

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407575

# 基于阻抗分析法的双馈风电场并网系统的 次同步振荡分析\*

王鑫<sup>1,2</sup> 程启明<sup>3</sup> 陈炯<sup>2</sup> 周伟成<sup>3</sup>(1. 上海电力大学电气工程学院 上海 200090; 2. 中核运维技术有限公司 嘉兴 314300;  
3. 上海电力大学自动化工程学院 上海 200090)

**摘要:**双馈风力发电机(DFIG)以其优异的性能和经济效益,已成为主流机型。然而,为了提高输电效率而采用的串联电容补偿技术可能因电网参数的共振而引发次同步振荡(SSO),威胁到电力系统的稳定性和风电机组的安全运行。为了解决这个问题,首先对双馈风电场的SSO特性进行了深入分析,并将中国河北沽源典型的风电场等效为远、近两个风电场,从而建立考虑DFIG变换器控制环节和PLL精度在内的等效阻抗模型;然后采用阻抗分析法从频域角度分析了风速、线路串补度、风电场容量及DFIG风机变流器的PI控制参数对系统稳定性的影响,并得出风电场SSO稳定性与RSC电流内环的PI比例系数、串补度成反比,与风速、远近风电场容量成正比;最后,在MATLAB/Simulink软件上采用时域的仿真分析法进一步验证了阻抗分析法分析结果的正确性和准确性。研究结论对理解风力发电系统动态特性和设计有效的SSO抑制策略具有重要意义。在SSO特性分析基础上,提出的线性自抗扰控制(LADRC)的SSO抑制策略能够有效地抑制SSO。

**关键词:**双馈风力发电场;次同步控制相互作用;阻抗分析法;并网系统;时域仿真法;PI控制;线性自抗扰控制

**中图分类号:** TM346; TN751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## SubSynchronous oscillation analysis of grid-connected doubly fed wind farm system based on impedance analysis method

Wang Xin<sup>1,2</sup> Cheng Qiming<sup>3</sup> Chen Jiong<sup>2</sup> Zhou Weicheng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China; 2. China Nuclear Power Operation and Maintenance Technology Corporation, Ltd., Jiaxing 314300, China; 3. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Double fed wind turbines (DFIG) have become mainstream models due to their excellent performance and economic benefits. However, the series capacitor compensation technology adopted to improve transmission efficiency can lead to sub-synchronous oscillations (SSO) due to resonance with grid parameters, threatening the stability of the power system and the safe operation of wind turbine units. In order to solve this problem, an in-depth analysis of the SSO characteristics of doubly fed wind farms is conducted, and the typical wind farm at China Hebei Guyuan is equivalent to two far and near wind farms, an equivalent impedance model considering the DFIG converter control link and PLL accuracy is established; Then, the impedance analysis method in the frequency domain is used to analyze the effects of wind speed, line series compensation, wind farm capacity, and PI control parameters of DFIG converter on system stability, it is found that the SSO stability of the wind farm is inversely proportional to the RSC current inner loop PI ratio coefficient and series compensation, and directly proportional to wind speed and the ratio of far and near wind farm capacity; Finally, the time-domain simulation analysis method is used on MATLAB/Simulink software to further verify the correctness and accuracy of the impedance analysis results. The research conclusion of this paper is of great significance for understanding the dynamic characteristics of wind power generation systems and designing effective SSO suppression strategies. Based on the analysis of SSO characteristics, the proposed linear active disturbance rejection control (LADRC) for SSO suppression strategy can effectively suppress SSO.

收稿日期: 2024-06-04 Received Date: 2024-06-04

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(62303301)、上海市电站自动化技术重点实验室项目(13Z2273800)资助

**Keywords:** doubly fed wind farm; subsynchronous control interaction; impedance analysis method; grid-connected system; time-domain simulation method; PI control; linear active disturbance rejection control

## 0 引言

随着双馈风机(doubly fed induction generator, DFIG)成为主流<sup>[1]</sup>,其串补输电时的次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO)问题愈发严重<sup>[2]</sup>。因此,对 DFIG 风电场中的 SSO 问题展开研究,提高 DFIG 在次同步工况下运行能力具有实际意义<sup>[3]</sup>。

目前对 SSO 的主要分析方法有 5 种方法:1) 阻抗分析法(也称为频率扫描法)。此法具有简便性和快速性<sup>[4]</sup>,但只能提供初步的判断,对于含有大量电力电子元件的复杂系统,其准确性不够<sup>[5-6]</sup>;2) 机组作用系数法。此法能有效识别和分析发电机轴系与高压直流输电系统(high voltage direct current, HVDC)两系统之间的相互作用,进而评判系统的稳定性状况<sup>[7]</sup>,但仅能分析发电机组与 HVDC 之间相互作用可能引起的 SSO 问题<sup>[8]</sup>;3) 特征值分析法(或称模态分析)。此法的优点是理论的严密性和分析结果的高精度,对结构简单的 SSO 研究中有十分良好的效果<sup>[9]</sup>,但需要建立系统的详细数学模型,随着系统规模的增大,计算量会急剧增加,存在“维数灾难”问题<sup>[10]</sup>;4) 复转矩系数法。此法避免了“维数灾难”问题,计算速度较快,能够提供电气阻尼随频率变化的全面特性,适用于大规模系统的分析<sup>[11-12]</sup>,但此法不能反映电气系统和机械系统之间的相互影响<sup>[13]</sup>,且需要依赖于实验或仿真工具来获取必要的参数,才能判断系统的稳定性<sup>[14]</sup>;5) 时域仿真法。此法优势在于其适用范围广,能提供系统内各元件动态过程的详细视图,在 SSO 研究中其结果直观且准确,利于研究 DFIG 系统的动态响应<sup>[15]</sup>,但此法依赖于精确的系统模型,且在多机系统中计算量较大,消耗时间较长<sup>[16]</sup>,另外在分析过程中无法通过结果明确 DFIG 的 SSO 产生机理<sup>[17]</sup>。

上面的 5 种方法可以依据分析原理及精度划分为筛选法、精确分析法两种<sup>[18]</sup>。其中:1) 筛选法无需准确的系统数学模型,它包括阻抗分析法、机组作用系数法两种,它主要用于快速识别可能存在 SSO 风险的系统或特定工况,其特点是计算量小、分析速度快,适用于对 SSO 问题的初步定性分析和风险筛选;2) 精确分析法需要准确的系统数学模型,它包括特征值分析法、复转矩系数法、时域仿真法 3 种方法<sup>[19]</sup>,它考虑系统各个方面的影响,理论分析更加精准,运算量更大,分析时间较长,适用于对 SSO 问题的深入定量分析。

DFIG 风电引发的 SSO 是多因素耦合导致,现有文献对其振荡机理大多是采取单台等值风机模型从串补度、

风速、风机并网台数和风机本身控制参数展开研究,而大型风电场某些风机和接入点距离较远,将整个风电场等价单台风机会引入误差,且对于锁相环(phase locked loop, PLL)锁相角误差引起的振荡关注较少。因此,DFIG 风电场并入交流电网造成的 SSO 问题的振荡机理尚不明确,还需进行深入研究。

论文首先将实际风电场等效为远近两个风电场,建立考虑 DFIG 变换器控制环节和 PLL 精度在内的等效阻抗模型;然后采用阻抗分析法从频域角度分析了风速、线路串补度、风电场容量及风机变流器控制参数对系统稳定性的影响;再采用时域仿真法从时域角度对该串联补偿风电系统进一步仿真验证,说明了论文建立的等效阻抗模型和阻抗分析法分析结果的准确性。论文的 SSO 特性分析结果为针对 SSO 振荡特性提出相应抑制方法提供了基础。在 SSO 特性分析基础上,提出的线性自抗扰控制的 SSO 抑制策略能够有效地抑制 SSO。

## 1 DFIG 建模与 SSCI 机理

### 1.1 DFIG 数学模型

DFIG 作为一个多输入多输出的高阶系统,其具有非线性、多变量、强耦合的特征,一般需对 DFIG 做基本假设:气隙磁场按照正弦规律分布、忽视漏饱和、三相绕组对称、将转子绕组等效到定子侧,这样可得到其物理模型,如图 1 所示。

图 1 中,固定的轴线 A、B、C 用来表示定子的三相绕组,旋转的轴线 a、b、c 用来表示转子的三相绕组, $\theta$  为转子的空间角位置。

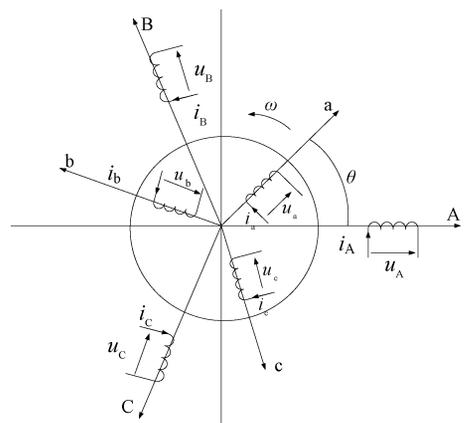


图 1 三相异步风力发电机物理模型

Fig. 1 Physical model of three-phase asynchronous wind turbine generator

下面按照电机与电路的基本理论对 DFIG 定、转子绕组进行建模分析,可得到下面电气量关系式。

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  和  $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  分别为定子(s)电流和转子(r)电流在  $d$  轴、 $q$  轴上的分量;  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$  和  $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  分别为定子绕组磁链和转子绕组磁链在  $d$  轴、 $q$  轴上的分量;  $L_m$  为定子与转子绕组之间的互感;  $L_s$ 、 $L_r$  分别为定子、转子绕组的自感。

功率方程为:

$$\begin{cases} P_s = 3/2(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}), & Q_s = 3/2(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) \\ P_r = 3/2(u_{rd}i_{rd} + u_{rq}i_{rq}), & Q_r = 3/2(u_{rq}i_{rd} - u_{rd}i_{rq}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_s$ 、 $Q_s$  分别为定子有功、无功功率;  $P_r$ 、 $Q_r$  分别为转子有功、无功功率;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  和  $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  分别为定子电压和转子电压在  $d$  轴、 $q$  轴上的分量。

### 1.2 转子侧数学模型

直流环节大电容将背靠背变换器中转子侧变换器(rotor side converter, RSC)与网侧变换器(grid side converter, GSC)分开,在忽略定子电阻  $R_s$  时,RSC 和 GSC 可进行解耦控制,相互之间不会影响。在 RSC 采用电网电压定向的矢量控制(vector control, VC)时,其传统双闭环 PI 控制器关系为:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \left( -\frac{L_m}{\omega_1 L_s} U_s + \sigma L_r i_{rq} \right) \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $R_r$  为转子的等效电阻;  $\omega_1$  为定子同步旋转角速度;  $\omega_r$  为转子旋转角速度;  $\omega_s$  为  $dq$  坐标系相对转子的电角速度,  $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ ;  $U_s$  为定子电压的幅值;  $\sigma$  为漏磁系数,其值为  $1 - L_m^2/L_s L_r$ 。

### 1.3 SSCI 产生的机理

DFIG 的次同步控制相互作用(sub-synchronous control interaction, SSCI)是由风电机组的控制器与输电线路中串补电容之间耦合引起。SSCI 产生机理的示意图如图 2 所示。其机理为:在投入串补的输电线路发生小扰动时,转子绕组通过电磁耦合感应到串补线路中的次同步电流分量,便在转子绕组上也出现次同步谐振电流,而 RSC 在畸变的反馈值作用下通过内环控制输出一个转子次同步电压,进而产生新次同步电流分量,此谐振电流与原次同步扰动叠加,最终使风电机组输出功率呈现振荡发散,整个过程可视为 RSC 与串补电容之间的相

互作用。SSCI 与 DFIG 的轴系无关<sup>[16]</sup>,影响 SSCI 的主要因素包括串补度、并网风机数量以及变流器的控制参数等<sup>[17-18]</sup>。

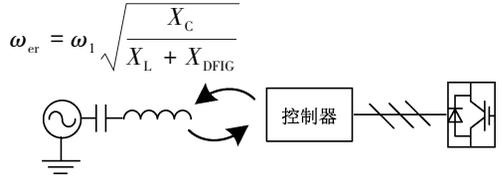


图 2 SSCI 产生的机理框图

Fig. 2 Mechanism diagram of SSCI generation

DFIG 的自然谐振频率  $\omega_{er}$  可以表示为:

$$\omega_{er} = \omega_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L + X_{DFIG}}} \quad (4)$$

式中:  $X_C$ 、 $X_L$  分别为系统的容抗、感抗;  $X_{DFIG}$  为风机等效电抗。为了便于讨论,串补度  $k$  为:

$$k = X_C/X_L \quad (5)$$

## 2 阻抗分析法的 SSCI 分析

### 2.1 沽源风电场阻抗模型

中国河北张家口沽源电网是一个典型的大规模风电集群经串补送出系统,该电网发生过起 SSO 事件,导致多起 DFIG 脱网事故。下面以沽源地区实际风电场为基础,采用基于频率特性的等效阻抗分析法评估 DFIG 发电系统的并网稳定性。为方便研究,后文分析均假定风电场中各台风力机型号控制参数均相同,且运行在同一工作点<sup>[20]</sup>。

沽源地区风电场<sup>[3]</sup>经串补线路送出输电系统为众多风电场经辐射状的 220 kV 输电线路接至升压站,再升压经通过两条 500 kV 的输电线路接入华北电网,其中串补投入在 500 kV 线路。论文选择对 180 台 1.5 MW 的 DFIG 并网系统进行等效建模,等效后的线路串补度为 6.67%。等效后的系统模型如图 3 所示。图中,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  为升压变压器,  $R_{L1}$ 、 $R_{L2}$  为线路电阻,  $L_{L1}$ 、 $L_{L2}$  为线路电感,  $C$  为串联补偿电容。180 台 1.5 MW DFIG 聚合后风机参数与并网串联补偿线路参数如表 1 所示<sup>[3]</sup>。

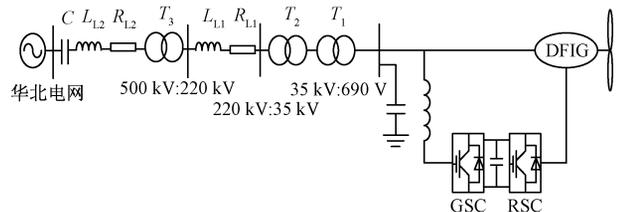


图 3 沽源地区风电系统等效图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of Guyuan area wind power system

表 1 聚合风电系统参数

Table 1 DFIG and transmission line parameters

参数	数值
线路基准容量	300 MW
220 kV 线路电阻	0.030 pu
220 kV 线路电抗	0.170 pu
变压器 T1 漏抗	0.030 pu
变压器 T3 漏抗	0.140 pu
额定电压	690 V
定子电阻	0.016 pu
定子漏抗	0.255 pu
励磁电抗	3.953 pu
额定功率	270 MW
500 kV 线路电阻	0.020 pu
500 kV 线路电抗	0.100 pu
变压器 T2 漏抗	0.070 pu
串补电容阻抗	0.040 pu
并网电压角频率	314 rad/s
转子电阻	0.018 pu
转子漏抗	0.222 pu
额定风速	10.5 m/s

阻抗分析法涉及从电网侧和风电场侧分别构建频域阻抗模型。建模过程中采用以下 4 个简化假设：

- 1) 控制外环的带宽远小于电流控制内环,在小信号建模中仅考虑电流内环的动态;
- 2) GSC 的等效阻抗很大,在稳定工作点的小信号模型中仅需考虑 RSC 的动态控制作用;
- 3) 励磁支路阻抗值  $X_m$  很大,其并联后对风力机部分阻抗影响可以忽略;
- 4) 由于本研究关注的 SSO 振荡频率一般在几至几十 Hz 范围内,远低于变换器的开关频率,因此可以忽略其影响。

对于感应发电机部分的阻抗模型,可由 DFIG 电压方程式得到稳态运行时的 DFIG 定、转子电压相量为：

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = (R_s + j\omega_1 L_s) \mathbf{I}_s + j\omega_1 L_m \mathbf{I}_r \\ \mathbf{U}_r/s_1 = j\omega_1 L_m \mathbf{I}_s + (R_r/s_1 + j\omega_1 L_r) \mathbf{I}_r \end{cases} \quad (6)$$

式中： $s_1$  为定子同步旋转角速度  $\omega_1$  时对于扰动频率分量转差率,其值为  $(\omega_n - \omega_1)/\omega_1$ 。

投入串联补偿电容的线路电流含有次同步频率  $\omega_n$  下扰动后,转子侧绕组会感应出则转子绕组将感应出频率为  $\omega_r - \omega_n$  的 SSO 电流分量,其中 a 相扰动电流在三相静止坐标系下表示为：

$$i_{na} = I_n \cos[(\omega_n - \omega_r)t] \quad (7)$$

式中： $I_n$  转子扰动电流的幅值。

由同步旋转坐标系转为三相静止坐标系,并将其转换为相量形式,可得相应的表达式为：

$$\begin{cases} \Delta u_{rd} = -k_{irp} I_n \cos(\omega_n - \omega_1)t - \frac{k_{iri} I_n}{\omega_n - \omega_1} \sin(\omega_n - \omega_1)t \\ \Delta u_{rq} = -k_{irp} I_n \sin(\omega_n - \omega_1)t + \frac{k_{iri} I_n}{\omega_n - \omega_1} \cos(\omega_n - \omega_1)t \end{cases} \quad (8)$$

式中： $k_{irp}$ 、 $k_{iri}$  分别为 RSC 电流内环的比例、积分系数。

将式(8)中这种电压  $d$ 、 $q$  轴电压谐波分量逆变换到三相静止坐标系下,得到 a 相谐波电压的向量形式为：

$$\mathbf{U}_{na} = -(k_{irp} - jk_{iri}/(\omega_n - \omega_1)) \mathbf{I}_{na} \quad (9)$$

式中： $\mathbf{U}_{na}$ 、 $\mathbf{I}_{na}$  分别为转子扰动电压向量、电流向量。

基于本节的假设 1), 可得考虑电流内环的 RSC 等效电阻  $\mathbf{Z}_{rsc}$  表示为：

$$\mathbf{Z}_{rsc} = k_{irp} + jk_{iri}/(\omega_n - \omega_1) \quad (10)$$

式(10)与(6)联立可以得到计及 RSC 电流内环动态控制过程后的 DFIG 等效阻抗为：

$$\mathbf{Z}_{dfig} = \frac{\mathbf{U}_s}{\mathbf{I}_s} = R_s + j\omega_n L_s - \frac{(j\omega_n L_m)^2}{(R_r + \mathbf{Z}_{rsc})/s_n + j\omega_n L_r} \quad (11)$$

式中： $s_n$  为在绕动频率  $\omega_n$  时对于扰动频率分量转差率  $1 - \omega_r/\omega_n$ 。

上面推导过程都涉及静止  $\alpha\beta$  到旋转  $dq$  坐标变换过程,同时 RSC 的控制也是通过  $dq$  轴解耦来进行,它们都需要电网电压相位  $\theta$  的精确值。因此,PLL 的锁相精度会对 DFIG 等效阻抗参数有影响,有必要对其进行分析。DFIG 一般采用的如图 4 所示的软件锁相环来跟踪电网电压相位信息,图中  $\theta$  为 PLL 输出相角。

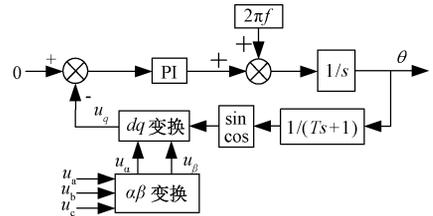


图 4 软件锁相环的结构

Fig. 4 Structure of software phase locked loop

电网电压中的次同步扰动会导致 PLL 的输出相角产生偏差  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$  与原电压扰动之间的频域传递函数  $G_{PLL}$  可表示为：

$$G_{PLL} = \frac{1}{2} \frac{j(\omega_n - \omega_1)k_{pp} + k_{pi}}{j(\omega_n - \omega_1)^2 + U_1 [(j(\omega_n - \omega_1)k_{pp} + k_{pi})]} \quad (12)$$

式中： $k_{pp}$ 、 $k_{pi}$  为 PLL 中 PI 环节的比例、积分系数； $U_1$  为电网电压幅值。

DFIG 发生 SSO 后,PLL 的输出存在扰动,考虑次同步工况下锁相环动态过程的 DFIG 等效输入频域阻

抗为:

$$Z_{DFIG} = \left( R_s + \frac{R_r + Z_{rsc}}{s_n} + j\omega_n L_{ls} + j\omega_n L_{lr} \right) \left( 1 - \frac{G_{PLL}(Z_{rsc} I_{r1} + U_{r1})}{s_n} \right)^{-1} \quad (13)$$

式中:  $k_{PLL}$  为锁相环引入的误差系数。它可表示为:

$$k_{PLL} = (1 - G_{PLL}(Z_{rsc} I_{r1} + U_{r1})/s_n)^{-1} \quad (14)$$

式中:  $U_{r1}$ 、 $I_{r1}$  为稳定工作点的转子电压、电流的稳态直流分量。

基于此分析,可以构建经过串联补偿并网的 DFIG 风电场的阻抗模型,具体模型如图 5 所示。图中滑差  $s_{lip}$  为  $s_{lip} = 1 - j\omega_r/s_o$ 。

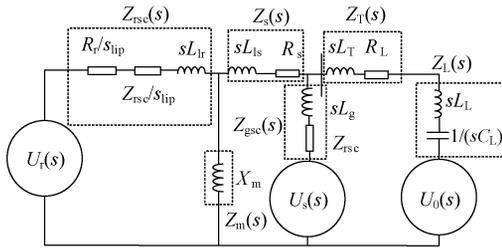


图 5 等效阻抗模型框图

Fig. 5 Diagram of equivalent impedance model

$$Z_{sys} = \frac{(R_r + k_{ip})}{2s_n} + \frac{R_s(R_2 + R_s)}{2R_s + R_2} + R_L + j \left[ \omega_n(L_L + L_T) + \frac{[x_{ci} + \omega_n(L_{ls} + L_{lr})][x_{ci} + \omega_n(L_{ls} + L_{lr} + L_2)]}{2x_{ci} + 2\omega_n(L_{ls} + L_{lr}) + L_2} - \frac{1}{\omega_n C} \right] \quad (15)$$

式中:  $x_{ci}$  为转子侧电流内环积分参数  $k_{ii}$  对系统阻抗影响,其可表示为:

$$x_{ci} = -k_{ii}/((\omega_n - \omega_1)s_n) \quad (16)$$

其中根据感应发电机效应(induction generator effect, IGE)振荡条件:

$$\begin{cases} R(\omega_n) = \frac{(R_r + k_{ip})}{2s_n} + \frac{R_s(R_2 + R_s)}{2R_s + R_2} + R_L < 0 \\ X(\omega_n) = \omega_n(L_L + L_T) + \frac{[x_{ci} + \omega_n(L_{ls} + L_{lr})][x_{ci} + \omega_n(L_{ls} + L_{lr} + L_2)]}{2x_{ci} + 2\omega_n(L_{ls} + L_{lr}) + L_2} - \frac{1}{\omega_n C} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

若在某一特定频率下,系统等效阻抗满足式(17),则对该频率 DFIG 风电输电系统表现为负阻尼,此时在小扰动下系统将会产生持续的 SSO 电气振荡,且负电阻绝对值越大,并网系统的负阻尼就越强,SSO 的趋势就越明显。

### 2.2 次同步稳定性影响因素

确定的风电系统下线路、变压器和风电机组的阻抗参数是固定的,一经投入使用就不能更改。而 RSC 控制参数(比例、积分系数  $k_{ip}$ 、 $k_{ii}$ )、次同步运行转差率  $s_n$  和串补线路的容抗  $X_C$  则是可变的是可变的。转子回路中

其中基于本节假设 2) GSC 变换器支路  $Z_{gsc}(s)$  可以忽略。鉴于沽源地区风电机组间的空间距离相对较远,本节将双馈风电场划分为近端风电场  $C_1$  和远端风电场  $C_2$ 。其中远端风电场  $C_2$  输电线路电阻、电抗标么值  $R_2 = 0.02$ ,  $x_2 = 0.11$ ,将图 5 用时域下阻抗来代替,在次同步频率  $\omega_n$  时,得到考虑远近风电场并网系统阻抗等效电路如图 6 所示。

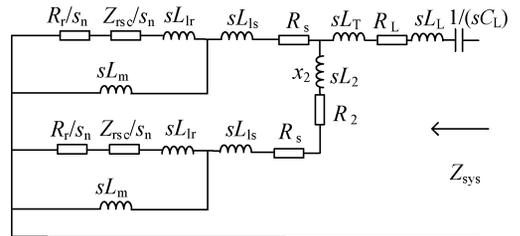


图 6 时域阻抗模型框图

Fig. 6 Diagram of time domain impedance model

基于本节假设 3), 并联励磁支路  $Z_m(s)$  可以忽略,系统侧看入的  $Z_{sys}$  即串联补偿线路和双馈风机系统阻抗为:

负电阻的幅值是影响系统稳定性的关键因素。系统稳定性受控制器参数  $K_{ip}$  和转差率  $s_n$  的影响,其中  $K_{ip}$  由控制参数决定,谐振转差率则由次同步谐振频率  $\omega_n$  与转子转速  $\omega_r$  共同决定。 $\omega_n$  受串补线路的补偿度影响,而基于最大风能追踪  $\omega_r$  由风速决定。因此,风速和串补度是影响次同步谐振转差率的主要因素。

下面将对 DFIG 并网次同步稳定性的关键变量风速、串补度以及转子侧变换器的控制参数等进行详细分析。

#### 1) 转子侧电流内环比例系数与振荡特性关系

保持 DFIG 输电系统线路为  $k = 20\%$ , 风速  $v = 10.5 \text{ m/s}$  (保证  $\omega_r$  足够大), 风机并网数 180 台, 远近风电场容量 1 : 1。对以下 4 种比例系数取值:  $k_{irpd} = k_{irpq} = 0.01$ ;  $k_{irpd} = k_{irpq} = 0.1$ ;  $k_{irpd} = 0.1$ ,  $k_{irpq} = 0.05$ ;  $k_{irpd} = 0.05$ ,  $k_{irpq} = 0.1$  进行分析,图 7 为 RSC 内环  $d$ 、 $q$  比例系数不同取值下沽源风电系统等效电阻/电抗的频率特性曲线。

由图 7 可知,在此范围改变比例系数对等效电抗影响很小,而随着 RSC 内环电流比例系数  $k_{irpd}$  与  $k_{irpq}$  同时增加时,等效电阻曲线总体向左下移,对应等效电阻运行点由 A 变为 D,对应谐振频率都是 22.3 Hz,其中 A 点系统等效电阻 0.052 pu, D 点系统等效电阻 -0.034 pu,系统出现谐振风险。只增加  $k_{irpd}$  工作点从 B 运动到 D,增

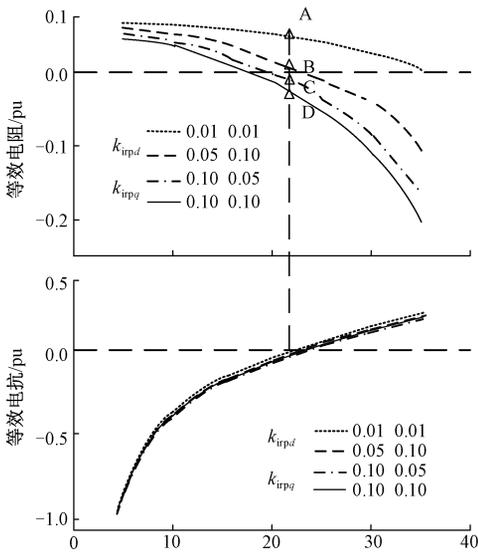


图 7 不同比例系数下电阻电抗的频率特性

Fig. 7 Frequency characteristics of resistance and reactance under different proportional coefficients

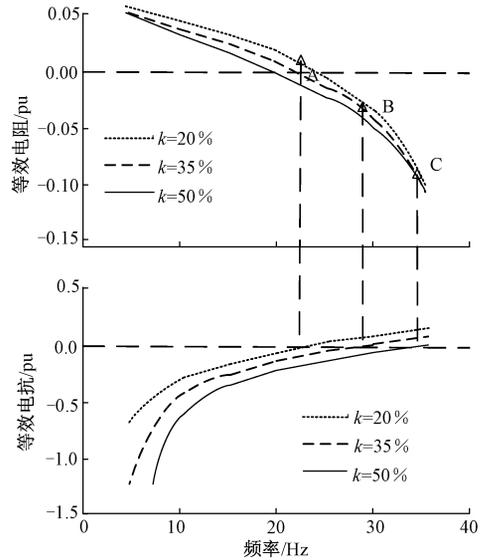


图 8 不同串补度下电阻电抗的频率特性

Fig. 8 Frequency characteristics of resistance and reactance under different series complement

加  $k_{irpq}$  工作点从 C 运动到 D, 可以得出比例系数  $k_{irpd}$  与  $k_{irpq}$  之间  $k_{irpd}$  增加对系统等效电阻增加起主导作用, 其中 B 点系统等效电阻 0.012 pu, C 点系统等效电阻 -0.027 pu, 系统在 B 点任保持稳定, 而 C 点等效电阻小于 0, 有振荡风险。

传统 DFIG 的 IGE 中的负电阻是由滑差和转子侧等效电阻共同决定的, 而 SSCI 与 DFIG 的变换器控制系统和输电系统结构相关, 与机械系统无关。当次同步系统的运行转差率  $s_n$  小于 0 时, 转子侧等效电阻向系统提供  $R_{req} = (R/2 + k_{irp})/s_n$  的等效负阻尼, 因而会使 SSO 更加严重, 可以解释为 SSCI 加强了双馈风机的 IGE 效应。

2) 串补度与振荡特性关系

在保持 DFIG 的风速  $v = 10.5 \text{ m/s}$ , 远近端风电场容量相同, 转子侧电流内环 PI 参数  $k_{irp} = 0.05$ 、 $k_{iri} = 0.05$  的情况下, 控制变量本小节只改变输电线路的串补度  $k$ , 即只改变投入串联补偿电容的大小。选取典型串补度 20%、35%、50%, 来分析 DFIG 风电场并网电系统稳定性, 分别求解各串补度下沽源风电系统等效电阻电抗, 其频率特性曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 串补度改变对等效电阻频率特性曲线影响不大, 在  $k$  增加时输电线路电容增加, 这导致求解阻抗虚部为 0 点得到 SSO 的频率  $\omega_n$  右移, 进而等效电网的电阻由 A 点运动到 B 点最后到 C 点。其中 A 点系统等效电阻 0.009 pu, 对应谐振频率 22.8 Hz; B 点系统等效电阻 -0.029 pu, 对应谐振频率 28.5 Hz; C 点系统等效电阻 -0.093 pu, 对应谐振频率 35.3 Hz; BC 两点等效电阻小于零, 对应频率小于 50 Hz, 系统有 SSO 风险。表明随

着串补度  $k$  的提高, 系统自然谐振频率上升, 对应频率下系统等效电阻下降甚至出现负阻尼, 所以串补度与系统次同步稳定性成反比。

3) 风速与振荡特性关系

华锐 SL-1500/82 型风机的额定风速为 10.5 m/s, 风速设置应保证风机控制系统会运行在最大风能追踪区。以下保持线路串补度 6.67%; 风机并网数量 180 台; 转子侧电流内环 PI 参数  $k_{irp} = 0.05$ 、 $k_{iri} = 0.05$  不变的情况下, DFIG 的风速  $v$  设置为 7 m/s、8 m/s、9 m/s 来分析 DFIG 风电场并网电系统稳定性, 在此最大功率追踪区域, 转子角频率  $\omega_r$  分别对应 0.75、0.85、0.95 pu, 频率特性分析结果如图 9 所示。

风机运行最大风能追踪区时候, 转子角频率  $\omega_r$  的大小随风速改变, 进而  $s_n$  变化影响等效阻抗实部。由图 9 可知, 风速变化对线路等效电抗影响不大, 其各曲线等效电抗过零点非常接近, 其中, A 点系统等效电阻 0.078 pu, 对应谐振频率 12.8 Hz; B 点系统等效电阻 0.027 pu, 对应谐振频率 12.8 Hz; C 点系统等效电阻 -0.032 pu, 对应谐振频率 12.7 Hz。

DFIG 等效阻抗的实部受到转子角频率  $\omega_r$  影响, 同时  $\omega_r$  也会影响出现负阻尼的次同步频率范围, 因为当谐波分量频率大于  $f_r$  时, 该频率对应运行转差率大于 0, 转子侧将不再提供负阻尼。随着风速降低, 并网系统的等效电阻曲线逐渐下移, 在小于  $f_r$  频段负阻尼程度加深, 因而破坏了并网系统的稳定性。所以, 风电场在低风速的工况更容易发生 SSO。

4) 远近风电场容量比与振荡特性关系

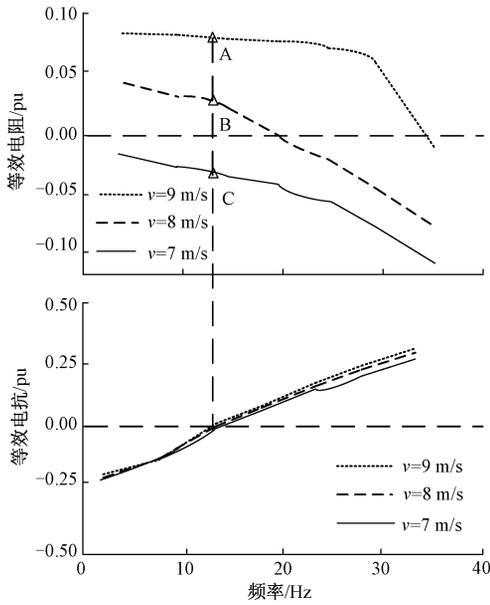


图 9 不同风速下电阻电抗的频率特性

Fig. 9 Frequency characteristics of resistance and reactance under different wind speed

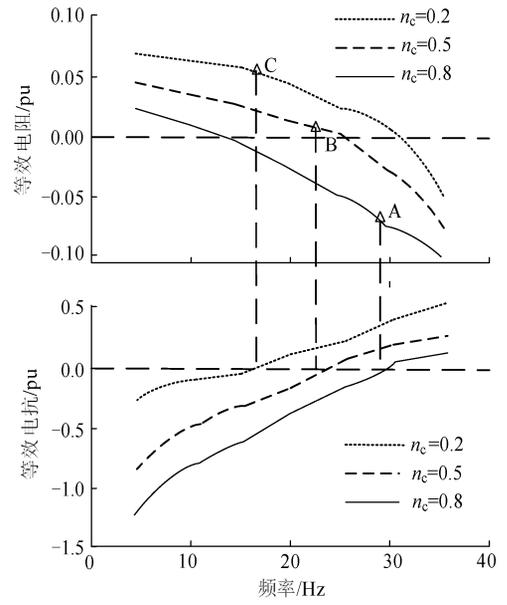


图 10 不同风电场容量比下电阻电抗的频率特性

Fig. 10 Frequency characteristics of resistance and reactance under different wind farm capacity ratio

在保持 DFIG 风速  $v = 10.5 \text{ m/s}$ ; 输电线路串补度 20%; 转子侧电流内环 PI 参数  $k_{ip} = 0.05$ 、 $k_{in} = 0.05$  的情况下, 风机总功率 270 MW 不变的情况下, 调整远近风电场的风机容量比例以模仿不同距离风机投入运行时的次同步振荡特性区别。定义远端风电场  $C_2$  的容量占 270 MW 的比例为  $n_c$ , 近端风电场  $C_1$  占总风机比例为  $1 - n_c$ 。  $n_c$  选取 0.2、0.5、0.8 来分析洁源风电系统的次同步稳定性, 其等效电阻/电抗的频率特性曲线如图 10 所示。

由图 10 可知, 改变远近风电场容量比  $n_c$  对系统电阻、电抗频率特性特性都有影响。当容量比  $n_c$  取 0.3 时近端风电场为主, 到  $n_c$  取 0.7 时远端风电场为主, 在相同频率下发电系统的等效阻抗实部虚部都增大, 曲线整体上移, 其中: A 点系统等效电阻  $-0.067 \text{ pu}$ , 对应谐振频率 28.9 Hz; B 点系统等效电阻  $0.013 \text{ pu}$ , 对应谐振频率 22.7 Hz; C 点系统等效电阻  $0.057 \text{ pu}$ , 对应谐振频率 16.7 Hz。在 A 点时等效电抗曲线过零点时所对应该频率处的等效电阻小于零, 且对应谐振频率也小于工频 50 Hz, 此工况对应近端风电场占主导, 系统有发生次同步振荡的风险。

远近风电场容量比  $n_c$  的会改变系统的自然谐振频率, 其原因在于等效增长了输电线路, 加大了线路电阻电感, 从而使得串补装置串补度降低, 当远端风电场  $C_2$  容量上升也即增大了连接电网的强度。

通过对 DFIG 风电场并网系统进行阻抗分析, 发现系统的次同步稳定性受多种因素影响, 包括线路串补度  $k$ 、运行风速  $v$ 、RSC 控制内环比例系数  $k_{ip,d}$  和远近风电场

容量比  $n_c$ 。DFIG 输电系统在投入串联补偿电容后, 电网阻抗因串联补偿而呈现容性, 而风电机组由于转子的滑差特性会呈现负阻尼。如果电网和机组阻抗在某个频率上相角, 并且此时系统的等效电阻为负, 系统就会存在振荡的风险。其中风速会影响转子角频率, 从而决定负阻尼频率范围上限。转子角频率、线路串补度、RSC 控制参数和容量比共同决定负阻尼频率范围的下限及负阻尼的深度, 即 SSO 发散程度。

阻抗分析法是一种基于风机的准确建模, 考虑上述初步分析的误差, 在时域进一步验证。

### 3 时域仿真分析的验证

本节将利用 MATLAB/Simulink 软件搭建华北洁源地区风电场经串补输电线路的仿真模型, 采用时域仿真法来验证第 2 节阻抗分析法的正确性和模型的适用性。时域仿真研究的是 DFIG 的输出功率, 若输出功率曲线能收敛, 说明 SSO 分量能够衰减, 系统处于稳定状态; 反之, 若输出功率曲线不收敛, 则表示 SSO 分量无法衰减, 系统不稳定。

#### 3.1 转子侧电流内环比例系数变化

保持 DFIG 输电系统的线路串补度  $k = 20\%$ , 风速  $v = 10.5 \text{ m/s}$ , 风机并网数 180 台, 远近风电场容量 1 : 1, 改变 RSC 电流内环的比例系数进行仿真, 选择在风机启动输出功率稳定后, 于 1.1 s 投入串联补偿线路, 风机输出功率如图 11 所示。

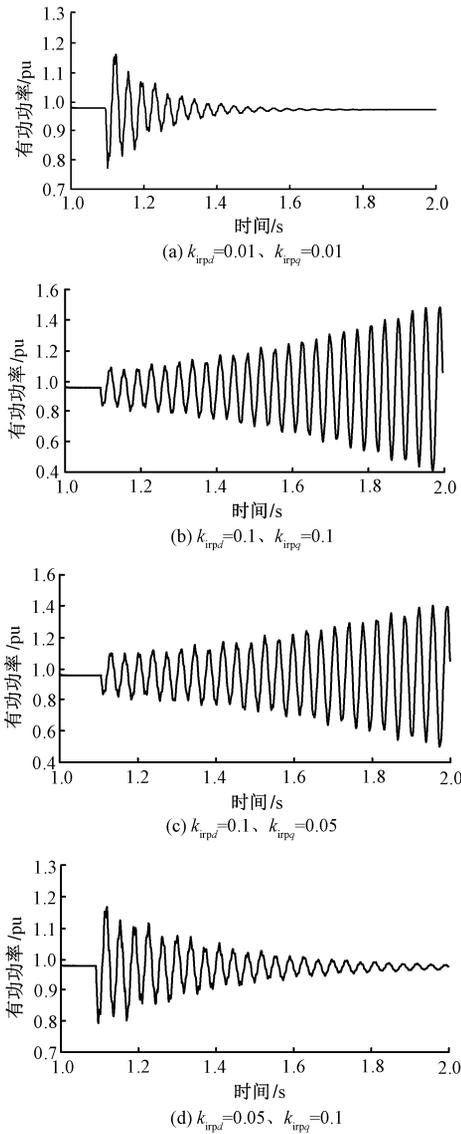


图 11 不同比例系数下输出功率

Fig. 11 Output power under different ratio coefficients

由仿真结果可知,  $k_{irpd} = k_{irpq} = 0.01$  时输出功率在 1.4 s 时收敛到  $\pm 0.01$  pu, 系统处于稳定状态;  $k_{irpd} = k_{irpq} = 0.1$  时输出功率在 2 s 时发散到  $\pm 0.45$  pu; 说明增加 RSC 电流内环积分参数会降低系统稳定性。  $k_{irpd} = 0.1$ 、 $k_{irpq} = 0.05$  时输出功率 2 s 时振荡发散  $\pm 0.42$  pu;  $k_{irpd} = 0.05$ 、 $k_{irpq} = 0.1$  时输出功率在 1.8 s 时收敛到  $\pm 0.01$  pu; 表明电流内环 PI 环节中有功比例参数  $k_{irpd}$  对系统负阻尼起主要作用。同时改变比例系数有功振荡频率不改变, 都为 27.7 Hz (为工频减去自然谐振频率), 与阻抗分析法相吻合。

### 3.2 串补度变化

风速  $v = 10.5$  m/s, 风机并网数 180 台, 转子侧电流内环 PI 参数  $k_{irp} = 0.05$ 、 $k_{iri} = 0.05$ 。风机输出功率稳定

后, 分别于 1.1 s 投入串补度为 20%、35%、50% 的串联补偿线路, 风机输出功率如图 12 所示。

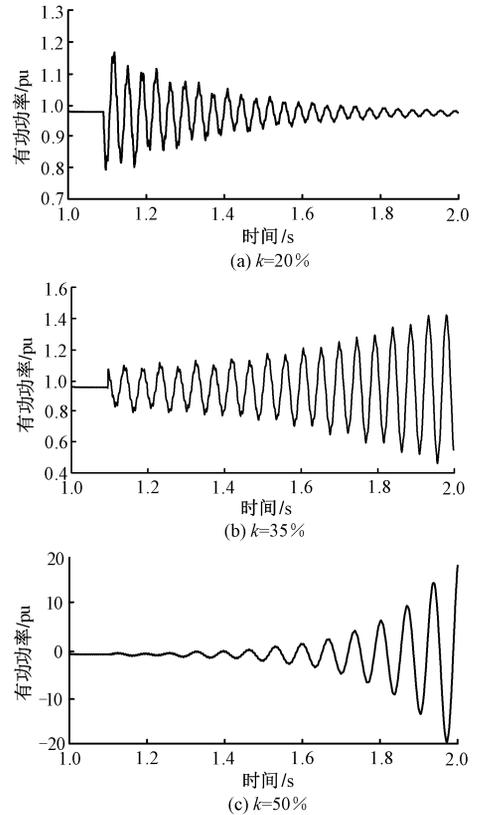


图 12 不同串补度下输出功率

Fig. 12 Output power under different series complement

由仿真结果可知, 线路串补度  $k$  为 20% 时, 风机输出功率可以收敛; 当  $k$  增加到 35% 时, 输出有功开始振荡, 其振荡频率为 21.5 Hz;  $k$  增加到 50% 时, 风机定子输出功率发散更快, 其振荡频率为 14.7 Hz, 此时若不施加控制手段, 风机将解列退出运行。即随着串联补偿电容容抗的提高, 虽然可以提高线路的传输容量, 但是系统的自然谐振频率上升, 对应频率下等效负电阻加大, 次同步稳定性减弱。

### 3.3 风速变化

默认串补度 6.67%, 风机并网数 180 台, 远近风电场容量 1 : 1, 转子侧电流内环 PI 参数  $k_{irp} = 0.05$ 、 $k_{iri} = 0.05$ 。风电场风速  $v$  分别设置为 7 m/s、8 m/s、9 m/s 来分析系统稳定性, 风机输出功率稳定后, 于 1.1 s 投入串补, 风机输出功率如图 13 所示。

由仿真结果可知, 风速  $v$  为 7 m/s 时, 风机输出曲线发散; 风速  $v$  为 8 m/s 时, 有功输出曲线收敛于 0.58 pu; 风速  $v$  为 9 m/s 时, 有功输出曲线收敛于 0.73 pu, 且收敛速度快于  $v = 7$  m/s 的工况, 3 种工况有功振荡频率都为 37.3 Hz。即随着风速的增大, 风机输出功率增加, 且并

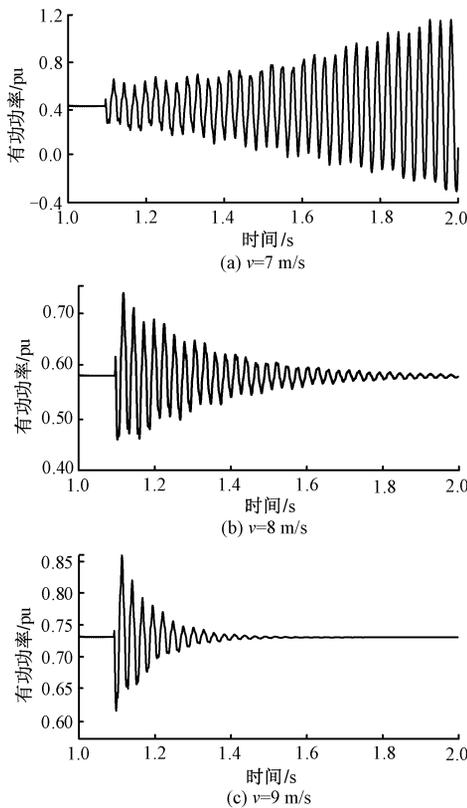


图 13 不同风速下输出功率

Fig. 13 Output power under different wind speed

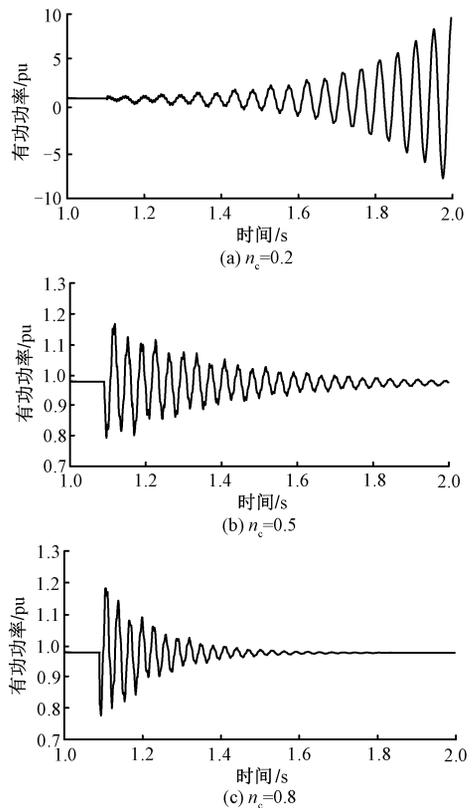


图 14 不同风电场容量比下输出功率

Fig. 14 Output power under different wind farm capacity ratio

网系统次同步振荡问题减缓。与阻抗分析法结论中转子角频率  $\omega_r$  的大小随风速改变,进而改变  $s_n$ ,影响系统等效阻抗实部相符。

### 3.4 远近风电场容量比变化

风速  $v=10.5 \text{ m/s}$ , 串补度 20%, 转子侧电流内环 PI 参数  $k_{irp}=k_{iri}=0.05$ 。远端风电场占总风机比例为  $n_c$ , 近端风电场占总风机比例为  $1-n_c$ 。 $n_c$  选取 0.2、0.5、0.8 来分析双馈风电场并网电系统稳定性,来分析系统稳定性,风机输出功率稳定后,于 1.1 s 投入串补,风机输出功率如图 14 所示。

由仿真结果可知,近端双馈风机  $C_1$  容量大时,即  $n_c=0.2$  时输出有功功率振荡发散,发生 SSO; 而远端风电场  $C_2$  容量占比越高,并网系统的稳定性越高,同时  $n_c$  越高,输出功率的振荡频率越高,此结论与阻抗分析法相吻合。

## 4 SSO 抑制策略

在上面得到的 DFIG 的 SSO 振荡机理分析基础上,可以进一步设计 DFIG 的 SSO 抑制策略。

在 SSO 故障发生时,线路含有次同步频率  $f_n$  谐波分

量,会对 DFIG 正常运行带来一系列影响,传统的双环 PI 控制不能满足控制要求。为了有效抑制 SSO,提出了基于线性自抗扰控制 (linear active disturbance rejection control, LADRC) 的 SSO 抑制策略,它是在转子侧传统双环 PI 控制的基础上,原有有功内环的 PI 控制部分替换为 LADRC,其中线性扩张状态观测器实时估计补偿 SSO 分量,对系统参数变化的抗干扰能力更强,不同工况下都有很好的适应性。

下面在 MATLAB/Simulink 搭建的沽源地方双馈风电场经串补线路输送功率的等值模型上进行仿真分析,来验证 LADRC 对次同步控制相互作用 (SSCI) 的抑制能力。

先来验证 LADRC 与 PI 的 DFIG 稳态运行能力。在不投入线路串补电容的情况下进行仿真,设置风速 0.25 s 时由 7 m/s 突变为 9 m/s, LADRC 控制下风机输出有功与传统 PI 控制对比,如图 15 所示。

由图 15 可见,随风速的增加 DFIG 输出的有功功率跟踪风速而增加并快速达到新稳态。与 PI 控制相比, LADRC 超调量更小。因此, LADRC 稳态运行时具有良好的控制能力。

再验证 LADRC 与 PI 对 SSO 的抑制效果。保持

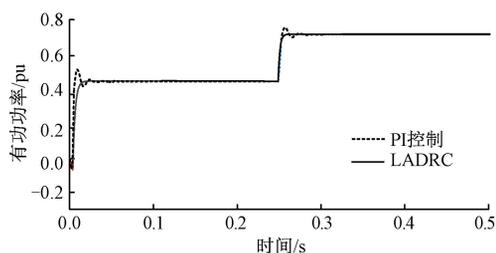


图 15 LADRC 和 PI 两种控制的 DFIG 稳态运行仿真结果

Fig. 15 Simulation curves of DFIG steady-state operation with LADRC and PI controls

DFIG 风机输电系统的线路串补度  $k = 40\%$ , 风速  $v = 9 \text{ m/s}$ , 风机并网数 180 台, 远近风电场容量 1 : 1, 对转子侧控制器 (RSC) 电流内环的比例系数取值  $k_{\text{inpd}} = k_{\text{inpq}} = 0.1$ , 选择在风机启动输出功率稳定后, 于 1.1 s 投入串联补偿线路, 风机输出功率如图 16 所示。

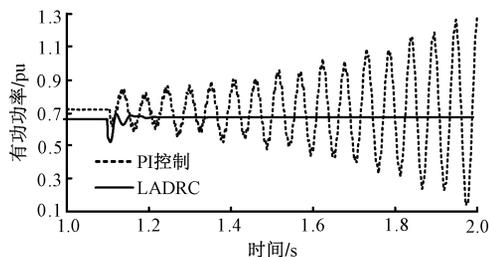


图 16 LADRC 和 PI 两种控制对 SSO 的抑制仿真曲线

Fig. 16 Simulation curves of suppression of SSO with LADRC and PI controls

由图 16 可见, PI 控制下风机输出功率振荡发散, LADRC 控制下波形收敛。相比于传统 PI 控制, LADRC 具有更好的次同步抑制性能, LADRC 在原理上阻断了次同步控制相互作用 (SSCI) 的谐波电流与转子电流内环控制器的感应叠加, 以提升系统次同步稳定性。

## 5 结论

目前对 DFIG 引发的 SSO 机理大多是采取单台等值风机模型展开研究, 而将大型风电场等价为单台风机会引入误差, 且对于 PLL 锁相角度误差引起的振荡关注较少。论文将实际风电场等效为远近两个风电场, 建立了考虑风机变换器控制环节和 PLL 精度在内的等效阻抗模型; 采用了阻抗分析法从 SSO 振荡机理方面进行理论推导, 得出了风电场 SSO 稳定性与 RSC 电流内环 PI 比例系数、串补度成反比且与风速、远近风电场容量成正比; 还采用了时域仿真法对阻抗分析法得出的影响 SSO

稳定性的结论进行了验证; 论文对理解风力发电系统的动态特性及制定有效的抑制策略具有重要意义。

论文还存在一些问题需要研究。例如, 论文将风电机当作统一型号的 DFIG 进行等效处理, 还可研究包含不同型号 DFIG 与 PMSG 构成混合型风电场的 SSO 问题, 以及对多机系统和单机等值系统的次同步响应问题; 论文采用阻抗分析法时将 DFIG 网侧系统简化为 RLC 等效电路, 未来可以考虑网侧系统更复杂的结构 (如加入储能和其他电力负载), 以提高分析的准确性和适用性。

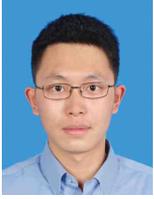
## 参考文献

- [1] 程启明, 沈章平, 程尹曼, 等. 基于虚拟同步发电机和无源性控制的 DFIG 机侧控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 141-151.  
CHENG Q M, SHEN ZH P, CHENG Y M, et al. Virtual synchronous generator and PBC based cascaded control for DFIG rotor-side converter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 141-151.
- [2] 高本锋, 刘晋, 李忍, 等. 风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 154-161.  
GAO B F, LIU J, LI R, et al. A review of research on the interaction between sub-synchronous control of wind turbines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 154-161.
- [3] 董晓亮, 田旭, 张勇, 等. 沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 321-328.  
DONG X L, TIAN X, ZHANG Y, et al. Analysis of typical events and influencing factors of sub-synchronous resonance in the series compensation transmission system of Guyuan wind farm [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 321-328.
- [4] 王胜伟, 张冲, 何国庆. 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): 1051-1059.  
WANG SH W, ZHANG CH, HE G Q. A review of research on sub synchronous oscillations in large-scale wind farm grid connected systems [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1051-1059.
- [5] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 84-91.  
CHEN F H, YANG J W, LIAO K, et al. Analysis of subsynchronous control interaction in double fed wind

- turbine based on frequency scanning[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(24): 84-91.
- [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] 高本锋, 刘毅, 李蕴红, 等. 直驱风电场与 LCC-HVDC 次同步交互作用的扰动传递路径及阻尼特性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1713-1729.
- GAO B F, LIU Y, LI Y H, et al. Disturbance transfer path and damping characteristics analysis of direct drive wind farm and LCC-HVDC sub-synchronous interaction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1713-1729.
- [8] 汪云涛, 张哲, 汤皓环, 等. 海上直驱风电场弱连接时 LVRT 引发的次同步振荡机理与特性分析 [J]. *电网技术*, 2024, 48(7): 2902-2909.
- WANG Y T, ZHANG ZH, TANG H H, et al. Mechanism and characteristics analysis of sub-synchronous oscillation induced by LVRT in weakly connected offshore direct drive wind farms [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7): 2902-2909.
- [9] 杨博闻, 谢小荣, 严干贵, 等. 风电并网系统次同步振荡分析方法综述 [J]. *电力建设*, 2019, 40(10): 56-63.
- YANG B W, XIE X R, YAN G G, et al. Summary of analysis methods for sub-synchronous oscillation in wind power grid connected systems [J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(10): 56-63.
- [10] MENG F Y, SUN D Y, ZHOU K, et al. A sub-synchronous oscillation suppression strategy for doubly fed wind power generation system [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 83482-83498.
- [11] 王一珺, 杜文娟, 王海风. 基于改进复转矩系数法的多风电场接入引发多机电力系统次同步振荡机理分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7): 2383-2395.
- WANG Y J, DU W J, WANG H F. Analysis of the mechanism of sub synchronous oscillation in multi machine power systems caused by the integration of multiple wind farms based on the improved complex torque coefficient method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2383-2395.
- [12] 周际城, 彭晓涛, 罗鹏, 等. 基于复转矩系数法的双馈风机次同步控制相互作用阻尼特性研究 [J]. *电网技术*, 2020, 44(4): 1247-1257.
- ZHOU J CH, PENG X T, LUO P, et al. Research on damping characteristics of interaction in sub synchronous control of doubly fed fans based on complex torque coefficient method [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(4): 1247-1257.
- [13] HU J B, WANG B, WANG W S, et al. Small signal dynamics of DFIG-based wind turbines during riding through symmetrical faults in weak AC grid [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 720-730.
- [14] DU W, QIANG F, WANG H, et al. Concept of modal repulsion for examining the subsynchronous oscillations caused by wind farms in power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 518-526.
- [15] 李生虎, 叶剑桥, 陈东. 基于无源控制的 DFIG 并网次同步控制相互作用抑制策略研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 77-85.
- LI SH H, YE J Q, CHEN D. Research on interaction suppression strategy for DFIG grid connected sub-synchronous control based on passive control [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 77-85.
- [16] MA J J, LIU F, JIANG L, et al. Multi-DFIG aggregated model based SSR analysis considering wind spatial distribution [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(4): 549-554.
- [17] 王洋, 杜文娟, 王海风. 多风电场-多机电力系统次同步振荡稳定性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 6562-6572.
- WANG Y, DU W J, WANG H F. Stability analysis of sub-synchronous oscillations in multi wind farm multi machine power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6562-6572.
- [18] CHEN CH, DU W J, WANG H F, et al. Sub-synchronous oscillations in power systems caused by grid-connected wind farms-A survey of mechanism studies [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2018, 4(4): 495-503.
- [19] LIU H, XIE X, GAO X, et al. Stability analysis of SSR in multiple wind farms connected to series-compensated systems using impedance network model [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(9): 3118-3128.
- [20] 郑大周, 曾东, 李广磊, 等. 双馈型风力发电机组电气模型的建立与仿真研究 [J]. *电气工程学报*, 2019, 14(3): 81-89.
- ZHENG D ZH, ZENG D, LI G L, et al. Establishment

and simulation research of electrical model for doubly fed wind turbines [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3): 81-89.

### 作者简介



王鑫, 2018 年于成都理工大学获得学士学位, 现为中核运维技术有限公司工程师、上海电力大学在职硕士研究生, 主要研究方向为高压电气设备运行维护、电力系统自动化。

E-mail: wangxin01@cnp. com. cn

**Wang Xin** received his B. Sc. degree from Chengdu University of Technology in 1998. Now he is an engineer in China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd. and a part-time M. Sc. candidate in Shanghai Electric Power

University. His main research interests include high voltage electrical equipment operation and maintenance, power system automation.



程启明(通信作者), 1984 年于苏州大学获得学士学位, 1988 年于浙江大学获得硕士学位, 现为上海电力大学教授(二级), 主要研究方向为新能源发电控制和电力电子控制。

E-mail: chengqiming@sina. com

**Cheng Qiming** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Suzhou university in 1984, M. Sc. degree from Jiangjin university in 1985, respectively. Now he is a professor (second level) in Shanghai university of electric power. His main research interests include new energy generation control and power electronic control.