

DOI: 10.7667/PSPC160574

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

彭光斌¹, 詹红霞¹, 黄培东¹, 张曦², 张宁², 龙飞²

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 重庆市电力公司南岸供电局, 重庆 400060)

摘要: 为了改善配电网络的静态电压稳定性, 提出一种接入分布式电源优化布置的方案。基于 IEEE33 节点配电网络和 Matlab 仿真测试软件平台, 以静态电压稳定指标 L (Voltage Stability Index)和最大电压偏差最小为目标函数, 以最大电压偏差小于 7%为约束条件, 应用自适应粒子群算法(Adaptive Mutation Particle Swarm Optimization Algorithm, AMPSO)对配电网络中 DG 的接入进行优化布置, 从而提高了整个配电网络的静态电压稳定性。并通过重庆某地区的实际配电网络进行实例验证, 证明方案的正确性和可行性。该研究所提出的方案, 对配电网络静态电压稳定性的改善有一定的指导意义。

关键词: 分布式电源; 配电网络; 静态电压稳定指标; IEEE33 节点; Matlab 仿真软件

Improved strategy of the static voltage stability of distribution network based on adaptive particle swarm optimization algorithm for DG

PENG Guangbin¹, ZHAN Hongxia¹, HUANG Peidong¹, ZHANG Xi², ZHANG Ning², LONG Fei²

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;
2. Nan'an Administration of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400060, China)

Abstract: In order to improve the static voltage stability of distribution network, a scheme of distributed generation access optimization is proposed. The conclusions obtained from the test system may be available for multiple-DGs connected to distribution networks. Based on IEEE 33 bus distribution network and MATLAB simulation test software platform, this paper takes the static voltage stability index L and maximum voltage deviation minimum as the objective function, considers the maximum voltage deviation less than 7 percent as the constraint condition, and applies adaptive particle swarm optimization algorithm (adaptive mutation particle swarm optimization algorithm, AMPSO) to optimize the layout of DG in distribution network access, thereby improving the static voltage stability of the entire distribution network. And through the actual distribution network in a certain area of Chongqing for example, the correctness and feasibility of the scheme is proved. The proposed scheme has certain guiding significance to the improvement of the static voltage stability of distribution network.

Key words: distributed generation; distribution network; static voltage stability index; IEEE 33 nodes; Matlab simulation software

0 引言

分布式电源(Distributed Generation, DG)以其灵活性、经济性和对清洁能源的重复利用等诸多优点, 已经成为传统发电系统中不可或缺的补充。它可以减少电能传输时的线路损耗以及由配网升级所增加的费用, 为用户提供了质量好、可靠性高的电能。但 DG 接入配网后, 因为 DG 自身的随机性、发电

控制策略和并网方式等因素, 会对传统配电网络的电能质量造成影响, 特别是电压稳定性问题。文献[1]推导负荷节点电压与分布式发电渗透率的解析表达式, 分析不同 DG 渗透率下的节点电压以及负荷 PV 特性, DG 采用主动无功控制策略对线路电压稳定指标的影响。文献[2-3]推导了能反映配电网各负荷节点电压稳定程度的电压稳定指标, 提出了一种针对配电网的负荷增长策略的电压稳定裕度判定

方法, 但研究者没有给出实例论证, 正确性有待商榷。文献[4]用灵敏度方法, 推导了预防风电汇集系统静态电压失稳的传输极限计算公式, 提出了利用有效短路比作为评价风电汇集系统静态电压稳定性的辅助判据, 结合实际系统的典型案例与调度应用对方法与结论进行了验证, 但没有给出静态电压稳定性改善方案。文献[5-6]提出了一种用于评估大规模风电场接入电网后系统静态电压稳定性的双重电压稳定指标, 但是只针对风电场的分布式电源, 并没有考虑风力发电自身的随机性和控制策略, 所以结论不具有普遍适用性。

鉴于目前对于配电网静态电压稳定性改善方向的研究, 大多还只是停留在静态电压稳定判定公式的推导和定性分析的层面上, 对于改善方案没有太多深入的研究, 所以本文从分布式电源优化布置的方向入手, 通过数学模型和实例验证的方式, 对配电网的静态电压稳定性的改善提出一种合理的方案, 为后续相关方向的研究工作提供了一定的借鉴和参考价值。

1 静态电压稳定指标

经典的静态电压稳定性判断方法, 是根据潮流计算解的存在性判断法。取任意配电网的一段支路, 其潮流情况如图 1。

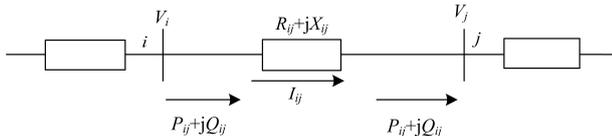


图 1 任意一段支路潮流

Fig. 1 Power flow of any branch

文献[7]中 Jasmon G B 通过研究配网支路的电压稳定性, 较早提出了由两节点配电系统推导而来的电压稳定性指标 L_{ij} 。但在推导过程中, 从网损等值的角度将复杂配网等值成简单的两节点网络, 误差较大并且没有考虑分支情况^[8-9]。针对以上 L_{ij} 的不足, 有学者又提出了一种改进的基于潮流解存在性的电压稳定指标:

$$L_{ij} = \frac{4}{V_i^4} [(P_{ji} X_{ij} - Q_{ji} R_{ij})^2 + (P_{ji} R_{ij} + Q_{ji} X_{ij}) V_i^2] \quad (1)$$

对于含 n 条支路的配电网, 为了判定整个配网的电压稳定性, 应该计算出所有支路的电压稳定指标, 再取其中的最大值为配网的电压稳定指标。由此定义配网电压稳定指标为

$$L = \max \{L_{ij}\} \quad ij \in B_{ij} \quad (2)$$

式中, $ij \in B_{ij}$ 表示配网中所有支路的集合。 L 反映

出配网的电压稳定情况。 L 与 1 差值的绝对值越大, 则配网电压越稳定。对应 L 最大的支路被称为配网最薄弱支路, 当系统发生电压崩溃时, 一定是从最薄弱支路开始的。本文采用该种判定方法作为配电网静态电压稳定判定指标 L 。

2 仿真测试

2.1 仿真流程

整个研究测试流程图如图 2 所示。

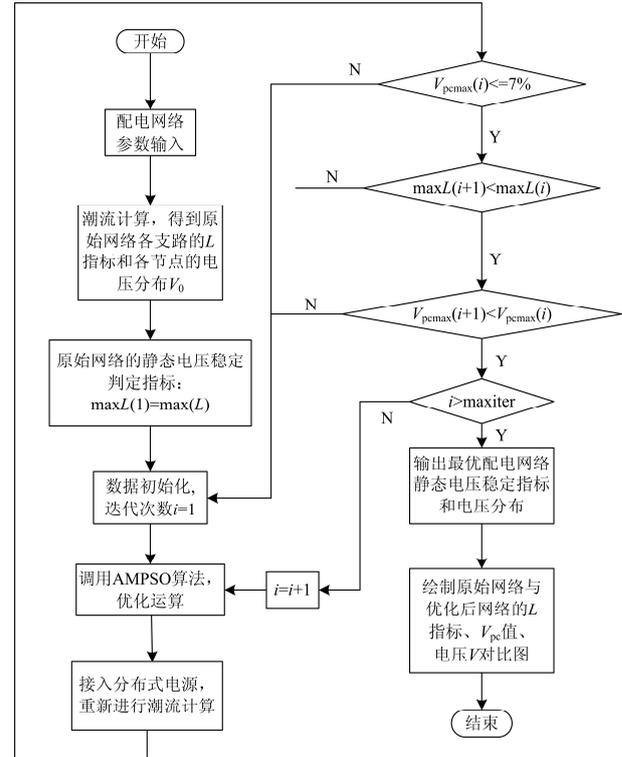


图 2 仿真测试流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation test

2.2 仿真模型

本文应用文献[10]中的 IEEE33 节点配网, 该配网有 32 条支路, 首端基准电压 12.66 kV, 功率基准值取 10 MVA, 总有功负荷为 3715 kW, 总无功负荷为 2300 kvar, 配网结构如图 3 所示。

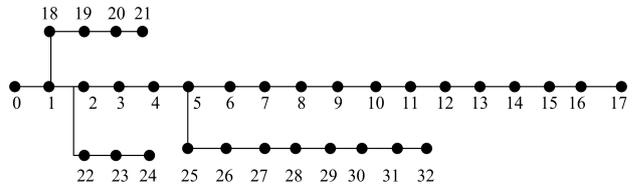


图 3 IEEE33 节点配网

Fig. 3 IEEE 33 nodes distribution network

2.3 参数设置

设置每个节点接入容量为 $m \times 60$, m 为容量

比例, 60 kVA 为容量基数。29 节点的容量最大为 632.46 kVA, 为保证每个节点接入的 DG 容量处于可控范围, 每个节点接入最大容量比例为 10, 即 10×60 kVA。根据 DG 接入总容量不超过上一级总负荷的 25%, 则单个 DG 最大容量为 1092.34 kVA, 配网接入总的 DG 容量也不能超过 1092.34 kVA, 即配网最多接入容量 18×60 kVA。

自适应粒子群优化算法中参数^[11]选取如下: 学习因子 $c_1=2$ 和 $c_2=2$, 惯性权重最大值 $W_{\max}=0.9$, 最小值 $W_{\min}=0.4$, 最大速度 $V_{\max}=4$, 种群规模 $N=30$, 最大迭代次数 $n_{\text{itermax}}=20$, 变异概率最大值 $P_{\max}=0.5$ 和变异概率最小值 $P_{\min}=0$ 。

2.4 仿真结果

利用 Matlab 进行潮流计算^[12-14], 并计算配网各支路的静态电压稳定判定指标 L , 如图 4 所示。

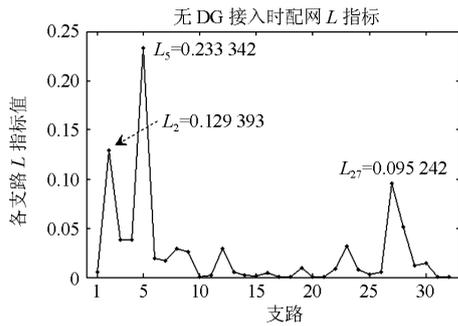


图 4 无 DG 接入时配网 L 指标

Fig. 4 Distribution network L index without DG integration

可以看到, 未接入 DG 时, 支路 5 的 L 指标最大, 为配网最不稳定支路。所以, 定义配网电压稳定指标 $\max L=L_5$, $\max L=0.233 342$ 。另外, 较不稳定的几条支路有支路 2 和支路 27, $L_2=0.129 393$, $L_{27}=0.095 242$ 。

历次迭代配网最大 L 指标 $\max L$ 记录如表 1 所示, 其中 $\max L$ 表示每次迭代后, 配网所有支路 L 指标中的最大值。

表 1 历次迭代系统最大 L 指标 $\max L$

Table 1 Previous iterative system maximum L index $\max L$

代数	$\max L$	代数	$\max L$
1	0.151 194	11	0.151 194
2	0.151 194	12	0.151 194
3	0.151 194	13	0.151 194
4	0.151 194	14	0.151 194
5	0.151 194	15	0.151 194
6	0.151 194	16	0.151 08
7	0.151 194	17	0.151 08
8	0.151 194	18	0.151 08
9	0.151 194	19	0.151 08
10	0.151 194	20	0.151 08

最优 DG 布置方式下配电网的静态电压稳定指标 L 如表 2 所示, 其中 L 指标表示配网各支路的静态电压稳定指标 L , $|L-1|$ 越大, 支路越稳定。

表 2 最优 DG 布置方式下配网各支路的静态电压稳定指标 L

Table 2 Static voltage stability index L of each branch of the distribution network with the optimal DG placement method

支路	L 指标	支路	L 指标	支路	L 指标
1	0.0041	12	0.0126	23	0.0308
2	0.0917	13	0.0046	24	0.0078
3	0.0252	14	0.0016	25	0.0022
4	0.0246	15	0.0014	26	0.0045
5	0.1511	16	0.0038	27	0.0813
6	0.009	17	0.0001	28	0.0479
7	0.0075	18	0.0002	29	0.0109
8	0.0132	19	0.0091	30	0.0136
9	0.0124	20	0.0004	31	0.0007
10	0.0002	21	0.0003	32	0.0001
11	0.0007	22	0.0085		

原始网络和最优迭代 DG 布置下电压稳定指标 L 对比, 如图 5。

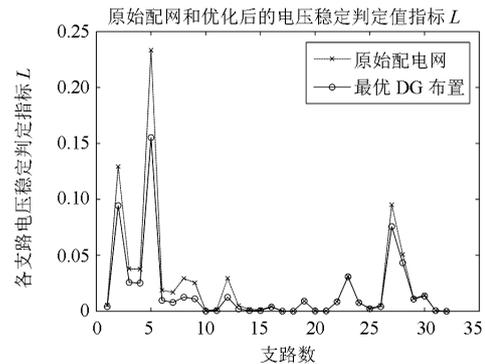


图 5 原始配网和最优 DG 布置下配网 L 指标

Fig. 5 L index of the original distribution network and distribution network with optimal DG layout

可以看到, 通过优化, 配网各支路的 L 指标都比原始配电网的 L 指标小, 说明支路稳定性改善了。同时, 原配电网最不稳定的支路 5 的 L 值明显降低了, 所以整个配网的静态电压稳定性是得到提高的。

3 实例验证

3.1 实际配电网

本文通过一个具体的配电网进行实例论证。选取重庆市某地区的一个 10 kV 配电网, 共 27 个节点, 26 条支路, 总的负荷为 41 300 kVA。这是由两个电源和两个开闭所组成的环网。选择 S1 投入运行, S2 断开, 联络线 1 闭合, 联络线 2 断开。

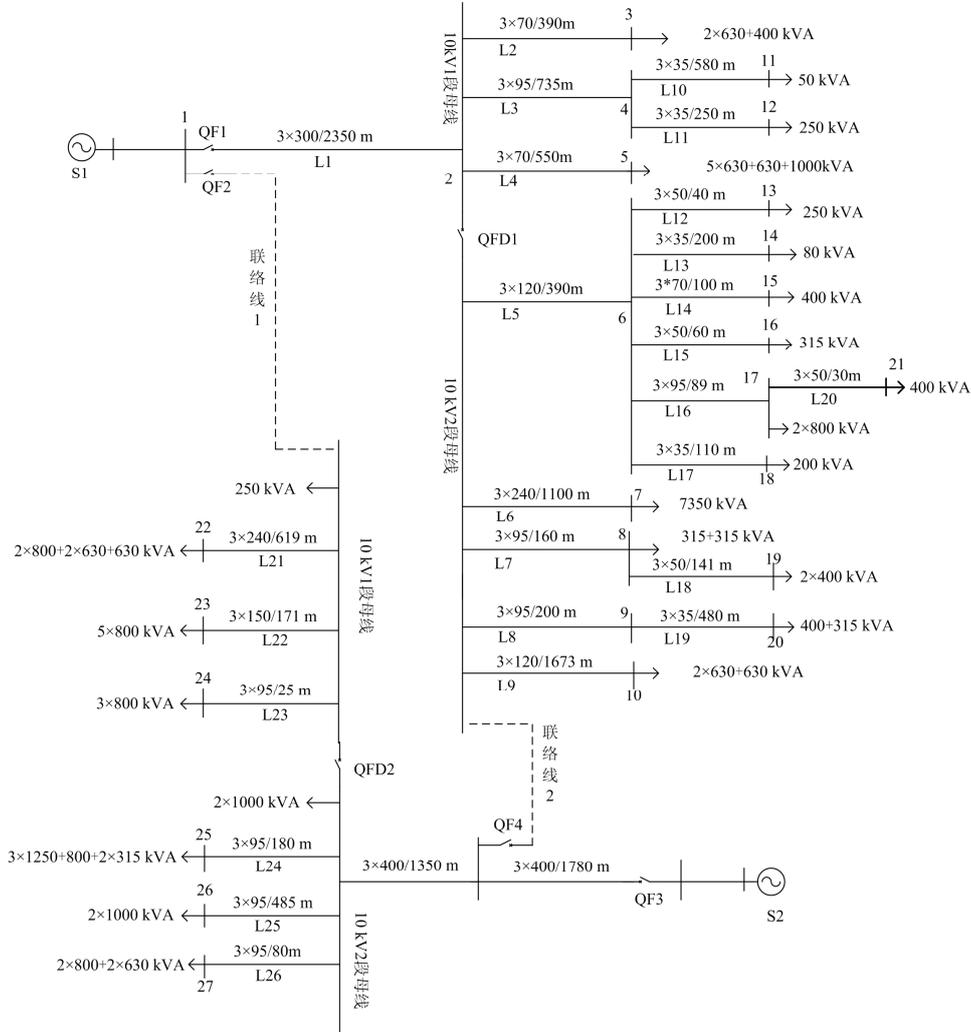


图 6 重庆市某地区某个 10 kV 环网

Fig. 6 A 10 kV loop network in a certain area of Chongqing City

3.2 论证仿真测试

基于 Matlab 仿真平台, 利用前面提出的优化方案, 优化改善配电网络的静态电压稳定指标 L ^[15-17]。

$$\max L = \max \{L_1, L_2, L_3, \dots, L_N\} \quad (3)$$

式中, $\max L$ 为配电网络的静态电压稳定判定指标, N 为配网支路数。

$$V_{pv}(i) = \left| \frac{V_i - V_N}{V_N} \right| \times 100\% \quad (4)$$

$$V_{pv\max} = \max \{V_{pv}(1), V_{pv}(2), \dots, V_{pv}(N)\} \quad (5)$$

其中: V_{pv} 为电压偏差; $V_{pv\max}$ 为所有节点电压偏差中的最大值; i 为配网节点数; V_N 为节点电压基准值。

优化运算后, 得到配电网络最大静态电压稳定指标 $\max L$ ^[18] 优化情况如图 7 所示, 各个节点最大电压偏差 $V_{pv\max}$ ^[19] 如图 8 所示。

优化前后配电网络各支路的静态电压稳定指标 L 如表 3 所示。

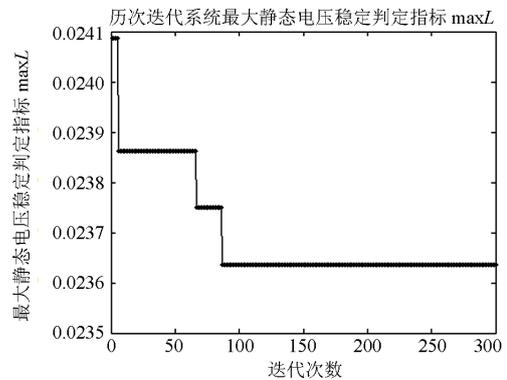


图 7 配电网络静态电压稳定指标 $\max L$ 迭代优化图

Fig. 7 Distribution network static voltage stability index $\max L$ iterative optimization diagram

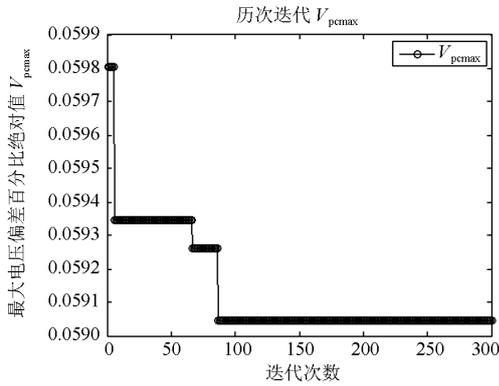


图 8 配电网最大节点电压偏差 V_{pemax} 迭代优化图

Fig. 8 Maximum node voltage deviation V_{pemax} of distribution network iterative optimization diagram

表 3 优化前后配电网各支路静态电压稳定指标 L

Table 3 Static voltage stability index L of each branch of the distribution network before and after optimization

支路	原始配网 L 指标	接入 DG 优化后 L 指标	支路	原始配网 L 指标	接入 DG 优化后 L 指标
1	0.101 255 57	0.000 201 82	14	0.000 000 64	0.000 003 13
2	0.000 165 45	0.000 034 8	15	0.000 000 47	0.002 638 5
3	0.000 008 96	0.000 000 47	16	0.000 006 52	0.002 082 9
4	0.002 845 31	0.000 114 88	17	0.000 001 14	0.000 006 21
5	0.000 229 95	0.000 124 3	18	0.000 016 88	0.000 000 1
6	0.004 650 74	0.000 006 87	19	0.000 279 41	0.000 000 45
7	0.000 010 89	0.024 087 28	20	0.000 000 193	0.000 0004 7
8	0.000 004 21	0.000 123 18	21	0.000 201 82	0.000 000 35
9	0.001 554 79	0.000 384 9	22	0.000 034 8	0.000 004 85
10	0.000 002 03	0.002 061 14	23	0.000 000 47	0.000 000 85
11	0.000 0091 3	0.000 170 01	24	0.000 114 88	0.000 0125 5
12	0.000 000 13	0.003 431 39	25	0.0001243	0.000 207 54
13	0.000 000 6	0.000 008 04	26	0.000 006 87	0.000 000 14

对应的曲线图对比如图 9 所示。

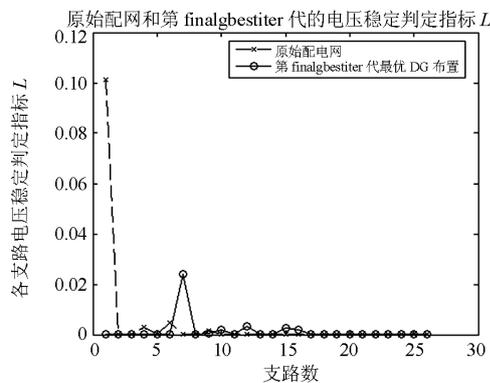


图 9 配电网各支路静态电压稳定指标 L 优化前后对比图

Fig. 9 Comparison diagram of distribution network static voltage stability index L before and after optimization

优化前后配电网各节点的电压如表 4 所示。

表 4 优化前后配电网各节点电压

Table 4 Voltage of each node of distribution network before and after optimization

节点	原始配网各节点电压	优化后配网各节点电压
1	1	1
2	0.897 327 51	0.966 476 14
3	0.893 587 26	0.963 006 9
4	0.896 030 71	0.972 843 91
5	0.876 353 4	0.947 078 07
6	0.893 316 11	0.971 894 05
7	0.869 702 27	0.940 955 21
8	0.896 195 48	0.965 536 59
9	0.896 484 9	0.965 694 86
10	0.880 203 99	0.955 611 59
11	0.895 518 31	0.972 372 02
12	0.894 723 26	0.971 639 97
13	0.893 186 42	0.971 774 86
14	0.892 979 94	0.971 585 08
15	0.892 963 31	0.973 961 55
16	0.893 074 19	0.971 671 7
17	0.892 693 29	0.971 444 15
18	0.892 849 57	0.971 465 26
19	0.894 389 87	0.964 115 84
20	0.889 016 44	0.958 769 76
21	0.892 540 04	0.971 330 18
22	0.996 543 66	0.996 543 66
23	0.998 034 04	0.998 034 04
24	0.999 741 17	0.999 741 17
25	0.994 943 57	0.994 943 57
26	0.994 749 04	0.994 749 04
27	0.998 735 99	0.998 735 99

对应的配电网优化前后节点电压对比曲线如图 10 所示。

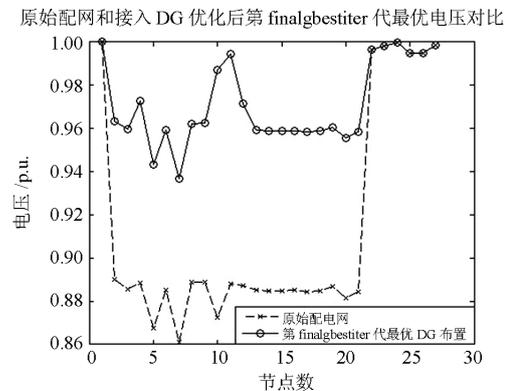


图 10 配电网各节点电压优化前后改善对比图

Fig. 10 Improvement comparison of each node of the distribution network before and after optimization

3.3 结果分析

首先, 每次迭代后, 新的 DG 布置方式下, 各节点的电压波动百分比的绝对值低于 7%, 电压没有越限, 符合国家对新能源发电接入大电网电压波动百分比限制的要求。其次, 每次迭代过程中, 除了各支路的 L 指标都要比 1 小, 没有失稳以外, 还保证了配电网最大的 L 指标 $\text{Max}L$ 都比上一代的小, 另外配网的最大电压偏差 V_{pvmax} 同样是得到优化变小了的。这样, 通过改善优化后, 整个配网的静态电压稳定性得到了很好的提高。

4 结论

对于在配电网中优化接入分布式电源来改善静态电压稳定性的策略, 先通过 IEEE33 节点配电网测试了提出的方案, 然后应用了重庆市某地区的一个实际配电网进行了可行性验证。可以看到, 通过对接入分布式电源的限制和优化, 不断地迭代筛选, 能够很大程度上改善原始配电网各支路的静态电压稳定性。同时, 对于原始网络的电压偏差也能起到很好的限制和改善。符合预期的目标, 改善方案的正确和可行性也得到验证。该研究方案, 可以为后续相关领域的深入研究提供一定的指导。

参考文献

- [1] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
LI Tiyin, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Static voltage stability characteristics and impact analysis of distributed generation access network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [2] 张谦, 廖清芬, 唐飞, 等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48.
ZHANG Qian, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Static voltage stability evaluation method for distribution network with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 42-48.
- [3] 李云亮, 杨绍勇, 马涛, 等. 含分布式电源的配电网静态电压稳定性判断方法的研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(25): 45-50.
LI Yunliang, YANG Shaoyong, MA Tao, et al. Research on the static voltage stability discrimination method of distribution network containing distributed[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(25): 45-50.
- [4] 许晓菲, 牟涛, 贾琳, 等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 15-19.
XU Xiaofei, MOU Tao, JIA Lin, et al. Practical criterion and control of static voltage stability of large scale wind transfer system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 15-19.
- [5] 卢锦玲, 石少通, 卢洋含. 大规模风电场的电网静态电压稳定性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 73-80.
LU Jinling, SHI Shaotong, LU Yanghan. Static voltage stability evaluation of large scale wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(6): 73-80.
- [6] 刘文颖, 徐鹏, 赵子兰. 基于区间估计的风电出力多场景下静态电压安全域研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 172-178.
LIU Wenyong, XU Peng, ZHAO Zilan. A research of static voltage stability region in wind power scenario based on interval estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 172-178.
- [7] JASMON G B, LEE L H C C. Distribution network reduction for voltage stability analysis and load flow calculations[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1991, 13(1): 9-13.
- [8] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433.
WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.
- [9] 李晓东, 刘广一, 贾宏杰. 基于电压调节的分布式可再生能源发电功率波动平抑策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 76-82.
LI Xiaodong, LIU Guangyi, JIA Hongjie. Mitigation of output power fluctuations for distributed renewable energy generation based on voltage regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 76-82.
- [10] 冯兴田, 孙添添, 马文忠. 配电网电能质量调节装置集散配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 33-39.
FENG Xingtian, SUN Tiantian, MA Wenzhong. Centralized and dispersed allocation strategy of power quality regulating devices in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 33-39.
- [11] 奚露露, 周玲, 杨明耀. 基于改进粒子群算法含双馈风电机组配网无功优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(8): 94-99.
XI Lulu, ZHOU Ling, YANG Mingyao. Research on

- reactive power optimization for distribution network with DFIG based on enhanced PSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(8): 94-99.
- [12] 周家南, 苏宏升. 计及负荷电压静特性的含分布式电源的前推回代潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32.
ZHOU Jianan, SU Hongsheng. Back/forward sweep power flow calculation with distributed generation considering static load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 26-32.
- [13] 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.
- [14] 张万月, 陈星莺, 余昆. 基于增广节点支路关联矩阵的前推回代潮流算法[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 62-67.
ZHANG Wanyue, CHEN Xingying, YU Kun. Augmented node branch incidence matrix based back/forward sweep flow calculation[J]. Power System and Elean Energy, 2015, 31(12): 62-67.
- [15] ALABRI R S, EL-SAADANY E, ATWA Y M. Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 326-334.
- [16] FREITAS W, DASILVA L C P, MORELATO A. Small disturbance voltage stability of distribution systems with induction generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1653-1654.
- [17] ALABRI R S, YASSER M. Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 326-334.
- [18] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.
CHEN Haiyan, DUAN Xianzhong, CHEN Jinfu. Effect of distributed generation on static voltage stability of distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 27-30.
- [19] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8-14.
LI Dongdong, LIANG Zichao, ZHOU Yuqi. Transient voltage stability assessment of receiving end grid incorporating with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 8-14.

收稿日期: 2016-04-22; 修回日期: 2016-06-03

作者简介:

彭光斌(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事分布式电源并网电压稳定性问题研究; E-mail: 1085586654@qq.com

詹红霞(1971-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光伏发电系统并网技术及电力系统智能继电保护的研究; E-mail: zhx1055@sina.com

黄培东(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源接入对电网的影响研究。Email: linweixiao@qq.com

(编辑 姜新丽)