

(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
2017年8月3日 (03.08.2017)



(10) 国际公布号
WO 2017/128499 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02M 5/458 (2006.01) H02M 3/335 (2006.01)
H02M 7/537 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/076496
- (22) 国际申请日: 2016年3月16日 (16.03.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201610057330.3 2016年1月27日 (27.01.2016) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国江苏省南京市玄武区四牌楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。
- (72) 发明人: 赵剑锋 (ZHAO, Jianfeng); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。 李东野 (LI, Dongye); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。 季振东 (JI, Zhendong); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。 孙毅超 (SUN, Yichao); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼二号, Jiangsu 210096 (CN)。

- (74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO.,LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路179号12楼B座, Jiangsu 210005 (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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)。

[见续页]

(54) Title: FOUR-PORT POWER ELECTRONIC TRANSFORMER BASED ON HYBRID MODULAR MULTILEVEL CONVERTER

(54) 发明名称: 基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器

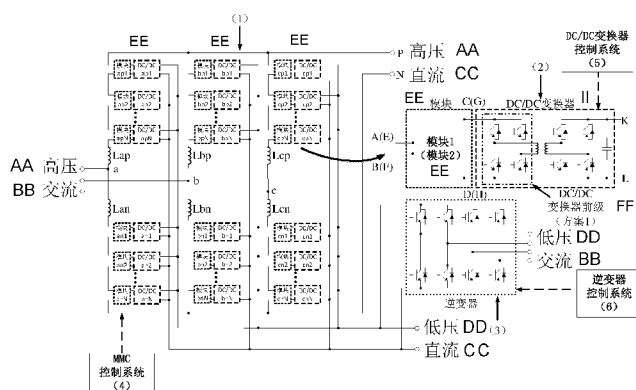


图 1

- (2) DC/DC converter
(3) Inverter
(4) MMC control system
(5) DC/DC converter control system
(6) Inverter control system
AA High-voltage
BB Alternating-current
CC Direct-current
DD Low-voltage
EE Module
FF Front stage of converter (solution 1)

(57) Abstract: A four-port power electronic transformer based on a hybrid modular multilevel converter, being constituted by a hybrid modular multilevel converter (MMC) (1), DC/DC converters (2) and an inverter (3). Each of the DC/DC converters comprises a preceding-stage part, a high frequency transformation part (T) and a succeeding-stage part. In the power electronic transformer structure, the MMC and the preceding-stage part of the DC/DC converter jointly complete direct-current fault ride-through, and the number of adopted devices is less; the MMC and the DC/DC converter respectively carry out direct-current voltage control and power control; and the voltage of one or two capacitors in the MMC can be controlled independently or simultaneously. The power electronic transformer structure is provided with four ports, namely, a high-voltage direct-current port, a high-voltage alternating-current port, a low-voltage direct-current port and a low-voltage alternating-current port, and is suitable for being applied to various kinds of multi-voltage-class high-voltage large-power occasions, particularly being applied to the energy Internet to be used as

an energy router and the like.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2017/128499 A1

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，由基于混合型模块化多电平变换器 (MMC) (1)、DC/DC 变换器 (2) 和逆变器 (3) 构成。每个 DC/DC 变换器包括前级部分、高频变压部分 (T) 和后级部分。在该电力电子变压器结构中，MMC 和 DC/DC 变换器前级部分共同完成直流故障穿越且所使用的器件少，MMC 与 DC/DC 变换器分别实施直流电压控制和功率控制，可对 MMC 中的单个电容电压单独控制或两个电容电压同时进行控制。该电力电子变压器结构具有高压直流、高压交流、低压直流和低压交流四个端口，适合应用于多种类多电压等级的高压大功率场合，特别是适用于能源互联网中，如作为能量路由器等。

说明书

基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器

技术领域

本发明涉及基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器。

背景技术

传统的多电平拓扑结构，如基于 H 桥级联的电力电子变压器，因为 H 桥级联结构本身都没有高压直流侧，所以该种电力电子变压器也没有高压直流端口。但是随着电力和能源需求的不断扩大，更高效、更节能的输电和用电技术也成为当今电力技术革新的重要方向，使得高压直流输电、直流配电网以及微网等领域逐渐进入大家研究的视野，从而出现了如 MMC 等相关技术，MMC 的出现使得高压直流相关应用变得更可实现和应用，也更符合直流相关技术的发展。基于 MMC 型的电力电子变压器具有了高压直流端口，使得其与高压直流电网的直接接入成为可能。但是最常见的基于半桥模块的 MMC 型电力电子变压器并不具有直流故障穿越能力，且所用器件较多，成本高昂，因此对其模块的改进是十分有必要的，否则可靠性很低，难以适应工程的实际应用。

发明内容

本发明要解决的技术问题是：现有的电子电力变压器结构复杂、成本高、谐波含量高、使用效果差、且无法满足多电源场合下的应用需求。

为解决上述技术问题，本发明采用的技术方案是：基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，包括混合型的模块化多电平变换器、DC/DC 变换器和逆变器；所述 DC/DC 变换器包括前级部分、高频变压部分和后级部分，前级部分的交流侧连接高频变压部分的原边，高频变压部分的副边连接后级部分的交流侧；所述逆变器为三相四桥臂逆变器；所述模块化多电平变换器为三相，每相两个桥臂，每个桥臂包括 X 个第一子模块、Y 个第二子模块和一个电感； $X+Y \geq N$ ，所述 N 为模块化多电平变换器正常工作时需要模块的最少数量；所述第一子模块包括两个串联的半桥结构，包含直流电容 C1、直流电容 C2，四个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T1、T2、T3 和 T4；所述 T1、T2、T3 和 T4 的集电极分别与各自的续流二

极管的阴极相连接, 所述 T1、T2、T3 和 T4 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接; 所述的 T1 的发射极和 T2 的集电极相连接并作为第一子模块的交流端口 A, T1 的集电极与 C1 的正极相连接并作为第一子模块的正极端口 C, T2 的发射极、C1 的负极、T4 的集电极和 C2 的正极相连接并作为第一子模块的端口 I, 所述的 T4 的发射极和 T3 的集电极相连接并作为第一子模块的交流端口 B, T3 的发射极与 C2 的负极相连接并作为第一子模块的负极端口 D; 所述第一子模块的正极端口 C、负极端口 D 分别与该模块直流侧所接 DC/DC 变换器前级的正极端口、负极端口相连接; 所述第二子模块包含直流电容 C3、直流电容 C4、五个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T5、T6、T7、T8 和 T9; 所述 T5、T6、T7、T8 和 T9 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接, 所述 T5、T6、T7、T8 和 T9 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接; 所述第二子模块中的 T5 的发射极和 T6 的集电极相连接作为第二子模块的交流端口 E, T5 的集电极与 C3 的正极相连接并作为第二子模块的正极端口 G, T6 的发射极、T9 的发射极与 C3 的负极相连接, T7 的发射极和 T8 的集电极相连接并作为第二子模块的交流端口 F, T7 的集电极、T9 的集电极与 C4 的正极相连接并作为第二子模块的端口 J, T8 的发射极与 C4 的负极相连接并作为第二子模块的负极端口 H; 所述第二子模块的正极端口 G、负极端口 H 分别与该模块直流侧所接 DC/DC 变换器前级的正极端口、负极端口相连接; 不考虑冗余情况时, $X+Y=N$, $(2X+2Y) V_c=V_{dc}$, $v_m=(2X+2Y) V_c$, 其中 V_{dc} 为高压直流侧电压, V_c 为每个直流电容电压, v_m 为高压交流侧相电压幅值, 考虑冗余情况时, $X+Y \geq N$; 当模块化多电

平变换器具有直流故障穿越能力且不考虑冗余的情况, $\frac{\sqrt{3}}{2}(2X+2Y) \leq 4Y$; 同一相内, X 个第一子模块、Y 个第二子模块和电感依次串联构成该相上桥臂, 电感、Y 个第二子模块和 X 个第一子模块依次串联构成该相下桥臂, 同相内的上桥臂和下桥臂连接的中点为该相电力电子变压器的高压交流接口; 三个上桥臂的正极端连接在一起作为电力电子变压器的高压直流端口的正极 P, 三个下桥臂的负极端连接在一起作为电力电子变压器的高压直流端口的负极 N, 每个第一子模块和第二子模块的直流侧均与 DC/DC 变换器的前级相连; 所述模块化多电平变换器中的各个子模块直流侧均各自连接一个 DC/DC 变换器, 每个 DC/DC 变换器的前级直流侧与模块化多电平变换器中每个模块串联的直流电容的正、负极相连接, 所有 DC/DC 变换器的后级直流侧的正、负极分别并联后与逆变器的直流侧的正、负极相连接。

所述冗余状态是指在满足正常运行状态的情况下设置多余的第一或第二子模

块，以备在有使用中的第一或第二子模块出现故障的时候有能够及时替换的第一或第二子模块，其中多余的第一子模块可以替换故障的第一子模块，多余的第二子模块可以替换故障的第一或第二子模块。

进一步，所述 DC/DC 变换器的高频变压部分是一个高频变压器 T，后级部分由一个 H 桥电路和一个直流电容组成。

进一步，所述 DC/DC 变换器的前级部分采用全桥结构，第一子模块的端口 I 和第二子模块的端口 J 不使用。

进一步，所述 DC/DC 变换器的前级部分采用改进型二极管钳位结构，包括五个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13、T14 和两个二极管 D1、D2，T10 的集电极与第一子模块的 C 端或第二子模块的 G 端相连接，T10 的发射极、D1 的阴极与 T11 的集电极相连接，D1 的阳极、T14 的发射极、D2 的阴极与变压器 T 的一端相连接，T14 的集电极与第一子模块的 I 端或第二子模块的 J 端相连接，T11 的发射极与 T12 的集电极和高频变压器 T 的另一端相连接，T12 的发射极与 D2 的阳极、T13 的集电极相连接，T13 的发射极与第一子模块的 D 端或第二子模块的 H 端相连接，其中，在电力电子变压器正常工作时，T14 一直处于导通的状态；电力电子变压器发生高压侧直流故障时，T14 的触发信号被封锁；所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13 和 T14 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接，所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13 和 T14 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接。

进一步，所述 DC/DC 变换器的前级部分采用改进型 T 型三电平结构，包括三个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T15、T16、T19 和一个由 T17 和 T18 组成的反向阻断绝缘栅双极型晶体管，T15 的集电极和第一子模块的 C 端或第二子模块的 G 端相连接，T15 的发射极、T16 的集电极、T17 的集电极、T18 的发射极与高频变压器 T 的一端相连接，T17 的发射极、T18 的集电极、T19 的发射极与高频变压器 T 的另一端相连接，T19 的集电极与第一子模块的 I 端或第二子模块的 J 端相连接，T16 的发射极与第一子模块的 D 端或第二子模块的 H 端相连接；所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T15、T16、T17、T18 和 T19 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接，所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T15、T16、T17、T18 和 T19 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接；其中 T19 在电力电子变压器正常工作时一直处于导通的状态，发生高压侧直流故障时 T19 的触发信

号被封锁。

进一步，模块化多电平变换器的调制比 $m \leq 2$ ， $m = 2V_m/V_{dc}$ 。这样取值的优点是使第一子模块的充放电时间可以满足电压平衡的要求。

本发明的优点是：本发明的基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，除了具备传统基于混合型模块化多电平变换器的电力电子变压器功能和优点外，相对于目前国内外所提出的设计方案，还具有如下的功能和特点：

1. 本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器具有四个端口，分别是高压直流端口，高压交流端口，低压直流端口和低压交流端口，较以往电力电子变压器所多出的高压直流端口，可以使该电力电子变压器直接与高压直流电网相连接，与高压直流输、配电网、微电网以及能源互联网的发展和建设相适应，适用于多电压种类和等级的高压大功率场合。

2. 本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器可以通过改变使用第一子模块和第二子模块的数量来达到调整故障穿越能力，第二子模块的数量越多，直流故障穿越能力越强，在高压直流侧出现短路故障时只需封锁所有绝缘栅双极型晶体管和反向阻断绝缘栅双极型晶体管的触发信号即可，由 MMC 中第二子模块和所接 DC/DC 电路前级共同完成直流故障穿越且所使用的器件少，充分利用了开关器件，节约了硬件成本，控制方式简单，安全，可以适应不同应用场合的需要。

3. 本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器可以直接使用传统模块化多电平变换器的所有调制和控制方法，只需在正常工作时将所有第二子模块中的绝缘栅双极型晶体管 T9 导通，而在出现短路故障时封锁触发信号；第一子模块和第二子模块中的两个直流电容电压可以同时控制，也可以分别控制任意一个电容的电压，调制和电压平衡策略选择较多，可以适用于不同应用场合。

4. 本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器中的 DC/DC 变换器与第一子模块和第二子模块的两个直流电容连接减少了所需要的 DC/DC 变换器的数量，降低了器件使用的数量，降低了控制的复杂性。

5. 本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，其特征在于第一子模块和第二子模块承担电容电压控制，DC/DC 变换器承担功率控制，电压和功率控制功能的分离使得控制易于实现。

6. 本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，其特征在于发生直流短路故障时，所有开关器件封锁后，当各桥臂电流正向流入第二子模块时流经 T9 的反并联二极管，而当各桥臂电流反向流入第二子模块后，流经 DC-DC

模块的前级开关器件的二极管, 从而进行故障清除, 充分利用了开关器件, 节约了硬件成本。

7. 本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器, 其特征在于 DC/DC 变换器的前级提出了 H 桥、二极管钳位和 T 型三电平电路共三种方案, 为工程实践根据不同要求提供了更多选择, 较现有电力电子变压器方案可具有提高输出波形质量, 降低通态损耗, 增大直流电压利用率等优点。

附图说明

图 1 表示基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器的整体原理框图。

图 2 是第一子模块的原理框图。

图 3 是第二子模块的原理框图。

图 4 是 DC/DC 前级部分原理框图 (方案 2)。

图 5 是 DC/DC 前级部分原理框图 (方案 3)。

图 6 是模块化多电平变换器每一相的控制电路示意图。

图 7 是 DC/DC 变换器控制电路示意图。

图 8 是低压侧逆变器控制电路示意图。

以上的图中有: 第一子模块中的直流电容 C1、C2, 带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T1、T2、T3, T4, 第一子模块中的交流端口 A、第一子模块中的交流端口 B、第一子模块中的正极端口 C、第一子模块中的负极端口 D、第一子模块中的端口 I, 第二子模块中的直流电容 C3、C4, 带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T5、T6、T7、T8、T9, 第二子模块中的交流端口 E、第二子模块中的交流端口 F、第二子模块中的正极端口 G、第二子模块中的负极端口 H、第二子模块中的端口 J, 每个桥臂含有第一子模块的个数 X、每个桥臂含有第二子模块的个数 Y、a 相上桥臂电感 L_{ap} 、a 相下桥臂电感 L_{an} 、b 相上桥臂电感 L_{bp} 、b 相下桥臂电感 L_{bn} 、c 相上桥臂电感 L_{cp} 、c 相下桥臂电感 L_{cn} 、公共直流母线侧的正极 P、公共直流母线侧的负极 N、交流侧 A 相端口 a、交流侧 B 相端口 b、交流侧 C 相端口 c、低压直流正极端口 K, 低压直流负极端口 L。DC/DC 前级部分第二种方案的四个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13 和两个二极管 D1、D2, 第三种方案的两个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T14、T15 和一个反向阻断绝缘栅双极型晶体管 T16 (T17), 高频变压器 T。

具体实施方式

下面对本发明技术方案进行详细说明，但是本发明的保护范围不局限于所述实施例。

实施例：如图 1-3 所示，本发明基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器由混合型的模块化多电平变换器 (Modular Multilevel Converter, MMC)、DC/DC 变换器、逆变器构成，每个 MMC 中的子模块直流侧都各自连接一个 DC/DC 变换器，每个 DC/DC 变换器的前级直流侧与模块化多电平变换器中每个模块串联的直流电容的正、负极相连接，所有 DC/DC 变换器的后级直流侧的正、负极分别并联后与逆变器的直流侧的正、负极相连接。逆变器为三相四桥臂逆变器。

本发明模块化多电平变换器中的子模块有两种，分别为第一子模块和第二子模块。第一子模块包含直流电容 C1、直流电容 C2、4 个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T1、T2、T3 和 T4。第二子模块包含直流电容 C3、直流电容 C4、5 个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T5、T6、T7、T8 和 T9。所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8 和 T9 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接，所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8 和 T9 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接。第一子模块是两个半桥结构的串联，即所述的 T1 的发射极和 T2 的集电极相连接并作为第一子模块的交流端口 A，T1 的集电极与 C1 的正极相连接并作为第一子模块的正极端口 C，T2 的发射极、C1 的负极、T4 的集电极和 C2 的正极相连接并作为第一子模块的端口 I，所述的 T4 的发射极和 T3 的集电极相连接并作为第一子模块的交流端口 B，T3 的发射极与 C2 的负极相连接并作为第一子模块的负极端口 D，所述第一子模块的正极端口 C、负极端口 D 分别与该模块直流侧所接 DC/DC 变换器前级的正极端口、负极端口相连接。第二子模块中所述的 T5 的发射极和 T6 的集电极相连接作为第二子模块的交流端口 E，T5 的集电极与 C3 的正极相连接并作为第二子模块的正极端口 G，T6 的发射极、T9 的发射极与 C3 的负极相连接，T7 的发射极和 T8 的集电极相连接并作为第二子模块的交流端口 F，T7 的集电极、T9 的集电极与 C4 的正极相连接并作为第二子模块的端口 J，T8 的发射极与 C4 的负极相连接并作为第二子模块的负极端口 H，所述第二子模块的正极端口 G、负极端口 H 分别与该模块直流侧所接 DC/DC 变换器前级的正极端口、负极端口相连接。模块化多电平变换器由两种模块和六个电感组成，电感分别是 Lap、Lan、Lbp、Lbn、Lcp、

Lcn。X 个第一子模块、Y 个第二子模块和电感 Lap 依次串联构成模块化多电平变换器的 A 相上桥臂，电感 Lan、Y 个第二子模块和 X 个第一子模块依次串联构成模块化多电平变换器的 A 相下桥臂；X 个第一子模块、Y 个第二子模块和电感 Lbp 依次串联构成模块化多电平变换器的 B 相上桥臂，电感 Lbn、Y 个第二子模块和 X 个第一子模块依次串联构成模块化多电平变换器的 B 相下桥臂；X 个第一子模块、Y 个第二子模块和电感 Lcp 依次串联构成模块化多电平变换器的 C 相上桥臂，电感 Lcn、Y 个第二子模块和 X 个第一子模块依次串联构成模块化多电平变换器的 C 相下桥臂。每个第一子模块的 C、D 端和第二子模块的 G、H 端分别和各自模块直流侧所连接的 DC/DC 变换器的前级 C (G)，D (H) 端相连。每个桥臂一共含有 N 个模块，其中共含有 2N 个直流电容，X 个第一子模块和 Y 个第二子模块，为保证该电力电子变压器的正常工作且不考虑第二子模块工作在负电压的情况，X 和 Y 满足以下关系： $X+Y=N$ ， $(2X+2Y)V_c=V_{dc}$ ， $v_m=(2X+2Y)V_c$ 其中 V_{dc} 为高压直流侧电压， V_c 为每个直流电容电压， v_m 为高压交流侧相电压幅值，考虑冗余情况则需满足 $X+Y \geq N$ 。

基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，假设每个模块中的直流电容电压相等，则模块化多电平变换器具有直流故障穿越能力且不考虑第二子

模块工作在负电压和冗余的情况，X 和 Y 满足以下关系：
$$\frac{\sqrt{3}}{2}(2X+2Y) \leq 4Y$$
；

在高压直流侧出现短路故障时只需封锁绝缘栅双极型晶体管和反向阻断绝缘栅双极型晶体管的触发信号即可，此时，当各桥臂电流正向流入第二子模块时流经 T9 的反并联二极管，而当各桥臂电流反向流入第二子模块后，流经 DC/DC 模块的前级开关器件的反并联二极管，从而进行故障清除，充分利用了开关器件，节约了硬件成本。

为了使第一子模块的充放电时间可以满足电压平衡的要求，则模块化多电平变换器的调制比 $m \leq 2$ ， $m=2v_m/V_{dc}$ 。

如图 4-5 所示，本发明每一个 DC/DC 变换器分为前级部分、高频变压部分、后级部分，其中前级部分共提出了三种方案，可根据不同应用场合进行选择，高频变压部分是一个高频变压器 T，后级部分由一个 H 桥电路和一个直流电容组成。DC/DC 前级部分的第一种方案采用全桥结构，该方案中第一子模块的端口 I 和第二子模块的端口 J 不使用，第二种方案采用改进型二极管钳位结构，第三种方案采用改进型 T 型三电平结构。第二种方案包含五个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13、T14 和两个二极管 D1、D2，T10 的集电极与第一子模块的 C

端或第二子模块的 G 端相连接, T10 的发射极、D1 的阴极与 T11 的集电极相连接, D1 的阳极、T14 的发射极、D2 的阴极与变压器 T 的一端相连接, T14 的集电极与第一子模块的 I 端或第二子模块的 J 端相连接, T11 的发射极与 T12 的集电极和高压变压器 T 的另一端相连接, T12 的发射极与 D2 的阳极、T13 的集电极相连接, T13 的发射极与第一子模块的 D 端或第二子模块的 H 端相连接, 其中 T14 在电力电子变压器正常工作时一直处于导通的状态, 发生高压侧直流故障时 T14 的触发信号被封锁。第三种方案包含三个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T15、T16、T19 和一个反向阻断绝缘栅双极型晶体管 T17 (T18), T15 的集电极和第一子模块的 C 端或第二子模块的 G 端相连接, T15 的发射极、T16 的集电极、T17 的集电极、T18 的发射极与高频变压器 T 的一端相连接, T17 的发射极、T18 的集电极、T19 的发射极与高频变压器 T 的另一端相连接, T19 的集电极与第一子模块的 I 端或第二子模块的 J 端相连接, T16 的发射极与第一子模块的 D 端或第二子模块的 H 端相连接。所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13、T14、T15、T16 和 T19 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接, 所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13、T14、T15、T16 和 T19 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接, 其中 T19 在电力电子变压器正常工作时一直处于导通的状态, 发生高压侧直流故障时 T19 的触发信号被封锁。

如图 6 所示, 以单个电容电压的控制为例, 模块化多电平变换器由环流抑制和模块电容电压控制电路来控制模块化多电平变换器的环流和模块电容电压, 每相的控制电路相同。以 a 相为例, 首先, 测量并采集 a 相上每一个电容的电压值 $v_{cap1} - v_{ap} (2X+2Y)$ 以及 $v_{can1} - v_{an} (2X+2Y)$, 然后求这些电压值的平均值 v_{ave} , 通过电压环的 PI 调节后, 与测量得到的环流 i_{za} 进行比较, 比较的差值经过电流环的 PI 调节后作为平均电压的调制信号分量 v_{aA} , 每一个电容实际测量的电压值与设定值的 v_{c*} 的差值经过 PI 调节后, 根据电容所在的桥臂电流的方向来决定是对模块进行充电还是放电而产生调制信号分量, 如第一个模块中第一个半桥模块的调制分量 v_{aBp1} , 根据 v_{aA} , v_{aBp1} , 模块所在桥臂的直流和交流信号参考量来产生调制信号, 从而产生每个模块所需的 PWM 信号。

如图 7 所示, DC/DC 变换器由分级独立控制下的直流输出级并联均流控制电路进行控制, 主要控制该电力电子变压器的功率流动, 引入一个电压外环和 $12 (X+Y)$ 个电流内环。DC/DC 变换器并联输出侧的实际值 U_{dc2} 与输出直流电压指令值 U_{dc*} 的差值经过 PI 调节后得到各个 DAB 变换器输出电流的指令值 I^* 。由于各 DC/DC 变

换器的实际输出电流 $i_{ox1}, \dots, i_{ox(12X+12Y)}$ 中含有高频分量, 需要使用低通滤波器滤除后得到其平均值 $I_{ox1}, \dots, I_{ox(12X+12Y)}$ 。最终, 实际平均输出电流与指令输出电流的差值通过 PI 调节后得出各 DC/DC 变换器的原、副边模块之间的移相比 $dx1, \dots, dx(12X+12Y)$, 根据各 DC/DC 变换器前级的不同方案以及不同的工程需要, 调制方式可能不同。

如图 8 所示该电力电子变压器低压侧的逆变器由基于对称分量法和电流解耦的控制电路进行控制, 主要控制该电力电子变压器低压交流端口的输出。主要工作原理为将低压侧逆变器交流侧负载的电压和电流分别分解为正序, 负序和零序分量, 然后分别对电压和电流的正序分量和负序分量进行 PARK 变换, 其中变换后的电压 D, Q 部分分别与给定值进行比较, 所得结果经过 PI 调节后分别与相应的电流 D, Q 部分相加, 所得结果再进行正序分量的反 PARK 变换以及负序分量的反 PARK 变换, 变换结果相加后作为调制信号, 经过调制算法产生驱动控制信号。

权利要求书

1. 基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，其特征在于：包括混合型的模块化多电平变换器、DC/DC 变换器和逆变器；

所述 DC/DC 变换器包括前级部分、高频变压部分和后级部分，前级部分的交流侧连接高频变压部分的原边，高频变压部分的副边连接后级部分的交流侧；

所述逆变器为三相四桥臂逆变器；

所述模块化多电平变换器为三相，每相两个桥臂，每个桥臂包括 X 个第一子模块、Y 个第二子模块和一个电感； $X+Y \geq N$ ，所述 N 为模块化多电平变换器正常工作时需要模块的最少数量；

所述第一子模块包括两个串联的半桥结构，包含直流电容 C1、直流电容 C2，四个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T1、T2、T3 和 T4；

所述 T1、T2、T3 和 T4 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接，所述 T1、T2、T3 和 T4 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接；

所述的 T1 的发射极和 T2 的集电极相连接并作为第一子模块的交流端口 A，T1 的集电极与 C1 的正极相连接并作为第一子模块的正极端口 C，T2 的发射极、C1 的负极、T4 的集电极和 C2 的正极相连接并作为第一子模块的端口 I，所述的 T4 的发射极和 T3 的集电极相连接并作为第一子模块的交流端口 B，T3 的发射极与 C2 的负极相连接并作为第一子模块的负极端口 D；所述第一子模块的正极端口 C、负极端口 D 分别与该模块直流侧所接 DC/DC 变换器前级的正极端口、负极端口相连接；

所述第二子模块包含直流电容 C3、直流电容 C4、五个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T5、T6、T7、T8 和 T9；

所述 T5、T6、T7、T8 和 T9 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接，所述 T5、T6、T7、T8 和 T9 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接；

所述第二子模块中的 T5 的发射极和 T6 的集电极相连接作为第二子模块的交流端口 E，T5 的集电极与 C3 的正极相连接并作为第二子模块的正极端口 G，T6 的发射极、T9 的发射极与 C3 的负极相连接，T7 的发射极和 T8 的集电极相连接并作为第二子模块的交流端口 F，T7 的集电极、T9 的集电极与 C4 的正极相连接并作为第二子模块的端口 J，T8 的发射极与 C4 的负极相连接并作为第二子模块的负极端口 H；所述第二子模块的正极端口 G、负极端口 H 分别与该模块直流侧所接 DC/DC 变换器前

级的正极端口、负极端口相连接；

不考虑冗余情况时， $X+Y=N$ ， $(2X+2Y)V_c=V_{dc}$ ， $v_m=(2X+2Y)V_c$ ，其中 V_{dc} 为高压直流侧电压， V_c 为每个直流电容电压， v_m 为高压交流侧相电压幅值，考虑冗余情况时， $X+Y \geq N$ ；当模块化多电平变换器具有直流故障穿越能力且不考虑冗余的情

况， $\frac{\sqrt{3}}{2}(2X+2Y) \leq 4Y$ ；

同一相内， X 个第一子模块、 Y 个第二子模块和电感依次串联构成该相上桥臂，电感、 Y 个第二子模块和 X 个第一子模块依次串联构成该相下桥臂，同相内的上桥臂和下桥臂连接的中点为该相电力电子变压器的高压交流接口；

三个上桥臂的正极端连接在一起作为电力电子变压器的高压直流端口的正极 P ，三个下桥臂的负极端连接在一起作为电力电子变压器的高压直流端口的负极 N ，每个第一子模块和第二子模块的直流侧均与 DC/DC 变换器的前级相连；

所述模块化多电平变换器中的各个子模块直流侧均各自连接一个 DC/DC 变换器，每个 DC/DC 变换器的前级直流侧与模块化多电平变换器中每个模块串联的直流电容的正、负极相连接，所有 DC/DC 变换器的后级直流侧的正、负极分别并联后与逆变器的直流侧的正、负极相连接。

2. 根据权利要求 1 所述的基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，其特征在于：所述 DC/DC 变换器的高频变压部分是一个高频变压器 T ，后级部分由一个 H 桥电路和一个直流电容组成。

3. 根据权利要求 1 所述的基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，其特征在于：所述 DC/DC 变换器的前级部分采用全桥结构，与第一子模块连接的 DC/DC 变换器的前级部分的直流侧接第一子模块的端口 C 和端口 D 端口，与第二子模块连接的 DC/DC 变换器的前级部分的直流侧接第二子模块的端口 G 和端口 H。

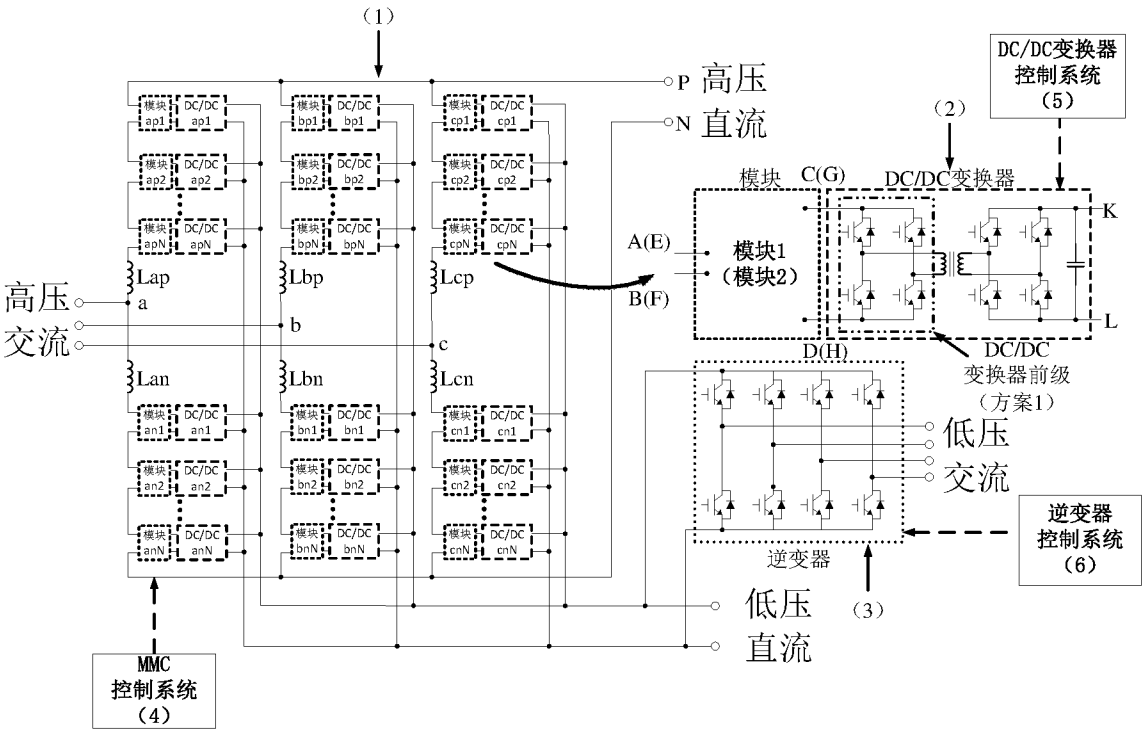
4. 根据权利要求 1 所述的基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器，其特征在于：所述 DC/DC 变换器的前级部分采用改进型二极管钳位结构，包括五个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T_{10} 、 T_{11} 、 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{14} 和两个二极管 D_1 、 D_2 ， T_{10} 的集电极与第一子模块的 C 端或第二子模块的 G 端相连接， T_{10} 的发射极、 D_1 的阴极与 T_{11} 的集电极相连接， D_1 的阳极、 T_{14} 的发射极、 D_2 的阴极

与变压器 T 的一端相连接, T14 的集电极与第一子模块的 I 端或第二子模块的 J 端相连接, T11 的发射极与 T12 的集电极和高频变压器 T 的另一端相连接, T12 的发射极与 D2 的阳极、T13 的集电极相连接, T13 的发射极与第一子模块的 D 端或第二子模块的 H 端相连接, 其中, 在电力电子变压器正常工作时, T14 一直处于导通的状态; 电力电子变压器发生高压侧直流故障时, T14 的触发信号被封锁; 所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13 和 T14 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接, 所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T10、T11、T12、T13 和 T14 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接。

5. 根据权利要求 2 所述的基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器, 其特征在于: 所述 DC/DC 变换器的前级部分采用改进型 T 型三电平结构, 包括三个带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T15、T16、T19 和一个由 T17 和 T18 组成的反向阻断绝缘栅双极型晶体管, T15 的集电极和第一子模块的 C 端或第二子模块的 G 端相连接, T15 的发射极、T16 的集电极、T17 的集电极、T18 的发射极与高频变压器 T 的一端相连接, T17 的发射极、T18 的集电极、T19 的发射极与高频变压器 T 的另一端相连接, T19 的集电极与第一子模块的 I 端或第二子模块的 J 端相连接, T16 的发射极与第一子模块的 D 端或第二子模块的 H 端相连接; 所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T15、T16、T17、T18 和 T19 的集电极分别与各自的续流二极管的阴极相连接, 所述的带有反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 T15、T16、T17、T18 和 T19 的发射极分别与各自的续流二极管的阳极相连接; 其中 T19 在电力电子变压器正常工作时一直处于导通的状态, 发生高压侧直流故障时 T19 的触发信号被封锁。

6. 根据权利要求 1 所述的基于混合型模块化多电平变换器的四端口电力电子变压器, 其特征在于: 模块化多电平变换器的调制比 $m \leq 2$, $m = 2v_m / V_{dc}$ 。

说明书附图



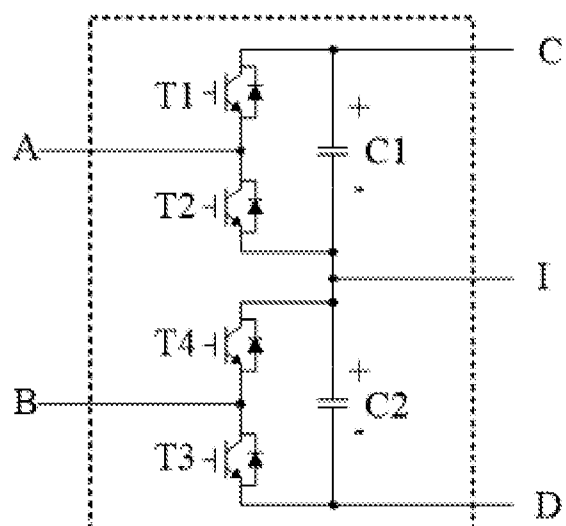


图 2

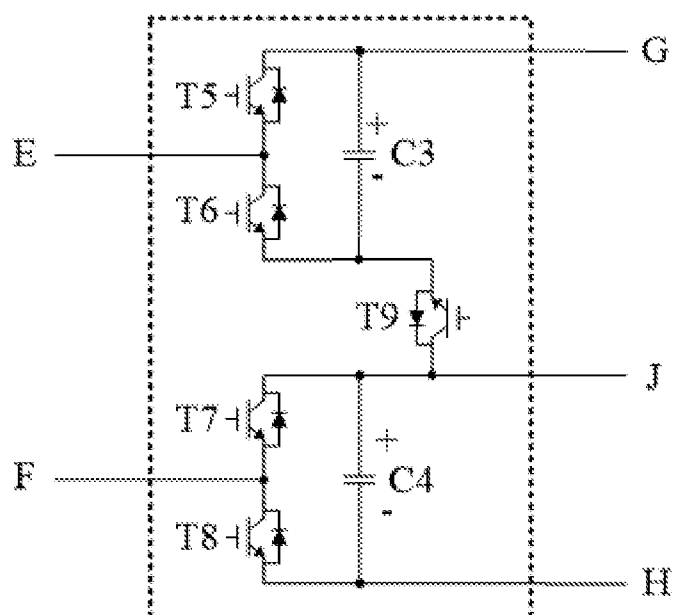


图 3

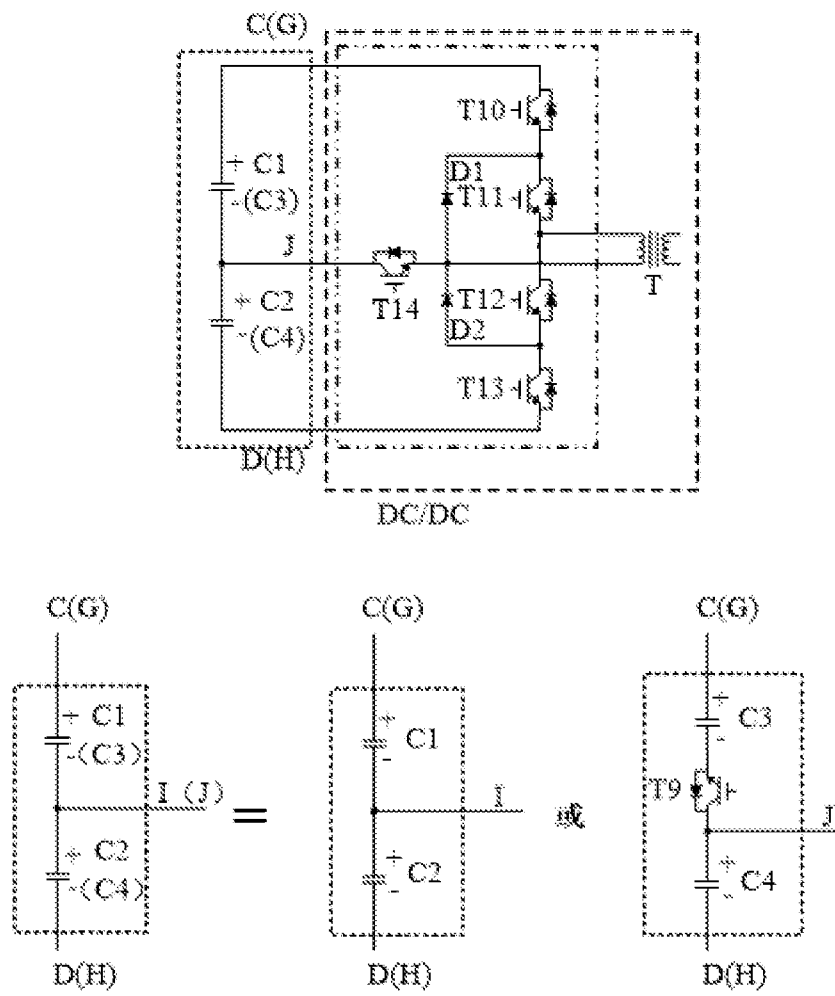


图 4

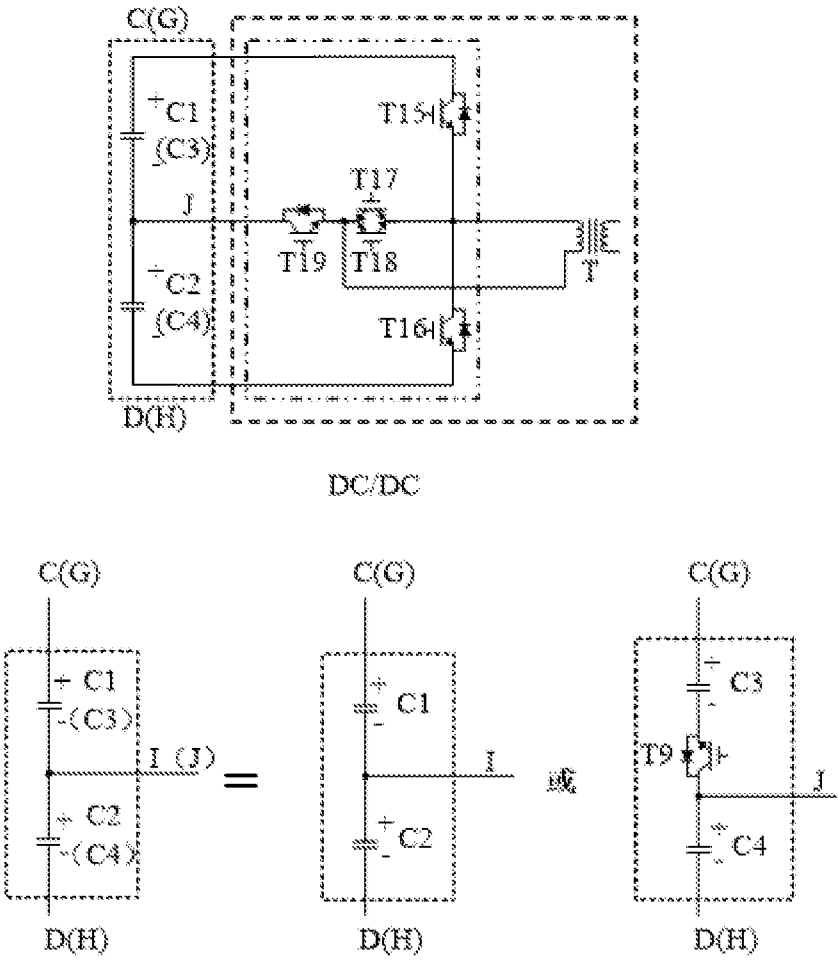


图 5

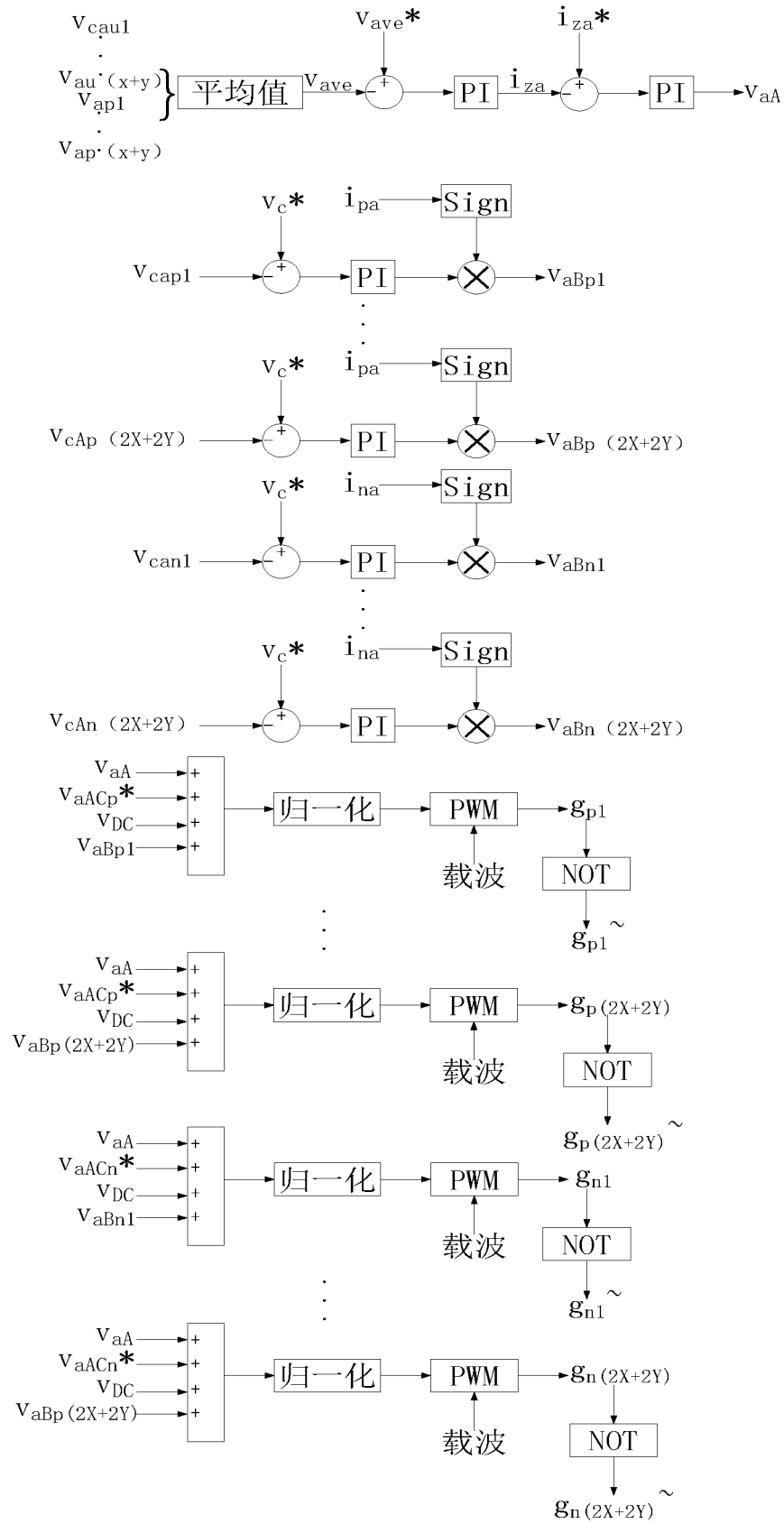


图 6

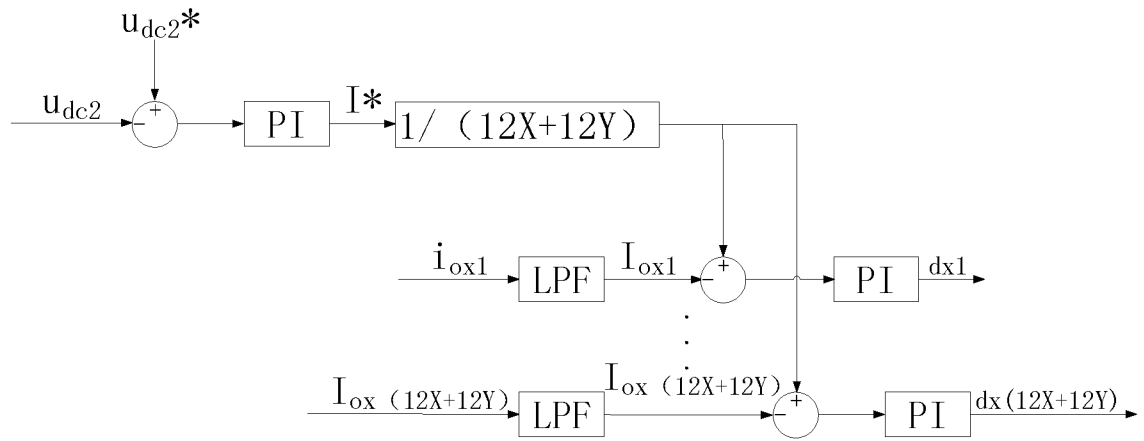


图 7

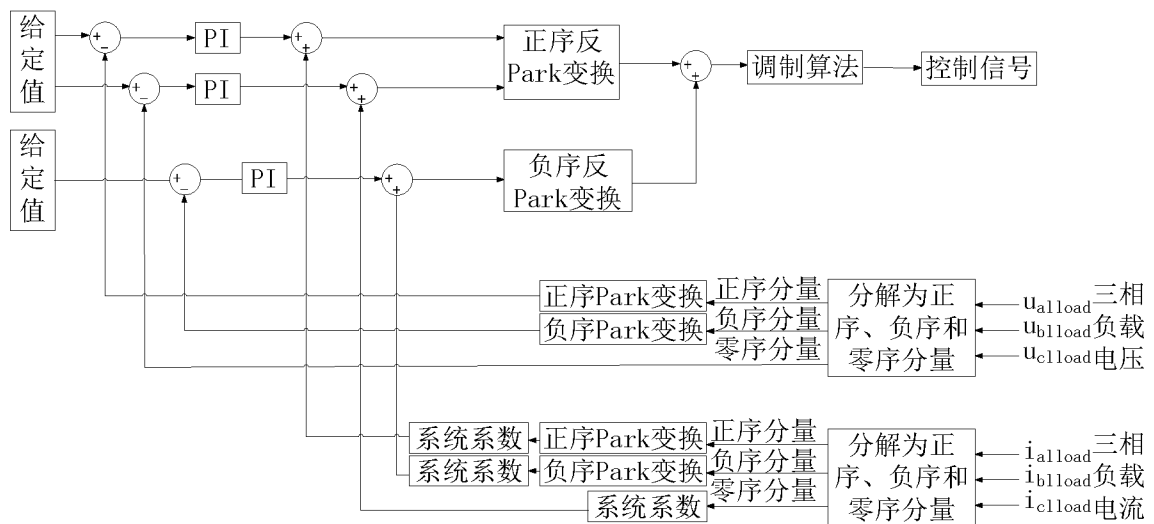


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/076496

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02M 5/458 (2006.01) i; H02M 7/537 (2006.01) i; H02M 3/335 (2006.01) 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; H02J

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, WPI, EPODOC, CNKI: MMC, submodule, direct current, modul+, multi level, chain, cascad+, series, fault, clamp+, mix+, hybrid, half bridge?, DC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 103208929 A (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE OF GUANGDONG POWER GRID CORPORATION et al.), 17 July 2013 (17.07.2013), description, paragraphs [0022]-[0039], and figures 1-5	1-6
A	CN 104821736 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.), 05 August 2015 (05.08.2015), description, paragraphs [0024]-[0027], and figures 4-6	1-6
A	CN 104078994 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 01 October 2014 (01.10.2014), description, paragraphs [0026]-[0036], and figures 3-4	1-6
A	CN 103731059 A (NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY), 16 April 2014 (16.04.2014), the whole document	1-6
A	WO 2014154241 A1 (ABB TECHNOLOGY LTD.), 02 October 2014 (02.10.2014), the whole document	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“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
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“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
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“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
“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)	“&” document member of the same patent family
“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	

Date of the actual completion of the international search 11 October 2016 (11.10.2016)	Date of mailing of the international search report 31 October 2016 (31.10.2016)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer HUANG, Jun Telephone No.: (86-10) 62411799

International application No.
PCT/CN2016/076496

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

A. 主题的分类 H02M 5/458(2006.01)i; H02M 7/537(2006.01)i; H02M 3/335(2006.01)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; H02J 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, WPI, EPDOC, CNKI: 模块化, 多电平, 级联, 链, MMC, 混, 子模块, 直流, 故障, 钳位, 嵌位, 半桥, 串, modul+, multi level, chain, cascad+, series, fault, clamp+, mix+, hybrid, half bridge?, DC																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 103208929 A (广东电网公司电力科学研究院等) 2013年 7月 17日 (2013 - 07 - 17) 说明书第[0022]-[0039]段, 附图1-5</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104821736 A (国家电网公司等) 2015年 8月 5日 (2015 - 08 - 05) 说明书第[0024]-[0027]段, 附图4-6</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104078994 A (东南大学) 2014年 10月 1日 (2014 - 10 - 01) 说明书第[0026]-[0036]段, 附图3-4</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103731059 A (华北电力大学) 2014年 4月 16日 (2014 - 04 - 16) 全文</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WO 2014154241 A1 (ABB TECHNOLOGY LTD) 2014年 10月 2日 (2014 - 10 - 02) 全文</td> <td>1-6</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 103208929 A (广东电网公司电力科学研究院等) 2013年 7月 17日 (2013 - 07 - 17) 说明书第[0022]-[0039]段, 附图1-5	1-6	A	CN 104821736 A (国家电网公司等) 2015年 8月 5日 (2015 - 08 - 05) 说明书第[0024]-[0027]段, 附图4-6	1-6	A	CN 104078994 A (东南大学) 2014年 10月 1日 (2014 - 10 - 01) 说明书第[0026]-[0036]段, 附图3-4	1-6	A	CN 103731059 A (华北电力大学) 2014年 4月 16日 (2014 - 04 - 16) 全文	1-6	A	WO 2014154241 A1 (ABB TECHNOLOGY LTD) 2014年 10月 2日 (2014 - 10 - 02) 全文	1-6
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
A	CN 103208929 A (广东电网公司电力科学研究院等) 2013年 7月 17日 (2013 - 07 - 17) 说明书第[0022]-[0039]段, 附图1-5	1-6																		
A	CN 104821736 A (国家电网公司等) 2015年 8月 5日 (2015 - 08 - 05) 说明书第[0024]-[0027]段, 附图4-6	1-6																		
A	CN 104078994 A (东南大学) 2014年 10月 1日 (2014 - 10 - 01) 说明书第[0026]-[0036]段, 附图3-4	1-6																		
A	CN 103731059 A (华北电力大学) 2014年 4月 16日 (2014 - 04 - 16) 全文	1-6																		
A	WO 2014154241 A1 (ABB TECHNOLOGY LTD) 2014年 10月 2日 (2014 - 10 - 02) 全文	1-6																		
☐ 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 2016年 10月 11日		国际检索报告邮寄日期 2016年 10月 31日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(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 黄君 电话号码 (86-10)62411799																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/076496

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	103208929	A	2013年 7月 17日	CN 103208929 B	2016年 6月 8日
CN	104821736	A	2015年 8月 5日	无	
CN	104078994	A	2014年 10月 1日	CN 104078994 B	2016年 3月 2日
CN	103731059	A	2014年 4月 16日	CN 103731059 B	2016年 4月 6日
WO	2014154241	A1	2014年 10月 2日	无	