# 基于转子平均瞬时功率的双馈异步发电机 定子绕组匝间短路故障诊断

马宏忠,张 艳,魏海增,付明星,黄春梅 (河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:由于双馈异步发电机转子参数的可测性,提出一种基于转子平均瞬时功率的定子绕组匝间短路故障诊 断方法。首先推导出计及高次谐波的双馈异步发电机正常及发生定子绕组匝间短路故障时的转子平均瞬时 功率的表达式,然后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故障时的转 子平均瞬时功率进行仿真计算。对仿真结果进行频谱分析,得到定子绕组匝间短路故障前后转子平均瞬时 功率谐波分量的变化规律,并验证了理论分析的正确性。分析结果表明转子平均瞬时功率谱直观简洁,其2 倍频分量不受转差率影响,高次谐波分量对定子绕组匝间短路故障有较强的灵敏性。

关键词:双馈异步发电机;转子平均瞬时功率谱;定子匝间短路;多回路法;频谱分析

中图分类号:TM 774 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.022

# 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[1-3]。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 电机的故障机理和故障特征的研究是十分必要的。

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[45],其故障特征与常规的发电机和 电动机不同,因此,国内外学者针对此故障进行了研 究:文献[6]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确定是否发送定子绕组匝间 短路故障及估计定子绕组匝间短路的严重程度,但 是受限于图像精度的判断,易造成早期故障的漏判、 误判:文献[7-8]提出通过监测转子电流谱和电压谱 的谐波成分判断定子匝间短路故障:文献[9]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方法,该方法较传 统的电压谱、电流谱法更灵敏。

因双馈异步发电机转子侧参数的可测性,笔者 对转子功率的进一步研究发现转子平均瞬时功率谱 具有灵敏、简洁、直观的特点。本文考虑高次谐波的 影响,首先推导了正常运行和发生定子绕组匝间短 路故障时转子平均瞬时功率的近似表达式,然后应 用多回路法建立了双馈异步发电机的数学模型,得 到转子平均瞬时功率。仿真结果验证了本文理论推 导的正确性,并分析了故障特征量的可行性。

收稿日期:2017-04-05;修回日期:2018-01-27 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577050) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577050)

#### 基于转子平均瞬时功率的双馈异步发电 1 机定子绕组匝间短路故障理论分析

1.1 正常运行时的转子平均瞬时功率分析 定义转子平均瞬时功率为<sup>[10]</sup>:

$$p(t) = \sqrt{3} \left( u_{ab} i_{a} + u_{bc} i_{b} + u_{ca} i_{c} \right) / 3 \tag{1}$$

其中, u<sub>ab</sub>, u<sub>bc</sub>, u<sub>ca</sub>为转子侧线电压; i<sub>a</sub>, i<sub>b</sub>, i<sub>c</sub> 为转子侧 对应的线电流。

当双馈异步发电机正常运行时,对称三相绕组 的连接消除了分数次谐波和3倍数次谐波<sup>[11]</sup>。电 机定子电流特征频率表达式为 $f_s = (6k \pm 1)f_1(f_1)$ 为定 子侧基波电流频率;k=0,1,2,…),文献[12]推导了 计及空间和时间谐波时的磁感应强度表达式,由此 得出转子侧电流谐波频率为 $f_{i} = nf \pm f_{i}(n = 6k \pm 1; f)$ 为 转子旋转频率)。当k=0或k=1时,转子侧电流表 达式为:

$$\begin{cases} i_{a} = I_{1} \cos \left[ (\omega - \omega_{1}) t - \varphi_{1} \right] + \\ I_{5} \cos \left[ (5\omega + \omega_{1}) t - \varphi_{5} \right] + \\ I_{7} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1}) t - \varphi_{7} \right] \\ i_{b} = I_{1} \cos \left[ (\omega - \omega_{1}) t + 2\pi/3 - \varphi_{1} \right] + \\ I_{5} \cos \left[ (5\omega + \omega_{1}) t - 2\pi/3 - \varphi_{5} \right] + \\ I_{7} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1}) t + 2\pi/3 - \varphi_{7} \right] \\ i_{c} = I_{1} \cos \left[ (\omega - \omega_{1}) t - 2\pi/3 - \varphi_{1} \right] + \\ I_{5} \cos \left[ (5\omega + \omega_{1}) t + 2\pi/3 - \varphi_{5} \right] + \\ I_{7} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1}) t - 2\pi/3 - \varphi_{5} \right] + \\ I_{7} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1}) t - 2\pi/3 - \varphi_{7} \right] \end{cases}$$

考虑双馈异步发电机转子侧励磁电压为理想的 正弦波,则其表达式为:

$$\begin{cases} u_{ab} = U_1 \cos(\omega_2 t) \\ u_{bc} = U_1 \cos(\omega_2 t - 2\pi/3) \\ u_{ca} = U_1 \cos(\omega_2 t + 2\pi/3) \end{cases}$$
(3)

)

其中, $U_1$ 为基频分量幅值; $\omega_1$ 为定子侧基波角频率,  $\omega_2$ 为转子侧基波角频率, $\omega$ 为转子转速角频率, $\omega_1$ =  $\omega_2+\omega$ ; $I_1$ 、 $I_5$ 、 $I_7$ 分别为基波及 5、7 次谐波的幅值,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_5$ 、 $\varphi_7$ 分别为对应谐波电流的相角。

将式(2)、(3)代入式(1),可得双馈异步发电机 正常运行时的转子平均瞬时功率为:

$$p(t) = \frac{\sqrt{3}U_1}{2} \{I_1 \cos \varphi_1 + I_5 \cos[(5\omega + \omega_1 - \omega_2)t - \varphi_5] +$$

$$I_7 \cos \lfloor (7\omega - \omega_1 + \omega_2) t - \varphi_7 \rfloor \}$$
(4)

可推得  $k=0,1,2,3,\cdots$  时转子侧的平均瞬时功 率谐波角频率主要为 $(6k\pm 1)\omega \mp \omega_1 \pm \omega_2$ 。

式(4)表明若仅考虑基波电流,则双馈异步发 电机正常运行时的转子平均瞬时功率恒定,相比转 子瞬时功率谱法所得的结果,其频谱更简洁<sup>[13]</sup>。

# 1.2 发生定子绕组匝间短路故障时的转子平均瞬时功率分析

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,因此 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。由文献 [12]可知,理想状况下发生定子绕组匝间短路故障 时转子侧电流谐波频率为 $f_r = nf \pm f_1(n = 6k \pm 1)$ 。当 k = 0或 k = 1时转子电流表达式为:

$$\begin{cases} i_{a} = I_{11} \cos \left[ (\omega - \omega_{1})t - \varphi_{11} \right] + I_{12} \cos \left[ (\omega + \omega_{1})t - \varphi_{12} \right] + \\ I_{51} \cos \left[ (5\omega - \omega_{1})t - \varphi_{51} \right] + I_{52} \cos \left[ (5\omega + \omega_{1})t - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - \varphi_{71} \right] + I_{72} \cos \left[ (7\omega + \omega_{1})t - \varphi_{72} \right] \\ i_{b} = I_{11} \cos \left[ (\omega - \omega_{1})t + 2\pi/3 - \varphi_{11} \right] + \\ I_{12} \cos \left[ (\omega + \omega_{1})t + 2\pi/3 - \varphi_{51} \right] + \\ I_{51} \cos \left[ (5\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t + 2\pi/3 - \varphi_{72} \right] \\ i_{c} = I_{11} \cos \left[ (\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{72} \right] \\ i_{c} = I_{11} \cos \left[ (\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{72} \right] + \\ I_{52} \cos \left[ (5\omega + \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{72} \right] + \\ I_{51} \cos \left[ (5\omega - \omega_{1})t + 2\pi/3 - \varphi_{51} \right] + \\ I_{52} \cos \left[ (5\omega + \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{51} \right] + \\ I_{52} \cos \left[ (5\omega + \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{51} \cos \left[ (5\omega - \omega_{1})t + 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{51} \cos \left[ (5\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[ (7\omega - \omega_{1})t - 2\pi/3 - \varphi_{52} \right] + \\ I_{71} \cos \left[$$

其中,*I*<sub>11</sub>、*I*<sub>12</sub>、*I*<sub>51</sub>、*I*<sub>52</sub>、*I*<sub>71</sub>、*I*<sub>72</sub>分别为11、12、51、52、71、72次谐波的幅值。

将式(3)、(5)代入式(1)可得:

$$p(t) = \frac{\sqrt{3} U_1}{2} \{ I_{11} \cos \varphi_{11} + I_{12} \cos [(\omega + \omega_1 + \omega_2) t - \varphi_{12}] + I_{51} \cos [(5\omega - \omega_1 - \omega_2) t - \varphi_{51}] + I_{52} \cos [(5\omega + \omega_1 - \omega_2) t - \varphi_{52}] + I_{71} \cos [(7\omega - \omega_1 + \omega_2) t - \varphi_{71}] + I_{72} \cos [(7\omega + \omega_1 + \omega_2) t - \varphi_{72}] \}$$
(6)

可推得  $k=0,1,2,3\cdots$  时转子侧的平均瞬时功 率主要谐波角频率为 $(6k\pm1)\omega\mp\omega_1\pm\omega_2$ 、 $(6k\pm1)\omega\pm\omega_1\pm\omega_2$ ,可以看出双馈异步发电机发生定子绕组匝 间短路后,除了产生与正常状态下相同的谐波外, 还产生了角频率为 $(6k\pm1)\omega\pm\omega_1\pm\omega_2$ 的故障特征 量,且 k=0时,谐波频率为 $2\omega_1$ ,此时转子平均瞬 时功率与转差率无关,具有很强的抗干扰能力。 由于双馈异步发电机转子参数的可测性,故出现的 突变谐波频率可作为定子绕组匝间短路的故障 频率。

## 2 双馈异步发电机多回路模型的建立

多回路数学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<sup>[14]</sup>。

本文选用的双馈异步发电机的定子侧绕组为三 角形接线、转子侧绕组为星形接线,且假设其发生故 障前为理想电机,分别对所选支路、回路进行编号, 如图1所示。



#### 图 1 双馈异步发电机的连接示意图

Fig.1 Wiring diagram of doubly-fed induction generator

假定:双馈异步发电机的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;转子 侧回路按电动机惯例处理,且电流为正时,产生的 磁链为正。根据以上假定,可列写出各支路电压方 程为:

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 & u_7 & u_8 & u_9 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = p \begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 & \psi_4 & \psi_5 & \psi_6 & \psi_7 & \psi_8 & \psi_9 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} +$$

$\lceil R_{s} \rceil$	0	0	0	0	0	0	0	[ 0	$\begin{bmatrix} -i_1 \end{bmatrix}$	
0	$R_{s}$	0	0	0	0	0	0	0	- <i>i</i> <sub>2</sub>	
0	0	$R_{\rm s}$	0	0	0	0	0	0	- <i>i</i> <sub>3</sub>	
0	0	0	$R_{\rm s}$	0	0	0	0	0	- <i>i</i> <sub>4</sub>	
0	0	0	0	$R_{\rm s}$	0	0	0	0	- <i>i</i> <sub>5</sub>	(7)
0	0	0	0	0	$R_{\rm s}$	0	0	0	- <i>i</i> <sub>6</sub>	
0	0	0	0	0	0	$R_{\rm r}$	0	0	<i>i</i> <sub>7</sub>	
0	0	0	0	0	0	0	$R_{ m r}$	0	i <sub>8</sub>	
0	0	0	0	0	0	0	0	$R_{\rm r}$	$\begin{bmatrix} i_9 \end{bmatrix}$	
$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\psi_4$	$\psi_5$	$\psi_6$	$\psi_7$	$\psi_8$	$\psi_9$	] <sup>T</sup> =	
$L_{11}$	$M_{12}$	<i>M</i> <sub>13</sub>	$M_{14}$	M	15 A	<i>I</i> <sub>16</sub>	<i>M</i> <sub>17</sub>	<i>M</i> <sub>18</sub>	$M_{19}$	$\begin{bmatrix} -i_1 \end{bmatrix}$
$M_{21}$	$L_{22}$	M <sub>23</sub>	<i>M</i> <sub>24</sub>	$M_{2}$	25 1	M <sub>26</sub>	<i>M</i> <sub>27</sub>	M <sub>28</sub>	M <sub>29</sub>	- <i>i</i> <sub>2</sub>
$M_{31}$	<i>M</i> <sub>32</sub>	$L_{33}$	<i>M</i> <sub>34</sub>	$M_{2}$	35 /	M <sub>36</sub>	<i>M</i> <sub>37</sub>	<i>M</i> <sub>38</sub>	M <sub>39</sub>	- <i>i</i> <sub>3</sub>
$M_{41}$	$M_{42}$	$M_{43}$	$L_{44}$	M	45 Å	M <sub>46</sub>	$M_{47}$	$M_{48}$	M <sub>49</sub>	- <i>i</i> 4
$M_{51}$	<i>M</i> <sub>52</sub>	M <sub>53</sub>	<i>M</i> <sub>54</sub>	$L_5$	5 Л	M <sub>56</sub>	<i>M</i> <sub>57</sub>	M <sub>58</sub>	M <sub>59</sub>	- <i>i</i> <sub>5</sub>
$M_{61}$	$M_{62}$	$M_{63}$	<i>M</i> <sub>64</sub>	$M_{c}$	<sub>65</sub> 1	L <sub>66</sub>	<i>M</i> <sub>67</sub>	<i>M</i> <sub>68</sub>	M <sub>69</sub>	- <i>i</i> <sub>6</sub>
$M_{71}$	M <sub>72</sub>	M <sub>73</sub>	$M_{74}$	M	75 Å	<i>I</i> <sub>76</sub>	$L_{77}$	M <sub>78</sub>	M <sub>79</sub>	<i>i</i> <sub>7</sub>
$M_{81}$	M <sub>82</sub>	M <sub>83</sub>	<i>M</i> <sub>84</sub>	$M_{s}$	85 A	M <sub>86</sub>	<i>M</i> <sub>87</sub>	$L_{88}$	M <sub>89</sub>	$i_8$
$M_{91}$	$M_{92}$	$M_{93}$	$M_{94}$	$M_{g}$	95 A	M <sub>96</sub>	<i>M</i> <sub>97</sub>	$M_{98}$	$L_{99}$	$\begin{bmatrix} i_9 \end{bmatrix}$
										(8)

式(7)、(8)可简化为:

$$\boldsymbol{U} = \mathbf{p}\boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{R} \boldsymbol{I} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{L} \boldsymbol{I} \tag{10}$$

其中,U为定、转子各支路电压;I为定、转子各支路 电流;p为微分算子;R为定、转子支路电阻;L为各 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:

	[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	(11)
<b>и</b> _	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	
11 –	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	
	Lο	0	0	0	0	0	0	1	-1	
	则支	路电	流和	回路	电流	的关	系	可以表	長示サ	J:

 $\boldsymbol{I} = \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}' \tag{12}$ 

根据式(9)、(10)、(12),可得:

$$HU = HLpI + H(pL)I + HRI$$
(13)  
$$U' = HLH^{T}pI' + H(pL)H^{T}I' + HRH^{T}I' =$$

$$\boldsymbol{L'PI'} + \boldsymbol{R'I'} \tag{14}$$

其中,**I**′为定、转子回路电流;**U**′为定、转子回路 电压。 由式(14)可得:

$$pI' = (-L')^{-1}R'I' + (L')^{-1}U'$$
 (15)

由式(15)可知,各支路间自感、互感系数的计 算是重点,可参考相关文献,本文不再赘述。采用四 阶龙格库塔求解此方程组,可得双馈异步发电机定、 转子各回路电流,再经过矩阵 H 变化,即可得到双 馈异步发电机各支路电流值。

双馈异步发电机发生定子匝间短路故障后,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,电压方程数也增加1,采用上述方法, 可求解各物理量。

## 3 仿真结果及分析

根据上文的多回路模型,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,且转子转速为 1 200 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

Table 1 Basic parameters of doubly-fed induction generator

参数	参数值	参数	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/	22.4	转子导线直流电阻/	0.03
$(\Omega \cdot km^{-1})$	22.4	$(\Omega \cdot km^{-1})$	9.95

### 3.1 定子不对称运行情况下的定子电流分析

双馈异步发电机在正常运行和故障状态下的定 子侧线电流时域波形图如图2所示。从图2可以看 出,双馈异步发电机定子绕组内部故障(绕组匝间短 路)与定子绕组外部故障(电网电压不平衡等)均使 其定子侧线电流不对称,但其波形有本质的区别。 双馈异步发电机发生定子绕组匝间短路时,其定子 侧线电流的幅值恒定,而电网电压不平衡时,其定子 侧线电流的幅值呈周期性变化。因此,可以首先从 定子侧线电流波形辨识双馈异步发电机定子绕组内 部故障和外部故障。

双馈异步发电机在正常运行和故障状态下的定 子侧线电流频域波形图如图 3 所示。由图 3 可见, 双馈异步发电机发生故障前后,其定子电流谐波频 率并没有发生明显的变化,这与文献[15]所得结果 是一致的。故发生定子绕组匝间短路故障后,双馈 异步发电机定子侧电流谐波分量的变化特征并不明 显,本文从转子特征量出发探究转子平均瞬时功率 谱的变化规律。



154

图 2 双馈异步发电机定子线电流时域波形

Fig.2 Time-domain waveforms of stator line current in doubly-fed induction generator





#### 3.2 转子平均瞬时功率谱分析

双馈异步发电机在正常运行和故障状态下的转 子平均瞬时功率时域波形图如图 4 所示。从图 4 中 可以看出,双馈异步发电机正常运行时,其转子平均 瞬时功率时域谱存在微小波动,近似呈现为直线,故 障后转子平均瞬时功率时域谱的波动程度明显增 加,且故障后其直流分量由正常时的 665 W 变化为 638 W。可见,双馈异步发电机在故障状态下的转 子平均瞬时功率时域谱图变化较为明显。



图 4 转子平均瞬时功率时域谱图



为了进一步分析双馈异步发电机的转子平均瞬时功率,对其进行傅里叶变换,如图 5 所示。由图 5(a)可知双馈异步发电机正常运行时,其转子瞬时 功率的主要谐波频率为 240、480、720、960 Hz( $\omega_1$  = 50, $\omega_2$  = 10, $\omega$  = 40),由图 5(b)可知故障后其转子瞬时功率的主要谐波频率为 100、140、240、340、380、480、580、620、720、820、860、960、1 060 Hz,这与第 1 节的理论分析结果是相同的。由于多回路数学模型中电感谐波次数取为 27,仿真中主要显示了 k = 0, 1,2,3,4 情况下的计算结果。



#### 图 5 转子平均瞬时功率频谱



双馈异步发电机在正常运行状态和发生定子绕 组2匝、5匝、10匝短路故障情况下的转子平均瞬时 功率频谱幅值如表2所示。

由表2可知:双馈异步发电机发生定子绕组匝间短路故障后,其转子平均瞬时功率中的2倍频分量显著增加,并随着故障程度的加剧而增加,且发生定子绕组2匝短路故障时,转子平均瞬时功率的2 倍频分量相对正常运行时的变化率为174.8%,变化非常灵敏;正常状态下,双馈异步发电机的转子平均瞬时功率240、960 Hz 主要特征频率分量的幅值随

#### 表 2 不同状态下的转子平均瞬时功率频谱幅值

Table 2 Amplitudes of instantaneous rotor average power under different states

·	转子平均瞬时功率频谱幅值/dB							
- 则平/ ΠΖ	正常运行	2 匝短路	5 匝短路	10 匝短路				
100	19.110	52.520	58.28	60.21				
140	52.520	21.880	27.68	31.48				
240	35.420	32.530	27.94	21.23				
340	10.210	16.090	22.34	24.81				
380	17.600	27.460	35.40	38.41				
480	37.730	34.330	37.52	39.47				
580	7.696	28.120	34.45	37.35				
620	12.910	-1.189	12.91	13.07				
720	35.880	36.140	35.32	35.40				
820	10.340	3.868	13.28	5.11				
860	7.268	16.320	21.78	25.29				
960	25.490	24.740	20.63	15.63				
1 060	6.779	12.680	15.22	19.44				

故障严重程度的增加而减小,而480、720 Hz 主要特 征频率分量的幅值变化不大;故障后新增的主要谐 波频率(140 Hz、340 Hz、380 Hz、580 Hz、620 Hz、 820 Hz、860 Hz、1 060 Hz)分量的幅值随着故障严重 程度的增加而增加。

由于双馈异步发电机转子平均瞬时功率的可测 性且定子绕组匝间短路故障后其故障特征频率变化 明显,故选择其2倍频为主特征频率(不受转差率的 影响),其他新增频率为辅助特征频率。

#### 4 结论

本文从转子平均瞬时功率的定义出发,推导了 双馈异步发电机发生定子绕组匝间短路故障情况 下,故障特征在转子平均瞬时功率中的表现形式,并 进行了仿真验证,从而揭示了双馈异步发电机匝间 短路故障与转子瞬时功率之间的关联。

a. 定子绕组外部故障(电网电压不平衡等)与 定子匝间短路故障对定子侧电流时域波形的影响有 一定的区别,可以先从时域波形中判断是否为定子 绕组本身故障引起的,然后再利用转子平均瞬时功 率进行进一步判断。

b. 双馈异步发电机发生定子匝间短路故障后,转子平均瞬时功率直流分量随着匝间短路故障程度的加深而逐渐降低,转子平均瞬时功率谱的波动范围随着匝间短路故障程度的加深而逐渐增加。

**c.** 与正常状态相比,双馈异步发电机发生定子 匝间短路故障后,转子瞬时功率出现  $2\omega_1$ 、( $6k\pm1$ ) $\omega\pm\omega_1\pm\omega_2(k=1,2,3\cdots)$ 频率分量,其中 2 倍频含量最高,变化最明显,且其他频率分量的变化也相对明显,故结合转子平均瞬时功率谱中的 2 倍频谐波和 其他次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[N].中 国能源报,2016-05-09(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):89-93,97.
   SHU Jin,ZHANG Baohui,LI Peng, et al. A control strategy on the variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(16):89-93,97.
- [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.
   ZHANG Hu,ZHANG Yongchang,YANG Dawei. Two-vectors-based model predictive direct power control of doubly fed induction generator for grid connection and power regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(5):69-76.
- [4]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.

WAN Shuting, LI Heming, XU Zhaofeng, et al. Analysis of generator vibration characteristic on stator winding inter-turn short circuit fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4):161-165.

- [5] YAZIDI A, CAPOLINO G A, CASADEI D, et al. Simulation of doublefed induction machine for wind turbine generator fault analysis
   [C] // 5th IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machine. Vienna, Austria; IEEE, 2005; 1-6.
- [6]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.
   WEI Shurong, FU Yang, MA Hongzhong. Stator winding inter-turn short-circuit diagnosis and experimental research on doubly-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control,2010,38 (11):25-28.
- [7]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):103-107,131.
  LI Junqing, WANG Dong, HE Long. Steady-state analysis on interturn short circuit fault of stator windings in doubly-fed induction generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (18):103-107,131.
- [8] 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.
- [9]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.

MA Hongzhong, ZHANG Zhengdong, SHI Weijun. Doubly-fed induction generator stator fault diagnosis based on rotor instantaneous power spectrum [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14):30-35.

- [10] JOKSIMOVIC G M, PENMAN J. The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5):1078-1084.
- [11] 许实章. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,2009:192-193.
- [12] NANDI S. Space and time harmonics related problems and their mitigation for position and speed sensorless slipring induction motor drives application[J]. Sadhana, 2008, 33(5):565-580.

[13] 刘振兴. 电机故障在线监测诊断新原理和新技术研究[D]. 武 汉:华中科技大学,2004.

LIU Zhenxing. Research on new principles and techniques of faults on-line monitoring and diagnosis for electrical machines [D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

- [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,2005:421-423.
- [15] 刘烔. 感应电机定子绕组匝间短路故障诊断方法研究[D]. 杭 州:浙江大学,2007.

LIU Tong. Research on stator winding interturn short circuit faults diagnosis of induction motor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

作者简介:



马宏忠(1962—),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力 设备状态监测以及故障诊断、新能源发电 (E-mail:hhumhz@163.com);

张 艳(1991—),女,河南商丘人,硕 士研究生,主要研究方向为双馈异步发电 机故障诊断(E-mail:530167282@qq.com);

魏海增(1991—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要研 究方向为电力设备状态监测和故障诊断(E-mail:805051548@ qq.com)。

# Diagnosis of stator winding inter-turn short circuit in DFIG based on instantaneous average power in rotor side

MA Hongzhong, ZHANG Yan, WEI Haizeng, FU Mingxing, HUANG Chunmei

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

**Abstract**: A method of stator winding inter-turn short circuit diagnosis for DFIGs (Doubly-Fed Induction Generators) is proposed due to the measurability of rotor parameters of DFIGs. With the consideration of high-order harmonic, the expressions of instantaneous rotor average power in conditions of normal and stator winding inter-turn short circuit are deduced, then the multi-loop mathematical model of DFIGs is established, and the simulation calculation of rotor average instantaneous power in conditions of normal and stator winding inter-turn short circuit in different degrees is carried out. The variation of harmonic component of instantaneous rotor average power is obtained by the spectrum analysis of simulative results, which verifies the correctness of theoretical analysis. The results also show that the rotor average instantaneous power spectrum is intuitional and simple, the 2nd-order harmonic components are not affected by slip ratio and the high-order harmonic components have strong sensitivity to stator winding inter-turn short circuit. **Key words**; doubly-fed induction generator; rotor average instantaneous power spectrum; stator inter-turn short circuit.

cuit;multi-loop method;spectrum analysis

(上接第 150 页 continued from page 150)

# Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine

LI Shaolin<sup>1</sup>, QIN Shiyao<sup>1</sup>, WANG Ruiming<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems,

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Wind Power System, Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: In order to solve the problem that the wind turbines do not initiatively participate in the frequency regulation of power grid, the capability of large-capacity DFIG-WT(DFIG-based Wind Turbine) using stored inertia energy of the rotor to participate in the frequency regulation of the power grid is evaluated. A control strategy of virtual inertia frequency regulation of wind turbine based on accessory torque is proposed, and its implementation principles and control strategies are stu-died respectively. A Bladed and MATLAB co-simulation system of large-capacity DFIG-WT is established, realizing the whole process dynamic simulation of virtual inertia frequency regulation. The field test is carried out on a MW class DFIG-WT by large capacity grid emulator for the first time, and the dynamic and technical characteristics of the virtual inertia frequency regulation are revealed. The simulative and experimental results support the theoretical analysis and verify the proposed control strategy.

Key words: wind power; DFIG-based wind turbine; virtual inertia; frequency regulation; co-simulation; field test