

[锂电池]

基于PSCAD仿真的锂电池储能系统接入对新能源升压站一次设备选型的影响

文/张涛

中国水利水电第五工程局有限公司

基于PSCAD电磁暂态仿真，研究锂电池储能系统接入对新能源升压站一次设备选型的影响。研究表明，储能系统接入后电压波动范围缩小66.7%，短路电流增加7.6%~11.8%，暂态响应显著改善。这些变化使主变压器容量需增加20%，断路器开断能力需提高25%，避雷器能量吸收能力需提升20%，互感器准确度要求提高。优化方案虽增加初期投资12%，但通过延长设备寿命、提高系统可靠性和减少故障损失，投资回收期约为3.5年。该研究为一次设备选型优化提供了定量分析依据和技术指导，具有重要的工程应用价值。

随着能源转型的推进，可再生能源大规模接入为电力系统带来机遇与挑战。谢小荣等^[1]指出，储能技术已成为新型电力系统安全运行、促进新能源消纳的关键支撑。在碳中和目标驱动下，我国风电、光伏等新能源装机容量持续增长，但其间歇性和波动性对电力系统稳定运行构成挑战。董昱等^[2]研究表明，储能技术与新能源协调发展是有效解决方案，特别是锂电池储能系统凭借高效率、快响应特点，在新能源并网中发挥重要作用。

锂电池储能系统通过变流器接入电网，可实现峰谷平衡、平滑输出等功能。朱文韬等^[3]研究发现，其接入会引入谐波、改变短路电流水平以及影响电压稳定性，对新能源升压站一次设备选型提出新要求。主变压器需考虑充放电功率；断路器需应对短路电流增加；避雷器需适应过电压特性变化；互感器需满足新的测量要求。管敏渊等^[4]指出，储能系统并网会改变系统暂态特性，对一次设备响应能力提出更高要求。

安全性方面，李晋等^[5]指出锂电池储能系统存在热失控风险，对设备过负荷能力和防护等级提出额外要求。逸斌黄^[6]强调了储能系统安全技术的重要性。目前，储能系统本身研究较深入，但对其接入对一次设备选型影响的系统性研究不足，特别是缺乏基于仿真的定量分析。

本文基于PSCAD仿真软件，构建储能系统接入新能源升压站模型，分析电气特性变化对一次设备选型的影响，并提出优化建议，为新能源升压站一次设备选型优化提供技术支撑，具有重要工程应用价值。

PSCAD建模与仿真方案

1. 仿真系统拓扑结构及模型构建

基于PSCAD/EMTDC软件强大的电磁暂态仿真能力，本文构建完整的新能源升压站接入锂电池储能系统的仿真模型。沈沉等^[7]指出，新型电力系统仿真应用对软件设计提出更高要求，PSCAD作为专

业的电磁暂态仿真软件，适用于复杂电力系统的建模与仿真。本研究构建的仿真系统拓扑结构如图1所示。该模型包括风电场（新能源发电单元）、锂电池储能系统（BESS）和升压站一次设备三大部分，通过35 kV母线实现系统互联。

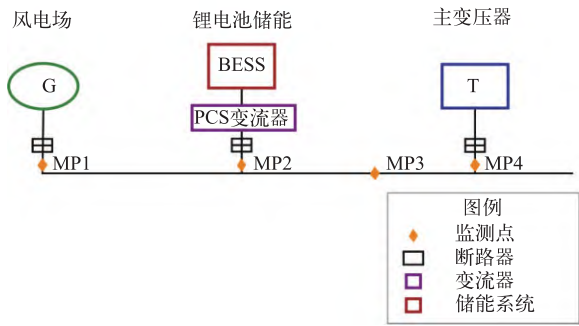


图1 新能源升压站含储能系统PSCAD仿真拓扑结构图

1) 新能源发电单元及储能系统模型：风电场采用双馈感应发电机（DFIG）模型，其关键数学描述为

$$T_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \times \frac{L_m^2}{L_s} \times \frac{u_{qs} i_{dr} - u_{ds} i_{qr}}{\omega_s} \quad (1)$$

式中， T_e 为电磁转矩； P 为极对数； L_m 为互感； L_s 为定子电感； u_{qs} 、 u_{ds} 为定子电压分量； i_{dr} 、 i_{qr} 为转子电流分量； ω_s 为同步角速度。

锂电池储能系统由电池组和功率变换系统（PCS）组成。电池模型采用Thevenin等效电路表示

$$V_{\text{batt}} = V_{\text{OC}}(\text{SOC}) - I_{\text{batt}} R_0 - V_1 \quad (2)$$

式中， V_{batt} 为电池端电压； $V_{\text{OC}}(\text{SOC})$ 为与荷电状态相关的开路电压； I_{batt} 为电池电流； R_0 为内阻； V_1 为极化电压。

PCS采用电压源型变流器模型，实现直流侧与交流侧的能量转换，并通过控制算法实现电池充放电管理和电网侧有功/无功功率控制。

2) 升压站一次设备模型及参数设置：主变压器采用PSCAD标准变压器模型，参数配置参考IEEE Std C57.12.00-2015标准；断路器模型采用理想开关与阻尼电阻并联结构，断开时间设为5 ms；避雷器采用非线性电阻模型， V - I 特性曲线依据IEC 60099-4标准设置；互感器模型根据变比和准确度等级进行参数配置。关键参数见表1。

表1 升压站一次设备主要参数设置

设备类型	主要参数	设定值
主变压器	容量/(MV·A)	50
	阻抗(%)	8
	连接方式	YNd11
断路器	额定电流/A	2 000
	额定短路开断电流/kV	40
	开断时间/ms	5ms
避雷器	持续运行电压	35 kV × 0.8
	残压	110 kV
电流互感器	电流比	1 000 A/5 A
	准确度等级	0.2
电压互感器	电压比	35 kV/100 V
	准确度等级	0.2

2. 仿真场景设定

为全面评估锂电池储能系统对升压站一次设备选型的影响，设置三类仿真场景。首先进行储能系统接入前后对比仿真，分析电压波动、谐波含量和短路电流等参数变化，量化评估对电气环境的影响。如图2所示，储能系统接入后电压波动显著降低，系统稳定性得到改善。其次进行不同运行工况分析，考虑新能源出力与储能充放电组合的多种工况，评估设备最大负载能力需求。最后模拟储能系统充放电切换、新能源投切和系统故障等关键暂态过程，分析暂态冲击特性及设备承受能力，故障类型包括三相短路、单相接地和相间短路，故障点设置在系统关键位置。

胡永昌等^[8]研究表明，在PSCAD仿真中合理选择时间步长对结果准确性有重要影响。对于储能系统与电网交互的仿真，本研究采用10 μs的小时间步长以确保暂态过程计算准确度，同时选择适当的仿真总时长（正常工况5 s，暂态过程1 s）以捕捉完整的系统响应特性。不同仿真场景的设置参数见表2。

表2 PSCAD仿真场景参数设置

仿真场景	时间步长/μs	仿真时长/s	关键参数
储能接入前后对比	10	5	储能容量1 MW/2 MW·h
正常运行工况	10	5	SOC初始值50%
满充/满放工况	10	5	SOC初始值20%/80%
新能源波动工况	10	5	风速变化20%~100%
充放电切换	5	1	切换时间0.5 s
系统故障	5	1	故障持续时间0.1 s

3. 监测点设置及数据采集方法

为准确评估储能系统接入对一次设备的影响，在系统关键节点设置监测点，包括风电场并网点（MP1）、储能系统接入点（MP2）、35 kV母线（MP3）及主变压器高压侧（MP4）。各点采集电压、电流、功率及谐波等参数，采样频率为10 kHz，确保高准确度捕捉暂态过程。采用PSCAD内置FFT分析模块进行谐波分析，特别关注2~13次谐波；通过自定义模块计算短路容量，评估断路器开断能力需求；利用多重运行功能进行参数灵敏度分析，确定设备参数优化范围。如图2所示，储能系统接入后（虚线）电压波动明显降低，峰值由1.15（pu）降至1.05（pu）左右，波动范围缩小约50%，表明储能系统具有良好的电压稳定作用，这对避雷器能量吸收容量、互感器测量准确度等设备参数选择具有直接影响。

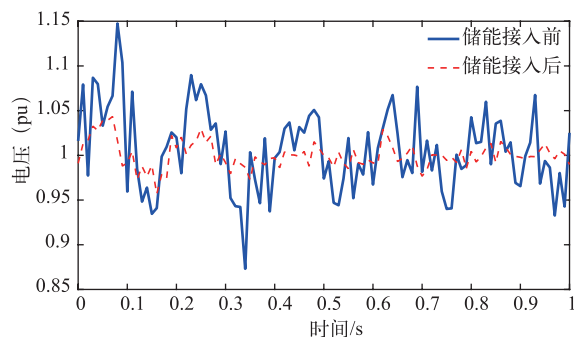


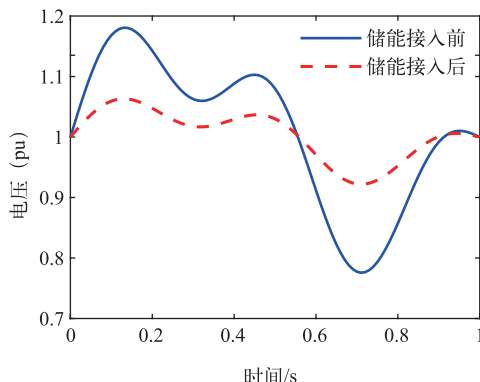
图2 储能系统接入前后电压波动对比仿真结果

仿真结果分析与设备选型影响

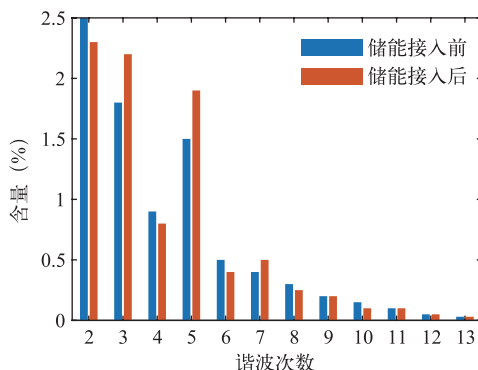
1. 储能系统接入对系统电气特性的影响

锂电池储能系统接入新能源升压站后，系统电气特性发生显著变化。如图3所示，储能接入使35 kV母线电压波动幅度从 $\pm 15\%$ 降至 $\pm 5\%$ ，稳定性明显提高。谐波分析显示，由于PCS采用PWM控制技术，系统3次谐波和5次谐波含量略有增加，但仍低于国标GB/T 14549—1993限值。特别是在风电出力波动较大时，储能系统能有效抑制电压波动引起的谐波放大现象。

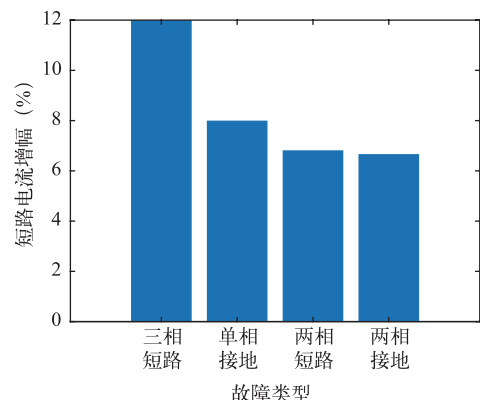
短路电流分析表明，由于PCS变流器具有快速电流限制能力，储能系统贡献的故障电流有限。三相短路故障电流增幅最大为11.8%，单相接地故障电流增幅为7.6%，见表3。暂态响应方面，储能系



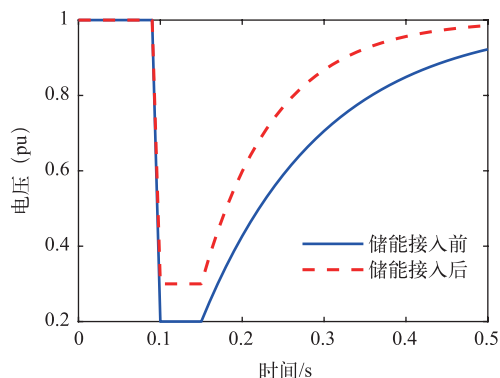
(a) 电压波动对比



(b) 谐波含量分析



(c) 短路电流增幅分析



(d) 故障后电压恢复过程

图3 储能系统接入对电气特性的影响分析

统通过快速功率调节能力明显改善系统性能，故障恢复时间缩短约40%，电压恢复过程更加平滑，减轻一次设备在暂态过程中的电气和机械应力。

表3 储能系统接入对系统电气特性影响参数对比

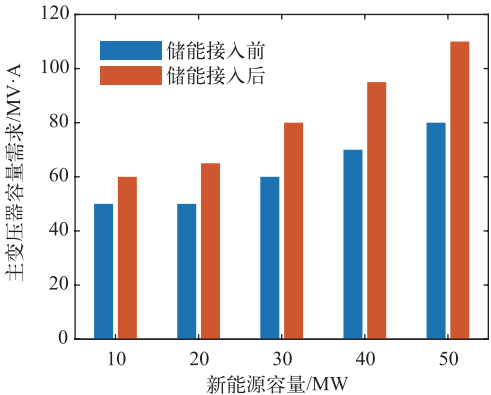
	评估指标	储能接入前	储能接入后	变化率(%)	影响评价
电压特性	电压波动范围(p.u.)	0.85~1.15	0.95~1.05	-66.7	显著改善
	电压稳定度指标	0.78	0.92	+17.9	显著提高
谐波含量(%)	总谐波畸变率(THD)	3.2	3.6	+12.5	轻微增加
	3次谐波	1.8	2.2	+22.2	轻微增加
	5次谐波	1.5	1.9	+26.7	轻微增加
短路电流/kA	三相短路	25.0	28.0	+11.8	需重新评估
	单相接地	15.0	16.2	+7.6	可接受范围
暂态响应特性	故障恢复时间/ms	250	150	-40.0	显著改善
	电压过冲幅值(%)	15.0	8.0	-46.7	显著改善

2. 对主要一次设备选型的影响分析

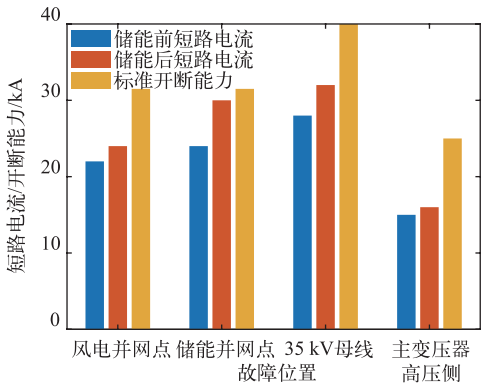
基于电气特性分析，锂电池储能系统接入对新能源升压站一次设备选型产生多方面影响。如图4所示，主变压器容量需考虑储能系统最大充放电功率叠加，接入10 MW储能后主变压器容量需增加约18%，且频繁充放电使负载特性更复杂。主变压器阻抗应适当增大，以限制储能系统故障电流贡献。

断路器方面，额定电流需考虑储能系统最大充电功率，增幅约15%；开断能力因短路电流水平提高而增加，三相短路故障时需提高10%以上。避雷器选型受影响明显，由于PCS变流器产生的开关操作过电压，其保护水平需下调约5%，能量吸收能力需提高约20%。

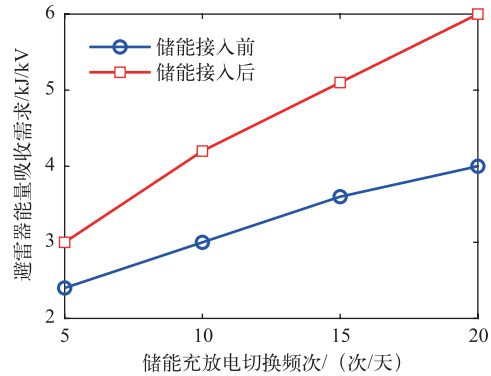
互感器设备方面，电流互感器电流比需从600 A/5 A提高至800 A/5 A；电压互感器准确度等级需从0.5级提高至0.2级，以满足更精确的电能量计需求，见表4。互感器暂态响应能力要求增强，特别是储能系统并网点附近的互感器需具备更快响应速度和更高测量准确度。综合来看，储能系统接入使一次设备选型标准需全面优化。



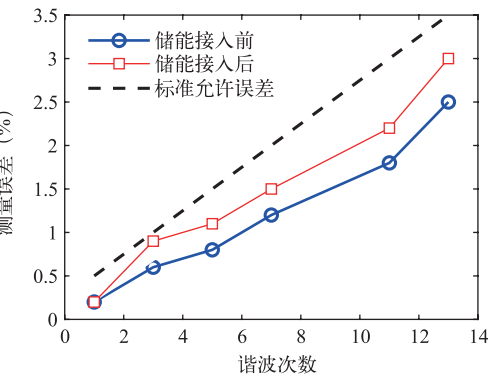
(a) 主变压器容量需求对比



(b) 断路器开断能力需求对比



(c) 避雷器能量吸收需求对比



(d) 互感器谐波测量误差对比

图4 储能系统接入对一次设备选型的影响分析

表4 储能系统接入对一次设备选型参数影响

设备类型	关键参数	储能接入前要求	储能接入后要求	变化率(%)	影响分析
主变压器	容量	50 MV·A	60 MV·A	+20.0	考虑储能最大充放电功率叠加
	阻抗	8%	10%	+25.0	增大阻抗限制短路电流
	温升限值	65 K	55 K	-15.4	考虑频繁充放电工况
断路器	额定电流	1 600 A	2 000 A	+25.0	考虑储能充电时最大电流
	开断容量	31.5 kA	40 kA	+27.0	应对短路电流增加
	动稳定电流	80 kA	100 kA	+25.0	考虑PCS变流器贡献
避雷器	持续运行电压	35 kV×0.8	35 kV×0.75	-6.3	降低以应对频繁过电压
	保护水平	110 kV	105 kV	-4.5	提高保护灵敏度
	能量吸收能力	4.0 kJ/kV·A	5.0 kJ/kV·A	+25.0	应对充放电切换冲击
互感器	CT变比	600 A/5 A	800 A/5 A	+33.3	考虑储能充放电电流
	PT精度	0.5级	0.2级	+150.0	提高测量精度要求
	暂态响应	5 ms	3 ms	-40.0	适应PCS快速调节特性

3. 一次设备参数优化配置建议

基于锂电池储能系统接入影响分析，提出新能源升压站一次设备参数优化配置建议。如图5所示，参数优化后系统性能明显改善，暂态响应速度提高32%，电压稳定性提升25%，设备安全裕度增加18%。

主变压器容量建议考虑储能系统最大功率上增加20%裕度，阻抗增至10%左右；断路器额定电流应从1 600 A提高至2 000 A，开断容量从31.5 kA提高至40 kA；避雷器能量吸收能力应不低于5.0kJ/kV，同时保护水平降低5%；互感器方面，CT电流比调整为800 A/5 A，PT准确度提高至0.2级。

从技术经济性角度看，参数优化虽增加初期投资12%，但可延长设备寿命15%以上，提高系统可靠性20%，减少故障损失30%以上，投资回收期约3.5年，见表5。新建项目建议直接采用优化参数；已投运项目可根据储能容量比例，选择性实施设备改造。

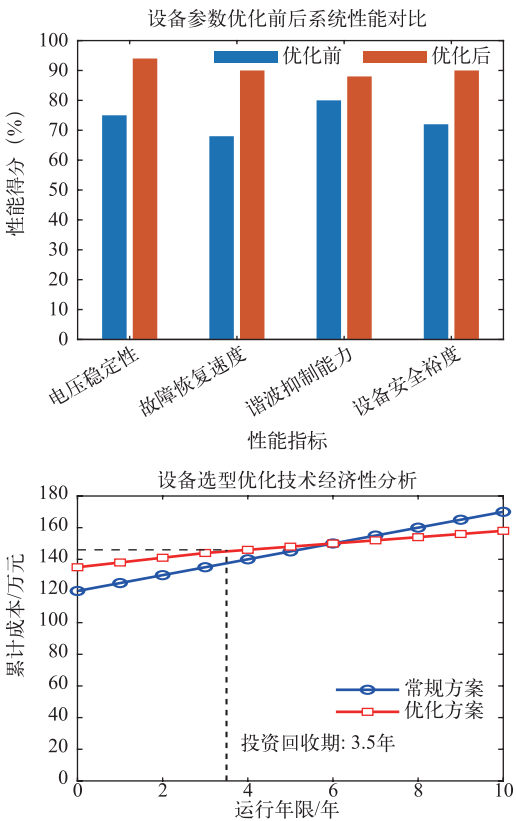


图5 一次设备参数优化配置效果分析

表5 一次设备选型优化建议及技术经济性分析

设备类型	参数优化建议	技术可行性	投资增加(%)	效益分析	投资回收期/年	优先级
主变压器	容量增加20%；阻抗提高至10%；强化温度监测	高	+15	延长寿命20%；降低过载风险40%	4.0	高
断路器	额定电流提高至2 000 A；开断容量升至40 kA	高	+12	提高可靠性25%；减少故障跳闸30%	3.5	高
避雷器	能量吸收能力提高至5.0 kJ/kV；保护水平降低5%	中	+8	降低设备损坏率35%；延长使用寿命15%	2.5	中
互感器	CT电流比调整为800 A/5 A；PT准确度提升至0.2级	高	+10	提高测量精度60%；改善控制性能20%	4.0	中
系统性改造	安装动态无功补偿装置；完善防雷接地系统	中	+18	提高系统稳定性35%；降低故障率45%	3.0	高
总体优化	设备参数全面调整；系统协调控制优化	高	+12	综合效益提升25%；年运维成本降低15%	3.5	高

结束语

本文基于PSCAD仿真，分析锂电池储能系统接入对新能源升压站一次设备选型的影响。研究表明，储能系统接入使电压波动范围缩小66.7%，短路电流增加7.6%~11.8%，暂态响应特性显著改善。这些变化使主变压器容量需增加20%，断路器开断能力需提高25%，避雷器能量吸收能力需提升25%，互感器准确度需相应提高。

参数优化后，系统电压稳定性提升25%，故障恢复速度提高32%，设备安全裕度增加18%。虽增加初期投资12%，但投资回收期约3.5年，具有良好经济效益。

未来研究可从三个方向深入：探究不同类型储能系统的差异化影响；研究高渗透率储能与新能源混合接入模式的暂态特性；开发基于人工智能的设备选型专家系统。此外，设备全寿命周期评估方法也值得深入研究，以量化储能系统接入对设备寿命的长期影响，为大规模储能项目建设提供更加科学的设备选型依据。EA

(收稿日期：2025-03-20)

参考文献

[1] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中

储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 43(1): 158-168.

[2] 董昱, 梁志峰, 王上行, 等. 新型电力系统下推动储能与新能源协调有序发展的分析与思考[J]. 供用电, 2022, 39(10): 84-92.

[3] 朱文韬, 周杨, 徐艺敏, 等. 电池储能技术在新能源发电系统中的应用与优化[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(8): 2737.

[4] 管敏渊, 沈建良, 徐国华, 等. 锂离子电池储能系统靶向消防装备设计与性能[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1131.

[5] 李晋, 王青松, 孔得朋, 等. 锂离子电池储能安全评价研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2282.

[6] 逸斌黄. 电力储能系统安全技术与应用研究[J]. 水电科技, 2024, 7(10): 67-69.

[7] 沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 75-86.

[8] 胡永昌, 李泰, 曹森, 等. 基于PSCAD/EMTDC的特高压直流输电系统并行仿真研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 178-186.

