

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220002

## LCL型多逆变器并网系统谐振研究综述

郑嘉龙<sup>1</sup>, 杨 鸽<sup>1</sup>, 陈开宇<sup>1</sup>, 张慧珍<sup>1</sup>, 孙 章<sup>2</sup>

(1. 四川水利职业技术学院电力工程学院, 四川 崇州 611231;

2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 多逆变器并网系统谐振将威胁电网的稳定运行。由于具备较好滤波效果, LCL型滤波器常被作为并网逆变器的输出滤波器。鉴于近年来又有很多LCL型多逆变器并网系统谐振机理分析和抑制方法被提出, 有必要进一步梳理和总结。首先, 介绍了多逆变器并网发电系统电路拓扑及等效电路。然后, 梳理了频域分析法、模态分析法和多输入多输出模型分析法的基本概念及其在系统谐振机理分析中取得的新成果。接着, 重点介绍了有源阻尼法、阻抗重塑法和采用有源阻尼器在系统谐振抑制方面的优点和局限性, 揭示了虚拟电阻和陷波器的应用是上述方法的关键技术。同时, 还分析了分层控制、控制器参数优化以及系统配置优化在系统谐振抑制方面的应用。最后, 从新型电力系统建设趋势的角度, 认为多逆变器并网系统正朝着大规模、多参数和不同控制方法并用的复杂系统方向发展, 需要多种分析方法相结合才能准确分析其谐振机理。对于多逆变器并网谐振的抑制方法而言, 传统有源阻尼法、阻抗重塑法和有源阻尼器将得到进一步深入研究, 谐振在线监测技术或将成为该研究新的突破口。

**关键词:** 多逆变器并网; LCL滤波器; 谐振; 机理分析; 有源阻尼; 阻抗重塑法; 有源阻尼器; 在线监测

### An overview on resonance for a multiple LCL-type inverter grid-connected system

ZHENG Jialong<sup>1</sup>, YANG Ge<sup>1</sup>, CHEN Kaiyu<sup>1</sup>, ZHANG Huizhen<sup>1</sup>, SUN Zhang<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Sichuan Water Conservancy College, Chongzhou 611231, China;

2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** The resonance of a multi inverter grid-connected system will threaten the stable operation of a power grid. Because of its good filtering effect, an LCL filter is often used as the output filter of a grid-connected inverter. In recent years, many resonance mechanism analysis and suppression methods of the LCL multi inverter grid-connected system have been proposed, and analysis and summarizing are needed. First, the circuit topology and equivalent circuit of a multi inverter grid-connected power generation system are introduced. Second, the basic concepts of the frequency domain analysis, modal analysis and multi input multi output model analysis methods, and their new achievements in the analysis of system resonance mechanism are explored. Then, the advantages and limitations of active damping and impedance reshaped methods and an active damper in system resonance suppression are emphasized. It is revealed that the application of virtual resistance and a notch filter is the key technology of the above methods. Also the applications of hierarchical control, controller parameter optimization and system configuration optimization in system resonance suppression are also analyzed. Finally, from the perspective of the construction trend of the new type power system, the development of a multi inverter grid-connected system towards complex systems with large-scale, multi parameter and different control methods is considered. It needs a combination of multiple analysis methods to accurately analyze the resonance mechanism. For the suppression methods of multi inverter grid connected resonance, the traditional active damping and impedance reshaped methods and the active damper will be further studied, and on-line resonance monitoring technology may become a new breakthrough in this research.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Sichuan Science and Technology Department (No. 2022YFG0117).

**Key words:** multi-inverter grid-connected; LCL filter; resonance; mechanism analysis; active damping; impedance reshaped method; active damper; online monitoring

**基金项目:** 四川省科技厅重点研发项目资助(2022YFG0117); 四川省水利厅科技计划项目资助(川水科 202003); 四川水利职业技术学院院级重点科研项目资助(KY2021-01)



## 0 引言

为实现“碳达峰，碳中和”的目标，可再生能源发电与储能系统在电网的建设规模将进一步增长<sup>[1-2]</sup>。高比例新能源的新型电力系统稳定运行备受研究人员关注<sup>[3]</sup>。现场经验表明多逆变器并网谐振是导致并网逆变器无故跳闸的重要原因之一<sup>[4]</sup>。并网逆变器适用条件多样性、电路拓扑多样性以及控制策略多样性提高了多逆变器并网谐振问题分析的复杂度。

逆变器并网所产生谐振的机理分析一直是研究人员关注的重点，不断创新的研究方法确保了该问题的研究深度。文献[5]构建串并联谐振等值电路分析了大型光伏电站谐振放大系数的影响因素。文献[6]基于多逆变器并联诺顿电路模型分析了电网阻抗对系统谐振的影响。文献[7]分析结果表明电网背景谐波加剧多逆变器并网电流的谐波畸变程度。文献[8]分析结果表明多逆变器并网系统存在多个谐振频率，并指出了影响谐振频率个数的因素。上述成果的研究过程中都采用了频域法分析了谐振影响因素，但是对谐振影响因素敏感度分析力度不够。文献[9]基于多逆变器并网系统节点导纳矩阵的模态分析法分析同型和异型的多逆变器并网系统谐振，提高了系统谐振时各元件灵敏度的分析水平。然而，该文所涉及异型逆变器的参数是指 LCL 滤波器和阻尼系数的参数，还未涉及不同控制策略下多逆变器并网的情况。除了系统谐振相关影响因素外，研究人员还开展了谐振系统的电流研究。文献[10]基于电流分解模式(current separation scheme, CSS)建立谐振交互模型，分离了逆变器间交互电流与注入电网的电流，论述了逆变器间交互电流导致系统谐振的影响因素。随着谐振机理研究的不断深入，研究人员也提出了多种抑制方法。文献[11]在传统有源阻尼方法的基础上采用虚拟电阻与陷波器级联，提出了适合多逆变器并联系统高频谐振抑制的阻抗重塑抑制方法。文献[12]在不改变电路拓扑的情况下，提出一种有源谐波电导方法可以有效抑制逆变器自身谐波电流的输出，从而避免因逆变器自身因素导致系统谐振现象发生。文献[13]的实验结果表明，可以通过改变并联滤波电容组数阻尼频率为 670~1230 Hz 的谐振。文献[14]通过建立具有一般性特点的多逆变器系统并网数学模型，优化有源阻尼参数抑制系统耦合谐振。文献[15]基于导纳重构原理，利用 PCC 处谐波电压产生虚拟导纳，该虚

拟导纳与系统谐振频率相关，可以动态调整网络阻抗从而抑制系统谐振。文献[16]建立多逆变器并网的闭环数学模型后，依据谐振阻尼表达式研究有源阻尼系数对多逆变器并网系统稳态及动态特性的影响。文献[17]提出采用有源阻尼器抑制系统谐振，虽然该方法将增加电气设备，但确实为系统谐振抑制提供了一个新的思路。

文献[18]已经对单机型和多机型并网逆变器系统谐振抑制问题进行了综述。然而，对多逆变器并网系统谐振机理分析和抑制问题介绍的不够深入。文献[19]从系统失稳的角度总结梳理了多逆变器并网谐振机理的传统频谱、频域分析方法和模态分析方法。该文对多逆变器并网谐振分析方法的综述存在局限性，例如，对于不同参数的异型多逆变器并网系统谐振机理分析方法的介绍还比较欠缺。同时，由于分布式发电单元(distributed generation units, DGs)和大规模集中发电系统(large scale centralized generation system, LSCGS)两种不同应用场景中对多逆变器并网系统谐振的约束条件是不同的。因此，本文在上述论文的基础上，侧重梳理论述近年来多逆变器并网系统谐振机理分析和抑制方面的研究成果，并按照微电网或分布式发电系统和大规模集中发电系统两种应用场景对取得的新成果进行综述。

## 1 多逆变器并网电路拓扑

### 1.1 多逆变器并网发电系统

多逆变器并网拓扑结构按照输入输出的串并联组合可以有 4 种结构，其中输入串联、输出串联的 LCL 型多逆变器并网电路拓扑应用中压或高压交流系统中<sup>[20]</sup>。下文阐述并联拓扑结构的多逆变器并网发电系统，如图 1 所示。图 1(a)所示为分布式并网发电系统，该系统单台逆变器容量较小，逆变器间距离分散，一般直接并入微电网或低压配网，适应屋顶光伏发电系统等场景。图 1(b)所示为集中式并网发电系统，该系统单台逆变器容量较大，特别是风力发电系统，需要采用汇流母线后经配网升压电力变压器并网。一般适用于大型光伏电场和风电场，所以采用容量更大的三相电力系统。大型光伏电场的逆变器距离较近，同一发电单元的并联逆变器间电缆影响可以忽略不计。但是大型风电场逆变器距离较远，特别是海上风电场，因此逆变器间的电缆影响不可忽略<sup>[21]</sup>。上述两种拓扑都是单交流母线，大规模分布式新能源发电系统还可以采用多交流母线并网，如图 1(c)所示。新能源发电系统的应用场景不同，电路拓扑结构也有差别，导致多逆

变器并网系统谐振的参与因素也不同。

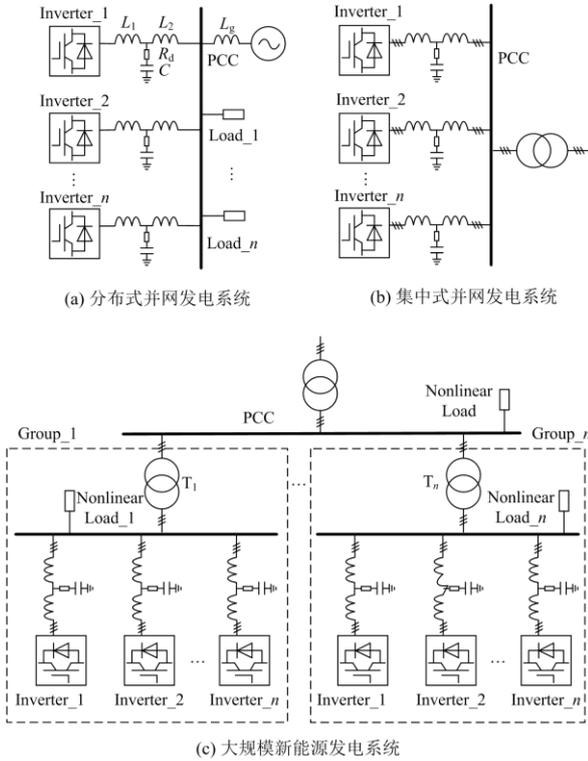


图 1 多逆变器并网原理图

Fig.1 Schematic diagram of multi inverter grid connection

### 1.2 等效电路

现有研究成果绝大部分是采用诺顿等效电路进行谐振机理分析的, 如图 2 所示。图 2(a)中虚线框  $Z_{line} / y_{line}$  表示等效输电线路阻抗, 根据不同的应用场景进行选择。图 2(b)为多逆变器并网等效电路简化图,  $Z_o$  为多逆变器并网的等效输出阻抗,  $Z_g$  为等效电网阻抗。多逆变器并网系统中的电流可分为单台逆变器输出电流  $i_o$ 、逆变器间的交互电流  $i_m$  和公共连接点的并网电流  $i_{PCC}$ 。

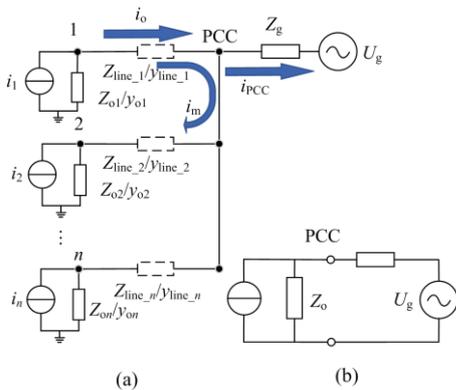


图 2 诺顿等效电路

Fig. 2 Norton equivalent circuit

## 2 谐振机理分析

现有研究表明多逆变器并网系统谐振的诱因是系统中存在谐波源, 逆变器与电网之间的交互以及逆变器之间的交互促成系统发生谐振, 系统谐振强度与逆变器、电网的参数相关。前些年的研究对系统谐振相关因素给予了极大的关注, 如并网时输电线路的距离及电网阻抗、并网逆变器数量及其参数, 还有背景谐波的类型、次数等。近些年的研究成果更多关注多逆变器并网系统中逆变器与电网、逆变器之间的交互机理分析。分析方法的创新是获得机理分析创新成果的基石。下文在阐述谐振机理分析方法演化过程中总结在系统谐振机理分析方面取得的成果。

### 2.1 频域分析法

基于传递函数的频域分析法是最早应用在多逆变器并网系统谐振机理分析的方法。频域分析法最重要的作用就是确定多逆变器并网系统谐振频率以及系统谐振时的系统阻抗。 $n$  台逆变器并网时, 基于 PCC 点观察的多逆变器并网阻抗模型如式(1)所示。

$$Z_{PCC}(s) = \frac{nZ_g(s) \cdot Z_o(s)}{nZ_g(s) + Z_o(s)} \quad (1)$$

根据系统并联谐振 PCC 处阻抗值最大可得系统谐振频率的表达式为

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + nL_g}{L_1 C(L_2 + nL_g)}} \quad (2)$$

文献[22]基于叠加原理建立了逆变器间交互电流分量、并网电流分量与逆变器电压源之间的传递函数。分析认为逆变器间交互电流谐振只与其本身 LCL 滤波器参数有关, 并网电流谐振与逆变器 LCL 滤波器参数以及电网阻抗相关。同时指出同型多逆变器并网系统具有交互谐振和公共谐振各自独立的特点, 而不同容量的异型多逆变器并网系统交互谐振和公共谐振存在耦合现象。文献[23]基于系统 PCC 点阻抗表达式, 分析认为多逆变器并网存在超高次谐波频率的系统谐振。文献[21]采用频率法分析发现海上风电机组间传输电缆  $\pi$  型等效电路存在多重共振频率, 说明在分析海上风电多逆变器并网系统谐振时, 相对于将该传输电缆简单等效为常规电感而言,  $\pi$  型等效电路更能反映它的真实特性。该研究将频率分析法拓展到了系统谐振相关因素的频率特性方面。

频域分析法的优点是通过系统传递函数的幅频特性图可以直观地判断系统是否发生谐振, 获取系

统谐振频率。同时,可以分析确定同型逆变器等效电路中各参数对谐振频率的影响。频域分析法的缺点是对影响系统谐振因素的敏感性分析能力不足,并且针对某一具体节点进行谐振分析时无法分析系统内其他节点对其的影响。

## 2.2 模态分析法

文献[24]首次提出将模态法应用于电网谐波谐振机理分析。多逆变器并网系统可等效为多节点网络系统。由图2多逆变器并网诺顿等效电路建立的 $n$ 台逆变器并网系统谐振电压方程如式(3)。

$$\mathbf{U}_f = \mathbf{Y}_f^{-1} \mathbf{I}_f = \mathbf{L} \mathbf{A}_f^{-1} \mathbf{T} \mathbf{I}_f \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{U}_f$  和  $\mathbf{I}_f$  分别为节点电压向量和节点注入电流向量;  $\mathbf{L}$  和  $\mathbf{T}$  分别为左、右特征相量矩阵;  $\mathbf{A}_f^{-1}$  为对角特征值矩阵;  $\mathbf{Y}_f^{-1}$  为系统谐振时网络节点导纳矩阵。

对角特征值矩阵  $\mathbf{A}_f^{-1}$  表达式为

$$\mathbf{A}_f^{-1} = \begin{bmatrix} \lambda_{f1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{f2}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{fn}^{-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

该系统发生谐波谐振时,相应节点出现并联谐振导致的过电压,网络节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}$  的某一特征值趋于零。文献[25]认为在模态域中实际系统谐振对应某个特定模态是系统的固有性质,与节点是否注入电流无关,因此可以很容易识别出系统谐振点。当模态1发生时,文献[26]认为式(4)中的第1个特征值远大于其他模态阻抗值,遂将其提取出矩阵表达式,进而分析系统各节点对该次谐振的参与程度。该文的研究结果表明同型多逆变器并网系统所有节点共同参与低频谐振模态,只有并网节点参与高频谐振模态,而对于异型多逆变器并网系统中,各类逆变器所占比例是影响谐振模态数量变化的一个重要因素。除了确定谐振点、研究系统节点对谐振的影响外,研究人员也试图采用模态法分析系统内各相关因素之间的交互作用对谐振的影响。逆变器并网电流是分析谐振系统时内部交互很好的切入点。文献[27]从逆变器并网电流受到的影响因素的角度,提出将其分为受自身因素影响和交互影响两个方面。该文建立的交互导纳模型可以有效描述多逆变器并网系统具有共性的交互问题。这种逆变器并网电流模型没有考虑电网背景谐波的影响,适用于分布式电网系统内部交互分析。对于大规模集中发电系统这类受电网影响较大的发电系统,逆变器并网电流往往被分成3部分:受自身因素影响、交互

影响和受电网影响<sup>[28]</sup>。文献[28]基于系统传递函数分析系统谐振特性,通过导纳矩阵模态方法分析逆变器数量、异型逆变器不同组合、线路阻抗和电网等效阻抗参与系统谐振的变化规律。大规模分布式逆变器并网经常采用分组接入配网变压器,如图1(c)所示。由于配网变压器泄漏阻抗的作用,该种多交流母线并网发电系统的谐振交互更加复杂。基于图1(c)中的PCC点建立  $V_{PCC}$  表达式后,文献[29]提出按工作组建立导纳矩阵,充分考虑配网变压器影响,将系统谐振分为逆变器自身谐振、工作组内谐振和工作组间谐振。然后,采用频率法分析3种谐振的频率特性,认为工作组内部谐振比工作组间谐振严重的多。

模态分析法的优点是在系统发生谐振时既可以确定系统的谐振点,又可以分析系统各节点对本次谐振的参与程度。通过节点导纳表达式分析系统物理参数对谐振的敏感性。模态分析法的缺点是基于节点导纳表达式矩阵方程无法描述系统中单台逆变器的运行特性,对系统内逆变器间交互机理分析能力不足。上述科研成果的研究过程说明模态分析法弥补了频率分析法对系统影响因素敏感性分析的不足,但是并不能完全替代频率分析法,因此两种方法结合使用是更有效的分析手段。

## 2.3 多输入多输出模型分析法

频率分析法和模态分析法在同型多逆变器并网分析中取得丰硕成果,但是在异型多逆变器并网方面的分析能力稍显不足。异型多逆变器并网系统谐振中各逆变器的参与因素仍有差别,因此需要对各逆变器具体参数进行分析。文献[30]在测量并网逆变器输出阻抗时首次采用了多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)识别技术,开启了MIMO模型在并网逆变器分析中的应用。研究人员已经开始将MIMO模型引入到多逆变器并网系统谐振特性的分析中。文献[31]考虑了单台逆变器并网谐波电流相关影响因素后,建立了以等效增益传递函数矩阵为系数的分布式发电系统谐波阻抗模型。分析该矩阵系数可以得出系统内每台逆变器输出谐波影响因素的权重。该文所提谐波阻抗模型已经具备了多输入多输出模型特征。但是,研究人员仅将其作为确定各逆变器输出电流使用而未对系统中各元件的交互展开讨论。文献[32-33]认为多逆变器并网系统谐振源于逆变器本身以及逆变器与电网的交互,因此将其MIMO模型分为逆变器自身稳定(也称为内部稳定)和外部交互稳定(也称为外部稳定)两大部分。由于文献[32-33]分别采用逆变器侧电流反馈和电容支路电流反馈,因此它们所提MIMO控制框图形式略有不同,但本质是一样的。文献[33]所

提逆变器 MIMO 控制框图如图 3 所示, 其中将  $i_{L2(1-n)}$  作为全部电网侧电感电流的输出变量,  $i_{ref(1-n)}$  作为全部的逆变器参考电流输入变量。由该框图可知, MIMO 模型法可以通过矩阵  $N_{n \times 1}$  中的传递函数分析电网背景谐波对单台逆变器输出电流  $i_o$  和多台逆变器并网电流  $i_{PCC}$  的影响, 也可以通过矩阵  $G_{cs, n \times n}$  和矩阵  $M_{n \times n}$  中的传递函数获取控制器参考电流对单台逆变器输出电流  $i_o$  和多台逆变器并网电流  $i_{PCC}$  的影响, 也可以通过矩阵内传递函数间的关系分析逆变器相关参数对逆变器间交互电流  $i_m$  的影响。

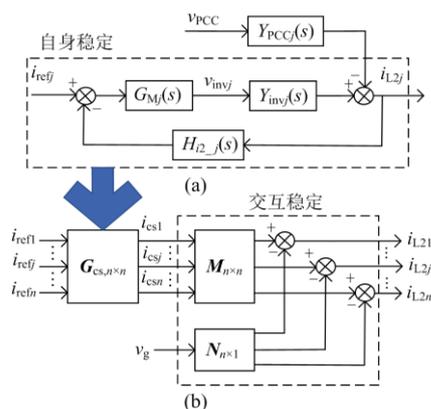


图 3 多逆变器并网 MIMO 控制框图

Fig. 3 MIMO control block diagram of multi-inverter grid connection

由上述分析可知, MIMO 模型分析法的优点是基于系统中各台逆变器建立传递函数的分析矩阵, 可以很好地描述所有逆变器在系统谐振时的运行状态。同时, MIMO 模型可以将谐振参与因素敏感度分析细化到各逆变器的具体参数上, 进一步提高各逆变器相关参数对逆变器间交互作用影响的分析能力。该方法对于同型或异型多逆变器并网系统都适用。MIMO 模型分析法的缺点是需要对系统内所有逆变器建立传递函数, 计算非常复杂, 计算量也非常大。采用传统计算方式, 很难敏锐获取系统内各参数交互的有效信息。

### 3 谐振抑制方法

系统谐振抑制方法研究已经取得了较多成果, 包括有源阻尼法、阻抗重塑法、有源阻尼器以及控制器参数优化设计等。

#### 3.1 有源阻尼法

LCL 滤波器的谐振阻尼可以分为无源阻尼和有源阻尼。无源阻尼是通过在 LCL 滤波器的电感支路或电容支路串联或并联电阻实现的。阻尼电阻在

LCL 滤波器电路中位置不同, 它的阻尼效果是不同的<sup>[34]</sup>, 6 种基本无源阻尼方法中阻尼电阻在 LCL 滤波器电路的分布图如图 4 所示。

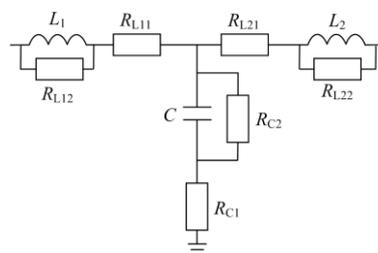


图 4 阻尼电阻在 LCL 滤波器上的分布图

Fig. 4 Distribution of damping resistance on LCL filter

文献[35]提出基于电容支路电压和电流的反馈方法抑制多逆变器并网系统谐振。该方法为无源阻尼方法, 在 LCL 滤波器电容支路上串联电阻用于抑制高频谐波, 后再并联电阻用于抑制低频谐波。虽然无源阻尼也能达到抑制谐波的效果, 但是无源阻尼电阻造成的能量损失是无法避免的。有源阻尼是将阻尼电阻通过控制算法虚拟化, 这样既保证了阻尼效果, 又避免了阻尼电阻的能量消耗。对于多逆变器并网系统谐振抑制的有源阻尼方法研究主要集中在 LCL 滤波器电容支路串联或并联虚拟电阻上。由于 LCL 滤波器电容支路并联电阻对于单台逆变器并网 LCL 滤波器谐振阻尼效果最好, 因此基于电容支路并联虚拟电阻抑制多逆变器并网系统谐振的研究起步较早<sup>[36]</sup>, 也是目前的主要研究方向之一。文献[37]在电容并联虚拟电阻  $R_{C2}$  的基础上并联虚拟电感, 分析认为该方法可以拓展控制带宽从而达到抑制系统谐振的目的。虽然电容串联电阻对单台逆变器 LCL 滤波器谐振阻尼效果不如电容并联电阻, 但是该方法因损耗较小而被广泛应用于无源阻尼。研究人员也试图采用电容支路串联虚拟电阻  $R_{C1}$  的方法抑制多逆变器并网系统谐振, 还提出了电容串联虚拟电阻  $R_{C1}$  参数定量计算方法<sup>[38]</sup>。除了虚拟电阻反馈外, 陷波器的使用也被认为是有源阻尼方法。针对多逆变器并网多谐振问题, 根据第 2 节多逆变器并网系统谐振机理分析, 文献[22]在上述传统有源阻尼的基础上, 提出采用数字陷波器抑制交互谐振、电容电流有源阻尼抑制 LCL 滤波器自身谐振的方法。在控制环路级联传递函数模块达到对已知谐振频率进行阻尼目的的方法称为陷波器有源阻尼。常用的陷波器传递函数表达式如式(5)所示。

$$G_x(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

式中:  $\omega_n$  为陷波器的中心角频率;  $\zeta$  为阻尼系数。

好的阻尼方法既要满足谐振抑制要求, 还要具

有较高的鲁棒性。文献[39]提出一种基于鲁棒扰动观测器的有源阻尼方法,通过把对直接控制信号的修改融入到传统分层控制结构中,在未知系统参数且不影响控制带宽的条件下,计算出适当的谐振补偿信号。仿真和实验验证该方法可以有效抑制孤岛微电网分布式发电系统谐振。除了基于电流反馈有源阻尼,电压反馈有源阻尼也得到了重视<sup>[40]</sup>。文献[41]提出在电网电压全前馈路径上引入了串联虚拟电阻,确保只有电网背景谐波被引入到前馈网络中,从而抑制并网逆变器注入电网的谐波电流。该方法在抑制与系统谐振频率相同的电网背景谐波方面能起到积极作用,达到抑制多逆变器与电网交互谐振的目的。

有源阻尼法的优点是显而易见的,它在取得良好抑制效果的同时不会增加额外的能源损耗。有源阻尼法的缺点是为了提高抑制效果而提出的各种复杂的改进型有源阻尼算法,再结合电压前馈策略,对逆变器控制电路要求非常高。采用陷波器就难免要平衡系统谐振频率检测灵敏度的问题。

### 3.2 阻抗重塑法

阻抗重塑法是指在多逆变器并网系统发生谐振时通过改变系统阻抗破坏系统谐振条件从而起到抑制谐振的作用。该方法的本质依然是无源阻尼电阻的虚拟化,它的创新点是这些虚拟电阻可以根据谐振抑制需求动态投入使用且不影响逆变器并网其他控制状态,这要归功于陷波器在阻抗重塑法中发挥了关键作用。文献[11]在并网逆变器控制环节中虚拟化 LCL 滤波器电容  $C$  并联电阻  $R_{C2}$  和电感  $L_1$  串联电阻  $R_{L1}$ ,并且分别串联陷波器。该方法将陷波器起到了鉴别谐振频率的作用,从而确保上述两个虚拟电阻的动态使用,达到改变系统谐振时总阻抗的目的。有别于传统阻抗重塑法引入虚拟电阻重塑系统阻抗,文献[42]引入虚拟电容或电感重塑系统谐振阻尼提高大型风电场接入弱电网系统谐振抑制效果。文献[43]提出一种自适应控制算法优化重塑逆变器输出阻抗,提高其动态响应能力。文献[44]基于  $H_\infty$  控制重塑逆变器输入导纳时,同时考虑了系统导纳的幅值和相位有效减少了并网电流,提高了系统谐振的抑制能力。文献[45]从阻抗重塑的角度提出一种谐波电压失真阻尼方法,以消除谐波阻抗和降频偏移对 PCC 电压质量的影响。

阻抗重塑法的优点为不会增加额外的能源损耗,能取得较好的抑制效果。阻抗重塑法的缺点为算法复杂,对逆变器控制电路要求高。不仅要平衡陷波器检测系统谐振频率检测灵敏度的问题,还要考虑阻抗重塑法抑制系统谐振的动态响应能力。

### 3.3 有源阻尼器

文献[17]提出有源阻尼器的初衷是为了在系统谐振时动态地重塑系统阻抗,因此该方法仍属于阻抗重塑法。然而,有源阻尼器是独立于并网逆变器系统的额外器件,通过它重塑系统阻抗与基于并网逆变器控制环节重塑系统阻抗有所区别。因此,将应用有源阻尼器抑制多逆变器并网谐振单独归类,论述其研究现状。有源阻尼器在大规模发电系统<sup>[46]</sup>和分布式发电系统中的应用都有研究成果出现。文献[47]将有源阻尼器连接到 PCC,提出了自适应输出虚拟电阻控制方法,在有效抑制系统谐振的同时降低电网损耗。为了解决分布式能源系统多谐振点问题,文献[48]提出了带循环功能有源阻尼器的双级框架方案。除了有源阻尼器单独用于系统谐振阻尼方法外,有源阻尼器与其他阻尼方法相结合抑制系统阻尼也引起了研究人员的兴趣。文献[49]提出有源阻尼器和无源阻尼器协同阻尼多逆变器系统谐振的方法。文献[50]提出有源阻尼控制和有源阻尼器相结合的改进有源阻尼法抑制光伏发电系统谐振。

有源阻尼器的优点为可以独立设置,不影响系统中其他逆变器工作。然而,传统有源阻尼器在谐振频率检测方面依然依靠陷波器,陷波器在有源阻尼法和阻抗重塑法中的应用缺陷同样存在于有源阻尼器中。虽然在线检测技术在多逆变器并网系统的孤岛检测<sup>[51]</sup>、振荡<sup>[52]</sup>方面已经取得了一定的研究成果,但是在谐振检测方面的研究还不够深入,还无法助力提高有源阻尼器主动阻尼的能力。同时,有源阻尼器需要额外增加建设成本和维护成本,需要考虑其工程经济效果。

### 3.4 其他方法

1) 分层控制策略。文献[53]基于电流预测模型控制实现电流内环传递函数单位化,基于二自由度控制实现电压外环传递函数单位化。该方法降低了谐振传递函数分子、分母间最高阶差,实现 Bode 图中无谐振尖峰。仿真证明该方法有效,但是该文所提控制算法复杂,对逆变器控制器硬件要求较高,需要更多工程实践验证其有效性。

2) 控制器参数优化。文献[54]的研究认为塑造控制闭环参数灵敏度函数可以限制系统谐振对控制闭环性能的影响,提出基于频率法的凸规划设计控制器,它的频率响应可以抵消新能源电站的谐振尖峰,还可以充分阻尼滤波器和耦合谐振。文献[55]提出采用区域稳定分析法替代单变量根轨迹分析法,设计控制器和有源阻尼参数抑制系统谐振。

3) 系统配置优化法。文献[56]介绍了一个采用相对简单方法成功抑制 23 次谐波谐振的案例。在该

案例中, 三绕组变压的中压绕组与并网逆变器组母线相连, 低压绕组与无源滤波器、SVG 相连, 该系统可以等效为电感滤波变压器。正是这种特殊的系统结构简单有效地抑制了系统谐振, 同时也说明该方法受系统拓扑结构条件的约束很强。该案例说明, 在工程实践中现有系统配置的优化也是抑制系统谐振的一种思路。

## 4 结论

高比例新能源电网结构是新型电力系统的发展方向, 这必然带来同型或异型多逆变器并网问题。针对其中的多逆变器并网谐振的研究现状与未来发展趋势结论如下所述。

1) 谐振机理的研究对象, 将重点聚焦在异型多逆变器并网系统、发-储系统、光-风-水-火混合发电系统和海上风电系统方面。新能源发电系统扩容扩建或将促使系统朝着异型多逆变器并网方向发展, 异型多逆变器系统谐振机理研究还不够深入。随着新能源发电系统规模的扩大, 系统发生局部故障引发电网拓扑变化的概率将上升。电网拓扑变化将改变电网等效阻抗引起系统谐振频率偏移<sup>[57]</sup>。因此, 针对电网等效阻抗变化引发系统谐振问题也需引起关注。为了平抑峰谷, 提高发电系统的经济效益和稳定性, 新能源发电系统将建成发-储系统。大规模储能系统建设需要接入储能逆变器。不同于发电系统的并网逆变器, 储能逆变器需要双向工作模型。为了更好地保证发-储系统稳定运行, 需要考虑系统谐振与储能系统交互的机理。虽然新能源发电容量占比不断提高, 传统水力发电和火力发电形式依然是当前最重要的发电形式。新型电力系统中将出现光-风-水-火混合发电系统, 特别是我国西南地区水电发达, 光-水或风-水混合发电系统中多逆变器系统谐振对混合电力系统影响的分析还鲜有成果。海上风电的电力传输离不开远距离电力电缆, 这使得谐波谐振在海上风电系统中更严重<sup>[58]</sup>。作为海上风电接入电网的有效方法, 柔性直流输电技术本身也面临很多问题急需解决<sup>[59]</sup>。因此, 针对海上风电系统谐振的问题必将进一步深入研究。

2) 谐振机理的研究方法及内容。研究方法也在推陈出新, 从传统的频域分析法, 发展到模态分析法, 又出现了基于 MIMO 模型的分析方法。多种研究方法结合可以将多逆变器系统谐振机理研究得更加全面、准确和深入。MIMO 模型分析法算法复杂, 涉及参数规模巨大, 获取参数间有效信息困难, 需要采用大数据技术、人工智能算法提高该方法的分析效率。现有谐振机理研究集中在 LCL 滤波器参数

和电网等效阻抗等参数的影响, 对逆变器间交互机理与系统谐振关系的问题研究还不深入。逆变器间环流对系统谐振的影响也鲜有研究成果。

3) 系统谐振的抑制方法。系统谐波来源于电网背景谐波和逆变器自身产生的谐波, 因此抑制方法也可以从这两个方面去考虑。对于电网背景谐波抑制方法而言, 有源阻尼法已经比较有效<sup>[60]</sup>。但是, 为了提高抑制效果, 有源阻尼法的算法越来越复杂, 降低了其工程实用性。在能量损耗可以承受范围内, 考虑无源阻尼和有源阻尼的混合阻尼法可以降低有源阻尼计算的复杂度, 或许更符合实际工程需求。增强系统谐振频率检测带宽是提高阻抗重塑法对新型电力系统适应性的重要研究方向。有源阻尼器的理论研究到大规模工程应用还需时日。随着多逆变器并网系统谐振监测与检测问题的深入研究, 具有谐振在线监测和主动谐振抑制功能的智能型有源阻尼器必将是未来的研究热点。同时, 功能的多样性有助于有源阻尼器降低使用成本, 其研究也将得到重视。对基于系统谐振特性的在线监测方法的深入研究或将为上述抑制方法提供新的突破口。

## 参考文献

- [1] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 92-99.  
FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 92-99.
- [2] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [3] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 506-515.  
ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515.
- [4] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [5] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16, 4.  
XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and

- grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16, 4.
- [6] 周林, 张密. 大型光伏电站谐振现象分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 8-14.  
ZHOU Lin, ZHANG Mi. Analysis of resonance phenomenon in large-scale photovoltaic power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 8-14.
- [7] 许德志, 汪飞, 阮毅, 等. 多逆变器并网系统输出阻抗建模与谐波交互[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(2): 1-7.  
XU Dezhi, WANG Fei, RUAN Yi, et al. Output impedance modeling and harmonic interactions of multiple inverters grid-connected system[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(2): 1-7.
- [8] 胡伟, 孙建军, 马谦, 等. 多逆变器并网系统谐振特性分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 93-98.  
HU Wei, SUN Jianjun, MA Qian, et al. Resonant characteristics of multi-inverter grid-connection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 93-98.
- [9] 刘洋, 帅智康, 李杨, 等. 多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4156-4164, 4295.  
LIU Yang, SHUAI Zhikang, LI Yang, et al. Harmonic resonance modal analysis of multi-inverter grid-connected systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4156-4164, 4295.
- [10] LU Minghui, WANG Xiongfei, LOH P C, et al. Resonance interaction of multiparallel grid-connected inverters with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 894-899.
- [11] 曾正, 赵荣祥, 吕志鹏, 等. 光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4547-4558.  
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, LÜ Zhipeng, et al. Impedance reshaping of grid-tied inverters to damp the series and parallel harmonic resonances of photovoltaic systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4547-4558.
- [12] 孙振奥, 杨子龙, 王一波, 等. 光伏并网逆变器集群的谐振原因及其抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 418-425.  
SUN Zhen'ao, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. The cause analysis and suppression method of resonances in clustered grid-connected photovoltaic inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 418-425.
- [13] 孙素娟, 翟炜, 瞿兴鸿, 等. 可适应宽频带的抗混叠有源阻尼控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5310-5316.  
SUN Sujuan, ZHAI Wei, QU Xinghong, et al. Anti-aliasing active damping control strategy adaptable for wide band[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5310-5316.
- [14] 匡慧敏, 罗安, 陈智勇, 等. 多逆变器并网耦合谐振机理及有源阻尼优化方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1180-1189.  
KUANG Huimin, LUO An, CHEN Zhiyong, et al. Coupling resonances mechanism of grid-connected multi-parallel inverters and its active damping parameter optimal method[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1180-1189.
- [15] 胡伟, 周友斌, 杜镇安, 等. 多并网逆变器系统谐振抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 45-50.  
HU Wei, ZHOU Youbin, DU Zhen'an, et al. Research on resonance suppression strategy of system with multiple grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 45-50.
- [16] 何国锋, 徐德鸿. 基于有源阻尼的多逆变器并网谐振抑制[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(10): 62-68.  
HE Guofeng, XU Dehong. Resonance suppression for grid-connected multi-inverter based on active damping method[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(10): 62-68.
- [17] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318-3329.
- [18] 黄亚申, 汪海宁, 马志保, 等. 并网逆变器系统的谐振抑制研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 143-156.  
HUANG Yashen, WANG Haining, MA Zhibao, et al. Review on researches of resonance suppression for grid-connected inverter system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 143-156.
- [19] 李建文, 阮筱菲, 李永刚, 等. 弱电网下多并网逆变器谐振失稳研究综述[J]. 现代电力, 2020, 37(2): 187-196.  
LI Jianwen, RUAN Xiaofei, LI Yonggang, et al. An overview on resonance instability of multiple grid-connected inverters in weak grid[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(2): 187-196.
- [20] FANG Tianzhi, SHEN Shuheng, JIN Yinglin, et al. Multiple-objective control scheme for input-series-output-series LCL-filtered grid-connected inverter system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8689-8700.
- [21] CHEN H C, CHENG P T, WANG Xiongfei, et al. A passivity-based stability analysis of the active damping technique in the offshore wind farm applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5074-5082.
- [22] 陶海军, 周犹松, 张国澎, 等. LCL型并网逆变器并联谐振机理分析及抑制方法[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(10): 1065-1073.  
TAO Haijun, ZHOU Yousong, ZHANG Guopeng, et al. Parallel resonance mechanism analysis and suppression

- method for LCL type grid-connected inverter[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(10): 1065-1073.
- [23] 汪颖, 罗代军, 肖先勇, 等. 多逆变器并网下的超高次谐振特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 192-199.  
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. Analysis on supraharmonic resonance characteristics with integration of multiple inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 192-199.
- [24] XU W, HUANG Z Y, CUI Y, et al. Harmonic resonance mode analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1182-1190.
- [25] WU Jian, CHEN Tao, HAN Wanqin, et al. Modal analysis of resonance and stable domain calculation of active damping in multi-inverter grid-connected systems[J]. *Journal of Power Electronics*, 2018, 18(1): 185-194.
- [26] 李建文, 阮筱菲, 李永刚, 等. 弱电网下多LCL型并网逆变器谐振模式分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 346-355.  
LI Jianwen, RUAN Xiaofei, LI Yonggang, et al. Resonance modal analysis for multiple LCL-type grid-connected inverters in weak grid[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(2): 346-355.
- [27] LU Minghui, YANG Yongheng, JOHNSON B, et al. An interaction-admittance model for multi-inverter grid-connected systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(8): 7542-7557.
- [28] HONG Lucheng, SHU Wantao, WANG Jianhua, et al. Harmonic resonance investigation of a multi-inverter grid-connected system using resonance modal analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(1): 63-72.
- [29] LIANG Beihua, HE Jinwei, WANG Chengshan. Resonance propagation analysis for inverter-dominated multi-AC-bus systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2021, 15(10): 2149-2159.
- [30] ROINILA T, MESSO T, SANTI E. MIMO-identification techniques for rapid impedance-based stability assessment of three-phase systems in DQ domain[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(5): 4015-4022.
- [31] 王喜莲, 程迪, 王顺. 基于输出阻抗建模的并网系统低次谐波预测模型[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(6): 18-26.  
WANG Xilian, CHENG Di, WANG Shun. Low harmonics prediction model of grid-connected system based on output impedance modeling[J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(6): 18-26.
- [32] CAVAZZANA F, CALDOGNETTO T, MATTAVELLI P, et al. Analysis of current control interaction of multiple parallel grid-connected inverters[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(4): 1740-1749.
- [33] FANG Tianzhi, SHEN Shuheng, JIN Yinglin, et al. Robustness investigation of multi-inverter paralleled grid-connected system with LCL-filter based on the grid-impedance allocation mechanism[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(12): 14508-14524.
- [34] 阮新波, 王学华, 潘冬华, 等. LCL 型并网逆变器的控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [35] YANG Qiuxia, LI Kun, ZHAO Cuimei, et al. The resonance suppression for parallel photovoltaic grid-connected inverters in weak grid[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2018, 15(6): 716-727.
- [36] HE Jinwei, LI Yunwei, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(1): 234-246.
- [37] YU Jingrong, DENG Limin, SONG Dongran, et al. Wide bandwidth control for multi-parallel grid-connected inverters with harmonic compensation[J]. *Energies*, 2019, 12(3): 571.
- [38] 王磊, 张凌博. 多逆变器并网等值建模及谐振抑制优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(6): 19-29.  
WANG Lei, ZHANG Lingbo. Equivalent modeling of multi-inverters connected to the grid and optimization of resonance suppression[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6): 19-29.
- [39] SAIM A, HOUARI A, GUERRERO J M, et al. Stability analysis and robust damping of multiresonances in distributed-generation-based islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(11): 8958-8970.
- [40] XIE Chuan, LI Kai, ZOU Jianxiao, et al. Passivity-based design of grid-side current-controlled LCL-type grid-connected inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 9813-9823.
- [41] LIN Zhiheng, RUAN Xinbo, WU Liguang, et al. Multi resonant component-based grid-voltage-weighted feedforward scheme for grid-connected inverter to suppress the injected grid current harmonics under weak grid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 9784-9793.
- [42] SONG Yipeng, WANG Xiongfei, BLAABJERG F. High-frequency resonance damping of DFIG-based wind power system under weak network[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(3): 1927-1940.
- [43] AZZOUZ M A, EI-SAADANY E F. Multivariable DG impedance modeling and reshaping for impedance stabilization of active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2166-2179.
- [44] COBRECES S, WANG Xiongfei, PEREZ J, et al. Robust admittance shaping approach to grid current harmonic

- attenuation and resonance damping[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5039-5053.
- [45] ZHOU Leming, WU Wenhua, CHEN Yandong, et al. Harmonic voltage distortion damping method for parallel-connected LCL-type inverters in islanded operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 9032-9044.
- [46] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 12-23.
- [47] JIA Lei, RUAN Xinbo, ZHAO Zhiheng, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9561-9574.
- [48] GUO Yan, LU Xiaonan, CHEN Laijun, et al. Functional-rotation-based active dampers in AC microgrids with multiple parallel interface inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5206-5215.
- [49] CHEN Zhiyong, HUANG Xucheng, LUO An, et al. Wideband harmonic resonance characteristics and coordinated damping method for distributed generation power plants[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7753-7764.
- [50] YUAN Chuanlai, SHI Dongning, HU Qiaokun, et al. Active damping resonance suppression and optimization of photovoltaic cluster grid connected system[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(5): 2509-2521.
- [51] HAMZEH M, RASHIDIRAD N, SHESHYEKANI K, et al. A new islanding detection scheme for multiple inverter-based DG systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3): 1002-1011.
- [52] CHEN Boli, PIN G, NG W M, et al. Online detection of fundamental and interharmonics in AC mains for parallel operation of multiple grid-connected power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9318-9330.
- [53] 郑峰, 林祥群, 邓长虹, 等. 计及降阶混合控制算法多逆变器并联系统谐振抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 48-55.  
ZHENG Feng, LIN Xiangqun, DENG Changhong, et al. Resonance suppression strategy of multi-inverter parallel system considering hybrid control algorithm for order reduction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 48-55.
- [54] KAMMER C, ARCO S D, ENDEGNANEW A G, et al. Convex optimization-based control design for parallel grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6048-6061.
- [55] GUO Yan, CHEN Laijun, LU Xiaonan, et al. Region based stability analysis of active dampers in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 7671-7682.
- [56] LIN Jinjie, LI Yong, HU Sijia, et al. Resonance mechanism analysis of large-scale photovoltaic power plant[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 7(1): 47-54.
- [57] 杨明, 杨杰, 赵铁英, 等. 弱电网下抑制谐振频率偏移的并网逆变器谐波谐振控制策略[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(8): 87-98.  
YANG Ming, YANG Jie, ZHAO Tieying, et al. Harmonic resonance control strategy of grid-connected inverter to suppress resonance frequency shift in weak grid[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(8): 87-98.
- [58] 徐政, 金砚秋, 李斯迅, 等. 海上风电场交流并网谐波谐振放大机理分析与治理[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 85-91.  
XU Zheng, JIN Yanqiu, LI Sixun, et al. Mechanism analysis and mitigation of harmonic resonance amplification caused by AC integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 85-91.
- [59] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20-32.  
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32.
- [60] 王翰文, 曾成碧, 苗虹. 基于多谐振电网电压前馈的并网逆变器相位补偿算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 81-89.  
WANG Hanwen, ZENG Chengbi, MIAO Hong. A phase compensation algorithm of a grid-connected inverter based on a feedforward multi-resonant grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 81-89.

收稿日期: 2022-01-01; 修回日期: 2022-02-27

作者简介:

郑嘉龙(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 高级实验师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: 308887214@163.com

孙章(1986—), 男, 高级实验师, 研究方向为分布式新能源发电、电力电子交换控制技术, 交直流微电网运行控制与保护技术。

(编辑 魏小丽)