

定子故障下的双馈风力发电机组建模与稳定性分析

许伯强,张舒怡

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 针对双馈风力发电机组(DFIG)发生定子绕组匝间短路(SWITSC)故障后的稳定性问题,建立了 SWITSC 故障下的 DFIG 的小干扰稳定性分析模型。基于 Lyapunov 稳定性理论进行特征值分析,并勾勒出主导特征值的变化轨迹;另外,找出了对稳定性影响作用较大的关键性控制参数,结合仿真波形说明了 DFIG 稳定性的变化情况。得到结论:DFIG 发生 SWITSC 故障后,其稳定性有所下降,但在风速及控制参数合理的条件下仍然具有保持稳定运行的能力。

关键词: 双馈风力发电机组; 风电; 定子绕组匝间短路故障; 小干扰稳定性; 特征值分析; 控制参数

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.014

0 引言

环境污染和资源枯竭问题使清洁能源得到了飞速发展,风电机组制造技术的日益成熟则使风力发电成为最具潜力、最具规模的新能源发电方式之一^[1]。随着风电并网规模的逐渐增大,风力发电机组的稳定性不可忽视,其中风力发电机组的小干扰稳定对电网也存在着必然的影响^[2-3]。

国内外学者对风力发电系统的低频振荡、阻尼特性等稳定性问题的研究已取得诸多成果。文献[4-5]在额定风速范围内建立了详细的与无穷大电网相连的双馈风电机组(DFIG)小干扰模型,分析了不同运行点的特征值变化并讨论发生 Hopf 分岔的关键控制参数,并进行了仿真验证;文献[6]在不同的控制策略下对 DFIG 轴系振荡的阻尼作用进行研究,并通过仿真给出了具备较好阻尼的转速控制模式;文献[7]定性分析了 DFIG 并网前后互联系统的

阻尼变化以及运行模式对低频振荡的影响程度;文献[8-10]建立了忽略定子磁链暂态、变流器和直流环节动态部分乃至转子暂态的 DFIG 模型。显然,当前关于风力发电系统稳定性问题的研究是针对正常 DFIG 的,且重点在电网侧(如低频振荡),而对故障 DFIG 则甚少关注。但是,DFIG 运行环境恶劣,故障概率也随运行时间的延长而增加^[11]。譬如,定子绕组匝间短路(SWITSC)故障是其典型故障之一,往往导致接地短路或相间短路,且其发生概率高达 30%^[12]。文献[13]提供实例,一台感应电动机在发生 SWITSC 故障之后保持全压运行 750 h,这说明了 DFIG 在特定情况下是可以带故障病态运行的。

为了重点分析 SWITSC 故障下 DFIG 的小干扰稳定性,本文针对正常与 SWITSC 故障 2 种情况,建立详细的 DFIG 模型,分别讨论了模型的机械和电气部分^[14],并利用 Lyapunov 稳定性理论对 DFIG 的稳定性展开研究,最后进行仿真验证。

1 SWITSC 故障下 DFIG 的数学模型

1.1 故障条件下的感应电机模型

由于感应电机的多变量性及耦合性,其故障情况

收稿日期:2015-10-26;修回日期:2016-07-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277077)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277077)

Dynamic economic dispatch based on wind power forecast error interval

LIU Liyang, MENG Shaoliang, WU Junji

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Since there is difference between actual and predicted values, the dynamic economic dispatch should consider the uncertainty of wind power forecast. The kernel density estimation method is applied to establish the probability distribution of forecast error based on its historical data for a particular predicted value. As an example, the corresponding error confidence intervals of Gaussian kernel function are derived to convert an uncertainty problem of dynamic economic dispatch into a problem of certain interval for reducing the complexity of dispatch model. The analysis of real data shows that, the kernel density estimation method has higher fitting level, avoiding the overestimate or underestimate of forecast error. The effectiveness of the proposed method is verified by the simulation for IEEE 30-bus system with wind farm.

Key words: economic dispatch; wind power; power fluctuations; forecast error; error confidence interval

下的数学模型建立是繁琐、复杂的。对于 SWITSC 故障情况下的感应电机的建模通常通过对原始三相轴模型进行变换^[15],以多回路理论作为支撑进行不对称参数的计算,进而引入不对称矩阵,达到模拟短路故障下各个物理量变化的目的。

图 1 为 A 相匝间短路示意图。假定 A 相发生匝间短路,将短路回路作为新的一相。为了直观地反映故障的严重程度,引入短路比 μ (短路匝数与一相绕组总匝数之比),短路回路电流 i_g 、回路过渡电阻 R_g 。

短路回路的电压方程为:

$$\frac{d\psi_g}{dt} + (R_g + \mu R_s)i_g + R_{sg}i_{sA} = 0 \quad (1)$$

定子绕组 A 相的电压方程为:

$$\frac{d\psi_{sA}}{dt} + R_s i_{sA} + R_{sg} i_g = 0 \quad (2)$$

故障模型推导如下:

$$U_F = R_F I_F + p \psi_F \quad (3)$$

其中, ψ_g 、 ψ_{sA} 分别为短路回路磁链及定子 A 相绕组磁链; R_s 、 R_g 、 R_{sg} 分别为定子一相绕组电阻、短路回路电阻以及定子 A 相绕组匝间短路部分电阻; U_F 、 R_F 、 I_F 、 ψ_F 分别为故障情况下的电压、电阻、电流及磁链矩阵; p 为微分算子。

在三相坐标系下,电感参数矩阵中的元素与转子位置角 γ 相关,具有时变性和复杂性。这样不利于 DFIG 状态方程的求解。因此,通过坐标变换至两相 $dq0$ 坐标系下,实现模型简化,而短路回路仍在三相坐标系下处理。

$$C_{3s/2r}^{-1} U_F^{dq} = R_F C_{3s/2r}^{-1} I_F^{dq} + p (M_F C_{3s/2r}^{-1} I_F^{dq}) \quad (4)$$

其中, $C_{3s/2r}$ 为三相坐标系至两相 $dq0$ 坐标系的变换矩阵; U_F 、 R_F 、 I_F 、 M_F 分别为故障情况下的电压、电阻、电流、电感系数矩阵。

通过推导可得到:

$$p I_F^{dq} = A^{-1} (U_F^{dq} - B \psi_F^{dq}) \quad (5)$$

$$p \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \\ i_g \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{s0} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \\ u_{r0} \\ 0 \end{bmatrix} - A^{-1} B \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{s0} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{r0} \\ \psi_g \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过计算可得到:

$$A = C_{3s/2r} M_F C_{3s/2r}^{-1}$$

$$B = C_{3s/2r} R_F C_{3s/2r}^{-1} + C_{3s/2r} p M_F C_{3s/2r}^{-1} + C_{3s/2r} M_F p C_{3s/2r}^{-1}$$

矩阵 A 、 B 、 $C_{3s/2r}$ 的具体表达式在此不予赘述。

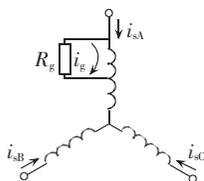


图 1 定子 A 相绕组匝间短路示意图

Fig.1 Schematic diagram of SWITSC in phase-A

此时的电磁转矩方程为:

$$T_{eF} = \frac{n_p}{2} I_F^T \frac{\partial M_E}{\partial \gamma} I_F \quad (7)$$

$$T_{eF} = \frac{3n_p}{2} L_m \left(i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq} - \frac{2}{3} \mu \sin \gamma' i_g i_{rd} - \frac{2}{3} \mu \cos \gamma' i_g i_{rq} \right) \quad (8)$$

$$\gamma' = \omega_s t \quad (9)$$

其中, T_{eF} 为故障下的电磁转矩; n_p 为极对数; L_m 为激磁电感; i_{sd} 、 i_{sq} 和 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为定子和转子的 d 、 q 轴电流; ω_s 为同步旋转电角速度; γ' 为同步旋转的 d 轴领先定子 A 轴的空间电角度。

联立式(6)和式(8)可以得到六阶故障电机暂态方程。

1.2 风机传动链模型

风机传动链采用双质块模型,该模型可以较精确地描述风力机的机械轴系部分与电网之间的动态作用^[7]。

$$\begin{cases} \frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t} (T_t - T_{sh}) \\ \frac{d\theta_t}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_g} (T_e - T_m - F\omega_r) \end{cases} \quad (10)$$

其中, T_t 、 T_e 、 T_{sh} 和 T_m 分别为风力机转矩、轴系转矩、两质块之间的扭转转矩和电机的电磁转矩; H_t 、 H_g 分别为风力机和发电机的等效惯性时间常数; ω_t 、 ω_b 、 ω_r 分别为风力机的角速度、角速度基值以及转子电角速度; θ_t 为风力机与电机转子之间的转差角; F 为粘性摩擦系数。

1.3 转子侧变流器模型

转子侧变流器主要为了实现有功和无功的解耦控制以及转子转速的控制^[16]。本文模型采用定子磁链定向,故有 $\psi_{sd} = 0$ 、 $\psi_{sq} = \psi_1$ 。通过控制转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} 分别控制转子转速与定子无功,具体控制策略如图 2 所示。

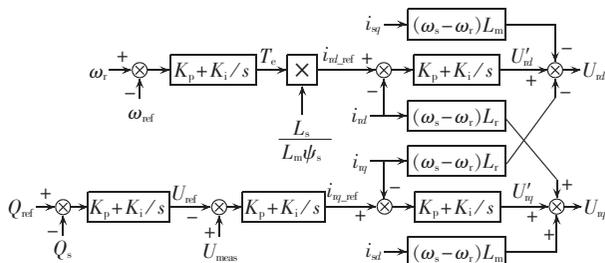


图 2 转子侧变流器控制策略框图

Fig.2 Block diagram of rotor-side converter control

转子侧变流器的系统状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \omega_r - \omega_{ref} \\ T_e = K_{p_speed}(\omega_r - \omega_{ref}) + K_{i_speed}x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = i_{rd_ref} - i_{rd} \\ u'_{rd} = K_{p_rotor}(i_{rd_ref} - i_{rd}) + K_{i_rotor}x_2 \\ u_{rd} = u'_{rd} + R_r i_{rd} - \omega_s L_r i_{rq} - \omega_s L_m i_{sd} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_3}{dt} = Q_{ref} - Q_s = -(u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \\ \frac{dx_4}{dt} = U_{meas} - U_{ref} \\ \frac{dx_5}{dt} = i_{rq_ref} - i_{rq} = K_{i_volt}x_4 - i_{rq} \\ u'_{rq} = K_{p_rotor}(i_{rq_ref} - i_{rq}) + K_{i_rotor}x_5 \\ u_{rq} = u'_{rq} + R_r i_{rq} + \omega_s L_r i_{rd} + \omega_s L_m i_{sd} \end{cases} \quad (12)$$

其中, K_{p_speed} 、 K_{i_speed} 分别为转速控制环节的比例和积分增益; K_{p_rotor} 、 K_{i_rotor} 分别为电流控制环节的比例和积分增益; K_{i_var} 、 K_{i_volt} 分别为无功和电压控制环节的积分增益。

1.4 网侧变流器模型

网侧变流器控制的主要作用是维持直流电压的稳定,使输入电流为正弦并协调功率因数^[17],即控制DFIG的转子与电网进行无功功率交换。网侧变流器采用定子电压定向,故 $u_{sd} = u_s$ 、 $u_{sq} = 0$ 。网侧的有功功率和无功功率分别与 i_{gd} 、 i_{gq} 成正比。控制原理框图见图 3。

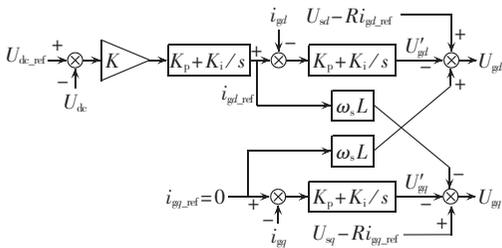


图 3 网侧变流器控制策略框图

Fig.3 Block diagram of grid-side converter control

网侧变流器系统状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{dx_6}{dt} = (U_{dc_ref} - U_{dc}) / U_{dc_nom} \\ i_{gd_ref} = [K_{p_dc}(U_{dc_ref} - U_{dc}) + K_{i_dc}x_6] / U_{dc_nom} \\ \frac{dx_7}{dt} = \frac{1}{U_{dc_nom}} [K_{p_dc}(U_{dc_ref} - U_{dc}) + K_{i_dc}x_6] - i_{gd} \\ u'_{gd} = -[K_{p_grid}(i_{gd_ref} - i_{gd}) + K_{i_grid}x_6] \\ u_{gd} = -u'_{gd} + u_{sd} + \omega_1 L i_{gd_ref} - R i_{gd_ref} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_8}{dt} = i_{gq_ref} - i_{gq} \\ u'_{gq} = -[K_{p_grid}(i_{gq_ref} - i_{gq}) + K_{i_grid}x_8] \\ u_{gq} = -u'_{gq} + u_{sq} - \omega_1 L i_{gd_ref} - R i_{gq_ref} \end{cases} \quad (14)$$

其中, K_{p_dc} 、 K_{i_dc} 分别为直流电压控制环节的比例和

积分增益; K_{p_grid} 、 K_{i_grid} 分别为网侧电流控制的比例和积分增益; U_{dc_ref} 为直流母线电压参考值。

1.5 直流电容环节

直流电容电压的控制环节是连接转子侧变流器和网侧变流器的中间环节,电路图如图 4 所示,状态方程如式(15)、(16)所示。

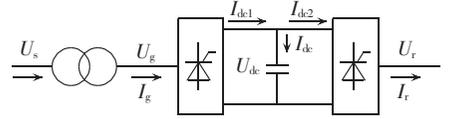


图 4 直流电容环节电路结构图

Fig.4 Circuit structure of DC-capacitor section

$$P_{dc} = P_g - P_r \quad (15)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{P_g - P_r}{U_{dc}} = \frac{1}{U_{dc}} \frac{3}{2} (u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq} - u_{rd} i_{rd} - u_{rq} i_{rq}) \quad (16)$$

其中, C 为直流母线电容; P_g 、 P_r 分别为网侧和转子侧流入直流母线环节的功率。

2 小干扰模型

雅可比矩阵对动态电力系统的稳定性分析有着至关重要的作用^[18]。根据 Lyapunov 理论,一个非线性动力系统的运动特性可以通过一个一阶微分方程组来描述^[19]。其中, X_0 作为系统平衡状态的向量,满足 $F(x, u) = 0$ 。系统受到小干扰后的微分方程组通过泰勒级数展开之后省略 ΔX 的二阶及以上各项之后可得:

$$\frac{d\Delta X}{dt} = \frac{dF(X)}{dx} \Big|_{x=X_0} \Delta X = J \Delta X \quad (17)$$

其中, J 为雅可比矩阵,其展开形式如式(18)所示。

$$\begin{bmatrix} J_{11} & \cdots & J_{17} \\ \vdots & & \vdots \\ J_{71} & \cdots & J_{717} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, $\{J_{ij}\}$ ($i = 1, 2, \dots, 17; j = 1, 2, \dots, 17$) 为式(6)—(16)描述的 SWITSC 故障情况下双馈电机的线性化动态模型。一般情况下系统功率因数为 1,故无功功率的参考值 $Q_{ref} = 0$,即 $i_{gq_ref} = 0$,所以网侧 q 轴电流控制部分可以在雅可比矩阵中忽略不计,即省略 x_8 的暂态方程。

Lyapunov 稳定性第一法描述了雅可比矩阵的特征值 $\sigma + j\omega$ 与待分析系统的稳定性间的关系;如果 $\sigma < 0$,则对应的振荡模态是衰减的,即系统稳定;反之,系统不稳定。

另外,为了度量系统遭受小干扰后趋至稳定的速度而定义阻尼比,如式(19)所示。一般而言,阻尼比越大,系统趋至稳定的速度越快、稳定性愈佳。

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (19)$$

3 特征值分析

3.1 额定风速情况下正常与故障 DFIG 特征值对比

正常情况和 SWITSC 故障(设置短路匝数比 $\mu=0.1$, 短路回路过渡电阻 $R_g=0.01 \Omega$)下 DFIG 在额定风速($v_w=11 \text{ m/s}$, $\omega_r=1.2 \text{ p.u.}$)时的特征值与阻尼比对比如表 1 所示。

表 1 正常与 SWITSC 故障情况下 DFIG 的特征值与阻尼比对比

Table 1 Comparison of eigenvalues and damp ratio between normal DFIG and DFIG with SWITSC

工况	特征值	特征值数值	阻尼比/%	工况	特征值	特征值数值	阻尼比/%
正常	$\lambda_{1,2}$	$-1265.41 \pm j109.95$	99.62	SWITSC 故障	$\lambda_{1,2}$	$-1328.65 \pm j185.88$	99.04
	$\lambda_{3,4}$	$-3.51 \pm j372.41$	0.94		$\lambda_{3,4}$	$-81.56 \pm j125.80$	44.37
	$\lambda_{5,6}$	$-0.73 \pm j13.72$	5.31		$\lambda_{5,6}$	$-0.48 \pm j13.80$	3.48
	$\lambda_{7,8}$	$-12.82 \pm j1.04$	99.67		$\lambda_{7,8}$	$-14.19, -10.70$	—
	$\lambda_{9,10}$	$-0.14 \pm j3.27$	4.28		$\lambda_{9,10}$	$-0.13 \pm j3.37$	3.86
	$\lambda_{11,12}$	$-0.00083 \pm j0.92$	0.09		$\lambda_{11,12}$	$-0.00052 \pm j0.95$	0.05
	$\lambda_{13,14}$	$-0.13 \pm j0.17$	60.75		$\lambda_{13,14}$	$-0.075 \pm j0.19$	36.72
	λ_{15}	-0.44	100		λ_{15}	-0.45	100
	λ_{16}	-1	100		λ_{16}	-1	100
	λ_{17}	—	—		λ_{17}	-1397.90	100

为了体现 SWITSC 故障对 DFIG 稳定性的影响,表 1 中引入了阻尼比的对比。选取共轭特征值为例。 $\lambda_{1,2}$ 阻尼比在 SWITSC 故障情况下变小, $\lambda_{3,4}$ 阻尼比在 SWITSC 故障情况下增大,但与之对应的振荡模态在 SWITSC 故障前后是不同的,这体现为不同的振荡频率($\omega/2\pi$)。而 $\lambda_{5,6}, \lambda_{9,10}, \lambda_{11,12}, \lambda_{13,14}$ 对应的振荡模态在 SWITSC 故障前后基本不变,可以进行直接对比。由表 1 可知,SWITSC 故障后 $\lambda_{5,6}, \lambda_{9,10}, \lambda_{11,12}, \lambda_{13,14}$ 阻尼比均趋于减小,这说明 SWITSC 故障将降低 DFIG 的稳定性。另外,表 1 数据表明,全部特征值均具有负实部,这说明在一定的运行条件下,DFIG 仍具有维持稳定运行的能力。

3.2 不同风速情况下正常与故障 DFIG 机组的特征值变化

对于具有多对共轭特征值的高阶系统,主导特征值对其稳定性起着决定性作用^[20]。主导特征值为复平面左半边离虚轴最近的共轭特征值,其他特征值位于主导特征值实部 5 倍以外^[21]。观察、确定主导特征值应符合上述条件,并考虑在不同运行状态下特

征值变化的大小和趋势。选取 $\lambda_{5,6}, \lambda_{9,10}, \lambda_{11,12}, \lambda_{13,14}$ 作变化轨迹图,见图 5。

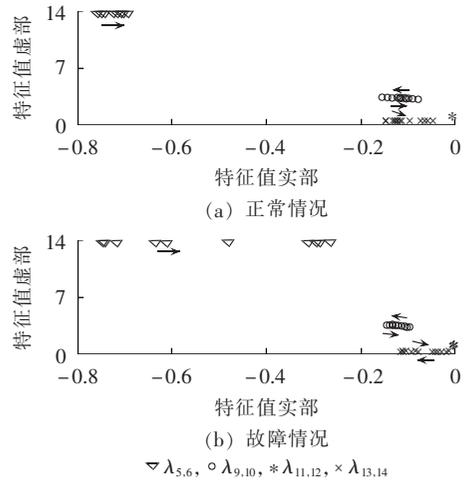


图 5 正常与 SWITSC 故障情况下 DFIG 在风速变化时(7~17 m/s)的特征值变化轨迹

Fig.5 Eigenvalue loci during wind speed variation (7~17 m/s) for normal DFIG and DFIG with SWITSC

由图 5 可知,随着风速的增大, $\lambda_{5,6}$ 实部向正方向移动但始终离零轴较远,在 SWITSC 故障情况下变化范围更加显著;随着风速的增大, $\lambda_{9,10}$ 实部先向左移动,到额定风速($v_w=11 \text{ m/s}$)时又向右移动,因此振荡模态在额定风速附近更为稳定; $\lambda_{11,12}$ 实部绝对值很小,离零轴最近,在风速改变下保持在一点附近,正常、SWITSC 故障情况下运行时几乎不受风速变化的影响; $\lambda_{13,14}$ 随着风速增大向零轴靠近,风速超过 14 m/s 时又开始向负方向移动。文献[15]指出,主导模态与系统的运行状态变化有关,在超同步、亚同步和同步条件下主导模态是不同的。在本文中,DFIG 在风速由 $7\sim 17 \text{ m/s}$ 的变化过程中由亚同步运行过渡至超同步运行,在不同的风速下主导特征根值不同, $\lambda_{5,6}, \lambda_{9,10}, \lambda_{11,12}, \lambda_{13,14}$ 对 DFIG 的稳定性发挥着重要作用。对比图 5(a)、(b)可知,当 DFIG 发生 SWITSC 故障后,DFIG 的稳定性有所减弱,但全部特征值始终具有负实部,仍能稳定运行。

3.3 控制参数对 DFIG 稳定性的影响

DFIG 在小干扰下发生暂态过渡过程,这取决于变流器控制策略及控制参数^[22-23]。大量仿真工作表明,改变转速控制环节的比例增益对 DFIG 的稳定性影响较大。改变比例系数 K_{p_speed} 以观察主导特征值变化情况,如图 6 所示。图 6(a)、(b)分别为正常和 SWITSC 故障情况下主导特征值的轨迹图。

由图 6 可看出,随着转速控制环参数 K_{p_speed} 的变化,主导特征值均有所变化。其中, $\lambda_{5,6}$ 变化最为明显,在 $K_{p_speed} > 60$ 之后 $\lambda_{5,6}$ 的虚部由 13 左右降至 6 左右,即振荡频率约降低一半; $\lambda_{9,10}$ 与 $\lambda_{11,12}$ 变化极

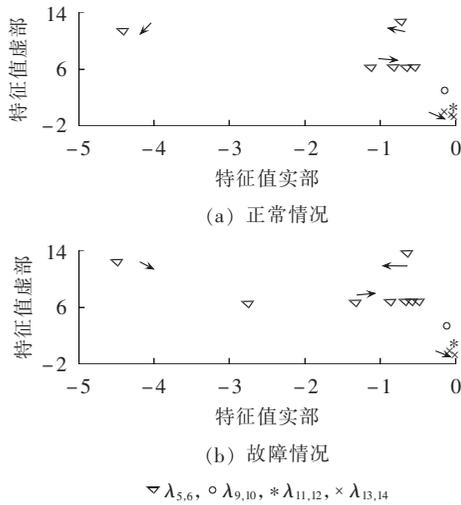


图 6 正常与 SWITSC 故障情况下 DFIG 在控制参数 ($K_{p_speed}=3\sim 500$)变化时的特征值轨迹

Fig.6 Eigenvalue loci during control parameter K_{p_speed} variation(3~500) for normal DFIG and DFIG with SWITSC

微,几乎不受 K_{p_speed} 变化的影响;随着 K_{p_speed} 的增大, $\lambda_{13,14}$ 实部增大、虚部变为 0,振荡模式转变为衰减模式,且随 K_{p_speed} 的增大向虚轴不断靠近,表明 DFIG 的稳定性有所下降。据此可知, K_{p_speed} 的变化对正常及 SWITSC 故障情况下的 DFIG 稳定性的影响差别不大。

从 3.2 节和 3.3 节的分析对比可以看出,在风速变化时,SWITSC 故障情况下的 DFIG 较正常情况更为敏感,但在一定的风速范围内对风速变化这一扰动呈现稳定过渡;对于控制参数 K_{p_speed} 的变化,无论故障与否,DFIG 的特征值变化均较大。以上分析表明,合理的运行范围及控制参数对 DFIG 的稳定运行至关重要。

4 仿真结果验证与讨论

4.1 故障模型仿真

MATLAB 自带的 DFIG 模型无法进行 SWITSC 故障的仿真。本文将 MATLAB Demo 中的电机模型替换为 Level-2 S 函数模块。

图 7 所示为风速恒为 11 m/s,在 $t=5$ s 时刻发生短路匝数比 $\mu=0.1$ 、过渡电阻 $R_g=0.01 \Omega$ 的 SWITSC 故障的仿真波形(图中纵轴数据均为标么值,后同)。

由图 7 可知,在发生故障后,有功功率有所减小,转子转速稳定在 1.15 p.u. 左右,短路回路电流 i_g 幅值为 2 倍额定电流,定子三相电流 i_{sA} 、 i_{sB} 、 i_{sC} 在发生故障之后变化并不明显,保护装置可能不动作,则 DFIG 带故障继续运行。

4.2 风速波动下的仿真波形

假定初始风速为 11 m/s,在 $t=10$ s 时降为 7 m/s。图 8(a)、(b)分别为正常和 SWITSC 故障情况下 DFIG

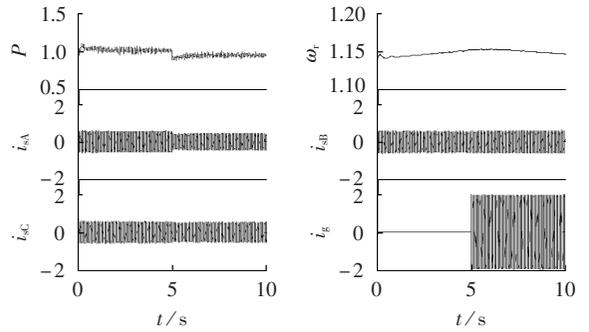
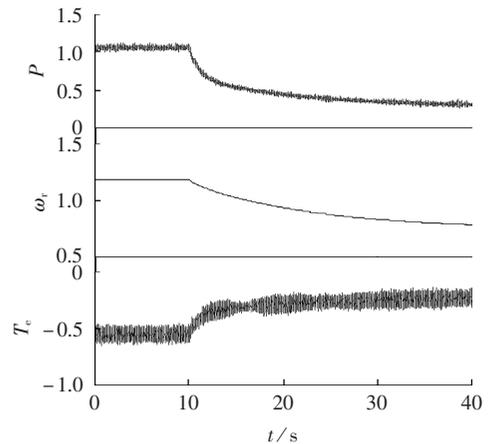
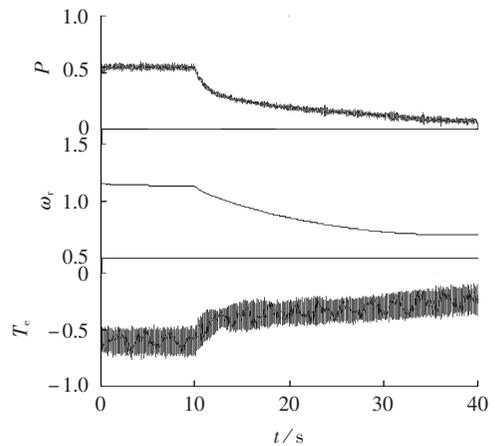


图 7 额定风速下发生 SWITSC 故障前后的波形变化

Fig.7 Simulative waveforms during SWITSC at rated wind speed



(a) 正常情况



(b) 故障情况

图 8 正常与 SWITSC 故障情况下 DFIG 对风速突变的暂态响应

Fig.8 Transient response of DFIG to sudden change of wind speed for normal and SWITSC conditions

的仿真结果。

对比可知,风速变化之前,故障情况下转速 ω_r 和有功功率 P 小于正常情况,说明故障发生之后电机的运行效率较低;在风速变化之后暂态过渡过程中,故障情况下有功功率 P 、转速 ω_r 以及电磁转矩 T_e 波动更大^[24],但对总体稳定性的影响并不明显。结合 3.2

节的分析可知,在合理的风速范围内,DFIG 仍能保持稳定运行;在相同外界条件下,故障 DFIG 的暂态波动较大,但仍可实现平稳过渡。

4.3 改变控制参数下的仿真波形

由 3.3 节中的讨论可知,控制参数变化对正常和故障 DFIG 的稳定性具有一定的影响,下面分析控制参数改变情况下的仿真波形。假定仿真时间 15 s,在 $t=5$ s 时刻发生 SWITSC 故障,图 9(a)、(b)分别为 $K_{p_speed}=3$ 、 $K_{p_speed}=500$ 时有功功率 P 和转子转速 ω_r 的波形。

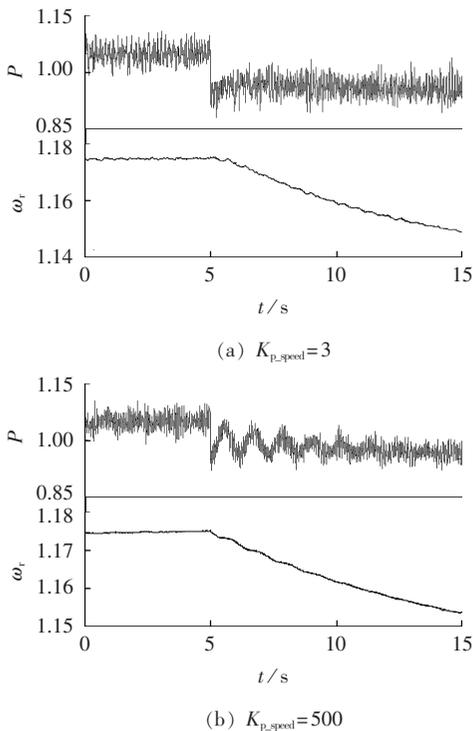


图 9 控制参数不同时 DFIG 机组的仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of DFIG for different values of key control parameter

由图 9 中可知,在 $K_{p_speed}=500$ 情况下, $t=5$ s 时刻电机发生故障,这相当于发生暂态过渡过程,因为阻尼的存在振荡逐步衰减而最终稳定运行。SWITSC 故障发生后,转速和有功功率的波形出现振荡,且有功功率的振荡十分明显。由图 9 可知,振荡频率约为 1 Hz,属于低频振荡,与特征值分析中变化最为明显的特征值 $\lambda_{5,6}$ 出现的频率吻合。

5 结论

通过建立 SWITSC 故障下 DFIG 的小干扰模型并对其进行特征值分析和仿真验证,得到如下结论。

a. 发生 SWITSC 故障后 DFIG 的阻尼比减小,稳定性减弱;但在一定的风速范围内、合理的控制参数下,DFIG 仍能保持稳定运行。

b. DFIG 的稳定性受转速环控制参数的影响较

大,其设置不当时,在暂态过程中可能发生低频振荡。

参考文献:

- [1] 孟永庆,翁钰,王锡凡,等. 双馈感应发电机暂态性能精确计算及 Crowbar 电路参数优化[J]. 电力系统自动化,2014,38(3):23-29. MENG Yongqing, WENG Yu, WANG Xifan, et al. Accurate calculation of DFIG transient performance and parameters optimization of Crowbar circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 23-29.
- [2] FRANCOISE M, BIKASH P. Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 728-736.
- [3] 张文娟,马浩森,张国慨,等. 基于转子串联电阻的双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):28-33. ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, ZHANG Guokai, et al. Low voltage ride-through of doubly-fed induction generator based on rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 28-33.
- [4] 杨黎晖,马西奎. 双馈风电机组对电力系统低频振荡特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):19-25. YANG Lihui, MA Xikui. Impact of doubly fed induction generator wind turbine on power system low-frequency oscillation characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 19-25.
- [5] YANG Lihui, XU Zhao, ØSTERGAARD J, et al. Hopf bifurcation and eigenvalue sensitivity analysis of doubly fed induction generator wind turbine system[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 25-29.
- [6] 张琛,李征,高强,等. 双馈风电机组的不同控制策略对轴系振荡的阻尼作用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(27):135-144. ZHANG Chen, LI Zheng, GAO Qiang, et al. Damping effects on torsional oscillation of DFIG drive-chain using different control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 135-144.
- [7] 和萍,文福拴,薛禹胜,等. 风电场并网对互联系统小干扰稳定及低频振荡特性的影响[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):1-10. HE Ping, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Impacts of wind power intergration on small signal stability and low frequency oscillation characteristics of interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 1-10.
- [8] RUEDA J L, ERLICH I. Impacts of large scale integration of wind power on power system small-signal stability[C]//2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, China: IEEE, 2011: 673-681.
- [9] LI Shanying, SUN Yu, WU Tao, et al. Analysis of small signal stability of grid-connected doubly fed induction generators[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [10] SLOOTWEG J G, POLINDER H, KLING W L. Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(4): 516-524.
- [11] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护[M]. 北京:中国电力出版社,2003:15-16.
- [12] 许伯强,李和明,孙丽玲,等. 异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):177-182.

- XU Boqiang, LI Heming, SUN Liling, et al. Detection of stator winding inter-turn short circuit fault in induction motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 177-182.
- [13] SOTTILE J, KOHLER J L. An on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random-wound motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(4): 762-768.
- [14] 龚文明, 胡书举, 许洪华. 一种适用于大型风电场实时仿真的双馈风力发电机响应模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 114-119.
- GONG Wenming, HU Shuju, XU Honghua. Response model of DFIG for real-time simulation of large-scale wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 114-119.
- [15] 刘卉圻. 异步电机定子绕组匝间短路故障建模与检测方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- LIU Huixi. Modeling and detecting methods research of stator winding turn faults in induction machines [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [16] 张志科. 双馈风电机组小干扰稳定性分析及参与调频控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- ZHANG Zhike. Small-signal stability analysis and participation frequency control strategies for doubly-fed wind turbine generation system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [17] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- LIU Qihui. The investigation of operation and control for a variable-speed constant-frequency wind power generation system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [18] YANG Lihui, XU Zhao, ØSTERGAARD J, et al. Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2011, 26(1): 328-339.
- [19] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 178-179.
- [20] 黄伟, 张小珍. 基于特征分析的大规模风电场等值建模[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2271-2277.
- HUANG Wei, ZHANG Xiaozhen. Feature analysis based equivalent modeling for large-scale wind farms [J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2271-2277.
- [21] 苏鹏声, 焦连伟. 自动控制原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 1-20.
- [22] XI Xinze, GENG Hua, YANG Geng. Enhanced model of the doubly fed induction generator-based wind farm for small-signal stability studies of weak power system [J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(7): 765-774.
- [23] 赵卓立, 杨苹, 蔡泽祥, 等. 含风电孤立中压微电网静态电压稳定性分析及改善策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 13-19.
- ZHAO Zhuoli, YANG Ping, CAI Zexiang, et al. Analysis and improvement of steady-state voltage stability for isolated medium-voltage microgrid with wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 13-19.
- [24] 蒋长江, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及风电随机激励的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 100-108.
- JIANG Changjiang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Transient stability analysis of power system considering wind-power stochastic excitation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 100-108.

作者简介:



许伯强

许伯强(1972—),男,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断(E-mail:xbq_ncepu@126.com);

张舒怡(1991—),女,福建南平人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为双馈风力发电系统稳定性(E-mail:zsy0612aza@163.com)。

Modeling and stability analysis of DFIG with stator fault

XU Boqiang, ZHANG Shuyi

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A small signal stability analysis model is established for DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) with SWITSC (Stator Winding Inter-Turn Short Circuit) to study its stability. Its eigenvalues are analyzed based on Lyapunov stability theory and the loci of its dominant eigenvalues are drawn. The key control parameter greatly influencing the stability of DFIG is found and the variation of DFIG stability is analyzed based on the simulative waveforms. Conclusion is that, although the stability of DFIG declines due to its SWITSC, it still maintains stable operation as long as both the wind speed and key control parameter are reasonable.

Key words: doubly-fed induction generator; wind power; stator winding inter-turn short circuit; small signal stability; eigenvalue analysis; control parameters