

风储孤网系统运行与控制研究综述

叶鹏¹, 李山¹, 何淼¹, 王刚², 孙峰²

(1. 沈阳工程学院电力学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 随着分布式发电的快速发展和应用, 风储孤网系统的运行与控制技术越来越受到人们的重视。与联网运行相比, 风储孤网系统具有运行灵活、高效等特点, 是未来新能源的重要应用形式和技术发展趋势。综述了风储孤网系统运行与控制技术的最新进展, 从风储孤网系统结构与应用、风储孤网系统的协调控制、自启动、能量管理和系统保护等方面进行了总结研究。分析了风储孤网系统运行与控制的关键技术, 给出了风储孤网系统自启动的实现方法和风储孤网系统能量管理系统的设计方案, 并对风储孤网系统未来的技术发展趋势进行预测和展望。

关键词: 风储孤网系统; 运行与控制; 自启动; 能量管理; 保护

Review of operation and control of the wind storage isolated network system

YE Peng¹, LI Shan¹, HE Miao¹, WANG Gang², SUN Feng²

(1. School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China)

Abstract: With the rapid development and application of distributed generation, more and more attention has been paid to the operation and control technology of the wind storage isolated network system. Compared with the interconnected network operation, the wind storage isolated network system has the characteristics of flexible operation and high efficiency. It is an important application form and technical development trend of the new energy resources in the future. The latest development of operation and control technology of the wind storage isolated network system is summarized. The structure and application, coordinated control, self start, energy management and system protection of the wind storage isolated network system are summarized. The key technologies of operation and control of the wind storage isolated network system are analyzed. The realization method of self starting and design scheme of energy management system of the wind storage isolation network system are given, and the future development trend of the wind storage isolation network system is forecasted and prospected.

This work is supported by Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 201602534) and Shenyang Science and Technology Project (No. F16-205-1-08).

Key words: wind storage isolated network system; operation and control; self starting; energy management; protection

0 引言

在分布式能源发电中, 风力发电是技术最成熟、最具备开发条件、发展前景良好的项目。自 20 世纪 90 年代以来, 风电的年增长率一直保持了两位数的百分比水平^[1]。虽然风电并网容量不断加大, 但由于风机出力存在分散性、随机性等缺陷, 风电场大规模并网后将对电网的运行控制、调峰调频和电能

质量等方面造成影响, 技术层面上的“并网难”和“弃风”一直是制约风电发展的最大难题^[2-5]。针对该技术难题, 国内外专家学者提出应用风储联合发电技术予以解决。储能系统能够实现电能的时空平移, 响应速度快且具备大规模应用的可行性, 可从多方面支持风电运行与控制。风储联合运行系统已经得到广泛的研究和应用, 随着储能技术的快速发展, 风储联合运行系统越来越多的得到电力企业的重视。

与联网运行相比, 风储孤网系统具有运行灵活、高效等特点, 是未来新能源的重要应用形式和

基金项目: 辽宁省自然科学基金指导计划资助(201602534); 沈阳市科技项目资助(F16-205-1-08)

应用到风电场群系统中以解决风电大规模直接并网过程中产生的电压、谐波等问题成为可能。在大型风电场出口安装超大型储能电站系统, 将风电发出的不稳定电能储存起来, 最后集中稳定地向电网输送能量, 在此过程中储能电站系统相当于风电场与大电网之间能量传输的媒介。

大型风电场群储能电站系统的结构如图 3 所示, 其结构主要由风电场群、超大型储能电站系统、隔离开关及大电网组成。大型风电场群储能电站系统的加入不仅可以保证风电机组的正常稳定运行、降低风电场输出功率的波动、稳定风电场的电压, 而且还可以增加电网系统可调用的备用容量, 调节大电网的峰谷差, 提高大电网运行的安全可靠; 同时, 大型风电场群储能电站系统可以作为大型风电场群的黑启动电源, 使因故障等原因而停止运行的风电机组或大电网重新正常运行; 大型风电场群储能电站系统可以作为新能源并入大电网前的一种暂时的运行方式, 提高大电网对风电等可再生能源的接纳和消耗能力, 为风电等新能源并网的进一步发展提供保障。随着储能系统的超大规模应用以及储能容量比的增加, 大型风电场群储能电站系统孤网运行也可以作为一种特定的运行方式, 增加电网运行和控制的灵活性。

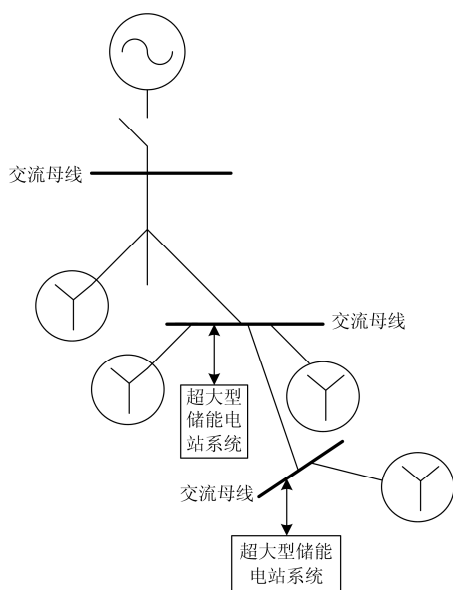


图 3 大型风电场群储能电站系统

Fig. 3 Energy storage power station system of large wind power group

2 风储孤网系统运行与控制关键技术

风储孤网系统运行与控制关键技术主要包括：

风储孤网运行与协调控制、风储孤网自启动、能量管理及系统保护。

2.1 运行与协调控制技术

风储孤网系统运行与协调控制技术是风储孤网系统运行与控制技术的核心。在风储孤网系统运行过程中, 受自然环境及气候变化的影响, 风电输出功率具有波动性、间歇性的特点。由于没有大电网的支撑, 风储孤网系统运行时系统电压和频率容易出现较大范围波动, 难以满足负荷的需求。因此, 如何维持风储孤网系统电压与频率的稳定以及功率需求的平衡是风储孤网系统稳定运行的关键。针对风储孤网系统运行时频率控制问题, 文献[6]研究了风机并网对孤立电网频率的影响; 文献[7]提出了改进的 P/δ 和 Q/V 下垂控制策略, 将电压和相角作为前馈量加入功率控制环节, 实现电压与相角的二次调整, 减小系统频率的波动性; 文献[8]提出了一种新型的频率分层控制方案, 提高了独立微电网频率控制的稳定性与灵活性, 通过一级控制和二级控制可实现系统频率的无差调节。另外, 储能系统的接入为解决由风能波动与负荷扰动所引起风储孤网系统频率及电压稳定性等问题提供了一种有效的方式。储能系统可以作为“平衡节点”来维持风储孤网系统电压和频率的稳定, 即储能系统在自身电池系统容量的允许范围内通过协调控制策略实现储能系统输出端的有功、无功功率的控制, 以协调系统的功率差额, 进而保证系统电压和频率稳定在一定范围以满足负荷供电要求^[9]。

然而, 受储能系统中电池系统自身因素的影响, 电池系统的存储容量有限。在某些极端气候下, 储能系统难以维持整个孤网系统运行的稳定; 同时, 风电机组输出功率的波动性、间歇性以及负荷的波动性和随机性必将导致储能系统长期处于充放电循环状态, 电池系统的使用寿命将受到影响。针对上述问题, 文献[10]提出基于孤岛模式的双储能微电网下垂协调控制策略, 该策略根据储能设备不同工作特性及各自不同的荷电状态(SOC), 实时修改储能单元输出功率比例系数, 从而使负荷所需功率在不同储能设备中得到合理优化分配, 大大补偿了风电孤网功率瞬时突变, 延长电池系统的使用寿命; 文献[11]在并联型储能系统中, 根据电池系统工作特性及传统下垂控制提出了外环功率控制, 同时考虑到下垂控制误差等其他因素提出了内环电压控制, 仿真结果表明该控制策略适宜为风能穿透比高、负载波动性大的孤岛供电, 同时该策略还可以提高电池使用寿命; 同时, 超级电容与蓄电池组成的混合储能系统能够弥补传统的蓄电池储能系统功率密

度低以及使用寿命短等缺点,在一定程度上提高了储能系统的使用寿命。文献[12-14]对混合储能系统的控制方法进行了研究,并提出了混合储能的控制策略,提高了储能系统的使用寿命;文献[15-17]对混合储能系统的容量优化配置进行了研究,提出了基于离散傅里叶变换和小波包分解的混合储能系统的容量优化配置方法,使混合储能系统的容量配置达到最优化。

与风储并网系统运行方式不同,风储孤网系统运行时由于没有大电网的支撑,当维持系统能量平衡时,不仅要考虑有功功率平衡,还要考虑无功功率平衡,而储能系统可以通过功率转换系统(PCS)来实现风储孤网系统中有功功率和无功功率的平衡。因此,在风储孤网系统中如何保障储能系统内部的协调控制及 DFIG 与储能系统之间的协调控制,以实现系统有功功率和无功功率的瞬时平衡、系统电压和频率的稳定,从而满足负荷的用电需求,对于系统的稳定运行至关重要。文献[18-19]研究了风储等孤立微电网的运行方式和协调控制策略;文献[20]提出了风电机组与并联储能系统之间的协调控制策略,在该策略中并联储能系统用于平滑风电机组与负载之间的功率差额,实现系统的功率平衡和维持系统电压、频率的稳定;文献[21-22]对风光柴储独立微电网系统进行了研究,提出了风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略,并通过仿真验证了提出控制策略的正确性和有效性。风储孤网系统协调控制策略如图 4 所示。

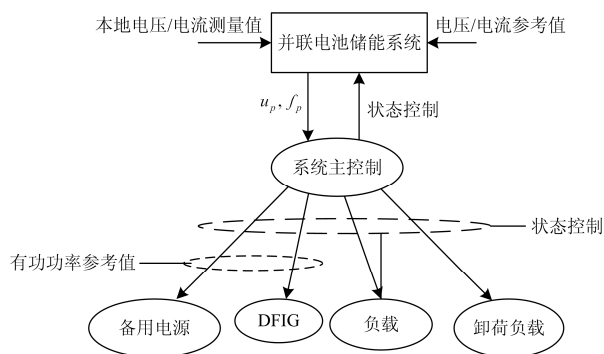


图 4 风储孤网系统协调控制策略

Fig. 4 Coordinated control strategy of wind storage isolated network system

2.2 自启动

风储孤网系统的自启动是风储孤网稳定运行的基础。在风储孤网系统中,双馈异步发电机自启动条件与风速、系统电压和频率等因素有关,目前有关风储孤网系统的研究主要集中在风储孤网系统运

行和控制上,而对于风储孤立供电系统自启动方面的理论研究工作还没有完全开展。而针对风储系统自启动问题,文献[23]通过利用储能装置,研究了基于定子磁链定向的双馈异步发电系统的孤岛启动运行与控制策略,同时比较了空载启动与带载启动两种启动方式的优缺点;文献[24]提出了基于双馈风电场混合型高压直流输电系统的正常并网运行控制方案,该方案能够完成双馈异步风机的自启动过程,快速准确地跟踪风电场有功功率变化,并向电网提供独立无功支撑。在工程实践方面,中国电力科学研究院、辽宁电力科学研究院联合正在进行有关风储孤网系统自启动的工程实验研究。风储孤网系统自启动实现的核心技术在于风机出力、风机及储能逆变器、储能充/放电转换三者间控制策略。在风储孤网系统中,任意时刻系统的有功功率都处于平衡状态。在获得风功率预测值 P 、风电机组启动功率预测值 P_s 、负荷预测值 P_{load} 和储能功率预测值 P_{bat} 后,可以根据系统有功功率平衡得到风储孤网系统功率偏差值 ΔP 。基于时间 Petri 网模型的风储孤网系统自启动过程状态转换关系如图 5 所示。任意时刻,风储孤网系统功率偏差计算函数为

$$P + P_s + P_{load} + P_{bat} + \Delta P = 0 \quad (1)$$

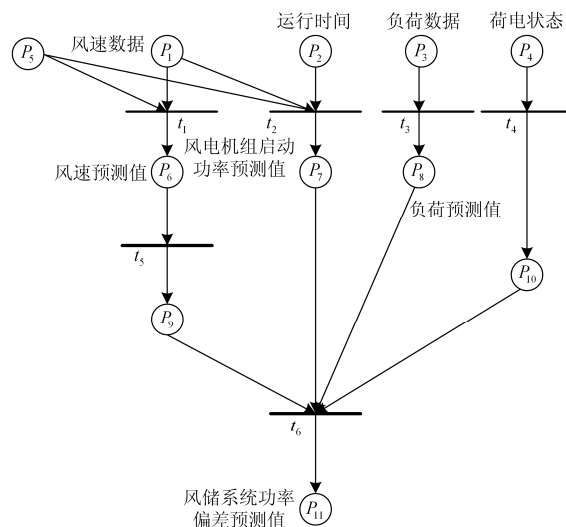


图 5 基于时间 Petri 网模型的风储孤网系统自启动过程状态转换

Fig. 5 State transition relation of the self starting process of the wind storage isolated network system based on the time Petri network model

2.3 能量管理

风储孤网系统的能量管理是保证风储孤网系统安全、可靠、经济运行的关键技术之一。受自然环境、风电机组自身缺陷、储能系统蓄电池荷电状态(SOC)及负荷变化等因素的影响,风储孤网系统容

量难以达到最优控制。因此,若想实现风储孤网系统的最优控制及最佳经济运行,就必须利用历史数据对风速曲线及负荷需求曲线进行短、长期预测,并制定合理的负荷计划及风电出力计划,以满足系统的需求平衡;根据风电机组及储能系统自身的约束条件建立基于投资成本及耗费最优的风储孤网系统容量配置模型,同时对系统各个模块进行合理的容量配置,从而构建一个基于风电系统与储能系统最优调度的能量管理系统^[25]。

能量管理系统(EMS)是风储孤网系统实现最优运行的关键,可在保证风储孤网系统可靠运行的基础上实现最大化经济效益或环境效益^[26]。在风储孤网系统中能量管理系统的主要功能:收集处理在线监控系统采集的电量、风电出力、储能系统荷电状态(SOC)及负荷变动等信息,并根据处理信息制定合理的计划曲线,以实现 DFIG、储能系统及负荷之间的最优功率分配。因此,能量管理系统的合理构建对风储孤网系统的可靠运行至关重要。针对微电网能量管理系统的构建问题,文献[27]通过多因子和合同网方法建立了一种新型的基于多代理系统的集中与分布混合式微网能量管理系统,同时提出 MAS 下微网内 Agent 协调的多因子评价决策机制,从而构建了基于微网本地发电单元自主控制与中央层多单元主动能量协调控制相结合的微电网系统能量协调控制框架;文献[28]引入非合作完全信息动态博弈理论的微电网能量管理系统优化算法,通过构建能源侧与负荷侧的互动关系,将经济性和用户满意度纳入考虑因素,正确引导用户合理用电,并根据历史数据及采集信息制定合理的负荷计划,再以此计划作为负荷需求优化风储孤网系统出力,并通过建立模型证明该策略的有效性。

风储孤网系统的安全、可靠、经济运行离不开能量管理系统,风储孤网能量管理系统功能结构图如图 6 所示。

2.4 保护

风储孤网系统的保护指当风储孤网系统发生故障时,智能保护终端能迅速识别和判定故障位置,并立即采取智能控制手段切除故障,从而保障风储孤网系统安全可靠稳定运行的一种关键技术。风储孤网系统运行时,为了尽可能降低系统故障率,系统中保护装置的合理配置尤为重要。针对微电网的保护技术的研究,文献[29-31]分别对微电网的保护技术展开了综述,对当前有关微电网的保护方法及主要特点进行了归纳与总结,并对微电网保护技术的未来发展趋势做出展望。当前,风储孤网系统的保护技术类型主要有基于自适应继电器的自适应保

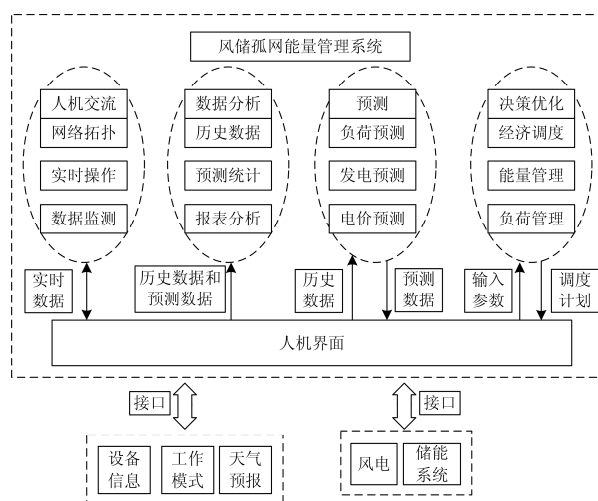


图 6 风储孤网能量管理系统功能结构图

Fig. 6 Function structure diagram of wind storage isolated network energy management system

护系统、基于电压的保护方法、差动保护、过流保护、差距保护等^[32]。风储孤网系统的保护主要包含两个方面问题:(1)如何提取故障特征;(2)如何在不同的故障情况下为系统提供充分的保护。风储孤网系统的故障保护主要分为两个阶段:(1)故障定位,即根据智能保护装置确定故障是风电机组故障、储能系统故障还是线路故障;(2)故障排除^[33]。在风储孤网系统中通常根据风储孤网系统故障发生的特点采用快速的分散采集和集中处理相结合的方式,由智能集中保护控制装置实现故障的快速切除^[34]。随着先进智能控制算法及通信技术的不断完善,基于智能算法的风储孤网系统保护将更加智能化。

3 总结与展望

风储孤网运行是新能源分散和大规模应用的有效形式,也是实现电网灵活控制和故障后快速恢复的有效支撑。虽然风储孤网系统的发展受各种关键技术的限制,但是其运行与控制技术仍具有很大的优化空间和发展前景。风储孤网运行与控制技术主要研究方向如下所述。

1) 储能系统能够实现风储孤网系统的峰谷转换,维持系统运行时电压幅值和频率的稳定、改善电能质量。然而,由于受电池容量、充放电循环次数及材料等因素的影响,储能系统的容量有限。因此,研发兼具功率密度高、能量密度大且工程应用经济成本低的多元复合储能系统及电池新材料对维持风储孤网系统的稳定运行具有重要意义;同时,如何优化储能系统的控制策略,在达到优化配置及协调运行的基础上,最大限度地降低储能系统的成

本,将成为今后研究的重点。

2) 风储孤网系统的安全、可靠、经济运行离不开能量管理系统。随着风储孤网运行与控制技术的逐步发展,风储孤网系统的能量管理将面临结构控制、优化算法及通信设计等一系列问题。如何实现风速、风电出力、负荷需求及电池荷电状态的预测为基础的智能预测技术,可靠且兼容的通信网络技术、风储各模块协调控制技术及模型和目标函数的优化技术为基础的各层次之间的能量管理,构建合理的能量管理系统框架实现能量的最优化配置,也将是今后长期研究的重点。

3) 风储孤网系统在遭到严重故障导致系统网络瓦解后,如何实现快速自启动,迅速恢复负荷供电,是风储孤网系统能否成为独立供电系统的关键问题。因此,开展风储孤网运行自启动的研究,提高风储孤网系统的自启动能力对风储孤网系统的运行有着积极的现实意义。

随着科学技术的进步、国家对分布式能源支持力度增加、新材料研发成功及智能控制技术的提出,风储孤网运行与控制技术必将得到飞跃发展。

参考文献

- [1] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等.大规模风电接入电网的相关问题及措施[J].中国电机工程学报,2010,30(25): 1-8.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-8.
- [2] LINDENMEYER D, DOMEEL H W, ADIBI M M. Power system restoration-a bibliographical survey[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2001, 23(4): 219-227.
- [3] VRETTOS E I, PAPATHANASSIOU S A. Operation policy and optimal sizing of a high penetration RES-BESS system for small isolated grids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 744-756.
- [4] SOUZA R L A, SAAVEDRA O R, LIMA S L, et al. Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: The case of Lencois island[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 1-11.
- [5] ASATO B, GOYA T, UCHIDA K, et al. Optimal operation of smart grid in isolated island[C] // IPEC 2010 Conference Proceedings, Oct. 27-29, 2010, Nanyang, Singapore: 1100-1105.
- [6] 陈树勇,朱琳,丁剑,等.风电场并网对孤网高频切机的影响研究[J].电网技术,2012,36(1): 58-65.
CHEN Shuyong, ZHU Lin, DING Jian, et al. Impact of grid-connected wind farms on high frequency generator tripping in isolated power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 58-65.
- [7] 张明锐,杜志超,莉娜,等.高压微网孤岛运行时频率稳定控制策略研究[J].中国电机工程学报,2012,32(25): 21-26.
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, LI Na, et al. Control strategies of frequency stability for islanding high-voltage microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 21-26.
- [8] 马艺玮,杨苹,陈思哲,等.含柴油发电机和蓄电池储能的独立微电网频率分层控制[J].控制理论与应用,2015,32(8): 1098-1105.
MA Yiwei, YANG Ping, CHEN Sizhe, et al. Frequency hierarchical control for islanded micro-grid consisting of diesel generator and battery energy storage system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(8): 1098-1105.
- [9] 彭思敏.电池储能系统及其在风—储孤网中的运行与控制[D].上海:上海交通大学,2013.
PENG Simin. Battery energy storage system and its operation and control in the isolated grid based on wind—battery[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [10] 张继红,贺智勇,李华,等.基于孤岛模式的双储能微电网下垂协调控制及仿真[J].太阳能学报,2015,36(1): 146-153.
ZHANG Jihong, HE Zhiyong, LI Hua, et al. Droop coordinated control and simulation based on islanded microgrid of dual energy storage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(1): 146-153.
- [11] 彭思敏,窦真兰,凌志斌,等.并联型储能系统孤网运行协调控制策略[J].电工技术学报,2013,28(5): 128-134.
PENG Simin, DOU Zhenlan, LING Zhibin, et al. Cooperative control for parallel-connected battery energy storage system of islanded power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 128-134.
- [12] 桑丙玉,陶以彬,郑高,等.超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(2): 1-6.
SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [13] 苏适,李萍,严玉廷,等.蓄电池-超级电容混合储能系统控制方法研究[J].电源技术,2016,40(10): 2030-2032.

- SU Shi, LI Ping, YAN Yuting, et al. Comparison of control strategies in a battery/supercapacitor hybrid energy storage system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(10): 2030-2032.
- [14] 李凡, 张建成, 朱立刚. 平抑光伏功率波动的混合储能系统控制方法[J]. 电源技术, 2016, 40(2): 397-399.
LI Fan, ZHANG Jiancheng, ZHU Ligang. Control method of hybrid energy storage system for photovoltaic power balancing[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(2): 397-399.
- [15] 李龙云, 胡博, 谢开贵, 等. 基于离散傅里叶变换的孤岛型微电网混合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 108-116.
LI Longyun, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in isolated microgrids based on discrete Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 108-116.
- [16] 卢芸, 徐骏. 基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 149-154.
LU Yun, XU Jun. Wind power hybrid energy storage capacity configuration based on wavelet packet decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 149-154.
- [17] NISHAD M, KASHEM M, SARATH P. Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 944-953.
- [18] 施琳, 罗毅, 施念, 等. 高渗透率风电-储能孤立电网控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 78-85.
SHI Lin, LUO Yi, SHI Nian, et al. A control strategy of isolated grid with high penetration of wind and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 78-85.
- [19] 黄伟, 牛铭. 微电网非计划孤网控制策略分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 41-46.
HUANG Wei, NIU Ming. Analysis on non-planned isolated control strategy for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 41-46.
- [20] 彭思敏, 王晗, 蔡旭, 等. 含双馈感应电动机及并联型储能系统的孤网运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 23-28.
PENG Simin, WANG Han, CAI Xu, et al. An operation control strategy for islanded power systems with DFIG and parallel-connected battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 23-28.
- [21] 王建萍, 潘庭龙. 风光储微网系统孤岛运行控制策略研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(12): 1804-1810.
WANG Jianping, PAN Tinglong. Research on control strategy in islanded mode of wind-PV-ES hybrid microgrid system[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(12): 1804-1810.
- [22] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.
LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A coordinated operation control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, PV system, diesel generator, and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 19-24.
- [23] 杜翠. 双馈风力发电系统的孤岛启动及运行控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
DU Cui. The islanding start and operation control of DFIG wind generation system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [24] 周宏林. 大容量双馈式风力发电系统并网关键问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
ZHOU Honglin. Grid integration of large doubly-fed induction generator-based wind energy conversion systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [25] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewable[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [26] 郭力, 王蔚, 刘文建, 等. 风柴储海水淡化独立微电网系统能量管理方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 113-121.
GUO Li, WANG Wei, LIU Wenjian, et al. The energy management method for stand-alone wind/diesel/battery/sea-water desalination microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 113-121.
- [27] 茆美琴, 金鹏, 奚媛媛, 等. 基于多因子和合同网协调机制的微电网多 Agent 混合能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5542-5552.
MAO Meiqin, JIN Peng, XI Yuanyuan, et al. Method of multi-agent hybrid energy management for microgrids based on multi-factor evaluation and contract net protocol cooperative mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5542-5552.
- [28] 李晨迪, 陈渊睿, 曾君, 等. 基于非合作博弈的微电网能量管理系统优化算法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 387-395.

- LI Chendi, CHEN Yuanrui, ZENG Jun, et al. Research on optimization algorithm of microgrid energy management system based on non-cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 387-395.
- [29] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [30] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [31] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
- ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [32] BUIGUES G, DYŚKO A, VALVERDE V, et al. Microgrid protection technical challenges and existing techniques[C] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Mar. 20-22, 2013, Bilbon, Spain: 222-227.
- [33] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 168-175.
- MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical characteristics and key technologies of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 168-175.
- [34] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.
- XU Huoju, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
-
- 收稿日期: 2017-04-20; 修回日期: 2017-07-10
- 作者简介:
- 叶 鹏(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事电力系统优化运行与节能控制, 新能源运行与控制技术研究; E-mail: yepeng_126@sina.com
- 李 山(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源运行与控制技术。E-mail: 416117708@qq.com
- (编辑 姜新丽)