

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

徐韵, 颜湘武

(分布式储能与微网河北省重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003)

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

XU Yun, YAN Xiangwu

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province (North China
Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China)

摘要: 可再生分布式电源高比例接入, 其出力随机性叠加负荷波动性, 极大地增加了配电网无功电压调控难度。结合风电、光伏等可再生分布式电源的动态无功调节特性, 提出配电网动态分区实时无功优化方法。基于配电网辐射状结构特性, 根据支路末端节点性质逆向初步合并, 以最大模块度函数为衡量指标进行初始分区, 并根据实时运行状态和无功储备约束调整分区, 形成可满足动态无功调节的最佳分区方案, 然后执行分区实时无功电压调控。最后, 以 IEEE33 节点系统为例通过 MATLAB 编程进行仿真分析, 结果表明: 日内实时控制与动态分区相结合, 有效提高系统无功电压控制快速性和精确性。

关键词: 配电网; 实时无功优化; 动态分区; 可再生分布式电源; 动态无功储备

Abstract: With high proportion of renewable distributed power access to distribution network, the difficulty of reactive power and voltage regulation is increased greatly by its random output overlapped with load fluctuation. By considering dynamic reactive voltage regulation characteristics of renewable power sources such as wind power and photovoltaic, a dynamic partitioning real-time reactive power optimization model for distribution network is proposed. Based on the radial structure characteristics of distribution network and the reverse preliminary merging according to the nature of branch terminal nodes, the initial partition is performed with the maximum modularity function as the metric. The partition is adjusted according to the real-time operating status and the reactive reserve constraint to

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2017XS119); 河北省自然科学基金资助项目 (E2018 502134)

form the optimal partition scheme. Then the partitioning real-time voltage is regulated. Finally, the simulation analysis is carried out by MATLAB programming with the IEEE-33 node system as an example. The results show that the combination of intra-day real-time control and dynamic partitioning can effectively improve the speed and accuracy of system reactive voltage control.

Keywords: distribution network; real-time reactive power optimization; dynamic partitioning; renewable distributed generators; dynamic reactive power reserve

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0072

0 引言

可再生分布式电源 (renewable distributed generation, RDG) 规模化开发与就地并网可有效降低网络损耗、提高能源利用效率^[1-2], 但其高比例接入将改变传统配电网结构特征与运行方式, 增加系统运行不确定性和复杂度, 给无功电压控制带来新挑战^[3-4]。传统离散无功调压设备有载调压变压器 (on-load tap changer, OLTC) 和并联电容器组 (shunt capacity bank, SCB) 安装地点固定, 响应速度迟缓, 难以动态调节局部电压越限; 安装 SVC、SVG 等动态无功补偿装置成本高, 加重配电网经济负担。双馈型感应风机 (doubly-fed induction generator, DFIG)、光伏发电等 RDG 通过逆变器并网进行有功/无功解耦控制, 可连续跟踪快速响应无功补偿, 实现配电网动态无功电压调节。

随着可控无功源大量接入, 配电网节点数目

增多，拓扑结构愈发复杂，使得集中控制难以满足配网无功电压调控精准性和快速性要求。通过无功电压分区控制将系统动态分解为多个独立子系统，并分别对各子系统进行无功电压调节，可有效提高调控精度和响应速度，实现无功功率就地平衡与分布式控制，成为学者研究的热点。

目前，配电网无功电压分区思路主要有两种：基于配电网物理结构分区^[5-6]和自适应分区^[7-10]。尽管基于物理结构分区可操作性强，但难以适应未来智能配电系统的复杂结构，从而自适应分区方法备受研究人员青睐。文献^[7]以 RDG 接入点为分区中心，通过电压灵敏度阈值来界定 RDG 影响范围进行分区，但阈值根据配电网运行状态变化人为调整，在运行状态频繁变化情况下适用性受到限制。文献^[8]应用二进制编码表示支路通断，采用遗传算法进行分区优化，保证了分区内各节点的连通性。文献^[9]提出一种改进模块度函数分区算法，结合无功/有功平衡度指标与区内节点耦合度指标，在有功和无功两个层面自动形成最佳分区，实现配电网有功/无功协调分区控制。文献^[10]将配电网实时无功优化与动态分区、短期无功调度相结合进行时空解耦，采用切割枚举法动态分区，保证分区内节点间的连通性，但需事先确定分区数目，在运行方式时变、负荷及 RDG 出力波动剧烈、动态无功源非均衡分布的系统中，难以保证各分区含有充足动态无功储备以响应瞬态无功补偿。

针对上述问题，本文在研究 RDG 无功调控特性基础上，提出配电网实时无功优化动态分区方法。在无需人为干预情况下，根据系统负荷、RDG 出力变化和动态无功裕度自动分区，保障分区内无功电压调节灵活性与时变运行态势的实时匹配。实时动态分区首先基于配电网辐射状结构特性，根据每条支路末端节点性质进行初步合并；然后以最大模块度函数为衡量指标完成初始分区；最后结合模块度函数指标及无功储备约束进行分区调整，自动形成最佳分区方案。制定的日内实时无功电压控制方案中融入动态分区，当系统出现节点电压越限时，进行快速分区计算，根据分区结果对电压越限区域局部优化调节，从而保障了无功电压调控的准确性和快速性。最后，通过 MATLAB 编程仿真，验证所提动态分区方法和无功优化策略的有效性。

1 RDG 无功调控特性

1.1 DFIG 无功调控特性

根据 DFIG 风电机组运行特性，DFIG 无功功率由定子侧变流器和网侧变流器共同决定^[11]。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，见式(1)~(2)；网侧无功极限受变流器容量限制，见式(3)。

$$\left(\frac{P_m}{1-s}\right)^2 + (Q_s)^2 \leq (U_s I_{s,\max})^2 \quad (1)$$

$$\left(\frac{P_m}{1-s}\right)^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2\omega_1 L_s}\right)^2 \leq \left(\frac{3L_m}{2L_s} U_s I_{r,\max}\right)^2 \quad (2)$$

$$\left(\frac{sP_m}{1-s}\right)^2 + (Q_c)^2 \leq (S_{c,\max})^2 \quad (3)$$

式中： P_m 为风电机组输入机械功率，由捕获风能大小决定； Q_s 和 Q_c 分别为定子侧注入无功功率和网侧变流器从电网中输入的无功功率； L_s 、 L_m 分别为定子电感和励磁电感； I_s 、 I_r 分别为定、转子电流有效值； s 为转差率， $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$ ， ω_1 、 ω_r 分别为同步旋转角速度和转子旋转角速度； U_s 为定子电压有效值； $S_{c,\max}$ 为网侧变流器容量限值。不同有功输出下的无功调节范围见附图 A1。

1.2 PV 无功调控特性

光伏逆变器利用自身无功控制功能为配电系统提供电压支撑，可调无功范围与逆变器容量关系为^[12]

$$Q_{PV,\max} = \pm \sqrt{(S_{inv})^2 - (P_{PV})^2} \quad (4)$$

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，约为额定有功容量的 1.0~1.1 倍。

2 分区准则及衡量指标

2.1 分区准则

配电系统无功电压分区需要满足以下要求：

1) 保证各分区内节点间电气强耦合，各分区间电气弱耦合，以减少分区间无功电压控制相互影响。

2) 保证各分区内无功平衡并预留一定无功储备，合理分配动态无功资源，确保分区内部对节点电压动态变化的调节。

3) 同一分区内各节点保持连通性, 即同一分区中各节点间直接或间接相连, 而非经其他分区节点方可相连。

4) 避免孤立节点, 即分区内至少含两个节点, 且各分区无重复节点。

2.2 电压/无功灵敏度

系统中各节点电压/功率灵敏度可以由潮流计算中雅克比矩阵的逆阵获得。基于交流潮流方程, 在稳态解处将非线性潮流方程线性化, 得到矩阵表达式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 分别为节点注入有功、无功功率偏差矩阵; $\Delta \theta$ 和 ΔU 分别为节点电压相角、幅值变化量矩阵; \mathbf{J} 为雅克比矩阵。对式 (5) 求逆可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{P\theta} & S_{Q\theta} \\ S_{PU} & S_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 灵敏度因子 S_{PU} 和 S_{QU} 分别为节点注入单位有功、无功功率引起的电压幅值变化量; $S_{P\theta}$ 和 $S_{Q\theta}$ 分别为节点注入单位有功、无功功率引起的电压相角变化量。由式 (6) 可知, 配电网节点电压变化量 ΔU 与有功、无功变化量序列 ΔP 和 ΔQ 的关系可表示为

$$\Delta U = S_{PU} \Delta P + S_{QU} \Delta Q \quad (7)$$

式中: $\Delta P = [\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_N]^T$, $\Delta Q = [\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_N]^T$ 。

节点 i 电压除受自身有功/无功功率变化影响外, 还受其他节点 ΔP_j 和 ΔQ_j 注入影响, 表示为

$$U_i = U_i^0 + \sum_{j=1}^N S_{PU,ij} \Delta P_j + \sum_{j=1}^N S_{QU,ij} \Delta Q_j \quad (8)$$

式中: U_i^0 为节点 i 的稳态电压; $S_{PU,ij}$ 和 $S_{QU,ij}$ 分别为 S_{PU} 和 S_{QU} 的元素。灵敏度因子 S_{PU} 和 S_{QU} 分别反应有功/无功功率对节点电压影响的幅度。

2.3 模块度函数指标

社团结构是复杂网络的一个重要属性, 是网络中一组相互之间相似性较大而与其他节点相似性较小的节点集合, 复杂网络由若干个社团组成^[13]。Girvan 和 Newman 等人提出模块度函数的概念, 拓展到加权网络之中, 用以衡量复杂网络社团结构特性, 并确定最优分区数目^[14], 描述如下:

$$\rho = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(i, j) \quad (9)$$

$$k_i = \sum_j A_{ij} \quad (10)$$

$$m = \left(\sum_i \sum_j A_{ij} \right) / 2 \quad (11)$$

式中: A_{ij} 为连接节点 i 和节点 j 的边的权重, 当节点 i 和节点 j 直接相连时 $A_{ij} = 1$, 不相连时 $A_{ij} = 0$; k_i 表示所有与节点 i 相连的边的权重之和; m 表示网络中所有边的权重之和; 若节点 i 与节点 j 在同一分区, 则 $\delta(i, j) = 1$, 否则 $\delta(i, j) = 0$ 。

根据模块度定义, 模块度 ρ 取值严格小于 1, 模块度越高, 社团内部越紧密, 外部越稀疏, 网络的社团结构越合理。因此, 可以通过搜索所有连接方式中的模块度最大值确定最优网络分区。在本文中, 为准确描述节点间电气耦合度, 节点间边的权重主要由电压无功灵敏度决定:

$$A_{ij} = \frac{S_{QU,ij} + S_{QU,ji}}{2} \quad (12)$$

不同节点间灵敏度大小与节点间的阻抗相关, 而节点间阻抗又与节点间地理属性直接相关, 因此以电压无功灵敏度为权重进行初始分区可在一定程度上保证区域间节点的连通性和电气耦合。

2.4 分区动态无功储备指标

动态无功储备充裕有助于配电网应对各种扰动引起的电压波动, 对维持系统电压稳定具有重要作用^[15]。SCB 属于静态无功设备, 动态无功储备主要由 RDG 提供。为避免分区紧急控制难以响应或无功资源过剩, 需均衡分配 RDG 动态无功资源。因此, 制定分区动态无功储备指标 β_i 描述如下:

$$\beta_i = \begin{cases} \frac{Q_{G,i}}{Q_{L,i}} & Q_{G,i} < Q_{L,i} \\ 1 & Q_{G,i} \geq Q_{L,i} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $Q_{G,i}$ 为分区 i 可用动态无功裕度; $Q_{L,i}$ 为区内负荷无功需求。分区结果必须满足各区域无功储备指标 β_i 大于预置值。

3 配电网动态分区方法

3.1 分区优化模型

配电网动态分区可分为 3 步: ①初步合并;

②初始分区；③分区调整。其中，初始分区与分区调整优化目标函数描述为

$$f_{\max} = \rho \tag{14}$$

分区无功储备约束为

$$\beta_i \geq \alpha \tag{15}$$

式中： ρ 为配电系统的模块度函数值； β_i 为分区*i*的动态无功储备，本文中 α 取20%。若存在分区不满足无功储备约束，则执行分区调整。

3.2 动态分区方法

动态无功电压分区步骤如下：

1) 计算配电网总动态无功储备 β ，若满足要求，初始化配电网分区，以各节点作为一个独立子分区。

2) 根据配电网辐射状结构特征进行初步合并：若某支路含 RDG 节点，且非末端节点，则将距该支路末端最近 RDG 节点连同末端之间的节点合并到一个分区，合并后的分区作为 RDG 节点(即分区中包含 RDG 的节点)处理；若某支路所有节点均为非 RDG 节点，则该支路所有节点连同其分支根节点合并到一个分区，合并后的分区作为负荷节点处理，如图 1 所示。

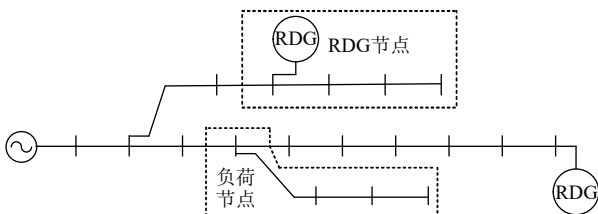


图 1 节点合并示例图

Fig. 1 Example diagram of node merging

3) 以公式(14)目标函数为衡量指标进行初始分区。从 RDG 节点开始，每次合并两节点形成新分区，两节点中必须含一个 RDG 节点且至少含一个孤立节点(独立成分区的节点)，合并后的分区作为 RDG 节点。

4) 重复步骤 3) 继续执行分区过程，直至所有孤立节点合并完毕，初始分区完成。

5) 计算各分区无功储备 β_i ，判断是否需要分区调整。

6) 若某分区 β_i 不满足式(15)无功储备约束，则与相邻无功储备充裕的分区合并，直至所有分区均满足无功储备约束，保留当前分区方案，执行步骤 7)。

7) 若所有分区 β_i 满足式(15)，则根据公式(14)目标函数进行分区合并优化，直至模块度函数最大，分区过程停止，获取最优分区结果。分区算法流程如图 2 所示。

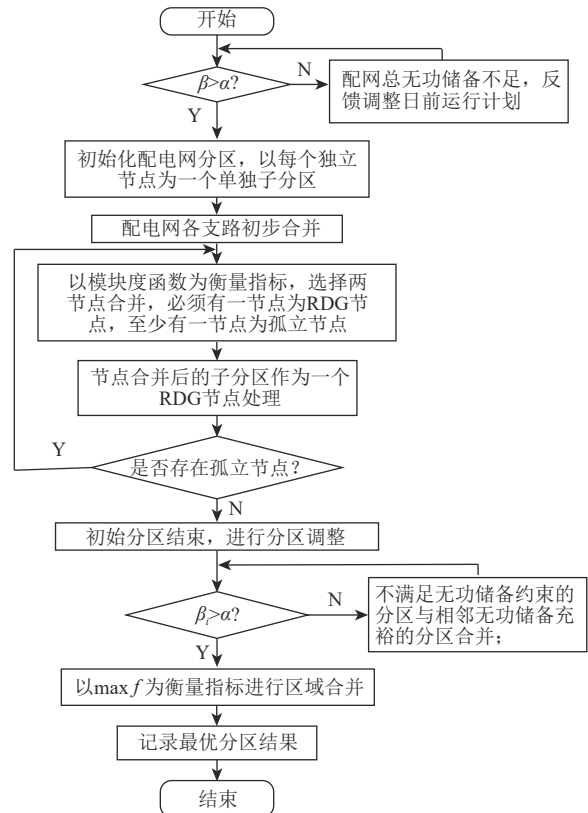


图 2 分区算法流程图

Fig. 2 Partition algorithm flow chart

整个分区过程中，初始分区以 RDG 节点为分区中心，保证每个分区均含有动态无功源，从而在初始分区过程中尽可能满足分区无功储备要求；模块度函数表征不同节点间耦合程度，以此为衡量指标可满足分区内节点电气强耦合、区域间节点电气弱耦合要求。基于模块度最优化的社区发现算法主要有：层次聚类算法^[16]和人工智能算法^[17]。其中，层次聚类算法准确度较高，但复杂度随网络规模扩大明显增加，为弥补其缺陷，本文根据配电网结构特征，首先对每条支路进行初步合并，然后在初始分区过程中限制每次聚类合并两点中至少有一点为 RDG 节点，且至少有一点为孤立节点，从而通过引导性层次聚类降低算法时间复杂度，有利于动态分区与实时无功优化快速性需求相匹配。

此外，RDG 出力随机性容易导致可用动态无

功电源非均衡分布,难以保证初始分区后各分区均满足无功储备要求。若在初始分区过程中增加无功储备约束,分区复杂度将极大增加,且容易出现连通性约束破坏的现象,限制初始分区采用模块度函数可自动满足连通性约束的固有优点。因此,本文根据实际情况调整初始分区,调整后分区数目由优化结果自动确定,无需提前设定;当系统动态无功容量充足且分布均衡时,分区数目会相应增加;当可用动态无功容量紧张且非均衡分布时,分区调整会自动减少分区数目来保证各分区内的无功储备满足要求。

4 考虑动态分区的实时无功优化模型

根据时间尺度,无功优化分为日前优化和实时控制。日前优化给出配电系统未来24h无功运行方案,优化时间粒度取1h,侧重于运行经济性,通过OLTC、SCB、RDG等不同响应速度无功设备间的协调配合,进行大幅度调节,并使RDG留有一定无功储备进行日内动态调节。本文研究侧重于动态分区和实时无功优化,日前优化模型参见文献[18]。

实时滚动调控时间粒度为5min,侧重于系统电压稳定性,借助实时更新的RDG出力、负荷需求超短期预测信息进行潮流计算,若配电系统各节点未出现电压越限,则严格执行日前无功优化方案;若系统某节点电压越限,根据各RDG无功裕度计算系统总无功储备,若满足需求,则系统进行分区优化;根据动态分区结果,在遗传算法中只随机生成电压越限区RDG无功补偿变量的初始种群,进行实时优化;OLTC、SCB等离散设备仍执行日前优化方案,不参与实时调控。实时调控以有功网损最小为优化目标,描述为

$$\min F = P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n u_i \sum_{j=1}^n u_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (16)$$

约束条件:

$$\begin{cases} P_i = u_i \sum_{j=1}^n u_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = u_i \sum_{j=1}^n u_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (17)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (18)$$

$$Q_{\text{RDG}i,\min} \leq Q_{\text{RDG}i} \leq Q_{\text{RDG}i,\max} \quad (19)$$

式中: P_{loss} 为网络损耗; P_i 、 Q_i 为各节点注入的有功和无功; n 为网络节点数; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导、电纳和相角差; $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压上、下限值; $Q_{\text{RDG}i,\min}$ 和 $Q_{\text{RDG}i,\max}$ 分别为 RDG 无功出力最小、最大值。

RDG 接入位置不同对配电网无功电压支撑贡献不同,且各 RDG 无功出力深度亦会直接影响调压效果。本文通过调用电压越限节点所在分区内最小距离存留无功裕度的 RDG 承担主要调节任务,降低电压调节对其他分区的影响,且减少无功功率远距离流动。此外,系统内总无功储备不足或分区不再执行(分区数目减少到1)时,若实时无功优化后仍存在节点电压越限,则启动反馈校正,对 OLTC、SCB 动作状态和 RDG 出力等日前运行方案进行重新优化校正。

5 实例计算与分析

本文采用调整后的 IEEE 33 节点配电系统(matpower6.0 “case33bw”实例,见图3)进行仿真分析。基准值选取: $S_B = 10 \text{ MVA}$; $U_B = 12.66 \text{ kV}$ 。各节点电压偏移上下限为 $\pm 0.7\%$; 节点 7、16、24 接入分布式风电机组,装机容量分别为 0.6 MW、0.6 MW、0.8 MW; 节点 21 和 30 接入分布式光伏,装机容量均为 0.6 MW; 节点 22、33 分别接入 4 组并联电容器组,每组容量为 0.1 Mvar; 负荷及各设备接入参数见附表 B1; RDG 出力曲线见附图 A2; 负荷曲线见附图 A3。

5.1 分区优化结果分析

根据 RDG 出力曲线和负荷曲线可知,风电反调峰和光伏发电集中出力特征显著,将导致不同时刻系统潮流非均衡分布,因此,本文选取 3 个典型时刻(5:00、12:00、20:00)的分区优化结果进行对比分析。其中,5:00 处于负荷低谷期,系统无功储备充足;12:00 负荷较重且光伏有功出力接近峰值,光伏逆变器无功储备较为紧张,而风机无功储备相对充足;20:00 为负荷晚高峰,光伏有功出力近乎零,无功充足,风电无功储备相对紧俏。表 1 为 3 个典型时刻日前优化结果,作为实时优化方案的数据基础。

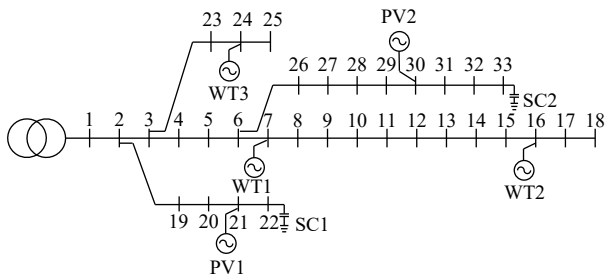


图 3 调整后的 IEEE 33 节点测试系统
Fig. 3 Adjusted IEEE33 node test case

表 1 日前优化各无功设备运行状态
Table 1 Operating status of reactive devices for day-ahead optimization

无功设备类型	5:00运行状态	12:00运行状态	20:00运行状态
WT1/Mvar	0.390	0.228	-0.001
WT2/Mvar	-0.023	0.260	0.249
WT3/Mvar	0.448	0.425	0.575
PV1/Mvar	-0.028	-0.262	0.034
PV2/Mvar	0.200	0.060	0.405
OLTC/p.u.	0.975	1	1.025
SC1/Mvar	0.35	0.4	0.4
SC2/Mvar	0.35	0.3	0.4

5.1.1 初始分区结果分析

表 2 给出 3 个典型时刻的初始分区结果，表 3 为仅初始分区下不同时刻各分区无功储备情况(本文中感性/容性无功储备分别表示无功源可发出的感性/容性无功)。可知：不改变配网拓扑结构情况下，采用模块度函数指标分区，不同时刻的分区结果一致，但各分区无功储备情况差异较大，其中，5:00 负荷较轻，无功储备需求相对较弱，且各分区内的 RDG 无功裕度满足无功储备要求；12:00 在光伏出力和负荷均接近峰值双重影响下，容易导致光伏发电所在分区内抑制光伏并网电压升高的容性无功储备不足(例如：分区 1 容性储备系数仅为 0.15)；20:00 负荷达峰

表 2 不同时刻初始分区相关节点

Table 2 Related nodes of initial partition at different time

分区编号	5:00、12:00、20:00初始分区结果(节点编号)
1	1-2,19-22
2	3,23-25
3	4-6,26-33
4	7-8
5	9-18

表 3 不同时刻初始分区无功储备

Table 3 Initial partition reactive reserve at different time

分区编号	5:00		12:00		20:00	
	感性	容性	感性	容性	感性	容性
1	1	1	0.909	0.150	0.935	1
2	0.256	1	0.567	1	0.149	1
3	0.740	1	0.226	0.315	0.197	0.822
4	0.229	1	1	1	1	1
5	1	1	0.590	1	0.471	1
总储备	0.638	1	0.637	1	0.425	1

值，分区 2 与分区 3 均出现感性无功储备不足情况。

5.1.2 初步合并提升计算效率情况分析

为验证本文所提初步合并方法对分区计算时间复杂度的影响，以 5:00 分区结果为例，针对初始分区前采用/不采用初步合并两种情况的仿真进行比较：未采用初步合并计算时间为 3.42 s；采用初步合并计算时间为 2.02 s。可见，通过初步合并，将支路上 RDG 并网点至末端无其他 RDG 节点穿插的所有节点，或纯负荷支路所有节点合并为一个节点，简化了初步分区的系统网架结构，有效提高初步分区计算效率。

算例中初步合并分别将节点 16-18、节点 21-22、节点 24-25、节点 30-33 合并为 4 个独立节点，配网结构简化效果尚未特别明显，但随着未来“源-荷”接入点逐步增多，配网结构愈加复杂，初步合并对分区效率提升的效果将凸显。

5.1.3 最终分区结果分析

RDG 出力和负荷变化特性决定了不同时刻系统负载分配和潮流走向不同，以及分区无功储备变化，进而影响动态分区最终结果。表 4 给出在不考虑无功储备情况下模块度函数值随分区数目的变化情况，图 4 为相应的分区合并示意图，结合表 3 可知：5:00 各分区无功储备均满足要求，最佳分区方案为 5 个分区，与以模块度函数值最大为衡量指标的分区方案一致，即初始分区为最佳分区；12:00 由于初始分区 1 容性无功储备不足，分区调整过程中将分区 1 与邻近无功储备充足的分区 2 合并，使得最佳分区模块度函数降低；同样，20:00 初始分区 2 和分区 3 感性无功储备不足，分别与分区 1、分区 4 合并来满足无功储备，模块度函数值由最优值 0.142 2 降低为 0.142 0。3 个时刻最终分区结果见表 5。

表4 模块度函数值随分区数量的变化
Table 4 Modularity function values variation with the number of partitions

分区数量	1	2	3	4	5
5:00	-0.045 2	0.130 6	0.145 3	0.145 5	0.145 6
12:00	-0.044 7	0.129 3	0.143 3	0.143 6	0.143 7
20:00	-0.044 8	0.128 4	0.142 0	0.142 1	0.142 2

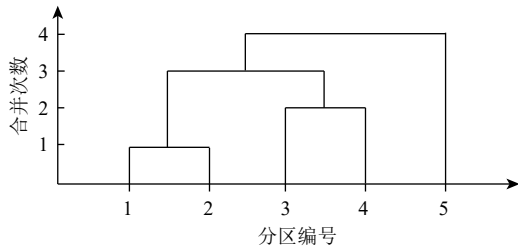


图4 分区合并示意图

Fig. 4 Schematic diagram of partition merging

表5 各个典型时刻最终分区结果
Table 5 Final partitioning results for each typical time

时刻	分区编号	区域内相关节点编号	感性无功储备	容性无功储备
5:00	1	1-2,19-22	1	1
	2	3,23-25	0.256	1
	3	4-6,26-33	0.740	1
	4	7-8	0.299	1
	5	9-18	1	1
12:00	1	1-3,19-25	0.786	1
	2	4-6,26-33	0.226	0.315
	3	7-8	1	1
	4	9-18	0.590	1
20:00	1	1-3,19-25	0.653	1
	2	4-8,26-33	0.499	1
	3	9-18	0.471	1

图5~7给出了3个时刻最终分区结果的区域划分图，需要注意的是，若系统总无功储备充足，而初始分区出现多个子分区无功储备不足时，记分区内各节点到主节点的最小电气距离为 x_i ，计算平均电气距离 x_{av} ，依次对 $|x_i-x_{av}|$ 最大的区域进行调整

5.2 实时无功优化结果分析

以20:00为例进行实时无功优化分析，此时负荷处于晚高峰，电压沿支路方向跌落严重，负荷和风电出力超短期预测与日前预测偏差导致末端32-33节点电压越限。采用本文所提的实时无

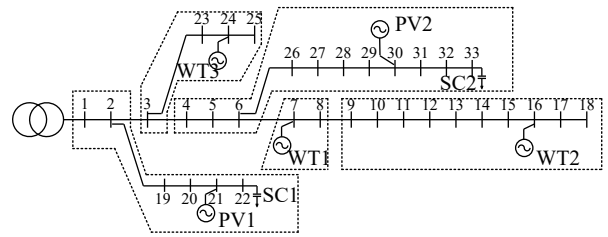


图5 最终分区结果(5:00)

Fig. 5 Final partitioning scheme at 5:00

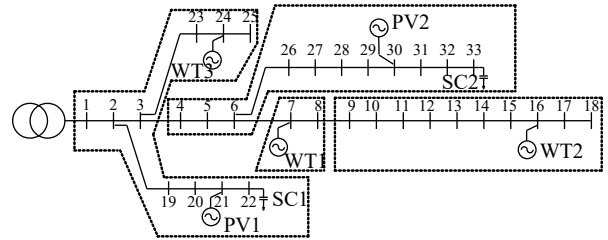


图6 最终分区结果(12:00)

Fig. 6 Final partitioning scheme at 12:00

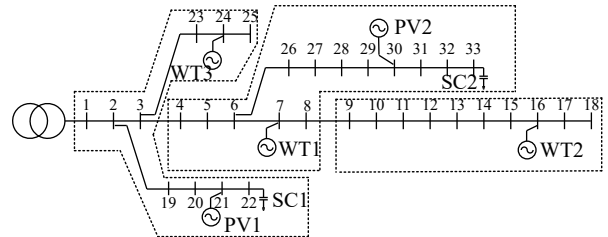


图7 最终分区结果(20:00)

Fig. 7 Final partitioning scheme at 20:00

功电压控制方法，在实时优化前进行分区优化计算，根据分区结果将电压越限节点所在分区的动态无功补偿量，即相应RDG无功控制量设为优化变量，其它分区中的控制变量保持不变，采用遗传算法进行优化。表6、表7分别给出考虑/不考虑分区两种方案下的实时无功优化结果(以20:00为例)，鉴于智能优化算法寻优的随机性，各给出3次优化结果进行分析；两种方案优化后的各节点电压及优化前节点电压情况如图8所示。

根据表6、表7和图8可知：优化前节点32、33电压越限，在考虑分区的实时无功优化方案下，仅对电压越限节点所在分区内电源WT1、PV2无功出力进行调节即可满足调节需求，且3次优化结果中靠近电压越限节点的PV2无功补偿量均最大，实现就地补偿降低无功功率在线路上的流动，平均网损为0.1635MWh，平均优化时间为26.51s；相比之下不考虑分区方案，实时无功优化针对于全网所有动态无功源，尽管个别

表 6 考虑分区的实时无功优化结果

Table 6 Real-time reactive power optimization results considering partitions

优化次数	参与调节的RDG无功出力/Mvar		网损/MW	优化时间/s
	WT1	PV2		
第1次	0.150	1.282	0.163	25.34
第2次	0.157	1.276	0.163	27.85
第3次	0.254	1.161	0.164	26.35

表 7 不考虑分区的实时无功优化结果

Table 7 Real-time reactive power optimization results without considering partitions

次数	参与调节的电源出力/Mvar					网损/MW	优化时间/s
	WT1	WT2	WT3	PV1	PV2		
1	0.213	0.076	-0.028	0.598	1.516	0.171	61.17
2	-0.015	0.081	0.509	0.358	1.433	0.173	84.95
3	-0.045	0.069	0.499	0.128	1.493	0.173	74.37

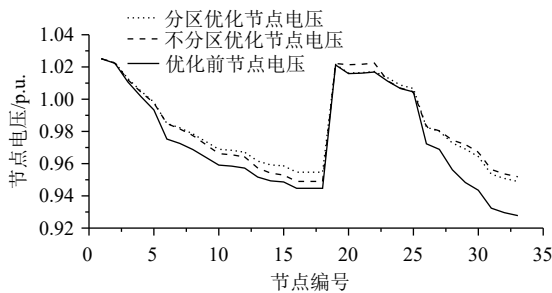


图 8 各节点电压对比

Fig. 8 Voltage comparison of each node

节点电压改善方面效果更佳，但加重了全网线路上无功流动，增加了网损，且优化变量增多也增加了优化计算时间复杂度。较考虑分区方案平均网损增加 0.01 MWh，为 0.173 5 MWh；平均优化时间增加近 2 倍，为 73.50 s。

6 结论

针对全局优化控制难以满足系统电压调控快速性和精准性，固定分区控制难以适用高比例 RDG 接入下系统运行状态多变的问题，本文研究了配电网动态分区实时无功优化方法，根据系统负荷、RDG 出力变化和无功储备动态分区，确保了分区电压调节灵活性与运行时态变化的实时匹配，保障配电网稳定运行。在实时电压调控过程中，各分区间存在电气弱耦合关系，调节过程中相互之间仍然存在一定影响，但相对于全局优化

的多源同步调整，影响明显降低，电压调节局部特性更明显，且计算效率显著提高。

本文研究聚焦点在于日内动态分区和实时无功优化，后续研究进一步将日前优化和实时优化相结合，并充分考虑未来柔性负荷、电动汽车、分布式储能系统等可控有功源接入，从“源-荷-储”多环节、多维度研究配电网多时间尺度有功/无功联合优化，扩展优化“可行域”，实现逐层细化调控，进一步提高所提模型和方法的工程应用价值。

(本刊附录请见网络版，印刷版略)

参考文献

- [1] MAHMUD N, ZAHEDI A. Review of control strategies for voltage regulation of the smart distribution network with high penetration of renewable distributed generation [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016(64): 582 – 595.
- [2] ADEFARATI T, BANSAL R C. Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review [J]. *Iet Renewable Power Generation*, 2016, 10(7): 873 – 884.
- [3] 姚良忠, 朱凌志, 周明, 等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(9): 36 – 43.
YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(9): 36 – 43 (in Chinese).
- [4] ZUBO R H A, MOKRYANI G, RAJAMANI H S, et al. Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016(72): 1177 – 1198.
- [5] BARR J, MAJUMDER R. Integration of distributed generation in the volt/var management system for active distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 576 – 586.
- [6] FAZIO A R D, FUSCO G, RUSSO M. Decentralized control of distributed generation for voltage profile optimization in smart feeders [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(3): 1586 – 1596.
- [7] 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 (in Chinese).
- [8] 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 of distribution network with high penetration of DGs [J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(11): 1664 - 1671 (in Chinese).
- [9] 肖传亮, 赵波, 周金辉, 等. 配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 147 - 155.
XIAO Chuanliang, ZHAO Bo, ZHOU Jinhui, et al. Network partition based cluster voltage control of high-penetration distributed photovoltaic systems in distribution networks [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(21): 147 - 155 (in Chinese).
- [10] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含DG配电网实时无功优化 [J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(23): 117 - 124.
ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions [J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(23): 117 - 124 (in Chinese).
- [11] EDRAH M, LO Kwok L, ANAYA-LARA O. Reactive power control of DFIG wind turbines for power oscillation damping under a wide range of operating conditions [J]. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 2016, 10(15): 3777 - 3785.
- [12] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(6): 1578 - 1587.
XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1578 - 1587 (in Chinese).
- [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 (in Chinese).
- [14] 韦钢, 李明, 卢炜, 等. 充放储一体站并网的多级阶梯电压控制分区方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15): 3823 - 3831.
WEI Gang, LI Ming, LU Wei, et al. Multistage ladder voltage control partitioning method containing grid-connected charging-discharging-storage integrative station [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3823 - 3831 (in Chinese).
- [15] 颜伟, 高峰, 王芳, 等. 考虑区域负荷无功裕度的无功电压优化分区方法 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(2): 61 - 66.
YAN Wei, GAO Feng, WANG Fang, et al. An optimal network partitioning algorithm for reactive power and voltage control considering regional reactive power margin [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(2): 61 - 66 (in Chinese).
- [16] 龚尚福, 陈婉璐, 贾澎涛. 层次聚类社区发现算法的研究 [J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(11): 3216 - 3220, 3227.
GONG Shangfu, CHEN Wanlu, JIA Pengtao. Survey on algorithms of community detection [J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(11): 3216 - 3220, 3227 (in Chinese).
- [17] 金弟, 刘杰, 杨博, 等. 局部搜索与遗传算法结合的大规模复杂网络社区探测 [J]. *自动化学报*, 2011, 37(7): 873 - 882.
JIN Di, LIU Jie, YANG Bo, et al. Genetic algorithm with local search for community detection in large-scale complex networks [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(7): 873 - 882 (in Chinese).
- [18] 颜湘武, 徐韵. 基于模型预测控制含RDG参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(10): 2022 - 2037.
YAN Xiangwu, XU Yun. Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including rdg regulation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(10): 2022 - 2037 (in Chinese).

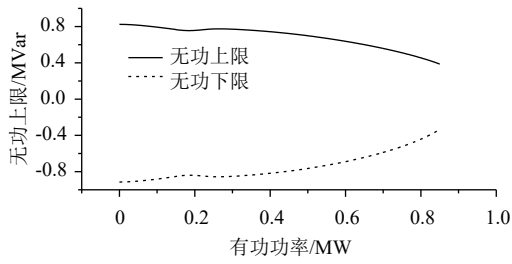
收稿日期: 2019-01-25

作者简介:

徐韵(1990), 女, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为新能源并网、电力优化调度, E-mail: xuyun2009054@163.com;

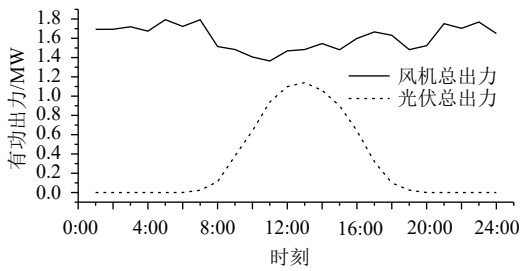
颜湘武(1965), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换新型储能与节能技术, E-mail: xiangwuy@ncepu.edu.cn.

附录 A



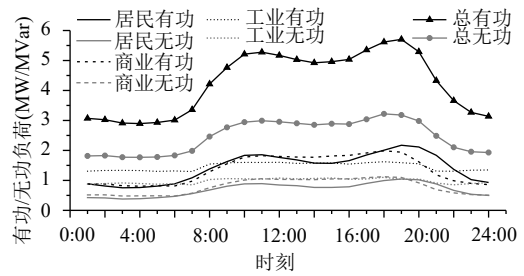
附图 A1 某 0.8 MW DFIG 风电机组无功调节范围

Fig. A1 Reactive power adjustment range of DFIG wind turbine



附图 A2 RDG 出力曲线

Fig. A2 RDG power curve



附图 A3 不同类型负荷曲线

Fig. A3 Curves of different types of load

附录 B

附表 B1 负荷及各设备接入参数

Table B1 Load and equipment access parameters

类型	参数及接入情况
RDG	① 0.6 MW(风电, 并网节点7)
	② 0.6 MW(风电, 并网节点16)
	③ 0.8 MW(风电, 并网节点24)
	④ 0.6 MW(光伏, 并网节点21)
	⑤ 0.6 MW(光伏, 并网节点30)
并联电容器组	① 0.4 MVar, 并网节点22
	② 0.4 MVar, 并网节点33
负荷	① 居民负荷, 接入节点: 4,5,7,8,10,14,16
	② 商业负荷, 接入节点: 26-32
	③ 工业负荷, 接入节点: 24,25,19,20,22