

弱电网下 VSC 的多维度建模及稳定性分析

赵雨童^{1,2}, 高 飞^{1,2}, 俞嘉浩^{1,2}, 张博深^{1,2}, 郑启鹏^{1,2}

(1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 为研究弱电网下电压源型变换器(voltage source converter, VSC)的稳定性, 建立了 3 个维度下的小信号阻抗模型, 具体为从交流侧维度建立的多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)模型、从直流侧维度建立的单输入单输出(single input single output, SISO)模型和从系统控制回路维度建立的 SISO 模型。基于上述模型分析了弱电网下 VSC 的 $d-q$ 轴耦合机理以及其对稳定性研究的影响, 在此基础上进一步研究了电网强度, 恒功率负荷和外环控制带宽对系统稳定性的影响; 验证了不同维度下的阻抗模型在系统稳定性判断的一致性, 并分析了各模型的特点。

关键词: 弱电网; 耦合机理; 多输入多输出系统; 单输入单输出系统; 恒功率负载

Multi-dimensional Modeling and Stability Analysis of VSC Connecting to Weak Grid

ZHAO Yutong^{1,2}, GAO Fei^{1,2}, YU Jiahao^{1,2}, ZHANG Boshen^{1,2}, ZHENG Qipeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University,

Shanghai 200240, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to study the stability of voltage source converter (VSC) in a weak grid, impedance models in three dimensions are established, which are multiple-input-multiple-output (MIMO) model in AC side dimension, single-input-single-output (SISO) model in control-loop dimension and SISO model in DC side dimension. Based on the established models, the $d-q$ axis coupling mechanism of VSC under a weak grid condition and its influence on system stability are analyzed. Furthermore, the relationship between grid strength, constant power load and system stability is studied. The Nyquist curves and pole-zero map illustrate the consistency of the impedance models in system stability assessment under different dimensions. The feature of each model is further analyzed.

Key words: weak grid; coupling behaviors; MIMO system; SISO system; constant power load

0 引言

随着化石燃料日益枯竭以及其造成的系列环境问题, 清洁环保的可再生能源收到越来越多的关注并且已有大规模的建设^[1]。由于可再生能源如大规模的风场和光伏电场多建于偏远地区, 需要长距离线路传输, 线路阻抗无法忽略。这导致了新能源并网所需的电压源型变换器(voltage source converter, VSC)处于弱电网条件下, 带来一系统稳定性问题^[2]。

针对弱电网下的 VSC 稳定性问题, 已有的研究工作主要基于交流侧维度建立的 MIMO 系统, 文献[3]提出了弱电网下锁相环(phase lock loop, PLL)研究了 PLL 参数对 VSC 端口特性的影响。文献[4]建

立了锁相环、直流电压环、电流环以及延时、主电路滤波环节对 VSC 阻抗特性影响的频域分布规律模型, 分析影响各频带阻抗特性的主导因素以及负阻尼特性的产生原因。文献[5]表明了弱电网下 VSC 交流侧阻抗出现 $d-q$ 耦合项, 导致频率耦合进而影响系统稳性, 且无法将系统分解为两个独立的 SISO 系统进行稳定性分析。文献[6]中表明需要广义奈奎斯特判据(generalized nyquist criterion, GNC)准确分析 MIMO 系统稳定性, 但其增加了稳定性分析的复杂程度。文献[7]分析了 PLL 对电流内环的影响以及其导致 $d-q$ 耦合的机理, 且文献[8]指出了直流电压控制和功率控制外环同样会引发弱电网条件下的 VSC 的 $d-q$ 耦合。

为了简化稳定性分析的复杂程度, 研究了耦合

项对系统稳定性的影响,探索将 MIMO 系统转化为 SISO 系统的方法成为研究热点。其中通过对 VSC 的交流侧阻抗的分析,文献[9]指出当弱电网下的 VSC 工作在单位功率因数模式运行时,耦合现象可以忽略。文献[10]提出了镜像频率耦合(mirror frequency coupling, MFC)的概念,研究了频率耦合的机理,并指出在 MFC 不存在时,VSC 的序阻抗可以解耦为正序子系统和负序子系统。文献[11]同时建立 VSC 的 $d-q$ 阻抗和序阻抗并分析了两者的相互关系和相互转换的矩阵。文献[12]定义了 VSC 的广义阻抗比,对 VSC 的序阻抗矩阵进行舒尔补变换得到没有耦合项的广义阻抗矩阵。具有对称结构输出复数角度的 PLL 被设计出来消除电流内环的频率耦合现象,然而依然无法解决控制外环引入的耦合现象^[13]。

由于在弱电网条件下 VSC 交流侧阻抗为 MIMO 系统且解耦困难,有学者从其他维度对其进行建模分析。比如从直流侧维度出发建立的小信号阻抗模型为天然的单端口模型^[14]。文献[2]建立了 VSC 的直流侧小信号阻抗模型,并分析了电网阻抗和系统延时环节对直流端口阻抗特性的影响。文献[15]分析了不同下垂控制下的 VSC 直流端口阻抗特性,研究了 PLL 对系统直流侧电压稳定性的影响。此外,从控制回路维度出发,建立电路控制回路的闭环传递函数并提取其开环传递函数进行稳定性分析^[16-17]。基于此方法,文献[18]推导了单闭环控制下 VSC 的控制回路传递函数并研究其稳定性;文献

[19]建立了弱电网下双闭环控制下 VSC 的电流内环控制回路模型,进而研究了 PLL 和电流内环的交互机理;文献[20]对功率控制下并网 VSC 的有功外环控制回路进行建模分析,研究了电网强度和锁相环对有功外环控制回路的影响。

以上的研究,针对不同的研究问题建立了不同维度下的阻抗模型。但是,对于不同维度下阻抗模型的特点与优势缺乏提炼,对于其稳定性研究的一致性缺乏验证。针对这些研究空白,本文对弱电网条件下直流电压控制的 VSC 建立交流侧小信号阻抗模型,直流侧小信号阻抗模型和所有控制回路的闭环小信号模型。基于建立的模型,验证了其在稳定性判断上的一致性;分析了系统中影响 $d-q$ 耦合的因素;定位了电网强度,恒功率负荷以及外环控制回路带宽对各控制回路的影响以及系统失稳的具体原因。

1 VSC 系统接入弱交流电网

弱电网下的 VSC 的双闭环控制框图如图 1 所示。为简化分析,将直流侧负载等效为恒定功率负载(constant power load, CPL)。交流电网由交流电源 u_{gabc}^s 、网侧线感 L_g 和网侧线阻 R_g 组成。 L_s 、 R_s 为逆变器侧电感和电阻; i_{abc} 为交流侧电流; u_{abc} 为公共连接点(point of common coupling, PCC)电压; u_{cabc} 为变换器侧电压; i_{gabc} 为交流侧电流; ω 为基波频率; C 为直流侧滤波电容; i_{dc} 为变换器直流侧电流; i_o 为直流侧输出电流; u_{dc} 为直流侧电压; θ_{PLL}

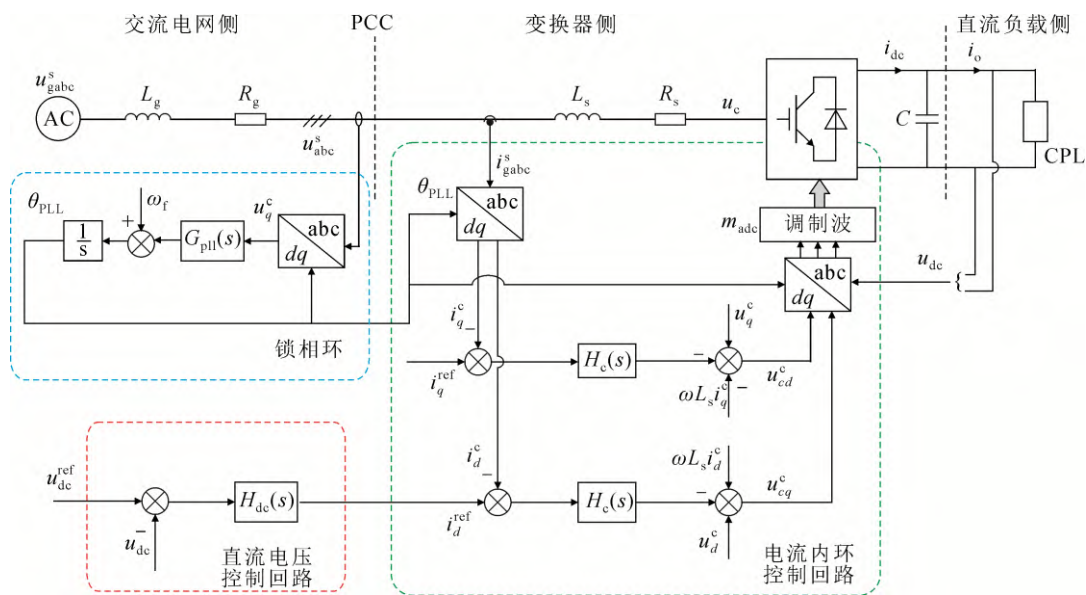


图1 弱电网下的 VSC 系统及控制回路

Fig.1 Control block diagram of VSC connecting to a weak grid

为 PLL 输出; m_{abc} 为 PWM 调制信号。其中上标 ref 表示变量参考值; 上标 s 和 c 分别表示系统坐标系和控制坐标系; 下标 d 和 q 分别表示 d-q 同步旋转坐标系下的 d 轴和 q 轴; 下标 o 表示稳态工作点。

该系统采用双闭环控制, 其中外环为电压环, 维持直流电压的稳定; 内环为 d-q 轴下的电流控制环, 其中 d 轴控制有功电流, q 轴控制无功电流。PLL 检测 PCC 的电压相位, 并以此信号作为旋转坐标系的相位。

2 交流侧阻抗模型

从交流侧建立阻抗模型分析系统稳定性时, 交流电网作为源子系统, VSC 与直流侧负载作为荷子系统。

2.1 坐标系统转换

在弱电网条件下, 电网呈感性且感值较大, 这导致 PCC 的电压敏感, 存在相角波动。PLL 需要实时追踪其电压相位, 然而由于 PLL 自身的动态特性输出的电压相位与实际值存在相对偏差, 对系统稳定性产生影响。

如图 2 所示, 上标 s 和 c 分别表示系统坐标系和控制坐标系, 其中系统坐标系以 PCC 电压相位为旋转角度, 控制坐标系以锁相环输出相角为旋转角度。在稳态工作时, 系统坐标系和控制坐标系角度一致, 当 PCC 电压波动时两坐标系存在相位差 $\Delta\theta$, 其对变量的影响如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} d^c \\ q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & \sin(\Delta\theta) \\ -\sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d^s \\ q^s \end{bmatrix} = T_{\Delta\theta} \begin{bmatrix} d^s \\ q^s \end{bmatrix} \quad (1)$$

对式(1)线性化可得

$$\begin{bmatrix} d_o^c + \tilde{d}^c \\ q_o^c + \tilde{q}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(0+\Delta\tilde{\theta}) & \sin(0+\Delta\tilde{\theta}) \\ -\sin(0+\Delta\tilde{\theta}) & \cos(0+\Delta\tilde{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_o^s + \tilde{d}^s \\ q_o^s + \tilde{q}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1 & \Delta\tilde{\theta} \\ -\Delta\tilde{\theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_o^s + \tilde{d}^s \\ q_o^s + \tilde{q}^s \end{bmatrix}$$

一般情况下, 系统坐标系和控制坐标系不会有较大差异, 即 $\Delta\theta$ 接近于 0。根据三角函数性质将公式(2)进一步简化得

$$\begin{bmatrix} \tilde{d}^c \\ \tilde{q}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{d}^s \\ \tilde{q}^s \end{bmatrix} + \Delta\tilde{\theta} \begin{bmatrix} q_o^s \\ -d_o^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据图 1 中 PLL 结构可推导出 $\Delta\theta$ 的小信号为

$$\Delta\tilde{\theta} = \tilde{u}_q^s \frac{G_{pll}(s)}{s + U_{do}^s G_{pll}(s)} = H_{pll}(s) \tilde{u}_q^s \quad (4)$$

其中: $G_{pll}(s)$ 表示 PLL 中 PI 控制器的传递函数; $H_{pll}(s)$

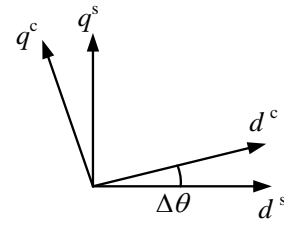


图 2 系统坐标系与控制坐标系

Fig.2 System d-q frame and controller d-q frame

为 PLL 的传递函数。其中, U_{do}^s 为 u_d 的稳态值。

结合式(1)与(4)可得网侧电流, PCC 电压和变换器侧电压的小信号表示为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_d^c \\ \tilde{i}_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & H_{pll}(s)I_{qo}^s \\ 0 & -H_{pll}(s)I_{do}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} + I_{pllo} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_d^c \\ \tilde{u}_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & H_{pll}(s)U_{qo}^s \\ 0 & -H_{pll}(s)U_{do}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} + U_{pllo} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^c \\ \tilde{u}_{cq}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^s \\ \tilde{u}_{cq}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & H_{pll}(s)U_{qo}^s \\ 0 & -H_{pll}(s)U_{do}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^s \\ \tilde{u}_{cq}^s \end{bmatrix} + U_{cplo} \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: I_{do}^s 、 I_{qo}^s 、 U_{qo}^s 、 U_{do}^s 和 U_{qo}^s 分别为 i_d 、 i_q 、 u_{cq} 、 u_{cd} 和 u_q 的稳态值; I_{pllo} 、 U_{pllo} 和 U_{cplo} 为各个变量在系统坐标系和控制坐标系间的小信号转换矩阵。

2.2 电流内环模型

根据图 1 中电流内环结构, 电流内环的线性化表达式可以写为

$$H_c(s) \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^c - \tilde{i}_d^{\text{ref}} \\ \tilde{i}_q^c - \tilde{i}_q^{\text{ref}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^c \\ \tilde{u}_q^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_f L_s \\ -\omega_f L_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^c \\ \tilde{i}_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^c \\ \tilde{u}_{cq}^c \end{bmatrix} \quad (8)$$

变换器侧电感电阻的数学模型为

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^s \\ \tilde{u}_{cq}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s + sL_s & -\omega_f L_s \\ \omega_f L_s & R_s + sL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(5)~(7)代入式(8)可得

$$\left(H_c(s)I_{pllo} + U_{pllo} - U_{cplo} - \omega_f L_s H_{pll}(s) \begin{bmatrix} 0 & I_{do}^s \\ 0 & I_{qo}^s \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} = -H_c(s) \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^s \\ \tilde{u}_{cq}^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \omega_f L_s \\ -\omega_f L_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} + \quad (10)$$

$$H_c(s) \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^{\text{ref}} \\ \tilde{i}_q^{\text{ref}} \end{bmatrix}$$

将式(9)代入式(10)可得电流内环的小信号模型为

$$\left(H_c(s)I_{pllo} + U_{pllo} - U_{cplo} - \omega_f L_s H_{pll}(s) \begin{bmatrix} 0 & I_{do}^s \\ 0 & I_{qo}^s \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} = H_c(s) \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^{\text{ref}} \\ \tilde{i}_q^{\text{ref}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s + sL_s + H_c(s) & 0 \\ 0 & R_s + sL_s + H_c(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $H_c(s)$ 为电流内环 PI 控制器的传递函数。由式(11)可以看出 PLL 的动态特性导致电流内环模型存在 d - q 耦合项。

2.3 直流负载与电压外环模型

精准控制的电力电子负载如 BUCK 电路、同步电机等外特性表现为恒功率特性^[21], 并且恒功率负载的负阻抗特性对系统稳定影响显著^[22], 其等效阻抗可以表示为

$$R_{CPL} = -\frac{U_{dc}^2}{P_L} \quad (12)$$

式中: U_{dc} 为 u_{dc} 的稳态值; P_L 为直流侧恒功率负载值; R_{CPL} 为直流侧恒功率负载的阻抗值。

电压外环控制器的模型为

$$\dot{i}_d^{ref} = H_{dc}(s)(u_{dc}^{ref} - u_{dc}) \quad (13)$$

式中 $H_{dc}(s)$ 直流电压控制器的传递函数。

根据功率守恒, 交直流侧变量有如下关系

$$\frac{3}{2}(\dot{i}_d^s u_{cd}^s + \dot{i}_q^s u_{cq}^s) = u_{dc} \left(\frac{P_L}{u_{dc}} + C \frac{du_{dc}}{dt} \right) \quad (14)$$

对式(14)线性化得

$$\tilde{u}_{dc} = \frac{3}{2CsU_{dc0}} \left(\begin{bmatrix} U_{cdo}^s & U_{cqo}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{do}^s & I_{qo}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^s \\ \tilde{u}_{cq}^s \end{bmatrix} \right) \quad (15)$$

结合式(11)、(13)和(15)即可得到 VSC 的交流侧阻抗为

$$Z_{DQ}^{VSC} = \begin{bmatrix} Z_{dd}^{VSC} & Z_{dq}^{VSC} \\ 0 & Z_{qq}^{VSC} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: Z_{dd}^{VSC} 为 d 轴阻抗; Z_{dq}^{VSC} 为耦合阻抗; Z_{qq}^{VSC} 为 q 轴阻抗。

具体的交流侧阻抗表达式将在附录 A 中展示, 交流侧的 VSC 阻抗矩阵为上三角矩阵, 并且存在耦合项。分析 Z_{dq}^{VSC} 可知 PLL 的动态特性和电压外环造成了 d - q 耦合, 值得注意的是在单位功率因数下, 虽然 PLL 的动态特性和电压外环所导致的耦合机理依然存在, 但是在此工况下如附录 A 中式(A2)所示, 系统阻抗耦合项模值为 0, 即耦合机理在此工况下不产生影响。

2.4 电网阻抗模型与耦合关系

交流电网由交流电源 u_{gabc} 、网侧线感 L_g 和网侧线组 R_g 组成, 电网的端口电压电流关系为

$$\begin{bmatrix} u_{gd}^s \\ u_{gq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d^s \\ u_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_g + sL_g & -\omega_f L_g \\ \omega_f L_g & R_g + sL_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 u_{gdq} 为理想电源, 其小信号为 0。将式(17)线性化可得

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_d^s \\ \tilde{u}_q^s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_g + sL_g & -\omega_f L_g \\ \omega_f L_g & R_g + sL_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} \quad (18)$$

即电网的阻抗模型可以表示为

$$Z_{DQ}^G = \begin{bmatrix} R_g + sL_g & -\omega_f L_g \\ \omega_f L_g & R_g + sL_g \end{bmatrix} \quad (19)$$

可以看出随着网侧电感的增大, 耦合项也会相应增大, 结合 VSC 的交流侧阻抗模型, 系统的耦合关系如图 3 所示。 D - q 的电流扰动在网侧阻抗上产生电压扰动, 由于 PLL 的动态特性该扰动通过 I_{pllo} , U_{cpilo} 和 U_{pllo} 作用到 d - q 内环上产生耦合关系。电压外环需要控制功率的输出输入平衡以维持电容电压, 电网有功输入在 d - q 轴都有分布, 因此 q 轴变量将影响直流电压的控制从而产生耦合关系。在强电网条件下, PCC 点电压波动可以忽略, 由 PLL 的动态特性产生的耦合现象将消失, 但电压外环依然存在耦合现象。当 VSC 工作在单位功率因数模式下时, 由式(11)和(15)可知耦合项为 0, 耦合现象消失。

由于耦合现象的存在, 无法将交流侧的阻抗解耦为两个独立的 SISO 系统, 需要根据 GNC 判据, 绘制 Z_{DQ}^G / Z_{DQ}^{VSC} 特征根的奈奎斯特曲线分析系统稳定性, 并且无法通过参数分析设计 d - q 回路的幅值裕度与相位裕度。

3 弱电网下 VSC 直流侧阻抗

从直流侧维度建立系统小信号模型时, VSC 交流侧与电网相连, 其电流内环可以看作为完整的闭环结构。联立式(11)和(19), 可以得到完整的电流内环回路模型, 如图 4 所示。

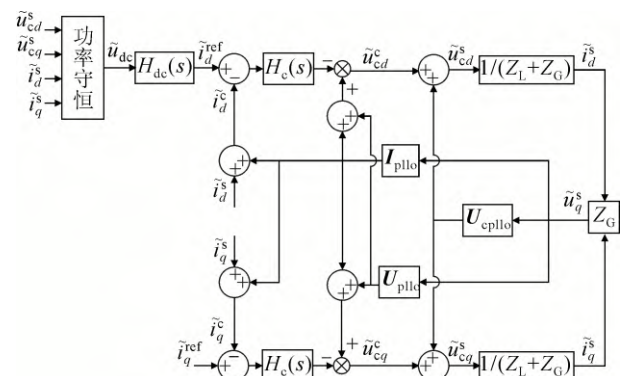


图3 弱电网下的 VSC 控制框图

Fig.3 Control diagram of VSC connected to weak grid

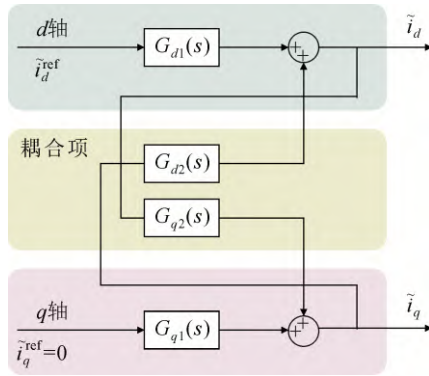


图4 电流内环框图

Fig.4 Block diagram of inner current loops

$$\begin{aligned} \tilde{i}_d^s = & -\frac{H_c(s)}{\omega_f L_g I_{q0} H_{pll}(s)(R_s + H_c(s)) - (R_s + sL_s + H_c(s))} \tilde{i}_d^{\text{ref}} \\ & - \frac{I_{q0} H_{pll}(s)(R_s + H_c(s))(R_g + sL_g)}{\omega_f L_g I_{q0} H_{pll}(s)(R_s + H_c(s)) - (R_s + sL_s + H_c(s))} \tilde{i}_q^s \\ = & G_{d1}(s) \tilde{i}_d^{\text{ref}} + G_{d2}(s) \tilde{i}_q^s \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \tilde{i}_q^s = & \frac{H_c(s)}{I_{d0} H_{pll}(s)(R_g + sL_g)(R_s + H_c(s)) + (R_s + sL_s + H_c(s))} \tilde{i}_q^{\text{ref}} \\ & - \frac{\omega_f L_g I_{d0} H_{pll}(s)(R_s + H_c(s))}{I_{d0} H_{pll}(s)(R_g + sL_g)(R_s + H_c(s)) + (R_s + sL_s + H_c(s))} \tilde{i}_d^s \\ = & G_{q1}(s) \tilde{i}_q^{\text{ref}} + G_{q2}(s) \tilde{i}_d^s \end{aligned} \quad (21)$$

图4中,弱电网下电流内环的闭环模型存在耦合项 G_{d2} 和 G_{q2} , d 轴子系统和 q 轴子系统皆为多数单输出系统。由式(20)和(21)可以看出,若在强电网条件下 G_{d2} 和 G_{q2} 为0,内环耦合现象消失;若在单位功率因数下 G_{d2} 为0, q 轴对 d 轴的耦合消失。

由于电压外环加在 d 轴, q 轴的电流参考值为常数即其小信号为0,可以进一步将图4简化为图5,简化后的电流内环为两个 SISO 形式的子系统。

由图5可得电流内环的闭环传递函数为:

$$\frac{\tilde{i}_d^s}{\tilde{i}_d^{\text{ref}}} = \frac{G_{d1}(s)}{1 - G_{d2}(s)G_{q2}(s)} = G_{dd_cl}(s) \quad (22)$$

$$\frac{\tilde{i}_q^s}{\tilde{i}_d^{\text{ref}}} = \frac{G_{d1}(s)G_{q2}(s)}{1 - G_{d2}(s)G_{q2}(s)} = G_{dq_cl}(s) \quad (23)$$

根据式(13)可得

$$\tilde{i}_d^{\text{ref}} = H_{dc}(s)(\tilde{u}_{dc}^{\text{ref}} - \tilde{u}_{dc}) \quad (24)$$

联立式(9)与(19)可得

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^s \\ \tilde{u}_{cq}^s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (R_s + R_g) + s(L_s + L_g) & -\omega_f(L_s + L_g) \\ \omega_f(L_s + L_g) & (R_s + R_g) + s(L_s + L_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} \quad (25)$$

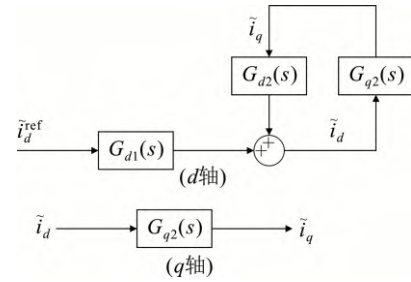


图5 简化电流内环框图

Fig.5 Simplified block diagram of inner current loops

根据交直流侧功率守恒可将图1中电容滤波后的直流输出电流表示为

$$i_o = \frac{3(i_d^s u_{cd}^s + i_q^s u_{cq}^s)}{2u_{dc}} - C \frac{du_{dc}}{dt} \quad (26)$$

对式(26)进行小信号线性化处理可得

$$\tilde{i}_o = \frac{3}{2U_{dc0}} \left(\begin{bmatrix} U_{cdo}^s & U_{cqo}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d^s \\ \tilde{i}_q^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{do}^s & I_{qo}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_{cd}^s \\ \tilde{u}_{cq}^s \end{bmatrix} \right) - \quad (27)$$

$$Cs \tilde{u}_{dc} - \frac{I_{dc0}}{U_{dc0}} \tilde{u}_{dc}$$

其中 I_{dc0} 为 i_{dc} 的稳态值。

将式(22), (23)与(25)代入式(27)可得

$$Z_{dc}^{\text{VSC}} = \frac{1}{Cs(P_{Bd} G_{dd_cl}(s) H_{dc}(s) + P_{Bq} G_{dq_cl}(s) H_{dc}(s) + 1) + \frac{I_{dc0}}{U_{dc0}}} \quad (28)$$

其中:

$$\begin{cases} P_{Bd} = 1.5 \times \frac{U_{cdo}^s - ((R_s + R_g) + s(L_s + L_g)) I_{do}^s - \omega_f(L_s + L_g) I_{qo}^s}{Cs U_{dc0}} \\ P_{Bq} = 1.5 \times \frac{U_{cqo}^s - ((R_s + R_g) + s(L_s + L_g)) I_{qo}^s + \omega_f(L_s + L_g) I_{do}^s}{Cs U_{dc0}} \end{cases} \quad (29)$$

从直流侧分析系统稳定性, VSC 作为源子系统提供了电压支撑维持以直流侧负载工作, 荷子系统为 CPL。由于直流侧构建的系统模型为单端口模型, 因此基于奈奎斯特判据(nyquist criterion, NC)判据分析 $Z_{dc}^{\text{VSC}} / R_{\text{CPL}}$ 即可准确研究系统稳定性, 并设计系统幅值裕度与相位裕度^[6]。

4 系统控制模型

如图1和图4所示,弱电网下双闭环控制的VSC有五个控制回路,其中内环控制包含 d - q 轴两个电流控制回路(i_d^{ref} 至 i_d , i_q^{ref} 至 i_q), 以及两个耦合控制回路(i_d^{ref} 至 i_q , i_q^{ref} 至 i_d); 外环控制为电压控制回路(u_{dc}^{ref} 至 u_{dc})。

在推导弱电网下 VSC 直流侧阻抗的过程中, d

轴有功电流内环的控制回路模型与 d 轴有功电流对 q 轴无功电流的耦合控制回路模型已经推导出如式(22)和(23)。二者的开环传递函数拥有一致的表达式为

$$G_{d_op}(s) = G_{d2}(s)G_{q2}(s) \quad (30)$$

在推导 q 轴无功控制回路模型时, 不考虑电压外环参考值的扰动。式(24)可以写为

$$\tilde{i}_d^{\text{ref}} = -H_{dc}(s)\tilde{u}_{dc} \quad (31)$$

联立式(15)与式(25)可得

$$\tilde{u}_{dc} = P_{Bd}\tilde{i}_d^s + P_{Bq}\tilde{i}_q^s \quad (32)$$

将式(31)和(32)代入式(20)可得

$$\tilde{i}_d^s = \frac{G_{d2}(s) - G_{d1}(s)H_{dc}(s)P_{Bq}}{1 + G_{d1}(s)H_{dc}(s)P_{Bd}}\tilde{i}_q^s = G_{d3}(s)\tilde{i}_q^s \quad (33)$$

将式(33)代入式(21)可得 q 轴无功电流控制回路模型和 q 轴无功电流对 d 轴有功电流耦合控制回路模型为:

$$\frac{\tilde{i}_q^s}{\tilde{i}_q^{\text{ref}}} = \frac{G_{q2}(s)}{1 - G_{d3}(s)G_{q2}(s)} \quad (34)$$

$$\frac{\tilde{i}_d^s}{\tilde{i}_d^{\text{ref}}} = \frac{G_{d3}(s)G_{q2}(s)}{1 - G_{d3}(s)G_{q2}(s)} \quad (35)$$

由式(34)和(35)可以看出, 与 d 轴相似, q 轴的两个控制回路模型也具有是一致的开环传递函数

$$G_{q_op}(s) = G_{d3}(s)G_{q2}(s) \quad (36)$$

联立式(22)、(23)和(32)可得电压控制回路模型为

$$\frac{\tilde{u}_{dc}}{\tilde{u}_{dc}^{\text{ref}}} = \frac{P_{Bd}G_{dd_cl}(s)H_{dc}(s) + P_{Bq}G_{qq_cl}(s)H_{dc}(s)}{1 + P_{Bd}G_{dd_cl}(s)H_{dc}(s) + P_{Bq}G_{qq_cl}(s)H_{dc}(s)} \quad (37)$$

电压控制回路的开环传递函数 $G_{dc_op}(s)$ 为

$$G_{dc_op}(s) = P_{Bd}G_{dd_cl}(s)H_{dc}(s) + P_{Bq}G_{dq_cl}(s)H_{dc}(s) \quad (38)$$

从系统控制的维度分析稳定性, 即利用 NC 判据分析系统控制回路的开环传递函数进而研究系统稳定性。基于建立的控制回路模型, 可以研究参数对控制回路幅值裕度和相位裕度的影响, 以及定位导致电路系统失稳的控制回路。

5 稳定性分析

5.1 D - q 耦合的影响

在弱电网下的 VSC 系统中, 分别建立 q 轴子系统和 d 轴子系统的等效阻抗模型, 分析电压电流关系。如图 6 所示, 其中源侧的 d - q 子系统相互耦合; 荷侧存在 q 轴子系统对 d 轴子系统的耦合通道。 d - q 子系统间的耦合关系对系统的动态特性和稳定性能存在一定影响。

根据图 6 若在电路 q 轴注入电压扰动 Δu_q , 可以推导出电路各变量的变化为

$$\begin{cases} \Delta i_d = \frac{(Z_{dq}^{\text{VSC}} + Z_{dq}^{\text{G}})}{(Z_{dq}^{\text{VSC}} + Z_{dq}^{\text{G}})Z_{qd}^{\text{G}} - (Z_{qq}^{\text{VSC}} + Z_{qq}^{\text{G}})(Z_{dd}^{\text{VSC}} + Z_{dd}^{\text{G}})} \Delta u_q \\ \Delta i_q = \frac{(Z_{dd}^{\text{VSC}} + Z_{dd}^{\text{G}})}{(Z_{dq}^{\text{VSC}} + Z_{dq}^{\text{G}})Z_{qd}^{\text{G}} - (Z_{qq}^{\text{VSC}} + Z_{qq}^{\text{G}})(Z_{dd}^{\text{VSC}} + Z_{dd}^{\text{G}})} \Delta u_q \\ \Delta u_d = \frac{2Z_{dq}^{\text{VSC}}Z_{dd}^{\text{VSC}} + Z_{dq}^{\text{G}}Z_{dd}^{\text{VSC}} + Z_{dd}^{\text{G}}Z_{dq}^{\text{VSC}}}{(Z_{dq}^{\text{VSC}} + Z_{dq}^{\text{G}})Z_{qd}^{\text{G}} - (Z_{qq}^{\text{VSC}} + Z_{qq}^{\text{G}})(Z_{dd}^{\text{VSC}} + Z_{dd}^{\text{G}})} \Delta u_q \end{cases} \quad (39)$$

如式(36)所示, 当耦合项 Z_{dq}^{VSC} 与 Z_{dq}^{G} 非零时, 系统 d - q 的变量相互影响, 且耦合程度由源侧阻抗和荷侧阻抗共同决定。

d - q 耦合增加了系统稳定性分析的复杂度, 为简化稳定性分析文献[9]和[23]指出, 在耦合项模值远小于对角元素模值的情况下, 可以根据 NC 判据分析 $Z_{dd}^{\text{G}}/Z_{dd}^{\text{VSC}}$ 和 $Z_{qq}^{\text{G}}/Z_{qq}^{\text{VSC}}$, 从而研究系统稳定性。根据附录 A 中耦合项 Z_{dq}^{VSC} 表达式可知, 耦合项模值与 q 轴无功电流工作点、直流侧电容和滤波电感呈正相关, 与 PLL 中 PI 参数和电流环中 PI 参数呈负相关。

图 7 为基于 GNC 判据绘制的 $Z_{DQ}^{\text{G}}/Z_{DQ}^{\text{VSC}}$ 特征根的奈奎斯特曲线与基于 NC 判据绘制 $Z_{dd}^{\text{G}}/Z_{dd}^{\text{VSC}}$ 和

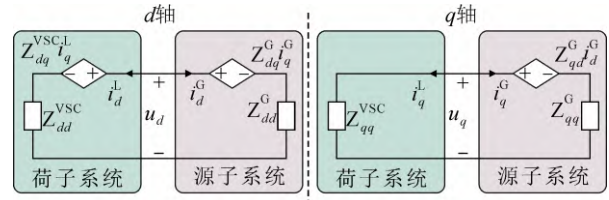


图 6 系统阻抗等效图

Fig.6 Equivalent circuit of impedance in d - q domain

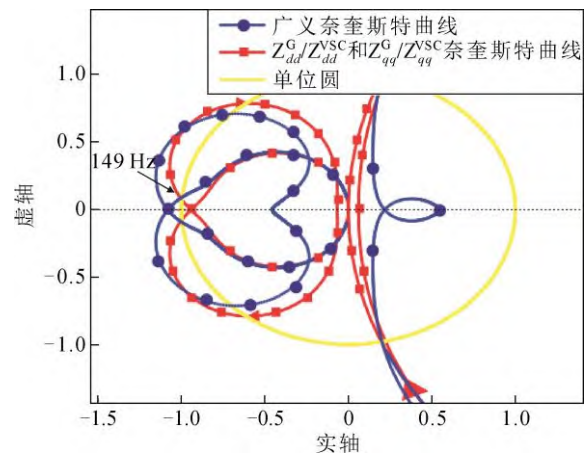


图 7 基于弱电网下 VSC 模型的奈奎斯特曲线($P_L=4\ 500\ \text{W}$)

Fig.7 Nyquist plot with $P_L=4\ 500\ \text{W}$ based on AC impedance

Z_{qq}^G / Z_{qq}^{VSC} 奈奎斯特曲线的对比,模型的控制参数设置如附录 B 中表 B1 所示。其中,广义奈奎斯特曲线绕过了 $(-1, j0)$ 点表示系统处于不稳定状态,且其在 149 Hz 处穿过单位圆表明振荡频率为 149 Hz;而 Z_{dd}^G / Z_{dd}^{VSC} 和 Z_{qq}^G / Z_{qq}^{VSC} 的奈奎斯特曲线并没有绕过 $(-1, j0)$ 点,表面系统依旧处于稳定状态。这说明在弱电网下,忽略耦合项分析系统稳定性,准确性较低且可能得出错误结果。

5.2 多维度模型系统稳定性分析特点

功率外环、锁相环和电流内环的带宽对于弱电网下 VSC 系统稳定性影响已被详细研究^[19]。本文将基于 3 个维度下的小信号模型分析电压控制外环带宽,电网强度和 CPL 对系统稳定性的影响。

图 8(a)交流侧阻抗模型表明,随着恒功率负载增大系统的幅值裕度下降,并在 $P_L=4\ 800\text{ W}$ 时系统处于不稳定状态。对比图 8(b)和图 8(c),可以发现不同阻抗模型的幅值裕度与相位裕度不同,并且在 $P_L=4\ 800\text{ W}$ 时图 8(b)和图 8(c)的奈奎斯特曲线没有绕过 $(-1, j0)$ 点。对直流侧系统阻抗模型和系统控制回路开环传递函数进行零极点分析。

图 9 为直流侧阻抗模型在 $P_L=4\ 800\text{ W}$ 时的零极点图,存在右半平面(right half plane, RHP)的极点,表明系统为非最小相位系统。根据奈奎斯特判据分析非最小相位系统稳定性, $Z=N-P-0-2\neq 0$, 其中, N 为奈奎斯特曲线沿逆时针方向环绕 $(-1, j0)$ 点圈数; P 为系统开环传递函数 RHP 极点数; Z 为系统闭环传递函数 RHP 极点数, Z 为 0 代表系统稳定, Z 非 0 代表系统不稳定。即根据直流侧阻抗模型,系统在 $P_L=4\ 800\text{ W}$ 时不稳定与交流侧阻抗模型稳定性判断一致。

对电压回路开环传递函数零极点分析时,其不含有 RHP 极点,但出现两个在原点处的极点和一个 RHP 零点,表明系统为 II 型系统和非最小相位系统。基于 NC 判据分析 II 型系统稳定性时,需要将发散的奈奎斯特曲线补全 ω 从 0^- 到 0^+ 段,补全后的奈奎斯特曲线如图 10 所示顺时针环绕 $(-1, j0)$ 两圈, $Z=N-P=0-0\neq 0$,代表电压控制回路不稳定,稳定性判断一致。

在基于控制回路维度研究双闭环控制的 VSC 系统稳定性时,大多数文章以外环控制回路模型研究系统稳定性^[20,22]。在强电网条件下, VSC 的电流内环稳定性较强,系统稳定性问题多由外环控制回路引发。但是,在弱电网条件下 VSC 的内环控制回

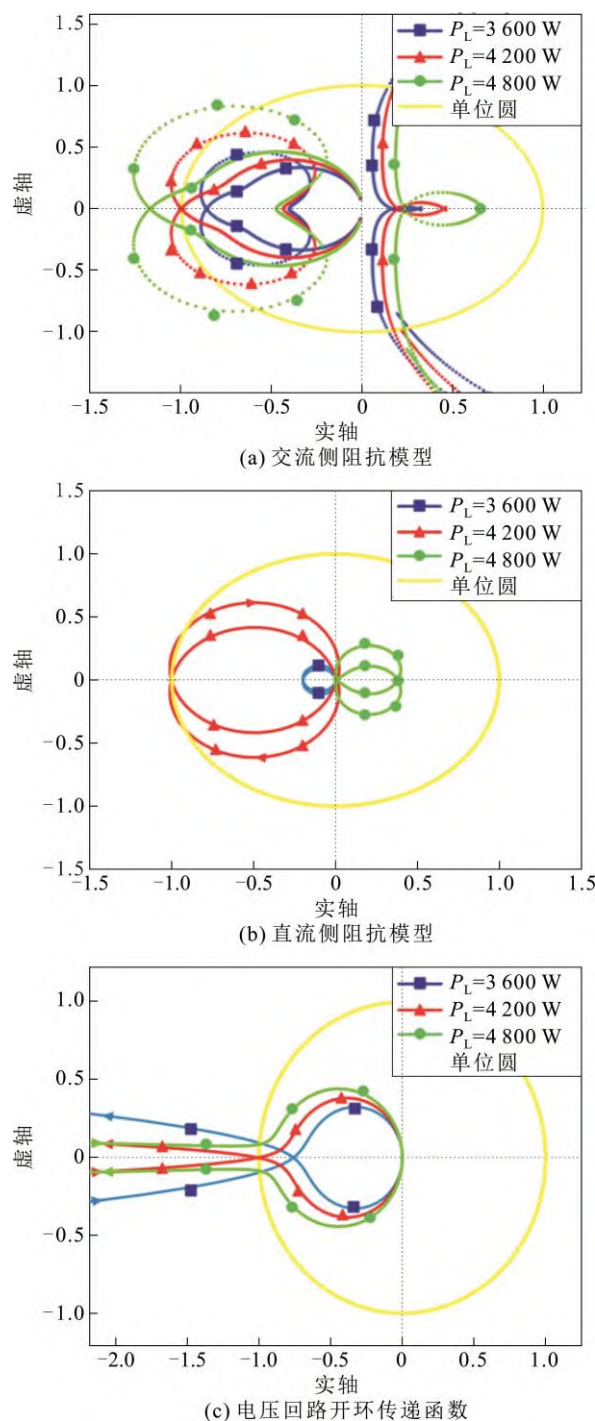


图 8 恒功率负载变化下 3 种模型的奈奎斯特曲线

Fig.8 Nyquist diagram based on three kinds of models with varying CPL

路因锁相环动态特性、相互耦合等原因存在稳定性问题甚至导致系统失稳。这表明在弱电网条件下,外环控制回路的稳定只是系统稳定的必要不充分条件,在系统中若存在一个不稳定回路,代表其控制变量发散进而导致系统失稳。因此,需要研究所有控制回路的稳定问题才能给出系统稳定的结论,定位系统失稳原因。

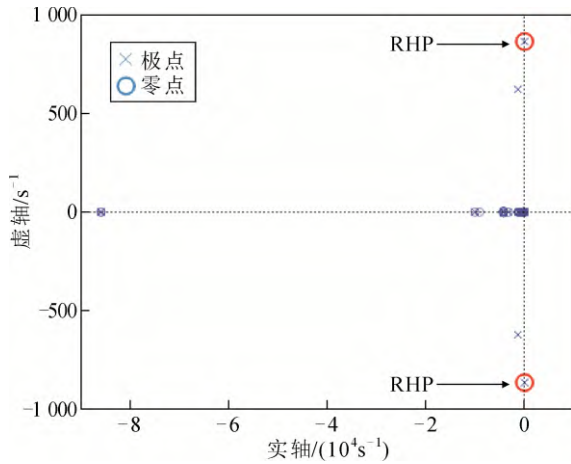
图9 直流侧阻抗模型零极点图($P_L=4\ 800\ \text{W}$)

Fig.9 Zeros and poles of dc impedance model

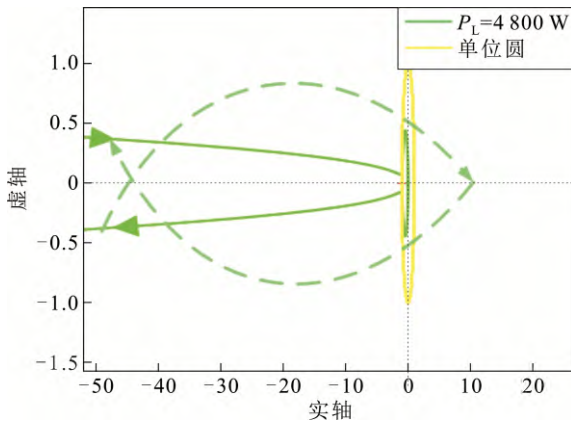


图10 基于电压控制回路模型的奈奎斯特曲线

Fig.10 Nyquist diagram based on voltage control loops

如图 11 所示, 其中 q 轴无功电流控制回路存在 RHP 极点为非最小相位系统且 $Z=N-P=0-2\neq 0$, 表示 q 轴无功控制回路不稳定导致系统失稳, 与交流侧和直流侧阻抗模型得出一致的稳定性判断。

电网强度一般由系统短路比(short circuit ratio, SCR) s_{CR} 表示

$$s_{\text{CR}} = \frac{S_{\text{ac}}}{P_{\text{dc}}} = \frac{U_{\text{ac}}^2}{P_{\text{dc}} |Z_{\text{g}}|} \quad (40)$$

式中: S_{ac} 为 PCC 点短路容量; P_{dc} 为直流输出功率; U_{ac} 为 PCC 点额定交流电压; $Z_{\text{g}}=R_{\text{g}}+sL_{\text{g}}$ 为交流系统等效阻抗。SCR 越小, 交流电网强度越弱。

系统短路比与恒功率负载相反, 图 12(a)表示随着系统短路比减小, 系统的稳定裕度下降, 并在 $s_{\text{CR}}=1.136\ 8$ 时系统处于不稳定状态。图 12(b)和(c)表示在 $s_{\text{CR}}=1.136\ 8$ 时 q 轴无功电流控制回路内环传递函数与直流侧阻抗模型均存在 2 个 RHP 极点, 且奈奎斯特没有绕过 $(-1, j0)$ 点, 根据奈奎斯特判据

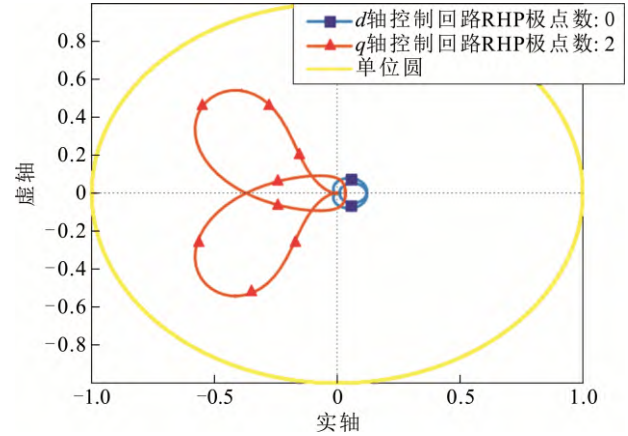


图11 基于电流内环控制回路模型的奈奎斯特曲线

 $(P_L=4\ 800\ \text{W})$

Fig.11 Nyquist diagram based on inner current loops

with $P_L=4\ 800\ \text{W}$

$Z=N-P=0-2\neq 0$, 表示系统不稳定。在 $s_{\text{CR}}=1.136\ 8$ 时, 电压控制回路的奈奎斯特曲线类似与图 10, 由于 q 轴无功电流控制回路失稳即可代表系统失稳, 这里就不在展示。

值得注意的是, 基于 GNC 判据分析交流侧阻抗模型稳定性时, 无法取得 $Z_{\text{DQ}}^{\text{G}} / Z_{\text{DQ}}^{\text{VSC}}$ 特征根的解析式, 缺少分析系统零极点状态的基础。因此, 交流侧阻抗模型无法判断系统是否为非最小相位系统。

在建立全面准确的控制回路模型的基础上分析系统稳定性, 可以确定系统稳定工作域和定位系统失稳原因。图 13 所示, 系统各控制回路稳定性有如下规律:

1) q 轴无功电流控制回路会随着恒功率负荷和外环电压控制回路带宽的增大或系统短路比减小出现 RHP 极点, 转变为非最小相位系统。

2) 电压控制回路和 q 轴无功电流控制回路存在失稳工作区域, 且二者失稳区间一致。

5.3 基于不同维度模型系统稳定性判断的一致性

5.2 节中的稳定分析还不足以证明基于不同维度模型的系统稳定性判断具有一致性, 只有确保通过不同维度模型得到的系统稳定临界条件是没有差异, 才可验证不同维度模型在系统稳定性判断上是否具有一致性。

图 14 为基于不同维度下小信号模型的稳定性分析, 3 个模型都在 125 Hz 处穿过 $(-1, j0)$, 即 3 个模型对系统稳定的临界条件判断一致。然而, 值得注意的是基于不同维度模型分析下得到的系统幅值裕度与相位裕度并不一致。

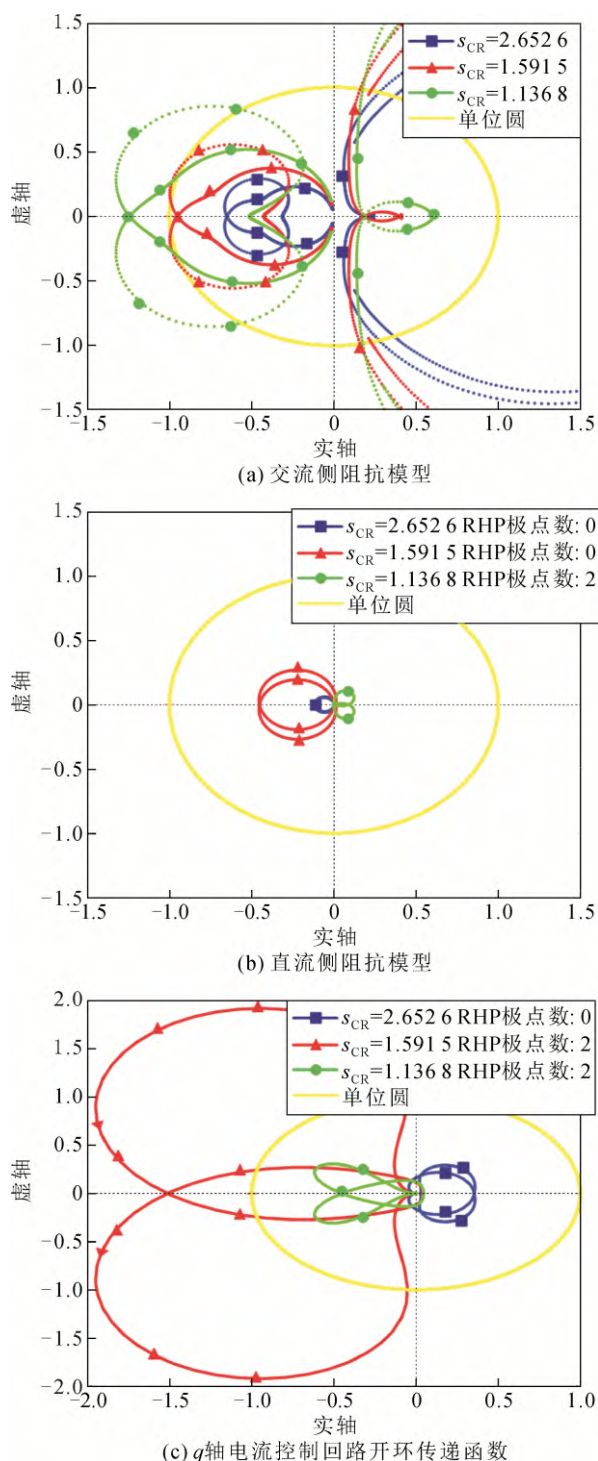


图 12 电网强度变化下 3 种模型的奈奎斯特曲线

Fig.12 Nyquist diagram based on models in different dimensions with varying grid impedance

基于 3 种模型分析系统稳定性, 系统临界稳定的条件判断一致说明 3 种模型的建立以及对应的稳定性判据能够准确的分析系统稳定性, 且可以相互验证。其中, 根据文献[6], 基于阻抗比分析系统稳定性的本质是, 先分析源子系统与荷子系统各自的稳定性, 再分析源子系统与荷子系统的端口电

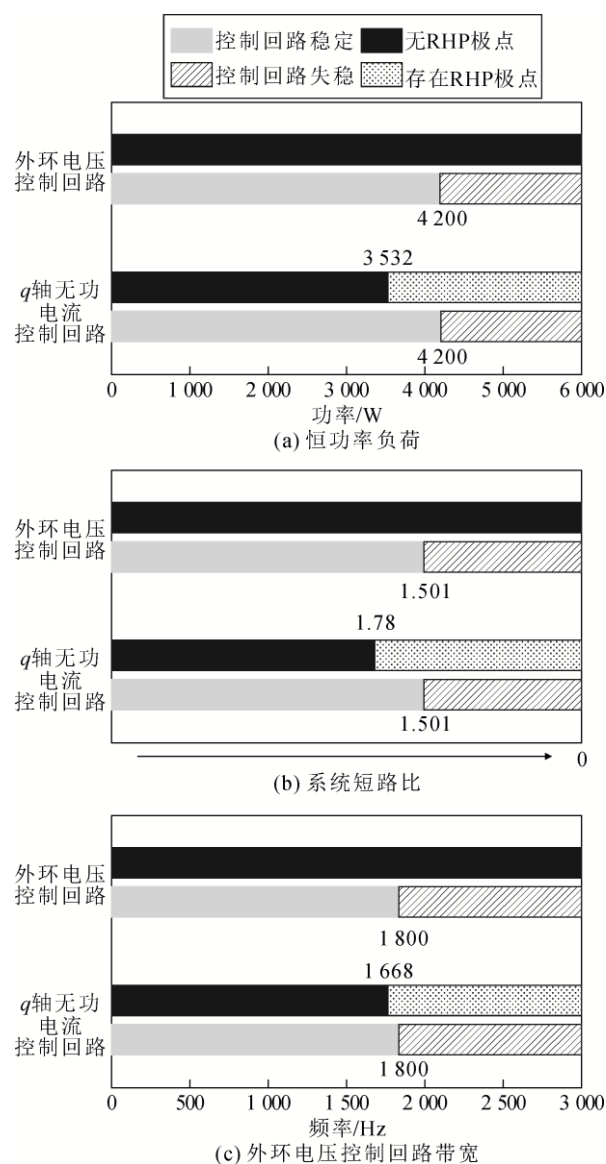
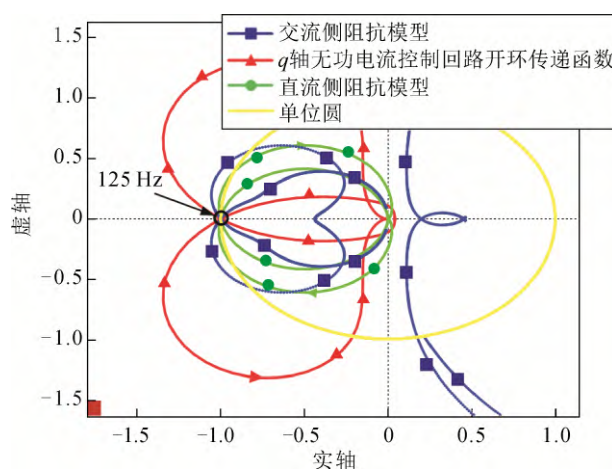


图 13 控制回路稳定区间分析

Fig.13 System stability range of control loop analysis

图 14 基于 3 种模型奈奎斯特曲线($P_L=4\ 200\ W$)Fig.14 Nyquist diagram based on small signal models in different dimensions with $P_L=4\ 200\ W$

压稳定性。其中, 基于直流侧阻抗比分析的端口电压是 u_{dc} , 而基于交流侧阻抗比分析的端口电压+相同。基于控制回路开环传递函数分析系统稳定性, 是通过分析系统每个控制回路的稳定性进而研究系统稳定性。系统的幅值裕度与相位裕度, 是一个描述非最小相位系统距离失稳状态的还有裕度的综合概念, 两个指标需要综合考虑。不同维度下的阻抗模型虽分析同一系统, 但由于分析的角度不同, 其建模分析的对象以及稳定性判据也不相同, 因而所得的系统幅值裕度与相位裕度并不一致, 且零极点分析也不一致。不同维度模型特性分析在附录 B 表 B2 中总结。

6 系统仿真

为验证第 5 章分析的结果的准确性, 本章采用在 MATLAB/SIMULINK 中搭建如图 1 所示的弱电网下的双闭环控制 VSC 进行时域仿真验证, 参数见附录 B 表 B1。

图 15 为不同恒功率负载下的 VSC 直流电压响应, 在 0.2~0.3 s 内负载功率为 4 200 W 时系统稳定工作且收敛的振荡频率为 125 Hz, 与图 14 中的穿越频率一致, 验证了模型的准确性。在 0.3 s 时负载增加为 4 800 W, 系统产生发散振荡系统不稳定, 与图 8 中所得的结果一致。

图 16 和图 17 为不同电网强度下的 VSC 直流电压响应, 在 0.1~0.2 s 内负载功率标么值为 0.9 时系统可以稳定工作。在 0.2 s 时负载功率标么值增加为 1, $s_{CR}=1.5915$ 的系统依旧可以稳定工作, 而为 $s_{CR}=1.1368$ 的系统发生振荡失稳, 与图 12 中所得的结果一致。

图 18 为不同直流电压带宽下的 VSC 直流电压响应, 在 0.21 s 时直流电压带宽由 1 500 Hz 变为 1 700 Hz, 系统出现收敛振荡且收敛时间较长, 表明系统虽然稳定但稳定裕度较低。在 0.23 s 时直流电压带宽由 1 700 Hz 变为 1 900 Hz, 系统产生发散振荡系统不稳定, 与图 13(c)中的结果一致。

7 结论

本文研究在弱电网条件下 VSC 稳定性, 建立了交流侧维度下、系统控制回路维度下和直流侧维度下的小信号阻抗模型进行分析, 主要得出如下结论:

1) 弱电网条件下, 由 PLL 动态特性和电压外环导致了 $d-q$ 耦合。在基于交流侧阻抗模型的稳定

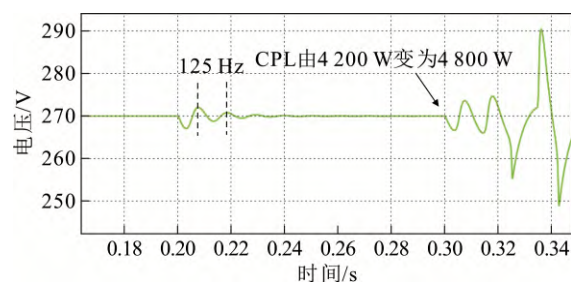


图 15 不同恒功率负载下的直流电压响应

Fig.15 DC voltage output with varying CPL

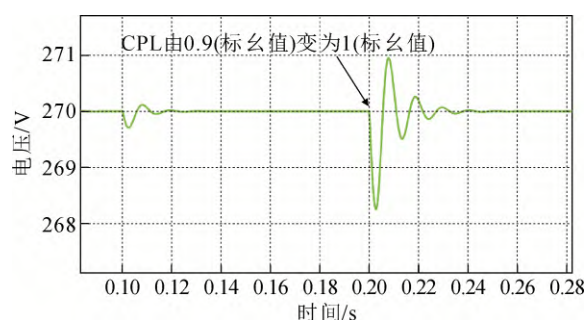


图 16 $s_{CR}=1.5915$ 时的直流电压响应

Fig.16 DC voltage output with $s_{CR}=1.5915$

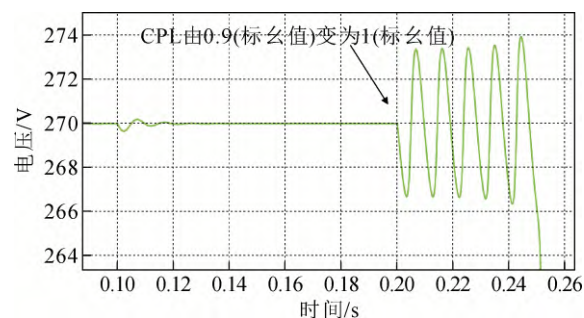


图 17 $s_{CR}=1.1368$ 时的直流电压响应

Fig.17 Dc voltage output with $s_{CR}=1.1368$

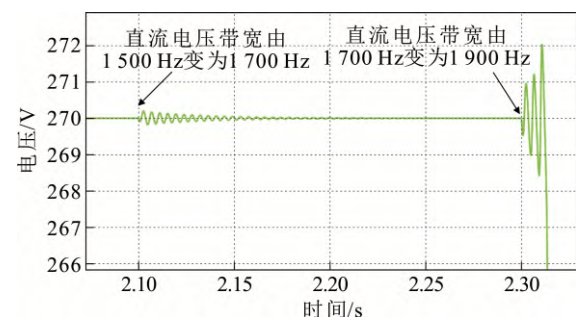


图 18 不同直流电压控制带宽下的直流电压响应

Fig.18 Dc voltage output with varying bandwidth of DC voltage control loop

性分析中, 若忽略 $d-q$ 耦合项进行系统稳定性分析会影响分析结果的准确性, 考虑 $d-q$ 耦合项的系统

稳定性分析更加准确但稳定区域更加狭窄。此外,指出了系统在单位功率因数下 d - q 耦合项的影响可以忽略不计。

2) 在基于系统控制回路模型的稳定性分析中发现,在弱电网条件下,电压控制回路存在两个原点处极点和 RHP 零点为 II 型系统和非最小相位系统, q 轴无功电流控制回路有存在 RHP 极点成为非最小相位系统的情况,且电压控制回路和 q 轴无功电流控制回路失稳工作区域一致。

3) 电压控制回路带宽、恒功率负荷和网侧阻抗的增加会降低系统的幅值裕度与相位裕度,导致系统失稳。同时,系统模型出现 RHP 极点,引发稳定性问题并对系统响应产生影响。

4) 基于不同维度的小信号阻抗模型进行系统稳定性分析,其稳定性判断结果具有一致性,但是幅值裕度和相位裕度存在差异。除单个 VSC 的稳定性三种模型都可以分析外,其他研究情况如 VSC 并联的直流母线稳定性或 VSC 并联的交流母线稳定性等,一般只有一种模型适合研究系统稳定性,且是由其建模端口的特性决定的。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献 References

- [1] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1473-1488.
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1473-1488.
- [2] 年 珩, 杨 军, 陈 亮, 等. 交直流混合供电系统直流侧阻抗建模及稳定性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3477-3487.
NIAN Heng, YANG Jun, CHEN Liang, et al. DC impedance modeling and stability analysis of AC/DC hybrid power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3477-3487.
- [3] WEN B, DONG D, BOROEYEVICH 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.
- [4] 李光辉, 王伟胜, 刘 纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6547-6561.
LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid (Part I): analysis of wideband impedance characteristics and oscillation mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6547-6561.
- [5] 年 珩, 徐韵扬, 陈 亮, 等. 并网逆变器频率耦合特性建模及系统稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1421-1431.
NIAN Heng, XU Yunyang, CHEN Liang, et al. Frequency coupling characteristic modeling of grid-connected inverter and system stability

- analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1421-1431.
- [6] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [7] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [8] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG C, et al. On the equivalence and impact on stability of impedance modeling of power electronic converters in different domains[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1444-1454.
- [9] WEN B, BURGOS R, BOROEYEVICH D, et al. AC stability analysis and dq frame impedance specifications in power-electronics-based distributed power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1455-1465.
- [10] 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 and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1383-1396.
- [11] SHAH S, PARSA L. Impedance modeling of three-phase voltage source converters in DQ, sequence, and phasor domain[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1139-1150.
- [12] 杨超然, 辛焕海, 宫泽旭, 等. 变流器并网系统复电路分析与广义阻抗判据适用性探讨[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4744-4757.
YANG Chaoran, XIN Huanhai, GONG Zexu, et al. Complex circuit analysis and investigation on applicability of generalized-impedance-based stability criterion for grid-connected converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4744-4757.
- [13] YANG D S, WANG X F, LIU F C, et al. Symmetrical PLL for SISO impedance modeling and enhanced stability in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1473-1483.
- [14] ZHANG C, CAI X, MOLINAS M, et al. On the impedance modeling and equivalence of AC/DC-side stability analysis of a grid-tied type-IV wind turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 1000-1009.
- [15] XUE D H, LIU J J, LIU Z, et al. Modeling and analysis of DC terminal impedance of voltage-source converters with different control modes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 5883-5896.
- [16] ZHANG H Y, HARNEFORS L, WANG X F, et al. Stability analysis of grid-connected voltage-source converters using SISO modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8104-8117.
- [17] ZHANG H Y, WANG X F, HARNEFORS L, et al. SISO transfer functions for stability analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2931-2941.
- [18] ZHANG C, CAI X, RYGG A, et al. Sequence domain SISO equivalent models of a grid-tied voltage source converter system for small-signal stability analysis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 741-749.
- [19] 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.
WU Guanglu, ZHOU Xiaoxin, WANG Shanshan, et al. Analytical research on the mechanism of the interaction between PLL and inner current loop when VSC-HVDC connected to weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2622-2633.

- [20] 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): 6169-6182.
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): 6169-6182.
- [21] GAO F, BOZHKO S. Modeling and impedance analysis of a single DC bus-based multiple-source multiple-load electrical power system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(3): 335-346.
- [22] GAO F, BOZHKO S, COSTABEER A, et al. Control design and voltage stability analysis of a droop-controlled electrical power system for more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9271-9281.
- [23] 赵雨童, 高 飞, 张博深. 基于交流电流下垂特性控制的 VSC 建模和稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 50-55.
ZHAO Yutong, GAO Fei, ZHANG Boshen. Modeling and stability analysis of VSC with droop characteristic based on AC current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 50-55.



ZHAO Yutong

赵雨童

1997—, 男, 硕士生

主要从事 VSC 弱连接稳定性和直流微电网系统稳定性方面的研究工作

E-mail: Yutong.zhao@sjtu.edu.cn



GAO Fei

高 飞(通信作者)

1985—, 男, 副教授

主要从事 VSC 弱连接稳定性和直流微电网系统稳定性方面的研究工作

E-mail: fei.gao@sjtu.edu.cn

Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2021-07-06 修回日期 2021-11-02 编辑 陈 蔓

附录 A

交流侧阻抗各元素的解析式为：

$$Z_{dd}^{VSC} = -\frac{U_{do}^s}{I_{do}^s} + (2R_s + sL_s) - \frac{2CsU_{dc0}(R_s + sL_s + H_c(s))}{3H_c(s)H_{dc}(s)I_{do}^s} \tag{A1}$$

$$Z_{dq}^{VSC} = -\frac{(U_{qo}^s - (2R_s + sL_s)I_{qo}^s)}{I_{do}} - \frac{I_{qo}}{I_{do}^2} \left(\frac{sL_s}{H_{pll}(s)(H_c(s) + R_s)} + \frac{1}{H_{pll}(s)} + \frac{2CsU_{dc0}(R_s + sL_s + H_c(s))}{3H_c(s)H_{dc}(s)} \right) \tag{A2}$$

$$Z_{qq}^{VSC} = \frac{sL_s + R_s + H_c(s)}{I_{do}H_{pll}(s)(H_c(s) + R_s)} \tag{A3}$$

附录 B

表 B1 系统主要参数

Table B1 Main system parameters

参数名称	符号	数值/单位
电网电压(峰值)	u_g	100 V
网侧阻抗	L_g	5 mH
	R_g	0.2 Ω
	L_s	1 mH
L 滤波器	R_s	0.1 Ω
	C	3 mF
直流侧电容	P_L	4 000 W
恒功率负载	U_{dc}^{ref}	270 V
直流电压	I_q^{ref}	25 A
q 轴无功电流	K_{pdc}	2
电压外环控制参数	K_{idc}	800
	K_{pc}	10
电流内环控制参数	K_{ic}	10000
	K_{pPLL}	40
锁相环控制参数	K_{iPLL}	4000

表 B2 不同维度模型特性分析

Table B2 Characteristic of impedance model in different dimensional

模型名称	模型特点	适用场景	稳定性判据	优缺点
交流侧阻抗模型	以交流并网点为端口，划分源子系统与荷子系统分别建模，其电流内环模型不是完整的闭环。交流侧多个变换器的端口特性可以通过其阻抗模型的并联获得。	交流母线稳定性分析	广义奈奎斯特判据	便于分析系统 d - q 耦合特性和频率耦合特性，需要 GNC 分析系统稳定性增加工作量，且不适合分析系统零极点问题。
直流侧阻抗模型	以直流并网点为端口，划分源子系统与荷子系统分别建模，其电压外环模型不是完整的闭环。直流侧多个变换器的端口特性可以通过其阻抗模型的并联获得。	直流母线稳定性分析	奈奎斯特判据	为 SISO 模型，基于 NC 即可分析系统稳定性，可以设计幅值裕度和相位裕度，适合研究系统零极点问题。
闭环控制回路开环传递函数	建立所有控制回路中输入参考量与反馈测量的闭环传递函数，通过完整的传递函数研究系统稳定性，缺乏对系统的端口特性的研究。	单个变换器稳定性分析	奈奎斯特判据	能够具体分析系统所有控制回路稳定性，且可设计每个控制回路的幅值裕度及相位裕度，能够研究系统零极点问题。但是，模型数量较多，工作量较大。