

构网型变流器的现状与发展趋势

刘旭^{1,3}, 张国驹^{1,3}, 裴玮^{1,3}, 朱恩泽¹, 张学¹, 赵军愉⁴

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院, 济南 250013;
3. 山东省先进电磁变换技术重点实验室, 济南 250013; 4. 国网保定供电公司, 保定 071051)

摘要: 随着新能源和电力电子的发展, 新型电力系统呈现典型的“双高”特征, 但同时带来低惯性、弱稳定性等问题。构网型(GFM)控制技术可实现变流器自主地建立频率和控制电压, 改善对外部电压源的依赖性, 提高系统稳定性。对构网型变流器的现状与发展趋势进行综述。首先, 对跟网型(GFL)控制技术与构网型控制技术进行对比分析, 指出构网型控制技术是解决新型电力系统稳定性的有效途径; 然后介绍现有的构网型控制技术, 分析构网型控制技术在各领域的应用; 最后指出构网型控制技术应用于变流器时所面临的挑战。

关键词: 可再生能源; 电力电子; 控制系统; 变流器; 构网型

中图分类号: TK02

文献标志码: A

0 引言

随着“双高”电力系统的发展, 其面临的要求越来越高, 尤其是电力电子变换器广泛应用带来的系统稳定性降低问题日益凸显^[1]。为应对大量分布式发电单元的加入对配电网的冲击, 变流器作为新能源接入电网的关键器件, 对新型电力系统的发展具有重要意义^[2-3]。变流器可实现新能源和微电网连接, 具有电能变换和功率传递的作用, 可通过控制实现可再生能源的安全可靠接入^[4-5]。

目前变流器多采用跟网型(grid-following, GFL)控制技术, 通过锁相环(phase-locked loop, PLL)测量并网的电压频率信息^[6], 产生相应的有功功率和无功功率与电网保持同步。文献[7]提出一种基于相位同步的控制器状态跟随平滑切换控制策略, 有效抑制微电网储能变流器切换过程中的电压波动, 同时降低冲击电流; 文献[8]提出一种基于分频控制的微电网并网电能质量主动提升控制策略, 有效提高了电能质量治理的响应速度和控制精度; 文献[9]针对电网电压出现不平衡会导致储能变流器输出有功功率波动、无功功率波动和三相电流峰值越限问题, 提出一种考虑电流峰值限制的储能变流器协调控制策略; 文献[10]针对微网储能变流器采用状态跟随控制器进行切换的过程中存在微小电压、电流扰动等问题, 提出一种基于线性自抗扰控制器的无缝切换控制策略; 文献[11]针对公共连接点电压跌落情况, 提出一种基于电流下垂的故障穿越控制策略。

但是随着新能源和电力电子设备的接入, 电网稳定性降低, 跟网型变流器难以满足需求, 于是构网型(grid-forming, GFM)控制的概念被提出^[12]。目前构网型控制尚未被明确定义, 文献[13-14]指出构网型控制在正常运行时被控制为电压源, 可通过相应的控制策略, 自主地建立电压以及频率, 达到其“构网”的功能。文献[15]提出, 类似于同步发电机, 构网型控制无需锁相环, 能自发地与电网同步, 同时还能表现出对电网频率、电压的响应和支撑。相比于跟网型变流器, 构网型变流器通过新能源系统建立电压, 可快速调整功率, 在无低通滤波器的情况下可实现惯性响应, 在极端环境下, 还可提供故障穿越、黑启动及有功无功稳定功能, 有效提高电力系统的可靠性^[16-17]。但目前国内外对构网型变流器的研究相对较少, 仍处于发展阶段。文献[18]提出一种基于虚拟阻抗的构网型储能变流器并网系统环路增益重塑控制策略; 文献[19]对构网型变流器及其对电网稳定性产生的影响进行了描述, 同时指出由现在的电力系统过渡到未来含有更多电力电子设备的电网是一项大挑战; 文献[20-21]对比分析了跟网型变流器和构网型变流器, 指出构网型变流器在未来电网的优势。目前对于构网型变流器的研究还是相对匮乏, 有必要对构网型变流器的控制策略、应用场景以及面临的问题挑战等方面进行总结和对比分析。

本文在上述研究的基础上对构网型变流器的现状与发展趋势进行了梳理。首先对比分析跟网型控制技术与构网型控制技术, 然后对构网型控制策略进行综述, 简述构网型

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 河北省重大科技成果转化专项(22292101Z)

通信作者: 张国驹(1984—), 男, 博士、正高级工程师, 主要从事电力电子与新能源方面的研究。zhangguojue@mail.iee.ac.cn

控制技术在各个领域的应用场景,最后对今后发展所面临的挑战进行分析,希望为构网型变流器的研究提供思路与借鉴。

1 跟网型与构网型变流器对比分析

对于接入电网的变流器,图 1 给出常用的单级式拓扑结构图^[22],主要包括新能源系统以及变流器,变流器由直流端口、PWM 变换器以及交流端口组成。其中直流端口直接或经过 DC-DC 变换器与新能源接口相连,交流端口经过滤波器与电网连接。

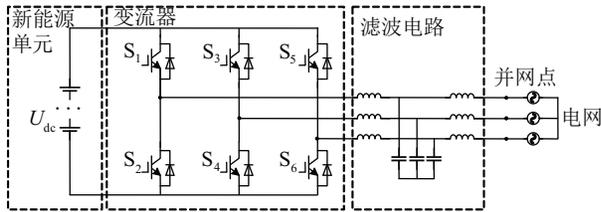


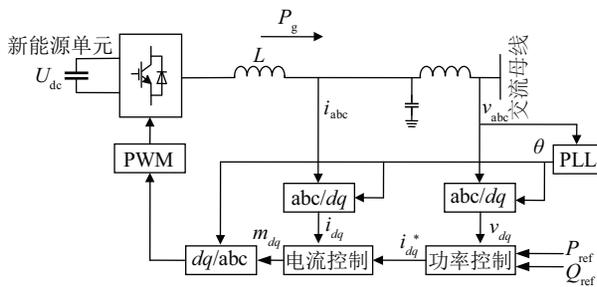
图 1 系统拓扑结构

Fig. 1 System topology diagram

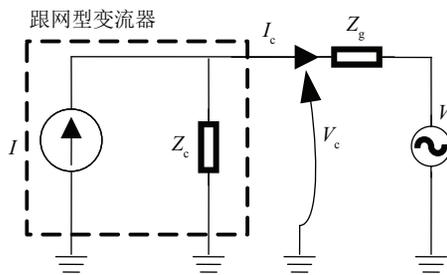
该系统具有以下特点:1)系统结构简单,新能源通过变流器来实现与电网的连接;2)工作特性多样,变流器的工作特性由自身的控制策略决定,采用跟网型控制技术时,变流器可近似为可控电流源;而采用构网型控制技术时,变流器可近似为可控电压源。

1.1 跟网型控制技术

跟网型控制是目前变流器主要使用的控制策略,其基本控制架构及等效电路如图 2 所示。



a. 跟网型控制结构图



b. 跟网型变流器等效电路图

图 2 跟网型控制结构及等效电路

Fig. 2 Network following control structure and equivalent circuit

由图 2a 可知,变流器的跟网型控制一般通过锁相环与接

入电网保持同步,包含两个子系统:锁相环系统和电流控制回路^[23-24]。其中锁相环系统用于跟踪并网电压的频率和相位,通常由 dq 变换、PI 控制器和一个积分器组成,如图 3 所示;电流控制回路以锁相环的电压和电流为输入,以 PWM 信号为输出,调节注入电网的电流。

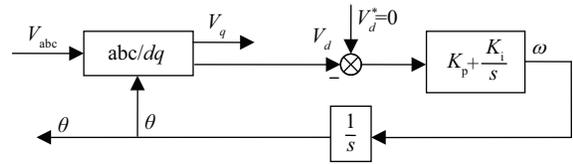


图 3 锁相环系统

Fig. 3 Phase locked loop system

采用跟网型控制的变流器可等效为图 2b,具有电流源属性,通过不断调整功率来实现对电网的跟随,增强电力系统的稳定性。但其依赖与稳定的本地电压,在要求瞬时功率时,测量系统的延迟会对其安全调节造成影响。文献^[25-26]发现在低电网强度(即弱电网)下,锁相环与电流控制的耦合现象加重,锁相环的动态特性会极大地削弱了电流控制的稳定裕度,影响系统响应甚至造成系统失稳。

1.2 构网型控制技术

构网型变流器借鉴同步发电机(synchronons generator, SG)的原理,通过使用 SG 摆动方程的工频控制来实现与电网的同步,可表示为:

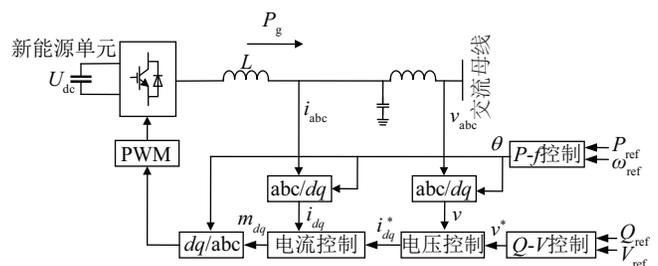
$$J \frac{d\omega_r}{dt} = P_m - P_e - P_d \tag{1}$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = P_m - P_e - D(\omega_r - \omega_{ref}) \tag{2}$$

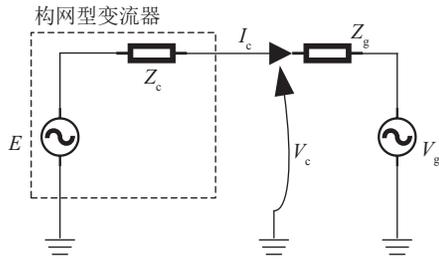
$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \tag{3}$$

式中: J——惯性矩, kg·m²; ω_r——转子角速度, rad/s; ω_{ref}——频率参考量, Hz; θ——电网电压相位角, rad; P_m——机械功率, W; P_e——电气功率, W; P_d——阻尼功率, W; D——阻尼常数。

不同学者在不同时期提出不同的构网型控制策略,尽管在不同文献中,并网型控制策略在功率控制上存在差异,但其电压、电流的控制方法均存在相似性^[27],常用的构网型控制框图如图 4a 表示。采用并网型控制的变流器可等效为图 4b,具有电压源属性,无需外部电压的支持,自行构建交流侧输出电压,自主运行^[28]。



a. 构网型控制结构图



b. 构网型变流器等效电路图

图4 构网型控制结构及等效电路图

Fig. 4 Network type control structure and equivalent circuit diagram

由构网型控制结构可看出外部控制回路通过有功功率和无功功率控制生成电压的幅值、相位参考值；内部控制回路负责电流的控制，并产生 PWM 信号传至变流器。其中频率动态调节过程如图 5 所示，通过设置改变频率常数的值来进行频率调节，但频率在扰动后仍保持恒定，不会恢复。为解决这个问题，文献[29]在上述频率动态调节的基础上，提出用 PI 控制来代替频率常数调节速度并校正频率反馈误差，如图 6 所示，并通过仿真验证了该方法具有较好的控制效果和频率恢复效果。

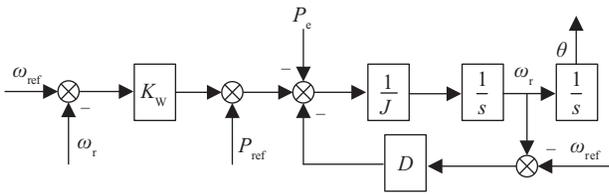


图5 频率控制

Fig. 5 Frequency control

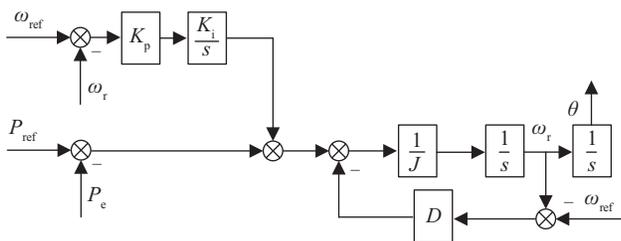


图6 PI频率控制

Fig. 6 PI Frequency control

1.3 对比分析

综上，跟网型变流器和构网型变流器具有本质区别，其中跟网型变流器可等效为并联高阻抗的电流源，构网型变流器等效为串联低阻抗的电压源^[6]，在电网发生故障时，其所表现出来的特性也不同。具体区别如表 1 所示。

2 构网型控制策略

目前，构网型控制策略主要围绕模拟同步发电机的运行展开^[30]，模拟部分不同，所体现的策略不同。常见的构网型

表 1 跟网型与构网型控制技术对比分析

Table 1 Comparative analysis of grid following and grid forming control technologies

跟网型控制技术	构网型控制技术
电网正常运行	电网正常运行或故障状态
直接正交(dq)矢量控制注入电网的电流	电压幅值和频率/相位的控制
P和Q的解耦控制	P和Q之间的轻微耦合
需PLL	可使用PLL控制在模式之间切换
需公共耦合点的电压来提供P和Q	可黑启动
无法在100%的电力电子渗透情况下运行 ^[19]	理论上可在100%的电力电子渗透下运行

控制策略主要包括：下垂控制、虚拟同步机、功率同步控制、虚拟振荡器以及匹配控制、基于 PLL 的改进型电流控制、直接功率控制^[31]等。

2.1 下垂控制

下垂控制是构网型控制最常见、也是最简单、最成熟的策略之一，在有功功率-频率、无功功率-电压之间表现出线性关系，如图 7 所示。采用下垂控制的构网变流器与稳态下同步发电机特性相同，其控制方程为：

$$\omega_d = \omega_{ref} + m_p (P_{ref} - P_e) \tag{4}$$

$$\theta_d = \int \omega_d dt \tag{5}$$

$$V_d = U_{ref} + n_q (Q_{ref} - Q_e) \tag{6}$$

式中： ω_d ——变流器输出的角速度，rad/s； ω_{ref} ——参考频率，一般取系统额定频率，Hz； m_p ——有功-频率控制下垂系数； P_{ref} ——变流器有功功率参考值，W； P_e ——变流器有功功率实际输出值，W； θ_d ——角速度 ω_d 对应的输出相位，rad； V_d ——输出的电压幅值，V； n_q ——无功-电压控制下垂系数； Q_{ref} ——变流器无功功率参考值，var； Q_e ——变流器无功功率实际输出值，var。

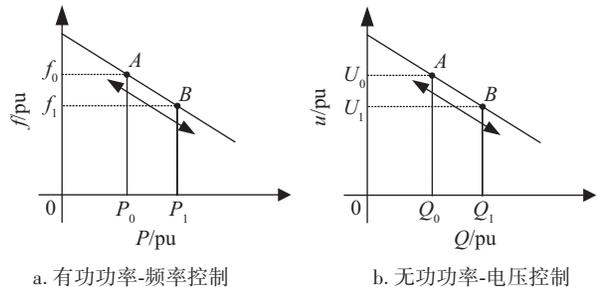


图7 PI频率控制

Fig. 7 PI frequency control

采用下垂控制的构网型变流器控制结构如图 8 所示，构网型变流器的电压参考信号，经功率计算与下垂控制后与电

网同步,其中构造方程可表示为:

$$E^{ref} = \sqrt{2} E^* \left[\sin \theta \quad \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \quad \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \quad (7)$$

式中: E^{ref} ——变流器输出的参考电压有效值, V; E^* ——变流器发出的参考电压有效值, V; θ ——变流器产生的相位, rad。

文献[32]总结了下垂控制在微电网的应用,指出在可再生能源系统中,调节有功功率、无功功率、频率和电压等变量,可在孤岛模式下使用逆变器来控制 and 调整产生的电能以适应负载的需求。

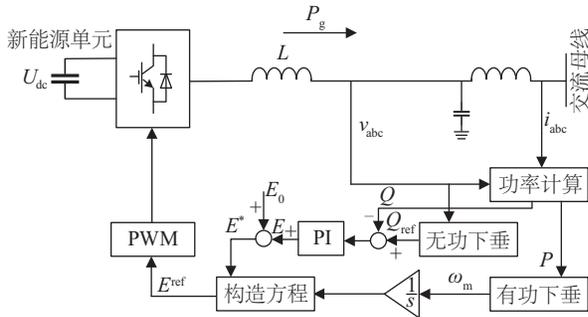


图8 构网型变流器下垂控制框图

Fig. 8 Sag control block diagram of grid-forming converter

下垂控制因其控制相对简单可靠而被广泛应用,但其控制受负荷变动的较大影响,文献[33]指出下垂控制无法为系统提供惯性与阻尼,导致其面对扰动时频率下降过快。

针对上述局限性,国内外学者提出一系列的改进措施。常用的改进型下垂控制如图9所示,在有功功率-频率加入了比例前馈,以提高其暂态响应。文献[34]为消除直流母线电压偏差,提出基于自适应下垂特性的功率精确分配策略和直流母线电压无偏差控制策略,且在功率分配策略中考虑了本地负荷的影响。文献[35]提出一种具有网络自适应能力的分布式电源改进下垂控制策略,实现有功负荷的精准分配。

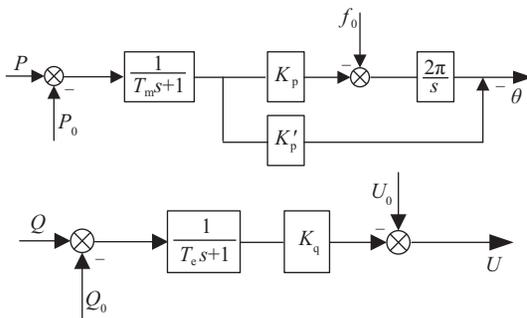


图9 改进型下垂控制

Fig. 9 Improved sag control

2.2 虚拟同步机

虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)是一种通过模拟同步发电机运行特性的逆变器并网技术,使并网逆变器在外特性上与发电机相同。虚拟同步机控制中通常引入

同步机转子运动与电磁暂态方程,将一次调频功能加入至有功功率控制回路,将端电压下垂调节(一次调压功能)加入至无功功率控制回路,虚拟同步机可在并网功率跟踪的同时具备频率异常事件处理能力,通过有功调节,降低并网点频率的偏差。

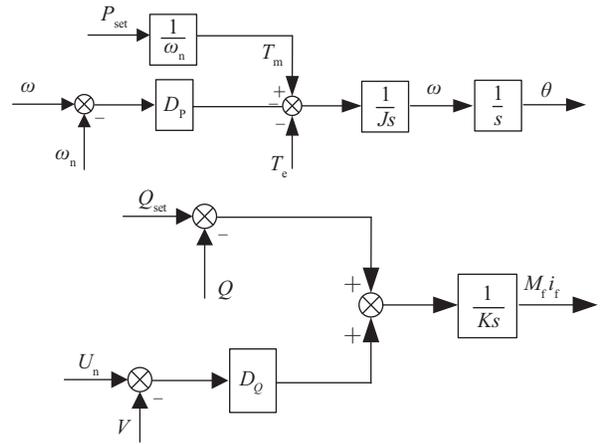


图10 虚拟同步机控制

Fig. 10 Virtual synchronous machine control

根据文献[36]和图10中的控制框图,虚拟同步机控制的动态特性表示为:

$$T_m - T_e = \frac{p_{ref}}{\omega_0} - \frac{p_e}{\omega_0} = J \frac{d\omega_v}{dt} + K_D (\omega_v - \omega_0) \quad (8)$$

$$\theta_v = \int \omega_v dt \quad (9)$$

$$V_v = U_{ref} + K_Q \int (Q_{ref} - Q_e) dt \quad (10)$$

式中: T_m ——虚拟同步机转矩给定值, N·m; T_e ——虚拟同步机转矩实际输出值, N·m; J ——虚拟同步机转子的惯量系数; K_D ——虚拟同步机转子的阻尼系数; ω_v ——虚拟同步机输出的角速度, rad; θ_v ——角速度 ω_v 对应的虚拟转子位置角, rad; V_v ——输出电压幅值, V。

采用虚拟同步机控制的构网型变流器控制结构如图11所示,以电压和频率为控制目标,无功功率控制部分与下垂控制的无功功率控制部分相同,有功功率部分通过模拟发电机转子运动方程进行控制。文献[37]整理了中国现有新能源并网标准中对虚拟同步机支撑电网的要求,全面梳理了虚拟同步控制技术的研究动态和已有成果,总结了通过虚拟同步机控制实现构网的过程及优化;文献[38]介绍了虚拟同步机控制的原理、作用以及应用现状,归纳总结了虚拟同步机控制在频率、小扰动稳定、暂态稳定性等方面对电力系统稳定性的影响以及限流对系统运行的影响,最后,对其进行定位分析并对发展和后续研究提出相应建议。

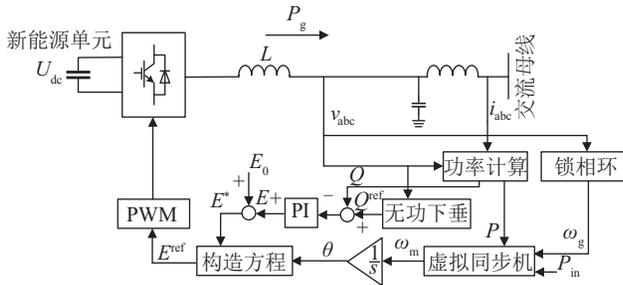


图 11 构网型变流器虚拟同步机控制框图

Fig. 11 Virtual synchronizer control block diagram of grid-forming converter

文献[39]在下垂控制的基础上串联一个虚拟阻抗,增加变流器的输出阻抗,提高构网型变流器的瞬态响应和稳定性;文献[40]针对变流器虚拟同步机控制的调频作用,推导了虚拟同步机控制的频率特性,通过模型预测控制对基于虚拟同步机控制的构网型变流器的输入功率进行自适应控制,进一步改善扰动时的频率动态特性;文献[41]针对虚拟同步机控制的构网型逆变器在并联运行时,由线路阻抗差异引起的输出无功功率无法实现精确分配问题,提出一种基于动态虚拟阻抗的阻抗匹配控制策略,有效保证了公共连接点电压的鲁棒性;文献[42]提出一种结合自适应虚拟惯量方法的分数阶滑模反推控制的非线性控制策略,用于解决孤岛运行状态下受扰动时虚拟同步机动态性能较差以及并网状态下与电网不同步的问题。

2.3 功率同步控制

功率同步控制是构网型变流器连接至交流电网的有效控制策略,采用功率同步控制的变流器控制结构如图 12 所示,无需依靠 PLL,功率控制基于有功功率同步。文献[43]研究功率同步控制的功率环和直流电压环建模与设计,通过与基于虚拟同步机的设计进行比较,证明功率同步控制有较好的电压支撑能力;文献[44]通过相图法对采用功率同步控制变流器的暂态功角特性进行分析,然后基于虚拟功率的概念,提出一种正交功率同步控制策略,有效保证了系统的暂态同步稳定,提高了变流器的控制性能;文献[45]在小扰动背景下,建立功率同步控制的相位误差模型,对影响功率同

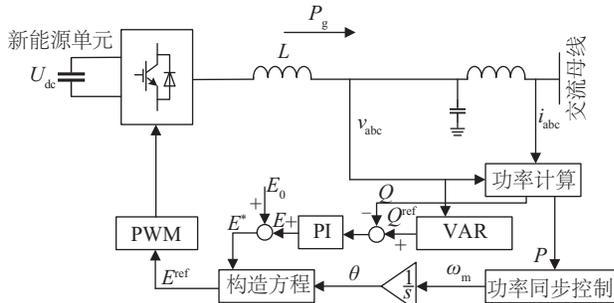


图 12 构网型变流器功率同步控制框图

Fig. 12 Power synchronization control block diagram of grid-forming converter

步控制相位误差特性的控制参数进行理论分析,通过与传统 PLL 相位误差的对比,证明其优越性;文献[46]提出一种改进的功率同步控制方法,将功率指令进行前馈,实现了闭环系统的零极点对消,有效提升系统的暂态特性。

功率同步控制控制框图如图 13 所示,包含功率-频率控制,将功率控制误差转换为频率偏差,然后积分为角度增量,输出信号。

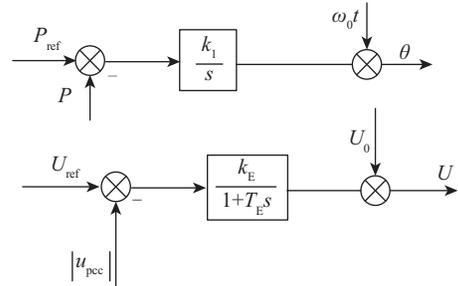


图 13 功率同步控制

Fig. 13 Power synchronization control

功率同步控制电压幅值调节由比例电压控制器级联和择优无功控制器级联组成,其中比例电压控制器也存在“下垂”特性,但方向相反,并网点处的幅值与无功电流的基本呈现线性关系,可表示为如图 14 所示的向量图。

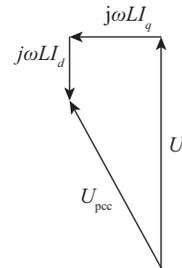


图 14 电压控制示意图

Fig. 14 Voltage control schematic diagram

2.4 虚拟振荡器

虚拟振荡器控制是一种非线性控制方法^[47],与虚拟同步机控制类似,但与虚拟同步机控制的向量表示方法有较大区别,其采用振荡电路的形式,固有频率与标称交流电网频率一致,剩余参数用以调整标称电压和控制带宽。采用虚拟振荡器控制的构网型变流器控制结构如图 15 所示,与下垂控制器和虚拟同步机控制策略不同的是,虚拟振荡器控制的电压电流双环的参考电压由虚拟振荡器给出,而非外环功率环计算所得,也无需进行闭环控制。文献[48]通过对离网虚拟振荡器控制引入并网电流反馈,并对其谐振参数和电压倍率进行闭环调节,使虚拟振荡器控制一直处于热备用状态,实现并网网的平滑切换;文献[49]以虚拟振荡器小信号模型为基础,提出一种基于虚拟阻抗的选择性谐波抑制方法,并证明与其他构网型控制方法相比,此方法简单易实现,减少了传感器的数量,增加了变流器的无源性范围;文献[50]介绍了

虚拟振荡器控制的原理,并指出传统虚拟振荡器控制的不足,提出改进型虚拟振荡器控制方案,在电流反馈端增设一个比例系数很小的二阶广义积分器,增加了变流器的虚拟惯性,有效增强电力系统的鲁棒性。

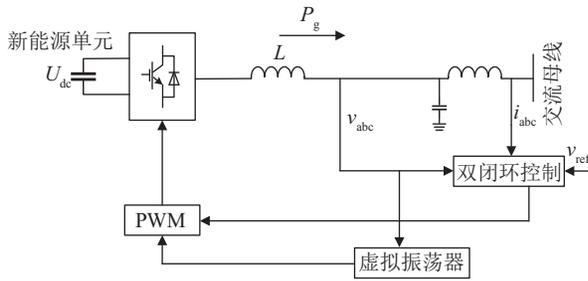


图 15 构网型变流器虚拟振荡器控制框图
Fig. 15 Virtual oscillator control block diagram of grid-forming converter

典型的范德波尔振荡电路结构如图 16 所示,由电阻、电感、谐振电容构成 RLC 线性谐振单元,以及非线性电压控制电流源组成,可表示为微分方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = v_c \\ C \frac{dv_c}{dt} = -\alpha v_c^3 + \sigma v_c - i_L - i \end{cases} \quad (11)$$

尽管虚拟振荡器可能看起来与上述控制方法完全不同,但它已被证明在稳态下表现出无功-电压、有功-频率的下垂定律,可表示为:

$$-\frac{\sigma}{C} \hat{V}_{csd} - \frac{1}{2C} P = 0 \quad (12)$$

$$\bar{V}_c = V_{cop} + \hat{V}_c \quad (13)$$

$$\hat{\omega} = \frac{1}{2C} Q \quad (14)$$

$$\bar{\omega} = \omega_n + \hat{\omega} \quad (15)$$

式中:变量上的“^”表示该变量是小信号分量; \hat{V}_{csd} —— \hat{V}_c 的稳态值, V; V_{cop} —— \bar{V}_c 的开路稳态值, V; ω_n ——电路中电感和电容的谐振频率, Hz。

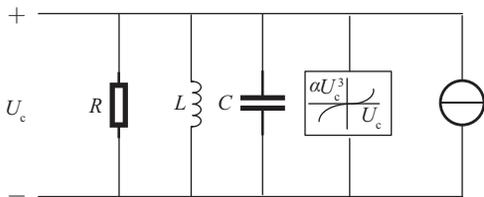


图 16 虚拟振荡器控制
Fig. 16 Virtual oscillator control

2.5 控制策略对比

对上述几种控制策略进行总结对比,其特点如表 2 所示。构网型变流器采用的控制策略不同,表现出来的动态特性以及工况适应性也不同。下垂控制简单可靠且成本低,响应速度较快,但其不具备惯性和阻尼特性,易引起电网电压和频率的震荡,而且其输出电压控制精度不高,电能质量会

受输出电流的谐波成分影响。与传统下垂控制相比,虚拟同步机增加了惯性和阻尼项,具有更好的动态特性,其均分功率能力强,适用于并联场景,但其参数整定较为复杂。功率同步控制比同步电机中的双重积分具有更高的稳定裕度,也可大幅提高弱电网下的功率传输能力。此外,功率同步控制结合直接电压控制可为系统增加一定阻尼,对次同步振荡具有抑制作用。功率同步控制具有稳定裕度高,接入弱电网的稳定性高,功率控制范围广等优点,但其控制也较为复杂。虚拟振荡器无需功率计算,动态响应速度要优于下垂控制与虚拟同步发电机,但输出电压存在较大的 3 次谐波分量,不适合并网。

表 2 控制策略对比分析

Table 2 Comparative analysis of control strategies

控制策略	惯性	阻尼	调速	应用
下垂控制	无	无	快	并网与离网
虚拟同步机	具备	具备	较慢	弱电网或离网
功率同步控制	具备	具备	较快	弱电网
虚拟振荡器	具备	具备	快	离网

3 构网型控制技术应用及挑战

3.1 变流器应用

上述构网型控制对高比例新能源接入电网起到一定的帮助作用,有望成为未来新能源并网运行的关键技术。目前构网型变流器已在苏格兰 Dersalloch 风电场、南澳 Dalrymple、南澳 BESS co-located Hornsdale Wind Farm 等项目进行实际工程应用。中国也正在进行构网型储能电站的建设,比如湖北荆门新港 50 MW/100 MWh 储能电站、龙源电力江苏盱眙 10 MW/20 MWh 构网型示范储能电站、山东莱芜电厂 100 MW/200 MWh 分散控制构网型独立储能电站以及青海格尔木鲁能 50 MW/100 MWh 构网型储能电站等。

构网型控制多具备功率同步或惯性同步的特性,同时也具备建立电压和构建电网的能力,具有丰富的应用场景。应用不同的场景,构网型变流器的控制目标和控制方法也略有不同,主要包括储能系统、风电并网、混合供电、孤岛运行等多种运行场景,其中储能系统是构网型变流器的主要应用场景。文献[51-55]对构网型储能系统进行了介绍,对构网型储能变流器的拓扑结构、建模方法以及控制策略等进行了分析;文献[56]综述了构网型在风电并网系统的应用,指出电压源型构网风电机组的特殊性;文献[57-59]提出混合供电系统,证明了构网型控制策略在该系统实现电网支撑,同时提供无功功率,保证电能质量。

3.2 问题及挑战

未来电力系统的运行基于构网型变流器对同步发电机的取代,因此安全可靠的过渡到新型电力系统是一大挑战。

3.2.1 系统保护

电力系统保护主要目的为确保电力系统的稳定性,同时最大限度地减少网络断开的程度。总体目标是通过电网不同区域保护设备的运行和协调,最大限度地减少由异常情况引起的网络中断的范围和时间^[60]。当电力系统与大电网断开时,传统跟网型变流器因无外部电压信号而自动关闭,构网型变流器可在孤岛/微电网模式下继续运行,因此,构网型变流器需某种形式的孤岛保护,以确保其在孤岛模式下安全运行,保证工作人员的安全。另外,在孤岛模式下,未来还需一套健全的标准来衡量其控制。

3.2.2 故障电流

保护装置用于检测不平衡故障的一种方式就是检测负序故障电流,理论上构网型变流器在故障条件下的表现与同步电机相同,具有明显的负序和零序电流^[61]。但目前尚未存在商用的变流器利用负序和零序电流来平衡相位,因此,故障条件下构网型变流器是否产生明显的负序和零序电流尚不清楚。未来必须分析构网型变流器产生负序和零序电流的能力。

3.2.3 失步和功率摆动闭锁保护

在线路保护中,需有效区分故障与功率摆动,如果保护设备确定电压/电流的变化是功率摆动而非故障的结果,则会阻止保护继电器跳闸。与功率摆动闭锁类似,失步保护跳闸旨在区分正常功率摆动和足以导致系统不稳定的功率摆动。传统跟网型控制具有同步问题,会导致失步保护跳闸和功率摆动闭锁。构网型控制变流器通过模拟同步电机的惯性响应,稳定功率波动,明显缓解此问题,但目前针对构网型控制变流器对保护装置影的研究响尚未详尽,利用构网型控制变流器进行构网控制是否会进一步缓解或加剧此问题还有待确认。

3.2.4 故障穿越和电压恢复

受到严重的干扰时,电力电子设备需在异常瞬态的同时保持运行的能力,即故障穿越。除此之外,电力电子设备还需在电压和角速度方面支持电压恢复到正常运行状态。传统方法中,通过调节同步电机的动作、负载响应机制等,恢复电力系统扰动后的电压,但随着电力电子设备的大量应用,这种电压恢复能力受到很大限制,当前电压穿越电网故障的方式可能不再适用。同时,因为电力电子设备无法像同步电机那样处理瞬时过高的电流^[62],故变流器在高渗透率的电网中运行是一项极大的挑战。构网型变流器不依赖于外部电网的电压源,能自主产生电压,因此其在电网电压支撑方面具有优势,故需开发稳定的构网型控制策略,完成电网的故障穿越。

4 结束语

应用于储能系统的构网型变流器可快速调整功率,同时为电网提供电压支撑,是未来“双高”电力系统的发展的重要技术路线,是提高配电系统可靠性的重要手段。本文通

过文献综述,分析对比了跟网型变流器和构网型变流器两类控制方法,指出构网型变流器在当前阶段更具有优势,更适用于电力电子变换器广泛应用的新型电力系统;全面总结了构网型控制策略,并对构网型控制在储能系统的应用进行了讨论,提出今后发展中构网型储能技术所面临的问题及挑战。未来可从构网型储能变流器的工程应用、控制方法、微电网/孤岛拓扑方案、故障处理以及通信等方面进行研究,进一步提升构网型储能变流器的技术成熟度,为未来电力系统稳定安全的运行提供解决方案。

[参考文献]

- [1] 刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):1-18.
LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.
- [2] 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 C Q, YAO L Z. 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.
- [3] 张耀文,张政权,刘庆想,等.新型双向储能变流器分析与研究[J].太阳能学报,2022,43(4):82-89.
ZHANG Y W, ZHANG Z Q, LIU Q X, et al. Analysis and research of new bidirectional energy storage converter [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(4): 82-89.
- [4] 李子欣,高范强,赵聪,等.电力电子变压器技术研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1274-1289.
LI Z X, GAO F Q, ZHAO C, et al. Research review of power electronic transformer technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [5] 吴智泉,贾纯超,陈磊,等.新型电力系统中储能创新方向研究[J].太阳能学报,2021,42(10):444-451.
WU Z Q, JIA C C, CHEN L, et al. Research on innovative direction of energy storage in new power system construction [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(10): 444-451.
- [6] 许诒翊,刘威,刘树,等.电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J].电网技术,2022,46(9):3586-3594.
XU J Y, LIU W, LIU S, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power system technology, 2022, 46(9): 3586-3594.
- [7] 朱作滨,黄绍平,李振兴.微网储能变流器平滑切换控

- 制方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 137-143.
- ZHU Z B, HUANG S P, LI Z X. Research on smooth switching control method for micro-grid power converter system [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2019, 31(12): 137-143.
- [8] 周皓, 李伟力. 基于分频控制的微电网储能变流器并网电能质量主动控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 330-337.
- ZHOU H, LI W L. Grid-connecting power quality active control strategy for microgrid power conversion frequency-dividing control[J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(2): 330-337.
- [9] 谭丽平, 谭鑫, 王立娜, 等. 电网电压不平衡下考虑电流峰值限制的储能变流器协调控制策略[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 111-118.
- TAN L P, TAN X, WANG L N, et al. Coordinated control strategy of power conversion system considering current peak limit under unbalanced grid voltage[J]. High voltage apparatus, 2022, 58(7): 111-118.
- [10] 朱作滨, 黄绍平. 基于VSG微网储能变流器无缝切换控制策略研究[J]. 控制工程, 2021, 28(3): 488-494.
- ZHU Z B, HUANG S P. Research on seamless switching control strategy of microgrid power converter system based on VSG[J]. Control engineering of China, 2021, 28(3): 488-494.
- [11] 吴东, 汪海宁, 房志学, 等. 基于微网储能变流器的故障穿越控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 66-73.
- WU D, WANG H N, FANG Z X, et al. Fault ride-through control based on microgrid energy storage converter [J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(10): 66-73.
- [12] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: an overview of control approaches and future trends [C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA, 2020: 4292-4299.
- [13] FAN B, LIU T, ZHAO F Z, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[J]. IEEE open journal of power electronics, 2022, 3: 955-969.
- [14] LASSETER R H, CHEN Z, PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: a critical asset for the power grid [J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2020, 8(2): 925-935.
- [15] ZHOU Z X, WANG W Z, LAN T, et al. Dynamic performance evaluation of grid-following and grid-forming inverters for frequency support in low inertia transmission grids [C]//2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). Espoo, Finland, 2021: 1-5.
- [16] JIANG Y, BERNSTEIN A, VOROBEV P, et al. Grid-forming frequency shaping control for low-inertia power systems [J]. IEEE control systems letters, 2021, 5(6): 1988-1993.
- [17] 桑顺, 齐琛, 张新松, 等. 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3168-3180.
- SANG S, QI C, ZHANG X S, et al. Grid-forming control and black start of PMSG-based direct-driven wind turbine [J]. Power system technology, 2022, 46(8): 3168-3180.
- [18] 郭小龙, 杨桂兴, 张彦军, 等. 构网型储能变流器并网系统 SISO 环路增益建模与重塑控制[J]. 电气技术, 2023, 24(2): 24-31, 51.
- GUO X L, YANG G X, ZHANG Y J, et al. Modeling and reshaping control of single input and single output loop gain of the grid-forming energy storage converter grid-connected system [J]. Electrical engineering, 2023, 24(2): 24-31, 51.
- [19] LIN Y SH, ETO J H, JOHNSON B B, et al. Research Roadmap on Grid-Forming Inverters [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2020.
- [20] COLLADOS-RODRIGUEZ C, CHEAH-MANE M, CIFUENTES-GARCIA F J, et al. Grid-following and grid-forming converter control comparison under fault conditions [C]//2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition-Asia (ECCE-Asia). Singapore, Singapore, 2021: 598-603.
- [21] VERBE S C, SHIGENOBU R, ITO M. Comparative study of GFM-grid and GFL-grid in islanded operation [C]//2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Brisbane, Australia, 2021: 1-5.
- [22] 张春雪, 黎灿兵, 冯伟, 等. 孤立运行光/储微电网中储能变流器暂态功率波动协调抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2302-2314, 2540.
- ZHANG C X, LI C B, FENG W, et al. A coordinated transient power fluctuation suppression strategy for power conversion system in islanded PV/storage microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2302-2314, 2540.
- [23] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- ZHOU X X, CHEN S Y, LU Z X, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [24] 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.
- XU Z. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources [J]. Southern power system technology, 2020, 14(2): 1-9.

- [25] 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.
- [26] LI X, LIN H. A design method of phase-locked loop for grid-connected converters considering the influence of current loops in weak grid [J]. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2020, 8(3): 2420-2429.
- [27] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
QU Z S. Synchronizing stability analysis and control technology of voltage source converters in power system with high-penetration renewables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [28] 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): 2339-2358, 24.
ZHAN C J, WU H, WANG X F, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2358, 24.
- [29] UNRUH P, NUSCHKE M, STRAUSS P, et al. Overview on grid-forming inverter control methods [J]. *Energies*, 2020, 13(10): 2589.
- [30] 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, 8.
XIE X R, HE J B, MAO H Y, 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, 8.
- [31] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(9): 3-9.
XU Z. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems [J]. *Electric power automation equipment*, 2020, 40(9): 3-9.
- [32] MÍREZ J. A review of droop control implementation in microgrids [C]//2019 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE). Cuernavaca, Mexico, 2019: 146-150.
- [33] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 72-84, 344.
ZHU S S, WANG F, GUO H, et al. Review of research on sag control technology for DC microgrids [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [34] 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 Z W, MIAO S H, FAN Z H, 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.
- [35] 吕志鹏, 吴鸣, 黄红, 等. 一种具有网络自适应能力的分布式电源改进下垂控制策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(9): 2948-2957.
LYU Z P, WU M, HUANG H, et al. An improved droop control with network self-adaptability for distributed generation [J]. *Power system technology*, 2018, 42(9): 2948-2957.
- [36] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine [C]//2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain, 2007: 1-6.
- [37] 刘钊汛, 秦亮, 杨诗琦, 等. 面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 1-15, 1.
LIU Z X, QIN L, YANG S Q, et al. Review on virtual synchronous generator control technology of power electronic converter in power system based on new energy [J]. *Power system technology*, 2023, 47(1): 1-15, 1.
- [38] 曹炜, 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 W, QIN H C, LU J Z, 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.
- [39] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [40] 倪泽龙, 林钰钧, 王治涛, 等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(14): 85-93.
NI Z L, LIN Y J, WANG Z T, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control [J]. *Power system protection and control*, 2022, 50(14): 85-93.
- [41] 王国栋, 李海洋. 基于阻抗匹配的构网型逆变器无功精确控制[J]. *电力电子技术*, 2022, 56(6): 45-48.
WANG G D, LI H Y. Accurate control of reactive power of grid-forming inverters based on impedance matching [J]. *Power electronics*, 2022, 56(6): 45-48.
- [42] 滕奇. 基于虚拟同步机的逆变器协调控制策略研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
TENG Q. Research on inverter coordinated control strategy based on virtual synchronous machine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.

- [43] HARNEFORS L, HINKKANEN M, RIAZ U, et al. Robust analytic design of power-synchronization control [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2019, 66(8): 5810-5819.
- [44] 王顺亮, 孙瑞婷, 马俊鹏, 等. 弱电网下并网逆变器正交功率同步控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(23): 8475-8485, 6.
WANG S L, SUN R T, MA J P, et al. Orthogonal power synchronization control for grid-connected inverters under weak grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(23): 8475-8485, 6.
- [45] 侯川川, 刘澳, 朱森, 等. 基于功率同步控制的逆变器并网相位误差机理[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(5): 1962-1974.
HOU C C, LIU A, ZHU M, et al. Mechanism of grid connected phase error of inverters based on power synchronization control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(5): 1962-1974.
- [46] HARNEFORS L, MAHAFUGUR RAHMAN F M, HINKKANEN M, et al. Reference-feedforward power-synchronization control [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2020, 35(9): 8878-8881.
- [47] 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.
- [48] 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 L, LI Y H, LI Z X, 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.
- [49] 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.
- [50] 罗众志. 基于虚拟振荡器的微网逆变器控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
LUO Z Z. Research on control strategy of microgrid inverter based on virtual oscillator [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [51] 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 H, HE C J, LIU Y S, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [52] 石荣亮, 王斌, 黄冀, 等. 储能虚拟同步机的并网阻尼特性分析与改进策略[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(7): 30-38.
SHI R L, WANG B, HUANG J, et al. Analysis and improvement strategy of grid-connected damping characteristic for energy storage vsG [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(7): 30-38.
- [53] 段洁琼. 储能接入对交直流混联系统稳定性影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
DUAN J Q. Study on the influence of energy storage access on the stability of AC-DC hybrid system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [54] 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 X B, GE J, HAN L S, 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.
- [55] 陈凌宇, 刘敏, 孙桐, 等. 基于电池储能的单级式构网型不间断供电系统[J]. *电力电子技术*, 2022, 56(5): 1-4, 12.
CHEN L Y, LIU M, SUN T, et al. Single stage grid formed uninterruptible power supply system based on battery energy storage [J]. *Power electronics*, 2022, 56(5): 1-4, 12.
- [56] 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): 1314-1333, 5.
QIN S Y, QI C, LI S L, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(4): 1314-1333, 5.
- [57] 刘京波, 吴林林, 李琰, 等. 构网型光储混合供电系统及其协调控制策略[J]. *电力电子技术*, 2023, 57(1): 92-95.
LIU J B, WU L L, LI Y, et al. A grid forming photovoltaic storage hybrid power supply system and its coordination control strategy [J]. *Power electronics*, 2023, 57(1): 92-95.
- [58] ZHAO F Z, WANG X F, ZHOU Z C, et al. Control interaction modeling and analysis of grid-forming battery energy storage system for offshore wind power plant [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2022, 37(1): 497-507.
- [59] BHATTACHARYYA S, SINGH B. Synchronization technique for PV-wind-battery based grid forming converter with DFIG [C]//2021 IEEE 6th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). Arad, Romania, 2021: 765-770.
- [60] 刘文龙, 吕志鹏, 刘海涛. 电力电子化配电网台区形态发展以及运行控制技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 4899-4922.

- LIU W L, LYU Z P, LIU H T. Overview of the development and operation control technology of power electronic distribution stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 4899-4922.
- [61] 张立坚, 徐铭倩, 卞春兵. 同步电机零序电流保护动作的原因分析及处理[J]. 中国水能及电气化, 2020(3): 49-51, 57.
- ZHANG L J, XU M Q, BIAN C B. Cause analysis and treatment of zero sequence current protection action of synchronous motor [J]. China water power & electrification, 2020(3): 49-51, 57.
- [62] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy [J]. IEEE power and energy magazine, 2017, 15(2): 61-73.

CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT TRENDS OF GRID TYPE CONVERTERS

Liu Xu¹⁻³, Zhang Guoju¹⁻³, Pei Wei¹⁻³, Zhu Enze¹, Zhang Xue¹, Zhao Junyu⁴

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering and Advanced Electromagnetic Drive Technology, Qilu Zhongke, Ji'nan 250013, China;

3. Shandong Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Conversion Technology, Ji'nan 250013, China;

4. State Grid Baoding power supply company, Baoding 071051, China)

Abstract: With the development of new energy and power electronics, new power systems exhibit typical "dual high" characteristics, but at the same time, they also bring problems such as low inertia and weak stability. Grid forming control technology (GFM) can enable the inverter to independently establish frequency and control voltage, improve dependence on external voltage sources, and improve system stability. The current situation and development trend of grid type converters are summarized. Firstly, a comparative analysis was conducted between grid following control technology (GFL) and grid building control technology, and it was pointed out that grid building control technology is an effective way to solve the stability of new power systems. Then, the existing grid control technology was introduced, and the application of grid control technology in various fields were analyzed. Finally, the challenges faced when applying grid control technology to converters were pointed out.

Keywords: renewable energy resources; power electronics; control systems; converter; grid-forming