

新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望

张兴, 李明*, 郭梓暄, 王继磊, 韩峰, 付新鑫

(可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室(合肥工业大学) 安徽省 合肥市 230009)

Review and Perspectives on Control Strategies for Renewable Energy Grid-connected Inverters

ZHANG Xing, LI Ming*, GUO Zixuan, WANG Jilei, HAN Feng, FU Xinxin

(National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology

(Hefei University of Technology), Hefei 230009, Anhui Province, China)

Abstract: With the increasing penetration of renewable energy generation systems such as wind power and photovoltaics, the power grid presents a weak grid or even very weak grid characteristics, which brings about serious challenges with regard to the stable and efficient operation of renewable energy grid-connected generation systems. By reviewing the current results of existing typical renewable energy grid-connected inverter stability control strategies and other aspects, the basic principles and research status of current-source mode, voltage-source mode, and dual-mode control are summarized, and the current-source mode based on phase-locked loop control can ensure system stability and power control rapidity under a strong grid, which has many limitations in terms of stability, system voltage, and frequency adjustment, and adapting to a scenario where a high proportion of renewable energy generation units are connected is difficult. Voltage-source mode control based on power self-synchronous control can provide support for voltage and frequency, and it is therefore more suitable for weak grid situations with high penetration of renewable energy generation connected to the grid. The dual-mode control strategy based on grid impedance adaptation takes advantage of both the current-source mode and voltage source mode in terms of stability, which is more applicable to the scenario of large fluctuations in grid impedance under a high penetration rate. Finally, the above-mentioned typical control strategies are summarized and discussed to determine possible future research directions.

Keywords: high penetration rate; renewable energy grid connection; current-source mode; voltage source mode; dual mode

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51937003); 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1766207)。

Key Program of National Natural Science Foundation of China (51937003); National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (U1766207).

摘要: 随着风电和光伏等新能源发电系统渗透率的不断提高, 电网呈现出弱电网甚至极弱电网特性, 给新能源并网发电系统稳定和高效运行带来了严峻挑战。通过回顾现有典型的新能源并网逆变器稳定控制策略等方面的成果, 总结了电流源模式、电压源模式以及双模式控制的基本原理和研究现状, 并指出基于锁相环控制的电流源模式并网虽然能够保证强电网下的系统稳定性和功率控制快速性等, 但是此类控制方式在稳定性、系统电压和频率调整等方面有诸多局限, 难以适应新能源发电单元高比例接入的场景。基于功率自同步控制的电压源模式控制能够为电压和频率提供支撑, 更加适用于高渗透率新能源发电并网的弱电网场合; 基于电网阻抗自适应的双模式控制策略则同时结合了电流源模式和电压源模式在稳定性上的优势, 更加适用于高渗透率下电网阻抗大幅波动的场合。最后, 对上述几种典型控制策略进行总结, 并探讨了未来的研究方向。

关键词: 高渗透率; 新能源并网; 电流源模式; 电压源模式; 双模式

0 引言

为了解决传统化石能源带来的环境污染问题, 光伏、风电等新能源发电技术得到了持续关注和应用。目前, 中国是世界上发展新能源发电最快且装机规模最大的国家, 2020年中国风电和光伏新增装机容量分别为71.67 GW和48.2 GW。在第75届联合国大会期间, 国家主席习近平提出中国力争于2030年前实现二氧化碳碳排放达到峰值, 并在2060年前努力争取实现“碳中和”的目标。为实现这一目标, 大力发展新能源发电已成为中国重大战略需求。

高渗透率新能源发电已成为必然趋势。目前, 中国蒙东、甘肃等地区的新能源装机比例已经超过了丹

麦、葡萄牙等发达国家。然而, 高渗透率也导致弃风、弃光和电网故障频发等一系列问题, 对电网和新能源发电系统的安全稳定运行带来了诸多挑战。例如, 2012年12月, 河北沽源风电场并网点附近有高补偿度串补输电线路, 引发次同步振荡, 由于电流过大, 导致部分风机脱网; 2015年7月, 新疆哈密的三塘湖电网风电场多次出现振荡现象; 2015年9月, 华东地区锦苏特高压直流系统发生双极闭锁事故, 导致送端电网过电压故障, 又由于电力系统惯量不足, 导致0.41 Hz的严重频率跌落。实际上, 以上事故的发生均与新能源并网的高渗透率紧密相关。高渗透率新能源发电往往具有间歇性、随机性和出力波动性, 并网点的等效电网阻抗往往出现大幅波动的问题, 使电网呈现出弱电网甚至极弱电网特性, 给新能源并网发电系统稳定和高效运行带来了严峻挑战。为此, 作为新能源发电的核心装备, 并网逆变器在电网阻抗大幅波动时的稳定性问题得到了大量专家学者的关注和研究。

可见, 为了实现稳定的新能源并网系统, 应充分解决并网逆变器的控制设计问题。目前, 并网逆变器主要有两种基本控制模式: 电流控制型和电压控制型, 或者称为电流源模式和电压源模式^[1-3]。目前并网逆变器多采用电流源模式。大量文献对电流源模式下的新能源发电单元稳定性控制策略进行了分析, 如虚拟阻抗控制、调整前馈电压控制和调整锁相环带宽控制等。但是此类电流源模式控制方式在系统电压和频率调整等方面有诸多局限, 难以适应新能源发电并网逆变器高比例接入的场景。因此, 有文献提出了新能源发电并网逆变器的电压源模式控制, 它以电压为控制目标, 使并网逆变器的外特性表现为受控电压源, 能够为电压和频率提供支撑, 更适用于高渗透率新能源发电并网场合。

综上所述, 本文将对高渗透率新能源并网逆变器的现有控制问题进行归纳与分析, 分别介绍电流源和电压源两种典型的并网逆变控制模式, 以及由此发展得到的双模式控制策略。

1 高渗透率新能源并网发电系统的典型结构

典型的高渗透率新能源并网发电系统如图1所示。新能源通过并网逆变器接入新能源发电单元接入点 (point of generating unit connection, PGUC), 多个新能源发电单元通过电站变压器汇集到电站接入点

(point of connection, POC), 然后多个新能源发电站再通过输电线路汇集到公共耦合点 (point of common coupling, PCC)。从图中可以看出, 不论是太阳能或风能, 都必须经过并网逆变器才能实现并网发电。可见, 并网逆变器是新能源发电必不可少的关键环节, 承担着能量高效转换的关键任务。并网逆变器与电网的联接与交互是影响新能源并网发电系统稳定、高效运行的关键因素。

通过图1可知, 随着分布式发电系统的不断推广和发展, 高渗透率新能源并网发电系统多采用长距离输电线路和多台变压器将系统互连并接入公共电网, 此时高渗透率新能源并网发电系统表现出含有不可忽略电网阻抗的低短路比 (short circuit ratio, SCR) 特征^[4-7]。根据IEEE Standard 1204-1997, 当 $2 < SCR < 3$ 时称为弱电网, 而极弱电网则 $SCR < 2$ ^[8]。并网逆变器作为分布式发电系统与电网之间的电源接口, 通常需要在SCR较大的强电网条件下才能稳定高效运行^[9]。一般可以由SCR的大小来判断电网的强弱, 从而间接判断出新能源发电系统渗透率的高低。

2 电流源模式并网逆变器控制策略

2.1 基本原理

并网逆变器主要采用基于锁相环 (phase-locked loop, PLL) 控制的电网电压定向方案^[10-11], 该控制方式下并网逆变器可等效为一个电流源^[3, 12], 称为电流源模式, 如图2所示。PLL是一种结构简单, 强电网下性能稳定的并网同步单元。从图2可见, 电流源模式并网逆变器除了需要PLL外, 通常还采用电网电压前馈, 以提升并网逆变器在电网电压发生扰动情况下的动态响应性能, 并抑制由于电网电压背景谐波引起的电网电流谐波等问题。

电流源模式是当前并网逆变器应用于新能源发电的主要并网模式。强电网下, 这种模式不仅能实现新能源利用率的最大化, 还可以保证较高的并网电能质量。对于电流源模式并网逆变器而言, 高渗透率条件下的电网阻抗大幅波动会导致稳定裕度的降低, 引起并网逆变器谐波谐振甚至不稳定^[5, 13-16]。有学者提出了一些改进的电流源模式稳定控制策略, 如调整PI控制器的参数或结构^[17-18]、在电流环中加入主动阻尼控制^[4, 19]等, 能够在一定程度上提高弱电网下电流源模式并网逆变器的稳定性。

下面将分别从电网电压前馈、PLL和dq坐标系下

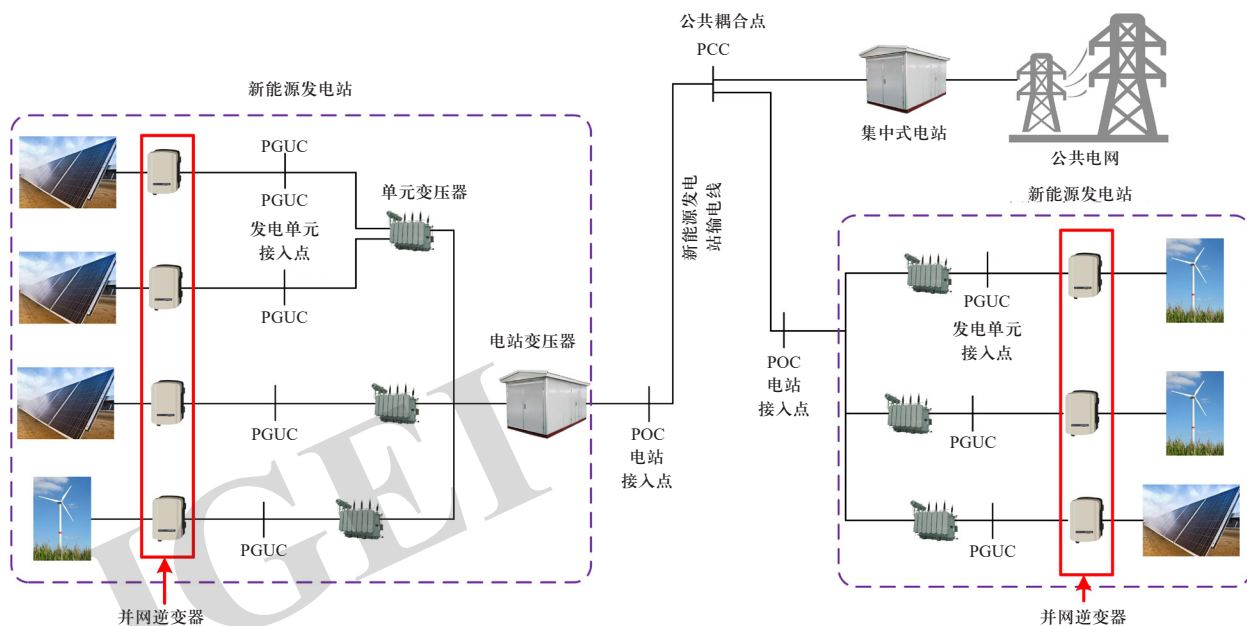


图1 高渗透率新能源并网发电系统的典型结构示意图

Fig. 1 Typical structure diagram of the high-penetration new energy grid-connected power generation system

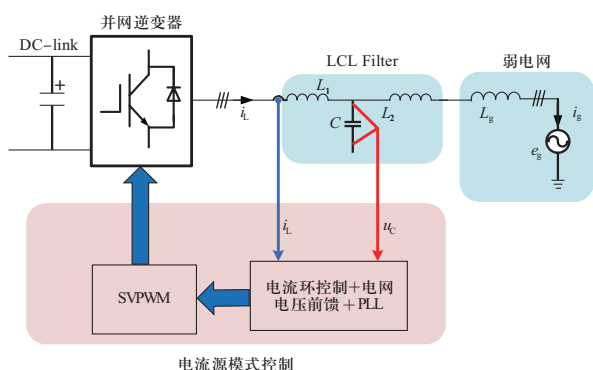


图2 电流源模式控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of current source mode control

的并网控制功率传输单调性三个方面, 阐述弱电网下电流源模式并网逆变器的稳定性问题原因及其解决方案。

2.2 电网电压前馈控制对并网稳定性的影响

电网电压前馈控制可以抵消电网电压的背景谐波对并网电流的影响, 同时由于其具备抑制并网逆变器启动时的冲击电流, 减小并网电流稳态误差等优点而得到广泛运用。弱电网下, 电流源模式并网逆变器的电压前馈环节将降低系统稳定裕度, 导致并网电流出现谐波谐振等问题, 恶化电能质量。

例如, 文献[20]从并网逆变器谐振阻尼特性出发, 分析了数字控制延时对谐振频率的作用, 得出弱

电网下的电网电压前馈控制一定程度上影响了系统稳定性。文献[21]对弱电网下电网电压全前馈策略进行了稳定性和频率响应分析, 根据电网阻抗引入的额外前馈误差问题, 采用一种微分近似控制器, 保证了并网逆变器在采用电网电压前馈时的鲁棒性和动稳态性能。文献[22]提出一种结合比例电网电压前馈控制和重复控制的方案, 同时保留了比例控制的快速性与重复控制的稳态性能, 提升了弱电网下的系统鲁棒性。

实际上, 采用传统电压前馈控制会引入一条与电网阻抗相关的正反馈通道, 从而引起逆变器输出并网电流出现谐波谐振, 甚至逐渐趋向于不稳定。为此, 有一些文献从该角度出发, 提出在该正反馈通道上设置不同的传递函数来削弱正反馈的影响, 提升并网逆变器稳定性。例如: 文献[23-28]中, 提出在电网电压正反馈通道上添加以基频为中心的二阶广义积分器(second-order generalized integrator, SOGI)。由于采用SOGI补偿了并网逆变器的相位裕度, 使得系统稳定性得到了提高, 但对电网电压低次背景谐波抑制的抑制作用相应减弱。进一步地, 文献[29]还提出一种基于多个SOGI叠加的并网点电压前馈自适应控制, 通过自适应调整叠加的SOGI次数来保证电网电压低次背景谐波抑制能力。也有文献考虑在电网电压前馈中引入加权比例系数, 来弱化前馈引入的正反馈通道, 使并网逆变器在具有部分电网电压前馈优点的同时, 提升系统稳定性^[30-31]。文献[32]对加权比例系数方案

进行了分析, 指出该加权比例系数在满足稳定性判据和最小阻尼比的情况下, 需要设置一定的取值范围, 因此该比例系数在并网逆变器稳定性和动态性能之间需要折中选择。文献[33]则通过在电压前馈通道中串联相角补偿函数引入虚拟等效电感, 减弱了比例前馈控制的动态相互作用, 提高了并网逆变器对电网阻抗变化的适应性。

2.3 PLL控制对并网稳定性的影响

弱电网下, 作为并网逆变器与大电网保持同步的传统同步单元, PLL会对并网逆变器的稳定性产生负面影响^[34-36]。

目前, 已有大量文献对弱电网下基于PLL同步控制并网逆变器的稳定问题进行了相关研究。例如, 文献[16]通过建立非线性PLL模型, 指出由于受到弱电网下的电阻阻抗影响, 将引起PLL的自同步现象, 导致逆变器不稳定, 然而这种非线性PLL模型不可避免地增加了逆变器电流控制的复杂性, 给实际分析和应用带来了难度。文献[37]通过研究弱电网下并网逆变器的同步稳定机理, 从影响系统阻尼特性分量的角度, 分析了电网阻抗等因素对小扰动下系统同步稳定性的影响。文献[38]研究了基于延时的PLL在弱电网下导致系统性能恶化的原因, 提出添加一个二阶低通滤波器和相位校正环节来改进系统相位裕度。文献[39]从并网逆变器输出阻抗模型的角度分析讨论PLL的稳定性问题, 提出了基于电网电流前馈的鲁棒型PLL及其相应的参数设计方法, 保证系统在极弱电网下稳定运行。文献[40]提出一种自适应阻尼的PLL控制策略, 增强了系统鲁棒性, 提高了并网逆变器对弱电网的适应能力。文献[41]通过构建并网逆变器输出阻抗模型, 提出弱电网下PLL引起的输出阻抗低频段负电阻特性将导致系统稳定性问题。

实际上, 较高的PLL带宽将导致弱电网中并网逆变器发生谐波谐振甚至不稳定^[42]。文献[13, 43]指出PLL的带宽设置越高, 逆变器在低频段的输出阻抗的负阻区域将越大。因此, 为了解决PLL在弱电网下引起的不稳定性, 降低PLL的带宽是一种有效的方法^[44]。基于此, 文献[32]提出了一种具有PLL自适应带宽的方案, 该方案根据电网阻抗自适应调节PLL带宽, 从而改善了并网逆变器在弱电网下的稳定性。然而, 这类方法将一定程度上降低PLL的动态性能, 当系统发生低电压穿越等情况时, 往往不能满足并网逆变器的快速性要求。

有文献提出采用不同PLL的控制结构以解决稳定性问题, 例如: 文献[45]为PLL增加了一个带通滤波器, 实现了并网逆变器输出阻抗的重塑, 抑制了弱电网下的谐振现象。文献[46]提出了一种鲁棒矢量控制策略, 该策略考虑了PLL的动态特性, 消除了PLL对并网逆变器稳定性的负面影响。文献[47]基于复数滤波器的基波正序电压提取特性, 提出了具有复数滤波器结构的PLL逆变并网系统, 增大了并网逆变器输出阻抗在中频段内的相角裕度。

此外, 作为电流源模式并网控制, 往往需要同时考虑电网电压前馈和PLL对并网逆变器稳定性的影响。例如, 文献[48]中构建了离散域并网逆变器的小信号模型, 提出了并网逆变器的输出阻抗重塑方案, 但该方案仅考虑了PLL, 却没有考虑电网电压前馈的影响。虽然该方案能够削弱低频带输出阻抗的负电阻特性, 从而提高了系统稳定性, 但是由于未考虑电网电压前馈控制, 缺乏谐波抑制能力, 并且电网电压幅值扰动时的动态响应速度也会一定程度下降。事实上, 类似于PLL对并网逆变器稳定性的影响, 过去的研究表明电网电压前馈同样也会降低逆变器输出阻抗的相位^[49], 因此文献[50]中采用了基于电流控制回路的相位超前控制策略, 可以有效地重塑输出阻抗的相位并降低了低频段的负阻区域。进一步地, 文献[51]提出了一种同时考虑PLL和电网电压前馈环节引入的低频段负电阻特性的方案, 通过在电网电压前馈通道上添加q轴输出阻抗重塑的控制器, 使并网逆变器能够在弱电网下稳定运行, 同时保留了电网电压前馈控制引入的电网电压背景谐波抑制性能。

值得一提的是, 以上的控制策略均针对弱电网下的PLL小信号稳定性, 而作为一种经典的同步控制结构, PLL的输出特性表达式是关于虚拟功角的非线性函数, 在大干扰情况下往往会出现虚拟功角失去稳定平衡点而发生同步失稳^[52-54]。

2.4 dq坐标系下的功率传输单调性对并网稳定性的影响

文献[3]研究了电流源模式下基于dq轴电流的功率控制在极弱电网下可能导致的非单调性问题, 如图3所示。当电网阻抗很大时, 并网逆变器输出功率不再具有单调性, 这说明电流源模式并网逆变器不能在极弱电网下稳定运行。因此, 为了保证并网逆变器在极弱电网下的稳定运行, 需要采用不同于电流源模式的并网模式。

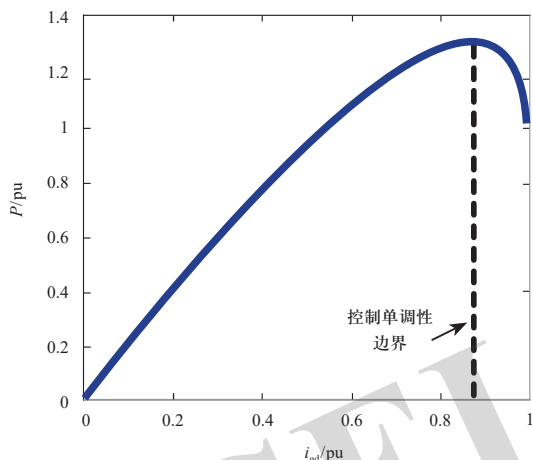


图3 电流源模式并网逆变器有功功率单调性示意图
Fig. 3 Schematic diagram of monotonicity of active power in current source mode controlled grid-connected inverter

3 电压源模式并网逆变器控制策略

3.1 基本原理

不同于电流源模式,有文献提出一种不使用PLL的电压源并网模式,该模式在弱电网下有较好的稳定性^[3, 12, 55]。电压源模式采用的是组网型同步控制单元,例如采用基于下垂控制或者虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的功率外环进行相位自同步,实现输出功率调节^[56]。电压源模式并网逆变器直接通过控制输出电压矢量相位和幅值实现输出功率调节,其控制特性类似于同步发电机系统。

电压源模式下的并网逆变器常采用基于功率环与电压电流双环结合的方案,其控制图如图4所示。

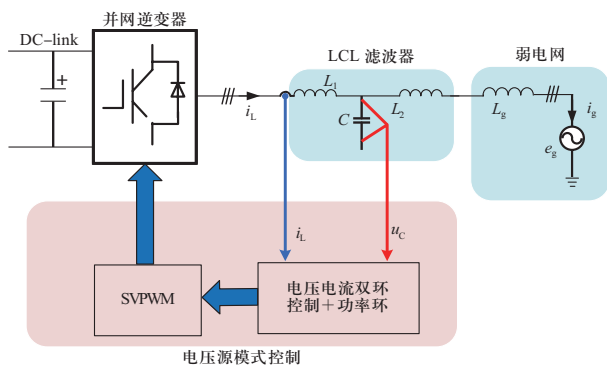


图4 电压源模式控制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of voltage source mode control

近年来,关于电压源模式并网逆变器的稳定性已有相关文献进行了研究,例如:文献[56]提出了一种

功率同步控制,使并网逆变器终端实现了与电网的固有同步,对于连接到极弱交流电网系统的高压直流环节,该方法已被证明是一种优越的解决方案。文献[57-58]研究了基于下垂控制的电压源模式全功率风电变流器在弱电网下的直流侧电压稳定控制,然而该方案没有考虑电网阻抗大幅变化时的系统稳定性,特别是需要分析强电网下电压源模式并网逆变器的系统稳定性。文献[59-61]从基于序阻抗的小信号建模角度出发,分析了基于VSG控制的电压源模式并网逆变器在高电网阻抗场景下的稳定性,指出相比于传统电流源模式,电压源模式在弱电网下更加稳定。文献[62-63]通过构建下垂控制三相并网逆变器的序阻抗模型,分析了功率同步环产生的频率耦合效应,得出弱电网下基于电压源模式的下垂控制具有更好的并网特性。进一步地,文献[64]基于谐波线性化建模方法,得到了基于VSG控制的整体序阻抗模型,获得了VSG频率耦合效应的原因。文献[65]通过分析对比电流源模式并网逆变器和电压源模式并网逆变器发现:前者的序阻抗在中频段呈负阻抗特性,后者则在中频段呈感性,因此电压源模式对弱电网更具适应性。

3.2 dq坐标系下的功率传输单调性对并网稳定性的影响

当并网逆变器运行在电压源模式时,和基于矢量控制的电流源模式不同,其通过控制输出端电压 E 和输出功角 δ 来控制输出功率,控制特性类似于传统同步发电机系统。当功角 δ 增大时,输出有功功率 P 并非单调增加,而是存在先增加后减小的现象。随着端电压 E 的增加,输出有功功率 P 也相应增加,如图5所示。值得一提的是,运行点功角 δ 可以反映当前运行工况下的交流电网强度,可采用短路比 λ_{SCR} 来衡量直流系统接入的交流系统强度^[66],其表达式为

$$\lambda_{SCR} = \frac{S_{ac}}{P_{dc}} = \frac{U^2/X_g}{UE \sin \delta / X_g} = \frac{U}{\sin \delta \cdot E} \quad (1)$$

式中: P_{dc} 表示直流系统的容量; S_{ac} 表示电网阻抗 X_g 对应的短路容量; U 表示远端单机无穷大电网电压。

根据式(1)可知单调边界对应的功角为 $\pi/2$ 。代入式(1)所示的SCR公式,且通过加入无功功率支撑使得 $E=U$,可得此时对应的SCR为1,根据实际物理系统中SCR的定义可知,SCR不会小于1,因此,电压源模式并网逆变器在更弱的电网下仍能够稳定运行^[3]。

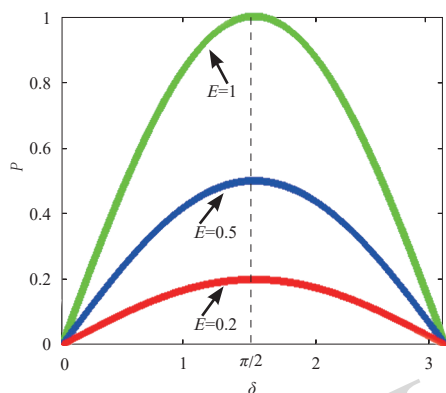


图5 电压源模式并网逆变器有功功率单调性示意图

Fig. 5 Schematic diagram of monotonicity of active power in voltage source mode controlled grid-connected inverter

3.3 功率外环的控制阻尼特性对并网稳定性的影响

文献[3]研究了电压源模式并网逆变器在电网阻抗变化时的功率外环小信号模型,发现电网阻抗较大时并网逆变器功率外环的极点阻尼较大,系统稳定性较好,而在电网阻抗较小时则阻尼非常小,输出功率易发生振荡。此外,电网阻抗过小时,电压源控制的并网逆变器对输出电压矢量小范围的调节将会给输出功率带来大范围的变化,大大增加了输出电压的控制精度和抗扰性能等方面的要求。因此,较高的电网阻抗将有利于提高系统的鲁棒性和稳定性。

值得一提的是,电压源模式并网逆变器具有类似于同步发电机的同步特性,因此,在大干扰情况下也可能发生类似同步发电机的同步暂态失稳现象。考虑电流饱和限幅环节时还会使失稳过程更为复杂^[67],往往需要进行控制切换以避免与电网的失步^[68-69]。另外,相比电流源模式并网控制,电压源模式如何实现光伏、风力发电的最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)以及和储能系统荷电状态、充放电模式和响应时间等动态响应特性之间的相互协调,保证直流母线电压和输出功率的稳定控制,这些都是电压源模式并网控制技术在实际应用中亟待解决的问题。

4 双模式并网逆变器控制策略

对比以上介绍的电流源模式和电压源模式的并网逆变器控制稳定性可知,二者的差异性本质上是由于采用了不同的控制结构导致的,使得并网逆变器对电网呈现出不同的外特性,从而在电网阻抗强弱变化时,产生了一定的“互补”特性。即电流源模式并网逆变器适用于强电网,而弱电网稳定性下降,在极弱

电网下甚至不能稳定运行;与之相反,在极弱电网和弱电网下的电压源模式并网逆变器具有较好的稳定性,而在强电网下系统则不稳定。因此,文献[3, 70-72]提出了基于电网阻抗自适应的双模式控制,如图6所示。在强电网下并网逆变器采用电流源模式,极弱电网下则切换到电压源模式,综合了两种并网模式的优点,有效提升了单台逆变器的电网阻抗适应性,但是却未涉及双模式控制扩展到多逆变器系统时的稳定性问题。在文献[3]的基础上,文献[12]将双模式控制应用到多逆变器系统,提出多逆变器系统由全电流源模式切换到混合模式,使得系统同时有电流源模式和电压源模式的并网逆变器,提升了弱电网下的并网逆变器稳定性。然而,文献[12]缺少对全电流源模式和混合模式切换边界的定量分析,也未考虑电网进一步变弱时混合模式系统是否仍旧稳定的问题。基于此,文献[73]进一步提出了基于电网阻抗自适应的双模式组合控制策略,将多逆变器系统从混合模式切换到全电压源模式,从而保证了极弱电网下的系统仍旧有足够的稳定裕度。特别地,该文献基于D分割法^[74-76],研究了在幅值裕度、相位裕度和系统带宽等多性能指标约束下的参数稳定域,得出了SCR大幅波动情况下全电流源模式、混合模式和全电压模式之间的定量切换边界。

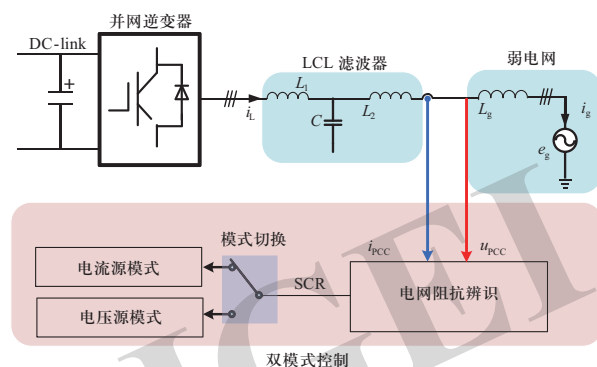


图6 双模式控制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of dual mode control

5 高渗透率新能源并网逆变控制策略研究展望

现有高渗透率新能源并网技术的研究工作大多局限于传统电流源模式的并网稳定性控制,电压源模式乃至双模式的并网控制技术仍处于起步阶段。随着科学技术的进步,高渗透率新能源并网系统将借助于信息处理技术、大数据技术和人工智能等技术的支持,实现以下几方面的研究方案和策略。

1) 适用于多逆变器系统的渗透率在线估计技术。针对传统电网阻抗被动辨识存在时效性差、精度低,而主动辨识存在对电网扰动大的问题,需要研究基于高精度、低延时的阻抗准被动辨识技术;另一方面,选取注入扰动信号合适的频谱特征和注入时序,有效提升装备的辨识技术对电网的干扰也是未来需要研究的问题。

2) 形成更有利于实际运用的电压源模式并网控制方案。研究计及MPPT特性和储能系统荷电状态、充放电模式和响应时间等特性的电压源模式协调控制方法,平抑并网功率波动和维持前后级功率平衡的直流稳压技术。

3) 研究基于渗透率指标的多逆变器系统混合模式控制技术。电流源模式和电压源模式具有稳定性上的互补特性,在电网中应该如何合理配置两种不同类型的并网逆变器从而使系统达到最好的动稳态特性是亟待解决的问题。探究基于渗透率指标的电压源、电流源混合模式控制策略,实现基于稳定裕度和新能源利用率两个指标综合最优的电压源模式最小容量配比规律也都需要进一步深入研究。

4) 基于人工智能优化算法的混合模式多并网变流器系统协同控制研究。研究基于人工智能算法的混合模式并网变流器系统协同控制策略,包括了电流源模式和电压源模式两种不同控制结构在电网中的落点和网架规划的合理设计,从而减小系统失稳风险是未来重要的研究内容。

5) 高渗透率新能源并网各设备、平台间的互联互通和数据共享等能源互联技术。基于5G等数据通信技术,集成新能源并网逆变设备数据采集、调度和协同等功能于一体,连接发电端、输电和用户,实现各平台间的数据共享体系。

6 结语

高渗透率新能源发电情况下,新能源发电单元的谐振等稳定性问题也日益显著。在专家学者的共同努力下,取得了大量理论科研成果,本文重点梳理了并网逆变设备电流源模式、电压源模式和双模式等方面的研究现状,并探讨总结了未来可能的研究方向和思路。希望本文可以为未来高渗透率新能源并网逆变控制技术提供有益参考,推动中国新能源并网变流技术创新和能源可持续发展,并满足中国能源互联重大战略。

参考文献

- [1] WU W M, LIU Y, HE Y B, et al. Damping methods for resonances caused by LCL-filter-based current-controlled grid-tied power inverters: an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7402-7413.
- [2] CHEN X R, RUAN X B, YANG D S, et al. Injected grid current quality improvement for a voltage-controlled grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1247-1258.
- [3] LI M, ZHANG X, YANG Y, et al. The grid impedance adaptation dual mode control strategy in weak grid[C]//2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). May 20-24, 2018, Niigata, Japan. IEEE, 2018: 2973-2979.
- [4] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [5] ZHOU S Y, ZOU X D, ZHU D H, et al. An improved design of current controller for LCL-type grid-connected converter to reduce negative effect of PLL in weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 648-663.
- [6] CHEN X, ZHANG Y, WANG S S, et al. Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 274-283.
- [7] YANG D S, RUAN X B, WU H. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.
- [8] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities, part I: AC/DC system interaction phenomena[J]. CIGRE, France, 1997.
- [9] IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[J]. IEEE Std 1547-2003, 2003: 1-28.
- [10] 张兴. PWM整流器及其控制策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [11] KAZMIERKOWSKI M P, MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 691-703.
- [12] LI M, ZHANG X, ZHAO W. A novel stability improvement strategy for a multi-inverter system in a weak grid utilizing dual-mode control[J]. Energies, 2018, 11(8): 2144.
- [13] 张学广, 付志超, 陈文佳, 等. 弱电网下考虑锁相环影响的并网逆变器改进控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 139-145. ZHANG Xueguang, FU Zhichao, CHEN Wenjia, et al. An improved control method for grid-connected inverters considering impact of phase-locked loop under weak grid condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 139-145(in Chinese).
- [14] 郑征, 黄旭, 杨明, 等. 弱电网下逆变侧电流反馈的并网逆变器稳定性分析及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019,

- 47(19): 31-37.
ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming, et al. Stability analysis and improvement for LCL filter grid-connected inverter using inverter-side current feedback[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19):31-37(in Chinese).
- [15] SILWAL S, TAGHIZADEH S, KARIMI-GHARTEMANI M, et al. An enhanced control system for single-phase inverters interfaced with weak and distorted grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12538-12551.
- [16] DONG D, WEN B, BOROYEVICH D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 310-321.
- [17] MIDTSUND T, SUUL J A, UNDELAND T. Evaluation of current controller performance and stability for voltage source converters connected to a weak grid[C]//The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. June 16-18, 2010, Hefei, China. IEEE, 2010: 382-388.
- [18] CAO X J, LIU G H, XU W N, et al. Adaptive quasi-PRD control method of grid-connected PV inverter under weak grid[C]//2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). June 1-5, 2015, Seoul, Korea (South). IEEE, 2015: 2469-2474.
- [19] YANG Y, FANG G, LU J J, et al. A virtual RC active damping method in weak grid for three-level three-phase grid-connected inverters[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). May 22-26, 2016, Hefei, China. IEEE, 2016: 741-747.
- [20] 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 Yueyuan, 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(in Chinese).
- [21] 查晓宇, 徐军忠, 王勇. 弱电网下并网逆变器的改进电压全前馈策略[J]. 电力电子技术, 2020, 54(4): 84-87.
ZHA Xiaoyu, XU Junzhong, WANG Yong. A modified voltage full-feedforward strategy for grid-connected inverters in weak grid[J]. Power Electronics, 2020, 54(4): 84-87(in Chinese).
- [22] 杨兴武, 王楠楠, 陈磊, 等. 弱电网下LCL型并网逆变器鲁棒重复控制策略[J]. 电力电子技术, 2018, 52(10): 15-18.
YANG Xingwu, WANG Nannan, CHEN Lei, et al. Robust repetitive control approach for grid-connected inverter with LCL filter in weak grid case[J]. Power Electronics, 2018, 52(10): 15-18(in Chinese).
- [23] YANG S D, TONG X Q, YIN J, et al. BPF-based grid voltage feedforward control of grid-connected converters for improving robust stability[J]. Journal of Power Electronics, 2017, 17(2): 432-441.
- [24] TANG Y, HUANG L L, ZHAO G S. Resonant feed forward control for LCL-type grid-tied inverters in weak grid condition[C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). September 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA. IEEE, 2016: 1-6.
- [25] XU J M, QIAN Q, XIE S J, et al. Grid-voltage feedforward based control for grid-connected LCL-filtered inverter with high robustness and low grid current distortion in weak grid[C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). March 20-24, 2016, Long Beach, CA, USA. IEEE, 2016: 1919-1925.
- [26] 杨树德, 同向前, 尹军, 等. 增强并网逆变器对电网阻抗鲁棒稳定性的改进前馈控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 222-230.
YANG Shude, TONG Xiangqian, YIN Jun, et al. An improved grid voltage feedforward strategy for grid-connected inverter to achieve high robust stability against grid-impedance variation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 222-230(in Chinese).
- [27] 徐飞, 汤雨, 谷伟. 弱电网条件下LCL型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4970-4979.
XU Fei, TANG Yu, GU Wei. Resonant feedforward control strategy for LCL-type grid-connected inverters in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4970-4979(in Chinese).
- [28] 尹有为, 井敬, 杨树德, 等. 增强LCL逆变器对弱电网适应能力的前馈控制[J]. 电气传动, 2018, 48(4): 17-21.
YIN Youwei, JING Jing, YANG Shude, et al. Feedforward control for improving LCL inverter's adaptability to weak grid[J]. Electric Drive, 2018, 48(4): 17-21(in Chinese).
- [29] XU J M, XIE S J, QIAN Q, et al. Adaptive feedforward algorithm without grid impedance estimation for inverters to suppress grid current instabilities and harmonics due to grid impedance and grid voltage distortion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7574-7586.
- [30] QIAN Q, GE X W, XIE S J, et al. Improved grid voltage feedforward for strengthening the inverter's adaptability to utility[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). May 22-26, 2016, Hefei, China. IEEE, 2016: 897-901.
- [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(in Chinese).
- [32] CESPEDAS M, SUN J. Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 516-523.
- [33] 杨兴武, 王涛, 徐依明, 等. 基于虚拟电感的LCL型并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 56-63.
YANG Xingwu, WANG Tao, XU Yiming, et al. Voltage feedforward control of lcl grid-connected inverter based on virtual inductor[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(11): 56-63(in Chinese).
- [34] 张孟香. 弱电网下并网逆变器自同步控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [35] 孙青青. 考虑锁相环影响的LCL型并网逆变器稳定控制方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [36] XU J M, QIAN Q, ZHANG B F, et al. Harmonics and stability

- analysis of single-phase grid-connected inverters in distributed power generation systems considering phase-locked loop impact[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 1470-1480.
- [37] 胡祺, 付立军, 马凡, 等. 弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 98-108.
- HU Qi, FU Lijun, MA Fan, et al. Small signal synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 98-108(in Chinese).
- [38] 许津铭, 卞申一阳, 钱浩, 等. 弱电网下单相并网逆变器延时锁相环的鲁棒控制及优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2062-2070.
- XU Jinming, BIAN Shenyiyang, QIAN Hao, et al. Robust control and optimization of Delay-based Phase-locked loop of Single-phase Grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2062-2070(in Chinese).
- [39] 许津铭, 卞申一阳, 钱强, 等. 弱电网下基于电网电流前馈的单相逆变器锁相环[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2647-2657.
- XU Jinming, BIAN Shenyiyang, QIAN Qiang, et al. Grid current feedforward based Phase-locked loop for Single-phase inverters in weak grid case[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(8): 2647-2657(in Chinese).
- [40] 张云飞, 赵晋斌, 周鸣捷, 等. 弱电网下自适应同步旋转坐标系锁相环鲁棒性分析及研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2234-2243.
- ZHANG Yunfei, ZHAO Jinbin, ZHOU Mingjie, et al. Robustness analysis and research of adaptive Synchronous-reference-frame Phase-locked loop under weak grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2234-2243(in Chinese).
- [41] WEN B, BOROEYEVICH D, MATTAVELLI P, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, 2014: 1233-1239.
- [42] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [43] ZHANG X G, XIA D N, FU Z C, et al. An improved feedforward control method considering PLL dynamics to improve weak grid stability of grid-connected inverters[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 5143-5151.
- [44] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [45] WU X J, LI X Q, YUAN X B, 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.
- [46] DAVARI M, MOHAMED Y A R I. Robust vector control of a very weak-grid-connected voltage-source converter considering the phase-locked loop dynamics[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(2): 977-994.
- [47] 涂春鸣, 高家元, 李庆, 等. 具有复数滤波器结构锁相环的并网逆变器对弱电网的适应性研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(12): 2632-2642.
- TU Chunming, GAO Jiayuan, LI Qing, et al. Research on adaptability of grid-connected inverter with complex coefficient-filter structure phase locked loop to weak grid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(12): 2632-2642(in Chinese).
- [48] FANG J Y, LI X Q, LI H C, et al. Stability improvement for three-phase grid-connected converters through impedance reshaping in quadrature-axis[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(10): 8365-8375.
- [49] WANG J, SONG Y L, MONTI A. A study of feedforward control on stability of grid-parallel inverter with various grid impedance[C]//2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). June 24-27, 2014, Galway, Ireland. IEEE, 2014: 1-8.
- [50] WANG J F, YAO J H, HU H B, et al. Impedance-based stability analysis of single-phase inverter connected to weak grid with voltage feed-forward control[C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). March 20-24, 2016, Long Beach, CA, USA. IEEE, 2016: 2182-2186.
- [51] LI M, ZHANG X, GUO Z X, et al. The control strategy for the grid-connected inverter through impedance reshaping in q-axis and its stability analysis under a weak grid[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(3): 3229-3242.
- [52] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(4): 3573-3589.
- [53] YUAN H, XIN H H, HUANG L B, et al. Stability analysis and enhancement of type-4 wind turbines connected to very weak grids under severe voltage sags[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(2): 838-848.
- [54] HE X Q, GENG H, LI R Q, et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1612-1623.
- [55] BOUAFIA A, GAUBERT J P, KRIM F. Predictive direct power control of three-phase pulsewidth modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM)[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(1): 228-236.
- [56] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power-synchronization control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 344-355.
- [57] YUAN X B, CHAI J Y, LI Y D. Control of variable pitch, variable speed wind turbine in weak grid systems[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. September 12-16, 2010, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2010: 3778-3785.
- [58] YUAN X B, WANG F, BOROEYEVICH D, et al. DC-link voltage control of a full power converter for wind generator operating in weak-grid systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(9): 2178-2192.
- [59] WU W H, ZHOU L M, CHEN Y D, et al. Sequence-impedance-based stability comparison between VSGs and

- traditional grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 46-52.
- [60] 伍文华. 新能源发电接入弱电网的宽频带振荡机理及抑制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [61] 伍文华, 周乐明, 陈燕东, 等. 序阻抗视角下虚拟同步发电机与传统并网逆变器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1411-1421.
- WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, et al. Stability comparison and analysis between the virtual synchronous generator and the traditional grid-connected inverter in the view of sequence impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1411-1421(in Chinese).
- [62] 陈杰, 闫震宇, 赵冰, 等. 下垂控制三相逆变器阻抗建模与并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4846-4856.
- CHEN Jie, YAN Zhenyu, ZHAO Bing, et al. On the impedance modelling and grid-connected characteristics of the three-phase droop controlled inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4846-4856(in Chinese).
- [63] 赵冰. 电压控制型逆变器控制策略及并网特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [64] 杜燕, 赵韩广, 杨向真, 等. 考虑频率耦合效应的虚拟同步发电机序阻抗建模[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 42-49.
- DU Yan, ZHAO Hanguang, YANG Xiangzhen, et al. Sequence impedance modeling of virtual synchronous generator considering frequency coupling effect[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 42-49(in Chinese).
- [65] 卫楚奇, 石磊, 周百灵, 等. 电压型与电流型逆变器序阻抗建模与分析[J]. 电力电子技术, 2020, 54(10): 107-110.
- WEI Chuqi, SHI Lei, ZHOU Bailing, et al. Sequence impedance modeling and analysis of voltage controlled and current controlled inverters[J]. Power Electronics, 2020, 54(10): 107-110(in Chinese).
- [66] 黄云辉, 周翩, 王龙飞. 弱电网下基于矢量控制的并网变换器功率控制稳定性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 93-99.
- HUANG Yunhui, ZHOU Pian, WANG Longfei. Power control stability in vector control based voltage source converters connected to weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 93-99(in Chinese).
- [67] XIN H H, HUANG L B, ZHANG L Q, et al. Synchronous instability mechanism of P-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5206-5207.
- [68] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [69] 黄林彬, 辛焕海, 鞠平, 等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 10-25.
- HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25(in Chinese).[知网]
- [70] 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.
- [71] LI M, ZHANG X, GUO Z X, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on D-partition method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420-14435.
- [72] 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 Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(7): 86-93(in Chinese).
- [73] LI M, ZHANG X, GUO Z X, 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.
- [74] NEIMARK Y I. D-partition and robust stability[J]. Computational Mathematics and Modeling, 1998, 9(2): 160-166.
- [75] HWANG C, HWANG L F, HWANG J H. Robust D-partition[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2010, 33(6): 811-821.
- [76] 李明, 张兴, 郭梓暄, 等. 弱电网下基于D分割法的逆变器PI参数设计及稳定域分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 139-147.
- LI Ming, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Proportional-integral parameter design for inverter based on D-partition method and its stability region analysis in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 139-147(in Chinese).

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-04-28。

作者简介:



张兴

张兴(1963), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为特种电源、大功率风力发电用变流器及大型光伏并网发电, E-mail: honglf@ustc.edu.cn。

李明(1993), 男, 博士, 主要研究方向为高渗透率新能源并网逆变控制技术, 微电网控制, 分布式发电技术

及并网逆变器稳定性建模与分析。通信作者, E-mail: jhuumi@163.com。

郭梓暄(1992), 男, 博士研究生, 主要研究方向为虚拟同步发电机技术及并网逆变器控制, E-mail: g_zixuan@126.com。

王继磊(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为并网逆变器稳定性分析及其控制, E-mail: 1392420343@qq.com。

韩峰(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源利用与分布式发电及其控制技术, E-mail: 1402129234@qq.com。

付新鑫(1998), 女, 博士研究生, 主要研究方向为并网逆变器建模与稳定性分析, E-mail: 1979180106@qq.com。

(责任编辑 张鹏)