# 极弱电网下直驱风电并网变流器小信号建模及 稳定性运行策略分析

刘 芳1,李 研1,何国庆2,李光辉2,刘世权1,刘 威1

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009;2. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:极弱电网下,直驱风电并网变流器各控制环路动态交互、满功率运行会改变并网点电压,导致不能稳定运行。对此,建立了考虑控制延时环节的全阶状态空间小信号模型,并采用特征值分析方法分析系统稳定性。研究表明系统稳定性随电网强度降低呈非线性变化,存在不连续稳定区间,且控制延时对不同振荡模式的阻尼比影响也呈非线性,部分阻尼比变大,部分阻尼比变小;同时,得到了参与电压、电流和锁相环之间交互作用的主导状态/控制变量,其参与度随电网强度减弱而加剧,进一步分析了各控制器参数对系统稳定性的影响规律,拉开控制带宽,避免频带交叠,将有助于提高系统稳定性;通过对比分析直驱风电系统在定交流电压控制和电压下垂控制下的适用性,发现定交流电压控制更适合极弱电网工况。通过MATLAB/Simulink 仿真验证了理论分析的正确性。

# 0 引言

随着风电机组经过电力电子接口大规模并入大 电网,世界各地多次发生与风电机组相关的振荡稳 定性问题<sup>[14]</sup>。直驱永磁系统因其具有无需励磁和 增速齿轮箱、电能质量好等优势,在风电中得到广泛 应用<sup>[5]</sup>,因此有必要对直驱风电系统中可能存在的 稳定性问题进行深入研究。

通常用短路比(SCR)描述电压源型换流器 (VSC)系统与电网的连接程度,将其定义为交流短 路容量与VSC额定容量的比值<sup>[6]</sup>。直驱风电系统可 以向弱交流电网供电,但是SCR减小到一定程度将 可能导致系统失去稳定性[7-8]。建立有效模型是研 究直驱风电系统失稳机理的基础。文献[9-11]提出 了单输入单输出(SISO)传递函数的分析方法,有效 简化了VSC系统建模与稳定性分析过程。文献[9] 针对直驱机组构成的风电场与柔直互联系统建立 SISO传递函数模型,并基于该模型利用奈奎斯特判 据分析系统稳定性问题,但需将系统作为黑箱模型 进行建模。文献[12-13]建立了阻抗模型,进而分析 影响系统稳定性的原因。文献[13]建立了双馈机组 在静止坐标系下的阻抗模型,采用等效 RLC 串联电 路,分析控制器参数以及电网参数对系统稳定性影 响,但阻抗分析法研究源、负荷阻抗的输入与输出特

收稿日期:2021-09-06;修回日期:2022-01-19 在线出版日期:2022-05-05

基金项目:中国电力科学研究院有限公司科技项目 (NYB51202002811)

Project supported by the Science and Technology Program of China Electric Power Research Institute(NYB51202002811) 性,无法揭示系统内部的交互机理。为深入研究弱 电网时并网变流器的失稳机理,很多学者采用了状 态空间小信号模型<sup>[14-16]</sup>,通过特征根分析法进行系 统稳定性判别,利用参与因子计算得到各模态的参 与度<sup>[17]</sup>。文献[14]建立了包括风电场在内的直流系 统小信号模型,提出利用部分直流线路电容简化换 流器直流侧模型推导,但在建模过程中未考虑延时 环节,不能准确反映系统实际运行情况。

弱电网条件下直驱风电系统易存在失稳现象, 明确系统失稳机理为有效控制策略的提出奠定基 础。目前大多研究表明弱电网条件下锁相环(PLL) 与控制环路之间的动态交互是影响直驱风电系统稳 定运行的关键因素<sup>[7,18]</sup>。文献[8]阐明了PLL与电流 内环控制的交互作用的原因,从本质上揭示了影响 VSC系统各控制环节对系统稳定性的机理,为进一 步分析直驱风机经柔直送出互联系统稳定性奠定基 础。文献[16]建立了弱电网下风力发电机组变流器 的小信号模型,阐述了弱电网下 PLL 会与直流电压 外环相互耦合,对其产生滞后作用,从而影响系统稳 定运行,特别是当PLL和直流电压外环带宽接近时 对系统稳定性影响最大。文献[19]利用特征值分析 方法得到PLL控制参数安全域,并由参数安全域中 出现的"峰值点"揭示了PLL与VSC的模式谐振诱发 的强交互是影响系统失稳的关键机理。目前大量文 献着重研究 VSC 系统各控制环路动态交互机理,尚 未明确控制器参数详细的优化方向。由于我国风力 资源和负荷分布的特点,大规模风电经远距离输电 线接入电网,使其与交流电网连接强度较弱[7],并网 变流器采用单位功率因数控制无法使系统满功率稳

定运行,亟需改进现有控制策略,很多学者采用无功 功率控制加以无功补偿,但目前较少文献涉及系统 采用不同无功类控制时小信号稳定性的对比研究。

针对以上问题,本文建立了考虑控制延时环节 的直驱风电并网变流器系统全阶状态空间小信号模 型,采用特征值分析方法,将其与不考虑控制延时环 节的系统稳定性进行对比分析;并探究了参与控制 环路交互作用的主导状态 / 控制变量,进一步分析 了控制器参数对系统稳定性的影响规律;同时,针对 极弱电网下单位功率因数控制不能使系统满功率稳 定运行的问题,对比分析了2种无功类控制的有效 性;最后,通过时域仿真对分析结果进行验证。

# 1 直驱风电系统拓扑结构及其控制

直驱风电系统拓扑结构中:机侧变流器 K<sub>1</sub>由变 流器模组 K<sub>11</sub>、K<sub>12</sub>直流侧并联,交流侧串接电感后并 联得到; 网侧变流器 K<sub>2</sub>由变流器模组 K<sub>21</sub>、K<sub>22</sub>直流侧 并联,交流侧串接电感后并联得到。具体等效电路 结构见附录 A 图 A1。根据直驱风电系统的特点,本 文主要研究在极弱电网下网侧变流器的运行特性。 网侧变流器采用定直流母线电压的双环控制策略, 外环采用直流电压外环,内环采用基于桥臂侧电流 反馈的电流控制内环,其控制框图见附录 A 图 A2。

# 2 小信号模型

当建立小信号模型时,将直驱风机并网变流器 系统分成如下部分建模:PLL模型、网侧变流器及控 制模型、控制延时环节模型、机侧/网侧变流器间直 流环节模型、网侧滤波器模型和电网接口模型。

#### 2.1 PLL模型

本文采用单同步旋转坐标系的PLL保证控制系统与电网电压同步。单同步旋转坐标系的PLL控制框图如附录A图A3所示,其数学模型如下:

$$\begin{cases} \omega = K_{\text{ppll}} (0 - u_{gq}) + u_{gq_{\text{int}}} + \omega_{s} \\ du_{gq_{\text{int}}} / dt = K_{\text{ipll}} (0 - u_{gq}) \\ d\delta / dt = \omega_{s} - \omega \end{cases}$$
(1)

式中: $\omega$ 为PLL得到的电网角频率; $K_{ppl}$ 、 $K_{ipl}$ 分别为PLL比例系数、积分系数; $u_{gg_{int}}$ 为PLL控制的积分项输出; $\omega_s$ 为电网参考角频率; $\delta$ 为通过PLL得到的角度与电网角度的偏差角度; $u_{gg}$ 为并网点电压 $u_{grid}$ 的q轴分量。将式(1)线性化可得其小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta \omega = K_{\text{ppll}} (0 - \Delta u_{gq}) + \Delta u_{gq_{\text{int}}} \\ d\Delta u_{gq_{\text{int}}} / dt = K_{\text{ipll}} (0 - \Delta u_{gq}) \\ d\Delta \delta / dt = -\Delta \omega \end{cases}$$
(2)

式中:"Δ"表示各电气量的小信号分量,后同。

# 2.2 网侧变流器及控制模型

网侧变流器采用电压电流双闭环控制,能稳定

直流母线电压、提高系统响应速度,其控制方程为:

$$\begin{vmatrix} i_{dref} = -\left\lfloor K_{up} \left( U_{deref} - \frac{U_{de}}{U_{base}} \right) + U_{errd\_int} \right\rfloor \frac{dU_{errd\_int}}{dt} = \\ K_{ui} \left( U_{deref} - U_{de} / U_{base} \right) \\ i_{qref} = 0 \\ u_{d}^{*} = \left[ K_{ip} \left( i_{dref} - \frac{i_{od}}{I_{base}} \right) + i_{errd\_int} \right] U_{base} \frac{di_{errd\_int}}{dt} = \\ K_{ii} \left( i_{dref} - i_{od} / I_{base} \right) \\ u_{q}^{*} = \left[ K_{ip} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \right] U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \right] U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \right] U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{base}} \right) + i_{errq\_int} \left[ U_{base} \frac{di_{errq\_int}}{dt} \right] = \\ K_{ii} \left( i_{qref} - \frac{i_{oq}}{I_{b$$

式中: $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$ 分别为电流内环 $d_{q}$ 轴给定值; $K_{up}$ 、 $K_{ui}$ 分别为电压控制环比例、积分系数; $U_{errd_{int}}$ 为电压控制环的积分项输出d轴分量; $U_{dcref}$ 为直流电压外环给定值; $U_{dc}$ 为直流电压; $U_{base}$ 为电压基准值; $K_{ip}$ 、 $K_{ii}$ 分别为电流控制环的比例、积分系数; $i_{errd_{int}}$ 、 $i_{errg_{int}}$ 分别为 网侧变流器电流控制环的积分项 $d_{q}$ 轴分量; $u_{d}^{*}$ 、 $u_{q}^{*}$ 分别为电流内环输出的 $d_{q}$ 轴分量; $i_{od}$ 、 $i_{oq}$ 分别为标 臂输出电流的 $d_{q}$ 轴分量; $I_{base}$ 为电流基准值。将式 (3)线性化可得其小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta i_{dref} = -\left[K_{up}\left(\Delta U_{dcref} - \frac{\Delta U_{de}}{U_{base}}\right) + \Delta U_{errd\_int}\right] \frac{d\Delta U_{errd\_int}}{dt} = \\ K_{ui}\left(\Delta U_{dcref} - \Delta U_{de}/U_{base}\right) \\ \Delta i_{qref} = 0 \\ \Delta u_{d}^{*} = \left[K_{ip}\left(\Delta i_{dref} - \frac{\Delta i_{od}}{I_{base}}\right) + \Delta i_{errd\_int}\right] U_{base} \frac{d\Delta i_{errd\_int}}{dt} = \end{cases}$$
(4)  
$$K_{ii}\left(\Delta i_{dref} - \Delta i_{od}/I_{base}\right) \\ \Delta u_{q}^{*} = \left[K_{ip}\left(\Delta i_{qref} - \frac{\Delta i_{oq}}{I_{base}}\right) + \Delta i_{errq\_int}\right] U_{base} \frac{d\Delta i_{errq\_int}}{dt} = \\ K_{ii}\left(\Delta i_{qref} - \Delta i_{oq}/I_{base}\right) \end{cases}$$

# 2.3 控制延时环节模型

对于数字控制系统,电流控制环得到的调制信号进行空间矢量脉宽调制(SVPWM)加载过程,以及电感电流的采样过程均存在纯延时环节。本文借助4阶Pade近似公式来模拟SVPWM过程带来的控制延时,其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}x_{1}}{\mathrm{d}t} = a_{11}x_{1} + a_{12}x_{2} + a_{13}x_{3} + a_{14}x_{4} + b_{1}u \\ \frac{\mathrm{d}x_{2}}{\mathrm{d}t} = a_{21}x_{1} + a_{22}x_{2} + a_{23}x_{2} + a_{24}x_{4} + b_{2}u \\ \frac{\mathrm{d}x_{3}}{\mathrm{d}t} = a_{31}x_{1} + a_{32}x_{2} + a_{33}x_{3} + a_{34}x_{4} + b_{3}u \\ \frac{\mathrm{d}x_{4}}{\mathrm{d}t} = a_{41}x_{1} + a_{42}x_{2} + a_{43}x_{3} + a_{44}x_{4} + b_{4}u \\ y = c_{1}x_{1} + c_{2}x_{2} + c_{3}x_{3} + c_{4}x_{4} + d_{0}u \end{cases}$$
(5)

式中: $x_1 - x_4$ 为延时环节相关变量;u为控制延时环 节输入变量,即 $u_a^*$ 、 $u_q^*$ ;y为控制延时环节输出变量, 即 $u_a$ 、 $u_q$ ;系数 $a_{11} - a_{44}$ 、 $b_1 - b_4$ 、 $c_1 - c_4$ 和 $d_0$ 具体数值 见附录A表A1。将式(5)线性化可以得其小信号模 型为:

$$\frac{d\Delta x_{1}}{dt} = a_{11}\Delta x_{1} + a_{12}\Delta x_{2} + a_{13}\Delta x_{3} + a_{14}\Delta x_{4} + b_{1}\Delta u$$

$$\frac{d\Delta x_{2}}{dt} = a_{21}\Delta x_{1} + a_{22}\Delta x_{2} + a_{23}\Delta x_{2} + a_{24}\Delta x_{4} + b_{2}\Delta u$$

$$\frac{d\Delta x_{3}}{dt} = a_{31}\Delta x_{1} + a_{32}\Delta x_{2} + a_{33}\Delta x_{3} + a_{34}\Delta x_{4} + b_{3}\Delta u$$

$$\frac{d\Delta x_{4}}{dt} = a_{41}\Delta x_{1} + a_{42}\Delta x_{2} + a_{43}\Delta x_{3} + a_{44}\Delta x_{4} + b_{4}\Delta u$$

$$\Delta y = c_{1}\Delta x_{1} + c_{2}\Delta x_{2} + c_{3}\Delta x_{3} + c_{4}\Delta x_{4} + d_{0}\Delta u$$
(6)

#### 2.4 机侧 / 网侧变流器间直流环节模型

对于机侧变流器,在忽略功率消耗和线路损耗的情况下,由功率守恒原理可知:

$$P_{\rm dck2} = U_{\rm dc} i_{\rm dckd} \tag{7}$$

式中:P<sub>dek2</sub>(k=1,2)为模组K<sub>1k</sub>向中间直流侧输送的功 率;*i<sub>acdd</sub>*为模组K<sub>1k</sub>机侧输出电流*d*轴分量。对于网侧 变流器,在忽略功率消耗和线路损耗的情况下,根据 功率守恒原理可知:

$$P_{dck1} = 1.5(u_{cd}i_{Lkd} + u_{cq}i_{Lkq})$$
(8)

式中: $P_{dck1}$ 为 $K_{2k}$ 向电网输送的功率; $u_{cd}$ 、 $u_{cq}$ 分别为滤波 电容电压的d、q轴分量; $i_{Lkd}$ 、 $i_{Lkq}$ 分别为 $K_{2k}$ 桥臂侧输出 电流d、q轴分量。直流侧电容 $C_{dc}$ 流过的功率为:

$$C_{dc}U_{dc}dU_{dc}/dt = P_{dck2} - P_{dck1}$$
(9)  
 $\Re$ T(7)—(9)线性化可得其小信号模型如下:  

$$\begin{cases} \Delta P_{dck2} = \Delta U_{dc}i^{0}_{dckd} + U^{0}_{dc}\Delta i_{dckd} \\ \Delta P_{dck1} = 1.5(\Delta u_{cd}i^{0}_{Lkd} + u^{0}_{cd}\Delta i_{Lkd} + \Delta u_{cq}i^{0}_{Lkq} + u^{0}_{cq}\Delta i_{Lkq}) \\ C_{dc}\frac{d\Delta U_{dc}}{dt} = \frac{1}{\Delta U_{dc}} (P^{0}_{dck2} - P^{0}_{dck1}) + \frac{1}{U^{0}_{dc}} (\Delta P_{dck2} - \Delta P_{dck1})$$
(10)

式中:上标"0"表示该变量对应的稳态值,后同。 2.5 网侧滤波器模型

LC滤波器的数学模型如式(11)所示。

$$\frac{di_{L1d}}{dt} = \frac{1}{L_{1}} \left( u_{d} - u_{cd} - R_{1}i_{L1d} + \omega L_{1}i_{L1q} \right)$$

$$\frac{di_{L1q}}{dt} = \frac{1}{L_{1}} \left( u_{q} - u_{cq} - R_{1}i_{L1q} - \omega L_{1}i_{L1d} \right)$$

$$\frac{di_{L2d}}{dt} = \frac{1}{L_{2}} \left( u_{d1} - u_{cd} - R_{2}i_{L2d} + \omega L_{2}i_{L2q} \right)$$

$$\frac{di_{L2q}}{dt} = \frac{1}{L_{2}} \left( u_{q1} - u_{cq} - R_{2}i_{L2q} - \omega L_{2}i_{L2d} \right)$$

$$\frac{du_{cd}}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_{od} - i_{gd} + \omega C u_{cq} \right)$$

$$\frac{du_{cq}}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_{oq} - i_{gq} - \omega C u_{cd} \right)$$

式中:C为滤波电容; $L_k$ 为模组 $K_{2k}$ 桥臂侧电感; $R_k$ 为 寄生电阻; $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$ 分别为并网点电流 $i_{grid}$ 的d、q轴分量。 将式(11)线性化可得其小信号模型为:

$$\left\{ \frac{d\Delta i_{L1d}}{dt} = \frac{1}{L_{1}} \left( \Delta u_{d} - \Delta u_{cd} - R_{1} \Delta i_{L1d} + \Delta \omega L_{1} i_{L1q}^{0} + \omega^{0} L_{1} \Delta i_{L1q} \right) \\ \frac{d\Delta i_{L1q}}{dt} = \frac{1}{L_{1}} \left( \Delta u_{q} - \Delta u_{cq} - R_{1} \Delta i_{L1q} - \Delta \omega L_{1} i_{L1d}^{0} - \omega^{0} L_{1} \Delta i_{L1d} \right) \\ \frac{d\Delta i_{L2d}}{dt} = \frac{1}{L_{2}} \left( \Delta u_{d1} - \Delta u_{cd} - R_{2} \Delta i_{L2d} + \Delta \omega L_{2} i_{L2q}^{0} + \omega^{0} L_{2} \Delta i_{L2q} \right) \\ \frac{d\Delta i_{L2d}}{dt} = \frac{1}{L_{2}} \left( \Delta u_{q1} - \Delta u_{cq} - R_{2} \Delta i_{L2q} - \Delta \omega L_{2} i_{L2q}^{0} - \omega^{0} L_{2} \Delta i_{L2q} \right) \\ \frac{d\Delta i_{L2q}}{dt} = \frac{1}{L_{2}} \left( \Delta i_{oq} - \Delta i_{eq} - R_{2} \Delta i_{L2q} - \Delta \omega L_{2} i_{L2d}^{0} - \omega^{0} L_{2} \Delta i_{L2d} \right) \\ \frac{d\Delta u_{cq}}{dt} = \frac{1}{C} \left( \Delta i_{oq} - \Delta i_{gq} + \Delta \omega C u_{cq}^{0} + \omega^{0} C \Delta u_{cq} \right) \\ \frac{d\Delta u_{cq}}{dt} = \frac{1}{C} \left( \Delta i_{oq} - \Delta i_{gq} - \Delta \omega C u_{cq}^{0} - \omega^{0} C \Delta u_{cq} \right)$$

$$(12)$$

# 2.6 电网接口模型

为实现在不同强弱电网下风机变流器的灵活切换,本文采用在理想电网和并网点之间串联等值阻抗来模拟系统在不同短路比下的情况。电网回路在 dq坐标系下的数学模型如式(13)所示。

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}i_{gd}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L_{g}} \left( u_{cd} - e_{d} - R_{g}i_{gd} + \omega L_{g}i_{gq} \right) \\ \frac{\mathrm{d}i_{gq}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L_{g}} \left( u_{cq} - e_{q} - R_{g}i_{gq} - \omega L_{g}i_{gd} \right) \\ e_{d} = U_{m}\cos\delta \\ e_{q} = U_{m}\sin\delta \end{cases}$$
(13)

式中: $U_m$ 为电网相电压幅值; $e_d$ 、 $e_q$ 分别为电网电压 d、q轴分量; $L_s$ 为电网电感。将式(13)线性化可得其 小信号模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta i_{gd}}{dt} = \frac{1}{L_g} \left( \Delta u_{cd} - \Delta e_d - R_g \Delta i_{gd} + \Delta \omega L_g i_{gg}^0 + \omega^0 L_g \Delta i_{gq} \right) \\ \frac{d\Delta i_{gg}}{dt} = \frac{1}{L_g} \left( \Delta u_{cq} - \Delta e_q - R_g \Delta i_{gq} - \Delta \omega L_g i_{gd}^0 - \omega^0 L_g \Delta i_{gd} \right) \\ \Delta e_d = -U_m \Delta \delta \sin \delta^0 \\ \Delta e_q = U_m \Delta \delta \cos \delta^0 \end{cases}$$
(14)

综上所述,可定义22个状态变量向量  $x=[U_{errd_int}, i_{errd_int}, i_{L1d}, i_{L1d}, i_{L2d}, i_{L2q}, u_{ed}, u_{eq}, i_{gd}, i_{gq}, u_{gq_int}, \delta, U_{de}, x_{1d}, x_{1q}, x_{2d}, x_{2q}, x_{3d}, x_{4d}, x_{4q}],其中 x_{1d}, x_{1q}, x_{2d}, x_{2q}, x_{3d}, x_{3q}, x_{4d}, x_{4q}],其中 x_{1d}, x_{1q}, x_{2d}, x_{2q}, x_{3d}, x_{3q}, x_{4d}, x_{4q}]$ ,(4)、(6)、(10)、(14)得到  $\Delta \dot{x} = A \Delta x$ ,利用 MATLAB 可 直接计算出状态矩阵  $A_{\circ}$ 

# 3 极弱电网下直驱风电系统小信号模型稳定 性分析

为了验证和分析极弱电网下直驱风电并网变流

器的小信号稳定性特性,本文在MATLAB/Simulink 平台中搭建了仿真模型,直驱风电系统网侧变流器 容量为4.5 MW,其硬件参数见附录B表B1。借助仿 真模型获得状态变量的稳态运行工作点并据此计算 出系统状态矩阵的特征根。

#### 3.1 电网强度变化时系统不连续稳定区间分析

电网强度 SCR 由1变化至919.745时,不考虑控制延时和考虑控制延时系统特征根的变化规律分别见附录 B 图 B1、B2。从图中可知,不考虑控制延时环节的直驱风电系统始终保持稳定,而考虑控制延时环节的系统稳定性发生了改变,其变化情况如附录 B 表 B2 所示。由表可知,系统存在不连续稳定区间,当电网强度 SCR 由 919.75变化至27.04和由1.75变化至1时系统不稳定,当 SCR 由 27.04变化至1.75时系统稳定,即系统存在非线性。

#### 3.2 有无考虑控制延时的系统振荡模式对比分析

为进一步研究控制延时对不同振荡模式的阻尼 比影响,分析同一电网强度下,不考虑和考虑控制延 时的直驱风电系统主要特征根、相应振荡模式的阻 尼比和主要参与变量,具体结果见附录B表B3、B4。 由表可知,系统存在3类频段的振荡模式:第1类振 荡模式的振荡频率集中在50 Hz以下,记为频带 I 振荡模式;第2类集中在[50,300] Hz范围内,记为 频带Ⅱ振荡模式;第3类集中在300 Hz以上,记为频 带Ⅲ振荡模式。考虑控制延时的系统多了3个振 荡模式,均与延时环节相对应,其中2个集中在频带 Ⅲ,振荡频率分别为1621.35 Hz 和1599.18 Hz,另 外1个分布在频带 [,振荡频率为9.23 Hz。此外,延 时环节会改变振荡模式的阻尼比。在频带 I 中, 11.13 Hz 振荡模式的阻尼比减小;在频带 II 中, 59.60 Hz振荡模式的阻尼比减小;在频带Ⅲ中,有2 个振荡模式与滤波器相关,其中1278.51 Hz振荡模式 的阻尼比减小,1378.14 Hz振荡模式的阻尼比变大。

综上所述,考虑控制延时的系统会产生新的振 荡模式,同时对不同振荡模式的阻尼比影响呈非线 性特点,部分阻尼比变大,部分阻尼比变小,因此在 小信号建模时需加以考虑。

# 3.3 电网强度变化时控制环路间交互作用分析

附录 B 表 B5 列写了电网强度变化(SCR 由 3 变 化至1)时,与电压环、电流环和 PLL 相关的振荡模式 的参与变量及其参与因子的变化规律。由表可知: 在13.18 Hz 振荡模式下,电压环的直流侧电压、电流 环的积分变量参与因子值均较大;同理,在1.64 Hz 振荡模式下,PLL角度、电流环积分变量参与因子值 均较大,且随着电网强度的减弱,这4个参与因子值 均增加,表明控制环路之间的交互作用进一步加剧。 3.4 直驱风电系统中各控制器参数对系统稳定性 影响规律

根据3.3节分析,控制环路间交互作用随电网强

度减弱而加剧,为解决交互作用影响系统稳定性的问题,本节研究极弱电网(SCR为1.5)条件下各控制器参数对系统稳定性的影响规律。

不同电压电流控制环比例系数下系统特征值的 变化情况如附录B图B3所示。由图B3(a)可知,当 其他控制器参数保持不变,取 $K_{up}$ =4时,系统存在不 稳定的低频振荡模式,随着 $K_{up}$ 增大,该低频振荡模 式逐渐向虚轴左侧运动并穿越虚轴回到稳定区域。 同理,由图B3(b)可知,当其他控制器参数不变时, 随着 $K_{ip}$ 增大,不稳定特征值逐渐向虚轴左侧运动, 实部由正值变为负值。由图B3(c)可知,当PLL控 制器参数不变, $K_{up}$ =4且 $K_{ip}$ =0.03时,系统存在虚轴右 侧特征根,系统不稳定,随着 $K_{up}$ 、 $K_{ip}$ 的同时增大,该 不稳定特征值逐渐向虚轴左侧移动并穿越虚轴回到 稳定区域,从而使得直驱系统恢复稳定。由此可见, 极弱电网下,在一定范围内,适当增加电压外环或电 流环的比例系数可提高系数稳定性。

不同PLL比例系数下系统特征根的运动轨迹如 附录B图B4所示。由图可知,当 $K_{ppl}$ 较大时,系统处 于失稳状态,随着 $K_{ppl}$ 减小,系统特征根逐渐向虚轴 左侧运动并穿越虚轴回到稳定区域。由此可知,在 极弱电网下,当电压外环和电流环控制器参数不变 时,适当减小PLL的 $K_{ppl}$ ,降低PLL的带宽,有利于提 高系统的稳定性。

综上所述,根据控制器参数对系统稳定性影响 规律,合理调节控制器参数,进而拉开带宽,避免频 带交叠,有助于提高系统在极弱电网下的稳定性。

# 3.5 不同功率因数下并网变流器极弱电网运行稳 定性对比分析

在极弱电网下,直驱风电系统电网阻抗较大,直 驱风机系统在满功率并网运行时通常会产生失稳问 题。图1对比在SCR为1.5时,有功功率P=3 MW和 P=4.5 MW 2种情况下,直驱风机并网变流器系统的 特征根分布情况。由图1可知,当P=3 MW时,系统 特征根均分布在虚轴左侧,表明系统在此功率指令 下能够稳定运行。但是当P=4.5 MW时,系统存在位 于虚轴右半平面的不稳定振荡模式,这表明直驱风 机并网变流器此时发出的功率受限,不能够实现在 SCR为1.5条件下的满功率运行。



#### 图1 不同功率因数下并网变流器特征根分布

Fig.1 Characteristic root distribution of grid connected converters under different power factors

# 3.6 不同无功类控制下直驱风电系统满功率运行 对比分析

为满足直驱风机并网系统在极弱电网下也能够 满功率稳定运行,并网变流器必须加入无功类控制 对无功功率加以补偿。本节就直驱风电系统在定交 流电压控制和电压下垂控制下的适用性进行研究。 其中,电压下垂控制方程为:

$$i_{aref} = a_1 \Delta U + a_0 \tag{15}$$

式中: $a_1$ 为电压下垂控制比例系数; $\Delta U$ 为并网点电 压降落,即 $\Delta U=U_m-U_g$ , $U_g$ 为并网点相电压幅值; $a_0$ 为 电压下垂控制常系数,所述电压下垂控制常系数 $a_0$ 为 $\Delta U=0$ 时所需的无功电流。

为比较不同无功类控制下直驱风电并网变流器 稳定性差异,分别建立系统在定交流电压控制和电压 下垂控制下考虑延时环节的小信号模型,控制框图见 附录B图B5。在3.5节同一组控制器参数基础上,利 用特征根分析方法分析小信号稳定性。图2、3分别 给出了电网强度SCR为5、1.5下,网侧变流器采用不 同无功类控制时,直驱风电系统特征根分布情况。





由图2可见,当SCR为5时,系统特征根均位于 虚轴左平面,系统皆能满功率稳定运行,说明在强电 网条件下这2种控制策略均有效。由图3可见,当 SCR为1.5时,网侧变流器采用定交流电压控制,系统 特征根均位于虚轴的左侧,但采用电压下垂控制时, 出现虚轴右半平面特征根,系统不稳定,说明定交流 电压控制较电压下垂控制更适合极弱电网工况。

# 4 仿真验证

为验证本文所推导的小信号模型和稳定性运 行策略分析的有效性,本节按照图A1所示的直驱 风电系统拓扑结构与表 B1 所示的硬件参数搭建 MATLAB / Simulink模型。

# 4.1 直驱风电系统不连续稳定区间的仿真验证

当发电机发出4.5 MW 功率时,分别验证电网强 度 SCR 为90、3和1.5 下系统的稳定性,如图4所示。 当 SCR 为90时,系统并网点电压和电流波形都有较 大程度的谐波和畸变,尤其是电流波形,此时系统不 能稳定运行,如图4(a)所示;当 SCR 为3时,并网点 电压和电流波形输出良好,系统稳定运行,如图4 (b)所示;当 SCR 为1.5时,并网点电压有较大幅度的 振荡,电流增大且产生畸变,系统不能稳定运行,如 图4(c)所示。这与3.1节分析给出的不连续稳定区 间规律对应,从而验证了系统稳定性呈非线性不连 续的特点,说明考虑控制延时环节的小信号模型更 加精确。





# 4.2 控制器参数对系统稳定性影响的仿真验证

当发电机输出 3 MW 功率时, 在极弱电网(SCR 为 1.5)下进行控制器参数对比分析验证。当控制器 参数 $K_{up}$ =2.5、 $K_{ui}$ =5、 $K_{ip}$ =0.1、 $K_{ii}$ =25、 $K_{ppl}$ =10、 $K_{ipl}$ =1.6时, 直驱风电系统的仿真波形如附录 C图 C1 所示。从图中可知, 此时直流侧电压波动较大, 并网点电压 和电流波形也出现振荡, 系统不能稳定运行。

根据3.4节各控制器参数对系统稳定性影响规

第 42 卷

律,适当增大电压环、电流环比例系数并减小PLL比例系数(K<sub>up</sub>=4.5、K<sub>ui</sub>=5、K<sub>ip</sub>=0.8、K<sub>i</sub>=25、K<sub>ppl</sub>=5、K<sub>ipl</sub>=1.6),进而拉开控制器带宽,防止频带交叠,得到系统的仿真波形,如附录C图C2所示。由图可知,直流侧电压保持稳定,并且并网点电压、电流谐波较小,满足并网要求,同时网侧变流器也能够输出3 MW有功功率。这与3.4节的分析结论相符,从而验证了控制器参数对直驱风电系统稳定性影响规律的有效性。4.3 不同无功类控制下直驱风电系统满功率运行对比的仿真验证

当发电机输出4.5 MW 功率时,合理调整控制器 参数避免频带交叠,在极弱电网(SCR为1.5)下进行 无功类控制对比分析验证,结果如附录C图C3、C4 所示。由图C3可知,当网侧变流器采用定交流电压 控制时,直流侧电压维持在1800 V左右,网侧变流 器满功率输出,同时并网点电压、电流保持稳定,这 说明该无功补偿方式能够适用于极弱电网的工况。 由图C4可知,当网侧变流器采用电压下垂控制时, 直流侧电压失稳,同时并网点电压、电流均产生畸 变,不能满足并网要求,这说明极弱电网下采用该控 制策略不能使直驱风电系统满功率稳定运行。

综上所述,直驱风电并网变流器采用定交流电 压控制较电压下垂控制更适合极弱电网的工况,能 使系统满功率稳定运行,这与3.6节理论分析相符。

# 5 结论

本文建立了考虑控制延时环节的直驱风电系统 全阶状态空间小信号模型,采用特征值分析方法进 行极弱电网下系统的小信号稳定性分析,并进行了 相应的仿真验证,得出以下结论。

1)系统稳定性随电网强度降低呈非线性变化, 存在不连续稳定区间,且控制延时对不同振荡模式 的阻尼比影响也呈非线性,部分阻尼比变大,部分阻 尼比变小,因此考虑控制延时环节在建立全阶状态 空间小信号模型时是非常必要的。

2)电压环的直流侧电压、PLL的角度和电流环 的积分变量均参与控制环路间交互作用,其参与度 随着电网强度减弱而加剧,根据控制器参数对系统 稳定性的影响规律,合理调整控制器参数,进而拉开 控制带宽,避免频带交叠,有助于提高系统稳定性。

3)极弱电网下并网点电压极易不稳定,直驱风 电系统不能满功率稳定运行,需加入无功补偿。定 交流电压控制较电压下垂控制的无功补偿方式更适 合极弱电网的工况,能保证并网点电压稳定且系统 满功率运行。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

# 参考文献:

[1] 周彦彤,郝丽丽,王昊昊,等. 大容量风电场柔直并网系统的

送 / 受端次同步振荡分析与抑制[J]. 电力自动化设备,2020, 40(3):100-106.

ZHOU Yantong, HAO Lili, WANG Haohao, et al. Analysis and suppression of SSO at sending/receiving end in VSC-HVDC system connected large-capacity wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):100-106.

- [2]郑超,张鑫,吕盼,等. VSC-HVDC与弱交流电网混联系统大扰 动行为机理及稳定控制[J].中国电机工程学报,2019,39(3): 629-641,943.
   ZHENG Chao,ZHANG Xin,LÜ Pan, et al. Study on the large disturbance behavior mechanism and stability control strategy for VSC-HVDC and weak AC hybrid system[J]. Proceedings
- of the CSEE,2019,39(3):629-641,943. [3] 薛安成,王子哲,吴雨,等. 次同步扰动下并网电压源换流器电 气量的频率分布及其幅值特性[J]. 电力自动化设备,2019,39 (3):23-29. XUE Ancheng,WANG Zizhe,WU Yu, et al. Frequency distri-

AUE Ancheng, WANG Zizne, WU Tu, et al. Frequency distribution and amplitude characteristic of electric flux for gridconnected voltage source converter under subsynchronous disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(3): 23-29.

- [4] LIU H,XIE X,HE J,et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks
   [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4708-4720.
- [5] 吴汪平,楚皓翔,解大,等. PI控制器参数对并网永磁直驱型风 力发电系统机网相互作用的影响[J]. 电力自动化设备,2017, 37(10):21-28.
  WU Wangping,CHU Haoxiang,XIE Da,et al. Influence of PI controllers' parameters on machine-network interaction of gridconnected PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):21-28.
- [6] HUANG Y,YUAN X,HU J,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.
- [7] 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,

Hons [J]. Froceedings of the CSEE, 2018, 38(0):1393-1004, 1895.
[8] 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. Analyti-

cal 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): 2622-2633,2830.

- [9] 王一凡,赵成勇,郭春义. 直驱风电场与柔直互联系统的传递 函数模型及其低频振荡稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(5):1485-1498.
   WANG Yifan,ZHAO Chengyong,GUO Chunyi. Transfer function model and low-frequency stability analysis for PMSGbased wind farm interconnected with flexible-HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(5):1485-1498.
- [10] ZHANG H, LENNART H, WANG X, et al. Stability analysis of grid-connected voltage-source converters using SISO modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8104-8117.
- [11] ZHANG H, WANG X, 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.

[12] 刘威,谢小荣,王衡,等.基于频率耦合阻抗模型的并网变流器全工况小信号稳定性分析[J].中国电机工程学报,2020,40 (22):7212-7221.
 LIU Wei,XIE Xiaorong, WANG Heng, et al. Frequency-cou-

LIU wei, XIE Xiaorong, WANG Heng, et al. Frequency-coupled impedance model-based small-signal stability analysis of grid-tied converters under all operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22):7212-7221.

 [13] 张学广,邱望明,方冉,等.双馈风电机组静止坐标系下阻抗建 模及次同步谐振抑制策略[J].电力系统自动化,2019,43(6): 41-48,106.
 ZHANG Xueguang, QIU Wangming, FANG Ran, et al. Impe-

dance modeling and sub-synchronous resonance mitigation strategy of DFIG based wind turbine in static reference frame [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6):41-48,106.

- [14] 时帅,安鹏,符杨,等. 含风电场的多端柔性直流输电系统小信号建模方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(10):92-102.
   SHI Shuai, AN Peng, FU Yang, et al. Small signal modeling method for multi-terminal flexible DC transmission system with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(10):92-102.
- [15] LI Y, FAN L, MIAO Z. Wind in weak grids: low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 109-118.
- [16] 黄云辉,翟雪冰,刘栋,等.弱电网下风力发电机组并网变流器 直流电压稳定性机理分析[J].高电压技术,2017,43(9):3127-3136.
  HUANG Yunhui, ZHAI Xuebing, LIU Dong, et al. Stability analysis on DC-link voltage of wind turbine grid-connected

analysis on DC-link voltage of wind turbine grid-connected converter as integrated to weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3127-3136.

- [17] 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.
- [18] YUAN H, YUAN X, HU J. 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.
- [19] 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.

#### 作者简介:



刘 芳(1980—),女,副教授,博士,主要 研究方向为新能源并网发电技术、分布式电 源及微电网控制技术、中低压直流变压器及 其控制技术(E-mail:fragcelau@hfut.edu.cn); 李 研(1997—),女,硕士研究生,主要 研究方向为新能源并网稳定性分析(E-mail: 1804843677@qq.com);

何国庆(1981—),男,教授级高级工程 师,博士,主要研究方向为新能源并网稳定

性分析与控制(E-mail:heguoqing@epri.sgcc.com.cn)。 (编辑 王欣竹)

# Small signal modeling and stable operation strategy analysis of direct drive wind power grid-connected converter in extremely weak power grid

LIU Fang<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, HE Guoqing<sup>2</sup>, LI Guanghui<sup>2</sup>, LIU Shiquan<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the extremely weak power grid, the dynamic interaction of the control loops of the direct drive wind power grid-connected converter and full power operation will change the grid-connected point voltage, resulting in unstable operation. In this regard, a full-order state space small signal model considering control delay is established, and the eigenvalue analysis method is used to analyze the system stability. The research shows that the system stability changes nonlinearly with the decrease of power grid strength, and there exist discontinuous stable regions. Moreover, the control delay has a non-linear effect on the damping ratio of different oscillation modes, some damping ratios become larger, while some damping ratios become smaller. At the same time, the dominant state / control variable participating in the interaction between voltage, current and phase-locked loop is obtained, and their participation increases with the decrease of power grid strength. The influence principal of each controller parameter on the system stability is further analyzed, and it will be helpful to improve the system stability to undraw the control bandwidth and avoid frequency band overlap. By comparing and analyzing the applicability of direct drive wind power system under constant AC voltage control and voltage droop control, it is found that constant AC voltage control is more suitable for the working conditions of extremely weak grid. The correctness of the theoretical analysis is verified by MATLAB / Simulink simulation.

Key words: extremely weak power grid; direct drive wind power grid-connected converter; full-order state space small signal model; control delay; discontinuous stable regions



 注: E<sub>a</sub>、E<sub>b</sub>、E<sub>c</sub>为电网电压; L<sub>g</sub>为电网电感, R<sub>g</sub>为电网电阻,用来模拟电网 阻抗; C为滤波电容; L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>分别为模组 K<sub>21</sub>、K<sub>22</sub>桥臂侧电感; R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 为寄生电阻; C<sub>dc</sub>为直流母线电容; L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub>分别为模组 K<sub>11</sub>、K<sub>12</sub>桥臂侧 电感; C<sub>1</sub>为滤波电容; R 为其寄生电阻; M 为永磁同步电机及风力机等 效模型; i<sub>dc1</sub>、i<sub>dc2</sub>分别为模组 K<sub>11</sub>、K<sub>12</sub>机侧输出电流。
 图 A1 直驱风电系统拓扑结构





注: *i*<sub>L1</sub>。*i*<sub>L1</sub>b、*i*<sub>L1</sub>b、*k*<sub>L1</sub>b、*k*<sub>L2</sub>b, *k*<sub>L2</sub>b, *k*<sub></sub>

Fig.A2 Control block diagram of grid-side converter



#### 图 A3 PLL 控制框图

Fig.A3Control block diagram of PLL表 A1控制延时环节各矩阵系数

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
<i>a</i> <sub>11</sub>	$-2.67 \times 10^4$	<i>a</i> <sub>12</sub>	$-1.95 \times 10^4$	<i>a</i> <sub>13</sub>	$-1.48 \times 10^{4}$	$a_{14}$	$-4.83 \times 10^{3}$
$a_{21}$	$1.64 \times 10^{4}$	<i>a</i> <sub>22</sub>	0	<i>a</i> <sub>23</sub>	0	$a_{24}$	0
<i>a</i> <sub>31</sub>	0	<i>a</i> <sub>32</sub>	$8.19 \times 10^{3}$	<i>a</i> <sub>33</sub>	0	<i>a</i> <sub>34</sub>	0
$a_{41}$	0	<i>a</i> <sub>42</sub>	0	<i>a</i> <sub>43</sub>	$8.19 \times 10^{3}$	<i>a</i> <sub>44</sub>	0
$b_1$	256.00	$b_2$	0	$b_3$	0	$b_4$	0
$c_1$	-208.33	$c_2$	0	$c_3$	-115.90	$c_4$	0
$d_0$	1.00						

Table A1 Matrix coefficients of control delay link

# **附录 B** 表 B1 直驱型系统硬件参数

Table B1         Hardware parameters of direct drive system							
参数	数值	参数	数值	参数	数值		
$P_{\rm base}$	4.5 MW	Iabc	2 279.014 A	$U_{ m dc}$	1 800 V		
$f_{\rm s}$	2 kHz	$U_{ m abc}$	1 140 V	ω	314.16 rad/s		
$L_1$	0.05 mH	$L_3$	0.1 mH	$C_{\rm dc}$	17 mF		
$L_2$	0.05 mH	$L_4$	0.1 mH	$R_{\rm g}$	0		
С	600 µF	$C_1$	0.1 µF	R	30 Ω		
$R_1$	0	$R_2$	0				





Fig.B1 Eigenvalue distribution of system without considering control delay when grid strength changes





Fig.B2Eigenvalue distribution of system considering control delay when grid strength changes表 B2电网强度变化时考虑控制延时的系统稳定性范围

Table B2	System stability	range consideri	ng control de	elay when	power grid	l intensity c	changes
----------	------------------	-----------------	---------------	-----------	------------	---------------	---------

SCR 范围	电网阻抗/mH	电网容量/MW	系统稳定性
[919.75, 27.04)	[0.001, 0.034)	[4138.875, 121.725)	不稳定
[27.04, 1.75)	[0.034, 0.5256)	[121.725, 7.875)	稳定
[1.75, 1.00)	[0.5256, 0.91975)	[7.835, 4.5)	不稳定

表 B3 不考虑控制延时的系统振荡模式分布与阻尼比特性 Table B3 System oscillation mode distribution and damping ratio characteristics without considering control delay

without considering control delay							
振荡模式	特征值/Hz	阻尼比	参与变量				
#Z ## 111	-937 ±j1378.14	0.107 6	$u_{cd}, u_{cq}, i_{L2d}, i_{L1d}, i_{L2q}, i_{L1q}$				
<b></b> 频审Ⅲ	-938 ±j1278.51	0.116 0	$u_{cq}, u_{cd}, i_{L1q}, i_{L2q}, i_{L1d}, i_{L2d}$				
#Z ## 11	$-80 \pm j59.60$	0.208 5	$i_{\mathrm{g}d}$ , $i_{\mathrm{g}q}$ , $U_{\mathrm{dc}}$				
─────────────────────────────────────	±j50	0	$i_{L1d}$ , $i_{L1q}$ , $i_{L2d}$ , $i_{L2q}$				
- 振典 I	-3±j11.13	0.047 8	$U_{ m dc}$ , $i_{ m errd\_int}$ , $i_{ m errq\_int}$ , $i_{ m gq}$				
一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	$-10 \pm j1.68$	0.691 4	$\delta$ , $i_{\mathrm{err}q\_\mathrm{int}}$ , $i_{\mathrm{err}d\_\mathrm{int}}$				

表 B4 考虑控制延时的系统振荡模式分布与阻尼比特性

characteristics considering control delay						
振荡模式	特征值/Hz	阻尼比	参与变量			
	$^{-1}$ 250 ±j1 621.35	0.121 8	$x_{2q}, x_{2d}$			
- 编世III	-1 767 ±j1 599.18	0.173 2	$x_{2q}, x_{2d}$			
<b></b> 一例币Ⅲ	-1 075 ±j1 165.04	0.145 3	$x_{3d}, u_{cd}, x_{3q}, u_{cq}$			
	-536 ±j1 107.12	0.076 8	$u_{cq}, x_{3q}, u_{cd}, x_{3d}$			
病共 II	$-66 \pm j63.96$	0.1617	$i_{\mathrm gd}$ , $i_{\mathrm gq}$ , $U_{\mathrm dc}$			
殎帘Ⅱ	±j50	0	$i_{L1d}$ , $i_{L1q}$ , $i_{L2d}$ , $i_{L2q}$			
频带 I	$-2 \pm j11.52$	0.024 5	$U_{ m dc}$ , $i_{ m errd\_int}$ , $i_{ m errq\_int}$ , $i_{ m gq}$			
	$-20.939 \pm j9.23$	1.000 0	$x_{1d}, x_{1q}, x_{2d}, x_{2q}$			
	-10+i1 69	0 690 2	δ. lorra int. lorra int			

characteristics considering control delay

表 B5 电网强度变化时系统振荡模式的参与变量及其参与因子值变化规律 Table B5 Participating variables of system oscillation mode and changing law of

participating factors when power grid intensity changes

振荡模式	-	-11 ±j13.18		$-14 \pm j1.64$			
(Hz)	主要参与变量及			主要参与变量及			
电网强度	其参与因子值		阻尼比	其参与因子值		阻尼比	
(SCR)	$U_{ m dc}$	$i_{\rm errd\_int}$		δ	i <sub>errq_int</sub>		
3	0.317 2	0.237 8	0.134 1	0.406 9	0.320 4	0.812 1	
2.6	0.325 7	0.254 2	0.089 3	0.405 1	0.330 0	0.772 7	
2	0.343 4	0.286 7	0.024 5	0.404 9	0.348 0	0.690 2	
1.7	0.355 3	0.307 9	-0.005 3	0.406 6	0.359 2	0.633 0	
1.4	0.370 1	0.333 4	-0.032 0	0.410 0	0.372 2	0.560 1	
1.2	0.382 0	0.352 9	-0.047 8	0.413 5	0.381 9	0.500 1	
1	0.395 6	0.373 9	-0.061 6	0.417 8	0.392 2	0.428 8	









Fig.B3 Characteristic root distribution diagram corresponding to proportional coefficients of different voltage and current control loops











附录 C











Fig.C3 Simulative waveforms of grid-side converter adopted constant AC voltage control



Fig.C4 Simulative waveforms of voltage droop control for grid-side converter