

# 弱连接 VSC 的 PLL 同步失稳特性分析及 补偿控制策略

程亮,段彭洋,苏宏帮,田生娟,齐晓璇,颜生萍

(国网青海省电力有限公司 国网青海营销服务中心,青海 西宁 810001)

**摘要:**在高比例新能源并网发电背景下,新能源接口换流器经长距离交流线路并网的现象愈发显著。弱网环境下,基于锁相环(PLL)同步的矢量控制型电压源换流器(VSC)易发生 PLL 同步失稳。以提升弱连接 VSC 的 PLL 同步稳定性为出发点,建立了用于揭示弱连接 VSC 的 PLL 同步失稳机理的分析模型,通过理论分析揭示了 PLL 与不同时间尺度控制环节动态耦合特性对 PLL 同步失稳机理的影响。基于理论分析结果设计了一种适用于多种时间尺度的 PLL 动态补偿控制策略,实现弱连接 VSC 的 PLL 同步稳定性的提升。基于 Matlab/Simulink 的仿真结果验证了理论分析的正确性和补偿控制策略的有效性。

**关键词:**电压源换流器;PLL同步稳定性;机理分析模型;动态交互;补偿控制策略

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25495

## Analysis of PLL Synchronous Instability Characteristics and Compensation Control Strategy for Weak Grid Connected VSC

CHENG Liang, DUAN Pengyang, SU Hongbang, TIAN Shengjuan, QI Xiaoxuan, YAN Shengping

(State Grid Qinghai Marketing Service Center, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810001, Qinghai, China)

**Abstract:** In the background of a high proportion of new energy source connected to grid, the phenomenon of new energy interface inverters being connected to the grid through long-distance AC lines is becoming increasingly significant. The traditional vector controlled weak grid connected voltage source converter (VSC) based on phase locked loop (PLL) synchronization is prone to PLL synchronization instability. To improve the PLL synchronization stability of weakly connected VSC, an analytical model to reveal the PLL synchronization instability mechanism of weakly connected VSC was established. Through theoretical analysis, the influence of the dynamic coupling characteristics of PLL and different time scale control links on the PLL synchronization instability mechanism was revealed. Based on the theoretical analysis results, a PLL dynamic compensation control strategy suitable for multiple time scales was designed to improve the PLL synchronization stability of weakly connected VSC. The simulation results based on Matlab/Simulink verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the compensation control strategy.

**Key words:** voltage source converter (VSC); PLL synchronous stability; mechanism analysis model; control loops interaction; compensation control strategy

大力发展新能源并网发电是解决我国能源短缺、实现“双碳”目标、构建新型电力系统的必由之路<sup>[1]</sup>。近年来,我国新能源装机容量增长迅猛,电力能源结构逐渐由传统的化石能源为主体转变为以新能源为主体<sup>[2]</sup>。新能源依靠电力电子设备实现并网,电压源换流器(voltage source con-

verter, VSC)凭借其四象限运行和功率电压灵活可控的优势,近年来广泛应用于新能源并网及柔性直流输电等领域<sup>[3]</sup>。VSC可配置多种控制策略,其中基于锁相环(phase locked loop, PLL)同步的矢量控制策略具有控制策略简单易行、有功无功解耦控制及低电压穿越能力强的特点,在实际

系统中应用最为广泛<sup>[4]</sup>。

新能源并网发电好处诸多,但同样也引发了多种电网问题,本文关注的是:新能源场站通常建立在远离负荷中心的山区和旷野,接口VSC需经长距离交流线路与城区主网相连,这将使得VSC与大电网间呈现薄弱电气连接(后文简称“弱连接”)特性<sup>[5]</sup>。在系统出现扰动时,弱连接VSC公共运行点(point of common coupling, PCC)电压的幅值、相角将出现较大波动,严重时导致VSC出现PLL同步失稳<sup>[6-7]</sup>。VSC发生PLL同步失稳后,将通过宽频振荡装置切除并网新能源,造成大容量新能源机组脱网,在负荷高峰时极易引发系统频率事件,这将对电力系统安全稳定运行造成不可预估的危害<sup>[8]</sup>。

按时间尺度,弱连接VSC动态可分为 $10^0\sim 10^1$  Hz级的电压外环控制时间尺度<sup>[9]</sup>以及 $10^2\sim 10^3$  Hz级甚至更高频率的电流内环控制时间尺度<sup>[10]</sup>。PLL时间尺度接近同步频率,居两者之间,当电网强度下降时,PLL与电压外环及电流内环均可能产生动态交互,进而影响PLL同步稳定性<sup>[11-12]</sup>。为解决此类弱连接VSC的PLL同步失稳问题,近年来国内外专家学者从失稳机理和改进控制策略等角度做出了一系列研究。

在失稳机理方面,现有文献提出了多种分析模型对PLL同步失稳特性进行分析。针对PLL与电压外环的交互作用对PLL同步稳定性的影响,文献[13]基于状态空间模型找出了电压时间尺度内,弱连接VSC系统的主导模态,并经由参与因子分析指出,该模态主要受PLL控制参数和电网强度的影响,弱网环境下降低PLL控制系数有利于PLL同步稳定。文献[14]基于状态空间模型分析指出直流电压外环与PLL在弱网环境下的耦合特性可能导致系统失稳。然而上述文献分析结论仅基于一组特定的运行参数,普适性不强。文献[15]基于直流电压动态建立了阻尼恢复转矩分析模型,并基于此模型指出交流电压外环的滞后性可能导致系统出现PLL同步失稳。文献[15]基于阻抗模型分析指出,弱网环境下弱连接VSC系统的负增量电阻显著增加,且该特性受PLL控制参数影响很大。文献[16]分析了不同外环控制策略下弱连接VSC的PLL同步稳定性,进而阐述了不同外环控制及PLL间的动态交互对PLL同步失稳形式的影响。

针对PLL与电流内环交互作用对PLL同步稳

定性的影响,文献[17]指出了弱连接VSC在电流时间尺度下存在多种模态的失稳特性,其中电流内环输出的内电势基于PLL输出相位进行相位转换的交互特性受PLL带宽影响明显,为使系统稳定,PLL响应速度不应过快。文献[18]基于状态空间模型理论,分析了电流内环时间尺度内,PLL带宽及系统短路比(short current ratio, SCR)对PLL同步稳定性的影响,进而指出弱网环境下高带宽PLL易出现失稳。上述文献结论反映了PLL与电流内环耦合对系统PLL同步稳定性的影响,然而上述文献的分析工况相对单一,且基于状态空间模型的分析方式对于PLL同步失稳机理的揭示并不十分清晰。

基于理论分析结果,一些文献提出了提升弱连接VSC系统PLL同步稳定性的改进控制策略。文献[19]提出一种功率-相角补偿控制策略,即引入有功功率到PLL输出相位的补偿环节,以减小扰动时PLL的波动,进而提升系统稳定性。文献[20]提出一种电压-频率补偿控制策略,该策略引入频率波动到电压控制的负增益补偿环节,进而削弱系统频率或电压相位扰动对电压控制的影响。针对一类通过建立外环与PLL间的附加传递函数通路,实现系统PLL同步稳定性提升的改进控制策略,文献[21]分析了此类方法对于电压控制时间尺度上,PLL同步稳定性提升机理的等价性,对于指导控制器设计提供了理论基础。然而已有文献大多针对VSC外环与PLL的动态耦合设计补偿策略,而以解决VSC内环与PLL动态耦合的改进控制方法却鲜有研究。

本文以提升弱连接VSC的PLL同步稳定性为研究动机,首先建立了弱连接VSC的PLL同步失稳特性分析模型,该模型将完整系统动态重组为PLL动态及整合了其它动态的传递函数环节两部分级联的形式。基于该模型,通过频域分析方法能够清晰得出VSC外环和内环与PLL在耦合频率附近的稳定裕度,进而揭示不同控制环节交互下PLL同步失稳的原因。与现有文献相比,本文所提方法对于电流内环时间尺度和电压外环时间尺度下的系统失稳分析具有通用性。基于理论分析结果,提出了一种提升PLL同步稳定性的补偿控制策略,通过针对性地设计补偿频段,该策略能够有效减弱PLL与电压外环交互以及PLL与电流内环交互对PLL同步稳定性的不良影响,提高系统稳定性。基于Matlab/Simulink的

仿真结果验证了理论分析的正确性及补偿控制策略的有效性。

## 1 PLL同步型VSC系统建模

### 1.1 PLL-矢量控制型弱连接VSC系统建模

图1给出了PLL同步型VSC接入弱交流系统的并网拓扑及其控制系统逻辑。VSC将直流系统注入电气量逆变为三相交流分量,经交流滤波环节后注入交流系统。图中,直流电气量 $P_{dc}$ 、 $U_{dc}$ 分别为直流系统传输功率和直流电压;C为VSC-直流系统等效电容。VSC出口采用LC滤波器削减逆变产生的交流谐波,LC滤波器的滤波电感和滤波电容分别用 $L_f$ 和 $C_f$ 表示。VSC经长电气距离交流线路并入大电网即呈现出弱连接特性,因此可建模为无穷大电源与等效电抗串联形式, $L_g$ 为长距离交流线路的等效电感。此外, $E$ 、 $V_1$ 及 $V_g$ 分别为VSC出口电压、PCC电压及无穷大系统电压的矢量形式; $I_1$ 、 $I_g$ 分别为流经LC滤波器电流及注入交流系统电流的矢量形式。

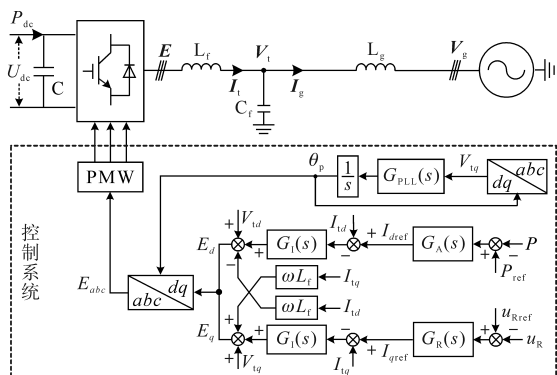


图1 PLL同步型VSC并网系统拓扑

Fig.1 PLL-synchronized VSC grid connected system topology

VSC采用内外环矢量控制模式,该控制模式下,VSC基于PLL与交流系统保持同步运行,PLL暂稳态向量如图2所示。

PLL提供的 $d$ - $q$ 同步参考坐标系 $d$ 轴始终追

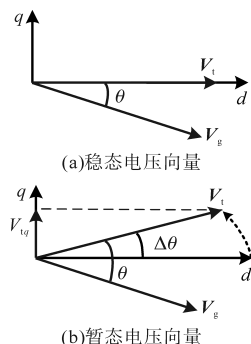


图2 PLL暂稳态向量特性

Fig.2 Transient steady-state vector characteristics of PLL

踪PCC电压 $V_1$ 所对应的相角,稳态条件下二者同相位。此时PCC电压 $V_1$ 与无穷大电网电压 $V_g$ 的相角差为 $\theta$ 。暂态条件下系统出现电气量扰动,此时PCC电压 $V_1$ 将发生幅值及相位变化, $d$ - $q$ 同步参考坐标系 $d$ 轴与 $V_1$ 产生相角差 $\Delta\theta$ ,进而产生 $q$ 轴分量 $V_{1q}$ ,结合图1所示PLL控制动态,此时PLL输出相角产生与 $\Delta\theta$ 同方向的增量 $\Delta\theta_p$ ,实现 $d$ 轴对 $V_1$ 相位的追踪。

$d$ - $q$ 同步参考坐标系下,PCC采集量基于PLL输出相角转化为 $d$ 、 $q$ 轴分量,进而经计算生成外环控制所需的有功功率、无功功率及交流电压输入量,其计算公式如下:

$$P = V_{1d}I_{1d} + V_{1q}I_{1q} \quad (1)$$

$$Q = V_{1q}I_{1d} - V_{1d}I_{1q} \quad (2)$$

$$V_1 = \sqrt{V_{1d}^2 + V_{1q}^2} \quad (3)$$

式中: $V_{1d}$ 、 $V_{1q}$ 分别为PCC电压 $V_1$ 的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $V_1$ 为 $V_1$ 的幅值; $I_{1d}$ 、 $I_{1q}$ 分别为VSC输出电流 $I_1$ 的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $P$ 、 $Q$ 分别为VSC输出的有功功率、无功功率。

PLL同步型VSC的外环控制灵活多样,其中有功侧可能采用定直流电压控制或定有功功率控制(后文简称“P-控制”),无功侧可能采用定交流电压控制(后文简称“V-控制”)或定无功功率控制(后文简称“Q-控制”)。新能源接口VSC有功侧通常采用P-控制,因此本文有功侧按P-控制进行建模。无功侧对Q-控制和V-控制两种模式分别建模,旨在分析不同无功侧控制对PLL同步失稳特性的影响。P-控制、Q-控制及V-控制的动态表示分别如下式所示:

$$I_{dref} = G_P(s)(P_{ref} - P) \quad (4)$$

$$I_{qref} = G_Q(s)(Q_{ref} - Q) \quad (5)$$

$$I_{qref} = G_V(s)(V_{1ref} - V_1) \quad (6)$$

其中

$$G_P(s) = k_{pP} + k_{iP}/s$$

$$G_Q(s) = k_{pQ} + k_{iQ}/s$$

$$G_V(s) = k_{pV} + k_{iV}/s$$

式中: $I_{dref}$ 、 $I_{qref}$ 分别为外环产生的 $d$ 、 $q$ 轴电流参考; $G_P(s)$ 、 $G_Q(s)$ 、 $G_V(s)$ 分别为有功功率外环、无功功率外环及交流电压外环对应的PI控制环节; $s$ 为微分算子; $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$ 、 $V_{1ref}$ 分别为有功功率、无功功率及交流电压的参考值。

基于外环输出的电流参考,VSC内环实现电流追踪,其具体控制形式如下式所示:

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} + G_1(s) \begin{bmatrix} I_{dref} - I_{td} \\ I_{qref} - I_{tq} \end{bmatrix} + \omega L_f \begin{bmatrix} -I_{tq} \\ I_{td} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$G_1(s) = k_{pi} + k_{il}/s$$

式中:  $E_d, E_q$  分别为 VSC 交流出口电压  $E$  的  $d, q$  轴分量;  $G_1(s)$  为电流内环的 PI 控制环节;  $\omega$  为系统频率。

交流系统可建模为

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sL_f & -\omega L_f \\ \omega L_f & sL_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{td} \\ I_{tq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_{td} \\ I_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{gd} \\ I_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sC_f & -\omega C_f \\ \omega C_f & sC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{gd} \\ V_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sL_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & sL_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{gd} \\ I_{gq} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, 式(8)、式(9)分别表示 LC 滤波器的电感、电容动态, 式(10)表示交流线路动态。

将式(9)、式(10)中导纳及阻抗矩阵记为

$$\begin{cases} Y_f(s) = \begin{bmatrix} sC_f & -\omega C_f \\ \omega C_f & sC_f \end{bmatrix} \\ Z_g(s) = \begin{bmatrix} sL_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & sL_g \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $Y_f(s)$  表示滤波电容动态,  $Z_g(s)$  表示长距离交流线路动态, 两者构成了交流系统的动态模型。

### 1.2 弱连接 VSC 阻抗模型推导

基于 1.1 小节推导的弱连接 VSC 模型, 本节推导其阻抗模型。将式(7)、式(8)线性化结果进行整合, 可得内环电流参考值到 VSC 输出电流的传递函数关系如下式所示:

$$\begin{bmatrix} I_{td} \\ I_{tq} \end{bmatrix} = \frac{G_1(s)}{G_1(s) + sL_f} \begin{bmatrix} I_{dref} \\ I_{qref} \end{bmatrix} = G_C(s) \begin{bmatrix} I_{dref} \\ I_{qref} \end{bmatrix} \quad (12)$$

结合图 2 可得, 稳态条件下  $V_{td}=V_t, V_{tq}=0$ , 因此式(1)~式(3)的线性化形式如下式所示:

$$\Delta P = V_{td0} \Delta I_{td} + I_{td0} \Delta V_{td} + I_{tq0} \Delta V_{tq} \quad (13)$$

$$\Delta Q = -V_{td0} \Delta I_{tq} - I_{tq0} \Delta V_{td} + I_{td0} \Delta V_{tq} \quad (14)$$

$$\Delta V_t = \Delta V_{td} \quad (15)$$

式中: 前缀“ $\Delta$ ”表示电气量的线性形式; 下角标“0”表示电气量的稳态值。

下面推导 VSC 有功侧、无功侧外环分别采用 P-控制、Q 控制(以下简称“PQ-控制”), 以及有功侧、无功侧外环分别采用 P-控制、V 控制(以下简称“PV-控制”)时, PCC 电压到 VSC 输出电流的传递函数。将式(4)~式(6)所示外环控制及式(11)所示内环控制的线性化形式代入式(13)~式(15)中, 可得 PCC 电压到 VSC 输出电流的等效导纳矩阵如下式所示:

$$-\begin{bmatrix} \Delta I_{td} \\ \Delta I_{tq} \end{bmatrix} = Y_{VSC}(s) \begin{bmatrix} \Delta V_{td} \\ \Delta V_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(s) & Y_{12}(s) \\ Y_{21}(s) & Y_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{td} \\ \Delta V_{tq} \end{bmatrix} \quad (16)$$

PQ-控制模式或 PV-控制模式下有:

$$\begin{cases} Y_{11}(s) = \frac{I_{td0} G_P(s) G_C(s)}{1 + V_{td0} G_P(s) G_C(s)} \\ Y_{12}(s) = \frac{I_{tq0} G_P(s) G_C(s)}{1 + V_{td0} G_P(s) G_C(s)} \end{cases} \quad (17)$$

当 VSC 运行在 PQ-控制模式:

$$\begin{cases} Y_{21}^{PQ}(s) = [I_{tq0} G_Q(s) G_C(s)] / [V_{td0} G_Q(s) G_C(s) - 1] \\ Y_{22}^{PQ}(s) = [I_{td0} G_Q(s) G_C(s)] / [1 - V_{td0} G_Q(s) G_C(s)] \end{cases} \quad (18)$$

当 VSC 运行在 PV-控制模式:

$$\begin{cases} Y_{21}^{PV}(s) = G_C(s) G_V(s) \\ Y_{22}^{PV}(s) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

对比两模式下 VSC 的导纳矩阵可见, 两者仅  $Y_{21}(s), Y_{22}(s)$  存在差别, 为便于公式推导, 将无功侧的无功功率控制及交流电压控制统一表示为

$$I_{qref} = G_Q(s)(Q_{ref} - Q) + G_V(s)(V_{ref} - V_t) \quad (20)$$

该形式的方便之处为: 当系统采用 PQ-控制模式时, 取  $G_V(s)=0$ ; 当系统采用 PV-控制模式时, 取  $G_Q(s)=0$ , 通过将对应的控制环节置 0, 实现统一表示模式下的无功侧控制环节选取和切换。

无功侧外环采用式(19)的通用形式后, 式(16)所示的导纳矩阵中  $Y_{21}(s)$  和  $Y_{22}(s)$  表达式如下:

$$\begin{cases} Y_{21}(s) = Y_{21}^{PQ}(s) + Y_{21}^{PV}(s) \\ Y_{22}(s) = Y_{22}^{PQ}(s) \end{cases} \quad (21)$$

基于式(9)、式(10)所示的交流系统动态模型的线性化形式, 以及式(16)所示的弱连接 VSC 等效阻抗模型, 可得出图 3 所示的弱连接 VSC 系统完整阻抗分析模型。

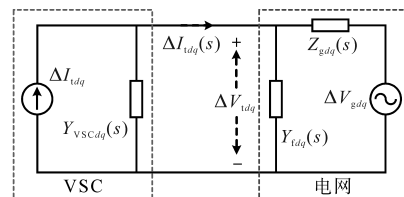


图3 弱连接VSC阻抗分析模型

Fig.3 Impedance analysis model for weakly connected VSC

## 2 PLL 同步失稳特性分析模型

### 2.1 模型推导

本节在 1.2 小节所推导的弱连接 VSC 系统的

双输入双输出阻抗分析模型的基础上推导出一种适用于分析PLL同步失稳特性的传递函数模型。

由图3等效阻抗模型电气关系,可求得PCC电压 $V_i$ 与无穷大电网电压 $V_g$ 关系如下式:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{gd} \\ \Delta V_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}(s) & K_{12}(s) \\ K_{21}(s) & K_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{td} \\ \Delta V_{tq} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中

$$\begin{cases} K_{11}(s) = 1 + (s^2 - \omega^2)C_f L_g + \omega L_g Y_{21}(s) + s L_g Y_{11}(s) \\ K_{12}(s) = -2s\omega L_g C_f - s L_g Y_{12}(s) - \omega L_g Y_{22}(s) \\ K_{21}(s) = 2s\omega L_g C_f + s L_g Y_{21}(s) + \omega L_g Y_{11}(s) \\ K_{22}(s) = 1 + (s^2 - \omega^2)C_f L_g + \omega L_g Y_{12}(s) + s L_g Y_{22}(s) \end{cases} \quad (23)$$

基于图2,可将无穷大电网电压的 $d, q$ 轴分量 $V_{gd}, V_{gq}$ 转换为幅值相角分量,具体关系如下:

$$V_{gd} + jV_{gq} = e^{-j\theta} V_g \quad (24)$$

式中: $\theta$ 为无穷大电网与PCC电压的相角差; $V_g$ 为无穷大电网电压幅值。

考虑到无穷大系统电压幅值稳定,即 $\Delta V_g=0$ ,基于此,将式(24)进行线性化,可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{gd} \\ \Delta V_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{g0} \sin\theta_0 \Delta\theta \\ -V_{g0} \cos\theta_0 \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (25)$$

将式(25)代入式(22),可得PCC电压相角与无穷大电网相角之差 $\Delta\theta$ 到PLL输入量 $\Delta V_{tq}$ 的传递函数 $L(s)$ 如下:

$$\begin{aligned} \Delta V_{tq} &= V_{g0} \frac{K_{21}(s) \sin\theta_0 - K_{11}(s) \cos\theta_0}{K_{11}(s) K_{22}(s) - K_{12}(s) K_{21}(s)} \Delta\theta \\ &= L(s) \Delta\theta \end{aligned} \quad (26)$$

图1所示的PLL动态可表示为

$$\theta_p = \frac{1}{s} [G_{\text{PLL}}(s) V_{tq} + \omega_0] \quad (27)$$

其中

$$G_{\text{PLL}}(s) = k_{\text{pPLL}} + k_{\text{iPLL}}/s$$

式中: $G_{\text{PLL}}(s)$ 为PLL的PI控制环节; $k_{\text{pPLL}}, k_{\text{iPLL}}$ 分别为比例、积分系数; $\omega_0$ 为系统额定频率; $\theta_p$ 为PLL的输出相角。

将式(27)进行线性化,可得PLL动态的小信号表示如下:

$$\Delta\theta_p = \frac{1}{s} G_{\text{PLL}}(s) \Delta V_{tq} \quad (28)$$

结合式(26)、式(28)获得弱连接VSC的PLL同步失稳特性完整分析模型,如图4所示,其中 $\theta_g$ 为无穷大电网的相位。PLL同步失稳特性完整分析模型的开环传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{1}{s} G_{\text{PLL}}(s) L(s) = P(s) L(s) \quad (29)$$

其中, $P(s)$ 表示PLL动态, $P(s)=G_{\text{PLL}}(s)/s$ 。

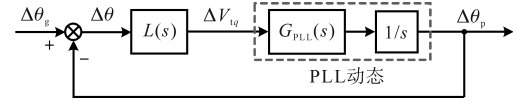


图4 PLL同步失稳特性分析模型

Fig.4 Analysis model of PLL synchronous instability

## 2.2 PLL同步失稳特性分析模型特征

综合上述推导过程可见,图4中的 $L(s)$ 为一个整合了VSC内外环动态、滤波环节动态及交流线路动态的传递函数。将 $L(s)$ 与PLL动态整合为图4所示级联形式,可以清楚地通过频域分析理论,辨识不同参数变化条件下 $L(s)$ 自身的频域特征量的变化趋势,进而清晰地分析出 $L(s)$ 与PLL动态的交互特性对弱连接VSC的PLL同步失稳特性的影响。

若VSC接入强交流电网,即交流线路等值阻抗 $R_g=0, L_g=0$ ,此时代入式(23)、式(26)可得 $L(s)=V_{g0}$ ,这意味着PLL同步失稳特性分析模型中仅包含PLL动态,即表明系统其它控制环节与PLL无交互特性,此时系统的闭环传递函数 $T(s)$ 为标准二阶环节,如下式所示:

$$T(s) = \frac{V_{g0} k_{\text{pPLL}} s + k_{\text{iPLL}}}{s^2 + V_{g0} k_{\text{pPLL}} s + k_{\text{iPLL}}} \quad (30)$$

其小扰动稳定性仅决定于PLL动态相关,只需按最优控制设计原则对PLL参数进行设计,则系统必然稳定。

当VSC接入薄弱交流电网时, $L(s)$ 为一个复杂的动态环节,此时需通过频域分析方法进行分析,其开环传递函数为 $L(s)$ 与 $P(s)$ 的级联形式,更便于通过幅值裕度及相位裕度判断系统稳定性,即截止频率 $\omega_c$ 处 $P(s)$ 与 $1/L(s)$ 的相角差在 $180^\circ$ 以内则系统稳定,如下式所示:

$$\Delta\varphi = |\angle P(s) - \angle \frac{1}{L(s)}| \quad (31)$$

后文将基于此进行详细分析。

## 3 PLL同步失稳特性分析

基于第2节所提出的弱连接VSC的PLL同步失稳特性分析模型,本节分别就无功侧外环控制模式、交流电网参数、控制系统参数对PLL同步失稳特性的影响进行分析,进而揭示其失稳机理。弱连接VSC系统相关参数如表1所示,需要指出的是,为便于对比分析控制系统参数及带宽对PLL同步失稳特性的影响,控制系统均采用标

么值系统建模。

表1 系统参数

Tab.1 System parameters

参数类型	参数名称	参数值
基本参数	交流线电压有效值	110 kV
	交流频率	50 Hz
控制参数	有功功率外环PI参数 $k_{pi}/k_{ip}$	2/20
	交流电压外环PI参数 $k_{pv}/k_{iv}$	2/20
	PLL环节PI参数 $k_{pPLL}/k_{iPLL}$	10/50
	电流内环PI参数 $k_{pi}/k_{ii}$	10/400
系统参数	LC滤波器电感及电容 $L_f/C_f$	0.5 mH/0.02 $\mu$ F
	交流系统线路电感 $L_g$	120 mH
	直流系统电容	500 $\mu$ F

### 3.1 不同无功侧外环控制策略的影响

基于表1所示参数,利用图4所示PLL同步失稳特性分析模型,绘制出无功侧外环分别采用Q-控制(即  $G_V(s)=0$ )和V-控制(即  $G_Q(s)=0$ )时,  $L(s)$ 与  $P(s)$ 级联开环传递函数的伯德图。需要说明的是,为排除不同控制模式下运行点对稳定性分析的干扰,两种控制模式下均保证PCC电压  $V_i$ 为1(标么值)。此外,取标么值控制系统下Q-控制带宽和V-控制带宽相同,以消除不同控制带宽对系统动态响应特性的影响。计及上述控制变量后的  $L(s)$ 与  $P(s)$ 伯德图如图5所示。图5中,  $\omega_Q, \omega_V, \omega_{PLL}$ 分别表示Q-控制、V-控制及PLL带宽。

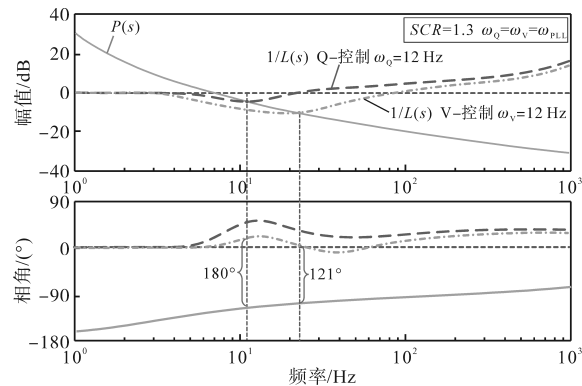


图5 不同无功侧外环控制的影响

Fig.5 Influence of different reactive side outer loop control

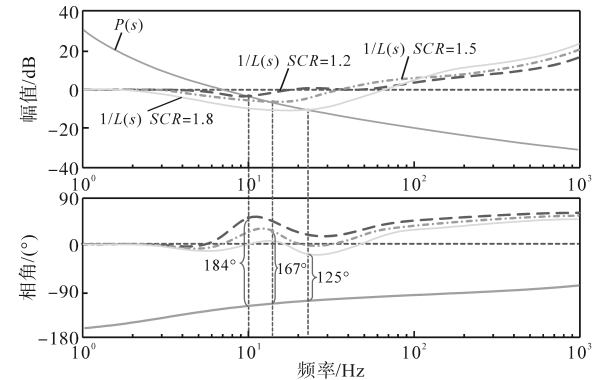
由图5可见,同一电网强度条件下,V-控制模式下幅值增益交叉频率  $\omega_c=11.2$  Hz处,  $P(s)$ 与  $1/L(s)$ 的相角差  $\Delta\varphi=121^\circ$ ,此时系统稳定。而Q-控制模式下,幅值增益交叉频率  $\omega_c=10.1$  Hz处  $\Delta\varphi=180^\circ$ ,系统处于临界失稳状态,若电网强度进一步降低,则将出现PLL同步失稳。这表明在无功侧外环施加电压控制,可以在PLL时间尺度上减轻该谐振峰值来提高稳定性,使VSC能够接入

更为薄弱的交流电网,换言之,V-控制更利于VSC经远距离交流线路传输功率。基于该结论,本文后续分析均基于PLL同步稳定性更优的PV-控制模型。

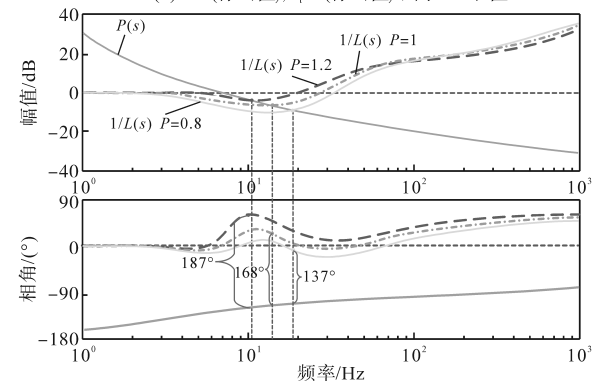
### 3.2 交流电网强度及VSC运行点的影响

前文已经讨论,当VSC接入强交流电网时,系统稳定性仅由PLL动态决定,现分析交流电网强度及VSC运行点对PLL同步失稳特性的影响,如图6所示。

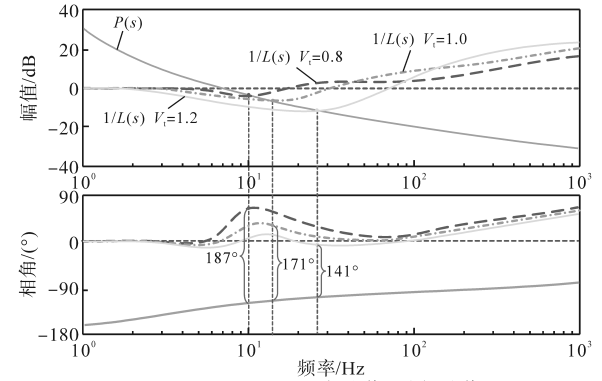
图6a给出了不同电网强度下,  $L(s)$ 与  $P(s)$ 级联开环传递函数的伯德图。设定VSC输出功率  $P=1$ (标么值),PCC电压  $V_i=1$ (标么值),分别取SCR为1.2,1.5和1.8,截止频率  $\omega_c$ 处  $P(s)$ 与  $1/L(s)$



(a)  $P=1$ (标么值),  $V_i=1$ (标么值)不同SCR取值



(b)  $SCR=1.5, V_i=1$ (标么值)不同P取值



(c)  $SCR=1.5, P=1$ (标么值)不同Vi取值

图6 交流电网强度及VSC运行点影响

Fig.6 Influence of AC grid strength and VSC operating point

的相角差  $\Delta\varphi$  为  $184^\circ$ ,  $167^\circ$  和  $125^\circ$ 。可见  $SCR=1.2$  时系统发生 PLL 同步失稳。对比不同  $SCR$  下开环传递函数的相角可见,随着电网强度下降,系统的相位最大滞后点将愈加接近截止频率  $\omega_c$ ,这将使得 PLL 时间尺度上系统的相位裕度明显降低,进而诱发系统失稳。

图 6b 展示了不同 VSC 有功功率输出下,  $L(s)$  与  $P(s)$  级联开环传递函数的伯德图。设定  $SCR=1.5$ , PCC 电压  $V_i=1$  (标幺值), 分别取  $P$  为 0.8 (标幺值), 1 (标幺值) 和 1.2 (标幺值), 截止频率  $\omega_c$  处  $P(s)$  与  $1/L(s)$  的相角差  $\Delta\varphi$  为  $137^\circ$ ,  $168^\circ$  和  $187^\circ$ 。

图 6c 为不同 PCC 电压条件  $V_i$  下,  $L(s)$  与  $P(s)$  级联开环传递函数的伯德图。设定  $SCR=1.5$ ,  $P=1$  (标幺值), 分别取  $V_i$  为 0.8 (标幺值), 1 (标幺值) 和 1.2 (标幺值), 截止频率  $\omega_c$  处  $P(s)$  与  $1/L(s)$  的相角差  $\Delta\varphi$  为  $187^\circ$ ,  $171^\circ$  和  $141^\circ$ 。

综合对比图 6a~图 6c 不难发现,  $P$  上升或  $V_i$  下降时, 系统开环传递函数的相角特性与  $SCR$  下降时的表现极为相似, 即系统的相位最大滞后点愈加接近截止频率  $\omega_c$ , 进而使 PLL 时间尺度上该谐振峰值升高, 不利于系统稳定。这与系统稳态传输功率  $P=V_i V_g \sin\theta/X_g$  相吻合, 即  $V_i$  升高、 $X_g$  降低可使得 VSC 理论传输有功极限提高。而计及控制环节后, 满足系统稳定条件的 VSC 有功输出上限必然小于其理论极限, 而通过控制系统改进, 可以将两者的差值缩小, 这也是本文理论分析的出发点。

### 3.3 VSC 控制环节动态交互的影响

矢量控制模式下 VSC 内环和外环控制的时间尺度通常设计为相差较大, 外环控制通常为  $10^1$  Hz 级, 而内环控制时间尺度则为接近  $10^3$  Hz 级, 甚至更高, 其目的为使内外环不产生频段交互, 在外环动态响应前, 内环已经实现电流追踪。PLL 的时间尺度介于两者之间, 为电网同步频率响应时间尺度。因此 PLL 同步稳定性分别受 VSC 外环及内环动态的影响, 特别需要指出的是, V-控制外环直接影响 PCC 电压动态, 因此其与 PLL 的交互特性明显强于 P-控制外环<sup>[15]</sup>。

首先分析 V-控制外环与 PLL 动态交互对系统稳定性的影响。图 7a 给出了 PV-控制模式下, 取  $SCR=1.2$ , PLL 带宽  $\omega_{PLL}=20$  Hz 时(取电流内环带宽  $\omega_i=800$  Hz), 不同 V-控制外环带宽  $\omega_v$  对应的伯德图。由图 7a 可见, 分别取  $\omega_v=15$  Hz, 17 Hz 和 20 Hz 时, 幅值增益交叉频率  $\omega_c$  处  $P(s)$  与  $1/L(s)$

的相角差  $\Delta\varphi=158^\circ$ ,  $164^\circ$  和  $181^\circ$ 。可见当  $\omega_v=20$  Hz 时, 系统在  $\omega_c=10.1$  Hz 附近失稳, 且对比几组结果可见, 当  $\omega_v$  接近  $\omega_{PLL}$  时,  $\Delta\varphi$  显著增大, 这表现为闭环传递函数存在较大相位滞后, 不利于系统稳定。

图 7b 给出了 PV-控制模式下, 取  $SCR=1.2$ , PLL 带宽  $\omega_{PLL}=80$  Hz 时(取外环带宽  $\omega_v=15$  Hz), 不同电流内环带宽  $\omega_i$  对应的伯德图。由图 7b 可见, 当电流内环带宽取  $\omega_i=400$  Hz, 800 Hz 时,  $P(s)$  与  $1/L(s)$  的幅值增益交叉频率在 10 Hz 附近, 且对应的相角差  $\Delta\varphi < 180^\circ$ , 系统稳定。需说明的是, 该幅值增益交叉频率并不在电流内环时间尺度内, 因此该模态并非电流内环与 PLL 动态交互引起。对比图 6 可知, 该频率仍属于 PLL 与 VSC 外环交互所产生, 但该 PLL 带宽下该模态稳定。

当电流内环带宽降至  $\omega_i=200$  Hz 时,  $P(s)$  与  $1/L(s)$  有两个幅值增益交叉频率, 分别为 123 Hz 和 147 Hz, 且  $\omega_c=147$  Hz 对应的相角差  $\Delta\varphi=206^\circ$ , 系统失稳。对比三种工况可见, 随  $\omega_i$  逐渐接近  $\omega_{PLL}$ , 系统相位裕度明显下降, 这对于系统稳定性存在不利影响。

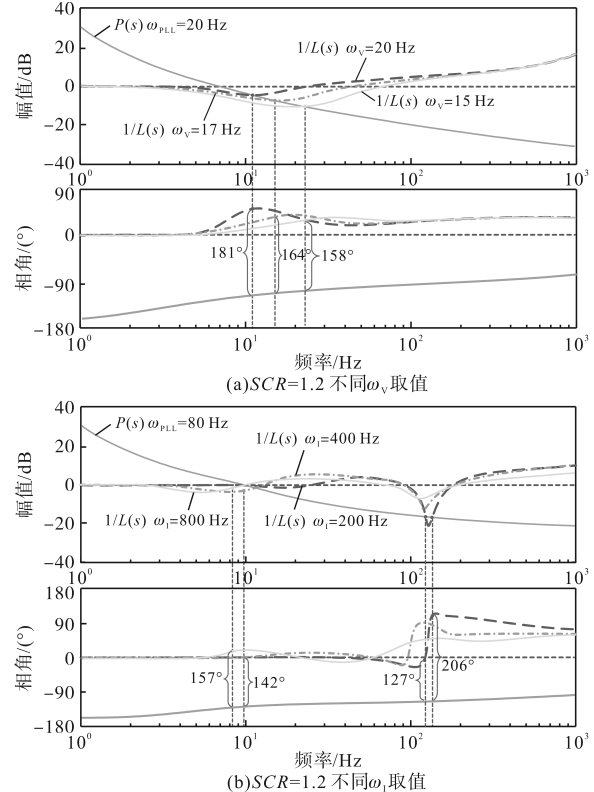


图 7 控制环节动态交互的影响

Fig.7 Influence of interaction between control loops

### 3.4 PLL 补偿控制策略设计

综合图 7 分析结果可见, 传统 PLL 在带宽设

计上需要同时满足远离电流内环带宽和电压外环带宽。因此理论上讲只需将电流内环带宽设计得很大,即可实现上述理想情形。然而实际系统中,电流内环带宽受换流器管体开断频率影响,不能无限制提高,否则将导致更高频的失稳,这对于PLL的设计提出了更高的要求。

传统PLL的幅值相位特性如图7中 $P(s)$ 曲线所示,可见在10 Hz附近 $P(s)$ 的幅值接近0 dB,这导致了与取较高电压外环带宽 $\omega_v$ 时的 $1/L(s)$ 幅值相交,而在 $10^2$  Hz附近,其幅值裕度过低,造成了与取较低电流内环带宽 $\omega_1$ 时的 $1/L(s)$ 幅值相交。由此可推想:若设计某种新型PLL环节,该环节能够实现同时避开较高电压外环带宽 $\omega_v$ 时的 $1/L(s)$ 幅值和较低电流内环带宽 $\omega_1$ 时的 $1/L(s)$ 幅值尖峰,同时对该处的相角特性影响较小,则将不会出现幅值增益交叉频率,这意味着系统的全部模式都是能够稳定运行的。

基于自动控制原理可知,若在PLL动态环节 $P(s)$ 中串联一动态补偿环节 $F(s)$ ,通过适当选取该动态环节参数,即可实现对PLL环节幅值相位特性的修正,其结构如图8所示。

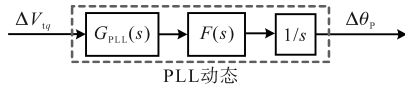


图8 加入修正环节后的PLL动态

Fig.8 PLL dynamics after adding compensation steps

综上所述,对于带宽较低的PLL,需设计 $F(s)$ 使得10 Hz附近的幅值增益增大,对于带宽较高的PLL,则可设计 $F(s)$ 使得 $10^2$  Hz附近的幅值增益减小。结合二阶动态环节的幅值相位特性,设计可实现对特定频率位置的补偿函数 $F(s)$ 如下式:

$$F(s) = \frac{s^2 + k_1\omega_E s + \omega_E^2}{s^2 + k_2\omega_E s + \omega_E^2} \quad (32)$$

式中: $\omega_E$ 为期望补偿的频率; $k_1, k_2$ 为固定常数,通过修改其数值可以调制补偿幅值。

$\omega_E$ 处的补偿幅值 $A$ 计算如下:

$$A = 20\lg(k_1/k_2) \quad (33)$$

本文以PLL带宽设计较高并与电流内环动态交互为例,设计 $F(s)$ 对100 Hz特性进行补偿,对较低带宽PLL的补偿控制环节设计原理与之相同。仍基于图7b所示工况,即 $SCR=1.2$ ,PLL带宽 $\omega_{PLL}=80$  Hz、外环带宽 $\omega_v=15$  Hz,电流内环带宽 $\omega_1=200$  Hz,此时 $\omega_c=147$  Hz,因此可取 $\omega_E=147$  Hz,补偿幅值设计为-20 dB,由此基于式(32)以及式

(33)可按 $k_1=0.05, k_2=0.5$ 设计 $F(s)$ ,补偿后的 $P(s)$ 幅值相位特性如图9所示。

由图9可见,补偿后,107 Hz处 $P(s)$ 与 $1/L(s)$ 的相角差 $\Delta\varphi=167^\circ$ ,较未补偿前相比减小了 $39^\circ$ ,该频率处系统稳定,且未产生其它不稳定模式。

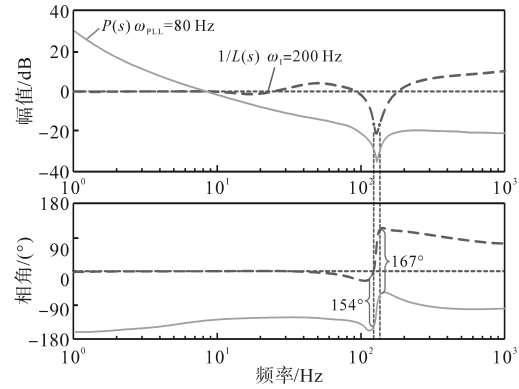


图9 加入补偿环节后的系统伯德图

Fig.9 Bode diagram after adding compensation loop

## 4 仿真验证

为验证本文理论分析的正确性,以及所提出的PLL补偿控制设计对于提升系统PLL同步稳定性的有效性,本节基于Matlab/Simulink环境下的VSC并网详细开关模型进行仿真验证,系统电气参数及控制参数见表1。

### 4.1 无功侧外环对PLL同步稳定性影响的验证

基于表1所示系统参数,图10给出了VSC分别采用PV-控制和PQ-控制时,相同VSC运行点及相同电网强度下的PLL输出相角波形。两控制模式下均保证PCC电压 $V_1$ 为1(标么值),且取标么值控制系统下 $\omega_v=\omega_0=12$  Hz。由图10可见,当系统 $SCR$ 由1.4降低至1.3时,PQ-控制模式下PLL输出相角出现振荡,进而发展为PLL同步失稳,而PV-控制模式下PLL输出相角经短暂的小幅振荡后恢复稳定。此仿真结果证明了图5理论分析结论的正确性,即弱网条件下无功侧外环采用PV-控制时系统稳定性更强。

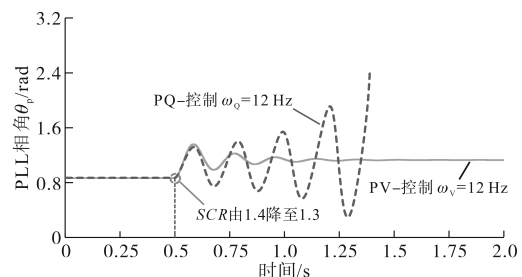


图10 无功侧外环的影响验证

Fig.10 Verification of the impact of reactive side outer loops

## 4.2 电网强度及VSC运行点对PLL同步稳定性影响的验证

图11给出了电网强度及VSC运行点对PLL同步稳定性影响的仿真验证结果。初始工况取 $SCR=1.3, P=1.2$ (标么值),  $V_i=1$ (标么值), 此时系统能够稳定运行。当 $P$ 由1.2(标么值)阶跃至1.3(标么值)时, PLL输出相角出现振荡, 并发展为系统失稳。然而 $SCR$ 由1.3升高至1.5(提升电网强度)或将PCC电压幅值 $V_i$ 由1(标么值)提升至1.1(标么值)后, 当 $P$ 由1.2(标么值)阶跃至1.3(标么值)时, 系统在振荡过程后恢复稳定。由此可见, 随着VSC输出功率升高, 系统将出现PLL同步失稳, 而提高交流电网强度和提升PCC电压幅值有利于系统稳定。

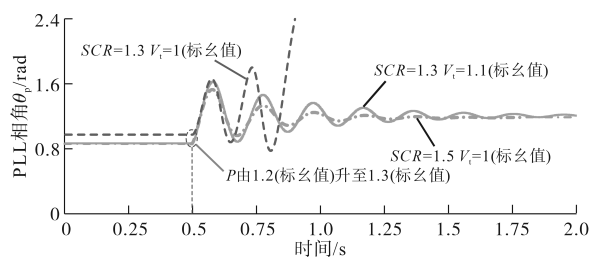
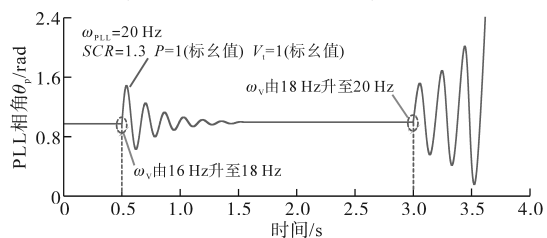


图11 交流电网强度及VSC运行点影响的验证

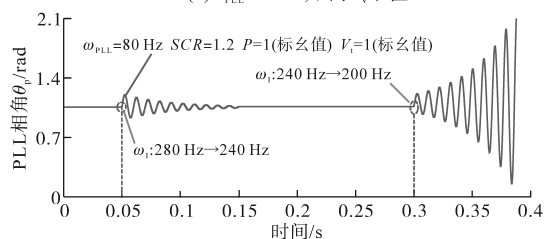
Fig.11 Verification of the impact of AC grid strength and VSC operating point

## 4.3 控制环节交互对PLL同步稳定性影响的验证

图12给出了电压外环与PLL的动态交互, 以及电流内环与PLL的动态交互对PLL同步稳定性影响的仿真验证结果。图12a为电压外环与PLL的动态交互特性的仿真验证结果, 取PLL带宽 $\omega_{PLL}=20$  Hz,  $SCR=1.3, P=1$ (标么值),  $V_i=1$ (标么值), 初始工况 $\omega_v=16$  Hz,  $t=0.5$  s时 $\omega_v$ 由16 Hz阶跃至



(a)  $\omega_{PLL}=20$  Hz, 不同 $\omega_v$ 取值



(b)  $\omega_{PLL}=80$  Hz, 不同 $\omega_v$ 取值

图12 控制环节交互影响的验证

Fig.12 Verification of the impact of control loops interaction

18 Hz, 此时系统仍保持稳定, 当 $t=3.0$  s时,  $\omega_v$ 由18 Hz阶跃至20 Hz, 发生PLL同步失稳。

图12b为电流内环与PLL的动态交互特性的仿真验证结果。取PLL带宽 $\omega_{PLL}=80$  Hz, 初始工况下 $\omega_1=280$  Hz,  $t=0.05$  s时,  $\omega_1$ 由280 Hz阶跃至240 Hz, 此时系统仍保持稳定, 当 $t=0.3$  s时,  $\omega_1$ 由240 Hz阶跃至200 Hz, 系统出现PLL同步失稳。仿真验证结果验证了理论分析的正确性。

## 4.4 PLL补偿控制策略有效性的验证

为验证第3节所提出的PLL补偿控制策略的有效性, 在PLL中级联式(32)、式(33)所设计的补偿控制环节, 得到补偿控制策略下的弱连接VSC模型, 并与传统控制策略下的系统模型进行仿真对比。图13给出了PLL与电流内环带宽接近情形下, 针对电流内环时间尺度内失稳频率进行补偿设计的仿真验证结果。

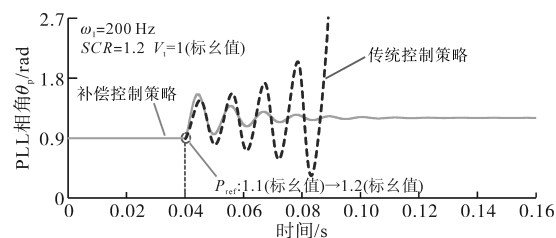


图13 PLL补偿控制策略有效性验证

Fig.13 Verification of effectiveness of PLL compensation control strategy

取电流内环带宽 $\omega_1=200$  Hz, 系统 $SCR=1.2, V_i=1$ (标么值), 由前文理论分析可知, 该工况下系统的失稳频率为147 Hz。初始工况为 $P_{ref}=1.1$ (标么值), 当 $t=0.04$  s时,  $P_{ref}$ 由1.1(标么值)阶跃至1.2(标么值), 传统控制策略下的PLL输出相角如图13中黑色虚线所示, 可见系统发生PLL同步失稳。针对失稳频率设计PLL补偿控制环节后, 同一工况变化下系统保持PLL同步稳定。仿真结果验证了PLL补偿控制策略对PLL同步稳定性提升的有效性。

## 5 结论

本文推导了弱连接VSC系统的PLL同步失稳特性分析模型, 用于揭示PLL同步失稳机理。基于该模型的理论分析结果, 设计了PLL的补偿控制策略。本文的关键结论和所提出的补偿控制策略优势总结如下:

1) 弱连接VSC的PLL同步失稳特性分析模型由PLL动态与弱连接VSC系统其它动态环节

组成的传递函数 $L(s)$ 两部分级联构成,基于频域分析方法可清晰得出两部分的幅值相位特性,并揭示系统PLL同步特性失稳机理。

2)基于该模型分析得出,弱网环境下,VSC采用交流电压控制时,PLL同步稳定性强于采用无功功率控制。此外当PLL带宽接近电压外环带宽或电流内环带宽时,PLL动态与 $L(s)$ 幅值交叉频率处相位裕度显著下降,VSC易出现PLL同步失稳。

3)所设计的PLL补偿控制环节简单清晰,能够修正特定频率范围内PLL动态的幅值相位特性,可避免PLL与电压外环或电流内环的交互造成的PLL同步失稳,进而提高系统稳定性。此策略能够拓宽PLL的带宽设计范围,在实际应用中具有一定的价值。

基于Matlab/Simulink环境下的仿真结果验证了理论分析的准确性,以及所提出的PLL补偿控制策略在提高PLL同步稳定性方面的有效性。随着VSC并网发电比率的日益升高,本文所提控制方法在实际系统中将会有更大价值。

#### 参考文献

- [1] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.  
HAN Xiaqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [2] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.  
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [4] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V, DEMETRIADES G. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [5] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- [6] 张硕文,苗虹,曾成碧. 增强并网逆变器对弱电网适应能力的控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(9): 43-48.  
ZHANG Shuowen, MIAO Hong, ZENG Chengbi. A control strategy for improving adaptability of grid-connected inverter to weak power grid[J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 43-48.
- [7] 张志军,李帆,孟庆波. 基于P-Q控制模式的VSC-HVDC小干扰稳定性研究[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 53-58, 64.  
ZHANG Zhijun, LI Fan, MENG Qingbo. Small-signal stability analysis of VSC-HVDC based on P-Q control mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 53-58, 64.
- [8] 王旭斌,杜文娟,王海风. 弱连接条件下并网VSC系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.  
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.
- [9] HUANG Y, ZHAI X, HU J, et al. Modeling and stability analysis of VSC internal voltage in DC-link voltage control timescale [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 3(27): 1425-1439.
- [10] 王晓阳,赵晋斌,朱宇昕. 多变流器并网系统小干扰稳定性分析综述[J]. 电气传动, 2022, 52(20): 3-10, 24.  
WANG Xiaoyang, ZHAO Jinbin, ZHU Yuxin. Small signal stability analysis of multi-grid connected converter system: an overview[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 3-10, 24.
- [11] 王一珺,王海风. 并网直驱风电场在交流电流时间尺度下的小干扰稳定性·功率控制外环影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1411-1421.  
WANG Yijun, WANG Haifeng. Small-disturbance stability of grid-connected PMSG wind farms under AC current timescales-the influence of power control outer loop[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1411-1421.
- [12] ZHENG W, HU J, YUAN X. Modeling of VSCs considering input and output active power dynamics for multi-terminal HVDC interaction analysis in DC voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2008-2018.
- [13] ZHOU J Z, HUI D, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [14] 黄云辉,宋泽凡,唐金锐,等. 连接弱电网的并网变换器直流电压时间尺度稳定器的设计与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 185-192.  
HUANG Yunhui, SONG Zefan, TANG Jinrui, et al. Design and analysis of DC-link voltage stabilizer for voltage source converter as connected to weak grid[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2018, 33(8): 185-192.

- [15] HUANG Y, WANG D. Effect of control loops interactions on power stability limits of VSC with integrated to AC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 17(8):301-310.
- [16] 李霞林,张晨,郭力,等.锁相环同步VSC接入弱网下的低频动态稳定性分析模型与机理研究[J].电力自动化设备, 2022, 42(8):29-38, 54.  
LI Xialin, ZHANG Chen, GUO Li, et al. Low frequency dynamic stability analysis model and mechanism research for PLL-synchronized VSC connected to weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8):29-38, 54.
- [17] 吴广禄,周孝信,王姗姗,等.柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理解析研究[J].中国电机工程学报, 2018, 38(9):2622-2633, 2830.  
WU Guanglu, ZHOU Xiaoxin, WANG Shanshan, et al. Analytical research on the mechanism of interaction between PLL and inner current loop when VSC-HVDC connected to weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9):2622-2633, 2830.
- [18] 杜步阳,邵德军,朱建行,等.电压源型变流器并网系统多时间尺度间相互作用[J].电工技术学报, 2023, 38(20):5547-5559.  
DU Buyang, SHAO Dejun, ZHU Jianxing, et al. The interaction between multiple timescales of the grid-tied voltage source converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20):5547-5559.
- [19] 王燕宁,郭春义,郑安然,等.极弱受端交流系统下LCC-MMC型混合直流输电系统的附加频率-电压阻尼控制[J].电工技术学报, 2020, 35(7):1509-1520.  
WANG Yanning, GUO Chunyi, ZHENG Anran, et al. Supplementary frequency-voltage damping control for LCC-MMC hybrid HVDC system connected to extremely weak receiving AC grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7):1509-1520.
- [20] GUO C, WEI L, ZHAO C, et al. A frequency-based synchronization approach for VSC-HVDC station connected to a weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 23(99):102-111.
- [21] 李霞林,李佳鑫,朱琳,等.弱连接VSC在“外环-锁相环”时间尺度下的一类小扰动稳定性提升方法及等效性分析[J].电网技术, 2023, 47(4):1632-1642.  
LI Xialin, LI Jiaxin, ZHU Lin, et al. Equivalence analysis of a class of small-signal stability enhancement for weak grid tied VSCs in "outer-loop & PLL" timescale[J]. Power System Technology, 2023, 47(4):1632-1642.
- [22] 靳丹,陟晶,辛世金,等.弱并网条件下VSC的自适应型虚拟并网规划与控制策略[J].电气传动, 2024, 54(2):55-64.  
JIN Dan, ZHI Jing, XIN Shijin, et al. Adaptive virtual access point planning and control strategy of VSC under weak network connection[J]. Electric Drive, 2024, 54(2):55-64.

收稿日期:2023-11-17

修改稿日期:2023-12-15