

弱电网下基于电流误差反馈的并网变流器 有源阻尼策略

杨树德¹, 姚嘉懿¹, 张新闻², 阚世奇¹, 熊连松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. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 西安 710049)

摘要: 弱电网下, 并网变流器将同时面临着高电网阻抗可能引发的失稳振荡以及背景谐波电压导致的并网电流质量下降问题。鉴于此, 该文首先采用基于内模原理的重复控制器来保证变流器对背景谐波电压的抗扰能力。其次, 为了提高变流器对弱电网的适应能力, 提出一种基于电流误差反馈的有源阻尼策略, 由于该策略根据电流误差构造叠加至电流参考值的阻尼量, 因此避免了将背景谐波扰动引入到电流参考值上, 所以在实现稳定性控制的同时不会对变流器原有的背景谐波电压抗扰能力产生影响。理论分析表明: 所提控制策略不仅能够保证变流器在含有背景谐波的高阻抗电网工况下稳定运行, 而且可获得较高的并网电流质量。最后, 通过仿真和实验结果对所提策略的有效性进行了验证。

关键词: 弱电网; 电流误差反馈; 背景谐波电压; 稳定性控制; 并网电流质量; 有源阻尼

Current Error Feedback-based Active Damping Strategy for Grid-connected Converters Under Weak Grid

YANG Shude¹, YAO Jiayi¹, ZHANG Xinwen², KAN Shiqi¹, XIONG Liansong³

(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. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: In weak grid, grid-tied converter will face the potential instability oscillation and grid current quality challenges induced by high grid impedance and background harmonic voltages. In view of this, the internal-model-based repetitive controller is first used in this paper to ensure the immunity of converter to the background harmonic voltages. Subsequently, to enhance the weak-grid adaptability of converter, and an active damping strategy based on current error feedback is proposed. In this strategy, the damping component injected into the current reference is derived from the current error, thereby effectively excluding the background harmonic disturbances from current reference. As a result, the stability control can be realized while preserving the original immunity of converter to the background harmonic voltages. Theoretical analysis demonstrates that the proposed active damping strategy not only ensures the stable operation of the converter under high-impedance grid conditions with background harmonics but also achieves high-quality grid-injected current. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is verified by both simulation and experimental results.

Key words: weak grid; current error feedback; background harmonic voltages; stability control; grid-injected current quality; active damping

0 引言

在现代电力系统中, 并网变流器的应用日益广泛。然而, 长距离的输电线路和升压变压器漏感等

因素往往导致实际中的电网阻抗不可忽略^[1-2], 并且当 n 台参数相同的变流器并联运行时, 每台变流器所承受的等效电网阻抗为实际电网阻抗的 n 倍^[3], 因此对于变流器来讲, 并网点(point of common coupling, PCC)易表现为弱电网甚至极弱电网特性。目前, 在新能源发电、直流输电、铁路牵引以及电能质量治理等多个领域均存在变流器与弱电网动态

基金资助项目: 国家自然科学基金(52367018); 江苏省高等学校自然科学基金(24KJB470031)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52367018), Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (24KJB470031).

交互所引发的失稳振荡问题^[4-8], 给系统稳定运行带来巨大挑战。所以, 如何抑制变流器接入弱电网可能诱发的失稳振荡已经成为一个研究热点。

围绕变流器接入弱电网可能诱发的失稳振荡问题, 国内外学者主要给出 3 种解决思路: 一是对参数进行优化^[9-10], 但由于主电路和控制参数可调整的区间通常较窄, 因此最大提升能力可能有限; 二是在 PCC 点处并联无源阻尼支路^[11], 但会导致损耗增大; 三是谋求控制策略的改进, 该方法不仅避免了额外的功率损耗, 而且对变流器阻抗重塑的自由度较大, 所以受到很多学者的青睐, 比如, 文献[12]给出一种基于电网阻抗在线测量的相位裕度补偿方法; 文献[13]和文献[14]分别利用直流电压误差前馈和电网电压前馈对变流器的阻抗进行重塑; 文献[15]给出一种基于 PCC 点电压反馈的有源阻尼器, 通过控制虚拟出一个并联至 PCC 点的阻尼电阻, 这些方法虽然显著提高了变流器所能适应的最大电网阻抗, 但这些方法均未考虑变流器对谐波电压的抗扰性。

值得注意的是, 弱电网通常具有高阻抗和背景谐波电压丰富的双重特点^[1,16], 而背景谐波电压扰动易对并网电流质量产生不利影响, 因此, 如何同时保证变流器对电网阻抗的鲁棒稳定性和对谐波电压的抗扰性尤为重要。为此, 文献[17]在传统比例前馈通道加入多谐振环节并结合在线测量的电网阻抗实时调整开环增益实现上述目的, 但该方法需要对电网阻抗进行实时测量, 算法复杂; 文献[18]通过在锁相环(phase-locked loop, PLL)和电网电压前馈中加入带通滤波器兼顾了变流器在弱电网下的鲁棒稳定性和抗扰性, 但仅在电流环为 PI 调节器时验证了其有效性; 文献[19]使用陷波器滤除了 PCC 点电压反馈通道中的低次背景谐波, 增强了文献[15]中所给出的有源阻尼方法的谐波电压抗扰性, 但所需的陷波器和电流环的谐振调节器数量较多, 对控制器的运算速度要求较高。文献[20]用电容电压全前馈和并网电流纯延迟反馈来解决弱电网下的稳定性和并网电流质量问题, 然而其中含有纯二阶微分运算环节, 实际中可能放大高频噪声。文献[21]通过在电压前馈和网侧电感电流反馈通道各引入一个带阻滤波器实现串、并联虚拟阻抗, 兼顾了高频振荡抑制和并网电流质量, 但未考虑延时环节对其阻尼控制效果的影响。

可见, 在变流器对电网阻抗的鲁棒稳定性提升

方面已取得了多项成果。值得说明的是, 数字控制和脉宽调制(pulse width modulation, PWM)环节所引入的延时可能对变流器的弱电网适应能力构成较大影响^[11,22]。另一方面, 弱电网下 PCC 点电压中通常含有大量的开关纹波^[23], 因此实际中一般需对其进行低通滤波后再用于电网电压前馈^[24], 而前馈通道中的低通滤波器同样会影响到并网变流器在弱电网下的稳定性^[25]。然而, 目前在分析有源阻尼策略的有效性时, 大多只考虑了上述部分因素, 少有同时考虑到数字控制延时、电网电压前馈、前馈通道中的低通滤波器以及相关策略是否会降低系统对谐波电压的抗扰性。此外, 已有方案的讨论范围只涉及到 PI 或比例谐振控制器, 其结论是否可以拓展至目前广泛应用的比例重复控制器还需进一步研究。

综上所述, 目前在提高变流器弱电网适应能力的有源阻尼策略方面尚未得到充分研究。鉴于此, 本文首先建立了比例重复控制下计及数字控制延时、电网电压前馈和前馈通道低通滤波器的变流器接入弱电网系统的数学模型, 评估了电网强度变化时系统的鲁棒稳定性。针对系统稳定性对电网强度的变化比较敏感的问题, 提出一种基于电流误差反馈的有源阻尼策略, 并且比较了引入该策略前后系统的谐波电压抗扰性, 结果表明所提阻尼策略在提高变流器对电网阻抗鲁棒稳定性的同时对其谐波电压抗扰性几乎没有影响, 因此不仅能够保证变流器在含有背景谐波的高阻抗电网工况下稳定运行, 而且可获得较高的并网电流质量。最后, 利用仿真平台和实验系统对分析结果的正确性进行了验证。

1 变流器接入弱电网的控制模型及稳定性

1.1 变流器接入弱电网的控制模型

变流器接入弱电网的主电路及控制原理如图 1 所示。图中直流侧电容 C 经过 H 桥和输出滤波电感 L 并联至 PCC 点, u_{inv} 、 U_{dc} 和 i_g 分别为 H 桥的交流侧电压和并网电流; 图中采用理想电压源 u_g 串联电感 L_g 来模拟弱电网(为了考虑最恶劣的工况, 这里将电网阻抗视为纯电感^[14,17-18])。其控制原理为, 并网电流指令 i_g^* 减去其实测值 i_g 后得到误差 e , 再经过电流调节器 G_c 并且与电网电压前馈支路 f 的输出信号叠加后得到期望输出电压, SLPF 为对 PCC 点电压 u_{pcc} 中开关纹波进行衰减的二阶低通滤波器(second-order low-pass filter, SLPF); 对于数字控制系统, 期望输出电压通常经过一拍延时装载后得到

调制波 u_M , 该过程会存在一个采样周期 T_s 的延时, 用 e^{-sT_s} 表示, 此外 PWM 环节的 ZOH 特性会引入约 $T_s/2$ 的延时^[17,26]。

并网电流指令中有功和无功分量的构造需借助 PLL 输出的相位信息, 对于静止无功发生器(static var generator, SVG)来讲, 其中用以维持直流侧电压稳定的有功电流分量的幅值由直流电压外环产生, 由于 PLL 和电压外环的截止频率通常远小于电流内环(本文中 PLL 和直流电压外环的参数满足该条件), 此时可忽略它们对系统稳定性的影响^[19,27-28], 因此, 这里在建立变流器接入弱电网的控制模型时仅考虑电流内环。根据图 1 可得弱电网下计及延时环节、电网电压前馈和前馈通道中 SLPF 的电流环控制结构如图 2 所示。

图 2 中, $F(s)$ 为 SLPF 的表达式, 具体为:

$$F(s) = \frac{\omega_{cf}^2}{s^2 + \frac{\omega_{cf}}{Q_f}s + \omega_{cf}^2} \quad (1)$$

式中: ω_{cf} 和 Q_f 分别为 SLPF 的截止角频率和品质因数; $G_d(s)$ 为综合考虑数字控制和 PWM 所引入的 1.5 个采样周期的延时, 其表达式和一阶 Pade 近似展开后的结果如式(2)所示^[29]; $G_g(s)$ 和 $P(s)$ 分别为电网阻抗和等效的被控对象, 相应的表达式分别如式(3)和式(4)所示。

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

$$G_g(s) = L_g s \quad (3)$$

$$P(s) = \frac{1}{(L_g + L)s} \quad (4)$$

定义 $D(s) = 1 - F(s)G_d(s)P(s)G_g(s)$, 则根据图 2 可推导出电流环的误差表达式为:

$$e(s) = \frac{D(s)i_g^*(s) - (F(s)G_d(s) - 1)P(s)u_g(s)}{D(s) + P(s)G_d(s)G_c(s)} \quad (5)$$

1.2 稳定性分析

电流调节器对控制性能有很大影响, 目前最常见的主要有 PI、PR 和比例重复控制器, 其中比例重复控制器可显著提高系统在谐波下的开环增益, 从而减小电网电压畸变对并网电流质量的影响。考虑到弱电网中易出现的背景谐波, 文中采用对各次谐波均具有较好抑制效果的比例重复控制器^[30], 其结构如图 3 所示。

图中: k_p 为比例系数; $Q(z)$ 为内部正反馈环节的环路增益, 通常取接近 1 的常数; N 为一个基波

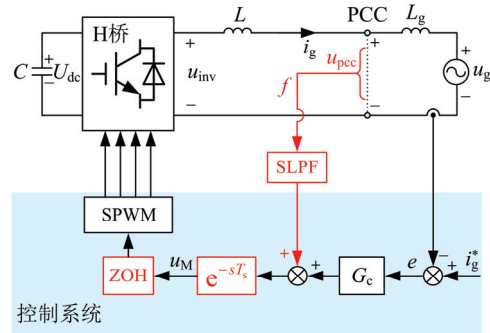


图 1 变流器接入弱电网的主电路及控制系统

Fig.1 Main circuit and control system of the converter connected to the weak grid

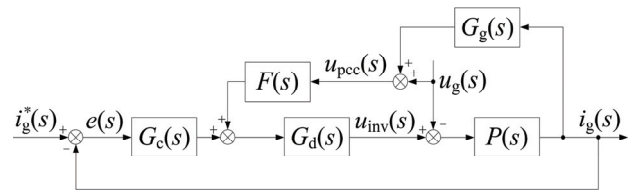


图 2 弱电网下电流内环控制结构

Fig.2 Structure of the inner current loop in weak grid

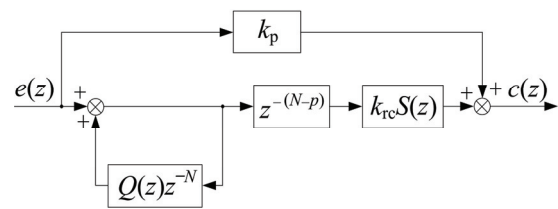


图 3 比例重复调节器的结构

Fig.3 Structure of the proportional repetitive regulator

周期的采样点数; p 为相位补偿环节的超前拍数; k_{rc} 为重复信号增益; $S(z)$ 为补偿滤波器, 通常选择 SLPF; $c(z)$ 为控制器的输出。由图 3 中各环节的关系可得调节器的传函为:

$$G_c(z) = \frac{c(z)}{e(z)} = k_p + \frac{k_{rc}S(z)z^{-(N-p)}}{1 - Q(z)z^{-N}} \quad (6)$$

将式(6)代入到式(5)并整理可得:

$$\frac{e(z)}{D(z)i_g^*(z) + P(z)(1 - F(z)G_d(z))u_g(z)} = \frac{1 - Q(z)z^{-N}}{1 + (D(z) - 1 + k_p P(z)G_d(z))} \cdot \frac{1}{1 - z^{-N}Y_1(z)} \quad (7)$$

式中:

$$Y_1(z) = Q(z) - \frac{k_{rc}P(z)G_d(z)S(z)z^p}{D(z) + k_p P(z)G_d(z)} \quad (8)$$

由式(7)可得并网电流误差的动态关系见图 4。

根据 $D(s)$ 、 $P(s)$ 、 $F(s)$ 和 $G_d(s)$ 的表达式可知电网等值电感 L_g 的增大不会导致图 4 中 $B_1(z)$ 和 $B_2(z)$ 的不稳定, 因此系统的稳定性由 $B_3(z)$ 、 $B_4(z)$ 和 $B_5(z)$ 这 3 个级联子系统决定^[31]。通常设计 $Q(z)$ 时已保证了 $B_4(z)$ 稳定, 所以只需分析 L_g 对 $B_3(z)$ 和 $B_5(z)$ 稳定性的影响。 $B_3(z)$ 为只考虑比例调节器的负反馈系统, 可利用根轨迹法分析其稳定性。需要注意的是, 与 $B_3(z)$ 相比, $B_5(z)$ 属于高阶正反馈系统, 极点个数较多, 其根轨迹不便于观察, 故此处采用小增益定理所给出的使得 $B_5(z)$ 稳定的充分条件: 在 Nyquist 频率范围内, $B_5(z)$ 的开环增益均小于 1^[31], 即:

$$|Y_1(e^{j\omega T_s})| < 1 \quad (9)$$

为了对变流器接入弱电网后的稳定性进行具体分析, 以一台 SVG 为对象, 其电路参数如表 1 所示, 由采样频率可知一个基波周期的采样点数 $N=192$ 。系统采用单极性倍频调制方式, 即 PCC 点电压中开关纹波的频率为 19.2 kHz, 所以电压采样通道中 SLPF 的截止频率取 2 kHz(约为开关纹波频率的 1/10), 综合考虑 SLPF 截止频率附近幅值衰减的速度和幅值超调, Q_f 取 0.707, 即具有平滑的巴特沃兹响应^[32-33]; 利用文献^[34]所提供的方法, 选择 $Q(z)=0.97$ 、 $k_{rc}=1.3$ 、 $k_p=2$ 、 $p=4$, $S(z)$ 与电压采样通道中 SLPF 的参数一致。

代入具体参数可导出以 L_g 为参数时 $B_3(z)$ 的特征方程为:

$$\begin{cases} a_1 z^4 + a_2 z^3 + a_3 z^2 + a_4 z + a_5 = 0 \\ a_1 = 23\,774.95L_g + 10.99 \\ a_2 = -42\,008.33L_g - 17.19 \\ a_3 = 17\,845.71L_g + 12.79 \\ a_4 = -4\,766.25L_g - 4.81 \\ a_5 = 5\,153.91L_g + 1 \end{cases} \quad (10)$$

一般使用短路容量比(short circuit ratio, SCR)来反映电网的强度, 通常 SCR 大于 10 时称为强电网; SCR 在 2 到 3 之间称为弱电网, 小于 2 时称为极弱电网^[13,35], 因此本文考虑 SCR 最小为 2(对应最大的 $L_g=7$ mH)的工况。利用 MATLAB 对式(10)和式(8)进行求解, 得到 $B_3(z)$ 的闭环极点和 $Y_1(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹如图 5 所示, 其变化趋势表明, 随着 SCR 的减小, $B_3(z)$ 的闭环极点并未移动至不稳定区域, 但 $Y_1(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹迅速放大, 当 SCR=20 时在 540~600 Hz 频率范围内轨迹达到单位圆, SCR 小于 20 后不再满足式(9)所给出的系统稳定的充分条件, 即变流器难以

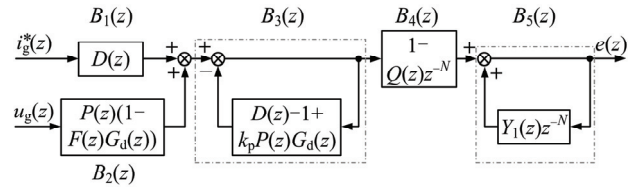


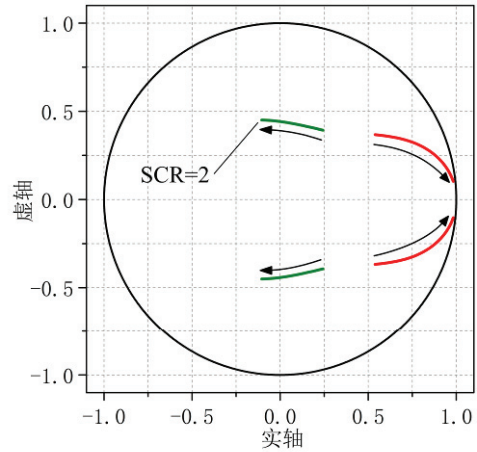
图 4 并网电流误差的动态关系

Fig.4 Dynamic relationship of grid-injected current error

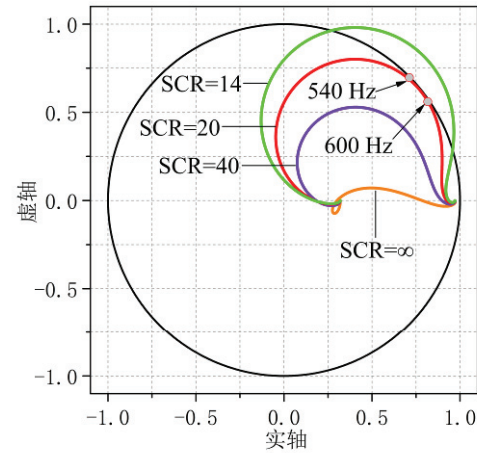
表 1 SVG 的电路参数

Table 1 Circuit parameters of SVG

| 参数 | 数值 |
|-----------------|-------|
| 电网电压 U_g/V | 220 |
| 采样频率 f_s/Hz | 9 600 |
| 额定电流 I_g/A | 50 |
| 滤波电感 L/mH | 0.5 |
| 直流侧电容 $C/\mu F$ | 470×6 |



(a) $B_3(z)$ 的闭环极点



(b) $Y_1(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹

图 5 未引入有源阻尼时 SCR 对系统稳定性的影响

Fig.5 Influence of the SCR on the system stability in the absence of active damping

在该工况下保持稳定。可见，若在控制中不引入附加阻尼，变流器通常难以适应弱电网工况。

2 电流误差反馈有源阻尼策略及控制效果

2.1 弱电网适应能力提升效果分析

以上分析表明，若在控制中未引入附加阻尼，通常难以保证变流器接入弱电网后的稳定运行。为此，本文提出一种基于电流误差反馈的有源阻尼策略，图 6 给出了其实现方法。

图 6 中： $A_d(s)$ 为有源阻尼支路，该支路由微分运算、微分系数以及避免实际中微分运算对噪声进行放大的 SLPF 构成，其传递函数为：

$$A_d(s) = C_d \cdot \frac{\omega_{cf}^2 s}{s^2 + \frac{\omega_{cf}}{Q_f} s + \omega_{cf}^2} \quad (11)$$

式中： C_d 为微分系数；由于输出电流与 PCC 点电压中开关纹波的频率相同，因此该环节中的 SLPF 与电压采样通道中 SLPF 的参数相同。由图 6 可导出引入误差反馈有源阻尼后电流环的误差表达式为：

$$\frac{e(z)}{G_A(z)D(z)i_g^*(z) + G_A(z)P(z)(1-F(z)G_d(z))u_g(z)} = \frac{1-Q(z)z^{-N}}{1+(D(z)-1+k_p G_A(z)P(z)G_d(z))} \cdot \frac{1}{1-z^{-N}Y_2(z)} \quad (12)$$

式中：

$$Y_2(z) = Q(z) - \frac{k_{rc} G_A(z)P(z)G_d(z)S(z)z^p}{D(z) + k_p P(z)G_d(z)G_A(z)} \quad (13)$$

$$G_A(z) = 1 + A_d(z) \quad (14)$$

根据式(12)可得引入误差反馈有源阻尼后并网电流误差的动态关系如图 7 所示。

同理，由 $D(s)$ 、 $P(s)$ 、 $F(s)$ 、 $G_d(s)$ 和 $A_d(s)$ 的表达式可知电网等值电感 L_g 的增大也不会引起图 7 中 $B_1(z)$ 和 $B_2(z)$ 的不稳定，而 $B_4(z)$ 的稳定性已由 $Q(z)$ 保证，因此这里仍只需分析 L_g 对 $B_3(z)$ 和 $B_5(z)$ 稳定性的影响。为了分析所提有源阻尼策略的有效性，取微分系数 $C_d=1/1400$ ，利用 MATLAB 得到 $B_3(z)$ 的闭环极点和 $Y_2(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹如图 8 所示，其变化趋势表明，随着 SCR 的减小， $B_3(z)$ 仍未产生不稳定极点，虽然在该过程中 $Y_2(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹仍有放大趋势，但速度明显减缓，当 SCR=2 时系统仍处于稳定状态。这说明，引入误差反馈有源阻尼后，变流器能够在弱电网下稳定运行。需要说明的是，微分系数越大越有利于提高变流器在弱电网下的稳定性，但

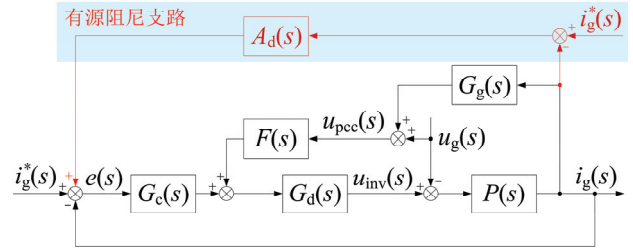


图 6 引入误差反馈有源阻尼后并网电流的控制原理

Fig.6 Principle of the grid-injected current control with current error feedback-based active damping

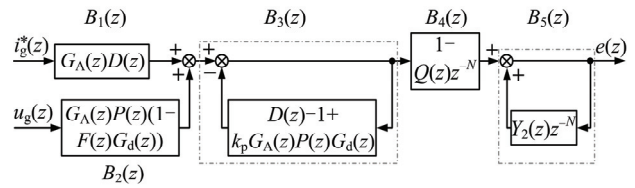


图 7 引入误差反馈有源阻尼后并网电流误差的动态关系

Fig.7 Dynamic relationship of grid-injected current error with current error feedback-based active damping

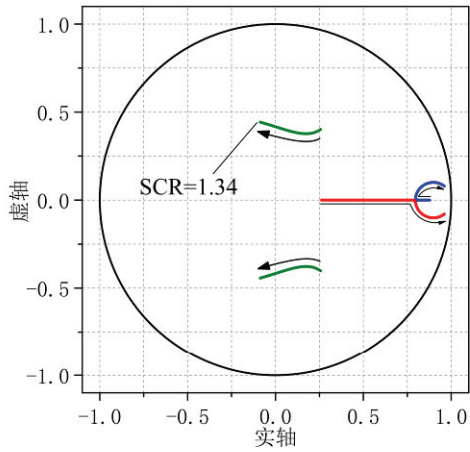
同样会抬高该环节在高频段的增益，削弱系统对开关噪声的抑制能力，因此微分系数应在首先保证最小 SCR 时系统稳定的前提下尽可能取小值，比如文中将变流器所能适应的最小 SCR 为 2 作为设计目标^[35]，再考虑到一定的稳定裕度，则根据图 8 可知 $C_d=1/1400$ 满足要求。若以文献[12]中变流器所能适应最小 SCR=6.5 为设计目标，根据图 9 可知，考虑到一定裕量可选择 $C_d=1/5700$ 。

2.2 系统的背景谐波电压抗扰能力分析

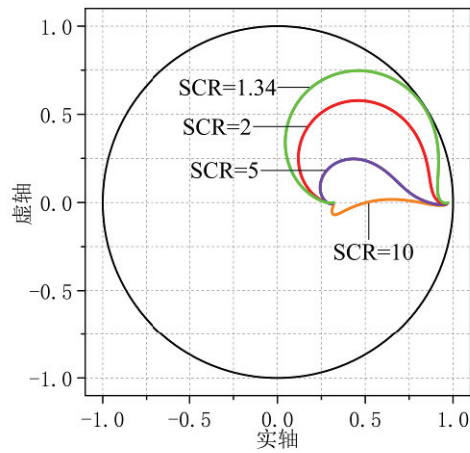
分析表明，引入误差反馈有源阻尼可显著提高变流器对电网阻抗的鲁棒稳定性，然而为了同时获得高质量的并网电流，需要进一步分析该策略是否会降低系统对谐波电压的抗扰性，为此，根据图 2 和图 6 可导出引入有源阻尼前后电网电压至并网电流误差的传递函数分别如式(15)和式(16)所示。

$$\frac{e(z)}{u_g(z)} = \frac{P(z)(1-F(z)G_d(z))(1-Q(z)z^{-N})}{(1+(D(z)-1+k_p P(z)G_d(z)))(1-z^{-N}Y_1(z))} \quad (15)$$

$$\frac{e(z)}{u_g(z)} = \frac{G_A(z)P(z)(1-F(z)G_d(z))(1-Q(z)z^{-N})}{(1+(D(z)-1+k_p G_A(z)P(z)G_d(z)))(1-z^{-N}Y_2(z))} \quad (16)$$



(a) $B_3(z)$ 的闭环极点



(b) $Y_2(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹

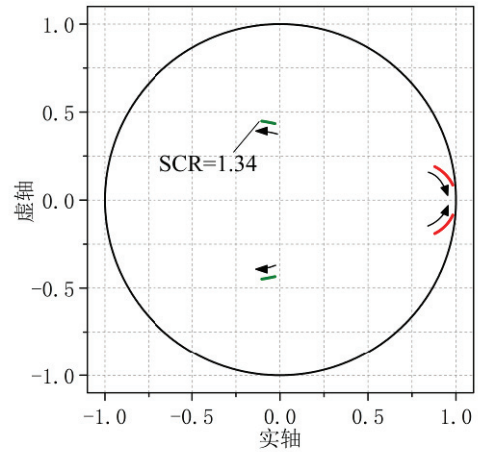
图8 引入误差反馈阻尼后 SCR 对系统稳定性的影响
Fig.8 Influence of the SCR on the system stability with current error feedback-based active damping

根据式(15)和式(16)可得引入误差反馈有源阻尼前后电网电压至并网电流误差传函的伯德图如图10所示, 并且表2给出了两者在主要谐波频率下的幅值。可见, 由于重复控制器的引入, 其伯德图呈梳状, 在各次谐波频率下的幅值均较小, 说明系统对背景谐波电压具有较强的抗扰能力。此外, 在低于1200 Hz范围内, 引入误差反馈有源阻尼前后的伯德图几乎重叠, 在1200~2000 Hz谐波范围内的幅值虽稍有升高, 但十分接近, 最大差别在2 dB以内。这说明, 引入误差反馈有源阻尼对系统的背景谐波电压抗扰能力几乎没有影响。

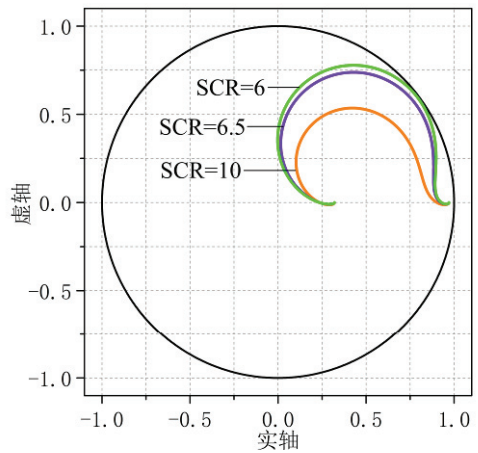
3 仿真与实验验证

3.1 仿真验证

为了证明上述结论的正确性, 根据图1和表1



(a) $B_3(z)$ 的闭环极点



(b) $Y_2(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹

图9 误差反馈阻尼下 $C_d=1/5700$ 时系统的稳定性分析
Fig.9 Evaluation of the system stability with current error feedback-based active damping and $C_d=1/5700$

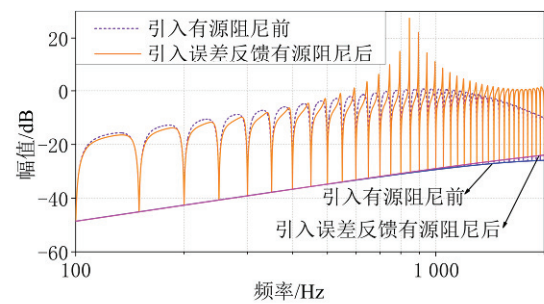


图10 引入误差反馈有源阻尼前后系统对背景谐波的抗扰能力对比

Fig.10 Comparison of the rejection ability to the background harmonic disturbances before and after introducing the current error feedback-based active damping strategy

中的参数, 利用 PLECS 平台构建了 SVG 接入弱电网系统的仿真模型。为了尽可能保证仿真和实验系

表2 主要谐波频率下的幅值对比

Table 2 Comparison of the amplitudes at major harmonic frequencies

| 谐波频率/Hz | 引入有源阻尼前幅值/dB | 引入误差反馈有源阻尼后幅值/dB |
|---------|--------------|------------------|
| 150 | -45.07 | -45.1 |
| 250 | -40.66 | -40.7 |
| 350 | -37.78 | -37.81 |
| 450 | -35.66 | -35.65 |
| 550 | -33.99 | -33.94 |
| 650 | -32.63 | -32.52 |
| 750 | -31.49 | -31.32 |
| 850 | -30.53 | -30.28 |
| 950 | -29.71 | -29.38 |
| 1 050 | -29.01 | -28.58 |

统的一致性,首先,除主电路外,所有控制算法(包括PWM比较值的滞后一拍装载)均在基于C语言的动态链接库中实现,此外,使用MATLAB获取实验室电网电压中各次谐波的幅值和相位,并在仿真中注入相应的谐波,从而获得与实验中尽可能一致的电网电压,图11给出了相应的波形,可见,叠加背景谐波后的电压波形存在明显的畸变。

为了对比,图12和图13分别给出了引入误差反馈有源阻尼前后不同SCR下的仿真结果,可见,未引入有源阻尼时,在 $SCR=\infty(L_g=0\text{ mH})$ 、 $SCR=40(L_g=0.35\text{ mH})$ 和 $SCR=20(L_g=0.7\text{ mH})$ 3种工况下变流器输出电流稳定且质量较高,THD依次为3.72%、2.94%和2.07%,随着SCR减小,THD降低的原因在于 L_g 具有滤波功能,SCR减小后输出电流中的开关纹波电流更小。然而图12(d)和图12(e)说明,当 $SCR=18.6(L_g=0.75\text{ mH})$ 时,输出电流中出现以550 Hz为主的振荡,THD增至19%,变流器所能适应的最小SCR以及振荡频率均符合1.2节图5(b)所给出的结果。与未引入有源阻尼相比,引入文中提出的电流误差反馈有源阻尼后在 $SCR=10(L_g=1.4\text{ mH})$ 、 $SCR=5(L_g=2.8\text{ mH})$ 、 $SCR=2(L_g=7\text{ mH})$ 和 $SCR=1.34(L_g=10.4\text{ mH})$ 四种情况下输出电流均未出现振荡,并且具有较高的质量,THD依次为1.3%、0.77%、0.3%和0.18%。

3.2 实验验证

为了进一步验证文中理论分析的正确性,搭建了与仿真参数相同的实验系统,如图14所示,主控芯片为TMS320F28335,电网电压和并网电流测量分别采用LV25-P和LAH50-P互感器,使用电感模拟弱电网的等值阻抗。实验中的电网电压如图15

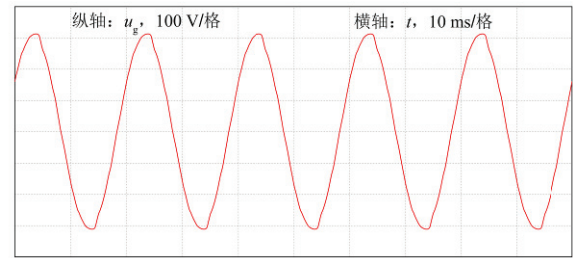


图11 含背景谐波的电网电压

Fig.11 Grid voltage with background harmonics

所示。图16和图17分别给出了引入误差反馈有源阻尼前后不同SCR下的实验结果,可见,引入有源阻尼前,在 $SCR=\infty(L_g=0\text{ mH})$ 、 $SCR=40(L_g=0.35\text{ mH})$ 和 $SCR=20(L_g=0.7\text{ mH})$ 时变流器输出电流正常,THD分别为4.78%、4.13%和3.33%,当SCR减小至18.6($L_g=0.75\text{ mH}$)时输出电流出现振荡,THD为15.76%,系统进入到不稳定状态,输出电流的谐波分析结果表明此时的振荡频率为550 Hz。引入电流误差反馈有源阻尼后,在 $SCR=10(L_g=1.4\text{ mH})$ 、 $SCR=5(L_g=2.8\text{ mH})$ 、 $SCR=2(L_g=7\text{ mH})$ 和 $SCR=1.34(L_g=10.4\text{ mH})$ 四种情况下输出电流均未出现振荡,并且质量较高,THD依次为2.84%、2.28%、1.71%和1.42%,相同情况下实验中输出电流的THD高于仿真,原因在于电感的实际值与标称值之间存在误差,并且实际中电感值与电流大小之间通常呈现一定的非线性关系,因此实验和仿真中THD的偏差不影响相关结果对文中理论分析的正确性和所提出的阻尼策略有效性的验证。

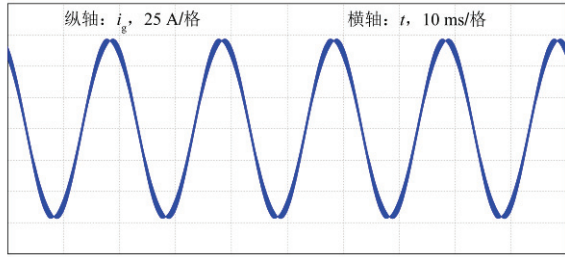
4 结论

本文在计及数字控制延时、电网电压前馈和前馈通道低通滤波器的前提下,针对变流器接入弱电网后可能出现的失稳振荡问题进行了分析,主要得出如下结论:

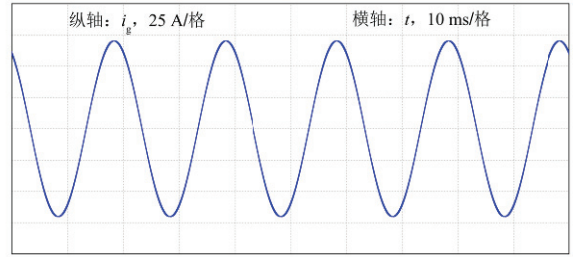
1) 传统未对弱电网工况进行特别关注的并网变流器控制方案虽然能够保证变流器接入较强电网后的稳定运行,但是系统的稳定性可能对电网强度的变化比较敏感,通常难以保证变流器接入弱电网后的稳定性。

2) 为应对变流器接入弱电网可能出现的失稳振荡问题,提出了一种基于电流误差反馈的有源阻尼方法,可显著降低系统稳定性对电网强度的敏感性,提高变流器对弱电网的适应能力。

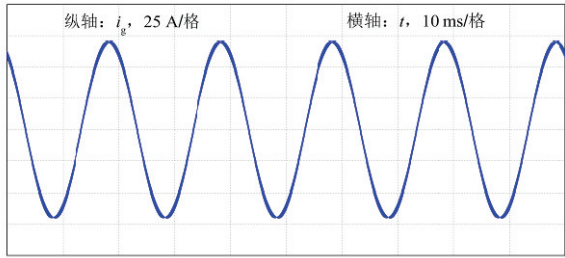
3) 电流误差反馈有源阻尼策略在提高变流器



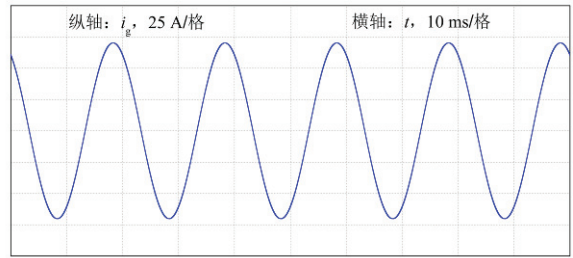
(a) SCR=∞



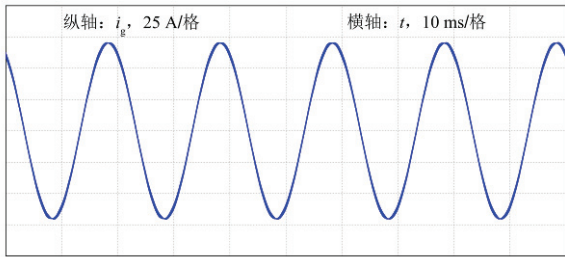
(a) SCR=10



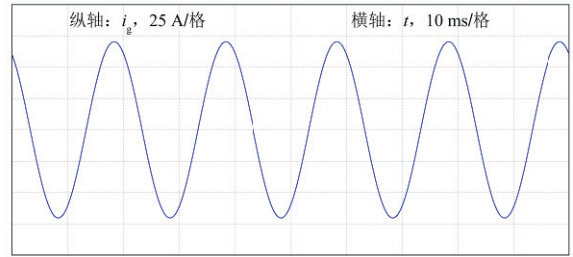
(b) SCR=40



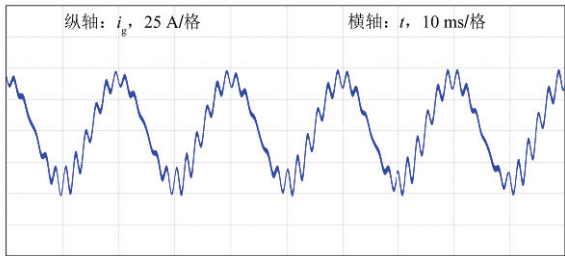
(b) SCR=5



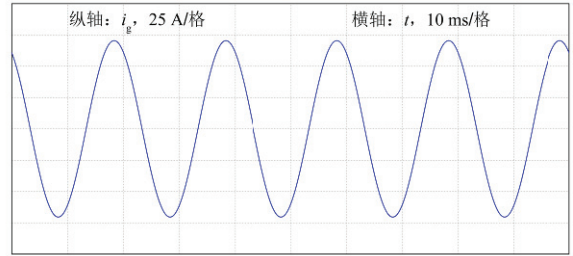
(c) SCR=20



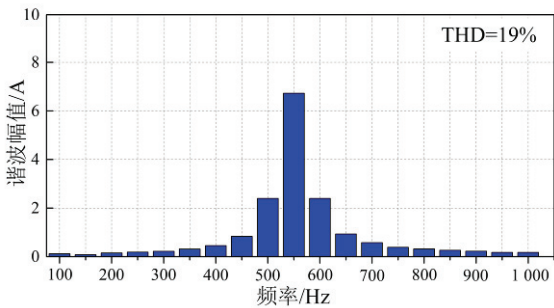
(c) SCR=2



(d) SCR=18.6



(d) SCR=1.34



(e) SCR=18.6 时输出电流谐波分析

图 13 引入误差反馈有源阻尼后不同 SCR 下的仿真结果
Fig.13 Simulated results using various SCRs with the current error feedback-based active damping strategy

图 12 未引入有源阻尼时不同 SCR 下的仿真结果
Fig.12 Simulated results using various SCRs without active damping strategy

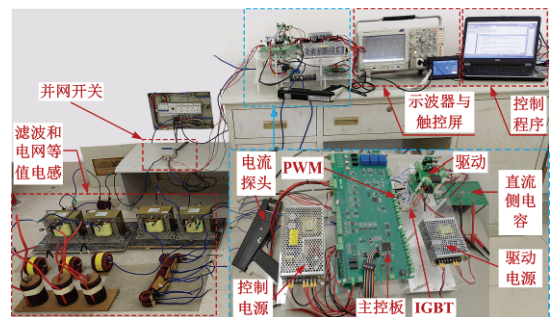


图 14 实验系统

Fig.14 Experimental system

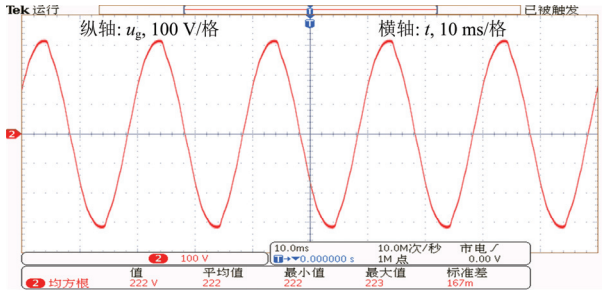


图 15 实验中的电网电压
Fig.15 Grid voltage used for experiment

对电网阻抗鲁棒稳定性的同时对其谐波电压抗扰性几乎没有影响, 因此不仅能够保证变流器在含有背景谐波的高阻抗电网工况下稳定运行, 而且可获得较高的并网电流质量。

参考文献 References

[1] 许津铭, 凌子涵, 程成, 等. 并网逆变器非线性特性建模及稳定性研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 370-385.
XU Jinming, LING Zihan, CHENG Cheng, et al. Overview on non-linear modeling and stability analysis of grid-tied inverters[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 370-385.

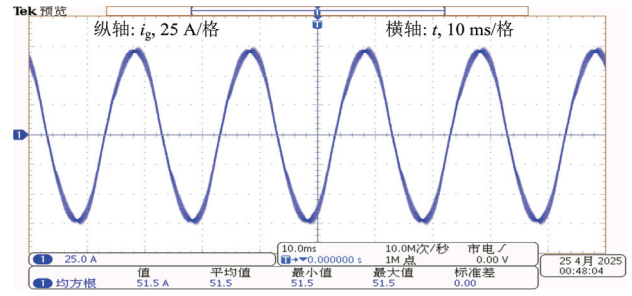
[2] 聂飞, 徐海亮, 刘壮壮, 等. 弱电网下三相并网变流系统全线性自抗扰控制及其小干扰稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 199-209.
NIE Fei, XU Hailiang, LIU Zhuangzhuang, et al. All LADRC control and small signal stability analysis of three-phase grid-connected converter system under weak AC grid condition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 199-209.

[3] 李强, 孙鹏菊, 董光德, 等. 基于模态分析的多逆变器系统串并联谐振特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5269-5280.
LI Qiang, SUN Pengju, DONG Guangde, et al. Series-parallel resonance analysis of multi-inverter system based on modal analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5269-5280.

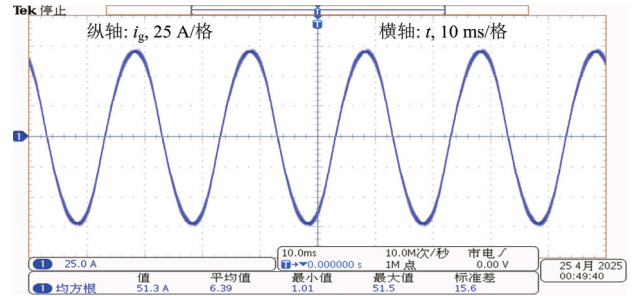
[4] 李梦杰, 谢震, 高翔, 等. 弱电网下双馈风电机组混合功率同步控制策略及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8388-8399.
LI Mengjie, XIE Zhen, GAO Xiang, et al. Hybrid power synchronization control strategy of DFIG-based wind turbines and its stability analysis under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8388-8399.

[5] 齐磊, 赵巍, 孙孝峰, 等. 基于双重稳定约束的屋顶光伏逆变器分布式阻尼重构方案[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 394-405.
QI Lei, ZHAO Wei, SUN Xiaofeng, et al. Distributed damping reconstruction control scheme of rooftop photovoltaic inverters based on dual stability limitations[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 394-405.

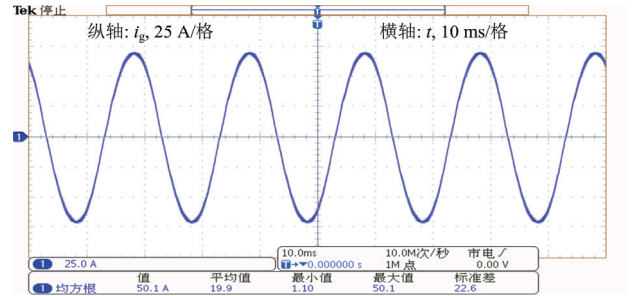
[6] 郭春义, 林欣, 王燕宁, 等. 联接弱交流电网 MMC-HVDC 系统的直流功率传输能力提升方法[J]. 华北电力大学学报, 2023, 50(4): 10-19, 29.
GUO Chunyi, LIN Xin, WANG Yanning, et al. An improvement method of DC power transmission capability for MMC-HVDC system integrated to weak AC grid[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(4): 10-19, 29.



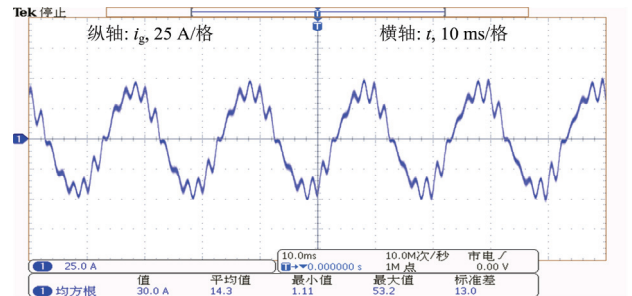
(a) SCR= ∞



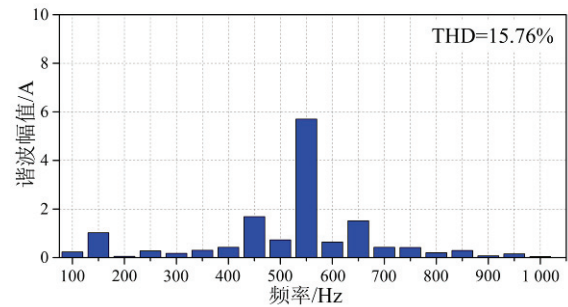
(b) SCR=40



(c) SCR=20



(d) SCR=18.6



(e) SCR=18.6 时输出电流谐波分析

图 16 未引入有源阻尼时不同 SCR 下的实验结果
Fig.16 Experiment results using various SCRs in the absence of active damping strategy

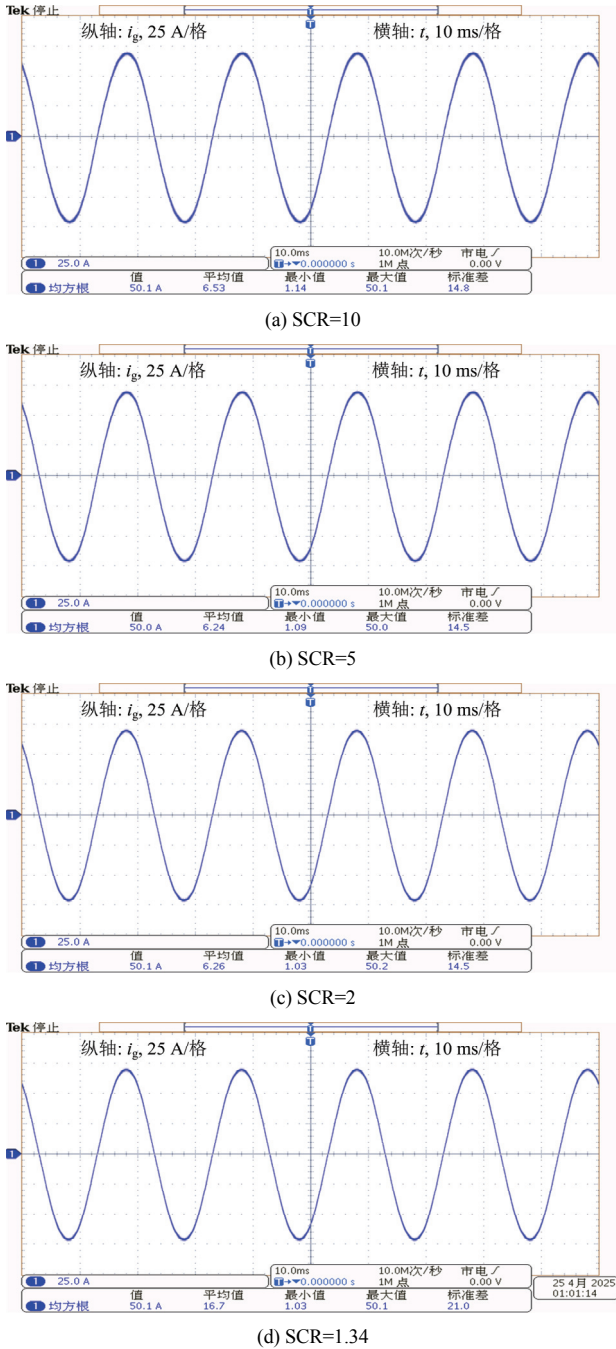


图 17 引入误差反馈有源阻尼后不同 SCR 下的实验结果

Fig.17 Experiment results using various SCRs with the current error feedback-based active damping strategy

[7] 孔睿, 吕晓琴, 王晓茹, 等. 列车混运的车网系统低频振荡建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3768-3780.
KONG Rui, LÜ Xiaoqin, WANG Xiaoru, et al. Modeling and analysis of low frequency oscillation in train-network system under mixed operation of trains[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3768-3780.

[8] 陈继开, 马修伟, 李江, 等. 并联双 APF 交互影响分析[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 956-961.
CHEN Jikai, MA Xiwei, LI Jiang, et al. Analysis on interaction of two-parallel APF[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 956-961.

[9] LU M H, AL-DURRA A, MUYEEN S M, et al. Benchmarking of

stability and robustness against grid impedance variation for LCL-filtered grid-interfacing inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 9033-9046.

[10] XU J M, ZHONG J F, KANG J H, et al. Stability analysis and robust parameter design of DC-voltage loop for three-phase grid-connected PV inverter under weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3776-3787.

[11] 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 1): 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(Supplement 1): 197-204.

[12] 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.

[13] 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偿稳定性提升策略[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.

[14] 杨明, 杨倬, 李玉龙, 等. 弱电网下基于电网电压前馈的并网逆变器阻抗重塑控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2553-2566.
YANG Ming, YANG Zhuo, LI Yulong, et al. Impedance remodeling control strategy of grid-connected inverter based on feedforward voltage under weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2553-2566.

[15] WANG X F, 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.

[16] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高 LCL 型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.
YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.

[17] 曹子恒, 肖先勇, 李媛, 等. 弱电网下 LCL 型并网逆变器的自适应改进前馈控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1567-1576.
CAO Ziheng, XIAO Xianyong, LI Yuan, et al. Adaptive novel feed-forward control strategy for LCL type grid-connected inverters in the weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1567-1576.

[18] 张惠丽, 方天治, 刘昊, 等. 弱电网下基于导纳合成相量法的单相并网逆变器鲁棒性提升技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3213-3223.
ZHANG Huili, FANG Tianzhi, LIU Hao, et al. Technical investigation on robustness enhancement of single-phase grid-connected inverter based on synthesis-admittance-phasor scheme in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3213-3223.

[19] JIA L, RUAN X B, ZHAO W X, 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] 段晓宁, 李萍, 赵峰, 等. 弱电网下基于电容电压全前馈的LCL型并网逆变器稳定性控制[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2140-2151.
DUAN Xiaoning, LI Ping, ZHAO Feng, et al. Stability control of LCL-type grid-connected inverter based on capacitor voltage full feedforward under weak grid condition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2140-2151.
- [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.
- [22] 刘芳, 李研, 何国庆, 等. 极弱电网下直驱风电并网变流器小信号建模及稳定性运行策略分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 167-173.
LIU Fang, LI Yan, HE Guoqing, et al. Small signal modeling and stable operation strategy analysis of direct drive wind power grid-connected converter in extremely weak power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 167-173.
- [23] WANG X H, QIN K, RUAN X B, et al. A robust grid-voltage feedforward scheme to improve adaptability of grid-connected inverter to weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2384-2395.
- [24] 黄通, 陈新, 张东辉, 等. 考虑电压前馈控制的MMC-HVDC并网稳定性分析及其阻抗控制优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 8987-8998.
HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. MMC-HVDC integrated system stability analysis and impedance optimization method with consideration of voltage feed-forward control[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 8987-8998.
- [25] 王渝红, 王馨瑶, 廖建权, 等. 交直流电网宽频振荡产生、辨识及抑制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3148-3162.
WANG Yuhong, WANG Xinyao, LIAO Jianquan, et al. Review of generation, identification and suppression of wide-band oscillation in AC-DC power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3148-3162.
- [26] 潘东华, 阮新波, 王学华, 等. 提高LCL型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-10.
PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 1-10.
- [27] LIN Z H, RUAN X B, ZHANG H, et al. A hybrid-frame control based impedance shaping method to extend the effective damping frequency range of the three-phase adaptive active damper[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 509-521.
- [28] DONG N B, LI M F, CHANG X F, et al. Robust loop correction scheme based on reference model for inverters in weak grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(2): 1696-1704.
- [29] 闫培雷, 葛兴来, 王惠民, 等. 弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2210-2221.
YAN Peilei, GE Xinglai, WANG Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2210-2221.
- [30] REN L T, WANG F, SHI Y J, et al. Coupling effect analysis and design principle of repetitive control based hybrid controller for SVG with enhanced harmonic current mitigation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5659-5669.
- [31] ABUSARA M, SHARKH S, ZANCHETTA P. Adaptive repetitive control with feedforward scheme for grid-connected inverters[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(8): 1403-1410.
- [32] 赵祖熠, 刘李勃, 解大, 等. 基于阻尼器的双馈风力发电系统扭转抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 8-14.
ZHAO Zuyi, LIU Libo, XIE Da, et al. A novel torsional vibration damping method for a DFIG-based system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 8-14.
- [33] 周林, 晁阳, 廖波, 等. 一种基于参考频率电网同步信号实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1353-1359.
ZHOU Lin, CHAO Yang, LIAO Bo, et al. A real-time detecting method for grid synchronization signals based on reference frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1353-1359.
- [34] JI C, ZANCHETTA P, CARASTRO F, et al. Repetitive control for high-performance resonant pulsed power supply in radio frequency applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2660-2670.
- [35] 杨明, 李玉龙, 杨倬, 等. 基于电容电压全前馈的并网逆变器高鲁棒性稳定控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4171-4183.
YANG Ming, LI Yulong, YANG Zhuo, et al. High robust stability control strategy of grid-connected inverter based on capacitor voltage full feedforward[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4171-4183.



YANG Shude
Ph.D.

Corresponding author



YAO Jiayi



ZHANG Xinwen
Ph. D., Professor

杨树德(通信作者)

1986—, 男, 博士, 讲师, 硕导

主要从事可再生能源发电系统并网控制及稳定性方面的研究工作

E-mail: yangshude@yzu.edu.cn

姚嘉懿

2000—, 男, 硕士生

主要从事弱电网下并网变流器稳定性控制方面的研究工作

E-mail: yaojy_1122@qq.com

张新闻

1976—, 男, 博士, 教授, 硕导

主要从事主动配电网电能质量与电力电子变换器控制方面的研究工作

E-mail: cindazm@126.com