

DG 容量对配电网电流保护的影响及对策研究

冯希科^{1,2}, 邵能灵¹, 宋凯^{1,3}, 顾临峰³, 盛继卿⁴

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007;
3. 上海市电力公司, 上海 200240; 4. 上海久隆电力科技有限公司, 上海 200240)

摘要: 含 DG 的配电网线路在发生短路故障时, 分布式电源的注入电流可能会影响流过该线路保护装置的短路电流, 导致保护误动或拒动, 因此需要根据电流保护分析 DG 的准入容量问题。分析了分布式电源并入配电网后, 在线路不同位置发生短路故障时, DG 对短路电流产生的助增、汲流和反方向电流影响, 并推导出含 DG 的配电网短路电流计算公式。在此基础上, 求出 DG 为不同容量时, 流过保护的短路电流变化曲线。并根据配电网电流保护整定值, 求出保证保护正确动作的 DG 最大准入容量。

关键词: 分布式电源; 电流保护; 准入容量; 配电网; 短路电流

Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and countermeasure

FENG Xi-ke^{1,2}, TAI Neng-ling¹, SONG Kai^{1,3}, GU Lin-feng³, SHENG Ji-qing⁴

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450007, China; 3. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200240, China; 4. Shanghai Jiulong Power Tech Co., Ltd, Shanghai 200240, China)

Abstract: When short circuit fault occurs in the transmission line of distribution network with DG connected, the injection current of the distributed generation may have an impact on the short circuit current, which flows through the current protection of the transmission line, and causes the protection misoperation or failure action, so the penetration level of DG needs to be analyzed according to the current protection. This paper analyzes the impact of DG on the protection, when the short circuit fault occurs at different positions of the transmission line, including increasing flow, decreasing flow and the opposite direction flow. At the same time, the short circuit current calculation formula of the distribution network with DG connected is deduced. On this basis, it calculates the short circuit current flowing through the current protection. According to the protection setting values, the maximum penetration level of DG connected into distribution network is analyzed, in order to ensure the current protection correct operation.

This work is supported by the Educational Ministry Program for New Century Excellent Talents.

Key words: distributed generation; current protection; penetration level; distribution network; short circuit current

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0156-05

0 引言

分布式电源 (Distributed Generation, DG) 接入配电网, 会使原来的配电网供电结构发生变化, 分布式电源将通过线路向负荷输送功率。在配电网发生故障时, 系统电源和 DG 可能同时向短路点提供短路电流。由于原有的配电网过电流保护是按照单电源、辐射式结构设计和安装的, 而在分布式电源并入配电网后, 会对配电网的短路电流产生影响, 主要包括助增、汲流和反向短路电流等问题。当分

布式电源容量过大时, 可能会使过电流保护不能正确动作于短路故障。因此, 必须对 DG 容量对电流保护产生的影响进行分析并提出相关改进措施。本文主要讨论了在考虑配电网过电流保护影响条件下的 DG 的准入容量问题。

1 DG 对过电流保护的影响分析

1.1 含 DG 的配电网系统

DG 对过电流保护产生的影响与 DG 的容量和类型、保护安装位置以及短路点位置有很大关系。本文选取如图 1 所示的典型配电网模型作为研究对

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划

象,推导出不同情况下流过保护装置的短路电流计算公式,并分析 DG 对配电网过电流保护产生的影响。

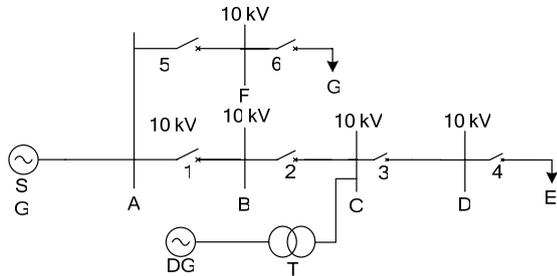


图 1 含 DG 的配电网系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of distribution network system with DG

在图 1 中,SG 为系统电源,DG 为分布式电源,6 条线路均设有过电流保护。母线电压为 10 kV,分布式电源 DG 经变压器 T 升压后接于母线 C 处。配电网末端 E、G 处为负荷。图 2 为图 1 所示配电网系统的等效阻抗图,将系统电源和分布式电源均等效为电压源和电源阻抗的串联形式,变压器等效为阻抗与 DG 串联。考虑典型情况,当线路 1、2、3 和 5 上分别发生短路故障时,分布式电源对其保护产生的影响是有一定差别的。

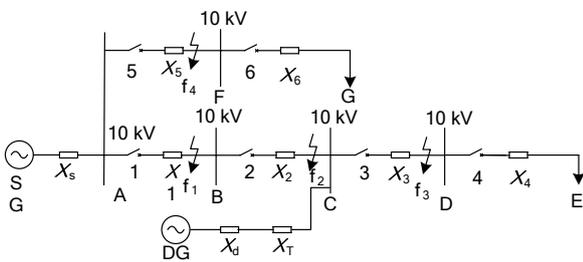


图 2 含 DG 的配电网等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of distribution network with DG

1.2 分布式电源对配电网过电流保护的影响分析

设系统电源电压为 E_s , 等效阻抗为 X_s , 分布式电源电压为 E_d , 等效阻抗为 X_d , 变压器电抗为 X_T 。 α 、 β 、 γ 和 δ 分别表示线路 AB、BC、CD 和 AF 的短路点距各自母线的距离占该段输电线路的百分比,以上参数均取标幺值。当配电网分别在 AB 线路 f_1 点、BC 线路 f_2 点、CD 线路 f_3 点及 AF 线路 f_4 点短路时,DG 的并入对电流保护将产生不同的影响,下面将分别讨论:

1) f_1 点短路

在 f_1 点发生短路时,只有系统电源经保护 1 向故障点提供短路电流,因此保护 1 应准确动作切除

保护范围内的故障。同时,DG 通过保护 2 向故障点提供短路电流,该短路电流有可能引起保护 2 的动作而使 DG 右侧的系统形成孤岛,这时要考虑 DG 的带负荷能力和系统重合闸时的同期问题。此时流过保护 1 和 2 的短路电流为:

$$I_{k1} = \frac{E_s}{X_s + \alpha X_1} \quad (1)$$

$$I_{k2} = \frac{E_d}{X_d + X_T + X_2 + (1-\alpha)X_1} \quad (2)$$

2) f_2 点短路

在 f_2 点发生短路的情况下,只有系统电源向短路点注入的短路电流流经保护 1 和 2,保护能够正常动作于故障。但是保护 1 和 2 动作后,分布式电源仍向故障点提供短路电流,使故障点电弧不能熄灭,线路重合闸不成功,延长瞬时性故障的停电时间。针对这种情况,一种解决办法是在 BC 线路的 C 端装设过电流保护,并动作切除故障,使 DG 不再向故障点提供短路电流。此时流过保护 1 和 2 的短路电流分别为:

$$I_{k1} = I_{k2} = \frac{E_s}{X_s + X_1 + \beta X_2} \quad (3)$$

3) f_3 点短路

当线路上 f_3 点发生短路时,系统电源和分布式电源共同向故障点提供短路电流,分布式电源的存在使流过保护 1 和 2 的短路电流减小,而流过保护 3 的短路电流增加。此时流过保护 1、2 和 3 的短路电流为:

$$I_{k1} = I_{k2} = \frac{E_s - \frac{E_{sd}}{X_{sd} + \gamma X_3} \cdot \gamma X_3}{X_1 + X_2} \quad (4)$$

$$I_{k3} = \frac{E_{sd}}{X_{sd} + \gamma X_3} \quad (5)$$

式中: $E_{sd} = \frac{E_s(X_d + X_T) + E_d(X_s + X_1 + X_2)}{X_s + X_1 + X_2 + X_d + X_T}$;

$$X_{sd} = \frac{(X_d + X_T) \cdot (X_s + X_1 + X_2)}{X_s + X_1 + X_2 + X_d + X_T}$$

由于 DG 对流过保护 1 和 2 的短路电流有汲流作用,而对流过保护 3 的短路电流有助增作用。DG 短路电流的注入使保护 1 和 2 的保护范围减小,降低其灵敏性,可能使保护拒动。而流过保护 3 的短路电流增加,增大其保护范围,会使电流速断保护延伸到下一段,引起保护的误动。

4) f_4 点短路

当相邻馈线 f_4 点发生短路时,DG 反向向故障点提供短路电流,流经保护 1 和 2。此时只需保护 5

动作切除故障线路，DG 所在馈线能够正常工作。由于 DG 的注入短路电流对流过保护 5 的短路电流产生助增作用，延长其保护范围，可能使保护失去选择性。而保护 1 和 2 也可能由于 DG 注入短路电流而误动作，使非故障线路保护动作，扩大故障范围。此时流过保护 1、2 和 5 的短路电流分别为：

$$I_{k1} = I_{k2} = \frac{E_d - \frac{E_{sd}}{X_{sd} + \delta X_5} \cdot \delta X_5}{X_1 + X_2 + X_d + X_T} \quad (6)$$

$$I_{k5} = \frac{E_{sd}}{X_{sd} + \delta X_5} \quad (7)$$

式中： $E_{sd} = \frac{E_s(X_d + X_T + X_1 + X_2) + E_d X_s}{X_s + X_1 + X_2 + X_d + X_T}$ ，

$$X_{sd} = \frac{(X_d + X_T + X_1 + X_2) \cdot X_s}{X_s + X_1 + X_2 + X_d + X_T}$$

经过以上分析可以得出，分布式电源注入的短路电流对电流保护的影响主要包括三个方面：①当电流保护位于 DG 上游，短路故障发生在电流保护的上游时，DG 会从反方向向保护注入电流，使其失去方向性而误动作；②当电流保护位于 DG 上游，短路故障发生在 DG 的下游时，DG 会减小流过保护的短路电流而降低其灵敏度，使保护范围减小而拒动；③当电流保护位于 DG 下游，短路故障发生在电流保护的下游时，DG 会增大流过保护的短路电流，使其保护范围增大，从而使保护装置误动。

2 DG 准入容量的分析

下面主要从分布式电源对配电网过电流保护的影响出发，研究并入配电网的分布式电源的容量限制。在分布式电源并入配电网后，会对原有配电网的运行产生影响，在配电网不同位置发生短路时，分布式电源对电流保护产生的影响是不相同的。由于配电网电流保护是按照原有的配电网结构和参数整定的，在发生短路故障后，考虑 DG 对配电网电流保护的影响，在保护不发生误动作和拒动作的情况下，求出其准入容量。

2.1 含分布式电源的配电网参数

如图 2 所示系统，分布式电源并入配电系统后，在 AB、BC、CD 线路末端短路和在相邻馈线 AF 线路末端短路时，分别分析 DG 在短路时对流过保护装置的短路电流的影响。设系统等效电源 SG 基准电压为 10.5 kV，内部电抗为 $L=0.0004$ H，系统电源容量为 $S=500$ MVA。输电线路 AB、BC 长为 3 km，CD 线路长为 4 km，DE 线路长为 6 km，AF 长为 5 km，FG 长为 8 km，线路阻抗为 $x_1 = 0.347 \Omega/\text{km}$ ， $r_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$ 。变压器 T 的容量为 100 MVA，

变比为 10 kV/690 V，短路电压百分比为 $U_k = 10\%$ 。分布式电源 DG 出口电压为 690 V，容量取不同数值以分析分布式电源并入电网对电流保护的影响。负荷 E 和 G 处接入额定容量为 6 MVA，额定功率因数为 0.85 的负荷。

2.2 线路电流保护的整定

配电网输电线路的保护相对简单，目前广泛采用三段式电流保护，即电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护。三段式保护依据不同的整定原则，以保护 1 为例可以得到电流保护整定计算公式为：

$$I_{dz1} = K_{rel}' \frac{U}{Z_S + Z_1} \quad (8)$$

$$I_{dz1}' = K_{rel}'' K_{rel}' \frac{U}{Z_S + Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

$$I_{dz1}'' = \frac{K_{rel} \cdot K_{Ms}}{K_{re}} \cdot I_{L,max} \quad (10)$$

式中： K_{rel}' 、 K_{rel}'' 和 K_{rel} 为电流保护的可靠系数； K_{Ms} 为自启动系数； K_{re} 为电流继电器的返回系数； $I_{L,max}$ 为线路上可能出现的最大负荷电流。

2.3 分布式电源并入配电网的准入容量分析

通过 PSCAD 建模如图 3 所示，设定电源、线路和负荷等参数，求出短路后各保护的测量电流。为便于分析，将短路点 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 点取为线路末端。计算并仿真线路发生短路时，分布式电源的注入短路电流对各个保护的動作影响，并结合保护整定值来确定分布式电源的准入容量。由于 f_3 点发生短路故障时，分布式电源对流过保护 1 和 2 的电流没有影响，仅影响保护的重合闸，因此不再做详细分析。

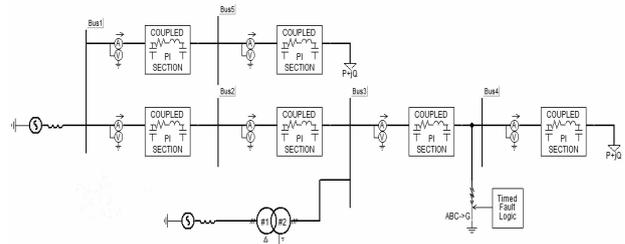


图 3 PSCAD 搭建 DG 并入配电网电路图

Fig.3 Circuit diagram of distribution network with DG structured by PSCAD

1) AB 线路末端短路

在 AB 线路末端发生三相短路故障时，DG 注入短路电流反向流过保护 2，会对其正确动作产生影响。此时流过保护 2 的短路电流值为

$I_{k2} = \frac{E_d}{X_d + X_T + X_2}$ ，而其 II 段整定值为

$I_{dz2}^* = K_{rel}^* K_{rel}' \frac{U}{Z_s + Z_1 + Z_2 + Z_3}$ ，当 $I_{k2} \geq I_{dz2}^*$ 时，保护 2

的 II 段保护可能动作切除故障线路。下面通过实际参数计算出使 $I_{k2} \geq I_{dz2}^*$ 的 DG 容量值。

根据以上电流保护的整定公式和图 2 所示配电系统的参数，取 $K_{rel}'=1.2$ ， $K_{rel}^*=1.1$ ， $K_{rel}=1.25$ ，

$K_{Ms}=1.0$ ， $K_{re}=0.85$ ，并假设 DG 容量从 0~85 MW 变化，求出流过保护 1 和 2 的短路电流数值，绘出变化曲线图如图 4 所示。分布式电源的注入短路电流对流过保护 1 的短路电流没有影响，保护 1 不会误动作。如图 4 所示 A 点，当 DG 容量大于或等于系统容量的 10.71% 时，反向流过保护 2 的短路电流 I_{k2} 超过保护 2 的 II 段整定值 I_{dz2}^* ，在短路时如果 DG 没有及时切除，经过延时后，保护 2 的 II 段会延时动作，切除故障线路，形成孤岛，DG 继续向负荷供电。这时需要考虑 DG 供电的电压和频率的稳定性，同时还要考虑配电网重合闸时，系统电源与 DG 的同期问题。

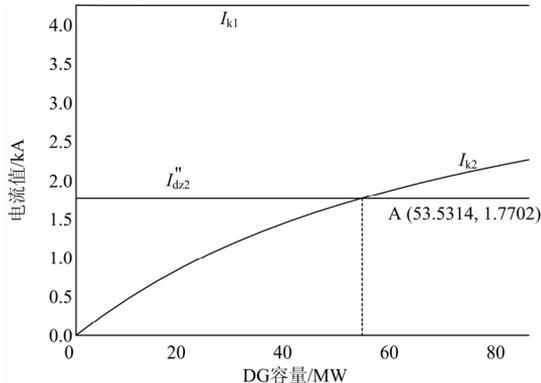


图 4 在 AB 线路末端短路时保护的测量值

Fig.4 The measured values of the protection when short circuit occurred at the end of line AB

2) BC 线路末端短路

由上面分析可以得知，在 BC 线路末端短路时分布式电源对流过保护 1 和 2 的短路电流没有影响，只是在保护动作切除系统电源后，分布式电源仍向故障点提供短路电流，会使保护不能重合闸成功，这时 DG 的保护需要动作以保证 DG 与故障线路脱离，停止向故障线路输送功率。

3) CD 线路末端短路

在 CD 线路末端发生三相短路时，DG 的注入短路电流对流过保护 2 电流产生汲流作用，减小其保护范围，保护 2 的 I 段不会误动作。由于 DG 是在母线 C 处并入电网，保护 2 的 II 段能不受 DG 影

响而能保护本段线路全长。在 DG 的下游发生短路时，DG 的注入电流使流过保护 2 的电流减小，因此保护 2 的 II 段也不会超出下段线路的保护 I 段，而与保护 3 的 II 段失去选择性。DG 对流过保护 3 的电流产生助增作用，增加其保护范围，可能使保护 3 的 I 段保护范围超出本段线路，与线路 4 的保护 I 段失去选择性而误动作。经过分析知，流过保护 3 的短路电流值为：

$$I_{k3} = \frac{E_s(X_d + X_T) + E_d(X_s + X_1 + X_2)}{(X_d + X_T) \cdot (X_s + X_1 + X_2) + X_3(X_s + X_1 + X_2 + X_d + X_T)}$$

而保护 3 的 I 段整定值为

$$I_{dz3}^* = K_{rel}' \frac{U}{Z_s + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$$

据此可求出当 $I_{k3} \geq I_{dz3}^*$ 时，DG 的最大准入容量。

DG 容量从 0~85 MW 变化时，计算出流过保护 2 和 3 的短路电流数值，其变化曲线图如图 5 所示。DG 的存在增大了流过保护 3 的短路电流 I_{k3} ，减小了流过保护 2 的短路电流 I_{k2} 。如图 5 中 B 点，在 DG 容量大于或等于系统容量的 6.67% 时，电流 I_{k3} 的值超出了保护 3 的 I 段整定值 I_{dz3}^* ，使其与保护 4 的 I 段失去选择性而误动。

4) AF 线路末端短路

在 AF 线路末端发生三相短路时，DG 提供短路电流反向流经保护 1 和 2，由于流过保护两者短路电流相同，而保护 2 的整定值较保护 1 的小，因此，主要分析保护 2 的动作情况。同时，DG 对保护 5 的电流有助增作用。

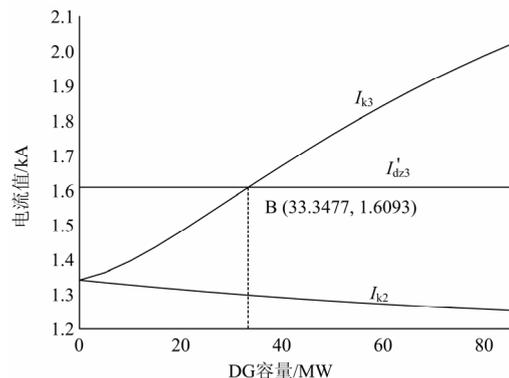


图 5 在 CD 线路末端短路时保护的测量值

Fig.5 The measured values of the protection when short circuit occurred at the end of line CD

DG 容量从 0~85 MW 变化时，可以求出流过保护 2 和 5 的短路电流值，绘出曲线图如图 6 所示。DG 的注入短路电流对流过保护 5 的短路电流 I_{k5} 影响较小，从图 6 中可以看出，DG 容量在一定范围时，不会使保护 5 误动。而由于短路点距离 DG 较

远, 因此, 反向流过保护 2 的短路电流也较小, 不会由于相邻馈线故障而误动作。

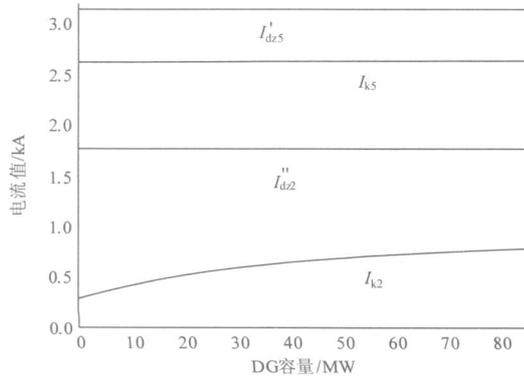


图 6 在 AF 线路末端短路时保护的测量值

Fig.6 The measured values of the protection when short circuit occurred at the end of line AF

3 总结

从以上分析可以看出, 在 DG 并入配电网后, DG 下游发生短路故障时, 对下游的保护测量电流产生助增作用, 对上游的保护测量电流产生汲流作用, 这样会增大下游保护的保护区而可能引起误动作, 减小上游保护的保护区而可能引起拒动。在反向向保护注入短路电流时, 也会使保护动作而切除故障线路, 这时要考虑重合闸和孤岛问题。根据引起保护误动或者拒动的情况, 本文以实例分析并求出分布式电源的容量问题, 以避免电流保护的误动作。由于分布式电源的并入电网还需要综合考虑其他因素, 因此分布式电源的准入容量问题还需要进一步分析。

参考文献

[1] 华丽丹, 陆于平, 吴罡, 等. DG 容量在分布式发电中对数字保护影响的研究[J]. 中国电力, 2008, 41 (3): 12-16.
HUA Li-dan, LU Yu-ping, WU Gang, et al. Study on the effect of distributed generation size on digital protective device in distribution system[J]. Electric Power, 2008, 41 (3): 12-16.

[2] 王希舟, 陈鑫, 罗龙, 等. 分布式发电与配电网保护协调性研究[J]. 继电器, 2006, 34 (3): 15-19.
WANG Xi-zhou, CHEN Xin, LUO Long, et al. Research on the coordination of distributed generation and distribution system protection[J]. Relay, 2006, 34 (3): 15-19.

[3] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (1): 81-84, 89.
SUN Jing-liao, LI Yong-li, LI Sheng-wei, et al. A

protection scheme for distribution system with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (1): 81-84, 89.

[4] 雷金勇, 黄伟, 夏翔, 等. 考虑相间短路影响的分布式电源准入容量计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 82-86.
LEI Jin-yong, HUANG Wei, XIA Xiang, et al. Penetration level calculation with considerations of phase-to-phase short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3): 82-86.

[5] 张伟. 异步风力发电系统并网运行仿真分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
ZHANG Wei. Simulation and analysis on grid-connected asynchronous wind power system[D]. Taiyuan: Taiyuan Technology University, 2006.

[6] Gomez J C, Morcos M M. Coordinating over current protection and voltage sag in distributed generation systems[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002.

[7] El-Khattam W, Salama M M A. Distributed generation technologies, definitions and benefits[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71: 119-128.

[8] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. The theories of power system protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

[9] Girgis A, Brahma S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system[C]. //Proceedings of IEEE Summer Meetings. 2001.

[10] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (6): 53-56.
LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong. Distributed generator and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (6): 53-56.

[11] 庞建业, 夏晓宾, 房牧. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器, 2007, 35 (11): 5-8.
PANG Jian-ye, XIA Xiao-bin, FANG Mu. Impact of distributed generation to relay protection of distribution system[J]. Relay, 2007, 35 (11): 5-8.

[12] 张超, 计建仁, 夏翔. 分布式发电对配电网馈线保护的影响[J]. 继电器, 2006, 34 (13): 9-12.
ZHANG Chao, JI Jian-ren, XIA Xiang. Effect of distributed generation on the feeder protection in distribution network[J]. Relay, 2006, 34 (13): 9-12.

[13] 韦钢, 吴伟力, 胡丹云, 等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 36-40.
WEI Gang, WU Wei-li, HU Dan-yun, et al. Distributed generation and effects of its parallel operation on power system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (1): 36-40.

(下转第 165 页 continued on page 165)

- Control, 2009, 37 (6): 44-47.
- [4] 王小君, 鲍海. 电力系统节点输电网损成本分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 120-124.
WANG Xiao-jun, BAO Hai. Node network loss cost analysis method in transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 120-124.
- [5] 罗庆跃, 李晓明, 等. 零阻抗支路在短路故障计算机分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (4): 107-110.
LUO Qing-yue, LI Xiao-ming, et al. Application of zero impedance branch for computer's analyses on short-circuit fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (4): 107-110.
- [6] 石东源. 电力系统故障计算中互感线路的处理[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (7): 58-61.
SHI Dong-yuan. Treatment of lines with mutual inductance in power system fault calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (7): 58-61.
- [7] Teng J H, Su Y S, et al. Decomposition approach and analysis for a Z-matrix building process[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151 (5): 638-643.
- [8] 李伟, 鲍海, 等. 基于功率分量理论的网损分摊问题[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (25): 157-160.
LI Wei, BAO Hai, et al. Problem of loss allocation based on power components theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (25): 157-160.
- [9] 陈圻. 电力系统稳态分析[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [10] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 二版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [11] 米麟书, 刘芳宁. 电力系统故障的计算机辅助分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992.
- [12] 苏小林, 阎晓霞. 提高节点阻抗矩阵支路追加法的效率分析[J]. 电力学报, 2004, 19 (2): 91-94.
SU Xiao-lin, YAN Xiao-xia. Efficiency analysis for improving brand additional method of node impedance matrix[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19 (2): 91-94.
- [13] Whei Minlin, Yuh Sheng, et al. A new building algorithm for Z-matrix[C]. //IEEE Power System Technology, Proceedings Power International Conference. 2000, 20 (4): 1041-1046.
- [14] 乐全明, 郁惟镛, 杜俊红. 一种计及支路互感的形成节点阻抗矩阵新方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (19): 42-46.
YUE Quan-ming, YU Wei-yong, DU Jun-hong. A new building algorithm for Z-matrix considering branch mutual-inductance[J]. Power System Technology, 2004, 28 (19): 42-46.
- [15] 乐全明, 郁惟镛, 杜俊红. 一种形成节点阻抗矩阵的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (2): 34-39.
YUE Quan-ming, YU Wei-yong, DU Jun-hong. An improved novel algorithm for building Z-matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (2): 34-39.
- [16] LIU Bao-zhu, LI Bo-long. A general algorithm for building Z-matrix based on transitional matrices[C]. //IEEE Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing(China): 2008: 794-797.
- [17] 冯天民, 刘宝柱, 鲍海. 一类含CCCS网络形成节点阻抗矩阵的新算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (2): 139-144.
FENG Tian-min, LIU Bao-zhu, BAO Hai. A novel algorithm for building Z-matrix of electric power network including CCCS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (2): 139-144.
- [18] 王承民, 蒋传文. 基于支路电流状态变量的灵敏度分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (1): 42-46.
WANG Cheng-min, JIANG Chuan-wen. Research on sensitivity analysis method based on line current variable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (1): 42-46.
- [19] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [20] 邱关源. 电路[M]. 四版. 北京: 高等教育出版社, 1999.

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2010-02-03

作者简介:

杨美佳 (1984-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统运行、分析与控制研究; E-mail: yangmeijia119@tom.com

刘宝柱 (1974-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统运行、分析与控制的研究工作。

(上接第 160 页 continued from page 160)

- [14] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (1): 35-40.
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on power flow calculation of distribution systems with DGs[J]. Automaiton of Eelertic Power Sysetms, 2006, 30 (1): 35-40.

收稿日期: 2009-09-15; 修回日期: 2009-12-23

作者简介:

冯希科 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电原理、分布式电源的并网特性及保护; E-mail: esport06@163.com

邵能灵 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、电力系统安全控制。