

风电系统中异步电机机电模式研究

李生虎, 刘正楷, 杨振林

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 随着风电容量的增加, 异步电机对同步电网动态特性的影响更加明显。提出在五阶异步电机模型中, 计及定子电压相角变化引起的定子频率变化。将振荡模式对状态变量的参与因子按同步和异步电机类型分类, 修改机电回路相关比定义以判别异步电机机电振荡模式。采用 Prony 算法, 提取异步电机振荡曲线的特征参数。静态稳定和时域仿真得到的机电振荡模式, 都证明了异步发电机比同步发电机更容易导致非失步振荡过程。

关键词: 异步发电机; 机电模式; 机电回路相关比; Prony 分析

Electromechanical modes of induction generators in wind power systems

LI Sheng-hu, LIU Zheng-kai, YANG Zhen-lin

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: With more wind power integrated, the induction generators will have more remarkable effect on the synchronous system dynamics. The stator frequency variation due to the change of the stator voltage angle is included into the 5th order model for the induction generators. The participation factors of the oscillation modes to the state variables are classified by the facilities, and the electromechanical loop participation ratio is modified to determine the electromechanical oscillation mode of the induction generator. The Prony algorithm is applied to extract the characteristic parameters of the oscillation curve of the induction generators. The electromechanical modes from both the steady-state stability and the time-domain analysis validate that the induction generators are more vulnerable to lead to the non-out-of-step electromechanical oscillations comparing with the synchronous generators.

Key words: induction generator; electromechanical mode; electromechanical loop participation ratio; Prony analysis

中图分类号: TM732; TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0006-06

0 引言

风电系统中机电能量转换的基础是异步电机。研究人员早就认识到异步电动机模型和参数对电力系统机电模式(低频振荡模式)的影响^[1]。由于异步电动机多连接配网末端, 台数、容量、阻抗参数、载荷率和输电路径都很难确定, 往往只能通过负荷建模和参数辨识大致估计。当异步电机运行于发电方式, 数学模型没有本质区别, 但是设备参数已知^[2], 无需进行参数估计, 输入功率也可由风速确定, 从而有可能准确研究其机电振荡特性。

现有相关研究中存在的问题有:

(1) 当小容量风机连接大电网, 定子电压和频

率近似认为不变, 可采用转子电流(暂态电势)和转子转速(转差率)的三阶模型^[3]。当风机容量较大时, 计及定子暂态采用五阶模型^[4]。但是现有五阶模型一般忽略定子电压相角和定子角速度(频率)变化, 取后者等于同步角速度。

(2) 传统机电(低频振荡)模式判据包括振荡频率(0.1~2.5 Hz)和机电回路相关比(>1)^[5-6], 后者基于同步电机定义, 不能判别异步电机机电振荡模式。

针对上述问题, 本文主要工作如下:

(1) 将定子功角和角速度引入异步风机动态模型, 验证了动态过程中定子频率变化及其对机电模式的影响。

(2) 对静稳分析得到的参与因子, 提出按设备类型进行归类, 建立异步机组机电模式判据。

(3) 采用Prony算法, 量化时域仿真得到的异

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划(NCET-08-0765);
国家自然科学基金项目(50707006)

步电机振荡曲线的特征参数。

1 考虑机电振荡时异步电机建模

考虑定子暂态, 式(1)给出异步电机五阶模型, 其中: 下标 dq 表示直轴和交轴分量; V_s 是定子电压; I_s 和 I_r 是定、转子电流; R_s 和 L_{ss} 是定子电阻和电感; R_r 和 L_{rr} 是转子电阻和电感; L_m 是激磁电感; ω_w 和 ω_r 是定子和转子角速度; T_{ew} 和 T_{mw} 是电磁转矩和机械转矩; H_w 是惯性时间常数。第一二行反映定子暂态, 只有当风场容量较小、类似单机无穷大系统时, 才可忽略定子暂态, 认为定子磁链可以突变。三四行反映转子暂态, 常用暂态电势 E'_d 、 E'_q 表示。第五行反映转子运动方程。

$$\begin{cases} L_{ss} p I_{sq} + L_m p I_{rq} = V_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_w (I_{ss} I_{sd} + L_m I_{rd}) \\ L_{ss} p I_{sd} + L_m p I_{rd} = V_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_w (I_{ss} I_{sq} + L_m I_{rq}) \\ L_m p I_{sq} + L_{rr} p I_{rq} = -R_r I_{rq} - (\omega_w - \omega_r) (I_m I_{sd} + L_{rr} I_{rd}) \\ L_m p I_{sd} + L_{rr} p I_{rd} = -R_r I_{rd} + (\omega_w - \omega_r) (I_m I_{sq} + L_{rr} I_{rq}) \\ 2H_w \frac{d\omega_r}{dt} = T_{ew} - T_{mw} \end{cases} \quad (1)$$

现有五阶模型一般假设同步系统有足够惯性, 认为 ω_w 等于同步角速度 ω_s 。此假设仅适合小风场、大系统情况。对于大容量风场, 由定子电压角度 θ_v (式(2)), 按 d 轴电压定向定义风机功角 δ_w (式(3)), 建立机网接口函数式(4) (图1)。

$$\theta_v = \int_{t_0}^t (\omega_w - \omega_s) dt \quad (2)$$

$$\delta_w = \pi/2 + \theta_v \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

由 δ_w 计算 ω_w (标么值), 后者随定子电压相角变化:

$$\omega_w = 1 + \frac{d\delta_w}{dt} \quad (5)$$

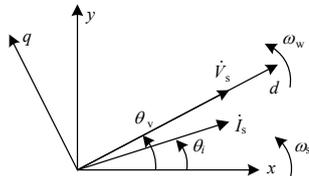


图1 异步电机功角和定子角速度

Fig.1 Power angle and stator frequency of induction machines

2 异步电机机电模式判别

风电系统作为线性时不变系统, 可用一组微分代数方程描述。在给定运行点将其线性化, 忽略增

量符号 Δ , 状态方程 $\dot{x} = Ax + Bu$ 的解为:

$$x(t) = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau \quad (6)$$

计算 A 矩阵的左右特征向量矩阵 Ψ 和 Φ 。取零输入响应, 状态变量第 k 个分量 $x_k(t)$ 如式(7), 其中参与因子 p_{ki} 反映了 $t=0_+$ 时刻, 第 i 模式对 $x_k(t)$ 的贡献。

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^n [\Phi_{ki} \Psi_{ik} e^{\lambda_i t}] = \sum_{i=1}^n [p_{ki} e^{\lambda_i t}] \quad (7)$$

传统定义机电回路相关比 ρ_i 定义如式(8), 其中 δ 和 ω 为同步机组功角和角速度, 机电模式判据为振荡频率在 0.1~2.5 Hz 之间且 $\rho_i \gg 1$ 。该判据仅适合同步机组, 不能识别由异步电机引起的振荡模式。

$$\rho_i = \left| \frac{\sum_{x_k \in (\Delta\delta, \Delta\omega)} p_{ki}}{\sum_{x_k \in (\Delta\delta, \Delta\omega)} p_{ki}} \right| \quad (8)$$

本文提出将状态变量按同步机组、励磁系统、调速系统、异步电机等设备类型, 分类为 x_{sg} 、 x_{ex} 、 x_{gov} 和 x_{ig} 式(9)。同步发电机采用五阶模型, x_{sg} 包括暂态电势 E'_d 、次暂态电势 E''_d 和 E''_q 、 δ 和 ω 。异步电机 x_{ig} 包括 I_{sd} 、 I_{sq} 、 I_{rd} 、 I_{rq} 和 ω_r 。

$$x = \{x_{sg}, x_{ex}, x_{gov}, x_{ig}\} \quad (9)$$

对参数因子归类, 得到模式 i 对不同设备的贡献因子 β_{sg_i} 、 β_{ex_i} 、 β_{gov_i} 、 β_{ig_i} , 以确定哪种设备更容易引发低频振荡:

$$\beta_{sg_i} = \left| \sum_{x_k \in x_{sg}} p_{ki} \right| \quad (10)$$

$$\beta_{ex_i} = \left| \sum_{x_k \in x_{ex}} p_{ki} \right| \quad (11)$$

$$\beta_{gov_i} = \left| \sum_{x_k \in x_{gov}} p_{ki} \right| \quad (12)$$

$$\beta_{ig_i} = \left| \sum_{x_k \in x_{ig}} p_{ki} \right| \quad (13)$$

类似定义 ρ_{ig_i} 以确定异步电机机电模式 (式(14))。当振荡频率在 0.1~2.5 Hz 之间且 $\rho_{ig_i} \gg 1$, 认为是异步电机机电模式。类似可以定义由励磁系统引起的低频振荡模式。

$$\rho_{ig_i} = \left| \frac{\sum_{x_k \in x_{ig}} p_{ki}}{\sum_{x_k \in \{x_{ex}, x_{gov}, x_{sg}\}} p_{ki}} \right| \quad (14)$$

特征值分析给出了小扰动后瞬间状态变量的初值和可能的振荡模式，当系统静态失稳时，根据贡献因子可确定导致失稳模式的关键设备。但是由于扰动未知，很难判断哪个振荡模式将被激发。另外在大扰动后（故障、切机等），网络结构、状态变量维数都将发生变化，静稳结果误差较大，需要进行大扰动后的时域仿真。

3 异步电机机电模式特征参数

除了异步电机状态方程和接口函数，风电系统时域仿真算法与同步系统没有本质区别。本程序实现时采用隐式梯形积分将微分方程差分化，与代数方程联立求解。差分方程中包括三角函数、电磁功率等非线性项，采用牛顿法迭代计算。

时域仿真得到的振荡波形，一般为变周期衰减（发散）形式，需要量化其幅值、衰减系数和振荡周期等特征参数。傅立叶级数基于周期波形，因此不适用。Prony方法用指数函数拟合等间距样本，可以计算振荡参数，预测未来振荡波形。

对线性时不变系统 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ ，等距离时间点采样信号 $y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$ ，得到 N 个观测数据 $y(k), k=0, \dots, N-1$ 。构建时域预测信号 $\hat{y}(t)$ 式 (15)，其中振幅 A_i 、初相角 φ_i 、衰减因子 σ_i 、频率 f_i ， p 为拟合指数函数个数，且 $N \geq 2p$ 。

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^p A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (15)$$

将 $\hat{y}(t)$ 写成相量形式如式 (16)，其中 B_i 称模式 i 的留数，其定义与参与因子定义类似。

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^p A_i e^{\varphi_i} e^{(\sigma_i + i2\pi f_i)t} = \sum_{i=1}^p B_i e^{\lambda_i t} \quad (16)$$

离散化得 $\hat{y}(k)$ 式 (17)，得振荡特征参数式 (18)。

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^p B_i e^{\lambda_i k \Delta t} = \sum_{i=1}^p B_i (e^{\lambda_i \Delta t})^k = \sum_{i=1}^p B_i z_i^k \quad (17)$$

$$A_i = |B_i|, \quad \varphi_i = \angle B_i, \quad \sigma_i = \frac{\text{Re}(\ln z_i)}{\Delta t}, \quad f_i = \left| \frac{\text{Im}(\ln z_i)}{2\pi \Delta t} \right| \quad (18)$$

Prony 算法的关键在于求解 B_i 和 z_i 。现有求解方法大都类似于文献[7]，以下将其用于计算异步电机机电模式的特征参数。将式 (17) 展开如式 (19) 并简记为 $\mathbf{ZB} = \hat{\mathbf{Y}}$ 。

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \cdots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_p^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^p & z_2^p & \cdots & z_p^p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}(0) \\ \hat{y}(1) \\ \vdots \\ \hat{y}(p) \\ \vdots \\ \hat{y}(N-1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

构建线性预测模型式 (20)，定义行向量 $\bar{\mathbf{A}}$ 如式 (21)，则 $\bar{\mathbf{A}}\mathbf{Z} = \mathbf{0}$ ， $\bar{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{Y}} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{ZB} = \mathbf{0}$ 。

$$a_1 z^{p-1} + a_2 z^{p-2} + \cdots + a_{p-1} z^1 + a_p z^0 = z^p \quad (20)$$

$$\bar{\mathbf{A}} = [-a_p, -a_{p-1}, \dots, -a_1, 1, 0, \dots, 0] \quad (21)$$

依次在预测模型两边同乘 z ，写成矩阵形式如式 (22)，求解可得 a_1, \dots, a_p 。代入式 (20) 解出 z_1, \dots, z_p 。代入式 (19) 可解出 B_1, \dots, B_p ，最终得到拟合信号，比较与实测信号的误差，定义信噪比 SNR 以确定拟合效果。

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(p-1) & \hat{y}(p-2) & \cdots & \hat{y}(0) \\ \hat{y}(p) & \hat{y}(p-1) & \cdots & \hat{y}(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{y}(N-2) & \hat{y}(N-3) & \cdots & \hat{y}(N-p-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}(p) \\ \hat{y}(p+1) \\ \vdots \\ \hat{y}(N-1) \end{bmatrix} \quad (22)$$

由于 $N \geq 2p$ ，式 (19) 和式 (22) 为超定方程组。对于一般形式 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ ，采用最小二乘法求解如式 (23)，其中 \mathbf{A}^H 为 \mathbf{A} 的共轭转置， $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ 为方阵。

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{b} \quad (23)$$

4 算例分析

作者采用 Matlab 语言，独立编程实现上述所有算法。算例采用 IEEE RTS 系统^[8]，在节点 6、3、19 分别通过两级降压变压器，连接三个风电场。异步风机参数取自文献[9]，同一风场内风机等值为一台。静态稳定分析中，整个系统状态变量共有 144 个，删除参考机组对应功角后，剩余状态变量 143 个。时域仿真保留网络结构，变量总数为 236 个。

4.1 异步电机机电模式

表 1 和表 2 分别给出了同步机组和异步机组的机电模式，两者并不重叠，说明按传统方式定义机电模式，将遗漏异步电机的机电振荡特性。更多数据分析表明，异步机组机电回路相关比 ρ_{igi} 要么很小，要么很大。其振荡模式一旦被激发，振荡效果要比同步机组明显。

表 1 同步机组机电模式

Tab.1 Electromechanical modes of synchronous generators

模式 i	$\lambda_i / \text{p.u.}$	f_{di} / Hz	$\beta_{sgj} / \text{p.u.}$	$\beta_{exi} / \text{p.u.}$	$\beta_{govi} / \text{p.u.}$	$\beta_{igi} / \text{p.u.}$	$\rho_i / \text{p.u.}$	$\rho_{igi} / \text{p.u.}$
31/32	$-2.5706 \pm 15.3597i$	2.444 6	0.991 9	0.004 2	0.024 6	0.000 0	48.666 6	0.000 0
33/34	$-1.9103 \pm 14.7193i$	2.342 6	0.987 6	0.002 1	0.026 7	0.000 0	36.708 0	0.000 0
35/36	$-2.0146 \pm 14.1967i$	2.259 5	0.984 7	0.002 8	0.025 0	0.000 0	36.553 2	0.000 0
37/38	$-3.0034 \pm 13.7607i$	2.190 1	0.986 5	0.001 3	0.030 9	0.000 0	30.925 7	0.000 0
41/42	$-0.7144 \pm 12.3051i$	1.958 4	0.944 9	0.002 8	0.065 6	0.000 0	13.871 9	0.000 0
45/46	$-0.9751 \pm 11.6848i$	1.859 7	0.968 4	0.000 5	0.035 8	0.000 0	26.694 1	0.000 0
48/49	$-0.9876 \pm 10.9211i$	1.738 1	0.965 3	0.002 2	0.045 1	0.000 1	22.286 0	0.000 1
51/52	$-1.2913 \pm 10.0599i$	1.601 1	0.983 1	0.006 3	0.020 4	0.000 1	55.654 6	0.000 1
53/54	$-0.5107 \pm 8.7189i$	1.387 7	0.952 2	0.002 2	0.046 5	0.000 3	19.868 8	0.000 3
55/56	$-2.0676 \pm 6.7597i$	1.075 8	0.994 8	0.000 2	0.006 8	0.000 0	148.671 6	0.000 0
82/83	$-4.7839 \pm 0.7028i$	0.111 9	0.547 1	0.356 8	0.105 3	0.001 6	1.202 4	0.001 6
96/97	$-0.5394 \pm 1.4577i$	0.232 0	0.512 5	0.515 3	0.024 8	0.036 2	1.050 0	0.035 8
98/99	$-0.8301 \pm 1.1480i$	0.182 7	0.740 8	0.390 8	0.021 7	0.009 4	1.925 7	0.009 3
100/101	$-0.5074 \pm 1.1685i$	0.186 0	0.530 8	0.492 7	0.001 2	0.001 7	1.076 1	0.001 7
108/109	$-0.5902 \pm 0.6587i$	0.104 8	0.533 3	0.467 8	0.009 1	0.013 6	1.137 4	0.013 5

表 2 异步机组机电模式

Tab.2 Electromechanical modes of induction generators

模式 i	$\lambda_i / \text{p.u.}$	f_{di} / Hz	$\beta_{sgj} / \text{p.u.}$	$\beta_{exi} / \text{p.u.}$	$\beta_{govi} / \text{p.u.}$	$\beta_{igi} / \text{p.u.}$	$\rho_i / \text{p.u.}$	$\rho_{igi} / \text{p.u.}$
102/103	$-0.0746 \pm 1.1203i$	0.178 3	0.005 5	0.006 6	0.002 7	1.008 4	0.005 5	102.755 6
104/105	$-0.0513 \pm 1.1098i$	0.176 6	0.001 0	0.001 0	0.000 3	0.999 6	0.001 0	552.209 7
106/107	$-0.0435 \pm 1.0927i$	0.173 9	0.005 6	0.005 5	0.000 9	1.010 1	0.005 6	92.770 7
112/113	$-0.0606 \pm 0.7574i$	0.120 5	0.001 3	0.001 0	0.000 9	0.998 4	0.001 3	588.348 0
114/115	$-0.0688 \pm 0.7410i$	0.117 9	0.000 8	0.000 7	0.001 1	0.998 4	0.000 8	590.289 1
118/119	$-0.0683 \pm 0.7086i$	0.112 8	0.001 7	0.000 5	0.000 9	0.998 8	0.001 7	455.717 4

为验证异步电机振荡模式，增加风机台数直至系统静态失稳。此时被激发的失稳模式 102/103 为 $0.002796 \pm 1.362055i$ ，相应振荡频率 0.216 8 Hz，振荡周期 4.61 s， $\rho_i = 0.0211 \text{ p.u.}$ ， $\rho_{igi} = 26.1080 \text{ p.u.}$ 。图 2 给出失稳模式对同步机组状态变量的参与因子，其坐标数量级为 10^{-3} p.u. 。表 3 给出失稳模式对异步机组状态变量的参与因子。对比可见，失稳模式与异步电机的关系更加密切。

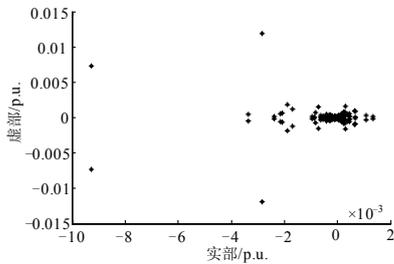


图 2 失稳变量对同步机组状态变量的参与因子

Fig.2 Participation factors of unstable modes to state variables of synchronous generators

表 3 失稳模式对异步电机状态变量的参与因子

Tab.3 Participation factors of unstable modes to state variables of induction generators

状态变量	参与因子 /p.u.	状态变量	参与因子 /p.u.
129	$0.0624 \pm 0.0079i$	137	$-5.7403 \pm 0.4709i$
130	$0.2860 \pm 0.1798i$	138	$-0.1436 \pm 0.0008i$
131	$6.2130 \pm 0.4651i$	139	$-0.5642 \pm 0.4714i$
132	$0.1486 \pm 0.0004i$	140	$-13.6417 \pm 1.8408i$
133	$0.5862 \pm 0.4858i$	141	$0.0002 \pm 0.0002i$
134	$14.1256 \pm 1.8057i$	142	$0.0011 \pm 0.0006i$
135	$-0.0578 \pm 0.0075i$	143	$0.0158 \pm 0.0273i$
136	$-0.2648 \pm 0.1650i$		

4.2 异步电机振荡特征参数

故障模式设为线路 4-9 距首端 90%处，在 0.1 s 发生三相短路，0.25 s 切除。积分步长取 0.01 s。图 3 和图 4 给出同步机组功角和频率振荡曲线。相同故障下，若风场没有并网，图 5 和图 6 给出了同步机组振荡曲线。

比较振荡幅度和持续时间可见，异步电机的存在加剧了同步系统振荡过程，验证了 4.1 节静态稳定分析结果。另外图 3 中发电机几乎同步摇摆，说明异步电机机电模式不直接导致同步机组的失步。

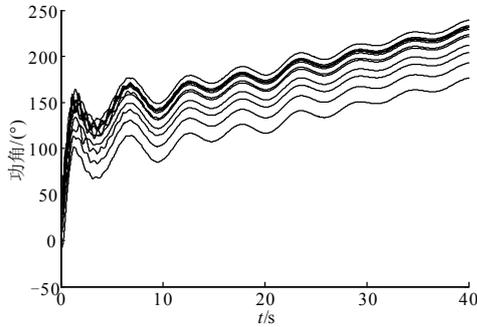


图 3 同步机组功角

Fig.3 Power angle of synchronous generators

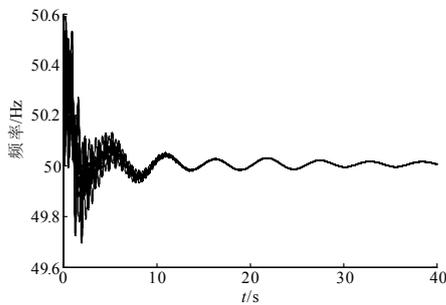


图 4 同步机组频率

Fig.4 Frequency of synchronous generators

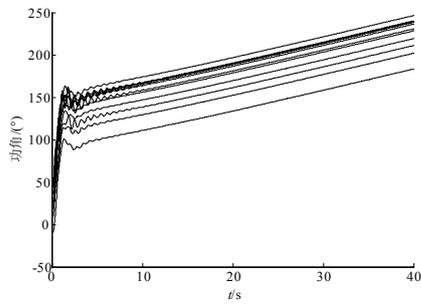


图 5 无风场时同步机组功角

Fig.5 Power angle of synchronous generators without wind farms

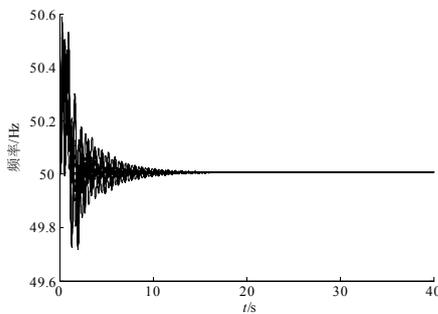


图 6 无风场时同步机组频率

Fig.6 Frequency of synchronous generators without wind farms

图 7~图 9 给出异步电机定子频率、转子频率和转差率。故障冲击后第一个周期，定子频率幅值接近 50.1 Hz。由此证实大容量等值异步电机建模时，确实不宜取定子频率为同步频率，否则将夸大系统同步惯性，分析结果偏于乐观。

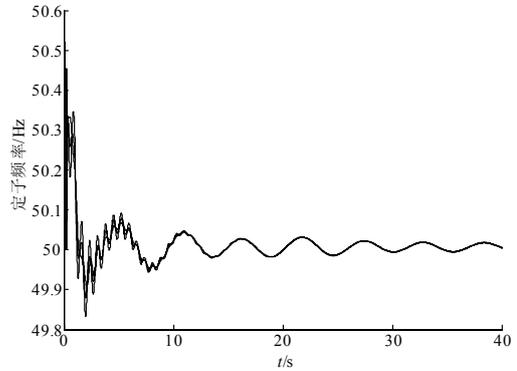


图 7 异步机组定子频率

Fig.7 Stator frequency of induction generators

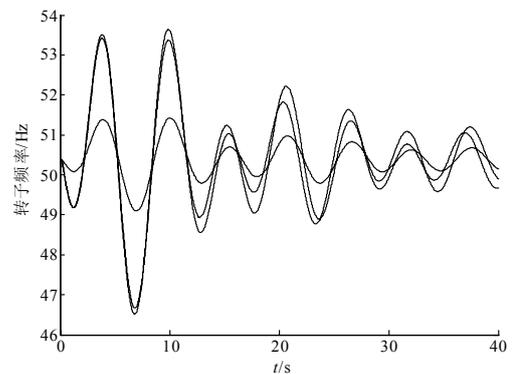


图 8 异步机组转子频率

Fig.8 Rotor frequency of induction generators

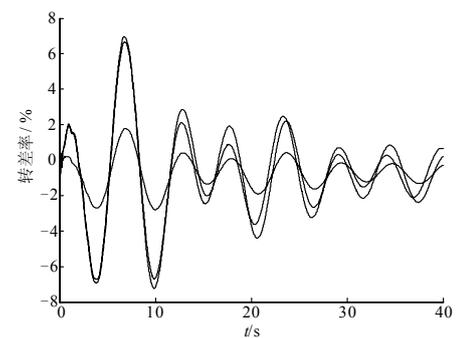


图 9 异步机组转差率

Fig.9 Slip of induction generators

分析第 1 台等值风机转差率振荡曲线的特征参数。取采样步长 0.1 s, $p=20$ 。图 10 给出了 a_i 参数，均为实数。表 4 给出了各个正弦波形的参数 z_i 和 B_i ，表 5 给出了异步电机机电模式的幅值、初相角、衰减系数和振荡频率。

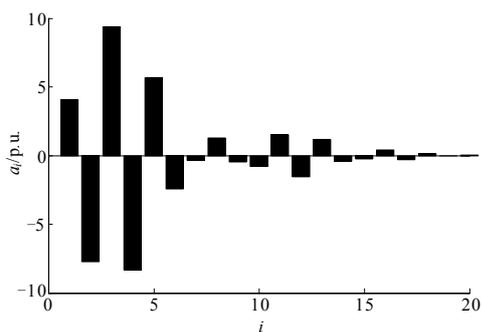


图 10 Prony 分析得到的 a_i 参数

Fig.10 Parameters a_i from Prony analysis

表 4 Prony 分析得到的 z_i 参数

Tab.4 Parameters z_i from Prony analysis

i	z_i	i	z_i
1/2	$-0.750\ 844 \pm 0.321\ 314\ i$	12/13	$0.057\ 293 \pm 0.573\ 333\ i$
3	$-0.678\ 278 \pm 0.000\ 000\ i$	14/15	$0.988\ 052 \pm 0.116\ 803\ i$
4/5	$-0.366\ 703 \pm 0.779\ 293\ i$	16/17	$0.987\ 711 \pm 0.082\ 764\ i$
6/7	$-0.164\ 869 \pm 0.876\ 838\ i$	18/19	$0.519\ 662 \pm 0.167\ 203\ i$
8/9	$0.442\ 486 \pm 0.840\ 015\ i$	20	$0.107\ 600 \pm 0.000\ 000\ i$
10/11	$0.621\ 706 \pm 0.739\ 004\ i$		

表 5 #1 风机转差率的特征参数

Tab.5 Characteristic parameters of the slip of No.1 wind farm

i	幅值	角度 / (°)	衰减系数	频率 / Hz
1/2	0.026 428	$\pm 40.178\ 696$	-0.020 248	0.043 564
3	0.104 269	-0.000 000	-0.038 820	0.050 000
4/5	0.029 402	$\pm 96.794\ 286$	-0.014 936	0.032 000
6/7	0.008 025	$\pm 65.047\ 572$	-0.011 406	0.027 958
8/9	0.014 965	$\pm 164.472\ 526$	-0.005 189	0.017 284
10/11	0.169 036	$\pm 23.611\ 461$	-0.003 487	0.013 869
12/13	0.221 535	$\pm 65.369\ 679$	-0.055 132	0.023 415
14/15	2.930 437	$\pm 107.122\ 292$	-0.000 508	0.001 873
16/17	3.242 464	$\pm 58.792\ 111$	-0.000 887	0.001 331
18/19	1.511 869	$\pm 76.592\ 120$	-0.060 532	0.004 954
20	1.785 596	180.000 000	-0.222 934	0.000 000

根据振荡特征参数, 图 11 给出#1 电机转差率拟合曲线, 其信噪比 $SNR=26.329\ 5$ 。前两个振荡周期内拟合效果较好, 随后误差较大。

按相同步骤, 拟合第 2 台风电机转差率 (图 12), 信噪比 $SNR=42.922\ 8$, 拟合效果比第 1 台精确。

由 Prony 分析结果可见, 振荡曲线为多个初值、衰减系数、频率都不同的三角函数的叠加。因此除非主振荡模式非常明显且衰减较慢, 否则用单一振荡模式描述异步电机机电模式, 将引起一定误差。

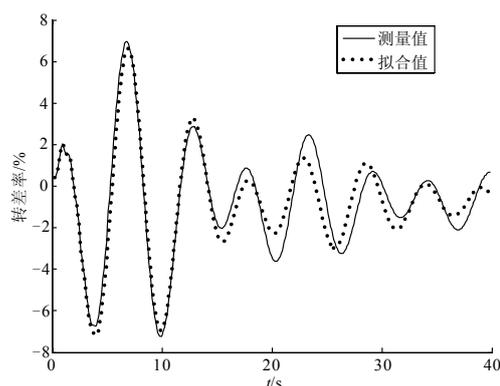


图 11 #1 风场转差率的拟合曲线

Fig.11 Curve fitting of slip in No. 1 wind farm

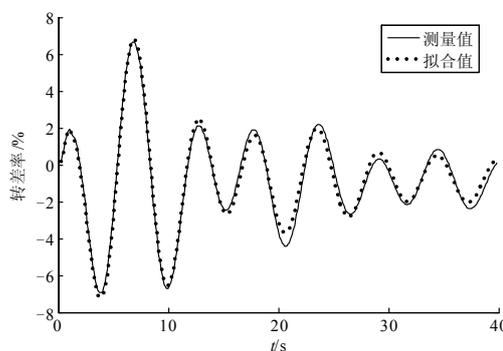


图 12 #2 风场转差率的拟合曲线

Fig.12 Curve fitting of slip in No.2 wind farm

5 结论

(1) 当电网承受大扰动时, 证实大容量异步风机的定子频率不是同步频率, 机网接口方程中需要考虑定子电压相角的变化。

(2) 传统低频振荡模式定义中的机电回路相关比只适合同步机组。本文将参与因子按设备类型分类, 提出异步电机机电模式判据, 证实风电系统振荡模式与异步电机关系相关性更强。

(3) 采用 Prony 分析, 求解异步电机振荡特征参数, 证实异步电机振荡特性可用多个三角函数之和予以拟合。

参考文献

- [1] KLEIN M, ROGERS G J, KUNDUR P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (3) : 914-921.
- [2] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (1) : 110-115.

(下转第 18 页 continued on page 18)

- 风力发电量预测[J]. 电网技术, 2009, 33 (17): 44-48.
- YANG Qi, ZHANG Jian-hua, WANG Xiang-feng. Wind speed and generated wind power forecast based on wavelet-neural network[J]. Power System Technology, 2009, 33 (17): 44-48.
- [11] LIU De-jun, LI Hui. Short-term wind speed and output power forecasting based on WT and LSSVM[C]. //International Conference on Information Engineering and Computer Science. Wuhan (China): 2009: 1-4.
- [12] WANG Xiao-lan, LI Hui. One-month ahead prediction of wind speed and output power based on EMD and LSSVM[C]. // International Conference on Energy and Environment Technology. Guilin (China): 2009: 439-442.
- [13] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 288-296.
- [14] 郑涛, 刘万顺, 肖仕武, 等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 18-24.
- ZHENG Tao, LIU Wan-shun, XIAO Shi-wu, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7): 18-24.
- [15] 吴青华, 张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (7): 45-49.
- WU Qing-hua, ZHANG Dong-jiang. Morphological filtering techniques and applications in protection relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (7): 45-49.
- [16] Pitas I. Morphological signal decomposition[C]. //International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Albuquerque, NM: 1990: 2169-2172.
- [17] JI Tian-yao, LU Zhen, WU Q H. Multi-resolution morphological operators for electrocardiogram signal analysis[C]. // Proceedings of the 26th Chinese Control Conference. Zhangjiajie (China): 2007: 425-429.
- [18] ZHANG Li-jun, XU Jin-wu, YANG Jian-hong, et al. Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 22 (3): 597-610.
- [19] Bangham J A, Chardaire P, Pye C J. Multiscale nonlinear decomposition: the sieve decomposition theorem[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18 (5): 529-539.
- [20] Klaus-Robert Muller, Sebastian Mika, Gunnar Ratsch. An introduction to Kernel-based learning algorithms[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2001, 12 (2): 181-201.
- [21] 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机-理论、算法与拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 124-133.
-
- 收稿日期: 2010-04-20**
- 作者简介:**
- 陈盼(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为风电场风速及风电功率预测研究; E-mail: panpan06101985@yahoo.com.cn
- 陈皓勇(1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统优化规划与优化调度、人工智能在电力系统中的应用、电力市场等;
- 叶荣(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为含大型风电场的电力系统调度。
-
- (上接第 11 页 continued from page 11)
- [3] WU F, ZHANG X P, GODFREY K, et al. Small signal stability analysis and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator[J]. IEE Proc Generation Transmission & Distribution, 2007, 1 (5): 751-760.
- [4] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, JENKINS N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67 (3): 207-215.
- [5] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] ZHOU E Z, MALIK O P, HOPE G S. A reduced-order iterative method for swing mode computation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (3): 1224-1230.
- [7] HAUER J F, DEMEURE C J, SCHARF L L. Initial results in Prony analysis of power system response signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5 (1): 80-89.
- [8] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98 (6): 2047-2054.
- [9] 雷亚洲, Gordon L. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25 (12): 27-32.
- LEI Ya-zhou, Gordon L. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2005, 25 (12): 27-32.
-
- 收稿日期: 2010-06-03**
- 作者简介:**
- 李生虎(1974-), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究领域为电力系统分析与控制; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn
- 刘正楷(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电系统稳定性和等值算法;
- 杨振林(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电系统潮流计算和风速预测。