

DOI: 10.7667/PSPC160452

分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究

张曦¹, 张宁¹, 龙飞¹, 彭光斌², 詹红霞², 黄培东²

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

摘要: 分布式电源(Distributed Generation, DG)接入配网后, 将对配网静态电压稳定性造成影响。基于 IEEE33 节点配电网和 Matlab 仿真测试软件平台, 考虑分布式电源的接入数量、接入位置、接入容量和功率因数 4 个影响因素。应用电压稳定性判定指标 L , 对比单个 DG 接入单分支线路和多个 DG 接入多条分支线路两种情况, 得出各自对配网电压分布和电压稳定性造成的影响。对比测试所得 L 指标, 结果表明多 DG 接入的方式更有利于配网电压稳定。该研究对配网中多 DG 的布局和规划具有积极的指导意义。

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

Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects

ZHANG Xi¹, ZHANG Ning¹, LONG Fei¹, PENG Guangbin², ZHAN Hongxia², HUANG Peidong²

(1. Nan'an Administration of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400060, China;

2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Static voltage stability of distribution networks will be impacted after the connection of distributed generation (DG) sources. The IEEE 33-nodes test system and Matlab simulation software platform are used and four impacts factors including the number of DGs, their locations, access capacities and power factors are considered. Based on the voltage stability assessment index L , two cases, which one is a single DG connected to single feeder bus and another is multiple DGs connected to multiple feeder buses, are compared to get their influence on voltage distribution and stability respectively. Compared index L from test, it shows that multiple DG connected to multiple feeder buses is more beneficial to voltage stability of distribution networks. The research is of guiding significance to the layout and planning of multi-DGs in distribution network.

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

0 引言

新型分布式电源(Distributed Generation, DG)可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, 为用户提供费用低、质量好、可靠性高的电能。但 DG 接入配网后, 配网由原来的单电源辐射状结构变为多电源复杂的网络, 潮流的大小和方向都会发生改变, 配网的电压稳定性将受到很大的影响。DG 的类型以及 DG 并网方式的不同对配网电压稳定性的影响也不同。文献[1]分析了 DG 渗透率对配网电压的影响, DG 渗透率越大, 对电压的支撑作用越大。文献[2]分析了 DG 出力、安装位置

和 DG 类型对配网电压分布的影响, 但没有考虑功率因数。文献[3]利用短路比和刚性率来评估 DG 对配网电压质量的影响, 考虑了旋转型与逆变型 DG, 但没有就配网电压稳定性进行讨论。文献[4]考虑了 DG 类型、位置、容量和功率因数对电压稳定性的影响, 但文章中 DG 只是单点接入, 未考虑多个 DG 接入的情况。文献[5]提出一种稳定性判定方法, 但正确性有待商榷。

大多数电压稳定性研究只涉及 DG 的部分影响因素, 并没有进行系统的分析研究。鉴于此, 本文全面考虑 DG 接入位置、接入容量、功率因数和 DG 布置方式 4 个因素对配网电压稳定性的影响。并且,

对比分析单个 DG 接入单分支和多个 DG 接入多条分支两种情况, 可以快速找到网络最薄弱、电压最易失稳线路, 对配网中 DG 的布置和规划有重要的指导意义。

1 静态电压稳定指标

现在常用的静态电压稳定性判断方法分为两类, 即根据潮流计算解的存在性判断法和根据负荷-电压特性判断法。任意一段支路潮流如图 1 所示。

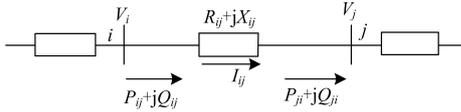


图 1 任意一段支路潮流

Fig. 1 Power flow of any branch

文献[6]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。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 条支路的配网, 为了判定整个系统的电压稳定性, 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系统的电压稳定指标。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。配网任意支路电流流向如图 2。

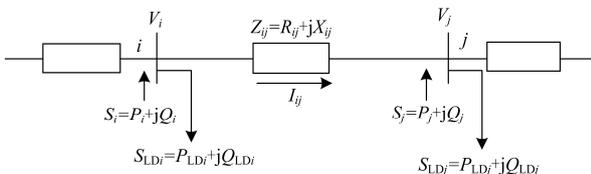


图 2 配网任意支路电流流向

Fig. 2 Distribution network current direction of any branch

文献[7]根据支路 b_{ij} 的供应侧和负荷侧的 V-I 伏安特性得出了一种节点电压快速判断方法。受端与送端 V-I 特性曲线如图 3。

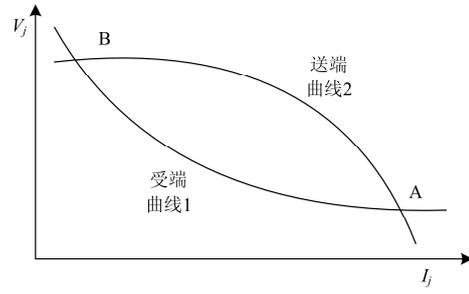


图 3 受端与送端 V-I 特性曲线

Fig. 3 V-I characteristic curve of delivery node and receiving node

对 PQ 节点 j , 令受端和送端特性曲线斜率分别为 K_{jL} , K_{jG} , 要使电压稳定, 节点工作在稳定工作点, 需满足两曲线斜率关系 $K_{jL} - K_{jG} \geq 0$, 取等号时节点工作在临界稳定状态。

定义电压稳定指标为 $H_j = K_{jL} - K_{jG}$, $H_j \geq 0$ 。

对于整个配网, 要使各条支路都满足上述条件, 则整个配网的电压稳定指标为

$$H = \min \{H_j\} \quad j \in n \quad (3)$$

式中: n 表示配网中所有节点集合; H 反映出节点电压抗扰动能力, H 值越小, 则受端曲线斜率比送端曲线斜率越大, 配网电压的抗扰动能力越强, 反之, 抗扰动能力越弱。

根据负荷-电压特性的稳定性判断法, 必须保证节点为 PQ 节点, 而根据潮流计算解存在性的判断法没有这个限制, 所以本文选择第一种稳定性判断方法。

2 仿真模型

本文应用文献[8]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, 配网结构如图 4 所示。

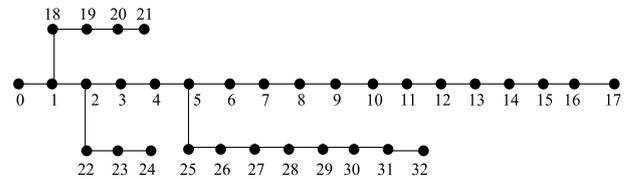


图 4 IEEE33 节点配网

Fig. 4 IEEE33 nodes distribution network

利用 Matlab 进行潮流计算^[9-10], 并计算配网各支路的静态电压稳定判定指标 L , 如图 5 所示。

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 $L=L(5)$, $L=0.233\ 342$ 。另外, 较不稳定的几条支路有支路 2 和支路 27, $L(2)=0.129\ 393$, $L(27)=0.095\ 242$ 。

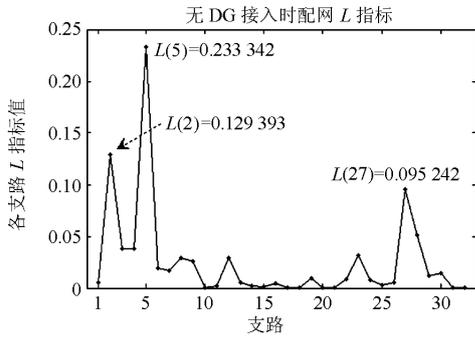


图 5 无 DG 接入时配网 L 指标

Fig. 5 Distribution network L index without DG integration

然后，基于 IEEE-33 节点配网结构，应用连续潮流算法和静态电压稳定指标 L ，在 Matlab 仿真软件中搭建测试模型，取该配网总负荷的 25% 作为 DG 可接入总容量上限，分析 DG 接入对配网电压稳定性影响。借鉴文献[11-12]中的分析思路，研究流程如图 6。

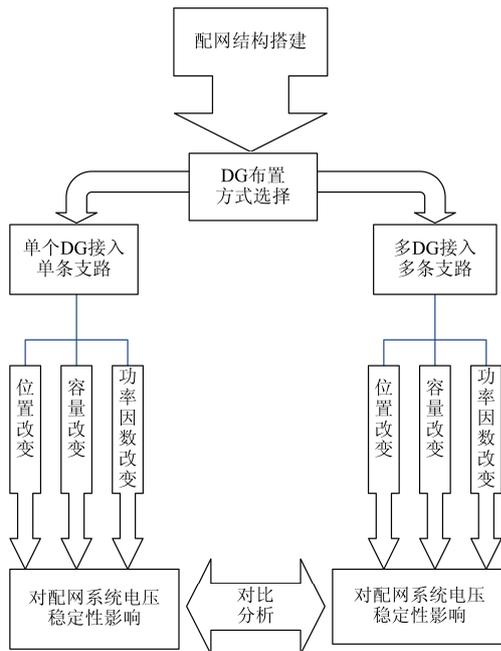


图 6 配网电压稳定性研究测试流程

Fig. 6 Measure process of distribution network voltage stability study

3 单个 DG 接入单条支路对配网静态电压稳定性影响分析

3.1 单个 DG 接入位置改变对配网静态电压稳定性影响

只在 IEEE33 节点配网中间馈线接入一个 DG，DG 容量比例取 1，即按 DG 可接入总容量的上限全部接入，取滞后功率因数 $\cos \varphi = 0.9$ 。依次改变 DG 接入位置为节点 1、5、9、13、17。

仿真得出配网最不稳定支路和 L 指标如图 7 所示。图中 $L(5)=0.232 603$ ，表示当 DG 接入位置为节点 1 时，配网所有支路中最大的 L 指标为 L_5 ， $L(5)=0.232 603$ ，即支路 5 最不稳定，以 L_5 作为整个配网的 L 指标， $L=L(5)$ 。后面图例类似，不再赘述。

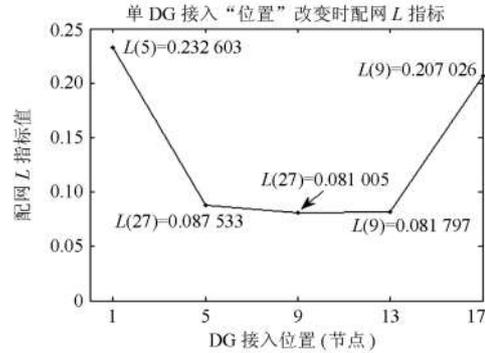


图 7 单 DG 接入位置改变时配网 L 指标

Fig. 7 Distribution network L index of single DG connected with changing location

由图 7 可知，DG 从中间馈线的首端往末端移动过程中，配网 L 指标先减小后增大，最不稳定支路也发生改变。这是因为，DG 往馈线中后段移动，负荷需求减少，而且负荷远远低于 DG 注入容量，很多节点的电压逼近电压可偏移上限值，稳定性就降低了。

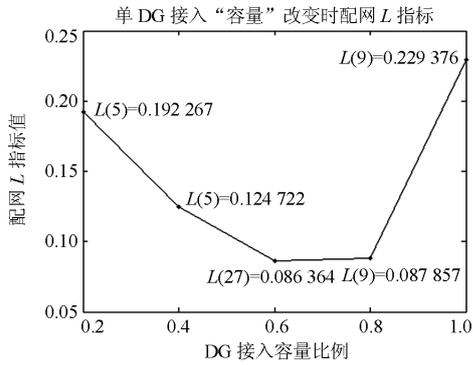
还可以看到，DG 接入的所有位置中，在节点 1 接入时，配网的静态电压稳定指标 $L(5)=0.232 603$ 最大，但是比起无 DG 接入配网时的 $L(5)=0.233 342$ 还是减小了。DG 的接入是有利于配网静态电压稳定的。相对来说，DG 接入馈线中后段，对配网静态电压稳定性改善效果更好。

3.2 单 DG 接入容量改变对配网静态电压稳定性影响

由 3.1 节的结论，将 DG 接入位置固定在节点 9，取滞后功率因数 $\cos \varphi = 0.9$ 。DG 接入容量比例依次按可接入总容量的 0.2、0.4、0.6、0.8、1 改变。仿真得出配网最不稳定的支路和 L 指标如图 8 所示。

DG 接入容量比例依次增大过程，配网 L 指标先减小后增大。这是因为，DG 接入节点 9 时，随着 DG 注入容量增大，会超过节点 9 及其周边支路的负荷需求，很多节点电压逼近甚至超过标么值，稳定性也就降低了。

另外，DG 容量比例增大到 0.2、0.4 时，配网最不稳定支路还是支路 5，增大到 0.6 时变为支路 27，当继续增大到 0.8、1 时，就变为支路 9。可以看出，随着 DG 容量增大，先是会影响配网最不稳

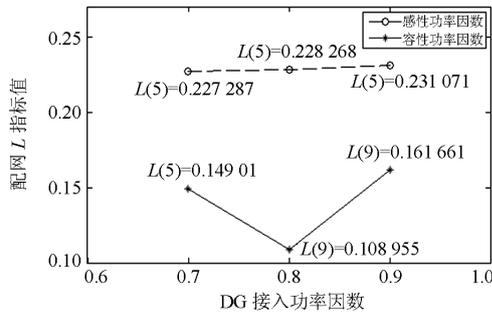
图 8 单 DG 接入容量改变时配网 L 指标Fig. 8 Distribution network L index of single DG connected with changing capacities

定的支路, 然后再直接影响 DG 接入节点附近支路的稳定性。

此处最大的 $L(9)=0.229\ 376$, 小于无 DG 接入时的 $L(5)=0.233\ 342$, 静态电压稳定性是得到改善的。所以, 在一定范围内, DG 接入容量增大, 对配网静态电压稳定性的改善作用会先增大后降低。

3.3 单 DG 接入功率因数改变对配网静态电压稳定性影响

由前面结论, DG 还是接入节点 9, 容量比例取 0.5, 分容性和感性两种功率因数, 依次按 0.7、0.8、0.9 改变。仿真得出配网最不稳定的支路和 L 指标如图 9 所示。

图 9 单 DG 接入功率因数改变时配网 L 指标Fig. 9 Distribution network L index of single DG connected with changing power factors

当接入感性 DG 时, 随着 $\cos\varphi$ 增大, 配网 L 指标是逐渐增大的。 $\cos\varphi$ 为 0.9 时 L 指标最大, 为 $L(5)=0.231\ 071$, 但小于无 DG 接入时的 $L(5)=0.233\ 342$ 。此种 DG 接入时的 L 指标相差不大, 和无 DG 接入时的 $L(5)$ 很接近。所以, 感性功率因数的 DG 对配网电压稳定性有改善作用, 但是改善作用并不明显。

当接入容性 DG 时, 比起配网未接 DG 时的 $L(5)$ 小很多, 配网稳定性改善明显。随着 $\cos\varphi$ 增大, 配网 L 指标先减小后增大, 而且最不稳定支路变成了支路 9。这是因为, $\cos\varphi$ 从 0.7 变为 0.8 时, 开始, 注入有功增大还没太厉害, 所以 L 指标减小。当 $\cos\varphi$ 增大至 0.9 时, 虽然 DG 无功补偿作用减小, 但有功还继续增加, 导致 DG 接入地节点 9 的电压升高过快, 电压已超过标么值, 所以 L 指标转而增大。但最大 $L(9)=0.161\ 661$, 远小于无 DG 接入时的 $L(5)=0.233\ 342$, 对于电压稳定起到了改善作用, 而且效果明显好于感性功率因数的 DG。

4 多 DG 接入多条分支对配网静态电压稳定性影响分析

4.1 多 DG 接入位置改变对配网静态电压稳定性影响

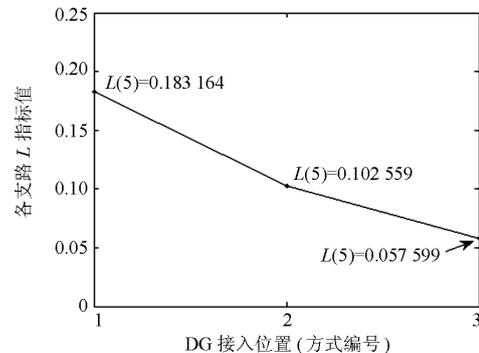
在配网中间馈线和 3 条分支上接入 4 个 DG, 将 DG 总容量平均分于 4 个 DG, 容量比例均取 0.25, 功率因数为容性 0.9, 各自选取各段线路的首端、中间和末端位置接入 DG 进行仿真。具体布置方式如表 1 所示, 其中表的第 2 列, 括号前面数字为 DG 接入位置, 括号内数字为 DG 接入容量比例。

表 1 多 DG 接入位置布置方式

Table 1 Multiple DG integration location arrangement

方式编号	DG 布置方式
1	1(0.25) 18(0.25)
	22(0.25) 25(0.25)
2	8(0.25) 19(0.25)
	23(0.25) 28(0.25)
3	17(0.25) 21(0.25)
	24(0.25) 32(0.25)

按以上位置布置方式改变接入 DG, 仿真得出配网最不稳定的支路和 L 指标如图 10。

图 10 多 DG 接入位置改变时配网 L 指标Fig. 10 Distribution network L index about multiple DG integrated with changing location

可以看到,随着 DG 接入位置从线路首端往末端移动过程,整个配网的 L 指标是逐渐减小的,配网的稳定性得到改善,配网最不稳定支路没有改变。

单 DG 和多 DG 情况对比如表 2 所示。

表 2 单 DG 和多 DG 位置影响配网 L 指标对比

Table 2 L index comparison of single DG and multiple DG about changing location

DG 接入位置	配网 L 指标	
	单 DG	多个 DG
首端	0.23	0.18
中间	0.09	0.1
末端	0.21	0.06

对比单个 DG 接入单条支路和多 DG 接入多条分支的情况,可以看到,中间位置上,单 DG 比多 DG 好,但相差不大。而首端和末端,同等的位置上接入 DG,多 DG 接入对配网电压稳定性的提升效果更明显。所以,总体来说,多 DG 分散接入的方式更有利于配网静态电压稳定性的改善。

4.2 多 DG 接入容量改变对配网静态电压稳定性影响

固定 4 个 DG 接入位置在节点 8、19、23、28,功率因数为容性 0.9,将 DG 总的接入容量平均分子于 4 个 DG,总的容量比例依次按 0.2、0.4、0.6、0.8、1 增大,仿真得出配网最不稳定支路和 L 指标如图 11。

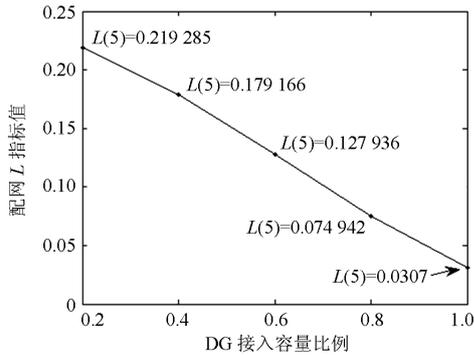


图 11 多 DG 接入容量改变时配网 L 指标

Fig. 11 Distribution network L index about multiple DG integrated with changing capacities

可以看到,随着 DG 容量的增加,整个配网的 L 指标逐渐减小,配网电压稳定性改善很理想。

另外,如表 3 所示,当 DG 容量增大,多 DG 配网 L 指标并没出现单 DG 先减小后增大的情况,是因为分散布置 DG 会削弱 DG 对配网的影响,此处则有利于配网稳定性。所以相比之下,多 DG 接入方式更有利于配网电压稳定。

表 3 单 DG 和多 DG 容量影响配网 L 指标对比

Table 3 L index comparison of single DG and multiple DG about changing capacities

DG 接入容量比例	配网 L 指标	
	单个 DG	多个 DG
0.2	0.1923	0.2193
0.4	0.1247	0.1792
0.6	0.0864	0.1279
0.8	0.0879	0.0749
1	0.2294	0.0307

4.3 多 DG 接入功率因数改变对配网静态电压稳定性影响

同样是将 DG 接入在节点 8、19、23、28,容量比例 0.5,功率因数分感性和容性两种,按 0.7、0.8、0.9 改变,仿真得出配网最不稳定的支路和 L 指标如图 12。

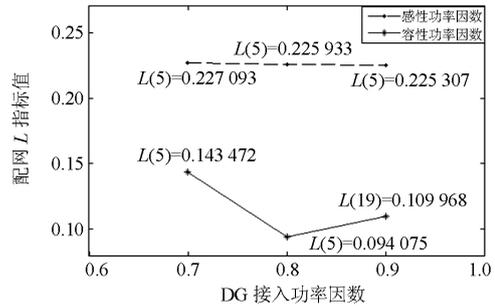


图 12 多 DG 接入功率因数改变时配网 L 指标

Fig. 12 Distribution network L index about multiple DG integrated with changing power factors

可以看到,当接入超前功率因数 DG 时, L 指标是随功率因数增大而减小的,但减小不是很明显。当换为滞后功率因数的 DG, L 指标先减小后增大,改善效果就很明显了,远小于无 DG 接入时的 $L(5)=0.233342$ 。

表 4 中对比可以看出,都接入容性功率因数 DG,单 DG 时配网 L 指标略微增大,多 DG 时 L 指标略微减小,多 DG 相对更有利于配网电压稳定性,但效果不是很明显。再看容性功率因数时, L 指标改善很明显,特别是 $\cos \varphi$ 为 0.9 时,多 DG 更有优势。

表 4 单 DG 和多 DG 功率因数影响配网 L 指标对比

Table 4 L index comparison of single DG and multiple DG about changing power factors

功率因数	配网 L 指标			
	感性		容性	
	单个 DG	多个 DG	单个 DG	多个 DG
0.7	0.2278	0.2271	0.149	0.1435
0.8	0.2283	0.2259	0.109	0.0904
0.9	0.2311	0.2253	0.1617	0.101

因为电力系统希望电源以大的功率因数运行以保证更多的输出有功,所以,当 DG 以大功率因数运行时,多 DG 接入多条分支的情况对电压稳定性的改善更好,和实际情况吻合。

5 结论

DG 接入配网后,对配网电压稳定性的影响有好有坏。只有选择合适的接入方式,才能保证系统处于最佳运行状态。

1) 通过计算配网静态电压稳定性指标 L , 可以清楚地看到配网中容易失稳的薄弱支路。只要保证最薄弱的节点和支路不失稳,则整个系统会保持稳定运行状态。

2) 从接入位置上看, DG 接入馈线中后段更有利于电压稳定性改善。

3) DG 容量增加,配网节点电压呈正相关的增长,静态电压稳定性也得到改善,但 DG 容量不能无限增大,需设置上限。

4) 通过对比可以看到,多 DG 分散接入比集中单 DG 接入对配网静态电压稳定性改善要好。该研究为后续的多个分布式电源规划问题提供积极的借鉴和指导作用。

参考文献

- [1] SEXAUER J M, MOHAGHEGHI S. Voltage quality assessment in a distribution system with distributed generation — a probabilistic load flow approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1652-1662.
- [2] 张立梅,唐巍,赵云军,等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-97.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. Analysis of the effect on the system voltage and loss of distributed generation connected to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-97.
- [3] 裴玮,盛鹏,孔力,等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 153-157.
PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 153-157.
- [4] 武晓朦,刘健,毕鹏翔. 配电网电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 31-35.
WU Xiaomeng, LIU Jian, BI Pengxiang. Research on voltage stability of distribute on networks[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 31-35.
- [5] 李云亮,杨绍勇,马涛,等. 含分布时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(10): 45-50.
- [6] 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.
 - [7] 李宝国,鲁宝春,巴金祥. 一种基于 V-I 特性的节点电压稳定判断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2004, 32(1): 1-4.
LI Baoguo, LU Baochun, BA Jinxiang. A practical method to judge static voltage stability of load nodes based on V-I characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2004, 32(11): 1-4.
 - [8] 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.
 - [9] 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.
 - [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] 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.
 - [12] 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.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-05-04

作者简介:

张曦(1977-),男,高级工程师,从事配网及配电网智能化方向研究; E-mail: cqepx@qq.com

龙飞(1984-),男,工程师,从事电气工程及其自动化方向研究; E-mail: logsini@163.com

张宁(1982-),男,工程师,从事风电场风速与风电功率预测方向研究工作。E-mail: 27045798@qq.com

(编辑 葛艳娜)