

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211567

风储联合发电系统三站合一智能监控系统设计与实现

杨京渝^{1,2}, 严文交³, 罗隆福¹, 阳同光², 田野¹, 庞涛¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000; 2. 智慧城市能源感知与边缘计算湖南省重点实验室(湖南城市学院), 湖南 益阳 413000; 3. 湖南华大紫光科技股份有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 针对新型山地式风储联合发电系统存在的电压波动、谐波污染等问题, 设计了基于感应滤波技术风储集成系统的新型拓扑结构。在此基础上, 为解决风储联合发电系统成组方式各异、标准不统一、设备融合部署不实用等问题, 提出了风电场、储能站和升压站“三站合一”的智能监控系统, 给出了智能监控系统的总体建设方案。详细阐释了各模块的主要功能, 实现了风电场厂站端系统的高度集成与一体化设计。搭建了“三站合一”仿真测试平台, 对拓扑结构和功能进行了测试, 验证了系统的可行性和有效性, 为下一步示范工程的应用奠定了坚实的技术支撑。

关键词: 风储联合发电; 感应滤波; 三站合一; 智能监控; 域控; 群控

Design and implementation of an intelligent monitoring system for three-station integrated wind-storage power plants

YANG Jingyu^{1,2}, YAN Wenjiao³, LUO Longfu¹, YANG Tongguang², TIAN Ye¹, PANG Tao¹

(1. School of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China; 2. Key Laboratory Energy Monitoring and Edge Computing for Smart City of Hunan Province (Hunan City University), Yiyang 413000, China; 3. Hunan Huada Unisplendour Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: There are problems of voltage fluctuation and harmonic pollution in the new mountain-type wind-storage combined power generation system. Thus a new topology of a wind-storage integrated system based on inductive filtering technology is designed. This solves the problems of different grouping methods of new mountain-type wind power storage power stations, non-uniform standards, and impractical deployment of equipment integration. An intelligent monitoring system of "three-station integration" for wind farms, energy storage stations and booster stations is proposed. The overall construction plan of the intelligent monitoring system is given, the main function of each module is explained in detail, and the highly integrated design of the wind farm station system is realized. A "three-station integration" test platform is built to test the topology and functions, verify the feasibility and effectiveness of the system, and lay a solid technical support for the application of the next demonstration project.

This work is supported by the Major Science and Technology Project of Hunan Province (No. 2020GK1013).

Key words: wind-storage power plants; inductive filtering; three-station integrated; intelligent monitoring; domain control; group control

0 引言

当前, 加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系, 持续推进碳减排, 已经成为能源电力行业的共识^[1-2]。风力发电作为一种清洁能源而日益受到重视

并得到了长足的发展^[3-5], 但由于风电功率受气象因素影响较大, 其出力曲线呈现较强的波动性和随机性, 此类特性会使得在大量风电并网时对电网的运行和调度产生巨大冲击和影响^[6-7]。储能技术在提高间歇式电源的可控性方面具有广阔的前景, 它的成功应用将突破间歇性电源与电网协调控制的技术瓶颈, 显著提高间歇性电源的接入能力^[8-10]。

国内外已有不少学者对风电场、储能系统的监

基金项目: 湖南省科技重大专项资助(2020GK1013); 湖南省自然科学基金面上项目资助(2021JJ30079)

控系统分别开展了深入的研究和应用实践,涌现出一批新能源应用的研究成果^[11-13]。文献[14]设计了一套完整的风电场集成监控平台,将风机、升压站、预测系统等风电场内所有设备构成了一个有机整体;文献[15]提出了基于统一平台的风电场中央监控系统,解决了不同版本监控系统难以兼容的问题,可实现多个风电场的统一监控;文献[16]优化了风电场监控系统结构,精简了风电场二次拓扑结构,实现了功率控制、能量管理及风机监控等不同功能模块的融合统一,提升了控制效率。在储能方面,文献[17]从源网荷互动、一次调频、自动发电控制(AGC)、自动电压控制(AVC)等功能方面,研究了储能系统参与调度的运行模式和控制策略;文献[18]全方位对比分析了当前3种主流的储能监控系统,针对系统构架存在的问题,提出了协调控制优化方案,并通过试验验证了方案的可行性;文献[19]研究了吉瓦级储能电站监测数据的特性,提出了基于大数据的储能系统监控云平台构架。

风电场、升压站、储能站虽有各自的监控系统,但三者在配置标准、通信协议、设计规范等方面不统一,互不兼容,处于“各自为政”的状态,无法实现统一的信息采集和处理,影响调度决策的制定和实施^[20]。为此,业内开展了新能源、储能联合发电控制的技术研究。文献[21]介绍了国家风光储示范工程联合监控系统的总体建设方案,对系统的功能设计、数据采集监视、AGC控制方案、AVC控制方案等内容进行了阐释;在此基础上,文献[22]设计了可灵活组态的联合控制模式和场站控制模式以及相应的控制策略,实现了各模式之间的无缝切换,满足了实践工程中联合发电一体化协调运行和多样化控制。

在新能源、储能联合发电一体化监控及控制等方面虽然取得了一定的研究成果并应用于实际工程,但风储联合发电系统正处于发展初期,电站成组方式各异、标准不统一、一二次系统能量信息流交叉耦合,控制繁琐。同时,当前电站层级划分和建设模式中,不同设备融合部署,功能分区不清晰,且各子系统运行管理分散设置,调度决策的制定以及系统运维管理难度大,运维人员工作任务重,安全风险高。对于实际运行中风电场、储能站、升压站的系统构架及功能应用,三者之间的互补运行机制、联合控制模式以及控制策略等方面还有待进一步研究。针对上述问题,本文提出了升压站、储能站和风电场“三站合一”的一体化智能监控系统,其主要工作体现在以下3个方面:

1) 提出了基于感应滤波技术的风储集成系统

新型拓扑结构,升压站变压器采用感应滤波技术,着重解决新能源发电的电能质量问题;

2) 提出了升压站、储能站和风电场的三站合一拓扑结构及其智能监控系统,实现风电场厂站端系统的高度集成与一体化设计,统一通信协议,统一设计风格,统一配置标准;

3) 搭建了三站合一智能监控系统测试平台,对系统功能开展了一系列相关调试验证工作,为实际三站合一监控系统现场挂网运行提供了宝贵的参考数据和调试经验。

1 风储联合发电系统拓扑结构

风储联合发电系统中存在大量的电力电子装置,给风电场接入电力系统带来了谐波污染、电压波动等复杂的电能质量问题^[23-24]。相对无源滤波和有源滤波技术,基于感应滤波技术的风储集成系统新型结构具有良好的综合性能,不仅能够改善风储联合系统中的谐波、电压波动及闪变、低电压穿越等电能质量问题,而且具有动态无功补偿效果^[25]。通过储能系统与滤波装置(FC)的协调控制,既可提供有功能量,同时可以取代静止无功发生器(SVG)为系统提供无功支撑。因此,在常规风电场结构的基础上,采用感应滤波装置,并加装储能系统,其总体拓扑结构如图1所示。

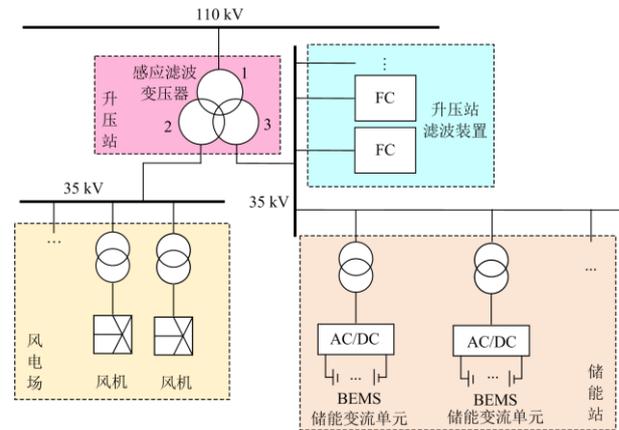


图1 风储联合拓扑总体结构

Fig. 1 Overall structure of wind-storage joint topology

图1中,110kV等级主变压器采用感应滤波变压器^[26],风机接入35kV母线,并与感应变压器绕组(绕组3)连接。每个储能单元采用统一标准变流升压一体化集装箱进行集成,变流升压一体化集装箱将柔性储能变流器、升压变压器、环网柜、单元配电、就地监控集成在一个集装箱内,并联后通过35kV母线接在变压器35kV侧感应滤波绕组(绕组

3)一侧, 该侧同时接入 FC, 给系统提供无功支撑和滤波。110 kV 母线与感应变压器绕组(绕组 1)连接, 通过 110 kV 线路接入主网。

2 三站合一智能监控系统设计

2.1 三站合一系统构架

三站合一智能监控系统是为满足大规模风储联合发电系统域控、群控柔性调度要求而设置的厂站端系统, 包括风电场、储能站以及升压站。该系统作为调度系统与能量管理系统(EMS)、AGC/AVC 控制系统、升压站综自系统、风电场 SCADA 系统以及感应滤波监测系统(或为 SVG 等无功补偿监控系统)5 个子系统间的数据上传和指令下达中枢。三站合一智能监控系统总的拓扑结构如图 2 所示。

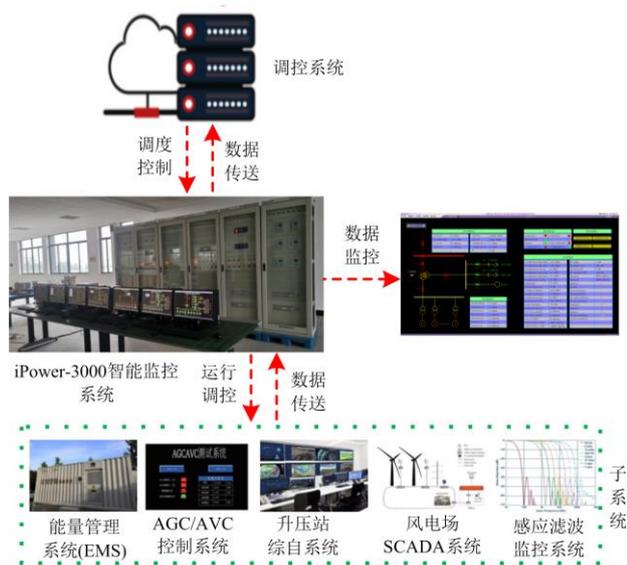


图 2 三站合一智能监控系统拓扑结构

Fig. 2 Three-station integrated intelligent monitoring system topology

三站合一智能监控系统主要由 4 套工作站、同步时钟对时装置、调度通信管理机组成, 站控层网络采用双星型网络, 如图 3 所示。

监控系统配置主服务器、备用服务器、操作员工作站和工程师工作站, 均通过高速以太网连接, 提供系统监控和维护、一次调频和 AGC/AVC 等功能。其中, 主、备用服务器采用冗余配置, 能实现双机无缝自动切换。

1) 三合一智能监控系统通过千兆以太网与各子系统通信: 与风机系统通信, 采集每台风机的实时运行数据如风速、风向、输出有功功率、无功功率、电压、电流等; 与感应滤波系统通信, 采集无功补偿装置的投切状态、输出无功功率、无功功率

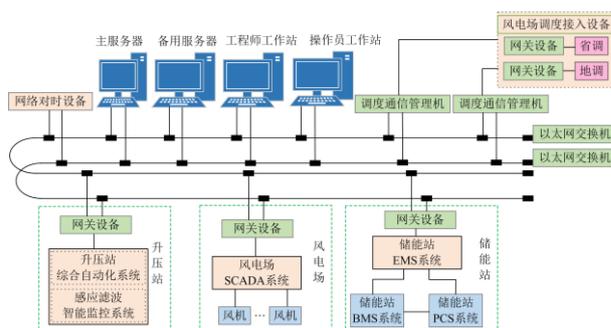


图 3 三站合一智能监控系统网络结构图

Fig. 3 Structure diagram of three-station integrated intelligent monitoring system network

可调范围等; 与升压站综自系统通信, 采集升压站并网点的电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、主变分接头位置以及断路器、隔离开关的状态等; 与储能系统通信, 采集储能站并网点的频率、电压、注入电网电流、注入有功功率和无功功率、功率因数、电池可充放电量、充电电量、放电电量、荷电状态、充放电状态等。

2) 调度通信管理机采用双套专用独立设备, 直采直送, 通过专用通道点对点方式以及站内的数据网接入设备向各级调度传送远动信息, 上传风电场风机、储能站电池和无功补偿装置运行数据, 同时接收调度下发的 AGC/AVC 调节指令。调度通信管理机经二次安防设备接入调度数据网, 二次安防设备包括防火墙, 交换机等。

3) 主、备用服务器根据调度下发的有功功率或电压目标值以及风电场风机、无功补偿装置、升压站、储能站电池的运行情况, 考虑电网和设备的安全约束, 通过优化计算确定风电场的有功功率和无功功率目标值、无功补偿装置的无功功率目标值、储能站有功功率和无功率目标值、主变分接头的升挡/降挡指令, 并下发给风机监控系统、感应滤波监控系统、储能站能量管理系统和升压站综自系统执行, 实现主电网与风电及储能系统的联合控制。

4) 系统配置和设备选型符合计算机、网络技术发展迅速的特点, 充分利用计算机领域的先进技术, 采用向上兼容的计算机体系结构, 使系统达到当前的国内领先水平。

2.2 三站合一系统功能

三站合一智能监控系统采用统一的模型管理、网络通信、数据库、人机界面以及系统管理等服务。融入风储联合系统的协调调度体系, 一方面为上级调控中心提供运行分析数据, 另一方面为风电场、升压站、储能站的调度及控制提供分析和决策。实

现风电场、升压站、储能站监控各项应用功能，使之具备良好的稳定性和实用性。风储联合发电监控系统功能网络结构如图 4 所示。

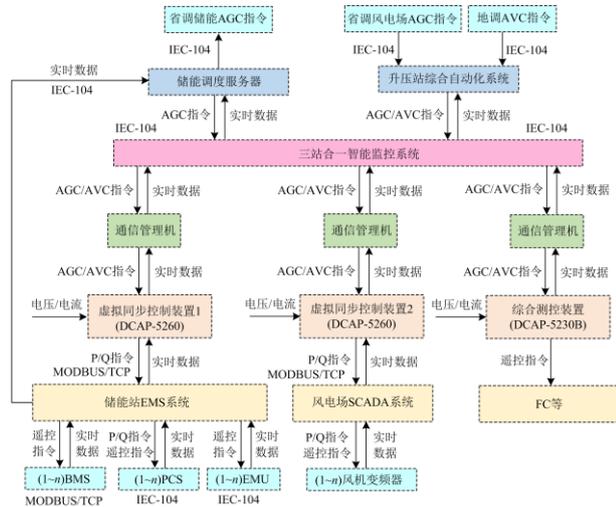


图 4 风储联合发电监控系统功能网络结构

Fig. 4 Functional framework of wind-storage combined power generation monitoring system

智能监控系统作为风储联合发电系统的控制核心，采用一体化的计算机监控系统设计，该系统通过统一协调分配风电、储能发电资源，实现风电、储能及电网之间的友好互动和智能调度。系统支持离线、当地和远方 3 种调节模式，且这 3 种模式间支持人工切换，也支持自动切换。

1) 离线模式：系统离线，不接收调度主站指令，不进行功率调节与控制，只监视新能源电站出力等信息。

2) 当地模式：系统在当地按照预先设定的策略进行功率调节与控制。

3) 远方模式：系统自动接收并执行调度主站定期下发的调节指令。

三站合一智能监控系统具有完善的调节策略，采取分层的调节策略，对于功率需求整定层、控制设备选择层和功率分配层都有完善的计算规则，且充分考虑系统安全、稳定和经济运行要求。同时，系统具有完善的闭锁措施，涉及闭锁的对象包含但不限于：AVC 系统、AGC 系统、发电机组/逆变器、储能系统、升压变压器和感应滤波系统等。

三站合一智能监控系统支持场控、域控、群控 3 种控制模式，实现数据采集和监视、自动发电控制、自动电压控制、虚拟同步、感应滤波等各类功能业务的一体化运行。

1) 场控：针对风电场、储能站的场站控制对象，

实时优化风储联合发电系统的运行状态，通过对储能系统的控制，满足平抑功率波动、跟踪计划曲线以及削峰填谷等运行模式。支持各种控制策略，可实现提高风电的并网消纳、经济效益最大化等控制目标。同时，也支持各种控制模式和策略来协调控制风机、储能、FC 等多种无功源。

2) 域控：风储联合发电系统作为子系统支持上级调控中心的自动电压控制，实现地区电网风电场群的无功电压控制，提高整个分区电网的安全性和经济性。

3) 群控：风储联合发电系统有功功率可作为一个整体支持调控中心 AGC 调度，对外可接收电网的调度指令，对内可进行协调控制，实现多个风储系统群之间的广域协调。同时，风电场和储能站也可处于单独运行模式，其有功功率分别接受调控中心的直接控制。

2.2.1 通信与数据采集

三站合一智能监控系统作为调度主站、风电场、升压站及储能站通信的中心枢纽，支持网络电缆、串口电缆、光纤等多种传输方式。与各系统之间支持 MODBUS、部颁 CDT、IEC60870-5-101、IEC60870-5-103、IEC60870-5-104、IEC61850 等标准协议或其他约定规约进行通信，具有很好的兼容性。实现对风机/逆变器运行信息的数据采集、数据存储和数据传输，并能够与远动通信终端(RTU)设备进行无缝对接；实现对储能系统运行信息的数据采集、数据存储和数据传输，并能够与 RTU 设备进行无缝对接；实现与升压站综合自动化系统的数据通信，互通互联。突破风电场、储能站、升压站不同厂家监控系统设备的信息交换瓶颈，执行统一的数据采集和处理，实现风储联合发电系统和主站无缝连接。数据采集点和功能包括：

1) 采集点包括三站合一智能监控系统(含 AGC/AVC 控制功能)、储能 EMS 系统、升压站综自系统、风电场 SCADA 系统、感应滤波系统；

2) 自动采集功率控制系统所需所有信息，并对采集到的数据进行有效性和正确性检查，更新实时数据库，使其能够正确反映现场设备的实际状况；

3) 自动接收并执行调度主站下发的调节指令，接收并执行操作员手动输入的数据信息；

4) 对运行数据和历史数据存盘，方便对比控制调节效果，保证数据的连续；

5) 生成各类事故报警记录，置有发出事故报警音响、事件顺序记录及处理等功能。

2.2.2 安全运行监视

通过三站合一智能监控系统后台监控系统操作人员工作站的人机接口完成实时的监视、控制调节和参数设置等操作。监控对象包括:

- 1) 各子系统运行状态、运行方式及系统状况监视;
- 2) 监视整站关键节点的采集数据, 譬如公共耦合点(PCC)节点电压、电流、无功功率、有功功率、风机风速、风机风向、风机输出功率、风机输出电流、储能站电池电量、储能电站的实时生产过程状况、主变压器温升、挡位等数据;
- 3) 通信通道监视, 功率控制系统能监视通信通道, 对冗余通道能自动切换。

操作人员监视的手段多样化, 如屏幕显示数据、文字、图形和表格等; 事故或故障的音响报警等。

2.2.3 自动发电控制

AGC 子站主界面如图 5 所示, AGC 内置于三站合一智能监控系统中, 能对风电场进行控制进而调节风机所输出的有功功率, 同时改变储能电池的充放电状态进而控制储能电站所输出的有功功率, 具有以下功能。

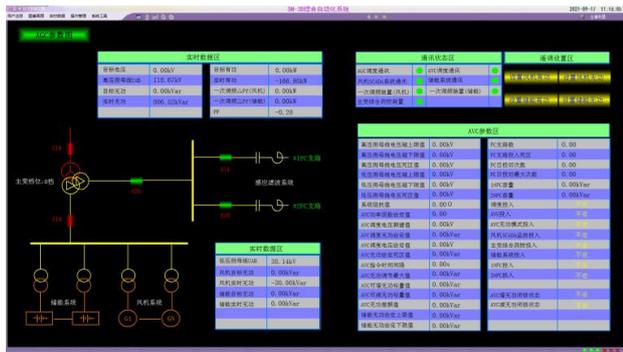


图 5 AGC 子站主界面

Fig. 5 Main interface of AGC substation

- 1) 自动接收调度主站系统下发的风电场、储能站发电出力计划曲线, 并控制风电场、储能站有功按计划曲线发电。
- 2) 自动接收调度主站系统下发的风电场、储能站有功控制指令, 主要包括功率下调指令(在一定时间内)及功率增加变化率限值等, 并能够控制风电场、储能站出力满足控制要求。
- 3) 根据所接收的调度主站系统下发的有功控制指令, 对场内新能源站进行自动停运及开机调整。
- 4) 采用自适应算法, 能动态计算系统有功损耗, 从而自动修正 AGC 目标值, 保证调节精度符合调度设定值。

5) 具备平滑风电出力功能, 在风电场输出功率波动分量超出波动限定值时, 控制储能系统快速进行充放电, 抑制功率波动。

6) 具备移峰功能, 在风电场出力高峰时段, 以削峰为应用目标控制电池储能系统充电, 在电网负荷高峰时段控制电池储能系统放电以辅助系统调峰。

2.2.4 自动电压控制

AVC 子站主界面如图 6 所示, AVC 内置于三站合一智能监控系统中, 能对所有具有无功功率补偿吸收设备的状态及变压器挡位进行控制, 以对整站各节点电压、PCC 节点电压进行调节, 具有以下功能。

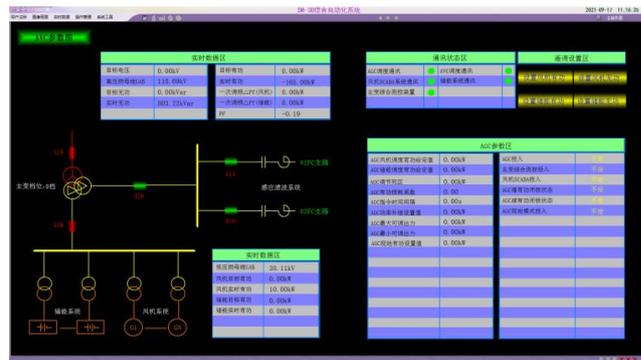


图 6 AVC 子站主界面

Fig. 6 Main interface of AVC substation

- 1) 自动接收调度 AVC 主站下达的高压侧母线电压调整量指令, 并上传 AVC 子站相关信息至调度 AVC 主站。
- 2) 具有分析、计算功能, 在充分考虑各种约束条件后分析、计算出各风机/逆变器对应的电压值或无功出力、储能系统对应的电压值或无功出力、FC 等无功补偿设备的电压控制目标、主变分接头位置。
- 3) 自动接收风电场监控系统、储能站监控系统、FC 等无功补偿设备的信息, 并负责按照计算结果将调控命令下发至风机/逆变器监控系统、储能站监控系统、FC 等无功补偿设备。
- 4) 综合考虑升压站内连续、离散等无功调节设备以及辐射网内的新能源电场无功出力, 进行全场内的二级电压控制计算。
- 5) 全面计算出风储联合系统接入点的无功调节能力范围, 上送至电网控制中心的 AVC 主站, 保证 AVC 主站执行基于全局的电压控制策略时, 能充分考虑各新能源电站自身的控制能力。

3 虚拟同步控制

虚拟同步装置(DCAP-5260)基于 32 位高性能 DSP(数字信号处理器)和高速以太网网络通信技术设

计,如图4所示。通信方面该装置采用 MODBUS 协议与三站合一智能监控系统通信,实现数据的交换,采用 MODBUS 协议与新能源站的 EMS、风电场 SCADA 系统通信,实现数据的交换;同时该装置还具备测量和执行功能,通过直接采集母线电压和线路电流来自行判断和下达指令,将原有的一次调频等功能由系统级完成放到了装置级,提高了响应速度。因此,虚拟同步装置具备一次快速调频、高低电压穿越、AGC/AVC、AGC 与一次调频协调控制、通信管理、报警等功能。

1) 虚拟同步装置具备执行三站合一智能监控系统指令(AGC/ACV),完成指令的分解及下发并监测功率设备的执行情况。

2) 能灵活根据储能单元的配置来设置虚拟同步装置的虚拟惯性,下发有功功率调节指令给 SCADA 和 EMS 系统,参与一次调频,增强电网运行的稳定性。

3) 该装置带有母线电压瞬变检测及报警、低电压和高电压报警、与 PCS 配合完成高低电压穿越等功能。

由图4还可以看出,由于在智能监控系统和风电场、储能站之间分别加装了 DCAP-5260 装置,因此风电场、储能站一次调频等功能可独立完成,调试简单、互不影响,两者数据最终在智能监控系统中汇集。该拓扑结构精简了网络结构,提高了通信的效率及速度,最重要的是该网络结构既便于功能和硬件的扩充,又能充分保护已有资源和节省投资。分布式数据库及软件模块化、结构化设计,使系统能适应功能的增加和规模的扩充。

3.1 一次调频

一次调频功能由 DCAP-5260 虚拟同步控制装置实现,本系统配置了两套频率快速控制设备。一套配置给风电场,另一套配置给储能站。DCAP-5260 实时计算电网的频率,采用下垂特性曲线(如图7所示)计算出一次调频的功率增量,然后发送给风电场 SCADA 或储能站 EMS。

以风电场为例,一次调频计算如下。

1) 当 $f_n - D_{B1} < f_n \leq f - D_{Z2}$ 时,即频率偏差的绝对值在电网规定的调频死区范围内时,风电场不参与调频,即 $dP_f = 0$ 。

$$P_{ref} = (P_0 + P_c) - dP_f = P_0 + P_c \quad (1)$$

式中: P_{ref} 为风电场一次调频功率; P_0 为风电场发出的实时功率; P_c 为内部损耗补偿功率。

2) 当 $f < f_n - D_{Z1}$ 时,此时电网处于低频,需要风电场提高出力。考虑到风电场的调频能力,在

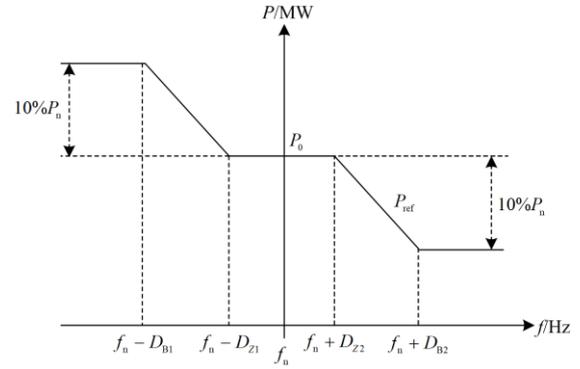


图7 下垂特性曲线

Fig. 7 Droop characteristic curve

系统频率下降至最小值 $f_n - D_{B1}$ 时,风电场的调频深度不再增加,即风电场在低频时根据频率大小分为两段,如式(2)所示。

$$dP_f = \begin{cases} \frac{P_n [f - (f_n - D_{Z1})]}{E_p \% f_n}, & f_n - D_{B1} < f < f_n - D_{Z1} \\ \frac{P_n (D_{Z1} - D_{B1})}{E_p \% f_n}, & f \leq f_n - D_{B1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f 为电网频率; P_n 为风电场总额定功率; D_{Z1} 为一次调频低频死区; D_{B1} 为一次调频低频限值; $E_p \%$ 为调差率; f_n 为系统额定频率。

当 $dP_f < -P_U \% \cdot P_n$ 时,有

$$dP_f = -P_U \% \cdot P_n \quad (3)$$

$$P_{ref} = (P_0 + P_c) - dP_f \quad (4)$$

式中, $P_U \%$ 为上调功率限定,即上调功率时的最大限定比例。

3) 当 $f > f_n + D_{Z2}$ 时,此时电网处于高频,需要风电场降低功率。考虑到风电场的调频能力,在系统频率上升至最大值 $f_n + D_{B2}$ 时,风电场的调频深度不再增加,即风电场在高频时根据频率大小也分为两段,如式(5)所示。

$$dP_f = \begin{cases} \frac{P_n [f - (f_n + D_{Z2})]}{E_p \% f_n}, & f_n + D_{Z2} < f \leq f_n + D_{B2} \\ \frac{P_n (D_{B2} - D_{Z2})}{E_p \% f_n}, & f > f_n + D_{B2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_{Z2} 为一次调频高频死区; D_{B2} 为一次调频高频限值。

当 $dP_f > P_D \% \cdot P_n$ 时,有

$$dP_f = -P_D \% \cdot P_n \quad (6)$$

$$P_{\text{ref}} = (P_0 + P_c) - dP_f \quad (7)$$

式中, $P_D\%$ 为下调功率限定, 即下调功率时的最大限定比例。

4) 对于风电场, 当计算出来的 $P_{\text{ref}} \leq P_{\text{Min}} \% \cdot P_n$ ($P_{\text{Min}}\%$ 为最小功率限定, 即风电场在不切机情况下最小的发电功率比例) 时, 令 $P_{\text{ref}} = P_{\text{Min}} \% \cdot P_n$; 对于储能站, $P_{\text{ref}} = (P_0 + P_c) - dP_f$ 。

3.2 高低电压穿越

当并网点电压出现瞬时骤升/跌落时, 风电场内的风电机组必须保证不脱网连续运行, 并从电网吸收/提供一定的无功功率, 以支持电网电压恢复, 直至电网恢复正常。装置设有两段高/低电压穿越报警功能。当所有线电压均大于/小于启动整定值时, 出口延时动作; 当所有线电压均小于/大于返回整定值时, 出口延时返回。

4 系统仿真测试分析

4.1 仿真系统搭建及参数设置

搭建了风储联合发电系统综合控制仿真系统, 其拓扑结构、系统功能及二次参数等完全参照示范工程设计, 如图 8 所示。仿真平台主要由储能站 EMS 系统(附图 1)、风机 SCADA 系统(附图 2)、感应滤波监控系统(附图 3)、升压站综合自动化系统(附图 4)、AGC/AVC 一体化智能监控系统(附图 5)等组成。主要设备参数: 滤波变压器电压等级为 110/35/35 kV, 容量为 50 MVA; 感应滤波补偿装置配置 2 条 FC 滤波及补偿支路, FC1(3 次谐波滤波支路)补偿容量为 1200 kvar, FC2(5 次谐波滤波支路)补偿容量为

2100 kvar; 风电场为 25 台 2000 kW 的风机; 储能站配置 5000 kW/10 000 kWh 磷酸铁锂电池, 充放电倍率为 0.5C。



图 8 仿真测试平台

Fig. 8 Simulation test platform

4.2 测试结果及分析

通过调度系统和三站合一智能监控系统的各子系统, 测试三站合一智能监控系统与调度、各子系统之间的数据上传、功率调节与控制功能。对功能模块挂接、数据采集系统运行、后台监控系统运行、事故记录与报警、AGC/AVC、虚拟同步装置、故障电压穿越等功能进行了测试。主要测试结果如下。

1) AGC 测试

风储联合发电系统有功功率控制模式可设置为独立调度和综合调度。独立调度模式下, 风电场和储能站的有功功率分别接收群控的 AGC 指令; 综合调度模式下, 风电场和储能站的有功功率统一接收群控的 AGC 指令, 内部通过跟踪计划曲线、平抑功率波动等工况下的优化算法, 实现全站的控制, 测试结果如表 1 所示。

表 1 AGC 试验结果

Table 1 AGC test results

试验内容	控制模式	功率		风电场		储能站		总稳定值/kW
		给定值/kW	初始值/kW	稳定值/kW	初始值/kW	稳定值/kW		
风电场 AGC	独立调度	9000	12 500	9072	—	—	9072	
储能站 AGC	独立调度	1000	—	—	230	995	995	
跟踪计划曲线 1	综合调度	10 000	8200	7200	1820	819	8019	
跟踪计划曲线 2	综合调度	10 000	8000	15 800	1980	-3930	11 870	
平抑功率波动 1	综合调度	—	17 115	10 980	560	2595	13 575	
平抑功率波动 2	综合调度	—	21 930	28 260	2560	-1356	26 904	

独立调度测试, 通过远方分别设定风电、储能调节目标, 风电场 AGC、储能站 AGC 将功率设定值作为跟踪目标进行调节。跟踪发电计划曲线测试, 协调储能系统来实时修正各时刻实际风电功率与计

划值之间的偏差, 计划允许偏差为 $\pm 20\%$ 。平抑功率波动测试, 利用储能平抑 1 min 的风功率波动, 允许波动范围为 ± 5000 kW。在表 1 跟踪计划曲线和平抑功率波动试验数据中, 功率给定值视为当前

时刻计划值,风电场/储能站初始值视为前一时间风电场/储能的有功功率,风电场/储能站稳定值视为当前时刻风电场/储能的有功功率,总稳定值视为风储联合出力功率。

从表 1 中可以看出,在独立调度试验中,风电场和储能站的调节误差分别为 0.8% 和 0.5%,能精确地根据 AGC 指令进行有功功率调节;在跟踪计划曲线 2 组试验中,风储联合出力与计划值之间的偏差分别为 19.8% 和 -18.7%,均在允许偏差之内,满足相关要求;在平抑风功率波动试验中,经储能系统平抑后,1 min 功率向下波动由 6135 kW 下降到了 3540 kW,1 min 功率向上波动由 6330 kW 下降到了 4974 kW,均小于 5000 kW,在允许范围内。测试结果表明,三站合一智能监控系统可以很好地

根据调度指令需求对风机、储能电站进行有功功率调节。

2) AVC 测试

全站的无功功率统一接收域控的 AVC 指令。控制对象包括新能源站的 SCADA 系统、储能 PCS 系统、无功补偿系统(包括 SVG)及主变挡位调节等。

AVC 接收调度(或当地)下达的风电场高压母线电压(或总无功功率)控制目标,在充分考虑各种约束条件并经过分析计算后,估测出全场总无功出力需求,以风电场风机机组无功、储能电站设备、无功补偿设备和主变分接头为调节手段,实现整个风电场与调度 AVC 主站系统的整体闭环调节。AVC 试验通过改变 PCC 节点电压进行测试,结果如表 2 所示(所有电压均为二次电压)。

表 2 AVC 试验结果
Table 2 AVC test results

110 kV 电压 给定值	110 kV 母线 初始电压/V	风电场 功率/kvar	储能站 功率/kvar	滤波支路 1 功率/kvar	滤波支路 2 功率/kvar	总功率/ kvar	110 kV 母线 稳定电压/V
初始状态	99.8	3260	0	1500	2100	6860	—
105 V	99.8	5820	0	1500	2100	9420	104.6
初始状态	104.6	5820	0	1500	2100	9420	—
100 V	104.6	5820	-149	1500	0	7171	99.7

从表 2 中可以看出,当 110 kV 母线电压初始值为 99.8 V 时,给定母线电压目标值为 105 V,此时风电场无功功率由初始值 3260 kvar 增加到了 5820 kvar,储能站、感应滤波装置输出无功功率保持初始值不变,经风电场无功补偿后,110 kV 母线稳定电压为 104.6 V。以此状态为初始状态,修改母线电压目标值为 100 V,此时滤波支路 2 退出运行,同时储能系统吸收无功功率 149 kvar,系统总的无功功率由 9420 kvar 下降到了 7170 kvar,母线电压最终稳定值为 99.7 V。测试结果表明,三站合一智能监控系统可以很好地根据调度指令需求对风机、储能电站、感应滤波补偿装置状态进行控制,进而

调节无功功率及电压。

3) 一次调频测试

三站合一智能监控系统自动实时检测 110 kV 母线电压的频率,测量精度为 0.002 Hz,一旦频率偏移超过一次调频死区(0.05 Hz),虚拟同步装置立即依据下垂特性曲线进行有功功率调节,当频率恢复至一次调频动作死区范围内时,自动退出本次一次调频。在虚拟同步装置的“设置试验”菜单设置系统频率,通过“调频试验”菜单启动一次调频试验。风电场的一次调频试验结果如表 3 所示,储能站的一次调频试验结果如表 4 所示。

表 3 风电场一次调频试验结果

Table 3 Results of primary frequency modulation test of wind farm

风电场额定功率/kW	调差率/%	死区/Hz	试验频率/Hz	功率变化计算值/kW	功率变化试验值/kW
5000	3	0.05	49.90	-166.7	-169.8
5000	3	0.05	50.10	166.7	165.2

表 4 储能站一次调频试验结果

Table 4 Results of primary frequency modulation test of an energy storage station

储能站额定功率/kW	调差率/%	死区/Hz	试验频率/Hz	功率变化计算值/kW	功率变化试验值/kW
1000	3	0.05	49.90	-33.3	-32.8
1000	3	0.05	50.10	33.3	33.7

如表 3 和表 4 所示, 从风电场一次调频 2 组试验结果中可以看出, 功率变化试验值与计算值相比, 调节误差分别为 1.86% 和 0.9%; 在储能系统一次调频 2 组试验中, 调节误差分别为 1.5% 和 1.2%。由此可知, 风电场和储能系统均能准确跟踪系统频率的变化, 验证了系统的有效性。

4) 故障电压穿越测试

三站合一智能监控系统自动实时检测 110 kV 母线电压的突变, 一旦发生突降或突升, 虚拟同步装置立即启动储能系统 PCS 发出无功功率(无功功率 dQ_{set} 可以设定)。在虚拟同步装置的“设置试验”菜单设置母线电压的突变, 通过“电压试验”菜单启动故障电压穿越试验, 其试验结果如表 5 所示(表内所有电压均为二次电压)。从试验结果可以看出, 当并网点电压出现瞬时骤升时, 储能系统从电网吸收无功功率; 当并网点电压出现跌落时, 储能系统向电网提供无功功率, 以支持电网电压恢复。

表 5 故障电压穿越试验结果

Table 5 Fault voltage ride through test results

储能站额定功率/kW	突降电压值/V	突升电压值/V	功率变化设定值/kvar	功率变化试验值/kvar
1000	80	—	50	50.7
1000	—	20	50	-49.6

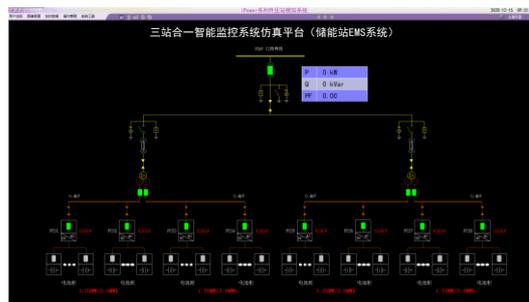
5 结论

针对新能源风力发电的消纳和谐波等问题, 提出了升压站、储能站和风电场的三站合一拓扑结构及其智能监控系统。该智能监控系统精简了风储联合发电系统的二次拓扑结构, 实现了构架的扁平化, 不仅可以提升控制效率, 而且降低了建设和运维成本。通过仿真测试平台, 对系统的通信与数据采集、安全运行监视、AGC/AVC、调频、调压、高低电压穿越等各项功能进行了测试, 验证了系统的可行性和有效性。同时, 该智能监控系统同样适用于光储、风光储等新能源站, 在后续的工作中, 将进一步开展以下两方面的研究:

1) 追求更为高效、经济的设备动作, 进一步对各子系统的控制逻辑和算法进行串联和优化精简, 满足较为快捷的响应速度以应对突发情况, 实现整体系统的一体化和高度集成;

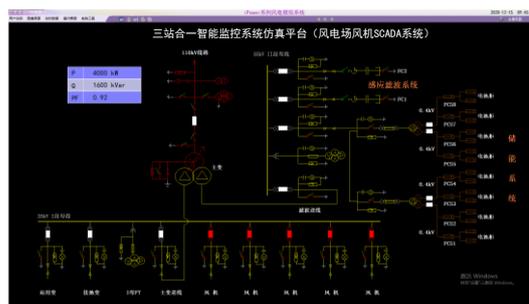
2) 综合考量新能源风力发电的出力特性, 进一步研究足够全面、合理且能满足各种工况及电网需求下的电池充放电策略, 促进大规模新能源稳定并网消纳。

附录



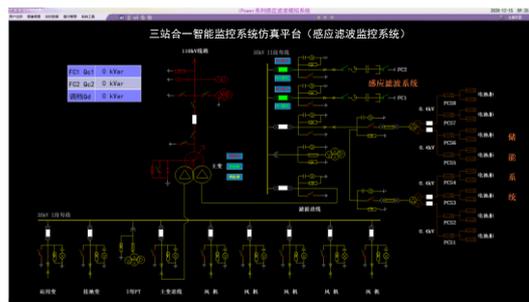
附图 1 储能站 EMS 系统

Attached Fig. 1 Energy storage station EMS system



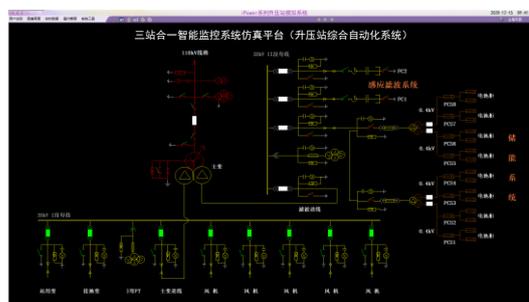
附图 2 风机 SCADA 系统

Attached Fig. 2 Wind turbine SCADA system



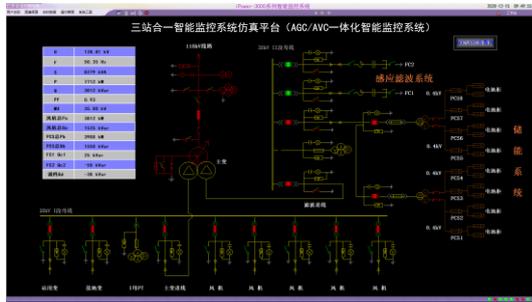
附图 3 感应滤波监控系统

Attached Fig. 3 Inductive filtering SCADA system



附图 4 升压站综合自动化系统

Attached Fig. 4 Comprehensive automation system for booster station



附图 5 AGC/AVC 一体化智能监控系统
Attached Fig. 5 AGC/AVC integrated intelligent monitoring system

参考文献

[1] 帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 18-26.
SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xueming, et al. “Source-network-load-storage” coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 18-26.

[2] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 1-11.

[3] 谢忠能, 王海云, 王维庆. 采用自适应 VMD 与能量管理控制的混合储能平抑风电波动策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 87-94.
XIE Zhongneng, WANG Haiyun, WANG Weiqing. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using adaptive VMD and energy management control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 87-94.

[4] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18.
SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.

[5] YIN Rui, LI Dengxuan, WANG Yifeng, et al. Forecasting method of monthly wind power generation based on climate model and long short-term memory neural

network[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 571-576.

[6] 侯力枫. 提高风储发电经济性的双储能系统模型预测控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 97-106.
HOU Lifeng. A model predictive control method of the dual energy storage system for improving wind storage economy[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 97-106.

[7] CHEN Hao, ZHANG Jianzhong, TAO Youbo, et al. Asymmetric GARCH type models for asymmetric volatility characteristics analysis and wind power forecasting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 356-366.

[8] 张刘冬, 袁宇波, 孙大雁, 等. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 59-66, 93.
ZHANG Liudong, YUAN Yubo, SUN Dayan, et al. Joint operation model of wind-storage system based on two-stage robust interval optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 59-66, 93.

[9] 傅金洲, 孙鸣. 基于气候条件的光伏储能一体发电系统的能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 142-149.
FU Jinzhou, SUN Ming. Energy management strategy based on weather condition for photovoltaic-energy storage integrated power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 142-149.

[10] YUAN Bo, WANG Peng, YANG Jie, et al. A review and outlook of user side energy storage development in China[C] // 3rd IEEE International Electrical and Energy Conference (CIEEC), September 7-9, 2019, Beijing, China: 943-946.

[11] MAHELA O P, SHAIK A G. Power quality improvement in distribution network using DSTATCOM with battery energy storage system[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 83.

[12] LIU Xingchen, DU Juan, YE Zhisheng. A condition monitoring and fault isolation system for wind turbine based on SCADA data[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(2): 986-995.

[13] PAPTHEOU E, DERVILIS N, MAGUIRE A E, et al. A performance monitoring approach for the novel Lillgrund offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6636-6644.

[14] 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.
- [15] 田英, 徐丽杰, 王玮, 等. 基于统一平台的风电场中央监控系统主站设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 55-59.
TIAN Ying, XU Lijie, WANG Wei, et al. Design of main station in wind farm center monitoring system based on unified platform[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2): 55-59.
- [16] 钟旭, 常鹏飞, 侯凯, 等. 风电场功率控制一体化监控系统开发与应用[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 168-173.
ZHONG Xu, CHANG Pengfei, HOU Kai, et al. Development and application of wind farm power control integrated monitoring system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 168-173.
- [17] 李建林, 牛萌, 王上行, 等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 28-35.
LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shangxing, et al. Operation and control analysis of 100 MW class battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 28-35.
- [18] 彭志强, 卜强生, 袁宇波, 等. 电网侧储能电站监控系统体系架构及关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 61-70.
PENG Zhiqiang, BU Qiangsheng, YUAN Yubo, et al. Architecture and key technologies of a monitoring and control system for an energy storage power station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 61-70.
- [19] 李建林, 武亦文, 王楠, 等. 吉瓦级电化学储能电站信息构架与安防体系综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 179-191.
LI Jianlin, WU Yiwen, WANG Nan, et al. Review of information architecture and security system of gigawatt electrochemical energy storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 179-191.
- [20] CASCIANELLI S, ASTOLFI D, CASTELLANI F, et al. Wind turbine power curve monitoring based on environmental and operational data[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 29(4): 1-10.
- [21] 於益军, 雷为民, 单茂华, 等. 风光储联合发电监控系统功能设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 32-38.
YU Yijun, LEI Weimin, SHAN Maohua, et al. Design and application of supervision and control system for wind-photovoltaic-battery power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 32-38.
- [22] 任洛卿, 白泽洋, 于昌海, 等. 风光储联合发电系统有功控制策略研究及工程应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 105-111.
REN Luoqing, BAI Zeyang, YU Changhai, et al. Research on active power control strategy for wind/photovoltaic/energy storage hybrid power system and its engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 105-111.
- [23] TIAN Ye, LUO Longfu, LIU Qianyi, et al. A new harmonic mitigation system with double balanced impedance filtering power transformer for multistage distribution network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4565-4575.
- [24] 邹京希, 秦汉, 刘东, 等. 考虑频率约束下提升风储联合发电系统可靠性的储能系统控制策略[J]. 供用电, 2020, 37(2): 73-78.
ZOU Jingxi, QIN Han, LIU Dong, et al. Energy storage system control strategy for improving the reliability of an integrated power generation system of wind and energy storage unit under frequency constraint[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2): 73-78.
- [25] YAO F, XU Z, YONG L, et al. An inductive filtering method for power quality improvement of large-scale wind farm[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 2063-2068.
- [26] 田野, 罗隆福, 李勇, 等. 220 kV 多绕组感应滤波变压器的性能分析与端口矩阵模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 3042-3052.
TIAN Ye, LUO Longfu, LI Yong, et al. Performance analysis and port matrix model of 220 kV multi-winding inductively filtered transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 3042-3052.

收稿日期: 2021-11-20; 修回日期: 2022-01-12

作者简介:

杨京渝(1986—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为新能源发电; E-mail: 443792056@qq.com

罗隆福(1962—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源发电、电能变换系统与装备动态无功补偿技术、HVDC 系统的关键技术与装备研制。E-mail: llf@hnu.edu.cn

(编辑 周金梅)