

高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述

张兴, 战祥对, 吴孟泽, 韩峰, 付新鑫, 李明

(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), 安徽省合肥市 230009)

摘要: 随着新能源发电渗透率的不断提升,目前以跟网型控制为主流的并网变流器稳定运行受到严峻挑战,具有主动电网支撑能力且弱电网稳定性强的构网型变流器控制技术受到广泛关注。然而,在高渗透率新能源发电条件下,尤其是末端弱电网中,并网变流器采用单一的跟网或构网模式控制难以兼顾稳定性、经济性和电网支撑性能。为此,国内外学者从2种模式的互补特性出发,提出并研究了跟网/构网混合模式控制策略,以期使并网变流器在弱电网下稳定运行的同时,最大限度地利用新能源,并取得优越的电网支撑性能。文中首先从跟网型与构网型变流器的基本控制结构出发,分析了跟网型和构网型变流器控制性能的互补特性;在此基础上,重点梳理了几种不同技术路线的混合模式控制方案,涉及多种单机混合控制策略和多机的场站级混合控制策略,并详细阐述了各方案的技术研究思路、原理和优缺点;最后,对跟网/构网混合模式控制技术的发展进行了展望。

关键词: 新能源发电; 高渗透率; 并网变流器; 跟网型变流器; 构网型变流器; 混合模式控制

0 引言

作为替代传统化石能源发电的环境友好型电源,光伏、风电等新能源并网发电受到世界各国的重视。截至2023年底,中国可再生能源发电总装机容量达到1 516 GW,其中,光伏和风电装机容量分别突破600 GW和400 GW^[1]。在“双碳”目标的指引下,高渗透率新能源发电是未来新能源发展的必然趋势。

并网变流器是新能源并网发电系统的核心装备,其现有控制方式可分为2类:跟网型(grid-following, GFL)控制和构网型(grid-forming, GFM)控制^[2]。跟网型控制是目前并网变流器的主要控制方式^[3],其不仅能够实现新能源利用率的最大化,而且具有较高的并网电能质量和功率调节速度,工程应用技术成熟^[4]。然而,随着系统中新能源渗透率和电力电子设备比例的不断升高,电网由“同步机主导型系统”逐步趋向于“变流器主导型系统”,具体表现为系统惯性减小,且公共耦合点(point of common coupling, PCC)的短路比(short circuit

ratio, SCR)大幅下降^[5-7],使电网呈现出弱电网状态,而传统跟网型变流器接入弱电网则存在谐振和失稳的风险^[8-13],使得高渗透率条件下的新能源发电系统事故频发^[14-16]。针对上述问题,国内外学者提出了诸多并网变流器跟网型控制改进策略,如调整锁相环控制带宽^[8,17]、电网电压前馈改进控制^[18-19]、电流环参数优化^[20]、主动阻尼控制^[21]等。

实际上,上述改进的跟网型控制策略虽然在一定程度上改善了并网变流器的弱电网稳定性,但是极弱电网下的稳定性和对电网的快速主动支撑性能依然不足^[22-23]。为此,具有主动支撑能力且弱电网稳定性强的构网型变流器技术备受学界和业界关注,并形成研究热点^[24-29]。然而,构网型控制存在功率调节速度慢、多机耦合强、强电网稳定性和经济性差等问题^[30-34],且当前中国的新能源并网发电系统处于由“同步机主导型系统”向“变流器主导型系统”的过渡期^[35-36]:一方面,并网点的SCR急剧下降,电网呈现弱电网甚至极弱电网特性,需要并网变流器具有构网型的主动电压支撑能力;另一方面,这种末端弱电网应用场景的系统频率波动较小,一般仍要求实现属于跟网型特征的新能源发电最大功率点跟踪。因此,迫切需要在成熟应用的跟网型控制基础上,植入构网型控制的“弱电网稳定性好”和“主动支撑能力强”等优点,实现高渗透率新能源发电的稳定高效运行。据此,国内外学者结合2种控制的优点

收稿日期: 2024-01-14; 修回日期: 2024-05-08。

上网日期: 2024-07-06。

国家自然科学基金联合基金资助项目(U23A20655);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52207211);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2024HG-TB0259)。

进行了大量研究,提出了多种跟网/构网混合模式控制策略。

本文在跟网型和构网型变流器典型控制结构的基础上,分别阐述和分析了跟网/构网不同混合模式控制的基本原理和优缺点,涉及多种单机混合控制策略和多机的场站级混合控制策略,最后展望了跟网/构网混合模式并网变流器控制技术的发展趋势。

1 跟网型、构网型并网变流器的典型控制结构及其混合模式控制的提出

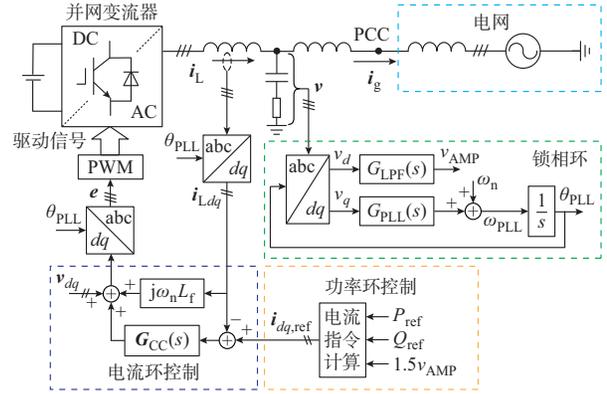
1.1 跟网型并网变流器的典型控制结构及优缺点

跟网型变流器的典型控制结构如图1(a)所示,包括锁相环、电流环控制和功率环控制。图中: v 为滤波电容支路三相电压; i_L 为变流器侧三相电感电流; i_g 为三相并网电流; ω_{PLL} 、 θ_{PLL} 和 v_{AMP} 分别为锁相环输出的电网电压角频率、相位和幅值; P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为功率环的有功和无功功率参考值; $i_{dq,ref}$ 为 dq 坐标系下的电流参考值; s 为拉普拉斯算子; $i_{L,dq}$ 为 dq 坐标系下的变流器侧电感电流; $v_{dq}=[v_d, v_q]$ 为 dq 坐标系下的滤波电容支路电压; e 为调制电压参考值; ω_n 为系统额定角频率; L_f 为变流器侧滤波电感值; $G_{L,PF}(s)$ 为低通滤波器的传递函数; $G_{PLL}(s)$ 为锁相环中环路滤波器的传递函数; $G_{CC}(s)$ 为电流调节器的传递函数矩阵。跟网型控制通过基于电网锁相的电流控制实现无静差的功率输出,使变流器的外特性表现为基于锁相环同步的受控电流源特性^[37],如图1(b)所示。图中: I_{dq} 为跟网型控制等效电流指令; Z_{CC} 为电流控制等效并联阻抗; I_{GFL} 为跟网模式输出电流; I_{dq} 、 Z_{CC} 、 I_{GFL} 均为复矢量。

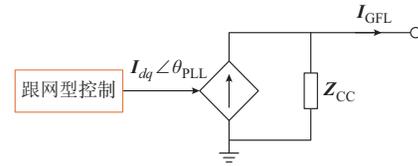
跟网型控制在强电网下的稳定性好,功率响应速度快,其不仅能够通过最大功率点跟踪实现新能源利用率的最大化,经济性较好,而且技术较为成熟,是现阶段新能源并网变流器的主流控制技术。然而,在弱电网下,锁相环和电网电压前馈引入的正反馈机制降低了跟网型控制的小扰动稳定性^[38],容易引起谐波谐振。此外,跟网型变流器的电压支撑能力弱,暂态稳定性差,在电网故障情况下容易发生大规模脱网事故,影响新能源发电的安全稳定运行^[4]。

1.2 构网型并网变流器的典型控制结构及优缺点

构网型变流器的典型控制结构如图2(a)所示,其结构主要由基于下垂控制的功率环和电压-电流双闭环控制组成。图中: i_{gdq} 为 dq 坐标系下的并网电流; P 和 Q 分别为变流器输出的有功和无功功率; ω 为功率环输出的角频率; V 为功率环输出的内电势幅值; θ_{PSC} 为功率环输出的参考角度; $v_{dq,ref}=[v_{d,ref}, v_{q,ref}]$ 为 dq 坐标系下的电容电压参考值; $i_{L,dq,ref}$ 为 dq 坐标系下的电感电流参考值; V_n 为变流器输出电压额定值; $G_{PC}(s)$ 和 $G_{QC}(s)$ 分别为功率环有功和无功功率下垂控制的传递函数; $G_{VC}(s)$ 为电压调节器的传递函数矩阵;PWM表示脉宽调制。构网型并网变流器通过下垂控制实现了自同步的构网型功率输出,其外特性表现为基于功率同步的受控电压源特性^[39],如图2(b)所示。图中: V_{dq} 为构网型控制等效电压指令; Z_{VC} 为电压控制等效串联阻抗; I_{GFM} 为构网模式输出电流; V_{dq} 、 Z_{VC} 、 I_{GFM} 均为复矢量。



(a) 跟网型变流器的典型控制结构图



(b) 跟网型变流器等效电路示意图

图1 跟网型变流器的典型结构

Fig. 1 Typical structure of grid-following converter

$[v_{d,ref}, v_{q,ref}]$ 为 dq 坐标系下的电容电压参考值; $i_{L,dq,ref}$ 为 dq 坐标系下的电感电流参考值; V_n 为变流器输出电压额定值; $G_{PC}(s)$ 和 $G_{QC}(s)$ 分别为功率环有功和无功功率下垂控制的传递函数; $G_{VC}(s)$ 为电压调节器的传递函数矩阵;PWM表示脉宽调制。构网型并网变流器通过下垂控制实现了自同步的构网型功率输出,其外特性表现为基于功率同步的受控电压源特性^[39],如图2(b)所示。图中: V_{dq} 为构网型控制等效电压指令; Z_{VC} 为电压控制等效串联阻抗; I_{GFM} 为构网模式输出电流; V_{dq} 、 Z_{VC} 、 I_{GFM} 均为复矢量。

构网型控制具有弱电网稳定性好和电压支撑能力强的优点,在暂态情况下可以主动支撑电网,且具备独立运行能力^[40];其缺点为功率响应速度慢,最大功率点跟踪性能差。此外,构网型变流器多机耦合强,一般需要数倍的强过载能力设计,经济性相对较差。实际上,构网型并网变流器适用于同步机占比较低、系统频率波动或需要独立运行的分布式微电网场合,在未来以新能源为主体的新型电力系统中,构网型技术还有待进一步的突破和发展^[41]。

上述分析表明:基于电流源特性的跟网型控制功率响应快,经济性好;而基于电压源特性的构网型控制电网支撑能力强,经济性差。可见,两者优势具有互补性。从控制结构上看,跟网型控制和构网型控制都具有功率环和电流环,结构上具有一定的相似性。

1.3 高渗透率新能源发电特征及跟网/构网混合模式并网变流器控制的提出

现阶段,中国高渗透率新能源发电主要呈现长

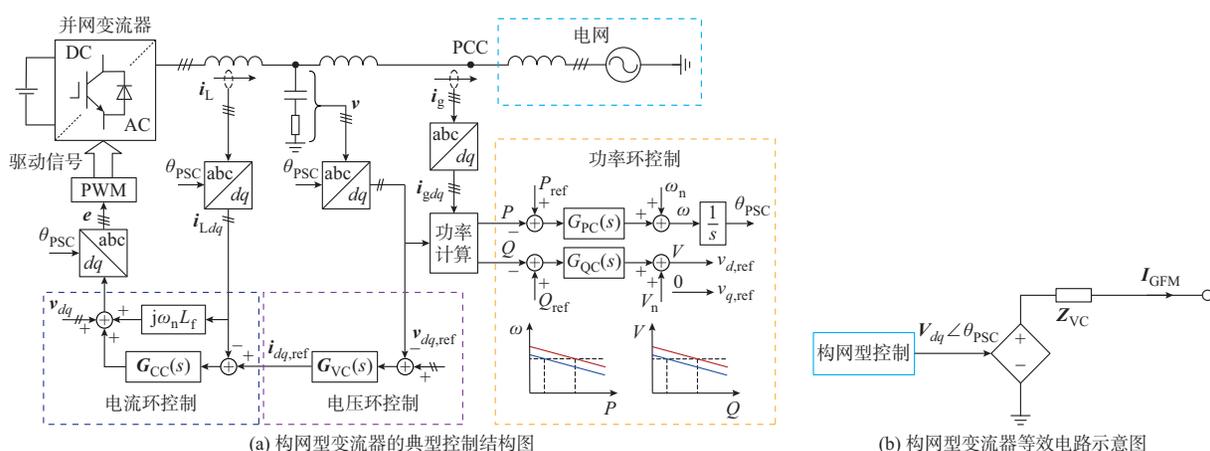


图2 构网型变流器的典型结构
Fig. 2 Typical structure of grid-forming converter

距离输电线路以及多级变压器汇集升压导致电网阻抗大幅增加所形成的末端弱电网特征,并网点SCR急剧下降,电网呈现出弱电网甚至极弱电网特性。然而,这种末端弱电网应用场景的系统频率一般波动较小。因此,为了进一步提升高渗透率条件下末端弱电网新能源的消纳能力,提高并网变流器的弱电网稳定性和电压支撑能力已成为迫切需要解决的关键问题。

针对这一问题,目前主要有“改进型跟网型控制”和“构网型控制”2种技术路线^[42]。其中,“改进型跟网型控制”虽然能在一定程度上改善并网变流器的弱电网稳定性,但是对电网电压的快速支撑能力依然不足。而“构网型控制”虽然较好地提高了并网变流器的弱电网稳定性以及电网电压支撑性能,但是功率调节速度慢,难以满足最大功率点跟踪的要求,并存在多机耦合谐振等问题。可见,单一跟网/构网型控制模式的新能源并网变流器难以在提升弱电网稳定性和电压支撑能力的前提下,实现快速的功率调节以充分消纳新能源。

为此,相关研究学者从跟网型变流器和构网型变流器的控制结构及互补特性出发,研究并提出了多种跟网/构网混合模式控制策略。从混合模式构建的技术思路出发,跟网/构网混合模式控制主要包括以下几类:切换型混合模式、融合型混合模式、补偿型混合模式、同步混合型以及场站级的混合模式控制。

2 切换型混合模式控制

切换型混合模式控制的基本出发点为:并网变流器在强电网条件下采用跟网模式控制,在弱电网条件下采用构网模式控制,根据电网条件进行切换以实现2种模式的优势互补。基于上述思路,文献

[38]提出了基于电网阻抗自适应的跟网/构网双模式切换控制策略,其控制框图如图3(a)所示,主要包括电网阻抗辨识环节、双模式切换环节及跟网/构网模式控制环节。图中: i_{PCC} 和 u_{PCC} 分别为电流扰动注入后PCC的电流和电压响应; L_g 为电网阻抗的感性分量; e_g 为远端电网电压。该控制方案中并网变流器通过基波阻抗辨识判断电网强弱,自适应选择运行模式,有效提升了电网阻抗适应性。

实际上,为兼顾新能源并网发电的经济性,并网变流器在一般情况下应尽量采用动态特性较快的跟网型控制或改进的跟网型控制^[43],仅在极弱电网条件下切换至构网型控制,故需要定量分析切换边界。针对上述问题,文献[44]提出了一种基于D分割法的并网变流器参数稳定域分析方法,研究了在幅值裕度、相位裕度和系统带宽等多性能指标约束下的参数稳定区域。文献[45]进一步指出,跟网模式的并网稳定性与新能源实际输出功率相关,采用运行短路比(operating short circuit ratio, OSCR)作为切换指标可同时反映电网阻抗和新能源功率对系统稳定性的影响,并基于此提出了跟网/构网可切换单元的最优配置方法,对提升场站在极弱电网下的稳定性具有较好作用。文献[46]提出了考虑电网阻抗频段特征的切换策略,实现了复杂电网条件下并网变流器的谐波谐振抑制。上述研究针对不同问题提出了切换指标,为变流器进行跟网/构网模式的切换提供了理论依据,有助于切换型混合模式控制在末端弱电网中的进一步应用。此外,极弱电网下,跟网型控制的稳定性受锁相环影响较大,可进一步结合广义阻抗判据^[47]等方法有针对性地分析同步环路参数对切换边界的影响。

文献[48]进一步对双模式切换控制的应用进行了推广,提出了在由2台并网变流器和双分裂变压

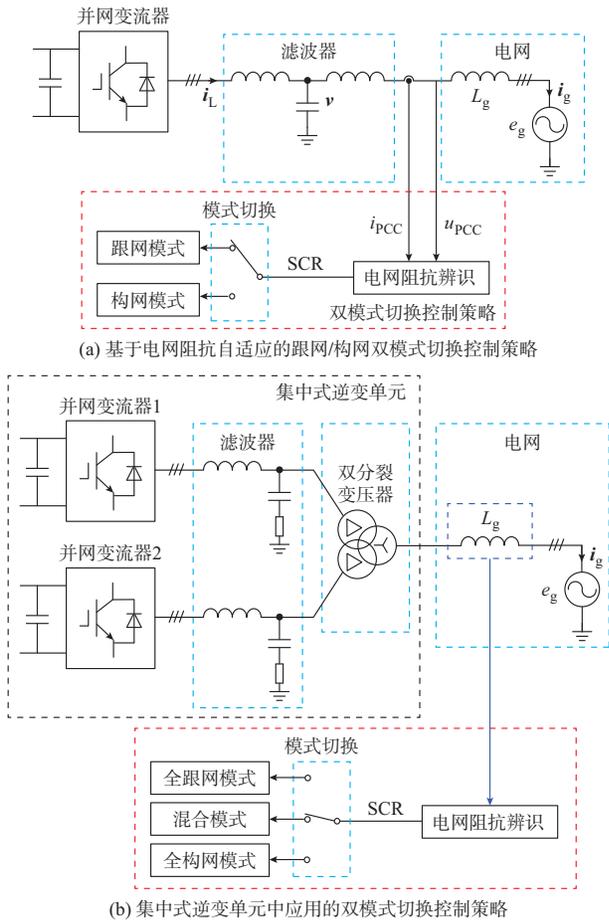


图3 切换型混合模式控制示意图
Fig. 3 Schematic diagram of switching hybrid mode control

器组成的集中式逆变单元中应用的双模式切换控制策略,如图3(b)所示。通过检测电网阻抗,自适应控制切换集中式逆变单元的运行模式为全跟网模式、混合模式和全构网模式,从而提升其在SCR大幅波动下的并网稳定性。

上述方法实现了跟网/构网双模式的自适应切换,能够综合2种并网模式的优点,提升并网变流器的电网阻抗适应性,但电网阻抗辨识技术尚不成熟,目前在工程应用中存在一定的难度^[49]。

3 融合型混合模式控制

为了避免切换型混合模式控制中电网阻抗辨识的困难,可考虑将跟网型“电流源”和构网型“电压源”的双源进行组合,实现无需电网阻抗辨识的融合型混合模式控制,使变流器同时具有跟网和构网的特性。双源融合型混合模式控制包括双源并联和双源串联2种方式,如图4(a)和(b)所示,对应的控制策略分别讨论如下。

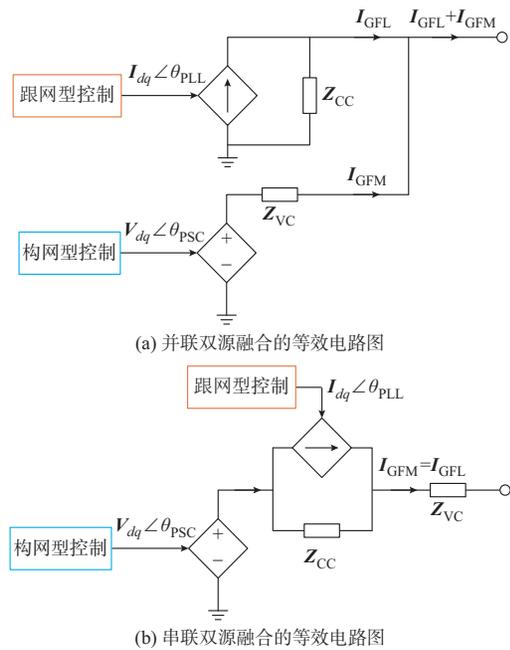


图4 融合型混合模式控制等效电路示意图
Fig. 4 Schematic diagram of equivalent circuit of integrated hybrid mode control

3.1 并联型双源融合控制

并联双源融合控制的基本出发点为将跟网型控制和构网型控制进行一定的并联组合,实现跟网/构网型控制特性的融合。文献[50]基于此提出了一种并联双源融合控制方法,提高了变流器的惯量响应性能。该方案中调制波输出为跟网模式和构网模式控制输出调制信号的加权和,如图5(a)所示。图中: P_{ref1} 和 Q_{ref1} 分别为构网模式的有功和无功功率参考值; P_{ref2} 和 Q_{ref2} 分别为跟网模式的有功和无功功率参考值; $i_{L,dq1}$ 和 $i_{L,dq2}$ 分别为构网模式和跟网模式控制的电流环反馈量; e_{dq1} 和 e_{dq2} 分别为 dq 坐标系下构网模式和跟网模式控制输出的调制电压参考值; e_1 和 e_2 分别为构网模式和跟网模式控制输出的调制电压参考值; k_1 和 k_2 分别为构网模式和跟网模式的并联融合比例系数。该控制中完全保留了跟网模式控制和构网模式控制的原有结构,并给出了并联电流的分配算法,如图5(b)所示。图中: R_f 为实际变流器侧的等效电阻; Y_f 为变流器侧滤波支路的等效导纳; L_{f1} 和 R_{f1} 分别为虚拟构网型“电压源”的滤波电感和等效电阻; L_{f2} 和 R_{f2} 分别为虚拟跟网型“电流源”的滤波电感和等效电阻; i_{L1} 和 i_{L2} 分别为构网模式和跟网模式控制的分配电流。

另外,文献[51]提出了一种基于功率同步的无锁相环并联双源融合控制策略,控制结构如图5(c)所示,其舍去了跟网型控制中的锁相环结构,统一采用构网型控制功率环的指令及输出角度。因此,该

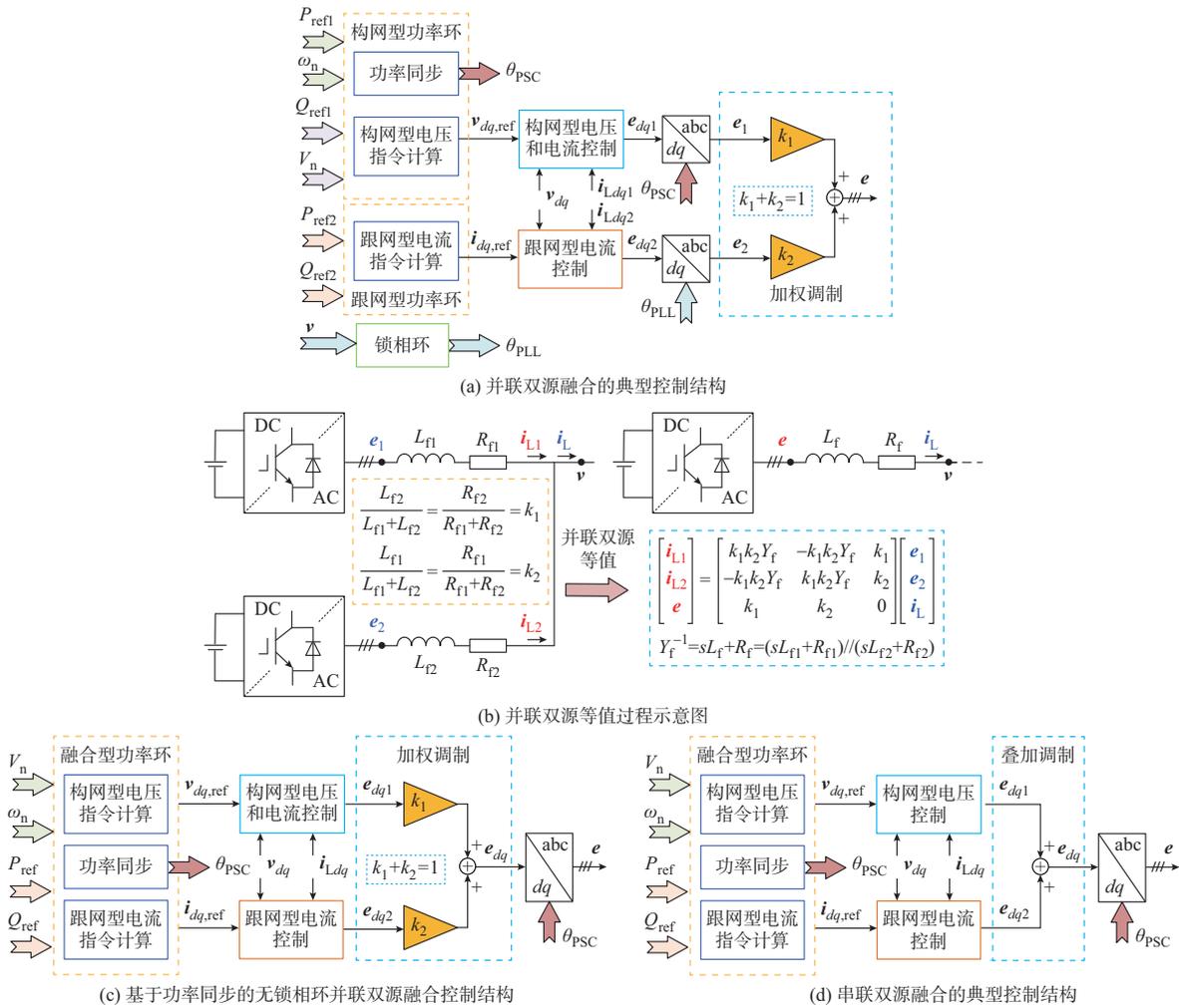


图 5 融合型混合模式控制示意图
Fig. 5 Schematic diagram of integrated hybrid mode control

方案可显著减小并网变流器输出阻抗的容性负阻区,提高其在宽SCR范围内的稳定性。图5(c)中: e_{dq} 为dq坐标系下混合模式控制的调制电压参考值。

并联双源融合控制的输出主要体现为电压源和电流源并联特性,具有较好的电网支撑性能。然而,有无锁相环的并联双源融合控制都存在强电网稳定性弱的问题,一般需要加入虚拟阻抗^[52]进行改进,而虚拟阻抗的加入一定程度影响了电网的支撑性能;而对于有锁相环的并联双源融合控制系统而言,锁相环带宽一定程度上影响了弱电网稳定性。

3.2 串联型双源融合控制

为了改善变流器在强电网下的功率调节能力,可以考虑在构网型“电压源”上串联一个具有快速电流响应能力的跟网型“电流源”,其控制结构如图5(d)所示,其中,2种模式的功率指令相同。文献^[53]采用串联双源融合控制结构来改善构网型变流器的有功调节性能,将具有功率前馈的电流环的输

出作为构网型控制输出电压指令的补偿项,通过调节电压,实现强电网下功率的快速响应,并且显著减小了超调。

然而,为进行电流调节,串联电流源的内阻需要具有一定的基波阻抗值,降低了变流器在弱电网下电压支撑的快速性。此外,上述具有功率前馈的电流环虽然改善了强电网下构网型控制的功率响应性能,但由于串联电流源的输出仅补偿了构网型控制的输出电压指令,并不能直接改善构网型控制强电网下的稳定性,一定程度上也影响了电网的支撑性能。为此,文献^[54]和文献^[55]分别进行了进一步的改进。

4 补偿型混合模式控制

双源融合控制的主要特征为跟网型控制和构网型控制的组合。实际上,还可以考虑从跟网型控制的电压补偿或者构网型控制的电流补偿2个角度出发进行改进,主要有基于电压补偿的混合模式控制、

基于电流补偿的混合模式控制和基于电压-电流补偿的混合模式控制这3类。

4.1 基于电压补偿的混合模式控制

从跟网型控制角度出发,可以考虑在跟网型电流环基础上,增加具有倒下垂机制的功率外环,提高其电网支撑能力,以实现基于电压补偿的混合模式

控制^[56-58],典型控制结构如图6(a)所示。图中: P_d 和 Q_d 分别为电压补偿输出的有功和无功功率指令; D_p 和 D_q 分别为有功和无功控制的下垂系数; $K_{pll,p}$ 和 $K_{pll,i}$ 分别为锁相环比例-积分(PI)环节的比例和积分系数。

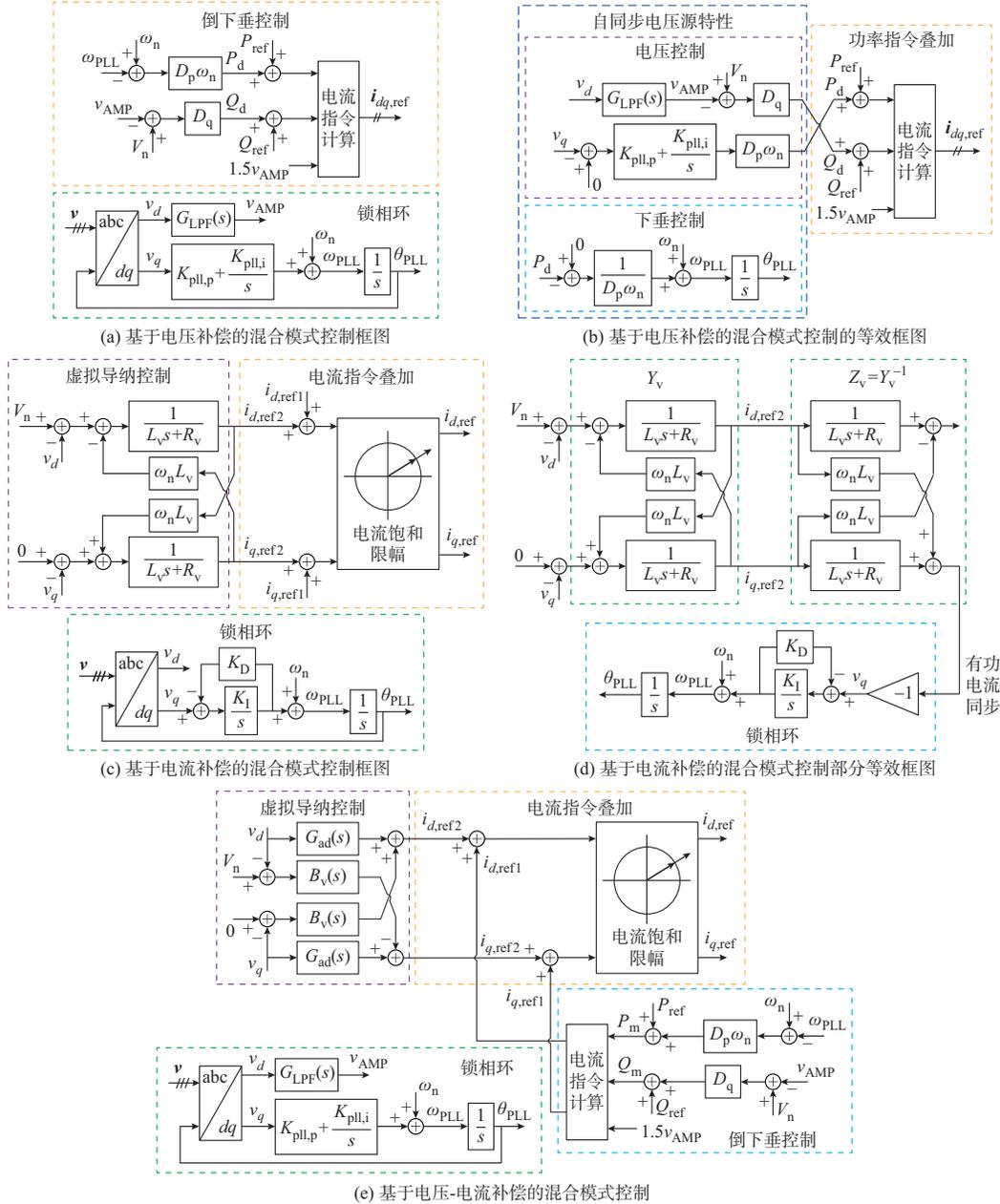


图6 补偿型混合模式控制示意图
Fig. 6 Schematic diagram of compensatory hybrid mode control

为了阐述上述控制的跟网/构网混合特性,可将图6(a)等效为图6(b),其包括电压控制、下垂控制和功率指令叠加3个部分。

基于电压补偿的混合模式控制能够模拟同步机的稳态支撑功能,但变流器输出阻抗与下垂控制直

接耦合,导致其难以模拟低输出阻抗的强电压源特性,动态支撑的电流响应速度较慢。在稳定特性方面,由于该控制方案通过对电网电压幅值及频率的观测来提供支撑,故其强电网稳定性较好,但锁相环仍然对系统稳定有一定影响^[56],在弱电网下容易引

起失稳。

4.2 基于电流补偿的混合模式控制

从构网型控制角度出发,可以考虑通过在基于虚拟导纳的电压环基础上,引入跟网电流指令补偿和锁相环同步控制,增强其功率响应能力,以实现基于电流补偿的混合模式控制^[59-62],典型控制结构如图6(c)所示。图中: L_v 和 R_v 分别为虚拟导纳对应阻抗的感性及阻性分量; $i_{d,ref1}$ 和 $i_{d,ref2}$ 分别为跟网模式和构网模式的电流 d 轴参考值; $i_{q,ref1}$ 和 $i_{q,ref2}$ 分别为跟网模式和构网模式的电流 q 轴参考值; K_D 和 K_I 分别为锁相环惯性环节的比例和积分系数。其中,锁相环实现了类似构网型控制功率环的有功同步和惯量响应功能,图6(c)中的虚拟导纳和锁相环部分可等效为图6(d)。图中: Y_v 为虚拟导纳, Z_v 是 Y_v 的逆元素。由图可见,在基频附近,锁相环的反馈主要与 d 轴虚拟导纳控制输出电流指令相关,变流器具有 d 轴电流-频率的下垂特性。

基于电流补偿的混合模式控制中虚拟导纳环节可以模拟低阻抗电压源,提供动态电压支撑能力,加快电流响应速度。此外,虚拟导纳还可提高变流器的强电网稳定性,并使锁相环的同步和有功功率关联,保证变流器的弱电网稳定性,故系统可在宽SCR范围内稳定运行。然而,虚拟导纳的加入一定程度上影响了弱电网下变流器的电压支撑性能。

4.3 基于电压-电流补偿的混合模式控制

为实现变流器动态和稳态支撑能力的进一步优化,有学者考虑上述2种方案的结合,同时增加跟网型控制的电网支撑性和构网功率控制的快速性,以实现基于电压-电流补偿的混合模式控制^[63],如图6(e)所示。图中: P_m 和 Q_m 分别为混合模式的有功和无功功率参考值; $B_v(s)$ 为虚拟基波电纳的传递函数; $G_{ad}(s)$ 为有源阻尼控制的传递函数。

该控制方案通过虚拟导纳实现电压动态支撑,通过倒下垂控制进行稳态支撑,并基于锁相环来模拟惯量响应,分别实现不同的动稳态支撑功能。文献[63]通过仿真和实验证明其不仅可在强电网和极弱电网下稳定并网,还可实现暂态电压支撑、孤岛运行和黑启动等功能。但该控制方案中多个环路之间存在耦合,影响了系统稳定性的分析和参数设计。

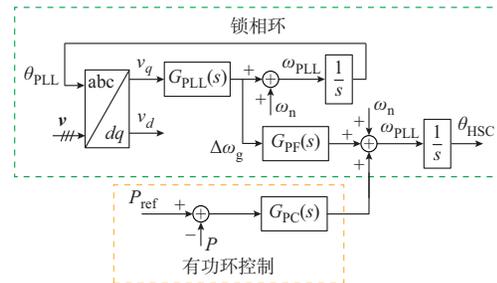
上述几种补偿型混合模式控制中,电网支撑和功率调节分别由独立的控制环节实现,多机之间耦合小,在强电网下稳定性较好。然而,上述控制下变流器在基频附近具有一定的输出阻抗,影响了弱电网下的电压支撑能力。

5 同步混合型控制

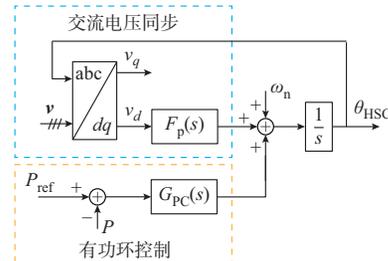
同步环节对并网变流器的稳定性和动态性能具有重要的影响^[64],跟网型控制主要采用锁相环进行同步,而构网型控制则通常采用功率环进行自同步^[65]。因此,可以考虑从锁相环/功率环同步混合的角度实现跟网/构网的混合控制。目前,同步混合型控制主要可分为电网频率前馈控制和电网电压反馈控制2类。

5.1 电网频率前馈控制

基于下垂功率环的并网变流器,通常设定的频率基准为50 Hz,然而实际电网频率存在一定的波动,变流器的输出有功功率随之变化显著^[66]。通常期望在电网频率的正常波动范围内,并网变流器输出恒定的有功功率,无须调频,为此可以通过锁相环或锁相环控制获取电网频率,并前馈至原功率环的频率输出,以抵消电网频率正常范围波动的影响,即基于电网频率前馈的同步混合型控制^[67-70],典型控制结构如图7(a)所示。图中: $\Delta\omega_g$ 为锁相环输出的电网频率波动量; $G_{PF}(s)$ 为电网频率前馈控制的传递函数; θ_{HSC} 为同步混合型控制输出的参考角度。由于具有独立的锁相环,可以进一步抑制电网谐波和负序电压对电网频率观测结果的影响。



(a) 电网频率前馈型同步混合控制结构



(b) 电网电压反馈型同步混合控制结构

图7 同步混合型控制示意图

Fig. 7 Schematic diagram of hybrid synchronous control

该控制方案可提高有功环对电网频率波动的抗扰性能,改善有功功率响应的动态特性。然而,文献[70]基于复转矩分析法研究发现,锁相环在反馈环路中引入了负阻尼转矩,不利于并网变流器的弱电网稳定运行,故电网频率前馈型同步混合控制难以

适应电网阻抗的大幅波动。

5.2 电网电压反馈控制

为提升功率环同步在强电网下的稳定性,可以考虑在原功率环输出频率的基础上,加入电网电压反馈的频率,如图7(b)所示。其中,电网电压反馈环节类似于锁相环结构,其控制的传递函数为 $F_p(s)$,通过合理设计控制器参数,可以提升变流器对不同阻抗电网的适应性^[71-72]。此外,相关研究表明,加入电网电压反馈对不同功率环控制的暂态稳定性均有一定改善作用^[73-74]。

以上2种同步混合型控制分别改善了变流器对电网频率和阻抗波动的适应性,对混合模式系统同步性能及稳定性的提升具有重要作用,但是其与前文介绍的几种混合模式控制的兼容性及其改进控制还有待进一步研究。

6 场站级混合模式及其控制

上述讨论的混合模式控制主要针对单台变流器或逆变单元。在新能源场站中实现混合模式控制的方法可分为3类:第1类是从设备层面出发,场站内发电单元均采用跟网/构网混合模式控制的并网变流器;第2类是从系统层面跟网型和构网型发电单元的配置出发,在多数跟网型发电单元运行的系统中加入部分构网型发电单元,以形成系统级的配置混合;第3类是从场站控制层面出发,采用系统级分层控制,以场站级构网型控制器作为功率外环,其输出功率指令通过通信控制场站内的各跟网型发电单元,以形成场站级的混合模式调度控制。

现阶段,新能源场站中并网变流器主要采用跟网型控制,单机混合模式控制的场站级应用技术尚未成熟。目前,国内新能源场站一般配备一定容量储能^[75],为变流器的构网型控制提供了客观条件^[76]。因此,通过配置部分储能变流器运行在构网模式,而新能源变流器仍运行在跟网模式,在物理层面上实现场站级跟网/构网混合模式控制,成为改善场站的电网适应性和主动支撑性能的可行方案,其典型控制结构如图8所示。

当前,新能源场站并网安全稳定运行面临的主要挑战为高阻抗弱电网下场站级不稳定问题。采用场站级跟网/构网混合模式控制来提升多机系统的弱电网稳定性,是实现高渗透率新能源高效发电和灵活并网的有效途径^[77]。文献[78]从电路振荡的角度出发,分析了构网型变流器对系统稳定性的影响机理,指出构网型变流器的“正电阻+电感”特性能够削弱跟网型变流器的“负电阻+电容”特性,改善新能源场站接入交流电网的振荡稳定性。文献

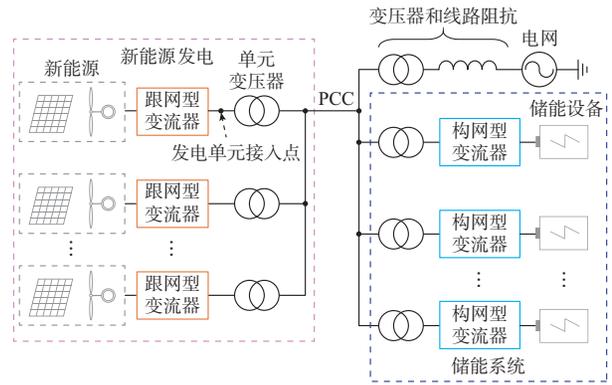


图8 场站级混合模式控制示意图
Fig. 8 Schematic diagram of station-level hybrid mode control

[79]指出,当配置构网型变流器基波阻抗远小于电网基波阻抗时,跟网/构网混合场站整体表现为同步机的支撑特性。此外,国内外专家学者还从电网强度^[80]、系统模态交互^[81]、同步稳定性^[82]、电压稳定性^[83]等角度,对构网型变流器改善传统跟网型变流器并网稳定的机理进行了大量研究。

考虑到系统的经济性,如何优化配置构网型变流器,以最小成本实现系统所需的稳定裕度和主动支撑性能,是目前亟待解决的问题。针对场站中现有跟网型变流器的构网型控制改造问题,文献[84]基于阻抗模拟和分层控制,提出了一种上层采用构网型控制、底层采用PQ控制的虚拟同步电站方案。该方案可在不修改原跟网型变流器的内部控制的前提下,聚合多机功率实现场站级主动支撑,但需要进行实时通信。针对场站的优化调度问题,文献[85]提出了一种采用分层控制结构的多变流器系统分层模式调度控制策略,上层控制采用基于D分割法的模式调度控制,分配不同并网模式的跟网型和构网型变流器数量,底层控制中变流器采用阻抗自适应双模式控制,有效提升了系统在外界条件变化时的小扰动稳定性。针对储能系统选址定容问题,文献[86]分析了构网型变流器接入对电网强度的提升作用,提出了一种基于参与因子的启发式优化求解方法。文献[87]研究了包含多个新能源场站的多馈入系统的混合模式优化配置问题,基于可量化系统中变流器支撑能力的评估指标,提出了大规模新能源场站混合模式变流器的协调优化配置方法。

此外,场站中构网型设备占比及其容量对电力系统运行的经济性和稳定性也具有一定的影响。在电力系统的稳态运行方面,构网型变流器不仅能提高电力系统的源荷平衡能力^[88],促进新能源的消纳,还可以增强系统的小扰动稳定性^[89],使跟网型变流器能运行于更低的SCR,提高系统的发电量。

在电力系统的电压调节方面,构网型变流器的电压源特性能在并网电压发生波动时提供快速的无功响应^[90],提高系统的电压稳定性,减少无功补偿设备的投入。在电力系统的频率调节方面,构网型变流器可直接参与系统的一次调频,提供惯量响应^[91],具备优越的频率支撑与灵活的调节能力^[27]。同时,其根据本地的频率信息实现调节,降低了系统调度的通信成本。此外,构网型变流器还能够提供黑启动^[92]、谐波抑制^[93]、孤岛运行^[94]等其他辅助功能,提高电力系统的电能质量和供电可靠性。然而,设备的构网能力并非与系统的稳定性及性能完全正相关,文献[95]研究了构网型变流器占比和控制参数对电力系统频率特性的影响,发现当构网型自同步电压源型新能源占比超出临界范围时,其占比提高对系统频率性能的提升作用明显降低。文献[96]建立了构网型设备并网的同步主导回路模型,指出弱电网下虚拟惯量对系统小干扰稳定性和频率稳定性的影响呈现相反的效果。

目前,场站级混合模式研究大多集中在小信号稳定方面,较少涉及大扰动稳定,考虑电力系统暂态稳定和其他多性能指标约束的混合模式控制及优化还有待进一步的研究。

7 跟网/构网混合模式控制方案优缺点分析

本文中讨论的几类混合模式控制分别从不同的角度对现有的跟网/构网型控制策略进行了改进,其特性及优缺点分析如下:

1) 切换型混合模式控制是一种电网自适应控制,在控制结构整体上进行切换,可直接使用现有的跟网/构网型控制策略,根据电网的状态选择最合适的运行模式,其难点在于电网阻抗检测和切换边界的确定。

2) 融合型混合模式控制具有清晰的物理意义,在控制结构整体上进行融合,兼有电压源和电流源特性,其控制效果为双源的串联或并联,但一般需要同时进行2种模式的控制运算,增加了控制复杂性。

3) 补偿型混合模式控制是在原有的跟网/构网型控制中通过倒下垂、虚拟导纳等控制策略补偿电压源/电流源的特性,其内环的功率/电流指令为原指令和补偿指令的叠加,故功率调节响应较快,但电压支撑性能受到一定影响。

4) 同步混合型控制是从同步环路的角度进行改进,将构网型控制的功率同步和跟网型控制的锁相环同步进行混合,改进了构网型控制对电网的适应性,其内环控制仍为电压控制,故电压支撑响应较快,但功率调节速度相对较慢。

5) 场站级混合模式控制是混合模式控制在系统级的应用,不仅可在上述几种单机混合模式控制的基础上推广得到,还可以通过跟网/构网型变流器在物理层面的混合配置实现,具有较高的灵活性,但其优化配置的困难随着系统规模扩大而增加。

基于上述分析,总结归纳上述几种控制的优缺点,如表1所示。

表1 混合模式控制方案的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of hybrid mode control schemes

控制方案	优点	缺点
切换型混合模式控制	根据电网信息自适应控制,兼顾稳定性和经济性	电网阻抗辨识技术尚不成熟
融合型混合模式控制	物理意义明确,变流器同时具有跟网和构网特性	控制计算量大,存在电网阻抗适应性问题
补偿型混合模式控制	功率响应速度快,通过电流补偿控制能够实现宽SCR范围运行	虚拟导纳一定程度上影响了电压支撑性能
同步混合型控制	能够适应电网频率的波动,电压支撑能力强	有功功率调节速度较慢
场站级混合模式控制	经济性好,可灵活配置	优化配置存在一定难度

8 跟网/构网混合模式控制研究展望

现有高渗透率新能源并网技术的研究工作大多局限于单一跟网或构网模式的并网稳定控制,单机混合模式乃至系统级混合模式的并网控制技术仍处于起步阶段,仍需进一步探索研究。针对高渗透率新能源发电并网变流器的混合模式控制研究,展望如下:

1) 随着高渗透率新能源发电技术的快速发展,提高并网变流器的电网支撑性能迫在眉睫,并网变流器跟网/构网混合模式控制是当前跟网型控制向构网型控制过渡的重要技术手段。目前,并网变流器跟网/构网混合模式控制具有多种方案,技术尚不成熟,如何优化出技术方案成熟、工程应用性强的统一型混合模式控制尚需进一步探索,尤其是混合模式的暂态控制仍需进一步研究,相关技术标准有待进一步制定和完善。

2) 研究聚合系统内单机混合模式构网特性的集群构网技术。基于单机混合模式控制,实现单点混合模式-局部构网的集中调度控制方式,从场站节点出发向全局构网过渡。在单机混合模式控制的各种方案中,基于电流补偿的混合模式控制通过较为简单的控制结构实现了跟网/构网特性的混合,适合参与调度,且能够适应强弱电网运行,对于改造场站内单机控制实现向构网的过渡具有一定的应用

前景。

3)场站级控制是混合模式控制的重要应用^[97],亟须进一步研究场站级基于新能源单元跟网型和储能单元构网型的混合模式控制技术,如场站级新能源发电系统的分层优化控制,在确保系统稳定性的同时,最大限度地利用新能源,以提升新能源场站发电经济性。需要形成更适合场站实际应用的跟网/构网混合模式控制方案。对于单元级的控制,研究计及新能源输出功率特性、储能系统能量约束以及器件过流能力限制的自适应混合控制,降低主动支撑的成本。对于系统级的控制,研究多场站共享储能情况下跟网/构网型变流器容量的优化配置,提高储能的利用率。

4)未来,随着新能源渗透率的进一步提升,电网频率波动凸显时,构网型控制将逐步提升占有率而发挥更大作用。大数据技术和人工智能有望在未来变流器的控制中发挥重要作用,可研究基于人工智能优化算法和互联通信的混合模式场站级系统协同控制,基于5G等数据通信技术,集成新能源并网变流设备数据采集、调度和协同等功能于一体,连接发电端、输电和用户,实现复杂电网条件下场站级混合模式系统的实时优化配置及电力系统多节点的协同构网型控制。

9 结语

随着新能源发电渗透率的不断增加,电网呈现出弱电网甚至极弱电网特性,新能源发电采用单一的跟网型或构网型控制并网难以兼顾稳定性、经济性及电网支撑性能。国内外学者不断创新,在并网变流器的跟网/构网混合模式控制方面取得了大量有价值的研究成果,实现了跟网与构网模式的优势互补。本文重点梳理了几类混合模式控制的技术方案和原理,总结了不同混合模式控制实现的优缺点,并探讨了未来可能的研究方向和思路。希望本文可以为高渗透率新能源发电的并网控制研究提供有益参考,推动中国并网变流器技术的创新,助力“双碳”目标的实现。

参考文献

- [1] 国家能源局.2023年全国电力工业统计数据[EB/OL].[2024-01-26]. http://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm. National Energy Administration. National electric power industry statistics in 2023[EB/OL]. [2024-01-26]. http://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
- [2] 徐政.高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J].南方电网技术,2020,14(2):1-9.
- [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. LIANG Jun, LI Chuanyue. Recent development of grid-connected inverters and weak-grid stabilization [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3703-3712.
- [4] 王伟胜,李光辉,何国庆,等.面向新型电力系统的新能源并网控制挑战与展望[J].新型电力系统,2023,1(2):145-160. WANG Weisheng, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Challenges and prospects of grid connection control of renewable energy for new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 145-160.
- [5] 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.
- [6] HONG Q T, KHAN M A U, HENDERSON C, et al. Addressing frequency control challenges in future low-inertia power systems: a great Britain perspective [J]. Engineering, 2021, 7(8): 1057-1063.
- [7] 石文辉,屈姬贤,罗魁,等.高比例新能源并网与运行发展研究[J].中国工程科学,2022,24(6):52-63. SHI Wenhui, QU Jixian, LUO Kui, et al. Grid-integration and operation of high-proportioned new energy[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 52-63.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ZHAO M Q, YUAN X M, HU J B, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937.
- [11] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [12] 袁辉,辛焕海,王康,等.弱电网下远端严重电压跌落时逆变器并网失稳机理分析[J].电力系统自动化,2018,42(22):38-43. YUAN Hui, XIN Huanhai, WANG Kang, et al. Instability mechanism analysis of inverters connected to weak grid during severe voltage sag on remote grid side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 38-43.
- [13] 王海宁,陈燕东,廖书寒,等.弱电网条件下考虑频率耦合的三相并网逆变器简化阻抗建模及宽频带振荡分析[J].电源学报,2021,19(6):19-29. WANG Haining, CHEN Yandong, LIAO Shuhan, et al. Simplified impedance modeling and broadband oscillation

- analysis for three-phase grid-connected inverter considering frequency coupling under weak grid conditions [J]. *Journal of Power Supply*, 2021, 19(6): 19-29.
- [14] 王伟胜,张冲,何国庆,等.大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J].*电网技术*,2017,41(4):1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1050-1060.
- [15] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等.电力系统新型振荡问题浅析[J].*中国电机工程学报*,2018,38(10):2821-2828.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2821-2828.
- [16] 方勇杰.英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J].*电力系统自动化*,2019,43(24):1-5.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(24): 1-5.
- [17] ZHU D H, ZHOU S Y, ZOU X D, et al. Improved design of PLL controller for LCL-type grid-connected converter in weak grid [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(5): 4715-4727.
- [18] 张学广,付志超,陈文佳,等.弱电网下考虑锁相环影响的并网逆变器改进控制方法[J].*电力系统自动化*,2018,42(7):139-145.
ZHANG Xueguang, FU Zhichao, CHEN Wenjia, et al. An improved control method for grid-connected inverters considering impact of phase-locked loop under weak grid condition [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(7): 139-145.
- [19] 杨明,杨焯,李玉龙,等.弱电网下基于电网电压前馈的并网逆变器阻抗重塑控制策略[J].*电工技术学报*,2024,39(8):2553-2566.
YANG Ming, YANG Zhuo, LI Yulong, et al. Impedance remodeling control strategy of grid-connected inverter based on feedforward voltage under weak grid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(8): 2553-2566.
- [20] 李明,张兴,郭梓暄,等.弱电网下基于D分割法的逆变器PI参数设计及稳定域分析[J].*电力系统自动化*,2020,44(15):139-147.
LI Ming, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Proportional-integral parameter design for inverter based on D-partition method and its stability region analysis in weak grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(15): 139-147.
- [21] WANG X F, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(7): 3318-3329.
- [22] 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), May 20-24, 2018, Niigata, Japan.
- [23] 于彦雪,胡鹏飞,陈玉树,等.极弱电网下并网逆变器功率传输能力分析及其提升方法[J].*电力系统自动化*,2022,46(14):101-108.
YU Yanxue, HU Pengfei, CHEN Yushu, et al. Analysis and improvement method of power transfer capability for grid-connected inverter in ultra-weak grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(14): 101-108.
- [24] 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.
- [25] ZHANG W Y, CANTARELLAS A M, ROCABERT J, et al. Synchronous power controller with flexible droop characteristics for renewable power generation systems [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(4): 1572-1582.
- [26] 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.
- [27] POOLLA B K, GROS D, DORFLER F. Placement and implementation of grid-forming and grid-following virtual inertia and fast frequency response [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 3035-3046.
- [28] ZHANG H B, XIANG W, LIN W X, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [29] DEGHANITAFI H, KONSTANTINOU G, FLETCHER J, et al. Control of distributed photovoltaic inverters for frequency support and system recovery [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(4): 4742-4750.
- [30] 张海峥,张兴,李明,等.基于变步长功率跟踪的有功备用式PV-VSG控制策略[J].*电力系统自动化*,2019,43(5):92-100.
ZHANG Haizheng, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Control strategy of PV-VSG in active power reserve mode based on power tracking with variable step [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 92-100.
- [31] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4127-4142.
- [32] 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.
- [33] 詹长江,吴恒,王雄飞,等.构网型变流器稳定性研究综述[J].*中国电机工程学报*,2023,43(6):2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2359.

- [34] GUO Z, 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 [2023-03-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10058867>.
- [35] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [36] 曹伟,钦焕乘,陆建忠,等.新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J].电力系统自动化,2023,47(4):190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [37] YANG D S, RUAN X B, WU H. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.
- [38] 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: Hefei University of Technology, 2020.
- [39] LI Y T, GU Y J, ZHU Y, et al. Impedance circuit model of grid-forming inverter: visualizing control algorithms as circuit elements [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3377-3395.
- [40] SONG G H, CAO B, CHANG L C. Review of grid-forming inverters in support of power system operation [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 8(1): 1-15.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 何国庆,王伟胜,刘纯,等.分布式电源并网技术标准研究[J].中国电力,2020,53(4):1-12.
HE Guoqing, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Study on technical standard of distributed resources grid integration [J]. Electric Power, 2020, 53(4): 1-12.
- [44] 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.
- [45] 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): 1091-1104.
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): 1091-1104.
- [46] 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: Hefei University of Technology, 2022.
- [47] 艾力西尔·亚尔买买提,辛焕海,宫泽旭,等.锁相环主导下变流器振荡问题的阻抗分析方法:标称性与鲁棒性[J/OL].中国电机工程学报[2023-06-19].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230616.1552.023.html>.
YAERMAIMAITI Ailixier, XIN Huanhai, GONG Zexu, et al. Impedance analysis method of oscillation issues in converter caused by phase-locked loop: nominal performance and robustness [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2023-06-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230616.1552.023.html>.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 刘欣,郭志博,贾焦心,等.基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J].电工技术学报,2023,38(15): 4130-4146.
LIU Xin, GUO Zhibo, JIA Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous machine based on sequence impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4130-4146.
- [53] HARNEFORS L, RAHMAN F M M, HINKKANEN M, et al. Reference-feedforward power-synchronization control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8878-8881.
- [54] 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.
- [55] ZHAO F Z, WANG X F, ZHOU Z C, et al. Robust grid-forming control with active susceptance [J]. IEEE Transactions

- on Power Electronics, 2023, 38(3): 2872-2877.
- [56] WU W H, ZHANG M M, CHEN Y D, et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6460-6472.
- [57] 石荣亮,张烈平,王文成,等.基于改进频率微分运算的虚拟惯量控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(20):94-102.
SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Virtual inertia control strategy based on improved frequency differential operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 94-102.
- [58] 罗魁,郭剑波,王伟胜,等.跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1262-1281.
LUO Kui, GUO Jianbo, WANG Weisheng, et al. Review of impact of grid following variable renewable energy supplementary frequency control on frequency stability and small-disturbance synchronization stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1262-1281.
- [59] HARNEFORS L, SCHWEIZER M, KUKKOLA J, et al. Generic PLL-based grid-forming control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1201-1204.
- [60] MOUTEVELIS D, ROLDAN-PEREZ J, JANKOVIC N, et al. Recursive secondary controller for voltage profile improvement based on primary virtual admittance control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4296 - 4311.
- [61] TARRASÓ A, CANDELA J I, ROCABERT J, et al. Grid forming control for power converters based on an inertial phase locked loop (IPLL) [J]. IEEE Access, 2023, 11: 76008-76019.
- [62] LEON J D V, TARRASO A, CANDELA J I, et al. Grid-forming controller based on virtual admittance for power converters working in weak grids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2023, 4(3): 791-801.
- [63] SCHWEIZER M, ALMER S, PETTERSSON S, et al. Grid-forming vector current control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11): 13091-13106.
- [64] 黄林彬,辛焕海,鞠平,等.电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J].电力自动化设备,2020,40(9):10-25.
HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25.
- [65] 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.
- [66] 李新,刘国梁,杨苒晨,等.具有暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略及无缝切换方法[J].电网技术,2018,42(7):2081-2088.
LI Xin, LIU Guoliang, YANG Ranchen, et al. VSG control strategy with transient damping term and seamless switching control method [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2081-2088.
- [67] 陶勇,邓焰,陈桂鹏,等.下垂控制逆变器中并网功率控制策略[J].电工技术学报,2016,31(22):115-124.
TAO Yong, DENG Yan, CHEN Guipeng, et al. Power flow control strategy for droop-controlled inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 115-124.
- [68] 李明焯,王跃,徐宁一,等.基于带通阻尼功率反馈的虚拟同步发电机控制策略[J].电工技术学报,2018,33(10):2176-2185.
LI Mingxuan, WANG Yue, XU Ningyi, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on bandpass damping power feedback [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2176-2185.
- [69] MENG X, LIU J J, LIU Z. 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.
- [70] HUANG L B, XIN H H, WANG Z. Damping low-frequency oscillations through VSC-HVDC stations operated as virtual synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5803-5818.
- [71] GONG H, WANG X F. Interaction analysis and enhanced design of grid-forming control with hybrid synchronization and virtual admittance loops [J]. iEnergy, 2023, 2(1): 71-84.
- [72] 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.
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.
- [73] 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.
- [74] LIU T, WANG X F. Physical insight into hybrid-synchronization-controlled grid-forming inverters under large disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 11475-11480.
- [75] 张程翔,丁宁,尹峰,等.新型储能应用场景与商业模式综述[J].分布式能源,2022,7(1):54-62.
ZHANG Chengxiang, DING Ning, YIN Feng, et al. Overview of new energy storage application scenarios and business models [J]. Distributed Energy, 2022, 7(1): 54-62.
- [76] 王新宝,葛景,韩连山,等.构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J].电力系统保护与控制,2023,51(5):172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [77] 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

- [2023-10-24]. <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 [2023-10-24]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231337>.
- [78] 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.
- [79] QUAN X J, YU R Y, ZHAO X, et al. Photovoltaic synchronous generator: architecture and control strategy for a grid-forming PV energy system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 936-948.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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 [2023-09-19]. <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 Jiao Tong University [2023-09-19]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.231>.
- [83] 王聪, 葛景, 汪莹, 等. 构网型储能提升系统电压稳定作用研究 [J]. 电工技术, 2023(12): 183-185.
- WANG Cong, GE Jing, WANG Ying, et al. Research on grid-forming BESS in improving voltage stability [J]. Electric Engineering, 2023(12): 183-185.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 吴琛, 刘晨曦, 黄伟, 等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 130-136.
- WU Chen, LIU Chenxi, HUANG Wei, et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 130-136.
- [87] 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 [2023-12-21]. <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-feed systems with grid-following or grid-forming [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2023-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20231220.1539.010.html>.
- [88] 管敏渊. 虚拟同步机运行状态下并网储能系统自动能量控制 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 144-150.
- GUAN Minyuan. Automatic energy control of grid-connected energy storage system under virtual synchronous generator operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 144-150.
- [89] 辛焕海, 甘德强, 鞠平. 多馈入电力系统广义短路比: 多样化新能源场景 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5516-5527.
- XIN Huanhai, GAN Deqiang, JU Ping. Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices: analysis for various renewable power generations [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5516-5527.
- [90] GHOSH R, TUMMURU N R, RAJPUROHIT B S. Dynamic voltage stiffness control technique for a virtual oscillator-based grid-forming controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6): 5725-5733.
- [91] 巩宇, 王阳, 李智, 等. 光伏虚拟同步发电机工程应用效果分析及优化 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 149-156.
- GONG Yu, WANG Yang, LI Zhi, et al. Engineering application effect analysis and optimization of photovoltaic virtual synchronous generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 149-156.
- [92] 李旭, 罗嘉, 丁勇, 等. 辅助重型燃气轮机黑启动的大容量储能系统控制技术及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 1069-1081.
- LI Xu, LUO Jia, DING Yong, et al. Control technology and application of large-scale energy storage system assisting black start of heavy duty gas turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 1069-1081.
- [93] TARRASO A, CANDELA J I, ROCABERT J, et al. Grid voltage harmonic damping method for SPC based power converters with multiple virtual admittance control [C]// 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 1-5, 2017, Cincinnati, USA.
- [94] 邹常跃, 陈俊, 魏伟, 等. 基于下垂控制的柔直变流器孤岛-并网控制模式切换方法 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(11): 92-101.
- ZOU Changyue, CHEN Jun, WEI Wei, et al. Method for switching of island-grid control mode for VSC-HVDC converter based on droop control [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(11): 92-101.
- [95] 李威, 朱玲, 祁晓婧, 等. 新能源自同步电压源接入电力系统频

率特性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 38-46.

LI Wei, ZHU Ling, QI Xiaojing, et al. Frequency characteristic analysis for power system with integration of renewable energy by self-synchronous voltage source [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 38-46.

[96] 花赞玥, 杨超然, 何国庆, 等. 考虑小干扰稳定和频率稳定的虚拟惯量配置分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 437-445.

HUA Yunyue, YANG Chaoran, HE Guoqing, et al. Virtual inertia configuration analysis considering small-signal stability and frequency stability [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 437-445.

[97] GUO Z X, ZHANG X, LI M, et al. Control and capacity planning for energy storage systems to enhance the stability of renewable generation under weak grids [J]. IET Renewable

Power Generation, 2022, 16(4): 761-780.

张 兴(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 并网逆变器和分布式发电系统。E-mail: honglf@ustc.edu.cn

战祥对(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 新能源发电变流器关键技术。E-mail: 2226024949@qq.com

吴孟泽(1998—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 构网型级联H桥变流器及其控制。E-mail: 2020110332@mail.hfut.edu.cn

李 明(1993—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 新能源并网逆变器稳定分析及控制。E-mail: liming2021@tsinghua.org.cn

(编辑 蔡静雯)

Review on Grid-following/Grid-forming Hybrid Mode Control for Grid-connected Converter in High Penetration Rate of Renewable Energy Generation

ZHANG Xing, ZHAN Xiangdui, WU Mengze, HAN Feng, FU Xinxin, LIMing

(National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of renewable energy generation, the stable operation of grid-connected converters with grid-following control as the mainstream has been severely challenged. Therefore, the control technologies of grid-forming converters with active support capability for the power grid and strong stability in the weak power grid have received much attention. However, under the conditions of high penetration rate of renewable energy generation, especially in the terminal weak grid, it is difficult for the grid-connected converters to balance stability, economy, and power grid support performance by using a single grid-following or grid-forming mode control. Based on the complementary characteristics of the two modes, scholars at home and abroad have proposed and studied the grid-following/grid-forming hybrid mode control strategy, to make the grid-connected converters operate stably in the weak power grid, maximize the use of renewable energy, and achieve superior power grid support performance. Starting from the basic control structures of grid-following and grid-forming converters, this paper analyzes the complementary characteristics of the control performance of grid-following and grid-forming converters. On this basis, the hybrid mode control schemes of several different technical routes are sorted out, involving a variety of single-machine hybrid control strategies and multi-machine station-level hybrid control strategies. The technical research idea, principle, advantages, and disadvantages of each scheme are elaborated in detail. Finally, the development of grid-following/grid-forming hybrid mode control technologies is prospected.

This work is supported by the Joint Funds of National Natural Science Foundation of China (No. U23A20655), the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52207211) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. JZ2024HGTB0259).

Key words: renewable energy generation; high penetration rate; grid-connected converter; grid-following converter; grid-forming converter; hybrid mode control

