第 52 卷 第 5 期：2139-2149 高电压技术 Vol.52, No.5: 2139-2149
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251629

计及 SoC 均衡的分布式储能型 MMC 参与电网频率支撑控制方法

王顺亮[1]，段宇轩[1]，李歆蔚[2]，涂　皓[1]，江　晗[2]，马俊鹏[1]，张华杰[3]
（1. 四川大学电气工程学院，成都 610065；2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院，广州 510080；
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院，成都 610095）

摘　要：将电池储能系统与模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)集成，可赋予柔性直流换流器更灵活的有功调节能力，更好地在暂态过程中为电网提供频率支撑。然而，储能单元间参数差异又易导致荷电状态(state of charge, SoC)失衡，威胁系统安全稳定运行。对此，提出兼顾 SoC 均衡的分布式储能型 MMC 参与电网频率支撑控制方法。首先，所提方法采用仿同步机控制策略，使换流器具备主动频率支撑能力；其次，设计了二次分配功率策略，利用储能电池快速提供有功功率支撑，避免电容电压越限；最后，提出了一种 SoC 均衡控制策略，通过动态调节各储能单元的功率参考值，在实现频率支撑的同时维持内部能量均衡。基于 PSCAD/EMTDC 以及硬件在环实验结果表明，所提方法在实现主动频率支撑的同时，兼顾储能单元 SoC 均衡，提升系统的稳定性与持续运行能力。

关键词：模块化多电平换流器；电池储能系统；分布式储能；SoC 均衡；仿同步机控制；频率支撑

Grid Frequency Regulation via MMC-BESS with SoC Balancing

WANG Shunliang[1], DUAN Yuxuan[1], LI Xinwei[2], TU Hao[1], JIANG Han[2], MA Junpeng[1], ZHANG Huajie[3]
(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chengdu 610095, China)

Abstract: Integrating a battery energy storage system (BESS) with a modular multilevel converter (MMC) enables the HVDC converter to deliver active power and provide frequency support during transient events. However, delivering frequency support may cause a decrease in the MMC capacitor voltage, and parameter inconsistencies among the storage units can further lead to state-of-charge (SoC) imbalance, posing risks to the system's safe and stable operation. To address these challenges, this paper proposes a distributed MMC-BESS frequency support control method that accounts for SoC balancing. First, a versatile static synchronous machine control strategy is adopted to enable autonomous frequency response. Second, a secondary power allocation mechanism is introduced, allowing the battery to rapidly provide active power support. Finally, an SoC balancing strategy is designed to dynamically adjust the power references of battery, achieving internal energy balancing while maintaining effective frequency support. Results based on PSCAD/EMTDC and HIL experiments verify that the proposed method not only provides active frequency support but also improves SoC consistency among storage units, thereby enhancing system stability and sustained operation capability.

Key words: modular multilevel converter; battery energy storage system; distributed energy storage; SoC balance; synchronous generator emulation control; frequency support

0　引言

在“双碳”战略引领下，我国正加速发展新能源、推动能源结构转型[1]。截至 2025 年上半年，全国风电、光伏累计装机容量分别达 5.73 亿 kW 和 11 亿 kW，合计规模已超过火电[2]。预计到 2050 年，风电和光伏装机占比将分别达 27%和 41%，可再生能源将持续快速增长[3]。

新能源大规模接入使电网呈现出高比例新能源与高比例电力电子设备的“双高”特征[4]。传统

基金资助项目：智能电网国家科技重大专项(2030)(2024ZD0801600)。
Project supported by Smart Gird National Science and Technology Major Special Project(2030) (2024ZD0801600).

电力系统中，同步发电机(synchronous generator, SG)提供的旋转惯量和阻尼特性对维持系统稳定至关重要。然而，同步机比例下降导致系统惯量降低、阻尼与电压支撑能力不足，加之新能源出力的随机性与波动性，共同加剧电网失稳风险[5-7]，电力系统运行面临多维度挑战。因此，电力电子变流器逐步承担起原本同步机提供的功能[8]，其运行模式与控制策略已成为影响电网稳定运行的关键因素[9-10]。

电力电子变流器核心控制策略分为跟网型和构网型两类：前者依赖锁相环实同步，呈现电流源特性，缺乏独立运行能力[11]；后者对外体现电压源特性，可并、离网运行，且具备主动支撑能力[12]。然而，构网型变流器在强电网下阻尼特性较差，易发生失稳的现象[13-14]；此外，受新能源出力波动性的影响，新能源构网型变流器调频能力有限[15]。

在大规模新能源外送和区域电网互联系统中，柔性直流变流器是单一容量最大的电力电子装备，具有输送功率大、控制灵活、动态响应快等优势[16]。将储能系统与柔性直流变流器深度耦合[17]，构成高压大容量的储变一体系统，不仅能够在毫秒级时间尺度上提供有功/无功功率支撑，平抑新能源出力波动，还可通过控制策略模拟同步机的惯量和阻尼特性，增强电网惯量与频率支撑能力[18]。

文献[19]综述了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的储能型变流器拓扑及其控制技术。为提升系统能量利用率，储能型 MMC 需保持储能单元荷电状态(state of charge, SoC)均衡，文献[20-21]按均衡系数重新分配相间功率，在桥臂调制信号中注入直流分量实现相间均衡。均衡系数越大均衡速度越快，但子模块调制信号可能超调。文献[22]通过重构子模块调制信号实现模块间均衡，但基于载波移相的方法不适用于模块数较多的场景，调制复杂度随电平数增加而显著提高。此外，在传统 MMC 中通常利用子模块电容存储的能量模拟同步发电机转子动能，为电网提供惯量支撑[23-24]，然而，这类方法通常基于传统双闭环矢量控制，电容电压与直流母线电压之间存在耦合，限制了电容能量的充分利用。文献[25]采用自适应阻尼和惯性系数，提升电容能量的支撑能力，但电容电压仍与直流电压相关联。文献[26-27]提出的主动能量支撑控制策略在数学上实现了直流电压与电容电压的解耦，拓展了能量利用裕度，但电容输出功率仍受支撑功率影响，导致电容电压波动较大。文献[28]采用电容能量同步环替代传统构网控制中的功率同步环，提高了系统稳定性，该文献认为电容能量支撑能力较弱，仅将其用于与电网同步。

针对上述问题，本文提出了一种兼顾 SoC 均衡的储能型 MMC 参与电网频率主动支撑的控制策略，利用储能电池有功功率快速响应的能力，解决了传统 MMC 频率支撑过程中使用电容能量做有功支撑，而导致的电压越限问题，以及储能系统长期运行 SoC 失衡导致能量利用率低的问题。以单机系统为例，对所提策略进行了仿真验证，证明了本文所提控制策略的有效性。

1 拓扑运行基本原理

1.1 拓扑结构

柔性直流输电系统因其高电压、大容量的要求，通常采用 MMC 作为核心功率变换器。若在 MMC 中集成电池储能系统，使得 MMC 有功调节能力更为灵活，能够实现新能源功率波动的快速调节和电网的主动频率支撑，其拓扑结构如图 1 所示。

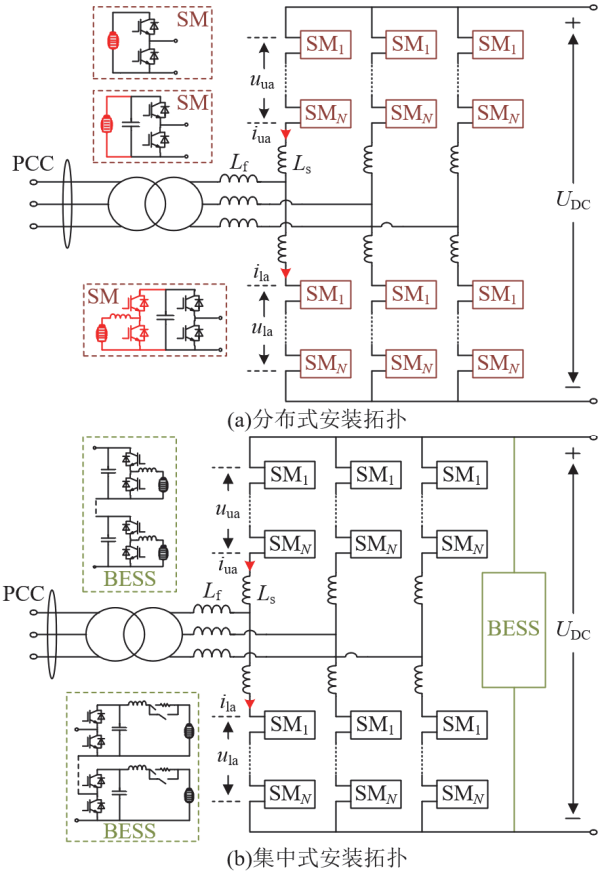


图 1 储能型 MMC 拓扑结构

Fig.1 Topology of MMC-BESS

图 1 中，MMC 由三相六桥臂构成，每个桥臂包含 N 个半桥结构功率子模块和一组桥臂电抗器 L_s，MMC 直流端口并入直流母线，直流母线电压为 U_{DC}，交流输出端口经滤波电感 L_f 通过公共连接点(point of common coupling, PCC)向网侧系统输送有功功率和无功功率。图中 u_{kj} 和 i_{kj} 分别表示桥臂电压和桥臂电流，i_j 为三相输出电流(k=u,l; j=a,b,c)。根据储能电池在系统中的安装位置与耦合方式不同，MMC-BESS 拓扑可分为两类：

1）分布式安装拓扑如图 1(a)所示：储能电池配置在 MMC 功率子模块中，与各模块电容直接并联。其具体实现方式包括：①将储能电池直接替换子模块中的电容；②储能电池与模块电容直接并联；③通过 DC/DC 变换器与子模块电容连接。

2）集中式安装拓扑如图 1(b)示：储能电池统一集中接入 MMC 直流端口。为匹配直流母线电压，储能单元需采用多组电池串并联配置，或是过双向 DC/DC 变换器实现电压匹配，从而降低对电池组额定电压的要求。

1.2 优势分析

在分布式拓扑中，前两种方式结构简单、易于实现，控制策略相对直观。但由于 MMC 子模块电容在正常运行中存在二倍频功率分量，若该分量流入储能电池，会加速电池寿命衰减。为避免此问题，可以在子模块中增加一级双向 DC/DC 变换器，以隔离二倍频功率影响，同时实现电压匹配，使 MMC 无需降压运行。该方式使储能单元电压可独立控制，有利于提升系统能量管理能力，并保障电池运行的灵活性。但其代价是增加了 $2\times6N$ 个开关器件，导致系统成本和复杂度上升。此外，分布式安装能够在子模块层面对储能单元进行精细化控制，便于实现 SoC 均衡和动态功率分配。

在集中式拓扑中，储能系统与 MMC 控制相对独立，结构更加简洁。同时，集中安装提高了系统电气安全性，降低了子模块与电池间的耦合风险，更适合工程实现。但其缺点是储能装置与 MMC 之间往往进行独立控制或存在延迟，系统的动态响应速度和功率分配灵活性不足。

综合考虑，分布式拓扑动态调节能力更强，而集中式拓扑在结构简化与工程应用方面更具优势。鉴于本文研究重点在于实现频率主动支撑与 SoC 均衡控制，因此选择分布式安装拓扑作为研究对象。

2 MMC-BESS 基础控制策略

2.1 MMC-BESS 数学模型

采用分布式拓扑的 MMC-BESS 与传统 MMC 类似，为三相对称结构，可仅对单相分析，其余两相类同。根据图 1(a)列写单相电压电流回路方程：

$$\begin{cases}\dfrac{U_{DC}}{2}=L_s\dfrac{\mathrm{d}i_{uj}}{\mathrm{d}t}+L_f\dfrac{\mathrm{d}i_j}{\mathrm{d}t}+u_{uj}+u_j\\ \dfrac{U_{DC}}{2}=L_s\dfrac{\mathrm{d}i_{lj}}{\mathrm{d}t}-L_f\dfrac{\mathrm{d}i_j}{\mathrm{d}t}+u_{lj}-u_j\end{cases}\tag{1}$$

上述两式分别进行相加和相减，可得：

$$\begin{cases}\dfrac{U_{DC}}{2}=L_s\dfrac{\mathrm{d}(i_{uj}+i_{lj})/2}{\mathrm{d}t}+\dfrac{u_{uj}+u_{lj}}{2}\\ u_j=(\dfrac{L_s}{2}+L_f)\dfrac{\mathrm{d}i_j}{\mathrm{d}t}+\dfrac{u_{lj}-u_{uj}}{2}\end{cases}\tag{2}$$

定义上下桥臂电流满足下式：

$$\begin{cases}i_{uj}=i_{cirj}-\dfrac{i_j}{2}\\ i_{lj}=i_{cirj}+\dfrac{i_j}{2}\end{cases}\tag{3}$$

式中：u_j 为交流测电压；i_{cirj}(j=a,b,c)为相内环流分量，包含直流分量、基频分量以及高频分量。整理上式，可得 MMC-BESS 交直流侧等效电路如图 2 所示。

2.2 MMC-BESS 基础控制

MMC 阀侧控制采用经典双闭环矢量控制策略。外环为功率控制环，利用 PI 控制器分别调节变流器的有功与无功功率输出，进而生成 dq 轴电流参考值；内环为电流控制环，通过 PI 控制器将电流误差转换为上下桥臂的差模电压参考值 u_{diffj}，具体结构如图 3 所示。

为抑制 MMC 环流并维持电容电压均衡，设计基于 PIR 的环流抑制控制器[29]，该控制器同时考虑桥臂间电压均衡与相间电压均衡，其输入量为 j 相环流电流的交流分量 i_{cirj_ac} 与直流分类 i_{cirj_dc}，生成上下桥臂的环电压参考值 u_{cirj}。鉴于 MMC 环流中

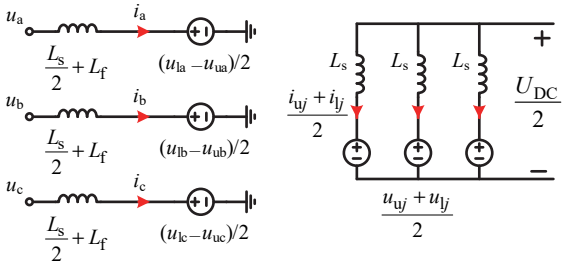


图 2 交直流侧等效电路

Fig.2 AC/DC-side equivalent circuit

主要包含二倍频分量，谐振控制器的谐振频率设定为 100 Hz。最终，通过叠加差模电压参考值与共模电压参考值，可获得各相上下桥臂的电压参考量，经子模块电容电压排序后，生成相应的开关信号。

3 主动频率支撑控制策略实现

3.1 仿同步机控制策略

MMC 并网运行时，可以通过控制策略实现模拟同步发电机运行特性，从而为电网提供支撑。忽略次暂态过程，以隐极机，极对数为 1 的同步发电机为例，其输出功率可由式(4)、(5)描述。

$$P_{\mathrm{s}}=\frac{E_0U}{x_d}\sin\delta \tag{4}$$

$$Q_{\mathrm{s}}=\frac{U(E_0\cos\delta-U)}{x_d} \tag{5}$$

式中：E_0 为发电机空载电动势；U 为机端电压；x_d 为发电机 d 轴电抗；δ 为 E_0 相对于 U 的功角；P_{s}、Q_{s} 为同步发电机输出的有功功率和无功功率。

将 P_{s}、Q_{s} 分别作为分布式储能型 MMC 的有功与无功功率参考值。其中，所需得到的变量包括空载电动势 E_0、机端电压 U 以及功角 δ。在并网条件下，机端电压 U 直接取 PCC 点电压，x_d 可参考同等电压等级和容量的同步发电机参数设定。因此仅需计算 E_0 和 δ 便可计算功率参考值。

3.1.1 仿同步机控制特性建模

为得到 E_0 和 δ，需要对同步发电机进行建模分析。首先考虑转子运动方程。在稳定运行状态下，转子角频率维持在额定值附近，其动态过程可由典型二阶方程描述，如式(6)、(7)所示。

$$J_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t}=P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{ac}}-D_{\mathrm{m}}\Delta\omega \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=\omega_{\mathrm{s}}-\omega_{\mathrm{n}}=\Delta\omega \tag{7}$$

式中：J_{m} 和 D_{m} 为参考同步发电机设定的转动惯量和阻尼系数；ω_{s} 和 ω_{n} 转子角频率以及其额定值；P_{m} 为同步发电机机械功率；P_{ac} 为交流侧输出功率。P_{m} 的值与同步发电机调速系统相关，具体表达式如式(8)。

$$P_{\mathrm{m}}=P_{\mathrm{ref}}+G_{\mathrm{g}}(s)\cdot(\omega_{\mathrm{n}}-\omega_{\mathrm{s}}) \tag{8}$$

式中：P_{ref} 为原动机输入机械功率设定值；$G_{\mathrm{g}}(s)$为调速系统的 s 域传递函数。调速系统的动态过程可近似为一阶惯性环节，见式(9)。

$$G_{\mathrm{g}}(s)=\frac{1}{R_{\mathrm{d}}}\cdot\frac{1}{1+T_{\mathrm{g}}s} \tag{9}$$

式中：R_{d} 为调差系数；T_{g} 为调速系统时间常数。根据式(6)可得同步发电机励磁电动势相位 θ_{s} 与机械功率 P_{m} 的关系：

$$\theta_{\mathrm{s}}=\frac{1}{s}\cdot\left(\frac{1}{D_{\mathrm{m}}+sJ_{\mathrm{m}}}\left(P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{s}}\right)+\omega_{\mathrm{n}}\right) \tag{10}$$

J_{m} 和 D_{m} 共同决定了系统的稳定性与动态性能，其值可参考传统 VSG 控制参数整定过程计算。

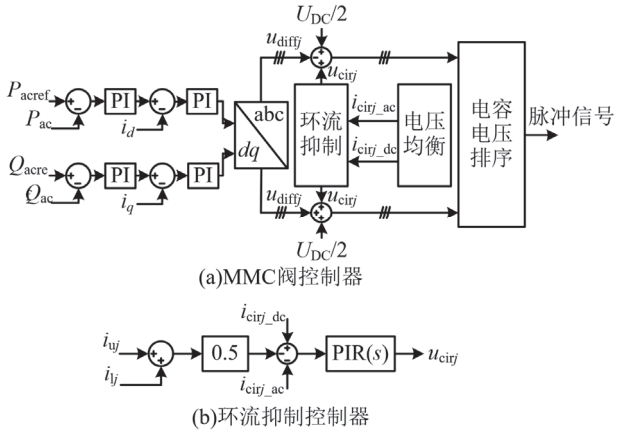
进一步地，对同步发电机励磁系统进行建模分析，以计算空载电动势 E_0。忽略电力系统稳定器，典型励磁系统传递函数 $G_{\mathrm{Tv}}(s)$包括以下部分：放大器 $G_{\mathrm{A}}(s)$放大机端电压 U 与额定电压 U_{ref} 的误差信号，送入励磁环节 $G_{\mathrm{T}}(s)$输出同步发电机所需的励磁电势 E_{Tv}，在励磁环节还需引入负反馈环节 $G_{\mathrm{F}}(s)$以保证系统动态稳定。图 4 为同步发电机励磁系统闭环传递函数框图，3 个环节的传递函数分别为：

$$G_{\mathrm{A}}(s)=\frac{K_{\mathrm{A}}}{1+sT_{\mathrm{A}}} \tag{11}$$

$$G_{\mathrm{T}}(s)=\frac{1}{1+sT_{\mathrm{e}}} \tag{12}$$

$$G_{\mathrm{F}}(s)=\frac{sK_{\mathrm{F}}}{1+sT_{\mathrm{F}}} \tag{13}$$

式中：K_{A}、T_{A} 为信号放大环节的增益系数和时间常数；T_{e} 为励磁环节时间常数；K_{F}、T_{F} 为负反馈环节的增益系数和时间常数。励磁环节各项系数可参考



(a)MMC阀控制器

(b)环流抑制控制器

图 3 MMC-BESS 基础控制策略框图

Fig.3 Basic control strategy of MMC-BESS

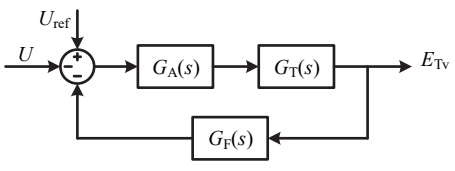


图 4 同步发电机励磁系统传递函数框图

Fig.4 Transfer function of SG excitation system

相同电压等级、容量同步发电机电磁参数设计[30]。

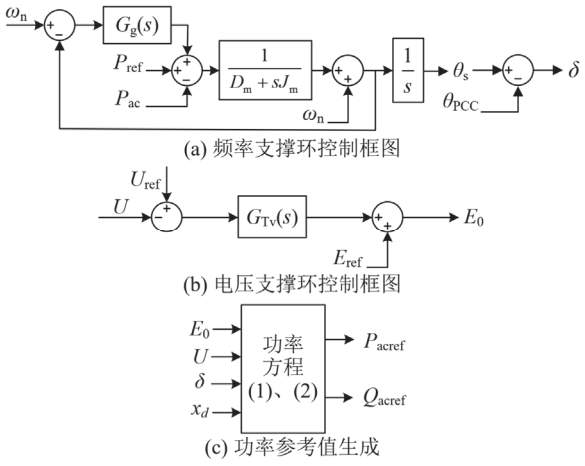
通过转子运动方程和励磁系统模型，即可得到励磁电势 E_0，以及相对机端电压相位 θ_{PCC} 的功角 δ。代入式(4)、(5)便可计算出参考同步发电机输出的有功功率和无功功率参考值，实现仿同步机控制，控制策略框图如图 5 所示。

3.1.2 功率重分配

由式(8)可知，有功-频率环中输出功率由两部分组成：一部分为额定机械功率 P_{ref}，另一部分为电网频率波动，调速系统输出的动态功率 P'_m。若动态功率由 MMC 模块电容提供，会导致电容电压波动，极端情况下可能引起电容电压越限，影响 MMC 正常运行。考虑到电池储能系统有功功率响应迅速，将动态功率分配给电池储能系统，既可减小电容电压波动，又能提升系统对频率扰动的快速响应能力。修改后的频率支撑环控制框图如图 6 所示，图中 P_{Batref} 为储能系统总功率参考值。

3.2 储能系统控制与 SoC 均衡策略

分布式拓扑结构下，储能电池通过 DC/DC 变换器并入 MMC 子模块，考虑到 MMC 阀级控制已采用三级电压均衡控制策略，因此储能系统采用功率控制策略。功率控制策略采用典型双闭环控制结构，控制结构如图 7 所示，图中 P_{Bat}、I_{Bat} 分别为储能电池输出功率以及输出电流。



(a) 频率支撑环控制框图

(b) 电压支撑环控制框图

(c) 功率参考值生成

图 5 仿同步机控制策略框图

Fig.5 Block diagram of SG-emulated control strategy

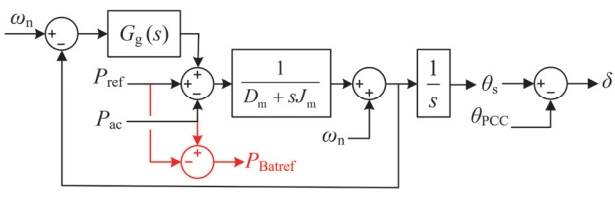


图 6 功率重分配策略框图

Fig.6 Block diagram of power redistribution strategy

由于电池单元在制造一致性、运行工况及开关损耗等方面存在差异，随着系统运行时间的推移，各电池的性能以不同速率退化，导致电池 SoC 差异增大，部分可能因电池过度放电或深度充电而退出运行，降低电池组能量利用率，因此还需额外控制保证各储能电池 SoC 均衡。本文提出通过调整各储能单元输出功率的方式实现 SoC 均衡，具体控制策略如图 8 所示。

$$S_{ave}=\frac{\sum_{1}^{N}S_i}{N} \tag{14}$$

$$K_i=K_{SoC}\cdot(S_i-S_{ave})\cdot\mathrm{sign}(P_{Batref}) \tag{15}$$

$$P_{Batrefi}=(\frac{1}{N}+K_i)\cdot P_{Batref} \tag{16}$$

首先计算各储能单元 S_i，并计算 SoC 平均值 S_{ave}。定义各单元矫正系数 K_i，其值由增益系数 K_{SoC} 以及 SoC 偏差值决定，并根据总功率参考值 P_{Batref} 的充放电方向确定修正方向。最终，式(17)通过在均分功率的基础上叠加修正项，得到各储能单元的实际功率参考值 $P_{Batrefi}$，储能系统控制结构如图 9 所示。图中 P_{Bati}、I_{Bati} 分别为各储能单元输出功率以及输出电流。

由于均衡过程中会在模块间产生不平衡功率，若不平衡功率过大会影响电容电压平衡效果，因此需对矫正系数 K_i 作以下限制。

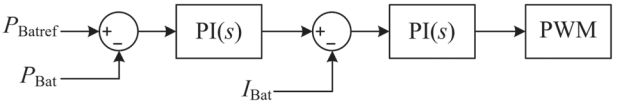


图 7 功率-电流双闭环控制框图

Fig.7 Block diagram of power-current dual-loop control

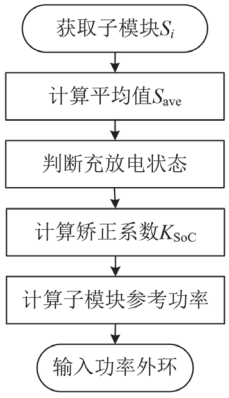


图 8 SoC 均衡控制流程图

Fig.8 Flowchart of SoC balancing control

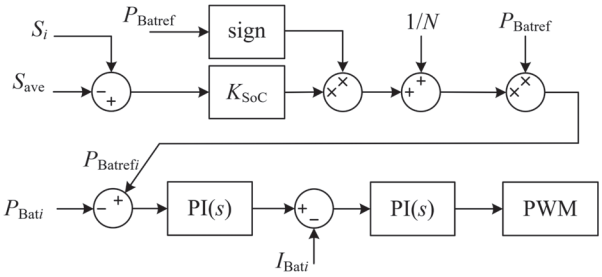


图 9 电池储能系统控制策略

Fig.9 Control strategy of battery energy storage system

均衡过程中，储能电池输出功率保持在 0.8~1.2 倍平均输出功率 P_{Batave} 之间：

$$P_{\mathrm{Batave}}=\frac{P_{\mathrm{Batref}}}{N} \tag{17}$$

$$0.8P_{\mathrm{Batave}}\le P_{\mathrm{Batrefi}}\le 1.2P_{\mathrm{Batave}} \tag{18}$$

通过式(16)、(17)可得：

$$-0.2\times\frac{1}{N}\le K_{\mathrm{SoC}}(S_i-S_{\mathrm{ave}})\le 0.2\times\frac{1}{N} \tag{19}$$

$$K_{\mathrm{SoC}}\left|S_i-S_{\mathrm{ave}}\right|\le\frac{0.2}{N} \tag{20}$$

$$\left|S_{\max}-S_{\mathrm{ave}}\right|\approx\left|S_{\min}-S_{\mathrm{ave}}\right|\approx 0.5(S_{\max}-S_{\min})=0.5\Delta S_{\max} \tag{21}$$

由此可得具体的约束关系：

$$0.5\Delta S_{\max}K_{\mathrm{SoC}}\le\frac{0.2}{N} \tag{22}$$

式中：N 为子模块总数；$\Delta S_{\max}$ 可通过估算储能电池初始 SoC 得到，当 SoC 均衡控制投入使用后，$\Delta S_{\max}$ 会持续减小，由此仅需初始状态满足约束条件即可。

3.3 整体控制策略

为保证 MMC-BESS 在电网频率波动期间提供有效支撑，系统整体控制策略如图 10 所示。通过仿同步机控制策略配合阀级控制策略使得换流器具备四象限运行能力以及一定的惯性、频率支撑能力。在电池储能系统控制策略中加入频率监测环节，通过监测系统频率 f_{PCC} 决定储能系统运行状态。

4 仿真与实验验证

4.1 仿真验证

测试系统主回路参数见表 1。

首先，通过调节输入参考量对 MMC-BESS 四象限运行能力进行验证(见图 11)：(1)调整机械功率参考值，以考察有功功率与输出功角的关系；(2)改变机端电压参考值，以考察励磁状态对无功功率输出的影响。当 t=0 s 时，输入机械功率参考值为正值，

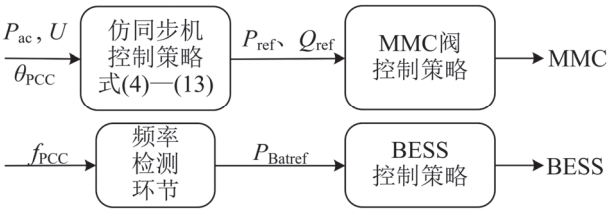


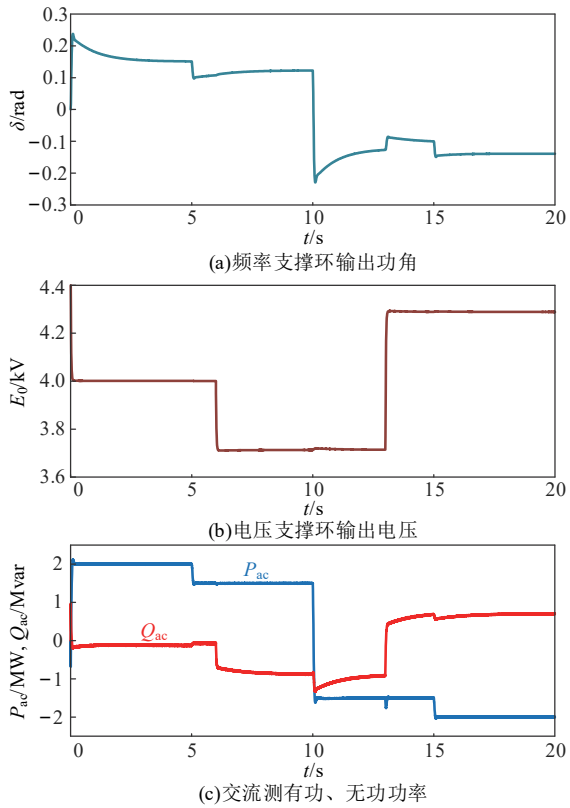
图 10 系统整体控制策略

Fig.10 Overall system control strategy

表 1 测试系统主回路参数

Table 1 Main circuit parameters of the test system

参数	数值
网侧相电压幅值 U_{g}/kV	4
直流侧电压 U_{DC}/kV	10
桥臂子模块数量 N	4
子模块电容 C/μF	3 750
额定电容电压 U_{c}/kV	2.5
电池额定电压 U_{Bat}/kV	1.2
额定容量 S_{N}/MVA	2



(a)频率支撑环输出功角

(b)电压支撑环输出电压

(c)交流测有功、无功功率

图 11 四象限运能力仿真结果

Fig.11 Simulation results of four-quadrant operation

输出有功功率与频率功角大小正相关，输出功角为正，此时 MMC-BESS 工作在同步发电机状态，向网侧输出功率；t=10 s 时刻修改输入机械功率参考值为负值，输出功角缓慢减小至负，此时 MMC-BESS 工

作在同步电动机状态，作为负载消耗有功功率。仿同步机控制下，MMC-BESS 输出无功功率类型与励磁状态有关，t=6 s 时刻，减小机端电压参考值，此时仿同步机处于弱励状态，对外吸收感性无功；t=13 s 时刻，增大机端电压参考值，令仿同步机处于强励状态，对外输出感性无功。仿真结果表明在仿同步机控制策略下，MMC-BESS 能够有效跟踪功率指令，灵活改变运行状态，为电网提供所需率支撑。

为验证仿同步机控制策略频率支撑环性能(见图 12)，以及储能系统参与频率支撑中有功功率的响应速度，设置 t=5 s 时刻，网侧电压频率下降 0.5 Hz，频率支撑环立刻响应增大输出功角，提高网侧输出功率，同时频率支撑环分配功率，将多发部分功率指令给到储能系统，储能系统控制器跟踪功率指令输出功率；在 t=15 s 时刻，网侧电压频率提高 0.5 Hz，频率支撑环输出功角降低，储能系统吸收功率。

电容电压纹波作为衡量系统是否稳定的重要指标之一，其波动大小与传输功率有直接关系。0~5 s 时刻，系统运行于额定容量下，此时电容电压纹波峰峰值约为 0.09 kV，为额定值的 3%，在常规标准 3%~5%范围内；5~10 s 时刻，交流端口输出功率增加 0.5 倍额定容量，纹波峰峰值增大为 0.15 kV，为额定电容电压的 6%，略高于常规标准，见图 13。

在仿真运行中，投入本文所提 SoC 均衡控制策略在仿真，为突出均衡控制效果，将储能电池额定容量及初始 SoC 差值设置较小，以便在较短时间尺度内观察 SoC 收敛过程。

图 14(a)为 A 相上桥臂电池输出功率，输出功率最大值约为平均值的 1.2 倍，符合本文均衡系数设计要求，仿真运行至 17 s 时刻，储能电池 SoC 最大差值为 0.06%，远小于初始时刻最大差值，可视为储能电池已处于均衡状态，若不投入 SoC 均衡控制，由于子模块内部差异，SoC 会逐渐发散如图 14(c)所示。图 15 则验证了不同均衡系数下 SoC 收敛时间的快慢以及对电容电压的影响，可以明显看见均衡系数越大，SoC 收敛速度越快，同时也会增大电容电压不平衡程度。

4.2 硬件在环实验验证

为进一步验证本文所提方法的有效性，搭建 MMC-BESS 硬件在环实验平台，平台采用 RTDS 实时数字仿真机模拟系统主电路，数字控制器为 DSP+FPGA 架构，主处理器采用 TMS320C28346

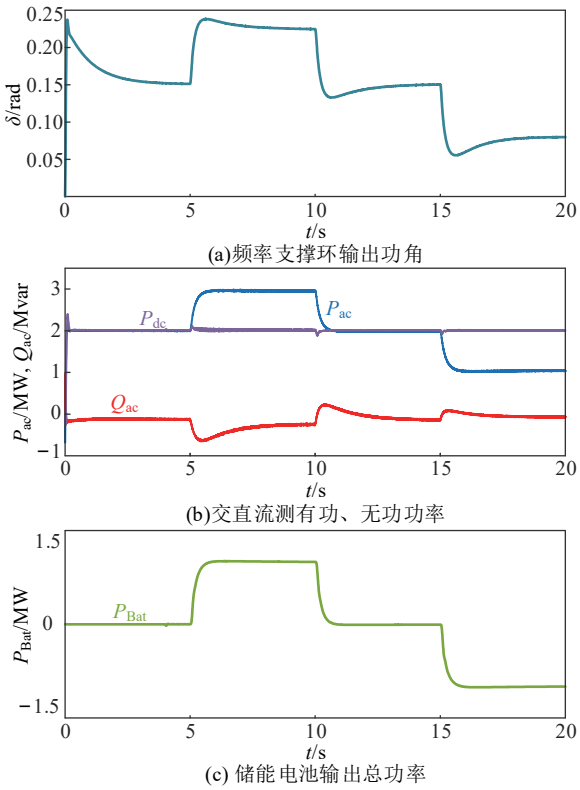


图 12 频率支撑能力仿真结果

Fig.12 Simulation results of frequency support

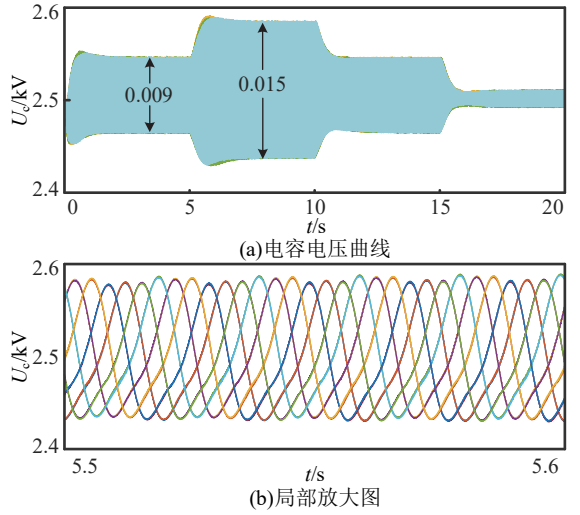


图 13 子模块电容电压曲线

Fig.13 Submodule capacitor voltage curve

芯片，FPGA 用于扩展系统 IO 接口。实验平台结构如图 16 所示，系统参数如表 2 所示。

四象限测试结果如图 17 所示，在 t_i(i=1,2,3,4)时刻改变有功功率、机端电压参考值。结果表明在仿同步机控制策略下，系统能够有效跟踪输入指令，灵活改变运行状态，为电网提供所需的功率。

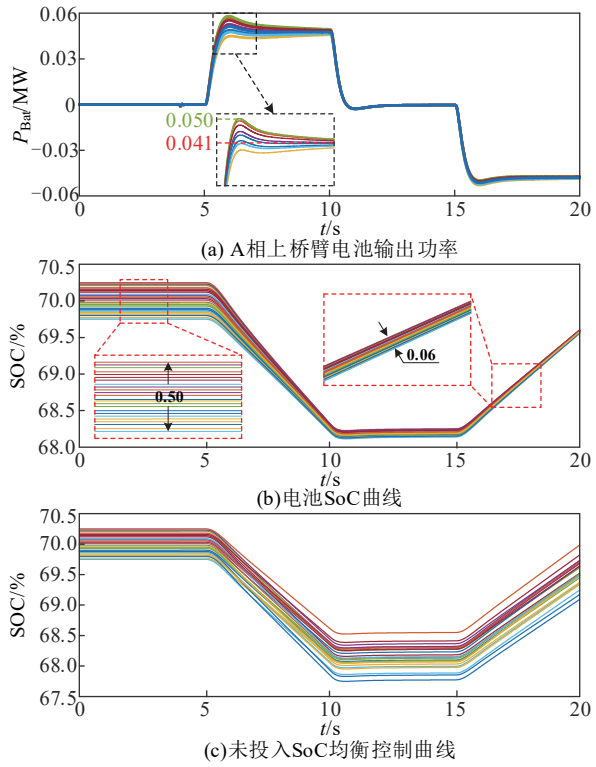


图 14 电池输出功率、SoC 曲线

Fig.14 Curve of battery power and SoC

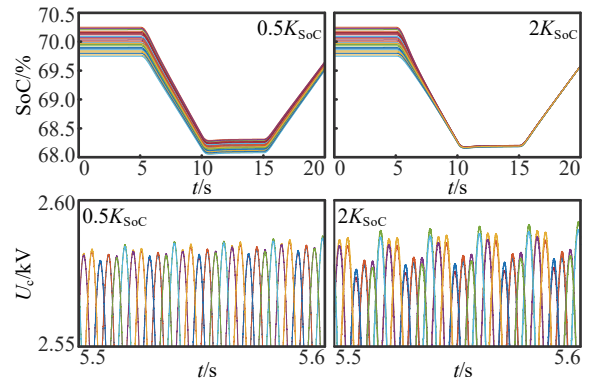


图 15 不同均衡系数 SoC、电容电压曲线

Fig.15 Simulation curves under different coefficients

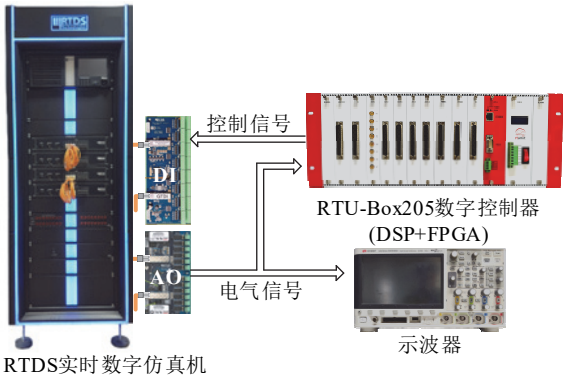


图 16 硬件在环实验平台

Fig.16 HIL testing platform

表 2 实验系统参数

Table 2 Parameters of experimental system

参数	数值
网侧相电压幅值 U_g/V	311
直流侧电压 U_{DC}/V	800
桥臂子模块个数 N	3
额定电容电压 U_c/V	266
额定电池电压 U_{Bat}/V	150
额定容量 S_N/kVA	10

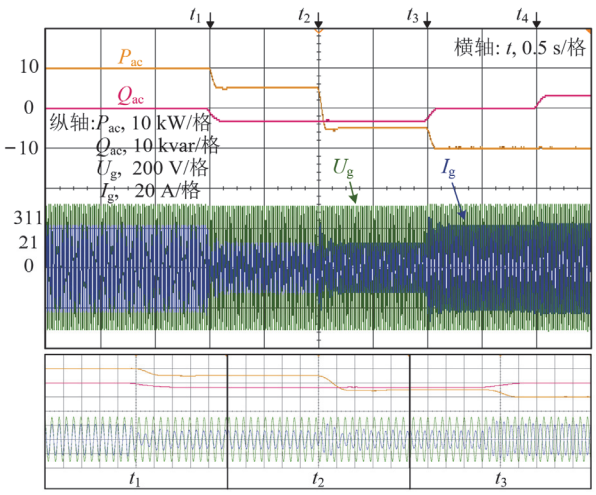


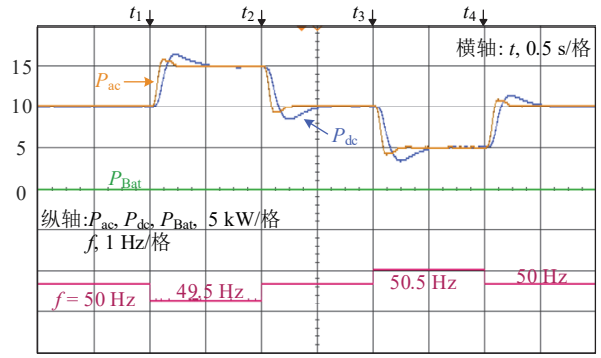
图 17 四象限运行实验曲线

Fig.17 Four-quadrant experimental curve

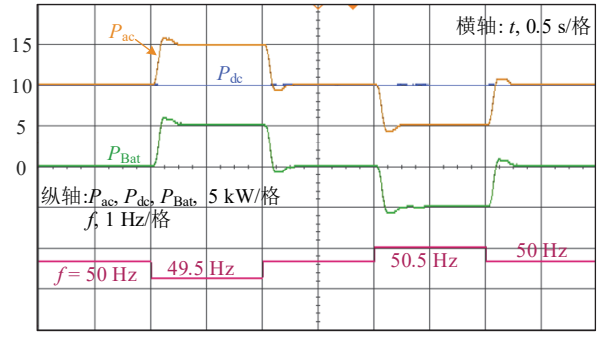
为验证仿同步机控制策略频率支撑环性能，以及储能系统参与频率支撑中有功功率的响应速度，在硬件在环实验平台测试以下两种运行模式。

首先，将所有储能系统闭锁，在 $t_i(i=1,2,3,4)$时刻改变交流电源频率，有功-频率控制环节识别到频率波动，立即修改输出功角改变交流端口输出功率，此时储能系统闭锁不参与有功功率支撑，测试结果如图 18(a)所示。其次，投入储能系统后，频率支撑过程中的波动有功功率则是由储能系统承担，输出功率曲线如图 18(b)所示；储能系统参与频率支撑过程中电容电压曲线如图 18(c)所示，MMC-BESS 运行于额定功率下，电容电压纹波峰峰值约为额定电压的 3%，输出功率提升至 1.5 倍额定容量时，纹波峰峰值也上升至 4.5%左右。

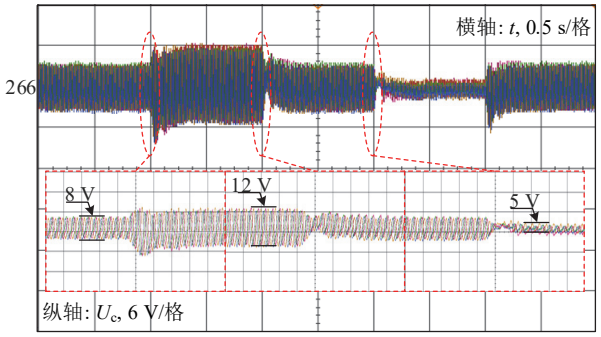
最后测试本文所提储能电池 SoC 均衡控制策略的有效性，实验给出了 A 相上下桥臂第 1 个子模块 A_{u1}、A_{l1}，B 相上桥臂第 1 个子模块 B_{u1}，C 相下桥臂第 1 个子模块 C_{l1} 的储能单元 SoC 曲线，测试结果如图 19 所示。



(a)未投入储能单元



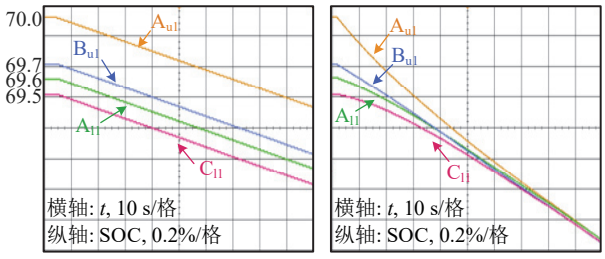
(b)投入储能单元



(c)投入储能单元电容电压

图 18　有功-频率支撑环实验测试

Fig.18　Experimental results of frequency support



(a)未投入均衡控制　(b)投入均衡控制

图 19　储能电池 SoC 曲线

Fig.19　SOC curve of energy storage battery

在未投入 SoC 均衡控制时，各储能电池 SoC 变化速度始终保持一致，SoC 曲线没有收敛的趋势。投入 SoC 均衡控制后，均衡控制环节调整储能电池输出功率，系统运行约 2 min 后 SoC 曲线趋于一致，证明了本文所提均衡策略的有效性。

5　结论

为实现 MMC-BESS 主动参与电网调节过程，本文通过模拟同步发电机运行特性，提出了一种 MMC-BESS 参与电网频率主动支撑的控制策略。

1）重构有功-频率支撑环中的功率分配，利用储能电池弥补频率支撑过程中变化的有功功率，避免了利用电容能量做支撑而导致电容电压越限的问题。

2）引入储能电池 SoC 均衡控制，解决了系统长期运行中储能系统 SoC 失衡导致能量利用率降低的问题。

3）本文所采用的拓扑相较于传统 MMC 增加了开关器件数量，系统复杂度较高。后续研究将聚焦于 MMC-BESS 轻量化拓扑，探索储能与 MMC 变流器拓扑的集成与优化，以减少开关器件数量、降低系统复杂度；此外，在高压直流输电应用场景下，交直流侧故障条件下的系统故障穿越与快速恢复策略亦是重点研究方向

参考文献　References

[1] 周孝信，赵　强，张玉琼，等. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势分析：绿电替代与绿氢替代[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6707-6720.
ZHOU Xiaoxin, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong, et al. Analysis of the development trend of China’s energy and power system under the dual carbon target: green electricity substitution and green hydrogen substitution[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6707-6720.

[2] 中国电力企业联合会. 2025 年一季度全国电力供需形势分析预测报 告 [EB/OL]. (2025-04-25)[2026-04-14]. https://cpnn.com.cn/news/dianli2023/202504/t20250425_1794104.html.
China Electricity Council. Analysis and forecast report on national electric power supply and demand in the first quarter of 2025[EB/OL]. (2025-04-25)[2026-04-14]. https://cpnn.com.cn/news/dianli2023/202504/t20250425_1794104. html.

[3] 毕亚雄. 《风能北京宣言 2.0》发布[EB/OL]. (2025-10-21)[2026-04-14]. http://www.news.cn/energy/20251021/664ea5e3e1564ce9b424a0d103-5bdf2b/c. html.
BI Yaxiong. Beijing declaration on wind energy 2.0[R/OL]. (2025-10-20)[2026-04-14]. http://www.news.cn/energy/20251021/664-ea5e3e1564ce9b424a0d1035bdf2b/c. html.

[4] 盛万兴，刘科研，李　昭，等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：1-18.
SHENG Wanxing, LIU Keyan, LI Zhao, et al. Review of basic theory and methods of morphological evolution and safe & efficient operation of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 1-18.

[5] 武倩羽. 新能源同步机技术对新型电网稳定性的提升作用研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2022.
WU Qianyu. Research on the promotion of synchronous motor-generator pair technology for new energy on stabilities of new type power grids[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2022.

[6] 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(2)：590-604.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590-604.

[7] 范 越，李永莱，舒印彪，等. 新型电力系统平衡构建与安全稳定关键技术初探[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1)：14-24.
FAN Yue, LI Yonglai, SHU Yinbiao, et al. Preliminary study on key technologies of balancing and stabilizing of renewable-energy-dominated power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 14-24.

[8] 李国庆，刘先超，辛业春，等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1165-1181.
LI Guoqing, LIU Xianchao, XIN Yechun, et al. Research on frequency stability of power system with high penetration renewable energy: a review[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1165-1181.

[9] 严文博，黄云辉，方 正，等. 低阻抗下构网型变流器稳定性机理分析[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1444-1453.
YAN Wenbo, HUANG Yunhui, FANG Zheng, et al. Stability mechanism analysis of grid-forming converter connected to low impedance grid[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1444-1453.

[10] 王冠淇，裴 玮，熊佳旺，等. 跟网型和构网型变流器混合系统稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1)：25-37.
WANG Guanqi, PEI Wei, XIONG Jiawang, et al. Stability analysis method for hybrid systems of grid-following and grid-forming inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 25-37.

[11] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.

[12] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.

[13] 薛翼程，张哲任，徐 政，等. 构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化，2023，47(16)：103-113.
XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 103-113.

[14] 孙鹏飞，田 震，查晓明，等. 功率同步型构网变流器并网系统暂态同步稳定性研究综述[J]. 电力系统自动化，2025，49(2)：1-19.
SUN Pengfei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Review on research of transient synchronization stability for grid-connected system based on power-synchronization grid-forming converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 1-19.

[15] 赵冬梅，裴建楠，白俊辉，等. 弱、极弱电网场景下构网型变流器调频能力提升技术研究[J]. 中国电机工程学报，2024，44(增刊 1)：215-226.
ZHAO Dongmei, PEI Jiannan, BAI Junhui, et al. Research on improving frequency modulation capability of grid-forming converter under weak and extremely weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(Supplement1): 215-226.

[16] 饶 宏，周月宾，李巍巍，等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(1)：1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.

[17] 饶成诚，王海云，王维庆，等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(4)：1-7.
RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 1-7.

[18] 陈晓龙，郑杰颖，杜钰珑. 基于参数灵敏度及虚拟阻抗的 VSG 并网系统稳定性提升策略[J]. 高电压技术，2025，51(12)：5963-5976.
CHEN Xiaolong, ZHENG Jieying, DU Yulong. Stability improvement strategy of VSG grid-connected system based on parameter sensitivity and virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(12): 5963-5976.

[19] 李善颖，吴 涛，任 彬，等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(16)：139-146.
LI Shanying, WU Tao, REN Bin, et al. Review of energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 139-146.

[20] 郭 龙，梁 晖，张维戈. 基于模块化多电平变流器的电池储能系统荷电状态均衡控制策略[J]. 电网技术，2017，41(8)：2688-2694.
GUO Long, LIANG Hui, ZHANG Weige. State-of-charge balancing control strategy for battery energy storage system based on modular multi-level converter[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2688-2694.

[21] LIANG G W, TAFTI H D, FARIVAR G G, et al. Analytical derivation of intersubmodule active power disparity limits in modular multilevel converter-based battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2864-2874.

[22] 程从智，徐 晨，戴 珂，等. MMC-BESS 电池荷电状态三级均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(15)：100-108.
CHENG Congzhi, XU Chen, DAI Ke, et al. Three-level balancing control for battery state-of-charge based on MMC-BESS[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 100-108.

[23] ZHU J B, SHEN Z P, BU S Q, et al. Coordinated flexible damping mechanism with inertia emulation capability for MMC-MTDC transmission systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7329-7342.

[24] 林钧杰，张浩博，向 往，等. MMC 电容能量对交流系统惯量支撑能力分析[J]. 电力系统自动化，2025，49(8)：118-128.
LIN Junjie, ZHANG Haobo, XIANG Wang, et al. Analysis on inertia support capability of modular multilevel converter capacitor energy for AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 118-128.

[25] 江守其，李卓易，李国庆，等. 柔性直流系统自适应惯性和阻尼模拟的自同步解耦控制策略[J]. 电网技术，2024，48(7)：3067-3074.
JIANG Shouqi, LI Zhuoyi, LI Guoqing, et al. Self synchronous decoupling control for adaptive inertia and damping simulation of MMC-HVDC systems[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 3067-3074.

[26] 向 往，文劲宇，张浩博，等. 柔性直流输电系统三维度控制[J]. 电网技术，2023，47(8)：3385-3395.

XIANG Wang, WEN Jinyu, ZHANG Haobo, et al. Three-degree control of MMC based high voltage direct current transmission system[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3385-3395.

[27] 李兰芳，李奇南，王子莹. 基于子模块电容电压平均值的构网型 MMC 同步控制及惯量支撑方法[J]. 电力自动化设备，2025，45(7)：138-147.
LI Lanfang, LI Qinan, WANG Ziying. Synchronous control and inertia support method for grid-forming modular multilevel converter based on average voltage of submodule capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(7): 138-147.

[28] YANG R X, SHI G, ZHANG C, et al. Internal energy based grid-forming control for MMC-HVDC systems with wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 503-512.

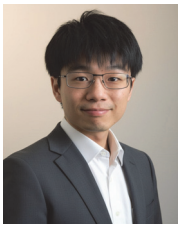
[29] 苑　宾，许建中，赵成勇，等. 模块化多电平换流器 PR 环流抑制器优化设计[J]. 中国电机工程学报，2015，35(10)：2567-2575.
YUAN Bin, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. Optimal design of PR circulating current suppressing controllers for modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2567-2575.

[30] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.



王顺亮
1987—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为高压直流输电、电力电子变流器拓扑/控制/调制/建模
E-mail: slwang@scu.edu.cn

WANG Shunliang
Ph.D., Professor



涂　皓(通信作者)
1989—，男，博士，副教授
主要研究方向为直流微网，高压直流输电
E-mail: htu@ieee.org

TU Hao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-11-17　修回日期　2026-02-02　　编辑　陈　蔓