

源-机-网协同视角下电力电子并网装备同步控制方法综述

查晓明^{1,2}, 李锡林^{1,2}, 黄 萌^{1,2}, 田 震^{1,2}, 梁军杨^{1,2}, 刘浴霜^{1,2}

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072;

2. 武汉大学综合能源电力装备及系统安全湖北省重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 发展新能源发电并网是“双碳”目标实现的重要途径, 高比例电力电子并网装备接入已成为新型电力系统的主要形态。然而, 电力电子系统的同步机制由装备同步控制主导, 受电源特性、装备能力、互联网络三者的共同影响。因此, 有必要从源-机-网协同视角出发, 考虑电力电子并网装备对资源的调控能力、并网装备间的交互作用, 梳理并网装备同步运行的内在机制。首先, 综述新能源发电输出特性对同步控制的影响及针对性的改进控制方法; 其次, 综述考虑并网装备物理资源约束下的同步控制方法; 再次, 梳理考虑弱电网交互下的并网装备同步控制和多机协同方法。由此, 引出电力电子并网装备同步控制需考虑的“源-机-网”三方面协同视角, 并提出新型同步控制构建思路。

关键词: 并网同步控制; 多变流器协同控制; 电力系统同步稳定性; 新能源发电集群; 源-机-网协同; 跟网型变流器; 构网型变流器

Review of Synchronous Control for Power Electronic Grid-connected Equipment from the Perspective of Source-converter-network Cooperation

ZHA Xiaoming^{1,2}, LI Xilin^{1,2}, HUANG Meng^{1,2}, TIAN Zhen^{1,2}, LIANG Junyang^{1,2}, LIU Yushuang^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Key Laboratory of Power Equipment & System Security for Integrated Energy, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The development of renewable energy power generation is an important way to achieve the goal of “double-carbon”, and the high proportion of power electronic grid-connected equipment has become the main form of renewable-resource-based power system. However, the synchronization mechanism of power electronic system is dominated by equipment synchronization control, which is affected by the characteristics of sources, equipment capability and interconnection network. Therefore, from the perspective of source-converter-network cooperation, it is necessary to consider the regulation ability of power electronic grid-connected equipment on resources and the interaction between different grid-connected equipment, and sort out the internal mechanism of synchronous operation of grid-connected equipment. Firstly, the influences of output characteristics of renewable energy generation on synchronous control and targeted improvement control methods are summarized. Secondly, the synchronous control methods considering the physical resource constraints of grid-connected equipment are reviewed. Thirdly, the synchronous control of grid-connected equipment under weak grid interaction and multi-converter coordination methods are reviewed. Therefore, the three aspects of “source-converter-network” coordination perspective for synchronous control of power electronic grid-connected equipment are introduced, and new methods of constructing synchronous control are proposed.

Key words: grid-connected synchronous control; multi-converter coordinated control; power system synchronous stability; renewable energy power generation cluster; source-converter-network cooperation; grid-following converter; grid-forming converter

0 引言

新能源发电主导新型电力系统形态特征加速电力电子化,高比例新能源发电与高比例电力通过电子设备(即“双高”)成为现代电力系统的各种运行问题的主要标识和电力电子化电力系统工程化的具体体现。电力电子功率变换及其控制技术主导了电力电子化电力系统的运行控制。并网变流器功率变换控制通过调控源-机-网多侧资源特性,实现新能源发电集群并网系统的功率平衡,满足系统安全稳定运行需求。电力电子化电力系统安全稳定运行问题可以抽象为针对如图 1 所示的海量变流器(同步单元)互联网络系统的控制与分析,其中多类型可再生能源资源通过不同同步控制的并网变流器接入互联网络。

目前,并网变流器运行的同步机制建立在传统电力系统运行控制理论之上。根据控制特征及效果演变发展成为跟网型^[1]和构网型^[2]两种类型的并网变流器,包括锁相环(phase locked loop, PLL)控制^[3]、功率同步控制^[4]、虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制^[5]等。其中,跟网型并网变流器不具备独立运行的能力,必须接入有源电网才能运行;构网型并网变流器具有独立运行的能力,但其功率调控灵活度不如跟网型并网变流器。此外,并网变流器对电网状态的感知能力极为有限。

随着新能源发电的大规模接入,电网经历了 2012 年酒泉风电场风机脱网等大量大规模风机脱网事故^[6],以及后来的功率振荡事件^[7]。这些事故促使人们对并网变流器及含高比例电力电子设备的电力系统稳定运行不断提出改进对策,如优化并网变流器的故障穿越能力^[8],开展阻抗分析理论工程化应用与振荡抑制策略应用研究^[9]等。然而,高比例新能源的电力系统稳定运行问题仍在不断暴露,如 2019 年 8 月英国伦敦大停电事故^[10]，“双高”电力系统运行控制的技术重构具有理论和工程上的必要性和迫切性^[11]。

现有跟网、构网同步控制针对强电网假设或模拟同步机运行,未能充分考虑新能源发电集群原动侧资源和变流器安全稳定约束问题。复杂工况下新能源集群并网系统往往经历不同动态过程,最终产生同步稳定性问题。与传统电力系统同步方式相比,新能源集群并网系统运行的同步机制形成机理不同,系统同步稳定性问题呈现多样复杂性^[12]。并网

变流器多环控制交互和多变流器网络交互特征,使得控制驱动系统多尺度功率平衡关系的形成过程复杂,全局优化的同步控制实现困难。一方面,并网变流器控制应具备对原动侧分布式资源和变流器装备能力资源的精确评估和充分支配能力,以实现系统行为的有效驱动,而目前控制设计大多未充分体现系统资源特性影响。同步控制设计需要充分考虑自身设备可用资源,通过电力电子控制调控能力实现对空间分散分布以及时间多尺度可用资源的充分协同利用。并网变流器可用资源包括原动侧风机、光伏等电源的物理特性,前级变流器的控制特性等源属资源,以及并网变流器装备能力等机属资源。另一方面,网络结构及参数也会影响变流器同步运行协调性的规律。暂态条件下并网变流器控制的协调性差,存在网络参数演化机制不清、协调运行目标不明、系统设备安全极限边界在控制策略设计中难以表征等问题,从而使得系统的安全稳定问题受到威胁。既有同步控制大多仅依赖电网的局部状态运行,缺乏系统状态感知协调能力。同步控制设计需充分考虑电网整体的特性,包括电网强度、阻抗比、电网电压以及网络内其他受控设备的动态响应特性等。不同电网特性下系统同步响应特性各异,需定制化改造并网同步控制。

综上所述,充分考虑电源特性、装备能力及互联网络影响下的并网同步控制设计,有助于实现控制与系统特性的匹配,从而达到最优的控制效果。传统并网同步控制策略如跟网型控制,存在弱电网条件下易暂态同步失稳、原动侧风机阻尼惯量特性未充分利用而导致变流器自身阻尼不足等缺陷;而构网型控制在强电网下易振荡,存在限流控制触发后无法兼顾同步稳定性与暂态支撑能力等局限。因此,有必要从源-机-网协同视角出发,考虑电力电子并网装备对资源的调控能力及并网装备间的交互作用,梳理并网装备同步运行的内在机制,探索源-机-网协同视角下电力电子并网装备同步控制协同的新思路,研究充分发掘利用分布式资源特性和适应多变流器复杂交互的多尺度分散自治协同控制。为此,本文分别综述了考虑电源特性、装备能力、网络特性以及多变流器交互协同改进的同步控制策略,并提出了一种基于参量变分原理的同步控制新思路;通过总结现有研究不足,归纳和展望了新能源发电集群并网系统安全稳定运行与协同控制的关键科学问题,可为后续研究提供思路参考。

1 考虑电源特性的控制设计

原动侧电源动态会通过直流母线电容影响网侧并网变流器运行, 严重时会发生宽频振荡乃至失稳, 因此并网变流器控制设计时需考虑原动侧的影响。有效利用原动侧物理特性可为并网变流器提供一定的惯量和阻尼能力。直驱式永磁同步风力发电机(directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generators, D-PMSG)、双馈感应风力发电机(wind turbine with doubly-fed induction generator, DFIG)、光伏电池(photovoltaics cell, PVC)等不同原动侧装备, 因物理特性和机侧控制策略各异而面临着不同的振荡和失稳风险^[13]。文献[14]指出变速风机主要通过风速、风机容量、风机控制等设计驱动系统同步特性。PVC 则主要通过光照强度和 DC-DC 变流器控制设计驱动系统同步特性^[15]。考虑到其他类型的新能源发电设备并网容量较低, 对电网影响较小, 本文不做展开。

1.1 考虑 PVC 特性的并网控制

PVC 输出特性为光照强度与温度的函数^[16]。光伏发电系统大多采用多级变流器实现并网, 其中前级 DC-DC 变流器通常采用最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)控制输出有功参考值 P_{ref} 至后级并网变流器^[17]。本节分别从光伏出力随机波动抑制控制和光伏功率备用控制两方面介绍既有光伏发电并网控制面对原动侧扰动和网

侧波动的改进优化。

1.1.1 光伏出力随机波动抑制控制

光照强度、温度以及部分遮挡等因素的随机波动性导致并网变流器输入功率和直流母线电压波动严重, 从而严重危害系统的稳定运行。增配储能装备或无功可调装置可以减小出力随机性造成的同步失稳风险^[18], 但会增加额外成本。从控制角度出发的波动抑制大致分为两类: 1) 改进 MPPT 控制; 2) 运行在最大功率运行点以下的非最优工作点。传统 MPPT 控制存在响应速度慢, 误判断扰动方向^[19], 光照温度条件快速变化时易振荡^[20], 以及无法辨别局部和全局最优工作点等问题^[19]。针对上述问题的改进 MPPT 控制主要包括: 自适应步长法^[21]、基于人工智能的最大功率点(maximum power point, MPP)预测法^[22]、基于模型预测的 MPPT 等^[23], 这些方法在动态性能、鲁棒性和计算复杂度上均有显著优势。文献[24]指出, DC-DC 变流器采用 MPP 以下运行控制可以实现对波动性不利影响的抑制。文献[25]利用光伏发电系统的有功-无功解耦特性来改善系统面对随机扰动的运行性能。光照强度随机性导致光伏发电系统面临较大的电能质量问题, 尤其是在低功率运行状态下, 目前也已得到广泛研究^[26]。文献[27]提出了一种自适应直流电压控制策略, 以减少并网变流器输出谐波, 并在非对称故障下减小直流电压的倍频波动。

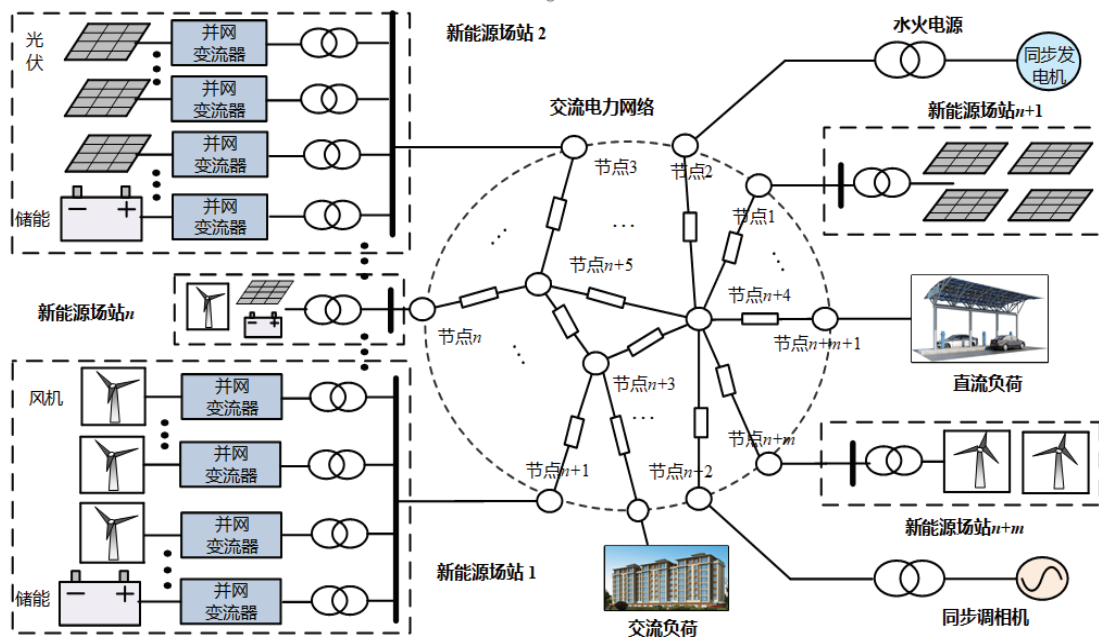


图1 海量并网变流器互联网络系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of mass grid-connected converter interconnection network system

1.1.2 电网故障下的光伏电源支撑控制

近年来基于光伏并网变流器改进控制为交流电网提供故障支撑也得到了广泛的研究。文献[28]和文献[29]分别提出一种针对光伏发电装备的功率备用控制,以改善系统暂态同步稳定性,并为故障下支撑电网频率提供额外功率。一旦变流器检测到电网频率跌落,备用功率将通过一个预定的下垂注入到电网,以模拟同步发电机惯量特性^[30],并可协同阻尼控制提高故障最低频率和故障后的稳态频率^[31],但该方法存在未考虑暂态稳定约束和备用率难以确定等不足。VSG 原动侧通常为储能电池而非具有复杂动态特性的 PVC 来提供恒定的直流电压。文献[32]提出一种考虑 PVC 动态特征的 PV-VSG 控制,如图 2 所示,图中 P_{ref1} 、 P_{ref2} 、 Q_{ref1} 、 Q_{ref2} 、 u_{acref1} 、 u_{acref2} 分别表示考虑 PVC 动态前、后的有功、无功、交流电压参考值; U_{dc} 和 U_{dcref} 分别代表直流母线电压和其参考值; u_{ac} 和 D_q 分别为交流电压和无功下垂系数; ΔX 为该控制交流电压/有功功率补偿值。但文献[32]在光伏出力最大值低于系统所需时依旧需要额外功率源的介入。

1.2 考虑变速风机特性的并网控制

目前风电机组主要采用 DFIG 和 PMSG 两类,可通过协调二者特性与控制对并网变流器控制进行改进。按照所调用的可控资源不同大致可分为预留风能备用和风机转子动能两类。

1.2.1 预留风能备用控制

针对预留风能备用控制可分为桨距角控制、风机超速减载控制两类。其中:1) 桨距角控制通过增大桨距角使得 $P-\omega$ 曲线下移而提供备用容量。因涉及到机械动作故主要用于慢尺度调节,频繁使用易造成机械磨损^[33],但其备用容量较大且全风速工况可用^[34]。为降低机械磨损,文献[35]提出一种基于鲸鱼算法在线优化的模糊比例积分微分(proportional-integral-derivative control, PID)控制器。文献[36]提出了一种响应电网频率变化的改进方法,改善了传统桨距角控制响应速度慢的不足。2) 风机超速减载控制通过让风机越过 MPP 转速从而为系统提供备用容量^[37]。其响应速度较快且机械磨损问题更小,但备用容量受风机转子最大转速限制^[38]。此外,还有一些研究结合了两种备用控制的优势,提出在高风速工况下使用桨距角控制、在中低风速工况下使用超速控制^[39]的方法,但控制分区边界整定方法未给出。进一步地,文献[40]提出了

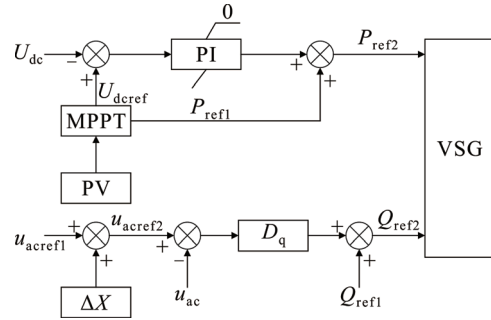


图 2 考虑源侧动态的 PV-VSG 控制

Fig.2 PV-VSG control considering source-side dynamic

一种同时利用超速控制实现快速功率响应和通过变桨距调节实现稳定功率跟踪的协调控制策略,但增加了风机发生扭矩振荡的风险。

1.2.2 风机转子动能控制

转子动能控制为利用风机转子可在较大范围运行的特性,通过控制其响应网侧功率需求而调用风机转子惯量为电网提供惯量支撑^[41]:包括根据系统频率变化 Δf 响应的下垂(droop)控制和根据系统频率变化率 $d\Delta f/dt$ 响应的虚拟惯量(virtual inertia)控制。但需要指出的是,转子动能控制与并网变流器构网同步控制有本质不同,前者系机侧控制调用风机惯量,根据电网频率输出相应的功率参考补偿;而后者为网侧控制模拟同步发电机惯量,根据并网变流器与电网的实时潮流输出相应放入端口电压相位参考,以实现以电网的同步。虚拟惯量控制和 MPPT 控制交互会造成故障恢复过程中频率二次跌落,通过附加转速保护模块抑制该风险^[42]。下垂控制具备频率最低处支撑能力强的优点,但也存在响应速度慢的缺点。同时,也有研究提出结合虚拟惯量与下垂控制的综合惯性控制^[43],该控制方式同时结合了二者的优势,控制方程如式(1)所示。

$$\Delta P = - \left(\frac{K_{DRC} \Delta f}{\text{droop}} + \frac{K_{VIC} d\Delta f/dt}{\text{virtual inertia}} \right) \quad (1)$$

式中: K_{DRC} 和 K_{VIC} 分别为下垂控制的比例系数和虚拟惯量控制的微分系数; ΔP 为附加有功功率; Δf 为交流侧频率变化值。此外,短时功率超发控制也是一种转子动能控制,其本质上是用时域函数代替虚拟惯量或下垂控制来响应电网频率变化,其响应速度较快,但关键参数整定困难^[44]。此外,预备风能备用资源和转子动能资源可同时调用,并按照风速区间设计分段控制^[45]。

1.2.3 原动侧控-网侧控制交互

原动侧前级控制也会使并网变流器产生一些振荡和失稳风险, 设计并网变流器参数时需考虑这些不利影响。例如, 原动侧风机容量较大时会导致并网变流器开关频率较低, 进而致使交流电流环设计带宽向 PLL 带宽区间偏移, 加剧了二者之间的非线性交互, 并增加了系统同步失稳的风险。针对此问题, 文献[46]和文献[47]分别基于传递函数法和等面积法则从小信号和大信号角度出发构建了考虑非理想电流环动态的 PLL 控制参数设计方法。文献[48]基于序阻抗分析法指出, 风机次同步振荡的主导因素是机组控制器产生的负容性阻抗与弱电网阻抗之间的串联谐振, 基于此提出了一种基于短路比的 PLL 优化设计方法。

本节按照新能源发电并网系统原动侧不同, 分别综述了考虑光伏电池资源特性和变速风机资源特性的改进并网控制, 总结如表 1 所示。无论原动侧为何种新能源发电设备, 现有改进控制均大致可以分为以下 3 类: 1) 改进 MPPT 控制, 实现对 MPP 更精确追踪的同时抑制源侧随机性波动对并网变流器的影响; 2) 使系统偏移 MPP 的功率备用控制; 3) 利用原动侧机械资源实现对网侧的阻尼惯量支撑。虽研究众多, 但依旧面临以下不足亟待解决: 1) 人为弃光弃风导致电场运行经济性较差; 2) 光伏电池缺乏机械资源无法调用; 3) 机械频繁调控导致磨损加剧; 4) 关键控制参数整定困难。

2 考虑变流器装备能力的控制设计

并网变流器与同步发电机的能量转换装置物理特征差异巨大, 尤其是故障耐受能力等难以通过控制模拟, 因此变流器装备能力特性也是设计并网控制时的一个重要考量因素。基于此, 本章从以下 3 个方面综述相关控制设计: 1) 考虑直压母线的动态特性; 2) 考虑变流器的耐流能力特性; 3) 考虑其他装备能力资源, 如硬件保护装置、控制延迟、及开关非线性等。

2.1 考虑直流母线动态的并网控制

传统构网型控制(如 VSG)需要直流母线电容电压维持恒定^[49], 因此传统构网型变流器大多需在直流侧配储能装置以维持直流电压恒定。为避免对储能装置的依赖性, 一种类似跟网型变流器直压环的直流电压控制被提出并被直接与同步控制环级联^[50-54]或并联^[55-56]。然而, 多控制环间的高阶耦合

表 1 考虑电源特性的改进控制设计

控制目标	改进思路	特点
源侧随机性扰动抑制	改进 MPPT 控制	响应快, 无方向误判和振荡风险, 可辨别全局最优工作点
	自适应协同控制	前级后级变流器协同设计 ^[27,48] , 降低交互导致的振荡风险
	有功无功解耦改进	利用光伏有功-无功解耦特性改善面对随机扰动的性能 ^[25]
电网故障支撑	光伏备用控制	为故障电网提供频率支撑, 但存在功率备用率难以确定及弃光等不足
	光伏-VSG 控制	在光伏出力最大值低于系统所需功率时依旧需要额外的功率源介入 ^[32]
	预留风能控制	桨距角控制机械磨损较大, 响应慢; 超速控制速度快且磨损小, 但备用容量有限
	转子动能控制	存在频率二次跌落风险, 响应慢, 参数整定困难

导致参数整定复杂^[57]、动态响应差^[58]及暂态同步稳定性恶化^[52,56]。

通过揭示直流母线电容动态和同步发电机动态间的相似性, 文献[59]提出一种直流电压同步控制(direct voltage synchronous control, DVSC), 亦称匹配控制^[60]。通过建立直流电压与电网频率间的关联, 直接根据直流母线电容动态产生同步相位。当电网频率发生跌落时, 直流电压会随之下降, 以防并网变流器功角增大, 从而避免进一步增加输出功率。通过这种实时映射关系, 直流母线电容的惯性特性被自然地引入到整个并网系统中。DVSC 相比于额外附加直流电压控制更加简洁, 且响应速度更快。但 DVSC 阻尼较弱, 故面临较大的振荡与失稳风险^[57]。文献[59]构建了 DVSC 小信号模型, 并提出了一种有功反馈改进控制以抑制低频振荡。但文献[61]证明该方法在参数整定不合理时会发生同步谐振, 并提出一种 q 轴电压前馈, 以消除该谐振风险。文献[62]建立了文献[59]所提控制的阻抗模型, 指出 DVSC 控制可能引入负电阻。文献[63]提出了一种基于直压平方的超前滞后 DVSC 控制, 巧妙地简化了非线性, 避免了 DVSC 中频率相关的变化惯量特性, 从能量角度揭示了 DVSC 的自同步机制。然而, 这种平方控制将导致直压变化过大, 并导致直流侧存在严重欠压风险。文献[64]提出一种虚拟电容控制(亦称惯量传递控制), 控制框图如图 3 所示, 图中 ω_m 、 v_{wind} 和 β 分别为转子转速、风速和桨距角; u_{dc} 、 T 和 K_c 分别为直流母线电压、惯量传统控制的滤波器时间常数和微分系数; P_{mppt} 、 P_{Vc} 和

P_{REF} 分别为 MPPT 输出参考有功功率、惯量传递控制输出参考有功功率和最终输出有功参考功率。该方法进一步提高了 DVSC 控制的惯性响应能力,但却降低了机侧阻尼,从而导致系统失稳风险加剧。

2.2 构网型变流器限流控制

跟网型变流器展现为电流源特性,因此其限流控制较为简单,无需复杂的额外设计,故不讨论。相比之下,构网型变流器的输出电流受电网条件决定,电网故障下可能会迅速变化。为防止硬件损坏,必须采用适当的故障穿越限流策略^[65-66]。常见的限流控制大致可分为:1) 电流饱和控制,即通过闭环电流控制将相电流幅值限制在最大允许值内^[67-70]; 2) 虚拟阻抗,即基于虚拟阻抗/导纳的控制方法^[71-74],通过增加总阻抗来调节输出电流大小; 3) 电压限制器,通过电压限制器减小电压差来调节输出电流大小^[75-76]; 4) 混合同步控制,故障电流饱和和下触发功率同步-锁相同步切换控制,电流限幅控制的接入和接出改变系统的暂态同步机制^[77]。文献^[78]指出电流饱和限幅控制触发可以等效为系统切换为类似 PLL 主导下的电流源特性,虚拟阻抗限幅控制触发则可以等效为电网电压和电感扰动,均不需要通过额外分析方法刻画其同步失稳机理。

限流控制研究难点主要在于:1) 限流介入后构网型变流器暂态同步稳定性急剧恶化; 2) 切换为电流源模式后无法继续为电网提供暂态支撑; 3) 控制切换平滑性需优化; 4) 如何避免暂态闭锁问题。文献^[79]针对上述问题给出了详细分析与文献综述,本文不再赘述。

2.3 其他装备能力资源

本节从硬件保护装置、控制延迟以及开关动态等方面综述并网变流器装备固有响应特性对并网控制的影响。不仅要通过控制优化来避免固有特性产生的不利影响,还要充分利用其中的有利资源,尤其是还未得到充分发掘的开关快速调控资源。

2.3.1 硬件保护电路

电网故障时,DFIG 迅速投入撬棒(Crowbar)电路并闭锁转子侧变流器,使过电流通过 Crowbar 耗散,从而避免转子绕组过电流造成电力电子设备损坏。文献^[80]对撬棒电路的拓扑设计和参数计算等进行了详细研究。然而,在该策略下转子侧变流器会被旁路,从而无法有效控制 DFIG 机组的输出功率,且发电机电磁转矩会产生剧烈振荡并消耗大量无功,从而不利于电网电压的恢复^[81]。为保护直流

母线电容,可在电容两端并联直流斩波保护装置,在电网故障期间为直流母线电容提供放电通路,从而抑制直流母线电压的上升^[82]。电网故障下斩波电路能够提供快速响应,避免变流器输出过高或过低的功率,从而保障电网的稳定性。此外,外接储能装置也能保护直压母线^[83]。

2.3.2 控制延迟和开关切换特性

控制延迟和开关切换特性也是电力电子设备的固有响应特性^[84]。文献^[85]指出控制延迟是构网变流器输出阻抗高频段呈负电阻的罪魁祸首。除直接增强控制器处理能力外^[86],也可通过控制改进尽可能减小控制延迟的不利影响,如线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)控制^[87]和陷波器超前补偿控制等^[88]。开关切换非线性主要影响变流器输出的电能质量^[89],常见的改进方法包括采用软开关技术^[90],通过多电平控制提高等效开关频率^[91],以及开关频率动态优化等^[92]。

本节综述了考虑并网变流器装备能力响应特性的改进控制策略,包括直流母线电压波动响应、变流器耐流能力不足、硬件保护、控制延迟以及开关切换非线性等,总结如表 2 所示。目前的研究瓶

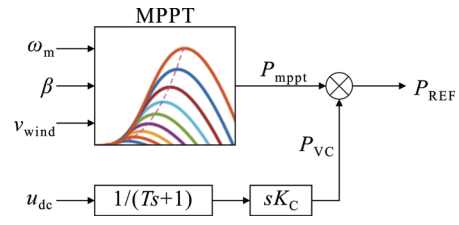


图3 惯量传递控制

Fig.3 Inertia transfer control

表 2 考虑变流器装备能力的控制设计

Table 2 Improved control considering converter capacity		
装备能力	控制方法	特点
直流母线 电容	附加直压外环 ^[54]	参数整定复杂, 动态响应差
	传统直压同步 ^[60]	控制简洁且响应快, 但阻尼较弱
	有功反馈直压同步	抑制低频振荡, 但有同步谐振风险 ^[59]
	电压反馈直压同步	引入 q 轴电压反馈消除谐振风险 ^[61]
	直压平方同步	避免控制非线性, 但直压波动较大 ^[63]
构网变流 器限流控 制	惯量传递控制	提高惯性响应能力, 但机侧阻尼弱 ^[64]
	电流饱和控制	切换后为电流源模式
	虚拟阻抗	暂态稳定性恶化
其他装备 特性	混合同步控制	控制切换平滑性有待优化
	硬件保护电路	影响同步稳定性, 存在机械磨损
其他装备 特性	控制延迟	导致变流器高频负电阻特性, 可用 LQR ^[87] 或陷波器补偿 ^[88]
	开关特性	恶化电能质量, 可用软开关 ^[90] 或多电平技术优化 ^[91]

颈可归纳为以下几点: 1) 直流电压同步控制阻尼不足且存在负电阻效应, 导致其发展受限; 2) 限流控制难以兼顾功率传输和暂态稳定性; 3) 电力电子开关尺度功率快速调控能力未利用。

3 考虑电网特性影响的并网同步控制设计

传统同步控制未考虑电网特性对变流器安全稳定运行的影响, 缺乏在复杂电网特性下的适应性。不同电网强度和故障深度对并网变流器协调运行的需求不尽相同, 从而驱动产生了相应的改进并网控制。本章分以下两部分综述: 1) 考虑电网强度特性的改进并网同步控制; 2) 考虑电网故障特性的改进并网同步控制。

3.1 考虑电网强度特性的改进并网同步控制

一方面, 弱电网下跟网型变流器各控制环路的动态行为间耦合关系加剧^[93], 严重影响了系统的同步稳定性^[94]。另一方面, 强电网下构网型变流器面临较大振荡和失稳风险^[85]。因此, 同步控制设计需充分考虑不同电网强度下的同步需求, 否则可能导致系统面临较大失稳风险。

3.1.1 跟网型控制改进

弱电网下并网点电压动态极易受 PLL 影响并同时影响 PLL 动态, 进而产生复杂交互。文献[95]指出电网强度会改变跟网型变流器并网系统的等效阻尼, 从而增加系统失稳风险。文献[96]通过复转矩系数法指出并网点强度会影响 PLL 的开环特性, 增大 PLL 的 PI 控制参数会导致系统振荡频率增加, 并基于相位补偿思路设计了一种阻尼控制器以增大等效阻尼。文献[48]基于序阻抗分析法提出了一种基于短路比的 PLL 优化设计方法。文献[97]提出一种基于前馈补偿的阻抗重塑方案, 以改善 PLL 在低频段的阻抗特性, 从而避免其负电阻特性导致的失稳。文献[98]和文献[99]分别从小扰动和大扰动角度提出了一种基于频率反馈的改进锁相环控制, 控制结构如图 4 所示, 通过增强系统阻尼改进了跟网型变流器的静态和暂态稳定性。图 4 中, θ_{PLL} 、 ω_{PLL} 和 ω_0 分别为 PLL 输出相位、PLL 输出频率和系统标称频率; I_{refd} 、 L_g 、 U_{PCC} 和 U_{PCCq} 分别为 d 轴输出电流参考值、线路电感、并网点电压及其 q 轴分量 (以 θ_{PLL} 为参考系); K_{iPLL} 和 K_{pPLL} 分别为 PLL 的积分和比例控制参数。

较低的电网强度使得跟网型并网变流器多控制环节尺度偏移产生重叠而出现交互振荡失稳^[100],

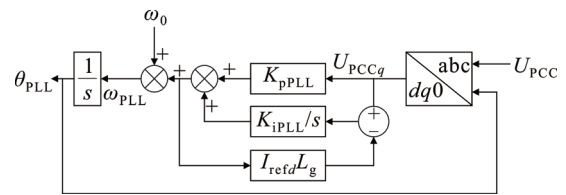


图 4 基于频率反馈的改进锁相环控制

Fig.4 Improved PLL based on frequency feedback

可能产生次/超同步振荡^[101]。文献[102]指出弱电网下跟网型变流器极易与电网发生低频共振, 此时 PLL 和直流电压环的带宽应小于电流环带宽的十分之一, 且积分系数不应过大。文献[103]指出弱电网下多控制环交互会产生一个正反馈于直流电压环的部分, 当 PLL 和直流电压环带宽接近时, 系统稳定性最差。文献[104]提出了一种基于阻抗压降反馈的改进 PLL 控制, 实现了 PLL 和直流电压环的解耦, 进而改善了跟网型变流器的稳定性。文献[105]基于单输入、单输出传函表征 PLL 与电流环的小扰动交互特征, 并提出一种控制参数协同设计方法, 改善了跟网型变流器的小信号稳定性。文献[106]提出了一种基于电容电流反馈主动阻尼的改进电流环设计, 以减少 PLL 对电流控制的负面影响, 该设计具有较强的电网强度鲁棒性。文献[107]指出 PLL 带宽不会随着电流环带宽的增加而线性增加, 并提出了一种考虑电流环影响的 PLL 参数设计方法, 使得跟网型变流器在弱电网条件下具有足够的小信号稳定裕度。文献[47]采用等面积法揭示了大扰动下 PLL、电流环与弱电网的暂态交互机理, 并推导了电流环动态需考虑的临界带宽边界。

3.1.2 构网型控制改进

构网型变流器的安全稳定运行同样也对电网强度特性较为敏感, 强电网条件下易发生次同步振荡并最终导致同步失稳^[108]。文献[109]用分岔分析法分析了不同电网强度下的构网型变流器失稳机制, 并指出端电压控制是导致强弱电网下系统协调性差异的关键因素。文献[85]指出强电网下构网型变流器易发生次同步振荡的物理解释是电压源间联络阻抗越小越容易发生振荡失稳, 联络阻抗包括网络线路阻抗和构网型变流器电压控制产生的等效输出阻抗^[110]。针对此, 直观解决方案是在交流电压环前增加虚拟阻抗控制, 但其参数整定较为复杂^[111]。文献[112]涉及了一种电压幅值单环控制, 直接输出调制信号而不再通过电流控制环, 可有效提高构网

型变流器的输出阻抗。文献[113]提出了一种有源阻尼改进控制，通过重塑变流器频域阻抗特征弥补构网型变流器低频段的负阻尼，从而消除其与串联补偿线路的次同步振荡风险。为改善传统构网型控制在阻性网络下效果不佳的缺陷，文献[114]提出了一种匹配电网阻抗比的旋转下垂控制(rotating droop control, RDRC)，其控制方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \theta_{\text{GFM}} = \int_0^t K_{\text{pRDRC}} (P_{\text{ref}} - P \cos \gamma + Q \sin \gamma) + \omega_0 d\tau \\ U_{\text{GFM}} = U_0 + K_{\text{qRDRC}} (Q_{\text{ref}} - P \sin \gamma - Q \cos \gamma) \\ \gamma = \arctan(R_g / X_g) \end{cases} \quad (2)$$

式中： K_{pRDRC} 和 K_{qRDRC} 分别有功和无功环比例系数； θ_{GFM} 和 U_{GFM} 分别为旋转下垂控制的输出相位和电压幅值； P 、 Q 、 P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为变流器输出的有功功率和无功功率以及相应的参考值； R_g 和 X_g 分别为线路电阻和电抗； γ 为相应线路阻抗比。该方法考虑了线路阻抗比 γ ，在减轻电压谐波等方面相比传统下垂控制有显著改善。

3.2 考虑电网故障特性的改进并网同步控制

电网发生大扰动故障时，线路阻抗幅值、比例以及电网电压频率、幅值等电网特性参数发生剧变，导致变流器安全稳定运行需求也发生变化。研究大扰动下电网特性驱动变流器并网控制的协调性机制至关重要。现有考虑电网故障特性的改进控制大致可分为：1) 屏蔽外环输出参考值，重新给定变流器输出参考；2) 对控制参数进行离线优化或在线自适应优化；3) 依据故障电网同步需求改进控制器结构，包括闭锁、饱和输出以及跟网构网混合控制等。

3.2.1 外环重塑改进控制

考虑电网故障特性改进并网控制以提升系统在故障运行能力，首先是要厘清变流器并网控制与电网的暂态交互机制。文献[115]通过将基于PLL的跟网型变流器2阶简化非线性状态方程与同步发电机转子摇摆方程类比，得到跟网型变流器等效驱动力矩 P_{mGFL} 、等效电磁力矩 $P_{\text{eGFL}} \sin \delta$ 及等效阻尼力矩 $\omega D_{\text{pGFL}}(\delta)$ ，具体表达式如式(3)所示。其中， $\delta = \theta_{\text{PLL}} - \theta_g$ ， $\omega = \omega_{\text{PLL}} - \omega_g$ ，分别表示跟网型变流器并网系统的功角和相对频率。

$$\begin{cases} M = (1 - K_{\text{pPLL}} L_g I_{\text{ref}d}) \\ P_{\text{mGFL}} = (\omega_0 K_{\text{iPLL}} L_g I_{\text{ref}d} + K_{\text{iPLL}} R_g I_{\text{ref}q}) / M \\ P_{\text{eGFL}} = K_{\text{iPLL}} U_g / M \\ D_{\text{pGFL}} = (-K_{\text{iPLL}} L_g I_{\text{ref}d} + K_{\text{pPLL}} U_g \cos \delta) / M \end{cases} \quad (3)$$

式中： $I_{\text{ref}q}$ 为 q 轴输出电流参考值； U_g 是电网电压幅值； M 是变流器等效虚拟惯量。基于此等效类比，文献[116]使用等面积法则精确刻画了PLL与电网的暂态交互机制。如图5所示，降低驱动力矩 P_{mGFL} 及提高等效电磁力矩 $P_{\text{eGFL}} \sin \delta$ 和等效阻尼力矩 $\omega D_{\text{pGFL}}(\delta)$ 均可提高暂态稳定性。因此，可以通过屏蔽跟网型变流器直流电压外环输出并人为设定电流参考值来降低系统等效驱动力矩，进而有效提升系统的故障穿越能力[117]。文献[118]指出故障穿越时减小 d 轴电流参考值有利于稳定。文献[119]、[120]指出故障条件下 d 、 q 轴电流参考值可设计为比值与线路电阻电抗比值的相反数，以保证稳态平衡点的存在性。类似地，构网型变流器也可通过降低输出功率来实现暂态同步稳定性的提升[121]。此外，提升构网型变流器的无功参考值可提升其输出端电压，从而提升变流器的有功传输极限功率，进而提升系统的暂态稳定性[122]。

3.2.2 参数优化改进控制

上述改进主要关注于系统驱动力矩和电磁力矩的改进，系统等效阻尼同样对系统暂态响应特性起决定性作用。暂态故障下跟网型变流器并网系统的等效阻尼同时受电网故障特性和PLL控制器参数的影响[123]，因此根据电网故障暂态时演变特性在线调整PLL控制器参数是一条可行的暂态稳定性改进路线。文献[124]通过对电网故障特征(电网电压相位和故障深度)在线估计，利用离线得到的自适应机制来调整PLL参数。进一步地，文献[124]提出了一种频率-相位解耦PLL策略，提高了跟网型变流器面对故障的快速穿越能力。文献[125]提出了一种基于比例权重的PLL参数自适应调整控制方法，以保证跟网型变流器在弱电网下具有 30° 以上的稳

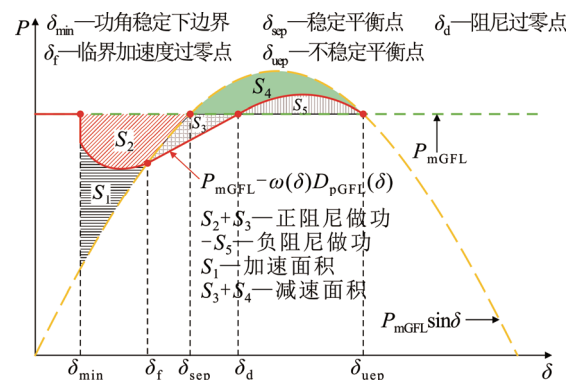


图5 考虑阻尼的跟网型变流器系统等面积法

Fig.5 Equal area criterion for grid-following converters considering damping

定裕度。人工智能算法也被广泛应用于跟网型变流器控制参数的自适应整定中: 文献[126]通过粒子群优化算法结合电网阻抗测量技术对附加有源阻尼控制器参数进行自适应优化; 文献[46]采用遗传算法对并网变流器关键控制环的参数进行协调优化, 以提升系统阻尼; 文献[127]基于代理模型黑箱算法构建了跟网型变流器外环参数的最优设计方案。

类似地, 构网型变流器也可通过参数优化改善其故障穿越暂态性能。文献[128]通过对有功下垂增益和低通滤波器截止频率的灵活配置, 实现了系统暂态稳定性的提升。文献[129]指出 VSG 控制暂态稳定性和静态稳定性间的矛盾性, 并通过对控制参数穷举实现了阻尼最优化, 但参数驱动系统暂态响应性能机理仍不清晰。文献[130]提出了一种结合柔性动作-评价算法的物理信息神经网络, 通过调节虚拟惯量和阻尼系数实现 VSG 控制暂态稳定的优化。需指出的是, 参数优化除以稳定性最优为目标外, 还需考虑系统动态响应性能, 否则所得优化结果将不具备工程应用价值。

3.2.3 结构改进控制

改善控制回路也是一条直观的稳定性优化思路。跟网型控制结构改主要包括前馈/反馈支路补偿和闭锁 PLL 等方法^[131]。文献[132-133]提出在故障期间闭锁 PLL 积分器以改进稳定性, 但其存在静态误差且电网导则兼容性较低的问题。构网型控制的改进则主要通过增加阻尼反馈项实现。文献[134]通过将测量电网暂态频率反馈至有功参考值以实现暂态扰动的阻尼, 但这种暂态阻尼改进 VSG 需借助额外的电网状态观测器。进一步地, 文献[135]指出 VSG 输出频率经滤波器后可近似等效为电网故障频率, 如图 6 所示, 该改进使得[134]不再需要额外的电网观测器。图 6 中, J 、 K_h 和 α 分别为改进 VSG 的虚拟惯量系数、阻尼改进增益和低通滤波器参数截止频率。需指出的是, 这类暂态阻尼改进 VSG 控制存在大扰动稳定性和小扰动稳定性间的矛盾, 即较大的滤波器增益会导致前者稳定裕度减小而后者稳定裕度增大, 因此设计参数时需兼顾二者^[129]。借助更高阶滤波器的阻尼修正控制^[136]也被提出, 但高阶控制器会导致系统动态复杂且参数整定困难。文献[67]通过在有功下垂控制环中附加 q 轴电压前馈项, 实现了系统等效驱动力矩的降低, 进而达到了改善暂态稳定性的效果。文献[137]提出一种自适应调节频率估计环增益控制, 通过附加提

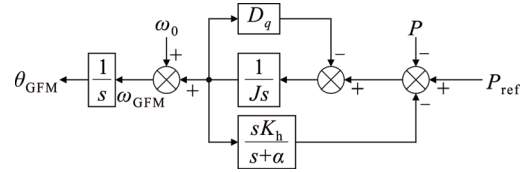


图 6 暂态阻尼改进 VSG 控制

Fig.6 Transient damping improved VSG control

取并网点电压 d 轴分量中的电网电压信息, 可实现平滑快速追踪电网相位变化的目的。

结合跟网和构网型控制各自优点的混合同步控制也可视作一类特殊的控制结构改善方法^[138]。文献[139]通过将锁相环添加至下垂控制器中, 改善了下垂控制功率响应特性的低短路比鲁棒性; 文献[140]则结合了跟网与构网型控制的优点, 建立了一种混合同步控制策略以实现变流器同步性能的改进。文献[141]提出了一种基于锁相环改进的混合控制, 可在离网情况下独立构网。文献[142]量化了不同电网强度下混合同步环中同步参数对系统稳定性的影响, 并给出了相应的参数协调鲁棒性优化策略。混合同步控制还可用于改善电流饱和控制触发后构网型变流器面对的限流精度与功率传输极限矛盾的问题。文献[143]提出了一种基于暂态频率偏差积分线性反馈的混合功率同步机制修正方法, 通过考虑附加相移对平衡点存在区间的影响和故障引入的最大不利减速面积, 给出了分段暂态频率偏差积分线性反馈增益设计准则。该方法无需故障深度检测即可实现动态功率补偿, 且适用于宽短路比的运行工况。然而, 有关混合同步控制研究并未形成完善的理论体系, 其所设计的控制受主观影响较大。

本节分别从考虑电网强度特性与电网故障特性两个角度综述了相关改进并网控制, 总结如表 3 所示。目前研究的改进思路主要包括: 1) 通过改进结构和优化参数提高系统阻尼比; 2) 通过降低变流器并网系统等效驱动力矩和提升等效电磁力矩, 从而保证稳定平衡点的存在性以及更大的最大减速面积和更小的加速面积。3) 设计解耦控制减缓电网强度变化时变流器内部多控制环间发生的不利交互。4) 结合多类型控制优势, 设计混合同步控制策略。目前研究的不足主要在于缺乏统一体系, 且过度关注某一或若干问题, 容易造成顾此失彼。后续研究应充分挖掘变流器并网控制与电网的暂态/静态交互机制, 构建综合化评价体系, 以实现并网变流器

的电网适应性最优。

4 新能源发电集群多变流器协同控制

前 4 章所综述的同步控制控制设计与参数整定大多针对单机并无穷大系统开展。然而，随着新能源发电集群日益发展，海量接入电力系统的异构并网变流器及其他类型的电力电子装备间产生复杂的交互，潮流和电压高度耦合，电网不再表现为恒定电压源属性。此时，单机并网控制无法在本地测量的电气量中实现对同步相位的有效提取，进而导致新能源发电集群失去同步。因此，以新能源发电集群整体同步性需求出发的多变流器协同控制的重要性凸现。通过在设计控制时即考虑系统内潜在在交互作用对设备同步的影响，在复杂网络交互中提取有效的同步信息。按照实现多变流器协同的视角不同，可分为借助快速实时通信、以机组特性构建网络特性的机到网协同控制，和无需实时通信、以网络特性塑造机组特性的网到机协同控制，下面对两者分别综述。

4.1 需要快速通信的机到网控制

这类控制通过实时通信将单个机组控制状态注入到网络协同控制中，使网络控制适应机组特性，因此也可称作机组塑造网络控制。常见的基于快速通信的协同控制大致可以分为集中式与分散式两类。

4.1.1 集中式机到网协同控制

如图 7 所示，集中式机到网协同控制通过借助额外通信系统将互连网络中分散分布变流器的输出相位或频率信息统一传递至中心处理器，再以特定算法计算出反馈的修正量，并再次借助通信系统将修正指令反馈传递给分散分布的变流器。图 7 中，下角标 n 表示第 n 台变流器对应的量； L_f 和 C_f 分别为变流器输出滤波电感和电容， ω_{coi} 为系统惯量中心频率。文献[144]基于等面积法则发现，跟-构网变流器混联系统中异构变流器的相位差会对系统稳定性产生较大影响。故提出基于通信将构网变流器运行状态信息输入到跟网变流器同步控制中的协同策略，以减小对稳定性不利的交互作用项，但这种稳定性的提升是以系统外送有功功率能力下降为代价的。

文献[145]提出了一种基于惯量中心频率差的多构网型变流器协同控制，通过将变流器输出频率与惯量中心频率之差输入到 PID 控制器，以形成频率反馈至本地控制器，从而实现多机系统频率的渐

表 3 考虑电网特性的控制设计

电网特性	改进对象/思路	改进控制方法
电网强度特性	电网强度影响跟网系统阻尼	相位补偿法 ^[96] 、阻抗重塑法 ^[97] 、频率反馈法 ^[98-99]
	电网强度弱导致跟网系统多环交互	带宽分离设计 ^[102] 、阻抗压降反馈法 ^[104] 、控制参数协同设计 ^[105,107] 、电容电流反馈主动阻尼 ^[106]
	电网强度导致构网系统振荡	虚拟阻抗法 ^[111] 、单电压环法 ^[112] 、有源阻尼法 ^[113]
	电网阻抗角影响构网同步性能	旋转下垂控制 ^[114]
电网故障特性	外环重塑法	降低输出电流/功率 ^[118,121] 。输出电流匹配阻抗角 ^[119-120] 。提升无功参考 ^[122]
	参数优化法	粒子群法 ^[126] 、遗传算法 ^[46] 、代理黑箱法 ^[127] 、穷举法 ^[129] 、神经网络 ^[130]
	结构改进控制	前馈/反馈支路 ^[67,134] 、闭锁锁相环 ^[132-133] 、混合同步控制 ^[138]

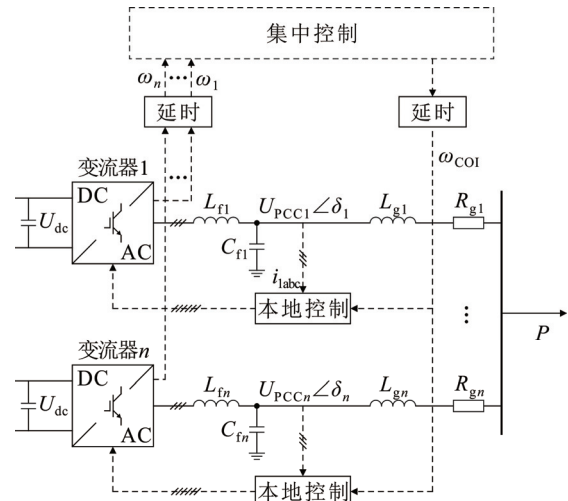


图 7 集中式机到网协同控制

Fig.7 Centralized converter-to-network cooperative control

进稳定。类似地，文献[146]借助频率加权差调节各变流器有功输出的参考值，从而改善不同变流器机组间的潮流分布差异，进而减小系统异步风险。然而，上述集中式基于通信的机到网协同控制，需要集中控制器在获取互连网络中全体变流器运行状态的同时给机组施加反馈指令，对通信系统的时延性需求较高。集中式基于通信的机到网协同控制在通信时延较大时协调性失效风险激增。

4.1.2 分散式机到网协同控制

如图 8 所示，与集中式不同的是，分散式基于通信的机到网协同控制只需要相邻变流器间的运行状态通信。例如，文献[147]提出了一种基于相邻变流器频率交换的虚拟阻抗设计控制，有效实现了并

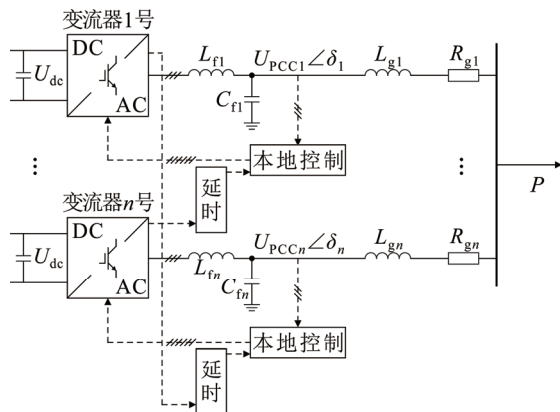


图8 分散式机到网协同控制

Fig.8 Distributed converter-to-network cooperative control

联构网变流器系统内有功振荡的抑制。类似地, 文献[148]提出了基于相邻变流器频率交换的协调阻尼控制, 有效抑制了控制时延和有功振荡对系统暂态同步稳定性的不利影响。尽管分散式基于通信的机到网协同控制具备时延敏感度低的优势, 但是其仅能实现互联系统局部设备的协调运行, 不能保证系统整体协调性最优。

此外, 介于集中式和分散式之间的分层控制也得到了广泛的研究^[149]。通常包括最顶层提供系统整体潮流分布需求的能量管理器, 中间层计算每台机组具体功率参考值的微网控制器, 以及最终实现机组并网的同步控制器^[150]。但分层控制结构复杂且成本过高, 工程应用价值较低。

综上所述, 需要快速通信的机到网控制由于没能充分挖掘电力网络潮流响应机制, 而是单纯地借助额外的通信设备实现机组之间的信息共享, 进而实现协调运行, 因此势必会面临集中式控制高时延和分散式控制无法实现整体最优的矛盾。

4.2 不需要快速通信的网到机控制

这类控制本质上是通过发掘交流电网功率平衡与各节点频率/电压之间的关系, 使机组控制适应网络特性, 因此也可称作网到机控制。其中, 部分需要慢速通信以获得网络内其他机组的运行参考值, 并将其用于实现在线协同优化^[151]。

下垂控制是最早利用网络功率平衡响应机理设计的多变流器协同控制策略, 可实现稳态下的有功功率自行分配, 具备较强的稳定性^[68]。交流电力网络功率平衡机制本质上一个多输入多输出系统平衡的问题, 而下垂变流器有功环和无功环完全解耦。因此, 单输入单输出的传统下垂控制由于具备较差

的暂态性能而无法充分驱动网络动态实现系统功率平衡。进一步提出了虚拟振荡控制, 其基本原理是通过模拟非线性振荡电路, 通过对有功-无功的统一控制实现多变流器间的无通信自发同步。虚拟振荡控制虽然与下垂控制拥有类似的稳态特性, 即电压偏差较小时虚拟振荡控制可简化为下垂控制, 但前者具备更好的暂态响应性能。常见的虚拟振荡控制包括 Liénard 型^[152-153]和 Andronov-Hopf 型^[154], 其中前者响应速度快但电能质量问题严重。文献[155]提出了一种可调度的虚拟振荡器控制(dispatchable virtual oscillator control, dVOC)策略, 并验证了其构网能力。文献[156]提出了一种新的几乎具有全局渐近稳定保证的耦合振荡器分散控制方法, 并探讨了其在并网逆变器控制中的应用。文献[157]基于工程实际提出复频率概念, 实现了对时变信号瞬时频率的统一解读, 即虚部表征相对常规电力系统定义的本地母线同步参考相位的变化率, 实部则依据电压幅值变化定义。包含二维频率信息的复频率充分体现了交流电力网络的有功-相位-无功-电压多变量耦合动态特征, 可为电力系统状态估计与控制提供新思路^[158]。通过类比下垂控制与常规频率定义关系, 复下垂控制^[159]被提出, 其在离网^[156]和并网^[160]场景下均具备全局渐进稳定性。复下垂控制与dVOC控制的线性部分完全等效, 具备快速复频率同步能力。慢尺度下dVOC控制可近似线性实现电压稳定。如此一来, 并网同步非线性问题被巧妙化解为2个线性子问题^[158]。文献[161]基于嵌套奇异摄动分析方法证明考虑内环多时间尺度交互影响时dVOC控制依旧具备较强的稳定性。文献[160]指出复下垂控制是输出反馈无源的, 因此不存在多机并联交互恶化稳定性的潜在风险, 是一种适应电网特性的多变量构网设计。然而, 上述近似全局渐进稳定结论大多是基于给定稳态工作点和统一阻抗比网络所得的, 在更普适的网络条件下其适用性尚不明确。为解决该局限, 文献[162]提出了一种动态复频率控制策略, 使用动态传递函数来改善静态下垂增益, 以增强频率和电压控制动态响应的灵活性。然而上述复频率控制/dVOC的有功控制环均是1阶控制, 无法为系统提供惯量支撑。此外, 一些基于小信号方法构建的自适应分散自治同步控制也在文献[163-164]中被提出, 但其是否具有较好的暂态性能则还未知。

需要快速通信的机到网控制的核心弊端就是

通信延迟, 通过在线估计算法赋能变流器间彼此感知对方的运行相位与频率, 是解决通信延迟的一条有吸引力的技术路线。实际上, 由于故障下电网电压频率对于变流器而言是未知的, 变流器甚至无法精确估计自身运行相位与电网相位的暂态差值, 进而使得暂态稳定性分析所得的功角-频率吸引域也失去了在线评估的意义。针对此问题, 文献[151]揭示了异构变流器通过交流电网暂态交互耦合的机制, 实现了每台机组从本地感知的电压/功率量中解耦出不同变流器的运行相位/频率信息, 使得每个变流器都可以在毫秒尺度内获取彼此和自身的实时运行相位以及频率信息, 即:

$$\begin{cases} \delta_{\text{GFM}}^i = \arccos \left(\frac{\left((U_{\text{GFLd}}^i - C_d)^2 - (a_2 U_{\text{GFM}})^2 + \right)}{\left((U_{\text{GFLq}}^i - C_q)^2 - (a_3 U_g)^2 \right)} \right) \Big/ 2a_2 a_3 U_{\text{GFM}} U_g + \theta_3 - \theta_2 \\ \delta_{\text{GFL}}^i = \arccos \left(\frac{\left(\left(2P_{\text{GFM}}^i / 3 - U_{\text{GFM}}^2 G_5 \right)^2 - U_{\text{GFM}}^2 U_g^2 a_5^2 - U_{\text{GFM}}^2 I_{\text{ref}}^2 a_2^2 + \right)}{\left(\left(2Q_{\text{GFM}}^i / 3 + U_{\text{GFM}}^2 B_5 \right)^2 \right)} \right) \Big/ 2U_{\text{GFM}}^2 U_g I_{\text{ref}} a_5 a_2 + \theta_5 - \theta_2 - \theta_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中: 上标 i 表示时刻 t_i 的观测量和计算量; C_d 、 C_q 、 a_1 — a_5 、 θ_1 — θ_5 、 G_5 、 B_5 均为与线路参数以及变流器控制参数相关的常数, 具体表达式见文献[151]。跟网型变流器通过其并网点电压 U_{GFLd} 、 U_{GFLq} 远程观测构网型变流器实时功角 δ_{GFM} ; 构网型变流器通过其并网点输出有功、无功功率 P_{GFM} 、 Q_{GFM} 远程观测跟网型变流器实时功角 δ_{GFL} 。由于文献[151]所提运行状态共享观测算法只需要获取各台变流器的输出参考, 因此仅需要慢速通信即可实现, 相比于 4.1 节中介绍的基于快速通信的协同控制方法, 其在经济性和可靠性方面均具有优势。文献[151]所提方法的不足在于其仅针对两并网变流器系统进行了分析与算法构造, 但可以明确的是, 其具备在含更多变流器机组互联网络中的可拓展性。理论上只需对所本地观测物理量进行多次积分或微分操作, 即可得到无穷多组含有网络内多变流器运行相位/频率的代数方程组, 并通过设计相应的迭代算法进行求解, 但其中涉及的算法快速性、多尺度交互问题以及随机噪声等对观测结果准确性的影响还尚待解决。

综上所述, 目前的新能源发电集群协同控制总结如表 4 所示, 大致分为 2 类: 1) 需借助快速通信的由机塑网协同控制; 2) 借助网络功率平衡机制的

表 4 考虑多机变流器交互的控制设计

Table 4 Improved control considering interaction among multi-converters

协同思路	控制方法	优缺点
由机塑网控制	集中式协同控制	协同效果佳, 但高度依赖通信
	分散式协同控制	对通信依赖弱, 但整体最优困难
	分层式协同控制	结构复杂且成本过高
由网塑机控制	传统下垂控制	SISO 特性导致暂态性能差
	复下垂控制	近似全局稳定, 无多环和多机交互失稳风险。但研究大多基于统一阻抗网络, 且无法提供惯量支撑
	主动观测法 ^[151]	主动感知多变流器运行状态, 实现助力通信协同优化, 但可拓展性不明

由网塑机协同控制。然而, 前者无法解决通信时延和全局感知间的矛盾; 后者则面临无法系统提供惯量和频率支撑, 以及对电网规模及网络结构的适应性不清晰等问题。因此, 目前尚缺乏可为系统提供频率/惯量支撑的借助网络功率平衡机理实现分散自治的无通信多并网变流器互联系统整体协同控制, 亟需更加深入的研究。

4.3 基于参量变分理论的最优同步控制设计思路

参量变分方法可为解决新能源集群并网控制问题提供新的思路。该方法从系统功率平衡关系出发, 刻画网络互联并网变流器系统多时空尺度控制交互下系统的整体同步响应需求。但是该整体需求受系统内全体机组的分散分布资源特征和运行状态共同影响, 直接利用传统变分法求解困难且不利于控制的分散实现。结构力学中的有限元思想可以实现对系统整体期望的求和分解, 为变流器协同控制体系构建提供了理论支撑和参考。

本节提出一种基于参量变分理论的最优同步控制设计思路, 步骤为: 1) 将新能源集群并网系统视为由多个并网变流器组成的模块化互联动态系统, 采用参量化处理方法将网络拓扑结构、设备参数与控制参数解耦。2) 基于系统整体功率平衡需求建立目标泛函, 如式(5)中的 V 所示, 该泛函涵盖了系统暂态响应特性与稳态性能指标, 式中: p_i 表示变流器 i 的瞬时有功功率; P_i 表示给定时间间隔内的平均有功功率; x_i 、 u_i 、 G_i 分别表示变流器 i 的状态变量、待定控制输出以及参量化后的网络状态; t_0 和 t_f 分别代表初始时间和末态时间; n 为网络内变流器总数。3) 将系统中的各类参数分为 2 大类: 直

接参与变分的状态变量和不直接参与变分但通过状态方程影响变分过程的控制变量, 这种区分使得控制设计既保持了整体最优性, 又便于分散实现。

$$V(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_f} \|p_i(\mathbf{x}_i, u_i, G_i) - P_i(\mathbf{x}_i, u_i, G_i)\| dt \quad (5)$$

如图 9 所示, 在所建立的系统泛函基础上, 引入拉格朗日乘子和并网变流器的状态方程, 构建系统的辅助泛函。定义系统的哈密顿函数, 应用参量变分原理推导出系统泛函的极值条件。利用极小值原理或动态规划方法求解满足约束方程和泛函极值条件下并网变流器的最优控制方程(同步机制), 并分析并网变流器的状态行为协调性。

参量变分控制系统的实现包括 3 个层次: 底层是基于参量化模型的本地控制器, 实现对单台变流器的基本控制; 中层是基于参变量的协调控制器, 负责处理变流器间的动态交互; 顶层是基于泛函极值的优化控制器, 确保系统整体的最优性。各层控制器均采用本地可测量信息, 通过参量化处理的网络约束实现信息传递, 避免了对通信网络的依赖。在暂态过程中, 通过松弛因子的动态调整实现控制律的自适应更新, 从而保证系统的暂态响应性能。

5 总结与展望

新能源发电集群并网控制主导电力电子化电力系统安全稳定运行能力。传统跟网型、构网型并网逆变控制采用理想化模型, 未考虑源-机-网侧动态对系统同步响应特性的驱动作用。因此, 本文从源-机-网协同角度出发, 对既有新能源发电并网同步控制研究进行综述, 包括考虑原动侧物理特性的改进控制、考虑变流器装备能力的改进控制、考虑电网强度与故障特性的改进并网控制以及针对新能源集群内海量分散分布变流器协同控制的研究。目前研究广泛在以下不足:

1) 缺乏统一体系, 并网控制改进往往只针对单一目标单一场景, 对系统状态感知能力不足, 无法自主适应多运行场景且易顾此失彼。

2) 未厘清并网变流器控制对系统功率平衡关系的驱动机制, 导致电力电子设备开关尺度功率快速调控能力未得到利用。

3) 新能源发电集群分散分布资源刻画不清, 现有模型难以表征可控资源与控制结构参数之间的匹配关系, 并网控制资源调用能力不足。

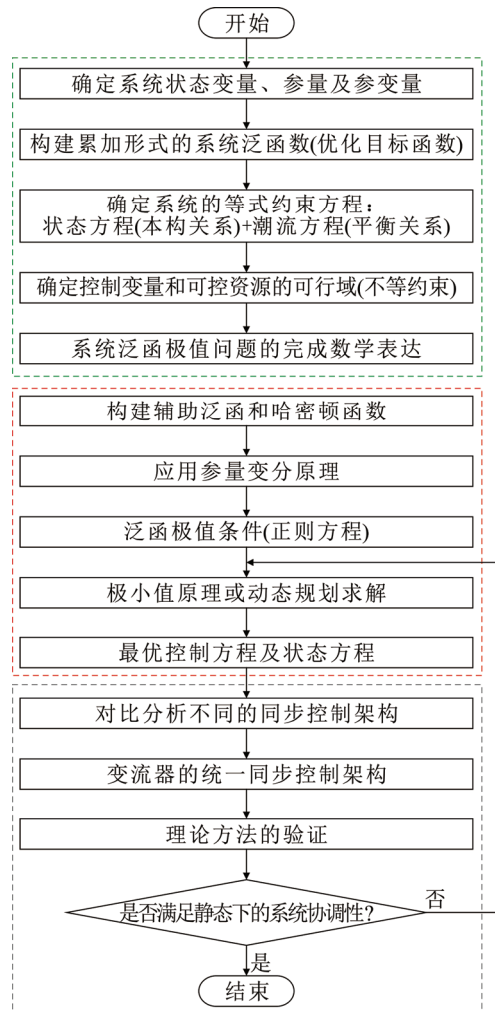


图 9 海量变流器互联系统泛函构建与极值求解

Fig.9 Functional construction and extreme value solving of mass converter interconnection system

4) 对多变流器复杂交互主导的新能源发电集群暂态演化机制挖掘不深入, 多变流器协同控制难以兼顾整体最优性和时延鲁棒性。

明确新能源发电集群并网系统与传统火电水电主导电力系统的区别, 才能针对性进行改进设计。同样也可以从源-机-网 3 个方向出发进行归纳:

1) 原动侧新能源出力具有随机波动性和故障扰动同时性。其中, 后者指新能源出力受气候等条件影响较大, 易出现大范围多机组出力同时波动的情况, 从而导致电网难以维持恒定电压与频率。相比之下, 传统电力系统机组间的故障扰动往往具有独立性, 因此故障穿越控制设计仅针对单机无穷大系统即可, 而在新能源主导系统中则不然。后续研究应关注场站级多机协同控制, 实现多机源侧资源的统一调控, 从而充分挖掘新能源集群网络面对不同扰动的响应特征, 提升新能源发电集群稳定运行

的能力。

2) 电力电子变流器耐流耐压能力远低于同步发电机, 控制优化需在限流的同时维持功率传输能力与同步稳定性间的平衡。电力电子变流器开关动态特性赋能的快速功率调控能力也需关注, 以充分发挥电力电子设备的灵活性。此外, 变流器控制器算力资源也不容忽视, 人工智能介入的并网控制优化思路也具有较高可行性。后续研究方向包括: 变流器硬件材料、拓扑以及调制策略的优化, 改善变流器过流能力; 挖掘变流器开关尺度功率快速调节能力, 实现故障下的灵活功率传输, 即使用深度学习、强化学习等 AI 技术, 基于实时数据自动调整变流器的控制策略, 尤其是在复杂电网环境下, 通过学习历史数据来优化功率调控策略。

3) 电网侧主要面临新能源渗透率提高后系统惯量阻尼下降的问题, 需结合原动侧动态特性充分挖掘系统惯量阻尼资源。此外, 跟网构网混联系统面临交互作用不对称的问题, 即异构变流器间等效交互力矩不满足牛顿第三定律。这导致系统交互项转变为具有路径依赖性的不可积项, 使得用于暂态同步稳定性分析的能量函数构造难度骤升。混联系统暂态交互机制挖掘困难, 进一步也导致了多变流器整体同步性最优协同控制设计思路不明确。后续可行的解决思路是构建变流器网络状态主动感知能力, 实现邻域内变流器间运行状态的精确快速共享, 对网络暂态行为作参量化处理, 从而实现在线控制优化。

目前研究大多过于关注单台变流器的改进与控制设计, 缺乏整体层面协调性优调控的研究。此外, 目前也缺乏对新能源发电集群并网系统暂态响应物理机理的揭示, 不论是稳定性分析还是最优控制设计都过分关注数学技巧, 缺乏从物理机制角度的剖析。未来研究应打破电力电子-复杂系统-分析力学等多学科间的壁垒, 充分挖掘电力电子化电力系统的物理内核, 揭示新能源发电集群并网系统的暂态响应机制, 探寻充分考虑源-机-网协同的新能源发电集群并网同步控制新思路, 通过控制设计实现可控资源与网络结构参数间的匹配。基于此, 本文提出了一种基于参量变分原理的并网变流器互联系统同步控制设计体系, 借用弹性结构力学理论理解多并网变流器网络互联系统; 通过系统功率泛函分析, 提出系统优化目标及参量化模型; 考虑时空分布的控制资源的高效利用及分散控制的实现, 应

用参变量变分方法确立并网变流器控制对系统功率平衡关系的驱动机制, 从而化解全局系统状态共享与并网变流器控制分散实现的矛盾。所提方法可为电力电子化电力系统中海量电力电子变流器并网接入提供新的理论基础, 有望进一步形成新的并网电力电子变流器同步机制, 为解决常规电源支撑能力不足的双高电力系统存在的同步稳定性和功率振荡等问题打下坚实的理论基础。

参考文献 References

- [1] CHEN J R, LIU M Y, O'DONNELL T, et al. Impact of current transients on the synchronization stability assessment of grid-feeding converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 4131-4134.
- [2] 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.
- [3] 鲍颜红, 吴峰, 任先成, 等. 基于势能界面的带锁相环变流器暂态同步稳定裕度评估[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4802-4811.
BAO Yanhong, WU Feng, REN Xiancheng, et al. Transient synchronizing stability margin assessment of phase-locked synchronous inverter based on potential energy boundary surface[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4802-4811.
- [4] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6473-6482.
- [5] QU Z S, PENG J C H, YANG H, et al. Modeling and analysis of inner controls effects on damping and synchronizing torque components in VSG-controlled converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 488-499.
- [6] 汪宁渤, 马彦宏, 丁坤, 等. 酒泉风电基地脱网事故频发的原因分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 42-46.
WANG Ningbo, MA Yanhong, DING Kun, et al. Analysis on root reasons of WTGs nuisance tripping in Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 42-46.
- [7] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [8] 耿华, 刘淳, 张兴, 等. 新能源并网发电系统的低电压穿越[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
GENG Hua, LIU Chun, ZHANG Xing, et al. Low voltage ride through of renewable energy power generation connected to grid system[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2014.
- [9] 帅智康, 肖凡, 涂春鸣, 等. 宽频域谐波谐振劣化机理及其抑制措施[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 16-23.
SHUAI Zhikang, XIAO Fan, TU Chunming, et al. Resonance degradation mechanism of wide-band frequency harmonics and the elimination strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 16-23.

- [10] 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.
- [11] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395. YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [12] 朱 蜀, 刘开培, 秦 亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3948-3962, 4273. ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3948-3962, 4273.
- [13] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7201. JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201.
- [14] 邢华栋, 张叔禹, 尹柏清, 等. 风电并网系统次同步振荡稳定性分析与控制方法研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 13-21. XING Huadong, ZHANG Shuyu, YIN Baiqing, et al. Review of sub-synchronous oscillation stability analysis and control method for grid-connected wind power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 13-21.
- [15] 丁 明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [16] 刘东冉, 陈树勇, 马 敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52. LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 47-52.
- [17] 黄汉奇, 毛承雄, 陆继明, 等. 光伏发电系统的小信号建模与分析(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 7-14, 24. HUANG Hanqi, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Small-signal modeling and analysis of grid-connected photovoltaic generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 7-14, 24.
- [18] 黄 伟. 考虑分布式光储参与的配电网运行优化与控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. HUANG Wei. Research on operation and control optimization of distribution grids with distributed photovoltaic and energy storage integration[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2019.
- [19] ESRAM T, CHAPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 439-449.
- [20] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 963-973.
- [21] JOHN R, MOHAMMED S S, ZACHARIAH R. Variable step size Perturb and observe MPPT algorithm for standalone solar photovoltaic system[C]//2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). Srivilliputtur, India: IEEE, 2017: 1-6.
- [22] 刘吉庆, 王 艳. 基于改进自适应粒子群算法的MPPT追踪系统[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(5): 18-25. LIU Jiqing, WANG Yan. MPPT tracking system design based on an improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2024, 38(5): 18-25.
- [23] ABDEL-RAHIM O, WANG H Y. A new high gain DC-DC converter with model-predictive-control based MPPT technique for photovoltaic systems[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(2): 191-200.
- [24] OMRAN W A, KAZERANI M, SALAMA M M A. Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 318-327.
- [25] 龙 源, 李国杰, 程 林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49. LONG Yuan, LI Guojie, CHENG Lin, et al. A study on damping power system oscillations based on photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 44-49.
- [26] 刘莉敏, 曹志峰, 许洪华. 50 kW_p 并网光伏示范电站系统设计及运行数据分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 146-151. LIU Limin, CAO Zhifeng, XU Honghua. Design and analysis of 50 kW_p grid-connected PV station[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(2): 146-151.
- [27] DING G Q, GAO F, TIAN H, et al. Adaptive DC-link voltage control of two-stage photovoltaic inverter during low voltage ride-through operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4182-4194.
- [28] PENG Q, TANG Z T, YANG Y H, et al. Event-triggering virtual inertia control of PV systems with power reserve[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 4059-4070.
- [29] SANGWONGWANICH A, YANG Y H, BLAABJERG F. A sensorless power reserve control strategy for two-stage grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8559-8569.
- [30] CRĂCIUN B I, KERÉKES K, SÉRA D, et al. Frequency support functions in large PV power plants with active power reserves[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 849-858.
- [31] PENG Q, YANG Y H, LIU T Q, et al. Coordination of virtual inertia control and frequency damping in PV systems for optimal frequency support[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 305-316.
- [32] 郑天文, 陈来军, 刘 炜, 等. 考虑源端动态特性的光伏虚拟同步机多模式运行控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 454-464. ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, LIU Wei, et al. Multi-mode operation control for photovoltaic virtual synchronous generator considering the dynamic characteristics of primary source[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 454-464.
- [33] 张子良, 郭乃志, 易 侃, 等. 基于主动变桨的风电场协同控制[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 511-516. ZHANG Ziliang, GUO Naizhi, YI Kan, et al. Cooperative control of wind farm based on active pitch[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(9): 511-516.
- [34] 付 媛, 王 毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716. FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed

- wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [35] 赵南南, 杨旭, 邹琳, 等. 基于鲸鱼优化算法的风力发电机组变桨模糊控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 80-89.
ZHAO Nannan, YANG Xu, ZOU Lin, et al. Pitch fuzzy control strategy for wind turbine based on whale optimisation algorithm[J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 80-89.
- [36] GHOSH S, KAMALASADAN S, SENROY N, et al. Doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farm control framework for primary frequency and inertial response application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1861-1871.
- [37] 姜莹, 边晓燕, 李东东, 等. 基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(9): 118-124.
JIANG Ying, BIAN Xiaoyan, LI Dongdong, et al. Research on doubly fed induction generator participation in microgrid frequency modulation based on variable load shedding ratio over-speed control[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(9): 118-124.
- [38] 李生虎, 朱国伟. 基于有功备用的风电机组一次调频能力及调频效果分析[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(10): 28-33, 50.
LI Shenghu, ZHU Guowei. Capability and effect of primary frequency regulation by wind turbine generators with active power reserve[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(10): 28-33, 50.
- [39] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 20-25, 43.
ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LI Guojie, et al. Frequency regulation by doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated overspeed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25, 43.
- [40] LUO H C, HU Z C, ZHANG H C, et al. Coordinated active power control strategy for deloaded wind turbines to improve regulation performance in AGC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 98-108.
- [41] 周立. 基于功率跟踪曲线的风电虚拟惯量优化控制及功率备用调频研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
ZHOU Li. Research on virtual inertia optimal control and power reserve frequency regulation of wind power based on power tracking curve[D]. Nanning, China: Guangxi University, 2021.
- [42] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 29-34, 95.
DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 29-34, 95.
- [43] 侍乔明, 王刚, 马伟明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2033-2042.
SHI Qiaoming, WANG Gang, MA Weiming, et al. An experimental study method of D-PMSG with virtual inertia control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2033-2042.
- [44] ULLAH N R, THIRINGER T, KARLSSON D. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines—potential and applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 601-612.
- [45] ATTYA A B, HARTKOPF T. Wind turbine contribution in frequency drop mitigation-modified operation and estimating released supportive energy[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(5): 862-872.
- [46] CHEN A K, XIE D, ZHANG D M, et al. PI parameter tuning of converters for sub-synchronous interactions existing in grid-connected DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6345-6355.
- [47] WU C, LÜ Y S, WANG Y, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-following converter considering the coupling effect of current loop and phase locked loop[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(1): 544-554.
- [48] 张冲, 王伟胜, 何国庆, 等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.
ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.
- [49] MOHAMMED N, UDAWATTE H, ZHOU W H, et al. Grid-forming inverters: a comparative study of different control strategies in frequency and time domains[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5: 185-214.
- [50] LUO C, LIU T, WANG X F, et al. Design-oriented analysis of dc-link voltage control for transient stability of grid-forming inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3698-3707.
- [51] HARNEFORS L, HINKKANEN M, RIAZ U, et al. Robust analytic design of power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 5810-5819.
- [52] XU C H, ZOU Z X. Stability analysis and control design of grid-forming converters with DC-link effect[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(5): 6813-6828.
- [53] LUO C, MA X K, LIU T, et al. A flexible saturation limiter for DC-link voltage control of grid-forming inverters with enhanced transient stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2514-2524.
- [54] LUO C, MA X K, LIU T, et al. Adaptive-output-voltage-regulation-based solution for the DC-link undervoltage of grid-forming inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12559-12569.
- [55] GUO J, CHEN Y D, WANG L, et al. Impedance analysis and stabilization of virtual synchronous generators with different DC-link voltage controllers under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11397-11408.
- [56] SHEN C, GU W, SHENG W X, et al. Transient stability analysis and design of VSGs with different DC-link voltage controllers[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(2): 593-604.
- [57] PENG Y L, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient stabilization control of electric synchronous machine for preventing the collapse of DC-link voltage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 82-93.
- [58] YAZDANI S, DAVARI M, FERDOWSI M, et al. Internal model power synchronization control of a PV-based voltage-source converter in weak-grid and islanded conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1360-1371.
- [59] ZHAO L, JIN Z M, WANG X F. Analysis and damping of low-frequency oscillation for DC-link voltage-synchronized VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 8177-8189.
- [60] ARGHIR C, DÖRFLER F. The electronic realization of synchronous machines: model matching, angle tracking, and energy shaping techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4398-4410.
- [61] ZHAO L, JIN Z M, WANG X F. Small-signal synchronization stability of grid-forming converters with regulated DC-link dynamics[J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12399-12409.
- [62] ZHAO L, WANG X F, JIN Z M. Impedance-based dynamics analysis for DC-link voltage-synchronized voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 10829-10844.
- [63] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [64] SANG S, ZHANG C, CAI X, et al. Control of a type-IV wind turbine with the capability of robust grid-synchronization and inertial response for weak grid stable operation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 58553-58569.
- [65] 付熙坤, 黄 萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型逆变器的暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2815-2824.
- FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2815-2824.
- [66] FAN B, LIU T, ZHAO F Z, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 955-969.
- [67] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [68] 黄林彬, 章雷其, 辛焕海, 等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 117-123, 150.
- HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Mechanism analysis of virtual power angle stability in droop-controlled inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 117-123, 150.
- [69] MA Y H, FU L J, HU Q, et al. Transient synchronizing stability of droop-controlled converter during grid fault considering current saturation limitation[J]. Processes, 2022, 10(8): 1578.
- [70] ROKROK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1519-1531.
- [71] WU H, WANG X F. Small-signal modeling and controller parameters tuning of grid-forming VSCs with adaptive virtual impedance-based current limitation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7185-7199.
- [72] QORIA T, GRUSON F, COLAS F, et al. Current limiting algorithms and transient stability analysis of grid-forming VSCs[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106726.
- [73] LU X N, WANG J H, GUERRERO J M, et al. Virtual-impedance-based fault current limiters for inverter dominated AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1599-1612.
- [74] PAQUETTE A D, DIVAN D M. Virtual impedance current limiting for inverters in microgrids with synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1630-1638.
- [75] BLOEMINK J M, IRAVANI M R. Control of a multiple source microgrid with built-in islanding detection and current limiting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2122-2132.
- [76] ZHOU L M, LIU S Y, CHEN Y D, et al. Harmonic current and inrush fault current coordinated suppression method for VSG under non-ideal grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1030-1042.
- [77] 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.
- [78] LI X L, FENG P, TIAN Z, et al. Transient stability analysis for grid-tied VSG considering high-order nonlinear interactions between active and reactive power control loops[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 6974-6988.
- [79] 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.
- [80] 年 珩, 程 鹏, 贺益康. 故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4184-4197.
- NIAN Heng, CHENG Peng, HE Yikang. Review on operation techniques for DFIG-based wind energy conversion systems under network faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4184-4197.
- [81] MORREN J, DE HAAN S W H. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [82] PANNELL G, ZAHAWI B, ATKINSON D J, et al. Evaluation of the performance of a DC-link brake chopper as a DFIG low-voltage fault-ride-through device[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 535-542.
- [83] 颜湘武, 崔 森, 宋子君, 等. 基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 111-120.
- YAN Xiangwu, CUI Sen, SONG Zijun, et al. Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 111-120.
- [84] 邹常跃, 刘邦银, 段善旭, 等. 并网逆变器中数字控制延时对系统稳定性的影响及其优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 411-417.
- ZOU Changyue, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Influence of delay on system stability and its optimization in grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 411-417.
- [85] 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): 2339-2358.
- ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358.
- [86] HU M J, HUA W, XIAO H F, et al. Fast current control without computational delay by minimizing update latency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12207-12212.
- [87] PANTEN N, HOFFMANN N, FUCHS F W. Finite Control set model predictive current control for grid-connected voltage-source converters with LCL filters: a study based on different state feedbacks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5189-5200.
- [88] 冯婷婷, 张竣淇, 周 平, 等. 逆变侧电流反馈的 LCL 型并网逆变器陷波超前补偿方法[J]. 电气传动, 2021, 51(8): 22-28.
- FENG Tingting, ZHANG Junqi, ZHOU Ping, et al. A method of notching lead compensation for LCL type grid-connected inverters of inverting-side current feedback[J]. Electric Drive, 2021, 51(8): 22-28.
- [89] 黄 萌, 刘浴霜, 付熙坤, 等. 电力电子并网变流器非线性行为机理与安全运行边界研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(11): 1380-1392.
- HUANG Meng, LIU Yushuang, FU Xikun, et al. A review of nonlinear

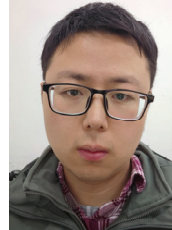
- behavior mechanism and safety operation boundary for power electronics grid-connected converters[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(11): 1380-1392.
- [90] 贺虎成. 谐振极软开关逆变器工作模式分析[J]. *高电压技术*, 2013, 39(3): 719-726.
HE Hucheng. Mode analysis of a resonant pole soft-switching inverter[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(3): 719-726.
- [91] 殷小东, 余佶成, 刘俊杰, 等. 适用于构网型新能源发电系统的MCSPWM多电平逆变器[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2): 861-869.
YIN Xiaodong, YU Jicheng, LIU Junjie, et al. MCSPWM multilevel inverter for grid-forming new energy generation system[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 861-869.
- [92] XIANG D W, WANG C D, LIU Y K. Switching frequency dynamic control for DFIG wind turbine performance improvement around synchronous speed[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(9): 7271-7283.
- [93] 姜齐荣, 赵崇滨. 并网逆变器的电磁暂态同步稳定问题[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(5): 415-428.
JIANG Qirong, ZHAO Chongbin. Electromagnetic transient synchronization stability with grid-connected inverters[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(5): 415-428.
- [94] 杜步阳, 邵德军, 朱建行, 等. 电压源型变流器并网系统多时间尺度间相互作用[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(20): 5547-5559.
DU Buyang, SHAO Dejun, ZHU Jianhang, et al. The interaction between multiple timescales of the grid-tied voltage source converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(20): 5547-5559.
- [95] HUANG Y H, ZHAI X B, HU J B, et al. Modeling and stability analysis of VSC internal voltage in DC-link voltage control timescale[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(1): 16-28.
- [96] 刘巨, 姚伟, 文劭宇. 考虑PLL和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(11): 3162-3173, 3371.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(11): 3162-3173, 3371.
- [97] FANG J Y, LI X Q, LI H C, et al. Stability improvement for three-phase grid-connected converters through impedance reshaping in quadrature-axis[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(10): 8365-8375.
- [98] YU P, ZHA X M, TIAN Z, et al. Frequency-dependent network analysis and stability enhanced design for voltage-source converters under weak grid conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(6): 4593-4602.
- [99] LI X L, LIU S J, TIAN Z, et al. A conservatism improved transient stability analysis of grid-following converters based on the proposed elliptic-equal area criterion[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(2): 1110-1123.
- [100] LIU Y S, HUANG M, ZHA X M, et al. Stability analysis of PLL influenced by control loops in grid-connected converters under fault disturbance[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(2): 239-248.
- [101] HUANG L B, XIN H H, LI Z Y, et al. Grid-synchronization stability analysis and loop shaping for PLL-based power converters with different reactive power control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 501-516.
- [102] HARNEFORS L, BONGIORNO M, LUNDBERG S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [103] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [104] HAUNG Z Q, WU C, WANG Y, et al. Transient stability analysis and enhancement of grid-following converters considering DC voltage dynamics under power step[C]//2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). Chengdu, China: IEEE, 2024: 2401-2405.
- [105] GONG H, WANG X F, HARNEFORS L. Rethinking current controller design for PLL-synchronized VSCs in weak grids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(2): 1369-1381.
- [106] ZHOU S Y, ZOU X D, ZHU D H, et al. An improved design of current controller for LCL-type grid-connected converter to reduce negative effect of PLL in weak grid[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(2): 648-663.
- [107] LI X, LIN H. A design method of phase-locked loop for grid-connected converters considering the influence of current loops in weak grid[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(3): 2420-2429.
- [108] LIAO Y C, WANG X F, LIU F C, et al. Sub-synchronous control interaction in grid-forming VSCs with droop control[C]//Proceedings of the 2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID). Xiamen, China: IEEE, 2019: 1-6.
- [109] 洪镇堃, 占萌. 构网型变流器并网系统在强弱电网下的分岔分析[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(9): 27-32, 54.
HONG Zhenkun, ZHAN Meng. Bifurcation analysis of grid-forming converter system connected with stiff or weak AC grids[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(9): 27-32, 54.
- [110] ZHANG H B, XIANG W, LIN W X, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [111] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [112] DU W, CHEN Z, SCHNEIDER K P, et al. A comparative study of two widely used grid-forming droop controls on microgrid small-signal stability[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 963-975.
- [113] LI G X, CHEN Y D, LUO A, et al. Analysis and mitigation of subsynchronous resonance in series-compensated grid-connected system controlled by a virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(10): 11096-11107.
- [114] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [115] HU Q, FU L J, MA F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 3220-3229.
- [116] LI X L, TIAN Z, ZHA X M, et al. An iterative equal area criterion for transient stability analysis of grid-tied converter systems with varying damping[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 1771-1784.
- [117] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研

- 究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367-3383.
- GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [118] 张 宇, 蔡 旭, 张 琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1701.
- ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1701.
- [119] GÖKSU Ö, TEODORESCU R, BAK C L, et al. Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1683-1691.
- [120] ALAWASA K M, MOHAMED Y A R I, XU W. Active mitigation of subsynchronous interactions between PWM voltage-source converters and power networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 121-134.
- [121] SHUAI Z K, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [122] PAN D H, WANG X F, LIU F C, et al. Transient stability impact of reactive power control on grid-connected converters[C]//Proceedings of 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, USA: IEEE, 2019: 4311-4316.
- [123] ZHAO J T, HUANG M, ZHA X M. Nonlinear analysis of PLL damping characteristics in weak-grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(11): 2752-2756.
- [124] HADJIDEMETRIOU L, KYRIAKIDES E, BLAABJERG F. An adaptive tuning mechanism for phase-locked loop algorithms for faster time performance of interconnected renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1792-1804.
- [125] 高家元, 黄 帅, 姜 飞, 等. 弱电网下基于比例权重的控制环参数自适应调整并网逆变器稳定性提升方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7846-7859.
- GAO Jiayuan, HUANG Shuai, JIANG Fei, et al. Stability improvement method of grid-connected inverter based on proportional weight control loop parameters adaptive adjustment under weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7846-7859.
- [126] 赵铁英, 高 宁, 杨 杰, 等. 基于 PI 控制器有源阻尼的并网逆变器自适应改进策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 152-161.
- ZHAO Tiejing, GAO Ning, YANG Jie, et al. Adaptive improvement strategy for grid-connected inverter based on active damping of PI controllers[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(5): 152-161.
- [127] TAUL M G, WU C, CHOU S F, et al. Optimal controller design for transient stability enhancement of grid-following converters under weak-grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10251-10264.
- [128] PAN D H, WANG X F, LIU F C, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [129] XIONG X L, WU C, CHENG P, et al. An optimal damping design of virtual synchronous generators for transient stability enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11026-11030.
- [130] QIU J, YANG H H, ZHANG J X, et al. Parameter tuning of new type energy virtual synchronous generator based on physics-informed reinforcement learning[C]//2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shanghai, China: IEEE, 2023: 888-893.
- [131] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 25-36.
- [132] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [133] HE X Q, GENG H, XI J B, et al. Resynchronization analysis and improvement of grid-connected VSCs during grid faults[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 438-450.
- [134] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in Smart-Grids[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 122: 180-197.
- [135] MO O, D'ARCO S, SUUL J A. Evaluation of virtual synchronous machines with dynamic or quasi-stationary machine models[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5952-5962.
- [136] DONG S, CHEN Y C. Adjusting synchronverter dynamic response speed via damping correction loop[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 608-619.
- [137] GHARTEMANI M K, KHAJEHODDIN S A, JAIN P K, et al. Problems of startup and phase jumps in PLL systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1830-1838.
- [138] 姜卫同, 胡鹏飞, 尹 瑞, 等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 124-133.
- JIANG Weitong, HU Pengfei, YIN Rui, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 124-133.
- [139] ROKKOK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Effect of using PLL-based grid-forming control on active power dynamics under various SCR[C]//IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon, Portugal: IEEE, 2019: 4799-4804.
- [140] HARNEFORS L, KUKKOLA J, ROUTIMO M, et al. A universal controller for grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5761-5770.
- [141] SCHWEIZER M, ALMÉR S, PETERSSON S, et al. Grid-forming vector current control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11): 13091-13106.
- [142] 邱晓燕, 林号缙, 周 毅, 等. 基于混合同步控制的构网型逆变器并网系统小扰动稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 172-178, 185.
- QIU Xiaoyan, LIN Haojin, ZHOU Yi, et al. Study on small-signal stability of grid-connected grid-forming inverter system based on hybrid-synchronous control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 172-178, 185.
- [143] SUN P F, TIAN Z, ZHA X M, et al. Hybrid power synchronization based transient stability enhanced control for grid-forming inverters under symmetrical grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(2): 2780-2796.
- [144] SHEN C, SHUAI Z K, SHEN Y, et al. Transient stability and current injection design of paralleled current-controlled VSCs and virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1118-1134.
- [145] CHOOPANI M, HOSSEINIAN S H, VAHIDI B. New transient stability and LVRT improvement of multi-VSG grids using the frequency of the center of inertia[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 527-538.
- [146] KE S, YANG J, LU Z H, et al. Consistency collaboration control strategy based on adaptive virtual inertia in multiple charging stations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(2): 896-913.

- [147] FU S Q, SUN Y, LI L, et al. Power oscillation suppression in multi-VSG grid by adaptive virtual impedance control[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(3): 4744-4755.
- [148] 洪灏灏, 顾伟, 黄强, 等. 微电网中多虚拟同步机并联运行有功振荡阻尼控制[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6247-6255. HONG Haohao, GU Wei, HUANG Qiang, et al. Power oscillation damping control for microgrid with multiple VSG units[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6247-6255.
- [149] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. *高电压技术*, 2016, 42(9): 2756-2767. ZHU Yongqiang, JIA Lihu, CAI Bingqian, et al. Overview on topologies and basic control strategies for hybrid AC/DC microgrid[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2756-2767.
- [150] DING X Y, YAO R Y, ZHAI X H, et al. An adaptive compensation droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 102(1): 267-278.
- [151] TIAN Z, FENG P, LI X L, et al. An online power angle remote estimation method for GFL-GFM-converters paralleled system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(10): 12130-12134.
- [152] RAISZ D, THAI T T, MONTI A. Power control of virtual oscillator controlled inverters in grid-connected mode[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5916-5926.
- [153] DHOPLÉ S V, JOHNSON B B, HAMADEH A O. Virtual Oscillator Control for voltage source inverters[C]//2013 51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). Monticello, USA: IEEE, 2013: 1359-1363.
- [154] AGHDAM S A, AGAMY M. Virtual oscillator-based methods for grid-forming inverter control: a review[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(5): 835-855.
- [155] SEO G S, COLOMBINO M, SUBOTIĆ I, et al. Dispatchable virtual oscillator control for decentralized inverter-dominated power systems: analysis and experiments[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anaheim, USA: IEEE, 2019: 561-566.
- [156] COLOMBINO M, GROß D, BROUILLON J S, et al. Global phase and magnitude synchronization of coupled oscillators with application to the control of grid-forming power inverters[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(11): 4496-4511.
- [157] MILANO F. Complex frequency[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(2): 1230-1240.
- [158] HE X Q, HÄBERLE V, DÖRFLER F. Complex-frequency synchronization of converter-based power systems[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2014: 1-12.
- [159] HE X Q, HÄBERLE V, SUBOTIĆ I, et al. Nonlinear stability of complex droop control in converter-based power systems[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2023, 7: 1327-1332.
- [160] HE X Q, HUANG L B, SUBOTIĆ I, et al. Quantitative stability conditions for grid-forming converters with complex droop control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(9): 10834-10852.
- [161] SUBOTIĆ I, GROß D, COLOMBINO M, et al. A Lyapunov framework for nested dynamical systems on multiple time scales with application to converter-based power systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(12): 5909-5924.
- [162] DOMINGO-ENRICH R, HE X Q, HÄBERLE V, et al. Dynamic complex-frequency control of grid-forming converters[C]//IECON 2024 - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Chicago, USA: IEEE, 2024: 1-6.
- [163] HÄBERLE V, FISHER M W, PRIETO-ARAUJO E, et al. Control design of dynamic virtual power plants: an adaptive divide-and-conquer approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(5): 4040-4053.
- [164] HÄBERLE V, TAYYEBI A, HE X Q, et al. Grid-forming and spatially distributed control design of dynamic virtual power plants[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(2): 1761-1777.



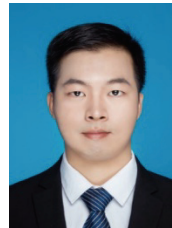
ZHA Xiaoming
Ph.D., Professor



LI Xilin
Ph.D. candidate



HUANG Meng
Ph.D., Professor
Corresponding author



TIAN Zhen
Ph.D.
Associate professor



LIANG Junyang
Ph.D. candidate



LIU Yushuang
Ph.D.
Associate professor

查晓明

1967—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事高比例电力电子装备的“双高”电力系统领域研究
E-mail: xmzha@whu.edu.cn

李锡林

1999—, 男, 博士生
主要研究方向为并网变流器系统暂态同步稳定性分析与控制优化
E-mail: snplee@whu.edu.cn

黄萌(通信作者)

1984—, 男, 博士, 教授, 博导
主要研究方向为新能源并网变流器稳定性与可靠运行等
E-mail: meng.huang@whu.edu.cn

田震

1991—, 男, 博士, 副教授, 硕导
主要研究方向为电力电子化电力系统稳定性分析与最优控制
E-mail: ztian.ee@whu.edu.cn

梁军杨

1998—, 男, 博士生
主要研究方向为并网变流器系统最优控制设计
E-mail: liangJY@whu.edu.cn

刘浴霜

1994—, 女, 博士, 副研究员
主要研究方向为新能源并网变流器建模及稳定性分析
E-mail: lyshuang@whu.edu.cn