

弱电网 APF 系统稳定性分析及有源阻尼方法

刘兴龙¹, 谢懿晗², 杨子阳¹, 张志龙², 易皓², 卓放²

(1. 云南电网有限责任公司 计量中心, 云南 昆明 650051;

2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:有源电力滤波器(APF)被广泛应用于电力系统谐波的动态补偿。然而在弱电网条件下, APF、非线性负载与电网线路阻抗间的交互容易引发补偿频率附近谐波振荡的稳定性问题, 导致 APF 谐波补偿失效, 系统的电能质量进一步恶化。通过对 APF 系统环路的小信号建模, 揭示了弱电网 APF 系统的谐波振荡机理, 并根据稳定性分析结论提出了一种基于电感电流反馈的有源阻尼方法抑制了这类谐波振荡, 从而保证了 APF 在弱电网条件下稳定的谐波补偿能力。该方法的有效性经 PLECS 时域仿真及硬件平台实验得以验证。

关键词:有源电力滤波器; 弱电网; 小信号建模; 稳定性分析; 有源阻尼

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd25531

Stability Analysis and Active Damping Scheme for APF System Under Weak Grid Condition

LIU Xinglong¹, XIE Yihan², YANG Ziyang¹, ZHANG Zhilong², YI Hao², ZHUO Fang²

(1. Measurement Center, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Active power filters (APF) are widely used for dynamic compensation of power system harmonic. However, under weak grid conditions, the interaction between APF, nonlinear loads and grid impedance can easily lead to the stability issue of harmonic oscillation around the compensation frequency, resulting in the fault of harmonic compensation and further deterioration of the system's power quality. Through small-signal modelling of the loop, the harmonic oscillation mechanism in APF system under weak grid conditions was revealed, and an active damping scheme based on inductor current feedback was proposed to suppress harmonic oscillation according to the conclusion of stability analysis, which ensures the stable harmonic compensation capability of APF under weak grid conditions. The effectiveness of the proposed scheme was verified by PLECS time-domain simulations and hardware platform experiments.

Key words: active power filter (APF); weak grid; small-signal modeling; stability analysis; active damping

有源电力滤波器(active power filter, APF)作为一种功能型并网变流器,被广泛应用于动态抑制电力系统谐波、补偿无功等场景^[1-3]。然而,随着近年来新能源渗透率的上升,配电网的弱电网化趋势愈发明显,这加剧了线路阻抗与并网变流器之间的交互特性^[4-7]。在弱电网条件下,由 APF 有源控制环节、非线性负载及线路阻抗构成的并网系统存在复杂的交互影响,从而降低了系统的稳定性^[8-9]。

现阶段关于 APF 系统稳定性问题的研究内

容较为丰富。文献[10]研究了 LCL 型 APF 系统存在的高频谐振问题,并分析了 LCL 无源谐振峰频移对系统稳定性的影响。文献[8, 11-14]关注到 APF 动态补偿非线性负载产生的谐波过程中因交互而引发的谐波振荡现象,并通过建模分析了这类稳定性问题的诱因。在此基础上,文献[15]进一步考虑直流侧电压对环路稳定性的影响,提出了在不影响谐波补偿稳定性前提下直流电压控制环的带宽提升方案。文献[9]则从多 APF 并网的交互影响入手,分析了交互影响程度与控制

基金项目:南方电网公司科技项目(YNKJXM20222155)

作者简介:刘兴龙(1984—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电能计量、计量自动化、数字电网,Email:215638848@qq.com

通讯作者:谢懿晗(2000—),男,博士研究生,主要研究方向为并网变流器建模与稳定性分析,Email:chaixyh@stu.xjtu.edu.cn

回路参数及弱电网等效电感间的定量关系。

针对上述稳定性问题,文献[12]提出通过降低 APF 谐波补偿比例抑制谐波振荡的方法,但该方法降低了稳态下的谐波补偿效果,且仅适用于分次检测补偿控制模式的 APF 系统^[16]。文献[17]首次提出了阻性有源电力滤波器(resistive active power filter, R-APF)的概念,其通过有源控制塑造具有阻尼端口特性的并网变流器,有效抑制了电网潜在的背景谐波放大现象并阻止振荡传播。在 R-APF 的基础上,众多学者开展了有源阻尼器的相关研究^[18-20]。文献[19]设计了有源阻尼器自适应阻尼输出的调控方案,以确保功率损耗最小化;文献[20]兼顾了稳态下 APF 的动态谐波补偿功能,提出了对 APF 进行模态切换以实现高频谐振的阻尼控制策略。但这些研究并未计及 APF、线网阻抗与非线性负载三者间的“源-网-荷”动态交互影响,且有源阻尼器的接入使系统多设备间的宽频交互特性变得更为复杂,现阶段仍难以在工程实际中推广^[21]。文献[22-24]研究了基于状态量反馈的并网变流器有源阻尼方法,其有效地抑制了弱电网 LCL 无源滤波网络诱发的高频振荡,尽管现有的有源阻尼方法未涉及 APF 系统动态交互的稳定性问题,但为抑制 APF 系统谐波振荡提供了思路。

本文针对网侧电流检测电流源型 APF 装置,首先建立 APF 系统“源-网-荷”交互的小信号模型,通过对系统环路做稳定性分析揭示弱电网条件下谐波振荡的产生机理。在谐波稳定性分析结论的基础上,提出并设计了一种基于电感电流反馈的有源阻尼方法用以抑制 APF 系统动态交互所引发的谐波振荡,从而确保 APF 能够稳定地补偿非线性负载产生的谐波电流。最后,本文通过 PLECS 时域仿真和硬件平台实验进一步验证了该有源阻尼方法的有效性。

1 APF 系统小信号建模

1.1 APF 控制原理简述

本文以网侧电流检测的电流源型 APF 装置作为分析对象,考虑典型的二极管整流器作为非线性负载,该系统结构如图 1 所示。其中, u_g, u_{dc} 分别为网侧并联点电压和 APF 直流侧电压; i_g, i_L 和 i_c 分别为网侧输出电流、负载电流和 APF 输出电流; L_g, R_g 分别为网侧线路电感及电阻; C_{PFC} 为并联点补偿电容,主要用作并网点功率因数校正;

L_c, C_{dc} 分别为 APF 端口输出侧电感和直流侧电容。考虑将二极管整流器作为非线性负载,其中, L_d, C_d 和 R_d 分别为负载直流侧电感、电容和电阻。

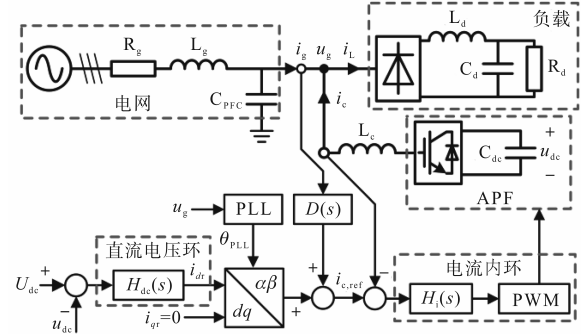


图1 电流源型 APF 系统结构

Fig.1 Structure of current-source-based APF system

APF 采用电流源型并网变流器控制方法,其输出电流参考值 $i_{c,ref}$ 由两部分生成:1)经直流电压环控制输出的合成分量;2)网侧电流中提取出的谐波电流分量。 $i_{c,ref}$ 与 i_c 作差后经电流内环控制生成 PWM 调制波,最终输出抵消非线性负载谐波的补偿电流。

为了实现快速的动态响应性能以及对指令值的无差跟踪效果,对直流电压环 $H_{dc}(s)$ 采用比例-积分(proportion-integrator, PI)控制。对于电流内环 $H_i(s)$,为了无静差跟踪特征次谐波,减少坐标旋转变换次数,故采用比例-谐振(proportion-resonance, PR)控制。于是, $H_{dc}(s)$ 和 $H_i(s)$ 的表达式分别为

$$H_{dc}(s) = K_{Pdc} + K_{Idc} \frac{1}{s} \quad (1)$$

$$H_i(s) = K_{Pi} + \sum_k \frac{K_{Ri,k}}{s - jk\omega_1} \quad (2)$$

式中: K_{Pdc}, K_{Idc} 分别为 $H_{dc}(s)$ 的比例系数和积分系数; $K_{Pi}, K_{Ri,k}$ 分别为 $H_i(s)$ 的比例系数和 k 次谐振系数。

为了补偿二极管整流器产生的谐波,设置 $k=-5, 7, -11, 13$ 。

此外, $D(s)$ 可以被设计为在基波处具有陷波特性的控制器,用以滤除基波分量的影响,从而提取谐波分量。通常还需对提取的谐波分量作进一步放大以提升补偿性能和谐波外环的控制带宽^[25],于是 $D(s)$ 表达式为

$$D(s) = K_d \cdot \frac{s - j\omega_1}{s - j\omega_1 + N_d} \quad (3)$$

式中: K_d 为谐波外环的比例系数; N_d 为陷波器的

作用带宽。

为保证陷波深度且不影响环路在其它频段的频率特性,陷波器作用带宽通常设置为1 Hz左右,即 $N_d=1 \times 2\pi$ 。

1.2 APF小信号模型

根据上述分析,APF可以被描述为采用双闭环控制结构的电流源型并网变流器,其小信号建模方法与一般的并网变流器类似。由于APF直流侧电容 C_{dc} 通常较大,使得直流电压环相较于电流内环对APF整体环路的影响很小,从而可忽略不计^[26]。APF电流内环控制的闭环结构可由如图2所示的框图表示。

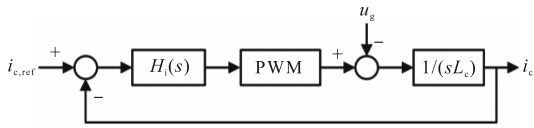


图2 APF电流内环控制框图

Fig.2 Control diagram of current inner loop of APF

由于PR控制的无静差特性,系统达到控制稳态时,可认为参考值 $i_{c,ref}$ 与输出值 i_c 具有相同的稳态分量,故系统输入的小信号波动量可以由 i_c 的小信号分量 \hat{i}_c 表示。在不考虑直流电压外环的情况下,电流内环可以视作一个多输入单输出(multi-input single-output, MISO)系统,其中输入变量小信号为 $[\hat{i}_c, \hat{u}_g]$,输出变量小信号为 $[\hat{i}_c]$ 。于是,该MISO系统的小信号传输关系为

$$\hat{i}_c = G_i(s)\hat{i}_c + Y_i(s)\hat{u}_g \quad (4)$$

式中: $G_i(s)$ 为电流内环的闭环传递函数; $Y_i(s)$ 为APF的等效端口导纳。

考虑PWM调制所引起的数字控制延时为开关周期的1.5倍,即 $T_d=1.5T_s$,则可推导出 $G_i(s)$ 和 $Y_i(s)$ 的传递函数分别为

$$G_i(s) = \frac{H_i(s)e^{-T_d s}}{sL_c + H_i(s)e^{-T_d s}} \quad (5)$$

$$Y_i(s) = \frac{1}{sL_c + H_i(s)e^{-T_d s}} \quad (6)$$

由式(5)可以看出,由于数字控制延时环节的存在,APF的电流内环事实上是一个非最小相位系统。然而在实际应用场景中,APF开关器件的开关频率通常设置的较高(通常高于10 kHz),在谐波频段该延时环节所引起的相位滞后很小,因此可以忽略数字控制延时对谐波稳定性的影响而将APF的电流内环作为最小相位系统分析。

1.3 APF系统环路模型

从图1所示的系统结构可以看出,当APF工

作于谐波补偿状态时,其与电网和非线性负载之间构成一个整体的闭合环路。将三相交流电网看作理想电压源置零做小信号分析,在零输入条件下该环路具有如下传输关系:

$$\begin{cases} \hat{u}_g = -Z_g(s)\hat{i}_g \\ \hat{i}_L = Y_L(s)\hat{u}_g \\ \hat{i}_c = D(s)G_i(s)\hat{i}_g \\ \hat{i}_g + \hat{i}_c + (-\hat{i}_L) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Z_g(s)$ 为网侧线路阻抗在复频域下的传递函数; $Y_L(s)$ 为非线性负载等效端口导纳。

根据RLC元件的复频域参数模型可直接得出 $Z_g(s)$ 的表达式为

$$Z_g(s) = \frac{R_g + sL_g}{1 + sR_g C_{PFC} + s^2 L_g C_{PFC}} \quad (8)$$

对于非线性负载的端口导纳模型,文献[27]提出了采用谐波线性化的二极管整流器阻抗建模方法,基于该模型可得到 $Y_L(s)$ 的表达式为^[8,26]

$$Y_L(s) = [9Y_d(s - j\omega)]/\pi^2 \quad (9)$$

式中: $Y_d(s)$ 为二极管整流器直流侧导纳在复频域下的传递函数。

同样地,可根据RLC元件的复频域参数模型直接得出其表达式为

$$Y_d(s) = \frac{1 + sR_d C_d}{R_d + sL_d + s^2 R_d L_d C_d} \quad (10)$$

联立小信号传输关系式(4)和式(7),上述APF系统模型可由如图3所示的环路描述。

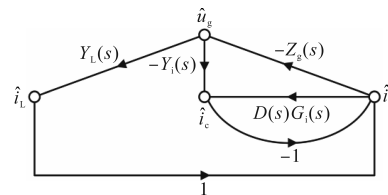


图3 APF系统小信号环路

Fig.3 Small-signal loop of APF system

根据梅森环路增益公式,图3所示APF系统环路的特征方程为

$$\Delta = 1 + Z_g(s)Y_L(s) + Z_g(s)Y_i(s) + D(s)G_i(s) \quad (11)$$

为了得到系统的稳定性判据,令 $\Delta = 0$,则式(11)的特征方程可以被进一步表示为

$$\Delta = 1 + T(s) = 0 \quad (12)$$

$$T(s) = \frac{Z_g(s)Y_L(s)}{1 + Z_g(s)Y_i(s) + D(s)G_i(s)} \quad (13)$$

式中: $T(s)$ 为APF系统的环路增益。

由此,APF系统“源-网-荷”间的交互特性已

通过小信号环路充分表征,下一步将对该系统作稳定性分析。

2 弱电网 APF 系统稳定性分析

将 APF 系统环路作为最小相位系统作分析,根据广义奈奎斯特判据,闭环系统的右半平面极点个数可由奈奎斯特曲线判定。

为明确交互部分的影响,对于式(13)表示的环路增益,可将其进一步拆分为

$$T(s) = T_p(s)T_A(s) \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} T_p(s) = Z_g(s)Y_L(s) \\ T_A(s) = \frac{1}{1 + Z_g(s)Y_i(s) + D(s)G_i(s)} \end{cases}$$

式中: $T_p(s)$ 为环路增益的无源环节,该环节表征了电网线路阻抗与非线性负载之间的交互作用; $T_A(s)$ 为环路增益的有源环节,该环节表征了电网线路阻抗与 APF 内环有源控制之间的交互作用以及 APF 自身的有源特性。

于是,APF 系统环路可分别从 $T_p(s)$ 和 $T_A(s)$ 两个环节展开分析,明确弱电网条件下各环节对系统稳定性的影响。

2.1 无源环节的影响

由 $T_p(s)$ 的表达式可以看出,网侧线路阻抗 $Z_g(s)$ 和非线性负载端口导纳 $Y_L(s)$ 决定了该环节对系统环路特性的影响。根据短路容量比(short circuit ratio, SCR)的定义,随着网侧线路阻抗幅值的增大,SCR 将减小,与此同时弱电网特性愈发显著^[4]。由于配电网线损通常较小,此时电感参数 L_g 将主导 $Z_g(s)$ 的频率特性。

图4所示的伯德图反映了网侧线路电感 L_g 增大对无源环节 $T_p(s)$ 频率特性的影响。结合式(8)

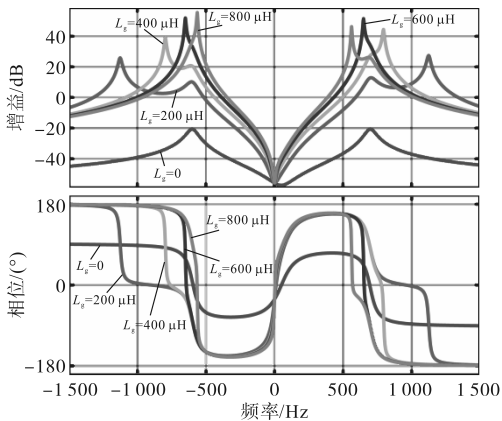


图4 不同 L_g 取值下 $T_p(s)$ 的伯德图

Fig.4 Bode plot of $T_p(s)$ with varying values of L_g

和式(10)的二阶传递函数可知, $Z_g(s)$ 和 $Y_L(s)$ 分别存在某特定频率附近的无源谐振峰。在弱电网条件下, $Z_g(s)$ 在中高频段的增益幅值显著增大,同时无源谐振峰也随着 L_g 的增大向低频方向移动。当二者无源谐振峰相近时(如 $L_g=600 \mu\text{H}$),在该频率附近 $T_p(s)$ 将呈现出高增益、高相位滞后的特点,从而进一步地影响 APF 系统的整体环路特性。

2.2 有源环节的影响

弱电网对有源环节 $T_A(s)$ 的影响体现在网侧线路阻抗 $Z_g(s)$ 与 APF 的等效端口导纳 $Y_i(s)$ 之间的交互上。如图5所示,由于 APF 电流内环 PR 控制器在谐波补偿频率处的无穷增益, $T_A(s)$ 在谐波补偿频率附近呈现出陷波特性和同时引入 -180° 的相位滞后。同时, $Z_g(s)$ 的无源谐振峰在 $T_A(s)$ 中表现为特定频率附近的陷波谷,在弱电网条件下随着 L_g 的增大该陷波谷向低频方向移动。显然,弱电网特性对 $T_A(s)$ 仅起到额外陷波及辅助相位变化的影响,因此认为 APF 的内环控制主导了 $T_A(s)$ 的特性。

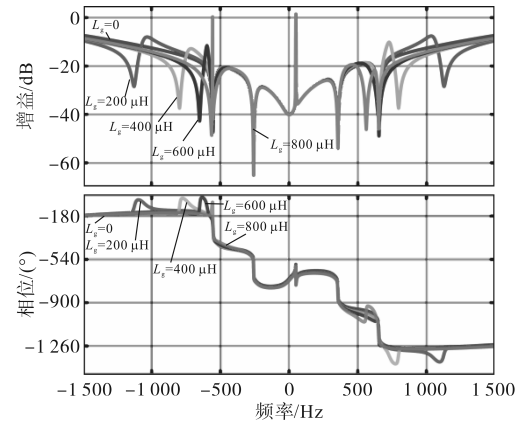


图5 不同 L_g 取值下 $T_A(s)$ 的伯德图

Fig.5 Bode plot of $T_A(s)$ with varying values of L_g

综上所述,有源环节对 APF 系统整体环路的影响主要体现在谐波补偿频率附近的陷波特性和低增益及高相位滞后,而该相位滞后将成为影响系统稳定性的主要因素。

2.3 弱电网 APF 系统谐波振荡机理

根据上述分析可知,弱电网条件下 APF 系统潜在的稳定性问题主要有两个来源,分别为:1)弱电网线路阻抗与非线性端口导纳的无源谐振峰耦合,提供特定频段的高增益;2)APF 内环有源控制在谐波补偿频率处的 -180° 相位跳变。此外,当无源谐振峰靠近谐波补偿频率时, $T_p(s)$ 的高相位滞后区域与 $T_A(s)$ 的 -180° 相位跳变重合,

进一步加剧了系统的稳定性问题。

设置APF系统参数为: $R_g=0.03\ \Omega, L_g=600\ \mu\text{H}, C_{\text{PFC}}=100\ \mu\text{F}, R_d=20\ \Omega, L_d=600\ \mu\text{H}, C_d=100\ \mu\text{F}, L_c=400\ \mu\text{H}, K_{\text{pi}}=0.12, K_{\text{Ri},k}=30, K_d=100, N_d=4\times 2\pi$,可得 $T(s)$ 的伯德图及其不稳定区间奈奎斯特图如图6所示。

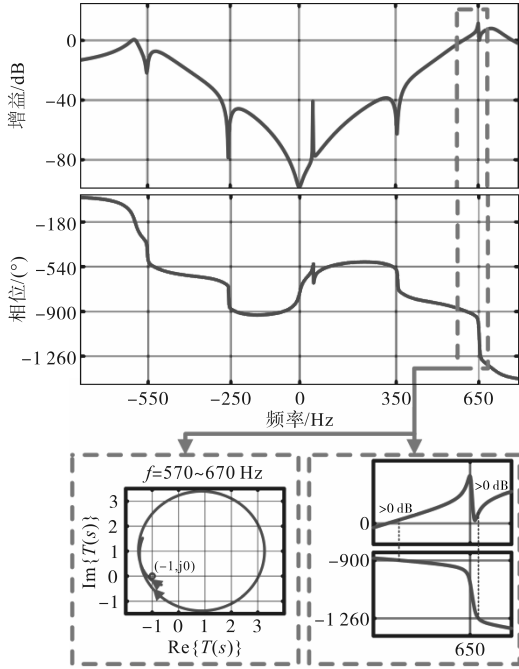


图6 不稳定条件下 $T(s)$ 的伯德图及奈奎斯特图

Fig.6 Bode/Nyquist plot of $T(s)$ under unstable condition

归根结底,这类不稳定是APF开启有源谐波控制后与弱电网线路阻抗及非线性负载等无源环节交互作用产生的,最终致使谐波补偿无法达到稳态而持续振荡。尽管这类谐波振荡的产生依赖于线网及负载参数,但受限于参数的不可控性以及弱电网条件下存在无源谐振峰的客观性,单一的参数调整手段难以确保系统的稳定性。因此有必要借助控制优化的方案来阻尼系统的谐波振荡。

3 谐波振荡有源阻尼方法

3.1 有源阻尼方案设计

上述分析表明,在系统外部因素不可控的条件下,APF电流内环在谐波补偿频率谐振控制引起的 -180° 相位跳变是导致不稳定的重要因素之一,因此对内环特性进一步改造,取消闭环极点是提升系统稳定性的关键。

基于状态量反馈的有源阻尼思想,将APF输出电流作反馈控制,其控制结构如图7所示。

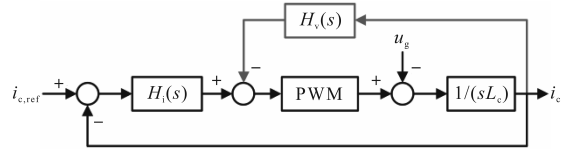


图7 加入电感电流反馈的APF电流内环控制框图

Fig.7 Control diagram of current inner loop of APF with inductor current feedback

等效地看,反馈通道传递函数 $H_v(s)$ 起到了APF端口电感额外串联阻尼的作用,从而改造了内环特性。此时,APF电流内环闭环传递函数 $G_{iv}(s)$ 及其等效端口导纳 $Y_{iv}(s)$ 的表达式分别为

$$G_{iv}(s) = \frac{H_i(s)e^{-T_d s}}{sL_c + [H_i(s) + H_v(s)]e^{-T_d s}} \quad (15)$$

$$Y_{iv}(s) = \frac{1}{sL_c + [H_i(s) + H_v(s)]e^{-T_d s}} \quad (16)$$

为保证 $H_v(s)$ 的阻尼性质,首先应使 $H_v(s)$ 具有正实部的阻尼项。尽管阻尼项虚部的引入增强了相位特征调节的灵活性,但考虑到交互环路的相频特性已经十分复杂,其引入可能造成系统稳定性在外部条件发生变化时难以维持,故舍弃虚部而将 $H_v(s)$ 的阻尼项设置为正实数。此外,为了避免SPWM出现过调制,同样地需为 $H_v(s)$ 配置基波处的陷波器。于是, $H_v(s)$ 的表达式为

$$H_v(s) = R_v(s - j\omega_1)/(s - j\omega_1 + N_v) \quad (17)$$

式中: R_v 为阻尼参数; N_v 为反馈通道基波陷波器的作用带宽。

其参数设置思路与 $D(s)$ 相似。

3.2 有源阻尼稳定机理分析

由于电流内环特性的改变不会影响系统环路增益的无源环节,因此只需分析阻尼参数 R_v 对有源环节的影响。引入电感电流反馈后有源环节 $T_{Av}(s)$ 的表达式为

$$T_{Av}(s) = \frac{1}{1 + Z_g(s)Y_{iv}(s) + D(s)G_{iv}(s)} \quad (18)$$

图8绘制了不同 R_v 取值下 $T_{Av}(s)$ 的伯德图。可以看出电感电流反馈的引入阻尼了有源环节在谐波补偿频率处的增益尖峰,这也进一步改变了相位在谐波补偿频率附近的穿越方向,即由原先的向下 -180° 跳变穿越变为向上穿越。随着 R_v 的增大,受阻尼效应影响的频率点也越多,最终 $T_{Av}(s)$ 的相位不再发生 -180° 跳变而被约束在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 范围内(如 $R_v=2.0$ 时)。

同理,引入电感电流反馈后系统环路增益可以表示为 $T_v(s)=T_p(s)T_{Av}(s)$,于是得到不同 R_v 取

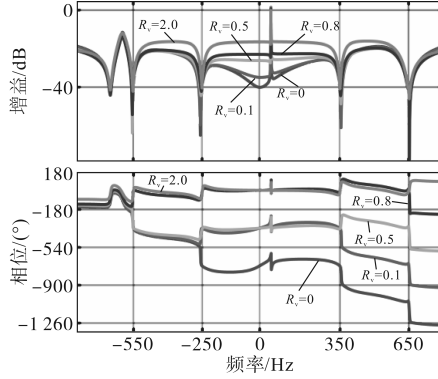
图8 不同 R_v 取值下 $T_{Av}(s)$ 的伯德图

Fig.8 Bode plot of $T_{Av}(s)$ with varying values of R_v . 值下 $T_v(s)$ 的伯德图如图9所示。可以看出若 R_v 过小(如 $R_v=0.1$ 时), $T_v(s)$ 在650 Hz附近尚存在正增益穿越 -180° 的区间,系统仍不稳定。而 R_v 过大则增加了APF上的能量耗散^[20],故根据 $T_v(s)$ 的伯德图可选择 $R_v=0.5$ 作稳定性分析。

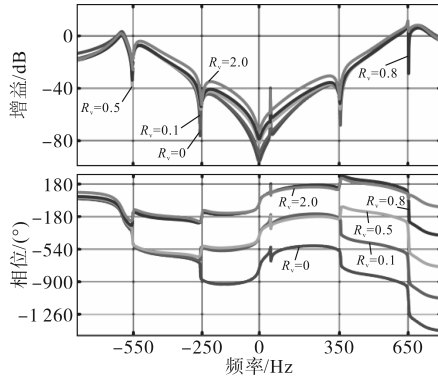
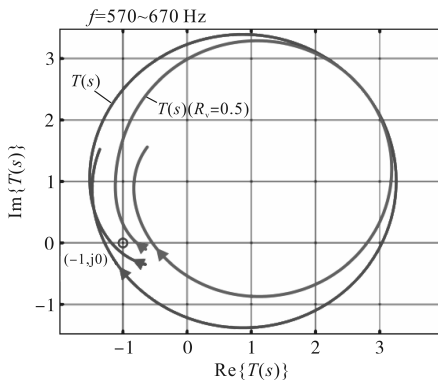
图9 不同 R_v 取值下 $T_v(s)$ 的伯德图Fig.9 Bode plot of $T_v(s)$ with varying values of R_v .

图10绘制了 $R_v=0.5$ 时 $T_v(s)$ 在650 Hz附近的奈奎斯特曲线,引入的电感电流反馈有效避免了 $T_v(s)$ 的奈奎斯特曲线顺时针包围 $(-1, j0)$,且在两次 -180° 穿越频率分别具有2.07 dB和5.28 dB的增益裕度,系统具备良好的稳定性。

图10 $T(s)$ 与 $T_v(s)$ 的奈奎斯特图对比Fig.10 Comparison of Nyquist plots between $T(s)$ and $T_v(s)$

综上所述可知,基于电感电流反馈的有源阻

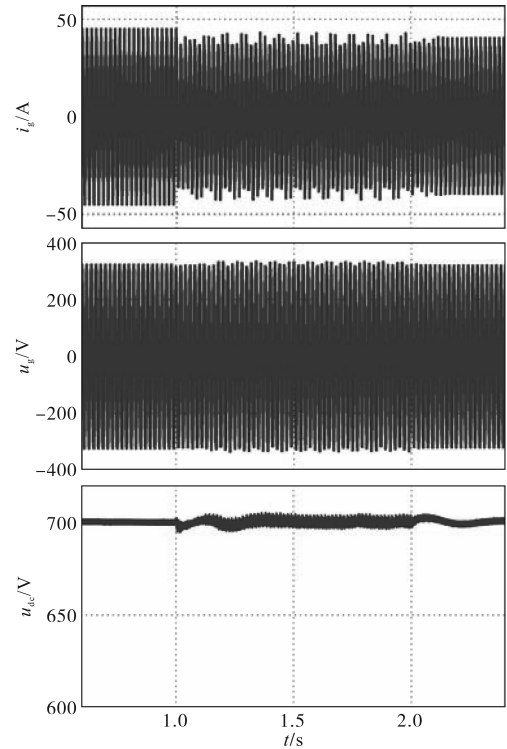
尼方法有效地改善了系统的环路特性,使APF在弱电网条件下能够稳定地补偿谐波。该方法的有效性将通过仿真和硬件实验得到验证。

4 仿真与硬件实验

4.1 PLECS仿真结果分析

本文首先通过仿真软件PLECS对提出有源阻尼方法的谐波振荡抑制效果做时域仿真验证。为了复现本文所分析的谐波振荡工况,仿真系统的主要参数仍按照2.3节中设置,对于上文中未包含的参数设置如下: $u_{dc}=700$ V, $C_{dc}=0.2$ mF, $K_{Pdc}=1$, $K_{Idc}=20$, $R_v=0.5$, $N_v=4 \times 2\pi$ 。

利用PLECS平台的C-Script模块实现离散化数字控制,分别在1 s和2 s时启动APF谐波补偿的PR控制和电感电流反馈控制。图11反映了网侧电流 i_g 、并联点电压 u_g 和APF直流侧电压 u_{dc} 的时域仿真结果,可以看出在1 s启动APF谐波控制后, i_g 出现了谐波振荡现象,在时域上体现为 i_g , u_g 和 u_{dc} 均出现明显波动,谐波补偿失效。而当2 s引入电感电流反馈后,谐波振荡得以抑制, i_g , u_g 和 u_{dc} 波形逐渐平稳,此时APF工作于稳定的谐波补偿。

图11 网侧电流 i_g 、并联点电压 u_g 和APF直流侧电压 u_{dc} 的波形Fig.11 Waveforms of grid-side current i_g , grid-connected-point voltage u_g and APF DC-side voltage u_{dc}

为了更清晰地表征提出的有源阻尼方案对弱电网APF系统谐波振荡的抑制效果,对网侧电

流作旋转变换分别提取出-5, 7, -11, 13次谐波电流幅值 $I_{g,-5}, I_{g,7}, I_{g,-11}, I_{g,13}$, 如图12所示。当APF启动谐波控制后, 尽管被补偿的谐波含量有所降低, 但由于不稳定系统谐波补偿无法达到稳态, 同时还会引起该频段其它次谐波的共振, 系统的电能质量进一步恶化。当加入电感电流反馈后, 系统迅速恢复稳定, 各次谐波均得到良好的补偿。

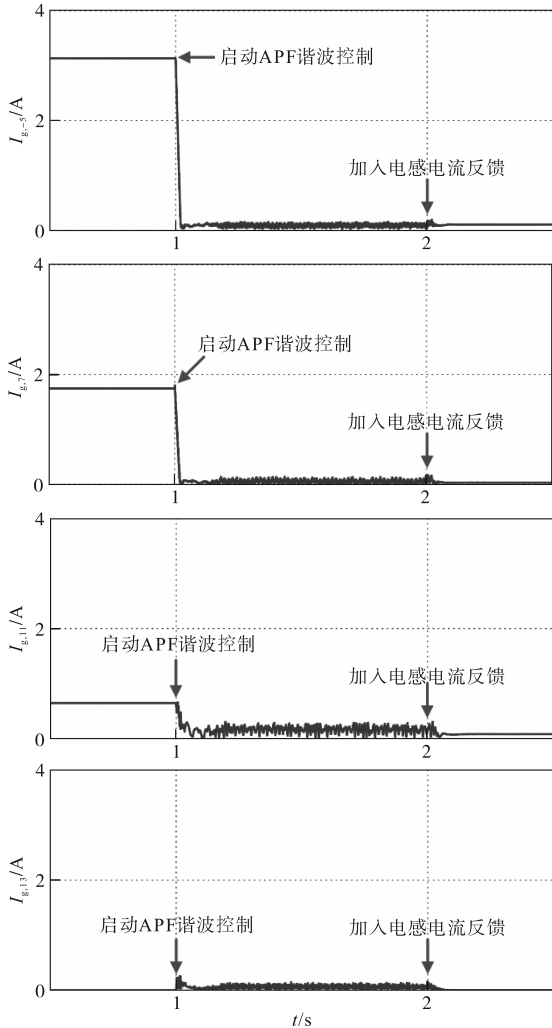


图12 网侧各次谐波电流幅值波形

Fig.12 Waveforms of the amplitude of grid-side harmonic current with different orders

将所提出的有源阻尼方法与文献[8]提出的耦合频率阻尼共享的相位补偿法进行对比。对APF内环13次谐振控制器加入 0.25π 的相位补偿以同时改善系统环路在650 Hz和-550 Hz附近的相位穿越特性, 观测网侧13次谐波电流幅值 $I_{g,13}$ 的波形, 如图13所示。

可以看出, 在PR控制器补偿相位的调节下, APF系统经过约0.5 s的调节时间后恢复稳定, 相较于所提出的有源阻尼方案约0.1 s的调节时间

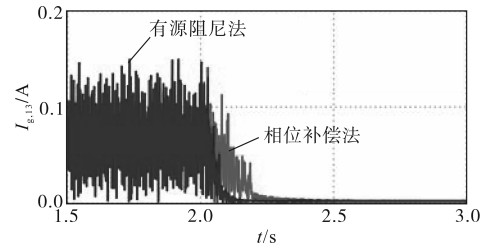


图13 不同稳定方法下网侧13次谐波电流幅值波形

Fig.13 Waveforms of the amplitude of grid-side 13th harmonic current with different stabilization methods

而言响应较慢。这是由于PR控制器的相位补偿效果需经过“外环-内环”的完整闭环控制结构建立响应, 与直接构造内环反馈通路的有源阻尼方法相比, 振荡抑制速度缓慢。

图14反映了图11中网侧电流和并联点电压在谐波补偿前、发生谐波振荡时及有源阻尼稳定后的波形特征与各次电压谐波含有率的频谱图。根据国家GB/T14549—1993《电能质量公用电网谐波》标准规定: 400 V系统的电压总谐波含有率不得大于5%, 其中奇次谐波电压含有率不得大于4%, 偶次谐波电压含有率不得大于2%。计算可得: 谐波补偿前, 并联点电压的谐波主要以奇次谐波为主, 其含有率为4.81%; 开启APF谐波控制后, 并联点电压的奇、偶次谐波含有率分别为1.47%和2.95%; 加入电感电流反馈后, 并联点电压的谐波得以抑制, 总谐波含有率仅为1.31%。由此可见弱电网条件下谐波振荡的危害性以及

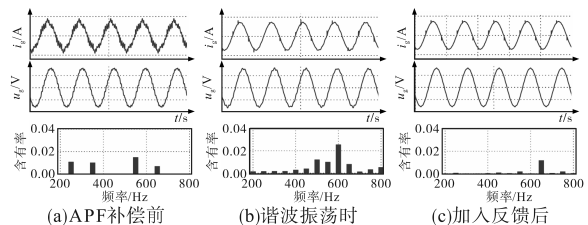


图14 网侧电流和并联点电压的波形与谐波含有率

Fig.14 Waveforms of grid-side current and grid-connected-point voltage and harmonic ratio

4.2 硬件实验结果分析

本文基于具有弱电网特性的硬件实验平台复现图11中网侧电流 i_g 、并联点电压 u_g 和APF直流侧电压 u_{dc} 在谐波补偿前、发生谐波振荡时及有源阻尼稳定后三种工况下的运行波形。实验平台如图15所示, 实验平台电路参数如下: $u_g=80$ Vrms, $R_g=0.9 \Omega$, $L_g=800 \mu\text{H}$, $C_{\text{PFC}}=50 \mu\text{F}$, $R_d=20 \Omega$, $L_d=1\ 200 \mu\text{H}$, $C_d=100 \mu\text{F}$, $L_c=1\ 200 \mu\text{H}$, $C_{dc}=0.1 \mu\text{F}$, $u_{dc}=200$ V, $f_s=10$ kHz。DSP控制参数如下: $K_{\text{Pdc}}=$

0.2, $K_{idc}=2$, $K_{pi}=0.1$, $K_{Ri,k}=30$, $K_d=100$, $N_d=6.28$, $N_v=4 \times 2\pi$, $R_v=10$ 。

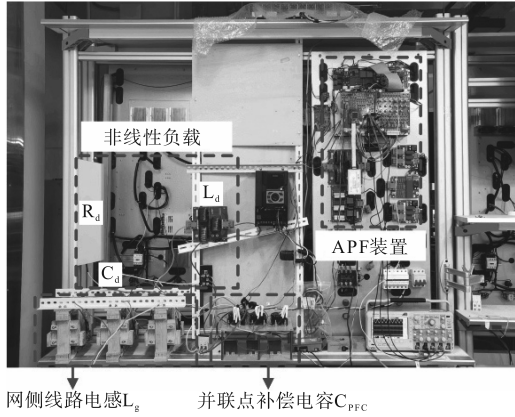


Fig.15 Hardware experimental platform

通过数字控制信号分别下达 APF 谐波控制指令及电感电流反馈指令,得到上述三种工况下的实验波形如图 16 所示。

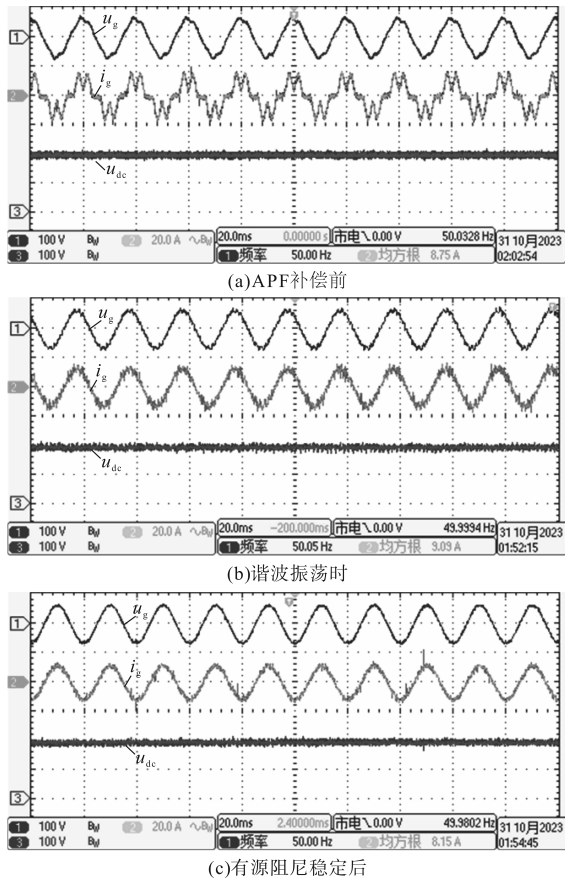


图 16 不同工况下并联点电压 u_g 、网侧电流 i_g 和 APF 直流侧电压 u_{dc} 的实验波形

Fig.16 Experimental waveforms of grid-connected-point voltage u_g , grid-side current i_g and APF DC-side voltage u_{dc} under different working conditions

可以看出:1)开启 APF 谐波控制前,由于非线性负载注入谐波电流,网侧电流和并联点电压

发生明显的畸变;2)开启 APF 谐波控制后,由于弱电网条件下系统环路的交互作用,网侧电流出现谐波振荡现象;3)引入电感电流反馈有源阻尼后,谐波振荡得以稳定,APF 工作于稳定的谐波补偿状态,网侧电流和并联点电压接近三相正弦波形。

上述实验现象与全文的理论分析及仿真结果具有一致性,进一步地验证了基于电感电流反馈有源阻尼方法抑制弱电网 APF 系统谐波振荡的有效性。

5 结论

本文的贡献和结论具体如下:

1)建立了能够充分表征弱电网电流源型 APF 系统“源-网-荷”交互的环路小信号模型,由此分析弱电网对系统稳定性的影响,从原理上揭示谐波振荡的产生机理;

2)提出了一种基于 APF 电感电流反馈的有源阻尼方法,通过改变环路的相位穿越特征可提升弱电网 APF 系统的稳定性;

3)验证了提出的有源阻尼方法在弱电网条件下抑制谐波振荡的有效性,使 APF 稳定工作于谐波补偿状态,系统的电能质量得到明显的改善。

本文的研究对新型电力系统的稳定运行及电能质量提升具有实际意义。该研究现阶段尚未考虑高比例新能源并网装备接入后更为复杂的交互稳定性问题。在此基础上,还需进一步设计阻尼自适应调控策略以优化系统在更大时间尺度、更宽频率范围的振荡抑制效果,同时确保暂态严重失稳工况下可靠的故障穿越。后续研究将对此做进一步完善。

参考文献

[1] 王兆安,刘进军,王跃,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 第3版.北京:机械工业出版社,2016:257-376.
WANG Zhaoan, LIU Jinjun, WANG Yue, et al. Harmonic suppression and reactive power compensation[M]. 3rd Edition. Beijing: China Machine Press, 2016:257-376.

[2] 王佰淮, 邬桐, 张卫正, 等. 基于谐波无功补偿的电网供电能力仿真研究[J]. 电气传动, 2022, 52(11): 61-67.
WANG Baihuai, WU Tong, ZHANG Weizheng, et al. Simulation research on power supply capability of power grid based on harmonic reactive power compensation[J]. Electric Drive, 2022, 52(11):61-67.

[3] 兰金晨, 林国栋, 晁武杰, 等. 基于 APF 的电网背景谐波抑制

- 方法研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(8):66-70.
- LAN Jinchun, LIN Guodong, CHAO Wujie, et al. Research on method of grid background harmonic suppression based on APF [J]. Power Electronics, 2023, 57(8):66-70.
- [4] 李雨果, 易皓, 姜鑫, 等. 极弱电网下新能源跟网逆变器低频振荡的机理探究与暂态无功过补稳定性提升策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2):482-495.
- LI Yuguo, YI Hao, JIANG Xin, et al. Mechanism researching on low-frequency resonance of renewable-energy grid-following inverters under very weak grid and the stability-improving strategy based on dynamic reactive power over compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2):482-495.
- [5] 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.
- [6] 苏乐, 程静, 王维庆. 光伏并网的宽频振荡问题分析[J]. 电气传动, 2023, 53(9):72-80.
- SU Le, CHENG Jing, WANG Weiqing. Analysis of broadband oscillation problem of photovoltaic grid connection[J]. Electric Drive, 2023, 53(9):72-80.
- [7] 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.
- WU Wenhua. Research on wide-bandwidth oscillation mechanism and suppression methods of renewable energy power generation connected to the weak grid[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [8] ZHANG Z, YI H, LI Y, et al. Symmetric harmonic virtual admittance stabilization method for harmonic compensation oscillation in SAPF system[C]//2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Shanghai, China. IEEE, 2023:634-638.
- [9] 王何, 李雨佳, 尹忠东, 等. 弱电网条件下多APF并网交互影响分析[J]. 中国电力, 2020, 53(11):23-30, 88.
- WANG He, LI Yujia, YIN Zhongdong. Analysis on interactive influences among multiple APFS connected to weak-structured power system[J]. Electric Power, 2020, 53(11):23-30, 88.
- [10] YANG L, YANG J, GAO M, et al. Current control of LCL-type shunt APFs: damping characteristics, stability analysis, and robust design against grid impedance variation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 9(4):5026-5042.
- [11] LEI J, QIN Z, LI W, et al. Modelling of output admittance coupling between shunt active power filters and non-linear loads [C]//2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid, Xiamen, China: IEEE, 2019:1-5.
- [12] ZHANG Y, DAI K, CHEN X, et al. An improved method of SAPF for harmonic compensation and resonance damping with current detection of power capacitors and linear/nonlinear loads [C]//2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Tampa, FL, USA: IEEE, 2017:3286-3291.
- [13] XIE Y, YI H, ZHUO F, et al. Analysis and stabilization for full harmonic compensation oscillation in SAPF system with source current direct control[J]. IET Power Electronics, 2024, 17(1):107-120.
- [14] ZHANG Z, YI H, ZHUO F, et al. Harmonic oscillation analysis and stabilization method comparison of shunt active power filter in full compensation mode[J]. IET Power Electronics, 2023, 17(9):1145-1158.
- [15] ZHANG Z, YI H, LI Y, et al. A bandwidth extension method of SAPF DC regulator considering harmonic compensation oscillation[C]//2023 IEEE PELS Students and Young Professionals Symposium, Shanghai, China: IEEE, 2023:1-5.
- [16] 许胜, 费树岷, 赵剑锋. 同步旋转坐标系中谐波电流分次控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16):154-162.
- XU Sheng, FEI Shuming, ZHAO Jianfeng. Harmonic current frequency dividing control strategy based on synchronous rotating frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16):154-162.
- [17] 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.
- [18] 郭学迪. 基于有源阻尼器的并网逆变器系统谐振抑制方法[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- GUO Xuedi. Resonance suppression method of grid-connected inverter system based on active damper[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [19] 贾雷. 提高弱电网下并网逆变器系统稳定性的自适应有源阻尼器[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- JIA Lei. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [20] 游奕弘, 谢懿晗, 张华赢, 等. 基于APF模态切换的高频谐振有源阻尼镇定策略[J]. 供用电, 2023, 40(10):10-18.
- YOU Yihong, XIE Yihan, ZHANG Huaying, et al. APF mode switching based active damping stabilization strategy for high-frequency resonance[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(10):10-18.
- [21] 郝为瀚, 谭威, 黄阳, 等. 基于无源阻尼的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3):23-31.
- HAO Weihan, TAN Wei, HUANG Yang, et al. High-frequency oscillation suppression strategy of MMC-HVDC based on passive damping method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3):23-31.
- [22] 吴云亚, 谢少军, 阚加荣, 等. 逆变器侧电流反馈的LCL并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6):54-60.
- WU Yunya, XIE Shaojun, KAN Jiarong, et al. A full grid voltage feed-forward control strategy with inverter-side current

(下转第26页)

considering position estimation error for sensorless drive system of permanent magnet synchronous motor[J]. *Electric Drive*, 2023, 53(12):4-9.

[3] 曹恒佩,艾萌萌,王延波. 永磁辅助同步磁阻电机研究现状及发展趋势[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(18):4575-4592.
CAO H P, AI M M, WANG Y B. Research status and development trend of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(18):4575-4592.

[4] KO Jae Sub, CHOI Jung Sik, PARK Ki Tae, et al. Maximum torque control of SynRM drive using ALM-FNN controller[C]//2007 International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, 2007:1609-1612.

[5] KWON T S, CHOI G Y, KWAK M S, et al. Novel flux-weakening control of an IPMSM for quasi-six-step operation[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44(6):1722-1731.

[6] MOUNA B H, LASSAAD S. Direct stator field oriented control of speed sensorless induction motor[C]//2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, Mumbai, India, 2006:961-966.

[7] 赵子箭. 用于新能源汽车的永磁辅助同步磁阻电机扩速特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
ZHAO Z J. Study on the speed expansion characteristics of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for renewable energy vehicles[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.

[8] 方磊. 新能源车用永磁辅助式同步磁阻电机设计与控制方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2018.
FANG L. Research on design and control method of PMASynRM for new energy vehicles[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[9] 刘堃, 范彩云, 韩坤, 等. 基于空间矢量脉宽调制的永磁同步电机死区效应分析与补偿[J]. *电机与控制应用*, 2016, 43(9):56-61.
LIU K, FAN C Y, HAN K, et al. Analysis and compensation on dead-time effect of permanent magnet synchronous motor based on space vector pulse width modulation[J]. *Electric Machine & Control Application*, 2016, 43(9):56-61.

[10] MANZOLINI V, DA RÙ D, BOLOGNANI S. An effective flux weakening control of a SyRM drive including MTPV operation [J]. *IEEE Transactions Industry Applications*, 2019, 55(3):2700-2709.

[11] LIU B, CHEN T, SONG W. The essential relationship between deadbeat predictive control and continuous-control-set model predictive control for PWM converters[C]//2018 International Power Electronics Conference, 2018:1872-1876.

[12] LEE Dong Choon, LEE G Myoung. A novel overmodulation technique for space-vector PWM inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, 13(6):1144-1151.

[13] GE L, ZHONG J, BAO C, et al. Continuous rotor position estimation for SRM based on transformed unsaturated inductance characteristic[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(1):37-41.

[14] WANG G, VALLA M, SOLSONA J. Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives—a review[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(7):5830-5842.

[15] YU Y, WANG L, WANG B, et al. Operation-area-selected overmodulation strategy for flux-weakening control of surface-mounted permanent magnet synchronous motor[C]//IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, Canada, 2021.

[16] WANG Linzhi, YU Yong, WANG Bo. Power-model-based adaptive overmodulation scheme for field-weakening control of PMSM[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 1:1-12.

[17] 方磊, 谭国俊, 刘娜, 等. 永磁辅助式同步磁阻电机转矩预测控制方法[J]. *电机与控制应用*, 2018, 45(5):1-7.
FANG L, TAN G J, LIU N, et al. Torque predictive control method for permanent magnet assisted synchronous reluctance motor[J]. *Electric Machine & Control Application*, 2018, 45(5):1-7.

收稿日期:2023-12-29

修改稿日期:2024-03-21

(上接第18页)

feedback for LCL grid-connected inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(6):54-60.

[23] ZHAO Z, YI H, LI Y, et al. Passivity enhancement for LCL-filtered grid-connected inverter based on capacitor voltage proportional-derivative feedback active damping[C]//IEEE Energy Conversion Congress & Exposition-Asia, Singapore, Singapore: IEEE, 2021:1354-1359.

[24] HE Y, WANG X, RUAN X, et al. Hybrid active damping combining capacitor current feedback and point of common coupling voltage feedforward for LCL-type grid-connected inverter [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(2):2373-2383.

[25] YI H, ZHUO F, ZHANG Y, et al. A source-current-detected shunt active power filter control scheme based on vector resonant controller[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2014, 50(3):1953-1965.

[26] LI Y, YI H, ZHUO F, et al. Analysis and stabilization of APF systems considering dynamic of nonlinear loads[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 39(1):409-423.

[27] SUN J. Small-signal methods for AC distributed power system—a review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(11):2545-2554.

收稿日期:2023-11-30

修改稿日期:2024-02-19