

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.2.158

中图分类号: TM721

文献标志码: A

一种提高变流器弱电网适应能力的虚拟阻抗控制策略

杨树德¹(中国电源学会会员), 李 旺¹, 张新闻², 蔡长虹³, 高雄鹰³, 周 鑫³
(1.扬州大学电气与能源动力工程学院,扬州 225127;2.北方民族大学电气信息工程学院,银川 750021;
3.扬州华鼎电器有限公司,扬州 225127)

摘要:弱电网下较大的电网等值电感可能引起并网变流器失稳,为此,首先,建立了并网变流器的阻抗模型,根据阻抗比判据分析了电网等值电感对并网变流器稳定性的影响;其次,针对并网变流器对感性电网阻抗适应能力较低的问题,提出了一种基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略,并研究了虚拟电阻值对变流器弱电网适应能力的影响,给出了虚拟电阻的选取原则;最后,搭建了系统仿真模型,仿真结果验证了文中理论分析的正确性和控制策略的有效性。

关键词:弱电网;并网变流器;虚拟阻抗;带通滤波;稳定性

Virtual Impedance Control Strategy for Improving the Adaptability of Converter to Weak Grid

YANG Shude¹, Member, CPSS, LI Wang¹, ZHANG Xinwen², CAI Changhong³, GAO Xiongying³, ZHOU Xin³
(1. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 3. Yangzhou Hua Ding Electric Appliance Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: The large grid inductance in weak grid may cause a grid-connected converter to be unstable. Therefore, an impedance model of grid-connected converter is built at first, and the influence of grid inductance on the stability of grid-connected converter is analyzed according to the impedance ratio criterion. Then, aimed at the problem of low adaptability of the grid-connected converter to inductive grid impedance, a virtual impedance control strategy based on band-pass filter is proposed, and the influence of virtual resistance value on the adaptability of grid-connected converter to weak grid is studied. Furthermore, a selection principle for the virtual resistance value is also given. Finally, a system simulation model is built, and simulation results verify the correctness of theoretical analysis and the effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: Weak grid; grid-connected converter; virtual impedance; band-pass filter; stability

并网变流器被广泛应用于新能源并网发电、输

电和电能质量治理领域。然而,由于电网阻抗的不确定性,近年来国内外由并网变流器与电网交互作用引发的失稳振荡现象频发,范围涉及到风电^[1]、光伏并网系统^[2]和高速铁路牵引供电系统^[3]等多个应用领域,已经成为影响电网安全运行的重要因素。由于我国可再生能源分布地区偏远且电力用户分散,变流器并网点与电网主线距离远、输电距离长,导致电网等值阻抗较大^[4],电网可能表现为弱电网特性,严重威胁到并网变流器的稳定运行。光伏电

收稿日期:2021-08-02; 修回日期:2021-08-26; 录用日期:
2021-09-03; 网络首发日期:2021-10-14

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究资助项目(19KJB470038);宁夏自然科学基金资助项目(2020AAC03210);国家自然科学基金资助项目(51867001)

This work is supported by Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions under the grant 19KJB470038; Ningxia Natural Science Foundation under the grant 2020AAC03210; National Natural Science Foundation of China under the grant 51867001

站接入电网技术规定指出,新能源并网逆变器需能适应的最小短路比为 $10^{[5]}$,因此,研究如何提高变流器对弱电网的适应能力具有重要的实际意义。

不少学者对如何提高变流器的弱电网适应能力进行了研究,主要围绕主电路和控制参数的优化设计以及控制策略的改进等方面。针对主电路的参数优化设计方面,文献[6]给出了以弱电网下并网变流器的稳定性为约束,以阻尼损耗最小、制造成本最低以及跟踪性能最佳为目标的LCL滤波器参数优化设计方法;文献[7]进一步研究了容性电网阻抗下LLCL型并网变流器的输出滤波器、EMI滤波电容以及RC无源阻尼支路的参数设计方法。针对控制参数的优化设计方面,文献[8]基于D分割法,借助于图形实现了逆变器同时满足相角裕度、幅值裕度、电流环带宽和短路比等多性能指标下PI参数稳定域的可视化;文献[9]给出的PLL控制器参数优化设计方法不仅提高了变流器对弱电网的适应能力,而且保证了系统的快速性。针对控制策略的改进方面,文献[10]提出一种基于电网电流前馈的PLL,使得单相并网逆变器在极弱电网下仍能稳定运行;通过实时估测电网的阻抗值,文献[11]提出了基于系统敏感度和相位裕度的自适应控制策略;针对弱电网下电网电压前馈对变流器稳定性的不利影响,文献[12]和[13]分别在电网电压前馈通道中引入带通滤波器和衰减因子提高变流器对弱电网的适应能力。从阻抗的角度讲,提高弱电网下并网变流器稳定性实际上是对电网阻抗或变流器输出阻抗的调节,文献[14]通过在公共耦合点并联RC无源支路的方式对电网阻抗进行调节;而文献[15]基于对谐振电压或谐振频率的实时测量实现对变流器输出阻抗的调节;文献[16]则根据实时检测的电网阻抗值对变流器输出阻抗进行重塑,在电网阻抗宽范围变化时能够保证系统具有恒定的稳定裕度;文献[17]提出了基于有源阻尼与虚拟导纳相结合的阻抗重塑控制策略,通过对控制参数的统一迭代优化设计对不同频带下阻抗的相位进行补偿,实现对直驱风电机组接入弱电网宽频带振荡的抑制。

综上所述,现有的虚拟阻抗控制通常基于对电

网阻抗大小、谐振电压或谐振频率的实时检测,算法较复杂,本文建立了并网变流器的阻抗模型,根据阻抗比判据分析了电网等值电感对并网变流器系统稳定性的影响,针对变流器对感性电网适应能力较低的问题,提出了一种基于带通滤波BPF(band-pass filter)的虚拟阻抗控制策略,进一步研究了虚拟电阻值对变流器弱电网适应能力的影响,给出了虚拟电阻的选取原则。基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略可显著提高变流器对弱电网的适应能力,而且算法简单、易于实现,在诸如有源滤波器、静止无功补偿器和光伏并网逆变器等系统中置入文中虚拟阻抗控制策略时所增加的运算量很小,且无需对现有设备的控制参数进行修改,也不需要增加额外的硬件资源,便于应用在并网变流器的研发和升级中。最后,仿真结果验证了文中理论分析的正确性和所提控制策略的有效性。

1 并网变流器的输出阻抗模型

考虑电网阻抗时并网变流器的主电路及控制原理如图1所示。

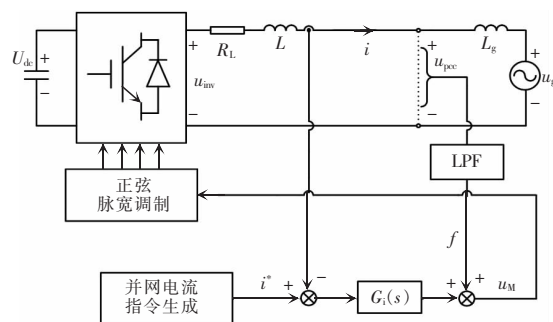


图1 考虑电网阻抗时并网变流器的主电路及控制原理

Fig. 1 Main circuit of grid-connected converter considering grid impedance and its control principle

其中: U_{dc} 为直流侧电压; u_{inv} 为变流器逆变输出电压; u_g 为电网电压; u_{pcc} 为并网点电压; L 为并网变流器的输出滤波电感; R_L 为其等值电阻; L_g 为电网等值电感,考虑到电网等值电阻可为系统提供一定的阻尼,有利于系统稳定,考虑到最恶劣情况,文中假设电网等值阻抗为纯感性^[18]; i 和 i^* 分别为并网电流及其参考值;图中 f 为改善系统启动性能而引入的电网电压前馈支路;LPF为电网电压采样前

置二阶低通滤波器。并网电流的参考值 i^* 与其实际值 i 做差后作为电流调节器 $G_i(s)$ 的输入, 电流调节器的输出与并网点电压相加后得到调制信号 u_M , 再与三角载波比较后产生各开关管的开关信号。

影响弱电网下并网变流器稳定性的因素较多, 比如锁相环和维持直流电压稳定的直流电压外环, 但考虑到在控制系统参数设计时通常锁相环和直流电压外环的穿越频率远小于电流内环, 此时两者与电流内环的耦合较小, 因此文中在分析弱电网下并网变流器的稳定性时忽略直流电压外环和锁相环的影响^[9]。根据图 1 可得以并网点电压 u_{pcc} 为扰动时并网变流器的电流控制框图如图 2 所示。

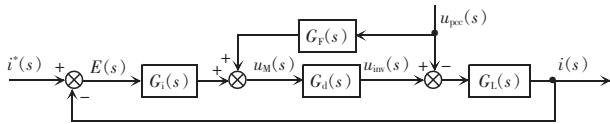


图 2 以并网点电压为扰动时并网变流器的电流控制框图

Fig. 2 Current control block diagram of grid-connected converter with PCC voltage as disturbance

目前常见的电流控制器主要有比例积分控制器、重复控制器以及比例谐振控制器。比例积分控制器在同步旋转坐标系下可以实现对交流量的无静差控制, 但在自然坐标系对交流量的稳态跟踪误差较大; 重复控制器在自然坐标系下对周期性交流信号具有较强的跟踪能力, 但其中存在的延时环节会影响到系统的快速性; 基于内模原理的谐振控制器在其谐振频率下具有很大的增益, 在自然坐标系下即可实现对谐振频率下交流信号较小的稳态跟踪误差, 近年来在并网变流器控制中得到广泛应用。考虑到谐振控制器对电网频率波动的适应能力, 本文采用具有一定带宽的准比例谐振控制器, 其传递函数为

$$G_i(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中: k_p 为比例系数; k_r 为谐振系数; ω_0 为谐振频率; ω_c 为控制器带宽。图 2 中 $G_d(s)$ 为数字控制和 PWM 比较所引入的延时, 在 PWM 采用一拍滞后装载模式下该环节引入的延时约为 1.5 个开关周期^[20], 可表示为

$$G_d(s) = e^{-1.5T_s} \approx \frac{1 - 0.75T_s s}{1 + 0.75T_s s} \quad (2)$$

式中, T_s 为采样时间。图 2 中 $G_L(s)$ 和 $G_F(s)$ 分别为并网变流器输出滤波器和电压采样二阶低通滤波器的传递函数, 具体表达式为

$$G_L(s) = \frac{1}{R_L + Ls} \quad (3)$$

$$G_F(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_f^2} s^2 + \frac{1}{Q_f \omega_f} s + 1} \quad (4)$$

式中: ω_f 为低通滤波器的截止频率; Q_f 为其品质因数。由图 2 可导出并网变流器的输出电流为

$$i = \frac{G_i(s) G_d(s) G_L(s)}{1 + G_i(s) G_d(s) G_L(s)} i^* - \frac{G_L(s) [1 - G_F(s) G_d(s)]}{1 + G_i(s) G_d(s) G_L(s)} u_{pcc} \quad (5)$$

由式(5)可得并网变流器的诺顿等效电路如图 3 所示。

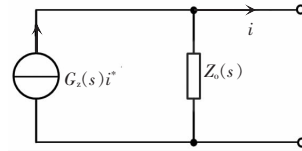


图 3 并网变流器的诺顿等效电路

Fig. 3 Norton equivalent circuit of grid-connected converter

图中 $G_z(s)$ 和 $Z_o(s)$ 的表达式分别为

$$G_z(s) = \frac{G_i(s) G_d(s) G_L(s)}{1 + G_i(s) G_d(s) G_L(s)} \quad (6)$$

$$Z_o(s) = \frac{1 + G_i(s) G_d(s) G_L(s)}{G_L(s) [1 - G_F(s) G_d(s)]} \quad (7)$$

由式(5)可知 $Z_o(s)$ 实际上反映了并网点电压 u_{pcc} 与并网电流 i 之比, 定义为并网变流器的输出阻抗。

2 电网等值电感对并网变流器稳定性的影响

采用阻抗比判据分析并网变流器系统的稳定性时可将变流器和电网分成 2 个子部分进行建模, 尤其是在分析多变流并网系统稳定性时, 可大幅简

化建模过程,目前在并网变流器系统稳定性分析中应用广泛。阻抗比判据指出并网变流器系统稳定的充要条件为^[21]:1)在理想电网下,即电网等值阻抗为零时并网变流器系统稳定;2)电网阻抗 $Z_g(s)$ 和式(7)给出的并网变流器的输出阻抗 $Z_o(s)$ 之比,即 $Z_g(s)/Z_o(s)$ 满足 Nyquist 判据,电网阻抗 $Z_g(s)$ 可表示为

$$Z_g(s) = L_g s \quad (8)$$

为了具体分析电网等值电感对并网变流器稳定性的影响,表 1 给出了文中并网变流器的主电路参数。根据表 1 所示的并网变流器主电路参数,综合考虑系统的快速性、稳态误差和对电网频率波动的适应能力,选择比例谐振控制器的参数为: $k_p=2$; $k_r=80$; $\omega_c=4\pi$; $\omega_0=100\pi$; 电网电压采样前置二阶低通滤波器 LPF 的截止频率取 2 kHz, 品质因数取 0.707。

表 1 并网变流器的主电路参数

Tab. 1 Main circuit parameters of grid-connected converter

电路参数	数值
电网电压 U_g/V	220
采样频率 f_s/Hz	9 600
额定功率 P_o/kW	22
滤波电感 L/mH	0.25
直流侧电容 $C/\mu F$	2 820
滤波电感等效电阻 R_l/Ω	0.01

实际中电网的强弱通常用短路比 SCR(short current ratio),即电网短路容量与装置额定容量之比来反映^[22],对于同一并网变流器,电网等值电感越大则 SCR 越小,说明电网越弱,反之则说明电网越强,短路比具体可表示为

$$SCR = [U_g^2 / (\omega_1 L_g)] / P_o \quad (9)$$

式中: U_g 为电网电压; ω_1 为电网角频率; P_o 为并网变流器额定容量。通常在控制系统参数设计时已保证并网变流器在理想电网情况下稳定,即阻抗比判据的第一个条件已经满足,此时分析变流器在含电网阻抗工况下的稳定性只需判断阻抗比判据的第二个条件是否满足。根据表 1 中给出的并网变流器主电路参数,结合式(8)和式(7)可得不同 SCR 下

阻抗比 $Z_g(s)/Z_o(s)$ 的 Nyquist 曲线及 $(-1,0)$ 点附近的放大图如图 4 所示。

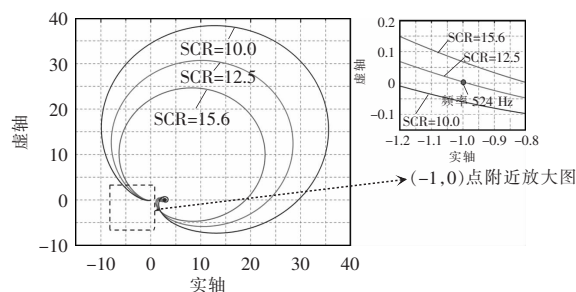


图 4 不同 SCR 下阻抗比的 Nyquist 曲线

Fig. 4 Nyquist plots of impedance ratio under different SCRs

图 4 表明,当 SCR=15.6 时,阻抗比的 Nyquist 曲线不包含 $(-1,0)$ 点,系统稳定。然而,随着 SCR 的减小,阻抗比的 Nyquist 曲线迅速向 $(-1,0)$ 点移动,说明并网变流器的稳定性随电网等值电感的增大迅速降低,当 SCR 减小至 12.5 时,阻抗比的 Nyquist 曲线穿越 $(-1,0)$ 点,此时系统开始进入不稳定状态,进一步分析表明 Nyquist 曲线在频率为 500 Hz 时穿越 $(-1,0)$ 点,说明系统失稳时的谐振频率在 500 Hz 附近。上述结果表明,随着电网等值电感的增大,并网变流器系统的稳定性迅速降低,即变流器对弱电网的适应能力较低,此时并网变流器所能适应的最小 SCR 为 12.5,并不能满足分布式电源并网标准要求的并网变流器应在短路比大于 10 工况下能够稳定运行的条件^[5]。

3 基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略

第 2 节的分析表明,传统控制下并网变流器对弱电网的适应能力较低。通过仿真研究发现,通过在并网点并联阻尼电阻可大幅提高并网变流器在弱电网下的稳定性,然而电网电压会在该电阻上产生电流从而引入较大的损耗,因此,为了提高变流器对弱电网的适应能力同时避免引入损耗,本文提出一种基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略,其控制原理如图 5 所示。

图中: R_v 为虚拟阻尼电阻的阻值; $G_B(s)$ 为允许基波通过的带通滤波器,其传递函数为

$$G_B(s) = \frac{\frac{\omega_b}{Q_b} s}{s^2 + \frac{\omega_b}{Q_b} s + \omega_b^2} \quad (10)$$

式中: ω_b 为 BPF 的中心角频率, 设置为基波角频率 100π ; Q_b 为其品质因数, 取 0.157。基于带通滤波的虚拟阻抗控制的具体思路为: 通过带通滤波器提取并网点电压中的基波成分, 再利用并网点电压减去其中的基波成分得到谐波成分, 最后将该谐波电压除以虚拟阻尼电阻 R_v 叠加至并网电流参考值上。这种做法使得虚拟阻尼电阻具有一定的“选频”特性, 即在基波频率下的阻值表现为

$$i = \frac{G_i(s)G_d(s)G_L(s)}{1+G_i(s)G_d(s)G_L(s)} i^* - \frac{R_v G_L(s) - R_v G_F(s)G_d(s)G_L(s) + G_F(s)G_d(s)G_i(s)[1-G_B(s)]}{R_v[1+G_i(s)G_d(s)G_L(s)]} u_{pcc} \quad (11)$$

由式(11)可知, 引入虚拟阻抗后并网变流器的输出阻抗为

$$Z_o(s) = \frac{R_v[1+G_i(s)G_d(s)G_L(s)]}{R_v G_L(s) - R_v G_F(s)G_d(s)G_L(s) + G_F(s)G_d(s)G_i(s)[1-G_B(s)]} \quad (12)$$

保持其他参数与第 2 节中相同, 根据式(12)可得, 在阻尼电阻为 10Ω , 即 $R_v=10$ 时, 不同 SCR 下阻抗比的 Nyquist 曲线及 $(-1, 0)$ 点附近的放大图如图 6 所示。

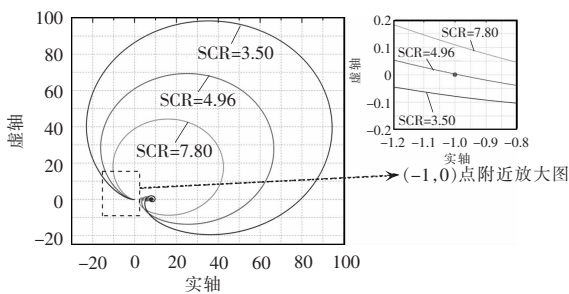


图 6 采用基于带通滤波的虚拟阻抗控制后不同 SCR 下阻抗比的 Nyquist 曲线

Fig. 6 Nyquist plots of impedance ratio under different SCRs with virtual impedance control based on band-pass filter

图 6 表明, 采用基于带通滤波的虚拟阻抗控制后, 随着 SCR 的减小, 阻抗比的 Nyquist 曲线向 $(-1, 0)$ 点的移动速度明显放缓, 并网变流器能够适应的最小短路比为 4.96, 说明变流器对弱电网的适应能力得到显著提高。

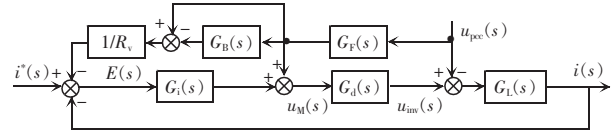


图 5 基于带通滤波的虚拟阻抗控制原理

Fig. 5 Principle of virtual impedance control based on band-pass filter

无穷大, 避免基波电压产生不必要的电流, 同时在谐波电压下的阻值为 R_v , 为系统提供阻尼, 抑制系统失稳引发的振荡。

根据图 5 可导出引入虚拟阻抗后并网变流器的输出电流为

需要指出的是, 虚拟阻尼电阻 R_v 的取值对阻尼控制效果有着重要影响, 为了进一步分析 R_v 对阻尼控制效果的影响, 图 7 给出了不同 R_v 下变流器能够适应的最小 SCR。

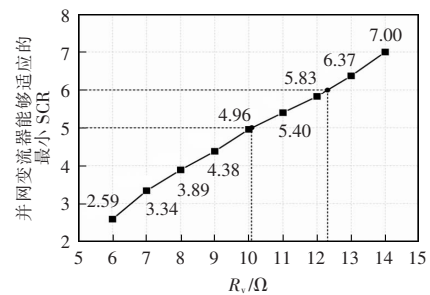


图 7 不同 R_v 下并网变流器能够适应的最小 SCR

Fig. 7 Minimum SCR that the grid-connected converter can adapt to under different values of R_v

由图 7 可见, 变流器对弱电网的适应能力随 R_v 的减小而增强, 且两者近似呈线性关系。需要注意的是, 当电网电压中含有背景谐波时, 该谐波电压同样会在 R_v 上产生不必要的谐波电流, 较小的 R_v 意味着系统对电网电压背景谐波扰动的抑制能力降低, 因此虚拟阻尼电阻应在满足变流器弱电网适应能力的前提下尽可能取大值, 以便最小限度地

牺牲系统对背景谐波电压扰动的抑制能力,比如要求变流器能够适应的最小 SCR 为 5,首先在图 7 中作纵坐标为 5 的水平线,该水平线与图中关系曲线交点的横坐标即为虚拟电阻 R_V 可取的最大值。根据满足弱电网适应能力前提下虚拟阻抗电阻尽可能取大值的原则,由图 7 可知,此时可选择 $R_V=10 \Omega$,同理,若要求变流器能够适应的最小 SCR 为 6,可选择 $R_V=12.3 \Omega$ 。

4 仿真结果

为了验证文中理论分析的正确性和基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略的有效性,在 PLECS 下搭建了系统仿真模型,仿真中主电路和控制参数均与文中所给出的值相同。图 8 给出了采用传统控制策略时不同 SCR 下的仿真结果。

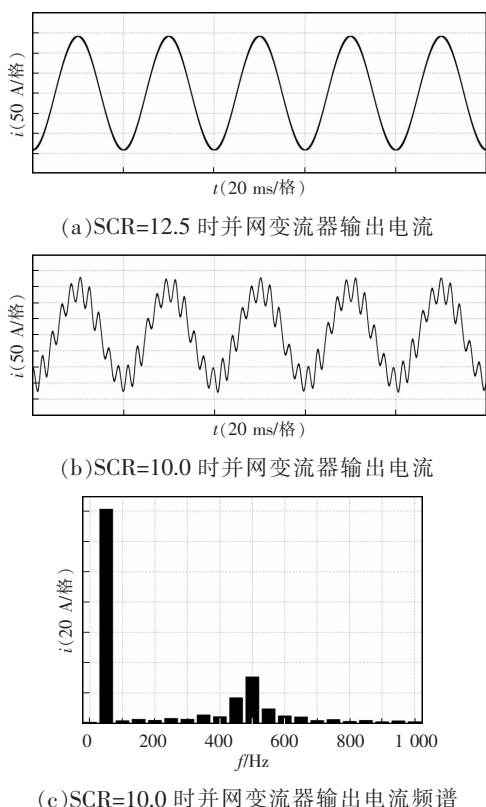


图 8 采用传统控制策略时不同 SCR 下的仿真结果

Fig. 8 Simulation results under different SCR values with traditional control strategy

图 8(a)表明,在电网较强,即 SCR=12.5 时,并网变流器的输出电流正常,电流 THD 为 1.5%。由

图 8(b)可知,当 SCR 下降至 10 时,并网变流器输出电流出现大幅振荡,电流 THD 高达 20.2%,系统呈现出不稳定状态。图 8(c)的进一步分析表明此时输出电流的振荡频率在 500 Hz 附近,这与前文图 4 中的分析结果一致。

保持其他参数相同,取 $R_V=10 \Omega$,图 9 给出了采用基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略时不同 SCR 下的仿真结果。可见,引入虚拟阻抗控制后并网变流器在 SCR 为 10 和 5 时均能稳定运行,这符合文中第 3 节的理论分析结果。分析表明,并网变流器在 SCR 为 10 和 5 时输出电流的 THD 分别为 1.3%和 0.8%,可见,系统稳定时相同负载下 SCR 越小输出电流的 THD 越小,这主要是因为较小的 SCR 对应较大的电网等值电感,其滤波作用使得输出电流中的开关纹波减小,因此总谐波畸变率越小。

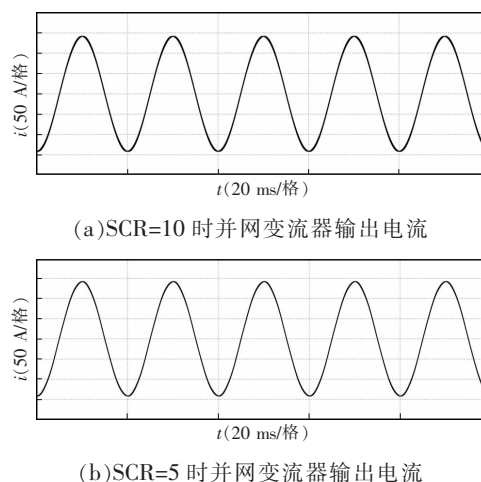


图 9 采用基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略时不同 SCR 下的仿真结果

Fig. 9 Simulation results under different SCR values with virtual impedance control strategy based on band-pass filter

为了观察引入虚拟阻抗控制后对系统动态响应的影响,图 10 给出了 SCR=15 工况下引入虚拟阻抗控制前后并网变流器输出电流由半载阶跃变化至满载时的暂态过程。结果表明,引入虚拟阻抗控制前后系统的上升时间基本相同,均为 0.5 ms,但引入虚拟阻抗控制后系统的调节时间大幅减小,由 23 ms 减小至 7.3 ms,这说明引入虚拟阻抗控制后不仅提高了系统的稳定性,而且不会影响到系统

的响应速度。

上述仿真结果表明,传统控制策略下随着 SCR 的减小,并网变流器系统的稳定性迅速降低,引入基于带通滤波的虚拟阻抗控制后,并网变流器对弱电网的适应能力显著增强,验证了文中理论分析的正确性和所提虚拟阻抗控制策略的有效性。

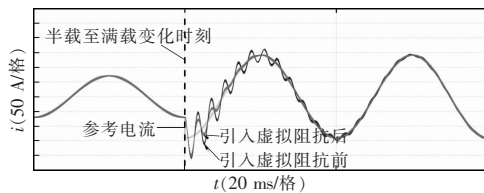


图 10 引入虚拟阻抗控制策略前后的动态响应对比

Fig. 10 Comparison of dynamic response with and without the virtual impedance control strategy

5 结论

本文首先建立了并网变流器的阻抗模型,根据阻抗比判据分析了电网等值电感对并网变流器系统稳定性的影响;然后,针对传统控制下变流器的弱电网适应能力较低的问题,提出了基于带通滤波的虚拟阻抗控制策略,该控制策略可显著提高变流器在弱电网下的稳定性,而且算法简单易于实现;最后,仿真结果验证了文中理论分析的正确性和所提控制策略的有效性,基于上述结果得出以下结论。

(1) 电网等值电感对并网变流器的稳定性有较大影响,并网变流器系统的稳定性随着电网等值电感的增大而降低。

(2) 通过将并网点电压与带通滤波器所提取的并网点电压中的基波分量作差,再除以虚拟电阻系数后叠加至并网电流参考值上,可在保证系统快速性的同时显著提高变流器对弱电网的适应能力。

(3) 在基于带通滤波的虚拟阻抗控制下,变流器所能适应的最小 SCR 随着阻尼电阻值的减小而减小,且两者近似呈线性关系。

(4) 阻尼电阻值的选择需综合考虑变流器的弱电网适应能力和系统对背景谐波电压扰动的抑制能力,在满足变流器所能适应的最小 SCR 前提下

应尽可能取大值,从而最小限度地牺牲系统对背景谐波电压扰动的抑制能力。

参考文献:

- [1] 吕佃顺, 许洪华, 马强, 等. 直驱变流器接入弱电网次同步振荡机理分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 423-429.
Lü Dianshun, Xu Honghua, Ma Qiang, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation mechanism of direct-drive wind turbine inverter connected to weak power system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(5): 423-429 (in Chinese).
- [2] Xia Yanghong, Yu Miao, Wang Xiaoming, et al. Describing function method based power oscillation analysis of LCL-filtered single-stage PV generators connected to weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8724-8738.
- [3] 陶海东, 胡海涛, 朱晓娟, 等. 车网耦合下的牵引供电系统谐振不稳定机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2315-2324.
Tao Haidong, Hu Haitao, Zhu Xiaojuan, et al. Mechanism on resonance instability of traction power supply system considering interaction between trains and networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2315-2324 (in Chinese).
- [4] 张前进, 周林, 李海啸, 等. 考虑 SVG 补偿装置的大型光伏并网系统振荡分析与抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2636-2643.
Zhang Qianjin, Zhou Lin, Li Haixiao, et al. Oscillation analysis and suppression of large-scale grid-connected photovoltaic system considering SVG equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2636-2643 (in Chinese).
- [5] 国家电网公司企业标准 Q/GDW 617-2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
State Grid Corporation of China. Q/GDW 617-2011 Technical rule for photovoltaic power station connected to power grid [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011 (in Chinese).
- [6] 郭超, 杨洪耕. 考虑弱电网下逆变器稳定性的 LCL 滤波器参数优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 949-956.
Guo Chao, Yang Honggeng. Optimized LCL-filter design considering stability of grid-connected inverters in weak grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 949-956

- (in Chinese).
- [7] Zhang Zhiheng, Wu Weimin, Shuai Zhikang, et al. Principle and robust impedance-based design of grid-tied inverter with LLCL-filter under wide variation of grid-reactance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4362-4374.
- [8] 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): 139-146.
- 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): 139-146 (in Chinese).
- [9] Zhu Donghai, Zhou Shiyang, Zhou Xudong, et al. Improved design of PLL controller for LCL-type grid-connected converter in weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4715-4727.
- [10] 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): 2647-2656.
- 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): 2647-2656 (in Chinese).
- [11] 郑晨, 周林, 解宝, 等. 基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波抑制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 85-96.
- Zheng Chen, Zhou Lin, Xie Bao, et al. The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 85-96 (in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 刘乐, 同向前, 杨树德, 等. 提高弱电网下逆变器稳定性
- 的前馈控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(1): 65-68.
- Liu Le, Tong Xiangqian, Yang Shude, et al. A feedforward control strategy for inverter to improve its stability in weak grid [J]. Power Electronics, 2019, 53(1): 65-68 (in Chinese).
- [14] 滕宇, 王学华, 余辉, 等. 提高 LCL 型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的阻抗调节方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊): 197-204.
- Teng Yu, Wang Xuehua, Yu Hui, et al. A grid impedance shaping method to improve robustness of LCL-type grid-connected inverter against grid impedance variation [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (Suppl): 197-204 (in Chinese).
- [15] Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede, Liserre Marco, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318-3329.
- [16] 涂春鸣, 高家元, 赵晋斌, 等. 弱电网下具有定稳定裕度的并网逆变器阻抗重塑分析与设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1327-1335.
- Tu Chunming, Gao Jiayuan, Zhao Jinbin, et al. Analysis and design of grid-connected inverter impedance remodeling with fixed stability margin in weak grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1327-1335 (in Chinese).
- [17] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(二): 基于阻抗重塑的宽频带振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6908-6920.
- Li Guanghui, Wang Weisheng, Liu Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid(Part II): Suppression method of wideband oscillation based on impedance reshaping [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6908-6920 (in Chinese).
- [18] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
- Wu Heng, Ruan Xinbo, Yang Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268 (in Chinese).

- [19] Jia Lei, Ruan Xinbo, Zhao Wenxin, 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.
- [20] Zhou Shiyang, Zou Xudong, Zhu Donghai, 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.
- [21] 杨苓, 陈燕东, 罗安, 等. 多机并网系统的两带阻滤波器高频振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2242-2252.
Yang Ling, Chen Yandong, Luo An, et al. High-frequency oscillation suppression method by two notch filters for multi-inverter grid-connected system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2242-2252 (in Chinese).
- [22] 刘桂花, 曹小娇, 王卫. 弱电网下单相光伏并网逆变器锁频环同步方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 5022-5028.
Liu Guihua, Cao Xiaojiao, Wang Wei. A frequency locked loop grid synchronization method of single-phase grid-con-

nected PV inverter under weak grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 5022-5028 (in Chinese).



杨树德

作者简介:

杨树德(1986-),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,讲师。研究方向:可再生能源发电系统并网控制及稳定性分析。E-mail:358060069@qq.com。

李旺(1996-),男,硕士研究生。研究方向:弱电网下并网变流器系统的稳定性分析与增强控制。E-mail:735987495@qq.com。

张新闻(1976-),男,博士,副教授。研究方向:电能质量控制技术。E-mail:cindazm@126.com。

蔡长虹(1965-),男,高级工程师。研究方向:机电工程与智能配电网。E-mail:yzcch8128@sina.com。

高雄鹰(1970-),男,副高级工程师。研究方向:机电工程与智能电网。E-mail:yzgaoxy@163.com。

周鑫(1983-),男,本科,工程师。研究方向:电子信息与智能电网。E-mail:zhouxin_cn@163.com。