

# 锁相环对柔性直流输电系统换流站 输入导纳的影响分析

李培法<sup>1,2</sup>, 唐欣<sup>1</sup>, 王文<sup>1</sup>, 李田<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 国网浙江象山县供电有限公司, 浙江象山 315700)

**摘要:**换流站阻抗模型的准确性直接影响柔性直流输电系统的小干扰稳定性分析,然而模型越精确其阶数也越高,从而增大分析的复杂度。为分析锁相环对换流站阻抗特性的影响,首先建立  $d-q$  坐标下考虑和不考虑锁相环 2 种情况下换流站交流侧导纳矩阵,进而建立静止坐标下换流站的同序和镜像导纳,通过对比考虑和不考虑锁相环的输入导纳,得出锁相环对输入导纳值影响与锁相环传函的截止频率直接相关的结论。最后,在 PSCAD 软件中建立仿真模型,利用信号注入法获得换流站的同序和镜像导纳验证理论分析的正确性。

**关键词:**导纳矩阵;锁相环;小信号分析;阻抗模型

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.003 中图分类号:TM721.1 文章编号:1673-9140(2020)04-0020-07

## Analysis of the effect of phase-locked loop on input admittance of converter station in flexible DC transmission system

LI Peifa<sup>1,2</sup>, TANG Xin<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, LI Tian<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. State Grid Zhejiang Xiangshan Power Supply Company, Xiangshan 315700, China)

**Abstract:** The accuracy of the impedance model of the converter station directly affects the small interference stability analysis of the flexible DC transmission system. However, the more accurate the model, the higher the order, which increases the complexity of the analysis. To analyze the influence of the phase-locked loop on the impedance characteristics of the converter station, we firstly establish the admittance matrix of the AC side of the converter station under the two conditions of  $d-q$  coordinates with and without consideration of the phase-locked loop, and then establish the same order and mirror admittance of the converter station at the static coordinates. By comparing and not considering the input admittance of the phase-locked loop, it is concluded that the influence of the phase-locked loop on the input admittance value is directly related to the cut-off frequency of the phase-locked loop transfer function. Finally, the simulation model is established in PSCAD software. We use the signal injection method to obtain the homologous and mirror admittance of the converter station to verify the correctness of the theoretical analysis.

**Key words:** admittance matrix; phase-locked loop; small signal analysis; impedance model

柔性直流输电技术凭借其有功无功独立控制、潮流反转迅速、无需无功补偿、直流侧无频率稳定问题等技术优点,被广泛应用于新能源并网、非同步电网互联、孤岛供电、远距离输电等场合<sup>[1-3]</sup>。但柔性直流输电技术在为电力系统带来新的发展机遇的同时,也给电力系统稳定性带来了新的挑战。换流站控制系统的电流内环、功率或直流电压外环、锁相环及其相关环节的多时间尺度响应特性,导致交直流耦合作用变得复杂<sup>[4]</sup>。

阻抗分析法分析将换流站和电网看作两个独立的子系统,利用换流站的交流侧阻抗特性可定量分析柔性直流系统的稳定性<sup>[5-6]</sup>。换流站阻抗模型的准确性直接影响柔性直流输电系统的小干扰稳定性分析,然而模型越精确其阶数也越高,会增大分析的复杂度<sup>[7-8]</sup>。因此,有必要明确系统每一个控制环节对系统阻抗的影响,从而可对低频振荡、次同步振荡和开关谐波振荡等不同类型的振荡,建立相应的简化模型。文献[9]建立了  $d-q$  坐标下换流站交流侧阻抗模型,并在  $d-q$  坐标下分析了低通滤波器对系统振荡频率的影响;文献[10]通过建立多变流器并联并网系统的诺顿等效电路模型,分析了 LCL 参数对多并联变流器的谐振影响;文献[11-12]在  $abc$  坐标系内采用换流器平均计算模型,在忽略正负序耦合的情况下,运用谐振线性化的方法建立了电压扰动时换流器阻抗模型,然而该方法没有定量分析锁相环对系统阻抗的影响;文献[13]详细地建立了换流器导纳矩阵,并分析了系统控制参数整定原则,也

没有具体分析锁相环对系统导纳的影响;文献[14]考虑了锁相环的影响,结合状态空间法建立不受电网强度影响的柔性直流输电系统的小信号模型;文献[15]分析了锁相环对变流器阻抗特性及系统稳定性的影响,但在分析不同频段振荡时针对变流器阻抗降阶或简化并未给出指导建议。

为定量分析锁相环对柔性直流输电系统输入导纳的影响,该文建立  $d-q$  坐标下考虑和不考虑锁相环 2 种情况下的变流站交流侧小信号模型,进而通过系统传递函数矩阵得出静止坐标下的等值导纳,并与测量的导纳进行对比分析。

## 1 系统描述

柔性直流输电系统结构如图 1 所示,整流站采用定有功和定无功功率控制,逆变站采用定直流和定交流电压控制方式。由于篇幅限制,该文仅分析锁相环对整流站交流侧导纳的影响。

当系统三相平衡时,图 1 整流站交流侧可以简化为如图 2 所示,交流电网由电压源  $V_g$  和阻抗  $Z_1(s)$  串联表征, $L$  为换流电抗, $u_{s1}$  为 PCC1 点电压, $u_{c1}$  为整流站交流侧出口电压(全文复数向量均用加粗斜体字表示,实数空间向量用加粗带箭头上标斜体字表示,下标含字母  $d$ 、 $q$  分别表示物理量的  $d$  和  $q$  轴分量,物理量可以用复数向量和矩阵向量 2 种形式表述,如:  $\mathbf{u}_{s1} = u_{s1d} + j u_{s1q} \leftarrow \vec{\mathbf{u}}_{s1} = [u_{s1d}, u_{s1q}]^T$ )。

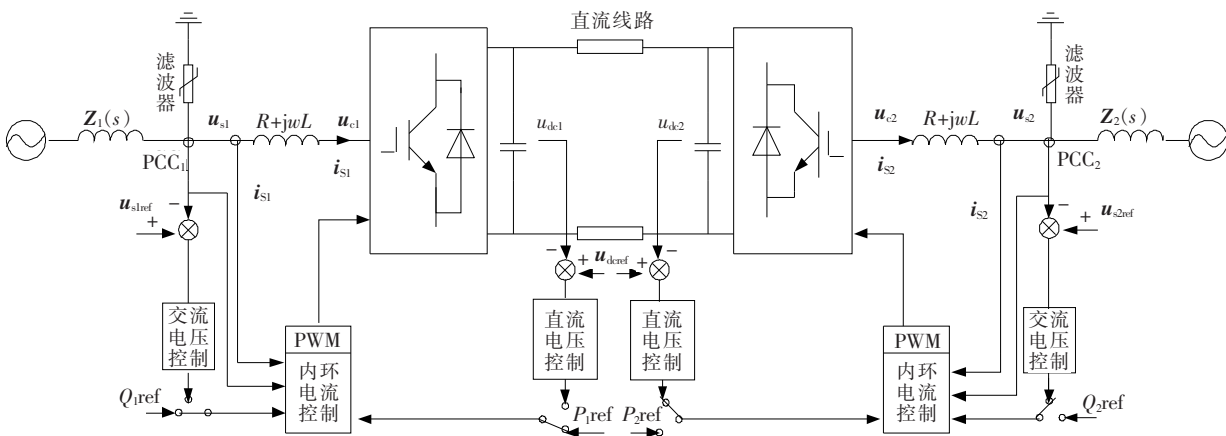


图 1 双端柔性直流输电系统

Figure 1 Double-ended flexible DC transmission system

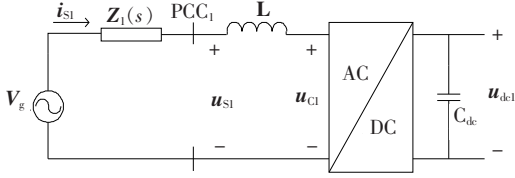


图2 整流站简化模型

Figure 2 Simplified model of rectifier station

系统参考坐标系如图3所示, PCC<sub>1</sub>点电压  $u_{s1}$  与  $\alpha$  轴的夹角为  $\theta$ , 锁相环通过锁定  $u_{s1}$  得到的相角为  $\theta_{pll}$ 。稳态时  $\theta = \theta_{pll}$ , 当系统出现扰动时,  $\theta_{pll}$  与  $\theta$  存在误差  $\Delta\theta_{pll}$ 。因此, 以锁相环输出为基准的  $d-q$  坐标内电压和以电网电压为基准的  $d-q$  坐标内电压的关系为

$$\mathbf{u}_{s1}^c = e^{-j\Delta\theta_{pll}} \mathbf{u}_{s1} \quad (1)$$

式中 含上标  $c$  的量表示以锁相环输出为基准的旋转坐标系内物理量; 不含上标  $c$  的量表示以电网电压为基准的旋转坐标系内物理量。

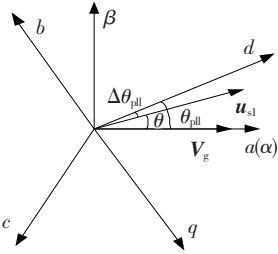


图3 系统参考坐标

Figure 3 System reference coordinates

系统扰动时  $d-q$  坐标系内电压电流关系为

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_{s1}^c}{dt} + j\omega \mathbf{L} \mathbf{i}_{s1}^c = \mathbf{u}_{s1}^c - \mathbf{u}_{c1}^c \quad (2)$$

式(2)中  $\omega$  为电网角频率;  $\mathbf{u}_{s1}^c = u_{s1d}^c + ju_{s1q}^c$ ,  $\mathbf{u}_{c1}^c = u_{c1d}^c + ju_{c1q}^c$ ,  $\mathbf{i}_{s1}^c = i_{s1d}^c + ji_{s1q}^c$  分别为  $d-q$  坐标内 PCC<sub>1</sub> 点电压向量、换流器交流侧电压向量、换流器交流侧电流向量。

整流站控制框图<sup>[9]</sup>如图4所示,  $u_{c1dref}^c$ 、 $u_{c1qref}^c$  为控制器输出电压参考值,  $u_{s1d}^c$ 、 $u_{s1q}^c$ 、 $i_{s1d}^c$ 、 $i_{s1q}^c$  为 PCC<sub>1</sub> 点电压、电流  $d$  和  $q$  轴分量, 由于稳态时以锁相环输出为基准的旋转坐标  $d$  轴与  $u_{s1}^c$  重合, 也就是稳态时有  $u_{s1q}^c = 0$ , 因而取  $i_{s1dref}^c = P_{ref}/u_{s1d}^c$ ,  $i_{s1qref}^c = Q_{ref}/u_{s1d}^c$ 。由图4可得:

$$\mathbf{u}_{c1ref}^c = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) (\mathbf{i}_{s1ref}^c - \mathbf{i}_{s1}^c) - j\omega \mathbf{L} \mathbf{i}_{s1}^c + \mathbf{u}_{s1}^c \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得:

$$\mathbf{i}^c = g_c(s) \mathbf{i}_{s1ref}^c \quad (4)$$

其中,  $g_c(s) = \frac{k_p s + k_i}{Ls^2 + k_p s + k_i}$ , 式(4)矩阵形式为

$$\vec{\mathbf{i}}^c = \begin{bmatrix} g_c(s) & 0 \\ 0 & g_c(s) \end{bmatrix} \vec{\mathbf{i}}_{s1ref}^c \quad (5)$$

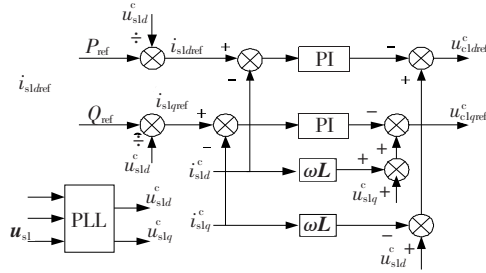


图4 整流站控制环

Figure 4 Rectifier station control loop

## 2 $d-q$ 坐标系内系统小信号阻抗模型

### 2.1 锁相环

锁相环(phase-locked loop, PLL)控制框图如图5所示, 控制器中所有反馈量的派克变换均以其输出为基准<sup>[14-17]</sup>。

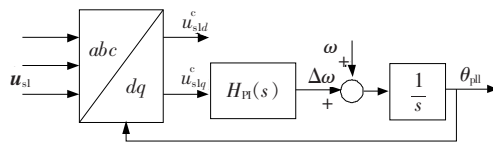


图5 锁相环控制框图

Figure 5 Block diagram of PLL control

由图5可得到锁相环输出相角和  $q$  轴电压的关系为

$$\theta_{pll} = \int \left[ u_{s1q}^c \underbrace{\left( k_{ppll} + \frac{k_{ipll}}{s} \right)}_{H_{PI}(s)} + \omega \right] dt \quad (6)$$

式中  $k_{ppll}$  和  $k_{ipll}$  分别为比例和积分系数。在平衡点对式(1)线性化可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{s1}^c &= \mathbf{u}_{s1d}^c + ju_{s1q}^c = (\mathbf{u}_{s10} + \Delta \mathbf{u}_{s1}) e^{-j\Delta\theta_{pll}} \approx \\ &(\mathbf{u}_{s10} + \Delta \mathbf{u}_{s1})(1 - j\Delta\theta_{pll}) \Rightarrow \\ \Delta u_{s1d}^c &\approx \Delta u_{s1d}, \Delta u_{s1q}^c \approx \Delta u_{s1q} - \Delta\theta_{pll} u_{s1d0} \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $u_{s1d0}$  为 PCC<sub>1</sub> 点电压在平衡点的  $d$  轴分量。

结合式(7), 在平衡点对式(6)线性化可得:

$$\Delta\theta_{pll} = H_{PLL}(s) \Delta u_{s1q} \quad (8)$$

其中,  $H_{\text{PLL}}(s) = \frac{H_{\text{PI}}(s)}{s + H_{\text{PI}}(s)u_{\text{s1d}0}}$ 。

## 2.2 电流内环

整流站采用定有功和定无功功率控制计算内环电流参考值。

$d$  轴电流参考值为

$$i_{\text{s1dref}} = 2P_{\text{ref}}/3u_{\text{s1d}0}^c \quad (9)$$

系统扰动时  $u_{\text{s1d}}^c \approx u_{\text{s1d}0} + \Delta u_{\text{s1d}}$ , 对式(9)进行线性化可得:

$$\Delta i_{\text{s1dref}} = -(2P_{\text{ref}}/3u_{\text{s1d}0}^2) \Delta u_{\text{s1d}} \quad (10)$$

与  $d$  轴计算类似,  $q$  轴电流参考值为

$$\begin{cases} i_{\text{s1qref}} = 2Q_{\text{ref}}/3u_{\text{s1d}0}^c \\ \Delta i_{\text{s1qref}} = -(2Q_{\text{ref}}/3u_{\text{s1d}0}^2) \Delta u_{\text{s1d}} \end{cases} \quad (11)$$

综合式(10)、(11), 电流参考值扰动量与电网电压关系矩阵可表示为

$$\vec{\Delta i}_{\text{ref}} = \begin{bmatrix} -\frac{2P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} & 0 \\ -\frac{2Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} & 0 \end{bmatrix} \vec{\Delta u}_{\text{s1}} \quad (12)$$

将式(5)代入式(12), 参考式(1)可得不考虑锁相环影响时变流站的输入导纳矩阵为

$$\vec{\Delta i} = \vec{\Delta i}^c = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) & 0 \\ -\frac{2Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) & 0 \end{bmatrix}}_{Y_1(s)} \vec{\Delta u}_{\text{s1}} \quad (13)$$

考虑锁相环影响时有  $i^c = e^{-j\Delta\theta_{\text{pll}}} i$ , 线性化可得:

$$\Delta i = \Delta i^c + j\Delta\theta_{\text{pll}} i_{\text{s1}0} = \Delta i^c + j i_{\text{s1}0} H_{\text{PLL}}(s) \Delta u_{\text{s1q}} \quad (14)$$

式中  $i_{\text{s1}0}$  为平衡点电流值。

$$j i_{\text{s1}0} H_{\text{PLL}}(s) \Delta u_{\text{s1q}} \leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 & -\frac{2Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) \\ 0 & \frac{2P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) \end{bmatrix} \vec{\Delta u}_{\text{s1}} \quad (15)$$

由式(14)、(15)可得输入导纳矩阵为

$$\vec{\Delta i} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{2P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) & -\frac{2Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) \\ -\frac{2Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) & \frac{2P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) \end{bmatrix}}_{Y_2(s)} \vec{\Delta u}_{\text{s1}} \quad (16)$$

## 3 传递函数矩阵与复系数传函的转化

对于任意一个线性时不变系统, 其输入、输出分别为 2 个物理量  $u, y$ , 可以表示为

$$y = G(s)u \quad (17)$$

式中 输入、输出可表示为  $u = [u_d, u_q]^T, y = [y_d, y_q]^T, G(s)$  为系统传递函数矩阵。设传递函数矩阵为

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{dd}(s) & -G_{dq}(s) \\ G_{dq}(s) & G_{qq}(s) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(17)的输出可转化为 2 个复系数传递函数与互为共轭的 2 个复数输入向量的乘积之和<sup>[18-21]</sup>:

$$y = G_+(s)u + G_-(s)u^* \quad (19)$$

$$\begin{cases} G_+(s) = \frac{G_{dd}(s) + G_{qq}(s)}{2} + j \frac{G_{dq}(s) + G_{qd}(s)}{2} \\ G_-(s) = \frac{G_{dd}(s) - G_{qq}(s)}{2} + j \frac{G_{dq}(s) - G_{qd}(s)}{2} \end{cases} \quad (20)$$

式中  $G_+(s)$  为静止坐标中同序导纳;  $G_-(s)$  为静止坐标的镜像导纳。

将式(20)分别应用于式(13)、(16), 得到系统扰动时在不考虑和考虑锁相环 2 种情况下, 换流站导纳函数为

$$\begin{cases} Y_{1+} = -\frac{P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) - j \frac{Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) \\ Y_{1-} = -\frac{P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) - j \frac{Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) \end{cases} \quad (21)$$

式中  $Y_{1+}, Y_{1-}$  分别为不考虑锁相环时同序、镜像导纳。

$$\begin{cases} Y_{2+} = -\frac{P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) + \frac{P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) - j \left( \frac{Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) - \frac{Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) \right) \\ Y_{2-} = -\frac{P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) - \frac{P_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) - j \left( \frac{Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}^2} g_c(s) - \frac{Q_{\text{ref}}}{3u_{\text{s1d}0}} H_{\text{PLL}}(s) \right) \end{cases} \quad (22)$$

式中  $Y_{2+}, Y_{2-}$  分别为考虑锁相环时同序、镜像导纳。

### 4 仿真验证

为验证整流站交流侧小信号阻抗模型的正确性及锁相环截止频率对换流站导纳的影响,该文在PSCAD/EMTDC中建立整流站电磁暂态模型,并对采用不同锁相环传递函数截止频率  $f_{cpll}$  的模型进行仿真,系统仿真参数如表1所示。

为测量变流站的输入导纳,该文在网侧注入不同频率正序谐波电压,频率范围为10~350 Hz,通过测量同序谐波电流和镜像谐波电流获得输入导纳的测量值,并通过MATLAB计算出输入导纳与测

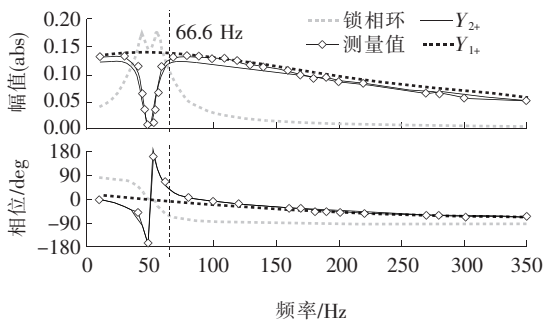
量值对比。当锁相环取不同截止频率时,静止参考坐标系内计算值和测量值对比如图6~8所示。由于锁相环是以旋转坐标系为参考实现控制的,因此,当其参考坐标系转化为静止坐标系时,其截止频率  $f_{cpll}$  在静止坐标中所对应的同序和镜像截止频率分别为  $f+f_{cpll}$  和  $f-f_{cpll}$ 。

当锁相环传递函数截止频率  $f_{cpll} = 16.6$  Hz时,计算值与测量值对比见图6(a)、(b),可以看出,  $Y_{1+}$ 、 $Y_{1-}$  与  $Y_{2+}$ 、 $Y_{2-}$  相比,  $Y_{2+}$ 、 $Y_{2-}$  与测量值拟合更好,锁相环对输入导纳影响主要是小于其传递函数截止频率的频段,此时其对0.1~10 Hz频段阻抗(低频振荡频段)的影响非常小。当锁相环传递函数

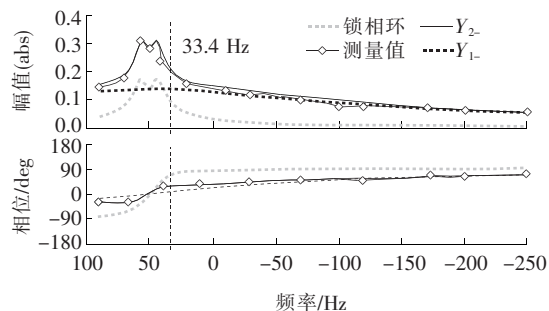
表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

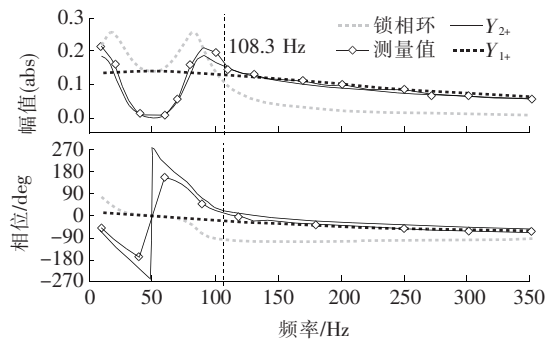
交流系统电压/kV	交流电频率/Hz	交流系统内阻抗/ $\Omega$	交流侧谐波线电压/kV	交流侧谐波电压频率/Hz	整流侧等效电感/H	载波频率/kHz	直流侧电容/ $\mu$ F	逆变器等效电压/kV	电流环控制器参数	锁相环控制器参数
60	50	0	3	10~350	0.005	4	250	350	$K_p = 4$ , $K_i = 20$	$K_{ppll} = 1.5(f_{cpll} = 66.6 \text{ Hz})$ $K_{ppll} = 3(f_{cpll} = 108.3 \text{ Hz})$ $K_{ppll} = 3(f_{cpll} = 131.3 \text{ Hz})$ $K_{ipll} = 50(f_{cpll} = 66.6 \text{ Hz})$ $K_{ipll} = 1\ 000(f_{cpll} = 108.3 \text{ Hz})$ $K_{ipll} = 2\ 050(f_{cpll} = 131.3 \text{ Hz})$



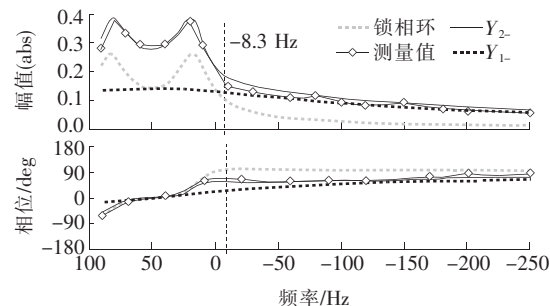
(a)同序导纳



(b)镜像导纳



(a)同序导纳



(b)镜像导纳

图6  $f_{cpll} = 16.6$  Hz时导纳

Figure 6 Admittance under  $f_{cpll} = 16.6$  Hz

图7  $f_{cpll} = 58.3$  Hz时导纳

Figure 7 Admittance under  $f_{cpll} = 58.3$  Hz

截止频率  $f_{\text{cpll}} = 58.3 \text{ Hz}$  时,计算值与测量值对比见图 7(a)、(b),可以看出,锁相环对输入导纳影响同样主要是小于其传递函数截止频率的频段,但此时其对  $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$  频段阻抗的影响需要考虑。当锁相环传递函数截止频率  $f_{\text{cpll}} = 81.3 \text{ Hz}$  时,计算值与测量值对比见图 8(a)、(b),可以看出,采用功率单环控制方式下,随着锁相环传递函数截止频率增大,其对输入导纳产生影响的频段也增大。

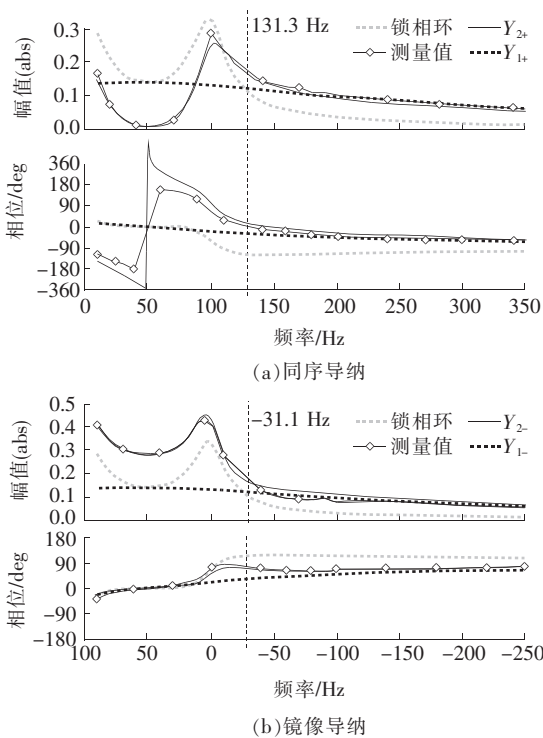


图8  $f_{\text{cpll}} = 81.3 \text{ Hz}$  时导纳

Figure 8 Admittance under  $f_{\text{cpll}} = 81.3 \text{ Hz}$

## 5 结语

换流站控制系统的电流内环、功率或直流电压外环、锁相环等环节会对其输入导纳有影响,造成输入导纳的详细模型的阶数较高,增加了复杂交直流网路的稳定性难度。该文针对换流站控制系统的多时间尺度响应特性,详细分析了锁相环对换流站输入导纳影响,得出了锁相环对换流站输入导纳影响频段与其传递函数的截止频率直接相关的结论,可以为输入导纳模型降阶提供理论依据,从而可对低频振荡、开关谐波振荡等不同类型的振荡,建立相应的简化模型。

## 参考文献:

- [1] 刘卫东,李奇南,王轩,等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力,2020,53(7):55-71.  
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms [J]. Electric Power, 2020,53(7):55-71.
- [2] 李祝昆,朱益华,徐海波,等. 适应安全稳定控制的双端柔性直流输电系统故障闭锁判据研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(11):145-155.  
LI Zhukun, ZHU Yihua, XU Haibo, et al. Research on fault blocking criteria of two-terminal VSC-HVDC transmission system adapting to safety and stability control [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11):145-155.
- [3] 肖超,韩伟,李琼林,等. 柔性直流输电系统交流侧线路继电保护适应性研究[J]. 智慧电力,2020,48(4):1-8.  
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. Adaptability of MMC-HVDC system on relay protection of AC transmission lines [J]. Smart Power, 2020,48(4):1-8.
- [4] Wen B, Dong D, Boroyevich D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,31(1): 26-38.
- [5] 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.
- [6] Wen Bo, Boroyevich D, Burgos R, et al. Small-signal stability analysis of three-phase AC systems in the presence of constant power loads based on measured d-q frame impedances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015,30(10):5952-5963.
- [7] 辛焕海,李子恒,董伟,等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1277-1292.  
XIN Huanhai, LI Ziheng, DONG Wei, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(5):1277-1292.

- [8] Zhao Mingquan, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(4): 2925-2937.
- [9] Xu L, Fan L. Impedance-based resonance analysis in a VSC-HVDC System[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(4): 2209-2216.
- [10] 聂程, 雷万钧, 王跃, 等. 多变流器并联时谐振特性及最优虚拟阻尼方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1467-1477.
- NIE Cheng, LEI Wanjun, WANG Yue, et al. Resonance analysis of multi-paralleled converter systems and research on optimal virtual resistor damping methods[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1467-1477.
- [11] Sun J. Small-signal methods for AC distributed power systems-A review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(11): 2545-2554.
- [12] Cespedes M, Sun J. Impedancemodeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 29(3): 1254-1261.
- [13] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [14] 杨洁, 刘开培, 王东旭, 等. 向无源网络供电的双端柔性直流输电系统小信号稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(10): 2400-2408.
- YANG Jie, LIU Kaipei, WANG Dongxu, et al. Small signal stability analysis of VSC-HVSC applied to passive network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(10): 2400-2408.
- [15] Wen B, Boroyevich D, Mattavelli P, et al. Influence of phase-locked loop on input admittance of three-phase voltage-source converters [C]//*IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 2013.
- [16] Bakhshizadeh M K, Wang X, 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] Golestan S, Guerrero J M, Vasquez J C. Three-phase PLLs: A review of recent advances[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(3): 1894-1907.
- [18] Harnefors L. Modeling of three-phase dynamic systems using complex transfer functions and transfer matrices[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(4): 2239-2248.
- [19] Wang X F, Harnefors L, Blaabjerg F. A unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 33(2): 1775-1787.
- [20] Rygg A, Molinas M, Zhang C, 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 & Selected Topics in Power Electronics*, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [21] Karimi-Ghartemani M. A unifying approach to single phase synchronous reference frame PLLs [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(10): 4550-4556.