

文章编号:1674-2869(2018)01-0093-06

# 直驱永磁风电机组轴系扭振的非线性控制

王忠勇<sup>1,2</sup>, 李啸聰<sup>2</sup>

1. 广东石油化工学院计算机与电子信息学院, 广东 茂名 525000;
2. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004

**摘要:**从抑制轴系扭振的角度,以直驱永磁同步风力发电机组为对象,建立了包括风力机、传动系统、发电机和电网的数学模型,提出了协调控制的非线性控制策略,有效处理风电系统受到扰动时永磁风机轴系扭振的问题。将设计的非线性控制方法与线性最优控制方法做仿真对比,结果表明当系统受到短路扰动,功率变化扰动和端电压扰动时,非线性控制方法能更好地抑制风力机和发电机之间功角位移偏差的振荡,减少轴系扭振事故的发生,提高系统稳定运行的能力。

**关键词:**轴系扭振;直驱永磁风机;扰动;非线性控制

**中图分类号:**TM614 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.01.001

## Nonlinear Control of Shaft Torsional Vibration for PMSG-Based Wind Turbines

WANG Zhongyong<sup>1,2</sup>, LI Xiaocong<sup>2</sup>

1. College of Computer and Electronic Information, Guangdong Institute of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Nanning 530004, China

**Abstract:** The paper addresses the issues associated with modeling and controlling of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generators (D-PMSG), according to the shaft torsional vibration. A complete model of D-PMSG including wind turbine model, drive train model and generator model was built. Compared to the linear optimal method, the simulation of nonlinear method shows that the nonlinear control could restrain oscillation of the angular displacement deviation between turbine and generator, reduced risk of accidents of shaft torsional vibration and improved greatly the steady-state operation level of system when the system was disturbed by short circuit, power change and terminal voltage.

**Keywords:** shafting torsional vibration; D-PMSG; disturbance; nonlinear control

风能的利用近年来得到了巨大的发展,但风电大规模并网给电力系统的稳定运行带来了新的挑战,并网运行后电网的扰动或风速的变化会导致机网扭振,对风电机组的稳定运行和设备安全产生很大的影响<sup>[1-5]</sup>。在大容量风电场中,严重的扭振现象会造成风电机组损耗加剧甚至损坏,影响电力系统的安全运行<sup>[6-7]</sup>。因此,深入研究风电机组

的动态特性及其与电网的相互作用,以及风机轴系的扭振问题是保证机组安全运行的重要课题。

直驱永磁风电传动系统具有“柔性”,受到电网扰动时轴系出现的低频振荡,使传动轴出现应力疲劳<sup>[8-12]</sup>。国内学者已经探讨了风机的稳定性运行和轴系扭振的问题<sup>[13-16]</sup>,已有学者对非线性控制理论应用于电力系统稳定分析进行了深入的探

收稿日期:2016-05-31

基金项目:国家自然科学基金(51267001);广东石油化工学院科研基金(2017rc14)

作者简介:王忠勇,博士研究生,副教授。E-mail:hqwzy2003@163.com

引文格式:王忠勇,李啸聰.直驱永磁风电机组轴系扭振的非线性控制[J].武汉工程大学学报,2018,40(1):93-97.

讨论<sup>[17-19]</sup>。

本文基于直驱永磁风机(direct-driven permanent magnet synchronous generators, D-PMSG)轴系扭振,建立了风机发电机组的模型,采用非线性控制策略实现协调控制来抑制轴系间扭矩振荡,仿真结果验证了该控制策略抑制轴系扭振的有效性。

## 1 直驱永磁风电系统模型

### 1.1 风电系统模型结构图

风电机组系统采用如图1所示的系统模型,由

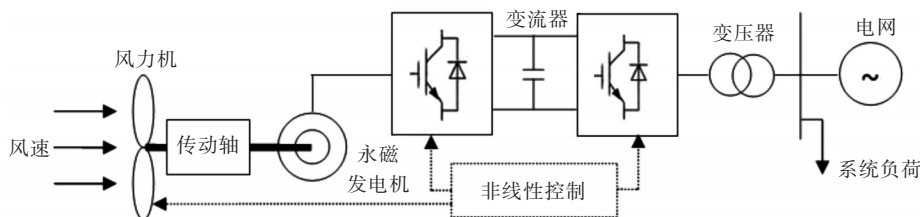


图1 直驱永磁风力发电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of PMSG system

### 1.2 系统数学模型

1.2.1 机械轴系模型 风电机的轴系通常等效为两个或三个质量块<sup>[4]</sup>,这里采用两质块,数学模型为式(2):

$$\begin{cases} 2H_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - K\theta - D(\omega_w - \omega_g) \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = -T_e + K\theta + D(\omega_w - \omega_g) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_0(\omega_w - \omega_g) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $D$  为阻尼系数,  $K$  为刚性系数,  $H_w$ 、 $H_g$  为风机、发电机惯性时间常数,  $\theta_w$ 、 $\theta_g$  分别为相对角位移,  $\omega_w$ 、 $\omega_g$  为转子角速度,  $T_w$ 、 $T_e$  分别为机械转矩、电磁转矩

1.2.2 桨距角模型 风速通过叶片桨距角  $\beta$  的控制来实现,如下方程表示桨距角模型<sup>[8]</sup>:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_s}(\beta_0 - \beta) \quad (3)$$

式(3)中  $T_s$  是桨距控制系统的惯性时间常数,  $\beta_0$  是桨距角初始值。

1.2.3 D-PMSG 模型 设 dq 坐标系以同步速度旋转,且  $q$  轴超前于  $d$  轴,则在 dq 轴坐标下的 D-PMSG 模型为式(4):

$$\begin{cases} \frac{di_{1d}}{dt} = -\frac{R_a}{L_1}i_{1d} + n_p\omega_m i_{1q} + \frac{1}{L_1}u_{dc}m_1 \cos \theta_1 \\ \frac{di_{1q}}{dt} = -\frac{R_a}{L_1}i_{1q} - n_p\omega_m i_{1d} - \frac{1}{L_1}\lambda_0 n_p \omega_m + \frac{1}{L_1}u_{dc}m_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

空气动力学可知,风力机产生的机械功率为风力机从空气中捕获的风能,由(1)式表示:

$$P_w = 0.5\rho\pi r^2 V_w^3 C_p(\beta, \gamma), \quad \gamma = r\omega_w / V_w \quad (1)$$

式(1)中  $\rho$  为空气的密度,  $r$  为风力机叶片半径,  $V_w$  为风速,  $C_p$  为风能利用系数,是  $\gamma$  和  $\beta$  的非线性函数,  $\beta$  为叶片的桨距角,  $\gamma$  为风力机叶尖速比,  $\omega_w$  为风力机的转速,  $P = T\omega_w$ 。

式(4)中  $u_{1d}$ 、 $u_{1q}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压,  $i_{1d}$ 、 $i_{1q}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流;  $L_{1d}$ 、 $L_{1q}$  分别为定子直轴电感和交轴电感;  $\lambda_0$  为永磁体磁链;  $n_p$  为转子的极对数;  $\omega_m$  及  $R_a$  分别为定子电角速度和电阻。

根据能量守恒,不计变流器的能量损失,直流环节表示为式(5):

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2C}i_{1d}m_1 \cos \theta_1 - \frac{3}{2C}i_{1q}m_1 \sin \theta_1 - \frac{3}{2C}i_{2d}m_2 \cos \theta_2 + \frac{3}{2C}i_{2q}m_2 \sin \theta_2 \quad (5)$$

式(5)中,  $m_1$ 、 $\theta_1$ 、 $m_2$ 、 $\theta_2$  分别为变换器直流环节两侧变比和导通角。

1.2.4 电网侧数学模型 由结构图,取  $d$  轴与  $a$  相电压矢量重合,  $d$  轴超前  $q$  轴  $90^\circ$  电角度,则网侧模型为<sup>[13]</sup>式(6):

$$\begin{cases} \frac{di_{2d}}{dt} = -\frac{R}{L_2}i_{2d} + n_p\omega_g i_{2q} + \frac{1}{L_2}u_{dc}m_2 \cos \theta_2 - \frac{U_d}{L_2} \\ \frac{di_{2q}}{dt} = -\frac{R}{L_2}i_{2q} - n_p\omega_g i_{2d} + \frac{1}{L_2}u_{dc}m_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中  $u_{2d}$ 、 $u_{2q}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压,  $i_{2d}$ 、 $i_{2q}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流;  $\frac{U_d}{L_2}$  为电网电压,  $\omega_g$  为电网角速度,  $L_2$ 、 $R$  分别为连接电感及等值电阻。

综合式(2)~式(6)构成了分析直驱永磁风电电机轴系扭振的数学模型,可以写出式(7)形式<sup>[18]</sup>:

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{j=1}^9 g_j(x)u \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]^T = [\omega_w, \omega_g, \theta_{wg}, \beta, i_{1d}, i_{1q}, u_{dc}, i_{2d}, i_{2q}]^T$$

根据对轴系扭振模型和控制目标的分析,确定3个输入量分别为:

$$u_1 = T_w, u_2 = m_1 \cos \theta_1, \quad u_3 = m_2 \sin \theta_2。$$

## 2 直驱永磁风电系统轴系扭振的非线性控制

根据对风机控制做分析,将桨距角,机侧、网侧变流器作为控制对象。

考虑非线性仿射控制系统<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})u_1 + \cdots + \mathbf{g}_m(\mathbf{x})u_m \\ y_1(t) = h_1(\mathbf{x}) \\ \cdots \cdots \\ y_m(t) = h_m(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  为状态量,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}) \cdots f_n(\mathbf{x})]^T \in \mathbf{R}^n$ 、 $\mathbf{g}_j(\mathbf{x}) = [g_{1j}(\mathbf{x}) \cdots g_{nj}(\mathbf{x})]^T \in \mathbf{R}^n$  为光滑向量,  $u_1 \cdots u_m$  为控制标量;  $h_1(\mathbf{x}) \cdots h_m(\mathbf{x})$  为输出函数;  $y_1 \cdots y_m$  为输出标量。

为保证协调控制的效果,输出函数选为多个状态量的线性组合<sup>[19]</sup>:

$$\begin{aligned} \text{桨距角 } h_1(\mathbf{x}) &= c_{11}\omega_w + c_{12}\omega_g + c_{13}\theta_{wg} + c_{14}i_{1d}, \\ \text{机侧变流器 } h_2(\mathbf{x}) &= c_{23}\theta_{wg} + c_{24}\beta + c_{26}i_{1q} + c_{27}u_{dc}, \\ \text{网侧变流器 } h_3(\mathbf{x}) &= c_{32}\omega_g + c_{37}u_{dc} + c_{39}i_{2q}。 \end{aligned}$$

将三个输出函数写成矩阵的形式:

$$\mathbf{y} = [h_1(\mathbf{x}) \quad h_2(\mathbf{x}) \quad h_3(\mathbf{x})]^T = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (9)$$
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{23} & c_{24} & 0 & c_{26} & c_{27} & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{37} & 0 & c_{39} \end{bmatrix}$$

根据非线性控制理论,先计算矩阵<sup>[22]</sup>:

$$\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g_1}L_f^0h_1(\mathbf{x}) & L_{g_2}L_f^0h_1(\mathbf{x}) & L_{g_3}L_f^0h_1(\mathbf{x}) \\ L_{g_1}L_f^1h_2(\mathbf{x}) & L_{g_2}L_f^1h_2(\mathbf{x}) & L_{g_3}L_f^1h_2(\mathbf{x}) \\ L_{g_1}L_f^2h_3(\mathbf{x}) & L_{g_2}L_f^2h_3(\mathbf{x}) & L_{g_3}L_f^2h_3(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

经过计算,系统的相对阶分别为  $r_1 + r_2 + r_3 = 5 < n = 9$ ,故可进行部分精确线性化设计控制律,将  $x$  空间转化为  $z$  空间的第二标准型,

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \\ z_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \\ \Delta\omega_g \\ \Delta\theta_g \\ \Delta\theta_w \\ \Delta\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}\omega_w + c_{12}\omega_g + c_{13}\theta_{wg} + c_{14}i_{1d} \\ c_{23}\theta_{wg} + c_{24}\beta + c_{26}i_{1q} + c_{27}u_{dc} \\ c_{32}\omega_g + c_{37}u_{dc} + c_{39}i_{2q} \\ L_f h_2(\mathbf{x}) \\ L_f h_3(\mathbf{x}) \\ \Delta\omega_g \\ \Delta\theta_g \\ \Delta\theta_w \\ \Delta\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

反馈控制律  $u$  可通过下式求取

$$u = -\tilde{\mathbf{B}}^{-1}(\mathbf{x})\tilde{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) + \tilde{\mathbf{B}}^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{v} \quad (12)$$

式(12)中  $\tilde{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = [L_f h_1(\mathbf{x}) \quad L_f h_2(\mathbf{x}) \quad L_f h_3(\mathbf{x})]^T$ ,

$$\begin{aligned} L_f h_1(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^9 \frac{\partial h_1(\mathbf{x})}{\partial x_i} f_i(\mathbf{x}), \\ L_f h_2(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^9 \frac{\partial h_2(\mathbf{x})}{\partial x_i} f_i(\mathbf{x}), \quad L_f h_3(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^9 \frac{\partial h_3(\mathbf{x})}{\partial x_i} f_i(\mathbf{x}), \\ \mathbf{v} &= [v_1 \quad v_2 \quad v_3]^T = [-k_1 z_1 \quad -k_2 z_2 \quad -k_3 z_3]^T。 \end{aligned}$$

对式(12)的反馈控制律  $u_1 = T_w$ ,  $u_2 = m_1 \cos \theta_1$ ,  $u_3 = m_2 \sin \theta_2$ ,即可通过控制风机输入,变换器的  $m_i(i=1,2)$ ,  $\theta_i(i=1,2)$  来实现对扭矩的控制。

## 3 控制仿真与分析

根据轴系扭振的简化模型,在 MATLAB/Simulink 环境下做仿真分析轴系扭振抑制效果,用于仿真永磁风力机组和变换器的参数采用文献<sup>[14]</sup>数据。

### 3.1 短路扰动分析

设电网侧发生三相短路0.5 s时发生三相短路,在0.15 s后切除故障,分析轴系扭振的两个主要状态量  $\Delta\delta_{SG}$ 、 $\Delta\omega_{SG}$  的响应曲线如图2~图4所示。

曲线表明,非线性控制方法抑制轴系扭振的效果较好,偏差振荡更小。

### 3.2 功率扰动分析

设定0.5 s时,风机有功功率增加10%,分析轴系扭振相关量  $\Delta\delta_{SG}$ 、 $\Delta\omega_{SG}$  的变化。从曲线看出非线性控制下的振荡更小,表明轴系扭振的幅度更小。

### 3.3 机端电压扰动分析

设定0.5 s时,机端电压增大5%,分析扭振相关状态量  $\Delta\delta_{SG}$ 、 $\Delta\omega_{SG}$  的变化,曲线表明非线性方法可用更短的时间恢复到稳定值。

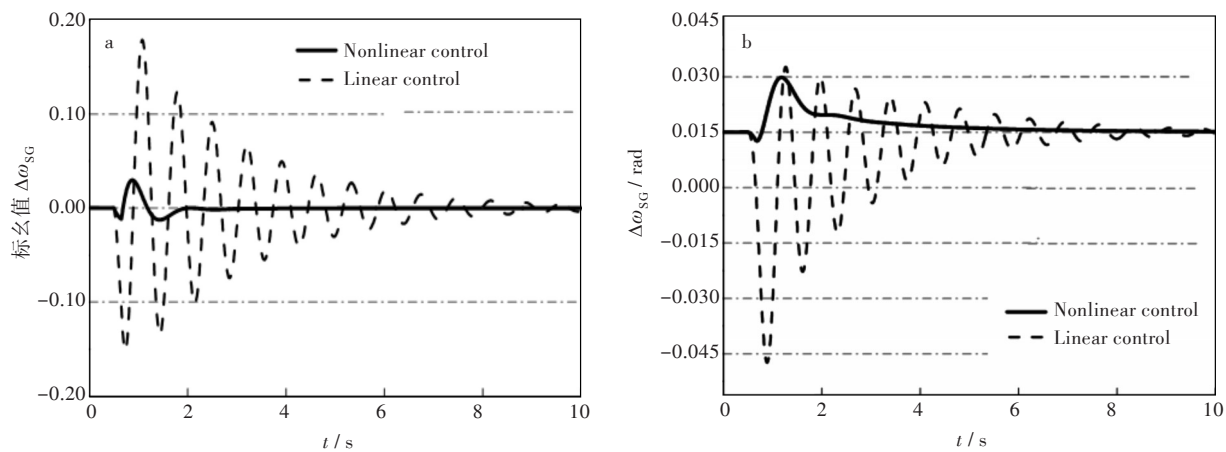


图 2 短路扰动时系统的动态响应曲线:(a)  $\Delta\omega_{SG}$  ;(b)  $\Delta\delta_{SG}$

Fig. 2 Dynamic response curves of system during short-circuit disturbance: (a)  $\Delta\omega_{SG}$  ;(b)  $\Delta\delta_{SG}$

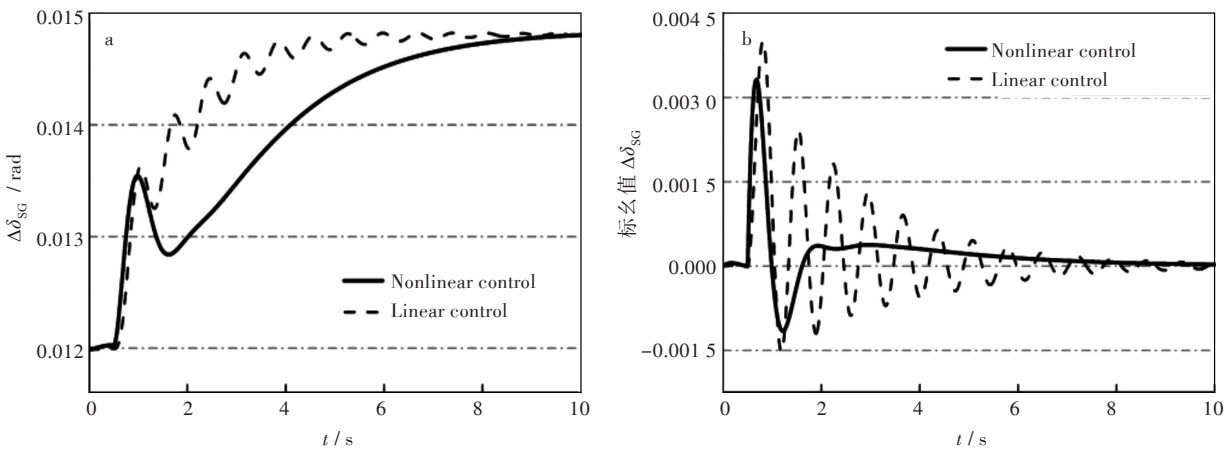


图 3 功率变化时系统的动态响应曲线:(a)  $\Delta\delta_{SG}$  ;(b)  $\Delta\omega_{SG}$

Fig. 3 Dynamic response curves of system at variable powers: (a)  $\Delta\delta_{SG}$  ;(b)  $\Delta\omega_{SG}$

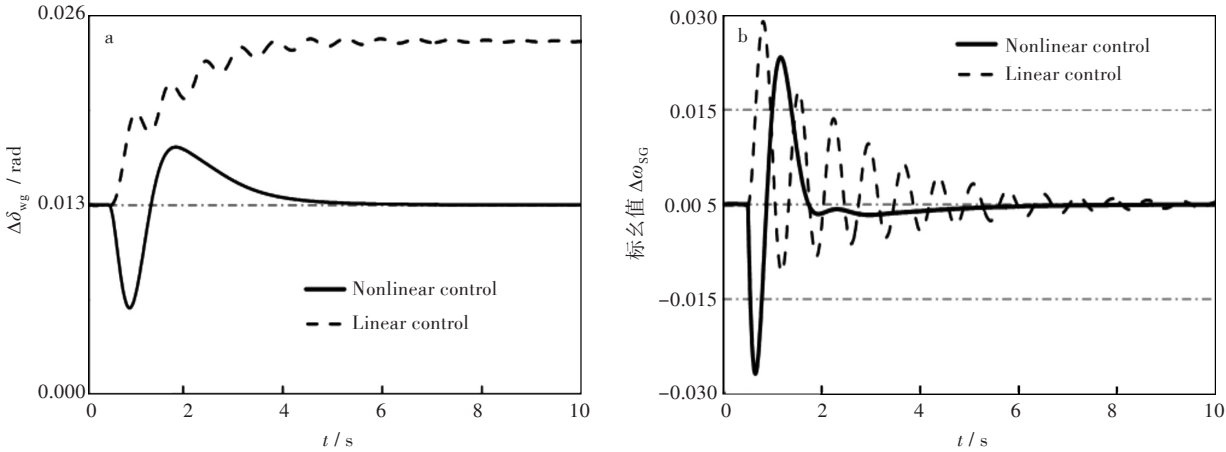


图 4 调压扰动时系统的动态响应曲线:(a)  $\Delta\delta_{SG}$  ;(b)  $\Delta\omega_{SG}$

Fig. 4 Dynamic response curves of system under voltage regulation disturbance: (a)  $\Delta\delta_{SG}$  ;(b)  $\Delta\omega_{SG}$

4 结 语

针对直驱永磁风电机组的轴系刚体模型,结合变流器和风机功率控制建立了该轴系的数学模型,采用协调控制的方法进行多指标控制策略的设计。仿真表明,该方法可使风力发电机组受到

扰动时,有效削弱轴系间的扭振,提高系统稳定运行的能力。

参考文献:

[1] LALOR G, MULLANE A, O' MALLEY M. Frequency control and wind turbine technologies [J]. IEEE

Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1913.

[2] 王晓敏,李自成,剪浩杰. 基于前馈和PI控制的光伏离网逆变器的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(3):293-294.

[3] 杨敏霞,解大,娄宇成,等. 定速异步机型风电场机网扭振建模及仿真[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2422-2428.

[4] 解大,王瑞琳,王西田,等. 多机型风电机组机网扭振的模型与机理[J]. 太阳能学报, 2011, 32(9): 1281-1283.

[5] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):1-5.

[6] 陈树勇,戴慧珠,白晓民. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(3):26-29.

[7] 王忠勇. 基于微分几何的电池储能系统输出稳定控制器设计[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(8): 103-106.

[8] 张红光,张粒子,陈树勇. 大容量风电场对电力系统小干扰稳定和阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(13):76-80.

[9] 王毅,张祥宇,李和明,等. 永磁直驱风电机组对系统功率振荡的阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12):163-165.

[10] KIA S H, HENAO H. Torsional vibration effects on induction machine current and torque signatures in gearbox-based electromechanical system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4689-4699.

[11] 耿华,许德伟,吴斌,等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程报, 2009, 29(30):68-75.

[12] 郝正航,余贻鑫. 励磁控制引起的双馈风电机组轴系扭振机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 81-86.

[13] 鲁玉普,解大,孙俊博,等. 风电场机网扭振的小信号建模及仿真[J]. 电网技术, 2016, 40(2):3-6.

[14] 蒋长江,刘俊,刘友波,等. 计及风电随机激励的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3):100-103.

[15] 张友鹏,李萌,高锋阳,等. 直驱型机组风电场并网静态电压稳定性研究[J]. 电源技术, 2013, 137(5): 811-813.

[16] 徐光虎,王杰,陈陈,等. 基于微分代数模型的 AC/DC 系统非线性控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7):52-57.

[17] 李啸骢,程时杰,韦化,等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.

[18] 李啸骢,程时杰,韦化,等. 输出函数在单输入单输出非线性控制系统设计中的重要作用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10):50-56.

[19] 李啸骢,程时杰,韦化. 输出函数在多输入多输出非线性控制系统设计中的重要作用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9):87-93.

本文编辑:陈小平