

# 跟网型和构网型储能电站低电压穿越仿真测试研究

戴俊雄

云南电力技术有限责任公司 云南 昆明 652701

**【摘要】**：在新型电力系统建设中储能技术是支撑高比例新能源消纳、保障电网安全稳定的关键，其在平抑新能源出力波动、提升电网稳定能够发挥重要作用。本文研究对比跟网型和构网型储能电站控制策略及其暂态特性，在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了跟网和构网储能并网模型进行了仿真验证，仿真结果表明构网型储能能在低电压穿越具有更好的无功支撑能力，抑制并网点电压跌落，提升系统暂态稳定性。

**【关键词】**：储能系统；跟网型；构网型；电压穿越；无功支撑能力

DOI:10.12417/3083-5526.25.07.002

## 1 引言

随着“双碳”目标推进，新型电力系统的快速发展，以风电、光伏为主的新能源装机规模和容量稳步提升。风电、光伏等对电网的弱支撑能力更加明显，使得电网的安全稳定运行愈发严峻。在风电快速发展的过程中，由于新能源场站的故障穿越能力不足，造成大规模新能源脱网事故屡见不鲜<sup>[1-2]</sup>。目前电化学储能并网需通过电力电子变换器，其控制方式有跟网型和构网型，要求在电网故障期间其能在规定范围内能够不脱网运行，并提供必要的无功支撑，提升电网安全稳定运行能力<sup>[3]</sup>。

针对构网型储能变换器在网侧电压跌落时由于有功不平衡导致的暂态失稳，通过分段自适应方法对功率参考值进行调整有效抑制功角波动，提高变流器暂态稳定性；<sup>[4]</sup>根据并网标准以构网型储能系统并网性能现场测试对其并网性能中频率、电压调节能力，充放电响应能力及故障电压穿越能力进行系统性测试；<sup>[5]</sup>根据储能并网测试需求设计了一套大容量储能系统并网检测的移动测试装置，能够满足储能系统的电网适应性测试要求。<sup>[6]</sup>对构网型与跟网型变流器的控制特性及电网电压、频率扰动动态响应进行对比分析；<sup>[7]</sup>对国内外各国储能变流器构网功能分类、技术指标和合规性验证等对比分析，为我国构网型研究及标志制定提供了有效参考；<sup>[8]</sup>对储能变流器暂态失稳机理进行分析，在暂态期间根据电压扰动程度对有功无功参考值进行自适应调节，有效防止系统失稳，同时尽量输出无功支撑系统。

储能电站也需具有故障穿越能力，防止其脱网进一步加剧电网稳定风险，因此有必要充分研究分析跟网型和构网型储能电站支撑能力，协调其故障穿越期间的有功、无功输出，提升其不间断运行和主动支撑能力，提高区域电网的安全稳定运行。本文对比分析了跟网型和构网型储能系统并网低电压穿越要求、无功支撑能力，基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了跟网型和构网型储能电站并网模型并进行了仿真验证。

## 2 跟/构网储能变流器低电压穿越技术要求和规范

### 2.1 跟网型储能低电压故障穿越

储能系统并网准则要求储能变流器要具有低电压穿越（low voltage ride through, LVRT）。目前储能电站主要以跟网型控制为主，在电网侧储能一般通过 10kV 及以上电压等级接入电网，其低电压穿越要求如图 1 所示，并网点电压在低电压穿越曲线范围内时，储能变流器要保持与电网连接；当并网点电压超出其电压要求范围时，为保证储能系统安全，可从电网切除。

如图 1 所示为 35kv 并网储能变流器低电压穿越要求<sup>[9]</sup>。

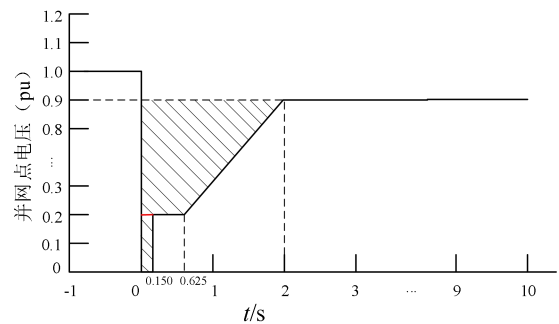


图 1 储能变流器低电压穿越要求

当电力系统发生故障，储能电站并网点电压跌落但高于 0.9p.u.时，储能系统保持正常时的有功无功控制。当储能电站并网点电压跌落至 0.9p.u.以下但高于低电压穿越曲线时储能变流器进入 LVRT 控制模式，LVRT 期间储能系统要根据电压跌落程度向电网提供容性无功电流辅助电压恢复，其动态无功电流增量为：

$$\begin{cases} \Delta I = 0 & 0.9 \leq U_{pcc} \leq 1.0 \\ \Delta I = k_1(0.9 - U_{pcc})I_N & 0 \leq U_{pcc} < 0.9 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $k_1$ 为低电压故障期间储能变流器动态无功电流系数（ $1.5 \leq k_1 \leq 3$ ）； $U_{pcc}$ 为储能系统并网点电压的标么值； $I_N$ 为储能电站额定电流。

### 2.2 构网型储能低电压故障穿越

目前的已经发布的储能变流器并网标准并未区分根网型和构网型变流器，今年 8 月由中国电力科学研究院有限公司起草的国家标准《构网型变流器通用技术规范》意见稿已经发布<sup>[10]</sup>，标准对构网型变流器并网提出了更高要求，如图 2 所示。

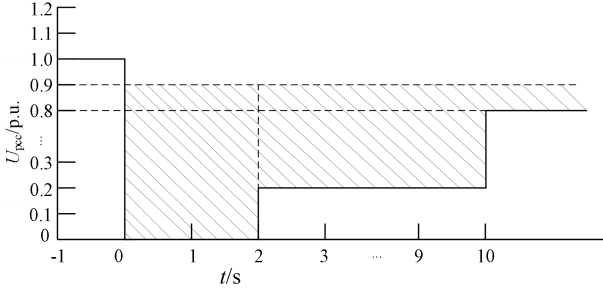


图 2 构网型变流器低电压穿越要求

当电力系统发生故障，储能电站并网点电压跌落构网型储能系统要根据电压变化量向电网提供容性无功电流支撑辅助电压恢复，其动态无功电流增量为：

$$\Delta I = \frac{\Delta U}{Z_t} \quad (2)$$

式中， $\Delta U$  为储能额定电压与实际电压差值， $Z_t$  为构网型变流器等效阻抗。

### 3 跟/构网储能电站变流器电压穿越控制策略

储能系统通过储能变流器接入电网，如图所示为储能系统并网结构图，通过变流器控制指令对储能系统充放电进行控制从而实现储能系统与电网的能交换；根据变流器控制策略不同其响应特性、支撑能力也有所差异，目前常见的控制策略有跟网型和构网型控制策略<sup>[11-12]</sup>。

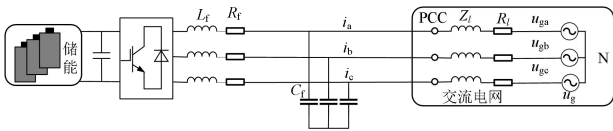


图 3 储能系统并网结构图

#### 3.1 跟网型储能变流器控制策略

跟网型储能变流器通过锁相环跟踪电网电压，控制输出电压调整注入的电流，从而保持与电网相位同步运行并实现有功无功交换，如图 4 所示，其转换效率高、应用广泛、技术相对成熟可靠，但对电网要求较高，需要电网提供稳定的电压和频率参考值，对外特性表现为电流源。

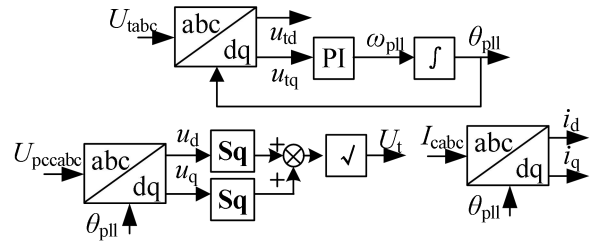


图 4 锁相环控制框图

但在弱电网中，跟网型控制策略稳定性降低，当系统发生扰动时锁相环容易失去同步，使得系统发生振荡甚至脱网，且其响应速度慢，甚至出现过度响应引起连锁反应，可能导致系统崩溃。

其中有功无功控制在传统跟网型储能变流器控制策略应用较多，采用功率外环和电流内环，实现输出功率的控制；控制结构框图如图 5 所示。

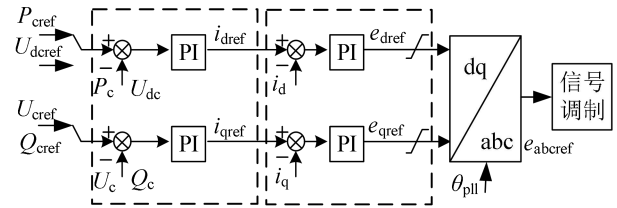


图 5 跟网型控制策略框图

#### 3.2 构网型储能变流器控制策略

构网型控制不需要依赖锁相环与电网保持同步，通过虚拟同步发电机（virtual synchronous generator, VSG）、下垂控制等控制策略实现构网特性。构网型变流器通过控制能够自主建立并维持电网的电压和频率实现与电网的同步运行，使变流器端口对外为类似同步发电机特性的电压源，其在弱电网中具有良好性能。

VSG 相比下垂控制能够更精确的模拟同步发电机运行特性，本文采用 VSG 控制作为构网型储能变流器控制策略，如图 6 所示。

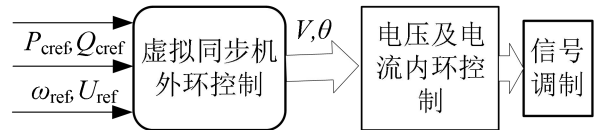


图 6 构网型变流器控制框图

通过模拟调速器有功-频率下垂特性其控制方程如下：

$$\begin{cases} J \frac{d(\omega - \omega_N)}{dt} = \frac{1}{\omega_N} (P_c^* - P_c) - D(\omega - \omega_N) \\ P_c^* = P_{ref} + D_p(\omega - \omega_N) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $J$  为控制系统中转动惯量,  $D$  为阻尼系数,  $\omega$ 、 $\omega_N$  分别为角频率实际值和额定值,  $P_c^*$ 、 $P_c$  为有功功率参考值和实际值,  $D_p$  是下垂控制系数。

根据上式 10, 储能变流器 VSG 有功-频率控制框图如图 7 所示。

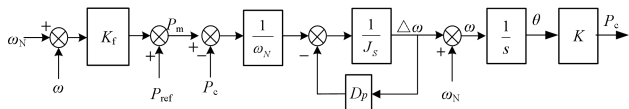


图 7 VSG 有功-频率控制

有功-频率控制中, 具有虚拟调速器控制, 能够实现构网型储能的调频、电压的主动支撑。VSG 无功-电压控制环节通过模拟同步发电机的励磁调节特性实现电压自动控制, 实际过程中, 通过模拟其无功-电压下垂特性方程:

$$E_0 = [(Q_{ref} - Q_c) + D_Q(U_n - U_c)](k_{Q-p} + \frac{k_{Q-i}}{s}) \quad (4)$$

其中,  $Q_{ref}$ 、 $Q_c$  为变流器无功功率参考值和实际值,  $D_Q$  是下垂系数,  $U_n$ 、 $U_c$  分别是电压幅值额定值和实际值。由式 (8) 可得到其无功-电压控制框图如图 8 所示。

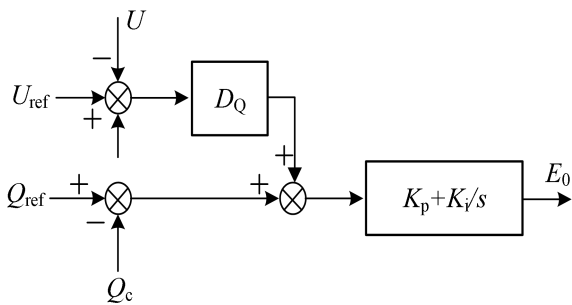


图 8 VSG 无功-电压控制框图

无功-电压控制策略中, 通过虚拟自动电压调节, 根据额定电压幅值和实际电压幅值的差值调节无功功率输出, 实现无功支撑。

#### 4 储能系统并网现场测试性能实例分析

储能系统通过图 9 所示并网, 其端口电压为 400V, 经端口升压变压器转换至 35kV 后接入电网并网点, 一般储能变流器容量较小, 所以在大容量储能电站中采用多台变流器并联接入电网。

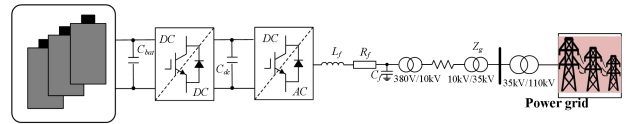


图 9 储能系统并网示意图

为验证跟网/构网储能变流器故障穿越策略在不同运行状态的有效性在 PSCAD/EMTDC 中分别搭建跟网型和构网型电化学储能电站弱电网并网仿真模型, 在不同运行状态和电压跌落程度下分别对跟网/构网储能故障期间支撑能力进行分析验证。该储能系统由 100 台额定容量为 1MVA 的储能变流器组成, 储能系统额定容量为 100MVA, 额定频率为 50Hz, 储能变流器端口电压为 400V, 结果升压变压器转换为 35kV 接入并网点, 通过并网点变压器与 110kV 电网相连。

在 0.2s 时, 电网发生三相短路故障, 此时变流器端口电压因电气距离及储能无功支撑为额定电压  $U_{pcc}$  的 10%, 电流上升至额定电流 1.5 倍, 故障的持续时间为 0.5s。此时跟网、构网型储能变流器有功无功输出如图 10 所示。

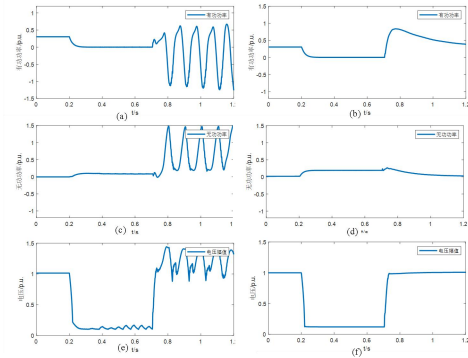


图 10 跟/构网储能高负载故障有功、无功和电压幅值

图 10(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 分别为跟网和构网控制下储能系统 LVRT 期间并网点有功功率、无功功率和电流幅值图。可以看出, 故障后储能系统提供无功支撑下均能对并网点电压有一定支撑作用, 跟网型储能系统采用传统 LVRT 控制, 根据电压跌落程度提供一定无功电流, 但跟网型储能在严重故障电压跌落下失稳; 而构网型控制下因其故障期间能够及时响应, 具有主动支撑能力提升电力系统稳定性, 在严重电压跌落期间仍具有较好故障穿越能力, 在故障后逐步恢复至稳态。

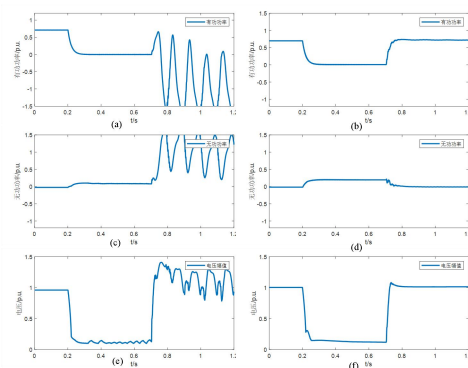


图 11 跟/构网储能高负载故障有功、无功和电压幅值

图 11 分别为跟网型和构网型储能变流器在 70%PN 额定功率下放电过程中发生故障时并网点有功功率、无功功率和电流幅值图, 此时端口电压跌落为额定电压  $U_{pcc}$  的 10%, 电流上升至  $1.5I_c$ , 故障持续时间 0.5s, 在相同故障情况下对比跟网、构网控制下储能系统支撑能力, 同储能轻载时类似, 跟网型储能能在故障穿越后失稳, 而构网型仍能保持较好稳定性。

## 5 现场测试

储能电站电压穿越测试依托新能源电网适应性测试平台, 在 35kV 集电线上串联接入电压穿越实验设备, 本次测试依托云南某储能电站测试故障穿越能力。

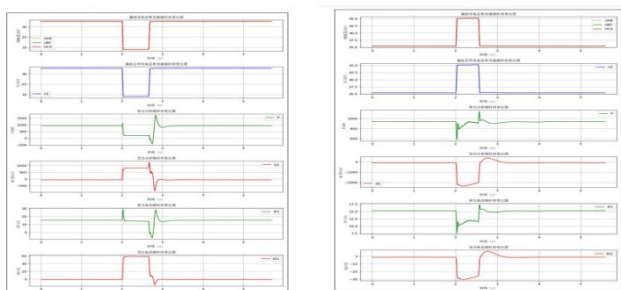


图 12 储能电站低电压穿越实测波形

图 13 储能电站高电压穿越实测波形

图 12 和图 13 分别为储能电站在 80%额定功率放电情况下 20%低电压和 130%高电压对称故障时测试波形, 能够满足并网要求。

## 6 结论

本文分别对储能系统跟网型和构网型控制进行分析研究, 得到以下主要结论:

(1) 跟网型和构网型储能系统在低电压穿越期间均能提供一定无功支撑, 但跟网型在故障穿越控制需切换至直接电流控制, 构网型控制其无功电压下垂控制能够主动响应, 不需要切换控制策略;

(2) 在 30%轻载和 70%重载功率下严重电压跌落故障穿越后跟网型储能都失稳发生振荡现象, 而构成网型储能均能保持稳定;

(3) 在弱电网中采用 VSG 控制的构网型储能系统严重故障暂态期间能保持较好响应、支撑能力, 有效提升并网点电压提升系统稳定性。

## 参考文献:

- [1] 杜剑行,朱冬雪. 张北地区风电汇集区域风机脱网问题探讨 [J]. 华北电力技术, 2017, (09): 49-54.
- [2] 曾辉,孙峰,李铁,等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (13): 1-6.
- [3] 赵清华,李明,李晓龙,等. 构网型与跟网型储能在弱电网中的暂态响应特性及并网性能研究[J].高压电器,2025,61(11):22-33+44.
- [4] 李建林,宋莹莹,游洪灏,等.低电压穿越场景下的构网型储能变换器功率协同控制策略[J].高压电器,2025,61(11):1-10+21+249.
- [5] 许珂玮,余莎,张明强,等.电网扰动下构网型与跟网型逆变器的响应特性探讨[J].云南电力技术,2025,53(04):38-43+65.
- [6] 周京华,李津.构网型储能变流器国内外技术标准对比与分析[J].电力系统自动化,2025,49(11):14-28.
- [7] 武永强,郭凯,王宇强,等.构网型储能系统并网测试要求及测试实例分析[J].内蒙古电力技术,2024,42(02):8-16.
- [8] 张永明,王希葵.电化学储能系统并网性能测试的研究[J].电工技术,2024,(01):7-11+17.
- [9] 全国电力储能标准化技术委员会(SAC/TC 550).电化学储能系统储能变流器技术要求:GB/T 34120-2023[S].中国标准出版社,2023.
- [10] 国家标准化管理委员会. [构网型变流器通用技术规范 (征求意见稿) [Z]. 中国电力企业联合会 2025 征求意见稿版. 发布日期 2025-08-25. 获取地址 <https://www.ccc.org.cn/>.
- [11] 刘辉,于思奇,孙大卫,等.构网型变流器控制技术及原理综述[J].中国电机工程学报,2025,45(01):277-297.
- [12] 迟永宁,江炳蔚,胡家兵,等.构网型变流器: 物理本质与特征[J].高电压技术,2024,50(02):590-604.