

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200525

# 含分布式电源的配电网双层分区调压策略

郑晓莹, 陈政轩, 曾琮

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对高渗透的分布式电源(DG)在配电网中造成逆功率潮流引起的电压越限问题, 提出了一种基于改进Fast-Newman算法的配电网双层分区调压策略。改进的Fast-Newman算法引入了考虑DG接入位置以及无功/有功-电压灵敏度矩阵的改进模块度增量, 可将分布式配电网进行更为细致合理的划分。双层分区调压策略首先通过改进的Fast-Newman算法分别针对无功补偿(RPC)与有功削减(APC)对配电网进行分区。而后在分区结果中进一步筛选节点组成优先调节点集。最后为应对高渗透DG配电网的复杂潮流造成的非线性复杂解空间的问题, 使用PSO算法分别计算优先调节点集中各节点的RPC与APC最佳调度值, 以优化DG注入点潮流, 实现无功/有功调整的合理组合。所提方法在IEEE33节点以及改进的IEEE123节点上进行案例研究, 通过与非分区电压调整模型对比, 表明该策略通过调度少量节点的RPC与APC, 即可达到全网电压调整的目的, 且调整后的节点电压更为平稳。

**关键词:** 改进Fast-Newman算法; 双层分区调压策略; 区域电压控制; PSO算法

## Double-layer partition voltage regulation strategy of a distribution network with distributed generation

ZHENG Xiaoying, CHEN Zhengxuan, ZENG Cong

(College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** To solve the overvoltage problem caused by reverse power flow in a distribution network with high penetration of a Distributed Generator (DG), this paper proposes a double-layer partition voltage regulation strategy based on an improved Fast-Newman algorithm. The improved Fast-Newman algorithm introduces an improved modularity increment index that takes into account the location of the DG and reactive/active-voltage sensitivity matrices, partitioning the distribution network more meticulously and reasonably. The double-layer partitioned voltage regulation strategy first uses the improved Fast-Newman algorithm to partition the distribution network for Reactive Power Compensation (RPC) and Active Power Reduction (APC). Then the nodes in the partitioning results are selected to form a priority regulation node set. Finally, in order to cope with the nonlinear complex solution space caused by the complex power flow of the distribution network with high penetration DGs, the PSO algorithm is used to calculate the optimal RPC and APC dispatch values of each node in the priority regulation node set. It can optimize the power flow in the DG injection point to achieve a reasonable combination of reactive/active power regulation. We conducted case studies on IEEE33 nodes and improved IEEE123 nodes. It is shown that this strategy can not only regulate voltage of the entire network by dispatching fewer nodes' RPC and APC, but also bring a more stable voltage than a non-partitioned strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61876040).

**Key words:** improved Fast-Newman algorithm; double-layer partition voltage regulation strategy; regional voltage control; PSO algorithm

## 0 引言

随着全球能源枯竭和环境污染问题的日益严峻,

基于可再生能源的分布式电源(Distributed Generation, DG)越来越多地接入到配电网中<sup>[1]</sup>。配电网是电力系统的重要组成部分, 直接面向终端用户, 其安全运行与用户用电的可靠性和供电质量息息相关<sup>[2]</sup>。DG的接入改变了配电系统原有的电压分布情况,

大大增加了配电网运行的不确定性和节点电压越限的可能性<sup>[3]</sup>。文献[4-5]通过事先计算 DG 集成到配电系统中的最佳位置避免 DG 的不确定性潮流对配电网的影响。然而, 此方法缺少灵活性, 许多研究工作集中在解决过电压问题时, 旨在无须升级原始网络的基础上增加配电网对 DG 电源的消纳能力, 同时将电压曲线保持在正常范围内。

储能系统<sup>[6-9]</sup>和电压调整装置<sup>[10]</sup>可有效解决大规模 DG 接入配电网带来的过电压问题; OLTC<sup>[11]</sup>可与分布式电源协调控制配电网电压, 但此类方法的建设成本将会随之增加。在文献[12]中以系统有功功率损耗最低与电压偏差量最小为双目标函数, 建立无功优化模型进行电压调整。然而, 由于经济考虑, 大多数分布式 DG 系统具有有限的无功功率调节能力。现今, 研究人员开始关注无功-有功组合调压策略的研发。文献[13]提出了一种无功协调补偿和有功优化缩减的调压策略, 实现了电压的低成本快速控制。

由于 DG 系统的分散性质, 将分配系统作为一个整体处理的方法在计算上是十分耗时的, 如果节点数目过多会造成优化效率低下, 无法运用于实际。文献[14]将每条馈线作为独立控制区域且只选择几个关键点, 控制关键点的电压实现整条馈线的电压控制。文献[15]提出微网与主网的主从调节模式提高实时性, 二次电压/无功控制方案<sup>[16]</sup>也被用于分布式配电网中实现更为精准的电压调整。上述方案均需要通信设备的参与, 其电压调整成本也将随之上升。

近年来, 研究人员开始以分区的思想为切入点, 将分散的 DG 分成若干个子网进行区域电压管理。文献[17]采用元件电气距离替代地理位置的方法对电网进行分区。文献[18]提出了一种基于电气距离, 集群大小, 集群数量和集群连接性的电力系统划分方法。聚类算法<sup>[19-22]</sup>和分层频谱聚类方法<sup>[23]</sup>已被用于优化电网的分区效果。文献[24-25]开发了基于谱聚类算法的无功电压分区方法, 采用数据挖掘提取特征值的思想提取最优节点进行调节。文献[26]提出了一种针对分布式能量存储系统(Distributed Energy Storage Systems, DESS)的协调电压控制策略, 通过计算和比较电压灵敏度矩阵来划分与 DESS 相对应的区域进行电压调节。文献[27-28]引入社区发现算法(Fast-Newman 算法), 利用无功电压灵敏度关系以及各节点的耦合程度作为 Fast-Newman 算法中模块度的附加指标, 对分布式配电网进行更为细致的分区, 有效提高实时性与电压调整效果。

本文通过使用 Fast-Newman 算法中改进的模块化增量, 在此基础上提出了大规模 DG 接入的分布

式电网双层分区调压策略。此调压策略的网络划分原则为分布式配电网中的无功功率补偿(Reactive Power Compensation, RPC)和有功功率削减(Active Power Curtailment, APC)。借助双层分区调压策略, 有效地结合无功补偿以及有功削减选择优先调节节点集, 以此达到控制少量的 DG 逆变器而实现整个网络电压调节的目的。

本文的主要贡献如下: 1) 针对分布式光伏电源位置分散难以统一控制的问题, 引入 Fast-Newman 算法对配电网分区。传统 Fast-Newman 算法分区无权无向, 故本文提出了分别针对无功补偿与有功削减的改进模块度增量, 使得分区结果不仅考虑到网络拓扑结构, 还考虑到有功/无功相对于调压的敏感程度以及 DG 接入位置, 此法可对高维的 DG 调压问题实行降维处理, 提取有效的节点进行调节, 使得筛选出的需调节节点数更少, 充分发挥光伏逆变器的有功/无功调节灵活性。2) 为合理组合无功补偿与有功削减进行电压调节, 提出双层分区调压策略。该策略使用改进的 Fast-Newman 算法针对无功补偿与有功削减进行双层分区, 调节电压时首先针对无功补偿分区后筛选出的优先调节节点进行第一层电压调整, 若效果不理想再进行针对有功削减的节点分区筛选出的优先调节节点进行第二层电压调整, 使得选择调节的节点集更精准, 且无功补偿与有功削减的组合运用更为合理。针对有功/无功的优化调度时面临的解空间复杂问题, 选择 PSO 算法进行优化。

## 1 改进的 Fast-Newman 算法

### 1.1 模块度增量的改进

当配电网中含有大量的 DG 单元时, 配电网的潮流将会变得更加复杂, 将难以统一控制所有的 DG 单元, 本文拟引入分区的方法尝试解决。2004 年 Girvan 和 Newman 提出一种 Fast-Newman 算法<sup>[29]</sup>, 其中 Fast-Newman 算法使用了模块化增量, 本文在此基础上考虑添加 DG 接入位置矩阵和 Q-V/P-V 灵敏度值作为附加指标。针对无功补偿(RPC)/有功削减(APC)的改进模块化增量可以表示为

$$\Delta\rho_{\text{RPC}} = 2e_{Ck1, Ck2} - 2a_{Ck1} \cdot a_{Ck2} - \frac{\sum_{i \in Ck1, j \in Ck2} (S_{VQ}^{ij})}{2} - \frac{D}{2} \quad (1)$$

$$\Delta\rho_{\text{APC}} = 2e_{Ck1, Ck2} - 2a_{Ck1} \cdot a_{Ck2} - \frac{\sum_{i \in Ck1, j \in Ck2} (S_{VP}^{ij})}{2} - \frac{D}{2} \quad (2)$$

$$e_{Ck1,Ck2} = \sum_{i \in Ck1, j \in Ck2} (S_{VQ}^{ij}) \frac{A_{ij}}{2m} \quad (3)$$

$$a_{Ck1} = \sum_n e_{Ck1,Ckn}, a_{Ck2} = \sum_n e_{Ck2,Ckn} \quad (4)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{ii} & \cdots & D_{ij} \\ \vdots & & \vdots \\ D_{ji} & \cdots & D_{jj} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $A_{ij}$ 为网络的邻接矩阵，表示节点*i*和节点*j*之间的边缘，如果节点*i*和节点*j*之间存在连接，则矩阵 $A_{ij}$ 的元素为1，否则为0， $A_{ij}$ 可以由无功电压(Q-V)或有功电压(P-V)灵敏度矩阵(非零元素)确定； $m$ 为所有节点之间的连接之和； $e_{Ck1,Ck2}$ 代表子社区*C<sub>k1</sub>*中节点*i*和子社区*C<sub>k2</sub>*中节点*j*之间连接的边缘与整个网络( $2m$ )的边缘之比； $a_{Ck1}$ 代表与*C<sub>k1</sub>*中节点*i*连接的其他子社区*C<sub>kn</sub>*中其余节点的边缘与整个网络的边缘之比； $D$ 为DG位置矩阵，如果节点*i*和节点*j*之间有DG，则 $D_{ii}$ 、 $D_{ij}$ 、 $D_{ji}$ 和 $D_{jj}$ 之间为1，否则为0；函数 $S_{VQ}^{ij}$ 与 $S_{VP}^{ij}$ 分别为节点*i*和节点*j*之间的Q-V或者P-V灵敏度矩阵。

### 1.2 分区策略

假设网络节点的数量为*N*，针对无功补偿和有功削减分区完成时的子社区的数量分别为*K<sub>1</sub>*、*K<sub>2</sub>*。针对无功补偿和有功削减分区的贪婪策略描述如下。

步骤 1：一开始将每个节点初始化为社区。

步骤 2：对于每个节点*i*，从其余网络节点中随机选择任何其他节点*j*( $j \neq i$ )，以形成两节点子社区对，然后计算两对子节点社区的 $\Delta\rho_{RPC}$ 和 $\Delta\rho_{APC}$ 的值。在无功补偿子社区中，具有 $\Delta\rho_{RPC}$ 最大值的子社区被选为新的候选子社区。同样，在有功削减的子社区中，具有 $\Delta\rho_{APC}$ 最大值的子社区被选为新的候选子社区。

步骤 3：与步骤 2 一样，新的候选子社区继续与其余的节点合并，直到 $\Delta\rho_{RPC}$ 或 $\Delta\rho_{APC}$ 的值变为负值。最终，用于无功补偿的一组分区子社区可以表示为 $\{C_1, C_2, \dots, C_{k1}\}$ 。同样，用于有功削减的分区子社区集可以表示为 $\{C_1, C_2, \dots, C_{k2}\}$ 。

## 2 双层分区电压调整策略的实施

电压调节策略的过程如图 1 所示。可以看出，阶段 2 和阶段 5 实施了上一节介绍的分区策略。阶段 3 和阶段 6 应用 PSO 算法为无功补偿和有功削减执行最佳调度。双层划分意味着在时间维度上组合有功/无功功率进行电压控制。其中，第一层计算针对无功补偿的调度量，从而调整电压；第二层计算针对有功削减的调度量，从而调整电压。具体实施

方案为：先使用贪婪策略对配电网进行针对无功补偿的分区。其次，从 $\{C_1, C_2, \dots, C_{k1}\}$ 中筛选出包含配电网中电压幅度最高的节点的子社区，并将 PSO 算法应用于无功补偿的最佳调度。若第一层的无功补偿调节后电压不在正常范围内，则使用贪婪策略再次对配电网进行针对有功削减的分区，分区后进行第二层有功削减调节。第二层的实现类似于第一层，各阶段的具体实施方案如下。

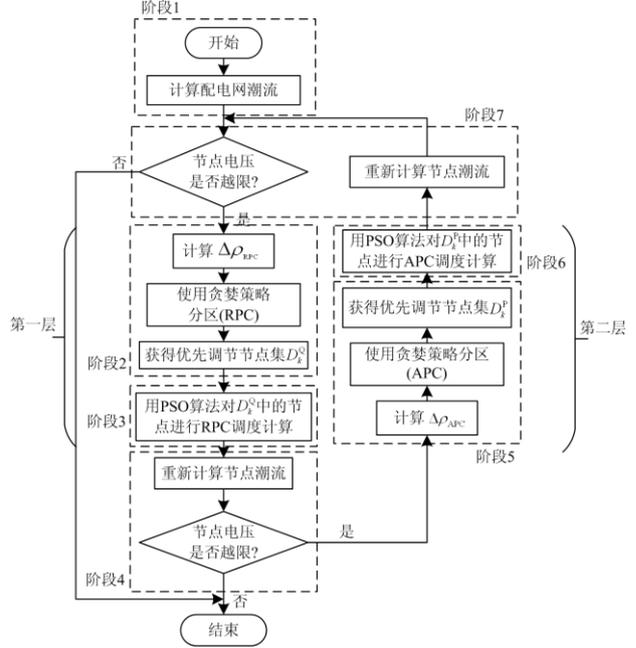


图 1 分区策略实施流程图

Fig. 1 Flow chart of the implementation of partition strategy

阶段 1：在含 DG 的分布式配电网上使用潮流计算，以获得每个节点的初始电压幅值和网络潮流信息。如果有节点的电压超过限值，则执行下一阶段，否则终止电压调节。

阶段 2：此阶段将执行无功补偿的电压分区。配电网的每个节点最初都定义为一个子社区，每个子社区使用式(1)计算 $\Delta\rho_{RPC}$ ，而后使用贪婪策略获得 $\{C_1, C_2, \dots, C_{k1}\}$ 。

在 $\{C_1, C_2, \dots, C_{k1}\}$ 的每个子社区中，电压幅度最高的节点被视为其子社区的代表节点。随后，选择代表节点中，具有最大电压幅值的所在子社区作为候选节点集，其中包含 DG 的这些节点形成优先调节节点集 $D_k^Q$ ，该优先调节节点集用于执行 PSO 算法的无功补偿电压调节。如果候选节点集中不存在带有 DG 的节点，则选择代表节点具有次高电压幅值的子社区作为候选节点集。

阶段 3：使用 PSO 算法对 $D_k^Q$ 进行无功补偿(RPC)的最优调度。

由于高渗透性 DG 发电的接入, 分布式配电网将从单一辐射结构变为多电源网络, 其潮流将发生显著变化, 进而电压调节优化调度的解空间也将变得复杂。因此, 选择的算法需要具有强大的解决隐式目标函数下非线性复杂解空间中过早收敛问题的能力。本文选择 PSO 算法作为无功补偿和有功削减的最优调度求解算法, 因 PSO 具有强大的搜索能力, 且收敛速度较快。

PSO 的目标函数旨在最小化节点注入的有功/无功反向潮流, 具体表达式为

$$F = \min \left( \sum_{i \in N} \Delta Q_i + \sum_{i \in N} \Delta P_i \right) \quad (6)$$

$$\Delta Q_i = \begin{cases} 0 & Q_i > 0 \\ |Q_i| & Q_i < 0 \end{cases} \quad \Delta P_i = \begin{cases} 0 & P_i > 0 \\ |P_i| & P_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\Delta P_i$  和  $\Delta Q_i$  分别为各个 DG 单元接入点的逆有功功率与逆无功功率;  $P_i$  和  $Q_i$  为各个 DG 单元的接入点潮流, 规定由主网流向 DG 单元的潮流为正方向。

受制于<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = V_i \sum_{j=1}^{N_{Ck}} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Di} = V_i \sum_{j=1}^{N_{Ck}} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ 0.95 \text{ p.u.} \leq V_{Ck}^i \leq 1.05 \text{ p.u.} \\ 0 \leq \Delta P_{\text{curt}}^d \leq \Delta P_{\text{out}}^d \\ 0 \leq \Delta Q_d \leq Q_{\text{absorb}}^d \quad i = 1, 2, \dots, N_{Ck}, d = 1, 2, \dots, n \\ -a \cos(0.9) \leq \varphi_{\text{DG}d} \leq a \cos(0.9) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{Gi}$  和  $Q_{Gi}$  为传统发电机产生的有功和无功功率;  $P_{Di}$  和  $Q_{Di}$  分别为负载的有功功率和无功功率;  $V_i$  和  $V_j$  为节点  $i$  和  $j$  的电压幅度;  $B_{ij}$ 、 $G_{ij}$  为由节点  $i$  和  $j$  组成的分支的电纳和电导;  $\theta_{ij}$  为节点与节点  $i$  和  $j$  之间的相位差;  $P_{\text{out}}^d$  和  $Q_{\text{absorb}}^d$  分别为第  $d$  台 DG 单元提供的最大有功功率和最大无功功率;  $V_{Ck}^i$  为子社区  $C_k$  中的节点电压幅度;  $\Delta P_{\text{curt}}^d$  和  $\Delta Q_d$  为第  $d$  台 DG 单元的有功功率削减和无功功率支持;  $\varphi_{\text{DG}d}$  为第  $d$  台逆变器的功率因数角。

阶段 4: 在进行第一层无功补偿调度的计算之后调整电压, 更新所有节点的电压, 并检查所有网络节点的电压是否在正常范围内。如果电压水平恢复到正常范围内, 则终止电压调节, 否则将启动第二层有功削减调度的计算。

阶段 5: 此阶段将执行有功削减的电压分区策略。与阶段 2 相似, 将配电网的每个节点初始化为一个子社区, 并使用式(2)计算每个子社区的  $\Delta \rho_{\text{APC}}$ 。

最后, 使用贪婪策略获得  $\{C_1, C_2, \dots, C_{k_2}\}$ 。

在  $\{C_1, C_2, \dots, C_{k_2}\}$  中的每个子社区中, 电压幅度最高的节点被视为其代表节点。随后, 选择代表节点中具有最大电压幅度所在的子社区作为候选节点集, 其中包含 DG 的这些节点形成优先调节节点集  $D_k^p$ , 该优先调节节点集用于执行 PSO 的有功削减电压调节。若候选节点集中不存在含 DG 的节点, 则选择代表节点具有次高电压幅度的子社区作为候选节点集  $D_k^p$ 。

阶段 6: PSO 算法用于对  $D_k^p$  进行有功功率削减 (APC) 的最佳调度, 其调度过程与无功补偿相似。

阶段 7: 在第二层有功削减调度的计算之后调整电压, 更新所有节点的电压, 并检查所有网络节点的电压是否在正常范围内。若是, 则终止电压调节, 否则将重新启动第一层无功补偿调度的计算。

### 3 算例分析

使用接入 DG 的 IEEE33 节点验证本文提出的策略, 如图 2 所示, 基准电压和基准功率分别设定为 12.66 kV 和 10 MVA。配电网分别在第 3、5、7、8、9、15、16、21、27、28 节点接入容量为 0.1 MW 的光伏电源 (PV), 在第 4、11、12、13、14、17、20、23、24、29 节点接入容量为 0.1 MW 的风力发电 (WT) 电源。系统中的每个 DG 单元都通过逆变器和升压变压器接入到系统中, 每个逆变器的工作功率因数范围为  $(-0.95, 0.95)$ 。在本研究中, 选择一年中的第 62 天的 24 h 作为代表性情景, 且所有 DG 单元在开始时以单位功率因数运行。

使用 Matlab 编写调压策略。在基于 PSO 的无功/主动调度过程中, 吸收的无功功率矢量和缩减的有功功率矢量分别有  $D_k^o$ 、 $D_k^p$  维, 种群大小  $N_{\text{size}} = 20$ , 最大迭代次数  $k_{\text{max}} = 100$ 。对 IEEE33 节点使用改进的 Fast-Newman 算法获得的分区结果如表 1 所示, 针对无功补偿的优先调节节点集  $D_k^o$  与针对有功削减的优先调节节点集  $D_k^p$  如图 2 所示。

为了验证本文所述分区方案的科学有效性, 选择非分区策略 (基于 PSO) 以及本文所述方法 (基于 PSO 的分区方法) 作对比, 其非分区策略与本文所述方法的节点有功/无功调整量如表 2 所示。表 2 反映了本文所述方法使得用于电压调整的无功补偿对应 DG 电源个数降到了 7 个, 有功削减对应 DG 电源个数降到了 6 个。非分区方法导致无功功率补偿与本文所述的分区方法相比要大, 这是因为非分区管理策略中所有逆变器的无功补偿调整量都是要求解的变量, 因此, 其调整量大幅增加。相对的, 非分



表 1 IEEE33 节点的分区结果

Table 1 Partition results of IEEE33 nodes

针对无功补偿分区	节点	针对有功削减分区	节点
C <sub>1</sub>	1,2,3,4,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24	C <sub>1</sub>	3,4,5,6,18,19,20,21,22,23
C <sub>2</sub>	5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,25	C <sub>2</sub>	1,2,13,14,15,16,17,24,25,32
C <sub>3</sub>	26,27,28,29,30,31,32	C <sub>3</sub>	7,8,9,10,11,12,26,27,28,29,30,31

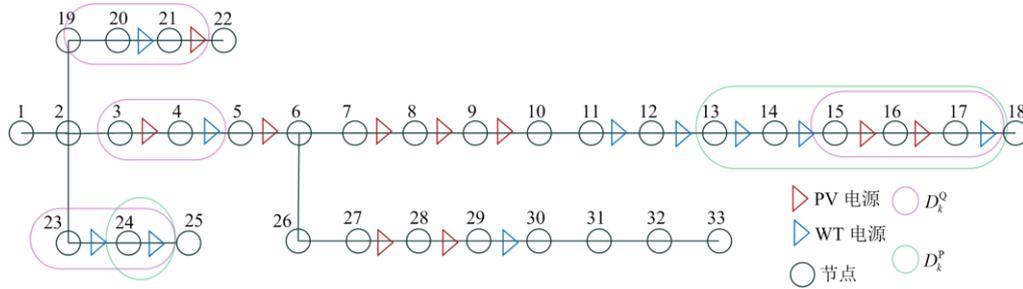


图 2 IEEE33 节点无功补偿与有功削减的优先调节节点集

Fig. 2 Priority adjustment node set of RPC and APC in IEEE33 nodes

区方法削减的有功功率总量比分区方法要小，因两种策略都是先进行无功补偿调整，当无功补偿调整后的电压水平未回到正常范围时才进行有功削减调节，故分区方法在调整节点以及无功补偿调整量都减少的情况下，有功削减量将会小幅增加。

五种情况的节点电压曲线，即接入 DG 电源、非分区策略(基于 PSO)以及本文所述方法(基于 PSO 的分区策略)的电压曲线如图 3 所示。显然，未接入 DG 前配电网的原始电压幅值都在 0.95~1.05 p.u.，接入 DG 后配电网的电压出现越限的情况。非分区管理策略调节后的电压曲线波动较大，且电压水平过低，分区方法调节后的电压曲线较为平稳，且都在标准范围内。

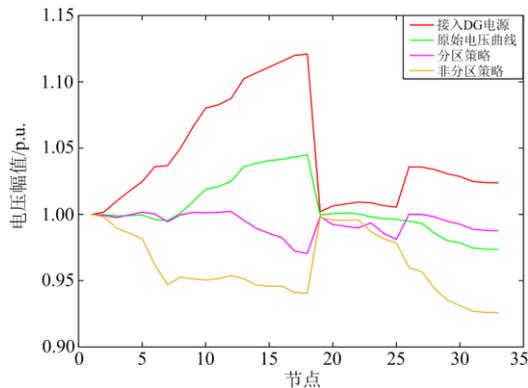


图 3 IEEE33 节点不同情况下的电压曲线

Fig. 3 Voltage curve of IEEE33 node under different conditions

为了验证所提方法的通用性，对并入分布式 DG 电源的改进 IEEE 123-bus 在 OpenDSS 软件<sup>[30]</sup>进行非分区策略以及本文所述策略的对比实验，配

电网分别第 25、46、62、93、105、80 节点接入容量为 1.2 MW 的 PV 电源，在第 15、35、68、88、114、121 节点接入容量为 1.5 MW 的风力发电(WT)电源。123 节点系统的原始电压曲线均保持在(0.95, 1.05) p.u.的允许范围内。本文所述策略的优先调节节点集  $D_k^Q$ 、 $D_k^P$  如图 4 所示。

表 2 IEEE33 节点两种策略的对比

Table 2 Comparison of two strategies of IEEE33 node

节点编号	非分区策略(PSO)		分区策略(PSO)	
	无功补偿量/kvar	有功削减量/kW	无功补偿量/kvar	有功削减量/kW
3	17.972	1.628	43.995	0.000
4	17.972	1.628	43.995	0.000
5	33.669	5.838	26.697	0.000
7	46.876	11.668	0.000	0.000
8	32.777	5.524	0.000	0.000
9	34.081	5.987	0.000	0.000
11	12.303	0.760	0.000	0.000
12	48.944	12.796	0.000	0.000
13	28.543	4.160	0.000	0.000
14	33.179	5.665	0.000	48.418
15	20.989	2.227	0.000	41.850
16	56.501	17.492	37.021	24.899
17	55.715	16.959	55.442	40.427
20	58.934	19.212	41.046	47.032
21	43.830	10.117	52.009	0.000
23	27.840	3.953	58.691	0.000
24	18.797	1.783	52.366	0.000
27	37.938	7.476	26.074	52.809
28	57.34	18.073	0.000	0.000
29	41.799	9.155	0.000	0.000
合计	725.998	162.100	437.334	255.433

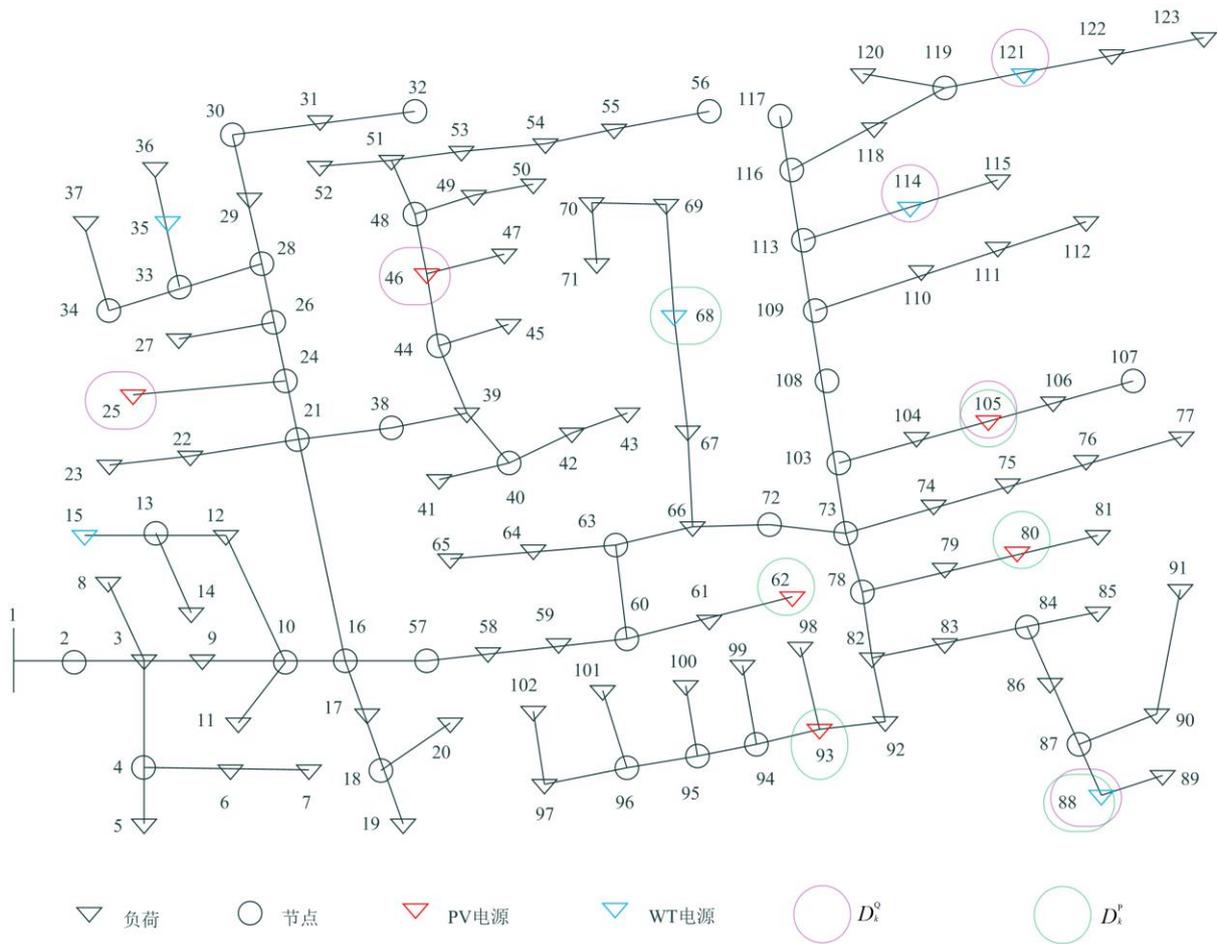


图4 IEEE123 节点无功补偿与有功削减的优先调节节点集

Fig. 4 Priority adjustment node set of RPC and APC in IEEE123 nodes

本文所述策略与非分区方法调节后的电压曲线如图5所示。由图5可知,非分区方法调节后的电压水平更低,而使用基于PSO算法的分区方法获得的电压水平略高,但整体的电压水平仍维持在1~1.026 1 p.u.,且整体电压幅值较为平稳。

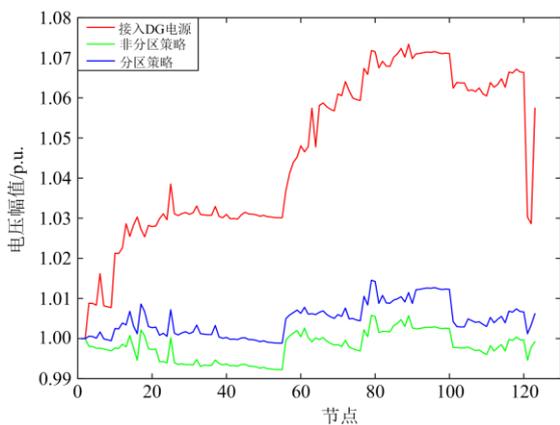


图5 IEEE123 节点不同情况下的电压曲线

Fig. 5 Voltage curve of IEEE123 node under different conditions

上述四种策略的调压效果对比如表3所示。其中,非分区调压需要的无功补偿明显多于分区调压策略所需量,而分区策略的有功调整量要多于非分区方法,结合图5中非分区策略与分区策略的调整电压曲线,说明本文提出的双层分区策略可合理运用无功补偿与有功削减组合调节电压。

表3 IEEE123 节点中两种策略的对比

Table 3 Comparison of two strategies in IEEE123 node

策略	无功补偿 总量/kvar	有功削减 总量/kW	最大电 压/p.u.	最小电 压/p.u.
非分区策略 (PSO)	3 406.022	549	1.007	0.992
分区策略 (PSO)	1 940.548	2 725.572	1.017	0.998

#### 4 结论

为解决高渗透率 DG 的配电网由潮流逆流带来的电压越限问题,本文提出了基于 PSO 算法的分布式光伏配电网双层分区调压策略,基于改进模块

度的双层分区调压策略旨在筛选出分别针对无功补偿与有功削减的少量有效的节点进行调节,实现对整个配电网的电压控制。该策略在 IEEE33、改进的 IEEE123 节点系统上进行了仿真研究,以验证策略的有效性和通用性。结果表明,该策略所涉及的针对无功补偿/有功削减的调节节点数量远少于非分配方法,总的无功补偿小于非分区方法,总的有功削减调整量略大于非分区策略,且双层分区策略调整后的节点电压更为平稳。

### 参考文献

- [1] 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 zoning and dominant node selection method for distribution networks with high-permeability distributed power[J]. Renewable Energy, 2017, 35(11): 1664-1671.
- [2] 乐健, 朱江峰, 孙旻, 等. 大规模分布式光伏接入的配电网风险评估及应对措施研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 28-33.  
LE Jian, ZHU Jiangfeng, SUN Min, et al. Distribution network risk assessment and response measures for large-scale distributed photovoltaic access[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(14): 28-33.
- [3] 李香龙, 付晓, 朱洁, 等. 含分布式电源的配电网分区和主导节点选取方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 24-29.  
LI Xianglong, FU Xiao, ZHU Jie, et al. Research on the method of selecting partitions and leading nodes of distribution networks with distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 24-29.
- [4] INJETI S K, THUNUGUNTLA V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 21-35. DOI: 10.1186/s41601-019-0149-x.
- [5] 潘欢, 徐陈, 杨丽. 含多种分布式电源的配电网多目标优化[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(10): 235-243.  
PAN Huan, XU Chen, YANG Li. Multi-objective optimization of distribution network with multiple distributed power sources[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 235-243.
- [6] ZERAATI M, HAMEDANI GOLSHAN M E, GUERRERO J. Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high DG penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3582-3593.
- [7] 于昌海, 吴继平, 杨海晶, 等. 规模化储能系统参与电网调频的控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 68-73, 105.  
YU Changhai, WU Jiping, YANG Haijing, et al. Frequency regulation strategy for power grid incorporating large-scale energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 68-73, 105.
- [8] 杨晓梅, 刘欢, 闻枫, 等. 光伏微电网孤岛运行模式下冲击负荷跟踪补偿控制[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 115-122.  
YANG Xiaomei, LIU Huan, WEN Feng, et al. Tracking and compensating control of impulse load for PV microgrid in the islanding operation mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 115-122.
- [9] 陈璟, 杨洪明, 邓友均. 考虑不间断电源储能的数据中心电-冷联供系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 129-135.  
CHEN Jing, YANG Hongming, DENG Youjun. Optimal operation of combined cooling and power system in green data center considering UPS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 129-135.
- [10] CHAMANA M, CHOWDHURY B H, JAHANBAKHS F. Distributed control of voltage regulating devices in the presence of high DG penetration to mitigate ramp-rate issues[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1086-1095.
- [11] 滕德云, 滕欢, 刘鑫, 等. 考虑多个分布式电源接入配电网的多目标无功优化调度[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 39-44.  
TENG Deyun, TENG Huan, LIU Xin, et al. Multi-objective reactive power optimization of the distribution network considering a large number of DGs connected[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 39-44.
- [12] 苗文静, 高瑜, 刘其辉, 等. 基于风电变模式运行与 OLTC 协调的配电网电压控制策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 48-53.  
MIAO Wenjing, GAO Yu, LIU Qihui, et al. Voltage control strategy for distribution network based on wind power variable mode operation and coordination with OLTC[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 48-53.
- [13] 柴园园, 郭力, 王成山, 等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 738-746.  
CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control of distribution networks with high-permeability photovoltaics[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738-746.

- [14] 陆善婷, 杨敏红, 程军照. 含高渗透率分布式光伏的实用型配电网无功电压控制技术研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4):121-126.  
LU Shanting, YANG Minhong, CHENG Junzhao. Research on practical distribution network reactive voltage control technology with high permeability distributed photovoltaics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 121-126.
- [15] ALFERGANI A, KHALIL A. Modeling and control of master-slave microgrid with communication delay[C] // 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC), March 21-23, 2017, Amman, Jordan: 1-6.
- [16] BORGHETTI A, BOTTURA R, BARBIROLI M, et al. Synchrophasors-based distributed secondary voltage/VAR control via cellular network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 262-274.
- [17] COTILLA-SANCHEZ E, HINES P D H, BARROWS C, et al. Comparing the topological and electrical structure of the North American electric power infrastructure[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(4): 616-626.
- [18] COTILLA-SANCHEZ E, HINES P D H, BARROWS C, et al. Multi-attribute partitioning of power networks based on electrical distance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4979-4987.
- [19] BISERICA M, FOGGIA G, CHANZY E, et al. Network partition for coordinated control in active distribution networks[C] // 2013 IEEE Grenoble Conference, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-5.
- [20] 朱威威, 赵岩松, 李艳灵. 一种基于集合划分的鲁棒性自适应模糊聚类分割算法[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2019, 32(1): 146-152.  
ZHU Weiwei, ZHAO Yansong, LI Yanling. A robust adaptive fuzzy clustering segmentation algorithm based on set partition[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2019, 32(1): 146-152.
- [21] 吴郅君, 殷新博, 陈中, 等. 基于模糊聚类曲线相似度的负荷用户识别方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 151-156.  
WU Zhijun, YIN Xinbo, CHEN Zhong, et al. Identification method of load customers based on similarity of fuzzy clustering curves[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 151-156.
- [22] 蒋铁铮, 尹晓博, 马瑞, 等. 基于 k-means 聚类和模糊神经网络的母线负荷态势感知[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 46-54.  
JIANG Tiezheng, YIN Xiaobo, MA Rui, et al. Bus loadsituation awareness based on the k-means clustering and fuzzy neural networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 46-54.
- [23] SANCHEZ-GARCIA R J, FENNELLY M, NORRIS S, et al. Hierarchical spectral clustering of power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2229-2237.
- [24] 徐毅非, 蒋文波, 程雪丽. 基于谱聚类的无功电压分区和主导节点选择[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 73-78.  
XU Yifei, JIANG Wenbo, CHENG Xueli. Reactive voltage partition and dominant node selection based on spectral clustering[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 73-78.
- [25] 孙笑雨, 于源, 孟垂懿, 等. 考虑大规模光伏和风电接入的主动配电网无功电源综合规划[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 16-22.  
SUN Xiaoyu, YU Yuan, MENG Chuiyi, et al. Comprehensive planning of reactive power supply for active distribution network accessed with large-scale photovoltaic and wind power[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 16-22.
- [26] ZHANG Delong, LI Jianlin, DONG Hui. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [27] ZHAO B, XU Z, XU C, et al. Network partition based zonal voltage control for distribution networks with distributed DG systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4087-4098.
- [28] CHAI Y, GUO L, WANG C, et al. Network partition and voltage coordination control for distribution networks with high penetration of distributed DG units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3396-3407.
- [29] NEWMAN M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2003, 69(6).
- [30] ROBBINS B A, HADJICOSTIS C N, DOMINGUEZ-GARCIA A D. A two-stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1470-1482.

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-07-28

作者简介:

郑晓莹(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源配电网的优化调度; E-mail: nicolar6@qq.com

陈政轩(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网的优化控制; E-mail: 763735310@qq.com

曾琮(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能算法在电网优化调度中的应用。E-mail: maszeac1997@163.com

(编辑 周金梅)