

DOI: 10.7667/PSPC152083

改善低压农网电压质量的分布式光伏电源优化配置方法

张战彬¹, 段 珺¹, 石磊磊¹, 韩胜峰¹, 张 俊¹, 陈 岩¹, 刘延华²

(1. 国网河北省电力公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要: 为解决低压农网电压偏低问题, 提出一种改善电压质量的利用遗传算法优化分布式光伏电源配置的方法。首先建立树状型结构电网的网基邻接表, 推导出各个节点所带总负荷, 得到光伏接入前后的各节点电压计算方法。然后建立以分布式光伏电源容量配置最小、电网节点电压偏差最小为目标的目标函数和考虑电压偏差范围、配置容量限制的约束条件。最后构建基于遗传算法的分布式光伏电源优化配置方法, 并通过实际算例进行验证分析。仿真结果表明, 该方法在不改变电网架构和增加补偿设备的情况下, 通过合理配置光伏电源能有效改善电网各节点的电压偏差。

关键词: 低压电网; 电压质量; 分布式光伏; 遗传算法; 优化配置

Optimal allocation method of distributed photovoltaic power for improving the voltage quality of low voltage rural network

ZHANG Zhanbin¹, DUAN Jun¹, SHI Leilei¹, HAN Shengfeng¹, ZHANG Jun¹, CHEN Yan¹, LIU Yanhua²

(1. Xingtai Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Company, Xingtai 054001, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: In order to solve the lower voltage problem of low voltage rural network, a method for improving the voltage quality based on genetic algorithm to optimize the allocation of distributed photovoltaic power is proposed. Firstly, the network adjacency list of tree structured grid is established, the total load of each node is deduced, and the node voltage calculation method of each node before and after photovoltaic connected is obtained. Then the objective function and constraints are established. The objective function includes least allocation of distributed photovoltaic power capacity and node voltage deviation minimal. The constraint includes voltage deviation range, allocation capacity constraints. The optimization allocation method of distributed photovoltaic power based on genetic algorithm is constructed. And actual example is verified and analyzed. Simulated results show that the proposed method can improve the voltage deviation of each node in the network through the rational allocation of photovoltaic power without changing the grid structure and increasing the compensation equipment.

Key words: low voltage power network; voltage quality; distributed photovoltaic; genetic algorithm; optimal allocation

0 引言

低压农网配电线路较长、分支结构复杂, 部分配变低压侧与用户侧经常出现负荷高峰期电压过低的问题, 电压质量问题突出。改善低压农网电压质量的常规手段主要有提升供电能力、调压和无功补偿等。文献[1]针对变电站选址的优化问题, 以地理信息系统(GIS)为基础, 将投资费用与年运行费用的最小值作为目标函数, 采用改进微分进化算法对变电站的位置和容量进行优化。文献[2]针对现有配电网如何优化和规划问题, 提出一种基于最大供电能

力的新规划方法。文献[3]以变压器分接头位置作为等式约束条件, 以电能损耗和投资费用最小为目标, 基于改进进化策略对配电网无功规划模型进行了优化求解。文献[4]提出一种基于改进遗传算法和准动态规划法的两层优化算法, 以兼顾算法的寻优速度和搜索精度。文献[5]提出一种多 DSTATCOM 与 TSC 相结合的两级无功补偿控制方法。随着新能源利用技术的发展, 越来越多的分布式电源接入配电网, 学者开始关注含分布式电源的优化配置问题^[6-8], 并对含分布式电源的配电网无功优化问题展开研究。文献[9]建立以降低系统网损、抑制电压波

动为综合目标的含分布式电源的配电网模糊无功优化模型,采用量子混合蛙跳算法求解;文献[10]采用区间算法求解含分布式电源的配电网无功优化。文献[11]建立了以无功补偿方案全寿命周期净收益现值为目标函数的配电网无功规划模型,实现用较少无功补偿投资满足配电网的无功需求的目的。虽然通过无功补偿方式可实现电压调节,但对于低压农网来说,电压偏低主要由有功损耗造成,仅用无功补偿方式效果不明显。而且文献[9-11]所提无功优化方法的前提是分布式电源无功输出可控,而实际应用的分布式光伏一般只提供有功输出,因此上述方法不适用改善低压农网电压质量问题。相比城市,农村地区户用屋顶产权清晰,且国家正在实施光伏扶贫工程,分布式光伏接入低压农网越来越多。可利用分布式光伏有功输出,实现低压农网的电压调节。本文建立以分布式光伏电源容量配置最小、电网节点电压偏差最小为目标的目标函数,通过遗传算法^[12]优化分布式光伏电源位置和容量,在不改变网架结构和不增加补偿设备的情况下,实现低压农网电压质量改善的目的。通过实际算例,验证了所提方法的有效性。

1 分布式光伏电源的低压农网电压计算方法

(1) 光伏电源接入前

低压农网多为树状型结构,如图1所示。

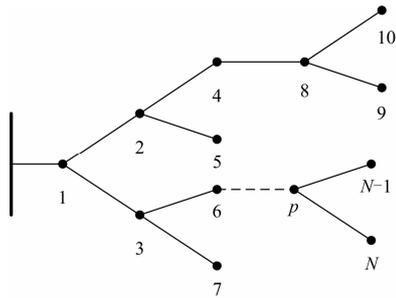


图1 农村低压树状型结构电网

Fig. 1 Tree structure of low voltage power network in rural

根据低压农网实际状况,其各节点间线路较短,可忽略线路损耗;负荷功率因数很高,且线路电抗较小,可忽略负荷的无功损耗。

设图1所示网络有 N 个节点,第 p 个节点所带负荷为 $P_p(p=1, 2, \dots, N)$,网络上第 p 个节点的电压为 $U_p(p=1, 2, \dots, N)$, U_1 为始端电压,其与配电台区连接。定义流向负载的潮流方向为正。

针对树状型结构电网,为求取网络各节点电压,本文通过建立网基邻接表给出计算各节点所带总负荷的方法。

对于 N 个节点的树状型结构电网,可得到 N 行3列的网基邻接表DT。

$$DT = \begin{bmatrix} dt_{11} & dt_{12} & dt_{13} \\ dt_{21} & dt_{22} & dt_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ dt_{p1} & dt_{p2} & dt_{p3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ dt_{N1} & dt_{N2} & dt_{N3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

网基邻接表DT每行的第1列元素是与该行对应节点相邻的逆潮流方向的节点,简称上节点;每行的第2、3列元素是与该行对应节点相邻的顺潮流方向的节点,简称下节点。若该行对应节点无相邻的上节点,表示该节点为始端节点,该行第1列元素用-1代替;若该行对应节点有2个相邻的下节点,表示该节点为T节点;若该行对应节点有1个相邻的下节点,表示该节点为普通节点,该行第3列元素用-1代替;若该行对应节点无相邻的下节点,表示该节点为末端节点,该行第2、3列元素用-1代替。

计算树状型结构电网各节点所带总负荷的步骤如下:

第1步,依次搜索 dt_{p2} 、 dt_{p3} 均为-1的行,该行对应节点所带总负荷为该节点所带负荷。

第2步,依次搜索 dt_{p2} 、 dt_{p3} 均为第1步得到的节点的行,或者 dt_{p2} 为第1步得到的节点, dt_{p3} 为-1的行,则该行对应节点所带总负荷为该行节点所带负荷与 dt_{p2} 、 dt_{p3} 两个节点所带总负荷(若 dt_{p3} 为-1,则其所带总负荷为0)之和。

第3步,依次搜索 dt_{p2} 、 dt_{p3} 均为前2步得到的节点的行,或者 dt_{p2} 为第2步得到的节点, dt_{p3} 为-1的行,则该行对应节点所带总负荷为该行节点所带负荷与 dt_{p2} 、 dt_{p3} 两个节点所带总负荷(若 dt_{p3} 为-1,则其所带总负荷为0)之和。

第4步,依次搜索 dt_{p2} 、 dt_{p3} 均为本步之前得到的节点的行,或者 dt_{p2} 为上1步得到的节点, dt_{p3} 为-1的行,则该行对应节点所带总负荷为该行节点所带负荷与 dt_{p2} 、 dt_{p3} 两个节点所带总负荷(若 dt_{p3} 为-1,则其所带总负荷为0)之和;直到所有行搜索完毕。

在获得网络所有节点所带总负荷的基础上,本文采用式(2)计算第 i 个节点的节点电压 U_i 。

$$U_i = U_j - \frac{P_i^* R_{j,i}}{U_j} \quad (2)$$

式中: j 是第 i 个节点的上节点; P_i^* 是第 i 个节点所带总负荷; U_j 是第 j 个节点的节点电压; $R_{j,i}$ 是第 i 与第 j 个节点间的线路电阻。

(2) 光伏电源接入后

由于分布式光伏电源发出无功很少, 本文忽略其无功输出。当有一个分布式光伏电源接入时, 如从第 i 个节点接入, 容量为 P_{PV} , 则认为第 i 个节点所带负荷变为 $P_i - P_{PV}$ 。当有多个分布式光伏电源接入时, 将未接入光伏电源的节点的光伏发电容量按 0 考虑, 则认为所有节点均接入了光伏电源。第 i 个节点接入的光伏容量记为 P_{PV_i} , 其所带负荷变为 $P_i - P_{PV_i}$ 。

接入光伏之后, 相当于各节点所带负荷发生了变化, 此时, 根据计及光伏发电容量的各节点所带负荷计算各节点所带总负荷, 然后根据式(2)得到各节点电压。

2 分布式光伏电源优化配置模型

2.1 目标函数

(1) 分布式光伏电源配置容量

以系统中配置最小容量的分布式光伏电源为目标, 建立如下目标函数

$$\min S = \sum_{i=1}^N \mu_i P_{PV_i} \quad (3)$$

式中: μ_i 为节点是否接入分布式光伏, μ_i 为 1 时表示该节点接入分布式光伏, μ_i 为 0 时表示该节点不接入分布式光伏; P_{PV_i} 为第 i 个节点接入分布式光伏电源容量; N 为系统总节点数。

(2) 系统节点电压偏差

以系统各节点整体电压偏差最小为目标, 建立如下目标函数

$$\min \Delta U = \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_i - U_0}{U_0} \right)^2 \quad (4)$$

式中: U_0 为系统额定电压; U_i 为该节点实际电压; N 为系统总节点数。

(3) 综合目标函数

将分布式光伏电源配置容量最小和系统节点电压偏差最小两个目标函数进行通过权重系数 α 转换为单目标函数

$$\min f = \min \left\{ \alpha \left[\frac{S}{\sum_{i=1}^N P_{Li}} \right]^2 + (1-\alpha) \Delta U \right\} \quad (5)$$

式中: $\sum_{i=1}^N P_{Li}$ 为系统负荷总容量, α 的取值考虑分布式光伏电源配置容量与系统节点电压偏差在优化中比重, 本文取 0.4。

2.2 约束条件

约束条件主要从节点电压、安装节点分布式光伏电源容量及系统允许接入分布式光伏电源总容量来考虑。这些约束条件均为不等式约束。

(1) 节点电压限值约束

由于分布式光伏接入后可能导致某些节点电压越限, 因此需要限制在一定范围内。

$$\Delta U_{i\min} \leq \frac{U_i - U_0}{U_0} \leq \Delta U_{i\max} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中: $\Delta U_{i\min}$ 为电压下限值; $\Delta U_{i\max}$ 为电压上限值。本文 $\Delta U_{i\min}$ 、 $\Delta U_{i\max}$ 分别取 -5%, +5%。

(2) 系统允许接入分布式光伏电源总容量约束

分布式光伏电源的出力具有很强的随机性, 过高容量的分布式光伏电源并网, 可能会对电网造成负面影响, 因此需要限制在一定范围内。

$$S \leq \eta \sum_{i=1}^N P_{Li} \quad (8)$$

式中: S 为接入分布式光伏电源总容量; $\sum_{i=1}^N P_{Li}$ 为系统负荷总容量; η 为分布式光伏电源接入总容量占负荷总容量的比例。一般接入低压 380V 农网的分布式光伏设计为不可逆并网方式, 即不能倒送功率。因此, 系统允许接入分布式光伏电源总容量最大为系统负荷总容量, 本文取 90% 的系统负荷总容量, 即 η 取 0.9。

(3) 节点接入分布式光伏电源容量约束

$$0 \leq P_{PV_i} \leq P_{PV_{i\max}} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中: P_{PV_i} 为第 i 个节点的分布式光伏电源容量; $P_{PV_{i\max}}$ 为第 i 个节点允许接入的分布式光伏电源最大容量。每个节点接入光伏的平均容量最大为系统平均负荷容量, 考虑节点接入分布式光伏的离散性, 本文接入光伏的最大容量按系统节点平均负荷容量的 2 倍考虑。

3 分布式光伏电源优化配置方法

本文利用遗传算法对分布式光伏电源进行优化配置。

(1) 编码

每个个体由控制基因和参数基因两部分构成，均采用二进制编码。控制基因表示节点是否接入光伏，其个数由节点数确定，每个控制基因用 1 位二进制数表示，其中“1”表示该节点接入分布式光伏电源，“0”表示该节点不接入分布式光伏电源；参数基因表示节点接入分布式光伏电源容量，其个数由节点数确定，每个参数基因根据节点允许接入的最大容量确定用几位二进制数表示。

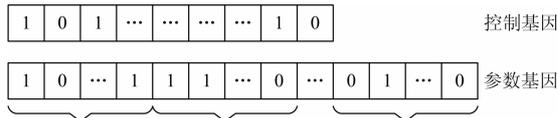


图 2 遗传算法编码及基因结构

Fig. 2 Coding and genetic structure of GA

(2) 初始种群

初始种群可通过随机赋值产生，但随机产生的个体很难同时满足多个约束，因此需要根据约束条件对随机产生的初始种群进行判断，若有些个体不满足约束条件，则需要重新生成，直到全部满足约束条件为止。

(3) 适应度函数

遗传算法中以个体适应度的大小来评定个体的优劣程度，从而决定其遗传机会的大小。根据综合目标函数构建适应度函数如式(9)所示。综合目标函数以最小为优化目标，因此个体适应度值越小越好。

$$F = \begin{cases} 10 & S \leq 0 \\ \alpha \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^N P_{Li}} \right)^2 + (1-\alpha)\Delta U & S > 0 \end{cases} \quad (9)$$

(4) 选择操作

利用选择算子对种群个体进行筛选，使得优势个体能够遗传到下一代，在选择过程中，主要标准是适应度小的个体被选中的概率更大，适应度大的个体将淘汰。

(5) 交叉操作

交叉是让两个个体的基因部分按照一定的交叉概率作交换，然后生成两个新个体。

(6) 变异操作

变异是让个体按照一定的变异概率进行变异，

然后生成一个新个体。

(7) 迭代终止

每当个体有变化时，都需要进行迭代终止判断，迭代终止可分为迭代条件和迭代次数。当适应度不再改善或达到迭代上限时，停止迭代，输出最优解。

整个遗传算法的流程如图 3 所示。

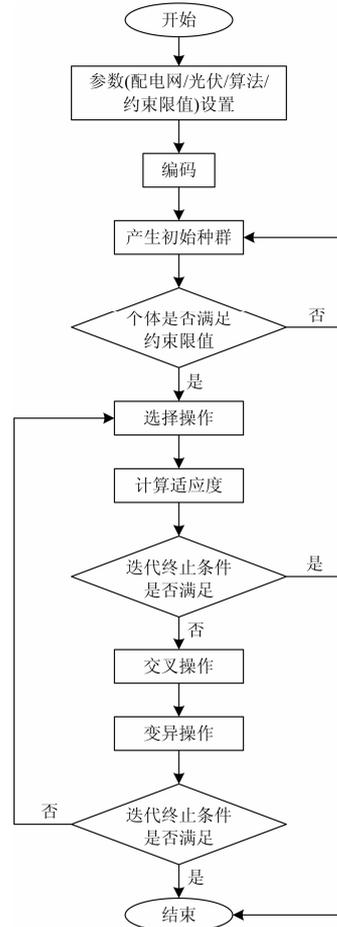


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

4 仿真验证

以邢台地区某光伏扶贫村低压电网为例，该村网络结构如图 4 所示。网络电压等级为 380 V，线

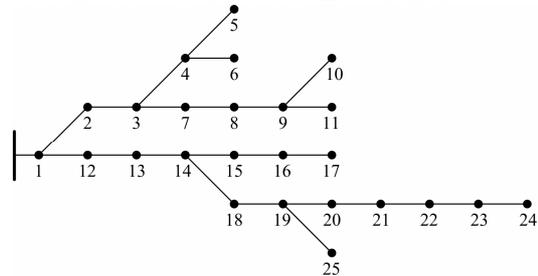


图 4 某村网络结构图

Fig. 4 Network structure of a village

路型号为 LGJ-35, 线路单位长度阻抗为 $0.85+j0.417 \Omega/\text{km}$ 。该村共有 25 个水泥杆塔, 作为网络节点, 各节点线路长度如表 1 所示。每个节点所带用户数如表 2 所示, 每个用户消耗的有功功率随季节变化差异较大, 在 200~500 W 之间, 消耗无功功率为 0。

根据图 4 的网络结构建立网基邻接表 DT 为

$$DT = \begin{bmatrix} -1 & 2 & 12 \\ 1 & 3 & -1 \\ 2 & 4 & 7 \\ 3 & 5 & 6 \\ 4 & -1 & -1 \\ 4 & -1 & -1 \\ 3 & 8 & -1 \\ 7 & 9 & -1 \\ 8 & 10 & 11 \\ 9 & -1 & -1 \\ 9 & -1 & -1 \\ 1 & 13 & -1 \\ 12 & 14 & -1 \\ 13 & 15 & 18 \\ 14 & 16 & -1 \\ 15 & 17 & -1 \\ 16 & -1 & -1 \\ 14 & 19 & -1 \\ 18 & 20 & 25 \\ 19 & 21 & -1 \\ 20 & 22 & -1 \\ 21 & 23 & -1 \\ 22 & 24 & -1 \\ 23 & -1 & -1 \\ 19 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

按每个用户消耗的最大有功功率进行分布式光伏电源配置。由表 2 可得系统负荷总容量为 88 kW, 节点平均负荷为 3.52 kW, 节点允许接入的分布式光伏电源最大容量为 7.04 kW。设分布式光伏电源最小容量为 1.5 kW, 容量范围为 1.5 kW~7 kW, 容量级差为 0.5 kW, 一共有 12 种容量, 编码中每个参数基因用 4 位二进制数表示。

遗传算法的参数设置如下: 初始种群规模为 500, 交叉概率为 0.5, 变异概率为 0.01, 迭代次数为 200 次。根据图 3 所示流程进行仿真, 分布式光伏电源的优化配置如表 3 所示。从表 3 可以看出, 接入光伏电源总容量为 14 kW, 占系统总负荷的 16%。

表 1 各节点线路长度

上节点	下节点	线路长度/km	上节点	下节点	线路长度/km	上节点	下节点	线路长度/km
1	2	0.039	9	10	0.042	14	18	0.034
2	3	0.041	9	11	0.043	18	19	0.036
3	4	0.038	1	12	0.041	19	20	0.042
4	5	0.044	12	13	0.042	20	21	0.035
4	6	0.049	13	14	0.043	21	22	0.032
3	7	0.058	14	15	0.045	22	23	0.030
7	8	0.055	15	16	0.040	23	24	0.041
8	9	0.010	16	17	0.039	19	25	0.049

表 2 节点所带用户数

节点编号	用户数量	节点编号	用户数量	节点编号	用户数量	节点编号	用户数量
1	10	8	3	15	3	22	2
2	12	9	2	16	6	23	11
3	13	10	4	17	3	24	2
4	7	11	4	18	10	25	6
5	12	12	8	19	7		
6	14	13	8	20	10		
7	7	14	4	21	8		

表 3 分布式光伏电源优化配置表

接入节点	17	20	21	22	23	24	25
接入容量/kW	5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

在图 4 网络中接入表 3 配置的分布式光伏电源, 与未接入分布式光伏电源时进行比较。两种情况下各节点电压偏差如图 5 所示。

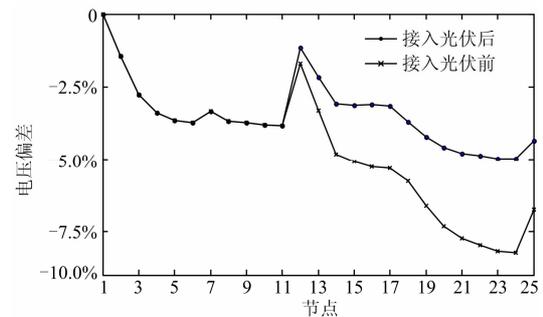


图 5 接入与未接入光伏电源的各节点电压偏差
Fig. 5 Each node voltage deviation of connected or not photovoltaic power

通过图 5 可以看出, 光伏电源经优化配置后, 能明显改善各节点电压偏差, 电压偏差减少到 -5.0% 以内, 满足设定要求。

当节点负荷发生变化时,验证优化配置的分布式光伏电源接入能够满足系统电压要求。以每个用户消耗最小有功功率 200 W 时为例,接入表 3 配置的分布式光伏电源与未接入分布式光伏电源的各节点电压偏差如图 6 所示。

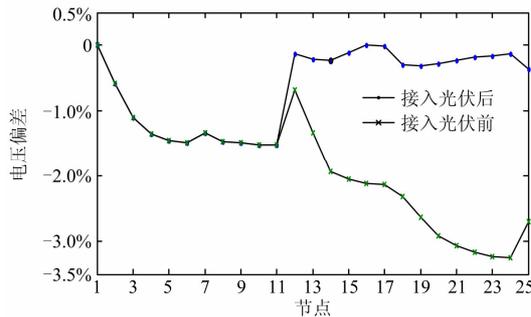


图 6 负荷最小时接入与未接入光伏电源的各节点电压偏差

Fig. 6 Each node voltage deviation of connected or not photovoltaic power at minimum load

通过图 6 可以看出,负荷最小时不接入光伏电源的各节点电压偏差较小(在-3.5%以内),接入按负荷最大时优化配置的分布式光伏电源也不会使各节点电压越上限。

多次仿真实验表明,虽然遗传算法每次优化结果存在一定差异,但目标函数输出始终在 0.245~0.263 之间变化,波动范围为 3.54%,算法稳定性较好。

5 结论

本文针对低压农网电压质量问题,提出一种改善电压质量的利用遗传算法对分布式光伏电源容量进行优化配置的方法。通过实际算例仿真表明,在满足分布式光伏电源配置容量最小、系统电压偏差最小的情况下,接入优化配置的分布式光伏电源,可以改善低压农网各节点电压偏低的问题,提高电压质量。在改善低压农网电压质量方面,本方法最大的优势是无需改变网络架构及增加无功补偿设备。

参考文献

- [1] 马威,李章维,徐毅. 基于 GIS 及改进微分进化算法的变电站选址研究[J]. 机电工程, 2015, 32(5): 684-689.
MA Wei, LI Zhangwei, XU Yi. Substation locating based on GIS and improved differential evolution algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(5): 684-689.
- [2] 肖峻,张婷,张跃,等. 基于最大供电能力的配电网规

- 划理念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 106-113.
- XIAO Jun, ZHANG Ting, ZHANG Yue, et al. TSC-based planning idea and method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 106-113.
- [3] 盛四清,李兴,李欢. 基于改进进化策略的配电网无功规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 68-72.
SHENG Siqing, LI Xing, LI Huan. Reactive power planning of distribution network based on improved evolutionary strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2015, 27(6): 68-72.
- [4] 胡晓阳,王卫平,王主丁,等. 一种实用的配电网无功运行两层优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 14-21.
HU Xiaoyang, WANG Weiping, WANG Zhuding, et al. A practical two-phase optimization method of dynamic var optimization in a distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 14-21.
- [5] 罗书克,张元敏. 低压配用电系统两级无功补偿控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 103-107.
LUO Shuke, ZHANG Yuanmin. Study of two-stage VAR compensation in low voltage distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 103-107.
- [6] 赵金利,于莹莹,李鹏,等. 一种基于锥优化的 DG 优化配置快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 173-179.
ZHAO Jinli, YU Yingying, LI Peng, et al. A fast determination method of DG capacity in distribution network based on conic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 173-179.
- [7] 陈海东. 基于细菌菌落优化算法分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 106-111.
CHEN Haidong. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on bacterial colony optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 106-111.
- [8] 韩璐,李凤婷,周二雄,等. 基于成本-收益的微网分布式能源优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 388-396.
HAN Lu, LI Fengting, ZHOU Erxiong, et al. The distributed energy optimization configuration of micro-grid based on cost-benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2015, 30(14): 388-396.
- [9] 陈光宇, 何健, 施蔚锦, 等. 基于量子混合蛙跳算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(5): 36-41, 46.
CHEN Guangyu, HE Jian, SHI Weijin, et al. Reactive power optimization in distribution network with distributed generators based on quantum shuffled frog leaping algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(5): 36-41, 46.
- [10] 张勇军, 苏杰和, 羿应棋. 基于区间算术的含分布式电源电网无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 21-26.
ZHANG Yongjun, SU Jiehe, YI Yingqi. Reactive power optimization based on interval arithmetic with distributed power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 21-26.
- [11] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [12] 况达, 滕欢, 王博堃, 等. 基于改进遗传算法的蓄电池容量配置及充放电策略研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 90-96.
KUANG Da, TENG Huan, WANG Bokun, et al. Capacity allocation and charging-discharging strategies study of storage battery[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 90-96.
-
- 收稿日期: 2015-11-29; 修回日期: 2016-01-12
作者简介:
张战彬(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为分布式光伏并网及其电能质量问题; Email: xtzhangzhanbin@aliyun.com
段 珺(1969-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量问题;
石磊磊(1985-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量问题。
- (编辑 张爱琴)