



## 计及机组有功与无功耦合特性的集群新能源电站无功优化

付红军 孙冉 赵华 李海波 江珂滕 雷一 王睿

### Reactive Power Optimization of Clustered New Energy Power Stations Considering Active and Reactive Coupling Characteristics of Generating Units

FU Hongjun, SUN Ran, ZHAO Hua, LI Haibo, JIANG Keteng, LEI Yi, WANG Ruizhe

引用本文:

付红军, 孙冉, 赵华, 等. 计及机组有功与无功耦合特性的集群新能源电站无功优化[J]. 现代电力, 2022, 39(4): 422–430. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0159

FU Hongjun, SUN Ran, ZHAO Hua, et al. Reactive Power Optimization of Clustered New Energy Power Stations Considering Active and Reactive Coupling Characteristics of Generating Units[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(4): 422–430. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0159

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0159>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 青南新能源集中送出地区动态无功补偿方案对比研究

Comparative Study on Dynamic Reactive Power Compensation Scheme in the Concentrated Delivery Area of New Energy in Southern Qinghai

现代电力. 2021, 38(1): 87–93 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0348>

#### 基于集群机组组合的区域电力系统生产模拟仿真

Regional Power System Production Simulation Based on Clustered Unit Commitment

现代电力. 2020, 37(5): 478–483 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0055>

#### 基于相空间重构和长短期记忆算法的电力系统无功负荷预测模型

Reactive Load Forecasting Model Based on PSR-LSTM in Power System

现代电力. 2020, 37(5): 470–477 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0235>

#### 含可再生分布式电源参与调控的配电网动态分区实时无功优化方法

Dynamic Partitioning Real-Time Reactive Power Optimization Method for Distribution Network with Renewable Distributed Generators Participating in Regulation

现代电力. 2020, 37(1): 42–50 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0072>

#### 计及多能源分频互补的新能源并网调度优化

Dispatching Optimization of Renewable Energy Integrated Grid Considering Multi-energy Frequency Division Complementation

现代电力. 2020, 37(2): 145–151 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0209>

#### 风电并网下计及机组特性的AGC动态优化控制策略研究

Research on AGC Dynamic Optimal Control Considering Units' Characteristics Under the Condition of Integration of Wind Power

现代电力. 2018, 35(6): 33–38 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I6/33>

# 计及机组有功与无功耦合特性的集群新能源 电站无功优化

付红军<sup>1</sup>, 孙冉<sup>1</sup>, 赵华<sup>2</sup>, 李海波<sup>3</sup>, 江珂滕<sup>3</sup>, 雷一<sup>3</sup>, 王睿喆<sup>3</sup>

(1. 国网河南省电力公司, 河南省郑州市 450018; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南省郑州市 450015;  
3. 清华四川能源互联研究院, 四川省成都市 610213)

## Reactive Power Optimization of Clustered New Energy Power Stations Considering Active and Reactive Coupling Characteristics of Generating Units

FU Hongjun<sup>1</sup>, SUN Ran<sup>1</sup>, ZHAO Hua<sup>2</sup>, LI Haibo<sup>3</sup>, JIANG Keteng<sup>3</sup>, LEI Yi<sup>3</sup>, WANG Ruizhe<sup>3</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018, Henan Province, China; 2. State Grid Henan Electric Power  
Research Institute, Zhengzhou 450015, Henan Province, China; 3. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute,  
Chengdu 610213, Sichuan Province, China)

**摘要:** 随着风电、光伏等新能源并网规模持续扩大和特高压直流等设备的接入, 电力系统逐步呈现出高度电力电子化特征, 为无功控制带来了新需求和新挑战。针对这一问题, 首先介绍了双馈风机、直驱风机和光伏的动态无功调节能力模型, 其次提出了考虑主动降有功的无功调节控制策略, 并建立了新能源电站集群层面考虑有功的无功优化模型。然后采用二阶锥凸松弛算法和分段线性化算法相结合, 提出了混合整数和二阶锥优化的求解方法, 有效解决了模型的非线性非凸及混合整数规划求解的难题。最后基于某实际新能源集群并网系统进行仿真分析。仿真结果表明采用考虑主动降有功的无功调节控制策略能够显著提升系统的无功控制能力, 改善电压控制效果, 提高系统经济性, 验证了所提模型的正确性和经济价值。

**关键词:** 电力电子化; 无功调节; 集群并网系统; 二阶锥凸松弛算法; 混合整数规划

**Abstract:** Along with the increasingly grid-connected scale of such new energy as wind power stations and photovoltaic (abbr. PV) stations and the grid-connection of HVDC equipments, the power grid gradually presents the feature of high degree power electronization, and it brings new demands and new challenges to reactive power control. In allusion to this problem, firstly, the dynamic reactive power regulation ability model of doubly fed

induction generator (abbr. DFIG), direct-driven wind turbine (abbr. DDWT) and PV were presented. Secondly, a reactive power control strategy, in which the active power was proactively considered to reduce, was proposed, and a reactive power optimization model, in which the active power was considered at the clustered level of new energy stations, was established. Thirdly, by means of combining the Second-order cone-convex relaxation algorithm with piecewise linearization algorithm, a solving method for mixed integer and second-order cone optimization was put forward, by use of this method the difficult nonlinear nonconvex and mixed integer programming problems in the established model were effectively solved. Finally, the simulation-based analysis on the grid-connection system of a certain practical clustered new energy power stations was performed. Simulation results show that adopting this reactive power regulation and control strategy, in which the active power is proactively considered to reduce, the reactive power control ability of the system can be evidently enhanced, and the voltage control effect can be improved, the economy of the system can be ameliorated as well, thus, both the correctness and the economic value of the established model were verified.

**Keywords:** power electronics; reactive power regulation; clustered grid-connected system; second-order cone-convex relaxation algorithm; mixed integer programming

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0159

**基金项目:** 国网河南省电力公司科技项目 (考虑特高压交直流电网电压安全的新能源无功协调控制技术研究(52170220000K))

State Grid Henan Electric Power Company Science and Technology Project(52170220000K)

## 0 引言

光伏、风电等新能源出力的随机波动性对并网地区电网稳定性产生了较大影响<sup>[1]</sup>, 风电场、

光伏电场等配置无功调节装置对于稳定并网点电压具有重要作用<sup>[2]</sup>。随着风电、光伏的大规模开发，新能源发电并网规模持续扩大，尤其在大规模新能源接入的特高压直流受端电网，部分同步电源被直流输电取代，系统的动态无功支撑能力被削弱，需要更多的动态无功源<sup>[3]</sup>。目前，新能源并网主要通过静止无功补偿器（static var compensator, SVC）、静止同步补偿器（static synchronous compensator, STATCOM）等补偿装置进行无功调节<sup>[4]</sup>，但是因为价格较高，如果在新能源电站大规模配置会影响风电场运行的经济性<sup>[5]</sup>。实际上，双馈风机、直驱风机和光伏等新能源发电设备本身具备一定的动态无功调节能力<sup>[6-7]</sup>，如果能够充分挖掘其自身的无功调节能力，并参与到系统的无功电压控制中，将进一步丰富新能源电站的无功电源容量，提高新能源电站运行的经济性。

新能源电网的无功功率控制研究经历了 3 个阶段，第 1 阶段为目前电网实际采用的新能源并网点（point of common coupling, PCC）技术考核指标，以并网点电压为约束，对新能源电站内部各机组进行无功控制与优化，方法包括模型预测控制（model predictive control, MPC）策略<sup>[7]</sup>、基于近似动态规划的辅助无功控制策略<sup>[5]</sup>以及比例调度、传输损耗最小、电能损耗最小和总损耗最小等的电站内部无功优化策略<sup>[8-13]</sup>。第 2 阶段对于梯级建设集中接入的若干个新能源电站，以电站为单位独立调压已不能满足区域电力系统电压稳定要求，因此对电站无功调节资源建模，将新能源电站及其汇集站作为整体进行电压管理<sup>[14-15]</sup>，参与大电网无功协调优化。文献<sup>[16]</sup>通过自适应动态规划和在线学习控制策略，降低控制复杂程度，减少模型依赖。有学者提出双层分散式控制方案，通过输电管理系统、共识协议和集中预测控制对大规模新能源电站群通信网络进行简化<sup>[17]</sup>。文献<sup>[18]</sup>将强耦合的大规模集群电站电压优化问题进行分解并分配给多个控制器，以降低中央控制器计算量。但是随着新能源接入电网规模增大，对无功需求也进一步增加，同时新能源电站会替代传统的同步电源，导致系统无功源进一步减少，为满足系统电压稳定需要投入更大的成本。因此，第 3 阶段需要充分挖掘新能源发电设备自身的无功控制能力。

目前已经有较多学者关注到双馈风机（doubly fed induction generator, DFIG）、直驱风机（direct-driven wind turbine, DDWT）和光伏（photovoltaic, PV）自身的无功调节能力，不少文献对 DFIG、DDWT 和 PV 的无功调节范围进行了定量分析<sup>[19-21]</sup>。如文献<sup>[19-21]</sup>基于 DFIG 等值电路系统，推导了 DFIG 的无功调节能力模型。基于新能源机组自身无功协调能力，有学者提出了以 DFIG 风电场电能损耗最小为目标的无功优化策略，该方法依赖于风电场内部通信的可靠性<sup>[9]</sup>。针对电压不平衡状态，文献<sup>[13]</sup>采用了有功无功协调控制策略，减少 DFIG 的双频振荡。文献<sup>[22]</sup>在研究海上风电集电系统无功优化中考虑了直驱永磁同步发电机（permanent magnet synchronous generator, PMSG）的无功调节能力，分析了计及 DDWT 无功调节能力对系统无功容量配置的影响。文献<sup>[23]</sup>证明了 DFIG 可以作为连续可调无功电源，参与风电场二次电压控制。

综上所述，现有研究主要将新能源机组看作无功范围可调的电源，同时考虑了有功变化时对无功范围的影响，但是还未充分挖掘新能源机组的无功调节潜力。根据新能源机组的有功-无功关系可知，随着有功出力的增大，机组的无功调节范围变小，在实际运行中，如果在新能源机组大出力的情况下，系统因负荷变化、故障等因素需要较大的无功时，可考虑适当降低有功出力进而增加无功出力，提升新能源电站的无功调节能力。目前，在考虑主动降低有功出力的新能源电站集群无功优化控制研究方面，还未看到相关的报道。

针对这一问题，本文首先基于新能源发电设备的动态无功调节能力模型，充分分析有功-无功之间的耦合关系，基于这一关系提出考虑主动降有功的无功调节范围模型，进一步以降有功出力和系统网损最小为目标，建立集群风电场层面的系统级无功优化模型。针对潮流模型的非凸非线性特性，采用二阶锥凸松弛优化进行处理，针对有功-无功的非线性关系，采用分段线性化进行处理，最终将其转化为混合整数二阶锥优化问题。最后基于某实际集群风电并网系统开展仿真分析，仿真结果表明采用主动降有功的策略可以在不增加无功设备投入的情况下，显著提升系统的无功控制能力，改善电压控制效果，验证了本

文模型的正确性和经济价值。

## 1 新能源电站有功-无功耦合关系

### 1.1 计及有功-无功耦合关联性的新能源电站集群协调无功优化思想

随着新能源并网规模逐渐增加, 新能源并网的无功控制技术和电网对新能源并网电压控制要求也随之发展, 主要经历了3个阶段。以DFIG为例, 其有功-无功功率关系如附图A1所示。其中虚线表示功率因数0.98时, 有功-无功功率关系曲线, 实线表示DFIG的有功-无功关联耦合出力范围。即DFIG有功出力为 $P_1$ 时, 采用定功率因数控制方式, DFIG无功出力最大值和最小值分别为点A、B, 相应的无功出力范围为 $(Q_1^{\max}, Q_1^{\min})$ 。采用考虑无功调节能力的无功优化控制方式, DFIG无功出力最大值和最小值分别为点C、D, 相应的无功出力范围为 $(Q_2^{\max}, Q_2^{\min})$ , 相比于定功率因数控制方式, 该控制方式的无功出力范围增加量分别为 $(\Delta Q_1^{\max}, \Delta Q_1^{\min})$ 。如果当维持电压稳定所需的无功功率范围大于有功出力 $P_1$ 对应的无功出力范围, 即点C和D时, 可以采用基于有功-无功关联耦合性的无功优化策略, 此时主动切有功出力 $\Delta P$ , 则DFIG有功出力减小至 $P_2$ , 使得无功出力范围扩大至点E和F。此时无功出力范围分别增加了 $\Delta Q_2^{\max}$ 和 $\Delta Q_2^{\min}$ , 相应的无功出力范围为 $(Q_3^{\max}, Q_3^{\min})$ , 满足维持电压稳定所需的无功功率要求。

### 1.2 各类型新能源电站的有功-无功耦合特性建模

#### 1) DFIG。

DFIG的定子直接并网, 定子侧无功功率运行范围主要受双馈电机额定容量和转子侧变流器电流最大值约束。转子通过背靠背变流器与电网连接, 使得定子侧变流器的无功功率 $Q_s$ 和网侧变流器的无功功率 $Q_c$ 相互解耦, 网侧变流器无功功率的范围由网侧变流器容量决定。因此, DFIG并网无功功率 $Q_g$ 范围满足

$$Q_g^{\min} = Q_s^{\min} + Q_c^{\min} = \left[ -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left( \frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{r\max} \right)^2 - \frac{P_g^2}{(1-s)^2}} \right] + \left[ -\sqrt{(P_c^{\max})^2 - [s/(1-s)]^2 P_g^2} \right] \quad (1)$$

$$Q_g^{\max} = Q_s^{\max} + Q_c^{\max} = \left[ -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left( \frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{r\max} \right)^2 - \frac{P_g^2}{(1-s)^2}} \right] + \left[ \sqrt{(P_c^{\max})^2 - [s/(1-s)]^2 P_g^2} \right] \quad (2)$$

式中:  $Q_s^{\min}$ 、 $Q_s^{\max}$ 和 $Q_c^{\min}$ 、 $Q_c^{\max}$ 分别表示定子侧和网侧变流器无功功率的最小值和最大值;  $U_s$ 为风机并网点电压;  $X_s$ 和 $X_m$ 分别为定子侧电抗和励磁电抗;  $I_{r\max}$ 为转子侧允许的最大电流;  $P_g$ 为风机有功出力值;  $s$ 为转差率;  $P_c^{\max}$ 为网侧变换器的允许最大功率, 一般按风电系统的最大转差有功功率设计。因此, 包含 $M$ 台DFIG的风电场总无功功率极限为

$$Q_{\text{DFIG}}^{\min} = \sum_{i=1}^M Q_{g,i}^{\min} \quad (3)$$

$$Q_{\text{DFIG}}^{\max} = \sum_{i=1}^M Q_{g,i}^{\max} \quad (4)$$

式中:  $Q_{g,i}^{\max}$ 、 $Q_{g,i}^{\min}$ 分别表示第 $i$ 台DFIG风电机组输出无功功率的最大值和最小值。

#### 2) DDWT。

DDWT的发电机定子通过全功率电力电子变流器直接与电网相连, 受变流器最大电流限制, 其无功功率的范围由电力电子变流器的容量决定, 其范围满足

$$Q_g^{\min} = -\sqrt{S^2 - P_g^2} \quad (5)$$

$$Q_g^{\max} = \sqrt{S^2 - P_g^2} \quad (6)$$

式中:  $Q_g^{\min}$ 、 $Q_g^{\max}$ 分别表示DDWT风电机组输出无功功率的最小值和最大值;  $S$ 表示DDWT风电机组输出的最大视在功率, 因此, 包含 $M$ 台DDWT的风电场总无功功率极限为

$$Q_{\text{DDWT}}^{\min} = \sum_{i=1}^M Q_{g,i}^{\min} \quad (7)$$

$$Q_{\text{DDWT}}^{\max} = \sum_{i=1}^M Q_{g,i}^{\max} \quad (8)$$

式中:  $Q_{g,i}^{\max}$ 、 $Q_{g,i}^{\min}$ 分别表示第 $i$ 台DDWT风电机组输出无功功率的最大值和最小值。

#### 3) PV。

PV电站通过并网逆变器与电网连接, 其无

功调节能力受逆变器电力电子器件最大运行电流约束。同时，为了保证逆变器正弦脉宽调制（sinusoidal pulse width modulation, SPWM）控制的有效性和输出电压的波形质量，调制比最大值为 1，则光伏电站的无功调节范围满足

$$Q_{PV}^{\min} = \max \left( \begin{array}{l} -\sqrt{\frac{9}{4}U_{pcc}^2 I_{\max}^2 - P_{PV}^2}, - \\ \sqrt{\left(\frac{3}{4}\frac{U_{dc}U_{pcc}}{\omega L}\right)^2 - P_{PV}^2} - \frac{3}{2}\frac{U_{pcc}^2}{\omega L} \end{array} \right) \quad (9)$$

$$Q_{PV}^{\max} = \min \left( \begin{array}{l} \sqrt{\frac{9}{4}U_{pcc}^2 I_{\max}^2 - P_{PV}^2}, \\ \sqrt{\left(\frac{3}{4}\frac{U_{dc}U_{pcc}}{\omega L}\right)^2 - P_{PV}^2} - \frac{3}{2}\frac{U_{pcc}^2}{\omega L} \end{array} \right) \quad (10)$$

### 1.3 新能源机组有功-无功耦合关系

DFIG 选取额定功率 1.5 MW，额定电压  $U_s$  为 690 V，网侧变换器设计的最大功率 0.6 MW，转子侧变流器的电流最大值  $I_{r\max}$  为 800 A。根据式 (1)—(2) 得到考虑网侧变流器无功输出的 DFIG 无功出力范围与有功功率关系曲线，如附图 A2 实线所示。

DDWT 选取额定功率 1.5 MW，额定电压  $U_s$  为 690 V。根据式 (5)—(6) 得到考虑网侧变流器无功输出的 DFIG 无功出力范围与有功功率关系曲线，如附图 A2 点划线所示。

PV 并网采用双极式逆变器，额定容量 500 kVA，额定电压 270 V。根据式 (9)(10) 得到 PV 无功出力范围与有功功率关系曲线，如附图 A2 虚线所示。

## 2 考虑有功-无功协调控制能力的新能源电站集群无功优化模型

### 2.1 目标函数

新能源电站集群通过汇集站集中并网、通过升压站接入汇入母线。传统的无功优化一般以系统网损最低为目标<sup>[10]</sup>，寻求满足电压约束、潮流约束的最优无功源出力，但实际中可能由于电压约束过紧产生无解的情况，因此一般将电压约束进行松弛，目标函数如式 (11) 所示。

$$\min F = \sum_{l=1}^{nL} P_{\text{loss},l} + \sum_{i=1}^{n_b} H_i \varepsilon_{V_i}^2 \quad (11)$$

式中： $P_{\text{loss},l}$  为支路线路有功损耗  $r_l |I_l|^2$ ； $\varepsilon_{V_i}$  表示节

点  $i$  电压偏差值； $H_i$  为节点  $i$  的电压偏差惩罚系数。

进一步，考虑新能源机组主动降有功增大无功调节能力的过程，引入  $\Delta P_{w,i}$  表征新能源电站  $w$  中第  $i$  台新能源机组减少的有功功率，为了使系统所有新能源机组的有功减少量之和最小，上述目标函数修正为

$$\min F = \sum_{l=1}^{nL} P_{\text{loss},l} + \sum_{i=1}^{n_b} H_i \varepsilon_{V_i}^2 + T \sum_{w=1}^{n_w} \sum_{i=1}^{m_w} \Delta P_{w,i} \quad (12)$$

式中： $T$  为降有功功率惩罚系数。

### 2.2 约束条件

约束条件主要包括新能源机组降有功约束、无功范围约束、节点功率平衡、电压约束、潮流约束等。

1) 新能源电站降有功约束。该约束主要考虑新能源机组主动降有功功率值不能超过当前可发有功的最大值。以新能源电站  $w$  中第  $i$  台新能源机组为例，假设其可发有功出力最大值为  $P_{w,i}^{\max}$ ，降有功量为  $\Delta P_{w,i}$ ，则降有功约束如式所示

$$0 \leq \Delta P_{w,i} \leq P_{w,i}^{\max}, i = 1, 2, \dots, m_w, w = 1, 2, \dots, n_w \quad (13)$$

2) 新能源电站无功范围约束。

考虑新能源机组降有功出力对无功范围的影响，提出新能源电站无功调节范围的约束形式。记  $\Delta P_{w,i}$  表示新能源电站  $w$  中机组  $i$  的降有功量，则该新能源电站的无功调节范围为

$$Q_{w,i}^{\min} \leq Q_{w,i} \leq Q_{w,i}^{\max} \quad (14)$$

$$Q_{w,i}^{\max} = \sum_{i=1}^{n_w} F_{Q_{w,i}}^{\max}(P_{w,i}^{\max} - \Delta P_{w,i}) + \sum_{i \in \Omega_Q} Q_i^{\max} \quad (15)$$

$$Q_{w,i}^{\min} = \sum_{i=1}^{n_w} F_{Q_{w,i}}^{\min}(P_{w,i}^{\max} - \Delta P_{w,i}) + \sum_{i \in \Omega_Q} Q_i^{\min} \quad (16)$$

式中： $n_w$  表示新能源电站的数量； $Q_{w,i}^{\max}$  和  $Q_{w,i}^{\min}$  分别代表新能源电站  $i$  的无功调节上限与下限，与新能源场站有功出力相关； $F_{Q_{w,i}}^{\max}(p)$  和  $F_{Q_{w,i}}^{\min}(p)$  分别表示新能源机组  $i$  无功调节上限、调节下限与有功出力之间的函数关系，具体计算方法可以参见 1.2 节； $\Omega_Q$  代表其他类型无功补偿设备的编号，如 SVC、STATCOM、电容器组等； $Q_i^{\max}$  和  $Q_i^{\min}$  分别代表其他类型无功补偿设备  $i$  的调节上限与调节下限。

3) 节点功率平衡。

$$P_j = \sum_{w \in j} (P_{w,j} - \Delta P_{w,j}) + \sum_{g \in j} P_{g,j} - P_{l,j} \quad (17)$$

$$Q_j = \sum_{w \in j} Q_{w,j} + \sum_{g \in j} Q_{g,j} - Q_{l,j} \quad (18)$$

式中： $P_j$ 和 $Q_j$ 分别表示节点 $j$ 的有功注入功率和无功注入功率； $P_{w,j}$ 、 $Q_{w,j}$ 表示节点 $j$ 接入的新能源电站的有功出力和无功出力； $P_{g,j}$ 、 $Q_{g,j}$ 表示节点 $j$ 接入的常规电站的有功出力和无功出力； $P_{l,j}$ 、 $Q_{l,j}$ 表示节点 $j$ 接入的有功负荷和无功负荷。

4) 电压约束。系统中各节点电压应满足电压约束条件，故引入松弛变量进行约束

$$V_i^{\min} - \varepsilon_{Vi} \leq V_i \leq V_i^{\max} + \varepsilon_{Vi} \quad (19)$$

式中： $V_i$ 表示节点 $i$ 的电压； $V_i^{\max}$ 和 $V_i^{\min}$ 分别表示节点 $i$ 的最高电压和最低电压允许值。

5) 潮流约束。目前大型新能源基地的风电场群一般采用辐射状网架结构接入电力系统<sup>[24]</sup>，因此，可将支路潮流模型应用到风电场群接入电力系统的潮流建模中<sup>[25]</sup>。附图A3为辐射状网架结构的支路潮流模型示意图，本节基于该图推导适用于风电场接入系统的支路潮流方程。

由附图A3可知，对于网架中任意节点 $j$ ，不考虑并联导纳，应满足节点有功、无功守恒，即如式(20)、(21)所示

$$\sum_{i \in u(j)} \left[ P_{ij} - \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(V_i)^2} r_{ij} \right] + P_j = \sum_{k \in v(j)} P_{jk} \quad (20)$$

$$\sum_{i \in u(j)} \left[ Q_{ij} - \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(V_i)^2} x_{ij} \right] + Q_j = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk} \quad (21)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + \frac{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(P_{ij}^2 + (Q_{ij})^2)}{(V_i)^2} \quad (22)$$

式中： $u(j)$ 为潮流流向节点 $j$ 的集合； $v(j)$ 为潮流从节点 $j$ 流出的集合； $P_{ij}$ 和 $Q_{ij}$ 分别表示节点 $i$ 流向节点 $j$ 的有功功率和无功功率； $P_{jk}$ 和 $Q_{jk}$ 分别表示节点 $j$ 流向节点 $k$ 的有功功率和无功功率； $r_{ij}$ 和 $x_{ij}$ 分别表示节点 $i$ 和节点 $j$ 之间的短路电阻和短路电抗； $V_i$ 和 $V_j$ 分别表示节点 $i$ 和节点 $j$ 的节点电压有效值。

### 3 求解算法

可以看出，引入降有功决策变量之后，风电场无功出力范围变为与决策变量相关的非线性函数，同时支路潮流方程约束的非凸非线性，导致

本文建立的模型是非凸非线性优化模型，需要进行适当转化才能求解<sup>[25-31]</sup>。针对支路潮流的非线性非凸约束，本文引入辅助决策变量，并进行二阶锥凸松弛<sup>[25]</sup>；针对无功约束范围的非线性，本文引入0-1辅助决策变量，将无功约束转化为分段线性化约束。本节分别予以介绍。

#### 3.1 二阶锥松弛

本文采用二阶锥松弛技术处理支路潮流约束的非线性非凸特性。首先，引入决策变量 $l_{ij}$ 、 $U_i$ 将支路潮流方程转化为线性约束， $l_{ij}$ 、 $U_i$ 如式(23)—(24)所示：

$$l_{ij} = \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(V_i)^2} \quad (23)$$

$$U_i = V_i^2 \quad (24)$$

引入辅助决策变量 $l_{ij}$ 、 $U_i$ 之后，潮流方程即转化为式(25)—(27)：

$$\sum_{i \in u(j)} [P_{ij} - l_{ij}r_{ij}] + P_j = \sum_{k \in v(j)} P_{jk} \quad (25)$$

$$\sum_{i \in u(j)} [Q_{ij} - l_{ij}x_{ij}] + Q_j = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk} \quad (26)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)l_{ij} \quad (27)$$

然而，式(19)仍然为非线性非凸约束，当节点负荷无上界且目标函数为支路电流的严格增函数时，式(23)的等式约束可以松弛为如下式所示的不等式约束<sup>[25]</sup>：

$$l_{ij} \geq \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(V_i)^2} \quad (28)$$

进一步，可将式(28)转化为式(29)的形式，根据二阶锥松弛的标准形式，该不等式约束满足二阶锥优化的约束形式。至此，支路潮流约束已经转化为二阶锥优化的形式，可采用成熟的二阶锥优化算法予以求解。

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ l_{ij} - U_i \end{array} \right\| \leq l_{ij} + U_i \quad (29)$$

二阶锥松弛可以将非线性约束转为可以求解的线性约束条件，但松弛会导致可行域扩大，所得最优解不满足原始非线性函数。因此需要“收紧”二阶锥松弛，使松弛满足精度需求。通过设置适当的目标函数可以驱动二阶锥松弛收紧于最

优解<sup>[25]</sup>，即式(12)中第一项可以驱使二阶锥松弛收紧。

定义偏差量  $d$  为各支路电流松弛偏差的无穷范数，如式(30)所示，验证二阶锥松弛是否收紧：

$$d = \left\| l_{ij} - \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(V_i)^2} \right\|_{\infty} \quad (30)$$

### 3.2 二分段线性函数化

由附图 A2 可以看出，新能源机组的有功-无功功率范围为非线性方程，因此本文采用分段线性函数化进行处理，如附图 A4 所示。

首先将非线性曲线分成  $n_p$  个区段，在每个区段中用直线段近似代替改曲线，使得该非线性曲线在每个区段中均为线性，则某区间内任意点均可以通过区段两端值进行求解。然后引入 0-1 变量  $z_j$  对该任意点所在线性化区段定位；最后引入变量  $w_j$  求解该任意点的对应值。

变量  $w_j$  和 0-1 变量  $z_j$  满足式(31)–(33)要求：

$$\begin{cases} w_1 \leq z_1 \\ w_2 \leq z_1 + z_2, \dots, w_{n_p} \leq z_{n_p-1} + z_{n_p} \\ w_{n_p+1} \leq z_{n_p} \end{cases} \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^{n_p} z_j = 1, z_j = 0 \text{ 或 } 1 \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^{n_p+1} w_j = 1, w_j \geq 0 \quad (33)$$

新能源机组的有功-无功功率曲线分段线性函数化处理如(34)–(38)所示。新能源机组的无功功率范围函数如式(34)(35)所示：

$$Q_w^{\min} = F_{\min}(P_{w,i}) \quad (34)$$

$$Q_w^{\max} = F_{\max}(P_{w,i}) \quad (35)$$

将  $F_{\min}$  和  $F_{\max}$  分成  $n_p$  段线性函数，则分点为  $P_{w,i}^1 \leq \dots \leq P_{w,i}^{n_p} \leq P_{w,i}^{n_p+1}$ ，对于任意有功出力  $P_{w,i}(x)$ ，采用式(36)确定变量  $w_j$  值，通过式(37)、(38)可以求出无功输出的最小值和最大值  $F_{\min}(P_{w,i}(x))$ 、 $F_{\max}(P_{w,i}(x))$  分别为

$$P_{w,i}(x) = \sum_{j=1}^{n_p+1} w_j P_{w,i}^j \quad (36)$$

$$F_{\min}(P_{w,i}(x)) = \sum_{j=1}^{n_p+1} w_j F_{\min}(P_{w,i}^j) \quad (37)$$

$$F_{\max}(P_{w,i}(x)) = \sum_{j=1}^{n_p+1} w_j F_{\max}(P_{w,i}^j) \quad (38)$$

### 3.3 联合概率分布分析

为了分析 1.1 节中所提 3 个阶段对应控制策略的经济性，本文需要计算以年为时间尺度下，第 1 阶段、第 2 阶段需要配置无功补偿设备的容量和第 3 阶段需要主动切出力的值。以年为时间尺度的经济性分析方法包括时序模拟和非时序分析。而非时序模拟方法难以保证数据准确性，且计算量大，耗时长。因此本文选用联合概率分布方法，将时序问题转化为非时序问题进行经济性分析。具体步骤如下。

Step 1: 形成联合概率分布函数。通过全年实际新能源出力值和实际负荷值，得到出力-负荷联合概率分布函数  $H_X(x,y), X \in \{L,R\}$ 。

Step 2: 数据计算。采用 3 个阶段对应控制策略，分别计算联合概率分布  $(x,y)$  对应的电压偏差概率分布、第 1、2 阶段需要增加的无功补偿容量和第三阶段主动切出力值  $\Delta P_w(x,y)$ 。

Step 3: 经济性分析。针对第 1、2 阶段需要增加的无功补偿容量，进行经济性分析。对于第 3 阶段，对切出力概率分布积分得到全年切出电量  $E_{w,abandon}$  如式(39)所示，进而获得全年切出力成本。

$$E_{w,abandon} = \int_0^{100\%} \int_0^{100\%} \Delta P_w(x,y) H_X(x,y) dx dy \quad (39)$$

## 4 算例分析

### 4.1 算例系统

某风电场集群拓扑图如附图 A5 所示，新能源电站集群总装机容量 570 MW，由 1 个汇集站、13 个升压站、3 个光伏电站和 36 个风电场组成，其中光伏电站装机容量均为 10 MW，风电场装机容量均为 15 MW，节点 8、9、10、11、14、15、16 的风电场安装直驱风机、其余风电场安装双馈风机。风电场集群经过汇集站后通过外送长线路并网，接入点短路容量为 2500 MVA，系统电压偏差允许值设定为 5%。

本文将选取以下 3 种无功控制策略进行对比分析。

控制策略 1: 传统的恒定功率因数控制策略，功率因数取 0.98，不考虑 DFIG 的无功调节能力；

控制策略 2: 考虑 DFIG 的无功调节能力的控制策略，根据 DFIG 当下有功出力确定相应的无功调节范围，允许 DFIG 在该范围内改变无功出

力,支撑节点电压;

控制策略3:本文提出的控制策略,进一步挖掘DFIG的无功调节潜力,在风电大出力情况下,系统因负荷变化、故障等因素需要较大的无功时,采用有功-无功耦合控制方式,适当减少DFIG有功出力,增大其无功调节范围,优化系统电压。

#### 4.2 单一时刻电压控制效果

在某一时刻,系统无功需求较大且风电出力较大(即无功调节能力较低)时,分别采用4.1节所述的3种无功功率控制策略对算例系统进行无功优化分析,此时假设各新能源电站出力均为最大值。计算得到系统各节点电压标幺值如附图A6所示。

由附图A6可知,采用不同控制策略下各节点电压分布的趋势相同,即2—20节点电压偏低,主要原因是这几个节点靠近并网点,而22—53号节点负荷较轻,为功率送出节点,电压偏高。采用控制策略1时,节点2—21、30、35电压偏差均无法控制在5%范围内;采用制策略2时,节点2—6、13—20电压偏差均无法控制在5%范围内。当节点电压偏差超过设定范围,根据相应并网规程,则对应新能源电站无法消纳,因此必须增加新的无功补偿装置。为了将所有节点电压偏差控制在5%范围内,采用控制策略1需要增加5Mvar无功补偿装置,采用控制策略2需要增加4Mvar无功补偿装置。

采用控制策略3时,各节点电压偏差均控制在5%范围内。此时,新能源电站集群总的切出力如附图A7所示,共计5.5MW,占新能源电站集群总出力的1.25%,其中新能源电站4、5、6、7分别切出0.54MW,节点11、12分别切出力0.92MW,节点13切出力1.5MW。

综上所述可以看出,本文提出的无功优化策略可以在不新增无功补偿装置的情况下,通过适当降低新能源电站集群有功出力提高其无功调节能力,进而将所有节点电压控制在要求范围之内,保障了电网的运行安全性,提高新能源消纳能力。

#### 4.3 新能源电站出力-负荷联合概率分布

根据3.3节所述联合概率分布分析方法,得到某地区实际1年新能源电站出力-负荷联合概率分布函数 $H_X(x,y)$ ,如附图A8所示。

分别采用4.1节所述的3种无功功率控制策略对各新能源电站出力-负荷情况进行无功优化

分析,计算各种情况下算例系统各节点电压偏差值(标幺值)。电压偏差值分布情况如附图A9所示。

采用控制策略1时,系统电压偏差值分散范围较大,且电压偏差超过5%的点较多;采用控制策略2时,系统电压偏差值分散范围小于控制策略1,但电压偏差超过5%的点仍然较多。采用控制策略1和采用控制策略2需要分别在靠近并网点的新能源电站4配置2Mvar和1Mvar无功补偿设备,才能保证所有节点电压控制在5%范围内。

采用控制策略3时,系统电压偏差值分散范围较小,基本保证电压偏差满足5%要求,相应的主动切出力值 $\Delta P_w(x,y)$ 如附图A10所示。

#### 4.4 算法正确性验证

本文采用二阶锥松弛模型对式(23)进行优化,因此需要验证式(28)在最优解处是否收紧,满足精确要求。因此采用式(30)验证算法正确性。对4.3节新能源电站出力-负荷联合概率分布下所有情况进行验证,计算结果如附图A11所示,可知二阶锥松弛后误差数量级为 $10^{-4}$ ,精度满足要求。因此本文算法正确性得到验证。

#### 4.5 经济性分析

电压等级35kV的动态无功补偿装置,容量2Mvar设备价格约为20万元,容量1Mvar设备价格约为10万元。考虑贷款利率6%,假设设备使用周期为20年,则每年折合成本分别为1.7万元和0.85万元,均远高于切出力带来的经济损失。

根据《国家发展改革委关于完善风电上网电价政策的通知》发改委价格[2019]882号,2020年I~IV类资源区符合规划、纳入财政补贴年度规模管理的新核准陆上风电指导价分别为0.29元/kW·h、0.34元/kW·h、0.38元/kW·h、0.47元/kW·h。根据4.3节新能源电站出力-负荷联合概率分布情况和各情况对应的主动切出力,可以计算得到该新能源电站集群一年总的主动切出力为3.44MW·h。那么3种控制策略下系统的电压合格率和折合成本如表1所示。

## 5 结论

1) 在没有额外无功补偿设备的情况下,采用本文的优化策略可以将电压控制在目标范围之内,而传统优化策略下某些节点的电压出现越限。

表 1 3 个控制策略下技术经济性分析  
Table 1 Techno-economical analysis under three control strategies

控制策略	电压合格率/%	折合成本/(元/年)
控制策略1	94.06	17,000
控制策略2	98.02	8,500
控制策略3	100	998.47~1618.21

2) 本文所提控制策略可以在不增加无功设备投入的情况下, 提升系统的无功控制能力, 相比传统优化策略, 本文提出的优化策略全年电压偏差的概率分布更加“细窄”, 即电压控制效果更好。

3) 切有功出力的年成本约为配置无功补偿设备成本的 10%, 证明本文提出的无功优化策略具有较好的经济性。

本文未来的研究方向是将提出的优化模型应用于含大规模新能源电网的无功资源优化配置、实时无功运行优化策略等领域。

(本刊附录请见网络版, 印刷版略)

## 参考文献

- [1] 王博学, 李清涛, 王秀丽, 等. 大规模新能源并网系统电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3114-3124.  
WANG Jianxue, LI Qingtao, WANG Xiuli, *et al.* A generation expansion planning method for power systems with large-scale new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3114-3124(in Chinese).
- [2] 侍乔明, 郭铭群, 刘凯, 等. 考虑惯性响应的特高压直流频率协调控制[J/OL]. 电网技术: 1-14[2021-05-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0015>.  
SHI Qiaoming, GUO Mingqun, LIU Kai, *et al.* Coordinated frequency control for UHVDC considering inertia response[J/OL]. Power System Technology: 1-14[2021-05-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0015>(in Chinese).
- [3] 周晓华, 张银, 刘胜永, 等. 静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 77-84.  
ZHOU Xiaohua, ZHANG Yin, LIU Shengyong, *et al.* Voltage control of static var compensator based on novel adaptive dynamic programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 77-84(in Chinese).
- [4] 崔正湃, 王皓靖, 马锁明, 等. 大规模风电汇集系统动态无功补偿装置运行现状及提升措施[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1873-1878.  
CUI Zhengpai, WANG Haojing, MA Suoming, *et al.* Operation situation analysis and improvement measure study for dynamic reactive compensation equipment applied in large-scale wind power systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1873-1878(in Chinese).
- [5] 张若微, 秦博宇, 李恒毅, 等. 基于干扰抑制的双馈风机低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 112-120.  
ZHANG Ruowei, QIN Boyu, LI Hengyi, *et al.* Low voltage ride-through control strategy for DFIG-based wind turbine based on disturbance attenuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 112-120(in Chinese).
- [6] 韩如磊, 钟鸣, 魏冰凌, 等. 光伏电站无功调节能力仿真及快速无功调节分析[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(4): 20-26.  
HAN Rulei, ZHONG Ming, WEI Bingling, *et al.* Simulation of reactive power regulation ability of photovoltaic power station and analysis of rapid reactive power regulation[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2020, 38(4): 20-26(in Chinese).
- [7] ZHAO Haoran, WU Qiuwei, WANG Jianhui, *et al.* Combined active and reactive power control of wind farms based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1177-1187.
- [8] GUO Wentao, LIU Feng, SI Jennie, *et al.* Approximate dynamic programming based supplementary reactive power control for DFIG wind farm to enhance power system stability[J]. Neurocomputing, 2015, 170(dec.25): 417-427.
- [9] ZHANG Baohua, HOU Peng, HU Weihao, *et al.* A reactive power dispatch strategy with loss minimization for a DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 914-923.
- [10] ZHANG Baohua, HU Weihao, HOU Peng, *et al.* Review of reactive power dispatch strategies for loss minimization in a DFIG-based wind farm[J]. Energies, MDPI, 2017, 10(7): 1-17.
- [11] KALOIG S, WANG J, BALOCH M H. Active and reactive power control of the doubly fed induction generator based on wind energy conversion system[J]. Energy Reports, 2016, 2(C): 194-200.
- [12] SINGH S, GOEL N, KUMAR P. A novel approach for reactive power output optimization in wind farm for the reduction of distribution losses using genetic algorithm[J]. Electronics and Instrumentation Engineering, 2013, 2(3): 1053-1059.
- [13] SHEHATA E G. Active and reactive power control of doubly fed induction generators for wind energy generation under unbalanced grid voltage conditions[J]. Electric Power Components and Systems, 2013, 41(6): 619-640.

- [14] LIU Shipeng, GUO Liping, KANG Lijun, *et al.* Reactive power optimization for wind farms group integrated system[C]//2012 Asia-Pacific Power & Energy Engineering Conference. IEEE, Shanghai, China, 2012:1-4.
- [15] YANG H, LIAO J. MF-APSO-Based Multiobjective optimization for PV system reactive power regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1346-1355.
- [16] TANG Yufei, HE Haibo, NI Zhen, *et al.* Reactive power control of grid-connected wind farm based on adaptive dynamic programming[J]. Neurocomputing, 2014, 125: 125-133.
- [17] HUANG Sheng, WU Qiuwei, GUO Yifei, *et al.* Bi-level decentralized active and reactive power control for large-scale wind farm cluster[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 111: 201-215.
- [18] HUANG Sheng, WU Qiuwei, ZHAO Jin, *et al.* Distributed optimal voltage control for VSC-HVDC connected large-scale wind farm cluster based on analytical target cascading method[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 4(11): 2152-2161.
- [19] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA J X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renewable Energy, 2004, 29(3): 377-392.
- [20] SAENZ J R, TAPIA A, TAPIA G, *et al.* Reactive power control of a wind farm through different control algorithms[C]//IEEE International Conference on Power Electronics & Drive Systems. IEEE, Denpasar, Indonesia, 2001:203-207.
- [21] KAYIKCI M, MILANOVIC J V. Reactive power control strategies for DFIG-based plants[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 389-396.
- [22] HAN Tingwei, HUANG Hongyang, SHI Linjun, *et al.* Reactive power coordinated control strategy for offshore wind farm cluster with VSC-HVDC transmission[C]// 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET). IEEE, Chengdu, China, 2019:185-189.
- [23] TAPIA G, TAPIA A, OSTOLAZA J X. Proportional-integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 488-498.
- [24] NIU Tao, GUO Qinglai, JIN Hongyang, *et al.* Dynamic reactive power optimal allocation to decrease wind power curtailment in a large-scale wind power integration area[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(13): 1667-1678.
- [25] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification—Part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [26] DAI Chaohua, CHEN Weirong, ZHU Yunfang, *et al.* Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1218-1231.
- [27] TINNEY W F, BRIGHT J M, DEMAREE K D, *et al.* Some deficiencies in optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 3(2): 676-683.
- [28] MOMOH J A, GUO S X, OGBUOBIRI E C, *et al.* The quadratic interior point method solving power system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1327-1336.
- [29] YAMIN H Y. Dynamic optimal power flow using interior point method and benders decomposition considering active and reactive constraints[J]. Electric Power Components and Systems, 2006, 34(12): 1377-1393.
- [30] CAPITANESCU F, WEHENKEL L. Sensitivity-based approaches for handling discrete variables in optimal power flow computations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1780-1789.
- [31] LIU W E, PAPALEXOPOULOS A D, TINNEY W F. Discrete shunt controls in a Newton optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4): 1509-1518.

收稿日期: 2021-06-11

作者简介:

付红军(1968), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行控制与新能源并网, E-mail: fuhongjun@ha.sgcc.com.cn;

孙冉(1979), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行控制与新能源并网, E-mail: persiasun@126.com;

赵华(1976), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统运行控制与新能源并网, E-mail: zhaohua1102@163.com;

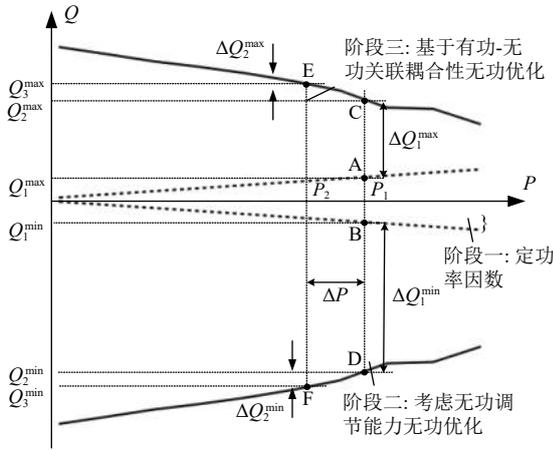
李海波(1990), 男, 博士, 副研究员, 通信作者, 研究方向为可再生能源并网、电力系统灵活性、能源互联网, E-mail: lihaibo@tsinghua-eiri.org;

江珂滕(1993), 女, 硕士, 主要研究方向为新能源电力系统规划与运行、综合能源系统与能效分析, E-mail: jiangketeng@tsinghua-eiri.org;

雷一(1985), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源并网、综合能源与智能配电技术, E-mail: lei yi@tsinghua-eiri.org;

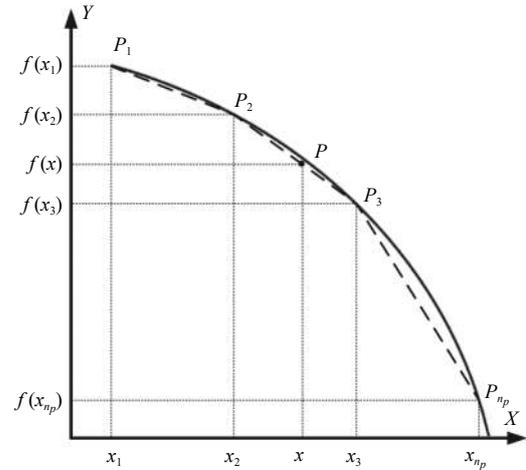
王睿喆(1997), 男, 硕士, 研究方向为可再生能源并网、能源互联网、电力系统灵活性, E-mail: 361506017@qq.com.

附录 A



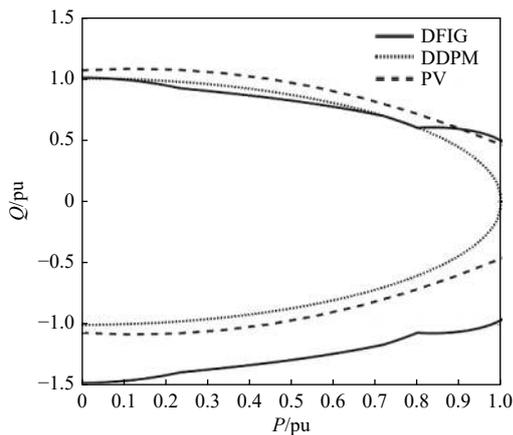
附图 A1 DFIG 的有功-无功功率关系图

Fig. A1 Diagram of the relation of active power and reactive power of doubly fed induction generator



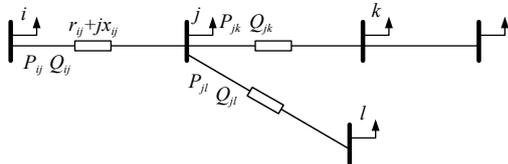
附图 A4 分段线性函数化示意图

Fig. A4 Diagram of piecewise linearization



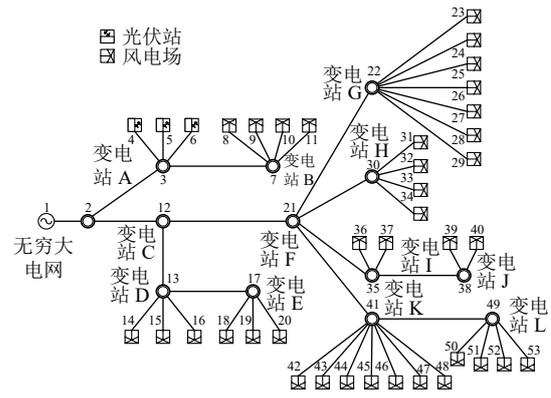
附图 A2 新能源机组无功出力范围

Fig. A2 Reactive power output range of new energy generating units



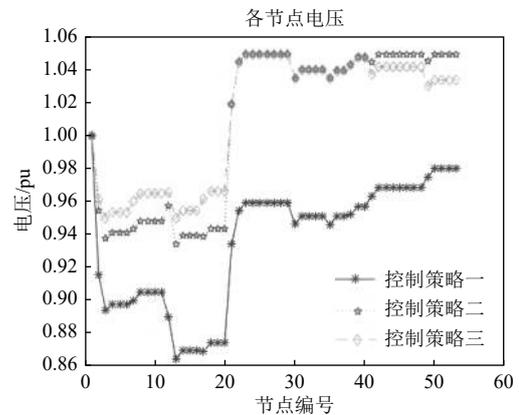
附图 A3 辐射状网架结构示意图

Fig. A3 Sketch map of a radial framework structure



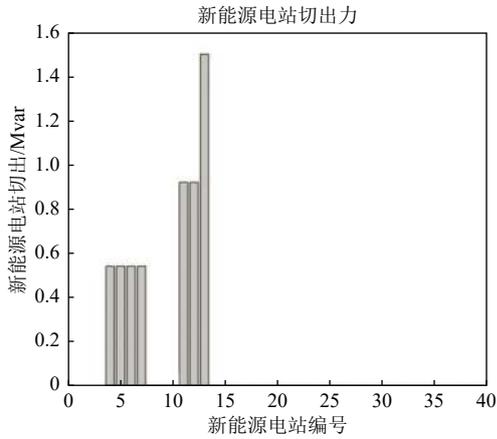
附图 A5 风电场集群拓扑图

Fig. A5 Topology graph of clustered wind farms



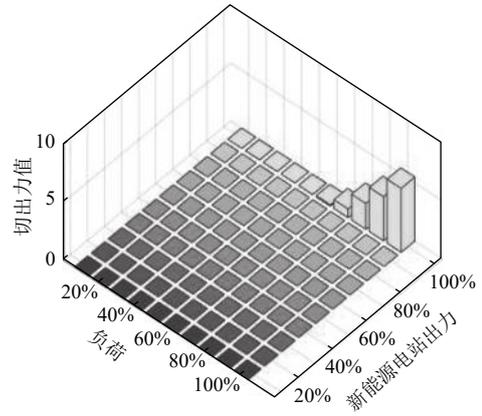
附图 A6 各节点电压标么值

Fig. A6 Per unit values of each nodal voltage



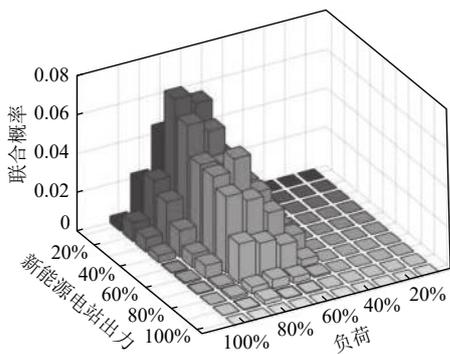
附图 A7 各新能源电站切出力值

Fig. A7 Cut-out power output of each new energy power station



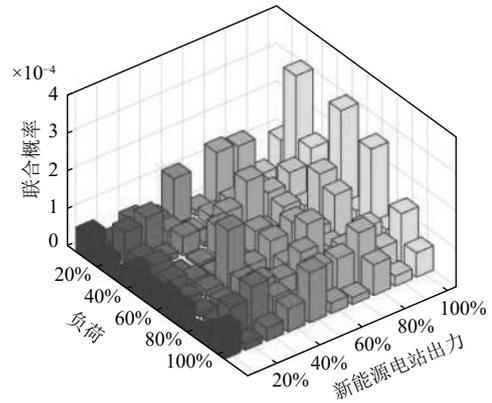
附图 A10 新能源电站切出力联合概率分布

Fig. A10 Joint probability distribution diagram of cut-out power of new energy power station



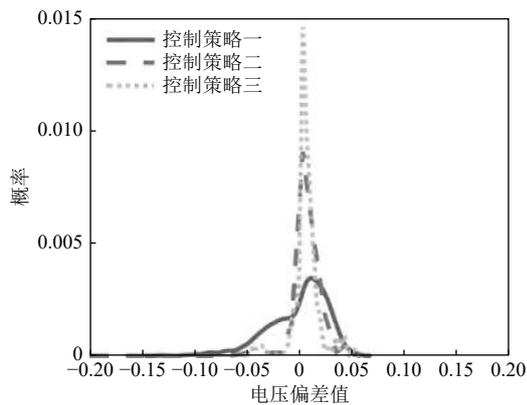
附图 A8 新能源电站出力-负荷联合概率分布

Fig. A8 Output-load joint probability distribution diagram of new energy power station



附图 A11 松弛偏差分布

Fig. A11 Distribution of relaxation deviation



附图 A9 电压偏差值分布

Fig. A9 Distribution of voltage deviation value