

电压源型逆变器对弱电网系统稳定性和风电场输出有功功率相关性的影响

董欣然 张钰烽 李佳瑞 李翔宇 赵 珺
(温州大学电气与电子工程学院)

摘要: 电压源型逆变器的应用可能会在风电场并网系统中引起次同步振荡事故,严重影响电力系统安全稳定运行。为了研究电压源型逆变器和风电场输出有功功率对电网稳定性的影响,本文建立了一个基于阻抗的并网系统模型,分析了影响输出有功功率与系统稳定性相关性的主要因素。结合 PSCAD/EMTDC 时域仿真实验,分析了影响风电场与弱交流电网稳定性的相关性主要因素。结果表明,影响风电场与弱交流电网稳定性的相关性主要因素包括:电压源型逆变器的内环、外环和锁相环参数。而且在不同的风电场输出有功功率下,电压源型逆变器控制回路参数与系统稳定性之间的相关性是不同的。

关键词: 电压源型逆变器; 风电场; 弱电网; 电力系统稳定性

0 引言

近年来我国风电行业发展迅速,2022年我国风电装机容量为3.65亿千瓦,同比增长11.2%。随着风电装机容量的不断增长,电压源型逆变器作为功率转换接口设备广泛应用于风电场并网系统中。电压源型逆变器可以提高电力系统的控制性能,但也可能在风电场并网系统中引发次同步振荡。2015年,我国新疆哈密地区的直驱风机风电场并入交流电网时发生了严重的次同步振荡事故,事故波及了整个哈密地区的电网系统。此次振荡事故主要由直接驱动永磁同步发电机和弱交流电网之间的相互作用引发的。

引发次同步振荡事故的因素有很多。文献[1]研究了直驱风机风电场与弱交流电网之间的相互作用对次同步振荡的影响,发现直驱风机风电场电网侧交流

器电流内环控制对风电场与电网的相互作用有明显影响。文献[2]通过构建含有锁相环动态部分的系统模型,研究了直驱风电场侧锁相环控制对电力系统次同步振荡的影响。

大多数现有研究^[3-5]是基于一组恒定的电压源型逆变器控制参数来研究风电场输出有功功率对次同步振荡的影响,没有考虑动态控制参数对系统稳定性和输出有功功率之间相关性的影响。在不同的电压源型逆变器控制参数下,风电场输出有功功率与系统稳定性之间的关系可能是不同的。因此,分析在不同的电压源型逆变器控制参数下的风电场有功功率输出和系统稳定性的相关性具有重要意义。

本文建立了基于直驱式永磁同步风力发电机的风电场并网系统模型,通过特征值分析,研究了影响

输出有功功率与系统稳定性相关性的主要因素，包括电压源型逆变器的控制内环、外环和锁相环参数。同时，分析了电压源型逆变器控制回路在不同输出有功功率下对系统稳定性的影响。最后在 PSCAD/EMTDC 的时域仿真实验中验证了稳定性分析的正确性。

1 系统模型

为了研究风电场与弱电网之间的次同步相互作用，本文构建了一个基于直驱永磁同步发电机的风电场接入弱电网的系统模型。如图 1 所示，该系统由交流电网、长距离输电线路、本地输电系统、变压器和多个直驱永磁同步发电机组成。单台风电机输出功率经机端变压器 T_1 升至 35kV 汇入 35kV 母线，风电场出口经过变压器 T_2 升至 110kV 送至本地的输电线路，然后经过变压器 T_3 升至 220kV，最后由长距离输电线路传输到交流电网。

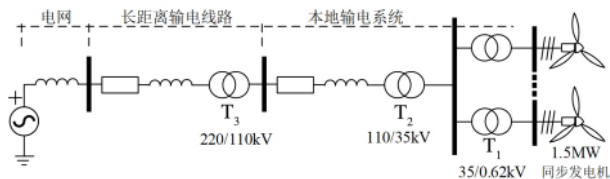


图 1 基于直驱永磁同步发电机的风电场与弱电网相连的系统模型

如图 2 所示，直驱永磁风力发电机组运行稳定时，风机组的并网动态主要取决于其网侧变流器（GSC）的控制性能，可将风机机组侧的变流器和风机等效为受控电流源。 U_{dc} 为直流输入电压， i_{dc} 为直流输入电流， C_{dc} 为直流稳压电容， L_f 和 R_f 为滤波电路的电感和电阻， L_g 和 R_g 为电网的电抗和电阻。电压源型逆变器控制器包括电流内环控制器（CC）、外环控制器（DVC）和锁相环控制器（PLL）。为了产生内环参考电流 i_{cdr} 的 d 轴分量，外环采用恒直流电压控制。内环参考电流 i_{cqr} 的 q 轴分量设置为零，

电压源型逆变器以单位功率因数运行。锁相环驱动电压 v_{sq} 的 q 轴分量设为零。

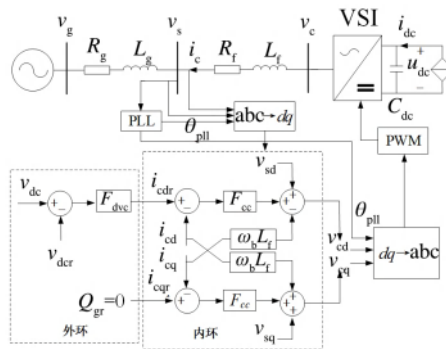


图 2 简化系统模型框图

电压源型逆变器的阻抗数学模型推导如下^[6-8]：

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{cd} \\ \Delta i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{v,dd}(s) & 0 \\ 0 & Y_{v,qq}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{sd} \\ \Delta v_{sq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y_{v,dd}(s) = -G_{cc}(s) G_{dc}(s) \quad (2)$$

$$Y_{v,qq}(s) = -\frac{P_{sd0}}{v_{sd0}} G_{pll}(s) \quad (3)$$

$$G_{cc}(s) = \frac{k_{p_cc}s + k_{i_cc}}{L_f s^2 + (R_f + k_{p_cc})s + k_{i_cc}} \quad (4)$$

$$G_{dvc}(s) = \frac{(k_{p_dvc}s + k_{i_dvc}) i_{cd0}}{s^2 C v_{dc0} + v_{sd0} G_{cc}(s) (k_{p_dvc}s + k_{i_dvc})} \quad (5)$$

$$G_{pll}(s) = \frac{(k_{p_pll}s + k_{i_pll})}{s^2 + v_{sd0} (k_{p_pll}s + k_{i_pll})} \quad (6)$$

式中， $G_{cc}(s)$ 为内环传递函数； $G_{dvc}(s)$ 为外环传递函数； $G_{pll}(s)$ 为锁相环的传递函数； k_{p_cc} 和 k_{i_cc} 为电流内环 PI 控制的比例调节系数和积分调节系数； k_{p_dvc} 和 k_{i_dvc} 为电压外环 PI 控制的比例调节系数和积分调节系数； k_{p_pll} 和 k_{i_pll} 为锁相环 PI 控制的比例调节系数和积分调节系数。

在 dq 坐标系下，电网模型的动态方程为：

$$v_g = \begin{bmatrix} v_{gd} \\ v_{gq} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_{g,dd}(s) & Z_{g,dq}(s) \\ Z_{g,qd}(s) & Z_{g,qq}(s) \end{bmatrix}}_{Z_g(s)} i_c + v_s \quad (7)$$

对于对称的系统， $Z_{g,dd}(s) = Z_{g,qq}(s)$ 、 $Z_{g,dq}(s) = -Z_{g,qd}(s)$ ，

带入式 (7) 得到的电网阻抗模型为：

$$Z_g(s) = \begin{bmatrix} R_g + L_g s & -L_g \omega_b \\ L_g \omega_b & R_g + L_g s \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， $\omega_b = 2f_b (f_b = 50\text{Hz})$ ，为电网的角频率。图 1 中的风机并网阻抗用 $Z_{\text{vsc}}(s)$ 表示，风机并网系统的小信号阻抗模型可表示为：

$$\Delta i_c = \underbrace{(Z_{\text{vsc}}(s) + Z_g(s))^{-1}}_{Y_{\text{sys}}(s) = Z_{\text{sys}}^{-1}(s)} \Delta v_s \quad (9)$$

2 稳定性分析

为了模拟电压源型逆变器的特性，下表给出了电压源型逆变器控制系统参数。电力系统模型的短路比 (SCR) 为 1.34，表明模型中的电网为弱交流电网^[9]。

表 电压源型逆变器控制系统参数

参数	符号 (单位)	数值
电压源型逆变器输入电压	v_{d0} (pu)	1
风力发电机输出额定功率	$P_{\text{gr, rated}}$ (MW)	1.5
滤波电阻	R_t (pu)	0.015
滤波电感	L_t (pu)	0.15
直流电容	C (pu)	13
内环带宽参考值	$\omega_{\text{cc, ref}}$ (pu)	0.1
外环带宽参考值	$\omega_{\text{dc, ref}}$ (pu)	0.02
锁相环带宽参考值	$\omega_{\text{pll, ref}}$ (pu)	0.0074

本文采用分析闭环系统阻抗矩阵模型的极点，来研究电压源型逆变器参数与系统稳定性的关系。内环带宽 ω_{cc} 和锁相环带宽 ω_{pll} 的变化对系统模型极点的影响如图 3 所示。极点的实部越大表明系统的稳定性越弱，从极点的变化趋势中可以看出较小的 ω_{cc} 增加了 P_{gr} 和系统稳定性之间的正相关性。通过比较图 3a 和图 3d 中相同 ω_{cc} 的根轨迹图，可以明显看出，当 ω_{cc} 不变时，随着 ω_{pll} 的增加， P_{gr} 与系统稳定性之间的正相关性增强。

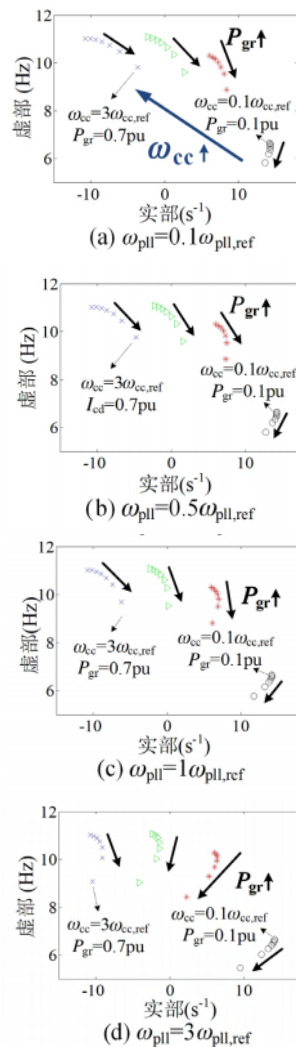


图 3 内环带宽、锁相环带宽和风机输出功率对系统稳定性的影响

时域仿真结果如图 4 和图 5 所示。在 5s 前， P_{gr} 设为 0.55pu；在 5s、6s 和 7s， P_{gr} 分别增加到 0.6pu、0.65pu 和 0.7pu。图 4 中，在 $\omega_{\text{pll}} = 0.5\omega_{\text{pll, ref}}$ 的条件下，随着 P_{gr} 的增加，逆变器输出有功功率 P_g 、d 轴电流 i_d 和电压 v_d 的振荡更加剧烈，这种结果与图 3b 中三角形点的变化趋势相符。在图 5 中，当 P_{gr} 升至 0.65pu 时，振荡强度增加，随着 P_{gr} 升至 0.7pu 后，振荡强度减弱，验证了图 3c 稳定性分析的正确性。

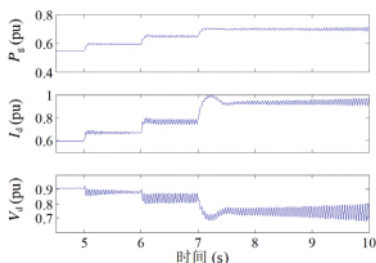


图4 系统时域仿真 ($\omega_{pll}=0.5\omega_{pll,ref}$)

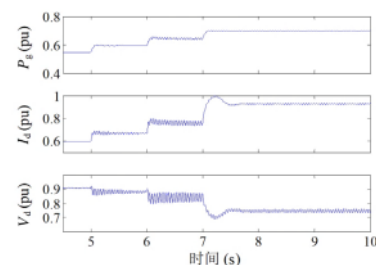
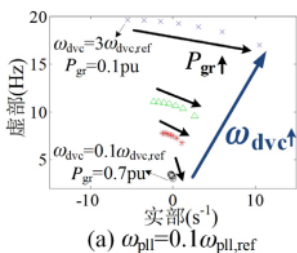
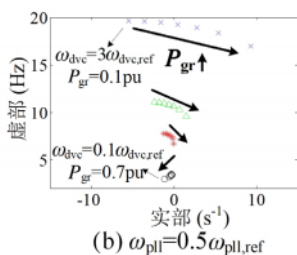


图5 系统时域仿真 ($\omega_{pll}=\omega_{pll,ref}$)

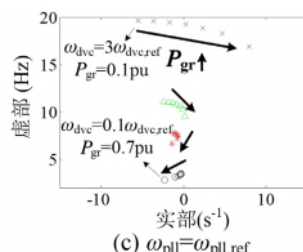
图6显示了外环带宽和锁相环带宽对系统极点根轨迹图的影响， P_{gr} 与系统稳定性之间的关系如图6所示。在图6a中，当 ω_{dvc} 增加时， P_{gr} 和系统稳定性之间的正相关性增强。大多数情况下，当 ω_{dvc} 不变时， ω_{pll} 的增加都会增强 P_{gr} 和系统稳定性之间的正相关性，但是比较图6c和图6d中的黑圈曲线 ($\omega_{dvc}=0.1\omega_{dvc,ref}$)，可以看出 ω_{pll} 的增加降低了 P_{gr} 与系统稳定性之间的正相关性。



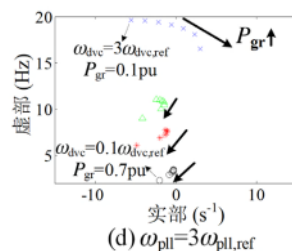
(a) $\omega_{pll}=0.1\omega_{pll,ref}$



(b) $\omega_{pll}=0.5\omega_{pll,ref}$



(c) $\omega_{pll}=\omega_{pll,ref}$



(d) $\omega_{pll}=3\omega_{pll,ref}$

图6 外环带宽、锁相环带宽和风机输出功率对系统稳定性的影响

时域仿真结果如图7和图8所示，在5s之前， P_{gr} 设为0.55pu，然后在5s时 P_{gr} 增加到0.6pu，在6s时增加到0.65pu，在7s时增加至0.7pu。在图7中，当 $\omega_{pll}=0.5\omega_{pll,ref}$ 时，系统振荡在 P_{gr} 增加到0.65pu时出现，在 P_{gr} 升至0.7pu后振荡变得更加剧烈。在图8中，当 $\omega_{pll}=\omega_{pll,ref}$ 时， P_{gr} 增加到0.65pu时的振荡比 $P_{gr}=0.6pu$ 和 $P_{gr}=0.7pu$ 时的更明显。仿真结果验证了图6中的系统稳定性分析。

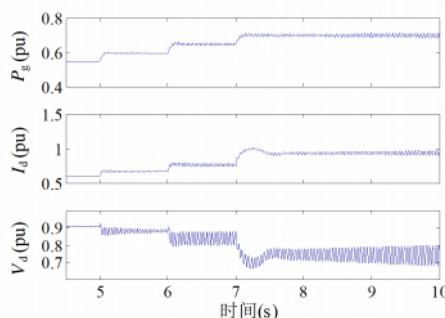


图7 系统时域仿真 ($\omega_{pll}=0.5\omega_{pll,ref}$)

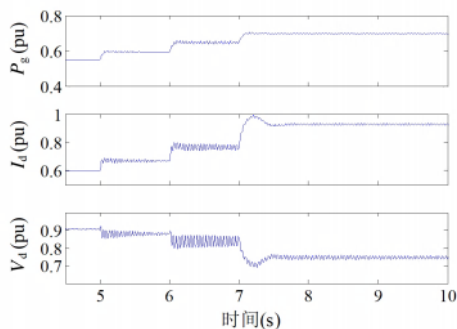


图8 系统时域仿真 ($\omega_{pll}=\omega_{pll, ref}$)

3 结束语

本文基于阻抗的稳定性分析和时域仿真，通过分析不同逆变器控制回路参数下的风电场输出有功功率和系统稳定性的关系，总结出以下结论：

- 1) 内环或外环带宽越低，风电场输出有功功率与系统稳定性之间的正相关性越强。
- 2) 大多数情况下，锁相环带宽的减小将降低风电场输出有功功率与系统稳定性之间的正相关性。但对于当外环带宽相对较低时，锁相环带宽减小将导致风电场输出有功功率与系统稳定性之间的正相关性增强。

参考文献

[1] 胡文波, 贾祺, 刘侃, 等. 低运行工况下直驱风电场电流内环主导的次同步振荡特性研究 [J]. 太阳能学报, 2022, 43 (4): 341-350.

[2] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 直驱风电并网系统中锁相环引起次同步振荡的开环模式谐振机理分析 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (7): 1935-1950, 2209.

[3] 宋瑞华, 郭剑波, 李柏青, 等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (16): 4662-4670, 4891.

[4] 于笑, 陈武晖. 风力发电并网系统次同步振荡研究 [J]. 发电技术, 2018, 39 (4): 304-312.

[5] 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.

[6] 陈新, 王赟程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (7): 2082-2094, 2223.

[7] 曾志杰, 肖华锋, 高博, 等. 并网逆变器小信号建模简化方法与应用 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (21): 7002-7012.

[8] 王赟程, 陈新, 张旻, 等. 三相并网逆变器锁相环频率特性分析及其稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (13): 3843-3853.

[9] 赵书强, 赵质森, 邵冰冰. 弱交流电网下不同位置的直驱风机对次同步振荡特性影响的比较分析 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2020, 47 (6): 1-9.

(收稿日期: 2023-10-09)