

构网型储能变流器技术研究综述与展望

朱宝宇¹, 王英¹, 张子翔¹, 葛磊蛟^{1,2}, 马喜平³

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;
3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730070)

摘要: 随着新能源与电力电子设备的高比例接入, 新型电力系统面临惯量缺失、稳定性弱化等挑战。传统跟网型控制依赖电网电压支撑的并网模式, 导致系统频率/电压调节能力不足, 已引发多起稳定性事故, 而构网型控制通过模拟同步机特性, 使变流器具备自主构建电压/频率的能力, 显著提升系统惯量响应和阻尼特性。基于此, 首先, 本文对储能变流器的拓扑进行简要介绍, 探讨其在新能源并网中的应用潜力; 其次, 对于现有的跟网型变流器和构网型变流器进行对比总结分析并介绍现有构网控制技术; 最后, 指出构网型技术应用于变流器时所面临的难点以及对未来研究的展望。

关键词: 储能; 构网型; 变流器; 控制; 拓扑

Review and Prospects on Research of Grid-forming Energy Storage Converter Technology

ZHU Baoyu¹, WANG Ying¹, ZHANG Zixiang¹, GE Leijiao^{1,2}, MA Xiping³

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With the high proportion of new energy and power electronic devices connected to the grid, the new type of power system is facing such challenges as lack of inertia and weak stability. The traditional grid-following control relies on the grid connection mode of grid voltage support, resulting in insufficient system frequency/voltage regulation capacity, and leading to a number of stability accidents. However, the grid-forming control makes the converter possess the ability of constructing voltage/frequency independently by simulating the characteristics of synchronous machine, which significantly improves both system inertia response and damping characteristics. Based on this, firstly, the topology of the energy storage converter is briefly introduced and its potential application in new energy grid-connection is explored. Then, the existing grid-following converter and grid-forming converter are compared, analyzed and analyzed, and the existing grid-forming control technology is introduced. Finally, the difficulties encountered by the grid-forming technology in case of application to the converter and the outlook of the future research are pointed out.

Keywords: energy storage; grid-forming; converter; control; topology

0 引言

在“双碳”战略目标的驱动下, 我国新能源装机

规模呈现爆发式增长^[1]。截至2025年3月底, 全国累计发电装机容量34.3亿千瓦, 同比增长14.6%。其中, 太阳能发电装机容量9.5亿千瓦, 同比增长

收稿日期: 2025-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(52367009); 2025年甘肃省“创新之星”项目(No.2025CXZX-661); 新型电力系统运行与控制全国重点实验室开放基金课题(No.SKLD24KM23); 兰州交通大学-西南交通大学联合创新基金(No.LH2024027)。

43.4%;风电装机容量 5.4 亿千瓦,同比增长 17.2%。占全国总装机容量的 29.6%^[2],标志着电力系统已全面进入高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”发展阶段^[3-4]。新能源机组通过电力电子变流器并网的模式虽突破了传统同步发电机组的并网限制,却导致系统惯量水平显著下降,引发电压失稳、宽频振荡等新型稳定性问题。根据国家能源局统计,2022 年新能源场站引发的次/超同步振荡事件同比增长 37%,严重威胁电网安全运行。在此背景下,构网型储能技术凭借其独特的电压源特性和自主惯量支撑能力,成为破解“双高”系统稳定性困局的关键突破口^[5-14]。现代变流器的并网特性则取决于控制策略,主要分为跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)两类^[15-19]。GFL 技术依赖锁相环实时跟踪电网相位信号,以受控电流源特性实现并网跟随,但其运行高度依赖稳定交流网络,在弱电网或高阻抗场景下易因端电压波动引发失稳^[20-22]。GFM 技术则突破锁相环节限制,采用类同步电机自同步原理,通过功率交互自主调节输出电压频率,具备独立构建电网电压源的能力^[23-26],不仅可支撑弱连接系统稳定运行,还能在离网孤岛模式下为交流母线提供持续供电,从根本上重塑了电力电子设备的电网支撑范式。

本文首先简要介绍储能变流器的拓扑,通过对储能功率变换系统(power conversion system, PCS)的对比分析^[27],探讨其在新能源并网与牵引供电储能系统中的应用潜力;其次,对于现有的并网控制技术进行总结分析并介绍现有构网控制技术;最后对构网型储能变流器技术的研究应用进行分析和展望,希望对构网型储能提供合理的思路与建议。

1 储能 PCS 对比分析

作为储能 PCS 使用的电力电子变换器,文献[28]根据拓扑的结构特征,目前已使用或提出的储能 PCS 大致可分为单级、两级、三电平和级联型结构。

单级型储能 PCS 的拓扑结构见图 1,主要由新能源系统及变流器,变流器由直流端变换器及交流端口组成。单级结构中储能单元直接连接到直流母线上^[29-31],单级结构的储能 PCS 除以上采用电压源变换器的拓扑之外,也有基于电流源变换器^[32]、Z 源变换器^[33]等的拓扑。两级式 PCS 即在单级 PCS 的基础上在并网变换器和储能单元之间增加一级双向 DC/DC 变换^[34]。三电平结构采用中性点钳位型(neutral point clamped, NPC)或有源中性点钳位型

(active neutral point clamped, ANPC)拓扑,通过钳位器件实现直流母线电压的三电平输出^[35]。对于储能系统,DC/DC 变换器对开关器件要求较高,不仅要承受高压直流母线电压,还需通过较大的工作电流。并网变换器与 DC/DC 变换器的协同调控存在较高复杂度,同时需兼顾开关频率与功率容量的匹配问题。级联型 PCS 采用级联 H 桥(cascaded H-bridge, CHB)^[36]和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)^[37]这两类多电平变换器,前者拓扑虽较为简单,但储能环节伴随二次脉动功率。

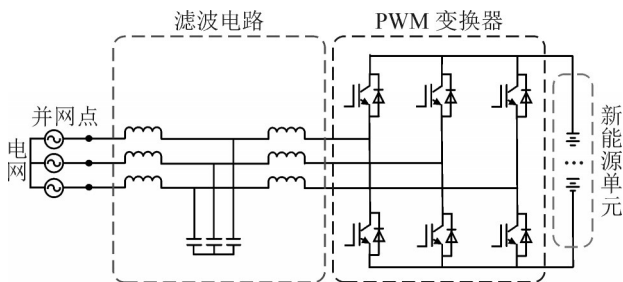


图 1 单级型储能 PCS 拓扑

Fig. 1 Topology of single-stage type energy storage PCS

典型的 MMC 桥臂拓扑结构由多个功率单元和 2 个桥臂电感依次串联构成。如图 2 所示,MMC 相对 CHB 增加了公共直流母线,该拓扑结构虽具模块化优势,但需要较多的功率器件和辅助电路,导致成本高且能量密度受限。同时其调制机制与控制复杂度较高,需集成电容电压平衡调控、环流抑制技术及冗余容错控制等。

子模块采用半桥结构,如图 3 所示,每个半桥子模块包括两个 IGBT 及一组电容器构成。令电流 i 由 A 流向 B 为正,MMC 半桥的工作方式有 4 种。表 1 给出了在不同工作模式下 MMC 子模块的状态。通过控制内部开关管的开通和关断,就能达到对子模块输出电压及其工作状态调节变换的控制效果,操作简单有效,故适用于构网型及新型电力系统的构建^[38-46]。

储能变流器拓扑对比分析表明,随着半导体器件数量的增多,拓扑复杂度逐渐上升,但同时提升了系统的电压适用范围。单级式和双级式储能变流器因结构紧凑、控制逻辑相对简化,更适用于低压场景,其中双级式架构通过增设双向 DC/DC 变换器增强了功率调节灵活性,为后续构网型拓扑优化提供了设计参考。然而,单双级式结构受限于电压支撑能力,难以适配新型电力系统的高压需求。三电平拓扑虽能生成更优的输出波形,但其电压支撑能力仍存在局限,难以满足新型电力系统的架构需求。

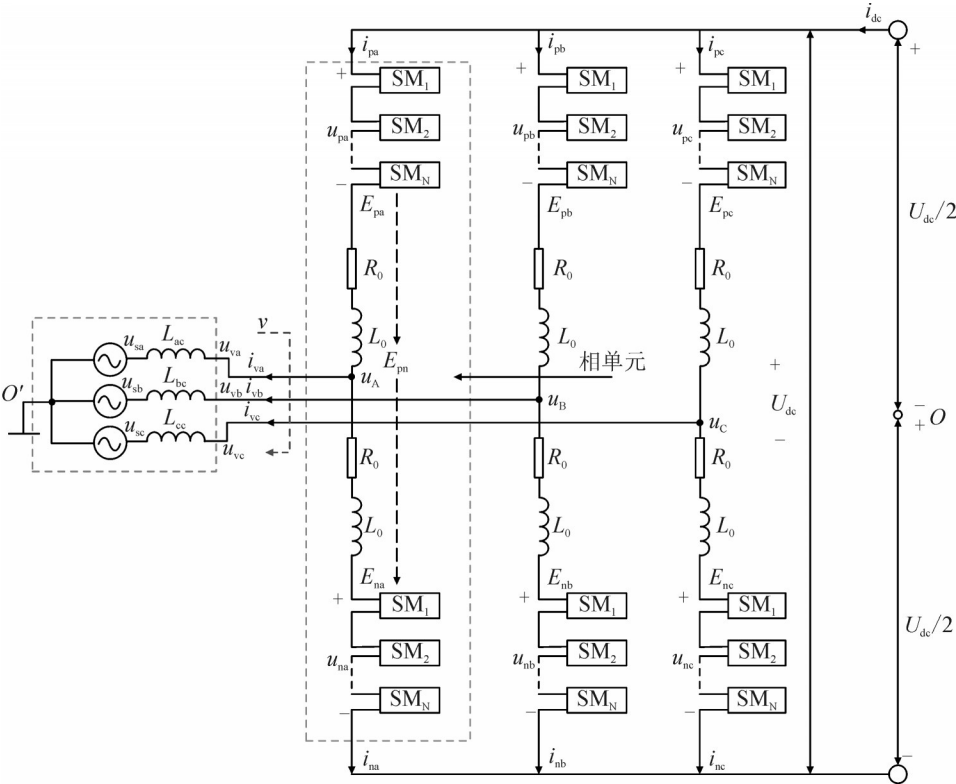


图2 MMC拓扑结构
Fig. 2 Topology of MMC

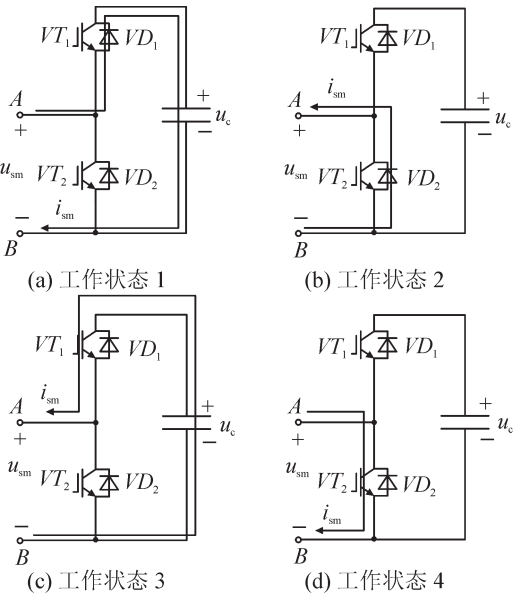


图3 MMC半桥工作原理
Fig. 3 Working principle of MMC half-bridge

表1 MMC子模块不同工作状态对比
Table 1 Comparison of MMC sub-model at different operating modes

工作状态	VT ₁ 状态	VT ₂ 状态	电压 u_{sm}	子模块状态
1	导通	关断	u_c	充电
2	关断	导通	0	切除
3	导通	关断	u_c	放电
4	关断	导通	0	切除

相比之下,级联型与 MMC 拓扑通过模块化设计突破了电压等级限制,级联 H 桥方案借助无环流特性和分布式储能单元,规避了大容量电池串并联难题;MMC 具备冗余设计和扩展优势,适配高压大功率构网型控制,模拟同步机惯性,支撑新能源并网、柔性直流及微电网,其依托公共直流母线结构显著降低储能单元的电流纹波,提升系统可靠性与配置灵活性,使其更适用于构网型变流器和新型电网架构^[47-49]。但模块化设计需配置大量电池单元,导致整体成本攀升,且多模块协同控制算法的复杂度显著增加,因此开发适配构网需求的高效控制策略成为核心技术挑战。

2 储能型并网变流器控制技术

对于接入电网的变流器,上一节给出常用的单级式拓扑结构,当实施跟网控制技术时,变流装置可等效为具备电流输出能力的可控源,而在构网控制模式下,该装置则转换为具有电压源特性的受控单元。这种控制策略的差异使得变流装置在电网中展现出多样化的运行特性。

2.1 跟网型变流器的控制技术

跟网型控制是目前变流器主要使用的控制策略,其基本控制结构及等效电路见图 4。

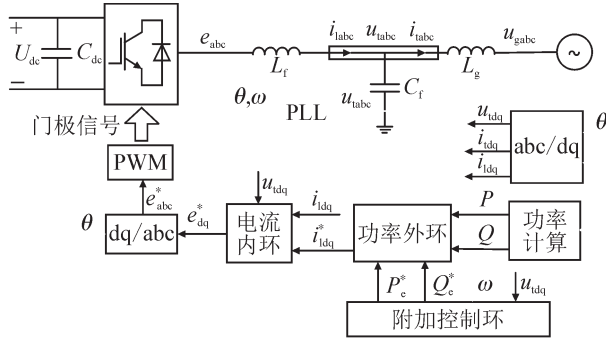


图4 跟网型变流器控制

Fig. 4 Control of grid-following type converter

跟网型控制属于电流型控制,对电网呈现电流源特性,这一特性是跟网型变流器暂态响应、阻抗特性等多项特征的基础。通过动态调节输出功率实现电网同步控制,从而提高电力网络的运行稳定性。其需要稳定的本地电压支持,然而在功率快速调节场景中,测量环节的时滞效应可能引发调控滞后问题。文献[50-51]中指出,在电网强度较弱工况下,锁相环与电流调节器之间的相互作用显著增强,这种动态交互作用会降低电流环路的稳定裕度,导致动态响应异常甚至引发系统振荡。具体而言,锁相环的相位追踪特性会与功率控制回路产生非线性耦合,当电网阻抗特性变化时,这种耦合效应会显著改变系统主导极点分布,进而引发次同步振荡等稳定性问题。

当前新能源发电机组及储能装置的并网变流器普遍采用依赖锁相环的跟网型控制策略,其运行高度依赖电网电压幅值与频率支撑,自身缺乏类似同步机的惯性响应及主动调频调压能力。随着新能源渗透率提升,系统等效惯量持续降低,电网暂态稳定性面临严峻挑战,弱电网环境下尤为突出[52-53]。案例显示,2019年英国“8·9”大停电事故[54]的诱因即为新能源机组替代同步机后系统惯量不足,频率扰动引发过大的频率波动,导致分布式电源连锁脱网并引起系统频率下降。在电压稳定性方面,以张雄特高压工程为代表的新能源集中外送系统,其送端短路比仅0.91~1.13,属于典型弱电网场景。当遭遇短路故障时,跟网型变流器因动态无功过剩易引发暂态过电压,严重制约输电能力。研究表明,此类问题源于新能源设备与电网交互特性薄弱,缺乏同步机固有的阻尼与电压支撑机制,导致系统小信号稳定性恶化。因此,亟需引入具备自主构建电压频率能力的构网型控制技术,通过模拟同步机动态特性提升新能源场站的系统支撑能力。

2.2 构网型变流器的控制技术

目前典型的构网型控制技术有下垂控制(droop control)、虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)、功率同步控制(power synchronization control, PSC)、虚拟振荡器控制(virtual oscillator control, VOC)4种构网型常见技术方案的发展历程,重点阐述各方案的关键技术以及应用领域。

2.2.1 下垂控制

传统同步发电机为主导的电力系统研究中,下垂控制作为基础性调节策略已获得广泛应用。该控制原理源于同步发电机的动态特性,即当机组输出有功功率增加时,其运行频率会随之降低,这种频率-功率的耦合特性通过电网相位差的调节作用,自然实现了多机组间的功率分配协调[55]。

随着电力电子技术的发展,该控制理念于1993年首次被移植到分布式不间断电源(uninterruptable power supply, UPS)系统中[56]。这种基于频率-有功功率曲线的自主调节机制,其突出优势在于无须依赖通信网络即可实现分布式电源间的自动负荷分配,显著提升了系统的可靠性与扩展性。

采用下垂控制的构网型变流器下垂控制结构见图5,构网型变流器的电压参考信号,经功率计算与下垂控制后与电网同步,构造方程为

$$E_{\text{set}} = \sqrt{2} E^* \left[\sin \theta \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \quad (1)$$

式中: E_{set} 表示变流器输出的参考电压有效值, V; E^* 表示参考电压有效值, V; θ 表示变流器产生的相位, rad。

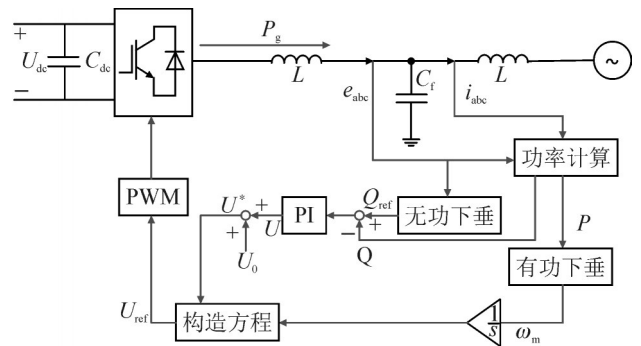


图5 构网型变流器下垂控制

Fig. 5 Sag control of grid-forming converter

典型下垂控制有功-频率和无功-电压方程为

$$\begin{cases} \omega = \omega_{\text{set}} + M_P (P_{\text{set}} - P) \\ V^* = V_{\text{set}} + M_Q (Q_{\text{set}} - Q) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_{set} 、 V_{set} 、 P_{set} 、 Q_{set} 分别为频率、电压、有功、无功的设定值; M_P 、 M_Q 为下垂系数; ω 、 V^* 分别为下

垂控制输出的频率、电压。下垂控制框图如图6所示。

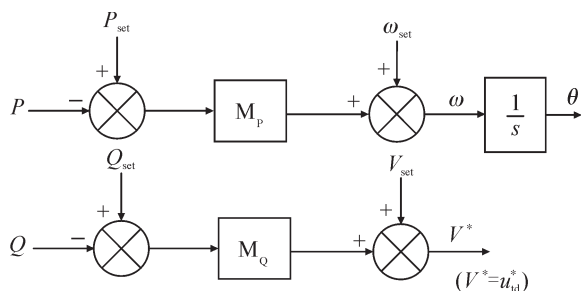


图6 下垂控制框图
Fig. 6 Sag control block diagram

文献[57]总结了下垂控制在微电网的应用,指出在可再生能源系统中,调节有功功率、无功功率、频率和电压等变量,可在孤岛模式下使用逆变器来控制 and 调整产生的电能以适应负载的需求。

在微电网应用场景下,文献[58–59]系统构建了基于传统下垂控制的逆变器多环控制体系,完整呈现了包含控制方程与结构框图在内的数学模型。研究团队通过建立精确的小信号状态空间模型,深入探究了控制参数对系统稳定性影响的定量规律,并借助仿真验证了功率均衡效果。然而这类研究存在明显局限,既未阐明传统下垂控制在负载突变及频率扰动下的暂态响应机理,也缺乏对稳态功率特性的动态过程描述。尤其是当电网遭遇扰动时,采用传统策略的逆变器会呈现频率调节速率超限、波动幅度超标等动态问题,直接导致电能质量劣化与频率稳定风险。

针对上述技术缺陷,有学者提出了惯性增强型改进方案。文献[60]在功率控制前馈通道嵌入惯性补偿单元,通过引入动态延时机制有效抑制了频率突变现象。但该研究对惯性时间常数的参数敏感度缺乏理论解析,可能导致系统动态响应速度与调节精度难以协调优化。另一改进方向体现在无功控制领域,采用微分阻尼回路重构了无功调节路径,通过建立电压渐变机制显著提升了无功波动的平抑能力。需要指出的是,该研究仅基于单机并网架构进行验证,尚未解决多机并联工况下的环流抑制与协调控制难题。

2.2.2 虚拟同步机控制

在传统发电结构中,同步发电机通过机电能量转换过程,其旋转部件自然储存的机械惯量可为电网提供频率支撑。随着新能源设备的大规模接入,虚拟同步机技术通过模拟同步发电机电枢绕组和励磁绕组的动态特性,不仅实现了直流电源与交流

电网的有效连接,更通过算法控制形成惯性支撑,有效延缓了系统频率的突变速度,为电网实施初级频率调节争取了关键时间窗口,显著提升了系统应对负荷波动的频率稳定性。

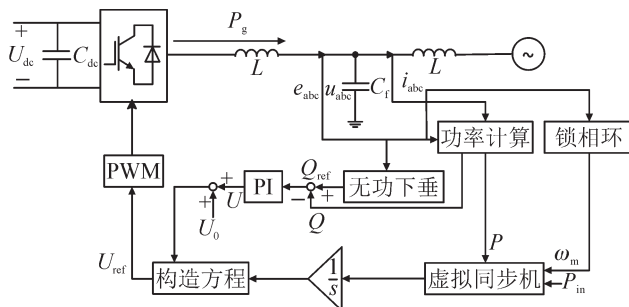


图7 构网型变流器 VSG 控制结构
Fig. 7 VSG control structure of grid-forming converter

构网型变流器采用虚拟同步机控制结构,如图7所示,以电压/频率调节为核心控制目标。其无功功率环沿用下垂控制结构,有功功率环通过模拟同步发电机转子运动方程实现调控。

典型 VSG 控制的有功-频率方程和无功-电压方程为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{(P_{\text{set}} - P)}{\omega_{\text{set}}} - D(\omega - \omega_{\text{set}}) \\ V^* = V_{\text{set}} + M_Q(Q_{\text{set}} - Q) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_{set} 、 P_{set} 分别为频率、有功的设定值; J 为转动惯量; D 为阻尼系数; ω 为 VSG 控制输出频率。从上式可看出, VSG 控制的无功-电压方程可与下垂控制相同,对应的控制框图见图8。

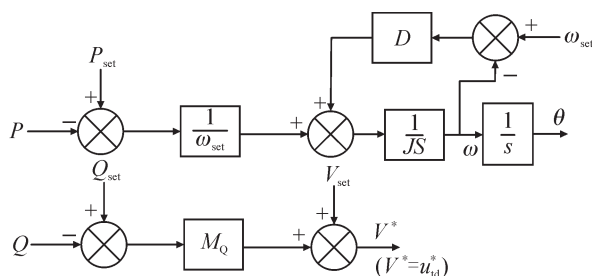


图8 VSG 控制框图
Fig. 8 Control block diagram of VSG

对比控制图, VSG 控制中惯性系数为 0 的情况等价于下垂控制^[61–62]。

并网技术标准研究方面,文献[63]系统梳理了我国新能源并网规范中构网型控制策略的技术要求,通过技术演进路径分析归纳了虚拟同步控制的关键创新点及优化路径;文献[64]重点阐释了虚拟同步机动态控制机理,从多时间尺度稳定性视角系

统解析了其在频率调节、小扰动响应和暂态稳定支撑等方面的作用机理,并针对控制策略的工程适配性提出了技术发展路线与重点攻关方向。

动态响应机理层面,虚拟同步机的阻尼惯量特性使其与下垂控制呈现显著差异。文献[65]通过多工况仿真对比揭示,VSG的二阶动态特性虽可有效抑制频率暂降速率,但会引发次生振荡风险,导致系统暂态过程稳定性劣化。

控制策略创新方面,文献[66]构建了融合自适应惯量调节的分阶滑模反推控制架构,实现孤岛暂态响应优化与并网同步稳定性的协调提升。

2.2.3 功率同步控制

在构网型并网变流器控制领域,功率同步控制通过有功功率自同步机制实现电网连接,其结构如图9所示。研究进展表明,构建的PSC功率-电压协同模型较虚拟同步机具有更优的电压支撑特性^[67];文献[68]基于相图法提出正交功率同步策略,有效增强暂态同步稳定性;文献[69]建立的小扰动相位误差模型揭示了控制参数的优化机理。相较于传统锁相环控制,该策略在同步稳定性与动态特性方面展现出显著优势。

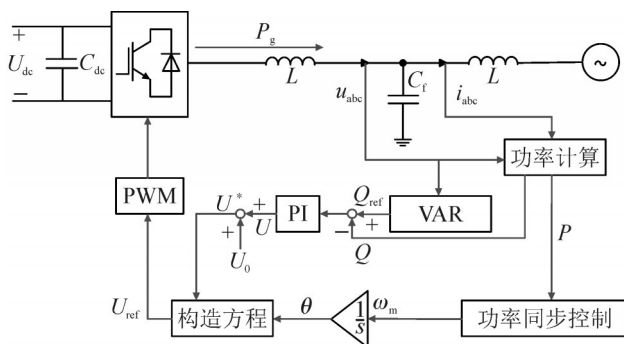


图9 构网型变流器功率同步控制结构
Fig. 9 Synchronization control structure of power of grid-forming converter

功率同步控制结构示意图见图10,其核心为功率-频率动态耦合机制,将功率误差信号转变为频率偏差量,经积分运算生成相位增量控制指令。

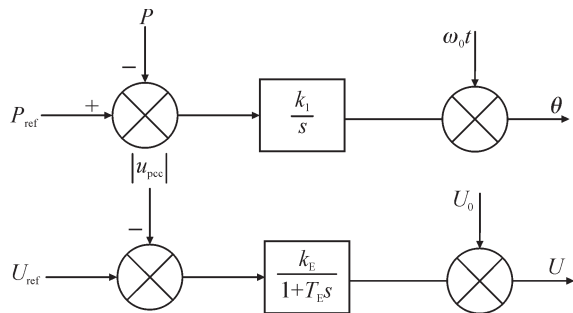


图10 功率同步控制框图
Fig. 10 Synchronization control block diagram of power

文献[70]提出光伏逆变器功率自主同步控制架构,通过动态虚拟阻抗匹配消除锁相环依赖,实现光伏系统与电网的自主功率同步,提升弱电网适应性。

文献[71]构建构网型变流器小信号阻抗模型,揭示功率同步环与电压环参数耦合机理,提出基于相位裕度修正的稳定性增强方法,突破传统功角稳定限制;文献[72]针对双馈机组弱网失稳问题,设计基于虚拟功率前馈的同步补偿策略,建立多时间尺度稳定判据,实现风电系统在10%~110%电网强度范围内的稳定运行。

2.2.4 虚拟振荡器控制

虚拟振荡器控制作为非线性控制策略^[67],在机理层面虽与虚拟同步机技术存在关联,但其数学表征体系具有显著差异性。该控制方法通过构建振荡器电路模型实现控制功能,其核心参数设定包含两个方面,电网基频同步机制以及运行特性调节模块。构网型变流器控制架构见图11,相较于传统下垂控制和虚拟同步机技术,该方案具有独特控制特征,其内环电压、电流调节器的基准信号直接来源于虚拟振荡器本体,无须构建外环功率计算环节,且整个控制过程采用开环架构实现。

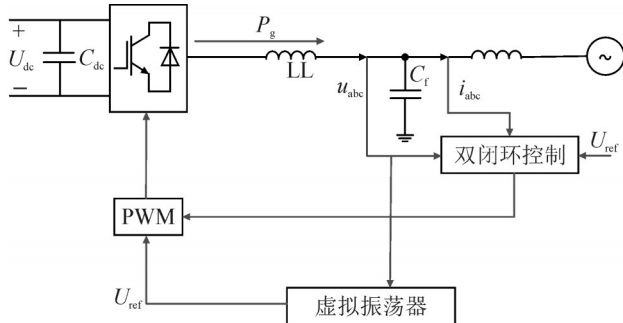


图11 构网型变流器功率同步控制结构
Fig. 11 Synchronization control structure power of grid-forming converter

常见的VOC类型有:死区振荡器、范德波尔振荡器(van der pol oscillator)和AHO振荡器(andronov-hopf oscillator)等^[74]。

范德波尔振荡器在孤岛运行模式中展现出独特优势,因其控制机理不需要传统功率计算环节,相较于下垂控制与虚拟同步发电机技术具有更优的动态响应特性。文献[75]系统阐述了该振荡器的拓扑构建原理及参数整定方法。尽管在同步精度和暂态性能方面较传统方法有所突破,但受限于并网逆变器输出电压中显著的三次谐波畸变问题,该技术目前主要适用于离网运行环境^[76]。

根据2.2小节所述,将4种构网控制技术特点总结对比见表2。

表2 控制技术对比总结
Table 2 Summary of comparison of control technologies

控制策略	下垂控制	虚拟同步发电机(VSG)	功率同步控制(PSC)	虚拟振荡器控制(VOC)
控制原理	模拟同步机特性	构建同步机电暂态模型	基于功率-相角同步机制实现自同步	非线性振荡器电路输出参考电压信号
动态响应	较慢(受下垂系数限制)	中等(受虚拟惯量调节影响)	较快(依赖功率动态跟踪)	快(无功功率环计算延迟)
电网适应性	强电网适用	弱电网/孤岛均适用	弱电网适应性突出	仅适用于孤岛模式
应用	并网与离网	弱电网或离网	弱电网	离网

下垂控制具有结构简单、可靠性好且经济性高的优势,其动态响应速度在常规控制方式中表现较佳。然而其缺乏等效惯量和阻尼调节功能,容易引发电网频率波动及电压失稳问题,同时伴随输出电压调节精度欠佳的问题,输出电流谐波分量会直接影响电能质量。与之形成对比的是虚拟同步机控制,虽然参数整定过程较复杂,但通过引入惯性和阻尼模块显著改善了系统动态性能,特别适用于多机并联运行环境,具备优异的功率均衡能力。功率同步控制在稳定性方面优于传统同步电机的双重积分结构,不仅可有效提升弱电网条件下的电能传输容量,当引入直接电压控制时还能增强系统阻尼特性,并有效抑制次同步振荡。该控制方式具备宽域功率调节能力、强电网适应性和高稳定裕度等优势,但存在控制系统复杂度较高的挑战。虚拟振荡器控制通过独特设计摆脱了传统功率计算环节,在动态响应速度方面超越下垂控制与虚拟同步机方案。然而其输出电压中三次谐波占比过高,导致该技术存在并网应用限制,主要适用于离网运行场景。

3 结语

构网型技术凭借其功率同步、惯性响应及自主构建电网的能力,在风电、储能、混合供电等场景中展现了关键作用,但其大规模工程化仍面临挑战。例如,苏格兰 Dersalloch 风电场、南澳 Hornsdale 储能项目及中国湖北荆门、山东莱芜等地的构网型储能电站实践表明,需进一步解决变流器参数优化、多机并联协同、弱电网适应性以及构网技术标准化进程等问题。国家能源局已发布《电力系统新型储能技术标准体系》,推动构网型逆变器、虚拟同步机等技术标准;南方电网提出“构网型风光储”技术规范,明确动态支撑能力要求,欧盟通过“超级电网”计划统一跨国能源调度标准。随着技术方法的革新及跨学科融合的持续推进,必将为新能源并网控制领域注入新的理论突破与系统性解决方案。

对于构网型控制技术,后续可从以下方面进行深入研究:

1)研究跟网/构网型控制混合组网控制技术。构网/跟网混合储能系统的优化配置将成为未来工程实践的主流方向。纯构网型储能方案虽然能提供更好的电网支撑,但经济性较差,而合理搭配构网型和跟网型储能,可在保证系统稳定性的同时降低总成本。如文献[77]以混合风电场为对象,对比 GFM 与 GFL 变流器的阻抗特性差异,结合频域阻抗模型与时域仿真,指出 GFM 变流器对高频振荡的抑制作用及中低频段潜在风险;文献[78]针对配电网中 GFM/GFL 光伏逆变器混联场景,设计有功-无功双层优化模型,兼顾经济性与电压稳定性。因此建立考虑技术性能、经济成本和环境效益的多目标优化模型。特别是针对不同应用场景,应制定差异化的混合配置方案。

2)构网型储能技术应用于牵引供电系统。储能技术也是分布式发电及微网、新型轨道交通供电的关键支撑^[79]。新能源接入铁路牵引供电系统主要有三相、两相、单相及直流等并网方式。考虑到机车单相取电特性,单相变流器接入方案更具灵活性与适配性。然而,新能源波动性与机车负荷随机性的叠加效应会降低系统强度,引发母线电压/频率稳定性下降,增加失稳风险^[80-82]。构网型变流器具备电压源特性,可主动支撑电压/频率,增强电网抗扰动能力,是提升系统稳定性的有效手段。

3)自适应与智能控制算法的深化研究。现有研究表明,固定参数的构网控制策略难以适应多变电网条件下的稳定性要求,特别是在弱电网、高比例新能源接入等复杂场景下,基于改进 LADRC 的构网型储能调频控制策略已证明自适应控制在频率支撑方面的优势^[83],未来可进一步探索将模型参考自适应控制、滑模变结构控制等先进理论应用于构网型储能的电压调节、功率分配等多个控制环节。特别是针对海上风电、孤岛微网等特殊应用场景,自适应控制算法可根据实时电网状态自动调整控制参数,实现“因网制宜”的精准支撑。

4)数字孪生与先进仿真技术的深度融合。数字孪生技术将为构网型储能的研发和应用提供强

大工具。构网型储能系统的性能高度依赖电网运行条件,传统离线测试和仿真难以覆盖所有可能的运行场景。数字孪生通过建立物理系统的高保真虚拟模型,并实现与实体系统的实时数据交互,可支持构网型储能的全生命周期优化。未来研究应重点突破构网型储能数字孪生的多尺度建模方法、实时仿真算法和硬件在环测试技术,构建覆盖从器件、设备到系统的完整孪生体系^[84-85]。

随着可再生能源发电占比持续攀升,电力系统运行特性正经历显著转变。研究表明,传统跟网型变流器的单一控制模式已无法满足新型电网运行需求。本文系统梳理了现有技术路线中基于多维度控制理念的变流器调控方法,涵盖不同控制架构与理论体系,进而提出潜在研究方向。在推进清洁能源系统建设进程中,亟需学界协同创新,深化电力电子装备关键技术攻关,助力构建新型电力系统基础设施,切实支撑能源互联网发展战略,加速实现国家双碳目标愿景。

参考文献

- [1] 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(1):277-297.
Liu Hui, Yu Siqi, Sun Dawei, et al. Review of grid-forming converter control technologies and principles[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-297.
- [2] 国家能源局.2025年1-3月份全国电力工业统计数据[R]. (2025-04-20) [2024-04-29]. <https://www.nea.gov.cn/20250420/ea90b16331c446a1bad218c4b3c0df7d/c.html>.
- [3] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New stability issues and classification discussion for dual-high power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [4] 冯长有.“双高”电力系统多能互补网源协调技术与应用.新疆维吾尔自治区[R]. (2021-08-14) [2024-04-29]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=eo3P1e0toG4cTGILU4vQOIRCE2uwEm64kj8rpDGfXj3S6>.
- [5] 杨鹏,刘锋,姜齐荣,等.“双高”电力系统大扰动稳定性:问题、挑战与展望[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):403-414.
YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of dual-high power systems: Challenges and prospects[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2021, 61(5): 403-414.
- [6] 刘淇玉,李永刚,王月,等.构网型并网逆变器状态空间建模及稳定性分析[J].华北电力大学学报,2024,51(1):83-93.
LIU Qiyu, LI Yonggang, WANG Yue, et al. State-space modeling and stability analysis of grid-forming grid-connected inverters[J]. Journal of North China Electric Power University, 2024, 51(1): 83-93.
- [7] 李翼翔,田震,唐英杰,等.考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J].电力自动化设备,2022,42(8):11-18.
LI Yixiang, TIAN Zhen, TANG Yingjie, et al. Small-signal stability analysis of islanded microgrid considering interaction between grid-forming and grid-following inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 11-18.
- [8] 赵炳洋,赵波,张芳,等.构网型逆变器技术综述[J].北京信息科技大学学报,2022,37(4):57-67.
ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, ZHANG Fang, et al. Review of grid-forming inverter technologies[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2022, 37(4): 57-67.
- [9] 胡宇飞,田震,查晓明,等.构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J].电力系统自动化,2022,46(24):121-131.
HU Yufei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Impedance stability analysis and enhancement strategies for islanded microgrid dominated by grid-forming and grid-following converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 121-131.
- [10] 詹长江,吴恒,王雄飞,等.构网型变流器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(6):2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. Review of grid-forming converter stability research[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [11] 袁小明,何维.动态过程的幅频调制统一本质与系统稳定问题分类及新能源发电电网能力创新[J].电源学报,2021,19(6):1-9.
YUAN Xiaoming, HE Wei. Unified amplitude-frequency modulation nature of dynamic processes and system stability classification with grid-forming innovation for renewable generation[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 1-9.
- [12] ZHONG Qingchang, WEISS Q. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [13] RODRÍGUEZ P, CITRO C, CANDELA J I, et al. Flexible grid connection and islanding of SPC-based PV power converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2690-2702.
- [14] J. MATEVOSYAN. Grid-forming inverters: Are they the key for high renewable penetration[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2023, 21(2): 77-86.
- [15] LASSETER R H, CHEN Zhe, PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: A critical asset for the power grid[J].

- IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 925-935.
- [16] C. LI, Y. HUANG, H. DENG, et al. Comparison on frequency stability of high inverter penetration power system with different grid-forming controls[C]//2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPE-SA). Singapore: IEEE, 2022: 374-380.
- [17] 张兴,李明,郭梓暄,等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515. ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and prospects of control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515.
- [18] 秦世耀,齐琛,李少林,等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1333. QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Research status and prospects of grid-forming voltage source wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1333.
- [19] 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 essence and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590-604.
- [20] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [21] B. FAN, T. LIU, F. ZHAO, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[C]//IEEE Open Journal of Power Electronics, [S.l.], 2022(3): 955-969.
- [22] 程亮. 跟网型变流器并网系统同步稳定性研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [23] 李悦. 基于非线性解耦的并网变流器暂态稳定性分析方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [24] R. ROSSO, X. WANG, M. LISERRE, et al. Grid-forming converters: An overview of control approaches and future trends[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA: IEEE, 2020: 4292-4299.
- [25] G. SONG, B. CAO AND L. CHANG, Review of grid-forming inverters in support of power system operation[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 8(1): 1-15.
- [26] 刘佳宁. 高比例风光并网系统稳定机理与功率振荡分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [27] 马凌怡, 肖珩, 李雅欣, 等. 电化学储能双级式PCS对比分析[J]. 电气应用, 2022, 41(3): 15-21. MA Lingyi, XIAO Heng, LI Yaxin, et al. Comparative analysis of two-stage PCS for electrochemical energy storage[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(3): 15-21.
- [28] WANG Ying, XIN Yueyang, CHEN Xiaoqiang. Research on low-frequency stability under emergency power supply scheme of photovoltaic and battery access railway traction power supply system [J]. Energies, 2023, 23(1): 4814-4836.
- [29] MIAO Z, XU L, DISFANI V. R, et al. An SOC-based battery management system for microgrids [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2014, 5(2): 966-973.
- [30] SERBAN I., MARINESCU C. Control strategy of three-phase battery energy storage systems for frequency support in microgrids and with uninterrupted supply of local loads [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2014, 29(9): 5010-5020.
- [31] KAI L., HONGBING X., QIAN M., et al. Hierarchy control of power quality for wind-battery energy storage system[J]. IET Power Electron., 2014, 7(8): 2123-2132.
- [32] LIXIA Z., WEI K., LI J., et al. Control of bidirectional current source SVPWM converter in the power AC cumulator battery testing system[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), [S.l.], 2010: 1-4.
- [33] RABKOWSKI J. The bidirectional Z-source inverter for energy storage application[C]//European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), [S.l.], 2007: 1-10.
- [34] SOONG T., LEHN P. W. Evaluation of emerging modular multilevel converters for BESS applications [J]. IEEE Trans. Power Deliv., 2014, 29(5): 2086-2094.
- [35] 陈强. 三电平储能变流器的研制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 122-124. CHEN Qiang. Development of three-level energy storage converter[J]. Power Electronics, 2021, 55(3): 122-124.
- [36] VASILADIOTIS M., RUFER A. Analysis and control of modular multilevel converters with integrated battery energy storage [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30(1): 163-175.
- [37] BARUSCHKA L, MERTENS A. Comparison of cascaded H-bridge and modular multilevel converters for BESS application[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011: 909-916.
- [38] 肖迁, 于浩霖, 金昱, 等. 面向中压直流配电网的模块化多电平电池储能系统电荷吞吐量抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6482-6494. XIAO Qian, YU Haolin, JIN Yu, et al. Charge throughput suppression strategy for modular multilevel battery energy storage system in medium-voltage DC distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6482-6494.
- [39] 余婕. 基于模块化多电平光储混合并网逆变器的运行及控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [40] 庞笑雨. 基于 MMC 的储能型光伏并网逆变系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [41] 蔡婉琪. 基于模块化多电平换流器的混合储能系统研

- 究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [42]丁超,裘鹏,张文超,等.一种储能型MMHC拓扑结构的研究[J].浙江电力,2021,40(9):24-31.
DING Chao, QIU Peng, ZHANG Wenchao, et al. Research on MMC-based energy storage topology[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(9): 24-31.
- [43]杨志才.储能型MMC在风储并网系统应用的关键技术研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [44]陈民武,陈天舒,代先锋,等.基于MMC的储能型同相供电系统模型及控制策略[J].中国铁道科学,2022,43(3):132-143.
CHEN Minwu, CHEN Tianshu, DAI Xianfeng, et al. MMC-based energy storage co-phase power supply system model and control strategy[J]. China Railway Science, 2022, 43(3): 132-143.
- [45]余欣洋,王琛,王毅,等.储能型模块化多电平换流器的桥臂级平均值模型及运行特性分析[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-11[2025-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20230707.2003.004.html.
YU Xinyang, WANG Chen, WANG Yi, et al. Arm-level average model and operational characteristics analysis of energy storage modular multilevel converter[J/OL]. Journal of North China Electric Power University, 1-11[2025-03-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20230707.2003.004.html.
- [46]吴伟亮,黄朝志,刘细平,等.基于模块化多电平变换器的光伏发电系统[J].计算机仿真,2024,41(6):120-128.
WU Weiliang, HUANG Chaozhi, LIU Xiping, et al. Photovoltaic power generation system based on modular multilevel converter[J]. Computer Simulation, 2024, 41(6): 120-128.
- [47]刘黎,杨仁炘,施刚,等.含电流内环的构网型MMC新型交流电压构建策略及参数设计[J].电力系统保护与控制,2025,53(7):27-39.
LIU Li, YANG Renxin, SHI Gang, et al. New AC voltage construction strategy and parameter design for grid-forming MMC with current inner loop[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 27-39.
- [48]高本锋,沈雨思,宋瑞华,等.虚拟同步机控制模块化多电平变流器阻抗建模及次/超同步振荡稳定性分析[J].电工技术学报,2025,40(2):559-573.
GAO Benfeng, SHEN Yusi, SONG Ruihua, et al. Impedance modeling and sub-/super-synchronous oscillation stability analysis of virtual synchronous machine controlled modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(2): 559-573.
- [49]王辉,王勇,张晓滨,等.构网型分布式电源渗透率高的微电网潮流计算及优化控制[J].电网与清洁能源,2024,40(4):35-43.
WANG Hui, WANG Yong, ZHANG Xiaobin, et al. Power flow calculation and optimization control of the microgrid with high penetration of grid-forming distributed generators[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4): 35-43.
- [50]D. ZHU, S. ZHOU, X. ZOU, et al. Improved design of PLL controller for LCL-type grid-connected converter in weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4715-4727.
- [51]P. M. REZAYI, M. ZOLGHADRI, F. MOHAMMADI, et al. PLL-less active and reactive power controller for three-phase grid-connected power converters[C]//2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Prague, Czech Republic: IEEE, 2022: 1-6.
- [52]李雨果,易皓,姜鑫,等.极弱电网下新能源跟网逆变器低频振荡的机理探究与暂态无功过补稳定性提升策略[J].中国电机工程学报,2023,43(2):482-495.
LI Yuguo, YI Hao, JIANG Xin, et al. Mechanism researching on low-frequency resonance of renewable energy grid-following inverters under very weak grid and the stability-improving strategy based on dynamic reactive power over compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 482-495.
- [53]胡祺,付立军,马凡,等.弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J].中国电机工程学报,2021,41(1):98-108.
HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Small signals synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 98-108.
- [54]孙华东,许涛,郭强,等.英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6192.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [55]BERGEN A R. Power systems analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1986.
- [56]CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPAR. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(1): 136-143.
- [57]朱振康.微电网多功能并网逆变器多模态控制策略研究[D].北京:北方工业大学,2024.
- [58]张明锐,杜志超,王少波.微网中下垂控制策略及参数选择研究[J].电工技术学报,2014,29(2):136-144.
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo. Research on droop control strategy and parameter selection in mi-

- crogrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 136-144.
- [59] 张明锐, 黎娜, 杜志超, 等. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 9-19.
- ZHANG Mingrui, LI Na, DU Zhichao, et al. Parameter selection and stability analysis for microgrid control based on small-signal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 9-19.
- [60] 吴萍. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略初探[J]. 国网技术学院学报, 2018, 21(3): 28-30.
- WU Ping. Preliminary study on virtual inertial frequency control strategy for microgrid power sources[J]. Journal of State Grid Technology College, 2018, 21(3): 28-30.
- [61] 杨帆, 张辉, 王帆, 等. 微电网逆变器惯性电压下垂控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(12): 93-94.
- YANG Fan, ZHANG Hui, WANG Fan, et al. Research on inertial voltage droop control strategy for microgrid inverters[J]. Power Electronics, 2018, 52(12): 93-94.
- [62] YU J, QI Y, DENG H, et al. Evaluating small-signal synchronization stability of grid-forming converter: a geometrical approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9087-9098.
- [63] 刘钊汛, 秦亮, 杨诗琦, 等. 面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 1-16.
- LIU Zhaoxun, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Review of virtual synchronous control methods for power electronic converters in new power systems[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 1-16.
- [64] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
- CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Positioning and application prospects of virtual synchronous machines in new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [65] M. WANG, K. MENG, L. YUAN, et al. Comparative synthetic inertia assessment between droop and virtual synchronous generator control for weak grids integration[C]// 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Nanjing, China: IEEE, 2022: 4493 - 4498.
- [66] 滕奇. 基于虚拟同步机的逆变器协调控制策略研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [67] L. HARNEFORS, M. HINKKANEN, U. RIAZ, F, et al. Robust analytic design of power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 5810-5819.
- [68] 王顺亮, 孙瑞婷, 马俊鹏, 等. 弱电网下并网逆变器正交功率同步控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8475-8486.
- WANG Shunliang, SUN Ruiting, MA Junpeng, et al. Orthogonal power synchronization control strategy for grid-connected inverters in weak grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8475-8486.
- [69] 侯川川, 刘澳, 朱森, 等. 基于功率同步控制的逆变器并网相位误差机理[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1962-1974.
- HOU Chuanchuan, LIU Ao, ZHU Miao, et al. Phase error mechanism of grid-connected inverters based on power synchronization control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1962-1974.
- [70] 赵鹏翔, 郭东旭, 杨佳霖, 等. 基于功率自主同步的构网型光伏逆变器控制[J]. 电力电子技术, 2024, 58(9): 61-64.
- ZHAO Pengxiang, GUO Dongxu, YANG Jialin, et al. Control of grid-forming PV inverters based on autonomous power synchronization[J]. Power Electronics, 2024, 58(9): 61-64.
- [71] 方正, 黄云辉, 严文博, 等. 构网型变流器功率同步控制稳定性机理分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(19): 101-108.
- FANG Zheng, HUANG Yunhui, YAN Wenbo, et al. Stability mechanism analysis of power synchronization control for grid-forming converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 101-108.
- [72] 高翔. 弱电网下功率同步构网型双馈风电机组稳定性分析与优化控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [73] 屠勇, 苏建徽, 杨向真, 等. 虚拟振荡器控制的新型逆变器无线并联方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4184-4192.
- TU Yong, SU Jianhui, YANG Xiangzhen, et al. Wireless parallel scheme for novel inverters with virtual oscillator control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4184-4192.
- [74] 潘鹏程, 任梦维, 王世青, 等. 不平衡电网下基于虚拟振荡器控制的并网逆变器控制策略[J/OL]. 现代电子技术, 1-9[2025-04-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1224.tn.20241219.1709.002.html>.
- PAN Pengcheng, REN Mengwei, WANG Shiqing, et al. Grid-connected inverter control strategy based on virtual oscillator control under unbalanced grid conditions[J/OL]. Modern Electronics Technique, 1-9[2025-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1224.tn.20241219.1709.002.html>.
- [75] B.B. JOHNSON, M. SINHA, N.G. AINSWORTH, et al. Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 6002-6015.

- [76] 贝太周, 王萍, 蔡蒙蒙. 注入三次谐波扰动的分布式光伏并网逆变器孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 44-51.
BEI Taizhou, WANG Ping, CAI Mengmeng. Islanding detection technology for distributed PV grid-connected inverters using third harmonic injection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 44-51.
- [77] 高本锋, 刘培鑫, 孙大卫, 等. 构网/跟网型混合风电场次同步振荡特性与机理分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(6): 1945-1959.
GAO Benfeng, LIU Peixin, SUN Dawei, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics and mechanism analysis in hybrid wind farms with grid-forming/grid-following converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6): 1945-1959.
- [78] 付利达, 贾清泉, 孙玲玲, 等. 构网/跟网型光伏逆变器互联的配电网有功无功双层调压策略[J/OL]. 电力系统自动化, 1-18[2025-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250219.1127.002.html>.
FU Lida, JIA Qingquan, SUN Lingling, et al. Dual-layer active/reactive power voltage regulation strategy for distribution networks with hybrid-parallel grid-forming/grid-following PV inverters[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-18 [2025-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250219.1127.002.html>.
- [79] 舒印彪, 范建斌, 李群, 等. 国际电工委员会《以新能源为主体的零碳电力系统》白皮书解读[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 1-10.
SHU Yinbiao, FAN Jianbin, LI Qun, et al. Interpretation of IEC white paper zero-carbon power systems with renewable energy as the mainstay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 1-10.
- [80] 王英, 辛月阳, 陈小强, 等. 光储接入牵引供电系统应急供电方案下低频稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 12(11): 1-15.
WANG Ying, XIN Yueyang, CHEN Xiaoqiang, et al. Research on low-frequency stability of PV-storage integrated traction power supply system under emergency power supply scheme[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 12(11): 1-15.
- [81] 孟昭斐, 胡海涛, 周毅. 电力机车运行工况对车网系统低频振荡的影响规律研究[J]. 电气工程学报, 2022, 17(2): 131-141.
MENG Zhaoifei, HU Haitao, ZHOU Yi. Research on the influence law of electric locomotive operating conditions on the low frequency oscillation of vehicle network system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(2): 131-141.
- [82] 葛磊蛟, 林可愿, 任丽苗, 等. 多能互补接入下贯通式柔性铁路牵引供电系统运行状态感知技术综述[J/OL]. 电力电容器与无功补偿, 1-15[2025-05-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1468.TM.20241119.1431.002.html>.
GE Leijiao, LIN Kewang, REN Limiao, et al. A review of operating state sensing technology of through-flexible railroad traction power supply system under multi-energy complementary access[J/OL]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 1-15[2025-05-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1468.TM.20241119.1431.002.html>.
- [83] 李建林, 卢冠铭, 游洪源, 等. 基于改进LADRC的构网型储能调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 142-154.
LI Jianlin, LU Guanming, YOU Honghao, et al. Research on grid-forming energy storage frequency regulation control strategy based on improved LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 142-154.
- [84] 刘雨珊, 陈俊儒, 常喜强, 等. 构网型储能变流器并网性能的多层级评价指标体系及应用[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 193-203.
LIU Yushan, CHEN Junru, CHANG Xiqiang, et al. Multi-level evaluation index system and application for grid-forming energy storage converter grid-connection performance[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 193-203.
- [85] 吴家杰, 陈新, 张东辉, 等. 构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9341-9354.
WU Jiajie, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. Stability analysis and enhancement strategies for grid-forming energy storage converters in renewable energy integration scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9341-9354.

作者简介:

朱宝宇(2002—),男,硕士研究生,研究方向为构网型储能方面的研究。E-mail:1063404453@qq.com。

王英(1978—),男,教授,研究方向为牵引“源-网-荷-风光储”多源供电、高速铁路“弓-车-网-桥-隧”动力学和人工智能、信息处理在电力系统的应用等。E-mail:wangying01@mail.lzjtu.cn。

张子翔(2002—),男,硕士研究生,研究方向为光储接入牵引供电系统稳定性方面的研究。E-mail:528939226@qq.com。

葛磊蛟(1984—),男,副教授,研究方向为智能配电网态势感知、新能源并网优化控制和人工智能赋能微电网/配电网等。E-mail:239255951@qq.com。

马喜平(1987—),男,博士,研究方向为新能源并网技术及电网降损节能技术。E-mail:maxpgs@163.com。