

定子匝间短路时双馈异步发电机电磁转矩的研究*

张 艳, 马宏忠, 付明星, 黄春梅, 顾苏雯

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 定子绕组匝间短路故障会引起双馈异步发电机气隙磁场的畸变, 从而导致电磁转矩的变化, 因此电磁转矩可作为故障特征之一。基于能量法分析定子绕组匝间短路故障前后电磁转矩的变化特征, 建立了双馈异步发电机的多回路数学模型, 并对其正常和不同程度匝间短路时的电磁转矩进行仿真计算。对仿真结果进行频谱分析, 得到了定子绕组匝间短路故障前后电磁转矩谐波分量的变化规律, 验证了理论分析的正确性。定子绕组匝间短路故障和电磁转矩的关联特征可以作为诊断定子绕组匝间短路故障的依据。

关键词: 双馈异步发电机; 匝间短路; 电磁转矩; 多回路; 频谱分析

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)09-0016-06

Research on Electromagnetic Torque of Doubly-Fed Induction Generators with Stator Winding Inter-Turn Short Circuit*

ZHANG Yan, MA Hongzhong, FU Mingxing, HUANG Chunmei, GU Suwen

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The stator winding inter-turn short circuit fault can cause the air gap magnetic field distortion of doubly-fed induction generators, which leads to the change of electromagnetic torque. The electromagnetic torque the same as electrical parameters can be used as the fault characteristics. The electromagnetic torque change characteristics before and after stator winding inter-turn short circuit fault were analyzed based on the energy method, and the multi-loop mathematical model of doubly-fed induction generators was established to calculate the electromagnetic torque of the normal and different degree of inter-turn short circuit fault. The harmonic variation characteristics of electromagnetic torque before and after the stator winding inter-turn short circuit fault were obtained by the spectrum analysis of the simulation results, which verified the correctness of the theoretical analysis. The correlation characteristics between stator winding inter-turn short circuit fault and electromagnetic torque could be used as the basis for fault diagnosis of doubly fed induction generators.

Key words: doubly-fed induction generators; inter-turn short circuit; electromagnetic torque; multi-loop; spectrum analysis

0 引 言

在当今清洁能源大力发展的背景下, 风力发电装机容量急剧增加, 其中双馈异步发电机以其调速范围宽、有功和无功功率可独立调节, 以及所

需励磁容量较小的优点, 迅速成为风电机组中的主流机型^[1-4]。但因双馈异步发电机运行环境恶劣、运行状况复杂多变, 故其故障率较高。因此, 对双馈异步发电机故障机理和故障特征的研究十分必要。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577050)

作者简介: 张 艳(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为双馈异步发电机状态监测与故障诊断。

马宏忠(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源发电等。

双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障是一种常见的电气故障^[5-6]。由于其故障特征与常规的发电机不同,因此,国内外学者针对此故障做了大量的研究。文献[7]提出通过监测转子相电流和转子探测电压中适当的谐波成分判断定子匝间短路。文献[8]提出通过比较定子电流 Park 矢量轨迹的形状和椭圆环的宽度可以确定是否短路,并可以估计匝间短路的严重程度。文献[9]分析了双馈异步发电机正常情况和不同程度匝间短路故障情况下的谐波变化规律,提出特定频率信号可作为定子匝间短路故障的依据。文献[10]提出了一种基于转子瞬时功率谱分析的双馈风力发电机定子绕组故障的在线监测与诊断新方法,较传统的电压谱、电流谱更灵敏。这些方法均是测量分析双馈异步发电机电气参数的变化情况,而发电机诊断系统需要全面了解发电机的运行机理和故障特征。

双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障必然会引起气隙磁场畸变,从而导致电机电磁转矩的变化,不但会激起发电机定转子的振动,还会使故障更为恶化,因此电磁转矩的分析研究非常有意义。本文基于能量法推导了电磁转矩的表达式,得到了电磁转矩中含有的谐波分量;应用多回路法建立了双馈异步发电机的数学模型,得到电磁转矩波形,验证了其理论推导的正确性。

1 双馈异步发电机气隙磁势和电磁转矩的分析

1.1 正常运行时电磁转矩分析

双馈异步发电机正常运行时,其基波合成磁势可表示为^[11-12]

$$F(\alpha, t) = F_s(\alpha, t) + F_r(\alpha, t) = F_s \cos(\omega_1 t - p\alpha) + F_r \cos\left(\omega_1 t - p\alpha + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

其中: $\Psi = \varphi + \theta + \phi$

式中: F_s ——定子绕组三相基波磁势;

F_r ——转子绕组三相基波磁势;

ω_1 ——同步电角频率;

p ——极对数;

α ——定子机械角度;

φ ——功率因数角;

θ ——功角;

ϕ ——转子扭振角。

不计双馈异步发电机转子偏心与受热变形的影响,且定、转子间的气隙均匀,则其单位面积的气隙磁导可表示为

$$\Lambda(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{k_\mu \delta_0} = \Lambda_0 \quad (2)$$

式中: μ_0 ——空气磁导系数;

k_μ ——饱和度;

δ_0 ——均匀气隙大小。

气隙空间的磁场能量为^[11]

$$W_m = \frac{R}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^L \{ \Lambda(\alpha, t) [F_s(\alpha, t) + F_r(\alpha, t)]^2 \} dz d\alpha \quad (3)$$

式中: R ——定子内圆半径;

L ——电机轴向有效长度。

根据虚位移原理,双馈异步发电机的电磁转矩为^[10]

$$T_e = -p \frac{\partial W_m}{\partial \phi} \quad (4)$$

当双馈异步发电机的极对数为 2 时,经推导可得其电磁转矩的表达式为

$$T_e = 2\pi F_s F_r \Lambda_0 R L \cos \Psi \quad (5)$$

1.2 定子绕组匝间短路电磁转矩分析

电机内部不对称时,由于气隙磁场的空间谐波较强,各个谐波磁场的转速、转向也各不相同,因而在各个绕组中的电流谐波也较强,即气隙磁场中有较强的空间谐波,电流中有较强的时间谐波。在理想状况下,文献[13]导出了计及空间和时间谐波时的磁感应强度表达式,则定子绕组匝间短路产生的空间磁势可表示为

$$F_s(\alpha, t) = F_{s1} \cos(n p \alpha \pm \omega_1 t) \quad (6)$$

其中: $n = 1, 6k \pm 1 (k = 1, 2, 3, \dots)$

式中: F_{s1} ——定子绕组对应的谐波磁势幅值;

α ——定子机械角度。

由于高次谐波含量较少,故取 $k = 1, 2$, 则

$$F_s(\alpha, t) = F_{s1} \cos(p\alpha \pm \omega_1 t) + F_{s2} \cos(5p\alpha \pm \omega_1 t) + F_{s3} \cos(7p\alpha \pm \omega_1 t) + F_{s4} \cos(11p\alpha \pm \omega_1 t) + F_{s5} \cos(13p\alpha \pm \omega_1 t) \quad (7)$$

由文献[13]知,转子绕组(三相对称绕组)产生的空间磁势可表示为

$$F_r(\alpha, t) = F_{r1} \cos$$

$$\left[np\alpha + (-n\omega t \pm \omega_2 t) + n\left(\frac{\pi}{2} + \Psi\right) \right] \quad (8)$$

其中: $\omega_1 = \omega + \omega_2$

式中: F_{r1} ——转子绕组对应的谐波磁势幅值;

ω ——转子旋转电角速度;

ω_2 ——转子励磁电流的电角速度。

由于转子绕组三相对称,且高次谐波含量较少,故取 $k=1, 2$, 则

$$\begin{aligned} F_r(\alpha, t) = & F_{r1} \cos \left[p\alpha + (-\omega t - \omega_2 t) + \frac{\pi}{2} + \Psi \right] + \\ & F_{r2} \cos \left[5p\alpha + (-5\omega t + \omega_2 t) + 5\left(\frac{\pi}{2} + \Psi\right) \right] + \\ & F_{r3} \cos \left[7p\alpha + (-7\omega t - \omega_2 t) + 7\left(\frac{\pi}{2} + \Psi\right) \right] + \\ & F_{r4} \cos \left[11p\alpha + (-11\omega t + \omega_2 t) + 11\left(\frac{\pi}{2} + \Psi\right) \right] + \\ & F_{r5} \cos \left[13p\alpha + (-13\omega t - \omega_2 t) + 13\left(\frac{\pi}{2} + \Psi\right) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

空间合成磁势可表示为

$$F(\alpha, t) = F_s(\alpha, t) + F_r(\alpha, t) \quad (10)$$

当双馈异步发电机的极对数为 2 时,将式(10)代入式(3)、式(4),可求得电磁转矩的表达式为

$$\begin{aligned} T_e = & 2\pi\Lambda_0 RL \{ F_{r1} F_{s1} [\cos \Psi + \cos(\Psi - \omega_{T1}t)] + \\ & F_{r2} F_{s2} [\cos(5\Psi - \omega_{T2}t) + \cos(5\Psi - \omega_{T3}t)] - \\ & F_{r3} F_{s3} [\cos(7\Psi - \omega_{T4}t) + \cos(7\Psi - \omega_{T5}t)] - \\ & F_{r4} F_{s4} [\cos(11\Psi - \omega_{T6}t) + \cos(11\Psi - \omega_{T7}t)] + \\ & F_{r5} F_{s5} [\cos(13\Psi - \omega_{T8}t) + \cos(13\Psi - \omega_{T9}t)] \} \quad (11) \end{aligned}$$

其中: $\omega_{T1} = \omega + \omega_1 + \omega_2$, $\omega_{T2} = 5\omega - \omega_1 - \omega_2$,

$\omega_{T3} = 5\omega + \omega_1 - \omega_2$, $\omega_{T4} = 7\omega - \omega_1 + \omega_2$,

$\omega_{T5} = 7\omega + \omega_1 + \omega_2$, $\omega_{T6} = 11\omega - \omega_1 - \omega_2$,

$\omega_{T7} = 11\omega + \omega_1 - \omega_2$, $\omega_{T8} = 13\omega - \omega_1 + \omega_2$,

$\omega_{T9} = 13\omega + \omega_1 + \omega_2$ 。

由式(11)可知,当定子绕组匝间短路时,且转差率 $s=0.2$,电磁转矩中将产生频率为 100、

140、240、340、380、480、580 Hz 的谐波分量,若计及更高次空间谐波磁势,同以上推导过程,可推知电磁转矩中还含有频率为 620、720、820、860、960、1 060 Hz 等的谐波分量。

2 双馈异步发电机多回路模型的建立

多回路模型不仅能够计算发电机绕组内、外部电流,而且在计算时还可以考虑气隙磁场空间谐波、定转子绕组布局、连接方式,以及故障空间位置等因素对结果的影响^[14]。

本文所选用的双馈异步发电机定子侧绕组为三角形接线,转子侧绕组为星形接线,且假设电机在故障前为理想电机,分别对所选支路、回路进行编号,各支路序号为 1-9,各回路序号为①-⑧,如图 1 所示。

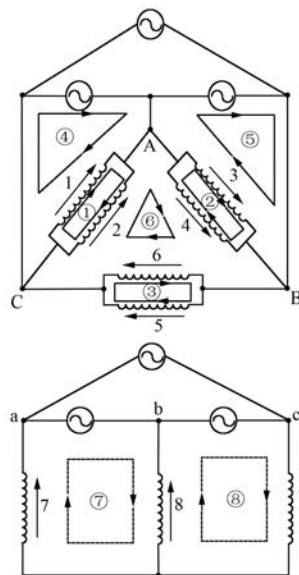


图1 双馈异步发电机的连接示意图

假定发电机定子侧回路按发电机惯例处理,且电流为正时,产生的磁链为负;假定转子侧回路按电动机惯例处理,且电流为正时,产生的磁链也为正。

根据以上假定,可列出各支路电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \\ \psi_5 \\ \psi_6 \\ \psi_7 \\ \psi_8 \\ \psi_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_1 \\ -i_2 \\ -i_3 \\ -i_4 \\ -i_5 \\ -i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \\ \psi_5 \\ \psi_6 \\ \psi_7 \\ \psi_8 \\ \psi_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} & M_{17} & M_{18} & M_{19} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & M_{27} & M_{28} & M_{29} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & M_{37} & M_{38} & M_{39} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_{44} & M_{45} & M_{46} & M_{47} & M_{48} & M_{49} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_{55} & M_{56} & M_{57} & M_{58} & M_{59} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{66} & L_{66} & M_{67} & M_{68} & M_{69} \\ M_{71} & M_{72} & M_{73} & M_{74} & M_{75} & M_{76} & L_{77} & M_{78} & M_{79} \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & M_{84} & M_{85} & M_{86} & M_{87} & L_{88} & M_{89} \\ M_{91} & M_{92} & M_{93} & M_{94} & M_{95} & M_{96} & M_{97} & M_{98} & L_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_1 \\ -i_2 \\ -i_3 \\ -i_4 \\ -i_5 \\ -i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(12)、式(13)可简化为

$$U = p\psi + RI \quad (14)$$

$$\psi = LI \quad (15)$$

式中: U ——定、转子各支路电压;

I ——定、转子各支路电流;

p ——微分算子;

R ——定、转子支路电阻;

L ——各支路间互感(自感)系数。

为方便处理,根据所选回路,可得支路与回路的转换矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

则支路电流和回路电流的关系可以表示为

$$I = H^T I' \quad (17)$$

根据式(14)、式(15)、式(17),可得式(18):

$$HU = HLpI + H(pL)I + HRI \quad (18)$$

$$U' = HLH^T pI' + H(pL)H^T I' + HRH^T I' =$$

$$L'pI' + R'I' \quad (19)$$

其中: $L' = HLH^T$, $R' = H(pL)H^T + HRH^T$ 。

由式(19)可得

$$pI' = (-L')^{-1}R'I' + (L')^{-1}U' \quad (20)$$

式中: I' ——定、转子回路电流;

U' ——定、转子回路电压。

由式(20)可知,重点是各支路间自感、互感系数的计算,可参看相关文献。采用四阶龙格库塔求解此方程组,可得定、转子各回路电流,再经过 H 矩阵变化,即可得到各支路电流值。

发生匝间短路故障后,匝间短路所在支路被分成短路支路和剩余支路,此时支路数增加1个,电压方程数也增加1个,采用上述同样的方法,可进行求解各物理量。

电机的总磁场能量可以表示为

$$W_m = \frac{1}{2} I^T L I \quad (21)$$

根据虚位移原理,电机的电磁转矩可求得

$$T_e = - \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = - \frac{1}{2} I^T \frac{\partial L}{\partial \theta} I \quad (22)$$

式中： θ ——转子机械位移角。

3 仿真结果及分析

根据以上多回路模型,本文对一台额定功率为 5.5 kW 的双馈异步发电机进行仿真。其基本参数如表 1 所示。当双馈异步发电机处于并网运行状态,且转子转速 $n = 1\,200\text{ r/min}$ ($s = 0.2$) 时,分别对发电机正常运行和定子 BC 相一条支路的 2 匝、5 匝、10 匝短路进行仿真分析。

表 1 双馈异步发电机基本参数			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	5.5	额定电压/V	380
额定频率/Hz	50	极对数	2
定子槽数	36	转子槽数	24
定子并联支路数	2	转子并联支路数	1
定子绕组节距	8	转子绕组节距	5
定子每线圈匝数	37	转子每线圈匝数	12
定子导线直流电阻/ $(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	22.4	转子导线直流电阻/ $(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	9.93

图 2 为双馈异步发电机正常与不同程度故障时的电磁转矩波形。通过对比故障前后电磁转矩时域波形可以观察到,当发电机正常运行时,其电磁转矩在 $-27.70\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近波动,发生不同程度的匝间短路故障时,其电磁转矩分别在 -27.14 、 -26.65 、 $-26.51\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近波动。即随着匝间短路故障程度的加深,电磁转矩平均值逐渐降低,其波动范围逐渐增加。

为进一步对电磁转矩进行分析,对故障前后的电磁转矩信号进行傅里叶变换,转换成频域信号进行对比分析。图 3 是定子绕组故障前后的电磁转矩频谱图(不考虑直流分量)。从 3 图中可以看出当双馈异步发电机正常运行时,其主要含有频率为 240、480、720、960 Hz 的谐波;而定子匝间短路故障后,电磁转矩信号中明显出现了频率为 100、140、340、380、580、860、1 060 Hz 的谐波,且 620、820 Hz 变化虽不明显但也比附近频率谐波含量略大,由此验证了理论推导的正确性。

双馈异步发电机定子绕组故障前后的电磁转矩谐波含量对比图如图 4 所示,序列 1~11 分别代表 100、140、240、340、380、480、580、720、860、960、1 060 Hz 频率。从图 4 中可以看出,定子绕组故障

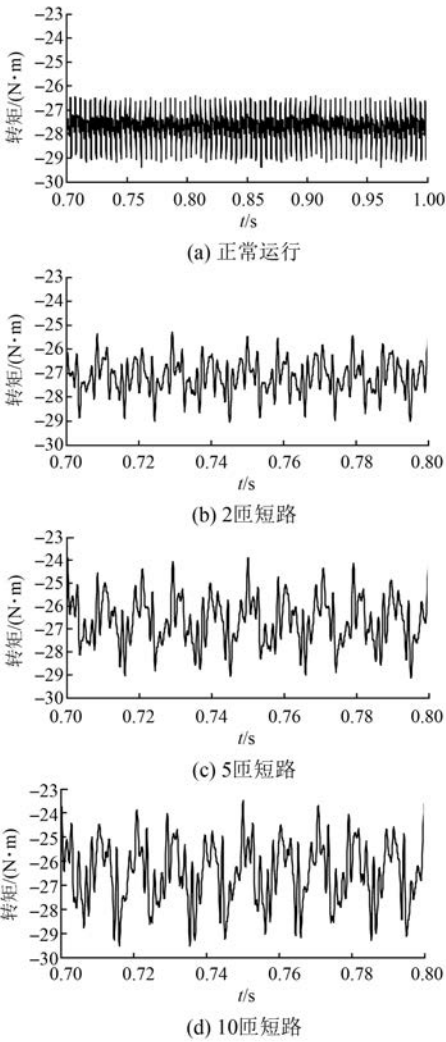


图 2 电磁转矩时域波形

前,100、140、340、380、580、860、1 060 Hz 的含量非常小,但故障后,电磁转矩中这些谐波含量显著增加,其中 100 Hz 含量最高,变化最明显,且 380、580 Hz 变化也相对明显,故电磁转矩中 100 Hz 谐波结合 380、580 Hz 谐波可以作为此状态下双馈异步发电机定子绕组匝间短路的故障特征量。

4 结 语

本文通过分析定子绕组匝间短路时双馈异步发电机气隙磁势及其作用于电磁转矩的变化,得到了故障后电磁转矩中所含谐波次数,并进行了仿真验证,从而揭示了双馈异步发电机匝间短路故障与电磁转矩之间的关联。

(1) 双馈异步发电机定子匝间短路故障后,电磁转矩的平均值随着匝间短路故障程度的加深而逐渐降低,电磁转矩的波动范围随着匝间短路

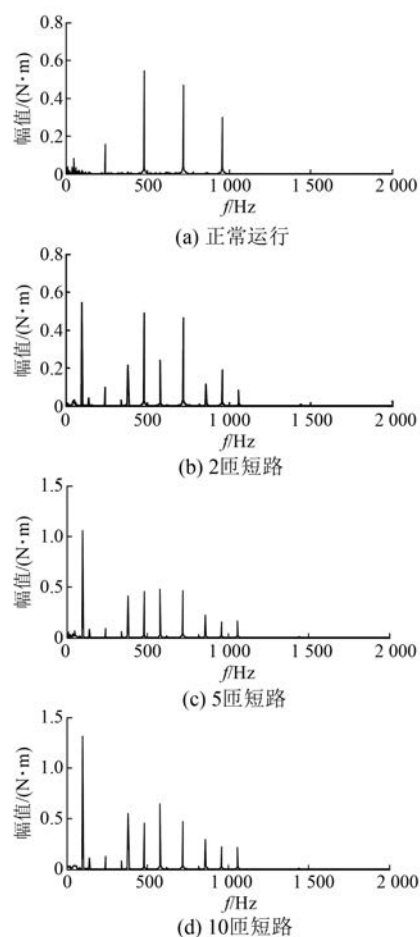


图3 电磁转矩频谱图

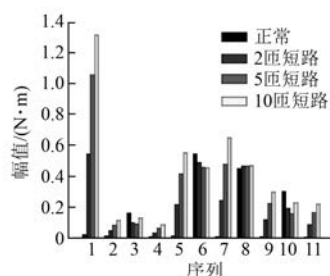


图4 定子绕组故障前后的电磁转矩谐波含量对比图

故障程度的加深而逐渐增加。

(2) 双馈异步发电机定子匝间短路故障后, 电磁转矩中较正常时出现频率为 100、140、340、380、580、860、1 060 Hz 的谐波分量(此时转差 $s=0.2$, 其他情况由理论分析计算得到), 其中二倍频含量最高, 变化最明显, 且 380、580 Hz 变化也相对明显, 故电磁转矩中 100 Hz 谐波结合 380、580 Hz 谐波可以作为双馈异步发电机定子绕组

匝间短路的故障特征量。

【参考文献】

- [1] 全球风能理事会. 未来五年中国仍是全球风电主引擎[J]. 中国能源报, 2016(5): 18.
- [2] 舒进, 张保会, 李鹏, 等. 变速恒频风电机组运行控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 89-93.
- [3] 张虎, 张永昌, 杨达维. 基于双矢量模型预测直接功率控制的双馈电机并网及发电[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 69-76.
- [4] 郑艳文, 柴建云, 李永东. 一种宽转速范围的双馈电机调速系统[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(9): 8-12.
- [5] 万书亭, 李和明, 许兆凤, 等. 定子绕组匝间短路对发电机定转子径向振动特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 161-165.
- [6] YAZIDI A, CAPOLINO G A, CASADEI D, et al. Simulation of double-fed induction machine for wind turbine generator fault analysis [C] // IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machine, 2005: 1-6.
- [7] SHAH D, NANDI S, NETI P. Stator Inter-turn fault detection of doubly-fed induction generators using rotor current and search coil voltage signature analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2009, 45(5): 1831-1842.
- [8] 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.
- [9] 李俊卿, 王栋, 何龙. 双馈式感应发电机定子匝间短路故障稳态分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 103-107.
- [10] 马宏忠, 张正东, 时维俊. 基于转子瞬时功率谱的双馈风力发电机定子绕组故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 30-35.
- [11] 邱家俊. 机电分析动力学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1992.
- [12] NANDI S. Space and time harmonics related problems and their mitigation for position and speed sensorless slip-ring induction motor drives application [J]. Sadhana, 2008, 33(5): 565-580.
- [13] 方红伟, 夏长亮, 修杰. 定子绕组匝间短路时发电机电磁转矩分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 83-87.
- [14] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

收稿日期: 2017-03-06