

# 考虑“源—荷”时序特性的配电网电压无功分区

季玉琦<sup>1</sup>, 陈雪寒<sup>1</sup>, 薛源<sup>2</sup>, 和萍<sup>1</sup>, 王佳琳<sup>2</sup>, 郭磊磊<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 国网河南省电力公司三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000)

**摘要:**分布式电源(DG)大规模接入配电网,其随机出力叠加负荷波动,增加了系统优化运行与控制的复杂程度。基于“源—荷”时序变化特性分析 DG 接入对配电网电压无功分区的影响,提出一种分区方案调整策略。首先,基于电压无功分区原则选取区域无功平衡、区域间耦合度、区域内耦合度以及区域无功储备等指标作为分区评价指标,建立基于增广电压/无功灵敏度矩阵的模糊聚类分区模型,并通过分析风电、光伏时序出力特性,结合典型日负荷曲线划分“源—荷”典型时序场景;然后,分析在多个“源—荷”场景下四项分区评价指标的变化,进而针对“源—荷”时序变化导致的分区指标变化,提出分区调整方法;最后,利用改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真分析。结果表明,“源—荷”的时序出力变化对电压无功分区影响较大,所提分区调整方法可以根据“源—荷”时序变化对分区方案进行动态调整,能较好地各分区评价指标控制在合理范围。

**关键词:**分布式电源;“源—荷”时序特性;电压无功分区;分区评价指标

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.006 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2022)04-0045-12

## Voltage and reactive power partitioning of distribution network considering the temporal information of "source-load"

Ji Yuqi<sup>1</sup>, CHEN Xuehan<sup>1</sup>, XUE Yuan<sup>2</sup>, HE Ping<sup>1</sup>, WANG JiaLin<sup>2</sup>, GUO Leilei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450003, China;

2. Sanmenxia Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Sanmenxia 472000, China)

**Abstract:** The integration of distributed generation (DG) to the distribution network and the random characteristic of DGs and load fluctuations increase the complexity of system optimization and control. In this paper, an adjustment strategy for partitioning is proposed considering the influence of DG integration on system voltage and reactive power partitioning based on the temporal characteristics of "source-load". Firstly, based on the principle of voltage and reactive power partitioning, four indexes containing regional reactive power balance, inter-regional coupling, intra-regional coupling, and regional reactive power reserve are selected as, and a fuzzy clustering partitioning model is established based on the augmented voltage and reactive power sensitivity matrix. Secondly, the characteristics of time series output of wind power and PV power, and typical daily load curve is analyzed to select the typical scenarios based on "source-load" time series. Then, a partitioning adjustment method is proposed considering the variations of the

收稿日期:2021-02-08;修回日期:2021-11-05

基金项目:国家自然科学基金(51707176);河南省科技攻关计划(212102210257);国网河南省电力公司科技项目(52171020000G);河南省高等学校重点科研项目(20A470014)

通信作者:季玉琦(1989-),男,博士,讲师,主要从事新能源电力系统规划与经济运行的研究;E-mail:jyiqui1989@163.com

four regional evaluation indexes in multiple "source-load" scenarios. Finally, the simulation is conducted based on the modified IEEE 33-node system. And the results show that the sequential variation of the "source-load" affects the voltage and reactive power partitioning. Besides, the evaluation indexes of each partition can be controlled in a reasonable range based on the proposed partitioning adjustment method.

**Key words:** distributed generation; time series variation characteristics of "source-load"; voltage and reactive power partitioning; evaluation indexes of partitioning

为缓解能源短缺和环境污染问题,越来越多分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网。DG就地消纳能有效降低网络损耗、提高能源利用效率<sup>[1-2]</sup>,同时也改变了配电网原有的电压无功分布,其出力的随机性增加了系统的不确定性<sup>[3]</sup>。

分区控制是实现DG就地消纳,降低DG不确定性对配电网影响的有效手段。通过合理分区把系统划分成若干个子系统,分别对子系统进行电压无功调节,既可降低含DG配电网优化控制的计算量,又能有效提高电压无功调控的精准性和实时性<sup>[4]</sup>。

目前提出的分区方法多考虑节点间电压无功的电气特性,根据节点间的电气紧密性聚类分区。基于电气距离分区的算法主要包括现代启发式算法<sup>[5]</sup>、聚类算法<sup>[6-7]</sup>、复杂网络理论算法<sup>[8]</sup>和混合算法<sup>[9]</sup>。这些分区方法主要考虑了节点间电气耦合度,但是未充分考虑区域无功平衡能力。

为了使分区方案更加合理,国内外学者提出了多目标分区方法,结合多个分区评价指标,建立多目标分区模型<sup>[10-14]</sup>。文献[10]提出一种改进的模块度函数分区算法,结合无功/有功平衡度指标与区域内节点耦合度指标进行分区,但未考虑“源—荷”时序特性对电压无功分区的影响;文献[11]基于电压/无功灵敏度建立模块度函数,考虑无功储备约束对系统进行分区;文献[12]以区域无功/有功储备及区域内/区域间耦合度四项分区评价指标作为粒子群算法的多目标函数进行优化分区;文献[13]提出综合考虑电气距离模块度指标和无功/有功平衡度功能性指标,采用改进的遗传算法进行分区优化。以上方法综合考虑了分区节点间的电气特性和无功调控能力,但未考虑DG出力与负荷时序特性对电压无功分区的影响。

本文基于增广电压/无功灵敏度的模糊聚类分区方法,分析“源—荷”时序特性对电压无功分区的影响。通过分析风电(wind generation, WG)、光伏

(photovoltaics, PV)时序出力特性,结合典型日负荷曲线划分“源—荷”典型时序场景,分析在多个“源—荷”典型场景下区域内耦合度、区域间耦合度、区域无功平衡、区域无功储备4项分区评价指标的变化。然后对4项分区指标进行合理性评价,进而提出电压无功分区的调整策略,实现分区结果随“源—荷”时序变化的动态调整,保证各区域内电压无功的合理分布。

## 1 配电网电压无功分区评价模型

基于电压控制与无功补偿的基本原则,结合国内外文献资料的分析<sup>[15]</sup>,配电网电压无功分区的基本原则可归纳如下:

- 1) 区域间弱耦合,尽可能减小相邻子区域间电压无功控制的相互影响;
- 2) 区域内强耦合,区域内各节点间的电气联系紧密;
- 3) 每个区域内应包含无功源节点和负荷节点,保证区域内无功平衡,且有一定的无功裕度,尽量满足无功功率就地平衡的基本原则;
- 4) 保证区域节点连通性,且分区数目不易过多,否则影响系统运行效率。

为量化分析电压无功分区方案是否满足分区原则,通常使用分区评价指标来进行评估<sup>[16]</sup>。分区评价指标可分为结构性指标和功能性指标。结构性指标衡量区域内各节点间以及各区域间的联系紧密程度,一般包括区域内耦合度指标和区域间耦合度指标。功能性指标衡量区域内的调控性能以及区域内“源—荷”的匹配协调程度,通常包括区域无功储备指标和区域无功平衡指标<sup>[17]</sup>。因此,为了保证分区结果“区域内强耦合”、“区域间弱耦合”、“每个区域内都包含无功源节点和负荷节点,区域内的无功源要有充足的无功储备,使无功源被均匀分配至各个

区域”等多个要求,引入了这 4 个指标区域内耦合度、区域间耦合度、区域无功平衡和区域无功储备 4 项指标对分区结果进行评价。

### 1.1 区域内耦合度

部分 DG 对负荷节点有一定的电压无功控制能力,根据分区原则,二者之间电气特性应存在强耦合。区域  $k$  的区域内耦合度为

$$f_{\text{OH}_{\text{in}k}} = \frac{1}{l_{k_g} \cdot l_{k_l}} \cdot \frac{\sum_{j=1, j \in k_g}^{l_{k_g}} \sum_{i=1, i \in k_l}^{l_{k_l}} D_{ij}}{\max D} \quad (1)$$

式中  $l_{k_g}$ 、 $l_{k_l}$  分别为区域  $k$  内 DG、负荷节点的个数; $k_g$ 、 $k_l$  分别为区域  $k$  内 DG、负荷节点的集合; $D_{ij}$  为负荷节点  $i$ 、 $j$  之间的电气距离; $D$  为配电网中任意 2 个节点间的电气距离<sup>[18]</sup>。

式(1)中,分子是区域  $k$  内 DG、负荷节点之间的平均电气距离,分母是整个系统中节点间最大电气距离。该指标数值越小,子区域内 DG、负荷节点的电气联系越紧密,即区域内耦合度越强。

### 1.2 区域间耦合度

为避免远距离传输无功增加网损和电压损耗,应尽量减小区域内控制对其他区域的影响,即保证各区域之间电气弱耦合。区域  $k$  与其他区域间耦合度为

$$f_{\text{OH}_{\text{out}k}} = \frac{1}{l_{k_l} \cdot l_{k_g}} \cdot \frac{\sum_{j=1, j \in k_l}^{l_{k_l}} \sum_{i=1, i \in k_g}^{l_{k_g}} D_{ij}}{\min_{i \in k_g, j \notin k} D_{ij}} \quad (2)$$

其中,分子表示区域  $k$  内 DG、负荷节点的平均电气距离,分母表示区域  $k$  内 DG 节点与区域  $k$  外的负荷节点间的最小电气距离。该指标越小,表示区域间耦合度越弱。

### 1.3 区域无功平衡

在分区原则中,理想状态是各区域内的无功就地平衡,避免大量无功功率流动造成的能量损耗和电压降落。区域  $k$  无功平衡指标为

$$f_{\text{RRB}_k} = \frac{Q_{G_k} - Q_{L_k}}{Q_{L_k}} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $Q_{G_k}$  为区域  $k$  内 DG 无功出力; $Q_{L_k}$  为区域  $k$  内无功负荷需求。 $f_{\text{RRB}_k} \geq 0$  表示 DG 无功出力满足其所在区域负荷的无功需求;反之, $f_{\text{RRB}_k} < 0$  表示 DG 无功出力不能满足所在区域负荷的无功需求。

### 1.4 区域无功储备

根据无功分区原则,系统实际运行时各区域内应有至少 10%~15% 的无功裕度<sup>[19-20]</sup>,以防止区域内因无功不足发生电压崩溃。区域  $k$  无功储备评价指标为

$$f_{\text{RR}_k} = \left(1 - \frac{Q_{L_k}}{Q_{G_k}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

其中, $Q_{G_k}$  为区域  $k$  内无功源的最大无功出力。当  $Q_{L_k} > Q_{G_k}$  时,该区域中没有无功储备,负荷的无功需求由其他区域无功源提供,此时令  $f_{\text{RR}_k} = 0$ 。

### 1.5 基于增广电压/无功灵敏度的模糊聚类分区

基于增广电压/无功灵敏度的模糊聚类分区是一种较常见的电压无功分区方法。该方法采用增广电压/无功灵敏度矩阵求得电气距离,进而基于传递闭包法进行模糊聚类分区<sup>[21-22]</sup>。对有  $n$  个节点的配电网,其中,第 1~ $m$  个节点是 PQ 节点,第  $(m+1)$ ~ $(n-1)$  个为 PV 节点,第  $n$  个为平衡节点。分区流程如图 1 所示,电压无功分区过程如下。

1) 基于牛拉法潮流分解的雅克比矩阵可得到  $m$  阶电压/无功灵敏度矩阵:

$$S_{\text{VQ}} = \left[ \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{\Delta Q} \right]_{m \times m} \quad (5)$$

其中, $\Delta V/V$  为节点电压幅值变化量; $\Delta Q$  为节点无功变化量; $S_{\text{VQ}}$  只包含  $m$  个 PQ 节点之间的电压/无功灵敏度。DG 的接入改变了电网中各支路潮流的单向流动特点,从而改变了电网的电压分布,且分布式电源的出力具有较强的随机性。

2) 构建增广电压/无功全维灵敏度矩阵。将系统中的各 PV 节点依次设为 PQ 节点,分别进行潮流计算,最后,得到一个包含除平衡节点外所有节点的增广电压/无功灵敏度矩阵。该矩阵为  $n-1$  阶方阵:

$$S = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1(n-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{i(n-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(n-1)1} & \cdots & x_{(n-1)j} & \cdots & x_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $x_{ij}$  为节点  $i$  的电压幅值对节点  $j$  的无功功率灵敏度,且  $x_{ij} = \Delta V_i / \Delta Q_j V_i$ 。

3) 数据标准化。将增广电压/无功灵敏度矩阵  $S$  标准化,有利于后续的比较与聚类分析。

4)定义电气距离矩阵,求出模糊相似矩阵。采用欧几里得距离表示节点*i*、*j*间电气距离:

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (7)$$

其中, $x_{ik}$ 、 $x_{jk}$ 分别表示节点*i*、*j*与其他节点之间标准化后的电压/无功灵敏度。由 $D_{ij}$ 构成一个*n*-1阶的系统全维电气距离方阵 $\mathbf{R}$ 。

5)将模糊相似矩阵利用平方自合成具有传递性的模糊等价矩阵<sup>[21]</sup>。

6)对各节点进行聚类合并,绘制模糊聚类图。

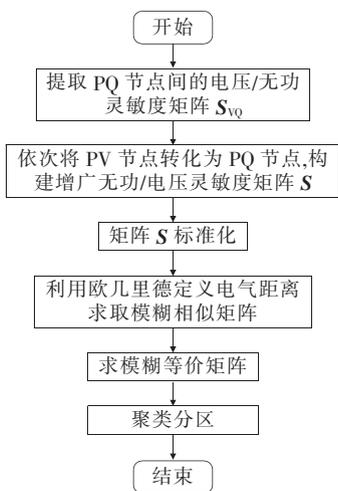


图1 基于增广电压/无功灵敏度矩阵的模糊聚类分区流程

Figure 1 Flow chart of fuzzy clustering partitioning based on augmented voltage and reactive power sensitivity matrix

## 2 DG 出力时序特性及无功调控特性

DG 按照出力特性可分为稳定出力型和间歇出力型,其中稳定出力型包括微型燃气轮机、冷热电联产机组、小型柴油发电机等,间歇出力型主要包括分布式的风力发电和光伏等。其中,风电和光伏的出力受天气因素影响,具有较强的随机性和波动性,增加了系统的不确定性,进而影响系统的优化运行<sup>[23]</sup>。本文主要分析风电和光伏这两类常见间歇出力型 DG 的出力特性。

### 2.1 DG 的时序出力特性

1)光伏的时序出力特性。

光伏发电主要受太阳辐射的影响,通常表现为白天有光照时发电、夜晚或白天无光照时停发,具有

明显的日周期性<sup>[24]</sup>。光伏板电池的有功发电出力 $P_{PV,t}$ 与太阳辐射强度之间的关系可近似表达为

$$\begin{cases} \frac{P_{sn} I_t^2}{I_{std} R_c} [1 - \partial_T (T_t - T_{stc})], & 0 \leq I_t < R_c \\ \frac{P_{sn} I_t}{I_{std}} [1 - \partial_T (T_t - T_{stc})], & R_c \leq I_t \end{cases} \quad (8)$$

式中  $I_{std}$  为标准条件下的单位面积光照强度; $R_c$  为设定的特定强度的光强; $P_{sn}$  为光伏板电池在标准条件下的额定功率; $T_t$  为  $t$  时刻光伏电池的温度; $T_{stc}$  为标准电池温度; $\partial_T$  为光伏的温度系数; $I_t$  为地球某水平面接收到的太阳总辐射强度。

某光伏电站全年各天不同时刻发电出力如图2所示,采样间隔为5 min,每天288个采样点,共365 d。由图2可以看出,随着太阳辐射的强弱变化,一天中不同时刻光伏电站发电出力不同,夜间发电出力为零,早上和晚上的发电出力较低,中午发电出力较高,具有间歇性、波动性以及随机性的特性。

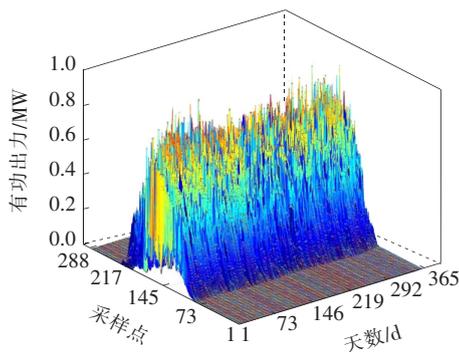


图2 某光伏电站的年有功出力曲线

Figure 2 The diagram of an annual photovoltaic power station output

2)风机的时序出力特性。

风电场输出功率的随机变化主要源于风速和风向的波动<sup>[25]</sup>,风电机组的输出功率 $P_w$ 和轮毂高度处的风速 $v$ 之间的关系数学模型为

$$P_w = \begin{cases} 0, & v \leq v_{Cl} \text{ 或 } v \geq v_{Co} \\ \frac{P_R}{v_R^3 - v_{Cl}^3} v^3 - \frac{P_R}{v_R^3 - v_{Cl}^3} P_R, & v_{Cl} \leq v \leq v_R \\ P_R, & v \geq v_R \end{cases} \quad (9)$$

式中  $P_R$  为风机额定输出功率,kW; $v$  为风机轮毂高度处的风速,m/s; $v_{Cl}$  为切入风速,风速高于此设定值时自动装置动作把风机并入电网; $v_{Co}$  为切出

风速,风速高于此值时风机停止发电,从电力系统中解列出来; $v_R$  为额定风速,风速大于或等于此值而小于切出风速时风机出力为额定值。

某地区风电各季度不同时间平均出力如图 3 所示,可以看出,季尺度风电出力具有较强的波动性和随机性。

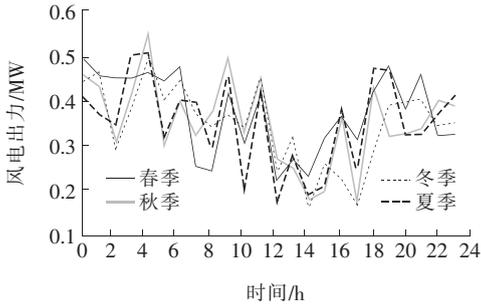


图 3 某地区的风力发电各季度不同时间平均出力

Figure 3 The average output of wind power in a region in different times of the season

## 2.2 DG 无功调控特性

### 1) 光伏发电的无功调控特性。

光伏发电并入电网,将会改变系统的无功潮流,影响节点的电压/无功灵敏度。作为系统新增的发电电源,有大量的有功、无功电流注入并网点。有功电流注入电网,会引起电网电压的升高;无功电流注入电网,如果是感性无功电流,会引起并网点电压的降低,如果是容性无功电流,会引起并网点电压的升高<sup>[26]</sup>。

PV 通过逆变器并网,由电力电子控制提供电压支撑,可调无功范围与逆变器容量有关<sup>[26]</sup>:

$$Q_{PV,max} = \pm \sqrt{(S_{inv})^2 - (P_{PV})^2} \quad (10)$$

式中  $Q_{PV,max}$  为逆变器最大无功输出容量; $P_{PV}$  为光伏逆变器有功出力; $S_{inv}$  为逆变器容量,通常约为 PV 额定有功容量的 1.0~1.1 倍。

光伏逆变器  $P$ - $Q$  容量调节范围曲线如图 4 所示,其中,A 点  $P_{PV,max}$  是光伏并网有功额定功率,对应无功可调范围 $[-Q_{max,1}^{PV}, Q_{max,1}^{PV}]$ ,当  $S_{inv}$  是 1.1 倍额定有功时,最大无功出力约为额定有功容量的 46%;B 点  $P_{PV,max}^{cut}$  为逆变器切入切出功率,对应无功调节范围 $[-Q_{max,2}^{PV}, -Q_{max,2}^{PV}]$ ;逆变器白天无功出力可调节范围是 $[-Q_{max}^{PV}, Q_{max}^{PV}]$ , $Q_{max}^{PV} \in [Q_{max,1}^{PV}, Q_{max,2}^{PV}]$ ,夜间有功输出为 0,无功范围为逆变器额定容量,故夜间无功调节潜力较大<sup>[27]</sup>。

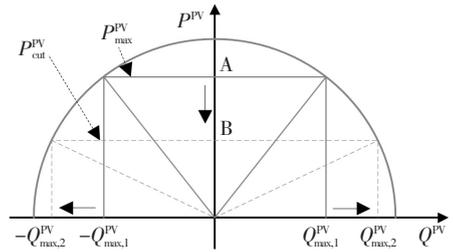


图 4 光伏逆变器  $P$ - $Q$  容量曲线

Figure 4 Photovoltaic inverter  $P$ - $Q$  capacity curve

### 2) 风机发电的无功调控特性。

双馈型感应风机(doubly-fed induction generator, DFIG)是目前最常见的风电机组。通过背靠背式变换器进行有功无功解耦控制,可实现连续无功补偿,且响应速度快,满足了多时间尺度灵活调节需求,使得 DFIG 单机或风电场参与电压无功调控来提高系统运行稳定性<sup>[27]</sup>。

DFIG 无功功率由定子侧变流器和网侧变流器共同决定。其中,定子侧无功极限同时受定子侧电流及转子侧电流限制。根据转子最大电流可得无功功率范围:

$$\begin{aligned} -\frac{3U_1^2}{X_1} - \sqrt{\left(\frac{3X_m U_1}{X_1} I_{max}\right)^2 - P^2} &\leq Q_s \\ &\leq \frac{3U_1^2}{X_1} + \sqrt{\left(\frac{3X_m U_1}{X_1} I_{max}\right)^2 - P^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $U_1$  为定子端电压; $X_1$  为定子电抗; $X_m$  为励磁电抗; $I_{max}$  为根据换流器容量得到的转子最大电流; $P$  为风机的有功功率; $Q_s$  为由气隙传至定子的无功功率。

随着风机有功出力的增大,无功功率调节范围减小,无功调节能力减弱。综合定子侧和网侧换流器无功调节能力,不同有功输出下的无功调节范围如图 5 所示。

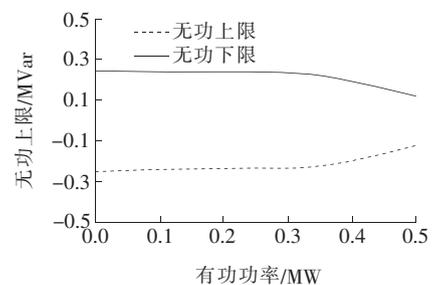


图 5 DFIG 风电机组无功调节范围

Figure 5 Reactive power adjustment range of DFIG wind turbine

### 3 “源—荷”时序变化对分区指标的影响

#### 3.1 基于增广电压/无功灵敏度模糊聚类的电压无功分区结果

本文基于改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真分析。参考相关文献[28],在节点 11、21 处分别接入 0.5 MW 的 WG;在节点 16、24、32 处分别接入 0.3、0.4、0.3 MW 的 PV;在节点 1、14、30 处分别接入 2.0、1.6、2.4 MVar 的并联补偿电容器组,单组容量均为 0.2 MVar。调整后的 IEEE 33 节点系统接线如图 6 所示;某典型日负荷和 DG 出力曲线如图 7 所示。

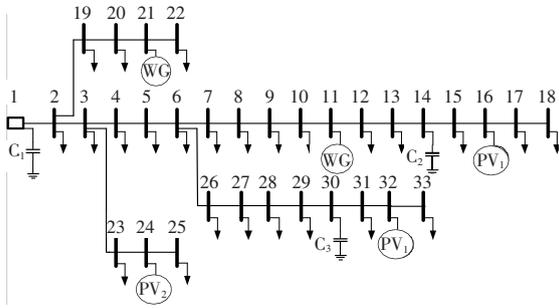


图 6 改进的 IEEE 33 节点系统接线

Figure 6 The modified IEEE 33 node system

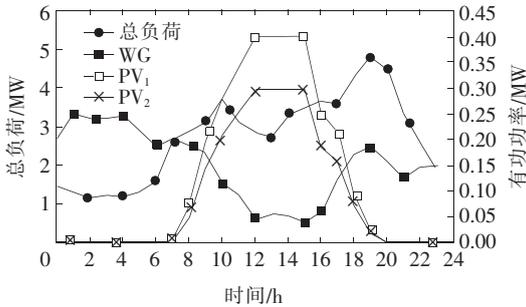


图 7 典型日负荷和 DG 出力曲线

Figure 7 Typical daily load DG output and curves

由图 7 可知,光伏发电集中出力和风电反调峰的特征显著,将导致不同时刻系统潮流非均衡分布。因此,根据负荷和 DG 的出力特性,划分出 8 个场景,如表 1 所示,场景 1 在负荷低谷期, DG 出力处于强风弱光状态,即 WG 出力较强, PV 出力较弱;场景 2、5 在负荷上升期, DG 出力分别处于中风中光和弱风强光状态;场景 4、6、8 在负荷下降期, DG 出力分别处于弱风强光、中风中光及中風弱光状态;

场景 3、7 在负荷高峰期, DG 出力分别处于中风中光、中風弱光状态。基于增广电压/无功灵敏度矩阵的模糊聚类方法,得到改进 IEEE 33 节点系统的分区结果,如图 8 所示。

表 1 考虑“源—荷”时序特性的典型场景划分

Table 1 Division of typical scenarios considering "source-load" temporal characteristics

场景	时段	负荷及 DG 有功出力变化
1	00:00—06:00, 23:00	负荷低谷期, 强风弱光
2	07:00—09:00	负荷上升期, 中风中光
3	10:00	负荷高峰期, 中风中光
4	11:00—13:00	负荷下降期, 弱风强光
5	14:00—15:00	负荷上升期, 弱风强光
6	16:00—17:00	负荷下降期, 中风中光
7	18:00—20:00	负荷高峰期, 中風弱光
8	21:00—22:00	负荷下降期, 中風弱光

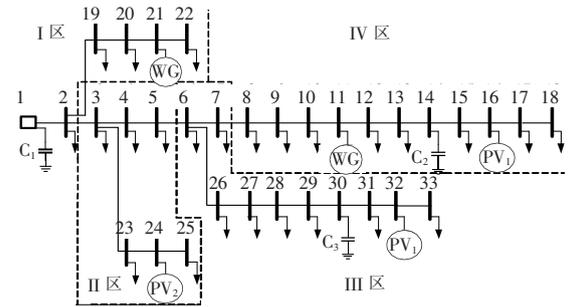


图 8 基于增广电压/无功灵敏度的模糊聚类分区结果

Figure 8 Fuzzy clustering partitioning result based on augmented voltage/reactive power sensitivity

#### 3.2 “源—荷”时序变化对区域内耦合度的影响

基于 8 个典型场景,分析“源—荷”时序变化对区域内耦合度指标的影响,如图 9 所示;各区域内耦合度的均值与方差如表 2 所示。

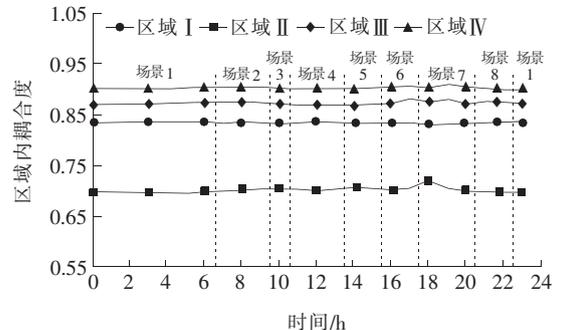


图 9 8 个场景的区域内耦合度指标

Figure 9 Intra-region coupling degree index under 8 scenarios

表 2 各区域内耦合度指标均值和方差

Table 2 Average values and variances of intra-region coupling degree index in each partitioning

区域	均值	方差	区域	均值	方差
I	0.820 3	$93.55 \times 10^{-6}$	III	0.863 1	$1.29 \times 10^{-5}$
II	0.670 0	$3.78 \times 10^{-5}$	IV	0.897 2	$6.25 \times 10^{-6}$

根据图 9 和表 2,不同场景下的区域内耦合度方差较小,指标变化平缓,表明区域内耦合度变化不大,这一指标未能体现 DG 时序出力变化对负荷节点的控制能力。

以场景 4、5 为例,在这 2 个场景下 PV<sub>1</sub>、PV<sub>2</sub> 满发。区域 II 仅含无功源 PV<sub>2</sub>,此时没有无功调节能力,但区域内耦合度与其他场景基本持平,未能反映 PV<sub>2</sub> 出力时序特性对负荷节点的控制能力。这是因为基于增广电压/无功灵敏度定义的电气距离是根据牛拉法潮流计算收敛时的雅可比矩阵求得。微分条件下得到的灵敏度不能较好地反映潮流分布发生较大变化后的电压/无功灵敏度。

### 3.3 “源—荷”时序变化对区域间耦合度的影响

8 个场景下的区域间耦合度变化如图 10 所示,各区域间耦合度均值如表 3 所示。根据图 10、表 3 可知,在场景 7 负荷高峰期时,区域 I、II 和 IV 的区域间耦合度最小。负荷越重,区域内 DG 的出力主要由本区域的负荷消纳,对其他区域的影响越小。但区域 III 的区域间耦合度呈上升趋势,该区域有 2 个无功源 PV<sub>1</sub> 和并联补偿电容器组 C<sub>2</sub>,其中 PV<sub>1</sub> 无功容量较小,基本由本区域无功负荷消纳;C<sub>2</sub> 补偿容量较大,区域 II 的一部分无功补偿也由 C<sub>2</sub> 承担。所以区域 III 对其他区域的区域间耦合度较大。

表 3 8 个场景下各区域间耦合指标的均值

Table 3 Average values of inter-region coupling degree index in each partitioning under 8 scenarios

场景	各区域间耦合度的均值			
	I	II	III	IV
1	4.931 4	1.126 1	3.455 2	5.128 6
2	4.888 6	1.110 6	3.632 7	5.055 8
3	4.836 9	1.097 3	3.738 2	4.947 6
4	4.884 7	1.100 0	3.714 4	5.117 9
5	4.853 2	1.090 6	3.867 4	5.118 0
6	4.828 5	1.100 2	3.945 1	4.967 5
7	4.775 3	1.081 9	3.844 1	4.874 4
8	4.900 4	1.115 0	3.632 2	5.080 0

综合“源—荷”时序变化对区域间耦合度的影响分析可知,负荷越重,区域内 DG 优先满足其所在区域的负荷需求,对其他区域影响越小。但在配电网中 DG 容量通常较小,无功补偿更多的是由并联电容器组承担。当某区域的电容器组对其他区域进行无功补偿时,区域间耦合度较大,未能体现 DG 时序出力变化对其他区域的影响。

### 3.4 “源—荷”时序变化对区域无功储备的影响

8 个场景区域无功储备指标如图 11 所示,8 个场景下的各个区域无功储备指标如表 4 所示。根据图 11、表 4 可知,区域 I、III、IV 的平均无功储备指标均满足区域无功储备大于 10% 的要求,但区域 II 在 8 种场景下无功储备均为 0。这是由于区域 II 的节点 23、24、25 无功负荷较大,仅由 PV<sub>2</sub> 承担无功补偿,无法满足该区域的无功需求。尤其在场景 4、5 时 PV<sub>2</sub> 满发,区域 II 中没有无功源,由相邻区域 I、III 提供无功。

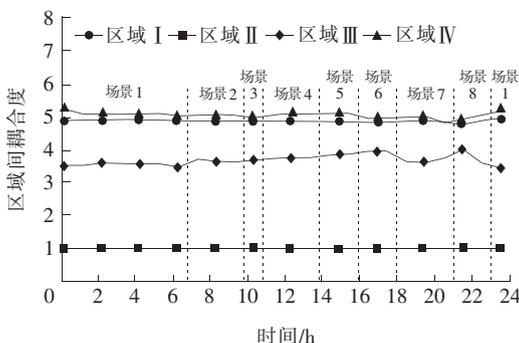


图 10 8 个场景的区域间耦合度指标

Figure 10 Inter-region coupling degree index under 8 scenarios

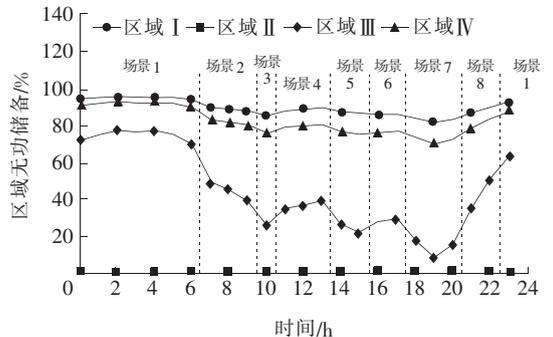


图 11 8 个场景的区域无功储备指标

Figure 11 Regional reactive power reserve index under 8 scenarios

表 4 8 个场景下各区域无功储备指标的均值

Table 4 Average values of regional reactive power reserve index under 8 scenarios %

场景	各区域无功储备指标的均值			
	I	II	III	IV
1	94.85	0	74.54	91.44
2	88.84	0	44.09	81.22
3	85.70	0	25.23	75.06
4	88.89	0	36.76	79.27
5	87.00	0	23.69	75.15
6	86.13	0	28.42	76.05
7	82.63	0	13.29	70.84
8	89.94	0	49.69	83.07

区域无功储备指标受 DG 出力特性和负荷无功需求时序性的影响较大,能在一定程度上反映 DG 出力变化对分区结果的影响。但是 DG 无功出力受有功出力制约,当无功出力较小导致区域无功储备不足时,需要根据这一指标对分区结果进行优化。

### 3.5 “源—荷”时序变化对区域无功平衡的影响

8 个场景区域无功平衡指标如图 12 所示,8 个场景下各区域无功储备指标的均值如表 5 所示。结合表 4、5 可知,区域 II 因无功紧俏而不平衡,但区域 III、IV 无功储备充足,却没有得到充分利用导致区域不平衡。这与潮流分布有关,区域 IV 中 PV 节点电压水平较高,无功从区域 IV 流向区域 I、II、III,导致出现区域无功不平衡现象。在场景 7 负荷晚高峰期,区域 IV 的无功平衡指标突然增大,这是因为区域 IV 中 PV<sub>1</sub> 有功出力较弱,可调无功增大。

因此,区域无功平衡指标除了受“源—荷”时序性的影响外,同时不能忽略系统潮流分布对指标的影响,其不能较好地反映“源—荷”时序特性对分区结果的影响。

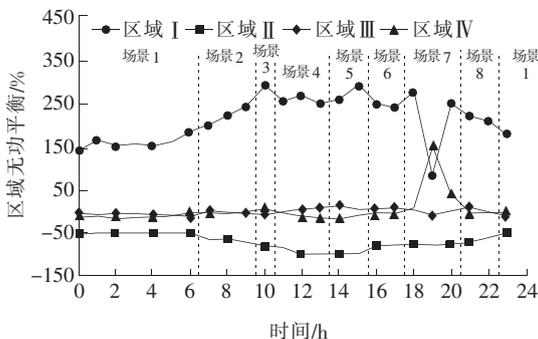


图 12 8 个场景的区域无功平衡指标

Figure 12 Regional reactive power balance index under 8 scenarios

表 5 8 个场景下各区域无功储备指标均值

Table 5 Average values of regional reactive power balance index in each partitioning under 8 scenarios %

场景	各区域无功平衡的均值			
	I	II	III	IV
1	166.37	-51.55	-4.87	-10.62
2	255.06	-73.05	-3.02	0.80
3	257.83	-83.23	0.62	-4.96
4	263.22	-100.00	8.93	-13.57
5	273.80	-89.49	6.11	-5.73
6	262.02	-77.04	5.15	2.85
7	187.83	-75.86	1.37	64.38
8	186.95	-53.15	-6.01	-4.51

## 4 考虑“源—荷”时序特性的分区调整

### 4.1 考虑各项分区指标的动态分区调整策略

“源—荷”时序变化对电压无功分区影响较大,多种场景下均出现了 4 项指标不合格的现象。结构性指标不能较好地体现 DG 时序变化对区域内及相邻区域节点的无功调控能力。在功能性指标中,区域无功平衡指标受潮流分布影响较大,易出现区域无功不平衡现象;区域无功储备指标受 DG 时序变化与负荷无功需求多样性的影响,易出现区域无功储备不合格现象。因此,需要依据电压无功分区原则对指标不合格的时段进行分区方案调整。

基于增广电压/无功灵敏度矩阵的模糊聚类分区是以区域内/区域间耦合度指标为目标进行聚类分区。因此在分区调整时,应更侧重于考虑区域无功储备和区域无功平衡指标对分区结果的影响。制定分区方案的调整策略如下。

1) 判断某一时刻的区域无功储备和区域无功平衡是否合格,判断公式为

$$\begin{cases} f_{RR_k} > 0 \\ f_{RR_k} \geq 10\% \end{cases} \quad (12)$$

2) 若各区域在某一时刻的区域无功平衡指标和区域无功储备指标满足式(12),则不需要分区调整。若不满足,则按照如下 2 种方式调整分区。

① 部分负荷节点调整。若相邻区域无功储备充

足,则将与该区域相连接的负荷节点划分到该区域,判断是否满足式(12)。

②分区合并。若部分负荷调整后仍无法满足区域无功平衡和区域无功储备的要求,则考虑将该分区与相邻无功储备较为充裕的分区合并,直至所有分区满足区域无功储备和区域无功平衡指标的要求。

#### 4.2 不同场景下的分区调整结果

依据“源—荷”时序特性对区域无功平衡指标和区域无功储备指标的分析可知,区域无功平衡指标评价较差,所以优先考虑区域无功平衡指标进行分区调整。将区域无功不平衡的区域 II、IV 与无功平衡且有充足无功储备的区域 I 合并,为保证节点的连通性同时合并节点 5、6,此时调整后的分区结果如图 13 所示。

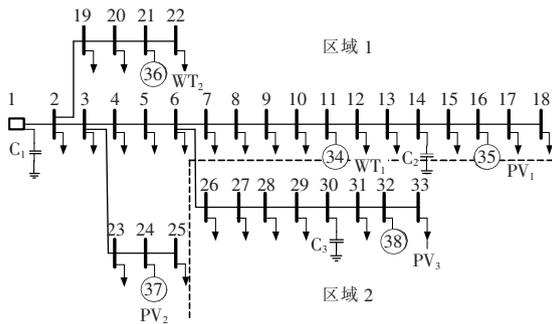


图 13 调整后的分区结果

Figure 13 The adjusted partitioning results

分区调整后经分区指标计算,负荷高峰期场景 3、7 中各区域功能性分区指标满足式(12)。其余场景因负荷较轻,经计算区域无功储备指标,区域 1 的无功储备没有充分利用导致该区域内无功不平衡,不宜分区。场景 3、7 调整后的区域无功储备和区域无功平衡指标如表 6 所示。经分区调整后的场景 3、7 中各区域功能性分区指标满足式(12)。调整前、后区域无功储备和区域无功平衡指标对比如图 14、15 所示。

由表 6 及图 14、15 可知场景 3、7 分区功能性指标比调整前优化较多,最小区域无功储备指标经调整后由 0% 增加到 17.97%,最小区域无功平衡指标经调整后由 -493% 增加到 4.49%。

表 6 分区调整后场景 3、7 的区域无功储备及区域无功平衡指标

Table 6 Regional reactive power reserve and regional reactive power balance indexes of scenario 3 and 7 after partitioning adjustment %

场景	时刻	$f_{RRB}$		$f_{RR}$	
		区域 1	区域 2	区域 1	区域 2
3	10:00	4.95	5.75	59.78	33.61
	18:00	5.61	16.55	54.97	26.60
7	19:00	20.29	4.49	49.56	17.97
	20:00	11.62	13.49	53.64	24.48

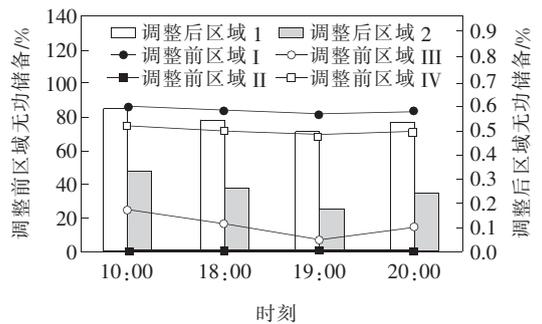


图 14 场景 3 和 7 调整前、后各区域无功储备指标

Figure 14 The reactive power reserve index of each partitioning before and after the adjustment under scenario 3 and scenario 7

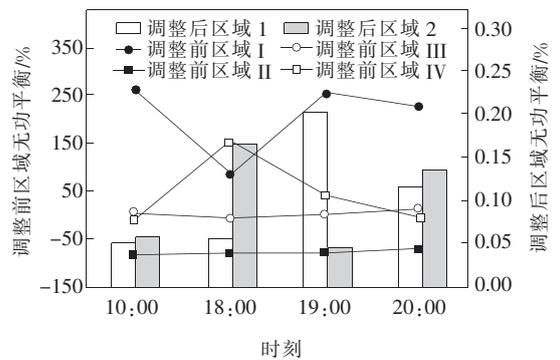


图 15 场景 3 和 7 调整前、后各区域无功平衡指标

Figure 15 The reactive power balance index of each partitioning before and after the adjustment under scenario 3 and scenario 7

根据分区调整前、后最小区域无功储备和区域无功平衡指标的对比,分区功能性指标比调整前优化较多,表明各区域的无功调控性能更好,区域内“源—荷”的匹配更加协调。经分区调整,不同场景

下各区域都达到区域无功平衡且无功储备充足。对比分区调整前的各项指标,根据 DG 出力时序性和负荷需求的多样性进行实时分区调整是有效的。

## 5 结语

基于增广电压/无功灵敏度矩阵的模糊聚类分区方法,分析了“源—荷”时序变化对区域内耦合度、区域间耦合度、区域无功储备和区域无功平衡 4 项分区指标的影响,提出了不同场景下的分区调整策略,用改进的 IEEE 33 节点系统进行验证,得出如下结论。

1)“源—荷”时序变化对电压无功分区的影响较大,部分时刻出现分区指标不合格现象。这是因为“源—荷”的时序变化会改变系统的电压无功分布,进而影响区域耦合度;同时 DG 有功出力的变化改变了其无功调节范围,对无功储备有较大影响。

2)根据“源—荷”时序变化对分区指标的影响分析,本文提出的分区调整方案能够实现分区结果随“源—荷”时序变化的动态调整,保证各区域内电压无功的合理分布。

### 参考文献:

[1] 韩悌,柯贤波,霍超,等.多直流、高占比新能源电力系统应对严重扰动新技术研究[J].智慧电力,2020,48(4):9-12+27.  
HAN Ti,KE Xianbo,HUO Chao,et al.New technology coping with serious disturbance in power system with multiple DC and high ratio new energy[J].Smart Power,2020,48(4):9-12+27.

[2] 李顺昕,洪海峰,秦砺寒,等.考虑配电网最大消纳能力的集中型分布式电源并网点选择方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):196-201.  
LI Shunxin,HONG Haifeng,QIN Lihan,et al.Selection of centralized distributed generation's connection point considering the maximum absorptive capacity of the distribution network[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(3):196-201.

[3] 孙伟卿,刘唯,张婕.高比例可再生能源背景下配电网动态重构与移动储能协同优化[J].电力系统自动化,

2021,45(19):80-90.

SUN Weiqing,LIU Wei,ZHANG Jie.Collaborative optimization for dynamic reconfiguration of distribution network and mobile energy storage in background of high proportion of renewable energy[J].Automation of Electric Power Systems,2021,45(19):80-90.

- [4] 俞翔,鲁江,董云龙,等.适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):174-180.  
YU Xiang,LU Jiang,DONG Yunlong,et al.A steady-state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system[J].Power System Protection and Control,2022,50(1):174-180.
- [5] 林少华,吴杰康,莫超,等.基于二阶锥规划的含分布式电源配电网动态无功分区与优化方法[J].电网技术,2018,42(1):238-246.  
LIN Shaohua,WU Jiekang,MO Chao,et al.Dynamic partition and optimization method for reactive power of distribution networks with distributed generation based on second-order cone programming[J].Power System Technology,2018,42(1):238-246.
- [6] 韩帅,孙乐平,杨艺云,等.基于改进 K-means 聚类 and 误差反馈的数据清洗方法[J].电网与清洁能源,2020,36(7):9-15.  
HAN Shuai,SUN Leping,YANG Yiyun,et al.A data cleaning method based on improved K-means clustering and error feedback[J].Power System and Clean Energy,2020,36(7):9-15.
- [7] 赵莉华,赵茂林,夏炜,等.基于 K-means 和 SOM 混合算法的高压断路器操作机构状态评估[J].高压电器,2020,56(1):36-42.  
ZHAO Lihua,ZHAO Maolin,XIA Wei,et al.Status assessment of high voltage circuit breaker operating mechanism based on K-means and SOM hybrid algorithm [J].High Voltage Apparatus,2020,56(1):36-42.
- [8] MEYERHENKE H,SANDERS P,SCHULZ C.Parallel graph partitioning for complex networks[J].IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,2017,28(9):2625-2638.
- [9] WANG Y R,LI F X,WAN Q L,et al.Reactive power planning based on fuzzy clustering,gray code,and simulated annealing[J].IEEE Transactions on Power Sys-

- tems,2011,26(4):2246-2255.
- [10] 李争博,刘友波,任鹏哲,等.考虑地理信息聚类分区的配电网多阶段动态规划方法[J].电力系统自动化,2022,46(14):38-45.  
LI Zhengbo, LIU Youbo, REN Pengzhe, et al. Multi-stage dynamic planning method for distribution network considering clustering and partitioning of geographic information[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(14):38-45.
- [11] 徐韵,颜湘武.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[J].现代电力,2020,37(1):42-51.  
XU Yun, YAN Xiangwu. Dynamic partitioning real-time reactive power optimization method distribution network with renewable distributed generators participating in regulation[J]. Modern Power, 2020, 37(1): 42-51.
- [12] 郑晓莹,陈政轩,曾琮.含分布式电源的配电网双层分区调压策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):90-97.  
ZHENG Xiaoying, CHEN Zhengxuan, ZENG Cong. Double-layer partition voltage regulation strategy of a distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control,2021,49(6):90-97.
- [13] 丁明,刘先放,毕锐,等.采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J].电力系统自动化,2018,42(15):47-52+141.  
DING Ming, LIU Xianfang, BI Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 47-52+141.
- [14] 崔惟,颜伟, Lee Weijen, 等.考虑区域无功平衡的主导节点选择和无功分区的优化方法[J].电网技术,2017,41(1):164-170.  
CUI Wei, YAN Wei, Lee Weijen e, et al. Optimal pilot-bus selection and network partitioning algorithm considering zonal reactive power balance[J]. Power System Technology,2017,41(1):164-170.
- [15] 张艳艳.电力系统无功电压控制分区研究综述[J].电工电气,2018(3):1-6+28.  
ZHANG Yanyan. Research overview of reactive voltage control partitioning for power systems[J]. Electro-technics Electric,2018(3):1-6+28.
- [16] 李建芳,张璐,宋晓辉,等.含高渗透率分布式电源的配电网多目标无功分区及主导节点选择方法[J].可再生能源,2017,35(11):1664-1671.  
LI Jianfang, ZHANG Lu, SONG Xiaohui, et al. Multi-objective reactive power partitioning and pilot node selection for distribution network with high penetration DGs[J]. Renewable Energy,2017,35(11):1664-1671.
- [17] 颜湘武,徐韵.考虑网络动态重构含多异质可再生分布式电源参与调控的配电网多时空尺度无功优化[J].电工技术学报,2019,34(20):4358-4372.  
YAN Xiangwu, XU Yun. Multiple time and space scale reactive power optimization for distribution network with multi-heterogeneous RDG participating in regulation and considering network dynamic reconfiguration[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society,2019,34(20):4358-4372.
- [18] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等.基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J].电力系统自动化,2005,29(10):36-40+54.  
GUO Qinlai, SUN Hongbing, ZHANG Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in mavar control space[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(10):36-40+54.
- [19] 宫一玉,吴浩,宋卓然.发电机无功储备的定义和评估[J].电网技术,2013,37(7):1902-1908.  
GONG Yiyu, WU Hao, SONG Zhuoran. Definition and assessment of generator reactive power reserve[J]. Power System Technology,2013,37(7):1902-1908.
- [20] 吴浩,郭瑞鹏,甘德强,等.发电机有效无功储备的分析和计算[J].电力系统自动化,2011,35(15):13-17+39.  
WU Hao, GUO Ruipeng, GAN Deqiang, et al. Analysis and computation of effective reactive power reserve of generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 13-17+39.
- [21] 杨秀媛,董征,唐宝,基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J].中国电机工程学报,2006,26(22):6-10.  
YANG Xiuyuan, DONG Zheng, TANG Bao, et al. Power network partitioning based on fuzzy clustering analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(22):6-10.
- [22] 林之岸,罗欣,魏骁雄,等.基于双层聚类和模糊等级评

- 定的客户侧供电服务评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 62-71.
- LIN Zhian, LUO Xin, WEI Xiaoxiong, et al. Client-side power supply service evaluation based on two-level clustering and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 62-71.
- [23] Naveen Jain, Singh S N, 文福拴. 分布式发电当前趋势与将来挑战[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 53-61.
- NAVEEN JAIN, SINGH S N, WEN Fushuan. Distributed generation recent trends and future challenges[J]. Journal of Electric Power and Technology, 2008, 23(4): 53-61.
- [24] 王晶, 黄越辉, 李驰, 等. 考虑空间相关性和天气类型划分的多光伏电站时间序列建模方法[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1376-1384.
- WANG Jing, HUANG Yuehui, LI Chi, et al. Time series modeling method for multi-photovoltaic power stations considering spatial correlation and weather type classification[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1376-1384.
- [25] 孙元章, 吴俊, 李国杰, 等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.
- SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guojie, et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-47.
- [26] 高久国, 赵艳龙, 朱司丞, 等. 考虑光伏并网的电力系统无功优化[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 69-73.
- GAO Jiuguo, ZHAO Yanlong, ZHU Sicheng, et al. Optimal reactive power dispatch considering photovoltaic integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 63-68.
- [27] 徐韵, 颜湘武. 含可再生分布式电源参与调控的配电网无功电压优化控制研究综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(4): 16-30.
- XU Yun, YAN Xiangwu. Review of research on optimal control of reactive voltage in distribution network manipulated by renewable distributed generation[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(4): 16-30.
- [28] 高荣, 寇鹏, 梁得亮, 等. 含混合式配电变压器的主动配电网电压鲁棒模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2081-2090+2388.
- GAO Rong, KOU Peng, LIANG Deliang, et al. Robust model predictive control for the voltage regulation in activedistribution networks with hybrid distribution transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2081-2090+2388.