

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760236

研究課題名(和文) 需要家電気エネルギーシステム監視制御による供給信頼度マネジメント

研究課題名(英文) Reliability Management of Customer's Power Systems Based on Monitoring and Control

研究代表者

渡邊 政幸 (WATANABE, Masayuki)

九州工業大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90398115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：電気エネルギー供給の形態が変化しつつある状況下においても供給信頼性を確保するため、監視情報に基づく方法を検討した。不確定性の増大に対して計測情報を用いた特性抽出およびモデル化により、特性変化の適切な把握およびその変化に適応できる系統制御方式を検討した。また、需要家システムにおいて、特に自立運用状態での電圧維持特性の評価方法、および特性抽出に基づく不安定要素特定による安定性評価方法を検討した。

研究成果の概要(英文)：A method based on the power system monitoring to secure the power system reliability under the condition of shifting of the electric power supply, has been investigated. The characteristic change including system uncertainties can be evaluated appropriately by modeling the system characteristic extracted from the measured data and an adaptive controller to compensate the uncertainties can be designed based on measured data. The reliability of customers system especially in islanding operation can be evaluated by investigating the voltage recovery characteristics and specifying the unstable factor.

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：電力系統 系統監視 系統制御 安定度

### 1. 研究開始当初の背景

利便性の高いエネルギーとしてもはや電気エネルギーは不可欠な社会基盤となり、今後電気自動車の普及が見込まれるなかでさらにその重要性が高まってきている。とくに近年は生活面、企業活動、工場等の生産ラインに至るまであらゆる面で情報通信技術が浸透し、ごく短時間の停電や瞬時電圧低下でも影響が多大となることから、高い供給信頼性の確保は大命題である。一方、環境意識の向上とともに、太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギーの大量導入が想定されるなか、電力システムの複雑化や不確定性の増大は避けられず、運用面ではより一層厳しい対応が求められる。

電力システムの構造として、電力会社による大規模集中型運用による供給形態の維持も重要であるが、需要家側から見ると家庭や事業所における太陽光発電装置の増加や電気自動車といった新たな需要の出現に伴い、電気エネルギーの利用形態が変化してきている。基幹系を含む電力システム全体で見れば需給面で著しいアンバランスを生じることが少ないと考えられるが、あるまとまった需要地域で見たとき需給アンバランスによる供給障害や電圧変動など電力品質面への影響が懸念される。例えば、自立電力システムの一つとして離島などでは従来から小容量のディーゼル発電機が利用されてきたが、電源構成の多様化が進み、安定度や信頼度についての検討は従来以上に重要となっている。

従来から電力システムにおける現象把握やシステム設計等には電力系統解析が適用されてきたが、分散型電力システムの増加に伴い、電圧階級の低い下位システムに対する解析技術向上が求められる。大規模需要家として例えば工場などでは自家発電設備を設置し、電気エネルギー供給に加えて発電時に発生する排熱を有効に活用して蒸気生成を行い生産ライン等で利用するなど、熱電併給によるエネルギーの利用効率向上が図られている。一方で、工場等の特徴として多数の回転機負荷の特性に起因して電圧安定性面で課題があり、大規模需要家においても再生可能エネルギーの導入によってシステムの複雑化が進むなかで、保護協調の考え方も供給信頼度を維持する上で重要である。こうした需要家電力システムを一つの供給エリアと捉え、供給信頼度をマネジメントすべく、監視情報に基づく状態推定、予防制御、保護協調を適応的かつ有機的に行うことが求められる。

電力システムの監視・制御に対する WAMS (Wide Area Measurement System) の導入は各国で進められ、基幹送電システムにおける監視に供されている。広域同期計測技術は特に基幹システムにおいて有効であると考えられるが、需要家システムにおいても、複数地点において電圧や周波数等を同期して計測し、情報網

での伝送・集約・処理を経て系統運用に活用することは有用であると考えられる。これまでに、広域システムを対象に同期計測技術を適用して、電力システムの動特性評価手法や安定化制御系設計手法の構築について研究を推進し、その有効性について検討を進めてきた。同期計測の概念を小規模需要家システムに適用したとき、その有効性と系統ダイナミクスの監視・制御・保護協調の方策を具体的に検討していく必要があると考えられる。

### 2. 研究の目的

これまでに、監視情報からのシステム状態推定手法や、監視結果に基づく制御系設計手法の確立を目的として検討を進めてきた。また、周波数情報利用による状態推定方法の基礎的検討を進めてきた。本研究ではさらに発展させるため、需要家電力システムや、今後増加する分散型電力システム、エネルギーコミュニティにおける状態監視制御手法のより具体的な構築を目指し、その有用性について検討を重ねる。

例えば自家発電設備を有する大規模需要家では、少数の発電設備が生産プラント等の多数の負荷設備における熱および電力需要の双方を支える構成を取り、発電機一機あたりに要求される信頼性がかなり高くなっている。さらに負荷変動に伴う発電設備への負担が大きく、需給バランス調整とともに、システム全体として安定性を考慮した運用が求められる。本研究では自立運用状態も含む需要家電力システムの信頼度監視制御に焦点をあて、具体的な検討課題として、

- ・ 電力システムにおける計測に基づく状態推定手法の構築
- ・ 電圧情報利用による安定性指標導出方法の検討
- ・ 自立運転状態における信頼度監視制御方法の検討

を挙げ、需要家システムにおける計測データに基づく状態監視および監視結果に基づく制御方式の有用性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

電気エネルギー供給の形態が大規模集中型運用から近年注目されるスマートグリッドに代表される小規模分散型へシフトしつつある状況下においても、高い供給信頼性は確保されなければならない。分散配置される電源の増加や需要家における負荷機器構成の変化が電力システム全体の特性に与える影響を的確に捉え、定常特性および動特性の解析・制御・保護協調が適切に実行されることが重要となってくる。そこで、本研究では小規模な需要家電力システムを対象として、電力品質にもかかわる電圧等の監視情報に基づくシステム状態監視・予防制御の方策を検討した。

(1) 電力系統における計測情報を用いた系統特性抽出手法について、これまでに基幹電力系統を対象として広域連系系統における同期計測情報を用いた電力システムの広域安定度評価手法の有用性を確認していることから、これをより発展させて、とくに系統を安定化させるための制御方法への適用を考慮した特性抽出方法を検討した。解析用電力系統モデルを利用して、計算機上での系統シミュレーションにより種々の条件下での検討を重ねて実施した。

(2) 電力系統における計測情報を用いた特性抽出に基づく系統制御方式として、不確定性を含むシステム状態の変化に対しても高い効果を有する制御系設計方法を検討した。上述の系統特性抽出手法によって、計測情報からシステム状態の変化を抽出できることを利用して、系統状態に適した制御系を設計する方法を検討した。

(3) 需要家電力系統においては電圧変動や電圧安定性に関する状態監視も重要である。監視に基づくオンライン電圧安定度評価方法が検討されており、計測も比較的容易であることから電圧情報を利用した特性抽出方法および評価方法を検討した。とくに自立運転状態となった場合、系統電圧の維持に重要な無効電力の供給能力が制限され、瞬時電圧低下発生時や負荷投入に伴う電圧低下後の回復性に問題を来す可能性がある。とくに回転機やインバータ駆動機器が全体の負荷に占める割合が多くなってきた場合に電圧回復が遅れる傾向が顕著となるため、この評価が重要となってくることから、系統シミュレーションを用いて電圧情報を用いた評価方法の検討を進めた。

(4) 需要家システムにおける安定度評価方法として、システム構成情報に基づく各構成機器の寄与度を調べることにより評価を行う方法を検討した。需要家システムにおいては、上位系統との並列運転時における系統状態に対し、解列により自立運転状態となった場合の系統状態が大きく異なり、運用上の制約が大きくなるとともに、周波数や電圧の変動および電力動揺も生じやすくなることから、需要家構内電力系統モデルを用いて、安定運用を実現するための余裕度を推定する方法を検討した。

上記(1)～(4)の各検討項目について、主として電力系統シミュレーションによる解析ならびに評価を実施した。広域電力系統モデル、ならびに小規模需要家構内電力系統モデルを用いることで、実際的な適用を想定して、各手法の有効性について検証を進めた。

#### 4. 研究成果

(1) 電力系統における計測情報を用いた系統特性抽出において、適切な電力系統制御を実現するためには現在のシステム特性を把握した上で制御系の調整を行うことが有効であることから、発電機制御系の入出力信号に着目して計測情報から安定性を特徴づける成分を抽出してシステム同定手法により対象をモデル化する方法を検討した。システムに対して外乱を与えることなく、定常時の計測で得られる観測情報のみを用いる方法を検討した。これは、定常時の負荷変動等によって生じる微小動揺には少なからず減衰成分が存在していることに着目することで実現される。また、システム全体を動揺させる要因が同定モデルの内部に存在すると考えることで、モデルに対する入力信号が十分小さいと考えることができ、より少ない情報で観測時の系統状態を反映する簡略的モデルの構築が可能となった。この方法は、設計対象となる制御器が設置されたままでのモデル構築も可能であり、既存の制御器の調整方法としても適用できる特長を有している。さらに観測情報の減衰部分のみを取り出して短時間の情報を用いてモデル同定を行うことで、より低次数で動揺特性を表現できるモデル構築を可能とした。観測が困難な外乱情報を用いることなく高い精度でモデル化できることが確認され、制御系設計への適用可能性を示すことができた。

(2) 電力系統における計測情報を用いた安定化制御方法を構築した。安定度において支配的となる動揺成分の特性は計測情報から抽出してモデル化することができる。このとき、システム状態が異なる状態で計測することで変化前後の差異を抽出してモデル化することを考えると、その変化分についても補償できる制御系設計が実現できる。一方で、計測情報からのモデル同定には少なからぬ誤差を含むため、モデル化誤差を補償することも考慮する必要がある。ここで、制御系設計問題を線形行列不等式 (LMI) で表現し、ロバスト性条件を満たす制御器を求めることで、特性変化分およびモデル化誤差を補償する制御系を設計できる。解析対象モデルに対し、安定度を低下させるなどいくつかの解析条件を設定して、設計した制御器の性能評価を行った結果、不確定性を含むシステム状態の変化に対しても高い効果を有する制御器が設計できることが確認された。この方法は、計測情報と設計対象となる制御器の構造が既知であれば適用できることから、詳細なシステム情報が不要で、適応的に系統制御が行えるという特長を有している。

(3) 電源を有する需要家電力システムにおいては電圧に関する状態監視も重要であり、とくに自立運転状態となって無効電力の供給能力が制限され系統電圧の維持が難しく

なる状況を想定し、瞬時電圧低下発生後の電圧回復性について評価を行った。電圧および電力情報の時間推移を平面上に軌跡として描くことで各機器の動特性を含む安定条件を視覚的に評価する方法を検討した。描いた軌跡を時系列で追跡することで、電圧回復性についての一連の過程を詳細に評価できるようになった。システムシミュレーションにより、発電機の定格出力に占める回転機負荷の割合や、電圧調整を行う発電機制御系の動作特性を変化させるなど種々の条件下で評価を実施し、電圧崩壊に至る条件を見出した。システム電圧の維持に不可欠な無効電力の供給源である発電機の保護装置の動作特性が大きく影響を及ぼし、適切な設計が必要であることを示した。設備設計や保護システムの構築、ならびにシステム運用上での活用が期待される。

(4) 電源を含む需要家システムや小規模グリッドでは自立運転での運用形態を有し、特に安定度面での制約が大きくなることから、システム解析において重要となる不安定要素を特定する方法を構築した。システムの構成情報から導出される線形化モデルに基づいて固有値を算出し、多数の機器で構成される複雑なシステムモデルから不安定モードに対する寄与度が高い状態量を特定する。この方法により運用上の不安定要素を特定できることが確認できた。需要家電力システムを想定した解析用システムモデルを用い、上位システムとの並列運転時および解列による自立運転状態を想定して評価を行った結果、いずれも発電機制御系に関する状態量の寄与度が高くなる結果が得られた。こうした小規模グリッドでは特に電圧の特性に起因して不安定となりやすく、自立運転時にはさらに周波数の面での評価が重要であることが示された。信頼度を確保するためのシステム制御方策に対する有用な指標として活用できることが期待される。

研究期間全体を通じて、計測情報を用いた電力システム特性の抽出およびモデル化とシステム制御手法、需要家システムにおける特性抽出に基づく安定性の評価方法について検討し、電力システムシミュレーションにより種々の条件下での検証を実施した。その結果、不確定性の増大に伴う特性変化の把握およびその変化に適応できる制御方式、安定性の適切な評価方法の有用性を示すことができた。

## 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 0 件)

[学会発表] (計 8 件)

- ① Masayuki Watanabe, Masaya Yamashita, and Yasunori Mitani, Wide Area

Measurements Based Robust Power System Controller Design, 18th Power Systems Computation Conference, 平成 26 年 8 月 18~22 日, ポーランド, 発表確定

- ② 山下真矢, 渡邊政幸, 三谷康範: LMI 適用による観測情報に基づく電力システム安定化制御, 平成 25 年電気学会電力技術・電力システム技術合同研究会, 平成 25 年 9 月 13 日, 福岡
- ③ 井上広土, 渡邊政幸, 三谷康範: 産業用電力システムにおける固有値に基づく電力動揺解析環境の構築, 平成 25 年電気学会電力技術・電力システム技術合同研究会, 平成 25 年 9 月 12 日, 福岡
- ④ 渡邊政幸・前田智寛・山下真矢・三谷康範: 広域位相計測に基づく電力システム安定化制御, 第 55 回自動制御連合講演会, 平成 24 年 11 月 18 日, 京都
- ⑤ 横馬場裕輔・渡邊政幸・三谷康範: 自家用発電設備を有する産業用電力システムにおける電圧回復遅れに関する解析, 平成 24 年電気学会電力技術・電力システム技術合同研究会, 平成 24 年 8 月 8 日, 東京
- ⑥ 前田智寛・渡邊政幸・三谷康範: 位相計測による電力動揺モデル同定に基づくシステム安定化制御, 平成 24 年電気学会電力技術・電力システム技術合同研究会, 平成 24 年 8 月 6 日, 東京

[図書] (計 1 件)

- ① Hassan Bevrani, Masayuki Watanabe, and Yasunori Mitani, John Wiley & Sons, Power System Monitoring and Control, 2014, 印刷中

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡邊 政幸 (WATANABE, Masayuki)  
九州工業大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 90398115

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: