

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231364

抑制新能源并网系统谐振的逆变器阻抗适配支路 参数设计方法

王立强¹, 陶军¹, 阿敏夫¹, 樊海龙², 马俊鹏³, 尹麒³, 王顺亮³

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 随着高比例新能源并网成为发展趋势, 新能源并网系统谐振成为影响新型电力系统安全稳定的潜在因素。由于风光资源在时间尺度上存在互补特性, 可以通过调整逆变器并网特性实现系统阻尼的分时互济。针对逆变器阻抗适配支路的参数设计问题, 提出阻尼系数的优化设计方法。首先, 推导了阻尼互济控制逆变器的输出阻抗表达式, 结合阻抗的幅值和相位分析阻尼系数对输出阻抗的影响, 提出阻尼系数的初选设计方法。随后, 从系统稳定性角度分析电网阻抗与阻尼系数之间的关系, 为阻尼系数的优化提供了依据。为解决固定阻尼给控制带来的限制问题, 提出了一种阻尼系数自适应的阻尼互济控制, 使得控制更加灵活有效。最后, 通过仿真和实验验证了阻抗适配支路参数设计方法的准确性以及阻尼系数自适应算法的有效性。

关键词: 新能源并网系统; 阻抗适配支路; 阻尼互济控制; 虚拟阻尼系数; 自适应算法

Parameter design method for the impedance adaptation branch of an inverter to suppress resonance in new energy grid-connected systems

WANG Liqiang¹, TAO Jun¹, A Minfu¹, FAN Hailong², MA Junpeng³, YIN Qi³, WANG Shunliang³

(1. Inner Mongolia Power Research Institute Branch, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 2. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the development of a high proportion of new energy grid connection, the resonance of new energy grid connection systems has become a potential factor affecting the safety and stability of new power systems. Because of the complementary characteristics of wind and solar resources in the time scale, the time-sharing and mutual aid of system damping can be realized by adjusting the grid-connected characteristics of the inverter. Aiming at the parameter design problem of the inverter impedance adaptation branch, an optimal design method is proposed. First, the output impedance expression of the inverter with damping complementary control is derived, and the influence of the damping coefficient on the output impedance is analyzed by combining the amplitude and phase of impedance, and the primary design method of the damping coefficient is proposed. Subsequently, the relationship between the impedance of the power grid and the damping coefficient is analyzed from the perspective of system stability, providing a basis for optimizing the damping coefficient. To address the limitation of fixed damping on control, a damping coefficient adaptive damping complementary control is proposed, making the control more flexible and effective. Finally, the accuracy of the impedance adaptation branch parameter design method and the effectiveness of the damping coefficient adaptive algorithm are verified through simulation and experiments.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC1904).

Key words: new energy grid connection system; impedance adaptation branch; damping mutual aid control; virtual damping coefficient; adaptive algorithm

基金项目: 四川省自然科学基金青年基金项目资助(2022NSFSC1904); 内蒙古电力公司2023年指令攻关计划项目资助(2023-4-4)

0 引言

随着“双碳”目标和新型电力系统的提出,以风电和光伏为代表的新能源发电迅速发展^[1-3]。截至2023年上半年,全国可再生能源新增装机1.09亿kW,同比增长98.3%,占新增装机的77%,其中,风电和光伏发电新增并网1.041亿kW,占可再生能源新增装机93%以上;风电光伏发电量快速增长,2023年上半年全国风电发电量4628亿kWh,同比增长20%,光伏发电量2663亿kWh,同比增长30%;截至2023年6月底,风电和光伏发电累计装机达到8.59亿kW,超过我国发电总装机的30%,部分地区新能源已成为主力电源之一,形成了高比例新能源并网络局,在全国范围内实现新能源高比例的并网已成为发展趋势^[4-6]。然而,新能源给电网带来绿色动力的同时也使得电网强度呈进一步下降趋势,新能源并网系统安全稳定问题不断凸显^[7-10]。

作为新能源和电网接口装置的并网逆变器已大规模、集群化地接入电网,高比例电力电子设备接入电网易导致宽频振荡现象,而随着新能源发电出力占比的增加,如不采取有效抑制措施,极易引发电网安全稳定问题,同时制约新能源的发展^[11-15]。通常由于系统整体的阻尼减小出现负阻尼会导致并网系统失稳,通过增加整体系统的阻尼提高系统稳定性是一种抑制逆变器并网系统振荡的有效手段。

针对LCL型逆变器并网系统,主流谐振抑制方法主要包括无源阻尼法、有源阻尼法、阻抗重塑法、有源阻尼器抑制法等^[16]。文献[17]介绍了LCL滤波器无源阻尼方法,明确了其本质是改变LCL滤波器的输出特性以达到优化控制的目的,指出其缺陷主要是无法避免能量的损失。有源阻尼法是将阻尼电阻通过控制算法虚拟化,在保证抑制效果的同时不增加能源损耗,其主要策略是在LCL滤波器电容支路中串联和并联虚拟电阻,控制上分为电流反馈有源阻尼和电压反馈有源阻尼,为达到控制某些特殊频率点还可以引入陷波器来强化控制效果^[17-21]。

在新能源并网的场景下,已经有利用风电和光伏自然资源特性来实现谐振抑制的理论研究。为实现新能源并网系统谐振抑制,文献[22]在传统的基于电容电流反馈的有源阻尼(capacitor current feedback active damping, CCF-AD)控制的基础上提出一种改进的新能源并网逆变器阻尼互济控制(damping complementary control, DCC)策略。该策略利用风光自然资源在时间尺度上的特性实现风光能源互补和新能源并网系统中逆变器的阻尼互济。阻尼互济理论主要根据阻抗适配器的控制原理,给出

了不同工作模式的切换标准,为增强新能源发电的安全稳定性提供了一种可行的方案。

但在文献[22]中,对新能源并网逆变器阻尼互济控制阻抗适配支路中参数的设计没有进行具体研究;在弱电网中电网阻抗变化范围较大的情况下,对于固定阻尼给控制系统带来的影响没有深入考虑,固定系数阻尼互济控制能否保证系统安全稳定还有待进一步讨论。

阻抗适配支路参数设计包括陷波器和虚拟电阻两个部分。陷波器设计具有灵活性,可根据需要设置其衰减范围,以满足控制要求^[23]。在虚拟电阻设计方面,为了系统能够稳定运行,通常采用稳定性判据如根轨迹或奈氏曲线图寻找合适的虚拟电阻参数^[24-26]。文献[27]利用有源阻尼器和其他变换器的阻抗适配器虚拟电阻、PI比例参数以及电网阻抗建立稳定区域,基于该稳定区域进行参数选择分析;文献[28]利用端口阻抗模型的思想将新能源发电系统的阻抗模型等效为RLC谐振电路,以此为基础得到适配阻抗的量化设计方法。而针对阻尼互济控制系统中阻抗适配支路的阻尼系数设计方法尚待明确。

本文在新能源并网系统的阻尼互济控制策略的基础上,对抑制新能源并网系统谐振的逆变器阻抗适配支路参数设计方法进行研究。首先,推导了阻尼互济控制逆变器输出阻抗的详细表达式,根据阻抗表达式绘制阻尼幅值相位的三维图,分析阻尼系数对逆变器输出阻抗的影响,明确阻抗适配支路参数设计原则。其次,提出阻抗适配支路阻尼系数设计方法,通过具体工况进一步分析电网阻抗与阻尼系数之间的关系,为阻抗适配支路参数的优化提供了依据。然后,为解决控制系统中阻尼系数固定带来的限制问题,提出了一种阻尼系数自适应的阻尼互济控制,使得对系统的控制更加灵活有效。最后,通过仿真和实验验证了阻抗适配支路参数设计方法的准确性以及阻尼系数自适应算法的有效性。

1 新能源并网系统的阻尼互济控制

1.1 并网逆变器的阻尼互济控制策略

根据阻抗适配器的控制原理,阻尼互济控制将处于低功率发电状态的风电或光伏并网逆变器控制为阻抗适配装置,实现系统阻尼提高和宽频振荡抑制。由于自然资源随着外部环境因素而改变,一般情况下白天的太阳能资源丰富而夜间会贫瘠,风能资源则在夜间能处于较为丰富的状态,会出现光伏和风电并网逆变器交替作为主要发电单元的情况。当其中一类并网逆变器轻载或空载运行,提高其开

关频率，将其转变为阻抗适配装置，为并网系统提供阻尼，抑制主要发电单元与电网间的谐振。

采用阻尼互济控制策略的并网逆变器与采用CCF-AD控制的逆变器的区别在于：1) 存在两种工作模式，即额定工作模式(mode1)和阻抗适配模式(mode2)，由于阻抗适配支路的存在，均有别于CCF-AD控制的逆变器；2) 额定工作模式(mode1)对应于新能源主要发电单元，在额定功率时能正常运行，同时阻尼性提高；3) 阻抗适配模式(mode2)对应于低发或空载的新能源发电单元，基波功率小，开关频率提高，逆变器转变为阻抗适配装置，抑制逆变器与电网之间的谐振。

切换工作模式的依据主要是开关频率和发电功率，设定工作模式间的参数边界值即可确定不同工作模式对应的参数区间。根据不同开关频率下阻抗适配模式逆变器输出阻抗的实部幅频特性曲线，开关频率提高至 10 kHz 时满足在 CCF-AD 控制的逆变器等效输出阻抗负阻尼频段内呈现正阻尼，同时为避免开关损耗较大，切换工作模式的开关频率边界设为 10 kHz^[22]。综合考虑功率器件的开关损耗和散热，两种模式切换的功率边界可以设为 10% 额定值，阻抗适配模式开关频率设置在 10~50 kHz 之间。图 1 为采用阻尼互济控制策略的并网逆变器基于开关频率和发电功率划分两种工作状态的示意图。

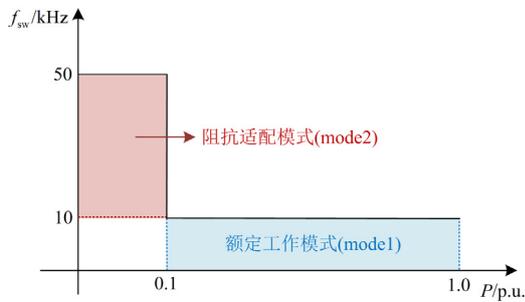


图 1 基于阻尼互济控制的并网逆变器两种工作状态
Fig. 1 Two working states of grid connected inverters based on damping mutual aid control

1.2 基于阻尼互济控制的逆变器输出阻抗

并网系统的电路拓扑如图 2 所示，可以看出 LCL 型的阻抗适配装置与并网逆变器的电路结构一致^[29]。在图 2 中， u_{pcc} 为公共连接点(point of common coupling, PCC)的电压， Z_g 为电网阻抗， i_g 为网侧电流， u_g 为电网电压。第 i 台 LCL 型单相并网逆变器电路中， i_{L_i} 为逆变器侧电感电流， i_{C_i} 为滤波电容电流， i_{gi} 为逆变器并网电流。阻抗适配器的电路部分

包含换流桥、直流侧电容 C_{dca} 、滤波电感 L_{1A} 和 L_{2A} 、滤波电容 C_A 以及控制模块组成。

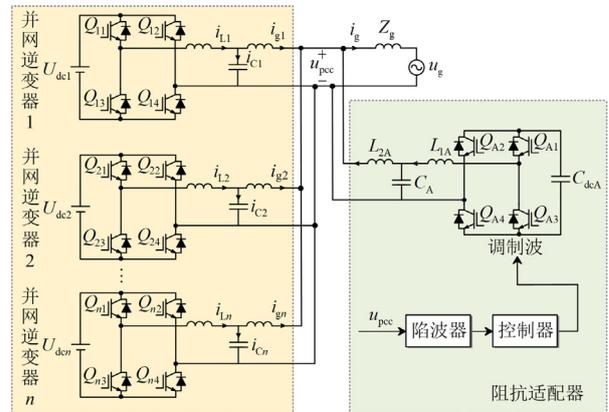


图 2 并网逆变器和阻抗适配装置并网系统电路拓扑
Fig. 2 Grid-connected system circuit topology for grid-connected inverters and impedance adapters

阻尼互济控制策略的逆变器控制结构如图 3 所示，模型框图如图 4 所示，阻抗适配器等效于在 PCC 点并联电阻，即在控制中增加一条阻抗适配支路。

在阻抗适配支路中，通过陷波器得到需要抑制的目标谐振分量，调控阻尼环节中虚拟阻尼系数以

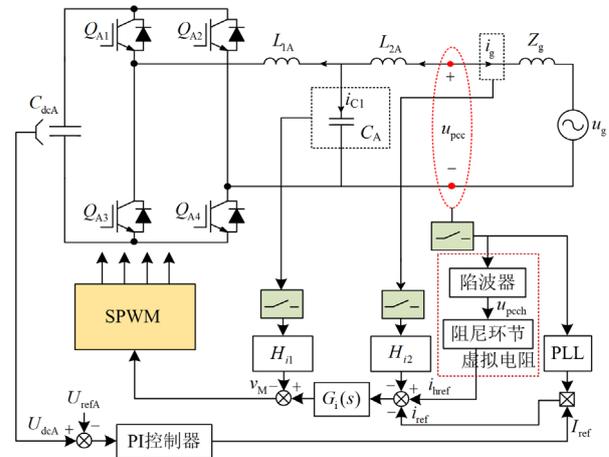
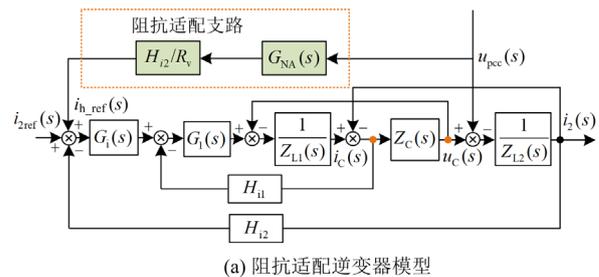


图 3 阻尼互济控制策略的逆变器控制结构图
Fig. 3 Inverter control structure diagram of damping mutual aid control strategy



(a) 阻抗适配逆变器模型

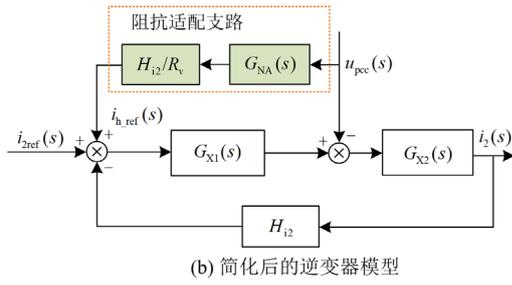

 图4 具有阻抗适配能力的逆变器模型框图^[22]

Fig. 4 Block diagram of inverter model with impedance adaptation capability

改变逆变器输出阻抗阻尼, 构造出具有阻抗适配能力的并网逆变器^[22]。根据图4可以推导出逆变器输出阻抗 $Z_{DCC}(s)$ 的详细表达式为

$$Z_{DCC}(s) = \frac{2R_v G_{X1}(s) G_{X2}(s) H_{i2} + R_v (G_{X1}(s) G_{X2}(s) H_{i2})^2}{R_v G_{X2}(s) - A + R_v G_{X1}(s) G_{X2}(s)^2 H_{i2} - B} \quad (1)$$

式中: R_v 为阻尼系数; $G_{X1}(s)$ 、 $G_{X2}(s)$ 分别对应模型框图简化后前向通道的两个环节; H_{i2} 为并网电流采样系数; $A = 3G_{X1}(s)G_{X2}(s)H_{i2}G_{NA}(s)$; $B = G_{NA}(s)[G_{X1}(s)G_{X2}(s)H_{i2}]^2$; $G_{NA}(s)$ 为陷波器的传递函数。 $G_{X1}(s)$ 、 $G_{X2}(s)$ 的表达式分别如式(2)和式(3)所示。

$$G_{X1}(s) = \frac{G_d(s)K_{PWM}G_i(s)}{s^2L_1C + sCH_{i1}K_{PWM}G_d(s) + 1} = \frac{e^{-1.5s\frac{1}{2f_{sw}}} K_{PWM}G_i(s)}{s^2L_1C + sCH_{i1}K_{PWM}e^{-1.5s\frac{1}{2f_{sw}}} + 1} \quad (2)$$

$$G_{X2}(s) = \frac{s^2L_1C + sCH_{i1}K_{PWM}G_d(s) + 1}{s^3L_1L_2C + s^2L_2CH_{i1}K_{PWM}G_d(s) + s(L_1 + L_2)} = \frac{s^2L_1C + sCH_{i1}K_{PWM}e^{-1.5s\frac{1}{2f_{sw}}} + 1}{s^3L_1L_2C + s^2L_2CH_{i1}K_{PWM}e^{-1.5s\frac{1}{2f_{sw}}} + s(L_1 + L_2)} \quad (3)$$

式中: K_{PWM} 为调制波到逆变输出电压的传递函数^[29]; $G_i(s)$ 为电流调节器; L_1 为逆变器侧电感; C 为滤波电容; H_{i1} 为电容电流反馈系数; L_2 为网侧电感; f_{sw} 为开关频率; $G_d(s)$ 为引入的 1 拍计算延时和 0.5 拍调制延时对应的传递函数, 表达式如式(4)所示^[30]。

$$G_d(s) = e^{-1.5sT_s} \quad (4)$$

2 阻抗适配支路参数设计方法

阻抗适配支路中阻尼系数会影响虚拟阻抗的大小, 进而影响系统稳定性和谐振阻尼效果, 合理设计阻尼系数可以更好地抑制谐振。文中逆变器主要参数设置如下: 电网电压 u_g 为 110 V; 直流侧电压 U_{dc} 为 300 V; 额定功率为 4 kW; 电感 L_1 、 L_2 分别为 2 mH、400 μ H; 电容 C 为 10 μ F。

2.1 参数设计原则

阻抗适配支路对应的阻抗 $Z_v(s)$ 的表达式如式(5)所示, 阻尼系数与阻抗适配支路对应的阻抗呈正相关关系。

$$Z_v(s) = -\frac{1 + G_{X1}G_{X2}H_{i2}}{G_{X1}G_{X2}H_{i2}} \frac{1}{G_{NA}(s)} R_v \quad (5)$$

根据式(1), 改变额定工作模式和阻抗适配模式逆变器输出阻抗中的虚拟阻尼系数 R_v 和频率 f 可得到不同参数下的输出阻抗。

图5和图6分别给出了不同阻尼系数下 mode1 模式和 mode2 模式的逆变器输出阻抗阻尼值 R_{mode1} 和 R_{mode2} 的三维图。在 1000~3000 Hz 频段范围内,

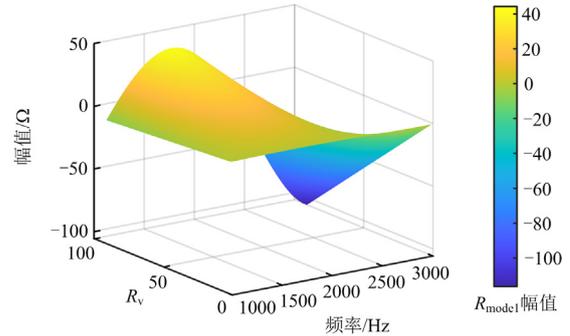

 图5 不同阻尼系数下 R_{mode1} 幅值的三维图

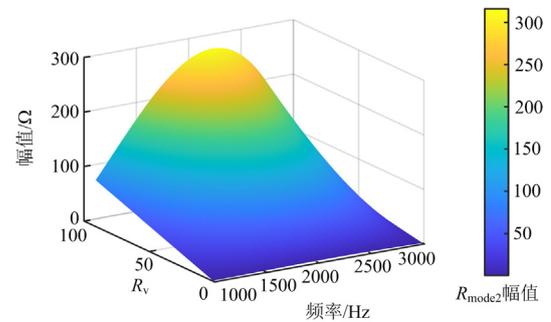
 Fig. 5 Three-dimensional diagram of R_{mode1} amplitude under different damping coefficients

 图6 不同阻尼系数下 R_{mode2} 幅值的三维图

 Fig. 6 Three-dimensional diagram of R_{mode2} amplitude under different damping coefficients

mode1 模式的逆变器正阻尼特性有限, 且在此频段范围内存在正负阻尼边界; 运行于 mode2 模式的逆变器在此频段范围内呈现正阻尼特性, 且当阻尼系数增大时, 逆变器输出阻抗正阻尼幅值逐步提升。

图 7 给出了阻抗适配模式的并网逆变器阻抗 Z_{mode2} 的相位三维图。当阻尼系数增大至一定范围时, Z_{mode2} 的相位变化不大, 无法保持正阻尼相位特性, 因此阻尼系数不能无限增大。

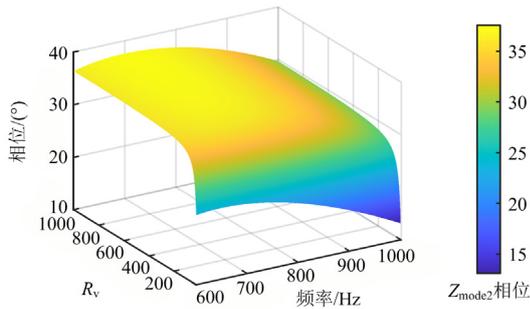


图 7 不同阻尼系数下 Z_{mode2} 相位的三维图

Fig. 7 Three-dimensional diagram of Z_{mode2} phase under different damping coefficients

2.2 参数设计流程

根据 L_1 、 L_2 、 C 、 H_{i1} 、 H_{i2} 、 K_{PWM} 和电流调节器参数等初始参数, 代入逆变器输出阻抗 $Z_{DCC}(s)$ 表达式中得到两种工作模式下的逆变器输出阻抗 $Z_{mode1}(R_v, s)$ 和 $Z_{mode2}(R_v, s)$, 由此得到横轴坐标为阻尼系数 R_v 、纵轴坐标为频率 f 、竖轴坐标为阻尼幅值或者相位的三维图。分析阻尼系数对输出阻抗的影响, 在关注的谐振频段内选择合适的阻尼系数, 并依照此参数进行稳定性分析。

考虑两种工作模式的逆变器配置情况, 用阻抗分析法分析并网逆变器-电网耦合系统的稳定性, 稳定性由环路增益 $Z_g(s)/Z_{inv}(s)$ 是否满足奈奎斯特判据决定^[31-33], 其中 $Z_{inv}(s)$ 为并网端口输出阻抗。分析在电网阻抗变化情况下系统等效环路增益的奈奎斯特图, 对所选择的阻抗适配支路阻尼系数 R_v 做优化设计。参数设计流程如图 8 所示。

2.3 参数设计举例

下面设置具体工况, 结合上述理论举例说明适配支路阻尼系数 R_v 的参数设计方法。

两台逆变器并网, 一台额定功率的逆变器运行于 mode1 模式, 一台轻载运行的逆变器工作于 mode2 模式。PCC 点的等效阻抗用 Z_p 表示, 改变阻尼系数 R_v , 对电网交互的稳定性进行分析。图 9、图 10 和图 11 分别是阻尼系数选取 5、10 和 20 时不同电网阻抗系统的等效环路增益 Nyquist 曲线图,

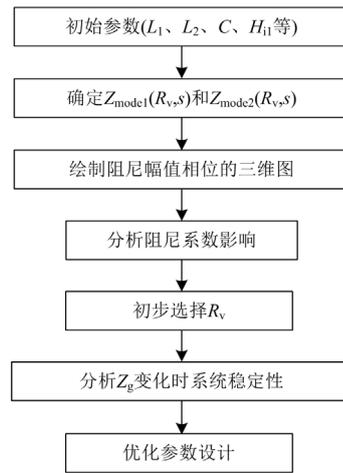


图 8 阻抗适配支路参数设计流程图

Fig. 8 Impedance adaptation branch parameter design flowchart

其中电网阻抗分别取 $500 \mu\text{H}$ 、 2 mH 、 5 mH 。

根据图 9 的曲线, 当 $R_v = 5$ 时, 运行于阻抗适配模式的逆变器振荡抑制效果随着电网变弱逐渐降低, 当电网阻抗增大到 2 mH 时, 此时系统阻尼已无法抑制系统谐振。

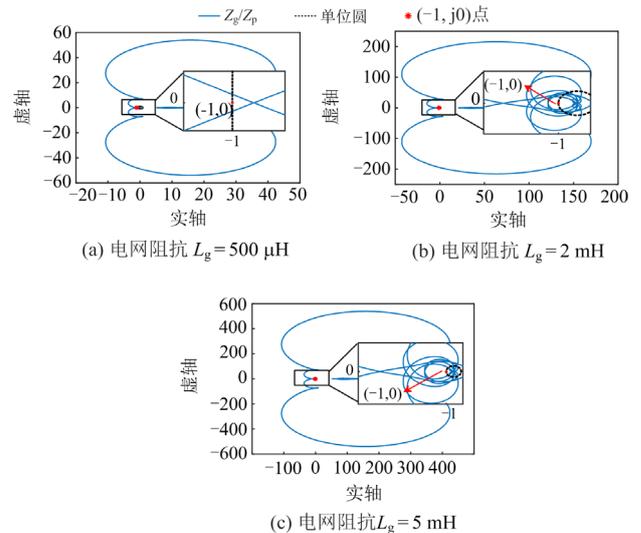


图 9 不同电网阻抗下阻尼系数 $R_v = 5$ 时的稳定性分析
Fig. 9 Stability analysis of damping coefficient $R_v = 5$ under different grid impedance

根据图 10 的曲线, 当 $R_v = 10$ 时, 阻抗适配模式逆变器阻尼效果优于 $R_v = 5$ 的工况, 但随着电网阻抗的逐步增大, 当 $L_g = 5 \text{ mH}$ 时系统阻尼已无法抑制系统谐振。根据图 11 的曲线, 当 $R_v = 20$ 时, 运行于阻抗适配模式的并网逆变器的阻尼效果进一步提高, 在电网阻抗 $L_g = 5 \text{ mH}$ 时, 系统仍然可以保持稳定。

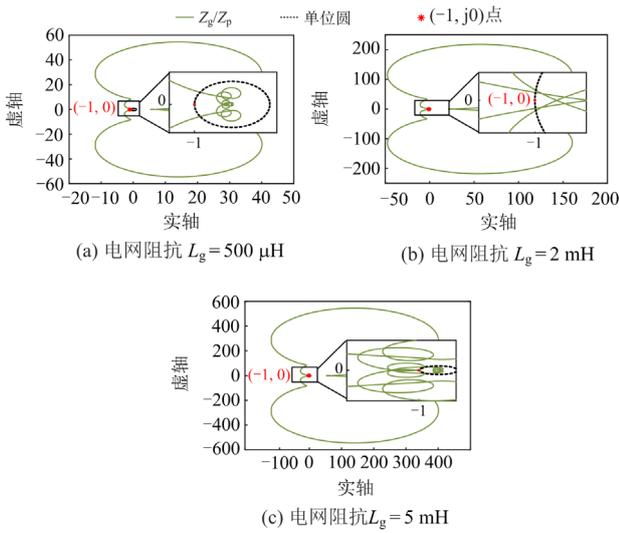


图 10 不同电网阻抗下阻尼系数 $R_v=10$ 时的稳定性分析

Fig. 10 Stability analysis of damping coefficient $R_v=10$ under different grid impedance

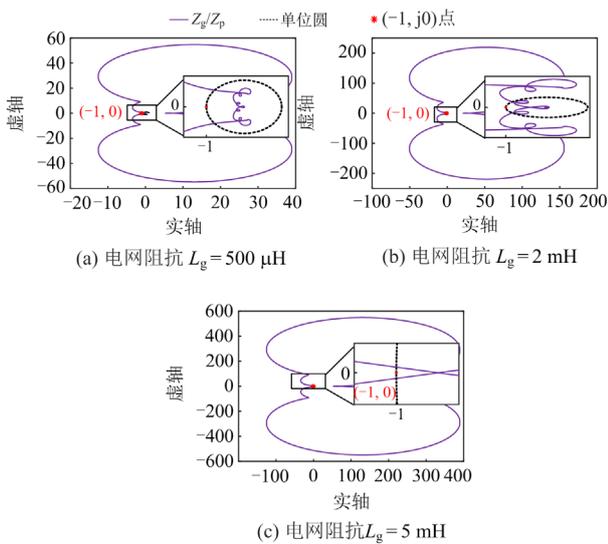


图 11 不同电网阻抗下阻尼系数 $R_v=20$ 时的稳定性分析

Fig. 11 Stability analysis of damping coefficient $R_v=20$ under different grid impedance

当电网阻抗增大时系统可能会发生谐振，固定阻尼系数抑制系统谐振的能力是有限的；阻尼系数的大小影响运行于阻抗适配模式(mode2)的逆变器阻尼功能，在一定范围内阻尼系数的大小与逆变器阻尼效果呈正比。根据本文所提方法，考虑到新能源并网系统在电网较弱时存在较大的振荡风险，将本节举例工况中的阻尼系数 R_v 设计为 20。

综上所述，阻抗适配模式逆变器能够通过虚拟一个正实部的宽频阻抗来校正并网逆变器输出阻抗，达到抑制系统谐振的作用，针对电网阻抗变化

的情况，设计固定的阻尼系数时需要根据系统稳定性分析的结果进行参数优化。

3 阻尼系数自适应算法

阻抗适配支路的阻尼系数影响系统稳定性，根据离线分析选取阻尼系数灵活性较差。为解决阻尼互济控制中阻尼系数固定导致控制受限的问题，本文提出选取阻抗适配支路阻尼系数的自适应算法。图 12 为自适应算法控制框图。

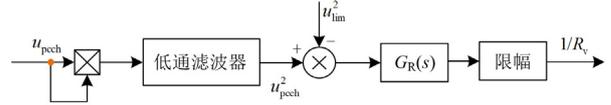


图 12 自适应算法控制框图

Fig. 12 Adaptive algorithm control block diagram

首先采集 PCC 点电压 u_{pcc} ，经陷波器滤除基波以及主要谐波分量得到谐振电压 $u_{pcc h}$ ，平方运算后输入到低通滤波器，处理得到不含脉动分量的谐振电压的平方 $u_{pcc h}^2$ 。设置谐振电压下限值 u_{lim} ，将 $u_{pcc h}^2$ 与 u_{lim}^2 进行比较，两者之差经过阻尼系数控制器环节 $G_R(s)$ 和限幅环节生成阻尼系数的倒数 $1/R_v$ 。

阻尼系数控制器选取 PI 控制器，低通滤波器选取一阶低通滤波器，其表达式分别为

$$G_R(s) = K_{pR} + K_{iR}/s \quad (6)$$

$$G_{LPF}(s) = \frac{1}{s/(2\pi f_{LPF}) + 1} \quad (7)$$

式中： K_{pR} 为控制器的比例系数； K_{iR} 为积分系数； f_{LPF} 为低通滤波器的转折频率，通常设置为基频。

当系统失稳时，谐波电压 $u_{pcc h}$ 增大，大于电压下限值 u_{lim} ，阻尼系数控制器自动调节阻尼系数，保证系统稳定。为满足电压电流并网标准，总谐波含量需小于 5%，电压下限值 u_{lim} 设定为电网额定电压的 1%。

4 实验验证

为验证阻抗适配支路参数设计方法的准确性以及阻尼系数自适应算法的有效性，使用如图 13 所示基于 RT-Box 的实验平台，搭建 LCL 型并网逆变器，数字控制器选用 TMS320F28379，限于硬件条件，针对两台逆变器运行工况进行实验验证。

当风光并网逆变器均采用阻尼互济控制策略时，假定并网系统中的第 1 台逆变器为风电逆变器，运行于额定工作模式，并网电流为 i_{g1} ，第 2 台逆变器为光伏逆变器，运行于阻抗适配模式，并网电流

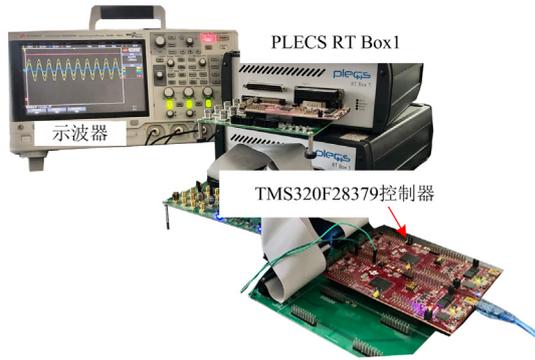


图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

为 i_{g2} 。分别改变电网阻抗和阻尼系数，测量公共点电压 u_{pcc} 和两台逆变器的并网电流 i_{g1} 和 i_{g2} 。电网阻抗 L_g 分别设置为 $500 \mu\text{H}$ 、 2 mH 和 5 mH ，阻尼系数 R_v 分别设置为 5、10、20。

由图 14 可知，当阻尼系数为 5 时，电网阻抗从 $500 \mu\text{H}$ 增至 2 mH ，系统从稳定运行变为失稳，此时光伏逆变器提供的阻尼不足以抑制并网逆变器与电网之间的谐振。电网阻抗增大为 5 mH 时，谐振变大。

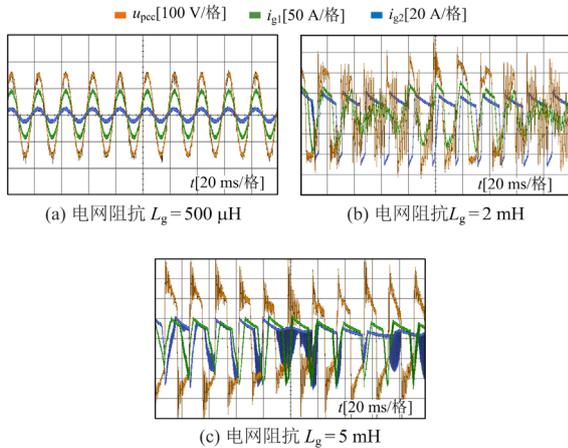


图 14 阻尼系数 $R_v = 5$ 时交流侧电压和并网电流实验波形

Fig. 14 Experimental waveform of AC side voltage and grid connected current when damping coefficient $R_v = 5$

图 15 为阻尼系数为 10 时的交流侧电压和并网电流波形，当电网阻抗为 $500 \mu\text{H}$ 和 2 mH 时，系统保持稳定。当电网阻抗继续增大到 5 mH ，系统失稳。阻尼系数为 10 时光伏逆变器的阻尼特性相对于阻尼系数为 5 的逆变器有所提高，但电网阻抗过大时也无法提供更多阻尼抑制逆变器与电网之间的谐振。

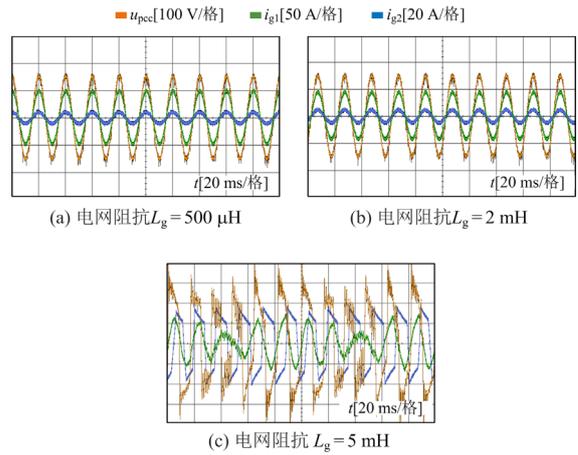


图 15 阻尼系数 $R_v = 10$ 时交流侧电压和并网电流实验波形

Fig. 15 Experimental waveform of AC side voltage and grid connected current when damping coefficient $R_v = 10$

当阻尼系数选取 20 时，光伏逆变器的阻尼特性优于前两种工况，在电网阻抗变化过程中，系统一直保持稳定，电压电流实验波形如图 16 所示。

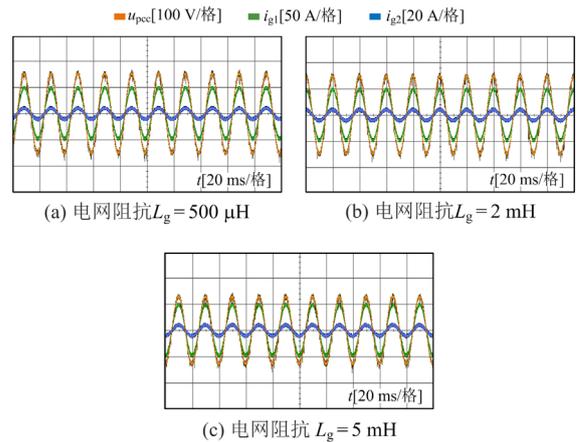


图 16 阻尼系数 $R_v = 20$ 时交流侧电压和并网电流实验波形

Fig. 16 Experimental waveform of AC side voltage and grid connected current when damping coefficient $R_v = 20$

根据各工况下的实验波形，当电网阻抗 $L_g = 5 \text{ mH}$ 时，阻尼系数选取小于 20 (选取 5、10) 时不能抑制振荡，而将阻尼系数设置为根据本文所提方法确定的 20 时，阻抗适配模式(mode2)逆变器能够有效抑制系统谐振。上述实验结果分析与理论仿真分析相一致，本文所提方法为阻抗适配支路的参数设计提供有效参考，实验中振荡抑制效果能够达到理论预期。

采用阻尼系数自适应算法，仍然假定风电逆变器在额定工作模式(mode1)下运行，光伏逆变器在阻抗适配模式(mode2)下运行。图 17 给出了不同电网

阻抗下新能源场站交流侧公共点电压 u_{pcc} 和并网电流 i_{g1} 、 i_{g2} 的波形以及阻尼系数倒数 $1/R_v$ 。

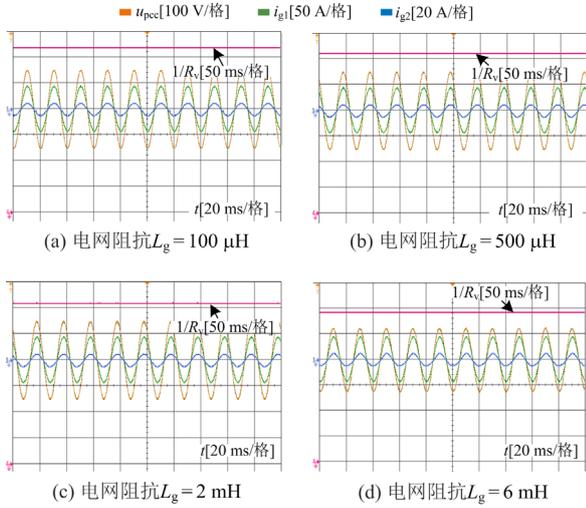


图 17 采用自适应算法时交流侧电压和并网电流实验波形
Fig. 17 Experimental waveform of AC side voltage and grid connected current using adaptive algorithm

观察图 17 的波形可知, 当电网阻抗变化时, 自适应算法会根据谐波含量自动调节阻尼系数。随着电网阻抗增大, $1/R_v$ 的值逐渐减小, 即阻尼系数增大, 系统一直保持稳定。相较于固定阻尼系数的控制策略, 本文所提出的基于阻尼系数自适应算法的阻尼互济控制策略, 能够更加灵活有效地抑制系统谐振, 降低系统失稳风险。

5 结论

本文在新能源并网系统的阻尼互济控制策略的基础上, 明确了阻尼互济控制策略特点及逆变器输出阻抗详细表达式, 针对抑制新能源并网系统谐振的逆变器给出了阻抗适配支路参数设计原则和设计方法, 并提出了一种阻尼系数自适应的阻尼互济控制, 能够使控制更加灵活有效。

通过搭建 RT-Box 实验模型, 针对阻抗适配支路阻尼系数 R_v 参数设计方法的准确性以及阻尼系数自适应算法的有效性进行了验证。结合理论分析和实验验证结果, 可以得到以下结论。

1) 在一定频段范围内, 额定工作模式的逆变器正阻尼特性有限, 且存在正负阻尼边界; 阻抗适配模式逆变器的输出阻抗呈现正阻尼特性, 且当阻尼系数增大时正阻尼幅值逐步提升, 但阻尼系数不能无限增大。

2) 在参数设计时需要根据系统稳定性分析对固定阻尼系数进行优化, 考虑电网阻抗变大时系统

存在的失稳风险。本文所提方法能够为阻抗适配支路的参数设计提供积极参考, 能够让逆变器振荡抑制效果达到理论预期, 有效抑制系统振荡。

3) 为解决固定阻尼系数的限制问题引入阻尼系数自适应算法, 其在复杂多变的弱电网场景下, 有效增强抑制多新能源并网系统谐振的能力, 使阻尼互济控制更灵活可靠。

参考文献

- [1] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491. XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(4): 484-491.
- [2] 郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪, 等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 65-74. ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR·Turgun, et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [3] 祁晓笑, 程静, 王维庆, 等. 基于 SC 的光伏发电并网系统次同步振荡抑制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 88-95. QI Xiaoxiao, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. Sub-synchronous oscillation suppression of photovoltaic grid-connected system based on SC[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 88-95.
- [4] 国家能源局. 国家能源局 2023 年三季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c_1310734825.htm
- [5] 张军六, 李佳朋, 唐震, 等. 基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 50-60. ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 50-60.
- [6] 单葆国, 冀星沛, 许传龙, 等. 近期全球能源供需形势分析及中国能源电力保供策略[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 1-13. SHAN Baoguo, JI Xingpei, XU Chuanlong, et al. Recent situation of global energy supply-demand and guarantee strategy of China's energy and power supply[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 1-13.
- [7] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展

- 研判及需要关注的问题[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 1-9.
- HUANG Bibin, ZHANG Yunzhou, WANG Caixia. New energy development and issues in China during the 14th five-year plan[J]. *Electric Power*, 2020, 53(1): 1-9.
- [8] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-12, 21.
- ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, TANG Shengqing, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(24): 1-12, 21.
- [9] 任冲, 柯贤波, 王吉利, 等. 高比例新能源电网新能源功率优化分配方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 110-117.
- REN Chong, KE Xianbo, WANG Jili, et al. New energy power optimal distribution method for high proportion new energy power grid[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(3): 110-117.
- [10] BLAABJERG F, CHEN Z, KJAER S B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(5): 1184-1194.
- [11] 郇政林, 刘杰, 徐沈智, 等. 面向高比例新能源接入的源-荷-储灵活性资源协调规划[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 107-117.
- HUAN Zhenglin, LIU Jie, XU Shenzhi, et al. Source-load-storage flexibility resource coordinated planning for high proportion of renewable energy[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(7): 107-117.
- [12] 刘普, 崔艺博, 刘兆峰, 等. 基于阻抗分析法的并网变流器稳定性统一分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 114-125.
- LIU Pu, CUI Yibo, LIU Zhaofeng, et al. The unified analysis method of grid-connected converter stability based on impedance analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(4): 114-125.
- [13] 马静, 沈雅琦, 杜延菱, 等. 适应宽频振荡的风电并网系统主动阻尼技术综述[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1673-1686.
- MA Jing, SHEN Yaqi, DU Yanling, et al. Overview on active damping technology of wind power integrated system adapting to broadband oscillation[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1673-1686.
- [14] 王世雨, 李绍令, 郑征, 等. 并网逆变器超高次谐波产生与传播机理分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 80-89.
- WANG Shiyu, LI Shaoling, ZHENG Zheng, et al. Analysis of the generation and propagation mechanism of supraharmic in grid-connected inverter[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(5): 80-89.
- [15] 张昱祺, 王波, 金萧, 等. 基于附加电流控制的并网逆变器输出谐波抑制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 34-40, 77.
- ZHANG Yuqi, WANG Bo, JIN Xiao, et al. Current harmonic suppression strategy for grid-connected inverter based on additional current control[J]. *Smart Power*, 2023, 51(6): 34-40, 77.
- [16] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [17] 郑嘉龙, 杨鸽, 陈开宇, 等. LCL型多逆变器并网系统谐振研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 177-186.
- ZHENG Jialong, YANG Ge, CHEN Kaiyu, et al. An overview on resonance for a multiple LCL-type inverter grid-connected system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(21): 177-186.
- [18] 范恩泽, 赵鲁, 李耀华, 等. 应用于两级式逆变的双有源串联谐振变换器二倍频波动抑制及控制参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 58-68.
- FAN Enze, ZHAO Lu, LI Yaohua, et al. Second harmonic suppression and design of control parameters for a dual-active-bridge series resonant converter applied to a two-stage inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 58-68.
- [19] LIN Z, RUAN X, WU L, 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.
- [20] WANG Yang, TANG Junmiao, SI Jiandong, et al. Power quality enhancement in islanded microgrids via closed-loop adaptive virtual impedance control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(1): 163-179.
- [21] 徐佳, 杨树德, 张新闻. 基于并网电流谐波反馈的有源阻尼策略[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 126-135.
- XU Jia, YANG Shude, ZHANG Xinwen. Current-harmonic-based active damping strategy[J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 126-135.
- [22] 鲁清源, 马俊鹏, 王顺亮, 等. 新能源并网逆变器的阻尼互济控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 238-248.
- LU Qingyuan, MA Junpeng, WANG Shunliang, et al. Damping complementary control strategy of renewable

- energy grid-connected inverter[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1): 238-248.
- [23] 滕国飞, 肖国春, 张志波, 等. 采用重复控制的LCL型并网逆变器单闭环电流控制[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(24): 13-21, 5.
TENG Guofei, XIAO Guochun, ZHANG Zhibo, et al. A single-loop current control method for LCL-filtered grid-connected inverters based on the repetitive controller[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(24): 13-21, 5.
- [24] WANG X, PANG Y, LOH P C, et al. A series-LC-filtered active damper with grid disturbance rejection for AC power-electronics-based power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(8): 4037-4041.
- [25] WANG X, 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.
- [26] HE Y, CHUNG H S H, LAI C T, et al. Active cancelation of equivalent grid impedance for improving stability and injected power quality of grid-connected inverter under variable grid condition[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(11): 9387-9398.
- [27] GUO Y, CHEN L, LU X, et al. Region-based stability analysis for active dampers in AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(6): 7671-7682.
- [28] 王艺潮. 基于等效RLC电路的新能源发电系统谐振特性分析及其阻抗适配技术[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
WANG Yichao. Harmonic stability analysis and impedance adaptation technology of renewable energy power system based on equivalent RLC circuit[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [29] 阮新波. LCL型并网逆变器的控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [30] ZHANG X, SPENCER J W, GUERRERO J M. Small-Signal modeling of digitally controlled grid-connected inverters with LCL filters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9): 3752-3765.
- [31] 张琛, 蔡旭, 李征. 电压源型并网变流器的机-网电气振荡机理及稳定判据研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(11): 3174-3183.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Stability criterion and mechanisms analysis of electrical oscillations in the grid-tied VSC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(11): 3174-3183.
- [32] 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.
- [33] 张成, 赵涛, 朱爱华, 等. 弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(3): 224-230.
ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(3): 224-230.

收稿日期: 2023-10-22; 修回日期: 2024-04-09

作者简介:

王立强(1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源电力系统电磁暂态仿真与稳定分析; E-mail: wangliqiang2121@163.com

陶军(1968—), 男, 学士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: taojun1968@126.com

王顺亮(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力电子和新能源并网。E-mail: slw_scu@163.com

(编辑 张颖)