

太陽光発電を大量に配電系統へ導入するための STATCOM による電圧品質改善に関する研究

A Study of Voltage Quantity Enhancement by STATCOM for Facilitating the
Integration of Large Amount of Dispersed PV Generations to Distribution Grid

中鉢 和寿^{*1}
Kazutoshi CHUBACHI *

高田 裕真^{*2}
Yuma TAKADA *

呉 国紅^{*3}
Guohong WU *

Abstract

Along with the increasing common concerns on global warming and exhaustion of fossil fuels, renewable energy generation is paid great attentions and may be rapidly introduced into the existing power grid not only at the power transmission network sides but also at the distribution feeder sides. However, with more and more renewable energy generations being integrated into the distribution system, the power fluctuation of these generations may cause some problems in distribution voltage and then aggravate the power supply quantities. For this purpose, in this work, we have made an approach aiming at obtaining mitigation effects of both rise and imbalance in the distribution voltage, which is caused by integration of large amount of PV generations, by use of a single STATCOM device - one type of the FACTS (Flexible AC Transmission System) devices based on the application of power electronic technologies. STATCOM model and its control systems, which have the functions of both mitigating the voltage fluctuations and compensating the voltage imbalances, are designed and introduced into a typical power distribution system model with large number of PV generations at the load sides. Simulation results have illustrated that the application of the designed STATCOM can bring about satisfied improvement of rise and imbalance in the voltage simultaneously for a distribution system with renewable energy generations.

キーワード： STATCOM, 太陽光発電, 配電系統, 電圧上昇, 不平衡電圧, 電圧品質

Key Words： STATCOM, PV, distribution grid, rise in voltage, voltage imbalance, voltage quantity

1. はじめに

近年, 地球環境問題やエネルギーセキュリティ問題に伴い, 分散型電源の普及が急速に進んできている。特にわが国では, 2020 年までに温室効果ガスの排出量を 90 年比で 25%削減することが掲げられており, 東日本大震災後に原子力発電の安全性も懸念され, 太陽光発電をはじめ再生可能エネルギー発電の更なる普及と系統連系の増大が見込まれる。しかしながら, 再生可能エネルギー発電は環境に優しいことや燃料が無尽蔵である一方, 自然条件に左右され不安定といった短所もあり, 大量に配電系統に連系された場合に配電系統における電圧問題が起こり得る。また, 現在の配電系統の大部分は, 負荷側に電源が接続され

ない状態で適切な電圧制御により, 各相のバランスをとれるように設計されているが, 今後の配電系統では, 急速な導入が進む負荷側の住宅用太陽光発電による電圧上昇や, 相間への導入量の偏りによる不平衡電圧の増加が生じる恐れがある。更に, 従来からも存在する不平衡負荷に起因する不平衡電圧等が加えられた場合には, 配電系統の各相の電圧が規定値を逸脱することも考えられ, 電力品質の低下を招くことが懸念される。この問題に対し, 現存の制御方式では電力品質の確保が困難だと思われる⁽¹⁾。

太陽光発電の大量連系による配電系統の電圧上昇問題に対して, 今までは, 新たな配電系統電圧制御方式⁽²⁾や FACTS (Flexible AC Transmission System) 機器の一種である SVC (Static Var Compensator) による電圧制御⁽³⁾⁽⁴⁾が研究されている。しかしながら, 定常状態に着目した配電系統電圧制御方式は過渡的な電圧変動への対応が困難といった課題が存在する。また, SVC は配電系統に設置する上でコストの面から妥当だと考えられるが, 設置面積が大きい上に高調波を発生するといった短所もある。

^{*1} 東北学院大学工学部大学院生
(〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1)
e-mail: wugh@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

^{*2} 東北学院大学工学部大学院生

^{*3} 東北学院大学工学部教授
(原稿受付: 2012 年 11 月 26 日)

その上、系統電圧が低下する際に電圧補償効果も低下することや、不平衡電圧の抑制効果への期待も難しいことが挙げられている。一方、SVCと同様に FACTS 機器である STATCOM (Static Synchronous Compensator) は迅速な電圧制御が可能であるという利点を持つ。また、系統事故などに伴って系統電圧が低下する際の電圧維持能力が高く、騒音及び振動が少ないといった特長もっており、設置面積や高調波対策の面からも配電系統への多数の設置に適していると考えられる⁽¹⁾⁽⁵⁾。コストの面では、SVC よりも増加するが、配電用のため多重化段数の削減によりコスト軽減が可能と考えられる。また、送電系統用 STATCOM 技術は既に実用化されている段階であり⁽⁶⁾、このタイプの STATCOM の電圧制御による電圧上昇や不平衡電圧の抑制効果も確認されている^{(7)~(9)}。そのほか、実験的に検証されている配電用ものはトランスレス方式もある⁽¹⁰⁾。ただし、今までの検討では、送電系統または特別負荷用 STATCOM 技術の開発に重点を置いており、従来の系統モデルを用いた研究が多く、太陽光発電等の再生可能エネルギー発電を考慮した配電系統における電圧変動、電圧上昇および不平衡電圧の抑制効果などについては、更なる検討が必要と思われる。

そこで本論文では、パワーエレクトロニクス分野で広く利用されている PSCAD/EMTDC を用いて、将来的に考え得る太陽光発電を大量に導入された配電系統モデルを作成し、配電系統における太陽光発電による電圧上昇と負荷不平衡を加味した電圧不平衡を、一台の STATCOM によって同時に抑制することを研究目的とした。そのため、電圧制御による電圧変動並びに電圧上昇の抑制の他に、不平衡電圧抑制制御を付加した STATCOM モデルを構成し、太陽光発電を大量に導入された配電系統モデルを用いてシミュレーションを行なった。また、STATCOM の配電系統設置を考慮して、電力変換器の多重化段数を極力減らすという手法を用いてコストの低減を図った。STATCOM による電圧変動および高調波抑制効果については、今までの研究では検討されていたが^{(6)(7)(11)~(13)}、本論文では、配電用 STATCOM による太陽光発電が大量に導入された配電系統の電圧上昇並びに不平衡電圧の抑制効果を重点的に考察し、太陽光発電の配電系統への導入を促進するための技術検討を行なった。

2. STATCOM モデル

2.1 主回路構成

今回作成した STATCOM の主回路構成を図 1 に示す。現在、わが国で導入されている STATCOM は主に送電系統に設置したものであり、電力変換器の多重化方法として直列多重方式が採用されている。本研究では、この方式の製造技術が既に確立され、導入実績もあることを考慮し、単純に小容量化したものを考えて直列多重方式を採用した。また、送電系統に導入される一般的な STATCOM は、移相変圧器や千島結線変圧器を用いて実回路上で電力変換器に移相差を設けて直列多重化する方法を用いるが、変圧器の構成が複雑でコストが高いことなどが挙げられ、配電系統への設置は困難と考えられる。そのため、本論文で

作成した STATCOM は図 1 に示すように、Y- Δ 結線を有する一般的な変圧器を用いて、直流側に並列接続している 2 台の自励式変換器が交流側では 2 台の変圧器の Δ 結線にそれぞれ接続し、系統側の Y 結線を直列に接続する簡素な直列多重の回路構成とした。STATCOM を多重化する理由としては、自励式変換器の発生する高調波の低減や、容易に全体容量の増減が可能であるといった利点が挙げられる。この利点は変換器の多重数に比例して効果が高くなるが、変換器の増加がコスト増に繋がるため、本研究では、通常送電系統に設置される大容量の STATCOM が 6~8 多重であることに對し、配電系統設置による STATCOM 容量の小容量化、さらに新型オンオフ制御デバイスの採用による高調波低減も考慮して、変換器の台数を 2 多重までに削減した。また、本論文の STATCOM モデルは、各変換器の位相差を PWM 制御の搬送波を多重数に反比例させて移相するキャリア多重変調法を用いて多重化する方法を採用しており、主変換器の構成は一般的な電圧形インバータとした。

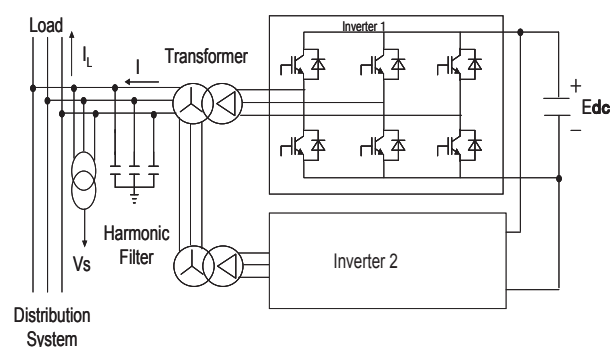


Fig.1. System Configuration of STATCOM

2.2 STATCOM の仕様

表 1 に本論文で作成した STATCOM モデルの仕様を示す。STATCOM の定格容量は、太陽光発電による電圧上昇を抑制でき、更に電圧不平衡率を 3% 以下に十分補償可能なものとして 1[MVar] に決定した。また、定格交流電圧は配電系統と同様に 6.6[kV] とした。なお、変圧器のインピーダンスは 0.2[p.u] と設定し、27.73[mH] となる。

配電系統用 STATCOM は多重化および新型オンオフ制御デバイスの採用により高調波の配電系統への影響が軽く、高調波フィルタの容量の削減が可能であるため、本研究では小容量のフィルタ (40[μ F]) を使用する。また、スイッチングデバイスとしては、送電系統に導入される STATCOM の場合は一般的に定格容量の高い GTO を採用することが多いが、本研究では配電系統設置のため容量が比較的小さく、さらに近年スイッチング周波数の高い IGBT の大容量化が目覚ましいことを考慮して、IGBT を採用することにした。

2.3 STATCOM の制御系

2.3.1 制御系の全体構成

作成した STATCOM の制御ブロックを図 2 に示す。制

御系は以下の 2 つの機能を有する。

Table 1 Specifications of STATCOM

Rated Capacity	1[MVar]
Rated AC Voltage	6.6[kV]
Rated DC Voltage	0.675[kV]
Winding Factor of Transformer	6.6/1.083[kV]
Rated AC Current	0.0875[kA]
Frequency	50[Hz]
DC Capacitor	8[mF]
Carrier Frequency	5000[Hz]
Multiplex Layer	2
Transformer	Y-Δ
Impedance of Transformer	27.73[mH]
Harmonic Filter	40[μF]
Power Device	IGBT

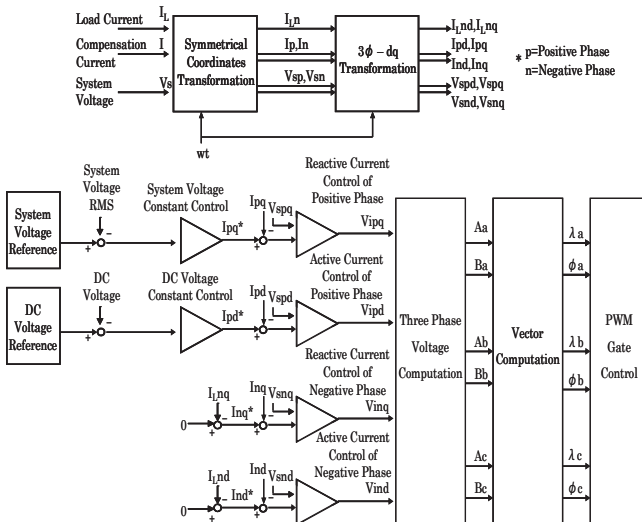


Fig.2. Block Diagram of Control System for STATCOM

- 1) 系統交流電圧+直流電圧安定化制御
- 2) 不平衡電圧抑制制御

太陽光発電による電圧上昇や直流電圧安定化を 1)の機能で対処し、異なる相間に接続する太陽光発電や負荷不平衡などによる不平衡電圧を 2)の機能で対処する制御系である。図 2 から分かるように、不平衡電圧補償を行うためには、フィード電流の逆相成分による配電系統電圧への影響を STATCOM が打ち消すように動作する。そのために、本論文では対称座標法を用いて必要な各電圧と電流を正相と逆相に分離し、さらに三相-二相変換により正相と逆相をそれぞれの有効成分と無効成分に分離する。次に、交流電圧制御のための q 軸電流指令値に実際の q 軸出力電流を高速追従させる非干渉電流制御を行い、必要な無効電力を出力する。また、直流コンデンサ電圧を維持するために d 軸出力電流を制御して変換器の有効電力損失分を正相制御部分より系統から補償し、直流電圧が一定となるように制御する。逆相部分は系統電圧の逆相成分を打ち消す

ように無効電力成分を変化させ不平衡電圧を補償するように同様の制御を行う。

以上の電流制御より得られた電流指令値から正相と逆相のインバータ電圧指令値を算出し、三相電圧演算により正相と逆相の成分を各三相ごとに合成する。その合成値より三相電圧の指令値を求め、PWM ゲート制御部で搬送波と比較して PWM パルスを作り、インバータのゲートに出力する。

2.3.2 三相-二相変換及び dq 変換

三相-二相変換は三相の各電圧と電流を有効成分と無効成分の二相に分離する変換方式であり、dq 変換（回転座標変換）はそれらを回転座標により直流量に変換する方式である。両者とも、三相自励式変換器に比較的に多く使用される変換方式であり、d 軸および q 軸の定義によって異なる変換行列式を使用する。以下に本研究で使用した三相-二相変換および正相と逆相の dq 変換行列式を示す。

補償電流を例に挙げて演算すると、三相-二相変換は式(1)のように表され、正相の dq 変換は式(2)となる。また、逆相の dq 変換は式(3)である。

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{pd} \\ I_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) & \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ -\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) & \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_{nd} \\ I_{nq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) & -\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) & \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

ここで、 ωt は系統電圧の位相を表す。また、本論文では ωt より $\pi/2$ 引くことにより母線ベクトルを d 軸に設定した。なお、dq 変換後の d 軸は有効成分、q 軸は無効成分となる。これらの変換方式により三相交流電圧と三相交流電流をすべて有効成分と無効成分に分離し、直流量に変換する。

2.3.3 非干渉電流制御

図 2 において、電圧安定化や不平衡電圧制御のための正相と逆相の電流指令値から PWM への電圧指令値を計算する必要がある。ここで、図 3 のような STATCOM の系統連系モデル図を用いて正相成分を例として電流指令値から電圧指令値への計算式を導く。

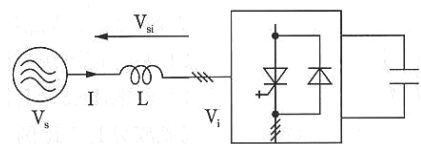


Fig.3. System Connected with a STATCOM

図 3 において、系統電圧 V_s と STATCOM の出力電圧 V_i の関係は式(4)で表現できる。式(4)に上述の dq 変換と逆 dq 変換を用いて整理すると、(5)式が得られる。逆相成分も同様に処理して、式(6)のような正相と逆相における

系統電圧及び電流から STATCOM の出力電圧への計算式

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

$$\begin{cases} V_{id} = V_{sd} - \left(L \frac{d}{dt} I_d - \omega L I_q \right) \\ V_{iq} = V_{sq} - \left(L \frac{d}{dt} I_q + \omega L I_d \right) \end{cases} \quad \dots (5)$$

$$\begin{aligned} V_{ipd} &= V_{spd} - \left(L \frac{d}{dt} I_{pd} - \omega L I_{pq} \right) \\ V_{ipq} &= V_{spq} - \left(L \frac{d}{dt} I_{pq} + \omega L I_{pd} \right) \\ V_{ind} &= V_{smd} - \left(L \frac{d}{dt} I_{nd} + \omega L I_{nq} \right) \\ V_{inq} &= V_{snq} - \left(L \frac{d}{dt} I_{nq} - \omega L I_{nd} \right) \end{aligned} \quad \dots (6)$$

が得られる。ただし、

V_{ipd} , V_{ipq} , V_{ind} , V_{inq} : それぞれ STATCOM の出力電圧目標値の d 軸と q 軸の電圧正相成分及び逆相成分；

V_{spd} , V_{spq} , V_{smd} , V_{snq} : それぞれ測定した系統電圧の d 軸と q 軸の電圧正相成分及び逆相成分；

I_{pd} , I_{pq} , I_{nd} , I_{nq} : それぞれ STATCOM の出力電流指令値の d 軸と q 軸の電流正相成分及び逆相成分

次に上記の非干渉電流制御で得られた出力電圧目標値の正相成分と逆相成分を用いて、式(7)～(9)の計算により出力電圧目標値の三相成分を合成する⁽⁹⁾。

$$\begin{bmatrix} A_a \\ B_a \\ A_b \\ B_b \\ A_c \\ B_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ipd} \\ V_{ipq} \\ V_{ind} \\ V_{inq} \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

$$\lambda = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{B}{A} \quad \dots (8)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ia}^* \\ V_{ib}^* \\ V_{ic}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda a \sin(\omega t + \phi_a - \frac{\pi}{6}) \\ \lambda b \sin(\omega t + \phi_b - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}) \\ \lambda c \sin(\omega t + \phi_c - \frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{6}) \end{bmatrix} \quad \dots (9)$$

3. 配電系統モデル

3.1 モデル構成

図 4 にシミュレーション用配電系統モデルを示す。配電用変電所より上位系統を電源で模擬し、配電用変電所、配電系統を通して複数の電力需要家に電力を供給する基本構成となっている。ここで、配電用変電所は 3 バンク

を想定し、うち 2 バンク分を Load1 と Load2 で模擬して、1 バンクのみを着目する。配電用変電所 1 バンクあたりの定格容量を 30[MVA]とし、1 フィーダあたりの定格容量を 3[MVA]として 10 フィーダとした。配電用変電所の巻線比は、二次側の送電による電圧降下を考慮した上で BUS2 地点の配電系統電圧が 6.66[kV]になるように決定した。各変圧器のインピーダンスはともに 0.2[p.u]に設定している。

需要家負荷(Load12~load21)については、複数の需要家をまとめて等価的に模擬し、1 基あたりの負荷容量を 300[kVA] (線間ごとの容量は 100[kVA]) とした。太陽光発電容量は、2030 年に我が国の太陽光発電の導入目標 5300 万[kW]を考えた時の導入率に基づき、住宅用太陽光発電 3[kW]が 1 フィーダに 200 基導入されることとして算出され、フィーダ全体で 600[kW]とし、多数の太陽光発電装置の相間への導入量にある程度偏りがあることを考慮して、導入率を ab 間 38%, bc 間 24.5%, ca 間 37.5% として Node5 から各線間に配分することを想定した。

また、シミュレーション条件として、従来の配電系統で起こり得る負荷不平衡を考慮した上で、各線間の負荷率を ab 間 16.5%, bc 間 33%, ca 間 33% (力率は各相ともに 0.95) とした。これにより、負荷不平衡と太陽光発電両者により実際に生じる得る不平衡電圧状態を模擬する。

本研究では、図 4 に示す配電系統モデルにおいて太陽光発電によるフィーダの電圧上昇と負荷不平衡を加味した電圧不平衡を 1 台の STATCOM によって抑制することを図る。配電系統電圧規定値は法規により低圧需要家電圧で 101±6[V]であり、電圧不平衡率は一般的な管理基準として 3%を指標とする。なお、STATCOM の設置箇所はタップ切り替え地点である Node6 とした。

3.2 太陽光発電出力と不平衡負荷

図 5 に実測した日射強度に基づいて、MPPT 制御を考慮した上で日射強度に比例して計算されたノード一当たりの太陽光発電の有効電力を示す。なお、日射強度は東北学院大学工学部クリーンエネルギー実験室にて測定した 2011 年 5 月 1 日の晴天時における 12 時～12 時 30 分の間のデータの一部(測定刻み時間は 1 秒)を使用した。また、各線間に連系された太陽光発電に入力される日射強度は各線間とも同一のものを使用する。太陽光発電の各相への配分は太陽光発電による電圧不平衡率の増加が約 1%になるように想定している。また、実際の配電系統で生じ得る不平衡負荷による電圧不平衡率として約 2%を想定し、一基当たりの各線間の需要家負荷を ab 間 15.675[kW], bc 間 31.35[kW], ca 間 31.35[kW]とした。なお、シミュレーション時間は 10[sec]であるため、その間の不平衡負荷による単相の負荷変動は考慮しないこととする。

4. シミュレーション結果および考察

4.1 STATCOM による電圧上昇抑制

本研究では、PSCAD/EMTDC v4.2.1 を用いてシミュレーション検討を行なった。シミュレーションの刻み時間は 5[μsec]と設定した。

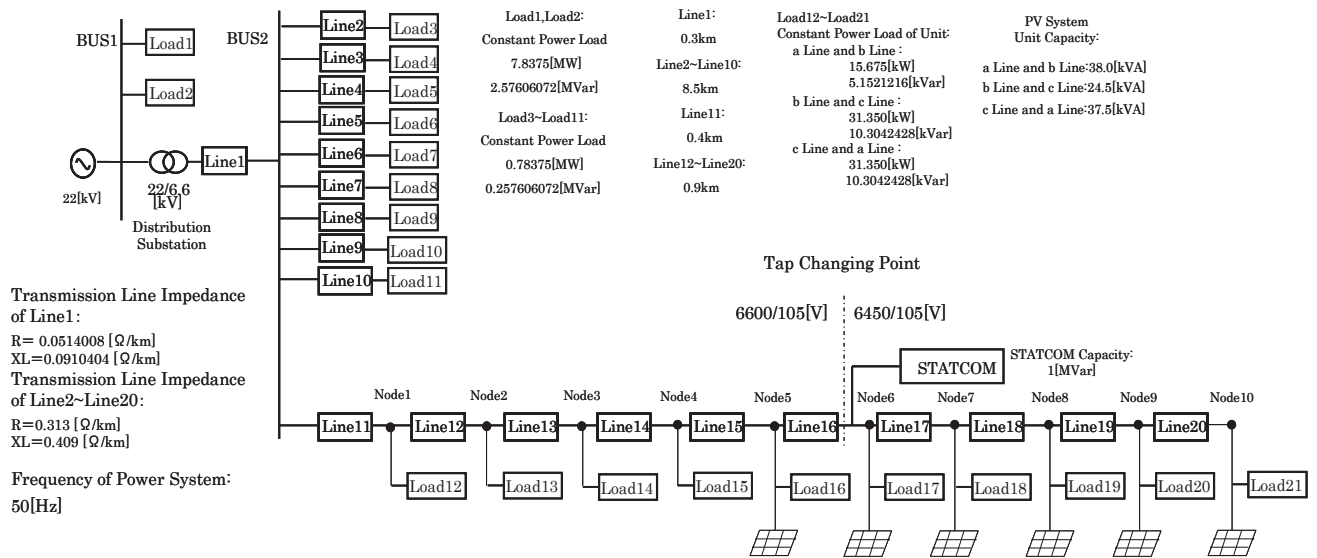


Fig.4. Power System Model

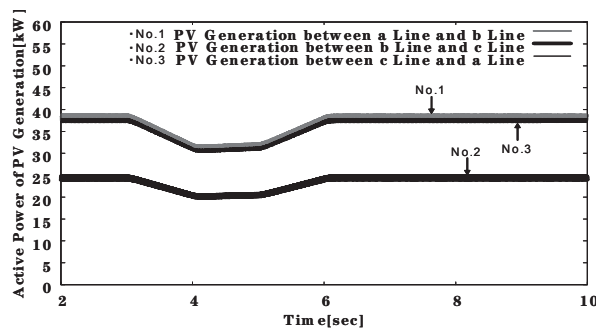


Fig.5. Active Power of PV Generation in Each Node

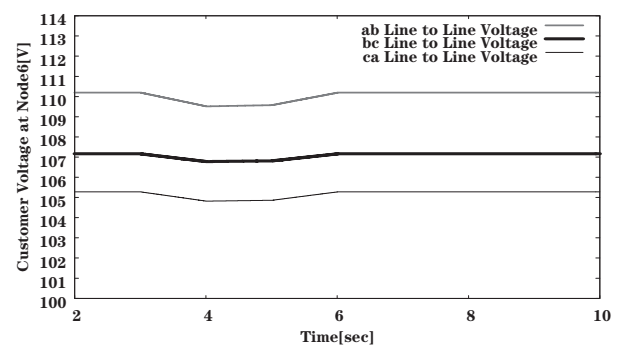


Fig.6. Line-to-Line Voltage (RMS) of Node6 in case without STATCOM

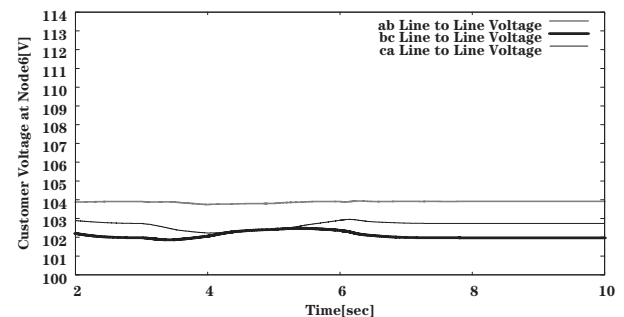


Fig.7. Line-to-Line Voltage (RMS) of Node6 in case with STATCOM

太陽光発電を連系した際に STATCOM を設置しない場合と設置した場合の配電系統母線 Node6 の電圧実効値をそれぞれ図 6、図 7 に示す。図 6 より、STATCOM が設置されていない場合は、ab 間、bc 間の線間電圧が規定値である 101 ± 6 [V]を逸脱し、電圧補償が必要であることが分かる。また、STATCOM の正相交流電圧制御指令値を低圧換算値で 103[V]と設定して得られた図 7 の結果から、各相間に最大 1.2[V]程度の差が生じているものの、各相の線間電圧の平均値は 103[V]の近傍にあることが確認できる。この結果より、どの相においても、補償後の電圧逸脱が無いことから、太陽光発電における電圧上昇問題に対して STATCOM の補償が有効的であると言える。

4.2 STATCOM による不平衡電圧抑制

電圧不平衡は一般的に配電用変電所から遠ければ遠いほど高くなるため、本研究では、不平衡電圧抑制の評価はフィーダ末端 (Node10) で行なう。電圧不平衡時に STATCOM を設置しない場合と設置した場合の Node10 の線間電圧波形をそれぞれ図 8、図 9 に示す。図 8 より、STATCOM を設置しない場合はフィーダ末端の線間電圧が不平衡になっていることが分かる。それに対して、図 9 の STATCOM が設置された場合の波形では線間電圧の不

平衡が軽減できていることが確認できる。更に、定量的に考察するために、式 (10) に示す電圧不平衡率 $K(\%)$ を導入して評価を行った。フィーダ末端の電圧不平衡率を図 10 に示す。

$$K(\%) = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad \dots (10)$$

ただし、 V_1 : 正相電圧; V_2 : 逆相電圧

図 10 より、STATCOM が設置しない場合は、負荷不平

衡および導入率が偏った太陽光発電の両方の影響で、フィード末端の電圧不平衡率が一般的な管理基準である 3%を超えていることが分かる。それに対して、STATCOM が設置された場合は、電圧不平衡率は 2%以内に抑制することができ、最大約 1.5%が改善されている。このことより、この条件では STATCOM が電圧不平衡率で約 50%の補償効果を有することが確認できた。ただし、STATCOM が設置された場合の電圧不平衡率の変化の様子を考察すると、3[sec]直後の 0.5 秒程度の間に、電圧不平衡率が一時的に上昇する現象も現れた。これは、太陽光発電の出力変化による STATCOM の制御遅れによって生じたと考えられる。また、この上昇値は電圧不平衡率で約 0.15%と極めて低く、電圧不平衡率の補償効果の約 10%程度であり、運用上は問題にならないと考える。

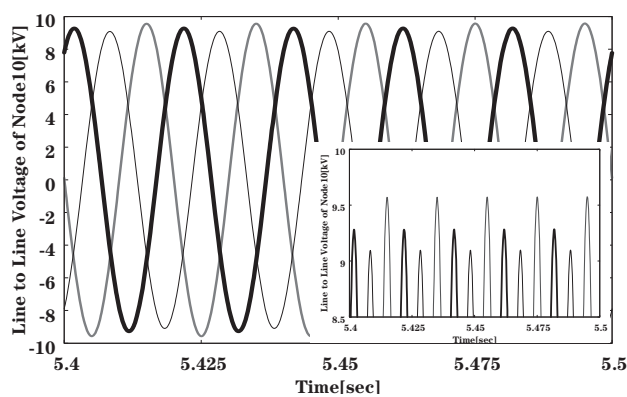


Fig.8. Voltage Wave of Node10 in case without STATCOM

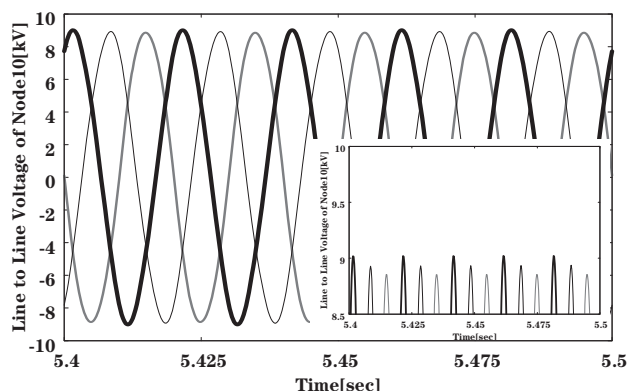


Fig.9. Voltage Wave of Node10 in case with STATCOM

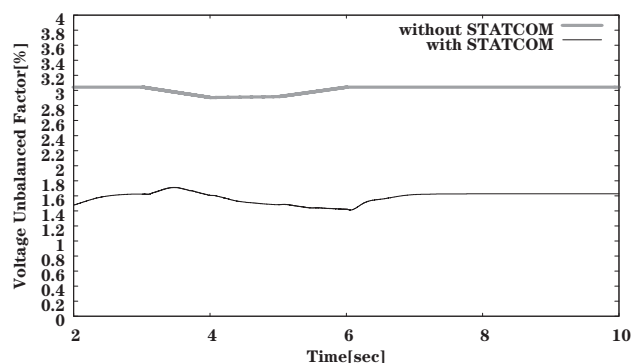


Fig.10. Voltage Unbalanced Factor of Node10

4.3 STATCOM 容量に関する考察

図 11 は電圧上昇抑制および電圧不平衡補償時の STATCOM 各単相の無効電力出力波形である。なお、図 11 において、マイナス無効電力値は STATCOM が配電系統から無効電力を吸収することと定義している。

図 11 の波形を図 6 の STATCOM を設置していない時の配電電圧波形と比べると分かるように、STATCOM は各単相個別に無効電力量を調整して、電圧不平衡に対応し、その上で各相の電圧上昇を補償していることが確認できる。また、現条件下での全体の出力無効電力量は三相の無効電力出力の最大値を合わせて最大約 0.7[MVar]となっていることも分かる。なお、前述のように本研究の STATCOM の定格容量は全体で 1[MVar]であり、単相容量では定格 0.333[MVar]となる。図 11 より b 相の無効電力調整量が約 0.30[MVar]であり、電圧上昇を抑制するために、ほぼ定格上最大の無効電力を吸収していることが分かる。

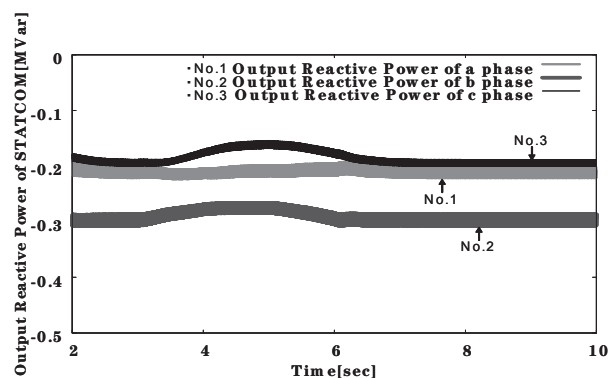


Fig.11. Reactive Power Output of STATCOM

以上の結果より、配電系統において太陽光発電の短時間の出力変動および負荷不平衡に伴う電圧上昇や電圧不平衡が発生しても、STATCOM などの高速で制御可能なパワーエレクトロニクス機器によって両者を補償することにより、配電電圧の基準電圧値である 101 ± 6 [V]及び電圧不平衡率管理基準値である 3%を満たすことが可能であることが確認された。

5. あとがき

今後、太陽光発電をはじめ、再生可能エネルギー発電の電力系統への導入増加が予測され、配電系統の電圧変動が許容範囲を逸脱することや不平衡電圧の影響などは重要な課題となる。本研究では、配電系統において、STATCOM による太陽光発電に起因する電圧上昇並びに負荷不平衡を加味した不平衡電圧の抑制効果についてシミュレーション検討を行ない、太陽光発電が大量に導入された配電系統の電圧安定化に対して、STATCOM の有用性を示した。研究の結果として以下にまとめられる。

- ・導入実績のある送電系統用 STATCOM 技術に基づき、配電系統に設置される小容量の STATCOM について、通常の変圧器および削減された多重数をもつ直列多重回路構成を有する STATCOM モデルを作成した。
- ・太陽光発電による配電系統の電圧上昇または不平衡電圧を抑制するために、系統交流電圧と STATCOM 側の

直流電圧安定化制御に不平衡電圧抑制制御機能を付加した STATCOM の制御系を考案した。

- ・太陽光発電が大量連系された配電系統モデルを構築し、太陽光発電の大量連系による電圧上昇並びに三相不平衡電圧を、1 台の STATCOM を設置することにより、基準値以内に抑制できることを確認できた。

今後の課題として、配電系統に設置される STATCOM の最適容量や最適設置点の選定などの検討が挙げられる。

謝 辞

本研究において詳細で有益なご助言をいただいた東北電力（株）斎藤明德氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 電気学会・半導体電力変換システム調査専門委員会：「配電系統に適用されるパワーエレクトロニクスの最新技術」，電気学会技術報告 第 1093 号（2007）
- (2) 林泰宏：「分散型電源の導入拡大に対応した配電系統電圧制御の動向と展望」，電学論 B, Vol.129, No.4, pp.491~494(2009-4)
- (3) 飯岡大輔・榊原邦晃・横水康伸・松村年朗・出原範久：「太陽光発電装置が集中導入された配電系統の電圧上昇と SVC による抑制」，電学論 B, Vol.126, No.2, pp.153~158(2006-2)
- (4) 近藤太郎・馬場旬平・横山明彦：「太陽光発電が多数導入された配電系統の FACTS 機器を用いた電圧制御」，電学論 B, Vol.126, No.3, pp.347~358(2006-3)
- (5) 今井孝二監修：「パワーエレクトロニクスハンドブック」，株式会社 R&D プランニング（2002）
- (6) T.Fujii, S.Funabashi, N.Morishima, M.Azuma, H.Teramoto, N.Lio, H.Yonezawa, D.Takayama, and Y.Shinki: "A ± 80 MVA GCT STATCOM for the Kanzaki Substation". Proc. IPEC-Niigata, S37-1, pp1299-1306 (2005-4)
- (7) 米沢比呂志・井村肇・新木依子・天満耕司・船橋真男・寺本仁志：「STATCOM による電圧安定性の向上」，電気学会電力技術研究会資料, PE-04-1, pp1~6（2004-1）
- (8) 江口直也・山本光俊・遠藤和弥・小西茂雄・森田敏浩：「不平衡補償付き自励式 SVC 制御方式の開発」，電学論 D, Vol.114, No.4, pp.444~450(1994-4)
- (9) 竹田正俊・村上昇太郎・飯塚昭廣・持永芳文：「自励式無効電力補償装置を適用した三相不平衡電圧変動補償装置の開発」，電学論 D, Vol.116, No.8, pp.826~834(1996-8)
- (10) 米谷心助・藤田英明・赤木泰文：「5 レベル変換器を用いた 6.6kV トランスレス STATCOM : 200V, 10kVA ミニモデルによる実験的検討」，電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-05-22（2005-1）
- (11) 吉住大介・高崎昌洋・横山明彦：「太陽光発電大量導入における配電系統用 STATCOM の瞬低補償効果」。平成 23 年電気学会全国大会論文集。No.6-142, pp.253~254（平成 23 年 3 月）
- (12) 張本毅・林秀美・村田勝昭：「特定高調波方式を用いた高調波抑制手法の検討」。電学論 B, Vol.128, No.9, pp.1504~1512 (2009-9)
- (13) 高田裕真・中鉢和寿・呉国紅：「STATCOM による配電系統の電圧上昇および高調波の抑制効果に関する検討」。平成 23 年電気学会全国大会論文集。No.6-148, pp.265~266（平成 23 年 3 月）