

基于信息融合的双馈风机定子匝间短路故障诊断*

李俊卿, 李忠徽, 仝宗义

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 双馈异步风力发电机在风力市场上所占据的比重越来越大, 容量也逐年增大。由于其恶劣的工作环境, 使得双馈电机故障频发, 其中定、转子匝间短路故障占据很高的比例。根据多回路理论建立了双馈异步电机数学模型, 分别模拟了正常情况下以及定子匝间短路时的情况, 通过扩展派克矢量变换对定子端电流进行频谱分析和在失电残压的基础上对定子端电压展开分析, 最终将得到的特征信息进行故障信息融合诊断。仿真结果表明, 将信息融合方法用于电机故障诊断中, 提高了其诊断的有效性和准确性。

关键词: 双馈异步发电机; 定子匝间短路; 扩展派克矢量变换; 失电残压; 信息融合

中图分类号: TM 346+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)08-0099-05

Fault Diagnosis of Stator Inter-Turn Short-Circuit in Doubly Fed Induction Generator Based on Information Fusion*

LI Junqing, LI Zhonghui, TONG Zongyi

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

Abstract: Doubly fed induction generators (DFIG) was gradually used in the wind power market, the capacity also increases year by year. Due to poor working conditions of the wind farm, it made DFIG often fail. Stator and rotor windings failure accounted for a large proportion of DFIG fault. A multi-loop math model was built for stator winding of DFIG under normal and inter-turn short-circuit fault conditions. Based on the extended Park's vector, the stator terminal current was analyzed by spectrum analysis and the residual voltage after switch-off was analyzed on the residual voltage. The characteristic information was diagnosed by fault information fusion. The simulation results showed that the information fusion method used in motor fault diagnosis, improved the effectiveness of its diagnosis and accuracy.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); inter-turn short-circuit; extended Park's vector; residual voltage after switch-off; information fusion

0 引言

如今在全球经济快速增长的过程中, 人类对于能源的依赖越来越重。在我国大力削减火电所占比重这一国情下, 风能作为清洁能源而备受

关注。

目前在风电领域中双馈异步电机由于其良好的性能, 被广泛应用在风力发电中。在双馈异步电机的故障中, 定子绕组匝间短路是发生概率较高的一种, 故障高达 30%^[1]。若早期没能及时发

* 基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(2014502015)

作者简介: 李俊卿(1967—), 女, 博士研究生, 教授, 研究方向为交流电机及其系统分析, 电气设备在线监测与故障诊断。

李忠徽(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交流电机及其系统分析。

仝宗义(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交流电机及其系统分析。

现故障的存在,任由匝间短路继续发展下去,那么将有可能引起相间短路等更加恶劣的故障,并对系统造成不可估量的损失。因此研究定子绕组匝间短路故障具有非常重要的意义。

文献[2]利用有限元法搭建了双馈风机的故障模型并进行诊断。文献[3]通过对比故障时和正常情况下的派克矢量轨迹图来判断是否故障及故障程度,但是受电源电压不平衡及电机自身结构不对称影响较大。文献[4]利用扩展派克矢量变换,检测电流派克矢量模中 $2kf_1$ 的交流分量,通过选取该频谱分量幅值与直流分量的比值作为故障特征,但是电机不平衡仍然会引起 2 倍频的变换。文献[5]提出了利用小波变换对定子侧故障进行分析。文献[6]利用转子侧特定频次谐波,来判断定子匝间短路。文献[7-8]使用 HHT 以及 EEMD-HHT 变换来识别故障特征量。文献[9]通过分析定子短路故障时的电磁特性来进行诊断。文献[10-14]利用失电残压检测断电后的 $k(R/P) \pm 1$ 次谐波来诊断是否发生故障,但是残压的幅值跟失电时刻电源的相位以及电机参数等相关,并随时间衰减很快。文献[15]基于转子瞬时功率谱去分析故障。通过分析,许多文献中所采用的方法并没有消除电机自身结构不对称和电压不平衡影响,或者存在其他一系列问题。

本文采用扩展派克变换和失电残压相结合的方法来进行故障信息融合诊断。扩展派克矢量变换受电源电压不平衡和电机本身结构不对称影响大,但失电残压的幅值只与失电时刻的相位、电机参数有关,对电机本身的不对称并不敏感。结合两者的特点,本文基于 abc 三相坐标系建立了双馈异步电机定子匝间短路的多回路数学模型,然后运用 MATLAB 先后构造扩展派克和失电残压下的模型,并对其进行频谱分析,得出初步结果,然后利用 D-S 证据理论进行信息融合。具体过程如图 1 所示。

1 扩展派克矢量变换

根据派克变化的基本思想将定子电流三相坐标系 abc 转换到两相坐标系 $\alpha\beta$ 下,其变换方程为

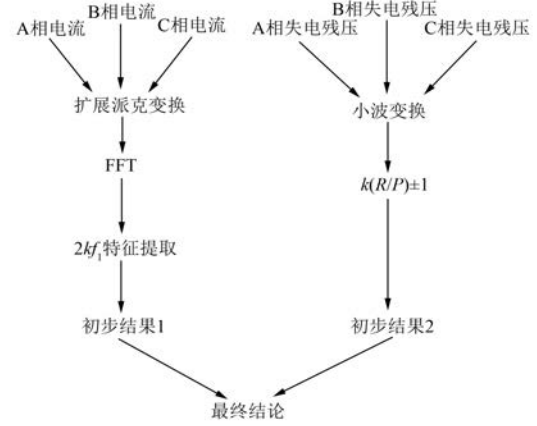


图 1 故障信息融合流程图

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

扩展派克矢量法是派克矢量法的延伸和扩展,其实质就是对矢量模 $|i_\alpha^2 + j i_\beta^2|$ 进行频谱分析。文献[4]中已经指出当异步电机发生匝间短路时, $|i_\alpha^2 + j i_\beta^2|$ 中应当包含直流成分和 $2kf_1$ 成分;并且 $2kf_1$ 成分与直流分量的比例可作为故障特征进行诊断。

2 异步电机失电残压模型

对于理想情况下的三相异步电机,定子电压可以写成如下形式:

$$\begin{cases} u_a = p\psi_a + R_a i_a \\ u_b = p\psi_b + R_b i_b \\ u_c = p\psi_c + R_c i_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_a, ψ_b, ψ_c ——定子绕组磁链。

一般电厂测量线电压比较方便,故

$$\begin{cases} u_{ab} = u_a - u_b = p(\psi_a - \psi_b) + (R_a i_a - R_b i_b) \\ u_{bc} = u_b - u_c = p(\psi_b - \psi_c) + (R_b i_b - R_c i_c) \end{cases} \quad (3)$$

在电机失电的瞬间,机械转速、位置角等这些量没有变化,但是失电后,定子中的电流突变为零。根据瞬间磁链守恒原理:

$$L_{rs} I_{s0} + L_{rr} I_{r0} = \psi_+ = \psi_- = L_{rr} I_r$$

可得

$$I_r = L_{rr}^{-1} L_{rs} I_{s0} + I_{r0} \quad (4)$$

式中: I_{s0} 、 I_{r0} ——失电前定、转子的支路电流;

I_r ——失电后的转子支路电流。

失电之后, 定子电流变为零, 式(3)中电压变为

$$\begin{cases} u_{ab} = u_a - u_b = p(\psi_a - \psi_b) \\ u_{bc} = u_b - u_c = p(\psi_b - \psi_c) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中定子磁链为

$$\begin{cases} \psi_a = L_{ar} I_r \\ \psi_b = L_{br} I_r \\ \psi_c = L_{cr} I_r \end{cases} \quad (6)$$

由于转子电压为零, 有

$$0 = \frac{d\psi_r}{dt} + R_r I_r, \psi_r = L_{rr} I_r$$

可得

$$\frac{dI_r}{dt} = -L_{rr}^{-1} R_r I_r \quad (7)$$

根据多回路模型求得定转子之间的互感, 以及转子自感等, 可得

$$\begin{aligned} u_{ab} &= p(L_{ar} - L_{br}) I_r - (L_{ar} - L_{br}) L_{rr}^{-1} R_r I_r \\ u_{bc} &= p(L_{br} - L_{cr}) I_r - (L_{br} - L_{cr}) L_{rr}^{-1} R_r I_r \end{aligned} \quad (8)$$

由文献[13]可知, 在失电瞬间电机的频率将突变为 $(1-s)f_1$, f_1 为失电前的基频。根据 Nandi 的研究, 极对数为 p , 转子导条数为 R 的感应电机, 定子绕组发生匝间短路故障时, 失电后的残压中包含如下频率分量: $f_v = \{[k(R/P)] \pm 1\} f_{off}$, 其中 f_{off} 为失电后突变的频率。利用短时傅里叶变换对失电残压进行频谱分析, 检测式中的频率分量, 以实现定子匝间短路的诊断。

3 D-S 证据理论的理论基础

3.1 基本信任分配函数

给定一个有限空间 Θ , 考虑 Θ 的一切集合包括 Θ 本身和空集 Φ , 将其记为 2^Θ : 对于一切属于 Θ 子集 A (命题), 基本信任分配函数 m 是一个从集合 2^Θ 到 $[0, 1]$ 的映射, 且满足

$$\begin{cases} \sum_{A \subseteq \Phi} m(A) = 1 \\ m(\Phi) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $m(A)$ ——事件 A 的基本分配函数, 当 $m(A) > 0$ 时, 称 A 为分配函数的焦点。

3.2 基本分配函数的获取

基本分配函数是代表着人对故障模式假设的可信程度的一种推理。这是人为的判断, 而且受各种因素的影响。

定义:

$$\alpha_j = \max\{C_j(A_i)\}, i = 1, 2, 3 \dots N_c$$

$$\beta_j = \{N_c W_j / (\sum_{i=1}^{N_c} C_j(A_i) - 1)\} / N_c - 1, N_c \geq 2$$

$$R_j = (W_j \alpha_j \beta_j) / (\sum_{j=1}^N W_j \alpha_j \beta_j), j = 1, 2, 3 \dots N$$

式中: $C_j(A_i)$ ——传感器 j 对目标模式 A_i 的相关系数, 可用隶属度函数代替^[16];

N_c ——目标模式数目;

N ——传感器总数;

W_j ——传感器 j 的环境加权系数, 其值域为 $[0, 1]$;

α_j ——传感器 j 最大相关系数;

β_j ——传感器 j 的相关分配值;

R_j ——传感器 j 的可靠性系数。

传感器 j 对目标模式 A_i 的基本分配函数 $m_j(A_i)$ 为

$$\begin{aligned} m_j(A_i) &= C_j(A_i) / \\ &\left\{ \sum_{i=1}^{N_c} C_j(A_i) + N \times K(1 - R_j)(1 - W_j \alpha_j \beta_j) \right\} \\ m_j(\theta) &= 1 - \sum_{i=1}^{N_c} m_j(A_i) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: K ——修正系数;

$m_j(\theta)$ ——不确定性函数。

3.3 证据理论的合成规则

信息融合过程如图 2 所示。

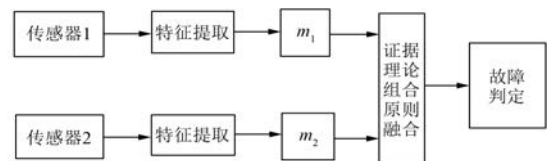


图2 信息融合过程

假设 m_1 、 m_2 分别是定义在 2^Θ 上的两个基本分配函数, 那么合成规则为

$$\begin{aligned} m(A) &= (m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C)}{1 - k} \\ k &= \sum_{B \cap C = \Phi} m_1(B) m_2(C) \end{aligned} \quad (11)$$

式中： k ——各个证据间的冲突因子，反映了两者的冲突关系。

$0 \leq k \leq 1$ ，其中 k 越大说明矛盾越明显，证据间冲突程度大。等于 1 时无法使用 D-S 证据理论。

3.4 故障判定原则

假设 $A_1, A_2 \subset U$ ，满足

$$\begin{aligned} m(A_1) &= \max\{m(A_i)\}, \quad A_i \subset U \\ m(A_2) &= \max\{m(A_i), A_i \subset U, \quad A_i \neq A_1\} \end{aligned}$$

故障判定原则为

$$\begin{cases} m(A_1) - m(A_2) > \varepsilon_1 \\ m(U) < \varepsilon_2 \\ m(A_1) > m(U) \end{cases} \quad (12)$$

式中： A_1 ——判决结果；

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ——阈值。

即(1)判定的故障元件必须具有最大的信度函数值，并且需大于某一阈值，为了防止误判，该值不能过小。(2)判定的故障元件与其他的信度函数值之差必须大于一个门限。(3)不确定信度函数则需小于一个门限值，但判定元件的信度函数必须大于这个不确定信度函数值。

4 仿真计算

本文进行仿真的是型号为 YR132M-4 的双馈异步电机，模拟多回路模型下的定子匝间短路故障。

电机的基本参数如下：额定功率为 5.5 kW；额定电压为 380 V；额定频率为 50 Hz；极对数为 2；定子槽数为 36；转子槽数为 24；定子并联支路数为 2；定子每支路串联线圈数为 6；定子每线圈匝数为 37；定子每条支路的阻值为 4.04 Ω，转子并联支路数为 1；转子每支路线圈数为 8；转子每线圈匝数为 12；转子每支路阻值为 0.83 Ω。失电时刻的转差率为 $s=0.1$ 。

本文对以下几种情况进行了仿真：

(1) 在正常情况下以及定子 C 相匝间短路时，对扩展派克矢量模进行仿真分析。

(2) 对正常情况以及定子 C 相匝间短路时的电机失电残压进行仿真。

如图 3、图 4 所示，通过对比可以明显得出匝间短路前后 $2kf_1$ (100 Hz) 处的谐波分量显著变化，取其为特征量一。不同短路匝数下的情况如

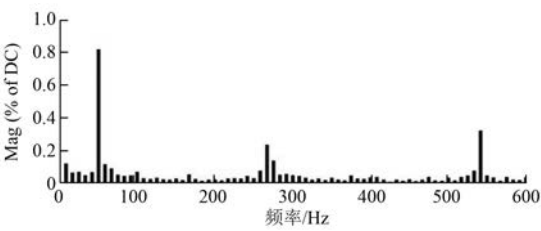


图3 正常情况下 FFT 分析

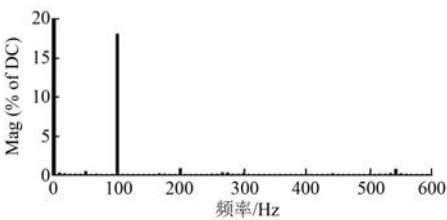


图4 定子短路情况下 FFT 分析

表 1 所示。

表 1 不同短路匝数下的故障情况	
短路匝数 N	$2f_1$ 所占基波比例/%
0	0.09
1	4.61
5	14.29
10	18.04

通过对比图 5 和图 6，可以看出定子匝间短路 $\{[k(R/P)] \pm 1\}f_{\text{off}}$ (585 Hz) 次谐波分量发生变化，取其为故障特征点二。不同短路匝数下的故障情况如表 2 所示。

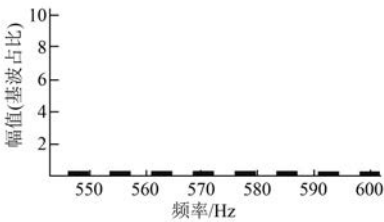


图5 正常情况下失电后电压 FFT 分析

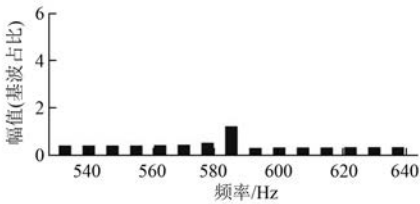


图6 定子短路下失电后电压 FFT 分析

表 2 不同短路匝数下特征量所占基波比

短路匝数	585 Hz 所占基波比/%
0	0.24
1	0.32
5	0.85
10	1.76

按照图 1 先采集短路前后两个模型中的故障特征量信息,定子电流信号和失电后定子绕组上的残压信号。利用式(10)求得 m_1 、 m_2 ,并初步得到结果。运用 MATLAB 编程根据式(11)进行 D-S 证据合成,故障融合结果如表 3 所示。

表 3 故障融合结果

	故障	正常	不确定
$m(1)$	0.774	0.163	0.063
$m(2)$	0.630	0.257 3	0.112 7
$m(A)$	0.903	0.072	0.013

最终计算结果:修正系数 K 为 0.46,电机故障率为 0.903。设定式(20)中的阈值 ε_1 、 ε_2 分别为 0.2、0.5。根据判定原则可以确认双馈电机发生匝间短路故障。

5 结 语

(1) 本文以双馈异步电机定子匝间短路故障为研究对象,基于多回路模型,建立异步电机数学模型并利用 MATLAB 进行仿真。通过扩展派克矢量法和失电残压模型,对定子端的电流电压进行频谱分析。仿真结果表明随着短路匝数的增大,故障信息量更加明显,从而验证了模型的正确性。

(2) 通过信息融合,解决了故障特征量受电机自身结构不对称和电压不平衡的影响,与常规的靠单一特征量诊断相较,其有效地提高了故障模式的识别能力,使故障的诊断率、准确率得以提高,对双馈异步电机的故障诊断有一定的意义。

【参 考 文 献】

[1] NANPI S, TOLYAT H A. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machine-review [C] // Conference Records of IEEE-IAS, 1999: 197-204.

[2] 李俊卿,何龙,王栋.双馈式感应发电机转子匝间短路的负序分量分析[J].大电机技术,2014(2): 14-18.

[3] CARDOSO A J M, CRUI S M A, FONSECA D S B. Inter-Turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three-phase Induction Motors, by Park's Vector Approach [C] // IEEE International Electric Machines & Drives Conference Record, 1999: 595-598.

[4] CRUZ M A, MARQUES A J. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(5): 1227-1233.

[5] GRITLI Y, STEFANI A, FILIPPETTI F. Stator fault analysis based on wavelet technique for wind turbines equipped with DFIG [C] // Italy, International Conference on Clean Electrical Power, 2009: 485-491.

[6] 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.

[7] 张正东,马宏忠,时维俊,等.双馈异步发电机定子绕组故障特征量提取方法研究[J].微电机,2014,47(5): 66-70.

[8] 李俊卿,于海波,张立鹏.基于 EEMD-HHT 的双馈感应发电机定子匝间短路故障研究[J].电机与控制应用,2015,42(2): 65-71.

[9] 李俊卿,王栋,王喜梅.双馈感应发电机定子绕组匝间短路时电磁特性[J].华北电力大学学报,2015,42(1): 16-21.

[10] 马宏忠,李训铭,方瑞明,等.利用失电残余电压诊断异步电机转子绕组故障[J].中国电机工程学报,2004,24(7): 184-187.

[11] 张虎,王宏,赵志科.基于笼形异步电机失电残压 HHT 的转子断条故障诊断研究[J].煤矿机械,2012,33(5): 276-279.

[12] 王轩,王莉,魏民.基于失电残压小波分析的定子绕组故障诊断[J].微特电机,2011,39(1): 32-34.

[13] MILIMONFARED J, KELK H M, NANDI S, et al. A novel approach for broken-rotor-bar detection in cage induction motors [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1999, 35(3): 1000-1006.

[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.

[15] 马宏忠,张正东,时维俊,等.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.

[16] 黄志彦,张柏书,于开山,等.D-S 证据理论数据融合算法在某系统故障诊断中的应用[J].电光与控制,2007,14(2): 146-149.

收稿日期: 2016-12-12