

DOI: 10.7667/PSPC160330

# 含分布式电源的配电网无功补偿分区平衡优化调节方法

余乐<sup>1,2</sup>, 张茜<sup>2,3</sup>, 刘燕<sup>4</sup>, 李勇<sup>4</sup>, 王强钢<sup>5</sup>

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610000;  
3. 国家电网公司西南分部, 四川 成都 610031; 4. 国网天府新区供电公司, 四川 成都 610000;  
5. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 提出一种含分布式电源的配电网潮流可行解调节方法。在配电网进行无功控制分区的基础上, 定义了配电网分区负载率, 然后设计考虑电压自动控制系统 AVC 站协调控制的无功平衡优化调节方法。具体包含: 配电网无功补偿分区平衡优化调节方法和变电站 AVC 站协调调节方法, 并且在调节过程中前者优先于后者。对于前者模型采用免疫遗传算法进行求解, 对于后者采用直接法进行计算。所提方法通过对配变低压侧无功补偿柜、分布式电源进行无功补偿分区平衡和变电站 AVC 的电压协调控制, 调节出无功分区平衡、各个节点电压满足合格要求、有功网损较低的潮流可行解。成都某实际 10 kV 55 节点配电网的仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 无功补偿分区; 优化平衡; 潮流可行解; 站协调

## An adjustment method of distribution network reactive power compensation partition balance with distributed power sources

YU Le<sup>1,2</sup>, ZHANG Xi<sup>2,3</sup>, LIU Yan<sup>4</sup>, LI Yong<sup>4</sup>, WANG Qianggang<sup>5</sup>

(1. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610000, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China; 3. State Grid Southwest Company, Chengdu 610031, China; 4. State Grid Tianfu Power Supply Company, Chengdu 610000, China; 5. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper proposes a feasible power flow adjusting method for distribution network with distributed power sources. Based on the reactive power partitioned-balance areas of distribution network, load rate of partitioned areas is defined, and then an optimal adjusting method of reactive power balance considering substation coordination of automatic voltage system (AVC) is designed. This method includes an optimal adjusting method for the balance of partitioned reactive power compensation for distribution system and a substation AVC coordinated adjusting method. In the process, the first method is prior to the following method. For the former model, the immunity genetic algorithm (IGA) is employed, and for the other model, the direct solving method is used. The proposed method in this paper could obtain a feasible power flow solution with reactive power partitioned-balance, bus voltage magnitudes satisfying security constraints, and the lower real power loss, by means of using the adjusting strategy on reactive power compensation cabinets of distribution transformer on low voltage side and distributed power sources for both the balance of partitioned reactive power compensation for distribution system and coordinated control with substation's AVC. Finally, a 10 kV 55-bus real system of Chengdu is simulated, verifying that the proposed method is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577018).

**Key words:** reactive power partitioned network; optimal balance; feasible power flow; substation coordinated adjusting

## 0 引言

微型燃气轮机、同步柴油发电机等分布式电源 (DG) 大量渗透到配电网中, 这些电源能够发出无功

功率, 对配电网的有功网损、电压无功分布具有显著影响<sup>[1-5]</sup>。但随着配电网的电压等级越来越高, 电网结构越来越复杂, 供电负荷密度大, 无功补偿装置容量不足等问题<sup>[6]</sup>, 会导致现有含 DG 配电网潮流计算后, 仍无法得到电压合格、分布式电源无功出力满足要求的可行潮流解。为此, 在其基础上,

如何通过电压无功调节获取可行潮流解,对提高用户电压质量、含 DG 的配电网安全、经济效益最优的运行方式决策具有重要指导意义。

常见的并网 DG 有利用可再生能源类的光伏发电、风电和利用不可再生能源类的燃料电池、微型燃气轮机。针对 DG 接入配电网的潮流计算,可再生能源类的 DG 具有间歇性,在配网潮流计算中一般作为 PQ 节点<sup>[2]</sup>。利用不可再生能源类的 DG,均具有一定的无功容量,在向电网输送有功功率的同时,也能输送一定容量的无功功率<sup>[4,7]</sup>,均能够作为 PV 节点处理。PV 型的分布式电源能够发无功,可有效解决配电网无功补偿不足引起的潮流不可行问题。而 PQ 控制型 DG 不具有电压调节能力,PV 控制型 DG 发出或吸收的无功与机端电压有关,能够进行配电网电压无功调节<sup>[3]</sup>。

在配电网潮流调节问题方面,仅文献[8]以输电网为研究对象进行潮流调节,而以配电网为研究对象的潮流调节方法还未见研究。在输电网的潮流调节方法中,其研究对象的特点是:1)传输功率主要是有功功率,全网无功需求较为均衡;2)环形电网的无功传输较为灵活,无功远距离传输并不会引起电压的大幅降低;3)无功电源含有发电厂和补偿电容,全网中分布较为分散。为此,该方法以分层负载率<sup>[6,8]</sup>为基础的无功调节,有利于无功的分层分区平衡和电压合格。

但在实际高压或者中压配电网中:1)传输功率中无功所占比重显著增大,不同用户的无功需求差异较大,各个配变终端的无功需求严重不平衡;2)配电网网架为辐射型结构,无功主要从变电站远距离输送;3)无功电源仅有变电站内的无功补偿、配电网低压侧的无功补偿柜以及 10 kV 电网中接入的少量分布式电源<sup>[9-15]</sup>。为此分层负载率大小并不能真实表征整条馈线的无功负载情况,而未考虑配电网低压侧的无功补偿柜与变电站的电压自动控制系统(Automatic Voltage Control, AVC)控制系统协调控制的问题,并且现有调节方法都没有考虑分布式电源对电压调节的影响。为了方便,本文采用站配协调代表变电站 AVC 系统与配电网主馈线电压无功之间的协调控制。

本文以无功补偿分区平衡和站配协调控制为基础,实现配电网的潮流可行解调节。首先,在配电网无功控制分区基础上,提出一种配电网分区负载率概念;然后进一步在分区负载率的基础上,提出一种考虑站配协调的潮流可行解调节方法,具体包含配电网无功补偿分区平衡优化调节方法和变电站 AVC 控制系统协调调节方法,对前者采取免疫遗传

算法<sup>[11]</sup>(Immunity Genetic Algorithm, IGA)进行了求解;对后者直接采用计算公式进行计算。

## 1 配电网分区负载率的定义

传统的配电网中电压中枢点都为首端变电站高压侧节点或者低压侧节点。但随着 PV 型分布式电源的不断接入,可认为配电网中的电压中枢点不仅包括首端变电站节点,还包含分布式电源接入的节点。根据文献[8]提出的同层区负载率,按照整个电压层的负载率大小对同层区所有中枢点电压幅值进行调节,可能导致无功负荷重的区域中枢点逆调压不够,而无功负荷轻的中枢点电压又调节过高。

为有效地表征配电网不同分区的无功负载程度,在配电网电压无功控制分区的基础上,本文定义分区  $A_i$  的分区负载率  $\beta_{A_i}$  为分区  $A_i$  内所有线路(包含分区与分区之间的联络线)电抗中消耗的无功功率与电纳中产生的无功功率之比,具体为

$$\beta_{A_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_l} \Delta Q_{R_j}}{\sum_{j=1}^{n_l} \Delta Q_{C_j}} \quad (1)$$

式中:  $n_l$  为同层分区  $A_i$  内的线路条数;  $Q_{R_j}$  和  $Q_{C_j}$  分别为分区同层区  $A_i$  的线路  $j$  的电抗中消耗的无功功率和电纳中产生的无功功率。

在分区  $A_i$  内,  $\beta_{A_i}$  越大表明线路传输功率较大,电抗中消耗的无功功率大于电纳中产生的无功功率,而  $\beta_{A_i}$  越小表明线路传输功率较小,电抗中消耗的无功功率小于电纳中产生的无功功率。由此可知,  $\beta_{A_i}$  的大小反映出线路的无功负载轻重,当  $\beta_{A_i}$  等于 1 时,线路输送自然功率,不消耗额外无功,此时有功损耗最低,电压运行水平较高。

由实际运行可知,首端变电站节点电压对整个配电网电压具有显著影响,应考虑整区无功负载情况,即按照整区负载率进中枢点电压调节。而在配电网的分区  $A_i$  内,应根据  $\beta_{A_i}$  的大小来确定分区  $A_i$  内所有中枢点电压。

## 2 含分布式电源的配电网无功补偿分区平衡优化调节方法

实际配电网中,由于配网终端负荷过重,或者变电站 AVC 控制并未协调考虑配电网电压质量等问题,会导致配电网的潮流出现不可行解,即节点电压幅值不合格,分布式电源的无功出力越限,或者这两种原因都存在。为了最大发挥配电网电压无功调节能力,需要从配变低压侧的无功补偿和站端无功补偿,变电站低压母线的电压调节这三种手段进行合理调节,实现配电网无功补偿平衡,杜绝配

电网潮流解不合理的现象。

### 1) 配电网无功补偿分区平衡优化调节方法

本文以分布式电源、配变低压侧无功补偿柜、首端变电站的无功出力为控制对象。首先考虑各个分区内分布式电源的无功出力均在范围内，即分布式电源的无功不平衡度<sup>[7]</sup>必须等于 0；然后是无功补偿的分区平衡，尽量使各个分区内分布式电源、配变低压侧无功补偿柜之间输出的无功分配比例较为合理，其对应的物理现象为各分区内有功网损尽量最小。显然，以上 2 个目标的优先级别不同。按照分布式电源的物理特性可知，分布式电源的无功不平衡度是必须满足的目标，即在实现分区内各个分布式电源无功不平衡度等于零以后，才考虑实现分区内有功网损最小。

在各分区补偿无功平衡的调节过程中，若分区与首端节点电气距离越近，则该分区内的分布式电源的无功不平衡问题越容易解决。为此，分布式电源无功不平衡度的调节顺序，应从首端节点电气距离最远的分区依次到电气距离最近的分区。分区  $A_i$  对应的具体模型为

$$\begin{aligned} \min F_{A_i,1} &= \sum_{j=1}^{n_G} |\alpha_{G,j}| \\ \min F_{A_i,2} &= P_{\text{loss}} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} P_{G,i} - P_{D,i} + P_i = 0, & i=1, \dots, N_b \\ Q_{G,i} + Q_{cr,i} - Q_{D,i} + Q_i = 0, & i=1, \dots, N_b \\ \underline{Q}_G \leq Q_{G,i} \leq \overline{Q}_G & i \in \text{分区 } A_i \text{ 内 PV 节点} \\ \underline{Q}_{cr} \leq Q_{cr,i} \leq \overline{Q}_{cr} & i \in \text{分区 } A_i \text{ 内无功补偿节点} \\ \underline{V}_G \leq V_{G,i} \leq \overline{V}_G & i \in \text{分区 } A_i \text{ 内 PV 节点集合} \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

式中： $n_G$  为分区  $A_i$  内 PV 型分布式电源的个数； $\alpha_G$  为分区  $A_i$  内 PV 型分布式电源的无功不平衡度； $P_{\text{loss}}$  为分区  $A_i$  内有功网损； $P_{G,i}$  和  $Q_{G,i}$  分别为分区  $A_i$  内发电机节点  $i$  的有功和无功出力； $P_{D,i}$  和  $Q_{D,i}$  分别为分区  $A_i$  内节点  $i$  的有功和无功负荷； $P_i$  和  $Q_i$  分别为分区  $A_i$  内节点  $i$  的注入有功和无功； $Q_{cr,i}$  为分区  $A_i$  内无功补偿节点  $i$  的无功补偿量； $N_b$  为系统节点个数； $\underline{Q}_G$  和  $\overline{Q}_G$  分别为分区  $A_i$  内 PV 型分布式电源的输出无功出力最大值和最小值； $\underline{Q}_{cr}$  和  $\overline{Q}_{cr}$  分别为分区  $A_i$  内配变低压侧无功补偿柜补偿电容的最大值和最小值； $\underline{V}_G$  为分区  $A_i$  内 PV 型分布式电源的机端电压。

### 2) 变电站 AVC 控制系统协调调节方法

在实际配电网中，配电网馈线首端节点电压幅

值高低会直接影响全配网的电压质量；馈线首端节点注入无功直接反馈了配电网总的无功需求。为此，需考虑变电站的 AVC 电压控制系统对馈线首端节点电压的逆调压作用以及站端的无功补偿调节，实现无功补偿就地平衡。已知馈线首端变电站的主变变比为  $k$ ，可投入总的并联无功补偿电容容量上下限分别为  $Q_{c\text{max}}$  和  $Q_{c\text{min}}$ 。在求解以上优化调节模型后，可知全配网首端节点 1 向配网注入无功为  $Q_1$ ，电压为  $V_1$ ，如图 1 所示。

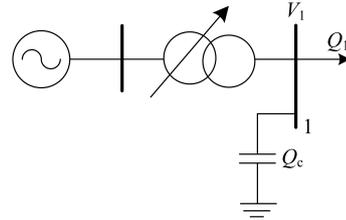


图 1 变电站与配电网电气联接示意图

Fig. 1 Electrical connection schematic between substation and distribution

为实现无功的分层平衡，考虑站端注入配电网的无功  $Q_1$  应该越少越好，故按照变电站的就地无功补偿的调节方式<sup>[8]</sup>。根据实际运行经验，10 kV 配电网馈线的理想功率因数一般在 0.90~0.95，故本文取理想功率因数目标为 0.92。不计无功调节的功率损耗，确定出理想的无功补偿量  $Q_{c,\text{aim}}$ ，最终确定最接近的就地无功调节量  $\Delta Q_c$ 。

若配网负荷较重，则馈线总的无功需求较大，则变电站投入无功补偿电容量的计算公式为

$$Q_{c,\text{aim}} = \min \left\{ \Delta Q_c \times \text{round} \left( \frac{Q_1 - P_1 \tan \varphi_{1,\text{aim}}}{\Delta Q_c} \right), Q_{c\text{max}} \right\} \quad (3)$$

$$\Delta Q_c = Q_{c,\text{aim}} - Q_c \quad (4)$$

式中： $\Delta Q_c$  为变电站的无功补偿的单位容量； $P_1$  为节点 1 注入的有功功率； $\tan \varphi_{1,\text{aim}}$  为理想功率因数目标值对应的正切值； $\text{round}(\ast)$  为四舍五入圆整函数； $Q_c$  为变电站已投无功补偿容量。

相反，若配网负荷较轻，则应切除变电站投入的无功补偿电容，其计算公式为

$$Q_{c,\text{aim}} = \min \left\{ \Delta Q_c \times \text{round} \left( \frac{Q_1 - P_1 \tan \varphi_{1,\text{aim}}}{\Delta Q_c} \right), Q_{c\text{min}} \right\} \quad (5)$$

$$\Delta Q_c = Q_c - Q_{c,\text{aim}} \quad (6)$$

在无功补偿就地平衡后，重新计算全配网的潮流。再根据潮流计算后的馈线首端节点电压  $V_1$ ，采取调节主变档位的方式对全配电网进行逆调压，以实现全配网节点的电压合格。

在潮流重新计算后，记此时全网所有节点中的

电压越上下限最大偏移量为

$$GV_{\text{upper}} = \max\{V_i - V_{i,\text{max}}\} \quad (7)$$

$$GV_{\text{lower}} = \max\{V_{i,\text{min}} - V_i\} \quad (8)$$

式中,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ,  $n$  为全配网最大节点编号。

在实际配电网中, 若负荷较重, 在配网的无功补偿分区平衡后, 配网中仍然会有少量节点电压越下限, 则考虑按照变电站主变升档的方式, 确定最接近的变比调节量  $k_{\text{aim}}$ , 以提升馈线首端节点电压  $V_1$ , 具体调节方式为

$$GV_{\text{lower}} = \min\{GV_{\text{lower}}, V_{\text{max}} - V_1\} \quad (9)$$

$$k_{\text{aim}} = \min\{\Delta k_0 \times \text{round}\left(\frac{V_1 + \Delta V_{\text{upper}}}{S_{V_k} \times \Delta k_0}\right), k_{\text{max}}\} \quad (10)$$

$$\Delta k = k_{\text{aim}} - k \quad (11)$$

式中:  $k$  为变电站主变变比当前值;  $\Delta k_i$  为变比的单位级差;  $k_{\text{max}}$  为变比的最大值;  $S_{V_k}$  为馈线首端节点电压  $V_1$  对变比  $k$  的灵敏度系数, 计算公式见文献[8]。

同理, 若配网负荷较轻, 而馈线首端的电压幅值又较高, 则配网中可能存在部分节点越上限, 可采取降低主变档位的调压方式, 具体为

$$\Delta V_{\text{upper}} = \min\{GV_{\text{upper}}, V_1 - V_{\text{min}}\} \quad (12)$$

$$k_{\text{aim}} = \min\{\Delta k_0 \times \text{round}\left(\frac{V_1 - \Delta V_{\text{lower}}}{S_{V_k} \times \Delta k_0}\right), k_{\text{min}}\} \quad (13)$$

$$\Delta k = k - k_{\text{aim}} \quad (14)$$

式中,  $k_{\text{min}}$  为变比的最小值。

变电站站端的电压无功的调节步骤上存在先后关系。首先是变电站无功补偿就地平衡, 其次才是馈线首端节点的逆调压。实现无功补偿就地平衡后, 考虑到补偿电容组的离散特性, 无法精确实现补偿无功等于首端节点的注入无功, 这种误差会直接对馈线首端节点的电压幅值大小产生显著影响。为此, 本文考虑应优先进行无功就地补偿。

由上可知, 本文所提考虑站配协调的无功平衡优化调节方法具体包含: 配电网无功补偿分区平衡优化调节方法和变电站 AVC 控制系统协调调节方法。如前所述, 整个潮流可行解调节是在全配网分区的基础上, 采取了由远到近、由下至上的调节思路, 即先是由远到近地实现无功补偿分区平衡, 然后再是变电站的电压无功协调调节, 最后实现全配网的潮流解可行。

### 3 配电网潮流调节的计算步骤

本文第 2 节提出了考虑站配协调的潮流可行解

调节方法, 其目标函数包括分区内各个分布式电源无功不平衡度的绝对值之和等于零, 全网有功网损最低, 在约束条件中有非线性潮流方程。由此使模型成为双目标的非线性规划问题, 故采用多目标的免疫遗传算法进行求解。本文免疫遗传算法 IGA 是将所求解问题的目标函数对应为抗原, 将问题的解对应为免疫系统产生的抗体, 由抗体和抗原之间的亲和度计算公式来评价不同抗体的优劣。通过一系列遗传操作及亲和度计算, 找出抗体种群中和抗原之间的亲和度最大的抗体, 即为问题的解<sup>[11]</sup>。在所建配网无功补偿分区平衡模型中抗体变量为分布式电源、变电站低压母线的电压幅值、配变低压侧无功补偿柜可投入电容。

同时, 考虑到配电网分区内无功电源较为单一, 在分区时需考虑区域内部电源对区域内负荷节点电压的强耦合控制。为此, 本文选用电源分区与短路阻抗距离的无功分区方法, 实现配电网的无功控制分区。具体计算步骤如下:

- 1) 采用电源分区与短路阻抗距离的无功分区方法<sup>[10]</sup>, 对含多个分布式电源的配电网进行分区;
- 2) 按照全配网的无功就地平衡调节, 进行无功平衡的粗略调节;
- 3) 采用免疫遗传算法求解本文所建配网无功补偿分区模型, 完成无功平衡的精细化调节;
- 4) 采用变电站 AVC 控制系统协调调节方法, 完成对站端的电压无功调节;
- 5) 调节结束。

## 4 算例分析

基于本文提出的上述电压无功调节方法和 Matlab R2012a 软件, 对成都某实际 10 kV 配电网进行了潮流调节研究, 下面介绍算例结果及仿真分析。

### 4.1 算例基础数据

成都某实际 10 kV 配电网由 55 个节点, 3 个分布式电源, 节点 21 接入小型燃气轮机、节点 51 接入微型燃料电池、节点 31 接入柴油发电机, 具体参数见表 1。并且, 变电站低压侧节点 2、负荷侧节点 5、13、15、19、26、46、49 和 54 安装有无功补偿电容器, 具体参数见表 2。同时, 本文设定基准功率为 100 kVA, 基准电压为 10 kV。

首端节点为 110 kV 变电站高压侧母线, 110 kV 变电站低压侧节点 2 安装有无功补偿电容器。110 kV 变电站主变运行档位为 2 档。本文的 3 个分布式电源均为 PV 型控制方式, 馈线首端变电站的高压侧节点 1 为平衡节点。具体接线方式见图 2 所示。

表 1 PV 型分布式电源参数

Table 1 Parameters of distribution power sources with PV control

p.u.				
节点编号	分布式电源	机端电压	无功上限	无功下限
21	小型燃气轮机	1.000	0.500	0.000
51	微型燃料电池	1.000	0.500	0.000
31	柴油发电机	1.000	0.500	0.000

表 2 无功补偿电容器参数

Table 2 Parameters of reactive power compensator

p.u.			
节点编号	当前投入无功	无功容量上限	无功容量下限
2	0.250	0.500	0.000
5	0.000	0.010	0.000
13	0.000	0.010	0.000
15	0.000	0.010	0.000
19	0.000	0.015	0.000
26	0.000	0.015	0.000
46	0.000	0.020	0.000
49	0.000	0.020	0.000
54	0.000	0.015	0.000

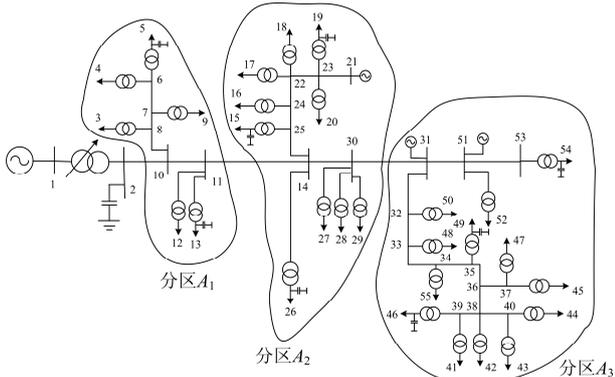


图 2 成都实际 10 kV 55 节点配电网

Fig. 2 A 53-bus distribution system of Chengdu

本算例的负荷数据来自于该条馈线 2015 年迎峰度冬期间上午 11:30 的实时 SCADA 采集值。在仿真中, 10 kV 节点电压的允许范围是 1.00~1.70 p.u., 分布式电源的机端节点是 0.95~1.05 p.u.。为简化问题, 假设所有调压设备都是连续调节。

#### 4.2 算例的计算条件

本文采用的免疫遗传算法抗体总数设定为 40, 变异概率为 0.15, 选择概率为 0.5, 免疫遗传进化最大代数 100 代。文献[8]提出输电网的电压无功分层分区平衡的潮流调节方法。为了验证本文所提模型有效性, 本文选择第 1 节所提分区负载率进行中枢点逆调压。并且, 配电网中馈线首端变电站为联络变电站, 在配电网中仅有 1 个, 而输电网中却有多多个联络变电站。故本文略去启发式方法与联络

变之间的无功调节。

#### 4.3 算例结果及分析

为了验证本文所提模型的有效性, 本文从配电网分区负载率、站配协调两个角度, 对配电网潮流可行解调节的影响进行了仿真分析。

##### 1) 配电网分区负载率的调节影响分析

按照文献[12]提出的电源分区与短路阻抗距离的无功分区方法, 将该配电网中所有 10 kV 节点 (110 kV 站 10 kV 母线节点除外) 分为三个区域, 具体见图 2 的分区  $A_1$ 、分区  $A_2$  和分区  $A_3$ 。

表 1 按第 1 节的中的分区负载率计算公式, 给出了成都实际 55 节点配电网的三个分区负载率值和整区负载率值, 并按照中枢点逆调压计算公式<sup>[7]</sup>, 给出了各个分区内中枢点电压的理想逆调压目标值。由图 2 可知, 分区  $A_2$  中的节点 21 和分区  $A_3$  中的节点 31、51 分别接入有分布式电源, 而分区  $A_1$  中没有接入分布式电源。所以中枢点电压的理想逆调压调节仅针对分区  $A_2$  和分区  $A_3$  中分布式电源的 PV 节点进行。为此, 两种方法对应的各个分区中分布式电源无功输出如表 3 所示。

表 3 各个分区中分布式电源的无功输出

Table 3 Three distribution power sources with PV control

p.u.					
分区编号	节点编号	分区负载率		整区负载率	
		机端电压	无功输出	机端电压	无功输出
$A_2$	21	1.01	0.150	1.040	0.610
	31	1.04	0.462	1.040	0.490
$A_3$	51	1.04	0.491	1.040	0.590

由表 4 可知, 分区  $A_1 \sim A_3$  负载率分别为 0.647、1.095 和 1.767, 分区  $A_3$  的无功负荷最重, 分区  $A_2$  的无功负荷次之, 分区  $A_1$  的无功负荷最轻。进一步由表 3 可知, 按照整区负载率进行各个分区内的中枢点电压理想值进行调节, 导致分区  $A_2$  中节点 21 接入的分布式电源无功输出为 0.61 p.u., 大于其上限 0.50 p.u.。同理, 分区  $A_3$  中节点 51 接入的分布式电源无功输出也同样越上限。相反, 按照分区负载率的中枢点逆调压后, 各个分布式电源的无功出力满足上下限要求。

表 4 分区负载率及中枢点理想逆调压目标值

Table 4 Partitioned load rate and ideal inverse voltage regulating target value in pilot node

p.u.				
分区编号	分区负载率	逆调压目标值	整区负载率	逆调压目标值
$A_1$	0.647	无		
$A_2$	1.095	1.010	1.48	1.040
$A_3$	1.767	1.040		

由此可知, 1) 配电网中不同分区的无功负载是不同的, 故中枢点电压逆调压的目标值应与其分区内的无功负载相匹配。2) 实际系统接入的分布式电源无功容量比较小, 中枢点电压调节目标设定不合理会导致其无功越限。

## 2) 本文方法与启发式方法的对比分析

为了验证本文所建站配协调优化模型的有效性, 本文对比了启发式方法求解成都配电网算例的结果, 具体如图 3 所示。表 5 给出了启发式方法和本文方法所得分区  $A_3$  中节点 47、49、42、44 和 55 的电压幅值。表 6 给出启发式方法和本文方法所得分区  $A_3$  中节点 46、49 和 54 的无功返送值。

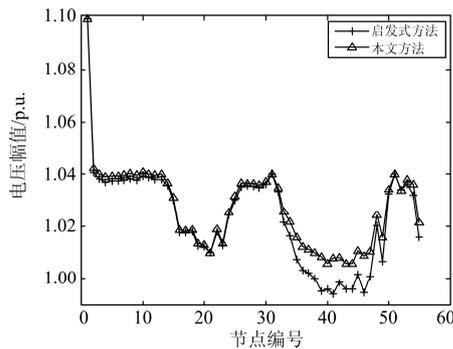


图 3 成都实际配电网各节点电压曲线

Fig. 3 Voltage curve of each node in a real distribution system of Chengdu

表 5 本文方法与启发式法求解的电压幅值和有功网损对比  
Table 5 Voltage amplitude and active power loss solved by the paper's method and heuristic method respectively

节点编号	电压幅值对比		有功网损对比	
	启发式方法	本文方法	启发式方法	本文方法
42	0.9984	1.0083		
44	0.9960	1.0059		
46	0.9948	1.0089	1.8102	1.3984
49	1.0065	1.0158		
54	1.0319	1.0362		

表 6 本文方法与启发式法求解分区  $A_3$  中无功返送对比  
Table 6 Reactive power foldback of partitioned  $A_3$  solved by the paper's method and heuristic method respectively

节点编号	无功负荷	有功网损对比	
		启发式方法	本文方法
46	0.500	0.500	2.000
49	0.800	0.800	2.000
54	0.800	0.800	2.000

由图 2 可知, 节点 31 和 51 分别接入了柴油发电机和微型燃料电池, 本文方法得出节点 32~50 的电压幅值均高于启发式方法所得, 而其余电压幅值均非常接近。由表 5 可知, 启发式方法调节后, 分区  $A_3$  中节点 44 和节点 45 的电压幅值仍然越下限 1.0 p.u., 而本文方法得到的电压没有出现越限。并且, 启发式方法调节后有功网损为 1.8102 p.u., 高于本文方法所得 1.3984 p.u.。

结合图 2 和表 5 可知, 节点 46、49 和 54 分别接入有无功补偿柜, 启发式方法得到的电压幅值均低于本文方法。进一步由表 6 来看, 启发式方法投入配变低压侧的无功补偿均按照所带无功负荷大小进行投入。相反, 本文方法投入配变低压侧的无功补偿均大于其所带无功负荷。

综合以上 3 点可知, 1) 本文所建模型 I 对电压越限调节的效果显著优于启发式方法。2) 本文所建分区调节模型得到的有功网损低于启发式方法, 其电网的无功平衡和运行的经济效益均高于启发式方法; 3) 本文所建分区调节模型充分考虑了配变低压侧无功补偿返送的问题, 有助于无功实现分区平衡, 提高相邻节点的电压幅值。

另外, 由图 2 可知, 启发式方法得出首端变电站高压侧节点 1 的理想电压幅值为 1.036 p.u., 而本文方法得出节点 1 的电压应该为 1.099 p.u., 接近于其电压上限 1.100 p.u.。可知, 本文所建模型 II 在中枢点逆调压计算公式得到的 1.036 p.u. 的基础上, 进一步提高了中枢点电压至 1.099 p.u.。这表明模型 II 更加充分地考虑了站端的调压能力, 弥补中枢点逆调压经验公式的不足, 较好地实现无功分层平衡。

## 5 结论

本文提出一种考虑站配协调的含分布式电源配电网潮流可行解的调节方法。在配电网进行无功控制分区的基础上, 提出了配电网分区负载率的基本概念, 并进一步提出考虑站配协调的无功平衡优化调节方法。所提方法简单易行, 仅通过一次优化和几步潮流计算就能获取全配电网的潮流可行解。本文的潮流可行解调节方法具有如下特点。

(1) 分区负载率表征了不同分区的无功负载情况, 得出电压中枢点理想目标值符合实际情况。

(2) 本文所建无功补偿分区平衡的调节模型对电压越限调节的效果显著优于启发式方法。

(3) 本文所建分区调节模型得到的潮流解, 其有功网损低于启发式方法, 电网运行的经济效益较高。

(4) 本文所提考虑站配协调的无功平衡优化调

节方法,充分考虑了站配协调对配网潮流可行解调节的能力,有助于进一步实现无功补偿分区平衡以及电压合格。

### 参考文献

- [1] 王旭强,刘广一,曾沅,等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.  
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [2] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.  
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40.
- [3] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 20-24.  
CHEN Lin, ZHONG Jin, NI Yixin, et al. Optimal reactive power planning of radial distribution system with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 20-24.
- [4] 黄付顺,王倩,何美华,等. 基于综合敏感性分析的时序分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 44-50.  
HUANG Fushun, WANG Qian, HE Meihua, et al. Timing distributed power planning based on a comprehensive sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 44-50.
- [5] 周家南,苏宏升. 计及负荷电压静特性的含分布式电源的前推回代潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32.  
ZHOU Jianan, SU Hongsheng. Back/forward sweep power flow calculation with distributed generation considering static load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 26-32.
- [6] 雷超. 无功优化不可行问题的薄弱节点辨识方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LEI Chao. A recognizing method for weak buses for the infeasibility of reactive optimization problem[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [7] BRAUN M. Reactive power supply by distributed generators[C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, USA, 2008: 1-8.
- [8] 颜伟,高强,余娟,等. 输电网络的分层分区电压无功调节方法[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 71-77.  
YAN Wei, GAO Qiang, YU Juan, et al. An algorithm for hierarchical and partitioned regulation of voltage and reactive power in transmission network[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 71-77.
- [9] KAMH M Z, IRAVANI R. Unbalanced model and power-flow analysis of microgrids and active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2851-2858.
- [10] 孟晓丽,唐巍,刘永梅,等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 45-51.  
MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 45-51.
- [11] LIU F, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Hybrid immune genetic method for dynamic reactive power optimization [C] // International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006. Chongqing, China: IEEE, 2006: 1-6.
- [12] 颜伟,王芳,唐文左,等. 基于电源分区与短路阻抗距离的电压无功分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 1-6.  
YAN Wei, WANG Fang, TANG Wenzhuo, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on power sources clustering and short-circuit impedance distance[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 1-6.
- [13] 刁浩然,杨明,陈芳,等. 基于强化学习理论的地区电网无功电压优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 408-414.  
DIAO Haoran, YANG Ming, CHEN Fang, et al. Reactive power and voltage optimization control approach of the regional power grid based on reinforcement learning theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 408-414.
- [14] 易桂平. 电网电压不平衡条件下微网恒功率控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 377-387.  
YI Guiping. Micro-grid constant power control strategy analysis under grid voltage imbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 377-387.
- [15] 刘文学,梁军,负志皓,等. 基于可信理论的多目标模糊机会约束无功优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 82-89.  
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained optimal reactive power flow based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 82-89.

收稿日期: 2016-03-11; 修回日期: 2016-06-03

作者简介:

余乐(1985-),男,工程师,主要从事电力系统继电保护研究; E-mail: honolulufishing@qq.com

张茜(1988-),女,工程师,主要从事电力系统继电保护研究。

(编辑 姜新丽)