

大容量电化学储能电站储能评价平台设计

赵博超, 李明, 张文煜*, 刘宏勇, 宋振宇, 戴嘉庚
(国网冀北张家口风光储输新能源有限公司, 河北省 张家口市 075000)

Design of Energy Storage Evaluation Platform for Large-capacity Electrochemical Energy Storage Power Station

ZHAO Bochao, LI Ming, ZHANG Wenyu*, LIU Hongyong, SONG Zhenyu, DAI Jiageng

(State Grid Jibei Zhangjiakou Wind and Solar Power Energy Demonstration Station Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, Hebei Province, China)

Abstract: In the context of implementing “the goal of carbon emission peak and carbon neutrality” and large-scale renewable energy, electrochemical energy storage is an important technical means to improve utilization of renewable energy, and it has developed rapidly in recent years. However, there is currently a lack of a complete evaluation platform for the energy storage effect of large-capacity electrochemical energy storage power stations. Therefore, this paper first analyzes the operating characteristics of the energy storage battery pack and the energy storage converter model, using the k-means clustering algorithm to extract the equivalence parameters of the electrochemical energy storage power station and establish an equivalent model. Secondly, based on the existing energy storage and broadcast architecture, the evaluation platform with four quadrant converters is developed to test the ability of faulty voltage through and grid adaptability for large-capacity energy storage power station, so as to realize grid-connected detection and operation evaluation of large-capacity electrochemical energy storage power stations. The test results show that the energy storage power station equivalent model and the large-capacity electrochemical energy storage power station evaluation platform can make accurate evaluation of electrochemical energy storage power plants within short simulation time.

Keywords: energy storage power station; equivalent model; clustering algorithm; evaluation platform

摘要: 在国内贯彻落实“双碳”目标和大规模推广可再生能源的背景下, 电化学储能作为提高新能源利用率的重要手段, 近年来快速发展。但目前尚缺乏完备的大容量电化学储能电站储能效果评价平台。首先剖析了储能电池组和储

能变流器模型的运行特性, 采用k-means聚类算法提取电化学储能电站的等值参数并建立等值模型。其次, 基于现有储能并网运行架构, 以四象限变流器为核心, 开发了测试大容量储能电站故障电压穿越能力和电网适应性的评价平台, 以实现大容量电化学储能电站的并网检测及运行评价。测试结果显示, 提出的储能电站等值模型和大容量电化学储能电站评价平台能够在较短的仿真时间内对电化学储能电站做出较准确的评价。

关键词: 储能电站; 等值模型; 聚类算法; 评价平台

0 引言

储能在构建安全、高效、清洁的现代能源电力体系, 优化能源结构中发挥着重要作用。储能按技术类别可以分为电磁储能、电化学储能和热储能等, 其中电化学储能因其效率高、受地理和资源条件限制小等特点在电力系统中广泛使用^[1]。

随着电化学储能技术的发展与成本的降低, 中国储能产业发展迅速, 储能电站的容量和规模不断增加, 并且开始陆续并网运行, 使电网的稳定运行受到了影响, 因此储能电站的并网运行需要进一步规范、标准化。中国颁布的GB/T 36549—2018《电化学储能电站运行指标及评价》提出了储能电站运行评价指标的统一规范。文献[2]利用层次分析法-熵权修正法与模糊评分理论, 将指标权重与指标评分相结合得出储能式充电站的评价方法。文献[3]采用层次分析法和模糊综合评价法计算指标权重和关系矩阵, 从而获得评价结果。文献[4]分析了储能系统的价值构成, 提出综合评价三级指标体系, 最后给出了电网侧储能系统的综合评价方法。文献[5]基于改进层次分析法, 通

基金项目: 国家电网公司科技项目 (DG71-19-003); 国家自然科学基金 (52007112)。

Science and Technology Foundation of SGCC (DG71-19-003); National Natural Science Foundation of China (52007112).

过数据预处理, 建立数据评价矩阵, 构建模糊矩阵评价模型, 最后提出风光储能电站数据评价模型。文献[6]首先构建系统的评价指标体系, 通过层次分析法和反熵权法取得最优组合权重, 最后建立基于组合权重的储能电站调峰调频性能综合评价模型。目前针对储能电站运行评价的相关研究较少, 无法有效支撑未来大规模储能电站的安全稳定运行。

与此同时, 由于大容量的电化学储能电站规模大、站内协同控制方式复杂, 运行过程中影响因素较多, 在并入电网后难免会对电网的稳定运行造成一定冲击, 因此必须在并网前对大容量电化学储能电站进行性能检测, 在并网后进行跟踪运行评价, 以满足电网稳定安全运行的需求。但目前的检测和评价方法是基于储能电站中的某一个系统且普遍基于设备级, 根据某一个储能系统的检测结果归纳整个储能电站的性能和运行效果, 该方法不仅存在较大的安全隐患, 还会占用大量的人力物力, 降低工作效率。中国2018年颁布的GB/T 36547—2018《电化学储能系统接入电网技术规定》、GB/T 36548—2018《电化学储能系统接入电网测试规程》、GB/T 36558—2018《电力系统电化学储能系统通用技术条件》等对储能系统的电网适应性和故障电压穿越能力做出了统一规范, 奠定了储能行业的国家标准基础。现有研究中, 文献[7]针对锂离子电池检测, 研究电池系统的全面检测评价技术, 建立了电力储能综合评估平台。文献[8]根据储能电站的构成, 研发了储能电站并网一体化测试平台, 并基于测试平台工程应用场景, 提出了储能电站并网测试实施方案, 但其所提指标不能满足GB/T 36548—2018的要求。文献[9-10]研究了可以测试电压、频率适应性和低电压穿越的电网模拟器。

本文针对上述问题, 选取储能系统并网的电网适应性及故障穿越等指标, 建立储能电站等值模型, 构建储能电站评价平台, 通过测试储能电站并网的适应性及高低压穿越能力, 验证测试平台的准确性, 实现对储能电站运行的评价和检测, 以提高储能系统并网的安全性和可靠性。

1 储能电站评价指标

储能系统的并网特性主要包括电能质量、功率控制能力、电网适应性、充放电转换、低电压穿越能力、保护功能等。并网运行评价指标包括储能电站响应能力、安全性、电网适应性、故障穿越等关键指

标, 其中安全性包括电气安全、电池安全、功能安全、电磁兼容、环保、并网接口保护等, 是储能系统的评价基础。除安全性之外, 储能系统的性能评估也是其重要指标, 包括额定容量、充放电效率、自放率、高低温特性、循环次数、响应时间等。

根据GB/T 36548—2018, 储能系统并网测试装置应满足以下2种要求^[11]: 能够模拟电网正常运行时的电压跌落与频率波动; 能够模拟电网故障时的电压降落和升高。因此本文选取电网适应性和故障电压穿越指标作为储能电站评价指标并进行仿真测试, 各指标的计算方法按照GB/T 36548—2018规定公式计算, 指标及其测试标准如下。

1) 适应性。

电网适应性包括频率适应性、电压适应性、电能质量适应性。电能质量适应性包括三相电压不平衡适应性、闪变适应性、谐波电压适应性。

测试装置模拟电网正常运行状态时应达到以下要求^[11]: ①频率偏差应小于0.01 Hz; ②测试过程中电压幅值变化量不能小于标准电压幅值的1%; ③三相电压不平衡度应小于1%, 相位偏差应小于5°; ④储能变流器连接侧的电压谐波畸变率小于允许值的50%。

2) 故障电压穿越。

电压穿越指系统在确定时间内承受某一电网高电压或低电压而不退出运行的能力^[11]。

故障电压穿越包括低电压穿越和高电压穿越, 根据GB/T 36995—2018规定, 低电压穿越要求为自电压跌落时刻起电压处在 $0.2 P_u$ (基准电压) 及以上, 0.625 s内及电压恢复时系统不脱网连续运行的能力; 高电压穿越要求为自电压升高时刻起, 电压处在 $1.3 P_u$ 及以下0.5 s内, $1.2 P_u$ 及以下1 s内系统不脱网连续运行的能力。

测试装置模拟电网故障运行状态时应达到以下要求^[12]: ①能模拟三相对称电压跌落、相间电压跌落和单相电压跌落, 跌落幅值应在0~90%之间; ②能模拟三相对称电压抬升, 电压抬升幅值应在110%~130%之间; ③电压阶跃响应调节时间小于20 ms。

2 储能电站评价平台

本文结合储能电站等值模型和并网检测与运行评价关键指标, 基于现有储能并网运行架构, 以四象限变流器为核心构建储能电站评价平台。

等值建模就是将建立的物理模型按照其内在特征

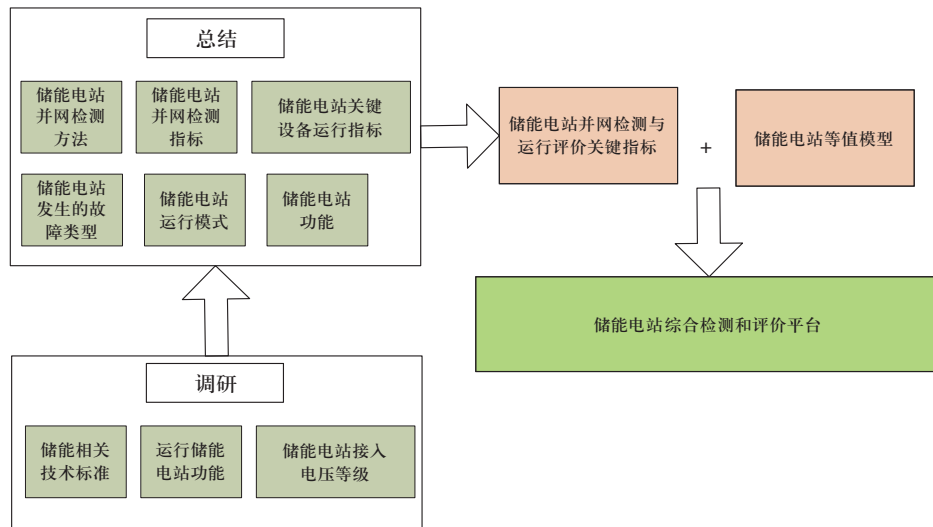


图1 储能电站评价平台构建流程

Fig. 1 Flow chart of evaluation platform construction for energy storage power station

及参数划分几个相类似的群组，再将相应参数聚合，将数个详细模型等值为一个等值模型，从而简化计算过程，缩短仿真计算时间，提高仿真效率。由于储能电站中存在众多特性不同的储能子系统，因此在进行等值建模时，需要对站内的储能子系统进行分类和聚合等值，可以有效解决包含储能系统的电力系统仿真时间过长的问题。平台构建流程如图1所示。

2.1 储能电站等值模型

2.1.1 等值原则

储能电站等值模型应遵循的规律为^[13]

$$\begin{cases} U_{eq} = U \\ I_{eq} = I = I_1 + I_2 + \dots + I_m \end{cases} \quad (1)$$

式中： U_{eq} 为等值后交流系统的电压； I_{eq} 为等值后储能电站的输出电流； U 为等值前交流系统电压； I 为等值前储能电站的输出电流； m 为需等值电站的集电线数目。

2.1.2 储能系统模型

储能系统模型主要包含电池组模型和变流器模型2部分。

1) 储能电池组模型。

储能电池组由多个电池单体串并联形成整体。电池组模型主要有戴维南模型、Rint模型、PNGV模型等，实际应用中戴维南模型结构更清晰，仿真结果具有足够精度，计算上较为简便，应用也相对广泛。储能电池组的戴维南模型如图2所示，其结构主要包含电池SOC (state of charge)、极化电压 U_c 、单体电压 U_b 、单体电流等。

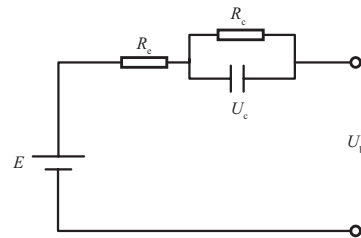


图2 蓄电池戴维南模型

Fig. 2 Davinen model of battery

2) 变流器模型。

储能变流器 (power conversion system, PCS) 均为双向变流器，能够实现电网与电池的连接，使电能可在电网与电池之间双向流动。储能变流器的性能对整个储能系统的安全稳定运行起着至关重要的作用^[14]。储能变流器的结构如图3所示。储能变流器模型控制方式包括恒功率 (PQ) 控制、电压-频率 (VF) 控制、下垂控制、电流内环控制等^[15]。

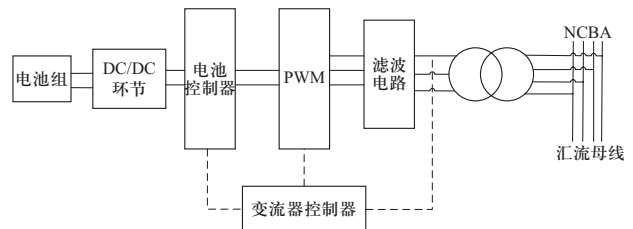


图3 储能变流器结构

Fig. 3 Structure of PCS

储能变流器通常采用单级型和多级型 (或双级型) 2种配置方式，在等值模型中多级型变流器可以认为是多个单级型变流器合并而成^[14]。双级型变流器的前

级为DC/DC直流变换器, 负责调节直流侧充放电电流并通过直流母线与后级相连。后级为DC/AC逆变整流器, 采用电压外环、电流内环的双闭环控制方式。图4为双级式变流器的主电路拓扑结构^[6]。

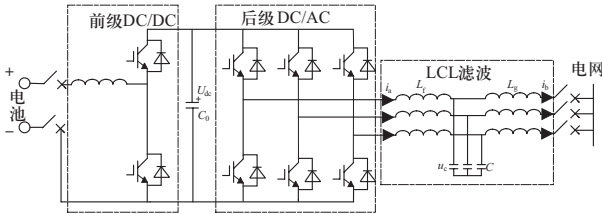


图4 双级式变流器主电路拓扑结构
Fig. 4 Main circuit topology of two-stage converter

四象限变流器为可编程交流电源, 可以实时控制输出交流电压的幅值和频率, 从而测试储能装置的电网适应和故障电压穿越能力, 其拓扑结构如图5所示。

四象限变流器不仅能够降低对电感、电容的容量要求, 还能使电网电流接近正弦波, 降低谐波含量, 控制功率因数大小, 实现能量的双向流动^[17]。四象限变流器有两电平和三电平两种结构, 其两电平主电路结构如图6所示。

3) 等值模型。

本系统从单电池的等效电路模型入手, 依据电池串并联的电气连接关系, 建立电池模组的等效控制模型。通过数据拟合及对等效控制模型的降阶处理, 得到电池组的等值模型, 同时从单机储能变流器仿真模型入手, 考虑储能变流器的电气联接方式/运行模式和控制策略, 得到储能变流器的多机并联仿真模型。将

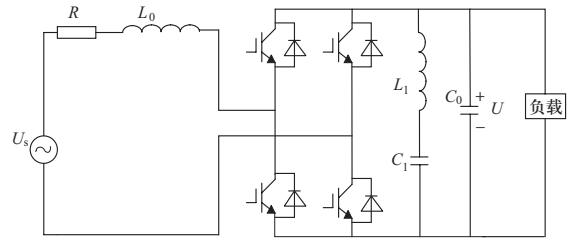


图6 四象限变流器主电路图
Fig. 6 Four-quadrant converter main circuit diagram

储能电池组和储能变流器模型融合, 考虑到储能单元在实际运行过程中会因控制作用使某一时刻某几个储能单元产生近似的仿真结果, 对运行状态相似的储能单元参数进行整合, 采用聚类算法并结合储能电站的运行特性, 从而合并为一个储能子系统^[15], 得到电化学储能电站的等值模型。

聚类算法可以分为k-means、模糊聚类、层次聚类、基于神经网络的聚类方法等。由于k-means算法响应速度快、计算结果较准确, 本文采用k-means聚类算法^[18]。本文以储能单元输出的有功功率相似度作为分群依据, 以有功功率之间的距离作为相似度的评价指标, 将样本划分为K个簇, 然后通过迭代计算使样本点到聚类中心的误差平方和 (sum of the squared errors, SSE) 达到最小, 以对运行状态相似的储能单元进行分类。

建立等值模型所选择的参数主要有电池组模型中的荷电状态SOC, 端口电压电流, 变流器中控制有功功率、无功功率、电压、频率的控制参数等。储能单元参数与等值模型整合参数建立如下联系:

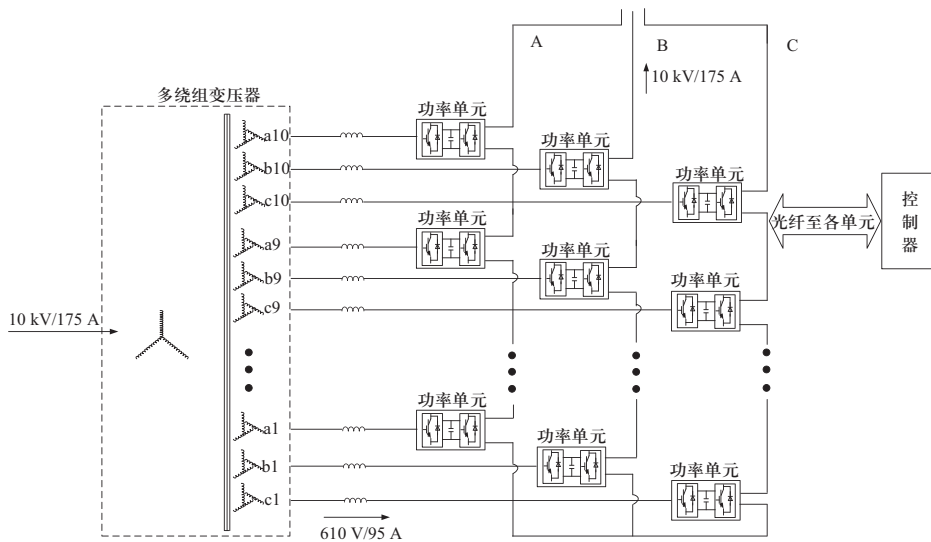


图5 四象限变流器拓扑结构
Fig. 5 Four-quadrant converter topology

$$P^{\text{ref}}(t) = \sum_{i=1}^n P_i^{\text{ref}}(t) \quad (2)$$

$$\overline{S}_{\text{oc}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{oc},i}(t)}{n} \quad (3)$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

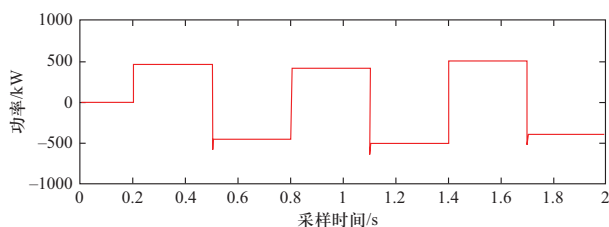
$$P_{\text{max}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{max}-i} \quad (5)$$

$$\overline{U}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n U_i(t)}{n} \quad (6)$$

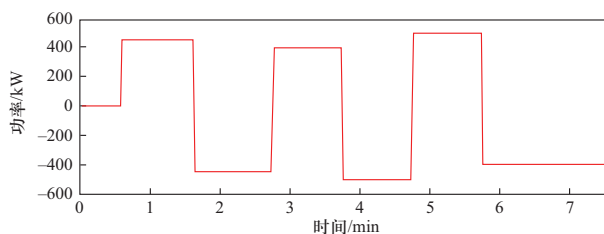
$$I(t) = \sum_{i=1}^n I_i(t) \quad (7)$$

式中： P^{ref} 为等值后的储能有功功率参考值，kW； i 表示第 i 个储能单元； n 为等值的储能单元个数； \overline{S}_{oc} 为等值后的电池组SOC； C 为等值后的储能容量，kWh； P_{max} 为等值后的储能最大充放电功率，kW； \overline{U} 为等值后的电压，V； I 为等值后的电流，A。

等值后变流器功率参考值、最大充放电功率和等值后电池组SOC的关系不会发生变化，储能变流器滤波电路采用电感电容并联的形式，其功率等级为500 kW，变流器侧滤波电感为0.25 mH，电网侧滤波电感为0.08 mH，滤波电容为220 μ F，并网电感为0.03 mH。等值模型给定电池组SOC的初值，以式(2)计算得到有功功率参考值作为输入数据，储能系统的充放电功率作为输出结果，所得结果如图7所示。



(a) 有功功率充放电仿真



(b) 有功功率充放电实测

图7 储能电站等值模型充放电测试

Fig. 7 Charging and discharging test of equivalent model of energy storage station

由测试结果可知，储能电站等值模型的充放电有功功率平均绝对误差为0.416 kW，最大绝对误差为1.166 kW；实际充放电有功功率的平均绝对误差为0.251 kW，最大绝对误差为0.737 kW；等值模型的仿真时间为2 s，而实际储能电站的仿真时间为7 min。故本文所建立的储能电站等值模型的有功功率充放电结果与实际测量的储能电站有功功率充电结果相差不大，但仿真时间远小于实际储能系统的仿真时间。等值后储能电站的模型较为简化，且储能系统对外充放电功率几乎不发生变化，即储能电站的外特性不变，所以该模型应用于电力系统仿真时可以快速得到仿真结果，能够极大缩短储能电站评价平台的仿真时间。

2.2 储能电站评价平台的搭建

平台整体方案示意图如图8所示。整个平台包括10 kV/6 kV输入断路器、10 kV 四象限变流器、10 kV/(10 kV/6 kV) 变压器、输出断路器和旁路断路器。通过控制10 kV四象限变流器输出幅值、频率和相位可变的电压来实现输出功能需求，单元可实现的测试功能包括：高低电压故障穿越能力测试、电网适应性[频率适应性、电压适应性和电能质量(谐波、简谐波、波动及闪变和三相不平衡)适应性]测试和一次调频等测试。

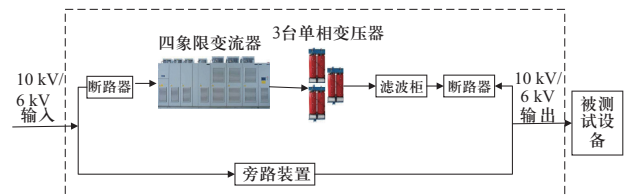


图8 整体方案示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the overall scheme

变流器功率单元整流端采用可控整流设计，实时检测单元直流量，进行恒压控制；四象限变流器输出端配置10 kV/(10 kV/6 kV) 变压器，实现输出10 kV/6 kV；扰动单元的输入端和输出端都设有断路器，旁路开关用于变流器停止运行后可旁路至电网输出。为了实现单相或两相不对称跌落，单元输出采用3台单相变压器，避免采用三相变压器由于磁路耦合造成的电压不能跌落至0的问题。

测试平台接入10 kV/6 kV电网，模拟10 kV/6 kV电网适应性扰动，电网电压适应能量双向流动能力，具备主回路旁路功能。测试平台工作时需串联在电网与储能系统之间，模拟电网扰动，并需要适应能量双

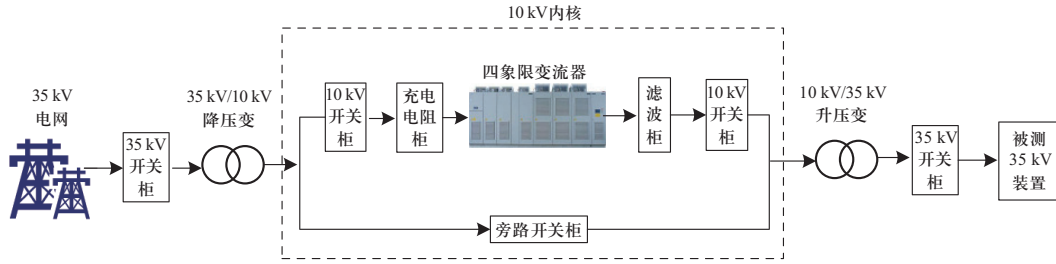


图9 35 kV/3 MVA装置主回路结构

Fig. 9 Main loop structure of 35 kV/3 MVA device

向流动。根据装置功能需求,设计的系统包括输入断路器、四象限变流器、10 kV/6 kV隔离变压器、输出断路器和旁路断路器等。

3 评价平台测试与结果分析

储能电站的并网检测大多通过抽取一个储能子系统进行,本文对35 kV/3 MVA的系统进行测试。35 kV电网通过开关柜、35 kV/10 kV降压变后,接入系统的10 kV内核,其输出经过10 kV/35 kV升压变和35 kV开关柜后接被测35 kV装置。装置的主回路结构如图9所示。

3.1 故障电压穿越

高电压穿越电压给定指令在0.1 s时由低电压变为高电压,持续0.1 s后经过2次阶跃减小。给定测试电压为 $1.3 P_u$,测试时间为2 s,测试波形如图10所示。

低电压穿越电压给定指令在0.1 s时由高电压变为低电压,持续0.2 s后经过1次阶跃增大,再经过大约0.6 s后以一定斜率缓慢增大。电压跌落至 $0.2 P_u$,测试时间为2 s,测试波形如图11所示。

3.2 电网适应性

三相电压不平衡仿真试验分别设置每相基准差值

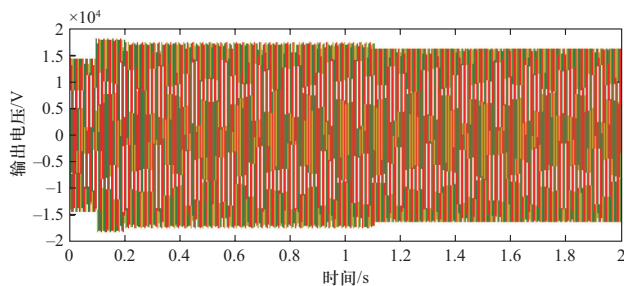


图10 高电压穿越输出电压仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of high voltage across output voltage

为: A、C相设置为100%基准值, B相设置为在0.06 s跌落30%基准电压,持续时间为0.01 s,仿真波形如图12所示。

设定输出电压幅值按照正弦规律波动,波动的频率为40 Hz,波动幅度为 $\pm 25\%$,测试波形如图13所示。

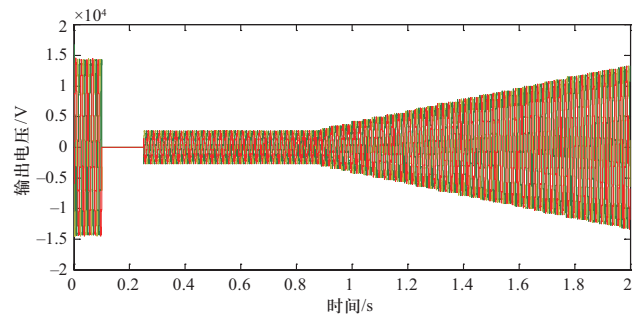


图11 低电压穿越输出电压仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms of low voltage across output voltage

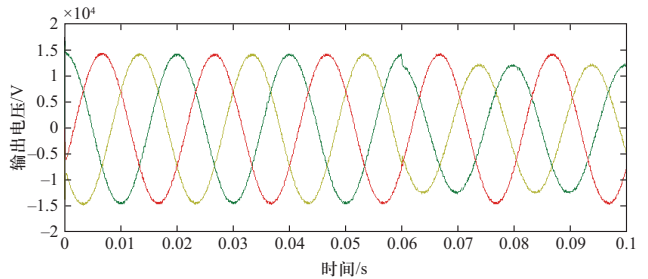


图12 三相输出电压不平衡仿真波形

Fig. 12 Simulation waveforms of three-phase output voltage imbalance

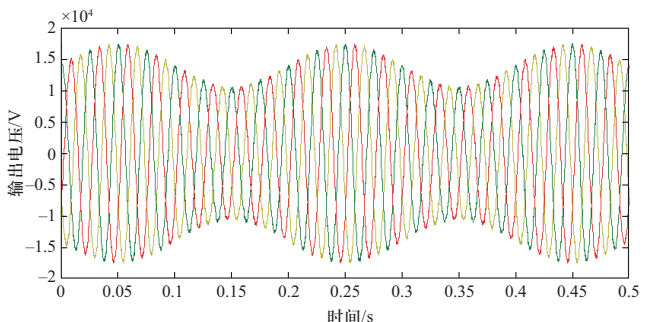


图13 输出电压波动以及闪变仿真波形

Fig. 13 Simulation waveforms of output voltage fluctuation and flicker

对系统装置分别进行5次、7次谐波扰动输出仿真,结果如图14所示。

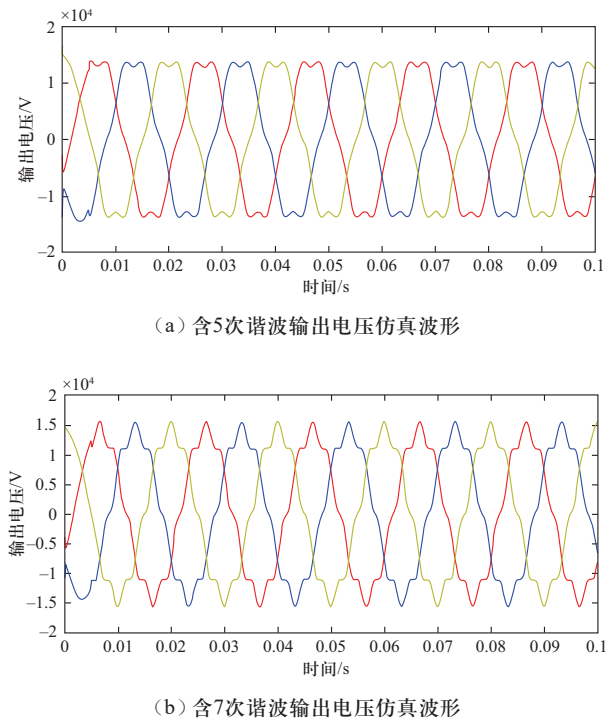


图14 含5次、7次谐波输出电压仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms of harmonic output voltage of 5 and 7 times

由以上仿真结果得出平台所测试系统的故障电压穿越能力、三相电压不平衡适应性、谐波扰动适应性、输出电压波动以及闪变适应性具体参数如表1所示。

表1 平台仿真结果
Table 1 Simulation results

测试项目	参数	标准值	测试值
高电压穿越	三相故障时电压抬升幅值/%	110~130	满足
低电压穿越	三相故障及不对称故障电压跌落幅值/%	0~90	满足
调节能力	阶跃响应时间/ms	20	15
三相不平衡	电压不平衡度/%	0.10	0.05
	电压相位偏差/(°)	3	3
电压谐波	奇次谐波畸变率/%	1.60	0.48
稳态电压	稳态电压变化最大幅值/%	1	0.66
频率	频率偏差/Hz	0.01	0.01

从表1可以看出,在故障电压穿越能力上,当系统承受高电压穿越时,在0.1 s给定 $1.3 P_u$ 测试电压时,

系统承受该电压0.1 s且正常运行;在0.2 s发生第一次阶跃电压减少至 $1.2 P_u$ 时,系统承受该电压0.9 s正常运行,自第二次阶跃发生至2 s时,系统仍能继续正常运行。低电压穿越过程中,在0.1 s时系统电压将为0,在0.3 s发生第一次阶跃电压升高至 $0.2 P_u$ 时,系统承受该电压0.6 s正常运行,在0.9 s时电压以一定斜率缓慢增大,系统仍能正常运行。电压阶跃响应时间为15 ms,说明系统灵敏性较强;反之,电压阶跃响应时间越长,说明系统反应越迟钝。因此,无论三相故障电压抬升至 $1.3 P_u$ 还是跌落至 $0.2 P_u$,系统都能迅速反应且在规定时间内不脱网连续运行,即故障承受能力强,有利于提高电网的稳定运行能力。

在电网适应性能力上,系统三相电压及相位不平衡度均能满足GB/T 36458—2018的要求,三相电压的平衡可以降低线路的电能损耗,有效防止继电器误动和电机发热,提高电动机效率,保证电网电能质量。同时,电压谐波畸变率为0.48%,小于GB/T 36458—2018中1.6%的要求,由于电网谐波可能会使局部电网发生谐振从而产生过电流和过电压,这将对电网的稳定运行造成严重影响,也会对相关设备的运行造成影响,因此较小的电压谐波畸变率将有利于电网和相关设备的稳定运行。电网电压偏差可分为电压偏高和偏低2种情况,电压偏高会导致电动机、变压器等相关设备的铁损增加;而电压偏低会严重降低系统有功功率,缩短设备使用年限,降低工作效率。电压波动造成的闪变也会给电网稳定运行造成隐患,该系统测得稳态电压变化最大幅值为0.66%,即天气变化等原因引起的电气量波动较小,有利于系统的正常稳定运行。系统频率偏差为0.01 Hz,满足GB/T 36458—2018中的要求,能够有效防止由于系统频率偏差过大引发的电网大面积停电事故。

通过上述分析可知,该平台可以较为准确地测量出系统的运行状态,实现对储能电站并网的实时监测及运行效果的实时评估,符合储能电站的行业规范,进而获得权威部门的运行认证许可,最终实现与国外储能电站的互联互通。同时,利用该平台对大容量电化学储能电站的并网运行进行检测与评价能够节省大量人力和设备,也将极大提高电力设备的运行安全性,具有很好的经济和实用价值。

4 结论

目前对电化学储能电站在电网运行过程中的异常

和故障状态分析等运行特性评价研究较少且大多基于设备级, 本文利用等值原则和聚类算法, 结合储能电池组和储能变流器模型, 得到电化学储能电站的等值模型, 极大缩短了系统仿真时间。基于现有储能并网的运行架构, 开发了大容量储能电站评价平台, 选取电网适应性及故障穿越等指标, 验证了测试平台的准确性。通过系统仿真实验结果可知, 该平台可以实现对仓储式储能系统的电网适应性和故障电压穿越测试。该平台可实现对储能电站并网的实时监测, 提高储能并网的安全性和可靠性, 实现储能电站检测运行评价的智能化升级。

参考文献

- [1] SUN Y M, GAO J, WANG J X, et al. Evaluating the reliability of distributed photovoltaic energy system and storage against household blackout[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 18-27.
- [2] 朱群波, 郝思鹏. 储能式充电站运行状态综合评价[J/OL]. *电测与仪表*, 2022-04-20: 1-10.
ZHU Qunbo, HAO Sipeng. Comprehensive evaluation of operation state of energy storage charging station [J/OL]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2022-04-20:1-10 (in Chinese).
- [3] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 电力储能技术的适用性评价模型与方法研究[J]. *高电压技术*, 2018, 44(7): 2239-2246.
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Feasibility evaluation model and method of energy storage technologies in power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(7): 2239-2246(in Chinese).
- [4] 王元凯, 周家华, 潘郁, 等. 电网侧储能电站综合评价[J]. *浙江电力*, 2020, 39(5): 3-9.
WANG Yuankai, ZHOU Jiahua, PAN Yu, et al. Comprehensive evaluation of energy storage power station on power grid side[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2020, 39(5): 3-9(in Chinese).
- [5] 张海玉, 张国锋, 李明, 等. 基于改进层次分析法的风光储能电站数据评价模型[J]. *电子设计工程*, 2021, 29(10): 32-36.
ZHANG Haiyu, ZHANG Guofeng, LI Ming, et al. Data evaluation model of wind-solar energy storage power station based on improved analytic hierarchy process[J]. *Electronic Design Engineering*, 2021, 29(10): 32-36(in Chinese).
- [6] 陶以彬, 薛金花, 王德顺, 等. 面向电网调峰调频的储能电站综合性能评价[J]. *电源技术*, 2021, 45(6): 764-767.
TAO Yibin, XUE Jinhua, WANG Deshun, et al. Comprehensive performance evaluation of BESS for power grid peaking and frequency regulation[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(6): 764-767(in Chinese).
- [7] 刘丝雨. 电化学储能系统并网/离网特性表征量及综合评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [8] 陈彬, 汤奕, 鲁针针, 等. 储能电站并网测试技术研究与实现[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(10): 138-143.
CHEN Bin, TANG Yi, LU Zhenzhen, et al. Research and realization of test technology for energy storage station interconnecting to power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(10): 138-143(in Chinese).
- [9] 于德政, 朱丹, 宋飞, 等. 用于分布式光伏电站电网适应性检测的电网模拟器[J]. *工业控制计算机*, 2018, 31(10): 147-149.
YU Dezheng, ZHU Dan, SONG Fei, et al. Grid simulator for grid adaption detection of distributed photovoltaic plant[J]. *Industrial Control Computer*, 2018, 31(10): 147-149(in Chinese).
- [10] 韩蓉, 徐千鸣, 丁红旗, 等. 模块化多电平中高压电网模拟器及其控制[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(增刊1): 165-175.
HAN Rong, XU Qianming, DING Hongqi, et al. Modular multi-level high voltage grid simulator and its control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(S1): 165-175(in Chinese).
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电化学储能系统接入电网技术规定: GB/T 36547—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] 李佳曼, 万文军, 苏伟, 等. 大容量储能移动并网测试装置设计及试验[J]. *广东电力*, 2020, 33(10): 9-15.
LI Jiaman, WAN Wenjun, SU Wei, et al. Design and test of large-capacity energy storage mobile grid-connected test device[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(10): 9-15(in Chinese).
- [13] 何俊峰, 葛延峰, 葛维春, 等. 大容量储能电站的等值仿真模型及并网运行特性研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(4): 221-227.
HE Junfeng, GE Yanfeng, GE Weichun, et al. Study on equivalent simulation models and grid-connected operation characteristics for large-capacity energy storage station[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(4): 221-227(in Chinese).
- [14] 韩静文, 朱港威, 王勇. 改进的双向储能变流器多模式运行控制方法[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(3): 77-80.
HAN Jingwen, ZHU Gangwei, WANG Yong. Improved control method of bidirectional PCS in multiple modes operation[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(3): 77-80(in Chinese).
- [15] 孙楠. 电池储能电站等值建模方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.
- [16] 卢胜利, 鞠文耀, 贾中璐. 一种双向储能变流器并网控制策略研究[J]. *电力电子技术*, 2013, 47(6): 41-43.
LU Shengli, JU Wenyao, JIA Zhonglu. Study of a grid-connected control strategy for bi-directional power conversion system[J]. *Power Electronics*, 2013, 47(6): 41-43(in Chinese).
- [17] 郑晋, 范强, 张琪, 等. 储能调频性能评价指标的k-means

聚类分析[J]. 中国科技论文, 2020, 15(11): 1289-1295.

ZHENG Jin, FAN Qiang, ZHANG Qi, et al. K-means clustering analysis of energy storage frequency regulation performance evaluation indices[J]. China Sciencepaper, 2020, 15(11): 1289-1295(in Chinese).

- [18] 张宏杰, 刘小东. 四象限变流器仿真研究[J]. 常州工学院学报, 2020, 33(4): 36-40.

ZHANG Hongjie, LIU Xiaodong. A research on the simulation of four-quadrant converter[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2020, 33(4): 36-40(in Chinese).

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-03-29。



赵博超

作者简介:

赵博超(1992), 男, 工程师, 学士, 主要从事新能源发电研究, E-mail: 747891104@qq.com。

李明(1988), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电气工程研究, E-mail: limingfgc_123@sina.com。

张文煜(1989), 男, 工程师, 硕士, 主要从事新能源发电及运行控制技术研究。通信作者, E-mail: Zhang.wyu@hotmail.com。

刘宏勇(1989), 男, 工程师, 学士, 主要从事新能源运行控制研究, E-mail: liu_hongyong123@126.com。

宋振宇(1993), 男, 助理工程师, 学士, 主要从事新能源发电研究, E-mail: 1748656225@qq.com。

戴嘉庚(1993), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事新能源发电研究, E-mail: 2329025029@qq.com。

(责任编辑 张宇)