

DOI: 10.7667/PSPC160969

计及电压不可行节点的配电网低电压治理方法

胡翔¹, 邵叶晨¹, 雷超², 苏宇³, 王强钢³, 周念成³

(1. 浙江省群力电气有限公司, 浙江 杭州 311100; 2. 国网天府新区供电公司, 四川 成都 610000;
3. 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: 提出一种计及电压不可行节点的配电网低电压治理方法。首先给出了配电网电压不可行节点的基本概念, 然后在配电网电压无功控制分区的基础上, 构建了考虑电压不可行节点的广域无功控制的低电压治理模型。该模型包含无功补偿薄弱区的电压控制模型和无功补偿非薄弱区的无功优化两个子模型。对应的目标函数分别为电压不可行节点的电压越下限量最少和网损最低, 约束条件则在传统的无功优化模型上更新电压不可行节点的电压幅值安全下限值。为了提高求解效率, 采用一种并行协同进化算法求解所建模型。通过杭州某实际 10 kV 55 节点配电网进行仿真分析, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 电压不可行节点; 广域无功控制; 低电压治理; 协同进化

A solution method for low voltage problem in distribution network considering voltage-violated buses

HU Xiang¹, SHAO Yechen¹, LEI Chao², SU Yu³, WANG Qianggang³, ZHOU Niancheng³

(1. Zhejiang Truly Electric Co., Ltd., Hangzhou 311100, China; 2. State Grid Tianfu Power Supply Company, Chengdu 610000, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper proposes a management method of distribution network's wide-area reactive power control with low voltage-violated buses. The concept of voltage-violated bus is proposed, and based on this concept, the distribution network's reactive power control with low voltage-violated buses is established. This model is composed of the controlled voltage sub-model for weak areas and the reactive power optimization sub-model for non-weak areas. The objectives are the minimum downside voltage deviation for voltage-violated buses and the minimum real power loss respectively. The set of constraints are based on the conventional reactive power optimization constraints and update the lower voltage boundary constantly. In order to enhance solving-efficiency, the parallel cooperative co-evolutionary differential evolution algorithm (PCCD-EA) is hired for solving the proposed model. Finally, a distribution system with 55 buses of Guangzhou is simulated, which verifies that the proposed method is effective.

This work is supported by Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2015jcyjBX0033).

Key words: voltage-violated bus; wide area reactive power control; low voltage solution; cooperative co-evolutionary

0 引言

在具有大农村特点的某些城市配网中有很多 10 kV 农网馈线, 其供电半径长, 配变的容量小、数量多、分布广, 配变负荷的峰谷差大, 馈线或者配变的无功补偿容量不足, 馈线功率因数低。这些农网长线路轻载时电压较高, 重载时电压很低, 且轻重载时功率和电压变化的幅度和速度都很大^[1-2]。

这些农网线路的低电压问题非常突出, 严重影响了相关用户的生产与生活, 如何治理配电网中长期存在的低电压问题已成为配电网目前亟待解决的一个关键问题。

现有配电网低电压治理采用的手段是通过关键节点的无功补偿^[3], 实现同一个区域的多个配变负荷的无功平衡需求, 满足无功的分区平衡, 从而解决低电压问题。在实际配电网中, 由于 110 kV 变电站的调压能力不足, 引起低压母线的电压幅值较低; 同时配电网的无功补偿配置分散、容量不足, 导致

馈线上电压降过大,出现部分节点电压越下限^[4-6]。

为治理由于无功不足引起的配电网低电压问题,现有方法主要是采取配变低压侧无功倒送的方式,进行广域无功优化控制^[3,7-9]。但是,若整个配电网中含有农网长线路、无功补偿容量过低,电压越限无法满足时,将引起无功优化不可行问题,导致广域无功优化控制电容器优化投切控制失效,进一步加剧电压越下限的程度。

目前,现有文献还未见对广域无功优化控制失效如何进行低电压治理的研究。考虑到在配电网重载、无功补偿严重不足导致广域无功优化控制失效时,研究如何防止电压持续降低,对保障配电网运行安全具有重要意义。因此,本文以配电网为研究对象,有必要研究在含电压不可行节点^[10-11]的配电网中,如何进行系统的无功优化计算,降低全网有功网损,并且提高电压不可行节点的电压安全效益。

针对上述问题,本文在配电网无功补偿分区平衡的基础上,构建了考虑电压不可行节点的配电网广域无功控制低电压治理模型。为了提高求解效率,采用一种并行协同进化算法(Improved Parallel Cooperative Co-evolutionary Differential Evolution Algorithm, IPCCD-EA)^[12-14],求解所建模型。

1 计及电压不可行节点的配电网低电压治理

1) 配电网电压不可行节点的定义

传统的配电网中调压设备是首端变电站的并联电容器和配变低压侧的无功补偿柜,变电站主变变比,有载调压的配变变比。在配电网无功补偿分区平衡的状态下,配电网各个配变高压侧负荷节点电压幅值均在安全的范围之内。

但是,由实际运行可知,配电网在电网结构不合理,无功补偿容量配置不足,农网线路较多,供电负荷过重的情况下,容易出现电压降比较大,可能导致部分配变低压侧出现电压越下限的物理现象。并且这种电压越下限的情况,无法通过有效的电压无功调节使得电压上升至安全范围内,本文将这种电压越下限的节点称之为配电网电压不可行节点。

2) 计及电压不可行节点的低电压治理模型

传统配电网广域无功优化控制是在配电网所有节点的电压幅值安全的前提下进行的。由前一节可知,如果配电网的配变高压侧节点存在电压不可行节点,该假设条件就不再成立。因此,传统的广域无功优化控制模型将不再适用。如何解决这种配电网中含有电压不可行节点的广域无功优化控制问题呢?根据配电网的无功补偿分区,如果某一个无功补偿分区中存在电压不可行节点,表明这个分

区内无功补偿不足,该分区的控制目标应该是追求电压不可行节点的电压安全效益。如果某一个无功补偿分区中不存在电压不可行节点,这表明该分区无功补偿能够平衡,应该尽量降低这个分区内的有功网损,并能够为薄弱区提供一定的无功,以提升电压不可行节点电压幅值。

为此,根据节点电压是否越下限,可将系统分为无功补偿薄弱区和无功补偿非薄弱区。对于含电压不可行节点的无功补偿薄弱区,实现的控制目标是电压越下限程度尽可能小。对于无功补偿非薄弱区,需要实现两个控制目标:一个是实现薄弱区的电压控制目标;另一个是降低配电网有功网损。然而,薄弱区的控制方案是其电压调节的必须手段,体现电压安全效益;而非薄弱区的控制方案是薄弱区电压调节的辅助手段,体现电压安全和降低有功网损综合效益。因此,本文首先要考虑配电网运行的电压安全效益,然后才是其安全与经济的综合效益。

基于此,鉴于本文的研究假设条件和控制目标与传统文献明显不同,对于含电压不可行节点的配电网广域无功控制失效的问题,解决电压不可行节点引起的低电压问题,本文将其所建模型称为计及电压不可行节点的广域无功控制低电压治理模型。该模型实际上是一个包含两个子模型的协同优化模型:1)无功补偿薄弱区的电压控制模型;2)无功补偿非薄弱区的无功优化模型。并且,从前述两者效益的关系可知,薄弱区的电压控制的重要程度优先于非薄弱区的无功优化的重要程度。

2 无功补偿薄弱和非薄弱区的电压控制模型

2.1 无功补偿薄弱区电压控制模型

在实际配电网无功补偿优化平衡的状态下,由于无功薄弱区内无功不足,区内并联无功补偿电容器全部投入,可采取调节该区内配变变比和非薄弱区调压设备的综合调节作用的调节实现。故无功补偿薄弱区的电压控制的调节手段可以分为两个方面:1)薄弱区的无功补偿全部投入,通过多个有载配变变压器变比调节,实现薄弱区内的无功调节,简称区内调压手段;2)非薄弱区调压设备的综合调节作用,简称区外调压手段。

无功补偿薄弱区有载配变变比调节对区内电压不可行节点的电压调节起直接作用;而非薄弱区调压设备的综合调节对其起间接作用。所以本文认为,实现电压不可行节点的电压越下限的程度尽可能小,以薄弱区调压手段为主,非薄弱区的综合调压手段为辅。列写无功补偿薄弱区的电压控制模型的

目标函数为

$$S_j = \max\{V_{\min,i} - V_{\text{violated},i}\} \quad i \in \text{薄弱区}j \quad (1)$$

式中: S_j 表示电压不可行节点越下限量; $V_{\text{violated},i}$ 表示薄弱区 j 的电压不可行节点 i 的电压幅值; $V_{\min,i}$ 表示薄弱区 j 的节点 i 的电压幅值安全下限值。引入定义电压偏移百分数 $u_{s,j}$ 来量化薄弱区 j 内电压不可行节点偏离电压幅值安全下限最大的程度:

$$u_{s,j} = \frac{S_j}{V_{\min,i}} \times 100\% \quad (2)$$

于是, 薄弱区 j 的电压控制模型的目标函数是 $u_{s,j}$ 最小, 通过投切区内全部的无功补偿、调节有载配变的变比实现。若是区内全部是无载调压变压器, 则仅依靠无功补偿柜补偿无功实现。

由于配变低压侧节点与用户电能质量关系密切, 为此本文考虑薄弱区电压控制的时候, 仅考虑配变低压侧节点电压幅值, 而高压侧节点的电压幅值不予考虑。若薄弱区 j 内装设部分有载配变, 则薄弱区 j 内的控制变量为高压侧的等效理想变比, 数目为有载配变个数。具体电压控制模型为式(3)一式(11)。若是无载调压变压器, 则模型为式(3)一式(9)和式(11)。

$$\min f_1 = u_{s,j} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } g_{P_i}(x) = P_{G_i} - P_{D_i} - P_i = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \text{ 且 } i \neq i_s \quad (4)$$

$$g_{Q_i}(x) = Q_{G_i} + Q_{\text{cri}} - Q_{D_i} - Q_i = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (5)$$

$$Q_{G_i \min} \leq h_{G_i}(x) = Q_{G_i} \leq Q_{G_i \max} \quad i = 1, \dots, N_G \quad (6)$$

$$V_{G_i \min}^2 \leq h_{V_i}(x) = e_i^2 + f_i^2 \leq V_{G_i \max}^2 \quad i = 1, \dots, N_G \quad (7)$$

$$h_{V_i}(x) = e_i^2 + f_i^2 \leq V_{i \max}^2 \quad i = 1, \dots, N_{\text{pq}} \quad (8)$$

$$h_{V_i}(x) = e_i^2 + f_i^2 \geq V_{i \min}^2 \quad i = 1, \dots, N_{\text{pq}} \quad (9)$$

$$k_{t \min} \leq h_{k_t}(x) = k_{\text{weak},t} \leq k_{t \max} \quad (10)$$

$$Q_{\text{cri}} = Q_{\text{cri max}} \quad i \in \text{薄弱区}j \quad (11)$$

式中: g_{P_i} 和 g_{Q_i} 表示配电网有功和无功潮流等式约束, 其中 i_s 是平衡节点, N_b 是系统节点个数; h_{V_i} 是变电站低压母线电压幅值上下限约束; h_{V_i} 是负荷节点电压幅值安全约束; N_{pq} 是非薄弱区的所有负荷节点数; h_{k_t} 是有载配变的变比约束, $k_{t \max}$ 和 $k_{t \min}$ 表示变比的上下限; Q_{cri} 是配变低压侧电容器的补偿无功量; $Q_{\text{cri max}}$ 是配变低压侧补偿无功最大值。

该模型计算完后, 若薄弱区 j 的 $u_{s,j}$ 为负数, 说明无功补偿薄弱区 j 内不存在电压越下限, 因此薄

弱区 j 不含有电压不可行节点, 应该将其归并至非薄弱区。相反, 如果薄弱区 j 的 $u_{s,j}$ 为正数, 返回无功补偿薄弱区 j 的 $u_{s,j}$ 对应的电压不可行节点 m 的电压幅值为 $V_{w_j,m}$ 。

2.2 无功补偿非薄弱区无功优化模型

无功补偿薄弱区的电压控制不仅需要本地的电压调节手段, 还需要无功补偿非薄弱区的调节手段。然而, 非薄弱区需要实现的目标, 不仅体现对薄弱区的电压安全效益, 还更需要体现降低网损的经济效益。所以, 如何选取非薄弱区调压设备的控制方案, 取决于两者之间的博弈。事实上, 该模型理想的寻优方向是两者同时达到最优, 优选出既能降低网损, 又能提高薄弱区电压幅值的控制方案。

因此, 该模型在全网计算的基础上, 保持薄弱区 j 内的电压不可行节点 m 的电压幅值大于或等于 $V_{w_j,m}$, 优化非薄弱区内的控制变量, 使得全网有功网损最小和电压不可行节点的偏移量最小。非薄弱区的无功优化模型列写为

$$\min f_{2,1} = P_{\text{loss}} \quad (12)$$

$$\min f_{2,j} = u_{s,j} \quad j = 1, 2, \dots, N_{\text{weak},s} \quad (13)$$

$$\text{s.t. } g_{P_i}(x) = P_{G_i} - P_{D_i} - P_i = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \text{ 且 } i \neq i_s \quad (14)$$

$$g_{Q_i}(x) = Q_{G_i} + Q_{\text{cri}} - Q_{D_i} - Q_i = 0 \quad i = 1, \dots, N_b \quad (15)$$

$$V_{G_i \min}^2 \leq h_{V_i}(x) = e_i^2 + f_i^2 \leq V_{G_i \max}^2 \quad i = 1, \dots, N_G \quad (16)$$

$$h_{V_i}(x) = e_i^2 + f_i^2 \leq V_{i \max}^2 \quad i = 1, \dots, N_{\text{pq}} \quad (17)$$

$$h_{V_i}(x) = e_i^2 + f_i^2 \geq V_{i \min}^2 \quad i = 1, \dots, N_{\text{pq}} \quad (18)$$

$$k_{t \min} \leq h_{k_t}(x) = k_t \leq k_{t \max} \quad t = 1, \dots, N_{\text{unweak},T} \quad (19)$$

$$Q_{\text{cri min}} \leq h_{\text{cri}}(x) = Q_{\text{cri}} \leq Q_{\text{cri max}} \quad i = 1, \dots, N_{\text{unweak},\text{cr}} \quad (20)$$

$$h_{V_i}(x) = e_i^2 + f_i^2 \geq V_{w_j,m}^2 \quad j = 1, \dots, N_{\text{weak},s}, m \in \text{薄弱区}j \quad (21)$$

式中: $N_{\text{unweak},T}$ 表示非薄弱区内的配变台数; $N_{\text{unweak},\text{cr}}$ 表示非薄弱区内的无功补偿电源个数; $N_{\text{weak},s}$ 表示薄弱区的个数。

3 计及电压不可行节点的配电网低电压治理模型求解

3.1 配电网低电压治理模型的构成

将由式(3)一式(11)构成的无功补偿薄弱区电压控制模型和由式(12)一式(21)构成的无功补偿非薄弱区无功优化模型合并, 构成了考虑电压不可行节点的广域无功控制的低电压治理模型。

由前述可知, 无功补偿薄弱区 j 的电压控制模型求解得出电压不可行节点 m 的电压幅值 $V_{w_j,m}$, 并将其传递给无功补偿非薄弱区无功优化模型, 更新

薄弱区 j 节点的电压下限安全值为 $V_{w,j,m}$ 。该过程确保了通过全部的区内调压手段, 可以使得薄弱区的电压尽可能地安全。

通过非薄弱区无功优化模型的求解, 可以得出非薄弱区的控制方案。该方案确保了通过全部的区外调压手段, 可以使得薄弱区电压安全效益和降低全网有功网损的经济效益综合最优。

3.2 基于并行协同进化算法的模型求解

本文第 2 节提出了考虑电压不可行节点的广域无功控制的低电压治理模型, 包含薄弱区电压控制模型和非薄弱区无功优化模型。约束条件含有非线性潮流方程, 由此该模型是一个非线性规划问题。由于两个子模型在电网优化过程中, 本文首先考虑配电网运行的电压安全效益, 然后才是其安全与经济的综合效益, 故本文采取种群先后协同的进化算法进行求解。

本文借鉴文献[13]提出的并行协同进化算法求解本文所建模型。考虑到本文模型的柔性控制目标存在显著的“交互”和“先后”特性, 而并行协同进化算法中的种群仅具有显著的“协同”作用, 故本文分别定义代表无功补偿薄弱区与无功补偿非薄弱区的种群, 并且实现对其种群的先后更新操作, 即可体现柔性控制目标的两种特性。

通过 IPCCD-EA 算法对各个种群进行选择、交叉、变异等操作, 最终收敛得到“最适应环境”的种群的最优个体, 从而求得问题的最优解。在所建考虑电压不可行节点的广域无功控制的低电压治理模型中优化控制变量为有载配变变比, 变电站低压母线电压及配变低压侧无功补偿设备注入无功。

针对不同子模型 I 和 II 的目标函数特点, 定义薄弱区电压控制模型的适应度函数为

$$fitness = 1 / f_1 \quad (22)$$

对于非薄弱区无功优化模型, 由于模型的目标函数是全网有功网损最小和电压不可行节点的偏移量最小, 采用相对占优策略^[15-16], 将多目标规划问题转化为单目标规划问题求解。适应度函数定义为

$$F = f_{2,1} / f_{2,1}^{\min} + \sum_{j=1}^{N_{weak,s}} f_{2,j} / f_{2,j}^{\min} \quad (23)$$

$$fitness = 1 / F \quad (24)$$

同时, 本文模型是在配电网电压无功控制分区的基础上进行的, 并且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。为此选用电源分区与短路阻抗距离的无功分区方法^[17], 实现配

电网的无功控制分区。

在采用并行协同进化算法时, 设定协同进化的种群的数目 n , 并满足 n 等于薄弱区和非薄弱区的数目之和。种群与种群之间的种群规模的比例设定为每个区域里面的控制变量数量之比。为此, 整个求解的具体计算步骤为

1) 采用电源分区与短路阻抗距离的无功分区方法^[17], 对配电网进行无功控制分区。

2) 采取电压无功分层分区启发式调节方法^[18], 确定存在电压越下限节点的无功控制分区, 将这些分区确定为初始薄弱区。

3) 在协同进化计算时, 对代表薄弱区种群优先进行寻优计算, 获取薄弱区内电压不可行节点电压偏移百分数最小的薄弱区控制方案。

4) 在薄弱区的电压不可行节点满足更新的下限值的基础上, 对代表非薄弱区种群进行寻优计算, 获取非薄弱区内的有功网损最低和薄弱区的电压效益最大的非薄弱区控制方案。

5) 并行协同进化算法迭代到最大进化代数, 算法收敛。模型的求解计算结束。

4 算例分析

基于本文提出的上述考虑电压不可行节点的广域无功控制方法和 Matlab R2012a 软件, 对杭州某实际 10 kV 农村配电网进行了广域无功控制研究, 下面介绍算例结果及仿真分析。

4.1 算例基础数据

杭州某实际 10 kV 配电网有 55 个节点, 具体参数见表 1。某 110 kV 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, 且所在配变均可有载调压, 具体参数分别见表 1 和表 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。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 1 所示。

本算例的负荷数据来自于该条馈线 2015 年迎峰度夏期间上午 11:37 的实时 SCADA 采集值。在仿真中, 380 V 低压系统电压安全变化范围为标称电压的+7%和-10%, 即 0.9~1.07 p.u.^[19-20]。为简化问题, 假设所有调压设备都是连续调节。

本文采用文献[17]提出的电源分区与短路阻抗距离的无功分区方法, 对杭州某实际 10 kV 55 节点配电网进行无功控制分区, 总共分为 3 个区, 具体

表 1 无功补偿电容器参数
Table 1 Parameters for distribution transformer with reactive power compensation cabinet

节点编号	当前投入无功	无功容量上限	无功容量下限
2	0.25	1.00	0.00
5	0.00	0.10	0.00
13	0.00	0.10	0.00
15	0.00	0.10	0.00
19	0.00	0.10	0.00
26	0.00	0.10	0.00
46	0.00	0.10	0.00
49	0.00	0.10	0.00
54	0.00	0.10	0.00

表 2 有载调压配变参数
Table 2 Parameters for distribution transformer

配变低压侧节点编号	实际档位	档位上限	档位下限
5	1.000	1.050	0.900
13	1.000	1.050	0.900
15	1.000	1.050	0.900
19	1.000	1.050	0.900
46	1.000	1.050	0.900
49	1.000	1.050	0.900
54	1.000	1.050	0.900

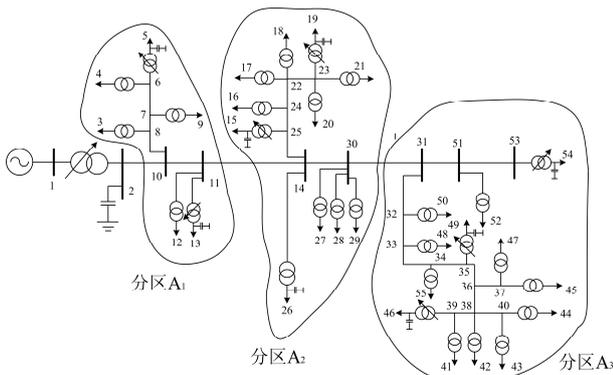


图 1 杭州某实际 10 kV 55 节点配电网

Fig. 1 A 55-bus distribution system of Hangzhou

分区结果见图 2。然后采用文献[18]提出的输电网的电压无功分层分区平衡的潮流调节方法，对该配电网进行初始电压无功平衡的调节，最后得出分区 A₂ 和 A₃ 内存在负荷节点电压越下限。由第 3 节可知，分区 A₂ 和 A₃ 为初始无功补偿薄弱区。

4.2 算例结果及分析

本文采用的并行协同进化算法，定义的薄弱区和非薄弱区的种群数目分别为 2 和 1，协同进化最大代数数为 100 代，协同进化种群规模为 80，遗传算法种群规模为 20，变异概率为 0.15，选择概率为 0.5，

遗传进化代数数为 10 代。为了验证本文所提模型的有效性，本文对初始潮流状态和优化求解后的低电压节点前后的电压幅值进行对比，然后再对电压不可行节点的特征进行分析。

1) 所建模型优化前后对比分析

图 2 给出了杭州某实际 10 kV 55 节点配电网在初始状态下和优化求解后各个节点的电压幅值曲线。表 3 给出了求解所建模型的无功补偿薄弱区分区 A₂ 和分区 A₃ 的部分电压优化结果。其中，第 1 列表示配变低压侧节点编号。第 2 列和第 3 列分别表示配变低压侧节点优化前后的电压幅值，第 4 列和第 5 列分别表示优化前后全网的有功网损。

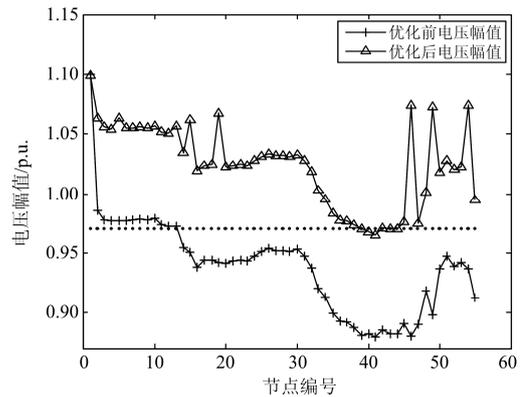


图 2 55 节点配电网电压幅值曲线

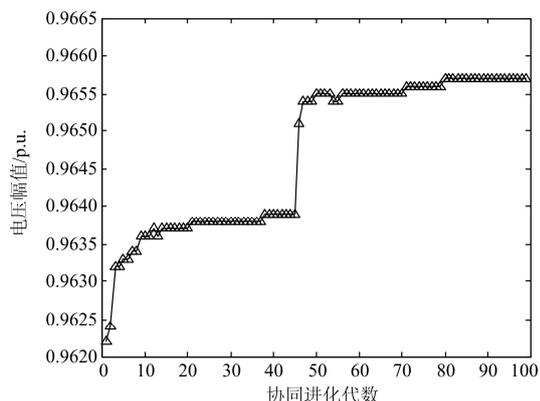
Fig. 2 Voltage magnitude for 55-bus distribution system nodes

表 3 所建模型的部分优化结果
Table 3 Partial solution of the proposed model

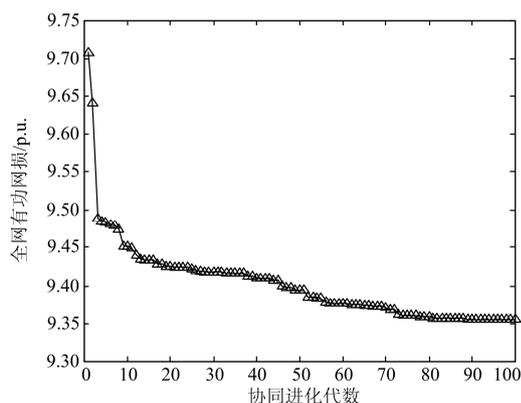
配变低压侧节点编号	所在分区	优化前电压幅值	优化后电压幅值	优化前 P_{loss}	优化后 P_{loss}
16	A ₂	0.9386	1.0192		
18	A ₂	0.9441	1.0242		
21	A ₂	0.9429	1.0232	9.9179	9.3552
40	A ₃	0.8820	0.9679		
41	A ₃	0.8795	0.9657		
52	A ₃	0.9394	1.0199		

从表 3 可以看出，分区 A₂ 的配变低压侧节点 16, 18, 21 和分区 A₃ 的配变低压侧节点 40, 41, 52，在优化前的电压幅值均不满足安全范围。但从图 2 可知，在优化后分区 A₂ 中所有节点电压均不越下限，分区 A₃ 中仅有节点 40 和 41 的电压幅值为 0.9679 p.u.和 0.9657 p.u.，其余电压幅值均不越限。可见，本文所建模型可对配电网进行有效电压调节，显著减少负荷节点电压越下限的个数，解决了电压越限节点的低电压问题。

从优化前后的电压越下限的程度来看, 分区 A_3 中仅有电压不可行节点 40 和 41 的电压幅值优化后分别提高了 9.7% 和 9.8%, 而其他节点电压均在安全范围内。这表明本文所建模型有效减少了电压不可行节点越下限的程度, 最大程度地对电压不可行节点引起的相邻节点的低电压问题进行了治理。图 3 表示了杭州某实际 10 kV 55 节点配电网的 IPCCD-EA 算法收敛曲线。



(a) 薄弱区 A_3 的电压不可行节点的电压上升曲线



(b) 有功网损的下降曲线

图 3 IPCCD-EA 算法收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of IPCCD-EA

从图 3(a)、图 3(b) 可知, IPCCD-EA 算法搜索薄弱区的电压不可行节点的电压幅值上升过程中伴随网损下降。IPCCD-EA 算法收敛曲线表明本文所建模型有效提升了薄弱区电压不可行节点的电压幅值, 实现了薄弱区电压调节与降低全网有功网损的综合效益最优。

2) 所建模型与无功优化对比分析

为进一步分析本文所建模型在处理分区 A_3 中电压不可行节点 40 和 41 的优越性, 本文采用放宽电压幅值安全约束至 $[0.9, 1.07]$ 的无功优化计算方法, 获取配电网全网各个节点的电压幅值和有功网损, 具体结果见图 4。本文方法得出电压越下限个

数为 2 个, 而全网无功优化计算方法得出的电压越下限个数为 6 个。同时, 全网无功优化的有功网损为 9.2031 p.u., 本文方法的有功网损为 9.3552 p.u.。从这两点可知, 本文方法优先保证了电网运行的安全效益, 其次才是电网运行的经济效益。

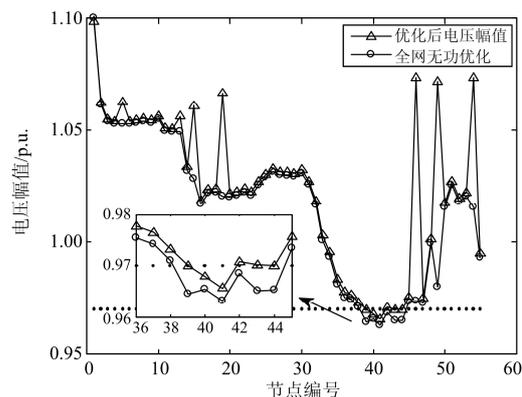


图 4 本文方法和无功优化计算结果对比曲线

Fig. 4 Comparison of the results of the method and reactive power optimization

本文方法是如何保证电压不可行节点的电压偏移百分数小于全网无功优化计算的呢? 节点 40、41 电气距离最近的无功补偿电源是节点 46, 下面给出两种方法关于分区 A_3 中与电压不可行节点 40、41 相关联的节点 46 的无功补偿及配变变比情况, 具体分别见表 4。

表 4 节点 46 的无功补偿和变比

Table 4 Reactive power compensation and the ratio with bus 46

	p.u.	
方法类别	无功补偿	配变变比
无功优化	0.057	1.00
本文方法	0.100	0.90

实际上无功补偿越多且配变档位最低, 则无功倒送越多。从表 4 的无功补偿和变比档位可知, 无功优化方法的无功补偿比本文方法补偿无功少, 配变档位比本文方法得出的高; 同时本文方法得出的节点 46 的电压幅值远高于无功优化方法所得。从这两个角度, 说明了本文方法使得节点 46 倒送大量无功, 而无功优化方法的倒送无功较少。因此, 无功优化方法并未发挥相邻无功电源最大电压无功调节能力, 以支持相邻的节点 39 至 45 的电压, 这可得出无功优化的低电压控制能力显著弱于本文方法。

5 结论

本文提出一种考虑电压不可行节点的广域无功控制的低电压治理方法。首先本文给出了配电网电

压不可行节点的基本概念,然后在配电网电压无功控制分区的基础上,构建了考虑电压不可行节点的广域无功控制的低电压治理模型。该模型包含无功补偿薄弱区的电压控制模型和无功补偿非薄弱区的无功优化两个子模型。本文所提方法成功解决了含电压不可行节点的配电网广域无功控制策略失效问题,该方法具有如下特点:

(1) 针对配电网中普遍存在的低电压问题,提出了一种相对应的基本概念,即电压不可行节点。

(2) 本文所建模型,按照实际配电网无功补偿情况分别建立了控制目标不同的子模型,有效解决了无功补偿薄弱区的低电压问题,同时降低了无功补偿非薄弱区的经济运行问题。

(3) 本文所建模型是传统广域无功控制问题的泛化,解决了配电网广域无功控制问题在含电压不可行节点失效的问题,为有效治理配电网中存在的低电压问题提供了有效且合理的解决途径。

参考文献

- [1] 王金丽,段祥骏,李云江,等. 配电网低电压产生原因与综合治理措施[J]. 供用电, 2016(7): 8-12.
WANG Jinli, DUAN Xiangjun, LI Yunjiang, et al. Causes and comprehensive governance measures of low voltage problem in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2016(7): 8-12.
- [2] 周封,肖强,刘志刚,等. 配电网串联电容补偿对电机机端电压调节性能的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 107-113.
ZHOU Feng, XIAO Qiang, LIU Zhigang, et al. Effects of regulating performance of voltage at the motor terminals with series capacitance compensation in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 107-113.
- [3] 颜伟,赵科,赵霞,等. 基于局部量测的配网馈线广域无功优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 23(14): 47-53.
YAN Wei, ZHAO Ke, ZHAO Xia, et al. Wide-area reactive optimal control method of radial distribution networks based on partial measurement data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [4] 周虎,陈佳黎,鲜龙,等. 电网三相不平衡下农网低电压治理的研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 47-53.
ZHOU Hu, CHEN Jiali, XIAN Long, et al. Research on the low voltage of three-phase unbalance in rural grid[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 47-53.
- [5] 李瑞生,翟登辉. 光伏 DG 接入配电网及微电网的过电压自动调节方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 62-68.
LI Ruisheng, ZHAI Denghui. Research on over-voltage automatic adjustment method of distributed photovoltaic source accessing to distribution network or microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 62-68.
- [6] 方景辉,温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.
FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [7] 周云成,朴在林,付立思,等. 10 kV 配电网无功优化自动化控制系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 125-130.
ZHOU Yuncheng, PIAO Zailin, FU Lisi, et al. Design of reactive power optimization automatic control system for 10 kV distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 125-130.
- [8] 李翔,顾全,居俐洁,等. 计及重要无功源有效无功储备的自动电压控制[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 49-56.
LI Xiang, GU Quan, JU Lijie, et al. Automatic voltage control considering effective reactive power reserves of important reactive power resources[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 49-56.
- [9] 唐冠军,陈永华,罗剑波,等. 集群风场并网地区无功电压紧急控制技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 107-114.
TANG Guanjun, CHEN Yonghua, LUO Jianbo, et al. Research on reactive voltage emergency control in integrated cluster wind farms area[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 107-114.
- [10] 丁恰,李乃湖,武寒. 电压无功功率优化控制中不可行问题的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 19-22.
DING Qia, LI Naihu, WU Han. Infeasibility study on voltage/reactive power optimization[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 19-22.
- [11] 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.
- [12] 王建党,王锡凡,陈皓勇,等. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 124-129.
WANG Jianxue, WANG Xifan, CHEN Haoyong, et al. Reactive power optimization based on corporative coevolution approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,

- 24(9): 124-129.
- [13] LIANG C H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Parallel optimal reactive power flow based on cooperative co-evolutionary differential evolution and power system decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 249-256.
- [14] 赵波, 郭创新, 张鹏翔, 等. 基于分布式协同粒子群优化算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 1-7.
ZHAO Bo, GUO Chuangxin, ZHANG Pengxiang, et al. Distributed cooperative particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 1-7.
- [15] 林烨. 输电设备检修计划及其安全校核的优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
LIN Ye. Study on optimization of global generation and transmission maintenance scheduling and its security correction[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [16] ZHU J Z, CHEUNG K, HWANG D, et al. Operation strategy for improving voltage profile and reducing system loss[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 390-397.
- [17] 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 Wenzuo, 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.
- [18] 高强. 输电网络的分层分区电压无功启发式调节方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
GAO Qiang. An algorithm for hierarchical and portioned regulation of voltage and reactive power in transmission network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. GBT 12325-2003 电能质量 供电电压允许偏差[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2004.
Standardization of Administration of the People's Republic of China. Power quality-admissible deviation of supply voltage[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2004.
- [20] 董海龙, 奚慧兴, 付立思, 等. 基于混合 PSO-ACO 算法的含 DG 配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 50-56.
DONG Hailong, XI Huixing, FU Lisi, et al. Reactive power optimization in distribution network with DG based on hybrid PSO-ACO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 50-56.

收稿日期: 2016-06-28; 修回日期: 2016-08-19

作者简介:

胡翔(1980—), 男, 本科, 工程师, 从事高低压设备制造和管理工作; E-mail: cquleichao@163.com

邵叶晨(1987—), 男, 本科, 工程师, 从事高低压设备制造和管理工作。

(编辑 张爱琴)