

构网型变流器控制技术及其原理综述

刘辉, 于思奇*, 孙大卫, 吴林林, 李蕴红, 王潇

(国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京市 西城区 100045)

An Overview of Control Technologies and Principles for Grid-forming Converters

LIU Hui, YU Siqi*, SUN Dawei, WU Linlin, LI Yunhong, WANG Xiao

(State Grid Jibei Electric Power Research Institute (North China Electric Power Research Institution Co., Ltd.),

Xicheng District, Beijing 100045, China)

ABSTRACT: In recent years, a significant number of new energy units connected to the power grid adopt grid-following (GFL) control mode, which weakens the system's synchronization mechanism and has caused multiple stability problems due to insufficient frequency and voltage support capabilities. Comparatively, grid-forming (GFM) technology controls the converter as an equivalent voltage source, which can effectively provide voltage and frequency support, as well as improve the inertia and damping characteristics of the power grid. This paper summarizes the development history of common grid-forming technologies, analyzes and compares the principles of control modules of GFM converters with droop control, VSG control and matching control, and points out their essential differences from the grid-following control mode. Furthermore, by applying electromagnetic transient simulation tools, this paper compares transient response characteristics of the above several kinds of GFM/GFL control modes and demonstrates the advantage of GFM converters in realizing active support function. Finally, the difficulties and future research prospects of GFM technology are summarized.

KEY WORDS: grid-forming; new energy; transient response; virtual synchronous generator; matching control

摘要: 近年来, 电网中新增的大量新能源机组多采用跟网型(grid-following, GFL)控制方式, 削弱了系统的交流同步机制, 已导致多次由于频率、电压支撑能力不足而发生的稳定问题。构网型(grid-forming, GFM)控制技术可实现变流器作为等效电压源并网, 能够有效为系统提供电压和频率支撑, 并提升电网的惯量和阻尼特性。该文总结了4种常见构网型技术方案的发展历程, 并对下垂控制、虚拟同步控制和匹配控制构网型变流器的各环节控制原理及其与跟网型控制方式的本质区别进行了详细的解析和对比。进一步, 借助

电磁暂态仿真工具对比了多类型构网型/跟网型控制方式在系统中的暂态响应特性, 指出了构网型控制在实现主动支撑功能上的优越性。最后, 总结了构网型控制技术的难点问题 and 未来研究展望。

关键词: 构网型; 新能源; 频率响应; 虚拟同步机; 匹配控制

0 引言

随着我国碳达峰、碳中和方案的扎实推进^[1], 新能源装机和发电量占比逐年提高。根据国家能源局发布的全国电力工业统计数据^[2], 截至2022年底, 我国风电装机容量为3.65亿kW, 同比增长11.2%, 太阳能发电(光伏为主)装机容量为3.93亿kW, 同比增长28.1%, 两者合计占全国总发电装机容量的29.6%。风电、光伏等以电力电子变流器为并网接口的新能源正逐步成为我国构建新型电力系统的主体电源, 从而使电网呈现出高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”特性^[3]。

传统电力系统中, 同步发电机具备建立电网电压和频率的能力, 并能够在扰动下提供惯量响应和短路电流, 支撑电力系统渡过暂态过程。变流器的并网特性则主要由其控制模式决定, 根据其是否与电网同步方式的区别, 一般分为跟网型(grid-following, GFL)、构网型(grid-forming, GFM)两大类^[4-13]。

跟网型变流器的同步方式为通过锁相环测量并网点的相位信息, 作为参考电压相位的基准, 从而实现对电网的“跟随”, 整体上对外表现为电流源特性。跟网型控制必须依赖较强的交流电网才能正常工作, 当电网强度较弱时, 输出电流对机端电压影响较大, 容易导致跟网型电源在大/小扰动下失稳。构网型变流器的同步方式与同步机类似, 可通

基金项目: 国家电网公司科技项目(52010122004Q)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52010122004Q)。

过与电网的功率交换来调整参考电压的频率,从而实现与电网的同步,整体上对外表现为电压源特性。构网型控制无需锁相环,具备自主构建电压、频率的能力,可以应用于在弱电网甚至孤网场景中,提供稳定的交流电压。

当前电力系统中,现存的大量风电、光伏等新能源发电机组和储能装置的网侧变流器几乎全部采用跟网型控制,而且很少具备主动支撑功能,无法提供与传统同步发电机类似的惯性响应和频率/电压控制能力。随着系统中新能源占比的增加,上述问题使得电网的暂态抗扰能力和小信号抗扰能力均有所下降,尤其是在低短路比的弱电网中,会增加系统失稳的风险^[14-19]。频率方面,2019年英国“8.9”频率扰动事件^[20]的事故后分析表明,导致大停电事故的原因之一是新能源机组大量替代同步机使系统惯量水平下降,扰动后系统频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)过大导致的大量分布式电源脱网,促使了系统频率的进一步降低。电压方面,大规模新能源集中送出系统的送端普遍存在就地同步电源少、抗扰能力差等弱电网特征^[21]。如张雄特高压工程送端在540万kW运行方式下的多场站短路比仅为0.91~1.13,属于典型的弱电网。实际运行情况表明,短路对称故障切除后跟网型控制的变流器无功盈余易引起暂态过电压现象^[22-23],严重制约了工程送电能力。

为解决上述问题,应用构网型变流器实现新能源接入大电网问题已成为研究的前沿和热点^[24-30],主要的研究方向包括构网型机组自身的暂态响应与稳定问题^[31-41]、故障穿越方式^[42-45]以及接入后对系统低频振荡、次同步振荡等问题的影响^[46-51]等。特别地,构网型储能装置或新能源-储能一体机由于具备多时间尺度功率支撑能力,在近两年获得了较多关注^[52-58]。与此同时,国内外相关标准也在逐步建立^[59-65],涉及构网型机组定义分类、响应特性要求、测试规程等。工程应用方面,截至2023年底,构网型新能源机组、储能等新型设备已在部分送/受端电网场景下的新能源场站中试点应用,如张家口张北风光储输示范电站、张家口康保河北建投跟网/构网混合型风电场、新疆阿克陶光伏储能电站、湖北广水宝林风光一体电站、安徽金寨县构网型储能示范电站等。

考虑到在分布式不间断电源、微电网等小型电力电子化系统中的应用场景,构网型变流器控制技

术已有30年的历史,先后发展出了下垂控制、虚拟同步机控制、匹配控制、虚拟振荡控制等路线。本文首先总结构网型常见技术方案的发展历程;然后,基于变流器控制原理解析其外特性成因,并对多类型跟网型/构网型控制结构和功能进行对比辨析;随后,通过电磁暂态仿真对比各类控制方式下的变流器以及同步机的响应特性差异,阐明构网型控制在发挥主动支撑功能上的优势;最后,总结构网型控制技术难点问题和未来研究展望。

1 构网型技术方案的发展历程

本节按照时间顺序分别介绍下垂控制、虚拟同步机控制、虚拟振荡控制、惯性同步控制4种构网型常见技术方案的发展历程,重点阐述各方案的关键技术、沿革关系以及应用领域。

1.1 下垂控制

在对传统的以同步机为主导的大型电力系统分析研究中,下垂控制是一个众所周知的概念。当交流发电机的输出功率增加时,降低其频率,从而根据有功传输与相角差的关系实现网内不同发电机组间的功率平衡^[66]。

1993年, $P-\omega$ 下垂控制首次应用于分布式不间断电源(uninterruptable power system, UPS)系统^[67]。由于下垂控制是一种基于有功-频率曲线的自建压控制方式,因此可在无附加通信的条件下实现网内多个分布式电源的自动功率平衡。2002年,美国电气可靠性技术解决方案联合会(consortium for electric reliability technology solutions, CERTS)提出了成熟、体系化的微电网概念^[68-69],整合了小型发电机、新能源发电设备、储能装置与可调负荷等网内资源,实现微电网孤岛运行或并入上级电网。 $P-\omega$ 下垂和 $Q-V$ 下垂是微电网中各分布式设备自主协同控制的核心方式。随后,以下垂控制为核心的CERTS微电网在一个由美国电力公司运营的全尺寸试验台上进行了演示,充分验证了控制的可行性和鲁棒性^[70-71]。

在早期的下垂控制中,由下垂曲线生成的频率和电压幅值直接合成为电压参考值输入至PWM环节,缺乏针对一些具体问题的附加控制手段。一个典型的例子是,在线路电阻与感抗相比不容忽略甚至数值更高时,电源间的有功传递与相角差和电压均相关,有功与电压不再解耦,理想阻抗比($X_L \gg R$)下的有功传输方程不再成立。在此情况下,基于理

想阻抗比设计的 $P-\omega$ 下垂控制出现偏差, 即有功、频率稳态运行点偏离下垂曲线, 这使得多电源间的功率分配精度严重下降。针对此问题, 学者在 2004 年提出采用虚拟阻抗方法^[72]作为附加控制手段嵌入下垂控制, 将变流器的等效端口阻抗进行重塑, 改善电源间的功率解耦特性, 从而提升下垂控制的精度和有效性。

此外, 早期的下垂控制不含电流内环, 从而缺乏对电流进行限制的手段, 在系统发生故障等较大扰动时容易产生过流问题, 对开关器件造成损坏。为此, 研究人员提出了含电压电流双内环的下垂控制^[4,73], 实现了对故障电流的有效限制。而近年来, 随着电网内变流器接口设备的增多, 研究人员通过小信号分析等方式发现含电压电流双内环的下垂控制在连接强电网时失稳风险增加, 一个重要的原因是其在低频段存在负阻抗区^[74-75]。相比之下, 早期的无内环的下垂控制不存在此项问题。虚拟阻抗方法^[76]可以改善该问题, 其本质原理依然为将变流器的等效端口阻抗进行重塑, 通过附加控制在逆变器端口串联虚拟正阻抗, 抵消双环下垂控制自身负阻抗的影响。

同样针对过流问题, 出于控制环节简化的考虑, 近年有学者提出了用虚拟导纳控制^[77-78]替换电压电流双内环控制中的电压环, 通过动态调节虚拟阻抗实现电流限幅功能。

上述文献讨论的全部是针对构网型变流器的下垂控制。需要说明的是, 下垂控制也可以应用于跟网型变流器。如美国可再生能源国家实验室(national renewable energy laboratory, NREL)联合夏威夷电网公司对光伏发电系统跟网型下垂控制改造进行了仿真和实地测试^[79]。两者的异同将在 3 节进行详细的对比分析。

作为一种最基础的自同步方式, 下垂控制通过 $P-\omega$ 下垂曲线(构网型) $\omega-P$ 下垂曲线(跟网型)来响应系统中的频率或功率变化量。但是, 下垂控制无法对 RoCoF 进行直接响应(可以通过分担网内同步机的功率实现间接响应)。为此, 在某些对 RoCoF 要求较高的系统中, 具备主动支撑功能的换流器需要具备一定的抵抗频率变化率的能力。这引起了学者对虚拟同步发电机控制的关注和研究。

1.2 虚拟同步发电机控制

将虚拟同步发电机控制(virtual synchronous generator, VSG, 简称虚拟同步控制)的技术方案主

要分为跟网型与构网型两类, 下文将依次阐述:

1) 跟网型虚拟同步发电机, 实现方式是对跟网型(锁相同步型)变流器附加虚拟同步控制^[80]。

2007 年, 文献[80]提出一种虚拟同步发电机方案(virtual synchronous machine, VISMA), 通过直接控制变流器滤波电感上的电流, 间接地使新能源具有同步发电机的特性, 在此基础上通过改变电流环控制指令值, 实现对同步机一次调频及一次调压特性的模拟。文献[81]提出一种基于新能源配置储能的虚拟同步控制策略, 应用类似同步发电机的功角摇摆方程, 控制储能输出功率, 以辅助新能源机组实现惯量响应和一次调频功能。这类方案的整体思路是通过在新能源机组中网侧跟网型变流器外环功率指令上叠加模拟同步机调频和惯量特性的附加指令, 使得变流器在外环控制时间尺度上具有相应的外特性。这类控制策略并未彻底改变新能源机组的电流源特性, 难以提供类似同步机的支撑能力, 也没有从本质上改变跟网型新能源机组阻尼特性差、无法在孤网中运行等固有问题。

2) 构网型虚拟同步发电机。其中一种实现思路是, 在构网型变流器上精细模拟同步机电磁特性及调频、励磁控制^[82-84]。

针对跟网型虚拟同步控制的不足, 学者从“见贤思齐”的角度出发, 以同步机的电路和控制为标杆, 提出了可模拟同步机内在运行原理的虚拟同步控制策略。其中最具代表性的是文献[82]在 2010 年提出的同步逆变器(synchronverter)控制方案。该方案从虚拟同步发电机交流侧的动态模型入手, 同时考虑了同步发电机的机电暂态和电磁暂态特性, 模拟了同步发电机的电磁特性、转子惯性、一次调频及调压功能, 从外特性上较为精细地对同步发电机进行了模拟。该方案中新能源机组的网侧变流器采用构网型控制策略, 可用于弱电网或孤网运行场景。但是由于其目标是尽可能模拟同步机特性, 会削弱变流器本身具备的快速响应能力。

另一种实现思路是在构网型变流器上直接模拟同步机的主动支撑功能^[85-86]。

上一种思路的核心思想是让变流器的表现尽可能接近同步机, 因此利用了专属于同步机的电机定子自感/互感、励磁系统延迟等参数, 以及机械转矩、励磁电流等变量。而部分学者另辟蹊径地从同步机的外特性切入, 将同步机对电网的主动支撑能力抽象成了一次调频、阻尼、惯量支撑、电压调节

等功能,以具备自建压能力的构网型变流器为基础,进行虚拟同步控制方法的研究。2007年,文献[85]较早地提出了一种分布式电源控制方案,该方案通过模拟同步机的一次调频、惯量功能,可以实现使分布式发电设备能够在并网和孤岛模式下运行,并提供在并网和自主模式之间提供平滑过渡的能力,该方案已经具备了虚拟同步机的全部特征。文献[86]基于电压源控制储能变流器提出一种类似的实现方案。这种实现思路中新能源机组的网侧变流器采用构网型控制策略,外环控制方法的选择也较为灵活,因此已成为近年来研究和应用的主流方向。

与下垂控制类似,在基于构网型变流器的虚拟同步机方案中,若将生成的电压和相角直接合成为电压参考值信号送至脉宽调制(pulse width modulation, PWM)环节,会因缺乏对电流的限制而易在系统发生故障等较大扰动时产生过流问题,对开关器件造成损坏。因此,学者在上述研究的基础上,对虚拟同步发电机添加了电压电流双内环控制^[87],实现了电流限幅功能。同样地,虚拟同步机中也可按实际情况添加虚拟阻抗等附加控制^[88]。文献[89]全面地比较了传统下垂控制和虚拟同步控制,并考虑了虚拟阻抗附加控制,形成了一种适用于电压型控制变流器的通用虚拟同步控制方案。这项研究对构网型虚拟同步机实现方案的相关技术做了较好的总结和提炼。

虚拟同步控制与下垂控制类似,均为基于功率的自同步方式。具体地,可通过控制手段模拟同步机的一次调频、阻尼、惯量支撑、电压调节等功能,对系统进行频率或电压支撑。由于虚拟同步机具备惯量支撑功能,可以直接响应系统中的RoCoF,此为虚拟同步控制相对于下垂控制的主要优势。

1.3 匹配控制/惯性同步控制

近年来,随着对构网型控制方式应用于风电、光伏等各类新能源机组的研究的深入,学者和工程师对变流器能量来源问题愈发关注。虚拟同步控制与下垂控制作为网侧变流器控制手段,负责调节向交流系统输出的有功功率,其调节能力的基础是机侧的能量或功率产出能力。如果机侧的功率来源不是储能等可以迅速调节功率的强电源,而是风电、光伏等功率受限的新能源,那么一般需要使新能源工作在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)位置的下方,留足功率备用以应对

网侧的功率调节需求,而且要通过附加控制避免网侧从机侧索取过多功率,导致风电机组频率二次跌落等问题。上述方法已能够基本解决构网型新能源机组的功率平衡问题,但功率的“需求”和“来源”未能有效统一,导致控制略显冗杂。对此,匹配控制及其衍生的惯性同步控制为解决功率平衡问题提供了一条更为清晰的途径。

同步发电机的惯量支撑电网频率的基础是释放或吸收转子动能。2016年,文献[90-91]提出匹配控制的概念,建立了变流器直流电容电压与同步机转子转速的匹配关系,利用变流器直流母线电容能量来模拟同步机转子能量。但实际上,电容的惯性时间常数通常为毫秒级,远小于同步机的转子惯性时间常数,故难以在扰动时提供有效的功率或能量支撑。因此,匹配控制主要是建立了一种利用直流电压和交流电压角频率匹配关系的自同步机制,该控制应用在网侧变流器上可实现交直流功率的传递,但并不能有效保证所需功率或能量的供给。

针对此项问题,文献[92-93]提出了一种惯量传递控制方案,在匹配控制的基础上,将直流电压信号额外引出作为惯量传递控制环的输入,用以控制直流侧原动机的额外有功输出,从而将匹配控制的等效惯量进行了扩展,所扩展的大小可以根据原动机的有功输出能力边界灵活选择。例如,当直流侧为永磁同步发电机组(permanent magnet synchronous generator, PMSG)时,扩展后的惯量一般不超过风轮和电机的物理惯量。经过扩展的匹配控制又叫做惯性同步控制,其中惯量包含电容本身的惯量和从原动机轴系“借得”的惯量。

在匹配控制和惯性同步控制中,网侧变流器承担直流电压控制和有功传递的角色,对大电网的主动支撑方式由机侧变流器的附加控制决定,可根据原动机的有功输出能力设置,从而实现了将有功的“需求”和“来源”统一到机侧变流器,控制更为直观和灵活,对不含储能的新能源以构网方式接入电网具有较高的适用性。需要注意的是,无功-电压控制依然由网侧变流器实现。

1.4 虚拟振荡器控制

基于构网型变流器的下垂控制和虚拟同步控制中,为减小输出频率/电压的谐波,大多需将变流器交流侧采集计算得到的有功、无功功率经过低通滤波器后再作为外环控制的反馈量,因此其动态性能受到了一定限制。针对此项不足,有学者自2013

年起将虚拟振荡器应用于逆变器并联运行控制^[94-95]。虚拟振荡器模拟了一类具有弱非线性的 Liénard 振荡器的动力学特性^[96-99]，该振荡器一般可由二阶微分方程描述，可模拟非线性系统的极限环振荡过程，由物理模型的振荡电压得到正弦调制波，实现变流器输出电压的自同步。由于不需要进行功率计算，虚拟振荡器控制相比下垂控制和虚拟同步控制可以实现更快的瞬态响应。近年来，学者对虚拟振荡器控制进行了多项改进，例如，文献^[96-97]提出了 dispatchable VOC (dVOC)使其具备功率控制能力，文献^[98]提出了 unified VOC (uVOC)使其具备故障穿越等能力。

虚拟振荡器控制具备比下垂控制与虚拟同步控制更快的响应速度，但是从大电网主动支撑功能

角度来看，较难实现惯量支撑能力。此外其参考电压生成机制直观性差、比较复杂，因此少见虚拟振荡器控制在实际工程尤其是大规模新能源并网工程中的应用。

1.5 综合评述

按照出现顺序以及技术特征，笔者对已有的构网型常见技术方案的发展历程做梳理，如图 1 所示。

总体看来，下垂控制和虚拟同步控制发展较早，控制结构也比较相近，两者在经历双内环控制、虚拟阻抗等改进后已日趋完善，其应用范围从微电网逐步扩展至大电网。近年来，匹配控制及其衍生的惯性同步控制为机侧与网侧的功率传递提供了更为直观、灵活的方法，虚拟振荡器控制则着重于提高构网型变流器的动态响应性能。

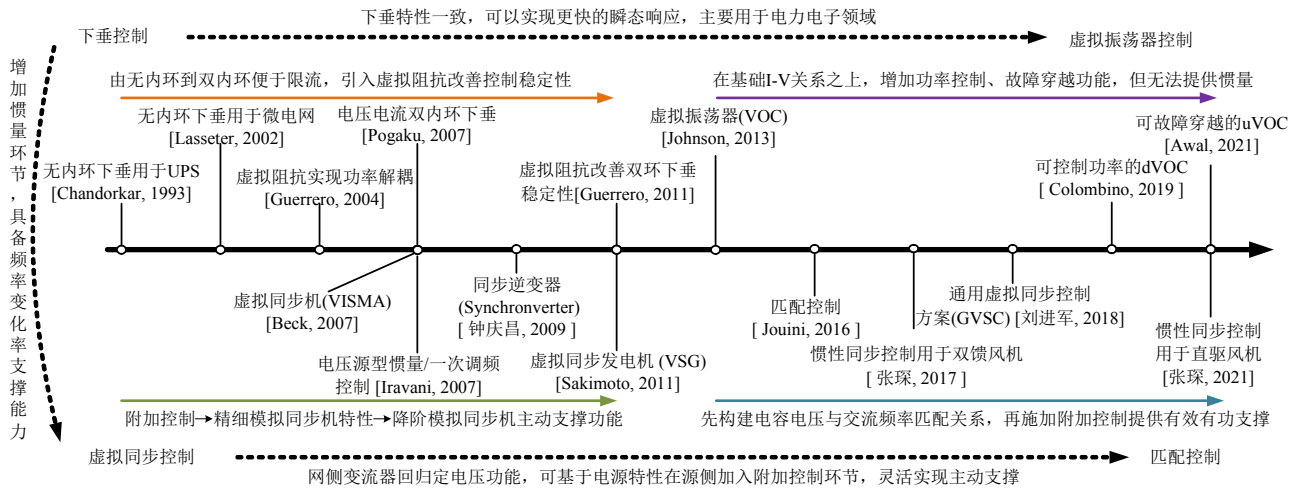


图 1 常见构网型控制技术的演进历程及彼此的关系

Fig. 1 Developing process and relationship of GFM control technologies

4 种构网型控制方案的部分技术特征的对比如表 1 所示，不同构网型控制之间的根本差异在于自

表 1 4 种构网型控制方案的对比

Table 1 Comparison of four GFM control methods

对比项目	下垂控制	虚拟同步控制	匹配控制	虚拟振荡控制
是否电压源型	是	是	是	是
受控变流器	网侧	网侧	网侧	网侧
自同步方式	功率同步 $P-\omega$	功率同步 $P-\omega$	惯性同步 $U_{dc}-\omega$	极限环振荡
一次调频能力	有	有	机侧附加控制	有
惯量响应	有(一阶滤波)	有	机侧附加控制	无
功率响应速度	一般	快	一般	最快
主要应用场景	功率响应快、限制少的电源，如储能	功率响应快、限制少的电源，如储能	功率响应慢、限制多的电源，如风机	大电网中较少应用

同步方式。

2 构网型变流器的控制原理

本节首先辨析构网型控制相关概念，随后回顾含主动支撑的跟网型变流器控制原理，并对下垂控制、虚拟同步控制、匹配控制的构网型变流器控制原理作详细介绍与对比分析，指出跟网型/构网型变流器的外特性本质上由相应时间尺度下到达稳态的控制环决定。考虑到新能源接入大电网的工程应用场景，本节暂不对虚拟振荡控制做进一步介绍。

2.1 构网型控制相关概念辨析

尽管构网型所包含的下垂控制、虚拟同步控制等技术方案已发展多年，但“构网型”这一概念本身近年来才被学者们广泛讨论，因此有必要对与构网型控制相关概念的内涵做以辨析。

1) 电流源型变流器(line-commutated converter,

LCC)与电压源型变流器(voltage source converter, VSC)。两者的区别在于开关器件的选择。前者以晶闸管等半控器件作为桥臂开关,后者以 IGBT、MOSFET 等全控器件作为桥臂开关。后者因其高可控性、灵活性,在中低压电网中逐步占据主导地位。本文涉及的全部控制方法均基于电压源型变流器。

2) 跟网型控制(grid-following, GFL)与构网型控制(grid-forming, GFM)。两者的区别在于与电网同步的方式。前者通过锁相环(phase locked loop, PLL)测量并网点的相位信息作为参考电压相位的基准,从而实现与电网的同步。后者通过与电网的功率交换来调整参考电压的频率,无需 PLL 便可实现与电网的同步。

3) 电流型控制与电压型控制。两者的区别在于控制器内环达到稳态后对电网表现出的特性。前者在滤波器外端口对电网表现电流源特性,后者则表现为电压源特性。特别地,对于无内环的构网型控制,则在滤波器内端口表现为电压源特性。

4) 构网型控制与支持型控制(grid-supporting)。在早期的分类^[4]中,构网型控制的内涵较窄,仅代表固定电压和频率的电压型控制方式。以下垂控制为例,含有 $P-\omega$ 下垂和 $Q-V$ 下垂的电压型控制方式被称为基于电压源的支持型控制,对应的电流型控制方式则被称为基于电流源的支持型控制。然而随着构网型概念的不断扩展,含下垂的电压型控制已成为构网型的一种。因此笔者认为,目前无需再使用支持型控制这一概念进行分类。

5) 构网型控制与主动支撑功能。主动支撑是大电网对新能源机组提出的功能要求,要求其通过适当的控制实现惯量响应、一次调频响应、快速调压等功能,助力维持系统频率、电压安全稳定。构网型控制天然可实现部分或全部主动支撑功能,常规跟网型控制无法实现主动支撑,但可以通过附加控制的方式实现。

2.2 典型跟网型变流器的控制原理回顾

图 2 展示了采用典型跟网型控制的变流器结构,外环以功率控制为例。采集变流器端口的滤波电容三相电压以及滤波电感三相电流后,电压经 PLL 环节计算相角,电压电流经 abc/dq 变换后馈入内环,同时也用作计算功率/直流电压馈入外环。外环的输入由附加控制提供,并向内环输出滤波电抗电流 dq 分量的参考值。内环输出参考电压的 dq 分量,经 dq/abc 变换生成变流器三相参考电压 e_{abc} ,

经 PWM 环节调制为门极信号驱动变流器。

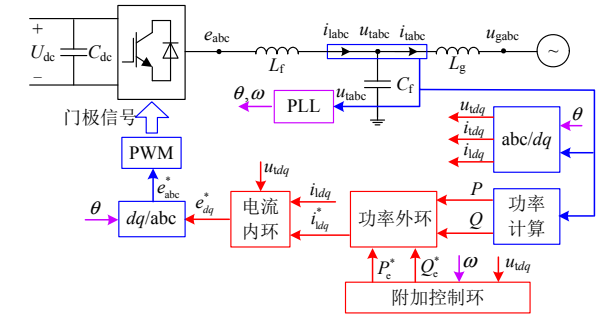


图 2 典型跟网型变流器结构

Fig. 2 Typical structure of GFL converter

如前文所述,跟网型控制属于电流型控制,对电网呈现电流源特性,这一特性是跟网型变流器暂态响应、阻抗特性等多项特征的基础。为深入考察这一特性的本质及其成立条件,有必要对跟网型控制的原理作进一步阐释。

2.2.1 电流内环

假设 PWM 和滤波器已经过良好设计,忽略开关谐波的影响,则 $e_j^* = e_j (j=a, b, c)$ 。

第 j 相滤波阻抗两端电压满足:

$$e_j^* = u_{vj} + L_f \frac{di_{vj}}{dt} + R_f i_{vj} \quad (1)$$

假设 PLL 准确地采集了端口电压相角 θ , 则式(1)在以端口电压为基准的 dq 坐标系中可描述为

$$\begin{cases} e_d^* = u_{td} + (R_f + sL_f) i_{td} - \omega L_f i_{tq} \\ e_q^* = u_{tq} + (R_f + sL_f) i_{tq} + \omega L_f i_{td} \end{cases} \quad (2)$$

电流内环的典型控制框图如图 3(a)所示。式(2)

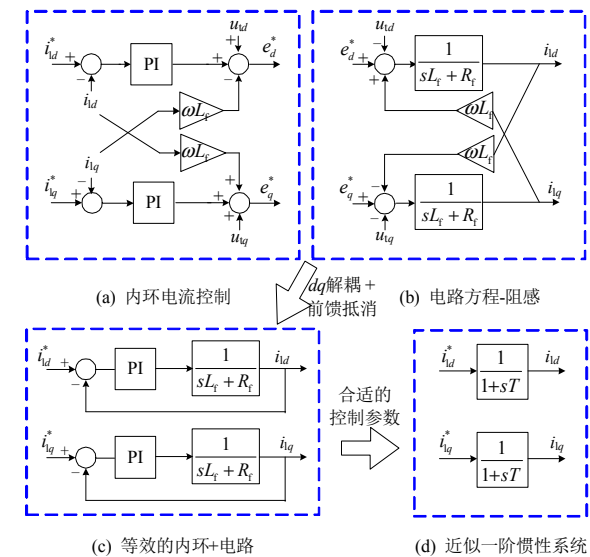


图 3 跟网型变流器电路方程及内环电流控制

Fig. 3 Circuit equations and inner loop current control of GFL converter

的电路方程可等效表示为框图的形式，如图 3(b)所示。下面考察电流内环的作用。观察图 3(a)和(b)的输入和输出可知，跟网型变流器内环的控制目标是滤波电感上的电流值等于其参考值，该目标通过 PI 控制器和电流反馈实现。容易发现，典型电流内环控制中含有的交叉耦合项 $i_{ld}\omega L_f$ 、 $i_{lq}\omega L_f$ 和前馈项 u_{ld} 、 u_{lq} ，其设计目的是为抵消电路方程中相应的变量。抵消后的电路和控制方程可简化为图 3(c)的形式，可见 dq 轴电流控制实现了解耦。若对 PI 控制器选取合适的参数使得闭环传递函数零极点尽可能抵消，则可将进一步将系统近似简化为一阶惯性环节，如图 3(d)所示。时间常数 T 由滤波器阻感参数和 PI 控制器参数共同决定。

图 3(d)直观地展示了跟网型变流器的电流源特性。其本质是，在控制结构和参数合理选取的条件下，当向电流内环施加电流参考值后，电感电流经较短时间即可有效跟踪该参考值，因此对外表现为电流源特性。需要注意的是，其中包含了“内环达到稳态”这一条件。因此，更准确的表述应该是，跟网型变流器在内环控制趋稳的时间尺度上(比如 $>5\text{ ms}$)，对外表现为电流源特性。

2.2.2 功率外环

在电流内环的基础上，可根据有功、无功与 dq 轴电流的关系，利用 PI 控制器实现外环控制，本节以定功率控制为例，如图 4 所示。一般在参数设计时，取电压外环的带宽为内环带宽的 1/50 左右，因此电流内环响应远快于电压外环。根据奇异扰动原理^[100-101]，在电压/功率外环控制尺度，电流内环+滤波器电路可直接视为单位增益。相应地，采用定功率控制条件下，跟网型变流器在外环控制趋稳的时间尺度上(比如 $>200\text{ ms}$)，对外表现为功率源特性。综合 2.2.1 与 2.2.2 节可知，“跟网型控制对电网呈现电流源或功率源特性”这一表述有其成立条件，必须结合时间尺度的因素加以辨别。

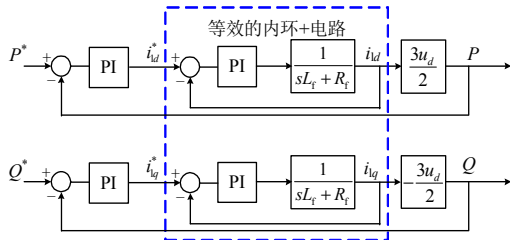


图 4 跟网型变流器外环控制及受控对象 (以定功率控制为例)

Fig. 4 Outer loop control and controlled plant of GFL converter (use PQ control as an example)

2.2.3 附加控制

跟网型变流器外环的参考值可以设置成固定值，亦可由更外层的附加控制给定。典型如上级调控指令和 MPPT 控制指令，以一定的间隔来动态调整变流器的输出功率。为使跟网型变流器具备电压、频率的主动支撑功能，也可以在施加附加控制^[4,79]，如图 5 所示为 ω - P 下垂和 V - Q 下垂控制(跟网型)。图中 M_P 和 M_Q 为常数。

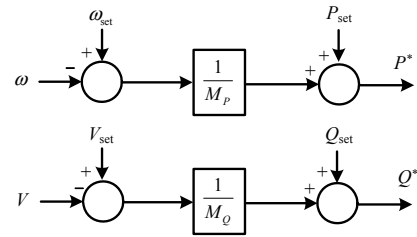


图 5 跟网型变流器附加下垂控制

Fig. 5 GFL-controlled converter with droop control

以有功-频率控制为例，采用 PLL 环节检测系统频率，根据其于设定频率的差值来决定输出的有功功率，在系统频率偏低时增发有功，频率偏高时减少有功，从而实现对电网频率的支撑作用。无功-电压控制的原理相同。

2.3 下垂/VSG 控制型构网型变流器的控制原理

图 6 展示了采用下垂/VSG 控制的构网型变流器结构。采集变流器端口的滤波电容电压以及滤波电感电流后，一方面经 abc/dq 变换馈入内环，另一方面经功率计算环节输入构网控制外环，生成滤波器外参考电压的幅值和相位馈入内环。内环包含电压反馈环和电流反馈环，输出变流器参考电压的 dq 分量，经 dq/abc 变换为三相参考电压 e_{abc} ，经 PWM 环节调制为门极信号驱动变流器。注意 dq 变换与反变换所用到的相角由构网型控制自主生成，无需 PLL 环节。

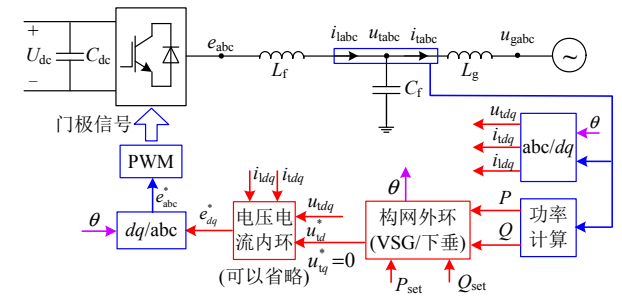


图 6 典型下垂/VSG 型构网型变流器结构

Fig. 6 Typical structure of GFM converter (droop control or VSG control)

构网型控制属于电压型控制，对电网呈现电压

源特性。与对跟网型控制的考察类似，有必要深入考察这一特性的本质及其成立条件，从而对构网型控制的原理作进一步阐释。

2.3.1 电压电流内环

第 j 相($j=a, b, c$)滤波电容上的电流满足:

$$i_{ij} - i_{ij}^* = C_f \frac{du_{ij}}{dt} \quad (3)$$

式(3)在以端口电压为基准的 dq 坐标系中可描述为

$$\begin{cases} e_d^* = \frac{1}{sC} (i_{id} - i_{id}^* + \omega C_f u_{dq}) \\ e_q^* = \frac{1}{sC} (i_{iq} - i_{iq}^* - \omega C_f u_{dq}) \end{cases} \quad (4)$$

采用电压电流双环控制的构网型变流器中，电压环部分如图 7(a)所示。式(4)的电路方程可等效表示为框图的形式，如图 7(b)所示。图 7 中滤波器阻感部分的电路方程和内环电流控制部分与跟网型变流器一致，可由图 3(a)、(b)表示，不再重复画出。根据 3.2 节的分析，若电流环及滤波器阻感方程的响应速度远高于电压环及滤波器电容方程的响应速度，则在后者的时间尺度上，前者可视为单位增益，即满足 $i_{id} \approx i_{id}^*$, $i_{iq} \approx i_{iq}^*$ 。此时，可将图 7(a)所示的电压环控制方程和图 7(b)所示的滤波器电容方程直接相连。观察其输入和输出，可知构网型变流器电压电流双内环的整体控制目标是滤波电容上的电压值等于其参考值，该目标通过 PI 控制器和电流、电压双环反馈实现。与电流环类似，典型电压环控制中含有的交叉耦合项 $u_{id}\omega C_f$ 、 $u_{iq}\omega C_f$ 和前馈

项 i_{id} 、 i_{iq} 的设计目的也是为抵消电路方程中相应的变量。因此，抵消后的电路和控制方程可简化为图 7(c)的形式，可见 dq 轴电压控制实现了解耦。若对 PI 控制器选取合适的参数，则可得闭环传递函数 $G(s)$ ，如图 7(d)所示。

图 7(d)代表了构网型变流器的电压源特性。在控制结构和参数合理选取的条件下，当向电压环施加电压参考值后，滤波电容电压经较短时间即可有效跟踪该参考值，因此对外表现为电压源特性。需要注意的是，其中包含了“电压、电流内环均达到稳态”这一条件。因此，更准确的表述应该是，构网型变流器在电压、电流内环控制均趋稳的时间尺度上，对外表现为电压源特性。

特别地，构网型变流器也可以采用无内环的控制方式，构网外环输出的电压幅值和相位直接合成为三相电压参考值。此时，变流器依然对外表现为电压源特性。两者的区别在于无内环构网型控制的是滤波器内电压，有内环构网型控制的是滤波器外的电压。因此，从并网点看向变流器时，前者是滤波阻抗后的等效电压源，而后者在电压电流双内环趋稳的时间尺度上是无阻抗的等效电压源。无内环构网型控制相对于双内环构网型控制的优势是在接入强电网时失稳风险较低^[74-75]，缺点是故障期间难以对电流有效限制。双内环构网型控制可以通过附加虚拟阻抗等方式提升连接强网时的稳定性，因此其实用性相对无内环构网型控制更好一些，目前已被新能源厂商应用于构网型机组的控制器设计。

2.3.2 构网控制外环

由 2.1 和 2.2 节的介绍，构网型控制的外环可选取多种类型的下垂控制或 VSG 控制方式。下面选取最典型的控制方式进行介绍。

典型下垂控制的有功-频率和无功-电压方程为

$$\begin{cases} \omega = \omega_{set} + M_P (P_{set} - P) \\ V^* = V_{set} + M_Q (Q_{set} - Q) \end{cases} \quad (5)$$

式中： ω_{set} 、 V_{set} 、 P_{set} 、 Q_{set} 分别为频率、电压、有功、无功的设定值； M_P 、 M_Q 为下垂系数； ω 、 V^* 分别为下垂控制输出的频率、电压。对应的控制框图如图 8 所示。

典型 VSG 控制的有功-频率方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{(P_{set} - P)}{\omega_{set}} - D(\omega - \omega_{set}) \quad (6)$$

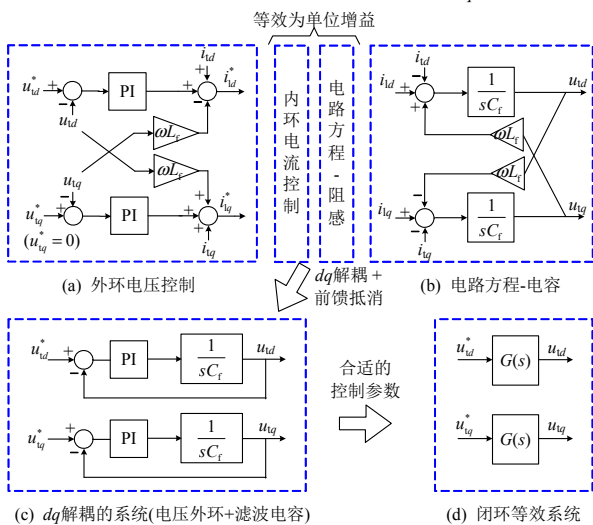


图 7 构网型电路方程及电压电流双内环控制

Fig. 7 Circuit equation and voltage-current inner double loop control of GFM converter

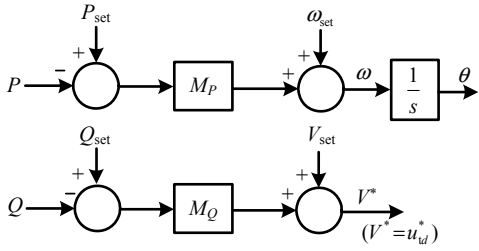


图 8 适用于构网型变流器的典型下垂控制

Fig. 8 Typical droop control applied to GFM converter

式中： ω_{set} 、 P_{set} 分别为频率、有功的设定值； J 为转动惯量； D 为阻尼系数； ω 为 VSG 控制输出频率。VSG 控制的无功-电压方程可与下垂控制相同，如式(5)的第二个方程。对应的控制框图如图 9 所示。

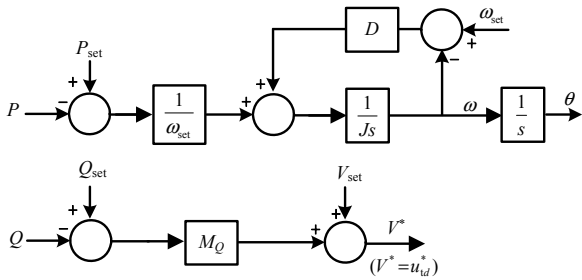


图 9 适用于构网型变流器的典型 VSG 控制

Fig. 9 Typical VSG control applied to GFM converter

对比图 8 和 9 可知，下垂控制和 VSG 控制均通过功率来实现自同步，即通过有功功率测量值与设定值的偏差来调节参考电压的频率。有所不同的是，下垂控制仅具备一次调频能力，而 VSG 由于惯量 J 的存在使其在功率和频率动态过程中具有惯性，阻尼 D 则使其具备阻尼功率振荡的能力。对于无功-电压调节，两者均通过无功功率测量值与设定值的偏差来调节输出电压，可采用相同的控制结构，并表现为类似同步机的主动调压特性。由于传输线路一般呈感性，变流器的有功无功是解耦的，两者的控制相互独立。因此，有部分文献中仅对有功进行下垂或 VSG 控制，无功采用反馈控制或其他控制方式^[102]。

2.4 匹配控制型构网型变流器的控制原理

图 10 展示了采用匹配控制的构网型变流器结构。无功控制环节与下垂/VSG 控制逻辑类似，采集变流器端口的滤波电容电压以及滤波电感电流后，功率计算环节得到无功功率，经含 PI 的电压控制环节得到参考电压幅值 V^* 。有功控制环节则有所区别，采集直流电压 U_{dc} ，经比例变换直接生成参考电压的频率。下面说明该控制方式的原理^[93]。

变流器的直流母线电压方程为

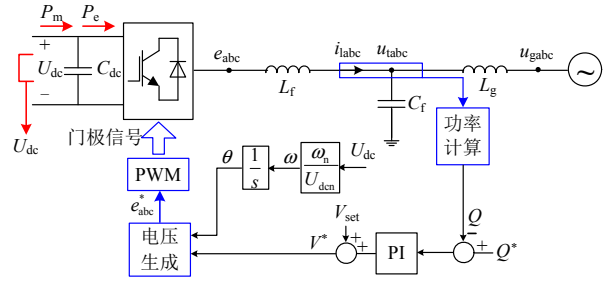


图 10 典型匹配控制的构网型变流器结构

Fig. 10 Typical structure of GFM-controlled converter (matching control)

$$2H_C(\bar{U}_{dc0} \frac{d\bar{U}_{dc}}{dt}) = \bar{P}_m - \bar{P}_e \quad (7)$$

式中： \bar{P}_m 为机侧变换器输出功率的标幺值； \bar{P}_e 为网侧变换器输出功率的标幺值； \bar{U}_{dc} 为直流电压的标幺值； \bar{U}_{dc0} 为稳态直流电压的标幺值，为 1.0 pu； H_C 为直流侧电容的惯性时间常数，计算式为

$$H_C = \frac{C_{dc} U_{dcn}^2}{2S_n} \quad (8)$$

式中： C_{dc} 为直流电容值； U_{dcn} 为直流电压的基准值； S_n 为变流器的额定功率。

同步发电机转子运动方程可表示为

$$2H_J(\bar{\omega}_m \frac{d\bar{\omega}_m}{dt}) = \bar{P}_M - \bar{P}_E \quad (9)$$

式中： \bar{P}_M 为同步机输入原动功率的标幺值； \bar{P}_E 为同步机输出电磁功率的标幺值； $\bar{\omega}_m$ 为转子转速的标幺值； H_J 为转子的惯性时间常数。

对比式(7)、(9)可知，直流电压标幺值 \bar{U}_{dc} 与同步发电机转速标幺值 $\bar{\omega}_m$ 动力学方程是相似的。类似地，两者的有功传输方程也具备相同的形式，本文不做赘述。由此，可建立 \bar{U}_{dc} 与 $\bar{\omega}_m$ 、 H_C 与 H_J 的类比关系，进而可建立网侧变流器交流电压角频率标幺值 $\bar{\omega}$ 与直流侧电压标幺值 \bar{U}_{dc} 之间的匹配关系，使其满足关系：

$$\bar{\omega} = \bar{U}_{dc} \quad (10)$$

此时，网侧变换器对电网呈现出同步发电机的外特性，此即匹配控制的原理。

对应至图 10 中的有名值表示，则有：

$$\omega = \frac{\omega_n}{U_{dcn}} U_{dc} \quad (11)$$

式中： $\omega = \bar{\omega} \cdot \omega_n$ ； $U_{dc} = \bar{U}_{dc} \cdot U_{dcn}$ 。

由式(8)可知，电容具有的等效惯量时间常数很小，一般在毫秒级，仅凭自身能量难以对交流电网

进行有功主动支撑。如 2.3 节所述，匹配控制/惯性同步控制的网侧变流器主要承担直流电压控制和有功传递的角色，对大电网的主动支撑方式由机侧变流器的附加控制决定。文献[93]提出在直驱风机在机侧变流器参考值给定环节附加惯量传递控制，如图 11 所示，整体控制结构类似于含主动支撑功能的跟网型变流器。

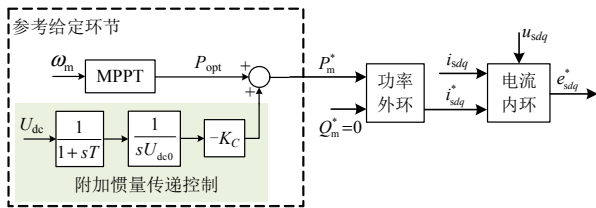


图 11 机侧变流器附加惯量传递控制
Fig. 11 Additional inertia transmission control on motor side

该控制方式的原理在于将直流电压的变化作为机侧变流器有功参考值的一部分，从而实现在网侧功率增加导致直流电压下降时，可从原动机额外吸取一部分功率。在惯量响应的时尺度上，该控制可将直流侧的等效惯性时间常数增至如式(12)所示。

$$H_{VC} = H_C + \frac{K_C}{2U_{dc0}} \quad (12)$$

这相当于除利用电容自身的等效物理惯量之外，也通过控制手段将机侧的一部分惯性传递到网侧，因此叫做惯量传递控制。考虑到机侧惯量的物理来源，在进行参数选取时，一般 H_{VC} 不应大于直驱风机轴系的物理惯量。

总体看来，采用匹配控制的网侧变流器主要负责直流电压控制和有功传递，与之相配合的惯量传递控制等方式负责有功调节。附加控制可根据原动机的惯量和功率调节能力灵活选取。

2.5 总结与对比

本小节将含支撑功能的跟网型以及各类构网型的控制方式作模块化呈现，如图 12 所示，并进行各类控制原理的直观对比。图中为简洁起见，跟网型外环以功率控制为例，跟网型中的附加控制以及构网型中的电压-无功控制均以下垂控制为例。

整体结构方面，跟网型变流器采用 ω -P 附加控制实现功率支撑功能，其中 ω 由 PLL 环节提供。构网型变流器则因自同步环节而天然具备功率支撑功能，其中下垂/VSG 控制的自同步方式为 P - ω 功率同步，匹配控制的自同步方式为 U_{dc} - ω 惯性同步，两者的 ω 都是自主生成的，无需 PLL 环节。

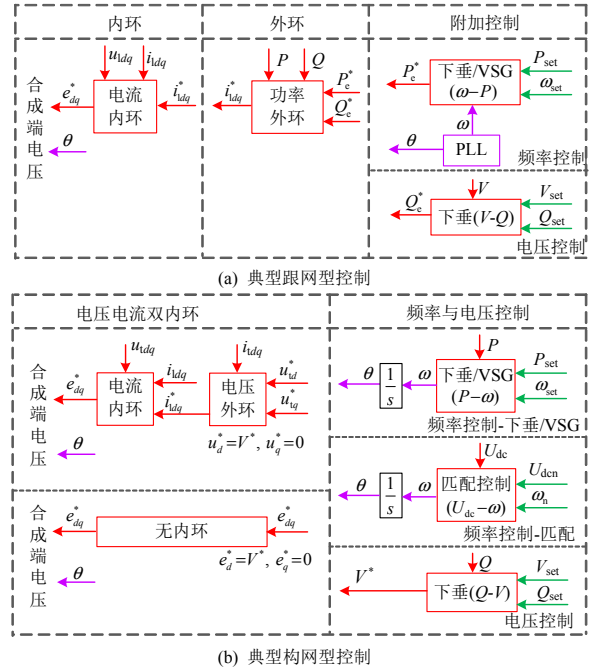


图 12 典型跟网型、构网型变流器的控制模块
Fig. 12 Control modules of typical GFL and GFM converters

外特性方面，跟网型变流器内环实现对滤波电感电流的反馈控制，在控制参数选取得当的条件下，内环控制和滤波阻感支路形成的闭环可视为一阶惯性系统，响应速度很快(毫秒级)。外环定功率，响应速度较慢(百毫秒级)，在外环控制尺度，可认为内环响应完毕。跟网型变流器因控制环的不同时间尺度而表现出不同特性。内环稳定后，表现为电流源特性；外环稳定后，表现为功率源特性。相对地，构网型变流器的电压电流双内环实现对滤波电容电压的反馈控制，在控制参数选取得当的条件下，双内环和 RLC 滤波器形成的闭环可视为低阶惯性系统，响应速度较快。这决定了其对外呈现电压源特性，受控量是滤波器外的电压。构网型变流器也可以不加双内环，此时受控量是滤波器内的电压，对外同样呈现电压源特性。

变流器的电压-无功控制相对独立于有功-频率控制，受控量和控制方式选取较为灵活，一般采用下垂控制方式但不局限于此，本文不做详细讨论。

3 构网型变流器暂态响应特性分析

由 1、2 节的分析可知，跟网型变流器及各类构网型变流器具备不同的自同步方式与有功-频率调节策略，跟网型与构网型变流器的端口也因内环控制不同而等效为不同的电源特性。上述差异共同决定了变流器在电网扰动下的暂态响应能力。由于

构网控制的自同步环节在有功控制回路，负荷扰动下的频率响应可用于对比不同控制方式的暂态响应特性。下面进行简要分析。

对于跟网型变流器，由于其外特性等效为电流源，阻抗很大，因此在负荷扰动时不参与初始功率分配。同时，网侧变流器通过锁相环实现与电网的同步，其附加的主动支撑功能响应的是频率信号而非功率信号。而频率的变化由系统的等效惯量与调频系数决定，无法瞬时产生。综合以上 2 点，跟网型变流器的暂态响应存在一定的延迟。

对于构网型变流器，由于其外特性等效为电压源，阻抗较小，因此在负荷扰动时可以参与初始功率分配。其中，下垂/VSG 构网型控制在网侧变流器通过有功-频率关系进行自同步并直接调节有功输出，而匹配控制在网侧变流器通过直流电压-频率关系进行自同步，并通过源侧附加控制来调节有功输出。因此，构网型变流器的暂态响应延迟较小，且因自同步方式的不同，响应特性会有所差别。

本文基于 Matlab/Simulink 平台，搭建下垂控制、VSG 控制、匹配控制 3 种常见的构网型控制方式以及定功率、含主动支撑功能这两种跟网型控制方式下的变流器电磁暂态仿真模型，以负荷扰动导致的频率响应为例，对比研究各类控制方式下变流器在系统中响应特性的差异。

3.1 单机无穷大系统响应特性

首先，搭建上述 3 种构网型变流器和含支撑功能的跟网型变流器的单机无穷大系统。参数和工况根据表 2 设置。

表 2 单机无穷大系统参数与扰动工况

Table 2 Parameters and disturbance of the single-machine infinite system

设置	控制方式			
	下垂控制	VSG 控制	匹配控制	支撑型跟网
一次调频系数 M_p	0.02	0.02	0.02	0.02
一次调频控制位置	网侧变流器	网侧变流器	电流源附加	网侧变流器
惯量常数 H	无	0.5 或 5	无	无
直流侧电源	含内阻	含内阻	含内阻	含内阻
	电压源	电压源	电流源	电压源
额定容量 S_{base}	2 MVA			
稳态有功设定值 P_0	1 MW			
扰动工况设置	在 $t=1.5\sim 2.0\text{ s}$ 时，无穷大系统产生频率扰动			
	工况 1：阶跃扰动， $50\text{ Hz}\rightarrow 49.5\text{ Hz}\rightarrow 50\text{ Hz}$ ， $H=0.5$			
	工况 2：斜坡扰动， $50\text{ Hz}\rightarrow 49.5\text{ Hz}(1\text{ Hz/s})$ ， $H=5$			

仿真结果见图 13、14。4 种控制方式均可实现基于系统频率变化调节输出有功功率的功能。其中

VSG 由于可以响应频率变化率，有功响应速度最快。在网侧直接采用下垂控制的速度慢于 VSG，但要快于在网侧采用匹配控制且在机侧采用附加下垂控制的方式。支撑型跟网变流器由于需要由 PLL 采集频率信号来控制功率，响应速度最慢。

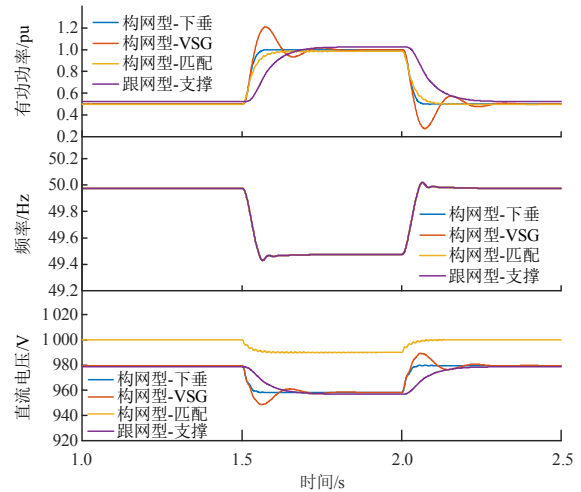


图 13 变流器单机无穷大系统频率阶跃响应

Fig. 13 Active power and frequency step response of the single-machine infinite system

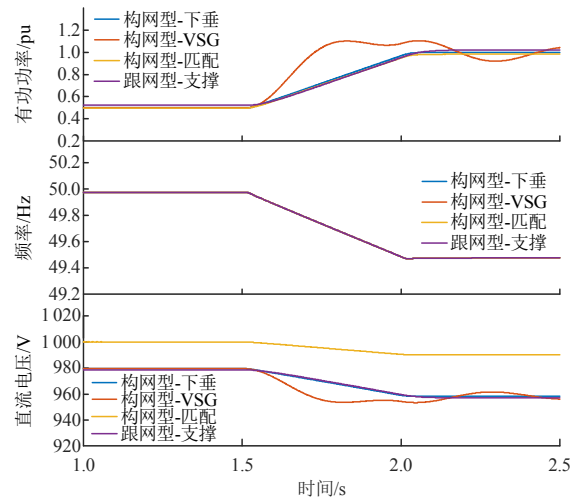


图 14 变流器单机无穷大系统频率斜坡响应

Fig. 14 Active power and frequency ramp response of the single-machine infinite system

3.2 变流器+同步机双机系统响应特性

为进一步研究各类型变流器并入同步电网后的响应特性，如图 15 搭建变流器+同步机双机系统。具体地，将 3 种构网型变流器、2 种跟网型变流器分别与同步机组成双机系统，并以双同步机系统作为参照，对以上共 6 组双机系统分别进行电磁暂态仿真，观察各自的有功-频率响应特性。参数和工况根据表 3 设置。

扰动后 10s 的波形和 0.05s 后的波形分别如

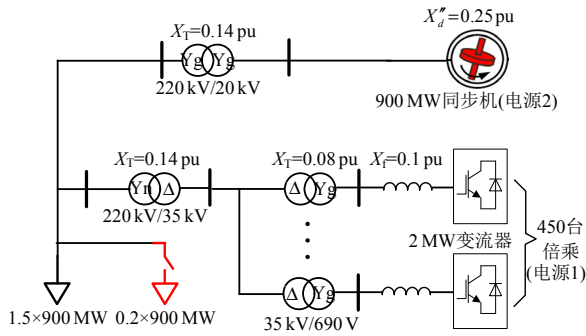


图 15 变流器+同步机双机系统结构

Fig. 15 Structure of the dual-machine system

图 16、17 所示。电源 1、2 之间的有功功率分配可借助同步机主导系统的暂态响应三阶段过程^[103]进行分析。

1) 阶段 1: 此阶段为扰动后几毫秒内, 有功功率在电压源间分配, 与负荷扰动点与电源的电气距离成反比。如图 17 所示, 3 种构网型变流器在扰动初始时刻($t=70\text{ s}$)后短期内都分担了 0.08 pu 左右的有功增量, 而两种跟网型变流器有功发生波动, 但并未增发。

表 3 双机系统参数与工况

Table 3 Parameters and disturbance of the dual-machine system

设置	电源 1 的控制方式					
	同步机	下垂控制	VSG 控制	匹配控制	支撑型跟网	定 PQ 跟网
一次调频系数 M_p	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	无
一次调频控制位置	—	网侧变流器	网侧变流器	电流源附加	网侧变流器	—
惯量常数 H	5	无	5	无	无	无
直流侧电源	—	含内阻电压源	含内阻电压源	含内阻电流源	含内阻电压源	含内阻电压源
额定容量 S_{base}	900 MVA(=1.0 pu)		单机 2 MVA, 倍乘 450 台, 共 900 MW			
稳态有功设定值 P_0	0.75x900 MW					
扰动工况设置	初始负荷为 1.5x900 MW, 电源一、二各承担一半。在 $t=70\text{ s}$ 时, 额外投入 0.2x900 MW 负荷 (系统总容量的 10%)					

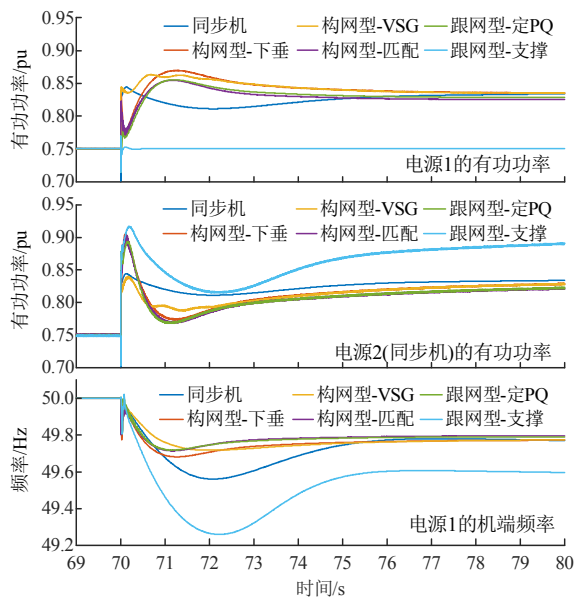


图 16 各双机系统扰动后 10 s 内波形

Fig. 16 Response of each dual-machine system in 10 s after the disturbance

2) 阶段 2: 此阶段为同步机调速器未出现明显动作前。同步机转子减速主导了系统频率下降, 如图 17 可知, 除定 PQ 的跟网型外, 其余 4 种变流器均可提供有功支撑, 减缓系统频率下降。期间, VSG 的有功支撑能力最强。匹配控制由于源侧采用下垂型($P-\omega$)附加控制, 与下垂控制特性接近。含支撑功

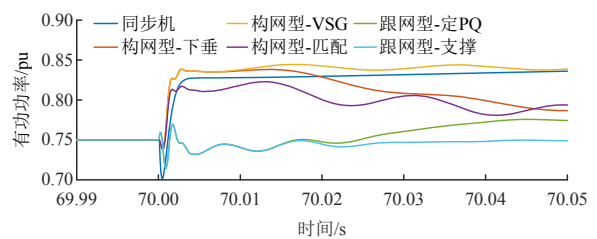


图 17 各双机系统扰动后 0.05 s 响应波形(电源 1 有功)
Fig. 17 Response of each dual-machine system in 0.05 s after the disturbance (active power of source 1)

能的跟网变流器尽管不参与阶段 1, 但可以在阶段 2 按下垂曲线($\omega-P$)提供有功, 因此也与下垂控制特性接近。

3) 阶段 3: 此阶段为同步机调速器出现明显动作后, 稳态时有功功率依据各电源的一次调频系数分配。在此阶段, 同步机发出有功逐渐上升, 频率亦开始回升, 变流器增发的有功开始减少。最终, 电源 1 按照各自的一次调频系数(下垂系数)与同步机共同承担有功增发。定 PQ 的跟网型控制不增发有功。

下面对跟网型/构网型变流器响应特性的细节差异做进一步的对比。观察图 16 和 17, 可以发现, 在阶段 1 结束后阶段 2 刚起始的时段($t=70.003\sim 70.1\text{ s}$), 下垂控制、匹配控制的有功功率均出现了

一个快速的回撤过程，而支撑型跟网出现了一个快速的上升过程。该过程对应着三者的外环控制器使得有功增量由初始分配的暂态值(下垂和匹配 0.08 pu, 支撑型跟网 0 pu)过渡到 $P-\omega$ 下垂曲线上的准稳态值(约 0.025 pu)。由于下垂控制仅响应频率变化量，而此时系统频率变化量尚且较小，该频率在下垂曲线上对应的有功增量准稳态值是一个较低的值。因此，对于存在初始有功分配的下垂和匹配控制，过程表现为功率的回撤，而对没有初始有功分配的支撑型跟网，过程表现为功率的上升。相比这三者，VSG 的响应特性更为优异，因为其具备虚拟惯量，可对频率变化率进行响应，故在上述频率快速下降的时段承担了更多的有功输出，相比其他控制方式，更多地分担了同步机的功率缺额，因此系统频率变化幅度最小。

综上，3 种构网型变流器以及含主动支撑的跟网型变流器均可在系统功率扰动后提供有功支撑，从而支撑系统频率。与此相比，定 PQ 的跟网型变流器不参与功率调节，功率扰动完全由单台同步机承担，因此系统频率变化幅度最大。双同步机系统由于一次调频响应较慢，频率下降大于变流器+同步机系统。由此可见，在变流器源侧功率充足的条件下，变流器因其快速功率调节能力，频率响应性能可优于同步机。

4 构网型变流器控制技术研究展望

随着电网对新能源主动支撑能力的需求日益提高，构网型控制技术在新能源机组和储能装置中的应用将更加广泛，这对电力系统的特性认知和稳定运行提出了新的问题与挑战。构网型变流器的控制方式是其并网特性的基础，以下 2 项难点问题亟待进一步研究。

4.1 故障期间构网型变流器控制技术

发生短路故障时，构网型变流器端口与短路点间的阻抗瞬时减小，由于其呈电压源特性，会使得短路电流急剧增大。为防止流经开关器件的电流过大而烧毁元件，传统控制方式采用虚拟阻抗或者电流限幅等方式限制变流器输出的短路电流，或者直接将构网型控制切换为跟网型控制。此类方案实际上制约了构网型变流器故障期间支撑电网的能力。

近来，研究人员提出了一种新的控制方式，从硬件扩容的角度入手，增大网侧变流器的开关器件及相关元件的过流能力，该方案目前已在部分构网

型储能和 SVG 装置中应用，并已在试点工程中投运^[104-105]。根据新能源送出系统的常规结构和线路、变压器参数，过流能力一般设定为 3 倍左右，一般可保证短路故障发生在 220 kV 变压器高压侧或更高电压等级的节点时，变流器可维持不限流的构网运行。但仅凭此方式难以避免故障发生在变流器近端时的过流风险。

综合上面的两类控制方式，有望形成如图 18 所示的构网型变流器故障期间控制方案。结合变流器硬件适当扩容和虚拟阻抗控制，实现构网型机组在并网点电压 0.2~1.3 pu 的大范围内维持故障期间构网能力。

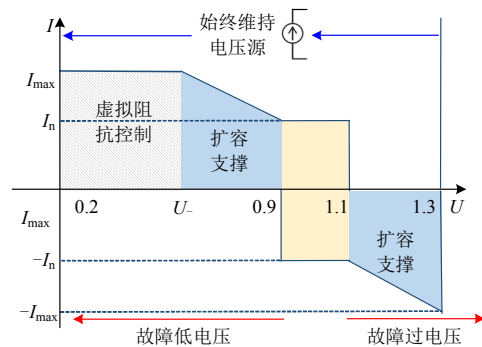


图 18 一种构网型变流器故障期间控制方案

Fig. 18 A control method for GFM converter during fault

在控制方案研究的基础上，针对故障期间构网型变流器暂态稳定性问题，由于其涉及控制策略切换导致的非线性、电压/功角的强耦合等复杂特征，加之变流器与同步机源侧响应速度的较大差异，难以直接套用传统的稳定分析理论，有待深入研究针对变流器并网系统的暂态稳定分析方法。

4.2 构网控制与源侧装置机电特性的配合

目前，将风电、光伏、储能、SVG 等变流器接口电源进行构网型改造已成为研究趋势。但网侧变流器的构网型控制方式多样，各类源侧装置自身机电特性各异，两者均具备多时间尺度响应特征，因此构网控制与源侧装置的配合是另一项难点问题。

风电机组是由叶轮、传动轴系等机械结构和变流器等电气结构组成的综合系统，实现从风能到机械能再到电能的传递，轴系可以储存一定的旋转动能。构网型控制方式必须与上述能量传递过程的延迟以及储存量的大小相协调，否则容易使风电机组出现频率二次跌落等问题，在实践中与匹配控制较为契合。光伏组件中电容储存能量较少，难以用作惯量调节，一般与超级电容或电池储能组成一体机施加构网型控制，SVG 则与光伏类似。电池储能装

置的响应速度较快,源侧特性较为理想,是构网型控制的较佳实现载体,以下垂和VSG控制居多。飞轮、压缩空气、燃料电池等储能方式各自具备不同的机械或化学特性,与构网型控制的配合方式需针对性地设计。综上,研究人员和工程运行人员对构网控制与源侧装置机电特性的配合问题已有一定的理论认识 and 实践经验,但目前尚未见定量的、成体系的论述,有待进一步研究总结。

5 结语

构网型变流器控制技术旨在将变流器控制为自同步电压源,易于融入电力系统交流同步运行机制,能够有效为系统提供电压和频率支撑,并提升电网的惯量和阻尼特性。相比传统的跟网型变流器,构网型变流器能在未来“双高”电力系统中更好地发挥主动支撑功能,提升电网的安全稳定运行水平。

下垂控制、VSG控制、匹配控制、虚拟振荡器是目前比较常见的4种构网型控制方式。其中前3种在接入大电网场景中较为常见,目前已初步应用至实物控制器及试点工程。未来电网中,跟网型、构网型变流器及同步机的协调共存将是一项长期趋势。对电网侧,构网型变流器、跟网型变流器及同步机混合组网系统的小信号稳定特性和暂态稳定特性尚不明晰,有待探索新的稳定分析体系。对电源侧,不同属性的电源需根据自身的响应速度、能量储存能力以及经济性等其他因素,综合选取最为适合的变流器控制方式。

参考文献

- [1] 国家发展改革委. “十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. (2022-06-01)[2024-01-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220602315308557623.pdf>. National Development and Reform Commission. 14th Five-year plan for renewable energy development [EB/OL]. (2022-06-01)[2024-01-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220602315308557623.pdf>.
- [2] 国家能源局. 2022年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2023-01-18)[2024-01-01]. http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm. National Development and Reform Commission. National power industry statistics for 2022 [EB/OL]. (2023-01-18)[2024-01-01]. http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm.
- [3] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474. XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [4] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [5] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1333. QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1333(in Chinese).
- [6] 马秀达, 卢宇, 田杰, 等. 柔性直流输电系统的构网型控制关键技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 1-11. MA Xiuda, LU Yu, TIAN Jie, et al. Key technologies and challenges of grid-forming control for flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 1-11(in Chinese).
- [7] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594. XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594(in Chinese).
- [8] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515. ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515(in Chinese).
- [9] TAYYEBI A, DÖRFLER F, KUPZOG F, et al. Grid-forming converters-inevitability, control strategies and challenges in future grids application[C]//CIRED Workshop. Ljiljana: CIRED, 2018.
- [10] LASSETER R H, CHEN Zhe, PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: a critical asset for the power grid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 925-935.
- [11] ROSSO R, WANG Xiongfeng, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE

- Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [12] MATEVOSYAN J, BADRZADEH B, PREVOST T, et al. Grid-forming inverters: are they the key for high renewable penetration?[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89-98.
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 李雨果, 易皓, 姜鑫, 等. 极弱电网下新能源跟网逆变器低频振荡的机理探究与暂态无功过补稳定性提升策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 482-495.
LI Yuguo, YI Hao, JIANG Xin, et al. Mechanism researching on low-frequency resonance of renewable-energy grid-following inverters under very weak grid and the stability-improving strategy based on dynamic reactive power over compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 482-495(in Chinese).
- [15] 刘佳宁. 高比例风光并网系统稳定机理与功率振荡分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
LIU Jianing. Stability mechanism and power oscillation analysis of power system with high-penetration wind power and photovoltaic generation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022(in Chinese).
- [16] 胡祺, 付立军, 马凡, 等. 弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 98-108.
HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Small signal synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 98-108(in Chinese).
- [17] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4777-4786.
SUN Dawei, WU Linlin, LIU Hui, et al. Effect of the low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4777-4786(in Chinese).
- [18] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6547-6561.
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid(Part I): analysis of wideband impedance characteristics and oscillation mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6547-6561(in Chinese).
- [19] 董炜. 弱同步电网中新能源并网系统的复电路建模与小干扰稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
DONG Wei. Modelling and small signal stability analysis based on circuit for renewable energy integrated systems in weakly synchronized grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019(in Chinese).
- [20] 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): 6183-61921.
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): 6183-6191(in Chinese).
- [21] 杜维柱, 罗亚洲, 李蕴红, 等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3224-3238.
DU Weizhu, LUO Yazhou, LI Yunhong, et al. Reviews of transient overvoltage problem cause by extra reactive power in large scale wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3224-3238(in Chinese).
- [22] 于思奇, 孙大卫, 吴林林, 等. 新能源汇集系统短路故障清除后的暂态过电压机理[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 179-185.
YU Siqi, SUN Dawei, WU Linlin, et al. Transient overvoltage mechanism after short circuit fault removal of renewable energy collection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 179-185(in Chinese).
- [23] 吴林林, 王潇, 杨艳晨, 等. 新能源汇集系统单瞬故障清除后的非全相运行过程工频过电压[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4362-4371.
WU Linlin, WANG Xiao, YANG Yanchen, et al. Power frequency overvoltage during open-phase operation process after clearance of single-phase transient earth fault in a new energy gathering system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4362-4371(in Chinese).
- [24] STRUNZ K, ALMUNEM K, WULKOW C, et al. Enabling 100% renewable power systems through power electronic grid-forming converter and control: system integration for security, stability, and application to Europe[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 891-915.
- [25] MAHMOUD K, ASTERO P, PELTONIEMI P, et al. Promising grid-forming VSC control schemes toward sustainable power systems: comprehensive review and perspectives[J]. IEEE Access, 2022, 10: 130024-130039.
- [26] 桑顺, 高宁, 蔡旭, 等. 功率-电压控制型并网逆变器及其弱电网适应性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017,

- 37(8): 2339-2350.
- SANG Shun, GAO Ning, CAI Xu, et al. A power-voltage controlled grid-connected inverter and its adaptability research under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2339-2350(in Chinese).
- [27] 刘辉, 孙大卫, 宋鹏, 等. 电压环对光伏虚拟同步机系统稳定性的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 311-318.
- LIU Hui, SUN Dawei, SONG Peng, et al. Influence of voltage loop on stability of photovoltaic virtual synchronous generators[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 311-318(in Chinese).
- [28] 孙大卫, 刘辉, 李蕴红, 等. 风火/光火打捆系统中逆变电源调频与惯量控制对低频振荡的影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5947-5956.
- SUN Dawei, LIU Hui, LI Yunhong, et al. Effect mechanism of primary frequency and virtual inertia control of inverter power on low frequency oscillation in wind-thermal/solar-thermal bundled system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5947-5956(in Chinese).
- [29] 孙大卫, 刘辉, 吴林林, 等. 虚拟同步发电机对低频振荡的影响建模与特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 134-144.
- SUN Dawei, LIU Hui, WU Linlin, et al. Modeling and characteristic analysis on influence of virtual synchronous generator on low-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 134-144(in Chinese).
- [30] 孙大卫, 刘辉, 赵峰, 等. 不同逆变电源主动支撑控制方式的对比研究[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4359-4367.
- SUN Dawei, LIU Hui, ZHAO Feng, et al. Comparison of inverter generators with different support control methods[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4359-4367(in Chinese).
- [31] TAYYEBI A, GROß D, ANTA A, et al. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1004-1018.
- [32] POOLLA B K, GROß D, DÖRFLER F. Placement and implementation of grid-forming and grid-following virtual inertia and fast frequency response[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020.
- [33] 贾焦心, 沈钟毓, 秦本双, 等. 构网型和跟网型电力电子装备混联系统惯量响应的匹配问题综述[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 77-89.
- JIA Jiaoxin, SHEN Zhongyu, QIN Benshuang, et al. Review on inertia response matching problem of hybrid power systems with grid-forming and grid-following power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 77-89(in Chinese).
- [34] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型变流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(in Chinese).
- [35] 张宇, 张琛, 鲍颜红, 等. 电网短路故障下风电场内跟-构网电源瞬时频率交互影响机理[J/OL]. 上海交通大学学报, 2024: 1-22[2024-12-16]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.246>.
- ZHANG Yu, ZHANG Chen, BAO Yanhong, et al. Transient frequency interaction between grid-following and grid-forming sources in windfarm under severe grid fault[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024: 1-22 [2024-12-16]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.246>(in Chinese).
- [36] 黄森, 姚骏, 钟勤敏, 等. 含跟网和构网型新能源发电单元的混联电力系统暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8378-8391.
- HUANG Sen, YAO Jun, ZHONG Qinmin, et al. Transient synchronization stability analysis of hybrid power system with grid-following and grid-forming renewable energy generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8378-8391(in Chinese).
- [37] 谢震, 杨曙昕, 代鹏程, 等. 构网型全功率风电机组网侧变流器耦合分析及抑制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3745-3758, 3768.
- XIE Zhen, YANG Shuxin, DAI Pengcheng, et al. Grid-side coupling analysis and suppression strategy of grid-forming full-power wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3745-3758, 3768(in Chinese).
- [38] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, 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.
- [39] 任先成, 李尚志, 李英彪, 等. 有和无电流环控制构网型 VSC 暂态建模与特性对比分析[J/OL]. 上海交通大学学报, 2024: 1-27[2024-12-16]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.416>.
- REN Xiancheng, LI Shangzhi, LI Yingbiao, et al. Transient modeling and characteristic comparative analysis of grid-forming VSC with and without current control[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024: 1-27[2024-12-16]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.416>(in Chinese).

- [40] 杜毅, 郑超, 孙华东. 构网型 VSC 暂态稳定机理及改进限幅策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3753-3765.
DU Yi, ZHENG Chao, SUN Huadong. Transient stability mechanism analysis of the grid forming voltage source converter and the improved limiting method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3753-3765(in Chinese).
- [41] 项中明, 倪秋龙, 李振华, 等. 采用功率同步控制的构网型换流器并网暂态同步稳定研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(9): 77-88.
XIANG Zhongming, NI Qiulong, LI Zhenhua, et al. Research on transient synchronous stability of integrated grid-forming converters using power synchronization control[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(9): 77-88(in Chinese).
- [42] 吕思卓, 郑超, 姜静雅. 基于功率指令切换的双级式构网型光伏故障穿越控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1281-1290.
LÜ Sizhuo, ZHENG Chao, JIANG Jingya. Fault ride-through control strategy for double-stage grid-forming photovoltaic based on power order switching[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1281-1290(in Chinese).
- [43] TAUL M G, WANG Xiongfei, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1062-1073.
- [44] WU Heng, WANG Xiongfei, ZHAO Liang. Design considerations of current-limiting control for grid-forming capability enhancement of VSCs under large grid disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 12081-12085.
- [45] LUO Cheng, LIU Teng, WANG Xiongfei, 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.
- [46] LIU Pengyin, YU Siqi, LI Yunhong, et al. Frequency-coupled impedance model of grid-forming converters[C]// 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference(CIEEC). Hefei, China: IEEE, 2023: 1172-1177.
- [47] 姜鑫, 易皓, 卓放, 等. 基于直流电压同步的构网型变流器低频振荡分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 30-39.
JIANG Xin, YI Hao, ZHUO Fang, et al. Low-frequency oscillation analysis and damping control for grid-forming converters based on DC voltage synchronization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 30-39(in Chinese).
- [48] 刘朋印, 谢小荣, 李原, 等. 构网型控制改善跟网型变流器次/超同步振荡稳定性的机理和特性分析[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 990-997.
LIU Pengyin, XIE Xiaorong, LI Yuan, et al. Mechanism and characteristics of grid-forming control for improving sub/super synchronous oscillation stability of grid-following-based grid-connected converter[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 990-997(in Chinese).
- [49] 张宇, 张琛, 蔡旭, 等. 虚拟同步机电流受限暂态电压支撑机理与改进故障穿越控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5996-6009.
ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Current-constrained transient voltage response analysis and an improved fault-ride through control of the virtual synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5996-6009(in Chinese).
- [50] 薛翼程, 张哲任, 徐政, 等. 构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 103-113.
XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 103-113(in Chinese).
- [51] 高本锋, 邓鹏程, 孙大卫, 等. 基于匹配控制的构网型直驱风电场次同步振荡机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2755-2770.
GAO Benfeng, DENG Pengcheng, SUN Dawei, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation of grid-forming direct-drive wind farm based on matching control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2755-2770(in Chinese).
- [52] 巩宇, 周子欣, 黄贤淼, 等. 考虑构网型变流器自主支撑特性的共享储能协同控制策略[J/OL]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2024: 1-12[2024-12-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20231229.1619.002.html>.
GONG Yu, ZHOU Zixin, HUANG Xianmiao, et al. Shared energy storage cooperative control strategy considering autonomous support characteristics of grid-forming converters[J/OL]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2024: 1-12[2024-12-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20231229.1619.002.html>(in Chinese).
- [53] 魏林君, 叶华, 迟永宁. 基于状态重构的构网型风机与储能系统联合频率支撑控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5095-5104.
WEI Linjun, YE Hua, CHI Yongning. Frequency response coordinated control strategy between grid-forming wind

- turbine and energy storage based on state reconstruction [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(12): 5095-5104(in Chinese).
- [54] 严文博, 黄云辉, 王栋, 等. 基于虚拟母线电压控制的构网型储能变流器稳定性优化研究[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(5): 1532-1541.
YAN Wenbo, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Investigation of stability optimization of grid-forming energy storage converters based on virtual bus voltage control[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(5): 1532-1541(in Chinese).
- [55] 王翀, 姚宏洋, 陆海洋, 等. 构网型中压直流直挂储能研究[J]. *电力电子技术*, 2023, 57(12): 72-75.
WANG Chong, YAO Hongyang, LU Haiyang, et al. Research on grid-forming medium voltage direct current mounted energy storage[J]. *Power Electronics*, 2023, 57(12): 72-75(in Chinese).
- [56] 王玉坤, 张慕婕, 李壮, 等. 构网型直驱风电机组间控制相互作用研究[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(3): 82-90.
WANG Yukun, ZHANG Mujie, LI Zhuang, et al. Research on control interaction between grid forming direct-drive wind turbines[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(3): 82-90(in Chinese).
- [57] 徐晨航, 邹志翔, 陈武, 等. 面向暂态稳定性提升的构网型储能系统自适应控制方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(11): 4658-4668.
XU Chenhang, ZOU Zhixiang, CHEN Wu, et al. Grid-forming based energy storage system adaptive control for transient stability enhancement[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(11): 4658-4668(in Chinese).
- [58] 吴家杰, 陈新, 张东辉, 等. 构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024: 44(23): 9341-9354.
WU Jiajie, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. Grid-connected stability analysis and improvement strategy for grid-forming energy storage system in new energy access scene [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024: 44(23): 9341-9354 (in Chinese).
- [59] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Technical specification for connecting wind farm to power system—Part 1: On shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [60] National Grid ESO. GC0137: minimum specification required for provision of GB grid forming(GBGF) capability(formerly virtual synchronous machine/VSM capability)[EB/OL]. (2024-08-26)[2024-11-01]. <https://www.neso.energy/industry-information/codes/gc/modifications/gc0137-minimum-specification-required-provision-gb-grid-forming-gb-gf-capability-formerly-virtual-synchronous-machine-vsm-capability>.
- [61] ENTSO-E. High penetration of power electronic interfaced power sources and the potential contribution of grid forming converters[R/OL]. (2022-01-30)[2024-11-01]. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/SOC/High_Penetration_of_Power_Electronic_Interfaced_Power_Sources_and_the_Potential_Contribution_of_Grid_Forming_Converters.pdf
- [62] AEMO. Voluntary specification for grid-forming inverters [EB/OL]. (2023-05-01)[2024-11-01]. <https://aemo.com.au/-/media/files/initiatives/primary-frequency-response/2023/gfm-voluntary-spec.pdf?la=en&hash=F8D999025BBC565E86F3B0E19E40A08E>.
- [63] SHAH S, YAN Weihang, KORALEWICZ P, et al. A testing framework for grid-forming resources[C]//2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Orlando, FL, USA: IEEE, 2023.
- [64] National Grid ESO. Great Britain grid forming best practice guide[EB/OL]. (2023-04-01)[2024-11-01]. <https://www.nationalgrideso.com/document/278491/download>.
- [65] ESIG. Report and briefs on grid-forming technology in energy systems integration[EB/OL]. (2022-03-01)[2024-11-01]. <https://www.esig.energy/grid-forming-technology-in-energysystems-integration/>.
- [66] BERGEN A R. Power systems analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1986.
- [67] CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, 29(1): 136-143.
- [68] LASSETER R H. MicroGrids[C]//2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings(Cat. No. 02CH37309). New York, NY, USA: IEEE, 2002.
- [69] LASSETER R H, AKHI A, MARNAY C, et al. Integration of distributed energy resources. The CERTS Microgrid Concept[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.
- [70] LASSETER R H, ETO J H, SCHENKMAN B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 325-332.
- [71] DU Wei, LASSETER R H, KHALSA A S. Survivability of autonomous microgrid during overload events[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3515-3524.
- [72] GUERRERO J M, GARCIA DE VICUNA L, 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.
- [73] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [74] DU Wei, CHEN Zhe, 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.
- [75] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
QU Zisen. Synchronizing stability analysis and control technology of voltage source converters in power system with high-penetration renewables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021(in Chinese).
- [76] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [77] LIU Chang, CAI Xu, LI Rui, et al. Optimal short-circuit current control of the grid-forming converter during grid fault condition[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(10): 2185-2194.
- [78] ZHANG Yu, ZHANG Chen, YANG Renxin, et al. Current-constrained power-angle characterization method for transient stability analysis of grid-forming voltage source converters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 1338-1349.
- [79] HOKE A, TAN J, MAHMUD R, et al. The frequency-watt function: simulation and testing for the Hawaiian electric companies[R]. NREL, 2017.
- [80] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]//2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain: IEEE, 2007.
- [81] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008.
- [82] ZHONG Qingchang, NGUYEN P L, MA Zhenyu, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [83] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [84] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93(in Chinese).
- [85] GAO Fang, REZA IRAVANI M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 850-859.
- [86] SAKIMOTO K, MIURA Y, ISE T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function[C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, Korea(South): IEEE, 2011.
- [87] D'ARCO S, SUUL J A. Virtual synchronous machines—classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids[C]//2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble, France: IEEE, 2013.
- [88] 袁敞, 丛诗学, 徐衍会. 应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 144-154.
YUAN Chang, CONG Shixue, XU Yanhui. Overview on grid-connected inverter virtual impedance technology for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 144-154(in Chinese).
- [89] MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [90] JOUINI T, ARGHIR C, DÖRFLER F. Grid-friendly matching of synchronous machines by tapping into the DC storage[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(2): 192-197.
- [91] ARGHIR C, JOUINI T, DÖRFLER F. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. Automatica, 2018, 95: 273-282.
- [92] 张琛, 蔡旭, 李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 476-485.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 476-485(in Chinese).

- [93] 桑顺, 张琛, 蔡旭, 等. 全功率变换风电机组的电压源控制(一): 控制架构与弱电网运行稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5604-5615.
SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control of wind turbines with full-scale converters(Part I): control architecture and stability analysis under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5604-5615(in Chinese).
- [94] JOHNSON B B, DHOPLÉ S V, HAMADEH A O, et al. Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6124-6138.
- [95] JOHNSON B B, SINHA M, AINSWORTH N G, et al. Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 6002-6015.
- [96] 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.
- [97] SEO G S, COLOMBINO M, SUBOTIC 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, CA, USA: IEEE, 2019: 561-566.
- [98] AWAL M A, HUSAIN I. Transient stability assessment for current-constrained and current-unconstrained fault ride through in virtual oscillator-controlled converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 6935-6946.
- [99] 林燎源, 柯全, 李平. 面向逆变器并联的虚拟振荡器控制技术综述[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 147-158.
LIN Liaoyuan, KE Quan, LI Ping. Review of virtual oscillator control techniques for parallel operation of inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 147-158(in Chinese).
- [100] 马凡, 马伟明, 付立军. 一种多时间尺度降阶原则及其在交直流电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 41-47.
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun. A multi-time scale order reduction principle and its application in AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 41-47(in Chinese).
- [101] 刘永强, 杨志辉, 唐云, 等. 多时间尺度电力系统的模型降阶及稳定性分析(一)基本理论[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 5-10.
LIU Yongqiang, YANG Zhihui, TANG Yun, et al. Order Reduction and stability analysis for multi-time scale power systems part one fundamental theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 5-10(in Chinese).
- [102] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, 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.
- [103] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 两大区互联系统交流联络线功率波动机制与峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 1-6.
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 1-6(in Chinese).
- [104] 北极星储能网. 南瑞继保构网储能再获验证! 国内首例广域大网架极高比例新能源电力系统中长期离网运行试验成功[EB/OL]. (2023-07-03)[2024-11-01]. <https://news.bjx.com.cn/html/20230703/1316525.shtml>.
Polaris Energy Storage Net. NARI relays validated again in grid-connected energy storage system! China's first successful long-term off-grid operation test in a wide-area power grid with an extremely high proportion of renewable energy[EB/OL]. (2023-07-03) [2024-11-01]. <https://news.bjx.com.cn/html/20230703/1316525.shtml>(in Chinese).
- [105] 南瑞继保. 电网支撑型 SVG 顺利投运[EB/OL]. (2024-01-02)[2024-11-01]. https://www.nrec.com.cn/index.php/search_info/1/1597?kw=svg.
NARI Relays. Successful commissioning of SVGs that support the grid[EB/OL]. (2024-01-02)[2024-11-01]. https://www.nrec.com.cn/index.php/search_info/1/1597?kw=svg (in Chinese).



刘辉

在线出版日期: 2024-05-10。

收稿日期: 2023-11-14。

作者简介:

刘辉(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源并网技术及电力系统稳定性分析等, liuhtj@163.com;

*通信作者: 于思奇(1992), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源建模仿真与控制技术, 新能源并网特性分析等, bredlly@126.com;

孙大卫(1990), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大规模新能源并网系统暂态与动态稳定性分析等, dddd129216713@126.com。

(编辑 张文鑫, 张蕾)