

面向智能配电网的保护与控制方法

庞清乐¹, 高厚磊¹, 杜强², 吴远波², 刘凯²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 莱芜供电公司, 山东 莱芜 271100)

摘要: 智能配电网的出现使配电网的保护和控制技术面临新的机遇和挑战, 提出了基于 Multi-Agent 的面向智能配电网的保护和控制方法。智能配电终端和控制中心分别作为一个 Agent, 各 Agent 通过通信网络组成一个 Multi-Agent 系统。各 Agent 通过信息交互, 实现智能配电网的继电保护、故障定位、故障隔离、网络重构、供电恢复以及故障诊断等功能。详细分析了其中的继电保护和故障定位算法。仿真结果表明, 该方法适用于智能配电网, 且具有较高的灵敏度和可靠性。

关键词: 智能配电网; 保护与控制; 故障定位; Multi-Agent

Protection and control method for smart distribution grid

PANG Qing-le¹, GAO Hou-lei¹, DU Qiang², WU Yuan-bo², LIU Kai²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Laiwu Power Supply Company, Laiwu 271100, China)

Abstract: Owing to the smart distribution grid, the protection and control technology of the distribution grid is facing new opportunities and challenges. The Multi-Agent based protection and control algorithm for the smart distribution grid is proposed. Each intelligent distribution terminal (IDT) and control master are all regarded as one Agent respectively, and all Agents construct a Multi-Agent system through communication network. By information exchanging, IDT fulfills protection, fault location, fault isolation, network reconfiguration, power supply restoration and fault diagnosis, etc. The protection and fault location algorithms are discussed in detail. The simulation results show that this method is suitable for smart distribution grid, and has a high sensitivity and reliability.

Key words: smart distribution grid; protection and control; fault location; Multi-Agent

中图分类号: TM764 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0028-05

0 引言

近年来, 世界各国加快了智能电网技术的发展, 并有力地促进了电网的智能化。智能电网已成为未来电网发展的新趋势^[1-2]。国家电网公司提出了加快建设以特高压电网为骨干网架, 以信息化、自动化、互动化为特征的各级电网协调发展的坚强智能电网。努力实现我国电网从传统电网向高效、经济、清洁、互动的现代电网的升级和跨越, 积极促进清洁能源发展。重点从发电、输电、变电、配电、用电、调度、通信信息等七个方面研究电网智能化的关键技术^[3-5]。具有交互和自愈特征的智能配电网 (Smart Distribution Grid, SDG) 使配电网的保护

和控制系统面临新的机遇和挑战。先进的传感器技术、时钟同步及数据同步技术、计算机技术、光纤通信技术和智能终端的设备为智能配电网保护和控制技术提供了广阔的发展空间, 实现基于广域测量信息, 从系统的角度综合考虑的配电网继电保护和分布式控制技术成为可能, 且必将成为配电网保护和控制的发展方向^[6-9]。同时, 智能电网的特征带来的网络重构、分布式电源接入、微网运行等技术, 对配电网的继电保护和控制提出了新的要求, 传统的故障检测、保护、定位、隔离和供电恢复等算法失效, 传统的馈线终端单元 (Feeder Terminal Unit, FTU) 已无法适应智能配电网的要求^[10-12]。因此, 研究适用于智能配电网的智能配电终端 (Intelligent Distribution Terminal, IDT) 和基于智能配电终端的面向智能配电网的保护和控制技术和具有重要的意义。

多代理系统 (Multi-Agent System, MAS) 理论

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (20090461204); 山东电力集团科技项目 (2010-038); 山东省高校科技发展计划项目 (J09LG09)

认为 Agent 具有自治性 (Autonomy)、社会性 (Sociality)、反应性 (Reactivity) 和预动性 (Pro-Activeness), 感知环境变化, 借助通讯交换信息, 由多个代理协调、协商与协作, 达到问题的逐步求解, 非常适合于要求信息交互和分布式控制的智能配电网。本文提出了以智能配电终端为基础, 基于 Multi-Agent 的智能配电网保护和控制方法。

1 智能电网的结构

1.1 智能电网的结构

借鉴传统配电网结构并按照智能电网要求设计智能配电网, 智能配电网主要由变电站、开关站、环网设备、柱上开关、微网 (Micro-Grid, MG)、分布式电源 (Distribution Generation, DG)、馈线、IDT、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和通信网络等组成。每个断路器或分段开关处均安装有电流互感器, 且安装一台 IDT。智能配电网中的配电自动化 (Distribution Automation, DA) 改为高级配电自动化 (Advanced Distribution Automation, ADA), ADA 包括高级配电运行 (Advanced Distribution Operation, ADO) 和高级配电管理 (Advanced Distribution Management, ADM) 两方面的技术内容。ADO 完成配电网安全监控与数据采集 (Distribution Supervisory Control And Data Acquisition, DSCADA)、馈线自动化 (Feeder Automation, FA)、电压无功控制、DG 调度等实时应用功能; ADM 以地理图像为背景信息, 实现配电设备空间与属性数据以及网络拓扑数据的录入、编辑、查询与统计管理。ADO 系统从 ADM 系统中获取配电网属性与网络拓扑数据和线路出线断路器运行信息, 通过向开关传送操作命令, 配合 IDT 实现故障定位、隔离和供电恢复。高级配电运行 (ADO) 系统结构如图 1 所示。变电站与 IDT 通过光纤以太网构成一个分布式控制系统。

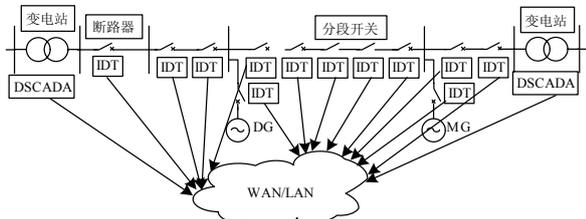


图 1 高级配电运行系统结构

Fig.1 Structure of ADO

1.2 面向智能电网的 MAS 的结构

将智能电网的控制中心和每个智能配电终端分别作为一个 Agent, 通过光纤以太网构成一个

MAS。每个 Agent 的结构如图 2 所示。整个 Agent 的结构分为四层: I/O 层、计算层、决策层和通讯层, I/O 层实现电压、电流和电气设备状态等数据的采集和开关动作、报警的控制; 计算层实现电压电流有效值、有功、无功、谐波含量和零序电压电流等值的计算, 各种故障特征的提取, 进行保护计算以实现速断保护; 决策层主要实现原始数据、中间数据和公共信息的存储, 实现监控报警、后备保护、故障定位、供电恢复和故障诊断等决策, 并协调 Agent 内各模块的工作; 通信模块主要实现与其他 Agent 的通信和与用户交互。

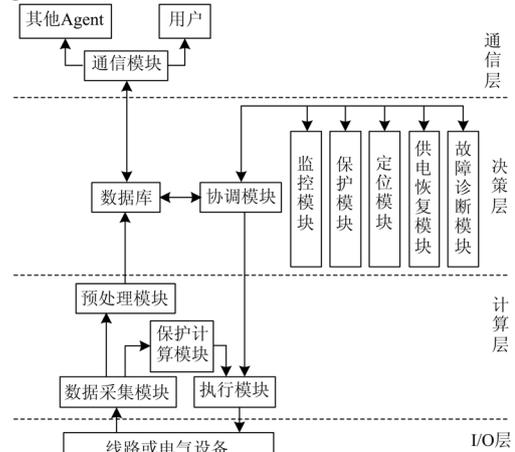


图 2 Agent 结构

Fig.2 Structure of Agent

1.3 智能配电终端的结构

智能配电终端 IDT 具有状态监测、故障检测、故障定位、故障诊断、交互信息、控制开关动作的作用, 它通过检测线路是否失压、过流, 以及暂稳态电流和暂稳态电压来判断故障所在, 继而操作开关, 隔离故障, 恢复供电。IDT 模型如图 3 所示。

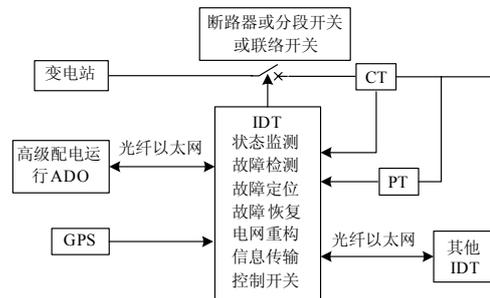


图 3 智能配电终端模型

Fig.3 Model of intelligent distribution terminal

2 保护和控制方法

2.1 继电保护方案

电流差动保护因为其具有简单可靠和动作速度

快且不受电力系统振荡影响等优点，而被广泛应用于输电网。随着光纤以太网和智能配电终端在智能配电网中的成功应用，电流差动保护必将成为智能配电网的最理想保护方法。但是，传统的电流差动保护要求每段线路两侧均安装断路器和电流互感器，使配电网的成本增加。本文在原有配电网结构基础上，通过对传统电流差动保护方法的改进实现智能配电网的差动保护。差动保护方法在高阻接地故障时有可能拒动，同时，由于该方法需要传输的信息量较大，当网络出现阻塞时，导致保护时间延长。传统的电流速断保护虽然具有动作速度快的优点，但是具有不能保护线路全长的缺点。为了提高保护的可靠性，主保护采用电流差动保护和电流速断保护，将两个保护输出进行“或”运算，得到最终的保护输出。传统的过电流保护作为后备保护。

传统的电流差动保护规定电流的正方向为母线指向线路的方向，其判据如式(1)：

$$\begin{cases} |i_M + i_N| - K_Z |i_M - i_N| \geq I_0 \\ |i_M + i_N| \geq I_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中： i_M 、 i_N 分别为节点M和N的电流相量； K_Z 为制动系数； I_0 为差动门槛定值，其整定原则是躲过节点M和N之间线路的电容电流和不平衡电流。

改进的电流差动保护规定电流的正方向为系统电源指向线路末端的方向，其中的分布式电源也看作线路末端。沿着电流的方向，距离系统电源较远的开关为下游开关，距离系统电源较近的为上游开关，不存在下游开关的开关定义为边界开关。

边界开关处的保护采用电流速断保护，保护判据如式(2)：

$$I_k \geq I''_{op} = K''_{rel} I_{k2} \quad (2)$$

其中： I_k 为实际的短路电流； I''_{op} 为保护启动电流； I_{k2} 为保护线路末端在最小运行方式下发生两相短路时的短路电流； K''_{rel} 为可靠系数，取为1.2。

其他开关处的主保护采用电流速断保护和电流差动保护，电流速断保护判据如式(3)：

$$I_k \geq I'_{op} = K'_{rel} I_{k3} \quad (3)$$

其中： I_k 为实际的短路电流； I'_{op} 为保护启动电流； I_{k3} 为保护线路末端在最大运行方式下发生三相短路时的短路电流； K'_{rel} 为可靠系数，取为1.3。电流差动保护判据如式(4)：

$$\begin{cases} |i_m - \sum_{i=1}^l i_{mi}| - K_Z |i_m + \sum_{i=1}^l i_{mi}| \geq I_0 \\ |i_m - \sum_{i=1}^l i_{mi}| \geq I_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中： i_m 为开关m的电流相量； i_{mi} 为开关m的下游第i个开关的电流相量；l为与开关m相连的下游开关的数量； K_Z 为制动系数； I_0 为差动门槛定值，其整定原则是躲过上游开关和下游开关之间线路的电容电流、不平衡电流以及引出负荷的负荷电流。

图4所示为一含有分布式电源的双电源环形接线的10kV智能配电网，开环点为断路器10，每个断路器或分段开关处均配备一个IDT，并作为一个Agent。电流差动保护的工作过程如下：当线路BC段的 k_1 点发生故障时，Agent1将检测到的流过开关1的电流与通过通信网络由Agent2传输过来的流过开关2的电流进行比较，不满足公式(3)和公式(4)的保护动作判据，因而Agent1的保护不动作；Agent2将流过开关2的电流与Agent3传输过来的流过开关3的电流进行比较，满足保护动作判据，故障位于BC段，Agent2的保护动作。当线路CD段的 k_2 点发生故障时，Agent1~5的保护均不动作，Agent6将流过开关6的电流与流过开关7的电流进行比较，满足保护动作判据，故障位于CD段，但是开关6和7处为分段开关，不能分断故障电流，因而Agent6向Agent4发送直跳命令，断开断路器4，其他保护均不满足保护动作判据，保护均不动作。当线路AH的 k_3 点发生故障时，Agent1~9均不满足保护动作判据，保护均不动作。Agent13的保护满足保护动作判据，保护动作，其下游的Agent14不满足保护动作判据，保护不动作。因此，在含有分布式电源的配电网中，无论是本线路故障还是相邻线路故障，电流差动保护均能正确动作。

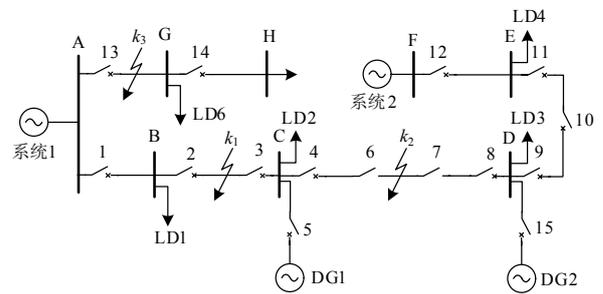


图4 智能配电网保护结构图

Fig.4 Frame of smart distribution grid protection

当保护动作后，在重合闸之前，保护动作的Agent通过通信网络通知其下游的分布式电源处的Agent，使分布式电源退出配电网，上游的分布式电

源依然并网运行。比如, k_1 点故障时, Agent2 向 Agent5 和 Agent15 发切除分布式电源的命令, 使分布式电源 DG1 和 DG2 退出网络。当 k_2 点发生故障时, Agent4 不向 Agent5 发切除分布式电源命令, DG1 依然并网运行。

保护动作后, 经过一段延时, 相应的保护启动自动重合闸, 使相应的开关闭合。若保护装置没有检测到故障, 则为瞬时性故障, 配电网恢复正常工作; 若仍然检测到故障, 则为永久性故障, 相应的保护重新动作, 跳开相应的断路器, 不再执行重合闸。

2.2 故障隔离和供电恢复

若线路 BC 的 k_1 点发生永久性故障, Agent2 将断路器 2 跳开后闭锁, 同时, 通过通信网络, 向 Agent3 发联跳命令, 使断路器 3 跳开, 然后将其闭锁, 实现了故障隔离。而 CD 段线路为非故障区段, 需要恢复其供电。Agent4 和 Agent6~9 处的保护不动作, 且不在故障区, 它们向其新电源侧的 Agent10 发恢复供电请求, 则 Agent10 将联络开关 10 闭合, CD 段负荷由系统 2 供电, 从而, 恢复其供电。若故障发生在 k_2 点, Agent1~5 的保护均不动作, Agent6 和 Agent7 判断出故障发生在节点 6 和节点 7 之间, Agent6 通知 Agent4 断开断路器 4 后, Agent6 在检测线路无压情况下, 断开分段开关 6, 并通知 Agent15 断开断路器 15, 切除 DG2; 经过一定的延时后, 断路器 4 重合闸, Agent 在检测到电压后闭合分段开关 6, 若是瞬时性故障, 配电网恢复正常工作。若为永久性故障, 则 Agent6 的保护又动作, 又向 Agent4 发送直跳命令, 断开断路器 4, 在检测到无压时, 断开分段开关 6 和 7, 实现故障隔离。在 Agent6、Agent7 检测到分段开关可靠断开后, 重新向 Agent4 发送重合闸命令, 使断路器 4 闭合。恢复节点 4 和节点 6 之间的线路供电。同时, Agent7 向 Agent10 发送恢复供电命令, 使联络开关 10 闭合, 恢复节点 7 到节点 10 之间的线路供电。

2.3 电网重构和继电保护再整定

当 k_1 点发生故障时, 由开关 2 和 3 将故障区域隔离后, CD 段线路有系统 2 供电, 实现了网络重构, 较为简单, 但是当存在多电源和多分枝时, 就要综合考虑负荷级别、负荷大小、线路的承受电流的能力和电源容量, 通过各 Agent 间的信息交互, 利用遗传算法等智能算法重新确定电能供应的网络结构, 实现网络重构。

网络重构后, 各 Agent 之间的关系发生了变化, 比如在 k_1 点发生故障时, 网络重构前, 节点 4 是节点 6 的上游节点, 节点 6 是节点 7 的上游节点, 而

网络重构后, 节点 4 是节点 6 的下游节点, 节点 6 是节点 7 的下游节点。电流差动保护和电流速断保护判据的整定值也需重新整定。

3 保护方法的仿真分析

智能配电网仿真模型如图 5 所示。该模型是一个典型的带有分布式电源和两条馈线的放射式 10 kV 配电网。线路的正序阻抗为 $Z_1=(0.17+j0.38)\Omega/\text{km}$, 正序对地导纳为 $b_1=(j3.045)\mu\text{s}/\text{km}$, 零序阻抗为 $Z_0=(0.23+j1.72)\Omega/\text{km}$, 零序对地导纳为 $b_0=(j1.884)\mu\text{s}/\text{km}$ 。电力系统的容量为 500 MVA, 分布式电源的容量为 3 MVA。

下面利用该模型对上述保护方法进行仿真分析。设 $I_d = \left| \dot{I}_m - \sum_{i=1}^l \dot{I}_{mi} \right|$, 为差动电流, $I_r = \left| \dot{I}_m + \sum_{i=1}^l \dot{I}_{mi} \right|$, 为制动电流, 制动系数 $K_Z=0.2$, 门槛定值 I_0 取线路额定负荷电流的 30%。

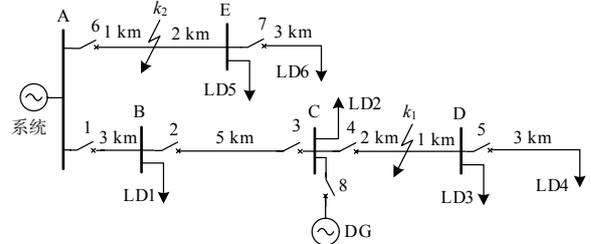


图 5 配电网仿真模型

Fig.5 Simulation model of distribution network

(1) 当 CD 段的 k_1 点发生 B、C 两相短路故障时, 各 Agent 检测到的本地开关电流与下游开关电流的各相的差动电流和制动电流以及相应的保护动作情况如表 1 所示。由表 1 可知, Agent4 处的保护动作, 其他 Agent 处的保护不动作, 动作正确。

表 1 差动保护的电流值和动作情况

Tab.1 Current value and relay operation of differential protection

Agent	A 相/kA		B 相/kA		C 相/kA		I_0/kA	保护动作情况
	I_d	I_r	I_d	I_r	I_d	I_r		
1	0.157	1.452 1	0.113 6	2.389	0.098 4	1.994 5	0.222 3	不动作
2	0	1.302 1	0	2.281 3	0	1.914 9	0.184 1	不动作
3	0.119 3	1.083 8	0.119 7	1.084 7	0.117 1	1.082 6	0.184 1	不动作
4	0.136 1	0.259 8	1.026 9	1.049 9	0.957 9	0.953 3	0.050 9	动作
6	0.154 3	0.446	0.143 1	0.418 4	0.127 7	0.376 7	0.081 9	不动作

各 Agent 处检测的故障电流和电流速断保护动作情况如表 2 所示。表中的 I_{k3}/I_{k2} 是指, 当 Agent 为边界 Agent 时为 I_{k2} , 其他 Agent 为 I_{k3} 。由表 2 可知, 各 Agent 处的保护均不动作, 保护不正确。

将电流差动保护和电流速断保护的输出进行“或”运算后，得到最终的保护输出为 Agent4 的保护动作，保护动作正确。

表 2 故障电流和电流保护动作情况
Tab.2 Fault current value and relay operation of current protection

Agent	A 相 / kA		B 相 / kA		C 相 / kA		保护动作 情况
	I_k	I_{k3}/I_{k2}	I_k	I_{k3}/I_{k2}	I_k	I_{k3}/I_{k2}	
1	0.802 1	2.719 8	1.248 8	2.682 5	1.038 6	2.655 0	不动作
2	0.651 1	1.309 6	1.140 7	1.300 1	0.957 4	1.277 7	不动作
4	0.197 2	0.891	1.038 1	0.902 2	0.955 6	0.873 9	不动作
5	0.064 3	0.121 5	0.018 1	0.126 7	0.018 9	0.116	不动作
6	0.300 1	2.073 6	0.280 7	2.038 9	0.252 2	2.008 4	不动作
7	0.145 9	1.141 7	0.137 7	1.199 7	0.124 5	1.154 7	不动作

(2) 当 AE 段的 k_2 点发生三相短路故障时，各 Agent 检测到的本地开关电流与下游开关电流的各相的差动电流和制动电流以及相应的保护动作情况如表 3 所示。由表 3 可知，Agent6 处的保护动作，其他 Agent 处的保护不动作，保护动作正确。

表 3 差动保护的电流值和动作情况
Tab.3 Current value and relay operation of differential protection

Agent	A 相 / kA		B 相 / kA		C 相 / kA		I_0 / kA	保护动作 情况
	I_d	I_r	I_d	I_r	I_d	I_r		
1	0.040 6	1.001 5	0.041 9	1.007 6	0.041 6	0.995 4	0.222 3	不动作
2	0	0.967 6	0	0.972 2	0	0.961 3	0.184 1	不动作
3	0.118 4	1.084	0.119 7	1.080 5	0.115 8	1.085 4	0.184 1	不动作
4	0.042	0.091 4	0.042 6	0.091 5	0.042 6	0.095 2	0.050 9	不动作
6	3.024 2	3.026	2.984 7	2.987 4	2.955 2	2.959 8	0.081 9	动作

各 Agent 处的检测的故障电流和电流速断保护动作情况如表 4 所示。由表 4 可知，Agent6 处的保护动作，保护正确。将电流差动保护和电流速断保护的输出进行“或”运算后，得到最终的保护输出为 Agent6 的保护动作，保护动作正确。

表 4 故障电流和电流保护动作情况
Tab.4 Fault current value and relay operation of current protection

Agent	A 相 / kA		B 相 / kA		C 相 / kA		保护动作 情况
	I_k	I_{k3}/I_{k2}	I_k	I_{k3}/I_{k2}	I_k	I_{k3}/I_{k2}	
1	0.518	2.719 8	0.522 1	2.682 5	0.521 2	2.655 0	不动作
2	0.483 8	1.309 6	0.486 1	1.300 1	0.480 7	1.277 7	不动作
4	0.066 4	0.891	0.066 9	0.902 2	0.068 7	0.873 9	不动作
5	0.025 3	0.121 5	0.024 9	0.126 7	0.026 8	0.116	不动作
6	3.025 1	2.073 6	2.986 2	2.038 9	2.957 9	2.008 4	动作
7	0.002 5	1.141 7	0.002 4	1.199 7	0.002 5	1.154 7	不动作

以上仿真结果表明，无论是本线路出现故障，还是相邻线路出现故障，保护均能正确动作，没有误动或拒动情况。

4 结论

针对智能配电网的要求，提出了基于 Multi-Agent 的智能配电网保护和控制方法。首先设计了智能配电网的结构，给出了以智能配电网终端为基础、基于 Multi-Agent 的智能配电网保护和控制系统的结构；然后详细论述了基于该模型的保护和控制算法。最后，通过仿真分析验证了该保护和控制算法具有较高的准确性。

参考文献

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (34): 1-8.
YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (34): 1-8.
- [2] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33 (8): 1-7.
CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33 (8): 1-7.
- [3] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (17): 1-7.
LI Xing-yuan, WEI Wei, WANG Yu-hong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (17): 1-7.
- [4] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (9): 1-4.
XIAO Shi-jie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (9): 1-4.
- [5] 施 婕, 艾芊. 智能电网实现的若干关键技术问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (19): 1-4, 55.
SHI Jie, AI Qian. Research on several key technical problems in realization of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (19): 1-4, 55.
- [6] 赵江河, 王立岩. 智能配电网的信息架构[J]. 电网技术, 2009, 33 (15): 26-29, 75.
ZHAO Jiang-he, WANG Li-yan. Information structure of smart distribution network[J]. Power System Technology, 2009, 33 (15): 26-29, 75.
- [7] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (17): 38-42.

(下转第 38 页 continued on page 38)

- (3): 45-50.
- [4] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and its control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 冯治鸿, 周双喜. 大规模电力系统电压失稳区的确定方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 152-156.
FENG Zhi-hong, ZHOU Shuang-xi. Determination of voltage collapse areas in large scale power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 152-156.
- [6] 席勇健, 郭永基, 颜寒, 等. 一种基于特征结构分析的电压稳定算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(3): 1-5.
XI Yong-jian, GUO Yong-ji, YAN Han, et al. Algorithm for evaluating voltage stability based on eigenvalue structure analysis method[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998, 38(3): 1-5.
- [7] 吴强, 吴杰康, 梁纓, 等. 基于特征结构法的交直流系统电压稳定性分析方法[J]. 现代电力, 2007, 24(2): 1-7.
WU Qiang, WU Jie-kang, LIANG Ying, et al. Voltage stability analysis of HVAC/ DC systems based on eigenvalue method[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(2): 1-7.
- [8] 马幼捷, 张继东, 周雪松, 等. 特征结构分析法对风电系统静态电压稳定的研究[J]. 中国电力, 2008, 41(3): 87-92.
MA You-jie, ZHANG Ji-dong, ZHOU Xue-song, et al. Study on steady state voltage stability of power systems including wind farms based on eigen-structure analysis[J]. Electric Power, 2008, 41(3): 87-92.
- [9] Feijoo A E, Cidras J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [10] Saad S Z, Jenkins N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 743-748.
- [11] 徐晓春, 万秋兰, 顾伟, 等. 在线电压稳定分析中快速连续潮流的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 37-41.
XU Xiao-chun, WAN Qiu-lan, GU Wei, et al. Application of fast continuation power flow for on-line voltage stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 37-41.

收稿日期: 2010-05-06

作者简介:

张建平(1972-), 男, 教授, 博士后, 从事风力发电及并网技术、新能源装置中关键部件性能仿真、寿命预测与可靠性测试等方面的研究。E-mail: jpzhanglzu@163.com

(上接第 32 页 continued from page 32)

- XU Bing-yin, LI Tian-you, XUE Yong-duan. Smart distribution grid and distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-42.
- [8] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
WANG Cheng-shan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [9] 李永亮, 李刚. IEC61850第2版简介及其在智能电网中的应用展望[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 11-16.
LI Yong-liang, LI Gang. An introduction to 2nd edition of IEC61850 and prospects of its application in smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 11-16.
- [10] 尹项根, 汪响, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.
YIN Xiang-gen, WANG Yang, ZHANG Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7.
- [11] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 139-145, 165.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New fault region location scheme in distribution system with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 139-145, 165.
- [12] 熊小伏, 陈星田, 夏莹, 等. 面向智能电网的继电保护系统重构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 33-37.
XIONG Xiao-fu, CHEN Xing-tian, XIA Ying, et al. Study on reconstruction of relay protection system for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 33-37.

收稿日期: 2010-06-05

作者简介:

庞清乐(1969-), 男, 博士, 副教授, 在站博士后, 研究方向为智能配电网保护与控制;

高厚磊(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、智能电网等; E-mail: houleig@sdu.edu.cn

杜强(1962-), 女, 高级工程师, 长期从事电力系统运行与管理工作。