

DOI: 10.7667/PSPC151469

基于分区分层前推回代算法的光伏阵列运行状态评估方法

霍富强, 王鹏, 龚晓伟, 焦东东, 葛琪

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 基于光伏阵列规模较大和辐射型网络且集电单元间耦合较弱的特点, 提出了一种基于分区分层前推回代算法的光伏阵列运行状态评估方法, 实现对光伏阵列运行状态的准确评估。重点论述了分区分层前推回代算法原理、节点支路矩阵求解和概率统计方法及评估流程。结合新疆某新建 20 MWp 光伏电站 5 MWp 光伏阵列系统参数, 采用 Matlab7.0 验证该方法。仿真结果表明: 该方法能正确输出 5 MWp 阵列运行状态的评估数据概率分布和评估结果概率密度, 能准确评估阵列运行状态。解决了单一评估算法难以准确评估大规模光伏阵列运行状态的缺陷, 提高了工程实用性。此外, 该方法具有迭代次数少, 收敛速度快, 计算效率高等优点。

关键词: 光伏阵列; 辐射型网络; 分区分层前推回代; 节点支路矩阵; 概率统计

Evaluation method of PV array of running status based on layered and divisional forward and backward algorithm

HUO Fuqiang, WANG Peng, GONG Xiaowei, JIAO Dongdong, GE Qi

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to accurately valuate the running state of the PV array, based on the PV array radial distribution electric network structure and the characteristics of randomness of output power, this paper proposes evaluation method of PV array of running status based on layered and divisional forward and backward algorithm. It discusses mainly the layered and divisional forward and backward algorithm, how to search the branch and node, probability and statistics method and evaluation process. It refers to 5 MWp PV array parameters of the new 20 MWp PV station and uses Matlab7.0 to verify this method. Simulation results show this method can correctly output evaluation data probability distribution and probability density of 5 MWp PV array running state, and can accurately evaluate the running state of PV array. This method solves the problem that single algorithm accurately assess running status of large scale PV arrays. In addition, this method has less number of iterations, fast speed, and high computational efficiency.

Key words: PV array; radial network; forward and backward algorithm; node branch matrix; probability and statistics

0 引言

近年来, 光伏发电产业持续健康快速发展。截止 2014 年底, 我国光伏累计并网容量约 25 GWp, 预计 2020 年底将突破 100 GWp, 光伏电能正在由补充电能向替代电能过渡。随着光伏发电应用模式的不断创新, 光伏发电系统运行环境日益复杂化(水光互补、渔光互补及荒山荒坡、煤矿采空区和沙漠化生态恢复与光伏发电结合)且运行要求更高; 光伏阵列是光伏发电系统的“发电机”, 因此, 准确评估光伏阵列运行状态, 有效避免故障及连锁故障发生, 实现光伏发电安全高效运行具有重要的现实意义。

潮流计算是研究电气系统运行状态的基本方

法, 基于潮流计算的电气系统运行状态评估具有天然的科学性。光伏阵列电气网络结构呈辐射状, 代表性的潮流算法由前推回代法^[1-2]、改进牛顿法^[3]、回路法^[4]等。文献[1-2]提出了前推回代与牛顿法结合计算辐射网络电气特性的方法, 减少迭代次数, 提高计算速率; 文献[3]提出了改进的前推回代算法, 节点和编号无关, 计算过程简单; 文献[4]提出了回路算法, 计算与回路相关, 计算精确但复杂; 文献[5]利用交替迭代算法将电压功率损耗交替迭代, 减少迭代次数, 提高计算精度; 文献[6]将复杂网络结构分层, 按层计算各支路功率损耗, 提高计算速度。

基于光伏阵列辐射型网络且集电单元间耦合较

弱及输出功率随机特点, 本文提出一种基于分区分层前推回代算法的光伏阵列运行状态评估方法。以 1 MWp 集电单元为基本单位进行光伏阵列区域划分, 根据分区分层前推回代算法计算 1 MWp 阵列最首端功率即逆变器输入端功率和最末端电压即阵列端电压, 结合检测电流计算出 1 MWp 阵列的功率因数和发电效率, 采用概率统计方法全面评估 5 MWp 光伏阵列运行状态, 结合新疆某新建 20 MWp 光伏电站 5 MWp 阵列的系统参数, 采用 Matlab7.0 验证该评估方法的有效性。

1 光伏阵列运行状态评估特征量

建立光伏阵列运行状态评估的关键特征量功率因数和发电效率, 根据功率因数和发电效率的概率分布全面评估光伏阵列运行状态, 并将概率分布区间量化为“优良[0.8, 1)”、“合格”[0.6, 0.8)、“注意[0.5, 0.6)”, 以此表征光伏阵列的不同运行状态。

2 分区分层前推回代评估方法

2.1 分区分层前推回代评估方法

光伏阵列电气网络结构呈辐射状且 MWp 集电单元间电气耦合较弱及 1 MWp 阵列布局呈模块化; 光伏电站阵列规模较大且运行状态受环境因素、阴影、灰尘、失配等因素影响, 因此采用分区思路以 1 MWp 集电单元为基本单位进行区域划分^[7-8], 使得参与状态评估的阵列运行状态更接近实际, 提高了计算效率和准确性; 解决了单一评估算法难以准确评估大规模光伏阵列运行状态的缺陷, 提高了工程实用性。

基于光伏阵列辐射型网络结构且规模较大特点和传统前推回代算法计算速度较慢的局限性, 提出了分区分层前推回代算法, 按网络结构层次建立节点支路矩阵, 采用多叉树遍历法搜索支路和节点, 根据功率和电压满足收敛条件输出阵列最首端功率和最末端电压; 计算过程不需要对节点和支路重新编号。每层支路及支路的首端和末端节点相互独立^[9-10], 可以分层计算; 同一层不同支路的参数彼此不相关, 可以并行计算。因此, 分区分层前推回代算法特别适用于大规模层次清晰的电气网络结构。1 MWp 光伏阵列电气网络结构如图 1 所示, 支路和节点层次清晰, 共 274 个节点, 273 条支路; 网络结构清晰, 可分 3 层, 支路 1 属于 L1 层(逆变层), 支路 2 至 17 属于 L2 层(汇流层), 支路 18 至 273 属于 L3 层(光伏组串层)。

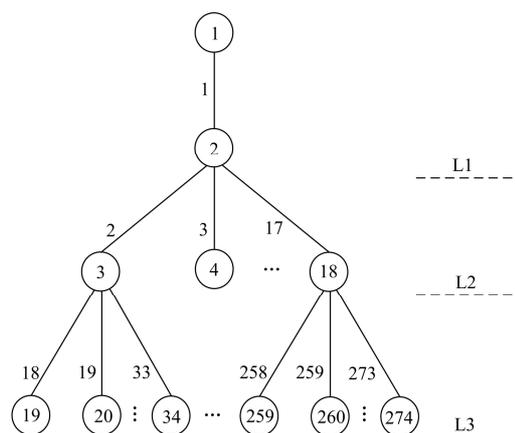


图 1 1 MWp 光伏阵列电气网络结构

Fig. 1 1MWp PV array electric network structure

根据分区分层前推回代算法计算出阵列最首端功率即逆变器输入端功率和最末端电压即光伏阵列端电压, 辅以实时电流计算出 1 MWp 阵列的功率因数和发电效率。功率因数和发电效率随机变化且遵循均匀分布, 分布函数如式(1)所示。采用概率统计方法计算出整体阵列功率因数和发电效率的概率密度和分布函数, 根据概率密度分布情况综合评估整体光伏阵列运行状态^[11-13], 将概率分布区间量化为“优良”、“合格”、“注意”, 以概率分布或分布函数形式展示光伏阵列不同运行状态。

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha} & \alpha \leq x < \beta \\ 1 & x \geq \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F(x)$ 为概率分布函数; x 为评估特征量(发电效率或功率因数); β 和 α 是评估特征量上限值和下限值。

2.2 分区分层前推回代评估方法

在节点支路矩阵中, 行表示节点号, 列表示支路号; 矩阵元素为 1, 则节点和支路相连, 若元素为 0, 则不相连^[14-16]; 每列有 2 个元素 1, 行号分别为支路的 2 个节点。1 MWp 光伏阵列的节点支路矩阵 A 如式(2)所示, A 为 274 × 273 矩阵。基于矩阵 A 查找参与计算的节点和支路; 以元素 $A_{12 \times 12}^1$ 为例, 其展开矩阵如式(3)所示, 从节点 2 出发, 即矩阵 A 第 2 行出发, 各列均有元素 1, 表示该节点与 1 至 12 支路均相连; 各列非零元素表示该支路两端节点, 上节点和下节点分别为首端节点和末端节点, 如第 3 列即支路 3 的首端节点和末端节点分别为 2 和 4。沿着既定路径依次查找, 可以查找整个网络的支路和首端及末端情况。

$$A = \begin{pmatrix} A_{12 \times 12}^1 & B_{12 \times 12}^1 & C_{12 \times 12}^1 & \cdots & W_{12 \times 9}^1 \\ A_{12 \times 12}^2 & B_{12 \times 12}^2 & C_{12 \times 12}^2 & \cdots & W_{12 \times 9}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ A_{12 \times 12}^{22} & B_{12 \times 12}^{22} & C_{12 \times 12}^{22} & \cdots & W_{12 \times 9}^{22} \\ A_{12 \times 12}^{23} & B_{12 \times 12}^{23} & C_{12 \times 12}^{23} & \cdots & W_{12 \times 9}^{23} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.3 前推回代主要计算步骤

前推回代即功率前推电压回代，功率前推即节点电压不变且已知末端功率，由末端向首端逐段前推支路功率和功率损耗，最终计算出支路首端功率。电压回代即支路功率不变且已知首端电压，由首端向末端逐段计算支路节点电压和电压损耗，最终计算出末端电压。重复迭代直至功率和电压偏差满足收敛条件。

功率前推：已知网络结构末端功率且节点电压不变，根据支路参数、节点电压和节点支路矩阵计算顺序，向首端方向逐段计算支路功率，简化电路如图 2 所示，支路功率计算如式(4)和式(5)所示。

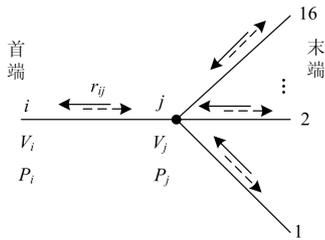


图 2 电气网络结构简化电路图

Fig. 2 Simplified circuit of the electric network structure

$$\Delta S_{ji}^k = \frac{(P_j + P_{sum,j}^k)^2}{V_j^{(k)^2}} r_{ij} \quad (4)$$

$$S_{ji}^k = S_{sum,j}^k + \Delta S_{ji}^k \quad (5)$$

式中： k 为迭代次数； r_{ij} 和 ΔS_{ji} 分别为节点 i 和对应支路的电阻和功率损耗； P_j 和 $P_{sum,j}$ 分别为节点 i 有功功率和所有支路功率； S_{ji} 为节点 i 流向的功率； V_j 为节点 i 电压。

电压回代：已知首端电压且支路功率不变，由首端向末端逐段计算支路节点电压和电压损耗，逐段计算末端电压，简化电路如图 2 所示。光伏发电阵列无功功率和感抗近乎于 0，只需计算纵向电压，电压计算如式(6)和式(7)所示。

$$\Delta V_j^{k+1} = \frac{P_i^k \times r_{ij}}{V_j^{k+1}} \quad (6)$$

$$V_j^{k+1} = \sqrt{(V_i^{k+1} - \Delta V_j^{k+1})(V_i^{k+1} + \Delta V_j^{k+1})} \quad (7)$$

式中： k 为迭代次数； ΔV_j 为节点纵向电压分量； P_i 为 i 流向功率； V_j 为节点电压。

3 分区分层前推回代算法评估流程

分区分层前推回代算法评估流程如图 3 所示，具体步骤如下。

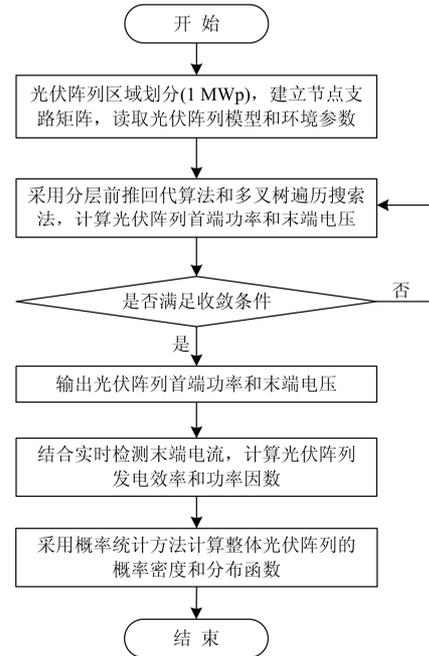


图 3 分区分层前推回代评估流程图

Fig. 3 Layered and divisional forward and backward evaluation process

(1) 以 1 MWp 为基本单位进行光伏阵列区域划分，建立 1 MWp 阵列节点支路矩阵。

(2) 读取 1 MWp 光伏阵列模型和辐照度、温度、湿度和风向等环境参数。

(3) 采用分层前推回代算法和多叉树遍历搜索

法, 计算 1 MWp 阵列首端功率和末端电压, 如果满足收敛条件, 输出该参数; 否则, 继续迭代计算。

(4) 结合末端电流的实时检测电流, 计算 1 MWp 光伏阵列发电效率和功率因数。采用概率统计方法计算出整体阵列功率因数和发电效率的概率密度和分布函数, 将概率分布区间量化为“优良”、“合格”、“注意”, 以概率分布或分布函数形式展示光伏阵列不同运行状态。

4 算法分析

利用 Matlab7.0 对基于分区分层前推回代算法的光伏阵列运行状态评估方法进行仿真验证, 选定新疆某新建 20 MWp 光伏电站新清洗的 5 MWp 光伏阵列, 以 1 MWp 为基本单位划分为 PV1、PV2、PV3、PV4 和 PV5, 1 MWp 电气网络结构如图 2 所示, 环境参数选用 2014 年 10 月 19 日 11:00 至 10 月 20 日 11:00 数据。5 个 1 MWp 光伏阵列部分评估数据(500 次迭代计算)如表 1 所示, 5 MWp 光伏阵列评估数据概率分布区和评估结果概率分布如图 4 和图 5 所示。由表 1 知, 5 个 1 MWp 阵列发电效率和功率因数几乎全部分布在 0.8 至 0.9 区间, 表明每个阵列运行优良。由图 4 知, 5 MWp 阵列综合发电效率和功率因数基本分布在 0.8 至 0.9 区间, 由图 5 中实曲线知, 5 MWp 阵列最大发电容量 4.4 MWp 的概率密度分布在 0.94, 仿真表明: 5 MWp 光伏阵

表 1 运行状态评估数据和结果(部分)

Table 1 Evaluation data and result (portion)

阵列	功率因数	发电效率	结果
PV1	0.88	0.85	优良
	0.89	0.84	优良
	0.85	0.83	优良
	0.89	0.84	优良
PV2	0.90	0.88	优良
	0.88	0.88	优良
	0.88	0.81	优良
	0.86	0.85	优良
PV3	0.88	0.75	合格
	0.89	0.85	优良
	0.89	0.84	优良
	0.90	0.86	优良
PV4	0.90	0.86	优良
	0.89	0.84	优良
	0.89	0.83	优良
	0.85	0.82	优良
PV5	0.89	0.86	优良
	0.90	0.88	优良
	0.82	0.74	合格
	0.87	0.85	优良

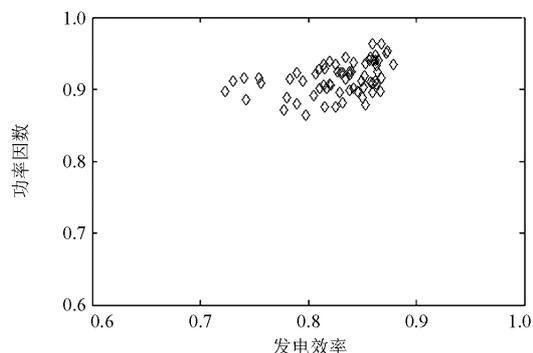


图 4 5 MWp 阵列运行状态评估数据概率分布区图

Fig. 4 5 MWp PV array of running status valuation data probability distribution

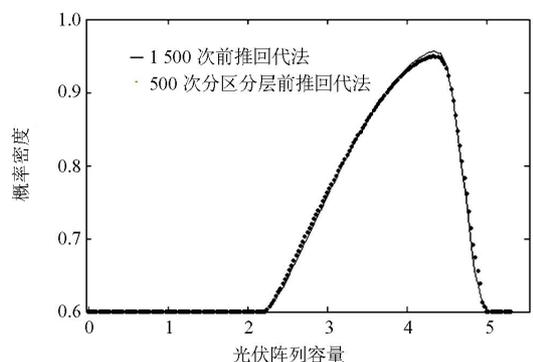


图 5 5 MWp 阵列运行状态评估结果概率分布图

Fig. 5 5 MWp PV array of running status valuation data probability density

列综合运行状态优良, 评估结果和阵列(新清洗)实际运行一致。由图 5 知, 1500 次迭代的前推回代和 500 次迭代的分区分层前推回代算法计算出的阵列运行状态概率密度基本一致, 显然, 分区分层前推回代法可以准确计算阵列运行状态的概率密度, 该方法迭代次数少, 收敛速度快, 计算效率高。

5 结论

基于光伏阵列面积较大和辐射型网络且集电单元间耦合较弱的特点, 提出了基于分区的改进前推回代算法的光伏阵列运行状态评估方法。结合新疆某新建 20 MWp 光伏电站 5 MWp 光伏阵列系统参数, 采用 Matlab7.0 进行仿真验证, 结果表明: 该方法能正确全面反映阵列的运行状态, 解决了单一评估算法难以准确评估大规模光伏阵列运行状态的缺陷, 提高了工程实用性。此外, 该评估方法对研究光伏电站运行维护具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 王振树, 林梅军, 刘岩, 等. 考虑光伏并网的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 178-185.
WANG Zhenshu, LIN Meijun, LIU Yan, et al. Power

- flow algorithm for distribution network with photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 178-185.
- [2] 张尧, 王琴. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 217-220.
ZHANG Yao, WANG Qin. A load flow algorithm for radial distribution power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 217-220.
- [3] 付敏, 金洪彬. 辐射状配电网潮流的改进推回代法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(3): 105-109.
FU Min, JIN Hongbin. Advanced forward and backward sweep algorithm for radial distribution network power flow[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(3): 105-109.
- [4] 王守相, 阮同军, 刘玉田. 配电网潮流计算的回路阻抗法[J]. 电力系统及自动化, 1998, 10(1): 11-16.
WANG Shouxiang, RUAN Tongjun, LIU Yutian. Distribution system power flow based on loop-impedance equations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1998, 10(1): 11-16.
- [5] 谢开贵, 周家启. 树状网络潮流计算的新算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 116-120.
XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. A new load flow algorithm for radial distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 116-120.
- [6] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 76-80.
YAN Wei, LIU Fang, WANG Guanjie, et al. Layer-by-layerback/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 76-80.
- [7] 涂春鸣, 董泰青, 姜飞, 等. 基于分层分区的配电网差异化节能规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 148-154.
TU Chunming, DONG Taiqing, JIANG Fei, et al. Research on differentiated energy saving method of partitioned distribution networks based on bi-level planning[J]. Power system Protection and Control, 2015, 43(14): 148-154.
- [8] 程新功, 厉吉文, 曹立霞, 等. 基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 109-113.
CHENG Xingong, LI Jiwen, CAO Lixia, et al. Multi-objective distributed parallel reactive Power optimization based on subarea division of the power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 109-113.
- [9] 闫丽梅, 谢一冰, 徐建军, 等. 改进的分层前推回代法在分布式电源配电网计算中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 117-123.
YAN Limei, XIE Yibing, XU Jianjun, et al. Improved forward and backward substitution in calculation of power distribution network with distributed generation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 117-123.
- [10] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13.
HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.
- [11] 方鑫, 郭强, 张东霞, 等. 考虑天气不确定性的光伏电站置信容量评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 27-32.
FANG Xin, GUO Qiang, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of photovoltaic generation considering weather uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 27-32.
- [12] 刘宇, 高山, 杨胜春, 等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 127-133.
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 127-133.
- [13] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变 var 量相关性的概率潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 80-87.
CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 80-87.
- [14] 刘畅, 黄民翔. 含多种分布式电源配电网重构优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 13-18.
LIU Chang, HUANG Minxiang. Distribution network reconfiguration with a variety of DGs[J]. Power system Protection and Control, 2013, 41(6): 13-18.
- [15] 范瑞娟, 王倩, 罗强. 一种配电网故障恢复拓扑和潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 23-28.
FAN Ruijuan, WANG Qian, LUO Qiang. A fast topology analysis and power flow calculation algorithm for distribution network service restoration[J]. Power system Protection and Control, 2014, 42(21): 23-28.
- [16] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-129.
ZHANG Limei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-129.

收稿日期: 2015-08-19

作者简介:

霍富强 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电系统、电力系统保护与控制及电力规划; E-mail: huofuqiang020@163.com

王 鹏 (1987-), 男, 本科, 研究方向为光伏发电系统、电力系统保护与控制。E-mail: 18539043388@163.com

(编辑 周金梅)