

风火打捆输电系统小扰动的稳定性

曹喜民, 刘天琪, 李兴源, 李从善

(四川大学电气信息学院, 四川成都 610065)

摘 要: 针对风火打捆输电系统小扰动稳定性问题, 建立了包括双馈风电机组风力机模型、桨距角控制模型、变流器模型、控制系统模型和感应发电机模型的风火打捆输电系统小扰动模型. 详细介绍了风火打捆外送系统小扰动稳定性分析方法; 在构造的风火打捆外送仿真系统中对风火打捆输电系统与大电网的联络线紧密程度、风电负载率、风火电配置比例对系统小扰动稳定性的影响进行了仿真分析. 仿真结果表明: 风电场与系统的联络越弱, 系统小扰动稳定性越差, 同时风电负载率和风火电配置比例也直接影响系统的小扰动稳定性.

关 键 词: 风电; 火电; 配置比例; 小扰动稳定性; 小扰动模型

中图分类号: TM 715

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0019-05

The Small Signal Stability for Transmitting Wind Power Bundled with Thermal Power

CAO Xi-min, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan, LI Cong-shan

(School of Electric Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China. Corresponding author: LIU Tian-qi, professor, E-mail: tqliu@scu.edu.cn)

Abstract: In order to research the small signal stability of wind-thermal bundled transmission system, the small perturbation analysis model of wind-thermal bundled transmission system was established, which included wind turbine, pitch angle control system, converter control system, the induction generator. The small signal stability analysis method of the wind-thermal bundled system was introduced in detail. The system eigenvalues of wind-thermal bundled transmission systems with different wind power access, wind power output level, wind-thermal allocation ratio and delivery line length were calculated under the simulation system of wind-thermal bundled transmission established. The simulation results showed that the weaker the relationship between wind power and the power system was, the worse the small signal stability of wind power was. In addition, the small signal stability of the system would be directly impacted by the wind power output level and wind-thermal allocation ratio.

Key words: wind power; thermal power; allocation ratio; small signal stability; small perturbation model

风力发电是现今利用较成熟、规模较大的可再生能源发电技术, 国内风电基地目前多建于西北、华北、东北(以下简称“三北”)地区^[1], 而负荷却集中在东南沿海一带, 由于国内的风电基地与负荷分布不平衡, 风电和火电均存在大规模远距离输送的客观需要^[2]. 由于风电的波动性和间歇性, 风电外送将面临输电稳定性及输电通道利用

率低的问题, 风火打捆外送可以在一定程度上解决此问题.

但是, 风电机组的负载率、风火电配置比例以及外送电网联络线的紧密程度对电网安全稳定运行有何影响需要进一步深入研究. 风火打捆外送系统稳定性方面已有一些研究^[3-9], 文献[3]采用时域仿真及 Prony 阻尼比辨识法, 定量分析

收稿日期: 2014-04-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2011AA05A119).

作者简介: 曹喜民(1985-), 男, 河南上蔡人, 四川大学博士研究生; 刘天琪(1962-), 女, 四川成都人, 四川大学教授, 博士生导师; 李兴源(1945-), 男, 四川成都人, 四川大学教授, 博士生导师.

风电场接入对其近端火电机组次同步振荡特性的影响,并提出了抑制方法;文献[6]分析了不同风电比例和不同直流控制方式下系统的暂态功角稳定特性,探讨了风电、火电和直流系统间的交互作用,并基于扩展等面积理论(extended equal-area criterion, EEAC)分析了送受端机组惯量对系统功角暂态稳定性的影响机理;文献[8]研究了风火打捆直流输电系统的暂态稳定性,以及电力系统稳定器(PSS)和静止同步串联补偿器(SSSC)附加广域阻尼控制器对系统阻尼特性的增强作用.但以上研究均未涉及风火电配置比例与风电机组的负载率对系统小扰动稳定性的影响.而在以往风电并网对系统稳定性影响的研究中,风电比例对电网的影响也一直存有争议^[10-11],甚至结论截然相反^[12].现有的风火打捆外送系统研究中风火电配置比例一般只考虑风电波动性与火电机组调峰能力进行确定^[8-9],进一步深入研究仍有实际价值.

本文在综合考虑变流器控制模型与桨距角控制系统小扰动稳定特性的基础上,基于李亚普诺夫原理建立风火打捆外送系统小扰动稳定性模型.构建了风火打捆外送系统仿真模型,通过仿真计算深入讨论了风火打捆输电系统与大电网的联络线紧密程度、风电负载率、风火电配置比例对系统小扰动稳定性的影响.

1 双馈风电机组小扰动模型

根据双馈风力发电系统的组成部分,列写各部分的状态方程.

1.1 风力机数学模型

风力机能够从风中吸取的能量为

$$P_m = \begin{cases} C_p P_w = 0.5 C_p \rho A v^3, & v_{in} \leq v \leq v_R; \\ P_R, & v_R \leq v \leq v_{out}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_w 为风功率; ρ 为空气密度; $A = \pi R^2$ 为风力机叶片扫风面积,其中 R 为风轮旋转面的半径; v 为风速; C_p 为风能利用系数, $C_p = P/(0.5 \rho S v^3)$ 为风能利用系数,其中 P 为风力机实际获得的轴功率, S 为风轮扫风面积; v_{in} , v_R , v_{out} 分别为启动、额定及切出风速; P_R 为风力机额定功率.

1.2 桨距角控制模型

对桨距角控制的目的是保证在风速变化时风电的稳定输出和其转换效率,用一阶微分方程来表示其系统:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_d}(\beta_0 - \beta). \quad (2)$$

式中: T_d 为桨距角控制系统惯性时间常数; β_0 为桨距角给定值.

1.3 双馈感应发电机模型

不考虑电机非线性对电气参数的影响,采用考虑定子暂态的五阶模型,其详细推导过程及各参数意义详见文献[13].

1.4 传动轴系模型

本文分析风电机组小扰动稳定性,把风电机组的机械传动部分等效为两质量块模型,两质量模型的数学方程为

$$\left. \begin{aligned} J_w \frac{d\omega_w}{dt} &= T_w - K_s \theta_s - D_s (\omega_w - \omega_g), \\ J_g \frac{d\omega_g}{dt} &= K_s \theta_s - T_e + D_s (\omega_w - \omega_g), \\ \frac{d\theta_s}{dt} &= \omega_0 (\omega_w - \omega_g). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: J_w 是风力机的惯性时间常数; J_g 是发电机的惯性时间常数; ω_w 是风力机转子的电角速度; ω_g 是发电机转子的电角速度; θ_s 是两质量块的相对角位移; D_s 为等效阻尼系数; K_s 为传动轴的刚性系数; T_e 为发电机电磁转矩.

1.5 变流器模型

换流器状态方程可以表示为

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr}) - (u_{dg} i_{dg} + u_{qg} i_{qg}). \quad (4)$$

式中: C 为电容; V_{dc} 为背靠背电压源型换流器的直流电压; u_{dr} 和 u_{qr} 分别是转子侧 d, q 轴电压; i_{dr} 和 i_{qr} 分别是转子侧 d, q 轴电流; u_{dg} 和 u_{qg} 分别为网侧 d, q 轴电压; i_{dg} 和 i_{qg} 分别为网侧 d, q 轴电流.

1.6 控制系统模型

转子侧变流器为实现双馈电机输出有功功率和无功功率的解耦控制采用定子电压定向的转子电流控制方法,通过控制转子电流 i_{dr} (控制有功)和 i_{qr} (控制无功)来实现^[14],其中, K_{p1} , K_{p2} , K_{p3} 分别表示转子侧变流器有功、电流和无功控制环节的比例, K_{i1} , K_{i2} , K_{i3} 分别表示转子侧变流器有功、电流和无功的积分增益.令 i_{qr_ref} 和 i_{dr_ref} 为转子电流控制环节 d, q 轴参考值,把 Q_{ref} 和 P_{ref} 分别作为无功和有功参考值,定子无功和有功测量值分别为 Q_{meas} 和 P_{meas} .通过引入中间变量 x_1, x_2, x_3, x_4 ,转子侧变流器控制系统状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= P_{\text{ref}} - P_{\text{meas}}, \\ \frac{dx_2}{dt} &= K_{p1}(P_{\text{ref}} - P_{\text{meas}}) + K_{11}x_1 - i_{qr}, \\ \frac{dx_3}{dt} &= Q_{\text{ref}} - Q_{\text{meas}}, \\ \frac{dx_4}{dt} &= K_{p3}(Q_{\text{ref}} - Q_{\text{meas}}) + K_{13}x_3 - i_{dr}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

和

$$\left. \begin{aligned} v_{qr} &= K_{p2}(K_{p1}\Delta P_s + K_{11}x_1 - i_{qr}) + \\ &\quad K_{12}x_2 + s\omega_s(L_m i_{ds} + L_{\pi} i_{dr}), \\ v_{dr} &= K_{p2}(K_{p3}\Delta Q_s + K_{13}x_3 - i_{dr}) + \\ &\quad K_{12}x_4 + s\omega_s(L_m i_{qs} + L_{\pi} i_{qr}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: ΔP_s 为定子有功参考值和测量值之差; ΔQ_s 为定子无功参考值和测量值之差; P_{meas} 为机组定子和转子总的有功功率; Q_{meas} 为机组定子和转子总的无功功率。

为了使电网侧变流器控制电网的无功交换并维持变流器直流电压恒定, 采用基于网侧电压定向矢量控制方案, 用变流器的 d 分量 i_{dg} 控制直流电压, 网侧与电网的无功功率交换由 q 轴分量 i_{qg} 控制。其中, K_{pdg} 为网侧变流器直流电压控制环节的比例; K_{ldg} 为网侧变流器直流电压控制环节的积分增益; K_{pg} 为电流控制环节的比例; K_{lg} 为电流控制环节积分增益。在引入中间变量 x_5, x_6, x_7, x_8 后, 电网侧变流器控制系统状态方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_5}{dt} &= V_{\text{dc_ref}} - V_{\text{dc}} = \Delta V_{\text{dc}}, \\ \frac{dx_6}{dt} &= K_{pdg}\Delta V_{\text{dc}} + K_{ldg}x_5 - i_{dg}, \\ \frac{dx_7}{dt} &= Q_{\text{grid_ref}} - Q_{\text{grid}} = \Delta Q_{\text{grid}}, \\ \frac{dx_8}{dt} &= K_{pqg}\Delta Q_{\text{grid}} + K_{lqg}x_7 - i_{qg}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

及

$$\left. \begin{aligned} v_{dg} &= K_{pg}(K_{pdg}\Delta V_{\text{dc}} + K_{ldg}x_5 - i_{dg}) + K_{lg}x_6, \\ v_{qg} &= K_{pg}(K_{pqg}\Delta Q_{\text{grid}} + K_{lqg}x_7 - i_{qg}) + K_{lg}x_8. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $Q_{\text{grid_ref}}$ 和 Q_{grid} 分别为网侧无功的参考值及测量值, 前者一般取 0。

$$\left. \begin{aligned} i_{dg} &= K_{pdg}\Delta V_{\text{dc}} + K_{ldg}x_5 + \frac{K_{lg}}{K_{pg}}x_6 - \frac{1}{K_{pg}}V_{dg}, \\ i_{qg} &= K_{pqg}\Delta Q_{\text{grid}} + K_{lqg}x_7 + \frac{K_{lg}}{K_{pg}}x_8 - \frac{1}{K_{pg}}V_{qg}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_5}{dt} &= V_{\text{dc_ref}} - V_{\text{dc}} = \Delta V_{\text{dc}}, \\ \frac{dx_6}{dt} &= \frac{1}{K_{pg}}V_{dg} - \frac{K_{lg}}{K_{pg}}x_6, \\ \frac{dx_7}{dt} &= Q_{\text{grid_ref}} - Q_{\text{grid}} = \Delta Q_{\text{grid}}, \\ \frac{dx_8}{dt} &= \frac{1}{K_{pg}}V_{qg} - \frac{K_{lg}}{K_{pg}}x_8. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2 小扰动稳定性分析

风火打捆输电系统小扰动方程包括双馈风电机组线性化方程、同步发电机线性化方程、负荷的线性化方程和两端直流输电系统方程, 本文详细列出了双馈风电机组。鉴于风力发电系统外的同步电机系统小扰动方程相对比较成熟, 本节不再详细列写数学关系式。当电网各个部分的小扰动方程建立之后, 通过各个部分的出口电压以及电流的关系将这些方程联系起来, 便得到风火打捆全系统的小扰动方程。

电力系统的动力学行为可以用微分-代数方程来描述:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u), \\ 0 &= g(x, u). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: x 为状态变量构成的向量; u 为运行变量构成的向量。设 x_0, y_0 为初始向量, 则对应于系统运行平衡点, 有

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_0 &= f(x_0, u_0) = 0, \\ 0 &= g(x_0, u_0). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

如果在系统上施加一个扰动, 则有

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + \Delta x, \\ u &= u_0 + \Delta u. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

把式(13)代入式(5)~式(12), 经过泰勒变换后消去代数变量 u 得出风火打捆输电系统全网络小扰动稳定性分析方程。

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x. \quad (14)$$

式中: A 为非线性系统线性化后的状态矩阵, 如果系统所有的特征值的实部均小于零, 那么系统在平衡点处是稳定的; 如果系统特征值的实部有不少于一个正值时, 系统在平衡点处是不稳定的。当打捆系统特征值实部有一个或以上为零时, 不能从该分析方法得出此系统稳定性与否的结论。

3 算例分析

为了研究风火打捆输电系统与外部系统的相

互作用,把外部系统等值为由一台发电机和负荷组成的系统,构成风火打捆输电系统,如图 1 所示,图中 DFIG 代表双馈风电机群,G 代表火电机

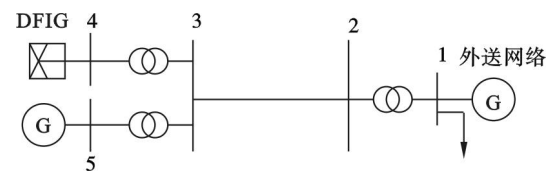


图 1 风火打捆输电系统结构图

Fig. 1 The structure of wind-thermal bundled system

群,风电场群单台风电机组参数如下:额定有功功率 $P_G = 2.5\text{ MW}$,电机转子额定转速 $\omega_g = 1\,200\text{ r/min}$,发电机的惯性时间常数 $J_g =$

1.14 s ,风轮半径 $R = 35.2\text{ m}$,风轮惯性时间常数为 7.64 s ,风轮额定转速为 15.4 r/min ,切入风速为 3.0 m/s ,额定风速为 11.8 m/s ,切出风速为 25.0 m/s 。

实际仿真计算中,风火电总出力不变,只改变其配置比例,来研究其小扰动稳定性,表 1 为风火打捆外送风火电配置比例为 1:3,1:2,1:1,2:1 和 3:1 时的典型特征值和阻尼比。其中风火电配置比例为 1:3 时,系统典型特征值为 $-1.355\,5 \pm \text{j}13.481\,0$ 和 $-0.878\,5 \pm \text{j}14.099\,4$,这些特征值对应的阻尼比分别为 10.004 5,6.219 0,随着风火电配置比例的变大,其特征值、阻尼比的变化情况如表 1 所示。

表 1 风火打捆输电系统不同风火电配置比例下的小扰动稳定计算结果(特征值)
Table 1 The calculating result of small signal stability for the wind-thermal bundled system under different wind-thermal installed capacity ratio

组名	风火电配置比例				
	1:3	1:2	1:1	2:1	3:1
1	$-1.355\,5 \pm \text{j}13.481\,0$	$-1.3563 \pm \text{j}13.481\,4$	$-1.3593 \pm \text{j}13.479\,5$	$-1.362\,1 \pm \text{j}13.476\,7$	$-1.364\,4 \pm \text{j}13.475\,0$
2	$-0.878\,5 \pm \text{j}14.099\,4$	$-1.040\,2 \pm \text{j}14.810\,8$	$-1.085\,5 \pm \text{j}14.514\,7$	$-1.190\,1 \pm \text{j}14.522\,0$	$-1.253\,3 \pm \text{j}14.455\,3$

由表 1 可知,随着风火电配置比例的增加,典型特征值实部逐渐增大,说明在该运行工况下该系统振荡模式的稳定性随风火电配置比例的增加而提高。随着风火打捆介入系统中的容量增大,其对系统的影响也会改变,具体系统小扰动稳定性随风火电配置比例的变化情况还要通过具体的仿真分析得出。

表 2 风火打捆输电系统不同外送线路长度下的小扰动稳定计算结果(特征值)
Table 2 The calculating result of small signal stability for the wind-thermal bundled system under different delivery line length

组名	外送线路长度 L/km				
	10	30	50	70	100
1	$-0.447\,1 \pm \text{j}0.547\,9$	$-0.445\,8 \pm \text{j}0.553\,4$	$-0.444\,8 \pm \text{j}0.557\,5$	$-0.444\,2 \pm \text{j}0.560\,5$	$-0.443\,7 \pm \text{j}0.563\,9$
2	$-0.966\,3 \pm \text{j}15.399\,7$	$-0.899\,7 \pm \text{j}14.710\,8$	$-0.837\,5 \pm \text{j}14.117\,0$	$-0.786\,3 \pm \text{j}13.603\,2$	$-0.715\,7 \pm \text{j}12.934\,7$
3	$-1.366\,3 \pm \text{j}13.456\,7$	$-1.367\,4 \pm \text{j}13.454\,9$	$-1.367\,6 \pm \text{j}13.451\,0$	$-1.361\,6 \pm \text{j}13.446\,4$	$-1.355\,8 \pm \text{j}13.454\,4$

由表 2 可知,随着外送线路长度的增加,前两组特征值的实部减小,第 3 组特征值的实部增大。由于前两组的特征值的实部小于 1,为系统较关键特征值,所以风火打捆输电系统随着外送线路长度的增大,系统整体呈不稳定趋势。

为了研究风火打捆输电系统风电机组的负载率和系统小扰动稳定性的关系,让风火打捆输电系统风火电总出力不变,不改变火电机组的运行工况,只改变风电机组的台数以改变风电机组的

负载率,在不同的负载率情况下对风火打捆系统的小扰动稳定性进行计算分析,分析结果如表 3 所示。

为了研究风火打捆输电系统与电网的紧密程度对系统小扰动稳定性的影响,假设风火打捆风火电配置比例(1:2)不变的情况下,通过将外送线路设为 10,30,50,70,100 km 来改变风火打捆系统与电网的紧密程度,分别在上述情况下对系统进行小扰动稳定性计算分析,结果如表 2 所示。

由表 3 可知,第 3 组特征值的实部的绝对值随着风电负载率的增加逐渐降低,前两组特征值为关键特征值,其实部的绝对值随着负载率的增加呈先降低后提高的变化趋势,即说明系统稳定性随着负载率的提高呈先降低后增加的趋势。

表 3 风火打捆输电系统不同风电机组负载率下的小扰动稳定计算结果(特征值)
Table 3 The calculating result of small signal stability for the wind-thermal bundled system under different wind power output level

组名	负载率/%			
	30	50	70	100
1	$-0.445\ 8 \pm j0.547\ 7$	$-0.446\ 3 \pm j0.572\ 3$	$-0.449\ 4 \pm j0.602\ 7$	$-0.445\ 8 \pm j0.553\ 5$
2	$-0.903\ 8 \pm j14.709\ 0$	$-0.888\ 8 \pm j14.714\ 5$	$-0.87\ 56 \pm j14.715\ 2$	$-0.899\ 7 \pm j14.710\ 8$
3	$-1.453\ 5 \pm j13.406\ 3$	$-1.442\ 73 \pm j13.409\ 8$	$-1.417\ 775 \pm j13.417\ 1$	$-1.367\ 4 \pm j13.455\ 0$

4 结 论

- 1) 通过对不同风火电配置比例下的系统小扰动稳定性的仿真分析可知,风火打捆输电系统的稳定性随着风火电配置比例的增大而提高,具体系统小扰动稳定性随风火电配置比例的变化情况还要通过具体的仿真分析得出。
- 2) 通过对不同风电机组负载率下的系统小扰动稳定性分析得出,系统关键特征值随着风电出力水平的升高呈现先增大后减小的规律。
- 3) 通过对风火打捆输电系统与大电网的联络线紧密程度计算分析得出,联络线紧密程度越低,系统稳定性越差。

参考文献:

[1] 国家电力监管委员会. 风电、光伏发电情况监管报告[R]. 北京:国家电力监管委员会,2011.
(State Electricity Regulatory Commission. The regulation report of wind power and photovoltaic power[R]. Beijing: State Electricity Regulatory Commission,2011.)

[2] 汪宁渤,丁坤,陟晶,等. 风电火电打捆联合外送是解决风电市场瓶颈的有效途径[J]. 电力技术,2010,19(13):1-4.
(Wang Ning-bo, Ding Kun, Zhi Jing, et al. The transmission of combined electricity generated from wind and thermals is an effective way to solute the market bottleneck in wind power development[J]. *Electrical Power Technology*,2010, 19(13):1-4.)

[3] 雷虹云,郑超,岳兴华,等. 风火电组合外送系统中风电改善火电机组 SSR 的研究[J]. 中国电力,2013,46(4):63-68.
(Lei Hong-yun,Zheng Chao,Yue Xing-hua,et al. Mitigating thermal power's SSR by additional damping controller of DFIG[J]. *Electric Power*,2013,46(4):63-68.)

[4] Zhu Y Y, Dong P, Hu T, et al. A digital-analog hybrid simulation system for sending out massive thermal-generated power bundled with wind power via HVDC transmission system[J]. *Power System Technology*,2013,37(5):1329-1334.)

[5] 郭小江,赵丽莉,汤奕,等. 风火打捆交直流外送系统功角暂态稳定研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):19-25.
(Guo Xiao-jiang,Zhao Li-li,Tang Yi,et al. Study on angle

transient stability for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. *Proceedings of the CSEE*,2013,33(22):19-25.)

[6] Tang Y, Zhao L L, Guo X J. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. *Automatic of Electric Power Systems*, 2013,37(20):34-40.)

[7] Guo X J, Ma S Y, Shen H, et al. HDVC grid connection schemes and system control strategies for large-scale wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2012,36(15):107-115.

[8] 郭东杰,王灵梅,韩西贵,等. 基于 PSS 和 SSSC 的风火打捆输电系统暂态稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(19):61-65,71.
(Guo Dong-jie,Wang Ling-mei,Han Xi-gui,et al. Study on transient stability of wind & thermal power transmission system based on PSS and SSSC[J]. *Power System Protection and Control*,2012,40(19):61-65,71.)

[9] 陈树勇,陈会元,唐晓骏,等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J]. 电网技术,2013,37(2):514-519.
(Chen Shu-yong, Chen Hui-yuan, Tang Xiao-jun, et al. Generator tripping control to uphold transient stability of power grid outwards transmitting thermal-generated power bundled with wind power[J]. *Power System Technology*, 2013,37(2):514-519.)

[10] Gautam D, Vittal V, Harbour T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2009,24(3):1426-1434.

[11] Gautam D, Vitta V, Harbour T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generator on transient and small signal stability of power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2009,24(3):1426-1434.

[12] El-Shimy M, Badr M A L, Rassem O M. Impact of large scale wind power on power system stability[C]// *Proceedings of the 12th International Mid-East Power System Conference(MEPCON'08)*. Aswan,2008:630-636.

[13] 魏巍,刘莹,丁理杰,等. 改进的双馈风力发电系统小干扰模型[J]. 电网技术,2013,37(10):2904-2911.
(Wei Wei,Liu Ying,Ding Li-jie,et al. An improved small perturbation model for doubly fed wind power system[J]. *Power System Technology*,2013,37(10):2904-2911.)

[14] 杨涛. 大规模风电并网小干扰稳定性研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.
(Yang Tao. Research on small signal stability of large scale wind power integration[D]. Beijing: North China Electric Power University,2010.)