(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 113030785 B
(45)授权公告日 2023.08.29

(21)申请号 202110289759.6
(22)申请日 2021.03.17
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113030785 A
(43)申请公布日 2021.06.25
(73)专利权人 青岛大学
地址 266000 山东省青岛市市南区宁夏路308号
(72)发明人 郑晓钦 吴新振 张旭东 王海峰 李修东 马海东 张雷
(74)专利代理机构 青岛易维申知识产权代理事务所(普通合伙) 37310
专利代理师 于正友
(51)Int.Cl.
*G01R 31/54*(2020.01)
*G01R 31/72*(2020.01)
*G01R 31/34*(2006.01)
(56)对比文件
CN 111679225 A,2020.09.18
CN 111024999 A,2020.04.17
CN 111090030 A,2020.05.01
US 2017192044 A1,2017.07.06
CN 108445340 A,2018.08.24
CN 110932239 A,2020.03.27
CN 110749842 A,2020.02.04
CN 102053210 A,2011.05.11
CN 106383289 A,2017.02.08
CN 108490353 A,2018.09.04
CN 104597368 A,2015.05.06
CN 110007183 A,2019.07.12
US 2021067077 A1,2021.03.04
US 2010033122 A1,2010.02.11
US 2011221366 A1,2011.09.15
US 6144924 A,2000.11.07
US 2013077194 A1,2013.03.28
Chandani Gor;Varsha Shah.Modelling, Analysis And Control of Five Phase Induction Motor Drive under Open Circuit Fault for Electric Vehicle . 2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP).2019,全文.
审查员 谢梦琪

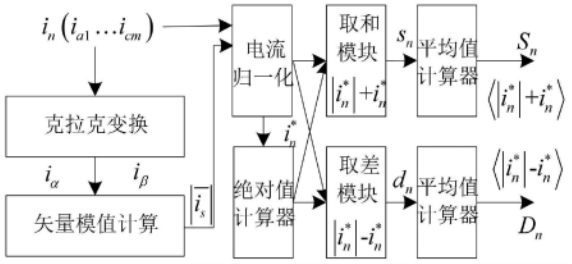
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种电机系统开路故障检测方法

(57)摘要

本发明属于电机系统故障分析领域，涉及一种电机系统开路故障检测方法，包括：归一化后的每一相定子电流与其绝对值分别进行取和、取差运算，再经过平均值计算器处理得到故障诊断变量，此时的故障判断变量为定值，无需再借助阈值辅助判断，即可同时在线检测开关管开路和绕组断相故障；并将多判断变量统一表述为单一诊断变量，有效避免了传统检测方法在空载及加载运行时的误诊断问题点。本发明使用相电流作为检测变量，避免了额外检测设备的增加；可同时准确检测开关管开路和绕组断相故障；诊断变量淘汰掉阈值选取，由范围值改进为确定值，使其更适合于负载变化大的应用场合，为精确定位交流电机开路故障类型、故障点提供更为准确、快速的新途径。




CN 113030785 B

1.一种电机系统开路故障检测方法，其特征在于，包含以下步骤：

步骤(1)、求取相电流模值：将定子相电流经过Clarke变换得到两相静止坐标系下的电流量，得到相电流的模值；

步骤(2)、对电流进行归一化处理：各相电流与电流模值之比即对电流的归一化预处理，得到$i_n^*$及其绝对值$|i_n^*|$，其中，$i_n^*$是各相归一化电流值，n为电流相数；

步骤(3)、确定中间变量：归一化后的相电流$i_n^*$与其绝对值$|i_n^*|$分别进行取和、取差运算得到中间诊断变量$s_n$、$d_n$：

$s_n=|i_n^*|+i_n^*$

$d_n=|i_n^*|-i_n^*$；

步骤(4)、求取诊断变量：中间变量$s_n$、$d_n$再分别经过平均值计算器处理得到最终诊断变量$S_n$、$D_n$：

$S_n=\langle|i_n^*|+i_n^*\rangle$

$D_n=\langle|i_n^*|-i_n^*\rangle$；

步骤(5)、定位开路故障，检测准测为：$S_n$、$D_n$在发生开路故障时跳变为定值“0”，通过观测每一项的$S_n$、$D_n$值是否为零，确定故障的种类与部位，检测准则如下：

$$\begin{cases} S_n \neq 0, D_n \neq 0 & \text{正常} \\ S_n = 0, D_n \neq 0 & \text{上桥臂开路} \\ S_n \neq 0, D_n = 0 & \text{下桥臂开路} \\ S_n = 0, D_n = 0 & \text{断相} \end{cases}$$

。

2.根据权利要求1所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，

在完成开路故障检测后，将开关管开路、绕组断一相、绕组断两相故障用一一对应的单一数值表示，将最终诊断变量$S_n$、$D_n$优化为单一故障识别指数Y，根据单一故障识别指数Y识别三种开路故障。

3.根据权利要求2所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，

所述将最终诊断变量$S_n$、$D_n$优化为单一故障识别指数Y的步骤，包括：

首先，求取每一相的$S_n$、$D_n$值，经过$S_n$、$D_n$是否为零的选择判断后，每一相电流的新增变量Z便对应一个特定的常数，Z＝n、10×n、-10×n或0；

然后，令n相电流的Z值加和为$Z_{sum}$，其中，$Z_{max}$为n个Z值的最大值；

最后，取差模块得到$x=Z_{sum}-Z_{max}$，取积模块得到$\lambda=10\times x$，取和模块得到$\eta=Z_{max}+\lambda$，最大值计算器输出$Y=\max(\eta、Z_{sum})$，Y表示最终的故障识别指数。

4.根据权利要求1至3任一项所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，所述电机为同步电机。

5.根据权利要求1至3任一项所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，所述电机为异步电机。

6.根据权利要求1至3任一项所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，所述电机相数为三相。

7.根据权利要求1至3任一项所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，所述电机相数为多相。

8.根据权利要求1至3任一项所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，所述电机系统开路故障为开关管开路故障。

9.根据权利要求1至3任一项所述的电机系统开路故障检测方法，其特征在于，所述电机系统开路故障为绕组开路故障。

# 一种电机系统开路故障检测方法

## 技术领域

[0001] 本发明属于电机驱动技术领域，涉及一种电机系统开路故障检测方法，用于电机开路故障类型判断及故障点的精确定位。

## 背景技术

[0002] 在电机系统的长期运行过程中，过电压、过电流以及功率器件老化造成的功率器件损坏，高温高振动等恶劣工作环境造成的焊锡脱焊等都有可能造成绕组的开路故障。在某些对于可靠性要求不高的应用场合，可通过简单检测手段，离线清理电机故障。但对于一些可靠性要求极为苛刻的场合，需要迅速、可靠、实时的在线检测出缺相数量及其位置，以便为容错控制策略的在线切换提供依据。因此，对电机及其驱动控制电路的故障进行在线检测与诊断是故障危害评估的基础，也是维持整个系统可靠稳定运行的关键。

[0003] 致力于研究电机驱动系统开路故障检测的学者一直在关注特征量的提取、数据分析和检测效果对比。大多数诊断策略虽简易快捷，但仅限于检测单开关管或单相绕组开路故障，对多相绕组开路检测的适用扩展性较差。并且在现有诸多检测方法中，诊断变量多为范围值。在发生不同类型开路故障时，需要选取不同的阈值以完成故障检测。

[0004] 因此，如何优化电机系统开路故障检测精度和诊断指标，检测开关管、绕组开路故障，是目前亟待解决的问题。

## 发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服现有技术存在的缺点，提出一种电机系统开路故障检测方法，涉及一种改进型相电流平均值算法，将多种开路故障的检测变量改进为确定值，为精确定位交流电机开路故障类型、故障点提供更为准确、快速的新途径。

[0006] 为了实现上述发明目的，本发明从每一相定子电流出发。为方便控制，首先将自然坐标系坐标系下的数学模型解耦到d-q-0坐标系；通过矢量空间解耦坐标变换，可以得到同步旋转坐标系下的数学模型；考虑到空载、轻载以及负载突变等电机运行工况发生变化时，定子电流会发生变化，将定子相电流经过Clarke变换得到两相静止坐标系下的电流量，完成对电流的归一化处理；为归一化后的相电流与其绝对值分别进行取和、取差运算，得到中间变量；最后经过平均值计算器处理得到故障诊断变量，n相电流便对应2n个诊断变量，此时的故障判断变量为定值，无需再借助阈值辅助判断，即可同时准确检测开关管开路和绕组断相故障。其具体步骤为：

[0007] (1)、求取相电流模值：将定子相电流经过Clarke变换得到两相静止坐标系下的电流量，得到相电流的模值；

[0008] (2)、对电流进行归一化处理：各相电流与电流模值之比即对电流的归一化预处理，得到$i_n^*$及其绝对值$|i_n^*|$；

[0009] (3)、确定中间变量：归一化后的相电流$i_n^*$与其绝对值$|i_n^*|$分别进行取和、取差运算得到中间变量$s_n$、$d_n$；

[0010] (4)、求取诊断变量：中间变量$s_n$、$d_n$再分别经过平均值计算器处理得到诊断变量$S_n$、$D_n$(如图4所示)；

[0011] (5)、开路故障定位：结合检测准则，仅通过2n个诊断变量$S_n$、$D_n$即可实现开关管、绕组开路故障的检测、识别与定位；

[0012] (6)、诊断变量简化：在完成开路故障检测后，可设计相关算法，将开关管开路、绕组断相故障的诊断变量$S_n$、$D_n$优化为单一指数Y，故障时表示为表1、2所示的数值。

[0013] 本发明与现有技术相比，具有以下优点：第一、使用相电流作为检测变量，避免了额外检测设备的增加；第二、可同时准确检测开关管开路和多绕组断相故障；第三、诊断变量淘汰掉阈值选取，由范围值改进为确定值，使其更适合于负载变化大的应用场合。

## 附图说明

[0014] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0015] 图1为本发明涉及的上桥臂开关管开路故障示意图；

[0016] 图2为本发明涉及的下桥臂开关管开路故障示意图；

[0017] 图3(a)为开关管开路时中间变量波形图；

[0018] 图3(b)为绕组断相时中间变量波形图。

[0019] 图4为本发明涉及的开路故障诊断原理图。

[0020] 图5(a)为本发明涉及的单一指标故障定位流程初步故障定位算法示意图；

[0021] 图5(b)为本发明涉及的单一指标故障定位流程改进后开关管开路、绕组断一相和绕组断两相故障定位算法示意图。

## 具体实施方式

[0022] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0023] 下面通过实施例并结合附图对本发明做进一步说明。

[0024] 本实施例以H桥供电开端绕组九相电机第1相上桥臂开关管T1(如图1所示)、第1相下桥臂开关管T2(如图2所示)、第1相绕组开路故障作为案例，故障检测的具体过程如下：

[0025] (1)、求取相电流模值：由于空载、轻载以及负载突变等电机运行工况发生变化时，定子电流幅值会发生变化，因此需对电流做归一化处理。首先将自然坐标系下的定子九相电流$i_n$(n＝1,…,9)，经过Clarke变换得到两相静止坐标系下的电流量$i_\alpha$、$i_\beta$，电流模值可表示为$\left|\overline{i_s}\right| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}$；

[0026] (2)、对电流进行归一化处理：各相电流与电流模值之比即对电流的归一化预处理，得到九相电流的归一化值$i_n^* = i_n / \left|\overline{i_s}\right|$及其绝对值$|i_n^*|$。其中Clarke变换矩阵为：

[0027] $$T_{\alpha\beta}=\frac{2}{9}\begin{bmatrix} 1 & \cos\alpha & \cos2\alpha & \cos6\alpha & \cos7\alpha & \cos8\alpha & \cos12\alpha & \cos13\alpha & \cos14\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \sin2\alpha & \sin6\alpha & \sin7\alpha & \sin8\alpha & \sin12\alpha & \cos13\alpha & \cos14\alpha \\ 1 & \cos3\alpha & \cos6\alpha & \cos18\alpha & \cos21\alpha & \cos24\alpha & \cos36\alpha & \cos39\alpha & \cos42\alpha \\ 0 & \sin3\alpha & \sin6\alpha & \sin18\alpha & \sin21\alpha & \sin24\alpha & \sin36\alpha & \sin39\alpha & \sin42\alpha \\ 1 & \cos5\alpha & \cos10\alpha & \cos30\alpha & \cos35\alpha & \cos40\alpha & \cos60\alpha & \cos65\alpha & \cos70\alpha \\ 0 & \sin5\alpha & \sin10\alpha & \sin30\alpha & \sin35\alpha & \sin40\alpha & \sin60\alpha & \sin65\alpha & \sin70\alpha \\ 1 & \cos7\alpha & \cos14\alpha & \cos42\alpha & \cos49\alpha & \cos56\alpha & \cos84\alpha & \cos91\alpha & \cos98\alpha \\ 0 & \sin7\alpha & \sin14\alpha & \sin42\alpha & \sin49\alpha & \sin56\alpha & \sin84\alpha & \sin91\alpha & \sin98\alpha \\ 1/2 & -1/2 & 1/2 & 1/2 & -1/2 & 1/2 & 1/2 & -1/2 & 1/2 \end{bmatrix};$$

[0028] (3)、确定中间变量：归一化后的九相电流$i_n^*$与其绝对值$|i_n^*|$分别进行取和、取差运算，得到本实施例检测方法的中间诊断变量sn＝$|i_n^*|+i_n^*$、$d_n=|i_n^*|-i_n^*$。图3(a)所示为$i_n^*$与$|i_n^*|$的和$s_n$，，图3(b)所示为$i_n^*$与$|i_n^*|$的差$d_n$，针对不同的开路故障，中间诊断变量$s_n$、$d_n$表示方法具体为：

[0029] (3A)、发生上桥臂开关管T1故障时，该相$i_n^*$波形上半周变为零、下半周正常，其绝对值$|i_n^*|$则下半周为零、上半周正常，即故障后$|i_n^*|=-i_n^*$，因此仅中间诊断变量$s_n$在故障后变为零值；

[0030] (3B)、发生下桥臂开关管T2故障时，该相$i_n^*$波形下半周变为零、上半周正常，其绝对值$|i_n^*|$则下半周为零、上半周正常，即故障后$|i_n^*|=i_n^*$，因此仅中间诊断变量$d_n$在故障后变为零值；

[0031] (3C)、发生第1相绕组开路时，该相整个$i_n^*$波形及其绝对值$|i_n^*|$变为零，即故障后$|i_n^*|=i_n^*=0$，因此中间变量$s_1$、$d_1$在故障后均变为零值；

[0032] (4)、求取诊断变量：中间变量$s_n$、$d_n$再分别经过平均值计算器处理得到最终诊断变量$S_n=\langle|i_n^*|+i_n^*\rangle$、$D_n=\langle|i_n^*|-i_n^*\rangle$，n相电流便对应2n个诊断变量。针对不同的开路故障，诊断变量$S_n$、$D_n$表示方法具体为：

[0033] (4A)、发生上桥臂开关管T1故障时，该相中间变量仅$s_n$变为零值，因此中间变量的平均值$S_n$、$D_n$中，仅$S_1$在故障后由非零的某个数跳变为定值0；

[0034] (4B)、发生下桥臂开关管T2故障时，该相中间变量仅$d_n$变为零值，因此中间变量的平均值$S_n$、$D_n$中，仅$D_1$在故障后由非零的某个数跳变为定值0；

[0035] (4C)、发生第1相绕组开路时，该相中间变量$s_1$、$d_1$变为零值，因此中间变量的平均值$S_1$、$D_1$在故障后均跳变为定值0，其他$S_n$、$D_n$均为非零值；

[0036] (5)、定位开路故障：对第n相开关管开路、绕组断相的检测准则如下：

[0037] $$\begin{cases} S_n\neq0, D_n\neq0 & \text{正常} \\ S_n=0, D_n\neq0 & \text{上桥臂开路；} \\ S_n\neq0, D_n=0 & \text{下桥臂开路} \\ S_n=0, D_n=0 & \text{断相} \end{cases}$$

[0038] 本发明的判断指标$S_n$、$D_n$在发生开路故障时跳变为定值“0”，而非范围值。通过观测不同相的$S_n$、$D_n$值是否为零，可以迅速确定故障的种类与部位。由于对相电流进行独立运算，每一相电流均有各自的判断指标。因此本发明也适用于检测多相绕组开路故障、其他相数电机的开路故障。

[0039] 通过2n个诊断变量$S_n$、$D_n$，已可实现开路故障的判断与定位。在另一些可选实施例中，本发明的方法还包括对最终诊断变量简化的步骤，在改进诊断变量之前，为使多种开路故障以单窗口报警，将开关管开路、绕组断一相、绕组断两相故障用一一对应的单一数值表示，如表1、表2所示。

[0040] 表1

[0041]

| | 上桥臂开路 | 下桥臂开路 | 断一相故障 |
|---|---|---|---|
| $a_1$ | 10 | -10 | 1 |

[0042]

| | | | |
|---|---|---|---|
| $a_2$ | 20 | -20 | 2 |
| $a_3$ | 30 | -30 | 3 |
| $b_1$ | 40 | -40 | 4 |
| $b_2$ | 50 | -50 | 5 |
| $b_3$ | 60 | -60 | 6 |
| $c_1$ | 70 | -70 | 7 |
| $c_2$ | 80 | -80 | 8 |
| $c_3$ | 90 | -90 | 9 |

[0043] 表2

[0044]

| 断两相故障 | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $c_1$ | $c_2$ | $c_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $a_1$ | | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $a_2$ | 12 | | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| $a_3$ | 13 | 23 | | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| $b_1$ | 14 | 24 | 34 | | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 |
| $b_2$ | 15 | 25 | 35 | 45 | | 56 | 57 | 58 | 59 |
| $b_3$ | 16 | 26 | 36 | 46 | 56 | | 67 | 68 | 69 |
| $c_1$ | 17 | 27 | 37 | 47 | 57 | 67 | | 78 | 79 |
| $c_2$ | 18 | 28 | 38 | 48 | 58 | 68 | 78 | | 89 |
| $c_3$ | 19 | 29 | 39 | 49 | 59 | 69 | 79 | 89 | |

[0045] 将九相电流重新标注为$i_1$、$i_2$.....$i_9$,将定子绕组第$a_1$、$a_2$.....$c_3$相重命名为第1、2.....9相(下同)。每一相电流都经过如图5(a)、图5(b)所示的流程判断,得出对应的$Z_n$值,n=1、2.....。其中,如图5(a)、图5(b)所示,流程判断具体为:首先求取每一相的$S_n$、$D_n$值,经过$S_n$、$D_n$是否为零的选择判断后,每一相电流的“新增变量Z”便对应一个特定的常数(Z=n、10×n、-10×n或0);然后,令n相电流的Z值加和为$Z_{sum}$($Z_{sum}=Z_1+Z_2+...+Z_n$),其中,$Z_{max}$为n个Z值的最大值;最后,取差模块得到$x=Z_{sum}-Z_{max}$,取积模块得到$\lambda=10\times x$,取和模块得到$\eta=Z_{max}+\lambda$,最大值计算器输出$Y=\max(\eta、Z_{sum})$,表示最终的故障识别指数。

[0046] 当有i、j两相发生断相故障时(i<j),第一个最大值计算器模块可将标号较大的故障相$Z_j$提取出,经取差模块处理后的x值则代表标号较小的故障相$Z_i$,取积模块、取和模块的处理使得较小的标号变为一个两位数的十位,较大的标号变为个位。即$\eta=\lambda+Z_{max}=10\times i+j$、$Y=\max(\eta、Z_{sum})$为最终故障识别指数。因此,单开关管开路、绕组断一相和断两相故障的检测指数并不重复,并且断两相故障时故障识别指数Y与发生故障的两相一一对应,仅通过单一报警窗口(故障识别指数)Y便实现了识别三种开路故障的目标。

[0047] 下面针对不同的开路故障,单一故障识别指数表示方法具体为:

[0048] (6A)、发生第1相上桥臂开关管T1开路时(如图1所示),第1相的$S_1=0$、$D_1\neq0$,其余相电流的$S_n$、$D_n$均为非零值。因此经过图5(a)、图5(b)流程判断得到的$Z_1$、$Z_2$.....$Z_9$中,仅$Z_1=10\times1=10$(其余$Z_n$值均为零),$Z_{sum}=Z_1+Z_2+...+Z_9=10$,$Z_{max}=Z_1=10$,则$x=Z_{sum}-Z_{max}=0$、$\lambda=10\times x=0$、$\eta=Z_{max}+\lambda=10$,最终的故障识别指标$Y=\max(\eta、Z_{sum})=10$;

[0049] (6B)、发生第1相下桥臂开关管T3开路时(图2所示),第1相的$S_1\neq0$、$D_1=0$,其余相

电流的$S_n$、$D_n$均为非零值。因此经过图5(a)、图5(b)流程判断得到的$Z_1$、$Z_2$.....$Z_9$中，仅$Z_1=-10\times1=-10$(其余$Z_n$值均为零)，$Z_{sum}=Z_1+Z_2+...+Z_9=-10$，但$Z_{max}=0$，进而$x=Z_{sum}-Z_{max}=-10$、$\lambda=10\times x=-100$、$\eta=Z_{max}+\lambda=-100$，最终的故障识别指标$Y=max(\eta、Z_{sum})=-10$；

[0050] (6C)、发生第1相绕组开路时，$S_1=0$、$D_1=0$，其余相电流的$S_n$、$D_n$均为非零值。经过图5(a)、图5(b)流程判断得到的$Z_1$、$Z_2$.....$Z_9$中，仅$Z_1=n=1$(其余$Z_n$值均为零)，$Z_{sum}=Z_1+Z_2+...+Z_9=1$，$Z_{max}=Z_1=1$，则$x=0$、$\lambda=0$、$\eta=1$，最终的故障识别指标$Y=max(\eta、Z_{sum})=1$；；

[0051] (6D)、发生第1相、第9相绕组同时开路，$S_1=0$、$D_1=0$，$S_9=0$、$D_9=0$，其余相电流的$S_n$、$D_n$均为非零值。经过5(a)、图5(b)流程判断得到的$Z_1$、$Z_2$.....$Z_9$中，仅$Z_1=1$、$Z_9=9$(其余$Z_n$值均为零)，$Z_{sum}=Z_1+Z_2+...+Z_9=10$，$Z_{max}=Z_9=9$，则$x=Z_{sum}-Z_{max}=1$、$\lambda=10\times x=10$、$\eta=\lambda+Z_{max}=19$，最终的故障识别指标$Y=max(\eta、Z_{sum})=19$；

[0052] 本发明使用相电流作为检测变量，可同时准确检测开关管开路和多绕组断相故障。与现有技术相比，诊断变量由范围值改进为确定值，淘汰掉阈值选取，使其更适合于负载变化大的应用场合。

[0053] 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、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

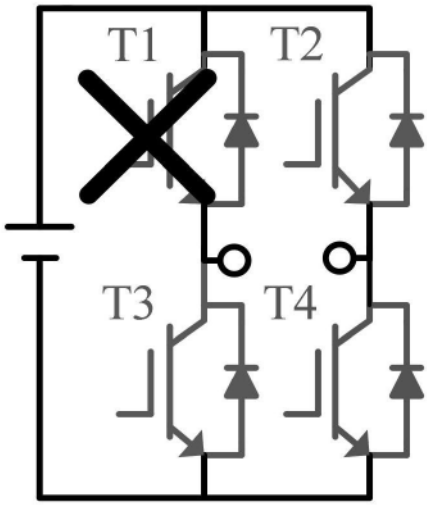

T1
T2
T3
T4

图1

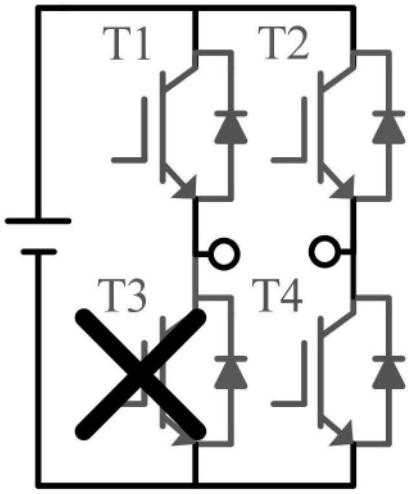

T1
T2
T3
T4

图2

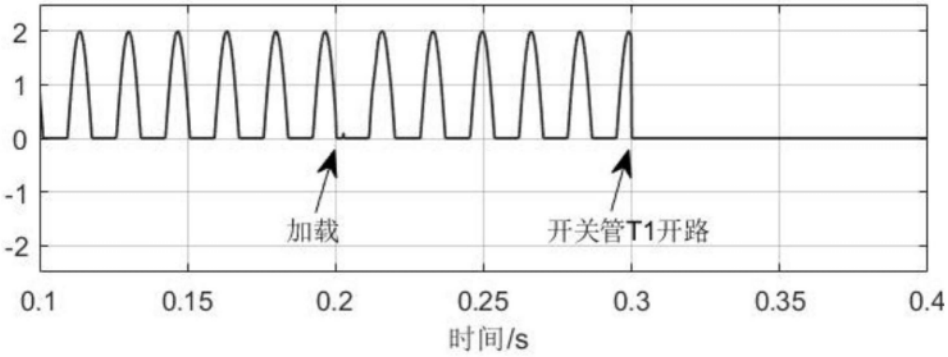

2
1
0
-1
-2
加载
开关管T1开路
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
时间/s

图3(a)

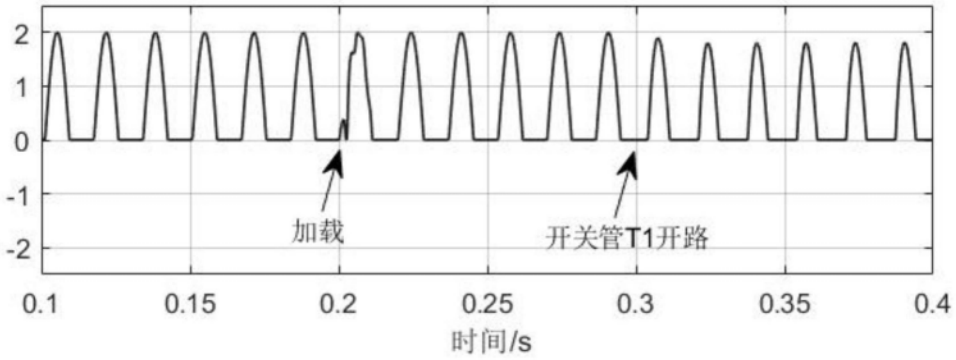

2
1
0
-1
-2
加载
开关管T1开路
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
时间/s

图3(b)

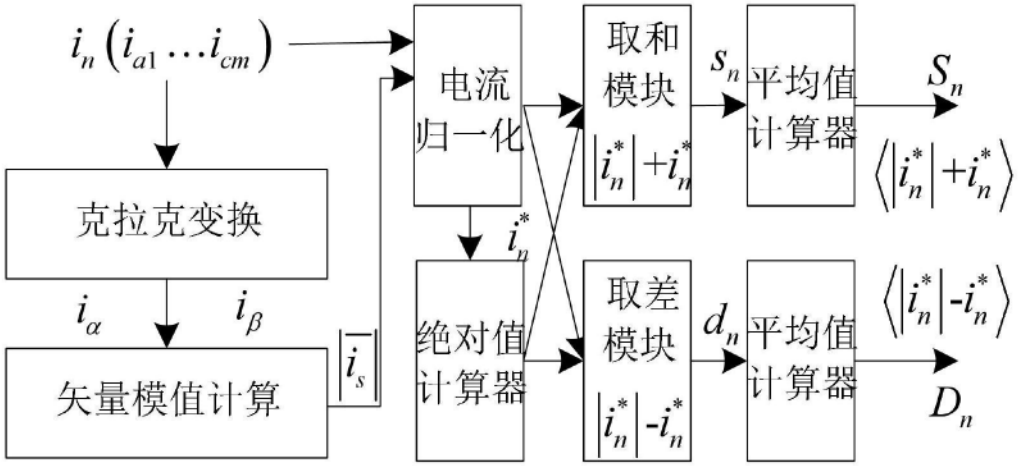

$i_n\left(i_{a1}\ldots i_{cm}\right)$
克拉克变换
$i_\alpha$
$i_\beta$
矢量模值计算
$\overline{|i_s|}$
电流归一化
$i_n^*$
绝对值计算器
取和模块
$|i_n^*|+i_n^*$
取差模块
$|i_n^*|-i_n^*$
$s_n$
$d_n$
平均值计算器
平均值计算器
$S_n$
$D_n$
$\langle|i_n^*|+i_n^*\rangle$
$\langle|i_n^*|-i_n^*\rangle$

图4

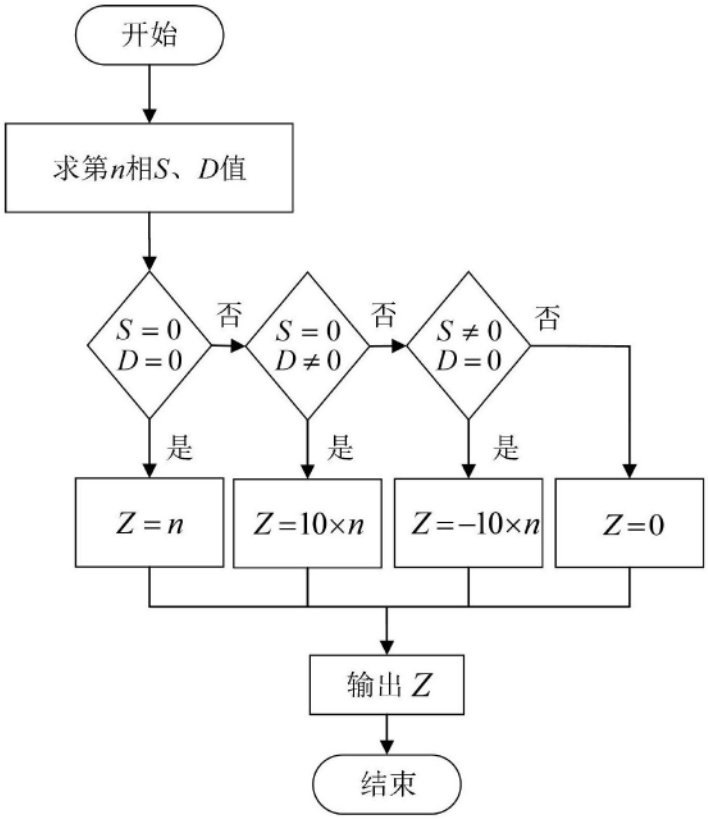

开始
求第n相S、D值
S = 0
D = 0
否
S = 0
D ≠ 0
否
S ≠ 0
D = 0
否
是
是
是
Z = n
Z = 10×n
Z = −10×n
Z = 0
输出 Z
结束

图5(a)

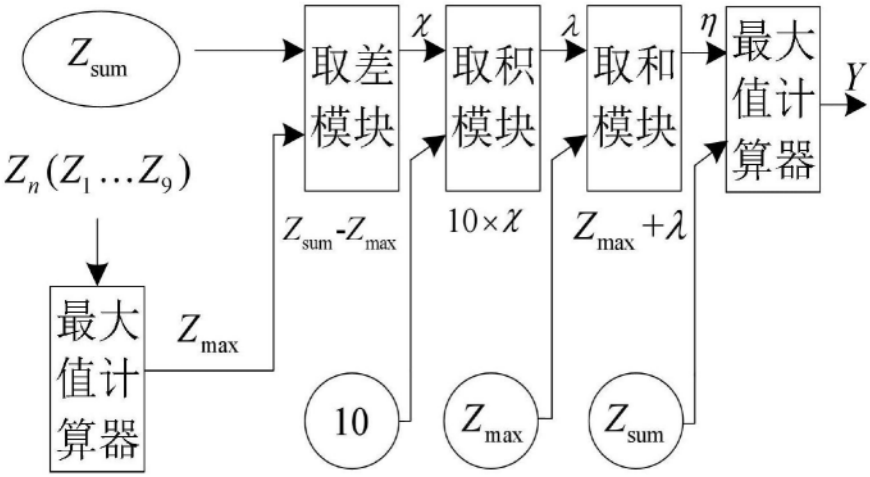

Z_sum
Z_n(Z_1 … Z_9)
最大值计算器
Z_max
取差模块
Z_sum-Z_max
χ
取积模块
10×χ
10
λ
取和模块
Z_max+λ
Z_max
η
最大值计算器
Y
Z_sum

图5(b)