

预制舱式磷酸铁锂电池储能电站能耗计算研究

李学斌[✉], 赵号, 陈世龙

(中国能源建设集团天津电力设计院有限公司, 天津 300000)

摘要: [目的] 基于站内能量损耗来源和设备属性详细分类, 提出了预制舱式磷酸铁锂电池储能电站能耗计算方法。[方法] 从储能电站的角度论述了预制舱式磷酸铁锂电池储能电站能耗计算中需考虑的主要因素, 进而将储能电站的能耗分为2个部分, 即储能系统自身的损耗和辅助设备运行的损耗, 并分别给出了每部分能耗的计算方法及效率值的选取方法。[结果] 通过实际算例, 分析了配置规模为2 MW/2 MWh的储能电池预制舱在典型运行方式下的全天运行能耗, 并与现场试验结果进行了对比, 从储能电池产热和空调传导热能的角度分析了现场试验结果和理论分析的差别, 对储能电站的能耗统计提出了建议。[结论] 研究提出的能耗计算方法较全面地论述了影响预制舱式磷酸铁锂电池储能电站能耗指标的主要因素, 依据设备属性详细分类给出了主要设备的能耗计算方法, 具有较好的工程参考价值。

关键词: 预制舱式; 磷酸铁锂电池; 储能电站; 能耗计算; 充放电倍率

中图分类号: TM7; TM912

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0071-07

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Energy Consumption Calculation of Prefabricated Cabin Type Lithium Iron Phosphate Battery Energy Storage Power Station

LI Xuebin[✉], ZHAO Hao, CHEN Shilong

(China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: [Introduction] The paper proposes an energy consumption calculation method for prefabricated cabin type lithium iron phosphate battery energy storage power station based on the energy loss sources and the detailed classification of equipment attributes in the station. [Method] From the perspective of an energy storage power station, this paper discussed the main factors to be considered in the energy consumption calculation of prefabricated cabin type lithium iron phosphate battery energy storage power station, and then divided the energy consumption of the energy storage power station into two parts, namely, the energy consumption of the energy storage system and the energy consumption of the auxiliary equipment operation. Besides, it also provided the calculation method for the energy consumption of each part and the selection method of efficiency value respectively. [Result] Through a practical calculation example, the whole-day energy consumption of a 2 MW/2 MWh energy storage battery prefabrication cabin in a certain operation mode is analyzed and compared with the field test results. The difference between the field test results and the theoretical analysis results is analyzed from the perspective of the heat produced by the energy storage battery and the heat transmitted by the air conditioner, and suggestions are put forward for the energy consumption statistics of the energy storage power station. [Conclusion] The energy consumption calculation method proposed in the study comprehensively discusses the main factors affecting the energy consumption index of the prefabricated cabin type lithium iron phosphate battery energy storage power station and gives the energy consumption calculation method for the main equipment according to the detailed classification of equipment attributes, which has a good engineering reference value.

Key words: prefabricated cabin type; lithium iron phosphate battery; energy storage power station; energy consumption calculation; charge/discharge rate

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-07-15 修回日期: 2022-10-19

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“碳中和目标下省级储能规划技术研究”(DG2-X01-2022)

0 引言

在人类共同应对全球气候变化背景下,2020年9月,习近平总书记在第75届联合国大会上宣布:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[1-3]。”这为我国应对气候变化、推动绿色发展提供了方向指引、擘画了宏伟蓝图。同年12月,习近平总书记在气候雄心峰会上进一步提出:到2030年,中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,风电、太阳能发电总装机容量将达到1.2 TW以上。

在碳达峰、碳中和政策背景下,2021年3月,总书记进一步提出要深化电力体制改革,构建以新能源为主体的新型电力系统。在国家“双碳”目标和“构建新型电力系统”的背景下,新能源成为我国未来能源发展的长期战略,电力系统中新能源的占比将不断增大,高比例可再生能源接入、高比例电力电子装置(“双高”)特征将更加显著,对于电网快速瞬变有功负荷、无功负荷调节的需求也更加紧迫。

在“双高”电力系统中,储能技术的应用将贯穿于发电、输电、配电、用电等各个环节^[4-6]。在发电侧,可以消除风能、太阳能发电波动性对电网稳定性的危害;在电网侧,可以平衡电网的供需,起到削峰填谷的作用;在用户侧,可以平抑电网的波动,为用户提供平稳可靠的电源^[7-9]。

储能电站通过电能的存储和释放,实现了电力生产和消费在时间、空间上的解耦,增强了电力系统运行的灵活性,但在能量转换的过程中,会产生电能的损耗,分析储能运行中电能损耗的主要来源并进行定量计算对提高电站综合效率和采取有针对性的降损措施至关重要。有学者以储能变流器(PCS)为研究对象,通过优化开关周期内的动作过程、合理分配开关管的动作时间等方法减少变流损耗^[10-12],此类方法可将效率提升0.3%~1%。文献^[13]通过将SI基IGBT模块更换为SIC IGBT模块,取得了较好的降损效果,但会显著增加设备投资。文献^[14]构建了电池损耗模型,并计及电池老化问题,分析并对比了不同运行方式下储能电站的经济效益和损耗情况。

考虑到应用于电力领域的新型储能装置较多采用磷酸铁锂电池技术路线^[15-16],且为预制舱(集装箱)

式布置,目前获得的效率数据、布置形式较为完整且依据性较强,因此,本文针对预制舱式磷酸铁锂电池储能电站(下文简称“储能电站”)的能量损耗计算开展研究^[17-19]。首先,分析了储能电站运行中产生能量损耗的原因,给出了能耗计算过程中需考虑的主要因素;其次,从储能系统自身的损耗和辅助设备运行的损耗两个方面对储能电站的能量损耗进行了详细分类,并分别给出了主回路设备能耗和辅助设备能耗的计算方法及效率值的选取方法;最后,选取规模为2 MW/2 MWh的储能电池预制舱为计算算例,在典型运行方式下计算了其全天运行能耗,并与现场试验结果进行了对比分析,以期同类储能电站项目的能耗计算和估计提供工程参考。

1 储能电站能耗计算需考虑的因素

储能电站能耗计算主要考虑如下影响因素:(1)储能电站规模,电站规模决定了其能耗的总体水平;(2)充放电倍率,不同的充放电倍率对储能的充放电效率及PCS效率均有影响;(3)运行模式,如快速频率响应(FRR)、峰谷套利(Arbitrage)等,储能系统可能在不同的时间段采用不同的运行模式,运行模式对储能系统的能耗水平有较大影响;(4)冷却方式,储能电池对于运行温度及温度的均匀性极为敏感,因此,储能电站通常采用空调系统作为舱内温度调节手段,空调配置的容量(耗电容量)及其能效比(COP)对储能电站总体能耗也有较大影响。

在展开分析前,应该指出,储能电站的有功损耗主要来自于电池的充放电循环能量损失、空调系统耗电及储能变流器(PCS)的效率损失,其他设备的有功损耗较小^[20-21]。大容量储能变流器(PCS)的效率较高,考虑不同负荷水平情况下,充/放电的综合效率一般可达到96%以上。总的来说,储能电站的总体效率通常为80%~85%,因此,主要的损耗来源是电池的充放电循环能量损失和空调系统耗电,且储能电站损耗较大的根本原因是电池的充放电产生的循环能源损耗。

2 储能电站能耗计算方法

储能电站主要由储能设备和其他必要的电气一、二次设备、辅助设备等组成,利用储能系统可以随时

储能或释放电力以及快速响应的特性为电网运行提供灵活性调节手段。

储能电站在运行时会产生能耗,能耗主要由两个方面组成:储能系统自身的损耗和辅助设备运行的损耗。

2.1 储能系统自身的损耗

当储能系统运行于充/放电状态时,在储能电站的主回路中,电池、直流电缆、PCS、变压器、低压交流电缆、高压交流电缆等设备均会产生能量损耗。

对于储能电池而言,储能放电和充电过程中其内阻均会产生能量损失,充电倍率越大产生的能量损失越大,因此,对于储能电池而言充放电倍率越大,其充放电转换效率越低。根据储能电池技术性能,在1 C倍率下,电池的充放电转换效率不小于92%,在0.5 C倍率下,电池的充放电转换效率不小于94%。直流电缆和交流电缆在通过电流时,会产生热量损失,一般按照0.5%计算损耗。变压器在运行时会产生损耗,一般按照0.5%计算。

储能变流器最大转换效率约98.5%,但是在运行时,不同的直流侧电压和充放电状态均会影响PCS的转换效率,因此在实际计算时,通常按照98%的转换效率进行计算,其中充电时和放电时分别计算转换效率。某厂家储能变流器(PCS)效率随直流侧电压和负载率的变化如图1所示。

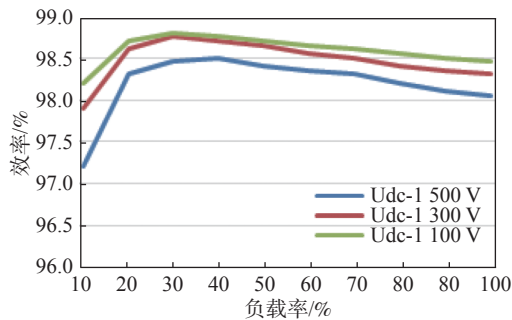


图1 某设备厂家储能变流器效率与负载率关系曲线

Fig. 1 Relation curve between efficiency and load rate of energy storage converter of an equipment manufacturer

针对预制舱式磷酸铁锂电池储能电站,在标称功率下进行一次充放电的转换效率公式为

$$\eta = \eta_c \times \eta_b \times \eta_{pc} \times \eta_{pd} \times \eta_x \quad (1)$$

式中:

η ——储能系统充放电转换效率(%);

η_c ——电池的充放电转换效率(%);

η_b ——变压器转换效率(%);

η_{pc} ——PCS充电效率(%);

η_{pd} ——PCS放电效率(%);

η_x ——其他损耗(变压器、线损等,%).

可见,针对储能固定的损耗,一次充放电效率应不低于87.5%,约有12.5%的电能在一次充放电过程中损耗掉了。损耗主要发生在电池的充放电损耗上,其余损耗主要产生于各个设备运行中的发热损耗。本部分的损耗受季节、每天的充放电次数的影响较小。属于固定的损耗,但是和储能系统的充放电倍率有很大关系。以按1 C配置的储能电站为例,在0.5 C的情况下,电池的充放电转换效率是94%,那么总的储能系统充放电转换效率为89.4%,在0.25 C的倍率下,电池的充放电转换效率是96%,储能系统的充放电转换效率为91.3%。

从以上的分析可以看出,储能电站在运行时,不同的充放电倍率对能耗有较大影响。根据已有项目运行经验,5 MW/10 MWh的储能电站在进行额定能量测试和充放电转换效率测试时,其并网点处的充放电转换效率约为89.7%(该储能电站站用电从站外取得,不计入电表)。可以基本验证上文对储能系统转换效率的分析是基本符合实际的。

2.2 辅助设备运行的损耗

储能电站作为一个实现一定功能的整体,在运行时由大量的辅助设备来保证储能系统的安全稳定运行,例如:一体化电源系统、照明系统、安防系统、火灾报警系统、环境系统、暖通系统、自动化系统等。这些系统作为储能电站的辅助系统来保证储能系统的可靠运行,因此辅助设备的耗电量也占储能电站总能耗的较大比重。

储能系统可能处于运行状态或未运行状态(待机状态),对于参与电网削峰填谷的储能电站,若运行策略为一天完成一充一放,充放电倍率为1 C,则在充放电状态(2 h)时处于运行状态,其余时间储能系统为未运行状态。针对运行状态,其辅助设备的运行状况和非运行状态下的运行状况有所不同,主要的不同点在于暖通系统在运行状态时开启,在非运行状态时不开启或偶尔开启。

储能电站内主要的辅助设备用电情况统计如表1所示。储能系统主要的辅助设备耗电功率在电池预制舱,主要的耗电设备是工业空调。工业空调

表 1 储能电站主要辅助设备用电情况统计

Tab. 1 Power consumption statistics of main auxiliary equipment of energy storage power station

设备	用电设备	功率/kW	单位	数量
接入预制舱(1台)	工业空调	3	台	2
	照明设备	1.5	套	1
	换气扇	0.2	台	1
	应急照明	1.2	套	1
总控预制舱(1台)	工业空调	3	台	1
	立柜空调	3	台	1
	风机	0.2	套	1
	照明设备	1.5	套	1
	应急照明	1.2	套	1
一体化电源预制舱(1台)	工业空调	3	台	1
	干变温控器	1.5	台	2
	风机	0.2	套	2
	照明设备	1.5	套	1
	应急照明	1.2	套	1
	一体化电源	5	套	1
升压一体机(1台)	干变温控器	3	台	1
	散热风机	1	套	4
	照明设备	1.5	套	1
	应急照明	1.2	套	1
电池预制舱(1台)	工业空调	20	台	2
	照明	1.5	套	1
	UPS供电	3	套	1
	风扇	3	套	1
	照明设备	1.5	套	1
	应急照明	1.2	套	1

作为电池预制舱的热管理关键设备,在储能系统运行时是必不可少的设备,主要用来维持储能设备的运行温度,保证储能电芯的最佳性能。辅助设备的耗电主要和运行策略、季节等相关度较大。电池预制舱的空调主要在储能系统的运行状态全力开启,非运行状态时通常开启内循环出风,不制冷,耗电不多。因此,每天的工作策略对空调的耗电影响较大,一天一充一放,空调每天的运行时长约为 2 h,两充两放,空调的运行时长约为 4 h。

不同季节对空调的耗电影响也比较大。空调的制冷量和户外环境的温度也有关系,当夏季环境温度较高时,制冷效果较差,因此工作时长会加长。在

冬季虽然环境温度低,制冷效果好,储能系统工作时的制冷工作时长较别的季节短,但是在储能不运行时,还需要启动制热功能,保证储能电芯的工作温度。因此,在冬季和夏季的耗电量相对较大。根据项目经验,辅助设备能耗约占储能电站整体损耗的 5%~8%。

3 案例分析

3.1 系统概述

某储能电池舱配置规模为 2 MW/2 MWh,主要耗电设备包括空调、电池管理系统(BMS)、风扇、照明等,电池舱主要配置参数如表 2 所示。

表 2 2 MW/2 MWh 储能电池舱主要配置参数
Tab. 2 Main configuration parameters of 2 MW/2 MWh energy storage battery cabin

序号	主要指标	分项指标	参数	备注
1	系统配置	功率/MW	2	
		能量/MWh	2	
2	储能电池	电芯	方形磷酸铁锂	电芯通过一定的串并联方式形成电池系统, 储能电池舱整体规模为2 MW/2 MWh
		模块	12S2P	
		模组	12S2P	
		电池簇	240S2P	
		电池堆	240S4P	
	系统单元(电池舱)	240S16P		
3	循环寿命	电池系统	循环次数 $\geq 5\ 000$ 次 (1 C @25 °C)	循环次数 $\geq 5\ 000$ 次 (1 C @25 °C) 90%DOD
4	系统指标	系统转化效率	$\geq 92\%$	

3.2 现场试验及分析

3.2.1 现场试验结果

现场试验中, 储能电池舱配置规模仍为 2 MW/2 MWh, 储能系统运行方式为参与电网削峰填谷, 运行工况为 1 C 充放电, 循环次数为 1 次。配置冷暖空调 2 台, 单台空调的最大制冷功率为 17.5 kW, 2 台共 35 kW, 单台空调的最大制热功率为 15 kW, 2 台共 30 kW。当空调采用内循环方式运行时, 单台空调的耗电量为 2 kW, 2 台共 4 kW。

根据现场试验结果, 按照 1 C 运行工况执行 1 次完整的充放电循环, 对于夏季场景, 空调需要以制冷方式运行约 4 h, 耗电量为 $4\text{ h} \times 35\text{ kW} = 140\text{ kWh}$, 其余时间为内循环方式, 耗电量为 $20\text{ h} \times 4\text{ kW} = 80\text{ kWh}$, 总计为 220 kWh。

对于冬季场景, 制热需要额外消耗一部分电量, 假定储能电池舱可近似为一绝热系统, 电池的发热也会将制冷时间降低, 因此, 可认为耗电量和夏季的情况大致相同。总的来说, 夏季、冬季的耗电量大于春季、秋季的耗电量。

其他用电设备包括电池管理系统(BMS)、风扇(安装于每个电池模组)、照明灯等, 供电容量最大约 5 kW, 考虑用电设备大部分时间不会同时满功率运行, 如果同时系数按 0.5 考虑, 则其他用电设备的全天耗电量约为 $5\text{ kW} \times 24\text{ h} \times 0.5 = 60\text{ kWh}$ 。

可见, 根据现场试验结果及其他用电设备耗电情况, 夏季和冬季场景中, 在假定运行方式和运行工

况下(参与电网削峰填谷、1 C 充放电、1 次充放电循环), 每天储能电池舱内的空调及其他用电设备耗电共约 280 kWh。

3.2.2 结果分析

储能电池在充放电的过程中存在能量损耗, 以充电效率和放电效率来表征。储能电池的充放电效率主要受电池运行环境、充放电倍率影响, 电池运行环境温度通常受舱内空调调控, 一般处于合理的温度区间, 充放电倍率是电池充放电效率的主要影响因素。如前文所述, 在 1 C 倍率下, 电池的充放电转换效率不小于 92%, 0.5 C 倍率下, 电池的充放电转换效率不小于 94%。假定电池以 1 C 倍率进行充放电(如试验工况), 电池的充放电转换效率约为 92% (充电效率、放电效率各约 96%)。

从以上分析可知, 若进行一次完整的充放电循环, 则约有 8% 的能量转换损耗, 即充电量为 2 MWh, 实际的放电容量为 1.84 MWh, 损耗能量约为 160 MWh。

假定储能电池舱为一绝热系统, 即不考虑外界温度的影响, 则在充放电过程中产生的热量将由空调传导至舱外, 以恢复舱内温度至合理水平。理论上说, 空调的制冷量与电池产生的热量相当即可。本例中每台空调最大制冷功率为 17.5 kW, 制冷量约为 40 kW, 2 台空调的制冷量约为 80 kW。因此, 若每天进行 1 次完整的充放电循环, 产生的热量约为 160 kWh, 舱内空调运行 2 h 即可使舱内温度处于正

常范围内,则理论上的空调全天耗电量为 $2\text{ h} \times 35\text{ kW} + 22\text{ h} \times 4\text{ kW} = 158\text{ kWh}$ 。可见,理论上空调耗电与电池损耗基本相同,可以理解为储能电池运行过程中产生一定能量的热量,还需要几乎同等的能量才可以将这部分热量传导至舱体外。

当计算整个储能电站的能量损耗时,需在本节所讨论的储能电池舱能量损耗的基础上,考虑接入预制舱、总控预制舱、一体化电源预制舱以及 PCS 升压预制舱的主回路和辅助设备产生的能量损耗,由于本节已计入储能电池舱内的辅助设备能耗,故再叠加 3%~6% 的损耗率即可估计储能电站的整体能量损耗。

结合现场试验结果和本节分析之间的差异性可知,储能站内的能耗不能仅通过某次试验获得,需要进行长期的能耗数据统计,同时与理论分析进行对比,才能获得储能站真实的能耗情况。

4 结论

1) 从储能电站的角度给出了能耗计算中需考虑的主要因素。

2) 将储能电站的能耗分为 2 个方面,储能系统自身的损耗和辅助设备运行的损耗,并分别给出了能耗的计算方法及效率值的选取方法。

3) 以配置规模为 2 MW/2 MWh 的储能电池预制舱为计算算例,在典型运行方式下计算了全天运行能耗,并与现场试验结果进行了对比分析。

4) 指出储能电站的长期能耗水平难以通过某次试验获得,需进行长期的能耗数据统计,并与理论计算进行对比,才能获得储能电站的真实能耗。

参考文献:

- [1] 范帅,危怡涵,何光宇,等.面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J].*电力系统自动化*,2022,46(7):1-12. DOI: 10.7500/AEPS20210726010.
FAN S, WEI Y H, HE G Y, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(7): 1-12. DOI: 10.7500/AEPS20210726010.
- [2] 侯金鸣,孙蔚,肖晋宇,等.电力系统关键技术进步与低碳转型的协同优化[J].*电力系统自动化*,2022,46(13):1-9. DOI: 10.7500/AEPS20220105011.
HOU J M, SUN W, XIAO J Y, et al. Collaborative optimization of key technology progress and low-carbon transition of power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(13): 1-9. DOI: 10.7500/AEPS20220105011.
- [3] 张鹏成,徐箭,孙元章,等.氢能驱动下钢铁园区能源系统低碳发展模式[J].*电力系统自动化*,2022,46(13):10-20. DOI: 10.7500/AEPS20211120001.
ZHANG P C, XU J, SUN Y Z, et al. Low-carbon development mode for energy system of iron and steel park driven by hydrogen energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(13): 10-20. DOI: 10.7500/AEPS20211120001.
- [4] 李峻,祝培旺,王辉,等.基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析[J].*南方能源建设*,2021,8(3):63-70. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.009.
LI J, ZHU P W, WANG H, et al. Flexible modification technology and application prospect of thermal power unit based on high temperature molten salt heat storage [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 63-70. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.009.
- [5] 周钰,郝为瀚.面向数据中心的储能系统应用研究[J].*南方能源建设*,2021,8(3):58-62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.008.
ZHOU Y, HAO W H. Research on application of energy storage system for data center [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 58-62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.008.
- [6] 陈卉,刘颖,赵龙生.楼宇型天然气分布式能源系统的典型案例分析[J].*南方能源建设*,2021,8(1):25-30. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.003.
CHEN H, LIU Y, ZHAO L S. Typical case analysis of the building-type CCHP system [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 25-30. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.003.
- [7] 何勇琪,张建成,鲍雪娜.并网型风光储混合发电系统中储能系统容量优化研究[J].*华北电力大学学报*,2012,39(4):1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2012.04.001.
HE Y Q, ZHANG J C, BAO X N. Optimization of storage capacity in grid-connected wind/PV/storage hybrid system [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2012, 39(4): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2012.04.001.
- [8] 韩晓娟,程成,籍天明,等.计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J].*中国电机工程学报*,2013,33(34):91-97.
HAN X J, CHENG C, JI T M, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 91-97.
- [9] 刘霞,江全元.风光储混合系统的协调优化控制[J].*电力系统自动化*,2012,36(14):95-100.
LIU X, JIANG Q Y. An optimal coordination control of hybrid wind/photovoltaic/energy storage system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(14): 95-100.
- [10] 娄修斐,张犁,陈永炜,等.4-SiC 3L-ANPC 逆变器损耗均衡和效率优化调制策略[J].*中国电机工程学报*,2022,42(5):1925-1933.
LOU X T, ZHANG L, CHEN Y W, et al. A dedicate modulation scheme for 4-SiC 3L-ANPC inverter with loss balanced

- distribution and efficiency improvement [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1925-1933.
- [11] 郎天辰, 杜士祥, 尹浩, 等. 基于可变关断时间断续电流模式的全桥逆变器轻载效率优化方法 [J]. *电工技术学报*, 2020, 35(22): 4761-4770. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191350.
LANG T C, DU S X, YIN H, et al. Voltage quality regulation with hybrid energy storage based on wind speed forecast in wind power system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(22): 4761-4770. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191350.
- [12] 王贵忠, 吴凤江, 李洪波, 等. 基于电流预测控制的二极管箝位拓扑可变频并网逆变器 [J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 144-150. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20190513003.
WANG G Z, WU F J, LI H B, et al. Current-prediction-control-based diode-clamped grid-connected inverter with flexible topology [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 144-150. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20190513003.
- [13] 王志伟, 张子峰, 尹韶文, 等. 集装箱储能系统降能耗技术 [J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(6): 1872-1877. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0001.
WANG Z W, ZHANG Z F, YIN S W, et al. Energy reduction technology of container energy storage system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(6): 1872-1877. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0001.
- [14] 朱啸宇, 刘学智. 光伏储能系统中的电池损耗模型及经济效益分析 [J]. *供用电*, 2022, 39(12): 98-102. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.12.013.
ZHU X Y, LIU X Z. Battery loss modal and economic benefit analysis in photovoltaic energy storage system [J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(12): 98-102. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.12.013.
- [15] 孙承晨, 袁越, SAN S C, 等. 基于经验模态分解和神经网络的微网混合储能容量优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 19-26. DOI: 10.7500/AEPS20140719002.
SUN C C, YUAN Y, SAN S C, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in microgrid using empirical mode decomposition and neural network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 19-26. DOI: 10.7500/AEPS20140719002.
- [16] 管晟超, 程浩忠, 杨堤, 等. 基于风速预测的风储电压质量调节系统 [J]. *电网技术*, 2016, 40(5): 1341-1347. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.05.008.
GUAN S C, CHENG H Z, YANG D, et al. Voltage quality regulation with hybrid energy storage based on wind speed forecast in wind power system [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(5): 1341-1347. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.05.008.
- [17] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(24): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2011.24.006.
YU P, ZHAO Y, ZHOU W, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power [J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(24): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2011.24.006.
- [18] 严干贵, 朱星旭, 李军徽, 等. 内蕴运行寿命测算的混合储能系统控制策略设计 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 110-114. DOI: 10.7500/AEPS201208140.
YAN G G, ZHU X X, LI J H, et al. Control strategy design for hybrid energy storage system with intrinsic operation life measurement and calculation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 110-114. DOI: 10.7500/AEPS201208140.
- [19] 马速良, 马会萌, 蒋小平, 等. 基于Bloch球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 592-599. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.03.011.
MA S L, MA H M, JIANG X P, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system based on Bloch spherical quantum genetic algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 592-599. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.03.011.
- [20] 于维珂, 汪涛, 杨尘. 储能用锂离子电池充放电能量效率的影响因素 [J]. *电池*, 2020, 50(6): 552-555. DOI: 10.19535/j.1001-1579.2020.06.010.
YU W K, WANG T, YANG C. Influence factors of charge-discharge energy efficiency of Li-ion battery for energy storage [J]. *Battery Bimonthly*, 2020, 50(6): 552-555. DOI: 10.19535/j.1001-1579.2020.06.010.
- [21] 曹俊. 碳化硅半导体技术和市场应用综述 [J]. *集成电路应用*, 2018, 35(8): 5-9. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2018.08.002.
CAO J. Summary of silicon carbide semiconductor technology and market application [J]. *Application of IC*, 2018, 35(8): 5-9. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2018.08.002.

作者简介:



李学斌

赵号

1990-, 男, 河北定州人, 高级工程师, 工学博士, 主要从事综合能源研究、变配电设计研究工作 (e-mail) zhaohaoyu@163.com。

陈世龙

1979-, 男, 河南南阳人, 教授级高级工程师, 工学硕士, 主要从事变电、智能配电网设计及三维建模研究工作 (e-mail) chenshilong620@163.com。

(编辑 孙舒)