

电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势

许诒翊¹, 刘威¹, 刘树², 常富杰², 谢小荣¹

(1. 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;

2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京市 海淀区 100084)

Current State and Development Trends of Power System Converter Grid-forming Control Technology

XU Jieyi¹, LIU Wei¹, LIU Shu², CHANG Fujie², XIE Xiaorong¹

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Dept. of
Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: With the increasing penetration of renewable energy and power electronic equipment, the inertia and the system strength of power system have decreased greatly, resulting in more serious stability issues. Grid-forming (GFM) control technology can improve voltage and frequency regulation capacity of converters, so as to improve power system stability. This paper presents an overview of the current state and development trends of GFM control. First, the differences between GFM control technology and grid-following (GFL) control technology are compared, and four types of GFM control strategies are introduced. Next, the function of GFM control in power system is analyzed, and some specific application scenarios are introduced. Finally, research challenges and hopeful solutions of GFM technology are discussed.

KEY WORDS: converters; grid-following (GFL) control; grid-forming (GFM) control; power system stability; droop control; virtual synchronous generator; virtual inertia

摘要: 随着新能源和电力电子设备的渗透率增加, 电力系统有着惯性减小、系统强度变弱的趋势, 稳定性问题愈发严重。构网(grid-forming, GFM)控制技术可以提高变流器的电压、频率支撑能力, 增强电力系统稳定性。对构网控制的现状与发展趋势进行了综述。首先, 比较了构网控制技术与跟网型(grid-following, GFL)控制技术的差异, 介绍了4类构网控制策略。然后, 分析了构网控制在电力系统中的作用, 介绍了具体的应用场景。最后, 指出了该技术仍面临的挑战及可能的解决思路。

关键词: 变流器; 跟网型(GFL)控制; 构网型(GFM)控制; 电力系统稳定; 下垂控制; 虚拟同步发电机; 虚拟惯量

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2149

0 引言

为了应对日益增长的电力需求和环境压力, 电力系统正形成高比例新能源和高比例电力电子设备(即“双高”)的发展趋势。一方面, 以风电、光伏为代表的新能源发电呈现爆发式增长。从风电、光伏装机容量变化来看, 全球范围 1999 年容量约为 18.55GW, 截至 2020 年总容量达到 1503GW^[1], 增长约 81 倍(我国数据为 1999 年容量 344MW、2020 年容量 535GW^[2]、增长约 1555 倍)。另一方面, 电力电子装备成为电力系统的重要组成部分, 其中变流器承担了关键组件的角色。例如, 新能源发电机组大部分通过电力电子变流器接入电网; 基于电压源变流器的柔性直流输电是远距离直流输电的发展趋势; 配电网侧的微电网、分布式电源和有源电力滤波器也需要借助变流器。随着电力电子变流器在电力系统中的占比不断增加, 以同步发电机为主导的传统电网形态正在发生转变。

目前电力电子变流器多采用原动机输入功率与网侧电磁功率解耦的控制模式, 普遍缺乏旋转备用容量和转动惯量, 不能提供与传统同步发电机类似的惯性响应。定量而言, 1000MW 火电机组的惯性时间常数达 8~10s^[3], 而变速风电机组和光伏机组几乎没有等效惯性。随着变流器在电力系统中的占比提升, 系统惯性大幅降低, 系统频率指标恶化。但值得一提的是, 变流器控制依靠的是控制算法而不是物理特性, 比同步发电机的响应更快、功率可控性更强。为提升“双高”系统稳定性, 可发挥变流器灵活可控的优势, 补偿系统缺失的固有惯性阻

基金项目: 国家自然科学基金项目(51925701, 51737007)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51925701, 51737007).

尼特性,为系统提供可靠的电压、频率支撑。

变流器控制模式可分为跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)^[4]2种。目前变流器多采用跟网控制,与电网同步需要锁相环(phase-locked loop, PLL)测量并网点(point of common coupling, PCC)的相位信息,在弱电网中存在稳定问题。在系统强度弱、物理惯性低的电网中,变流器宜采用构网控制。构网型变流器采用与同步发电机类似的功率同步策略,不需要借助锁相环便可实现同步。辅以储能元件或预留备用容量时,构网型变流器还能为系统提供虚拟惯性和阻尼。

目前,国内外学者提出了多种构网控制策略。其中,基于模拟同步发电机运行机理的下垂控制^[5]、虚拟同步发电机控制^[6-10]的应用较多;此外,匹配控制^[11]、虚拟振荡器控制^[12]等非线性控制方法也得到了广泛关注。

本文对于构网控制技术的现状及发展趋势进行了综述。首先辨析了跟网型和构网型变流器的区别,然后介绍了构网的4类控制策略,并分析了构网控制技术在新型电力系统中的作用及应用场景,最后探讨了当前研究的若干关键问题及挑战。

1 跟网型和构网型变流器的比较

从工作特性来看,跟网型变流器表现为并联高阻抗的可控电流源, P^* 和 Q^* 分别表示变流器输出有功功率和无功功率参考值,如图1(a)所示;构网型变流器表现为串联低阻抗的可控电压源, E^* 和 ω^* 分别表示变流器电压和频率参考值,如图1(b)所示。图中其他变量符号的含义参见附录。

具体而言,跟网型变流器通过控制注入电网的电流来控制输出功率,构网型变流器则直接控制输

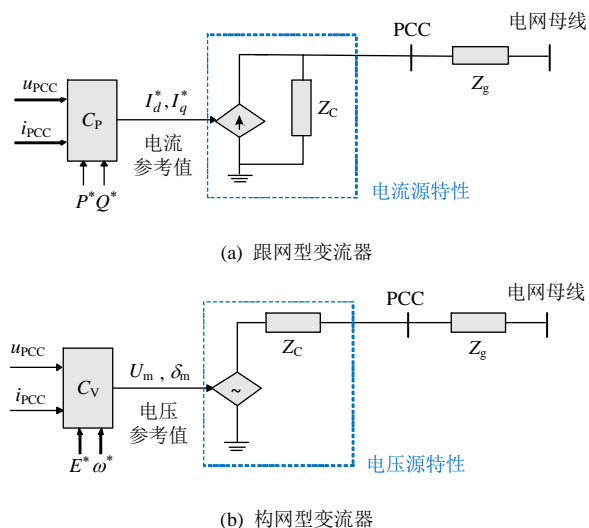


图1 变流器控制结构

Fig. 1 Control structure of converters

出端的电压来控制输出功率。跟网型和构网型变流器的区别主要表现在3个方面:1)对电网事件的响应;2)同步策略;3)适用场景。

1.1 对电网事件响应的区别

在发生电压波动、短路故障等电网事件时,跟网型和构网型变流器的响应方式有所区别。图2用相量图展示了2种变流器在电网电压 U_g 突变时的响应。跟网型变流器具有电流源特性,在锁相环重新跟踪到电网相位之前,变流器输出电流 I 将保持恒定,由此不可避免地导致输出电压 U_{out} 的突变;构网型变流器具有电压源特性,瞬时响应时将保持内电势 E 恒定,有利于系统电压稳定性,但缺陷是导致 I 幅值跃升,存在过流风险。

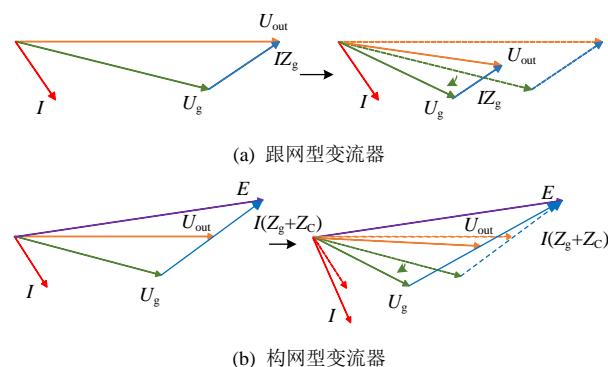


图2 变流器对电网电压波动的响应

Fig. 2 Response of converters to grid voltage fluctuation

1.2 同步策略的区别

在同步策略方面,跟网型和构网型变流器也存在明显区别。跟网型变流器利用派克变换实现有功和无功功率的解耦,通过控制注入电流的幅值和相位来控制功率输出,同步过程需要依赖锁相环测量电网相位信息。

构网型变流器采取类似于同步发电机的功率同步策略。定义PCC点电压超前于电网电压的相位差为 δ (也称作虚拟功角),在感性电网下构网型变流器的输出功率 P 可以表示为

$$P = \frac{U_g U_{out}}{X} \sin \delta \quad (1)$$

式中: U_g 为电网电压; U_{out} 为变流器输出电压; X 为线路感抗。

δ 的变化反映了构网型变流器与电网的同步过程,与同步发电机转子角的摇摆方程具有类似形式,对 δ 的控制策略一般可用式(2)描述^[13]:

$$\frac{d\delta}{dt} = k_p (P^* - P) \quad (2)$$

式中 P^* 和 P 分别为变流器输出有功功率的参考值和检测值。

下面举例说明构网型变流器的功率同步过程:

若初始时 $P^* > P$, 则有 $d\delta/dt > 0$, δ 呈增大趋势; 根据式(1)可知, P 随着 δ 的增大而增加, 使 P^* 与 P 之间的偏差减小。该过程将持续至 $P^* = P$, 变流器和电网的频率达到一致, 两者电压相位差 δ 不再变化, 完成同步过程。可见, 在功率同步策略下, 构网型变流器不需要锁相环跟踪电网频率/相位, 而是通过有功功率输送过程来实现同步。

1.3 适用场景的区别

如前所述, 跟网型变流器依赖锁相环同步, 然而在电网强度较低时, 锁相环与电网阻抗之间存在强耦合, 严重降低了并网变流器的小干扰稳定性^[14]。与跟网型变流器相比, 构网型变流器的电压源特性和功率同步策略使其在弱电网中更稳定。当电网发生波动时, 构网型变流器通过改变输出电压相位/幅值以调节有功/无功功率输出, 可为系统提供频率/电压支撑, 且调频/调压过程的时延短、响应快。总体而言, 构网型变流器不依赖电网频率/相位测量以实现同步, 在弱电网中对频率和电压的调节更为灵活, 有利于系统的稳定运行。在高比例新能源的电力系统中, 同步发电机减少而导致系统强度降低, 此时变流器更宜采用构网控制方式, 以减小系统频率与电压波动。

此外, 跟网型变流器必须由外部的刚性交流系统或构网型变流器给定电压、频率参考值, 因此无法工作在孤网模式。构网型变流器借助功率同步策略实现同步, 不依赖外部电网相位信息, 在孤网和并网模式下均能工作。例如, 构网型变流器的一个典型应用是承担不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)的角色, 在发生电网故障时为负载或其他并网设备提供参考电压和频率值。

2 构网控制策略

本文介绍 4 类常见的构网控制策略: 1) 下垂控制; 2) 虚拟同步发电机控制; 3) 匹配控制; 4) 虚拟振荡器控制。其中下垂控制、虚拟同步发电机控制都在一定程度上模拟了同步发电机的运行机理, 现有文献中针对这 2 种控制策略的讨论及应用较多; 匹配控制和虚拟振荡器控制是近年来提出的非线性控制方法。

2.1 下垂控制

下垂控制模拟同步发电机的有功-频率和无功-电压下垂特性, 是构网型控制最简单、最常见的策略之一。图 3 展示了下垂控制的控制框图。 ω_{ref} 和 U_{ref} 分别为频率和电压的参考值, 输出功率参考值 $P^*(Q^*)$ 与检测值 $P(Q)$ 的差值为功率偏差, 功率

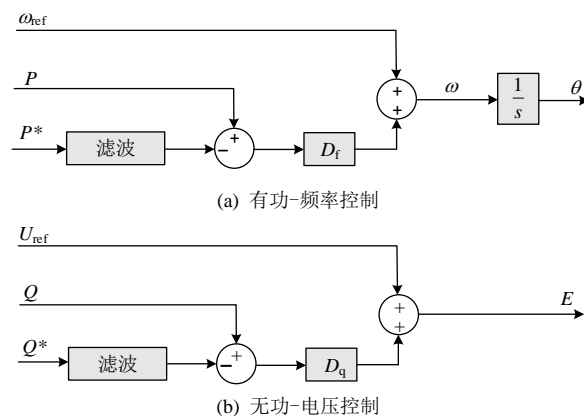


图 3 下垂控制

Fig. 3 Droop control

偏差与下垂系数 $D_f(D_q)$ 的乘积为频率(电压)调节项。频率 ω 和电压 E 的控制如式(3)所示:

$$\begin{cases} \omega = \omega_{\text{ref}} + D_f(P^* - P) \\ E = U_{\text{ref}} + D_q(Q^* - Q) \end{cases} \quad (3)$$

下垂控制的优点是响应速度较快, 但是下垂控制不具备同步发电机的惯性和阻尼特征, 容易引起电网电压和频率的振荡。在实际应用中, 在下垂控制的功率外环中串联低通滤波器, 以降低控制系统对交流信号扰动的敏感度, 相当于增大了变流器的阻尼^[15]。

在理想条件下, 下垂控制无需通信便可以实现多个变流器按容量分配功率。然而, 受到线路阻抗、负荷波动等因素的影响, 实际上难以实现功率的精确分配^[16]。为此, 文献[17-18]分别提出了基于自适应下垂系数、虚拟阻抗的改进下垂控制策略, 提高了功率分配精度。

2.2 虚拟同步发电机控制

虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制技术^[19]通过模拟同步发电机机械和电磁部分, 使变流器具备了同步发电机的惯性阻尼特征。VSG 控制的基本方式是模拟同步发电机摇摆方程, 主要考虑机电暂态过程, 对交流侧电压、电流和功率检测的依赖性较强。为更好模拟同步发电机的动态特性, 文献[20]加入了对电磁暂态过程的考虑, 提出了“同步逆变器”模型, 使变流器具备自同步和功率自动共享的能力, 且控制环节只需测量交流侧的电流信息。

VSG 的有功-频率控制模拟了同步发电机的转子运动和一次调频过程, 用于表征有功-频率下垂特性。有功-频率控制框图如图 4(a)所示, 根据检测有功功率偏差来改变虚拟机械功率输出, 从而实现频率调节。频率动态调节过程如式(4)所示:

$$J\dot{\omega} = (P^* - P) / \omega - D(\omega_{\text{ref}} - \omega) \quad (4)$$

式中: J 为虚拟转动惯量; D 为阻尼系数, 表示单位频率变化对应的有功功率调整值。 J 的存在使 VSG 在频率动态过程中具有了虚拟惯性, D 的存在使 VSG 对振荡具有阻尼作用。通过对 ω 进行积分, 生成变流器输出电压的相位参考值 θ 。

VSG 的无功-电压控制模拟了同步发电机的励磁调节过程, 用于表征无功-电压下垂特性。传统同步发电机通过改变励磁电流来改变感应电动势幅值, VSG 则根据检测无功功率偏差和电压偏差来调节输出电压。VSG 的无功-电压控制框图如图 4(b)所示, 其中 U_{out} 和 U_{ref} 分别为输出电压的实际值和参考值, 系数 K_u 表示单位电压变化对应的无功功率调整值; 控制框图中的积分控制器用以实现输出电压的无静差调节, 系数 K 为积分系数。此外, 还可以在积分控制器之前加入一阶惯性环节, 以模拟同步发电机磁通量引起的时延^[6]。

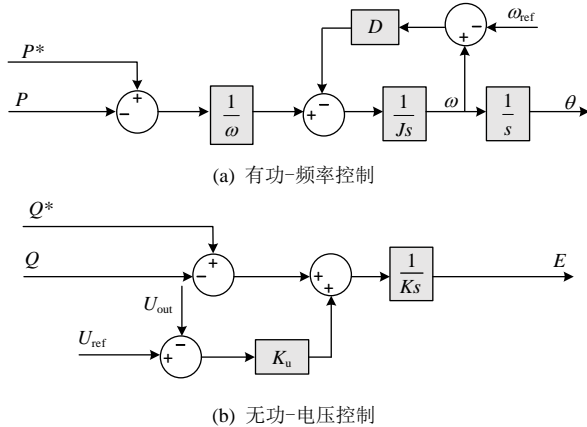


图 4 虚拟同步发电机控制
Fig. 4 Virtual synchronous generator

2.3 匹配控制

考虑到同步发电机通过释放或吸收转子动能的方式实现调频, 有学者提出可以利用变流器直流母线电容能量来模拟同步机转子能量, 基于该原理的匹配控制策略由此产生。变流器与同步发电机在结构上存在一定的对偶性, 变流器直流母线电压与同步机转子角频率、变流器直流电流与同步机机械转矩之间具有匹配关系^[17]。图 5 展示了匹配控制方法的结构框图, 将直流母线电压 u_{dc} 乘上系数 η 为频率 ω , ω 通过积分环节得到参考电压相位 θ ; u_{dc} 与幅值调制比 μ 相乘, 得到参考电压幅值 E 。文献[7]详细阐述了系数 η 和 μ 的确定方法, 仿真实验表明该控制策略具备调节交流侧电压和频率的能力。根据变流器直流电流 i_{dc} 和同步机机械转矩之间的对偶性, 通过调节 i_{dc} 可以改变 u_{dc} 的大小。

与之前所述的下垂控制和 VSG 控制不同, 匹配控制只需要测量直流母线电压, 这使得匹配控制

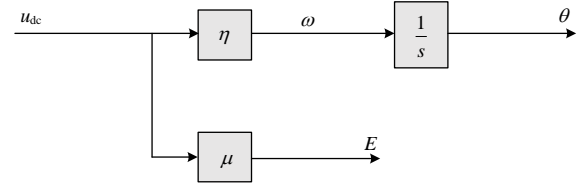


图 5 匹配控制
Fig. 5 Matching control

具有低时延的优势。此外, 之前的控制策略都要求交流量和直流量的控制在时间尺度上相互独立, 而匹配控制不存在此要求, 因为其规避了交流端和直流端之间的交互作用^[17]。

2.4 虚拟振荡器控制

虚拟振荡器控制 (virtual oscillator control, VOC) 再现了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。文献[12]给出典型的虚拟振荡器控制方法, 采用的是范德波尔振荡器 (Van der Pol oscillator), 其结构如图 6 所示。电感电流 i_L 和电容电压 u_C 满足式(5)给出的二阶微分方程组:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_C \\ C \frac{du_C}{dt} = g(u_C) - i_L - k_i i \end{cases} \quad (5)$$

式中: L 和 C 分别为电感值和电容值; i 为虚拟振荡器的输入电流; k_i 为电流幅值变换系数; $g(u_C)$ 是关于 u_C 的非线性函数。由上述方程组可推导出振荡电压 u_C 的时域表达式, 再由 u_C 进行比例变换得到变流器电压调制信号 e 。

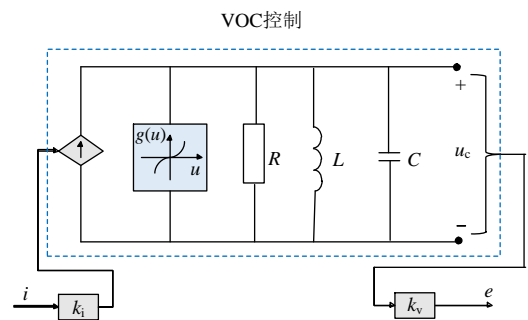


图 6 虚拟振荡器控制
Fig. 6 Virtual oscillator control

在图 6 所示的虚拟振荡器控制策略中, 对输入电流 i 仅进行了幅值的比例变换, 无法满足有功和无功功率的调节需求, 不适用于变流器并网工作状态。文献[22]对原有的虚拟振荡器结构进行了改进, 提出了可调度型的虚拟振荡控制 (dispatchable virtual oscillator control, dVOC) 技术, 对振荡器输入电流的幅值、相位均进行调节, 从而实现了变流器的功率控制。

3 构网控制技术的应用

构网控制最早在微电网的场景下被提出, 未来有望广泛应用于输配电网, 具有更丰富的应用场景。对于“双高”电力系统, 构网控制技术可以在正常、扰动以及故障情况下保证系统稳定运行, 而不需要依赖同步发电机的辅助。具体而言, 构网控制技术在未来电力系统中的作用主要包括^[23]:

1) 提升系统短路电流水平, 提高系统强度; 2) 为系统提供阻尼和惯性, 改善系统频率稳定性; 3) 当系统失步解列时快速响应, 提升系统的第 1 摇摆周期稳定性, 主动支撑系统恢复; 4) 削弱电力系统间谐波和不平衡电压带来的影响。

下面将介绍构网控制技术的具体应用场景, 包括孤岛供电、新能源并网、储能系统、柔性直流输电等。

3.1 孤岛供电

孤岛供电是当前构网控制技术的重要应用领域, 包括海岛/海上平台供电、偏远地区孤网供电等实际场景。孤岛失去与大电网的联接, 缺乏必要的调频资源和无功补偿, 易受到负荷运行的影响, 电压和频率的波动幅度大, 难以稳定运行。

为解决上述问题, 孤网中的变流器宜进行构网控制, 通常采用下垂控制或 VSG 控制策略。构网型变流器对孤网工作模式有良好的适应性, 能实现孤岛的局部电压和频率控制, 提升孤岛供电的可靠性。此外, 针对孤岛运行时的负荷不平衡或波动带来的电能质量问题, 以及多变流器并联时的功率分配等问题, 国内外学者提出了相应的改进控制策略, 包括正/负序阻抗解耦、二次频率/电压控制等方法^[16]。

3.2 新能源并网

以风电、光伏为代表的新能源机组多以变流器为接口并网, 存在接入功率波动大、无功补偿功率大、连接弱交流系统易不稳定等问题。采用构网型变流器可以平抑频率和电压波动, 为高比例新能源系统提供必要的惯性阻尼响应。

对于风电控制, 文献[24]对双馈风电机组的转子侧变流器和网侧变流器分别采取 VSG 控制和匹配控制策略, 提高了风电机组的自主组网和弱网运行能力。文献[25]基于 VSG 技术建立了直驱风机的完整动态模型, 根据系统频率自适应调节虚拟惯量和阻尼系数, 提升了风电机组的频率响应能力。

对于光伏发电控制, 文献[26]对光伏变流器采用广义下垂控制, 在常规下垂的有功-频率环中附

加控制器, 实现了变流器的惯量特征, 使机组具备了平抑负荷波动的能力。文献[27]基于 VSG 技术, 将变流器分为离网运行、并网发电和频率调节 3 种运行模式, 根据电网频率进行自适应控制, 提高了光伏并网的暂态稳定性。

3.3 储能系统

储能系统在电网中的作用包括: 为系统提供有功或无功支撑、提高新能源并网能力、参与调峰调频、故障期间短时供电等。随着新能源渗透率的提高, 储能系统有助于改善新能源出力波动性带来的不稳定问题, 同时也有助于减少弃风弃光现象、提高新能源利用率。储能系统主要通过电力电子接口并网, 其响应性能与变流器控制策略有关。

采用构网控制技术来控制储能变流器, 可以提高新型电力系统的稳定性。文献[28]提出了一种储能与风机配合的微电网控制方法, 储能系统不仅对 PCC 点进行功率补偿, 而且能在风速变化时保证风机在离网和并网模式之间无缝切换。文献[29]提出了基于下垂控制的储能系统聚合方法, 加入了荷电状态的反馈回路, 使得储能系统具备更优良的调频能力。考虑到 VSG 控制受到储能容量和响应速度的限制, 文献[30]采取快速/慢速储能系统相结合的策略, 前者储能容量大、用于模仿惯性和阻尼, 后者储能容量小、用于改变功率进行调速, 这种改进策略可以提供良好的频率响应。

3.4 柔性直流输电

柔性直流输电是基于电压源型变流器、全控型开关器件和 PWM 技术的新型直流输电技术。相比于传统高压直流输电技术, 柔性直流输电具有响应速度快、功率控制灵活、无需外加换相电压、谐波水平低等优势, 因此得到了广泛应用。随着柔性直流输送容量的增大, 应当考虑使其参与系统频率调节, 为电网的安全稳定运行做出贡献。目前柔性直流输电系统受端变流器多采用跟网控制, 不能为系统提供灵活的调频响应, 当连接弱电网时还容易出现严重的稳定问题。鉴于构网型变流器具备一次调频能力和惯性特性, 可将其应用到柔性直流输电系统, 以改善系统电压和频率稳定性。

国内外学者对柔性直流输电参与系统调频的控制策略进行了研究。文献[31]采用下垂控制、VSG 控制等不同控制策略, 实现了柔性直流输电的功率快速调节, 有助于异步互联交流系统之间的频率支援。文献[32]提出了受端变流器参与调频的 VSG 方法, 并通过改进算法实现了直流电压的协调控制, 改善了直流系统的运行可靠性。文献[33]将自适应

虚拟惯性控制应用到柔性直流输电系统,抑制了二次调频过程引起的暂态波动。

4 构网控制技术的问题及挑战

随着“双高”电力系统的发展,构网型变流器将逐渐取代同步发电机。构网型变流器的大规模应用带来了新的挑战与机遇,若干关键问题有待进一步研究。

4.1 同步稳定性

4.1.1 小干扰同步稳定

构网型变流器采取功率同步策略,在弱电网中的小干扰同步稳定性比跟网型变流器更好。

然而在电网强度较大时,构网控制的小干扰稳定裕度有所降低,可能失去与电网的同步。这是因为在强电网中使用功率同步控制策略时,变流器与电网之间相位差的微小变化都可能引起明显的功率波动,容易导致同步振荡。为使构网型变流器能广泛适用于不同强度的电网条件下,更为可靠的阻尼控制方式显得尤为关键。

在强电网下提高小干扰稳定性的途径主要包括控制器参数整定和附加阻尼^[34]。此外,小干扰失稳也可能是由于构网控制的参数设置不当(例如下垂控制中的下垂系数、虚拟同步控制中的惯量或阻尼系数不合理)。在对构网型变流器的参数进行整定时,应该注意使阻尼比处于合适范围。

4.1.2 大干扰同步稳定

构网型变流器具有与同步发电机类似的同步特性,在大干扰下也可能出现与同步发电机类似的暂态失稳现象。此外,构网型变流器在故障情况下进行限流控制,通常切换为电流控制模式,电流饱和特性将限制有功功率输出,导致变流器的同步稳定裕度大幅下降。有研究表明,构网型变流器电压外环和电流内环在暂态过程中存在动态交互,也会降低变流器的大干扰同步稳定性^[35]。

构网型变流器采用基本的功率同步策略(不含虚拟惯量)时,虚拟功角动态过程呈现一阶特性,变流器具有过阻尼响应。当受大干扰且存在平衡点时,变流器始终保持同步稳定;即使不存在平衡点,变流器在振荡一个周期后仍能与电网保持同步,从而降低了延迟故障清除而导致系统崩溃的风险^[13]。然而,当构网型变流器采用VSG控制或串联低通滤波的下垂控制时,即变流器提供惯性响应时,虚拟功角存在二阶动态过程,导致变流器响应欠阻尼,将出现与同步发电机类似的暂态稳定问题^[34]。

为提高构网型变流器的大干扰稳定性,可采取

的措施包括调节功率参考值、改进控制回路。文献[36-37]指出,在电压暂降时提高有功功率参考值或降低无功功率参考值,可以改善构网型变流器的暂态稳定性。此外,考虑到虚拟惯量导致二阶动态控制特性,文献[38]致力于协调设计惯量和阻尼参数,使功率控制环呈现一阶动态特征,同时利用阻尼响应以抑制暂态波动。总体而言,目前关于构网控制的大干扰同步稳定性的研究仍处于起步阶段,未来还值得进一步探讨。

4.2 限流保护和故障穿越

在电网发生短路故障时,构网型变流器为了维持内电势不变,可能引起很大的短路电流,危害变流器装置。

最简单的限流方法是在电网故障发生时改变构网控制方式,转而采用与跟网控制类似的矢量控制模式,直接限制注入变流器的电流^[13]。直接限流法一般是通过限制电流参考值实现的,这容易导致电流控制环发生饱和,从而使电压控制环失去控制能力,不利于变流器的稳定运行。另一种有效的限流方法是采用虚拟阻抗控制,通过模拟限流器的电阻和电感作用,降低端电压幅值以实现限流。与直接限流法不同,虚拟阻抗控制方法限制的是电压参考值,不容易导致变流器失稳。

此外,有许多研究致力于使构网型变流器在进行限流控制的同时,具备在电网故障期间保持运行的能力。文献[39]通过调节构网控制系统的电流内环正序、负序分量参考值,将三相电流限制在预定义的阈值内,实现了对扰动信号的瞬时抑制,保证变流器在对称及不对称故障期间的限流保护和故障穿越。

值得一提的是,限流措施会影响构网型变流器输出功率,降低其暂态稳定性。未来还需要进一步研究构网型变流器功率控制环的稳定性。

4.3 孤网/并网模式无缝切换

对于分布式系统、微电网等应用场景,孤网/并网模式之间的平稳过渡显得尤为重要。以动态微电网为例,其特点是边界特性动态可调,微电网中多个构网型变流器在孤网/并网模式之间灵活切换,为系统提供灵活的功率响应。然而,2种模式的切换过程可能导致电压/频率的偏差或振荡。引起不稳定现象的原因包括^[40]:1)从孤网模式过渡到并网模式时,微电网电压与电网电压不匹配;2)从并网模式过渡到孤网模式时,输出功率不为零。

为实现孤网/并网模式的无缝切换,关键在于改进构网控制策略。有学者提出,将下垂控制作为一

级控制,在二级控制中添加补偿项,可使变流器在孤网切换到并网模式时实现与系统电压同步,且在并网切换到孤网模式时实现功率最小化^[41]。仿真结果表明,添加补偿项之后的改进控制策略可以提高过渡过程中的稳定性,保证运行模式无缝切换。

4.4 多变流器协同控制

未来将有数量庞大的构网型变流器接入电网,需要考虑如何在系统动态特性复杂的条件下实现变流器的协同控制。

首先,大量构网型变流器的协同运行需要先进的通信技术和控制策略。大规模变流器进行协同控制的前提是,在构网型变流器相互之间、构网型变流器与电网之间实现全局信息共享,这需要传感和通信技术的支持。另外,需要进一步改进变流器协同控制策略,可以借鉴微电网中的分布式优化管理策略^[42],将集中控制细化为多代理系统的分层控制,有助于复杂系统的优化控制。

此外,大规模构网型变流器接入电网会使电网动态特性更复杂,导致系统层面的稳定控制更为困难。系统中多个变流器的功率分配也是值得研究的问题。未来还需要进一步研究整体系统的动力学特征,在此基础上设计更为可靠的构网控制策略。

5 结语

构网控制技术能够有效提升电网惯量阻尼特性,为系统提供电压和频率支撑,在高比例新能源和高比例电力电子设备的新型电力系统中有广阔的应用前景。本文通过文献综述,总结了构网型变流器的基本特性、控制策略、典型应用场景以及当前研究面临的主要问题和挑战。

构网型变流器表现为串联低阻抗的可控电压源,采用与同步发电机类似的功率同步策略,在弱电网中可实现自同步和稳定运行。本文介绍了4类构网控制策略,分别是下垂控制、虚拟同步发电机控制、匹配控制和虚拟振荡器控制。在正常、扰动以及故障情况下,构网控制技术均可以保证系统稳定运行,对于孤岛供电、新能源并网、储能系统和柔性直流输电等应用场景具有重要作用。目前,构网控制在同步稳定性、限流保护、孤网/并网模式切换、多变流器协同控制等方面仍存在挑战。针对这些挑战,本文相应提出了可行的解决思路,以期为后续的相关研究提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] REN21. Renewables 2021 global status report[R]. Paris: REN21, 2021.
- [2] 国家能源局. 2020 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2021-01-20) [2021-10-15]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.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] 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.
- [6] LIU Jia, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [7] 马钦林, 杨欢, 屈子森, 等. 改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 269-275.
MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 269-275(in Chinese).
- [8] 殷桂梁, 董浩, 代亚超, 等. 光伏微网中虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 192-199
YIN Guiliang, DONG Hao, DAI Yachao, et al. Adaptive control strategy of VSG parameters in photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 192-199(in Chinese).
- [9] 陈继开, 曾强, 辛业春, 等. 基于改进 VSG 的 MMC-MTDC 受端换流器二次调频控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1428-1436.
CHEN Jikai, ZENG Qiang, XIN Yechun, et al. Secondary frequency regulation control strategy of MMC-MTDC converter based on improved VSG[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1428-1436(in Chinese).
- [10] 杨帆, 邵银龙, 李东东, 等. 一种计及储能容量和 SOC 约束的模糊自适应 VSG 控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1869-1876
YANG Fan, SHAO Yinlong, LI Dongdong, et al. Fuzzy adaptive vsg control strategy considering energy storage capacity and SOC constraint[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1869-1876(in Chinese).
- [11] ARGHIR C, JOUINI T, DÖRFLER F. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. Automatica, 2018, 95: 273-282.
- [12] SINHA M, DÖRFLER F, JOHNSON B B, et al. Uncovering droop control laws embedded within the nonlinear dynamics of van der pol oscillators[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(2): 347-358.
- [13] ZHANG Lidong, 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.
- [14] ROSSO R, ANDRESEN M, ENGELKEN S, et al. Analysis of the interaction among power converters through their synchronization mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12):

- 12321-12332.
- [15] 颜湘武, 刘正男, 张波, 等. 具有同步发电机特性的并联逆变器小信号稳定性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 910-917.
YAN Xiangwu, LIU Zhengnan, ZHANG Bo, et al. Small-signal stability analysis of parallel inverters with synchronous generator characteristics[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 910-917(in Chinese).
- [16] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175(in Chinese).
- [17] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.
LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806(in Chinese).
- [18] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39(in Chinese).
- [19] 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: 1323-1325.
- [20] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [21] TAYYEBI A, DÖRFLER F, KUPZOG F, et al. Grid-forming converters-inevitability, control strategies and challenges in future grid applications[C]//CIRED Workshop. Ljubljana: IET, 2018: 0236.
- [22] 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.
- [23] ENTSO-E. High penetration of power electronic interfaced powersources (HPoPEIPS)[EB/OL]. 2017[2021-10-15]. <https://www.entsoe.eu>.
- [24] 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).
- [25] YAZDI S S H, MILIMONFARED J, FATHI S H, et al. Analytical modeling and inertia estimation of VSG-controlled Type 4 WTGs: Power system frequency response investigation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 107: 446-461.
- [26] 查雨欣, 林健, 王悦, 等. 基于广义下垂控制的光伏发电系统的惯量特性分析[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 54-59, 68.
CHA Yuxin, LIN Jian, WANG Yue, et al. Analysis of inertia characteristics of photovoltaic power generation system based on generalized droop control[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 54-59, 68(in Chinese).
- [27] 温烨婷, 戴瑜兴, 毕大强, 等. 一种电网友好型光储分布式电源控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 464-475.
WEN Yeting, DAI Yuxing, BI Daqiang, et al. A grid friendly PV/BESS distributed generation control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 464-475(in Chinese).
- [28] CHAUHAN P J, REDDY B D, BHANDARI S, et al. Battery energy storage for seamless transitions of wind generator in standalone microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 69-77.
- [29] SHIM J W, VERBIČ G, KIM H, et al. On droop control of energy-constrained battery energy storage systems for grid frequency regulation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 166353-166364.
- [30] SUN Chu, ALI S Q, JOOS G, et al. Virtual synchronous machine control for low-inertia power system considering energy storage limitation[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 6021-6028.
- [31] 朱良合, 袁志昌, 盛超, 等. 基于柔性直流输电的异步互联系统频率支援控制方法综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 84-92.
ZHU Lianghe, YUAN Zhichang, SHENG Chao, et al. Review of frequency support control methods for asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 84-92(in Chinese).
- [32] 姚为正, 杨美娟, 张海龙, 等. VSC-HVDC 受端换流器参与电网调频的 VSG 控制及其改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 525-533.
YAO Weizheng, YANG Meijuan, ZHANG Hailong, et al. VSG control and its modified algorithm for VSC-HVDC inverter participating grid's frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 525-533(in Chinese).
- [33] 刘英培, 谢乾, 梁海平. 柔性直流输电系统自适应虚拟惯性调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 129-136.
LIU Yingpei, XIE Qian, LIANG Haiping. Frequency regulation control strategy for flexible dc transmission system based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 129-136(in Chinese).
- [34] WANG Xiongfei, TAUL M G, WU Heng, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources-an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.
- [35] TAOUFIK Q, GRUSON F, COLAS F, et al. Analysis of the coupling between the outer and inner control loops of a Grid-forming Voltage Source Converter[C]//2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE ECCE Europe). Lyon, France: IEEE, 2020: P.1-P.10.
- [36] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, 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.
- [37] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Transient stability impact of reactive power control on grid-connected converters[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 4311-4316.
- [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] MAHAMED B, ESKANDARI M, FLETCHER J E, et al. Sequence-Based control strategy with current limiting for the fault Ride-Through of Inverter-Interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 165-174.
- [40] ROSSO R, ENGELKEN S, LISERRE M. Current limitation strategy for Grid-Forming converters under symmetrical and asymmetrical grid faults[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA: IEEE, 2020: 3746-3753.
- [41] DU Yuhua, LU Xiaonan, TU Hao, et al. Dynamic microgrids with Self-Organized Grid-Forming inverters in unbalanced distribution feeders[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1097-1107.
- [42] 郝雨辰, 窦晓波, 吴在军, 等. 微电网分层分布式能量优化管理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 154-162.
- HAO Yuchen, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. Hierarchical and distributed optimization of energy management for microgrid[J].

Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 154-162(in Chinese).



许诒翊

在线出版日期: 2021-12-30。

收稿日期: 2021-11-01。

作者简介:

许诒翊(2000), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: xujy22@mails.tsinghua.edu.cn;

刘威(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: liuw17@mails.tsinghua.edu.cn;

刘树(1981), 男, 硕士, 研究方向为电力电子技术, E-mail: liushu@sf-auto.com;

常富杰(1979), 男, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: changfujie@sf-auto.com;

谢小荣(1975), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统振荡分析与抑制、柔性输配电系统等, E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)

附录 A

表 A1 变流器控制结构中符号的含义

Table A1 Explanation of the symbols in the control structure of converters

符号	含义
u_{PCC}	变流器并网点电压
i_{PCC}	变流器并网点电流
I_d^*	跟网型变流器输出电流参考值的直轴分量
I_q^*	跟网型变流器输出电流参考值的交轴分量
U_m	构网型变流器输出电压幅值参考值
δ_m	构网型变流器输出电压相位参考值
Z_C	变流器等效阻抗
Z_g	电网等效阻抗