

(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
2015 年 9 月 17 日 (17.09.2015)



(10) 国际公布号
WO 2015/135352 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02M 7/483 (2007.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2014/093855
- (22) 国际申请日: 2014 年 12 月 15 日 (15.12.2014)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201410092678.7 2014 年 3 月 13 日 (13.03.2014) CN
- (71) 申请人: 国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。 国网智能电网研究院 (STATE GRID SMART GRID RESEARCH INSTITUTE) [CN/CN]; 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号 (未来科技城), Beijing 102211 (CN)。 中电普瑞电力工程有限公司 (CHINA-EPRI ELECTRIC POWER ENGINEERING CO., LTD.) [CN/CN]; 中国北京市昌平区南部镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司 (STATE GRID LIAONING DALIAN ELECTRIC POWER SUPPLY CO., LTD.)

[CN/CN]; 中国辽宁省大连市中山区中山路 102 号, Liaoning 116001 (CN)。

- (72) 发明人: 孔明 (KONG, Ming); 中国北京市昌平区南邵镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。 汤广福 (TANG, Guangfu); 中国北京市昌平区南邵镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。 杨杰 (YANG, Jie); 中国北京市昌平区南邵镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。 马巍巍 (MA, Weiwei); 中国北京市昌平区南邵镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。 季兰兰 (JI, Lanlan); 中国北京市昌平区南邵镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。 李泓志 (LI, Hongzhi); 中国北京市昌平区南邵镇南中路 16 号, Beijing 102200 (CN)。
- (74) 代理人: 北京安博达知识产权代理有限公司 (AM-BOYNA INTELLECTUAL PROPERTY AGENT CO.,LTD.); 中国北京市海淀区大钟寺 13 号院 1 号楼华杰大厦 B215 号, Beijing 100098 (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,

[见续页]

(54) Title: DC FAULT RIDE-THROUGH CONTROL METHOD OF HYBRID MODULAR MULTILEVEL CONVERTER

(54) 发明名称: 一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法

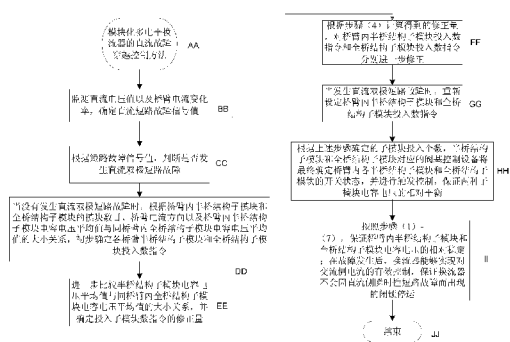


图 1/ Fig. 1

AA DC FAULT RIDE-THROUGH CONTROL METHOD OF A HYBRID MODULAR MULTILEVEL CONVERTER

BB MONITORING DC VOLTAGE AND LEG CURRENT CHANGE RATE AND DETERMINING A DC SHORT CIRCUIT FAULT SIGNAL VALUE

CC CHECKING WHETHER A DC DUAL POLE SHORT CIRCUIT FAULT OCCURS ACCORDING TO THE SHORT CIRCUIT FAULT SIGNAL VALUE

DD WHEN A DC DUAL POLE SHORT CIRCUIT FAULT DOES NOT OCCUR, PRIMARILY DETERMINING A COMMAND INDICATING THE NUMBER OF ADDED HALF-BRIDGE SUBMODULES (HBSMs) AND FULL-BRIDGE SUBMODULES (FBSMs) ACCORDING TO THE NUMBER OF THE HBSMs AND FBSMS, LEG CURRENT DIRECTION AND COMPARISON OF THE AVERAGE OF CAPACITANCE AND VOLTAGE BETWEEN THE HBSMs AND FBSMS WITHIN THE SAME LEG

EE FURTHER COMPARING THE AVERAGE OF CAPACITANCE AND VOLTAGE BETWEEN THE HBSMs AND FBSMS WITHIN THE SAME LEG, AND DETERMINING A CORRECTION FOR THE COMMAND INDICATING THE NUMBER OF ADDED MODULES

FF FURTHER CORRECTING THE COMMANDS INDICATING THE NUMBER OF ADDED HBSMs AND FBSMS WITHIN THE LEG RESPECTIVELY ACCORDING TO THE CORRECTION OBTAINED FROM STEP (4)

GG WHEN A DC DUAL POLE SHORT CIRCUIT FAULT OCCURS, RESETTING THE COMMANDS INDICATING THE NUMBER OF ADDED HBSMs AND FBSMS WITHIN THE LEG

HH A VALVE-BASED CONTROL DEVICE CORRESPONDING TO THE HBSMs AND FBSMS WILL PRIMARILY DETERMINE THE OPEN OR CLOSE STATE OF EACH HBSM AND FBSM WITHIN THE LEG, AND CONDUCT TRIGGER CONTROL TO ENSURE RELATIVE BALANCE OF CAPACITANCE AND VOLTAGE OF TWO TYPES OF SMS

II BASED ON STEPS (1) TO (7), ENSURING RELATIVE BALANCE OF CAPACITANCE AND VOLTAGE OF THE HBSMs AND FBSMs AFTER A FAULT OCCURS, THE CONVERTER CAN REALIZE EFFECTIVE CONTROL OVER THE AC SIDE CURRENT, AVOIDING SHUTDOWN OF THE CONVERTER DUE TO A DC SIDE TRANSIENT SHORT CIRCUIT FAULT

JJ END

(57) Abstract: A DC fault ride-through control method of a hybrid modular multilevel converter. The control method dynamically configures the number of added half-bridge submodules (HBSMs) and full-bridge submodules (FBSMs) within the same leg by controlling the addition and removal of HBSMs and FBSMs (3, 4) in the leg and tracking the average of capacitance and voltage of the HBSMs and FBSMs and monitoring the DC side fault state based on the effectively operated HBSMs and FBSMs, thus realizing the balance of capacitance and voltage of the HBSMs and FBSMs in the steady state, and achieving effective control of AC/DC current and voltage during a transient state DC fault. The method ensures continuous operation of a converter and prevents shutdown of the converter due to a fault.

(57) 摘要: 一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法。该控制方法通过控制桥臂中半桥和全桥结构子模块 (3, 4) 投入和切除, 并且基于有效运行的半桥和全桥结构子模块, 跟踪同桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块电容电压的平均值以及监测直流侧故障状态, 来动态分配同桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块的投入数量, 从而实现在稳态期间桥臂内半桥和全桥结构子模块电容电压的平衡以及实现暂态直流故障期间交直流电流电压的有效控制。该方法能够保证换流器的持续运行, 不会因故障导致换流器闭锁。

WO 2015/135352 A1



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。

(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)。

(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

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法

技术领域

本发明涉及电力系统柔性直流输电技术领域，具体涉及一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法。

背景技术

半桥和全桥结构子模块混合型模块化多电平变流器 (Cell Hybrid Modular Multilevel Converter, CH-MMC) 采用目前国际上较为流行的新型多电平拓扑结构。其核心单元——子模块 (Sub Module, SM) 分为两种。一种是由两个带有反并联二极管的可关断电力电子开关器件和一个电容器构成的半桥结构子模块 (Half Bridge Sub-Module, HBSM, 图 1 中的 3); 另一种是由四个带有反并联二极管的可关断电力电子开关器件和一个电容器构成的全桥结构子模块 (Full Bridge Sub-Module, FBSM, 图 1 中的 4)。若干个半桥结构子模块级联构成了一个半桥结构子模块阀段 (HBSM Valve); 若干个全桥结构子模块级联构成了一个全桥结构子模块阀段 (FBSM Valve); 半桥结构子模块阀段、全桥结构子模块阀段和一个桥臂电抗器串联构成了换流桥臂 (Converter Leg), 上下对称的换流桥臂则构成了一个相单元 (Phase Module 或 Phase Unite, 图 1 中的 2)。同 H 桥臂级联多电平结构类似, 其由包含 A、B、C (或 a、b、c) 三个相单元。

正常运行时, 子模块混合型模块化多电平换流器通过控制半桥中两个开关期间的开通和关断, 以及全桥中四个开关期间的开通和关断, 控制各桥臂子模块的投入和切除数, 得到不同的桥臂输出电压。同相内, 通过控制上下桥臂输出电压, 得到不同的交流输出电压。三相投入的子模块电压及桥臂电抗上压降共同构成了直流电压。由此可见, 桥臂内半桥和全桥结构子模块的电容电压平衡直接关系到换流器交直流输出电压质量。

在直流侧发生暂时性双极短路故障时, 通过控制并调整各桥臂中半桥和全桥结构子模块组输出电压指令来得以实现。与正常运行所不同的是, 在此阶段半桥结构子模块组的输出电压指令将设定为 0; 交流侧输出电压将全部由全桥结构子模块来承担, 同相内上下桥臂全桥输出电压指令为换流器输出电压指令的一半。

赵成勇、刘兴华等人的“一种模块化多电平换流器的子模块分组均压控制方法”(申请号: 201210451946.0), 提出了一种桥臂分组子模块电压平衡的控制方法。该方法通过对各桥臂子模块进行同等数量分组, 并计算各分段的能量平衡因子, 确定各组投入子模块数来实现同桥臂内子模块的相对均衡。但是, 需要指出的是, 上述控制方法仅适用于各分段内子模块数量一致的场合, 当分段内子模块数量由于子模块故障等因素而减少时或各分段间模块数量存在较大差异时, 该文所提出的控制方案将不再适用, 需进行一定的改进。

赵成勇、刘兴华等人的“一种建立模块化多电平换流器的混合结构模型的方法”(申请号: 201210451918.9), 提出了一种模块化多电平换流器的混合结构模型的方法。该混合结构换流器即由半桥和全桥结构子模块构成的混合子模块模块化多电平换流器。与本发明所涉及的换流器在结构上的不同之处在于其桥臂电抗器上并有由晶闸管构成的放电通路。在控制方法方面, 文中并没有详细给出稳态期间半桥和全桥结构子模块电容电压平衡的控制方法; 同时, 对于瞬时直流侧故障, 文中所设计的穿越方法同样需要闭锁换流器来实现。

上述两种控制方法的根本不足之处分别在于: 其一, 分组控制方法鲁棒性不足; 其二, 直流瞬时性故障仍然需要闭锁换流器。

发明内容

针对现有技术的不足, 本发明的目的是提供一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法, 本发明实现了稳态期间混合型模块化多电平换流器各桥臂内半桥和全桥结构子模块的电压平衡控制, 同时保证了对直流双极故障期间交流侧电流的有效控制。所提出的控制方法能够保证换流器的持续运行, 不会因故障导致换流器闭锁。

本发明的目的是采用下述技术方案实现的:

本发明提供一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法, 所述混合模块化多电平换流器由三相构成, 每相由串联的结构相同的上下两桥臂构成; 上下两桥臂的中点处连接模块化多电平换流器的交流端;

所述上下两桥臂中每个桥臂由 1 个电抗器、若干级联的半桥结构子模块和若干级联的全桥结构子模块组成; 每个桥臂中级联的半桥结构子模块和级联的全桥

结构子模块串联后的一端通过电抗器与模块化多电平换流器的交流端连接；另一端与另两相桥臂的级联的子模块一端连接，形成所述模块化多电平换流器直流端的正负极母线；

其改进之处在于，所述方法包括下述步骤：

(1) 监测直流电压值 u_{dc} 以及桥臂电流变化率 $d(i_{jp,n})/dt$ ，确定直流短路故障信号 Sdc 值；其中 $j = A、B、C$ ，分别代表 A，B，C 三相；p 代表上桥臂，n 代表下桥臂；

(2) 根据短路故障信号 Sdc 值，判断是否发生直流双极短路故障；

(3) 当没有发生直流双极短路故障时，根据桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块的模块数目、桥臂电流方向以及桥臂内半桥结构子模块电容电压平均值与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值的大小关系，初步确定各桥臂半桥结构子模块和全桥结构子模块投入数指令；

(4) 进一步比较半桥结构子模块电容电压平均值与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值的大小关系，并确定投入子模块数指令的修正量；

(5) 根据步骤 (4) 计算得到的修正量，对桥臂内半桥结构子模块投入数指令和全桥结构子模块投入数指令分别进一步修正为

$$n_{hpnj} = n_{hpnj} - \Delta n_{pnj}, \quad n_{fpnj} = n_{fpnj} + \Delta n_{pnj};$$

(6) 当发生直流双极短路故障时，重新设定桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块投入数指令，桥臂内半桥结构子模块投入数设定为 0，全桥结构子模块投入数设定为 $n_{fpnj} = n_{hfpnj}$ ；

(7) 根据上述步骤确定的子模块投入个数，半桥结构子模块和全桥结构子模块对应的阀基控制设备将最终确定桥臂内各半桥结构子模块和全桥结构子模块的开关状态，并进行触发控制，保证两种子模块电容电压的相对平衡；

(8) 按照步骤 (1) - (7)，保证桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块电容电压的相对稳定；在故障发生后，换流器能够实现对交流侧电流的有效控制，保证换流器不会因直流侧瞬时性短路故障而出现的闭锁停运。

进一步地，所述步骤 (2) 中，若直流短路故障信号 Sdc=1，认为没有发生直流双极短路故障；桥臂内半桥结构子模块投入模块数初步设定为

$n_{hpnj} = \text{Round}\left(\left(n_{hfpnj} \times N_{hpnj}\right) / \left(N_{hpnj} + N_{fpnj}\right)\right)$; 桥臂内全桥结构子模块投入模块数初步设定为 $n_{fpnj} = \text{Round}\left(\left(n_{hfpnj} \times N_{fpnj}\right) / \left(N_{hpnj} + N_{fpnj}\right)\right)$; 其中 n_{hfpnj} 为 j 相上桥臂或下桥臂投入模块数指令; N_{hpnj} 为 j 相上桥臂或下桥臂中半桥结构子模块阀段正常工作的模块数; N_{fpnj} 为 j 相上桥臂或下桥臂中全桥结构子模块阀段正常工作的模块数; $\text{Round}()$ 为四舍五入算法。

进一步地, 所述步骤 (3) 中, 当桥臂内半桥结构子模块投入模块数 n_{hpnj} 与桥臂内全桥结构子模块投入模块数 n_{fpnj} 之和大于半桥结构子模块投入模块数 n_{hfpnj} 时, 则判断桥臂电流 i_{jpn} 大小; 若 $i_{jpn} > 0$, 则比较桥臂内半桥结构子模块电容电压平均值 u_{smhpnj_avg} 与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值 u_{smfpnj_avg} 的大小关系; 若 $u_{smhpnj_avg} > u_{smfpnj_avg}$, 则半桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{hpnj} = n_{hpnj} - 1$; 否则, 全桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{fpnj} = n_{fpnj} - 1$; 若 $i_{jpn} < 0$, 且若 $u_{smhpnj_avg} > u_{smfpnj_avg}$, 则全桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{fpnj} = n_{fpnj} - 1$; 否则, 半桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{hpnj} = n_{hpnj} - 1$ 。

进一步地, 所述步骤 (4) 中, 进一步比较半桥结构子模块电容电压平均值 u_{smhpnj_avg} 与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值 u_{smfpnj_avg} 的大小关系, 若二者之差绝对值大于设定阈值 Δu_{set} 时, 则计算得到投入模块数的修正量 Δn_{pnj} ; 投入模块数的修正量 Δn_{pnj} 为半桥和全桥结构子模块均值之差 $\Delta u_{smpnj} = u_{smhpnj_avg} - u_{smfpnj_avg}$ 乘以 K_p , 再乘以 i_{jpn} , 最后将三者乘积四舍五入取整得到。

进一步地, 所述步骤 (6) 中, 若直流短路故障信号 $S_{dc} = 0$, 则认为发生直流双极短路故障, 此时 j 相上下桥臂输电电压指令将不在含有直流分量, 上下桥臂将分别承担一半的交流输出电压 u_{ejref} , 设定桥臂中半桥结构子模块阀段内投入子模块个数 $n_{hpnj} = 0$; 同时, 设定全桥结构子模块阀段内投入子模块个数

$$n_{fpnj} = n_{hfpnj} ;$$

当检测到 $S_{dc} = 0$ 时，全桥臂投入子模块数 n_{fpnj} 为正或为负；当为负时，说明全桥结构子模块阀段需要反向投入 n_{fpnj} 个模块。

与现有技术比，本发明达到的有益效果是：

本发明所提出的混合子模块模块化多电平换流器稳态期间的电容电压平衡控制方法，保证了半桥结构子模块和全桥结构子模块电容电压的相对均衡；同时满足了直流瞬时性故障穿越的性能要求，故障期间无需闭锁换流器。减少了所需开关器件、相关的驱动器等设备，实现了经济效益和设备性能的统一。

瞬时性故障期间，无需闭锁换流器，保证了功率控制的连续性；可为模块化多电平换流器在架空线方式下直流输电领域的运用所借鉴。

附图说明

图 1 是本发明提供的混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法的流程图；

图 2 是本发明提供的子模块混合型模块化多电平换流器结构示意图；

图 3 是本发明提供的桥臂总的投入模块数计算示意图；

图 4 是本发明提供的修正量 Δn_{pnj} 的确定示意图；

图 5 是本发明提供的 A 相上下桥臂半桥结构子模块电容电压平均值波形图；

图 6 是本发明提供的 A 相上下桥臂全桥结构子模块电容电压平均值波形图；

图 7 是本发明提供的 A 相上下桥臂全桥结构子模块电流波形图；

图 8 是本发明提供的直流双极短路故障发生前后交流侧电流波形图；

图 9 是本发明提供的双极直流电压波形图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明。

针对子模块混合型模块化多电平换流器稳态及其直流故障穿越问题，本发明提出了一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法。在本发明中，通

过监测直流电压值及其变化率来确定是否发生直流双极短路故障。若没有发生短路故障,根据桥臂内半桥和全桥子模块数量以及两者子模块电压的平均值来确定各半桥子模块阀段和全桥子模块阀段内投入子模块数量;若发生了直流短路故障,则使桥臂内半桥子模块投入子模块数为 0,输出的交流电压由全桥子模块来承担。所设计的控制方法,具有较强的鲁棒性,直流故障穿越期间无需闭锁换流器,从而弥补了现有技术存在的不足。

混合模块化多电平换流器由三相构成,每相由串联的结构相同的上下两桥臂构成;上下两桥臂的中点处连接模块化多电平换流器的交流端;

上下两桥臂中每个桥臂由 1 个电抗器、若干级联的半桥结构子模块和若干级联的全桥结构子模块组成;每个桥臂中级联的半桥结构子模块和级联的全桥结构子模块串联后的一端通过电抗器与模块化多电平换流器的交流端连接;另一端与另两相桥臂的级联的子模块一端连接,形成所述模块化多电平换流器直流端的正负极母线。子模块混合型模块化多电平换流器结构示意图如图 2 所示。

本发明提供的混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法的流程图如图 1 所示,包括下述步骤:

(1) 监测直流电压值 u_{dc} 以及桥臂电流变化率 $d(i_{jp,n})/dt$, 确定直流短路故障信号 Sdc 值;其中 $j = A, B, C$, 分别代表 A, B, C 三相; p 代表上桥臂, n 代表下桥臂;

(2) 根据短路故障信号 Sdc 值, 判断是否发生直流双极短路故障;

若直流短路故障信号 Sdc = 1, 认为没有发生直流双极短路故障;桥臂内半桥结构子模块投入模块数初步设定为 $n_{hpnj} = \text{Round}((n_{hfpnj} \times N_{hpnj}) / (N_{hpnj} + N_{fnpj}))$; 桥臂内全桥结构子模块投入模块数初步设定为 $n_{fnpj} = \text{Round}((n_{hfpnj} \times N_{fnpj}) / (N_{hpnj} + N_{fnpj}))$; 其中 n_{hfpnj} 为 j 相上桥臂或下桥臂投入模块数指令; N_{hpnj} 为 j 相上桥臂或下桥臂中半桥结构子模块阀段正常工作的模块数; N_{fnpj} 为 j 相上桥臂或下桥臂中全桥结构子模块阀段正常工作的模块数; Round() 为四舍五入算法。

(3) 当没有发生直流双极短路故障时, 根据桥臂内半桥结构子模块和全桥

结构子模块的模块数目、桥臂电流方向以及桥臂内半桥结构子模块电容电压平均值与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值的大小关系,初步确定各桥臂半桥结构子模块和全桥结构子模块投入数指令;

当桥臂内半桥结构子模块投入模块数 n_{hpnj} 与桥臂内全桥结构子模块投入模块数 n_{fpnj} 之和大于半桥结构子模块投入模块数 n_{hfpnj} 时,则判断桥臂电流 i_{jpn} 大小;若 $i_{jpn} > 0$,则比较桥臂内半桥结构子模块电容电压平均值 u_{smhpnj_avg} 与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值 u_{smfpnj_avg} 的大小关系;若 $u_{smhpnj_avg} > u_{smfpnj_avg}$,则半桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{hpnj} = n_{hpnj} - 1$;否则,全桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{fpnj} = n_{fpnj} - 1$;若 $i_{jpn} < 0$,且若 $u_{smhpnj_avg} > u_{smfpnj_avg}$,则全桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{fpnj} = n_{fpnj} - 1$;否则,半桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{hpnj} = n_{hpnj} - 1$ 。桥臂总的投入模块数计算示意图如图 3 所示。

(4) 进一步比较半桥结构子模块电容电压平均值 u_{smhpnj_avg} 与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值 u_{smfpnj_avg} 的大小关系,若二者之差绝对值大于设定阈值 Δu_{set} 时,则计算得到投入模块数的修正量 Δn_{pnj} ;投入模块数的修正量 Δn_{pnj} 为半桥和全桥结构子模块均值之差 $\Delta u_{smpnj} = u_{smhpnj_avg} - u_{smfpnj_avg}$ 乘以 K_p ,再乘以 i_{jpn} ,最后将三者乘积四舍五入取整得到。修正量 Δn_{pnj} 的确定示意图如图 4 所示。

(5) 根据步骤 (4) 计算得到的修正量,对桥臂内半桥结构子模块投入数指令和全桥结构子模块投入数指令分别进一步修正为 $n_{hpnj} = n_{hpnj} - \Delta n_{pnj}$, $n_{fpnj} = n_{fpnj} + \Delta n_{pnj}$;

(6) 当发生直流双极短路故障时,重新设定桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块投入数指令,桥臂内半桥结构子模块投入数设定为 0,全桥结构子模块投入数设定为 $n_{fpnj} = n_{hfpnj}$;包括:

若直流短路故障信号 $S_{dc} = 0$,则认为发生直流双极短路故障,此时 j 相上

下桥臂输电电压指令将不在含有直流分量, 上下桥臂将分别承担一半的交流输出电压 u_{ejref} , 设定桥臂中半桥结构子模块阀段内投入子模块个数 $n_{hpnj} = 0$; 同时, 设定全桥结构子模块阀段内投入子模块个数 $n_{fpnj} = n_{hfnj}$; 双极直流电压波形图如图 9 所示。

当检测到 $S_{dc} = 0$ 时, 全桥臂投入子模块数 n_{fpnj} 为正或为负; 当为负时, 说明全桥结构子模块阀段需要反向投入 n_{fpnj} 个模块。

(7) 根据上述步骤确定的子模块投入个数, 半桥结构子模块和全桥结构子模块对应的阀基控制设备将最终确定桥臂内各半桥结构子模块和全桥结构子模块的开关状态, 并进行触发控制, 保证两种子模块电容电压的相对平衡;

(8) 按照步骤 (1) - (7), 保证桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块电容电压的相对稳定; 在故障发生后, 换流器能够实现对交流侧电流的有效控制 (A 相上下桥臂全桥结构子模块电流波形图如图 7 所示), 保证换流器不会因直流侧瞬时性短路故障而出现的闭锁停运。A 相上下桥臂半桥结构子模块和全桥结构子模块电容电压平均值波形图分别如图 5 和 6 所示。

如果没有步骤 (4) 得到的修正量 Δn_{pnj} , 同桥臂内半桥和全桥子模块电容电压的平衡将无法得到有效保证, 进而会影响换流器交直流侧电压的控制效果, 导致功率振荡等现象。如果有步骤 (4) 所述修正量 Δn_{pnj} , 半桥和全桥子模块电容电压误差将控制在一定范围之内 (如图 5 和 6 所示)。

特别说明的是如果没有步骤 (6) 所述调制策略的切换, 换流器交流侧电流将无法得到控制, 也就无法实现直流故障的穿越控制。如果有步骤 (6) 所述调制策略的切换, 即便是直流电压为 0 的条件下, 依然可以实现对交流电流的有效控制 (如图 8 所示)。

本发明所提出的混合子模块模块化多电平换流器稳态期间的电容电压平衡控制策略, 保证了半桥子模块和全桥子模块电容电压的相对均衡; 同时满足了直流瞬时性故障穿越的性能要求, 故障期间无需闭锁换流器。减少了所需开关器件、相关的驱动器等设备, 实现了经济效益和设备性能的统一。

最后应当说明的是: 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制, 尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明, 所属领域的普通技术人员应当理

解：依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换，而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

权 利 要 求

1、一种混合模块化多电平换流器的直流故障穿越控制方法，所述混合模块化多电平换流器由三相构成，每相由串联的结构相同的上下两桥臂构成；上下两桥臂的中点处连接模块化多电平换流器的交流端；

所述上下两桥臂中每个桥臂由 1 个电抗器、若干级联的半桥结构子模块和若干级联的全桥结构子模块组成；每个桥臂中级联的半桥结构子模块和级联的全桥结构子模块串联后的一端通过电抗器与模块化多电平换流器的交流端连接；另一端与另两相桥臂的级联的子模块一端连接，形成所述模块化多电平换流器直流端的正负极母线；

其特征在于，所述方法包括下述步骤：

(1) 监测直流电压值 u_{dc} 以及桥臂电流变化率 $d(i_{jp,n})/dt$ ，确定直流短路故障信号 Sdc 值；其中 $j = A、B、C$ ，分别代表 A，B，C 三相；p 代表上桥臂，n 代表下桥臂；

(2) 根据短路故障信号 Sdc 值，判断是否发生直流双极短路故障；

(3) 当没有发生直流双极短路故障时，根据桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块的模块数目、桥臂电流方向以及桥臂内半桥结构子模块电容电压平均值与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值的大小关系，初步确定各桥臂半桥结构子模块和全桥结构子模块投入数指令；

(4) 进一步比较半桥结构子模块电容电压平均值与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值的大小关系，并确定投入子模块数指令的修正量；

(5) 根据步骤 (4) 计算得到的修正量，对桥臂内半桥结构子模块投入数指令和全桥结构子模块投入数指令分别进一步修正为

$$n_{hpnj} = n_{hpnj} - \Delta n_{pnj}, \quad n_{fpnj} = n_{fpnj} + \Delta n_{pnj};$$

(6) 当发生直流双极短路故障时，重新设定桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块投入数指令，桥臂内半桥结构子模块投入数设定为 0，全桥结构子模块投入数设定为 $n_{fpnj} = n_{hfpnj}$ ；

(7) 根据上述步骤确定的子模块投入个数，半桥结构子模块和全桥结构子模块对应的阀基控制设备将最终确定桥臂内各半桥结构子模块和全桥结构子模

块的开关状态，并进行触发控制，保证两种子模块电容电压的相对平衡；

(8) 按照步骤 (1) - (7)，保证桥臂内半桥结构子模块和全桥结构子模块电容电压的相对稳定；在故障发生后，换流器能够实现对交流侧电流的有效控制，保证换流器不会因直流侧瞬时性短路故障而出现的闭锁停运。

2、如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述步骤 (2) 中，若直流短路故障信号 $S_{dc} = 1$ ，认为没有发生直流双极短路故障；桥臂内半桥结构子模块投入模块数初步设定为 $n_{hpnj} = \text{Round}\left(\left(n_{hfpnj} \times N_{hpnj}\right) / \left(N_{hpnj} + N_{fnpj}\right)\right)$ ；桥臂内全桥结构子模块投入模块数初步设定为 $n_{fnpj} = \text{Round}\left(\left(n_{hfpnj} \times N_{fnpj}\right) / \left(N_{hpnj} + N_{fnpj}\right)\right)$ ；其中 n_{hfpnj} 为 j 相上桥臂或下桥臂投入模块数指令； N_{hpnj} 为 j 相上桥臂或下桥臂中半桥结构子模块阀段正常工作的模块数； N_{fnpj} 为 j 相上桥臂或下桥臂中全桥结构子模块阀段正常工作的模块数； $\text{Round}()$ 为四舍五入算法。

3、如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述步骤 (3) 中，当桥臂内半桥结构子模块投入模块数 n_{hpnj} 与桥臂内全桥结构子模块投入模块数 n_{fnpj} 之和大于半桥结构子模块投入模块数 n_{hfpnj} 时，则判断桥臂电流 i_{jpn} 大小；若 $i_{jpn} > 0$ ，则比较桥臂内半桥结构子模块电容电压平均值 u_{smhpnj_avg} 与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值 u_{smfnpj_avg} 的大小关系；若 $u_{smhpnj_avg} > u_{smfnpj_avg}$ ，则半桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{hpnj} = n_{hpnj} - 1$ ；否则，全桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{fnpj} = n_{fnpj} - 1$ ；若 $i_{jpn} < 0$ ，且若 $u_{smhpnj_avg} > u_{smfnpj_avg}$ ，则全桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{fnpj} = n_{fnpj} - 1$ ；否则，半桥结构子模块阀段投入模块数修正为 $n_{hpnj} = n_{hpnj} - 1$ 。

4、如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述步骤 (4) 中，进一步比较半桥结构子模块电容电压平均值 u_{smhpnj_avg} 与同桥臂内全桥结构子模块电容电压平均值 u_{smfnpj_avg} 的大小关系，若二者之差绝对值大于设定阈值 Δu_{set} 时，则计算得到投入模块数的修正量 Δn_{pnj} ；投入模块数的修正量 Δn_{pnj} 为半桥和全桥结构

子模块均值之差 $\Delta u_{smpnj} = u_{smhpnj_avg} - u_{smfnpj_avg}$ 乘以 K_p ，再乘以 i_{jpn} ，最后将三者乘积四舍五入取整得到。

5、如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述步骤（6）中，若直流短路故障信号 $S_{dc} = 0$ ，则认为发生直流双极短路故障，此时 j 相上下桥臂输电电压指令将不在含有直流分量，上下桥臂将分别承担一半的交流输出电压 u_{ejref} ，设定桥臂中半桥结构子模块阀段内投入子模块个数 $n_{hpnj} = 0$ ；同时，设定全桥结构子模块阀段内投入子模块个数 $n_{fpnj} = n_{hfpnj}$ ；

当检测到 $S_{dc} = 0$ 时，全桥臂投入子模块数 n_{fpnj} 为正或为负；当为负时，说明全桥结构子模块阀段需要反向投入 n_{fpnj} 个模块。

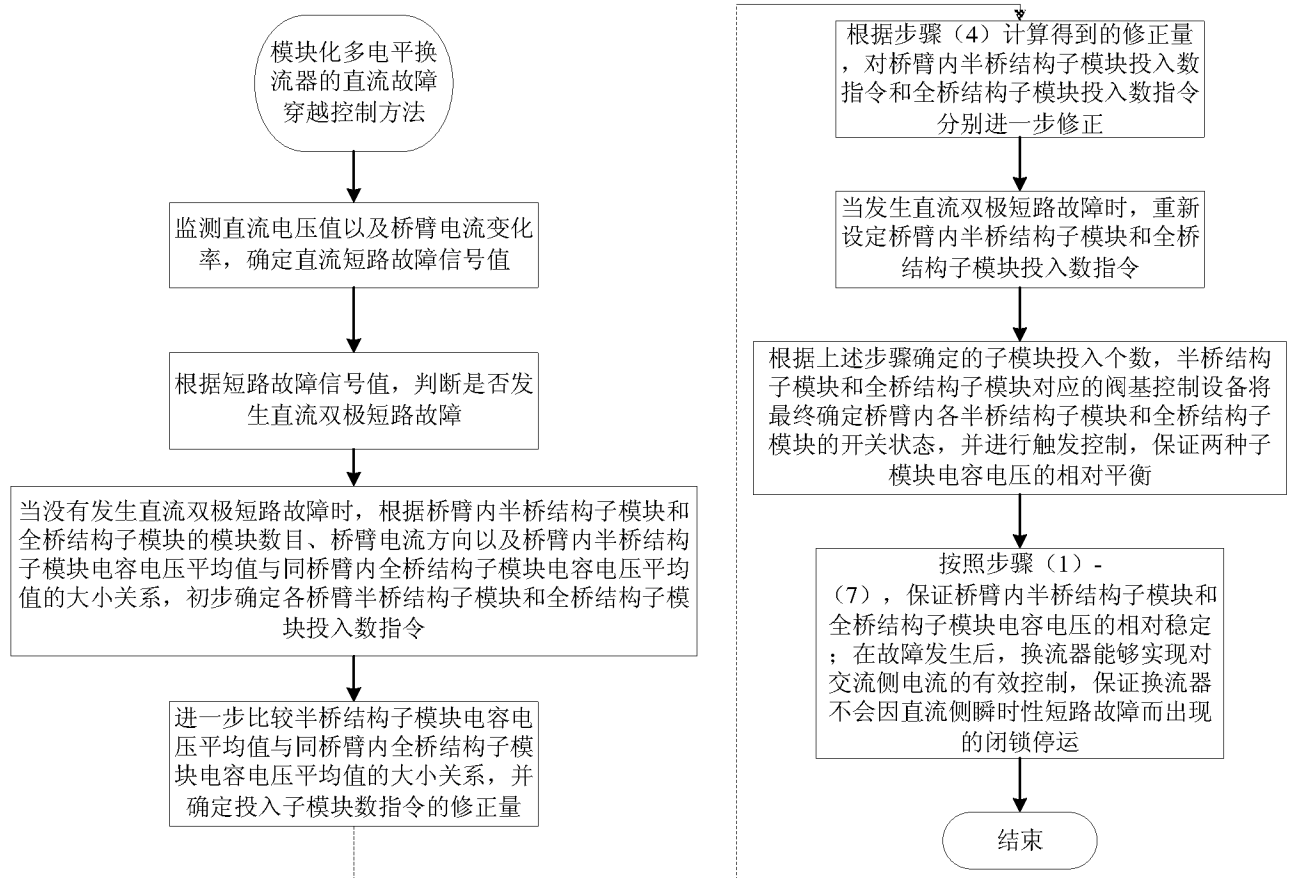


图 1

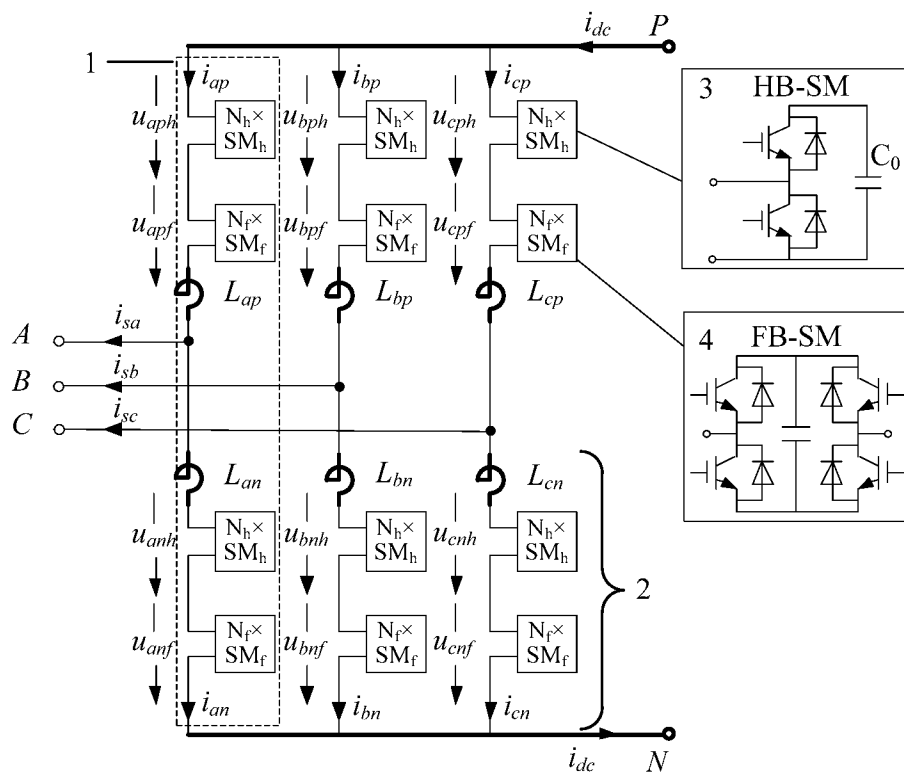


图 2

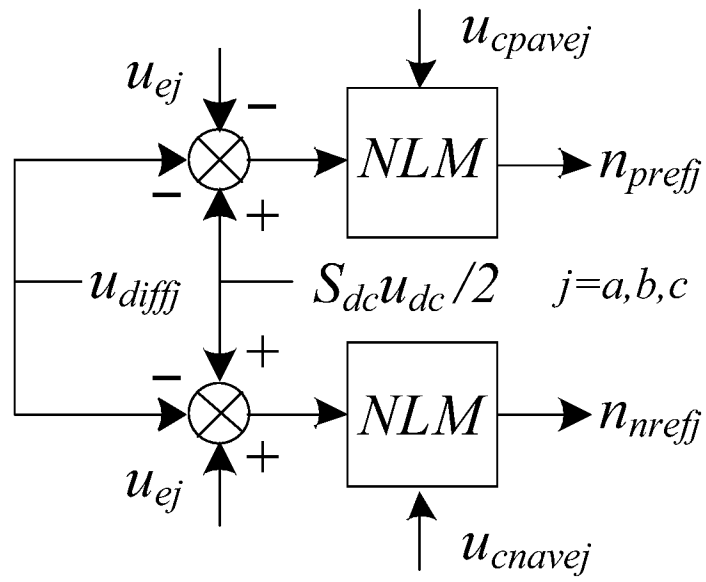


图 3

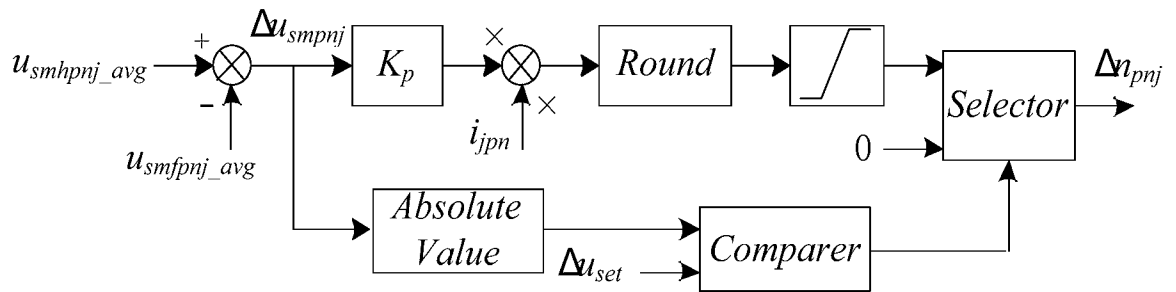


图 4

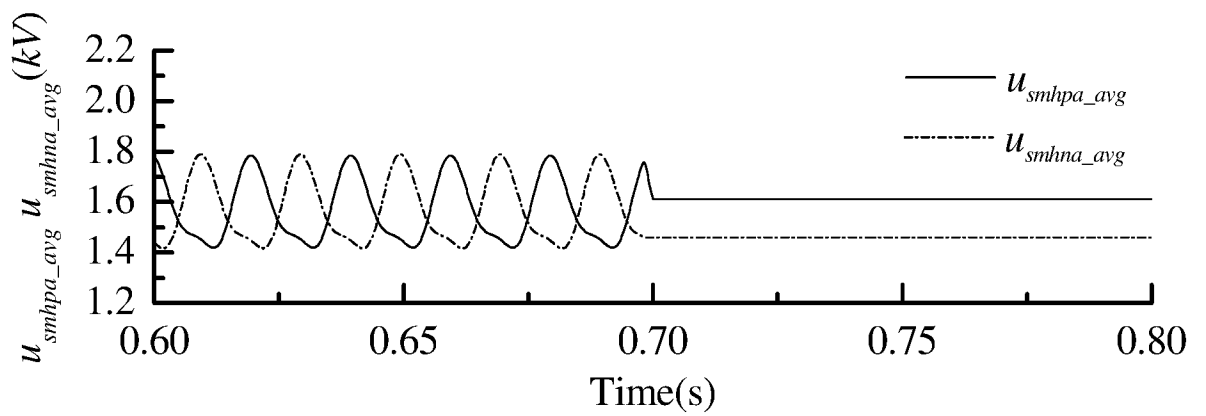


图 5

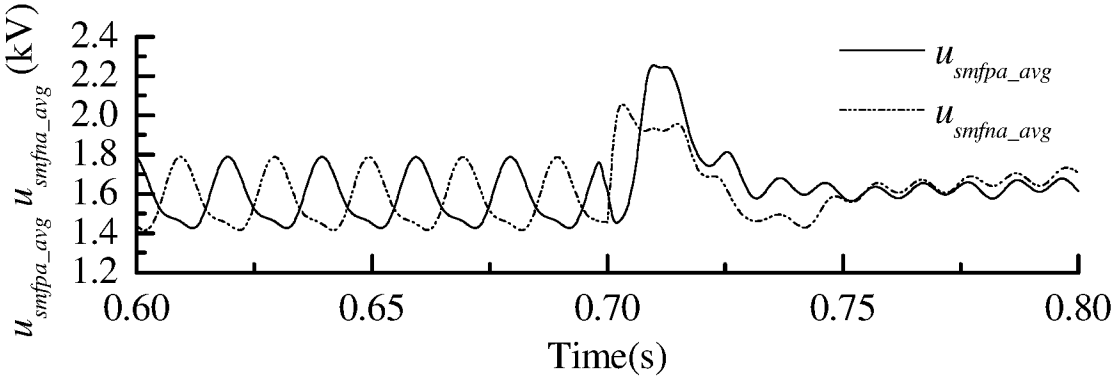


图 6

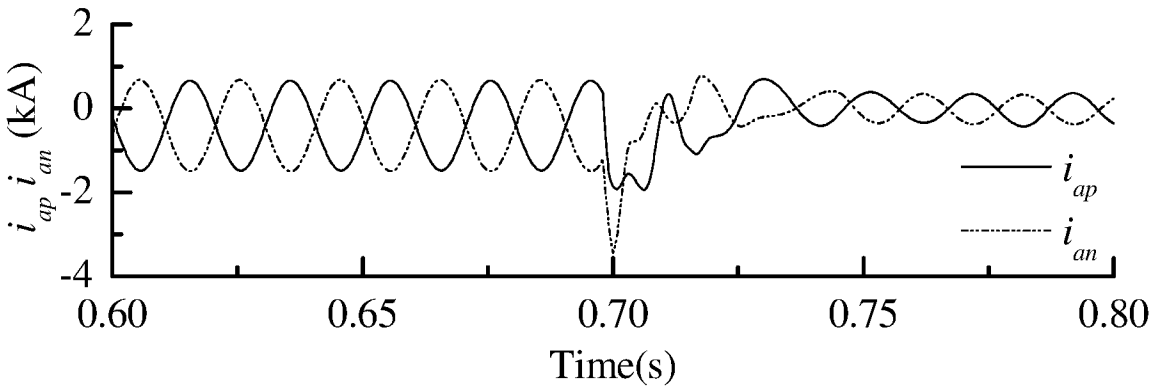


图 7

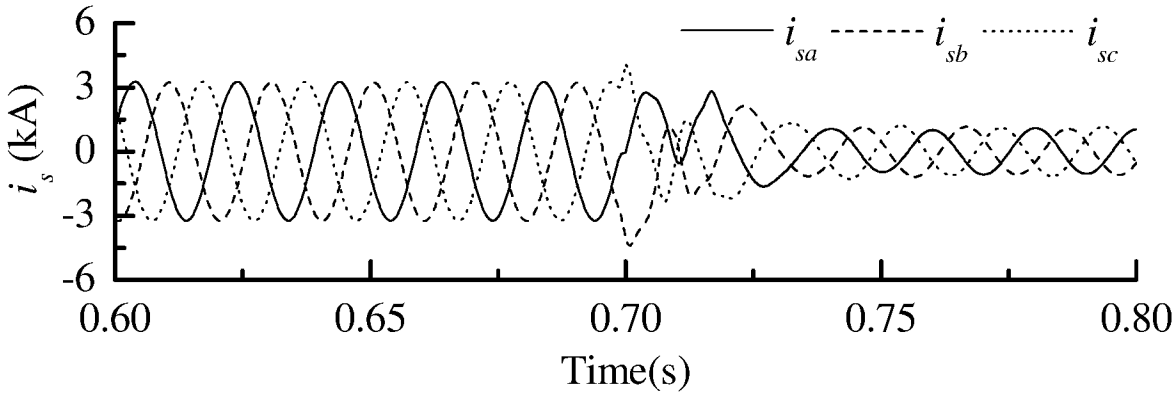


图 8

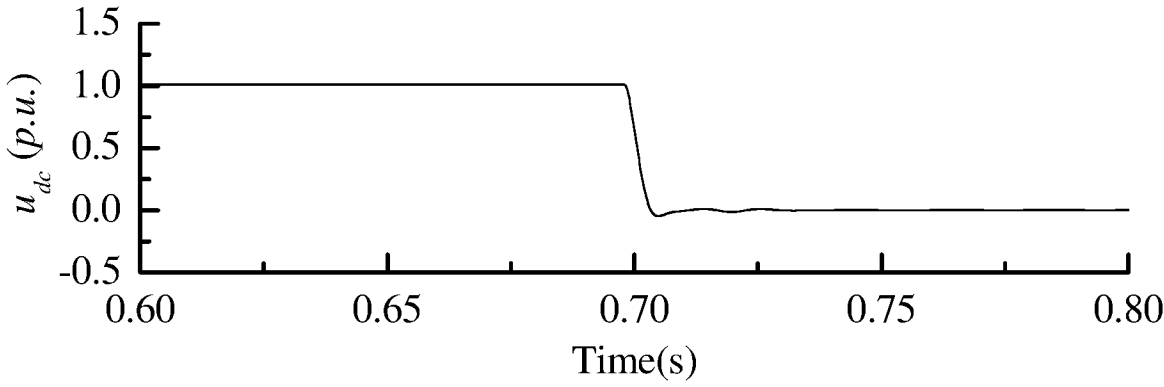


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2014/093855

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

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)

IPC: 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)

WPI, EPODOC, CNPAT: MMC, four-quadrant, mix, short circuit, Modula+, chain, cascaded+, multi 3w level, multilevel, three 3w level, five 3w level, seven 3w level, number+, balance+, capacit+, average, half 3w bridge?, full 3wbridge?, h 3w bridge?, short, lock

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 103633871 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY), 12 March 2014 (12.03.2014), description, page 3, line 15 to page 4, line 4, and figure 2	1-5
A	CN 103339814 A (SIEMENS AG), 02 October 2013 (02.10.2013), the whole document	1-5
A	WO 2013017160 A1 (ALSTOM TECHNOLOGY LTD. et al.), 07 February 2013 (07.02.2013), the whole document	1-5
A	CN 102281014 A (ZHEJIANG UNIVERSITY), 14 December 2011 (14.12.2011), the whole document	1-5
A	CN 102931863 A (NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY), 13 February 2013 (13.02.2013), the whole document	1-5

☐ 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 19 January 2015 (19.01.2015)	Date of mailing of the international search report 28 January 2015 (28.01.2015)
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 SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2014/093855

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 103633871 A	12 March 2014	None	
CN 103339814 A	02 October 2013	EP 2671297 A1	11 December 2013
		US 2013308235 A1	21 November 2013
		WO 2012103936 A1	09 August 2012
		KR 20140022374 A	24 February 2014
WO 2013017160 A1	07 February 2013	CN 103891121 A	25 June 2014
		WO 2013017177 A1	07 February 2013
		EP 2740204 A1	11 June 2014
		US 2014293656 A1	02 October 2014
		US 2014254205 A1	11 September 2014
		CN 103959624 A	30 July 2014
CN 102281014 A	14 December 2011	CN 102281014 B	25 September 2013
CN 102931863 A	13 February 2013	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2014/093855

A. 主题的分类

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))

WPI, EPODOC, CNPAT: 模块化, 级联, MMC, 三电平, 多电平, 五电平, 七电平, 链式, 四象限, 混合, 半桥, 全桥, H 桥, 数, 电容, 均, 衡, 短路, 闭锁, Modula+, chain, cascada+, multi 3w level, multilevel, three 3w level, five 3w level, seven 3w level, number+, balanc+, capacit+, average, half 3w bridge?, full 3wbridge?, h 3w bridge?, short, lock

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	CN 103633871 A (华南理工大学) 2014年 3月 12日 (2014 - 03 - 12) 说明书第3页第15行-第4页第4行, 附图2	1-5
A	CN 103339814 A (西门子公司) 2013年 10月 02日 (2013 - 10 - 02) 全文	1-5
A	WO 2013017160 A1 (ALSTOM TECHNOLOGY LTD等) 2013年 2月 07日 (2013 - 02 - 07) 全文	1-5
A	CN 102281014 A (浙江大学) 2011年 12月 14日 (2011 - 12 - 14) 全文	1-5
A	CN 102931863 A (华北电力大学) 2013年 2月 13日 (2013 - 02 - 13) 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

2015年 1月 19日

国际检索报告邮寄日期

2015年 1月 28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)
北京市海淀区蓟门桥西土城路6号
100088 中国

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/CN2014/093855

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	103633871	A	2014年 3月 12日	无			
CN	103339814	A	2013年 10月 02日	EP	2671297	A1	2013年 12月 11日
				US	2013308235	A1	2013年 11月 21日
				WO	2012103936	A1	2012年 8月 09日
				KR	20140022374	A	2014年 2月 24日
WO	2013017160	A1	2013年 2月 07日	CN	103891121	A	2014年 6月 25日
				WO	2013017177	A1	2013年 2月 07日
				EP	2740204	A1	2014年 6月 11日
				US	2014293656	A1	2014年 10月 02日
				US	2014254205	A1	2014年 9月 11日
				CN	103959624	A	2014年 7月 30日
CN	102281014	A	2011年 12月 14日	CN	102281014	B	2013年 9月 25日
CN	102931863	A	2013年 2月 13日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)