

电力电子设备主动支撑电网安全稳定运行 关键技术与展望

文劲宇^{1,2}, 林钧杰^{1,2}, 张劭鹏^{1,2}, 底昊天^{1,2}, 张浩博^{1,2}, 向往^{1,2*}

1. 华中科技大学强电磁技术全国重点实验室, 武汉 430074

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074

* E-mail: xiangwang1003@hust.edu.cn

收稿日期: 2025-05-25; 接受日期: 2025-09-22; 网络版发表日期: 2026-01-06

国家自然科学基金重点项目(批准号: 52237004)资助项目

摘要 “双碳”战略驱动下, 源-网-荷-储设备的电力电子化成为新型电力系统的发展趋势. 电力电子设备在提升电网灵活性和可再生能源消纳能力的同时, 带来了低惯量、低阻尼、弱抗扰以及宽频振荡等问题. 面向新型电力系统新特征, 如何优化电力电子设备的控制性能, 提升设备的主动支撑能力将成为保障新型电力系统安全稳定运行的关键. 本文首先从电网形态变革出发, 总结电力电子化电力系统的新特征, 提出电力电子设备需从“被动跟随”向“主动支撑”转型的核心需求. 接着, 从空间、时间尺度以及功能维度揭示电力电子设备的支撑潜力, 探索新型电力系统“谁来支撑”的关键问题. 进一步, 面向电力电子设备“如何支撑”, 从变流器控制、支撑能力量化、多设备协同等多角度探讨主动支撑体系构建方法. 最后从高性能开关器件、变流器先进控制和电网安全方面指出电力电子设备怎么“更好支撑”, 对未来主动支撑技术的发展进行展望.

关键词 新型电力系统, 电力电子设备, 主动支撑, 变流器控制, 电网安全稳定

1 引言

电力电子设备因其电能变换等方面的灵活性, 近年来被广泛应用于可再生能源发电、直流输电、配网供电等多环节. 源-网-荷-储的电力电子化成为我国电网发展的必然趋势. 以南方电网为例, 电力电子容量渗透率在2025年已达近30%, 预计到2030年将达到40%, 2060年将超过50%^[1]. 然而, 电力电子化趋势在提升电网灵活性和清洁能源消纳能力的同时, 深刻改变了电力系统的动态特性, 给电网的安全稳定运行带

来了新挑战^[2,3].

传统电力系统以同步电机为主导电源, 其固有的转动惯量、阻尼特性及同步支撑能力可为电网提供稳定的频率和电压^[4]. 相比之下, 电力电子设备过压过流能力弱、不具备转动惯量, 且多时间尺度控制的动态耦合加剧了系统宽频振荡的风险^[5]. 这使得电力电子化电力系统呈现低惯量、低阻尼、弱抗扰等特征, 安全稳定风险突出^[6]. 例如, 张北柔直电网示范工程投运后, 随着新能源并网容量增加, 发生了一系列宽频振荡问题, 严重影响系统运行^[7].

引用格式: 文劲宇, 林钧杰, 张劭鹏, 等. 电力电子设备主动支撑电网安全稳定运行关键技术与展望. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 113–133
Wen J Y, Lin J J, Zhang S P, et al. Key technologies and prospects for power electronic devices in supporting power grid security and stable operation
(in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 113–133, doi: [10.1360/SST-2025-0116](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0116)

相比传统电力系统, 电力电子化变革下新型电力系统源-网-荷-储各环节运行工况复杂多样, 使主动支撑内涵和要求更为丰富, 在传统的频率/电压支撑和同步稳定基础上, 还需并网设备具备多频段振荡抑制、主动带孤网运行、故障后黑启动等多种能力。传统以同步机为主的稳定调控资源和技术难以满足新型电力系统的安全稳定需求, 需要研究更先进、更适合电网形态的主动支撑技术。电力电子设备通过变流器连接电网, 控制灵活、响应速度快, 虽然在抗扰性、功率支撑能力以及惯量等方面劣于传统同步电源, 但变流器的强控制和快速响应特性使电力电子设备的主动支撑成为可能, 并具备独特的优势。通过主动控制变流器, 电力电子设备可从对电网“被动跟随”向“主动支撑”转变, 在电网故障/扰动时调用新能源、储能等设备内部能量支撑频率/电压^[8-10], 并协助维持同步稳定性^[11], 亦可通过控制环路重构等措施增强等效阻尼, 抑制多频段振荡风险^[12]。

随着电力电子设备在源-网-荷-储各环节的不断渗透, 充分挖掘调用源-网-荷-储全环节电力电子设备的主动支撑能力, 将是提升新型电力系统安全稳定运行水平的关键技术。因此, 面向电力电子设备对电网安全稳定运行的主动支撑技术发展, 本文首先总结了电力电子化系统的新特征, 提出电力系统安全稳定运行的新需求。接着, 围绕新型电力系统“谁来支撑”-“如何支撑”-“更好支撑”三个关键问题展开论述: 从多空间、时间尺度分析源-网-荷-储全链路电力电子设备的支撑潜力, 总结不同设备的支撑特性, 探究新型电力系统“谁来支撑”的关键问题。在此基础上, 从单设备“控制技术-量化反馈”的闭环出发, 介绍电力电子设备在主动支撑型控制、支撑能力量化分析等不同层面的关键技术, 并进一步总结多设备的协同配合和定容配置方案, 分析支撑设备“如何支撑”。最后, 针对电力电子设备的“更好支撑”, 从高性能半导体器件发展、设备控制策略革新和电网安全进行展望。本文各章节内容的逻辑框架如图1所示。

2 电力系统新特征与新需求

2.1 电网运行新特征

随着能源清洁化转型加速推进^[13], “双高”趋势使得电网形态向“源-网-荷-储”多元互动模式不断演化,

系统安全稳定运行呈现出区别于传统电力系统的新特征。

在源侧, 保证电源与负荷的电力电量平衡是电网安全运行的刚性要求^[14]。传统电力系统中, 负荷具有随机性, 电源出力相对稳定且可根据负荷自动调节, 呈现“源-荷”单侧随机特性。然而在新型电力系统中, 电源与负荷的电力电量平衡呈现出双侧随机性的新特点, 供需匹配难度显著增加。此外, 新能源出力受气候、气象等客观因素制约且不可控, 无法根据负荷灵活调节, 电力电量实时平衡的挑战随着新能源渗透率的提升日益严峻^[15,16]。

在网侧, 我国已建成“22交20直”交直流特高压互联大电网与若干高压直流输电、背靠背电网互联、嵌入式直流等工程, 部分负荷电网外来电比重加大, 形成了“强直弱交”格局^[17], 电网应对故障能力被大幅削弱, 电压稳定性恶化。同时, 极端气候灾害易导致电网出现极端运行场景。例如, 台风、山火等造成大量输电杆塔、变电站损坏, 严重威胁电网保供电。此外, 受限于地理与气候因素, 以沙戈荒、西南水风光基地为代表的送端电源处于电网末端, 电网支撑能力弱, 甚至存在“孤岛化”送出问题。

在荷侧, 随着我国终端能源消费电气化的推进, 交通、工业、建筑、信息技术、服务业等领域的用电特性使负荷供电更加复杂。电动汽车等新型负荷的运行规律难以预测, 电力市场动态影响用电行为, 加之夏冬季制冷/制热需求导致“双高峰”负荷特征等长时间尺度的问题, 负荷侧的随机特性复杂多变。另一方面, 以城市应急指挥中心、医院等核心基础设施、超算中心等为代表的重要用户对电网提出了更高的要求, 除了提供高质量电能外, 还需具有故障穿越与快速自恢复能力。

在储能侧, 近十年来, 电化学储能、压缩空气储能、氢能等新型技术快速发展。以电化学储能为例, 其功能从峰谷调节发展至惯量支撑、振荡抑制、黑启动等, 可助力解决电力系统“促消纳”和“保供电”两大需求。2024年10月, 英国-北欧联络线突发故障, 挪威出口到英国的电力从1400 MW骤降至0, 英国电网频率在2 s内降至49.59 Hz。根据Kraken平台(英国电网服务平台)数据, 签订了频率服务合同的电池储能系统提供了超过450 MW的响应容量, 占损失量的约1/3, 有力支撑了英国电网频率的恢复^[18]。在储能并网拓扑方面,

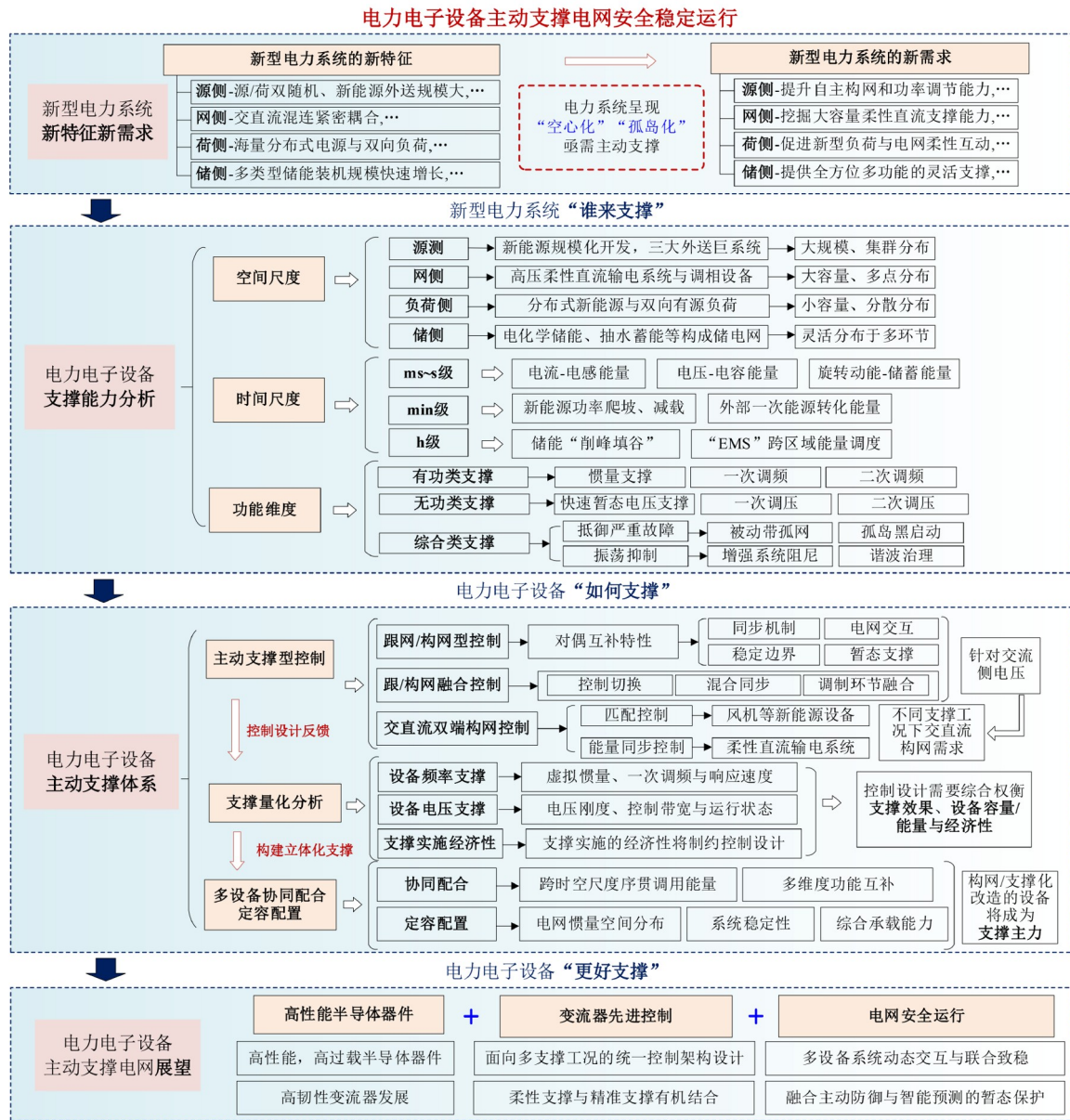


图 1 (网络版彩图)电力电子设备主动支撑新型电力系统示意

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of power electronic devices actively supporting the new power system.

传统储能并网拓扑由变压器逐级升压联接至10 kV/35 kV电网, 效率低、损耗较大。高压级联直挂式储能减少了中间转换环节, 无需变压器升压环节, 降低了能量损耗, 系统效率比升压式储能高2%~2.5%左右, 电能转换效率可提升至92%以上。直挂式储能直接连接高压电网, 能够快速响应电网的功率变化需求, 可在电网故障瞬间提供无功电压支撑, 对电网支撑效果更强。

2.2 电网运行新需求

电力电子设备作为新型电力系统的核心组成部分, 需要发挥其高度可控性、快速响应能力和灵活拓扑结构等优势。在源侧, 需挖掘新能源场站的自主构网和功率调节等功能, 使其能够参与到支撑系统电压、频率、阻尼等稳定性的场景中, 缓解电网“送端孤岛化”问题。在网侧, 亟需提升电网应对各类型故障的

穿越与自保能力, 发挥电力电子设备可快速调节输出的优势, 挖掘交直流混联电网格局下直流系统作为高速调控能量池为电网提供主动支撑的潜力, 重点探究大容量柔性直流主动支撑电网的问题^[19]。在荷侧, 促进新型负荷与电网灵活互动, 提升电力电子设备在重要负荷供电方面的参与度。在储侧, 为了更好地发挥储能优势, 一方面, 需要效仿源侧需求设计储能变流器针对所接电网或孤岛场景的支撑功能, 另一方面则需要继续提升储能并网电压等级与容量, 扩大储能参与支撑电网运行的场景范围。此外, 考虑海上风电送出、沙戈荒送出、高温严寒天气等极端场景, 为了确保电力电子设备有多场景适应能力, 还需对其环境耐受性、经济性、可靠性等方面予以探索。上述需求共同构成了电力电子设备在新型电力系统中的完整支撑体系。

因此, 电力电子设备需在基础性能层面实现系统性升级。器件方面, 通过宽禁带半导体器件突破传统硅基器件的通流极限, 大幅提升设备的过载能力, 弥补同步机减少导致的电网强度弱化问题。拓扑层面, 电力电子设备在小容量、低电压等级至大容量、高电压等级均存在使用场景, 需要针对性地开发并创新换流拓扑, 挖掘暂态和稳态运行能力。控制层面, 需构建多时间尺度协调控制架构, 扩充电力电子设备的动态响应维度, 实现从毫秒级电磁暂态到小时级稳态调节的全过程精准控制, 兼顾快速响应与长效平衡。

3 电力电子设备支撑能力分析

新型电力系统的深刻变革为电力电子设备提出更广泛的支撑需求。本节面向新型电力系统安全稳定运行新特征与新需求, 分别从电力电子设备接入新型电力系统后所呈现出的“多空间尺度、多时间尺度、多功能维度”等三个层面来探讨电力电子设备主动支撑的能力与特点。

3.1 电力电子设备多空间尺度支撑能力

电力电子设备具有多空间尺度分布特征, 其内涵在于电力系统“源-网-荷-储”各环节的电力电子设备在空间分布规律及其并网电压等级方面呈现一定的相关性和一致性。具体而言, 如图2所示, 电力电子设备分布的多空间尺度特征可从以下4个方面分析。

(1) 源侧。根据舒印彪报告^[20], 我国绿色清洁能源富集地区主要划分为西北“沙戈荒”可再生能源发展带、西南“水风光”可再生能源发展带与东南“深远海”风电资源发展带。基于此资源分布禀赋, 源侧将相应地在空间尺度上形成三大新能源外送“巨系统”, 使得我国电力流格局由西电东送变为外电内送^[21]。在容量方面, “巨系统”中风光机组电力电子变流器单台容量仅为MW量级, 但通过规模化广域建设与集群化场站建设可集聚为1 GW~10 GW量级; 在电压等级方面, “巨系统”中的每个发电单元电力电子变流器出口电压仅为百伏至千伏量级, 需通过汇集升压接入35/110/220 kV电压等级的场站级集电线路, 最终进一步升压由特高压直流系统实现外送。整体而言, 源侧的三大新能源“巨系统”所含电力电子设备空间分布特征可概括为“大规模、集群”分布, 并在电压等级、并网容量与网络拓扑上呈现“设备群-基地群-巨系统”三级空间分布格局。

(2) 输电侧。三大可再生能源巨系统与主要负荷中心的逆向分布、源荷电力电量时空不均衡等问题突出, 利用高压直流输电实现远距离送出将是重要的解决途径^[22]。在输电形态层面, 柔性交流潮流控制器^[23]、柔性直流换流站、柔性低频换流站等电力电子设备主要用于实现电能的远距离传输与变换; 在辅助服务层面, 电力电子式调相机、有源滤波器以及新式变压器主要用于提升电网电能质量并精准提供系统无功补偿。整体而言, 网侧的电力电子设备空间分布特征可概括为“大容量、多点”分布, 直接作用主网可以提升其支撑效果与响应速度, 有利于实现电网“柔性化”建设。

(3) 负荷侧。配网/微网的“有源化”趋势明显, 海量的分布式电力电子设备一方面属于灵活性资源, 另一方面则可视作潜在的支撑性资源。虽然分布式新能源或者新型电力电子负荷单机容量较小, 仅为数kW~MW量级; 并直接接入110 kV及以下的配电网或10 kV及以下的微电网; 但通过相互调配协同, 其可集聚为大型虚拟电厂或者聚合负荷^[24], 实现配电网特性从单向无源向双向有源的转变。针对局域支撑场景, 屋顶光伏、园区光伏等小型分布式设备可广泛应用于绿色楼宇、绿色园区改造; 针对全域支撑场景, 轨道交通沿线光伏、双向电动汽车充电桩等设备群则可实现即插即用与双向互动等功能。整体而言, 此类电力电子

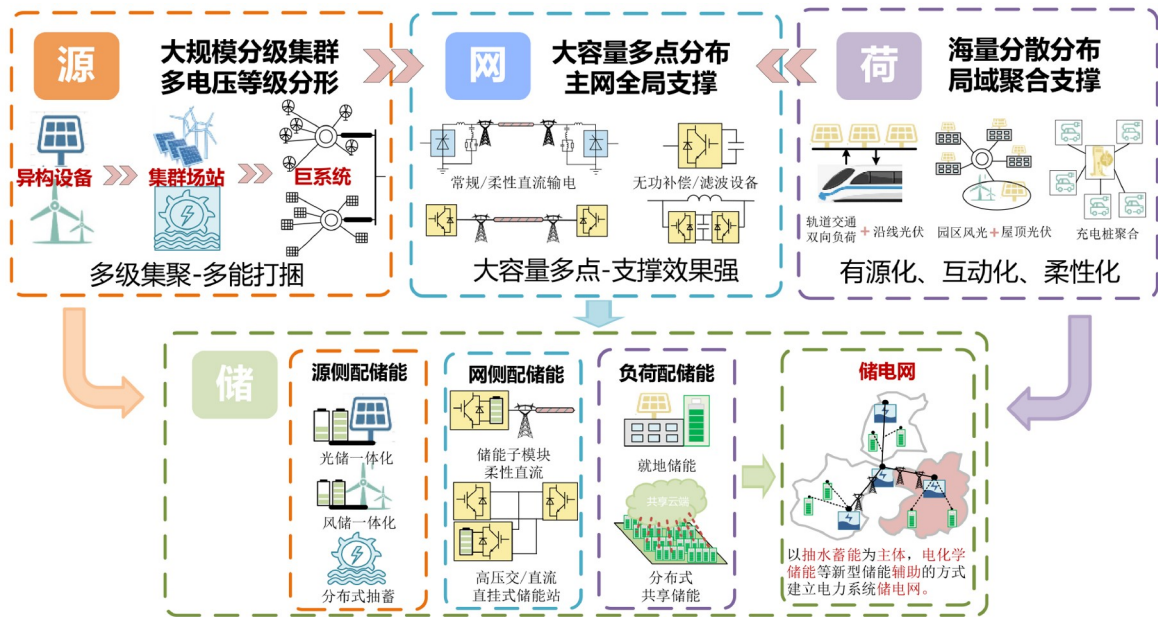


图 2 (网络版彩图) “源-网-荷-储”环节电力电子设备分布空间尺度特征概念图

Figure 2 (Color online) Conceptual diagram of spatial-scale distribution characteristics of power electronic devices in “generation-grid-load-storage” links.

设备呈现“小容量、海量分散”的空间分布特征, 使得传统单一配电售电服务向着资源高效配置与源荷互动转变, 呈现出更强的互动化、柔性化与数智化发展特征。

(4) 储能侧。储能具有能量存储与功率时移的作用, 能够将传统的源-荷刚性平衡转换为更容易实现的源-储-荷柔性平衡, 可在保证电力系统安全的前提下促进新能源发电的消纳。储能可根据实际的支撑需求和技术经济条件灵活选择空间分布和并网电压等级: 场站布设可涵盖“源-网-荷”多环节, 并网电压等级包含“微网-配网-主网”多等级, 空间分布形式呈现“海量分散-分布集群-大容量集中”特征。同时, 文劲宇等人^[21]前瞻性地提出构建“储电网”设想, 即以抽水蓄能为主体, 电化学储能等新型储能为辅助的方式建立电力系统储电网, 以避免不同储能电站各自为政可能引发的充放电对冲, 减少资源浪费, 优化储能资源的配置, 提升储能在电力系统不同场景下的综合价值。

此外, 空间分布特性还将显著影响电力电子设备的支撑机制: (1) 电气距离决定了设备对扰动信息感知的即时性与准确性。处于远端节点的设备因网络阻抗衰减、滤波效应以及通信过程的延时干扰, 可导致频率、电压感知误差, 从而影响支撑响应的即时性,

严重时甚至引发系统振荡。(2) 设备接入位置影响电压与无功调节的范围与强度。靠近负荷侧的设备可有效提升局部电压稳定性, 但若集中接入在某一馈线末端, 可能引发反向潮流与局部过补偿, 削弱整体电压控制的协调性。(3) 系统谐波传播特性与设备空间密度相关。合理的电力电子设备分布有利于谐波抑制, 而局部密集布置则可能诱发谐振风险。(4) 设备惯量支撑能力与其空间分布紧密耦合。电气距离较远的设备虚拟惯量存在响应延迟, 同一区域内设备控制方式的差异亦将导致频率响应强度不一致, 形成相对的低惯量区域, 造成系统频率响应能力不一致。(5) 分布式设备的“海量分散”特性对支撑的协同调控提出更高要求, 应构建高效的区域聚合控制机制以实现本地快速响应与全网协调支撑。电力电子设备支撑能力受空间尺度制约显著, 其机制复杂、影响多维, 需从系统层面开展空间优化部署与响应策略设计。

综上所述, 电力电子支撑型设备在空间分布上呈现多尺度特征, 其“电压等级-设备容量-分布规律”在从高到低, 从大到小, 从多点、集群到海量分散的变化过程中形成了具备分形特征的多空间尺度。同时, 这种空间分布特性还将影响电力电子设备的主动支撑机制, 需发展更加合理的系统协同支撑策略。

3.2 电力电子设备多时间尺度支撑能力

电力电子设备的支撑特性具有显著的多时间尺度特征, 其核心机理在于: 电力电子设备通过级联控制结构实现能量变换, 具体表现为控制系统对不同能量存储元件的状态调节^[25]; 也正是不同储能元件的时间常数、响应速度和能量流动特性决定了电力电子设备在支撑性能上的多时间尺度特征。

根据“ms级-s级-min级-h级”的时间尺度划分, 电力电子设备的支撑能力呈现以下特征。

(1) 在ms级时间尺度上, 电力电子设备的内环电流控制器主导线路电感的能量调节, 其时间常数为10 ms量级^[26,27]; 外环功率/电压环控制器主导直流侧集中或分布电容的能量调节, 其时间常数为100 ms量级^[28,29]。依据奇异摄动理论^[30], 复杂动力学系统可划分为快、慢两个动态。电力电子控制器的动态特性主要属于快动态^[31,32], 可近似归入传统电力系统的电磁暂态过程。在该时间尺度下, 电力电子设备的支撑能力主要体现在阻抗重塑、谐波抑制、电网强度提升及电网电磁阻尼增强等方面。

(2) 在s级时间尺度上, 其动态过程属于慢动态, 主要对应机侧变流器及机械部分的能量释放过程, 如风机转子动能的释放、光伏最佳跟踪点的调节等物理过程。因此, 该时间尺度的分析可近似类比为传统的机电暂态过程。此尺度下, 电力电子设备的支撑能力主要体现在惯量支撑、一次有功调节、一次无功调节及相角同步等方面。

(3) 在min级时间尺度上, 新型电力电子设备相较传统火电机组具有显著优势。传统机组受限于发电和稳燃等技术约束, 存在较高的最小出力限制和较慢的爬坡速度。而电力电子设备作为新型灵活调节资源, 具有快速响应、频繁调节、无最小出力限制等特点。另外, 在电网发生严重故障时, 大容量电力电子设备甚至可实现被动带孤网运行。在该时间尺度下, 能量调节主要涉及储能能量管理系统(energy management system, EMS)系统的跨区能量协调以及风电、光伏的功率爬坡/减载过程。值得注意的是, 部分情况下电力电子设备可将min级时间尺度的功率爬坡提升至百ms~s级时间尺度, 因此上述多时间尺度划分可能随实际情况而存在尺度耦合。总体而言, 在此时间尺度下, 电力电子设备的支撑能力主要体现在严重故障抵御、二次有功

调节、二次无功调节等方面。

(4) 在h级时间尺度上, 不同于传统系统中“源随负荷”特性, 新型电力系统中电源侧出力的随机性显著增加, 呈现“源荷互动”的双重不确定性。这要求电力电子设备(主要为储能变流器)通过双向功率变换实现中长时间段的电力电量平衡, 以保障电网安全运行并提升资源利用效率。此时间尺度下电力电子设备主要实现“削峰填谷”与电力电量中长时间段平衡等支撑功能。

综上所述, 电力电子设备的支撑特性呈现出明显的多时间尺度耦合特征。具体而言, 支撑过程由快到慢, 时间尺度从ms级到h级, 能量来源从电感、电容到旋转机械能, 形成完整的序贯支撑体系。

3.3 电力电子设备多功能维度支撑能力

电力电子设备的支撑能力具有多功能维度, 其内涵在于: 处于不同空间尺度的电力电子设备在不同时间尺度上发挥其支撑作用, 其支撑功能必然是面向电网的不同需求, 从而形成多维度、全方位的支撑体系(表1)。

高洁等人^[33]和饶宏等人^[19]分别对风电、光伏新能源场站以及柔性直流换流站的支撑作用进行了功能维度分类, 其主要包含“频率支撑、电压支撑、增强电网阻尼、短路电流控制、谐波治理、模拟交流线路互联特性、功率灵活调控、抵御严重故障”等八大功能。在此基础上, 本文进一步凝练上述研究对支撑功能的分类体系, 将电力电子设备的立体化支撑能力大体划分为“有功类支撑、无功类支撑、综合类支撑”三大方面。

(1) 从有功类支撑维度分析, 电力电子设备需要具备惯量支撑、一次调频、二次调频等支撑能力。传统电力系统中同步机组转子具有旋转动能, 电网发生频率波动时转子通过自动响应调节动能抵御频率变化, 延缓跌落速率, 可提供较强的惯量支撑; 同时调速器在频率变化超过死区后将从锅炉中抽取热能进一步填补动能的缺失, 抬升频率最低点, 通过控制器下垂系数自动完成一次调频; 最后通过实施机组功率爬坡指令, 完成二次调频任务。

类比同步机的转子动能, 电力电子设备全链路同样储备了一定可利用能量, 如风机的转子动能^[34]、直流传输链路上的电容储能^[35]、模块化多电平变流器的子模块电容储能^[36], 以及各类型储能设备内部能量^[37]等。若能充分利用这些能量响应频率变化, 则可

表 1 电力电子设备多空间-多时间尺度支撑能力
Table 1 Power electronic devices' support capability across multiple spatial and temporal scales

多空间尺度				多时间尺度			
所处环节	主要并网电压等级	分布特点	主要可改造支撑资源	时间尺度	主要对应实际环节	主要对应能量	主要对应支撑功能
源侧	35/110/220 kV	大规模、集群	风/光网侧变流器	10 ms级	控制器内环、锁相环	电流-电感能量	阻抗重塑、阻尼提升、电压强度提升、谐波抑制、惯量支撑、一次调频、一次调压
网侧	220/500 kV	大容量、多点	直流换流站、电力电子式调相机、有源滤波器、有源潮流控制器等	100 ms级	控制器外环、锁相环、功率同步环	电压-电容能量	
负荷侧	10/35/110 kV	小容量、分散	风/光网侧变流器、多场景电力电子变流器	s级	转子机械运动	旋转动能/储蓄能量	惯量支撑、一次调频、一次调压、故障电压支撑
储能侧	灵活选择	灵活选择	抽蓄机组/储能变流器	min级	风机桨距调整/光伏跟踪位置调整	外部一次能源转换能量	二次调频、二次调压、抵御极端故障
				h级	EMS系统能量调度	跨区调度能量	抵御极端故障、电力电量平衡、构筑第三道防线

在低同步机占比的系统中维持频率安全稳定，实现频率支撑功能。同时，也可在电力电子设备的控制器外环适当加入下垂环节，实现一次功率调节任务；通过调节风机与光伏出力特性曲线，改善功率爬坡与减载特性，实现二次有功调节任务。值得注意的，电力电子设备主导的一次/二次有功支撑响应速度将显著快于传统同步机组，因而具备更好的支撑效果。

(2) 从无功类支撑维度分析，电力电子设备需要具备一/二次无功支撑、故障暂态电压支撑能力。同步电机内电势受转子磁链约束，其内部的励磁系统也可灵活控制同步机的无功功率，使其在小扰动下具备较强的电压幅值维持能力。同时，面对短路等严重故障工况，同步机也可通过其极强的过电流能力(5~10倍额定电流)为故障点注入大量无功功率以减轻电压跌落。

对于电力电子设备，静止无功补偿器与静止无功发生器已被广泛用于提升高比例新能源系统的无功/电压支撑能力^[38]，而对于新能源场站或是大容量的高压直流输电系统，同样可利用控制作为桥梁，通过环路改进模拟同步电机的强电压源外特性，在电压波动时主动提供无功支撑。面对短路等严重故障，虽然目前电力电子设备受器件限制过流能力较弱，但可通过一些措施短时增强无功输出能力，如在暂态下限制有功功率，或是通过三次谐波注入等措施短暂提升电力电子设备的无功输出能力^[19]。

(3) 从综合类支撑维度分析，电力电子设备需要具备抑制谐波、提升电网阻尼、抵御极端故障等支撑能力。在谐波治理层面，传统电力系统需要并联无源滤波器、串联电感进行滤波；或增设由电力电子设备构成的有源滤波器，以实现较好的滤波效果与更灵活的调控。而下一阶段，则可以通过改造电力系统各个时空尺度中现有的可控电力电子设备，充分挖掘其冗余容量，使其在完成原有功能的基础上集成有源滤波功能。

在提升电网阻尼层面，新能源的大规模并网将持续降低电网的阻尼，甚至出现负阻尼频段从而引发电网宽频振荡现象。通过对电力电子设备控制器进行参数整定^[39]、结构整形^[40]、环路低通滤波^[41]等措施，则可以有效避免控制器动态与系统动态耦合而激发振荡，整体上实现提升系统阻尼的功能。

在抵御严重故障层面，传统电力系统的“三道防线”主要对应电网的预防控制、紧急控制与恢复控制，针对极端故障工况的应对能力较弱，系统的黑启动速度较慢。将电力电子设备进行支撑型改造，可使设备具备严重故障下带孤网运行能力，以及故障恢复过程中快速黑启动能力，使支撑型电力电子设备极大提升电网的韧性，更稳健地应对极端故障工况。

此外，对于海量支撑型设备在暂态故障下的协同配合问题，传统的协同策略为下垂控制、虚拟同步机控制等具有自发响应特性的控制模式，使各设备在故

障暂态过程中可根据电气距离、控制下垂系数等因素进行自发的协同。随着GPS同步校时技术与人工智能网络控制技术的逐步成熟,在快速自发响应特性的基础上,可尝试为支撑型设备群设计“本地快速响应-区域协调-全局优化”的三级支撑协同架构,实现秒级甚至毫秒级的故障协同支撑与恢复。

由上述分析可知,相较于传统电力系统,电力电子化电力系统的支撑能力将在时空尺度与功能维度层面产生深刻的拓展。图3为以“多空间-多时间-多功能”维度构建电力电子设备支撑能力的三轴坐标系。传统电力系统支撑能力的时空尺度划分较为单一,新型电力系统由于电力电子设备的深度渗透,其时空尺度的划分将更为精细化;同时,各时间尺度、空间尺度以及功能维度上将产生耦合,难以清晰地区分。此外,传统电力系统的支撑呈现扁平化、可改进空间小、支撑能力局限、能量来源单一等特征,如图3(a)所示;而新型电力系统由于高比例电力电子设备的分布特征,能量来源、调控策略更为丰富,因此其支撑能力是立体式、全方位的,如图3(b)所示。因此,根据新型电力系统支撑需求所位于的空间尺度与时间尺度,即可明确时空尺度相适配的支撑资源选择,确定相应的能力来源以及支撑特点,最终保障电网运行的安全性、稳定性与经济性。

4 电力电子设备主动支撑体系构建

面向电网的多元支撑需求,电力电子设备具备多空间、多时间、多功能维度的支撑能力,可作为新型

电力系统的支撑主力,但其仍然面临诸多支撑难点^[42,43]:(1)设备控制的快速响应特性与电网缓慢渐变的动态过程不匹配,过快或过强的控制可能引发振荡,过慢则易错失支撑时机。(2)电力电子设备通常面临频率、电压、阻尼等多重支撑任务,但其资源有限、目标之间存在相互制约,缺乏对这些支撑能力的有效评估手段,影响综合调控效果。(3)多台设备并网运行时缺乏协调,控制策略之间易发生冲突,可能诱发系统谐振等问题。(4)故障期间,设备还需进行多种控制模式切换,影响支撑的连续性和可靠性。对此,本节将进一步分析电力电子设备应“如何支撑”,从控制策略、支撑能力评估和多设备协同等方面探讨主动支撑体系构建方法。

变流器的强控制特性是电力电子设备相较传统同步电源进行主动支撑的优势,通过控制可建立设备能量/功率与电网电气量的耦合关系,是主动支撑的具体实施方式^[44,45]。设备支撑能力的量化分析可作为支撑效果的反馈,促进控制技术的发展,并作为多支撑任务的协同依据。最后,还应探索多电力电子设备的协同支撑,从设备配置、不同场景的支撑策略配合等方面构建立体化支撑,并分析大量电力电子设备聚集以及同质化等因素对电网的影响。图4为电力电子设备主动支撑与评估架构示意图。

4.1 电力电子设备主动支撑型控制

变流器控制是探究电力电子设备“如何支撑”问题的基础。现有控制技术可分为跟网(grid-following, GFL)和构网(grid-forming, GFM)控制。不同类型控制

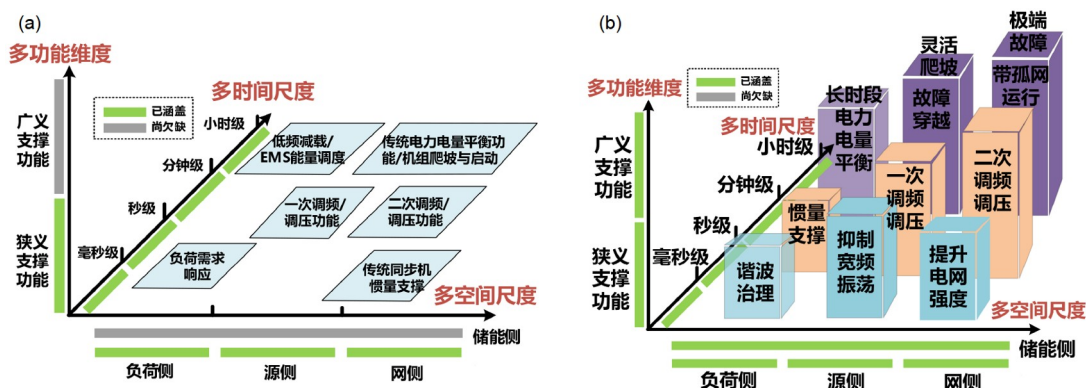


图3 (网络版彩图)传统(a)和新型(b)电力系统主动支撑特征对比

Figure 3 (Color online) Comparison of active support characteristics between traditional (a) and modern power systems (b).

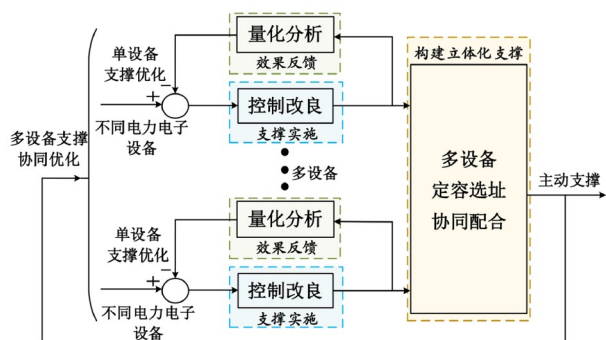


图4 (网络版彩图)电力电子设备主动支撑与评估

Figure 4 (Color online) Active support and evaluation of power electronic devices.

下,电力电子设备的对外特性和主动支撑方式不同.同时,面对更加复杂多元的电网需求,二者正从二元对立走向融合统一,为新型电力系统的主动支撑提供新方案.

4.1.1 跟网/构网控制

面对不同的主动支撑工况,跟网型与构网型控制是现有研究中讨论最为广泛的变流器控制策略,二者呈现显著的对偶性特征,其差异与互补性深刻影响系统的动态特性.

基于锁相环(phase-locked loop, PLL)的GFL控制通过跟踪电网电压相位实现电流控制,其主动支撑表现为功率输出为对参考值的被动跟随^[46].在低短路比(short circuit ratio, SCR)电网中,GFL因输出导纳与电网阻抗交互易引发振荡失稳,现有研究通过优化PLL参数或重塑控制环路阻抗提升弱电网适应性^[47-49],但其在极弱电网下仍面临功率失衡导致的电压失稳^[50].构网控制,包括定电压-频率(voltage-frequency, VF)和基于功率同步环(power synchronous loop, PSL)等策略可主动构建电压幅值与相位,并模拟同步机二阶运动方程,提供惯量与阻尼支撑,在无源网络及有源弱电网中具备优越性能,正在新型电力系统中得到推广^[51].

两种控制在多方面呈现对偶特性^[52].对于同步机制,GFL控制的电压跟踪与GFM控制的功率/电流下垂同步形成互补,前者可视作电压跟踪的“积分下垂型控制”,后者则为电流跟踪的“比例型PLL”;对于电网交互,GFL控制表现为“电压跟随-电流构建”,主动调节电流以跟随电网电压,而GFM控制呈现“电压形成-电

流跟随”,主动调节电压维持电压源外特性;对于控制稳定边界,GFL控制在弱电网(高阻抗)下因导纳失配失稳,GFM控制则在强电网(低阻抗)下面临阻抗冲突,两者的稳定性敏感方向相反;对于暂态支撑,GFM控制的虚拟惯量源于下垂控制低通滤波时间常数,GFL控制则通过PLL积分增益间接实现,体现惯量传递路径的对偶差异.

跟网、构网控制的对偶特性提供了二者小扰动稳定运行的理论极限,也揭示了极端工况下(开路/短路)稳定性的互补边界,为高比例新能源电网的稳定性分析与多时间尺度控制优化奠定了基础.

4.1.2 跟网-构网融合控制

随着电力电子设备比例增高,受端电网强度分析难,运行工况变化大.送端孤岛新能源受自然环境影响,出力波动剧烈,短路比不确定.单一构网、跟网控制难以满足新型电力系统复杂运行需求,充分结合二者运行的对偶互补,并进一步融合统一将成为控制发展的新趋势.

早期研究聚焦于变流器跟/构网控制切换策略.Li等人^[53]通过测量计算电网阻抗变化,自适应调整变流器的工作模式.Li等人^[54]进一步定量计算出控制的切换边界,并设计了控制切换死区.但是控制切换过程是非线性变化的,且跟/构网控制外特性不相同,切换策略本身可能为电网运行带来未知风险.

为避免切换带来的风险,并使变流器同时具备跟网与构网的特性,部分学者提出两种控制同步环的融合方法.Harnefors等人^[55]在功率同步的基础上引入锁相环的角频率补偿,形成混合同步控制(hybrid-synchronization control, HSC),其结构如图5所示.仿真与实验表明,其比传统构网控制具备更好的强网运行能力.Wu和Wang^[56]指出,HSC相较传统的功率同步控制具有更好的暂态稳定性,在电网相角剧烈变化时,PLL的补偿将提高变流器同步控制的动态响应能力.Lima和Watanabe^[57]进一步通过加权分配PLL和PSL的比重,使HSC在不同电网强度下具有更明显的主导模式.除PSL型的混合同步外,匹配控制等直流电压同步型GFM控制,亦可通过加入锁相环的动态补偿提升其宽短路比运行能力^[58].同时,这种混合同步的结构还可提高系统阻尼,改善单环匹配控制的小信号稳定性.前述融合策略方案集中在对同步环节的改进,Han等

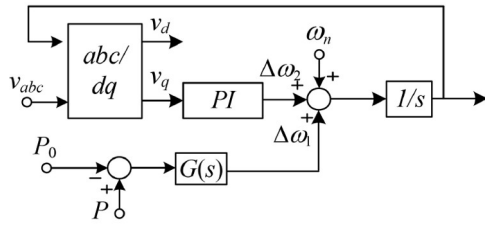


图5 混合同步控制结构

Figure 5 Structure of hybrid-synchronization control.

人^[59]和Liu等人^[60]均提出, 可通过加权融合跟/构网型逆变器的调制环节, 使变流器同时具备两种控制的电源特性, 如图6所示。

新型电力系统的支撑需求更加复杂多元, 跟网、构网控制从最初的二元对立逐渐走向融合统一, 使变流器主动适应复杂电网工况变化。但融合控制背后的机理解释尚不明晰, 需结合理论分析与实验进一步探究融合背后的物理本质, 开发适应新型电力系统需求的先进控制。

4.1.3 交直流双端构网控制

前述研究中, 跟网、构网控制定义主要针对变流器对交流侧电压的构建能力。随着电网电力电子化深入, 交流侧构网难以适应所有主动支撑工况。跟/构网的概念可进一步拓展至直流电网电压构建^[61]。具备直流电压构网能力的变流器可自主维持直流电压稳定, 而直流跟网变流器需要通过其他器件提供稳定的直流电压。前述多种基于PSL的构网策略可进一步定义为交流构网、直流跟网型控制, 图7展示了不同类型设备主动支撑电网时应采用的构网控制。

对于多类型储能设备, 因其直流侧电压可稳定运行, 设计构网型主动支撑方案时可采用前述基于PSL的交流侧构网控制。对于以风机为主的新能源设备, 因机侧变流器运行于最大功率跟踪模式, 网侧变流器缺乏功率调节能力, 无法采用前述方案。不同于PSL, 匹配控制通过直流电压下垂生成交流电压相角^[61], 可将其用于新能源设备的网侧变流器, 并在机侧变流器附加直流电压-有功下垂环节^[62], 使新能源设备灵活调节有功功率支撑电网频率/惯量, 如图7(b)所示。

对于高压直流(high voltage direct current, HVDC)系统, 受端换流站需运行于直流电压控制模式, 若采用匹配控制构网, 电网的频率波动将影响直流电压稳定,

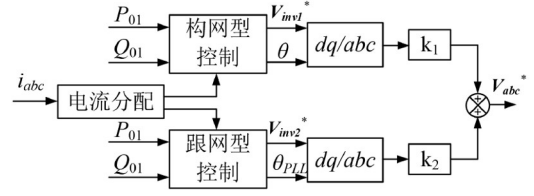


图6 调制环节融合方法

Figure 6 Method of hybrid modulation.

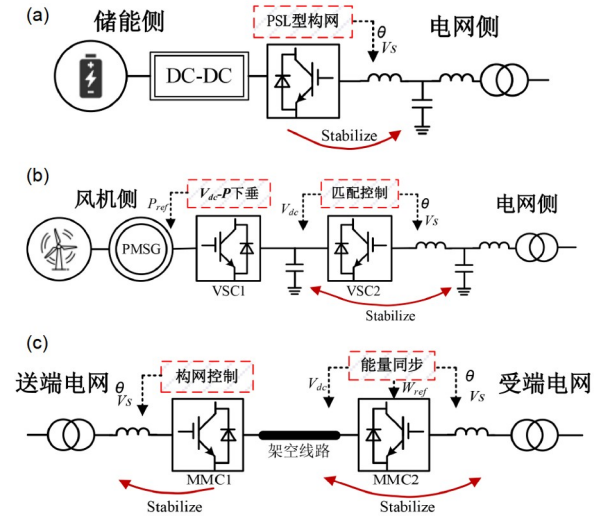


图7 (网络版彩图)不同电力电子设备主动支撑构网控制。(a) 储能-交流侧构网; (b) 风机设备-交直流双端构网; (c) 柔直输电-交直流双端构网

Figure 7 (Color online) Grid-forming control for active support of diverse power electronic devices. (a) Energy storage-AC GFM; (b) wind turbine-AC/DC dual GFM; (c) HVDC-AC/DC dual GFM.

引起保护误动作, 加剧线路传输损耗。Zhang等人^[36]提出基于模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)换流站4自由度控制的能量同步策略, 通过改进的最近电平调制解耦电容电压与直流电压, 并将电容能量控制等效为同步电机转子惯量, 实现类似于同步机的功率自同步控制^[63]。同时, 利用交流电压控制环与直流电压控制环同时维持交、直流侧电压幅值稳定, 形成适用于HVDC系统的交直流双端构网, 控制方案如图8所示。此外, 当送端交流站连接高比例新能源弱电网时, 亦需采用构网控制, 进而实现全输电系统的“交-直-交”协同构网模式, HVDC系统的构网架构如图7(c)所示。在未来, 包括藏粤在内的多端柔直输电工程将快速发展, 如何设计面向多换流站主动支撑的多端构网架构将成为新型电力系统建设的新挑战。

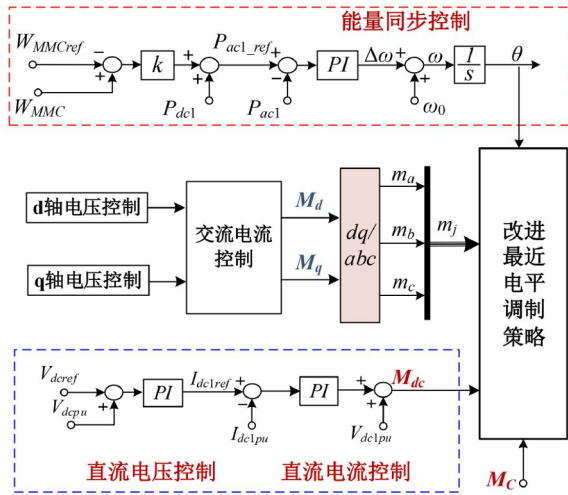


图 8 (网络版彩图)基于4自由度控制架构的交直流双端构网控制

Figure 8 (Color online) Four-degree control based alternating current (AC)/direct current (DC) dual grid forming control.

4.2 电力电子设备支撑能力量化反馈

控制技术是电力电子设备主动支撑的实施方式,但只通过仿真或简单定性分析难以对多类型控制策略进行评判与选择,也无法精细化指导构网控制器的改进与配置.因此,应进一步量化评估不同控制的支撑效果,作为“反馈调节”辅助支撑型电力电子设备的控制选型与改造.

在频率支撑方面,应从虚拟惯量、一次调频能力、支撑响应速度等多方面进行评估.虚拟惯量指设备对频率变化率的响应能力^[64],是控制对频率微分的反馈,具有超前特性,响应速度快,其作用效果可有效抑制扰动初期的频率变化率.一次调频能力是频率支撑控制对频率变化的比例反馈^[65],可提升频率首摆周期的跌落幅值.在控制选型和设计时应综合考虑二者的支撑效果,通过提高控制的惯量环节延缓系统的频率变化率,为一次调频争取时间;通过增强一次调频环节提供持续的有功支援,阻止频率的持续跌落.此外,不同支撑方法的支撑响应速度也是控制设计的参考标准.英国标准GC0137指出,惯量响应动作时间应小于5 ms^[66],需“零延时”支撑.跟网型控制信息采样和控制追踪等环节延时较大,难以满足快速动作需求,因此可采用自发响应的构网型控制进行惯量支撑.而对于时间尺度较长的一次调频,控制器动作的延时可能

减小频率波动幅值^[67],但当延时超过阈值时将引发系统的振荡失稳^[68],也需在控制设计中有所权衡.

在电压支撑方面,控制设计需统筹考虑小扰动下的静态电压稳定性与大扰动下的暂态电压支撑能力.徐政^[69]提出了电压刚度指标,表现为设备维持接入点电压模值接近空载电压的能力.该指标与电压控制环带宽及运行状态密切相关^[70-73].电压控制环带宽越小,抗扰能力越强,在小扰动下对电压的维持性能好,可自发快速输出无功减小电压波动^[56].但在短路故障等大扰动下,抗扰性强的控制易导致变流器电流快速饱和,丧失暂态电压支撑能力^[74],甚至面临同步失稳风险^[75,76].因此,控制设计应充分考虑大/小扰动下的电压暂/稳态特性,通过参考值动态调整^[77]、限幅策略优化^[78]等方法,实现不同工况下电压支撑性能的协调提升.

在评估控制支撑效果的同时,还应考虑实施支撑控制的能量来源以及支撑效果和经济性间的矛盾.对于能量来源,惯量支撑是短时的冲击型功率支撑,作用速度快但所需能量少,控制设计应针对可快速释放的设备旋转动能^[79]或是电容型的储能元件^[80,81].一次调频功率在系统频率有差时持续存在,产生的能量积累可观,需要支撑源具备长时的能量吸收/释放能力,控制设计适合大容量的电化学储能、抽水蓄能以及新能源场站的主动有功调节.对于无功/电压支撑,设计控制时亦需充分考虑设备的功率极限和半导体器件的耐流能力,针对不同设备特点设计并选择合适的支撑策略.

先进的控制结构和多元化的能量来源可有效提升支撑效果,但也带来了更高的策略实施成本^[82].对于跟网型支撑控制,提升变流器输出电气量对参考值的跟踪性能可改进支撑效果,但将提高信息滤波与采样装置要求,提升成本.构网控制下变流器具备较强的抗扰能力,但需更高的设备容量和过载能力更强的半导体器件,导致设备制造与运维成本的提升.同时,新能源设备构网改造时,常需引入储能装置满足构网运行中对功率支撑的要求,较低的控制带宽亦可能限制对风、光资源的利用率,影响系统整体的能量收益.

综上,不同控制策略对经济性的影响表现出多维耦合关系.一方面,GFL控制通过提高控制带宽以增强动态性能,但也带来更高的初始硬件投入和运行应力,从而加剧器件老化.另一方面,GFM控制虽然可提升系统抗扰能力、降低外部支撑设备的投资压力,但

其对器件、控制系统及运维策略的要求更高, 同时不利于对新能源发电的利用. 表2反映了不同控制的应用成本对比.

因此, “量化反馈”不仅是对支撑效果的反馈调节, 更应综合权衡控制、设备能量和经济性间的平衡. 所设计的控制应首先以适合设备和运行工况为基础, 在保证基础可靠性的前提下追求支撑效能. 图9反映了设备的容量/能量和经济成本对支撑型控制设计的制约关系.

综上所述, 设计电力电子设备主动控制时, 不仅需考虑支撑效果, 还应计及设备的能量和支撑实施经济性的约束, 综合权衡以回应单设备“如何支撑”的关键问题. 同时, 现有主动支撑控制和评估体系多基于同步电机框架, 而电力电子设备的支撑响应快速且灵活可控, 不受同步机的物理约束限制, 有望实现更优越的电网支撑性能. 未来可进一步尝试构建更适应电力电子设备的新支撑理论, 充分挖掘其支撑潜力.

4.3 多设备/场站定容配置与协同配合

单个电力电子设备因容量、能量与经济性的约束, 难以为大规模电力系统提供多功能、多尺度的支撑, 可通过多设备的协同配合与优势互补克服单设备的不足.

对于多设备的“协同”, 需综合考虑不同电力电子设备在空间分布特性、动态响应时滞以及功能支撑维度等方面的差异化特征, 通过序贯化能量调度与多目标协同控制, 实现系统级主动支撑能力的整体优化. 针对“源-网-储”能量协同, 序贯调用支撑资源丰富的送端新能源基地能量和响应速度快的柔性直流MMC子模块电容能量, 为电网同时提供惯量、一次调频和阻尼等支撑^[83]. 同时, 在不同支撑场景下, 通过优化储

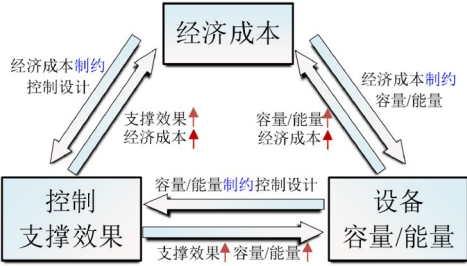


图9 (网络版彩图)控制支撑-设备容量/能量-经济成本制约关系图

Figure 9 (Color online) Relationship diagram of control support-equipment capacity/energy-economic cost constraint.

能的多阶段协调策略, 可有效改善支撑后的风机频率二次跌落^[84]、电容能量越限等现象, 进一步提升电力电子设备的支撑性能. 面对严重故障下的暂态支撑, 可通过跨空间尺度设备的协同和同空间尺度设备的配合共同支撑. 优先调用与故障同空间尺度的可控资源, 最小化能量传输延时与网络损耗. 在响应资源容量饱和时, 进一步通过通讯或改变直流电压等方式使送端新能源共同消纳不平衡功率^[85]. 对于同空间尺度的设备, 可根据电气距离和设备物理极限协调支撑, 优先使能电气耦合强度高、容量裕度大、暂态耐受能力更强的设备承担主导支撑作用^[86,87].

同时, 还需注意电力电子设备同质化带来的系统性风险, 应增加电网中变流器多样性, 促进电力电子设备运行工况, 控制方式等方面的非同质化^[88,89]. 具体而言, 多样化的功率因数可使系统远离临界失稳边界, 增强系统静态电压稳定性; 多样化的运行状态(发电、充电等)可提升系统的小扰动同步稳定性, 减小同步振荡风险; GFL和GFM控制的混合使用可以提升系统的电压抗扰性能, 适应不同电网工况. 因此, 在新型

表2 不同控制策略成本对比

Table 2 Cost comparison of different control strategies

对比维度	GFL控制	GFM控制	分析
硬件成本	中等	较高	GFM控制需要更大容量的功率器件, 需加装储能装置
控制复杂度	较低	较高	GFM软件开发与调试成本更高
电网适应性	强网 适应性强	弱网 适应性强	GFM适合高电力电子设备渗透场景
新能源利用率	较高(MPPT跟踪)	较低	GFM跟踪性能变慢降低新能源利用率
支撑能力	较低	较强	构网控制支撑能力强, 可减小系统稳定性投资

电力系统的运行规划中,通过增加变流器多样性可有效提升系统的强度,增强其稳定性和适应性。

多设备的“协同”提供了合理有效的支撑策略,需进一步探究电力电子设备的“配置”问题,通过合理的布点和容量配置可使电力电子设备在外部状态量变化时所改变的能量/功率吞吐量更加有效,达到“事半功倍”的支撑效果。不同于传统同步电源,电力电子设备的惯量与调频能力灵活可控且特征不同,使电网各节点的频率动态特性差异化明显,导致调频资源响应程度不均衡,影响设备能量利用率和电网频率动态,需从频率空间分布视角探究惯量与调频资源的“配置”。传统电力系统常通过惯量中心(center of inertia, COI)分析全局频率动态,但其聚合程度较高,难以适应电力电子化系统的频率空间分布特性。Liu等人^[90,91]通过系统不平衡功率与节点频率动态映射关系,提出更具普适性的系统节点惯量,刻画了虚拟惯量对频率空间分布的影响规律。基于此,可从电网整体节点惯量的平衡与最优出发,构建包括储能、输电网等在内的惯量资源规划方案,提升电力电子设备调频资源的利用能力^[92,93]。

同时,不同支撑控制下电力电子设备对外等效阻抗各异,不同的接入和配置方法将影响系统强度,改变电网的稳定运行边界。部分研究指出,构网型变流器的接入等效于增加了系统的SCR,有利于系统的稳定运行。Yang等人^[94]综合分析了不同类型构网型设备的等效阻抗,发现合理的构网型设备的接入位置和容量配置可有效提升系统的小扰动稳定性。吴琛等人^[95]进一步从广义短路比的临界值计算新能源多馈入系统的小干扰稳定裕度,提出面向稳定性的构网型储能选址定容方法。合理的支撑型设备配置还将增强电网对新能源随机波动的适应能力,进而提升电网的承载力^[96]。文献^[97,98]指出,电网承载力包括安全性、经济性、灵活性等多维评价指标,在关键节点配置多类型的储能设备或合适的高压直流馈入落点将有效提升电网的新能源的消纳水平,促进新型电力系统安全稳定运行^[98]。此外,在稳态运行层面,协同良好的集聚设备可提供更大的等效调节容量,显著提升系统的短路比,具备更灵活的电力电量平衡能力;在故障应对层面,集聚设备的可靠性与支撑特性的鲁棒程度更高,且不易受到局部因素的影响,显著提升系统整体弹性与韧性。

综上所述,单设备的“控制改良-量化反馈”闭环从

主动支撑效果、实施经济性等角度在变流器控制层面提供了选型与改进方案,多设备的“协同”和“配置”进一步在多时间/空间尺度与功能维度提供了设备层面的支撑优化策略,克服了单设备的支撑限制。二者的有机结合将为新型电力系统提供全方位的立体化支撑。因此,未来电力系统中将形成以构网和支撑化改造电力电子设备为核心,多资源协同为脉络的主动支撑架构,在源-网-荷-储全链路代替同步机成为新型电力系统的支撑主力。

5 电力电子设备主动支撑电网安全运行发展展望

5.1 高性能、高过载半导体器件

电力电子设备的开关损耗、过流能力、耐压能力等特性掣肘于半导体技术。因此,必须大力发展高性能半导体器件,通过材料、集成与封装技术的创新在物质层面提升电力电子设备的根本性能^[99]。半导体技术发展主要包括传统器件优化和新型材料突破两条路径。在传统器件方面,IGBT技术已发展至6500 V/5000 A水平,但多芯片并联均流与可靠性仍是主要挑战^[100]。与此同时,增强型集成门极换流晶闸管(IGCT-Plus)通过本征结构优化和门极雪崩关断增强等关键技术突破,显著提升了抗浪涌能力和耐压性能,为构建高韧性变流器提供了新路径^[101]。另一方面,以新材料为基础的新一代半导体技术凭借其宽禁带特性展现出更高的击穿电场强度,有望实现更高性能^[102,103]。但在单晶衬底生长、芯片工艺等关键制造环节仍面临自主化率低、生产成本高等产业化挑战,目前尚未实现大规模商业化应用。未来,需要进一步在上述挑战方面开展研究。

变流器方面,主要考虑向更高电压等级、更大容量、更广适用范围3个方向发展。如今广泛用于柔直输电的MMC虽具有可控性强、可主动支撑优势,且其分布的上千个子模块电容具有较好的支撑潜力,但特高压、大容量的MMC变流器成本过高,阻碍了其在跨区输电、深远海输电场景下的应用。因此,可通过变流器异构串联技术^[104],将控制能力强、成本高的MMC与可控性差、成本低、电力传输容量大的二极管整流器结合起来形成新的拓扑,有效结合二者的优势。此外,考虑储能或超级电容的变流器拓扑也是一个发展

热点。各类形式的高压直挂储能、嵌入储能或超容模块的MMC等拓扑已有初步研究,相比于之前传统的集中并网式储能变流器有可控性强、电池管理更高效等优势。在未来,仍需对各类变流器的拓扑进行深入研究,充分结合各类电力电子设备的优缺点,赋予变流器更优异的性能与更广的适用范围。

5.2 先进变流器控制技术

“柔性支撑”与“精准支撑”将成为电力电子控制发展的新需求,即控制策略在不同工况下平滑的自适应调整,在设置的多功能优先级与多目标权重的期望下,充分的动态平衡各种性能指标,以实现系统全局或局部下的最优或次优。

早期控制器设计主要关注电能转化效率和功率传输能力,功能较为单一。伴随新型电力系统的发展,国内外学者开始更充分地挖掘电力电子变流器控制潜力,发挥其“柔性支撑”功能。为此,各类改进控制层出不穷,虽响应了部分工况下的支撑需求,但也反映出变流器控制设计的问题与局限: (1) 设备控制与电网的支撑需求匹配度不足,支撑的“精准性”有待提高; (2) 控制的环路改进多针对特定场景,适用范围窄,缺乏面向多功能、多工况的统一控制设计体系。

因此,未来电力电子设备的控制发展应建立在“电力系统-电力电子-控制理论”三学科深度交叉融合的基础上,以电网需求为导向,以设备特性为基础,以控制理论为电网-设备的支撑交互途径。变流器的控制设计不能仅停留在“设计了新控制”,还应进行更加深入的探索,分析不同设备在多种控制下的支撑能力边界,探索面向全工况的统一控制架构设计方案。

除此之外,在控制的理论研究层面,控制器的设计存在多对内在的矛盾,如响应速度与超调量的矛盾、稳定性与快速性的矛盾、增益与带宽的矛盾、复杂性与高性能的矛盾。因此,实际工程中的控制器性能是多种指标的平衡,是在不同工况下对于多种性能的取舍。相较原有控制器单一的设计思路与性能抉择,未来支撑型电力电子控制技术应趋向更加规范化与精细化,实现柔性支撑与精准支撑的有机结合。

5.3 电网安全运行

现有研究将电网防御体系划分为预防控制、应急控制和恢复控制三道防线。随着电力电子设备渗透率

不断提升,仅依赖传统防线已难以满足稳定性需求。如何明确电力电子支撑与三道防线的协同逻辑,是未来电网安全稳定运行的关键。

对于第一道防线,电力电子设备主要与继电保护和预防控制形成互补。由于其快速调节特性可能导致传统保护误动或拒动,需结合设备特性修正保护定值,并在必要时通过控制策略注入特征信号,辅助故障识别与定界。对具备低电压穿越能力的设备,可在短时扰动下闭锁非必要保护,以维持暂态稳定。从预防控制角度看,电力电子设备可通过潮流优化、虚拟惯量注入和阻尼增强,改善系统潮流分布和稳定裕度,在长时段电力电量平衡和动态约束中发挥补充作用。

在第二道防线中,电力电子设备可在扰动初期提供快速惯量与电压支撑,减少系统进入切机、切负荷等应急措施的频率和规模。例如,STATCOM/SVG能在ms级快速注入无功功率以支撑电压,储能可短时释放有功功率抑制频率跌落,柔性直流换流站可采用构网控制增强惯量与阻尼。同时,相比传统基于电压、频率阈值的触发方式,基于动态响应的稳定性分析方法可为电力电子控制提供更合理的启动判据,如通过电压变化率(dV/dt)、频率梯度(df/dt)等动态指标,可更早识别扰动趋势并触发支撑,从而在时间尺度上实现对传统措施的前移补充。

针对第三道防线,电力电子设备与传统的低频/低压减载(UFLS/UVLS)及解列措施的协调,是避免电网崩溃的最后关键环节。其核心在于通过电力电子设备的快速响应能力,延缓或减少传统极端控制措施(如大面积切负荷、强制解列)的触发,同时确保在电力电子控制不足时,传统措施仍能可靠动作。主要协同的思路为在极端故障下最大化利用柔性控制的潜力,减少对刚性措施(切负荷、解列)的依赖。在设备容量和响应速度允许范围内,优先通过电力电子调节功率平衡;当电力电子支撑达到极限再触发切负荷或解列。由此,电力电子与传统措施形成先后衔接的多层防御。

需明确,即便系统发展到第二、三道防线阶段,电力电子支撑仍然必要。一方面,其快速响应可缓解频率、电压偏移,降低刚性措施触发的程度;另一方面,主动支撑型电力电子设备具备孤岛运行和黑启动功能,在系统恢复过程中具有不可替代的作用。相比传统同步机,其支撑能力更灵活,能够在极端工况下显著提升电网韧性。

综上所述, 电力电子设备与三道防线的协同关系可归纳为: 在第一道防线中前移保护和预控; 在第二道防线中承担快速支撑并提供新型触发判据; 在第三道防线中支撑黑启动与局部恢复. 这体现了“电力电子主动支撑——传统防线”的协同格局, 为构建更加稳健的新型电力系统提供了理论依据.

6 结论

电力系统的源-网-荷-储电力电子化已成为未来发展的核心趋势, 本文从电网的新特征和安全稳定运行新需求出发, 围绕电网“谁来支撑”-“如何支撑”-“更好支撑”三个问题系统性探讨了电力电子设备主动支撑电网的关键技术与发展方向, 主要结论如下.

(1) 针对“谁来支撑”的问题, 电力电子设备具备多空间、时间尺度及多功能维度支撑潜力. 空间尺度上, “源-网-荷-储”设备群分别呈现“集群-多点-分散”分形分布, 支撑主体需与电压等级和电气距离适配; 时间尺度上, 毫秒级至小时级的动态特性覆盖电磁暂态至稳态调节全周期, 可设计序贯支撑策略; 功能维度上, 有

功类支撑、无功类支撑与综合类支撑的协同优化是提升电网稳定性和可靠性的关键.

(2) 针对“如何支撑”的问题, 应构建变流器控制-单设备支撑能力量化-多设备协同配合的主动支撑体系. 变流器控制是主动支撑的实施基础, 针对不同支撑工况和需求可分别采用跟/构网控制、跟/构网融合控制与交直流双端构网控制. 支撑能力量化是单设备“如何支撑”的反馈调节, 可指导变流器控制的选择和改进. 多设备协同配合进一步从空间、时间和功能等方面推进了新型电力系统的全面、立体化支撑.

(3) 针对“更好支撑”的问题, 应从高性能开关器件、变流器先进控制和电网安全运行等层面全方位提升电力电子设备的支撑能力, 推动电力系统从“被动响应”向“主动防御”演进, 为新型电力系统的高效、安全与可靠运行提供解决方案.

综上所述, 本文系统梳理了电力电子设备主动支撑电网安全稳定运行的关键问题与技术路径, 为后续理论创新与工程实践提供了重要参考. 未来需进一步深化多学科交叉研究, 突破器件、控制与系统协同优化的技术壁垒, 助力“双碳”目标的实现.

参考文献

- 1 Rao H, Lu S Y, Zhuo Y J, et al. Key problems of new power systems in the southern region towards carbon peak and carbon neutrality (in Chinese). *New Type Power Syst*, 2023, 1: 74–83 [饶宏, 卢斯煜, 卓映君, 等. “双碳”目标下南方区域新型电力系统重点问题研究. *新型电力系统*, 2023, 1: 74–83]
- 2 Yuan X M, Zhang M Q, Chi Y N, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 1904–1917 [袁小明, 张美清, 迟永宁, 等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 1904–1917]
- 3 Zhuo Z Y, Zhang N, Xie X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2021, 45: 171–191 [卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战. *电力系统自动化*, 2021, 45: 171–191]
- 4 Kang C Q, Yao L Z. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2017, 41: 2–11 [康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架. *电力系统自动化*, 2017, 41: 2–11]
- 5 Xie X R, He J B, Mao H Y, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 461–475 [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. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 461–475]
- 6 Li M, Chang Y K, Mao Y T, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation (in Chinese). *High Volt Eng*, 2024, 50: 4773–4788 [李明, 常永康, 毛永涛, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望. *高电压技术*, 2024, 50: 4773–4788]
- 7 Du Z Y, Yang Y X, Ji K, et al. High frequency harmonic resonance and suppression in Zhangbei project (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2022, 46: 3066–3075 [杜镇宇, 阳岳希, 季柯, 等. 张北柔直工程高频谐波振荡机理与抑制方法研究. *电网技术*, 2022, 46: 3066–3075]

- 8 Zhang H, Xiang W, Lin W, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: Control strategy, stability, application, and challenges. *J Modern Power Syst Clean Energy*, 2021, 9: 1239–1256
- 9 Gao B T, Hu Z Y, Wang W S, et al. Review on fast active power control and frequency support technologies of renewable energy stations (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 4335–4353 [高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 等. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 4335–4353]
- 10 Han M X, Zhao Z K, Zheng J H, et al. Development of dynamic voltage support for power grid with large-scale renewable energy generation (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2023, 47: 1309–1327 [韩民晓, 赵正奎, 郑竞宏, 等. 新能源场站电网暂态电压支撑技术发展动态. *电网技术*, 2023, 47: 1309–1327]
- 11 Wang X, Taul M G, Wu H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—An overview. *IEEE Open J Ind Applicat*, 2020, 1: 115–134
- 12 Li H P, Nian H, Hu B, et al. Review of analysis and suppression methods for wide-band oscillation in wind power grid-connected systems (in Chinese). *New Power Syst*, 2023, 1: 237–255 [李海盼, 年珩, 胡彬, 等. 风电并网系统宽频振荡分析与抑制方法综述. *新型电力系统*, 2023, 1: 237–255]
- 13 National Energy Administration. Notice on the issuance of “Action Plan for Accelerating the Construction of the New-type Power System (2024–2027)” (in Chinese). 2024 [国家能源局. 关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024–2027年)》的通知. 2024] https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm
- 14 Fan Z, Han C D, Zhou J, et al. Exploring the development model and evolution path of future power grid forms under the dual carbon target (in Chinese). *New Power Syst*, 2024, 2: 272–281 [范征, 韩丛达, 周静, 等. “双碳”目标下未来电网形态发展模式及演变路径初探. *新型电力系统*, 2024, 2: 272–281]
- 15 Shu Y B, Zhang Z G, Guo J B, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation (in Chinese). *Proc CSEE*, 2017, 37: 1–9 [舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究. *中国电机工程学报*, 2017, 37: 1–9]
- 16 Zhou X X, Chen S Y, Lu Z X, et al. Technology features of the new generation power system in China (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 1893–1904, 2205 [周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 1893–1904, 2205]
- 17 National Energy Administration. China’s first high-altitude ultra-high voltage AC project put into operation (in Chinese). 2025, <https://www.nea.gov.cn/20250103/f2e5d17a58564617bbb0f68c8e2b321b/c.html> [国家能源局. 我国首个高海拔特高压交流工程投运. 2025, <https://www.nea.gov.cn/20250103/f2e5d17a58564617bbb0f68c8e2b321b/c.html>]
- 18 UK BESS fleet jumped in to provide 1.5 GW of power to grid after interconnector trips. 2024, <https://www.solarpowerportal.co.uk/statkraft-kraken-arenko-bess-saves-day-interconnector-trips/>
- 19 Rao H, Huang W H, Guo Z, et al. Grid-supporting VSC-HVDC for enhancing the stability of receiving end power grid: Forms, key technologies, and prospects (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 6818–6831 [饶宏, 黄伟煌, 郭铸, 等. 提升受端电网稳定性的主动支撑型柔性直流的形态、关键技术与展望. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 6818–6831]
- 20 Shu Y B. Fundamental issues of new-type power system construction (in Chinese). In: 390th Shuangqing Forum. Guangzhou, 2024 [舒印彪. 新型电力系统构建的若干基本问题. In: 双清论坛390期. 广州, 2024]
- 21 Wen J Y, Zhou B, Wei L C. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China (in Chinese). *Power Syst Protect Control*, 2022, 50: 1–10 [文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探. *电力系统保护与控制*, 2022, 50: 1–10]
- 22 Liu Z Y, Zhang Q P, Dong C, et al. Research on large-scale, high-efficiency and secure outbound transmission of wind, solar and thermal power from major energy bases via UHVDC (in Chinese). *Proc CSEE*, 2014, 34: 2513–2522 [刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究. *中国电机工程学报*, 2014, 34: 2513–2522]
- 23 Xie X R, Jiang Q R. Principles and Applications of Flexible AC Transmission Systems (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2014 [谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2014]
- 24 Zuo J, Ai Q, Wang W B, et al. Standardization status and architecture design of virtual power plants (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2025, 15: 144–156 [左娟, 艾芊, 王文博, 等. 虚拟电厂标准化现状及体系架构设计. *电力系统自动化*, 2025, 15: 144–156]
- 25 Hu J B, Zhu J H, Guo Z R, et al. Small signal stability of multi-time-scale time-varying dynamics in power electronic-based power systems (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 7349–7361 [胡家兵, 朱建行, 郭泽仁, 等. 电力电子化电力系统多时间尺度时变动态小干扰稳定问题. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 7349–7361]

- 26 Ma R, Qiu Q, Kurths J, et al. Fast-slow-scale interaction induced parallel resonance and its suppression in voltage source converters. *IEEE Access*, 2021, 9: 90126–90141
- 27 Yang Z Q, Ma R, Cheng S J, et al. Challenges in stability of power electronic-based power systems: A comparative analysis of transient stability (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 103–116 [杨子千, 马锐, 程时杰, 等. 电力电子化电力系统稳定的问题及挑战: 以暂态稳定比较为例. *物理学报*, 2020, 69: 103–116]
- 28 He W, Yuan X, Hu J. Inertia provision and estimation of PLL-based DFIG wind turbines. *IEEE Trans Power Syst*, 2017, 32: 510–521
- 29 Yan Y B. Time-scale equipment modeling of ac current control for voltage source converters and its dynamic impact on power systems (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018 [严亚兵. 电压源型变换器交流电流控制时间尺度装备建模及对电力系统动态影响研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2018]
- 30 Gao B F, Wang G, Shao B B, et al. Singular perturbation approximation method based on the dominant degree analysis for direct drive wind farm (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 2449–2462 [高本锋, 王刚, 邵冰冰, 等. 基于主导度分析的直驱风电场奇异摄动降阶方法. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 2449–2462]
- 31 Al-Iedani I, Gajic Z. Order reduction of a wind turbine energy system via the methods of system balancing and singular perturbations. *Int J Electrical Power Energy Syst*, 2020, 117: 105642
- 32 Peng Y L, Shuai Z K, Shen J, et al. Reduced order modeling method of inverter-based microgrid for stability analysis. In: *Proceedings of the 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Tampa, 2017. 3470–3474
- 33 Gao J, Wang T, Zhao W, et al. Review on the development and prospect of active support technologies for wind power and photovoltaic stations to improve the security and stability level of power system (in Chinese). *New Type Power Syst*, 2024, 2: 201–222 [高洁, 王彤, 赵伟, 等. 提升电力系统安全稳定水平的风电光伏场站主动支撑技术发展及展望综述. *新型电力系统*, 2024, 2: 201–222]
- 34 Wu Z, Gao D W, Zhang H, et al. Coordinated control strategy of battery energy storage system and PMSG-WTG to enhance system frequency regulation capability. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2017, 8: 1330–1343
- 35 Zhu J, Booth C D, Adam G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems. *IEEE Trans Power Syst*, 2013, 28: 1277–1287
- 36 Zhang H, Xiang W, Wen J. Dual grid-forming control with energy regulation capability of MMC-HVDC system integrating offshore wind farms and weak grids. *IEEE Trans Power Syst*, 2024, 39: 261–272
- 37 Liang K, Peng X T, Qin S Y, et al. Strategy research on optimizing wind storage system frequency response based on coordinated control (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 2628–2641 [梁恺, 彭晓涛, 秦世耀, 等. 基于协同控制优化风储系统频率响应的策略研究. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 2628–2641]
- 38 Yang S, Wang W S, Liu C, et al. Transient voltage security analysis and control strategy for wind power collection systems (in Chinese). *High Volt Eng*, 2017, 43: 2080–2087 [杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电汇集系统暂态电压安全分析及其控制策略. *高电压技术*, 2017, 43: 2080–2087]
- 39 Lu X J, Xiang W, Lin W X, et al. Stability analysis and control parameter optimization of hybrid MMC connected to weak AC grid (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2020, 44: 70–78 [鲁晓军, 向往, 林卫星, 等. 混合型MMC接入弱交流电网稳定性分析及控制参数优化. *电力系统自动化*, 2020, 44: 70–78]
- 40 Wu W H. Research on the broadband oscillation mechanism and suppression methods for new energy generation connected to weak grids (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: Hunan University, 2019 [伍文华. 新能源发电接入弱电网的宽频带振荡机理及抑制方法研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2019]
- 41 Sun K, Yao W, Zhou Y, et al. Analysis and suppression of medium-frequency oscillation mechanism in direct-drive wind farms via flexible DC transmission systems based on SISO sequence impedance (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 442–454 [孙焜, 姚伟, 周毅, 等. 基于SISO序阻抗的直驱风电场经柔直输电系统中频振荡机理分析及抑制. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 442–454]
- 42 Tang G F. High Voltage Direct Current Transmission Technology Based on Voltage Source Converters (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 2010 [汤广福. 基于电压源变流器的高压直流输电技术. 北京: 中国电力出版社, 2010]
- 43 Xu Z, Xiao H Q, Zhang Z R, et al. Flexible HVDC Transmission Systems (in Chinese). Beijing: China Machine Press, 2017 [徐政, 肖晔庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统. 北京: 机械工业出版社, 2017]
- 44 Wen J Y, Zhang H B, Xiang W, et al. A unified control architecture for flexible DC converters in new power system (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 7068–7084 [文劲宇, 张浩博, 向往, 等. 面向新型电力系统的柔性直流变流器统一控制架构. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 7068–

- 7084]
- 45 Pattabiraman D, Lasseter R H, Jahns T M. Comparison of grid following and grid forming control for a high inverter penetration power system. In: Proceedings of the 2018 IEEE PES General Meeting (PESGM). Portland, 2018
 - 46 Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, et al. Control of power converters in AC microgrids. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, 27: 4734–4749
 - 47 Fan L L. Control and Dynamics in Power Systems and Microgrids. Boca Raton: CRC Press, 2017
 - 48 Loix T. Participation of inverter-connected distributed energy resources in grid voltage control. Dissertation for Doctoral Degree. Holland: Katholieke Universiteit, 2011
 - 49 Wu H, Ruan X B, Yang D S. Impact of phase-locked loop on stability of LCL-type grid-connected inverters in weak grid and PLL parameter design (in Chinese). *Proc CSEE*, 2014, 34: 5259–5268 [吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对LCL型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计. *中国电机工程学报*, 2014, 34: 5259–5268]
 - 50 Pan E S, Wang Z D, Wang D, et al. Stability analysis of doubly-fed induction generator weak grid integration based on phase-locked loop synchronization control (in Chinese). *High Volt Eng*, 2020, 46: 170–178 [潘尔生, 王智冬, 王栋, 等. 基于锁相环同步控制的双馈风机弱电网接入稳定性分析. *高电压技术*, 2020, 46: 170–178]
 - 51 Cao W, Qin H C, Lu J Z, et al. Positioning and application prospects of virtual synchronous generators in new power system (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2023, 47: 190–207 [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. *电力系统自动化*, 2023, 47: 190–207]
 - 52 Li Y, Gu Y, Green T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: A duality theory. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 4541–4554
 - 53 Li M, Zhang X, Yang Y, et al. The grid impedance adaptation dual mode control strategy in weak grid. In: Proceedings of the 2018 International Power Electronics Conference. Niigata: IEEE, 2018. 2973–2979
 - 54 Li M, Zhang X, Guo Z, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on d-partition method. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, 36: 14420–14435
 - 55 Harnefors L, Kukkola J, Routimo M, et al. A universal controller for grid-connected voltage-source converters. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2021, 9: 5761–5770
 - 56 Wu H, Wang X. Control of grid-forming VSCs: A perspective of adaptive fast/slow internal voltage source. *IEEE Trans Power Electron*, 2023, 38: 10151–10169
 - 57 Lima L A M, Watanabe E H. Hybrid control scheme for VSC presenting both grid-forming and grid-following capabilities. *IEEE Trans Power Deliver*, 2022, 37: 4570–4581
 - 58 Zhao L, Jin Z, Wang X. Small-signal synchronization stability of grid-forming converters with regulated DC-link dynamics. *IEEE Trans Ind Electron*, 2023, 70: 12399–12409
 - 59 Han F, Zhang X, Li M, et al. Stability control for grid-connected inverters based on hybrid-mode of grid-following and grid-forming. *IEEE Trans Ind Electron*, 2024, 71: 10750–10760
 - 60 Liu P, Xie X, Shair J. Adaptive hybrid grid-forming and grid-following control of IBRs with enhanced small-signal stability under varying SCRs. *IEEE Trans Power Electron*, 2024, 39: 6603–6607
 - 61 Groß D, Sanchez-Sanchez E, Prieto-Araujo E, et al. Dual-port grid-forming control of MMCs and its applications to grids of grids. *IEEE Trans Power Deliver*, 2022, 37: 4721–4735
 - 62 Lyu X, Groß D. Grid forming fast frequency response for PMSG-based wind turbines. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2024, 15: 23–38
 - 63 Yang R, Shi G, Zhang C, et al. Internal energy based grid-forming control for MMC-HVDC systems with wind farm integration. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2023, 59: 503–512
 - 64 Sun H D, Wang B C, Li W F, et al. Research on inertia system for frequency response in high power electronics-penetrated power system (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 5179–5192 [孙华东, 王宝财, 李文峰, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 5179–5192]
 - 65 Qin X H, Su L N, Chi Y N, et al. Function orientation analysis of inertia support and primary frequency regulation for virtual synchronous generator in large power grid (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2018, 42: 36–43 [秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析. *电力系统自动化*, 2018, 42: 36–43]
 - 66 National Grid ESO. GC0137: Minimum specification required for provision of GB grid forming (GBGF) capability (formerly virtual synchronous machine/VSM capability). 2023, <https://www.neso.energy/industry-information/codes/gc/modifications/gc0137-minimumspecifi->

- cation-required-provision-gb-grid-forming-gbgf-capability-formerly-virtual-synchronous-machinevsm-capability.
- 67 Min Y, Chen L, Liu R K, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 855–868 [闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 855–868]
 - 68 Olgac N, Sipahi R. An exact method for the stability analysis of time-delayed linear time-invariant (LTI) systems. *IEEE Trans Automat Contr*, 2002, 47: 793–797
 - 69 Xu Z. Rational reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems (in Chinese). *High Volt Eng*, 2022, 48: 3805–3819 [徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法. *高电压技术*, 2022, 48: 3805–3819]
 - 70 Lin W F, Tang Y, Bu G Q. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed ac/dc power systems (in Chinese). *Proc CSEE*, 2008, 31: 1–8 [林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用. *中国电机工程学报*, 2008, 31: 1–8]
 - 71 Sun H D, Xu S Y, Xu T, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 497–506 [孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 497–506]
 - 72 Strachan N P W, Jovicic D. Stability of a variable-speed permanent magnet wind generator with weak AC grids. *IEEE Trans Power Deliver*, 2010, 25: 2779–2788
 - 73 Wu H, Wang X. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 6473–6482
 - 74 Bottrell N, Green T C. Comparison of current-limiting strategies during fault ride-through of inverters to prevent latch-up and wind-up. *IEEE Trans Power Electron*, 2014, 29: 3786–3797
 - 75 Shuai Z, Shen C, Liu X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method. *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 10: 4648–4661
 - 76 Yang W L, Tu C M, Xiao F, et al. Transient stability enhancement method for VSG to improve frequency stability (in Chinese). *Proc CSEE*, 2025, 45: 52–66 [杨万里, 涂春鸣, 肖凡, 等. 面向频率稳定性提升的VSG暂态稳定性增强方法. *中国电机工程学报*, 2025, 45: 52–66]
 - 77 Zhang Z, Jin Y, Xu Z. Grid-forming control of wind turbines for diode rectifier unit based offshore wind farm integration. *IEEE Trans Power Deliver*, 2023, 38: 1341–1352
 - 78 Fan B, Liu T, Zhao F, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances. *IEEE Open J Power Electron*, 2022, 3: 955–969
 - 79 Han P P, Chen P F, Ding M, et al. Quantitative analysis of inertia support capability of direct-drive wind turbines under VSG control (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2025, 49: 501–510 [韩平平, 陈鹏飞, 丁明, 等. VSG控制下直驱风机惯量支撑能力定量分析. *电网技术*, 2025, 49: 501–510]
 - 80 Lin J J, Zhang H B, Xiang W, et al. Analysis on inertia support capability of modular multilevel converter capacitor energy for AC system (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2025, 49: 1–13 [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. *电力系统自动化*, 2025, 49: 1–13]
 - 81 Yang S, Fang J, Tang Y, et al. Modular multilevel converter synthetic inertia-based frequency support for medium-voltage microgrids. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 8992–9002
 - 82 Yaermaimaiti A, Xin H H, Huang L B, et al. Trade-off triangle of tracking performance, anti-interference performance, and economic cost of grid-connected converters (in Chinese). *Proc CSEE*, 2025 [艾力西尔·亚尔买买提, 辛焕海, 黄林彬, 等. 变流器跟踪性能-抗扰性能-经济代价间的矛盾三角关系. *中国电机工程学报*, 2025] <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250221.1704.019>
 - 83 Zhang H, Xiang W, He Y, et al. Optimal energy utilization of MMC-HVDC system integrating offshore wind farms for onshore weak grid inertia support. *IEEE Trans Power Syst*, 2024, 39: 1304–1318
 - 84 Tang F, Qi J F, Xie J R, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment to avoid frequency secondary drop (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 3824–3836 [唐飞, 亓君锋, 谢家锐, 等. 避免频率二次跌落的风储联合调频控制策略. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 3824–3836]
 - 85 Zhang H B, Xiang W, Wen J Y. Active energy control of offshore wind power MMC-HVDC system to handle ac faults of receiving-end power grid (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 4600–4614 [张浩博, 向往, 文劲宇. 应对受端交流故障的海上风电柔直并网系统主动能量控制方法. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 4600–4614]

- 86 Cui Y, Peng L, Zhong W Z, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator (in Chinese). *Proc CSEE*, 2015, 35: 4300–4307 [崔杨, 彭龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略. *中国电机工程学报*, 2015, 35: 4300–4307]
- 87 Cao W, Zhang T, Fu Y S, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous condenser (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2020, 44: 1–10 [曹伟, 张甜, 傅业盛, 等. 同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用. *电力系统自动化*, 2020, 44: 1–10]
- 88 Ma F Y R. Assessment and enhancement of voltage support strength in renewable-energy-integrated power systems with grid-forming power electronic devices (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2024 [马富艺龙. 含构网型电力电子装备的新能源电力系统电压支撑强度评估与提升. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2024]
- 89 Ma F Y R, Xin H H, Li Z Y, et al. Impact analysis of converter diversity on system strength in multiinfeed power system (in Chinese). *Transact China Electrotech Soc*, 2025 [马富艺龙, 辛焕海, 李知艺, 等. 多馈入系统中变流器多样性对系统强度的影响分析. *电工技术学报*, 2025] DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.242168
- 90 Liu J H, Wang C, Bi T S. Node equivalent inertia index for temporal-spatial frequency dynamics of renewable energy power system and its applications (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 7773–7789 [刘家豪, 王程, 毕天姝. 面向新能源电力系统频率时空动态的节点等效惯量指标及其应用. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 7773–7789]
- 91 Liu J, Wang C, Zhao J, et al. RoCoF constrained unit commitment considering spatial difference in frequency dynamics. *IEEE Trans Power Syst*, 2024, 39: 1111–1125
- 92 Liu R X, Wang Z, Wu J L, et al. Virtual inertia configuration optimization of virtual inertia considering spatial distribution characteristics of frequency (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2024, 48: 122–130 [刘瑞煦, 汪震, 吴佳良, 等. 考虑频率空间分布特性的虚拟惯量配置优化. *电力系统自动化*, 2024, 48: 122–130]
- 93 Zhao H Y, Zheng F, Zhuo Q A, et al. Transmission-storage collaborative planning method for sending-end grid considering dynamic frequency security (in Chinese). *High Volt Eng*, 2025, 51: 3500–3509 [赵淦宇, 郑繁, 卓庆澳, 等. 考虑动态频率安全的送端电网输-储协同规划方法. *高电压技术*, 2025, 51: 3500–3509]
- 94 Yang C, Huang L, Xin H, et al. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems. *IEEE Trans Power Syst*, 2021, 36: 3563–3573
- 95 Wu C, Liu C X, Huang W, et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy (in Chinese). *Autom Electric Power Syst*, 2023, 47: 130–136 [吴琛, 刘晨曦, 黄伟, 等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法. *电力系统自动化*, 2023, 47: 130–136]
- 96 National Energy Administration. Technical guideline for evaluating power grid bearing capability of distributed resources connected to network (in Chinese). DL/T 2041–2019. Beijing: Standards Press of China, 2019 [国家能源局. 分布式电源接入电网承载力评估导则. DL/T 2041–2019. 北京: 中国标准出版社, 2019]
- 97 Hao W B, Meng Z G, Zhang Y, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system (in Chinese). *Power Syst Protect Control*, 2023, 51: 23–33 [郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究. *电力系统保护与控制*, 2023, 51: 23–33]
- 98 Gong R, Li H Q, Xu L X. Optimal allocation method of energy storage systems for improving the comprehensive carrying capacity of distribution network (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2025, 49: 3860–3869 [龚锐, 李华强, 许立雄. 面向配电网综合承载力提升的储能优化配置方法. *电网技术*, 2025, 49: 3860–3869]
- 99 Ren H, Shao W, Ran L, et al. A phase change material integrated press pack power module with enhanced overcurrent capability for grid support —A study on FRD. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2021, 57: 3956–3968
- 100 Rao H, Zhou Y B, Li W W, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology (in Chinese). *Automaton of Electric Power System*, 2023, 47: 1–11 [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. *电力系统自动化*, 2023, 47: 1–11]
- 101 Zeng R, Zhao B, Yu Z Q, et al. New-generation resilient HVDC technology (I): From device, equipment to system (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 7321–7333 [曾嵘, 赵彪, 余占清, 等. 新一代高韧性直流输电技术(一): 从器件、装备到系统. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 7321–7333]
- 102 Bai R, Zhao B, Yang C, et al. A novel ultrafast turn-off failure detection method of integrated gate commutated thyristor for VSC application.

IEEE Trans Power Electron, 2023, 38: 2839–2843

- 103 Shang J, Chen Z, Zhao B, et al. A novel detachable gate driver unit with ultralow inductance for integrated gate commutated thyristor. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 14000–14004
- 104 Wen J Y, Meng P Y, Xiang W, et al. Unified high voltage direct current converter topology dedicated for new power systems (in Chinese). *New Type Power Syst*, 2023, 1: 84–98 [文劲宇, 孟沛戡, 向往, 等. 面向新型电力系统的直流输电换流器统一拓扑架构. *新型电力系统*, 2023, 1: 84–98]

Key technologies and prospects for power electronic devices in supporting power grid security and stable operation

WEN JinYu^{1,2}, LIN JunJie^{1,2}, ZHANG ShaoPeng^{1,2}, DI HaoTian^{1,2}, ZHANG HaoBo^{1,2} & XIANG Wang^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

² School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Driven by the “Dual Carbon” strategy, the widespread adoption of power electronic devices in “source-network-load-storage” systems has become an important trend in the development of modern power systems. While power electronic devices enhance grid flexibility and renewable energy integration, they introduce critical challenges such as low inertia, weak damping, poor disturbance rejection, and wide-band oscillations. Considering these emerging characteristics of modern power systems, optimizing the control performance of power electronic devices and enhancing their grid-supporting capabilities have become pivotal for ensuring secure and stable system operation. This paper first examines the evolving grid paradigm, summarizing the distinctive features of power-electronics-dominated power systems and identifying the fundamental need for power electronic devices to transition from “passive following” to “active supporting” modes. Subsequently, the study investigates the “who support” question by analyzing the support potential of power electronic devices across spatial, temporal, and functional dimensions. Furthermore, addressing the “how to support” challenge, the paper explores methodologies for constructing active support systems through multi-faceted approaches including converter control strategies, capability quantification, and coordinated operation of multiple devices. Finally, the discussion extends to “how to better support” by examining high-performance power semiconductors, advanced converter controls, and grid security, while providing perspectives on future developments in active support technologies.

modern power system, power electronic devices, active support, converter control, power system security and stability

doi: [10.1360/SST-2025-0116](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0116)