

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

任必兴¹, 杜文娟², 王海风², 李海峰³, 赵静波¹, 孙 蓉¹, 黄 强¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065;

3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:主要从控制参数安全域的角度研究了锁相环(PLL)控制对并网永磁直驱风机(PMSG)次同步振荡稳定性的影响。基于所建立的全系统动态互联模型,通过特征值分析方法计算得到了PLL控制参数安全域。研究发现,参数安全域中出现的一系列“峰值点”主要是由模式谐振诱发的PLL与电压源型换流器(VSC)之间的强动态交互作用引起的,并通过非线性仿真验证了模式分析所得结论的正确性。进一步地,从PLL参数安全域的角度详细筛查了模式谐振诱发PMSG次同步振荡失稳的机理,分析了系统参数和VSC控制参数这2个因素对风电并网次同步振荡特性的影响。

关键词:锁相环;永磁直驱风机;次同步振荡;控制参数安全域;特征值分析方法

中图分类号:TM 614;TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202007019

0 引言

随着风电大规模集中接入电网,给电力电子化系统的动态稳定性带来了新的挑战,国内外均报道过由风机电压源型换流器(VSC)的次同步控制交互(SSCI)引发的振荡失稳事故^[1-6]。VSC控制主要由外环控制、电流内环控制以及锁相环(PLL)控制三部分构成。永磁直驱风机(PMSG)并网引发的振荡问题主要表现为PLL与VSC的外环、内环控制器间的交互作用^[7-12]。

针对PLL与VSC外环控制的交互影响研究,文献[8]研究表明PLL与直流电压控制、交流电压控制间的负交互作用将恶化PMSG系统稳定性,当PLL和电压控制带宽接近时交互作用达到最强。文献[9]指出随着短路比减小或风机注入电网功率的增加,PLL向电压控制环节提供的阻尼功率将随之衰减,当PLL控制器与电压控制器带宽接近时负交互影响最强,该结论与文献[8]类似。针对PLL与VSC内环控制的交互影响研究,文献[10]应用特征值分析与时域仿真方法,得到PLL和内环控制的交互作用可能会导致VSC出现失稳振荡。文献[11]基于阻抗模型研究了PLL和电流内环控制对DFIG系统小

干扰稳定性的影响,得到PLL和电流内环控制参数变化会使系统趋向失稳。文献[12]基于复转矩模型研究了弱连接条件下并网PMSG的小干扰稳定性,结论表明在PLL和电流内环控制的带宽接近时二者之间的交互作用更强。

影响并网PMSG系统稳定的参数主要包括系统短路比和VSC控制参数^[7-13]。常见的并网PMSG的稳定机理分析方法主要有阻抗分析^[4,6,14]与模式谐振^[15-19]。文献[15-17]从模式谐振机理角度揭示了含风电机组的电力系统振荡问题,研究表明当风机VSC控制模式与同步机的振荡模式在复平面分布位置接近时将引发开环模式谐振现象,此时VSC控制环节与系统同步机间将呈现强动态交互作用,2个关联的谐振特征根向相反方向移动,其中1个谐振特征根向正半复平面移动,系统阻尼遭到恶化。文献[18-19]从开环模式谐振角度详细研究了变速风机中PLL与VSC控制环节间的动态交互,并分析了风电机组与电网的连接对模式谐振的影响。

本文主要从PLL控制参数角度出发,通过特征值分析和时域仿真方法,研究PLL控制对并网PMSG的次同步振荡稳定性的影响。本文建立了含PMSG的PLL与VSC控制器的全系统动态互联模型,通过特征值分析方法计算得到PLL控制参数安全域;针对模式谐振机理,从PLL参数安全域这个全新角度出发,逐步筛查了模式谐振诱发次同步振荡失稳的机理;详细分析了系统参数和VSC控制参数两因素对风电并网次同步振荡特性的影响。

1 PLL模型介绍

PLL对电压的相位跟踪图见附录图A1。理想

收稿日期:2020-03-19;修回日期:2020-05-22

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(多电力电子变流器接入江苏电网引发宽频振荡风险评估及优化控制策略研究)(J2020129)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited (Risk Assessment and Optimal Control Strategy of Broadband Oscillation in Jiangsu Power Grid Caused by Grid-connected Multiple Power Electronic Converters)(J2020129)

PLL认为图A1中 $V_{pcc} \angle \theta_{pcc}$ 的估计相位 θ_{pll} 始终与PCC节点电压相位 θ_{pcc} 相等,因此 $V_{pcc} \angle \theta_{pcc}$ 被认为一直在 d 轴上,所以其 q 轴分量 $V_q \equiv 0$ 。如果PLL跟踪到的电压相位 θ_{pll} 并非一直等于PCC节点实际电压相位 θ_{pcc} ,则PLL相位跟踪误差为 $\theta_{error} = \theta_{pcc} - \theta_{pll}$,VSC的 dq 坐标系由PLL跟踪到的电压相位 θ_{pll} 确定。由图A1可得:

$$V_d = V_{pcc} \cos \theta_{error}, \quad V_q = V_{pcc} \sin \theta_{error} \quad (1)$$

三相同步锁相环(SRF-PLL)是最常用的PLL结构,SRF-PLL的线性化框图模型如图1所示^[18-19]。

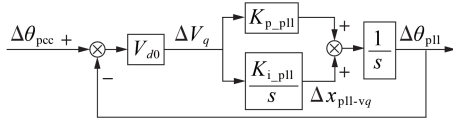


图1 SRF-PLL 线性化框图模型

Fig.1 Linearized block diagram model of SRF-PLL

系统处于稳定状态时有 $\theta_{error0} = \theta_{pcc0} - \theta_{pll0} = 0$,对式(1)进行线性化可得:

$$\begin{cases} \Delta V_d = \Delta V_{pcc} \\ \Delta V_q = V_{pcc0} \Delta \theta_{error} = V_{d0} \Delta \theta_{error} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Δ 为微分算子;下标“0”表示变量稳态初值。

由图1可得:

$$H_{pll}(s) = \frac{\Delta \theta_{error}}{\Delta \theta_{pcc}} = \frac{s^2}{s^2 + V_{d0} K_{p_pll} s + V_{d0} K_{i_pll}} \quad (3)$$

2 PLL与VSC的控制交互

PMSG接入系统的示意图如图2所示。

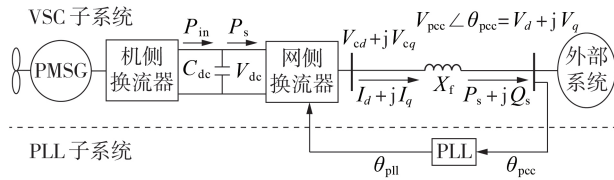


图2 并网PMSG系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of grid-connected PMSG system

将图2中PLL控制环节视为PLL子系统,则 $H_{pll}(s)$ 为PLL子系统的传递函数,详见式(3)。定义 θ_{pcc} 为PLL子系统的输入信号, θ_{error} 为PLL子系统的输出信号。PLL子系统的线性化状态空间方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta X_{pll} = A_{pll} \Delta X_{pll} + b_{pll} \Delta \theta_{pcc} \\ \Delta \theta_{error} = c_{pll}^T \Delta X_{pll} + d_{pll} \Delta \theta_{pcc} \end{cases} \quad (4)$$

其中, ΔX_{pll} 为PLL的全部状态变量; A_{pll} 为PLL子系统特征矩阵; b_{pll} 为PLL子系统输入矩阵; c_{pll}^T 为PLL子系统输出矩阵; d_{pll} 为PLL子系统反馈矩阵。

图2中,除PLL控制环节外,其他部分视作VSC

子系统。PMSG网侧VSC模型详见文献[15]。定义 $\Delta \theta_{error}$ 为VSC子系统的输入信号, $\Delta \theta_{pcc}$ 为输出信号,VSC子系统的线性化状态空间方程为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta X_g = A_g \Delta X_g + b_g \Delta \theta_{error} \\ \Delta \theta_{pcc} = c_g^T \Delta X_g + d_g \Delta \theta_{error} \end{cases} \quad (5)$$

其中, ΔX_g 为VSC子系统的全部状态变量; A_g 为VSC子系统特征矩阵; b_g 为VSC子系统输入矩阵; c_g^T 为VSC子系统输出矩阵; d_g 为VSC子系统反馈矩阵。

联立式(5)中的2个等式,消去 ΔX_g ,可得:

$$G(s) = \Delta \theta_{pcc} / \Delta \theta_{error} = [c_g^T (sI_g - A_g)^{-1} b_g + d_g] \quad (6)$$

其中, I_g 为与矩阵 A_g 同维的单位阵。

式(3)和式(6)构成全系统闭环互联线性化模型,如附录图A2所示,全系统线性化状态空间方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta X_g \\ \Delta X_{pll} \end{bmatrix} &= A_T \begin{bmatrix} \Delta X_g \\ \Delta X_{pll} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{gg} & A_{gp} \\ A_{pg} & A_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_g \\ \Delta X_{pll} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} A_{gg} & A_{gp} \\ A_{pg} & A_{pp} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_g + d_{pll} b_g c_g^T & b_g c_{pll}^T \\ b_{pll} c_g^T & A_{pll} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知,全系统闭环状态矩阵 A_T 中,两子系统之间存在“动态耦合”影响。

定义PLL子系统的传递函数 $H_{pll}(s)$ 的极点为PLL控制模式^[19],PLL控制模式与PI控制器参数取值密切相关。下一节主要应用特征值分析方法计算PLL控制参数安全域(以下简称为“PLL参数域”),并分析PLL分别与PMSG网侧VSC的外环电压控制、内环电流控制之间的耦合交互作用对PLL参数域的影响。

3 PLL控制参数安全域分析

3.1 算例系统介绍

图3所示的并网风机经长直输电线Line2送至远端无穷大系统。系统的线路参数详见附录表A1,设PMSG额定出力为 $0.6 + j0.3$ p.u.,PMSG主要参数取值详见附录表A2。



图3 风电并网外送系统

Fig.3 Grid-connected wind power transmission system

本文提及的PLL参数域,是指整个系统中所有动态模式均为正阻尼模式下的PLL参数域,不仅包括PLL控制模式,还包括PMSG的外环电压控制模式、内环电流控制模式。

假设当 $\Delta \theta_{error} = 0$ 时,图2中PLL子系统与VSC子系统间无动态交互,呈开环动态解耦,式(7)中全系统特征矩阵 A_T 的子矩阵 $A_{gp} = A_{pg} = 0$, A_{gg} 退化为式(5)中主系统特征矩阵 A_g , A_{pp} 退化为式(4)中子系统特征矩阵 A_{pll} 。VSC子系统的特征值见附录表A3。

3.2 额定工况下的PLL参数安全域

额定工况下,PLL参数域见图4。图中,“实线”为计及整个系统所有动态模式的PLL控制参数的临界稳定线,在积分系数 K_{i_pll} 取值相同的条件下,当比例系数 K_{p_pll} 取值大于或等于临界稳定线对应取值时,全系统特征矩阵 A_T 的所有特征值均为正阻尼;当 K_{p_pll} 取值小于临界稳定线对应取值时,全系统特征矩阵 A_T 的某个特征值均为负阻尼。同理,“虚线”为只计及PLL开环控制环节的临界稳定线,以子系统特征矩阵 A_{pll} 的特征值(即 $H_{pll}(s)$ 的极点)作为判别依据。由式(3)可知, $H_{pll}(s)$ 极点为二阶方程,PLL的PI参数取值与二阶方程特征根关系密切。需要说明的是,本文算例分析中,随着PLL积分系数增加,比例系数取值为0时自身开环传递函数 $H_{pll}(s)$ 极点仍旧是正阻尼模式,因此“虚线”为虚轴。

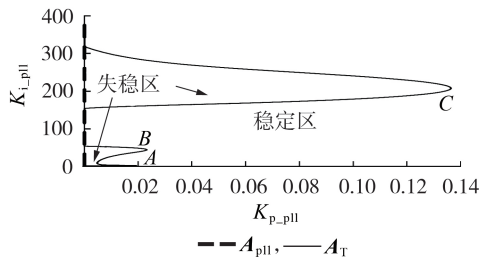


图4 PLL参数安全域(额定工况)

Fig.4 PLL parameter safety region(rated condition)

由图4可知,当仅考虑PLL控制环节时,临界稳定线接近“坐标系虚轴”,PLL控制稳定性良好;当计及VSC子系统控制动态时,PLL控制器与VSC各控制环节均发生了不同程度的耦合交互,导致PLL参数域的面积严重缩减。

图4中,计及整个系统动态的PLL参数域依次出现了3个“峰值点”,由图5所示的参与因子分析结果可知,“峰值点A、B、C”附近的PLL模式的频率分别与附录表A3中的3个模式(频率由低到高依次为无功 Q/V 模式、直流电压 V_{dc} 模式、内环电流 I_q 模式)的频率较接近。对比上述3个“峰值点”,PLL控

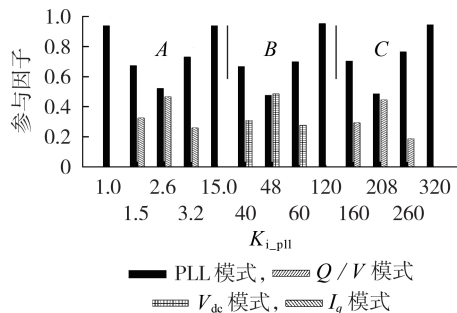


图5 临界稳定模式下各变量的参与因子

Fig.5 Participation factor of variables under critical safety mode

制与电流内环控制的交互作用对系统稳定的恶化最严重。文献[17]针对并网PMSG的PLL控制环节,基于留数理论提出估计开环模式谐振条件下闭环特征根在复平面分布位置的方法,其可量化评估模式谐振对目标模式的影响强弱,本文不再赘述。需要说明的是,本文通过特征值分析方法计算的安全域中,侧重于小干扰稳定分析,风机本体控制性能予以忽略。

3.3 参与因子分析

全系统临界稳定模式(即图4中临界稳定线上PI参数取值所对应的临界稳定特征值)的参与因子计算结果如图5所示。可见随着PLL控制积分系数 K_{i_pll} 不断增加,PLL控制模式的频率逐渐增大;当 K_{i_pll} 取值远离峰值点A、B、C时,临界稳定模式主要由PLL控制变量自身参与;而当 K_{i_pll} 取值接近峰值点A时,PLL相关变量与 Q/V 控制相关变量出现了耦合交互;当 K_{i_pll} 取值接近峰值点B时,PLL相关变量与直流电压 V_{dc} 控制相关变量出现了耦合交互;当 K_{i_pll} 取值接近峰值点C时,PLL相关变量与无功电流 I_q 控制相关变量出现了耦合交互。

耦合交互后,模式的主要参与变量发生了互换。下面以峰值点B为例进行详细说明:随着 K_{i_pll} 取值由40逐渐增加至60,临界稳定模式的主要参与变量由PLL控制相关变量逐渐变换为直流电压控制相关变量;当 K_{i_pll} 取值增大到120时,取值远离峰值点,临界稳定模式的主要参与变量又变换为PLL控制相关变量。峰值点A、C的临界稳定模式的参与因子结果、主要参与变量的变化规律与峰值点B相同。

3.4 谐振模式的根轨迹变化

PLL参数域各峰值点的PI参数见附录表A4。对应各峰值点处临界稳定模式的PI参数取值,将 K_{p_pll} 在失稳区内取定值(PLL参数变化详见图6),讨论 K_{i_pll} 变化时动态交互模式的根轨迹变化,变化轨迹如图6所示。

图6表现为两谐振模式“反向弹开”的变化趋势^[13-17],使得其中一个模式移向右半复平面,恶化为负阻尼模式。随着 K_{i_pll} 逐渐增大,图6(a)~(c)中均出现了模式互换现象。由此可知,图4中各峰值点处PLL参数域面积严重缩减的原因主要是由模式谐振导致的。

3.5 非线性时域仿真

下面采用非线性时域仿真验证上文所得结论的正确性。故障设置为0.1 s时PMSG输出有功功率突增10%,故障持续100 ms后被清除,仿真结果如图7所示。图中, Q 、 V_{dc} 、 I_q 均为标幺值。各“失稳点”、“稳定点”PI参数取值见附录表A5,“临界稳定点”取值同表A4。

图7(a)中,“稳定点”PI取值下,PLL锁相误差与无功输出曲线均能快速收敛;“临界稳定点”PI取值

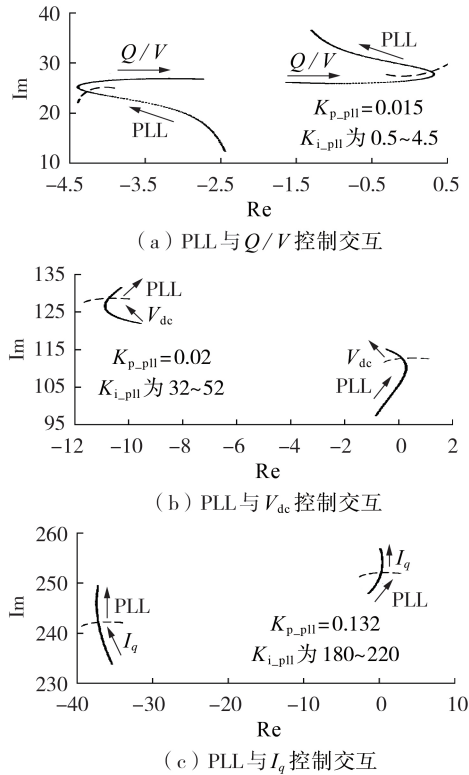


图6 PLL模式与其他模式交互的根轨迹

Fig.6 Root locus of interaction between PLL mode and other modes

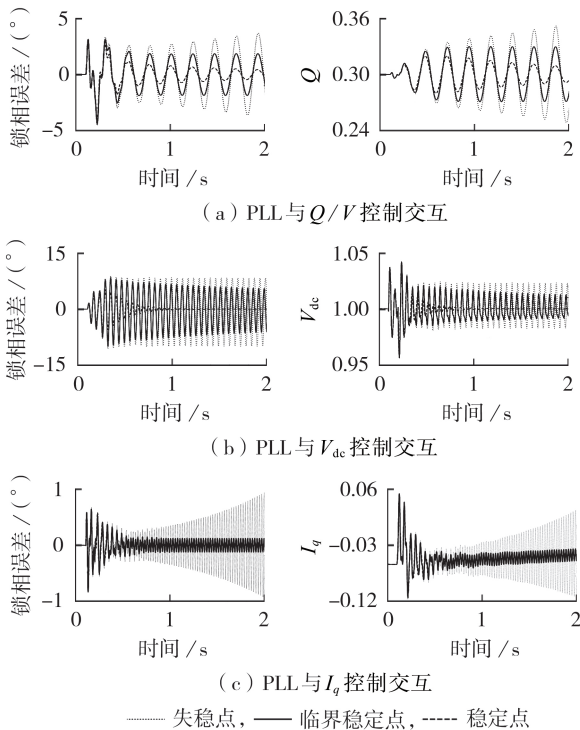


图7 PLL与VSC的动态交互

Fig.7 Dynamic interaction between PLL and VSC

下,二者均出现持续等幅振荡;“失稳点”PI取值下,二者均出现失稳发散振荡。图7(b)、(c)各相关量的仿真曲线振荡规律与图7(a)相同,因此仿真结果验

证了上文分析的正确性。

4 PLL主导的PMSG并网稳定机理分析

本节主要应用特征值分析方法逐步筛查其他可能存在的影响PMSG并网稳定性的机理性因素,结果见表1和图8。由表1可知,随着并网PMSG各动态环节的依次引入(步骤1—4),PLL参数域逐渐缩减,出现各峰值点。由第3节分析可知,各峰值点是由PLL诱发的模式谐振引起的,由此可得模式谐振是影响PMSG并网稳定性的关键机理。当PLL模式与VSC模式未发生模式谐振时,PLL与VSC之间的控制交互很弱。

表1 稳定性机理筛查场景

Table 1 Conditions of screening for stability mechanism

筛查步骤	分析对象	结果
1	仅PLL控制	图4“虚线”
2	PLL与外环 V_{dc} 控制	图8(a)
3	PLL与外环 V_{dc} 、无功控制	图8(b)
4	PLL与VSC外、内环控制	图4“实线”

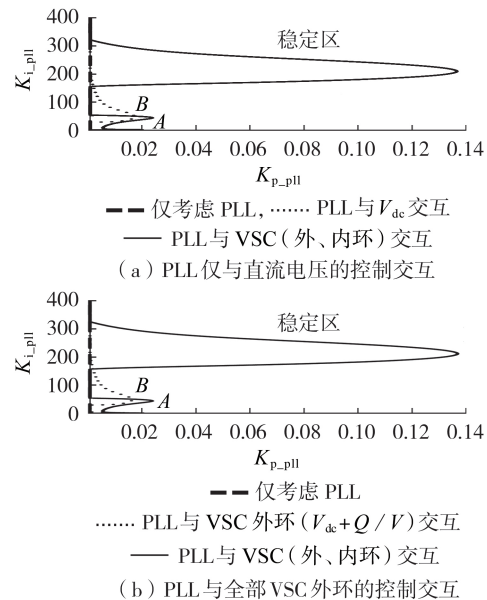


图8 并网PMSG的稳定机理筛查结果

Fig.8 Screening results of stability mechanism for grid-connected PMSG

5 影响PMSG振荡稳定的参数因素

第3节重点分析了额定运行工况下的PLL参数域,本节考虑影响该安全域的2类因素:系统参数(输电距离、PMSG功率输出)和VSC控制参数。

5.1 系统参数

不同输电距离(输电线路阻抗关系同附录表A1,即 $R=0.1X$)和风机出力情况下,PLL参数域的变化情况如附录图A3所示。由图A3可知:PMSG输电距离越近、PMSG功率输出越少,PLL与PMSG的无功控制、电流内环控制的动态交互越弱;当PMSG有

功出力偏低(P 为0.5~0.75 p.u.)或者近距离输电(X 为0.4~0.7 p.u.)时,PLL与PMSG的有功侧 V_{dc} 的控制交互呈减弱趋势,系统稳定性逐渐变好;当PMSG有功出力偏高(P 为0.75~0.8 p.u.)或者远距离输电(X 为0.7~0.8 p.u.)时,PLL与 V_{dc} 的控制交互呈增加趋势,系统稳定性逐渐变差。上述结论表明系统参数是影响PMSG并网稳定性的重要因素。

5.2 VSC控制参数

根据3.4节,PLL参数域各峰值点是由PLL模式与其他模式发生谐振使得某一模式恶化为负阻尼导致的。本小节重点研究VSC控制参数对PLL参数域的影响。通过调节PMSG目标模式的相关控制(无功 Q/V 、直流电压 V_{dc} 、内环电流 I_q 控制)参数,得到附录表A6中Case A—Case D共4组模式,各模式逐渐远离虚轴并向左半复平面移动,模式阻尼逐渐增大。

VSC控制参数变化对PLL参数域的影响如图9所示。由图9可知:随着无功模式与电流模式的阻尼增加,PLL临界稳定线“左移”,安全域的面积扩大,表明系统稳定性变强;Case D模式下,PLL控制与无功控制、电流控制基本上不存在模式谐振,系统安全域主要由PLL自身控制环节所决定;随着 V_{dc} 模式阻尼的增加,PLL临界稳定线先“左移”后“右移”,表明系统稳定性先增强后减弱。由此可得,VSC控制参数调节不当可能诱发模式谐振,导致PLL安全域面积缩减,恶化系统次同步稳定性。

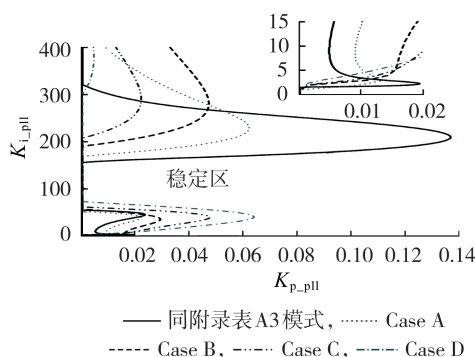


图9 模式分布对PLL参数安全域的影响

Fig.9 Impact of mode distribution on parameter safety region for PLL

6 结论

本文主要从PMSG的PLL控制参数安全域的角度出发,研究PLL与VSC的控制交互对PMSG并网系统次同步振荡稳定性的影响,以下为主要贡献。

(1)将PLL与其他部分等价2个互联的子系统,两子系统共同构成了并网PMSG的全系统动态互联模型。通过特征值分析方法计算得到了PMSG的PLL参数安全域,并得到安全域中的“峰值点”主要由PMSG的PLL控制环节与其他动态环节诱发的强动态交互作用所导致的。

(2)从PLL控制参数域角度出发,逐步筛查了模式谐振诱发次同步振荡失稳的机理,得到PLL与VSC的模式谐振诱发的强交互是影响PMSG次同步振荡失稳的关键机理。

(3)从PLL控制参数域角度详细分析了系统参数(输电距离、风机出力)和VSC控制参数(外环直流电压、无功、内环电流)两因素对风电并网次同步振荡特性的影响,可知输电距离越远、风机出力越大,参数安全域面积越窄,系统阻尼恶化;通过调节VSC控制参数能消除模式谐振,会增大参数安全域面积,提升系统阻尼。

下一步的研究工作将围绕风电场中多台PMSG之间的VSC与PLL控制参数的协同整定而展开。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 姜齐荣,王亮,谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术,2017,43(4):1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4):1057-1066.
- [2] 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.
- [3] 王伟胜,张冲,何国庆,等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术,2017,41(4):1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4):1050-1060.
- [4] 李奕欣,赵书强,马燕峰,等. 三相LCL型并网逆变器的阻抗建模及特性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):107-113.
LI Yixin, ZHAO Shuqiang, MA Yanfeng, et al. Impedance modeling and characteristic analysis of three-phase LCL-type grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7):107-113.
- [5] 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 distribution and amplitude characteristic of electric flux for grid-connected voltage source converter under subsynchronous disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):23-29.
- [6] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):2366-2372.
- [7] 张琛,蔡旭,李征. 电压源型并网变流器的机-网电气振荡机理及稳定判据研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3174-3183.

- ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Stability criterion and mechanisms analysis of electrical oscillations in the grid-tied VSC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3174-3183.
- [8] 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 & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [9] 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.
- [10] MIDTSUND T, SUUL J A, UNDELAND T. Evaluation of current controller performance and stability for voltage source converters connected to a weak grid[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China: IEEE, 2010: 382-388.
- [11] 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): 1507-1515.
- 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): 1507-1515.
- [12] HU J, QI H U, WANG B, et al. Small signal instability of PLL-synchronized type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4): 1676-1687.
- [13] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
- XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices in-feed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [14] 吕敬, 蔡旭, 张健文. 模块化多电平换流器的交直流侧阻抗模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 131-136, 143.
- LÜ Jing, CAI Xu, ZHANG Jianwen. Analysis and suppression of SSO at sending/receiving end in VSC-HVDC system connected large-capacity wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 131-136, 143.
- [15] DU W, CHEN X, WANG H. Power system electromechanical oscillation modes as affected by dynamic interactions from grid-connected PMSGs for wind power generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1301-1312.
- [16] DU W, CHEN X, WANG H. A method of open-loop modal analysis to examine the SSOs in a multi-machine power system with multiple variable speed wind generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4297-4307.
- [17] DU W, WANG Y, WANG H, et al. Concept of modal repulsion for examining the sub-synchronous oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4614-4624.
- [18] DU W, CHEN X, WANG H. Parameter tuning of the PLL to consider the effect on power system small-signal angular stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(1): 1-8.
- [19] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 开环模式谐振引发含变速风电机组电力系统振荡的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6481-6491.
- WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Oscillations caused by open-loop modal resonance in power system with variable-speed wind generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6481-6491.

作者简介:



任必兴

任必兴(1988—),男,福建福州人,工程师,博士,主要研究方向为柔性交/直流输电、大规模新能源接入电力系统的稳定分析与控制(E-mail: renbixing@126.com);

杜文娟(1979—),女,江苏宜兴人,教授,博士,通信作者,研究方向为新能源电力系统和交直流电网混成电力系统稳定性分析与控制、人工智能(E-mail: ddwenjuan@qq.com);

王海风(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为柔性电网和新能源接入电力系统的分析与控制。

(编辑 李玮)

Influence of PLL control on sub-synchronous oscillation stability of grid-connected PMSG: control parameter safety region

REN Bixing¹, DU Wenjuan², WANG Haifeng², LI Haifeng³, ZHAO Jingbo¹, SUN Rong¹, HUANG Qiang¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjing 210024, China)

Abstract: The impact of PLL (Phase Locked Loop) control on the sub-synchronous oscillation stability for grid-connected PMSG (Permanent Magnet Synchronous wind Generator) from the perspective of control parameter safety region is studied. Based on the established dynamic interconnection model of the general system, the parameter safety region of PLL is calculated using the eigenvalue method. It is found that a series of “peak points” appeared in the parameter safety region that are mainly due to strong dynamic interactions between the PLL and VSC (Voltage Source Converter) caused by modal resonance. This conclusion drawn from mode analysis is verified by nonlinear simulations. Moreover, from the new perspective of control parameter safety region for PLL, the instability mechanism of sub-synchronous oscillations of grid-connected PMSG is investigated in detail. The impacts of system parameters and VSC control parameters on the sub-synchronous oscillation characteristics of wind power grid-connected system are discussed.

Key words: phase locked loops; PMSG; sub-synchronous oscillation; control parameter safety region; eigenvalue analysis method

附录

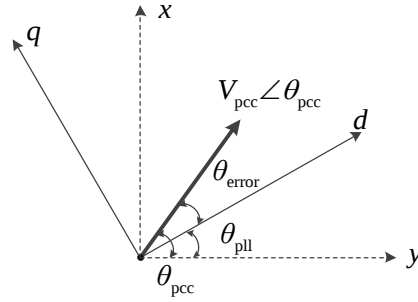


图 A1 PLL 对电压的相位跟踪
Fig.A1 Phase tracking of voltage by PLL

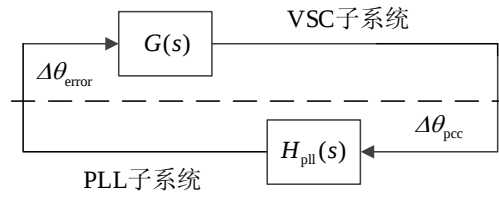


图 A2 全系统动态互联线性化模型
Fig.A2 Dynamic interconnected linearized model of power system

表 A1 系统线路额定参数

Table A1 Rated line parameters of system

线路	电阻/p.u.	电抗/p.u.
Line1	0.001	0.01
Line2	0.06	0.6
Line3	0.01	0.1

表 A2 PMSG 主要参数

Table A2 Main parameters of PMSG

参数	数值
C_{dc} /p.u.	0.01
V_{dc0} /p.u.	1.0
X_f /p.u.	0.1
V_{dc} 控制(PI 控制)	$K_{p_Vdc}=0.1, K_{i_Vdc}=150$
Q/V 控制(PI 控制)	$K_{i_Q}=100, K_{i_V}=5$
I_q 控制(PI 控制)	$K_{p_Iq}=0.01, K_{i_Iq}=20$

表 A3 额定运行下 VSC 子系统目标模式

Table A3 Target oscillation mode of VSC sub-system

VSC 模式	特征根
直流电压 V_{dc} 模式	-7.219+j119.98
无功 Q/V 模式	-1.794+j25.973
内环电流 I_q 模式	-13.767+j248.94

注：内环 d - q 电流模式类别相同，本文仅以无功电流 I_q 作为分析对象

表 A4 各“峰值点”PI 参数

Table A4 PI parameters of each “peak point”

PI 控制器	峰值点 A	峰值点 B	峰值点 C
K_{p_pll}	0.0193	0.0232	0.1364
K_{i_pll}	2.3	44	208

表 A5 PI 参数(非线性仿真)

Table A5 PI parameters(nonlinear simulation)

参数	图 7(a)	图 7(b)	图 7(c)
失稳点 K_{p_pll}	0.015	0.018	0.12
稳定点 K_{p_pll}	0.03	0.055	0.2

注: K_{i_pll} 取值同表 A4。

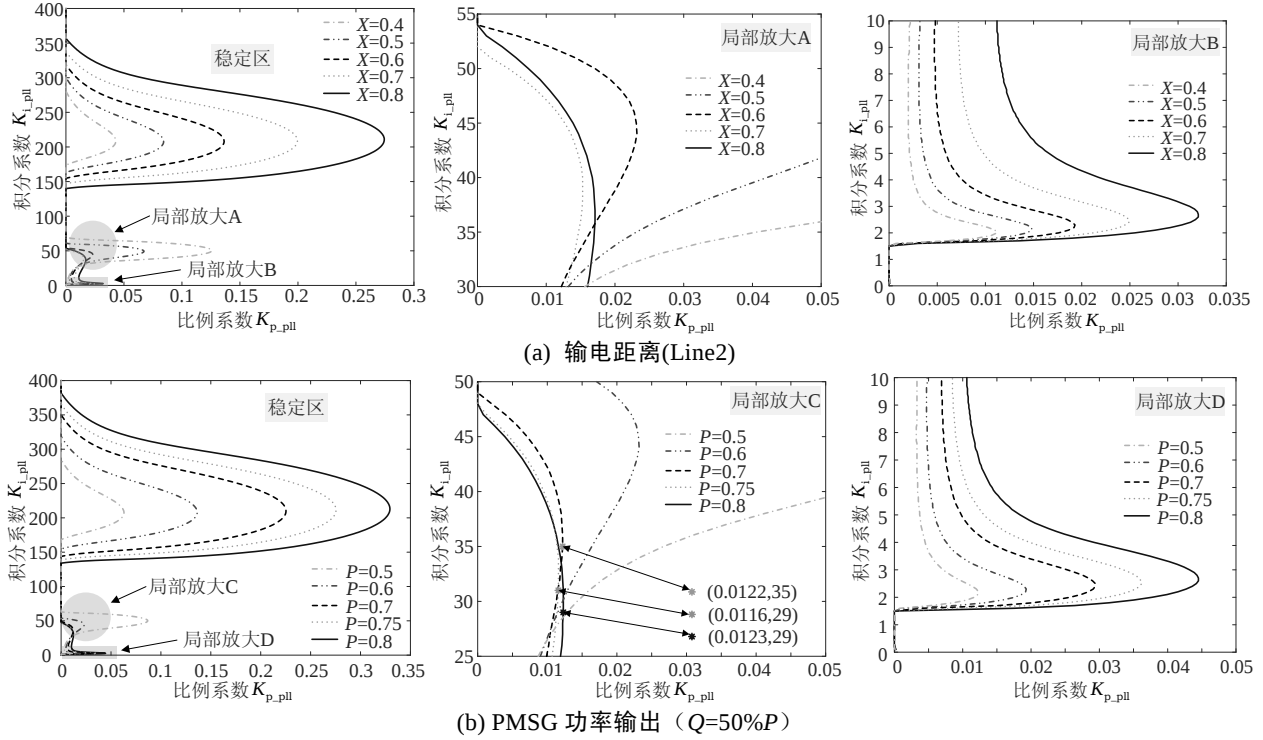


图 A3 系统参数对 PLL 参数安全域的影响

Fig.A3 Impact of system parameters on parameter safety region of PLL

表 A6 各模式在复平面的分布

Table A6 Distribution of modes in complex plane

模式	Case A	Case B	Case C	Case D
V_{dc}	-7.21+j119	-7.36+j119	-17.5+j118	-27.7+j116
I_q	-1.79+j25.9	-3.17+j25.2	-6.65+j26.9	-10.1+j25.3
Q/V	-13.7+j248	-27.5+j247	-39.3+j246	-51.2+j244

注: Case A—Case D 中每组模式的计算方法同表 A3。