

基于灵敏度聚类的含 DG 配电网 电压分区控制方法

郭 沛¹, 王利利², 李 锰³, 陈 春⁴

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000; 3. 国网河南省
电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 4. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 高比例分布式电源接入配电网易导致电压波动甚至越限, 同时增加系统网络损耗。为增大配电网安全裕度, 提高供电可靠性, 提出基于灵敏度聚类的含 DG 配电网电压分区控制方法。利用潮流分析得到雅可比矩阵, 计算各节点电压对 DG 出力的灵敏度, 得到 DG 无功电压控制空间矩阵, 采用 K-means 算法聚类, 实现 DG 自适应分区, 以灵敏度和分区结果作为调节 DG 和无功设备出力的依据。所提方法能针对系统电压薄弱点进行定向补偿, 实现分布式电源的分区调节。最后采用 IEEE 33 节点系统作为算例, 结果表明该电压控制方法能有效提升系统电压水平, 提高电能质量。

关键词: 分布式电源; 灵敏度; 聚类分析; 自适应分区; 电压分区控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.011 中图分类号: TM761 文章编号: 1673-9140(2022)06-0100-08

Voltage partition control method for distribution network with DG based on sensitivity clustering

GUO Pei¹, WANG Lili², LI Meng³, CHEN Chun⁴

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2. Sanmenxia Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Sanmenxia 472000, China; 3. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 4. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: A high proportion of distributed generations are connected to the distribution network, which can easily lead to voltage fluctuations and even voltage limit violations, and increase system network losses at the same time. To increase the safety margin of the distribution network and improve the reliability of power supply, this paper proposes a voltage partition control method for the distribution network with DG based on sensitivity clustering. First, power flow calculation is conducted to obtain the Jacobian matrix. Then, calculate the sensitivity of the voltage of each node to the output of the distributed generation, through which the reactive power voltage control space matrix of the DG can be obtained. Then clustering is performed by the K-means algorithm to obtain DG adaptive partition. Finally, according to the sensitivity and partition results, the output of DG and reactive power equipment is adjusted for voltage

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(52007009); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5574); 湖南省教育厅优秀青年项目(19B003)

通信作者: 陈 春(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事智能配电网规划与运行控制的研究; E-mail: chch3266@126.com

regulation. Voltage control of this method can perform directional compensation for the weak points of the system voltage, and realize the divisional adjustment of distributed generations. Finally, the IEEE 33-node system is used as an example, and the results show that the voltage control method can effectively improve the system voltage level and improve the power quality.

Key words: distributed generation; sensitivity; cluster analysis; adaptive partitioning; voltage zone control

2020 年习近平主席多次在国际会议上提到碳达峰、碳中和,提出力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。2021 年 3 月 1 日,国家电网有限公司发布了“碳达峰、碳中和”行动方案,其中特别强调加强电力技术创新,大力发展清洁能源,最大限度开发利用风电、太阳能发电等新能源,坚持集中开发与分布式并举。

在此低碳化、去碳化的能源转型期,配电系统面临高渗透率可再生能源技术挑战。高渗透率分布式电源的接入,改变了传统配电网作为单一受端网络的特性,增加了配电网运行方式的灵活性^[1-3],但同时也带来配电网电压波动甚至越限问题,若配置不当还可能增加系统网络损耗,给配电网的运行安全带来隐患^[4-6]。

目前针对含分布式电源(distributed generation, DG)的配电网电压控制已有相关研究。文献[7]充分考虑分布式电源的无功调节能力,结合节点电压灵敏度计算进行电压控制;文献[8]通过计算灵敏度考虑各种电压控制方法的相互影响,能有效降低网损;文献[9]基于模型预测,利用有载调压变压器调节系统电压,但目前有载调压变压器的调节能力较差,需考虑与分布式电源配合控制;文献[10]通过计算最优加权值来确定分布式电源的控制策略,对电压波动进行实时优化,但优化的经济性无法保证。

对于含 DG 配电网的电压控制方法研究很多采用分布式分区控制方法。文献[11]将配电网电压分为 3 种状态,对配电网电压进行分区协调控制;文献[12]以各节点间电气距离为依据进行聚类,实现配电网的电压分区控制;文献[13]通过计算灵敏度因子对配电网进行用户分区,利用逆变器进行无功调节;文献[14]提出双层优化方法,建立配电网分区和节点选择模式。以上电压控制方法通过分布式分区的方法进行配电网电压调节,但计算复杂度较高,不能针对电压薄弱点进行针对性的电压优化,导致电压调控效果不显著。

针对以上电压控制方法的不足,以提升配电系

统电压水平为控制目标,提出基于灵敏度聚类的含 DG 配电网电压分区控制方法,首先通过潮流计算得到雅可比矩阵,然后计算各节点电压对 DG 出力的灵敏度,得到 DG 无功电压控制空间矩阵,再通过 K-means 算法进行聚类得到 DG 自适应分区,最后根据灵敏度和分区结果调节 DG 和无功设备出力进行电压调控。以 IEEE 33 节点系统作为仿真算例进行验证,该方法能有效提升系统电压水平,提高电能质量。

1 含分布式电源的配电网电压控制数学模型

配电网中电阻与电抗的比值较大,系统的有功和无功功率都很大程度地影响着系统节点电压与网络损耗。传统的电压控制方法无法满足当前配电网的可靠性要求,需要建立新的系统模型来进行电压控制。

基于灵敏度聚类分析的含分布式电源配电网电压控制方法,以提升配电系统电压水平为优化目标,考虑系统节点电压、网络功率平衡以及线路功率传输约束。

节点电压偏差最小数学描述如下:

$$\delta_{vq} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_i - V_{ei}}{V_{ei}} \right| \quad (1)$$

式中 n 为配电网节点数量; δ_{vq} 为电压偏差指标; V_i 为第 i 个节点电压; V_{ei} 为第 i 个节点的额定电压。

优化的约束条件有节点电压、网络功率平衡、线路功率传输约束,分别为

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{ij,\min} \leq S_{ij} \leq S_{ij,\max} \quad (4)$$

式(2)~(4)中 U_i 为节点 i 的实际电压; $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点允许的电压最大、最小值。 P_{Gi} 、 P_{Li} 分别为与节点 i 相连的 DG、负荷的有功功率; Q_{Gi} 、 Q_{Li} 分别为与节点 i 相连的 DG、负荷的无功功率; N 为节点数目; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压; θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 、 j 的相角; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 与 j 间导纳的实部、虚部。 S_{ij} 、 $S_{ij,\min}$ 、 $S_{ij,\max}$ 分别为节点 i 和 j 间线路传输功率及其幅值。

2 基于灵敏度聚类的分布式电源分区方法

2.1 节点电压的灵敏度计算

配电网电压水平受多种因素共同影响,任意节点的电压变化都是受系统中各节点的功率变化总和影响的^[15-16],需要计算各节点灵敏度值,选择电压薄弱点作为观测点,通过改变分布式电源出力提升系统电压水平,提高供电可靠性^[17]。含分布式电源的配电网如图 1 所示。

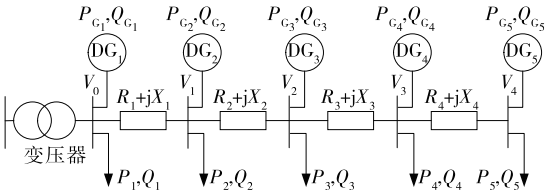


图 1 含分布式电源的配电网

Figure 1 Schematic diagram of distribution network with distributed generation

对于任意节点 m , 其节点电压为

$$V_m = V_0 - \left[\frac{R_{0m} \left(\sum_{k \in Gf} P_k + \sum P_{\text{loss}} \right)}{V_m} + \frac{X_{0m} \left(\sum_{k \in Gf} Q_k + \sum Q_{\text{loss}} \right)}{V_m} \right] \quad (5)$$

式中 G_f 为节点 0 与 m 间的关联拓扑; I_{0m} 、 X_{0m} 、 R_{0m} 分别为电流、电抗、电阻; P_{loss} 、 Q_{loss} 分别为有功、无功功率损耗。

接入分布式电源后节点 m 的电压为

$$V_m = V_0 - \frac{R_{0m} \sum_{k \in Gf} (P_k - P_{\text{DG}k}) + X_{0m} \left(\sum_{k \in Gf} (Q_k - Q_{\text{DG}k}) \right)}{V_N} \quad (6)$$

因此,在一定程度上增加分布式电源出力能有效提升系统节点电压水平。若系统有 M 个分布式电源,通过调节 M 个分布式电源的出力就能对节点 m 进行电压控制,节点 m 处的电压改变量 ΔV_m 对 M 个分布式电源的有功、无功出力的改变量 (ΔP , ΔQ) 为

$$\Delta V_m = \sum_{i=1}^M (S_P \cdot \Delta P_i + S_Q \cdot \Delta Q_i) \quad (7)$$

式中 S_P 、 S_Q 分别为节点电压 V_m 对于接入分布式电源的有功、无功出力的灵敏度。

通过改变分布式电源的有功、无功出力就可以进行电压控制;计算节点电压变量对分布式电源有功、无功出力的灵敏度,根据灵敏度确定分布式电源和无功设备的注入顺序。

根据式(6),假定调节分布式电源出力时负荷功率不变,则节点 m 的电压 V_m 与接入分布式电源 $P_{\text{DG}k}$ 、 $Q_{\text{DG}k}$ 的关系为

$$V_m = f(P_{\text{DG}1}, P_{\text{DG}2}, \dots, P_{\text{DG}N}, Q_{\text{DG}1}, Q_{\text{DG}2}, \dots, Q_{\text{DG}N}) \quad (8)$$

改变分布式电源功率后节点 m 的电压改变量为

$$\Delta V_m = \frac{\partial V_m}{\partial P_{\text{DG}1}} \Delta P_{\text{DG}1} + \frac{\partial V_m}{\partial P_{\text{DG}2}} \Delta P_{\text{DG}2} + \dots + \frac{\partial V_m}{\partial P_{\text{DG}N}} \Delta P_{\text{DG}N} + \frac{\partial V_m}{\partial Q_{\text{DG}1}} \Delta Q_{\text{DG}1} + \frac{\partial V_m}{\partial Q_{\text{DG}2}} \Delta Q_{\text{DG}2} + \dots + \frac{\partial V_m}{\partial Q_{\text{DG}N}} \Delta Q_{\text{DG}N} \quad (9)$$

对于含有 N 个节点的系统,矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_{\text{DG}1}} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_{\text{DG}1}} & \frac{\partial V_1}{\partial P_{\text{DG}2}} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_{\text{DG}2}} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial P_{\text{DG}N}} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_{\text{DG}N}} \\ \frac{\partial V_2}{\partial P_{\text{DG}1}} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_{\text{DG}1}} & \frac{\partial V_2}{\partial P_{\text{DG}2}} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_{\text{DG}2}} & \dots & \frac{\partial V_2}{\partial P_{\text{DG}N}} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_{\text{DG}N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_N}{\partial P_{\text{DG}1}} & \frac{\partial V_N}{\partial Q_{\text{DG}1}} & \frac{\partial V_N}{\partial P_{\text{DG}2}} & \frac{\partial V_N}{\partial Q_{\text{DG}2}} & \dots & \frac{\partial V_N}{\partial P_{\text{DG}N}} & \frac{\partial V_N}{\partial Q_{\text{DG}N}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{DG}1} \\ \Delta Q_{\text{DG}1} \\ \Delta P_{\text{DG}2} \\ \Delta Q_{\text{DG}2} \\ \vdots \\ \Delta P_{\text{DG}N} \\ \Delta Q_{\text{DG}N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

简化为

$$\Delta V = [S_P \quad S_Q] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 S_P 、 S_Q 分别为节点电压 V 对于接入分布式

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta P_N \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & \cdots & H_{1N} & N_{1N} \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & \cdots & J_{1N} & L_{1N} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & \cdots & H_{2N} & N_{2N} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & \cdots & J_{2N} & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{N1} & N_{N1} & H_{N2} & N_{N2} & \cdots & H_{NN} & N_{NN} \\ J_{N1} & L_{N1} & J_{N2} & L_{N2} & \cdots & J_{NN} & L_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta e_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_2 \\ \vdots \\ \Delta f_N \\ \Delta e_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

令

$$J = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & \cdots & H_{1N} & N_{1N} \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & \cdots & J_{1N} & L_{1N} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & \cdots & H_{2N} & N_{2N} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & \cdots & J_{2N} & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{N1} & N_{N1} & H_{N2} & N_{N2} & \cdots & H_{NN} & N_{NN} \\ J_{N1} & L_{N1} & J_{N2} & L_{N2} & \cdots & J_{NN} & L_{NN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_1}{V_1} & \frac{f_1}{V_1} \\ \frac{e_2}{V_2} & \frac{f_2}{V_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{e_N}{V_N} & \frac{f_N}{V_N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \vdots \\ \Delta e_n \\ \Delta f_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

令

$$B = \begin{bmatrix} \frac{e_1}{V_1} & \frac{f_1}{V_1} \\ \frac{e_2}{V_2} & \frac{f_2}{V_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{e_N}{V_N} & \frac{f_N}{V_N} \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据以上推导可得,系统节点电压 V_m 对于分布式电源有功、无功出力的灵敏度为

$$[S_P \quad S] = B \cdot J^{-1} \quad (17)$$

2.2 分布式电源分区方法

在配电网中,假设系统内部可控制电压的节点数目为 n ,分布式电源数目为 ω ,求解某一分布式电源 j 注入的无功功率对 n 个节点电压控制的灵敏度,可以得出:

电源的有功、无功出力的灵敏度。

通过潮流计算得到雅可比矩阵,从而计算系统节点电压对于分布式电源有功、无功出力的灵敏度,过程如下:

因为

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{e_i^2 + f_i^2} \\ \partial V_m = \frac{e_i \partial e_i}{\sqrt{e_i^2 + f_i^2}} + \frac{f_i \partial f_i}{\sqrt{e_i^2 + f_i^2}} = \frac{e_i \partial e_i + f_i \partial f_i}{V_m} \end{cases} \quad (14)$$

所以

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial U_1}{\partial Q_j}, \frac{\partial U_2}{\partial Q_j}, \dots, \frac{\partial U_n}{\partial Q_j} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

不断重复以上步骤,求解 ω 个分布式电源注入的无功对各个节点的电压灵敏度,可以得到系统中所有分布式电源无功电压控制的空间矩阵^[18]:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial U_1}{\partial Q_2} & \cdots & \frac{\partial U_1}{\partial Q_{\omega-1}} & \frac{\partial U_1}{\partial Q_\omega} \\ \frac{\partial U_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial U_2}{\partial Q_2} & \cdots & \frac{\partial U_2}{\partial Q_{\omega-1}} & \frac{\partial U_2}{\partial Q_\omega} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial U_{n-1}}{\partial Q_1} & \frac{\partial U_{n-1}}{\partial Q_2} & \cdots & \frac{\partial U_{n-1}}{\partial Q_{\omega-1}} & \frac{\partial U_{n-1}}{\partial Q_\omega} \\ \frac{\partial U_n}{\partial Q_1} & \frac{\partial U_n}{\partial Q_2} & \cdots & \frac{\partial U_n}{\partial Q_{\omega-1}} & \frac{\partial U_n}{\partial Q_\omega} \end{pmatrix} \quad (19)$$

满足分布式电源无功控制范围分区的有效性包含准则:①确保分区内的分布式电源能控制其余分

区中的节点,需要分布式电源分区内的相关节点能与分布式电源有很强的耦合性;②为确保分布式电源自身的电压控制能力,需要合理控制分区的范围,还要保证分区内的节点处于互相连通的状态。

聚类分析法是处理分析数据并进行分类的重要方法,聚类分析可以将数据根据相似性或者其他标准进行分类。首先将分布式电源的无功电压控制空间矩阵进行处理,取出矩阵中灵敏度最大的元素,并将矩阵中某个元素除以最大元素 S_{max} ,得到新的元素记为 $X_{ij} = S_{ij} / S_{max}$;然后对原矩阵中的每一元素均进行数学处理,可以得到处理后的新矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1w} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2w} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nw} \end{bmatrix}$$

利用 K-means 算法计算新矩阵中的元素,将获得的数据分为 3 种不同类型。

K-means 算法包括:①随机选取聚类中心或者借助直方图来完成选取;②将数据中心移到其所在类别的中心;③根据最邻近规则将数据点重新聚到聚类中心;④更新聚类中心,不断重复上述过程直到评价标准不再变化。评价标准为

$$J(c, \mu) = \sum_{i=1}^m \|x^{(i)} - \mu_{c(i)}\|^2 \quad (20)$$

式中 $J(\cdot)$ 为评价聚类中心的评价函数。

根据计算的灵敏度和分区结果,参考文献[17]中方法,调节电容器组和分布式电源出力,提高系统节点电压水平,整体思路如图 2 所示。



图 2 基于灵敏度聚类的电压分区控制流程

Figure 2 Voltage partitioning control flow chart based on sensitivity cluster analysis

3 算例仿真

采用 IEEE 33 节点系统作为仿真算例,如图 3 所示,母线电压为 12.66 kV,系统总负荷为 $3\ 802.2 + j2\ 694.6\ \text{kV} \cdot \text{A}$ 。 V_{ci} 、 V_r 、 V_{co} 分别取 3、14、25 m/s,此处假设风机功率因数恒定,取 $p_f = 0.9$,吸收和发出的有功功率为

$$P_w = \begin{cases} 0, & V \leq V_{ci} \text{ or } V \geq V_{co} \\ \frac{P_r \cdot V^3}{V_r^3 - V_{ci}^3} - \frac{V_{ci}^3 \cdot P_r}{V_r^3 - V_{ci}^3}, & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_r, & V \geq V_r \end{cases} \quad (21)$$

$$Q_w = P_w \cdot \tan(\arccos p_f) \quad (22)$$

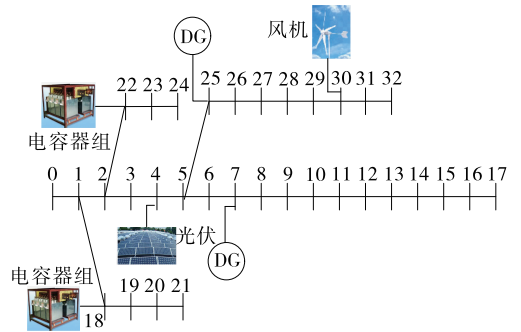


图 3 33 节点配电系统接线

Figure 3 33-node power distribution system wiring diagram
分布式电源、无功补偿电容器的安装位置与容量分别如表 1、2 所示。

表 1 DG 安装位置与容量

Table 1 Installation position and capacity of DG			
类型	节点	有功/kW	无功/kVar
光伏	4	400	0
可稳定出力	7	500	300
分布式电源	25	500	400
风机	30	500	0

表 2 无功补偿电容器的安装位置与容量

Table 2 Installation position and capacity of reactive power compensation capacitor		
电容器	节点	容量/kVar
C ₁	18	150×5
C ₂	22	150×5

3.1 本文方法验证

首先计算系统潮流,投入 DG 前系统各节点电压分布如图 4 所示,通过牛拉法计算雅克比矩阵;然后计算有功和无功灵敏度矩阵,得到有功和无功出力对各节点的灵敏度情况,如图 5 所示。

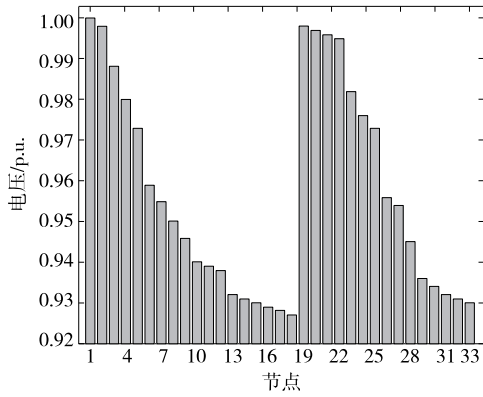


图 4 投入 DG 前系统各节点电压分布情况
Figure 4 Voltage distribution of each node in the system before DG input

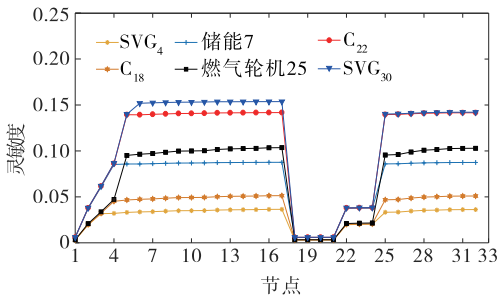


图 5 各节点灵敏度

Figure 5 Sensitivity of each node

利用式(21)、(22),将各节点灵敏度进行数据处理后可得

$$S = \begin{bmatrix} 6.014 & 2 & 14.563 & 6 & 7.894 & 6 & 21.391 & 2 \\ 14.883 & 7 & 22.388 & 4 \end{bmatrix}$$

根据 K-means 算法,取聚类数 $k = 3$,即分为 3 个子类,得到的聚类结果为

- 子类 1: 6.014 20 7.894 60
- 子类 2: 14.565 3 14.883 7
- 子类 3: 21.391 2 22.388 4

根据聚类结果进行系统分区,如图 6 所示,根据计算的灵敏度以及电容器组与分布式电源的调节方法,得出投入节点 12、25 的 DG 出力,如图 7 所示,投入后系统节点电压水平满足要求。

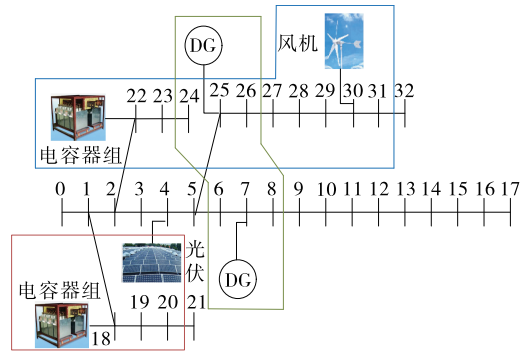


图 6 分区结果

Figure 6 Partition result diagram

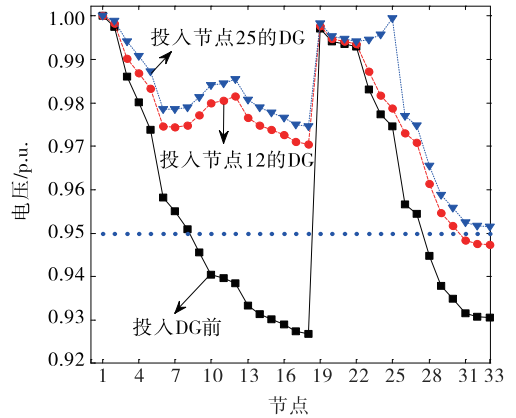


图 7 投入 DG 后系统各节点电压分布情况

Figure 7 Voltage distribution of each node in the system after DG input

投入节点 12 后 DG 系统依然存在节点 31、32、33 的电压不满足要求,但继续投入节点 25 后,系统的所有节点均满足要求。

3.2 本文方法与 2 种智能算法对比

将本文方法与和声、遗传算法进行对比,其中和声算法参数:和声记忆库的大小(HMS)取为 10,记忆库的考虑概率(HMCR)为 0.85,扰动概率(PAR)为 0.3;遗传算法参数:种群数目(POP)为 30,交叉概率(CP)为 0.85,变异概率(MP)为 0.05。

利用和声算法进行配电网电压调控,协调系统中分布式电源出力,通过选择随机数不断产生新解并不断更新最差解,直到系统节点电压均在合理范围内;利用遗传算法以电压偏差最小为目标进行电压调控,随机生成新个体,通过种群的交叉和变异不断优化,达到调控系统电压的效果;而本文方法通过聚类分析,不断更新聚类中心,得到各分布式电源的自适应分区结果,结合灵敏度计算实现系统的电压

控制,相比于其他2种智能算法,本文方法利用灵敏度计算刻画系统电压薄弱点,通过聚类得到分布式电源分区,实现系统电压的分区控制。

3种方法投入分布式电源后各节点电压分布情况对比如图8所示,通过本文方法进行电压调控后系统各节点电压水平明显优于其他2种智能算法。

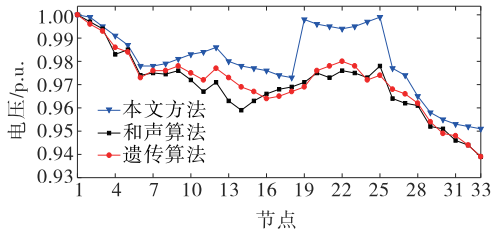


图8 3种方法投入DG后各节点电压分布情况对比

Figure 8 Comparison of voltage distribution of each node after DG input by three methods

通过与和声、遗传算法对比,2种智能算法的求解过程需要不断搜索,计算时间较长,分别为2.19、3.47 s,而本文电压控制方法通过灵敏度计算和聚类分析,对分布式电源进行自适应分区,计算时间仅为0.62 s,且电压控制后能有效提升系统各节点电压水平,验证了本文方法的优越性。

4 结语

本文提出基于灵敏度聚类的含DG配电网电压分区控制方法。①通过计算分布式电源出力对所有节点电压的灵敏度,能直观地刻画出系统电压薄弱点,得到分布式电源有功和无功出力对于系统节点电压变化的影响程度;②根据灵敏度矩阵得出分布式电源的无功电压控制空间矩阵,再通过K-means算法进行聚类,得到分布式电源的分区情况,实现系统中分布式电源的分区调节;③根据灵敏度和分区结果调节分布式电源和无功设备出力,能针对电压薄弱点进行定向补偿,有效提高系统电压水平。通过33节点算例进行验证,经过本文电压控制方法,系统各节点电压均得到提升且满足要求,且与2种智能方法对比具有较明显优势,能有效提升系统电压水平,验证了本文方法的合理性与优越性。

参考文献:

[1] 刘华志,李永刚,王优胤,等.无功电压优化对新能源消

纳的影响[J].电工技术学报,2019,34(S2):646-653.

LIU Huazhi, LI Yonggang, WANG Youyin, et al. Influence about reactive power voltage optimization on the dissipation of new energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 646-653.

[2] 潘本仁,王和春,张妍,等.含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(15):102-107.

PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.

[3] 谢林枫,王红星,刘军成,等.基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J].电网与清洁能源,2020,36(4):41-47.

XIE Linfeng, WANG Hongxing, LIU Juncheng, et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 41-47.

[4] 李祖明,徐光福,陈俊,等.大型光伏电站快速无功控制系统研制及应用[J].中国电力,2020,53(3):177-184.

LI Zuming, XU Guangfu, CHEN Jun, et al. Development and application of fast reactive power control system for large-scale PV power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 177-184.

[5] 裘昕月,朱自伟,黄春辉,等.考虑风电出力不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J].智慧电力,2020,48(5):1-6+59.

QIU Xinyue, ZHU Ziwei, HUANG Chunhui, et al. Robust optimization of integrated energy system considering uncertainty of wind power output[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 1-6+59.

[6] 辛锐,张瑜,郝保中,等.考虑响应不确定性的高比例可再生能源微电网优化策略[J].供用电,2021,38(9):35-41.

XIN Rui, ZHANG Yu, HAO Baozhong, et al. Optimization strategy of high proportion renewable energy microgrid considering response uncertainty[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(9): 35-41.

[7] 肖浩,裴玮,邓卫,等.分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J].电工技术学报,2016,31(S1):203-213.

XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network

- voltage and its optimal control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 203-213.
- [8] 卓煜,陈维荣,戴朝华.基于灵敏度分析的主动配电网无功电压控制[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(5):21-27.
ZHUO Yu, CHEN Weirong, DAI Chaohua. Reactive power/voltage control strategy for active distribution network based on sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(5): 21-27.
- [9] 蔡宇,林今,宋永华,等.基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J].电工技术学报,2015,30(23):42-49.
CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42-49.
- [10] LI P, ZHANG C, FU X, et al. Determination of local voltage control strategy of distributed generators in active distribution networks based on kriging metamodel[J]. IEEE Access, 2019, 7: 34438-34450.
- [11] 袁方方,赵江信,郭宝甫,等.分布式光伏电源与配电网协调控制策略研究[J].电测与仪表,2020,57(24):116-124.
YUAN Fangfang, ZHAO Jiangxin, GUO Baofu, et al. Research on coordinated control strategy of distributed photovoltaic generation and distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 116-124.
- [12] 陆凌芝,耿光飞,季玉琦,等.基于电气距离矩阵特征根分析的主动配电网电压控制分区方法[J].电力建设,2018,39(1):83-89.
LU Lingzhi, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Voltage control partitioning method for active distribution network based on electrical distance matrix eigenvalue analysis[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(1): 83-89.
- [13] 龚向阳,周开河,徐孝忠,等.含分布式光伏的配电网电压分区协调控制方案[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(5):127-133.
GONG Xiangyang, ZHOU Kaihe, XU Xiaozhong, et al. Voltage partition coordinated control scheme for distribution network with distributed PV[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(5): 127-133.
- [14] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于 V2G 的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].高压电器,2022,58(5):164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 164-171.
- [15] 蔡永翔,张璐,唐巍,等.考虑逆变器无功充裕性的含高比例户用光伏低压配电网电压控制策略[J].电网技术,2017,41(9):2799-2808.
CAI Yongxiang, ZHANG Lu, TANG Wei, et al. A voltage control strategy for LV distribution network with high proportion residential PVs considering reactive power adequacy of PV inverters[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2799-2808.
- [16] 伍惠铨,王淳,尹发根,等.基于功率控制的含高渗透率户用光伏低压配电网电压控制策略[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):27-35.
WU Huicheng, WANG Chun, YIN Fagen, et al. Power control-based voltage control strategy of LV distribution network with high penetrations residential PVs[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 27-35.
- [17] 陈春,汪汎,刘蓓,等.一种智能配电网安全运行控制方法[J].电工技术学报,2015,30(12):357-366.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A method of safe operation control of smart distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 357-366.
- [18] 冯玉始.含分布式风电的配电网电压稳定协调控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2018.