

# 定子匝间短路故障下双馈风力发电机组高压穿越性能研究

胡兰青, 孙丽玲

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为了研究定子绕组匝间短路(SWITSC)故障对双馈风力发电机组高压穿越的影响,基于多回路理论建立了计及定子绕组匝间短路故障的双馈感应发电机(DFIG)仿真模型,并在 MATLAB/Simulink 下建立了其 S-函数。依据短路故障回路特性,分别在 SWITSC 前后建立了 DFIG 风电机组的 ABC 坐标系统和  $dq0$  坐标系统下的数学模型,并简要分析了 SWITSC 故障下的电磁特性。对双馈风电机组的高压穿越能力做出分析,分析了风电场电压升高的原因、高压穿越的标准及双馈风机在电网电压骤升下的暂态过程。重点研究了 DFIG 在 SWITSC 故障前后高压穿越的仿真结果。结果表明,定子绕组匝间短路故障会严重降低风电场的高压穿越的能力。

**关键词:** 双馈感应发电机; 定子绕组匝间短路; 高压穿越; 仿真

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)05-0108-08

## High Voltage Ride Through Research of Doubly-Fed Induction Generator System Under Sator Winding Inter-Turn Short Circuit Faulty Condition

HU Lanqing, SUN Liling

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

**Abstract:** In order to study the effect of high voltage ride through (HVRT) of doubly-fed wind power system under sator winding inter-turn short circuit (SWITSC) faulty condition, based on the multi loop theory, a simulation mode of doubly fed induction generator under SWITSC faulty condition was established, the S-function in the MATLAB/Simulink was established. On the basis of fault loop characteristics, mathematical model of DFIG wind turbine on ABC coordinate system and  $dq0$  coordinate system were established under normal and fault condition, and the electromagnetic characteristics was analyzed briefly under SWITSC fault, then the capability of high voltage ride through of DFIG was analyzed, the reason and the transient process of wind farm voltage rise were analyzed. The standard of high voltage ride through was provided. Focused on the simulation results of HVRT of DFIG under SWITSC faulty condition, the explanation was given. The results showed that SWITSC faulty destroyed capability of HVRT of DFIG to a great extent.

**Key words:** doubly-fed induction generator (DFIG); stator winding inter-turn short circuit (SWITSC); high voltage ride through (HVRT); simulation

## 0 引言

目前,能源短缺和环境恶化已经成为威胁人类自身生存和发展的两大问题。风能作为清洁可再生能源,近年来随着风电装机并网容量的增大,拓展了其应用前景。在风力发电系统中,变速恒频双

馈风力发电机组已成为主力机型,使得双馈感应发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)机组的仿真、建模、稳定性及故障分析已成为国内外学者研究的热点。随着双馈风电机组对电网的影响逐渐加强,加上运行环境恶劣,一旦发生故障,修复难度较大,故研究电机的早期故障对风电场的运

作者简介: 胡兰青(1989—),女,硕士研究生,研究方向为双馈风力发电系统稳定性研究。

孙丽玲(1972—),女,副教授,研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断。

行稳定性和供电可靠性有重要作用,同时也为故障风机的高低电压穿越提供了理论支持<sup>[1]</sup>。资料显示,定子绕组匝间短路(Stator Winding Inter-Turn Short Circuit, SWITSC)故障是破坏性极强的发电机内部故障,可达电机总故障的 30% 以上<sup>[2-5]</sup>,若不加治理将会发展成严重的相间短路和单相接地故障等。因此研究 SWITSC 故障迫在眉睫。文献[6]基于多回路理论引入 EEMD-HHT 方法排除了传统 HHT 方法中因电压不平衡、变转子转速等因素造成的定子绕组匝间短路检测的干扰,优化了检测方法;文献[7]选取了适当的负载电流检测阈值检测定子绕组的匝间短路故障并通过了仿真验证。此外,为保障大规模风电系统接入电网能够长期安全可靠运行,必须保证双馈风机有较高的电网故障穿越能力。低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)研究技术比较成熟,由低压穿越失败衍生出的高电压穿越(High Voltage Ride Through, HVRT)或由于电网故障带来的高压穿越能力不足,会引起风电机组的继电保护动作而脱网,对电网的可靠运行同样造成很大危害,因而研究定子故障的双馈风机的 HVRT 能力具有实际意义<sup>[8-12]</sup>。文献[13]着重分析了风机 HVRT 的运行特性。

本文在建立 SWITSC 故障并计及风速、风力机、换流器及其相关控制的 DFIG 风电机组整体数学模型下,重点研究和分析了 DFIG 在 SWITSC 故障前后 HVRT 的暂态性能,通过仿真结果验证了 SWITSC 故障对风电机组的 HVRT 危害极大,为故障风机高压病态运行性能的研究提供理论指导意义。

## 1 DFIG 风电机组的数学模型

假设电机处于理想电机运行条件<sup>[14]</sup>,在 MATLAB/Simulink 2014a 自带风机仿真模型基础上,基于多回路理论建立了定子绕组匝间短路的 DFIG 的 S-函数。通过仿真例子程序验证了该 S-函数的正确性。根据 SWITSC 故障前后的物理模型建立了正常电机与故障电机的数学模型。

### 1.1 正常电机数学模型

电机定转子绕组并非一直完全对称,绕组不对称情况发生后产生很强的空间谐波磁场,传统的对称分量无法应用,而多回路分析法可全面计及气隙

磁场的空间谐波,并把绕组的具体分布及联结方式考虑在内,在单个线圈电感计算的基础上采用叠加原理计算回路参数,可更为准确描述定、转子绕组的分布情况。图 1 为 DFIG 的物理模型列写正常电机的数学模型。其中定、转子回路均采用电动机惯例,即定、转子的正值电流均产生正值磁链。

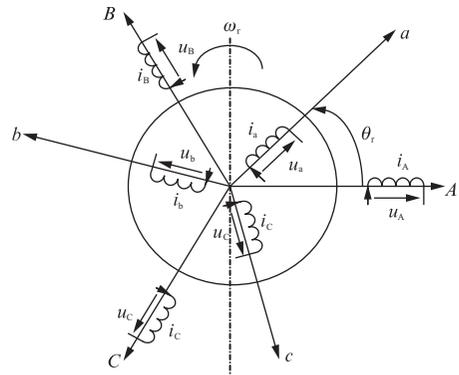


图 1 DFIG 正常情况下的物理模型

#### 1.1.1 三相 ABC 静止坐标系下的数学模型

(1) 电压方程。

$$U = RI + p\psi \quad (1)$$

$$I = [i_{sA} \quad i_{sB} \quad i_{sC} \quad i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T$$

$$\psi = [\psi_{sA} \quad \psi_{sB} \quad \psi_{sC} \quad \psi_{ra} \quad \psi_{rb} \quad \psi_{rc}]^T$$

式中:  $u_{sA}$ 、 $u_{sB}$ 、 $u_{sC}$ ——定子 A、B、C 三相绕组电压;

$u_{ra}$ 、 $u_{rb}$ 、 $u_{rc}$ ——转子 a、b、c 三相绕组电压(归算值);

$i_{sA}$ 、 $i_{sB}$ 、 $i_{sC}$ ——定子 A、B、C 三相绕组电流;

$i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$ ——转子 a、b、c 三相绕组电流(归算值);

$R$ ——定转子三相绕组电阻的六阶矩阵,不再列出,其中  $r_s$ 、 $r_r$  为定、转子一相绕组电阻;

$p$ ——极算子。

(2) 磁链方程。

$$\psi = MI \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $M$ ——定、转子的电感矩阵;

$L_{ss}$ 、 $L_{rr}$ ——分别表示定子间、转子间的互感矩阵;

$M_{sr}$ 、 $M_{rs}$ ——分别表示定子匝链到转子间

的互感矩阵及转子匝链到定子侧的互感矩阵。

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix}, L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

$$M_{sr} = \begin{bmatrix} M_{Aa} & M_{Ab} & M_{Ac} \\ M_{Ba} & M_{Bb} & M_{Bc} \\ M_{Ca} & M_{Cb} & M_{Cc} \end{bmatrix}, M_{rs} = \begin{bmatrix} M_{aA} & M_{aB} & M_{aC} \\ M_{bA} & M_{bB} & M_{bC} \\ M_{cA} & M_{cB} & M_{cC} \end{bmatrix}$$

其中各个电感参数分别为： $L_{ik}(i, k = A, B, C, a, b, c, i = k)$  为定转子三相绕组自感系数,  $M_{ik}(i, k = A, B, C, i \neq k)$  为定子 A、B、C 三相绕组间互感系数;  $M_{ik}(i, k = a, b, c, i \neq k)$  为转子 a、b、c 三相绕组间互感系数(归算值);  $M_{ik}(i = A, B, C, k = a, b, c)$  定、转子三相绕组间互感系数(归算值)。

(3) 电磁转矩方程。

$$T_e = \frac{p}{2} I^T \frac{\partial M}{\partial \gamma} I \quad (4)$$

根据能量守恒定律推出电磁转矩方程,即在感应电机运行时,电磁转矩为电流恒定时磁场的储能对转子的空间机械弧度  $\theta_r$  的偏导数。

(4) 转子运动方程。

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_m - F\omega_r), \omega_r = \frac{d\gamma}{dt} \quad (5)$$

式中:  $J$ ——转动惯量;

$T_e$ ——电磁转矩;

$T_m$ ——机械转矩;

$F$ ——转子黏性摩擦因数。

### 1.1.2 两相旋转 dq 坐标系下的数学模型

由三相 ABC 静止坐标系向两相旋转 dq 坐标系下的转换过程及各参数具体计算参见文献 [15], 这里不再赘述。

## 1.2 SWITSC 故障电机下的数学模型

启用 MATLAB/Simulink 下的 S-函数,使 DFIG 工作在 SWITSC 故障状态下,研究其等效的物理模型及数学模型。

### 1.2.1 三相 ABC 静止坐标系下的数学模型

定子绕组匝间短路故障是 DFIG 比较严重的内部故障,发生故障的原因大多是雷击、变桨距控制以及变流器电力电子器件高速开关所导致的过电压。定子绕组的第一个线圈是该过电压的主要

承担者,所以 SWITSC 经常发生在定子绕组的第一个线圈上。假定定子 A 相绕组发生短路故障,如图 2 所示。

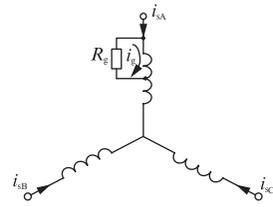


图 2 SWITSC 故障示意图

在 SWITSC 故障下,短路匝线圈作为一个新的回路而增加了一个新的电流回路。回路方程为

$$\frac{d\psi_g}{dt} + (R_g + r_{sg})i_g + r_{sg}i_{sA} = 0 \quad (6)$$

此时的定子 A 相回路电压方程变为

$$u_{sA} = \frac{d\psi_{sA}}{dt} + r_{sg}i_g + r_s i_{sA} \quad (7)$$

式中:  $\psi_g$ ——短路回路磁链;

$r_{sg}$ ——定子 A 相绕组匝间短路部分的电阻;

$R_g$ ——接入短路回路的滑动变阻器的电阻设定值。

电压方程

$$U_F = R_F I_F + p\psi_F \quad (8)$$

磁链方程

$$\psi_F = M_F I_F \quad (9)$$

电磁转矩方程

$$T_{eF} = \frac{n_p}{2} I_F^T \frac{\partial M_F}{\partial \gamma} I_F \quad (10)$$

转子运动方程

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_{eF} - T_m - F\omega_r) \quad (11)$$

电压、磁链各增加了一阶故障相短路回路,由式(7)和式(8)具体展开矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \\ u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{sg} \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ r_{sg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_g + r_{sg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \\ i_g \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_{sA} \\ \psi_{sB} \\ \psi_{sC} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \\ \psi_g \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sA} \\ \psi_{sB} \\ \psi_{sC} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \\ \psi_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & M_{AB} & M_{AB} & M_{AB} & M_{Ag} + L_{gg} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & M_{Ba} & M_{Bb} & M_{Bc} & M_{Bg} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & M_{Ca} & M_{Cb} & M_{Cc} & M_{Cg} \\ M_{aA} & M_{aB} & M_{aC} & L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{ag} \\ M_{bA} & M_{bB} & M_{bC} & M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{bg} \\ M_{cA} & M_{cB} & M_{cC} & M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cg} \\ M_{gA} + L_{gg} & M_{Bg} & M_{Cg} & M_{ag} & M_{bg} & M_{cg} & L_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \\ i_g \end{bmatrix}$$

短路故障后的电感参数发生变化,电感矩阵中与增加的  $g$  回路相关的电感参数需根据多回路模型电感参数进行推导,矩阵中各电感参数计算如下:

$$\begin{cases} L_{gg} = \frac{2}{3}\mu^2 L_m + \mu L_{sl} \\ M_{Ag} = M_{gA} = \mu(1 - \mu)L_{AA} \\ M_{Bg} = M_{gB} = M_{Cg} = M_{gC} = \mu M_{AB} \\ M_{ag} = M_{ga} = \mu M_{aA} \\ M_{bg} = M_{gb} = \mu M_{bA} \\ M_{cg} = M_{gc} = \mu M_{cA} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $L_{gg}$ ——匝间短路回路自感系数;  
 $\mu$ ——短路匝数比,且短路匝数比值越大,短路电流越大;  
 $M_{gA} = M_{Ag}$ ——定子 A 相绕组匝间短路故障后定子 A 相绕组(不包括匝间短路部分)与匝间短路回路间互感系数;  
 $M_{Bg}$ 、 $M_{Cg}$ ——定子 B、C 相绕组与匝间短路回路间互感系数;  
 $M_{ag}$ 、 $M_{bg}$ 、 $M_{cg}$ ——转子 a、b、c 三相绕组与匝间短路回路间互感系数;

$$C_{3s/dq} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\cos\gamma' & \frac{2}{3}\cos\left(\gamma' - \frac{2}{3}\pi\right) & \frac{2}{3}\cos\left(\gamma' + \frac{2}{3}\pi\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3}\sin\gamma' & -\frac{2}{3}\sin\left(\gamma' - \frac{2}{3}\pi\right) & -\frac{2}{3}\sin\left(\gamma' + \frac{2}{3}\pi\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3}\cos(\gamma' - \gamma) & \frac{2}{3}\cos\left(\gamma' - \gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \frac{2}{3}\cos\left(\gamma' - \gamma + \frac{2}{3}\pi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{3}\sin(\gamma' - \gamma) & -\frac{2}{3}\sin\left(\gamma' - \gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & -\frac{2}{3}\sin\left(\gamma' - \gamma + \frac{2}{3}\pi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$L_m$ ——激磁电感;  
 $L_{sl}$ 、 $L_{rl}$ ——定转子一相绕组漏感。

在三相静止坐标系中,由于转子旋转使得定、转子之间的互感为定、转子间位置角的余弦函数,电机运行特性的描述也是一组非线性、时变系数的微分方程组。但是,这对求解和分析系统的稳定性带来很大困难,因而,要从简化磁链关系入手借助坐标变换技术来简化 DFIG 数学模型。

### 1.2.2 两相旋转 dq 坐标系下的数学模型

坐标变换作为一种线性变换,其实质是物理量的变换。一般先由三相静止坐标系向两相静止坐标系转换,再向 dq 旋转坐标系转换,转化过程参见文献[16],不再赘述。由式(7)~式(8)经坐标变换得在 dq 坐标系下方程:

$$U_F^{dq} = C_{3s/dq} R_F C_{3s/dq}^{-1} I_F^{dq} + C_{3s/dq} p (M_F C_{3s/dq}^{-1} I_F^{dq}) \quad (13)$$

将各个电阻、电感参数代入式(11),推导后可得

$$U_F^{dq} = A_F p I_F^{dq} + B_F I_F^{dq} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{cases} U_F^{dq} = [u_{sd} & u_{sq} & u_{s0} & u_{rd} & u_{rq} & u_{r0} & 0]^T \\ I_F^{dq} = [i_{sd} & i_{sq} & i_{s0} & i_{rd} & i_{rq} & i_{r0} & i_g]^T \\ \psi_F^{dq} = [\psi_{sd} & \psi_{sq} & \psi_{s0} & \psi_{rd} & \psi_{rq} & \psi_{r0} & \psi_g]^T \end{cases} \quad (15)$$

$C_{3s/dq}$ ——三相坐标系到 dq 坐标系的坐标变换矩阵;

$C_{3s/dq}^{-1}$ ——逆矩阵。

$C_{3s/dq}^{-1}$ 具体为

其逆矩阵为

$$C_{3s/dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\gamma' & -\sin\gamma' & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\left(\gamma' - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma' - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\left(\gamma' + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma' + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\gamma' - \gamma) & -\sin(\gamma' - \gamma) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\left(\gamma' - \gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma' - \gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\left(\gamma' - \gamma + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma' - \gamma + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中： $\gamma$ ——转子  $a$  相绕组轴线领先于定子  $A$  相绕组轴线的空间电弧度， $A_F$ 、 $B_F$  矩阵较大，可通过式(13)与上述坐标变换矩阵推出，此处不再列写。

同样的方法，由式(9)可推出电磁转矩方程为

$$T_{eF} = \frac{n_p}{2} (C_{3s/dq}^{-1} I_F)^T \frac{\partial M_F}{\partial \gamma} (C_{3s/dq}^{-1} I_F) \quad (16)$$

代入具体矩阵方程，计算可得其电磁转矩方程为

$$T_{eF} = n_p L_m \left[ \frac{3}{2} (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) - \mu (i_g i_{rd} \sin\gamma' + i_g i_{rq} \cos\gamma') \right] \quad (17)$$

### 1.3 DFIG 在 SWITSC 故障的电磁特性分析

由图 2 可得，DFIG 在 A 相定子绕组发生匝间短路故障时，A 相绕组等效匝数减少，三相绕组不再对称，三相电流大小与相位角也发生变化，使得电机的电磁转矩发生变化。根据以下的异步电动机电磁转矩物理表达式加以说明。

$$T_e = \frac{\mu_0 \pi D L p}{2\delta} F_1 F_2 \sin\theta_{12} \quad (18)$$

式中： $\delta$ ——气隙长度；

$\mu_0$ ——真空磁导率；

$D$ ——定子铁心内径；

$L$ ——定子铁心长度；

$p$ ——极对数；

$F_1$ 、 $F_2$ ——定、转子侧磁动势；

$\theta_{12}$ ——其空间夹角。

在电机本身固有参数不变的情况下，电磁转矩是定转子侧磁动势的函数。当两磁动势的大小和相位不变时电磁转矩不会变化；当发生 SWITSC 时，绕组的变化引起各相电流的变化，又因为磁动

势与电流成正比，故而使得电机的电磁转矩发生变化。这增加了 DFIG 高压穿越的阻力。短路相由于绕组有效匝数减少，阻抗减少，使该相的电流增大，还会使各相电流谐波含量明显增加。其中定子 A 相绕组短路故障前后谐波含量如图 3(b) 所

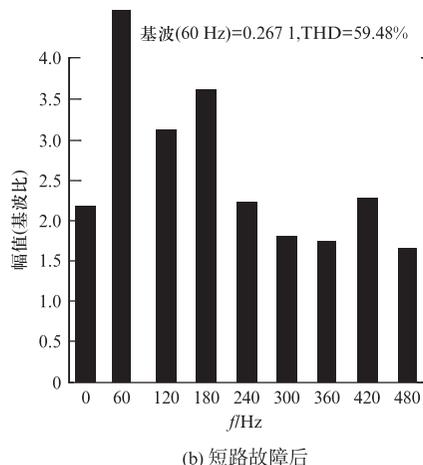
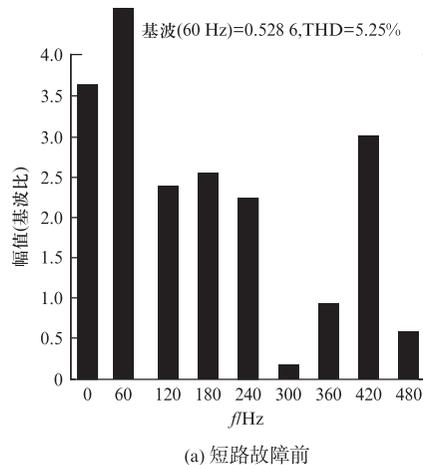


图 3 SWITSC 故障风机定子 A 相电流谐波含量

示,各次谐波含量大幅上升,使谐波总畸变率达到 59.48%。此外,匝间短路支路电流迅速增大,这是因为匝间短路电流大小由短路线圈的感应电动势阻抗所决定,短路故障下的感应电动势大而阻抗小,从而使得短路支路电流很大,引起电能损耗,使局部温度升高,甚至会带来更大的灾难性事故。DFIG 在 SWITSC 故障下进行 HVRT 的“病态”运行,将会对风电场自身安全、可靠、稳定运行带来极大危害,同时也会加大对电网造成谐波污染,降低电能质量。

## 2 DFIG HVRT 能力分析

DFIG 如果不具备 HVRT 能力将会使大型风电机组因为过电压保护动作而脱网,造成风能资源的大幅度浪费,引起电网供电可靠性的降低,文献[17]对风机脱网事故进行了详细的分析,表明了 DFIG 具备高压穿越能力的必要性。

### 2.1 风电场电压升高原因

(1) 风电场自身引起的电压升高。当电网电压骤降时,因风电场 HVRT 能力不足导致风机相继脱网,使得风电机组系统内部无功功率过高,即便低压引起的脱网过程结束,风机由于不具备 HVRT 能力而引起更大范围的脱网,因而说风机的高低电压穿越是彼此关联的。除此之外,在电网正常情况下,风电场也可能由于无功电压调整能力不足、电容器投切不当而引起电压骤升。

(2) 接入电网引起的电压升高。电网正常运行下,负载的突然变化会引起风电场电压的升高。当电网发生单相接地故障时非故障相电压升高至线电压;当发生两相接地故障时非故障相电压可升高至其额定值的 1.5 倍。可见,风电场电压骤升现象普遍存在,研究双馈风机的 HVRT 性能对整个风电系统的稳定运行意义重大。

### 2.2 HVRT 标准

根据上述分析,为增强风电场及其对电力系统的稳定运行功能,风机在具备 HVRT 能力的同时也必须具备 HVRT 能力。目前,由于国内的 HVRT 技术研究还不太成熟,对 HVRT 的标准未作出具体要求,但对并网运行的电压范围有所规定:当风电场网点电压在标称电压的 90%~110% 时风电机组应能正常工作;当高于 110% 时则由机组运行性能而定。各国对风机 HVRT 的要求标

准不尽相同。图 4 为澳洲 HVRT 标准:电压达 1.3 p.u. 时机组应在 60 ms 内不脱网,开始降落至 1.1 p.u. 的过程中能持续 1 s 不脱网。其他国家的标准不再一一介绍。

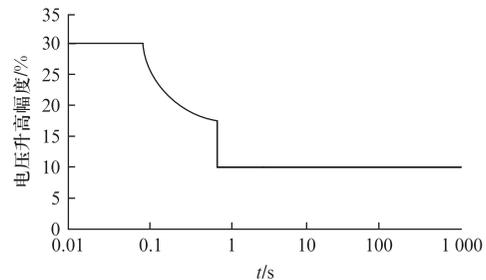


图 4 澳洲高电压穿越标准

### 2.3 电网电压升高下 DFIG 暂态过程分析

(1) 定子磁链暂态分析。DFIG 在电网电压上升过程中基于三相静止坐标系对定子磁链暂态过程加以分析。定、转子侧的电压磁链方程如下:

$$u_s = r_s i_s + p\psi_s \quad (19)$$

$$u_r = r_r i_r + p\psi_r - j\omega_r \psi_r \quad (20)$$

$$\psi_s = L_s i_s + M i_r \quad (21)$$

$$\psi_r = L_r i_r + M i_s \quad (22)$$

式中:  $M$ ——定、转子互感。

为简化分析,在式(20)中忽略转子侧电流,即视转子开路,由式(18)和式(19)可得

$$p\psi_s = u_s - \frac{r_s}{L_s} \psi_s \quad (23)$$

假设电网电压在  $t=t_0$  时刻骤升,则风机定子侧电压相应从  $U_{s1}$  上升到了  $U_{s2}$ ,定子侧电压方程可表示为

$$U_s = \begin{cases} U_{s1} e^{j\omega_s t} = U_s e^{j\omega_s t} & (t < t_0) \\ U_{s2} e^{j\omega_s t} = U_s e^{j\omega_s t} + m U_s e^{j\omega_s t} & (t > t_0) \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $m = (U_{s2} - U_s) / U_s$ ——定子侧电压升高幅值。

结合式(22)和式(23)可得定子磁链故障前后表达式为

$$\psi_s = \begin{cases} \frac{U_{s1}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} = U_s e^{j\omega_s t} & (t < t_0) \\ \frac{U_{s2}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} = U_s e^{j\omega_s t} + m U_s e^{j\omega_s t} & (t > t_0) \end{cases} \quad (25)$$

由式(24)可知,在电压上升前,定子磁链取决于电网电压,是一强制分量;在电网电压上升后,定子磁链包含强制分量和直流分量,强制分量与升高

后的电网电压成正比,且以同步角速度旋转,直流分量是用来在电网电压上升过程中维持定子磁链连续的瞬态分量,其幅值随时间逐渐衰减。

(2) 直流母线电压暂态分析。风电场得以稳定运行的一个重要条件就是直流侧母线电压的恒定。电网电压的突升将会引起定子磁链瞬态分量的变化使转子电流瞬间增大,转子电流和电压的波动最终会引起直流母线电压的上升,不利于风电并网的稳定运行。究其根本原因,就是因为DFIG 风电机组的功率输入输出不平衡导致的。直流母线功率消耗方程为

$$\frac{1}{2}C \frac{dU_{dc}^2}{dt} = P_r - P_g = u_{rd}i_{rd} - P_g \quad (26)$$

式中:  $U_{dc}$ ——直流母线电压;

$P_r$ ——转子侧流向直流侧的功率;

$P_g$ ——网侧流向转子侧的功率。

易知直流母线电压与转子  $d$  轴电压电流、网侧输出功率都有关,电压上升暂态过程中,  $P_g$  变化不明显,转子  $d$  轴电压电流迅速上升,进而引起直流母线电压的跃升。SWITSC 故障加剧了定子磁链和转子电流的变化,使得直流母线电压跃变更加严重。

### 3 故障 DFIG HVRT 仿真

本文在 MATLAB/Simulink 环境下建立了一个包含大电网、线路与 DFIG 机组的典型风力发电系统,并在此基础上建立匝间短路故障的 S-函数模块。基于 MATLAB/Simulink 例程进行了仿真,验证了所建 S-函数模块的正确性。为了有效验证 DFIG 机组在 SWITSC 故障下对高压穿越的影响,分别对故障前后的仿真结果做了对比与分析。本文以额定容量为 1.5 MVA 的 DFIG 为例,其基本参数设置如下:定子额定电压 575 V,定子额定频率 60 Hz,短路比  $\mu = 0.15$ ,短路回路电阻  $R_g = 0.01 \Omega$ ,假定风机处于正常风速 10 m/s 下,在 2 s 时刻风电机组电压骤升为 1.3 p.u.,0.5 s 之后故障切除,待机组恢复到故障前状态后,在 5 s 时刻风电机组电压再次骤升为 1.3 p.u. 且开启 SWITSC 故障,设 0.5 s 之后电压恢复且短路故障持续,仿真时间为 10 s。

#### 3.1 仿真结果

仿真结果如图 5(a)~图 5(k) 所示。

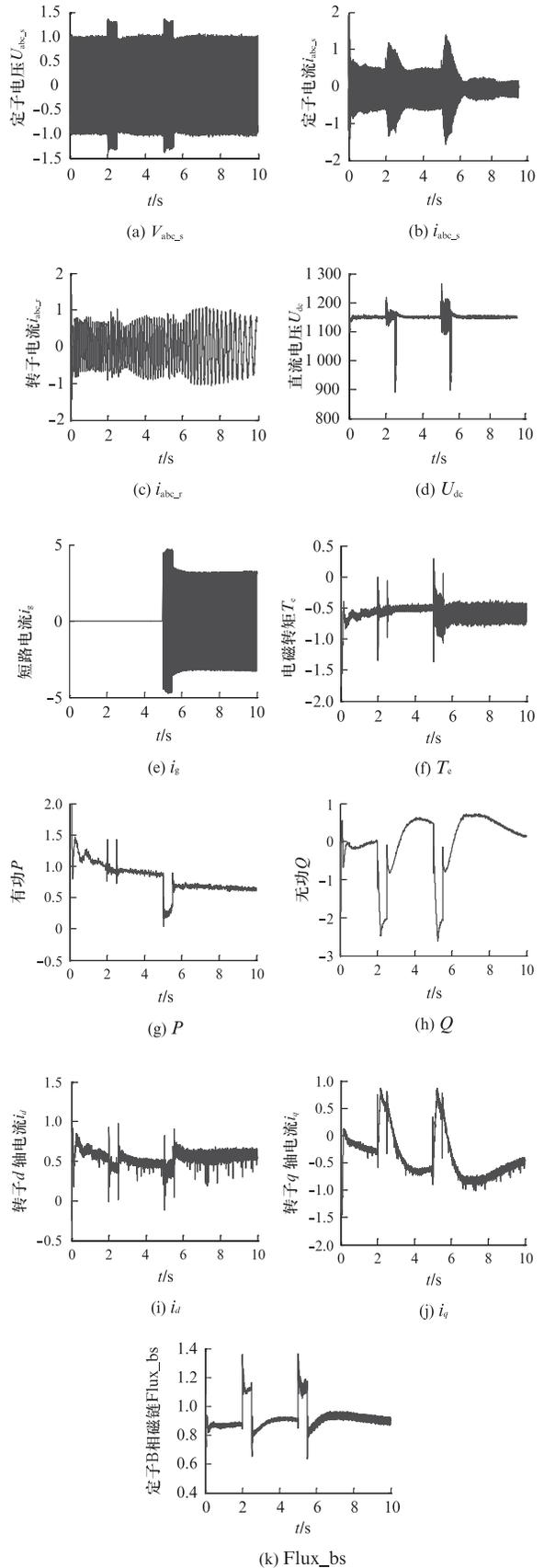


图 5 SWITSC 故障下 DFIG HVRT 仿真图

### 3.2 仿真结果分析

由仿真结果可知,在电网电压骤升到 1.3 p.u. 时,首先影响到定子的电压和电流,由于定子直接挂接到电网中,因而网侧电压与电网变化一致,与定子匝间短路故障无关,示于图 5(a)。电压突升使定子电流迅速增大,由图 5(b)可知,正常 DFIG 下定子电流骤升到 1.0 p.u.,而 SWITSC 故障下的机组定子电流则突升到 1.2 p.u.,尤其短路 A 相电流,由于有效匝数减少,阻抗减小造成该相定子电流增大最明显,增加了机组故障穿越的难度。定子侧电压电流的变化直接导致变流器网侧电流和电压的突增,使能量全部堆积在直流母线上,造成了直流母线电压的快速升高,且 SWITSC 故障在高压下把  $U_{dc}$  抬高到 1 250 V,较正常机组在高压下的直流电压大了许多,示于图 5(d)。若不采取有效措施会使电流由变流器中的反并联二极管通入母线电容,造成网侧变流器失控,给整个风电机组带来更大的潜在性故障。转子侧电流在高压故障下也相应增大,且 SWITSC 会使 DFIG 高压穿越后的静态稳定性变差。图 5(e)表明,匝间短路故障使短路回路电流增大近 5 p.u.,这是由于短路线圈产生的感应电动势较大而阻抗很小引起的。在图 5(f)中,由式(17)可知,电磁转矩受定转子磁动势的影响,而磁动势与电流成正比,SWITSC 引起的定转子电流变化带来电磁转矩的增大,在高压故障下变化效果更明显,且在电压恢复后仍有很大波动,不利于风电机组运行的稳定性。高压穿越过程增加了定子磁链的瞬态分量,会迅速增大,SWITSC 故障加剧了系统的不稳定性,示于图 5(k)。由图 5(h)可知,在高压故障下,网侧换流器实施最大无功电流跟踪控制,在高压过程从电网中吸收大量的无功功率以减弱对机组的危害,顺利实现高压穿越,无功的变化与匝间短路故障关系不大。此外,高压故障下 DFIG 定子匝间短路同时会引起风机输出有功功率的大幅降低,示于图 5(g)。

## 4 结 语

本文主要针对定子绕组匝间短路故障,研究 DFIG 风电机组的 HVRT 能力。通过分析 SWITSC 过程的电磁特性和 HVRT 能力,在仿真平台上对 SWITSC 故障的 DFIG 风电机组的 HVRT 进行了

仿真,通过改变短路匝数比  $\mu$  及  $R_g$ ,均可得到相同的结论,且短路比越大效果越明显。仿真结果表明,SWITSC 故障对 DFIG 风电机组高压故障下的穿越产生严重破坏作用,使得直流母线电压、短路支路电流、定子磁链等迅猛增加,电磁转矩、转子电流等的大幅度波动,严重降低了 DFIG 风电机组的 HVRT 能力,不利于风电场及电网的长期稳定运行。

### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 魏书荣,符杨,马宏忠.双馈风力发电机定子绕组匝间短路诊断与实验研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(11): 25-28.
- [ 2 ] 肖雅丽,方瑞明,李文彭.双馈感应风力发电系统状态监测方法综述[J].电网与清洁能源,2012,28(3): 68-73.
- [ 3 ] YAZIDI A, HENAO H, CAPOLINO G A, et al. Double-fed three-phase induction machine model for simulation of inter-turn short circuit fault[C]//The Proceedings of IEEE International Electric Machine and Drives Conference, Miami, USA; IEEE, 2009: 571-576.
- [ 4 ] SHAH D, NANDI S, NETI P. Stator-interturn-fault detection of doubly-fed induction generators using rotor-current and search-coil-voltage signature analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009,45(5): 1831-1842.
- [ 5 ] KIA M Y, KHEDERI M, NAJAFI H R, et al. Hybrid modeling of doubly fed induction method using wavelet analysis generators with inter-turn stator fault and its detection [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013,7(9): 982-990.
- [ 6 ] 李俊卿,于海波,张立鹏.EEMD-HHT 方法在双馈式感应发电机定子绕组匝间短路故障分析中的应用研究[J].华北电力大学学报,2014,41(5): 42-46.
- [ 7 ] 钱雅云,马宏忠,张志新,等.基于多回路模型的双馈异步发电机匝间短路故障检测方法研究[J].大电机技术,2012(5): 35-38.
- [ 8 ] 谢震,张兴,宋海华,等.电网电压骤升故障下双馈风力发电机变阻尼制策略[J].电力系统自动化,2012,36(3): 39-45.
- [ 9 ] MORREN J, HAAN S W. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005,20(2): 435-441.

(下转第 127 页)