

DOI: 10.7667/PSPC150829

基于全景精细化模型的风电场能量管理系统研制及应用

贾宁¹, 王彬^{2,3}, 孙宏斌^{2,3}, 郭庆来^{2,3}, 张伯明^{2,3}, 吴文传^{2,3}

(1. 中电国际新能源控股有限公司, 上海 200086; 2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京 100084; 3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 为了提高风电场能量管理和运行控制水平, 基于风电场分布式能量管理系统(EMS)的体系结构, 研发了基于全景精细化模型的风电场 EMS。首先, 阐述了风电场在能量管理层面面临的主要技术挑战及 EMS 功能层次划分, 然后分别从公用数据平台、精细化建模、实时态势感知、评估预警、优化调度、有功/无功协调控制等多个层面介绍各关键模块的信息流和主要功能。所研发的智能化风电场能量管理系统已经在多家风电场投入应用。

关键词: 电力系统; 风力发电; 智能化风电场; 全景精细化模型; 能量管理系统

Development and application of panoramic fine modeling based wind farm energy management system

JIA Ning¹, WANG Bin^{2,3}, SUN Hongbin^{2,3}, GUO Qinglai^{2,3}, ZHANG Boming^{2,3}, WU Wenchuan^{2,3}

(1. China Power International New Energy Holding Ltd., Shanghai 200086, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the architecture of wind farm side distributed energy management system, the wind farm intelligent energy management system (W-EMS) is proposed to improve the ability of energy management and operation in wind plant. Firstly, the main technology challenges on wind energy management and the hierarchically functional partitioning for W-EMS are expounded. Secondly, the information flow and function of W-EMS key modules are described, including common data integration platform, detailed network model, wind farm real-time situations awareness, evaluation and warning, optimal scheduling and coordinate control. The W-EMS developed in this paper has been put to actual application in several wind plants.

This work is supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228201), National Natural Science Foundation of China (No. 51277105) and State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS13007).

Key words: power system; wind power; intelligent wind farm; panoramic fine modeling; energy management system

0 引言

目前中国风电并网装机容量高居世界第一, 且根据“十二五”规划, 中国风电装机将在 2020 年达到 1.5 亿 kW^[1]。由于风电自身具有的强间歇性、随机波动性和低可调度性特点, 如何在保障电网安全的基础上提高风电利用率是业界研究热点^[2-3], 可行

的思路之一是在风电场侧建立能量管理系统(W-EMS), 利用风电场的能动性, 抑制风电波动对电网的影响, 提高风电场对电网接入的友好程度。

由于传统集中式能量管理系统(EMS)在风电消纳的局限性^[4-6], 文献[7]提出了分布式 EMS 的功能框架和体系结构, 目前与风电场能量管理和运行控制有关的研究已经涵盖了风电场建模、风功率预测、有功控制、无功电压控制等领域^[8-29], 为开展风电场 EMS 奠定了较好的理论基础。但完整的 W-EMS 现场应用较少, 文献[30]提出并实现了风电场集成监控平台, 以风功率预测为基础, 包含有功控制、

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB228201); 国家自然科学基金(51277105); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS13007)

电压控制和发电与检修计划安排等功能,文献[31]提出并实现了基于预测的分布式发电能量管理系统,阐述了光伏阵列发电预测的工作原理,提出了一种分布式发电系统能量管理控制算法。

作为文献[4]与文献[7]的延续,本文研发了智能化风电场 EMS,首先分析风电场 EMS 在现场应用中的技术挑战,然后阐述智能化风电场 EMS 的信息流程、主要功能及关键技术实现,最后介绍现场应用情况。

1 技术挑战及功能架构

1.1 技术挑战

风电场能量管理和运行控制的技术挑战:

(1) 风电场模型等值与“微网结构”之间的矛盾。风电场内部为典型“微电网”结构,并且呈现出“空间分布”特点,一个风电场动辄上百台风机,风电场内电气节点数以百计,从风机 690 V 上网点到风电场并网点之间一般有几公里到几十公里不等的输出线路连接。在风电大发时期,各节点电压差异较大(典型可超过 5%)。而在控制中心,风电场只是被简单等值为发电机(或者每条汇集线被等值为一个发电机),风电场内部网络被简化。并且在现有的风电场内,在运行和控制时,也只是关心有什么设备,但是没有建立风电场内的详细网络模型,从而无法刻画设备之间的电气联系。

(2) 集中控制与分散运行之间的矛盾。风电场内有多种控制系统,包括面向升压站的升压站监控系统(既传统的变电站综合自动化系统),面向 SVC/SVG 的 SVC/SVG 监控系统,面向风电机组的风机监控系统,面向功率预测的风功率预测系统,各系统生产厂家各不相同,相互独立,并且缺乏有效的信息交互机制,导致一些控制策略或者高级应用实施起来非常麻烦,以有功自动控制(AGC)子站和无功电压自动控制(AVC)子站为例,其与上述 4 大系统接口如图 1 所示。

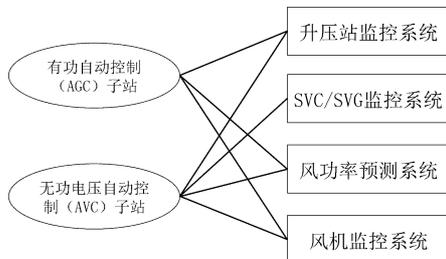


图 1 现有接口示意图

Fig. 1 Schematic diagram of existing interface

这种接口方式一方面将导致各控制系统的数据库

接口压力随着应用建设而不断提高,另一方面对各控制系统和新上应用系统的接口适应度有较高要求,提高了系统建设难度,另外这种网式接口结构也不利于调度管理和运行维护。

1.2 功能架构

为了解决上述问题,本文基于文献[7]提出的风电场分布式 EMS 体系结构,研发了智能化风电场能量管理系统,功能架构及信息流框架如图 2 所示。

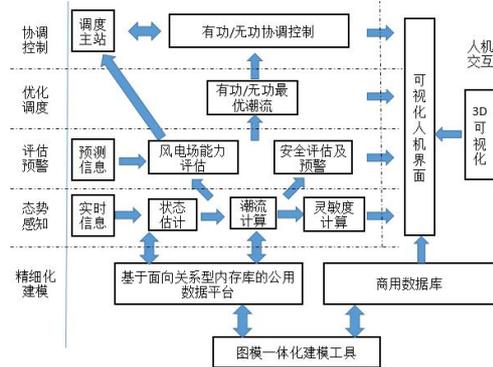


图 2 风电场分布式 EMS 体系架构

Fig. 2 Architecture of distributed wind farm EMS

基于面向关系型内存库的公用数据平台,依数据流方向依次包括风电场精细化网络建模、全场态势感知及状态监视、基于预测信息的评估预警、优化调度和协调控制等关键功能,并最终提供多种形式的可视化人机界面,下节将介绍各模块的关键技术。

2 关键技术

2.1 基于面向关系型内存库的公用数据平台

针对风电场的数据库多源难题,本文提出了基于面向关系型内存库的公用数据平台,实现了 EMS 高级应用与 4 大基础数据采集和控制系统的隔离,如图 3 所示。

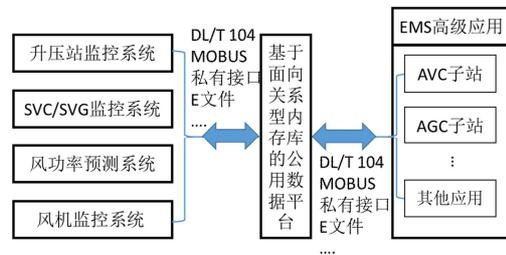


图 3 风电场 EMS 公用数据平台

Fig. 3 Common data integration platform for W-EMS

主要技术特点:

(1) 提供 DL/T 104 规约、MODBUS 规约、E 文件接口、私有接口等多种格式数据接口,可实现对

不同类型控制系统的自适应接入。

(2) 提供面向关系的内存数据库, 确保访问速度和使用便捷, 实现风电场多类型数据的集成, 为后续应用提供高效数据接口。

(3) 提供 DL/T 104 规约、MODBUS 规约、E 文件接口、私有接口等多种格式数据接口, EMS 各高级应用模块可根据自身特点选择相应的数据接口完成与基础控制系统的信息交互。

2.2 全景精细化网络建模

结合风电场的典型“微电网结构”特征, 建立风电场全景精细化网络模型, 如图 4 所示。

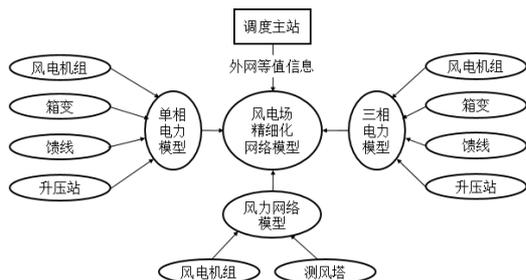


图 4 风电场 EMS 精细化建模

Fig. 4 Detailed network modeling for W-EMS

精细化建模的主要功能包括:

(1) 建立覆盖“风机-箱变-馈线-升压站-并网线路”的全风电场电力模型。

(2) 由于风电场内 35 kV 馈线未换相以及主变中性点未接地等, 部分风电场存在三相不平衡问题, 220 kV 并网母线电压的 A、B 相电压之差可达 3~5 kV。为此, 需要建立风电场的三相电力模型^[32]。

(3) 风电场外网等值电抗的精确程度将影响控制设备调节对电压灵敏度的计算准确度, 风电场应当具备外网等值功能, 自动接入调度主站下发的外网等值信息并与本地模型进行拼接形成完整的风电场电力模型。

(4) 为了计算风电场最大出力, 风电场一般存在标杆风机、测风塔等设备; 风电场的动力源是风能, 由于“尾流效应”等因素的影响, 空间分布的风机出力将在一定程度上影响全场出力。为此, 需要结合 GIS 信息, 建立风电场的风力网络模型, 从而更加准确地刻画风电场内风能与电能之间的关系。

2.3 风电场态势感知

为了解决风电场内多种监控系统独立运行的问题, 智能化风电场能量管理系统需要研制风电场的态势感知及状态监视功能, 如图 5 所示。

(1) 基于 DL/T 104 规约、MODBUS 规约、E 文件接口、私有接口等多种数据接口, 分别从风机监

控系统采集风机数据, 从升压站监控系统采集升压站数据, 从 SVC/SVG 监控系统采集 SVC/SVG 设备数据, 从风功率预测系统采集风功率预测信息, 通过量测映射, 建立风电场的电力量测模型。

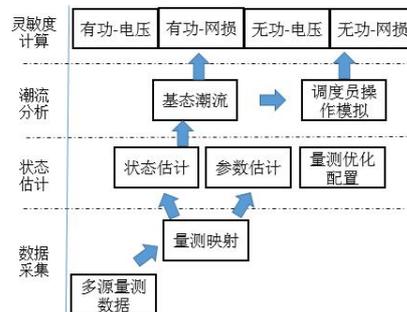


图 5 风电场 EMS 实时态势感知

Fig. 5 Real-time situations awareness for W-EMS

(2) 风电场测点主要集中在升电站内和风机机端, 馈线和箱变上基本没有测点, 需要使用状态估计工具完成风电场状态计算, 并结合风电场量测特点研制风电场参数辨识^[33-34]模块以提高支路参数精度, 研制风电场量测优化配置模块为提高风电场可观测度提供依据。

(3) 风场在有功出力较小(甚至为零)时, 风机、SVC/SVG 等控制设备依然可以作为无功源参与电网调压, 因此, 需要改变区别于传统电网潮流计算时根据有功出力大小来判断是否活岛的判据, 使得风电场能量管理系统在小风(甚至停风)状态下依然发挥作用。

(4) 结合精细化模型提供的高精度外网等值模型以及准稳态计算模型, 通过雅可比矩阵求逆, 分别在线计算控制设备有功/无功调节对风电场各电压等级母线电压以及全场有功损耗的灵敏度, 为后续控制决策提供基础灵敏度信息。

2.4 评估预警

快速波动性和随机性是风电场的运行特点, 为此, 需要智能风电场能量管理系统提供评估预警功能, 一方面对风电场当前状态进行准确评估, 另一方面需要结合预测信息, 完成风电场未来运行状态的评估, 并对可能面临的危险进行提前预警, 主要功能如图 6 所示。

在风电场评估模块:

(1) 结合测风塔数据和标杆风机的“风力-电气”数据, 建立风机最大有功出力的评估模型, 一方面为全风电场最大有功出力评估提供基础数据, 另一方面为风电场内有功分配提供评估基准。

(2) 在控制中心侧, 风电场按等值发电机来处

理,控制主站并不掌握等值发电机无功出力上下限,需要研制风电场无功能力评估模块,结合场内各设备的无功限值约束以及场内母线的电压运行约束,在线计算生成等值发电机的无功出力上下限。



图 6 风电场 EMS 评估预警

Fig. 6 Evaluation and warning for W-EMS

(3) 电网与风电场的边界是并网点,并网点母线电压运行上下限由电网决定,同时由于风电场的辐射网运行特点以及场内缺乏必要的 PV 节点支撑,并网点母线电压高低将直接影响整个风电场的电压水平,因此,需要研制风电场并网点电压可行空间评估模块,结合风电场内各节点的电压约束以及各控制设备的无功调节能力,在线确定生成并网点母线电压可行约束。

在风电场预警模块,包括基态预警、N-1 预警、预测预警 3 个层次功能。

(1) 基态预警: 巡视基态潮流信息,输出电压越上限/下限的母线信息,并实时告警;

(2) N-1 预警: 在基态潮流的基础上,按顺序依次开断风电机组、馈线、主变,对可能发生的基态不越限但 N-1 后越限的母线节点,输出告警信息;

(3) 预测预警: 结合风功率预测信息,通过潮流分配和电压调整,生成下一时刻(5 min 后)的风电场预测潮流断面,并基于预测潮流分别开展基态预警和 N-1 预警。

2.5 优化调度

风电场优化调度本质是多目标多变量多时段的混合整数规划问题。从工程实用角度,分工如图 7。

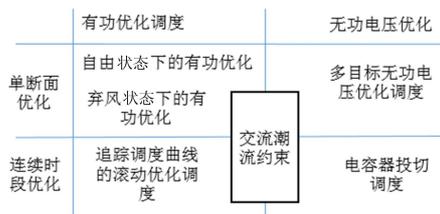


图 7 风电场 EMS 优化调度

Fig. 7 Optimal scheduling for W-EMS

单断面的优化调度,包括有功和无功两部分。

(1) 在有功层面。以风电机组有功出力优化变

量,在自由状态下,考虑尾流效应,安排风机出力,保证全风电场有功出力最大;在弃风状态下,考虑到风机有功总出力与并网上网有功的差异,考虑风电场有功损耗最小,提高并网上网功率。

(2) 在无功层面。以风电机组无功出力和 SVC/ SVG 无功出力为控制变量,以控制设备调节能力和各侧电压为运行约束,以风电场有功损耗最小为优化目标,通过无功优化,从提高电压和减少网内无功流动两个方面降低网内有功损耗。

连续时段(典型为 1 h)的优化调度,包括有功和无功两部分。

(1) 在有功层面,以跟踪调度主站下发的有功设定曲线和风机调节量最小为优化目标,结合超短期风功率预测以及各风机的有功调节快慢特性,安排各风机的有功出力计划。

(2) 在无功层面,以风电场安全优质经济运行作为优化目标,结合风功率预测,合理安排固定电容电抗器(人工调节)、风机(秒级)、SVC/ SVG(毫秒级)等不同时间尺度控制设备的调节特性,确定升压站内电容电抗器的投切计划。

2.6 协调控制

由于风资源的随机波动、强不可控、难预测等特性,如何消除大规模风电接入对电网调度的影响是各级控制中心面临的重要挑战之一。可行的技术路线之一是通过风电场自动发电控制(AGC)和自动电压控制(AVC),充分调用风电场自身的有功无功调节能力,实时追踪调度主站的有功/无功电压控制指令,提高风电场对电网接入的友好程度。

AGC 和 AVC 是风电场能量管理和运行控制的核心功能,主要功能如图 8 所示。

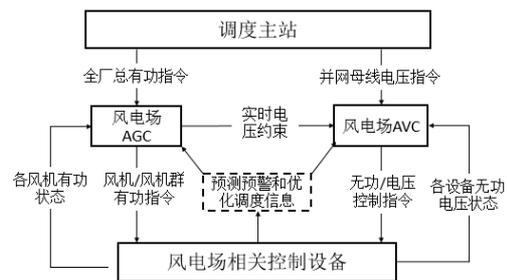


图 8 风电场 EMS 协调控制

Fig. 8 Coordinate control for W-EMS

在站控制中心角度,智能化风电场的 AGC 和 AVC 功能主要应对风电场的可观性和可控性两大问题。

2.6.1 提高风电场可观性措施

一般情况下,风电场作为电源点在控制中心侧

被简单等值为 1 台(或多台)发电机, 控制中心并不掌握风电场内部“微网”细节。为了解决风电场可观性, 确保控制中心主站下发指令的有效性和准确性, 需要在风电场评估预警的基础上, 将风电场网络信息浓缩为风电场的调节能力和运行需求, 并以风电等值机参数的形式实时上送至控制中心主站, 包括:

(1) 调节能力。体现了风电场对电网的支撑能力, 表现为风电等值机的无功上下限和有功上下限约束。

(2) 运行需求。体现了风电场对电网的调节需求, 表现为并网点母线电压的上下限约束。

需要特别指出的是, 由于风电场有多种调节资源并且各类调节资源特性各异(比如风机无功可实现秒级调节, 而 SVC/SVG 无功可实现毫秒级调节)。因此, 风电场提交的调节能力和运行需求应该根据调节资源的时间特性和调节成本加以分类, 比如稳态下的秒级无功调节能力(体现了风机调节能力)、暂态下的毫秒级无功调节能力(体现了 SVC/SVG 的调节能力)等。

风电场上送数据的刷新周期为秒级(典型值为 10 s), 数据通信方式可采用风电场和控制中心现有的实时通信接口。

2.6.2 提高风电场可控性措施

风电场接收调节主站指令周期为分钟级(典型值为 1 min), 有功指令为全场总有功设定值, 无功电压指令为并网点高压侧母线电压设定值(或者全场总无功设定值)。

(1) 控制设备之间的协调

在有功控制方面, 需要协调机组离散投切和桨距角连续调节等多种控制手段, 结合风功率预测提前安排机组开机方式, 避免频繁启停机操作, 保留较多的连续快速调节裕度来实时追踪调度主站有功指令, 同时协调风场内各风机间的有功分布, 在长时间尺度上确保各风机利用小时数趋向一致, 并降低风场内不必要的有功损耗。

在无功电压控制方面, 基于预测信息, 协调场内的风机和 SVC/SVG 等控制设备, 提前安排较慢速的风机无功出力, 在保证风机机端电压满足安全要求(校正控制)、并网点电压满足主站要求(追踪控制)的基础上, 优化场内无功分布(增强控制), 使得风电场内保留足够的快速无功调节裕度来应对可能面临的电网扰动。

(2) AGC 与 AVC 之间的协调

区别于传统输电网, 风电场线路以架空线为主, 阻抗比较大, 并且风电场位于电网末端, 风机的有

功出力和无功出力均对电网电压有较大影响, 所以在 AGC 和 AVC 调节时, 需要考虑有功和无功的协调, 确保电网电压安全不越限。

另外, 针对双馈风机, 不同的运行工况下对风机机端电压有不同的下限要求, 因此, 在有功控制时, 需要考虑风机机端电压下限约束, 类似地, 在无功电压控制时, 需要考虑当前风机的有功出力水平, 确保风机设备不会由于机端电压陷落触发 Crowbar 保护动作而脱网。

2.7 可视化及人机交互

智能风电场 EMS 系统的主要计算功能位于安全 1 区, 所有控制结果均写入公用数据平台。基于公用数据平台, 实现智能风电场 EMS 的可视化及人机交互, 如图 9 所示。

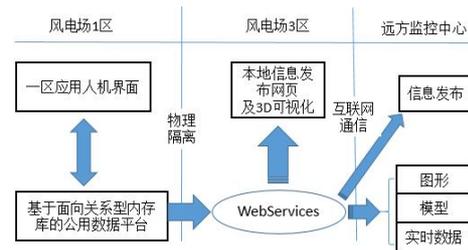


图 9 风电场 EMS 可视化及人机交互

Fig. 9 Visualization and human interface for W-EMS

在风电场 1 区, 基于 C/S 架构, 完成风电场电力/风力信息的实时展示, 并提供主要的模型维护、参数设置等人机交互功能。

在风电场 3 区, 建立 Web 服务, 通过物理隔离, 从公用数据平台实时获取风电场信息, 并提供网页浏览功能, 实现方便、快捷及形象的风电场信息显示。

同时, 基于 Web 服务和互联网通信, 智能化风电场 EMS 还提供面向远方监控中心的风电场实时信息发布, 包括以网页形式展示风电场实时统计信息, 以 SVG 文件格式描述风电场图形, 以 CIM-E 文件格式描述风电场电网模型, 以 E 语言文件格式描述风电场实时状态。

3 应用实例

本文描述的风电场 EMS 系统已经实现, 其中大部分功能已在江苏、华北、西北等多家风电场得到了现场应用。以下通过分析闭环测试中风电场 AVC 的控制效果, 说明风电场 EMS 的有效性。风电场规模如表 1。

表 2 给出了风电场 EMS 相关的外部系统的生产厂家、数据交互接口以及数据刷新周期。

表 3 给出了风电场 EMS 各功能模块的计算周

期及单次计算用时。

表 1 风电场规模

Table 1 Size of wind farm proposed

设备	类型	数量
风电场	占地面积	52 km ²
	容量	160 MW
风电机组	数量	123 台
	种类	3 种
动态无功补偿装置	数量	2 台
	类型	1 种
	总容量	40 Mvar
场内馈线	条数	208 条
	总长度	354 km
EMS 采用的四遥个数	遥测	512 个
	遥信	407 个
	遥控	6 个
	遥调	255 个

表 2 风电场已有系统接口

Table 2 Data interface of existing systems in wind farm proposed

外部通信系统	厂家	数据接口	数据刷新周期
风功率预测系统	南瑞科技	E 文件	15 min
风机监控系统	金风	MODBUS-TCP	<5 s
升压站监控系统	南自	数量	<5 s
SVG 监控系统	荣信	数量	<5 s

表 3 风电场 EMS 技术指标

Table 3 Performance for W-EMS

外部通信系统	计算周期	单次计算用时
量测映射	10 s	<1 s
状态估计	10 s	<1 s
调度员潮流	10 s	<1 s
	支持离线仿真	
有功无功最优潮流	10 s	<1 s
	支持离线仿真	
灵敏度计算	10 s	<1 s
	支持离线仿真	
安全评估及预警	30 s	<5 s
风电控制能力评估	20 s	<2 s
自动电压控制	10 s	<2 s
自动发电控制	10 s	<2 s
可视化界面数据刷新	周期、人工及事件等多种刷新方式	<1 s

4 结论

站在研发和应用的角度, 本文详细阐述了智能化风电场 EMS 的功能架构和关键技术, 并通过应用实例说明了风场 EMS 相关功能指标, 实际运行结果表明, 本文系统能满足风电场能量管理的实时

性、复杂性和快速性要求。结论如下。

(1) 智能化风电场 EMS 继承于分布式 EMS 框架, 并在研发过程中考虑了风电场自身在能量管理和运行控制方面的技术挑战。

(2) 通过精细化建模、态势感知和评估预警, 智能化风电场 EMS 提高了风电场运行人员对风电场运行状态的全面掌握能力, 并通过信息浓缩和上传, 提高了控制中心对风电场运行的可观度, 为控制中心实施风电汇集区域多风电场/电厂/变电站的协调控制提供了基础数据。

(3) 通过优化调度和协调控制, 智能化风电场 EMS 一方面提高了风电场对电网接入的友好程度, 另一方面, 实现了对场内多控制资源的优化调控, 在使得风电场跟踪调度主站指令的同时, 确保风电场运行于安全、优质、经济的运行状态。

值得说明的是, 本文研发的智能化风电场 EMS 系统及其工程应用还在初步阶段, 随着运行人员对风电场认识水平以及运行需求的提高, 智能化风电场 EMS 系统将在风场电力模型和风力模型的融合、含储能等新型设备的风电场能量管理和运行^[35-36]、结合实际现场条件的风电场 EMS 实用化应用等方面进一步提升。

参考文献

- [1] Global Wind Energy Council. [EB/OL]. [2012-04-6]. [http://www.gwec.net/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=340&tx_ttnews\[backPid\]=4&cHash=f4d1217bad](http://www.gwec.net/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=340&tx_ttnews[backPid]=4&cHash=f4d1217bad).
- [2] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.
- [3] 朱凌志, 陈宁, 韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 29-34.
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problem and solutions of wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [4] SUN Hongbin, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Family of energy, management system for smart grid[C] // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Berlin, Germany, Oct 13-18, 2012.
- [5] WU F F, MOSLEHI K, BOSE A. Power system control centers: past, present, and future[J]. Proc of the IEEE, 2005, 93(11): 1890-1908.
- [6] BOSE A. Smart transmission grid applications and their supporting infrastructure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 11-19.

- [7] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 风电场分布式能量管理系统: 体系架构和关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-6.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, WU Wenchuan, et al. Wind farm distributed energy management system: architecture and key technologies[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-6.
- [8] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [9] 吴林伟, 张建华, 刘若溪. 考虑风电机组故障的风电场可靠性模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 31-35.
WU Linwei, ZHANG Jianhua, LIU Ruoxi. A wind farm reliability model considering wind turbine faults and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 31-35.
- [10] 仇国兵. 考虑复杂尾流效应和连接电缆故障的风电场可靠性建模[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 33-39.
QIU Guobing. Reliability modeling of wind farms considering complex wake effects and connecting cable failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 33-39.
- [11] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 98-104.
YAN Gangui, WANG Maochun, MU Gang, et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 98-104.
- [12] MACDOWELL J M, CLARK K, MILLER N W, et al. Validation of GE wind plant models for system planning simulations[C] // IEEE PES General Meeting, Detroit, Michigan, USA, July 24-29, 2011.
- [13] 穆钢, 王健, 严干贵, 等. 双馈型风电机组近满载工况下连锁脱网事件分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 35-40.
MU Gang, WANG Jian, YAN Gangui, et al. Cascading trip-off of doubly-fed induction generators from grid at near full-load condition in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 35-40.
- [14] SHI Hongtao, YANG Jingling, DING Maosheng, et al. A short-term wind power prediction method based on wavelet decomposition and BP neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 44-48.
- [15] 刘瑞叶, 黄磊. 基于动态神经网络的风电场输出功率预测[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 19-22.
LIU Ruiye, HUANG Lei. Wind power forecasting based on dynamic neural networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 19-22.
- [16] 陈颖, 周海, 王文鹏, 等. 风电场输出功率超短期预测结果分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 30-33.
CHEN Ying, ZHOU Hai, WANG Wenpeng, et al. Improvement of ultra-short-term forecast for wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 30-33.
- [17] 朱倩雯, 叶林, 赵永宁, 等. 风电场输出功率异常数据识别与重构方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 38-45.
ZHU Qianwen, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Methods for elimination and reconstruction of abnormal power data in wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 38-45.
- [18] 孟令斌, 朱凤龙. 混合电源及功率预测系统在风电并网中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 79-85.
MENG Lingbin, ZHU Fenglong. Applications of the mixing power and power forecasting system in wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 79-85.
- [19] 叶荣, 陈皓勇, 王钢, 等. 多风电场并网时安全约束机组组合的混合整数规划解法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 29-33.
YE Rong, CHEN Haoyong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming method for security-constrained unit commitment with multiple wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 29-33.
- [20] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-71.
YAO Zhiqing, ZHANG Xi, LIU Ximei, et al. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-71.
- [21] 李立成, 叶林. 采用虚拟调节算法的风电场有功功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 41-47.
LI Licheng, YE Lin. Wind farm active power control strategy based on virtual regulation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 41-47.
- [22] 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 Zongxiang. Wind farms active power

- control considering constraints of power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 88-93.
- [23] MARTINEZ J, KJAER P C. Fast voltage control in wind power plants[C] // IEEE PES General Meeting, Detroit, Michigan, USA, July 24-29, 2011.
- [24] NARIMANI M, VARMA R K. Application of static var compensator (SVC) with fuzzy controller for grid integration of wind farm[C] // Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010 23rd Canadian Conference on, 2010: 1-6.
- [25] MOLINAS M, JON A S, UNDELAND T. Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1104-1117.
- [26] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 双馈风电场无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 1-6.
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative control strategy for reactive power and voltage of wind farms with doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 1-6.
- [27] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.
CHEN Ning, HE Weiguo, QIAN Minhui, et al. Design and application of reactive power control system for wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 32-36.
- [28] LIU Yifeng, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Network model based coordinated automatic voltage control strategy for wind farm[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT Asia, 2012.
- [29] 乔颖, 陈惠粉, 鲁宗相, 等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 15-22.
QIAO Ying, CHEN Huifen, LU Zongxiang, et al. Design and application of automatic voltage control system in doubly-fed induction generator wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 15-22.
- [30] 乔颖, 鲁宗相, 徐飞, 等. 风电场集成监控平台的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 117-123.
QIAO Ying, LU Zongxiang, XU Fei, et al. Study on the integrated monitoring & control platform of wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 117-123.
- [31] 陈昌松, 段善旭, 殷进军, 等. 基于发电预测的分布式发电能量管理系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 150-156.
CHEN Changsong, DUAN Shanxu, YIN Jinjun, et al. Energy management system of distributed generation based on power forecasting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 150-156.
- [32] WU W C, ZHANG B M. A three-phase power flow algorithm for distribution system power flow based on loop-analysis method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30(1): 8-15.
- [33] XIANG Niande, WANG Shiyong, YU Erkeng. An application of estimation-identification approach of multiple bad data in power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(2): 225-233.
- [34] ZHANG B M, LO K L. A recursive measurement error estimation identification method for bad data analysis in power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, PWRS-6(1): 191-197.
- [35] 冯江霞, 梁军, 张峰, 等. 考虑调度计划和运行经济性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 90-95.
FENG Jiangxia, LIANG Jun, ZHANG Feng, et al. An optimization calculation method of wind farm energy storage capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 90-95.
- [36] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103-109.
HONG Haisheng, JIANG Quanyuan, YAN Yuting. An optimization control method of battery energy storage system with wind power fluctuations smoothed in real time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 103-109.

收稿日期: 2015-05-18

作者简介:

贾宁(1982-), 男, 博士研究生, 工程师, 要从事新能源运行管理和研究工作;

王彬(1984-), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为新能源接入后的能量管理和运行控制及电力系统调度控制; E-mail:wb1984@tsinghua.edu.cn

孙宏斌(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 教育部长江学者特聘教授, 国家级教学名师, 国家杰出青年科学基金获得者, IET Fellow, 主要从事智能电网能量管理、电力系统调度自动化领域的研究和教学工作。

(编辑 葛艳娜)