

并网换流器控制参数安全域构建方法及控制交互作用分析

王瑾媛¹, 刘崇茹¹, 苏晨博², 吴文传², 房佳姝¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084)

摘要: 弱电网条件下, 电力电子换流器的锁相环(PLL)与直流电压控制环之间的交互作用可能引发振荡问题。为了降低并网换流器引发的振荡风险, 提出了一种控制参数安全域边界选定方法, 通过研究控制带宽的相对制约关系, 定量分析各控制参数对并网换流器主要控制环节之间及控制器与弱电网之间交互作用的影响规律。首先, 从控制器带宽重叠区域的动态响应特性具有相似性的角度出发, 建立了涵盖电网强度及各控制环节的直流电压外环闭环传递函数数学解析模型。然后, 在该传递函数解析表达式的基础上, 利用Nyquist稳定判据和稳定裕度约束求解控制带宽比安全域边界。所得结果可用于指导弱电网条件下PLL和直流电压控制带宽的设计, 并映射为各控制参数安全域。此外, 控制参数安全域直观地反映了并网换流器的参数设置差异对系统稳定性的影响, 由此指导控制参数的调节方向。最后, 通过PSCAD/EMTDC仿真验证了所提方法的有效性及准确性。

关键词: 并网换流器; 安全域; 控制参数; 稳定性; 交互; 锁相环; 直流电压控制

0 引言

随着中国“碳达峰·碳中和”政策稳步推进, 预计2030年中国风电和太阳能总装机容量将达到1.2 TW以上^[1]。大量新能源并网换流器加剧了电力系统的电力电子化程度, 使电力网络的基本形态、稳定特征和演化规律发生改变, 多时间尺度下各电力电子设备之间、控制环节之间及其与电网之间的交互作用引发了众多稳定性问题^[2-3]。在弱电网条件下, 并网换流器与电网之间的能量交换可能诱发复杂的功率振荡, 严重威胁电力系统的安全稳定运行。因此, 有必要建立并网换流器的控制参数安全域来快速评估和预警不同控制参数组合的匹配状况, 并基于参数稳定边界对典型控制环节之间的交互作用规律进行深入研究, 由此指导该运行方式下控制参数的调节方向, 进而针对潜在的并网换流器振荡风险采取预防措施^[4]。

目前, 已有研究基于各类稳定分析方法给出了新能源并网系统的控制参数稳定域, 常用的稳定分析方法有状态空间法^[5-8]、阻抗分析法^[9-12]等。状态

空间法主要通过计算特征值和阻尼比来分析系统的振荡模态, 并根据参数改变后特征根的轨迹变化情况判断系统的稳定裕度。例如, 可以通过逐点采样计算特征值^[5], 寻找并网换流器相应频段的参数稳定域边界, 但当系统规模较大时计算量较大, 不利于在线应用。因此, 特征值估计法成为新的研究方向, 文献[6]基于D分割法得到系统的临界稳定曲线, 并进一步设计逆变器的比例-积分(PI)系数; 文献[7-8]通过盖尔圆盘定理对系统状态矩阵特征值的分布范围进行估计, 实现参数稳定域的快速构建。上述方法在系统结构和参数发生变化时需要重新建模, 具有一定局限性。

阻抗分析法一般在频域下建立系统的小信号阻抗模型, 并根据Nyquist定理分析判断系统的稳定性。文献[9]基于直驱风电机组的序阻抗模型, 结合频域阻抗稳定判据刻画了不同电网强度下的控制参数稳定域; 文献[10]在dq坐标系下建立了考虑锁相环(phase-locked loop, PLL)影响的双馈发电机输入导纳模型, 并利用广义Nyquist判据定性分析了电流环及PLL的PI系数对系统稳定性的影响, 但以上方法难以进行定量分析, 结果不具有解析特性。

在此基础上, 部分研究在考虑各控制环节之间及其与电网之间交互耦合作用的前提下, 进一步设计换流器的控制参数。文献[11]基于广义阻抗判

收稿日期: 2024-03-01; 修回日期: 2024-08-20。

上网日期: 2024-09-25。

国家重点研发计划资助项目(2022YFB2402704); 国家电网公司科技项目(52272222001J)。

据,通过改变参数取值绘制系统幅频特性曲线来揭示PLL和直流电压环之间的交互作用规律;文献[12]基于Nyquist稳定判据推导无刷双馈风机的稳定域,分析了弱电网下PLL与电流内环带宽变化趋势对系统稳定性的影响;文献[13]利用特征值分析方法计算得出PLL的控制参数安全域,通过讨论不同PLL参数下谐振模式的根轨迹变化分析控制环节交互作用对PLL参数域的影响。但是,上述文献并未从解析角度量化分析控制环节的交互作用,即控制带宽的重叠程度对换流器并网振荡稳定性的影响,对减弱控制耦合现象进而确立控制参数安全域边界的意义有限。

在实际工程中,较小的稳定裕度会降低系统抗扰性,并网换流器仍存在失稳风险^[14-15]。因此,为了降低并网换流器振荡风险,在确定控制参数安全域边界的过程中不仅要满足传统稳定判据,也应该将稳定裕度作为衡量指标。部分研究虽然考虑了稳定裕度^[6,12],但仅定性分析了参数变化时幅值裕度对系统稳定性的影响,并未给出该指标约束下的稳定边界,或仅给出考虑稳定裕度下单一PI控制环节比例系数与积分系数的相互制约关系,忽略了各控制环路之间的交互作用,在实际工程中的指导意义有限。

因此,本文提出了一种控制参数安全域边界选定方法。该方法通过研究带宽的相对制约关系量化分析并网换流器PLL和直流电压环之间及控制器与弱电网之间的交互作用规律,并基于Nyquist稳定判据和相角稳定裕度寻找控制带宽比值的稳定边界,指导弱电网条件下PLL和直流电压控制带宽的设计,并映射为控制参数安全域,进而快速直观地评估不同控制参数组合的匹配状况,降低并网换流器的振荡风险。

1 考虑直流电压控制的三相并网换流器数学模型

1.1 控制环节数学模型

典型的三相并网换流器拓扑电路及其控制结构如附录A图A1所示,并网换流器采用同步旋转 dq 坐标系下的双闭环控制,有功外环采用定直流电压控制,无功整定值设为0。图中: E_{abc} 为交流电网三相电压; U_{gabc} 为并网点三相电压; I_{abc} 为换流器端口输出三相电流; U_{cd} 、 U_{cq} 分别为换流器端口输出电压 d 、 q 轴分量; U_{gd} 、 U_{gq} 分别为并网点电压 d 、 q 轴分量; U_{dc} 和 U_{dc}^* 分别为直流母线电压和其参考值; C_1 为

Boost电路前置电容; L_1 为Boost电路电感; I_{dc} 为直流电流源; L_g 为电网电感; L_f 为滤波电感; I_d 、 I_q 分别为换流器端口输出电流 d 、 q 轴分量; I_d^* 、 I_q^* 分别为换流器内环电流 d 、 q 轴分量参考值; ω_1 、 ω 分别为交流电网、 dq 轴旋转坐标系的角频率; θ_{pll} 为PLL输出角度; C_{dc} 为直流电容; $H_{dc}(s)$ 为直流电压控制环节; $H_{pll}(s)$ 为PLL控制环节。本文在研究直流电压时间尺度下的并网换流器稳定性问题时,考虑了以下前提条件:

1)为了增强控制器的鲁棒性,实际工程中电压源型换流器(voltage source converter, VSC)电流内环控制带宽设定值一般远超直流电压控制带宽,认为并网换流器输出电流始终能跟踪并网电流指令值^[16-17];

2)忽略了电网阻抗电阻分量 R_g 的影响,因为电阻 R_g 主要为电流控制环路提供阻尼^[18-20],对电流衰减动态过程起作用,在直流电压时间尺度下影响较小。

综上所述,根据电流内环典型系统参数设计^[21],采用比例环节 K_{eqi} 表示电流控制器增益^[22]。

由附录A图A1可得三相并网换流器的各控制环节数学模型如下。

1)直流电压环模型

直流电压控制是通过控制变换器与电网间功率交换来实现的。

$$\begin{cases} I_d^* = (U_{dc}^* - U_{dc}) H_{dc}(s) \\ H_{dc}(s) = K_{pdc} + \frac{K_{idc}}{s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; K_{pdc} 和 K_{idc} 分别为直流电压PI控制器的比例系数和积分系数。

同时,根据直流侧与交流侧的功率平衡关系,可得:

$$P_{dc} = P_{out} - P_{in} = C_{dc} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (2)$$

式中: P_{dc} 为直流电容的瞬时功率; P_{in} 为新能源侧输送功率; P_{out} 为并网换流器输出功率; t 为时间。

2)PLL模型

本文采用系统频率响应(system frequency response, SFR)-PLL跟踪电网角度,控制框图如附录A图A2所示,其数学模型为:

$$\begin{cases} \omega_{pll} = H_{pll}(s) U_{gq} + \omega_1 \\ s\theta_{pll} = \omega_{pll} \\ H_{pll}(s) = K_{p,pll} + \frac{K_{i,pll}}{s} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_{pll} 为 PLL 得到的电网电压角频率; $K_{\text{p,pll}}$ 和 $K_{\text{i,pll}}$ 分别为 PLL 控制的比例系数和积分系数。

3) 电流内环模型

由附录 A 图 A1 的控制结构可知, 直流电压内环输出的电流参考值 I_d^* 和给定的 q 轴电流参考值 0 与换流器输出的实际电流 I_d 、 I_q 比较后经过比例环节 K_{eqi} 、电压前馈环节和解耦环节得到 d 、 q 轴调制信号, 最后, 通过正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 调制环节获得并网换流器的输出电压。

$$\begin{cases} U_{cd} = K_{\text{eqi}}(I_d^* - I_d) - \omega_1 L_f I_q + U_{gd} \\ U_{cq} = K_{\text{eqi}}(0 - I_q) + \omega_1 L_f I_d + U_{gq} \end{cases} \quad (4)$$

4) 滤波器模型

由附录 A 图 A1 主电路拓扑可知, 换流器经 L 型滤波器的电网阻抗接入理想电网。滤波器的数学模型为:

$$\begin{cases} U_{cd} = U_{gd} + sL_f I_d - \omega_1 L_f I_q \\ U_{cq} = U_{gq} + sL_f I_q + \omega_1 L_f I_d \end{cases} \quad (5)$$

5) 主电路模型

同理, 根据附录 A 图 A1 的主电路拓扑可知, 主电路的数学模型为:

$$\begin{cases} U_{gd} = E_d + sL_g I_d - \omega_1 L_g I_q \\ U_{gq} = E_q + sL_g I_q + \omega_1 L_g I_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_d 、 E_q 分别为交流电网电压的 d 、 q 轴分量。

此外, 并网换流器系统的短路比指电网短路容量与换流器容量的比值:

$$K_{\text{SCR}} = \frac{U_{\text{ac}}^2}{S_{\text{inv}} |Z_g|} \quad (7)$$

式中: K_{SCR} 为短路比; U_{ac} 为交流电网的线电压有效值; S_{inv} 为变流器设备容量; $|Z_g|$ 为电网等效阻抗的模, 忽略电阻分量时 $Z_g = j\omega_1 L_g$ 。

1.2 考虑直流电压控制的闭环传递函数

本节在计及直流电压控制环节的基础上, 建立了涵盖电网强度及各控制环节的直流电压外环闭环传递函数数学解析表达模型。

首先, 建立了三相换流器的小信号模型。对式 (1)~式 (6) 线性化后联立计算, 即可获得以 ΔU_{dc}^* 为输入、以 ΔU_{dc} 为输出的并网换流器闭环系统, 如附录 A 图 A3 所示。系统直流电压控制器闭环传递函数如式 (8) 所示。具体推导计算过程见附录 B。

$$\frac{\Delta U_{\text{dc}}}{\Delta U_{\text{dc}}^*} = \frac{G_0}{1 + G_0} \quad (8)$$

式中: G_0 为系统的开环传递函数。

$$G_0 = \frac{3H_{\text{dc}} K_{\text{eqi}} [U_{cd0} + sI_{d0}(L_f + L_g)]}{2sC_{\text{dc}}(K_{\text{eqi}} + sL_f)U_{\text{dc0}}} + \frac{3H_{\text{dc}} K_{\text{eqi}} \frac{sH_{\text{pll}} I_{d0}^2 L_f L_g (L_f + L_g) \omega_1^2}{K_{\text{eqi}} + sL_f(1 + sH_{\text{pll}} I_{d0} L_g)}}{2sC_{\text{dc}}(K_{\text{eqi}} + sL_f)U_{\text{dc0}}} \quad (9)$$

式中: U_{cd0} 、 I_{d0} 分别为并网换流器输出电压和电流的 d 轴分量稳态值; U_{dc0} 为直流电压稳态值。

由式 (9) 可知, 开环传递函数中包含了直流电压控制 H_{dc} 、电流控制器 K_{eqi} 、PLL 控制 H_{pll} 和电网电感 L_g , 均对电网强度存在影响。

2 并网换流器控制带宽安全域边界选定方法

为降低并网换流器的振荡风险, 基于直流电压外环闭环传递函数, 从 PLL 控制带宽和直流电压外环控制带宽的相互制约关系出发, 利用 Nyquist 稳定判据和稳定裕度约束寻找控制带宽安全域稳定边界。

2.1 基于 Nyquist 判据的安全域边界求解

本节基于 Nyquist 稳定判据推导得出直流电压外环控制带宽与 PLL 控制带宽的相互制约关系, 进而得出满足稳定性约束的带宽边界条件。

为了便于分析, 将系统开环传递函数 G_0 等效变换为两个典型环节乘积的表达形式, 如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} G_0 = G_1 \frac{1}{G_2} \\ G_1 = U_{cd0} + sI_{d0}(L_f + L_g) \cdot \left[1 + \frac{H_{\text{pll}} I_{d0} L_f L_g \omega_1^2}{K_{\text{eqi}} + sL_f(1 + sH_{\text{pll}} I_{d0} L_g)} \right] \\ G_2 = \frac{2sC_{\text{dc}}(K_{\text{eqi}} + sL_f)U_{\text{dc0}}}{3H_{\text{dc}} K_{\text{eqi}}} \end{cases} \quad (10)$$

观察式 (10) 可以发现, 当系统稳态运行点 U_{cd0} 和 I_{d0} 不变, 元件参数 L_f 、 L_g 、 C_{dc} 及电流控制器增益 K_{eqi} 确定时, G_1 的动态特性主要由 PLL 控制环节 (即 H_{pll}) 主导, G_2 主要由直流电压控制环节 (即 H_{dc}) 主导, 两者比值的幅频特性决定了系统的小扰动稳定特性。基于式 (10) 所示的开环传递函数表达形式, 运用 Nyquist 稳定判据^[14]可得:

1) 幅值条件: 当 $\angle G_1 - \angle G_2 = 180^\circ$ 时, 则 $|\angle G_1(j\omega_{180^\circ})| / |\angle G_2(j\omega_{180^\circ})| < 1$, 其中, ω_{180° 为 $\angle G_1 - \angle G_2 = 180^\circ$ 时对应的角频率;

2) 相位条件: 当 $|G_1| = |G_2|$ 时, 则 $180^\circ + \angle G_1(j\omega_m) - \angle G_2(j\omega_m) > 0$, 其中, ω_m 为 $|G_1| = |G_2|$

时对应的角频率。

为保证系统幅值裕度和相位裕度大于0,若在所研究时间尺度内满足 $|G_1| < |G_2|$,则开环系统可以同时满足幅值条件和相位条件,进而保证闭环系统的稳定性。因此,由式(9)可以绘制开环传递函数 G_0 的幅频特性曲线如附录A图A4所示。

由附录A图A4可知, G_0 的幅频特性曲线呈递减趋势,对于弱电网下并网逆变器的典型控制环节,通常满足外环控制带宽 $<$ PLL控制带宽 $<$ 内环控制带宽^[23-24],则在所研究时间尺度下, G_0 的幅值最大点大致在 $\omega \approx \omega_c$ 处,其中, ω_c 为直流电压外环带宽。因此,为保证全频段内 $|G_1| < |G_2|$,即全频段内满足稳定裕度大于0,则有:

$$20\lg \left| \frac{G_1(j\omega_c)}{G_2(j\omega_c)} \right| < 0 \quad (11)$$

将直流电压控制和PLL的PI系数用各自的控制带宽表示,并通过假设 $\omega_c = k\omega_{pll}$ ($0 < k < 1$),进一步体现直流电压控制带宽与PLL控制带宽的相互制约关系。其中, k 表征二者控制带宽数值上的比值,控制带宽的重叠程度反映了其交互作用的强弱。当 k 越接近1时,二者带宽越接近,带宽重叠程度越大,二者交互作用增强;当 k 越接近0时,二者带宽重叠程度较小,交互作用减弱。

在系统稳态工作点下,当系统元件参数和电流控制器参数确定时,可得(具体参数设置见附录C):

$$\left| \frac{G_1(k, \omega_{pll}, L_g)}{G_2(k, \omega_{pll}, L_g)} \right| < 1 \quad (12)$$

求解式(12)可得满足Nyquist稳定判据的带宽比 k 的取值范围如式(13)所示(具体求解过程见附录C)。

$$k < f_1(\omega_{pll}, L_g) \quad (13)$$

式中: $f_1(\omega_{pll}, L_g)$ 为控制带宽比安全域的上边界,且为关于PLL带宽和电网电感的函数。

当换流器接入不同并网点短路比的交流电网时,保证系统稳定的直流电压控制带宽设计条件也会有所不同。图1给出了带宽比 k 随PLL带宽和短路比的变化曲线及安全域上边界三维图。

由图1(a)可知,在同一PLL带宽条件下,当系统短路比减小即电网强度减弱时, k 的上边界越接近0,PLL带宽和直流电压控制带宽相差越大($\omega_c = k\omega_{pll}$)。如果二者带宽太过接近,会导致 k 越接近1,可能超出控制带宽安全域的上边界,此时,直流电压

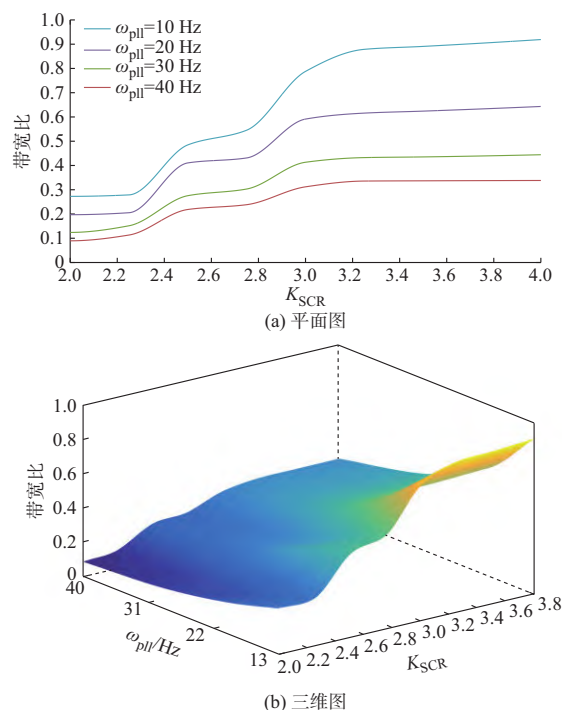


图1 不同短路比下带宽比的安全域上边界

Fig. 1 Upper boundary of security region for bandwidth ratio under various short-circuit ratios

控制带宽与PLL带宽重叠程度变大,进而加强PLL与直流电压环的交互作用,导致系统失稳。

此外,如果出现并网换流器接入弱电网时PLL带宽 ω_{pll} 小于直流电压带宽 ω_c 的特殊情况($k > 1$),那么针对该条件下的边界求解过程见附录C,在实际工程应用中可以根据二者带宽大小的实际情况选择求解。

2.2 基于稳定裕度的安全域边界求解

2.1节基于Nyquist稳定判据推导得出了控制带宽比安全域上边界。但是,在实际工程中为降低振荡风险,应尽可能增大系统的稳定裕度,故本节将相位裕度作为衡量指标求解控制带宽安全域的边界条件。

在系统参数和电流控制器增益确定的情况下(具体数值见附录C表C1),令 $s = j\omega$,可得系统的开环频率特性为:

$$G_0(j\omega) = |G_0(j\omega, \omega_c, \omega_{pll}, L_g)| \angle G_0(j\omega, \omega_c, \omega_{pll}, L_g) \quad (14)$$

设 ω_{cut} 为截止频率,令 $\omega_c = k\omega_{pll}$,则有:

$$|G_0(j\omega_{cut}, k, \omega_{pll}, L_g)| = 1 \quad 0 < k < 1 \quad (15)$$

由式(15)可求得截止频率 ω_{cut} 为:

$$\omega_{cut} = f(k, \omega_{pll}, L_g) \quad (16)$$

式中: $f(k, \omega_{\text{pll}}, L_g)$ 为截止频率关于 $k, \omega_{\text{pll}}, L_g$ 的函数。

定义相角裕度为 γ , 则有

$$\gamma = 180^\circ + \angle G_0(j\omega_{\text{cut}}) = g(k, \omega_{\text{pll}}, L_g) \quad (17)$$

式中: $g(k, \omega_{\text{pll}}, L_g)$ 为相关裕度关于 $k, \omega_{\text{pll}}, L_g$ 的函数。

为求解稳定裕度最大值, 令

$$\frac{d\gamma}{dk} = \frac{dg(k, \omega_{\text{pll}}, L_g)}{dk} = 0 \quad (18)$$

则满足相位裕度最大的带宽比如式(19)所示, 具体求解过程见附录D。

$$k(\gamma_{\max}) = f_2(\omega_{\text{pll}}, L_g) \quad (19)$$

式中: $\gamma_{\max}$ 为相位裕度最大值; $f_2(\omega_{\text{pll}}, L_g)$ 为控制带宽比值的下边界, 同时也是关于 PLL 带宽和电网电感的函数。

由式(19)可得不同短路比和不同 PLL 带宽条件下对应的系统稳定裕度最大值的带宽比 k 曲线, 如图 2(a) 所示。图 2(b) 给出了系统相位裕度 γ 随带宽比 k 的变化关系。由图可知, 随着 k 增大, 相位裕度先增大后减小, 存在最大值 $\gamma_{\max}$ 。在实际求解过程中, 根据式(18), 若存在多个极值点, 则在多个极值中选择最大值 $\gamma_{\max}$ 。

在设计直流电压控制带宽时, 应在满足 PLL 和直流电压环控制带宽合理关系的前提下, 尽可能提升稳定裕度, 降低振荡风险。结合图 1 基于 Nyquist 稳定判据求解得出的 k 值的安全域上边界, 为了使控制参数可调节范围更大, 直流电压控制带宽应在 $k(\gamma_{\max})$ 曲线上方的稳定区域进行调节。

由以上分析可得带宽比安全域的下边界, 即

$$k > f_2(\omega_{\text{pll}}, L_g) \quad (20)$$

与上边界求解过程相似, 通过改变系统短路比和 PLL 控制带宽可以得出不同短路比下带宽比 k 的下边界, 如图 2 所示。由图 2(a) 可知, 随着短路比增大, k 逐渐减小, 但在不同 PLL 带宽条件下曲线下降快慢趋势有所差异。PLL 带宽越大, k 越接近 0, PLL 和直流电压控制带宽重叠区域减小, 二者交互作用减弱, 进而对电网强度的敏感程度降低, 曲线下降趋势越缓慢。

值得注意的是, 在不同稳态工作点下, 本文所给出的控制带宽比安全域边界选定方法是通用的, 只要代入不同实际工程场景下的稳态工作点及网络拓扑参数, 进行求解即可, 从而指导控制带宽设计, 减

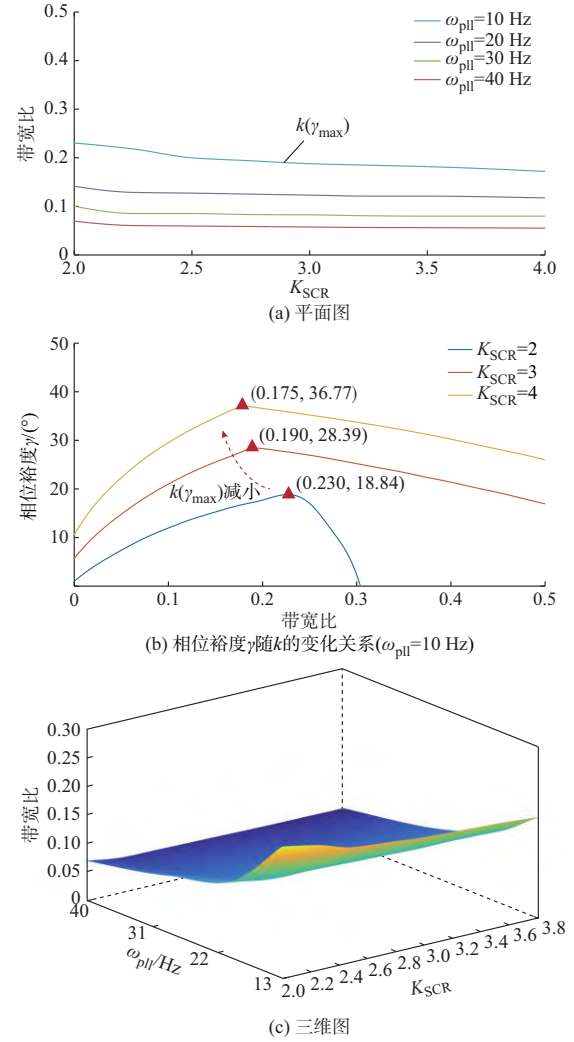


图2 不同短路比下带宽比的安全域下边界
Fig. 2 Lower boundary of security region for bandwidth ratio under various short-circuit ratios

弱 PLL 与直流电压环的交互作用。

3 并网换流器控制参数安全域及控制交互作用分析

本章基于第 2 章所提的边界选定方法, 得出了满足 Nyquist 判据和稳定裕度约束的控制带宽比安全域, 并映射为控制参数安全域, 为直流电压控制和 PLL 的参数调节方向提供指导。

3.1 控制带宽比值安全域

由式(13)和式(20)可得控制带宽比的安全域为:

$$f_2(\omega_{\text{pll}}, L_g) < k < f_1(\omega_{\text{pll}}, L_g) \quad (21)$$

并网换流器控制带宽安全域如图 3(a) 和图 3(d) 所示。结果表明, 为降低系统振荡风险, PLL 与直流电压环带宽不能太过接近。否则, 二者交互

作用增强。此外,在同一PLL带宽条件下,当系统短路比减小时,参数可调区间减小,对系统参数的要求更加严格。

3.2 控制参数安全域

为了更加直观、准确地指导系统控制参数的设计,将控制器的带宽制约关系映射为控制参数之间的关系。由附录C可知,PLL比例系数 $K_{p,pll}$ 与带宽 ω_{pll} 成正比,令 $\omega_{pll} = mK_{p,pll}$,可得直流电压控制比例系数与PLL比例系数的制约关系如式(22)所示。

$$K_{pdc} = C_{dc}\omega_c = C_{dc}\omega_{pll}f(\omega_{pll}, L_g) = C_{dc}mK_{p,pll}f(mK_{p,pll}, L_g) = h_1(K_{p,pll}, L_g) \quad (22)$$

式中: $h_1(K_{p,pll}, L_g)$ 为 K_{pdc} 关于 $K_{p,pll}$ 和 L_g 的函数。

此外,PLL比例系数与积分系数之间有固定的关系且一一对应。因此,本文仅设置PLL比例系数 $K_{p,pll}$ 为研究变量。同理,可得直流电压控制积分系数 K_{idc} 与PLL比例系数的制约关系如式(23)所示。

$$K_{idc} = \frac{C_{dc}\omega_c^2}{10} = \frac{C_{dc}\omega_{pll}^2 f^2(\omega_{pll}, L_g)}{10} = \frac{C_{dc}(mK_{p,pll})^2 f^2(mK_{p,pll}, L_g)}{10} = h_2(K_{p,pll}, L_g) \quad (23)$$

式中: $h_2(K_{p,pll}, L_g)$ 为 K_{idc} 关于 $K_{p,pll}$ 和 L_g 的函数。

根据以上转换关系,可得直流电压控制比例系数和积分系数的安全域分别如图3(e)和图3(f)所示。由图3(b)和图3(c)可知,控制参数安全域边界变化趋势与带宽的安全域边界相同,都呈阶梯式上升。但是,从图3(b)可以看出,随着PLL比例系数的增大,直流电压控制比例系数的安全域面积增大,这与图3(a)带宽比安全域面积随PLL带宽变化的趋势相反,说明了只分析控制环节带宽制约关系难以直观地反映控制参数安全域的变化趋势。值得注意的是,直流电压控制积分系数安全域的边界趋势和系数变化规律与比例系数相同。

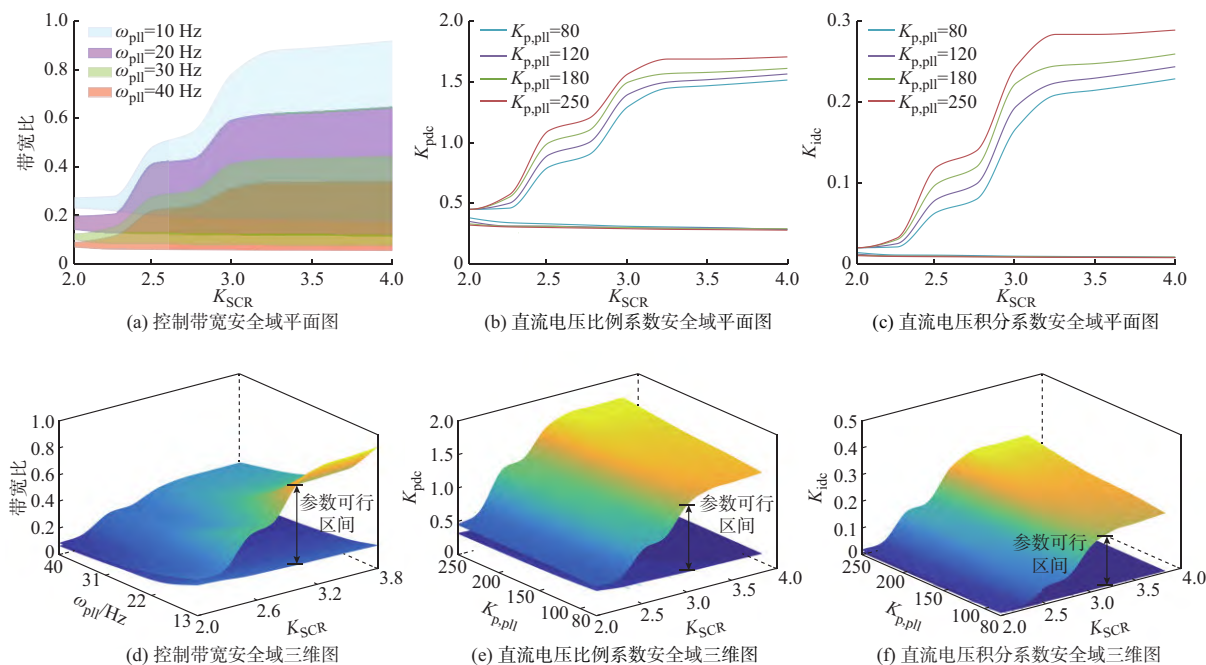


图3 不同短路比下带宽比及控制参数安全域

Fig. 3 Bandwidth ratios and security regions for control parameters under various short-circuit ratios

3.3 弱电网条件下并网换流器控制交互作用规律及其对系统振荡稳定性的影响

上述求得的满足Nyquist判据和稳定裕度约束的控制参数安全域,揭示了弱电网条件下直流电压控制与PLL控制的交互作用规律及其对系统振荡稳定性的影响。具体结论如下:

1)当PLL或直流电压环其中一个控制器的带宽确定时,基于文中所提方法可以相应地给出另一

控制器的带宽稳定边界及控制参数安全域。

2)当PLL控制参数 $K_{p,pll}$ 一定时,电网强度越小,直流电压控制带宽的可调区间范围变小。此时,应减小直流电压控制带宽,使 k 接近0,从而减少二者的控制带宽重叠区域,避免二者发生动态交互增加换流器失稳的风险,但不可越过选定的参数安全域下边界。

3)当设置直流电压控制参数时,在满足传统稳

定判据的基础上,需要通过提升稳定裕度来提高系统的抗扰性,从而降低并网换流器振荡风险。具体来说,在电网等效阻抗与PLL控制参数确定的情况下,直流电压控制参数在不越过安全域的同时应尽量接近下边界,以获得更大的稳定裕度。

4 算例分析

为了验证所提控制参数安全域边界选定方法的合理性与有效性,在PSCAD/EMTDC中搭建三相并网换流器模型并进行3组仿真,具体系统参数如表1所示。

4.1 控制参数安全域边界选定方法有效性验证

为了对所提控制参数安全域边界选定方法的有

表1 三相并网换流器参数
Table 1 Parameters of three-phase grid-connected converter

参数	数值	参数	数值
额定功率 S_{base}	0.01 (MV·A)	额定电压 U_{gd0}	0.19 kV
额定电流 I_{d0}	0.03 kA	滤波器电感 L_f	0.03 H
直流电压 U_{dc}	0.40 kV	直流电容 C_{dc}	200 μF

效性及弱电网条件下并网换流器交互作用规律进行验证,本节算例对比了在不同电网强度下,PLL与直流电压控制参数(带宽)取值不同时并网换流器输出的电流波形来分析系统的稳定性,如图4所示。表2给出了多场景下不同短路比和PLL带宽对应的直流电压控制参数理论边界值和实际值。

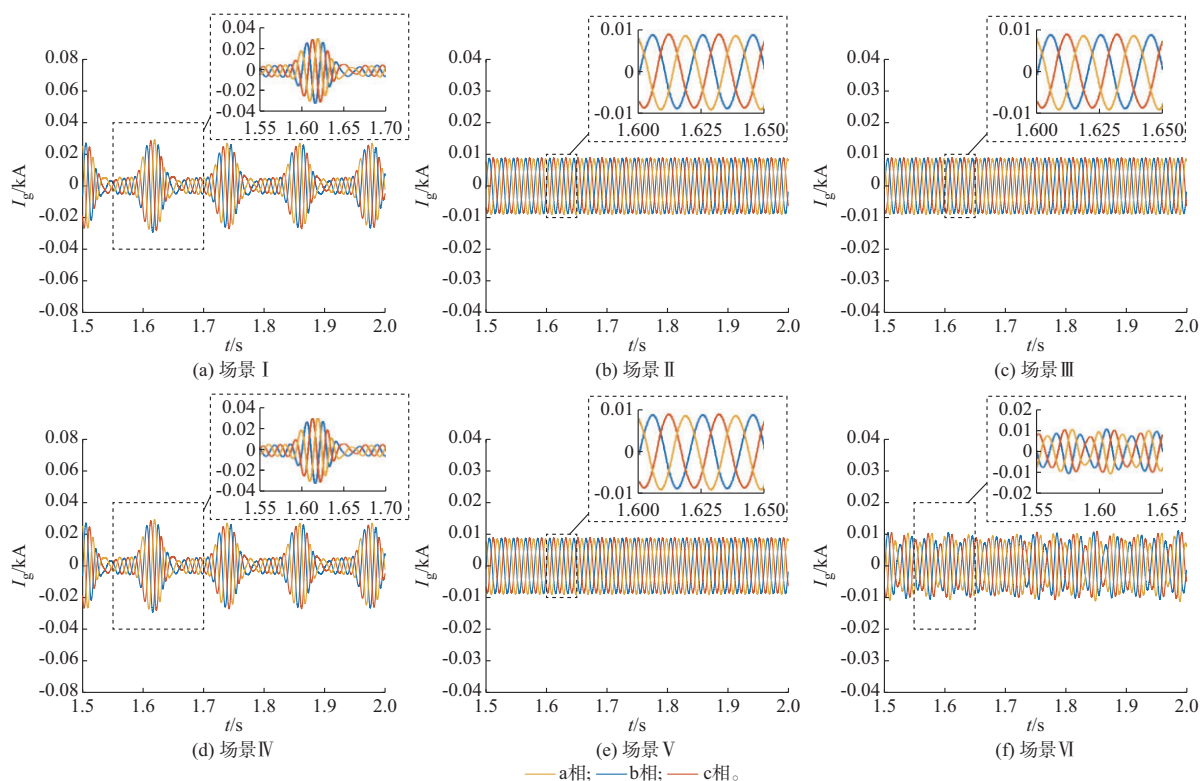


图4 不同短路比、控制带宽和参数下并网换流器输出电流波形

Fig. 4 Output current waveforms of grid-connected converter under various short-circuit ratios, control bandwidths and parameters

观察图4可知,在电网阻抗和PLL参数确定的情形下,当直流电压控制环节参数设置符合由文中所提方法计算得出的上、下临界值要求时,并网换流器的输出电流未发生振荡,如场景II、场景III和场景V所示,而当直流电压控制参数越过安全域的上下边界时,系统的输出电流发生振荡,如场景I、场景IV和场景VI所示。附录E图E1给出了不同场景下的电流傅里叶分析结果。

通过表2中各场景下不同短路比、PLL和直流

电压控制参数的对比仿真,可得出以下结论:

1)由场景I和场景III对比可知,在同一电网强度下,在场景I ($K_{\text{pdc}}=0.28$)中系统失稳振荡,但是当PLL比例系数由120变化为250(场景III)时,尽管直流电压带宽和参数未发生变化,但由于PLL控制带宽和参数的增大,使得二者的带宽比接近0,控制交互作用减弱,系统恢复稳定状态;

2)对比场景III和场景IV可知,在场景III ($K_{\text{pdc}}=0.28$)中系统处于稳定状态,但当系统短路比 K_{SCR} 从

表2 多场景下的控制带宽和参数设计
Table 2 Design of control bandwidth and parameters in multiple scenarios

场景	K_{SCR}	PLL		直流电压		ω_c/Hz	K_{pdc}
		ω_{pll}/Hz	$K_{p,pll}$	边界 ω_c/Hz	边界 K_{pdc}		
I	3	20	120	2.4~11.4	0.30~1.44	2.385	0.28
II	3	20	120	2.4~11.4	0.30~1.44	3.722	0.47
III	3	40	250	2.2~12.4	0.27~1.57	2.385	0.28
IV	2	40	250	2.8~3.6	0.35~0.45	2.385	0.28
V	2	40	250	2.8~3.6	0.35~0.45	2.932	0.37
VI	2	40	250	2.8~3.6	0.35~0.45	3.722	0.47

3降低到2(场景IV)时,尽管控制环节参数未发生改变,但系统强度减弱,故发生振荡现象。这意味着系统短路比越小,PLL和直流电压控制的动态交互作用增强。

3)由场景II和场景VI对比可知,当系统短路比 K_{SCR} 从3降低到2时,增大PLL控制带宽和参数,在场景II($K_{pdc}=0.47$)中系统未发生振荡,但是在场景VI中,尽管直流电压带宽和参数未发生变化,系统的输出电流仍发生振荡现象,这意味着相较于PLL控制参数的增大对控制交互作用的削弱,电网强度的减弱对系统稳定性影响更大。

以上结论均与前文的理论分析相吻合,由此可以证明所提并网换流器控制参数安全域边界选定方法的有效性。

4.2 控制参数安全域边界选定方法准确性验证

为了进一步验证所提控制参数安全域边界选定方法的准确性,图5给出了当直流电压控制参数越过安全域上下边界时,并网换流器的输出功率、直流电压和电流波形。由表2可知,在场景I下,当 $K_{SCR}=3$ 、 $\omega_{pll}=20\text{ Hz}$ 时, K_{pdc} 的稳定取值范围为0.30~1.44,将直流电压控制比例系数 K_{pdc} 在 $t=1\text{ s}$ 时从0.31增加到1.43、在 $t=4\text{ s}$ 时从1.43增加到1.45,如图5(a)所示,当 K_{pdc} 超过求解安全域的上边界理论值时,系统发生振荡。在场景III下,当设置 $K_{SCR}=3$ 、 $\omega_{pll}=40\text{ Hz}$ 时, K_{pdc} 的稳定取值范围为0.27~1.57,将直流电压控制比例系数 K_{pdc} 在 $t=1\text{ s}$ 时从1.56减小到0.28、在 $t=4\text{ s}$ 时从0.28减小到0.26,如图5(b)所示,当 K_{pdc} 小于求解安全域的下边界理论值时,系统发生振荡。在误差允许的情况下,以上仿真结果均与文中参数安全域边界求解结果基本吻合。

4.3 直流电压阶跃仿真验证

本文所提控制参数安全域边界选定方法在传统稳定判据的基础上,考虑了系统控制环节的相角裕度,本节通过直流电压阶跃仿真验证了在确定控制

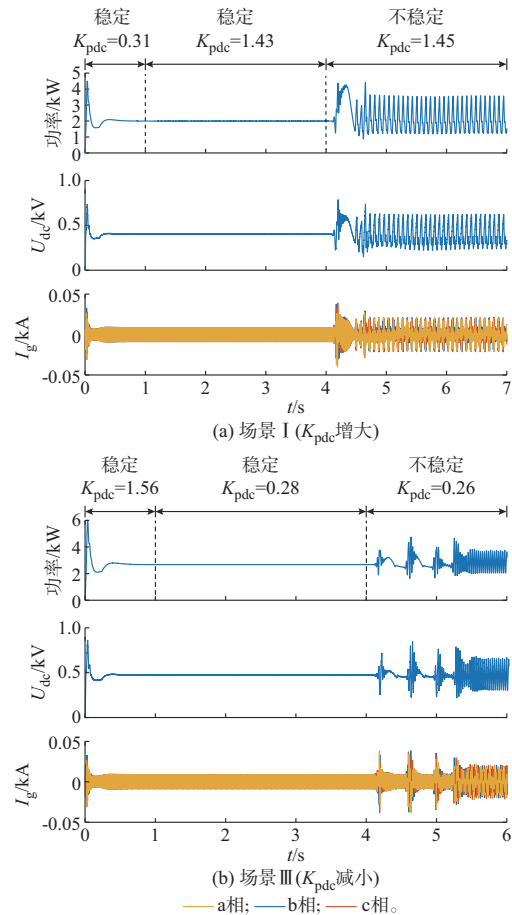


图5 直流电压控制参数改变时的并网换流器响应
Fig. 5 Responses of grid-connected converter with varying DC voltage control parameters

参数安全域边界时考虑相位裕度的必要性。

当 $\omega_{pll}=20\text{ Hz}$ 时,初始工况下直流电压参考值 $U_{dc}^*=0.4\text{ p.u.}$ 、 $K_{p,pll}=120$,由所提控制参数安全域边界选定方法确定的 K_{pdc} 取值范围为0.28~1.55。当控制参数 K_{pdc} 分别为0.20、0.28、0.90、1.40时,将直流电压参考值 U_{dc}^* 从0.4 p.u.阶跃至0.5 p.u.,直流电压阶跃仿真验证结果如附录E图E2所示,不同 K_{pdc} 下系统相位裕度如表3所示。

表3 不同 K_{pdc} 下的相位裕度($K_{SCR}=4$, $K_{p,pll}=120$)
Table 3 Phase margin under various K_{pdc} ($K_{SCR}=4$, $K_{p,pll}=120$)

工况	直流电压控制参数 K_{pdc}	相位裕度 $\gamma/(^\circ)$
1	0.20	5.31
2	0.28	36.48
3	0.90	28.15
4	1.40	18.72

由附录E图E2可知,当直流电压控制参数 $K_{pdc}=0.20$ (工况1)小于安全域下边界($K_{pdc}=0.28$)时,直流电压阶跃后存在持续振荡。此时,并网换流

器的相位裕度较小,系统抗扰性较差,在小扰动下可能有振荡风险。当 $K_{\text{pdc}}=0.28$ 、 0.90 时(工况2、工况3),直流电压阶跃后可以迅速达到新的稳定状态,表明工况2和工况3下系统均具有一定的相位裕度,且 $K_{\text{pdc}}=0.28$ 时系统的超调量更小,响应时间更短,与表3结果一致。当 $K_{\text{pdc}}=1.40$ 时(工况4),接近安全域上边界,直流电压阶跃后经过 0.9 s 才达到新的稳态,同时超调量较大。表3中工况1、工况4下的相位裕度较小,与以上仿真结果一致。因此,文中所提的基于Nyquist稳定判据和相角稳定裕度的控制参数安全域边界选定方法可以有效指导控制参数的调节方向,并降低并网换流器的振荡风险。

5 结语

本文提出了一种控制参数安全域边界选定方法,详细讨论了PLL和直流电压控制环对换流器并网振荡稳定性的影响,并得出如下结论:

1)弱电网条件下,并网换流器控制环路之间及控制器与弱电网之间会发生交互作用,并导致系统失稳,且随着电网强度的减弱交互作用进一步增强;

2)文中通过研究控制带宽的相对制约关系量化分析了PLL和直流电压控制带宽重叠程度对换流器并网振荡稳定性的影响,二者的交互作用随着直流电压控制与PLL带宽的逐渐接近而加剧,从而导致系统失稳;

3)为降低并网换流器的振荡风险,文中基于Nyquist稳定判据和相角稳定裕度确定控制带宽比的稳定边界,在实际工程应用中可以结合稳定裕度要求,利用文中方法计算不同运行方式下的控制参数稳定边界,进一步指导控制参数的调节方向。

未来,在本文所提控制参数安全域的稳定边界内,实现多控制环节的协调及控制系统动态性能优化的参数设计将是下一步工作重点。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4719-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4719-4731.
- [2] 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.
- [3] 李云丰,贺之渊,庞辉等.柔性直流输电系统高频稳定性分析及抑制策略(一):稳定性分析[J].中国电机工程学报,2021,41(17):5842-5856.
LI Yunfeng, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. High frequency stability analysis and suppression strategy of MMC-HVDC systems (part I): stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5842-5856.
- [4] 高家元,涂春鸣,肖凡,等.弱电网下PLL结构引入的不对称正反馈回路对并网逆变器稳定性的影响分析[J].中国电机工程学报,2022,42(3):1113-1125.
GAO Jiayuan, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Analysis of the influence of the asymmetric positive-feedback loop introduced by the PLL structure on the stability of grid-connected inverter in weak grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 1113-1125.
- [5] 陈汝斯,林涛,余光正,等.基于Gerschgorin定理和矩阵相似变换的谐波谐振参数安全域快速估计方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4610-4617.
CHEN Rusi, LIN Tao, YU Guangzheng, et al. Study on fast estimation method of parameter security region of harmonic resonance based on Gerschgorin theorem and matrix similarity transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4610-4617.
- [6] 李明,张兴,郭梓暄,等.弱电网下基于D分割法的逆变器PI参数设计及稳定域分析[J].电力系统自动化,2020,44(15):139-147.
LI Ming, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Proportional-integral parameter design for inverter based on D-partition method and its stability region analysis in weak grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 139-147.
- [7] 徐衍会,高天初,滕先浩.基于盖尔原理的逆变器并网系统稳定性判据[J].电力系统自动化,2022,46(21):89-96.
XU Yanhui, GAO Tianchu, TENG Xianhao. Stability criterion for grid-connected inverter system based on Gerschgorin principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 89-96.
- [8] 李水天,林涛,盛逸标,等.面向次/超同步振荡的控制器参数稳定域构建[J].中国电机工程学报,2020,40(22):7221-7230.
LI Shuitian, LIN Tao, SHENG Yibiao, et al. Construction of stability region of control parameters against sub/super synchronous oscillation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7221-7230.
- [9] 高本锋,郑展翔,邓晓洋,等.计及不同强度电网的直驱风电机组控制参数稳定域分析[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版)[2024-01-01].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20240403.1337.002.html>.
GAO Benfeng, ZHENG Zhanxiang, DENG Xiaoyang, et al.

- Stability region analysis of control parameters of direct drive wind turbines with different power grids [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)[2024-01-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20240403.1337.002.html>.
- [10] 张学广,马彦,王天一,等.弱电网下双馈发电机输入导纳建模及稳定性分析[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1507-1516. ZHANG Xueguang, MA Yan, WANG Tianyi, et al. Input admittance modeling and stability analysis of DFIG under weak grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1507-1516.
- [11] 杨超然,宫泽旭,洪敏,等.外环动态影响下变流器广义阻抗判据的适用性分析[J].中国电机工程学报,2021,41(9):3012-3024. YANG Chaoran, GONG Zexu, HONG Min, et al. Applicability analysis of the generalized-impedance stability criterion for converters considering the outer-loop dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3012-3024.
- [12] 王远卓,徐海亮,葛平娟,等.弱电网下无刷双馈风机稳定域评估及电流前馈控制策略[J/OL].电网技术[2024-01-01]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1006>. WANG Yuanzhuo, XU Hailiang, GE Pingjuan, et al. Stability domain evaluation and current feed-forward control strategy of BDFIG-based wind turbines during weak grid condition [J/OL]. Power System Technology [2024-01-01]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1006>.
- [13] 任必兴,杜文娟,王海风,等.锁相环控制对永磁直驱风机并网次同步振荡稳定性的影响:控制参数安全域[J].电力自动化设备,2020,40(9):142-149. REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Influence of PLL control on sub-synchronous oscillation stability of grid-connected PMSG: control parameter safety region [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 142-149.
- [14] 胡寿松.自动控制原理[M].4版.北京:科学出版社,2001. HU Shousong. Principle of automatic control [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2001.
- [15] 苏晨博.大规模风电场并网引发系统宽频振荡的机理分析及抑制措施[D].北京:华北电力大学,2022. SU Chenbo. Mechanism analysis and suppression measures of broadband oscillation caused by grid connection of large-scale wind farms [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [16] YUAN H, YUAN X M, HU J B. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3981-3991.
- [17] WANG D, LIANG L, SHI L, et al. Analysis of modal resonance between PLL and DC-link voltage control in weak-grid tied VSCs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1127-1138.
- [18] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [19] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, et al. DC-bus voltage control stability affected by AC-bus voltage control in VSCs connected to weak AC grids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 445-458.
- [20] 袁豪,袁小明.用于系统直流电压控制尺度暂态过程研究的电压源型并网变换器幅相运动方程建模与特性分析[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6882-6892. YUAN Hao, YUAN Xiaoming. Modeling and characteristic analysis of grid-connected VSCs based on amplitude-phase motion equation method for power system transient process study in DC-link voltage control timescale [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6882-6892.
- [21] 刘芳,刘威,徐韞钰,等.弱电网条件下并网逆变器控制环路稳定判据及交互作用规律分析[J].中国电机工程学报,2023,43(2):466-482. LIU Fang, LIU Wei, XU Yunyu, et al. Analysis on stability criterion and interaction law of grid-connected inverter control loop under weak grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 466-482.
- [22] 汪春江,孙建军,宫金武,等.并网逆变器与电网阻抗交互失稳机理及阻尼策略[J].电工技术学报,2020,35(增刊2):503-511. WANG Chunjiang, SUN Jianjun, GONG Jinwu, et al. Interaction instability mechanism and damping strategy of grid-connected inverter and power grid impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 503-511.
- [23] 黄通,陈新,张东辉,等.计及直流电压控制的MMC换流站阻抗建模及其稳定性分析[J].中国电机工程学报,2023,43(11):4273-4284. HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. Impedance characteristic and integration stability research on modular multilevel converter with consideration of DC voltage controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4273-4284.
- [24] 吴广禄,王姗姗,周孝信,等.VSC接入弱电网时外环有功控制稳定性解析[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6169-6183. WU Guanglu, WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, et al. Analytical analysis on the active power control stability of the weak grids-connected VSC [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6169-6183.

王瑾媛(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向:新能源并网稳定性分析及控制。E-mail:847090484@qq.com

刘崇茹(1977—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:交直流混合系统分析与仿真、运行与控制。E-mail:chongru.liu@ncepu.edu.cn

苏晨博(1991—),男,通信作者,博士,助理研究员,主要研究方向:风力发电系统及其控制、柔性直流输电系统及其控制。E-mail:scb2636@foxmail.com

(编辑 冯慧敏)

Construction Method and Control-interaction Analysis of Security Region for Control Parameters of Grid-connected Converter

WANG Jinyuan¹, LIU Chongru¹, SU Chenbo², WU Wenchuan², FANG Jiashu¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The interaction between the phase-locked loop (PLL) and the DC voltage control loop of a power electronic converter under weak grid conditions may trigger oscillations. In order to reduce the risk of oscillation caused by the grid-connected converters, a method for determining the boundary of the security region for the control parameter is proposed. By studying the relative constraint relationship of the control bandwidth, the influence law of each control parameter on the interaction between the main control links of the grid-connected converter and between the controller and the weak grid is quantitatively analyzed. First, from the perspective that the dynamic response characteristics of the overlapped region of the controller bandwidth are similar, a mathematical analytical expression model of the closed-loop transfer function of the outer DC voltage loop covering the grid strength and each control link is established. Then, based on the analytical expression of this transfer function, the boundary of the security region for the control bandwidth ratio is solved by using the Nyquist stability criterion and stability margin constraints. The result can guide the design of the PLL and DC voltage control bandwidths under weak grid conditions and map it to the security region for each control parameter. In addition, the security region for control parameters intuitively reflects the influence of differences in parameter settings of the grid-connected converter on system stability, thereby guiding the adjustment direction of control parameters. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed method are verified through PSCAD/EMTDC simulations.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFB2402704) and State Grid Corporation of China (No. 52272222001J).

Key words: grid-connected converter; security region; control parameter; stability; interaction; phase-locked loop; DC voltage control

