

文章编号:0254-0096(2020)05-0182-09

基于锁相环的寄生反馈通道参与双馈风电并网 SSCI现象研究

郭永辉¹, 张新燕¹, 李振恩¹, 周远翔^{1,2}, 常喜强³

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 清华大学电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;
3. 新疆电力公司电力调度控制中心, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 为了研究风电并网中锁相环参与的次同步控制相互作用(SSCI)问题,将系统的控制侧与电机侧的子系统模型分别建立在控制侧和电机侧旋转轴中,然后通过两旋转轴间变换关系建立含锁相环扰动的全系统模型,与原始电流环模型对比发现,次同步扰动(振荡)将额外通过一个基于锁相环且与运行工况和外电网结构相关的寄生反馈通道作用于转子侧控制器(RSC)的电流比较点和电压补偿点。通过该寄生反馈通道相频特性和全系统传递函数极点分布,分析其对原始电流环的反馈效果和对全系统SSCI稳定性的影响。研究结果表明:寄生反馈通道在特定的工况和参数组合下对原始电流环起正的或负的反馈效果,进而会影响系统发生SSCI的风险。最后,在DigSILENT仿真平台上对理论分析结果进行时域仿真验证。

关键词: 电力系统; 锁相环; 反馈感应发电机; 次同步控制相互作用; 反馈通道

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A

0 引言

随着风电在电力系统电源结构中比重的增加,其动态特性对电网稳定性的影响越来越显著,美国德州电网、中国冀北沽源地区以及新疆哈密山北地区相继发生双馈或直驱风电参与的次同步振荡,造成风电机组脱网、设备损坏等一系列严重后果^[1-2]。在现代电力系统中,新能源机组如双馈风力发电机组(doubly fed induction generator, DFIG)主要基于矢量控制技术,通过机侧电压源型变换器及其依赖锁相环的转子侧控制器(rotor side controller, RSC)控制风电接入电网^[3-5],在该背景下,锁相环输出扰动会影响RSC的动态特性,进而参与到RSC与外部电网耦合引起的次同步振荡(sub-synchronous control interactions, SSCI),改变SSCI产生的风险。

目前少量文献针对锁相环参与风电场和电网相互作用引起振荡问题进行研究,主要来自2个层面:首先,将锁相环动态考虑到DFIG功率输出方程或DFIG机端

电压动态中,然后研究含锁相环动态的双馈风电机组与电力系统互联后可能会产生的相互影响,探讨其相互作用的机理^[6-7];其次,将锁相环动态对DFIG的影响归结为,其将导致转子侧控制信号和网侧电气量存在于2个不同的 dq 轴系中(锁相环输出扰动为2个 dq 轴系相位差),然后将转子侧控制信号和网侧电气量归于同一 dq 轴系建立系统模型,研究含锁相环动态的逆变器控制与电力系统间相互作用机理^[8]。

但上述文献将锁相环引入系统的建模方法中均未考虑及锁相环动态(扰动)参与RSC的具体过程,然而发电机转子 d 轴、 q 轴电流测量值的计算和RSC输出转子电压指令变换为发电机接受到转子电压的过程都是基于锁相环输出相位完成的,在这2个过程中锁相环扰动会为RSC引入新的扰动及输入端,这将改变RSC结构。本文提出的基于控制侧和电机侧 dq 轴相分离思想和小扰动分析方法,将控制侧(RSC)基于锁相环输出确定的 dq 轴单独建模,能反映RSC因锁相环扰动而引入新的扰动分量及输入端后结构变化情况,基于此研究锁

收稿日期: 2019-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(51667018); 国网新疆电力公司项目资助(SGXJ0000DKJS1440234)

通信作者: 张新燕(1964—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事新能源发电并网控制及消纳、电力故障诊断等方面的研究。
xjcxzy@126.com

相环将基于怎样的通道,以何种方式、多大程度地对 SSCI 施加影响。

1 虑及锁相环的双馈风电并网系统模型分析

1.1 模型分析与简化

本文针对次同步振荡(扰动)下各模块参与 SSCI 的实际情况进行简化分析。因为双馈风力发电机组转子转速和并网侧变流器控制环节的响应速度远小于 SSCI 引发的次同步振荡发散速度,另外通常转子侧变流器功率环相对电流环的比例系数配置较大,对 SSCI 现象影响有限^[9],同时次同步振荡频率远小于逆变器开关频率,可将转子侧变流器视为受控电压源^[10]。为此,本文建模过程作如下简化:略去转子侧变流器功率控制环、并网侧变流器控制环节、变流器开关频率和转子轴动态作用,只在控制系统中保留锁相环和 RSC 中的电流调节器与解耦电路,见图 1。完整转子变流器控制模型与原理不再赘述,具体参考文献[11]。

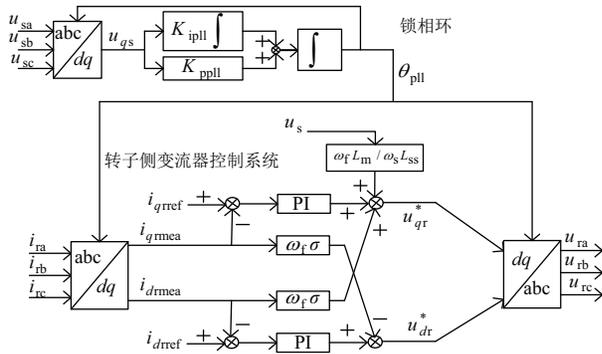


图1 转子侧变流器控制系统

Fig. 1 Control system of rotor side converter

为方便分析,本文将 RSC 输出转子电压指令记为 u_{dr}^* 、 u_{qr}^* , 发电机接收到转子电压记为 u_{dr} 、 u_{qr} , 电流环调节器记为 PI, 见图 1。图 1 中 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 分别为发电机定子端电压; K_{ppll} 、 K_{ipll} 分别为锁相环比例积分系数; θ_{pll} 为锁相环输出相角; i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} 和 u_{ra} 、 u_{rb} 、 u_{rc} 分别为发电机转子三相电流和电压; i_{qrref} 、 i_{drref} 和 i_{qrmea} 、 i_{drmea} 分别为发电机转子 d 轴、 q 轴电流的参考值和测量值; $\omega_r = \omega_s - \omega_r$ 为同步旋转轴相对转子的角速度; $\sigma = (L_r L_{ss} - L_m^2) / L_{ss}$, 其中 L_{ss} 、 L_r 分别为发电机定、转子电感, $L_{ss} = L_s + L_m + L_g$, $L_r = L_r + L_m$, 其中 L_s 、 L_r 、 L_m 和 L_g 分别为发电机定子漏感、转子漏感、定转子间互感和外电网等效电感。

1.2 锁相环参与 SSCI 原因分析

在图 1 中,锁相环输出的定子电压矢量相位有 2 个作用:1)用于计算发电机转子 d 轴、 q 轴电流的测量值; 2)用于将 RSC 输出转子电压指令变换为发电机接收到转子电压。

理想情况下,锁相环输出相位与定子电压矢量相位相同,不会为 RSC 引入新扰动,即不会参与到 SSCI 过程。但在实际情况下,锁相环具有低通动态特性^[12],系统中次同步频率扰动通过锁相环,导致其输出相位与定子电压矢量相位不同,引起发电机转子 d 轴、 q 轴电流的出现测量值误差,同时也导致 RSC 输出的发电机转子 d 轴、 q 轴电压指令与发电机接收到电压存在偏差,下文将根据上述分析,基于控制侧和电机侧 dq 轴相分离思想和小扰动分析方法,对锁相环参与 SSCI 现象数学建模。

2 基于锁相环的寄生反馈通道参与 SSCI 的模型建立

2.1 锁相环输出扰动对转子电流控制影响

2.1.1 锁相环输出扰动对转子电流测量影响

锁相环输出扰动使其输出相位与定子电压矢量真实位置不同,导致电机侧电气量与控制侧信号所对应的旋转 dq 轴系不同,其中电机侧电气量所对应的旋转轴系是由定子电压空间矢量真实位置决定的,本文称之为电机侧 dq 轴,记为 dq_{ste} , 控制侧信号所对应的旋转轴系是锁相环输出相角 θ_{pll} 决定,本文称为控制侧 dq 轴,记为 dq_{mea} , 见图 2。

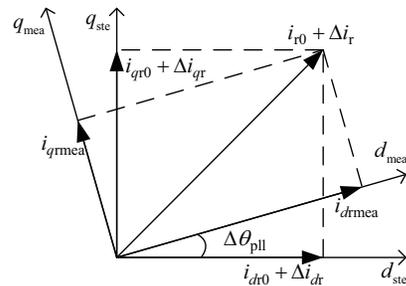


图2 转子电流矢量在 dq_{ste} 轴和 dq_{mea} 轴中分解图

Fig. 2 Schematic diagram of rotor current vector decomposition in dq_{ste} and dq_{mea} axes

设 dq_{ste} 与 dq_{mea} 存在偏差 $\Delta\theta_{pll}$; 实际转子电流在 dq_{ste} 中含有稳态分量 i_{dr0} 、 i_{qr0} 和小扰动分量 Δi_{dr} 、 Δi_{qr} 。根据图 2,在 dq_{mea} 中得到的转子电流测量值为:

$$\begin{bmatrix} i_{drmea} \\ i_{qrmea} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{pll} & \sin \Delta\theta_{pll} \\ -\sin \Delta\theta_{pll} & \cos \Delta\theta_{pll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr0} + \Delta i_{dr} \\ i_{qr0} + \Delta i_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, i_{drmea} 、 i_{qrmea} ——转子电流测量值。

式(1)表明,若锁相环输出无扰动,始终有 $\Delta\theta_{pll} = 0$,则 $i_{drmea} = i_{dr0} + \Delta i_{dr}$, $i_{qrmea} = i_{qr0} + \Delta i_{qr}$,转子电流无测量误差;若锁相环输出存在扰动,即 $\Delta\theta_{pll} \neq 0$,此时,转子电流测量值为:

$$\begin{cases} i_{drmea} = i_{dr0} + \Delta i_{dr} + \Delta\theta_{pll} i_{qr0} \\ i_{qrmea} = i_{qr0} + \Delta i_{qr} - \Delta\theta_{pll} i_{dr0} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表明,若转子电流中出现小扰动分量 Δi_{dr} 、 Δi_{qr} ,则锁相环输出扰动 $\Delta\theta_{pll}$ 导致转子电流环节测得的转子电流扰动为:

$$\begin{cases} \Delta i_{drmea} = \Delta i_{dr} + \Delta\theta_{pll} i_{qr0} \\ \Delta i_{qrmea} = \Delta i_{qr} - \Delta\theta_{pll} i_{dr0} \end{cases} \quad (3)$$

式中, Δi_{drmea} 、 Δi_{qrmea} ——转子电流测量值扰动。

2.1.2 锁相环输出扰动对转子电压影响

RSC 输出的转子电压指令是基于 dq_{mea} 的信号,而双馈风力发电机转子电压是基于 dq_{ste} 的电气量,若锁相环输出存在扰动(dq_{mea} 与 dq_{ste} 不同),则两者有偏差。设在 dq_{mea} 下的 RSC 输出的转子电压指令中含有稳态分量 u_{dr0}^* 、 u_{qr0}^* 和小扰动分量 Δu_{dr}^* 、 Δu_{qr}^* ,根据图 3,在 dq_{ste} 下的双馈风力发电机得到的转子电压为:

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{pll} & -\sin \Delta\theta_{pll} \\ \sin \Delta\theta_{pll} & \cos \Delta\theta_{pll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{dr0}^* + \Delta u_{dr}^* \\ u_{qr0}^* + \Delta u_{qr}^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, u_{dr} 、 u_{qr} ——发电机接收到的 d 轴、 q 轴电压。

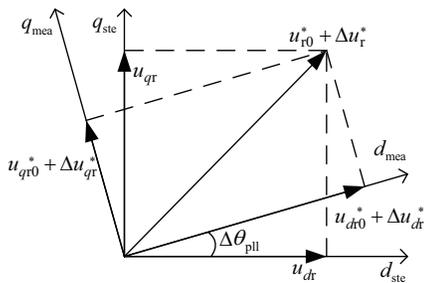


图3 RSC输出转子电压指令矢量在 dq_{ste} 轴和 dq_{mea} 轴中分解图

Fig. 3 Decomposition diagram of RSC output rotor voltage instruction vector in dq_{ste} and dq_{mea} axes

同理,式(4)表明,若锁相环输出无扰动,始终有 $\Delta\theta_{pll} = 0$,则 $u_{dr} = u_{dr0}^* + \Delta u_{dr}^*$, $u_{qr} = u_{qr0}^* + \Delta u_{qr}^*$,发电机接收到的 d 轴、 q 轴电压就是 RSC 输出的转子电压指令;若锁相环输出存在扰动,即 $\Delta\theta_{pll} \neq 0$,此时发电机接收到

的 d 轴、 q 轴电压为:

$$\begin{cases} u_{dr} = u_{dr0}^* + \Delta u_{dr}^* - \Delta\theta_{pll} u_{qr0}^* \\ u_{qr} = u_{qr0}^* + \Delta u_{qr}^* + \Delta\theta_{pll} u_{dr0}^* \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表明,若 RSC 输出的转子电压指令中出现小扰动分量 Δu_{dr}^* 、 Δu_{qr}^* ,则因为锁相环输出扰动 $\Delta\theta_{pll}$ 导致双馈风力发电机得到的转子电压扰动变为:

$$\begin{cases} \Delta u_{dr} = \Delta u_{dr}^* - \Delta\theta_{pll} u_{qr0}^* \\ \Delta u_{qr} = \Delta u_{qr}^* + \Delta\theta_{pll} u_{dr0}^* \end{cases} \quad (6)$$

式中, Δu_{dr} 、 Δu_{qr} ——转子电压扰动。

根据上述分析,由式(3)、式(6)可知,线性化的转子电流的测量值扰动 (Δi_{drmea} 、 Δi_{qrmea}) 和发电机接收到转子电压扰动 (Δu_{dr} 、 Δu_{qr}),既分别包含实际转子电流小扰动分量 Δi_{dr} 、 Δi_{qr} 和 RSC 输出的转子电压指令小扰动分量 Δu_{dr}^* 、 Δu_{qr}^* ,又包含锁相环输出扰动 $\Delta\theta_{pll}$ 。此时,图 1 中转子侧变流器控制系统的线性化模型如图 4 所示。

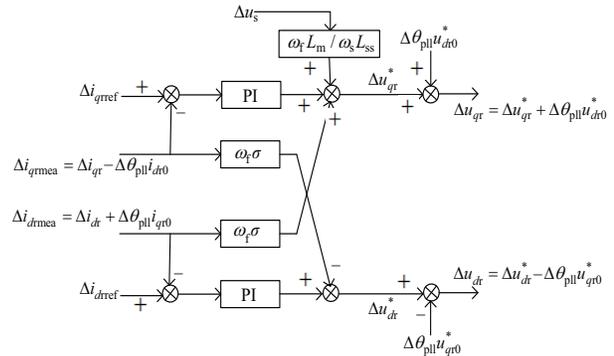


图4 转子侧变流器控制系统的线性化模型

Fig. 4 Linearization model of control system of rotor side converter

将图 4 分解到 d 、 q 轴对应的控制模型,见图 5a 和图 5c,其对应的控制对象实为存在交叉耦合项的 DFIG 转子电压控制方程,具体关系式参考文献[11],对应的模型见图 5b 和图 5d。观察图 5a 和图 5b, q 轴控制对象中所含的交叉耦合项,可被 q 轴转子电流控制中的前馈补偿项完全抵消,仍能实现发电机转子 dq 解耦,但在转子电流控制中引入了锁相环输出扰动。在图 5a 和图 5b 中去掉相抵消支路,结合在一起得到 q 轴含锁相环输出扰动的转子电流控制系统,见图 6a。同理得到 d 轴的含锁相环输出扰动的转子电流控制系统,见图 6b。图 6 给出了锁相环输出扰动引起转子电流扰动的传递函数。

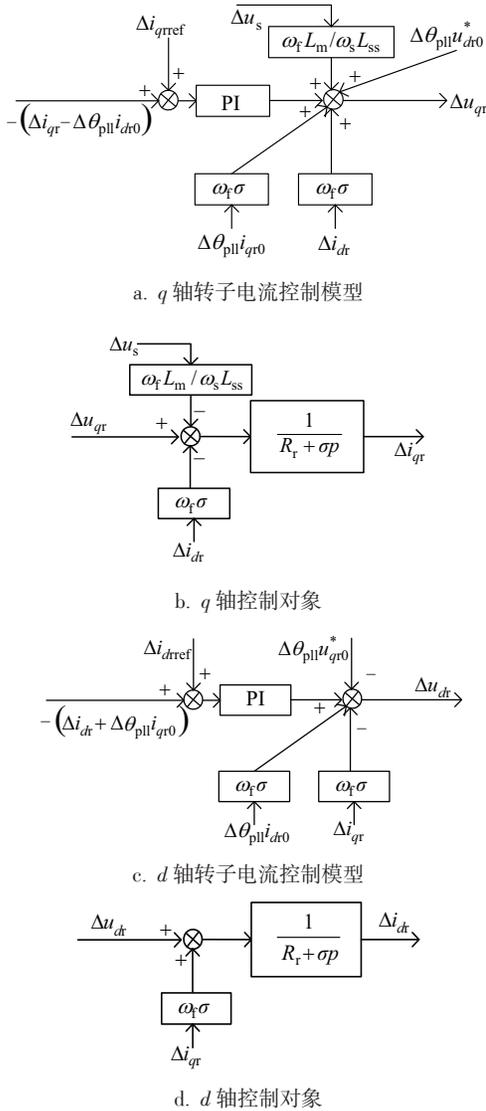


图5 转子电流控制及其控制对象在d、q轴分解图
Fig. 5 Decomposition diagrams of rotor current control and its control objects on d and q axes

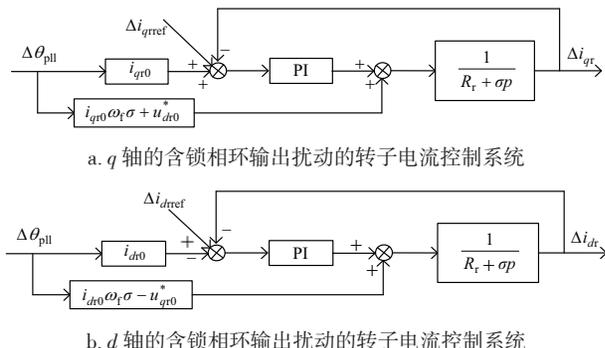


图6 含锁相环输出扰动的转子电流控制系统
Fig. 6 Rotor current control system with PLL output disturbance

2.2 转子电流扰动对机端电压的影响

对于单机无穷大并网系统,发电机外电网用电感 L_g 表示,见图 14,根据文献[8]中式(4)和文献[11]中式(2.22)、式(2.26),可得到转子电流小扰动 Δi_{dr} 、 Δi_{qr} 与机端电压 q 轴分量扰动 Δu_{qs} 的关系见式(7),其对应的传递函数模型见图 7。

$$\Delta u_{qs} = \frac{L_g L_m}{L_{ss} + L_g} p \Delta i_{qr} + \frac{L_g L_m}{L_{ss} + L_g} \Delta i_{dr} \quad (7)$$

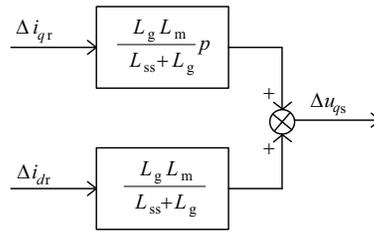


图7 转子电流到机端电压小扰动传递函数
Fig. 7 Transfer function of small perturbation of rotor current and terminal voltage

2.3 锁相环小扰动传递函数

锁相环结构见图 1,具体数学模型参考文献[12],文献[8]中式(3)给出了对其在某一稳态运行点的小扰动传递函数模型,其对应的传递函数模型见图 8。

$$\Delta u_{qs} \rightarrow \frac{K_{ppll} p + K_{ipll}}{p^2 + K_{ppll} p + K_{ipll}} \Delta \theta_{pll}$$

图8 锁相环小扰动传递函数
Fig. 8 Small perturbation transfer function of PLL

2.4 基于锁相环的寄生反馈通道

双馈风力发电机采用最大功率点跟踪控制,无功给定电流相对有功给定电流很小^[13],文中忽略无功给定电流的扰动,有功给定电流扰动作为小扰动模型输入。根据前文分析,并将相应环节结合,得虑及锁相环的转子电流控制系统(本文称全系统),其输入为 Δi_{qref} ,输出为 Δi_{qr} ,见图 9。观察图 9 可知,相对于未虑及锁相环时情况,此时系统存在 1 个寄生于锁相环且与运行工况和外电网结构相关的次同步扰动(振荡)反馈通道,本文称为寄生反馈通道。

3 寄生反馈通道对原始电流环SSCI现象的影响方式分析

假设风电并网系统发生SSCI,存在次同步扰动。若锁相环可实现完全跟踪,即 $\Delta \theta_{pll} = 0.000$,图 9 中寄生

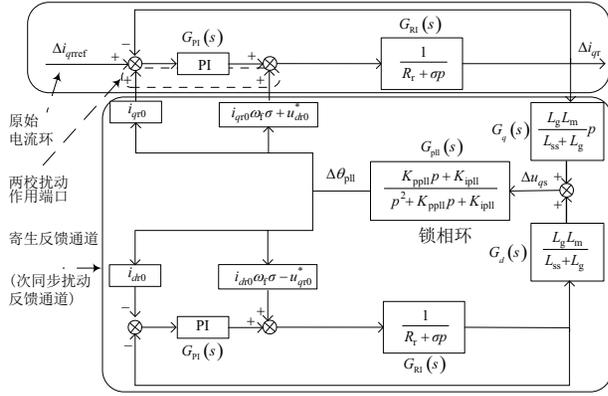


图9 全系统传递函数模型

Fig. 9 Transfer function model of whole system

反馈通道不存在,SSCI只存在于原始电流环,但锁相环具有低通特性。根据图9,转子内次同步扰动(振荡)电流引起的机端电压扰动可传递给锁相环并引起其输出扰动,最终为原始电流环在电流调节器PI前后引入2个新扰动,将两者统一到参考电流比较点,记为 Δi_t ,即为寄生反馈通道的输出。设 $G_{pi}(s)$ 、 $G_{ri}(s)$ 、 $G_{pll}(s)$ 和 $G_d(s)$ 、 $G_q(s)$ 分别为PI控制器、转子电流模型、锁相环小扰动模型和d轴、q轴转子电流与q轴机端电压扰动模型的传递函数,运行状态 i_{q0} 、 $i_{q0}\omega_r\sigma + u_{d0}^*$ 、 i_{d0} 、 $i_{d0}\omega_r\sigma - u_{q0}^*$ 分别用a、b、c、d表示,则寄生反馈通道传递函数可表示为:

$$H_t(s) = \frac{G_{pll}(s)}{1 - G_{pll}(s)H_1(s)} \left(\frac{b}{G_{pi}(s)} + a \right) G_q(s) \quad (8)$$

式中, $H_1(s)$ —— 锁相环输出扰动 $\Delta\theta_{pll}$ 作用于无功电流环引起q轴机端电压扰动的传递函数,

$$H_1(s) = \frac{G_{pi}(s)G_{ri}(s)}{1 + G_{pi}(s)G_{ri}(s)} \left(\frac{d}{G_{pi}(s)} - c \right) G_d(s)。$$

如果系统在特定的工况和参数组合下,使得该寄生反馈通道在某次同步频率处的相位的绝对值小于 90° ,则其对原始电流环呈现正反馈效果^[8],此时若原始电流环自身的负反馈通道不能抵消掉寄生反馈通道的正反馈效果,可能加重原始电流环SSCI作用,发生次同步振荡失稳,线路电流及功率振荡发散。

4 寄生反馈通道在不同参数和工况下对SSCI的影响分析

根据式(8)和图9,寄生反馈通道传递函数的输入为 Δi_{qr} ,输出为 Δi_t ,全系统传递函数的输入为 Δi_{qref} ,输出为 Δi_{qr} ,改变表1(见后文第5节)中相应参数,利用Matlab作出寄生反馈通道的相频特性和全系统的极点

分布,分析不同锁相环参数、系统结构参数和运行工况下,寄生反馈通道对原始电流环的反馈效果与其对全系统中SSCI稳定性的影响。

4.1 锁相环参数

寄生反馈通道传递函数相频特性分析。保持其他参数不变,锁相环比例系数 K_{pll} 取较小值1和较大值70时,积分系数 K_{ipll} 取较小值100和较大值5000时,计算寄生反馈通道的相频特性,如图10所示,可看出,当 K_{pll} 取较小值或 K_{ipll} 取较大值时,寄生反馈通道在次同步频率范围内相角绝对值大于 90° ,表明其对原始电流环呈现负反馈效果。当 K_{pll} 取较大值或 K_{ipll} 取较小值时,寄生反馈通道在次同步频率范围内相角绝对值小于 90° ,表明其对原始电流环呈现正反馈效果。

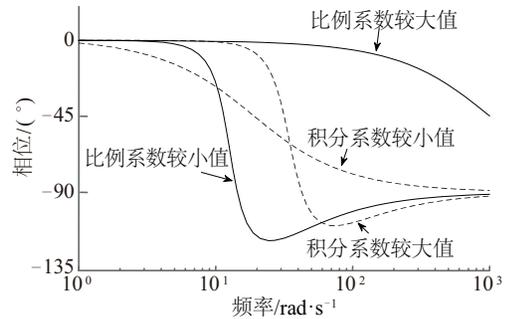


图10 不同 K_{pll} 和 K_{ipll} 下寄生反馈通道相频特性

Fig. 10 Phase-frequency characteristics of parasitic feedback channels with different K_{pll} and K_{ipll} values

全系统传递函数次同步频率主导极点分析。图11为全系统传递函数的次同步频率主导极点随比例系数 K_{pll} (1~70)和积分系数 K_{ipll} (100~5000)变化时的轨迹,可看出,当 K_{pll} 取较小值时,全系统相对原始电流环的

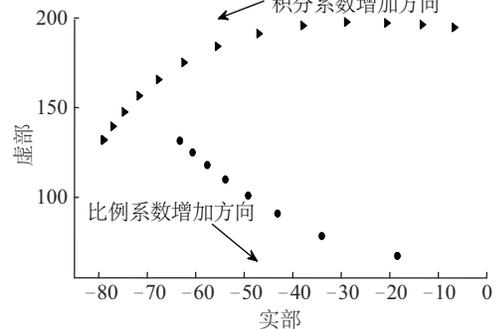


图11 增加 K_{pll} 和 K_{ipll} 时全系统次同步频率主导极点轨迹

Fig. 11 Dominant pole locus of whole system when values of K_{pll} and K_{ipll} are increasing

特征根更远离虚轴,系统稳定性增加,表明此时寄生反馈通道有利于系统的稳定性。当 K_{pll} 取较大值时,全系统相对原始电流环的特征更靠近虚轴,系统稳定性降低,表明此时寄生反馈通道不利于系统的稳定性。同理, K_{pll} 取较大值时,寄生反馈通道有利于系统的稳定性,反之则不利于系统的稳定性。

4.2 系统工况与结构参数

寄生反馈通道传递函数相频特性分析。保持其他参数不变,表征系统工况的转子电流稳态值 i_{qr0} ($i_{qr\text{ref}}$)分别取较小值0.1 pu和较大值3.0 pu时,表征系统结构的外电网电感 L_g 分别取较小值 $0.1L_{g0}$ 和较大值 $3.0L_{g0}$ 时,计算寄生反馈通道的相频特性如图12所示,可看出,当 i_{qr0} 、 L_g 取较小值时,寄生反馈通道在次同步频率范围内相角绝对值大于 90° ,表明其对原始电流环呈现负反馈效果。当 i_{qr0} 、 L_g 取较大值时,寄生反馈通道在次同步频率范围内相角绝对值小于 90° ,表明其对原始电流环呈现正反馈效果。

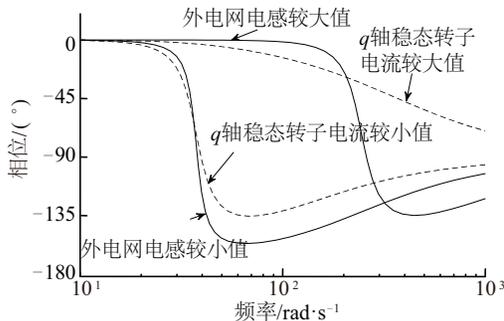


图12 不同 i_{qr0} 和 L_g 下寄生反馈通道相频特性

Fig. 12 Phase-frequency characteristics of parasitic feedback channels with different i_{qr0} and L_g values

全系统传递函数次同步频率主导极点分析。图13为全系统传递函数的次同步频率主导极点随转子电流

稳态值 i_{qr0} (0.1~3.0 pu)和外电网电感 L_g ($0.1L_{g0} \sim 3.0L_{g0}$)变化时的轨迹,可看出,当 i_{qr0} 取较小值时,全系统相对原始电流环的特征更远离虚轴,系统稳定性增加,表明此时寄生反馈通道有利于系统的稳定性。当 i_{qr0} 取较大值时,全系统相对原始电流环的特征更靠近虚轴,系统稳定性降低,此时寄生反馈通道不利于系统的稳定性。同理, L_g 取较小值时,寄生反馈通道有利于系统的稳定性,反之则不利于系统的稳定性。

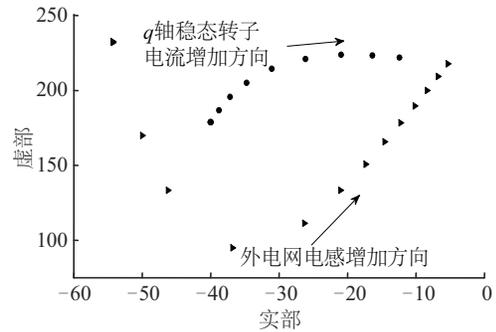


图13 增加 i_{qr0} 和 L_g 时全系统次同步频率主导极点轨迹

Fig. 13 Dominant pole locus of system when values of i_{qr0} and L_g are increasing

5 仿真实验

利用Digsilent平台仿真,按图14搭建单双馈风力发电机无穷大系统,调整锁相环积分和比例系数、有功给定电流和外电网电感,使并网有功功率出现振荡,此时并网功率为50 MVA,系统参数如表1所示。由图15可看出,起振阶段(0.250~0.730 s)并网功率以次同步频率振荡(约35 Hz)快速发散,在0.750 s时刻,保持其他参数不变,1)将 K_{pll} 的取值由70减小为1后,并网功率衰减直至平稳,见图15a;2)将 K_{pll} 的取值由100增大到5000后,并网功率有所衰减,但仍存在振荡,见图15b;

表1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值	参数	数值	
外电网电感初值 L_{g0}	出口变压器漏感/pu	0.590+0.590	容量基值/MVA	60
	升压变压器漏感/pu	0.510+0.510	电机定子电阻/pu	0.013
	输电线路电感/pu	2.690	电机定子漏感/pu	0.170
锁相环比例系数 K_{pll}	70	电机转子电阻/pu	0.017	
锁相环积分系数 K_{ipl}	100	电机转子电感/pu	0.144	
转子 q 轴电流稳态值 i_{qr0} /pu	2.410	电机励磁电感/pu	3.660	

3) 将 i_{qr0} (i_{qrref}) 的取值由 2.410 pu 减小为 0.100 pu 后, 并网功率跌落至小值, 并伴有明显振荡衰减, 见图 15c; 4) L_g 的取值由 $3.0L_{g0}$ 减小为 $0.1L_{g0}$ 后, 并网功率逐渐衰减直至平稳, 见图 15d, 仿真结果与理论分析结论一致。同时仿真结果表明, 锁相环比例系数 K_{pll} 和外电网电感 L_g 相当于锁相环积分系数 K_{ipl} 和发电机转子 q 轴电流稳态值 i_{qr0} 对 SSCI 的影响更加显著。

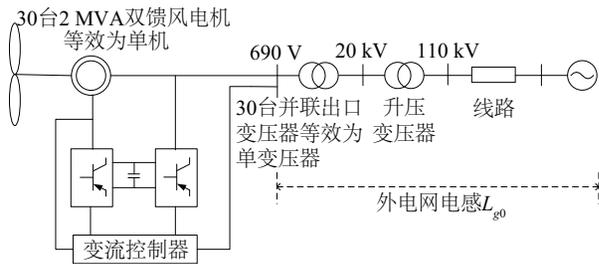
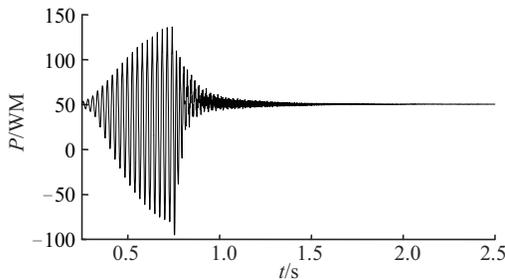
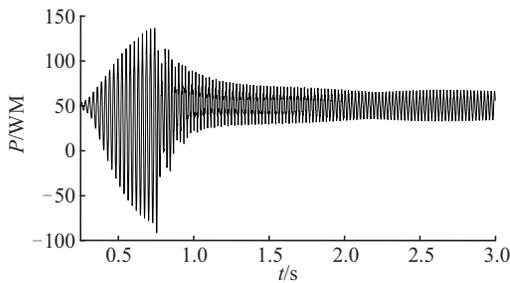


图 14 单双馈风力发电机无穷大系统示意图

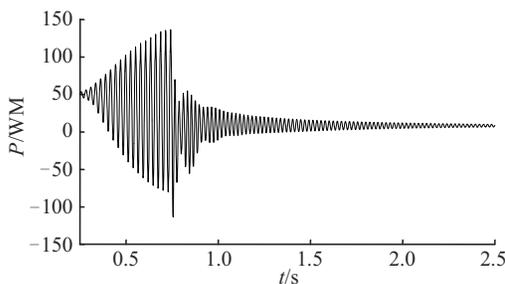
Fig. 14 Schematic diagram of infinite bus system of single DFIG wind turbine



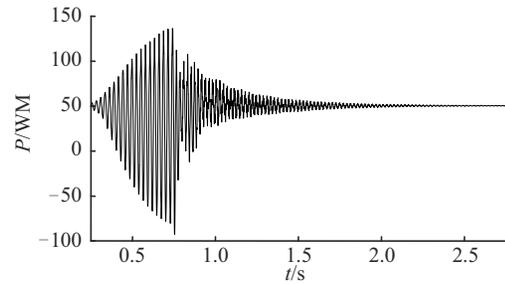
a. 减小 K_{pll}



b. 增大 K_{ipl}



c. 减小 i_{qr0} (i_{qrref})



d. 减小 L_g

图 15 寄生反馈通道各参数对并网功率振荡影响

Fig. 15 Effects of parasitic feedback channel parameters on grid-connected power oscillation

6 结 论

本文以单双馈风力发电机经外电网并入理想电网的典型模型为例进行分析, 建立含锁相环扰动的全系统传递函数模型, 与未虑及锁相环时情况对比发现锁相环的存在还会为次同步扰动(振荡)引出一条额外的反馈通道。通过对其数学分析可知, 该寄生反馈通道在次同步频率范围内相角绝对值大小决定了锁相环对系统 SSCI 的作用性质。当双馈风力发电机并网外电网等效电感过大、高出力工况运行, 且锁相环控制器比例系数过小、积分系数过大时, 寄生反馈通道对原始电流环起到正反馈效果, 增加了发生 SSCI 的风险, 反之, 寄生反馈通道对原始电流环起负反馈效果, 有助于降低系统发生 SSCI 的风险。通过调整相应系统参数可在一定程度上抑制 SSCI 现象, 其中调整锁相环比例系数、外电网电感相对于调整锁相环积分系数、发电机转子有功稳态电流对 SSCI 的影响更为显著。

[参考文献]

[1] 薛安成, 吴雨, 王子哲, 等. 次同步扰动下的双馈风机系统多频率响应分析[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1804-1810.
XUE A C, WU Y, WANG Z Z, et al. Analysis of frequency response of DFIG system under subsynchronous disturbance[J]. Power system technology, 2018, 42(6): 1804-1810.

[2] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI M J, YU Z, XU T, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution [J]. Power system technology, 2017, 41(4): 1035-1042.

- [3] 凌禹. 主动撬棒技术及其对双馈风电机组影响研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1396-1401.
LING Y. Analysis of active crowbar control and its effect on doubly fed induction generators wind turbines [J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(5): 1396-1401.
- [4] 史磊, 1.5 MW 风电机组并网逆变器控制技术研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.
SHI L. 1.5 MW wind turbine grid inverter control technology research [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2018.
- [5] 王元成, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [6] 王志文, 沈沉, 刘锋. 不同锁相机制的双馈电机对电力系统小干扰稳定的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6167-6176.
WANG Z W, SHEN C, LIU F. Analysis on impact of doubly fed induction generations with different phase lock mechanism on power system small signal stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6167-6176.
- [7] 薛安成, 王清, 毕天姝. 双馈风机与同步机小扰动功角相互作用机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 417-425.
XUE A C, WANG Q, BI T S. Study on the mechanism of small signal dynamic interaction between doubly-fed induction generator and synchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 417-425.
- [8] 王晖, 李莹, 李文锋, 等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1061-1067.
WANG H, LI Y, LI W F, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter [J]. Power system technology, 2017, 41(4): 1061-1067.
- [9] 吴熙, 关雅静, 宁威, 等. 双馈风机转子侧变换器参数对次同步振荡的交互影响机理及其应用研究[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2536-2543.
WU X, GUAN Y J, NING W, et al. Mechanism of interactive effect of RSC parameters in DFIG on SSO and its application [J]. Power system technology, 2018, 42(8): 2536-2543.
- [10] 朱晓荣, 刘世鹏, 王毅, 等. 电网电压对称故障时双馈风电机组转子电压补偿控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3280-3288.
ZHU X R, LIU S P, WANG Y, et al. Rotor voltage compensation control strategy for doubly fed induction generators during balanced voltage fault [J]. High voltage engineering, 2016, 42(10): 3280-3288.
- [11] 王波. 含双馈机组风电场次同步振荡分析与抑制[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
WANG B. Analysis and suppression of subsynchronous oscillation in wind farm with doubly fed induction generator [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [12] 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 Y H, ZHAI X B, LIU D, et al. Stability 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.
- [13] 曹娜, 于群. 风电场建模技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

RESEARCH ON MECHANISM OF PHASE-LOCKED LOOP PARTICIPATING IN SSCI OF DFIG GRID CONNECTION

Guo Yonghui¹, Zhang Xinyan¹, Li Zhen'en¹, Zhou Yuanxiang^{1,2}, Chang Xiqiang³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Communication Center for Power Dispatching, Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830002, China)

Abstract: In order to study the influence of PLL on SSCI of wind power grid connected system, the corresponding subsystem models of both sides are established based on the control side rotation coordinate system, and the motor side rotation coordinate system respectively, and then the wind power grid connected system model with PLL is deduced by combining the transformation relationship between the two rotation coordinate systems. Compared with the original current loop model, it can be known from this study that the stator side sub-synchronous disturbance (oscillation) will be appeared on the current comparison point and voltage compensation point of RSC through a parasitic feedback channel and a phase-locked loop which are related to operation conditions of external grid structure. By studying the phase frequency characteristics of the parasitic feedback channel and the pole distribution of the transfer function of the whole system, the feedback effect of the parasitic feedback channel on the original current loop and its influence on the SSCI stability of the wind power grid connected system are analyzed. The results show that the parasitic feedback channel has a positive or negative feedback effect on the original current loop under certain conditions and parameters combination, which will increase the risk of SSCI in the wind power grid connected system. Finally, the theoretical analysis results are validated by time domain simulation on the DIgSILENT platform.

Keywords: power systems; phase locked loops; doubly fed induction generator (DFIG); subsynchronous control interaction (SSCI); feedback loops