

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 9 月 23 日 (23.09.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/184820 A1

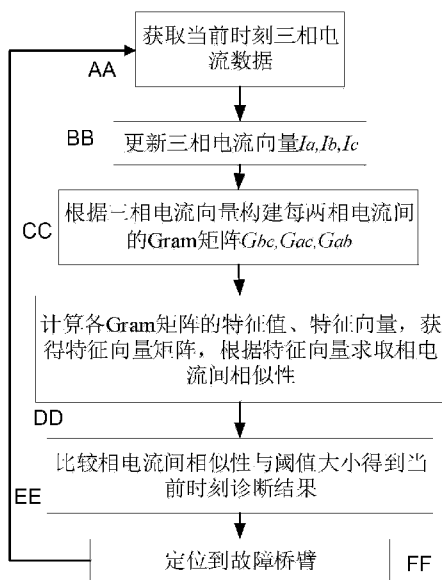
- (51) 国际专利分类号:
G01R 31/54 (2020.01) **G01R 31/56** (2020.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/131801
- (22) 国际申请日: 2020 年 11 月 26 日 (26.11.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202010192597.X 2020 年 3 月 18 日 (18.03.2020) CN
- (71) 申请人: 华中科技大学(HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。
- (72) 发明人: 赵金(ZHAO, Jin); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。 周

洋(ZHOU, Yang); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。 宋宇金(SONG, Yujin); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号, Hubei 430074 (CN)。

- (74) 代理人: 华中科技大学专利中心(HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PATENT AGENCY CENTER); 中国湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学东一楼 340 室, Hubei 430074 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) Title: TWO-LEVEL THREE-PHASE VOLTAGE SOURCE INVERTER BRIDGE ARM OPEN-CIRCUIT FAULT DIAGNOSIS METHOD

(54) 发明名称: 一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法



- AA Obtain three-phase current data at the current time point
- BB Update three-phase current vectors I_a , I_b , and I_c
- CC Construct Gram matrixes G_{bc} , G_{ac} , and G_{ab} between every two phases of current vectors according to the three-phase current vectors
- DD Calculate feature values and feature vectors of the Gram matrixes to obtain a feature vector matrix, and obtain the similarity between phase currents according to the feature vectors
- EE Compare the similarity between the phase currents with a threshold value to obtain a diagnosis result at the current time point
- FF Locate to a fault bridge arm

图 1

(57) Abstract: A two-level three-phase voltage source inverter bridge arm open-circuit fault diagnosis method, relating to the technical field of on-line diagnosis. The method comprises: collecting three-phase current data output by an inverter at the current time point, and updating three-phase current vectors; constructing Gram matrixes between every two phases of current vectors according to the three-phase current vectors; calculating feature values and feature vectors of the Gram matrixes to obtain a feature vector matrix, and obtaining the similarity between phase currents according to a ratio of the absolute value of the minimum element to the absolute value of the maximum element in the feature vector matrix; comparing the similarity between the phase currents with a set threshold value, obtaining a feature quantity representing a fault at the current time point, and obtaining an open-circuit fault diagnosis result at the

MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

current time point according to the feature quantity. The two-level three-phase voltage source inverter bridge arm open-circuit fault diagnosis method has the advantages of low cost, small calculated amount, high detection speed, and high robustness, provides a basis for fault-tolerant control of a motor driving system, and improves the reliability of the system.

(57) 摘要: 一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法, 属于在线诊断技术领域, 包括: 采集当前时刻逆变器输出的三相电流数据, 并更新三相电流向量; 根据三相电流向量构建每两相电流向量间的格拉姆矩阵; 计算各格拉姆矩阵的特征值、特征向量, 获得特征向量矩阵, 根据特征向量矩阵中最小元素与最大元素的绝对值之比得到相电流间相似性; 比较相电流间相似性与设定阈值的大小, 获得当前时刻表征故障的特征量, 根据特征量得到当前时刻开路故障诊断结果。两电平三相电压源逆变器的桥臂开路故障诊断方法具有成本低、计算量小, 检测速度快、鲁棒性强的优点, 为电机驱动系统容错控制提供基础, 提高了系统的可靠性。

一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法

【技术领域】

本发明属于在线诊断技术领域，更具体地，涉及一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法。

【背景技术】

随着三相脉冲宽度调制（PWM）电压型逆变器在各个工业领域的广泛应用，逆变器的故障诊断成为近年来的研究热点。在逆变器中，由于过压、过流、热应力等因素影响，功率管容易发生故障。短路故障已有较成熟的硬件保护技术，而开路故障目前尚无通用的诊断方法。开路故障极易引发系统二次故障甚至造成系统崩溃。因此近年来针对逆变器开路故障的诊断与容错控制技术得到了快速发展。对于感应电机驱动系统容错控制，只需要诊断并定位到故障桥臂。

现有针对桥臂故障的诊断方法可大致分为两大类，一类采用硬件方法，如附加检测电路、传感器等检测功率管是否过电压过热，再通过集成的逻辑电路诊断是否故障。这类方法诊断速度快但附加的传感器和电路增加了诊断成本，也增加了逆变器系统的不确定性。另一类采用系统信息方法，如检测逆变器系统输出的电压、电流信号，对信号进行处理提取特征值，将其与系统正常时的信号特征进行比较，从而诊断出故障。这类方法特别如基于系统电流信号的方法，利用了控制系统自带的电流传感器，不需要增加额外传感器和电路，因而降低了成本，但信号处理和特征提取等过程计算量较大，占用了较多的处理器资源。

【发明内容】

针对现有技术的以上缺陷或改进需求，本发明提供了一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，其目的在于在逆变器功率管发生故

障时快速诊断并定位到故障桥臂，为电机驱动系统容错控制提供基础。

为实现上述目的，本发明的提供一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，包括：

S1.采集当前时刻逆变器输出的三相电流数据，并更新三相电流向量；

S2.根据三相电流向量构建每两相电流向量间的格拉姆矩阵；

S3.计算各格拉姆矩阵的特征值、特征向量，获得特征向量矩阵，根据特征向量矩阵中最小元素与最大元素的绝对值之比得到相电流间相似性；

S4.比较相电流间相似性与设定阈值的大小，获得当前时刻表征故障的特征量，根据特征量得到当前时刻开路故障诊断结果。

进一步地，根据以下公式更新三相电流向量；

$$I_m(k)=[i_m(t), i_m(t+1), \dots, i_m(k)]^T, m=a, b, c$$

其中， $t=k-L+1$ ， k 为当前采样时刻， $L=\frac{60}{n_p \times w \times T_s}$ 为电流向量维度， n_p

是电机极对数， w 是电机转速， T_s 为采样时间， $i_m(k)$ 为 k 时刻采集到的 m 相电流数据。

进一步地，每两相电流向量间的格拉姆矩阵为：

$$G_{bc} = \begin{bmatrix} I_b^T I_b & I_b^T I_c \\ I_c^T I_b & I_c^T I_c \end{bmatrix}$$

$$G_{ac} = \begin{bmatrix} I_a^T I_a & I_a^T I_c \\ I_c^T I_a & I_c^T I_c \end{bmatrix}$$

$$G_{ab} = \begin{bmatrix} I_a^T I_a & I_a^T I_b \\ I_b^T I_a & I_b^T I_b \end{bmatrix}$$

其中， I_a 、 I_b 、 I_c 为三相电流向量。

进一步地，相电流间相似性计算公式为：

$$r(I_m, I_n) = \left| \frac{2I_m^T I_n}{I_m^T I_m - I_n^T I_n + \sqrt{(I_n^T I_n - I_m^T I_m)^2 + 4(I_m^T I_n)^2}} \right|, \quad m, n = a, b, c。$$

进一步地，表征故障的特征量根据如下表达式得到；

$$F_A = \begin{cases} 1, & r_{bc} > k, r_{ab} < k, r_{ac} < k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$F_B = \begin{cases} 1, & r_{ac} > k, r_{ab} < k, r_{bc} < k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$F_C = \begin{cases} 1, & r_{ab} > k, r_{ac} < k, r_{bc} < k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

其中， k 为设定阈值， F_m 为表征 m 相故障的特征量， $m=A,B,C$ 。

进一步地，表征故障的特征量 F_m 为 1 时，该相桥臂发生开路故障； F_m 为 0 时，该相桥臂处于健康状态，其中， $m=A,B,C$ 。

进一步地，设定阈值 k 为 0.414 至 1 之间的某一数值。

总体而言，通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比，能够取得下列有益效果。

(1) 诊断成本低、计算量小。本发明中的诊断方法具体属于系统信息方法中的电流法，通过共享三相逆变器控制系统采集的三相电流信号，不需要增加额外传感器和电路，因此诊断成本低；对于数据量为 n 的电流链表，算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ ，计算量较小。

(2) 检测速度快、鲁棒性强。通过物理实验验证，本发明所构思的技术方案的平均诊断时间仅需 $\frac{1}{3}$ 个电流基波周期，快于目前大多数诊断方法（1 个电流基波周期左右）；同时，本方法不需要对电流信号进行滤波、降噪等处理，在电机负载的单次突变在额定负载 30% 以内时仍然能够快速、准确的给出诊断结果，没有发生误诊，具有较好的鲁棒性。

(3) 本发明有利于快速定位到故障桥臂，为逆变器的快速检修或容错控制提供基础，提高系统的可靠性。

【附图说明】

图 1 是本发明提供的一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法流程图；

图 2(a)是本发明提供的逆变器工作于健康情况下的三相电流波形图；

图 2 (b) 是本发明提供的逆变器 a 相桥臂双管故障情况下三相电流波形图；

图 2 (c) 是本发明提供的逆变器 a 相桥臂单管故障情况下三相电流波形图；

图 3 是本发明提供的带故障检测模块的电机矢量控制系统拓扑结构。

【具体实施方式】

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

如图 1 所示，本发明提供了种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，包括以下步骤：

S1.采集逆变器当前时刻三相电流数据 $i_a(k)$, $i_b(k)$ 和 $i_c(k)$ ；

S2.更新三相电流向量 $I_a(k)$, $I_b(k)$, $I_c(k)$ ；

具体地，采用以下公式更新三相电流向量；

$$I_m(k)=[i_m(t),i_m(t+1),\cdots,i_m(k)]^T,m=a,b,c \quad (1)$$

其中， $t=k-L+1$ ， k 为当前采样时刻， $L=\frac{60}{n_p \times w \times T_s}$ 为电流向量维度， n_p

是电机极对数， w 是电机转速， T_s 为采样时间。

S3.根据三相电流向量构建每两相电流向量间的格拉姆(Gram)矩阵 G_{bc} , G_{ac} , G_{ab} ；

具体地，对于任何两个维度相同的向量 a,b ，其对应的格拉姆矩阵为：

$$G(a,b)=(a \ b)^T(a \ b)=\begin{pmatrix} a^T a & a^T b \\ b^T a & b^T b \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{相应地, } G_{bc} = \begin{bmatrix} I_b^T I_b & I_b^T I_c \\ I_c^T I_b & I_c^T I_c \end{bmatrix}, G_{ac} = \begin{bmatrix} I_a^T I_a & I_a^T I_c \\ I_c^T I_a & I_c^T I_c \end{bmatrix}, G_{ab} = \begin{bmatrix} I_a^T I_a & I_a^T I_b \\ I_b^T I_a & I_b^T I_b \end{bmatrix}。$$

S4.计算各 Gram 矩阵的特征值、特征向量, 获得特征向量矩阵, 根据特征向量矩阵中最小元素与最大元素的绝对值之比得到相电流间相似性;

具体地, 对于任何两个维度相同的向量 a, b , 其对应的格拉姆矩阵特征值为:

$$l_1 = \frac{a^T a + b^T b - \sqrt{(a^T a - b^T b)^2 + 4(a^T b)^2}}{2}$$

$$l_2 = \frac{a^T a + b^T b + \sqrt{(a^T a - b^T b)^2 + 4(a^T b)^2}}{2}$$

l_1, l_2 对应的特征向量为:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{b^T b - a^T a - \sqrt{(b^T b - a^T a)^2 + 4(a^T b)^2}}{2a^T b} \end{bmatrix}^T$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} \frac{a^T a - b^T b + \sqrt{(b^T b - a^T a)^2 + 4(a^T b)^2}}{2a^T b} & 1 \end{bmatrix}^T$$

特征向量矩阵记为 $X_{ab} = [X_1 \ X_2]$, 采用特征向量矩阵中最小元素与最大元素的绝对值之比来度量两个向量间相似性大小, 记为 r , 则可得到 r 的表达式并进行简化:

$$r = \frac{\min_{1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 2} |X_{ab}(i, j)|}{\max_{1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 2} |X_{ab}(i, j)|} = \left| \frac{2a^T b}{a^T a - b^T b + \sqrt{(b^T b - a^T a)^2 + 4(a^T b)^2}} \right| \quad (3)$$

根据电流自身结构的对称性, 将一个电流周期划分为 6 个子区间, 于是可将三相电流向量分解为 3 个子向量 I_1, I_2, I_3 的组合, 在健康情况下, 三相电流波形如图 2 (a) 所示, 为简化分析, 假定 a 相初相位为 0; 当采集到的 a 相一个周期电流信号初相位不为 0 时, 可通过电流信号平移重构使初相位为 0, 因此假定不影响分析结果; 当 a 相发生单管故障、双管故障时, 电流信号的平移分解类似。经过以上操作, 可大大简化不同情况下电流相似性数值的计算。

三相电流向量可分解为：

$$\begin{cases} I_a^T = [I_1^T & I_2^T & I_3^T & -I_1^T & -I_2^T & -I_3^T] \\ I_b^T = [-I_2^T & -I_3^T & I_1^T & I_2^T & I_3^T & -I_1^T] \\ I_c^T = [I_3^T & -I_1^T & -I_2^T & -I_3^T & I_1^T & I_2^T] \end{cases}$$

因此有，

$$I_a^T I_a = 2(I_1^T I_1 + I_2^T I_2 + I_3^T I_3) = I_b^T I_b = I_c^T I_c$$

结合公式（3）可计算得到 a 相电流与 b 相电流间的相似性；

$$r_{ab} = \left| \frac{2I_a^T I_b}{I_a^T I_a - I_b^T I_b + \sqrt{(I_a^T I_a - I_b^T I_b)^2 + 4(I_a^T I_b)^2}} \right| = \left| \frac{2I_a^T I_b}{\sqrt{4(I_a^T I_b)^2}} \right| = 1$$

因此正常情况下 a 相电流与 b 相电流间的相似性为 1；根据对称性，有

$$r_{bc} = r_{ca} = r_{ab} = 1。$$

以 a 相为例，当 a 相桥臂中上下两个晶体管都发生故障时，三相电流波形会发生畸变，如图 2（b）所示，三相电流向量可分解如下：

$$\begin{cases} I_a^T = [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0] \\ I_b^T = [-I_2^T & -I_3^T & I_1^T & I_2^T & I_3^T & -I_1^T] \\ I_c^T = [I_3^T & -I_1^T & -I_2^T & -I_3^T & I_1^T & I_2^T] \end{cases}$$

因此 a 、 b 相电流对应的格拉姆矩阵为 $G(I_a, I_b) = (0 \ I_b)^T (0 \ I_b) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_b^T I_b \end{pmatrix}$ ，相应的特征值 $l_1 = I_b^T I_b$ ， $l_2 = 0$ ，特征向量矩阵 $X_{ab} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。因此故障的 a 相电流与正常的 b 相电流间相似性为，

$$r_{ab} = \frac{\min_{1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 2} |X_{ab}(i, j)|}{\max_{1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 2} |X_{ab}(i, j)|} = 0$$

根据对称性， a 相电流与 c 相电流间相似性也为 0，由此可知，当某一相发生开路故障时，故障相电流与正常相电流间相似性会急剧减小，对于正常的两相电流，其相似性仍为 1。因此当 a 相发生双管故障时， b 、 c 相电流之间相关性为 1，即正常的另外两相电流间相似性保持不变，而正常相与故障相间相似性会急剧减小到 0。

当 a 相桥臂中发生单管故障时, 三相电流波形如图 2 (c) 所示, 三相电流向量分解如下:

$$\begin{cases} I_a^T = [0 & 0 & 0 & -I_1^T & -I_2^T & -I_3^T] \\ I_b^T = [-I_2^T & -I_3^T & I_1^T & I_2^T & I_3^T & -I_1^T] \\ I_c^T = [I_3^T & -I_1^T & -I_2^T & -I_3^T & I_1^T & I_2^T] \end{cases}$$

$$I_a^T I_b = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -I_1^T \quad -I_2^T \quad -I_3^T] \cdot$$

$$[-I_2^T \quad -I_3^T \quad I_1^T \quad I_2^T \quad I_3^T \quad -I_1^T]^T$$

$$= I_1^T I_3 - I_1^T I_2 - I_2^T I_3$$

利用正弦三角函数进行积分计算。

$$\begin{aligned} I_a^T I_b &= (I_a^T I_b)^T = I_b^T I_a = I_s^2 \left(\int_0^{\frac{p}{3w}} \sin wt \cdot \sin(wt + \frac{2p}{3}) dt \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{\frac{p}{3w}} \sin wt \cdot \sin(wt + \frac{p}{3}) dt - \int_0^{\frac{p}{3w}} \sin(wt + \frac{p}{3}) \cdot \sin(wt + \frac{2p}{3}) dt \right) \\ &= -\frac{p}{4} I_s^2 \end{aligned}$$

$$I_a^T I_a = \int_0^{\frac{p}{w}} (I_s \sin wt)^2 dt = \frac{p}{2} I_s^2$$

$$I_b^T I_b = 2(I_1^T I_1 + I_2^T I_2 + I_3^T I_3) = 2 \int_0^{\frac{p}{w}} (I_s \sin wt)^2 dt = p I_s^2$$

因此有 $G(I_a, I_b) = \begin{bmatrix} I_a^T I_a & I_a^T I_b \\ I_b^T I_a & I_b^T I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p I_s^2}{2} & -\frac{p I_s^2}{4} \\ -\frac{p I_s^2}{4} & p I_s^2 \end{bmatrix} = \frac{p I_s^2}{4} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 4 \end{bmatrix}$, 求得 $X_{ab} = \begin{bmatrix} 1 & 1-\sqrt{2} \\ \sqrt{2}-1 & 1 \end{bmatrix}$, 相应

的 $r_{ab} = \frac{\min_{1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 2} |X_{ij}|}{\max_{1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 2} |X_{ij}|} = 0.414$ 。结果表明此种情形与单桥臂双管故障电流间相似性

变化趋势基本一致, 故障相电流与正常相电流间相似性会减小到 0.414. 对于正常的两相电流, 其相似性仍为 1。

S5.比较相电流间相似性与设定阈值的大小, 获得当前时刻表征故障的特征量, 根据特征量判断各桥臂是否发生故障。

通过上面具体地计算分析发现, 当某相发生故障时, 故障相与正常相电流间相似性会显著减小, 并且可以选定阈值为 0.414 至 1 之间的某一数值, 比较相似性与阈值大小, 判断各桥臂是否发生故障; 按下式比较相似性与

阈值大小，诊断出当前时刻各桥臂是否发生故障，其中 k 为选定阈值，本发明实施例中选定阈值 k 为 0.75：

$$F_A = \begin{cases} 1, r_{bc} > k, r_{ab} < k, r_{ac} < k \\ 0, \text{ else} \end{cases}$$

$$F_B = \begin{cases} 1, r_{ac} > k, r_{ab} < k, r_{bc} < k \\ 0, \text{ else} \end{cases}$$

$$F_c = \begin{cases} 1, r_{ab} > k, r_{ac} < k, r_{bc} < k \\ 0, \text{ else} \end{cases}$$

表征故障的特征量 F_m 为 1 时，该相桥臂发生开路故障； F_m 为 0 时，该相桥臂处于健康状态，其中， $m=A,B,C$ 。

本发明方法的应用实例如图 3 所示，带故障检测模块的电机矢量控制系统由功率管（T1-T6）、对应续流二极管（D1-D6）、整流后输出的直流电压、滤波电容（C）、感应电机、PWM 控制模块以及故障检测模块组成，故障诊断模块采用共享控制系统的三相电流信号的方式，避免了添加额外的传感器，因此诊断成本低。

本领域的技术人员容易理解，以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求

1、一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，其特征在于，包括：

S1.采集当前时刻逆变器输出的三相电流数据，并更新三相电流向量；

S2.根据三相电流向量构建每两相电流向量间的格拉姆矩阵；

S3.计算各格拉姆矩阵的特征值、特征向量，获得特征向量矩阵，根据特征向量矩阵中最小元素与最大元素的绝对值之比得到相电流间相似性；

S4.比较相电流间相似性与设定阈值的大小，获得当前时刻表征故障的特征量，根据特征量得到当前时刻开路故障诊断结果。

2、根据权利要求1所述的一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，其特征在于，根据以下公式更新三相电流向量；

$$I_m(k)=[i_m(t), i_m(t+1), \dots, i_m(k)]^T, m=a, b, c$$

其中， $t=k-L+1$ ， k 为当前采样时刻， $L=\frac{60}{n_p \times w \times T_s}$ 为电流向量维度， n_p 是电机极对数， w 是电机转速， T_s 为采样时间， $i_m(k)$ 为 k 时刻采集到 m 相电流数据。

3、根据权利要求1或2所述的一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，其特征在于，每两相电流向量间的格拉姆矩阵为：

$$G_{bc} = \begin{bmatrix} I_b^T I_b & I_b^T I_c \\ I_c^T I_b & I_c^T I_c \end{bmatrix}$$

$$G_{ac} = \begin{bmatrix} I_a^T I_a & I_a^T I_c \\ I_c^T I_a & I_c^T I_c \end{bmatrix}$$

$$G_{ab} = \begin{bmatrix} I_a^T I_a & I_a^T I_b \\ I_b^T I_a & I_b^T I_b \end{bmatrix}$$

其中， I_a 、 I_b 、 I_c 为三相电流向量。

4、根据权利要求3所述的一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障

诊断方法，其特征在于，相电流间相似性计算公式为：

$$r(I_m, I_n) = \left| \frac{2I_m^T I_n}{I_m^T I_m - I_n^T I_n + \sqrt{(I_n^T I_n - I_m^T I_m)^2 + 4(I_m^T I_n)^2}} \right|, \quad m, n = a, b, c。$$

5、根据权利要求 1 所述的一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，其特征在于，表征故障的特征量根据如下表达式得到；

$$F_A = \begin{cases} 1, & r_{bc} > k, r_{ab} < k, r_{ac} < k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$F_B = \begin{cases} 1, & r_{ac} > k, r_{ab} < k, r_{bc} < k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$F_c = \begin{cases} 1, & r_{ab} > k, r_{ac} < k, r_{bc} < k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

其中， k 为设定阈值， F_m 为表征 m 相故障的特征量， $m=A,B,C$ 。

6、根据权利要求 5 所述的一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，其特征在于，表征故障的特征量 F_m 为 1 时，该相桥臂发生开路故障； F_m 为 0 时，该相桥臂处于健康状态，其中， $m=A,B,C$ 。

7、根据权利要求 5 所述的一种两电平三相电压源逆变器桥臂开路故障诊断方法，其特征在于，设定阈值 k 为 0.414 至 1 之间的某一数值。

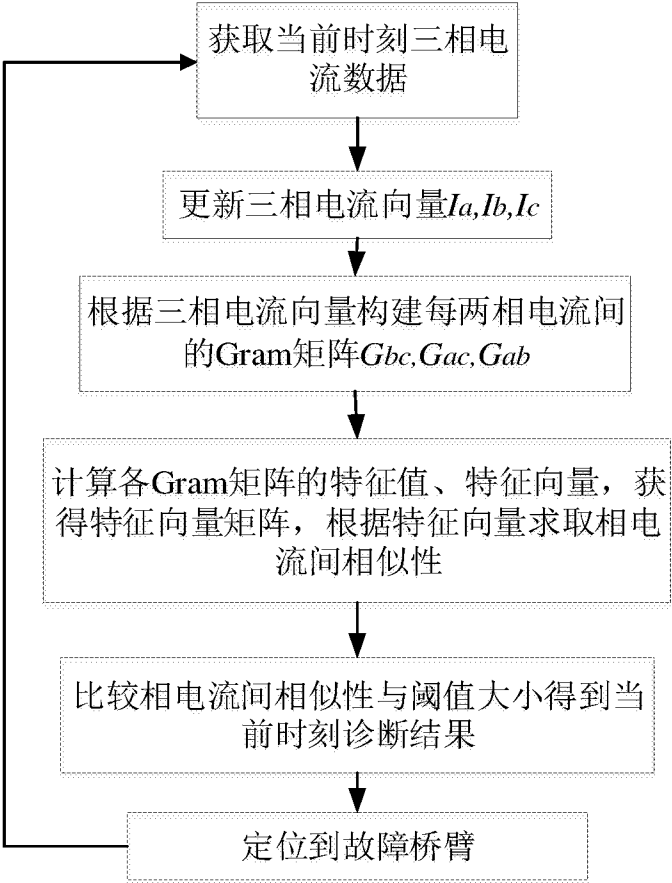


图 1

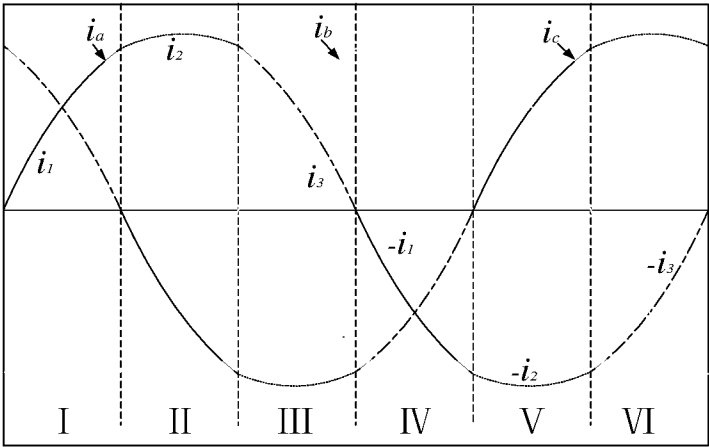


图 2(a)

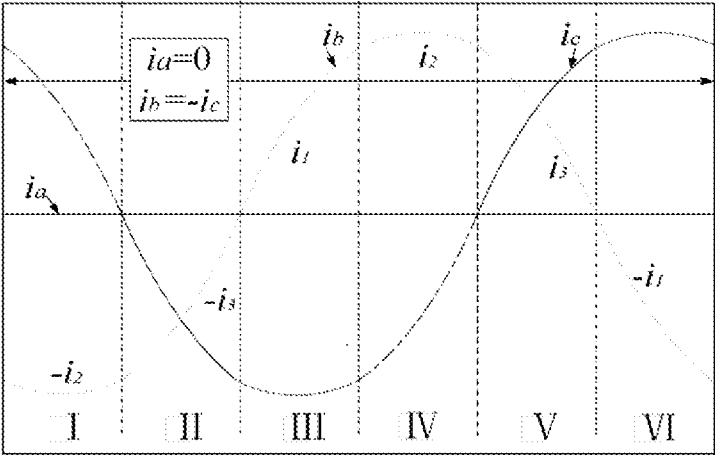


图 2 (b)

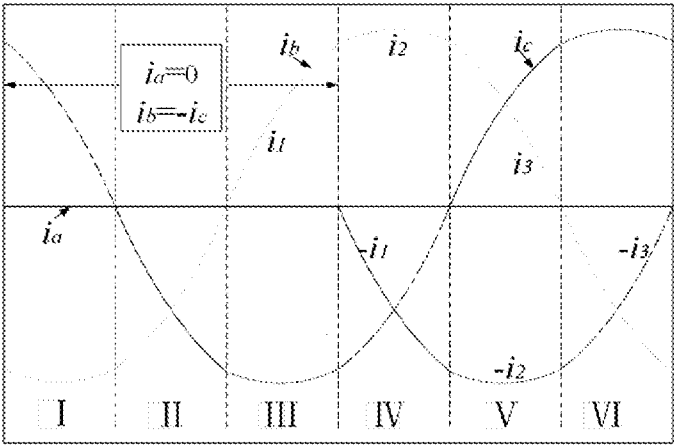


图 2 (c)

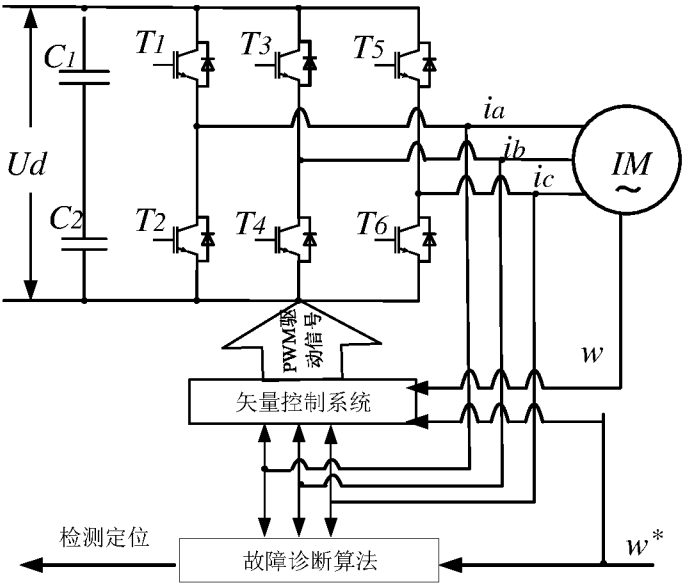


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/131801

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 31/54(2020.01)i; G01R 31/56(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01R31

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 华中科技大学, 逆变器, 开路, 故障, 电流, 向量, 矩阵, 格拉姆, 相似, 阈值, inverter, inventor, open W circuit, fault, failure, defect, current, vector, similar???, matrix, threshold, Gram

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111381188 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 07 July 2020 (2020-07-07) claims 1-7, description, paragraphs [0004]-[0083], figures 1-3	1-7
X	CN 106124913 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 16 November 2016 (2016-11-16) description, paragraphs [0003]-[0073], figure 1	1-7
A	CN 106124914 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 16 November 2016 (2016-11-16) entire document	1-7
A	CN 108680818 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 19 October 2018 (2018-10-19) entire document	1-7
A	CN 103701394 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 02 April 2014 (2014-04-02) entire document	1-7
A	KR 20170090149 A (UNIV YEUNGNAM RES COOPERATION FOUNDATION) 07 August 2017 (2017-08-07) entire document	1-7



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 January 2021

Date of mailing of the international search report

27 January 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/131801

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	SHI, Yi et al. "基于核密度估计的逆变器故障诊断方法 (Fault Diagnosis Method of Converter Based on Kernel Density Estimation Classifier)" 变频器世界 (<i>The World of Inverters</i>), No. 04, 30 April 2019 (2019-04-30), ISSN: 1561-0330, pp. 72-75	1-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/131801

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111381188	A	07 July 2020	None			
CN	106124913	A	16 November 2016	None			
CN	106124914	A	16 November 2016	None			
CN	108680818	A	19 October 2018	CN	108680818	B	10 November 2020
CN	103701394	A	02 April 2014	CN	103701394	B	08 June 2016
KR	20170090149	A	07 August 2017	KR	101823140	B1	14 March 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/131801

A. 主题的分类

G01R 31/54(2020.01)i; G01R 31/56(2020.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01R31

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, CNKI, WPI, EP0D0C: 华中科技大学, 逆变器, 开路, 故障, 电流, 向量, 矩阵, 格拉姆, 相似, 阈值, inverter, invertor, open W circuit, fault, failure, defect, current, vector, similar???, matrix, threshold, Gram

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 111381188 A (华中科技大学) 2020年 7月 7日 (2020 - 07 - 07) 权利要求1-7, 说明书第[0004]-[0083]段, 图1-3	1-7
X	CN 106124913 A (华中科技大学) 2016年 11月 16日 (2016 - 11 - 16) 说明书第[0003]-[0073]段, 图1	1-7
A	CN 106124914 A (华中科技大学) 2016年 11月 16日 (2016 - 11 - 16) 全文	1-7
A	CN 108680818 A (中南大学) 2018年 10月 19日 (2018 - 10 - 19) 全文	1-7
A	CN 103701394 A (哈尔滨工业大学) 2014年 4月 2日 (2014 - 04 - 02) 全文	1-7
A	KR 20170090149 A (UNIV YEUNG NAM RES COOPERATION FOUNDATION) 2017年 8月 7日 (2017 - 08 - 07) 全文	1-7

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件
--	---

国际检索实际完成的日期

2021年 1月 15日

国际检索报告邮寄日期

2021年 1月 27日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

张博

电话号码 86-(10)-53962599

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	施翼 等. “基于核密度估计的逆变器故障诊断方法” 变频器世界, 第04期, 2019年 4月 30日 (2019 - 04 - 30), ISSN: 1561-0330, 第72-75页	1-7

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/131801

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111381188	A	2020年 7月 7日	无	
CN	106124913	A	2016年 11月 16日	无	
CN	106124914	A	2016年 11月 16日	无	
CN	108680818	A	2018年 10月 19日	CN 108680818	B 2020年 11月 10日
CN	103701394	A	2014年 4月 2日	CN 103701394	B 2016年 6月 8日
KR	20170090149	A	2017年 8月 7日	KR 101823140	B1 2018年 3月 14日