



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103701394 A

(43) 申请公布日 2014. 04. 02

(21) 申请号 201310743597. 4

(22) 申请日 2013. 12. 30

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 安群涛 孙力 孙立志 赵克 段鸣航

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事务所 23109

代理人 张宏威

(51) Int. Cl.

H02P 21/14 (2006. 01)

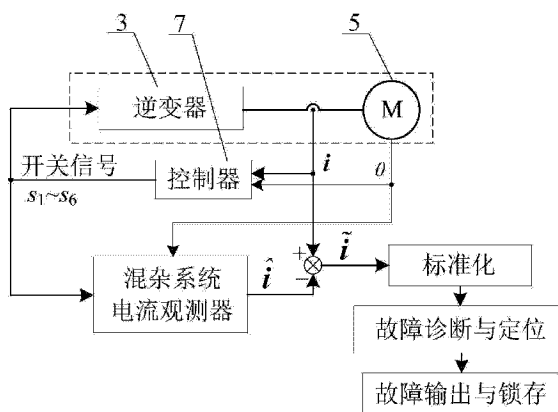
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法

(57) 摘要

一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法,属于电机控制领域,本发明为解决基于电流量的逆变器功率管开路故障诊断技术的鲁棒性差的问题。本发明方法首先利用混杂系统理论建立永磁同步电机驱动系统在无故障状态下的电流观测器模型,然后将电流观测值与检测电流相比较,获得三相电流残差,将其利用坐标变换转换到两相坐标系下获得电流残差矢量,并对电流残差矢量标准化,最后根据标准化电流残差矢量的幅值和相位来诊断和定位逆变器功率管的开路故障。本发明公开的基于标准化电流残差矢量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法,不受系统闭环控制算法的影响,对负载不敏感,对参数误差、测量误差和系统扰动等具有较好的鲁棒性。



1. 一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法,该方法涉及的永磁同步电机驱动系统包括整流器(1)、直流滤波电容(2)、逆变器(3)、电流传感器(4)、永磁同步电机(5)、位置传感器(6)、控制器(7)和隔离与驱动电路(8);

逆变器(3)由功率管  $T_1, T_2, \dots, T_6$  构成, A相桥臂由  $T_1$  和  $T_2$  构成, B相桥臂由  $T_3$  和  $T_4$  构成, C相桥臂由  $T_5$  和  $T_6$  构成,  $T_1, T_3$  和  $T_5$  为上桥臂,  $T_2, T_4$  和  $T_6$  为下桥臂;

整流器(1)的直流输出端并联直流滤波电容(2),整流器(1)的直流输出端还连接逆变器(3)的直流输入端,逆变器(3)的交流输出端连接永磁同步电机(5);

电流传感器(4)采集永磁同步电机(5)的三相电流信号  $i = [i_a, i_b, i_c]$  输出给控制器(7),  $i_a$  为 A相检测电流,  $i_b$  为 B相检测电流,  $i_c$  为 C相检测电流;

位置传感器(6)采集永磁同步电机(5)的位置信号  $\theta$  输出给控制器(7);

控制器(7)输出开关信号  $S_1, S_2, \dots, S_6$  通过隔离与驱动电路(8)加载给逆变器(3)中的六个功率管的驱动端;

其特征在于,该方法包括以下步骤:

步骤一、采用混杂系统电流观测器来观测永磁同步电机(5)的电流信号,并获取电流观测值  $\hat{i} = [\hat{i}_a \quad \hat{i}_b \quad \hat{i}_c]^T$ , 其中,  $\hat{i}_a$  为 A相电流观测值,  $\hat{i}_b$  为 B相电流观测值,  $\hat{i}_c$  为 C相电流观测值;

步骤二、将电流观测值  $\hat{i}$  与电流传感器(4)采集的三相电流信号  $i$  进行比较,获取三相电流残差  $\tilde{i} = [\tilde{i}_a \quad \tilde{i}_b \quad \tilde{i}_c]$ , A相残差  $\tilde{i}_a$ 、B相残差  $\tilde{i}_b$  和 C相残差  $\tilde{i}_c$  按下述公式获取:

$$\begin{cases} \tilde{i}_a = i_a - \hat{i}_a \\ \tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b \\ \tilde{i}_c = i_c - \hat{i}_c \end{cases};$$

步骤三、利用三相静止坐标系到两相静止坐标系的变换将三相电流残差  $\tilde{i}$  变换为  $\tilde{i} = \tilde{i}_\alpha + j\tilde{i}_\beta$ , 其中  $\tilde{i}_\alpha$  为  $\alpha$  轴电流残差,  $\tilde{i}_\beta$  为  $\beta$  轴电流残差;

步骤四、求取标准化的电流残差矢量  $r = \frac{\tilde{i}}{\sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}} = |r|e^{j\delta}$ , 其中:  $|r|$  为标准化电流残差矢量  $r$  的幅值,  $\delta$  为标准化残差矢量相位;

$r = [r_a \quad r_b \quad r_c]$ ,  $r_a$  为标准化 A相电流残差,  $r_b$  为标准化 B相电流残差,  $r_c$  为标准化 C相电流残差;

步骤五、将标准化电流残差矢量  $r$  的幅值  $|r|$  与设定的阈值  $R_{th}$  相比较,判断是否有功率管开路故障发生:当  $|r| \leq R_{th}$  时,无故障,然后返回执行步骤一;当  $|r| > R_{th}$  时,有故障,然后,执行步骤六;这里阈值  $R_{th}$  通常选取为 1;

步骤六、根据表 1 定位发生开路故障的功率管;

表 1

标准化三相电流残差 $r_a$ 、 $r_b$ 、 $r_c$ 间的关系	开路故障功率管	标准化残差矢量相位 $\delta$
$r_a = r_b = r_c = 0$	正常	0
$r_a = -2r_b = -2r_c \leq 0$	T <sub>1</sub>	$\pi$
$r_a = -2r_b = -2r_c \geq 0$	T <sub>2</sub>	0
$r_a = -2r_b = -2r_c$ 交变	T <sub>1</sub> 和 T <sub>2</sub>	0 和 $\pi$
$r_b = -2r_a = -2r_c \leq 0$	T <sub>3</sub>	$5\pi/3$
$r_b = -2r_a = -2r_c \geq 0$	T <sub>4</sub>	$2\pi/3$
$r_b = -2r_a = -2r_c$ 交变	T <sub>3</sub> 和 T <sub>4</sub>	$2\pi/3$ 和 $5\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b \leq 0$	T <sub>5</sub>	$\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b \geq 0$	T <sub>6</sub>	$4\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b$ 交变	T <sub>5</sub> 和 T <sub>6</sub>	$\pi/3$ 和 $4\pi/3$

完成逆变器功率管开路故障的诊断。

2. 根据权利要求 1 所述一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法,其特征在于,步骤一中采用混杂系统电流观测器来观测永磁同步电机(5)的电流信号,并获取电

流观测值  $\hat{i} = [\hat{i}_a \quad \hat{i}_b \quad \hat{i}_c]^T$  的过程为:

按模型  $\dot{\hat{i}} = A\hat{i} + B_1e + B_2s$  对永磁同步电机(5)的电流信号进行观测,

其中:  $\dot{\hat{i}}$  为  $\hat{i}$  对时间的导数;

开关信号  $s = [s_1 \quad s_3 \quad s_5]^T$  为系统的离散输入向量;

$e = [e_a \quad e_b \quad e_c]^T$  为永磁同步电机(5)的反电势向量;

状态系数矩阵  $A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$ , R 和 L 分别为永磁同步电机(5)的绕组电阻和电感;

连续输入系数矩阵  $B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}$ ;

离散输入系数矩阵  $\mathbf{B}_2 = \frac{V_{dc}}{3L} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$ ,  $V_{dc}$  为由整流器(1)得到的直流母线电压;

反电势向量  $e = -\omega \psi_r [\sin \theta \sin(\theta - 2\pi/3) \sin(\theta + 2\pi/3)]^T$ , 式中  $\omega$  为永磁同步电机(5)的转子转速,  $\psi_r$  为永磁同步电机(5)的永磁磁链,  $\theta$  为永磁同步电机(5)的转子位置角。

3. 根据权利要求1所述一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法, 其特征在于, 步骤三中  $\alpha$  轴电流残差  $\tilde{i}_\alpha$ ,  $\beta$  轴电流残差  $\tilde{i}_\beta$  按下述公式获取:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_b \\ \tilde{i}_c \end{bmatrix}。$$

## 一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法,属于电机控制领域。

### 背景技术

[0002] 电压源逆变器供电的永磁同步电机驱动系统以其优越的性能和较高的效率在工业、电动汽车、军事、航天航空等领域得到了广泛应用。然而,由于电力电子器件及其驱动电路的脆弱性,使得逆变器成为系统中易发生故障的薄弱环节。逆变器发生故障后工作在非正常状态,将导致电机输出转矩降低和波动,影响系统性能,并增加其他器件的电压和电流应力,重则会使系统陷入崩溃,因此需要进行及时诊断。功率开关管的短路和开路是逆变器常见的故障,错误的驱动信号、辅助电源失效、器件过压击穿、雪崩击穿、热击穿等都会造成功率管的短路故障;造成功率管开路的原因主要有器件破裂、绑定线断裂或焊接脱落、驱动信号丢失或电路失效等。短路故障因存在时间极短(通常在  $10\mu\text{s}$  以内)而难以被诊断,因此短路故障的诊断和保护多采用基于硬件电路的设计,目前过压、过流、短路、过热和驱动电路欠压等检测和保护电路已被应用到逆变器中,这些常规保护电路在智能功率模块(IPM)中已成为一个标准,在一定程度上保障了逆变器的安全运行。然而,对于功率管的开路故障,却需要采取一定的技术手段提取系统的故障信息来实现诊断和定位。

[0003] 逆变器应用的广泛性和脆弱性使得其故障诊断具有重要的意义,研究者提出了许多逆变器开路故障的诊断方法。

[0004] 中国专利《基于输出功率的三相逆变器 IGBT 开路故障的诊断方法》,公开号为 CN130278727A,公开日为 2013 年 9 月 4 日,公开了一种利用一个周期内六个半波功率和设定阈值比较来诊断逆变器 IGBT 开路故障的方法,该方法能够检测并定位出任意一个或任意两个同时开路的 IGBT 功率管。

[0005] 中国专利《逆变器运行状态显示与故障在线诊断电路》,公开号为 CN101201391,公开日为 2008 年 6 月 18 日,公开了一种利用光电检测器件构成的三相桥式整流电路来实现逆变器运行状态的显示和在线诊断,优点是电路简单。

[0006] 中国专利《二极管中点钳位三电平逆变器的器件开路故障诊断电路》,公开号为 CN102937688A,公开日为 2013 年 2 月 20 日,利用三个结构相同的开路故障诊断单元电路来检测三电平逆变器中的器件开路故障,具有诊断速度快的优点。

[0007] 中国专利申请《逆变器功率管开路故障的在线检测装置及检测方法》,申请号为 201010135717.9,公开日为 2010 年 9 月 22 日,公开了一种采用光电耦合器间接检测功率管电压,结合逻辑电路和开关信号上升沿延时电路来实现功率管开路故障诊断的方法,诊断电路简单,诊断速度快。

[0008] 中国专利《一种无刷直流电机逆变器常见断路故障诊断方法》,公开号为 CN102998588A,公开日为 2013 年 3 月 27 日,通过检测本阶段电流,确定本阶段导通状态矩阵;然后根据本阶段电流检测信号,输出故障位信号;再求本阶段之前一个周期内导通矩

阵的和矩阵  $Q$ , 通过判断和矩阵  $Q$  中 0 元素的个数和位置来诊断故障管的个数和位置。该方法适用于无刷直流电机驱动系统中逆变器开路故障的诊断。

[0009] 在针对逆变器功率管开路故障诊断的专利和文献中, 诊断方法大致可以分为两类: 一类是基于系统电流量的诊断技术, 这类方法利用系统原有的电流反馈量, 不需要额外传感器, 缺点是依赖于负载, 易受系统闭环控制算法的影响, 且对瞬态过程较为敏感, 鲁棒性差; 另外一类方法是基于系统电压量的诊断技术, 这类方法独立于负载, 鲁棒性好, 诊断速度快, 但需要额外的电压传感器, 增加了系统的硬件成本和复杂度。

## 发明内容

[0010] 本发明目的是为了解决基于电流量的逆变器功率管开路故障诊断技术的鲁棒性差的问题, 提供了一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法。

[0011] 本发明所述基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法, 该方法涉及的永磁同步电机驱动系统包括整流器、直流滤波电容、逆变器、电流传感器、永磁同步电机、位置传感器、控制器和隔离与驱动电路;

[0012] 逆变器由功率管  $T_1, T_2, \dots, T_6$  构成, A 相桥臂由  $T_1$  和  $T_2$  构成, B 相桥臂由  $T_3$  和  $T_4$  构成, C 相桥臂由  $T_5$  和  $T_6$  构成,  $T_1, T_3$  和  $T_5$  为上桥臂,  $T_2, T_4$  和  $T_6$  为下桥臂;

[0013] 整流器的直流输出端并联直流滤波电容, 整流器的直流输出端还连接逆变器的直流输入端, 逆变器的交流输出端连接永磁同步电机;

[0014] 电流传感器采集永磁同步电机的三相电流信号  $i = [i_a, i_b, i_c]$  输出给控制器,  $i_a$  为 A 相检测电流,  $i_b$  为 B 相检测电流,  $i_c$  为 C 相检测电流;

[0015] 位置传感器采集永磁同步电机的位置信号  $\theta$  输出给控制器;

[0016] 控制器输出开关信号  $S_1, S_2, \dots, S_6$  通过隔离与驱动电路加载给逆变器中的六个功率管的驱动端;

[0017] 该方法包括以下步骤:

[0018] 步骤一、采用混杂系统电流观测器来观测永磁同步电机的电流信号, 并获取电流

观测值  $\hat{i} = [\hat{i}_a \quad \hat{i}_b \quad \hat{i}_c]^T$ , 其中,  $\hat{i}_a$  为 A 相电流观测值,  $\hat{i}_b$  为 B 相电流观测值,  $\hat{i}_c$  为 C 相电流观测值;

[0019] 步骤二、将电流观测值  $\hat{i}$  与电流传感器采集的三相电流信号  $i$  进行比较, 获取三相电流残差  $\tilde{i} = [\tilde{i}_a \quad \tilde{i}_b \quad \tilde{i}_c]$ , A 相残差  $\tilde{i}_a$ 、B 相残差  $\tilde{i}_b$  和 C 相残差  $\tilde{i}_c$  按下述公式获取:

$$[0020] \quad \begin{cases} \tilde{i}_a = i_a - \hat{i}_a \\ \tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b \\ \tilde{i}_c = i_c - \hat{i}_c \end{cases};$$

[0021] 步骤三、利用三相静止坐标系到两相静止坐标系的变换将三相电流残差  $\tilde{i}$  变换为

$$\tilde{i} = \tilde{i}_\alpha + j\tilde{i}_\beta, \text{ 其中 } \tilde{i}_\alpha \text{ 为 } \alpha \text{ 轴电流残差, } \tilde{i}_\beta \text{ 为 } \beta \text{ 轴电流残差;}$$

[0022] 步骤四、求取标准化的电流残差矢量  $\mathbf{r} = \frac{\tilde{\mathbf{i}}}{\sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2}} = |\mathbf{r}|e^{j\delta}$  ; 其中 :  $|\mathbf{r}|$  为标准化

电流残差矢量  $\mathbf{r}$  的幅值,  $\delta$  为标准化残差矢量相位 ;

[0023]  $\mathbf{r} = [r_a \ r_b \ r_c]$ ,  $r_a$  为标准化 A 相电流残差,  $r_b$  为标准化 B 相电流残差,  $r_c$  为标准化 C 相电流残差 ;

[0024] 步骤五、将标准化电流残差矢量  $\mathbf{r}$  的幅值  $|\mathbf{r}|$  与设定的阈值  $R_{th}$  相比较, 判断是否有功率管开路故障发生 : 当  $|\mathbf{r}| \leq R_{th}$  时, 无故障, 然后返回执行步骤一 ; 当  $|\mathbf{r}| > R_{th}$  时, 有故障, 然后, 执行步骤六 ; 这里阈值  $R_{th}$  通常选取为 1 ;

[0025] 步骤六、根据表 1 定位发生开路故障的功率管 ;

[0026] 表 1

[0027]

标准化三相电流残差 $r_a$ 、 $r_b$ 、 $r_c$ 间的关系	开路故障功率管	标准化残差矢量相位 $\delta$
$r_a = r_b = r_c = 0$	正常	0
$r_a = -2r_b = -2r_c \leq 0$	T <sub>1</sub>	$\pi$
$r_a = -2r_b = -2r_c \geq 0$	T <sub>2</sub>	0
$r_a = -2r_b = -2r_c$ 交变	T <sub>1</sub> 和 T <sub>2</sub>	0 和 $\pi$
$r_b = -2r_a = -2r_c \leq 0$	T <sub>3</sub>	$5\pi/3$
$r_b = -2r_a = -2r_c \geq 0$	T <sub>4</sub>	$2\pi/3$
$r_b = -2r_a = -2r_c$ 交变	T <sub>3</sub> 和 T <sub>4</sub>	$2\pi/3$ 和 $5\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b \leq 0$	T <sub>5</sub>	$\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b \geq 0$	T <sub>6</sub>	$4\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b$ 交变	T <sub>5</sub> 和 T <sub>6</sub>	$\pi/3$ 和 $4\pi/3$

[0028] 完成逆变器功率管开路故障的诊断。

[0029] 本发明的优点 : 本发明诊断方法独立于系统控制算法之外, 因此不受系统闭环控制算法的影响 ; 对电流残差矢量的标准化处理使得该诊断方法对负载不敏感 ; 同时, 由于采用阈值和扇区, 该方法对参数误差、测量误差和系统扰动等具有较好的鲁棒性。

#### 附图说明

[0030] 图 1 是本发明方法涉及的永磁同步电机驱动系统结构图 ;

[0031] 图 2 是本发明所述基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法的原理框图 ;

[0032] 图 3 为本发明的功率管开路故障下标准化电流残差矢量的理想轨迹 ;

[0033] 图 4 为本发明的故障诊断和定位时的阈值设置和扇区分割图；

[0034] 图 5 为本发明的故障诊断方法的仿真结果。

### 具体实施方式

[0035] 具体实施方式一：下面结合图 1 至图 5 说明本实施方式，本实施方式所述一种基于电流量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法，该方法涉及的永磁同步电机驱动系统包括整流器 1、直流滤波电容 2、逆变器 3、电流传感器 4、永磁同步电机 5、位置传感器 6、控制器 7 和隔离与驱动电路 8；如图 1 所示；

[0036] 逆变器 3 由功率管  $T_1, T_2, \dots, T_6$  构成，A 相桥臂由  $T_1$  和  $T_2$  构成，B 相桥臂由  $T_3$  和  $T_4$  构成，C 相桥臂由  $T_5$  和  $T_6$  构成， $T_1, T_3$  和  $T_5$  为上桥臂， $T_2, T_4$  和  $T_6$  为下桥臂；

[0037] 整流器 1 的直流输出端并联直流滤波电容 2，整流器 1 的直流输出端还连接逆变器 3 的直流输入端，逆变器 3 的交流输出端连接永磁同步电机 5；

[0038] 电流传感器 4 采集永磁同步电机 5 的三相电流信号  $i = [i_a, i_b, i_c]$  输出给控制器 7， $i_a$  为 A 相检测电流， $i_b$  为 B 相检测电流， $i_c$  为 C 相检测电流；

[0039] 位置传感器 6 采集永磁同步电机 5 的位置信号  $\theta$  输出给控制器 7；

[0040] 控制器 7 输出开关信号  $S_1, S_2, \dots, S_6$  通过隔离与驱动电路 8 加载给逆变器 3 中的六个功率管的驱动端；

[0041] 其特征在于，该方法包括以下步骤：

[0042] 步骤一、采用混杂系统电流观测器来观测永磁同步电机 5 的电流信号，并获取电

流观测值  $\hat{i} = [\hat{i}_a \quad \hat{i}_b \quad \hat{i}_c]^T$ ，其中， $\hat{i}_a$  为 A 相电流观测值， $\hat{i}_b$  为 B 相电流观测值， $\hat{i}_c$  为 C 相电流观测值；

[0043] 步骤二、将电流观测值  $\hat{i}$  与电流传感器 4 采集的三相电流信号  $i$  进行比较，获取三

相电流残差  $\tilde{i} = [\tilde{i}_a \quad \tilde{i}_b \quad \tilde{i}_c]$ ，A 相残差  $\tilde{i}_a$ 、B 相残差  $\tilde{i}_b$  和 C 相残差  $\tilde{i}_c$  按下述公式获取：

$$[0044] \quad \begin{cases} \tilde{i}_a = i_a - \hat{i}_a \\ \tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b \\ \tilde{i}_c = i_c - \hat{i}_c \end{cases};$$

[0045] 步骤三、利用三相静止坐标系到两相静止坐标系的变换将三相电流残差  $\tilde{i}$  变换为

$\tilde{i} = \tilde{i}_\alpha + j\tilde{i}_\beta$ ，其中  $\tilde{i}_\alpha$  为  $\alpha$  轴电流残差， $\tilde{i}_\beta$  为  $\beta$  轴电流残差；

[0046] 步骤四、求取标准化的电流残差矢量  $r = \frac{\tilde{i}}{\sqrt{\tilde{i}_\alpha^2 + \tilde{i}_\beta^2}} = |r|e^{j\delta}$ ；其中： $|r|$  为标准化

电流残差矢量  $r$  的幅值， $\delta$  为标准化残差矢量相位；

[0047]  $r = [r_a \quad r_b \quad r_c]$ ， $r_a$  为标准化 A 相电流残差， $r_b$  为标准化 B 相电流残差， $r_c$  为标准



化 C 相电流残差；

[0048] 步骤五、将标准化电流残差矢量  $r$  的幅值  $|r|$  与设定的阈值  $R_{th}$  相比较，判断是否有功率管开路故障发生：当  $|r| \leq R_{th}$  时，无故障，然后返回执行步骤一；当  $|r| > R_{th}$  时，有故障，然后，执行步骤六；这里阈值  $R_{th}$  通常选取为 1；

[0049] 步骤六、根据表 1 定位发生开路故障的功率管；

[0050] 表 1

[0051]

标准化三相电流残差 $r_a$ 、 $r_b$ 、 $r_c$ 间的关系	开路故障功率管	标准化残差矢量相位 $\delta$
$r_a = r_b = r_c = 0$	正常	0
$r_a = -2r_b = -2r_c \leq 0$	T <sub>1</sub>	$\pi$
$r_a = -2r_b = -2r_c \geq 0$	T <sub>2</sub>	0
$r_a = -2r_b = -2r_c$ 交变	T <sub>1</sub> 和 T <sub>2</sub>	0 和 $\pi$
$r_b = -2r_a = -2r_c \leq 0$	T <sub>3</sub>	$5\pi/3$
$r_b = -2r_a = -2r_c \geq 0$	T <sub>4</sub>	$2\pi/3$
$r_b = -2r_a = -2r_c$ 交变	T <sub>3</sub> 和 T <sub>4</sub>	$2\pi/3$ 和 $5\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b \leq 0$	T <sub>5</sub>	$\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b \geq 0$	T <sub>6</sub>	$4\pi/3$
$r_c = -2r_a = -2r_b$ 交变	T <sub>5</sub> 和 T <sub>6</sub>	$\pi/3$ 和 $4\pi/3$

[0052] 完成逆变器功率管开路故障的诊断。

[0053] 本实施方式所述方法，参见图 2 所示原理框图进行说明，首先利用混杂系统理论建立永磁同步电机驱动系统在无故障状态下的电流观测器模型，然后将电流观测值与检测电流相比较，获得三相电流残差，将其利用坐标变换转换到两相坐标系下获得电流残差矢量，并对电流残差矢量标准化，最后根据标准化电流残差矢量的幅值和相位来诊断和定位逆变器功率管的开路故障。本发明公开的基于标准化电流残差矢量的逆变器功率管开路故障在线诊断方法，不受系统闭环控制算法的影响，对负载不敏感，对参数误差、测量误差和系统扰动等具有较好的鲁棒性，在可靠性要求较高的航天航空、电动汽车等领域有较高的实际应用价值。

[0054] 本实施方式所述方法采用阈值比较是为消除观测器模型参数误差、测量误差、负载扰动及噪声等影响，提高诊断方法的鲁棒性。

[0055] 当发生功率管开路故障时，图 3 描绘了标准化电流残差矢量的理想轨迹与故障功率管的对应关系：当某相桥臂上管发生开路故障时，标准化电流残差矢量轨迹位于该相轴线的负半轴上；当某相桥臂下管发生开路故障时，标准化电流残差矢量轨迹位于该相轴线的正半轴；当某相桥臂上下管同时发生开路故障时，标准化电流残差矢量轨迹位于该相整个轴线上。开路故障功率管对应的标准化三相电流残差及标准化残差矢量相位如表 1 所

示。

[0056] 为消除观测器模型参数误差、测量误差、负载扰动及噪声等影响，下面通过分割扇区来提高诊断方法的鲁棒性。将  $\alpha \beta$  坐标平面等分为 6 个扇区，每个扇区为  $60^\circ$ ，图 4 为扇区分配图，表 2 为分配表。扇区分配及标准化残差矢量位于某扇区时对应的故障开关如下表所示。仿真结果如图 5 所示，本发明的故障诊断方法在参数误差、负载扰动等条件下仍然能够获得可靠的诊断。

[0057] 表 2

[0058]

扇区号	角度范围	开路故障功率管
I	$-\pi/6 \sim \pi/6$	$T_2$
II	$\pi/6 \sim \pi/2$	$T_5$
III	$\pi/2 \sim 5\pi/6$	$T_4$
IV	$5\pi/6 \sim 7\pi/6$	$T_1$
V	$7\pi/6 \sim 3\pi/2$	$T_6$
VI	$3\pi/2 \sim 11\pi/6$	$T_3$

[0059] 具体实施方式二：本实施方式对实施方式一作进一步说明，步骤一中采用混杂系统电流观测器来观测永磁同步电机 5 的电流信号，并获取电流观测值  $\hat{i} = [\hat{i}_a \ \hat{i}_b \ \hat{i}_c]^T$  的过程为：

[0060] 按模型  $\dot{\hat{i}} = A\hat{i} + B_1e + B_2s$  对永磁同步电机 5 的电流信号进行观测，

[0061] 其中： $\dot{\hat{i}}$  为  $\hat{i}$  对时间的导数；

[0062] 开关信号  $s = [s_1 \ s_3 \ s_5]^T$  为系统的离散输入向量；

[0063]  $e = [e_a \ e_b \ e_c]^T$  为永磁同步电机 5 的反电势向量；

[0064] 状态系数矩阵  $A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$ ，R 和 L 分别为永磁同步电机 5 的绕组电阻和电

感；

[0065] 连续输入系数矩阵  $\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}$  ;

[0066] 离散输入系数矩阵  $\mathbf{B}_2 = \frac{V_{dc}}{3L} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$ ,  $V_{dc}$  为由整流器 1 得到的直流母线电

压;

[0067] 反电势向量  $e = -\omega \psi_r [\sin \theta \sin(\theta - 2\pi/3) \sin(\theta + 2\pi/3)]^T$ , 式中  $\omega$  为永磁同步电机 5 的转子转速,  $\psi_r$  为永磁同步电机 5 的永磁磁链,  $\theta$  为永磁同步电机 5 的转子位置角。

[0068] 具体实施方式三: 本实施方式对实施方式一作进一步说明, 步骤三中  $\alpha$  轴电流残差  $\tilde{i}_\alpha$ ,  $\beta$  轴电流残差  $\tilde{i}_\beta$  按下述公式获取:

[0069] 
$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_b \\ \tilde{i}_c \end{bmatrix}.$$

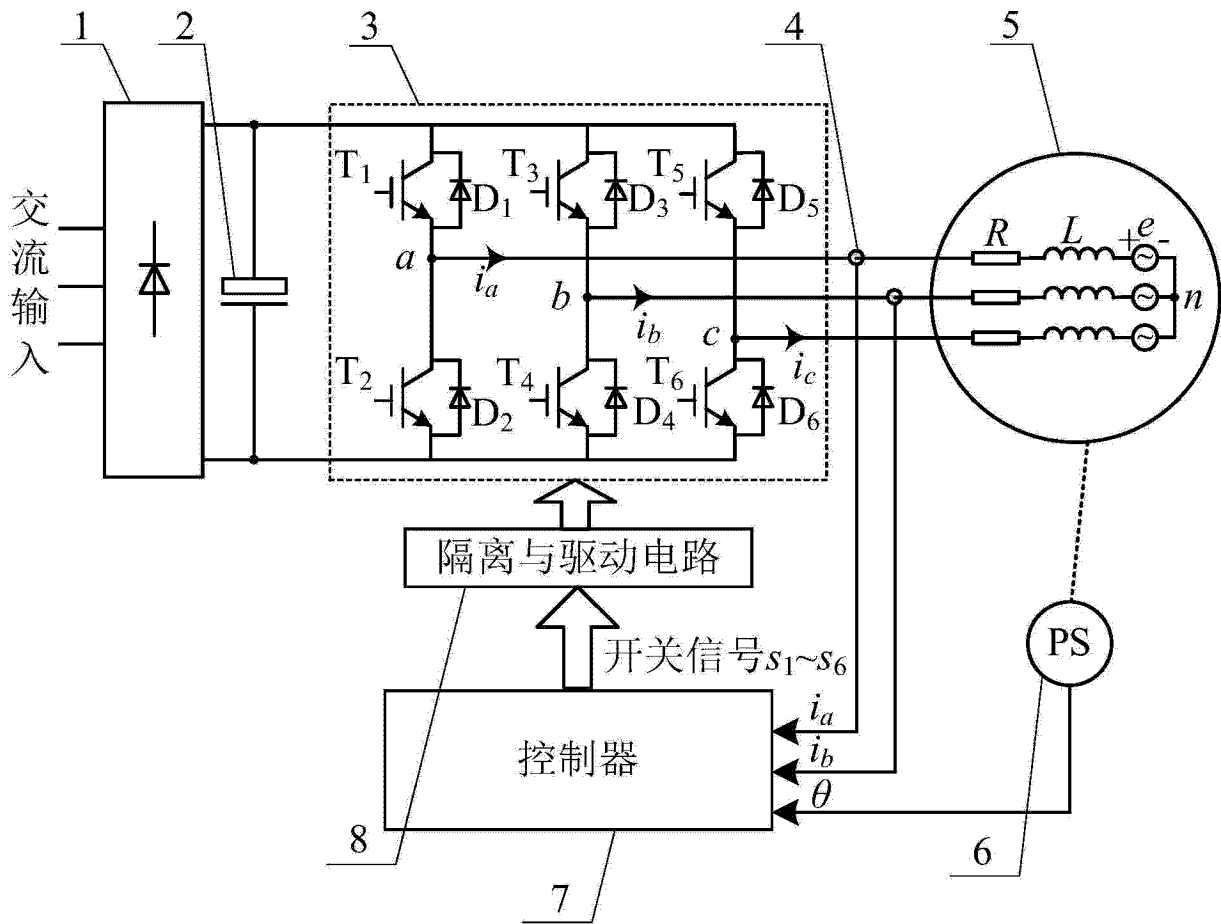


图 1

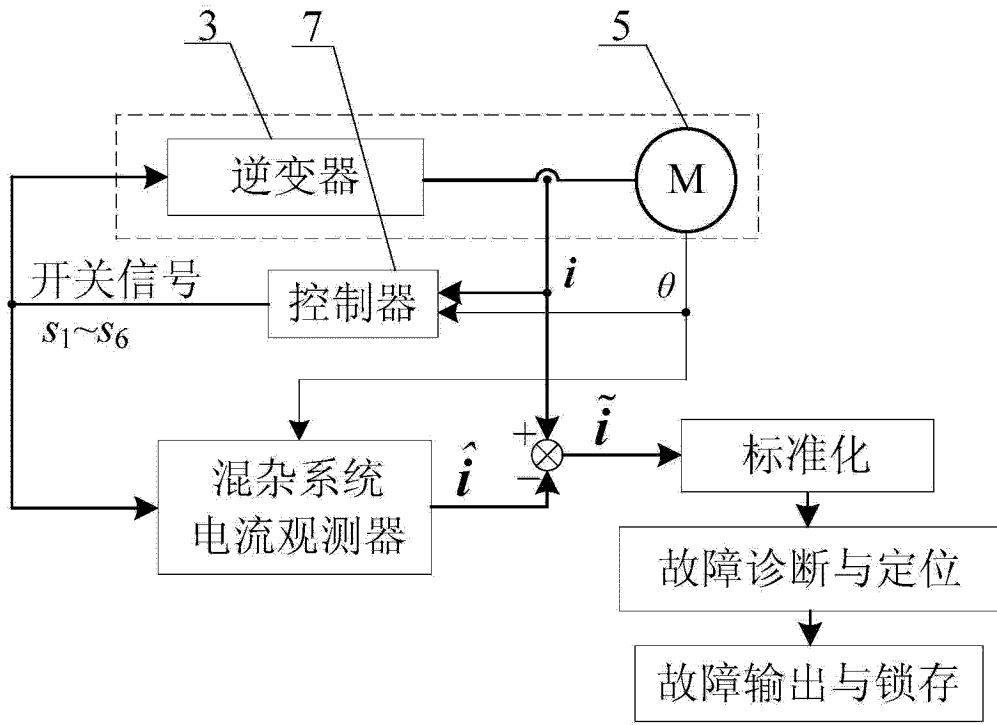


图 2

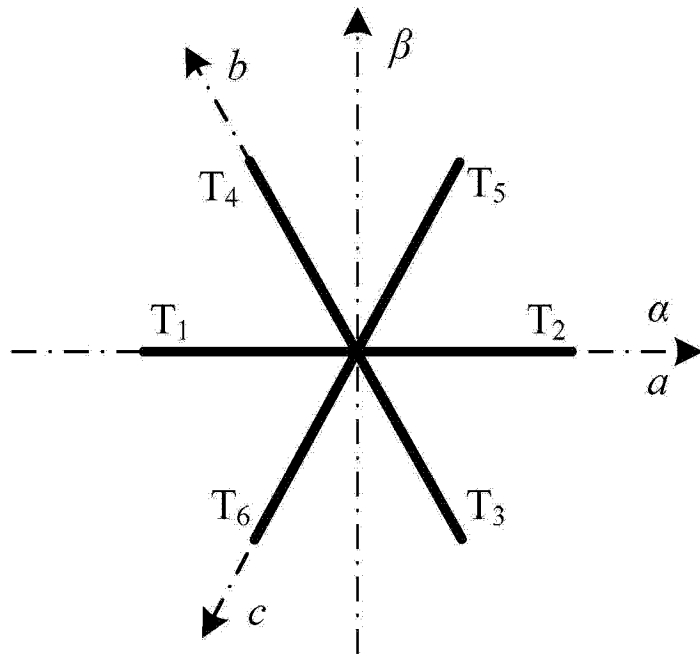


图 3

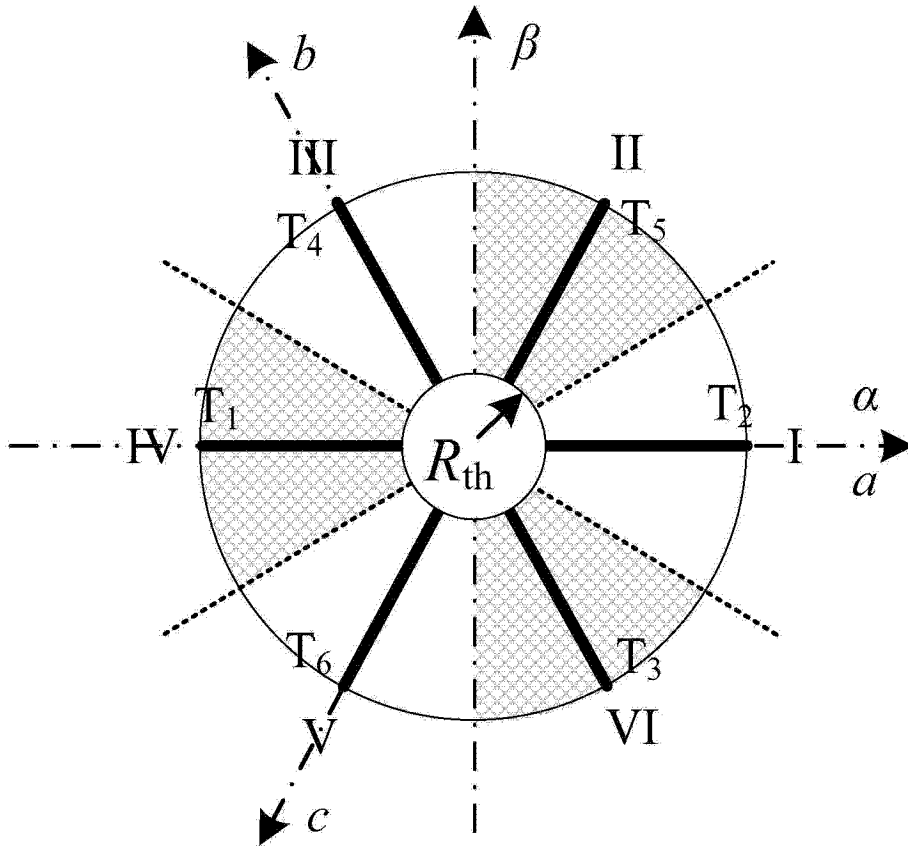


图 4

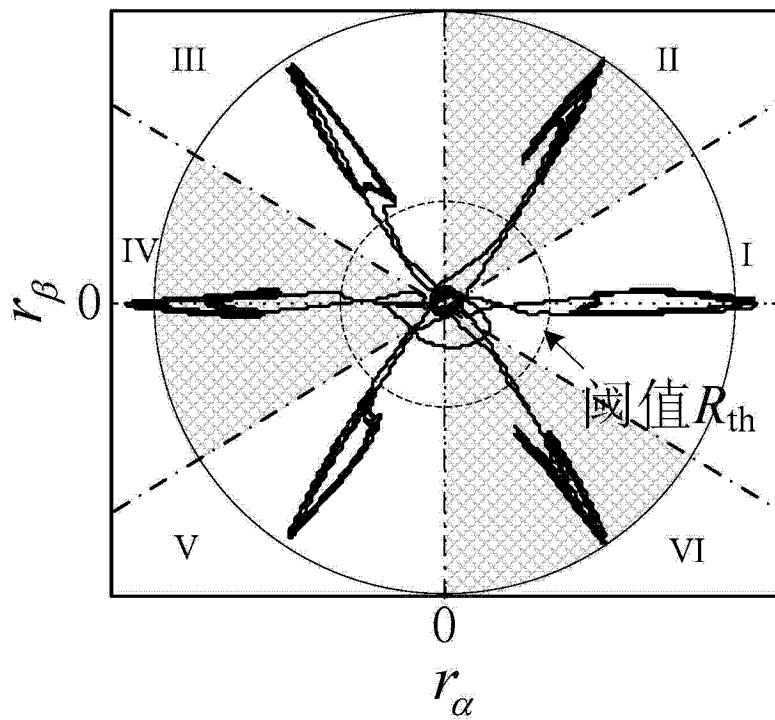


图 5