

太陽光発電大量導入時における

スマートインバータを用いた電圧変動抑制手法の一検討

電気電子情報工学専攻
電力システム工学研究

MA22126 前田 はるか
指導教員 藤田 吾郎

1. はじめに

近年、エネルギーの脱炭素化を目的とし、太陽光発電（以下、PV：Photovoltaic Generation）などの再生可能エネルギーの導入が進められている⁽¹⁾。しかし、PVは発電機を用いた発電方式ではなく、慣性力を持たない非同期電源であり、発電設備そのものに系統安定化機能が備わっていない。そのため、導入量が増えることで電力系統の周波数や電圧の変動を増大させ、大規模停電や事故の原因となる。

アメリカではPVなどの非同期電源に系統の周波数や電圧の調整能力を持たせる取り組みとして、スマートインバータの導入を進めている⁽¹⁾。インバータはPVで発電された直流電力を交流に変換する装置であり、それに通信機能と系統安定化機能を持たせたものがスマートインバータである。

本稿では、PVが電力系統に大量導入された際の電圧変動を抑制する手法として、スマートインバータの活用とその制御手法について検討した。

2. 制御手法

2.1 volt-VAR 制御

volt-VAR 制御はスマートインバータに搭載される機能の1つであり、無効電力を制御することで電圧変動を低減する制御手法である。電圧が不感帯の上限値に達すると無効電力が吸収される制御を行い、逆に電圧が下限値に達すると無効電力を供給する制御が行われる（図1）。不感帯領域の電圧は比較的公称値に近いいため、無効電力は供給しない。垂下ゲインは、インバータが電圧変動に対しどれだけの無効電力を供給するかを決定する。そして、飽和領域は無効電力容量に達した領域のことを指す。ここでの無効電力容量とは、インバータの容量の関係で出力が制限された際の無効電力最大値のことであり、(1)式より導出される。また、volt-VAR 制御におけるインバータからの無効電力は(2)式から導出される。

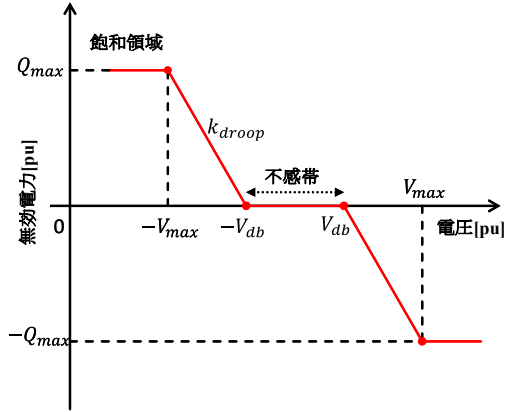


図1 volt-VAR 制御の特性曲線

$$Q_{max}(t) = \sqrt{S^2 - P_{pv}^2(t)} \quad (1)$$

$$Q_{inv}(t) = \begin{cases} (V_{PCC}(t) - V_{ab})/k_{droop} & ; V_{PCC} \leq -V_{ab} \\ 0 & ; -V_{ab} < V_{PCC} < V_{ab} \\ \{V_{PCC}(t) - (-V_{ab})\}/k_{droop} & ; V_{PCC} \geq V_{ab} \end{cases} \quad (2)$$

Q_{max} ：無効電力容量， S ：インバータ容量， P_{pv} ：PV 発電電力， Q_{inv} ：インバータ無効電力， V_{PCC} ：連系点電圧変動値， V_{ab} ：不感帯電圧， k_{droop} ：垂下ゲイン

この volt-VAR 制御のうち電圧不感帯幅や垂下ゲインが常に同じであるものを静的 volt-VAR 制御と呼ぶ。一方、本稿で提案する動的 volt-VAR 制御では、時間 t におけるインバータの無効電力容量の大きさに応じて、不感帯幅と垂下ゲインを変化させ、無効電力の出力特性を変化させる。不感帯幅と垂下ゲインの値はそれぞれ式(3)と式(4)から導出される。

$$k_{droop}(t) = (V_{ab} - V_{max}) / (Q_{ab} - Q_{max}(t)) \quad (3)$$

$$V_{ab}(t) = \frac{Q_{max}(t)}{S} \times V_{ab0} \quad (4)$$

Q_{ab} ：不感帯における無効電力， V_{max} ：連系点電圧変動許容最大値(0.02 pu)， V_{ab0} ：不感帯基準電圧(0.01 pu)

2.2 対象システム

発電事業者は新たな発電設備を電力系統に接続する際に、系統の電圧安定性を確保するために SVC の設置を継続することが電力会社から義務づけられている。図

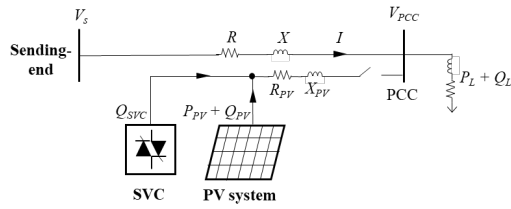


図2 PVシステムの概略図

表1 解析条件

対象エリア	九州地方
対象期間	2022年4月からの1年間(8760時間)
負荷需要	25~65 [MW]
系統電圧	66 [kV]
負荷力率	遅れ力率 85 [%]
PV 発電量	0~35 [MW]
インバータ容量	35 [MVA]

表2 解析ケース

	制御方式
ケース①	スマートインバータによる制御なし (AC/DC 変換機能のみ)
ケース②	静的 volt-VAR 制御 ($k_{droop} = -0.01, V_{db} = 0.01$)
ケース③	動的 volt-VAR 制御

2のようなPVとSVCが連系点に接続されたシステムにおいて、連系点の電圧変動値 $V_{PCC}(t)$ は式(5)のように定義される。

$$V_{PCC}(t) = RP_L(t) + XQ_L(t) + R_{PV}P_{PV}(t) + X_{PV}Q_{PV}(t) \quad (5)$$

R : 幹線抵抗, R_{PV} : PVシステム抵抗, X : 幹線インダクタンス, X_{PV} : PVシステムインダクタンス, P_L : 負荷有効電力, Q_L : 負荷無効電力, P_{PV} : PVインバータ有効電力, Q_{PV} : PVインバータ無効電力

また、PVとSVCが近くに設置されるとき、PVとSVCは同じインダクタンス(X_{PV})を共有することになるので、必要なSVCのサイズは式(6)から推定できる。

$$Q_{SVC}(t) = (V_{reg} - V_{PCC}(t)) / X_{PV} \quad (6)$$

V_{reg} : 許容電圧, Q_{SVC} : SVCからの無効電力

3. 解析結果

本稿では九州地方にある66kVの送電系統における、約10kmの送電線の中央にPVシステムが設置されることを想定した(表1)。PV発電量や電力需要は、ISEP(Institute for Sustainable Energy Policies)のウェブサイト⁽²⁾からデータを取得した。

本稿では、volt-VAR制御を加えない場合と、静的・動的volt-VAR制御を加えた場合の3つのケースについて比較する(表2)。電力会社が電圧適正範囲として定める電圧変動率 $\pm 2\%$ 以内の範囲に収まる時間が増えるかどうかを確認した(図3)。また、インバータからの出力さ

表3 解析結果

	電圧変動[h]		インバータ無効電力 Q_{inv} [Mvar]		SVC無効電力 Q_{svc} [Mvar]	
	範囲外	範囲内	最大値	最小値	最大値	最小値
①	611	8149	0.00	0.00	14.16	-7.24
②	128	8632	19.13	-11.91	5.72	-4.47
③	15	8745	33.26	-16.29	1.23	-4.47

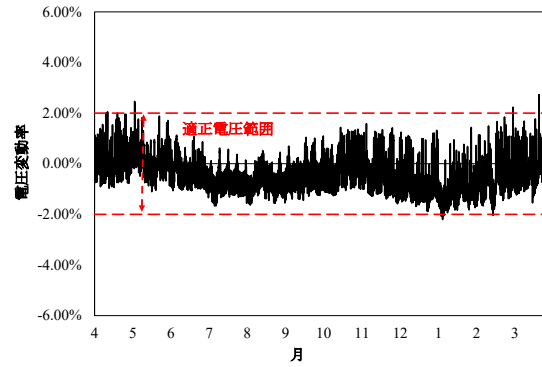


図3 電圧変動率の年次推移(動的 volt-VAR 制御適用時)

れる無効電力とSVCの必要サイズについても導出した。結果を表3に示す。

4. まとめ

本稿では、PVの導入率が高い送電系統における動的volt-VAR制御の手法を提案した。提案した制御を用いることで、電圧変動抑制効果を高め、電圧変動の抑制に必要なSVCの容量についても削減効果があることを確認した。しかし、動的volt-VAR制御を用いても適正範囲に収められない期間があることも確認した。

今後は、スマートインバータの容量を変化させることでの抑制効果の向上や、蓄電池など他の機器と組み合わせた協調制御を行うことを検討する。

参考文献

- (1) S. Yoshizawa et al., "Voltage-Sensitivity-Based Volt-VAR-Watt Settings of Smart Inverters for Mitigating Voltage Rise in Distribution Systems," IEEE Open Access J. Power Energy, Vol. 8, pp. 584-595 (2021)
- (2) ISEP Energy Chart: <https://isep-energychart.com/>

研究業績

- (1) Haruka Maeda, Sandro Sitompul and Goro Fujita, "Effectiveness Verification of the Dynamic Volt-VAR Control to Reduce SVC Capacity", ICHVEPS 2023, pp170-175 (2023)
- (2) Ken Shimomukai, Haruka Maeda, Zahirah binti Muhammad Azman, Sandro Sitompul and Goro Fujita, "Volt-Var Control for Utility-Scale Solar PV Plants to Downsize SVCs and Curtailment Effects", Journal of Energy and Power Technology 2023, Volume 5, Issue 3 (2023)

他3件