

分布式发电机在配电网中的优化配置

张勇¹, 吴淳²

(1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100037; 2. 上海东捷集团, 上海 200120)

摘要: 分布式发电机接入配电网后会对网损产生重要影响, 其影响与分布式发电 (Distributed Generation, DG) 的安装位置和注入容量密切相关。提出一种在网损最小优化条件下配置 DG 的简化估算方法, 基于放射状单回路的配电网结构, 均匀分布的负荷模型, 推导出了单电源 DG 接入配网的网损解析表达式和优化配置计算公式, 并将该算法推广到多台 DG 接入的情况。通过仿真算例与基因算法的配置结果进行比较, 配置结果基本吻合, 验证了该算法的有效性; 同时, 该算法的应用简单方便, 对电网规划具有较强的实用性。研究表明, 单电源 DG 的安装位置和注入容量在网损最优约束条件下, 有明确的理论依据。

关键词: 分布式发电; 配电网; 网损; 优化配置; 接入位置; 注入容量

Optimal placement of DG unit in distribution system

ZHANG Yong¹, WU Chun²

(1. College of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China;
2. Shanghai Dongjie Group, Shanghai 200120, China)

Abstract: Interconnection of distributed generators has obvious impacts on line loss in distribution system and the effects depend on interconnected location and power injection of DG. Optimal DG unit placement under objective of minimizing the line loss is proposed. Based on radial distribution system structure, this paper illustrates the line loss expression of single DG unit placement under evenly distributed load condition and finds the optimal siting and sizing algorithm for single DG unit and multiple DG units. The proposed method is compared with Genetic algorithm based on same simulation sample, and the result confirmed the validation of proposed method. The proposed method is very simple and has practical value for distribution system planning. It shows that in the constraints of loss optimum, the interconnected location and power injection have explicit principle.

Key words: distributed generation; distribution system; line loss; optimal placement; interconnected location; power injection

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0033-05

0 引言

分布式发电 (Distributed Generation, DG) 是相对于传统的大容量集中式发电厂而言的一种新兴技术, 也称为分布式能源 (Distributed Energy Resource, DER), 是一种分散、非集中式的发电方式, 具有如下特点:

接近终端用户;

容量相对较小 (通常几十kW到几十MW);

运行在380 V、10 kV或稍高的配电电压等级上;

采用洁净或可再生能源 (天然气、沼气、太阳能、生物质能、微燃机、小型风力发电、小型水力发电);

常采用热电联产的方式。

分布式发电通常以接入配电网为主, 会对配电

网的很多方面产生影响, 比如电能质量、电网可靠性、配网损耗、继电保护等。

分布式发电和传统集中式发电形式有显著不同, 主要表现在以下 9 个方面: (1) 发电的目的; (2) 发电装置的安装地点; (3) 发电装置的容量; (4) 所发电能的覆盖域; (5) 发电技术; (6) 对环境的影响; (7) 运行模式; (8) 发电装置的所有权; (9) 发电量所占的份额^[1]。

其中特别是第 (2)、(3) 两点, 也就是确定在各种约束条件下 DG 的安装位置和注入容量对于电网规划、设计和投资都是至关重要的, 已经成为国内外学者研究的热点问题。

关于分布式发电接入配电网的准入功率和位置的算法有大量相关研究。文献[2]基于链式网络、恒电流静态负荷和恒电流输出的分布式电源稳态模

型, 从电压分布角度理论分析了负荷平衡点、分布式发电可行接入位置和临界注入容量的解决方法。文献[3]根据配电网拓扑结构特点以及引入 DG 后的影响, 提出了一种基于馈线潮流分布图示求解 DG 优化配置的问题。文献[4]应用遗传算法优化分布式电源的位置和容量。文献[5]以有功和无功发电成本最小为目标函数, 采用 GA 结合 OPF 确定分布式电源的优化配置。文献[6]采用模糊推理系统解决 DG 的优化配置问题。

这些算法都要求了解配电网的负荷情况、网络结构并且大都要经过复杂的迭代计算过程。本文试图通过分析给出一个基于网损最小优化条件的配置 DG 的简化估算方法, 为配电网的运行管理人员快速评估和配置分布式电源提供了一个有力工具。

本文第 2 部分分析了网损最小目标下单电源 DG 的优化配置问题, 第 3 部分研究了多台 DG 的优化配置问题, 第 4 部分通过仿真算例说明本文方法的有效性, 第 5 部分给出了结论。

1 网损最小目标下单电源 DG 优化配置

在放射状结构的配电网中, 如果没有任何分布式电源接入, 通常由配网变压器连接负荷线路和高电压等级的电源, 并供给所有负荷电能。如图 1 所示, 配网线路接近电源的部分流过的潮流和负荷电流要明显大于远离电源的线路部分。这就必然导致配网变压器和接近电源部分馈线的发热和高损耗。而如果在配网的合适位置接入适当容量的 DG, 则能大大降低配电网馈线的网损。

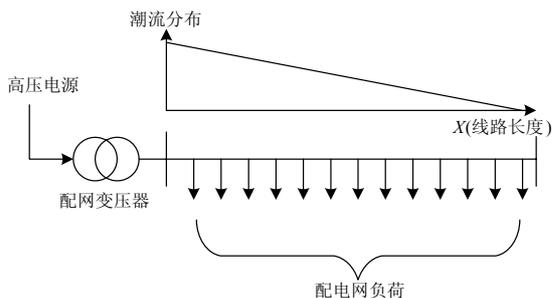


图 1 配网潮流沿放射状线路分布示意图

Fig.1 Power flow along radial feeder line in distribution system

考虑到配电网的特点, 在以下分析中, 做出如下假设,

- 只计及铜损;
- 与有功传输量相比, 无功在配网中的传输量很小, 因而线路损耗主要由有功潮流决定;
- 计算线路损耗时, 假定馈线电压沿线路保持不变;

d. 负荷功率沿配电线路均匀分布。

图 1 中给出一个负荷功率沿配电线路均匀分布的放射状配电网。如图所示, 流过配网线路的有功功率 p_f 可以表示为从配网变压器到线路指定点的距离的函数, 考虑到负荷均匀分布, p_f 随着距离增加而线性降低。

配电网中的有功潮流 p_f 可以表示为如下形式:

$$p_f(x) = (P_{\text{load}} - P_{\text{DG}}) - p_1 x \quad 0 < x < x_{\text{DG}} \quad (1)$$

$$p_f(x) = (L - x) p_1 \quad x_{\text{DG}} < x < L \quad (2)$$

$$P_{\text{load}} = p_1 L \quad (3)$$

式中: L 代表线路总长度; P_{load} 代表沿此段线路的总负荷功率; p_1 代表单位长度的负荷功率; x_{DG} 代表 DG 接入位置; P_{DG} 代表 DG 注入功率。

通常情况下, DG 的优化配置可以等效成为一个有约束最优化问题, 关于这类最优化问题的求解, 文献[4-6]有详细的描述。在本文中, 选取配网线路损耗最小为优化目标, 此优化问题可表示如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & P_{\text{loss}} \\ & 0 < x_{\text{DG}} < L \\ & 0 < P_{\text{DG}} < P_{\text{load}} \end{aligned}$$

在接入 DG 的配网中, 由于损耗减小而导致的电压升高现象是限制 DG 准入容量的关键性因素。在本文提出的优化配置快速估算方法中, 并不考虑电压约束条件。具体应用中, 可以先用本文方法进行配置, 然后再验证配置结果是否满足电压约束条件, 如不满足则降低注入功率。

配网沿线路的损耗函数可以表示为式 (4)

$$p_{\text{loss}}(x) = r_1 I_{\text{active}}(x)^2 = r_1 \left(\frac{p_f(x)}{\sqrt{3}U_{\text{line}}} \right)^2 = K p_f(x)^2 \quad (4)$$

式中: $p_{\text{loss}}(x)$ 为馈线单位长度损耗; r_1 为馈线单位长度电阻; U_{line} 为馈线线电压, 计算损耗时假定沿馈线保持不变; $K = \frac{r_1}{3U_{\text{line}}^2}$ 为常数。

配网总的损耗功率 P_{loss} 可以用如式 (5) 积分式计算:

$$P_{\text{loss}} = K \left[\int_0^{x_{\text{DG}}} ((p_1 L - P_{\text{DG}}) - p_1 x)^2 dx + \int_{x_{\text{DG}}}^L ((L - x) p_1)^2 dx \right] \quad (5)$$

积分结果为:

$$P_{\text{loss}} = K \left[p_1 P_{\text{DG}} x_{\text{DG}}^2 - 2 p_1 L x_{\text{DG}} P_{\text{DG}} + x_{\text{DG}} P_{\text{DG}}^2 + \frac{1}{3} p_1^2 L^3 \right] \quad (6)$$

可以把式 (6) 看成是配网总的损耗功率

$P_{\text{loss}}(x_{\text{DG}}, P_{\text{DG}})$ 相对分布式电源接入位置和容量的函数表达式。

求取 $P_{\text{loss}}(x_{\text{DG}}, P_{\text{DG}})$ 的极值。设接入位置固定, 即 x_{DG} 为常数, 令 $P_{\text{loss}}(x_{\text{DG}}, P_{\text{DG}})$ 对 P_{DG} 的偏导为零, 即

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_{\text{DG}}} = 0$$

可以得到:

$$P_{\text{DG}} = p_1 L - \frac{1}{2} p_1 x_{\text{DG}} \quad (7)$$

类似地, 再假设 P_{DG} 为常数, 令 $P_{\text{loss}}(x_{\text{DG}}, P_{\text{DG}})$ 对 x_{DG} 的偏导为零, 即

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial x_{\text{DG}}} = 0 \quad (8)$$

可以得到,

$$x_{\text{DG}} = L - \frac{P_{\text{DG}}}{2p_1} \quad (9)$$

$$P_{\text{loss}} = K \left[-p_1 L^2 P_{\text{DG}} + L P_{\text{DG}}^2 - \frac{1}{4p_1} P_{\text{DG}}^3 + \frac{1}{3} p_1^2 L^3 \right] \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (10), 求对 P_{DG} 的一阶偏导:

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_{\text{DG}}} = -p_1 L^2 + 2L P_{\text{DG}} - \frac{3}{4p_1} P_{\text{DG}}^2 = 0 \quad (11)$$

式 (10) 的可行解为:

$$P_{\text{DG}} = \frac{2}{3} P_{\text{load}} \quad (12)$$

式 (12) 代入式 (9), 得到,

$$x_{\text{DG}} = L - \frac{P_{\text{DG}}}{2p_1} = \frac{2}{3} L \quad (13)$$

在图 2 中, DG 的注入容量和接入位置都在假设条件下得到优化, 优化后的潮流分布如图 2。

由上述推导过程可见, 当单台 DG 在距线路起始位置 66.7% 的地点接入配网, 注入功率为 66.7% 的总负荷功率时, 配网的线路损耗能取得极小值。

假定图 2 所示系统的线路长度为 30 km, 则网损随单台 DG 注入功率和接入位置的变化可以参考三维示意图 3, 其中注入容量采用标么值, 配网损耗指数表明损耗大小。

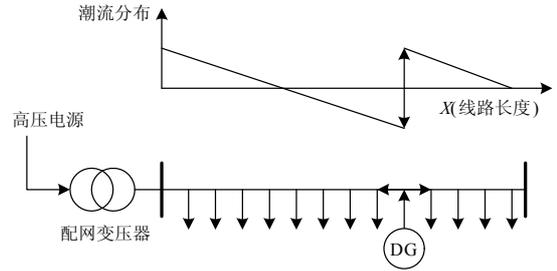


图 2 单台 DG 接入配电网的优化配置及潮流分布

Fig.2 Optimal placement of single DG in distribution system and power flow along radial line

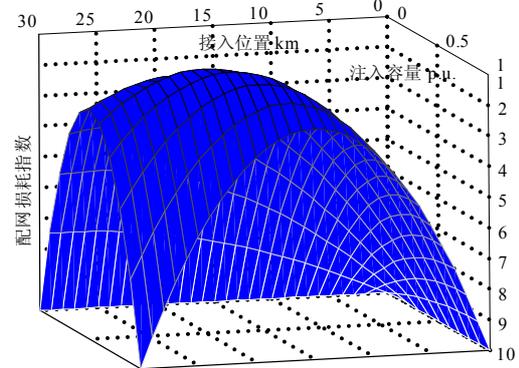


图 3 配网损耗和单台 DG 注入容量及接入位置的关系

Fig.3 Relationship between line loss, injection power of DG and interconnected position

2 多台 DG 的优化配置

上一部分的分析主要是针对单台 DG 的注入功率和接入位置的优化, 下文将此方法推广到多台 DG 的优化配置。假定有 n 台 DG 需要配置, 目标是确定所有 DG 的注入功率 $P_{\text{DG},i}$ 和接入位置 $x_{\text{DG},i}$, 使得总损耗最小。则 $P_{\text{DG},i}$ 、 $x_{\text{DG},i}$ 的表达式为:

$$x_{\text{DG},i} = \frac{2i}{2n+1} L \quad (14)$$

$$P_{\text{DG},i} = \frac{2}{2n+1} P_{\text{load}} \quad i=1, \dots, n \quad (15)$$

多台 DG 优化配置如图 4 所示, 其注入功率和接入位置由公式 (14) (15) 确定, 此时配电网线路潮流呈周期性变化的波形, 网损取得最小值。

由公式 (4) 可知, 配电网的本地损耗与本地有功潮流的平方成正比, 结合式 (14)、(15), 总的配网损耗与式 (16) 成正比:

$$P_{\text{loss}} \propto \left[(2n+1) \int_0^L \left(\frac{P_{\text{load}}}{2n+1} - \frac{P_{\text{load}}}{L} x \right)^2 dx \right] \quad (16)$$

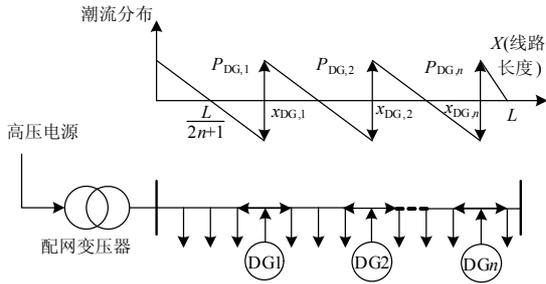


图 4 n 台 DG 接入配电网的优化配置及潮流分布

Fig.4 Optimal placement of n DGs in distribution system and power flow along radial line

积分并化简可得,

$$P_{\text{loss}} \propto \frac{P_{\text{load}}^2 L}{3(2n+1)^2} \quad (17)$$

由式 (17) 可见, 接入 n 台 DG 之后, 总的配电网线路损耗与 $(2n+1)$ 的平方成反比。如果设定总负荷 P_{load} 恒定, 在无 DG 接入的情况下配网基准线路损耗为 $100\% P_{\text{loss}}$, 则按式 (14)、(15) 接入不同数量、不同容量的 DG 后, 损耗的变化情况可以参考图 5。由图 5 可以看出, DG 的接入能大幅度降低配网线路损耗, 接入 1 台 DG, 相对损耗相当于不接入时的 11%, 降低了 89%; 接入 2 台 DG, 相对损耗为 4%, 降低了 96%。

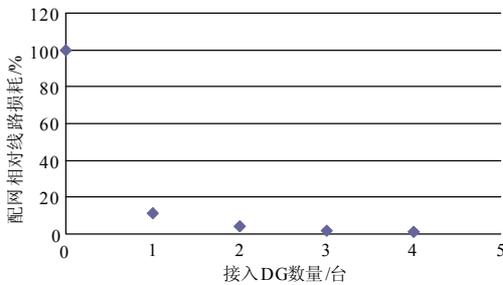


图 5 配网相对线路损耗随 DG 数量变化示意图

Fig.5 Relationship between line loss reduction and number of interconnected DG

式 (14)、(15) 中, 接入位置 $x_{\text{DG},i}$ 是从配网变压器到接入点的距离来计算的, 这种方法忽略了配网变压器本身对于损耗的影响, 并且只能用于配网线路单位长度阻抗保持不变的情况。如果要计及变压器损耗的影响, 可以将式 (14) 改写为:

$$z_{\text{DG},i} = \frac{2i}{2n+1} (z_T + z_{\text{line}}) \quad i=1, \dots, n$$

其中: $z_{\text{DG},i}$ 代表配网变压器到第 i 台 DG 接入点的等效线路阻抗; z_T 代表变压器等效串联阻抗; z_{line}

代表配网线路总串联阻抗。

应用上式确定 DG 的接入位置可以考虑变压器阻抗对于损耗的影响, 也不再限于只能采用配网线路单位长度阻抗保持不变的线路模型。由于放射状接线的配电网始端负荷电流要明显大于末端, 通常末端线路的截面积要小于始端, 因而单位长度的阻抗值在也会发生变化。

本文 2、3 部分所提出的基于配网线路损耗优化配置 DG 的方法完全基于理论上的推导, 所设定的条件, 比如负荷沿放射状线路均匀分布等是为推导方便所作的简化假设。在实际应用中, DG 所有权不属于电网公司和调度机构, 通常是间歇性地接入电网, 并不是随时可投入运行。但是采用优化方法得到配电网损耗最优的 DG 配置方案仍然对于电网规划和管理人员有着重要意义, 管理者可以通过在不同安装地点收取不同的电网接入费用等经济手段引导 DG 的业主方在合适的地点安装 DG。本文所提出的 DG 优化配置算法物理意义明确, 应用方便简单, 不需要复杂的迭代或者 OPF 计算, 非常适用于配电网的设计、规划和管理人员在项目前期进行初步估算。

3 仿真算例

在此采用图 4 的系统验证本文提出的算法。仿真条件设置如下, 配网主干线路全长 30 km, 负荷沿线路均匀分布, 单位长度负荷值为 $1/30$ p.u., 总的负荷为 1 p.u., 优化目标为配电网损耗最小, 损耗用式 (17) 表示。

本文设定了接入 1~4 台 DG 作为不同的仿真场景, 分别用本文配置方法和基因算法 (GA) 进行仿真计算, 仿真结果可参考表 1。

表 1 中 K 参见式 (4)。由表 1 可见, 两种算法优化配置结果, DG 位置的相对误差主要在 $0.64\% \sim 13.5\%$ 之间, DG 注入容量的误差主要在 $2.22\% \sim 14.2\%$ 之间。个别点出现偏差较大的情况, 是由基因算法的随机误差造成的。

两种算法的配置结果比较可以参照图 6, 图中横坐标代表接入位置, 纵坐标代表优化配置 DG 的注入功率值, 实线代表本文算法的配置结果, 虚线代表 GA 算法的配置结果。两种算法的相对误差比较可参考图 7。

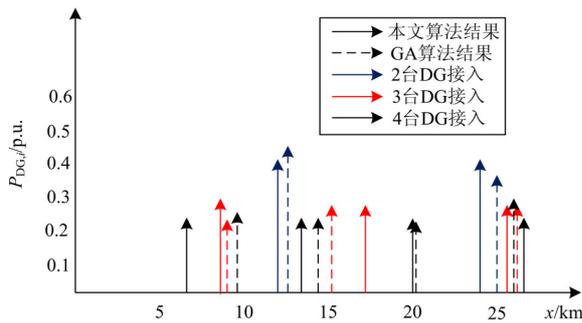


图 6 算例仿真结果比较

Fig. 6 Comparison of simulation result

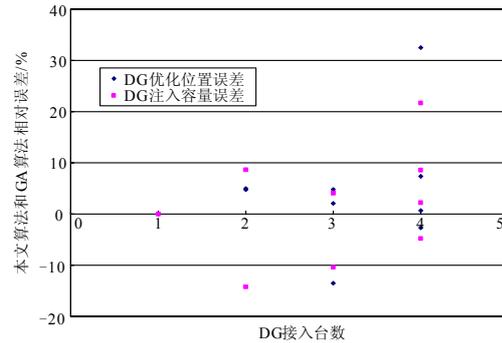


图 7 算例相对误差比较

Fig.7 Comparison of relative error of proposed method and GA algorithm

表 1 仿真算例结果

Tab. 1 Simulation result

DG 数量	$n=1$	$n=2$	$n=3$				$n=4$			
本文方法 配网损耗	1.11K	0.400K	0.204K				0.100K			
GA 配网损 耗	1.11K	0.416K	0.238K				0.184K			
DG 优化位 置 (本文)	20.000	12.000	24.000	8.571	17.140	25.710	6.667	13.330	20.000	26.670
DG 优化位 置 (GA)	20.000	12.620	25.190	9.000	15.100	26.250	9.875	14.390	20.130	25.970
DG 注入容 量 (本文)	0.667	0.400	0.400	0.286	0.286	0.286	0.220	0.220	0.220	0.220
DG 注入容 量 (GA)	0.668	0.438	0.350	0.259	0.298	0.298	0.241	0.225	0.210	0.281

4 结论

本文采用网损最优模型研究配网中 DG 接入位置和注入容量的优化配置问题。基于放射状单回路的配电网结构, 均匀分布的负荷模型, 推导出了单电源 DG 接入配网的网损的解析表达式, 并得到了网损最优条件下的 DG 优化配置计算公式。随后将优化配置算法推广到多台 DG 接入的情况。结合仿真算例, 说明了本文与基因算法相比, 配置结果基本吻合, 验证了算法的有效性。虽然存在负荷模型等方面的粗糙性, 但本方法物理意义明确, 应用简单方便, 对于配电网的规划设计人员进行初步估算有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 赵豫, 于尔铿. 电力零售市场研究- (六) 分散式发电对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 27 (15): 25-28, 48.

ZHAO Yu, YU Er-keng. Study on retail electricity market——part six: influence on the electric power system by distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (15): 25-27.

- [2] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 17 (1): 53-58.
- WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi, et al. Study on location and penetration of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 17 (1): 53-58.
- [3] 李根富, 吕林. 一种基于图示求解的分布式发电优化配置方法[J]. 继电器, 2006, 34 (24): 33-37.
- LI Gen-fu, Lü Lin. A figure-based method of optimal placement of DG[J]. Relay, 2006, 34 (24): 33-37.

(下转第 43 页 continued on page 43)

能问题同样是关注的焦点。本项目的测试执行方案(本文的姊妹篇)对全数字化保护系统的设计应用有重要参考价值,为实现更好的经济技术指标和变电站建设的数字化革命具有重要的推动意义。

参考文献

- [1] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. The main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [2] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 57-61.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. New method for implementing the synchronization of merging unit according to the IEC 61850 standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 57-61.
- [3] IEC 61850 communication networks and systems in substation-part 9-2: specific communication service mapping(SCSM)-sampled analogue values over ISO 8802-3[S].
- [4] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. System architecture of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77.
- [5] 王刚, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 47-52.
WANG Gang, DING Mao-sheng, LI Xiao-hua, et al. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 47-52.
- [6] 贺家李, 郭征, 杨晓军, 等. 继电保护的可靠性与动态

性能仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 18-22.

HE Jia-li, GUO Zheng, YANG Xiao-jun, et al. Reliability and dynamic performance simulation of protective relays[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 18-22.

- [7] 李永丽, 李致中, 杨维. 继电保护装置可靠性及其最佳检修周期的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 63-65, 71.
LI Yong-li, LI Zhi-zhong, YANG Wei. Study of reliability and optimal routine test interval of protective relays[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 63-65, 71.
- [8] Anderson P M, Agarwal S K. An improved model for protective system reliability[J]. IEEE Trans Rel, 1992, 41(3): 422-426.
- [9] Anderson P M, Ghajar R F, Chintaluri G M, et al. An improved reliability model for redundant protective systems -Markov models [J]. IEEE Trans on Power Sys, 1997, 12(2): 573-578.
- [10] Schweitzer I E O, Anderson P M. (1998) Reliability analysis of transmission protection using fault tree methods[J/OL]. <http://www.Selinc.com/techpprs/6060.pdf>. 2006-04-21.

收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-04-29

作者简介:

杨丽(1985-), 女, 博士研究生, 研究方向为数字化变电站继电保护技术; E-mail: li.yang-3@hotmail.com

赵建国(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和FACTS装置在电力系统中的应用技术;

Peter A. Crossley(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和可再生能源技术。

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [4] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-42.
WANG Cheng-shan, CHEN Kai, XIE Ying-hua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-42.
- [5] Mardaneh M, Gharehpetian M B. Siting and sizing of distributed generation units using GA and OPF[C].//IEEE Region 10 Conference Tencon. Chiang mai(Tailand): 2004

- [6] Lakshmi Devi A, Subramanyam B. Optimal DG unit placement for loss reduction in radial distribution system-a case study[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2007, 2(6): 57-61.

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2010-01-03

作者简介:

张勇(1972-), 男, 讲师, 硕士, 从事分布式发电、可再生能源和电力市场等方面的研究工作; E-mail: zhangf701@126.com

吴淳(1972-), 男, 工程师, 硕士, 从事分布式发电和配电网自动化方面的研究工作。