第 49 卷 第 8 期：3137-3148 高电压技术 Vol.49, No.8: 3137-3148
2023 年 8 月 31 日 High Voltage Engineering August 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230517

微电网三电平储能变流器优化控制技术综述

周京华，李　津
（北方工业大学北京市变频技术工程技术研究中心，北京 100144）

摘　要：高比例新能源接入导致微电网惯量低、抗干扰能力弱、电压波动性强。储能变流器作为平抑新能源功率波动、支撑电网电压和频率稳定的重要设备，在微电网中的应用越来越广泛。针对微电网储能变流器控制优化技术的发展，文章首先在三电平储能变流器拓扑方面，聚焦储能变流器自身非线性因素对输出波形的影响，归纳总结输出波形非线性的产生机理及优化策略；在此基础上，深入探讨弱电网下跟网型储能变流器的失稳机理，梳理增强稳定性的优化策略；同时，整理了构网型储能变流器的控制目标及架构，分析总结储能变流器的稳定性问题及控制优化策略；最后，对相关技术的优化方向进行了展望，为微电网三电平储能变流器优化控制提供参考借鉴。
关键词：微电网；储能变流器；跟网型控制；构网型控制；优化控制；稳定性分析

Review of Optimal Control Technology for Three-level Power Converter System in Microgrid

ZHOU Jinghua, LI Jin
(Inverter Technology Engineering Research Center of Bejing, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The connection of a high proportion of renewable energy to the grid leads to low inertia, weak anti-disturbance ability and strong voltage volatility of micro-grid. Serving as an important device to stabilize power fluctuations of renewable energy and support voltage and frequency stability of grid, power converter system (PCS) is being widely used in microgrid. In accordance with the development of micro-grid PCS optimal control technology, this paper focuses on the influence of PCS's own nonlinear factors on output waveform from three-level PCS topology perspective, and then summarizes the generation mechanism and optimization strategy of PCS's output waveform. On this basis, the instability mechanism of the grid-following type PCS within weak-grid is discussed in depth, and the optimal control strategy to strengthen stability of the micro-grid system is summarized. At the same time, the control objectives and control architecture of the grid-forming PCS are sorted out, and the problems of the micro-grid system stability and control optimization strategy of PCS are analyzed and summarized. Finally, the prospects in optimization direction of related technologies are put forward to provide reference for the optimization control of micro-grid three-level PCS.
Key words: microgrid; power converter system; grid-following control; grid-forming control; optimal control; stability analysis

0　引言

随着我国光伏、风电为代表的可再生能源发电技术不断发展，电力系统呈现出新能源接入高渗透率和电力电子变流器接入高占比的“双高”新型态[1]。为了适应可再生能源随机性、间歇性和波动性的特点，将多种分布式能源、储能、可控负荷集成一体并接收联合调控，组成微电网形式运行，能缩短电力传输距离，提升系统效率。在微电网中电力电子设备占比通常较高，其对系统稳定性影响显著，弱电网特性明显，电力电子设备之间、电力电子设备与传输线路之间的耦合作用对微电网稳定性的影响愈发严重，甚至导致微电网失稳解列[2]。与传统电力系统相比，“双高”背景下的微电网以具有快速响应特性的电力电子设备为主导，缺乏惯量支撑，导致系统惯量低、电压和频率支撑能力弱[3]；同时，由于不同电力电子设备具备多时间尺度下的动态响应，导致微电网内设备间的扰动频带更为宽泛[4]；另外，电力电子设备中普遍存在的死区、限幅等非线性环节对系统稳定性也将产生一定影响，进一步加剧了微电网的动态复杂性[2]。

作为独立系统，微电网可并网、离网、并/离网切换运行。储能变流器(power converter system, PCS)

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFE0103800)；北京市高水平创新团队建设计划(IDHT20180502)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFE0103800), Beijing High Level Innovation Team Construction Plan (IDHT20180502).

作为微电网中的重要构成，在并网运行时接受微电网功率调度，平滑新能源功率输出；在离网运行时对微电网进行电压、频率支撑[5]。PCS 在微电网中的运行特点和控制优化，是近些年的研究热点。

目前，微电网下 PCS 主要以跟网型控制(grid-following, GFL)为主，以电流控制调节功率大小，并通过锁相环(phase-locked loop, PLL)跟踪电网相位。在强电网下 GFL 可实现功率精准控制并获得较高的并网电能质量，然而在电力电子高占比的微电网中，系统惯量低、支撑能力不足，线路阻抗大幅波动会导致并网点电压波动甚至振荡，跟网型控制容易引发并网电流谐振甚至失稳[5-7]。另外，由于微电网中存在三相不平衡、负载突变等问题，并且 GFL 控制的 PCS 无法为微电网提供惯量和电压支撑，因此电流/电压谐波、不平衡以及电压波动等电能质量问题较为明显[4]。

为了提高可再生能源高渗透率(甚至 100%渗透率)下电力系统的稳定性，需要电力系统中一部分变流器采用电压源型控制，从而实现对电网电压和频率的支撑。以此为目标，许多学者参照同步发电机物理机理，对构网型(grid-forming, GFM)控制进行研究。虽然 GFM 变流器具有孤岛运行、极弱电网运行的特点，其中以虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略为代表的 GFM 变流器可实现下垂及惯量特性，进而实现电压及频率支撑，但在强电网条件下使用 GFM 功率同步控制策略，变流器与电网之间相位差的微小变化都有可能引起明显的功率波动，进而导致同步振荡；另外，不同于同步发电机，电力电子变流器的过流能力有限，在故障时需要进行限流运行，而限流措施会影响变流器对电网的支撑能力，并会降低变流器的暂态稳定性。

文章以微电网三电平 PCS 控制优化为目标，分析了 PCS 自身非线性因素特征，并介绍输出波形优化控制的方法；其次，归纳梳理基于 GFL、GFM 的 PCS 控制稳定性问题，并总结优化控制方法；最后，对微电网三电平 PCS 优化控制的后续研究作出展望。

1 三电平 PCS 波形影响因素及优化控制

在 750~1500 V 直流电压等级、50 kW~3.5 MW 功率等级的储能系统中，PCS 大都采用三电平拓扑结构，相较两电平变流器有更好的谐波特性、更低的电压变化率(du/dt)、更低的器件耐压和更高的转换效率。针对不同的功率等级和电压等级，可选择二极管中点箝位型(neutral point clamped, NPC)、T 型二极管中点箝位型(T type-neutral point clamped, T-NPC)和有源中点箝位型(active neutral point clamped, NPC)拓扑，各拓扑的特点在大量文献中已有详细介绍，本文不再赘述。在微电网中不同的三电平拓扑 PCS 具有相似的外特性，文章以 T-NPC 为例，对三电平 PCS 非线性因素输出特征进行分析。

1.1 三电平储能拓扑非线性输出特征分析

对三电平 PCS 而言，受死区、直流中点电位不平衡等非线性因素影响，PCS 输出波形含有低次谐波。在“双高”电力系统中，当低次谐波频率与弱电网下的准谐振频率重合时，低次谐波电流将被放大，从而严重影响并网电能质量[4]。PCS 并网系统的诺顿等效电路如图 1 所示，其中，$i_{s_\alpha\beta}(s)$为 PCS 等效电流源、$Z_o(s)$为 PCS 等效输出阻抗、$i_{\alpha\beta}(s)$为 PCS 输出电流、$u_{PCC_\alpha\beta}(s)$为并网点电压、$Z_g(s)$为电网线路阻抗、$u_{g_\alpha\beta}(s)$为电网电压。

由图 1 可得 PCS 并网电流表达式为：

$$i_{\alpha\beta}(s)=\left(i_{s_\alpha\beta}(s)-\frac{u_{g_\alpha\beta}(s)}{Z_o(s)}\right)\frac{1}{1+Z_g(s)/Z_o(s)} \tag{1}$$

根据阻抗判据可知，式(1)中右边项可看作前向通道增益为 1 的闭环传递函数，所以 $Z_g(s)/Z_o(s)$应满足 Nyquist 稳定性判据。当死区时间增大时，系统相位裕度减小，PCS 输出阻抗与电网线路阻抗相位差接近至 180°，随着线路阻抗的增大，并网电流可能出现低次谐振，从而使得并网电能质量降低。

T-NPC 型 PCS 拓扑如图 2 所示，其中 U_{dc} 为直流电压，u_a、u_b、u_c 分别为 PCS 三相桥臂输出端对交流中性点的相电压，i_a、i_b、i_c 分别为三相并网电流，U_g 为电网线电压。与两电平 PCS 的载波调制策略不同，其载波调制以载波层叠算法为主，调制波在 0 点及峰值附近均可能出现窄脉冲现象，从而导致开关管无法正常开通或关断。同时，死区的加

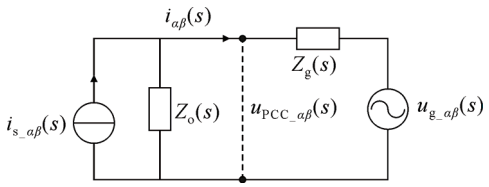


图 1 PCS 并网系统诺顿等效电路

Fig.1 Norton equivalent circuit for PCS grid-connected systems

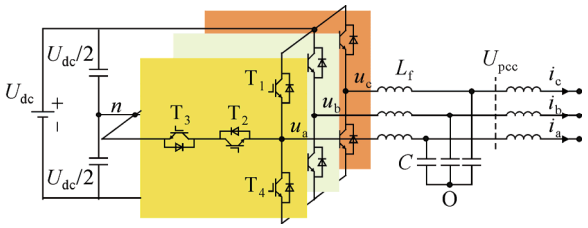


图 2　T-NPC PCS 拓扑

Fig.2　PCS topology for T-NPC

入将加重窄脉冲甚至引发脉冲整型，进而引起输出电压和电流的非线性畸变[6]。此外，受中点电位不平衡、寄生电容、功率器件导通压降等的影响，T-NPC 型 PCS 在半桥导通状态和中点续流状态下，参与换流功率器件的数量不同，导致中点续流状态的导通压降大于半桥导通状态；另外，当中点电位不平衡时，电压损耗与电流极性不再满足半波对称关系，可能引入偶次谐波[6]。因此，PCS 非线性因素与拓扑类型相关，多种因素均会引起输出波形畸变，故有必要对关键非线性因素的优化技术进行梳理。

1.2　死区效应优化

死区的加入使得理论上 2 个互补脉冲不再严格互补，在死区时间内存在互补功率管同时为 0 的情况。此时的输出电压与电流极性相关，当电流大于 0 时输出电压为$-U_{dc}/2$，当电流小于 0 时输出电压为 $U_{dc}/2$，由死区时间 t_d、开通时间 t_{on}、关断时间 t_{off} 表示的平均误差电压 ΔU_d 可表示为：

$$\Delta U_d=\frac{(T^*-T_{on})U_{dc}}{2T_s}=\begin{cases}\dfrac{(t_{on}-t_{off}-t_d)U_{dc}}{2T_s} & ,i>0\\ \dfrac{(t_{on}-t_{off}+t_d)U_{dc}}{2T_s} & ,i<0\end{cases} \tag{2}$$

式中：T^*为理想开通时间；T_{on}为实际开通时间；T_s为开关周期；i 为相电流。

误差电压导致误差电流，误差电流可表示为：

$$\begin{cases}\Delta\bar{i}_a=\dfrac{4t_{eq}u_{dc}}{\pi T_s}\displaystyle\sum_{n=1,3,5,\cdots}\frac{1}{n^2\omega L_f}\sin(n\omega t-\frac{\pi}{2})\\ \Delta\bar{i}_b=\dfrac{4t_{eq}u_{dc}}{\pi T_s}\displaystyle\sum_{n=1,3,5,\cdots}\frac{1}{n^2\omega L_f}\sin\left(n(\omega t-\frac{2\pi}{3})-\frac{\pi}{2}\right)\\ \Delta\bar{i}_c=\dfrac{4t_{eq}u_{dc}}{\pi T_s}\displaystyle\sum_{n=1,3,5,\cdots}\frac{1}{n^2\omega L_f}\sin\left(n(\omega t+\frac{2\pi}{3})-\frac{\pi}{2}\right)\end{cases} \tag{3}$$

式中：t_{eq}为等效开通时间；L_f为滤波器电感值。

由式(3)可知，死区效应会导致输出电流基频分量偏差，以及 $6k$+1 次正序电流和 $6k$−1 次负序电流。这些谐波电流会导致输出电流畸变。

为解决死区问题，现有研究集中在 2 个方向[7]：一是死区补偿，二是死区消除。

1.2.1　死区补偿

死区补偿的基本思路是补偿误差电压，补偿量通过器件参数表或通过实验方式获得，该技术又有平均误差电压补偿[8-9]和脉冲电压补偿[8,10-12]两种。

平均误差电压补偿是基于平均电压理论的，利用伏秒特性原理，将误差电压平均在一个开关周期内，并将平均误差电压补偿在参考电压上。脉冲电压补偿是根据电流极性前移功率管的开通时刻，实现脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)周期内补偿。

死区补偿方法存在的主要问题是：①电流极性判断精度不足，导致补偿失败；②实际驱动脉冲相较理想驱动脉冲滞后半个死区时间，导致瞬时电压存在误差；③死区补偿导致调制波幅值增大，可能引发窄脉冲等其他非线性因素问题。

为解决问题①，文献[13]提出根据电流幅值自适应设置死区时间，实现补偿矢量随电流大小连续变化且无需检测电流极性，实验结果验证了算法对低次谐波抑制的有效性。为解决问题②，文献[14]提出一种基于新型无差拍重复控制策略，实现谐波电流抑制并校正输出电流偏差。为解决问题③，文献[12]分析了死区补偿与窄脉冲消除存在的矛盾性，提出一种不对称矢量作用时间内死区补偿和窄脉冲消除分区执行的调制策略。

1.2.2　死区消除

死区消除的机理是只改变有效功率管驱动信号，而对应的互补功率管不动作。由于有效驱动信号中不包含死区，因此从根本上避免了死区效应。死区消除的主要问题是对电流极性判断的依赖严重，相比死区补偿易造成更严重的输出电压畸变。

现有研究主要考虑将死区消除与死区补偿综合考量，文献[15]提出一种新颖的双调制波死区消除法，如图 3 所示，以 a 相为例，S_{a1}、S_{a2}、S_{a3}、S_{a4}分别为 T_1、T_2、T_3、T_4的驱动信号，采用 2 个有幅度差的调制波 u_{a1}、u_{a2} 来产生互补驱动脉冲之间的死区时间，在电流 i_a的极性判断存在偏差时，能有效降低常规死区消除算法产生的电流畸变。

1.3　直流中点电位不平衡优化

直流中点电位不平衡是三电平变换器的核心问题，可分为直流不平衡和交流振荡[16]。导致直流不平衡的主要原因可归纳为以下几种：①电容参数不一致；②负载不对称；③控制策略自身特点。由于常见的直流不平衡补偿方法会在调制波中引入 3

次谐波的零序电压，导致直流电压也存在 3 倍频纹波，即交流振荡。交流振荡纹波大小取决于输出电流、功率因数和直流电容的大小，且纹波过大可能导致交流输出电压畸变以及功率器件电压应力过高。

目前针对三电平 PCS 的中点电位不平衡问题已有大量的研究，研究内容大多集中在以下方面：①全功率因数和全调制度下的中点不平衡控制；②交流振荡抑制；③降低开关损耗与中点不平衡性能的协同控制。现有控制方法可分为：基于载波的脉宽调制(carrier-based pulse width modulation, CBPWM)和空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)。其中，基于 CBPWM 的方法可分为零序电压注入法和双调制波调制法；基于 SVPWM 的方法又可分为最近三矢量 SVPWM、最近三虚拟矢量 SVPWM(virtual SVPWM, VSVPWM)以及混合 PWM。

针对问题①，文献[17]提出一种载波幅值可变的零序电压注入法，可改善 CBPWM 在全功率因数和全调制度范围内的控制性能。同时，虽然 VSVPWM 自身具有全范围内中点电位控制有效性，但会造成输出谐波和开关损耗增大[18]。

针对问题②，研究人员基于 CBPWM、SVPWM、DPWM 提出了一系列中点电位平衡策略[19-22]，但这些策略在本质上是一致的，均无法克服低频振荡问题[23]。而 VSVPWM 利用小矢量、中矢量构成中性点电流为零的虚拟矢量，使流过中性点的电流为零，可避免低频振荡[24]。

针对问题③，结合 VSVPWM 与 SVPWM，文献[25]将基波周期分为中点电压波动可控区和不可控区，在可控区采用 SVPWM，在不可控区采用 VSVPWM；但此方法在高调制度、低功率因数时 VSVPWM 比重超过 80%，降耗能力有限。文献[26]提出一种全新的调制策略，可实现全范围内中点电位平衡，且开关损耗较 VSVPWM 方法有明显的降低，每个开关周期动作次数由 4 次降低至 3 次。

本文重点对死区和中点电位平衡问题及优化方法进行了梳理，为提高设备对不同电池系统、电网电压的适用能力，要求 PCS 具有较宽的交流/直流电压，从而导致更容易出现过调制，对于死区、中点电位平衡、窄脉冲抑制的优化控制限制也更严格。因此，需综合考虑上述 3 方面的综合优化问题。另外，对于兆瓦级大功率 PCS，受限于成本和开关器件的选型，其额定功率下的损耗较大，因此如何在进行非线性优化控制的同时降低系统损耗，也是亟待解决的问题。

2 弱电网下跟网型 PCS 稳定性分析及优化

在微电网中，随着可再生能源渗透率的不断提升，大量电力电子设备接入导致变压器广泛接入；同时微电网常见的输电线路长、电网末端特性，将向电网引入较大的等效阻抗，导致电网线路阻抗不可忽略，即出现弱电网。弱电网条件下多电力电子变换器组网系统的振荡问题由电力电子设备主导，图 4 为多电力电子变换器组网系统耦合示意图，图中展示了 4 种振荡形式[27]：①多变换器通过变压器并联接入，设备间的高阶滤波器耦合导致内部振荡，如图 4 中 S_1 路径；②变换器的高阶滤波器与电网阻抗耦合，引起外部振荡，如图 4 中 S_2 路径；③使用直流电压控制或功率控制等的电力电子变流器用电设备与电网阻抗耦合产生外部振荡，如图 4 中 S_3 路径；④受电网阻抗影响，多时间尺度动态响应的电力电子设备间耦合产生内部振荡，如图 4 中 S_4 路径。

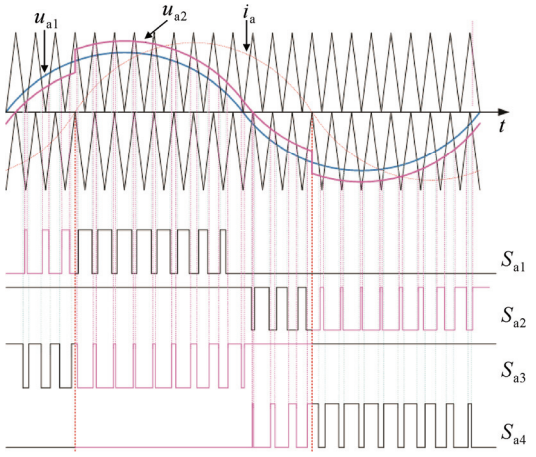


图 3 双调制波死区消除方法

Fig.3 Double-modulation wave for dead-time-effect elimination method

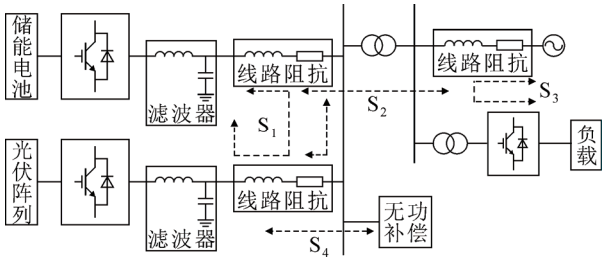


图 4 多电力电子变换器组网系统的耦合振荡示意图

Fig.4 Coupling oscillation diagram of multi-power electronic converter network system

2.1　跟网型 PCS 稳定运行因素分析

影响 GFL-PCS 稳定运行的因素主要是 PLL 和电网电压前馈，图 5 给出了 GFL-PCS 受 PLL 和电压前馈影响的闭环系统小信号模型，由图 5 中虚线区域可知，在小扰动时 PLL 控制误差将引起控制系统与物理系统的相位偏差，并从并网电流反馈环节、有源阻尼环节、电压前馈环节、调制环节 4 个方面施加影响[28]。

针对电网电压前馈的稳定性影响，可通过对引入电压前馈系统开环传递函数 bode 图中相位裕度的变化趋势进行分析；针对锁相环的稳定性影响，则需根据图 5 构建系统闭环传递函数，并建立系统输出阻抗 $Z_o(s)$的数模模型，根据式(1)中 $Z_g(s)/Z_o(s)$绘制 Nyquist 曲线进行稳定性分析。

此外，文献[29]指出在弱电网下，并网电流指令与 PCS 有功功率之间呈现非单调性，如图 6 所示。其中采用标幺化变量并以无穷大电源的电压和线路阻抗为基准值。随着电流指令增加，线路感抗分压加大，并网点电压降低，与电网间功角变大，导致并网有功功率反而降低。该现象会导致 PCS 输出有功功率与并网有功功率发生不平衡现象，甚至引起功率失稳，因此需根据系统及控制参数，计算其单调性临界短路比，相关计算方法请参考相关文献，此处不再赘述。

2.2　跟网型 PCS 稳定性优化技术

针对 GFL-PCS 小信号稳定性优化方法有 3 类：一是降低 PLL 带宽，但会降低 PLL 动态性能，无法满足低电压穿越等快速性响应要求；二是优化电网电压前馈，以提高相角裕度，降低前馈对输出阻抗负面影响；三是综合考虑电压前馈与 PLL 的影响，对输出阻抗进行重塑[30]，在降低输出阻抗低频段负阻抗特性的同时，保留了电网电压前馈对电网电压背景谐波的抑制能力。

针对电网电压前馈的优化方法，一是在图 5 中电网电压前馈环节 $G_u(s)$采用加权比例系数[31]，以“弱化”电压前馈引入的正反馈增益，为解决前馈系数减小带来的动态性能降低，可适当提高电流环参数；二是在图 5 中 $G_u(s)$环节引入相位滞后环节，实现输出阻抗远离−90°以“钝化”电压前馈引入的正反馈影响，此类方法以引入低通滤波器或 2 阶广义积分(second-order generalized integrator, SOGI)[32]为代表，需要说明的是，引入 SOGI 会导致低频段的输出阻抗幅值非常小，这将引起并网逆变器的输出动态特性大幅恶化。

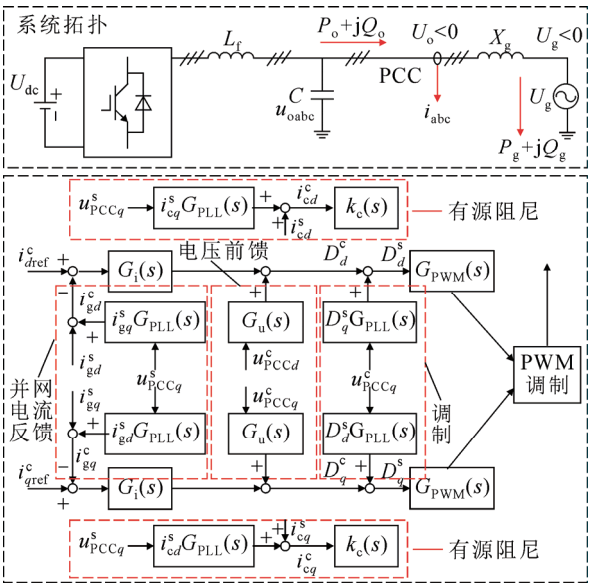


图 5　GFL-PCS 闭环系统小信号模型

Fig.5　The small signal model for closed-loop system of GFL-PCS

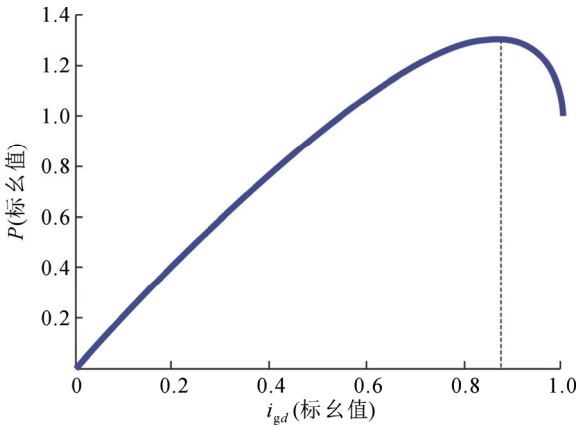


图 6　弱电网下有功功率单调性示意图

Fig.6　Diagram of monotonicity of active power under weak grid condition

针对 PLL 的优化方法，一是进行 PLL 带宽优化，如文献[29]提出根据电网阻抗自适应调节 PLL 带宽，以改善系统稳定性；二是修改 PLL 控制器以重塑输出阻抗，如文献[33]在 PLL 中添加带通滤波器，在一定程度上降低了 PLL 动态性能。

系统发生谐振有 2 个必要条件，一是存在振荡网络，二是存在谐波源。因此防止谐振主要有 2 种方法，一是防止谐波电流产生，二是重构阻抗网络。上文提到的阻抗重塑主要是有源阻抗重塑，其原理是通过改变控制策略，实现在输出阻抗上串联或并联输出电阻，以此抑制系统谐振，此方法不会产生

功率损耗，可以灵活地改变控制策略，其包含 3 种基本形式，如图 7 所示，并可自由组合。为避免上述方法在基频处的高阻抗特性，可在电压前馈和并网电流反馈通道中分别引入带阻滤波器，实现串并联阻尼阻抗重塑，进而实现高频振荡抑制[28]。

在电网故障或其他大干扰下 PCS 的稳定性与锁相环存在紧密联系。电流控制环与锁相环间的动态交互作用会引起变流器暂态失稳。为解决此问题，通过锁相环带宽增加、补偿控制系统延时、有功电流给定值减小以及电流控制带宽降低等方法来提升变流器暂态期间的稳定性[34]。另外在发生电网不平衡跌落时，需对并网电流的正负序分量进行无静差控制，主要有双同步旋转坐标系谐振控制和静止坐标系谐振控制，其中静止坐标系谐振控制又包含比例谐振控制和矢量比例积分控制 2 种。由于谐振控制器在谐振频率处增益无穷大且相位突变 180°，导致其 Nyquist 曲线在控制频率处靠近临界点，并使得在谐振频率处发生放大现象，因此延时补偿在提高系统稳定性和抑制闭环奇异点中发挥决定作用[35-36]。

本文梳理了弱电网下 GFL-PCS 稳定性及优化控制，随着多并网变流器、非线性负载、直流输电设备等构成的微电网网络越发复杂，多路径耦合引发的稳定性也愈发复杂，值得进一步研究。此外，数字控制系统中存在的死区设置、计算延时、调制延时等非线性因素均会影响输出阻抗特性，可对考虑控制延时的小扰动阻抗模型进行研究，并进一步探讨如何提高系统在电网阻抗变化的鲁棒性。另外，考虑到微电网多变流器不同参数因素的复杂网络，在公共耦合点增加电能质量综合治理装置可能成为提高系统稳定性的趋势。

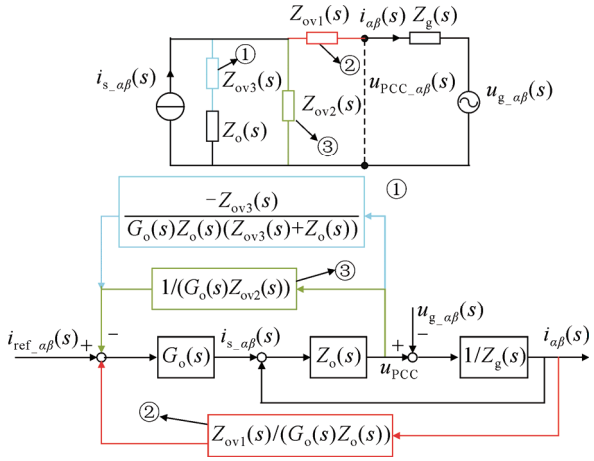


图 7 阻抗重构基本方法

Fig.7 Basic method of impedance reshaping

3 构网型 PCS 稳定性分析及优化

3.1 GFM-PCS 控制技术

在电力电子高占比的新型电力系统中 GFL 变流器无法支撑交流电压，系统稳定运行受影响，因此，需要一部分变流器以电压源形式运行，通过控制功率(或直流电压)而非锁相实现同步，即 GFM 运行模式，GFM 控制框图如图 8 所示。图 8 中 PCS 可等效为串联内阻的受控电压源，受控电压源幅值控制由无功功率环决定，其相位控制则根据直流端是否存在稳定直流源而有所不同。当直流端电压稳定受控时(如 PCS、光伏和风电等直流环节受控的双级式变流器等)，输出电压相位由有功功率控制，即“有功功率同步”；基于此类控制的方法有下垂控制(droop control)、VSG、自动电流均分法[37]等。当直流端无稳压源(如定直流电压的柔性变电站[38]、无前级直流稳压的全功率变换风电机组[39])，则应以直流电压控制为目标，通过交直流功率平衡来动态实现对电网的自主同步控制，即“直流电压同步”[39]。此外，基于虚拟振荡器的控制策略(virtual oscillator control, VOC)是利用数字控制构造 LC 振荡回路，将谐振电压作为构网型控制电压参考，并送入控制内环。上述控制产生变流器输出电压参考值后，

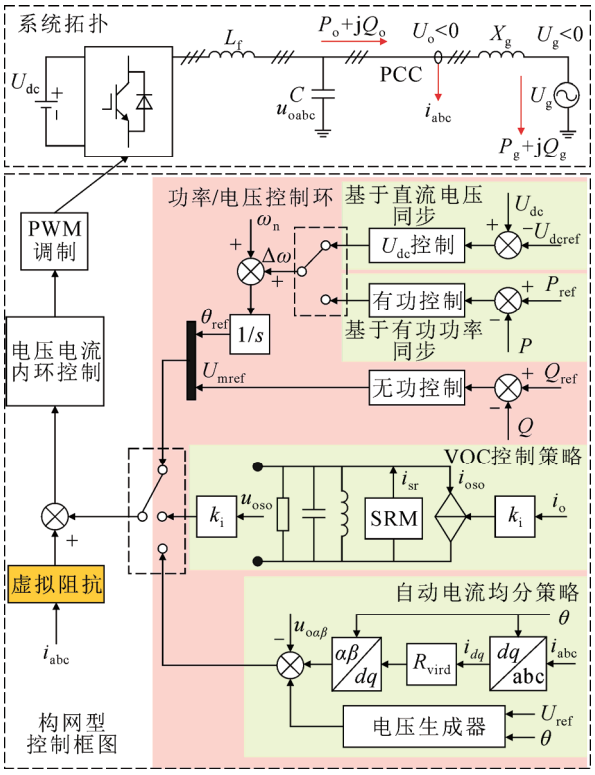


图 8 GFM 控制结构

Fig.8 Control structure of grid-forming

可采用电压电流内环实现虚拟阻抗、故障限流等功能[40]。最后，为了避免扰动失稳，可通过加入虚拟阻抗来改变其输出阻抗，目前已有方案在电压给定处加入虚拟阻抗回路来增大输出阻抗[41]。

3.2　GFM-PCS 稳定性优化

3.2.1　稳定工作点分析

在进行 GFM-PCS 稳定性分析时，应首先判断稳态工作点是否存在。并网有功功率 P_g 可表示为：

$$P_g=\frac{U_oU_g}{X_g}\sin\theta \tag{4}$$

式中：P_g 为并网有功功率；$U_o\angle\theta$ 为变流器输出电压；θ 为相角；U_g 为电网电压；线路阻抗为 X_g。

并网系统短路容量比的定义为 $k_{SCR}=1/X_g$，代入式(4)，则有：

$$P_g=U_oU_gk_{SCR}\sin\theta\ge U_oU_gSCR \tag{5}$$

由于 $P_o=P_g+P_{load}$，可得：

$$P_{gmax}=U_oU_gk_{SCR}\ge P_o-P_{load} \tag{6}$$

令 P_o、U_o、U_g 标幺值为 1，则有：

$$k_{SCR}\ge1-P_{load}=k_{SCR\,min} \tag{7}$$

式中：P_o 为变流器输出有功功率；P_{load} 为本地负载有功功率；P_{gmax} 为 P_g 的最大值。

当无本地负荷时，SCR 最小值为 $k_{SCRmin}=1$。考虑到电网电压存在波动，因此在实际工程中 k_{SCRmin} 在 1 附近波动。当存在本地负荷时，允许 GFM-PCS 工作在 $k_{SCR}<1$ 的工况，当 $k_{SCR}=0$ 时表示 PCS 工作在离网模式。因此，当 PCS 工作在 $k_{SCR}<1$ 工况下时，应先判断稳态工作点是否存在，若不存在稳态工作点则 PCS 无法运行。

3.2.2　小信号稳定性分析

目前，以 PCS 为代表的构网型变流器在应用中出现的小信号稳定问题，根据振荡失稳频率大小可划分为低频振荡[42]、次同步振荡[43]、工频振荡[44]以及高频振荡[45]4 个方面，其产生机理如表 1 所示。

表 1 中，虚拟阻抗添加有 2 种方法，一是常见的电压型虚拟阻抗，二是电流型虚拟阻抗，其 d 轴控制框图如图 9 所示。研究发现，加入虚拟阻抗后的输出阻抗受自身滤波器参数、虚拟阻抗参数、电流环调节器参数以及负载参数共同影响。其中，电流环参数主要影响输出阻抗中频段特性，需考虑虚拟阻抗值进行重新整定；而 PCS 滤波器硬件参数决定了虚拟阻抗的选取范围，虚拟阻抗中的虚拟电感主要影响中低频段特性，增大感值可促使系统极点远离虚轴，从而提高系统稳定性；而虚拟电阻对闭环主导极点无明显影响，但会减小低频段幅频增益[49]。

3.2.3　大干扰稳定性分析

除小信号稳定外，GFM-PCS 还需在电网大扰动时提供功率支撑：在电网相位跳变时快速提供有功功率支撑，在电网电压跌落时快速提供无功功率支撑。图 10 给出了同步发电机功角特性曲线与虚拟同步机功角特性曲线。

表 1　GFM 变流器小信号振荡机理及优化方法

Table 1　Small signal oscillation mechanism and optimization method of GFM converter

类型	振荡机理	优化方法
低频振荡	振荡频率在 0.2~2.5 Hz 之间，其产生机理是在电网强度较弱且本地负载较重时，构网型变流器的无功–电压控制引入了负的等效阻尼，当该系数足够小时可能导致系统等效阻尼为负，进而引发低频振荡	调整合理的设计构网型控制参数，增大系统等效阻尼来保证系统等效总阻尼为正
次同步振荡	振荡频率低于工频且远高于低频，其产生机理是在强电网下电压源直接并联或串补线路自然谐振引起。在接入强电网下，由于线路阻抗较小，不利于并联运行，可能引发次同步振荡	为避免该现象，电压电流双闭环需额外加入虚拟阻抗以增大输出阻抗[46]
工频振荡	当线路电阻 R 较小时，有功–频率控制传递函数在工频处可能谐振，导致系统失稳	加入虚拟电阻来阻尼工频谐振峰[47]
高频振荡	产生机理是由数字控制延时引起的变流器输出阻抗在高频处呈现负阻尼特性，进而产生高频振荡	减小控制系统数字延时或在控制中加入有源阻尼来消除高频段负阻尼特性[48]

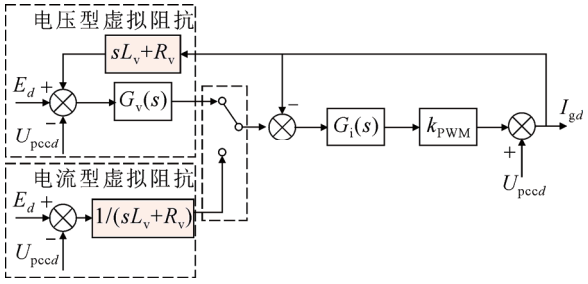


图 9　虚拟阻抗控制框图(d 轴)

Fig.9　Virtual impedance d-axis control block diagram

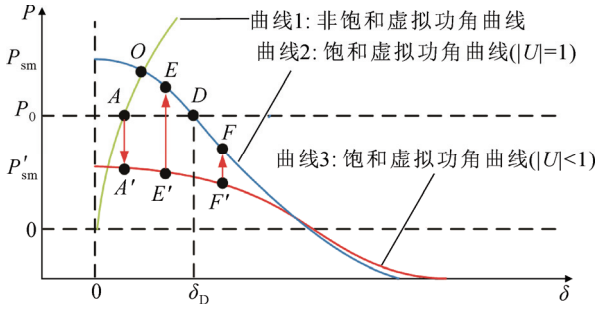


图 10　GFM-PCS 大扰动前后功率曲线

Fig.10　Power curve of GFM-PCS before and after large disturbance

由图 10 可知，传统同步发电机在遇到短路等大扰动时，其功角非线性导致暂态功角稳定。而 GFM-PCS 在大干扰下也存在暂态失稳，但由于无法像同步发电机一样提供短路电路，其暂态稳定性会由于电流限幅而呈现电流源特性，且故障清除后电流维持饱和状态，无法回到合理的平衡点，从而相比同步发电机更容易暂态失稳[50]。为消除频率和电压偏差，在完成一次调频调压后，可通过模型预测控制等方法由能量管理系统下发指令，进行频率/电压的二次调节[51]。文献[52]给出了诸多 GFM-PCS 暂态响应的相关结论：无功功率控制降低了系统暂态稳定性；增加阻尼系数、无功功率–电压的下垂系数及线路阻抗会降低系统的稳定裕度；故障期间降低功率给定可提升变流器稳定性；与电流闭环直接控制相比，常规 GFM-PCS 采用电压控制，暂态稳定性更高。针对暂态稳定性优化问题，可采用虚拟阻抗控制模拟限流器的阻感作用，以降低端电压幅值实现限流[53]。

3.3 考虑储能容量限制的控制优化

针对 GFM-PCS 控制，运动方程的本质是将储能系统电势能模拟成同步发电机转子机械能。因此有必要根据使用场景、储能系统容量、储能介质特性等因素对控制中惯量值的设定范围进行设计。

GFM-PCS 所具备的模拟惯量受储能荷电状态(state of charge, SOC)约束，因此有必要将储能容量设计规划、多种微电网复杂工况下考虑 SOC 的 GFM 控制策略及其保护逻辑进行优化研究。文献[54]根据惯量和阻尼来动态配置储能容量，并利用线性优化方法抑制功率振荡。文献[5]基于电力电子储能系统的惯性特性，提出了给定储能系统的等效惯量计算方法。文献[55]基于储能 SOC 和 VSG 调频特性建立了含功率权重分配系数的 VSG 控制模型，引入模糊逻辑理论，将考虑储能容量和 SOC 约束后计算得到的惯量范围作为模糊自适应 VSG 控制的输出论域。

3.4 GFL/GFM 双模式控制

在高电力电子渗透率微电网中 SCR 存在大范围波动，在 SCR 变化时 GFL 与 GFM 的系统稳定性具有互补性，由此文献[29]提出基于电网阻抗自适应的双模式控制策略，在强电网下采用 GFL 控制，在弱电网下采用 GFM 控制。为扩展到多机并联系统中，文献[56]进一步提出，当 SCR 逐渐由强变弱的过程中，多变流器依次运行在全 GFL 控制、混合控制、全 GFM 控制模式。为分析全 GFL 控制至混合控制、混合控制至全 GFM 控制的运行边界及稳定性问题，文献[57]进一步提出了组合优化控制策略，定量分析了上述 3 种控制之间的 SCR 切换边界。双模式控制策略为电力电子变流器在高渗透率下的稳定运行提供了全新的思路，但未考虑多变流器参数不一致的情况；另外，GFM 以下垂控制为主，VSG 等其他 GFM 是否同样适用并未进行说明。最后，上述研究主要针对小信号扰动条件，在故障条件下的暂态扰动特性仍待讨论。

4 结论与展望

本文针对可再生能源高渗透率微电网下对储能变流器需求目标进行整理，分别从三电平储能变流器波形影响因素及优化、弱电网下跟网型 PCS 稳定性及优化、构网型 PCS 稳定性优化 3 方面进行了总结，并针对性地指出后续各自研究重点。针对 100%可再生能源消纳微电网，构想了具有构网能力的虚拟同步机惯量/电压支撑和电能质量综合治理能力的 PCS 控制技术，以期为后续的相关研究提供参考，相关的研究重点和目标如下：

1）在“双高”背景下的微电网系统中，高渗透率甚至 100%绿电消纳的微电网，存在惯量调节能力不足易导致电压与频率失稳甚至解列的问题，从而严重威胁微电网的安全运行；同时，随着离网型微电网容量的提升，需要多台构网型变流器并联运行，这会引发微电网功率振荡和输出功率分配不均等问题。

2）高比例新能源接入微电网的弱网特性以及存在大量非线性和不对称负荷，会导致电压/电流谐波、不平衡以及电压波动、闪变等电能质量问题愈发凸显，电能质量恶化风险激增。基于此，研究具有构网能力的虚拟同步机惯量/电压支撑和电能质量综合治理技术，是微电网 PCS 未来的发展方向。

3）PCS 在提供功率平滑能力的同时，需要为微电网提供必要的惯量支撑和电压支撑，因此有必要利用 PCS 对并网电流、离网电压控制的灵活性，分别在跟网型控制中加入并网电流谐波及不平衡抑制，在构网型控制中加入输出电压谐波及不平衡抑制。

4）考虑到电网强度大范围变化的实际工况，要求 PCS 具备跟网型/构网型双模式平滑切换能力，目前已有研究团队在此方面展开了一些探索，但仍需对以下问题进行研究：①多变流器参数不一致且

运行工况不同时的稳定性及切换逻辑；②在电网故障等暂态扰动下的稳定性；③考虑变流器非线性因素后的数学模型，进一步精确推导各运行模型的稳定边界；④如何快速、精确获取多变流器并联时的电网强度，指导系统运行逻辑切换。

参考文献　References

[1] 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 Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

[2] 董旭柱，华祝虎，尚　磊，等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[3] 杨银国，戴耀辉，陆秋瑜，等. 虚拟同步发电机暂态全局稳定分析与阻尼调制方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2505-2516.
YANG Yinguo, DAI Yaohui, LU Qiuyu, et al. Transient global stability analysis and damping tuning method of virtual synchronous generator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(0): 2505-2516.

[4] 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.

[5] 胡安平，杨　波，潘鹏鹏，等. 基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(17)：4999-5008，5297.
HU Anping, YANG Bo, PAN Pengpeng, et al. Study on inertial characteristics of energy storage system with power electronic interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4999-5008, 5297.

[6] KIM H S, KWON Y C, CHEE S J, et al. Analysis and compensation of inverter nonlinearity for three-level T-type inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4970-4980.

[7] 苏小芳，袁佳歆，薛　钢，等. 基于免疫算法的三相逆变器无死区混合空间矢量PWM控制[J]. 电工技术学报，2016，31(16)：135–144.
SU Xiaofang, YUAN Jiaxin, XUE Gang, et al. An immune-algorithm-based dead-time elimination hybrid space vector pwm control strategy in a three-phase inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 135-144.

[8] ZHANG Z, XU L. Dead-time compensation of inverters considering snubber and parasitic capacitance[J]. IEEE Transactions on Power Elactronics, 2014, 29(6): 3179-3187.

[9] SHEN Z, JIANG D. Dead-time effect compensation method based on current ripple prediction for voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 971-983.

[10] CHIERCHIE F, PAOLINI E E, STEFANAZZI L. Dead-time distortion shaping[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 53-63.

[11] OLIVEIRA A C, JACOBINA C B, LIMA A M N. Improved dead-time compensation for sinusoidal pwm inverters operating at high switching frequencies:[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 2295-2304.

[12] 肖宏伟，何英杰，刘进军，等. 基于窄脉冲消除的三电平逆变器矢量不对称死区补偿调制策略研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(4)：1386-1397，1545.
XIAO Hongwei, HE Yingjie, LIU Jinjun, et al. Research on vector asymmetric dead-time compensation modulation strategy of three-level inverter based on narrow pulse elimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1386-1397, 1545.

[13] 张继元，舒　杰，王　浩，等. 基于电流矢量的三电平逆变器死区补偿策略[J]. 太阳能学报，2018，39(6)：1637-1645.
ZHANG Jiyuan, SHU Jie, WANG Hao, et al. Dead-time compensation strategy based on current vector for three-level inverter[J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(6): 1637-1645.

[14] 梁营玉，刘建政. 电压源变流器死区效应分析及抑制策略[J]. 电力系统自动化，2018，42(24)：135-142.
LIANG Yingyu, LIU Jianzheng. Analysis and suppression strategy of dead-time effect for voltage source converter[J]. Automation of electric Power Systems, 2018, 42(24): 135-142.

[15] YAN Q, XIAO L, YUAN X, et al. A double-modulation-wave pwm with reduced dependency on current polarities for dead-time-effect elimination in three-level T-type converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 8413-8427.

[16] LEE J S, LEE K B. Time-offset injection method for neutral-point ac ripple voltage reduction in a three-level inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 1931-1941.

[17] 龚　博，程善美，秦　忆. 基于载波的三电平中点电压平衡控制策略[J]. 电工技术学报，2013，28(6)：172-177.
GONG Bo, CHENG Shanmei, QING Yi. A three-level neutral point voltage balance control strategy based on carriers of SPWM[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2013, 28(6): 172-177.

[18] 陈　兮，黄声华，李炳璋，等. 一种零序注入的三电平中点钳位型变换器中点电位平衡控制策略[J]. 电工技术学报，2019，34(2)：337-348.
CHEN Xi, HUAG Shenghua, LI Binzhang, et al. A Novel zero sequence injection scheme for three-level NPC converters considering neutral-point potential balance[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2019, 34(2): 337-348.

[19] WANG Z, CUI F, ZHANG G, et al. Novel carrier-based PWM strategy with zero-sequence voltage injected for three-level NPC inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1442-1451.

[20] ZHANG Y, LI J, LI X, et al. A method for the suppression of fluctuations in the neutral-point potential of a three-level NPC inverter with a capacitor-voltage loop[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 825-836.

[21] 谢之光，侯世英，唐治德，等. NPC三电平逆变器最优化虚拟电压矢量控制[J]. 电力系统自动化，2017，41(18)：95–102.
XIE Zhiguang, HOU Shiying, TANG Zhide, et al. Optimized virtual voltage vector control of NPC three-level inverter[J]. Automation of electric Power Systems, 2017, 41(18): 95-102.

[22] LEE J S, YOO S, LEE K B. Novel discontinuous pwm method of a three-level inverter for neutral-point voltage ripple reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3344-3354.

[23] 姜卫东，王培侠，王金平，等. 全范围内中点电位平衡的三电平变换器调制策略[J]. 电力系统自动化，2018，42(21)：145-153.
JIANG Weidong, WANG Peixia, WANG Jinping, et al. Modulation strategy for three-level converter with neutral point potential balance in full range[J]. Automation of electric Power Systems, 2018, 42(21): 145-153.

[24] 李敏裕，马晓军，魏曙光，等. T型逆变器中点电压全范围精确平衡研究[J]. 电工技术学报，2018，33(8)：1814-1826.
LI Minyu, MA Xiaojun, WEI Shuguang, et al. Research on narrow

pulse suppression of three-level virtual space vector pulse width modulation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3264-3273.

[25] JIANG W, DU S, CHANG L, et al. Hybrid PWM strategy of SVPWM and VSVPWM for NPC three-level voltage-source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10): 2607-2619.

[26] WU X, TAN G, YE Z, et al. Virtual-space-vector PWM for a three-level neutral-point-clamped inverter with unbalanced DC-links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2630-2642.

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

[28] 杨 苓，陈燕东，罗 安，等. 多机并联接入弱电网的改进型带阻滤波器高频振荡的抑制[J]. 中国电工技术学报，2019，34(10)：2079-2091.
YANG Ling, CHEN Yandong, LUO An, et al. Suppression method of high-Frequency oscillation by improved notch filter for multi-parallel inverters connected to weak-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2079-2091.

[29] 李 明，张 兴，郭梓暄，等. 弱电网下基于电网阻抗自适应的双模式并网稳定控制策略[J]. 太阳能学报，2021，42(7)：86-93.
LI Ming, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Grid impedance adaption dual mode grid-connected stability control strategy in a weak grid[J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(7): 86-93.

[30] 魏石磊，田艳军，王 毅，等. 弱电网中增强 LCL 逆变器稳定性的虚拟阻抗控制[J]. 高电压技术，2019，45(6)：1827-1834.
WEI Shilei, TIAN Yanjun, WANG Yi, et al. Virtual inductance control for enhancing stability of LCL inverter in weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1827-1834.

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

[32] 苗丽芳，王乐媛，曹 斌，等. 弱电网下电网电压前馈控制分布式逆变系统的谐振阻尼特性分析[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3521-3532.
MIAO Lifang, WANG Leyuan, CAO Bin, et al. Resonance damping characteristic analysis of distributed inverter-based system with grid voltage feed-forward control in weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3521-3532.

[33] WU X, LI X, YUAN X, et al. Grid harmonics suppression scheme for LCL-type grid-connected inverters based on output admittance revision[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 411-421.

[34] HU Q, FU L, MA F, et al. Analogized synchronous-generator model of PLL-based VSC and transient synchronizing stability of converter dominated power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1174-1185.

[35] YEPES A G, FREIJEDO F D, LOPEZ O, et al. Analysis and design of resonant current controllers for voltage-source converters by means of Nyquist diagrams and sensitivity function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5231-5250.

[36] YEPES A G, FREIJEDO F D, DOVAL-GANDOY J, et al. Effects of discretization methods on the performance of resonant controllers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(7): 1692-1712.

[37] GUAN Y, GUERRERO J M, ZHAO X, et al. A new way of controlling parallel-connected inverters by using synchronous-reference-frame virtual impedance loop-part I: control principle[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4576-4593.

[38] HUANG L, XIN 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.

[39] 赵雨童，高 飞，俞嘉浩，等. 弱电网下 VSC 的多维度建模及稳定性分析[J]. 高电压技术，2022，48(1)：220-232.
ZHAO Yutong, GAO Fei, YU Jiahao, et al. Multi-dimensional modeling and stability analysis of VSC connecting to weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 220-232.

[40] ROSSO R, WANG X, 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.

[41] YANG D, SUN Y. SISO impedance-based stability analysis for system-level small-signal stability assessment of large-scale power electronics-dominated power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 537-550.

[42] 刘 取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京：北京电力出版社，2007.
LIU Qu. Power system stability and excitation control[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2007.

[43] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-114.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-114.

[44] ZHANG L, 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.

[45] WU H, WANG X. Passivity-based dual-loop vector voltage and current control for grid-forming VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8647-8652.

[46] LIAO Y, WANG X, LIU F, et al. Sub-synchronous control interaction in grid-forming VSCs with droop control[C]//2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid. Xiamen, China: IEEE, 2019: 1-6.

[47] YANG D, WU H, WANG X, et al. Suppression of synchronous resonance for VSGs[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 2574-2579.

[48] JI K, PANG H, HE Z, et al. Active/passive method-based hybrid high-frequency damping design for MMCs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 6086-6098.

[49] GUO L, SU J, LAI J, et al. Research on power scheduling strategy for microgrid in islanding mode[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(2): e2493.

[50] 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.

[51] HEINS T, JOŠEVSKI M, KARTHIK GURUMURTHY S, et al. Centralized model predictive control for transient frequency control in islanded inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2641-2652.

[52] LI M, HUANG W, TAI N, et al. Lyapunov-based large signal stability assessment for VSG controlled inverter-interfaced distributed generators[J]. Energies, 2018, 11(9): 2273.
[53] 韩　刚，蔡　旭. 虚拟同步发电机输出阻抗建模与弱电网适应性研究[J]. 电力自动化设备，2017，37(12)：116-122.
HAN GANG, CAI XU. Output impedance modeling of virtual synchronous generator and its adaptability study in a weak grid[J]. Automation of electric Power Systems, 2017, 37(12): 116-122.
[54] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
[55] LIU J, MIURA Y, ISE T. Fixed-parameter damping methods of virtual synchronous generator control using state feedback[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99177-99190.
[56] LI M, ZHANG X, GUO Z, 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.
[57] 李　明. 高渗透率新能源发电并网逆变器阻抗自适应双模式控制研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2020.
LI Ming. Research on impedance adaptive dual-mode control of the grid-connected inverter for high-penetration new energy generation[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2020.



周京华(通信作者)
1974—，男，博士，教授，博导
研究方向为大功率电力电子变换
E-mail: zjh@ncut.edu.cn

ZHOU Jinghua
Ph.D., Professor
Corresponding author



李　津
1985—，男，博士
研究方向为大功率电力电子变换
E-mail: lijin275@126.com

LI Jin
Ph.D.

收稿日期　2023-03-30　修回日期　2023-07-27　　编辑　何秋萍

附录 A

表 A1　图 5 变量定义说明

Table A1　The variable definitions in Fig. 5

类型	振荡机理
u_{od}^{s}	并网点电压 d 轴分量(系统坐标系)
u_{oq}^{s}	并网点电压 q 轴分量(系统坐标系)
u_{od}^{c}	并网点电压 d 轴分量(控制坐标系)
u_{oq}^{c}	并网点电压 q 轴分量(控制坐标系)
i_{cd}^{s}	滤波电容电流 d 轴分量(系统坐标系)
i_{cq}^{s}	滤波电容电流 q 轴分量(系统坐标系)
i_{cd}^{c}	滤波电容电流 d 轴分量(控制坐标系)
i_{cq}^{c}	滤波电容电流 q 轴分量(控制坐标系)
i_{gd}^{s}	并网电流 d 轴分量(系统坐标系)
i_{gq}^{s}	并网电流 q 轴分量(系统坐标系)
i_{gd}^{c}	并网电流 d 轴分量(控制坐标系)
i_{gq}^{c}	并网电流 q 轴分量(控制坐标系)
D_{d}^{s}	调制输入信号 d 轴分量(系统坐标系)
D_{q}^{s}	调制输入信号 q 轴分量(系统坐标系)
D_{d}^{c}	调制输入信号 d 轴分量(控制坐标系)
D_{q}^{c}	调制输入信号 q 轴分量(控制坐标系)
$G_{\mathrm{PLL}}(s)$	锁相环控制传递函数
$k_{\mathrm{c}}(s)$	有源阻尼控制传递函数
$G_{\mathrm{i}}(s)$	电流环传递函数
$G_{\mathrm{u}}(s)$	电网电压前馈控制传递函数
$G_{\mathrm{PWM}}(s)$	控制延时及放大系数传递函数