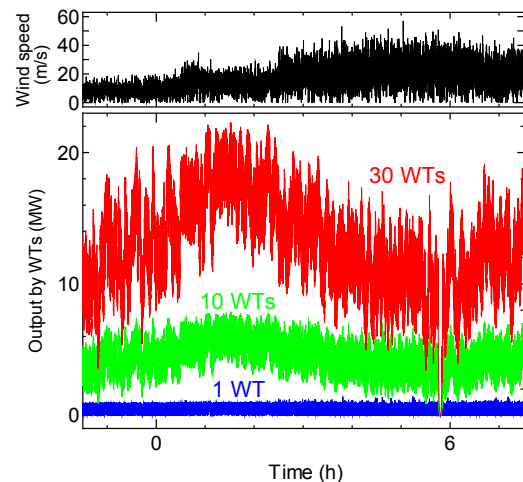
### (1) 適用効果の数値解析

#### 数値解析用入力データの収集

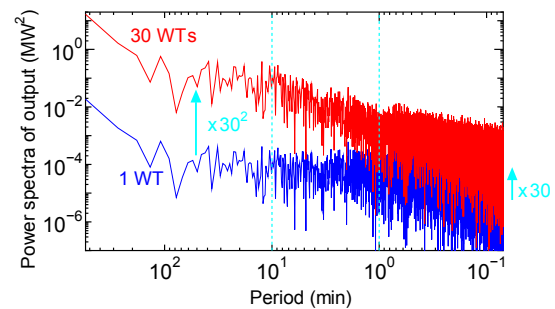
解析対象エリアとして北海道地区を例に挙げ、風速や需要の時系列データを用い、系統全体の需給バランスから周波数変動を計算した。2003年度末の時点での北海道における電気温水器(EWH)の普及は、17万台弱、737MW分である。平均消費電力は4.3kW/台となり、標準的な8時間通電タイプ、370ℓクラスの電気温水器の定格消費電力4.4kWとほぼ同じである。そこで、このタイプの電気温水器17万台が、23:00から翌朝7:00までに自律的に消費電力を制御しながら沸き上げに必要なエネルギーを消費するとした。

風力発電出力については、まず、北海道沿

岸の15箇所の灯台で30分毎に観測された風速に、それぞれ短周期変動を人工的に加え、2006年の1年間における15地点の2秒毎風速時系列データを生成した。次にこの風速を風速の鉛直分布のべき乗則に従い、1MW風力発電機のハブ高さに換算した。そしてその風速データより各地点に誘導発電機型の1MW機(カットイン風速4.4 m/s, カットアウト風速24 m/s)を設置した場合の単機発電出力データを計算した。求めた1MW機の単機出力から、各地点に複数台の風力発電機が設置されたウィンドファームの総発電出力を計算した。求めた風力発電出力の時系列データとスペクトルの例を図1に示す。



(a) Time series



(b) Spectra

図1 風力発電出力例(納沙布岬, 2月3-4日)

#### 数値解析プログラムの改良

系統全体の需給バランスのずれから生じる周波数変動を数値計算した。供給側としては風力発電出力  $P_{WF}$ , 固定出力  $P_{CG}$ , 経済負荷配分運転出力  $P_{EDC}$ , 負荷周波数制御運転出力  $P_{LFC}$ , ガバナフリー制御運転出力  $P_{GF}$  を考慮した。需要側は17万台の電気温水器の総消費電力  $P_{EWH}$  とその他の負荷による総消費電力  $P_{OL}$  からなる総需要  $P_L = P_{EWH} + P_{OL}$ , および負荷周波数特性に伴う変動分  $P_{LS}$  を考慮した。基本周波数  $f_0 = 50\text{Hz}$  からの偏差  $\Delta f$  と需給バランスとの関係を示すブロック線

図を図 2 に示す。

経済負荷配分運転出力  $P_{EDC}$  は実際は数分先の需要予測を基に調整されるが、本検討では変化率を 10 MW/min 以下に制限することで低速な制御特性を模擬した。電気温水器が自律的周波数調整を行う場合は、午後 11:00 から翌朝 7:00 の間は  $P_{EWH}$  が可変である。そこで  $P_{LFC}$ ,  $P_{GF}$ ,  $\Delta f$  のいずれにも大きな偏りがない時は、需要  $P_L$  が翌朝 7:00 の需要  $P_L(AM7)$  を下回らないよう図 3 に示した  $P_{Ltar}$  に近づくように経済負荷配分運転出力の目標値  $P_{EDCtar}$  を設定する。これによりボトムアップ（最低需要の増加）が図られ、結果として  $P_{EDC}$  の下げ代を確保できる。

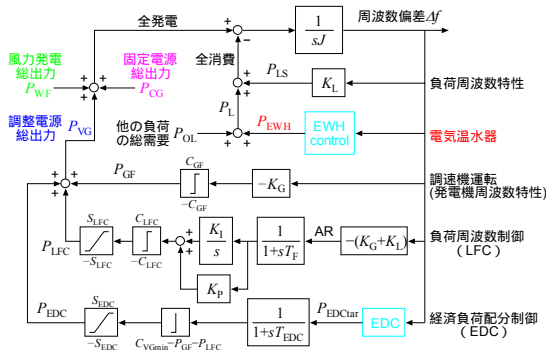


図 2 周波数偏差  $\Delta f$  を計算するブロック線図

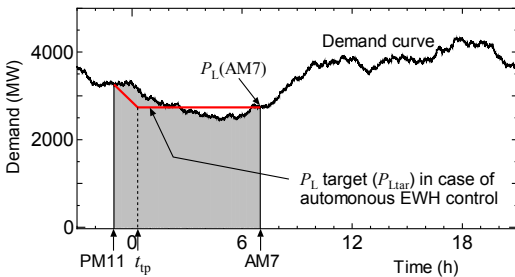


図 3 日負荷曲線

### 熱負荷制御の効果分析

電気温水器が自律的周波数調整を行う場合と行わない場合の両方について数値解析を行った。風力発電出力について 2006 年の 1 年間における各日の午後 10:30 から翌朝午前 7:30 までのデータを用い、需要曲線については 2000 年 4 月のある日のデータを最低需要が 2500 MW となるようにバイアス調整した図 3 を 1 年間のすべての日に当てはめた。両方の計算条件の相違は電気温水器と経済負荷配分運転の制御法のみである。

一例として、風力発電設備が各サイトに 45 MW、北海道全体で 675 MW 導入された時の、11 月 5 日夜から翌朝にかけての周波数偏差  $\Delta f$ , 時差  $T_d$ , 各総電力、およびある 1 台の電気温水器の消費電力  $p_i$  の時間変化を図 4 に示す。北海道電力の調整目標は  $\Delta f$  が

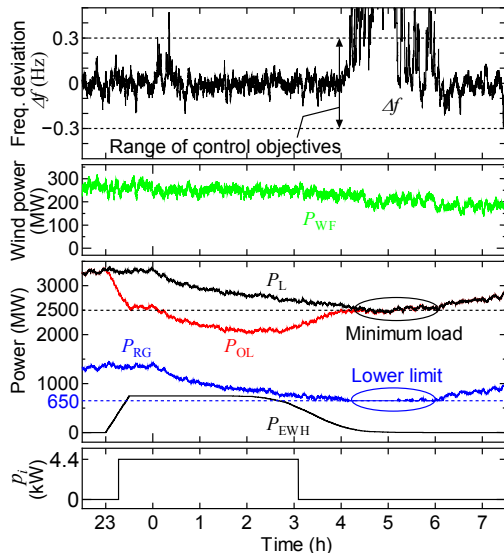
$\pm 0.3$  Hz 以内、 $T_d$  が 3 秒以内だが、電気温水器が自律的周波数調整を行わない場合は図 4(a)のように  $\Delta f$  と  $T_d$  の双方が 0:30 頃および 4:00 以降に目標範囲を大きく逸脱している。0:30 頃は  $P_{EDC}$  にはまだ下げ代があるが  $P_{LFC} + P_{GF}$  が最小値に振り切れており、調整力不足が偏差の原因である。4:00 以降は  $P_{EDC}$  を下限まで下げているにも関わらず供給が需要を上回る下げ代不足が偏差の原因である。これに対し電気温水器が自律的周波数調整を行う場合は図 4(b)のように  $\Delta f$  と  $T_d$  の双方が常に目標範囲内である。また、ある 1 台の電気温水器の消費電力  $p_i$  のパターンは、自律的周波数調整を行っている場合は一晩に合計 5 回のオン・オフを行っている。しかし、その時間積分値であるエネルギー消費は、自律的周波数調整を行った場合と行わない場合で等しい。このことから、自律的周波数調整を行った場合でも、午前 7:00 時点では貯湯槽内の水を同じ設定温度まで沸き上げられており、需要家利便性を維持している。

一年分の計算により算出した周波数偏差  $\Delta f$  について、 $|\Delta f|$  の最大値が  $\pm 0.35$  Hz を超えず、かつ  $|\Delta f| > 0.3$  Hz となる時間割合が  $1 \times 10^{-5}$  以内となる範囲で導入できる風力発電設備容量を、風力発電導入可能量と定義する。数値解析により得られた、自律的周波数制御を行う電気温水器台数と、風力発電導入可能量との関係を図 5 に示す。図 5 より、自律的周波数制御を行う電気温水器の台数が増えるほど、風力発電導入可能量が増加する結果となった。また、北海道の 17 万台の電気温水器の消費電力を本提案法で制御すれば、風力発電導入可能量を 250MW から 675MW に増加できるという評価結果を得た。

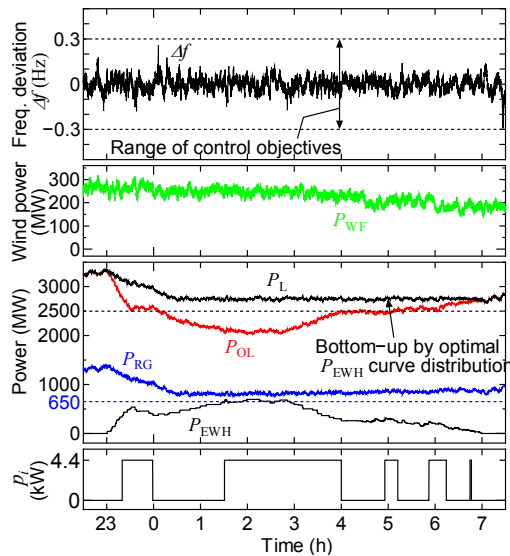
### (2) 可制御熱負荷の試作・運転

#### 系統周波数偏差測定法の検討

上記の定量的評価では、自律的周波数制御を行う電気温水器は系統周波数を分解能 0.01 Hz で 2 秒毎に検出できると仮定した。そこで、これ以上の計測性能を有する制御ボードの作成を目指した。PIC の CCP モジュールの中のキャプチャモードを用いて、系統交流電圧の立ち上がりゼロクロス時刻の周期を検出し、系統周波数を求める構成とした。回路構成の概要を図 6 に示す。フォトプラにより系統電圧を制御ボードと絶縁しながら取り込み、コンパレータにより 0-5 V の矩形波信号にして、PIC の CCP1 ピンに取り込む。50 Hz 付近の周波数を分解能 0.01 Hz で計測するには、誤差は  $0.01/50 = 0.02\%$  より小さくしなければならない。これに対し、PIC に外部クロックを与えるのにセラミック振動子を用いると、周波数変動誤差が 0.5% 程度であり、不十分である。そこで本制御ボードでは、出力周波数偏差が 0.01% である水晶発振器 (20 kHz) を用いた。



(a) No EWH control case



(b) Autonomous EWH control case

図4 解析結果例(11月5-6日, 風力発電設備 675MW 導入時)

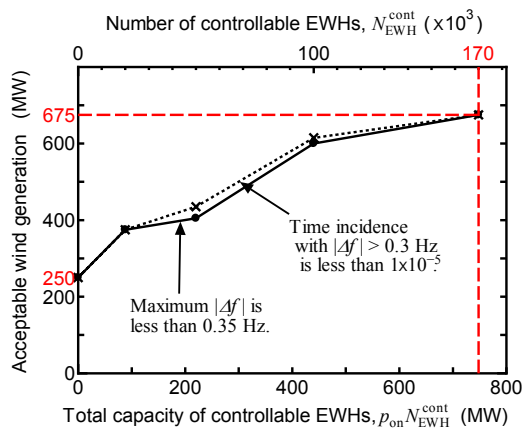


図5 自律的周波数制御を行う電気温水器の台数と風力発電導入可能量との関係

作成した制御ボードの周波数偏差計測機能の試験を, 図7の構成により行った。デジタルファンクションジェネレータにより設定周波数の正弦波を生成し, 精密電力増幅器で電圧を高めて抵抗負荷に給電した。そしてこのときの精密電力増幅器出力電圧の周波数を製作した制御ボードの周波数計測用入力端子に繋ぎ, 周波数偏差を計測した。その結果, 製作した制御ボードでの周波数計測が要求する分解能 10 mHz に比べて十分に小さい誤差を, 10 サイクル(約 0.2 s)毎の計測で実現できることを確認した。

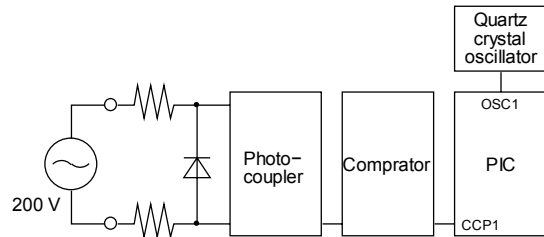


図6 系統周波数測定回路構成

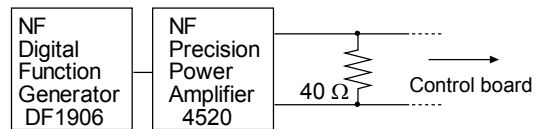


図7 周波数偏差計測試験構成



図8 製作した制御ボード

#### 系統周波数測定・制御回路の作成

系統周波数を計測し, および貯湯槽温度分布から蓄積熱エネルギーを算出してオン・オフする閾値周波数を求め, 電気温水器ヒータの消費電力をオン・オフ制御する制御ボードを製作した。その概観を図8に示す。必要最

小限の主要パーツはすべて、PS コンポーネンツ (<http://jp.rs-online.com/web/>) から購入したものであり、その総価格は 5,000 円程度であった。量産する場合、パーツ単価は下がるので、より安価に製作できると考えられる。

#### 熱負荷の試作

上記の機能を持つ制御ボードを 150 l タイプの東芝機器 (株) 製電気温水器 HPL-TF159MA に組み込み、試運転を行った。系統周波数、時差、貯湯槽温熱エネルギー、貯湯槽温度、将来需要比率、オン・オフ状態といったデータを、製作した制御ボードから 1 秒毎にパソコンへ RS232C 送信した。電気温水器に取り付けたサーミスタの配置を図 9 に、試運転の結果を図 10 に示す。図 9 に示すサーミスタのうち、製作した制御ボードの AD 変換チャンネルに繋いでいるのは  $T_2$ ,  $T_4$ ,  $T_6$ ,  $T_8$ ,  $T_{in}$  の 5 つである。また図 10 において、 $\Delta f'$  は次式で計算される偏差評価値であり ( $K_P$ ,  $K_I$  は定数),  $\Delta f_{th}^h$  と  $\Delta f_{th}^l$  はそれぞれオン・オフ閾値である。

$$\Delta f' = K_P \cdot \Delta f + K_I \int \Delta f dt$$

図 10 より、この電気温水器は従来のように 1 回オンすると沸き上げるまでオンし続けるのではなく、自律的周波数調整のために 6 回オン・オフを繰り返している。しかしながら、7:00 までに設定温度 85 まで沸き上げることに成功しており、需要家利便性が維持できた。

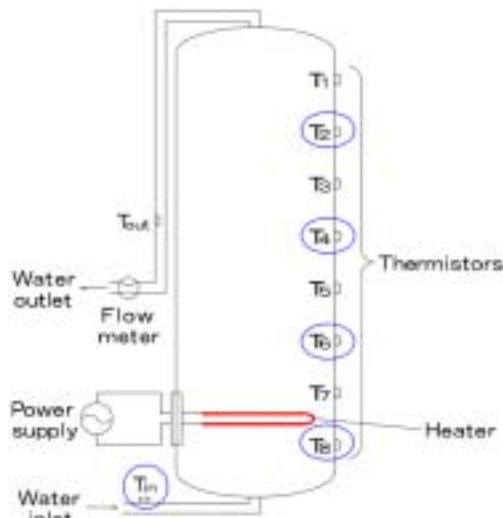


図 9 電気温水器とサーミスタの配置

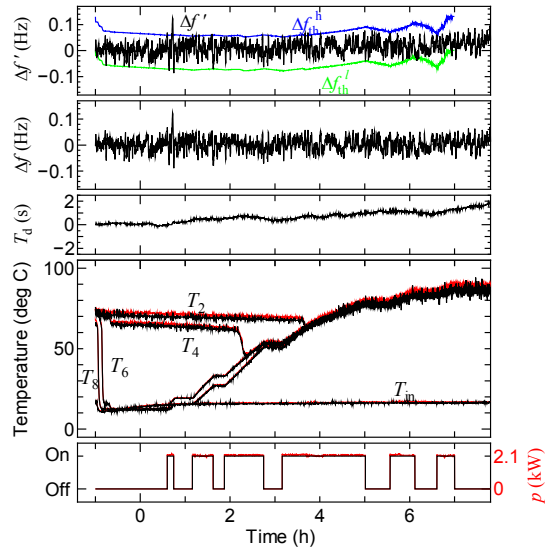


図 10 試作電気温水器の試運転結果

なお本研究の成果は、2010 年 3 月 31 日に日刊工業新聞の一面トップ記事で紹介された。(ただし、事前の校正依頼などが無かったため、幾つか誤った記載があった。)

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

J. Kondoh, "Autonomous Frequency Regulation by Controllable Loads to Increase Acceptable Wind Power Generation", *Wind Energy*, 査読有, DOI: 10.1002/we.375, Dec. 2009

〔学会発表〕(計 3 件)

近藤潤次:「自律的周波数調整を行う電気温水器の試作」, 電気学会新エネルギー・環境研究会, FTE-10-005, p.23-28 (2010.3.10), 筑波大学

J. Kondoh, "A Direct Load Management Scheme to Control Appliances and EVs While Considering End Users Comfort", Grid-Interop 2009, 17-19 Nov. 2009, Denver, CO, USA

近藤潤次:「電気温水器群の自律的周波数調整による風力発電導入可能量増大の定量的評価」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-08-142, PSE-08-151, p.39-44 (2008.8.7), 熊本大学

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 潤次 (KONDOH JUNJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・研究員

研究者番号: 20357049