

基于三质量块模型的失速型风机小信号建模和模态分析

姜宇成¹, 解 大¹, 冯俊淇², 王西田¹, 杨敏霞¹

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 华东电力设计院, 上海 200331)

摘要: 风电场大规模接入电网可能增加区域电网低频振荡和风电机组轴系扭振的风险, 研究风机建模及扭振特性是保证电力系统安全稳定的重要课题。以失速型风电机组为例, 建立基于三质量块轴系模型的单机对无穷大母线系统小信号模型, 并采用模态分析法探讨系统电气参数对失速型风电机组轴系扭振特性的影响。为方便不同机型及多机风电机组的扭振特性的拓展研究, 系统各部分模型相对独立。在单机对无穷大母线系统模型的基础上建立简化失速型风电场多机小扰动仿真模型, 研究风电场扭振模态的变化, MATLAB 仿真验证了该模型用于风电机组轴系扭振问题研究的有效性和准确性。

关键词: 风电; 失速型风机; 三质量块模型; 小信号模型; 模态分析; 轴系扭振; 模型

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.019

0 引言

截至 2013 年底, 全球风电机组累计装机容量超过 318 GW, 预计到 2050 年, 风电有望占全球电力供应的 25%~30%^[1]。随着大规模风电场接入电网, 风电场与电网的相互作用不容忽视, 由于风能具有明显的随机性、波动性、间歇性等特点, 电网中发生低频振荡和风电机组轴系扭振的风险也大幅增加^[2]。其中, 风电机组机网扭振会造成风机寿命损耗、甚至直接损坏^[3-4], 是制约电力系统稳定安全运行的重要因素, 深入研究风电场扭振特性具有重要的现实意义。

建立风机与电网统一模型是风电机组机网扭振作用研究的基础。文献[5]指出定速风机轴系振荡将会引起电网功率波动和电压闪变等, 并强调轴系模型对系统稳定的重要影响。国内外对于轴系模型建立也有大量研究。文献[6]采用集中单质量块模型描述风机机械传动部分, 忽略了轴系刚度和阻尼系数, 模型简单, 但不适用于风机轴系扭振的研究, 一般典型的风电机组轴系均采用两质量块模型或三质量块模型^[7-8]来分析风力系统的暂态稳定特性。对于风机仿真研究, 文献[9-10]建立风电机组的小信号模型, 文献[4, 11]基于质量块模型在 PSCAD/EMTDC 中建立失速型风电机组和定桨恒频风电机组的时域仿真模型, 而文献[12-13]采用模态分析法研究风电机组的轴系扭振问题。

为全面分析风电场接入系统的扭振特性, 本文轴系建模采用三质量块模型。由于齿轮箱分别与低速轴和高速轴相连, 两边齿轮转速不同, 与文献[8, 14]三质量块模型不同, 本文将齿轮箱的转动惯量分别折算到低速轴和高速轴, 从而得到对应的三质量块

包括风轮叶片、低速轴和高速轴。在轴系模型基础上, 本文进而建立了失速型风电机组机网统一模型, 包括三质量块模型、感应发电机模型、并联补偿电容模型和输电线路模型, 采用模态分析法, 改变电气参数, 研究失速型风电机组机网扭振模态的变化特性, 并将该方法推广到风电场的扭振传递研究中。

1 并网风电机组数学模型

建立失速型风电机组单机对无穷大系统的拓扑如图 1 所示。风机通过输电线路连接电压和频率恒定的无穷大母线, 输电线路包含变压器和电缆。由于失速型风机没有励磁回路, 需从电网吸收无功, 因此并联补偿电容对于提高电网功率因数必不可少。如图 1 所示, 失速型风电机组单机对无穷大母线系统包括 4 个模块: 三质量块模型、感应发电机模型、并联补偿电容模型和输电线路模型。

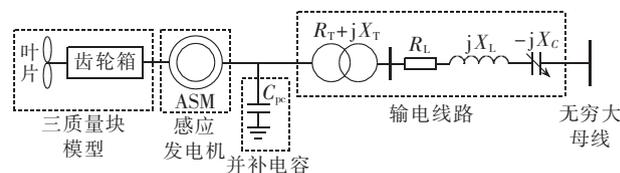


图 1 失速型风电机组单机对无穷大母线系统的结构图
Fig.1 Structure of infinite bus system with single stall wind turbine

1.1 三质量块模型

对于失速型风力机, 风力发电机组的机械传动系统由五部分组成: 叶片、低速传动轴、齿轮箱、高速传动轴和发电机转子。文献[7, 15]提出可采用若干个等效质量块来描述机械传动系统的轴系参数, 且随着自由度和质量块数目的增加, 旋转轴系参数的精度也越高。文献[16]指出不同精度的质量块模型适用于不同的应用场合, 其中两质量块模型可用于电力系统暂态稳定分析。

收稿日期: 2014-05-12; 修回日期: 2015-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277119)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277119)

图 2 为失速型风机等效轴系三质量块模型。与一般模型等效不同,本文考虑到齿轮箱的两边转速不同,将其转动惯量分别折算到低速传动轴和高速传动轴。另外,将高速传动轴和发电机转子等效为一个质量块,从而得到三质量块模型包括风轮叶片、低速传动轴和高速传动轴三部分。



图 2 失速型风机轴系模型

Fig.2 Drive shaft model of stall wind turbine

图 2 所示模型中, T_w 为风力转矩, T_e 为发电机电磁转矩, M 、 D 、 K 分别为质量块的转动惯量、阻尼系数和刚度系数, n 为齿轮箱变比。多质量块等效模型的动力学方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\theta}_1 = \Delta \omega_1 \\ \Delta \dot{\theta}_2 = \Delta \omega_2 \\ \Delta \dot{\theta}_3 = \Delta \omega_3 \\ M_1 \Delta \dot{\omega}_1 = \Delta T_w - D_1 \Delta \omega_1 - D_{12}(\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) - K_{12}(\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) \\ M_2 \Delta \dot{\omega}_2 = -D_2 \Delta \omega_2 - D_{12}(\Delta \omega_2 - \Delta \omega_1) - D_{23}(\Delta \omega_2 - \Delta \omega_3) - K_{12}(\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2) - K_{23}(\Delta \theta_2 - \Delta \theta_3) \\ M_3 \Delta \dot{\omega}_3 = \Delta T_e - D_3 \Delta \omega_3 - D_{23}(\Delta \omega_3 - \Delta \omega_2) - K_{23}(\Delta \theta_3 - \Delta \theta_2) \end{cases} \quad (1)$$

其中,下标 1、2、3 分别表示质量块 1、2、3 标号; θ 和 ω 分别为质量块的机械旋转角和机械旋转角速度。

根据式(1)可建立标准状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{X}_M = A_M X_M + B_M u_M \\ Y_M = C_M X_M + D_M u_M \end{cases} \quad (2)$$

$$X_M = [\Delta \theta_1 \quad \Delta \theta_2 \quad \Delta \theta_3 \quad \Delta \omega_1 \quad \Delta \omega_2 \quad \Delta \omega_3]^T$$

$$Y_M = [\Delta \theta_3 \quad \Delta \omega_3]^T, \quad u_M = [\Delta T_w \quad \Delta T_e]^T$$

$$A_M =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-K_{12}}{M_1} & \frac{K_{12}}{M_1} & 0 & \frac{-(D_{12}+D_2)}{M_1} & \frac{D_{12}}{M_1} & 0 \\ \frac{K_{12}}{M_2} & \frac{-(K_{12}+K_{23})}{M_2} & \frac{K_{23}}{M_2} & \frac{D_{12}}{M_2} & \frac{-(D_{12}+D_2+D_{23})}{M_2} & \frac{D_{23}}{M_2} \\ 0 & \frac{K_{23}}{M_3} & \frac{-K_{23}}{M_3} & 0 & \frac{D_{23}}{M_3} & \frac{-(D_{23}+D_3)}{M_3} \end{bmatrix}$$

$$B_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_3} & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_M = 0$$

其中,下标 M 表示三质量块模型。

1.2 感应发电机

异步电机采用两相同步旋转 dq 坐标系上的数

学模型^[17],列写标准状态空间如式(3)所示:

$$\begin{cases} \dot{X}_G = A_G X_G + B_G u_G \\ Y_G = C_G X_G + D_G u_G \end{cases} \quad (3)$$

$$X_G = [\Delta \psi_{qs} \quad \Delta \psi_{ds} \quad \Delta \psi_{qr} \quad \Delta \psi_{dr}]^T$$

$$Y_G = [\Delta i_{qs} \quad \Delta i_{ds} \quad \Delta T_e]^T$$

$$u_G = [\Delta u_{qs} \quad \Delta u_{ds} \quad \Delta u_{qr} \quad \Delta u_{dr} \quad \Delta \omega_r]^T$$

$$A_G =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-\omega_b R_s X_{rr}}{X_{eq}} & -\omega_s \omega_b & \frac{\omega_b R_s X_m}{X_{eq}} & 0 \\ \omega_s \omega_b & \frac{\omega_b R_s X_{rr}}{X_{eq}} & 0 & \frac{\omega_b R_s X_m}{X_{eq}} \\ \frac{\omega_b R_r X_m}{X_{eq}} & 0 & \frac{-\omega_b R_r X_{ss}}{X_{eq}} & -s_0 \omega_s \omega_b \\ 0 & \frac{\omega_b R_r X_m}{X_{eq}} & s_0 \omega_s \omega_b & \frac{-\omega_b R_r X_{ss}}{X_{eq}} \end{bmatrix}$$

$$B_G = \begin{bmatrix} \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_b & 0 & \omega_s \omega_b \psi_{dr0} \\ 0 & 0 & 0 & \omega_b & -\omega_s \omega_b \psi_{qr0} \end{bmatrix}$$

$$C_G = \begin{bmatrix} \frac{X_{rr}}{X_{eq}} & 0 & \frac{-X_m}{X_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{X_{rr}}{X_{eq}} & 0 & \frac{-X_m}{X_{eq}} \\ \frac{X_m}{X_{eq}} \psi_{dr0} & \frac{-X_m}{X_{eq}} \psi_{qr0} & \frac{-X_m}{X_{eq}} \psi_{ds0} & \frac{X_m}{X_{eq}} \psi_{qs0} \end{bmatrix}$$

$$D_G = 0$$

其中,下标 G 表示感应电机模型; $X_{eq} = X_s X_r + (X_s + X_r) \times X_m$, $X_{ss} = X_s + X_m$, $X_{rr} = X_r + X_m$, X_s 、 X_r 、 X_m 分别为定子、转子和励磁绕组电抗; Δu_{ds} 、 Δu_{qs} 、 Δu_{dr} 、 Δu_{qr} 分别为定子、转子电压 d 轴、 q 轴分量的微增量; Δi_{ds} 、 Δi_{qs} 、 Δi_{dr} 、 Δi_{qr} 分别为定子、转子电流 d 轴、 q 轴分量的微增量; $\Delta \psi_{ds}$ 、 $\Delta \psi_{qs}$ 、 $\Delta \psi_{dr}$ 、 $\Delta \psi_{qr}$ 分别为定子、转子磁链 d 轴、 q 轴分量的微增量; R_s 、 R_r 分别为定子、转子内阻; ω_b 为系统基准角速度; ω_s 为同步角速度; s 为转差率; T_e 为感应发电机电磁转矩;下标“0”的变量表示系统稳态运行点的参数值。

1.3 并补电容

建立并补电容标准状态空间方程如式(4)所示:

$$\begin{cases} \dot{X}_C = A_C X_C + B_C u_C \\ Y_C = C_C X_C + D_C u_C \end{cases} \quad (4)$$

$$X_C = Y_C = [\Delta u_{Cx} \quad \Delta u_{Cy}]^T, \quad u_C = [\Delta i_{Cx} \quad \Delta i_{Cy}]^T$$

$$A_C = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b \\ -\omega_b & 0 \end{bmatrix}, \quad B_C = \begin{bmatrix} -\omega_b x_C & 0 \\ 0 & -\omega_b x_C \end{bmatrix}$$

$$C_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_C = 0$$

其中,下标 C 表示并补电容; Δu_{Cx} 、 Δu_{Cy} 分别为电容两端电压 x 、 y 轴分量的微增量; Δi_{Cx} 、 Δi_{Cy} 分别为流过电容的电流 x 、 y 轴分量的微增量; x_C 为电容阻抗值。

1.4 输电线路

由于变压器、无穷大母线均可等效为 RL 模型, 输电线路模型可同时包括变压器、无穷大母线等 RL 模型, 考虑超高压输电线路一般含有串补电容, 因此需要等效为 RLC 模型。

建立标准状态空间方程如式(5)所示:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_{RLC} = \mathbf{A}_{RLC} \mathbf{X}_{RLC} + \mathbf{B}_{RLC} \mathbf{u}_{RLC} \\ \mathbf{Y}_{RLC} = \mathbf{C}_{RLC} \mathbf{X}_{RLC} + \mathbf{D}_{RLC} \mathbf{u}_{RLC} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{X}_{RLC} = [\Delta i_{lx} \quad \Delta i_{ly} \quad \Delta u_{lCx} \quad \Delta u_{lCy}]^T, \quad \mathbf{Y}_{RLC} = [\Delta i_{lx} \quad \Delta i_{ly}]^T$$

$$\mathbf{u}_{RLC} = [\Delta u_{lx1} \quad \Delta u_{ly1} \quad \Delta u_{lx2} \quad \Delta u_{ly2}]^T$$

$$\mathbf{A}_{RLC} = \begin{bmatrix} -\omega_b r/x_1 & \omega_b & -\omega_b/x_1 & 0 \\ -\omega_b & -\omega_b r/x_1 & 0 & -\omega_b/x_1 \\ -\omega_b/x_1 & 0 & 0 & \omega_b \\ 0 & -\omega_b/x_1 & -\omega_b & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{RLC} = \begin{bmatrix} \omega_b/x_1 & 0 & -\omega_b/x_1 & 0 \\ 0 & \omega_b/x_1 & 0 & -\omega_b/x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{RLC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{RLC} = 0 (2 \times 4 \text{ 维})$$

其中, 下标 RLC 表示含串补输电线路; Δu_{lCx} 、 Δu_{lCy} 分别为串补电容两端电压 x 、 y 轴分量的微增量; Δu_{lx} 、 Δu_{ly} 分别为线路两端电压 x 、 y 轴分量的微增量; Δi_{lx} 、 Δi_{ly} 分别为流过线路的电流 x 、 y 轴分量的微增量; r 为线路电阻值; x_1 为线路电抗值。

2 失速型风电机组小干扰稳定分析

2.1 单机对无穷大系统小信号模型

根据式(2)~(5)数学推导, 得到三质量块、感应发电机、并补电容、输电线路各模块间输入输出参数关系, 建立统一机网模型状态空间方程如式(6)所示:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_M \quad \mathbf{X}_G \quad \mathbf{X}_C \quad \mathbf{X}_{RLC}]^T$ 。

通过模型等效接口转换, 在 MATLAB/Simulink 中搭建失速型风电机组单机对无穷大系统机网统一模型如图 3 所示。

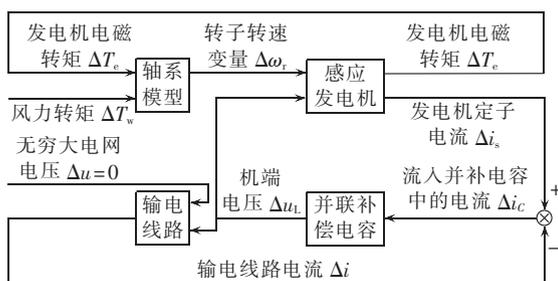


图 3 风机小信号模型

Fig.3 Small-signal model of wind turbine

2.2 模态分析

为研究风电场轴系扭振特性, 本文在 MATLAB/Simulink 中建立 2 MW 失速型风电机组单机对无穷大母线系统模型, 机端电压 690 V, 经 0.69 kV/10 kV 变压器升压至 10 kV 连接至无穷大电源。模型参数见表 1、表 2, 表 2 中电阻、电抗均为标么值。

表 1 三质量块模型参数

Table 1 Parameters of three-mass shaft model

参数	有名值	标么值
M_1	$6.41 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	4.50
M_2	$8.79 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	0.12
M_3	$121.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	0.75
K_{12}	$1.455 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$	0.65
K_{23}	$9.22 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2$	3.62
n	93.75	—

表 2 感应电机和输电线路参数

Table 2 Parameters of induction machine and transmission line

元件	参数	数值
感应电机	n_p	2.0000
	X_m	3.9507
	X_s	0.0924
	X_r	0.0990
	R_s	0.0046
	R_r	0.0055
	X_T	0.0440
输电线路	R_T	0.0070
	X_L	8.4020
	R_L	0.8402
	X_B	0.0600
	R_B	0
	X_{pc}	2.0000

编程计算式(6)系统状态矩阵特征值, 表征系统振荡模态, 如表 3 所示, 其中特征值虚部表征模态振荡频率, 特征值实部表征系统小干扰稳定特性。从表 3 可知, 系统有 7 个振动模态, 特征值实部均为负, 系统小干扰稳定。

表 3 系统特征根分析

Table 3 Analysis of system eigenvalues

序号	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比
1	$-7.350 \pm j1348.096$	214.556	0.0054
2	$-10.189 \pm j720.127$	114.612	0.0142
3	$-15.415 \pm j508.783$	80.975	0.0303
4	$-15.257 \pm j119.413$	19.005	0.1267
5	$-0.144 \pm j78.070$	12.425	0.0018
6	$-1.041 \pm j10.816$	1.721	0.0958
7	$-1.014 \pm j3.112$	0.495	0.3097

各振荡模态的相关因子分析见表 4, 其中粗体数据表示相应的状态变量在该振荡模态中起主导作用。

由表 3 和表 4 可知, 振荡模态 1、2 的振荡频率分别为 214.556 Hz 和 114.612 Hz, 其中定子磁链和机端并补电容对其起主导作用, 说明该振荡模态主要由感应电机定子电抗以及机端并补电容的电气谐振引

表 4 各振荡模态相关因子
Table 4 Participation factors for different oscillation modes

状态变量	相关因子						
	模态 1	模态 2	模态 3	模态 4	模态 5	模态 6	模态 7
$\Delta\theta_1$	0	0	0	0	0.0002	0.085 80	0.355 1
$\Delta\theta_2$	0	0	0	0	0.445 3	0.041 89	0.004 4
$\Delta\theta_3$	0	0	0	0	0.054 6	0.384 50	0.230 5
$\Delta\omega_1$	0	0	0	0	0.000 2	0.085 80	0.355 2
$\Delta\omega_2$	0	0	0	0	0.445 3	0.042 00	0.004 4
$\Delta\omega_3$	0	0	0	0.000 7	0.054 5	0.364 60	0.024 0
$\Delta\psi_{qs}$	0.244 0	0.244 00	0.005 9	0.005 8	0	0.001 40	0.000 8
$\Delta\psi_{ds}$	0.244 0	0.243 00	0.005 8	0.005 4	0.000 1	0.001 90	0.000 8
$\Delta\psi_{qr}$	0.001 2	0.004 34	0	0.000 5	0.000 3	0.136 00	0.278 4
$\Delta\psi_{dr}$	0.001 2	0.004 15	0	0.001 0	0.000 2	0.129 70	0.350 2
Δu_{cx}	0.250 0	0.250 00	0.000 2	0.000 2	0.000 1	0.002 70	0.001 2
Δu_{cy}	0.250 0	0.250 00	0.000 2	0.000 2	0	0.002 60	0.001 6
Δi_{Lx}	0.005 8	0.005 80	0.245 0	0.246 0	0.000 1	0.001 60	0.001 2
Δi_{Ly}	0.005 8	0.005 80	0.245 0	0.245 0	0.000 1	0.002 30	0.000 7
Δu_{Lx}	0.000 2	0.000 20	0.250 0	0.251 0	0.000 1	0.000 90	0.000 3
Δu_{Ly}	0.000 2	0.000 20	0.250 0	0.251 0	0.000 1	0.000 70	0.000 4

起。振荡模态 3、4 的振荡频率分别为 80.975 Hz 和 19.005 Hz,其中输电线路电感电流和串补电容两端电压对其起主导作用,表明该振荡模态是由输电线路电感和串补电容的电气谐振引起。

振荡模态 5 的频率为 12.425 Hz,其中低速轴转角和转速对其起主导作用,此外,感应电机转子的转角和转速也对其有一定影响,可见,该振荡模态是风电机组轴系的固有振荡频率。振荡模态 6 的频率为 1.721 Hz,其中感应电机转子转角和转速对其起主导作用,此外,感应电机转子磁链也起到一定作用,因此,该模态也是风电机组轴系的固有振荡频率。由于质量块模型的固有频率个数等于质量块数减去 1^[8,18],所以振荡模态 5 和 6 为轴系模型的 2 个固有振荡频率,且属于轴系扭振模态。

振荡模态 7 的频率为 0.495 Hz,其中风电机组叶片的转角和转速、感应电机转子的转角和转速、感应电机转子磁链均对该振荡模态起主导作用,即该模态不仅与风电机组机械参数有着强相关性,还与感应电机的电气参数有着强相关性,因此,该振荡模态为机电模态。

2.3 输电线路串补对系统阻尼的影响

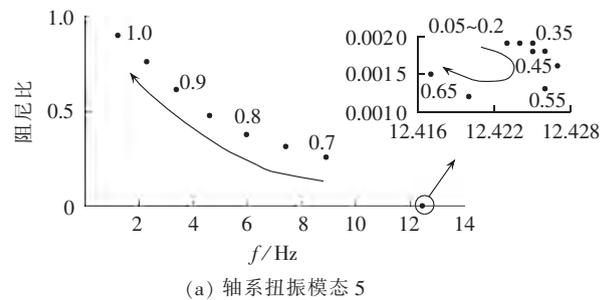
定义输电线路串补率为:

$$k_{com} = X_{sc} / X_L \quad (7)$$

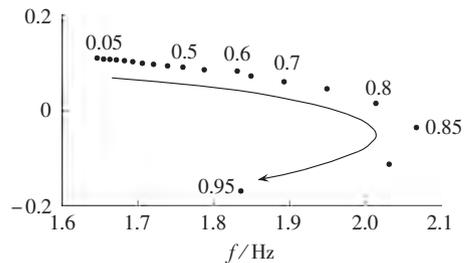
其中, X_{sc} 为串补电容等效电抗; X_L 为输电线路等效电抗。

保持其他参数不变,改变系统串补率(0.05~1),轴系扭振模态 5、6 的振荡频率和阻尼比变化如图 4 所示(图中数据表示串补率取值)。

如图 4(a)所示,对于扭振模态 5,当串补率小于 0.65 时,随着输电线路串补率的逐渐增大,扭振频率和阻尼比基本不变,正是由于该模态由低速轴主导,



(a) 轴系扭振模态 5



(b) 轴系扭振模态 6

图 4 扭振模态振荡频率和阻尼比随串补率变化情况

Fig.4 Oscillation frequency and damping ratio for different series compensation degrees of torsional vibration mode 5 and 6

电气系统参数的变化对其影响较小;当串补率大于 0.65 时,随着串补率的增大,扭振频率开始减小,阻尼比逐渐增大,正是由于感应电机转子也对该模态有一定影响,因此也会受到感应电机电磁转矩和电气参数的影响;扭振模态阻尼比始终为正,小干扰稳定。

如图 4(b)所示,对于扭振模态 6,随着输电线路串补率逐渐增大,扭振频率逐渐增大,当串补率为 0.85 时,频率达最大,随后逐渐减小;阻尼比一直减小,当串补率大于 0.85 时,扭振模态阻尼比始终为负,小干扰不稳定。这是由于该模态主要由感应电机转子主导,受感应电机电磁转矩和电气参数影响较大。

2.4 并补对系统阻尼的影响

定义 $1/X_{pc}$ 为系统并补率,其中 X_{pc} 为并补电容

标么值,保持其他参数不变,改变系统并补率(0.05~1),轴系扭振模态 5、6 的振荡频率和阻尼比变化如图 5 所示(图中数据表示并补率取值)。

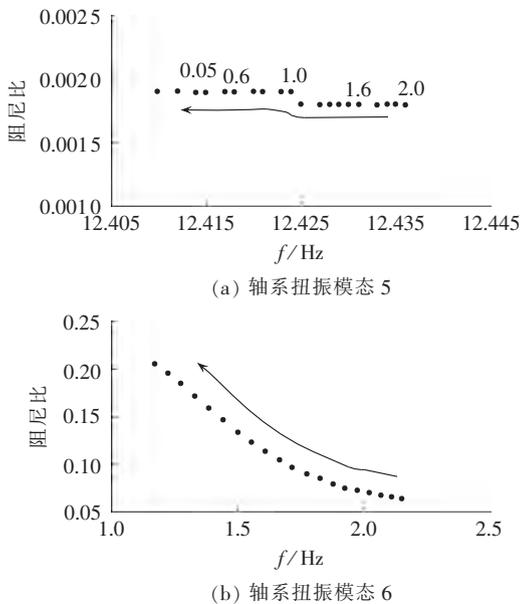


图 5 扭振模态振荡频率和阻尼比随并补率变化情况

Fig.5 Oscillation frequency and damping ratio for different parallel compensation degrees of torsional vibration mode 5 and 6

如图 5(a)所示,对于扭振模态 5,由于该模态由低速轴主导,电气参数的变化对其影响较小,因此当并补率发生变化时,扭振频率和阻尼比基本保持不变。

如图 5(b)所示,对于扭振模态 6,由于该模态由感应电机转子主导,因此随着机端并补率的逐渐增大,扭振频率逐渐减小,阻尼比逐渐增大且始终为正,系统小干扰稳定。

3 多机系统小信号模型

实际风电场一般由几十台风电机组组成,由于相邻 4 台风电机组在拓扑结构上能够一定程度地反映机组间的电气连接,具有一定的代表性,本文选取了实际风电场中 4 台风电机组,其电气接线方式如图 6 所示,图中每 2 台风电机组并联连接,并通过变

压器连接至 10 kV 架空线,最后汇聚到公共连接点。风电场内部电网参数由风电机组的电缆阻抗决定,可以根据风机之间的距离设定。

依据该风电场电气主接线方式及电气参数,对风电机组单机对无穷大系统小信号模型进行修改,建立图 6 所示 WT₁₁、WT₂₁、WT₁₂ 和 WT₂₂ 的四机的风电机组并网模型。

修改如下。

a. 由于串补电容一般用于超高压输电线路,以提高线路输送容量、改善系统运行稳定性,因此对于单机对无穷大系统小信号模型,输电线路使用 RLC 模型;对于风电场的多机小信号模型,0.69 kV/10 kV 输电线路采用 RL 模型,如式(6)所示,220 kV 架空线采用 RLC 模型,如式(7)所示。

b. 由于电缆具有很大的对地电容,因此 10 kV 电缆采用 Γ 电路模型,增加对地电容电压为一个状态变量 X_{ΓC}。

四机系统模型的状态方程如式(8)所示:

$$\dot{X}' = A'X' + B'u' \tag{8}$$

$$A' = \begin{bmatrix} A_1'' & 0 & 0 \\ 0 & A_2'' & 0 \\ C_{4 \times 32}^{wt1-rlc} & C_{4 \times 32}^{wt2-rlc} & A_{RLC} \end{bmatrix}_{68 \times 68}$$

$$X' = [X_1' \ X_2' \ X_{RLC}]^T$$

$$A_i'' = \begin{bmatrix} A_{WT1i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{WT2i} & 0 & 0 \\ C_{2 \times 14}^{wt1i-c} & C_{2 \times 14}^{wt2i-c} & A_{\Gamma C} & 0 \\ 0 & 0 & C_{2 \times 2}^{c-rl} & A'_{RLC} \end{bmatrix}_{32 \times 32}$$

$$X_i' = [X_{li} \ X_{2i} \ X_{\Gamma C} \ X_{RL}]^T$$

其中, X_{ji} = [X_{Mji} X_{Gji} X_{Cji} X_{RLji}]^T 为风电机组 WT_{ji} 的状态变量,且状态矩阵为上三角为 0 的分块稀疏矩阵,利于对多机系统进行等值; A_i'' 为两机系统的状态矩阵; A_{RLC} 为两机系统出口输电线路的状态矩阵; C_{4×32}^{wt1-rlc} 为两机系统与输电线路间的接口关系矩阵; A_{WT1i}、A_{WT2i} 分别为两机系统中风机 1 和风机 2 的状态矩阵; A_{ΓC} 为并联电容的状态矩阵; A'_{RLC} 为单台风力发电机出

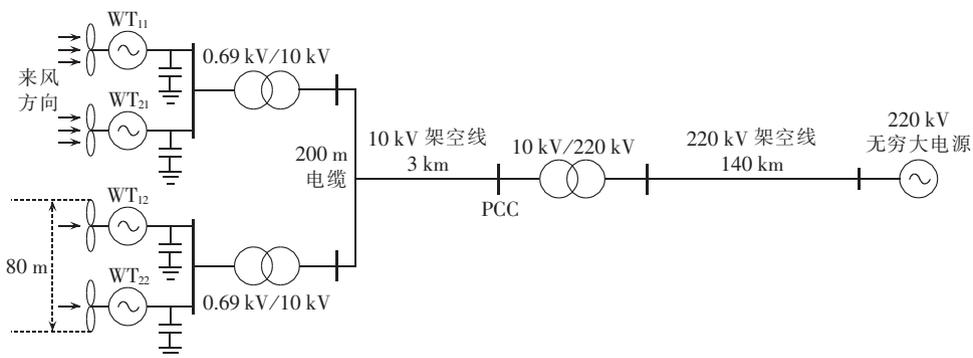


图 6 实际风电场电气主接线图

Fig.6 Main electrical wiring diagram of an actual wind farm

口处的输电线路状态矩阵; $C_{2 \times 14}^{u1-c}$ 为单台风机与并联电容的接口关系矩阵; $C_{2 \times 2}^{c-rlc}$ 为并联电容与输电线路的接口关系矩阵。

对模型状态方程进行模态分析,得到四机系统的机械轴系扭振频率如表 5 所示。

表 5 系统轴系扭振频率

Table 5 Torsional vibration frequency of shaft system for different modes

序号	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比
1	-0.00047±j0.24850	0.03955	0.00190
2	-0.00009±j0.03531	0.00562	0.00264

由各振荡模态相关因子知,振荡模态 1 的频率为 0.03955 Hz,由风电机组低速轴主导,感应电机转子也起一定作用;振荡模态 2 的频率为 0.00562 Hz,由感应电机转子主导。

4 结论

本文建立了基于三质量块的失速型风电机组单机对无穷大系统的小信号稳定模型,对其进行模态分析,并研究不同的电气参数对系统阻尼的影响,得到以下结论:

a. 风电机组轴系会受到感应电机电磁转矩和电网电气参数的影响而发生谐振甚至机械故障,且轴系扭振的薄弱环节在低速轴;

b. 系统的串补率和并补率对系统的阻尼特性有一定影响,本文提出的小信号模型有助于设计合理的电气参数或者阻尼器,增加系统在扭振频率上的小干扰稳定性;

本文提出的小信号模型为模块化设计,有助于进行扩展和修改,并且在进行简单修改后可得到风电机组多机系统的小信号模型,为以后研究大型风电场的机网轴系扭振奠定基础。

参考文献:

- [1] STEVE S,SVEN T. 全球风电发展展望 2014[R]. 北京:GWEC, 2014.
- [2] 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.
- [3] 郝正航,余贻鑫. 励磁控制引起的双馈风电机组轴系扭振机理[J]. 电力系统自动化,2010,34(21):81-86.
HAO Zhenghang,YU Yixin. Analysis on wind turbine driven DFIG shaft torsional oscillation mechanism caused by excitation control[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(21):81-86.
- [4] 王瑞琳,解大,王西田,等. 定桨恒频风电机组机网扭振的建模和机理[J]. 电力自动化设备,2010,30(3):20-24.
WANG Ruilin,XIE Da,WANG Xitian,et al. Modeling and mechanism of torsional vibration of grid-connected wind generator [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(3):20-24.
- [5] AKHMATOV V. Induction generators for wind power[M]. New York, USA: Muli-science, 2009:128-172.

- [6] SALMAN S K,RIDA I M. Investigating the impact of embedded generation on relay settings of utilities' electrical feeders [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(2):246-251.
- [7] FAN Lingling,KAVASSERI R,MIAO Zhixin,et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2073-2082.
- [8] LI H,CHEN Z. Transient stability analysis of wind turbines with induction generators considering blades and shaft flexibility[C]// Industrial Electronics Society,2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE. [S.I.]:IEEE,2007:1604-1609.
- [9] HUANG H,MAO C,LU J,et al. Small-signal modelling and analysis of wind turbine with direct drive permanent magnet synchronous generator connected to power grid[J]. IET Renewable Power Generator,2012,6(1):48-58.
- [10] MEI Ting,ROYCHOWDHURY J. Small-signal analysis of oscillators using generalized multitime partial differential equations [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,2007,26(6):1054-1069.
- [11] 解大,王瑞琳,王西田,等. 失速型风电机组机网扭振的模型与机理[J]. 电机与控制学报,2010,14(4):46-51.
XIE Da,WANG Ruilin,WANG Xitian,et al. Model and principle of stalled wind turbine for torsional vibration studies[J]. Electric Machines and Control,2010,14(4):46-51.
- [12] MEI F,PAL B. Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007,22(3):728-736.
- [13] FAN Lingling,ZHU Chanxia,MIAO Zhixin,et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network[J]. IEEE Transactions Energy Conversion,2011,26(4):1010-1020.
- [14] 王瑞琳. 风力发电机与电网之间扭振相互作用的研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
WANG Ruilin. The study of torsional vibration between wind turbines and grid[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [15] AKHMATOV V,KNUDSEN H,NIELSEN A H. Advanced simulation of windmills in the electric power supply[J]. Electrical Power and Energy Systems,2000,22(6):421-434.
- [16] BOUKHEZZAR B,SIGUERDIDJANE H. Nonlinear control of a variable-speed wind turbine using a two-mass model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26(1):149-162.
- [17] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill Professional,1994:8-24.

作者简介:



姜宇成

姜宇成(1990—),女,江苏南通人,硕士研究生,从事新能源并网技术、电网机网扭振研究(E-mail:louyucheng@126.com);

解大(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,从事智能输配电、微电网管理、新能源并网技术的研究(E-mail:xieda@sjtu.edu.cn);

冯俊淇(1988—),男,河南郑州人,工程师,硕士,从事电力系统调度自动化、继电保护专业的设计研究工作(E-mail:syfjq@126.com);

王西田(1973—),男,陕西西安人,副教授,博士,从事电网机网扭振研究(E-mail:x.t.wang@126.com);

杨敏霞(1989—),女,广东揭阳人,硕士研究生,从事新能源并网技术、电网机网扭振研究(E-mail:wendyymx@gmail.com)。

Small-signal modeling and modal analysis based on three-mass shaft model for stall wind turbine

LOU Yucheng¹, XIE Da¹, FENG Junqi², WANG Xitian¹, YANG Minxia¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. East China Electric Power Design Institute, Shanghai 200331, China)

Abstract: Since the large-scale integration of wind farms into power grid is likely to increase the risk of regional low frequency oscillation and wind turbine shafting torsional vibration, the wind turbine modeling and its torsional vibration characteristics are studied to ensure the security and stability of power system. With the stall wind turbine as an example, a small-signal model of an infinite bus with single wind turbine, which is based on the three-mass shaft model, is established and the modal analysis is applied to discuss the impact of system electric parameters on the torsional vibration characteristics, each component model is relevant independent for the further research of torsional vibration characteristics of stall wind turbine. The system component models are independent of each other to facilitate the further study for different turbine types and multi-turbine unit, based on which, a simplified small-signal simulation model is built for a wind farm with multiple stall turbines and the variation of its torsional vibration modal is researched. The simulation with MATLAB verifies the effectiveness and correctness of the model for the research of wind turbine torsional vibration.

Key words: wind power; stall wind turbine; three-mass shaft model; small-signal model; modal analysis; shaft torsional vibration; models

(上接第 94 页 continued from page 94)

Electronics. Paris, France; IEEE, 2006: 1878-1883.

- [17] JIN K. Behavior-mode simulation of power electronic circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12 (3): 443-452.

作者简介:

申全宇(1989—),男,河南鹤壁人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:quanyu.shen@stu.xjtu.



申全宇

edu.cn);

宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:song.gb@mail.xjtu.edu.cn);

王晨清(1987—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:wcmorning@stu.xjtu.edu.cn)。

Rapid fault transient simulation of electric elements with converter for relay protection

SHEN Quanyu¹, SONG Guobing¹, WANG Chenqing¹, LIU Kai², WANG Huanhuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Corporate Research Center, ABB(China) Limited, Beijing 100015, China)

Abstract: Since the detailed model simulation of electric elements with converter has great calculation load, its scale and speed could not be easily enhanced, aiming at which, a rapid fault transient simulation method is proposed for relay protection. The functions and control strategy of converter are analyzed and its simplified mathematical model is obtained based on the active power conservation law, which keeps its functions and control characteristics and neglects its internal complex structure. By discretizing the simplified model equations, the iterative equations of output power-frequency components are obtained for the electric elements with converter. The proposed method avoids the use of plentiful separated power electronic devices and trigger units, which reduces the complexity of simulation model, lowers the computational load of converter simulation and enhances the simulation speed. Its feasibility and rapidity are verified by the results of PSCAD simulation.

Key words: electric converters; electric elements; transients; computer simulation; large-scale system; relay protection; models