

DOI: 10.7667/PSPC161990

基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析

陈斐泓¹, 杨健维², 廖凯², 何正友²

(1. 福建省电力勘测设计院, 福建 福州 350003; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 双馈风电机组中存在较多与次同步振荡频率范围耦合的控制环路, 容易引发控制环路与线路串联电容补偿之间的次同步控制相互作用(SSCI)。其中双馈风电机组转子侧内环比例参数对SSCI影响显著, 但由于其稳定阈值较小, 在抑制SSCI时的可调范围有限, 因此有必要探寻控制环路中的其他参数对SSCI的影响。在建立完善的含双馈风电机组控制环路的并网系统阻抗模型的基础上, 通过波特图与灵敏度分析详细对比控制参数对系统阻抗的影响大小, 采用频率扫描法揭示了控制参数对系统阻抗的影响机理。结果表明: 转子侧内环积分参数直接影响系统的谐振频率与线路的临界串联电容补偿度大小, 积分参数的减小能够增加比例参数的可调范围, 从而有利于降低并网系统发生SSCI的风险。

关键词: 双馈风电机组; 次同步控制相互作用; 灵敏度分析; 波特图; 频率扫描法

Sub-synchronous control interaction analysis in doubly-fed induction generator based on frequency scanning

CHEN Feihong¹, YANG Jianwei², LIAO Kai², HE Zhengyou²

(1. Fujian Electric Power Survey & Design Institute, Fuzhou 350003, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Doubly-fed wind turbines have many control loops that are coupled to the sub-synchronous oscillation frequency range, which may lead to Sub-Synchronous Control Interaction (SSCI) between the control loop and series compensated transmission line. Although inner loop proportional parameter has a significant effect on the SSCI, because of the limit of stability threshold, it is necessary to find out the effects of other parameters in the control loop on the SSCI. On the basis of the establishment of the impedance model contains control loops of DFIG, bode plot and sensitivity analysis are adopted to compare the influence of different controller parameters on the system impedance and frequency scan is used to reveal the impact mechanism of system impedance at different control parameters. The results show that the integral parameter of the rotor side directly affects the resonance frequency and series compensation degree of the transmission line. The reduction of the integral parameter can increase the adjustable range of the proportional parameter, which is beneficial to reduce the risk of SSCI in grid-connected system.

This work is supported by International Cooperation Project of Sichuan Provincial Science and Technology Department (No. 2015HH0055).

Key words: double-fed wind turbine; sub-synchronous control interaction; sensitivity analysis; bode plot; frequency scan

0 引言

风能是最具规模化开发前景的清洁、可再生优质能源, 由于风能资源一般远离负荷中心, 串联电容补偿能够有效提高远距离输电系统的输电容量, 从而被大规模风电远距离外送系统广泛采用^[1-2]。然

而, 实际运行情况表明, 串联电容补偿的引入加大了风电外送系统诱发次同步振荡的风险, 严重时甚至会造成风电并网系统设备的损伤^[3-5]。相比于常规火电机组, 双馈风电机组(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)具有较低的扭转频率(<3 Hz), 不容易发生扭转相互作用。产生次同步振荡的主要原因为DFIG控制环路与固定串联电容补偿之间的次同步控制相互作用(Sub-Synchronous Control Interaction, SSCI)^[6], 因此, 研究如何准确衡量DFIG控制环路参数对并网系统

基金项目: 四川省科技厅国际合作计划基金资助项目(2015HH0055)

次同步振荡的影响, 对进一步提高风电并网系统的运行稳定性具有重要意义。

目前, 针对含 DFIG 并网系统 SSCI 发生机理和振荡特性的研究, 主要包括频率扫描、特征值分析和时域仿真三种方法。文献[7-10]采用频率扫描法与传递函数方法分析了 SSCI 的发生机理和影响因素, 揭示了 DFIG 转子侧电流内环控制参数对 SSCI 特性的影响, 但没有进一步讨论电流环控制参数与线路串联电容补偿度之间的相互作用关系。文献[11]从机侧变流器 PI 控制器的电路模型出发, 建立了含控制器的风电系统等效电路模型, 并在此基础上提出了基于虚拟电阻的次同步振荡的抑制策略, 但忽略了 DFIG 转子侧电流内环比例参数稳定阈值较小, 可调区间有限。文献[12-15]建立了双馈风机等值阻抗模型, 通过计算输电线路阻抗与双馈风机等值阻抗比值的耐奎斯特曲线, 研究了风速、线路串联电容补偿度以及内环比例参数对次同步特性的影响, 但分析中忽略了双馈风电机组控制器其他参数对系统次同步振荡的影响。

本文在现有研究的基础之上, 计及风机控制环路与输电线路统一过程中的坐标变换, 建立了完善的含双馈风电机组转子侧变频器 (Rotor-Side Converters, RSC) 以及电网侧变频器 (Grid-Side Converters, GSC) 内外环的并网系统阻抗模型。利用波特图与阻抗灵敏度分析的方法详细地比较了内外环 PI 参数对系统阻抗的影响, 基于此筛选出对 SSCI 影响更为显著的控制参数。分析结果表明: 除风速、系统串联电容补偿度以及 RSC 侧内环比例参数外, RSC 侧内环积分参数也会对次同步特性产生显著影响; 相比于内环比例参数, 内环积分参数有着更大的可调范围, 因而更利于次同步振荡抑制。频率扫描的分析结果表明, 积分参数减小, 有助于增加比例参数的可调范围, 提高系统的稳定运行域。仿真分析结果验证了理论分析的正确性。

1 双馈风电机组并网系统阻抗模型

1.1 双馈风电机组并网系统

本文研究的双馈风电机组并网算例系统如图 1 所示^[16]。该系统基于 IEEE 第一标准测试系统, 将同步发电机组替换为双馈风电场。其中, 风电场由 50 台单机容量为 2 MW 的双馈风电机组构成, 本文采用一台容量为 100 MW 的风电机组对风电场进行了等效, 等效后的双馈风电机组并网系统的参数如表 1 所示^[17]。

表 1 双馈风机和输电系统参数

Table 1 Parameters of DFIG and transmission network

参数	数值	参数	数值
容量基值/MVA	100	直流侧电容/ μF	$50 \times 14\ 000$
等值定子电阻 $R_s/\text{p.u.}$	0.004 88	网侧滤波电抗 $X_{lg}/\text{p.u.}$	0.3
等值定子漏抗 $X'_s/\text{p.u.}$	0.092 31	线路电阻 $R_L/\text{p.u.}$	0.02
等值转子电阻 $R_r/\text{p.u.}$	0.005 49	线路感抗 $X_L/\text{p.u.}$	0.5
等值定子漏抗 $X'_r/\text{p.u.}$	0.099 55	线路容抗 $X_C/\text{p.u.}$	0~0.4
等值励磁电抗 $X_m/\text{p.u.}$	3.952 79	变压器漏抗 $X_T/\text{p.u.}$	0.14

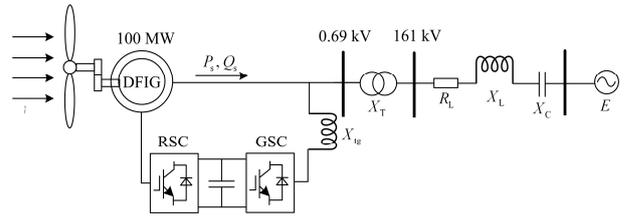


图 1 双馈风电机组经串联电容补偿并网系统结构图

Fig. 1 DFIG based series compensated transmission system

1.2 并网系统阻抗模型

假设串联电容补偿线路三相对称, 忽略线路的互感, 三相 RLC 电路的矢量空间表达式可以表示如式(1)^[18]。

$$Z_{\text{net}} = \frac{U}{I} = R_L + j(X_L + X_T) - jX_C \quad (1)$$

双馈感应发电机的阻抗等效模型如图 2 所示, 其中 s 为转子侧的转差率, 其大小与系统谐振频率以及风电机组的输入风速有关。

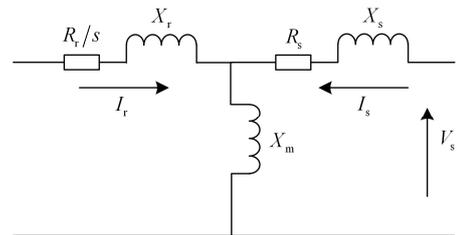


图 2 感应发电机频率扫描模型

Fig. 2 Induction generator frequency scan model

双馈风电机组 RSC 侧由功率外环以及电流内环两部分组成, 以实现有功无功独立解耦^[19], 其控制结构如图 3 所示。

为分析 RSC 侧功率外环与电流内环 PI 参数对系统阻抗的影响, 将功率外环看成电压跟踪型 PI 控制单元。由电压外环与电流内环等效电路原理, 将 RSC 侧的控制回路进行戴维南等效^[20], 得到的等效电路模型如图 4 所示。

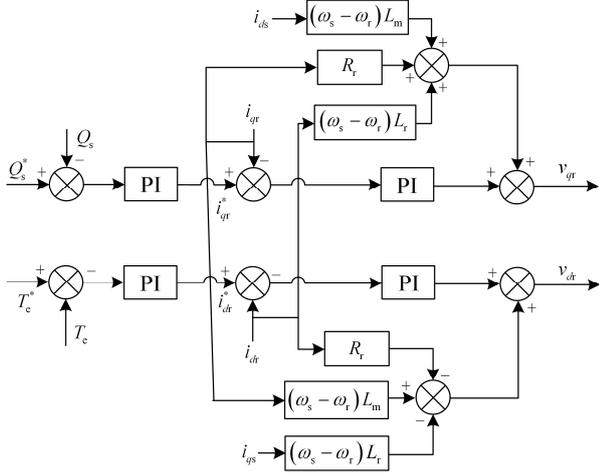


图3 双馈风电机组 RSC 侧控制环
Fig. 3 RSC control loop of DFIG

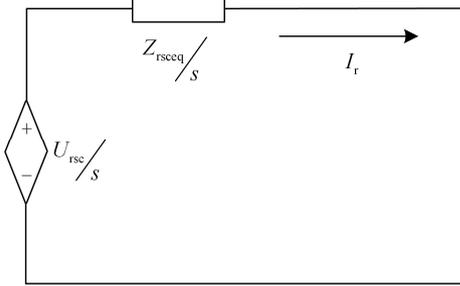


图4 RSC 侧戴维南等效电路模型
Fig. 4 Thevenin equivalent circuit of RSC

其中,

$$U_{rsc}(s) = \frac{(sK_{p1} + K_{i1})(sK_{p2} + K_{i2})}{s^2 + (sK_{p1} + K_{i1})(sK_{p2} + K_{i2})} (Q_s^* + jT_c^*) \quad (2)$$

$$Z_{rsc}(s) = \frac{s(sK_{p2} + K_{i2})}{s^2 + (sK_{p1} + K_{i1})(sK_{p2} + K_{i2})} \quad (3)$$

式中: \$K_{p1}\$、\$K_{i1}\$ 表示 RSC 侧外环比例参数与积分参数; \$K_{p2}\$、\$K_{i2}\$ 表示 RSC 侧内环比例参数与积分参数, \$Q_s^*\$ 表示双馈风电机组无功功率的参考值; \$T_c^*\$ 表示双馈风电机组电磁转矩的参考值。

同样地, GSC 侧的戴维南等效电路可以表示为

$$U_{gsc}(s) = \frac{(sK_{p3} + K_{i3})(sK_{p4} + K_{i4})}{s^2 + (sK_{p3} + K_{i3})(sK_{p4} + K_{i4})} V_{dc}^* \quad (4)$$

$$Z_{gsc}(s) = \frac{s(sK_{p4} + K_{i4})}{s^2 + (sK_{p3} + K_{i3})(sK_{p4} + K_{i4})} \quad (5)$$

线路侧的坐标系为 \$abc\$ 坐标系, 双馈风电机组控制侧的坐标系为 \$dq\$ 坐标系, 考虑到坐标系的统

一, 需要将控制侧的坐标系通过坐标变换转化为 \$abc\$ 坐标系。其中, RSC 侧的等效阻抗经坐标变换可以表示为

$$Z_{rsc}(j\omega) = Z_{rsc}(s - j\omega) \quad (6)$$

同样的, GSC 侧的等效阻抗可以表示为

$$Z_{gsc}(j\omega) = Z_{gsc}(s - j\omega) \quad (7)$$

因此, 可以得到图 5 所示的双馈风电机组并网系统阻抗模型。图中转差率为

$$s_{slip} = \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} \quad (8)$$

其中,

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \sqrt{\frac{K(X_L + X_T)}{\sum X}} \quad (9)$$

式中: \$f_1\$ 为并网系统的自然谐振频率, 其大小与线路参数以及风电机组参数均相关; \$K\$ 为线路串联电容的补偿度大小; \$\sum X\$ 为从无穷大电源看进去双馈风电机组并网系统的等效阻抗; \$\omega_r\$ 为双馈风电机组转子转速, 其大小与输入风速有关。

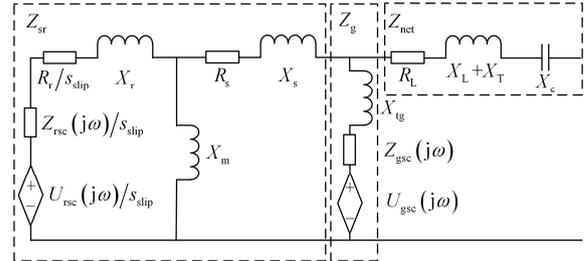


图5 双馈风电机组并网系统阻抗模型
Fig. 5 Impedance circuit of DFIG based series compensated transmission system

考虑到并网系统完整的阻抗模型含有较多并联支路, 在次同步振荡频率的频段(62~314 rad/s)下等值励磁电抗 \$X_m\$ 与 GSC 侧等效阻抗 \$Z_g\$ 均显著地大于含 RSC 侧双馈感应发电机等效阻抗 \$Z_{sr}\$, 对于并联支路其总电阻近似等于 \$Z_{sr}\$, 因此可以忽略 \$X_m\$ 与 \$Z_g\$ 对其的影响^[11]。从无穷大电源看进去含双馈风电机组的并网系统简化阻抗表达式为

$$Z = (Z_{rsc} + R_r) \frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega_r} + R_s + jX_{eq} - jX_c \quad (10)$$

其中,

$$X_{eq} = X_r + X_s + X_T + X_L \quad (11)$$

$$Z_{rsc} = \frac{(s - j\omega)((s - j\omega)K_{p2} + K_{i2})}{(s - j\omega)^2 + ((s - j\omega)K_{p1} + K_{i1})((s - j\omega)K_{p2} + K_{i2})} \quad (12)$$

2 双馈风电机组控制器参数的灵敏度分析

双馈风电机组 RSC 侧控制器参数对并网系统阻抗的影响大小不一, 而通过对控制器参数的灵敏度作波特图, 可以直观地比较不同运行点附近的影响大小^[21]。因此, 本文通过波特图与灵敏度分析对控制器参数变化对阻抗影响的大小进行详细对比, 其中控制器参数的阻抗灵敏度可以表示为

$$\frac{\alpha Z}{\alpha K_{p1}} = \frac{-(s-j\omega)^2((s-j\omega)K_{p2}+K_{i2})^2}{((s-j\omega)^2+((s-j\omega)K_{p1}+K_{i1}))((s-j\omega)K_{p2}+K_{i2})^2} \quad (13)$$

$$\frac{\alpha Z}{\alpha K_{i1}} = \frac{-(s-j\omega)((s-j\omega)K_{p2}+K_{i2})^2}{((s-j\omega)^2+((s-j\omega)K_{p1}+K_{i1}))((s-j\omega)K_{p2}+K_{i2})^2} \quad (14)$$

$$\frac{\alpha Z}{\alpha K_{p2}} = \frac{(s-j\omega)^4}{((s-j\omega)^2+((s-j\omega)K_{p1}+K_{i1}))((s-j\omega)K_{p2}+K_{i2})^2} \quad (15)$$

$$\frac{\alpha Z}{\alpha K_{i2}} = \frac{(s-j\omega)^3}{((s-j\omega)^2+((s-j\omega)K_{p1}+K_{i1}))((s-j\omega)K_{p2}+K_{i2})^2} \quad (16)$$

式(13)一式(16)为系统阻抗对控制参数的一阶偏导数。在控制参数给定的情况下, 可得到不同参数在不同频率下的阻抗灵敏度大小, 如图 6 所示。

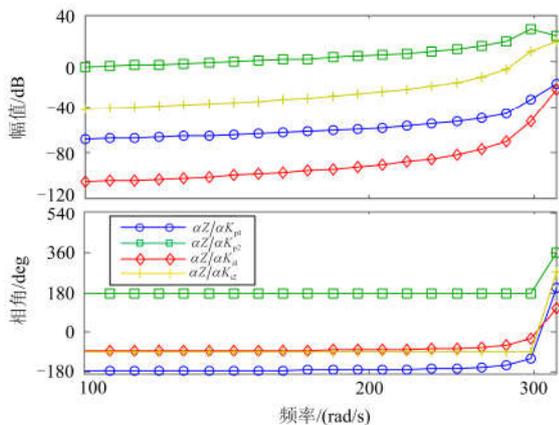


图 6 双馈风电机组 RSC 侧控制器参数阻抗灵敏度波特图

Fig. 6 Bode plot of control parameter of RSC of DFIG

图 6 所示的双馈风电机组 RSC 侧控制器参数阻抗灵敏度波特图反映了控制参数的灵敏度大小。图中结果表明, 双馈风电机组 RSC 侧控制系统中内环比例参数 K_{p2} 的影响最大, 紧接着是内环积分参数 K_{i2} 、外环比例参数 K_{p1} 以及外环积分参数 K_{i1} 的影

响较小。总体来看, 内环参数的阻抗灵敏度大于外环参数的, 比例参数的阻抗灵敏度大于积分参数的。

波特图的相角响应曲线反映了不同控制参数对系统阻抗性质的影响。图 6 中的分析结果表明, 内外环比例参数的相角近似为 180° 与 -180° , 其中内外环比例参数均呈负阻性, 随着比例参数的增加, 系统的阻抗实部将减小。比例参数的变化影响并网系统的等效电阻。内外环积分参数相角均为 -90° , 积分参数呈容性, 随着积分参数的增加, 系统的阻抗虚部将下降。积分参数的变化影响并网系统的等效电抗。

当双馈风电机组控制参数发生相应的改变时, 控制器参数的阻抗灵敏度会发生相应的变化, 其中图 7 揭示了不同双馈风电机组 RSC 侧内环控制参数下控制器参数阻抗灵敏度幅值的变化情况。结果表明, 随着内环比例参数与积分参数的增加, 外环比例参数与积分参数在对应频率下的阻抗灵敏度均有一定程度的提升, 而内环比例参数与积分参数的阻抗灵敏度变化较小。但内环参数的阻抗灵敏度大于外环参数的、比例参数的阻抗灵敏度大于积分参数的关系仍然保持。上述结果表明, 内环比例参数与积分参数对于系统阻抗的影响较为显著, 因此, 可以认为两者是影响次同步振荡的关键因素。

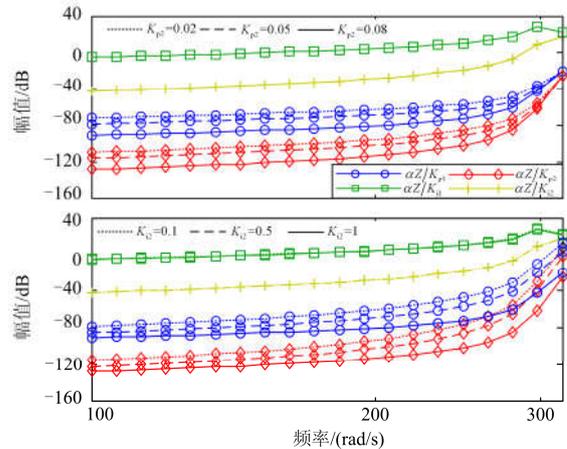


图 7 RSC 侧不同控制参数下阻抗灵敏度波特图

Fig. 7 Bode plot of RSC of DFIG at different control parameters

3 基于频率扫描的次同步影响因素分析

3.1 内环比例参数影响分析

对简化阻抗电路, 进行频率扫描可以得到对应的阻抗扫描曲线。由阻抗电路表达式可知, 阻抗曲线与风速、线路串联电容补偿度、风电机组控制侧参数均有关。保持风速为 9 m/s , 且维持线路串联电容补偿度在 60% 的水平, 设定 RSC 侧内环积分参数

K_{i2} 为 0，得到不同内环比例参数下的系统阻抗扫描曲线如图 8 所示。阻抗扫描曲线中电抗过零点所对应的频率即为系统的谐振频率，其过零点对应的频率随着线路串联电容补偿度的增大而逐渐增大。随着内环比例参数增加，等效电抗曲线也会略微向右位移，但为便于分析内环比例参数的变化对系统主导因素电阻的影响，本文忽略了内环比例参数对等效电抗的影响。从图中可以得到，随着内环比例参数的增加，谐振频率下对应的并网系统等效电阻将逐渐减小。需要说明的是，内环比例参数在线路串联电容补偿度为 60%的水平下的临界稳定值大约为 0.01，其稳定阈值较小。对该参数的调整具有一定的局限性，不能从根本上解决次同步振荡的问题。

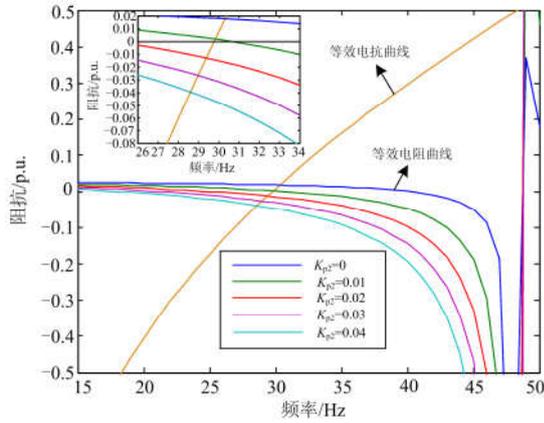


图 8 不同内环比例参数下的系统频率扫描阻抗曲线
Fig. 8 System frequency scanning impedance curve at different K_{p2}

3.2 内环积分参数影响分析

保持风速为 9 m/s，且维持线路串联电容补偿度在 60%水平，设定 RSC 侧内环比例参数 K_{p2} 为 0.01，得到不同内环积分参数下的系统频率扫描阻抗曲线如图 9 所示。可以得出，内环积分参数的改变会对系统的电气谐振频率产生影响，进而影响谐振频率下对应的并网系统等效电阻。且随着内环积分参数的增加，并网系统的谐振频率发生了右移，表明谐振频率下对应的等效电阻有所减小，当等效电阻为负时，将导致线路电流持续增大，发生次同步振荡。

3.3 内环控制参数综合影响分析

临界串联电容补偿度指的是双馈风电机组 RSC 侧内环 PI 参数确定下系统阻抗实部恰好为 0 所对应的线路串联电容补偿度大小。临界串联电容补偿度与 RSC 侧内环 PI 参数的关系如图 10 所示。

从图 10 中得出，当内环 PI 参数保持不变，系统临界串联电容补偿度随着风速增加而逐渐增大。

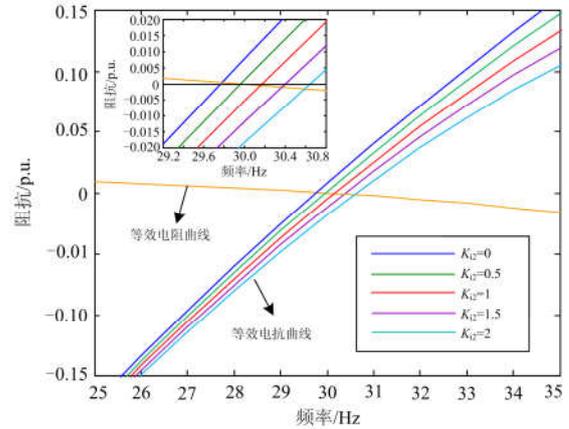


图 9 不同内环积分参数下的系统频率扫描阻抗曲线
Fig. 9 System frequency scanning impedance curve at different K_{i2}

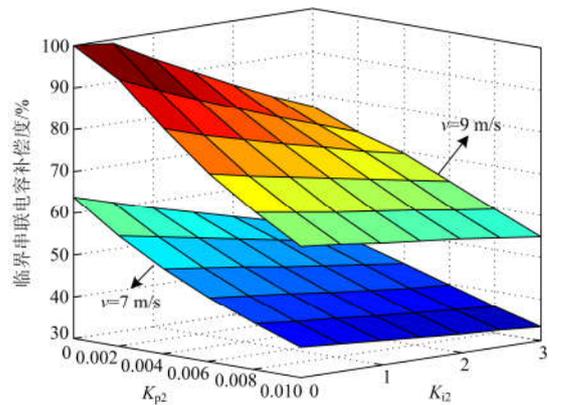


图 10 不同内环控制参数下的系统临界串联电容补偿度
Fig. 10 Critical compensation degree of system under different inner control parameters

因此，高风速下并网系统更加不容易发生次同步振荡。当风速保持恒定，线路临界串联电容补偿度随着内环 PI 参数的增加而逐渐减小，其中当内环比例参数 K_{p2} 取值较小时，内环积分参数 K_{i2} 对系统临界补偿度的影响较为明显，随着内环比例参数 K_{p2} 的增加，内环积分参数 K_{i2} 对线路临界串联电容补偿度的影响不断减弱。当线路的临界串联电容补偿度小于线路实际的串联电容补偿度时，并网系统会发生次同步振荡。当风速保持恒定时， K_{p2} 对并网系统稳定性的影响大于 K_{i2} 。但是，考虑到内环积分参数可调范围要显著地大于内环比例参数，因此，较大的积分参数对次同步振荡的影响同样不可忽视。同时，分析结果也表明，在一定的线路串联电容补偿度下，内环积分参数的减小能够增加内环比例参数的稳定阈值，从而有利于借助比例参数进行 SSCI 的抑制。

4 仿真分析

为了验证本文第 3 节中理论分析结果的正确性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了如图 1 所示的仿真系统。保持初始风速为 9 m/s, 设定双馈风电机组 RSC 侧内环积分参数 K_{i2} 为 0.1, 维持线路串联电容补偿度在 20% 水平, 在 1.5 s 时刻附加补偿电容投入使得线路的串联电容补偿度升至 60%。图 11 给出了不同内环比例参数下转子转速与电磁转矩动态响应曲线。结果表明: 当内环比例参数 $K_{p2}=0$ 时, 转子转速与电磁转矩在经历一段暂态过程之后, 收敛到了附加补偿电容投入之前的稳态运行点; 当 $K_{p2}=0.01$ 时, 转子转速与电磁转矩近似呈现等幅振荡的趋势; 当 $K_{p2}=0.02$ 时, 转子转速与电磁转矩呈现增幅振荡的趋势, 并网系统失稳。系统的振荡频率为 29 Hz, 该频率与图 8 中的等效电抗过零点对应的谐振频率互补, 此结果也验证了图 8 中所得到的谐振频率点的正确性。在风速、线路串联电容补偿度与双馈风电机组内环积分参数保持不变的情形下, 随着内环比例参数的增加, 双馈风电机组的转子转速与电磁转矩的振荡幅值不断增大, 双馈风电机组并网系统更容易引发次同步振荡。

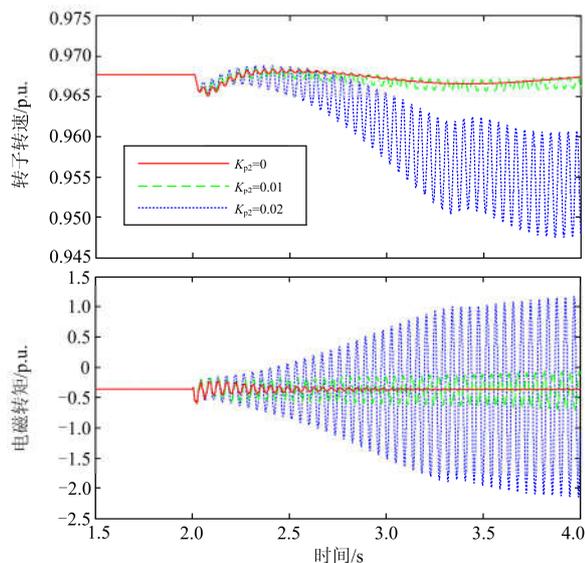


图 11 不同比例参数下转子转速与电磁转矩动态响应曲线

Fig. 11 Dynamic response of ω_r and T_e at different K_{p2}

为研究双馈风电机组转子侧内环积分参数对次同步振荡的影响, 在相同的风速情况下, 设定双馈风电机组 RSC 侧内环比例参数 K_{p2} 为 0.01, 且维持线路串联电容补偿度在 20% 水平, 在 1.5 s 时刻附加的补偿电容投入使得线路的串联电容补偿度升至 60%。图 12 给出了不同积分参数下转子转速与电磁

转矩的动态响应曲线。结果表明: 当内环积分参数 $K_{i2}=0$ 时, 转子转速与电磁转矩都在经历一段暂态过程之后收敛到了附加补偿电容投入之前的稳态运行点; 而当 $K_{i2}=0.5$ 时, 转子转速与电磁转矩近似呈现等幅振荡的趋势; 进一步增加 K_{i2} 到 1 时, 附加补偿电容投入之后转子转速与电磁转矩出现了增幅振荡, 并网系统失稳。其振荡频率为 30 Hz, 该频率也互补于图 9 中 $K_{i2}=1$ 时的等效电抗过零点对应的谐振频率。

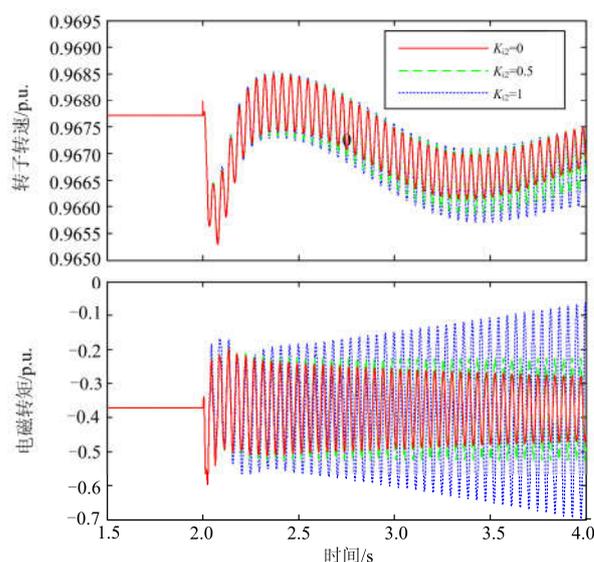


图 12 不同积分参数下转子转速与电磁转矩动态响应曲线

Fig. 12 Dynamic response of ω_r and T_e at different K_{i2}

上述仿真结果表明, 在风速、线路串联电容补偿度与双馈风电机组内环积分参数保持不变的情形下, 随着内环积分参数的增加, 并网系统的稳定性逐渐降低, 从而更容易引发次同步振荡。相比于内环积分参数, 双馈风电机组的内环比例参数对于次同步振荡的影响更为显著。然而, 实际运行中内环比例参数的临界值很小, 其可调范围有限, 因此借助对内环比例参数的调节实现 SSCI 的抑制将受到限制。内环积分参数的适当减小, 可以增大内环比例参数的稳定阈值, 同时有利于降低系统发生次同步振荡的风险。

5 结论

本文对双馈风电机组经串联电容补偿输电线路接入电网造成的次同步振荡问题进行了详细的分析, 建立了含控制环路的完整阻抗模型。通过波特图与频率扫描法对风电机组次同步相互作用进行了研究, 理论和仿真分析结果表明:

1) 双馈风电机组转子侧内环控制参数对系统

阻抗的灵敏度显著大于外环控制参数,内环 PI 参数是影响并网系统等效阻抗的关键参数。

2) 通过对内外环阻抗灵敏度的频域分析,得到了控制器内环比例参数与内环积分参数对应呈现负阻性与容性。进一步借助频率扫描法,从系统阻抗的角度揭示了内环积分参数也会对系统稳定性产生显著影响,内环积分参数的减小将有效降低并网系统发生次同步振荡的风险。

参考文献

- [1] OSTAD A, YAZDANI A, VARMA R K. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1504-1514.
- [2] LAESEN E V. Wind generators and series-compensated AC transmission lines[C] // PES T&D 2012, 2012.
- [3] 时伯年, 李树鹏, 梅红明, 等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 113-118.
SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 113-118.
- [4] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [5] 康晓蒙, 苏勋文, 付松涛, 等. 基于 VSC-HVDC 阻尼控制次同步振荡研究综述[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 1-5.
KANG Xiaomeng, SU Xunwen, FU Songtao, et al. Review on damping control sub-synchronous oscillation based on VSC-HVDC. Power System[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 1-5.
- [6] LEON A E, SOLSONA J A. Sub-synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 419-428.
- [7] 栗然, 卢云, 刘会兰, 等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3073-3079.
LI Ran, LU Yun, LIU Huilan, et al. Sub-synchronous oscillation mechanism analysis of doubly-fed wind farms connected to the power system through the series-compensated line[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079.
- [8] SURIYAARACHCHI D H R, ANNAKAGE U D, KARAWITA C, et al. A procedure to study sub-synchronous interactions in wind integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 377-384.
- [9] 卓华, 黄立, 侯小平. 一种基于全闭环实时数字物理仿真的次同步振荡阻尼控制[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 71-77.
ZHUO Hua, HUANG Li, HOU Xiaoping. Reducing sub-synchronous oscillation based on RTDS[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 71-77.
- [10] 赵斌. 双馈风电场并网系统的次同步振荡特性及抑制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
ZHAO Bin. Studies on characteristic and suppressing strategies of subsynchronous oscillation with DFIG-based wind farms[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [11] MIAO Zhixin. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 984-991.
- [12] PIYASINGHE L, MIAO Z, KHAZAEI J, et al. Impedance model-based SSR analysis for TCSC compensated type-3 wind energy delivery systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 179-187.
- [13] LIU Huakun, XIE Xiaorong, ZHANG Chuanyu, et al. Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 474-483.
- [14] HUANG P, EL MOURSI M S, et al. Subsynchronous resonance mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm by using two-degree-of-freedom control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1442-1454.
- [15] IEEE SSR Working Group. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [16] MOHAMMADPOUR H A, SANTI E. Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1022-1033.
- [17] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013,

- 42(4): 97-104.
- LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 42(4): 97-104.
- [18] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp. DOI 10.1186/s41601-016-0019-8
- [19] 王波, 卢继平, 龚建原, 等. 含双馈机组转子侧附加控制的风电场次同步振荡抑制方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2580-2584.
- WANG Bo, LU Jiping, GONG Jianyuan, et al. A method to suppress sub-synchronous oscillation of wind farm composed of doubly fed induction generators with additional rotor side control[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2580-2584.
- [20] 顾威, 李兴源, 陈建国, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.
- GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo, et al. Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.
- [21] 董晓亮, 李江, 侯金鸣, 等. 基于双馈风机转子侧变频器的次同步谐振抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 92-97.
- DONG Xiaoliang, LI Jiang, HOU Jinming, et al. Subsynchronous resonance suppression method based on rotor-side converters in DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 92-97.

收稿日期: 2016-12-01; 修回日期: 2017-01-29

作者简介:

陈斐泓(1991—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: feihongjames@126.com

杨健维(1983—), 女, 通信作者, 副教授, 研究方向为智能电网故障诊断、城市电网安全分析, 电动汽车并网; E-mail: jwyang@swjtu.cn

廖凯(1989—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: liaokai.lk@foxmail.com

(编辑 魏小丽)