

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.01.015

风电场接入对系统小干扰稳定性的影响

揭璐琦,李培强,夏正邦,翁才杰

(福建工程学院 信息科学与工程学院,福建 福州 350118)

摘要: 基于小干扰稳定的概念和分析方法,通过 3 种不同类型的风电机组,采用 PSAT 软件中的特征值分析方法,研究风电机组在类型不同、风电场接入距离不同以及风电渗透率不同情况下接入 WSCC 3 机 9 节点系统时对小干扰稳定性的影响。研究表明:风电机组类型、接入距离以及风电渗透率均会对系统产生不同程度的影响。DFIG 的影响优于另外两个机组,在风电机组确定的情况下,距离越近、风电渗透率越低对系统的小干扰稳定性越有利。

关键词: 电力系统;风电并网;风电机组;小干扰稳定;PSAT;阻尼特性

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)01-0083-06

Effects of wind farm access on system small signal stability of the system

JIE Luqi, LI Peiqiang, XIA Zhengbang, WENG Caijie

(School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on the concept and analysis method of small signal stability, the eigenvalue analysis method in PSAT was used to study, with three different types of wind turbines, the effects on small signal stability when different types of wind turbines were connected to the WSCC 3-machine, 9-bus system with different wind farm access distances and different wind power penetration rate. Results show that the wind turbine type, the access distance and the wind power penetration rate affected the system to different degrees. The effects of DFIG were better than the other two units. When the wind turbine is determined, the closer the distance and the lower the wind power penetration rate, the better stability of the system.

Keywords: power system; wind power integration; wind turbines; small signal stability; PSAT; damping characteristic

随着环境的日益恶化和传统能源的日渐消耗,新能源正在迅猛发展,风力发电是可再生能源中最成熟的发电技术^[1]。2017 年中国风电新增装机容量 19.5 GW;至年底累计装机容量为 188.232 GW^[2],排名世界第一。风力发电技术因建设周期短、环境要求低、储量丰富、利用率较高得到大力发展^[3],但是风电具有随机性和不确定性,大规模风电并网会对系统产生一定的干扰,研究风电系统接入电力系统的小干扰稳定性受到普

遍关注。

近年来,针对风电系统入网的小干扰稳定性问题,国内外做了许多研究工作。

文献[4]在 10 机 39 节点系统上仿真分析双馈变速风电机组(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)和恒速异步风电机组(Squirrel Cage Induction, SCIG)在电网侧扰动和风电场扰动情况下风电系统的频率响应过程,研究表明两种不同风电机组以及同种风电机组下不同并网容量对系统频

收稿日期:2018-09-12

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2018J01622)

第一作者简介:揭璐琦(1993-),女,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向:电力系统运行分析与控制。

通信作者:李培强(1975-),男,山西忻州人,教授,博士,研究方向:电力系统运行分析与控制。

率的作用和影响是不同的。文献[5]在 3 机 9 节点系统上比较了同一母线接入 SCIG、DFIG、永磁直驱风电机组 (Direct-drive Permanent Magnet Synchronous Generator, DDPMSG) 与接入同等容量同步发电机组对小干扰稳定性和暂态稳定性的影响, 研究表明不同风电机组对其影响程度不同。文献[6]在 4 机 2 区节点系统对 DFIG 不接入和接入情况下仿真, 研究表明 DFIG 的接入会影响系统小干扰稳定性。文献[7]在 4 机 2 区系统上仿真分析 DFIG 和 DDPMSG, 研究表明风电机组并网、风电渗透率增加时均影响系统小干扰稳定性。文献[8]在 5 机 14 节点系统上仿真分析 DFIG 并网后, 其自身参数的改变对电力系统的暂态稳定具有一定的影响。文献[9]在 3 机 9 节点系统上研究了 DDPMSG 接入位置不同, 渗透率增加时可提高系统小干扰稳定性。文献[10]在 3 机 9 节点系统上分析了不同渗透率下 3 种风电机组对系统振荡模式阻尼特性的影响。以上文献大多数是一种或两种风电机组做对比进行研究分析, 鲜有 3 种风机的详细对比。本文在以上文献的研究基础上, 基于 Matlab 工具箱 PSAT (Power System Analysis Toolbox) 研究风电机组类型不同、风电场接入距离不同以及风电渗透率不同情况下接入电力系统小干扰稳定性的影响。

1 风力发电机组的数学模型

本文的风力发电机组的数学模型来自文献[11], 运用在风电场中的种类主要有以下 3 种: 笼型异步风力发电机组、双馈感应风电机组和直驱永磁同步风电机组。作如下假设, 使得本文所讨论的风力发电机组数学模型适用于电力系统动态仿真: (1) 忽略磁饱和; (2) 磁通正弦分布; (3) 除铜耗外, 不计其他任何损耗; (4) 基频下定子电压电流正弦分布^[12]。

1.1 鼠笼异步风力发电机数学模型

在同步旋转坐标 dq 坐标系中其发电机的定子电压方程如下:

$$\begin{cases} u_{ds} = \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_1 \psi_{qs} + R_s i_{ds} \\ u_{qs} = \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_1 \psi_{ds} + R_s i_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

因励磁电流等于零, 转子电压方程如下:

$$\begin{cases} 0 = \frac{d\psi_{dr}}{dt} + R_r i_{dr} - s\omega_1 \psi_{qr} \\ 0 = \frac{d\psi_{qr}}{dt} + R_r i_{qr} - s\omega_1 \psi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

定子磁链方程如下:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = (L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

转子磁链方程如下:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_m i_{ds} + (L_r + L_m) i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_m i_{qs} + (L_r + L_m) i_{qr} \end{cases} \quad (4)$$

电磁转矩方程如下:

$$T_e = E'_d i_{ds} + E'_q i_{qs} \quad (5)$$

式(1)-(5)中 ω_1 为同步旋转转速; $u_{ds}, u_{qs}, \psi_{ds}, \psi_{qs}, i_{ds}, i_{qs}$ 分别为定子电压、磁链、电流的 d 轴、q 轴分量; L_s 为定子电感; L_r 为转子电感; L_m 为励磁电感。

1.2 双馈感应风力发电机数学模型

在同步旋转坐标 dq 坐标系中其发电机的定子电压方程如下:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

转子电压方程如下:

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_s \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_s \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

定子磁链方程如下:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m i_{qr} \\ L_{ss} = L_s + L_m \end{cases} \quad (8)$$

转子磁链方程如下:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_{rr} i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_{rr} i_{qr} + L_m i_{qs} \\ L_{rr} = L_r + L_m \end{cases} \quad (9)$$

电磁转矩方程如下:

$$T_e = p_n L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) \quad (10)$$

式(6)-(10)中 R_s 为定子电阻; R_r 为转子电阻; $u_{dr}, u_{qr}, i_{dr}, i_{qr}, \psi_{dr}, \psi_{qs}$ 分别为发电机转子电压、电流、磁链的 d 轴、q 轴分量; ω_s 为转差频率, $\omega_s = s\omega_1$; s 为转差率; L_s 为定子漏抗; L_r 为转子漏抗;

L_m 为定子与转子之间的互感; T_e 为电磁转矩; p_n 为极对数。

1.3 直驱永磁同步风力发电机数学模型

在同步旋转坐标 d_q 坐标系中其发电机的定子电压方程如下:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_1 \psi_{ds} \end{cases} \quad (11)$$

定子磁链方程如下:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_d i_{ds} + \psi_f \\ \psi_{qs} = L_q i_{qs} \end{cases} \quad (12)$$

电磁转矩方程如下:

$$T_e = 1.5 p_n (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (13)$$

式(11)-(13)中 L_d 、 L_q 为 d 轴、 q 轴同步电感, 认为恒定; ω_1 为转子磁链, 认为恒定。

2 小干扰稳定分析方法

小干扰稳定是指系统受到小扰动后, 不发生自发振荡或非周期性失步, 自动恢复到起始运行状态的能力^[13]。电力系统小干扰稳定分析主要采用特征值分析法、频域法和时域仿真法。其中特征值分析法使用最为广泛。用于小扰动稳定分析的系统是一种微分代数方程(DAE)为:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, x 表示微分方程组中描述系统动态特征的状态变量; y 表示代数方程组中系统的输入向量。

根据 Lyapunov 第一法的基本思想, 可以用线性化系统的稳定性来研究实际非线性电力系统的稳定性。在稳定运行点 $(x_{(0)}, y_{(0)})$ 线性化, 得到:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta x}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & \tilde{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (15)$$

在上式中消去运行向量 Δy , 得到:

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A x \quad (16)$$

式中, A 称为 $n \times n$ 维系数矩阵或状态矩阵, 用来评价小干扰系统稳定性。

对于共轭特征值 $\lambda = \sigma \pm j\omega$, 对应于发电机

转子运动方程, 称为低频振荡模式。实部反映了衰减性质, 虚部反映了频率。振荡的频率 (Hz) 为:

$$f = \frac{-\omega}{2\pi} \quad (17)$$

定义阻尼比为:

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (18)$$

阻尼比是衡量电力系统小干扰稳定的一个指标, 阻尼比为负时, 系统小干扰不稳定, 反之, 系统会达到新的稳态平衡点, 且阻尼比越大, 系统振荡衰减得越快, 振荡次数越少。

根据小干扰转子角振荡模式, 按振荡特性可分成局部振荡模式和区域间振荡模式, 分别为 1~2 Hz 和 0.1~0.7 Hz。

3 算例分析

以美国西部联合电力系统(WSCC)3机9节点系统为例^[14], 接入风力发电系统后如图1所示。G1、G2、G3 采用经典四阶模型, 风力发电机额定容量为 2 MVA, 功率因数为 1, 在 PSAT 中进行所有仿真。

3.1 风电机组类型不同对系统小干扰稳定的影响

3.1.1 算例设计

设计 4 种算例如下: 算例 A: 原 3 机 9 节点系统, 未接入任何风机。算例 B-D 在 bus4 上分别接入 SCIG、DFIG、DDPMSG。3 种风力发电机均采用 Weibull 风速模型, 设 $v = 15.00$ m/s, $\rho = 1.225$ kg/m³, 取 $C = 20$, $K = 2$, 台数为 100。

3.1.2 特征根分析

通过特征根分析, 可知与算例 A 相比较, 加入风电机组后的算例 B、C、D 均系统不稳定, 但特征根均向复平面的左部移动, 提高了系统的小干扰稳定性。其中接入 SCIG 的算例 B 有一个很大的正实根, 接入 DFIG 和 DDPMSG 的算例 C 和 D 有一个数值相差很小的正实根, 说明接入 SCIG 的影响是最大的, 接入 DFIG 的影响是最小的。鼠笼异步风机系统一般采用并联电容器组来提高整个风电系统的功率因数, 本身无法抑制风速变化和桨距角变化引起的功率波动, 容易影响电网的电能质量, 而 DFIG 和 DDPMSG 可通过有功无功的解耦控制, 达到消除风速变化对系统的影响。

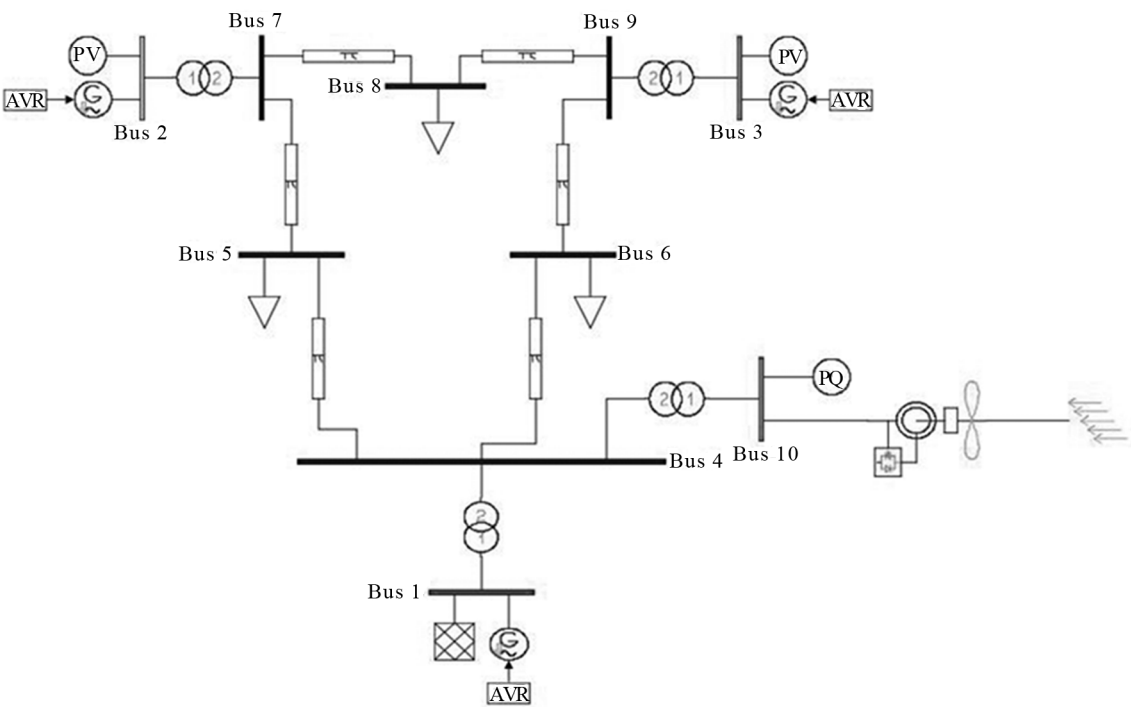


图 1 风电场接入的 3 机 9 节点系统图

Fig.1 WSCC 3-machine 9-bus system diagram for wind farm connection

通过图 2,观察阻尼比可得,区域间振荡模式的阻尼比均为正,且对比算例 A,阻尼比均有不同程度的增加,阻尼比的增加提高了系统的小干扰稳定性,其中接入 DFIG 的模式 C 相较于其余两种风机,新增了一个振荡模式 $-2.857 \pm 0.700 59j$,振荡衰减更快,振荡次数更少,更快达到新的平衡点。

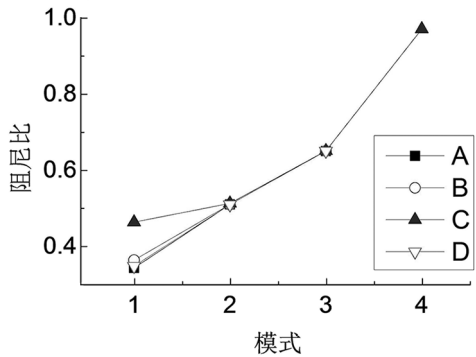


图 2 风电机组不同区域间振荡模式阻尼比

Fig.2 Inter-area oscillation mode damping ratio of different wind turbines

3.2 风电场接入距离不同对系统小干扰稳定性的影响

以下算例分析均为:将风电场在 bus4 接入电力系统,其中风电场容量为 200 MVA,功率因数为 1,其余设置和上述算例一致。设计算例如下:算例 A-C:接入电力系统的距离分别为 25、15、5 km。

3.2.1 风机为 SCIG 时接入的特征根分析

通过特征根分析可知,风电场在风机为 SCIG 时,无论距离远近系统都是不稳定的,但距离为 5 km 时较 15 km 和 25 km 系统都表现得更加优良。通过图 3 阻尼比折线图可知算例 A 与算例 B、C 有明显差别,算例 A 不仅阻尼比较大,振荡衰减得较快,振荡的次数也更少。算例 B、C 在折线图上相差无几,并出现了负阻尼比且增加了一个模式,说明当风机为 SCIG 时有一个临界,超出后 SCIG 开始影响系统,表现为降低系统的小干扰性。

3.2.2 风机为 DFIG 时接入的特征根分析

通过特征根分析可知,风电场接入距离为 5 km 时,系统是小干扰稳定的,随着接入距离的增大系统变得不稳定,可见距离对系统小干扰稳定

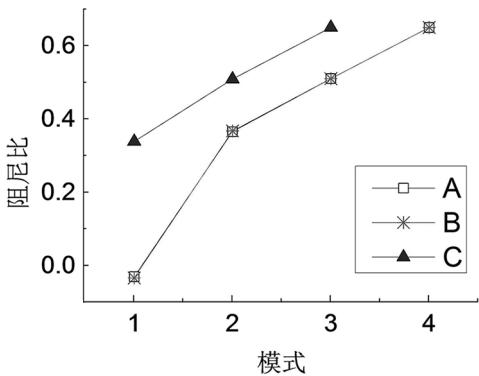


图 3 风机为 SCIG 时接入距离不同区域间振荡模式阻尼比
Fig.3 Oscillation mode damping ratio between different regions of the access distance when the fan is SCIG

产生一定的不利影响;通过图 4 阻尼比折线图可知模式 1、2、3 的阻尼比未发生太大的变化,算例 A 和算例 B 相较于算例 C 增加了一个模式 4,模式 4 的出现是 DFIG 发电机对系统起到的稳定作用,且算例 A 相较于算例 B 的模式 4 阻尼比更大 0.001 938,则更容易达到小干扰稳定状态,可见距离越小对系统小干扰稳定性越好,超出一定范围,DFIG 便失去了维稳的作用。

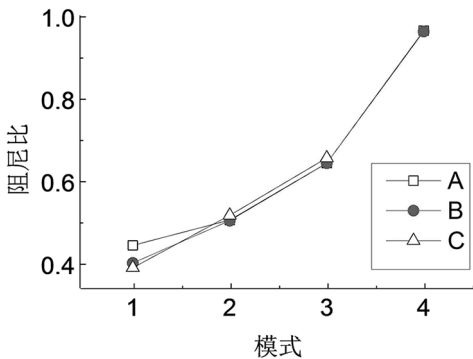


图 4 风机为 DFIG 时接入距离不同区域间振荡模式阻尼比
Fig.4 Oscillation mode damping ratio between different regions of the access distance when the fan is DFIG

3.2.3 风机为 DDPMSG 时接入的特征根分析

通过特征根分析可知,风电场在风机为 DDPMSG 时,无关距离长短系统均为不稳定状态。通过图 5 阻尼比折线图可知算例 A、B、C 只有细微的差别,折线图近乎重叠。虽然阻尼比均为正值且无论距离长短风机均对系统表现出积极的影响,但是 DDPMSG 自身的结构就决定了它没办法完全根据自身的解耦控制来达到消除距离对

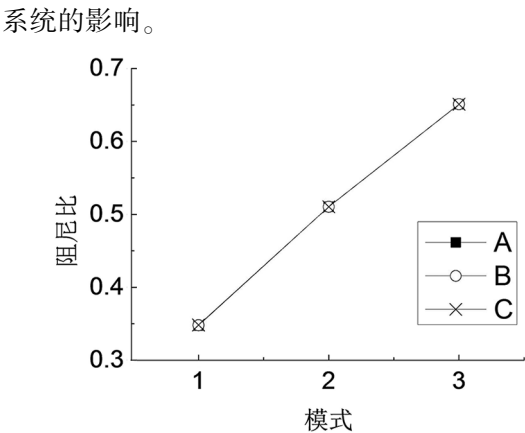


图 5 风机为 DDPMSG 时接入距离不同区域间振荡模式阻尼比
Fig.5 Oscillation mode damping ratio between different regions of the access distance when the fan is DDPMSG

3.3 风电渗透率不同对系统小干扰稳定性的影响

3.3.1 算例设置

由 3.2 可知在没有其他设备帮助下,只有当风机为 DFIG 时系统才有可能达到稳定状态,故采用 3.2.2 中系统,DFIG 接入系统距离为 5 km,此时系统稳定。设计算例如下:算例 A-E:风电场容量增加 60、80、100、120、140 MVA。以上算例均减少 G2、G3 相应的火电机组出力。

3.3.2 特征根分析

通过特征根分析可知,随着风电渗透率的增加,特征根向复平面的右边移动,系统变得小干扰不稳定。通过图 6,观察振荡模式的阻尼比,随着风电渗透率的增加,振荡模式减少,主导振荡模式发生了改变;相同的振荡模式阻尼比随渗透率的增加逐渐减少,但不明显。

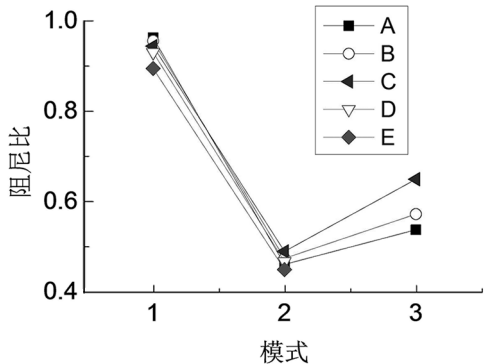


图 6 风电渗透率不同区域间振荡模式阻尼比
Fig.6 Inter-area oscillation mode damping ratio when wind power penetration rate is different

4 结论

为了研究风电场接入对系统小干扰稳定性的影响,本文从系统接入风机不同、风电场接入系统距离不同,以及风电场渗透率不同 3 方面入手,利用 PSAT 工具箱,在 3 机 9 节点系统上进行修改实验进行比较分析。通过分析可知以上 3 方面对

系统小干扰稳定均有一定的影响。其中,DFIG 的影响优于另外两个机组,在风电机组确定的情况下,距离越近、风电渗透率越低对系统的小干扰稳定性作用越显著。由此在实际操作中,可以优先考虑双馈风电机组,在远距离传输和风电渗透率较高时,应采取相应的措施提高系统的小干扰稳定性,这也是接下来的研究工作。

参考文献:

- [1] DOMINGUEZ-GARCIA J L, GOMIS-BELLMUNT O, BIANCHI F D, et al. Power oscillation damping supported by wind power: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 4994-5006.
- [2] 徐涛. 2017 年全球风电装机统计[C]//风能产业(2018 年 3 月), 中国农业机械工业协会风力机械分会, 2018: 7.
- [3] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 7-13.
- [4] 王凤军. 风电接入电力系统对电网频率动态特性的影响[J]. 电子技术与软件工程, 2017(21): 236-238.
- [5] 和萍, 文福拴, 薛禹胜, 等. 不同类型风电机组对小干扰和暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 23-29, 135.
- [6] 王丽娟. 包含 DFIG 的风电系统小干扰稳定性分析[J]. 数码设计, 2017, 6(5): 67-69, 82.
- [7] 李培强, 王继飞, 李欣然, 等. 双馈与直驱风电机组的小干扰稳定性对比分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 92-97.
- [8] 林承华, 苏永亮. 双馈风力机组电力系统暂态稳定的影响研究[J]. 煤矿机电, 2012(2): 32-37.
- [9] 任振宇, 张师. 直驱风电接入后对电力系统小干扰稳定性影响分析[J]. 电气开关, 2017, 55(2): 57-60.
- [10] 李媛媛, 邱跃丰, 马世英, 等. 风电机组接入对系统小干扰稳定性的影响研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 50-55.
- [11] 杨校生. 风力发电技术与风电场工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 56-58.
- [12] 郝元钊, 李培强, 李欣然, 等. 风电机组对电力系统暂态稳定性影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 41-46.
- [13] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994: 158-160.

(特约编辑:黄家瑜)

(上接第 82 页)

- [19] BACCIOTTI A, ROSIER L. Liapunov functions and stability in control theory [M]. New York: Springer-Verlag, 2005.
- [20] WU J, MA Z C, SUN Y Z, et al. Finite-time synchronization of chaotic systems with noise perturbation [J]. Kybernetika, 2015, 51(1): 137-149.
- [21] GE Z E, CHEN J W. Chaos synchronization and parameter identification of three time scales brushless DC motor system [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 24: 597-616.
- [22] YAN J J, LIN J S, LIAO T L. Synchronization of a modified Chua's circuit system via adaptive sliding mode control [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 36: 45-52.
- [23] GENESIO R, TESI A. Harmonic balance methods for the analysis of chaotic dynamics in nonlinear systems[J]. Automatica, 1992, 28(3): 531-548.

(责任编辑:方素华)