

# 再生可能エネルギー発電を含む配電系統における STATCOMとマイクログリッドの協調制御による電圧 安定化効果（翻訳論文）

著者	三浦 宏友, 呉 国紅
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	48
号	1
ページ	42-47
発行年	2014-02
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00000127/">http://id.nii.ac.jp/1204/00000127/</a>

# 再生可能エネルギー発電を含む配電系統における STATCOM とマイクログリッドの協調制御による電圧安定化効果

## Voltage Stabilization of Distribution System Integrated with Renewable Power Generations by Cooperative Control using STATCOM and Interconnected Microgrids

三浦 宏友\*

呉 国紅\*\*

Hiroto MIURA

Guohong WU

**Abstract:** This paper presents a method to improving the voltage stability of a distribution system integrated with renewable power generations and interconnected by microgrids, which can be expected to appear in the near future. Because of the increasing integration of renewable power generators, the distribution voltage may be considerably degraded by the fluctuation caused by such power generators. However, even higher voltage quality is desirable in the modern society, and therefore, the voltage stabilization problem in the future distribution system comes to be a critical issue of concerns. In this paper, a new method is proposed to deal with this voltage stabilization problem by cooperated use of STATCOM (synchronous static compensator) and the reactive power control of interconnecting microgrids. Using the proposed method, the reactive power from the microgrids is controlled for mitigating the voltage change caused by the active power of these microgrids. Simultaneously, the STATCOM is activated to suppress the voltage fluctuation originating from renewable power generators directly integrated into the distribution grid. In this paper, a STATCOM model of small capacity with relatively simple structure and low cost is proposed for distribution use, and the control systems for both the STATCOM and microgrids are designed as well. Digital simulations with a created typical future distribution system model are conducted in this study, and the simulations results have verified the voltage stabilization effects by the proposed method.

**Keywords:** distribution system, microgrid, reactive power control, renewable power generations, STATCOM, voltage stabilization

### 本論文の翻訳元

本論文は、

Miura Hiroto and Guohong Wu : "Voltage Stabilization of Distribution System Integrated by Renewable Power Generations by Cooperated Control of STATCOM and Interconnecting Microgrids" : International Journal of Smart Grid and Clean Energy, Volume 3 , Number 1 , 96-103, January 2014

を翻訳したものであり、併せて参照頂きたい。

### 1 はじめに

近年、化石エネルギー枯渇問題や地球温暖化問題に伴い、太陽光発電や風力発電などの再生

可能エネルギーの導入が急速に進められている。しかし、再生可能エネルギーには多くの利点があるものの、電力システムの管理及び制御に問題が発生する可能性がある。この問題は、日射量や風速に出力エネルギーが左右されるという自然エネルギー発電の特徴から生じている。

再生可能エネルギー発電が配電系統へ大量に導入をされた場合に、配電系統電圧が規定されている範囲を逸脱してしまう可能性が上げられる。一方、半導体製品などの精密機器は電圧変動に非常に弱く、より高品質の電力が必要とされている。これらの理由から、自然エネルギー発電が配電系統へ大量導入された場合の電圧安定化問題は非常に重要な課題と考えられる。

現在までに、配電系統電圧上昇や電圧変動の対策として、SVR (Step Voltage Regulator)やLRT

\* 東北学院大学大学院電気工学専攻

\*\* 東北学院大学工学部電気情報工学科

(Load Ratio control Transformer)などが実用化されているが、再生可能エネルギー発電の多様な条件に対処することが難しく、秒オーダーの電圧激変に追従できない欠点がある。一方、再生可能エネルギー発電が導入された配電系統の電圧安定性を向上するためには、STATCOM (Synchronous Static Compensator) <sup>[1]-[5]</sup> や SVC (Static Var Compensator) <sup>[6][7]</sup> などのパワエレ機器が有望とされている。文献[1]、[2]では、STATCOM による風力発電が接続された配電系統において、STATCOM による電圧安定度向上効果が検討され、配電系統に太陽光発電が接続された場合における電圧変動及び不均衡に対して、STATCOM を使用することにより効果的な制御ができる事が文献[3]、[4]に示されている。また、[6]、[7]の論文には、大量の太陽光発電が導入された配電系統の電圧が逸脱した場合における SVC の有効性を論じている。

SVC はコスト面では合理的な選択と思われるが、STATCOM に比べ、設置面積が広く、高調波を発生し、電圧アンバランスを補償できないなどの欠点もあげられる。そのため、本論文では、STATCOM を用いて再生可能エネルギー発電が大量導入された将来の配電系統の電圧安定性を図る。

また、将来の配電系統では、STATCOM または SVC の導入だけでは、制御の効率化、コスト面から十分ではないことが考えられる。そのため、配電系統内の利用可能な装置と協調で電圧制御を行うことが望ましい。本論文では、これらの目的を達成するために STATCOM とマイクログリッドによる無効電力の協調制御により配電系統の電圧安定化に関する方法を提案する。我が国の事情を考慮し、一部の太陽光発電は直接系統に接続され、他の再生可能エネルギー発電はマイクログリッド内に導入され、DC/AC インバータを介して系統へ接続されている事を想定する。更に、マイクログリッドはエネルギー貯蔵能力を備えており、系統への有効電力を制御する事も考慮する。本研究では、マイクログリッドは、内部の再生可能エネルギー発電による出力有効電力変動に伴う配電系統電圧の変動を DC/AC インバータの無効電力抑制によって制御され、同時に、STATCOM は配電系統に接続され再生可能エネルギー発電による電圧変動を抑制する。

本論文では、小容量・低コストで比較的簡単な構造を有する STATCOM モデルを採用している。

マイクログリッドモデルは、再生可能エネルギー発電と電力貯蔵装置が接続されている直流母線と系統連系用交流母線から構成されており、DC/AC インバータを介して相互接続されている。配電系統モデルは、既存の配電系統に大量の太陽光発電が接続されており、将来の日本の配電系統を想定している。そして、STATCOM とマイクログリッドの制御系を提案し、PSCAD/EMTDC を用いて、提案した STATCOM とマイクログリッドのモデルを作成し、デジタルシミュレーションによって配電系統の電圧安定化効果を検討し、確認する。

## 2 STATCOM・マイクログリッドモデル

### 2.1 STATCOM モデルの構成

高圧送電システムで使用される STATCOM 技術は十分な研究がされており、現在すでに実用段階である。しかしながら、STATCOM を配電系統へ適用する場合、低コスト・構造の簡単化・省スペースなどのような設計が必要となり、高電圧送電用 STATCOM の構成を使用することは実用的ではないと言われている<sup>[10]</sup>。このような状況を考慮し、本研究では、既存の大容量・高電圧の STATCOM の技術に基づき、図1に示す配電系統用の STATCOM 構成を提案する<sup>[3][4]</sup>。

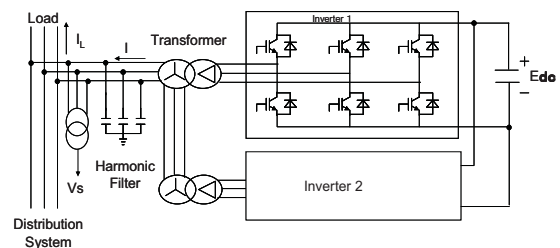


図1 STATCOM 構成

作成した STATCOM の特性を以下に示す。

- ① 配電系統に設置する STATCOM が小容量であることを考慮して変換器の台数を2多重まで減らした。また、一般的な変圧器を使用することにより低コストを図る。
- ② IGBT スイッチング素子を用いて、PWM 制御を行う従来型電圧インバータ変換器を使用する。
- ③ AC フィルタの小容量化

配電系統に一か所または数か所に接続される。STATCOM は設置個所の電圧を制御するように無効電力を吸収または注入する。

## 2.2 マイクログリッドモデルの構成

現在導入されている再生可能エネルギー発電のほとんどは、電力網へ直接接続をされている。この方法は導入コストを低くすることができる。しかし、再生可能エネルギー発電は、不確実性があり出力が変動するため電力システムの管理及び制御が非常に複雑で困難となる傾向があり、電力システムの管理の観点から再生可能エネルギー発電の直接接続の増加は望ましくない。従って、将来的には、再生可能エネルギー発電の多くがマイクログリッドの一部として導入され、電力システムへ接続されると考えられる。その場合、再生可能エネルギー発電の電力変動がマイクログリッドで適切な電力制御・エネルギー貯蔵により安定化され、配電系統への悪影響が軽減できる。

マイクログリッドは、負荷とマイクロ電源などで構成される小規模なエネルギー供給網であり、熱や電力を供給している。これらのマイクロ電源は、風力発電、太陽光発電またはディーゼルタービン・ガスタービンなどのコジェネレーションとなっている。マイクログリッドは、一般的にエネルギー管理・電力制御・電圧制御の機能を持っており、独立運転または系統連系運転が可能である。

本論文のマイクログリッドモデルは、DC/AC インバータにより相互に接続されている直流母線と交流母線から構成される。マイクログリッド内の再生可能エネルギー発電及びバッテリーは、電力変換器を介して直流母線に接続され、交流負荷が交流変圧器を通して配電系統に接続している交流母線に接続されることを想定している。マイクログリッド内部では、電力変換器出力および蓄電電力を適切に制御することにより、直流母線電圧を安定させることができるため、直流母線から交流母線への有効電力出力も制御できる<sup>[11]</sup>。従って、本研究では、直流母線を電力の可変制御可能な定直流電源と簡略化した。また、DC/AC インバータモデルの詳細は、パワーエレクトロニクス技術に基づく6ブリッジ交流3相電圧型PWMインバータを採用しており、これが接続点の無効電力を制御することにより電圧の安定化が実現される。

## 3 制御システム

今回、提案する電圧制御方式は以下のことを考慮して考案した。

A) 配電系統電圧は、以下の2つの原因で変動する：(1)配電系統に直接接続された再生可能

エネルギー発電の出力変動；(2)およびマイクログリッド出力有効電力の変化。配電系統電圧は、(1)(2)の原因により変動するため、これら2つの影響を軽減することにより配電系統電圧の安定化を実現できる。

B) (1)による電圧変動に対してSTATCOMを用いて補償する。

C) (2)による電圧変化は、マイクログリッドの無効電力制御により対応する。

### 3.1 STATCOM 制御系

STATCOMの制御系は、図2に示すように構成され、2つの制御ブロックからなる。

#### ① 交流電圧一定制御

配電系統電圧の低下及び変動を軽減するために、STATCOMにより配電系統電圧の実効値(r.m.s)を指令値に追従するように制御をする。

#### ② 直流電圧一定制御

STATCOM 直流側のコンデンサの直流電圧を維持するための制御である。STATCOMが無効電力制御に伴ってコンデンサの直流電圧も変動するため、STATCOM装置全体の連続的な運転にこの制御が必須である。

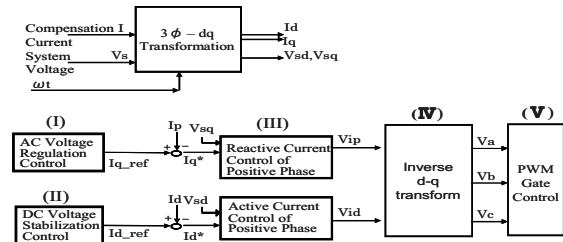


図 2 STATCOM 制御系

### 3.2 マイクログリッド制御系

マイクログリッドの制御系は、STATCOMの制御系と同様な構成となっている。ただし、制御の目的と使用する信号は異なり、以下で説明する。

#### ① 直流母線電圧安定化制御

再生可能エネルギー発電によるマイクログリッド内の直流母線における電圧変動と偏差を抑制する。この制御は、マイクログリッド内のバッテリーの電力制御と協調で動作する。DC/ACインバータから配電系統へ送られる有効電力は、指令値 $P_{in}$ により設定される。

#### ② 交流電圧安定化制御

無効電力を制御し配電系統電圧を安定化させる。この制御ブロックは、配電系統電圧とその指令

値の偏差を計算した後、PID 制御によって無効電力指令値  $Q_{ref}$  が得られ、最終的な無効電力指令値  $Q$  は下記の無効電力最大出力制御により決定する。

(a) 出力可能な無効電力容量の計算式

$$Q_{in\_max} = \sqrt{S_{in}^2 - P_{in}^2} \quad (1)$$

ここで、 $S_{in}$ :インバータ容量、 $P_{in}$ :出力有効電力

(b)  $Q_{in\_max}$  が  $Q_{ref}$  よりも大きい場合、 $Q_{ref}$  は最終の指令値  $Q$  として使用され、一方、 $Q_{in\_max}$  が  $Q_{ref}$  よりも小さい場合、最終指令値  $Q$  は指令値  $Q_{in\_max}$  となる。

## 4 シミュレーション条件

### 4.1 配電システムシステムモデル

図3にシミュレーションで使用した配電システムモデルを示す。このモデルは、配電システムの母線には6フィーダが接続されていると仮定をした。その内5フィーダに関しては、配電線の簡略化のために簡易的モデルとした。今回は、1フィーダに着目して詳細モデル化をした。住宅は、それぞれ #1,#2,#4,#5,#7,#8 および#9 のノードに接続されている負荷で模擬し、住宅の内ノード#5,#7,#8,#9 には、太陽光発電がグリッドに直接接続されている。また、容量 250kVA のマイクログリッドがそれぞれノード#3,#6,#10 に接続されている。パラメータは図3に示されている。STATCOM は、タップ切換を行っており電圧逸脱しやすいノード#6 に接続されている。配電システムの太陽光発電のモデルは、可変電源を使用しており MPPT (Maximum Power Point Trace)制御を考慮した構成となっている。太陽光発電量は、東北学院大学多賀城キャンパスに設置されるクリーンエネルギー発電装置で計測した日射量データを使用し出力を計算した。すべての太陽光発電の日射量データは同じデータを使用しており、50kW が出力され、22~40 秒には最小 28kW まで出力が減少する。

### 4.2 STATCOM の使用とパラメータ

シミュレーションで使用した STATCOM の仕様を表1に示す。STATCOM の容量は、配電システムの電圧を低圧換算した場合に  $101 \pm 6V$  以内に抑制し、かつ配電システムの電圧上昇を緩和するという条件を満たすように、500kvar と設定している。

### 4.3 マイクログリッドの動作条件

マイクログリッド内の再生可能エネルギー発電電力がエネルギー貯蔵装置を使用することにより制御できることを考慮し、マイクログリッドから配電システムへの有効電力が安定して変更することができる想定し、以下のように設定した。

150kW(0~30 秒)→180kW(30~50 秒)  
→130kW(50~60 秒)

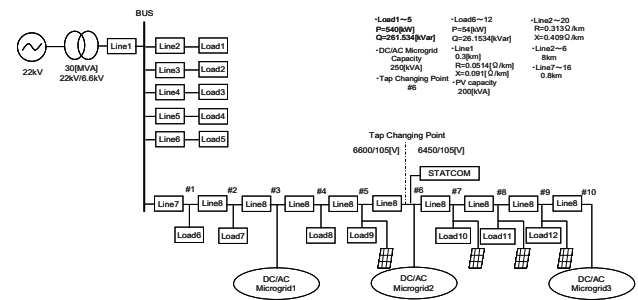


図 3 配電システムモデル

表 1 STATCOM パラメータ

定格容量	500 kVA	周波数	50 Hz
交流電圧容量	6.6 kV	直流電圧容量	0.3375 kV
交流電流容量	0.0435 kA	直流キャパシタ	12 mF
PWM パルス	100	交流フィルタ	50 $\mu$ F
変圧器	Y- $\Delta$	使用素子	IGBT

## 5 シミュレーション結果

STATCOM とマイクログリッドによる協調制御の効果を検証するため、デジタルシミュレーションにより検証を行った。この研究では、以下の2つの問題について検証をした。

- 1) 協調制御により効率よく電圧を安定化させ、電圧基準値を満たすことができるかの確認。
- 2) STATCOM とマイクログリッドの間で干渉が起きている場合、予期しない動作を発生する可能性があるため、干渉を起こしているかどうかの確認。

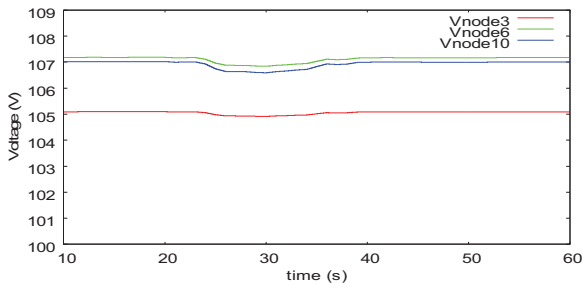
### 5.1 配電システムの電圧

電圧安定化の効果の確認のために、主ノード(#3,#6,#10)の電圧波形を示す。比較のために、無効電力制御を使用しない場合の波形を図4(a)、無

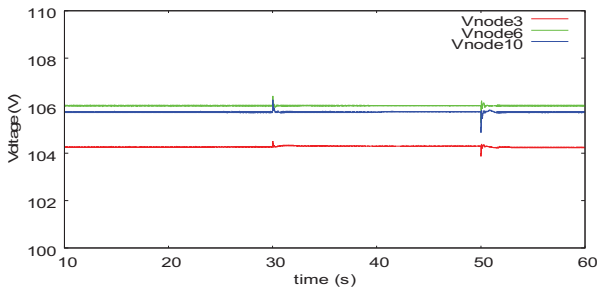
効電力制御を使用した場合の波形を図 4(b)に示す。図4より、無効電力制御のない場合の図 4(a)では、母線#6 と#10 の電圧が明らかに規定の許容範囲  $101\pm 6V$  を逸脱しており、一方、無効電力制御のある場合の図 4(b)では、すべての母線電圧が許容範囲以内に抑制され、かつ電圧偏差も顕著に向上されていることが確認できる。

## 5.2 無効電力出力

STATCOM 出力無効電力波形を図5、マイクログリッド出力無効電力を図6に示す。



(a) 制御無しの場合の配電電圧波形



(b) 制御を使用した場合の配電電圧波形

図 3 ノード#3,#6,#10 の電圧波形

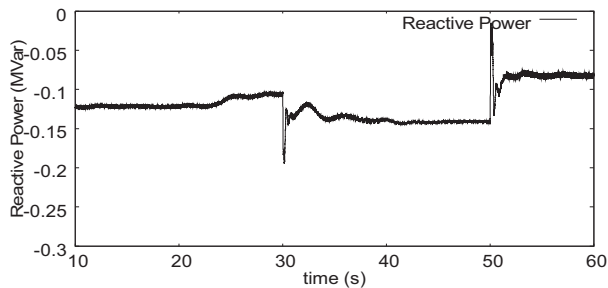


図 4 STATCOM 出力無効電力

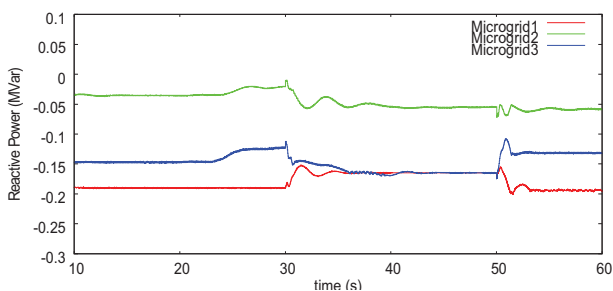


図 5 マイクログリッド出力無効電力

これらの図から、STATCOM とマイクログリッドは、太陽光発電とマイクログリッドの有効電力増加による配電系統の電圧上昇を低減するように無効電力を吸

収していることが確認できる。また、30~50 秒の間にマイクログリッドの有効電力が増加する一方、配電系統から供給される有効電力が減少し、ノード#6 の電圧が上昇傾向にあるため、そのノード電圧を一定に保つために、同ノードに設置される STATCOM が無効電力を多く吸収するように迅速に動作し、同時に同じ場所に接続されているマイクログリッド 2 も無効電力吸収量を増加させる。30 秒の前と後の電圧を考えた場合、配電線に流れる有効電力の変化により#10 の電圧が増加し、#3 の電圧が減少する。これは、図7に示すマイクログリッドの交流電圧波形から確認できる。また、これらの電圧変化にตอบสนองし、ノード#3に接続しているマイクログリッド 1 は無効電力吸収量を減らし、逆にノード#10に接続しているマイクログリッド3が無効電力吸収量を増加していることが確認できる。なお、STATCOM の無効電力変化後には過渡現象が生じているが、制御システムの最適化により向上できると考えられる。

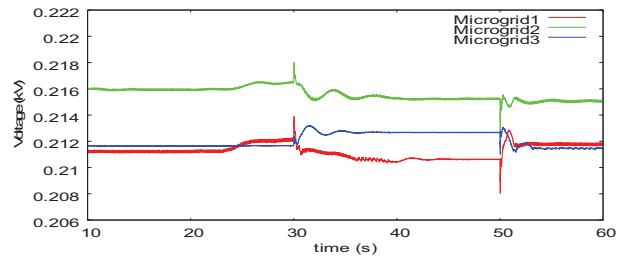


図 7 マイクログリッドの交流電圧波形

## 5.3 マイクログリッドの交流電圧

図7にマイクログリッド側の交流電圧波形を示す。交流電圧は、有効電力変化の影響によって多少変動しているものの、適切に制御され、 $202\pm 20V$  内に収まっていることが確認できる。また、30~50 秒の間では、マイクログリッドからの有効電力変動により、各々のノードに設置されるマイクログリッドの交流電圧も異なる変化を示しているが、すべてのマイクログリッドは、適切な無効電力制御を行うことによって設置点の電圧を一定の範囲に安定化させている。

## 6 まとめ

本論文では、再生可能エネルギー発電を配電システムに導入した場合における電圧品質低下問題に対処するため、STATCOMとマイクログリッドの協調制御により無効電力を制御する方法を提示した。

本研究では、配電システムに適すると思われる、コストが低く簡単な構造を有する STATCOM モデルを設計し、配電システムの電圧を安定化させるための STATCOM とマイクログリッドの制御系を提案した。提案した制御系では、配電システムの電圧変動を設置点のローカル信号を用いて STATCOM とマイクログリッドの協調的な無効電力制御によって安定化する。さらに、日本政府による再生可能エネルギー発電の導入目標に基づき想定された導入率の太陽光発電および典型的なマイクログリッドを導入した配電システムモデルも作成し、提案した STATCOM モデル、マイクログリッドモデルおよび制御系を用いて、シミュレーション検討を行なった。その結果、提案した STATCOM とマイクログリッドによる協調制御により、配電システムの電圧およびマイクログリッド電圧の両方を適切な範囲に制御できることが確認できた。

## 謝辞

この研究の遂行において、本学から卒業し、現在東北電力株式会社で務めている高田様と中鉢様の多大なる貢献に感謝をいたします。

## 参考文献

- [1] A.M. Sharaf, W. Wang, I.H. Atlas, Novel STATCOM Controller for Reactive Power Compensation in Distribution Networks with Dispersed Renewable Wind Generation. *Int. Journal of Emerging Electric Power Systems*. Vol.8, Issue 3, 2007: No.6
- [2] C. Han, A.Q. Huang, M. Baran, S. Bhattacharya, W. Litzemberger, L. Anderson, A.L Johnson, I A.-A Edris, STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power System. *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.1, 2008: 226 – 233
- [3] Y.Takada, G.Wu, A Study of Quality Enhancement by introduction of STATCOM in Distribution System with Dispersed Generations. In: *Proc. Int. Conf. on Electrical Engineering*, Kanazawa, Japan, 2012:876–881.
- [4] G.Wu, K.Chubachi, C.H. Huang, L. Kang, An

Approach to Voltage Quality Improvement by Introduction of STATCOM for Distribution System with Renewable Power Generations. In: *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia*, Tianjin, China, 2012: No. 156953649, p6.

[5] W. Qiao, R.G. Harley, G.K. Venayagamoorthy, Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming. *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol.24, 2009: No.2

[6] D.Iioka, K.Sakakibara, Y.Yokomizu, T.Matsumara, M.Norihisa, Distribution Voltage Rise at Dense Photovoltaic Power Generation Area and its Suppression by SVC. *IEEJ Trans. PE*, Vol.126 No2, 2006:153-158 (in Japanese)

[7] T. Kondo, J. Baba, and A. Yokoyama, Voltage Control of Distribution Network with a Large Penetration of Photovoltaic Generations using FACTS Devices. *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.3, 2006: 347-358 (in Japanese)

[8] A.G. Madureira, J.A. Peças Lopes, Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids. *Journal of IET Renewable Power Generation*, Vol. 3, Issue 4, 2009: 439–454

[9] T.Fuji, S.Funabashi, N.Morishima, M.Azuma, H.Teramoto, N.Lio, H.Yonezawa, D.takayama, Y.Shinki, A  $\pm 80$ MVA GCT STATCOM for the kanzaki substation. In: *Proc. IPEC-Nigata*, 2005:1299-1306

[10] The Power to Change - Stabilizing grids and enabling renewable power generation with PCS 6000 STATCOM. *ABB Review Jan. 2010:16-19.*

[11] G. Wu, S. Kodama, Y. Ono, Y. Monma, A Hybrid microgrid System Including Renewable Power Generations and Energy Storages for Supplying both the DC and AC Loads. In *Proc. Int. Conf. Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2012)*, No.ISS-6, Nagasaki, Japan, 2012: p6