

# 基于奇异摄动降阶的风电接入系统阻尼分析

舒进<sup>1</sup>, 都劲松<sup>1</sup>, 王靖程<sup>1</sup>, 张保会<sup>2</sup>

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为分析风电机组接入对同步机主系统低频振荡的影响, 首先建立 FSIG 及 DFIG 风电机组小干扰分析模型, 其次应用基于奇异摄动系统动态降阶技术揭示两类风电机组接入后同步机主系统阻尼变化机理。将奇异摄动动态降阶与特征值分析相结合, 分析不同控制参数的 FSIG 及 DFIG 风电机组接入对系统低频振荡模式及阻尼的影响。基于风电接入 IEEE 测试系统仿真表明, 所提出的分析方案能够直观、有效地对两类风电接入系统低频振荡进行分析。

**关键词:** 风电机组; 奇异摄动系统; 动态降阶; 低频振荡; 阻尼

## System damping analysis after wind power integration using singular perturbation system reduction

SHU Jin<sup>1</sup>, DU Jin-song<sup>1</sup>, WANG Jing-cheng<sup>1</sup>, ZHANG Bao-hui<sup>2</sup>

(1. Thermal Power Research Institute, Co., Ltd. Xi'an 710043, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to analyze the effect of wind power integration on low frequency oscillation of synchronous machine main system, the small-signal analysis models of FSIG and DFIG are built firstly, then the damping change mechanism after the above two generators integration is revealed by using the singularly perturbed system reduction. The influence of FSIG and DFIG integration with different parameters on system oscillation modes and damping is analyzed combined with the singularly perturbed system reduction and eigenvalue analysis. The IEEE testing system simulation shows that the proposed scheme can analyze the system low-frequency oscillation after wind power integration intuitively and effectively.

**Key words:** wind turbine generator; singularly perturbed system; system reduction; low frequency oscillation; damping

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0018-08

## 0 引言

作为可再生能源的主要利用形式, 风能发电一直保持高速增长。2012 年我国新增风电装机 12 960 MW, 同比增长 20.8%, 总装机达 75 324 MW, 装机总量居全球首位。在华能集团加快装机结构转型升级, 积极发展清洁能源的宏观形势下, 2012 年底, 集团风电装机达 9 356.9 MW, 已成为仅次于水电的第三大发电形式。

由欠阻尼导致的低频振荡是制约电力系统安全运行的重要因素。大规模风电将对其接入的同步机主系统低频振荡特性产生显著影响<sup>[1-3]</sup>。文献[4]基于数值仿真, 分析了恒速与变速风电机组及不同控制方式的双馈式(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)风电机组对系统稳定性的影响, 指出恒速风电机组接入系统阻尼特性更好而 DFIG 机组对系统小干扰稳定性能影响不大; 若

风电机组装设稳定控制器, 其接入可改善系统阻尼特性。文献[5]基于内蒙风电系统数值仿真, 指出风电机组出力改变使网内常规机组运行方式变化, 导致一些局部振荡模态出现或消失。各大机群间振荡特性发生变化, 增加了与风电场强相关的振荡模式。文献[6]采用 DFIG 机电暂态模型, 指出风电接入对系统小干扰稳定性的作用与其并网位置有关, 而风电场不参与振荡。文献[7]指出定速感应型(Fixed-Speed Induction Generator, FSIG)风电场接入后增加了与风场强相关的振荡模式, 但这些模式具有很好的阻尼。文献[8]分析了不同无功控制方案风电机组对接入系统稳定性影响, 指出按电压偏差进行比例式控制的 DFIG 电压调节有助于其他节点电压恢复, 但过大的反馈增益将造成系统稳定性下降。文献[9-10]针对风电接入系统, 设计了附加控制器改善接入系统稳定性。数值分析虽能够定量计算风电对接入系统

小干扰稳定性的影响, 但难以从本质上揭示风电场与系统小干扰稳定性间的相互作用规律。

首先给出常见 FSIG 及 DFIG 风电机组接入电力系统简化小干扰分析模型。其次, 采用所建立的分析模型, 提出基于奇异摄动的系统动态降阶技术, 通过消除与风电机组相关的快动态状态量, 揭示两类风电机组接入后, 经典同步机系统低频振荡阻尼变化的机理。进一步, 将奇异摄动动态降阶与特征值分析技术相结合, 对 DFIG 风电机组控制参数对系统低频振荡模式及阻尼的影响进行研究。基于风电接入 IEEE 9 节点系统分析表明, 所提出的方案可直观、有效地分析风电接入系统低频振荡。

## 1 风电机组小干扰分析模型

### 1.1 DFIG 风电机组模型

DFIG 转子运动方程为

$$M_w \dot{\omega}_w = T_m - T_e \quad (1)$$

式中:  $T_m$  为机械转矩;  $M_w$  为转子惯性常数;  $\omega_w$  为转速; 电磁转矩  $T_e = \text{Re}(E \dot{I}_s^*)$ ,  $E$  为内电势,  $\dot{I}_s^*$  为定子电流向量的共轭。

定子磁场定向 DFIG 定子有功、无功功率为

$$\begin{cases} P_s = U_s I_{sT} = U_s I_{rT} L_m / L_s \\ Q_s = U_s I_{sM} = U_s (-\psi_s + L_m I_{rM}) / L_s \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_s$  为定子电压向量幅值;  $I_{sM}$ 、 $I_{sT}$ 、 $I_{rM}$ 、 $I_{rT}$  为定、转子电流向量  $M$ 、 $T$  轴分量;  $\psi_s$  为定子磁链; 定、转子互感  $L_m = 1.5L_{md}$ ; 定、转子自感  $L_s = L_m + L_{s\sigma}$ 、 $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ ;  $L_{s\sigma}$ 、 $L_{r\sigma}$  为定、转子漏感;  $L_{md}$  为定、转子互感。

由 DFIG 转子磁链、电压方程及式(2), 可知

$$\begin{cases} U_{rM} = r_r I_{rM} + (L_r - L_m^2 / L_s) \frac{dI_{rM}}{dt} + \Delta U_{rM} \\ U_{rT} = r_r I_{rT} + (L_r - L_m^2 / L_s) \frac{dI_{rT}}{dt} + \Delta U_{rT} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $r_r$  为转子电阻;  $U_{rM}$ 、 $U_{rT}$  为转子电压向量的  $M$ 、 $T$  轴分量;  $\Delta U_{rM}$ 、 $\Delta U_{rT}$  表达式参见附录。

对补偿后转子电压控制量为

$$\begin{cases} U_{rM}^0 = U_{rM}^* - \Delta U_{rM} \\ U_{rT}^0 = U_{rT}^* - \Delta U_{rT} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $U_{rM}^*$ 、 $U_{rT}^*$  为转子电压参考值。

其与转子电流为一阶关系。

$$\begin{cases} U_{rM}^0 = r_r I_{rM} + (L_r - L_m^2 / L_s) \frac{dI_{rM}}{dt} \\ U_{rT}^0 = r_r I_{rT} + (L_r - L_m^2 / L_s) \frac{dI_{rT}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)知, 通过配置闭环系统零极点, 可实现有功与无功功率解耦控制。为突出风电机组对同步机的影响, 简化风电机组动态模型, 小干扰分析时认为 DFIG 功率动态为一阶惯性环节。

由式(2), 单位功率因数运行的 DFIG 风电机组  $i$ , 其总功率为

$$\begin{cases} P_{wi} = \omega_{wi} U_{wsi} I_{wsTi} \\ Q_{wi} = U_{wsi} I_{wsMi} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\omega_{wi}$  为风电机组  $i$  的转速。

DFIG 小干扰定子有功、无功动态过程可表示为一阶惯性环节。

$$\begin{cases} \dot{x}_{1i} = P_{refi} - P_{wsi} \\ \dot{x}_{2i} = Q_{refi} - Q_{wsi} \\ I_{wsTi} = K_{pi} x_{1i} \\ I_{wsMi} = K_{qi} x_{2i} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{wsi}$ 、 $Q_{wsi}$  为定子侧有功; 无功功率;  $x_{1i}$ 、 $x_{2i}$  为状态变量;  $K_{pi}$ 、 $K_{qi}$  为积分增益。

电网接口方程为

$$\begin{bmatrix} I_{wxi} \\ I_{wyi} \end{bmatrix} = \frac{1}{U_{wsi}^2} \begin{bmatrix} \omega_{wi} P_{wsi} U_{wxi} + Q_{wsi} U_{wyi} \\ \omega_{wi} P_{wsi} U_{wyi} - Q_{wsi} U_{wxi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(1)、式(6)~式(8), DFIG 线性化模型如式(9)所示。

式中:  $\mathbf{I}$  为单位阵;  $\Delta \omega_w = [\Delta \omega_{w1} \ \cdots \ \Delta \omega_{wn}]^T$ ;

$$U_{ws} = \text{diag}(U_{wx1}^2 + U_{wy1}^2, \cdots, U_{wxmw}^2 + U_{xym}^2);$$

$$\Delta U_{Wx} = [\Delta U_{wx1} \ \cdots \ \Delta U_{wxnw}]^T,$$

$$\Delta U_{Wy} = [\Delta U_{wy1} \ \cdots \ \Delta U_{wynw}]^T;$$

$$\Delta \mathbf{I}_{Wx} = [\Delta I_{wx1} \ \cdots \ \Delta I_{wxnw}]^T,$$

$$\Delta \mathbf{I}_{Wy} = [\Delta I_{wy1} \ \cdots \ \Delta I_{wynw}]^T;$$

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}(K_{p1}, \cdots, K_{pnw}), \quad \mathbf{K}_q = \text{diag}(K_{q1}, \cdots, K_{qnw});$$

$$\mathbf{I}_{sT} = \text{diag}(I_{sT1}, \cdots, I_{sTnw}), \quad \mathbf{I}_{sM} = \text{diag}(I_{sM1}, \cdots, I_{sMnw});$$

$$\mathbf{U}_{Wx} = \text{diag}(U_{wx1}, \cdots, U_{wxnw}), \quad \mathbf{U}_{Wy} = \text{diag}(U_{wy1}, \cdots, U_{wynw});$$

$$\mathbf{P}_w = \text{diag}(\omega_i P_{w1}, \cdots, \omega_i P_{wnw}), \quad \mathbf{Q}_w = \text{diag}(Q_{w1}, \cdots, Q_{wnw});$$

$$\Delta U_{wy} = [\Delta U_{wy1} \ \cdots \ \Delta U_{wynw}]^T; \quad \mathbf{K} \text{ 的表达式参见附录。}$$



$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_w \\ \Delta\dot{x}_1 \\ \Delta\dot{x}_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{0} & M_w^{-1}K_p U_{ws} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_p U_{ws} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & K_q U_{ws} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_w \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_w^{-1}K_p U_{ws} x_1 & M_w^{-1}K_p U_{wy} x_1 \\ K_p U_{ws} x_1 & K_p U_{wy} x_1 \\ K_q U_{ws} x_2 & K_q U_{wy} x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{wx} \\ \Delta U_{wy} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta I_{wx} \\ \Delta I_{wy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ws} U_{wx} / U_{ws}^2 & \omega_w U_{ws} U_{wx} K_p & U_{ws} U_{wy} K_q \\ P_{ws} U_{wy} / U_{ws}^2 & \omega_w U_{ws} U_{wy} K_p & -U_{ws} U_{wx} K_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_w \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} \Delta U_{wx} \\ \Delta U_{wy} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

## 1.2 FSIG 风电机组模型

忽略转子暂态过程, FSIG 电磁转矩为

$$T_e = -T_{\max} / (s/s_c + s_c/s) \quad (10)$$

式中:  $T_{\max} = U_s^2 / (x_{s\sigma} + x_{r\sigma})$ ;  $s_c = r_r / (x_{s\sigma} + x_{r\sigma})$ 。其中,  $U_s$  为定子电压;  $r_r$  为转子电阻;  $x_{s\sigma}$ 、 $x_{r\sigma}$  为定、转子漏抗。

采用一阶机械暂态模型, FSIG 线性化模型为

$$\begin{cases} \Delta\dot{\omega}_w = -M_w^{-1}A_w \Delta\omega_w - \begin{bmatrix} M_w^{-1}B_{w1} & M_w^{-1}B_{w2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{wx} \\ \Delta U_{wy} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta I_{wx} \\ \Delta I_{wy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_{w1} \\ C_{w1} \end{bmatrix} \Delta\omega_w + \begin{bmatrix} G_w & B_w \\ -B_w & G_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{wx} \\ \Delta U_{wy} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_w &= [\Delta\omega_{w1} \ \cdots \ \Delta\omega_{wn}]^T; \\ A_w &= \text{diag}(A_{w1}, \cdots, A_{wn}); \\ B_{w1} &= \text{diag}(B_{w11}, \cdots, B_{wn1}); \\ B_{w2} &= \text{diag}(B_{w21}, \cdots, B_{wn2}); \\ C_{w1} &= \text{diag}(C_{w11}, \cdots, C_{wn1}); \\ C_{w2} &= \text{diag}(C_{w21}, \cdots, C_{wn2}); \\ R_{w1} &= \text{diag}(r_{w1}, \cdots, r_{wn}), \quad X_{w1} = \text{diag}(x_{w1}, \cdots, x_{wn}). \end{aligned}$$

其中:  $A_{wi}$ ;  $B_{w1i}$ ;  $B_{w2i}$ ;  $C_{w1i}$ ;  $C_{w2i}$ ;  $G_{wi}$ ,  $B_{wi}$  表达式参见附录。

## 1.3 同步机组模型

内电势恒定的同步机线性化模型为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M_G^{-1}K_S & -M_G^{-1}K_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ M_G^{-1}B_{G1} & M_G^{-1}B_{G2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{Gx} \\ \Delta U_{Gy} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta I_{Gx} \\ \Delta I_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{G1} & \mathbf{0} \\ C_{G2} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} & B_G \\ -B_G & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{Gx} \\ \Delta U_{Gy} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $M_G$ ;  $K_D$ ;  $B_G$ ;  $K_S$ ;  $B_{G1}$ 、 $B_{G2}$ ;  $C_{G1}$ 、 $C_{G2}$  表达式参见附录。

## 1.4 电力网络模型

采用恒阻抗负荷, 仅保留同步机与风电机组并网节点, 收缩后系统线性化模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_w \\ \Delta \dot{I}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ww} & Y_{wg} \\ Y_{gw} & Y_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_w \\ \Delta \dot{U}_g \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $\Delta \dot{U}_w$ 、 $\Delta \dot{I}_w$  为风电机组端电压、电流向量增量;  $\Delta \dot{U}_g$ 、 $\Delta \dot{I}_g$  为同步机组端电压、电流向量增量;

$Y_{GG}$ 、 $Y_{WW}$  为同步机组集与风电机组集自导纳阵;  $Y_{WG}$ 、 $Y_{GW}$  为二者互导纳阵。

## 2 基于动态降阶的风电接入系统阻尼分析

### 2.1 奇异摄动系统的动态降阶

风电机组具有良好的小干扰稳定性, 分析中关注的是其对同步机主系统阻尼的影响。本节通过动态降阶<sup>[12]</sup>, 消去风电机组状态量, 仅保留同步机状态变量, 直接分析同步机主系统阻尼变化。

风电机组惯性小且控制迅速, 其动态比同步机快的多, 含风电接入系统为奇异摄动系统。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ \varepsilon \dot{y} = g(x, y) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $x \in R^n$ 、 $y \in R^m$  为同步机及风电机组状态量。快动态(风电)系统参数  $\varepsilon = \text{diag}(\varepsilon_1, \cdots, \varepsilon_m)$  为小参数对角阵。

若存在可微解  $h(x, \varepsilon)$ , 满足

$$\varepsilon \frac{\partial h(x, \varepsilon)}{\partial x} f(x, h(x, \varepsilon)) = g(x, h(x, \varepsilon)) \quad (15)$$

且对小参数  $\varepsilon$ ,  $y = h(x, \varepsilon)$ ,  $f(x, h(x, \varepsilon))$  在  $\varepsilon = 0$  处可展开为级数

$$\begin{cases} h(x, \varepsilon) = \sum_{i=0}^{\infty} h_i(x) \varepsilon^i \\ f(x, h(x, \varepsilon)) = \sum_{i=0}^{\infty} f_i(x, [h_0(x), \cdots, h_i(x)]) \varepsilon^i \end{cases} \quad (16)$$

式中:

$$\begin{aligned} h_i(x) &= h(x, \varepsilon)|_{\varepsilon=0}, \quad h_i(x) = (1/i!) \partial^i h(x, \varepsilon) / \partial \varepsilon^i |_{\varepsilon=0}; \\ f_i(x, [h_0(x), \cdots, h_i(x)]) &= (1/i!) \partial^i f(x, h(x, \varepsilon)) / \partial \varepsilon^i |_{\varepsilon=0}. \end{aligned}$$

由式(15)、式(16)有

$$\varepsilon \left( \sum_{i=0}^{\infty} \frac{h_i(x)}{\partial x} \varepsilon^i \right) \sum_{i=0}^{\infty} f_i(x, [h_0(x), \cdots, h_i(x)]) \varepsilon^i = \sum_{i=0}^{\infty} g_i(x, [h_0(x), \cdots, h_i(x)]) \varepsilon^i \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} g_i(x, [h_0(x), \cdots, h_i(x)]) \varepsilon^i$$

由  $\varepsilon$  对应项系数, 得到代数方程组

$$\begin{cases} g(x, h_0(x)) = 0 \\ \frac{\partial h_0(x)}{\partial x} f(x, h_0(x)) = g_1(x, h_0(x), h_1(x)) \\ \vdots \end{cases} \quad (18)$$

对奇异摄动系统, 依次求解代数方程组(18),

可得  $h(x, \varepsilon)$  的任意阶近似。

则奇异摄动系统(14)可降阶为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, h(x)) \quad (19) \\ \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega}_w \\ \Delta\dot{x}_1 \\ \Delta\dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -M_G^{-1}K'_S & -M_G^{-1}K_D & -M_G^{-1}K_{Dr1} & -M_G^{-1}K_pK_{Dr2} & -M_G^{-1}K_qK_{Dr3} \\ -M_W^{-1}K_pK_A & \mathbf{0} & -M_W^{-1}K_pK_{B1} & -M_W^{-1}K_pK_{B2} & -M_W^{-1}K_qK_{B3} \\ -K_pK_A & \mathbf{0} & -K_pK_{B1} & -K_pK_{B2} & -K_pK_qK_{B3} \\ -K_qK_A & \mathbf{0} & -K_qK_{B1} & -K_qK_qK_{B2} & -K_q^2K_{B3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta\omega_w \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad (20) \end{aligned}$$

## 2.2 DFIG 接入系统分析

由式(9)、式(12)及式(13), 消去  $\Delta U_G$ 、 $\Delta U_W$ 、 $\Delta I_G$ 、 $\Delta I_W$ , 含 DFIG 接入系统方程如式(20)所示。式中各参数表达式参见附录。

若选小参数阵为

$$\varepsilon = \text{diag}(\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3) = \text{diag}(K_p^{-1}M_w/M_{Gm} \quad K_p^{-1}/M_{Gm} \quad K_q^{-1}/M_{Gm}) \quad (21)$$

式中,  $M_{Gm} = \max(M_{G1}, \dots, M_{Gi})$ 。

式(20)中, 对 DFIG 机组子系统, 有

$$\varepsilon \begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_w \\ \Delta\dot{x}_1 \\ \Delta\dot{x}_2 \end{bmatrix} = -M_{Gm}^{-1} \begin{bmatrix} K_A\Delta\delta + K_{B1}\Delta\omega_w + K_pK_{B2}\Delta x_1 + K_qK_{B3}\Delta x_2 \\ K_A\Delta\delta + K_{B1}\Delta\omega_w + K_pK_{B2}\Delta x_1 + K_qK_{B3}\Delta x_2 \\ K_A\Delta\delta + K_{B1}\Delta\omega_w + K_pK_{B2}\Delta x_1 + K_qK_{B3}\Delta x_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$h(x)$  的一阶近似为

$$h(x) = \begin{bmatrix} \Delta\omega_w \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{\omega_w}^0(\Delta\delta, \Delta\omega) + \varepsilon_1 h_{\omega_w}^1(\Delta\delta, \Delta\omega) \\ h_{x_1}^0(\Delta\delta, \Delta\omega) + \varepsilon_2 h_{x_1}^1(\Delta\delta, \Delta\omega) \\ h_{x_2}^0(\Delta\delta, \Delta\omega) + \varepsilon_3 h_{x_2}^1(\Delta\delta, \Delta\omega) \end{bmatrix} \quad (23)$$

满足方程

$$\varepsilon \frac{\partial h}{\partial(\Delta\delta, \Delta\omega)} f(\Delta\delta, \Delta\omega, h) = g(\Delta\delta, \Delta\omega, h) \quad (24)$$

其中,  $\frac{\partial h}{\partial(\Delta\delta, \Delta\omega)}$ ,  $f(\Delta\delta, \Delta\omega, h)$ ,  $g(\Delta\delta, \Delta\omega, h)$  表达式参见附录。

对式(24), 求解方程组(18), 有

$$\begin{cases} h_{\omega_w}^0 = K_{\omega_w}^0 \Delta\delta, h_{\omega_w}^1 = M_{Gm} K_{\omega_w}^1 \Delta\omega \\ h_{x_1}^0 = K_{x_1}^0 K_p^{-1} \Delta\delta, h_{x_1}^1 = M_{Gm} K_{x_1}^1 K_p^{-1} \Delta\omega \\ h_{x_2}^0 = K_{x_2}^0 K_q^{-1} \Delta\delta, h_{x_2}^1 = M_{Gm} K_{x_2}^1 K_q^{-1} \Delta\omega \end{cases} \quad (25)$$

故, 降阶同步机主系统为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M_G^{-1}(K'_S - K_{S1}) & -M_G^{-1}(K_D - K_{D1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中:  $K_{D1} = (K_{Dr1}M_wK_{\omega_w}^1 + K_{Dr2}K_{x_1}^1)K_p^{-1} - K_{Dr3}K_{x_2}^1K_q^{-1}$ ;

$K_{S1} = K_{Dr1}K_{\omega_w}^0 + K_{Dr2}K_{x_1}^0 + K_{Dr3}K_{x_2}^0$ 。

式(26)表明, DFIG 对系统同步机阻尼影响与其控制时间常数及惯性时间常数均相关, 若控制增益  $K_p$ 、 $K_q$  很大, 则风电机组不影响同步机阻尼阵。上

述结论解释如下: 对大积分增益, DFIG 功率调节十分迅速, 可忽略调节动态, 近似认为动态过程中其功率恒定。此时, 其线性化模型为

$$\Delta U_w = Z_w \Delta I_w \quad (27)$$

式中:  $\Delta I_w = [\Delta I_{wx} \quad \Delta I_{wy}]^T$ ;  $\Delta U_w = [\Delta U_{wx} \quad \Delta U_{wy}]^T$ ;

$$Z_w = \begin{bmatrix} -Z_{wD1} & Z_{wD2} \\ Z_{wD2} & Z_{wD1} \end{bmatrix}。$$

其中:  $Z_{wD1} = -(U_{wy0}I_{wy0} - U_{wx0}I_{wx0})/I_{w0}^2 < 0$ ;  $Z_{wD2} = -(U_{wx0}I_{wy0} + U_{wy0}I_{wx0})/I_{w0}^2 < 0$ 。

由式(12)、式(13)及式(27), 有

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M_G^{-1}(K_S + K_{S1}) & -M_G^{-1}K_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中,  $K_{S1}$  表达式参见附录。

因  $M_G^{-1}K_D$  为一对角阵, 式(28)的迹为常数。系统全部特征值, 即总阻尼 (含非周期振荡模态) 守恒。

$$\sum_{i=1}^{n_s} \sigma_{ii} \equiv \sum_{i=1}^{n_s} D_i/M_i \quad (29)$$

式(29)表明, 采用恒功率控制, DFIG 电功率调节迅速, 其接入影响系统同步转矩阵而不影响阻尼阵。DFIG 接入不影响系统总阻尼, 仅影响总阻尼在各模态间的分配。DFIG 接入后, 由于总阻尼守恒, 随着部分模态阻尼增加, 其余模态阻尼将减小。

## 2.3 FSIG 接入系统分析

由式(11)~式(13), 含 FSIG 机组接入的电力系统动态方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\omega}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -M_G^{-1}K'_S & -M_G^{-1}K_D & -M_G^{-1}K_{Dr} \\ -M_W^{-1}K_A & \mathbf{0} & -M_W^{-1}K_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta\omega_w \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中, 各参数参见附录。

同上节分析, 得到降阶同步机主系统方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M_G^{-1}(K_S - K_{S1}) & -M_G^{-1}(K_D - K_{D2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix} \quad (31)$$

其中:  $K_{S1} = K_A/K_B$ ;  $K_{D2} = M_w K_A/K_B^2$ 。

式(31)表明, FSIG 对同步机主系统同步转矩阵及阻尼阵均产生影响。机组对系统阻尼影响与风电

机组惯性与接入系统方式均有关系，风电机组容量越大，对系统影响越显著。

### 3 大规模风电接入系统算例分析

本节通过风电机组接入 IEEE 3 机 9 节点系统考查不同类型风电机组对系统小干扰稳定性的影响。仿真系统如图 1 所示，系统运行方式参见附录。母线 8 经线路 L8-10 接入不同类型电源。G1 为平衡机。风电场采用等值风电场，单机参数参见附录。

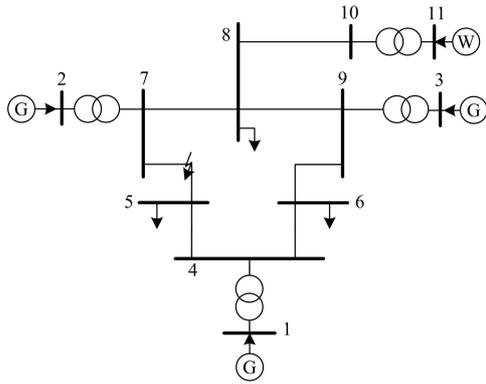


图 1 仿真系统结构

Fig. 1 Simulation system structure

不同电源接入后系统特征值如表 1 与表 2 所示。易知，原系统存在两个振荡模态，由相应特征向量知：模态 1 为 G2 相对 G3 的局部模态，模态 2 为 G1 相对 G2、G3 的区间模态，两个模态均有良好的阻尼。母线 11 接入同步机 G4 后，系统增加一个 G3 相对 G11 的局部振荡模态，原有各模态阻尼略有降低，而新增模态具有良好阻尼。

母线 11 接入 DFIG 后，原各模态频振荡率均降低，但幅度不大。模态 1 阻尼降低而模态 2 阻尼增加。同步机振荡模态与无风电接入时相同，而风电机组相应右特征向量幅值很小。主要原因是 DFIG 与系统为柔性连接，低频振荡模态与 DFIG 转速无关。

母线 11 接入 FSIG 后，系统原有各模态频振荡率与阻尼均有改善，且改善程度较 DFIG 显著。同步机振荡模态 1、2 与无风电接入时相同。

表 1 各模态振荡频率与阻尼

Table 1 Frequency and damping ratio of each mode

新增电源类型	模态	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比/%
无	1	-0.0747±13.4i	2.126	0.56
	2	-0.0348±8.76i	1.394	0.40
同步机	1	-0.0686±14.0i	2.228	0.49
	2	-0.0197±7.85i	1.261	0.25
	3	-0.0249±11.9i	1.892	0.21
DFIG	1	-0.074±13.34i	2.125	0.55
	2	-0.0413±8.570i	1.380	0.48
FSIG	1	-0.0748±13.34i	2.122	0.56
	2	-0.0631±8.593i	1.368	0.73

表 2 各模态特征向量

Table 2 Eigenvector of each mode

新增电源类型	模态	右特征向量			振荡模式
		机组	幅值	相位/deg	
无	1	G1	0.001 4	-89.2	G2 相对 G3
		G2	0.010	-89.4	
		G3	0.034	91.1	
	2	G1	0.007 2	89.0	G1 相对 G2, G3
		G2	0.019	-90.5	
		G3	0.011	-90.8	
同步机	1	G1	0.000 96	161.0	G2 相对 G3
		G2	0.002 4	163.4	
		G3	0.035	-19.0	
		G11	0.011	159.6	
	2	G1	0.008 3	-18.3	G1 相对 G2, G3, G11
		G2	0.012	161.8	
		G3	0.008 1	161.7	
		G11	0.012	162.2	
	3	G1	0.001 0	161.0	G3 相对 G11
		G2	0.002 4	163.4	
		G3	0.035	-19.0	
		G11	0.011	159.6	
DFIG	1	G1	0.001 4	-89.6	G2 与 G3
		G2	0.011	-89.8	
		G3	0.034	90.7	
		W4	0.000 054	127.6	
	2	G1	0.007 3	171.7	G1 相对 G2, G3
		G2	0.019	-7.8	
		G3	0.011	-7.4	
		W4	0.000 39	-137.8	
FSIG	1	G1	0.001 4	-35.0	G2 相对 G3
		G2	0.011	-35.2	
		G3	0.034	161.9	
		W4	0.000 08	161.9	
	2	G1	0.007	70.4	G1 相对 G2, G3
		G2	0.019	-108.5	
		G3	0.011	-107.9	
		W4	0.001 4	98.0	

不同类型电源接入后系统特征值如图 2 所示。由该图知，DFIG 通过定子磁场定向实现恒功率控制，其与系统为柔性连接，对系统各振荡模态频率及阻尼影响均不显著，接入后部分模态阻尼略有增加而其余模态阻尼降低。而采用经典同步机与一阶 FSIG 模型，系统交换功率仅由同步机功角及 FSIG 转速确定，FSIG 功率仅与同步机功角相关而与同步机转速无关。FSIG 为一随自身转速变化的可变电阻，故同步机电功率与风电机组转速相关，这正是式 (36) 的矩阵中各非零元意义所在。通过系统电气联系，FSIG 转速与同步机转速产生关联，从而对系统阻尼产生影响。FSIG 机组接入后，系统原有各振荡模态阻尼略有增加，幅度较 DFIG 机组显著，其中模态 2 阻尼有显著增加。

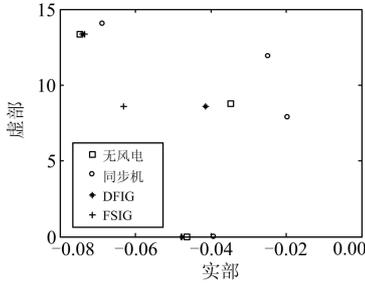
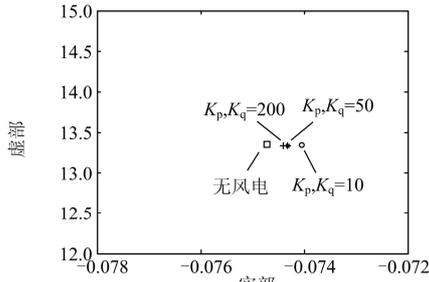
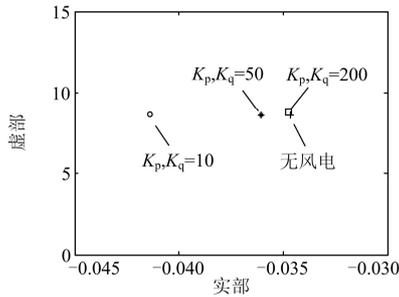


图 2 不同电源接入系统振荡模式

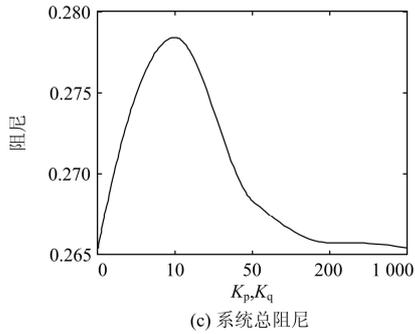
Fig. 2 Oscillation modes with different sources



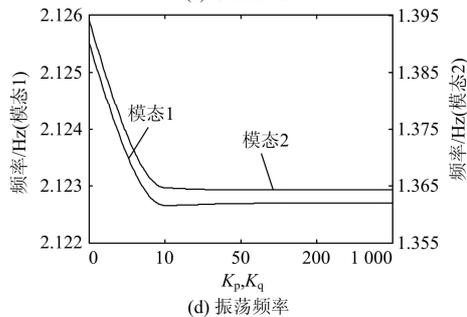
(a) 模式1特征值



(b) 模式2特征值



(c) 系统总阻尼



(d) 振荡频率

图 3 不同控制参数系统振荡模式

Fig. 3 Oscillation modes with different control parameters

DFIG 风电机组控制增益  $K_p$ 、 $K_q$  变化时, 系统特征值情况如图 3。由该图知, 随着  $K_p$ 、 $K_q$  增大, 系统各模式振荡频率变化较小。模式 1 阻尼先增大然后减小, 而模式 2 阻尼先减小后增大, 均随控制参数非线性变化。系统总阻尼亦呈现先增大后减小的趋势, 最终趋于风电机组接入前系统总阻尼值。

对经典同步机模型接入系统, 系统总阻尼 (含非周期振荡模式) 由同步机机械阻尼确定。使用恒功率控制, 若 DFIG 控制迅速, 小干扰条件下其等效于一阻抗, 该阻抗影响同步机主系统网络阻抗阵, DFIG 机组接入将影响系统振荡频率, 但不改变系统总阻尼, 仅影响阻尼在各模式间的分配。考虑到 DFIG 风电机组功率调节十分迅速, 其在影响系统振荡频率的同时, 对系统总阻尼影响不大。

## 4 结论

应用奇异摄动系统降阶技术, 揭示了 FSIG 与 DFIG 风电机组接入对同步机系统低频振荡模式影响的机理, 分析表明:

与同步发电机组相比, FSIG 风电机组能够改善系统小干扰稳定性, 且对系统小干扰稳定性改善效果较 DFIG 更为显著。

仅使用最大功率追踪控制的 DFIG 不能改善接入系统总阻尼, 仅影响系统总阻尼在各振荡模式间的分配。

## 附录

1 式(4)中  $\Delta U_{rM}$ ,  $\Delta U_{rT}$  表达式

$$\begin{cases} \Delta U_{rM} = -s'(L_r - L_m^2/L_s)I_{rT} \\ \Delta U_{rT} = s'L_m/L_s\psi_s + s'(L_{td} - L_m^2/L_s)I_{rM} \end{cases}$$

2 式(9)中  $K$  表达式

$$K = \frac{1}{U_w} \begin{bmatrix} \omega_w U_{wX} & U_{wY} \\ \omega_w U_{wY} & -U_{wX} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sT} U_{wX} & I_{sT} U_{wY} \\ I_{sM} U_{wX} & I_{sM} U_{wY} \end{bmatrix} + \frac{1}{U_w^2} \begin{bmatrix} P_w & Q_w \\ -Q_w & P_w \end{bmatrix} \left( I - \frac{2}{U_w^2} \begin{bmatrix} U_{wX}^2 & U_{wX} U_{wY} \\ U_{wX} U_{wY} & U_{wY}^2 \end{bmatrix} \right)$$

3 式(11)中各参数表达式

$$A_{wi} = \frac{2T_{\max i} (-1/s_{ci} + s_{ci}/s_i'^2)}{M_{wi} (s_i'/s_{ci} + s_{ci}/s_i'^2)^2} \Big|_{s_{i0}}$$

$$B_{w11i} = \frac{4T_{\max i} U_{xi}}{U_{si}^2 (s_i/s_{ci} + s_{ci}/s_i)} \Big|_{(s_{i0}, U_{si0})}$$

$$B_{W12i} = \frac{4T_{\max i} U_{yi}}{U_{si}^2 (s_i/s_{ci} + s_{ci}/s_i)} \Big|_{(s_{i0}, U_{i0})}$$

$$C_{W1i} = \frac{r_{si} ((r_{ri}/s_i + r_{si})^2 - (x_{r\sigma i} + x_{s\sigma i})^2)}{s_i^2 ((r_{ri}/s_i + r_{si})^2 + (x_{r\sigma i} + x_{s\sigma i})^2)} \Big|_{(s_{i0}, U_{i0})}$$

$$C_{W2i} = \frac{-2r_{si} (r_{ri}/s_i + r_{si})(x_{r\sigma i} + x_{s\sigma i})}{s_i^2 ((r_{ri}/s_i + r_{si})^2 + (x_{r\sigma i} + x_{s\sigma i})^2)} \Big|_{(s_{i0}, U_{i0})}$$

$$G_{Wi} = \frac{r_{ri}/s_i + r_{si}}{(r_{ri}/s_i + r_{si})^2 + (x_{r\sigma i} + x_{s\sigma i})^2} \Big|_{(s_{i0}, U_{i0})}$$

$$B_{Wi} = \frac{1}{x_{ni}} + \frac{x_{r\sigma i} + x_{s\sigma i}}{(r_{ri}/s_i + r_{si})^2 + (x_{r\sigma i} + x_{s\sigma i})^2} \Big|_{(s_{i0}, U_{i0})}$$

4 式(12)中参数表达式

$$M_G = \text{diag}(M_{G1}, \dots, M_{Gng}); \quad K_D = \text{diag}(D_1, \dots, D_{ng})$$

$$B_G = \text{diag}(1/x'_1, \dots, 1/x'_{ng})$$

$$K_S = \text{diag}(E'_{q1} B_{G1} U_1 \cos \delta_1, \dots, E'_{qng} B_{Gng} U_{ng} \cos \delta_{ng})$$

$$B_{G1} = \text{diag}(E'_{q1} B_{G1} \sin \delta_{i0} U_{x10}/U_1, \dots, E'_{qng} B_{Gng} \sin \delta_{ng0} U_{xng0}/U_{ng})$$

$$B_{G2} = \text{diag}(E'_{q1} B_{G1} \sin \delta_{i0} U_{y10}/U_1, \dots, E'_{qng} B_{Gng} \sin \delta_{ng0} U_{ynng0}/U_{ng})$$

$$C_{G1} = \text{diag}(B_{G1} E'_{q1} \cos \delta_{i0}, \dots, B_{Gng} E'_{qng} \cos \delta_{ng0})$$

$$C_{G2} = \text{diag}(B_{G1} E'_{q1} \sin \delta_{i0}, \dots, B_{Gng} E'_{qng} \sin \delta_{ng0})$$

式中:  $\Delta \delta = [\Delta \delta_1 \ \dots \ \Delta \delta_{ng}]^T$ ;  $\Delta \omega = [\Delta \omega_1 \ \dots \ \Delta \omega_{ng}]^T$ ;

$$\Delta I_{Gx} = [\Delta I_{Gx1} \ \dots \ \Delta I_{Gxng}]^T, \quad \Delta I_{Gy} = [\Delta I_{Gy1} \ \dots \ \Delta I_{Gyng}]^T;$$

$$\Delta U_{Gx} = [\Delta U_{Gx1} \ \dots \ \Delta U_{Gxng}]^T, \quad \Delta U_{Gy} = [\Delta U_{Gy1} \ \dots \ \Delta U_{Gyng}]^T。$$

其中:  $\Delta \delta_i$  为同步机功角增量;  $\Delta \omega_i$  为同步机转速增量;  $\delta_{i0}$  为同步机  $i$  与同步参考坐标系间角度差;  $\Delta I_{Gx}$ 、 $\Delta I_{Gy}$ 、 $\Delta U_{Gx}$ 、 $\Delta U_{Gy}$  为同步旋转坐标系  $x$ 、 $y$  轴电流、电压分量增量,  $E'_{qi}$  为内电势,  $B_{Gi}$  为发电机内导纳。

5 式(20)中各参数表达式

$$K'_S = K_S + (B_{G1} Y_{11} + B_{G2} Y_{21}) C_{G1} + (B_{G1} Y_{12} + B_{G2} Y_{22}) C_{G2}$$

$$K_{Dr1} = -(B_{G1} Y_{13} + B_{G2} Y_{23} + B_{G1} Y_{14} + B_{G2} Y_{24}) P_s U_x / U_{ws}^2$$

$$K_{Dr2} = -(B_{G1} Y_{13} + B_{G2} Y_{23} + B_{G1} Y_{14} + B_{G2} Y_{24}) \omega_w U_x U_{ws}$$

$$K_{Dr3} = -(B_{G1} Y_{13} + B_{G2} Y_{23} + B_{G1} Y_{14} + B_{G2} Y_{24}) U_y U_{ws}$$

$$K_A = (U_x x_1 Y_{31} + U_y x_1 Y_{41}) C_{G1} + (U_x x_1 Y_{32} + U_y x_1 Y_{42}) C_{G2}$$

$$K_{B1} = -(U_x x_1 Y_{33} + U_y x_1 Y_{43} + U_x x_1 Y_{34} + U_y x_1 Y_{44}) P_s U_x / U_{ws}^2$$

$$K_{B2} = -(U_x x_1 Y_{33} + U_y x_1 Y_{43} + U_x x_1 Y_{34} + U_y x_1 Y_{44}) \omega_w P + D U_{ws} U_x$$

$$K_{B3} = -(U_x x_1 Y_{33} + U_y x_1 Y_{43} + U_x x_1 Y_{34} + U_y x_1 Y_{44}) P + I_s U_{ws} U_y$$

式中:  $n_g \times n_g$  维矩阵  $Y_{11}$ ,  $Y_{21}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{22}$ ;  $n_w \times n_w$  维矩阵  $Y_{33}$ ,  $Y_{34}$ ,  $Y_{43}$ ,  $Y_{44}$  是  $Y_S^{-1}$  的分块。

$$Y_S^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

$$Y_S = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{GG} & -B_{GG} \\ B_{GG} & G_{GG} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{GW} & -B_{GW} \\ B_{GW} & G_{GW} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{WG} & -B_{WG} \\ B_{WG} & G_{WG} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{WW} & -B_{WW} \\ B_{WW} & G_{WW} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -Y_G \\ Y_G & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

其中,  $K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}$  为矩阵  $K$  的分块。

6 式(24)中表达式

$$\frac{\partial h}{\partial (\Delta \delta, \Delta \omega)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{\omega_w}^0}{\partial \Delta \delta} + \varepsilon_1 \frac{\partial h_{\omega_w}^1}{\partial \Delta \delta} & \frac{\partial h_{\omega_w}^0}{\partial \Delta \omega} + \varepsilon_1 \frac{\partial h_{\omega_w}^1}{\partial \Delta \omega} \\ \frac{\partial h_{x_1}^0}{\partial \Delta \delta} + \varepsilon_2 \frac{\partial h_{x_1}^1}{\partial \Delta \delta} & \frac{\partial h_{x_1}^0}{\partial \Delta \omega} + \varepsilon_2 \frac{\partial h_{x_1}^1}{\partial \Delta \omega} \\ \frac{\partial h_{x_2}^0}{\partial \Delta \delta} + \varepsilon_3 \frac{\partial h_{x_2}^1}{\partial \Delta \delta} & \frac{\partial h_{x_2}^0}{\partial \Delta \omega} + \varepsilon_3 \frac{\partial h_{x_2}^1}{\partial \Delta \omega} \end{bmatrix}$$

$$f(\Delta \delta, \Delta \omega, h) = \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ -M_G^{-1} (K_S \Delta \delta + K_D \Delta \omega + K_{Dr1} (h_{\omega_w}^0 + \varepsilon_1 h_{\omega_w}^1) + K_p K_{Dr2} (h_{x_1}^0 + \varepsilon_2 h_{x_1}^1) + K_q K_{Dr3} (h_{x_2}^0 + \varepsilon_3 h_{x_2}^1)) \end{bmatrix}$$

$$g(\Delta \delta, \Delta \omega, h) = -M_{Gm}^{-1} \begin{bmatrix} K_{A1} \Delta \delta + K_{B1} \Delta \omega + K_p K_{B2} \Delta x_1 + K_q K_{B3} \Delta x_2 \\ K_{A2} \Delta \delta + K_{B1} \Delta \omega + K_p K_{B2} \Delta x_1 + K_q K_{B3} \Delta x_2 \\ K_{A3} \Delta \delta + K_{B1} \Delta \omega + K_p K_{B2} \Delta x_1 + K_q K_{B3} \Delta x_2 \end{bmatrix}$$

7 式(28)中  $K_{S1}$  表达式

$$K_{S1} = ((B_{G2} B'_{GG} - B_{G1} G'_{GG} + B_{G1} B_G) C_{G1} - (B_{G2} G'_{GG} + B_{G1} B_g + B_{G1} B'_G) C_{G2}) (G_{GG}^2 + B_{GG}^2 + 2G'_{GG} B'_G + B_g^2)^{-1}$$

8 式(30)中各参数表达式

$$K'_S = K_S + (B_{G1} Y_{11} + B_{G2} Y_{21}) C_{G1} + (B_{G1} Y_{12} + B_{G2} Y_{22}) C_{G2}$$

$$K_A = (B_{W1} Y_{31} + B_{W2} Y_{41}) C_{G1} + (B_{W1} Y_{32} + B_{W2} Y_{42}) C_{G2}$$

$$K_{Dr} = -(B_{W1} Y_{33} + B_{W2} Y_{43}) C_{W1} - (B_{W1} Y_{34} + B_{W2} Y_{44}) C_{W2}$$

$$K_B = -(B_{G1} Y_{13} + B_{G2} Y_{23}) C_{W1} - (B_{G1} Y_{14} + B_{G2} Y_{24}) C_{W2} + M_W^{-1} A_w$$

式中:  $n_g \times n_g$  维矩阵  $Y_{11}$ ,  $Y_{21}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{22}$ ;  $n_w \times n_w$  维矩阵  $Y_{33}$ ,  $Y_{34}$ ,  $Y_{43}$ ,  $Y_{44}$  是  $Y_S^{-1}$  的分块。

$$Y_S^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

其中,

$$Y_S = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{GG} & -B_{GG} \\ B_{GG} & G_{GG} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{GW} & -B_{GW} \\ B_{GW} & G_{GW} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{WG} & -B_{WG} \\ B_{WG} & G_{WG} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{WW} & -B_{WW} \\ B_{WW} & G_{WW} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -Y_G \\ Y_G & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_w & -B_w \\ B_w & G_w \end{bmatrix} \end{bmatrix}。$$

9 仿真系统方式(1 p.u.=100 MVA)

功率	G1	G2	G3	W4	PL5	PL6	PL8
$P$	0.33	1.63	0.85	0.4	-2.3	-1.5	-1.0
$Q$	0.32	0.15	0	0	-0.5	-0.3	-0.35

## 10 DFIG 仿真风电场机组参数

设计数据	额定风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	切断风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	空气密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	额定转速/rpm
		13.5	25	1.225
DFIG	额定功率/MW	额定电压/kV	$J_g/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$r_r/\text{p.u.}$
	2.0	0.69	80	0.01
	$x_r/\text{p.u.}$	$x_s/\text{p.u.}$	$x_m/\text{p.u.}$	转速范围/rpm
	0.08	0.1	3.0	650~1 350
风力机	风轮半径/m	转速范围/rpm	$J_w/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	
	42	9~16	$1\times 10^4$	
传动轴及桨距角调节	$K_s/(\text{Nm}\cdot\text{rad}^{-1})$	齿轮箱速比	$\tau_p/\text{s}$	变桨范围/deg
	$8.1\times 10^7$	77.44	0.1	0~18

## 11 FSIG 仿真风电场机组参数

设计数据	额定风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	切断风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	空气密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	额定转速 /rpm
		12	20	1.225
发电机	额定功率/MW	额定电压/kV	$J_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$r_r/\text{p.u.}$
	1.0	0.69	50	0.01
	$x_r/\text{p.u.}$	$x_s/\text{p.u.}$	$x_m/\text{p.u.}$	
	0.05	0.08	2.0	
风力机	风轮半径/m	转速范围/rpm	$J_w/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	
	30.31	20	$0.7\times 10^4$	
传动轴	$K_s/(\text{Nm}\cdot\text{rad}^{-1})$	齿轮箱速比		
	$9.1\times 10^7$	76		

## 参考文献

- [1] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风电场对电力系统阻尼影响的转矩分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 152-157.  
HAO Zheng-hang, YU Yi-xin. Torque analysis for the influence of DFIG-based wind farm on damping of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 152-157.
- [2] 钱少锋, 林俐, 沈辉, 等. 基于 PSS/E Wind 大型风电场并入输电网的动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 11-16.  
QIAN Shao-feng, LIN Li, SHEN Hui, et al. Dynamic characteristic analysis of transmission grid including large wind farm by PSS/E wind package[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 11-16.
- [3] 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.  
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.
- [4] ANAYA-LARA O, HUGHES F M, JENKINS N, et al. Influence of wind farms on power system dynamic and transient stability[J]. Wind Engineering, 2009, 30(2): 107-127.
- [5] 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 Hong-guang, ZHANG Li-zi, CHEN Shu-yong, 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.
- [6] 王忱, 石立宝, 姚良忠, 等. 大规模双馈型风电场的小扰动稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 63-70.  
WANG Chen, SHI Li-bao, YAO Liang-zhong, et al. Small signal stability analysis of the large scale wind farm with DFIGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 63-70.
- [7] 关宏亮, 迟永宁, 戴慧珠, 等. 异步风电机组接入系统的小干扰稳定及控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 54-58.  
GUAN Hong-liang, CHI Yong-ning, DAI Hui-zhu, et al. Small signal stability and control of wind turbine with asynchronous generator intergration into power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 54-58.
- [8] FERNANDEZ R D, BATTAIOTTO P E, MANTZ R J. Impact of wind farms voltage regulation on the stability of the network frequency[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(13): 3543-3548.
- [9] 张子泳, 胡志坚, 李勇汇, 等. 大型双馈风力发电系统小信号动态建模及附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 127-133.  
ZHANG Zi-yong, HU Zhi-jian, LI Yong-hui, et al. Small signal dynamic modelling and additional damping controller designing for large wind generation system based on DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 127-133.
- [10] 范高锋, 迟永宁, 赵海翔, 等. 用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报, 2007, 22(11): 158-162.  
FAN Gao-feng, CHI Yong-ning, ZHAO Hai-xiang, et al. Transient voltage stability enhancement of wind farm using STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(11): 158-162.
- [11] 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): 162-170.  
WANG Yi, ZHANG Xiang-yu, LI He-ming, et al. Damping control of PMSG base wind turbines for power system oscillations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 162-170.
- [12] 徐光虎. 交直流输电系统低频振荡相关问题分析及阻尼控制策略[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.  
XU Guang-hu. Special issues of low frequency oscillation and damping control strategies study for AC/DC power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005.

收稿日期: 2013-12-06; 修回日期: 2014-04-25

作者简介:

舒进 (1983-), 男, 工学博士, 工程师, 主要从事风力发电相关研究工作。E-mail: shujin@tpri.com.cn