

基于阻抗分析的双馈风电场次同步振荡研究

鲁翔¹, 陈立群², 李成博², 李长伟², 段子越³, 孟永庆³

(1. 中国南方电网超高压输电公司, 广州 510663; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 210000;
3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要:以新能源为主题的新型电力系统大力发展的背景下,风力发电得到了显著的发展。风力发电成为可再生能源的主要来源之一。串联补偿法将电容器组与输电线路串联,可以有效提高输电线路传输能力,是大型风力发电厂并网的优选途径。但是,串联补偿法的缺点是增加了系统次同步振荡的可能性。为了研究次同步振荡的抑制方法,本文基于阻抗分析,主要针对双馈风电场中由感应发电机效应引起的次同步振荡问题,采用基于阻抗分析的广义奈奎斯特分析法对风电场的次同步振荡现象进行推导分析,并提出一种在系统转子侧加入积分系数以增加系统阻尼的次同步振荡抑制策略。最终在 Matlab/Simulink 搭建风电场等值系统,通过仿真验证所建理论分析与抑制策略的准确性。

关键词:双馈风机; 阻抗分析; 次同步振荡

Research on Sub-synchronous Oscillation of DFIG-based Wind Farm Based on Impedance Analysis

LU Xiang¹, CHEN Liqun², LI Chengbo², LI Changwei², DUAN Ziyue³, MENG Yongqing³

(1. China Southern Power Grid EHV Transmission Company, Guangzhou 510663, China; 2. Nanjing Nanrui Relay Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Under the background of the vigorous development of the new power system with the theme of new energy, wind power has been significantly developed. Wind power has become one of the main sources of renewable energy. The series compensation method can effectively improve the transmission capacity of transmission lines by connecting capacitor bank with transmission lines, which is the preferred way for large wind power plants to connect to the grid. However, the disadvantage of the series compensation method is that it increases the possibility of sub synchronous oscillation of the system. For studying the suppression method of sub synchronous oscillation and as for the problem of sub synchronous oscillation caused by induction generator effect in doubly fed wind farm in this paper, the generalized Nyquist analysis method based on impedance analysis is used to deduce and analyze the sub - synchronous oscillation phenomenon of wind farm, and an integral coefficient is added to the rotor side of the system to increase the damping of the system. Finally, the wind farm equivalent system is set up in Matlab / Simulink, and the accuracy of the theoretical analysis and suppression strategy is verified by simulation.

Keywords: DFIG; impedance analysis; sub-synchronous oscillation

0 引言

20 世纪 80 年代以来,特别是以新能源为主体的新型电力系统大力发展的背景之下,风力发电得

到了显著的发展。在技术发展的推动下,风电机组额定功率迅速增长到兆瓦级,风电场大量建成,增长速度极快。风力发电成为可再生能源的主要来源之一。风电机组设备成本的下降,以及技术性能

的提高,对投资者具有吸引力^[1-7]。

风电的装机容量的飞速攀升,大规模风电的快速发展,风电已进入到大规模集中并网的时代。为了适应风力发电增加的产量,存在两种选择,要么需要安装新的输电线路,要么需要增强现有线路的电力传输能力^[8-10]。安装新的输电线路不是一个经济的选择,增加串联补偿不仅是提高输电线路传输能力的有效手段,还可以提高电力网络的稳定性和电压可控性,是大型风力发电厂并网的有效途径,同时具有一定的经济性。

串联补偿是将电容器组与输电线路串联,可以有效提高输电线路传输能力,实现远距离大规模并网。但是,添加串联补偿的方法增加了系统发生次同步振荡的潜在可能性。因此建立风电机组经串联补偿电路并网的模拟系统,对可能发生的次同步振荡问题进行研究具有必要性。

次同步振荡是指两个或多个电力系统元件(如发电机-涡轮机、串联电容器、电力电子控制和高压直流输电设备控制)之间同时发生振荡的有害现象^[11]。研究电力系统次同步谐振有多种方法。最常见的技术有频率扫描法、特征值分析法、电磁暂态分析法、基于阻抗的奈奎斯特稳定性分析法等。

次同步振荡往往涉及串联补偿传输系统和多质量涡轮发电机之间的相互作用。它是一种动态现象,具有一定的特殊性,是电力系统研究的热点。增加电阻尼可以使系统电阻尼和机械电阻尼之和为正,正电阻尼可以防止次同步谐振(subsynchronous resonance, SSR)的发生。增加电阻尼的方法可分为两类。一种方法是安装电力电子装置设备,如静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)等。在文献[11]中,将风电场末端的 SVC 和可控串联补偿装置(thyristor controlled series compensation, TCSC)与线路串联,应用于增加系统的电阻尼以抑制 SSR,对比研究表明 TCSC 的性能优越。文献[12]与文献[13]分别探讨了 STATCOM 和 UPFC 在抑制 SSR 方面的性能。

频率扫描法是分析次同步谐振的基本技术。该技术扫描次同步频率,能得到从中性点看的发电机系统驱动点阻抗^[14]。在这项技术中,从特定发电机定子绕组后面的一个点作为各个频率的扫描源头,得到系统等效电阻和电抗,其值是关于扫描频率的函数。

特征值分析法是基于系统的小信号模型,得到一组线性常微分方程,通过求解分析系数矩阵的特

征值来得到系统的频率和阻尼信息,应用广泛。特征值分析在每次计算中可以提供整个系统的频率和阻尼信息,可用于 TI 和 IGE 的研究^[15]。电磁暂态分析法主要利用 ATP、PSASP、PSCAD/EMTDC 等仿真软件。先对次同步振荡进行特征值分析,然后使用 PSCAD/EMTDC 软件进行电磁暂态仿真,对特征值分析的结果进行合理验证。

奈奎斯特稳定性分析方法基于阻抗分析,在电力电子和系统相互作用研究中得到了广泛的应用。这项技术被引入用于次同步振荡分析,在近几年的文献中,有用于检测双馈型风力发电场中的次同步振荡问题^[16-19]。

本文基于阻抗分析的方法,主要针对风力发电系统中双馈风电场中由感应发电机效应引起的次同步振荡问题,采用阻抗分析法对风电场的次同步振荡现象进行推导分析,采用广义奈奎斯特理论,对系统的稳定性进行了分析,清晰明确地揭示了发生次同步振荡现象和系统稳定性的影响因素,提出一种在系统转子侧加入积分系数以增加系统阻尼的次同步振荡抑制策略,对于工程实践中对其振荡的抑制和研究具有重要意义。

1 基于阻抗分析的奈奎斯特稳定性分析

本文采用奈奎斯特稳定性分析方法,分析双馈风电场系统的次同步振荡问题。奈奎斯特稳定性分析方法基于阻抗分析,在电力电子和系统相互作用研究中得到了广泛的应用。这项技术被引入用于次同步振荡分析,属于在近几年的用于检测双馈型风力发电场中的次同步振荡问题的新型方案。

具体而言,所研究的系统被分为源子系统和负载子系统。源子系统由理想电压源(E_s)与源阻抗(Z_s)串联构成的戴维南等效电路建模,负载子系统由其输入阻抗(Z_l)建模,见图 1^[18]。

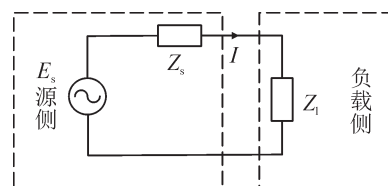


图1 奈奎斯特分析等效系统

Fig. 1 Equivalent system of Nyquist analysis

系统中的电流公式为

$$I(s) = \frac{E(s)}{Z_s(s) + Z_l(s)} = \frac{E(s)}{Z_l(s) \left(1 + Z_s(s)/Z_l(s) \right)} \quad (1)$$

基于阻抗分析法的奈奎斯特稳定性分析判据指出:假设 E_s 和 $1/Z_l(s)$ 都是稳定的,因此电流的稳

定性取决于式(1)中第2项的稳定性。目前,分析问题转化为反馈控制问题,通过回路增益 $Z_s(s)/Z_l(s)$ 来判断系统的稳定性,源阻抗 $Z_s(s)$ 与负载输入阻抗 $Z_l(s)$ 之比必须满足奈奎斯特稳定性准则。也即为若奈奎斯特图将包围 $(-1,0)$,这表明系统是稳定的。

基于上述基于阻抗分析法的奈奎斯特稳定性分析原理,具体应用于风力发电领域双馈风电场系统的次同步振荡问题研究中,双馈风电机组经串补线路并网系统示意图见图2,首先对图2双馈风电机组经串补线路并网系统进行源子系统和负载子系统的等效划分。

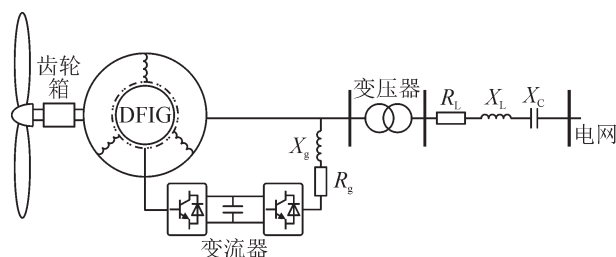


图2 双馈风电机组经串补线路并网系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of grid connected system of doubly fed wind turbine through series compensation line

双馈风电机组经串补线路并网系统等效图见图3。如图3所示,双馈风电机组经串补线路并网系统等效图可以分为3部分。首先,从左侧第1部分为转子侧换流器部分,考虑到双馈风力发电系统的变流器由转子侧变流器(rotor side converter, RSC)和电网侧变流器(grid side converter, GSC)组成,双馈风力发电系统始终由RSC控制,以实现最大功率点跟踪,而直流电压由GSC控制为恒定。因此,双馈风力发电系统的整体输出阻抗相当于双馈风力发电机与RSC再和GSC的并联。由于在锁相环的带宽内,GSC的阻抗幅值大于双馈风力发电机与无功补偿控制器,因此人们普遍认为,在锁相环的带宽内,GSC对阻抗的影响小于双馈风力发电机与无功补偿控制器。因此,本文只分析了双馈风力发电机与转子换流器两部分的阻抗。

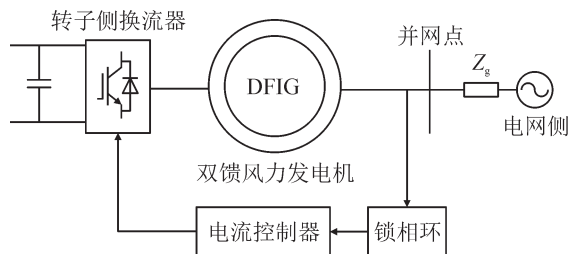


图3 双馈风电机组经串补线路并网系统等效图
Fig. 3 Equivalent diagram of grid connected system of doubly fed wind turbine through series compensated line

其次,第2部分从并网点到转子侧换流器,中间部分是双馈风力发电机和其电流控制器部分,由于与次同步振荡问题动态特性和内部电流控制环路带宽相比,直流母线电压外环的带宽要慢得多,因此在建立转换器的电路模型时,外环控制被忽略。在此等效图中只考虑电流内环部分,所以称为电流控制器,其输入的一部分是来自于并网点电压由锁相环得到的相位信息。

最后,第3部分是从并网点到右侧的由线路阻抗和串补综合等效的阻抗 Z_g 和电网侧无穷大电网电源。

这样根据基于阻抗分析法的奈奎斯特稳定性分析原理,定义负载子系统为从并网点左侧到转子侧换流器部分,定义其等效阻抗为 Z_l ,则整体风力发电领域双馈风电场系统的次同步振荡问题的研究,可以转化为研究 $L(s)$,也即为

$$L(s) = Z_g(s)/Z_l(s) \quad (2)$$

2 双馈风机的阻抗建模分析

双馈风力发电机的转子侧变流器控制包括内部电流控制回路和外部电压控制回路。内部控制回路的动态比外部控制回路快得多,因此外部控制被认为是恒定的。与RSC相比,GSC的影响也可以忽略不计,因此GSC和外部控制环路将不包括在阻抗模型中^[21-23]。由于风力机模型、传动系统模型是很多文章中都提及的经典模型,在此基础上要将机械能转换为电能,还需要研究发电机和变流器的工作原理和数学模型,本节通过上述假设和简化对双馈异步发电机进行阻抗建模分析。

在建立双馈电机的数学模型时,首先,假设定子均为三相对称绕组且在空间上相差 120° ,产生的磁动势沿气隙均匀分布;不计及温度和频率变化对绕组电阻造成的影响;忽略铁耗及涡流损耗,忽略谐波及齿槽效应,忽略磁饱和效应、铁心磁滞和集肤效应;假设各绕组的自感和互感都是与电流无关的恒定值。

静止三相坐标系下,双馈发电机的定转子电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & & & & \\ & R_s & & & & \\ & & R_s & & & \\ & & & R_r & & \\ & & & & R_r & \\ & & & & & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 和 u_a 、 u_b 、 u_c 为定子、转子相电压的

瞬时值; i_A, i_B, i_C 和 i_a, i_b, i_c 为定子、转子相电流的瞬时值; R_s, R_r 为定子绕组、转子绕组的电阻; p 表示微分算子 $\frac{d}{dt}$; ψ_A, ψ_B, ψ_C 和 ψ_a, ψ_b, ψ_c 为定子、转子绕组的全磁链。

同理,在静止三相坐标系下绕组磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中式(4)有关电感 L_{xx} 定义为

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} & -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{s1} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{s1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{r1} & -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{r1} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{r1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $L_{s1} = L_{m1} + L_{ls}$, 表示三相定子绕组自感; L_{m1} 表示其中一相的绕组励磁电感; L_{ls} 为定子绕组漏磁电感。 $L_{r1} = L_{m1} + L_{lr}$, 表示三相转子绕组自感, L_{lr} 表示转子绕组漏磁电感。

由于三相静止坐标系下双馈发电机的数学模型存在着大量的电机参数,是一个非线性高阶强耦合的系统,一般的研究方式是先将静止 abc 三相坐标系写的方程由式(7)的等功率矩阵 $C_{3s/2s}$ 变化至静止 $\alpha\beta$ 两相坐标系,再利用式(8)的旋转变换矩阵 $C_{2s/2r}$ 变换至 dq 旋转坐标系。静止 abc 三相坐标系、 $\alpha\beta$ 两相坐标系、dq 旋转坐标系的相对关系见图 4。

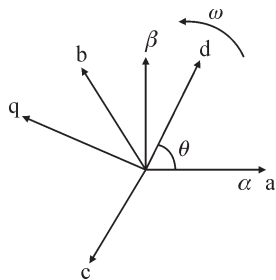


图4 三个坐标系的相对关系图

Fig. 4 Relative relation diagram of three coordinates

$$C_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

dq 旋转坐标系下,双馈发电机的定转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (9)$$

同理, dq 旋转坐标系下转子的磁链可以表示为

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u_{ds}, u_{qs}, \psi_{ds}, \psi_{qs}, i_{ds}, i_{qs}$ 是定子电压、磁、电流分量; $u_{dr}, u_{qr}, \psi_{dr}, \psi_{qr}, i_{dr}, i_{qr}$ 是转子电压、磁链、电流分量; ω_s, ω_r 是感应电机的同步电角速度和转子的电角速度; L_m 是等效绕组间的互感; L_s 是定子等效绕组的自感; L_r 是转子等效绕组的自感。

综合分析式(9)和式(10),可以得到转子侧电压控制方程为

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + L_p i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) L i_{rq} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + L_p i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) L i_{rd} \end{cases} \quad (11)$$

式中, L 表示转子侧的瞬态电感,表达式为

$$L = L_r - L_m^2 / L_s \quad (12)$$

通过式(11)可以得到转子侧控制框图,即为电流控制器部分见图 5。

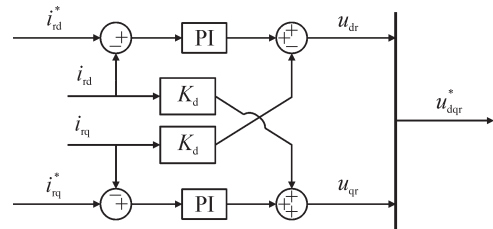


图5 电流控制器部分

Fig. 5 Current controller part

图中 PI 表示内部电流控制回路的比例和积分参数, K_d 表示其中的耦合项,其表达式为

$$K_d = (\omega_s - \omega_r) L \quad (13)$$

定义双馈异步电机的转差率为 s_e ,则由式(9)

其表达式为

$$s_e = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s \quad (14)$$

综上所述,可得出双馈风机阻抗模型见图6。

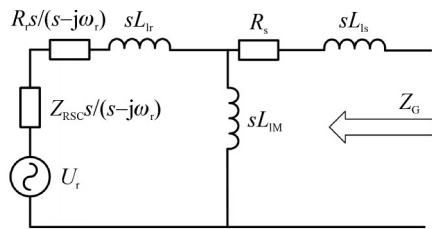


图6 双馈风机阻抗模型
Fig. 6 Impedance model of DFIG

图6中, L_{ls} 和 L_{lr} 都是定子侧和转子侧的互感。根据三项静止坐标系和 dq 坐标系,即两项旋转坐标系在频域之间的关系为

$$U_{abc}(s) = U_{dq}(s - j\omega) \quad (15)$$

另外,图6中 Z_{RSC} 可以表示为

$$Z_{RSC} = K_p + \frac{K_i}{(s - j\omega)} - jK_d \quad (16)$$

式中, K_p 和 K_i 都是 PI 调节器中的参数。因此可以得到最终 DFIG 的阻抗模型为

$$Z_g = R_s + sL_{ls} + \frac{sM \left[sL_{lr} + \frac{s}{s - j\omega} \left(R_r + K_p + \frac{K_i}{(s - j\omega)} - jK_d \right) \right]}{sM + sL_{lr} + \frac{s}{s - j\omega} \left(R_r + K_p + \frac{K_i}{(s - j\omega)} - jK_d \right)} \quad (17)$$

3 基于广义奈奎斯特判据的稳定性分析

3.1 广义奈奎斯特曲线绘制

根据基于阻抗分析理论的奈奎斯特稳定性理论和推导出的 DFIG 和串补之间的阻抗模型之比,可以绘制相应的广义奈奎斯特曲线。

分析在双馈风机系统在 9 m/s 风速下,在 30%、60%、90% 的串补度 3 种不同情况下分别绘制广义奈奎斯特曲线见图7,其中系统的参数见表1。

其中关键点为图7中使用三角标注的 $(-1, 0)$ 点,通过其做一条和虚轴平行的曲线,可以很明显的观察到,当串补度为 60% 和 90% 时整个曲线是和其有交点的,即为整个奈奎斯特曲线在这两种串补度条件下是包围 $(-1, 0)$ 点的,系统是不稳定的发生了次同步振荡。相反当串补度为 30% 的情况下,是既没有交点存在,也没有出现包围 $(-1, 0)$ 点的情况出现的,所以在此时整个系统是稳定的,

不存在次同步振荡问题。

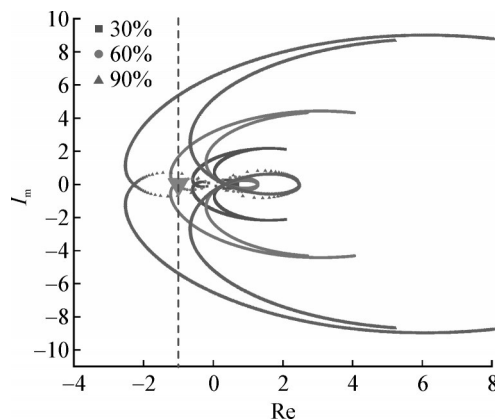


图7 广义奈奎斯特曲线图
Fig. 7 Generalized Nyquist curve

表1 双馈式异步发电机模型的主要参数
Table 1 Main parameters of doubly fed induction generator model

参数	数值
额定容量/MW	2
电机极对数	2
额定电压/V	690
定子电阻/ Ω	0.001 164
转子电阻/ Ω	0.001 31
定转子互感/mH	2.995
转子漏感/mH	0.075 44
定子漏感/mH	0.070 03

通过广义奈奎斯特判据,除了绘制广义奈奎斯特曲线可以判断系统稳定性的方法之外,还可以通过绘制广义奈奎斯特伯德图的方式,在同一张伯德图中绘制和 DFIG 和串补的阻抗模型,见图8。二者幅频特性曲线相交的位置对应的频率即为振荡频率。通过对图8中广义奈奎斯特伯德图的对比,可以得到和图7同样的结论。

对于次同步振荡情况发生之后,振荡频率的分析,可以通过上述交点对应的频率得出。可以从图7中得到,在 90% 串补度下,有功功率振荡发散,振荡频率约为 30.23 Hz,对应次同步谐振频率约为 19.77 Hz。在 60% 串补度下,有功功率振荡发散,振荡频率约为 25 Hz,对应次同步谐振频率约为 25 Hz。

由阻抗分析的结果可得,在额定风速、30% 串补度下,系统的总等效电阻在次同步谐振频率下为正值,系统收敛。在额定风速,60% 和 90% 串补度下,系统的总等效电阻在次同步谐振频率下为负值,系统将发生次同步振荡,振荡发散。

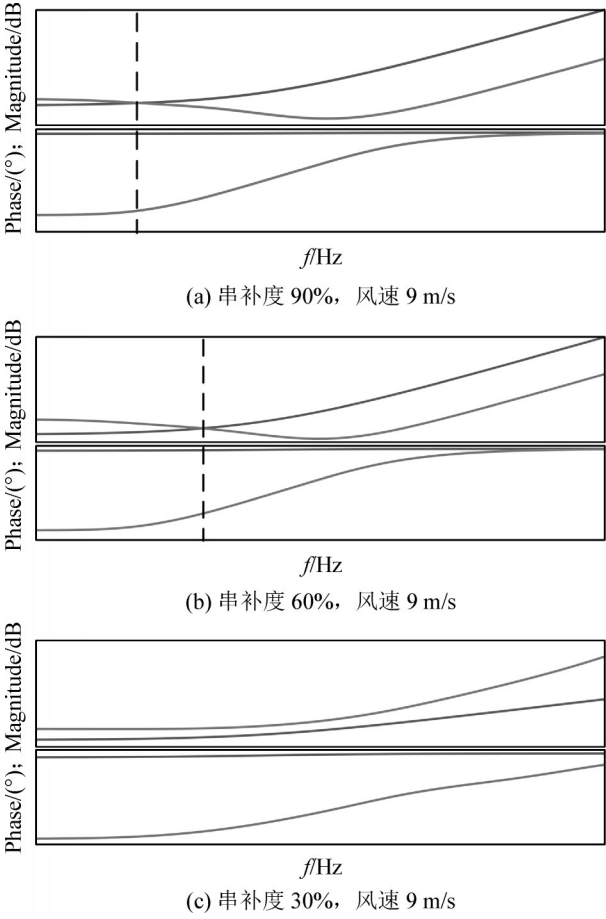


图8 广义奈奎斯特伯德图
Fig. 8 Generalized Nyquist Bode diagram

3.2 时域仿真验证

为了验证上述广义奈奎斯特曲线得到的次同步振荡频率的正确性,在 Matlab/Simulink 中按照表 1 中的参数搭建仿真模型,设定风速为额定风速 9 m/s,变流器调节参数一定,在风机稳定运行后,于 5 s 时投入 30%,60%,90% 串补度对应的串补电容,系统输出的有功功率无功功率、转子转速的仿真结果见图 9-11。

仿真结果与阻抗分析和广义奈奎斯特曲线的结果具有一致性,所得次同步谐振频率与理论分析的结果误差相差较小,验证了这两种方法的有效性和准确性。同时验证了结论:对着系统增加的串补度的增大,次同步振荡发生的危险性越大,振荡速度越快,振幅越大。

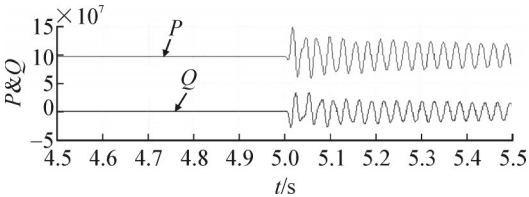


图9 额定风速 30% 串补度系统的输出功率振荡曲线
Fig. 9 Output power oscillation curve of 30% series compensation system at rated wind speed

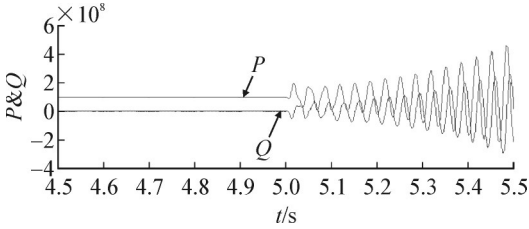


图10 额定风速 60% 串补度系统的输出功率振荡曲线
Fig. 10 Output power oscillation curve of 60% series compensation system at rated wind speed

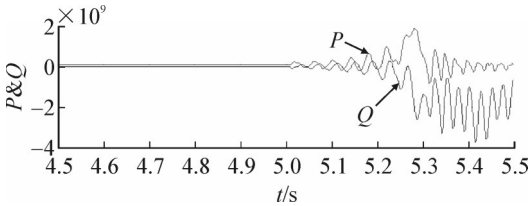


图11 额定风速 90% 串补度系统的输出功率振荡曲线
Fig. 11 Output power oscillation curve of 90% series compensation system at rated wind speed

4 增加积分系数抑制次同步振荡策略

因串联补偿在风电远距离输送的广泛应用,抑制其引发的次同步谐振成为了研究热点。在对整个系统等效阻抗式 6 进行分析的基础上,可以设计出基于阻抗分析的通过增加积分系数和虚拟电感来提出的次同步振荡问题的抑制方案。

4.1 抑制原理

由于次同步频率电流在发电机定子与转子气隙间产生旋转磁场,这个旋转磁场转速和发电机的转子速度之间有所差异。在次同步频率下,旋转磁场的速度小于实际转子速度。因此,从定子绕组看,转子的等效电阻为负值。这一负值电阻可能导致系统的总电阻为负,导致次同步电流持续存在,产生自激振荡。

从对系统的阻抗分析和频率扫描中可知,缓解系统次同步振荡问题发生的危险性,要降低系统等效电抗过零点时对应的等效电阻。根据阻抗分析广义奈奎斯特曲线和时域仿真结果的分析,可以使用的方法有两个,一个是直接减小转子侧的等效电阻的绝对值,以防其值过大使系统的总电阻呈负值;一个是适当增加系统的等效电抗,使可能发生的次同步振荡频率值减小,系统的等效电阻值随次同步振荡频率的减小而增大,因此,通过增加积分元素,相当于在系统中增加一个虚拟电感,可以抑制系统次同步振荡的发生。

添加积分元件之后整个系统的电路图和转子侧整体的控制框图见图 12-13。

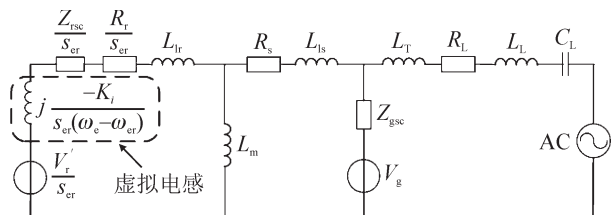


图12 添加虚拟电感的全系统等效电路图

Fig. 12 Equivalent circuit diagram of the whole system with virtual inductance added

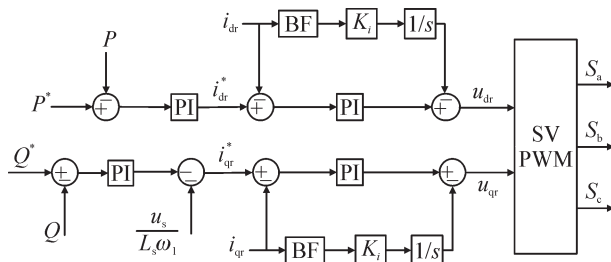


图13 添加积分系数后转子侧变流器控制框图

Fig. 13 Control block diagram of rotor-side converter after adding integral coefficient

4.2 积分系数值计算

积分系数的值需要设置。如果该值过大,将导致次同步振荡频率偏差过大,影响电力系统的稳定运行;如果该值过小,则不能在全工作区抑制次同步振荡。加入积分系数后,转子侧变流器的等效阻抗可以表示为

$$Z'_{rsc} = \frac{K_{p1} + (-K_i + K_{il})/(s - j\omega_c)}{s_{er}} = \frac{s}{s - j\omega_m} K_{p1} + \frac{s}{(s - j\omega_m)(s - j\omega_c)} (-K_i + K_{il}) \quad (18)$$

式中, s 在次同步振荡频率下的值为 $j\omega_{er}$ 。从式(18)可以得出,因 $s_{er} < 0$, 如果 $K_i > K_{il}$, 则意味着转子侧变流器的等效阻抗是感性的, 系统的感抗增大, 将导致次同步振荡频率降低。如果 $K_i < K_{il}$, 则意味着转子侧变换器的等效阻抗仍呈容性, 但容抗的幅值减小, 那么它能否降低次同步振荡频率取决于系统的总等效阻抗。

综上, 添加虚拟电感能否抑制次同步谐振, 系数 K_i 的取值需要整定, 风电场在不同的运行状态下所需的虚拟电感值不同。

针对所研究的 100 MW 风电场系统, 假设串补度为 60%。在 Matlab 中绘制了不同转子转速下 60% 串补度情况下积分系数、次同步振荡频率和系统等效电阻之间的关系, 见图 14。

可以从图 14 观察到, 在系统中加入积分元素会导致次同步振荡频率降低, 积分系数越大, 频率偏移量越大。当转子转速为 1 500 rpm 时, 一个小的积

分系数可以使系统稳定。当转子转速为 1 200 rpm 时, 积分系数为 0.35, 是系统的临界稳定点。假设转速的最小值为 900 rpm, 积分系数必须大于 0.46。因此, 设定 0.5 的固定值, 以确保系统在任何风速下都不会发生次同步振荡。

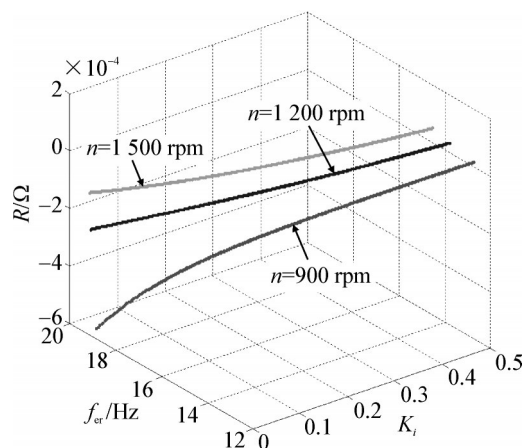


图14 积分系数、次同步谐振频率与系统等效电阻的关系

Fig. 14 Relationship among integral coefficient, sub-synchronous resonance frequency and system equivalent resistance

积分系数有助于降低次同步振荡频率, 这有助于减轻其高补偿水平下导致负总电阻的倾向。串补度越高, 次同步振荡频率下降越大。

图 15-16 分别给出了 30% 和 60% 串补度下系统等效电阻、次同步振荡频率和转子转速之间的关系。

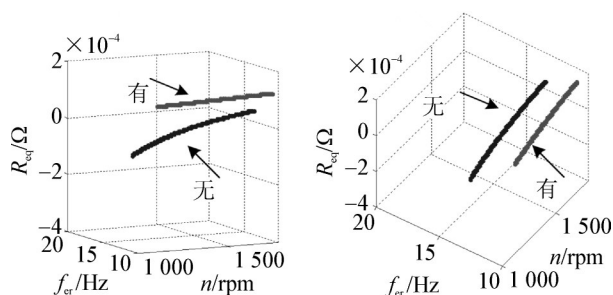


图15 30% 串补度下有无积分元素的系统总等效电阻

Fig. 15 Total equivalent resistance of systems with and without integral elements at 30% series compensation

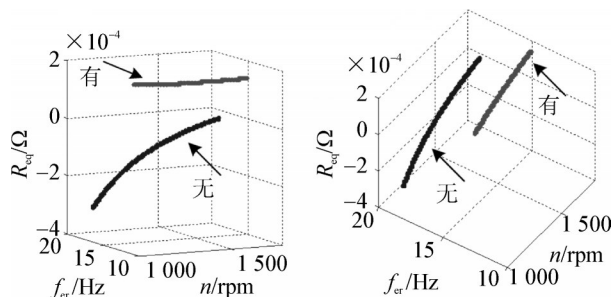


图16 60% 串补度下有无积分元素的系统总等效电阻

Fig. 16 Total equivalent resistance of systems with and without integral elements at 60% series compensation

可以看出,在任意转速下,合适的积分系数值可以将系统的等效电阻值增大到正值,从而使系统的次同步振荡收敛。此外,串补度越高,次同步振荡频率越高;转子转速越高,系统等效电阻越大。

5 仿真验证结果

为了验证所提出的次同步振荡抑制方案的有效性,需要时域仿真来反映干扰过程中的实际动态行为,这也就首先需要验证时域模型的正确性。下面将分为两部分,首先在 Matlab/Simulink 中搭建的仿真模型验证时域模型正确性,之后采用基于阻抗分析法提出的在系统转子侧加入积分系数的次同步振荡抑制策略,并使用仿真的方式展示其抑制效果。

5.1 时域模型验证

根据建立的双馈发电机的数学模型与变流器的数学模型及其控制策略,在 Matlab/Simulink 中搭建其仿真模型用以验证推导的数学模型与控制策略的正确性。两者主要参数设置见表 1。

设定风速为额定风速,运行建立的仿真模型,风机稳态运行后取 4.5 s 至 5.5 s 发电机有功功率、无功功率、风机出口电压、电磁转矩等的仿真波形见图 17-20。

由图 17 可得,所建的模型控制实现了双馈风机输出无功功率维持为 0,为单位功率因数运行,有功功率约为 2 MW,说明所设计的网侧变流器控制方案能较好地控制功率,根据系统需要可以调节无功功率给定值并向电网输出无功功率。图 18-19 为风机出口电压和风机出口电流、波形,为 50 Hz 的正弦交流电,波形稳定,电能质量较好。由图 20 可得,发电机电磁转矩较好地跟踪上风机输出机械转矩。

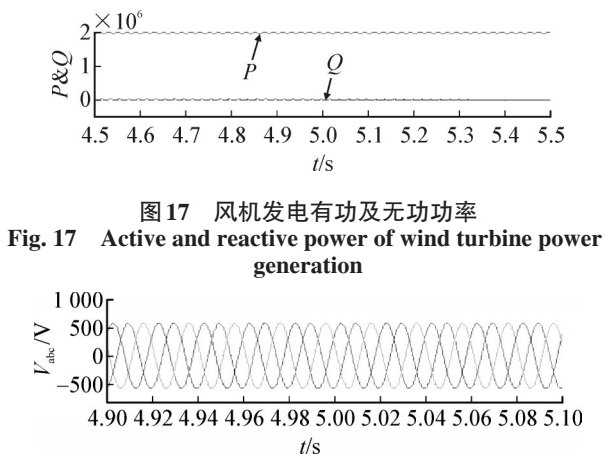


图 17 风机发电有功及无功功率
Fig. 17 Active and reactive power of wind turbine power generation

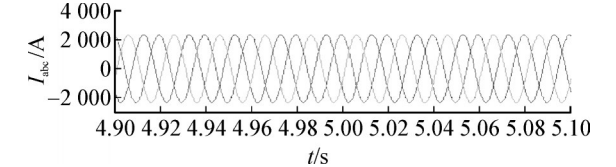


图 19 风机出口电流
Fig. 19 Wind turbine outlet current

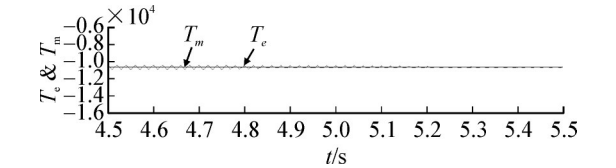


图 20 双馈发电机机械转矩和电磁转矩
Fig. 20 Mechanical and electromagnetic torque of doubly fed generator

5.2 抑制策略验证

为了验证所提出的次同步振荡抑制方案的有效性,需要时域仿真来反映干扰过程中的实际动态行为。设定系统最大补偿水平为 90%,对在不同风速和串补度下加虚拟电感和不加虚拟电感的发电机转速及输出功率的动态响应进行仿真研究。串联补偿电容器在 5 s 时接通。

图 21-22 显示了系统在 9 m/s 风速下的动态响应,即在一定风速和补偿水平下,添加或不添加虚拟电感的系统仿真结果。每个工况的时域仿真分别在 30%、60%、90% 的串补度下进行。

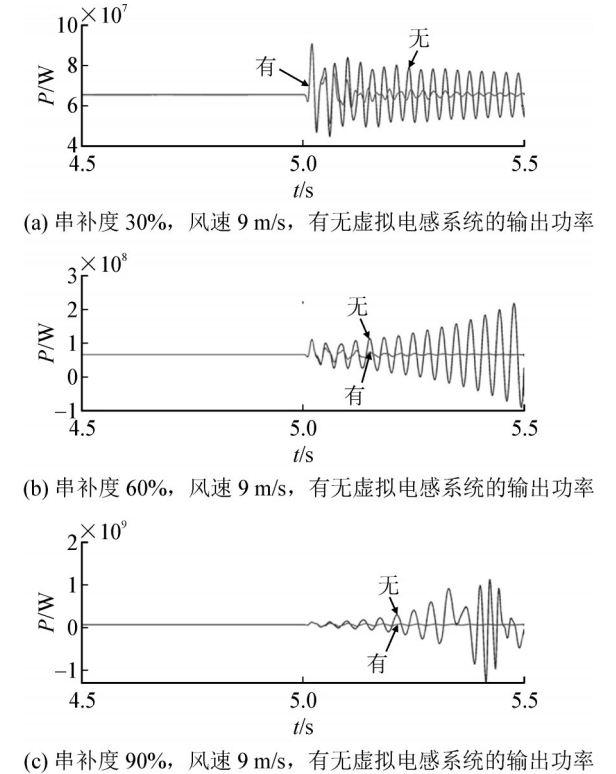


图 21 风速 9 m/s 下系统添加虚拟电感前后系统的输出功率
Fig. 21 Output power of system before and after adding virtual inductance at 9 m/s wind speed

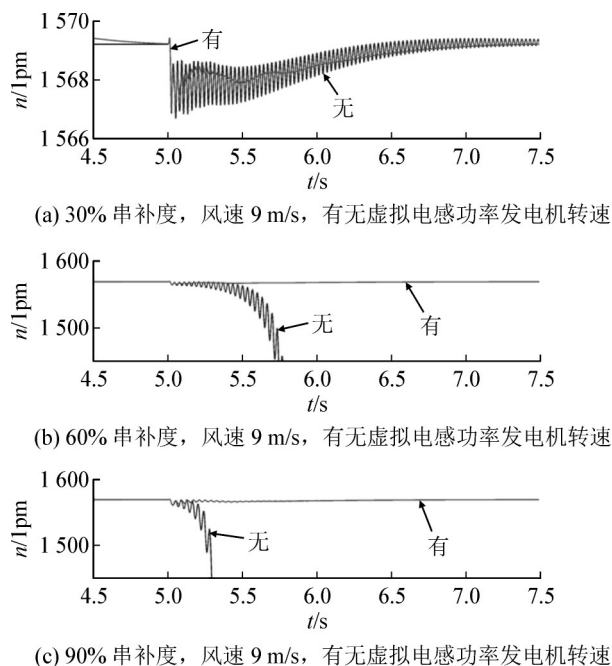


图 22 风速 9 m/s 下系统有无虚拟电感的发电机转速曲线
Fig. 22 Revolution curve of generator with or without virtual inductance at 9 m/s wind speed

在风速为 9 m/s、补偿水平为 30% 的情况下,系统的输出功率和发电机转速见图 20(a)与图 22(a)。可以观察到在没有虚拟电感(积分元素)的情况下,系统振荡,但系统有缓慢收敛的趋势。在系统中加入积分元素后,系统可以更快地进入稳态。

在风速为 9 m/s,补偿水平为 60%、90% 的两种情况下,若没有阻尼控制策略,系统将发生持续振荡,如图 20(b)、20(c)和图 22(b)、22(c)所示。在系统中加入积分元素后,系统振荡收敛保持稳定。仿真结果验证了所提出的增加虚拟电感抑制策略的有效性,该控制策略能显著改善系统的阻尼,抑制系统次同步振荡的发生。

根据仿真结果和以上分析可以总结,所提出的抑制策略提高了系统抑制次同步振荡的能力。利用虚拟电感,系统可以在各串补度和各风速下快速进入稳态。

6 结语

串联补偿能提高电力网络的稳定性和电压可控性,相比增加新线路具有经济型,是提高风电输电线路传输能力的有效手段。但风电场经串补电容补偿接入电网可能导致次同步振荡发生。在诸多研究次同步振荡的方法中,基于广义奈奎斯特的阻抗分析法不需要建立系统的特征值方程,判定方法直观有效,而且可以对复杂系统进行模块化集成。因此,基于广义奈奎斯特的阻抗分析法开展风

电场次同步振荡问题的研究,对电力系统的安全稳定运行具有重要的理论与应用价值。本文基于阻抗分析,主要研究了基于 DFIG 的风电场中由感应发电机效应引起的次同步振荡,采用广义奈奎斯特的阻抗分析法对风电系统的次同步振荡现象进行了分析,提出了一种在系统转子侧加入积分系数的次同步振荡抑制策略。现将本文的主要研究工作、相关结论、创新点等总结如下:

1)因双馈风电在风电输送领域的广泛使用且其串补线路具有发生次同步振荡的风险,故详细研究了双馈风机的运行原理,推导出数学模型及分析了其控制策略,建立了其阻抗模型,并采用广义奈奎斯特理论,对其次同步振荡问题进行了分析;

2)详细建立了其实现最大功率跟踪的风力机数学模型,双轴系数数学模型,双馈发电机数学模型,以及变流器的数学模型及控制策略。在 Matlab/Simulink 中搭建了双馈风机系统模型,通过仿真验证了所推导的数学模型与控制策略的准确性与可靠性;

3)基于阻抗分析法提出了一种在系统转子侧加入积分系数的次同步振荡抑制策略。该积分系数在系统的等效电路图中等效为一个虚拟电感。给出了此抑制方法的原理,计算得到合理的积分系数,将抑制策略应用于 Matlab/Simulink 中搭建的仿真模型验证了该控制策略的有效性。该策略从阻抗分析的角度分析了风电系统的次同步振荡现象。它具有清晰直观的物理概念,有利于系统集成,不需要计算分析系统状态空间控制模型,为抑制次同步振荡提供了一种简单、经济的方法。

参考文献

- [1] 张成,赵涛,朱爱华,等. 提高弱电网下并网逆变器稳定性的复合补偿策略[J]. 智慧电力,2021,49(5):42-47.
ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Composite compensation strategy for improving stability of grid connected inverter in weak current network[J]. Smart Power, 2021,49(5):42-47.
- [2] GLOVER E, CHANG C C, GORINEVSKY D, et al. Frequency stability for distributed generation connected through grid-tie inverter[C]//2012 IEEE International Conference on Power System Technology(Powercon). [S.l.]:IEEE,2012:1-6.
- [3] MENG Yongqing, PAN Xixi, MA Hao, et al. Analysis and mitigation of subsynchronous resonance based on integral control for DFIG-based wind farm[J]. IET Generation, Transmission Distribution, 2019. 13(9):1715-1728.
- [4] 胡人川,刘俊勇,刘友波,等. 促进新能源外送的梯级水电-风电联盟备用效益均衡模型[J]. 电网与清洁能源,

- 2023,39(2):103-113.
- HU Renchuan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. A cascade hydropower-wind power alliance backup benefit equilibrium model to promote new energy transmission[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 103-113.
- [5] 黄晓尧, 谢瑞, 裴鹏, 等. 远海风电两种送出方案的经济性评估[J]. 浙江电力, 2022, 41(7):1-7.
- HUANG Xiaoyao, XIE Rui, QIU Peng, et al. Economic evaluation of two transmission methods for long-distance offshore wind power[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(7):1-7.
- [6] 于家英, 韩民晓, 曹昕, 等. 基于功率同步机制锁相的光伏并网系统稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12):59-66.
- YU Jiaying, HAN Minxiao, CAO Xin, et al. Stability analysis of photovoltaic grid-connected system based on power synchronization mechanism phase-locked[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2020, 36(12): 59-66.
- [7] 郑征, 黄旭, 杨明, 等. 弱电网下逆变侧电流反馈的并网逆变器稳定性分析及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19):31-37.
- ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming, et al. Stability analysis and improvement for LCL filter grid-connected inverter using inverter-side current feedback[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 31-37.
- [8] 周杰, 刘傲洋, 罗皓文, 等. 虚拟同步机接入弱电网的电能质量新问题及谐波抑制方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(2):83-90.
- ZHOU Jie, LIU Aoyang, LUO Haowen, et al. Power quality issues and harmonic suppression method of virtual synchronous generator connected to weak grid[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 83-90.
- [9] MOHAMMADPOUR H A, E. Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(2): 1022-1033.
- [10] Y SONG X W, F. Impedance-based high-frequency resonance analysis of DFIG system in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(5): 3536-3548.
- [11] MOHAMMADPOUR H A, ISLAM M M, SANTI E, et al. SSR damping in fixed-speed wind farms using series FACTS controllers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 76-86.
- [12] 蒋泽度, 陈卓, 郝正航, 等. 用于分布式风电的LCL型STATCOM控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2):102-109.
- JIANG Zeqian, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. A study on lcl-type STATCOM control strategy for distributed wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 102-109.
- [13] H. JIANG. Application of UPFC to mitigate SSR in series-compensated wind farms [J]. The Journal of Engineering, 2019(16):2505-2509.
- [14] W CHEN X X W L, H Liu. Probabilistic stability analysis of subsynchronous resonance for series-compensated DFIG-based wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable energy, 2017, 9(1):400-409.
- [15] 胡安平, 杨波, 潘鹏鹏, 等. 基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4999-5008.
- HU Anping, YANG Bo, PAN Pengpeng, et al. Research on inertial characteristics of energy storage system based on power electronic interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17):4999-5008.
- [16] 熊连松, 卓放, 刘小康, 等. 静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12):112-120.
- XIONG Liansong, ZHUO Fang, LIU Xiaokang, et al. Analysis on mechanism of power oscillation mitigation by STATCOM[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12):112-120.
- [17] 和萍, 武欣欣, 陈婕, 等. 含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 20-27.
- HE Ping, WU Xinxin, CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of an integrated energy system with wind and solar power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 20-27.
- [18] 陈虹虹, 张宸宇, 缪惠宇, 等. 带蓄电池SOC反馈的虚拟同步发电机系统[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4):90-96.
- CHEN Hongfei, ZHANG Chenyu, MIAO Huiyu, et al. Virtual synchronous generator system with battery SOC feedback control[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2018, 37(4):90-96.
- [19] 殷桂梁, 董浩, 代亚超, 等. 光伏微网中虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 192-199.
- YIN Guiliang, DONG Hao, DAI Yachao, et al. Adaptive control strategy of VSG parameters in photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 192-199.
- [20] 杨俊, 程昱舒, 陈安琪, 等. 风电场防雷击系统设计与评估方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(7):34-41.
- YANG Jun, CHENG Yushu, CHEN Anqi, et al. Study on design and evaluation method of lightning protection system in wind power plant[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7):34-41.

(下转第176页)

(5):161-168.

作者简介:

罗军杰(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网保护与控制。E-mail:1772242586@qq.com。

粟时平(1963—),男,教授,主要研究方向为电力系统运行控制、新能源发电等。

倪亮(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网运行与控制。

李志轩(1996—),男,硕士研究生,研究方向为隔离型变换器运行与控制。

苏乾坤(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为柔性多状态开关运行控制。

(上接第150页)

[21] D. FATEH, A. A. M. Birjandi, J. M. Safe sub synchronous oscillations response for large DFIG-based wind farms[J]. IEEE Access, 2020: 169822-169834

[22] H. LI . An improved fast detection method on subsynchronous resonance in a wind power system with a series compensated transmission line[J]. IEEE Access , 2019 (7) : 61512-61522.

[23] BAESMAT H J, M. BODSON. Suppression of sub-synchronous resonances through excitation control of doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2019, 34(6):4329-4340.

[24] W DU Y W W, Q. FU. Concept of modal repulsion for examining the sub-synchronous oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):4614-

4624.

作者简介:

鲁翔(1985—),男,高级工程师,研究方向为高压直流输电。

陈立群(1992—),男,工程师,研究方向为电力电子技术。

李成博(1985—),男,高级工程师,研究方向为电力电子技术。

李长伟(1980—),男,高级工程师,研究方向为电力电子技术。

段子越(1997—),男,博士研究生,研究方向为分频输电系统。

孟永庆(1976—),男,副教授,研究方向为电力系统运行与控制。