

機関番号： 17104  
 研究種目： 若手研究 (B)  
 研究期間： 2009 ~ 2010  
 課題番号： 21760217  
 研究課題名 (和文) 小規模分散型電力供給システムオンライン監視に基づく  
 協調運用制御  
 研究課題名 (英文) Coordinated Control of Distributed Small Power Systems  
 Based on Online Monitoring  
 研究代表者  
 渡邊 政幸 (WATANABE MASAYUKI)  
 九州工業大学・大学院工学研究院・准教授  
 研究者番号： 90398115

研究成果の概要 (和文)： 小規模電力システムにおける監視情報を利用した状態推定および制御系調整方法を検討した。監視情報から推定されるシステムの動特性を低次元モデルとして表現することで、状態推定を適切に行うとともに、容易に制御系調整を実現できることが特長である。監視情報に基づくためシステムの状態変化に対して柔軟に対応でき、不確定要素も補償できる方法を取り入れるなど効果的に制御できる方策を検討した。

研究成果の概要 (英文)： An approach for the state estimation and the controller tuning by using online measurement data in distributed small power systems has been studied. The features of the approach are appropriate state estimation and easier controller tuning since dynamic characteristics of the system are represented by a lower-order system model based on the online monitoring; consequently, the approach is flexible to the change of the system state. The method for tuning of the effective controller considering the compensation to uncertainties has also been investigated.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野： 電力系統工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学，電力工学・電気機器工学

キーワード： 電力系統，系統監視，位相計測，安定度，系統制御，自家用発電設備

#### 1. 研究開始当初の背景

電気エネルギーは欠くことのできない重要な社会基盤であり、利便性や利用時における低環境負荷が注目されて利用が高まるとともに、とくに近年は身近な生活から企業活動、工場等の生産ラインに至るまであらゆる面で情報化が進展し、短時間の停電や瞬低（瞬時電圧低下）でも多大な影響が生じることから、これまで以上に高い供給信頼性の確保が求められている。一方、電力市場開放に

伴い新規事業者による電力供給も増加し、電力システムの複雑化や不確定性は年々増大している。とくに近年は環境への高い関心から、太陽光発電や風力発電に注目が集まる一方で、その発電量の変動への対策が必要となるなど電力システムの運用に関わる環境はより一層厳しい状況となっている。

電力システムの構造は電力会社による大規模集中型電源・集中型運用から小規模分散型電源・分散型運用へとシフトしてきており、

安定運用の実現には両者の協調が欠かせず、協調制御による自律復旧型システムのコンセプトおよび実現可能性を検討した事例も報告されている。安定運用のベースとなる系統解析技術についても従来は基幹系統を主体とした検討が進められてきたが、分散型電力供給システムの増加に伴い、より電圧階級の低い下位系統に対する解析技術の向上が求められるようになってきている。また、工場などの大規模需要家においては自家用発電設備を設置し、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を図っている。とくに電力自由化以降においては増加してきており、余剰電力で供給事業を行っている事例もある。一方で、工場等では生産ラインなど多数の負荷設備を有しており、自家用発電設備とこれらの負荷設備、さらに電力会社から買電するための受電設備からなる複雑なシステムを構成しており、小規模系統においても系統複雑化への対策として系統監視に基づく状態推定や制御、さらに系統解析に基づく種々の検討を行うことが有効となってくる。

電力システムの監視・制御に対して近年PMU (Phasor Measurement Unit) を利用したWAMS (Wide Area Measurement System) が注目されており、特に大規模な国際連系を実施している欧州では活発に研究が進められている。これまでにPMUによる位相計測を利用した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が、対象は広域の電力システムであり電力会社が有する基幹系統を対象としたものであった。分散型供給システムへのシフトが進むなかで、PMU を利用した監視・制御の適用可能性を検討していく必要があり、両者を有機的に結合することで協調運用への応用が期待される。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、これまでの電力会社が有する基幹系統を対象とした検討から、構成や特性が異なるより小規模な電力システムへと対象を移行し、今後増加が見込まれる分散型電力供給システム、工場等の大規模需要家が構成する自家用電力システム等における位相計測に基づく監視・状態推定・制御手法の構築を行う。

電力事業用の基幹系統では多数の発電設備が連系されており、さらに事業者間の広域連系による電力融通も実施され、強固な電力ネットワークを築くことで安定運用を実現している。一方、例えば自家用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電力を供給する構成をとり、発電機一機あたりに要求される信頼性が事業用電力系統と比較してかなり大きくなっている。さらに負荷変動が大きいため発電設備への負担が大きく、熱電併給を行っていることも運用を難しくしており、事業用のシステムとは大きく異なった特徴を有している。したがって、これまで検討を進めてきた広域系統における安定度問題や安定化制御系設計問題とは異なった観点で検討する必要がある。本研究では具体的な検討課題として、小規模系統への位相・周波数計測の適用による系統動揺抽出手法の構築、小規模自家用発電設備における安定度推定手法の検討、位相計測に基づく自家用発電機制御系調整手法の検討、位相計測データを利用した分散型小規模系統解析の精度向上・高機能化、を挙げて小規模系統における位相計測に基づく監視・制御の有用性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、自家用発電設備を有する大口需要家構内のような小規模電力供給システムにおける信頼性向上のため、オンライン監視に基づく系統状態推定および制御手法について検討した。監視情報を利用することで、負荷変動等による需給バランスの変化といった不確定性を適切に把握できれば、適切かつ柔軟な対処が期待できる。一方、系統故障のような擾乱時における供給信頼性の確保のためには十分な余力を持った状態での運用が求められることから、電力系統解析による事前検討が有効であるが、その精度向上により高度化が期待できる。そこで、以下に挙げる方法により検討を進めた。

(1) 小規模電力系統への位相・周波数計測の適用による系統動揺抽出手法について、小規模分散型電力系統を想定した系統解析モデルを構築し、計算機上での系統シミュレーションによる基礎的検討を実施した。より計測が容易な周波数情報を利用して、系統安定度面で支配的となる電力動揺モードを抽出できればより有用であることから、周波数情報利用における処理方法を検討した。

(2) 小規模自家用発電設備における安定度推定手法について、自家用発電設備を有する需要家電力システムでは種々の電動機が多数稼働しているため負荷構成や系統構成が複雑になる傾向があり、系統状態の把握を難しくしている。一方で、発電機停止といった供給障害の影響が大きいことから、その指標となる安定度問題に着目して、動揺特性抽出に基づく系統安定度推定手法を検討した。観測情報を用いて動特性を表現する簡略動揺

モデルを推定し、システムの状態を固有値によって客観的に評価する方法について検討し、いくつかの系統状態を設定して有効性の検証を行った。

(3) 観測情報に基づく発電機制御系調整手法について、発電設備に付随する励磁制御装置に着目して、監視結果に基づく調整方法を検討した。監視情報からシステムの特徴を抽出して表現した推定モデルに基づいて制御系調整を行うことで、系統状態に合致した効果的な制御系を構成することが期待できる。一方で、系統構成の変化や不確定性、状態推定における誤差などによって制御系の性能低下が懸念されることから、これらを補償するためにロバスト性を考慮した制御系調整方法を検討した。

(4) 計測データを利用した系統解析の精度向上に関して、電力系統シミュレーションにおける実現現象の模擬において、定常時に観測される微小変動の模擬方法について検討した。これは、実測データとシミュレーションに基づく解析結果との対比においても有効性が期待できる。システム全体の特性を大きく変化させることなく、定常的な動揺を発生させる方法について観測情報の処理結果と照らし合わせつつ、系統解析の有用性を高めるためシミュレーション条件の見直しを実施した。

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を実施した。西日本の電力系統を模擬した広域系統モデル、ならびに小規模系統を模擬した需要家構内電力系統モデルを用いることで実際の適用を想定して、各手法の有効性について検証を進めた。

#### 4. 研究成果

(1) 小規模電力系統における動揺抽出手法について、小規模分散型電力系統を想定して小容量の自家用発電設備を有する需要家構内電力系統を考え、計算機上での系統シミュレーションによる基礎的検討を実施するため、できるだけ実態に合うよう系統解析モデルを構築した。需要家電力系統の特徴として、負荷の多くが電動機で構成されていることから瞬時電圧低下といった電圧変動等の系統擾乱の影響を受けやすく、電圧低下量が大きくなるほどその影響は大きくなる。構築した系統モデルにおいても電動機モデルとして表現することで、その動的な特性が模擬できるようにした。これらの電動機に接続されている負荷がわずかに変動することで系統に対して微小な変動を与え、定常運転状態において観測される微小動揺を模擬した。

位相計測を想定して上述の解析によって得られた位相情報から、スペクトル解析による特徴的動揺の抽出を試みたが、電力会社が有する基幹系統とは異なり、系統規模がはるかに小さいことから、観測される微小動揺も非常に小さくなり、特徴的動揺の抽出が困難であることがわかった。そこで視点を変え、より観測が容易な周波数情報を利用することを考え、微小な周波数変動情報に対してスペクトル解析を行うと支配的な動揺成分が検出され、バンドパスフィルタ処理によって動揺抽出を試みた結果、系統安定度面で支配的となる弱減衰の電力動揺モードを抽出できることがわかった。

需要家電力系統では、通常上位系統である電力会社系統と連系して必要に応じて電力の一部を受電する場合があるが、系統擾乱発生時には解列して自立運転状態となる場合がある。このとき系統構成が大きく変化することにより、系統安定度も大きく変化することが予想されるため、系統状態によって動揺抽出方法の使い分けが必要となってくる。とくに動揺抽出のためのバンドパスフィルタの設定は推定精度に影響するため、特にフィルタの特性を定める中心周波数およびフィルタ幅に着目して、複数のケーススタディを実施して適切な設定方法を導出した。

(2) 小規模自家用発電設備における安定度推定手法について、上述の動揺特性抽出に基づく系統安定度推定方法を検討した。検出される支配的動揺成分は電力の動揺方程式に由来する減衰振動モデルとして表現でき、簡略的に2次の伝達関数として表される。観測された周波数情報を用いてこの簡略動揺モデルを推定し、システムの状態を固有値によって客観的に評価する方法を検討した。

定常状態における監視情報から推定された固有値の精度について、系統擾乱発生時に観測される過渡動揺波形と比較することで精度検証を行った。擾乱時には特に支配動揺成分が顕著に現れ、他の動揺成分や観測時のノイズの影響を抑えることができ、支配動揺成分の特性を明確に捉えることができる。このときの着目動揺成分に対し、上記で推定した固有値を持つ減衰振動波形を算出し重ね合わせて比較した。いくつかの異なる系統条件に対して適用した結果、それぞれの推定値が正確であることを確認でき、安定度推定方法の有効性を示すことができた。

(3) 観測情報に基づく発電機制御系調整手法について、発電機に付随する励磁制御補助装置に着目して、監視結果に基づく調整による系統安定化制御方法を検討した。監視情報からシステムの支配的動揺成分を抽出して表現した動揺特性モデル、着目する制御装置

の特性を表現するモデル，および制御装置が動揺特性に与える効果を表現するモデルを同定して，制御系調整に必要な主要な特性のみを表現する低次元の電力システムモデルを推定することで，より容易な制御系調整を可能とした。電力システムは一般に高次であるため制御系の設計および調整が困難となりやすいが，本手法を適用することで容易に実現できる特長を有している。また，監視情報に基づく方式であることからシステム状態に合致した適応的かつ効果的な制御系を構成できる特長も有している。

一方，システム構成の変化や不確定性，状態推定における誤差などに起因して制御系調整の効果が低下する懸念があることから，これらの不確定要素を補償するためにロバスト性を考慮する方法を組み込んだ。計算機上におけるシステムシミュレーションを用いてこれらの検証を実施した結果，擾乱発生時における原システムと推定した低次電力システムモデルの応答が一致しており，推定モデルおよび推定手順に矛盾がないことが確認できた。さらに本手法を用いて制御系調整を実施し，擾乱発生時における調整前後の応答を比較した結果，調整によってシステム安定化が図られ効果的に動揺を抑制していることが確認でき，本手法の有効性を明らかにした。

(4) 実電力システムでは，通常運転時においては負荷変動等に起因して常に微小変動が発生していることが観測によってわかっている。この微小変動を電力システムシミュレーションにおいて模擬する方法として，システム全体の特性を大きく変化させることなく，定常的動揺を発生させる方法について検討した。

観測情報と照らし合わせながらシミュレーション条件の見直しを繰り返し実施して，実現象に近い特性が得られる手順を見出した。より実現象に近い条件で解析することで，システムシミュレーションでの結果と実データに対する解析結果との対比が容易になり，実データに対する処理等の妥当性を容易に検証することが可能となった。また，これはシステム解析の有用性を高め，精度面・機能面での向上につながることを期待できる。

## 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10件)

- ① 福島 大・渡邊政幸・三谷康範：「位相計測および  $H^\infty$  制御理論に基づく電力システム安定化制御」，平成 23 年電気学会全国大

会，2011 年 3 月 16 日，大阪

- ② 三宅良英・渡邊政幸・三谷康範：「産業用電力システムにおける周波数情報に基づく安定度推定のための動揺抽出手法」，平成 23 年電気学会全国大会，2011 年 3 月 16 日，大阪
- ③ 山尾秀行・渡邊政幸・三谷康範：「同期位相計測における電力動揺モード抽出に関する検討」，平成 22 年電気学会電力技術・電力システム技術合同研究会，2010 年 9 月 30 日，広島
- ④ 添田裕介・渡邊政幸・三谷康範：「位相計測を利用したシステム同定による電力システム安定化制御」，平成 22 年電気学会電力技術・電力システム技術合同研究会，2010 年 9 月 29 日，広島
- ⑤ 野口圭太・渡邊政幸・三谷康範：「長周期動揺抑制のための位相・電圧計測による電力システム安定化制御」，平成 21 年電気学会電力技術・電力システム技術合同研究会，2009 年 9 月 15 日，東京
- ⑥ Masayuki Watanabe, Yuuya Ueno, Yasunori Mitani, Hiroyuki Iki, Yoshihisa Uriu, and Yasuhiro Urano, “A Dynamical Model for Customer’s Gas Turbine Generator in Industrial Power Systems,” IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control 2009, 2009 年 7 月 6 日, Tampere, Finland

[図書] (計0件)

[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・大学院工学研究院・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：