

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760233

研究課題名(和文) 不確定リソースの大量導入に対応する同期化力付インバータモデルの開発

研究課題名(英文) A Novel Control Scheme of Voltage Source PWM Inverters For Improving Power System Stability

研究代表者

佐々木 豊 (SASAKI, YUTAKA)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10511561

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：近年、世界では経済成長や人口増加による化石燃料の需給が逼迫している。世界的にエネルギー・資源問題が深刻となっている。このような問題の解決策として、再生可能エネルギー電源(RES)に注目が集まっている。特に、我が国は2030年までに太陽光発電(PV)を2008年度比で約40倍に引き上げることを目標としている。本研究では、PVを含むパワーエレクトロニクス機器の大量導入に起因する電力システムの安定度維持問題に着目し、既存同期発電機と同様に同期化力を有するインバータモデルを提案し、その有効性を計算機シミュレーションおよび簡易実験により見いだした。

研究成果の概要(英文)：The rapid growth in energy demand with renewable energy sources (RESs) are presenting serious challenges for the optimal operation of power systems. The future perspective of the dramatic increase in RESs, such as wind and solar energy, may lead to severe problems related to power system stability. For this solution, the authors have developed the power supply and demand management system that is robust to instability. RESs are also connected to the existing bulk power systems via power electronics devices such as power conditioning systems (PCSs). However, when a large amount of RESs are interconnected in power systems, the level of power synchronization with power system may decrease. In this paper, we propose the novel control scheme of voltage source pulse width modulation (PWM) inverters for improving power system stability under future environment with uncertainties.

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 インバータ 同期化力 不確定性

1. 研究開始当初の背景

電力システムでは送電線事故や急激な負荷変化に対しても電力需給バランスを維持できるように、発電機の電氣的出力の他に、発電機内部の回転エネルギー（いわゆる慣性力）を有効に活用し常に需要と供給を満足させている。このため、現状では多少の擾乱に対しても供給信頼度を低下させることなく安定的に電力供給を行えている。この系統擾乱に対して安定度を維持する力（電力系統工学分野において同期化力と呼ばれる）は電力システムの運用・制御において非常に重要な効果である。一方、我が国で急速に普及が進む太陽光発電（PV）や電気自動車（EV）について、電力システムとの連系の際には、電力変換機器であるインバータが必須であり、現状、電力系統側での事故時には単独運転を防止するようインバータを停止する方策が採られている（例えば、電気協同研究「電力系統瞬時電圧低下対策技術」（2011年9月））。この機能（単独運転検出）は再生可能エネルギー電源であるPVの出力抑制につながることから、継続的かつ効率的な運用には至らない。そのようなことから、インバータを停止することなく運転を継続する Fault Ride-Through (FRT) 機能の具備が必須であり、各国で FRT 機能に関する議論がなされている（例えば、E. Troester, "New German Grid Codes for Connecting PV Systems to the Medium Voltage Power Grid," 2nd Int'l Workshop on Concentrating PV Power Plants, 2009）。

以上から、電力システムへのインバータ機器などの新要素技術の大量導入に対し、昨今の原子力発電稼働延期に伴う系統自身が持っている同期化力の低下の状況から、供給信頼度を安定的に確保していくためには、インバータ機器への同期化力機能の具備が急務であるといえる。例えば、文献（L. Zhang, L. Harnefors, and H.P. Nee, "Power-Synchronization Control of Grid-Connected Voltage-Source Converters," IEEE Trans. on Power Systems, 2010）では、既存インバータに仮想同期化力を具備した機能を提案しており電力系統末端における安定度の改善効果を示している。しかし、安定度向上に資することができる十分な設備容量を備えたインバータのみにとどまっており、国内外を調査しても、出力変動するPVや不確定電源となりうるEVを用いた安定度向上効果については検討されていない。そのため、PV等の分散型電源が連系された同期化力付インバータの開発が望まれる。

2. 研究の目的

太陽光発電（PV）や電気自動車（EV）を活用したスマートグリッドの実現が検討されており、このような要素技術はインバータ機器を必ず備える。一方、昨今の原子力発電

稼働延期に伴い、将来の電力系統においては同期化力低下による系統安定度の不安定化が懸念される。本研究では系統安定度を低下させることなくスマートグリッド実現を視野に入れた、安定度改善を図る同期化力機能を具備する新しいインバータモデルの開発を研究目的とする。計算機シミュレーションによる解析・評価、簡易実験設備による検証から、開発したインバータの有効性を比較検討する。

3. 研究の方法

研究代表者は本研究に専念する大学院生による研究グループを編成した。本グループは申請者が所属する研究室の大学院生（3名）から成り、大学院生それぞれが、本研究の要素研究（解析モデル作成・インバータ実験回路作成・インターフェース作成）を実施する並列型研究体制とした。研究代表者を筆頭にして協力大学院生とともに本研究を着実に進めるために、定期的な打ち合わせを実施し、研究進捗に遅れを生じさせないように各担当の状況を逐次管理を行った。研究代表者が主担当となり、文献調査からインバータモデル作成、実験回路作成と動作検証までの一連を総括した。シミュレーションおよび実験回路作成の補助として、大学院生を割り当てて研究目的を達成した。なお、実験回路作成には安全管理のために本学技術センターの協力を得た。具体的には研究期間（2年間）に以下の項目を実施した。

（1）インバータに関連するデータ収集と解析モデルの作成（研究代表者、大学院生1名）

系統連系インバータをPC上で模擬し解析するためには、電力系統工学とパワーエレクトロニクスの両工学の側面から十分に検討し、モデル構築を行っていく必要がある。まず、1年目ではインバータに関連する基礎データを蓄えることを目的として、インバータの研究動向、実機に使用されている制御アルゴリズムといった情報を収集した。続いて、Mathworks社のMATLAB/Simulink、（一財）電力中央研究所の電力系統瞬時値解析プログラム（XTAP）、およびPowersim社のPSIMを用いたインバータ制御回路の構築を行った。Matlabについて研究代表者および大学院生2名が使用するため、計3パッケージの購入をした。

（2）インバータの簡易実験回路の作成（研究代表者、大学院生1名）

1年目では（1）の担当と同様に、インバータに関連する文献調査をはじめに実施し、その後アナログ素子を利用した簡易的なインバータ実験回路を作成した。実験回路作成に際しては、安全確保のために本学技術センター職員の支援を要求し、試作機として直流電源を三相交流に変換するインバータ回路は作成した。本担当ではこの回路を不確定性電源（PV）および蓄電池を接続可能なように簡易的な回路で有りながら、比較的自由度の

効く回路に仕上げることを目的とした。

(3) インバータ制御用インターフェースの作成 (研究代表者, 大学院生 1 名)

1 年目では, (1) の担当と同様に, インバータに関連する文献調査を実施し, インバータ制御信号の扱い方 (AD/DA 変換回路の作成等) について情報収集およびその整理を行った。なお, 実施にあたっては本学技術センター職員の支援を要求した。実験回路の作成上の工作機械など一連の機器はすべて広島大学にて確保できていたため, 専用装置を購入する必要はなかった。(1) で作成したインバータモデルからの制御信号を (2) で作成するインバータ実験回路に入力する重要な項目である。

(4) 不確定性を考慮した解析モデルへの改良 (研究代表者, 大学院生 1 名)

(1) を担当した大学院生は, 初年度までに先行研究で行われた同期化力付インバータと同等の機能を組み込んだインバータモデルを作成している。このため, 2 年目ではこのインバータに不確定性電源を組み込んだモデルとして改良を加えていくための検討を行った。なお, 現実的には太陽光パネル (PV) からの出力のみで安定な交流電源を発生させることが困難であるため, 最低限の蓄電池を併設することを視野に入れたモデルへと拡張を進めていく。本シミュレーションにおいては, 同期化力の発生状況を波形ベースで確認し, 状況によっては複数台の同期化力付きインバータの挙動も併せて観察した。

(5) 不確定性を考慮した実験モデルの改良と検証 (研究代表者, 大学院生 2 名)

(2) と (3) を担当した大学院生 2 名により, インバータ実験回路の改良を行った。不確定性を考慮した実験とするために, 太陽光パネルと蓄電池の導入を検討した。太陽光パネルについては新規に購入し, 蓄電池はすでに他の実験にて使用している物品を利用した。

(6) 全体の研究結果のまとめ

以上までのシミュレーションベースおよび実験ベースの研究結果から, 総合的な考察を実施し, 不確定性に対応した同期化力付きインバータを作成する上での留意点などを今後の課題としてとりまとめた。

以上より研究目的の欄で述べた項目 (1) ~ (6) の実施を完了し, 研究期間内に本研究の目的を達成した。

4. 研究成果

(1) 同期化力付インバータモデルの調査

同期化力とは, 電力設備の事故等によって, 系統擾乱が発生した場合に, 元の安定な出力状態に戻すために発電機間に働く復元力を指す。同期化力を具備したインバータモデルに関する研究動向として, 次のように調査を行った。同期機の動揺方程式に加えて, 位相角導出の際にフィードバック制御を行う方法や独立系統においても安定化した制御が

実現できるように負荷周波数制御を応用した既存同期機との協調制御方法などが挙げられる。一方, 海外では, 直流送電システム (HVDC) に対して, 同期化力を具備したインバータを用いた安定化制御を行う方法も提案されている。上記のような同期化機能をもつインバータや制御方法は, Virtual Synchronous Generator (VSG) や Inertia Emulation Control (INEC) などと呼ばれており, 制御系からの視点による研究が各方面で行われている。

(2) 同期化力付インバータモデルの提案

本研究では同期発電機の特性を表す以下の動揺方程式を用いて, インバータの位相角 θ を導出し, 回転座標変換の信号としてフィードバックループに組み込み, 同期信号を生成する手法を提案した (図 1)。

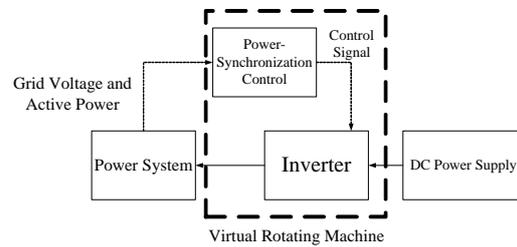


図 1 提案する同期化力付インバータの概要

具体的には同期発電機の動揺方程式は一般的に次式で簡易的に与えられる。

$$M \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = P_m(t) - P_e(t) \quad (1)$$

ここで, M : 慣性定数[kW・s], θ : 位相角[rad], P_m, P_e : 機械的入力と電氣的出力[kW]である。今, $\theta = \theta + \Delta\theta$ になったと仮定すると電力相差角曲線より $P_m < P_e$ となり発電機は減速する。逆に, $\theta = \theta - \Delta\theta$ になったとすると, $P_m > P_e$ となり発電機は加速する。このように発電機が元の状態に戻ろうとする力を同期化力と呼ぶ。本研究ではこれに制動力 (ダンピング力) P_d を加えることで, より安定状態へ戻りやすくさせる。これらを考慮し, インバータに同期化力を実装した (図 2)。

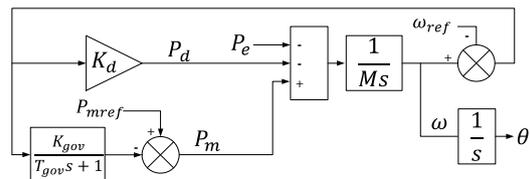


図 2 同期化力を組み込んだ制御ブロック

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{M} (P_m(t) - P_e(t) - P_d(t)) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) \quad (3)$$

(3) 電力系統安定化に関する有効性検証

Mathworks 社の MATLAB/Simulink の SimPowerSystems 上の各コンポーネントを用いてモデルを作成した。インバータを同期発電機側の系統に同期させた際の各位置での波形を観測し、インバータに同期化力が実装されているかを検証した。初期状態として発電機側の系統とインバータ側の系統を切り離れた状態でシミュレーションを開始する。両系統の電圧位相を観測しつつ、位相が等しくなった瞬間に同期投入を行う。位相は発電機側系統の可変負荷を増減させることで変動させる。これによりインバータ側系統の位相等しくなるように調整する。また発電機はシミュレーション開始と同時に始動するため、同期のタイミング計算は発電機が安定状態になる約 6[sec]以降に位相の比較によって行う。さらに時刻 8[sec]で事故点において新たな負荷を投入し、約 1[sec]後に系統から切り離し、その後の波形の動揺についても観測する。図 3 の結果より、さらに同期発電機の機械的入力同期後に増減しておらず、インバータから比較的安定した電力が出力されていることが確認できる。また周波数においても、微小変動が残存してはいるが、一定を保っていることが確認できた。以上より、同期発電機の同期化力を模擬して系統安定化を図るインバータモデルを提案し、既存の同期発電機とインバータが同期して、系統擾乱に対しても安定的に運転継続できることが確認された。本モデルの提案により、系統安定度を担保できる新たなインバータ（ハードウェア）を実現できると考えている。そのため、スマートグリッド実現にむけ、自然エネルギーを有効に活用しつつ、供給信頼度の維持が持続的に可能な次世代電力流通システムを築くことができると予想される。

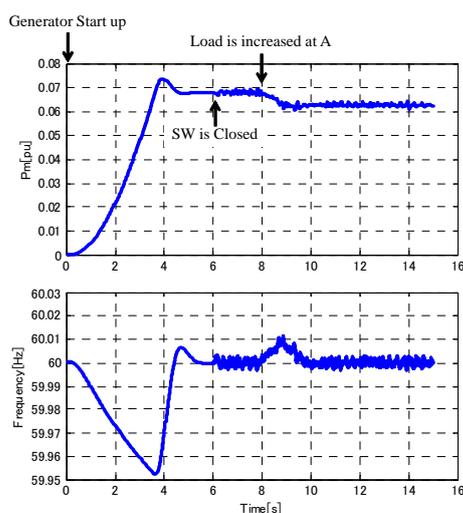


図 3 シミュレーション結果

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 1 件)

1. Yoshiharu Okumoto, Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Yoshifumi Zoka, Shoki Fujita, and Toshihiro Yamanaka, "Security issues for mega penetration of photovoltaic power generation in future electric power systems. A case study of stability for power swing oscillation using the IEEJ WEST 10-machine model," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 184, No. 3, pp.1-13, August 2013 (査読有) DOI: 10.1002/eej.22391

〔学会発表〕(計 4 件)

1. Yutaka Sasaki, Keita Noguchi, Yoshifumi Zoka, Naoto Yorino, Shinya Sekizaki, Yuki Nakamura, and Masatoshi Matsuyama, "A Novel Control Scheme of Voltage Source PWM Inverters for Improving Power System Stability," *IEEE P&ES Symposium on Advanced Technology in Power Systems 2014*, pp.1-6, 2014, Bangkok, Thailand

2. 野口敬太, 佐々木豊, 造賀芳文, 餘利野直人, 「同期化力インバータを用いた系統安定化制御」, 平成 25 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, No.7-2, pp.67-68, 岡山大学, 2013 年 10 月 19 日

3. Yutaka Sasaki, Emil Popov Hristov, Naoto Yorino, and Yoshifumi Zoka, "A Real-time Robust Dynamic ELD against Uncertainties of Renewable Energy Sources," *2013 ISGT Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, paper#351, pp.1-5, October 6-9, 2013, Copenhagen, Denmark

4. Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Emil Popov Hristov, Yoshifumi Zoka, and Yoshiharu Okumoto, "Dynamic Load Dispatch For Power System Robust Security Against Uncertainties," *2013 IREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control -IX (IREP)*, paper #103, pp. 1-17, August 25-30, 2013, Rethymnon, Greece

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 豊 (SASAKI YUTAKA)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：10511561