

(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 3 月 4 日 (04.03.2021)



(10) 国际公布号

WO 2021/036364 A1

(51) 国际专利分类号:
H02M 7/5387 (2007.01) H02M 7/483 (2007.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/091726

(22) 国际申请日: 2020 年 5 月 22 日 (22.05.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910789974.5 2019 年 8 月 26 日 (26.08.2019) CN

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 史婷娜(SHI, Tingna); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。姚欢(YAO, Huan); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。阎彦(YAN, Yan); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。张国政(ZHANG,

Guozheng); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。王志强(WANG, Zhiqiang); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。夏长亮(XIA, Changliang); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司(HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市玉古路 147 号黄鸿年科技综合大楼 215 室/林超, Zhejiang 310013 (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, 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, 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,

(54) Title: SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION METHOD FOR ANY-LEVEL CASCADED H-BRIDGE INVERTER

(54) 发明名称: 任意多电平的级联H桥逆变器空间矢量脉宽调制方法

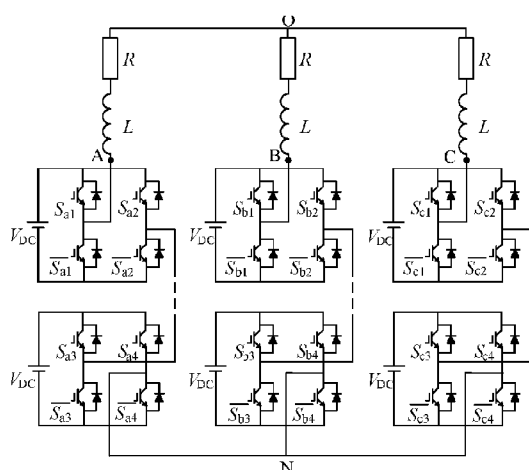


图 1

(57) Abstract: A space vector pulse width modulation (SVPWM) method for an any-level cascaded H-bridge inverter, comprising: re-dividing a multi-level space vector diagram; directly obtaining coordinates of nearest three vectors by determining positions where reference vectors are located; equalizing the reference vectors as additional vectors to compute duty ratios of the nearest three vectors; and obtaining an on/off state by means of a zero-sequence component and coordinate conversion and performing synthesis to obtain a desired reference vector to perform SVPWM modulation. Any-level modulation in a rectangular coordinate system is implemented without any iterative computations, and the computational load is irrelevant to the number of levels. The localization of reference vectors and a duty ratio computation process are simplified, and the computational complexity is reduced.

(57) 摘要: 一种任意多电平的级联H桥逆变器空间矢量脉宽调制方法。将多电平空间矢量图进行重新划分, 并通过判断参考矢量所处位置直接得到最近三矢量的坐标, 将参考矢量等效为附加矢量计算得到最近三矢量的占空比; 并且通过零序分量和坐标变换得到开关状态, 合成所期望的参考矢量, 进行SVPWM调制。实现了在直角坐标系下的任意多电平调制, 不需任何迭代计算, 且计算量与电平数无关; 简化了参考矢量定位以及占空比的计算过程, 降低了计算复杂度。

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))。

任意多电平的级联 H 桥逆变器空间矢量脉宽调制方法

技术领域

本发明涉及属于电力电子电路控制领域的一种级联 H 桥逆变器的调制方法，尤其是一种任意多电平的级联 H 桥逆变器空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法，适用于级联 H 桥逆变器在电机调速、可再生能源发电等领域。

背景技术

随着电力电子技术在中高压、大功率场合的不断发展，传统两电平逆变器已难以适用。因此多电平逆变器在中、大功率电能变换领域得到了越来越广泛的关注与研究。其中，级联 H 桥逆变器具有模块化的特点，所需功率器件少，不存在直流侧电容均压的问题，而且非常易于电平数的扩展，这些优势使得该逆变器在工业场合广泛应用。针对逆变器的调制策略主要有载波调制(SPWM)，最近电平调制(NVL)，特定谐波消除调制(SHE)和空间矢量调制(SVPWM)。其中空间矢量调制具有更大的调制灵活性和自由度，且易于数字化实现，因而是一种理想的调制策略。但是，随着电平数的增加，空间矢量调制中对于参考矢量位置的判定会非常复杂，进而对确定最近三矢量坐标带来困难。此外，对最近三矢量的占空比计算也会愈发繁复。此时，传统两电平或三电平逆变器中的调制方法已无法使用。

现有多电平逆变器的调制方法根据坐标系的不同主要有三类。第一类基于 abc 坐标系，这类调制策略应用较少。第二类基于 60 度坐标系，此类方法通常需要额外的坐标转换。第三类则基于 $\alpha\beta$ 坐标系，但现有方法的实现过程往往较为复杂。一些方法在判定参考矢量位置时依赖于电平数，需要进行迭代运算，当电平数增加时，计算量也会随之增加。另一些方法则需要扇区判断以及复杂的三角函数运算，从而增加了计算复杂度。

发明内容

为了解决背景技术中存在的技术问题，本发明提供了一种简单可行、普适性好的适用于任意电平数下级联 H 桥逆变器的 SVPWM 调制方法。本发明首先判定参考矢量所在位置，然后选择出距离它最近的三个电压矢量，即最近三矢量坐标，最后计算三个电压矢量作用时间的占空比，进而结合开关状态合成所期望的参考矢量，实现空间矢量脉宽调制(SVPWM)。

本发明所采用的技术方案是：

1) 由级联 H 桥逆变器所生成的电压矢量绘制直角坐标系 ($\alpha\beta$ 坐标系) 下的多电平空间矢量图, 其中相邻电压矢量之间相互连线构成了多个三角形, 一个三角形的三个顶点上的电压矢量为最近三矢量 (NTVs), 参考矢量处于多电平空间矢量图中; 其特征在于, 方法还包括如下步骤:

2) 将直角坐标系 (如图 2 的 $\alpha\beta$ 坐标系) 的多电平空间矢量图进行划分两类矩形, 并判断参考矢量处于哪类矩形中:

沿竖直轴方向 (β 轴方向) 等间隔添加 $4n+1$ 条平行于水平轴方向的水平分割虚线, 水平分割虚线平行于 α 轴方向, 且中间的一条水平分割虚线与水平轴 (α 轴) 重合, 相邻水平分割虚线之间间距为 $\sqrt{3}/2$ 个单位长度; 沿水平轴方向 (α 轴方向) 等间隔添加 $8n-1$ 条平行于竖直轴方向的竖直分割虚线, 竖直分割虚线平行于 β 轴方向, 且中间的一条竖直分割虚线与竖直轴 (β 轴) 重合, 相邻竖直分割虚线之间间距为 0.5 个单位长度; 其中, n 为级联 H 桥逆变器每一相所级联的 H 桥单元的个数; 单位长度是指直角坐标系中从原点到坐标 (1,0) 或坐标 (0,1) 之间的距离;

通过水平分割虚线与竖直分割虚线把多电平空间矢量图划分多个矩形 (将位于边缘的直角三角形也补充看作是一个矩形。), 在每个矩形上均有两个电压矢量位于角顶点, 该两个电压矢量之间的连线构成了矩形的一条对角线, 根据矩形对角线的不同将矩形分为两类: 对角线与 α 轴正向方向之间夹角为 60 度的矩形作为 A 类矩形, 对角线与 α 轴正向方向之间夹角为 120 度的矩形作为 B 类矩形; 最后根据 A 类矩形/B 类矩形的边界判断参考矢量处于 A 类矩形或 B 类矩形中;

3) 根据矩形的对角线将矩形进一步划分, 将矩形中对角线上方的区域为 I 型区域, 将矩形中对角线下方的区域为 II 型区域, 然后判断参考矢量处于 I 型区域或 II 型区域; 再根据 A 类/B 类矩形和 I 型/II 型区域的划分, 参考矢量所处的位置有 AI、AII、BI 和 BII 四类; AI、AII、BI 和 BII 分别表示 A 类矩形中的 I 型区域、A 类矩形中的 II 型区域、B 类矩形中的 I 型区域、B 类矩形中的 II 型区域。

4) 根据参考矢量所处的位置得到最近三矢量在直角坐标系 ($\alpha\beta$ 坐标系) 下的坐标, 之后通过选择零序分量并进行坐标变换得到级联 H 桥逆变器的开关状态;

5) 将参考矢量分解为有效矢量 OP 和附加矢量 PS , 处理获得参考矢量在不同位置时最近三矢量作用时间的占空比;

本发明将最近三矢量占空比的求解等效于求解附加矢量 PS 在对应三角形中

的占空比, 据此求得参考矢量在不同位置时最近三矢量作用时间的占空比。

6) 由级联 H 桥逆变器的开关状态和最近三矢量作用时间的占空比合成所期望的参考矢量, 利用合成的参考矢量实现 SVPWM 调制。

所述步骤 2) 中, 在将直角坐标系的多电平空间矢量图进行划分两类矩形后, 判断参考矢量处于哪类矩形中具体为:

首先采用以下公式计算水平轴量化因子 q_α 和竖直轴量化因子 q_β 分别为:

$$\begin{cases} q_\alpha = \text{floor}(V_{\text{ref}\alpha} / 0.5) \\ q_\beta = \text{floor}\left(V_{\text{ref}\beta} / \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $V_{\text{ref}\alpha}$ 和 $V_{\text{ref}\beta}$ 分别为参考矢量 V_{ref} 在直角坐标系的水平轴和竖直轴 (α 和 β 轴) 分量; $\text{floor}(\bullet)$ 表示向下取整函数;

接着通过以下公式判断获得参考矢量所处于的 A 类矩形还是 B 类矩形:

$$k_{\text{rec}} = \begin{cases} 0, & \text{当 } q_\alpha + q_\beta \text{ 为偶数} \\ 1, & \text{当 } q_\alpha + q_\beta \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_{rec} 为判定参考矢量所处矩形的矩形判定系数; 当 k_{rec} 等于 0 时, 参考矢量处于 A 类矩形中; 当 k_{rec} 等于 1 时, 参考矢量处于 B 类矩形中。

所述步骤 3) 中, 判断参考矢量处于 I 型区域或 II 型区域具体为:

参考矢量 V_{ref} 分解为有效矢量 OP 和附加矢量 PS 的合成, 根据附加矢量 PS 起始点的坐标, 附加矢量 PS 表示为:

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = V_{\text{ref}\alpha} - \frac{1}{2}(q_\alpha + k_{\text{rec}}) \\ v_{s\beta} = V_{\text{ref}\beta} - \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta \end{cases} \quad (3)$$

式中, $v_{s\alpha}$ 、 $v_{s\beta}$ 分别为附加矢量 PS 在直角坐标系的水平轴和竖直轴 (α 和 β 轴) 分量;

接着通过以下公式判断获得参考矢量所处于矩形中的 I 型区域还是 II 型区域:

$$k_{\text{reg}} = (-1)^{k_{\text{rec}}} \sqrt{3}v_{s\alpha} - v_{s\beta} \quad (4)$$

式中, k_{reg} 为判定参考矢量所处区域的区域判定系数; 当 k_{reg} 大于 0 时, 参考矢量处于 I 型区域; 当 k_{reg} 小于 0 时, 参考矢量处于 II 型区域; k_{reg} 等于 0 时, 参考矢量处于 I 型和 II 型区域的边界, 可任意判定为 I 型区域或 II 型区域, 对最后结果没有影响。

本发明在任一矩形中,判断参考矢量所处的区域等效为判断附加矢量 $\mathbf{PS}$ 所处的区域,进而获得参考矢量所处的区域。

所述步骤4)中,按照如下表的对应关系,根据参考矢量所处的位置获得最近三矢量在直角坐标系 ($\alpha\beta$ 坐标系) 下的坐标:

	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_2$	$\mathbf{v}_3$
AI	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha + 1, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
AII	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha - 1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
BI	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha - 1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
BII	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 2), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$

其中, $\mathbf{v}_1$ 、 $\mathbf{v}_2$ 和 $\mathbf{v}_3$ 表示最近三矢量,具体分别表示第一电压矢量、第二电压矢量、第三电压矢量。

所述步骤5)中,处理获得参考矢量在不同位置时最近三矢量作用时间的占空比,具体为:

当参考矢量位于 AI 区域或 BI 区域的位置时,采用以下公式获得最近三矢量的占空比:

$$\begin{cases} d_1 = v_{sa} - \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} + k_{rec} \\ d_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} v_{s\beta} \\ d_3 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (5)$$

当参考矢量位于 AII 区域或 BII 区域的位置时,采用以下公式获得最近三矢量的占空比:

$$\begin{cases} d_1 = v_{sa} + \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} \\ d_2 = \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} - v_{sa} \\ d_3 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为最近三矢量 $\mathbf{v}_1$ 、 $\mathbf{v}_2$ 和 $\mathbf{v}_3$ 的占空比。

本发明的有益效果是：

本发明的适用于任意电平数下级联 H 桥逆变器的 SVPWM 调制方法，实现了在 $\alpha\beta$ 坐标系下的任意多电平调制，最近三矢量坐标由参考矢量直接获得，不需任何迭代计算，且计算量与电平数无关。

本发明通过将参考矢量等效为附加矢量，只需判断附加矢量在矩形中所处的区域以及附加矢量在相应三角形中的占空比，从而简化了参考矢量定位以及占空比的计算过程，不需要三角函数计算，降低了计算复杂度。

本发明的方法可应用于电机调速、可再生能源发电等领域。

附图说明

图 1 是级联 H 桥逆变器的拓扑结构图；

图 2 是 $\alpha\beta$ 坐标系下的空间矢量图以及矩形划分图；

图 3 是参考矢量定位方法示意图；

图 4a 是当逆变器每一相有 1 个 H 桥单元时（三电平）的线电压波形图；

图 4b 是当逆变器每一相有 2 个 H 桥单元时（五电平）的线电压波形图；

图 4c 是当逆变器每一相有 3 个 H 桥单元时（七电平）的线电压波形图；

图 4d 是当逆变器每一相有 4 个 H 桥单元时（九电平）的线电压波形图。

具体实施方式

下面结合实例和附图对本发明的适用于任意电平数下级联 H 桥的 SVPWM 调制方法做出详细说明。

级联 H 桥逆变器的拓扑结构如图 1 所示。以级联 H 桥逆变器每一相仅有 1 个 H 桥单元（三电平）为例进行说明，需要说明的是本发明适用于任意多电平。此时由电压矢量构成的三电平空间矢量图在 $\alpha\beta$ 坐标系下如图 2 所示。

本发明的实施例的 SVPWM 调制过程，包括如下步骤：

具体实施是在逆变器输出三电平下实施进行。

1) 级联 H 桥逆变器所生成的电压矢量构成了多电平空间矢量图，其中相邻电压矢量之间相互连线，构成了多个三角形，一个三角形的三个顶点上的电压矢量被称作最近三矢量（NTVs）。将直角坐标系（ $\alpha\beta$ 坐标系）形式下的三电平空间矢量图按照图 2 中虚线所示进行划分：

沿竖直轴方向（ β 轴方向）等间隔添加 $4n+1$ 条平行于水平轴方向的水平分割虚线，水平分割虚线平行于 α 轴方向，且中间的一条水平分割虚线与水平轴（ α 轴）重合，相邻水平分割虚线之间间距为 $\sqrt{3}/2$ 个单位长度；沿水平轴方向（ α 轴方向）等间隔添加 $8n-1$ 条平行于竖直轴方向的竖直分割虚线，竖直分割

虚线平行于 β 轴方向，且中间的一条竖直分割虚线与竖直轴（ β 轴）重合，相邻竖直分割虚线之间间距为 0.5 个单位长度。

其中， n 为级联 H 桥逆变器每一相所级联的 H 桥单元的个数；单位长度是指直角坐标系中从原点到坐标（1,0）或坐标（0,1）之间的距离；

水平分割虚线与竖直分割虚线把多电平空间矢量图划分为多个矩形，在每个矩形上都有两个电压矢量位于矩形顶点，这两个电压矢量之间的连线构成了矩形的一条对角线。根据矩形的对角线的不同将矩形分为两类：对角线与 α 轴正向方向之间夹角为 60 度的矩形定义为 A 类矩形，对角线与 α 轴正向方向之间夹角为 120 度的矩形定义为 B 类矩形。在图 2 中以深色代表 A 类矩形，浅色代表 B 类矩形，以示区分。根据矩形的边界，分别为水平轴量化因子 q_α 和竖直轴量化因子 q_β 分别为：

$$\begin{cases} q_\alpha = \text{floor}(V_{\text{ref}\alpha} / 0.5) \\ q_\beta = \text{floor}\left(V_{\text{ref}\beta} / \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $V_{\text{ref}\alpha}$ 和 $V_{\text{ref}\beta}$ 分别为参考矢量 V_{ref} 在直角坐标系的水平轴和竖直轴分量； $\text{floor}(\bullet)$ 表示向下取整函数；

接着通过以下公式的矩形判定系数判断获得参考矢量所处于的 A 类矩形还是 B 类矩形：

$$k_{\text{rec}} = \begin{cases} 0, & \text{当 } q_\alpha + q_\beta \text{ 为偶数} \\ 1, & \text{当 } q_\alpha + q_\beta \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (2)$$

式中， k_{rec} 为判定参考矢量所处矩形的矩形判定系数。判定条件如表 1 所示，当 k_{rec} 等于 0 或 1 时，参考矢量分别处于 A 类矩形或 B 类矩形中。

表 1

条件	k_{rec}		k_{recg}	
	0	1	≥ 0	< 0
位置	A	B	I	II

2) 根据矩形的对角线可将矩形进一步划分为 I 型区域和 II 型区域，对角线上方的区域为 I 型区域，对角线下方的区域为 II 型区域，且 I 型区域和 II 型区域分别组合成了上三角形与下三角形，如图 3 所示。对区域的判定可以通过下述方法实现。

在两类矩形中，将参考矢量 V_{ref} 分解为有效矢量 OP 和附加矢量 PS ：

$$V_{\text{ref}} = OP + PS \quad (3)$$

因此,由图 3 可知,在任一矩形中,判断参考矢量所处的区域可以等效为判断附加矢量 $\mathbf{PS}$ 所处的区域。并且在任一矩形中,其左下角端点的坐标表示为 $(q_\alpha/2, \sqrt{3}q_\beta/2)$,在 A 类矩形中,如图 3 左图所示,该坐标即为 P 点坐标;而在 B 类矩形中,如图 3 右图所示, P 点坐标应为 $((1+q_\alpha)/2, \sqrt{3}q_\beta/2)$ 。因此,根据 P 点坐标,附加矢量 $\mathbf{PS}$ 可表示为:

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = V_{\text{ref}\alpha} - \frac{1}{2}(q_\alpha + k_{\text{rec}}) \\ v_{s\beta} = V_{\text{ref}\beta} - \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta \end{cases} \quad (4)$$

式中, $v_{s\alpha}$ 、 $v_{s\beta}$ 分别为附加矢量 $\mathbf{PS}$ 在直角坐标系的水平轴和竖直轴 (α 和 β 轴) 分量。

对于 A 类矩形和 B 类矩形,分别计算系数:

$$k_A = \sqrt{3}v_{s\alpha} - v_{s\beta} \quad (5)$$

$$k_B = -\sqrt{3}v_{s\alpha} - v_{s\beta} \quad (6)$$

式中, k_A 、 k_B 分别是 A 类矩形和 B 类矩形中判断 I 型区域和 II 型区域的系数。当 k_A 、 k_B 大于 0 或小于 0 时,参考矢量分别处于 I 型区域或 II 型区域。

式(5)和式(6)可进一步整合计算区域判定系数:

$$k_{\text{reg}} = (-1)^{k_{\text{rec}}} \sqrt{3}v_{s\alpha} - v_{s\beta} \quad (7)$$

式中, k_{reg} 为判定参考矢量所处区域的区域判定系数。判定条件如表 1 所示, k_{reg} 等于 0 时,参考矢量处于 I 型区域和 II 型区域的边界,任意判定为 I 型区域或 II 型区域,对最后结果没有影响。

通过将多电平空间矢量图进行矩形划分,并根据上述位置判定方法,参考矢量在空间上任一点的位置都可以通过式(2)与式(7)定位在 A/B 矩形和 I/II 区域中。根据上述划分,参考矢量所处的位置有 AI、AII、BI 和 BII 四类。

3)以参考矢量处于 AI 位置为例,如图 3 左图所示, P 点的坐标可表示为 $(q_\alpha/2, \sqrt{3}q_\beta/2)$,即 $\mathbf{v}_3$ 的端点坐标。此时,根据最近三矢量位置关系就可求出 $\mathbf{v}_1$ 和 $\mathbf{v}_2$ 的端点坐标,其余位置的最近三矢量同理可求得。据此得到最近三矢量在 $\alpha\beta$ 坐标系下的坐标如表 2 所示。

表 2

	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_2$	$\mathbf{v}_3$
AI	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha + 1, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$

AII	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha+1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta+1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha-1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta+1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
BI	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha+1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta+1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha-1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
BII	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha+2), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta+1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta+1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha+1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$

在得到了最近三矢量坐标之后，通过选择零序分量并进行坐标变换，就可得到级联 H 桥逆变器的开关状态。

以上所有计算过程无迭代算法，因此计算量与电平数或调制度无关。

4) 根据伏秒平衡原则，在图 3 中的参考矢量 V_{ref} 可表示为

$$V_{\text{ref}} = d_1 \mathbf{OQ} + d_2 \mathbf{OR} + (1 - d_1 - d_2) \mathbf{OP} \quad (8)$$

式中， d_1 为矢量 $\mathbf{OQ}$ 对应的占空比； d_2 为矢量 $\mathbf{OR}$ 对应的占空比。

由图 3 中矢量位置的关系，式(8)可表示为：

$$\begin{aligned} V_{\text{ref}} &= \mathbf{OP} + d_1 (\mathbf{OQ} - \mathbf{OP}) + d_2 (\mathbf{OR} - \mathbf{OP}) \\ &= \mathbf{OP} + d_1 \mathbf{PQ} + d_2 \mathbf{PR} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(3)和式(9)得到最近三矢量占空比与附加矢量在相应三角形中占空比的等效性，进而求解附加矢量 $\mathbf{PS}$ 在相应三角形中的占空比。因此，参考矢量位于 AI 区域或 BI 区域位置时，最近三矢量占空比可表示为：

$$\begin{cases} d_1 = v_{s\alpha} - \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} + k_{\text{rec}} \\ d_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} v_{s\beta} \\ d_3 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中， d_1 、 d_2 、 d_3 分别为 v_1 、 v_2 和 v_3 的占空比。

同理，参考矢量位于 AII 区域或 BII 区域位置时，最近三矢量占空比表示为：

$$\begin{cases} d_1 = v_{s\alpha} + \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} \\ d_2 = \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} - v_{s\alpha} \\ d_3 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (11)$$

以上所有计算只涉及代数运算，而没有复杂的三角函数运算与扇区判断，

从而极大地减少了运算量。

实施例为了验证所提 SVPWM 算法的可行性，在 Matlab/Simulink 平台上进行仿真验证。仿真中，采样频率为 2.5kHz，阻感负载阻抗为 10Ω 。调制度为 0.9 时，不同 H 桥单元个数下的线电压 V_{AB} 仿真波形如图 4 所示。当级联 H 桥逆变器每一相级联 1 到 4 个 H 桥单元时，级联 H 桥逆变器的输出电平也从三电平上升到九电平，并且每个 H 桥单元所需直流电压也有所下降，分别为 200V、100V、66V 以及 50V。本发明中的方法适用于任意电平、任意调制度，即使电平数很多时依然具有良好的效果，具有很好的普适性。

权 利 要 求 书

1. 一种任意多电平的级联 H 桥逆变器空间矢量脉宽调制方法, 方法包括:

1) 由级联 H 桥逆变器所生成的电压矢量绘制直角坐标系下的多电平空间矢量图, 其中相邻电压矢量之间相互连线构成了多个三角形, 参考矢量处于多电平空间矢量图中; 其特征在于, 方法还包括如下步骤:

2) 将直角坐标系的多电平空间矢量图进行划分两类矩形, 并判断参考矢量处于哪类矩形中:

沿竖直轴方向等间隔添加 $4n+1$ 条平行于水平轴方向的水平分割虚线, 水平分割虚线平行于 α 轴方向, 且中间的一条水平分割虚线与水平轴重合, 相邻水平分割虚线之间间距为 $\sqrt{3}/2$ 个单位长度; 沿水平轴方向等间隔添加 $8n-1$ 条平行于竖直轴方向的竖直分割虚线, 竖直分割虚线平行于 β 轴方向, 且中间的一条竖直分割虚线与竖直轴重合, 相邻竖直分割虚线之间间距为 0.5 个单位长度; 其中, n 为级联 H 桥逆变器每一相所级联的 H 桥单元的个数; 单位长度是指直角坐标系中从原点到坐标 (1,0) 或坐标 (0,1) 之间的距离;

通过水平分割虚线与竖直分割虚线把多电平空间矢量图划分多个矩形, 在每个矩形上均有两个电压矢量位于角顶点, 该两个电压矢量之间的连线构成了矩形的一条对角线, 根据矩形对角线的不同将矩形分为两类: 对角线与 α 轴正向方向之间夹角为 60 度的矩形作为 A 类矩形, 对角线与 α 轴正向方向之间夹角为 120 度的矩形作为 B 类矩形; 最后根据 A 类矩形/B 类矩形的边界判断参考矢量处于 A 类矩形或 B 类矩形中;

3) 根据矩形的对角线将矩形进一步划分, 将矩形中对角线上方的区域为 I 型区域, 将矩形中对角线下方的区域为 II 型区域, 然后判断参考矢量处于 I 型区域或 II 型区域; 再根据 A 类/B 类矩形和 I 型/II 型区域的划分, 参考矢量所处的位置有 AI、AII、BI 和 BII 四类;

4) 根据参考矢量所处的位置得到最近三矢量在直角坐标系下的坐标, 之后通过选择零序分量并进行坐标变换得到级联 H 桥逆变器的开关状态;

5) 将参考矢量分解为有效矢量 **OP** 和附加矢量 **PS**, 处理获得参考矢量在不同位置时最近三矢量作用时间的占空比;

6) 由级联 H 桥逆变器的开关状态和最近三矢量作用时间的占空比合成所期望的参考矢量, 利用合成的参考矢量实现 SVPWM 调制。

2. 根据权利要求 1 所述的任意多电平的级联 H 桥逆变器空间矢量脉宽调制方法, 其特征在于: 所述步骤 2) 中, 在将直角坐标系的多电平空间矢量图进

行划分两类矩形后,判断参考矢量处于哪类矩形中具体为:

首先采用以下公式计算水平轴量化因子 q_α 和垂直轴量化因子 q_β 分别为:

$$\begin{cases} q_\alpha = \text{floor}(V_{\text{ref}\alpha} / 0.5) \\ q_\beta = \text{floor}\left(V_{\text{ref}\beta} / \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $V_{\text{ref}\alpha}$ 和 $V_{\text{ref}\beta}$ 分别为参考矢量 V_{ref} 在直角坐标系的水平轴和垂直轴分量; $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整函数;

接着通过以下公式判断获得参考矢量所处于的 A 类矩形还是 B 类矩形:

$$k_{\text{rec}} = \begin{cases} 0, & \text{当 } q_\alpha + q_\beta \text{ 为偶数} \\ 1, & \text{当 } q_\alpha + q_\beta \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_{rec} 为判定参考矢量所处矩形的矩形判定系数; 当 k_{rec} 等于 0 时, 参考矢量处于 A 类矩形中; 当 k_{rec} 等于 1 时, 参考矢量处于 B 类矩形中。

3. 根据权利要求 1 所述的任意多电平的级联 H 桥逆变器空间矢量脉宽调制方法, 其特征在于: 所述步骤 3) 中, 判断参考矢量处于 I 型区域或 II 型区域具体为:

参考矢量 V_{ref} 分解为有效矢量 OP 和附加矢量 PS 的合成, 附加矢量 PS 表示为:

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = V_{\text{ref}\alpha} - \frac{1}{2}(q_\alpha + k_{\text{rec}}) \\ v_{s\beta} = V_{\text{ref}\beta} - \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta \end{cases} \quad (3)$$

式中, $v_{s\alpha}$ 、 $v_{s\beta}$ 分别为附加矢量 PS 在直角坐标系的水平轴和垂直轴分量;

接着通过以下公式判断获得参考矢量所处于矩形中的 I 型区域还是 II 型区域:

$$k_{\text{reg}} = (-1)^{k_{\text{rec}}} \sqrt{3}v_{s\alpha} - v_{s\beta} \quad (4)$$

式中, k_{reg} 为判定参考矢量所处区域的区域判定系数; 当 k_{reg} 大于 0 时, 参考矢量处于 I 型区域; 当 k_{reg} 小于 0 时, 参考矢量处于 II 型区域; k_{reg} 等于 0 时, 参考矢量处于 I 型和 II 型区域的边界, 可任意判定为 I 型区域或 II 型区域。

4. 根据权利要求 1 所述的任意多电平的级联 H 桥逆变器空间矢量脉宽调制方法, 其特征在于: 所述步骤 4) 中, 按照如下表的对应关系, 根据参考矢量所处的位置获得最近三矢量在直角坐标系下的坐标:

	v_1	v_2	v_3
AI	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha + 1, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
AII	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha - 1), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
BI	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha - 1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$
BII	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 2), \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}q_\alpha, \frac{\sqrt{3}}{2}(q_\beta + 1)\right)$	$\left(\frac{1}{2}(q_\alpha + 1), \frac{\sqrt{3}}{2}q_\beta\right)$

其中, v_1 、 v_2 和 v_3 表示最近三矢量。

5. 根据权利要求 1 所述的任意多电平的级联 H 桥逆变器空间矢量脉宽调制方法, 其特征在于: 所述步骤 5) 中, 处理获得参考矢量在不同位置时最近三矢量作用时间的占空比, 具体为:

当参考矢量位于 AI 区域或 BI 区域的位置时, 采用以下公式获得最近三矢量的占空比:

$$\begin{cases} d_1 = v_{sa} - \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} + k_{rec} \\ d_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}v_{s\beta} \\ d_3 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (5)$$

当参考矢量位于 AII 区域或 BII 区域的位置时, 采用以下公式获得最近三矢量的占空比:

$$\begin{cases} d_1 = v_{sa} + \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} \\ d_2 = \frac{v_{s\beta}}{\sqrt{3}} - v_{sa} \\ d_3 = 1 - d_1 - d_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为最近三矢量 v_1 、 v_2 和 v_3 的占空比。

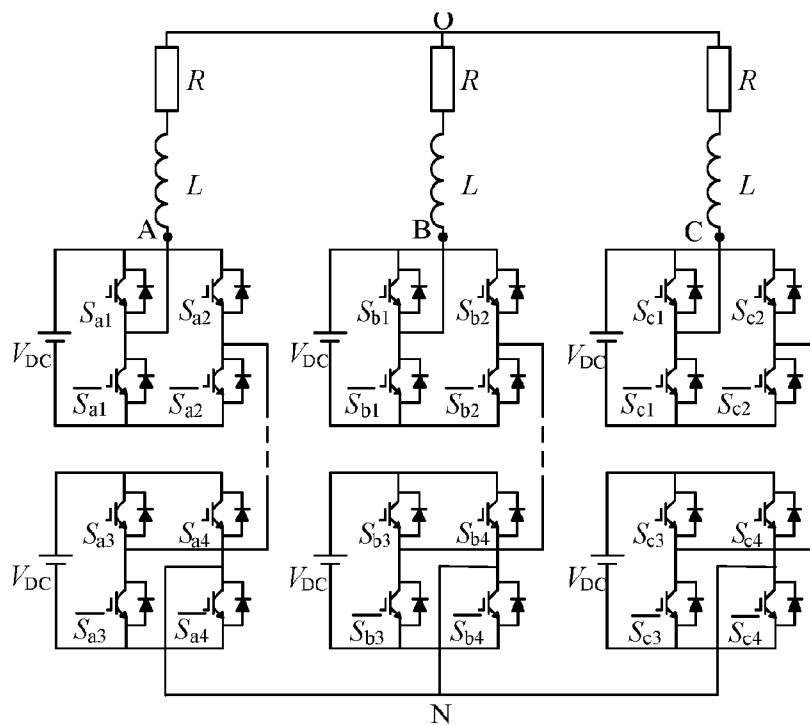


图 1

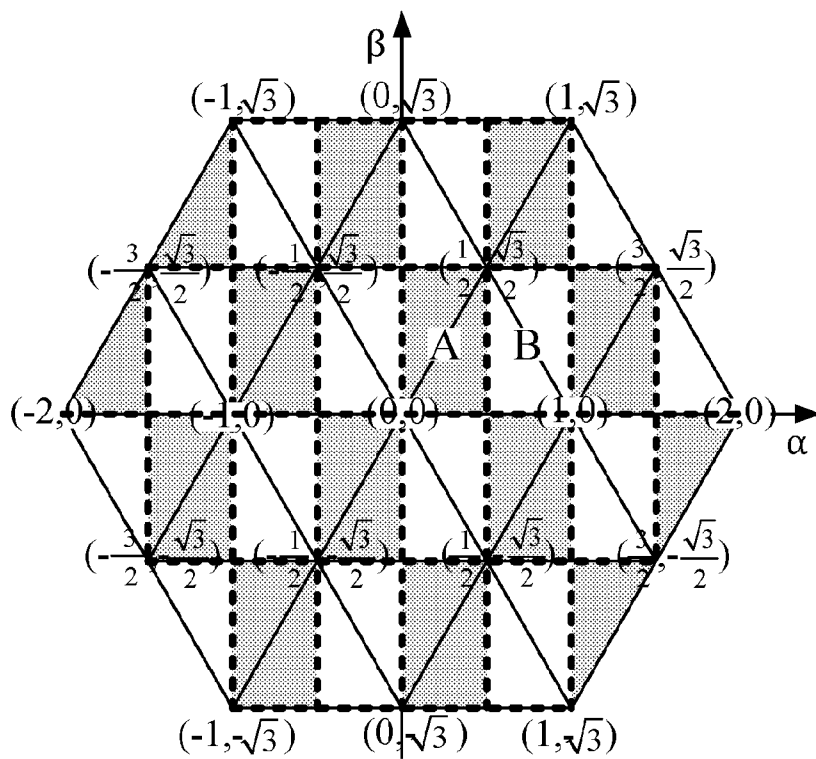


图 2

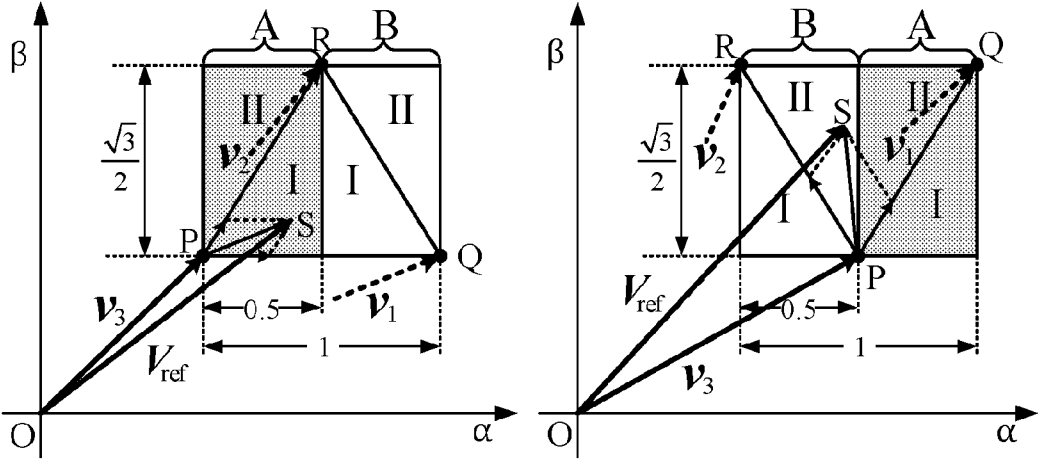


图 3

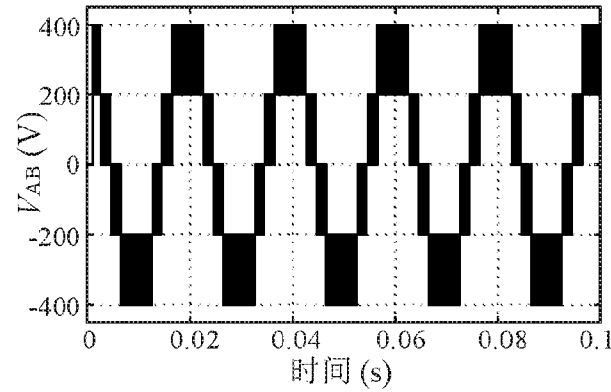


图 4a

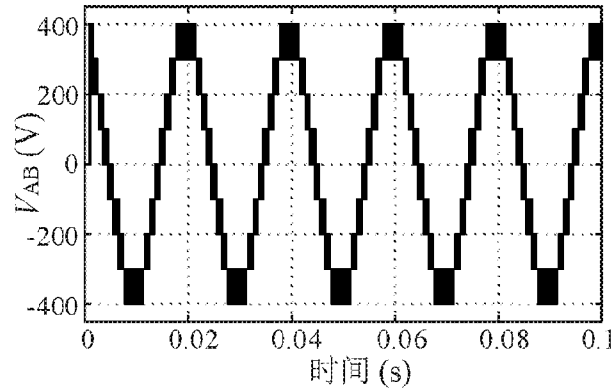


图 4b

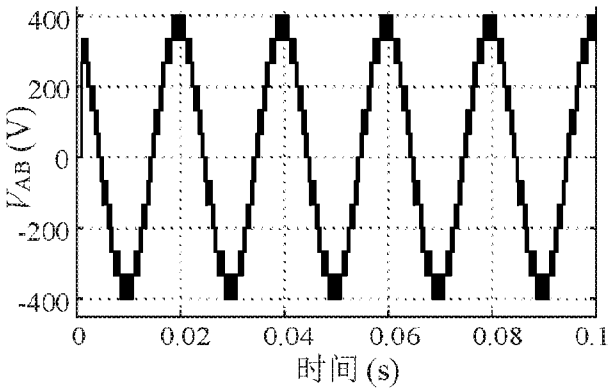


图 4c

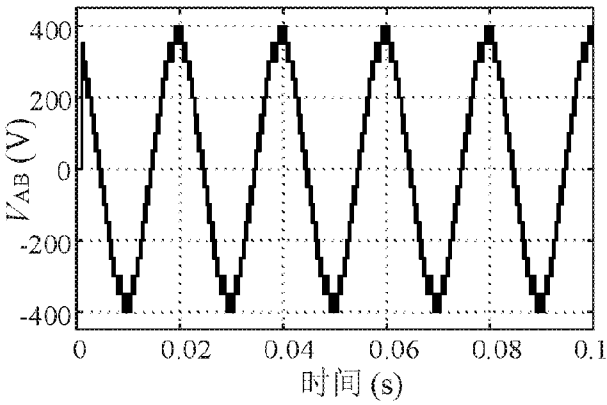


图 4d

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/091726

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02M 7/5387(2007.01)i; H02M 7/483(2007.01)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)

H02M

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, IEEE: 逆变器, 矢量脉宽调制, 脉冲宽度调制, 脉宽调制, 调制, 多电平, 任意电平, 矢量, 定位, 位置, 区域, 矩形, modulat+, inverter, width, voltage, cascade, pulse, pwm, multi, level

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110518822 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 29 November 2019 (2019-11-29) claims 1-5, description, paragraphs 0001-0095	1-5
A	CN 104753381 A (SOUTHWEST JIAOTONG UNIVERSITY) 01 July 2015 (2015-07-01) description, paragraphs 0007-0020, figures 4-5	1-5
A	US 2007139970 A1 (ADVANCED ENERGY CONVERSION, LLC) 21 June 2007 (2007-06-21) entire document	1-5
A	CN 1487658 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 07 April 2004 (2004-04-07) entire document	1-5
A	CN 104578867 A (CHINA UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY) 29 April 2015 (2015-04-29) entire document	1-5
A	WO 2015138744 A1 (QATAR FOUNDATION FOR EDUCATION SCIENCE AND COMMUNITY DEVELOPMENT) 17 September 2015 (2015-09-17) entire document	1-5



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

06 August 2020

Date of mailing of the international search report

24 August 2020

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/CN2020/091726

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2016099661 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, INC.) 07 April 2016 (2016-04-07) entire document	1-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/091726

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	110518822	A	29 November 2019	None			
CN	104753381	A	01 July 2015	None			
US	2007139970	A1	21 June 2007	US	7558089	B2	07 July 2009
CN	1487658	A	07 April 2004	None			
CN	104578867	A	29 April 2015	CN	104578867	B	11 July 2017
WO	2015138744	A1	17 September 2015	US	2017229871	A1	10 August 2017
				US	10027126	B2	17 July 2018
US	2016099661	A1	07 April 2016	JP	2016073199	A	09 May 2016
				US	9559610	B2	31 January 2017
				JP	6465782	B2	06 February 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/091726

A. 主题的分类

H02M 7/5387(2007.01)i; H02M 7/483(2007.01)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)

H02M

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, EPDOC, IEEE: 逆变器, 矢量脉宽调制, 脉冲宽度调制, 脉宽调制, 调制, 多电平, 任意电平, 矢量, 定位, 位置, 区域, 矩形, modulat+, inverter, width, voltage, cascade, pulse, pwm, multi, level

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 110518822 A (浙江大学) 2019年 11月 29日 (2019 - 11 - 29) 权利要求1-5, 说明书第0001-0095段	1-5
A	CN 104753381 A (西南交通大学) 2015年 7月 1日 (2015 - 07 - 01) 说明书第0007-0020段, 附图4-5	1-5
A	US 2007139970 A1 (ADVANCED ENERGY CONVERSION, LLC) 2007年 6月 21日 (2007 - 06 - 21) 全文	1-5
A	CN 1487658 A (清华大学) 2004年 4月 7日 (2004 - 04 - 07) 全文	1-5
A	CN 104578867 A (中国矿业大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 全文	1-5
A	WO 2015138744 A1 (QATAR FOUNDATION FOR EDUCATION SCIENCE AND COMMUNITY DEVELOPMENT) 2015年 9月 17日 (2015 - 09 - 17) 全文	1-5
A	US 2016099661 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, INC.) 2016年 4月 7日 (2016 - 04 - 07) 全文	1-5

☐ 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

2020年 8月 6日

国际检索报告邮寄日期

2020年 8月 24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

杨嘉

电话号码 86-(10)-53961443

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/091726

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	110518822	A	2019年 11月 29日	无			
CN	104753381	A	2015年 7月 1日	无			
US	2007139970	A1	2007年 6月 21日	US	7558089	B2	2009年 7月 7日
CN	1487658	A	2004年 4月 7日	无			
CN	104578867	A	2015年 4月 29日	CN	104578867	B	2017年 7月 11日
WO	2015138744	A1	2015年 9月 17日	US	2017229871	A1	2017年 8月 10日
				US	10027126	B2	2018年 7月 17日
US	2016099661	A1	2016年 4月 7日	JP	2016073199	A	2016年 5月 9日
				US	9559610	B2	2017年 1月 31日
				JP	6465782	B2	2019年 2月 6日