

风电场集成监控平台的研究

乔颖¹, 鲁宗相¹, 徐飞¹, 王小海², 侯佑华², 朱长胜²

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084;

2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司调度通信中心, 内蒙古自治区 呼和浩特 010020)

摘要: 实现风电场调度控制的自动化、常规化和智能化是其融入电网管理体系的关键。设计了风电场集成监控平台, 在数据采集与控制系统的基础上, 将风电场内所有设备组织成一个有机整体, 可实现有功控制、电压控制、发电与检修计划安排等高级应用功能。平台以风功率预测为基础, 制定发电、储能与检修计划, 并报送电网调度中心, 供后者编制全局优化方案; 在运行时响应电网调度指令, 实现闭环控制, 使风电场真正成为电网的一个可预测、可调节和可靠的优质电源。

关键词: 风电场; 监控平台; 风功率预测; 协调调度; 预测控制

Study on the integrated monitoring & control platform of wind farms

QIAO Ying¹, LU Zong-xiang¹, XU Fei¹, WANG Xiao-hai², HOU You-hua², ZHU Chang-sheng²

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Dispatch Center of Inner Mongolia Power Company, Hohhot 010020, China)

Abstract: It is essential for wind farms to implement automatic, routine and intelligent control and dispatching so as to integrate themselves to power grid management. Based on wind farm SCADA system, this paper designs an integrated monitoring & control platform. The platform manages all equipments in a wind farm as a whole, and has comprehensive function such as active power control, voltage control, and generation & maintenance planning, etc. On the basis of wind power prediction, the platform can make plans of generation, storage, and equipment maintenance, then report them to grid dispatching center for global optimal plan; it real-time responses to dispatching orders in close loop mode. The platform helps the wind farm work as a predictable, controllable and reliable generation unit of good quality.

Key words: wind farm; monitoring & control platform; wind prediction; coordinate dispatching; predictive control

中图分类号: TM85 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0117-07

0 引言

截止 2008 年底, 我国风电装机容量超过 1 200 万 kW, 超过 100 万 kW 的省份达到了 4 个; 预计到 2020 年, 将建设千万 kW 级风电基地 7 个^[1]。局部地区风力发电峰值占负荷比例已超过 20%^[2], 标志着这些地区电网已步入高风电渗透率阶段, 对风电的调度也需要由被动接纳转入主动管理阶段。

实现风电场调度控制的自动化、常规化和智能化, 使之具有与传统能源电厂相似的调节能力, 是其融入现有电网运行管理体系的关键。相关基础技术涉及风功率预测、风电场单元设备控制技术、风机与变电站自动监控系统技术等多个方面。

风功率预测是目前国内外公认有效地提高风电可控性的关键基础技术。在风电装机容量较大的欧

美国家, 相关研究已相当成熟, 有多套软件预测包(如 Prediktor, Zephyr, eWind, Advanced WPPT 等)应用于发电计划与电力市场交易等^[3]。我国近年也在开展算法研究^[4-8], 但离实用还有相当距离。预测精度的主要制约因素是数值天气预报精度和现场数据积累程度。

单元设备的调节能力是风电场协调控制的基础。双馈与直驱等采用 PQ 解耦控制的风机可远程执行给定有功/无功/功率因数指令^[9-11]。10~35 kV 级 SVC/Statcom 动态无功补偿设备在风电场已有一定普及率。1~5 MJ/MW 级超导储能(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)基本技术成型, 10 MW/MJ 级电池储能技术在风/储发电系统已有成功示范^[12-13]。

相对而言, 我国风电场调度系统建设还处于初

级阶段。现行风电场安装的变电站自动监控系统与风机数据采集与监视系统(SCADA)之间通信隔离,前者不提供对风机设备四遥的支持,后者采用私有规约甚至公网通信^[4],尚无法支持功能层对风电场各类可控资源进行有机整合。部分风机制造商提供以风机为受控对象的风电场有功/无功控制方案,但对风机与集中补偿设备之间如何联动、如何实时响应电网调度等问题的研究尚不充分^[15-16]。

本文提出了一套完整的风电场集控平台设计框架,将风电场内的所有设备(包括风机、升压站、测风塔与风场馈线子网等)组织成一个有机整体,对外可接受电网统一调度,对内可协调监控风场设备,有效提高风场的可预测性、可靠性与可控性,使之能够像常规能源电厂那样融入电网调度体系,促进风电真正成为未来电网的优质电源。

本文将先介绍风电场集成监控平台的基本概念,然后具体讨论平台的结构与功能,特别是有功/无功控制、发电计划安排等电网密切关注的子模块,最后总结了平台建设的若干关键技术。

1 风场集成监控平台的基本概念

风电场集成监控平台是集现有风机SCADA和变电站SCADA为一体、并在此基础上实现自动闭环、协调控制风场内所有可调设备以满足风场并网综合需求的监控管理系统。

从风场角度来看,集控平台就是风场这个小网络的调度中心,进行功率预测,远程监控风机、馈线、升压站设备、储能、集中补偿电容器等设备,在确保风场安全经济运行的同时,使公共接入点状态满足电网调度需求。

从电网角度来看,集控调度平台使风场成为一个行为可预测、状态可控制和具有较高可靠性的发电单元。电网可以发送指令,使其参与频率和电压的调整、甚至紧急控制,从而实现全网的安全稳定与优化运行。

与现有的风电场SCADA相比,集控平台的突出特点如下:

①主动控制:改变现有风电场类似负荷的工作模式(如不干涉有功出力、被动进行无功补偿等),采用基于预测的主动控制,在尽可能不弃风的前提下控制有功、提高并网点电压一无功水平。

②集群控制:平台考虑风机的群体效应和集中补偿设备的协同效果、以提高风场整体输出特性为设计依据。平台不需要更改现有风机控制器设计,而是利用简单远程指令(如定无功、定功率因数、有功输出限制和起停等)的有机组合来实现调频、

调峰、调压等复杂的风电场控制,更易于风场业主接受。

③多目标协调控制:平台不仅在风机与集中补偿设备之间协调,也在紧急控制与校正控制之间、有功控制与无功控制等不同控制目标进行协调。

④事件驱动型控制:由于风能的随机性与波动性,风电场的最优运行点、稳定域边界也时刻变化。平台采用离散事件驱动型控制,将有悖并网要求的越限状态、风电场安全裕度降低和电网调度指令等都视为出发控制的基本事件,激发相应设备动作。

2 风场集成监控平台的功能与结构

2.1 风电场并网控制需求

电力系统对并网风场提出了综合控制需求,涉及有功控制(一次/二次调频、调峰)、无功控制(电压稳定、无功优化)、电能质量(谐波、闪变、电压合格率)和紧急控制(低电压穿越、电压/频率支撑)等各个方面^[17]。风电场除了尽量利用风机控制能力之外,往往辅以多种集中补偿设备,其时间常数分布从毫秒到小时不等。设备的时间常数与并网控制需求之间的匹配关系总结如图1所示。

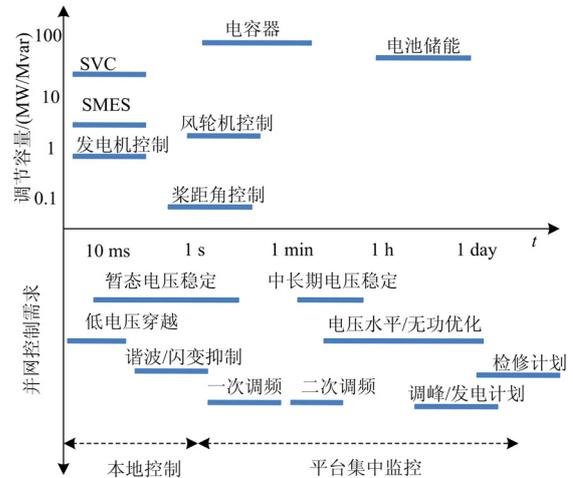


图1 风电场并网控制需求与可控设备时间常数对比

Fig.1 Comparison of grid integration requirements and time constant of controllable equipments in wind farms

总地来讲,谐波与闪变的抑制、紧急控制等对响应速度要求很高的功能主要依赖可控设备的本地控制实现,而调频、调压、无功优化等需要配合电网进行的控制,由平台集中协调。

2.2 平台整体结构

风场集成监控平台的基本结构与电网能量管理系统类似,由以四遥为核心的风电场 SCADA(基础层)及其高级应用(功能层)构成,如图2所示。

风电场 SCADA 在传统电力系统 SCADA 的基

基础上增加了风场监控所特有的子块(如风机模型、风场模型、地理信息模型和风速实测、气象库、风机四遥等)为功能层提供基础数据、模型与通信环境。目前,在风电场 SCADA 所涉及的通信规约中,风机通信和公共气象服务通信在我国还没有可以参照的标准。风电 SCADA 多由风机制造商基于局域网、VPN 等搭建,受安全条件制约,与现有电力通信网互不连通。并网型风电场集控平台建设需要引入防火墙以强化技术安全,打破通信壁垒。详细安全策略可参考文献[14]。

风场集控的功能层包含三个模块:计划安排、校正控制和紧急控制模块。计划安排模块依据风功率日前预测结果,制定发电、储能与检修的相关计划,并发送至电网调度中心,供后者制定全局优化方案^[18]。校正控制模块是风电场在线常规控制的主体,它按照调度指令,结合超短期风功率预测进行闭环的发电控制与电压控制(即 AGC 和 AVC)。紧急控制模块以具有快速调节能力设备的本地控制(储能、SVC/Statcom、风机低电压穿越)为基础,在故障时闭锁校正控制,向电网提供短时支援。

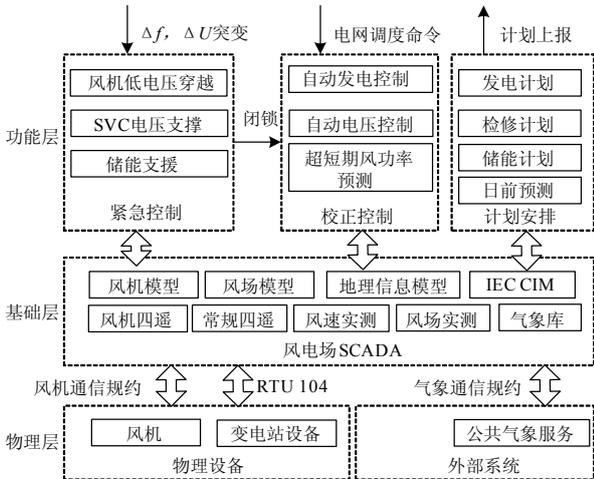


图 2 风电集成监控平台的整体结构

Fig.2 Framework of the integrated monitor & control platform of a wind farm

2.3 计划安排模块

风电场计划安排模块以日前风功率预测为基础。在风功率较低时安排设备检修,以减少因停运带来的发电损失。

结合日负荷预测,可安排储能错峰以缓解电网的调峰压力。这里定义风电日出力曲线与系统日负荷曲线的匹配系数 $r(t)$ 如下。

$$r(t) = \frac{P_w(t) / \bar{P}_w}{P_L(t) / \bar{P}_L}$$

式中: $P_w(t)$, $P_L(t)$ 分别表示风电出力与负荷; \bar{P}_w , \bar{P}_L 分别表示风电日出力均值与负荷均值。所谓风电的反调峰指负荷处于高峰而风电处于低谷,或反之负荷处于低谷期而风电反而处于高峰期的情形,即 $P_L(t) < \bar{P}_L$ 时 $r > 1$, 此时风电过剩,储能应充电;或 $P_L(t) > \bar{P}_L$ 时 $r < 1$, 风电出力不足,储能应放电。

最后,风电场在次日风资源状况、设备可用状态与储能安排的基础上,制定日前发电计划,并上报电网调度。

2.4 校正控制模块

风电场包含超短期风功率预测、AGC和AVC三个子块。风电场AGC与AVC有相似的管理结构,如图3所示。平台接收电网调度中心下发的整场有功/电压一无功参考指令,由最上层风场协调层进行优化计算将调节任务分解,一部分由变电站的集中补偿设备承担,另一部分由风机群承担。平台中间层为风机群分配层,按当前风机的运行状态及其调节灵敏度,将整体控制目标分摊到各风机。分摊方法视控制目标而定,常见的分摊方法有均摊法^[19-20]、按电气距离灵敏度分摊^[11]、按风机逆变器容量利用率分摊^[21]等。最下层为风机控制层,校验指令安全性,通过风机控制器执行具体指令。

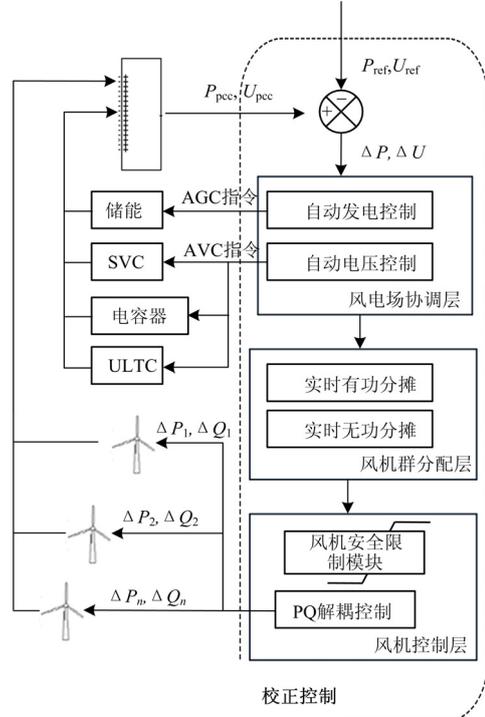


图 3 校正控制模块逻辑

Fig.3 The logic of regulate control model

2.4.1 风电场 AGC

风电场内可参与 AGC 的设备主要是风机与储能装置。受风能特性约束,风电场 AGC 的功能定位与常规电厂有较大不同。

常见的风机控制^[3,9-10,22-25]有:①输出限制控制,主要服务于电网调峰,一般是在风电出力过大、以致威胁系统安全时不得已的弃风之举;②平滑控制,主要用于维持风机在小幅高频的风速波动下出力不变,由于风机群的平滑效应可抵消部分波动,只有在小惯性电网中,风机的平滑控制才有必要考虑;③爬坡率限制控制可用于防止极端情况下风机出力过快爬升引起的电网过频问题。一般认为,风机不宜闭环参与电网的二次调频,因为它只能单向调频,且受风速波动性影响,风电场作为二次备用的容量可信度较低。

现今配备在大型风场的储能设备以高功率、大容量的电化学储能为主。受充放电次数限制,一般用来调峰;而电磁储能(如 SMES, 超级电容器等)的容量较小,无法成为调频主力^[12-13]。

总而言之,以目前的技术条件风电场直接进行二次调频并非电网的优先选项。风电场 AGC 的定位在于在电网出现频率偏差较大、常规调频容量不足时,以限制出力、限制风电爬坡率的形式,协助电网进行调频。电网以风功率预测系统发布的风场日前最大可能出力为基础,考虑运行安全与经济约束,修正有功出力参考曲线,并发送至风电场。风电场 AGC 控制风机出力,使整场输出功率曲线与参考曲线相吻合。这种基于预测的风电场 AGC 控制是在目前技术条件下,一种能够兼顾风电场经济性与可控性的、较为实现方案^[21]。

2.4.2 风电场 AVC

与有功控制相比,风电场的无功容量充足、调节手段丰富,并网点(即 PCC)状态可按电网需求,选择类似 PV 或 PQ、甚至调压节点模式工作。目前对风电场无功控制的研究有两种思路:一种是以双馈/直驱风机调节为主,维持电网内某先导节点(如 PCC)的电压,直接参与二级电压控制^[26-30],该方法响应迅速但需要直接更改现有风机控制规律,对风机稳定运行不利;另一种是以压站集中补偿设备为核心,借鉴变电站综合电压-无功控制系统^[31-33]经验(Voltage & Reactive Power Control, VQC),以调节变压器分接头与电容器组保证 PCC 的电压品质,经验成熟但离散调节难以适应风速的波动。这两种思路都没有考虑风机与集中补偿装置的配合问题,本文建议的风电场 AVC 采用三层协调控制结构^[34],考虑含有载调压变压器、集中补偿电容器和

双馈风机等多种无功源设备的协调控制策略。顶层是风场协调决策模块,依据电压/无功参考曲线计算整体控制量,按设备调节成本最低原则进行风机群与集中补偿设备的控制量协调;中间层是风机群决策模块,将风机群的总补偿量按风机无功调节灵敏度分摊无功;底层是风机控制模块,由各风机逆变器利用 PQ 解耦控制,在其无功可控域内进行定功率因数或定无功控制。

此外,引入风功率预测可优化风场日电压控制参考曲线,起到减少设备动作次数、提高电压合格率,支持局部地区电压的作用。

3 风电场集控平台关键技术

3.1 基于微观气象学的风电场预测技术

风场出力的变化趋势、静态安全域、风机的运行状态与可控容量都与未来一段时间内的风资源分布状况密切相关。风电场集控平台的校正控制、计划安排等模块都必须考虑到各自周期内风速变化的影响。平台采用综合的风功率预测技术来匹配各模块的需求,如表 1 所示(表中误差水平参考 2008 年主要风电国家的预测水平^[35])。

表 1 风电场综合预测技术

	预测时长/ 分辨率	预测 范围	用途	误差水平
日前	24 h/15 min	整场	制定发电 / 储能 / 检修计划; 调峰	±7%
超短期 期预 测	1~6 h/15 min	整场	电力交易; 阻塞管 理(供电网调度使用)	±5%
	15 min/3 min	整场	AGC/AVC 协调层、 风电场建模	±2%
	15 min/3 min	一组 风机	AGC/AVC 风机群 优化分配层	±7%

日前风功率预测一般依赖高精度数值天气预报(Numeric Weather Predict, NWP),其基本原理是:结合局部地理特征,将高空数值天气预报结果,如风速、风向、气温、气压、湿度等推导至风机轮毂高度,然后利用风机的功率捕获模型计算出有功预测值。超短期预测方法以 ARMA,小波分析,卡尔曼滤波等时间序列法为主^[3-4]。总的来说,风功率预测的误差随着预测时间的增长、预测范围的减小而增加。NWP、近地天气模型、风机功率捕获模型都可能产生误差,但近地天气模型是最大的技术难点。

3.2 风电场控制基础理论

由于大型风场的风机群平滑效应和出力随机性

同时存在,风电场控制往往无法、也无必要精确跟随期望曲线。有必要建立基于统计指标的风电场控制效果评价体系。

目前对风电场控制应该参照何种控制理论还存在争议。不少研究仍依据经典 PID 控制设计方法,以风机直接采集电网频率/电压偏差形成反馈闭环,调节自身有功/无功输出^[9,25-27],参与电网频率/电压调节。方法忽略控制周期内风速变化,响应迅速、控制跟随特性好,利于处理瞬时扰动。但实际上大电网调频、调压、调峰周期一般都可能长达数分钟至数小时,此类方法不计风速的变化趋势,不利于提高风电场在长时间过程里的综合性能。该算法也难以实现风机之间、风机与升压站设备之间的协调控制。从本质上来讲,仍旧是一种“风机群”控制,而非风电场整体控制。

本文建议,基于 SCADA 的风电场控制适合采用采样控制算法而不是连续控制算法。风电场难以实现全工况精细建模、风速分布分散性强、风速不确定性强,这些因素都限制了那些基于准确模型的控制理论的应用。结合高精度风功率预测、引入预测控制理论是设计风电场控制方法的一条新路。预测控制^[36-37]包含三个基本环节:预测模型、滚动优化和反馈修正。预测模型可以是状态方程、传递函数等经典模型,也可以是分布参数系统、非参数模型等;滚动优化实现分时段的控制效果最佳;反馈校正修正预测模型适配或预测输入量偏差。

4 小结

通过建设风电场集控平台,整合风场内所有可控资源响应电网综合调度需求,是提高风电并网性能的一种切合实际的方案。

本文介绍了风电场集控平台的基本结构与主要功能。风机 SCADA 与变电站 SCADA 是平台的基础层,涉及研究课题包括通信安全、数据描述模型与通信规约标准化、通信可靠性较低情况下的数据挖掘技术等。有功/无功的校正控制、发电/储能的计划安排等是平台功能层的核心模块,关键技术有风功率预测、风电场预测控制理论、能量调度理论等。依照本文思路设计并实现的示范系统已经完成了现场试验(各功能模块的控制算法细节可参看文献^[21,34]等),重点对风电场 AVC 进行了全面测试,系统可显著提高风电场的电压/无功合格率,2010年还将在内蒙、河北等数个风电场推广运行。

总地来讲,风电场控制的相关研究才刚刚起步,其发展成熟必将有利于促进我国电网的风电接纳能力的提高。

参考文献

- [1] 李俊峰, 马玲娟. 风电形势及其前景展望[J]. 世界环境, 2009, 4: 18-20.
LI Jun-feng, MA Ling-juan. Wind energy and its prospect[J]. World Environment, 2009, 4: 18-20.
- [2] 内蒙古电力调通中心调度管理处. 内蒙古电网风电运行情况介绍[R]. 呼和浩特: 内蒙古电力调通中心, 2009.
Dispatching Group of the Dispatching and Communication Center of Inner Mongolia Power Grid. Induction on operation of wind power in inner Mongolia power grid[R]. Hohhot: Dispatching and Communication Center of Inner Mongolia Power Grid, 2009.
- [3] Ackermann T. Wind power in power systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2004: 283-297, 365-380, 567-575.
- [4] 丁明, 张立军, 吴义纯. 基于时间序列分析的风电场风速预测模型[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 32-34.
DING Ming, ZHANG Li-jun, WU Yi-chun. Wind speed forecast model for wind farms based on time series analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 32-34.
- [5] 李俊芳, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于灰色模型的风速-风电功率预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 151-159.
LI Jun-fang, ZHANG Bu-han, XIE Guang-long, et al. Grey predictor models for wind speed power prediction [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 151-159.
- [6] 王丽婕, 廖晓钟, 高阳, 等. 风电场发电功率的建模与预测研究综述[J]. 电力系统保护与控制. 2009, 37(13): 118-121.
WANG Li-jie, LIAO Xiao-zhong, GAO Yang, et al. Summarization of modeling and prediction of wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 118-121.
- [7] 蔡开, 谭伦农, 李春林, 等. 时间序列与神经网络法相结合的短期风速预测[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 82-85.
CAI Kai, TAN Lun-nong, LI Chun-lin, et al. Short-term wind speed forecasting combing time series and neural network method[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 82-85.
- [8] 王丽婕, 冬雷, 廖晓钟, 等. 基于小波分析的风电场短期发电功率预测[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 30-33.
WANG Li-jie, DONG Lei, LIAO Xiao-zhong, et al. Short-term power prediction of a wind farm based on wavelet analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29

- (28) : 30-33.
- [9] Fernandez L M, Garcia C A, Jurado F, et al. Control system of doubly fed induction generators based wind turbines with production limits[C]. //IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, May 15, 2005: 1936-1941.
- [10] Wu L, Wang Z X, Tamuar J. Smoothing control of wind farm output fluctuation with doubly-fed asynchronous machine[C]. //IEEE International Conference on Power Electronics and Drives Systems, San Antonio, May 15, 2005, 1: 495-500.
- [11] 王岩松, 朱凌志, 陈宁, 等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (13) : 83-88.
WANG Yan-song, ZHU Ling-zhi, CHEN Ning, et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical layered principle[J]. Automatic of Electric Power System, 2009, 33 (13) : 83-88.
- [12] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32 (7) : 1-9.
ZHANG Wen-liang, QIU Ming, LAI Xiao-kang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7) : 1-9.
- [13] 桂长清. 风能和太阳能发电系统中的储能电池[J]. 电池工业, 2008, 13 (1) : 50-54.
GUI Chang-qing. Energy-storing batteries used in wind and solar power generation systems[J]. Chinese Battery Industry, 2008, 13 (1) : 50-54.
- [14] 颜娜, 段斌, 邓清勇. 风电场SCADA系统边界安全模型设计[J]. 电网技术, 2009, 33 (7) : 24-29.
YAN Na, DUAN Bin, DENG Qing-yong. Design of border security model of SCADA system for wind power farm[J]. Power System Technology, 2009, 33 (7) : 24-29.
- [15] 北京光耀电力设备股份有限公司. 风电场群远程监控远方系统[EB/OL].
<http://www.gyee.com.cn/modules/product/article.php?storyid=41>
Guangyao Electricity. Remote monitoring & control system of wind farm groups[EB/OL].
<http://www.gyee.com.cn/modules/product/article.php?storyid=41>
- [16] 金风科技股份有限公司, 金风1500kW永磁直驱风力发电机组并网电气性能[R]. 乌鲁木齐: 新疆金风科技股份有限公司, 2009.
Gold Wind Science & Technology, Electric performance of grid integrated Gold Wind 1500kW permanent magnet direct drive wind turbines[R]. Urumchi, Gold Wind Science & Technology Co., 2009.
- [17] 国家电网公司. 国家电网公司风电场接入电网技术规范(试行)[S]. 2006.
State Power Grid Corporation. The Code of grid integration of the wind farm[S]. 2006.
- [18] 陈宁, 于继来. 基于电气剖分信息的风电系统有功调度与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (16) : 51-58.
CHEN Ning, YU Ji-lai. Active power dispatch and regulation of wind power system based on electrical dissecting information of electric power network[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28 (16) : 51-58.
- [19] Janseens N A, Lambin G, Bragard N. Active power control strategies of DFIG wind turbines[C]. //IEEE Power Tech, Lausanne Switzerland, July 1-5, 2007: 516-521.
- [20] Tarnowski G C, Reginatto R. Adding active power regulation to wind farms with variable speed induction generators[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa FL, June 24-28, 2007: 1-8.
- [21] 乔颖, 鲁宗相. 考虑电网约束的风电场自动有功控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (22) : 88-93.
QIAO Ying, LU Zong-xiang. Wind farm active power control considering constraints of power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (22) : 88-93.
- [22] Das M K, Chowdhury S, Chowdhury S P, et al. Doubly-fed induction generator models for optimal algorithm of wind farms[C]. //The 43rd Universities Power Engineering International Conference, Padova, Sep 1-4, 2008: 1-5.
- [23] Tennakoon A P, Arulampalam A, Ekanayake J B, et al. Operational restrictions with maximum power extraction of DFIG connected with wind farms[C]. //IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, Nov 24-27, 2008: 960-965.
- [24] De Almeida R G, Pecos Lopes J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22 (3) : 944-949.
- [25] Ullah N R, Thiringer T, Larlsson D. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines - potential and applications[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23 (2) : 601-612.
- [26] 曹娜, 赵海翔, 戴慧珠. 常用风电机组并网运行时的无功与电压分析[J]. 电网技术, 2006, 30 (22) : 91-94.
CAO Na, ZHAO Hai-xiang, DAI Hui-zhu. Analysis on reactive power and voltage of commonly used wind turbines interconnected to power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30 (22) : 91-94.

- [27] Moursi M E, Joos G, Abbey C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23 (3): 1178-1190.
- [28] Tapia G, Tapia A, Ostolaza J X. Proportional-integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22 (2): 488-498.
- [29] Zhao J J, Li X, Hao J T, et al. Wind farm reactive power output optimization for loss reduction and voltage profile improvement[C]. //IEEE 6th International Conference on Power Electronics and Motion Control, Wuhan, China, May 17-20, 2009: 1009-1103.
- [30] Ko H-S, Bruey S, Jatskevich J, et al. A PI control of DFIG-based wind farm for voltage regulation at remote location[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, June 24-28, 2007: 1-6.
- [31] 朱雪凌, 张洋, 高昆, 等. 风电场无功补偿问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 68-76.
ZHU Xue-ling, ZHANG Yang, GAO Kun, et al. Research on the compensation of reactive power for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 68-76.
- [32] 朱春明, 刘明波, 裴爱华, 等. 变电站电压无功控制范围的整定计算方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (8): 70-74.
ZHU Chun-ming, LIU Ming-bo, PEI Ai-hua, et al. Setting method for control range of voltage and reactive power in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (8): 70-74.
- [33] 阎振坤, 厉吉文, 李晓华. 基于模糊边界和双九区图的变电站电压无功控制策略研究[J]. 继电器, 2003, 33(10):36-40
YAN Zhen-kun, LI Ji-wen, LI Xiao-hua. Study of voltage and reactive power integrative control strategy based on fuzzy boundary and double nine-area control method [J]. Relay, 2003, 33(10): 36-40.
- [34] 乔颖, 鲁宗相, 徐飞. 双馈风场自动电压协调控制策略的研究[J]. 电力系统自动化, 已接收.
QIAO Ying, LU Zong-xiang, XU Fei. Study on coordinate automatic voltage control strategy of double-fed induction generator wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, Accepted.
- [35] 国际能源署风电工作组. 大规模风电并网问题研究报告[R]. 中国电机工程学报, 译. 北京, 2009: 10-20.
International Energy Agency Wind Power Working Group. Reports on large-scale grid-integrated wind power[R]. Chinese Society of Electrical Engineering, Trans. Beijing, 2009: 10-20.
- [36] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 5-28.
XI Yu-geng. Predictive control[M]. Beijing: National Defense & Industry Press, 1993: 5-28.
- [37] 诸静. 智能预测控制及其应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 29-44.
ZHU Jing. Intelligent predictive control and its application[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001: 29-44.

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-06-07

作者简介:

乔颖(1981-), 女, 工学博士, 主要从事新能源、分布式发电、电力系统安全与控制研究工作; E-mail: qiao-y02@mails.tsinghua.edu.cn

鲁宗相(1974-), 男, 副教授, 工学博士, 研究方向是电力系统可靠性、新能源及分布式发电、风力发电及微电网;

徐飞(1973-), 男, 副教授, 工学硕士, 研究方向为风力发电与分布式发电。

(上接第 98 页 continued from page 98)

- CHEN Jiong-cong, GAO Xin-hua, PAN Fan. Analysis of interoperability test of IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 121-123.
- [8] 张仕, 毛宇光. XML 语法检查的实现[J]. 计算机工程与设计, 2002, 23 (11): 86-90.
ZHANG Shi, MAO Yu-guang. Implementation of XML parser[J]. Computer Engineering and Design, 2002, 23 (11): 86-90.
- [9] 王丽华, 马君华, 王传启, 等. 变电站配置描述语言 SCL 的应用研究[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 93-96.
WANG Li-hua, MA Jun-hua, WANG Chuan-qi, et al. Research on application of substation configuration description language[J]. Power System Technology, 2006, 30 (S): 93-96.
- [10] 张燕涛, 黄伦, 王庆平, 等. IEC 61850 标准一致性测

试的方案和现场应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (4): 98-102.

ZHANG Yan-tao, HUANG Lun, WANG Qing-ping, et al. Scheme and application of IEC 61850 standard conformance test[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (4): 98-102.

收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-05-27

作者简介:

王珍珍(1986-), 女, 通信作者, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为变电站自动化设备规约测试的研究; E-mail: wangzhenzhen@sgepri.sgcc.com.cn

孙丹(1978-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为变电站自动化设备的研发, 数字化变电站的实现工作。