

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190104

基于三相不平衡的分布式光伏接入配电网的优化配置研究

吴斌¹, 单来支¹, 王庆¹, 高运兴¹, 张丽强²

(1. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000; 2 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为了准确分析分布式光伏接入导致的配电网不平衡, 针对配电网三相不平衡, 给出了一种基于分布式光伏接入配电网的优化配置。选择三个目标函数(光伏容量比、系统网络损耗、电压稳定裕度), 并且建立考虑三相不平衡的分布式光伏多目标优化配置模型。为了解决粒子之间互不占优的问题, 使用最小角度的多目标粒子群算法求解, 通过算例验证模型和方法的有效性。结果表明, 配电系统三相不平衡得到了有效改善。所做研究工作为我国分布式电源接入配电网的发展提供了参考和借鉴。

关键词: 分布式光伏; 配电网; 三相不平衡; 优化配置

Research on optimal configuration of distributed photovoltaic access distribution network based on three-phase unbalance

WU Bin¹, SHAN Laizhi¹, WANG Qing¹, GAO Yunxing¹, ZHANG Liqiang²

(1. Tai'an Power Supply Company, State Grid Shandong Power Company, Tai'an 271000, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to accurately analyze the distribution network imbalance caused by distributed photovoltaic access, an optimized configuration based on distributed photovoltaic access distribution network is given for the three-phase unbalance of distribution network. It selects three objective functions (photovoltaic capacity ratio, system network loss, voltage stability margin), and establishes a distributed PV multi-objective optimization configuration model considering three-phase unbalance. In order to solve the problem that the particles do not dominate each other, the multi-objective particle swarm optimization algorithm with minimum angle is used to solve the problem. The validity of the model and method is verified by an example, the results show that the three-phase unbalance of the power distribution system is effectively improved. The research work provides reference for the development of distributed power access distribution network in China.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877126) and Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 2018A-073).

Key words: distributed photovoltaic; distribution network; three-phase unbalance; optimal configuration

0 引言

倡导低碳经济和建设生态文明成为这一时期的主旋律, 分布式光伏发电系统以其安装简单、占地面积小等优点, 推动了整个光伏产业的发展^[1]。在“十三五”期间确立了分布式光伏发展趋势, 到2020年分布式光伏发电的比例将达到45%。光伏发电的相关政策不断推出, 光伏产业的发展模式更加

明确, 而分布式光伏技术的迅速发展则是未来的趋势。由于分布式光伏接入配电网导致三相电压和电流的不平衡, 因此, 有必要从三相不平衡角度来研究配电网中分布式光伏最优配置, 以确保电网的安全性和可靠性^[2]。

配电网合理的光伏接入会使电压质量和供电可靠性提高, 减少网络损耗和环境污染等。然而, 光伏接入也给配电网带来了谐波、电压变动等影响。国内外专家开展了大量的分布式发电技术以及分布式电源的选址和定容研究。文献[3]讨论了分布式电源的经济和环境优势, 分析了分布式电源并网的规

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877126); 国网山东省电力公司科技项目资助(2018A-073)

划、电力质量、保护和可靠性等。文献[4]在配电网规划条件下,对于新增负荷节点,将网络建设成本和运营成本作为目标函数,并通过智能遗传算法优化分布式电源的位置、容量和分布。文献[5]中,以有功网损最优为目标,使用改进粒子群优化算法来规划分布式电源并网容量和位置。文献[6]分析了中压配电网接入分布式电源的最大容量,以获得最大的分布式电源接入容量。

基于上述背景,从考虑三相不平衡的角度研究配电网中分布式光伏接入的优化配置,提出改进粒子群算法的分布式光伏接入配电网优化配置,并建立考虑三相不平衡的分布式光伏多目标优化模型。使用基于最小角度的多目标粒子群优化算法求解,并通过实例验证模型和方法的有效性。

1 光伏优化配置模型

随着大规模分布式光伏接入配电网,传统的单一电源配电网向多电源配电网转换,合理的光伏规划对配电网起支撑作用,相反,会产生许多不利的影

1.1 约束条件

分布式光伏接入配电网的约束应考虑配电网的安全和可靠,包括:潮流、谐波、电压偏差、三相不平衡、谐波。

(1) 潮流约束

潮流约束如式(1)所示^[7]。

$$\begin{cases} P_i^m + P_{PV_i}^m = P_{Li}^m + U_i^m \sum_{j=1}^n U_j^m (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i^m + Q_{PV_i}^m = Q_{Li}^m + U_i^m \sum_{j=1}^n U_j^m (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_i^m 为 i 节 m 相电压; U_j^m 为 j 节点 m 相电压; P_i^m 为 i 节点 m 相的有功功率输入; Q_i^m 为无功功率; P_{Li}^m 为 i 节 m 相的输入有功负荷; Q_{Li}^m 为无功负荷; $P_{PV_i}^m$ 为 i 节 m 相光伏有功出力; $Q_{PV_i}^m$ 为无功出力; θ_{ij} 为节点电压相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 为连接 i 节点和 j 节点导纳。

(2) 谐波约束

谐波约束如式(2)所示。

$$\begin{cases} T_{i,u} \leq T_{u,\max} \\ H_{i,h} \leq H_{h,\max} \\ I_{PCC}^h \leq I_{PCC,\max}^h \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{i,u}$ 和 $T_{u,\max}$ 为 i 节点总谐波畸变率和限值;

$H_{i,h}$ 和 $H_{h,\max}$ 为 i 节点第 h 次谐波含量和限值; I_{PCC}^h 和 $I_{PCC,\max}^h$ 为公共连接点各次谐波注入电流值和限制。

(3) 电压偏差约束

根据国家标准 GB/T12325-2008 标准, 20 kV 以下三相电压偏差在额定电压 $\pm 7\%$ 的范围内。文中将电压偏差标准作为“电压偏差限制”,以最大程度地接入分布式光伏容量,电压等级为 12.66 kV,如式(3)所示^[8]。

$$\Delta U_i^m = (U_i^m - U_r) / U_r \times 100\%, \quad (|\Delta U_i^m| \leq 7\%) \quad (3)$$

式中: ΔU_i^m 为 i 节点 m 相的电压偏差率; U_r 是电网额定电压。

(4) 三相不平衡约束

作为电能质量评价的重要指标之一,三相不平衡程度由负序基波分量引起的。计算电流不平衡的公式如式(4)所示,三相电流不平衡度小于 15%。

$$\varepsilon = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% = \frac{\text{norm}(I_a + a^2 I_b + a I_c)}{\text{norm}(I_a + a I_b + a^2 I_c)} \times 100\% \leq 15\% \quad (4)$$

式中: I_1 和 I_2 是三相电流的正、负序分量的方均根值; $\text{norm}(\)$ 用于解析向量的 2 范数函数; I_a 、 I_b 、 I_c 为三相电流的向量值; $a = e^{j120^\circ}$ 。

1.2 目标函数

目标函数选择光伏容量比、电压稳定裕度和系统网络损耗,建立考虑三相不平衡的分布式光伏的多目标优化配置模型^[9]。

(1) 光伏容量比

光伏容量比是当前系统接入光伏总有功功率和系统总负荷有功功率比值,在不影响当前系统的安全和稳定性的前提下,优化函数如式(5)所示。

$$f_1 = \max \eta_{PV} = \max \left(\left(\sum_{i \in \phi_1} \sum_{m \in \Omega} P_{PV_i}^m \right) / \left(\sum_{i \in \phi_2} \sum_{m \in \Omega} P_{Li}^m \right) \times 100\% \right) \quad (5)$$

式中: ϕ_1 是光伏接入候选节点集; ϕ_2 为负荷接入节点集; Ω 为 a、b、c 三相结合。

(2) 静态电压稳态裕度

静态电压稳定性是特定运行模式下电压稳定的极限,操作人员对机组运行状态更加了解,方便合理化控制。目前,多采用潮流平衡公式的临界解作为分析静电压的重要指标。文中选择静态电压稳定裕度,用以衡量当前操作条件与崩溃点之间的距离,并定义相电压幅值判别公式如式(6)所示^[10]。

$$A_{VM}^{i,m} = V_{i,m}^4 - 4(P_i^m r_{i,mm} + Q_i^m x_{i,mm})V_{i,m}^2 - 4(P_i^m x_{i,mm} - Q_i^m r_{i,mm})^2 \quad (6)$$

为了更方便地进行评估,公式变量都是标么值,如式(7)所示^[11]。

$$A_{VM}^{i,m} = [V_{i,m}^4 - 4(P_i^m r_{i,mm} + Q_i^m x_{i,mm})V_{i,m}^2 - 4(P_i^m x_{i,mm} - Q_i^m r_{i,mm})^2] / V_B^4 \quad (7)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,n$, $m=a,b,c$; $r_{i,mm} + jx_{i,mm}$ 是 i 节点 m 相自阻抗; $V_{i,m}$ 为 i 节点 m 相电压幅度; V_B 线路参照电压,即额定电压。

系统电压崩溃点是从裕度最小值节点开始的,所有节点电压的最小稳定裕度是电压稳定指标。如式(8)所示^[12]。

$$M = \min\{A_{VM}^{1,m}, A_{VM}^{2,m}, \dots, A_{VM}^{n,m}\} \quad (8)$$

优化电压稳定裕度,改进系统电压的稳定性,从而避免由于系统负荷和故障的干扰造成的电压崩溃,优化函数如式(9)所示^[13]。

$$f_2 = \max(M) \quad (9)$$

(3) 系统网络损耗

系统网络损耗优化函数可以表示为式(10)所示。

$$f_3 = \min\left(\sum_{i=1}^l P_{\text{loss},i} + \sum_{i=1}^l Q_{\text{loss},i}\right) \quad (10)$$

式中: $P_{\text{loss},i}$ 是第 i 个分支的三相有功网络损耗; $Q_{\text{loss},i}$ 无功网络损失; l 系统分支总数。

2 优化配置算法

在优化单个目标的过程中,更新粒子位置的全局引导者可以通过粒子之间的拓扑确定。在优化多目标问题中,两个粒子之间可能会增加互不支配关系,在每次迭代后,得到一个或多个算法最优解^[14]。为此,采用改进粒子群算法对分布式光伏配置模型进行求解。

2.1 全局引导者选择

首先,对两个粒子之间的角度进行定义。如式(11)所示。

$$\delta_{ij} = \delta(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \arccos \frac{\vec{f}(\vec{x}_i) \vec{f}(\vec{x}_j)}{|\vec{f}(\vec{x}_i)| |\vec{f}(\vec{x}_j)|} \quad (11)$$

式中: \vec{x}_i 是可行域 F 第 i 个粒子在 n 维空间中的位置,即 $\vec{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n})$; $\vec{f}(\vec{x}_i)$ 为粒子 \vec{x}_i 的 m 维粒子向量值,即由 m 个优化向量确定优化函数如式(12)所示^[15]。

$$\vec{f}(\vec{x}_i) = (\vec{f}_1(\vec{x}_i), \vec{f}_2(\vec{x}_i), \dots, \vec{f}_m(\vec{x}_i)) \quad (12)$$

以角度值为基础,计算储备集元素和粒子 \vec{x}_i 的最小角度,元素作为粒子 \vec{x}_i 的全局引导者 $x\vec{p}_i(t)$ 。这个方法对目标函数的值没有要求,计算非常方便。

2.2 引导者更新

所有粒子全局引导者都可以在储备中找到。换句话说,储备集的元素,元素的粒子群有对应数量的粒子。在粒子群中,将 A 中元素 \vec{a}_j 作为全局引导者全部粒子 \vec{x}_i 构成的集合。粒子的浓度是子粒子群的粒子数^[16]。根据粒子浓度的概念,粒子引导者更新步骤如下:

步骤一 对于可行区域 F 两个粒子 \vec{x}_i 、 \vec{x}_j , 如果满足以下条件,表示 \vec{x}_i Pareto 占优 \vec{x}_j , $\forall k \in \{1,2,\dots,M\}$, $f_k(\vec{x}_i) \leq f_k(\vec{x}_j)$ 且 $\exists g \in \{1,2,\dots,M\}$, $f_g(\vec{x}_i) < f_g(\vec{x}_j)$

步骤二 初始化 $x\vec{p}_i(t)$ 和 $x_i(t+1)$ 的个体引导者为其自身^[17]。

步骤三 更新规则 L ,从最高的粒子浓度的粒子群中选择粒子 $\vec{x}_r(t)$,将该个体引导者 $x\vec{p}_r(t)$ 与群中其他粒子进行占优比较, $x\vec{p}_r(t)$ 不占优删除 $\vec{x}_r(t)$ 和 $x\vec{p}_r(t)$ 。反之亦然,如图1所示粒子个体引导者更新过程^[18]。

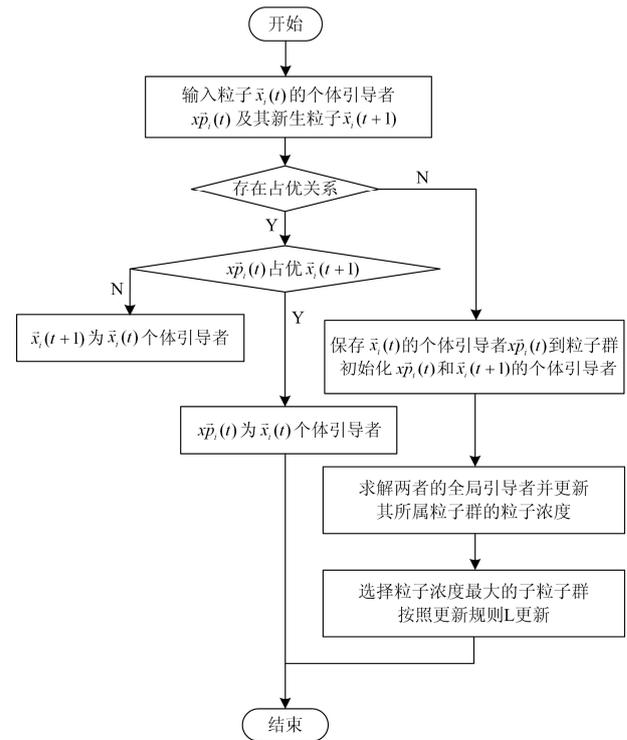


图1 粒子个体引导者更新流程

Fig. 1 Particle individual guide update process

2.3 系统优化算法

把粒子的全局引导者选择和更新结合起来，以最小角度的 MOPSO 优化算法求解光伏最优模型。算法流程如图 2 所示^[19]。求解步骤如下：

步骤一 输入配电网相关参数和约束。

步骤二 粒子的初始速度为 0，随机初始化粒子位置，将初始集初始为空集^[20]。

步骤三 计算每个粒子的目标函数矢量值，并更新储备集。

步骤四 以最小角度对粒子进行全局引导者更新。

步骤五 基于粒子浓度更新个体引导者^[21]；

步骤六 更新粒子的速度和位置；

步骤七 确定迭代次数，如果满足，将输出分布式光伏规划结果，否则，将进入步骤三。

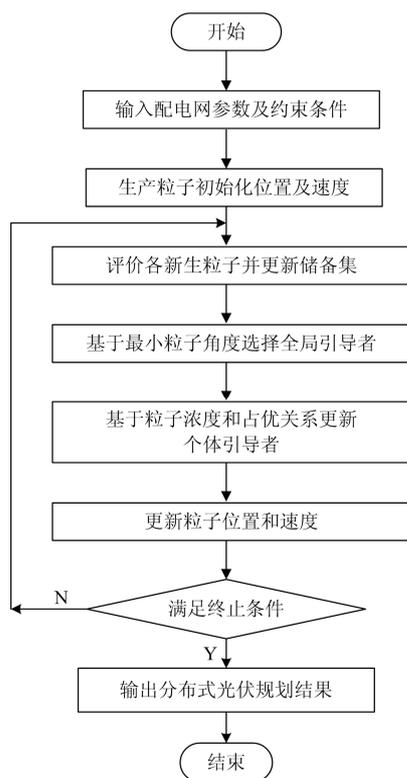


图 2 优化算法流程图

Fig. 2 Flow chart of optimization algorithm

3 仿真分析

以 IEEE33 节点系统为仿真对象的拓扑图，如图 3 所示，有 33 个节点和 32 个支路，线型是架空线路类型，分布式光伏运行在没有无功的状态。要想每个节点的三相不平衡小于 15%，节点 4 的负荷改为[45, 50, 35]，节点 15 的负荷改为[20, 19+j3, 20+j3]。总有功 3 785 kW，总无功 2 246 kvar。

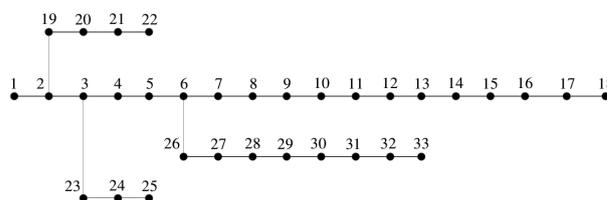


图 3 IEEE33 节点拓扑图

Fig. 3 IEEE33 node topology

根据基于最小角度的 MOPSO 优化算法，通过 Matlab 仿真求解配电网分布式光伏功率优化配置方案^[22]。使系统光伏容量比、电压稳定裕度、系统的网络损耗达到最优水平。在分布式光伏接入优化配置中，考虑了三相不平衡，这对于改善配电网的三相不平衡、线损及设备寿命都有很大帮助。

考虑到三相不平衡约束影响配电网光伏接入优化配置，设计 3 个方案，方案 1 忽视三相不平衡度约束，方案 2 整个系统的三相不平衡度小于 15%。方案 3 中每个节点的三相不平衡度小于 15%。三种方案的分布式光伏优化配置结果如图 4、图 5、图 6 所示。

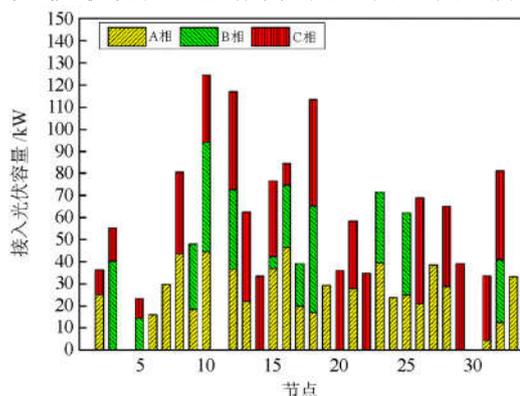


图 4 方案 1 三相分布式光伏接入优化规划结果

Fig. 4 Scheme 1 three-phase distributed photovoltaic access optimization planning results

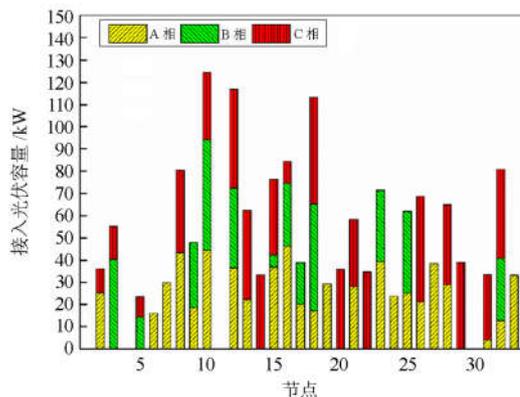


图 5 方案 2 三相分布式光伏接入优化规划结果

Fig. 5 Scheme 2 three-phase distributed photovoltaic access optimization planning results

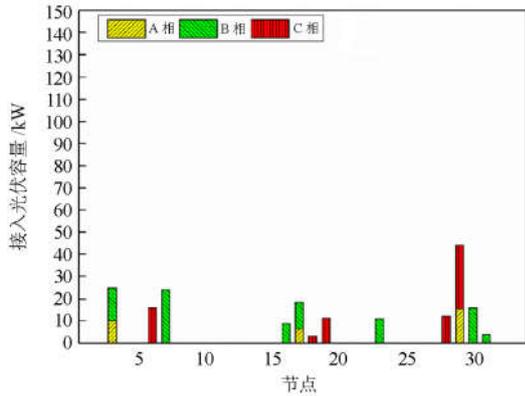


图 6 方案 3 三相分布式光伏接入优化规划结果
 Fig. 6 Scheme 3 three-phase distributed photovoltaic access optimization planning results

分布式光伏三相之间的优化配置根据负载和线路参数因素而有很大的不同。重负荷节点接入分布式容量大，方案 1 和 2 分布式光伏的总容量相近，但是优化配置方案是完全不同的。方案 3 中三相不平衡约束限制每一个节点，光伏接入容量减少非常明显。每种方案电网中每个节点电压比较如图 7、图 8、图 9 所示。

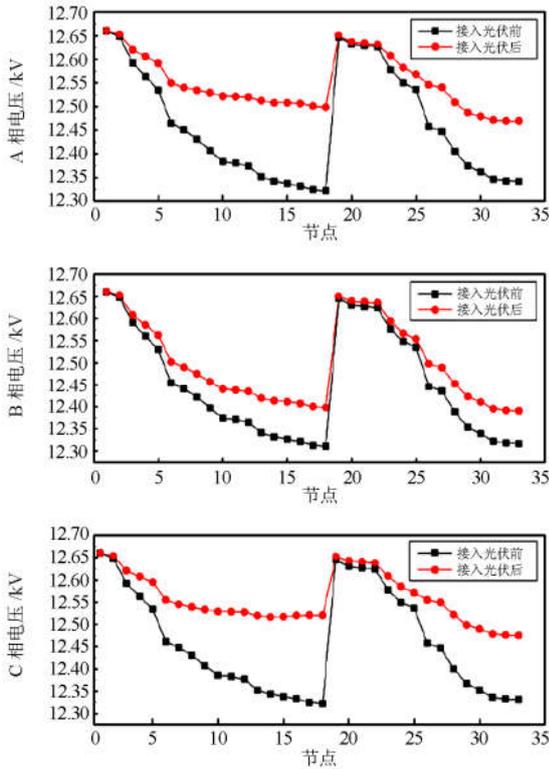


图 7 方案 1 光伏接入对配电网电压影响
 Fig. 7 Scheme 1 PV access impact on distribution network voltage

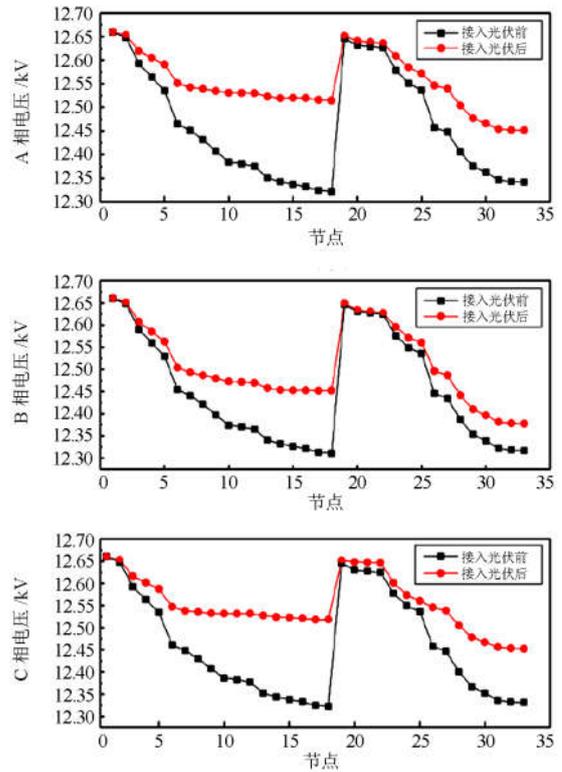


图 8 方案 2 光伏接入对配电网电压影响
 Fig. 8 Scheme 2 PV access impact on distribution network voltage

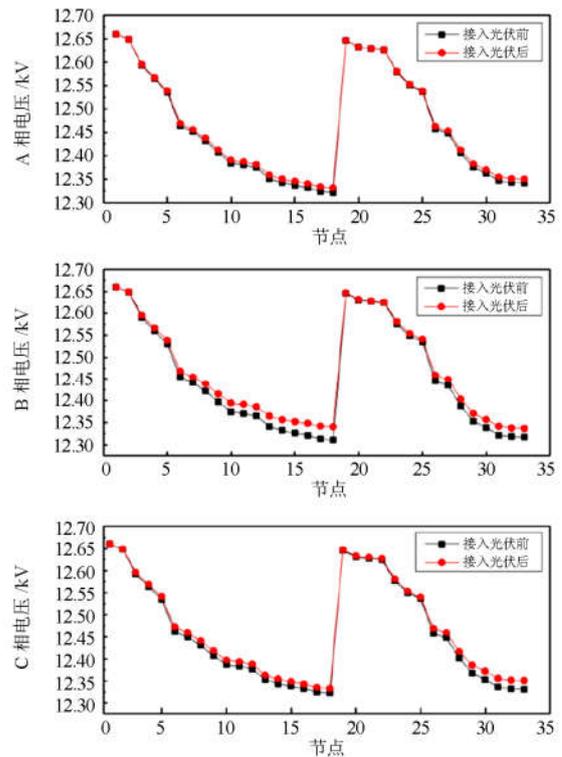


图 9 方案 3 光伏接入对配电网电压影响
 Fig. 9 Scheme 3 PV access impact on distribution network voltage

充分利用分布式光伏的接入可以有效地提高系统节点的电压幅度。在辐射状网络中, 分布式光伏接入容量越大, 每个节点的电压上升越高, 叶节点中的电压上升高于非叶节点的电压上升。与方案 1 和 2 相比, 方案 3 接入较小光电压容量, 并对每个节点的电压上升产生很小的影响。表 1 所示三种方案下电网的电压稳定裕度、网络损耗和光伏容量比等。

表 1 不同方案下光伏配置优化情况

Table 1 Optimizing photovoltaic configuration under different schemes

方案	无光伏	方案 1	方案 2	方案 3
电压裕度	0.893 4	0.917 0	0.9132	0.899 5
网络损耗	0.061 4+	0.030 9+	0.031 8+	0.055 4+
	0.039 6i	0.020 5i	0.021 2i	0.035 7i
光伏容量比	0	45.95%	42.67%	5.13%
系统三相不平衡度	1.5393%	10.0999%	10.4957%	1.2222%
节点三相不平衡	6.6897%	194.0357%	165.7415%	13.8602%

IEEE33 节点配电系统的三相负载相对平衡, 原系统的三相不平衡度低至 1.5393%, 节点最大三相不平衡度 6.6897%。但是, 分布式光伏非对称接入使得三相不平衡增加。方案 1 中, 系统节点三相的不平衡度最大, 方案 2 略低, 但方案 3 的每个节点三相不平衡度小于 15%。

为了满足日益严格的三相不平衡约束, 系统通过控制光伏接入量来实现更高的安全运行目标。从而降低了光伏容量比。方案 3 的光伏容量比仅为 5.13%, 均低于方案 1 和方案 2 超过 40%。由于光伏接入总量的减少, 改善程度降低。因此, 方案 1 和方案 2 优化目标函数值高于方案 3, 但合理的光伏接入改善了整个系统。

4 结语

在考虑三相不平衡的基础上, 本文提出了分布式光伏接入配电网的优化配置, 并建立分布式光伏多目标最优配置模型, 使用最小角度多目标粒子群算法求解, 通过 Matlab 仿真对系统模型和方法进行有效值验证。结果表明, 配电系统三相不平衡可以得到有效改善, 降低电网互联对电网的影响。鉴于目前的实验室设备和数据规模, 本文仍处于初期阶段, 在此基础上, 方案的逐步改进和完善将成为下一步研究的重点。

参考文献

[1] 刘文军, 仇彦军, 孙立臣. 500 kV 输电线路杆塔接地不同环境下优化降阻方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 41(13): 88-106.

- LIU Wenjun, QIU Yanjun, SUN Lichen. 500 kV transmission line tower grounding grid optimal resistance reduction scheme under different environment[J]. Power System Protection and Control, 2018, 41(13): 88-106.
- [2] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
- WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.
- [3] 崔弘, 郭熠昀, 夏成军. 考虑环境效益的分布式电源优化配置研究[J]. 东北电力, 2010, 38(12): 1968-1971.
- CUI Hong, GUO Yiyun, XIA Chengjun. Study on distributed power supply optimal configuration considering environmental benefits[J]. Northeast Electric Power, 2010, 38(12): 1968-1971.
- [4] 贺志华, 程若发, 杨宏超. 基于多智能体遗传算法的微电网优化策略研究[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(2): 126-128.
- HE Zhihua, CHENG Ruofa, YANG Hongchao. Research on optimization strategy of microgrid based on multi-agent genetic algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(2): 126-128.
- [5] 王秀丽, 赵兴勇, 曹建文. 基于改进粒子群算法的分布式电源选址定容优化设计[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(3): 355-360.
- WANG Xiuli, ZHAO Xingyong, CAO Jianwen. Location and capacity optimization design of distributed generation based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(3): 355-360.
- [6] 阎鼎, 包海龙, 程浩忠. 配电网中分布式电源最大准入容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 16-20.
- YAN Ding, BAO Hailong, CHENG Haozhong. Optimal Allocation of maximum access capacity of distributed power supply in distribution network[J]. Proceedings of CSU-EPSC, 2015, 27(10): 16-20.
- [7] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36.
- HAN Zhonghe, QI Chao, XIANG Peng, et al. Benefit analysis and comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 31-36.

- [8] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 41(13): 41-47.
XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Reliability evaluation under single-phase-to-ground fault of cable distribution network with different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 41(13): 41-47.
- [9] 王玉梅, 吴志明. 分布式电源接入配电网的最佳位置和容量研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(21): 65-70.
WANG Yumei, WU Zhiming. Research on optimal position and capacity of distributed power access distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(21): 65-70.
- [10] 盛四清, 张晶晶, 陈玉良. 基于改进二进制蝙蝠算法的独立型微网容量优化配置[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 121-128.
SHENG Siqing, ZHANG Jingjing, CHEN Yuliang. Optimal capacity configuration of independent microgrid based on improved binary bat algorithms[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 121-128.
- [11] BOUBZIZI S, ABID H, ELHAJJAJ A, et al. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 214-225. DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
- [12] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [13] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [14] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [15] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [16] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [17] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [18] ZHU Ziming, CHEN Xindu, HUANG Shenneng, et al. The process of wavy fiber deposition via auxiliary electrodes in near-field electrospinning[J]. Applied Physics A, 2015, 120(4): 234-241.
- [19] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI P C. Clustering using a combination of particle swarm optimization and k-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [20] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [21] LI Zhou, ZHAN Ruopei, LI Yazhou, et al. Recent developments in HVDC transmission systems to support renewable energy integration[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 5(5): 375-382.
- [22] WANG Changlong, DARGAVILLE R, JEPPESEN M, et al. Power system decarbonisation with global energy interconnection-a case study on the economic viability of international transmission network in Australasia[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 5(4): 507-519.

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-04-10

作者简介:

吴斌(1968—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: yyju245@163.com

单来支(1975—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

王庆(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 张爱琴)