

# 新能源场站接口 VSC 直流电压控制稳定性分析及改进控制策略

赵伟程<sup>1</sup>, 马浩原<sup>1</sup>, 黄津明<sup>2</sup>, 曹鑫<sup>1</sup>, 柯行思<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司营销服务中心, 四川 成都 610041;

2. 湖北瑞华科技工程管理有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**新能源场站接口电压源换流器(VSC)需经长距离交流线路接入城区主网,造成二者连接强度薄弱,易引发VSC直流电压控制的失稳。为分析弱连接VSC的直流电压失稳机理,建立了适用于多种控制策略下的VSC并网系统直流电压稳定性分析模型,揭示了弱连接VSC运行点和控制环节交互对直流电压稳定性的影响机理,并设计了补偿频段灵活可变的直流电压稳定性提升控制策略。Matlab/Simulink环境下的仿真模型验证了所提研究内容的正确性。

**关键词:**弱连接VSC; 直流电压稳定性; 通用模型; 控制环节交互; 补偿控制

中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd26053

## DC Voltage Stability Analysis and Improved Control Strategy of New Energy Station Interfaced VSC

ZHAO Weicheng<sup>1</sup>, MA Haoyuan<sup>1</sup>, HUANG Jinming<sup>2</sup>, CAO Xin<sup>1</sup>, KE Xingsi<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Marketing Service Center, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Hubei Ruihua Science and Technology Engineering Management Company, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** Voltage source converter (VSC) working as the interface of new energy stations connects to urban main network with long-distance AC line, which results a weak grid connected condition and has a risk of DC voltage instability. To analyze the mechanism of DC voltage instability of weak grid connected VSC, a DC voltage stability analysis model for VSC grid connected systems applicable to various control strategies was established. The impact mechanism of the interaction between weak grid connected VSC operating points and control loops interaction on DC voltage stability was revealed. Then a DC voltage stability improvement control strategy was designed with the characteristic of compensation frequency range flexible and variable. The simulation model in Matlab/Simulink environment verified the correctness of the proposed research content.

**Key words:** weak grid connected voltage source converter (VSC); DC voltage stability; general model; control loops interaction; compensation control

构建新型电力系统是实现“双碳”目标的必由之路,而大力开发新能源发电并网则是构建新型电力系统的核心环节<sup>[1]</sup>。然而新能源场站通常位于远离城区负荷中心的山区或荒原等风光资源丰富地区,因此新能源场站接口电压源换流器(voltage source converter, VSC)需经长距离交流线路向城区主网供电,这造成了VSC与主网电气连接强度薄弱<sup>[2]</sup>。现有研究指出,弱连接的新能源接口VSC易发生直流电压控制失稳现象,针对此现象现有研究从机理分析和改进控制策略研究

等角度展开。

在弱连接VSC直流电压控制失稳的机理揭示方面,文献[3]基于状态空间分析理论,研究了风电场接口VSC直流电压控制与电流控制间的交互作用,并指出不良的参数设计可能导致两者在时间尺度上存在交叉,进而造成直流电压失稳;文献[4]基于矩阵迹作为判据研究了风电场接口VSC的直流电压稳定性,并指出锁相环(phase locked loop, PLL)与直流电压控制在弱网环境下的动态交互显著增强,PLL动态易造成VSC输出

功率波动,进而诱发直流电压失稳;文献[5]基于复转矩分析法,研究了直流电压控制与交流电压控制的动态交互,分析指出弱网环境下交流电压控制与直流电压控制的交互将为系统负阻尼,进而造成系统总阻尼下降,因此易诱发直流电压失稳;文献[6]提出了一种弱连接 VSC 的等效 PLL 模型,分析了不同直流电压控制模式下,直流电压外环与 PLL 的交互特性对系统稳定性的影响,并指出两者带宽接近时,弱连接 VSC 系统的稳定裕度显著下降,且系统的直流电压失稳形式受直流电压控制形式影响;文献[7]着重分析了弱连接 VSC 电流内环动态对直流电压控制的影响,研究指出弱网环境下直流电压控制响应速度过快时,系统易失稳。以上文献虽从不同角度对弱连接 VSC 的直流电压失稳展开分析,然而其大多研究某一时间尺度下的控制环节交互的影响,其模型及分析结果均具有局限性。

在弱连接 VSC 直流电压控制稳定性提升方面,文献[8]提出了一种相位补偿的直流电压前馈控制策略,该策略能够有效削弱交流电压动态对直流电压稳定性的负面影响;文献[9]基于频域分析理论研究了弱连接 VSC 直流电压控制时间尺度的参数对于系统稳定性的影响,并提出了相应的参数优化理论,实现直流电压稳定性的提升;文献[10]设计了由直流电压控制到无功功率控制的附加控制路径,以减小弱网条件下二者之间的强耦合特性,使弱连接 VSC 的直流电压稳定裕度得到提升;文献[11]提出了一种附加频率-电压阻尼控制策略,该策略能够削弱 PLL 动态对弱连接 VSC 电压的影响,进而抑制了交流系统扰动对直流电压动态的影响;文献[12]研究了一类通过在 VSC 外环与 PLL 的输入输出量间添加附加补偿环节的改进控制策略,证明了通过控制策略设计,可使得此类控制策略在直流电压稳定提升机理方面具有等效性,并在此基础上给出了此类补偿控制提升弱连接 VSC 直流电压稳定性的通用设计思路。以上文章通过设计特定的补偿控制,以抑制控制动态交互所产生的薄弱环节对直流电压稳定性的影响,然而此类改进控制仅适用于解决特定控制环节交互所引起的系统失稳,其设计不具备良好的通用性。

针对现有文献在弱连接 VSC 直流电压稳定性分析方面的不足之处,本文首先建立了一种适用于多种控制策略下的弱连接 VSC 系统直流电

压控制稳定性分析模型,并基于频域分析理论,揭示了电网强度、VSC 输出功率以及不同控制环节与直流电压控制的交互对系统稳定性的影响机理。再针对理论分析指出的系统薄弱环节,设计了补偿频段灵活可变的直流电压稳定性提升控制策略。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 弱连接 VSC 系统建模

本节首先介绍了新能源场站接口 VSC 接入薄弱交流电网的拓扑结构和基于 PLL 同步的内外环矢量控制策略,并在此基础上对新能源接口 VSC 并网系统模型进行线性化,得到系统完整的小信号模型。

### 1.1 弱连接 VSC 并网系统建模

弱连接 VSC 并网系统模型的拓扑结构如图 1 所示。新能源场站采用直流汇集结构,新能源发电功率通过直流系统进行汇集后输送至场站接口 VSC,记直流系统电压为  $U_{DC}$ ,直流汇集功率及 VSC 换流功率分别为  $P_{DC}, P_{AC}$ , 直流系统等效电容为  $C_{DC}$ 。 $C_{DC}$  的电压动态如下式所示:

$$\frac{P_{DC} - P_{AC}}{U_{DC}} = sC_{DC}U_{DC} \quad (1)$$

接口 VSC 将直流汇集功率逆变为三相交流分量,并经 LC 滤波器滤除非工频谐波后注入交流系统,记 LC 滤波器的电感、电容分别为  $L_f$  和  $C_f$ 。新能源场站接口 VSC 经远距离输电线路与负荷中心连接,本文将远距离输电线路建模为等效阻抗形式,考虑到高压输电线路的感抗值远大于阻抗值,且在矢量控制时间尺度上集中参数模型与分布参数模型的建模精度相当,因此本文用等效电感  $L_g$  表示远距离输电线路。负荷中心因其规模庞大特性坚强,可认为其稳定性不受小扰动影响,因此建模为无穷大电源。分别记 VSC 公共连接点(point of common coupling, PCC) 电压向量、无穷大电压向量为  $V_t, V_g$ , 记注入 LC 滤波器电流和注入交流系统电流为  $I_t, I_g$ 。

新能源接口 VSC 采用内外环矢量控制策略,并基于 PLL 实现与交流系统同步,其结构见图 1。此控制模式下,VSC 可根据实际系统的运行特点和控制目标灵活选择外环控制模式,有功侧外环常见的有直流电压控制(后文简称“ $U$  控制”)、有功功率控制或直流电压-功率下垂控制等,而无功侧外环则通常选取交流电压控制(后文简称“ $V$

控制”)、无功功率控制或功率因数控制等<sup>[13]</sup>。值得说明的是,新能源接口 VSC 的有功侧外环宜选用  $U$  控制以稳定直流电压,而接入薄弱交流电网时,其无功侧外环采用  $V$  控制时其稳定性更优<sup>[14]</sup>,因此本文选用  $U-V$  控制进行建模,但思路亦适用于其它控制模式下的 VSC。

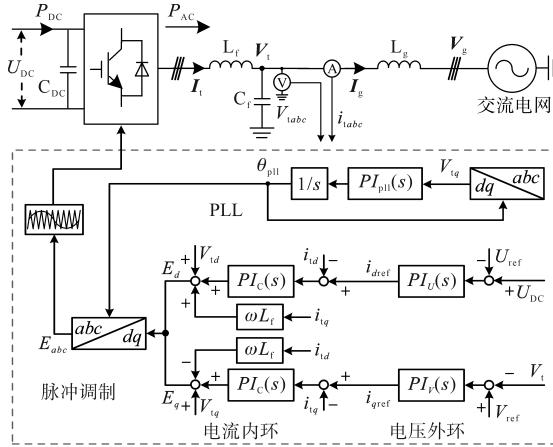


图 1 新能源接口 VSC 并网系统

Fig.1 New energy interface VSC-grid connected system

PLL 的相位追踪过程如图 2 所示。取无穷大电网电压  $V_g$  的相位为参考,则  $V_g$  对应的交流系统 DQ 参考系位置始终不变。PLL 为系统提供  $dq$  参考系,其  $d$  轴始终追踪 PCC 电压向量  $V_t$ ,当系统出现扰动时,  $V_t$  相角将与  $d$  轴产生偏移量  $\Delta\theta_t$ ,该偏移量经 PLL 的 PI 控制环节输出为  $d$  轴的角频率变化量,使得 PLL 输出相角产生与  $\Delta\theta_t$  同方向的增量  $\Delta\theta_{pll}$ ,直至  $\Delta\theta_{pll}$  与  $\Delta\theta_t$  相等时,系统再次恢复稳态,  $d$  轴亦实现对  $V_t$  相角的追踪。

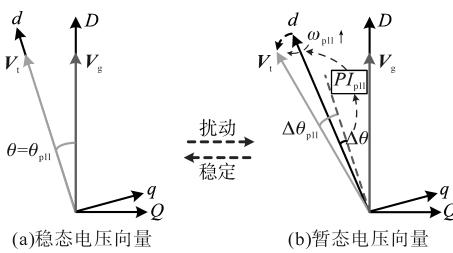


图 2 PLL 暂稳态向量特性

Fig.2 Transient steady-state vector characteristics of PLL

基于  $dq$  参考系可对控制系统建模,其中电压外环  $U-V$  控制的表达式分别如下式所示:

$$I_{dref} = PI_U(s)(U_{DC} - U_{ref}) \quad (2)$$

$$I_{qref} = PI_V(s)(V_{ref} - V_t) \quad (3)$$

其中  $PI_U(s) = k_{pU} + k_{iU}/s$   $PI_V(s) = k_{pV} + k_{iV}/s$

式中:  $I_{dref}, I_{qref}$  分别为电流参考的  $d, q$  轴分量;  $PI_U, PI_V(s)$  分别为  $U, V$  控制的比例积分(PI)环节;  $s$  为微分算子;  $U_{ref}, V_{ref}$  为直、交流电压参考。

基于电压外环  $U-V$  控制提供的电流参考,内环实现电流追踪,其动态如下式所示:

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} + PI_C(s) \begin{bmatrix} I_{dref} - I_{td} \\ I_{qref} - I_{tq} \end{bmatrix} + \omega L_i \begin{bmatrix} -I_{td} \\ I_{tq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $PI_C(s) = k_{pC} + k_{iC}/s$

式中:  $E_d, E_q$  和  $V_{td}, V_{tq}$  分别为 VSC 交流侧端口电压以及 PCC 电压的  $d, q$  轴分量;  $I_{td}, I_{tq}$  分别为 VSC 输出电流的  $d, q$  轴分量;  $PI_C(s)$  为电流控制的 PI 环节;  $\omega$  为系统频率。

PLL 的控制动态如下式所示:

$$\theta_p = \frac{1}{s} [ PI_{pll}(s)V_{tq} + \omega ] \quad (5)$$

其中  $PI_{pll}(s) = k_{ppll} + k_{ipll}/s$

式中:  $\theta_p$  为 PLL 的输出相角;  $PI_{pll}(s)$  为 PLL 的 PI 环节。

基于 PLL 输出相位  $\theta_p$  可得  $dq$  参考系与  $DQ$  参考系间变量的转化关系如下式所示:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_p & -\sin\theta_p \\ \sin\theta_p & \cos\theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ x_Q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 下角标 “ $d$ ”、“ $q$ ” 和 “ $D$ ”、“ $Q$ ” 分别对应电气量在  $dq$  参考系和  $DQ$  参考系下的分量; 变量  $x$  可为电压或电流。

交流系统动态包含 LC 滤波动态以及交流线路电感动态,分别如下式所示:

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sL_f & -\omega L_f \\ \omega L_f & sL_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{td} \\ I_{tq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_{td} \\ I_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{gd} \\ I_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} sC_f & -\omega C_f \\ \omega C_f & sC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

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

式中:  $V_{gd}, V_{gq}$  分别为交流系统电压的  $d, q$  轴分量;  $I_{gd}, I_{gq}$  分别为流经  $L_g$  的  $d, q$  轴分量。

基于式(7)~式(9)可求得 PCC 电压分量,进而求出 VSC 的传输功率、PCC 电压幅值及相位,具体计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{AC} = V_{td}I_{td} + V_{tq}I_{tq} \\ V_t = \sqrt{V_{td}^2 + V_{tq}^2} \\ \theta_t = -\arctan(V_{tq}/V_{td}) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\theta_t$  为 PCC 电压相角。

由式(1)~式(10)可得 VSC 并网系统完整模型。

## 1.2 弱连接 VSC 并网系统小信号模型

结合式(4)、式(7)可得由电流参考值到 VSC 输出电流的传递函数如下式所示:

$$\begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{iq} \end{bmatrix} = \frac{PI_1(s)}{PI_1(s) + sL_f} \begin{bmatrix} I_{dref} \\ I_{qref} \end{bmatrix} = G_c(s) \begin{bmatrix} I_{dref} \\ I_{qref} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $G_c(s)$ 为电流参考到输出电流的传递函数。

结合式(8)、式(9),可由VSC输出电流求得PCC电压,其求取公式为

$$\begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix} = (1 + Z_g Y_f)^{-1} \begin{bmatrix} V_{gd} \\ V_{gq} \end{bmatrix} + (1 + Z_g Y_f)^{-1} Z_g \begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{iq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} Z_g = \begin{bmatrix} sL_g & -\omega L_g \\ \omega L_g & sL_g \end{bmatrix} \\ Y_f = \begin{bmatrix} sC_f & -\omega C_f \\ \omega C_f & sC_f \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $Z_g, Y_f$ 分别为交流输电线路阻抗矩阵和滤波电容的导纳矩阵。

结合式(6)、式(12),可用VSC输出电流 $I_{id}, I_{iq}$ 以及PLL输出相角 $\theta_p$ 表示PCC电压,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix} = V_T \begin{bmatrix} \cos\theta_p \\ \sin\theta_p \end{bmatrix} + Z_T \begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{iq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} V_T(s) = \begin{bmatrix} V_{T11}(s) & V_{T12}(s) \\ V_{T21}(s) & V_{T22}(s) \end{bmatrix} = V_g (1 + Z_g Y_f)^{-1} \\ Z_T(s) = \begin{bmatrix} Z_{T11}(s) & Z_{T12}(s) \\ Z_{T21}(s) & Z_{T22}(s) \end{bmatrix} = (1 + Z_g Y_f)^{-1} Z_g \end{cases} \quad (15)$$

式中: $V_{T11}(s) \sim V_{T22}(s), Z_{T11}(s) \sim Z_{T22}(s)$ 为 $V_T(s), Z_T(s)$ 的各传递函数元素,可基于 $Z_g, Y_f$ 求出。

将式(1)、式(2)线性化,可得 $U$ 控制下的直流电压动态的小信号形式如下式所示:

$$\Delta I_{dref} = PI_U(s) \left( \frac{\Delta P_{DC} - \Delta P_{AC}}{sC_{DC}U_{DC0}} - \Delta U_{ref} \right) \quad (16)$$

式中:下角标“0”表示电气量的稳态值;前缀“ $\Delta$ ”表示电气量对应的小信号形式,后文均以此方法表示。

$V$ 控制和PLL的小信号形式如下式所示:

$$\Delta I_{qref} = PI_V(s)(\Delta V_{ref} - \Delta V_t) \quad (17)$$

$$\Delta\theta_p = \frac{PI_{pll}(s)}{s + PI_{pll}(s)} \Delta\theta_t = G_\theta(s) \Delta\theta_t \quad (18)$$

式中: $G_\theta(s)$ 为 $\Delta\theta_t$ 到 $\Delta\theta_p$ 的传递函数。

将式(11)线性化可得电流传递函数:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{id} \\ \Delta I_{iq} \end{bmatrix} = G_c(s) \begin{bmatrix} \Delta I_{dref} \\ \Delta I_{qref} \end{bmatrix} \quad (19)$$

将式(14)线性化,并结合式(19)可得由电流参考值到PCC电压的小信号模型如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{id} \\ \Delta V_{iq} \end{bmatrix} = V_\theta(s) \Delta\theta_p + Z_c(s) \begin{bmatrix} \Delta I_{dref} \\ \Delta I_{qref} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中

$$\begin{cases} V_\theta(s) = \begin{bmatrix} V_{\theta11}(s) \\ V_{\theta12}(s) \end{bmatrix} = V_T(s) \begin{bmatrix} -\sin\theta_{p0} \\ \cos\theta_{p0} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} V_{T12}(s)\cos\theta_{p0} - V_{T11}(s)\sin\theta_{p0} \\ V_{T22}(s)\cos\theta_{p0} - V_{T21}(s)\sin\theta_{p0} \end{bmatrix} \\ Z_c(s) = \begin{bmatrix} Z_{c11}(s) & Z_{c12}(s) \\ Z_{c21}(s) & Z_{c22}(s) \end{bmatrix} = Z_T(s)G_c(s) \\ = G_c(s) \begin{bmatrix} Z_{T11}(s) & Z_{T12}(s) \\ Z_{T21}(s) & Z_{T22}(s) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $Z_{c11}(s) \sim Z_{c22}(s)$ 为 $Z_c(s)$ 的各传递函数元素。将式(10)线性化并结合式(19)、式(20)可得VSC控制系统所需反馈量的小信号形式如下:

$$\Delta P_{AC} = k_1(s) \Delta I_{dref} + k_2(s) \Delta I_{qref} + k_3(s) \Delta\theta_p \quad (22)$$

$$\Delta V_t = k_4(s) \Delta I_{dref} + k_5(s) \Delta I_{qref} + k_6(s) \Delta\theta_p \quad (23)$$

$$\Delta\theta_t = k_7(s) \Delta I_{dref} + k_8(s) \Delta I_{qref} + k_9(s) \Delta\theta_p \quad (24)$$

其中

$$\begin{cases} k_1(s) = I_{td0}Z_{c11}(s) + I_{tq0}Z_{c21}(s) + V_{id0}G_c(s) \\ k_2(s) = I_{td0}Z_{c12}(s) + I_{tq0}Z_{c22}(s) + V_{iq0}G_c(s) \\ k_3(s) = I_{td0}V_{\theta11}(s) + I_{tq0}V_{\theta12}(s) \\ k_4(s) = \cos\theta_{p0}Z_{c11}(s) - \sin\theta_{p0}Z_{c21}(s) \\ k_5(s) = \cos\theta_{p0}Z_{c12}(s) - \sin\theta_{p0}Z_{c22}(s) \\ k_6(s) = \cos\theta_{p0}V_{\theta11}(s) - \sin\theta_{p0}V_{\theta12}(s) \\ k_7(s) = [\cos\theta_{p0}Z_{c11}(s) + \sin\theta_{p0}Z_{c21}(s)]/V_{t0} \\ k_8(s) = [\cos\theta_{p0}Z_{c12}(s) + \sin\theta_{p0}Z_{c22}(s)]/V_{t0} \\ k_9(s) = [\cos\theta_{p0}V_{\theta11}(s) + \sin\theta_{p0}V_{\theta12}(s)]/V_{t0} \end{cases} \quad (25)$$

综合式(16)~式(18)、式(22)~式(24)可得系统完整小信号模型如图3所示。

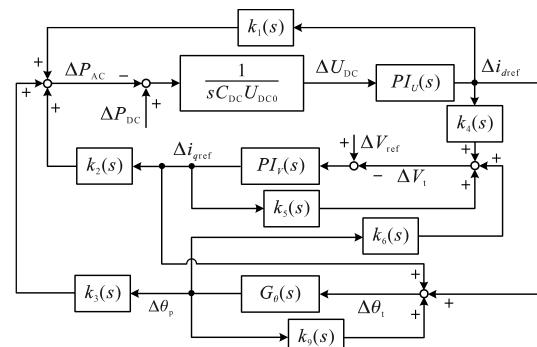


图3 弱连接VSC系统小信号模型

Fig.3 Small signal model of weak grid connected VSC system

## 2 直流电压稳定分析模型

本节将图3所示的弱连接VSC系统完整小信号模型进行重新整合,并构建为直流电压稳定分析模型,该模型结构为两动态环节级联形式,包含直流电压控制动态环节以及整合了其它系统动态的传递函数 $T(s)$ 。

## 2.1 弱连接 VSC 直流电压稳定分析模型推导

图 3 所示模型包含多个动态环节, 基于此模型虽可通过状态空间分析理论研究不同参数对系统稳定性的影响, 但在动态环节交互对直流电压稳定性的影响方面却无法量化评估, 更难以揭示系统失稳的机理。

为此, 将图 3 整合为一个级联的传递函数结构, 包含直流电压控制动态环节  $G_u(s)$  以及其它系统动态的聚合传递函数  $T(s)$ , 具体过程如下:

结合式(18)、式(24), 用  $\Delta I_{dref}$ ,  $\Delta I_{qref}$  表示  $\Delta \theta_p$ :

$$\begin{cases} \Delta \theta_p = G_1(s)\Delta I_{dref} + G_2(s)\Delta I_{qref} \\ G_1(s) = G_\theta(s)k_7(s)/[1 - G_\theta(s)k_9(s)] \\ G_2(s) = G_\theta(s)k_8(s)/[1 - G_\theta(s)k_9(s)] \end{cases} \quad (26)$$

结合式(23)、式(26), 用  $\Delta I_{dref}$ ,  $\Delta I_{qref}$  表示  $\Delta \theta_p$  后, 再代入式(17), 可用  $\Delta I_{dref}$  表示  $\Delta I_{qref}$ , 如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta I_{qref} = G_3(s)\Delta I_{dref} \\ G_3(s) = \frac{-PI_V(s)[k_4(s) + k_6(s)G_1(s)]}{1 + PI_V(s)[k_5(s) + k_6(s)G_2(s)]} \end{cases} \quad (27)$$

结合式(22)、式(26)、式(27), 可得由  $\Delta I_{dref}$  到  $\Delta P_{AC}$  的传递函数如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta P_{AC} = T(s)\Delta I_{dref} \\ T(s) = k_1(s) + k_2(s)G_3(s) + \\ k_3(s)G_1(s) + k_4(s)G_2(s)G_3(s) \end{cases} \quad (28)$$

直流电压控制动态  $G_u(s)$  如下式所示:

$$G_u(s) = PI_U(s)/(sC_{DC}U_{DC0}) \quad (29)$$

由式(28)、式(29)可得重组后的级联型直流电压稳定性分析模型如图 4 所示。

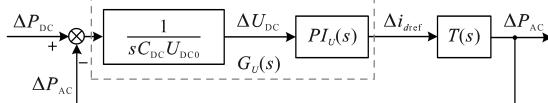


图 4 PLL 同步失稳特性分析模型

Fig.4 Analysis model of PLL synchronous instability

## 2.2 直流电压稳定性分析模型特性

图 4 所示模型结构为  $G_u(s)$  与  $T(s)$  级联形式, 该结构具有如下优点:

1) 优点 1: 能够清晰反映 VSC 与电网连接强度变化对系统稳定性的影响。当 VSC 接入强交流电网时, 有  $L_g \approx 0$ , 由式(13)可知  $Z_g \approx 0$ 。因此结合  $T(s)$  的表达式可知,  $T(s) \approx 0$ , 因此系统的完整传递函数可表示为如下形式:

$$G(s) = \frac{\Delta P_{AC}}{\Delta P_{DC}} = \frac{G_u(s)}{1 + G_u(s)} = \frac{sk_{pu} + k_{iu}}{s^2 C_{DC} U_{DC0} + sk_{pu} + k_{iu}} \quad (30)$$

式中:  $G(s)$  为  $\Delta P_{DC}$  到  $\Delta P_{AC}$  的完整传递函数。

由式(30)可见, 传递函数中仅包含直流电压动态  $G_u(s)$ , 即  $U$  控制与其它动态环节无交互作用, 这表明强网下, VSC 各控制环节间无交互作用, 因此若各控制环节均稳定, 则系统必然稳定。

2) 优点 2:  $G_u(s)$  与  $T(s)$  的级联结构, 便于利用频域分析理论研究控制环节交互对直流电压稳定性的影响。此时系统相位裕度为  $G_u(s)$  与  $T(s)$  相位裕度之和, 因此只需判断截止频率  $\omega_c$  (即  $G_u(s)$  与  $T(s)$  幅值曲线相交频率, 后文简称为“交叉频率”) 处相位裕度  $> 0$  则系统稳定<sup>[15]</sup>。亦可由  $1/G_u(s)$  与  $T(s)$  的相角差为判据, 如下式所示:

$$\Delta\varphi = |\angle T(s) - \angle 1/G_u(s)| \quad (31)$$

式中:  $\Delta\varphi$  为  $T(s)$  与  $1/G_u(s)$  的相角差。

当  $\Delta\varphi$  在  $180^\circ$  以内则系统稳定。采用此判据后, 可以分别绘制  $G_u(s)$  与  $T(s)$  的 Bode 图, 能够更为直观地展示不同控制环节与  $U$  控制交互对于  $T(s)$  幅相特性的影响。

## 3 直流电压控制稳定性分析

本节基于频域分析理论研究弱连接 VSC 系统运行点以及不同控制环节与  $U$  控制的交互对于直流电压稳定性的影响, 表 1 给出了系统参数, 控制系统在标幺值系统下进行建模, 便于量化分析控制参数对直流电压稳定性的影响。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

参数类型	参数名称	参数值
额定参数	交流系统额定电压	220 kV
	交流系统额定频率	50 Hz
	VSC 额定功率	300 MW
控制参数 (标幺值)	直流电压外环 PI 环节 $PI_U(s)$	$2+30/s$
	交流电压外环 PI 环节 $PI_V(s)$	$1+5/s$
	PLL 环节 PI 环节 $PI_{pll}(s)$	$1+10/s$
	电流内环 PI 环节 $PI_C(s)$	$20+500/s$
系统参数	滤波电感/电容 $L_f/C_f$	$6 \text{ mH}/0.02 \mu\text{F}$
	输电线电感 $L_g$	480 mH
	直流等效电容 $C_{DC}$	500 $\mu\text{F}$

## 3.1 电网强度及 VSC 输出功率的影响

首先分析 VSC 与交流系统间的连接强度以及 VSC 输出有功功率对于系统稳定性的影响。基于表 1 所示系统参数, 图 5a 给出了电网强度对于直流电压稳定性的影响。电网强度可用短路比(short current ratio, SCR) 来表示,  $SCR$  越小则表明 VSC 与交流电网间的等效电感越大, 即连接强

度越弱<sup>[16]</sup>。保持VSC输出功率 $P_{AC}=1$ (标幺值)不变,并分别取 $SCR=1.1, 1.3$ 和 $1.5$ ,绘制出 $T(s)$ 与 $1/G_U(s)$ 的Bode图。

由图5a可见,交叉频率处 $T(s)$ 与 $1/G_U(s)$ 的相角之差分别为 $\Delta\varphi=190^\circ, 153^\circ$ 和 $117^\circ$ 。可见随着 $SCR$ 减小, $\Delta\varphi$ 逐渐增大,当 $SCR=1.1$ 时, $\Delta\varphi=190^\circ>180^\circ$ ,系统失稳。对比3组工况可见,随着 $SCR$ 减小,交叉频率处的相位滞后特性越发明显,这将导致系统相位裕度不足而失稳。

图5b给出了VSC输出的有功功率 $P_{AC}$ 变化时, $T(s)$ 与 $1/G_U(s)$ 的Bode图。保持 $SCR=1$ (标幺值)不变,分别取 $P_{AC}=0.9$ (标幺值), $0.7$ (标幺值)和 $0.5$ (标幺值),由图5可得3种工况对应的 $\Delta\varphi=184^\circ, 136^\circ$ 和 $92^\circ$ 。可见随VSC输出功率升高, $\Delta\varphi$ 逐渐增大,当 $P_{AC}=0.9$ (标幺值)时, $\Delta\varphi=184^\circ>180^\circ$ ,系统失稳。对比3组工况可见,随着VSC输出功率 $P_{AC}$ 增大,交叉频率处的相位滞后特性越发明显,这对于直流电压稳定不利。

此外对比图5a、图5b可见, $SCR$ 减小与 $P_{AC}$ 增大对于相位滞后特性影响相似,此现象通过单机无穷大系统最大传输功率的数学公式 $P_{max}=V_t V_g / X_g$ 不难解释,当VSC与无穷大电网间的等效电抗 $X_g$ 减小时,VSC的理论有功传输极限 $P_{max}$ 将升高,同样地,当VSC在当前传输功率较低时,VSC可接入更为薄弱的电网。

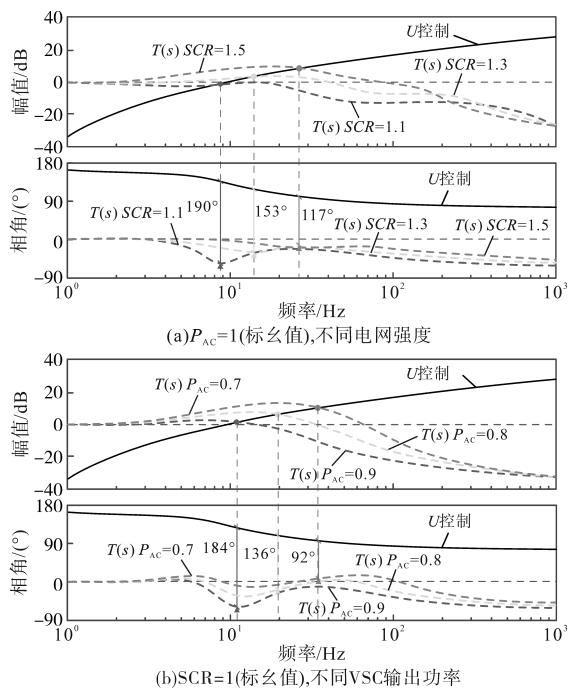


图5 电网强度和VSC运行点的影响

Fig.5 Influence of grid strength and VSC operating point

### 3.2 控制环节交互对直流电压稳定性的影响

VSC控制环节包含 $U$ 控制、 $V$ 控制、PLL以及电流控制。首先分析 $U$ 控制与 $V$ 控制交互对直流电压稳定性的影响,如图6所示。图6a给出了取 $U$ 控制带宽 $\omega_u=26.2$ Hz,不同 $V$ 控制带宽 $\omega_v$ 条件下 $T(s)$ 与 $1/G_U(s)$ 的Bode图。可见 $\omega_v=22$ Hz,26Hz和30Hz时对应的 $\Delta\varphi$ 分别为 $167^\circ, 183^\circ$ 和 $155^\circ$ ,其中 $\omega_v=26$ Hz时, $\Delta\varphi>180^\circ$ ,系统失稳。对比3组工况可见,当 $\omega_v$ 接近 $\omega_u$ 时, $\Delta\varphi$ 将增大,此时系统相角严重滞后,诱发直流电压失稳。

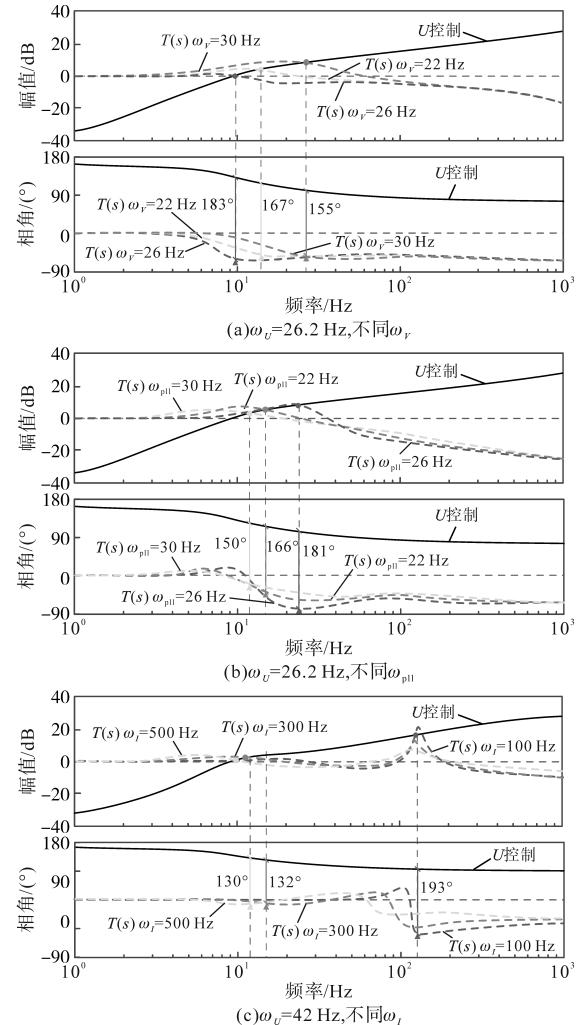


图6 控制环节动态交互的影响

Fig.6 Influence of interaction between control loops

图6b给出了取 $U$ 控制带宽 $\omega_u=26.2$ Hz,不同PLL带宽 $\omega_{pll}$ 条件下 $T(s)$ 与 $1/G_U(s)$ 的Bode图。可见 $\omega_{pll}=22$ Hz,26Hz和30Hz时对应的 $\Delta\varphi$ 分别为 $166^\circ, 181^\circ$ 和 $150^\circ$ ,其中 $\omega_{pll}=26$ Hz时, $\Delta\varphi>180^\circ$ ,系统失稳。对比图6a、图6b可见,PLL和 $U$ 控制间的动态交互对直流电压稳定性的影响与 $V$ 控制和 $U$ 控制间的动态交互影响相似,即当 $\omega_{pll}$ 接近

$\omega_v$ 时,  $\Delta\varphi$ 将增大, 表现为  $T(s)$  产生较大的相角滞后, 造成系统相位裕度不足。

图6c展示了取  $U$  控制带宽  $\omega_u=42$  Hz, 不同电流控制带宽  $\omega_i$  条件下  $T(s)$  与  $1/G_u(s)$  的 Bode 图。可见  $\omega_i=100$  Hz, 300 Hz 和 500 Hz 时对应的  $\Delta\varphi$  分别为 193°, 132° 和 130°。对比 3 种工况可见,  $\omega_i=300$  Hz, 500 Hz 两工况下,  $T(s)$  与  $1/G_u(s)$  的交叉频率为  $10^1$  Hz 附近, 这并非电流控制的频率范围, 且  $10^2$  Hz 以上频段附近  $T(s)$  与  $1/G_u(s)$  幅值特性相差较大, 这表明带宽相差较远时, 电流控制与  $U$  控制交互极弱, 几乎不影响直流电压稳定性。而当  $\omega_i=100$  Hz 时,  $\Delta\varphi=193^\circ$ , 且交叉频率正分布于  $10^2$  Hz 附近, 此时电流控制与  $U$  控制的交互使得系统相角严重滞后, 由此说明  $\omega_i$  也不宜接近  $\omega_u$ , 否则将降低直流电压稳定性。

### 3.3 直流电压补偿控制环节设计

由图6所示 Bode 图不难发现,  $\omega_v$ ,  $\omega_{pll}$  或  $\omega_i$  其中之一与  $\omega_u$  接近时, 系统的直流电压稳定性减弱。这意味着在带宽设计时要使得  $\omega_u$  与  $\omega_v$ ,  $\omega_{pll}$  和  $\omega_i$  之间均有一定差距。然而实际系统中,  $\omega_i$  受 VSC 开断频率约束不能设计过高, 这就限制了  $\omega_u$ ,  $\omega_v$  以及  $\omega_{pll}$  的取值。通常  $\omega_v$  和  $\omega_{pll}$  的取值相对较低, 以使得 PCC 电压在扰动过程中变化不过于剧烈, 这就需要  $\omega_u$  带宽稍高, 然而这容易造成  $\omega_u$  与  $\omega_i$  带宽接近。

为避免上述情形, 需要设计一补偿环节, 该环节能够使得在  $\omega_u$  取大于  $\omega_v$  和  $\omega_{pll}$  条件下, 在交叉频率处能够减小  $T(s)$  的相位滞后, 即使得全频段内系统稳定。考虑到  $T(s)$  与  $G_u(s)$  级联, 若在  $G_u(s)$  与  $T(s)$  间加入一个补偿环节  $K(s)$ , 并通过合理设计控制参数, 使其在交叉频率处能够提供正相角, 便可对  $T(s)$  进行相位补偿, 如图7所示。

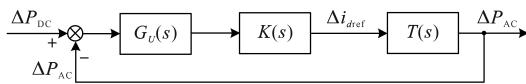


图7 补偿控制环节

Fig.7 Compensation control loop

根据自动控制理论中二阶动态环节能够对特性频率段的相位进行补偿的特点, 将  $K(s)$  设计为二阶动态环节, 如下式所示:

$$K(s) = s^2 + a_1\omega_c s + \omega_c^2 / (s^2 + a_2\omega_c s + \omega_c^2) \quad (32)$$

式中:  $a_1$ ,  $a_2$  为常数, 其取值影响  $\omega_c$  处的补偿程度;  $\omega_c$  处的幅值补偿  $A=20\lg(a_1/a_2)$ 。

以图6c工况设计  $K(s)$ , 图6c对应的  $\omega_c=126$  Hz, 设定补偿幅值为 -20 dB, 由此取  $a_1=0.05$ ,  $a_2=$

0.5, 经  $K(s)$  补偿后,  $T(s)$  的幅相特性修正为图8。可见补偿后, 原交叉频率处  $T(s)$  与  $1/G_u(s)$  不再交叉, 全频段均满足  $\Delta\varphi<180^\circ$ , 补偿后系统稳定。

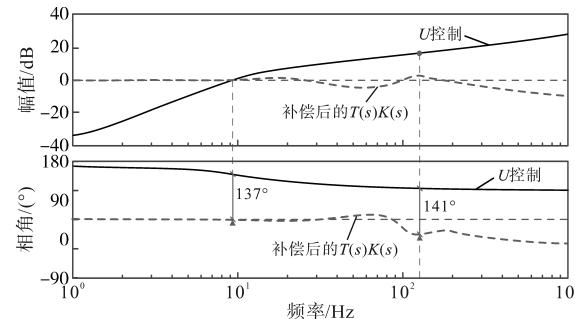


图8 加入补偿环节后的系统伯德图

Fig.8 Bode diagram after adding compensation loop

值得指出的是, 上述补偿设计方法不仅适用于  $\omega_u$  接近  $\omega_i$  时, 补偿由  $U$  控制与电流控制交互引起的系统相位裕度不足, 该策略对  $U$  控制与 PLL,  $U$  控制与  $V$  控制在带宽接近时的交互作用因其负相位特性亦能够进行补偿, 只需根据对应的交叉频率按式(32)进行设计即可。

## 4 仿真验证

本节在 Matlab/Simulink 环境下搭建弱连接 VSC 系统仿真模型, 对直流电压稳定性分析模型推导的正确性、理论分析的正确性以及所提补偿控制对于系统稳定性提升的有效性进行验证。仿真模型参数见表1。

### 4.1 直流电压稳定性分析模型正确性验证

基于表1所示参数, 图9给出了直流电压稳定性分析模型与仿真模型的直流电压动态对比。设定初始工况为  $P_{AC}=0.9$  (标幺值),  $SCR=1.4$ , 在  $t=1$  s 时,  $SCR$  由 1.4 降低至 1.3, 在  $t=4$  s 时,  $P_{AC}$  由 0.9 (标幺值) 阶跃至 1 (标幺值), 由图9可见, 施加上述两次扰动后, 两模型的  $U_{DC}$  动态几乎一致, 这验证了直流电压稳定性分析模型推导的正确性。

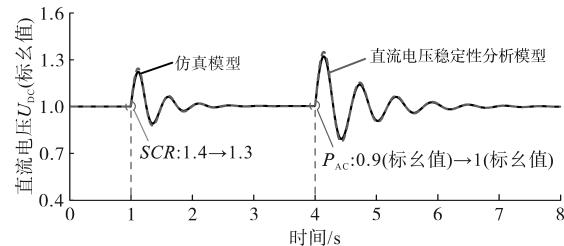


图9 直流电压稳定性分析模型正确性验证

Fig.9 Verification of correctness of  $U_{DC}$  stability analysis model

### 4.2 电网强度及 VSC 输出功率的影响验证

图10展示了电网强度及 VSC 输出有功功率

对系统稳定性影响的验证。设置如下 3 个工况,工况 1:初始条件  $SCR=1.1$ ,  $t=2$  s 时  $P_{AC}$  由 0.9(标幺值)阶跃至 1(标幺值);工况 2:初始条件  $SCR=1.1$ ,  $t=2$  s 时  $P_{AC}$  由 0.8(标幺值)阶跃至 0.9(标幺值);工况 3:初始条件  $SCR=1.2$ ,  $t=2$  s 时  $P_{AC}$  由 0.9(标幺值)阶跃至 1(标幺值)。可见工况 1 系统发生失稳,与工况 1 相比,工况 2 降低了 VSC 输出功率,工况 3 增大了  $SCR$ (交流电网强度增加),此时系统稳定,由此验证本节理论分析的正确性。

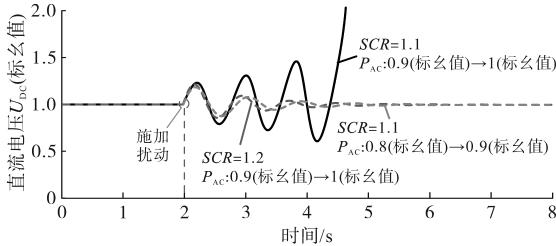
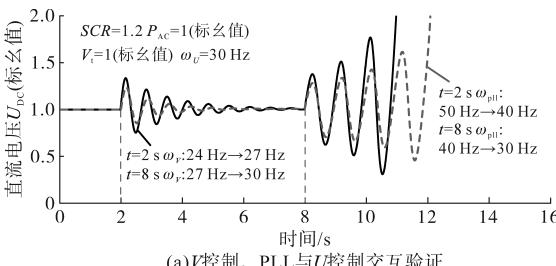


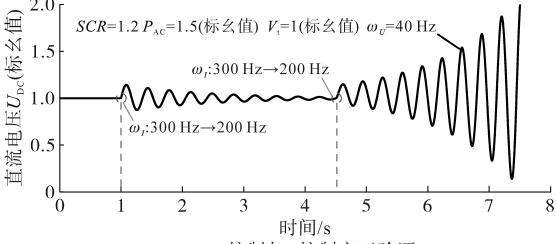
图 10 电网强度及 VSC 输出功率的影响验证  
Fig.10 Verification of the impact of grid strength and VSC output power

#### 4.3 控制环节交互对直流电压稳定性影响验证

图 11 展示了  $V$  控制、PLL 以及电流控制与  $U$  控制在弱连接条件下的动态交互对系统稳定性的影响。设定初始工况为  $SCR=1.2$ ,  $P_{AC}=1$ (标幺值),  $\omega_v=30$  Hz, 图 11a 分别给出了  $V$  控制、PLL 带宽逐渐接近  $U$  控制时的直流电压动态。仿真场景 1: $t=2$  s 时,  $\omega_v$  由 24 Hz 阶跃至 27 Hz,  $t=8$  s 时,  $\omega_v$  由 27 Hz 阶跃至 30 Hz。可见当  $\omega_v$  升至 30 Hz 时直流电压失稳。仿真场景 2: $t=2$  s 时,  $\omega_{pll}$  由 50 Hz 降至 40 Hz,  $t=8$  s 时,  $\omega_{pll}$  由 40 Hz 降至 30 Hz, 此时系统出现失稳。图 11b 为电流控制与  $U$  控制交互对



(a)  $V$  控制、PLL 与  $U$  控制交互验证



(b)  $I$  控制与  $U$  控制交互验证

图 11 控制环节交互影响的验证  
Fig.11 Verification of the impact of control loops interaction

系统稳定性影响的验证。设定初始工况为  $SCR=1.2$ ,  $P_{AC}=1.05$ (标幺值),  $\omega_v=40$  Hz,  $t=1$  s 时,  $\omega_i$  由 300 Hz 降至 200 Hz,  $t=4.5$  s 时,  $\omega_i$  由 200 Hz 降至 100 Hz, 此时系统发生失稳。上述仿真结果说明了  $V$  控制、PLL 以及电流控制的带宽与  $U$  控制带宽接近时,系统的直流电压稳定裕度均减小,由此验证了理论分析的正确性。

#### 4.4 补偿控制策略的系统稳定性提升效果验证

图 12 给出了补偿控制策略对于提升系统稳定性效果验证。初始工况:  $SCR=1.2$ ,  $V_i=1$ (标幺值),  $\omega_v=40$  Hz,  $\omega_i=100$  Hz, 由图 6c 可知  $T(s)$  与  $1/G_U(s)$  的交叉频率  $\omega_c=126$  Hz, 按式(32)设计  $K(s)$  后, 图 12 给出了 VSC 输出功率  $P_{AC}$  升高时的系统稳定性。可见传统控制下,  $P_{AC}$  由 0.9(标幺值)阶跃至 0.97(标幺值)时系统失稳,而添加补偿控制环节后,  $P_{AC}$  由 0.9(标幺值)阶跃至 0.97(标幺值)以及  $P_{AC}$  由 0.97(标幺值)阶跃至 1.05(标幺值)时系统均稳定,直至  $P_{AC}$  由 1.05(标幺值)阶跃至 1.1(标幺值)时系统失稳,由此可见满足系统稳定的 VSC 输出功率上限至少提升了 0.1(标幺值)。

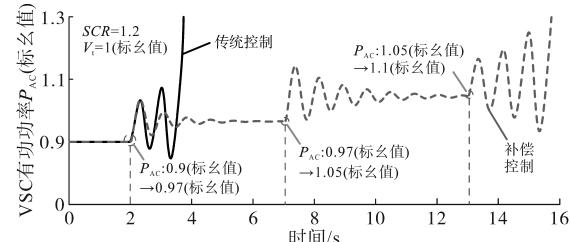


图 12 补偿控制的稳定性提升效果验证

Fig.12 Verification of the stability improvement effect of compensation control

## 5 结论

本文推导了新能源接口 VSC 的直流电压稳定性分析模型,基于该模型分析了系统参数、控制环节交互对直流电压稳定性的影响,揭示了 VSC 直流电压的失稳机理,并针对控制系统薄弱环节设计了直流电压控制的补偿环节,实现对系统稳定性的提升,本文关键结论及贡献如下:

1) 弱连接 VSC 的直流电压控制分析模型将  $U$  控制动态与其它控制动态两部分组合为级联形式,便于利用频域分析方法揭示其它控制环节与  $U$  控制的交互。

2) 弱网环境下控制环节交互对直流电压稳定性影响显著, $V$  控制、PLL 或电流控制其中之一的带宽接近  $U$  控制时,VSC 直流电压稳定裕度将

明显降低。

3)设计了能够灵活改变补偿频段的直流电压补偿控制环节,对于系统稳定性效果提升明显,在相同电网强度下,可使得VSC输出功率上限明显提升,这有助于新能源场站发电功率输送与消纳。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 潘莉,李霞林,王智,等.弱连接VSC的锁相环同步暂态稳定综述[J].电力自动化设备,2023,43(9):138–151.  
PAN Li, LI Xialin, WANG Zhi, et al. Overview of the transient stability analysis of phase-locked loop synchronization in weak grid connected VSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9):138–151.
- [3] SOSEUL Jeong, GILSOO Jang. Stability analysis of a weak grid connected voltage sourced rectifier considering phase-locked loop dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2):436–446.
- [4] 刘克权,刘文飞,刘春,等.基于矩阵的弱电网下永磁直驱风电竞直电压时间尺度小扰动振荡稳定性分析[J].电力自动化设备,2022,42(5):153–159.  
LIU Kequan, LIU Wenfei, LIU Chun, et al. Small disturbance oscillation stability analysis of permanent magnet synchronous generator wind farm under weak grid in DC voltage timescale based on matrix trace[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5):153–159.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] MORRS Jelvises, AHMED Kinghinn, EGEA Alvarez. Analysis of controller bandwidth interactions for vector-controlled VSC tied to very weak AC grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 31(8):1214–1226.
- [8] 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.
- [9] 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 Electrotechnical Society, 2018, 33(8):185–192.
- [10] GUO Chunyi, YANG Shuo, LIU Wei, et al. Small-signal stability enhancement approach for VSC-HVDC system under weak AC grid conditions based on single-input single-output transfer function model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 3(36):781–792.
- [11] 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.
- [12] 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 connected VSCs in “outer-loop & PLL” timescale[J]. Power System Technology, 2023, 47(4):1632–1642.
- [13] MIZANUR Rahman, YASSER Abdel. Interaction dynamics and active suppression of instability in parallel photovoltaic voltage-and current-source converters connected to a weak grid [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2023, 4 (27) : 395–414.
- [14] 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 trans-mission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (1):1–11.
- [15] 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.
- [16] 唐欣,何洋,李珍,等.弱电网下并网变流器相位裕度的分频段补偿方法[J].中国电机工程学报,2023,9(2):113–123.  
TANG Xin, HE Yang, LI Zhen, et al. Frequency division compensation method for phase margin of grid connected converters in the weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 9(2) : 113–123.