

构网型储能变流器研究及典型配置

王大杰, 欧阳超, 蔡清梅

(北京索英电气技术股份有限公司, 北京 100094)

摘要: 高比例新能源接入给电力系统的稳定性带来一定的影响, 使电网惯性减小, 强度变弱, 也使电压支撑能力变弱、稳定性降低。通过构网型储能系统的应用, 可以提高电力系统的短路容量, 同时提高电网暂态过程中的频率和电压支撑, 为系统增加转动惯量, 并增强电力系统的稳定性。描述了构网储能技术的指标要求, 比较了构网型与跟网型储能技术的区别, 明确了不同储能技术适用的应用场景, 并提供了一种构网型储能变流升压一体机的技术参数, 为储能电站的功能定位、电站建设及经济运行提供了参考。

关键词: 构网型储能系统; 构网型储能变流器; 新型电力系统

Research and typical configuration of grid type power conversion system

WANG Dajie, OUYANG Chao, CAI Qingmei

(Beijing Soaring Electric Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: High proportion of new energy integration have a certain impact on the stability of the power system, reducing the inertia and strength of the power grid, weakening the voltage support capacity, and reducing stability. The application of grid type energy storage systems can improve the short-circuit capacity of the power system, enhance the frequency and voltage support during the transient process of the power grid, increase the rotational inertia of the system, and enhance the stability of the power system. This article describes the technical specifications and requirements of grid energy storage technology, compares the differences between grid type and grid type energy storage technology, clarifies the application scenarios of different energy storage technologies, and provides technical parameters for a grid type energy storage transformer and booster integrated machine, providing reference for the functional positioning, power station construction, and economic operation of energy storage power stations.

Key words: grid type energy storage system; grid type energy storage inverter; new power system

0 引言

高比例新能源接入影响了电网原有的稳定性, 为解决这一问题, 需要在新能源厂站或电网侧配置一定比例的储能系统, 通过储能系统调峰调频来解决高比例新能源的接入给电网带来的不确定性。

储能系统也是电力电子装置, 储能系统的接入未能解决电网高比例电力电子化的特点。由于

电力电子装置过载能力较低, 使电网抗冲击能力变弱、惯性减小, 为解决这一问题, 可以通过采用构网型储能技术来提高电网的强度和稳定性; 构网型储能技术自身作为电压源, 具备快速响应和紧急功率支撑的能力, 通过构网型储能系统的应用, 可以提高电力系统的短路容量, 同时提高电网暂态过程中的频率和电压支撑, 为系统增加转动惯量, 并增强电力系统的稳定性^[1-2]。

1 构网型储能技术

构网型储能技术的特点在于可以为系统提供惯量和支撑，目前提高系统惯量和支撑的方式主要包括常规同步发电机组、同步调相机和构网型储能系统。常规发电机组目前仍是电网惯量和支撑的核心，但降碳要求和地理位置原因使其发展受到限制；同步调相机可同时提供无功和真实惯量，具备短路电流支撑能力，技术成熟，但建设成本和运行成本高，多用在直流输电领域，系统运维复杂。

构网型储能技术是将同步机的转子运动方程、无功下垂控制等核心算法嵌入变流器控制系统中，通过采集电压和电流计算端口功率，利用核心算法生成电压幅值与相位参考值，将变流器端口塑造为与同步发电机类似的电压源外特性，通过储能变流器构建起支撑电网稳定运行的电压源。构网型储能变流器采用并联方式接入电网，与电网同作为电压源为用电负荷提供能量。此种并联电压源接入方式，可提高系统短路比，增加惯量和短路容量支撑，起到快速调频调压、抑制宽频振荡等作用^[3]。

构网型储能技术与常规同步机组类似，可在扰动前、中、后各阶段构建起电力系统稳定运行必须的电动势，起到支撑性作用。

1.1 构网功能及技术指标要求

构网型储能技术在频率支撑和电压支撑方面具有明显优势。主要表现为通过控制释放直流电容和储能能量等效为同步机惯量机械能或阻尼能量，进而提供惯量响应与振荡抑制，具备更好的频率支撑能力；通过功率同步控制机制，将储能变流器塑造成电压源外特性，可在不依赖外界交流系统的情况下，自行构建交流电压幅值与相位，具备更好的电压支撑能力。

基于其功能实现，对其硬件的短时过载能力、软件的主动支撑等成为关键技术，构网型储能除应满足常规储能各项指标外，还应满足以下技术要求。

(1) 过载能力要求

T/CES 243—2023标准要求构网型储能系统

应具备交流电流在110%的额定电流下长期持续运行的能力；在120%的额定电流下，持续运行时间应不少于2 min；在150%的额定电流下，持续运行时间不少于1 min，在300%的额定电流下，持续运行时间不少于10 s。

(2) 惯量支撑能力

电化学储能电站借鉴传统同步发电机转子运动方程，使输出的有功功率响应系统频率变化率，从而减缓频率变化的控制功能。系统在经受扰动时，并网主体提供响应系统频率变化的快速正阻尼，以阻止系统频率突变。

构网型储能系统具备类似同步发电机的有功功率调节特性，等效惯量时间常数应灵活可设，按照《电化学储能电站并网运行与控制技术规范》，其惯量公式为

$$\Delta P_1 \approx -\frac{T_J}{f_N} \frac{df}{dt} P_N \quad (1)$$

式中， t 为时间，s； f 为电化学储能电站并网点频率，Hz； T_J 为电化学储能电站惯性时间常数，s； P_N 为电化学储能电站额定容量，W； f_N 为系统额定频率，Hz； ΔP_1 为电化学储能电站有功功率变化量，W。

构网型电化学储能系统支持的惯性时间常数最大值不小于20 s，并可根据接入系统的需要灵活调整。储能惯量响应启动时间不应超过50 ms，响应时间不应超过150 ms，调节时间不应超过500 ms，控制偏差应在 $\pm 1.0\% P_N$ 以内。

(3) 阻尼控制

电力系统中的阻尼效应是指系统中的某些元件或机构能够通过吸收和释放能量的方式来缓冲电力系统中因不稳定因素引起的振荡，以避免系统发生失稳甚至崩溃。阻尼影响着频率的偏差，为一次调频争取时间。监视系统功率振荡，为系统提供正阻尼，以提高系统动态稳定性。

当系统发生0.2~2.5 Hz的低频振荡，且并网点频率振荡幅值大于0.003 Hz时，电化学储能电站应通过附加阻尼控制调节有功功率，抑制低频振荡，有功功率变化量 P_D 最大值应在10%~30% P_N 之间，响应时间不应大于0.5 s。

阻尼控制响应时, 储能提供的振荡能量流 W 应小于0, 公式为

$$W = \int (\Delta P_D 2\pi \Delta f) dt \quad (2)$$

式中, W 为电化学储能电站提供的振荡能量, J; ΔP_D 为电化学储能电站有功功率变化量, W; Δf 为电化学储能电站并网点频率变化量, $\Delta f = f - f_N$, Hz。

(4) 一次调频能力

一次调频功能是并网运行发电机组在电网频率发生波动时及时自发参与电网稳定调节的功能, 构网型储能系统具备主动一次调频能力。其一次调频系数应满足

$$\Delta P \approx -K_f \frac{\Delta f}{f_N} P_N \quad (3)$$

式中, ΔP 为构网型储能电站的有功功率变化量; Δf 为系统频率变化量; K_f 为电化学储能电站有功调频系数, 一次调频功能在与惯量响应、AGC等功能协调时, 宜设定一定的死区(0.033~0.1 Hz), 控制偏差应在 $\pm 1.0\% P_N$ 以内。一次调频功率响应时间应小于0.2 s, 并能够根据接入系统的需要进行灵活调整; 一次调频有功功率调节偏差应不大于2%。

(5) 主动电压支撑能力

参与电力系统电压动态调节, 系统暂态期间提供短时无功功率支撑。构网型储能系统具备类似同步发电机的有功功率调节特性, 也具备内电势和无功调压能力, 其调压公式满足

$$K_V = \pm \frac{\Delta Q / S_N}{\Delta U / U_N} \quad (4)$$

式中, ΔQ 为构网型储能电站无功功率变化量; ΔU 为并网点电压幅值变化量; S_N 为构网型储能变流器的视在功率。

构网型储能无功启动时间应不超过5 ms, 无功响应时间应不超过10 ms, 最大无功电流能力应不低于3倍额定电流, 电压阶跃响应时间应不大于100 ms, 并能够根据接入系统的需要灵活调整。

(6) 短路电流支撑能力

短路比是表征直流输电所连接的交流系统

强弱的指标, 是换流站交流母线的短路容量对直流换流器额定容量之比。构网型储能应提供一定的短路电流, 其过载能力应不低于3倍的额定电流, 过载持续运行时间应不低于10 s。构网型储能的短路支撑能力可通过变流器的能力提升以及多机并联等多种方式实现。多机并联运行时, 共机环流小于5%。

1) 构网型电化学储能系统应具有构网控制功能, 能为系统提供惯量和短路容量, 在稳态、暂态过程中, 构网型储能变流器端电压的幅值和相角应具有一定的维持能力, 能够分担电网不平衡功率, 功率响应时间不大于5 ms。

2) 构网型电化学储能系统应能够接收并响应调度发送的AGC、AVC指令。

3) 构网型电化学储能系统应具备黑启动功能, 在黑启动期间, 各个变流器之间应无明显环流、振荡问题, 电流有效值最大偏差应不大于5%。

4) 构网型电化学储能系统应具有一定的频率电压耐受能力, 在 ± 2 Hz频率偏差以内可维持运行; 储能机端电压应能够在0%~130%范围内根据系统的需要进行灵活调整。

5) 构网型电化学储能系统涉网参数由电网调度部门统一管理, 构网型储能系统并网前, 应完成关键涉网参数网源参数协调工作, 并完成现场参数实测。

1.2 构网与跟网对比

构网型储能与跟网型储能的主要区别在于:

1) 在频率支撑方面, 构网型储能通过控制释放直流电容和储能能量等效为同步机惯量机械能或阻尼能量, 进而提供惯量响应与振荡抑制, 具备更好的频率支撑能力。

2) 在电压支撑方面, 通过功率同步控制机制, 将储能变流器塑造成电压源外特性, 可在不依赖外界交流系统的情况下, 自行构建交流电压幅值与相位, 具备更好的电压支撑能力^[4]。

技术实现方面主要的区别见表1。

表 1 技术对比

Tab. 1 Technical comparison

类型	跟网型	构网型
电源特性	受控电流源特性，功率与无功解耦	受控电压源特性，功率与无功耦合
同步方式	基于锁相环检测电压同步	内置功率同步
硬件要求	1.2 倍 60 s 过载能力	3 倍 10 s 过载能力
故障响应	端口电流保持恒定有利于故障限流和穿越控制；端口电压跳变不利于系统电压稳定	端口电压保持恒定有利于系统电压稳定性；端口电流突变导致过流风险，不利于故障限流和穿越实现
接入环境	需要一定的系统强度支撑，不适用于大规模新能源接入	可在无源网络运行，具备 100% 新能源接入能力

结合构网型储能技术和跟网型储能技术的技术区别，基于产品特性，列举跟网型和构网型不同应用场景，见表2。

表 2 应用场景对比

Tab. 2 Application scenario comparison

	跟网型	构网型
调度响应	实现最大能量收益，完全响应调度需求	牺牲部分功率，不能完全响应调度需求
弱电网架构下	存在系统电压失稳风险	可支撑并稳定系统电压
强电网架构下	无过电流风险	电网和变流器之间微小的相位差会被急剧放大，存在过电流风险
适用场景	适用于强电网架构	适用于弱电网架构

2 构网储能变流升压一体机配置

构网型储能系统和跟网型储能系统的主要区别在于储能变流升压一体机的配置不同。现阶段为满足构网型储能变流器的过载能力，通常采用在跟网型变流器的容量基础上进行一定比例的降容以满足3倍过载需求，通常降容比例为50%。现以行业里应用普遍的1 725 kW跟网型储能变流器列举说明。

典型构网储能变流升压一体机主接线图如下图所示，35 kV开关柜采用负荷开关熔断器组合电器，升压变压器采用SCB13-3450 kV·A/37 kV干式双绕组变流器，储能变流器采用2台功率2 × 1 725 kW的变流器（为满足构网要求，2 × 1 725 kW储能变流器降容到1 725 kW使用），舱内配有

100 kV·A辅助变压器为对应的储能单元供电。

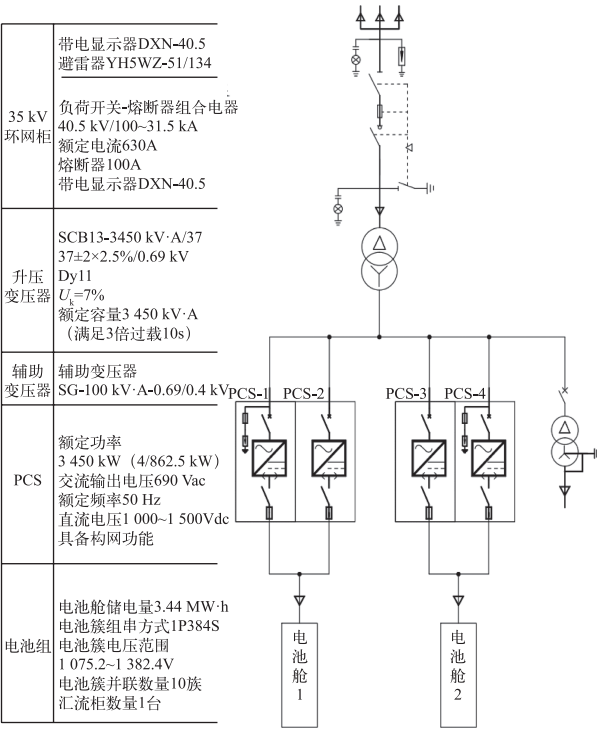


图 典型构网储能变流升压一体机主接线图

Fig. Main wiring diagram of typical grid energy storage converter boost integrated Machine

构图储能变流器参数见表3。

表 3 构网储能变流器参数表

Tab. 3 Parameter table of grid energy storage converter

型号	ES-1725K
直流侧参数	
最大输入电压 /V	1 500
电池组电压范围 /V	1 000 ~ 1 500
功率通道数量	1
交流侧参数	
额定交流功率 /kW	满足跟网应用时：1 725 满足构网应用时：862.5
过载能力	300% 额定功率，10 s
额定电网电压 /V	690
额定电网频率 /Hz	50
系统参数	
最大效率 (%)	99.0
防护等级	IP65
工作环境温度 /℃	— 25 ~ +55
允许湿度范围	0% ~ 95%，无凝露
最高运行海拔高度 /m	5 000（3 000 m 以上降容）
冷却方式	风冷
电池管理通信接口	RS485/CAN/（CAN/Modbus 规约）
调度通信接口	Ethernet（IEC61850/104/Modbus 规约）

35 kV环网柜技术参数见表4。

表4 35 kV 环网柜技术参数表

Tab. 4 Technical parameter table of ring main unit

序号	名称	参数值
1	高压负荷 开关	额定电压 /kV
		40.5
		额定电流 /A
		630
		短路关合电流 /kA
		80
		额定短时耐受电流 /kA
		31.5
2	高压保护 熔断器	额定短路持续时间
		4
		开断额定电流次数
		≥ 200 次
		机械操作次数
		≥ 3 000 次
		辅助触头数量
		2 常开 2 常闭
3	避雷器 参数	额定电压 /kV
		40.5
		短路关合电流 /kA
		80
		短路开断电流 /kA
		31.5
		额定电流 /A
		100
		额定电压 /kV
		51
		持续运行电压 /kV
		40.5
		直流参考电压 /1mA/kV
		73
		标称放电电流残压 /kV
		134
		2 ms 方波电流耐受值 /A
		400

PCS升压一体机内配置一台升压变压器，变压器常采用双绕组干式变压器，变压器线圈采用薄层环氧树脂浇注，绝缘性能好，抗短路能力强，耐雷电冲击水平高，局部放电量小，噪声低，具有阻燃、自熄、防潮、散热性好、免维护和无污染等特点。

升压变压器的主要参数见表5。

表5 升压变压器主要参数表

Tab. 5 Main parameter table of step-up transformer

序号	类别	参数
1	型号	SCB13-3450/37 kV
2	相数	三相
3	额定频率 /Hz	50
4	额定电压 /kV	37±2×2.5%/0.69
5	额定容量 /kV·A	3 450
6	过载能力	3 倍 10 s 过载
7	连接组别	Dy11
8	阻抗电压	7%

3 结束语

构网型储能技术具备诸多技术优势，且已开始陆续应用，其功能、性能、稳定性和安全性正在随着工程项目开展验证和应用实践。

目前在大规模工程项目应用中面临一些问题，例如：如何提升多电压源同步稳定性，解决强电网下干扰稳定裕度降低、易失步问题；如何解决限流保护，避免短路电流危害变流器安全以及限流引起的暂态稳定性降低问题；如何在系统动态特性复杂的条件下实现变流器的协同控制，多台电压源并列运行，避免环流和抢功率问题等。这些问题需业内各大厂商、科研机构解决，共同推动技术进步。

参考文献

- [1] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3587-3588.
- [2] 余果, 吴军, 夏热, 等. 构网型变流器技术的发展现状与趋势研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9): 65-67.
- [3] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 173-175.
- [4] 李建林, 丁子洋, 游洪灏, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 5-7.

作者简介

王大杰(1989—), 男, 工程师, 研究方向为新型电力系统储能技术。

(收稿日期: 2024-05-23)