

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560310

研究課題名(和文) 超分散意思決定要素を含む大規模電力システムの安定性理論の構築

研究課題名(英文) Stability Theory for Large Scale Electric Power Systems Including Super-distributed Decision Making Entities

研究代表者

斎藤 浩海 (Saitoh, Hiroumi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10202079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：消費者が電力量単価などの情報を受け取ったとき、電気機器の使い方を変更することを需要応答と呼ぶ。本研究の目的は、需要応答を電力システムの新たな制御としたときのシステム安定性を明らかにすることである。アンケート調査と電力システムシミュレータによる需要応答の計測実験、および直接負荷制御による周波数・電圧変動抑制シミュレーションから、電力量単価や電力品質情報に対する需要応答の基本特性と、電力システムを不安定化させる一つの要因が直接負荷制御における制御遅れ時間であることが明らかになった。本研究の成果は進展した需要側管理システムが導入された将来の電力システムの安定運用に資するものである。

研究成果の概要(英文)：Consumers will change the use of their appliances in order to maximize their benefits obtained from electricity consumption when information about electricity price and power quality is given by electricity suppliers. This consumer's behavior is called demand response. The purpose of my study is to clarify how demand response affects stability of electric power systems. In the study, basic characteristics of the demand response were identified through questionnaire and experiment using a power system simulator. It was also clarified that time delay with direct appliance control for reducing frequency and voltage fluctuations could cause instability of power systems. The results of the study are useful for stable operation of future electric power systems with advanced demand side management systems.

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：電力システム 需要応答 安定性 負荷制御 周波数制御 電圧制御 むだ時間

### 1. 研究開始当初の背景

電力システムの制御・運用において、これまで電力消費者の負荷は制御対象ではなく、外乱として扱われてきている。したがって、従来までの電力システム安定性理論(同期安定性と周波数安定性)は発電機と送配電網の性質およびそれらの制御系に基づいて構築されている。しかし、今後の電力システムの安定性理論は負荷特性、特に電力消費者の意思決定に基づく負荷特性を組み込んだ理論にする必要がある。その理由は、低炭素社会の実現要求と電力市場の自由化の下、電力設備のさらなる高効率利用と再生可能エネルギー電源の大量導入が望まれる今後の電力システムでは、電力消費者に周波数や電圧などの電力品質、発電時のCO<sub>2</sub>排出量、電力料金などの情報(以下、電力システム情報と呼ぶ)をリアルタイムで提示して、電力システム信頼度の維持に有効な需要応答(電力消費行動)を引き出すことが期待されているからである。

### 2. 研究の目的

需要応答を引き出すことは、多数の電力消費者と電力システムの間新たなフィードバック制御ループを導入することに他ならず、従来までの電力システムの制御構造を大きく変化させることを意味する。また電力消費者は提示する情報によって特性が変化してしまう非線形で不確実性を有する制御対象である。したがって将来も安定な電力供給インフラを持続するためには、多数の電力消費者を制御対象要素として含む新しい電力システムの安定性理論を早急に確立しておくべき重要課題であり、本研究はその安定性理論の確立を目的としている。

### 3. 研究の方法

図1のように需要側の新たなフィードバック制御ループを構成する電力消費者の需要応答をモデル化するため、電力消費者を対象としたアンケート調査を行い、電力品質や電力料金などの情報提示に対する電力消費の仕方を明らかにする。さらにマンマシンインタフェースを備えた簡易電力システムシミュレータを製作し、それをを用いた実験から電力消費行動の時間特性を計測し、需要応答の動的モデルを構築する。この需要応答モデルと電力システム動的特性モデルを結合し

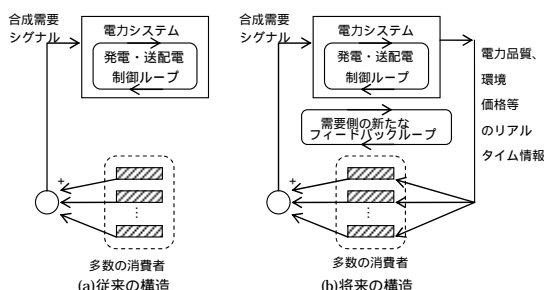


図1 現在と将来の電力システムの制御構造

て、その数値シミュレーションと理論解析から電力システムを不安定化する需要応答特性を同定する。この結果に基づき、需要応答を考慮した電力システム安定性について新しい理論の構築を試みる。以下に具体的な研究方法を述べる。

#### (1) 電力消費者の意思決定メカニズムのアンケート調査

電力消費者に電力システム情報が提示された時の電力消費の仕方について、アンケート調査を行い、需要応答をモデル化するためのデータベースを構築する。

#### (2) 需要応答のモデル化：アンケート調査結果の分析

アンケート調査のデータに基づき電力消費者の各種電力システム情報に対する応答モデルを作成する。応答モデルとしては、ミクロ経済学における需要曲線に類似した表現を想定しているが、電力システム安定性解析用数学モデルとの融合を図るため、電力システム分野の従来までの負荷需要モデルを文献等により調査し、需要応答モデルの適切な表現方法を明確にする。

#### (3) 需要応答と強い相互作用を持つ電力システム動的特性の同定

多数の電力消費者をフィードバック制御ループに組み込んだ時の電力システムの安定性は、消費者の需要応答と電力システムの応答が強く干渉する時間領域で問題になると予想される。そこで電力システムの動特性を電力動揺や調速機制御を対象とする秒オーダーの動的特性と分オーダーの負荷周波数制御を対象とする特性、さらにオペレーターによる電源出力指令などが関連する十分オーダーの動的特性に分け、それぞれの動特性を模擬できる電力システムモデルを作成する。そして項目(1)と(2)の検討から明らかにする需要応答のモデルと組み合わせ、種々の運転状態におけるシミュレーションを行って、どの時間領域の動的特性が需要応答と干渉するのかを定量的に評価する。

#### (4) 需要応答モデルの改良：電力消費者特性計測のための簡易電力システムシミュレータ開発

項目(1)のアンケート調査だけでは、電力システム情報の提示に対する電力消費者の消費行動を変更するまでの応答時間を正確に抽出することは難しいかもしれない。そこで申請者の研究室内に、複数人の電力消費行動を同時に計測できる簡易な電力システムシミュレータを製作し、擬似的な電力消費者に対する実験から需要応答時間の計測を行う。

#### (5) マルチタイムスケール電力システムモデルによる不安定要因の発見

項目(3)で述べた三つの時間オーダーの電

カシステム動的特性のモデルを統合し、マルチタイムスケール電力システムモデルを作成する。そして、それと需要応答モデルを組み合わせて数値シミュレーションおよび理論解析を行い、現実の電力システムに近い状況で需要応答に起因する不安定現象を探索する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 電力量単価の変化に対する需要応答の調査

需要応答には、電力システム情報が電力消費者に提示されてから意思決定行動を起こすまでの応答と、負荷機器そのものの応答がある。ここでは前者の応答の仕方について調査した結果を述べる。

##### 需要応答の調査方法

研究代表者の研究室の卒業生 171 名を対象に 2012 年 2 月に電力量単価の変化に対する一般家庭の需要応答をアンケートにより調査した。質問事項は、性別、年齢、住居のある都道府県、同居人数、世帯収入、契約アンペア、夏季（7 月と 8 月）1 カ月の平均電力料金および時間帯別の電気機器の使い方（一日の各時間における機器の使用台数等）である。調査対象の電気機器は夏季電力需要の 86% を占めるエアコン、冷蔵庫、テレビ、照明の 4 種類とした。また電力量単価として、現状の 24 時間単価一定の場合（以下、基準単価）、朝（7～11 時）、昼（11～16 時）、晩（16～23 時）、夜間（23～翌日 7 時）の各時間帯だけ単価を現状の 2 倍にした場合の計 5 ケースについて回答を要請した。

##### 収集データの分析方法

アンケート調査から得られた各時間における電気機器の使用台数や設定温度のデータと次に示す各機器の消費電力算定式を用いて日間の需要曲線を推定した。

エアコン（冷房時）：

$$\text{消費電力} = \text{使用台数} \times (-29.982 \times \text{設定温度} + 1006.2) \text{ [W]}$$

照明：消費電力 = 使用台数 × 68 [W]

テレビ：消費電力 = 使用台数 × 140 [W]

冷蔵庫：

$$\text{消費電力} = \text{使用台数} \times (1 + 0.11 \times (\text{設定値} - 2)) \times 125 \text{ [W]}$$

（設定値：弱 = 1、中 = 2、強 = 3）

また、価格弾力性に相当する電力量単価の変化に対する電力需要の感度も算出した。

##### 調査結果とその考察

アンケート調査の有効回答数は 74 であった。回答者の特徴は、95% が男性、80% 以上が 20 代～40 代、契約電力会社は 70% が東日

本、同居人数は 2 人から 4 人が 80% 以上、世帯収入は 85% 以上が 500 万円以上であった。

図 2 に電力量単価に関する需要の感度を示す。単価が上昇する時間帯の感度が大きいことが分かる。ただし単価を上昇させた時間帯以外の時間も感度は 0 ではなく、全時間において需要が影響を受けることが分かった。なお感度が負となる時間があり、これは単価上昇に伴う需要シフトを表わしていると考えられる。

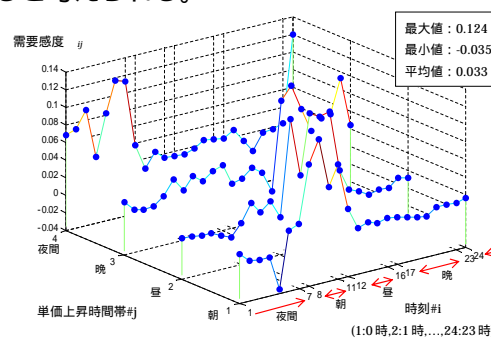


図 2 電力量単価に関する需要の感度

##### (2) 需要応答が影響を与え得る電力システムの動的特性

発電機の调速機制御系と周波数制御系に関わる秒オーダーから分オーダーの電力システムの動的特性に影響を与え得る需要応答として、負荷制御の対象と考えられているヒートポンプ式空調機を取り上げ、その応答特性の分析と消費電力制御を行ったときの周波数変動抑制効果を述べる。なおヒートポンプ式空調機として、異なる応答特性を持つ 2 種類の実機の地中熱ヒートポンプ空調機（以下、GeoHP）を使用した。

##### GeoHP の応答特性

定格消費電力が約 15kW の GeoHP に、ある消費電力目標値の制御指令を与えると時定数 300[s] 程度の 1 次遅れ状に消費電力を変化させることが分かった。もう 1 つの定格消費電力が約 3kW の GeoHP では、HP の循環水温度における設定温度を変更すると、図 3 に示すような約 10[s] のむだ時間を経て消費電力が少し複雑に変化することが判明した。なお、以下では 15kW 機を消費電力指令型 GeoHP、3kW 機を設定温度指令型 GeoHP と呼んでいる。

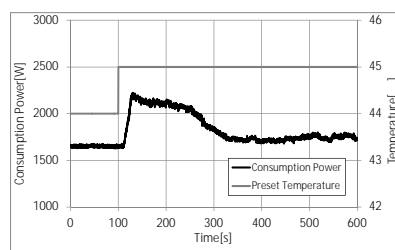


図 3 GeoHP 消費電力の時間変化特性

応答特性を考慮した GeoHP 制御システム  
 上述の応答特性を考慮した GeoHP の消費電力制御系を図 4 のように設計し、それを組み込んだ電力システム周波数制御系のリアルタイムシミュレータ（2 台の実機の GeoHP と計算機上の電力システム周波数制御系を通信ネットワークで接続した設備）を開発した。

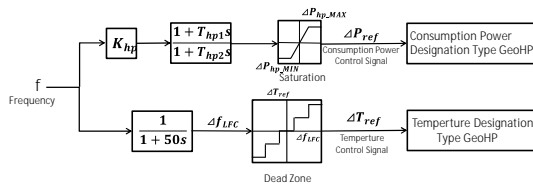


図 4 GeoHP の消費電力制御系

### 周波数変動抑制の効果

次の仮定の下、4 時間のシミュレーションを行った。

- 15kW の GeoHP：一般家庭用空調機 10 台相当
- 3kW の GeoHP：一般家庭用空調機 3 台相当
- 全空調機台数：490 万台（東北地域を想定）
- 電力システムの規模：容量約 16GW

図 5 に電力システムの周波数変動  $f$  の振幅スペクトルを示す。消費電力指令型 GeoHP のみを制御したときは広い範囲で変動が抑制され、特に 160[s]以上の成分でその効果が表れている。設定温度指令型 GeoHP のみを制御したときは、短周期成分の抑制効果は大きくなっているが、30～100[s]成分を励起させていることがわかる。両方の GeoHP を制御したときは、互いの持つ変動抑制効果により 200[s]～500[s]の短周期成分が大きく抑制されている。

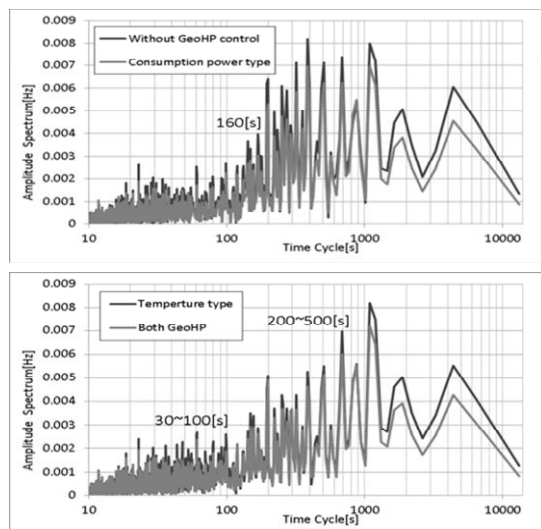


図 5 周波数変動  $f$  の振幅スペクトル

(3)電力消費特性計測用シミュレータの開発  
 電力システム情報が消費者に提示された際、どのように電気機器の使用の仕方を変更するのかを（使用変更する機器や変更するまでの時間など）実験により計測するため、電力消費特性計測用シミュレータを作成し、被験者から計測されたデータを用いて需要応答の特徴分析を試みた。

### シミュレータの構成

開発シミュレータの特徴は次の 2 点である。

- ・電力品質劣化の情報が提示された際の、電気機器の使用状況を調査する機能
- ・電気機器の使用の仕方の変更によって電力品質の変化を模擬する電力潮流計算機能

図 6 にシミュレータを用いて需要応答を計測する流れを示す。被験者に、マン・マシンインターフェースを介して潮流計算により算出された電力品質劣化情報（配電電圧）が提示されたとき、エアコン、冷蔵庫、TV、照明、PC、扇風機、掃除機、洗濯機、乾燥機、炊飯器、ゲーム機を使用または停止させる。ただしエアコンに関しては設定温度を、冷蔵庫に関しては運転状態（強弱）を変更できる。変更した電気機器の使用状態および電力品質を表すデータが記録・収集される。

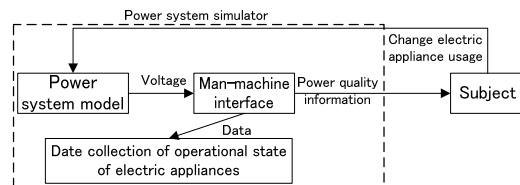


図 6 電力消費特性計測シミュレータの概要

### 実験条件

被験者は 6.6kV の配電線の変電所から最も遠い位置（電圧変動が大きくなり易い位置）の家に住んでいると仮定し、電力品質劣化情報として受電電圧が提示されることにした。被験者には、受電電圧が下限値 95V を逸脱しそうであると感じた場合に、電圧低下を回避するように電気機器の使用状態を変更してもらうように事前に説明した。なお被験者の家と同一の位置で配電線に接続している他の家の消費者も、被験者と全く同じ行動をとるものと仮定した。実験では夏場の需給が逼迫する午後を想定し、配電線に連系されている太陽光発電装置の出力が 14 時 4 分にステップ状に急減し、その結果、受電電圧が瞬時に下限値を逸脱するという予測情報が、4 分前の 14 時に被験者に通知されるものとした。

### 実験結果

被験者は、平成 25 年 7 月下旬に開催された東北大学工学部オープンキャンパスに会場した 25 人である。電圧低下を回避するために負荷の削減行動（適切な行動）をとった被験者は 9 人であった。図 7 に需要応答（消費電力削減量）の人数分の合計値を示す。電圧低下の予測情報が提示された時点から避



くとも 1 分 30 秒以内に消費電力の削減行動が取られたことが分かる。

なお 被験者の中には、削減行動と逆に消費電力を増やそうとした被験者が 4 人存在した。このような被験者が現れた理由は、実験開始前に電力システムの基礎知識に関する簡単な説明をしたにもかかわらず、これらの被験者がその知識を正しく理解していなかったためと考えられる。この事実は、電力システム側で期待する需要応答とは逆の応答が発生し得ることを示唆しており、そのような応答に対する対策も必要であることが分かった。

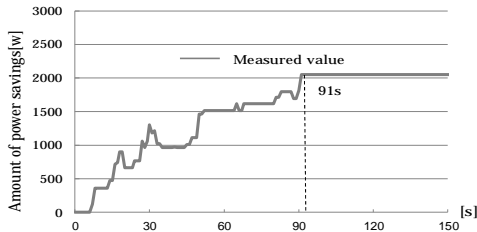


図 7 電圧低下を回避する需要応答の計測

#### (4) 負荷制御に伴う電力システムの不安定化

電力システムオペレーターの意思決定行動に伴う十分オーダーの動的特性のモデル化については現在検討中である。そのためマルチタイムスケール電力システムモデルの開発は完了できていない。そこで、ここでは現時点でモデル化を終えている負荷機器そのものの応答特性の影響を受ける秒オーダーおよび分オーダーの電力システム動的特性に焦点を当て、その不安定要因と対策法を述べる。

##### 空調機負荷制御による周波数変動抑制

電力システムの周波数変動を抑制する目的で需要側に存在する多数の空調機の消費電力を PI 制御系により調節する場合、制御信号の通信による遅れなどで生じるむだ時間が、ある長さ以上になると周波数と空調機消費電力が発散振動し、システム全体が不安定になることが分かった。また比例ゲインを大きな値に設定するとむだ時間が短くても不安定化を引き起こすことも分かった。むだ時間によるシステムの不安定化は制御工学ではよく知られた性質である。しかし多数の負荷機器を制御対象とする場合、負荷機器毎に応答特性が異なり、かつ制御信号が負荷機器に到達するまでの時間は確率的に変動するので、むだ時間による電力システムの不安定化を検討する意義は高いと考えられる。

##### 需要側蓄電池の充放電制御による配電電圧の適正化

配電ネットワークに接続する蓄電装置として電気自動車の蓄電池がある。将来、電気自動車が普及した際、その充電が配電ネットワークの大きな負荷になり得る。特に急速充電のとき配電電圧が適正範囲を逸脱し、不安定化する恐れがある。これを回避するため、

同時に急速充電を行える電気自動車の台数を効率的に決定する最適化計算の方法を開発し、その有効性を配電ネットワークモデルの数値計算により明らかにした。

また太陽光発電などの分散電源の出力変化変動により生じる電圧変動を、電気自動車などの蓄電池の充放電により抑制する分散制御の方法を考案した。図 8 にその制御のコンセプトを示す。この制御では、6.6kV 高压配電線の電圧変動を計測し、その変動を PI 制御系に入力して低压配電線に接続する多数の蓄電池の充放電制御を行う。この充放電制御において制御信号の伝送遅延等ある長さを超えるむだ時間が生じると、図 9 に示すように配電電圧や蓄電池出力が発散振動をすることが明らかになった。この不安定現象は前述の空調機負荷制御による周波数変動抑制の場合と同じ原理で発生することが分かり、その対策として次の二つの方法を考案した。一つは、むだ時間の影響をフィードバック制御ループの外に追い出す効果を持つスミス補償器を応用した方法である。もう一つは、配電電圧の振動が持続的になる兆候を後述する白色化フィルタを応用して検出し、PI 制御系のゲインを低下させて不安定化を防ぐ方法である。

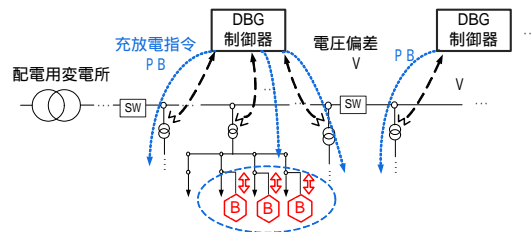


図 8 蓄電池の充放電による配電電圧適正化

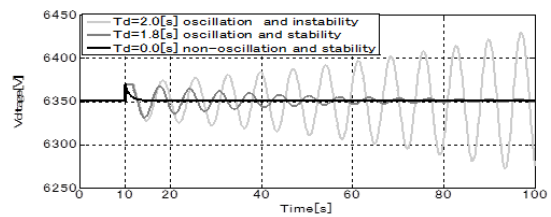


図 9 異なるむだ時間における電圧変動

##### 電力システムの安定性評価の方法

負荷制御により電力システムが不安定化する場合、不安定化の兆候を早期に検出する必要がある。前述のとおり、その兆候は周波数や電圧、送電線の流れる電力潮流の変動に出現するので、その変動の減衰性を計測した時系列データからリアルタイムで評価できることが望まれる。本研究では、そのような評価方法として、白色化フィルタと回帰モデルを組み合わせた新しい方法を開発した。そしてその有効性を東日本の電力システムを模擬したモデルのシミュレーションにより明らかにしている。

#### (5)今後の展望

本研究において残された課題を列挙すると次のとおりである。

- ・電力量単価に関するアンケート調査の結果のさらなる分析と電力量単価の変化に対する需要応答のモデル化
- ・電力消費特性計測用シミュレータを用いた十分オーダーの需要応答の調査とモデル化
- ・秒オーダー、分オーダー、十分オーダーの電力システム動的特性を表わすモデルおよび需要応答のモデルを統合したマルチタイムスケール電力システムモデルの開発およびそのモデルを利用した需要応答に起因の不安定要因の特定

#### 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2件)

阿部政紀、齋藤浩海、配電ネットワークの電圧制約を満たすEV急速充電器の使用可能台数決定法、電気学会論文誌B、査読有、133巻、2013年、654-663

DOI:10.1541/ieejpes.133.654

菅原尚哉、齋藤浩海、秋山康人、坂本邦夫、電力システムの制動特性を表わす回帰モデルによるモード推定用白色化フィルタの時数決定法、電気学会論文誌B、査読有、132巻、2012年、885-893

DOI:10.1541/ieejpes.132.885

[学会発表](計31件)

佐藤崇広、齋藤浩海、岡本淳、柴幸秀、谷藤浩二、異なる応答特性の複数台GeoHP制御による周波数変動抑制の向上、電気学会全国大会、2014年3月18日~2014年3月20日、愛媛大学(松山市)

南條俊也、齋藤浩海、電力消費特性計測用シミュレータによる電力品質劣化に対する需要応答のモデル化、電気学会全国大会、2014年3月18日~2014年3月20日、愛媛大学(松山市)

茂村亜久里、齋藤浩海、石岡修、長沢善一郎、畠山宏尚、需要側蓄電池群を活用した配電電圧制御の安定性に及ぼす影響の要因の検討、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2013年9月11日~2013年9月13日、九州工業大学(北九州市)

越康彦、齋藤浩海、電力量単価の変化に対する需要応答の基本調査結果の考察、電気学会全国大会、2013年3月20日~2013年3月22日、名古屋

越康彦、齋藤浩海、石岡修、長沢善一郎、畠山宏尚、風力発電大量連系時の周波数変動を抑制する需要側蓄電池グループの分散制御、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2012年8月6日~2012年8月8日、東京大学(東京都)

越康彦、齋藤浩海、周波数変動抑制を目的

とした空調機制御が電力システム安定性に及ぼす影響、電気学会全国大会、2012年3月23日、広島工業大学(広島市)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

齋藤 浩海 (SAITOH, HIROUMI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10202079