

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180661

计及分布式电源局部调压能力的 10 kV 配电网低电压治理方法

孟晓芳¹, 王俊¹, 王英男², 刘然³, 王慧¹, 张涵¹

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 电建(沈阳)新能源发展有限公司, 辽宁 沈阳 110180;
3. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 为了充分利用分布式电源局部调压能力治理 10 kV 配电网的低电压问题, 提出了一种利用分布式电源改善电压的方法。根据配电网 5 种典型运行案例的节点电压, 利用模糊聚类分析对配电网中节点进行二次分区, 并利用改进的粒子群算法在分区内优化配置分布式电源和无功补偿设备。计及分布式电源和无功补偿设备的输出电流以及有载调压变压器变比的影响, 推导出了计算节点电压变化量的公式以及基于电流的电压灵敏度分析矩阵, 并提出了基于灵敏度分析矩阵的电压控制策略。以存在“低电压”问题 10 kV 配电网为例, 对所提出的方法进行了分析和验证, 结果表明了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 分布式电源; 模糊聚类分析; 电压控制策略; 灵敏度分析; 粒子群算法; 无功补偿设备

Low-voltage control method for 10 kV distribution network considering distributed generation capability of local voltage regulation

MENG Xiaofang¹, WANG Jun¹, WANG Yingnan², LIU Ran³, WANG Hui¹, ZHANG Han¹

(1. College of Information and Electric Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;
2. Electric Power Construction (Shenyang) New Energy Development Co., Ltd., Shenyang 110180, China;
3. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to make full use of local voltage regulation capability of the Distributed Generation (DG) to solve the low-voltage problem in 10 kV distribution network, this paper introduces a method to improve voltage with DG. According to the node voltage of five typical operation cases, second division of network nodes is implemented using fuzzy cluster analysis. And the improved Particle Swarm Algorithm (PSO) is used for the optimal configuration of DG and Reactive Power Compensation Equipment (RPCE) in the node division areas. Considering the output current of DG and RPCE, and the ratio of the On-Load Tap Changer (OLTC), this paper deduces the formula for calculating the node voltage variation and voltage sensitivity analysis matrix based on current. Voltage control strategy is proposed on the sensitivity analysis matrix. The method proposed is tested on the actual 10 kV grid example with low-voltage problem. The results show the feasibility and effectiveness of the approach proposed to solve the low-voltage problem.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2012BAJ26B00) and Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 20170540810).

Key words: distribution network; distributed generation (DG); fuzzy cluster analysis; voltage control strategy; sensitivity analysis; particle swarm optimization (PSO); reactive power compensation equipment (RPCE)

0 引言

近年来 10 kV 配电网“低电压”现象频繁出现,

已经引起国家电网等有关部门的高度重视^[1]。目前主要利用线路调压器^[1]、OLTC^[2]、RPCE^[2-3]、DG^[4]调节电压。在调节电压时, 大多数是几种设备协调控制电压。文献[1]利用线路无功补偿和调压器调压。文献[2]基于模型预测控制理论, 通过调节 DG 的无功出力、储能充放电和 OLTC 控制母线电压。

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAJ26B00); 辽宁省自然科学基金项目资助(20170540810)

文献[3]中利用 DG 和电容器组无功出力, 基于电压/无功灵敏度矩阵调节电压。文献[4]中提出了利用 OLTC、分布式能源(包括 DG)的混合整型非线性优化方法。文献[5]提出了 DSTATCOM 和 DG 协调配合的两阶段分区电压控制策略, 第 1 阶段为 DSTATCOM 独立参与的快速电压控制, 在第 2 阶段, 发挥 DG 无功输出能力进行调压。文献[6]提出了主从电压协调控制方案, 利用 OLTC 和 DG 输出的无功功率实现电压调节。文献[7]提出了两阶段规划法, 利用 OLTC 和电容器以及 DG 实现控制电压。文献[8]提出了电压分层协调控制策略, 利用 OLTC 和无功功率调节实现电压的调节。

对于 DG 参与的电压控制方法中, 基本是利用 DG 输出的无功功率来实现电压控制^[2-12]。参与调压的 DG 以一定的功率因数参与电压调节, 对 DG 的接入位置没有太多要求^[4,7-8]。基于电压与功率的灵敏度分析矩阵不是常数矩阵, 需要多次计算^[3,12]。

由于配电线路的 R/X 值高^[13-14], 节点电压不仅受到无功注入功率的影响^[9], 而且对有功注入功率的变化非常敏感^[10], DG 注入功率对节点电压有较大影响^[15-16], DG 注入有功可能引起电压升高^[11], 对于治理中压配电网的低电压问题是有利的。

由于小规模 DG 影响配电网的局部运行^[17], 影响配电网的局部无功电压特性^[18]。为了利用 DG 局部调压能力调节电压, 需要对中压配电网分区, 然后优化配置 DG。而将配电网中馈线分为一个区或者两个区^[5,8], 对于治理负荷分散、供电半径长的 10 kV 配电网的低电压问题存在一定的局限性。

综上, 本文考虑我国 10 kV 配电网的实际情况^[1,19], 提出利用 DG 局部调压能力的 10 kV 配电网低电压治理方法, 对配电网中节点分区, 然后优化配置 DG 和 RPCE, 推导基于电流的电压灵敏度分析矩阵, 配合变压器分接头, 研究电压控制策略。

1 辐射式配电网节点电压和有功损耗计算

对于具有 $N+1$ 个节点、 b 条支路的辐射式网络时, 独立节点集合 $\Omega_N = \{1, 2, \dots, N\}$, 对于 i, j 节点之间的支路 l 记为 $l(i, j)$, 其中 $l = j (j \in \Omega_N)$ 。

设支路 l 电流为 \dot{I}_l , 流出独立节点 j 负荷电流为 \dot{I}_{Nj} 。设流出节点电流为正, 流入节点电流为负。

设 A 为独立节点一树支关联矩阵, 不计 DG 和无功补偿影响时, 根据 KCL 有

$$A\dot{I}_b + \dot{I}_N = 0 \quad (1)$$

式中: \dot{I}_N 为 N 个独立节点的负荷电流列矢量,

$\dot{I}_N = [\dot{I}_{N1} \ \dot{I}_{N2} \ \dots \ \dot{I}_{NN}]^T$; \dot{I}_b 为 b 条支路的支路电流列矢量, $\dot{I}_b = [\dot{I}_1 \ \dot{I}_2 \ \dots \ \dot{I}_b]^T$ 。

根据式(1)可得支路电流为

$$\dot{I}_b = T\dot{I}_N \quad (2)$$

式中, T 为支路—道路(节点)关联矩阵^[20], $T = -A^{-1}$ 。

计 DG 和无功补偿影响时, 设 \dot{I}_{DG} 、 \dot{I}_C 分别为 DG 和 RPCE 提供的独立节点的注入电流列矢量, 则式(2)可写为

$$\dot{I}_b = T(\dot{I}_N + \dot{I}_{DG} + \dot{I}_C) \quad (3)$$

设 Z_b 为支路阻抗矩阵, $Z_b = \text{diag}(Z_l)$, Z_l 是支路 l 的阻抗, 支路电压降落 $\Delta\dot{U}_b$ 列矢量为

$$\Delta\dot{U}_b = Z_b \dot{I}_b \quad (4)$$

网络中独立节点的电压 \dot{U}_N 列矢量为

$$\begin{aligned} \dot{U}_N = \dot{U}_{N+1} \mathbf{e}_p - T^T \Delta\dot{U}_b = \\ \dot{U}_{N+1} \mathbf{e}_p - T^T Z_b T (\dot{I}_N + \dot{I}_{DG} + \dot{I}_C) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: \dot{U}_{N+1} 为电源点(即节点 $N+1$)电压; \mathbf{e}_p 为元素均为 1 的 $N \times 1$ 维列矢量, $\mathbf{e}_p = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ 。

网络的有功损耗 ΔP (kW) 可由式(6)计算得到。

$$\Delta P = 3 \times 10^{-3} \cdot \sum_{l=1}^b I_l^2 R_l \quad (6)$$

式中: I_l 为支路 l 的电流(A); R_l 是支路 l 的电阻(Ω)。

2 DG 和 RPCE 的配置

为了更好地利用 DG 和 RPCE 调节电压, 首先需要配置 DG 和 RPCE。由于中压配电网一般开环运行^[21-22], 可对独立的配电线路实现分区电压优化。

2.1 配电线路的分区

根据模糊聚类分析^[23], 利用配电线路 N_{case} 种典型运行情况时节点电压和支路电流, 对配电线路的节点进行分区。模糊聚类分析步骤如下。

a) 数据标准化

设 $\mathbf{X} = \{x_j, j \in \Omega_N\}$ 是对应于独立节点电压的集合, 对 \mathbf{X} 中数据进行标准化, 将 x_{jt} 变换为 x'_{jt} , 即

$$x'_{jt} = \frac{x_{jt} - \min\{x_{jt}\}}{\max\{x_{jt}\}} \quad (7)$$

式中, x_{jt} 为第 t 运行案例时节点 j 的电压, $t=1, 2, \dots, N_{\text{case}}$ 。

b) 建立模糊相似矩阵

被分类对象 x_g 、 x_h 间的相似程度用相似系数 r_{gh} 表示为

$$r_{gh} = \frac{\sum_{t=1}^{N_{\text{case}}} \min(x_{gt}, x_{ht})}{\sum_{t=1}^{N_{\text{case}}} \max(x_{gt}, x_{ht})} \quad (g, h \in \Omega_N) \quad (8)$$

模糊相似矩阵 $\tilde{\mathbf{R}} = (r_{gh})_{N \times N}$ 。

c) 建立模糊等价矩阵

利用平方法求 $\tilde{\mathbf{R}}$ 的模糊等价矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}^*$ 为

$$\tilde{\mathbf{R}}^* = t(\tilde{\mathbf{R}}) = \tilde{\mathbf{R}}^k = \tilde{\mathbf{R}}^{2k} = (\tilde{r}_{gh}^*)_{N \times N} \quad (9)$$

式中, k 为使式(9)成立的最小的正整数, 且 $k \geq 1$ 。

d) 聚类

设 $0.4 \leq \lambda \leq 1$, 采用 λ 截矩阵法对 $\tilde{\mathbf{R}}^*$ 作聚类分析, 得到矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_\lambda^* = (\tilde{r}_{gh}^*)_{N \times N}$ 。 \tilde{r}_{gh}^* 可表示为

$$\tilde{r}_{gh}^* = \begin{cases} 1 & \lambda \leq \tilde{r}_{gh} \leq 1 \\ 0 & 0 \leq \tilde{r}_{gh} < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

对于任意的 $g, h \in \Omega_N$, $g \neq h$, 若 $\tilde{r}_{gt}^* = \tilde{r}_{ht}^* (t = 1, 2, \dots, N)$, 则 x_g 和 x_h 归为一类。

根据节点电压偏移大小, 将节点分为电压偏移小、中、大三类, 分别用 N_{set_A} 、 N_{set_B} 、 N_{set_C} 表示。

e) 分区

为了使电压相关性较大的节点位于同一分区, 对 N_{set_A} 、 N_{set_B} 、 N_{set_C} 进行二次聚类分析, 设 N_{set_A} 、 N_{set_B} 、 N_{set_C} 分别为 NA 、 NB 、 NC 类, 即

$$\begin{cases} N_{\text{set}_A} = \text{Set}_1 \cup \text{Set}_2 \cup \dots \cup \text{Set}_{N_A} \\ N_{\text{set}_B} = \text{Set}_{N_A+1} \cup \text{Set}_{N_A+2} \cup \dots \cup \text{Set}_{N_A+N_B} \\ N_{\text{set}_C} = \text{Set}_{N_A+N_B+1} \cup \text{Set}_{N_A+N_B+2} \cup \dots \cup \text{Set}_{N_A+N_B+N_C} \end{cases} \quad (11)$$

于是, 配电网节点分为 $(NA+NB+NC)$ 个区, 结合电网实际情况在分区内设置 DG 或和 RPCE。

2.2 DG 和 RPCE 配置数学模型

利用最大负荷情况时的运行数据, 确定 DG 和 RPCE 配置位置和最大容量。DG 的功率因数设为 1^[24]; RPCE 仅作为无功电源, 且有一定的调压能力。

a) 目标函数

在配置 DG 和 RPCE 后, 配电网的所有节点偏离额定电压的程度最小, 同时降损效果最大, 即

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^N |U_i - U_e| \quad (12)$$

$$\max F_2 = 100\% \times (\Delta P_{\text{be}} - \Delta P_{\text{af}}) / \Delta P_{\text{be}} \quad (13)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压; U_e 为配电网的额定电压; ΔP_{be} 和 ΔP_{af} 分别为配置 DG 和 RPCE 前后的配电网的有功损耗(kW), 根据式(6)计算。

b) 约束条件

在存在低电压节点的分区内, 配置 1 个 DG 和 1 个 RPCE, 不存在低电压节点的分区内配置 RPCE 的数量不超过 1 个。还需要满足等约束条件和不等约束条件, 分别如式(14)和式(15)所示。

$$\begin{cases} \sum P_L + \sum \Delta P - P_S - \sum P_{\text{DG}} = 0 \\ \sum Q_L + \sum \Delta Q - Q_S - \sum Q_C = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_{DG} 为 DG 所发出的有功(kW); P_L 和 Q_L 分别为负荷的有功(kW)和无功功率(kvar); P_S 和 Q_S 分别为系统输送的有功(kW)和无功功率(kvar); ΔQ 为无功功率损耗(kvar); Q_C 为 RPCE 所发出的无功功率(kvar)。

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ I_l \leq I_{l,\max} \\ \sum_{i \in \Gamma} P_{\text{DG},i} \leq P_{\text{DG}\Sigma,\max} \\ \cos \varphi_{\min} \leq \cos \varphi_l \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_{\min} 和 U_{\max} 分别为节点允许的最小和最大电压; $I_{l,\max}$ 为支路 l 允许的最大电流(A); Γ 为安装 DG 的节点集合; $P_{\text{DG},i}$ 、 $P_{\text{DG}\Sigma,\max}$ 分别为节点 i 安装 DG 的有功功率和安装 DG 的总容量(kW); $\cos \varphi_{\min}$ 为最小功率因数; $\cos \varphi_l$ 为主干线首端功率因数。

2.3 求解方法

1) PSO 算法

确定 DG 最佳位置和容量的方法较多, PSO 算法是有效的方法之一^[25-26]。许多研究和应用已经成功地使用 PSO 算法^[15,25-30], 本文利用改进的 PSO 算法确定 DG 和 RPCE 最佳位置和最大容量。设第 e 个粒子 $\mathbf{x}_e = (x_e^1, x_e^2, \dots, x_e^d)$, 粒子 e 的速度 $\mathbf{v}_e = (v_e^1, v_e^2, \dots, v_e^d)$, k 表示迭代次数, d 为每个粒子维数, 根据文献[25-26] PSO 算法中粒子位置和速度的更新如式(16)所示。

$$\lambda(k) = \lambda_{\max} - \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{k_{\max}} k \quad (16)$$

$$\mathbf{v}_e(k+1) = \lambda(k) \mathbf{v}_e(k) + c_1 \cdot r_1 (\mathbf{pbest}_e(k) - \mathbf{x}_e(k)) + c_2 \cdot r_2 (\mathbf{gbest}(k) - \mathbf{x}_e(k)) \quad (17)$$

$$\mathbf{x}_e(k+1) = \mathbf{x}_e(k) + \mathbf{v}_e(k+1) \quad (18)$$

式中: λ 为惯性权重因子; λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为惯性权重因子的最大值、最小值; k_{\max} 为最大迭代次数; c_1 、 c_2 为加速常数; r_1 、 r_2 为 0~1 的随机数; $\mathbf{pbest}_e(k)$ 、 $\mathbf{gbest}(k)$ 分别为第 k 次迭代完成时粒子 e 的最好值和全局最好值。

2) 求解步骤

(1) 获取配电网线路数据, 根据历史运行数据选择几种典型运行案例的负荷数据;

(2) 计算各种运行案例的功率分布和节点电压;

(3) 根据式(7)一式(11)对配电线路节点进行分区;

- (4) 确定节点电压、支路电流、DG容量、功率因数的限制条件;
- (5) 设定 λ_{\max} 、 λ_{\min} 、 $\lambda(1)$ 、 k_{\max} ， $k=1$;
- (6) 产生满足约束条件的初始粒子 $\mathbf{x}_e(1)$ 以及其速度 $\mathbf{v}_e(1)$;
- (7) 确定 $\mathbf{pbest}_e(k)$ 、 $\mathbf{g}_{\text{best}}(k)$;
- (8) 利用式(16)一式(18)更新 $\lambda(k+1)$ 、 $\mathbf{x}_e(k+1)$ 、 $\mathbf{v}_e(k+1)$;
- (9) 根据式(12)一式(15)更新 $\mathbf{pbest}_e(k+1)$ 、 $\mathbf{g}_{\text{best}}(k+1)$;
- (10) 迭代次数 $k \leftarrow k+1$;
- (11) 如果 $k < k_{\max}$ 确定返回(7)，否则停止迭代。

3 电压控制数学模型与策略

3.1 基于电流的电压灵敏度分析矩阵

设 K_T 为OLTC分接头位置，电源点为参考节点， \dot{U}_{N+1} 可表示为

$$\dot{U}_{N+1} = U_{N+1} \angle 0 = U_e + \Delta U_{N+1} = U_e + U_e \cdot K_T \quad (19)$$

设节点负荷电流、DG和RPCE输出电流的变化量分别为 $\Delta \dot{I}_N$ 、 $\Delta \dot{I}_{\text{DG}}$ 、 $\Delta \dot{I}_C$ ，考虑OLTC分接头位置，则网络中独立节点的电压变化量 $\Delta \dot{U}_N$ 为

$$\Delta \dot{U}_N = U_e \Delta K_T \mathbf{e}_p - \mathbf{S}_u (\Delta \dot{I}_N + \Delta \dot{I}_{\text{DG}} + \Delta \dot{I}_C) \quad (20)$$

式中： \mathbf{S}_u 为基于电流的电压灵敏度分析矩阵， $\mathbf{S}_u = \mathbf{T}^T \mathbf{Z}_b \mathbf{T}$ ， \mathbf{S}_u 是常系数矩阵； ΔK_T 为OLTC分接头位置的变化量。

3.2 电压控制策略

在第 t 运行案例时，网络中独立节点的电压列矢量为 $\dot{U}_N^{(t)}$ ，为了保证所有节点电压在允许的运行范围内，出现低电压节点期望的电压变化量为 $|\Delta \dot{U}_N^{(t)}|$ ，利用OLTC分接头位置、DG和RPCE协调调节电压，根据式(20)有

$$\Delta \dot{U}_N^{(t)} = U_e \Delta K_T^{(t)} \mathbf{e}_p - \mathbf{S}_u (\Delta \dot{I}_{\text{DG}}^{(t)} + \Delta \dot{I}_C^{(t)}) \quad (21)$$

第 t 运行状态时电压控制策略具体实施如图1所示。各分区内节点电压首先利用同分区内的DG和RPCE调节，然后利用其他分区的DG和RPCE以及OLTC分接头调节电压。

利用PSO算法确定 $\Delta \dot{I}_{\text{DG}}^{(t)}$ 、 $\Delta \dot{I}_C^{(t)}$ 、 $\Delta K_T^{(t)}$ 时，根据OLTC分接头、DG和RPCE的最大容量确定初始速度 $\mathbf{v}_e(1)$ ，设定 λ_{\max} 、 λ_{\min} 、 $\lambda(1)$ 、 k_{\max} ，根据式(21)确定DG和RPCE的电流变化量 $\Delta \dot{I}_{\text{DG}}^{(t)}$ 、 $\Delta \dot{I}_C^{(t)}$ ， $\Delta K_T^{(t)} = 0$ ，其他步骤与2.3节中步骤(7)一步(11)相同。但是，在更新 $\mathbf{pbest}_e(k+1)$ 、 $\mathbf{g}_{\text{best}}(k+1)$ 时，除了满足式(12)一式(15)，还要保证DG的利用容量最大化。

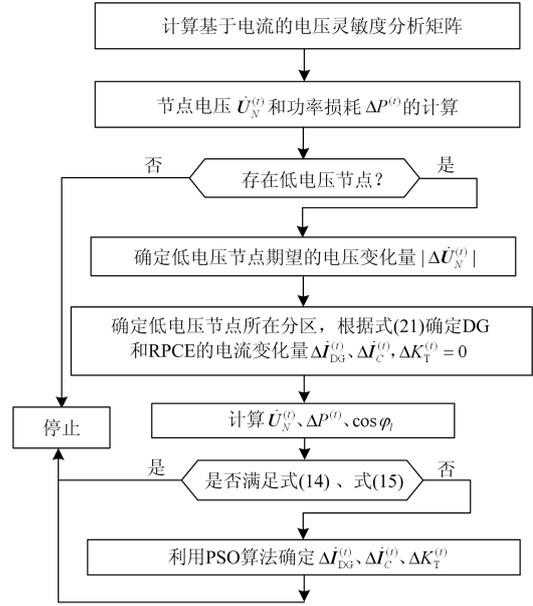


图1 电压控制策略

Fig. 1 Voltage control strategy

4 实例分析

以图2所示实际10 kV网络2014年数据为例，计算中电压基准值选为66 kV、10.5 kV，网络首端(支路1)功率如表1所示，在表1中给出了以案例5为基准值的百分数。允许的最大、最小电压偏差分别取为系统额定电压的+7%和-7%^[7,31]。

表1 支路1功率

Table 1 Power of the 1st branch

	有功/kW	百分数/%	无功/kvar	百分数%
案例1	1079.228163	22.70307038	467.0995511	18.300728
案例2	1991.558262	41.89520711	965.2774679	37.81909091
案例3	3579.490232	75.29957193	1905.814633	74.66886906
案例4	4151.382371	87.33012109	2183.45057	85.54650693
案例5	4753.666111	100	2552.355027	100

表2 节点分区

Table 2 Node partition

分区		节点编号
一次	二次	
$Nset_A$	Set_1	69, 1
$Nset_B$	Set_2	63, 11, 10, 9, 66, 65, 64, 8, 7, 6, 68, 67, 5, 4, 3, 2
	Set_3	62, 61, 60, 59, 58, 15, 14, 13, 12
	Set_4	57, 56, 55, 54, 53, 21, 20, 19, 18, 17, 16
$Nset_C$	Set_5	52, 51, 50, 49, 48, 47, 22
	Set_6	42, 43, 44, 41, 40, 39, 38, 26, 25, 46, 45, 24, 23
	Set_7	34, 33, 32, 31, 30, 36, 35, 29, 28, 37, 27

本文中 $P_{DG\Sigma, \max}$ 取最大总有功功率的 30%，选择图 2 的 5 种运行案例进行分析，这 5 种运行案例的实际电压如图 3(a)所示。图 3 中 c1、c2、c3、c4、

c5 分别表示案例 1、案例 2、案例 3、案例 4、案例 5。利用网络这 5 种运行案例的实际电压，根据模糊聚类分析对节点进行分区，节点分区如表 2 所示。

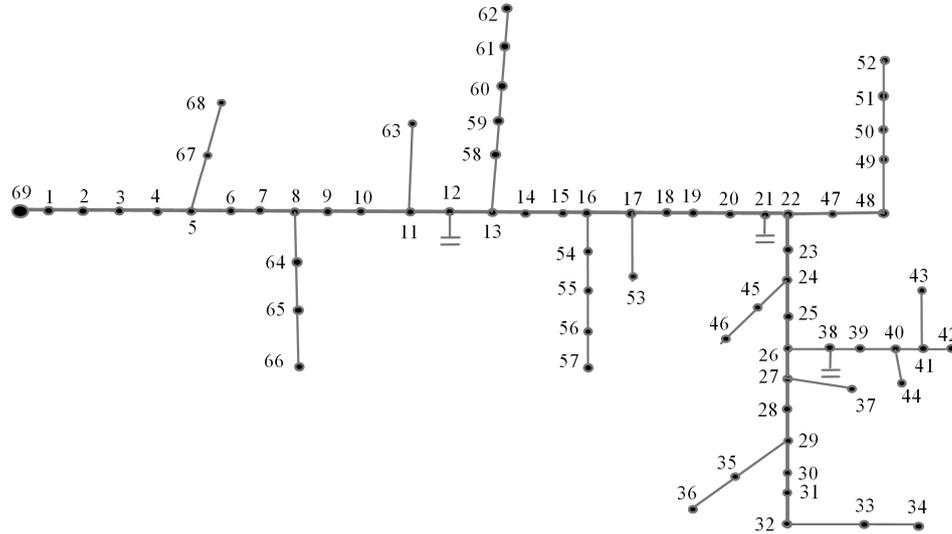
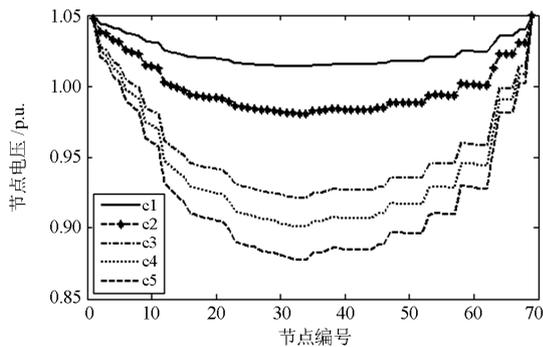
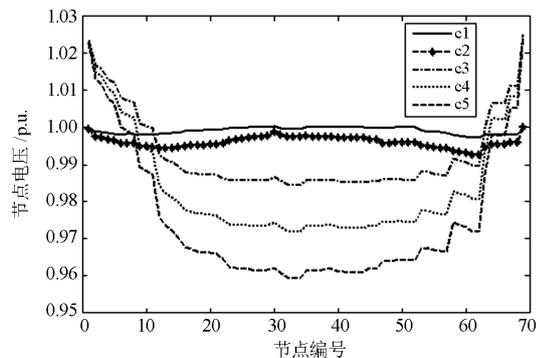


图 2 10 kV 辐射式网络图

Fig. 2 10 kV radial network



(a) 调压前的节点电压曲线



(b) 调压后的节点电压曲线

图 3 节点电压曲线

Fig. 3 Curve of node voltage

比较表 2、图 2 和图 3，二次分区后，分区内的节点电压相关性较大，道路上的相交部分更多。

结合图 3 可知，分区 Set_4 、 Set_5 、 Set_6 、 Set_7 中电压较低，存在低电压节点。在分区 Set_4 、 Set_5 、 Set_6 、 Set_7 中配置 1 个 DG 和 1 个 RPCE， Set_2 和 Set_3 区仅配置 1 个 RPCE，配置位置和最大容量如表 3、表 4 所示，DG 的 $\cos\phi=1$ ，DG 的总安装容量约为 27.24%。

OLTC 的电压选择为 66 kV/10.5 kV $\pm 2 \times 2.5\%$ ，OLTC 变比分别为 1.05、1.025、1、0.975、0.95，相对应的 OLTC 分接头 K_T 分别为 0.05、0.025、0、-0.025、-0.05。

表 3 DG 安装位置及容量(2014 年)

Table 3 Siting and sizing of DG in 2014

配置DG节点	DG输出最大电流/A	DG的配置容量/kW
30	28.265 538 362 593 9	490
39	22.904 803 711 205	397
50	9.673 424 654 323 73	168
53	13.837 357 452 653 8	240

表 4 RPCE 安装位置及容量(2014 年)

Table 4 Siting and sizing of RPCE in 2014

配置RPCE节点	RPCE输出最大电流/A	RPCE容量/kvar
30	35.941 006 090 232 1	623
39	18.012 709 298 532 2	312
50	16.736 312 204 360 5	304
53	5.487 067 858	290
59	2.743 353 441	95
8	45.371 643 77	786

在 5 种案例情况下, OLTC 的变比、DG 和 RPCE 的输出电流如表 5 所示, 三者配合后, 5 种案例节

点电压如图 3(b)所示。在 5 种案例情况下, 调节电压前后的结果分析如表 6 所示。

表 5 DG 和 RPCE 的输出电流(2014 年)
Table 5 Output current of DG in 2014

名称	节点编号	案例 1	案例 2	案例 3	案例 4	案例 5
DG 输出点流/A	30	9.229 772 817	28.265 538 36	28.265 538 36	28.265 538 36	28.265 538 36
	39	17.263 309 76	22.904 803 71	22.904 803 71	22.904 803 71	22.904 803 71
	50	9.378 438 192	9.673 424 654	9.673 424 654	9.673 424 654	9.673 424 654
	53	9.109 700 757	13.837 357 45	13.837 357 45	13.837 357 45	13.837 357 45
无功补偿设备输出电流/A	30	6.322 634 215	10.858 156 09	26.998 482 75	32.346 905 48	35.941 006 09
	39	2.215 076 971	10.041 294 69	16.769 832 36	17.112 073 83	18.012 709 3
	50	4.537 117 964	5.971 451 55	6.634 946 167	8.895 759 841	16.736 312 2
	53	0.309 777 572	1.389 720 386	2.075 961 084	2.080 920 175	5.487 067 858
	59	0.167 744 819	0.466 584 747	1.685 831 379	1.785 134 117	2.743 353 441
	8	10.15 237 155	19.075 328 57	34.310 252 53	43.103 061 58	45.371 643 77
OLTC 变比/p.u.	—	1	1	1.025	1.025	1.025

表 6 结果分析

Table 6 Results analysis

名称	有功损耗 F_2 /kW		有功损耗 下降率/%	主干线首端功率因数 $\cos\phi_1$		最大节点电压/p.u.		最小节点电压/p.u.	
	调压前	调压后		调压前	调压后	调压前	调压后	调压前	调压后
案例 1	24.913 684 92	1.027 569 39	95.875 482 12	0.917 731 124	0.994 633 181	1.05	1.000 358 679	1.013 579 356	0.997 308 246
案例 2	45.410 850 93	4.234 067 395	90.676 088 85	0.899 872 02	0.997 391 848	1.05	1	0.980 646 901	0.992 593 278
案例 3	301.848 143 9	53.326 610 26	82.333 298 6	0.882 685 171	0.996 727 279	1.05	1.025	0.921 236 705	0.984 547 539
案例 4	405.505 698 1	89.490 449 35	77.931 148 74	0.885 048 892	0.998 884 058	1.05	1.025	0.900 815 132	0.971 861 036
案例 5	539.554 854	134.707 159	75.033 648 94	0.881 036 122	0.999 273 47	1.05	1.025	0.877 669 228	0.959 396 683

根据表 6 和图 3 可知, 调压后 5 种案例节点电压偏差均为-7%~7%, 有功损耗下降率超过 75%, 主干线首端功率因数大于 0.99。根据表 1、表 3、表 5, 应用本文提出的低电压调节方法, 在配置 DG 不超过 30%最大总有功功率的情况下, 当超过最大总有功功率的 41%时, DG 输出电流不改变, 而 RPCE 输出电流随负荷变化; 不超过最大总有功功率的 41%时, 变压器分接头为 1, 即变压器二次侧的电压为 10.5 kV。

4 结论

本文研究了 10 kV 配电网的“低电压”治理问题, 提出了根据多种运行案例节点电压分区的方法, 并结合实际运行情况在分区内优化配置 DG、RPCE, 提出了基于电压灵敏度分析矩阵的电压控制策略。算例分析验证了本文提出的方法可以有效改善节点电压, 保证各节点电压在允许的范围内, 而且减小了有功功率损失, 提高了功率因数。本文的方法避免了 DG 输出电流和变压器分接头的频繁变化, 而 RPCE 的电流就要跟随负荷变化而变化。

当然, 10 kV 配电网的低电压治理中, OLTC 的动作需要考虑同一变压器二次侧不同馈线实际的运行情况, 需要更加优化的方法进行协调控制以达到更好的调压效果, 这点值得以后进一步深入研究。

参考文献

[1] 杨伟奇, 高晓阳, 朴在林. 中压配电网低电压补偿调控技术及实现[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 198-202.
YANG Weiqi, GAO Xiaoyang, PIAO Zailin. Implementation of low voltage compensation control in medium voltage distribution network[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(S1): 198-202.

[2] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42-49.
CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control strategy in active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42-49.

[3] 付英杰, 汪泓, 陈春, 等. 考虑分布式电源的配电网电压控制新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015,

- 27(6): 26-31.
- FU Yingjie, WANG Feng, CHEN Chun, et al. New method of voltage control considering distribution network containing distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(6): 26-31.
- [4] KULMALA A, REPO S, JÄRVENTAUSTA P. Coordinated voltage control in distribution networks including several distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 2010-2020.
- [5] 张玮亚, 李永丽, 孙广宇, 等. 基于静止同步补偿器的主动配电网分区电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1644-1656.
- ZHANG Weiya, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Zonal-voltage control for active distribution network based on distributed static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1644-1656.
- [6] MOURSIM S E, ZEINELDIN H H, KIRTLEY J L, et al. A dynamic master/slave reactive power-management scheme for smart grids with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1157-1167.
- [7] 陶顺, 骆晨, 薛佳佳, 等. 基于两阶段规划法的有源配电网综合电压优化控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 54-59.
- TAO Shun, LUO Chen, XUE Jiajia, et al. Comprehensive voltage control optimization in active distribution network based on two-stage planning method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 54-59.
- [8] 陈飞, 刘东, 陈云辉. 主动配电网电压分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 61-67.
- CHEN Fei, LIU Dong, CHEN Yunhui. Hierarchically distributed voltage control strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 61-67.
- [9] DESHMUKH S, NATARAJAN B, PAHWA A. State estimation and voltage/VAR control in distribution network with intermittent measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 200-209.
- [10] ROBBINS B A, HADJICOSTIS C N, DOMÍNGUEZ-GARCÍA 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.
- [11] 张玮亚, 王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 146-154.
- ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 146-154.
- [12] TAMP F, CIUFO P. A sensitivity analysis Toolkit for the simplification of MV distribution network voltage management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 559-568.
- [13] DAVDA A T, AZZOPARDI B, PAREKH B R, et al. Dispersed generation enable loss reduction and voltage profile improvement in distribution network—case study, Gujarat, India[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1242-1249.
- [14] 李清然, 张建成. 含分布式光伏电源的配电网电压越限解决方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 117-123.
- LI Qingran, ZHANG Jiancheng. Solutions of voltage beyond limits in distribution network with distributed photovoltaic generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 117-123.
- [15] 彭光斌, 詹红霞, 黄培东, 等. 基于自适应粒子群算法优化 DG 的配网静态电压稳定性提高策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 100-106.
- PENG Guangbin, ZHAN Hongxia, HUANG Peidong, et al. Improved strategy of the static voltage stability of distribution network based on adaptive particle swarm optimization algorithm for DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 100-106.
- [16] 刘健, 尹海霞, 尚海仓, 等. 基于二分法的本地控制改善含分布式电源配电网电压质量[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 61-67.
- LIU Jian, YIN Haixia, SHANG Haicang, et al. Voltage performance improvement by dichotomy based local control for power distribution networks with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 61-67.
- [17] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
- FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [18] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2015, 40(1): 143-151.
- CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 40(1): 143-151.
- [19] 朴在林, 孟晓芳. 配电网规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 178-181.
- [20] 孟晓芳, 刘文宇, 朴在林, 等. 基于网络拓扑分析的配电网潮流节点分析法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 140-145.

- MENG Xiaofang, LIU Wenyu, PIAO Zailin, et al. A node analysis method of load flow in distribution network based on network topology analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 140-145.
- [21] 王永杰, 吴文传, 张伯明. 考虑负荷量测和光伏不确定性的主动配电网鲁棒电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 138-144.
- WANG Yongjie, WU Wenchuan, ZHANG Bomeng. Robust voltage control model for active distribution network considering load and photovoltaic uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 138-144.
- [22] 孟晓芳, 朴在林, 王珏. 计及负荷不确定性的农网无功优化方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 182-187.
- MENG Xiaofang, PIAO Zailin, WANG Jue. Reactive power optimal approach in rural power network considering load uncertainty[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 182-187.
- [23] 曹炳元. 应用模糊数学与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 165-170.
- [24] 孙浩, 姚鹏, 张磊, 等. 计及有功—无功功率协调控制的 2 层微电网优化调度模型[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3249-3255.
- SUN Hao, YAO Peng, ZHANG Lei, et al. Bi-level microgrid optimal dispatching model considering active-reactive power coordinated control[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3249-3255.
- [25] HIEN N C, MITHULANANTHAN N, BANSAL R C. Location and sizing of distributed generation units for loadability enhancement in primary feeder[J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(4): 797-806.
- [26] MALEKPOUR A R, NIKNAM T, ANIL P, et al. Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration in systems with wind power generators and fuel cells using the point estimate method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1483-1492.
- [27] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [28] 初壮, 李钊, 白望望. 计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 34-41.
- CHU Zhuang, LI Zhao, BAI Wangwang. Optimal siting and sizing of distributed generations considering uncertainties and environmental factors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 34-41.
- [29] 孙可, 段光, 李晓春, 等. 综合能源服务系统结构描述及设计优化[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 33-39.
- SUN Ke, DUAN Guang, LI Xiaochun, et al. Structural description and design optimization for integrated energy service system[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 33-39.
- [30] 周檬, 贾亚雷. 基于改进粒子群优化算法的先进绝热压缩空气储能系统参数优化[J]. 热力发电, 2018, 47(1): 94-99.
- ZHOU Meng, JIA Yalei. Parameter optimization for compressed air energy storage system based on particle swarm optimization[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(1): 94-99.
- [31] 国家电网公司. 电力系统电压质量和无功电力管理规定: DL/T 1198—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- State Grid Corporation of China. Regulation of voltage quality and reactive power management in power system: DL/T 1198—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

收稿日期: 2018-05-31; 修回日期: 2018-07-28

作者简介:

孟晓芳(1974—), 女, 工学博士, 副教授, 研究方向为农村电力网规划和电能质量; E-mail: xfmeng123@126.com

王俊(1979—), 男, 通信作者, 副教授, 工学博士, 研究方向为分布式电源并网技术、配电网运行与控制; E-mail: wddream2016@syau.edu.cn

王英男(1960—), 女, 高级工程师, 研究方向为电力网规划及运行优化. E-mail: wangyn_ln@163.com

(编辑 许威)