第 50 卷 第 11 期：4773-4788 高电压技术 Vol.50, No.11: 4773-4788
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241234

高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望

李　明[1]，常永康[1]，毛永涛[1]，刘恩俊[1]，汪　兴[1]，张　兴[1]，耿　华[2]
（1. 可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室(合肥工业大学)，合肥 230009;
2. 自动化系(清华大学)，北京 100084）

摘　要：随着以光伏和风电为代表的新能源渗透率不断提升，电网的特性愈发复杂，传统单一模式跟网型和构网型变流器无法完全满足电网的需求。因此，一方面，高渗透率条件下，局部电网的阻抗波动更加显著，电网表现出强弱交替变化的特点，现有并网变流器稳定控制应用存在局限性，如何将两种控制模式结合，使得变流器能够兼顾经济性和稳定性是研究热点；另一方面，现有并网变流器控制难以适应复杂电网特性的非线性变化。高渗透率条件下，受到新能源间歇性、电网故障导致设备/支路切除等因素的影响，电网结构/参数呈现非线性变化。为此，探索非线性控制在跟、构网变流器中的应用，使得变流器在复杂电网状况下能够具有更强的稳定性。综上，该文在构网型和跟网型单一控制的基础上，综述了几类结合跟、构网两种模式优点的控制方式，涉及单机双模式切换控制、单机双模式融合控制以及多机场站混合模式控制。然后，进一步阐述如何改进现有并网变流器控制，使其能够适应复杂电网特性的非线性变化。最后，对未来变流器控制技术进行了展望。

关键词：高渗透率；新能源并网；电网阻抗；非线性控制；构网型控制；跟网型控制

Review and Prospect of Stability Control Techniques for Grid-following/Grid-forming Converters in High-penetration Renewable Energy Generation

LI Ming[1], CHANG Yongkang[1], MAO Yongtao[1], LIU Enjun[1], WANG Xing[1], ZHANG Xing[1] , GENG Hua[2]
(1. National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract：As the penetration rate of renewable energy sources(represented by photovoltaic and wind power)continues to increase, the characteristics of the power grid become increasingly complex. Traditional single-mode grid-following and grid-forming converters cannot fully meet the needs of power grids. Consequently, on one hand, under high penetration conditions, the problem of significant fluctuations in the impedance of local grids becomes more pronounced, exhibiting characteristics of strong to weak variations. The existing stability control of grid-connected converters still has application limitations. How to combine both control modes to ensure that the converters could compromise both economy and stability is a research hotspot. On the other hand, the control of existing grid-connected inverters is hard to adapt to the nonlinear changes in the complex grid characteristics. Under high penetration conditions, influenced by the intermittency of renewable energy sources and grid faults leading to equipment or grid branch disconnections, the structure or parameters of the grid exhibit nonlinear changes. Therefore, exploring the application of nonlinear control in grid-following and grid-forming inverters to enhance their stability under complex grid conditions is of significant importance. In summary, we reviews several control methods that combine the advantages of both grid-following and grid-forming modes, based on the single-mode control of grid-forming and grid-following converters. These methods include single-converter dual-mode switching control, single-converter dual-mode integrated control, and multi-converters station hybrid mode control. Furthermore, this paper elaborates how to improve the existing control of grid-connected inverters to adapt to the nonlinear changes in complex grid characteristics. Finally, we provide an outlook on future control technologies of converters.

Key words：high penetration rate; renewable energy grid connection；grid impedance; nonlinear control; grid-forming control; grid-following control

基金资助项目：国家自然科学基金(52207211；U2166601；U23A20655)；中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2024HGTB0259).
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207211，U2166601，U23A20655), Special Funds for Basic Research Operating Expenses of Central Universities(JZ2024HGTB0259).

0 引言

为了应对气候问题，在 2020 年第七十五届联合国大会上。习总书记提出中国将全力争取在 2030 年前实现碳达峰，并在 2060 年前实现碳中和。作为环境友好型电源，以光伏、风电为代表的新能源因此受到广泛关注。截至 2024 年 5 月底，光伏和风电累计装机容量分别达到了 691 GW 和 461 GW[1]。

在“双碳”目标的驱动下，我国的新能源发电的渗透率越来越高。目前，新疆、甘肃、宁夏等部分地区新能源渗透率已经超过了 100%。高渗透率新能源也给电力系统带来了一定的挑战[2]，引发了一系列事故[3]。2012 年，在我国河北的沽源地区，由于风机与串补线路之间的交互作用，引发了的次同步振荡，部分风机因此而被迫脱离电网；2015 年，华东锦苏特高压直流系统发生双极闭锁事故，并由于系统惯量不足，导致电网出现 0.41 Hz 的严重频率跌落；2020 年 6 月，随着张北柔直工程的投运，系统发生了多起宽频振荡。这些事故的发生都是新能源渗透率的提高导致的。新能源出力的随机性、波动性等因素对电网影响的日益显著，电力电子设备对电网的影响越来越大[4]，电网短路比(short circuit ratio, SCR)降低，更易呈现出弱电网[5](2<SCR<3)甚至极弱电网的(SCR<2)的特性。并网变流器作为新能源与电网之间的接口装置[6]，是新能源与电网之间的桥梁，其稳定性控制也是受到了广泛的关注。

变流器主要有跟网型(grid-following, GFL)[7]和构网型(grid-forming, GFM)两种控制方式。其中，由于跟网型控制能实现新能源的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)[8]具有良好的经济效益而得到了广泛的应用。但是随着新能源渗透率的提高，跟网型控制变流器在弱电网下稳定性不足以及无法为系统提供支撑等问题日益凸显。因此，构网型控制以及场站级的跟网型和构网型的混合控制模式也开始受到国内外专家学者的关注。

本文针对现有的新能源发电控制技术进行总结，介绍的控制策略由线性控制策略逐步转到非线性控制策略，主要贡献如下：

1）综述了单一模式控制模式在线性小扰动情况下的稳定性问题，揭示了两种并网模式在经济性和稳定性上的互补特性；

2）综述在电网阻抗大幅波动情况下基于互补特性的单机双模式自适应切换相关控制方法以及扩展到多机系统时的混合模式运行控制技术；

3）综述了两种控制模式在非线性场景下采用无源控制(passivity-based control，PBC)的稳定性提升方法以及暂态大扰动情况下的稳定提升控制方法；

4）对未来两种模式变流器的发展进行了展望。

本文的章节安排如下，第 1 章综述了跟网型和构网型的线性控制方法，从单机变流器的控制逐步过渡到场站的变流器控制；第 2 章综述了非线性控制方法；第 3 章对新能源变流器的未来发展进行了展望。

1 不同电网阻抗条件下跟网/构网变流器控制方法

目前，针对跟网型和构网型变流器的控制，国内外许多学者都致力于建立变流器在其工作点附近的线性化小扰动模型[9]，并据此研究变流器稳态性能提升的线性控制策略。

1.1 跟网/构网变流器单一模式控制

1.1.1 单一跟网型模式的宽频振荡抑制策略

不同于传统的以同步发电机为主导电源的电力系统，并网变流器新能源发电系统大多采用锁相环(phase-locked loop，PLL)进行电网同步。基于 PLL 的跟网型模式是目前应用最为广泛的并网变流器控制方案，也称电流源模式控制。

传统的跟网型控制不仅能够工作在 MPPT 模式下，实现新能源利用率的最大化，还能够获得高质量的并网电流，控制技术十分成熟[10-14]，典型的跟网型控制结构如图 1 所示。其中，i_{abc}、u_{abc} 分别是变流器采样的输出电流和并网点电压；L_g 为电网等效电感；u_d、u_q 为 dq 坐标系下的并网点电压；i_d、i_q 为 dq 坐标系下的输出电流；i_{dref}、i_{qref} 为 dq 坐标系下的电流给定值；e_d、e_q 为 dq 坐标系下的调制波；e_{mabc} 为 abc 静止坐标系下调制波；s 为拉普拉斯算子；$H_{LPF}(s)$、$H_{PLL}(s)$、$H_{CC}(s)$分别为低通滤波器、PLL 的 q 轴电压控制器、电流环电流控制器；K_d、K_f 分别为电压前馈系数和电流解耦系数；P_{set} 和 Q_{set} 分别设定有功功率和无功功率；ω_n 为电网额定角频率；ω_{PLL}、θ_{PLL} 分别是 PLL 所计算输出的电网角频率以及相位；u_{AMP} 为计算出的并网点电压幅值。

然而，随着新能源在电网的比例越来越高，公共耦合点(point of common coupling，PCC)的 SCR 大幅下降。国内外专家学者主要基于线性控制理论，

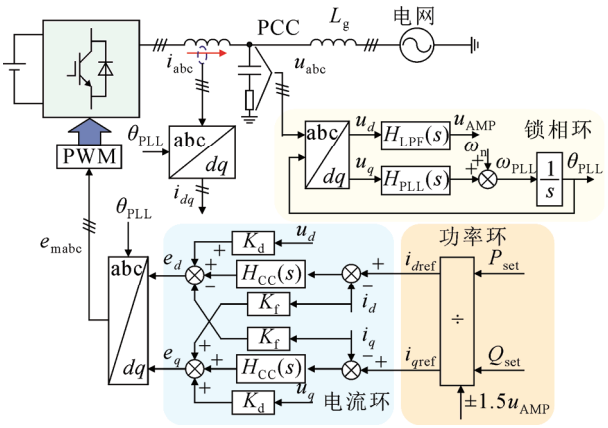


图 1　跟网型控制典型控制结构

Fig.1　Typical structure of grid-following control

从改进跟网型模式控制设计的角度来提升系统稳定性，从而在一定程度上解决宽频振荡问题。已有研究表明，弱电网下，PLL 和电网电压前馈环节是影响电流控制型模式并网变流器稳定性的重要因素。比如，跟网型控制变流器在弱电网下由于 PLL 的动态而存在振荡失稳风险[15-20]，严重危害着系统的安全稳定运行[21-23]。对此，大量国内外专家学者提出了一系列改进的控制策略，如重新设计 PLL 带宽[24]、改进电压前馈[25-26]、阻抗导纳重塑[27-28]等。在弱电网条件下，PLL 和电网电压前馈环节是影响并网型变流器稳定性的关键因素。首先，针对 PLL 环节，文献[16]指出，随着电网阻抗的增加，PLL 与电网阻抗之间的耦合效应会增强，导致系统稳定性下降。文献[29]进一步分析了弱电网条件下 PLL 对变流器稳定性的影响，并提出了优化 PLL 参数的设计方法。文献[30]则建议通过降低 PLL 带宽来提高弱电网下变流器的稳定性。其次，针对电网电压前馈环节，文献[26]指出，在弱电网下，该环节会引入一个等效的正反馈通道，进而降低并网变流器的稳定裕度。为此，基于加权系数的电压前馈改进方案被提出，以一定程度上提升变流器的稳定性。类似的，文献[31]和[32]分别提出了在前馈通道中增加带通滤波器和复数滤波器的改进方法，也有助于增强系统在弱电网下的稳定性。然而，上述研究仅分别考虑了 PLL 和电网电压前馈环节对稳定性的影响。为解决这一问题，文献[27]提出了一种同时抵消二者影响的并网变流器输出阻抗重塑方案。

但是无论如何改进，跟网型控制变流器都无法替代传统同步机组，根本原因在于其没有基于旋转动能的惯性响应特性[33]，对系统的主动支撑能力不足[34]。另外，本研究团队研究发现[35]，当处于电网阻抗很大的极弱电网时，受到静态功率传输单调性的影响，即使是采用改进后的跟网型模式，并网变流器仍将出现输出功率传输失衡而无法支撑并网点电压，导致其无法稳定运行。

综上，现有基于线性理论设计的单一跟网型模式在强电网下能稳定运行，在弱电网下其改进控制能在一定程度上提升系统稳定裕度并抑制宽频振荡，但仍旧不能在极弱电网下稳定运行。

1.1.2　单一构网型模式的宽频振荡抑制策略

近年来的相关研究表明，构网型模式并网变流器(也称电压源模式控制)因无需 PLL 进行电网同步，因此不存在由 PLL 引起的不稳定性[35]。

构网型控制由于其自身具备对电网的主动支撑能力，逐渐成为研究热点[36-40]。构网型模式在弱电网和极弱电网中表现出良好的稳定性，能够有效避免宽频振荡现象。例如，文献[41]通过单台构网型变流器接入无穷大电网的实验，证明即使在弱电网甚至极弱电网下，构网型变流器仍能保持足够的稳定裕度。文献[42]则通过建立基于下垂控制的三相并网变流器的序阻抗小信号模型，得出在弱电网条件下，构网型模式相比于跟网型模式具有更好的并网稳定性。类似地，文献[43]研究了基于虚拟同步机的构网型模式的序阻抗小信号模型，进一步证明了构网型模式在弱电网中的更高稳定性。然而，针对构网型模式在强电网下的稳定性，本研究团队发现：在强电网条件下，构网型模式的有功功率环路阻尼较小，容易导致输出功率振荡，难以实现稳定运行[35]。为此，通常采用加入虚拟阻抗的方式来提升构网型模式在强电网中的稳定性[44]。

常见的构网型控制有下垂控制，虚拟同步机控制以及虚拟振荡器控制，如图 2 所示。图中，P、Q 是变流器实际输出功率；D_p、D_q 是有功功率和无功功率的下垂系数；$\Delta\omega$、Δu 为计算出来的角频率差和电压差；u_n、u_{ref} 为电压额定值和计算出来的电压参考值；θ_m 为功率同步计算出的相位；$H_{VC}(s)$为电压控制器；J、K 为虚拟同步机有功环和无功环惯性系数；$i_{\alpha\beta}$、$i_{\alpha\beta ref}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下的变流器输出电流和参考电流；K_i、K_t、K_V 是虚拟振荡器比例系数；$T(\theta)$为旋转变换矩阵。

相比于跟网型控制仅仅是跟随电网的电压并向电网注入电流，一旦脱离电网将无法运行的特性，构网型控制变流器即使没有电网，也能够正常工作，

并为整个系统提供一定频率和电压参考。已有研究表明，构网型模式在弱电网和极弱电网下具有更好的稳定性[43]，从而避免出现宽频振荡现象。但是研究发现[35]，强电网下构网型控制模式的有功功率环路阻尼很小，输出功率易发生振荡，因此存在稳定性问题。

虽然构网型控制还存在诸如功率调节速度慢、多机并联耦合强等[43-45]问题，但是仍然无法阻碍其发展。并且为了进一步提升其在实际应用中的可靠性与稳定性，构网型控制技术往往与储能相结合，最大限度满足电网频率和电压支撑的有功和无功功率需求。西班牙、葡萄牙、澳大利亚等国家早在 2015 年就开始规划建设构网型储能示范项目[46]，另外我国也在近来年提出要加强构网型技术示范[47]。2022 年 12 月，湖北荆门新港储能电站一期工程建设完成并投入并网运行。作为构网型储能站的先行示范项目，该电站在削峰填谷、保障电力供应以及提升区域电网稳定性方面发挥了重要作用。2023 年 6 月，内蒙古额济纳地区“源-网-荷-储”微电网示范工程成功配套构网型电化学储能系统，并开展了并网性能调试及现场测试，这是构网型储能技术首次在内蒙古电网中应用。张北柔直电网工程于 2023 年 7 月完成系统调试，并通过孤岛柔直开环控制和低频阻尼附加控制两种构网型控制策略，顺利投入实际运行，有效解决了复杂场景下纯电力电子电网的宽频振荡问题。此外，在新疆克州阿克陶在 50 MW 光伏电站中，配备建设了国内首个具备 3 倍过流能力的 5 MW/10 MWh 构网型储能机组[48]，大大提升了其稳定运行的能力。甘肃民勤县 200 MW/800 MWh 一期构网型储能电站也于 2024 年 1 月并网成功。我国的构网型控制技术进入了实际应用的阶段。

1.2 跟网/构网双模式切换控制

从单一模式的跟网型和构网型变流器来看，两类控制模式分别适应于电网强弱不同的场合。然而，并网变流器并网端电网阻抗往往会因并网设备数量、负载以及系统运行方式等因素的变化而发生大幅波动。此时，电网阻抗的大幅波动将会超出单一并网模式的稳定运行范围，导致并网变流器出现稳定性问题[49]，具体体现在：跟网型变流器外端口呈现为一个具有较大等效输出阻抗的电流源特性[50]，并且在中低频段，特别是 50 Hz 附近容易出现容性负阻区，从而与电网中的感性分量发生交互振荡，导致其在弱电往下稳定性较差；而构网型变流器的

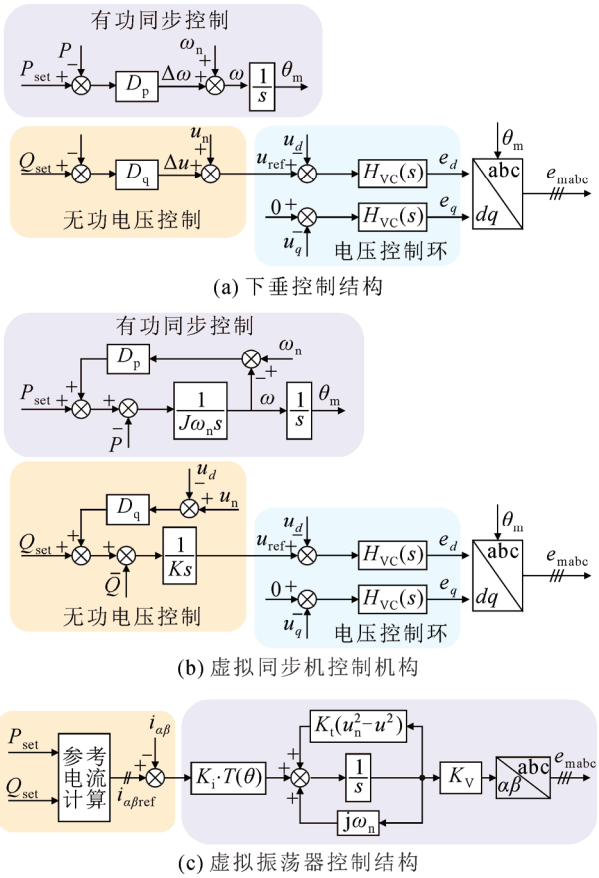


图 2 构网型控制典型控制结构

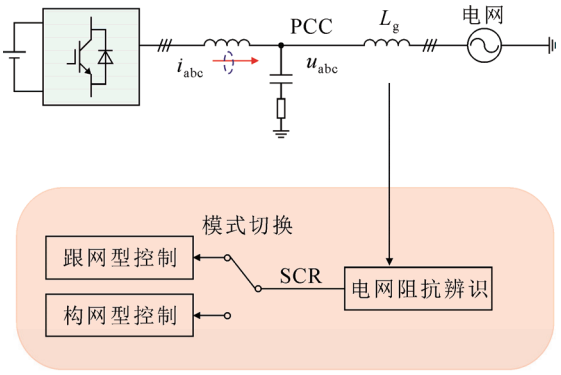
Fig.2 Typical structure of grid-forming control

外端口特性则是表现为一个具有较小等效输出阻抗的电压源[50]，在中低频段呈现感性，因此其在弱电网甚至极弱电网下能够保持稳定[51]。

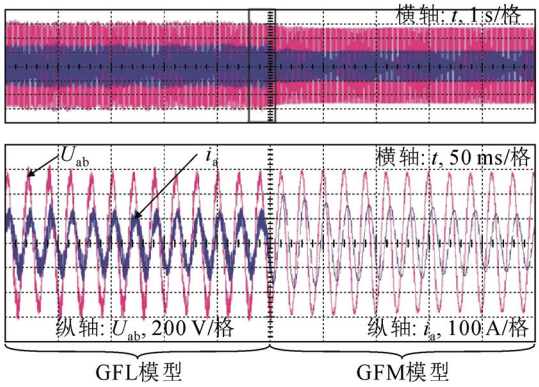
针对跟网型控制变流器和构网型控制变流器在不同电网强弱下的互补特性，本研究团队在文献[35]提出一种能够自适应电网阻抗变化的双模式切换控制，如图 3(a)所示。双模式切换的核心是针对电网阻抗的高低，调整变流器的工作模式，解决了单一模式变流器对电网适应性差的问题。具体切换逻辑为：在强电网下，采用跟网型控制模式，提高新能源利用率；弱电网下切换到构网型控制模式，提高弱电网下的稳定性，并为电网提供一定的支撑能力。然而，文献[35]中仅定性地介绍了跟网型和构网型两种控制模式在强弱电网中进行切换的这种控制方式，并未定量明确两种模式切换的 SCR 边界。因此，为了弥补上述不足，本研究团队在文献[52]中，基于 D 分割法[53]，对变流器在 PLL 带宽、幅值和相位裕度等相关性能指标约束下的两种工作模式的参数稳定域进行了定量分析，并提出了根据 SCR 变化进行滞环切换的方法，避免了 SCR 小幅

波动所导致的频繁切换，又特别设计双模式切换控制器，确保切换前后相位和电流指令不变，实现无扰动切换，切换实验波形如图 3(b)所示。图中，当电网较弱时，跟网型控制变流器出现电压和电流的谐振现象。当并网变流器切换到构网型控制模式时，谐振现象消失，验证了双模式控制的有效性。在此基础上，本研究团队在文献[54]中将双模式控制应用到多机系统中，提出在电网阻抗较大时，让多机系统中部分变流器从跟网型控制模式切换到构网型控制模式，即构成混合模式运行，从而改善系统中的电流谐振现象，提高系统的稳定性。但是文献[54]中并没有对多机系统中全跟网型控制和混合模式控制的切换边界进行量化分析。因此本研究团队在文献[55]针对双分裂变压器的集中式光伏并网变流器在大型荒漠光伏电站中的应用，提出一种基于电网阻抗自适应的双模式组合控制策略，对多机系统的双模式控制再度扩展，当检测到多变流器系统处于极弱电网环境中时，进一步从混合模式切换到全构网型控制模式，从而扩展了 SCR 波动时变流器的稳定区间。同时文献[55]基于 D 分割法，量化分析了多机系统在多性能指标约束下稳定区域，得到了全跟网型控制模式、混合模式、全构网型控制模式 3 种模式之间的切换边界。文献[56]中指出，系统的稳定性不仅仅只受到电网阻抗大小的影响，也与新能源实际输出功率有关，据此提出运行短路比指标作为双模式的切换依据，可同时反应电网阻抗和新能源功率对系统稳定性的影响。但是新能源发电系统的出力高度依赖天气状况，具有很强的波动性和随机性，这也就也导致实际应用中该指标可能会变化过快，导致变流器频繁进行模式切换。

上述双模式切换控制的方法，充分发挥了跟网型控制模式和构网型控制模式变流器自身的优点，使其工作在各自的稳定区间，但是该方法也存在一定的技术难题。首先，变流器本身的参数不仅只有控制参数，还有会随着环境和使用年限而变化的硬件参数，无论是控制参数还是硬件参数的变化都可能会使得变流器自身的稳定边界发生偏移，导致模式切换不准确[57]。其次，双模式切换需要准确地辨识电网阻抗，但是电网本身就是一个复杂多变的系统，使得目前电网阻抗辨识准确度普遍不足，难以在实际工程中应用[58]。最后，上述的分析都是基于变流器在切换前和切换后的稳定性，对于切换过程中的稳定性研究不足。并且从系统级的角度来看，



(a) 双模式切换结构



(b) 弱电网下GFL控制切换到GFM控制实验波形

图 3　双模式切换控制

Fig.3　Dual-mode switching control

双模式切换策略是非线性的，属于“非 0 即 1”的过程。两种模式的变流器的外特性本质是完全不同的电源形式，这种非线性切换在大规模切换时瞬间以及切换后对电网会造成的影响还有待分析与研究。

1.3　跟网/构网变流器双模式融合控制策略

双模式控制可以在一定程度上提高在新能源高渗透率场景下并网变流器的稳定性和适应能力，但是该策略本身切换的非线性会给电网带来未知的风险。因此，国内外学者们考虑将跟网型和构网型两种控制模式相融合，使得一台变流器既能表现出跟网型控制的特性，又具有构网型控制的特性。

1.3.1　同步环节融合

跟网型控制模式和构网型控制模式的一大区别就是同步方式的不同[59]，跟网型控制采用 PLL 锁定电网的相位，从而实现与电网的同步并控制并网电流。而构网型控制则是依靠诸如功率同步[41]、直流电压同步[60]等方式实现与电网同步，无需 PLL。基于此，国内外学者们针对同步方式的融合进行了相关研究。文献[61]中提出了一种将 PLL 与功率同步环融合的方式，如图 4 所示。该同步方式既可以随着有功功率的变化而调整变流器自身输出的频

率，也能够应对电网自身频率的波动及时做出相位修正，兼顾构网型和跟网型的特性，能够适应电网阻抗的大范围波动。但是文献[62]指出，该方式在变流器并入 SCR 较大或者较小电网中时可能会出现小扰动失稳的问题，其只适用于 SCR 在中间某一范围内的情况。为此，文献[63]提出一种自适应的功率同步环和 PLL 比重的融合方式，相比于图 4 所示方法，该方法对两种同步方式进行了加权，加权系数根据当前电网 SCR 辨识的结果进行自适应调整。在 SCR 较高时，系统工作在 PLL 同步主导的模式，反之 SCR 较低时，系统工作在功率同步主导的模式。

1.3.2 调制环节融合

上述两种融合方式本质是只是同步环节的融合，并没有真正的融合跟网型和构网型两种电源形式，因此国内外学者致力于真正融合两者电源形式。

文献[64]提出一种融合跟网型和构网型控制电源特性的方法，其控制方式如图 5(a)所示。图中，i_{1abc}、i_{2abc} 分别是电流分配后的两种模式实际电流值；P_{set1}、Q_{set1} 分别是构网型控制模式的有功和无功功率设定；P_{set2}、Q_{set2} 分别是跟网型控制模式的有功和无功功率设定；e_{dq1}、e_{dq2} 分别 dq 坐标系下是两种模式计算出的调制波；k_1、k_2 分别是两个调制波的加权系数。该方法是将一台变流器的控制等效为一台构网型变流器和一台跟网型变流器并联的虚拟系统，在采集到变流器所需的电压电流信号后，对电流信号进行分配，分别送入跟网型控制计算单元和构网型控制计算单元，由两个控制计算单元分别各自调制波的计算，最终对两个的调制信号进行加权，得到变流器的开关信号。该方法中对电流控制进行了分配，旨在用一台变流器去模拟一套真实的构网型控制和跟网型控制并联的系统，仅仅是在输出端对两种电源进行外部特性并联融合。同时，该方法中 PLL 的存在一定程度上影响了其在极弱电网下的稳定性，需要合理设计 PLL 带宽。

在上文方法的基础上，本研究团队在文献[65]中提出了一种无 PLL 的融合方式，控制方式如图 5(b)所示。相较于图 5(a)的控制，该控制结构中去除了跟网型独立控制时的 PLL 结构，统一采用了功率同步所计算出的相位，也无需对输出电流进行分配，而是直接利用实际电流进行构网型控制和跟网型控制的并行计算，最终对并行计算的调制信号进行加权，控制策略的实施效果如图 5(c)所示。SCR

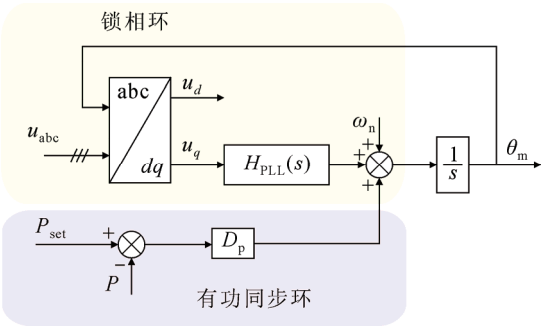
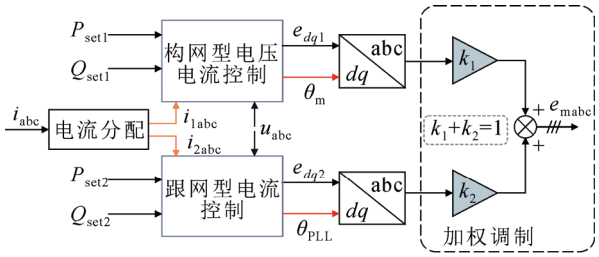
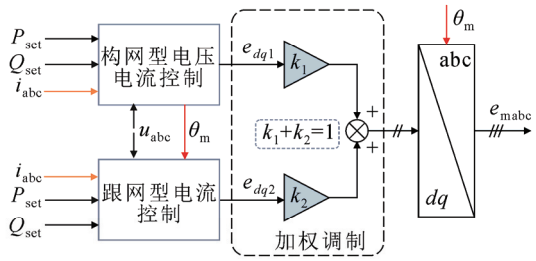


图 4 同步方式融合结构

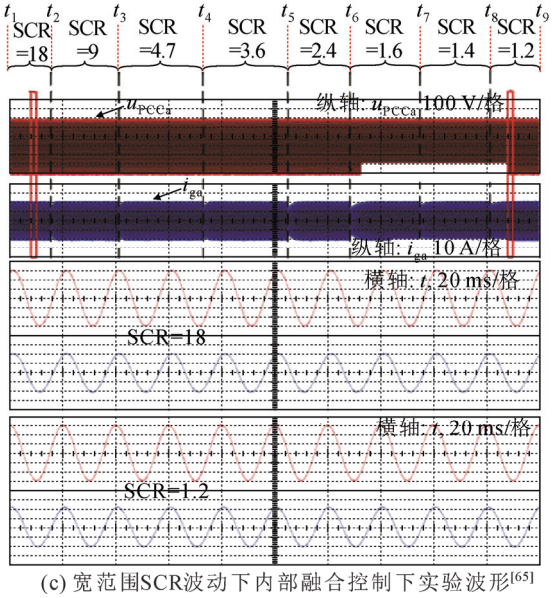
Fig.4 Structure of hybrid synchronous



(a) 外部并联融合结构



(b) 内部融合结构



(c) 宽范围SCR波动下内部融合控制下实验波形[65]

图 5 调制融合控制

Fig.5 Hybrid modulation control

在 1.2 到 18 之间内，变流器都能够保持稳定。相比于文献[64]的外部融合，该方法无需电流分配的过

程，真正让两种控制方式在电源内部合作控制，是对构网型和跟网型控制的整体融合，让变流器具有这两种控制的特性，适应 SCR 宽范围波动的电网环境。该方法是前文双模式切换控制中切换过程的线性化，理论上用一台变流器就可以实现跟网型和构网型控制模式的任意配比，并且其切换的过程大大降低了切换过程对电网的扰动。但是该方法的所采用的功率同步环在强电网下也存在稳定性较弱的问题，需要加入虚拟阻抗[66]等提升其在强电网下的稳定性。

综上，构网型和跟网型相融合的方式能够提高变流器在宽 SCR 波动下的稳定性，但是相比于双模式切换控制，目前对其物理机理的解释并不明确，在多机系统甚至场站级混合系统中的特性也有待研究。

1.4　跟网/构网变流器多机场站混合模式控制

前文介绍的几种控制方式主要针对单台变流器的优化控制。随着能源需求的逐渐变大，学者们将目光逐渐转移到以新能源场站为目标的场站级变流器控制。相比较于单机控制，场站级控制更加灵活、复杂，不仅要确保每个变流器单元的稳定，更要兼顾到整个场站输出的稳定性[67]。

目前，大多数新能源场站里的变流器都是采用跟网型控制，仍然存在弱电网下稳定裕度不足、对系统的支撑能力较弱等问题，场站级的新能源并网也因此面临一系列的宽频振荡的风险。而构网型变流器的振荡稳定性相对较好，因此，两种控制策略的组合形成混合模式运行成为解决场站振荡问题的有效办法[68-70]，如图 6 所示。文献[71]中提出了一种虚拟同步电站的概念，为整个电站的输出设计一个虚拟同步机[72-75]控制器，计算整个场站所需的输出，并根据电站内的每台变流器的工况，将电站所需的总输出分配到每台变流器上，无需对现有变流器的结构进行改变，仅需要在场站的中央控制器中增加相应的运算单元。该方法实现了从跟网型单机到构网型场站的扩展，可以为电网提供一定的惯性和频率支撑，但是变流器自身可能会出现稳定性不足的问题。本研究团队文献[76]中采用分层控制策略，顶层由中央控制器执行，可以根据电网 SCR 和变流器本身数量的变化，并基于 D 分割法定量分配构网型和跟网型控制模式各自的变流器数量；底层由变流器本地控制器负责，根据中央控制器命令控制自身的工作模式。该方案无需增加与频率振荡相关的控制回路，仅需要慢速的顶层与底层之间的通信，即可实现多变流器新能源电站快动态的协同。

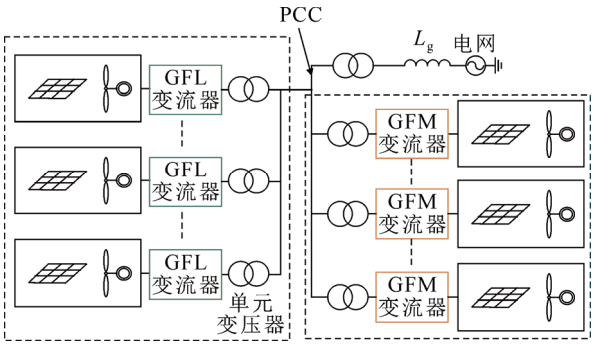


图 6　场站混合模式控制示意图

Fig.6　Schematic diagram of hybrid mode control for station

针对场站中构网型和跟网型控制变流器该如何配置，国内外学者也进行相应的研究。文献[69]基于阻抗模型定量分析了“跟网+构网”混合变流器系统振荡阻尼随构网型变流器占比的变化，并给出了振荡阻尼由负变正的构网型变流器临界接入比例。文献[77]中建立了一种双机等效方法，同时模拟出了场站级和单元级的谐振问题。并且先从场站稳定的角度，考虑电网可能出现的最弱工况，提供了构网型变流器在场站建设初期的容量规划指导。又在此基础上，针对单元级的稳定，提出根据 SCR 的变化实时优化系统中构网型变流器的容量，从而在最大限度的提高新能源发电经济性的同时确保系统的稳定性。文献[78]明确了构网型和构网型控制变流器在对应 SCR 下的主导振荡模态，通过建立的混联系统小信号模型对主导振荡模态进行解耦，并最终建立混联系统的优化配置模型，提出了构网型跟网型混合控制系统的优化配置方法。文献[79]基于矩阵扰动理论，证明构网型变流器的接入相当于增加了 SCR，也提高了跟网型变流器的小扰动稳定性，并分析了系统中构网型变流器的最佳位置。文献[80]也指出，在新能源场站中，相比较于跟网型储能变流器，储能接入构网型变流器中更有利于整个系统稳定运行。文献[81]研究了构网型变流器的容量比例对场站稳定性的影响，研究表明在风场内配置少量构网型机组即可有效改善弱电网下风场的次同步振荡问题，但该文献未考虑其对经济性的影响，尤其是长期运行情况下的场站新能源利用效率和硬件成本问题。同时，目前针对变流器配比优化和布点设计的研究仍然较少，特别是在场站外部系

统波动下的综合考量。并且现有大多数研究集中在集中控制模式，忽视了不同控制模式变流器配比对场站稳定性和经济性的综合影响。

美国国家可再生能源实验室(NREL)主持的一个美国能源部资助的变流器场站级混合模式运行项目，该项目主要围绕构网型变流器面临的研究挑战展开，如图 7 所示。项目提供了针对未来多模式控制新能源场站的布局规划和技术路线，展示 NREL 项目对构网型变流器在未来场站中的关键作用及其对系统稳定性和可扩展性的增强作用[82]，给未来多模式控制的新能源场站布局规划了美好的发展蓝图。

综上所述，现阶段，针对新能源场站控制的研究略显不足，主要集中于场站的小扰动稳定性提升。然而，国标 GB/T 19964—2024[83]对接入电力系统的新能源场站提出了高电压穿越以及连续低-高电压穿越的要求，因此，新能源场站的暂态稳定性提升有待进一步研究。

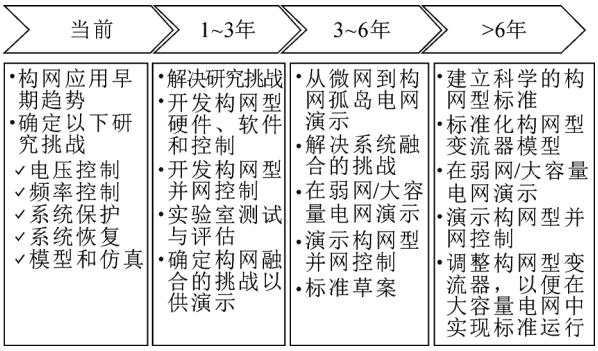


图 7 NREL 跟/构网混合系统布局和研究技术路线图

Fig.7 Hybrid system layout and research technology roadmap for GFL/GFM networks

2 电网非线性变化场景下的跟网/构网变流器的改进控制方法

高渗透率新能源条件下，受到风、光等间歇性能源、电网故障导致设备/支路切除等因素的影响，尤其是变流器具有即插即用的运行特性，导致电网结构/参数呈现非线性变化。变流器自身也含有非常多的非线性环节，采用常规的线性控制理论与方法可能会导致变流器的适应能力不足，稳定性下降甚至失稳[84-85]。因此，变流器的非线性建模与控制也开始受到人们的关注[86-89]。

2.1 变流器即插即用非线性场景下跟网/构网型控制

为满足多机场站系统下变流器设备的灵活使用，并网变流器将出现即插即用等非线性操作。即插即用特性指变流器在不对电网其他部分产生显著影响的情况下，能够连接或脱离电网的能力。在电网非线性变化场景下，即插即用特性不仅涉及变流器的物理连接和通信协议的兼容性，还包括在不同电网状态下保持稳定运行的能力[76]。为此，通常会将即插即用特性定义为在系统动态变化过程中，变流器能够快速、无缝地加入或退出电网的能力，且不会对电网的暂态或稳态运行带来负面影响。然而，该情况下变流器将脱离原本的稳态工作点，此时基于在对变流器在稳态工作点附近的小信号线性化理论设计的控制方案将难以保证系统稳定性，易出现由于失稳导致的脱网等稳定性问题。虽然经过众多国内外学者的研究，目前各种非线性补偿措施已经应用于比例-积分(proportional integral, PI)控制器中，使其控制效果得以改善，但是此类方案往往参数整定复杂、鲁棒性差，实际工程应用效果受限。

除此之外，一些国内外学者提出直接采用非线性控制方法来研究并网变流器的控制问题，包括反馈线性化控制、滑模变结构控制、自抗扰控制等。然而，以上非线性控制方法多是局限于单台并网变流器的控制和设计，一旦扩展到多机的场站级系统，就会出现由于变流器之间的相互交互耦合作用，整个系统可能会出现稳定性等问题，并网端电压、电流发生难以抑制的宽频振荡现象。鉴于此，所需并网变流器非线性控制方法不仅要保证单个并网变流器的稳定性，还要同时满足直接应用于多机系统时仍旧能够稳定运行的要求。

现在研究表明，无源控制是一种有效的解决上述问题的方法。该方法从能量的角度出发，通过互联和阻尼分配无源控制方法进行控制器的设计，控制系统满足无源性条件使其保持稳定。目前，无源控制已被广泛应用于互联动力学系统中[90]，能够满足多个无源子系统并联或反馈连接后的新系统仍是无源且稳定的[91]。由于供给整个系统的能量是由子系统分别耗散的，只要迭代地应用无源性原理，就可以进一步扩展到任意数量相互连接的系统[92]。因此，无源控制的这项属性保证了并网变流器从单机扩展到多机系统时的稳定性[93-94]。这与变流器即插即用的要求不谋而合。

由于具备上述特点，目前该控制已经广泛应用于直流变换器和并网变流器系统中。例如，在直流变换器方面，文献[95]设计了一种自适应能量塑形无源控制算法，以稳定恒定功率负载的直流变换器；

也有文献提出了一种改进的无源控制算法，以改善无源控制方案在直流微电网应用上的实现效果[96]。在并网变流器方面，图 8 所示为目前设计并网变流器无源控制律的主要方法，包括将并网变流器表示成欧拉-拉格朗日方程和端口受控哈密顿方程(port-controlled Hamiltonian，PCH)等形式。例如，文献[97]根据基于欧拉-拉格朗日方程的并网变流器建模方法，得到了使其网侧电流解耦的无源控制律，并通过采用注入阻尼的方法对控制器进行了优化设计，提高了并网变流器控制的动态性能[98]；或针对传统线性 PI 控制在弱电网下稳定性不足的缺点，通过构建并网变流器的欧拉-拉格朗日方程，将无源控制理论引入到系统控制中，能够有效提升了系统稳定性[99]；还有文献通过研究基于 PCH 的无源控制，采用互连与阻尼配置的无源控制，并指出相较于传统线性 PI 控制，无源控制能够有效提升系统的稳定性[100]。本研究团队在前述研究的基础上，提出了基于无源理论的分布式控制方法，解决了跟网型变流器的场站宽频振荡问题，并将其转化为并网变流器的模式切换问题[101]。

上述分析表明，相比于传统的 PI 控制，无源控制在稳定性方面有其明显优势。然而，现有的无源控制并网变流器严重依赖于精确的系统数学模型[101-104]，当并网变流器自身和并网对象的结构/参数未知，以及电网特性发生变化等情况时，现有无源控制的性能会严重下降。一方面，对于并网变流器自身而言，其实际运行时硬件主电路滤波器等参数摄动、线路及开关损耗、甚至传感器测量误差都是不确定性参数，而这些参数在实际中往往难以准确获知，并且会随时间发生变化；另一方面，对于并网变流器并网对象而言，从并网端看去的电网规模越来越大、网架结构越来越复杂，并且受到新能源间歇性、电网故障导致设备/支路切除等因素的影响，并网对象的结构/参数呈现非线性变化，具有不确定性，实际同样难以精确建模。

另外，虽然无源控制方案可以保证多变流器场站的稳定性，但是其不能协同多台变流器的动态性能。即使每台变流器都有完美的阻尼特性，也很难保证整个电站的动态性能。现有多机之间的协同控制通常应用于慢动态要求的场景，比如多台变流器之间的功率调度[105-106]；而对于高频快动态的振荡抑制，基于通信的协同控制将很难发挥作用，因为所需通讯带宽太高。另外的方法是直接利用变流器

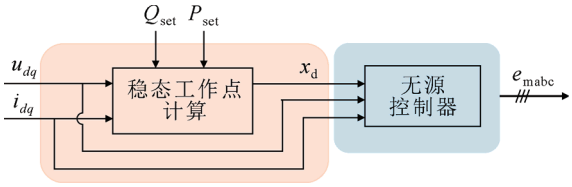


图 8　无源控制结构

Fig.8　Structure of PBC

本地测量信息并提前设定协同规则，从而实现多台变流器之间的相互协同。这种方法表现出分布式控制特性，通常称为分布式协同控制[107]。

综上所述，现有无源控制对精确模型的依赖以及缺乏多机系统之间的阻尼协同限制了其在新能源并网变流器中的适应能力。因此，亟需研究能够感知并网变流器自身和并网对象不确定性的无源控制改进方案，从而保证其在应对新能源电网特性发生非线性变化时仍具有足够的鲁棒性和控制稳定性。

2.2　变流器暂态非线性场景下跟网/构网稳定控制

随着电力系统的不断发展，变流器的暂态稳定性的也受到了广泛的关注[108]。即插即用特性对电网暂态稳定性的影响主要表现在以下几个方面：首先，变流器在即插即用过程中会投入或切除新的变流器设备，这些设备的动态响应特性可能与现有设备不匹配，从而引发暂态不稳定。其次，即插即用过程可能导致电网结构的瞬时变化，例如 SCR 的降低，这会增加系统的复杂性并削弱电网的稳定性。最后，变流器的控制策略在即插即用过程中的动态适应能力也是影响系统暂态稳定性的关键因素。

另外，相较于变流器工作点附近的小扰动模型，变流器暂态稳定性分析需要在传统的同步机暂态分析方法基础上，针对变流器的特性建立非线性大扰动模型。从现有研究来看，一方面，变流器的大扰动暂态稳定过程的工况、模型都更为复杂[109]，基于线性控制理论的方法难以适用，需要引入相关的非线性理论。另一方面，跟网型控制变流器与构网型控制变流器由于锁相方式的不同，因此，两者的暂态稳定性控制方法也不同[110]。

2.2.1　跟网型变流器暂态稳定性改进控制

正如前文所述，跟网型控制变流器本质是一个利用 PLL 同步的受控电流源，因此暂态稳定提升常见方法主要是改进 PLL 结构以及注入电流。

文献[111]构建了弱电网下变流器的最大估计吸引域，并在此基础上刻画了电网对称故障下的有

功和无功电流设定值的可行域，并分析了变流器典型控制参数对该可行域的影响。文献[112]利用等面积法分析了 PLL 所导致的变流器暂态失稳机理，并由此提出电网故障时有功电流和无功电流注入的边界条件。文献[113-114]更是提出了变流器与辅助无功补偿设备的协同电流注入来提高系统的暂态稳定性。

除了电流注入，更有许多国内外学者从 PLL 的角度出发提高系统的暂态稳定性。文献[115]利用改进的等面积法研究 PLL 致变流器暂态失稳机理，并发现 PLL 的积分调节器不利于重新同步，因此，提出在电网故障期间删除 PLL 的积分调节器。文献[116]在此基础上设计了自适应切换的 PLL 结构，能够根据电网的故障与否自适应增加或者去除 PLL 的积分调节器。此外，还有通过为 PLL 设计前馈[117-120]、电压归一化[121]等方法。文献[122]进一步提出可以通过在故障期间冻结 PLL 来提高变流器的低电压穿越能力。

2.2.2 构网型变流器暂态稳定性改进控制

构网型控制变流器大多采用功率同步，模拟同步发电机的转子特性，在稳态具有与同步发电机类似的特性。但是，由于构网型变流器过流能力远低于同步机，因此，在功率器件过流能力得不到提升的情况下，构网型变流器暂态过程中限流显得非常重要。

构网型变流器暂态稳定性提高的主要方法是模式切换法、虚拟阻抗法以及控制环路电流限幅法等。模式切换法主要是利用现有跟网型变流器暂态稳定性提升方法，在电网发生故障后将变流器由构网型切换到跟网型控制模式[123-125]，再利用跟网型控制变流器的相关策略提升变流器的暂态稳定性。但是，在切换过程中的稳定性分析难以保证。虚拟阻抗法主要是通过增加变流器的等效阻抗从而限制暂态过电流[126-129]，例如文献[127]提出了一种虚拟阻抗的动态限流控制策略，如图 9(a)所示。图中，R_V 和 L_V 分别是虚拟阻抗的电阻和电感值。在电网故障发生后，首先根据要求计算当前所需注入的无功功率参考值，再根据无功功率参考值去计算有功功率的参考值，并通过附加虚拟阻抗的电压电流内环计算调制信号，以此从虚拟阻抗和功率两个层面进行动态限流。另外，控制环路限流则是通过修改控制环路的计算结果来限流。例如，文献[130]提出在暂态过程中在有功-频率环增加一个无功附加项，如

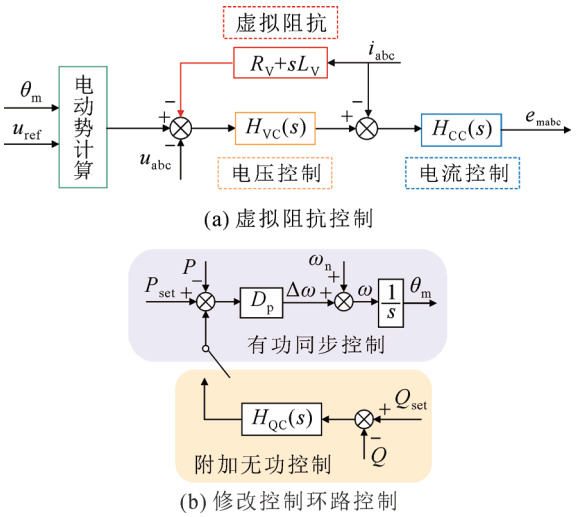


图 9 暂态稳定提升控制结构

Fig.9 Control structure of transient stability enhance

图 9(b)所示。其中，$H_{QC}(s)$为无功功率控制器。在有功环路添加无功分量后，变流器达到一个合适的平衡点从而提高变流器的暂态稳定性。文献[131]证明了当下垂控制变流器在大扰动下电流饱和时可能会发生暂态不稳定，并通过在有功-频率环中添加变流器电压的 q 轴分量以增强构网型变流器的暂态稳定性。文献[132]提出了一种协同控制的方法，通过对有功-频率环和电压环的改造，并配合电流内环的虚拟阻抗，确保构网型变流器电网故障下的稳定性。

综上所述，目前，针对变流器暂态稳定性研究的分析方法主要是以 Lyapunov 函数为代表的非线性方法，但是针对暂态稳定性的控制，大多数控制策略本质仍然是线性控制的方法。

3 展望

目前，新能源并网控制技术的发展已经进入到了一个新的阶段，各种控制方法层出不穷，但是其中大多数研究仍然是局限于线性控制方法，非线性控制策略在新能源并网控制中的应用的关注度还有待提高。并且，随着技术方法的进步，学科融合将会越来越深入，这也必将为新能源并网控制技术提供新的理论和解决方案。对此，有如下技术展望：

1）研究针对新能源场站级的构网控制技术。目前构网型控制技术的研究大部分都是针对单台变流器而言，但是一台变流器对整个电网的影响是微乎其微的，其构网能力远不及一个新能源场站。并且随着我国加快推进沙漠、戈壁、荒漠地区的大型风光基地建设，大规模新能源场站的相关问题将是

未来研究重点。因此，从新能源场站的角度研究构网型控制技术具有很高的价值。

2）进一步研究非线性控制方法在新能源变流器控制中的应用。现有的变流器大多是采用传统的PI控制器，PI控制器本质上是线性控制器，实现简单，但是，一旦其面对一些复杂工况亦或是控制器饱和，将容易进入不稳定区域甚至失控，控制性能将无法保证。此外，无源性控制技术的应用研究也相对不足，仍然停留在单机无穷大系统中，对于变流器在暂态和故障工况下无源控制技术的研究缺失。另外，对于复杂电网感知能力的缺乏和并网对象的不确定性同样会影响了无源控制的精度和鲁棒性，亟需研究在多机系统之间的配合和与其他变流器设备之间的协同。因此，随着新能源的渗透率不断提高，以无源控制为代表的一系列非线性控制技术在新能源并网控制中的应用需要进一步研究与发展。

3）进一步推进大数据和人工智能在变流器中的应用。随着技术发展，大数据和人工智能也逐步渗透新能源领域，目前已经广泛应用于新能源功率预测、电力系统负荷预测[133-134]等领域。未来人工智能也必将在变流器参数优化、灵活控制和状态监测等领域发挥重大作用，全面实现变流器的自抗扰、自适应、自趋优。

4）加强新能源设备之间的互联。随着以5G为代表的通讯技术发展，变流器设备间数据的互联共享，可以从调度层面实时优化变流器的配置和参数，提高设备的稳定运行能力，进一步加快新能源构网的实现。

综上所述，随着新能源发电渗透率不断提高，电网的特性也发生着变化，传统的单一跟网型变流器已经难以适应电网的变化。本文总结了在当前背景下，基于各种不同控制思路、不同控制理论的变流器控制策略，并探讨未来变流器可能的研究方向。新能源电力系统的路还有很长，需要各位学者共同努力，推动我国变流器技术的进一步发展，满足我国能源互联的重大战略，早日实现“碳达峰”、“碳中和”。

参考文献　References

[1] 国家能源局. 国家能源局发布 1-5 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2024-06-28)[2024-07-01]. https://www.nea.gov.cn/2024-06/28/c_1310779865.htm.
National Energy Administration. National energy administration releases national electric power industry statistics for January-May.[EB/OL]. (2024-06-28)[2024-07-01]. https://www.nea.gov.cn/2024-06/28/c_1310779865.htm.

[2] 梁作放，孔令勃，潘　华. 新型电力系统面临的挑战及关键技术[J]. 电力与能源，2024，45(2)：154-159.
LIANG Zuofang, KONG Lingbo, PAN Hua. Challenges and key technologies of the new power system[J]. Power & Energy, 2024, 45(2): 154-159.

[3] 王伟胜. 新能源并网系统宽频振荡分析与抑制[M]. 北京：中国电力出版社，2022：1-4.
WANG Weisheng. Analysis and mitigation of broadband oscillation in renewable energy generation and AC/DC transmission systems[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2022: 1-4.

[4] 卓振宇，张　宁，谢小荣，等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化，2021，45(9)：171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[5] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities, part I: AC/DC system interaction phenomena[C]//CIGRE. France: CIGRE, 1997.

[6] BLAABJERG F, MA K, YANG Y H. Power electronics - the key technology for renewable energy systems[C]//2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte-Carlo, Monaco: IEEE, 2014: 1-11.

[7] 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)：3703-3711.
LIANG Jun, LI Chuanyue. Recent development of grid-connected inverters and weak-grid stabilization[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3703-3711.

[8] 张　兴，曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2018：204-278.
ZHANG Xing, CAO Renxian. Solar Photovoltaic grid-connected power generation and its inverter control[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2018: 204-278.

[9] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.

[10] 张　兴，张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京：机械工业出版社，2012.
ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM rectifiers and its control[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2012.

[11] HE N, XU D H, ZHU Y, et al. Weighted average current control in a three-phase grid inverter with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2785-2797.

[12] 余　洋，王孟云，冯路婧，等. 电流矢量定向下基于反推控制的并网变流器改进 PQ 控制及参数分析[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1385-1392.
YU Yang, WANG Mengyun, FENG Lujing, et al. Improved PQ control and its parameter analysis for grid-connected inverter based on backstepping control under current vector orientation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1385-1392.

[13] 汪　颖，孙建风，肖先勇，等. 改进加权平均电流反馈的 LCL 型逆变器控制方法[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2678-2687.
WANG Ying, SUN Jianfeng, XIAO Xianyong, et al. Control method of LCL inverter based on improved weighted average current feedback[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2678-2687.

[14] 岳之双，刘　黎，田艳军，等. LCL 型并网变流器交直流双侧状态反馈有源阻尼优化控制[J]. 高电压技术，2023，49(2)：860-870.

YUE Zhishuang, LIU Li, TIAN Yanjun, et al. Optimal control for AC/DC bilateral state feedback active damping of LCL grid-connected converter[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 860-870.

[15] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.

[16] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.

[17] 岳菁鹏，安然然，高家元，等. 基于电流正负反馈环效应的弱电网下并网逆变器稳定性分析[J]. 电网技术，2023，47(6)：2423-2433.
YUE Jingpeng, AN Ranran, GAO Jiayuan, et al. Stability analysis of grid-connected inverter based on current positive and negative feedback loop effects under weak grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2423-2433.

[18] 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.

[19] ADIB A, MIRAFZAL B, WANG X F, et al. On stability of voltage source inverters in weak grids[J]. IEEE Access, 2018, 6: 4427-4439.

[20] 杨 苓，陈燕东，周乐明，等. 弱电网下锁相环对三相 LCL 型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(13)：3792-3804.
YANG Ling, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Effect of phase locked loop on the small-signal perturbation modeling and stability analysis for three-phase LCL-type grid-connected inverter in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804.

[21] 陈国平，李明节，许 涛，等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(1)：20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.

[22] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[23] 徐式蕴，王一鸣，孙华东，等. 国外新能源脱网事故对中国电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化，2024，48(13)：1-8.
XU Shiyun, WANG Yiming, SUN Huadong, et al. Insights from renewable energy outage accidents abroad for secure and stable operation of power grids in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 1-8.

[24] 吕雅诗，邹赵悦，吴 超，等. 基于低通滤波器的标幺化锁相环同步稳定性分析[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3848-3858.
LÜ Yashi, ZOU Zhaoyue, WU Chao, et al. Analysis of synchronization stability of the normalization PLL based on low-pass filter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3848-3858.

[25] 段晓宁，李 萍，赵 峰，等. 弱电网下基于电容电压全前馈的 LCL 型并网逆变器稳定性控制[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2140-2151.
DUAN Xiaoning, LI Ping, ZHAO Feng, et al. Stability control of LCL-type grid-connected inverter based on capacitor voltage full feedforward under weak grid condition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2140-2151.

[26] 李 明，张 兴，杨 莹，等. 弱电网下基于加权系数的电网电压前馈控制策略[J]. 电源学报，2017，15(6)：10-18.
LI Ming, ZHANG Xing, YANG Ying, et al. Grid voltage feedforward control strategy based on weighting coefficient in weak grid[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(6): 10-18.

[27] LI M, ZHANG X, GUO Z X, et al. The control strategy for the grid-connected inverter through impedance reshaping in *q*-Axis and its stability analysis under a weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3229-3242.

[28] 杜 燕，张梦梦，杨向真，等. 基于自适应复合导纳校正的并网逆变器稳定方法[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2088-2097.
DU Yan, ZHANG Mengmeng, YANG Xiangzhen, et al. Grid-connected inverter stabilization method based on adaptive composite admittance correction[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2088-2097.

[29] 吴 恒，阮新波，杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报，2014，34(30)：5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.

[30] 潘尔生，王智冬，王 栋，等. 基于锁相环同步控制的双馈风机弱电网接入稳定性分析[J]. 高电压技术，2020，46(1)：170-177.
PAN Ersheng, WANG Zhidong, WANG Dong, et al. Stability analysis of phase-locked loop synchronized DFIGs in weak grids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 170-177.

[31] 杨东升，阮新波，吴 恒. 提高 LCL 型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报，2014，34(15)：2327-2335.
YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.

[32] 杨 明，鲍靖雯，孙岩洲，等. 弱电网下并网逆变器电容电压前馈控制策略[J]. 太阳能学报，2021，42(7)：94-102.
YANG Ming, BAO Jingwen, SUN Yanzhou, et al. Capacitor voltage feedforward control strategy of grid-connected inverter in weak grid[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 94-102.

[33] 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.

[34] 康重庆，姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化，2017，41(9)：2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[35] LI M, ZHANG X, YANG Y, et al. The grid impedance adaptation dual mode control strategy in weak grid[C]//2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). Niigata, Japan: IEEE, 2018: 2973-2979.

[36] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

[37] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.

[38] ROSSO R, WANG X F, 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.

[39] 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.

[40] 刘　辉，于思奇，孙大卫，等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-16[2024-10-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007. html.
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-16[2024-10-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240509.1704.007. html.

[41] 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.

[42] 陈　杰，闫震宇，赵　冰，等. 下垂控制三相逆变器阻抗建模与并网特性分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(16)：4846-4856.
CHEN Jie, YAN Zhenyu, ZHAO Bing, et al. On the impedance modelling and grid-connected characteristics of the three-phase droop controlled inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4846-4856.

[43] 伍文华，周乐明，陈燕东，等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(5)：1411-1420.
WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, et al. Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional grid-connected inverter in the view of sequence impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1411-1420.

[44] 郭梓暄，张　兴，李　明，等. 弱电网下电压控制型逆变器的自适应快速功率控制策略[J]. 电源学报，2023，21(4)：56-66.
GUO Zixuan, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Adaptive rapid power control strategy for voltage-controlled inverter under weak grid conditions[J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 56-66.

[45] 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，2024：1-15 [2024-10-11]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM. 20240124.1816.011.
LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Comparison of impedance characteristics and oscillation mechanism for grid following and grid forming renewable energy[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-15 [2024-10-11]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM. 20240124.1816.011.

[46] MUSCA R, VASILE A, ZIZZO G. Grid-forming converters. A critical review of pilot projects and demonstrators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 165: 112551.

[47] 国家能源局. 国家能源局关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知　国能发新能[2023]66 号[EB/OL]. (2023-09-27)[2024-07-12]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/27/c_1310745991.htm.
National Energy Administration. Circular of the national energy administration on organizing pilot demonstration of renewable energy development national energy development new energy[2023]No.66 [EB/OL]. (2023-09-27)[2024-07-12]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/27/c_1310745991. htm.

[48] 李亚楼，赵　飞，樊雪君. 构网型储能及其应用综述[J/OL]. 发电技术，2024：1-13[2024-10-11]. https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK. 20240619.1715.004.
LI Yalou, ZHAO Fei, FAN Xuejun. A review of grid-forming energy storage and its applications[J/OL]. Power Generation Technology, 2024: 1-13[2024-10-11]. https://link.cnki. net/urlid/33.1405.TK. 20240619.1715.004.

[49] 卫楚奇，石　磊，周百灵，等. 电压型与电流型逆变器序阻抗建模与分析[J]. 电力电子技术，2020，54(10)：107-110.
WEI Chuqi, SHI Lei, ZHOU Bailing, et al. Sequence impedance modeling and analysis of voltage controlled and current controlled inverters[J]. Power Electronics, 2020, 54(10): 107-110.

[50] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.

[51] 李　明. 高渗透率新能源发电并网逆变器阻抗自适应双模式控制研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2020.
LI Ming. Research on Impedance Adaptive Dual-Mode Control of the Grid-Connected Inverter for High-Penetration New Energy Generation[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2020.

[52] LI M, ZHANG X, GUO Z X, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on d-partition method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420-14435.

[53] HWANG C, HWANG L F, HWANG J H. Robust D-partition[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2010, 33(6): 811-821.

[54] LI M, ZHANG X, ZHAO W. A novel stability improvement strategy for a multi-inverter system in a weak grid utilizing dual-mode control[J]. Energies, 2018, 11(8): 2144.

[55] LI M, ZHANG X, GUO Z X, et al. The dual-mode combined control strategy for centralized photovoltaic grid-connected inverters based on double-split transformers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12322-12330.

[56] 周于清，姚　伟，宗启航，等. 基于运行短路比的新能源场站中跟/构网可切换单元的最优配置方法[J]. 电网技术，2024，48(3)：1091-1102.
ZHOU Yuqing, YAO Wei, ZONG Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy stations based on operating short-circuit ratio[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1091-1102.

[57] WANG P, MA J P, ZHANG R, et al. Power self-synchronization control of grid-forming voltage-source converters against a wide range of short-circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 15419-15432.

[58] 李　杨，帅智康，方俊彬，等. 基于阻抗测量的多逆变器系统稳定性校验方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(11)：95-101.
LI Yang, SHUAI Zhikang, FANG Junbin, et al. Stability check method for multi-inverter system based on impedance measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 95-101.

[59] 徐　政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3805-3819.
XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805-3819.

[60] 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.

[61] 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.

[62] 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.

[63] LIU P Y, XIE X R, SHAIR J. Adaptive hybrid grid-forming and grid-following control of IBRs with enhanced small-signal stability under varying SCRs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024,

39(6): 6603-6607.

[64] LIMA L A M, WATANABE E H. Hybrid control scheme for VSC presenting both grid-forming and grid-following capabilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 4570-4581.

[65] HAN F, ZHANG X, LI M, et al. Stability control for grid-connected inverters based on hybrid-mode of grid-following and grid-forming[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(9): 10750-10760.

[66] 杜 燕，朱 轲，杨向真，等. 考虑频率耦合的 VSG 虚拟阻抗优化设计[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5057-5067.
DU Yan, ZHU Ke, YANG Xiangzhen, et al. Optimal design of virtual synchronous generator virtual impedance considering frequency coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5057-5067.

[67] GUO Z X, ZHANG X, LI F, et al. A double-machine equivalent method for evaluating the plant- and unit-level stability of hybrid grid-connected renewable power plants[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023: 1-13[2023-03-03]. https://doi.org/10.17775/CSEEJPES. 2021.08940.

[68] 宗皓翔，张 琛，鲍颜红，等. 跟网型与构网型并网变换器系统的频域建模与同步视角交互稳定机理[J/OL]. 上海交通大学学报，2024 ： 1-22[2024-10-11]. https://doi.org/10.16183/j.cnki. jsjtu. 2023.231.
ZONG Haoxiang, ZHANG Chen, BAO Yanhong, et al. Frequency-domain modeling and synchronization perspective interaction mechanism of GFL-GFM converter system[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024: 1-22[2024-10-11]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.231.

[69] 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.

[70] SUN P, XU H, YAO J, et al. Dynamic interaction analysis and damping control strategy of hybrid system with grid-forming and grid-following control modes[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(3): 1639-1649.

[71] TARRASO A, LAI N B, VERDUGO C, et al. Design of controller for virtual synchronous power plant[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 4033-4041.

[72] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报，2017，37(2)：336-348.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.

[73] 张 兴，朱德斌，徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报，2012(3)：1-6，12.
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012(3): 1-6, 12.

[74] 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.

[75] 吕志鹏，盛万兴，钟庆昌，等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报，2014，34(16)：2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.

[76] LI M, GENG H, ZHANG X. Hierarchical mode-dispatching control for multi-inverter power stations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10044-10054.

[77] 郭梓暄. 电网阻抗变化条件下并网变流器及系统稳定控制研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2022.
GUO Zixuan. Research on stability control of grid-connected converter and system under grid impedance changes[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2022.

[78] 余光正，胡越，刘晨曦，等. 含跟网/构网型混联多馈入系统协调优化配置方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报，1-15[2024-10-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm. 20231220.1539.010. html.
YU Guangzheng, HU Yue, LIU Chenxi, et al. Research on the coordinated optimization configuration method for hybrid multi-infeed systems with grid-following or grid-forming[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-15[2024-10-14]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm. 20231220.1539.010.

[79] YANG C R, HUANG L B, XIN H H, et al. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3563-3573.

[80] 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/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-14[2024-10-11]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231337.
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/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-14[2024-10-11]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee. 231337.

[81] 罗澍忻，韩应生，余 浩，等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术，2023，17(5)：39-48.
LUO Shuxin, HAN Yingsheng, YU Hao, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 39-48.

[82] LIN Y S, ETO J H, JOHNSON B B, et al. Research roadmap on grid-forming inverters[M]. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2020.

[83] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 光伏发电站接入电力系统技术规定：GB/T 19964—2024[S]. 北京：中国标准出版社，2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2024.

[84] 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.

[85] AGORRETA J L, BORREGA M, LÓPEZ J, et al. Modeling and control of *N*-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 770-785.

[86] 许津铭，凌子涵，程 成，等. 并网逆变器非线性特性建模及稳定性研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：370-385.
XU Jinming, LING Zihan, CHENG Cheng, et al. Overview on nonlinear modeling and stability analysis of grid-tied inverters[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 370-385.

[87] 姚 玮，陈 敏，牟善科，等. 基于反馈线性化的高性能逆变器数字控制方法[J]. 中国电机工程学报，2010，30(12)：14-19.
YAO Wei, CHEN Min, MOU Shanke, et al. Digital control method for high-performance inverters based on feedback linearization[J]. Pro-

ceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 14-19.

[88] 郭　伟，魏　妙，李　涛，等. 基于分数阶 PID 滑模变结构的逆变器控制研究[J]. 控制工程，2019，26(7)：1397-1404.
GUO Wei, WEI Miao, LI Tao, et al. Fractional order pid sliding mode variable structure control based inverter circuits[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(7): 1397-1404.

[89] 马　明，廖　鹏，蔡雨希，等. LCL 并网逆变器的自抗扰控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2223-2231.
MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. Active disturbance rejection control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2223-2231.

[90] 王久和. 无源控制理论及其应用[M]. 北京：电子工业出版社，2010.
WANG Jiuhe. Passivity-based control theory and its applications[M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[91] 哈森·K 哈里尔. 非线性系统[M]. 朱义胜，董　辉，李作洲，等，译. 3 版. 北京：电子工业出版社，2022.
KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. ZHU Yisheng, DONG Hui, LI Zuozhou, et al., trans. 3rd ed. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2022.

[92] GUI Y H, WEI B Z, LI M S, et al. Passivity-based coordinated control for islanded AC microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 229: 551-561.

[93] HE Y Y, WANG X H, RUAN X B, et al. Passivity-based design for the plug-and-play single-loop controlled LCL-filtered inverter[C]//2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe). Lyon, France: IEEE, 2020: 1-7.

[94] HARNEFORS L, YEPES A G, VIDAL A, et al. Passivity-based controller design of grid-connected VSCs for prevention of electrical resonance instability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 702-710.

[95] HE W, ORTEGA R. Design and implementation of adaptive energy shaping control for DC–DC converters with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5053-5064.

[96] PANG S Z, NAHID-MOBARAKEH B, PIERFEDERICI S, et al. Toward stabilization of constant power loads using IDA-PBC for cascaded *LC* filter DC/DC converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1302-1314.

[97] LI J G, ZHANG Y J, ZHAO Y M, et al. An improved three-stages cascading passivity-based control of grid-connected LCL converter in unbalanced weak grid condition[J]. IEEE Access, 2021, 9: 89497-89506.

[98] 王久和，慕小斌. 基于无源性的光伏并网逆变器电流控制[J]. 电工技术学报，2012，27(11)：176-182.
WANG Jiuhe, MU Xiaobin. Current control strategy of photovoltaic grid-connected inverter based on passivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 176-182.

[99] 高善诚，廖冬初，陈　俊，等. 有源阻尼与无源控制的弱电网下 LCL 并网逆变器[J]. 电力系统及其自动化学报，2020，32(6)：57-64.
GAO Shancheng, LIAO Dongchu, CHEN Jun, et al. LCL grid-connected inverter under weak grid with active damping and passive control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 57-64.

[100] 程启明，李　涛，程尹曼，等. 基于受控耗散 Hamiltonian 系统模型的光伏准 Z 源 T 型三电平并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报，2019，34(8)：1718-1727.
CHENG Qiming, LI Tao, CHENG Yinman, et al. Control strategy of PV Quasi-Z-Source T-type three-level inverter based on port controlled Hamiltonian with dissipation model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1718-1727.

[101] LI M, GENG H, ZHANG X. Distributed coordinated control for stabilization of multi-inverter power plant[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12421-12430.

[102] ZHAO J P, WU W M, HUANG M, et al. A modified PBC controller using dynamic damping injection for LCL-filtered grid-tied inverter with zero steady state error[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, USA: IEEE, 2019: 602-608.

[103] ZHAO J P, WU W M, SHUAI Z K, et al. Robust control parameters design of PBC controller for *LCL*-filtered grid-tied inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8102-8115.

[104] ZHAO J P, WU W M, SHUAR Z, et al. Parameters design strategy of PBC controller for LCL-filtered grid-tied inverter based on limited steady-state error[C]// 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia). Busan, Korea (South): IEEE, 2019: 1-6.

[105] GUERRERO J M, CHANDORKAR M, LEE T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.

[106] HAN Y, LI H, SHEN P, et al. Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2427-2451.

[107] LEE T L, CHENG P T. Design of a new cooperative harmonic filtering strategy for distributed generation interface converters in an islanding network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 1919-1927.

[108] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 电化学储能系统储能变流器技术要求：GB/T 34120—2023[S]. 北京：中国标准出版社，2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for power conversion system of electrochemical energy storage system: GB/T 34120—2023[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2024.

[109] 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.

[110] 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.

[111] 李霞林，王　智，郭　力，等. 基于最大估计吸引域的 VSC 接入弱网下的锁相环同步暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(20)：7485-7496.
LI Xialin, WANG Zhi, GUO Li, et al. Transient stability analysis of PLL synchronization in weak-grid-connected VSCs based on the largest estimated domain of attraction[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7485-7496.

[112] 曾　平，张　琛，李　征. 电网故障期间全功率风电机组的暂态同步稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：5935-5947.
ZENG Ping, ZHANG Chen, LI Zheng. Control strategy of transient synchronization stability of full-scale wind turbines during grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5935-5947.

[113] MA S K, GENG H, LIU L, et al. Grid-synchronization stability improvement of large scale wind farm during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 216-226.

[114] GENG H, LIU L, LI R Q. Synchronization and reactive current support of pmsg-based wind farm during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1596-1604.

[115] 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.

[116] 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.

[117] 王继磊，张　兴，韩　峰，等. 并网逆变器 LVRT 同步稳定性分析及其优化策略[J]. 太阳能学报，2024，45(2)：309-317.
WANG Jilei, ZHANG Xing, HAN Feng, et al. Synchronous stability analysis and optimization strategy of LVRT for grid-connected inverter[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(2): 309-317.

[118] 裴金鑫，姚　骏，黄　森，等. 电网短路故障下新能源并网变换器的暂态同步机制及其自适应稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：5922-5934.
PEI Jinxin, YAO Jun, HUANG Sen, et al. Transient synchronization mechanism and adaptive stability control strategy for renewable energy grid-connected converter under grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5922-5934.

[119] LIU Y, YAO J, PEI J X, et al. Transient stability enhancement control strategy based on improved PLL for grid connected VSC during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 218-229.

[120] HUANG S, YAO J, PEI J X, et al. Transient synchronization stability improvement control strategy for grid-connected VSC under symmetrical grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 4957-4961.

[121] WU C, XIONG X L, TAUL M G, et al. Enhancing transient stability of PLL-synchronized converters by introducing voltage normalization control[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 69-78.

[122] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. Robust fault ride-through of converter-based generation during severe faults with phase jumps[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1): 570-583.

[123] 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.

[124] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN C, et al. Characteristics and restraining method of fast transient inrush fault currents in synchronverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7487-7497.

[125] ZHANG X, WANG J L, GUO Z X, et al. Low voltage ride through of voltage source converters with droop control[C]//2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Chengdu, China: IEEE, 2021: 1547-1551.

[126] 孙艺鹤. 电网对称故障下构网型并网逆变器低电压穿越控制技术研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
SUN Yihe. Research on the Low Voltage Ride Through Control Technology for Grid-Forming Converters under Symmetrical Grid Faults[D]. Xuzhou, China: China University of Mining and Technology, 2023.

[127] 王盼宝，王　鹏，李珅光，等. 电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3829-3837.
WANG Panbao, WANG Peng, LI Shenguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3829-3837.

[128] 段　青，盛万兴，沈　超，等. 孤岛微电网中虚拟机差异化故障穿越方法[J]. 电网技术，2017，41(10)：3307-3314.
DUAN Qing, SHENG Wanxing, SHEN Chao, et al. Differentiated fault ride-through method for synchronverter in islanded microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3307-3314.

[129] 王世权. 虚拟同步发电机并网逆变器的低电压穿越控制策略研究[D]. 西安：西安理工大学，2022.
WANG Shiquan. Research on low voltage ride through control strategy of virtual synchronous generator grid-connected inverter[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Technology, 2022.

[130] 章雷其，黄林彬，黄　伟，等. 提高下垂控制逆变器虚拟功角暂态稳定性的控制方法[J]. 电力系统自动化，2017，41(12)：56-62，99.
ZHANG Leiqi, HUANG Linbin, HUANG Wei, et al. Control methods for improving virtual power angle transient stability of droop-controlled inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 56-62, 99.

[131] 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.

[132] WANG J L, ZHANG X. Active power and voltage cooperative control for improving fault ride-through capability of grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12301-12311.

[133] 韩富佳，王晓辉，乔　骥，等. 基于人工智能技术的新型电力系统负荷预测研究综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8569-8591.
HAN Fujia, WANG Xiaohui, QIAO Ji, et al. Review on artificial intelligence based load forecasting research for the new-type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8569-8591.

[134] 朱琼锋，李家腾，乔　骥，等. 人工智能技术在新能源功率预测的应用及展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(8)：3027-3047.
ZHU Qiongfeng, LI Jiateng, QIAO Ji, et al. Application and prospect of artificial intelligence technology in renewable energy forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3027-3047.



李　明
1993—，男，博士，副教授，硕导
主要从事大规模新能源发电场站跟网型与构网型混合模式控制技术、稳定性分析与控制、多逆变器电站分布式协同稳定控制技术等方面的研究工作
E-mail: liming2021@tsinghua.org.cn

LI Ming
Ph.D.
Associate professor



耿　华(通信作者)
1981—，男，博士，教授
主要研究方向为可再生能源发电技术、新型电力系统稳定与控制等
E-mail: genghua@tsinghua.edu.cn

GENG Hua
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-07-29　修回日期　2024-10-08　　编辑　陈　蔓