

# 大型风电基地连锁故障在线预警系统研究与开发

吕颖<sup>1</sup>, 孙树明<sup>1</sup>, 汪宁渤<sup>2</sup>, 訾鹏<sup>1</sup>, 陈得治<sup>1</sup>, 周强<sup>2</sup>, 高凯<sup>3</sup>, 何晓阳<sup>3</sup>, 张艳军<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃 兰州 730050;  
3. 国网辽宁电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

**摘要:** 针对大规模风电连锁脱网事故频发, 研究并开发了大型风电基地连锁故障在线预警系统。首先分析风电连锁故障的事故特征, 确定建立风电连锁故障在线预警系统的关键环节, 完善风机模型、建立风机保护模型和无功补偿模型。然后基于在线动态安全评估技术, 提出了适合于大型风电基地的连锁故障在线安全预警的方案和基本结构, 包括在线数据整合与预想故障集, 风电场连锁脱网事故搜索方法, 连锁故障严重性评估方法和连锁故障在线预警并行计算方案。研发的系统在电网中进行了实际应用, 验证了所提方法的合理性和有效性。

**关键词:** 风电基地; 连锁故障; 在线预警

## Study and development of on-line cascading fault early-warning system for large-scale wind power base

Lü Ying<sup>1</sup>, SUN Shu-ming<sup>1</sup>, WANG Ning-bo<sup>2</sup>, ZI Peng<sup>1</sup>, CHEN De-zhi<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>2</sup>, GAO Kai<sup>3</sup>, HE Xiao-yang<sup>3</sup>, ZHANG Yan-jun<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;  
2. Wind Power Center of Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China;  
3. Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China)

**Abstract:** With consideration of large-scale cascading trip-off fault of wind generating, an on-line cascading fault early-warning system for large-scale wind power base is developed. Through the research of fault characteristics for wind generating cascading trip-off, the key links for building up cascading fault on-line early-warning system for wind power base are determined, including improving wind generator model and modeling wind generating protection and reactive compensation device. Based on on-line dynamic security analysis system, the scheme and basic structure of cascading fault on-line early-warning system for wind power base are proposed, including on-line data integration and contingency set, searching strategy for cascading trip-off fault, severity evaluation method for cascading fault, and parallel computing method. The system has been put into practice, which proves the rationality and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** wind power base; cascading fault; on-line early-warning

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0142-06

## 0 引言

风电作为最具规模化开发和商业化发展前景的新型清洁能源, 越来越受到世界各国的重视。我国风电近年发展迅猛, 发展规模和发展速度均处于全球领先地位, 截至2010年底, 我国风电装机规模跃居世界第一位, 成为全球风电装机容量最高、新增装机容量最多、增长速度最快的国家。随着风电装机规模的逐渐增大, 风电并网对电力系统安全稳定性的影响逐渐凸显。风电场的大规模建设, 给

电网安全稳定运行带来了挑战。近年来, 国内外都曾发生含大规模风电系统连锁跳闸的运行事故。2006年西欧电网“11·4”大停电事故中, 大量风电机组因频率保护跳闸, 加重电力不平衡, 导致长时间频率偏差<sup>[1-2]</sup>。2011年中国甘肃酒泉地区和河北张家口地区的多起风电机组脱网事故中, 大量风电机组因电压问题连锁跳闸脱网, 损失大量出力, 导致电网频率明显偏低<sup>[3-5]</sup>。

为此, 国内外学者开展了相关的研究。在大电网连锁故障方面, 电力科技工作者对连锁故障引起的大面积停电事故进行了详尽的分析研究, 采用的理论和方法主要包括: 利用复杂系统理论揭示连锁

基金项目: 国家电网公司重大科技项目

故障发生的内在机理; 从电网的整体结构入手研究不同的拓扑结构对电网发生大规模连锁故障的影响; 利用模式搜索方法模拟连锁故障的过程并对结果进行分析评估<sup>[6-9]</sup>。

大型风电基地集中开发和远距离外送的风电发展模式为我国特有, 具有以下特点: (1) 在部分风资源丰富地区, 风电装机比例、发电量和运行水平已与风电发达国家相当; (2) 不同于国外分散开发的模式, 我国风电开发集中度高; (3) 风电接入电压等级高, 约 50% 的风电场接入 220 kV 及以上电压等级电网<sup>[10]</sup>。对于包含多个风电场的大型风电基地, 连锁故障的发生和风电机组的故障穿越能力、风电机组以及电网的控制保护配置有密切关系, 对于大型风电基地连锁故障的机理和在线预警技术的研究, 目前国内外尚未有成熟的研究成果。

本文研制开发的大型风电基地连锁故障在线预警系统, 在现有大电网在线预警系统开发的基础上<sup>[11-12]</sup>, 完善风力发电机及无功补偿装置仿真模型, 建立风机保护及低电压穿越仿真模型, 以 PSASP 分布式仿真平台作为支撑运行平台, 实现大型风电基地的连锁故障仿真及在线预警, 进而及时发现电网中存在的风电连锁故障隐患, 帮助调度人员调度决策, 提高电网安全稳定运行能力。

## 1 系统设计

### 1.1 风电连锁故障事故特征分析

甘肃省是我国风能资源相对丰富的省区之一, 风能资源主要集中在河西走廊酒泉附近, 已经建成规模庞大的风电基地。酒泉风电基地 2011 年 2·24、4·17 和 4·25 连续三次发生大规模风电机组脱网事故, 风电机组的脱网容量均超过 80 万 kW, 如此频繁的大规模风电脱网在对电力系统安全稳定运行构成了严重威胁的同时, 也在国内外引发了风电发展模式的广泛热议<sup>[5]</sup>。

如图 1 所示, 风电大面积脱网事故有明显的连锁故障特征, 在风电场附近发生故障后引起电压下降导致部分风机脱网, 故障切除后电压升高导致部分风机脱网, 扰动引起频率波动导致部分风机脱网。

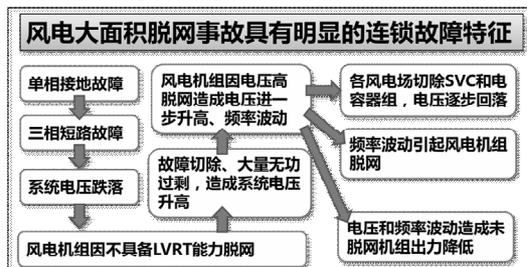


图 1 风电大面积脱网故障特征

Fig. 1 Character of wind power trip-off fault

### 1.2 风电连锁故障在线预警系统关键点

总结多次风电连锁故障暴露的问题如下。

1) 风电机组低电压穿越能力不足, 这是引发风电机组大规模脱网的重要原因。事故时, 部分在运风电机组不具备低电压穿越能力, 故障过程中, 在系统电压仅降至额定电压的 70% 左右时, 就有大量风电机组脱网。在具备低电压穿越能力的风电场中, 风电机组低电压穿越能力未经过调试开放, 在故障过程中仍出现脱网情况。

2) 风电机组动态无功调节能力不足, 大部分风电场配置的动态无功补偿装置的调节性能、容量及速率不满足电网的运行需要。部分风电机组因低电压穿越失败而脱网后, 输电通道上的有功功率减小, 充电功率增大导致系统电压升高, 而此时大多数动态无功补偿仅作为固定电容运行, 又进一步加剧了电压升高, 造成大量风电机组因过电压保护动作脱网, 扩大了故障影响。

3) 风电机组涉网保护配置及定值整定不满足电网适应性要求, 设定时考虑风电机组本身的安全多于考虑系统的安全, 部分厂家对风电机组变频器的保护设定较风电机组的保护设定更严。风电机组涉网保护与电网保护不协调, 在运风电机组抵御扰动的能力偏低。

4) 风电场 35 kV 系统单相故障不能快速切除, 导致事故扩大, 风电机组脱网容量增加。

大型风电基地连锁故障在线预警的研发目标是根据电网的实时运行方式, 预想风电场附近发生故障, 基于仿真分析计算出风电场可能发生的连锁故障。根据风电连锁故障的特征和电网中存在的问题, 确定大型风电基地连锁故障仿真的关键环节: 1) 初始扰动故障仿真, 预想风电场近区电网发生故障, 模拟诱发风电连锁故障的初始扰动。2) 风机保护动作仿真, 在机电暂态仿真计算过程中实现对风机保护动作策略的仿真, 模拟电网电压和频率波动造成的风机脱网。3) 无功补偿装置仿真, 模拟动态无功补偿装置的调节和对系统电压的影响。

### 1.3 风电连锁故障在线预警系统设计

在已经建成的在线动态安全评估系统基础上<sup>[11-12]</sup>开发实现大型风电基地连锁故障在线预警的功能。如图 2 所示, 通过动态数据平台有效整合电网调度自动化 EMS 在线运行数据、WAMS 动态量测数据和运行方式数据中的元件动态参数, 形成在线稳定分析用的计算数据, 以 PSASP 分布式并行计算平台作为支撑运行平台实现对当前电网快速的在线仿真分析, 通过人机系统实现计算设置和分析结果的可视化展示。在动态安全评估系统的技术上,

完善风机保护模型、无功补偿模型，基于 PSASP 暂态稳定计算、静态安全分析等模块，实现风电连锁故障的仿真。

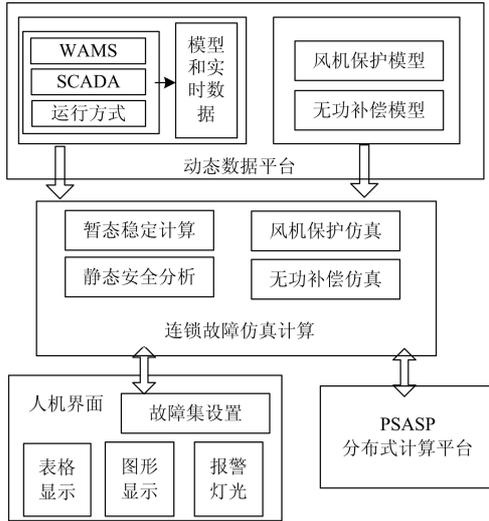


图 2 风电在线安全预警系统结构

Fig. 2 Structure diagram of wind power on-line security early-warning

## 2 风机保护和无功补偿建模

本文利用 PSASP 建立风电机组模型、风机保护模型和无功补偿装置的模型。

### 2.1 风机模型

因为风电场中机组的众多，实际的大规模风电场通常包含几十台，上百台风电机组，受到计算量的限制，不可能对每台风机进行详细建模，本文在仿真中将一个风电场中的风电机组等值为一台或几台等值机<sup>[13-14]</sup>。采用 PSASP 中的鼠笼型异步风力发电机（7 型发电机）、双馈感应风力发电机（11 型发电机）和直驱式永磁同步风力发电机（10 型发电机）模型。

### 2.2 风机保护模型

基于 PSASP 分别建立风电机组高压/低压保护模型、高频/低频保护模型<sup>[15]</sup>，可设定风机名称、高压保护动作限值、有效仿真时间。低压保护、高频保护、低频保护的参数录入和高压保护类似。

对于具备低电压穿越能力的风电机组细化电压保护模型，建立 LVRT 继电器保护控制模型，图 3 为低电压穿越参数示意界面，可设定切出电压下限、最低电压连续运行最长时间、最低连续运行电压下限、最长电压恢复时间，当风机电压维持在图中曲线上方区域时，风机能保持运行，否则风机保护动作退出运行。

甘肃电网酒泉风电基地风机一般都配置有低压高压/低压保护和高频/低频保护，一部分风机具备低电压穿越能力，根据各风电场风机的实际情况建立风机保护模型，一般低压保护模型和低电压穿越继电保护模型为二选一配置。在仿真计算中，风电机组动态模型与风机保护模型协同运作，模拟电网发生初始扰动后至仿真结束这一过程中风电场的动态行为。

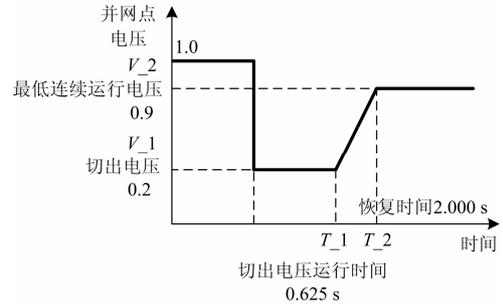


图 3 风机低电压穿越继电器参数录入界面

Fig. 3 Parameter setting interface of LVRT relay for wind turbine

### 2.3 无功补偿模型

风电场的无功补偿装置主要包括 SVC 与 SVG，采用 PSASP 中的 3 型/4 型 SVC 模型和 SVG 模型，建立风电基地的动态无功补偿装置模型<sup>[16]</sup>，可设定电压偏差控制的最大偏差、控制增益、超前滞后环节和导纳限制等内容。

## 3 连锁故障在线预警

图 4 为风电连锁故障在线预警仿真计算的流程图，各部分的功能和实现方式如下。

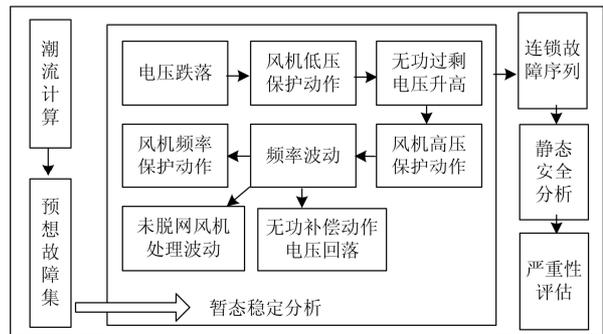


图 4 风电连锁故障在线预警流程图

Fig. 4 Flow chart for wind power cascading trip-off on-line early-warning

### 3.1 数据整合与预想故障集

数据整合从调度自动化系统周期性（每 5 min 一次）获取电网 SCADA 在线运行工况数据，进行含风电场的电力系统潮流计算，得到反映电网和风

电场实时运行方式的电网潮流数据。

风电连锁故障一般由风电场附近发生故障触发, 为了搜索风电基地可能发生的连锁故障, 根据各风电场实时运行工况, 按照设定原则自动生成预想故障集: 1) 故障地点包括投运的风电场附近线路及变压器, 根据酒泉风电基地的特点, 由程序根据拓扑关系搜索风电基地内各风电场连接的 330 kV 及以下电压等级的线路和变压器, 为了分析风电送出通道上故障对风电基地的影响, 故障点也考虑风电基地所连输电通道的 4 回 750 kV 线路; 2) 故障类型包括单相故障和三相故障, 故障持续时间分为瞬时故障和永久故障。

### 3.2 连锁故障搜索

基于 PSASP 暂态稳定计算实现风电连锁故障的搜索。根据电网实时运行方式、初始扰动和风电场相关模型, 进行机电暂态稳定仿真, 计算风电机组有功、无功、电压和系统频率等电气量在电网发生扰动后的变化, 仿真过程中根据风机模型和安全保护模型模拟风机保护的動作: 在初始故障发生后判断风电场并网点电压是否跌落到动作阈值, 导致风机启动低压保护退出运行, 对于具备低电压穿越能力的风电场判断电压跌落过程是否触发 LVRT 继电保护动作; 由于风电场切除导致系统无功过剩以及 SVC 等无功补偿装置没有及时调整, 判断风电场并网点电压是否升高至动作阈值, 导致风机启动高压保护退出运行; 判断系统的频率波动是否达到动作阈值, 导致风电机组高频或低频保护动作。为了防止在仿真计算中遗漏风机脱网事件, 设置较长 (20~40 s) 的暂态稳定仿真时间。

通过 1 次暂态稳定仿真计算可以分析出当前电网在指定的预想故障下是否会发生风电连锁故障, 通过时域仿真计算得到系统的暂态功角稳定、暂态电压稳定、暂态频率稳定等稳定性指标, 得到仿真过程中的风机动作序列, 连锁故障的判别指标是有两个及以上风电场的风机脱网且脱网风机数不小于 4 台。

大规模风机脱网事故会引起大量的有功功率缺额, 必然会引起潮流转移, 为此在暂态稳定仿真计算后, 根据风机脱网动作序列, 继而进行潮流计算和静态安全分析, 判断大规模风机脱网后电网的静态安全稳定性。

### 3.3 连锁故障严重性评估

针对不同的预想故障进行仿真分析, 可能发现不同的风电连锁故障隐患。为了对比分析不同连锁故障的严重程度, 建立如下评价指标。

1) 风机脱网严重指标, 统计仿真过程中的脱

网风机数量和脱网有功功率总加。

2) 暂态稳定评价指标, 统计暂态稳定判别结果和时域仿真中的最大功角时刻及最大功角差等指标。

3) 静态安全评价指标, 统计由于潮流转移引起的新增电网潮流越限, 包括线路电流越限、变压器容量越限和输电断面有功功率越限。

### 3.4 连锁故障在线预警并行计算

为了提高风电连锁故障在线预警的计算速度, 采用并行化计算方法。如图 5 所示, 把基于单个预想故障的仿真分析作为最小的并行计算单元, 采用故障并行的方式, 由并行计算机群根据预想故障集和计算服务器列表分配各自的计算任务, 然后单个计算服务器逐一针对计算任务列表中的各个故障进行暂态稳定仿真计算、静态安全分析计算, 最后所有计算结果汇总到调度服务器上进行统一的严重性评估。

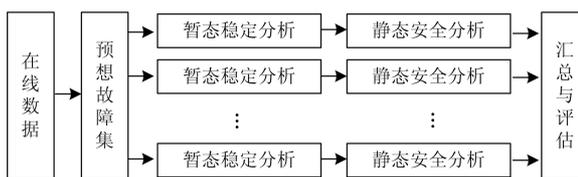


图 5 风电连锁故障仿真并行计算示意图

Fig. 5 Sketch map of parallel computing for wind power cascading trip-off simulation

## 4 应用情况

本文的研发成果应用到甘肃电网风电中心。系统每 5 min 获取一次西北电网的 SCADA 数据, 然后与西北电网离线运行方式数据整合, 形成能进行稳定分析的西北电网在线数据, 电网规模如下: 发电机数目 1002 (风机数目 85), 负荷数 1 930, 线路数 4 743, 变压器数目 1 738。

在应用中, 完善了酒泉风电基地的风机、风机保护及无功补偿装置模型, 建立了包括金风、华锐、GE 和东汽等不同厂家的风机模型, 建立了包括荣信、三得普华和思源清能等不同厂家的无功补偿装置模型, 建立了风机高压/低压保护模型、高频/低频保护模型和 LVRT 继电保护控制模型。

根据某时间断面的电网运行状态, 酒泉风电基地风电总出力 2 159 MW, 建立预想故障集数目 388 个, 线路故障 166 个, 变压器故障 222 个, 包含了酒泉风电基地风电场附近的线路和变压器故障。系统的运行指标如下:

1) 数据整合时间 < 10 s;

2) 针对 380 个预想故障的风电场在线连锁故

障仿真计算时间小于 5 min;

3) 连锁故障评估时间 < 10 s。

进行风电连锁故障仿真计算，共发现连锁故障隐患 51 个，表 1 列出了部分连锁故障仿真结果，包括故障发生的电压等级、切除风机数目、切除风机的功率、暂态稳定时域仿真的最大功角差和风机切除后潮流转移引起的静态安全越限功率，其中风机数目是在仿真中等值建模的风机数目，并不是实际的风力发电机数目。

表 1 风电连锁故障列表

Table 1 Cascading outages of wind power plant

序号	故障电压等级/ kV	切除风机数目	切除风机功率/MW	暂态稳定最大功角	静态越限功率/MW
1	750	24	1 294.1	311.5	280.9
2	750	24	1 294.1	311.3	280.2
3	330	22	1 247.8	311.2	277.2
⋮					
51	0.69	5	90.5	252.5	26.5

表 2 列出了其中一个连锁故障的风机动作序列，该故障是发生在 0.69 kV 的风机出口处支路的三相短路故障，故障起始时间 0.01 s，0.13 s 保护动作三相跳开，仿真结果共发生 7 个风机脱网，脱网功率 394 MW。图 6 是时域仿真输出的相关风机机端电压曲线，0.01 s 故障后，1-2 号风机由于距离故障点非常近电压跌落至接近 0，LVRT 动作脱网，邻近的 3-7 号风机电压有所降低，0.13 s 电网保护动作切除故障，并且由于 1-2 号风机退出，3-7 号风机机端电压升高超过 1.1 标么，高压保护动作导致风机脱网。

表 2 风机连锁脱网序列表

Table 2 Sequence table of wind generating trip-off

序号	风机名称	风机功率/ MW	切除时间/ s	风机切除原因
1	GGD2-1	52.8	0.01	LVRT 动作
2	GGD2-2	51.0	0.01	LVRT 动作
3	GGB2-2	52.6	0.13	高压保护动作
4	GGB1-1	53.7	0.13	高压保护动作
5	GGB1-2	52.3	0.13	高压保护动作
6	GGB2-1	93.5	0.13	高压保护动作
7	GQD1-1	38.5	0.14	高压保护动作

如果风机不配置低电压穿越继电器，而配置低压保护，针对相同时间断面和相同的预想故障集进行连锁故障仿真计算，共发现连锁故障隐患 132 个，

表 3 列出了部分连锁故障仿真结果，对比表 1 可以看出风电机组具备低电压穿越能力，可以有效减少连锁脱网事故的发生，并降低连锁事故的规模。

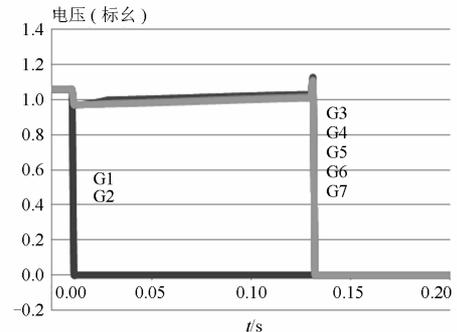


图 6 故障后风机电压曲线

Fig. 6 Wind generating voltage curve after fault

表 3 风电连锁故障列表

Table 3 Cascading outages of wind power plant

序号	故障电压等级/ kV	切除风机数目	切除风机功率/MW	暂态稳定最大功角	静态越限功率/MW
1	330	36	2 068.6	332.3	280.2
2	330	36	2 068.6	332.5	272.7
3	330	33	1 911.7	331.9	269.4
⋮					
132	0.69	4	152.0	325.0	36.5

## 5 结论

本文探讨了大型风电基地发生连锁故障的关键环节，提出了大型风电基地连锁故障在线预警系统方案和系统架构，在此基础上开发了大型风电基地连锁故障在线预警系统。利用该系统能够促进新能源调度技术的发展，加强对电网的分析评估能力，为新能源环境下的坚强电网建设提供一项有效的技术手段。以广泛应用的电力系统分析综合程序 PSASP 作为核心仿真计算程序，保证了时域仿真结果的正确性和可靠性。所开发系统在电网中的实际应用，验证了本文方法的有效性。

## 参考文献

- [1] UCTE. Final report system disturbance on 4 November 2006[R]. Brussels, Belgium: UCTE, 2006.
- [2] ROSAS P. Dynamic influences of wind power on the power system[D]. Kongens Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2003.
- [3] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.

- HE Shi-en, DONG Xin-zhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137.
- [4] 李丹, 贾林, 许晓菲, 等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 41-44.  
LI Dan, JIA Lin, XU Xiao-fei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbines trip-off from grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 41-44.
- [5] 汪宁渤, 马彦宏, 丁坤, 等. 酒泉风电基地脱网事故频发的原因分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 42-46.  
WANG Ning-bo, MA Yan-hong, DING Kun, et al. Analysis on root reasons of WTGs nuisance tripping in Jiuquan Wind Power Base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 42-46.
- [6] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风电场对电力系统阻尼影响的转矩分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 152-158.  
HAO Zheng-hang, YU Yi-xin. Torque analysis for the influence of DFIG-based wind farm on damping of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 152-158.
- [7] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.  
HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [8] 王英英, 罗毅, 涂光瑜, 等. 电力系统连锁故障的关联模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 204-209.  
WANG Ying-ying, LUO Yi, TU Guang-yu, et al. Correlation model of cascading failures in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 204-209.
- [9] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 11-17.  
YE Xi, LU Zong-xiang, QIAO Ying, et al. A primary analysis on mechanism of large scale cascading trip-off of wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 11-17.
- [10] 刘峻, 何世恩. 建设坚强智能电网助推酒泉风电基地发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 19-23.  
LIU Jun, HE Shi-en. Strong smart grid boosts Jiuquan Wind Power Base Development[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 19-23.
- [11] 苏峰, 殷战稳, 任玲玉, 等. 风电在线风险评估系统的开发及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 130-135.  
SU Feng, YIN Zhan-wen, REN Ling-yu, et al. Development and application of on-line risk assessment system of wind power in grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 130-135.
- [12] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 87-93.  
YAN Jian-feng, YU Zhi-hong, TIAN Fang, et al. Dynamic security assessment & earlywarning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93.
- [13] 蔺红, 晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.  
LIN Hong, CHAO Qin. Simulation study of modeling and control of direct drive wind turbine under grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 189-195.
- [14] 高峰, 周孝信, 朱宁辉, 等. 直驱式风电机组机电暂态建模及仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 29-34.  
GAO Feng, ZHOU Xiao-xin, ZHU Ning-hui, et al. Electromechanical transient modeling and simulation of direct-drive wind turbine system with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 29-34.
- [15] 丁天池, 夏天, 刘鹏飞, 等. 基于继电保护 UD 建模的连锁故障仿真分析[J]. 黑龙江电力, 2011, 33(6): 426-434.  
DING Tian-chi, XIA Tian, LIU Peng-fei, et al. Simulation analysis of chain failures based on relay protection UD modeling[J]. Heilongjiang Electric Power, 2011, 33(6): 426-434.
- [16] 缙新科, 郭瑞川, 宋磊, 等. 酒泉风电基地动态无功补偿装置性能测试分析[J]. 工矿自动化, 2012(7): 38-42.  
GOU Xin-ke, GUO Rui-chuan, SONG Lei, et al. Test and analysis of performance of dynamic var compensator at Jiuquan Wind Power Base[J]. Industry and Automation, 2012(7): 38-42.

收稿日期: 2013-08-30; 修回日期: 2013-10-29

作者简介:

吕颖(1981), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统在线安全稳定分析; E-mail: lvying@epri.sgcc.com.cn

孙树明(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统在线安全分析;

汪宁渤(1963-), 男, 研究生, 高级工程师, 研究方向为电网规划和风电并网。