

# 電力システムシステムにおける電力安定化のための制御設計法

## Stable Control Design Method of General Power Systems

橋本賢司\*, 天野耀鴻\*

Kenji Hashimoto\*, Yoko Amano\*

\*日本大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻

\*Nihon University Graduate School of Engineering, Electrical and Electronic Engineering

キーワード： 電力システムシステム (power system), インバータ (inverter), コンバータ (converter),  
電力の安定化制御 (stable control of power)

連絡先： 〒 963-8642 日本大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 天野研究室  
橋本賢司, Tel.(024)956-8796:E-mail: control\_lab\_8@yahoo.co.jp

### 1. 緒言

近年, 化石燃料の枯渇問題などにより自然エネルギーによる発電である太陽光発電や風力発電などに対して関心が高まっており, 今後はさらに需要が増加していくと考えられる。しかし, 自然エネルギーによる発電は天候など周辺の環境に大きく左右されるため, 周波数変動や電圧フリッカなどによって電力システムに悪影響が生じ, 照明機器のちらつきや電気機器の故障などの問題に繋がる可能性がある。それらの問題を防ぐためには従来よりも安定した電力システムが重要になってくる。

従来のものは常に一定の出力を出し続けるものであり, 電力システム側の電力状況を考えていないものであった。しかし, 今後の分散型発電の需要の増加に伴い, 個々に電力システムの状態に合わせた出力が得られるような電力システムが必要となっている。

そのため, 本研究では電力システムシステムのコンバータ及びインバータの両方に着目し, 両方

の連系動作の制御システムを提案する。これによって入力電力変動及び電力システム側の負荷変動などに対して安定的な出力電力を確保できるような制御システムを新たに開発することが目標となる。

### 2. 電力システムシステムの構成

#### 2.1 ハードウェアの構成

Fig.1 に電力システムシステムの構成を示す。系統連系システムは大別して整流部, コンバータ部, インバータ部およびフィルタ部からなるシステムである。また, システムの入力部には発電機

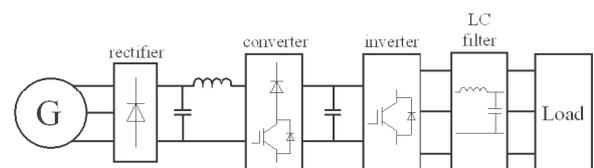


Fig. 1 電力システムシステムの構成  
Constitution of the power system connection

を接続し，出力部には電力系統が接続されている．このシステムは発電機の出力電力を電力系統の商用電源（ $202 \pm 20V$ ， $50/60Hz$ ）に合わせることが目的である．

## 2.2 制御システムの構成

このシステムでは，発電機の出力変動をコンバータ部でのみ調整しているため，インバータは常に一定の入力値であるという仮定の基に制御を行っている．従来の電力システムシステムの制御は電力系統の電圧・電流を測定し，その値に一致するように電圧制御，電流制御，位相制御を行っている．

従来の制御システムではコンバータの調整が追い付かない入力変動などが発生した場合，インバータではその変動に対処しきれず，出力電圧・電流の変動が生じてしまう．

## 3. 電力安定化制御システムの提案

本研究では，コンバータとインバータにおいて入力変動及び負荷変動に対応できる安定化制御システムの設計法を新しく提案する．

入力変動及び負荷変動に対応するためにコンバータとインバータに入力される直流電圧を測定し，その直流電圧に対応した PWM 信号を生

成して，コンバータとインバータの両方の制御を実行する．入力変動と負荷変動を考慮した制御を行うことによって，電圧および電流の変動を抑え，安定的に出力することができ，電力系統側における変動の影響も小さくする制御システムを設計することができる．

Fig.2 に本研究で提案の制御システムブロック線図を示す．まずコンバータの制御の流れを説明する．コンバータに入力される直流電圧  $V_{dc1}$  と理想直流電圧  $V_{dc_{ref}}$  の偏差  $V_{dc_{de}}$  を取る．コンバータ出力  $V_{dc2}$  と  $V_{dc_{de}}$  の偏差  $V_{dc_{de2}}$  を取り，偏差が零になるように PI 制御を行い，制御の結果に基づいて PWM 波形を生成しコンバータを制御する．

次にインバータの制御の流れを説明する．始めに理想 d-q 軸電流を求めていく． $V_{dc_{de2}}$  を PI 制御し，理想無効電力  $Q_{s_{ref}}$  を算出し，その値から理想 d 軸電流  $I_d^*$  を求める．そして，電力系統側の電圧  $V_s$  と電流  $I_s$  を測定し，有効電力  $P_s$  と無効電力  $Q_s$  を求め， $V_s$  からは位相  $\theta_s$  を算出する． $P_s$  と理想有効電力  $P_{s_{ref}}$  との偏差  $P_{s_{de}}$  を取り，偏差が零になるように PI 制御を行い，その値から理想 q 軸電流を求める．

最後にインバータの出力電流から d 軸電流  $I_d$  と q 軸電流  $I_q$  を算出し．それぞれを  $I_d^*$  と  $I_q^*$  との偏差を取り PI 制御を行う．d-q 逆変換と二相三相変換を行い  $I_{inv}$  から PWM 波形を生成し，インバータを制御する．

上述のように本研究はコンバータとインバータの制御を同時に実行することによって，電力系統システムの安定化を実現する．

## 4. シミュレーションの検証

### 4.1 シミュレーションの条件

今回のシミュレーションに用いたブロック線図を Fig.3 に示す．

シミュレーションは電圧制御と位相制御の有効性を検証するため 2 つのシミュレーションを

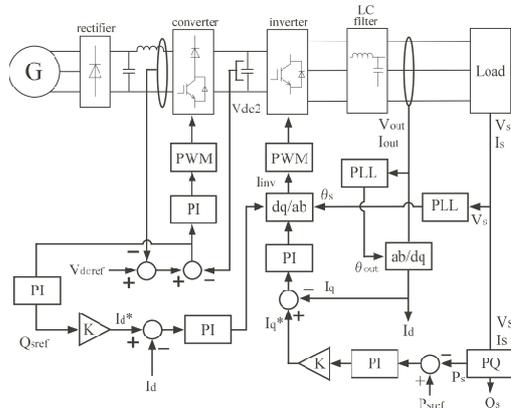


Fig. 2 制御システムのブロック線図  
Block diagram of the control system

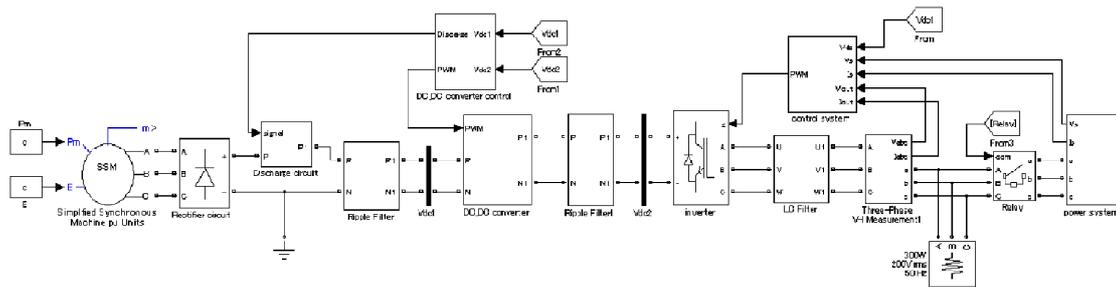


Fig. 3 シミュレーションブロック線図  
Block diagram of the simulation

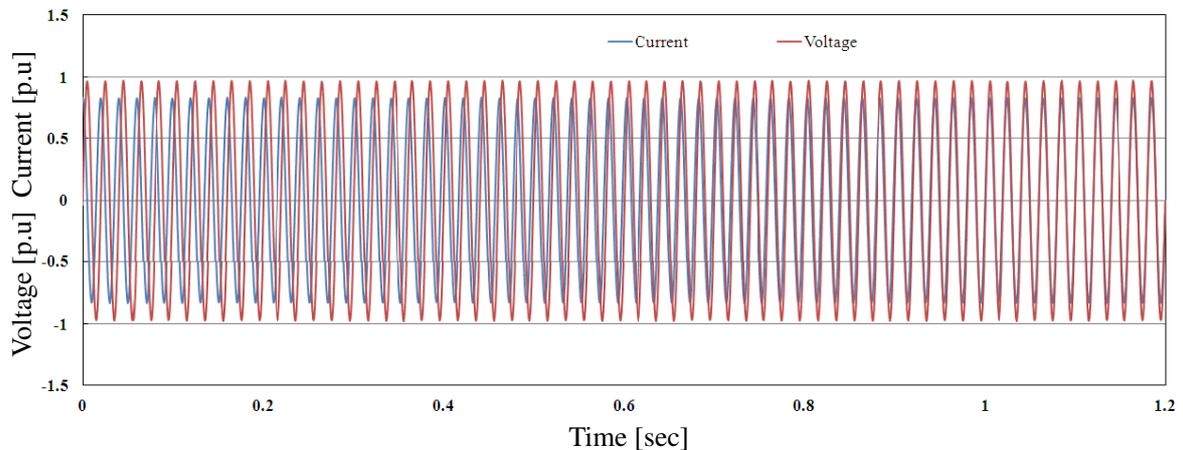


Fig. 4 従来型の位相制御結果  
Phase control result of conventional

行った．1つ目は電圧に対して電流の位相が90度ずれている状態を初期条件として，制御信号を入力してからの電流の位相の変化を測定する位相制御シミュレーションを行った．

2つ目は発電機からの入力電圧を110Vから80Vに低下させ、同時に負荷を100%から200%に急変した時の電圧制御シミュレーションを行った．また，位相制御シミュレーション時の制御信号の入力開始時間は0.1secとして制御を行った．

電力系統の条件としては，電力系統側において系統電圧200V，周波数50Hzとする．また，同様の条件の基に実機実験も行った．

## 4.2 シミュレーションの結果

### 4.2.1 位相制御

従来の制御システムによる位相制御のシミュレーション結果をFig.4に示す．Fig.5は制御信号を入力し初めた時の電流と電圧のグラフである．また制御信号入力から1秒後の波形をFig.6に示す．またFig.7は提案型での位相制御のシミュレーションを行った結果を示す．Fig.8は制御信号を入力し初めた時の波形である．また制御信号入力から1秒後の波形をFig.9に示す．

従来型と提案型のどちらも電圧に対して電流が90度ずれている状態から制御信号を入力して約1秒で電圧と電流の位相が同期しているこ

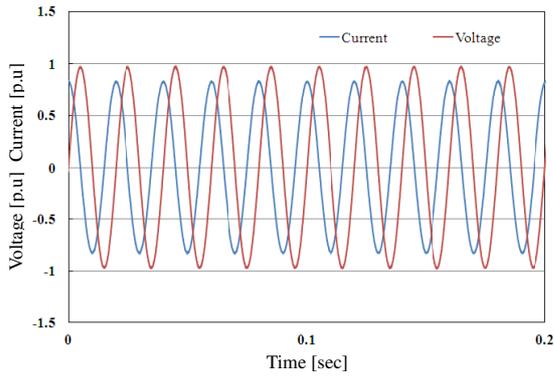


Fig. 5 従来型の位相制御開始時  
Phase control at the start of the conventional

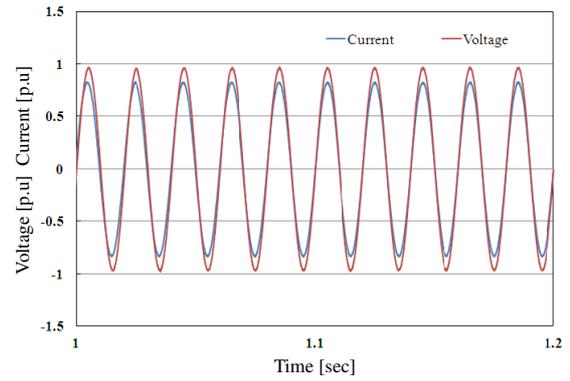


Fig. 6 従来型の位相制御同期時  
Phase control when syncing conventional

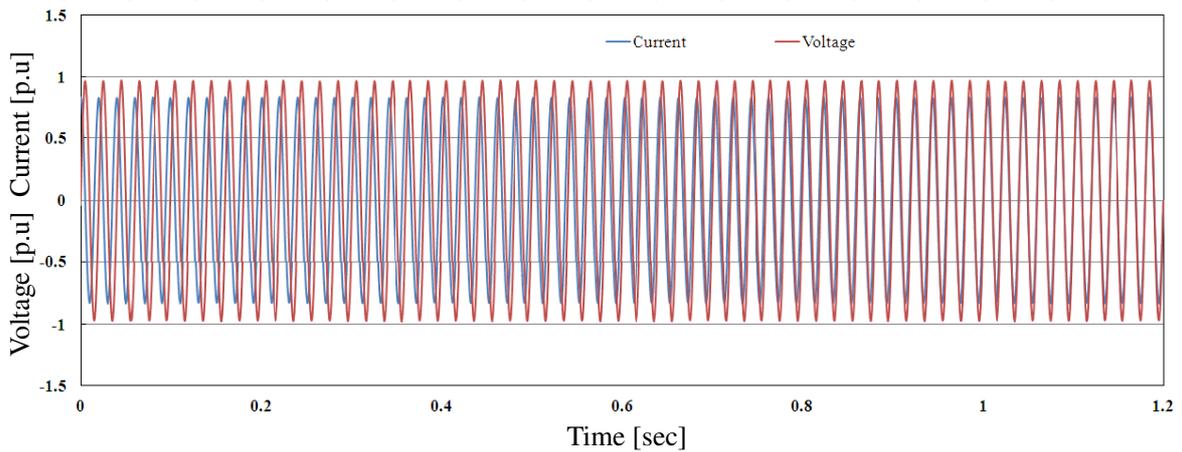


Fig. 7 提案型の位相制御結果  
Phase control result proposal

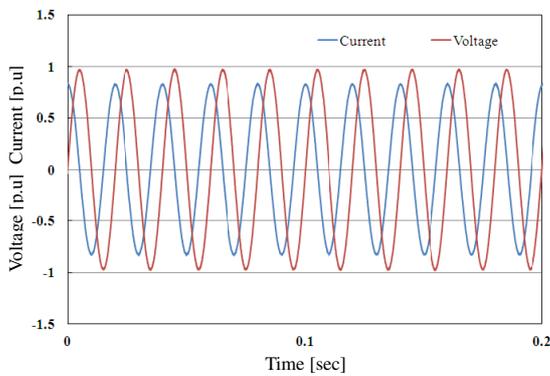


Fig. 8 提案型の位相制御開始時  
Phase control at the start of the proposal

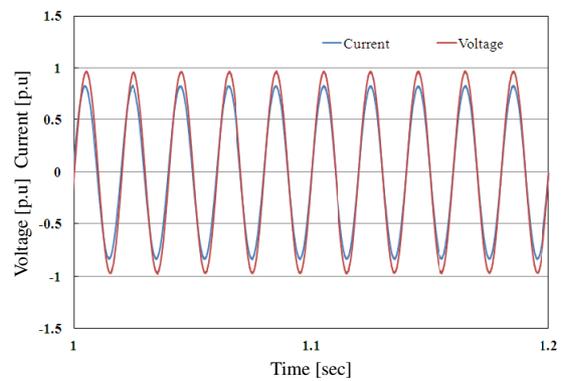


Fig. 9 提案型の位相制御同期時  
Phase control binding when syncing proposal

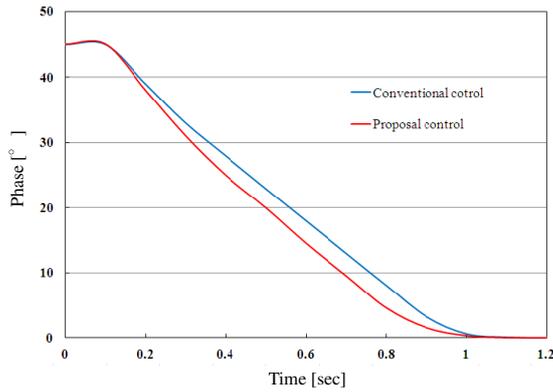


Fig. 10 本提案と従来型の位相変化の比較  
Comparison of the phase variation and conventional this proposal

とがわかる。また、位相変化の推移を表したのが10である。この結果から提案型は従来型と比べ、若干同期時間が早いことがわかる。これらのことから提案型の場合も位相制御が可能であることが確認できた。そのため力率を1にすることが可能であり、有効電力と無効電力の制御も可能であることが確認できた。

#### 4.2.2 電圧制御

従来型の電圧制御時のシミュレーションの結果を Fig.11 に示し、提案型の結果を Fig.12 に示す。また2つの結果を比較したグラフは Fig.13 である。この結果より入力電圧及び負荷が急変した時、従来型はインバータからの出力電圧の波形が大きく乱れ、最大で約 90 [V] もの変動が生じている。それに対して提案型は波形の乱れが小さく、電圧の変動も最大で約 40[V] と大きく抑えられている。このことから提案型の方が電圧制御が優れていることが確認でき、入力変動及び負荷変動に対応できていることがわかる。

以上のシミュレーション結果より提案型の制御システムは位相制御及び電圧制御が可能であり、位相制御は従来とほぼ同じ結果であるが電圧制御は従来がよりも歪みを大きく抑えられていることがわかる。この結果を元に実機実験を行う。

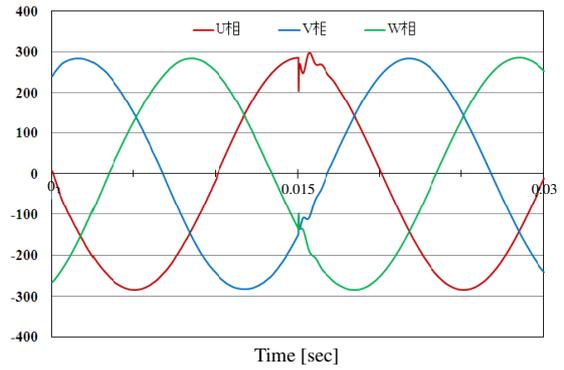


Fig. 11 従来型の負荷変動  
Load variation of conventional

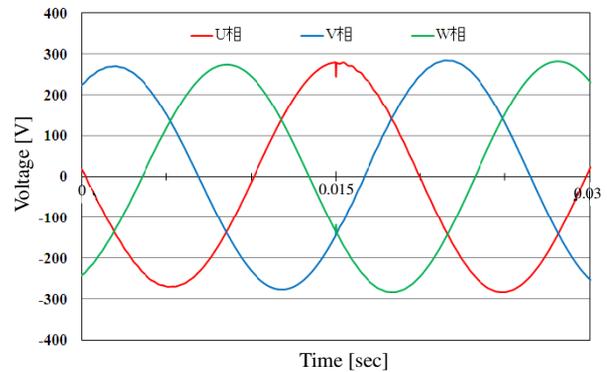


Fig. 12 提案型の負荷変動  
Load variation of the proposal

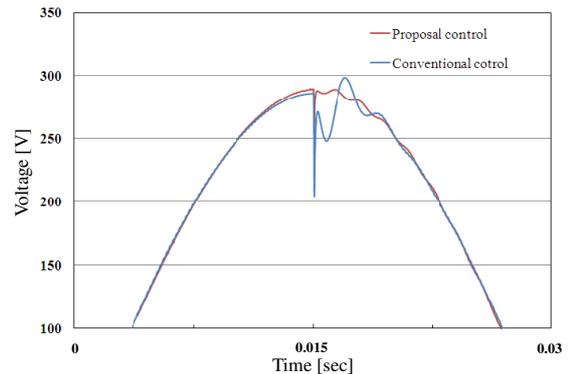


Fig. 13 提案型と従来型の負荷変動比較  
Load variation comparison of conventional and proposal

## 5. 実機実験の検証

### 5.1 位相制御

従来型の位相制御の結果を Fig.14 に示す .

Fig.15 は制御信号を入力し初めた時の電流と電圧の結果である . また制御信号入力から 1 秒後の波形を Fig.16 に示す . 提案型の位相制御の結果を Fig.17 に示す . Fig.18 は制御信号を入力し初めた時の電流と電圧の結果である . また制御信号入力から 1 秒後の波形を Fig.19 に示す .

結果より実機実験においても従来型と提案型のどちらも電圧に対して電流が 90 度ずれている状態から位相制御を行い , 電圧と電流を同期することが確認できた . また , 実機実験での位相変化の推移を表したのが 20 である . この結果

ではシミュレーションと同様に従来型と提案型での同期時間に差が生じており , 提案型の方が少し早く同期している . この結果はシミュレーションよりも少し差が生じている . これらのことから位相制御が正しく行われていることがわかり , 力率を 1 付近に維持することが可能であり有効電力と無効電力の制御が可能であることが確認できた .

以上のことから本研究で提案した制御システムは実機においても位相制御が実現できる制御システムであると確認できた .

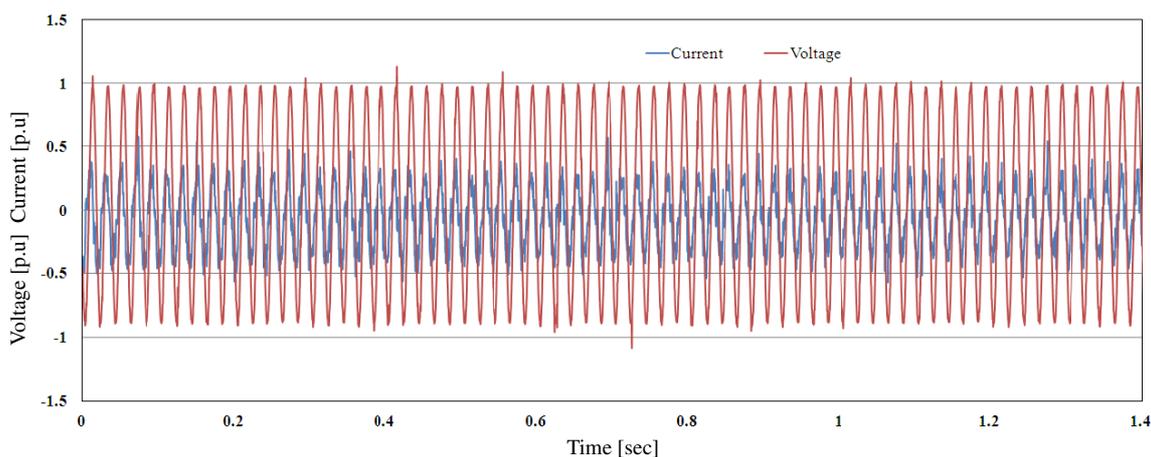


Fig. 14 従来型の位相制御  
Phase control of conventional

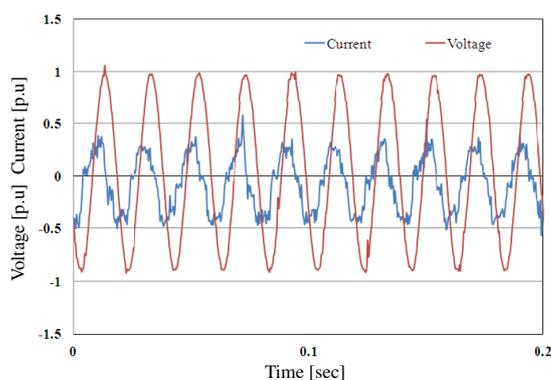


Fig. 15 従来型の位相制御開始時  
Phase control at the start of the conventional

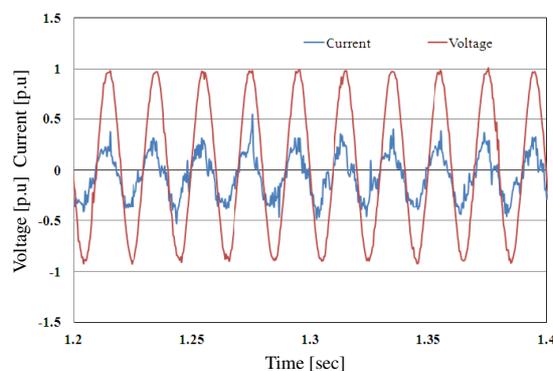


Fig. 16 従来型の位相制御同期時  
Phase control when syncing conventional

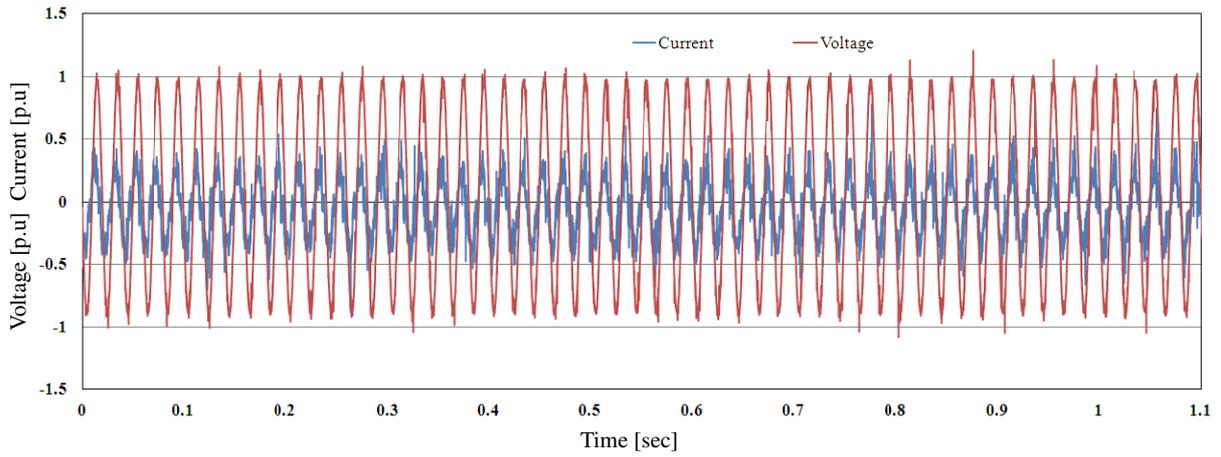


Fig. 17 提案型の位相制御結果  
Phase control result proposal

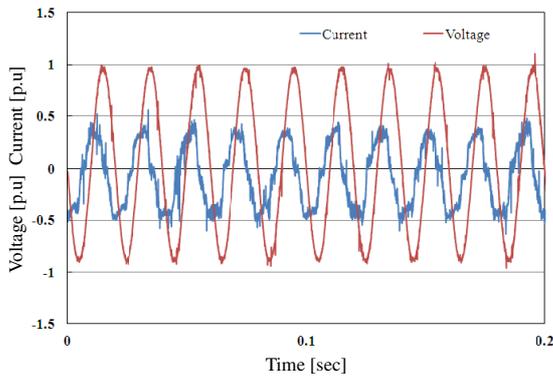


Fig. 18 提案型の位相制御開始時  
Phase control at the start of the proposal

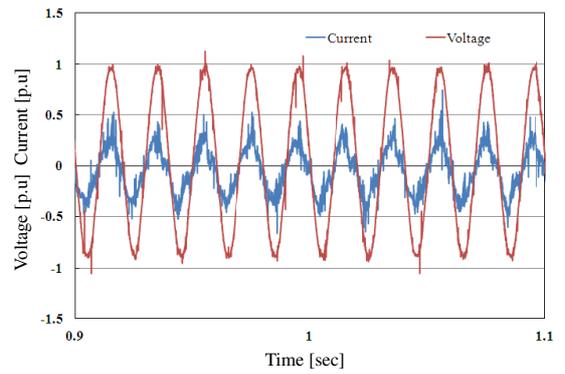


Fig. 19 提案型の位相制御同期時  
Phase control binding when syncing proposal

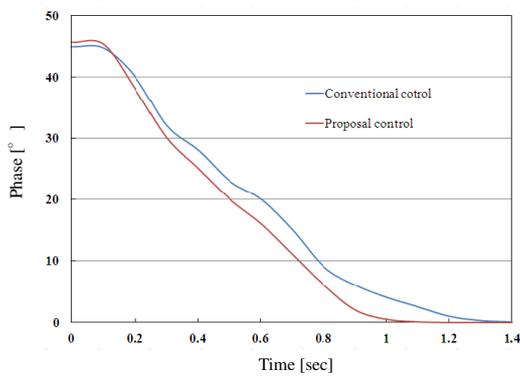


Fig. 20 本提案と従来型の位相変化の比較  
Comparison of the phase variation and conventional this proposal

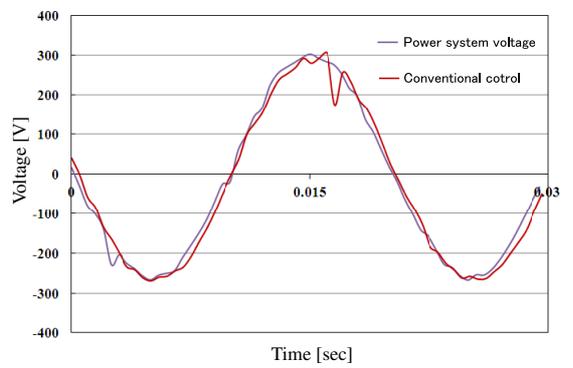


Fig. 21 従来型の負荷変動  
Load variation of conventional

## 5.2 電圧制御

従来の電圧制御時の結果を Fig.21 に示し、提案型の結果を Fig.22 示す．また2つの結果を比較したグラフは Fig.23 である．この結果より提案型はシミュレーションと比べると波形のひずみが大きくなっている．しかし、従来型と比べると波形の歪みは小さく抑えられていることが確認できた．従来型は約 3msec で元の状態に復帰しているが、提案型は約 2msec で元の状態に復帰している．このことから提案型は従来型よりも入力変動及び負荷変動に対応できていること確認できた．

以上のことから本研究で提案した制御システムは入力変動及び負荷変動に対応でき、安定的に出力電圧を確保できる様な制御システムであると確認できた．

## 6. 結言

本研究では電力安定化のための電力システムシステムの制御システムを提案設計した．本提案の制御システムを用いてシミュレーション及び実機実験を実行した．その結果は電力システムシステムの入力電力と負荷の変動が同時に起きても、常に安定的な出力を確保できることが確認できた．このことから本提案型の制御システムの入力電力と負荷の変動に対する有効性が検証された．

## 参考文献

- 1) Giovanni G. Pozzebon, Amilcar F. Q. Goncalves, Guido G. Pena, Nilton E. M. Mocambique, and Ricardo Q. Machado: Operation of a Three-phase Power Converter Connected to a Distribution System, IEEE Transaction on Industrial Electronics (2011)
- 2) 加藤 利次・井上 磐・堂ノ本 宜尚: LCL 形フィルタ型系統連系インバータの正弦波追従電流制御法, 電気学会論文誌 C, Vol.131, No.11, 1858/1863 (2011)
- 3) Bin Li, Xiaohe Tian, Hongran Zeng: A Grid-Connecton Control scheme of PV System with

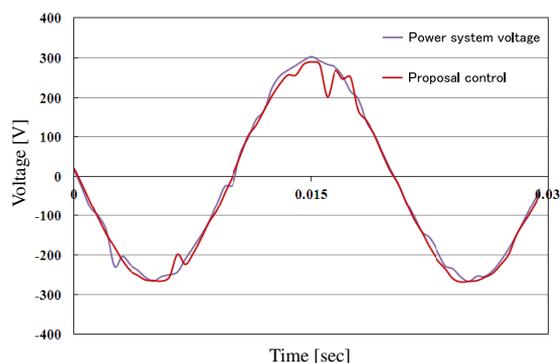


Fig. 22 提案型の負荷変動  
Load variation of the proposal

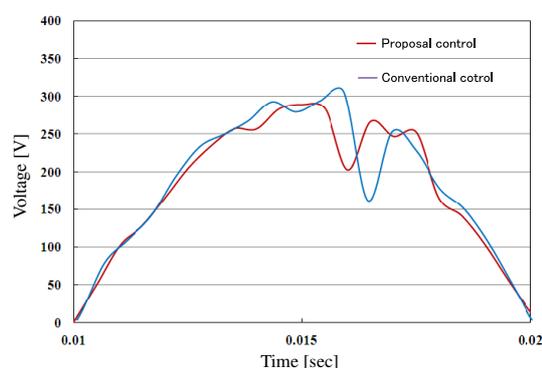


Fig. 23 従来型と提案型の負荷変動比較  
Load variation comparison proposal type and conventional

Fluctuant Reactive Load, IEEE Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 786/790 (2011)

- 4) Bi-Ying Ren, Yan-Ru Zhong, Xiang-Dong Sun and Xiang-Qian Tong: A Digital PLL Control Method Based on the FIR Filter for a Grid-Connected single-Phase Power Conversion System, IEEE, (2008)
- 5) 加藤 利次・井上 磐・黒田 真作: PWM インバータの正弦波追従デジタル制御法, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.3, 218/224 (2006)
- 6) 渋谷 貴之・春名 順之助・伊藤 淳一: 系統連系システムにおける高速電流制御の安定性に関する検証, SPC-11-013, (2011)
- 7) 高松 和義・金 春峰・石原 好之, 戸高 敏之: 昇圧形コンバータにおけるフィードバック制御の安定性, 電子情報通信学会, EE2006-8, 43/48 (2006)