

# 含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制

刘 蕊, 吴奎华, 冯 亮, 梁 荣, 王 宪, 杨慎全

(国网山东省电力公司经济技术研究院, 济南 250001)

**摘要:** 随着高渗透率分布式光伏的接入,配电网的过电压问题愈发严重,传统集中式的电压优化控制方法因为变量维数过多而无法满足控制时间的要求。基于此,该文提出一种主动配电网电压分区协调优化控制的方法。首先提出无功/有功分区质量函数作为分区指标,并以网络快速分区算法对配电网进行无功、有功分区。在无功分区内,以无功调节量最少为目标建立光伏逆变器无功优化二阶锥模型,在有功分区内,以光伏有功剪切最少为目标建立光伏逆变器有功剪切二阶锥优化模型,采用并行计算方式对各分区内二阶锥优化模型同时求解,然后将各分区优化结果作为其他分区优化约束再进行迭代优化,直至所有分区内目标函数值不再发生变化,达到各分区之间协调控制的目的。最后以某实际馈线系统为例,验证所提方法能对配电网过电压进行快速有效的控制。

**关键词:** 分布式光伏; 配电网; 高渗透率; 电压调节; 网络分区

中图分类号: TM711

文献标志码: A

## 0 引言

目前传统能源的紧缺及各行业对能源需求的增长刺激了光伏发电的迅速崛起<sup>[1]</sup>。然而随着分布式光伏渗透率的提升,对配电网的安全稳定运行与控制带来重大挑战<sup>[2]</sup>。电网过电压是其中倍受关注的问题之一<sup>[3]</sup>,过电压问题不止影响配电网的正常运行,更是直接限制电网新能源消纳能力、降低光伏自身的经济效益和运行效率<sup>[4]</sup>。

随着分布式电源安装比例的提升,传统配电网由无源网络转变为有源复杂配电网,为提高有源复杂配电网对分布式新能源的消纳水平,电力电子产业的增多与发展使得配电网自主协调管控能力不断提升,且随着配电网中业务需求的不断增多,配电网慢慢从被动管理模式发展为主动参与的主动配电网,可实现主动管理、控制分布式电源。在主动配电网对分布式光伏控制管理中,光伏逆变器自身参与电网电压控制的能力不断发展。文献[5-6]提出光伏逆变器无功补偿策略RPC,利用光伏逆变器实现吸收(释放)无功功率,灵活地对网络节点电压进行调节,但RPC策略易使馈线节点功率因数过低且会增加线路网损,甚至产生过热现象(例如变压器)。文献[7-8]提出光伏有功剪切策略APC,通过对光伏有功功率削减解决电网过电压问题。APC策略只适用于阻抗比大(large  $R/X$ )的低压配电网的电压调节,且该方法无法利

用光伏逆变器的无功容量,易造成资源浪费。针对RPC和APC策略的不足,文献[9-10]提出有功无功最优配置策略OID,OID具备APC与RPC的所有优点,通过光伏逆变器有功、无功功率最优输出点设定,以最少的经济代价对电压进行调节,同时保证节点的功率因数要求,能最大发挥光伏发电效率,使其在实际中得到更好的应用,并成为主要的光伏调压手段<sup>[11]</sup>。然而,在上述文献所提方法基本采用集中式控制的方法对区域内所有光伏逆变器的优化控制。这种优化控制方法在光伏渗透率较低且配电网节点数量较少时较为适用。然而在配电网中高渗透率、分散化光伏接入的场景下,由于光伏发电装置安装数量较多且位置不集中,此时配电网已经变为一个复杂网络,对所有光伏发电系统采用集中式优化控制的方法,由于变量维度过多,会导致优化过程复杂,优化时间过长,甚至会产生维度灾的问题。

近年来电压分区控制为解决高维复杂的电压优化控制问题提供了新的思路。所谓“分区”即是将配电网按照一定的规则划分为若干个子区域,不同子区域的节点具有弱耦合的特性,同一子区域内节点之间具有强耦合的特性,因此各子区域内可独立控制电压且不受其他子区域的影响。目前国内外文献针对电压分区优化控制的主要分区方法有:谱聚类法<sup>[12]</sup>、K均值法<sup>[13]</sup>、免疫算法<sup>[14]</sup>、复杂网络理论<sup>[15]</sup>等。其中,复杂网络理论由于不需要提前设定分区数且能自动生成

收稿日期: 2020-03-20

基金项目: 国网山东省科技项目(52062518000P)

通信作者: 刘 蕊(1993—), 女, 硕士、中级工程师, 主要从事新能源发电及关键技术等方面的研究。liu\_rui@zju.edu.cn

最佳分区数目而被广泛应用<sup>[16]</sup>。在分区的基础上,电压分区控制可实现各分区内电压的独立优化与控制。文献[17]对配电网进行有功与无功分区,并在有功分区内调节关键光伏节点的有功出力、在无功分区内调节关键光伏节点逆变器的无功输出,从而迅速将电压控制在安全稳定运行范围内。该方法虽然能够实现迅速控制电压,但并未考虑运行的经济性,且在调节过程中存在顺序控制,未做到分布式并行优化。文献[18]将电网进行无功功率分区,分区后对各子区域内部光伏采用粒子群算法进行有功、无功优化,迅速将电压控制在安全稳定运行范围内,同样也存在子分区的顺序控制,不能做到分布式并行计算。文献[19]基于配电网的无功功率分区,采用日前调度与实时控制相结合的手段对分区内光伏进行无功优化,通过分区控制快速规避光伏预测的不确定性问题,但该方法只对光伏进行无功调节,忽略有功调节部分,除此之外,该方法并未考虑分区之间的协调,导致电压调节代价变大。因此,对配电网进行分区后,如何实现各子分区内的光伏优化的并行计算,同时又能实现分区间的协调优化,从而真正实现配电网光伏的分区并行优化控制,保证每个分区内光伏优化控制的“公平”、“公正”。

综合上述问题,本文提出含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制方法。首先基于社团分区理论提出配电网无功/有功分区质量函数,并以此为基础对配电网进行无功、有功分区。在无功分区内,以光伏逆变器无功调节量最小为目标,建立分区内无功电压二阶锥优化模型,在有功分区内,以光伏有功剪切量最小为目标,建立分区内有功电压二阶锥优化模型。对上述各模型同时采用二阶锥规划(SOCP)进行并行求解,以此实现对含高渗透率分布式光伏配电网的分区优化,解决优化过程复杂、变量维度过多、优化时间过长的问题。对上述分区内部优化问题求解后,将优化结果作为其他分区优化约束,再进行迭代优化,直至所有分区内的目标函数值不再发生变化,以此实现各分区之间优化的协调交互。最后,采用某一实际馈线开展案例分析,证明本文所提研究方法的有效性与适用性。

## 1 配电网无功/有功分区方法

随着分布式光伏渗透率的提升,配电网中优化控制节点数目增多,配电网的电压优化控制愈加复杂,若对所有光伏采用传统集中式方法进行优化控制,将出现因控制维数过多而无法满足控制时间尺度要求。此时若利用分区算法将配电网分成若干个子区域,在各子区域内进行分区电压控制,不仅可以将原本复杂的集中式电压控制问题分解为若干个可独立求解的子问题,实现各分区之间的并行计算,便于问题求解,而且当针对某个区域进行电压调节时,该区域参数的变化对其他区域影响最小,便于各分区内光伏的独立控制,从而实现分布式光伏灵活地响应系统调度和协调控制。考虑到分区控制的优点,若能将数目众多、位置分散的高渗透率分布式光伏进行分区优化控制,由于分区内节点高度耦

合,分区间节点弱耦合,在控制过程中,某分区内光伏进行优化的结果对其他分区光伏优化控制的影响非常小,每个分区忽略其他分区光伏的影响独立地对本分区内光伏进行优化控制,做到每个分区内光伏只对本分区内与其电压敏感度最高的节点进行电压调节,从而以最小的光伏调节成本换取最大的电压调节效益,体现光伏调节过程的“公平”、“公正”。本文依据电压敏感度对系统开展有功、无功分区研究。

### 1.1 无功、有功电压分区解耦

依据雅克比矩阵,系统潮流计算应符合式(1):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ps} & B_{pu} \\ C_{qs} & D_{qu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  ——节点注入有功功率变化量;  $\Delta Q$  ——节点注入无功功率变化量;  $\Delta \delta$  ——节点电压相角变化量;  $\Delta U$  ——节点电压幅值变化量;  $A_{ps}$ 、 $B_{pu}$ 、 $C_{qs}$ 、 $D_{qu}$  ——式(1)中雅克比矩阵元素,表示节点注入功率波动量( $\Delta P$ ,  $\Delta Q$ )与电压变化量( $\Delta \delta$ ,  $\Delta U$ )之间的关系。对式(1)进行矩阵变换:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ps} & S_{qs} \\ S_{pu} & S_{qu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $S_{pu}$ 、 $S_{qu}$ 、 $S_{ps}$ 、 $S_{qs}$  ——灵敏度因子;  $S_{pu}$ 、 $S_{ps}$  ——注入单位数量的有功功率节点电压幅值、相角的变化;  $S_{qu}$ 、 $S_{qs}$  ——注入单位数量的无功功率后节点相角、电压幅值的变化量。

由式(2)可得,假设配电网共含  $N$  个节点,网络内各节点电压幅值变化量与有功、无功变化量满足式(3):

$$\Delta U = S_{qu} \cdot \Delta Q + S_{pu} \cdot \Delta P \quad (3)$$

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

若对  $N_{pv}$  个光伏进行有功、无功调节时,节点电压变化主要受自身光伏调节以及其他节点注入功率的影响。所以第  $i$  个节点电压表示如下:

$$V_i = V_i^0 + \sum_{j=1}^{N_{pv}} S_{pu}^{ij} \Delta P_j + \sum_{j=1}^{N_{pv}} S_{qu}^{ij} \Delta Q_j \quad (4)$$

式中:  $V_i^0$  ——节点  $i$  的初始电压;  $S_{pu}^{ij}$ 、 $S_{qu}^{ij}$  ——式(2)中  $S_{pu}$ 、 $S_{qu}$  第( $i$ ,  $j$ )个元素。

### 1.2 无功/有功分区质量函数

社团分区方法针对复杂网络分区存在的问题提供了新的思路,例如 Girvan 和 Newman 提出的模块度函数<sup>[20]</sup>等,与已有的分区方法相比,这些方法无需设定分区数即可自动形成最优分区值,能更加合理地对复杂网络进行自适应分区。当配电网中接入高渗透率分布式光伏时,为实现配电网的合理分区,本文提出无功/有功分区质量函数,并以此为基础对复杂网络进行无功/有功自适应分区。无功分区质量函数考虑了网络的拓扑结构,反映分区内节点之间的无功强耦合性、分区之间节点的无功弱耦合性,限制分区内与分区之间节点数目,防止分区内节点数目过多或过少,同时还能保证分区数目的合理性。无功分区质量函数主要由区内灵敏度函数、区间灵敏度函数组成,各函数定义如下:

### 1.2.1 区内无功灵敏度函数 $Q_{\text{internal}}^{\vartheta}$

$$Q_{\text{internal}}^{\vartheta} = \frac{\sum_{k=1}^T \left( \sum_{i \in \pi_k^{\vartheta}} \sum_{j \in \pi_k^{\vartheta}} A_{ij}^{\vartheta} \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij}^{\vartheta} \right)^2 \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^T |N_k^{\vartheta}|^2}} \quad (5)$$

式中:  $T$  ——当前无功分区数目;  $\pi_k^{\vartheta}$  ——第  $K$  个无功分区;  $N$  ——网络节点数目;  $N_k^{\vartheta}$  ——第  $K$  个无功分区内节点数目;  $A_{ij}^{\vartheta}$  ——连接节点  $i$  和节点  $j$  的边的无功-电压权重, 描述节点之间无功耦合度。  $A_{ij}^{\vartheta}$  值越大, 表示当前分区下节点  $i$  与节点  $j$  之间具有越强的无功耦合度, 即节点  $i$  与节点  $j$  之间具有越强的电压-无功灵敏度。  $A_{ij}^{\vartheta}$  可通过式(6)计算<sup>[17]</sup>:

$$A_{ij}^{\vartheta} = \frac{S_{qu}^{ij} + S_{vu}^{ij}}{2} \quad (6)$$

在式(5)中, 分子表征当前分区状态下各子区域内节点之间电压-无功灵敏度的强弱, 分子越大, 表示区域内各节点之间具有越强的电压-无功灵敏度; 分母的第 1 项用于对分子进行标幺化, 分母的第 2 项则用于平衡各分区内的节点数目, 其值越小, 各分区内的节点数目差异越小。区内无功灵敏度函数  $Q_{\text{internal}}^{\vartheta}$  以配电网的拓扑结构为依据, 表征分区内节点之间的无功耦合度大小, 其值范围为  $[0, 1]$ , 其值越大, 表示分区内各节点之间的无功耦合度越高, 各节点之间无功-电压灵敏度越高, 分区更加合理。同时, 区内无功灵敏度函数  $Q_{\text{internal}}^{\vartheta}$  还能够平衡各分区内的节点数目, 避免不同分区内部节点数目差异较大, 不利于后续优化控制的实现。

### 1.2.2 区间无功灵敏度函数 $Q_{\text{external}}^{\vartheta}$

$$Q_{\text{external}}^{\vartheta} = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^T \left( \sum_{i \in \pi_k^{\vartheta}, j \notin \pi_k^{\vartheta}} A_{ij}^{\vartheta} \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij}^{\vartheta} \right)^2 \cdot \sum_{k=1}^T |N_k^{\vartheta}| \cdot |N - N_k^{\vartheta}|}, & N_k^{\vartheta} < N \\ 1, & N_k^{\vartheta} = N \end{cases} \quad (7)$$

在式(7)中, 当  $N_k^{\vartheta} < N$  时, 其分子表示当前分区状态下不同分区内的节点之间电压-无功灵敏度的强弱, 其值越小, 表示不同分区节点之间有越弱的电压-无功灵敏度。其分母的第 1 项用于对分子进行标幺化, 第 2 项用于平衡各分区内的节点数目, 各分区内的节点数目差异越小其值越大。当配电网被分为一个分区时, 即  $N_k^{\vartheta} = N$  时, 则第 1 个等式的分子、分母都为 0, 本文设定此情况下区间无功灵敏度函数值为 1。区间无功灵敏度函数主要表征电压-无功灵敏度的大小, 其值范围为  $(0, 1]$ , 其值越小, 表示分区之间各节点之间无功耦合度越低, 各节点之间具有较弱的无功电压灵敏度, 分区更加合理。同时, 区间无功灵敏度函数也能防止各分区内部节点数目过多, 导致分区结果不合理。

综合上述指标, 本文提出无功分区质量函数表达式如下:

$$Q_{\text{quality}}^{\vartheta} = \frac{1}{2} (Q_{\text{internal}}^{\vartheta} + 1 - Q_{\text{external}}^{\vartheta}) \quad (8)$$

式(8)中, 区内无功灵敏度函数取值越大无功分区质量越好, 而区间无功灵敏度函数取值范围为  $[0, 1]$ , 且其值越小, 分区效果越好, 因此, 将区间无功灵敏度函数转化为  $1 - Q_{\text{external}}^{\vartheta}$ 。将变化后的区间无功灵敏度函数与区内无功灵敏度函数相加, 然后取均值即可得到无功分区质量函数。无功分区质量函数取值越大, 代表分区结果越合理。

同理, 有功分区质量函数表达式为:

$$Q_{\text{quality}}^P = \frac{1}{2} (Q_{\text{internal}}^P + 1 - Q_{\text{external}}^P) \quad (9)$$

式中:  $Q_{\text{internal}}^P$  ——区内有功灵敏度函数;  $Q_{\text{external}}^P$  ——区间有功灵敏度函数。

## 1.3 配电网分区过程

配电网无功分区与有功分区实现方式相同, 本节仅阐述利用无功分区质量函数实现分区过程。本文利用光伏与负荷的预测数据, 对配电网进行无功/有功分区, 以此作为后续优化控制的基础。针对配电网(共  $N$  节点)无功分区, 其最优分区方法如下, 分区过程流程图如图 1 所示。

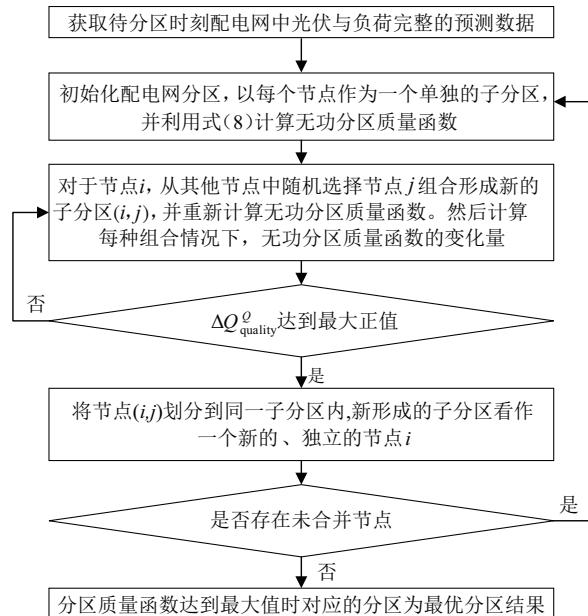


图 1 网络分区流程图

Fig. 1 Flowchart of network partition algorithm

具体步骤如下:

- 1) 获取待分区时刻配电网中光伏与负荷完整的预测数据。
- 2) 对配电网的分区进行初始化, 配电网中每个节点为分区过程的初始子分区, 利用式(8)计算初始分区下的无功分区质量函数。
- 3) 选取某一节点  $a$ , 从配电网中任意选择另一节点  $b$  组合形成新的子分区  $(a, b)$ 。重新计算无功分区质量函数以及当前分区下无功分区质量函数的变化量。当无功分区质量函数的变化量达到最大正值时, 将对应的节点  $(a, b)$  合并

形成一个新的子分区,更新此时的无功分区质量函数。

4)把新生成的子分区作为配电网内新的独立节点,重复步骤3)并继续分区。

5)当所有节点都合并为一个分区时,分区过程停止,选取无功分区质量函数最大时的分区作为最优分区结果。

本文主要依据网络的拓扑结构对配电网进行分区,而对于配电系统来说,其运行方式(如网络重构等)经常在短时间内发生较大改变,此时若仍采用原来的分区结果进行分区控制将不再合理。因此,当配电网的运行方式发生改变时,需对配电网进行重新分区,并以此作为后续分区控制的基础,从而实现动态分区、动态优化。

## 2 配电网电压分区协调优化控制

配电网电压分区协调优化控制分为分区并行优化与交互协调两部分。其中,分区并行优化部分主要是在配电网无功、有功分区内建立相应的光伏逆变器无功、有功输出优化模型,并以并行计算的方式获取每个分区内当前状态下的最优结果;交互协调部分通过将当前状态下各分区并行优化结果在各分区之间相互交换,用以下一状态下各分区并行计算,并以迭代搜索法进行多代重复交换,直至各分区内目标函数不再发生变化,以此实现各分区之间的协调交互。

### 2.1 无功分区内二阶锥优化模型

在配电网无功分区内通过改变光伏逆变器的无功调节量进行电压调节,考虑到调节的经济性与有效性,无功分区内以运行成本最低为目标建立优化模型。在光伏逆变器调节无功功率时,无论释放或吸收无功功率都会产生一定的损耗,因此以光伏逆变器无功功率调节费用来表征无功分区运行成本,目标函数如下:

$$obj_k^0 = \min \left( c_{pv\_q} \sum_{j=1}^{n_k^0} |Q_{pv,j,t}| \right) \quad (10)$$

式中:  $c_{pv\_q}$  ——逆变器损耗的补偿成本;  $n_k^0$  ——无功分区  $K$  内部光伏数目;  $Q_{pv,j,t}$  —— $t$  时刻  $j$  节点的逆变器无功调节量。在进行电压优化调节时,无功分区内还需满足网络潮流及光伏逆变器运行约束,式(11)表示支路潮流二阶锥松弛变换,式(12)~式(14)表示有功、无功节点注入功率平衡等式,式(15)~式(17)表示节点电压幅值及支路电流约束,式(18)表示光伏逆变器有功无功功率及功率因数约束。

$$\begin{cases} P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 = H_{ij,t} U_{i,t}^2 \\ U_{j,t}^2 = u_{j,t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \end{cases} \leq H_{ij,t} + u_{i,t}, \forall (i,j) \in \chi \quad (11)$$

$$P_{pv,j,t}^* - P_{l,j,t} = \sum_{l \in \Phi(j)} P_{jl,t} - \sum_{i \in A(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} H_{ij,t}), \forall j \in \pi \quad (12)$$

$$Q_{pv,j,t}^* - Q_{l,j,t} = \sum_{z \in \Phi(j)} Q_{zj,t} - \sum_{i \in A(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} H_{ij,t}), \forall j \notin \pi^0 \quad (13)$$

$$Q_{pv,j,t} - Q_{l,j,t} = \sum_{z \in \Phi(j)} Q_{zj,t} - \sum_{i \in A(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} H_{ij,t}), \forall j \in \pi^0 \quad (14)$$

$$u_{i,t} = u_{i,t} - 2(r_{ij,t} P_{ij,t} + x_{ij,t} Q_{ij,t}) + (r_{ij,t}^2 + x_{ij,t}^2) H_{ij,t}, \forall (i,j) \in \chi \quad (15)$$

$$(U^{\min})^2 \leq u_{j,t} \leq (U^{\max})^2, \forall j \in \pi \quad (16)$$

$$H_{ij,t} \leq (I_{ij}^{\max})^2, \forall (i,j) \in \chi \quad (17)$$

$$\begin{cases} \left\| \begin{array}{c} Q_{pv,j,t} \\ P_{pv,j,t}^* \end{array} \right\|_2 \leq S_{pv,j} \\ -P_{pv,j,t}^* \tan \theta_j^{\min} \leq Q_{pv,j,t} \leq P_{pv,j,t}^* \tan \theta_j^{\min} \end{cases}, \forall j \in \pi^0 \quad (18)$$

式中:  $H_{ij,t}$  —— $t$  时刻线路  $i-j$  电流的平方;  $Q_{ij,t}$ 、 $P_{ij,t}$  ——线路  $i-j$  上在  $t$  时刻的无功功率、有功功率;  $U_{i,t}$  ——节点  $i$  在  $t$  时刻的电压幅值;  $u_{i,t}$  ——节点  $i$  在  $t$  时刻的电压幅值的平方;  $c$  ——所有线路集合;  $\pi$  ——所有节点集合;  $\pi_k^0$  ——无功分区  $K$  内所有节点集合;  $A(j)$ 、 $\Phi(j)$  ——节点  $j$  的母支路集合与子支路集合;  $P_{pv,j,t}^*$  —— $t$  时刻节点  $j$  点光伏输出有功功率,为定值,由 2.2 节有功分区优化计算给出;  $Q_{pv,j,t}^*$  —— $t$  时刻节点  $j$  ( $j \notin \pi_k^0$ ) 点光伏逆变器无功调节量,为定值,由其他无功分区优化计算给出;  $Q_{pv,j,t}$  —— $t$  时刻节点  $j$  ( $j \in \pi_k^0$ ) 点光伏逆变器无功调节量;  $P_{l,j,t}$ 、 $Q_{l,j,t}$  —— $t$  时刻节点  $j$  点有功、无功负荷需求量;  $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$  ——线路  $i-j$  的电阻与电抗;  $I_{ij}^{\max}$  ——线路  $i-j$  的最大电流。其中  $S_{pv,j}$  ——节点  $j$  点光伏额定功率;  $\theta_j^{\min}$  ——节点  $j$  点光伏逆变器最小功率因数角。

从上述模型可知,目标函数及约束皆为线性或标准二阶锥形式。

### 2.2 有功分区内二阶锥优化模型

在配电网有功分区内,主要通过光伏有功剪切来进行电压调节,因此,以光伏有功剪切量产生资源浪费表征有功分区内的运行成本,目标函数如下:

$$C_{p,p,t} = c_{pv,p} \sum_{j=1}^{n_k^p} (P_{pv,j,t}^{\text{real}} - P_{pv,j,t}) \quad (19)$$

式中:  $c_{pv,p}$  ——光伏有功剪切的补偿成本;  $n_k^p$  ——有功分区  $K$  内部光伏的安装数目;  $P_{pv,j,t}^{\text{real}}$  —— $t$  时刻第  $j$  个节点的光伏无调节状态下的有功发电量;  $P_{pv,j,t}$  —— $t$  时刻第  $j$  个节点的光伏调节后的有功发电量。在有功分区内进行电压优化调节时,还需满足网络潮流及光伏逆变器运行约束:

$$\text{s.t.} \quad \text{式(11), 式(15)~式(17);} \quad (20)$$

$$P_{pv,j,t} - P_{l,j,t} = \sum_{l \in \Phi(j)} P_{jl,t} - \sum_{i \in A(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} H_{ij,t}), \forall j \in \pi_k^p \quad (20)$$

$$P_{pv,j,t}^* - P_{l,j,t} = \sum_{l \in \Phi(j)} P_{jl,t} - \sum_{i \in A(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} H_{ij,t}), \forall j \notin \pi_k^p \quad (21)$$

$$Q_{pv,j,t}^* - Q_{l,j,t} = \sum_{z \in \Phi(j)} Q_{zj,t} - \sum_{i \in A(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} H_{ij,t}), \forall j \in \pi \quad (22)$$

$$\begin{cases} \left\| \begin{array}{c} Q_{pv,j,t}^* \\ P_{pv,j,t}^* \end{array} \right\|_2 \leq S_{pv,j} \\ -P_{pv,j,t}^* \tan \theta_j^{\min} \leq Q_{pv,j,t} \leq P_{pv,j,t}^* \tan \theta_j^{\min} \end{cases}, \forall j \in \pi_k^p \quad (23)$$

上述约束中:  $\pi_k^p$  ——有功分区  $K$  内所有节点集合。从

上述模型可知, 目标函数及约束皆为线性或标准二阶锥形式。

### 2.3 问题求解

对于本文提出的模型求解包含分区并行优化与交互协调2部分, 其中, 并行优化部分主要通过二阶锥优化在各分区内部进行独立优化, 交互协调部分则是采用迭代<sup>[21]</sup>的方法进行各分区之间的优化交互, 过程如下:

1) 初始化配电网中所有光伏变量的初始值:  $\forall Q_{PV,j,t}^0 = 0$ ,  $j \in \pi_1^0, \forall Q_{PV,j,t}^0 = 0, j \in \pi_2^0 \dots \forall Q_{PV,j,t}^0 = 0, j \in \pi_T^0 \forall P_{PV,j,t}^0 = P_{PV,j,t}^f$ ,  $j \in \pi_1^p, \forall P_{PV,j,t}^0 = P_{PV,j,t}^f, j \in \pi_2^p \dots \forall P_{PV,j,t}^0 = P_{PV,j,t}^f, j \in \pi_R^p$

计算各无功分区运行成本  $(C_{1,t}^{0,0}, C_{2,t}^{0,0}, \dots, C_{T,t}^{0,0})$  以及有功分区运行成本  $(C_{1,t}^{p,0}, C_{2,t}^{p,0}, \dots, C_{T,t}^{p,0})$ 。

2) 将所有光伏有功初始量以及除  $\pi_r^0$  外所有无功利益团体的无功初始量带入  $\pi_r^0$  内, 采用二阶锥松弛算法求解此无功分区内的运行成本  $C_{K,t}^{0,1}$ , 以及该无功分区内光伏的无功优化值  $\{Q_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_k^0\}$ 。以同样的方法求出所有的无功分区内的运行成本  $(C_{1,t}^{0,1}, C_{2,t}^{0,1}, \dots, C_{T,t}^{0,1})$  以及无功分区内光伏的无功优化值  $\{Q_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_1^0\}, \{Q_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_2^0\} \dots \{Q_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_T^0\}$ 。将所有光伏无功初始量以及除  $\pi_k^p$  外所有有功分区内的光伏有功初始量带入  $\pi_k^p$  内, 求解此有功分区的运行成本  $C_{K,t}^{p,1}$ , 以及该有功利益团体内的光伏的有功优化值  $\{P_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_k^p\}$ , 以同样的方法求出所有的有功利益团体的利益损失  $(C_{1,t}^{p,1}, C_{2,t}^{p,1}, \dots, C_{R,t}^{p,1})$  以及有功利益团体内的光伏的有功优化值  $\{P_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_1^p\}, \{P_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_2^p\} \dots \{P_{PV,j,t}^1 | j \in \pi_R^p\}$ 。将上述所有问题及变量的优化结果作为下一代迭代的初始值, 并更新下一代初始值。

3) 给定算法的收敛阈值为  $\tau$ , 令:

$$\Delta = \begin{bmatrix} C_{1,t}^{0,1} - C_{1,t}^{0,0} \\ \vdots \\ C_{T,t}^{0,1} - C_{T,t}^{0,0} \\ C_{1,t}^{p,1} - C_{1,t}^{p,0} \\ \vdots \\ C_{R,t}^{p,1} - C_{R,t}^{p,0} \end{bmatrix} \quad (24)$$

4) 若  $\Delta \leq \tau$ , 结束计算并求得最优解。反之, 则将上述所有问题及变量的优化结果作为下一代迭代的初始值, 并更新下一代初始值。重复步骤2)~4), 直至收敛。

## 3 算例分析

### 3.1 算例背景简介

针对中国某一地区实际馈线开展案例分析, 验证本文所提研究方法的可行性、有效性。该案例为 10 kV 三相平衡系统, 其网络拓扑结构如图 2 所示, 共计 103 个节点, 线路承载

总负荷大小为 22.8 MVA, 总光伏安装容量为 13.2 MW, 各节点光伏安装容量如图 3 所示。

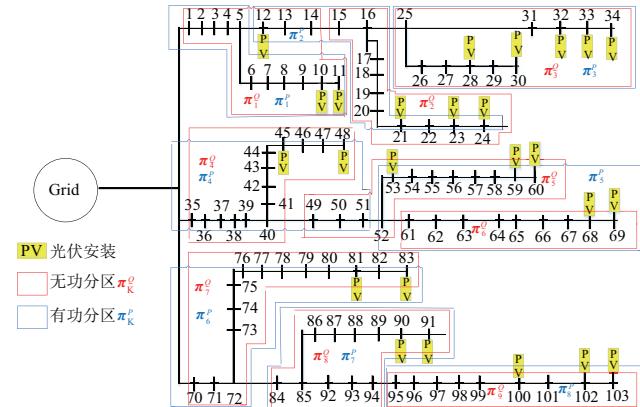


图 2 实际网络拓扑图

Fig. 2 Topology of real feeder

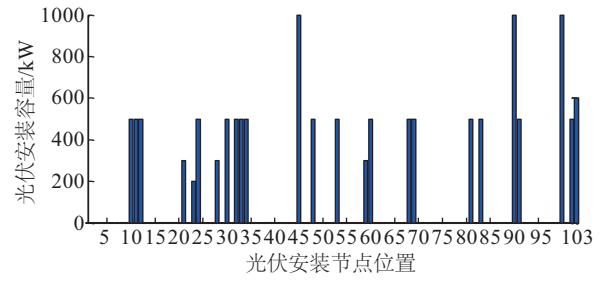


图 3 馈线中光伏安装

Fig. 3 PV installations in feeder

本文采用 OpenDSS 软件平台对本文配电网拓扑模型进行搭建, 在 Matlab 环境下调用 OpenDSS 并进行仿真。本文基准功率分别设 100 MVA, 基准电压设为 10 kV。为体现本研究方法的可行性, 选取 2017 年 7 月 16 日(一年中光照强度最强)对系统运行进行分析。2017 年 7 月 16 日辐照度预测值(辐照度基准值为 1500 W/m<sup>2</sup>)及负荷需求预测曲线可见图 4。在仿真算例中, 光伏逆变器的功率因数保持在(-0.95, 0.95), 同时本方法设定光伏有功功率剪切上限值为光伏装机容量的 10%。

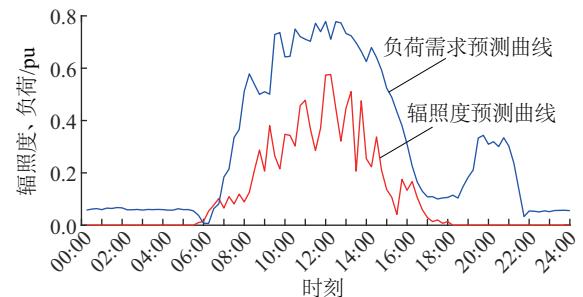


图 4 2017年7月16日太阳辐照度与负荷需求预测曲线

Fig. 4 Forecasting curve of PV irradiance, load demand on 2017-07-16

### 3.2 本文方法实现

当所有光伏全部接入配电网且不采取任何电压调节措施时,2017年7月16日当天配电网各节点电压分布如图5所示,各时段最高节点电压如表1所示。从图5及表1中可以看出,中午部分时刻配电网出现节点过电压,此时必须有效的电压调节措施以保证配电网的经济安全稳定运行。

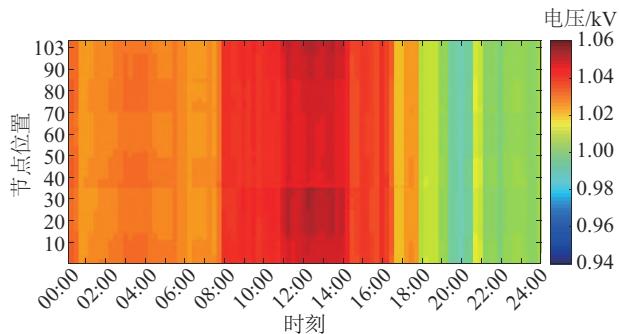


图5 2017年7月16日全天节点电压分布

Fig. 5 Nodal voltage profiles on 2017-07-16

表1 配电网各时段最高节点电压分布

Table 1 Highest nodal voltage during different periods

时段	最高电压节点	电压幅值/kV
00:00—04:00	1	1.0315
04:00—08:00	35	1.0414
08:00—12:00	34	1.0593
12:00—16:00	34	1.0594
16:00—20:00	35	1.0371
20:00—24:00	1	1.0188

本文首先根据配电网光伏出力的预测数据对配电网进行无功/有功分区,并作为后续优化控制的基础。根据2017年7月16日全天馈线运行状态的预测值,根据上述分区方法对103节点馈线系统开展所有时段的无功、有功分区,以2017年7月16日12:30为例,说明本文分区实现过程及结果。2017年7月16日12:30在各分区数值下计算无功/有功分区质量函数曲线如图6所示。由图6可知当配电网划分为9个无功子分区时,无功分区质量函数取得最大值 $\rho=0.5233$ ,因此最佳无功分区数为9分区,此时网络拓扑结构中无功分区结果如图2中红色虚线框标注。同理,有功分区质量函数取得最大值 $\rho=0.5526$ ,最佳有功分区数为8分区,配电网有功划分结果如图2中蓝色虚线框标注所示。从图2来看,无论有功分区还是无功分区,各分区结果与配电网拓扑具有一定的相关性,这是因为节点之间电压灵敏度的大小与其阻抗相关,而节点之间阻抗又与配电网拓扑接线相关。不相连节点之间电压灵敏度值较低,而相连的2个节点之间电压灵敏度值较高,所以配电网分区结果与配电网拓扑接线相关联。

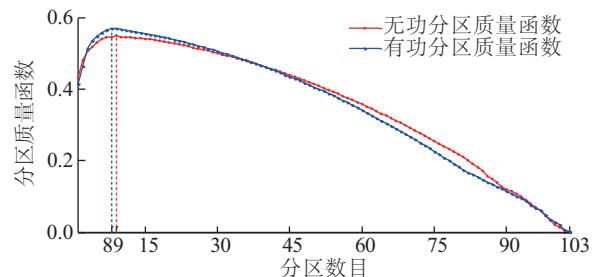


图6 不同分区数下无功、有功分区质量函数曲线

Fig. 6 Reactive/active power quality function versus number of clusters

对配电网进行分区后,采用配电网分区协调优化控制方法对配电网各变量进行优化。采用本文分区优化控制方法后,2017年7月16日全天光伏逆变器无功调节量如图7所示,有功剪切值如图8所示。如图所示,在11:00—14:00内,某些光伏节点参与电压调节,而在其他时刻内,光伏无动作情况。这是因为在11:00—14:00内线路中会出现过电压,在本文控制策略下,相应的光伏与配电网其他调压设备进行了有功无功优化控制,而在其他时刻,由于光伏无需参与电压调节,因此光伏无需动作。除此之外,从图7可见,节点10、11、45、48始终未参与电压调节,是因为这些节点所在的有功分区与无功分区并不包含过电压节点,所以光伏无需动作。

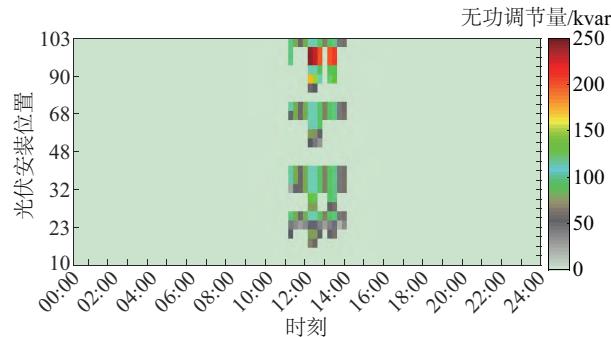


图7 本文控制策略光伏逆变器无功调节量

Fig. 7 Regulated reactive power of PV inverters under proposed method

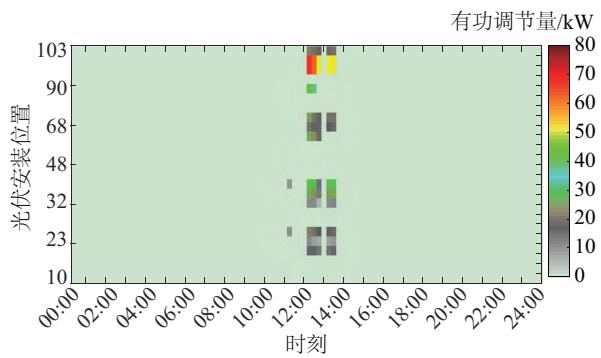


图8 本文控制策略光伏逆变器有功调节量

Fig. 8 Curtailed active power of PV inverters under proposed method

参与调节。而对于光伏节点 12,既属于  $\pi_1^p$ ,又属于  $\pi_2^q$ ,但  $\pi_1^p$  内无过电压节点,而  $\pi_2^q$  内存在过电压节点,所以光伏节点 12 会出现只有无功输出而无有功剪切的现象。

经过上述调节后,配电网全天电压分布如图 9 所示,各时段最高节点电压分布如表 2 所示。如表 2 及图 9 所示,经本文分区优化控制后,配电网内节点电压均分布在允许运行范围内。证明本文所提分区优化控制方法能有效应对配电网内的过电压问题。

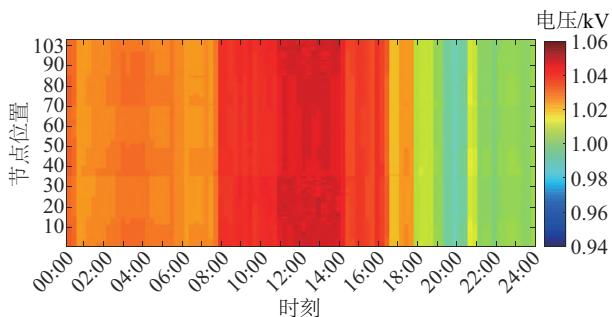


图9 本文控制策略下馈线电压分布

Fig. 9 Nodal voltage profiles under proposed method

表2 本文方法下配电网最高节点电压分布

Table 2 Highest voltage attained by proposed scheme

时段	最高电压节点	电压幅值/kV
00:00—04:00	1	1.0312
04:00—08:00	35	1.0413
08:00—12:00	34	1.0494
12:00—16:00	34	1.0492
16:00—20:00	35	1.0373
20:00—24:00	1	1.0188

### 3.3 案例对比

为体现所提方法的有效性,本文设置集中式优化控制方法作为对比案例。集中式控制方法与本文方法区别在于,集中式方法采用不分区的方法,即可将整个配电网看做一个有功与无功分区相重叠的子区域,并对区域内所有光伏同时进行优化。

采用集中式优化控制方法,配电网中全天电压调节效果如图 10 所示。从图 10 可看出,集中式优化控制方法也可将配电网内所有节点电压控制在安全稳定运行范围内,无电压越限发生。

从表 3 中集中式策略与分区策略案例对比结果来看,集中式控制方法一天内光伏无功总调节量比分区控制多 1351 kvar,有功剪切少 597 kW,总调节成本少 27.1 美元。产生上述差异的主要原因是集中式控制方式是在整个配电网范围内对所有光伏的有功无功出力进行优化,能全局优化所有光伏的有功无功输出,使光伏无功容量达到极大可能利用,

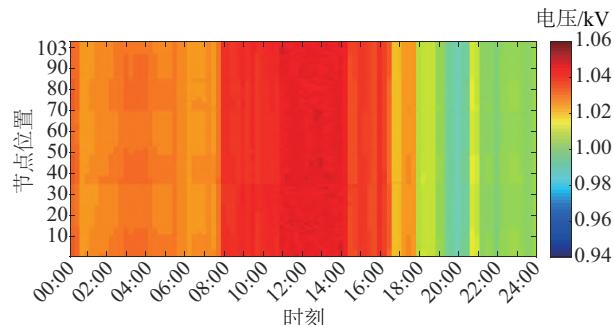


图10 集中式控制策略下馈线电压分布

Fig. 10 Nodal voltage profiles under centralized method

而分区控制方式则是每个分区独立地对自己分区内部光伏进行优化,而无法对其他分区光伏优化,所以在分区优化时,若某一分区内光伏无功调节容量不足时,由于无法调节其他分区的无功容量,只能对本区域的光伏有功进行剪切,因此分区控制的无功调节总量比集中式少,有功剪切总量比集中式控制多。表 3 显示集中式优化结果下用户利益总损失为 852.5 美元,而分区控制用户利益总损失为 879.6 美元,分区控制用户利益总损失比集中式多 27.1 美元,相比总的利息损失,二者差异不大,这是由于本文在第三优化阶段过程中各分区之间能相互协调交互,各分区独立优化的同时还能兼顾其他分区内的光伏的运行状态,因此能极大地减少集中式优化控制结果与分区优化控制结果之间的差异,保证其电压控制的经济性。从表 3 中优化时间来看,集中式控制方法需要 12.6 s 完成全天所有时段的优化,而分区控制完成全天的所有时段的优化只需要 3.5 s,优化时间缩短,优化过程大大加快。分析其原因主要是,集中式控制需要对整个配网内所有光伏逆变器进行优化,优化过程中变量维度增大,整个求解过程变得复杂且耗时长。而分区优化控制则是通过分区将复杂的配电网优化控制问题分解为各分区内部电压优化控制的子问题,各分区只对本分区内的光伏进行独立优化,极大地降低了控制变量维度,简化了控制过程,且在优化过程中各分区并行优化,极大地缩短了优化时间。

表3 2种方法优化结果对比

Table 3 Comparison of two scheme

项目	本文方法	集中式方法
逆变器无功/kvar	12942	14293
光伏有功剪切/kW	1395	798
总调节成本/美元	879.6	852.5
优化时间对比/s	3.5	12.6

综上所述,分区优化控制方法与集中式控制都能将配电网各节点电压控制在安全范围内,且二者的调节成本相差不大,但分区控制能进行并行计算,减少变量维度,简化控制过程,可在较短的时间内实现所有节点电压控制,因此具有较大的优化时间尺度优势,且随着配电网拓扑结构变大,二者

之间在优化时间上的差距会进一步增大,当配电网节点数目增加到一定规模后,集中式方法会因为其优化时间过长而无法满足控制时间尺度要求(例如,难以满足超短期调度的时间尺度要求),甚至会因为变量维度过大导致维度灾问题,进而无法得到优化结果。因此,综合上述优势,本文所提方法更适合未来含高渗透率分布式光伏的配电网电压优化控制。

## 4 结 论

随着分布式光伏渗透率的不断提高,配电网过电压问题愈发严重,传统集中式电压控制方法因为优化求解过程复杂而难以实现,问题急需解决。本文提出含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制方法。首先基于社团分区理论提出无功、有功分区质量函数,并以此为基础对配电网进行无功、有功分区,并在无功/有功利益团体内提出光伏有功、无功二阶锥优化模型,采用二阶锥松弛算法对上述两种模型进行并行优化求解,以此来解决变量维度过多、优化过程复杂、优化时间过长的问题。求解后,将优化结果作为其他利益团体优化问题约束,再进行迭代优化,直至所有分区内的目标函数值不再发生变化,以此来解决分区之间协调优化的问题。本文所提方法能将复杂的配电网优化控制问题分解为各分区内部电压优化控制的子问题,极大地降低了优化变量维度,简化了优化过程,并通过并行计算快速得到优化结果,缩短优化时间,同时还能考虑各分区之间的协调优化,满足工程实际控制需求。

## [参考文献]

- [1] HOSENUZZAMAN M, RAHIM N A, SELVARAJ J, et al. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2015, 41: 284-297.
- [2] SAADAT N, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. A series-connected photovoltaic distributed generator capable of enhancing power quality [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2015, 28(4): 1026-1035.
- [3] 崔杨, 刘文, 唐耀华, 等. 改善光伏高渗透率配电网电压水平的储能电池最优容量配置方法 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1157-1165.  
CUI Y, LIU W, TANG Y H, et al. An optimal allocated method for storage batteries improving voltage level of distributed network with high penetration of distributed PV [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38 (5) : 1157-1165.
- [4] 裴玮, 孔力, 齐智平. 光伏发电参与配电网电压调节的控制策略研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1629-1635.  
PEI W, KONG L, QI Z P. Cooperative voltage regulation strategy in distribution network with high penetration level of PV generation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(11): 1629-1635.
- [5] STETZ T, MARTEN F, BRAUN M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2013, 4 (2) : 534-542.
- [6] JAHANGIRI P, ALIPRANTIS D C. Distributed volt/var control by PV inverters [J]. IEEE transactions on power system, 2013, 28(3): 3429-3439.
- [7] TONKOSKI R, LOPES L A C, EL-FOULY T H M. Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2011, 2(2): 139-147.
- [8] TONKOSKI R, LOPES L A C. Impact of active power curtailment on overvoltage prevention and energy production of PV inverters connected to low voltage residential feeders [J]. Renewable energy, 2011, 36(12): 3566-3574.
- [9] DALL' ANESE E, DHOPLE S V, GIANNAKIS G B. Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2014, 5(2): 487-497.
- [10] DALL' ANESE E, DHOPLE S V, JOHNSON B B, GIANNAKIS G B. Decentralized optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2014, 29 (4): 957-967.
- [11] DALL' ANESE E, DHOPLE S V, JOHNSON B B, et al. Optimal dispatch of residential photovoltaic inverters under forecastinguncertainties [J]. IEEE journal of photovoltaics, 2015, 5(1): 350-359.
- [12] 赵金利, 余贻鑫. 电力系统电压稳定分区和关键断面的确定 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 1-5.  
ZHAO J L, YU Y X. Determination of power system voltage stability regions and critical sections [J]. Automation of electric power systems, 2008, 32(17): 1-5.
- [13] BISERICA M, FOGGIA G, CHANZY E, et al. Network partition for coordinated control in active distribution networks [C]//2013 IEEE PowerTech, Grenoble, France, 2013.
- [14] 胡泽春, 王锡凡, 王秀丽, 等. 用于无功优化控制分区的两层搜索方法 [J]. 电网技术, 2004, 28 (24) : 37-41.  
HU Z C, WANG X F, WANG X L, et al. A two-layered network partitioning approach for optimal reactive power dispatching [J]. Power system technology, 2004, 28(24): 37-41.
- [15] 倪向萍, 阮前途, 梅生伟, 等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28 (24) : 37-41.

- 2007, 31(9): 6-12.
- NI X P, RUAN Q T, MEI S W, et al. A new network partitioning algorithm based on complex network theory and its application in Shanghai power grid[J]. Power system technology, 2007, 31(9): 6-12.
- [16] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical review E, 2004, 69(2): 026113.
- [17] 肖传亮, 赵波, 周金辉, 等. 配电网中基于网络分区的高渗透率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 C L, ZHAO B, ZHOU J H, 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.
- [18] ZHAO B, XU Z C, XU C, et al. Network partition-based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. IEEE transactions on smart grid, 2018, 9(5): 4087-4098.
- [19] XIAO C L, ZHAO B, DING M, et al. Zonal voltage control combined day-ahead scheduling and real-time control for distribution networks with high proportion of PVs[J]. Energies, 2017, 10: 1464.
- [20] GIRVAN M M, NEWMAN M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [21] SHIMIZ K, AIVOSHI E. Necessary conditions for min-max problems and algorithms by a relaxation procedure [J]. IEEE transactions on automatic control, 1980, 25 (1): 62-66.

## VOLTAGE PARTITION COORDINATED OPTIMIZATION CONTROL OF ACTIVE DISTRIBUTION NETWORK OF HIGH PENETRATION DISTRIBUTED PVs

Liu Rui, Wu Kuihua, Feng Liang, Liang Rong, Wang Xian, Yang Shenquan  
*(Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250001, China )*

**Abstract:** The higher the penetration level of PVs in distribution networks, the greater the overvoltage issues would be. Due to the extremely high dimension of control variables, the traditional centralized control methods are getting too complex, which would barely satisfy the operational requirements of future active distribution networks. In order to address this crucial issue, this paper presents a voltage control method based on a network partitioning technique. A community detection algorithm based on a reactive/active quality function is introduced to divide a distribution network into reactive/active power sub-networks. For the reactive power sub-networks, a second-order cone programming (SOCP) based model for PV inverters is established with the objective of minimizing the regulated reactive power. For the active power sub-networks, a SOCP based model is also proposed for PV inverters with the objective of minimizing the curtailed active power of PVs. The proposed models in each sub-network are solved by a parallel way. After the optimization, the results of the optimization are exchanged among each sub-network, and the constraints in each sub-network are then updated accordingly. A new optimization process is then started until the stopping criterion is met. Finally, an actual feeder is employed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

**Keywords:** distribution photovoltaic; distribution network; high penetration; voltage regulation; network partition