

基于同伦函数的风电系统频率稳定特征值分析

伍济开, 江辉, 彭建春

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Eigenvalue Analysis on Homotopy Function Based Frequency Stability of Wind Power System

WU Ji-kai, JIANG Hui, PENG Jian-chun

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: The dynamic behavior of power system frequency is analyzed while large-capacity and high-proportion of wind power is involved in the power system. A mathematical model to analyze power system frequency where wind farms are involved is built, and by use of homotopy function the state variables corresponding to system eigenvalues are discriminated, especially the state variables related to system frequency. For the power system containing constant rotating speed wind power generation units and doubly-fed wind power generation units, by use of eigenvalue analysis method and by means of discrimination results of homotopy function the comparison and analysis of frequency stability characteristic are implemented. Simulation results show that the power system containing doubly fed finds power generation units possesses better frequency stability.

KEY WORDS: wind power system; eigenvalue analysis; frequency stability; homotopy function

摘要: 分析了含大容量高比例风电的电力系统频率动态行为。建立了一种含风电场的电力系统频率分析数学模型, 利用同伦函数辨别出系统特征值对应的状态变量, 特别是与系统频率相关的状态变量。针对含恒速风力发电机组和双馈风力发电机组的电力系统, 用特征值分析法并借助同伦函数的辨别结果实现了频率稳定特性的比较和分析。仿真结果表明含双馈风力发电机组的电力系统具有更好的频率稳定性。

关键词: 风电系统; 特征值分析; 频率稳定; 同伦函数

0 引言

风电场接入对电网稳定性影响的研究是一个热点^[1-3]。由于含风电场的电力系统(以下简称风电系统)是一个复杂的动力系统, 目前的研究大都侧重于风力发电机本身的稳定性。文献[4-5]建立了静态

稳定条件下的风电场小扰动分析模型, 应用这种建模方法分析了风电场接入系统后影响系统小干扰稳定性的因素; 文献[6-11]建立了双馈风力发电机和恒速风力发电机的详细模型, 在此基础上研究了风电场接入对电网暂态稳定性的影响, 研究表明风电场吸收无功功率导致并网点附近电压稳定性降低, 且电压稳定性与并网点短路容量、风电场的无功补偿措施有关。

频率稳定是电力系统稳定的一个重要方面。由于风能具有随机性和间歇性的特点, 风电系统的频率稳定问题显得尤为突出。文献[12-15]介绍了风机惯性对风电系统频率的影响, 通过对含有大容量高比例风电的电网进行分析表明, 风电场的运行状态对电网的低频振荡特性有一定影响; 研究了与风电场强相关的振荡模式, 这些振荡模式具有较好的阻尼特性。

特征值分析法是一种用来分析复杂非线性动力系统稳定性的方法, 以往常用参与矩阵或参与因子来分析系统状态变量和特征值的对应关系^[16-17], 进而明确系统的稳定状况。同伦函数表征了线性化动力系统中特征值与状态变量之间的耦合关系, 不需像参与矩阵或参与因子那样事先确定阈值^[18]。本文将同伦函数引入到风电系统的频率稳定分析中, 运用特征值分析法实现了恒速风电系统和双馈风电系统频率稳定特性的比较和分析。首先建立一个风电系统模型(包括风电场模型和同步发电机模型), 计算出系统特征值后利用同伦函数辨别出风电系统特征值对应状态变量(包括系统频率), 从而实现基于特征值的2种不同机型风电系统频率特性分析。最后对含有2种不同机型的风电系统进行了仿真和比较, 进一步研究了系统的动态频率稳定性, 为控制并改善系统频率稳定提供了理论基础。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677015)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677015).

1 风电系统数学模型

1.1 风机模型

恒速风力发电机和双馈风力发电机转子都是由风机驱动，而风机靠其叶片吸收风能，并转化为机械运动。风机转矩 T_t 可由式(1)描述^[16]。

$$T_t = \pi \rho r^2 v^3 C_p(\lambda) / 2\Omega \quad (1)$$

式中： ρ 、 r 、 v 、 $C_p(\lambda)$ 、 Ω 分别为风能密度、风机半径、风速、效率系数、风机机械角速度； $\lambda = \Omega r / v$ 为叶尖速比。

1.2 恒速风力发电机和双馈风力发电机模型

大多数风力发电机都采用异步发电机，其 d-q 轴下的定子电压方程和电磁转矩 T_e 可由式(2)、(3)描述^[8,11]。

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + E'_d \\ u_{qs} = R_s i_{qs} - X'_s i_{ds} + E'_q \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} M L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

式中： X'_s 为异步发电机暂态电抗； R_s 为转子阻抗； E'_d 、 E'_q 分别为异步发电机暂态电势的 d、q 轴分量； M 为发电机极对数； L_m 为电感， i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{ds} 、 i_{qr} 分别为 d-q 坐标下的定转子电流， u_{ds} 、 u_{qs} 为 d-q 坐标下的定子电压。

恒速风力发电机采用鼠笼型异步发电机直接接入电网，不能最大限度地捕获风能，稳态下的有功功率 P_e 可由式(4)描述^[16]。

$$P_e = \frac{3MR_r}{2S\omega_e} \frac{u^2 \Omega}{(R_s + R_r/S)^2 + \omega_e^2 (L_{ls} + L_{lr})^2} \quad (4)$$

式中 u 、 R_r 、 ω_e 、 Ω 、 L_{ls} 、 L_{lr} 、 S 分别为定子电压、定子阻抗、系统额定角频率、风力发电机机械角速度、定子漏抗、转子漏抗、转差率。

双馈风力发电机通过背靠背变流器间接接入电网，实现变速恒频控制，可最大限度地捕获风能^[9]。有功功率 P_e 由式(5)描述。

$$P_e = u_{qs} i_{qs} + u_{ds} i_{ds} \quad (5)$$

1.3 风电场模型

一个大型的风电场通常是由多个类似 1.1 节和 1.2 节中所描述的风力发电机组成，如果考虑每个风力发电机的详细模型，风电场的建模会变得相当复杂。本文主要分析含有风电场电力系统的频率行为，可以考虑把风电场看成一个整体的集中质块，而不去探究其内部反应。本文引用的风力发电机动态模型只包含转子机械运动方程，所有风电场模型都可用式(6)来描述^[10]。

$$(J_g + J_t/N^2) \dot{\omega}_r = M(T_t/N - T_e) \quad (6)$$

式中： $\omega_r = M\Omega$ 为风力发电机转子速度； J_t 、 J_g 为风机侧和发电机侧的转动惯量； N 为风机齿轮箱传动比，在数值上等于高速齿轮与低速齿轮数量之比。

1.4 含风电场的电力系统模型

大型风电场一般都连接在电力系统的末端，图 1 为一个简单的风电系统图。

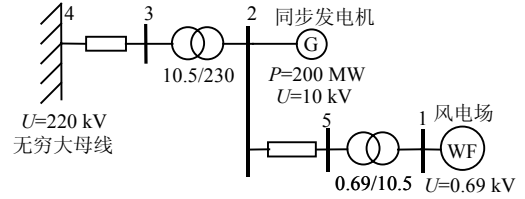


图 1 含风电场的电力系统接线图

Fig. 1 Power system including wind farm

图 1 所示系统的运行状态可以用如下的 6 阶微分方程(包括 5 阶同步机模型和 1 阶 1.3 节中所描述的风电场模型)和 4 阶代数方程组来描述^[19]。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_e s_m \\ \dot{s}_m = (-ds_m + P_m - P_g) / 2H \\ \dot{E}'_d = [-E'_d - (x_d - x'_d) i_q] / T'_{do} \\ \dot{E}'_q = [-E'_q - (x_d - x'_d) i_d + E_{fd}] / T'_{do} \\ \dot{E}_{fd} = [-E_{fd} + K_A (u_{ref} - u_t)] / T_A \\ \dot{\omega}_r = M(T_t/N - T_e) / (J_g + J_t/N^2) \\ 0 = R_1(i_d + i_{ds}) - X_1(i_q + i_{qs}) + u_{Bd} - u_d \\ 0 = R_1(i_q + i_{qs}) + X_1(i_d + i_{ds}) + u_{Bq} - u_q \\ 0 = R_2 i_{ds} - X_2 i_{qs} + u_d - u_{ds} \\ 0 = R_2 i_{qs} + X_2 i_{ds} + u_q - u_{qs} \end{cases} \quad (7)$$

式中： δ 、 s_m 、 E'_d 、 E'_q 、 E_{fd} 、 ω_r 为系统状态变量，分别代表同步发电机转子角、同步转子滑差、等效 d 轴暂态同步电动势、等效 q 轴暂态同步电动势、同步机励磁系统的输出电压和风力发电机转子速度； P_m 、 $P_g = E'_q i_q + E'_d i_d + (x'_d - x'_q) i_d i_q$ 为原动机输出功率和同步发电机功率； d 、 H 为阻尼系数和原动机惯性系数； x_d 、 x_q 不同步电抗的 d、q 轴分量； x'_d 、 x'_q 是暂态同步电抗的 d、q 轴分量； i_q 、 i_d 为同步发电机定子电流的 d、q 轴分量； T'_{do} 、 T'_{qo} 分别为用 d-q 轴表示的同步发电机转子绕组暂态时间常数； K_A 、 T_A 分别为励磁系统的传递系数和时间常数； u_{ref} 、 u_t 为励磁系统的参考电压和同步发电机母线处电压； $u_q = E'_q + x'_d i_d$ 、 $u_d = E'_d - x'_q i_q$ 分别为同步发电机定子电压的 d、q 轴分量； R_1 、 X_1 为

图 1 所示系统中节点 2、4 之间各元件的等效阻抗； R_2 、 X_2 为节点 1、2 之间各元件的等效阻抗； u_{Bd} 、 u_{Bq} 为无穷大母线处电压的 d、q 轴分量。

2 用同伦函数确定特征值对应的状态变量

电力系统中特征值与状态变量之间的对应关系对研究系统的详细稳定性具有十分重要的意义。本节简单介绍用同伦函数来确定风电系统特征值对应的具体状态变量的方法。

式(7)所描述的非线性微分代数方程组都可抽象成式(8)所示的模型^[18]。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ 为系统的状态变量； $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)^T$ 为系统的控制向量； \mathbf{f} 、 \mathbf{g} 为微分部分和代数部分的函数映射关系。

在稳态运行点 $(x_{(0)}, y_{(0)})$ 将式(8)线性化得：

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{y} \\ \mathbf{0} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{y} \end{cases} \quad (9)$$

式中：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial y_m} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial y_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial y_m} \end{bmatrix}。$$

当 $|\mathbf{D}| \neq 0$ 时，消去 $\Delta \mathbf{y}$ 可得：

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{A}} \Delta \mathbf{x} \quad (10)$$

式中 $\dot{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{C}$ ，为系统状态矩阵，状态矩阵 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值就是系统的特征值。因此，根据状态矩阵特征值的性质可判断系统的稳定性。如果不考虑式(8)所示系统中代数方程的约束关系，且其中第 i 个微分方程只与第 i 个状态变量有关 ($1 \leq i \leq n$)，即各状态变量间彼此独立，则此系统经线性化后可表示为

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F} \Delta \mathbf{x} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{F} = \text{diag}[\partial f_1 / \partial x_1, \dots, \partial f_i / \partial x_i, \dots, \partial f_n / \partial x_n]$ 。显然，矩阵 \mathbf{F} 的特征值就是矩阵 \mathbf{A} 的对角线元素，同时也是 \mathbf{F} 的对角线元素。由 Liapunov 理论可知， \mathbf{F} 的第 i 个特征值对应 x 中第 i 个状态变量。事实上，动

力系统大都存在代数约束，且在各个状态变量之间有耦合，所以决定系统特性的矩阵往往是 $\dot{\mathbf{A}}$ 而不是 \mathbf{F} ，但 2 个矩阵之间势必有一定联系，于是构造同伦矩阵函数 $H(r)$ 来描述这种联系^[20]。

$$\mathbf{H}(r) = (1-r)\mathbf{F} + r\dot{\mathbf{A}}, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (12)$$

当 $r=0$ 时， $\mathbf{H}(r)$ 的特征值即为 \mathbf{F} 的特征值；当 $r=1$ 时， $\mathbf{H}(r)$ 的特征值即为 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值。 r 取连续值时 $\mathbf{H}(r)$ 的特征值轨迹便反映了由 \mathbf{F} 的特征值过渡到 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值的过程，于是矩阵 $\dot{\mathbf{A}}$ 和 \mathbf{F} 的特征值便有了某种关联，而 \mathbf{F} 的特征值与系统状态变量之间的对应关系是确定的，所以 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值与系统状态变量的对应关系也可以确定。

设 $\dot{\mathbf{A}}$ 和 \mathbf{F} 的特征值分别用 α 和 λ 表示， $\mathbf{H}(r)$ 的特征值用 $\xi(r)$ 表示。在 Matlab 中追踪 $r(0 \leq r \leq 1)$ 取连续值时 $\mathbf{H}(r)$ 特征值的轨迹，过程如图 2 所示，其中 $0 < p < 1, 1 \leq k < i$ 。

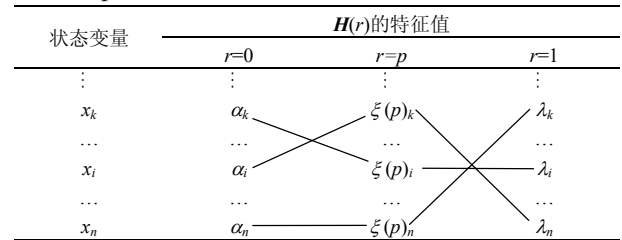


图 2 \mathbf{F} 的特征值过渡到 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值的示意图

Fig. 2 Track of $H(r)$'s eigenvalues

图 2 中左边纵列是 \mathbf{F} 的特征值和与之相对应的系统状态变量，右边纵列是 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值即系统特征值，中间纵列是当 $r=p(0 < p < 1)$ 时同伦矩阵函数 $\mathbf{H}(r)$ 的特征值。 $r=0$ 时， $\mathbf{H}(r)$ 的特征值即 \mathbf{F} 的特征值， r 连续变化的同时 $\mathbf{H}(r)$ 的特征值也是连续变化的； $r=1$ 时 $\mathbf{H}(r)$ 的特征值便过渡到了 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值。即图 2 中 $\mathbf{H}(r)$ 的特征值轨迹 ($\alpha_k \rightarrow \xi(p)_i \rightarrow \lambda_i$ 、 $\alpha_n \rightarrow \xi(p)_n \rightarrow \lambda_k$ 、 $\alpha_i \rightarrow \xi(p)_k \rightarrow \lambda_n$ 、 \dots) 是连续而平滑变化的。根据这种连续而平滑变化的特征值轨迹， \mathbf{F} 的特征值与 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值即可对应起来，进而可得到 $\dot{\mathbf{A}}$ 的特征值对应的系统状态变量，如表 1 所示。

表 1 特征值与系统状态变量的对应关系

Tab. 1 Correspondence between eigenvalues and state variables

特征值	...	λ_k	...	λ_i	...	λ_n
状态变量	...	x_n	...	x_k	...	x_i

3 仿真与分析

3.1 特征值计算

针对图 1 所示的风电系统，当系统风电穿透功率不断增加时分别对风电场是恒速风力发电机(简

称恒速风电系统)和双馈风力发电机(简称双馈风电系统)2种不同情况进行特征值计算,风电穿透功率的增加是通过增加风力发电机的数量来实现的。风力发电机参数见文献[16];系统同步发电机参数(pu)为 $x_d=1.312$, $x'_d=0.181$, $x_q=1.260$, $x'_q=0.250$, $T'_{d0}=5.89$, $T'_{q0}=0.6$, $H=2.89$, $d=0.05$, $K_A=200$, $T_A=1.0$;系统网络参数(pu)为 $R_1=0.02$, $X_1=0.97$, $R_2=20$, $X_2=10.2$ 。表2、3计算出了2种风电系统在不同风电穿透功率下的特征值。

表2 不同风电穿透功率下的系统特征值
(恒速风电系统)

Tab. 2 Eigenvalues in different wind penetrations
(SCIG power system)

P_e/MW	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
60	-0.318	-0.118+j0.48	-0.118-j0.48	-8.423	-16.840	-18.932
100	-0.320	-0.125+j0.40	-0.125-j0.40	-8.536	-16.749	-18.932
140	-0.318	-0.130+j0.32	-0.130-j0.32	-8.710	-16.710	-18.932
180	-0.332	-0.141+j0.20	-0.141-j0.20	-8.940	-16.650	-18.932

表3 不同风电穿透功率下的系统特征值
(双馈风电系统)

Tab. 3 Eigenvalues in different wind penetrations
(DFIG power system)

P_e/MW	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
60	-0.318	-0.132+j0.52	-0.132-j0.52	-5.396	-16.749	-18.932
100	-0.322	-0.160+j0.52	-0.160-j0.52	-5.396	-16.758	-18.932
140	-0.310	-0.193+j0.52	-0.193-j0.52	-5.396	-16.732	-18.932
180	-0.320	-0.234+j0.51	-0.234-j0.51	-5.396	-16.746	-18.932

用第2节中所介绍的同伦函数找出表2和3中的特征值所对应的状态变量。设图1所示系统中的风电场为双馈风电场,且风电场出力 $P_e=60\text{ MW}$,相关参数的计算结果为

$$\dot{A} = \begin{bmatrix} 0 & 6.290 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.017 & 5.010 & -11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -22.023 & 3.323 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.260 & 1.457 & 0.171 & 0 \\ 2 & 0 & 647.4 & -721.1 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & 0.020 & -0.140 & 0 & -0.318 \end{bmatrix}$$

$$F = \text{diag}[0, -0.017, -13.385, -0.046, -20, -0.318]$$

求出 \dot{A} 的特征值 $\lambda_1=-0.318$, $\lambda_2=-0.132+j0.520$, $\lambda_3=-0.132-j0.520$, $\lambda_4=-5.396$, $\lambda_5=-16.749$, $\lambda_6=-18.932$,构造同伦矩阵函数并在Matlab中计算出同伦矩阵函数的连续特征值,根据图2和表1中同伦矩阵函数特征值的过渡过程便可得到系统特征值与状态变量之间的对应关系,结果如表4所示。

结合表2~4可以看出,特征值 λ_2 、 λ_3 是一对共轭特征值,对应的系统状态变量为同步转子角 δ

表4 图1所示系统的特征值所对应的状态变量
Tab. 4 Correspondence between eigenvalues and state variables in Fig. 1

特征值	λ_1	λ_2, λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
状态变量	E'_q	δ, s_m	ω_r	E'_d	E_{fd}

和同步转差率 s_m 。系统频率与发电机转子速度和同步转差率密切相关,所以应用特征值分析法研究风电系统的频率稳定性时重点分析 δ 和 s_m 所对应的特征值即可。

3.2 恒速风电系统与双馈风电系统的特征值分析

对比恒速风电系统和双馈风电系统在不同风电穿透功率情况下的特征值(表2、3所示),并结合表4中的对应关系可以看出:

1) 表2、3中的特征值(或特征值实部)均为负实数,2种风电系统都是渐近稳定的。对比相同风电穿透功率下的表征风电系统频率的特征值,表2中特征值实部的绝对值要小于表3中的相应值,且后者更远离临界点,即双馈风电系统的频率稳定性要好于恒速风电系统。

2) 恒速风电系统中与风力发电机转子速度对应的特征值随着风电穿透功率的增加而增大,而双馈风电系统相应的特征值却维持定值。风电穿透功率的增加并没有影响双馈风力发电机的转子速度。双馈风力发电机一般采用各种控制策略(矢量控制、转矩控制等),对系统参数的改变具有很强的控制能力,对于发电机自身的稳定性来说,双馈风力发电机比恒速风力发电机更好。

3) 当风电穿透功率从60 MW逐步增加到180 MW后,表征系统频率特性的状态变量 δ 和 s_m 所对应的特征值实部从-0.118变化到-0.141,这是恒速风电系统的情况;而双馈风电系统增加同样的风电穿透功率,相应的特征值实部从-0.132变化到-0.234,变化幅度明显大于前者。可见,恒速风电系统和双馈风电系统中表征系统频率特性的特征值阻尼都随着风电穿透功率的增加而增加,使系统的频率稳定特性有所提升,但由于双馈风电系统中的表征系统频率的特征值变化幅度要大于恒速风电系统中相应的特征值变化,使得双馈风电系统具有更好的频率稳定特性,这也与实际情况相符,证明表4中用同伦函数辨别出的风电系统特征值对应的状态变量的结果是有效的。

3.3 系统频率稳定分析

3.3.1 风电场出力恒定时系统频率的动态特性

应用本文方法进一步研究系统的频率稳定性,

针对图1所示的风电系统,分别对风电场是恒速风力发电机组和双馈风力发电机组的情况进行了仿真和比较。

系统在1s时在风电场母线处加入一个60MW的负载,风电场出力 $P_e=100\text{MW}$ 。图3、4分别为发生扰动时2种风电系统的频率稳定情况和风电场的有功功率变化。系统发生扰动后,从图3可以看出恒速风电系统的最大频率下降幅值为0.04Hz,而双馈风电系统的情况只有不到0.03Hz。从图4可以看出当系统发生扰动时恒速风电场和双馈风电场对系统有功功率均有所贡献,但2种风电场所贡献的有功功率裕度明显不足,最大值只有4MW,且持续时间只有0.5s左右,其有功功率在这么短的时间内不能很好地补偿扰动时带来的频率波动(如图3所示),导致系统频率波动周期较长,波动幅值较大。事实上,由于恒速风电系统中与频率相关的特征值实部比双馈风电系统中相应的特征值更靠近临界点,后者经历扰动过后的频率动态特性明显好于前者,且波动幅值也小得多,这与3.2节中特征值分析的结果相同。

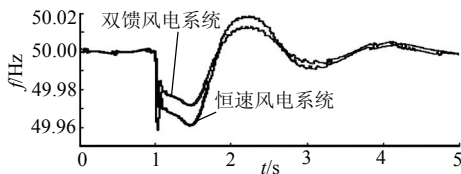


图3 风电系统的动态频率特性

Fig. 3 Frequency dynamics of wind power system

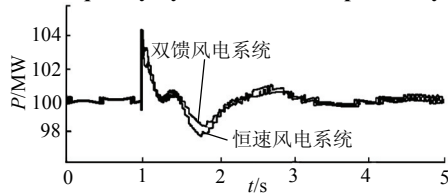


图4 风电场出口处有功功率特性

Fig. 4 Active power characteristics of wind farm

3.3.2 不同风电穿透功率下系统频率的动态特性

图5、6分别为按表2和3逐步增大风电穿透功率时恒速风电系统和双馈风电系统经受扰动后的系统频率动态特性。尽管风电穿透功率不断增加,但经受扰动时2种风电系统的最大频率下降幅值反而逐步减小,减小的趋势在恒速风电系统中更为明显,最大下降幅值从 $P_e=60\text{MW}$ 时的0.045Hz减小到 $P_e=180\text{MW}$ 时的不到0.03Hz;而不管风电穿透功率怎样变化,双馈风电系统的最大频率下降幅值基本上维持在0.03Hz左右。

从以上的分析可见,随着穿透功率的增加,2种

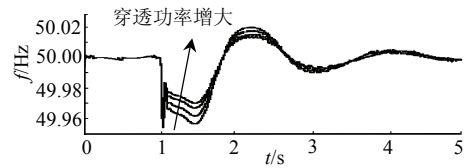


图5 恒速风电系统在不同穿透功率水平下的频率特性

Fig. 5 Frequency dynamics of SCIG power system in different wind penetrations

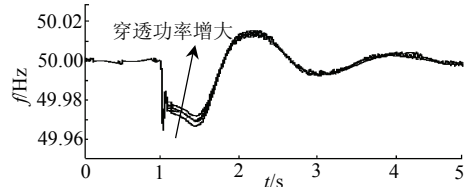


图6 双馈风电系统在不同穿透功率水平下的频率特性

Fig. 6 Frequency dynamics of DFIG power system in different wind penetrations

风电系统的阻尼相应增加,这种效应在双馈风电系统中尤为显著,使双馈风电系统的频率稳定性好于恒速风电系统。这与表2、3特征值分析的结果也相符。

4 结论

1) 用同伦函数辨别风电系统特征值对应的状态变量的方法是有效的。

2) 恒速风力发电机组和双馈风力发电机组接入系统后都增加了系统的特征值阻尼,且系统特征值阻尼随着风电穿透功率的增加而增加。这种特性在双馈风电系统中更加显著,使双馈风电系统具有更好的频率稳定性。

3) 双馈风力发电机组和恒速风力发电机组在系统发生扰动时不能向系统提供足够的有功功率来稳定系统频率。

参考文献

- [1] Slootweg J G. Wind power modeling and impact on power system dynamics[D]. Delft, Netherlands: Technische Universiteit Delft, 2003.
- [2] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
Lei Yazhou. Studies on wind farm integration in to power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89(in Chinese).
- [3] Akhmatov V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2003.
- [4] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
Tang Hong, Wu Junling, Zhou Shuangxi. Modeling and simulation for

- small signal stability analysis of power system containing wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 38-41(in Chinese).
- [5] 吴学光, 张学成, 印永华, 等. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 68-72. Wu Xueguang, Zhang Xuecheng, Yin Yonghua, et al. Application of models of the wind turbine induction generators to wind power system dynamic stability analysis[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 68-72(in Chinese).
- [6] 林成武, 王凤祥, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125. Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).
- [7] Akhmatov V, Knudsen H, Nielsen A H, et al. Modelling and transient stability of large wind farms[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(1): 123-144(in Chinese).
- [8] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 77-81. Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 77-81(in Chinese).
- [9] 曹娜, 李岩春, 赵海翔, 等. 不同风电机组对电网暂态稳定的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 53-57. Cao Na, Li Yanchun, Zhao Haixiang, et al. Comparison of effect of different wind turbines on power grid transient stability[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 53-57(in Chinese).
- [10] Salman S K, Anital J T. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 793-802.
- [11] 闫广新, 吐尔逊, 晁勤. 交流励磁双馈风力发电机组的稳定性仿真分析[J]. 继电器, 2007, 35(14): 7-9. Yan Guangxin, Tu Erxun, Chao Qin. Analysis of simulation of stability of AC excited double-fed wind generator[J]. Relay, 2007, 35(14): 7-9(in Chinese).
- [12] Lalor G, Mullane A, O'Malley M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [13] Mullane A, O'Malley M. Inertial response of induction-machine-based wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1496-1503.
- [14] Ekanayake J, Jenkins N. Comparison of response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 1496-1503.
- [15] 张红光, 张粒子, 陈树勇, 等. 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): 75-80. Zhang Hongguang, Zhang Lizi, Chen Shuyong, et al. Influence of large scale wind farms on power system small signal stability and damping characteristic[J]. Power system Technology, 2007, 31(13): 75-80(in Chinese).
- [16] Fernandez R D, Mantz R J, Battaiotto P E. Impact of wind farms on a power system: an eigenvalue analysis approach[J]. Renewable Energy, 2007, 32 (1): 1676-1688.
- [17] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill Inc, 1994: 127-141.
- [18] Robertson G A, Cameron I T. Analysis of dynamic process models for structural insight and model reduction PartI: structural identification measures[J]. Computers Chemical Engineering, 1997, 25(5): 455-473.
- [19] Rajesh K G, Padiyar K R. Bifurcation analysis of a three node power system with detailed models[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(5): 375-392.
- [20] 武志刚, 张尧, 郑风雷, 等. 电力系统特征值与状态变量对应关系分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 23-26. Wu Zhigang, Zhang Yao, Zheng Fenglei, et al. Analysis of relationship between eigenvalues and state variables in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 23-26(in Chinese).



伍济开

收稿日期: 2008-09-28.

作者简介:

伍济开(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制, E-mail: wujiyeah@hotmail.com;

江辉(1968—), 女, 博士, 教授, 从事电力系统优化运行、电力经济和计算机应用等研究工作;

彭建春(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电能市场最优运营与控制、电力系统安全稳定经济运行等研究。

(编辑 张玉荣)

我国今年前两月用电量总体情况较乐观

中国电力企业联合会权威专家表示, 2009年1月份用电量与2008年同比持平, 由于2008年1月是用电高峰, 这表明2009年1月份经济状况是可喜的, 而前两月的总体情况较为乐观。由于2008年和2009年春节在不同月份, 1、2月份的合计发电量、用电量数据更应受到关注。发电和用电情况往往是工业经济的晴雨表, 1、2月份的合计数据更能准确反映中国工业经济的真实情况。分地区看, 西部有几个省用电量略有增长, 与政府推动因素有关; 中部未见明显复苏迹象; 东部地区分化严重, 有的下降较多, 有的有增长。总体来说, 工业结构在调整, 技术密集型企业还是能够走出来, 有自己品牌的电器、机械制造业或者国家支持的高耗能产业状态不错, 状况比想象中好, 但这样的省份不多。然而整体数据难以准确反映工业经济的具体情况, 要综合结构性数据才能知道具体情况如何。