

# 基于双线性观测器的双馈风电机组 变流器功率管开路故障诊断

赵洪山,程亮亮

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

**摘要:**针对双馈风电机组变流器的开路故障,提出一种基于双线性观测器的故障诊断方法。从双馈感应发电机和变流器的数学模型出发,根据模型的非线性特点,推导双馈风电机组变流系统的双线性模型,并构造出变流系统的双线性电流观测器。通过电流观测器得到变流器的电流残差信息,并据此对变流器进行故障检测,然后利用电流平均值定位出具体故障器件。考虑到功率管开关延时、死区时间及测量噪声的影响,设计自适应阈值进行故障判断,保证了诊断的鲁棒性。通过不同故障类型和电网电压跌落的仿真分析,验证了所提开路故障诊断方法的有效性和可靠性。

**关键词:**双馈风电机组;风电;变流器;开路故障诊断;双线性观测器;自适应阈值

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.013

## 0 引言

变流器由电力电子器件构成,是大型风电机组实现并网的核心部件,已在风力发电系统中得到了广泛应用。但风电机组运行环境大多比较恶劣,再加上电子器件的脆弱性,使变流器成为了风电机组中最脆弱和故障率最高的部件<sup>[1-2]</sup>。变流器的故障主要为功率开关管开路和短路故障<sup>[3]</sup>,其中,驱动失效和开关损坏引发的开路故障,不仅容易引发其他器件发生二次故障,而且会引起变流器整体损坏,最终导致风电机组停机,影响系统的可靠性和稳定性<sup>[4-5]</sup>,然而,目前关于变流器故障诊断技术的研究却很少。因此,本文对双馈风电机组变流器开路故障诊断方法进行研究,以避免重大事故,降低运维成本,提高风电机组的可靠性和可用率。

目前,故障诊断方法大致可分为基于模型的故障诊断方法和基于数据的故障诊断方法,其中,基于数据的风电机组变流器故障诊断方法已经有很多的研究。文献[6]对直流侧电压信号进行小波包变换,通过频谱特征对变流器进行故障诊断。文献[7-8]针对风电机组的中点箝位全功率变流器,分析了其正常和开路状态下的电流特征,将三相电流的极性及其过零范围时间作为特征量进行故障诊断。文献[9-11]提出了变流器开路故障电流瞬时频率检测法,利用电流矢量相角的微分计算电流矢量的瞬时频率,然后根据电流瞬时频率与阈值的比较结果判断变流器是否发生故障,并通过电流极性和平均电

流绝对值识别具体故障位置。文献[12]采用电流信号平均值直接进行双馈风电机组变流器开路故障诊断,能够实现单个功率管故障和2个功率管故障的识别和定位。基于数据的故障诊断方法易受系统运行状况和电流畸变的影响,特别是变流器的开路故障,单一功率管和双功率管故障都会引发电流、电压等多种信号发生变化,从而导致故障识别十分困难。

基于模型的故障诊断方法充分利用了系统内部的深层信息,能有效反映物理系统故障本质特征,有利于系统的故障隔离和辨识<sup>[13]</sup>。国内外已有研究者将基于模型的方法应用在风电机组变流器的故障诊断中<sup>[14-15]</sup>。文献[14]基于状态观测器实现双馈风电机组变流器的故障检测,但无法识别具体故障元件,且不能对网侧变流器进行故障检测。文献[15]提出了一种基于观测器和自适应阈值的直驱式风电机组变流器故障诊断方法,但不适用于模型属于非线性系统的双馈风电机组变流器的故障诊断。此外,由于非线性系统目前还没有构造观测器的统一方法,构造合适的观测器比较困难,从而使得基于观测器的双馈风电机组变流器故障诊断方法研究有一定难度。

基于此,本文首先推导出双馈风电机组变流系统的双线性模型,并据此构造出其双线性电流观测器,解决了非线性变流系统观测器难以设计的问题。然后基于观测器得到电流的残差信息,并根据残差信息检测变流器发生开路故障的故障相。最后根据故障相电流的平均值进行故障定位,诊断发生开路故障的器件。但由于功率器件的非理想性和测量噪声的影响,在实际运行中即使无故障也会出现电流残差。因此,本文采用自适应阈值比较的方法进行故障判断,确保故障诊断的准确性。通过仿真分析

收稿日期:2016-06-09;修回日期:2017-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277074)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277074)

表明了所提开路故障诊断方法的有效性和可靠性。

### 1 双馈风电机组变流系统模型

双馈风电机组的拓扑结构如图 1 所示。变流系统主要由双馈感应发电机 (DFIG)、滤波器、中间直流电容器、转子侧和网侧变流器组成。DFIG 转子通过 2 个背靠背的电压源型 PWM 变流器接入电网,定子直接与电网连接。双 PWM 变流器在保持直流母线电压稳定的前提下,可根据控制需求独立互逆地运行于整流或逆变状态。当 DFIG 处于超同步状态时,转子侧馈出能量,转子侧变流器工作于整流状态,网侧变流器工作于逆变状态;当 DFIG 处于亚同步运行时,转子侧馈入能量,转子侧变流器工作于逆变状态,网侧变流器工作于整流状态。

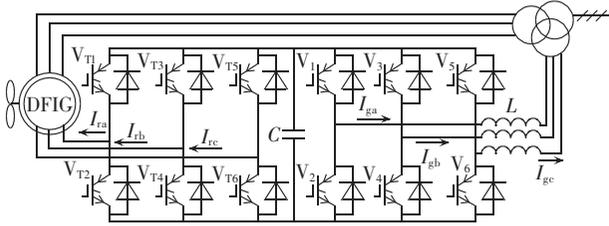


图 1 双馈风电机组拓扑结构

Fig.1 Topological structure of doubly-fed wind turbine

#### 1.1 网侧变流器模型

在  $dq$  同步坐标系下,与滤波器连接的电压源型 PWM 变流器的数学模型如下:

$$\begin{cases} LpI_{gd} = -RI_{gd} + \omega_s LI_{gq} + U_{gd} - U_{sd} \\ LpI_{gq} = -\omega_s LI_{gd} - RI_{gq} + U_{gq} - U_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$  为网侧变流器控制电压;  $U_{sd}$ 、 $U_{sq}$  为双馈发电机定子电压;  $I_{gd}$ 、 $I_{gq}$  为网侧变流器电流;  $R$ 、 $L$  分别为交流侧电阻和电感;  $\omega_s$  为同步电角速度;  $p$  为微分算子。

#### 1.2 DFIG 模型

根据电动机惯例,DFIG 的空间矢量电压方程和磁链方程分别为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + j\omega_s \psi_s + p\psi_s \\ U_r = R_r I_r + j(\omega_s - \omega_r) \psi_r + p\psi_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $U_s$ 、 $U_r$  分别为定子和转子电压矢量;  $I_s$ 、 $I_r$  分别为定子和转子电流矢量;  $\psi_s$ 、 $\psi_r$  分别为定子和转子磁链矢量;  $R_s$ 、 $R_r$  分别为定子和转子绕组电阻;  $\omega_r$  为发电机转子的电角速度;  $L_s$ 、 $L_r$  分别为定子和转子绕组的自感;  $L_m$  为励磁电感。

将式(3)代入式(2),并将其空间矢量模型分解至  $d$  轴和  $q$  轴即可得到 DFIG 在  $dq$  参考坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s I_{sd} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s L_m I_{rq} + L_s p I_{sd} + L_m p I_{rd} \\ U_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s L_m I_{rd} + L_s p I_{sq} + L_m p I_{rq} \\ U_{rd} = R_r I_{rd} - (\omega_s - \omega_r) L_r I_{rq} - (\omega_s - \omega_r) L_m I_{sq} + L_r p I_{rd} + L_m p I_{sd} \\ U_{rq} = R_r I_{rq} + (\omega_s - \omega_r) L_r I_{rd} + (\omega_s - \omega_r) L_m I_{sd} + L_r p I_{rq} + L_m p I_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

以网侧变流器控制电压和 DFIG 定子、转子电压的  $d$ 、 $q$  轴分量作为输入量  $U$ ,以网侧变流器和发电机定、转子电流的  $d$ 、 $q$  轴分量作为状态量  $X$ ,  $\dot{X}$  为  $X$  的微分量,  $Y$  为系统输出量,根据式(1)和式(4)推导出双馈风电机组变流系统的状态空间表达式形式:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (5)$$

$$U = [U_{sd} \ U_{sq} \ U_{rd} \ U_{rq} \ U_{gd} \ U_{gq}]^T$$

$$X = [I_{sd} \ I_{sq} \ I_{rd} \ I_{rq} \ I_{gd} \ I_{gq}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix}$$

$$A_1 =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-R_s L_r}{M} & \omega_s + \omega_r \frac{L_m^2}{M} & \frac{R_r L_m}{M} & \omega_r \frac{L_r L_m}{M} \\ -\omega_s - \omega_r \frac{L_m^2}{M} & \frac{-R_s L_r}{M} & -\omega_r \frac{L_r L_m}{M} & \frac{R_r L_m}{M} \\ \frac{R_s L_m}{M} & -\omega_r \frac{L_s L_m}{M} & -\frac{R_r L_s}{M} & \omega_s - \omega_r \frac{L_s L_r}{M} \\ \omega_r \frac{L_s L_m}{M} & \frac{R_s L_m}{M} & -\omega_s + \omega_r \frac{L_s L_r}{M} & -\frac{R_r L_s}{M} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_s \\ \omega_s & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{L_r}{M} & 0 & \frac{-L_m}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_r}{M} & 0 & \frac{-L_m}{M} & 0 & 0 \\ \frac{-L_m}{M} & 0 & \frac{L_s}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-L_m}{M} & 0 & \frac{L_s}{M} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$M = L_s L_r - L_m^2$$

### 1.3 建立双馈风电机变流器的双线性系统模型

双线性系统状态空间表达式形式一般如下<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + \sum_{i=1}^l N_i XU_i + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $X \in \mathbf{R}^n$ 、 $U \in \mathbf{R}^l$ 、 $Y \in \mathbf{R}^m$  分别为状态变量、控制变量和输出变量;  $A$ 、 $N_i (i=1, 2, \dots, l)$ 、 $B$ 、 $C$  是适当维数的常数矩阵, 分别为系统矩阵、双线性矩阵、输入矩阵和输出矩阵;  $N_i XU_i$  为双线性项。

从式(6)可以看到, 双线性系统是线性系统与双线性项(即控制变量和状态变量的乘积项)的和, 且双线性系统的非线性信息都包含在双线性项中。因此, 它是一种最简单的非线性系统, 如果  $N=0$ , 则退化为线性系统<sup>[18]</sup>。

由式(5)可知, 系统矩阵  $A$  包含发电机转子的电角速度  $\omega_r$ , 且  $\omega_r$  为时变参数。因此, 把参数  $\omega_r$  从矩阵  $A$  中分离出来, 可得如下形式:

$$A = A_0 + N\omega_r \quad (7)$$

根据式(7)可知, 系统矩阵  $A$  是由常系数矩阵  $A_0$  和双线性矩阵  $N\omega_r$  组成。以时变参数  $\omega_r$  为一独立控制量, 并根据式(5)~(7), 可推导出双馈风电机变流系统的双线性系统模型, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{X} = A_0 X + N X \omega_r + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (8)$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} \frac{-R_s L_r}{M} & \omega_s & \frac{R_r L_m}{M} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s L_r}{M} & 0 & \frac{R_r L_m}{M} & 0 & 0 \\ \frac{R_s L_m}{M} & 0 & \frac{-R_r L_s}{M} & \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_s L_m}{M} & -\omega_s & \frac{-R_r L_s}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & \omega_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_m^2}{M} & 0 & \frac{L_r L_m}{M} & 0 & 0 \\ -\frac{L_m^2}{M} & 0 & \frac{-L_r L_m}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L_s L_m}{M} & 0 & \frac{-L_s L_r}{M} & 0 & 0 \\ \frac{L_s L_m}{M} & 0 & \frac{L_s L_r}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 2 基于双线性观测器的变流器开路故障诊断

### 2.1 双线性状态观测器设计

基于状态观测器可以估计双馈风电机组的转子

侧和网侧变流器的三相电流, 从而产生电流残差, 并据此进行故障检测和定位。根据双馈风电机变流系统的双线性状态空间表达式, 把线性 Luenbenger 观测器理论加以推广, 构造双线性状态观测器, 表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = A_0 \hat{X} + N \hat{X} \omega_r + BU + L(Y - \hat{Y}) \\ \hat{Y} = C \hat{X} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $L$  为反馈矩阵。

定义  $e$  表示观测器残差, 其表达式如下:

$$e = X - \hat{X} \quad (10)$$

由式(8)减去式(9)可得:

$$\begin{aligned} \dot{e} = & A_0 X + N X \omega_r + BU - \\ & [A_0 \hat{X} + BU + N \hat{X} \omega_r + LC(X - \hat{X})] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)经化简可得:

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (12)$$

状态观测器的设计关键在于反馈矩阵  $L$  的确定, 基于文献[19]的方法构造状态反馈矩阵  $L$  使得  $\dot{e} = Ae$ 。

$$L = L_0 + L_r \omega_r \quad (13)$$

其中,  $L_0 = A_0 + A$ ;  $L_r = N$ ;  $A = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6 \}$ ,  $\lambda_i (i=1, 2, \dots, 6)$  为对角矩阵的数值。通过极点配置法可得到合适的反馈对角矩阵 ( $\lambda_i$  均大于零), 使观测器快速、稳定地收敛<sup>[20]</sup>。因此, 本文构造的双馈风电机变流系统双线性观测器结构图如图 2 所示。

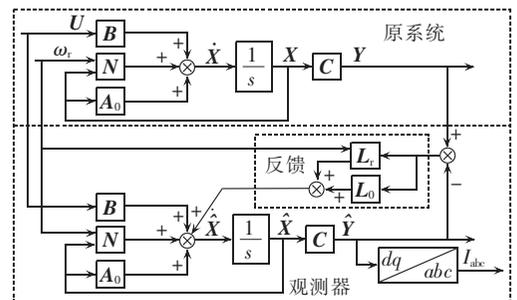


图 2 双馈风电机变流系统双线性观测器

Fig.2 Bilinear observer for conversion system of doubly-fed wind turbine

由于双馈风电机组的转子侧变流器常采用定子电压或磁链定向的矢量控制, 网侧变流器采用电网电压定向的矢量控制, 因此, 图 2 中定子电压信号为网侧电压在  $dq$  坐标系下的值; 转子电压和网侧变流器控制电压信号分别取自其矢量控制环中的电压控制信号。同时, 为了准确诊断出变流器具体故障器件, 本文通过坐标变换, 将观测器输出电流的  $d$ 、 $q$  轴分量转换成其在真实坐标系下的三相电流值。

### 2.2 故障检测

残差是系统实际输出与状态观测器输出的差值, 反映实际系统与系统数学模型之间不一致程度

的一个量。计算残差是进行故障检测的主要方法之一,采用一定的残差判别指标(如残差均值、均方根等)可以有效反映系统动态特性,进而实现系统故障检测。本文则根据双线性观测器输出电流值与变流器实际三相电流测量值的残差信息进行故障检测。

首先定义变流器三相电流残差  $r_{rk}, r_{gk}$ :

$$\begin{cases} r_{rk} = I_{rk} - \hat{I}_{rk} \\ r_{gk} = I_{gk} - \hat{I}_{gk} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $k$  表示 a、b、c 三相;  $r_{rk}$  为转子侧变流器  $k$  相电流的残差;  $r_{gk}$  为网侧变流器  $k$  相电流的残差;  $I_{rk}, I_{gk}$  分别为转子侧变流器和网侧变流器  $k$  相电流测量值;  $\hat{I}_{rk}, \hat{I}_{gk}$  分别为观测器得到的转子侧变流器和网侧变流器  $k$  相电流估计值。

正常状态时,残差基本为零;变流器发生开路故障时,三相电流残差会突然变大,并发生周期性变化。为了能有效判别故障,引入电流残差的平均绝对值作为故障检测变量  $R_{rk}$  和  $R_{gk}$ 。其中,  $R_{rk}$  的表达式如下:

$$R_{rk} = \left| \frac{1}{T} \int_t^{t+T} r_{rk}(t) dt \right| \quad (15)$$

其中,  $k$  表示 a、b、c 三相;  $t$  为时间;  $R_{rk}$  为转子侧变流器  $k$  相的故障检测变量。

故障检测的目的是在避免误报警的前提下,判断系统是否发生了故障。为此,用阈值作为判断故障是否发生的依据。目前,在较多数文献中通常采用固定阈值的方法来实现,往往导致故障检测不能适应其动态过程。此外,风电机组是受外界干扰较大的系统,如果阈值选择较小,容易引起误报警;若阈值选择较大,又会有部分故障难以检测出来。因此,采用自适应阈值来进行故障检测,以实现故障的准确判断。

### 2.3 自适应阈值设计

正常状态下,各变流器故障检测变量  $R_k$  基本为零,而变流器三相电流的实际有效值大于零;功率管开路时,其故障相检测变量  $R_k$  的值会远大于零,但变流器故障相会因开路故障使其电流实际有效值大幅减小,甚至为零。因此,引入相电流的有效值作为自适应阈值,具体如下:

$$\begin{cases} D_{rk} = \varepsilon_1 I_{rkRMS} \\ D_{gk} = \varepsilon_1 I_{gkRMS} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $\varepsilon_1$  为一比例常数;  $D_{rk}, D_{gk}$  分别为转子侧和网侧变流器  $k$  相的自适应阈值;  $I_{rkRMS}, I_{gkRMS}$  分别为转子侧和网侧变流器  $k$  相电流的有效值。

从而,可以得到风电机组变流系统故障检测决策逻辑。以转子侧变流器为例,具体如下:

$$\begin{cases} R_{rk} > D_{rk} & \text{检测到 } k \text{ 相故障} \\ R_{rk} \leq D_{rk} & \text{未检测到 } k \text{ 相故障} \end{cases} \quad (17)$$

如果把式(17)中的  $R_{rk}$  和  $D_{rk}$  分别替换为  $R_{gk}$  和  $D_{gk}$ ,则该方法可用于检测网侧变流器的开路故障。

通过变流器各相检测变量与其自适应阈值比较的结果,可以有效检测出变流器的故障相,但变流器每一相的桥臂均包含有上、下 2 个功率开关管,为了实现故障诊断,必须定位到具体故障器件。

### 2.4 故障定位

功率管开路故障会引起变流器相应桥臂上侧或下侧电流不能导通,其他各相电流也会因此发生变化。在不考虑二极管的前提下,某相桥臂上侧功率管(如  $V_{T1}, V_{T3}, V_{T5}$ )开路,则该相电流将为零或为负;若单相桥臂下侧功率管(如  $V_{T2}, V_{T4}, V_{T6}$ )开路,则该相电流将为零或为正。因此,某相桥臂的一个功率管发生开路故障时,该相电流幅值会始终大于或小于零;如果该相桥臂的 2 个功率管都发生开路,则相电流幅值会一直为零。因此,相电流平均值  $I_{kAV}$  可以作为故障定位变量。

以转子侧变流器电流为例,其平均值表达式如下:

$$I_{rkAV} = \frac{1}{N} \sum_{j=m-N+1}^m I_{rk}(j\tau) \quad (18)$$

其中,  $I_{rk}$  为转子侧变流器  $k$  相电流;  $I_{rkAV}$  为  $k$  相电流平均值;  $N$  为每周期的采样点数;  $\tau$  为电流信号的周期。

当某相桥臂的 2 个功率管同时发生开路故障时,故障相电流平均值  $I_{kAV}$  接近于零,这与系统正常运行情况类似。但故障发生时能检测出故障相,且故障定位是在检测出故障相后进行的,而正常情况下无故障相。因此,根据阈值仍可以进行识别。

故障定位的自适应阈值  $T_k$  仍根据电流的有效值进行设计,具体如下:

$$\begin{cases} T_{rk} = \varepsilon_2 I_{rkRMS} + 0.1 \\ T_{gk} = \varepsilon_2 I_{gkRMS} + 0.1 \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $\varepsilon_2$  为一比例常数;  $T_{rk}, T_{gk}$  分别为转子侧和网侧变流器  $k$  相的故障定位阈值。

为了便于识别故障功率管,定义故障标志  $F$ ,用来表示不同的开路故障功率管。以转子侧变流器 a 相的功率管为例,具体规则如下:如果  $R_{ra} > D_{ra}$  且  $I_{raAV} < -T_{ra}$ ,则  $F_{VT1} = 1$ ,表示 a 相功率管  $V_{T1}$  故障;如果  $R_{ra} > D_{ra}$  且  $I_{raAV} > T_{ra}$ ,则  $F_{VT2} = 1$ ,表示 a 相功率管  $V_{T2}$  故障;若  $R_{ra} > D_{ra}$  且  $-T_{ra} < I_{raAV} < T_{ra}$ ,则  $F_{VT1} = 1$  且  $F_{VT2} = 1$ ,表示 a 相功率管  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  同时故障;其他情况下  $F_{VT1}, F_{VT2}$  的值均为 0。所以,“1”表示故障,“0”表示正常。

表 1 为转子侧变流器单个功率管和 2 个功率管发生开路故障时的故障诊断表。若将表 1 中  $V_{T1} - V_{T6}$  和  $F_{VT1} - F_{VT6}$  分别替换成  $V_1 - V_6$  和  $F_{V1} - F_{V6}$ ,则可用于网侧变流器功率管的开路故障诊断(表 1 中“+”、“-”分别表示大于 0 和小于 0;  $N$  表示不用于故

表 1 转子侧变流器开路故障诊断表

Table 1 Symptoms of rotor-side converter open-circuit faults

故障功率管	故障检测			故障定位			故障标志					
	$R_{ra}-D_{ra}$	$R_{rb}-D_{rb}$	$R_{rc}-D_{rc}$	$I_{raAV}$	$I_{rbAV}$	$I_{rcAV}$	$F_{VT1}$	$F_{VT2}$	$F_{VT3}$	$F_{VT4}$	$F_{VT5}$	$F_{VT6}$
$V_{T1}$	+	-	-	$<-T_{ra}$	N	N	1	0	0	0	0	0
$V_{T2}$	+	-	-	$>T_{ra}$	N	N	0	1	0	0	0	0
$V_{T3}$	-	+	-	N	$<-T_{rb}$	N	0	0	1	0	0	0
$V_{T4}$	-	+	-	N	$>T_{rb}$	N	0	0	0	1	0	0
$V_{T5}$	-	-	+	N	N	$<-T_{rc}$	0	0	0	0	1	0
$V_{T6}$	-	-	+	N	N	$>T_{rc}$	0	0	0	0	0	1
$V_{T1}, V_{T2}$	+	-	-	$[-T_{ra}, T_{ra}]$	N	N	1	1	0	0	0	0
$V_{T2}, V_{T3}$	+	+	-	$>T_{ra}$	$<-T_{rb}$	N	0	1	1	0	0	0
$V_{T3}, V_{T4}$	-	+	-	N	$[-T_{rb}, T_{rb}]$	N	0	0	1	1	0	0
$V_{T1}, V_{T4}$	+	+	-	$<-T_{ra}$	$>T_{rb}$	N	1	0	0	1	0	0
$V_{T2}, V_{T5}$	+	-	+	$>T_{ra}$	N	$<-T_{rc}$	0	1	0	0	1	0
$V_{T3}, V_{T6}$	-	+	+	N	$<-T_{rb}$	$>T_{rc}$	0	0	1	0	0	1
$V_{T1}, V_{T6}$	+	-	+	$<-T_{ra}$	N	$>T_{rc}$	1	0	0	0	0	1
$V_{T4}, V_{T5}$	-	+	+	N	$>T_{rb}$	$<-T_{rc}$	0	0	0	1	1	0
$V_{T5}, V_{T6}$	-	-	+	N	N	$[-T_{rc}, T_{rc}]$	0	0	0	0	1	1

定位)。

综上所述,基于观测器的双馈风电机组变流系统故障诊断的原理为:通过状态观测器重构变流系统的动态过程,并将其与实际系统并行运行,从而基于观测器的电流估计值和实际的测量值得到电流残差,然后以电流残差的平均绝对值作为检测变量,以电流的平均值作为故障定位变量,并结合自适应阈值,进行故障诊断。其原理框图如图 3 所示。

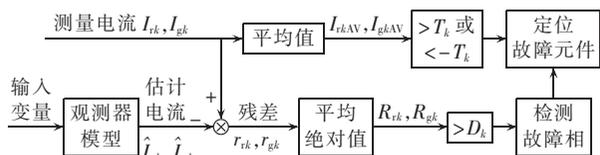


图 3 基于观测器的风电机组变流系统故障诊断原理图

Fig.3 Schematic diagram of observer-based fault diagnosis for conversion system of wind turbine

### 3 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 环境中建立双馈风电机组变流器开路故障诊断系统的仿真模型,进行相关的仿真。仿真中所用的风电机组的相关参数如下:额定功率为 1.5 MW,额定电压为 575 V,额定转速为 1680 r/min,定子电阻  $R_s=0.023$  p.u.,定子漏感  $L_{ls}=0.18$  p.u.,转子电阻  $R_r=0.016$  p.u.,转子漏感  $L_{lr}=0.16$  p.u.,定、转子互感  $L_m=2.9$  p.u.,极对数为 3,额定转差率为 -0.2,滤波电阻  $R=0.003$  p.u.,滤波电感  $L=0.3$  p.u.。转子侧变流器采用基于空间矢量调制技术的定子磁链定向控制策略,网侧变流器采用基于空间矢量调制技术的电网电压定向控制策略。变流器的开路故障通过移除功率管的驱动信号进行仿真。仿真结果中电流值用标幺值表示。

将双馈风电机组的相关参数代入式(13),并根据文献[19]的反馈矩阵极点配置法,通过编程可得

到双线性状态观测器的反馈矩阵  $L$ 。 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  是自适应阈值比例系数,其大小决定了故障诊断的灵敏性和鲁棒性。基于变流器各功率管开路故障的大量仿真分析和研究, $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  的值分别取 0.6 和 0.4。为了验证故障诊断方法的有效性和鲁棒性,分别在下面 3 种情况下进行故障诊断的仿真:①转子侧 a 相功率管  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  开路;②网侧 b 相、c 相功率管  $V_4$  和  $V_5$  开路;③电网电压跌落。

图 4 为情况①的故障诊断仿真结果。仿真过程中,系统运行至 1 s 时,突然断开转子侧  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  的触发脉冲,使系统在开路故障下运行。根据图 4(a)可知,转子侧电流发生畸变。从图 4(b)可以看出,1.02 s 后,a 相故障检测变量  $R_{ra}$  开始大于阈值  $D_{ra}$ ,而其他相检测变量始终未超过其自适应阈值的范围。由此,可以确定故障相为 a 相。从图 4(c)中可以看出,1.03 s 后,a 相平均电流  $I_{raAV}$  开始超过阈值  $-T_{ra}$ ,使得故障标志  $F_{VT1}$  由 0 转变为 1,表明功率管  $V_{T1}$  出现了开路故障;1.35 s 之后,a 相平均电流  $I_{raAV}$  开始介于阈值  $\pm T_{ra}$  之间,使得故障标志  $F_{VT2}$  也开始变为 1,而其他故障标志均为 0。根据表 1 的故障辨识规则,可确定转子侧变流器的功率管  $V_{T1}$  和  $V_{T2}$  出现了开路故障。该结果与仿真过程中设置的故障情况相符合,表明了所提开路故障诊断方法对转子侧变流器开路故障诊断的有效性。

图 5 为情况②的故障诊断仿真结果。系统正常运行至 0.7 s 时,先移去功率管  $V_5$  的驱动信号;待系统运行 1 s 时,再移除功率管  $V_4$  的驱动信号,使系统在网侧变流器双功率管发生开路故障的情况下运行。网侧变流器的电流如图 5(a)所示。从图 5(b)可知,c 相故障检测变量  $R_{gc}$  在 0.72 s 后率先超过其阈值  $D_{gc}$ ,由此确定故障相为 c 相;1.02 s 后,因 b 相故

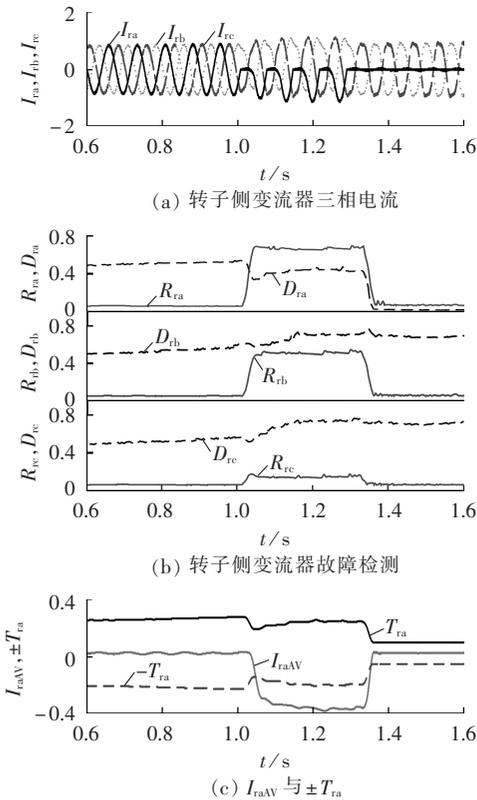


图 4 转子侧变流器单相故障诊断仿真结果  
Fig.4 Simulative diagnostic results of rotor-side converter single-phase fault

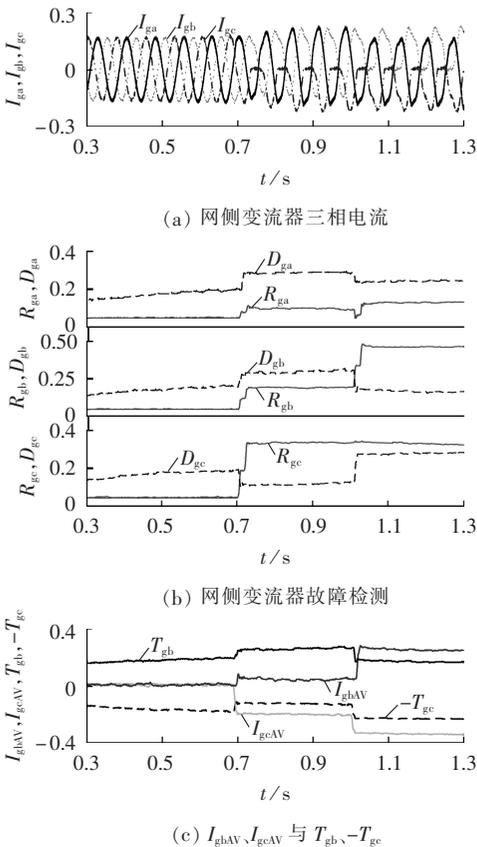


图 5 网侧变流器两相故障诊断仿真结果  
Fig.5 Simulative diagnostic results of grid-side converter two-phase fault

障检测变量  $R_{gb}$  也超过其阈值  $D_{gb}$ , 从而确定 b 相也为故障相。检测到故障相后, 将故障相的平均电流和故障定位自适应阈值进行比较, 结果如图 5(c) 所示。0.72 s 后, c 相平均电流  $I_{gcAV}$  超过其阈值  $-T_{gc}$ ; 1.02 s 后, b 相平均电流  $I_{gbAV}$  也开始超过其阈值  $T_{gb}$ , 故障标志  $F_{V5}$  和  $F_{V4}$  分别从 0 变为 1。结合表 1, 可确定故障功率管分别为  $V_5$  和  $V_4$ 。该结果与仿真过程中设置的故障情况相一致, 表明了所提诊断方法对网侧变流器开路故障诊断的有效性。

为了进一步验证本文所提故障诊断方法的鲁棒性, 以电网电压跌落为例进行仿真验证。系统正常运行至 1 s 时, 将电网电压跌落为原来的 1/2, 1.3 s 后将其恢复正常, 此时, 双馈风电机组变流系统的故障诊断仿真结果如图 6 所示。图 6(a) 为电网电压跌落前后三相电压的瞬时值(标么值)。从图 6(b) 和 6(c) 可以看出, 当电网电压出现跌落时, 由于在扰动期间网侧和机侧变流器三相电流会有小幅的增大, 进而引起变流器各相故障自适应阈值  $D_{rk}$ 、 $D_{gk}$  随之增大。虽然观测器电流值与实际电流的残差也会出现波动, 使得各相检测变量  $R_{rk}$ 、 $R_{gk}$  发生变化, 但其数值

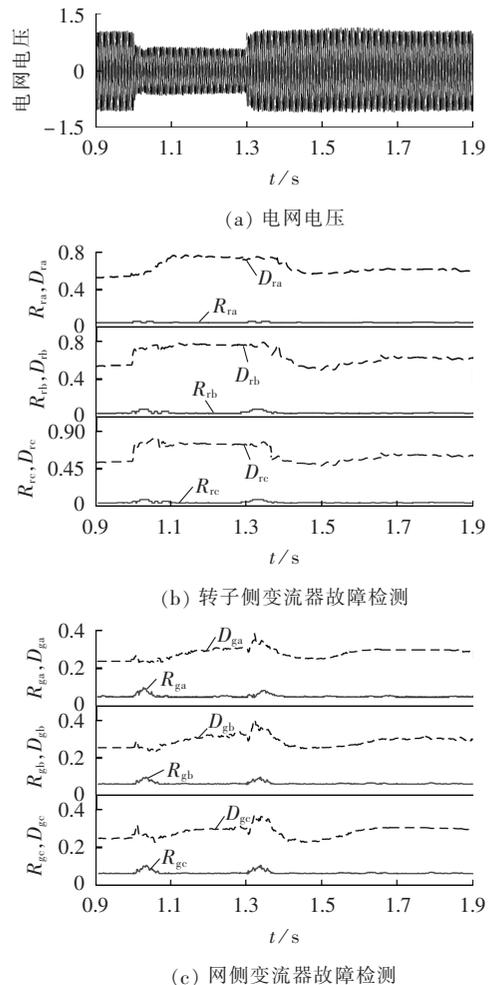


图 6 故障诊断鲁棒性仿真结果  
Fig.6 Simulative results of fault diagnosis robustness

都很小,并不会超过阈值而引起误报警。因此,所提故障诊断方法有很好的鲁棒性。

#### 4 结论

本文根据 DFIG 电磁暂态模型和变流器数学模型,结合基于观测器进行故障诊断的目的进行变形,推导出了双馈风电机组变流系统的双线性模型,并构造了其双线性状态观测器。在此基础上,利用观测器对变流器电流大小进行估计,并与实际电流进行比较得到残差信息,据此进行故障检测。然后,利用平均电流进行故障器件的定位,并采用自适应阈值消除功率管开关延时和测量噪声等的影响。转子侧和网侧变流器的开路故障诊断仿真表明:基于观测器的故障诊断方法提取的故障特征明显,对故障的定位准确,能给检修带来极大方便;所提方法不仅能够快速准确地诊断出变流器的单一功率管开路故障,而且能够对双功率管的开路故障进行诊断;所提故障诊断方法对电网电压跌落具有较好的鲁棒性,且不受闭环控制策略的影响。

#### 参考文献:

- [1] NILSSON J, BERTLING L M. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plant during 1997-2005[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 167-173.
- [2] 李辉, 胡姚刚, 李洋, 等. 大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 6-16.  
LI Hui, HU Yaogang, LI Yang, et al. Overview of condition monitoring and fault diagnosis for grid connected high power wind turbine unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 6-16.
- [3] 姜保军, 安群涛. 基于运行模式分析的逆变器功率管开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 30-37.  
JIANG Baojun, AN Quntao. A novel diagnostic technique for open-switch faults of inverters based on operating mode analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 30-37.
- [4] BIN L, SHARMA S K. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1770-1777.
- [5] JUN S M, PARK J S, KIM H W, et al. An MRAS-based diagnosis of open-circuit fault in PWM voltage-source inverters for PM synchronous motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2514-2526.
- [6] 沈艳霞, 周文晶, 纪志成, 等. 基于小波包分析的风力发电系统中变流器的故障识别[J]. 电网技术, 2013, 37(27): 2011-2017.  
SHEN Yanxia, ZHOU Wenjing, JI Zhicheng, et al. Fault identification of converter used in wind power generation based on wavelet packet analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(27): 2011-2017.
- [7] LEE J S, LEE K B, BLAABJERG F. Open-switch fault detection method of a back-to-back converter using NPC topology for wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 325-335.
- [8] LEE J S, LEE K B, BLAABJERG F. Open-switch fault detection method of an NPC converter for wind turbine systems[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA: IEEE, 2013: 1696-1701.
- [9] FREIRE N, ESTIMA J O. Converters fault-diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications[C]//IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, USA: IEEE, 2010: 403-408.
- [10] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3957-3967.
- [11] 黄科元, 刘静佳, 黄守道, 等. 永磁直驱系统变流器开路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 129-136.  
HUANG Keyuan, LIU Jingjia, HUANG Shoudao, et al. Converters open-circuit fault-diagnosis method research for direct-driven permanent wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 129-136.
- [12] DUAN P, XIE K, ZHANG L, et al. Open-switch fault diagnosis and system reconfiguration of doubly fed wind power converter used in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 816-821.
- [13] 赵洪山, 连莎莎, 邵玲. 基于模型的风电机组变桨距系统故障检测[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 440-444.  
ZHAO Hongshan, LIAN Shasha, SHAO Ling. A model-based fault detection for variable-pitch system of wind turbines [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 440-444.
- [14] 毛永梅, 彭涛, 韩华, 等. 基于观测器的双馈风电机组变流器开关管开路故障检测[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(3): 57-61.  
MAO Yongmei, PENG Tao, HAN Hua, et al. Open-circuited fault detection on switch of convertor in double-fed wind power generator set based on state observer[J]. Computer Aided Engineering, 2015, 24(3): 57-61.
- [15] JLASSI I, ESTIMA J O, KHIL E, et al. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2689-2702.
- [16] 李辉, 赵猛, 赵斌, 等. 双馈风电机组关键传感器的故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 73-78.  
LI Hui, ZHAO Meng, ZHAO Bin, et al. Fault diagnosis method for key sensors of doubly fed wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 73-78.
- [17] 华向明. 双线性系统建模与控制[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1990: 1-13.
- [18] 张涌萍, 张波, 丘东元. DC-DC 变换器双线性系统建模及基于李亚普诺夫直接法的控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 7-11.  
ZHANG Yongping, ZHANG Bo, QIU Dongyuan. Bilinear system model and Lyapunov-based control method for DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 7-11.
- [19] ROTHENHAGEN K, FUCHS F W. Current sensor fault detection by bilinear observer for a doubly fed induction generator[C]//IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Elec-

tronics. Paris, France: IEEE, 2006: 1369-1374.

- [20] KAUTSKY J, NICHOLS N K, VAN DOOREN P. Robust pole assignment in linear state feedback [J]. International Journal of Control, 1985, 41(5): 1129-1155.

#### 作者简介:

赵洪山(1965—),男,河北沧州人,教授,博士,主要研究



赵洪山

方向为电力系统运行与控制、电力设备故障诊断与优化检修 (E-mail: zhaohshcn@126.com);

程亮亮(1990—),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统故障诊断及优化维修策略 (E-mail: chlhdhsq@163.com)。

## Open-circuit fault diagnosis based on bilinear observer for converter power-switch of doubly-fed wind turbine

ZHAO Hongshan, CHENG Liangliang

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

**Abstract:** A method of open-circuit fault diagnosis based on the bilinear observer is proposed for the converters of doubly-fed wind turbine. Based on the mathematical model of doubly-fed induction generator and converter, and according to its nonlinear characteristic, a bilinear conversion system model of doubly-fed wind turbine is derived and a bilinear observer of conversion system is established. The converter residual current obtained by the observer is used to detect the fault and the mean value of phase current is used to locate the faulty component. With the consideration of power-switch delay, dead-time and measurement noise, the adaptive threshold is designed for the open-circuit fault diagnosis to guarantee its robustness. The results of simulations for different fault types and different grid voltage sags show the effectiveness and reliability of the proposed method.

**Key words:** doubly-fed wind turbine; wind power; electric converters; open-circuit fault diagnosis; bilinear observer; adaptive threshold

(上接第 65 页 continued from page 65)

## Probabilistic modeling based on orthogonal series for PV power output

XU Yiyue, WU Zaijun, WANG Yang, DOU Xiaobo, HU Minqiang

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Since the existing parameter analysis methods of probabilistic modeling for PV (PhotoVoltaic) power output require the presupposition of parameter distribution while the bandwidth selection of kernel density estimation, a commonly used method of non-parameter analysis, is not unified, another method of non-parameter analysis, orthogonal series density estimation, is proposed, based on which the probabilistic model of PV power output can be directly established without any presupposition of data distribution. Simulation is carried out based on the historical PV power output measurements of Nanchang and Jiaying, and combined with fitting goodness test and error analysis, the accuracy and effectiveness of the proposed model are verified. The proposed method is adaptable to the randomness of PV power output of different periods and different regions, and the established model keeps stable when the sample-size changes.

**Key words:** photovoltaic power; probabilistic model; orthogonal series density estimation; kernel density estimation; fitting goodness test