

弱电网下三相并网系统自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略研究

杨苓, 许家浩, 陈思哲*, 黎荣伟, 张桂东, 王裕, 章云

(广东工业大学自动化学院, 广东省 广州市 510006)

Control Strategy Study of Adaptive Frequency Coupling Oscillation Suppression Device for Three-phase Grid-connected System Under Weak Grid

YANG Ling, XU Jiahao, CHEN Sizhe*, LI Rongwei, ZHANG Guidong, WANG Yu, ZHANG Yun

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: In the case of weak grid, the interaction between the three-phase grid-tied inverter (GTI) and the AC grid will cause frequency coupling oscillation, threatening the stable operation of the system. The parameters of traditional oscillation suppression strategies cannot be automatically adjusted with changes in working conditions, nor can they adapt to the multi-modal characteristics of frequency coupling oscillation. To address the above problems, this paper first established an impedance model (IM) of grid-connected system with multiple control loops, which illustrated the causes of the system frequency coupling phenomenon. Second, according to the proposed IM, the generalized Nyquist criterion (GNC) was used for discretization stability analysis, which proved that the frequency coupling phenomenon could deteriorate the stability of the system. Then, an adaptive control strategy to suppress frequency coupling oscillation was proposed for grid-connected system in weak grid, which enabled the suppression device to automatically adapt to different system parameters and working conditions. The suppression device could respond to grid oscillations according to the actual grid conditions, and quickly and steadily suppress oscillations generated by frequency coupling. With good dynamics, the power quality of grid can be improved. Finally, experimental verification proved the effectiveness of the proposed suppression device.

KEY WORDS: three-phase grid-tied inverter; impedance model; stability analysis; adaptive; frequency coupling; oscillation suppression device

摘要: 在弱电网情况下三相并网逆变器与交流电网之间的相互作用会引发频率耦合振荡, 威胁系统的稳定运行。传统振荡抑制措施参数无法随之自动调整, 也无法适应频率耦合振荡的多模态特征。针对上述问题, 该文首先建立一种带有多个控制环的并网系统阻抗模型, 该阻抗模型说明系统频率耦合现象产生的原因。其次, 根据所提出的阻抗模型, 利用广义奈奎斯特判据对其进行离散化稳定性分析, 证明频率耦合现象会恶化系统的稳定性。接着提出一种自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略, 使得抑制装置能够自动适应不同的系统参数及工况, 根据实际的电网情况对电网振荡作出反应, 快速并稳定地抑制由系统频率耦合产生的振荡, 具有良好的动态性, 改善了电网电能质量。最后, 通过实验验证, 证明所提出的抑制装置的有效性。

关键词: 三相并网逆变器; 阻抗模型; 稳定性分析; 自适应; 频率耦合; 振荡抑制装置

0 引言

在“碳达峰、碳中和”行动方案的推动下, 新能源分布式发电系统的使用率越来越高^[1-2]。在新能源分布式发电系统中, 电力电子装置被大量应用于电网。我国可再生能源主要集中于西北部等偏远地区, 为了输送电能, 并网逆变器(grid-tied inverter, GTI)与电网之间的传输网络给 GTI 和电网之间引入一定数量的线路阻抗^[3]。此时电网无法被等效为理想电压源, 这种类型的电网称为弱电网^[4]。

在弱电网条件下, 一方面由于较长的输配电线路导致电网阻抗不可忽略, 另一方面 GTI 在公共耦合点处的等效阻抗也是不可忽略的。电网阻抗与逆变器的等效阻抗之间存在的阻抗耦合会在谐波源激励下引发振荡^[5-6], 例如我国云-贵区域光伏发电

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107185); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A151110768)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107185); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2019A151110768).

机组发生的振荡事件^[7]。其中, GTI 中控制器在 dq 轴结构或参数的不对称会导致系统在静止坐标系下存在两个扰动频率分量相互耦合, 在谐波源的激励下, 系统便会产生频率耦合振荡, 危害系统的稳定性。

为了研究并网系统产生的频率耦合振荡, 需要对其进行稳定性分析。目前对于三相 GTI 的稳定性分析方法分为两类, 一是状态空间法, 二是阻抗分析法。相比状态空间法, 阻抗分析法由于其容易分析、便于重塑阻抗的特点更受到学者们的青睐^[8-9]。阻抗分析法使用的前提是建立并网系统的阻抗模型(impedance model, IM)。然而, 由于 GTI 没有固定的直流工作点, 所以传统的小信号阻抗建模方法无法使用^[10]。对此, 有学者提出了两种可行的阻抗建模方法: 序阻抗建模方法^[11]和 dq 域阻抗建模方法^[12-13]。文献[12]在 dq 坐标系下建立了带有反馈控制和锁相环(phase-locked loop, PLL)的三相并网逆变器小信号模型, 揭示了在 PLL 的带宽内逆变器阻抗在 q - q 通道为电阻的负增量。

在现有的研究中, 已经阐述了并网系统频率耦合产生的原因^[14-16]。文献[14]在 dq 坐标系下建立了双馈感应发电机的 IM, 利用广义奈奎斯特判据(generalized Nyquist criterion, GNC)分析得到 PLL 的控制带宽或转子电流控制的不对称性, 会影响系统的频率耦合程度。文献[15]分别在序域和 dq 域下建立了镜像频率解耦(mirror frequency decoupled, MFD)系统, 并说明了系统的镜像频率耦合是由电流控制器在 dq 轴上的不平衡、PLL 的动态特性以及直流电压环的控制器造成的。而且文献[16]还指出 PLL 主要影响系统的 q 轴阻抗, 直流电压环主要影响系统的 d 轴阻抗。不仅如此, 文献[17]说明了电网电感的增大加剧并网系统的频率耦合现象。所以, 电流环在 dq 轴的不对称性、直流电压环与 PLL 的动态特性都是频率耦合产生的原因。

针对并网系统产生的频率耦合现象, 一些学者已经给出了不同的解决方案^[18-23]。文献[18]提出的有源阻尼器可以动态地重塑电网阻抗, 达到抑制振荡的目的。对于电流控制器引起的振荡, 文献[19]提出了一种 PI 控制器加多种 PR 控制器的控制方法, 该方法保证了并网电流的动态响应, 并且能够抑制特定次的谐波。对于直流电压环引起的振荡, 文献[3]提出了一种带有虚拟阻抗的直流侧电压控制方法, 其具体的作用是将逆变器的输出阻抗由负

变为正, 从而减少电压源型逆变器-高压直流输电的直流侧的振荡。对于 PLL 的动态特性引起的振荡, 文献[20]提出了一种前馈控制方法来减轻 PLL 对并网电流的影响; 文献[21]采用不对称的电流控制方法来缓和 PLL 对并网系统的影响; 而文献[22]设计了一种对称的 PLL 结构, 该结构利用复相位角来跟踪电网电压的相角和幅值, 消除了传统 PLL 在阻抗上引起的负增量, 在 PLL 方面不会引起频率耦合。

然而上述对不同频率耦合原因所提出的具有针对性的方法, 需要用到系统中的其他参数来进行控制环节的设计。也就是说, 传统的抑制方法只能对特定的频率耦合振荡进行抑制, 如果改变并网系统的工况, 使频率耦合呈现不一样的模态, 又需要对控制环节重新设计。对此, 本文提出了一种自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略, 使抑制装置能够自动经过一系列的运算获得不同频率耦合情况下电网电流的基频值, 以此来作为频率耦合振荡抑制的基础。相比于传统的抑制方法, 该装置适用于不同工况下的并网系统, 并且当系统的工况变化时, 不需要对装置的参数重新设计, 更具便捷性。

对于所提出的自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略, 本文的主要工作如下:

- 1) 给出并网系统的导纳模型和稳定性分析, 展示频率耦合现象, 揭示系统导纳的非主对角线元素反映了系统频率耦合的程度。
- 2) 提出一种自适应频率耦合振荡抑制装置, 介绍其控制策略, 建立加入抑制装置的并网系统导纳模型并进行稳定性分析。
- 3) 对不同频率耦合现象下和不同负载状态下的并网系统进行实验, 验证其稳定性和动态性以及有效性。

1 并网系统的建模及稳定性分析

1.1 并网系统的导纳模型

图1是并网系统的拓扑结构及控制框图。其中, 主电路部分中的 PV、 C_{dc} 、 U_{dc} 、 L_i 、 L_g 、 u_{gabc} 、 i_{iabc} 、 i_{gabc} 分别为光伏并网、直流侧电容、直流侧电容电压、逆变器滤波电感、电网电感、三相电网电压、经过滤波电感的三相电流、三相电网电流, 其中电网电感值的大小代表电网的强弱程度; 控制部分中的 U_{dc0} 、 i_{d0} 、 i_{q0} 、 i_d 、 i_q 、 u_{iabc} 、 u_d 、 u_q 、 θ_{PLL} 分别为直流电压基准值、 d 轴电流基准值、 q 轴电流基准

值、电网电流 d 轴分量、电网电流 q 轴分量、逆变器驱动电压、电网电压 d 轴分量、电网电压 q 轴分量、PLL 输出相角, $G_u(s)$ 、 $G_{di}(s)$ 、 $G_{qi}(s)$ 、 Q_j 、 $G_{PLL}(s)$ 分别代表直流电压环 PI 控制器、电流环 d 轴 PI 控制器、电流环 q 轴 PI 控制器、解耦系数、PLL 的 PI 控制器。电流环中电网电流通过 Park 变换、控制器和反 Park 变换实现电流控制及能量交互。直流电压环中直流侧电容电压用于获得电流环的 d 轴电流基准值。PLL 中电网电压经过 Park 变换得到电网电压 dq 轴分量, 其中 q 轴分量用于获得电网电压的相位, 以此来同步电流环及 PLL 自身的控制相位。

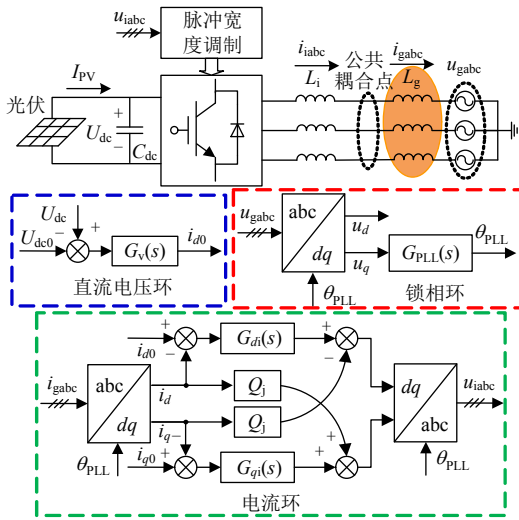


图 1 并网系统的拓扑结构及控制框图

Fig. 1 Topology and control block diagram of grid-connected system

利用文献[17]所推导的 IM, 可以得到并网系统的小信号模型, 如图 2 所示。利用该小信号模型可以推导出并网系统的导纳模型, 如式(1)所示。式(1)中所有传递函数矩阵的含义及详细公式都在附录 A 中展示。

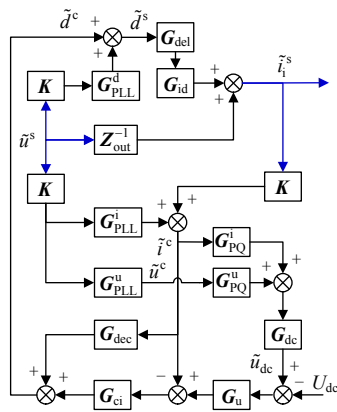


图 2 并网系统的小信号模型

Fig. 2 Small signal model for grid-connected system

$$Y_{il_vl_PLL} = \{Z_{out}^{-1} + G_{id} G_{del} [G_{PLL}^d + (G_{dec} - G_{ci}) \cdot G_{PLL}^i + G_{ci} G_u G_{dc} (G_{PQ}^u G_{PLL}^u + G_{PQ}^i G_{PLL}^i)] K\} \cdot [I - G_{id} G_{del} (G_{dec} - G_{ci} + G_{ci} G_u G_{dc} G_{PQ}^i) K]^{-1} \quad (1)$$

并网系统的参数在表 1 中展示。参照表 1, 利用 Matlab 对并网系统的导纳模型进行 Bode 图绘制, 如图 3 所示。观察 Bode 图, 在 10Hz 到 100Hz 之间导纳非主对角线 Y_{dq} 和 Y_{qd} 的幅值与导纳主对角线 Y_{dd} 和 Y_{qq} 的幅值相近, 也就是说, 导纳非主对角线元素的幅值是不可忽略的, 而并网系统在 dq 轴的耦合程度正是由导纳的非主对角线元素反映的。导纳非主对角线元素幅值越大, 频率耦合的程度越大。

表 1 并网系统的参数

Table 1 Parameters of grid-tied system

参数	数值	参数	数值
直流侧输入电压 U_{dc}/V	600	d 轴电流环比例增益 k_{pid}	0.1
d 轴电网电压 U_d/V	170	d 轴电流环积分增益 k_{iud}	245
q 轴电网电压 U_q/V	0	q 轴电流环比例增益 k_{piq}	6.3
d 轴电流参考值 I_d/A	15	q 轴电流环积分增益 k_{iiq}	785
q 轴电流参考值 I_q/A	0	固有频率 $\omega_n/(\mu rad/s)$	1.23
角频率 $\omega/(rad/s)$	100 π	阻尼系数 ζ	4.74×10^{-3}
逆变器侧滤波电感 L_i/mH	5	时间延迟 T_{del}	$1.5/f_{sw}$
开关频率 f_{sw}/kHz	10	PLL 的比例增益 k_{pPLL}	4.46
直流电压环比例增益 k_{pu}	1.12	PLL 的积分增益 k_{iPLL}	991
直流电压环积分增益 k_{iu}	140.15	直流侧电容 C_{dc}/mF	15

1.2 并网系统的频率耦合现象

参照表 1, 利用 Simulink 搭建并网系统模型并对并网系统进行仿真。图 4 为并网系统的三相并网电流波形及 FFT 分析, 可以看到在频率耦合振荡的影响下, 并网电流不稳定, 波形振荡, 而并网电流的整体畸变率为 10.36%, 并且在基频附近有两处明显的振荡点, 其振荡频率相加为两倍的基频。回顾图 3 并网系统导纳模型的 Bode 图, 图 4 印证了并网系统在 dq 轴的耦合会造成频率耦合现象。

1.3 并网系统的稳定性分析

利用表 1 中的参数及导纳模型绘制并网系统的 Nyquist 图。由文献[17]和图 3 可知, 稳定性分析时考虑 IM 的非对角项能够提高结论的准确性, 所以在绘制奈奎斯特图中考虑了导纳的非对角项。在 dq 坐标系下, 电网的阻抗矩阵为

$$Z_g = \begin{bmatrix} sL_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & sL_g \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $L_g=0.5mH$ 。令 $Y_{il_vl_PLL}=Y_i$, 于是并网系统的回

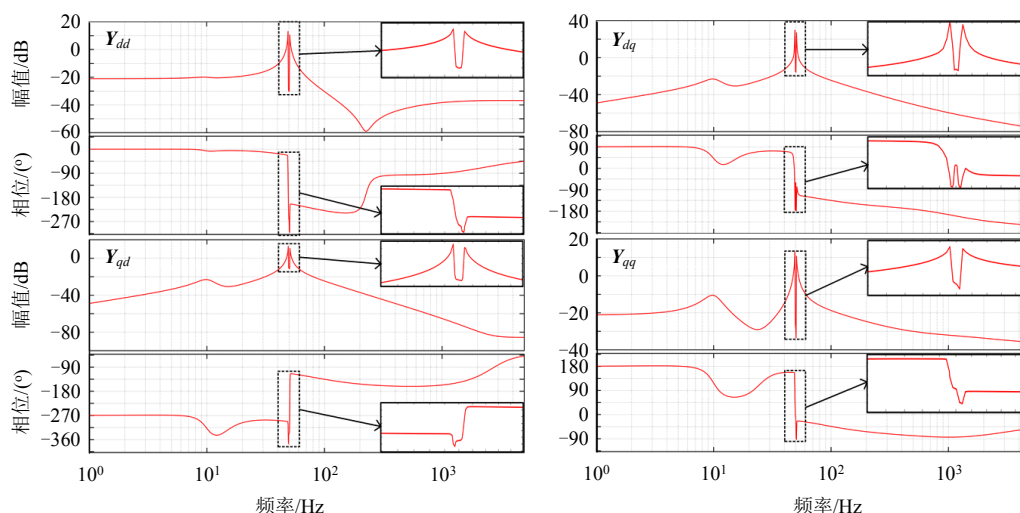


图3 并网系统的导纳 Bode 图

Fig. 3 Admittance Bode of grid-connected system

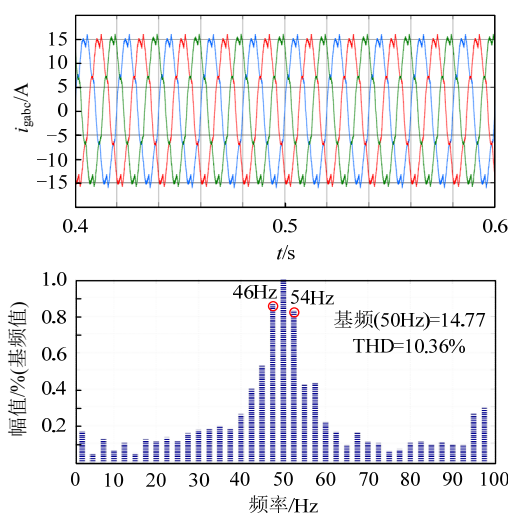


图4 三相并网电流波形及 FFT 分析

Fig. 4 Three-phase grid current waveform and FFT analysis

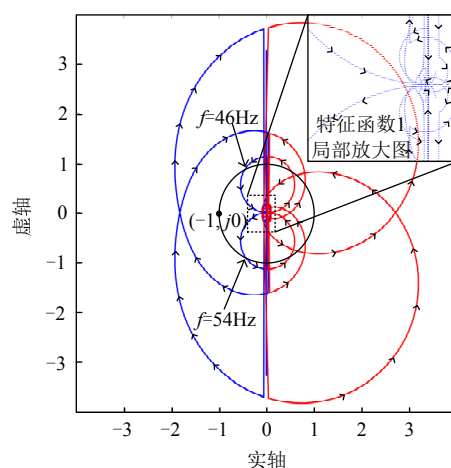
率矩阵为

$$\mathbf{L}_{ZY} = \mathbf{Z}_g \mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{gdd} & \mathbf{Z}_{gdq} \\ \mathbf{Z}_{gqd} & \mathbf{Z}_{gqq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{idd} & \mathbf{Y}_{idq} \\ \mathbf{Y}_{iqd} & \mathbf{Y}_{iqq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由 \mathbf{L}_{ZY} 可以算出其两个特征值, 也就是特征函数。根据 GNC 可以得知, 当且仅当并网系统的两个特征函数在 s 平面环绕 $(-1, j0)$ 点的圈数为 0, 并网系统稳定。

当并网系统发生频率耦合振荡时, 并网系统的两个特征函数在 s 平面环绕 $(-1, j0)$ 点的圈数不为 0, 并且与单位圆在左半平面的交点所对应的频率为系统的振荡频率^[24-25]。图 5 为并网系统的奈奎斯特图。其中特征函数 1 的曲线顺时针环绕 $(-1, j0)$ 点两圈, 并且与单位圆在左半平面的交点所对应的频率为 46 Hz 和 54 Hz, 与图 4 所展示的振荡频率一致。

由此我们可以得知: 逆变器与电网相互作用会使并网系统在 dq 轴产生耦合, 进而导致系统产生频率耦合现象, 而频率耦合现象便会导致并网系统不稳定, 危害电网的电能质量。



蓝线为系统特征函数 1; 红线为系统特征函数 2。

图5 并网系统的 Nyquist 图

Fig. 5 Nyquist plot of grid-connected system

2 并网系统的自适应频率耦合振荡抑制装置的建模与稳定性分析

2.1 所提出的自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略

为抑制并网系统频率耦合产生的振荡, 本文提出了一种自适应频率耦合振荡抑制装置(本文其余部分将其简称为抑制装置)的控制策略。图 6 为该装置的拓扑结构及控制框图。其中, 抑制装置检测实际的电网电流值, 经过一系列的运算, 自动获得电网电流的基准值。抑制装置再将逆变器输出的电流与电网电流基准值比较得到谐波电流。谐波电流再

与抑制装置输出的电流比较, 经过抑制装置的 PI 控制器, 最后获得抑制装置的驱动电压。

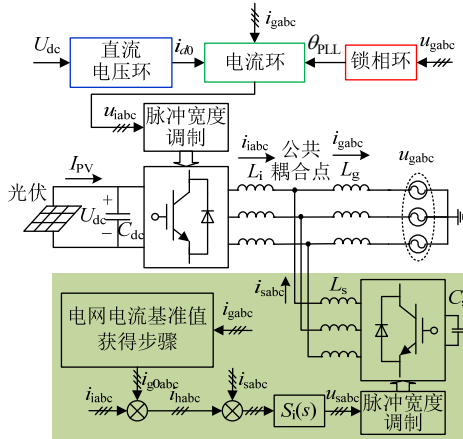


图 6 自适应频率耦合振荡抑制装置拓扑结构及控制框图

Fig. 6 Adaptive frequency coupling oscillation suppression device topology and control block diagram

抑制装置获得电网电流基准值的步骤图为附图 A2。首先, 在步骤①中抑制装置检测电网电流 i_{gabc} , 将其分别与三相正弦信号 s_{abc} 和三相余弦信号 c_{abc} 相乘, 分别经过低通滤波器后得到 6 个信号 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{21} 、 P_{22} 、 P_{31} 、 P_{32} ; 其次, 在步骤②中 P_{11} 与 P_{21} 经过 3 种不同的运算分别得到 i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} , 在步骤③中 P_{12} 与 P_{22} 经过 3 种不同的运算分别得到 i_{a2} 、 i_{b2} 、 i_{c2} , 在步骤④中 P_{31} 与 P_{32} 经过一种运算得到 i_{a3} 、 i_{b3} 、 i_{c3} , 它们的公式如式(4)~(6)所示。

$$i_{a1/b1/c1} = \sqrt{P_{11}^2 + P_{21}^2} \times \sin[\arctan \frac{P_{21}}{P_{11}} + 2\pi ft + (0/-\frac{2\pi}{3}/\frac{2\pi}{3})] \quad (4)$$

$$i_{a2/b2/c2} = \sqrt{P_{12}^2 + P_{22}^2} \times \sin[\arctan \frac{P_{22}}{P_{12}} + 2\pi ft + (0/\frac{2\pi}{3}/-\frac{2\pi}{3})] \quad (5)$$

$$i_{a3} = i_{b3} = i_{c3} = \sqrt{P_{31}^2 + P_{32}^2} \times \sin(\arctan \frac{P_{32}}{P_{31}} + 2\pi ft) \quad (6)$$

最后, 在步骤⑤中将 i_{a1} 、 i_{a2} 、 i_{a3} 相加、将 i_{b1} 、 i_{b2} 、 i_{b3} 相加、将 i_{c1} 、 i_{c2} 、 i_{c3} 相加得到三相电网基准电流 i_{g0abc} 。在这些步骤的帮助下, 即使并网系统改变其负载状态, 导致电网电流的幅值改变, 抑制装置也可以自动获得电网电流的基准值, 以协助装置自身获得电网的谐波电流, 实现频率耦合振荡抑制。

2.2 加入所提出抑制装置的并网系统建模

并网逆变器加入了抑制装置后, 其小信号模型

也会随之发生改变, 如图 7 所示。根据该模型, 可以推导出加入抑制装置的逆变器导纳模型, 导纳模型如式(7)所示。在式(7)中, G_{ids} 为抑制装置占空比到电流的传递函数矩阵, G_s 为抑制装置 PI 控制器传递函数矩阵, 详细公式在附录 A 中展示。

$$Y_{il_vl_PLL_s} = \{Z_{out}^{-1} + G_{id} G_{del} [G_{PLL}^d + (G_{dec} - G_{ci}) \cdot G_{PLL}^i + G_{ci} G_u G_{dc} (G_{PQ}^u G_{PLL}^u + G_{PQ}^i G_{PLL}^i)] K + G_{ids} G_{del} G_s \cdot K G_{id} G_{del} [G_{PLL}^d + (G_{dec} - G_{ci}) G_{PLL}^i + G_{ci} G_u G_{dc} (G_{PQ}^u G_{PLL}^u + G_{PQ}^i G_{PLL}^i)] K\} \cdot \{I - [G_{id} G_{del} (G_{dec} - G_{ci} + G_{ci} G_u G_{dc} G_{PQ}^i) K + G_{ids} G_{del} G_s \cdot K G_{id} G_{del} (G_{ci} - G_{dec} - G_{ci} G_u G_{dc} \cdot G_{PQ}^i) K + G_{ids} G_{del} G_s] + G_{ids} G_{del} G_s G_{id} G_{del} \cdot (G_{dec} - G_{ci} + G_{ci} G_u G_{dc} G_{PQ}^i) K\}^{-1} \quad (7)$$

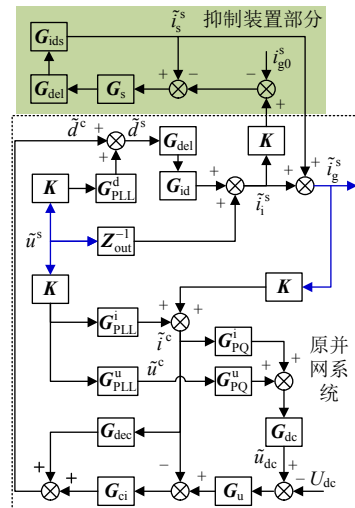


图 7 加入抑制装置的并网系统小信号模型

Fig. 7 Small signal model of grid-connected system with suppression device

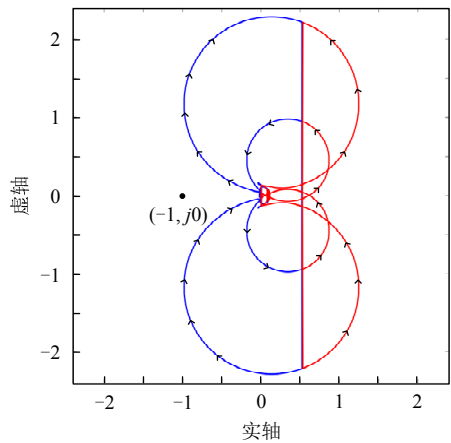
2.3 加入所提出的抑制装置的并网系统稳定性分析

令并网系统的参数与表 1 一致, 抑制装置的参数如表 2 所示。利用参数及导纳模型绘制加入抑制装置的并网系统 Nyquist 图, 如图 8 所示。根据 GNC 可知, 在加入抑制装置的并网系统 Nyquist 图中, 两条特征函数曲线在 s 平面都没有环绕 $(-1, j0)$ 点, 所以并网系统稳定。所以, 并网系统在加入所

表 2 抑制装置的参数

Table 2 Parameters of the suppression device

参数	数值	参数	数值
直流侧电容 $C_s/\mu F$	1	电流控制器比例增益 k_{ps}	5.7
滤波电感 L_s/mH	20	电流控制器积分增益 k_{is}	280
开关频率 f_{sw}/kHz	10	—	—



蓝线为系统特征函数 1；红线为系统特征函数 2。

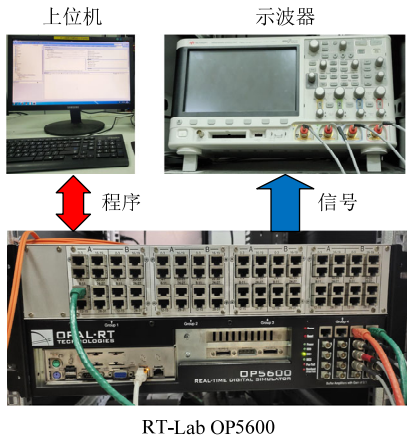
图 8 加入抑制装置的并网系统 Nyquist 图

Fig. 8 Nyquist plot of grid-connected system with suppression device

提出的抑制装置以后稳定性得到了改善。

3 并网系统的自适应频率耦合振荡抑制装置的实验分析

为验证加入抑制装置后并网系统的稳定性和动态性，观察所提抑制装置的有效性，在 RT-Lab OP5600 半实物仿真系统中搭建了本文所建立的并网系统。实验参数与表 1、2 的一致，实验中使用的硬件如图 9 所示。



RT-Lab OP5600

图 9 硬件展示

Fig. 9 Hardware display

本节选取 4 种不同工况对并网系统进行实验分析，分别为工况 A(由电流环 dq 轴不对称、直流电压环动态特性、PLL 动态特性多种频率耦合原因造成的频率耦合)、工况 B(加剧直流电压环对 d 轴影响)、工况 C(加剧 PLL 对 q 轴影响)、工况 D(增大电网阻抗对并网系统影响)，在这 4 种不同工况下，并网系统频率耦合的程度不同，呈现的振荡频率也不尽相同，以此验证所提抑制装置能够自动适应不同的系统参数及工况，实现频率耦合振荡的抑制，

并对并网系统满载和 80%负载两种负载情况的切换下进行实验，以此验证加入抑制装置后并网系统具有良好的动态性。表 3 为并网系统在不同工况下的控制器参数，是根据实际工程中所得到的典型参数。

表 3 并网系统在不同工况下的控制器参数

Table 3 Controller parameters of grid-connected system under different working conditions

	工况 A	工况 B	工况 C	工况 D
参数	多种频率耦合原因	加剧直流电压环对 d 轴影响	加剧 PLL 对 q 轴影响	增大电网阻抗对并网系统影响
k_{pid}	0.1	0.2	0.2	0.1
k_{iid}	245	515	515	245
k_{piq}	6.3	0.2	0.2	6.3
k_{iiq}	785	515	515	785
C_{dc}/mF	15	10	15	15
k_{pu}	1.12	5.4	1.12	1.12
k_{iu}	140.15	673	140.15	140.15
k_{pPLL}	4.46	4.46	6.2	4.46
k_{iPLL}	991	991	1450	991
L_g/mH	0.5	0.5	0.5	0.8

3.1 不同工况下加入抑制装置前后的并网系统实验结果

工况 A：如表 3 所示，电流环控制器 d 轴和 q 轴的 PI 参数是不相同的，不仅如此，直流电压环对 d 轴的影响和 PLL 对 q 轴的影响都是存在的，此时并网系统是由多种频率耦合原因造成的振荡。

工况 B：如表 3 所示，电流环控制器 d 轴和 q 轴的 PI 参数是相同的，直流侧电容减小到了 10mF，直流电压环 PI 控制器的参数 k_{pu} =5.4， k_{iu} =673，PLL 参数不变，此时加剧了直流电压环对 d 轴影响造成的频率耦合。

工况 C：如表 3 所示，电流环控制器 d 轴和 q 轴的 PI 参数是相同的，直流侧电容与直流电压环的 PI 参数与工况 A 一致，PLL 的 PI 控制器的参数为 k_{pPLL} =6.2， k_{iPLL} =1450，此时加剧了 PLL 对 q 轴影响造成的频率耦合。

工况 D：如表 3 所示，工况 D 在工况 A 的基础上将电网电感从 0.5mH 增大至 0.8mH，此时通过调节电网电感来改变电网强弱。电感越大，电网越弱。

分别设置实验参数为工况 A、工况 B、工况 C 和工况 D，并网系统在 0.5s 时将抑制装置切入电路。其中并网系统在工况 A 下加入抑制装置前后并网系统 A 相电网电压和电流波形如图 10 所示，电网电

压和电流为同相位, 逆变器输出有功功率到电网。

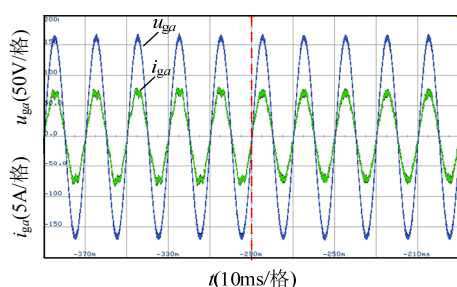


图 10 工况 A 下加入抑制装置前后 A 相电网电压电流实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of voltage and current of phase A grid before and after the suppression device is added under working condition A

图 11—18 分别为并网系统在工况 A、B、C、D 下加入抑制装置前后电流实验波形及工况 A、B、C、D 下并网电流 FFT 实验分析及系统 Nyquist 图。工况 A 系统的 Nyquist 图见图 5、8。以上实验中电流波形在 0.5s 后均由振荡趋于稳定。由于在工况 C 下加剧了 PLL 对 q 轴影响造成的频率耦合的耦合程度更深, 所以图 15 的三相并网电流波形有些许的

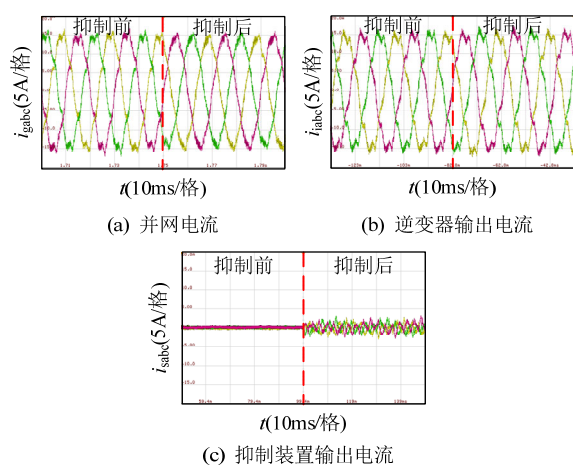


图 11 工况 A 下加入抑制装置前后系统电流实验波形
Fig. 11 Experimental waveforms of the system current before and after the suppression device is added under working condition A

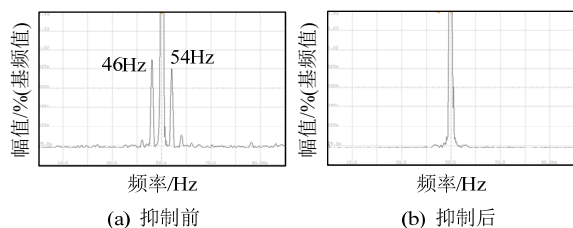


图 12 工况 A 下并网电流 FFT 实验分析
Fig. 12 FFT experimental analysis of grid current under working condition A

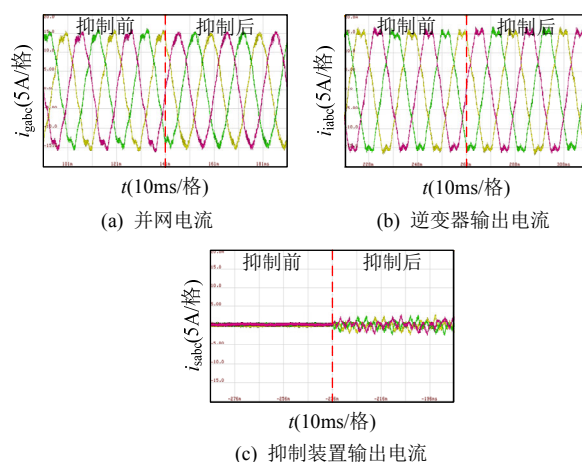


图 13 工况 B 下加入抑制装置前后系统电流实验波形
Fig. 13 Experimental waveforms of the system current before and after the suppression device is added under working condition B

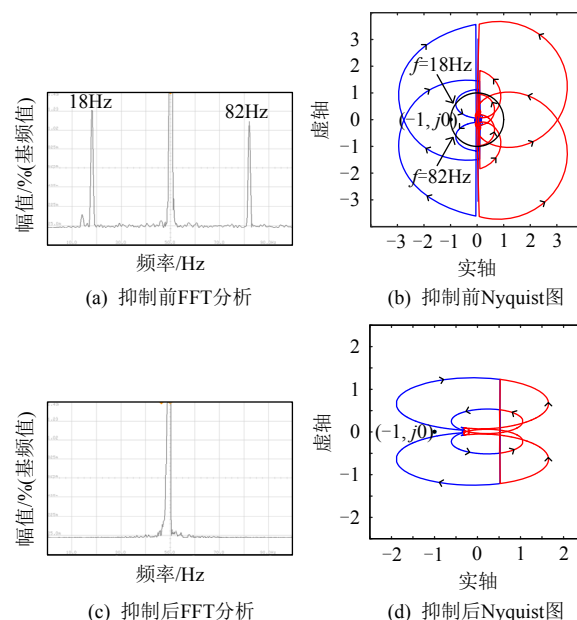


图 14 工况 B 下并网电流 FFT 实验分析及系统 Nyquist 图

Fig. 14 FFT experimental analysis of grid current and Nyquist diagram of system under working condition B

畸变, 但不会影响电网的正常运行。

由图 11—18 可知, 在加入抑制装置之前, 并网电流波形和逆变器输出电流波形都是振荡的, 系统不稳定。加入抑制装置以后, 抑制装置输出电流汇入逆变器输出电流形成了没有振荡的并网电流, 也就是 $I_{gabc} = I_{iabc} + I_{sabc}$, 系统趋于稳定。同时, 振荡点频率的幅值在抑制装置加入后降低到符合并网要求。此外, 并网系统频率耦合振荡的振荡频率, 和系统 Nyquist 图中特征函数 1 与单位圆在左半平面交点所对应的频率是一致的, 它们分别为 46 和 54Hz、18 和 82Hz、4 和 96Hz、48 和 52Hz, 在加入抑制装置后振荡现象都得到了很好的改善。

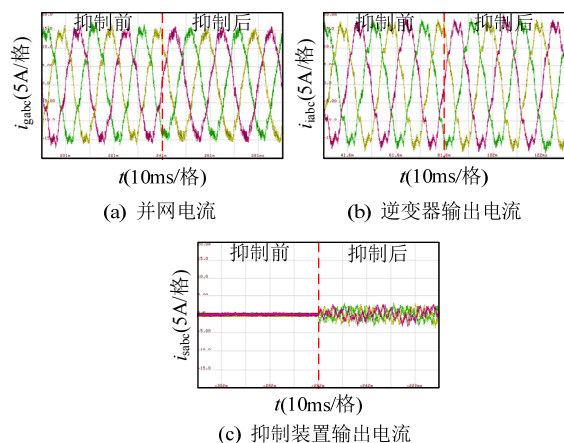


图 15 工况 C 下加入抑制装置前后系统电流实验波形
Fig. 15 Experimental waveforms of the system current before and after the suppression device is added under working condition C

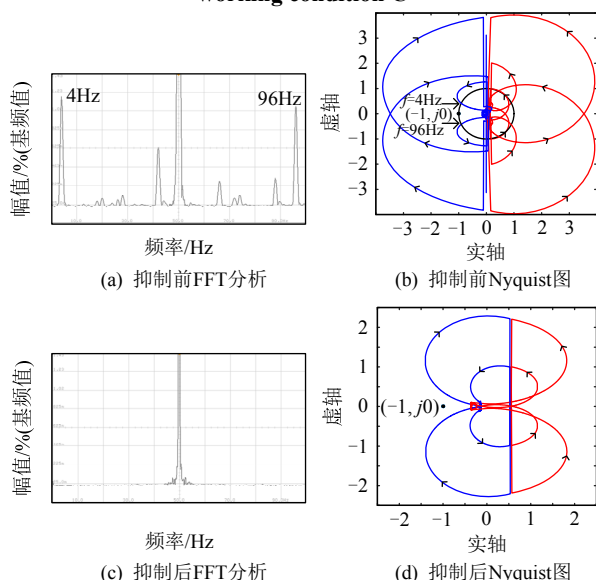


图 16 工况 C 下并网电流 FFT 实验分析及系统 Nyquist 图
Fig. 16 FFT experimental analysis of grid current and Nyquist diagram of system under working condition C

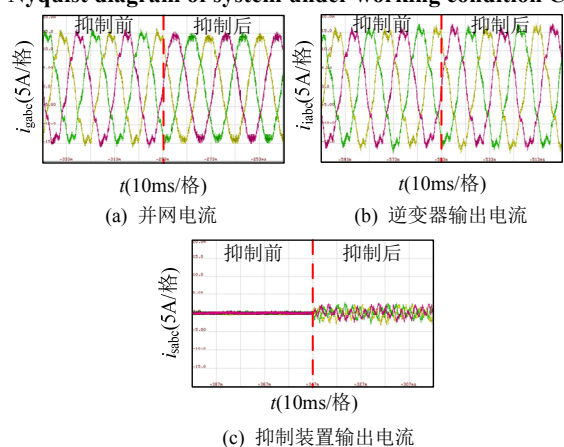


图 17 工况 D 下加入抑制装置前后系统电流实验波形
Fig. 17 Experimental waveforms of the system current before and after the suppression device is added under working condition D

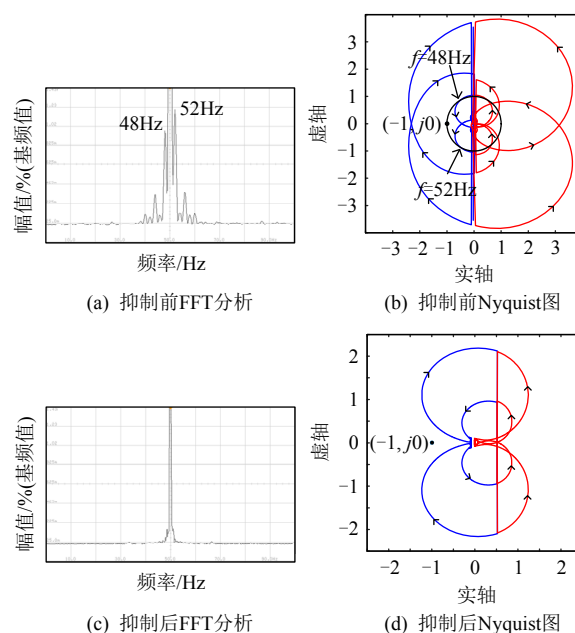


图 18 工况 D 下并网电流 FFT 实验分析及系统 Nyquist 图
Fig. 18 FFT experimental analysis of grid current and Nyquist diagram of system under working condition D

3.2 在工况 A 下所提控制策略与 SAADR-PI 控制器实验结果对比分析

目前已有学者提出了一种自适应自抗扰比例积分(self-adaptive auto disturbance rejection PI, SAADR-PI)控制器, 将其引入到瞬态直接电流控制策略的电压外环控制中, 抑制了由高铁车网耦合系统产生的频率耦合振荡^[26]。以工况 A 为例, 将 ASSDR-PI 控制器引入到本文建立的并网系统中, 与本文所提的控制策略进行对比, 如图 11、12、19 所示。图 19 为系统在工况 A 下采用 SAADR-PI 控制器的并网电流实验波形及 FFT 实验分析。

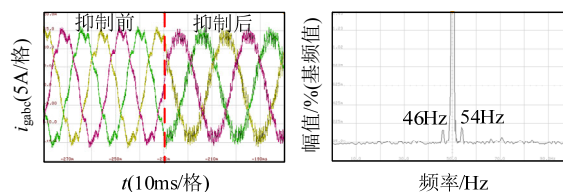


图 19 系统在工况 A 下采用 SAADR-PI 控制器的并网电流实验波形及 FFT 实验分析

Fig. 19 Experimental waveform and FFT analysis of grid current of system under working condition A with SAADR-PI controller

经过对比, 采用 SAADR-PI 控制器抑制后的波形与本文所提方法相比毛刺较多, 抑制后振荡频率处对应的幅值虽然满足并网要求但相对较高。所以, 本文所提出的自适应抑制方法在改善电能质量方面更有优势。此外, 将文献[26]中的方法引入到本文的系统中, 系统工况发生了较大改变。此时

SAADR-PI 控制器需要根据实际情况调整基础 PI 控制器的比例系数和积分系数。而本文所提方法在工况发生较大改变时不需要调整系数,灵活性更强。

3.3 在不同负载状态下加入抑制装置的并网系统实验结果

以工况 A 为例,参照表 1、2,对当前参数下的系统进行仿真,系统在 0.2s 时将抑制装置切入电路,在 0.6s 时切换负载状态。图 20 为加入抑制装置的并网系统从满载切换到 80%负载时三相并网电流实验波形。图 21 为加入抑制装置的并网系统从 80%负载切换到满载时三相并网电流实验波形。其中,图 20 在 0.6s 从满载状态切换为 80%负载时,并网电流快速平稳地降低幅值,并且具有良好的波形;图 21 在 0.6s 从 80%负载的状态切换为满载时,并网电流快速平稳地升高幅值,并且具有良好的波形。

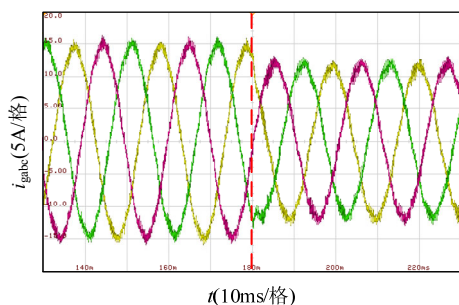


图 20 从满载切换到 80%负载时三相并网电流实验波形
Fig. 20 Three-phase grid current experimental waveforms when switching from full load to 80% load

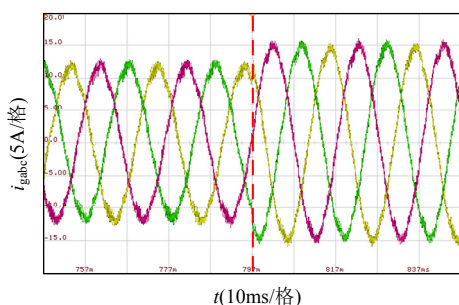


图 21 从 80%负载切换到满载时三相并网电流实验波形
Fig. 21 Three-phase grid current experimental waveforms when switching from 80% load to full load

以上在不同工况下加入抑制装置的实验中,由多种频率耦合原因、加剧直流电压环对 d 轴影响、加剧 PLL 对 q 轴影响和增大电网阻抗对并网系统影响这 4 种工况导致的频率耦合振荡,在加入抑制装置后都得到了有效抑制,并且在负载状态切换的实验中,并网电流都能够快速平稳地升高或降低幅值,同时没有发生振荡,具有良好的波形。以上实验证明所提出的自适应频率耦合振荡抑制装置的有效性。

4 结论

本文提出了一种自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略来抑制三相并网系统频率耦合产生的振荡,得出以下结论:

1) 在 dq 坐标系下建立了考虑频率耦合的并网系统导纳模型,其 Bode 图、Nyquist 图和 FFT 分析印证了并网系统频率耦合的程度由导纳的非主对角线元素反映,并且频率耦合现象危害着并网系统的稳定性。

2) 为抑制并网系统的频率耦合现象,本文提出了一种自适应频率耦合振荡抑制装置的控制策略。该装置能够适应不同工况下的电网,自动获得电网电流的基频值,以此来快速灵活地抑制多模态的频率耦合振荡。

3) 利用 GNC 对加入抑制装置的并网系统导纳模型进行离散化分析,分析结果证明了抑制装置能够改善并网系统的稳定性。对加入抑制装置的并网系统在不同频率耦合原因的工况下和不同负载的工况下进行实验,验证其稳定性和动态性以及有效性。

参考文献

- [1] 黄旭程,何志兴,刘亚丽,等.考虑光伏发电单元孤岛检测影响的直流电网稳定性分析与阻尼控制[J].中国电机工程学报,2021,41(1):109-122.
HUANG Xucheng, HE Zhixing, LIU Yali, et al. Stability analysis and damping control of DC grid considering PV generators with island detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 109-122(in Chinese).
- [2] 康勇,林新春,潘辰,等.弱电网下采用 SVC 与 SVG 补偿后新能源并网变换器的功率传输特性分析[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2115-2124.
KANG Yong, LIN Xinchun, PAN Chen, et al. Analysis of power transmission characteristics of renewable energy grid-connected converter considering SVC and SVG compensation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2115-2124(in Chinese).
- [3] WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. A virtual phase-lead impedance stability control strategy for the maritime VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(12): 5475-5486.
- [4] 华淼杰.弱电网条件下并网逆变器控制系统的稳定性分析[D].南京:南京航空航天大学,2014.
HUA Miaojie. Research on the stability of grid-connected inverter control system under weak grid conditions[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014(in Chinese).
- [5] WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept,

- modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [6] 杨苓, 陈燕东, 罗安, 等. 多机并联接入弱电网的改进型带阻滤波器高频振荡的抑制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2079-2091.
YANG Ling, CHEN Yandong, LUO An, et al. Suppression method of high-frequency oscillation by improved notch filter for multi-parallel inverters connected to weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2079-2091(in Chinese).
- [7] 马燕峰, 蒋云涛, 陈磊, 等. 光伏电站自抗扰附加阻尼控制抑制低频振荡策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1741-1747.
MA Yanfeng, JIANG Yuntao, CHEN Lei, et al. An ADRC additional damping control strategy research on low frequency oscillation suppression of photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1741-1747(in Chinese).
- [8] 刘威, 谢小荣, 王衡, 等. 基于频率耦合阻抗模型的并网逆变器全工况小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7212-7220.
LIU Wei, XIE Xiaorong, WANG Heng, et al. Frequency-coupled impedance model-based small-signal stability analysis of grid-tied converters under all operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7212-7220(in Chinese).
- [9] 年珩, 李萌, 陈亮, 等. 采用多正弦信号注入的宽频带并网逆变器频率耦合特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7408-7419.
NIAN Heng, LI Meng, CHEN Liang, et al. Measurement method for broadband frequency coupling characteristics of grid-connected inverter using multi-sine signal injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7408-7419(in Chinese).
- [10] SUN Jian. Small-signal methods for AC distributed power systems—a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2545-2554.
- [11] 武相强, 王赞程, 陈新, 等. 考虑频率耦合效应的三相并网逆变器序阻抗模型及其交互稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1605-1616.
WU Xiangqiang, WANG Yuncheng, CHEN Xin, et al. Sequence impedance model and interaction stability research of three-phase grid-connected inverters with considering coupling effects[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1605-1616(in Chinese).
- [12] WEN Bo, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [13] 唐冰婕, 迟永宁, 田新首, 等. 基于阻抗模型闭环极点的双馈风电系统次同步振荡稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 871-879.
TANG Bingjie, CHI Yongning, TIAN Xinshou, et al. Stability analysis of subsynchronous oscillation in DFIG-based wind power system based on closed-loop poles of impedance model[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 871-879(in Chinese).
- [14] XU Yunyang, NIAN Heng, WANG Tao, et al. Frequency coupling characteristic modeling and stability analysis of doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1475-1486.
- [15] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG Chen, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the dq-domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [16] BAKHSHIZADEH M K, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Couplings in phase domain impedance modeling of grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6792-6796.
- [17] XU Jiahao, YANG Ling, CHEN Sizhe, et al. Impedance model and stability analysis of three-phase grid-connected inverter in vehicle-to-grid[C]//2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). Hong Kong, China: IEEE, 2020: 1-7.
- [18] 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.
- [19] ZHOU Xiandong, HUANG Peng, YU Weigang, et al. The control strategy of Harmonic suppression of Photovoltaic grid-connected inverter based on PI+MPR[C]//2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid(eGRID). Xiamen, China: IEEE, 2019: 1-5.
- [20] ZHANG Xueguang, XIA Danni, FU Zhichao, 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.
- [21] DU Xiong, WANG Guoning, SHI Ying, et al. Using asymmetric current controller to improve the stability of grid-inverter system due to PLL effect[C]//2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics(COMPEL). Stanford: IEEE, 2017: 1-7.
- [22] QI Yang, FANG Jingyang, LIU Jiazhe, et al. Coordinated control for harmonic mitigation of parallel voltage-source inverters[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(3): 276-283.
- [23] YANG Dongsheng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Symmetrical PLL for SISO impedance modeling and enhanced stability in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1473-1483.
- [24] 李小强, 伍小杰, 耿乙文, 等. 感性电网阻抗下三相光伏逆变器稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2906-2916.
LI Xiaoqiang, WU Xiaojie, GENG Yiwen, et al. Stability

analysis of three-phase PV inverter under inductive grid impedance condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2906-2916(in Chinese).

- [25] 汪海蛟, 何国庆, 刘纯, 等. 计及频率耦合和汇集网络的风电场序阻抗模型等值方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 87-92.

WANG Haijiao, HE Guoqing, LIU Chun, et al. Equivalent method for sequence impedance model of wind farms considering frequency coupling and collecting network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 87-92(in Chinese).

- [26] 许加柱, 程慧婕, 黄文, 等. 自适应自抗扰比例积分控制下的高速铁路网耦合系统低频振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4035-4045.

XU Jia Zhu, CHENG Huijie, HUANG Wen, et al. A novel approach based on self-adaptive auto disturbance rejection proportional integral controller to suppress low frequency oscillation of high speed railway electric multiple units-traction network coupling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4035-4045(in Chinese).

附录 A 三相并网逆变器导纳模型的推导过程补充及抑制装置获得电网电流基准值的步骤图

直流侧电压扰动与 d 轴有功功率的传递函数矩阵推导过程:

图 A1 为直流侧电源逆变的简化结构, 由图可得直流母线电容电压动态方程:

$$C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = I_{PV} - I_{dc} \quad (A1)$$

式中 U_{dc} 、 I_{PV} 和 I_{dc} 分别是直流母线电压、直流侧输出电流和逆变器侧输入电流。

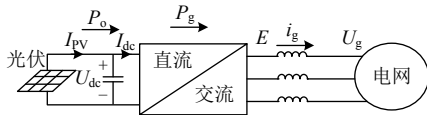


图 A1 直流侧电源逆变的简化过程

Fig. A1 Simplified process of DC side power inverter

忽略逆变器损耗, 直流侧输出功率为

$$p_o = U_{dc} I_{PV} \quad (A2)$$

系统输入至电网功率为

$$p_g = U_{dc} I_{dc} = 1.5 u_d i_d \quad (A3)$$

式中: p_g 为交流侧功率; u_d 为电网电压的 d 轴分量; i_d 为逆变器输出至电网的网侧电感电流的有功分量。

直流电压环直接对电网电流控制器的 d 轴产生影响, 所以将式(A1)的动态方程经过拉氏变换, 再将式(A3)代入变换后的式(A1), 可得到直流侧电压扰动与电网控制器 d 轴有功功率的关系式:

$$\tilde{u}_{dc} = \frac{3}{2(I_{PV} - sC_{dc}U_{dc})} \tilde{u}_d^{cc} \quad (A4)$$

所以可以得到传递函数矩阵:

$$\mathbf{G}_{dc} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2(I_{PV} - sC_{dc}U_{dc})} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (A5)$$

PLL 的小信号传播路径传递函数矩阵推导过程:

从系统 dq 坐标系到控制器 dq 坐标系的传递函数矩阵可以用 $\mathbf{T}_{\Delta\theta}$ 表示。

$$\mathbf{T}_{\Delta\theta} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta & \sin \Delta\theta \\ -\sin \Delta\theta & \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (A6)$$

系统 dq 坐标系中的电压和电流经过 $\mathbf{T}_{\Delta\theta}$ 进入控制器 dq 坐标系进行反馈控制, 再将控制产生的占空比指令经过 $\mathbf{T}_{\Delta\theta}$ 的逆矩阵进入系统 dq 坐标系, 控制逆变器。于是:

$$\begin{cases} u^c = \mathbf{T}_{\Delta\theta} \cdot u^s \\ i^c = \mathbf{T}_{\Delta\theta} \cdot i^s \\ d^s = \mathbf{T}_{\Delta\theta}^{-1} \cdot d^c \end{cases} \quad (A7)$$

式中: 上标 s 为在系统 dq 坐标系下的变量; 上标 c 为在控制器 dq 坐标系下的变量。

由式(A6)~(A7)可知, 系统 dq 坐标系和控制器 dq 坐标系下的电压小信号扰动关系:

$$\begin{bmatrix} U_d^c + \tilde{u}_d^c \\ U_q^c + \tilde{u}_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(0 + \Delta\tilde{\theta}) & \sin(0 + \Delta\tilde{\theta}) \\ -\sin(0 + \Delta\tilde{\theta}) & \cos(0 + \Delta\tilde{\theta}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_d^s + \tilde{u}_d^s \\ U_q^s + \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} \quad (A8)$$

PLL 传递函数为

$$\mathbf{G}_{PLL} = \frac{f_{PLL}}{s + U_d^s f_{PLL}} \quad (A9)$$

则由式(A8)~(A9)可知:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_d^c \\ \tilde{u}_q^c \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & U_q^s \mathbf{G}_{PLL} \\ 0 & 1 - U_d^s \mathbf{G}_{PLL} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} \quad (A10)$$

于是得到 dq 坐标系下系统电压到控制器电压的小信号扰动矩阵 \mathbf{G}_{PLL}^u , 同理可得 dq 坐标系下系统占空比到控制器占空比的小信号扰动矩阵 \mathbf{G}_{PLL}^d 、 dq 坐标系下系统电流到控制器电流的小信号扰动矩阵 \mathbf{G}_{PLL}^i 。

$$\mathbf{G}_{PLL}^u = \begin{bmatrix} 1 & U_q^s \mathbf{G}_{PLL} \\ 0 & 1 - U_d^s \mathbf{G}_{PLL} \end{bmatrix} \quad (A11)$$

$$\mathbf{G}_{PLL}^d = \begin{bmatrix} 0 & -D_q^s \mathbf{G}_{PLL} \\ 0 & D_d^s \mathbf{G}_{PLL} \end{bmatrix} \quad (A12)$$

$$\mathbf{G}_{PLL}^i = \begin{bmatrix} 0 & I_q^s \mathbf{G}_{PLL} \\ 0 & -I_d^s \mathbf{G}_{PLL} \end{bmatrix} \quad (A13)$$

$$\mathbf{G}_{id} = \frac{-U_{dc}}{(sL_g)^2 + (\omega L_g)^2} \begin{bmatrix} sL_g & \omega L_g \\ -\omega L_g & sL_g \end{bmatrix} \quad (A14)$$

$$\mathbf{G}_{del} = \begin{bmatrix} \frac{1 - 0.5T_{del}s}{1 + 0.5T_{del}s} & 0 \\ 0 & \frac{1 - 0.5T_{del}s}{1 + 0.5T_{del}s} \end{bmatrix} \quad (A15)$$

式中 $T_{del} = 1.5/f_{sw}$, 其中 f_{sw} 为开关频率;

$$\mathbf{G}_{dec} = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_i / U_{dc} \\ \omega L_i / U_{dc} & 0 \end{bmatrix} \quad (A16)$$

$$\mathbf{G}_{ci} = \begin{bmatrix} k_{pid} + k_{iid}/s & 0 \\ 0 & k_{piq} + k_{iiq}/s \end{bmatrix} \quad (A17)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \omega_n^2 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) & 0 \\ 0 & \omega_n^2 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \end{bmatrix} \quad (A18)$$

式中: ω_n 为信号调节滤波器的自然频率; ζ 为信号调节滤波器的阻尼系数。

$$\mathbf{G}_u = \begin{bmatrix} k_{pu} + k_{iu}/s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A19})$$

$$\mathbf{G}_{PQ}^i = \begin{bmatrix} U_d^s & U_q^s \\ -U_q^s & U_d^s \end{bmatrix} \quad (\text{A20})$$

$$\mathbf{G}_{PQ}^u = \begin{bmatrix} I_d^s & I_q^s \\ I_q^s & -I_d^s \end{bmatrix} \quad (\text{A21})$$

$$\mathbf{G}_{ids} = \frac{-U_{dcs}}{(sL_s)^2 + (\omega L_s)^2} \begin{bmatrix} sL_s & \omega L_s \\ -\omega L_s & sL_s \end{bmatrix} \quad (\text{A22})$$

式中: U_{dcs} 为抑制装置直流侧电压; L_s 为抑制装置滤波电感。

$$\mathbf{G}_s = \begin{bmatrix} k_{ps} + \frac{k_{is}}{s} & 0 \\ 0 & k_{ps} + \frac{k_{is}}{s} \end{bmatrix} \quad (\text{A23})$$

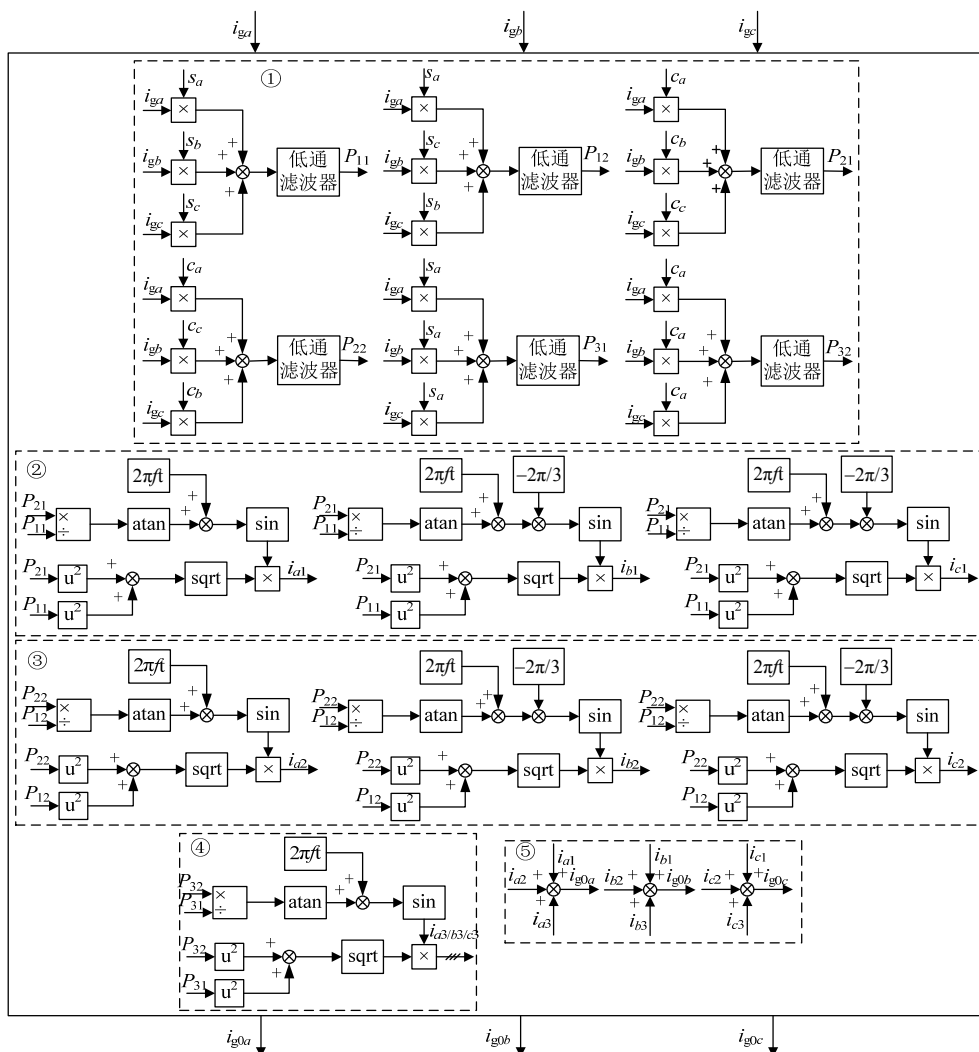
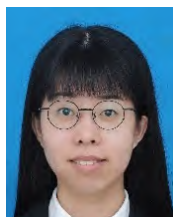


图 A2 抑制装置获得电网电流基准值的步骤

Fig. A2 Steps for the suppression device to obtain the reference value of the grid current



杨苓

在线出版日期: 2022-04-29。

收稿日期: 2021-06-30。

作者简介:

杨苓(1992), 女, 工学博士, 讲师, 研究方向为并网逆变器的建模与稳定性分析, 1650148795@qq.com;

*通信作者: 陈思哲(1981), 男, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电与储能、锂电池能量管理、动力电池梯次利用, sizhe.chen@gdut.edu.cn。

(实习编辑 张文鑫)

Control Strategy Study of Adaptive Frequency Coupling Oscillation Suppression Device for Three-phase Grid-connected System Under Weak Grid

YANG Ling, XU Jiahao, CHEN Sizhe*, LI Rongwei, ZHANG Guidong, WANG Yu, ZHANG Yun
(School of Automation, Guangdong University of Technology)

KEY WORDS: three-phase grid-tied inverter; impedance model; stability analysis; adaptive; frequency coupling; oscillation suppression device

As plenty of parallel inverters connected to weak grid at the point of common coupling (PCC), the line impedance between the grid-connected inverter and the grid cannot be ignored, and the grid condition at this time is weak grid. There is a coupling between the grid impedance and the equivalent impedance of the inverter. Among them, the controller structure and parameters are asymmetry under the dq -axis in the grid-connected inverter, which will lead to the existence of two disturbance frequency components coupled to each other in the stationary coordinate system. Under the excitation of harmonic sources, the system will then generate frequency coupling oscillations, which endangers the stability of the system.

In this paper, an adaptive control strategy to suppress frequency coupling oscillation is proposed for grid-connected system in weak grid, which enables the suppression device to automatically adapt to different system parameters and working conditions, as shown in Fig. 1.

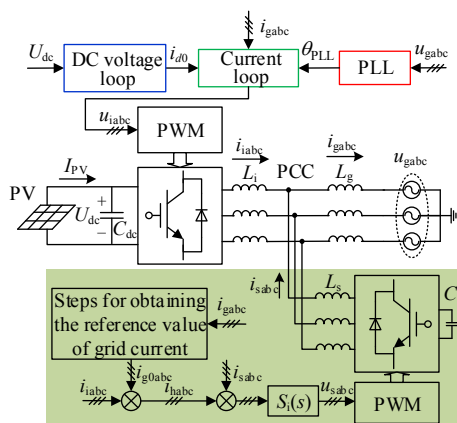


Fig. 1 Adaptive frequency coupling oscillation suppression device topology and control block diagram

The suppression device detects the actual grid current value, and after a series of calculations, it automatically obtains the reference value of the grid current. Then, the suppression device compares the

output current of inverter with the reference value of the grid current to obtain the harmonic current. The harmonic current is compared with the output current of the suppression device, and the result is obtained through the PI controller to obtain the driving voltage of the suppression device.

The steps for the suppression device to obtain the grid current reference value are as follows: First, the suppression device detects the grid current i_{gabc} , multiplies it with a three-phase sine signal s_{abc} and a three-phase cosine signal c_{abc} , and obtains six signals P_{11} , P_{12} , P_{21} , P_{22} , P_{31} , P_{32} after passing through a low-pass filter. Second, P_{11} and P_{21} undergo three different calculations to obtain i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} , P_{12} and P_{22} obtain i_{a2} , i_{b2} , i_{c2} respectively after three different calculations, and P_{31} and P_{32} obtain i_{a3} , i_{b3} , i_{c3} after one calculation. Finally, i_{a1} , i_{a2} , i_{a3} are added together, i_{b1} , i_{b2} , i_{b3} are added together, and i_{c1} , i_{c2} , i_{c3} are added together to obtain the three-phase grid reference current i_{g0abc} .

Fig. 2 shows the Nyquist plot of the grid-connected system. Before adding the suppression device, the curve of the characteristic function 1 of the system encircles the point $(-1, j0)$ twice clockwise, and the system is unstable. After adding the suppression device, the curve of the system does not encircle the point $(-1, j0)$, and the system is stable.

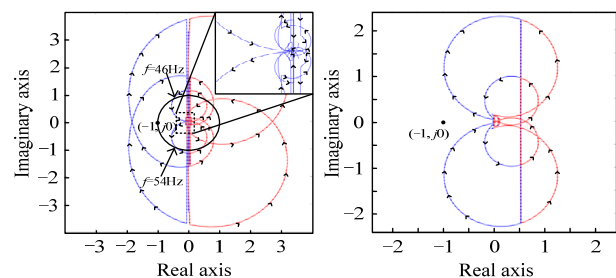


Fig. 2 Nyquist plot of grid-connected system before and after adding suppression device (blue line is system characteristic function 1, red line is system characteristic function 2)