

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220628

基于阻抗分析法的并网变流器稳定性统一分析方法研究

刘普¹, 崔艺博¹, 刘兆峰², 梁燕¹

(1. 郑州轻工业大学电气工程系, 河南 郑州 450002; 2. 上海理工大学电气工程系, 上海 200093)

摘要: 变流器作为可再生能源发电并网的关键设备, 在与交流电网互联时产生的系统振荡问题日益增多。阻抗模型是分析“变流器-电网”耦合系统稳定性的基础。首先基于 $\alpha\beta$ 坐标系建立了特定工况下的并网系统阻抗数学模型; 在此基础上, 进一步建立全工况下的统一阻抗数学模型。由该阻抗模型可知, 运行工况与控制器参数是影响系统阻抗特性的主要因素。通过 Nyquist 稳定判据量化分析两种影响因素对系统稳定性的影响。然后提出增大控制环参数 K_{pi} 以抑制系统在小干扰下的谐振, 增强系统稳定性。最后, 不同运行工况下的仿真与实验结果验证了所提出的全工况阻抗数学模型分析系统稳定性的准确性, 同时也验证了稳定性提升方法的有效性。

关键词: 并网变流器; 阻抗扫频; 奈奎斯特稳定判据; 谐振抑制

The unified analysis method of grid-connected converter stability based on impedance analysis

LIU Pu¹, CUI Yibo¹, LIU Zhaofeng², LIANG Yan¹

(1. Department of Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: As key equipment for the integration of renewable energy generation into the grid, converters are increasingly experiencing system oscillations when interconnected with the AC grid. The impedance model is the basis for analyzing the stability of the "converter-grid" coupled system. Based on the $\alpha\beta$ coordinate system, this paper establishes the grid system impedance mathematical model of specific conditions. Then a unified impedance mathematical model under all working conditions is established. From the impedance model, the operational condition and controller parameters are the main factors influencing the system impedance characteristics. The Nyquist stability criterion is used to quantitatively analyze the influence of two kinds of influence factors on system stability. Then it proposes to increase control loop K_{pi} parameters to suppress system resonance under a small signal and enhance system stability. Finally, the simulation and experimental results under different operating conditions verifies the accuracy of the proposed mathematical model of impedance in all operating conditions in analyzing the stability, and also verifies the effectiveness of the stability improvement method.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0106300).

Key words: grid-connected converter; impedance sweep; Nyquist stability criterion; resonance suppression

0 引言

随着经济社会的迅速发展, 煤炭、石油、天然气等化石资源逐步走向枯竭, 能源问题及环境污染成为了危及人类社会的主要原因^[1-2]。2020 年我国发布的《新时代的中国能源发展》白皮书中, 提出了加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系, 促使新能源迅速发展。但新能源发电并网变流器接入弱

电网时, 并网变流器与电网之间存在一定的动态交互, 会对并网系统的稳定运行产生影响, 针对该问题许多国内外学者展开了广泛研究^[3-5]。

分析并网逆变器稳定性, 传统的状态空间方法更多地关注变流器本体的稳定性^[6-9], 文献^[10-12]通过状态空间分析方法, 建立三相变流器并网系统的状态空间方程, 求解得出系统的特征值和特征向量判定系统是否稳定, 并且可以量化分析参与计算的变量, 确定影响变流器并网系统稳定性的主要因素。但状态空间方法在考虑锁相环(phase-locked loop, PLL)控制和电网阻抗的影响时, 稳定性分析就

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0106300);
河南省科技攻关项目资助(222102220089)

变得非常复杂^[13-16], 适用性有待进一步验证。有学者提出了利用谐波线性化在静止坐标下建立变流器阻抗数学模型^[15]。文献[17-18]利用谐波线性化建立变流器并网系统的一维序阻抗模型, 但变流器内部存在锁相环等不对称控制环节, 导致变流器端口正负序阻抗出现明显的频率耦合效应, 一维系统扩展至二维或高维的阻抗矩阵, 增加了稳定性分析工作的难度。为此, 有学者提出了基于阻抗的分析方法, 该方法着重研究并网逆变器与电网之间的交互稳定性, 把变流器和电网分别视为独立的子系统, 以阻抗的形式表示其特性, 再采用奈奎斯特稳定判据对交互系统的稳定性进行分析^[19]。文献[20-21]通过在 dq 坐标下进行数学建模, 但 dq 坐标系控制变量间存在耦合效应, 导致阻抗模型变为二维矩阵形式, 同样增加了稳定性分析的难度。文献[22]通过在两相静止坐标系下建立系统阻抗数学模型, 不用考虑系统耦合效应, 可以直观地表述系统阻抗特性。

阻抗分析法是由阻抗匹配法则衍生出来的^[23], 该法则适用于直流电网的阻抗稳定判据, 是分析级联系统稳定性的经典方法。基于频域的阻抗分析法通常需要建立变流器端口的阻抗特性, 利用电路理论进行稳定性分析。变流器并网系统的主电路拓扑如图 1(a)所示, 通过将并网系统划分为变流器侧与电网侧两个独立系统, 对电网侧和变流器侧分别建立阻抗模型, 再运用奈奎斯特判据即可判定变流器并网系统的稳定性。

变流器并网系统的等效电路如图 1(b)所示, 交流电网等效为电压源 $U_g(s)$ 与电网等效阻抗 $Z_g(s)$ 串联, 变流器等效为电流源 $I_{vsc}(s)$ 与变流器侧等效阻抗 $Z_{vsc}(s)$ 并联, 并假设变流器与无穷大电网连接时是稳定的且电网不接变流器时也是稳定的。图 1(b)中变流器的输出电流 $I_g(s)$ 如式(1)所示。

$$I_g(s) = \left[I_{vsc}(s) - \frac{U_g(s)}{Z_{vsc}(s)} \right] \frac{1}{1 + Z_g(s)/Z_{vsc}(s)} \quad (1)$$

式中: $I_g(s)$ 为网侧电流; $I_{vsc}(s)$ 为变流器侧电流; $Z_g(s)$ 为电网侧等效阻抗。

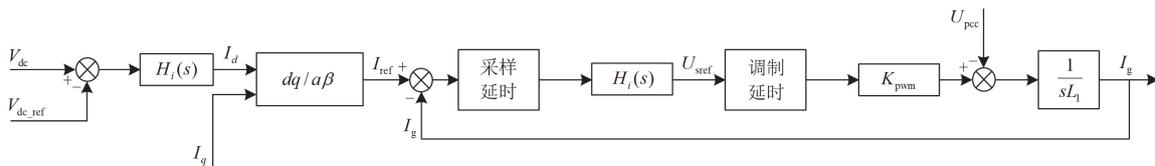


图 3 系统简化模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the simplified model of the system

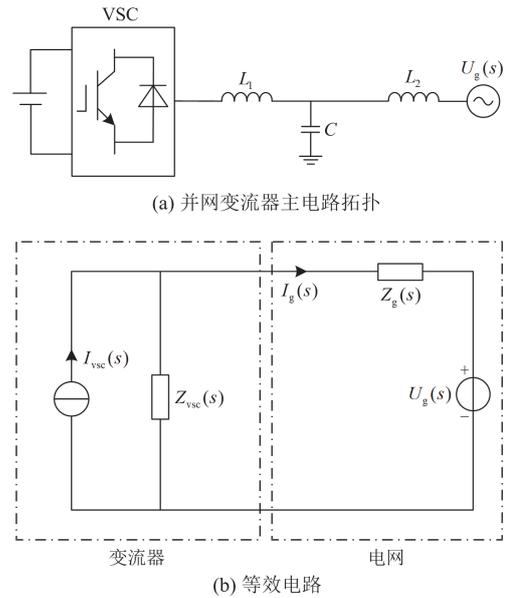


图 1 阻抗法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the impedance method

电网与变流器均可单独稳定运行, 变流器输出 $I_g(s)$ 的稳定性取决于 $1/(1 + Z_g(s)/Z_{vsc}(s))$ 的大小, $1/(1 + Z_g(s)/Z_{vsc}(s))$ 可等效为如图 2 所示的负反馈系统。

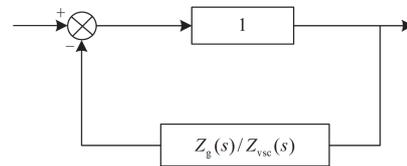


图 2 等效负反馈系统框图

Fig. 2 Block diagram of an equivalent negative feedback system

该负反馈系统中 $Z_g(s)/Z_{vsc}(s)$ 即为电网侧阻抗与变流器侧阻抗之比, 采用奈奎斯特判据即可判断系统的稳定性^[24]。

本文采用基于频域的阻抗分析法, 在两相静止坐标系下建立系统阻抗数学模型, 该模型不存在耦合效应。通过简化得出系统简化模型如图 3 所示, 利用 KCL、KVL 即可建立变流器端口数学模型。图中 U_{sref} 为 PR 控制输出电压。

1 变流器并网系统模型

1.1 阻抗数学模型

本文主要对基于 LCL 滤波器的三相两电平并网变流器接入弱电网系统的稳定性进行研究, 研究方法可以推广到多电平拓扑的并网变流器。基于 LCL 滤波器的三相两电平并网变流器系统控制框图如图 4 所示。

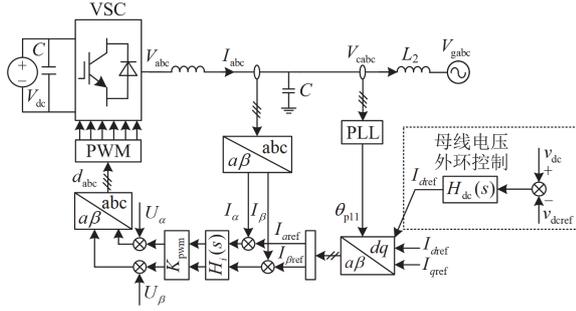


图 4 并网变流器系统控制框图

Fig. 4 Block diagram of the grid-connected converter system and control

图中 $H_i(s)$ 为电流环传递函数; K_{pwm} 为调制增益。系统主回路与控制环节参数如表 1 所示。

表 1 三相并网变流器参数

参数	数值	参数	数值
直流母线电压 V_{dc}	30 V	变流器侧滤波电感 L_1	2 mH
交流电网电压 V_g	380 V	变压器漏感 L_2	0.067 mH
变压器输出电压 V_{g0}	15 V	采样延时时间常数 T_c	10^{-4} s
隔离变压器变比	25.33	调制延时时间常数 T_s	10^{-6} s
滤波电容 C	2 μ F	控制频率	10 kHz

图 4 所示的三相平衡系统可以简化为单相系统进行分析, 其单相等效电路如图 5 所示。

a 相基尔霍夫电压回路方程如式(2)所示。

$$u_a - u_{ga} = L_1 \frac{di_a}{dt} + u_{ca} + L_2 \frac{di_{ga}}{dt} \quad (2)$$

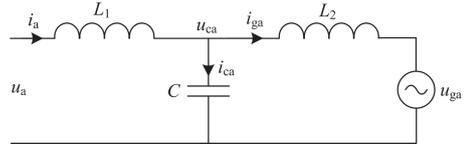


图 5 单相等效电路

Fig. 5 Single-phase equivalent circuit

式中: u_a 和 i_a 分别为三相静止坐标系下整流器 a 相输出电压和电流; u_{ga} 和 i_{ga} 分别为电网电压和电流; u_{ca} 为电容 C 上的电压。

据此可以得出三相静止坐标系下的数学模型如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = L_1 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_2 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

将三相静止坐标系经 Clark 变换转换为两相静止坐标系, 如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix} = L_1 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + L_2 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

LCL 滤波器并网变流器系统控制框图如图 6 所示。

若单独分析变流器侧阻抗, 在根据 Bode 图和极坐标确定系统潜在谐振点时, 分析极坐标时要考虑图像与正虚轴的交点。变流器阻抗为容性阻抗, 与感性电网相互作用, 使得系统阻抗最小, 在系统受到小扰动时, 系统发生谐振。本文建立数学模型时将变流器阻抗与电网阻抗同时考虑在内(如式(5)所示), 对其 Bode 图和极坐标图进行分析时略有差异, 需分析 Bode 图幅值最小处以及极坐标图距 0 点最近处。

对应 U_g 处阻抗传递函数为

$$\frac{U_g}{I_{L2}} = \frac{I_{ref} H_i(s) K_{pwm}}{(1 + CsH_i(s)K_{pwm} + Cs^2L_1) + sL_2} - \frac{H_i(s)K_{pwm} + sL_1 + sL_2 + Cs^2H_i(s)K_{pwm}L_2 + Cs^3L_1L_2}{1 + CsH_i(s)K_{pwm} + Cs^2L_1} \quad (5)$$

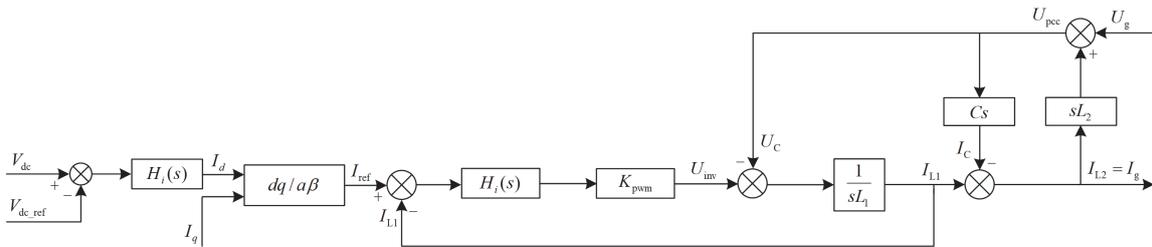


图 6 系统控制框图

Fig. 6 Block diagram of system control

式中: I_{L2} 为网侧电流; I_{ref} 为电流指令。

其中 I_{ref} 可以用含 U_g 的变量进行替换, 可以根据 I_{ref} 与 U_g 的关系设定运行工况。例如容性工况时,

$$I_{ref} = j \frac{2U_g}{12.25}$$

式(5)所示阻抗模型为特定运行工况阻抗数学模型, 对不同运行工况进行分析时, 需进一步建立全工况阻抗通式。并网系统的运行工况与电流、电压的相位关系密切相关, 据此可以建立电流与电压关系如式(6)所示。

$$\frac{i_{ref}}{u_{pcc}} = \frac{I_{amp}(A + jB)}{U_{amp}} \quad (6)$$

式中: u_{pcc} 为公共连接点电压; I_{amp} 为给定电流幅值; U_{amp} 为电压幅值。其中 A 、 B 的取值对应了不同的运行工况情况, 具体如表 2 所示。

表 2 A 、 B 不同的取值所对应的运行工况

Table 2 Operating conditions corresponding to different values of A and B

A 、 B 取值	$B=0$	$B>0$	$B<0$
$A=0$	—	纯容性无功	纯感性无功
$A>0$	纯有功	感性有功	感性有功
$A<0$	纯负有功	感性有功	感性无功

将式(6)代入到式(5)中, 化简得出可表示全工况的阻抗表达式如式(7)所示。

$$\frac{U_g}{I_{L2}} = \frac{H_i(s)K_{pwm}}{(1+CsH_i(s)K_{pwm}+Cs^2L_1)} \frac{I_{amp}(A+Bi)U_{pcc}}{U_{amp}} - \frac{H_i(s)K_{pwm} + sL_1 + sL_2 + Cs^2H_i(s)K_{pwm}L_2 + Cs^3L_1L_2}{1+CsH_i(s)K_{pwm}+Cs^2L_1} + sL_2 \quad (7)$$

根据式(7)可对并网系统全工况运行的稳定性进行分析。

1.2 系统谐振点频率理论计算

根据式(7)与表 1 数据得出容性无功工况阻抗 Bode 图如图 7 所示。

根据图 7 可以得出此时系统潜在谐振点为 131 Hz。通过极坐标进行对比验证, 确定系统谐振点是否为 131 Hz。画出 131 Hz 附近扰动频率下的系统极坐标图如图 8 所示, 图中红点对应系统最小阻抗, 即系统谐振点。

通过式(7)将阻抗数学模型设置为感性无功工况和有功工况, 按照容性无功工况分析方法, 得出感性无功工况和有功工况下的阻抗 Bode 图和极坐标图, 如图 9—图 12 所示。

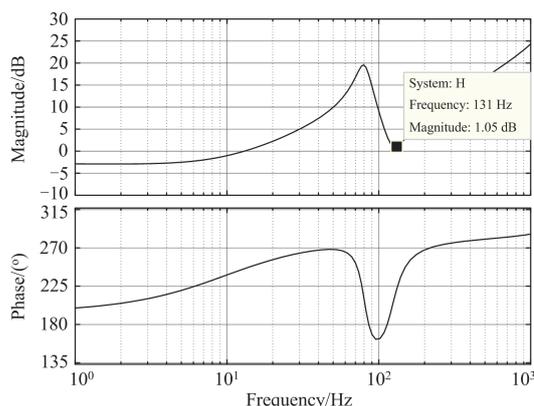


图 7 容性无功工况系统阻抗 Bode 图

Fig. 7 Bode diagram of the system impedance under capacitive reactive condition

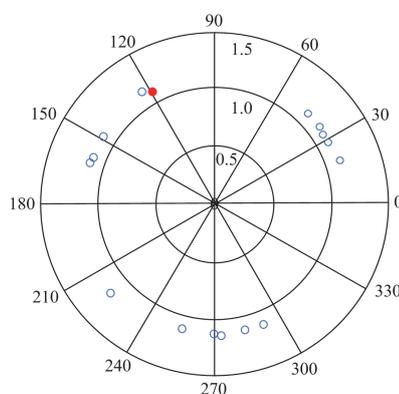


图 8 容性无功工况系统阻抗极坐标图

Fig. 8 Polar diagram of the system impedance under capacitive reactive condition

根据图 9—图 12 可得, 并网系统在不同的运行工况下谐振点均在 130 Hz 附近, 存在 0.77%~1.53% 的误差, 具体结果如表 3 所示。

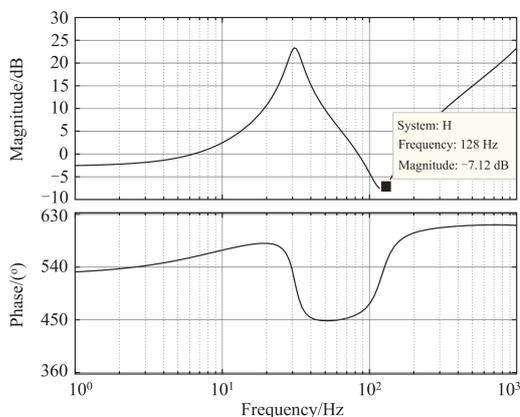


图 9 感性无功工况系统阻抗 Bode 图

Fig. 9 Bode diagram of the system impedance under inductive reactive condition

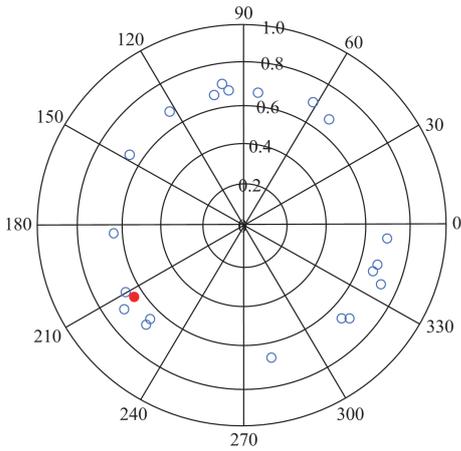


图 10 感性无功工况系统阻抗极坐标图
Fig. 10 Polar diagram of the system impedance under inductive reactive power condition

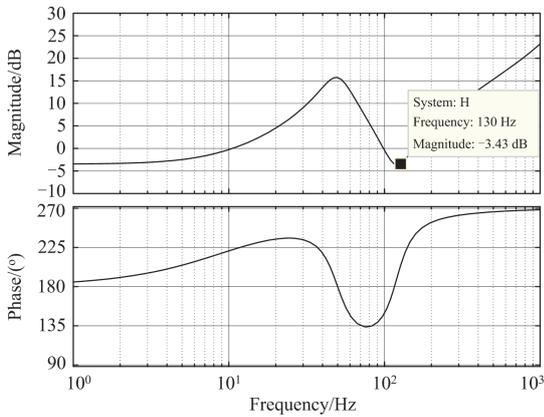


图 11 有功工况系统阻抗 Bode 图
Fig. 11 Bode diagram of the system impedance under active power condition

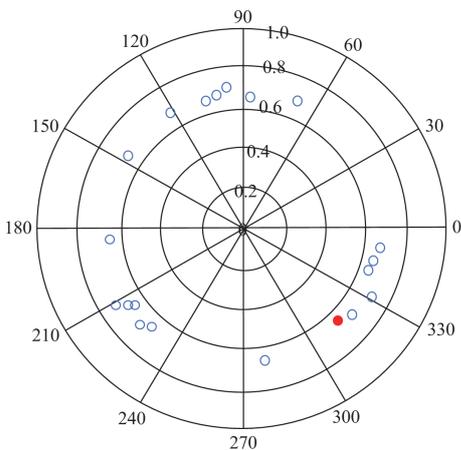


图 12 有功工况系统阻抗极坐标图
Fig. 12 Polar diagram of the system impedance under active power condition

表 3 不同工况下谐振点频率理论分析结果

Table 3 Results of theoretical analysis of resonance point frequencies under different operating conditions

工况	谐振点频率/Hz
容性无功	131
感性无功	128
有功运行	130

2 并网变流器系统稳定性分析

2.1 稳定性判据

在对并网变流器接入弱电网系统稳定性继续进行分析时, 阻抗比稳定判据具有很大的优势, 该方法主要依据系统的传递函数求出系统的等效输出阻抗, 将并网变流器系统等效为诺顿或者戴维南电路模型后, 结合奈奎斯特稳定判据来判断系统稳定性。

奈奎斯特判据以复变函数为数学基础, 将系统开环频率响应与右半平面闭环极点数(不包括虚轴上的极点)联系在一起, 当系统的半闭合曲线不穿过 $(-1, j0)$ 点, 且逆时针包围临界点 $(-1, j0)$ 的圈数等于反馈系统的开环传递函数的正实部极点数, 由幅角原理可知, 闭合曲线包围函数的零点即反馈控制系统正实部极数为

$$Z = P - R = P - 2N \quad (8)$$

系统等效开环传函为

$$G_s(s) = Y_s(s)Z_G(s) \quad (9)$$

假设变流器在并入无穷大电网时是稳定的且电网自身也是稳定的, 变流器的控制器在设计时也没有右半平面的极点, 由于 $G_s(s)$ 对变流器侧和电网侧的传递函数进行了混合, 在此进一步假设开环传递函数 $G_s(s)$ 没有右半平面的极点。则系统的稳定判据可以描述如下:

- 1) 当奈奎斯特曲线不包围 $(-1, 0j)$ 点时, 系统稳定。
- 2) 当奈奎斯特曲线包围 $(-1, 0j)$ 点时, 系统失稳。
- 3) 当奈奎斯特曲线经过 $(-1, 0j)$ 点时, 系统临界稳定。

当 $G_s(s)$ 存在右半平面的极点时, 奈奎斯特判据依然可以适用, 判定稳定条件为奈奎斯特曲线逆时针包围点 $(-1, 0j)$ 的圈数等于开环传函不稳定极点数。依照该稳定判据, 分析并网系统在小干扰下的稳定情况。

2.2 影响系统稳定性的因素

并网系统发生谐振的主要原因是: 在小干扰的作用下, 电网阻抗与变流器端口阻抗产生谐振, 变流器端口的容性阻抗的虚部与电网感抗相互抵消, 系统阻抗非常小, 产生很大的谐振电流, 对电流和

系统的稳定运行造成了极大的影响。所以研究并网变流器的稳定性,归根结底就是要分析对系统阻抗的影响因素。如式(7)所示,除系统主回路参数外,控制器参数以及系统运行工况均对系统阻抗产生影响。所以对控制器参数和运行工况进行分析,研究这两种因素对系统稳定性的影响。

1) 不同控制器参数对系统稳定性的影响

根据式(7)可得出,阻抗传递函数虚部呈容性,而电网阻抗一般呈感性,因此在扰动源的作用下,容性感性相互抵消,阻抗 Z 如式(10)所示,其大小取决于实部 a ,而 K_{pi} 是实部 a 的主要组成部分。

$$Z = a + jb \quad (10)$$

本文通过研究电流环控制器参数中的 K_{pi} 值对系统阻抗的影响,分析控制器参数对并网变流器系统稳定运行的影响。首先通过 Nyquist 判据分析 K_{pi} 对系统稳定性的影响,选取 $K_{pi} = 0.75$ 、1.5、4、6 进行对比分析。Nyquist 曲线如图 13 所示。

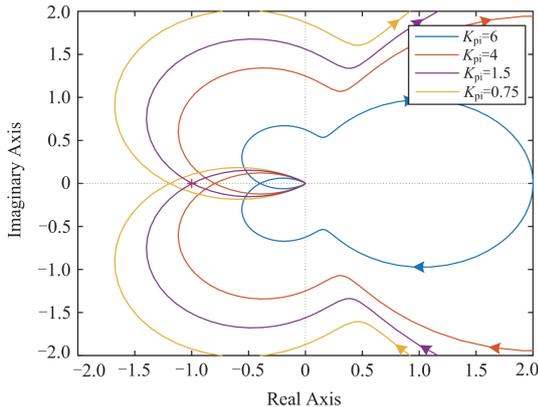


图 13 Nyquist 判据分析图

Fig. 13 Nyquist criterion analysis diagram

根据图 13 可以得出, $K_{pi} = 0.75$ 时, Nyquist 曲线包围 $(-1, 0j)$ 点,依据 2.1 节所述的系统稳定判据,此时系统处于不稳定状态。 $K_{pi} = 1.5$ 时, Nyquist 曲线经过 $(-1, 0j)$ 点,此时系统处于临界稳定状态。 $K_{pi} = 4$ 和 6 时, Nyquist 曲线不包围 $(-1, 0j)$ 点,此时系统处于稳定状态。

由此可以得出,随着 K_{pi} 的增大, Nyquist 曲线从包围 $(-1, 0j)$ 点,经过 $(-1, 0j)$ 点,再到不包围 $(-1, 0j)$ 点。由不稳定状态,到达临界稳定状态,再到达稳定状态, K_{pi} 对系统的稳定性起着至关重要的作用。

2) 不同运行工况对系统稳定性的影响

根据式(7)可以得出,系统阻抗传递函数除了控制器参数会对其产生影响外,电流指令 I_{ref} 也会对

系统阻抗造成影响。根据上文可知,并网变流器可以四象限运行,而不同的电流指令 I_{ref} 可以改变系统运行工况,所以本文对不同的运行工况也进行研究,分析运行工况对系统稳定性的影响。

3 仿真研究

为了验证并网变流器接入弱电网系统谐振频率理论计算的正确性,根据选取的拓扑以及控制方式,搭建三相两电平并网变流器仿真模型进行仿真研究。

仿真研究的主要内容如下:

① 扫频分析得出系统谐振点;② 不同运行工况对系统稳定性的影响;③ 控制器参数对系统稳定性的影响。

3.1 谐振点分析

通过仿真验证系统谐振点,设定 I_{ref} 与 U_g 的关系,可以使系统运行在有功工况,令 $K_{pi} = 0.75$ 。向系统中注入 1~1000 Hz 扰动后扫频得出的系统阻抗与理论分析得出的阻抗值对比如图 14 所示。

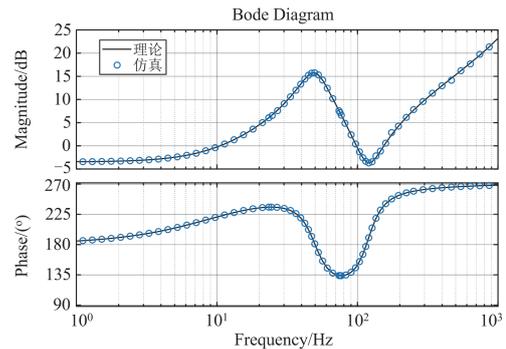


图 14 仿真扫频与理论分析阻抗对比图

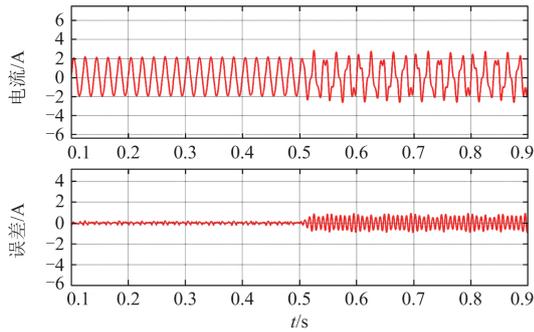
Fig. 14 Simulated sweep versus theoretical analysis of impedance

根据图 14 可得,仿真扫频得出的系统阻抗与理论分析结果基本一致。系统谐振点均为 130 Hz。

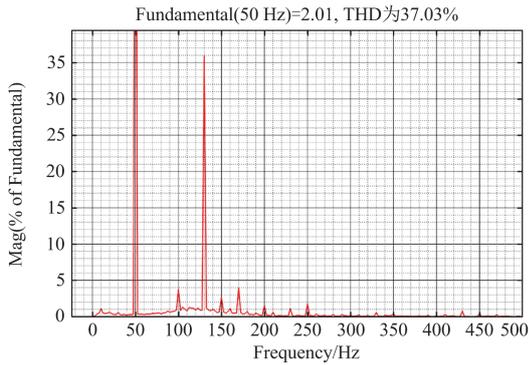
在 1 s 时,加入频率为 130 Hz 的谐波源。系统在加入谐波前后电流变化情况如图 15(a)所示(上半部分为电流值,下半部分为电流给定值与实际值的误差,下文若无特殊说明,均为此情形)。电流 FFT 分析如图 15(b)所示。

从图 15(a)可知,在加入谐波后,电流给定值与实际值误差增大 3 倍,THD 增大到 37.03%,由此可以得出系统在 130 Hz 干扰源的作用下,发生了振荡,系统稳定性受到影响。

从图 15(b)可知,电流在 130 Hz 处谐波含量最高为 36%,为了排除不是系统加入谐波所造成的谐波含量增高,而是谐振引起的谐波含量增高,向系统分别注入 200 Hz 谐波和 300 Hz 谐波进行仿真分析,对系统稳定性的影响分别如图 16 和图 17 所示。



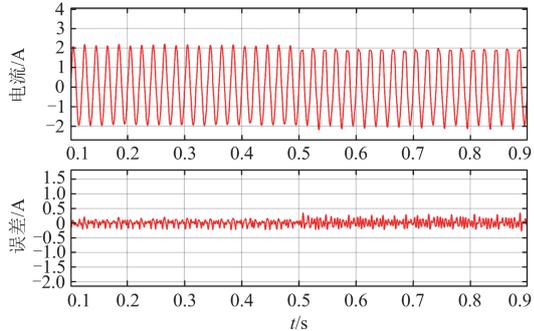
(a) 加入谐波前后实际电流变化情况



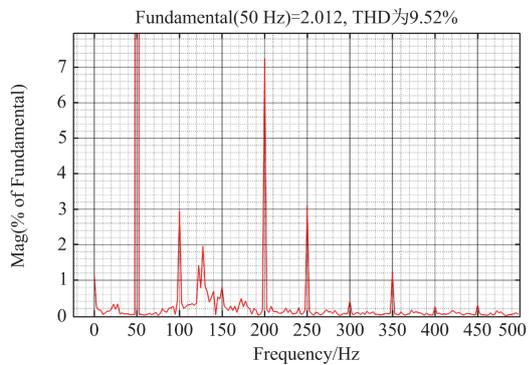
(b) 加入谐波后实际电流FFT分析

图 15 加入 130 Hz 谐波对系统稳定性的影响

Fig. 15 Effect of adding 130 Hz harmonics on system stability



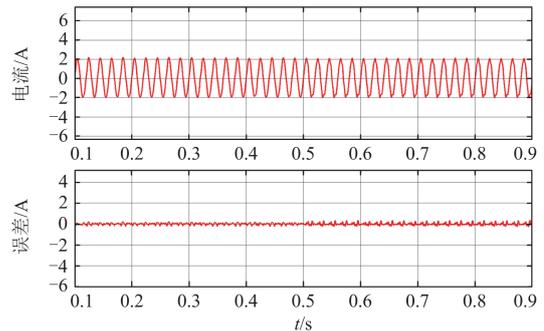
(a) 加入谐波前后实际电流变化情况



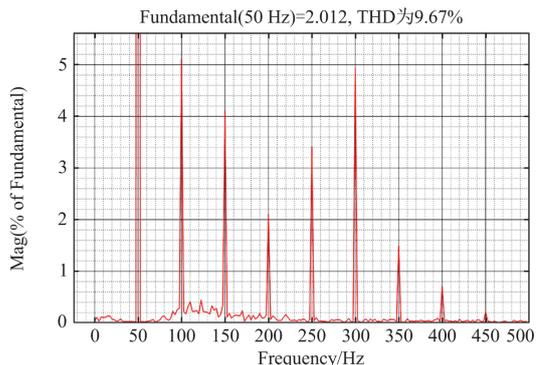
(b) 加入谐波后实际电流FFT分析

图 16 加入 200 Hz 谐波对系统稳定性的影响

Fig. 16 Effect of adding 200 Hz harmonics on system stability



(a) 加入谐波前后实际电流变化情况



(b) 加入谐波后实际电流FFT分析

图 17 加入 300 Hz 谐波对系统稳定性的影响

Fig. 17 Effect of adding 300 Hz harmonics on system stability

从图 15—图 17 可知，在 130 Hz 扰动下，系统发生谐振；在 200 Hz 和 300 Hz 扰动下，系统对应的电流扰动含量明显小于 130 Hz 时，并且根据扰动电流和扰动电压可以计算出 200 Hz 和 300 Hz 对应的阻抗值，3 个频率扰动下理论与仿真阻抗值数据对比如表 4 所示。

表 4 3 个频率下理论与仿真阻抗值对比

Table 4 Comparison of theoretical and simulated impedance values of three frequencies

频率/Hz	理论阻抗值/ Ω	仿真阻抗值/ Ω
130	0.67	0.70
200	1.77	1.78
300	2.80	2.50

从表 4 可知，130 Hz、200 Hz 和 300 Hz 3 个扰动频率下，仿真扫频阻抗值与理论 Bode 图中的阻抗值基本一致，验证了研究方法的准确性。其他运行工况的仿真研究方法与有功工况一致，仿真研究结果如表 5 所示。

通过仿真研究结果可以发现，不同的运行工况会使系统的谐振点产生偏移。接下来研究控制器参数对系统稳定性的影响。

表 5 不同工况下谐振点频率仿真研究结果

Table 5 Simulation results of resonance point frequency under different working conditions

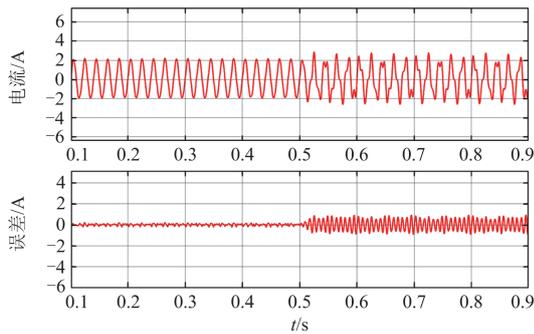
工况	谐振点频率/Hz
容性无功	131
感性无功	128
有功运行	130

3.2 控制器参数对系统稳定性的影响

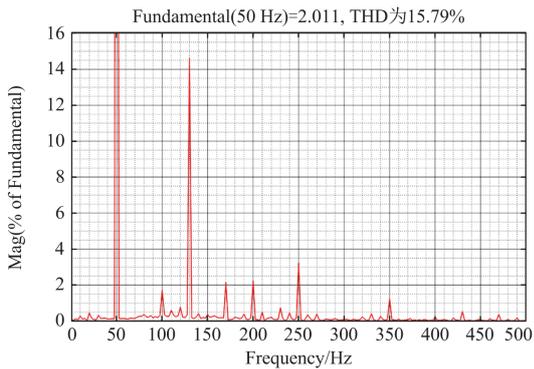
3.1 节在进行研究时, 电流内环比例环节参数 K_{pi} 均为 0.75, 本节为了验证控制器参数对系统稳定性的影响, 分别设置 K_{pi} 为 1.5 和 4 进行研究。

1) $K_{pi} = 1.5$ 时

$K_{pi} = 1.5$ 时加入频率为 130 Hz 的谐波源的谐振情况如图 18 所示。从图 18 可知, 在 $K_{pi} = 1.5$ 时, 加入 130 Hz 扰动后, 比 $K_{pi} = 0.75$ 时电流误差明显降低, 并且根据 FFT 分析可得, 130 Hz 谐波含量降到 14.7%, THD 降到 15.79%。



(a) 加入谐波前后实际电流变化情况



(b) 加入谐波后实际电流FFT分析

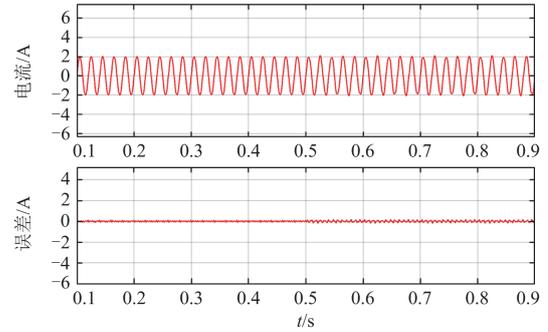
图 18 $K_{pi} = 1.5$ 时, 加入 130 Hz 扰动后系统振荡情况Fig. 18 System oscillations with the addition of a 130 Hz disturbance at $K_{pi} = 1.5$

2) $K_{pi} = 4$ 时

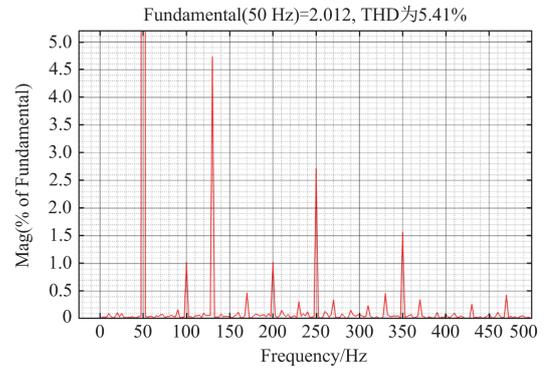
$K_{pi} = 4$ 时加入频率为 130 Hz 的谐波源的谐振

情况如图 19 所示。

从图 19 可知, 在 $K_{pi} = 4$ 时, 加入 130 Hz 扰动前后电流误差没有明显变化, 并且根据 FFT 分析可得 130 Hz 谐波含量降到 4.7%, THD 降到 5.41%。不同控制参数下系统电流误差、谐波含量与 THD 如表 6 所示。



(a) 加入谐波前后实际电流变化情况



(b) 加入谐波后实际电流FFT分析

图 19 $K_{pi} = 4$ 时, 加入 130 Hz 扰动后系统振荡情况Fig. 19 System oscillations with the addition of the 130 Hz disturbance at $K_{pi} = 4$ 表 6 不同 K_{pi} 参数系统电流误差、谐波含量与 THDTable 6 System current error, harmonic content and THD for different K_{pi} parameters

K_{pi}	电流误差/A	130 Hz 谐波含量/%	THD/%
0.75	0.4	36.0	37.03
1.5	0.2	14.7	15.79
4	0.1	4.7	5.41

从表 6 可知, 在有功工况下进行仿真实验, 得出的系统谐振点与理论分析基本一致, 说明本文所建立数学模型以及仿真模型的正确性。并通过增大控制器参数可以抑制系统的谐振, 说明控制器参数 K_{pi} 的增大可以增强系统的稳定性, 但 K_{pi} 不能过大, 否则会影响对稳态性能的控制效果。

3) $K_{pi} = 6$ 时

加入谐波后电流 FFT 分析如图 20 所示。

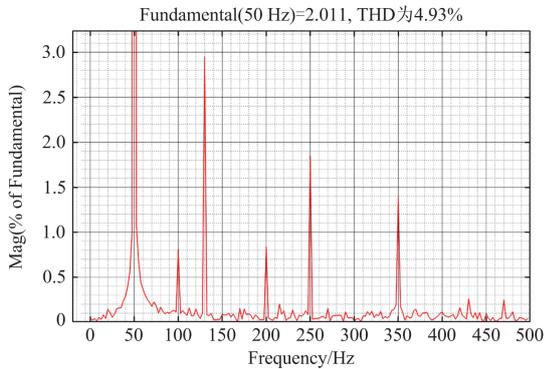


图 20 $K_{pi} = 6$ 时, 加入 130 Hz 扰动后实际电流 FFT 分析
Fig. 20 FFT analysis of actual current after adding 130 Hz disturbance at $K_{pi} = 6$

4) $K_{pi} = 8$ 时

加入谐波后电流 FFT 分析如图 21 所示。

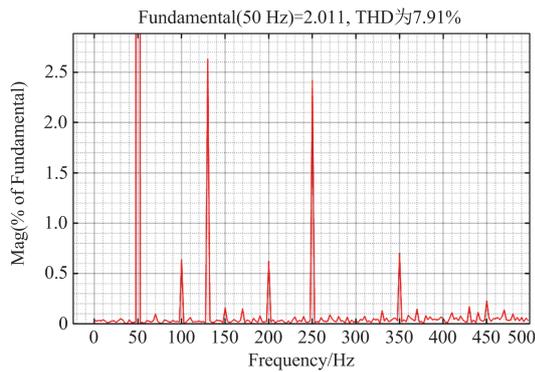


图 21 $K_{pi} = 8$ 时, 加入 130 Hz 扰动后实际电流 FFT 分析
Fig. 21 FFT analysis of actual current after adding 130 Hz disturbance at $K_{pi} = 8$

从图 20 和图 21 可知, K_{pi} 从 4 增大到 6、8 时, 谐波含量与 THD 对比结果如表 7 所示。

表 7 不同 K_{pi} 参数谐波含量与 THD
Table 7 Harmonic content and THD with different K_{pi} parameters

K_{pi}	130 Hz 谐波含量/%	THD/%
4	4.65	5.41
6	2.95	4.93
8	2.65	7.91

当 K_{pi} 从 4 增大到 6、8 时, 虽然 130 Hz 谐波含量越来越低, 但是系统 THD 从 5.41% 先降到 4.93% 后又升至 7.91%, 说明 K_{pi} 参数的取值不能过大, 要控制在 4~6 之间, 此时可以增强系统稳定性,

一旦 K_{pi} 超过 6 时, 系统控制效果逐渐恶化, 所以在 K_{pi} 的选取时需要综合考虑系统的稳态性能指标。其他运行工况得出的结论与有功工况得出的结论基本一致。

综上所述, 理论分析结果与仿真结果一致。

4 实验研究

为了进一步验证本文控制策略以及稳定性理论分析和仿真分析的正确性, 本文进行了实验研究。

4.1 谐振点验证

通过向系统注入 100~1000 Hz 扰动信号进行扫频, 对每个扰动信号对应网侧电流波形进行 FFT 分析, 得出对应扰动谐波含量如图 22 所示。

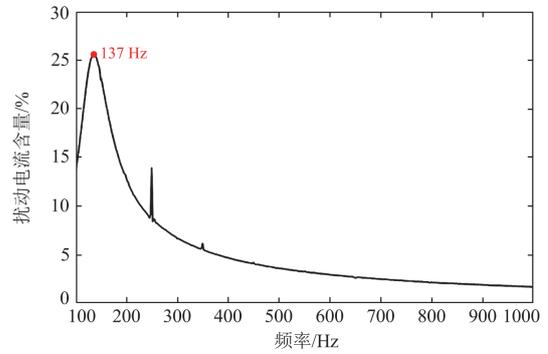
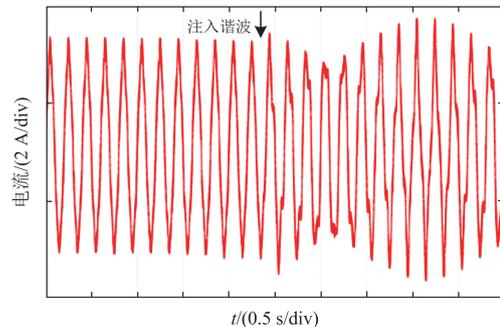


图 22 100~1000 Hz 扰动下谐波含量
Fig. 22 Harmonic content at 100~1000 Hz disturbance

根据图 22 可得, 加入 137 Hz 扰动时, 扰动电流含量最高, 可推测出系统在 137 Hz 扰动下发生谐振。与理论和仿真结果基本一致。

系统加入 137 Hz 扰动前后电流变化如图 23(a) 所示, FFT 分析结果如图 23(b) 所示。

根据图 23(a) 可知, 在 137 Hz 扰动下, 系统电流波形发生明显畸变; 根据图 23(b) 可知, 137 Hz 频率含量除基频外最高, 由此可得在 137 Hz 作用下, 系统发生谐振。其他运行工况得出的实验结果与有功工况基本一致, 具体如表 8 所示。



(a) 系统突加谐振频率电流变化



(b) 网侧电流FFT分析

图 23 137 Hz 扰动下系统电流波形与 FFT 分析

Fig. 23 System current waveform with FFT analysis under 137 Hz disturbance

表 8 不同工况下谐振点频率实验研究结果

Table 8 Results of experimental studies of resonance point frequencies under different working conditions

工况	谐振点频率/Hz
容性无功	137
感性无功	137
有功运行	138

通过实验研究可以发现, 不同的运行工况会使系统的谐振点产生偏移。接下来研究控制器参数对系统稳定性的影响。

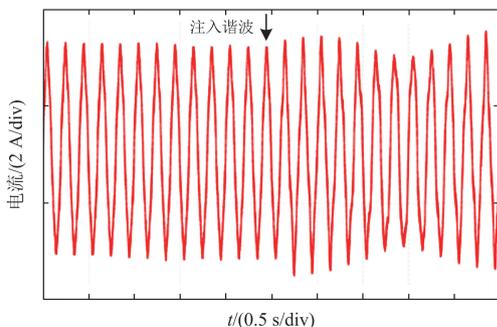
4.2 控制器参数对系统稳定性的影响

4.1 节在进行研究时, 电流内环比例环节 K_{pi} 参数均为 0.75, 本节为了验证控制器参数对系统稳定性的影响, 通过设置 K_{pi} 为 1.5 和 4 进行研究。

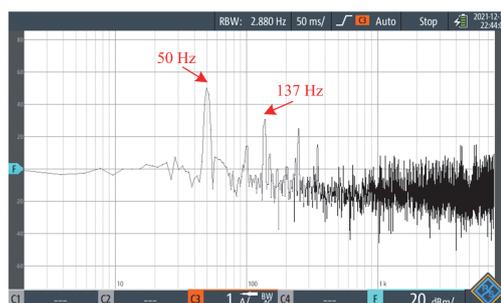
1) $K_{pi} = 1.5$ 时

$K_{pi} = 1.5$ 时, 加入扰动前后电流变化如图 24(a) 所示, FFT 分析结果如图 24(b) 所示。

从图 24 可知, $K_{pi} = 1.5$ 时, 扰动电流含量明显低于 $K_{pi} = 0.75$ 时, 由此可以得出增大 K_{pi} 后, 系统的谐振受到了一定的抑制。网侧电流 FFT 分析所对应的 137 Hz 的谐波含量也明显降低。



(a) 系统突加谐振频率电流变化

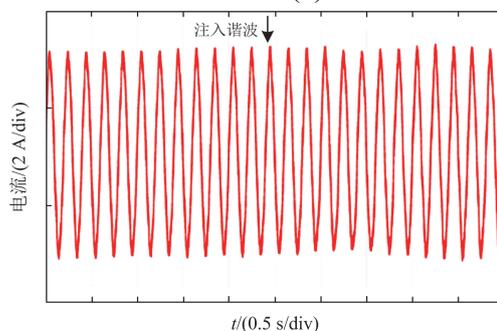


(b) 网侧电流FFT分析

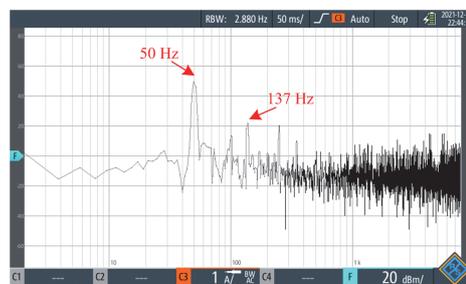
图 24 $K_{pi} = 1.5$ 时网侧电流分析Fig. 24 Network-side current analysis at $K_{pi} = 1.5$

2) $K_{pi} = 4$ 时

$K_{pi} = 4$ 时, 加入扰动前后电流变化如图 25(a) 所示, FFT 分析结果如图 25(b) 所示。



(a) 系统突加谐振频率电流变化



(b) 网侧电流FFT分析

图 25 $K_{pi} = 4$ 时网侧电流分析Fig. 25 Analysis of network-side currents at $K_{pi} = 4$

从图 25 可知, $K_{pi} = 4$ 时, 扰动电流含量明显低于 $K_{pi} = 0.75, 1.5$ 时, 由此可以得出增大 K_{pi} 后, 系统的谐振受到了一定的抑制。网侧电流 FFT 分析所对应的 137 Hz 谐波含量也明显降低。不同 K_{pi} 参数对应的谐波含量实验结果如表 9 所示。

从表 9 可知, 在有功工况下随着 K_{pi} 参数的增大, 系统的振荡幅度逐步被抑制, 系统谐振点谐波含量逐步降低, 由此可以得出, 系统电流环控制器

参数的比例环节参数可以抑制并网变流器系统的谐振。

表 9 不同 K_{pi} 参数对应谐波电流含量

Table 9 Harmonic current content corresponding to different K_{pi} parameters

组别	K_{pi}	谐波含量/%
1	0.75	25.39
2	1.5	11.75
3	4	4.56

综上所述,通过对并网变流器系统进行理论研究、仿真研究和实验研究,得出系统的谐振点结果如表 10 所示。

表 10 理论、仿真与实验研究系统谐振点结果

Table 10 Resonance point results for theoretical, simulation and experimental study systems

类别	理论/Hz	仿真/Hz	实验/Hz
容性无功工况	131	131	137
感性无功工况	128	128	137
有功运行工况	130	130	138

从表 10 可知,理论与仿真研究结果一致,但由于试验系统接入实际的弱电网时存在的阻抗特性,导致实验结果较理论与仿真研究结果存在 5.1%~5.8%的偏差。

5 总结

随着分布式能源大量接入电网,对电网的稳定性造成了严重影响,为了避免变流器和弱电网的互联系统产生振荡,本文进行了全面的阻抗理论研究、仿真研究和实验研究,并验证不同运行工况和控制参数对系统稳定性的影响,论文的主要研究内容和成果如下:

1) 建立了三相两电平并网系统的阻抗模型。该阻抗模型考虑了系统主回路、控制环节等参数,根据 KCL、KVL 等电路原理建立等效数学模型,通过分析阻抗模型伯德图与极坐标图,确定系统谐振点,并根据阻抗模型分析影响系统稳定性的因素。

2) 通过奈奎斯特稳定判据分析变流器与电网互联系统的稳定性,并研究控制器参数对系统稳定性的影响,从研究结果可以得出,电流控制器参数与系统阻抗密切相关, K_{pi} 参数增大,谐振点阻抗也随之变大,谐振情况受到抑制。但 K_{pi} 参数的增大,会牺牲对稳态性能的控制效果,所以在选取 K_{pi} 参数时要均衡谐振抑制与稳态性能的控制效果。

3) 仿真和实验均对不同运行工况、不同控制器参数对系统稳定性的影响进行了研究,通过扫频得

出系统谐振点,从研究结果可以得出:不同运行工况会对系统的稳定性产生影响,造成谐振点的偏移;不同控制器参数对系统稳定性研究的结果与稳定判据得出的结果一致, K_{pi} 的增大会增强系统稳定性。

参考文献

- [1] 郭敏晓,杨宏伟. 围绕“碳中和”愿景能源与环境领域将呈现六方面的变化趋势“十三五”能源与环境形势及“十四五”展望[J]. 中国能源, 2021, 43(3): 19-23.
- [2] 邹才能,赵群,张国生,等. 能源革命:从化石能源到新能源[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 1-10.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, ZHANG Guosheng, et al. Energy revolution: from a fossil energy era to a new energy era[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 1-10.
- [3] 孙宜澎. 弱电网下并网变流器的稳定性分析及电网电压前馈控制策略研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
SUN Yipeng. Stability analysis of grid-connected converter under weak grid and research on feedforward control strategy of grid voltage[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [4] 邵振国,许昊铂,肖颂勇,等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [5] 李东东,刘强,徐波,等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 24-33.
LI Dongdong, LIU Qiang, XU Bo, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 24-33.
- [6] 李凌达. 考虑弱电网条件的 LCL 型并网变流器控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI Lingda. Research on control strategy of LCL grid-connected converter considering weak grid conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [7] WANG Y, WANG X, BLAABJERG F, et al. Harmonic instability assessment using state-space modeling and participation analysis in inverter-fed power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 806-816.
- [8] 盘宏斌,阮浩浩,张佳乐. 基于参数化镇定控制器和误差信号 H2 范数的 LCL 型并网逆变器电流控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 1-12.
PAN Hongbin, RUAN Haohao, ZHANG Jiale. A parameterized stabilizing controller and H2 norm-based control scheme for LCL-filtered grid-tied inverters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 1-12.
- [9] 陈思源,景巍巍,史明明,等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022,

- 50(7): 162-175.
CHEN Siyuan, JING Weiwei, SHI Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 162-175.
- [10] 万炜. 任意功率因数下并网变流器的广义阻抗建模及其二次侧测量方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
WAN Wei. Modeling and secondary side measurement method of generalized impedance of grid-connected converters under arbitrary power factor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [11] 刘人志, 陈卓, 唐文博, 等. 弱电网下计及锁相环影响的LCL型并网逆变器控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(5): 178-187.
LIU Renzhi, CHEN Zhuo, TANG Wenbo, et al. Control strategy of an LCL type grid-connected inverter with the influence of a phase-locked loop under a weak power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(5): 178-187.
- [12] YANG S, LEI Q, PENG F Z, et al. A robust control scheme for grid-connected voltage-source inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 202-212.
- [13] WANG C. An improved impedance/admittance analysis method considering collector subsystem transformation in converter-integrated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5963-5966.
- [14] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于PI调节器和电容电流反馈有源阻尼的LCL型并网逆变器闭环参数设计[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 133-142.
BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 133-142.
- [15] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 29(3): 1254-1261.
- [16] 王赞程, 陈新, 陈杰, 等. 基于谐波线性化的三相LCL型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21): 5890-5898.
WANG Yuncheng, CHEN Xin, CHEN Jie, et al. Analysis of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21): 5890-5898.
- [17] 万炜, 袁辉, 王冠中, 等. 二次侧注入扰动的变流器次超同步频段广义阻抗测量方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 19-25.
WAN Wei, YUAN Hui, WANG Guanzhong, et al. Measurement method for converter generalized impedance in sub-and super-synchronous band based on perturbation on secondary side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(14): 19-25.
- [18] 吴天昊, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 考虑频率耦合及交直流端口耦合效应的并网变流器三端口导纳模型[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 248-259.
WU Tianhao, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Three-port admittance modeling of grid-connected converters considering frequency-coupling and AC/DC coupling effects[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 248-259.
- [19] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 31(1): 1-10.
- [20] 年珩, 杨洪雨. 不平衡运行工况下并网逆变器的阻抗建模及稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(10): 76-83.
NIAN Heng, YANG Hongyu. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected inverters under unbalanced operation conditions[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(10): 76-83.
- [21] 马也, 史丽萍, 李衡, 等. 基于VSG控制的微网逆变器工频振荡现象研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 107-115.
MA Ye, SHI Liping, LI Heng, et al. Power frequency oscillation of a microgrid inverter based on VSG control[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 107-115.
- [22] 陈新, 张昉, 王赞程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(27): 4559-4567.
CHEN Xin, ZHANG Yang, WANG Yuncheng. A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(27): 4559-4567.
- [23] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators[C] // *IEEE Industrial Application Society Annual Meeting*, 1976, Chicago, USA: 366-382.
- [24] ZHAO J, HUANG M, YAN H, et al. Nonlinear and transient stability analysis of phase-locked loops in grid-connected converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(1): 1018-1029.

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-06-12

作者简介:

刘普(1984—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为柔性直流输电技术, 可再生能源并网发电技术; E-mail: liupu1984@stu.xjtu.edu.cn

刘兆峰(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电并网系统稳定性。E-mail: 903557075@qq.com

(编辑 魏小丽)