

[控制技术]

构网型发电设备研究综述

文/康健¹ 蔡龙¹ 赵艺婷² 杨硕² 刘子剑²

1. 中国华电集团有限公司青海分公司；2. 电力规划设计总院

同步调相机和构网型发电设备将成为保障新能源可持续发展的关键设备。分析构网型控制技术与跟网型控制技术的区别，介绍典型的构网型控制技术，分析构网型发电设备与同步调相机的区别，最后对未来构网型发电设备的发展进行展望。

随着新能源的快速发展，高比例电力电子设备的应用进一步加剧了高比例新能源发电场景下电源侧惯量和短路容量不足的问题，系统抗扰动能力下降，在遭受扰动后极易诱发频率稳定和电压稳定问题^[1]。

目前工程中普遍采用跟网型控制技术，与电网同步需要锁相环测量并网点（Point of Common Coupling, PCC）的相位信息，在弱电网中存在稳定问题^[2-3]。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^[4]。构网型控制技术不依赖电网频率/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^[5]。

为解决新能源消纳和特高压直流输电的安全问题，国家电网公司于2015年9月立项“暂动态特性优、安全可靠、运行维护方便”的新一代大容量同步调相机项目；2018年，又提出适用于新能源场站的新型分布式调相机项目。截至目前，新一代大容量同步调相机和新型分布式调相机项目均实现工程应用，在提升跨区输电能力和支撑新能源消纳方面发挥了重要作用，已成为保障新能源可持续发展，推动能源结构转型的关键设备^[6]。

构网型控制发电设备和同步调相机均具备自主快速支撑电网电压和频率的能力，因而得到广泛关注。本文首先分析构网型控制技术与跟网型控制技术的区别，介绍典型的构网型控制技术，然后分析构网型发电设备与同步调相机的区别，最后对未来构网型发电设备的发展进行展望。

构网型控制技术

图1是典型的跟网型变流器控制策略，直流侧应用恒定电压源 V_{dc} 来替代，交流侧经由LC滤波器滤除高频谐波后接入到PCC点。跟网型并网变流器采用功率外环控制，电流内环控制，实现恒定功率输出。跟网型并网变流器控制由锁相环节、外环功率控制、内环电流控制、PWM发生器及采样环节构成。锁相环通过对交流电压跟踪，获取交流电压幅值及相角。外环功率控制根据不同控制需求对不同变量进行调节，包括有功功率、无功功率、直流侧电压及交流侧电压，其输出值作为内环电流控制的给定信号。

图2是构网型变流器控制策略，采用典型的构网控制策略虚拟同步控制技术、电压电流双闭环控制，提供电压和频率支撑。内环电压、电流控制能够有效提高机端电压、输出电流的动态响应性能，并限制变流器故障电流。虚拟同步机控制通过对功率进行调节，输出同步信号，即电压幅值给定信号、电压相位给定值。同步信号作为内环电压控制

的给定值。内环电流控制输出的调制信号通过PWM发生器生成开关器件的触发信号。

跟网型变流器表现为并联高阻抗的可控电流源，通过控制注入电网的电流来控制输出功率，在电力系统发生扰动后，跟网型变流器输出电流保持恒定，则变流器输出电压会发生突变。构网型变流器表现为串联低阻抗的可控电压源，直接控制输出端的电压来控制输出功率^[7]。在电力系统发生扰动后，瞬时电压保持恒定，则变流器输出电流幅值会

产生较大的冲击，存在过电流风险。传统跟网型变流器的控制非常依赖于锁相环以保持同步性，因此锁相环的负面影响能够降低系统的稳定性。然而，构网型控制将同步功能融合于功率控制器当中，克服了锁相环的缺点。因此，构网型变流器非常适合于弱电网情况。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。

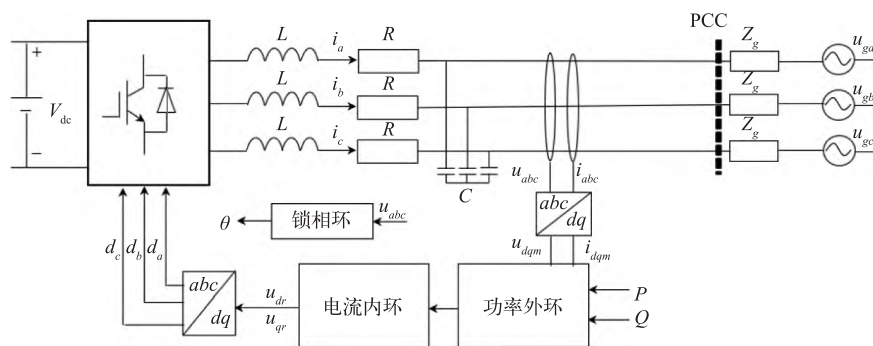


图1 跟网型变流器控制策略

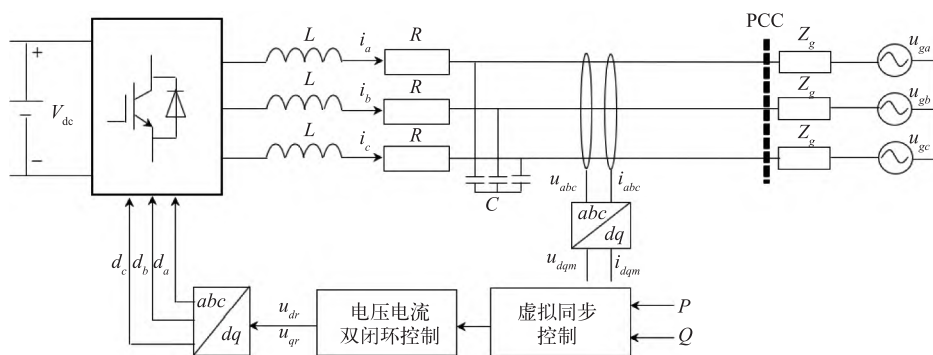


图2 构网型变流器控制策略

典型的构网型控制技术

常见的构网控制策略主要包括下垂控制^[8]、虚拟同步发电机控制^[9-10]、匹配控制和虚拟振荡器控制。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，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。

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。下垂控制响应速度快，通过功率按照下垂

系数分配，提高实际工程中的经济适用性。典型的下垂控制在线路阻抗呈现阻性较强且多机并联情况下，难以实现平衡的无功分配，在某种程度上会影响下垂控制的效果^[11]。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，当系统发生扰动时，典型的下垂控制会存在频率变化较大和电压波动大等问题，对电网的安全稳定问题构成挑战。在实际应用中，通过对下垂控制的功率控制环节中增加惯性环节，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^[12]。

2. 虚拟同步机控制

虚拟同步发电机（Virtual Synchronous Generator, VSG）控制技术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。具体控制方式是在控制环节结合同步发电机的数学模型，引入转子运动与电磁暂态方程。相比于下垂控制，虚拟同步机控制可实现惯量模拟，提升系统的等效惯量水平，但在模拟同步发电机的同时，VSG控制也存在和同步发电机故障情况下同样的弊端，即面临高故障电流的风险^[13]。VSG控制按照控制方式不同，可分为电流型VSG和电压型VSG两种类型。电压型VSG具有电网支撑能力，更适用于弱电网情况，成为目前主流的控制方式。

3. 匹配控制

匹配控制是利用变流器直流侧直流母线电容来模拟同步发电机转子动能的吸收和释放，考虑到电容的惯性通常为毫秒级别，相比于同步机的转子惯性时间常数是较小的，当系统发生故障，直流电容的能量难以提供有效的能量支撑。后续研究中针对这一问题，将直流侧电压信号引出，通过控制传递环节，控制原动机的有功输出。匹配控制由于只需要监测直流母线电压的信号，同其他典型的构网型控制方式相比，具有延时小的优点。

4. 虚拟振荡器控制

虚拟振荡器控制的参考电压是由虚拟振荡器控制的，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。振荡器是实际存在的谐振电路，虚拟振荡器则是通过微分方程建立振荡器模型并离散化后利用编程得到的虚拟电路。虚拟振荡器包含一个LC振荡回路、一个受控电流源与受控电阻相结合的模，以及一个电流控制型电流源。

构网型发电设备与同步调相机的区别

同步调相机本质上是不带机械负荷的同步发电机，运行过程中不与原动机连接，调整电网电压相位，可以帮助发电厂和电网保持同步，以确保电力系统的稳定运行。同步调相机的主要功能是实时监测电网和发电设备的电压和相位信息，然后通过控制电机的运转来调整电网相位，以保持与发电设备的同步运行。它通常安装在发电设备侧或电网侧，

通过实时监测电网和发电设备的电压和相位信息，来调整电网相位，以保持同步。

1. 静态电压稳定

构网型设备都具有动态无功功率调节的能力，可以主动系统的调峰平衡和静态电压稳定控制等，提升安全稳定裕度。同步调相机在维持静态电压稳定方面也具有独特的优势，可以通过调节励磁装置来吸收或发出无功功率，达到调压的目的^[18]。在小扰动电压稳定方面，构网型控制设备由于采用电力电子器件，调节速度快。而同步调相机在系统电压变化后的无功电流响应主要由两部分组成：一是基于调相机物理特性的自发无功电流响应，在电网电压变化的瞬间产生，并随后衰减，这部分无功电流的大小主要与调相机的机端电压变化幅度和次暂态电抗有关，电压变化幅度越大，次暂态电抗越小，瞬时无功功率出力越大；二是基于同步调相机励磁控制的无功电流响应，需要一定的响应时间。因此，在小扰动电压稳定方面，构网型设备在参数设置合理的基础上控制响应速度会更具有优势。

2. 暂态稳定性

与小扰动稳定类似，构网型设备本体灵活可控的参数和电网参数都会对自身暂态稳定性产生影响，包括虚拟惯量、阻尼参数、无功下垂系数和线路阻抗参数等都会影响自身暂态稳定裕度，其次合适的暂态控制策略也可提高构网型设备自身的暂态稳定性。在大干扰稳定性方面，构网型设备通过逆变器控制及配置可调的有功能力可以模拟同步发电机组的运行特性，但由于电力电子器件的过流能力的限制，并网变换器只能多发出额定电流20%~40%的电流，无法具备与同步调相机一样提供数倍短路电流的能力。同步调相机在故障工况下会自主响应系统的无功需求，提供数倍于额定值的短时过载电流，在严重故障工况下的电压支撑方面，大容量及分布式同步调相机会更具有优势。

目前提升构网型设备过电流能力的相关研究也在多角度不断深入，包括硬件设计、控制角度等提升构网型设备短路电流输出能力。

3. 惯性支撑能力

构网型设备是通过控制手段进行惯量支撑，以达到提供虚拟惯量的效果，其惯性支撑能力和设备容量、控制方式、运行工况及控制参数有关。同步

调相机具有旋转的转子但不具有原动机系统，能够提供惯性响应但惯性支撑能力还有待提高，主要用于提供无功补偿与电压稳定服务。受自身物理结构限制，同步调相机惯量、阻尼等参数一般为固定值，而构网型设备控制参数选取较为灵活，构网型设备在合适的参数配置下，可以提供的惯性支撑能力效果优于同步调相机。

构网型发电设备未来展望

未来对于新能源发电设备的构网能力的需求已经很明确，在频率稳定方面，构网型控制技术具有自主惯量响应能力、一次调频能力。在小干扰稳定方面，构网型发电设备在弱电网情况下，仍保持较好的小信号稳定性。但在强电网方面，构网型发电设备的稳定性有所降低，随电网强度逐渐增大，构网型发电设备可能会发生失稳现象。现有研究针对小信号稳定方面，常用的稳定性分析方法包括传递函数分析、状态空间法、阻抗法和复转矩系数法等，目前均有成熟的应用。在大干扰稳定性方面，传统跟网型发电设备不能再电网故障时，承担起维护电厂稳定的能力，缺乏对电压稳定和频率的支撑能力。构网型控制技术可以构建电网的电压和频率，但这也意味着在故障发生时，会产生较大的电流值，这也对构网型发电设备的过电流能力提出了要求。因此针对故障情况下，如何能提高构网型控制的限流能力将成为未来需要深耕的研究内容之一。此外，目前针对在强电网情况下，多台构网型发电设备共同运行也会面临振荡风险，需要更深入研究构网型发电设备稳定机理。考虑到未来新能源在强弱电网中的适应性和切换能力，结合现有跟网型发电设备的成熟性及经济性，构网型发电设备和跟网型发电设备的配置比例也将成为业界探讨问题之一。EA

(收稿日期：2024-08-29)

参考文献

- [1] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] Li Y, Gu Y, and Green TC. Revisiting Grid-Forming and Grid-Following Inverters A Duality Theory[J]. IEEE Transactions on Power

Systems, 2022, 37(6): 4541-4554.

- [3] 梁军, 李传玥. 并网换流器控制模式发展及弱电网稳定研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3703-3712.
- [4] 王祺, 张泽轲, 郭杰帅, 等. 新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 504-517.
- [5] 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): 3586-3595.
- [6] 郭强, 李志强. 同步调相机发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6050-6064.
- [7] 雷雨, 李光辉, 王伟胜, 等. 跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15[2024-06-27].
- [8] KUSHWAH R S, WALKE G R. Parallel operation of inverters with droop control of voltage and frequency[C]//2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET). Mumbai, India: IEEE, 2018: 1-5.
- [9] 马铨林, 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.
- [10] EBRAHIMIM, KHAIEHODDIN SA, KARIMIGHAR-TEMANI M. An improved damping method for virtual synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1491-1500.
- [11] 杜威, 姜齐荣, 陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 26-31.
- [12] 杨帆, 张辉, 王帆, 等. 微电网逆变器惯性电压下垂控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(12): 93-94.
- [13] 于鸿儒. 虚拟同步机并网系统功率振荡分析与抑制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [14] 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.