

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.006

电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略综述

林宇轩¹, 李威¹, 朱玲¹, 任冲²

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048)

摘要:随着大量新能源通过电力电子变流器接入电网, 电力系统面临惯性降低、抗扰和暂态支撑能力下降等问题, 构网型变流器的自主同步和主动支撑特性可以有效提升新能源并网稳定性和系统支撑能力。暂态电压扰动下构网型变流器并网控制策略与设备及系统的稳定性存在紧密联系, 文中重点关注电网电压跌落的扰动场景, 围绕构网型变流器暂态控制策略展开综述。首先, 归纳目前典型的构网型变流器同步控制策略; 其次, 揭示构网型变流器过电流的产生机理并分析变流器暂态期间的过流和支撑特性; 然后, 将当前构网型变流器暂态控制策略分为两类进行梳理, 并对比讨论两类控制策略的原理、研究现状和优缺点; 最后, 展望未来高比例新能源电力系统中构网型变流器并网问题的研究方向。

关键词: 构网型变流器; 限流控制; 电压支撑; 暂态控制策略; 高比例新能源电力系统; 新能源并网

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)02-0055-14

0 引言

近年来, 在国家“双碳”战略的指导下我国新能源领域迅猛发展, 不断取得突破创新。截至2024年6月底, 我国累计发电装机容量约30.7亿kW, 其中风电、光伏装机容量分别为4.7亿kW和7.1亿kW, 共占总装机容量的38.4%, 预计到2030年风光电源装机容量占比可达49.1%^[1]。

风、光等新能源通过电力电子变流器实现并网。近年来新能源和电力电子设备在我国电力系统中的渗透率不断提升, 电力系统出现了同步支撑能力减弱、转动惯量降低、抗扰能力下降等问题, 对构建安全稳定的新型电力系统提出了新挑战^[2-5]。跟网型变流器通过控制输出电流实现并网同步, 暂态期间便于限制故障电流、实现故障穿越, 目前已形成较为成熟的暂态控制策略, 但跟网型变流器由于缺乏惯量和阻尼并且依赖外部电源提供并网参考电压而难以在弱电网和孤网中维持稳定运行。相比跟网型变流器, 稳态期间构网型变流器可以不依赖外界交流(alternating current, AC)系统自主构建电压幅值和相位, 能够提供惯量支撑、主动响应电网需求, 有助于提高新能源高占比系统的稳定性^[6]。暂态期间构网型变流器需要维持主动支撑和孤岛运行能力, 并且为保持端口电压恒定, 变流器易产生过流问题, 对构网型变流器暂态控制策略的研究提出了更高要求。随着构网型变流器在电力

系统中占比的提升, 为提高暂态期间新能源的并网稳定性, 构网型变流器暂态控制策略的研究受到广泛关注^[7-13]。

围绕构网型变流器的暂、稳态问题, 目前已有部分文献对相关领域的研究现状进行了总结。文献[6]总结了当前构网型变流器小信号和大信号稳定性的研究现状, 进一步归纳了提升构网型变流器小信号和大信号稳定性的控制方法, 并展望了未来的研究方向; 文献[14-15]对构网型变流器的同步控制策略、典型应用场景以及未来面临的挑战进行了评述, 但尚未对构网型变流器的暂态控制策略进行梳理; 文献[16-17]针对跟网型和构网型变流器的暂态同步稳定性问题展开综述, 其中文献[17]进一步分析了混合多机系统的暂态同步稳定问题; 文献[18-19]聚焦于构网型风电机组的发展情况, 对构网型风电机组控制策略和稳定性分析的研究现状进行了归纳总结。上述文献从不同角度对构网型变流器的研究进行了总结和评述, 但尚未对电网电压跌落下构网型变流器的暂态控制策略进行梳理归纳, 针对构网型变流器故障期间的过电流和主动支撑能力受限等问题及相应改进方法的评述也鲜有涉及。

电网电压跌落时构网型变流器并网控制策略与设备、系统层级的稳定性存在紧密联系。文中旨在梳理和总结电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略的研究现状。首先, 分析了下垂和虚拟同步机控制策略, 归纳了基于有功功率和直流(direct current, DC)电压的两类同步控制策略的原理和特

收稿日期: 2024-08-06; 修回日期: 2024-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B6008)

性;其次,根据电网电压跌落下变流器过电流的产生机理,分析了构网型变流器暂态期间的过流和支撑特性;然后,针对构网型变流器暂态期间存在的电流越限和支撑能力受限问题,梳理了电网电压跌落期间两类构网型变流器暂态控制策略的研究现状,并总结了每种策略的控制原理、适用场景和优缺点等;最后,基于当前研究现状进行归纳总结,并展望未来构网型变流器并网问题的研究方向。

1 构网型变流器的同步控制策略

构网型变流器的同步控制策略是实现其自主构建和主动支撑电网电压能力的基础,同步控制结构的差异也直接影响电压扰动下构网型变流器采用的暂态控制策略^[20-22]。围绕构网型变流器的同步控制,相关文献已提出多种控制策略,根据直流侧是否存在恒定电源可以分为功率同步和直流电压同步^[6]。目前电网电压跌落下构网型变流器的暂态控制方法多基于功率同步控制结构进行改进,故本章重点以下垂控制和虚拟同步机控制为研究对象分析构网型变流器的同步原理,并对其他典型同步控制策略进行总结。

1.1 两类典型同步控制策略

下垂控制通过模拟同步发电机有功功率与频率、无功功率与电压的下垂关系实现构网型变流器与电网的同步,具有控制结构简单、响应速度快等特点。但下垂控制表达式中缺少惯量和阻尼项,功率环输出量极易受到系统扰动的影响,无法向系统提供惯量支撑和阻尼作用。下垂控制方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \omega = \omega_{ref} + K_p(P_{ref} - P) \\ U_{GFM} = U_{ref} + K_q(Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 、 U_{GFM} 分别为功率环输出的角频率和电压幅值; ω_{ref} 、 U_{ref} 分别为输出角频率和电压幅值的指令值; K_p 、 K_q 分别为有功和无功下垂系数; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为输出有功和无功功率的指令值; P 、 Q 分别为变流器输出有功和无功功率。

为解决传统下垂控制缺乏惯量和阻尼的问题,有学者进一步提出了虚拟同步机控制^[23-24]。该控制策略的原理是通过有功功率环和无功功率环控制方程分别模拟同步发电机的转子运动和定子电压方程,使构网型变流器具备同步发电机的惯量支撑和阻尼能力,进一步提高变流器的抗扰能力和稳定性,广义上虚拟同步机控制可以视作含惯量和阻尼项的下垂控制^[25]。其中有功功率环通过检测有功偏差量 ΔP 控制输出的有功功率,进而调节输出

角频率生成内电势的相角^[26];无功功率环通过检测无功偏差量 ΔQ 和端口电压偏差量 ΔU 控制输出的电压幅值^[26]。虚拟同步机控制方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\omega_{ref}}(P_{ref} - P) - D_p(\omega - \omega_{ref}) \\ K \frac{dU_{GFM}}{dt} = Q_{ref} - Q + D_q(U_{ref} - U) \end{cases} \quad (2)$$

式中: J 为虚拟惯量; D_p 为虚拟阻尼; K 为无功功率环积分系数; D_q 为无功功率环下垂系数; U 为实际输出电压。

下垂控制和虚拟同步机控制的功率环控制结构如图1所示。图1中, Z_{GFM} 为构网型变流器等效内阻抗; I_{GFM} 为构网型变流器输出电流幅值; U_{PCC} 为并网点电压幅值; Z_g 为线路等效阻抗; R_f 、 C_f 分别为滤波电阻和电容; e_{ref} 为脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制信号; θ_{GFM} 为变流器内电势的相角。

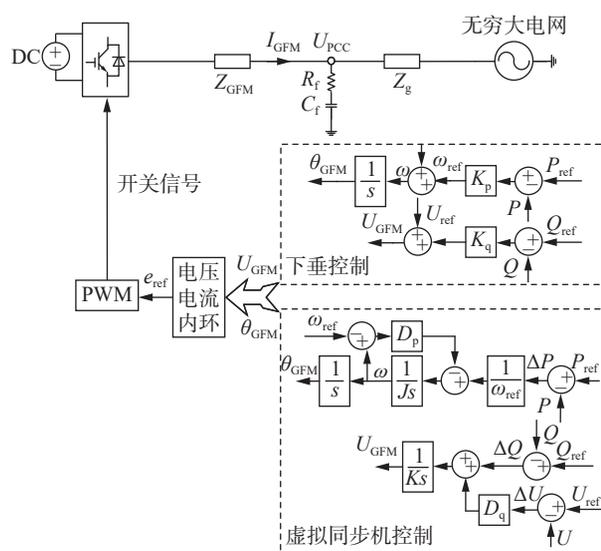


图1 下垂控制和虚拟同步机控制框图

Fig.1 Block diagram of droop control and virtual synchronous control

1.2 典型同步控制策略的总结

目前构网型变流器同步控制策略研究已较为成熟,功率同步控制策略通常应用于储能等DC/AC变流器中,直流侧存在电压源维持直流电压恒定;直流电压同步控制策略通常应用于直驱型风电机组等AC/DC/AC变流器中,直流侧无恒定电压源,直流电压由变流器自身控制。其中,功率同步控制主要包括下垂控制、虚拟同步机控制、虚拟振荡器控制等,直流电压同步控制主要包括匹配控制、柔性直流电压控制等。

本章梳理了构网型变流器功率同步和直流电压同步控制策略,并总结了各控制策略的特点,如

表1所示,明确了构网型变流器的同步机制,也为后文总结不同控制结构下的暂态控制策略奠定了基础。

表1 构网型变流器典型同步控制策略
Table 1 Typical synchronization control strategies for grid-forming converters

控制策略	同步原理	惯性支撑和阻尼作用	同步速度	
下垂控制	有功-频率和无功-电压下垂特性	无	较快	
功率同步	虚拟同步机控制	存在	较慢	
	虚拟振荡器控制	无	快	
直流电压同步	匹配控制	直流侧电容能量模拟同步发电机转子动能	存在	快
	柔性直流电压控制	将下垂控制和匹配控制相结合	存在	快

2 电网电压跌落下构网型变流器的暂态过流和支撑特性

本章分析了构网型变流器过流能力有限的原因、电网电压跌落时过电流的产生机理以及主动支撑能力与输出电流的关系,进一步揭示了构网型变流器暂态期间的过流和主动支撑特性。考虑到电网电压跌落时系统对电压支撑的需求更加迫切,并且短时间尺度下电网频率的变化较小,故本章分析的主动支撑问题主要关注暂态期间构网型变流器的电压支撑。

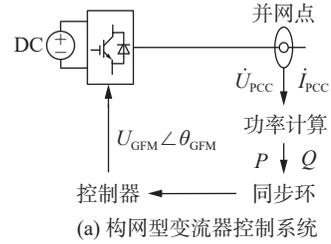
2.1 电网电压跌落下构网型变流器的暂态过流特性

2.1.1 网侧电压跌落时过电流机理分析

构网型变流器稳态时表现为串联低阻抗的电压源特性^[27],其控制系统和等效电路如图2所示。图2中, \dot{U}_{PCC} 、 \dot{I}_{PCC} 分别为并网点电压和电流相量。当电网发生大扰动故障导致网侧电压跌落时,构网型变流器内电势与并网点之间存在较大的电压差,会激发严重过流威胁设备安全^[15]。

假设电网发生三相短路故障,建立如图3所示的故障期间构网型单机无穷大系统等效电路模型。根据构网型变流器稳态时的电压源外特性,在电路模型中将构网型单机并网设备等效为串联阻抗的电压源,电网侧使用理想电源和线路阻抗串联代替,并假设三相短路故障发生在并网点处^[28-29]。

图3中, $U_{GFM} \angle \theta_{GFM}$ 为构网型变流器内电势相量; $R_{GFM} + jX_{GFM}$ 为虚拟内电势到并网点的等效阻抗; Z_f 为短路阻抗; $R_g + jX_g$ 为并网点与电网侧间的等效线路阻抗; $U_g \angle \theta_g$ 为电网电压相量。



(a) 构网型变流器控制系统



(b) 构网型变流器等效电路

图2 构网型变流器控制系统及等效电路
Fig.2 Control system and equivalent circuit of grid-forming converters

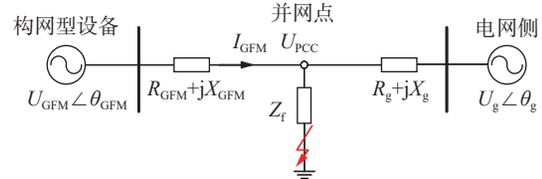


图3 故障期间等效电路

Fig.3 Equivalent circuit during fault

假设电网发生三相短路故障前后,并网点电压相量的变化量 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 为:

$$\Delta \dot{U}_{PCC} = \dot{U}_{PCC}(0^-) - \dot{U}_{PCC}(0^+) \quad (3)$$

式中: $\dot{U}_{PCC}(0^-)$ 、 $\dot{U}_{PCC}(0^+)$ 分别为并网点故障前后电压相量。

由于构网型变流器功率控制环的时间尺度慢于电流内环的时间尺度,并且实际电网从故障发生到设备检测出故障信号间存在6~10 ms延时,扰动瞬间设备会维持故障前状态继续运行,故电网故障瞬间可假设构网型变流器内电势相量的幅值和相位基本维持不变^[30],即满足:

$$\dot{U}_{GFM}(0^-) = \dot{U}_{GFM}(0^+) = \dot{U}_{GFM} \quad (4)$$

式中: \dot{U}_{GFM} 为构网型变流器内电势相量; $\dot{U}_{GFM}(0^-)$ 、 $\dot{U}_{GFM}(0^+)$ 分别为电网故障前后变流器内电势相量。

假设等效阻抗均为感性,根据电路原理电网故障时构网型变流器虚拟内电势、输出电流和电网电压满足如下电路动态方程:

$$R_{GFM} \dot{I}_{GFM} + L_{GFM} \frac{d\dot{I}_{GFM}}{dt} = \dot{U}_{GFM} - \dot{U}_{PCC} \quad (5)$$

式中: \dot{I}_{GFM} 为构网型变流器输出电流相量; R_{GFM} 、 L_{GFM} 分别为构网型变流器的等效电阻、电感。

进一步,求解式(5)可得电网三相短路故障期间构网型变流器输出电流为:

$$\dot{I}_{GFM}(t) = \dot{I}_{GFM}(\infty) + (\dot{I}_{GFM}(0^+) - \dot{I}_{GFM}(\infty)) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} i_{GFM}(\infty) = \frac{\dot{U}_{GFM} - \dot{U}_{PCC}(0^+)}{R_{GFM} + jX_{GFM}} \\ i_{GFM}(0^+) = \frac{\dot{U}_{GFM} - \dot{U}_{PCC}(0^-)}{R_{GFM} + jX_{GFM}} \end{cases} \quad (7)$$

将式(3)和式(7)代入式(6)并化简得:

$$i_{GFM}(t) = i_{GFM}(0^-) + \left(1 - e^{-\frac{R_{GFM}}{L_{GFM}}t}\right) \frac{\Delta \dot{U}_{PCC}}{R_{GFM} + jX_{GFM}} \quad (8)$$

由于电流内环中存在比例积分(proportional integral, PI)环节,故障瞬时输出电流暂态分量的衰减特性可以忽略^[30],故构网型变流器输出电流在故障瞬时的变化量,即网侧电压跌落产生的故障电流可表示为:

$$\Delta i_{GFM}(t) = i_{GFM}(t) - i_{GFM}(0^-) = \frac{\Delta \dot{U}_{PCC}}{R_{GFM} + jX_{GFM}} \quad (9)$$

式中: Δi_{GFM} 为构网型变流器输出电流相量的变化量。

由式(9)可知,若忽略并网点电压故障前后的相位变化,故障电流的大小与并网点电压幅值的跌落程度成正比、与变流器至故障点间的等效阻抗成反比。在构网型单机无穷大系统的简化模型中,变流器到故障点的等效阻抗通常较小,若不采取限流措施,网侧电压跌落时输出电流可能增大至数倍额定电流^[28]。

2.1.2 构网型变流器过流期间的相量关系分析

基于 2.1.1 节的分析可知,故障瞬间构网型变流器由于具备电压源特性将保持输出内电势相量的幅值和相位不变,能够维持对电网电压的主动支撑。采用相量图分析网侧电压幅值跌落时,构网型变流器内电势、网侧电压和输出电流间的相量关系,如图 4 所示。

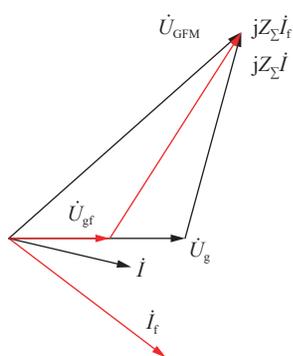


图 4 过流期间相量关系

Fig.4 Phasor relationship during overcurrent period

假设构网型变流器内电势相量 \dot{U}_{GFM} 在故障前后保持不变。图 4 中, \dot{U}_g 、 \dot{U}_{gf} 分别为故障前、后的网侧电压; i 、 I_f 分别为故障前、后的输出电流; Z_Σ 为网侧电压和变流器内电势间等效阻抗。由图 4 可

知,网侧电压幅值跌落后构网型变流器优先维持内电势 \dot{U}_{GFM} 不变,若未设置限幅环节,变流器故障后输出电流的幅值将激增为 I_f ,对变流器的设备安全产生威胁。

与同步发电机相比,构网型变流器作为电力电子设备因设备结构、耐热能力、器件控制原理等方面的差异导致其过流能力远弱于同步发电机,文献[31]研究表明同步发电机在短时间内可承受 3~10 倍的额定电流;与跟网型变流器基于电流控制实现同步的方式相比,构网型变流器采用基于有功功率或直流电压的同步方式在故障瞬间难以维持输出电流不变,易产生过流风险。因此,暂态期间构网型变流器需要采取相应控制策略限制输出电流。

2.2 电网电压跌落下构网型变流器的暂态支撑特性

电压是衡量电力系统安全稳定运行的重要指标之一。电网发生故障导致电压跌落后,若运行人员和控制系统无法阻止电压的大面积和大幅度下降,电网将进入电压失稳状态甚至恶化为电压崩溃、引发系统更大范围的失稳。构网型变流器动态过程中能够主动感知电网侧需求变化,并作出响应为电网提供支撑。当电网中某一节点发生短路故障时,传统电力系统的同步发电机因惯性作用其转子磁链不会发生突变,能够维持发电机内电势在一段时间内保持恒定,并通过励磁系统的强励作用向故障点瞬间注入数倍额定值的短路电流,有利于故障切除后系统电压恢复。随着新能源在电力系统中的渗透率提升,同步发电机占比进一步下降,其在电力系统中的暂态支撑作用被削弱,系统亟须增补新的具备主动支撑能力的电源。构网型变流器具有构建电压和主动支撑能力,但电力电子设备过流能力有限,电网发生大扰动故障导致网侧电压跌落时,构网型变流器易出现过流问题,并且暂态期间构网型变流器的电压主动支撑能力与其输出电流的大小密切相关。因此网侧电压跌落期间如何在采取限流措施保障设备安全的同时维持构网型变流器的主动支撑能力,是亟待解决的问题。

根据前文的特性分析可知,电网电压跌落时构网型变流器存在过电流和主动支撑能力受限等问题,后文主要以上述两类问题为导向展开综述。目前构网型变流器暂态控制策略的研究路线可以分为暂态期间切换至跟网型模式和维持构网型模式。其中切换至跟网型模式的暂态控制策略便于限制故障电流,但切换模式后变流器的电压支撑能力弱于构网型模式;维持构网型模式的暂态控制策略在限制输出电流的同时保留了一定的电压支撑

能力,但支撑性能与电流限幅值存在耦合关系。后文将对构网型变流器切换至跟网型模式和维持构网型模式的暂态控制策略展开综述,并对两类暂态控制策略的研究现状进行总结。

3 切换至跟网型模式的暂态控制策略

通过 2.1 节对构网型变流器暂态过电流的机理分析可知,构网型控制模式下需要维持变流器内电势恒定,故网侧电压跌落时易产生较大的短路电流。传统并网变流器一般为跟网型控制模式,通过直接控制输出电流相量实现与电网同步,目前已形成较为成熟的故障穿越技术。因此,有学者提出在电网发生故障时将构网型变流器切换至跟网型控制模式,采用跟网型变流器的低电压穿越策略实现故障穿越,待系统电压恢复后再切换回构网型控制模式。

3.1 控制模式切换的原理

切换至跟网型模式的暂态控制策略的基本原理是:稳态时构网型变流器采用功率同步或直流电压同步控制,当检测到网侧电压跌落至一定程度时,将构网型变流器切换为基于电流相量同步的跟网型控制模式,通过备用锁相环跟踪电网电压实现同步。切换模式后采用跟网型变流器的低电压穿越策略,暂态期间一般通过控制变流器有功和无功电流的指令值限制输出电流的幅值^[32-33]。

切换至跟网型模式的暂态控制策略的结构如图 5 所示,在构网型变流器的同步控制模块中分别设置构网型同步控制和跟网型同步控制模块,通过检测电网电压和电流信息判断是否满足切换条件。图 5 中, u_{abc} 、 i_{abc} 分别为测量得到的网侧三相电压和电流幅值; U_{GFM} 、 θ_{GFM} 分别为变流器在构网型模式下输出的内电势的幅值和相角; U_{LVRT} 、 I_{LVRT} 分别为跟网型故障穿越策略输出的电压和电流指令值; θ_{PLL} 为锁相环采集的并网电压相位。为完成 2 种同步控制模式间的平滑过渡,通常会采取相应的控制策略实现平滑切换,这是切换至跟网型模式暂态控制策略需要解决的难点。

3.2 跟网型控制模式下的故障穿越策略

针对电流越限问题,传统跟网型变流器采用的故障穿越策略主要通过调整电流指令值实现电流限幅。文献[34]通过参考电流相量实现对跟网型变流器输出电流峰值的控制;文献[35-37]围绕不对称故障引起的电压跌落问题展开研究,推导分析了跟网型光伏逆变器功率和电流指令值的表达式,并提出了不同的控制策略实现逆变器的低电压穿越;

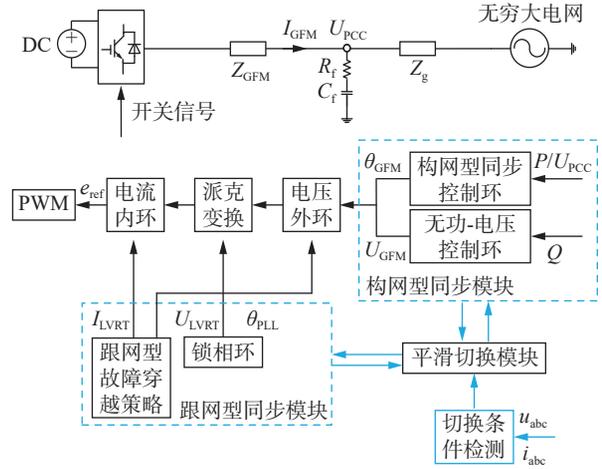


图 5 切换至跟网型模式的暂态控制策略示意

Fig.5 Schematic diagram of the transient control strategy for switching to grid-following mode

文献[38]针对跟网型光伏逆变器低电压穿越期间故障检测、电网电压相位同步和不平衡跌落等问题,提出了在故障不同阶段根据逆变器状态实时控制并网电流的低电压穿越策略。

综上,目前跟网型变流器在电网电压跌落期间的故障穿越策略已有较为成熟的理论和实践基础,但上述文献均只针对跟网型变流器的暂态控制策略展开研究,并未将相关研究拓展至构网型变流器的暂态控制。基于传统跟网型变流器的故障穿越策略,现有研究将其与构网型变流器的控制相结合,提出了暂态期间切换至跟网型控制模式的控制策略。文献[38]研究不平衡故障时的电流控制,暂态期间在构网型变流器的控制模式切换完成后采用电网电压前馈的控制策略分别对正序和负序电流独立控制,进而限制故障期间短路电流;文献[39]故障期间将构网型变流器切换为传统低电压穿越控制,通过调整故障期间有功和无功电流指令值限制输出电流并为系统提供必要的无功支撑。目前构网型变流器切换控制模式的暂态策略的难点主要在于构网型和跟网型控制模式间的平滑切换,此问题将在下一节中进一步阐释。

3.3 存在的难点和不足

通过前文分析可知,网侧电压跌落时切换至跟网型模式的暂态控制策略在低电压穿越的过程中存在 2 处模式切换^[39],即故障发生时刻由构网型控制切换至跟网型低电压穿越控制和故障清除时刻由跟网型低电压穿越控制恢复为构网型控制,如图 6 所示。2 种控制模式间存在着同步方式、输出信号、电流指令值等方面的切换,若切换过程中相关变量产生偏差可能会导致较大的暂态冲击电流,甚至破坏设备的安全稳定运行。因此,采用切换至

跟网型模式的暂态控制策略需要解决模式间平滑切换的问题,实现该目标的关键点是使2种控制模式下输出变量的属性和数值在切换时刻保持一致^[40]。为此,文献[39]提出了状态跟随的方法,暂态期间将构网型控制结构输出的电流指令值以负反馈的形式作用于跟网型控制结构的输入端,保证了2种模式输出的电流指令值时刻保持一致,进而实现模式间的平滑切换;文献[40]则采用相位角反馈跟踪的同步控制策略实现模式间平滑切换,其控制目标是保证2种模式输出电压相量的相位角一致并与电网电压保持同步;文献[32]同样通过保证构网型变流器2种模式输出的电压相量指令值一致,实现变流器由功率同步控制无缝切换至电流相量控制。

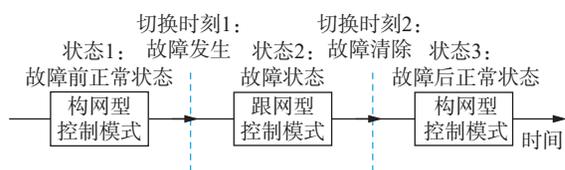


图6 构网型变流器模式切换时序图

Fig.6 Mode switching for grid-forming converters

构网型变流器暂态期间切换至跟网型模式能够实现电流限幅并提供一定的无功支撑,但是该模式下变流器将无法主动感知系统的支撑需求,暂态期间会失去构建电网电压的能力。此外,构网型和跟网型间的模式切换增加了变流器稳定性分析的难度,跟网型模式下锁相环的引入也会降低变流器在弱电网中的稳定性。以上是构网型变流器切换至跟网型模式的暂态控制策略存在的难点和不足,在未来的研究中还需进一步加以改进和完善。

4 维持构网型模式的暂态控制策略

针对网侧电压跌落引起的电流越限问题,为维持故障期间构网型变流器的主动支撑能力,有学者提出了维持构网型模式的暂态控制策略。目前相关研究主要通过改进控制环路、增加限流环节等措施实现构网型变流器故障电流的限幅控制^[18],包括直接限制电流指令值、虚拟阻抗限幅、综合限流法等。为应对低电压和换相失败等故障,已有学者围绕构网型变流器主动支撑能力的提升展开研究^[41-48]。

4.1 暂态期间的电流限幅控制策略

4.1.1 限制电流指令值

第一种维持构网型模式的电流限幅策略采用直接限制电流指令值的方法抑制暂态电流,该方法一般适用于含有电压电流内环控制结构的构网型变流器,在电压环输出电流指令值的出口处分别对

d 、 q 轴电流幅值进行限制,如图7所示。图7中, I_{dref} 、 I_{qref} 分别为限幅后的 d 、 q 轴电流指令值; I_{d0} 、 I_{q0} 分别为输出电流限幅前的 d 、 q 轴分量; I_{max} 为所设定的电流限幅值。常用的限幅方法包括 d 、 q 轴电流比例限幅和 d 、 q 轴电流动态限幅等。以 d 轴电流优先的动态限幅方法为例,表达式如式(10)和式(11)所示^[49]。其中, I_d 、 I_q 分别为输出电流限幅后的 d 、 q 轴分量; I_{mag} 为输出电流的模值。

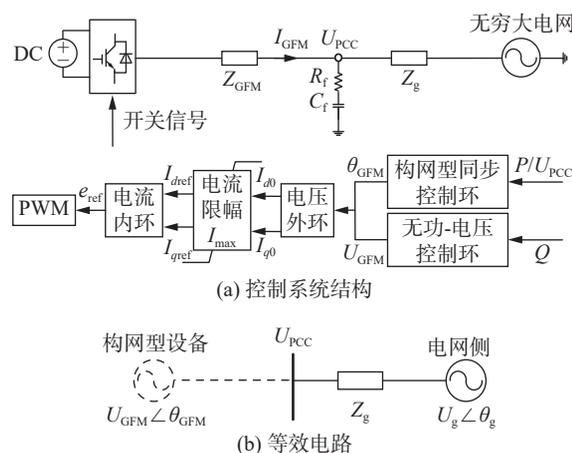


图7 电压环输出电流指令值限幅示意

Fig.7 Schematic diagram of the current command limitation in voltage loop output

$$I_d = \begin{cases} I_{d0} & I_{d0} \leq I_{max} \\ I_{max} & I_{d0} > I_{max} \end{cases} \quad (10)$$

$$I_q = \begin{cases} I_{q0} & I_{mag} \leq I_{max} \\ \sqrt{I_{max}^2 - I_{d0}^2} & I_{d0} \leq I_{max} < I_{mag} \\ 0 & I_{d0} > I_{max} \end{cases} \quad (11)$$

$$I_{mag} = \sqrt{I_{d0}^2 + I_{q0}^2} \quad (12)$$

直接限制电流指令值的方法仅需在电流环指令入口处设置限幅环节,具有简单易实现的优势。但是当网侧电压发生深度跌落导致电流饱和时,构网型变流器将等效为输出电流幅值恒定的电流源,电压外环失去其控制作用,图8为电流未饱和与电流饱和时构网型变流器的运行状态,图中 I_{max} 为电流限幅环节输出的饱和电流相量。文献[50]研究表明,暂态期间电流饱和问题会对变流器的暂态同步稳定性产生影响,导致变流器的虚拟功角曲线发生偏移。

4.1.2 虚拟阻抗限幅

采用虚拟阻抗限制电流幅值的方法适用于多种类型的控制结构,如电压电流双环控制结构^[51-53]、采用虚拟阻抗代替电压内环的控制结构^[54-56]以及直接电压式控制结构^[28,57]。根据式(9)可知,假设暂态期间构网型变流器虚拟内电势保持恒定,则故障

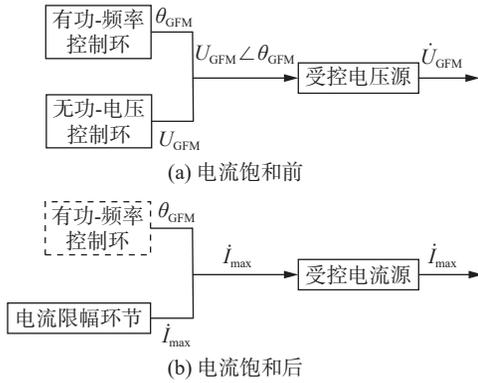


图8 电流饱和前后构网型变流器运行状态

Fig.8 Operating states of the grid-forming converter before and after current saturation

电流仅与网侧电压幅值跌落程度和变流器到故障点处的等效阻抗有关,且故障电流的大小与等效阻抗成反比,虚拟阻抗限幅法基于此原理通过增大构网型变流器的等效虚拟阻抗间接限制暂态期间短路电流的幅值。

目前实现虚拟阻抗限幅的方法主要包括两类,第一类方法是利用虚拟阻抗分担的压降限制输入电压环的电压指令值,进而间接限制输出电流指令值的幅值;第二类方法是通过修改故障期间虚拟阻抗的大小,对输出电流指令值进行限制,此类方法多用于采用虚拟阻抗代替电压内环的控制结构中,通常使用环型限幅器实现对电流指令值的限幅^[54-55]。两类方法采用的限幅手段不同,但是原理均为等效增大构网型变流器的虚拟阻抗^[17]。图9为采用虚拟阻抗限幅示意,其中虚线框内按序号依次为电压电流双环、虚拟阻抗和直接电压式控制结构。图9中, I_f 为输入的虚拟电流; I_{ref} 为电流指令值。

相比直接限制电流指令值的限流方法,虚拟阻抗限幅法的物理意义更加明确,能有效限制暂态期间的短路电流,并提高构网型变流器的暂态稳定性。此外,在电流电压双环控制结构中通过虚拟阻抗调节电压环的输出能一定程度保留电压环的调节作用,避免了电流饱和期间电压环失效的问题^[18]。

4.1.3 综合限流法

除了上述两类维持构网型模式的限流方法,还有部分研究采取了将多种限流措施综合的方法,此类方法一般根据短路电流的稳态分量和暂态分量或者故障程度的差异分别采用不同的暂态电流控制策略。文献[28]和文献[58]针对故障电流的暂态分量和稳态分量分别进行独立限流控制。其中文献[28]采用相量限流法和虚拟阻抗法分别限制故障电流的稳态分量和暂态分量;文献[58]通过调整输出电压指令值限制短路电流的稳态分量,通过

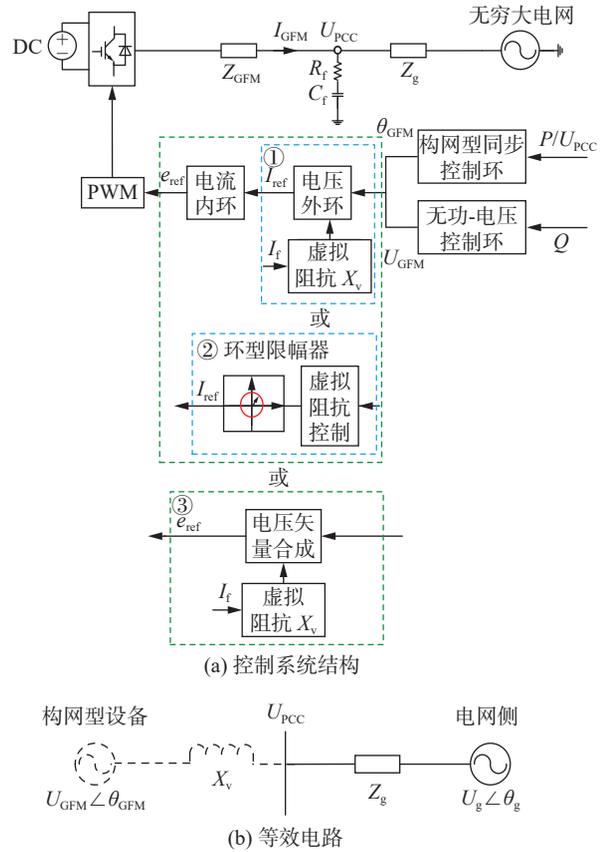


图9 虚拟阻抗限幅示意

Fig.9 Schematic diagram of the virtual impedance limiting

故障期间投入虚拟电抗限制短路电流的暂态分量。文献[29]则根据构网型变流器距故障点距离对变流器故障程度进行划分,对故障程度较深的近端构网型变流器采用切换模式的暂态电流控制策略,对故障程度较浅的远端构网型变流器采用不切换模式的虚拟阻抗法限制短路电流,该方法虽然根据故障程度深浅进行了差异化处理,但是近端变流器仍存在故障期间模式切换的问题。

综合限流法根据故障电流不同分量的特点采用相应的控制策略,使不同限流方法的优势相互补充,能够有效限制故障发生和切除瞬间、故障持续期间的短路电流,是一种有效的暂态电流控制策略。但综合限流法的控制策略更加复杂,构网型变流器后续暂态期间的稳定性分析的难度也进一步增大。

4.2 暂态期间的电压主动支撑控制策略

电力系统中新能源占比的提升导致系统缺失了部分常规电源的主动支撑作用,大规模新能源的并入和长距离高压直流输电系统的建设也对电力系统暂态电压的支撑能力提出了更高的要求。构网型变流器稳态期间体现出电压源的外特性,具备较为稳定的电压支撑能力,但电力电子设备对暂态

电流的耐受能力有限,因此如何在避免电流越限的情况下维持构网型变流器暂态期间的电压主动支撑能力是当前研究的热点。文中针对网侧电压跌落和直流送出系统换相失败 2 种故障场景,对构网型变流器维持电压主动支撑能力的暂态控制策略展开综述。

4.2.1 网侧电压跌落期间的主动支撑

当电网侧发生电压跌落时,构网型变流器需要增发无功功率以提升电网的暂态电压水平^[57]。目前电网低电压故障期间构网型变流器暂态主动支撑策略主要通过功率环的附加控制实现,其控制目标通常是在故障期间使变流器在限流水平下尽可能增发无功电流,提高功率环的无功输出^[41-44,54]。文献^[59]从构网型变流器增发无功的角度出发,通过调整有功和无功指令值使构网型变流器暂态期间优先发出无功功率支撑故障点电压恢复。文献^[42, 54]均是通过附加控制使构网型变流器输出短路电流的功率因数与电网短路电流的功率因数一致,保证 2 种电流叠加后得到的故障电流达到限流水平下的最大值,进而提高变流器对故障点电压的支撑能力。其中文献^[54]需要通过电网中的监控设备采样电网短路电流的功率因数角,对电网的通信技术有着较高要求;文献^[42]在文献^[54]的基础上,在有功环和无功环中分别增加了相角补偿和电压下垂控制,实现了构网型变流器对电网电压的最优支撑,避免了暂态控制对电网通信设备的依赖。与前述文献不同,文献^[43]并未直接通过改进控制提高构网型变流器的支撑能力,而是围绕新能源场站以构网型和跟网型变流器多机协同为切入点,通过构网型变流器的柔性限幅和暂态有功阻尼控制为跟网型变流器提供更为稳定的同步条件,再通过跟网型变流器的改进控制提升场站整体的无功支撑能力。此外,目前有研究通过提升并网变流器设备的耐热能力,实现了变流器 3 倍额定电流持续 3 s 和 1.5 倍额定电流持续 30 s 的过流能力^[31],为未来进一步提升构网型变流器对电网电压的支撑能力提供了研究基础。

综上,在电网发生低电压故障时既要采取限流措施保证构网型变流器的安全稳定运行,又要最大限度地利用变流器的过流能力输出无功电流、增发无功功率,保证暂态期间对电网电压的主动支撑。由于变压器和线路阻抗参数的差异,同步发电机通常可提供 3~10 倍额定电流支撑系统电压^[31],受限于电力电子器件的耐流水平,现阶段构网型变流器的过流能力弱于同步发电机。目前现场试验中已发

现大容量中压构网型静止无功发生器的短时过流能力可达 7 倍。构网型风机和储能通常要求变流器具备 1.5~3 倍的过流能力,如中关村储能产业技术联盟发布的《构网型储能变流器技术规范》中提出“构网型储能变流器交流侧电流在 150% 额定电流下,持续运行时间宜不少于 10 s;构网型储能变流器交流侧电流在 200% 额定电流下,持续运行时间宜不少于 2 s”的过载能力要求,以在保证设备自身安全的前提下向电网提供电压支撑^[59-60]。

4.2.2 换相失败期间的主动支撑

换相失败是直流送出系统最常见的故障之一,此期间换流站吸收的无功功率快速波动,导致送端电网电压出现先低后高的连锁反应,也存在着电网电压跌落下的主动支撑问题。直流换相失败下送端电网电压的波动具有幅值连续变化、三相对称波动、波动周期短且以基波频率为主等特征,目前的研究初步表明构网型变流器接入系统能一定程度上缓解换相失败时系统暂态过电压水平^[45-48]。文献^[45-47]针对直流送出系统换相失败问题,建立了特高压直流输电系统送端电网的暂态数学模型,从虚拟同步机控制双馈风电系统和风场层多机协调 2 个维度提出了抑制换相失败下送端电网过电压的风电系统改进控制策略;文献^[48]采用有功控制环路增加功率补偿项、无功控制环路按相关标准向电网注入无功电流的风电机组高、低电压连锁故障穿越策略,提高了构网型风电机组对连锁故障电压冲击的承受能力和恶劣工况下的并网稳定性。

目前对于换相失败下新能源机组的暂态控制多聚焦于采用锁相环同步的跟网型新能源机组,围绕构网型新能源机组换相失败的故障穿越技术研究尚处于起步阶段。由于直流系统换相失败时送端电网电压的波动情况复杂,该类故障下构网型变流器的暂态控制策略还有待进一步深入研究。

4.2.3 电压支撑作用对电网的影响

随着新能源占比的提升,局部电网因缺乏传统同步机而可能出现电压支撑不足的问题^[61]。构网型变流器具备电压源特性,稳态期间能够提供稳定的电压支撑保障功率输送和负荷正常运行,暂态期间则能快速响应电网需求,通过注入无功功率缓解电网电压跌落程度并缩短故障后电压恢复时间。因此,在新能源高比例接入、传统电压源不足的弱电网中,构网型变流器的电压支撑作用能够有效提升电网的抗扰动能力和动态稳定性。

前述两类暂态控制策略因故障期间的控制模式不同,其电压支撑能力有所差异。切换至跟网型

模式的暂态控制策略存在模式切换的固有延时,且跟网型模式依赖锁相环采样并网点电压,再经电压环控制实现调压,其电压支撑的响应速度较慢^[62],此外控制模式切换的平滑性和弱电网中锁相环的稳定性也会影响变流器的暂态稳定性;维持构网型模式的暂态控制策略在故障期间仍具备构网控制的惯量和阻尼特性,网侧电压跌落瞬间能够维持内电势的幅值和相角不发生突变,为电网提供连续的电压和频率支撑。综上,维持构网型模式的暂态控制策略在稳态和暂态期间均能主动响应电网需求、快速提供电压支撑,并能在孤网中自主构建电压维持电网运行;切换模式的暂态控制策略在故障发生进入跟网型模式后会失去电压主动支撑能力,若暂态期间电网进入孤岛运行状态,由于锁相环失去并网参考电压,变流器将难以稳定运行。

5 总结与思考

针对电网电压跌落期间构网型变流器电流越限和无功主动支撑不足的问题,将构网型变流器暂态控制策略根据暂态期间是否切换模式分为切换至跟网型模式和维持构网型模式的暂态控制策略,并分别对两类控制策略的研究现状展开综述。本章对电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略的研究现状进行总结,并提出当前研究存在的不足和对未来面临挑战的思考。

5.1 构网型变流器暂态控制策略总结

根据前文所述,切换至跟网型模式和维持构网型模式的暂态控制策略的主要差异是暂态限流期间控制模式不同,进而具有不同的适用场景,总结见表2。跟网型变流器经锁相环采样并网点电压后通过控制输出电流完成与电网同步,暂态期间便于对输出电流进行控制,在强电网中能够实现新能源发电功率的最大化利用,并能保证较高的并网电能质量。因此,切换至跟网型控制模式的暂态控制策略适用于具有一定电网强度、系统中存在同步机或构网型变流器等电压源提供并网点参考电压的场景。构网型变流器采用自主同步方式实现与电网

同步,能够在缺乏同步发电机的弱电网场景中稳定运行,适用于电网强度较弱或缺乏同步发电机、同步调相机等传统电压源的系统。目前我国正加快产业和能源结构调整,积极推进沙漠、戈壁、荒漠等地区的新能源基地开发。沙戈荒地区电网通常位于我国大电网架构的末梢,具有电网强度低、交流网架薄弱、缺少传统同步发电机支撑等特点,该场景下亟须适当配置构网型变流器以支撑系统电压、增大系统惯量和阻尼,提高沙戈荒地区新能源并网稳定性和电网的新能源消纳能力。因此,虽然跟网型模式的低电压穿越策略已有较为成熟的研究,但为满足弱电网场景下系统的支撑需求,维持构网型模式的暂态控制策略还需更加深入的研究和推广。

5.2 存在的不足与思考

切换至跟网型控制模式的暂态控制策略具有在跟网型和构网型模式间切换的优势,该策略目前存在的不足主要包括模式间平滑切换、暂态期间无法主动响应电网需求和控制结构更加复杂等问题;维持构网型控制模式的暂态控制策略只能维持单一的控制模式,无法根据应用场景灵活切换控制模式,并且暂态期间构网型控制技术尚没有跟网型成熟。为解决上述问题,可以从以下方面进行改进:

(1) 多机间的协调控制是实现两类构网型变流器暂态控制策略互补的关键。根据电网的结构、强度等特性配置采用不同暂态控制策略的构网型变流器,或者通过不同类型的并网变流器之间、并网变流器和同步发电机之间的协调运行控制提升新能源并网稳定性。在缺乏同步发电机的电网中,可以采用构网型变流器自主构建电压带负荷运行或外送功率,并为跟网型变流器提供跟踪同步所需的并网点电压,若采用维持构网型模式的暂态控制策略,故障期间变流器依然能够起到一定的电压支撑作用;在配有同步发电机或构网型变流器等电压源的电网中,可以配置跟网型变流器实现新能源发电功率的最大化利用,也可将采用模式切换策略的构网型变流器在系统电压支撑能力充足时切换至跟

表2 构网型变流器暂态控制策略总结

Table 2 Summary of transient control strategies for grid-forming converters

控制策略	控制原理	优势	不足	适用场景
切换至跟网型模式	稳态期间采用构网型模式,暂态期间切换至跟网型模式	暂态期间便于限流,控制模式更加灵活	须解决模式间平滑切换问题,跟网型模式下响应速度较慢	跟网型模式下利用锁相环实现同步,适用系统中存在外部电源提供并网参考电压,或由故障前并网点电压作为参考电压
维持构网型模式	暂、稳态期间均保持构网型模式	快速响应电网需求,暂态期间具备主动支撑能力	暂态期间的限流控制更加复杂,控制模式较单一	暂、稳态期间均具备构网能力,适用于缺乏传统电源支撑的弱电网

网型模式运行,实现对电源侧最大功率点的跟踪。

(2) 精准快速的电网信息采样技术是实现构网型变流器暂态期间动态响应和控制模式间快速平滑切换的重要保障。高精度的信息采样能够准确捕获电网信息的实时变化,确保变流器控制系统在故障时迅速、准确地感知电网状态,并及时发出调节指令响应电网需求。此外,在切换至跟网型模式的暂态控制策略中存在切换过程的固有延时,若能进一步提升设备的数据采样和处理速度,将有利于提升构网型变流器暂态控制的动态响应速度。

(3) 构网型风电、光伏与储能设备的衔接配合是提升构网型控制主动支撑能力的重要手段。储能设备能够参与新能源并网系统的惯量和频率控制,通过其合理配置可以增强系统的电压和频率稳定性,并且储能的快速充放电特性可以降低新能源发电的波动性,有利于提升构网型变流器的主动支撑能力。

6 结论与展望

随着我国新型电力系统呈现出高比例新能源和高比例电力电子设备的“双高”发展态势,构网型变流器的自主同步、主动支撑、孤岛运行等优势日益凸显。构网型变流器作为电力电子设备,与同步发电机相比在同步机制、响应速度、耐流能力等方面存在显著差异,传统同步发电机的分析方法难以直接套用在构网型变流器的研究中。构网型变流器的动态和暂态控制、暂态稳定性等研究尚处于起步阶段,相关示范应用工程初步开展,大部分研究处于理论试验初期。文中对电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略的研究现状展开综述,重点对构网型变流器故障期间的电流越限、电压主动支撑问题和暂态控制策略进行总结和评述,并初步得出以下结论。

(1) 构网型变流器暂态期间的过流能力有限。构网型变流器稳态期间的外特性表现为串联低阻抗的电压源,通过控制输出电压相量实现与电网的自主同步,在故障瞬间优先维持输出内电势不变,易产生过流风险。此外,通过理论分析发现故障期间构网型变流器内部的短路电流主要与网侧电压跌落程度、变流器和故障点间等效阻抗有关。

(2) 构网型变流器稳态期间具备自主同步和主动支撑电网电压的能力,当暂态期间维持构网型模式运行时变流器的主动支撑能力与其电流限幅值的大小存在耦合关系,若电流限幅值较小将限制变流器的电压支撑能力。

(3) 针对电网电压跌落下构网型变流器的过电流和电压主动支撑能力受限问题,目前构网型变流器暂态控制策略可以分为故障期间切换至跟网型控制模式和维持构网型控制模式两类。其中切换控制模式的暂态控制策略便于直接限制故障期间的短路电流,但是存在模式间平滑切换和故障期间失去主动支撑能力、响应速度下降等问题;维持构网型控制模式的暂态控制策略能在故障期间维持对电网的主动支撑,但当前该类策略的研究尚不如跟网型控制模式的暂态控制策略成熟,需要解决的难点是在限制故障电流的同时尽可能地提高电压支撑能力。

文中总结了电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略的研究现状,针对目前研究中存在的不足对未来高比例新能源电力系统中构网型变流器的研究方向作出如下展望。

(1) 推进构网型变流器暂态控制策略的深化研究和工程应用。进一步完善新能源高、低电压穿越期间构网型变流器的暂态控制策略,揭示控制参数对变流器支撑能力和稳定性的影响机理。同时,推动构网型变流器在实际工程中的验证与优化,在工程应用中不断优化控制策略和设备参数,加快国内构网型变流器相关标准与技术规范的制定。

(2) 电网电压跌落下构网型变流器并网稳定性问题的研究。构网型变流器并网的同步机制具有控制策略主导、响应速度快、切换和离散性显著等特征,变流器暂态控制策略的非线性、多时间尺度等特性又进一步增加了其并网稳定性问题的复杂度,明确构网型变流器的并网同步稳定机理并挖掘暂态期间提升构网型变流器并网稳定性的控制技术是未来研究的重点之一。

(3) 含规模化构网型变流器的复杂系统的暂态控制策略研究。早期新能源多机并联系统的研究主要集中在跟网型变流器并网的场景,目前围绕构网型变流器多机系统暂态控制策略的研究较少。针对规模化构网型变流器接入的大型电力系统,其控制策略需要考虑设备间的动态耦合、控制模式切换的协调性以及故障穿越期间电压和频率支撑的响应速度等。将构网型变流器单机设备的暂态控制策略拓展至多机系统,并优化多机协同的稳定控制技术是未来保障高比例新能源电力系统安全稳定运行的关键点之一。

致谢

本文得到国家电网有限公司西北分部科技项目(SGNW0000DKJS2310133)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年 1-6 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2024-07-20]. https://www.nea.gov.cn/2024-07/20/c_1310782235.htm.
National Energy Administration. National Energy Administration releases national power industry statistics for January-June 2024 [EB/OL]. [2024-07-20]. https://www.nea.gov.cn/2024-07/20/c_1310782235.htm.
- [2] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [3] 徐耀. 基于虚拟同步机控制的变流器同步稳定性分析与提升技术研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2023.
XU Yao. Research on synchronous stability analysis and lifting technology of converter based on virtual synchronizer control [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2023.
- [4] PAN D H, WANG X F, LIU F C, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [5] 屠勇, 苏建徽, 杨向真, 等. 虚拟振荡器控制的新型逆变器无线并联方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4184-4192.
TU Yong, SU Jianhui, YANG Xiangzhen, et al. A novel virtual oscillator control in wireless parallel connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4184-4192.
- [6] 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.
- [7] AWAL M A, YU H, HUSAIN I, et al. Selective harmonic current rejection for virtual oscillator controlled grid-forming voltage source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(8): 8805-8818.
- [8] 罗龙, 李耀华, 李子欣, 等. 基于范德波尔振荡器和 PQ 控制的微电网并网协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 130-139.
LUO Long, LI Yaohua, LI Zixin, et al. On-grid and off-grid coordinated control strategy of microgrid based on Van der Pol oscillator and PQ control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 130-139.
- [9] SEO G S, COLOMBINO M, SUBOTIC I, et al. Dispatchable virtual oscillator control for decentralized inverter-dominated power systems: analysis and experiments[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anaheim, CA, USA. IEEE, 2019: 561-566.
- [10] AWAL M A, HUSAIN I. Unified virtual oscillator control for grid-forming and grid-following converters[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4573-4586.
- [11] ARGHIR C, DÖRFLER F. The electronic realization of synchronous machines: model matching, angle tracking, and energy shaping techniques[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4398-4410.
- [12] 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.
- [13] HUANG L B, XIN H H, DÖRFLER F. H_∞ -control of grid-connected converters: design, objectives and decentralized stability certificates[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 3805-3816.
- [14] 许靖翔, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3595.
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [15] 余果, 吴军, 夏热, 等. 构网型变流器技术的发展现状与趋势研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9): 65-70.
YU Guo, WU Jun, XIA Re, et al. Study on the status quo and development trend of grid-forming converter technology[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(9): 65-70.
- [16] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1702.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1702.
- [17] 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.
- [18] 蔡旭, 秦垚, 王晗, 等. 风电机组的自同步电压源控制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2478-2490.
CAI Xu, QIN Yao, WANG Han, et al. Review of self-synchronous voltage source control for wind turbine generator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2478-2490.
- [19] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1334.
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334.
- [20] 盛况, 任娜, 徐弘毅. 碳化硅功率器件技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1741-1753.
SHENG Kuang, REN Na, XU Hongyi. A recent review on sili-

- con carbide power devices technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1741-1753.
- [21] LU X N, WANG J H, GUERRERO J M, et al. Virtual-impedance-based fault current limiters for inverter dominated AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 1599-1612.
- [22] CHEN J R, PRYSTUPCZUK F, O'DONNELL T. Use of voltage limits for current limitations in grid-forming converters[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(2): 259-269.
- [23] 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 Qingchan. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.
- [24] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators [C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA. IEEE, 2008: 1-3.
- [25] 赵炳洋, 赵波, 张芳, 等. 构网型逆变器技术综述[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 37(4): 57-67.
ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, ZHANG Fang, et al. Overview of grid forming inverter technology[J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2022, 37(4): 57-67.
- [26] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(21): 165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(21): 165-175.
- [27] 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.
- [28] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 403-412.
SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-412.
- [29] 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.
- [30] 胡海林, 万晓凤, 丁小华, 等. 分布式虚拟同步发电机改进低电压穿越控制技术[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(1): 145-155.
HU Hailin, WAN Xiaofeng, DING Xiaohua, et al. Improved low voltage ride-through control strategy for distributed virtual synchronous generator[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(1): 145-155.
- [31] SHAO W H, WU R Z, RAN L, et al. A power module for grid inverter with in-built short-circuit fault current capability[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(10): 10567-10579.
- [32] 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.
- [33] CHOOPANI M, HOSSEINIAN S H, VAHIDI B. New transient stability and LVRT improvement of multi-VSG grids using the frequency of the center of inertia[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 527-538.
- [34] QIN Y, WANG H, DENG Z Y, et al. Control of inertia-synchronization controlled wind turbine generators under symmetrical grid faults[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023, 38(2): 1085-1096.
- [35] 郭小强, 邹伟扬, 漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(3): 22-28, 19.
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28, 19.
- [36] 周京华, 刘劲东, 陈亚爱, 等. 大功率光伏逆变器的低电压穿越控制[J]. *电网技术*, 2013, 37(7): 1799-1807.
ZHOU Jinghua, LIU Jindong, CHEN Yaai, et al. Low voltage ride-through control of high power inverter for grid-connection of photovoltaic generation[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(7): 1799-1807.
- [37] 谭骞, 徐永海, 黄浩, 等. 不对称电压暂降情况下光伏逆变器输出电流峰值的控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(3): 601-608.
TAN Qian, XU Yonghai, HUANG Hao, et al. A control strategy for peak output current of PV inverter under unbalanced voltage sags[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(3): 601-608.
- [38] 房志学, 苏建徽, 汪海宁, 等. 虚拟同步发电机的LVRT能力研究[J]. *电力电子技术*, 2019, 53(11): 12-14.
FANG Zhixue, SU Jianhui, WANG Haining, et al. Research on LVRT capability of virtual synchronous generator[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(11): 12-14.
- [39] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(7): 2134-2140.
CHEN Tianyi, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching[J]. *Power System Technology*, 2016,

- 40(7): 2134-2140.
- [40] SHI K, SONG W T, XU P F, et al. Low-voltage ride-through control strategy for a virtual synchronous generator based on smooth switching[J]. *IEEE Access*, 2017, 6: 2703-2711.
- [41] 桑顺, 张琛, 蔡旭, 等. 全功率变换风电机组的电压源控制(一): 控制架构与弱电网运行稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5604-5616.
- SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control of wind turbines with full-scale converters (part I): control architecture and stability analysis under weak grid conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5604-5616.
- [42] DENG Z Y, WANG H, QIN Y, et al. An optimal short-circuit current control method for self-synchronization controlled wind turbines[C]//2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Haining, China. IEEE, 2022: 1-6.
- [43] 杨铭, 曹武, 赵剑锋, 等. 受控电压/电流源型变流器混合多机暂态电压支撑策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(19): 5207-5223, 5240.
- YANG Ming, CAO Wu, ZHAO Jianfeng, et al. Transient voltage support strategy for hybrid multi-converter of controlled voltage/current source converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(19): 5207-5223, 5240.
- [44] ANDRESEN M, DE CARNE G, LISERRE M. Load-dependent active thermal control of grid-forming converters[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(2): 2078-2086.
- [45] NIAN H, LIU Y M, LI H P, et al. Commutation overlap characteristic modeling and stability analysis of LCC-HVDC in sending AC grid[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1594-1606.
- [46] JIN X, NIAN H, ZHAO C, et al. Optimal power coordinated control strategy for DFIG-based wind farm to increase transmission capacity of the LCC-HVDC system considering commutation failure[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(3): 3129-3139.
- [47] JIN X, NIAN H, ZHAO C, et al. Improved VSG control strategy for wind turbines connected to non-synchronized grid under commutation failure[C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Nanjing, China. IEEE, 2022: 885-889.
- [48] 王德胜, 颜湘武, 贾焦心, 等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(6): 2164-2175.
- WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, et al. High/low voltage continuous fault ride through strategy of PMSGs based on virtual synchronization technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(6): 2164-2175.
- [49] 黄林彬, 章雷其, 辛焕海, 等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 117-123, 150.
- HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Mechanism analysis of virtual power angle stability in droop-controlled inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 117-123, 150.
- [50] 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.
- [51] MATEVOSYAN J, MACDOWELL J, MILLER N, et al. A future with inverter-based resources: finding strength from traditional weakness[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2021, 19(6): 18-28.
- [52] 杨帆, 张辉, 王帆, 等. 微电网逆变器惯性电压下垂控制策略研究[J]. *电力电子技术*, 2018, 52(12): 93-94.
- YANG Fan, ZHANG Hui, WANG Fan, et al. Inertia voltage droop control strategy of micro grid inverter[J]. *Power Electronics*, 2018, 52(12): 93-94.
- [53] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(4): 795-806.
- LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(4): 795-806.
- [54] LIU C, CAI X, LI R, et al. Optimal short-circuit current control of the grid-forming converter during grid fault condition[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2021, 15(10): 2185-2194.
- [55] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1062-1073.
- [56] 杨仁焯, 张琛, 蔡旭, 等. 海上风电-柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4823-4835.
- YANG Renxin, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control and fault ride-through of VSC-HVDC systems with offshore wind farm integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(13): 4823-4835.
- [57] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Voltage sag ride-through performance of virtual synchronous generator[C]//2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA). Hiroshima, Japan. IEEE, 2014: 3298-3305.
- [58] 李清辉, 葛平娟, 肖凡, 等. 基于功角与电流灵活调控的VSG故障穿越方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.
- LI Qinghui, GE Pingjuan, XIAO Fan, et al. Study on fault ride-through method of VSG based on power angle and current flex-

ible regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.

[59] 万萌. 动态限流方式下的功率器件主动热控制方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.

WAN Meng. Research on active thermal control method of power devices under dynamic current limiting mode[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.

[60] CHEN M, ZHOU D, TAYYEBI A, et al. Generalized multi-variable grid-forming control design for power converters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(4): 2873-2885.

[61] 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.

[62] 孙素娟. 跟网型和构网型风电并网支撑特性及宽频带振荡分

析与抑制[R]. 中国电工技术学会, 2023.

SUN Sujuan. Support characteristics and wide-band oscillation analysis and suppression of grid-following and grid-forming wind power integration [R]. China Electrotechnical Society, 2023.

作者简介:



林宇轩

林宇轩(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为高占比新能源系统安全稳定分析与控制 (E-mail: yuxuanlin0208@163.com);

李威(1976), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 从事高占比新能源系统安全稳定分析与控制工作;

朱玲(1986), 女, 硕士, 高级工程师, 从事高占比新能源系统安全稳定分析与控制工作。

Review of transient control strategies for grid-forming converters under grid voltage sag conditions

LIN Yuxuan¹, LI Wei¹, ZHU Ling¹, REN Chong²

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: As a large amount of renewable energy is integrated into the grid via power electronic converters, the power system is faced with challenges, such as reduced inertia, diminished disturbance resistance, and declining transient support capabilities. The stability of the renewable energy interconnected with the grid and the capability of supporting the grid are enhanced by the autonomous synchronization and active support capacity of grid-forming converters. The grid-connected control strategy of grid-forming converters is closely related to the stability of the device and system under transient voltage disturbances. This paper focuses on disturbances caused by grid voltage sags and reviews the transient control strategies of grid-forming converters. Firstly, current synchronization control strategies of grid-forming converters are summarized. Next, the mechanism of overcurrent generation in grid-forming converters is revealed, and the overcurrent behavior and support characteristics of converters during transient periods are analyzed. Then, transient control strategies are classified into two major types, and the principles, research status, advantages and disadvantages of these two types of control strategies are comparatively discussed. Finally, future research directions for grid-connected issues of grid-forming converters in high-penetration renewable energy power systems are prospected.

Keywords: grid-forming converter; current limiting control; voltage support; transient control strategy; high penetration renewable energy power system; renewable energy grid integration

(编辑 方晶)