

修士学位論文要約（令和4年3月）

## 風力発電が大量連系した電力系統の調相設備の 最適配置決定における P-V 特性の利用法

石黒 雄貴

指導教員：斎藤 浩海

### Utilization of P-V Characteristics in Determining the Optimal Layout of Reactive Power Compensators in Power System with Large Amounts of Wind Power Generation

Yuki ISHIGURO

Supervisor: Hiroumi SAITOH

When a large amount of renewable energy such as wind power generation (WF) is interconnected, the output fluctuation of WF causes voltage and power flow fluctuations. As a result, voltage control will be difficult. In this study, first, using P-V characteristics, the effect of the increase of interconnected WF on the voltage in the power system is investigated. As a result, it was confirmed that the voltage on the bus near WF decreased as the amount of WF increased. Thereby, to prevent the decreasing in voltage, the optimal layout of the reactive power compensators was studied by solving the optimal power flow (OPF) problem. The result showed that the buses at both ends of transmission line with the largest reactance and the bus connected with WF are effective locations for the compensators. In addition, it was confirmed that there is a limit on reactive power compensation at the buses for maintaining the voltages.

#### 1. はじめに

近年、風力発電(WF)の導入が推進されている。WF の大量連系は、電圧変動や潮流状態の変化を招き、電力系統における電圧制御を難しくすると考えられる。そこで、WF 連系量増加が系統電圧に与える影響を、P-V 特性を用いて検討した。そして、WF 連系量増加後の電圧変動に対応すべく、最適潮流計算(OPF)を用いて、調相設備の最適配置を検討した。

#### 2. WF 連系量の変化による電圧変動

WF 連系量と電圧の関係を明らかにすべく、電力潮流計算を行った。解析に用いた基幹系統モデルを図1に示す。G<sub>0</sub>は連系先の大規模系統、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>は火力機、WFは風力機、B<sub>9</sub>、B<sub>10</sub>、B<sub>11</sub>は負荷母線である。G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>の出力およびB<sub>9</sub>、B<sub>10</sub>、B<sub>11</sub>の有効電力需要を固定し、WF 連系量を増加させたときの各母線電圧を図2に示す。WF=3.6798[GW]で計算が収束しなくなったため、このWF 連系量が調相設備増強前の最大連系可能量であると考えられる。また、WF 連系量の増加は、WF 近傍の母線を中心に電圧低下をもたらすことが確認できる。この電圧低下の原因を考察すべく、次章において、文献(1)で論じられているP-V曲線と図1の基幹系統のP-V曲線を比較検討した。

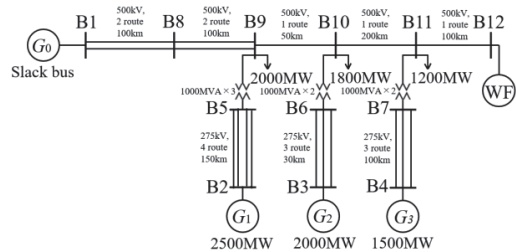


図1 基幹電力系統モデル

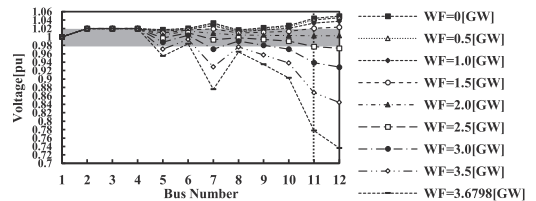


図2 WF 連系量と母線電圧の関係<sup>(2)</sup>

#### 3. WF 連系量の増加による電圧安定性への影響

文献(1)を参考に、図3のような、負荷母線にWFが連系した一負荷無限大母線系統を用いて、P-V曲線の特性を分析した。尚、文献(1)を参考に、 $V_s=1.1[\text{pu}]$ 、送電線リアクタンス  $x=0.4[\text{pu}]$ と設定した。図4に、WF 連系量を0.8[pu]ずつ増加させたときの

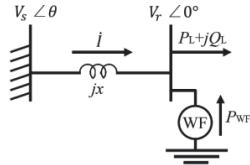
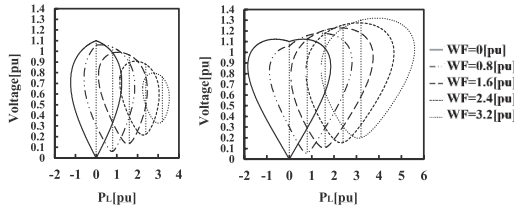


図3 簡略システムモデル<sup>(2)</sup>

$$V_r = \sqrt{\frac{-(2xQ_L - V_s^2) \pm \sqrt{(2xQ_L - V_s^2)^2 - 4\{x^2Q_L^2 + x^2(P_L - P_{WF})^2\}}}{2}} \quad (1)$$



(a) 力率遅れ 0.98 (b) 力率進み 0.98

図4 簡略システムモデルにおけるP-V曲線<sup>(2)</sup>

P-V 曲線を示す。負荷力率が遅れ 0.98 の場合、WF 連系量の増加に伴って P-V 曲線が右側にスライドしながら縮小することが確認できる。尚、各 P-V 曲線の中央付近に示した点線は  $P_L = P_{WF}$  を示しており、点線から右側が無限大母線から負荷に電力が流れている場合(順潮流)、左側が負荷母線の WF から無限大母線に電力が流れている場合(逆潮流)である。

図1の基幹システムモデルにおいて、WF 連系量を増加させたときの、B11 における P-V 曲線を図5に示す。B11 の電力需要のベースケースを縦線で示す。WF 連系量増加により P-V 曲線が右側にスライドしながら縮小することが確認できる。この P-V 曲線形状の変化は、図4(a)の結果と類似の現象であると考えられる。基幹システムモデルの負荷力率は 1 としたが、送電線のパラメータは誘導性リアクタンスが大きく、また火力機の出力を固定したことで、WF 連系量の増加は無有限大母線へと向かう潮流の増加を招き、簡略システムモデルにおける逆潮流増大時と類似の現象が確認されたと考えられる。まとめると、WF 連系量の増加により P-V 曲線がスライド及び縮小することで電圧が低下し、最終的には電力需要上に左側ノーズ端が出現し、WF 連系量及び電圧安定性の限界に達すると考えられる。次章では、WF 連系量増加時の電圧低下に対応すべく、調相設備の最適配置を検討した。

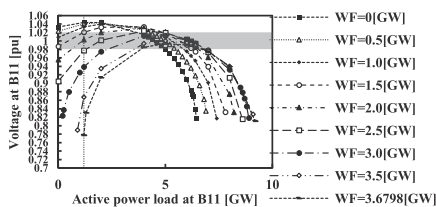
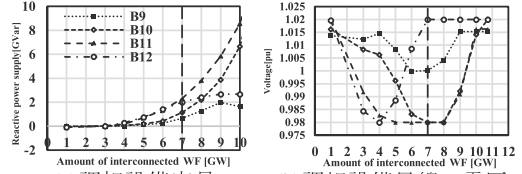


図5 基幹システムモデル B11 における P-V 曲線<sup>(2)</sup>



(a) 調相設備容量 (b) 調相設備母線の電圧

図6 各 WF 連系量における調相設備最適配置結果

#### 4. WF 大量連系を想定した調相設備の最適配置

最適潮流計算(OPF)と呼ばれる数理最適化手法を用いて調相設備の最適配置を検討する。調相設備設置母線は B9、B10、B11、B12 であり、目的関数は(2)式のように定式化した。(2)式は、調相設備容量  $Q_{Ci}$  の最小化を目的としている。尚、全母線の電圧を  $1.00 \pm 0.02$  [pu] に維持するという制約を与えている。

$$\min_{P,Q,V,\theta} \sum_{i=9}^{12} Q_{Ci}^2 \quad (2)$$

各 WF 連系量を 0~10[GW]まで、1[GW]ずつ変化させた各断面における計算結果を図6(a)に示す。調相設備の設置により、WF 連系可能量が設置前の 3.6798[GW]より増加していること、WF 連系量の増加とともに調相設備容量が上昇していくことが確認できる。また、WF 連系量が 7[GW]より小さい場合、WF に近い母線ほど調相設備容量が多く割り振られていることが確認できる。一方、WF=7[GW]以上の場合、B10 と B11 に調相設備容量が多く割り振られていることが確認できる。まとめると、WF=7GW 付近で、調相設備の最適配置傾向が変化していることが確認できる。図6(b)は、前述の最適配置を行った際の、調相設備母線の電圧を示している。最適配置傾向が変化した WF=7[GW]において、B12の電圧が上限である 1.02[pu]に達している。したがって、調相設備設置母線の電圧制約が、設置効果の高い母線への集中配置の限界となっているといえる。

#### 5. まとめ

WF 連系量増加は、WF 近傍の母線での電圧低下をもたらすことを明らかにし、電圧特性を考慮した調相設備の最適配置手法を示した。また、OPF による最適配置の検討により、調相設備の集中的な配置には限界があることを明らかにした。

#### 文献

- 1) 石川幸一郎, 他:「太陽光発電が大量に連系されたシステムの電圧に関する基礎特性」, 電気学会論文誌 B, Vol.134, No.1, pp.2-8 (2013)
- 2) 石黒雄貴, 斎藤浩海:「風力発電連系量が基幹システムの電圧安定性に与える影響」, 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.201, 2WEB5 (2021)