

# 计及电缆分布电容的并网逆变器 谐振特性与抑制

常继凯<sup>1</sup>, 舒勤<sup>1</sup>, 李鸿鑫<sup>2</sup>, 陈伯建<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 中国南方电网深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;  
3. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 逆变器与电网之间的阻抗交互无法避免, 当传输电缆的分布电容较大无法忽略时, 逆变器并网系统会出现多个谐振点, 容易引发高频谐振问题。为此, 首先从阻抗交互的角度出发, 利用无源性理论分析逆变器并网系统潜在的不稳定区域, 以及线路长度和电网侧阻抗对并网逆变器系统谐振频率的影响。然后针对系统的高频谐振问题, 提出在逆变器控制通路中串联二阶低通滤波器和相位补偿器的有源阻尼方法对逆变器阻抗进行重塑, 使逆变器输出阻抗可以在全频段满足无源性条件, 达到抑制高频谐振的目的, 从而提升系统的稳定性。最后搭建 Matlab/Simulink 仿真系统, 仿真结果验证所提方案的有效性。

**关键词:** 分布电容; 高频谐振; 无源性理论; 有源阻尼

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.012 中图分类号: TM464 文章编号: 1673-9140(2023)03-0114-10

## Resonance characteristics and suppression of grid-connected inverter system considering cable distributed capacitance

CHANG Jikai<sup>1</sup>, SHU Qin<sup>1</sup>, LI Hongxin<sup>2</sup>, CHEN Bojian<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Southern Power Grid Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The impedance interaction between the inverter and the grid cannot be avoided. When the distributed capacitance of the transmission cable is large and cannot be ignored, multiple resonance points will appear in the grid-connected system of the inverter, which is easy to cause high-frequency resonance. From the perspective of impedance interaction, this paper uses passivity theory to analyze the potential unstable region of grid-connected inverter system, and the influence of line length and grid side impedance on the resonant frequency of grid-connected inverter system. Aiming at the problem of high frequency resonance of the system, the active damping method of series second-order low-pass filter and phase compensator in the inverter control path is proposed to reshape the impedance of the inverter, so that the output impedance of the inverter can meet the passive condition in the whole frequency band, achieve the purpose of suppressing high frequency resonance and improve the stability of the system. Finally, the simulation model in Matlab/Simulink is established, verifying the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words:** distributed capacitance; high frequency resonance; passivity theory; active damping

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51877141)

通信作者: 舒勤(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统稳定与控制、智能电网以及现代信号处理等方面的研究;

E-mail: shuchin@163.com

作为新能源发电与电网之间的主要功率接口单元,逆变器起着将电能转换为交流形式并馈送至电网的重要作用<sup>[1]</sup>。逆变器通常使用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)的方式驱动,为了抑制并网电流中开关谐波,一般在逆变器出口处接入滤波性能更好的 LCL 型滤波器<sup>[2]</sup>,该滤波器自身存在谐振尖峰,可能会并网系统谐振<sup>[3-13]</sup>。文献[3]详细介绍了在 LCL 型滤波器中串并联电阻的无源阻尼方法以及等效的有源阻尼方法;文献[5]考虑延时对系统稳定性的影响,通过减小延时时间来提高系统稳定性;文献[11-12]从优化电流控制器参数的角度出发,达到降低并网电流畸变率的目的。上述文献中都将传输线的阻抗简单等效为纯电感模型,并未考虑传输电缆的对地分布电容问题。

当计及传输电缆的分布电容时,文献[14-20]通过分析系统的开环传递函数,指出输电电缆的分布电容会使开环传递函数的伯德图中出现多个谐振尖峰,对此提出了在公共耦合点处安装有源阻尼器、前向回路中串联陷波器及引用电容电压反馈等谐振抑制方法。但是通过开环传递函数无法分析系统潜在的不稳定区域,且这些方法或需要增加额外的硬件和传感器而增加系统成本,或在系统参数变化时可能会失效。文献[21]分析了双馈异步感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)系统经长电缆输电的高频谐振现象,指出考虑输电电缆分布电容时系统会出现多个谐振点,但并未提出相应的谐振抑制方案;文献[22-23]提出了将公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压经补偿器反馈和在 DFIG 系统中插入虚拟阻抗的有源阻尼方法来抑制谐振,但逆变器输出阻抗无法在全频段满足无源性条件<sup>[24]</sup>。

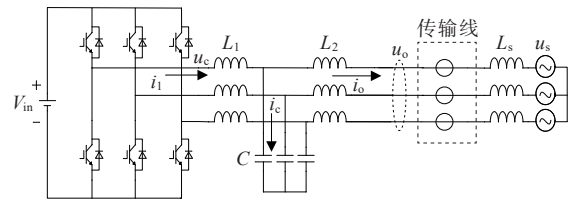
针对上述问题,本文计及传输电缆分布电容的影响,从阻抗交互的角度出发,利用无源性理论揭示系统潜在的不稳定区域,并分析逆变器并网系统的谐振机理与谐振特性。为使逆变器的阻抗在全频段都能满足无源性条件,提出在逆变器控制通路中串联滤波器和相位补偿器的有源阻尼方法,达到抑制高频谐振的目的。通过仿真验证有源阻尼方法的有效性。

## 1 逆变器阻抗和网侧阻抗模型

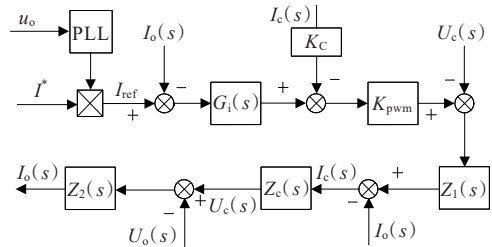
### 1.1 逆变器的阻抗

典型的三相 LCL 型逆变器的模型及逆变器控制框图如图 1 所示,  $V_{in}$  为直流侧输入电压,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为逆变器侧和网侧电感,  $C$  为输出滤波电容,  $u_c$  表示逆变器的输出电压,  $i_1$ 、 $i_o$  和  $i_c$  分别为逆变器侧电流、逆变器输出电流和输出滤波电容电流,  $u_s$  为理想电压源,  $L_s$  为电网侧电感;  $u_o$  为 PCC 点电压,  $I^*$  为指令电流,  $I_{ref}$  为参考电流;传输线为输电电缆,等效为分布参数模型。

$\alpha\beta$  静止坐标系下的三相控制是一个完全对称并相互解耦的过程,因此本文将逆变器输出电流  $i_o$  选在  $\alpha\beta$  坐标系下进行控制(图 1(b))。在此只给出  $\alpha$  轴下的电流控制策略方框图,且忽略下标“ $\alpha$ ”。



(a) 三相 LCL 型并网逆变器结构



(b) 逆变器控制框图

图 1 三相 LCL 型逆变器结构与控制框图

Figure 1 Structure diagram and control block diagram of three-phase LCL inverter

由图 1(b) 可以得到逆变器入网电流  $I_o(s)$  在频域下的表达式为

$$I_o(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} I_{ref}(s) - \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} U_o(s) \quad (1)$$

其中,

$$G_1(s) = \frac{Z_c(s)G_i(s)K_{pwm}}{Z_1(s) + Z_c(s) + K_c K_{pwm}}$$

$$G_2(s) = \frac{Z_1(s) + Z_c(s) + K_c K_{pwm}}{Z_1(s)Z_2(s) + Z_1(s)Z_c(s) + Z_2(s)Z_c(s) + Z_2(s)K_c K_{pwm}}$$

式中,  $G_2(s)/(1 + G_1(s)G_2(s))$ 为逆变器的等效输出导纳;  $Z_1(s) = sL_1$ ,  $Z_2(s) = sL_2$ ,  $Z_c(s) = 1/sC$ , 其中  $s$ 为拉普拉斯算子;  $K_{pwm} = V_{in}/2V_{tri}$ 为PWM调制下逆变器的增益;  $V_{tri}$ 为三角载波幅值;  $K_c$ 为电容电流反馈系数; 采用能够实现无静差追踪的准比例谐振控制器(quasi-proportional-resonant, QPR)调节并网电流, 其传递函数为

$$G_i(s) = K_p + \frac{2K_r\omega_i s}{s^2 + 2\omega_i s + \omega_o^2} \quad (2)$$

式中,  $K_p$ 为控制器的比例系数;  $K_r$ 为谐振系数;  $\omega_i$ 为考虑-3 dB要求的谐振带宽, 通常取为  $\pi$  rad/s;  $\omega_o = 2\pi f_0$ 为基波角频率, 其中  $f_0$ 为基频频率。

逆变器阻抗的伯德图如图2所示, 当频率高于1.4 kHz(图2(b))时, 逆变器阻抗的最大相角达到了98°, 在中、高频段(大于1 kHz)呈现明显的感性性质。

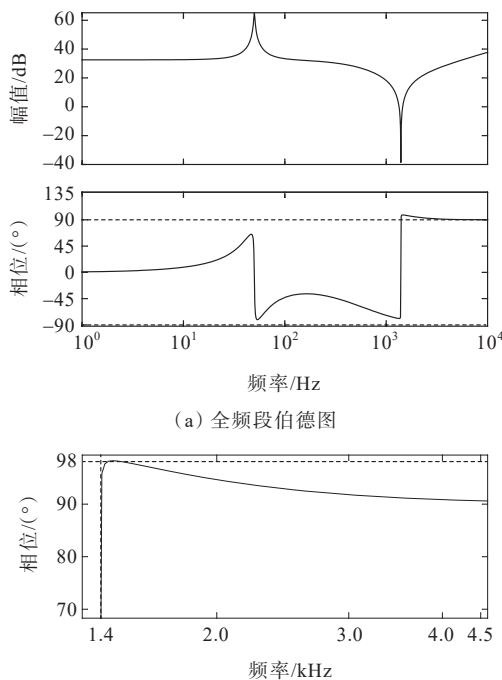


图2 逆变器阻抗伯德图

Figure 2 Bode diagram of inverter impedance

### 1.2 网侧阻抗

输电电缆的分布参数模型如图3所示,  $Z_c$ 为从逆变器侧向电网侧看去的等效网侧阻抗。根据图3

可以推导出网侧阻抗为

$$Z_c(s) = \frac{Z_g(s) + Z_c(s) \tanh(\gamma(s)l)}{1 + Z_g(s) \tanh(\gamma(s)l)/Z_c(s)} \quad (3)$$

其中,

$$Z_c(s) = \sqrt{\frac{R_0 + sL_0}{sC_0}}$$

$$\gamma(s) = \sqrt{(R_0 + sL_0)sC_0}$$

式中,  $Z_c(s)$ 为输电电缆的特征阻抗;  $\gamma(s)$ 为输电电缆的传播系数;  $R_0$ 、 $L_0$ 和  $C_0$ 分别为输电电缆单位长度的电阻、电感和电容。

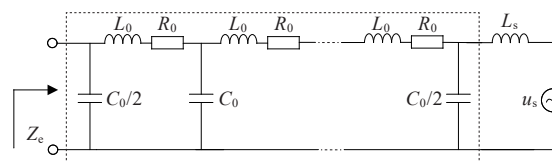


图3 输电电缆分布参数模型

Figure 3 Distribution parameter model of transmission cable

网侧阻抗的伯德图如图4所示, 当计及输电电缆分布电容时, 网侧阻抗的幅频曲线在中、高频段出现多个尖峰, 网侧阻抗不再呈现感性, 而是随着频率的变化交替呈现容性或者感性, 且相角交替呈现  $\pm 90^\circ$ 。

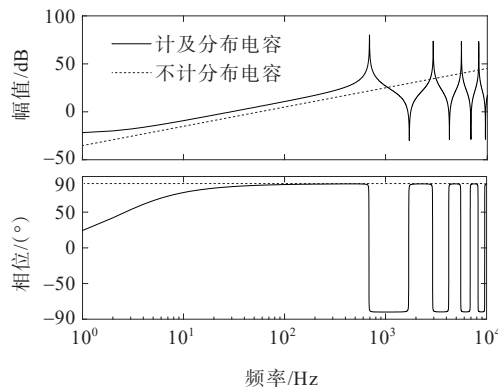


图4 网侧阻抗的伯德图

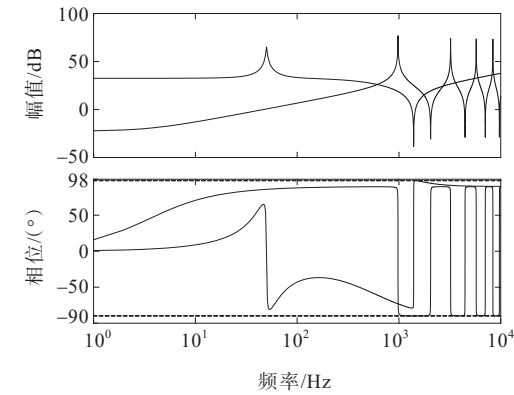
Figure 4 Bode diagram of grid side impedance

## 2 逆变器并网系统的谐振特性

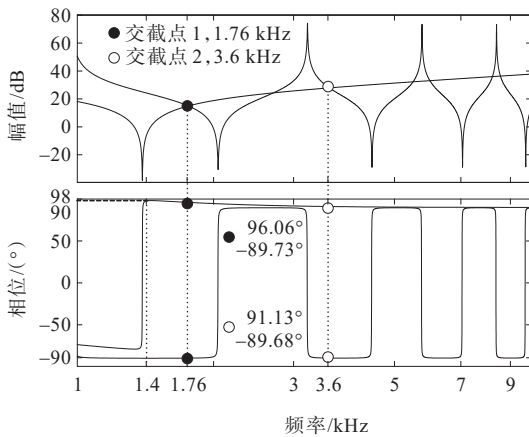
根据阻抗的并网逆变器稳定性判据得知, 并网逆变器系统若想稳定, 则其阻抗比应该满足Nyquist稳定性判据<sup>[8]</sup>。利用伯德图进行分析, 就表现为电网和逆变器阻抗在交截点处的相位差处于  $\pm 180^\circ$ <sup>[3]</sup>。

当逆变器的输出阻抗在任一频率点都满足  $\text{Re}[Z(j\omega)] \geq 0$  时,称逆变器的输出阻抗满足无源性条件,此时阻抗的相角为  $[-90^\circ, 90^\circ]$ <sup>[24]</sup>。电网通常由无源器件构成,可以满足无源性条件。通常将网侧阻抗等效为一个纯电感元件,电网阻抗的相角恒为  $90^\circ$ ;当逆变器阻抗的相角为  $-90^\circ \sim 180^\circ$ <sup>[3]</sup>时,即使逆变器的输出阻抗无法在全频段满足无源性条件,系统也可以维持稳定。

一般分析中将网侧阻抗简单地等效为纯电感模型,当考虑输电线路的分布电容时,逆变器与网侧阻抗交互的伯德图如图 5 所示,在大于 1.4 kHz 频段内(图 5(b)),出现了相角差小于  $-180^\circ$  的区域,交截点落在这些区域内时系统失稳。在图 5(b)中所示的交截点处,交截频率为 1.76 kHz 处的相角裕度最小,约为  $-5.8^\circ$ ,系统失稳后该频率下的谐波电流会成为并网电流中含有的主要谐波成分。



(a) 全频段伯德图



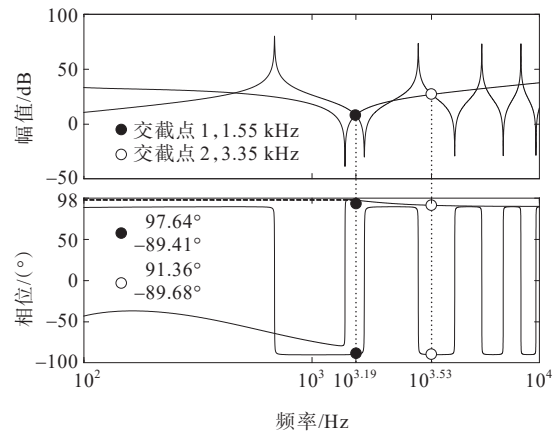
(b) 中、高频段放大图

图 5 逆变器与网侧阻抗交互的伯德图

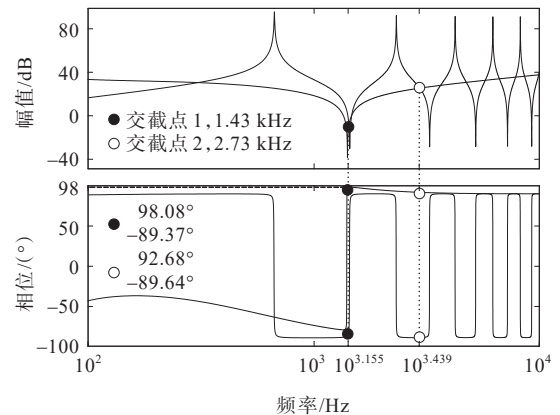
Figure 5 Bode diagram of the interaction between inverter and grid side impedance

参数改变时网侧阻抗的伯德图如图 6 所示。增大电网侧阻抗(图 6(a)),网侧阻抗幅相曲线因电网侧阻抗的增加而向左移动,同时网侧阻抗的容性和感性区域在 1~4 kHz 频段内明显变大,此时交截频率为 1.55 kHz 处的相角裕度约为  $-7^\circ$ ,系统仍会发生高频谐振现象,且并网电流中含有的主要谐波成分是该频次下对应的谐波电流。

改变输电电缆长度(图 6(b)),线路的长度增加不仅使曲线左移,还改变了网侧阻抗的尖峰和曲线呈现容性/感性的数量。需要注意的是,LCL 型滤波器的谐振频率约为 1.43 kHz,电容电流有源阻尼可以起到有效的抑制作用。当交截频率降至图 6(b)中的滤波器谐振频率附近时(仍只给出图 6(b)中所示的交截点),此处的相角裕度虽然约为  $-7.45^\circ$ ,但由于电容电流反馈有源阻尼,并网电流中含有的主要谐波成分却是位于 2.73 kHz 处左右的频率。



(a) 增加电网侧阻抗



(b) 增加线路长度

图 6 参数改变时网侧阻抗的伯德图

Figure 6 Bode diagram of network side impedance with variable parameters

观察图5(b)、6(a)、6(b),并总结上述理论分析:电网侧阻抗和线路长度的增加导致网侧阻抗的幅相曲线发生了左移,逆变器阻抗和网侧阻抗的交截频率逐渐减小;计算交截频率处的相角裕度,判断出系统失稳后,并网电流中的主要谐波电流频率随之减小;当交截频率减小至滤波器谐振频率附近时,虽然此处的相角裕度最小,但因电容电流反馈有源阻尼,主要谐波电流频率却增大至图6(b)中的交截点2。如果参数继续增大,网侧阻抗的幅相曲线会继续左移,主要谐波电流频率会从交截点2处重新开始左移。由此可以得出,主要谐波电流频率是一种先减小后增大继而减小的过程。

### 3 有源阻尼策略设计

在逆变器和电网交互的系统中,提高系统的稳定性有2种解决思路<sup>[3]</sup>:①避免逆变器阻抗与电网阻抗发生交互;②改变逆变器阻抗或者电网的相位。由于网侧阻抗计及输电电缆,且电网阻抗会发生变化,第1种思路难以满足,电网阻抗的相角也难以改变<sup>[9]</sup>。因此,本文对逆变器阻抗进行重塑来改变逆变器的相角,达到谐振抑制的目的。

通过文2中的谐振分析可知,逆变器阻抗在全频段若都能满足无源性条件,则在交截频率会留有一定的相角裕度,达到抑制谐振的目的。本文选择在逆变器控制前向通路中串联低通滤波器和相位补偿器的方法,以达到改变逆变器阻抗相位的目的。系统的控制框图如图7所示。

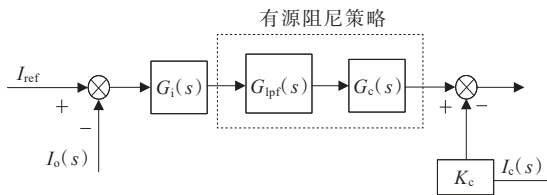


图7 加入有源阻尼后逆变器的控制框图

Figure 7 Control block diagram of the inverter with active damping

相位补偿器的传递函数为

$$G_c(s) = K \frac{1 + \alpha Ts}{1 + Ts} \quad (4)$$

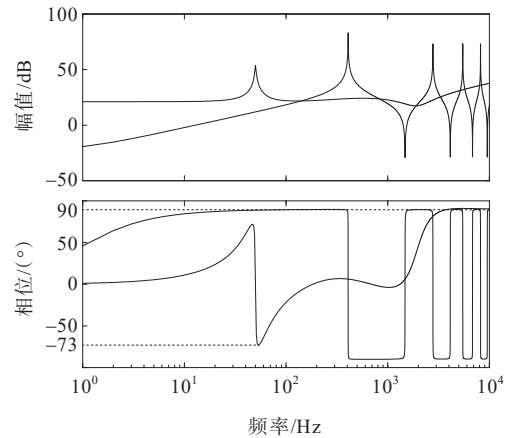
式中, $\alpha$ 为常数, $\alpha > 1$ 时为超前补偿器, $0 < \alpha < 1$ 时为滞后补偿器; $T$ 为补偿器的时间常数; $K$ 为增益。

常数 $\alpha$ 、时间常数 $T$ 和增益 $K$ 的计算公式为

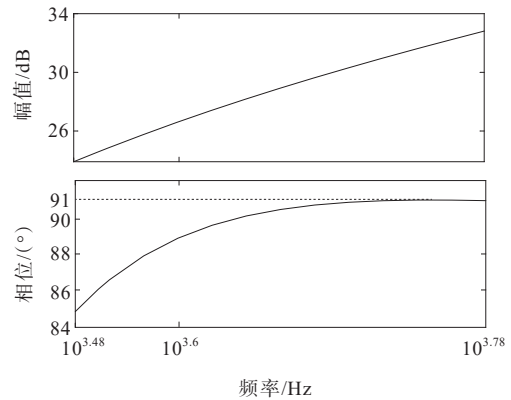
$$\begin{cases} \alpha = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \\ T = 1/(\omega \sqrt{\alpha}) \\ K = 1/\sqrt{\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\varphi_m$ 为校正器能够补偿的最大相角; $\omega$ 为超前补偿器最大补偿相角对应的角频率。

经超前补偿器补偿后的逆变器阻抗伯德图如图8所示。从图8(a)中可以看到,超前补偿器有效地将逆变器阻抗范围为1.4~4.0 kHz的相角降到了 $90^\circ$ 以下。但在4 kHz以上的频段仍存在相角大于 $90^\circ$ 的区域(图8(b))。



(a) 全频段伯德图



(b) 高频段放大伯德图

图8 逆变器阻抗重塑后的伯德图

Figure 8 Bode diagram of inverter impedance remodeling

低通滤波器有着优秀的高频衰减增益,还可以滤除高次谐波,一般选择在前向通路中再串联一个低通滤波器来实现非无源区域的消除。低通滤波器根据阶数可划分为 1 阶、2 阶、高阶低通滤波器。滤波器的阶数越高,对高频信号的衰减也越快,但过高的阶数会增加系统的复杂度,故综合考虑信号衰减幅度和阶数两方面的因素,选择 2 阶低通滤波器,其传递函数为

$$G_{lpf}(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (6)$$

式中,  $\omega_c$  为低通滤波器的截止频率,  $\xi$  为阻尼比,通常取 0.707。

当截止频率分别为 1.3、1.0、0.7、0.4 kHz 时,逆变器阻抗的伯德图如图 9 所示。从图 9(a) 中可以看到,不同截止频率时逆变器阻抗相角都能被降至  $90^\circ$  以下,但作用效果有限。这是因为逆变器阻抗传递函数的分母阶次始终比分子高一阶,这也是逆变器阻抗在高频段呈现感性的主要原因。从图 9(b) 中可以看到,过高或者过低的截止频率可能会使逆变器阻抗的相角超过  $\pm 90^\circ$ ,无法在全频段满足无源性条件。因此,折中选择低通滤波器的截止频率为 0.7 kHz。

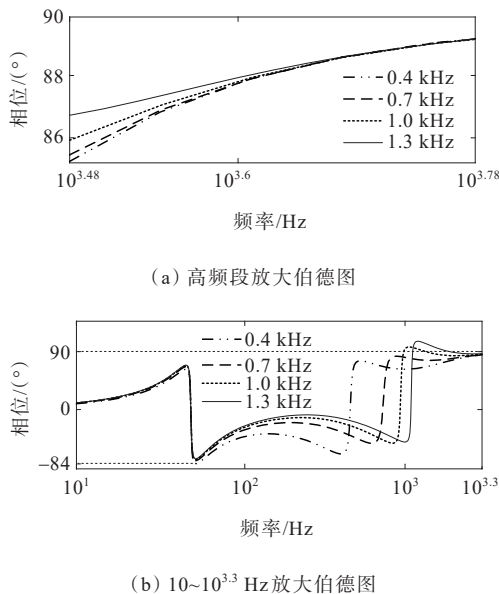


图 9 不同截止频率下逆变器阻抗的伯德图

Figure 9 Bode diagram of inverter impedance at different cutoff frequencies

添加有源阻尼后系统交互的伯德图如图 10 所示,采用所提的有源阻尼方法后逆变器输出阻抗可以在全频段满足无源性条件。以交截频率为 1.76 kHz 进行分析,可知低通滤波器的引入改变了逆变器阻抗与网侧阻抗的交截频率。新的交截频率为 1.56 kHz,对应的相角裕度为  $16.16^\circ$ ,原交截频率处对应的相角裕度提升至  $14.27^\circ$ ; 3.57 kHz 交截频率的相角裕度则由原来的  $-0.81^\circ$  提升至现在的  $3.27^\circ$ 。可见,所提的有源阻尼策略可以提高交截频率处的相角裕度,维持系统的稳定性。

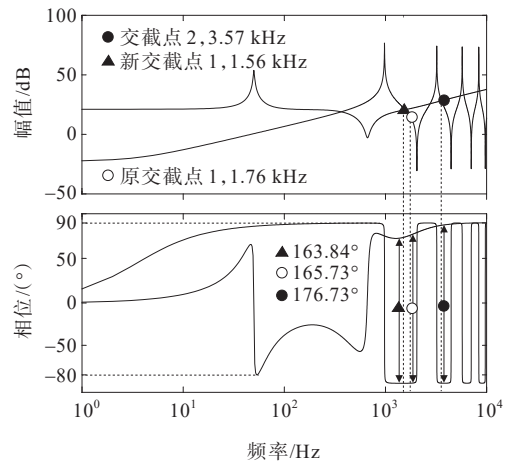


图 10 添加有源阻尼后系统交互的伯德图

Figure 10 Bode diagram of system interaction with active damping

## 4 仿真实验

为了验证本文的理论分析以及所提的有源阻尼方法对高频谐振的抑制效果,在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建图 1 所示的三相 LCL 型逆变器并网的仿真模型,参数如表 1 所示。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main system parameters

电网电压 $u_s/V$	逆变器侧电感 $L_1/mH$	滤波电容 $C/\mu F$		
220	2.5	15		
网侧电感 $L_2/mH$	直流输入电压 $V_{in}/V$	采样频率 $f_s/kHz$		
1.25	700	10		
$K_c$	$K_p$	$L_0/mH$	$R_0/\Omega$	$C_0/\mu F$
0.084	0.121	0.8	0.025	4.7

#### 4.1 不考虑输电电缆对地电容

不考虑输电电缆对地电容,当电网侧电感分别为0.1、5.0 mH时,逆变器并网电流的波形及快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)分析如图11所示。观察不同电网侧电感下并网电流的波形,可以看到,并网电流的波形质量良好,可以认为是标准的正弦波。对a相电流进行FFT分析(下文中的FFT分析均是指对a相的并网电流),2种情况下并网电流的总谐波畸变率(total harmonics distortion, THD)分别为1.12%、0.99%,THD均小于5%,满足并网要求,验证了文2中理论分析的准确性。

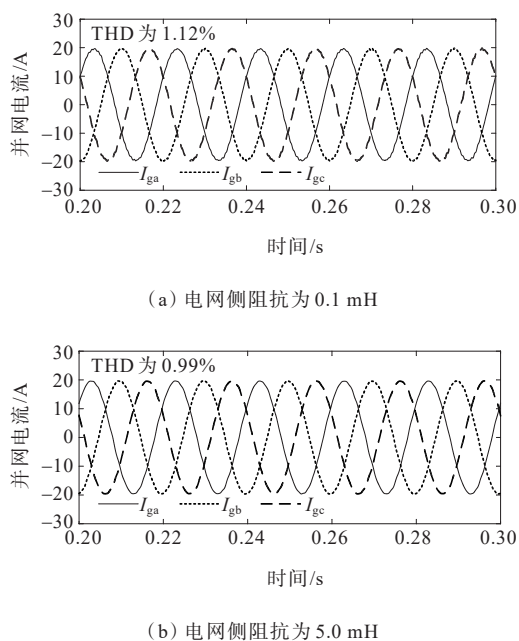


图11 不考虑输电电缆分布电容时并网电流波形

Figure 11 Grid-connected current waveform without considering distributed capacitance of transmission cable

#### 4.2 计及输电线路分布电容

选择输电电缆长度为3 km、电网侧阻抗为3 mH以及长度为4 km、电网侧阻抗为1.8 mH时的2组数据进行仿真验证。计及输电电缆对地电容时逆变器并网电流波形以及并网电流的FFT分析如图12所示,可以看出,并网电流的波形严重畸变,随着仿真时间的延后,并网电流将会严重发散,系统完全失稳。观察并网电流的FFT值,可以看到,2种情况下并网电流中谐波分量最高的电流分别是31、55次谐波电流,所对应的谐振频率分别为1.55、

2.75 kHz。从FFT分析中可知,并网电流中谐波含量成分最高的是2.75 kHz对应的谐波电流,而不是1.43 kHz对应的谐波电流。验证了文2中理论分析的正确性。

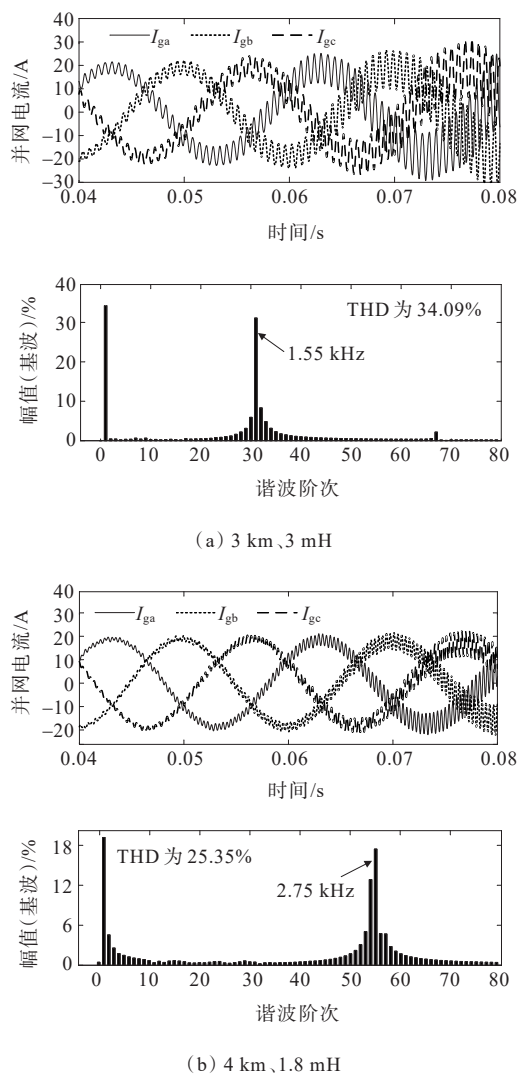


图12 并网电流波形和FFT分析

Figure 12 Grid-connected current waveform and FFT analysis

#### 4.3 谐振抑制策略验证

仍选择文4.2中的2组数据对所提的谐振抑制策略进行仿真验证,加入谐振抑制策略后逆变器并网电流的波形及FFT分析如图13所示,可以看出,并网电流的THD均在5%以下且各次谐波电流的含量满足IEEE Std.929—2000和IEEE Std.1547—2003制定的并网标准要求。所提的有源阻尼策略在不同条件下,均能有效地抑制逆变器并网系统所发生的高频谐振现象,具有良好的鲁棒性。

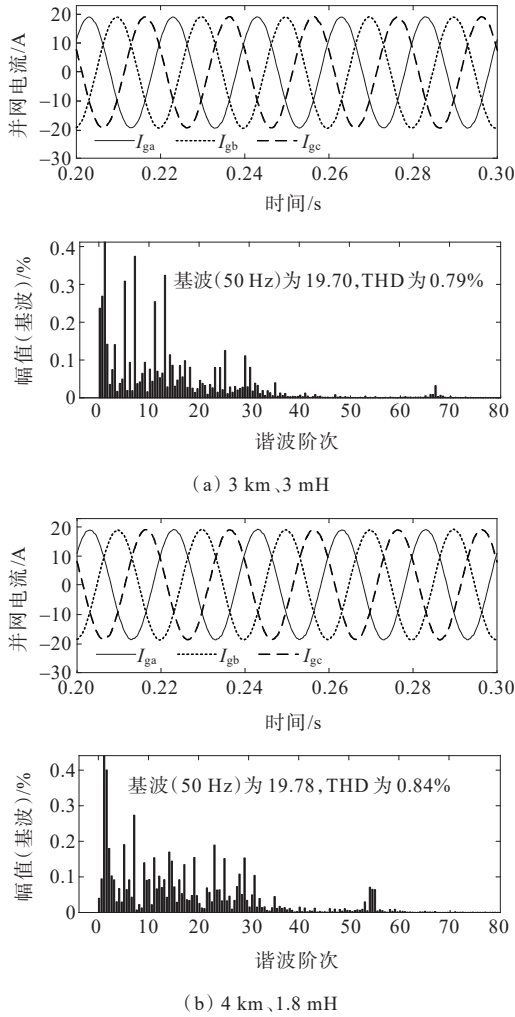


图 13 加入谐振抑制策略后并网电流的波形及FFT分析

Figure 13 Waveform and FFT analysis of grid-connected current after adding resonance suppression strategy

### 4.4 谐振抑制策略对比验证

可以从 2 个方面进一步证明本文所提谐振抑制策略的有效性和适用性,即①选择文献[7]、[20]中的谐振抑制方法与本文所用方法进行对比验证,检验谐振抑制方法的有效性以及逆变器阻抗在全频段满足无源性条件的必要性;②LCL 型滤波器的参数变化会影响逆变器输出阻抗的幅频特性,选择文献[15]、[19]中 2 种不同的滤波器参数验证本文谐振抑制策略的适用性。仿真数据以 3 km、3 mH 为例。

文献[7]、[20]中谐振抑制方法的仿真结果分别如图 14、15 所示。当采用文献[7]中的谐振抑制方法时,逆变器输出阻抗的伯德图和图 8 类似,从图 14 中可以看到,在考虑输电电缆的分布参数时,该方法失效,并网电流畸变严重;当采用文献[20]中提到的谐振抑制方法后,逆变器输出阻抗无法在全

频段满足无源性条件,验证了该方法在系统参数变化时可能会失效的结论。通过这 2 种方法的对比,证实了逆变器输出阻抗在全频段满足无源性条件的重要性,增强了谐振抑制策略的说明力。

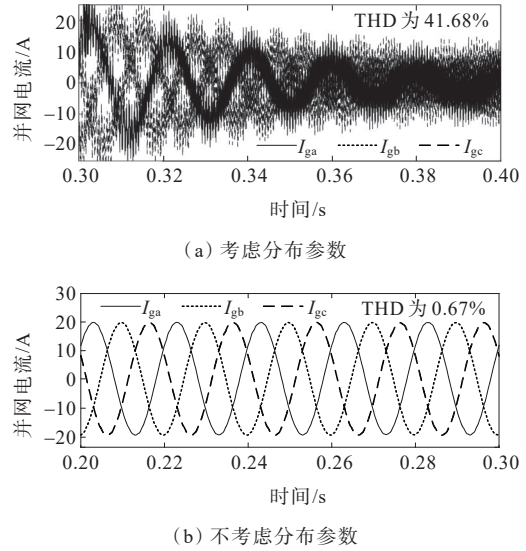


图 14 文献[7]中的谐振抑制方法

Figure 14 Resonance suppression method in reference[7]

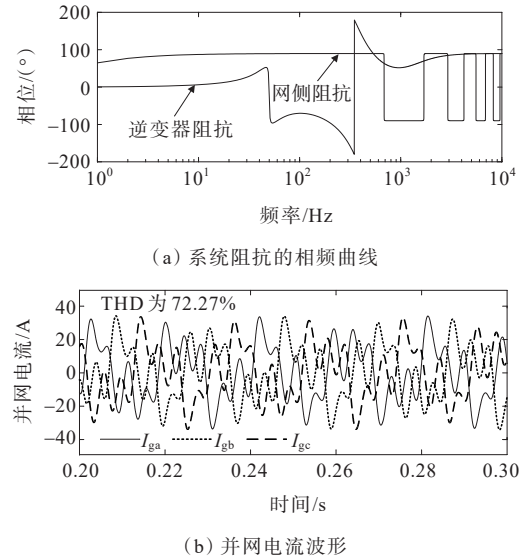
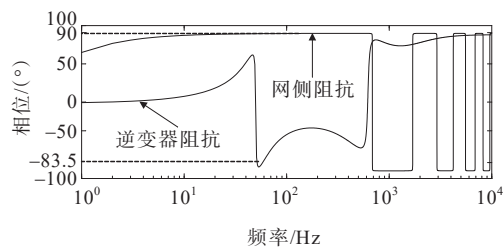


图 15 文献[20]中的谐振抑制方法

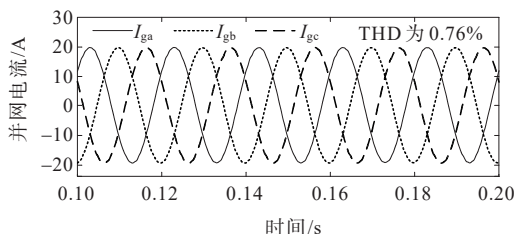
Figure 15 Resonance suppression method in reference[20]

在不同 LCL 滤波器参数下,逆变器输出阻抗的相频曲线和共振抑制策略的效果分别如图 16、17 所示(分别选用文献[15]、[19]中滤波器参数)。从图 16(a)、17(a)可见,在本文所提的谐振抑制策略下,逆变器输出阻抗在全频段均能满足无源性条件;观察图 16(b)、17(b)中电流波形,可知谐振抑制策略仍然有效。证实了该方法具有比较广泛的适用性。





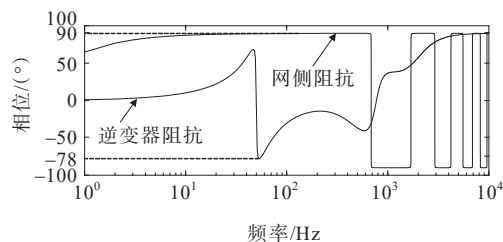
(a) 系统阻抗的相频曲线



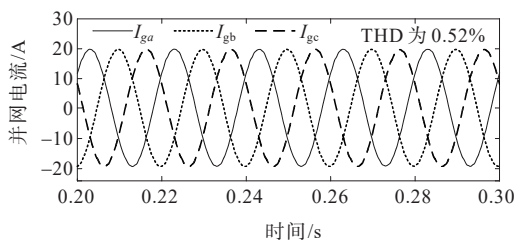
(b) 并网电流波形

图 16 文献[15]中的滤波器参数

Figure 16 Filter parameters in reference[15]



(a) 系统阻抗的相频曲线



(b) 并网电流波形

图 17 文献[19]中的滤波器参数

Figure 17 Filter parameters in reference[19]

## 5 结语

本文研究了考虑输电电缆对地电容时逆变器并网系统的谐振特性,提出了在逆变器前向通路中串联低通滤波器和相位补偿器的有源阻尼策略,通过仿真验证,得出以下结论:

1) 计及输电电缆对地电容时逆变器阻抗与网侧阻抗在中高频段出现了多个交截点,当电网侧阻抗和线路发生变化时,会引起系统交截频率的偏移;当交截频率处的相角裕度不足时,系统会发生高频谐振;

2) 针对逆变器并网系统的高频谐振问题提出了有源阻尼策略,该策略可以提高交截频率处的相角裕度,实现高频谐振的抑制;

3) 该研究思路可以进一步拓展,包括电网中存在背景谐波时有源阻尼策略对谐振的抑制效果、从仿真和硬件 2 个方面共同证实分析的正确性以及分析逆变器并网台数对系统谐振频率的影响等。

## 参考文献:

- [1] 许德志. 并网逆变器与电网谐波交互的建模分析与抑制研究[D]. 上海: 上海大学, 2015.  
XU Dezhi. Modeling analysis and suppression of harmonic interaction between grid-connected inverter and power grid[D]. Shanghai: Shanghai University, 2015.
- [2] 王学华, 阮新波, 刘尚伟. 抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 7-14.  
WANG Xuehua, RUAN Xinbo, LIU Shangwei. Control strategy of grid-connected inverter to suppress background harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 7-14.
- [3] 姜云龙, 司鑫尧, 史鸿飞, 等. 弱电网下计及锁相环影响的并网逆变器稳定性提升方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 113-120.  
JIANG Yunlong, SI Xinyao, SHI Hongfei, et al. Stability improvement method of grid-connected inverter considering phase-locked loop effect in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 113-120.
- [4] PAN D, RUAN X, BAO C, et al. Capacitor-current-feed back active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL-type grid-connected inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3414-3427.
- [5] WANG X, BLAABJERG F, LOH P C. Grid-current-feedback active damping for LCL resonance in grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 213-223.
- [6] YANG D, RUAN X, WU H. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5795-5805.
- [7] 王渝红, 叶葳, 宋瑞华, 等. 基于阻抗分析法的三相 LCL 型并网逆变器附加有源阻尼设计[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2645-2656.  
WANG Yuhong, YE Wei, SONG Ruihua, et al. Design of three-phase LCL grid-connected inverter with additional active damping based on impedance analysis[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(8): 2645-2656.

- [8] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2011,26(11):3075-3078.
- [9] 吴林林,程浩,刘京波,等.静止无功发生器对双馈风电场高频振荡的影响[J].*中国电力*,2022,55(9):163-173+182.  
WU Linlin, CHENG Hao, LIU Jingbo, et al. Influence of static var generator on high frequency oscillation of doubly-fed wind farm[J]. *Electric Power*, 2022, 55(9): 163-173+182.
- [10] 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.
- [11] 李景灏,吴爱国.基于离散趋近律与无差拍双闭环结构的单相LCL型PWM整流器控制策略[J].*电工技术学报*,2021,36(6):1290-1303.  
LI Jinghao, WU Aiguo. A double closed-loop control method for single-phase PWM rectifiers with LCL filter based on discrete reaching law and deadbeat algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(6):1290-1303.
- [12] 吴斌,杨旭红.基于改进遗传PI和重复控制的三相逆变器并网研究[J].*电力科学与技术学报*,2021,36(6):151-156.  
WU Bin, YANG Xuhong. Research on grid-connection of three-phase inverter based on improved genetic PI and repetitive control[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(6):151-156.
- [13] 郑晨,周林,解宝,等.基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J].*电工技术学报*,2016,31(19):85-96.  
ZHENG Chen, ZHOU Lin, XIE Bao, et al. Harmonic resonance suppression strategy for large-scale photovoltaic power station based on phase margin compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(19):85-96.
- [14] 吴旭涛,周秀,周童浩,等.空间电容耦合法测量局部放电信号的波形及能量分布特性分析[J].*高压电器*,2022,58(7):183-190.  
WU Xutao, ZHOU Xiu, ZHOU Tonghao, et al. Analysis of waveform and energy distribution of partial discharge signal measured by spatial capacitor coupling method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(7): 183-190.
- [15] 李臻,曹增新,蒋程,等.应用于光伏发电并网逆变器的有源阻尼控制策略[J].*电网与清洁能源*,2021,37(11):102-108+114.  
LI Zhen, CAO Zengxin, JIANG Cheng, et al. Active damping control strategy applied to grid-connected inverter of photovoltaic power generation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(11): 102-108+114.
- [16] 张劲松,段文燕,孙孝峰,等.基于长传输线的并网系统谐波谐振抑制策略研究[J].*太阳能学报*,2019,40(9):2561-2570.  
ZHANG Jinsong, DUAN Wenyan, SUN Xiaofeng, et al. Research on harmonic resonance suppression strategy of grid-connected system based on long transmission lines[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(9): 2561-2570.
- [17] 俞容江,马炯,李家栓,等.考虑电缆宽频特性的光伏电站谐振机理及抑制[J].*电工电能新技术*,2020,39(10):47-54.  
YU Rongjiang, MA Jiong, LI Jiashuan, et al. Resonance mechanism and suppression of photovoltaic power station considering cable broadband characteristics[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2020, 39(10):47-54.
- [18] WU W, HU K, ZHANG M, et al. An enhanced double quasi-PR controller for grid-side inverter with long transmission cable[C]//*IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Vancouver, BC, Canada, 2021.
- [19] WANG X, BLAABJERG F, LISERRE M. An active damper to suppress multiple resonances with unknown frequencies [C]//*IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition and Fort Worth, TX, USA*, 2014.
- [20] 韩祥民,刘晓波,刘敏,等.基于改进EEMD与GA-BP的谐振接地故障选线方法[J].*智慧电力*,2021,49(12):80-87.  
HAN Xiangmin, LIU Xiaobo, LIU Min, et al. Resonant grounding fault line selection method based on improved EEMD and GA-BP model[J]. *Smart Power*, 2021, 49(12): 80-87.
- [21] SONG Y, EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F. Analysis of high-frequency resonance in DFIG-based offshore wind farm via long transmission cable[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 33(3): 1036-1046.
- [22] PENG X, YANG H. Impedance-based stability criterion for the stability evaluation of grid-connected inverter systems with distributed parameter lines[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 1(1): 1-13.
- [23] SONG Y, BLAABJERG F, WANG X. Analysis and active damping of multiple high frequency resonances in DFIG system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 369-381.
- [24] 刘怀远.弱电网下并网换流器稳定控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
LIU Huaiyuan. Research on stability control of grid-connected converter in weak current network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.