(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106787877 A
(43)申请公布日 2017.05.31

(21)申请号 201611148476.5

(22)申请日 2016.12.13

(71)申请人 清华大学
地址 100084 北京市海淀区清华园1号

(72)发明人 魏应冬　于心宇　姜齐荣　刘蓁
张树卿

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事务所(普通合伙) 11201
代理人 廖元秋

(51)Int.Cl.
H02M 7/483(2007.01)

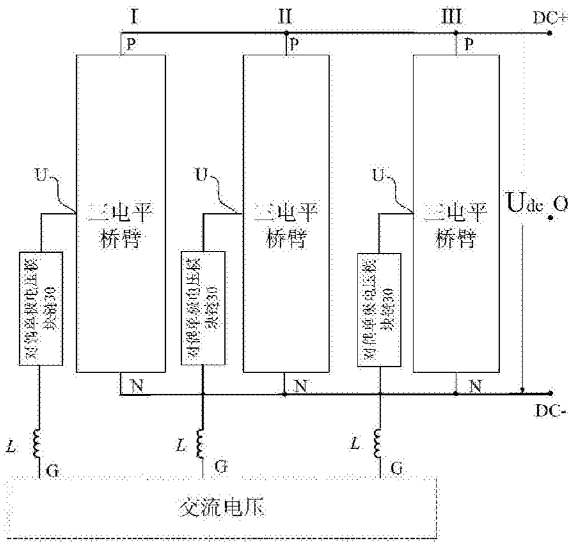
权利要求书3页　说明书11页　附图7页

(54)发明名称

对偶单极电压模块链及其混合多电平变流器

(57)摘要

本发明提出的对偶单极电压模块链及其混合多电平变流器，属于电力电子技术和电力输配电领域，所述对偶单级电压模块链由N_1个正极性单极电压模块和N_2个负极性单极电压模块的共计N个单极电压模块依次串联构成，通过双向电流时具备双极性电压输出能力；基于该模块链的混合多电平变流器至少包括两个相同的相，每相包括一个对偶单极电压模块链、三电平桥臂和电抗器；其中，对偶单极电压模块链的一个端口接入三电平桥臂中点，对偶单极电压模块链的另一端口接入电抗器的一端，电抗器的另一端接入交流电压；本发明能够以较低的工程成本和紧凑的占地空间，实现宽范围的交-直流变换，转换效率高，谐波特性好，并具备直流故障穿越的能力。



CN 106787877 A

1.一种对偶单级电压模块链，由N_1个正极性单极电压模块和N_2个负极性单极电压模块的共计N个单极电压模块依次串联构成，N_1、N_2均为自然数，且$N_1 \geq 1$，$N_2 \geq 1$，每个模块包括一个正极端“+”和一个负极端“-”，正极端“+”和负极端“-”之间的电压差为该模块端口电压u_{SM}，其特征在于：前一个模块的负极端与后一个模块的正极端相连接，第1个模块的正极端作为该对偶单极电压模块链的一个端口，第N个模块的负极端作为该对偶单极电压模块链的另一个端口，且在双向电流下具备零和正、负双极性电压输出能力；

所述的正极性单极电压模块，通过对模块内部全控开关器件导通和关断不同状态的控制，当其电流i_{SM}方向从正极端“+”流入，从负极端“-”流出时，端口电压u_{SM}的电平包括零和正、负极性；当电流i_{SM}方向从负极端“-”流入，从正极端“+”流出时，端口电压u_{SM}电平仅包括零和正极性电平或零和负极性电平，且在正常运行时，端口电压u_{SM}电平仅为零电平；

所述的负极性单极电压模块，通过对模块内部全控开关器件导通和关断不同状态的控制，当其电流i_{SM}方向从负极端“-”流入，从正极端“-”流出时，端口电压u_{SM}的电平包括零和正、负极性；当电流i_{SM}方向从正极端“+”流入，从负极端“-”流出时，端口电压u_{SM}电平仅包括零和正极性电平或零和负极性电平，且在正常运行时，端口电压u_{SM}电平仅为零电平。

2.根据权利要求1所述的对偶单级电压模块链，其特征在于，所述N_1个正极性单极电压模块包括由K_{11}个第一两电平单级电压全桥模块(10)和K_{12}个第二两电平单级电压全桥模块(20)构成的K_1个两电平正极性单极电压模块、以及由L_1个三电平交错连接模块(100)构成的三电平正极性单极电压模块，K_{11}、K_{12}、K_1、L_1均为整数，且同时满足：$0 \leq K_{11} \leq K_1$、$0 \leq K_{12} \leq K_1$、$0 \leq K_1 \leq N_1$、$0 \leq L_1 \leq N_1$、$K_1+L_1=N_1$；所述N_2个负极性单极电压模块包括由K_{21}个第一两电平单级电压全桥模块(10)和K_{22}个第二两电平单级电压全桥模块(20)构成的K_2个两电平正极性单极电压模块、以及L_2个三电平交错连接模块(100)构成的三电平正极性单极电压模块，K_{21}、K_{22}、K_2、L_2均为整数，且同时满足$0 \leq K_{21} \leq K_2$、$0 \leq K_{22} \leq K_2$、$0 \leq K_2 \leq N_2$、$0 \leq L_2 \leq N_2$、$K_2+L_2=N_2$；所述对偶单极电压模块链中正极性单极电压模块电容数和负极性单极电压模块电容数相等，均用M表示：

$$\begin{cases} M = N_1 + L_1 \\ M = N_2 + L_2 \end{cases};$$

所述第一、第二两电平单级电压全桥模块(10、20)的电容数目均为1，该电容阳极与阴极之间的直流额定电压记为U_c，第一、第二两电平单级电压全桥模块内各个全控开关器件的额定耐压值为U_c；

所述三电平交错连接模块(100)的电容数目为2，每个电容阳极与阴极之间的直流额定电压记为U_c，其中，位于每条对角线上的全控开关器件的总额定耐压值为$2U_c$，其余各个全控开关器件的额定耐压值为U_c。

3.一种基于权利要求1所述对偶单级电压模块链构建的混合多电平变流器，与交流电压相连，其特征在于，该变流器至少包括两个相同的相，每相包括一个三电平桥臂、由一个对偶单极电压模块链和一个电抗器串联构成的串联支路；其中，所述串联支路的一端接入三电平桥臂的中点，串联支路的另一端接入交流电压；三电平桥臂的正极端均接入混合多电平变流器的直流母线正极，三电平桥臂的负极端均接入混合多电平变流器的直流母线负极。

4.根据权利要求3所述的混合多电平变流器，其特征在于，所述每相的三电平桥壁采用中点箝位型三电平桥臂，该变流器还包括两个直流电容器；所述中点箝位型三电平桥臂均由四个全控开关器件单元和两个二极管单元构成；其中，第一电容的阳极与直流母线正极相连，第一电容的阴极与第二电容的阳极相连作为该变流器的直流公共点，第二电容的阴极与直流母线负极相连；第一全控开关器件单元的集电极作为该三电平桥臂的正极端，第一全控开关器件单元发射极、第二全控开关器件单元集电极相连的公共端与第一二极管单元的阴极相连，第二全控开关器件单元发射极与第三全控开关器件单元集电极相连接的公共端作为该三电平桥臂中点，第三全控开关器件单元发射极与第四全控开关器件单元集电极相连的公共端与第二二极管单元的阳极相连，第四全控开关器件单发射极作为该三电平桥臂的负极端，第一二极管单元的阳极与第二二极管单元的阴极相连接入直流公共中点；各个全控开关器件单元、二极管单元、直流电容的额定耐压值均相同，记为$U_{dc}/2$；所述各个全控开关器件单元均由m个额定耐压值为U_d的全控开关器件依次串联构成；所述各个二极管单元均由m个额定耐压值为U_d的二极管依次串联构成。

5.根据权利要求3所述的混合多电平变流器，其特征在于，所述每相的三电平桥壁采用飞跨电容型三电平桥臂，该飞跨电容型三电平桥臂均由四个全控开关器件单元和一个箝位电容构成；其中，第一全控开关器件单元的集电极作为该三电平桥臂的正极端，第一全控开关器件单元发射极、第二全控开关器件单元集电极均与箝位电容的阳极相连，第二全控开关器件单元发射极与第三全控开关器件单元集电极相连接的公共端作为该三电平桥臂中点，第三全控开关器件单元发射极与第四全控开关器件单元集电极相连的公共端与箝位电容的阴极相连，第四全控开关器件单发射极作为该三电平桥臂的负极端；各个全控开关器件单元、箝位电容的额定耐压值均相同，记为$U_{dc}/2$；所述各个全控开关器件单元均由m个额定耐压值为U_d的全控开关器件依次串联构成。

6.根据权利要求4或5所述的混合多电平变流器，其特征在于，所述m为自然数，且$m \geq U_{dc}/(2U_d)$；

记所述混合多电平变流器接入的交流电压的线电压有效值为U_L，若使该变流器在直流侧发生直流短路故障时具备短路故障抑制能力，所述对偶单极电压模块链中模块电容数目M为自然数，且满足：

$$M \geq \frac{\sqrt{2}U_L}{4 \cdot U_c};$$

若使得所述对偶单极电压模块链具备完全的谐波电压补偿能力，该模块链中模块电容数目M为自然数，且满足：

$$M \geq \frac{U_{dc}}{4 \cdot U_c};$$

所述每相交流侧输出电压由对偶单极电压模块链的两个端口之间的电压U_{SM}、以及三电平桥臂中点与直流公共中点之间的电压U_{UO}组成；其中，U_{SM}等于N个单极电压模块端口电压u_{SM}之和。

7.根据权利要求6所述的混合多电平变流器，其特征在于，所述混合多电平变流器处在正常运行时，U_{SM}共具有2M+1个电平状态，分别为：0，$\pm U_c$、$\pm 2U_c$、…、$\pm(M-1)U_c$、$\pm MU_c$；

所述混合多电平变流器直流侧发生短路故障时，对偶单极电压模块链中的全部全控开关器件均受控关断，进入闭锁状态，故障电流对模块链中的2M个电容充电，直至电流衰减至零。

8.根据权利要求6所述的混合多电平变流器，其特征在于，控制所述每相三电平桥壁中各个全控开关器件单元的导通或关断状态，三电平桥臂中点与直流公共中点之间的电压U_{U0}共有3个电平数目，混合多电平变流器的交流电压侧电压，共有2M+3个电平数目。

对偶单极电压模块链及其混合多电平变流器

技术领域

[0001] 本发明属于电力电子技术和电力输配电领域，特别涉及一种对偶单极电压模块链及其混合多电平变流器。

背景技术

[0002] 应用在柔性直流输电、电机驱动等领域的传统两电平、三电平变流器，常常采用两相或三相结构，实现交流-直流的功率转换；在高压应用场合，会结合全控开关器件(典型如绝缘栅双极型晶体管，IGBT)的串联技术构成高压两电平或高压三电平变流器。这类变流器存在的主要问题是由于电平数目少，为获得较好的输出谐波特性，需要大幅度提高开关频率，但随之带来开关损耗激增的缺点，限制了开关频率的进一步提高；同时，此类变流器在直流侧发生短路故障时，无法通过闭锁全控开关器件实现对直流故障电流的抑制，必须增加其他辅助设备实现直流故障闭锁。以在高压柔性直流输电工程上普遍采用的两/三电平拓扑变流器为例，由于输出谐波特性差，电压变化率(dv/dt)高，需要安装专门的交流滤波装置，且开关损耗大、转换效率低；同时由于不具备直流故障闭锁或直流故障穿越的能力，往往必须采用成本高昂的直流电缆或配备直流断路器。

[0003] 与传统的两电平、三电平变流器相比，模块化多电平变流器(MMC)具有可模块化设计、谐波特性好、dv/dt低、开关频率低、损耗小等优点，克服了两/三电平变流器的绝大部分缺点，因而在高压柔性直流输电、高压电机驱动、冶金、风电场低电压穿越等领域得到了较为广泛的研究和应用。但相对而言，MMC也存在使用器件数和电容数较多的缺点，不但工程造价显著提高，由于所需的电容数量多、体积大，还大幅增加了变流器整体的体积和占地面积。另一方面，目前投运的MMC工程基本上采用半桥模块结构，即MMC的每相桥臂均由相同数量的半桥模块级联而成。与两/三电平变流器相同，半桥模块式MMC也不具有直流故障闭锁或穿越的能力。

[0004] 为解决该问题，可采用的第一类典型技术，是将各类具有直流故障闭锁能力的功率模块，全部或者部分替代半桥模块，以实现MMC的直流故障闭锁能力。比如，每相桥臂全部采用具备直流故障闭锁能力的箝位双子模块(CDSM，clamp-double sub-module)替代半桥模块构成的MMC(Marquardt，R.，"Modular Multilevel Converter:An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-applications，"Power Electronics Conference(IPEC)，2010International，vol.，no.，pp.502，507，21-24June 2010.)。或者，采用不同类型功率模块通过不同的混合方式实现直流故障闭锁能力，包括每个桥臂内由不同类型的功率模块进行混合的模块混合型MMC(Zeng，R.；Xu，L.；Yao，L.；Morrow，J.，"Pre-charging and DC Fault Ride-Through of Hybrid MMC Based HVDC Systems，"Power Delivery，IEEE Transactions on，vol.PP，no.99，pp.1，1.2014.)，以及三相上桥臂与下桥臂分别采用不同类型功率模块的混合的桥臂混合型MMC(AlirezaNami，Jiaqi Liang FransDijkhuizen，“Analysis of Modular Multilevel Converters with DC Short Circuit Fault Blocking Capability in Bipolar HVDC Transmission Systems，"Power

Electronics and Applications,2015 17th European Conference on ECCE-Europe)。通过选择不同类型的功率模块、采用不同的混合方式，其目的都是尽可能地降低具备直流闭锁故障能力的功率模块的数目和每个模块中全控开关器件的数目，因为此类模块的成本和损耗都大于半桥模块。尽管如此，上述手段构成的MMC，使用的全控开关器件数量和成本，均明显大于半桥模块式MMC。

[0005] 可采用的第二类技术，则是将全桥模块(FBSM)与串联的全控开关器件(典型IGBT)组构成的两/三电平拓扑通过不同方式进行混合，包括交替桥臂导通型变流器(AAC,alternative arm converter)(Merlin,M.M.C.;Green,T.C.;Mitcheson,P.D.;Trainer,D.R.;Critchley,R.;Crookes,W.;Hassan,F.,"The Alternate Arm Converter:A New Hybrid Multilevel Converter With DC-Fault Blocking Capability,"Power Delivery,IEEE Transactions on,vol.29,no.1,pp.310,317,Feb.2014.);交流侧级联H桥混合多电平(HCMC,hybrid cascaded multilevel converter with ac side cascaded H-bridge cells)(Adam,G.P.;Ahmed,K.H.;Williams,B.W.,"Mixed cells modular multilevel converter,"Industrial Electronics(ISIE),2014IEEE 23rd International Symposium on,vol.,no.,pp.1390,1395,1-4June 2014)和由本发明申请人曾提出的“一种中点箝位型级联H桥混合多电平变流器，HNMC”(专利申请号：201510276068.7)等。上述方案的共同特点是均采用FBSM与IGBT串联技术构成的高压两电平或三电平结构进行混合，优势是不但使用的IGBT器件数量与混合型MMC相当或更少，而且直流电容的使用量大幅降低，兼具两/三电平变流器中器件数量少和MMC变流器输出特性好的优点因而，第二类技术相对于第一类，MMC在体积和占地面积以及工程成本上相对更具优势。

[0006] 在第二类技术中，HCMC和HNMC使用的功率模块数量相同，都仅为AAC的一半，是当前最具成本优势的MMC拓扑类型。而且，HNMC采用了IGBT串联的三电平拓扑，相对于HCMC其串联的IGBT可实现更低的开关频率，更具效率优势，只是由于采用中点箝位型三电平拓扑需增加了一定数量的二极管和电容组，增加了一部分成本和体积，故与HCMC总体比较而言优势尚不够明显。基于第二类技术构成的MMC全部使用全桥模块，其原因与该类型MMC的运行特性有关，表现在两方面：其一，需要利用全桥模块在内部全控开关器件全部关断期间，对双向故障电流相同的闭锁能力；其二，需要全桥模块在双向电流条件下具备正、负、零双极性电压输出能力，用以承担两/三电平桥臂端口与三相交流电压之间的谐波电压，保持变流器良好的谐波输出特性。与HCMC不同的是，通过控制HNMC中三电平桥臂的PWM调制策略，HNMC交流侧模块链双极电压的输出需求，可只占HCMC交流侧模块链双极电压输出需求的1/2。但在实际设计中，由于需要相同的直流故障闭锁能力，HNMC和HCMC两种变流器的交流侧模块链中所需的全桥模块数量也是相同的。因此对于HNMC来说，其交流侧模块链中至少有一半数量的全桥模块在正常运行状态实际并未发挥作用，仅用于直流短路故障状态的闭锁，器件利用率很低，存在较大的浪费。同时，全桥模块结构复杂、成本较高，每个全桥模块使用的全控开关器件数目是4只，因此，HNMC和HCMC共计三相模块链中使用的全控开关器件的总体数量和成本不容小觑。

[0007] 与全桥模块相比，采用相同规格全控开关器件的单极电压模块，在内部全控开关器件全部关断时具备与全桥模块相同的双向故障电流闭锁能力，并且使用的全控开关器件

更少。所述单极电压模块可包括两电平的单极电压全桥模块(UBSM,unipolar-voltage full-bridge sub-module)和三电平交错连接模块(3LCC,three-level cross-connected sub-module)(Qin,J.,et al.,Hybrid Design of Modular Multilevel Converters for HVDC Systems Based on Various Submodule Circuits.IEEE Transactions on Power Delivery,2015.30(1):p.385-394.)。已有的两种两电平单级电压全桥模块,其结构如图1所示,均包括第一并联支路、第二并联支路和电容C,其中第一并联支路包括第一全控开关器件T_1和第二全控开关器件T_2,第二并联支路包括第三全控开关器件T_3和第一二极管D_1;

[0008] 其中,第一两电平单级电压全桥模块10的结构连接关系,见图1(a):T_1的发射极与T_2的集电极相连接于端子11,T_1的集电极作为第一并联支路的阳极,T_2的发射极作为第一并联支路的阴极;D_1的阳极与T_3的集电极相连接于端子12,D_1的阴极作为第二并联支路的阳极,T_3的发射极作为第二并联支路的阴极;第一并联支路阳极、第二并联支路阳极均与C的阳极相连,第一并联支路阴极、第二并联支路阴极均与C的阴极相连。

[0009] 第二两电平单级电压全桥模块20的结构连接关系,见图1(b):T_1的发射极与T_2的集电极相连接于端子21,T_1的集电极作为第一并联支路的阳极,T_2的发射极作为第一并联支路的阴极;D_1的阴极与T_3的发射极相连接于端子22,D_1的阳极作为第二并联支路的阴极,T_3的集电极作为第二并联支路的阳极;第一并联支路阳极、第二并联支路阳极均与C的阳极相连,第一并联支路阴极、第二并联支路阴极均与C的阴极相连。

[0010] 已有的一种三电平交错连接模块100,其结构如图2所示,包括第一直流电容器C_a、第二直流电容器C_b、第一全控开关器件T_1、第二全控开关器件T_2、第三全控开关器件T_3、第四全控开关器件T_4、第五全控开关器件T_5和第一二极管D_6(T_5、D_6均位于对角线上)。其中,T_1的发射极与T_2的集电极相连,其连接点作为该模块的正极端101,T_1的集电极与C_a的正极端相连作为第一正极端,T_2的发射极与C_a的负极端相连作为第一负极端;T_3的发射极与T_4的集电极相连,其连接点作为该模块的负极端102,T_3的集电极与C_b的正极端相连作为第二正极端,T_4的发射极与C_b的负极端相连作为第二负极端;D_6的阴极与第一正极端相连、阳极与第二负极端相连,T_5的集电极与第二正极端相连、发射极与第一负极端相连。

[0011] 在故障电流闭锁能力上具体而言,一个UBSM与一个全桥模块相当,一个3LCC与两个全桥模块相当。每个UBSM中仅3只全控开关器件,每个3LCC中至多6只全控开关器件,具备相同故障闭锁电压下比全桥模块平均节省了25%的全控开关器件。因此若能用单极电压模块链替代全桥模块链将具有显著的成本优势。然而,单极电压模块共同的问题是,在流经双向电流运行范围不具备零和正、负双极性电压输出能力,只在通过单一电流方向具备零和正、负双极性电压输出能力,在通过相反电流方向仅具备零和正极性或者零和负极性的单极电压输出能力;或者说,单极电压模块在流经双向电流的运行范围仅具备零和正极性或者零和负极性的单极电压输出能力。故此,目前由单极电压模块构成的模块链在运行范围也同样受此限制,单极电压模块链仅被用于基于第一类技术的MMC的桥臂中,即采用多个相同的单极电压模块相互串联构成单极电压模块链,并控制模块内每个全控开关器件的导通和关断状态,使得每个单极电压模块在双向电流运行范围,仅输出零和正极性电压。

[0012] 因此,传统的单极电压模块链的连接结构及其控制方式,使得其在双向电流运行范围不具备正、负双极性电压输出能力,因而也无法用于HCMC或HNMC中,替代全控开关器件数量更多,成本更为昂贵的全桥模块链。

发明内容

[0013] 本发明的目的是克服已有技术的不足之处,提出一种对偶单极电压模块链及由之构建的混合多电平变流器,能够以较低的工程成本和紧凑的占地空间,实现宽范围的交-直流变换,转换效率高,谐波特性好,并具备直流故障穿越的能力,为高压直流输电、电机驱动等领域存在的问题提供新的解决方案。

[0014] 本发明提出的一种对偶单级电压模块链,由N_1个正极性单极电压模块和N_2个负极性单极电压模块的共计N个单极电压模块依次串联构成,N_1、N_2均为自然数,且$N_1 \geqslant 1$,$N_2 \geqslant 1$,每个模块包括一个正极端“+”和一个负极端“-”,正极端“+”和负极端“-”之间的电压差为该模块端口电压u_{SM},其特征在于:前一个模块的负极端与后一个模块的正极端相连接,第1个模块的正极端作为该对偶单极电压模块链的一个端口,第N个模块的负极端作为该对偶单极电压模块链的另一个端口,且在双向电流下具备零和正、负双极性电压输出能力;

[0015] 所述的正极性单极电压模块,通过对模块内部全控开关器件导通和关断不同状态的控制,当其电流i_{SM}方向从正极端“+”流入,从负极端“-”流出时,端口电压u_{SM}的电平包括零和正、负极性;当电流i_{SM}方向从负极端“-”流入,从正极端“+”流出时,端口电压u_{SM}电平仅包括零和正极性电平或零和负极性电平,且在正常运行时,端口电压u_{SM}电平仅为零电平;

[0016] 所述的负极性单极电压模块,通过对模块内部全控开关器件导通和关断不同状态的控制,当其电流i_{SM}方向从负极端“-”流入,从正极端“-”流出时,端口电压u_{SM}的电平包括零和正、负极性;当电流i_{SM}方向从正极端“+”流入,从负极端“-”流出时,端口电压u_{SM}电平仅包括零和正极性电平或零和负极性电平,且在正常运行时,端口电压u_{SM}电平仅为零电平。

[0017] 所述N_1个正极性单极电压模块包括由K_{11}个第一两电平单级电压全桥模块10和K_{12}个第二两电平单级电压全桥模块20构成的K_1个两电平正极性单极电压模块、以及由L_1个三电平交错连接模块100构成的三电平正极性单极电压模块,K_{11}、K_{12}、K_1、L_1均为整数,且同时满足:$0 \leqslant K_{11} \leqslant K_1$、$0 \leqslant K_{12} \leqslant K_1$、$0 \leqslant K_1 \leqslant N_1$、$0 \leqslant L_1 \leqslant N_1$、$K_1+L_1=N_1$;所述$N_2$个负极性单极电压模块包括由$K_{21}$个第一两电平单级电压全桥模块10和$K_{22}$个第二两电平单级电压全桥模块20构成的$K_2$个两电平正极性单极电压模块、以及$L_2$个三电平交错连接模块100构成的三电平正极性单极电压模块,K_{21}、K_{22}、K_2、L_2均为整数,且同时满足$0 \leqslant K_{21} \leqslant K_2$、$0 \leqslant K_{22} \leqslant K_2$、$0 \leqslant K_2 \leqslant N_2$、$0 \leqslant L_2 \leqslant N_2$、$K_2+L_2=N_2$;所述对偶单极电压模块链中正极性单极电压模块电容数和负极性单极电压模块电容数相等,均用M表示:

[0018] $$\begin{cases} M = N_1 + L_1 \\ M = N_2 + L_2 \end{cases};$$

[0019] 所述第一、第二两电平单级电压全桥模块的电容数目均为1,该电容阳极与阴极之间的直流额定电压记为U_c,第一、第二两电平单级电压全桥模块内各个全控开关器件的额定耐压值为U_c;

[0020] 所述三电平交错连接模块的电容数目为2,每个电容阳极与阴极之间的直流额定电压记为U_c,其中,位于每条对角线上的全控开关器件的总额定耐压值为$2U_c$,其余各个全控开关器件的额定耐压值为U_c。

[0021] 本发明还提出一种基于上述对偶单级电压模块链构建的混合多电平变流器,与交

流电压相连，其特征在于，该变流器至少包括两个相同的相，每相包括一个三电平桥臂、由一个对偶单极电压模块链和一个电抗器串联构成的串联支路；其中，所述串联支路的一端接入三电平桥臂的中点，串联支路的另一端接入交流电压；三电平桥臂的正极端均接入混合多电平变流器的直流母线正极，三电平桥臂的负极端均接入混合多电平变流器的直流母线负极。

[0022] 所述每相的三电平桥壁采用中点箝位型三电平桥臂，该变流器还包括两个直流电容器；所述中点箝位型三电平桥臂均由四个全控开关器件单元和两个二极管单元构成；其中，第一电容的阳极与直流母线正极相连，第一电容的阴极与第二电容的阳极相连作为该变流器的直流公共点，第二电容的阴极与直流母线负极相连；第一全控开关器件单元的集电极作为该三电平桥臂的正极端，第一全控开关器件单元发射极、第二全控开关器件单元集电极相连的公共端与第一二极管单元的阴极相连，第二全控开关器件单元发射极与第三全控开关器件单元集电极相连接的公共端作为该三电平桥臂中点，第三全控开关器件单元发射极与第四全控开关器件单元集电极相连的公共端与第二二极管单元的阳极相连，第四全控开关器件单发射极作为该三电平桥臂的负极端，第一二极管单元的阳极与第二二极管单元的阴极相连接入直流公共中点；各个全控开关器件单元、二极管单元、直流电容的额定耐压值均相同，记为$U_{dc}/2$；所述各个全控开关器件单元均由m个额定耐压值为U_d的全控开关器件依次串联构成；所述各个二极管单元均由m个额定耐压值为U_d的二极管依次串联构成。

[0023] 所述每相的三电平桥壁采用飞跨电容型三电平桥臂，该飞跨电容型三电平桥臂均由四个全控开关器件单元和一个箝位电容构成；其中，第一全控开关器件单元的集电极作为该三电平桥臂的正极端，第一全控开关器件单元发射极、第二全控开关器件单元集电极均与箝位电容的阳极相连，第二全控开关器件单元发射极与第三全控开关器件单元集电极相连接的公共端作为该三电平桥臂中点，第三全控开关器件单元发射极与第四全控开关器件单元集电极相连的公共端与箝位电容的阴极相连，第四全控开关器件单发射极作为该三电平桥臂的负极端；各个全控开关器件单元、箝位电容的额定耐压值均相同，记为$U_{dc}/2$；所述各个全控开关器件单元均由m个额定耐压值为U_d的全控开关器件依次串联构成。

[0024] 所述m为自然数，且$m \geq U_{dc}/(2U_d)$；

[0025] 记所述混合多电平变流器接入的交流电压的线电压有效值为U_L，若使该变流器在直流侧发生直流短路故障时具备短路故障抑制能力，所述对偶单极电压模块链中模块电容数目M为自然数，且满足：

[0026] $$M \geq \frac{\sqrt{2}U_L}{4 \cdot U_c};$$

[0027] 若使得所述对偶单极电压模块链具备完全的谐波电压补偿能力，该模块链中模块电容数目M为自然数，且满足：

[0028] $$M \geq \frac{U_{dc}}{4 \cdot U_c};$$

[0029] 所述每相交流侧输出电压由对偶单极电压模块链的两个端口之间的电压U_{SM}、以及三电平桥臂中点与直流公共中点之间的电压U_{U0}组成；其中，U_{SM}等于N个单极电压模块端口电压u_{SM}之和。

[0030]　所述混合多电平变流器正常运行时，U_{SM}共具有2M+1个电平状态，分别为：0，$\pm U_c$、$\pm 2U_c$、…、$\pm(M-1)U_c$、$\pm MU_c$；

[0031]　所述混合多电平变流器直流侧发生短路故障时，对偶单极电压模块链中的全部全控开关器件均受控关断，进入闭锁状态，故障电流对模块链中的2M个电容充电，直至电流衰减至零。

[0032]　控制所述每相三电平桥壁中各个全控开关器件单元的导通或关断状态，三电平桥臂中点与直流公共中点之间的电压U_{U0}共有3个电平数目，混合多电平变流器的交流电压侧电压，共有2M+3个电平数目。

[0033]　本发明提出的一种对偶单极电压模块链及由之构建的混合多电平变流器，其特点及有益效果在于：

[0034]　本发明根据第二类技术MMC拓扑的运行特性，克服了全桥模块开关器件数量多、成本高，以及全桥模块链的器件利用率不足的缺陷，通过分析现有单极电压模块链的连接方式及其内部全控开关器件的导通、关断状态的控制方式的不足，采用对偶的方式构造出在双向电流条件下具备双极电压输出能力的对偶单极电压模块链，同时，该模块链与具有相同模块电容数量的全桥模块链相比较，其双极性电压输出范围是后者的一半，但直流故障闭锁能力与后者相当；考虑到三电平桥臂与外部交流电压之间的谐波电压范围基本为直流电压的一半，该特性非常适于与三电平桥臂的混合，能有效提高对模块链全控开关器件的利用率；进一步地本发明还将基于所述对偶单极电压模块链的不同类型的三电平变流器拓扑结合，构造出具备直流故障闭锁能力的新型变流器，这种变流器其模块链使用的全控开关器件数量仅为HCMC和HNMC的75％，具有全控开关器件数量少，成本低，输出电压谐波特性好和转换效率高等优点。

[0035]　1、本发明克服了传统两电平、三电平变流器以及采用半桥模块结构的MMC，在直流侧发生双极短路故障时无法对直流故障进行闭锁的缺点；所提出的混合多电平变流器，利用交流侧的对偶单极电压模块链电路闭锁状态，可有效实现直流短路故障闭锁，保护变流器内部的器件，因而可应用于采用架空线的远距离柔性直流输电工程；

[0036]　2、本发明克服了传统两电平或三电平变流器较低的开关频率与变流器交流侧较大的谐波的缺陷，本发明所提出的多电平变流器，利用其对偶单极电压模块链电路，混合三电平桥臂，输出电压共包括2n+3个电平。在有效改善谐波特性的同时，仍保持三电平桥臂中全空开关器件单元较低的开关频率，开关损耗小。

[0037]　3、与采用全桥模块、箝位双子模块结构的MMC以及AAC相比，本发明所用全控开关器件大大减少，器件成本和体积大为降低；

[0038]　4、与HCMC相比，本发明提出的对偶单极电压模块链具备与HCMC中全桥模块链完全相同的直流电压闭锁能力，但使用的全控开关器件仅为后者的75％，并且全控开关器件单元频率更低；此外相同条件下，三电平桥臂相比较HCMC中的两电平桥臂，每个全控开关器件单元中串联的器件数目更少，有利于全控开关器件单元的串联均压，并降低桥臂dv/dt。

附图说明

[0039]　图1是已有的两种两电平单级电压全桥模块(10、20)的结构图；

[0040]　图2是已有的三电平交错连接模块块100的结构图；

[0041] 图3是本发明的对偶单极电压模块链30的结构图；

[0042] 图4是本发明的单极电压模块示意图；

[0043] 图5是本发明的混合多电平变流器40的结构示意图；

[0044] 图6是本发明的采用中点箝位三电平桥臂的混合多电平变流器40的电路结构图；

[0045] 图7是本发明的采用飞跨电容三电平桥臂的混合多电平变流器40的电路结构图；

[0046] 图8是本发明的桥臂电路中第一全控开关器件单元S_1的电路结构图；

[0047] 图9是本发明的桥臂电路中第一二极管单元D_1的电路结构图；

[0048] 图10为本发明的采用中点箝位三电平桥臂的混合多电平变流器，其输出功率、网侧电流、直流母线电压、直流电容器电压和直流侧电流的波形图。

具体实施方式

[0049] 本发明提出的对偶单极电压模块链，结合附图及具体实施例进一步说明如下：

[0050] 本发明提出的对偶单极电压模块链30，见图1，由包括N_1个正极性单极电压模块和N_2个负极性单极电压模块的共计N个($N=N_1+N_2$，N_1、N_2均为自然数，且$N_1 \geq 1$，$N_2 \geq 1$)单极电压模块依次串联构成，每个模块包括一个正极端“+”和一个负极端“-”，正极端“+”和负极端“-”之间的电压差为该模块端口电压u_{SM}，见图2。其结构连接关系为：第1个模块的正极端作为对偶单极电压模块链30的一个端口，第1个模块的负极端与第2个模块的正极端相连接，…，第k个($k=2,3,\cdots,N-1$)模块的负极端与第k+1个模块的正极端相连，…，第N-1个模块的负极端与第N个模块的正极端相连，第N个模块的负极端作为对偶单极电压模块链30的另一个端口，且在双向电流下具备零和正、负双极性电压输出能力；

[0051] 所述的正极性单极电压模块，当其电流i_{SM}方向从正极端“+”流入，从负极端“-”流出时，通过对模块内部全控开关器件导通和关断不同状态的控制，端口电压u_{SM}的电平可包括零和正、负极性，当电流i_{SM}方向从负极端“-”流入，从正极端“+”流出时，端口电压u_{SM}电平仅包括零和正极性电平或零和负极性电平；且在正常运行时，端口电压u_{SM}电平仅为零电平；

[0052] 所述的负极性单极电压模块，当其电流i_{SM}方向从负极端“-”流入，从正极端“-”流出时，通过对模块内部全控开关器件导通和关断不同状态的控制，端口电压u_{SM}的电平可包括零和正、负极性，当电流i_{SM}方向从正极端“+”流入，从负极端“-”流出时，端口电压u_{SM}电平仅包括零和正极性电平或零和负极性电平；且在正常运行时，端口电压u_{SM}电平仅为零电平。

[0053] 本发明中所述的正常运行，含义是指所述混合多电平变流器40的直流极间，即直流母线正极DC+与直流母线负极DC-之间未发生直流短路故障时的运行状态。

[0054] 所述正极性单极电压模块，其具体实施方式至少包括三种结构形式：

[0055] (1)由图1(b)所示的第二两电平单级电压全桥模块20构成，该模块20的一个端子21作为该模块的正极端，另一个端子22作为该模块的负极端；

[0056] (2)由图1(a)所示的第一两电平单级电压全桥模块10构成，该模块10的一个端子12作为该模块的正极端，另一个端子11作为该模块的负极端；

[0057] (3)由图2所示的三电平交错连接模块100构成，该模块100的一个端子102作为该模块的正极端，另一个端子101作为该模块的负极端；

[0058] 所述负极性单极电压模块，其具体实施方式至少包括三种结构形式：

[0059] (1)由图1(a)所示的第一两电平单级电压全桥模块10构成，该模块10的一个端子

11作为该模块的正极端，另一个端子12作为该模块的负极端；

[0060] (2)由图1(b)所示的第二两电平单级电压全桥模块20构成，该模块20的一个端子22作为该模块的正极端，另一个端子21作为该模块的负极端；

[0061] (3)由图2所示的三电平接错连接模块100构成，该模块100的一个端子101作为该模块的正极端，另一个端子102作为该模块的负极端；

[0062] 本发明提出的对偶单极电压模块链30的具体实施方式，令N_1个正极性单极电压模块中，由K_{11}个第一两电平单级电压全桥模块10和K_{12}个第二两电平单级电压全桥模块20构成的两电平正极性单极电压模块数量为K_1(K_{11}、K_{12}、K_1均为整数，且同时满足：$0 \leqslant K_{11} \leqslant K_1$、$0 \leqslant K_{12} \leqslant K_1$、$0 \leqslant K_1 \leqslant N_1$，所述模块10、20的前后顺序并不限定)，其余由三电平接错连接模块100构成的三电平正极性单极电压模块数量为L_1(L_1为整数，且$0 \leqslant L_1 \leqslant N_1$)，显然满足$K_1+L_1=N_1$；$N_2$个负极性单极电压模块中，由$K_{21}$个第一两电平单级电压全桥模块10和$K_{22}$个第二两电平单级电压全桥模块20构成的两电平负极性单极电压模块数量为K_2(K_{21}、K_{22}、K_2均为整数，且同时满足：$0 \leqslant K_{21} \leqslant K_2$、$0 \leqslant K_{22} \leqslant K_2$、$0 \leqslant K_2 \leqslant N_2$，所述模块10、20的前后顺序并不限定)，其余由三电平接错连接模块100构成的三电平负极性单极电压模块数量为L_2(L_2为整数，且$0 \leqslant L_2 \leqslant N_2$)，显然满足$K_2+L_2=N_2$；

[0063] 用M表示对偶单极电压模块链30中正极性单极电压模块电容数和负极性单极电压模块电容数，两者相等且满足：

[0064]
$$\begin{cases} M = N_1 + L_1 \\ M = N_2 + L_2 \end{cases} \quad (1)$$

[0065] 式中M为自然数，每个两电平单极电压模块的电容数目是1，每个三电平单极电压模块的电容数目是2。

[0066] 设定所采用的两种两电平单级电压全桥模块10、20内电容C的阳极与阴极之间的直流额定电压为U_c，则第一～第三全控开关器件T_1、T_2、T_3以及第一二极管D_1的额定耐压值与电容C的直流额定电压相匹配，均选择为U_c。

[0067] 设定所采用的三电平接错连接模块100内的电容C_a与C_b的阳极与阴极之间的直流额定电压均为U_c，则四个全控开关器件T_1、T_2、T_3、T_4的额定耐压值与电容C_a或C_b的直流额定电压相匹配，均选择为U_c；第五全控开关器件T_5与第一二极管D_6的额定耐压值均选择$2U_c$或者第五全控开关器件T_5由两只相同的全控开关器件T_{51}、T_{52}串联，第一二极管D_6由两只相同的二极管D_{61}、D_{62}串联构成，T_{51}、T_{52}、D_{61}、D_{62}的额定耐压值均选择为U_c。

[0068] 本发明提出的基于所述对偶单级电压模块链的混合多电平变流器40，如图5所示，图中0点表示直流侧电压中间电位点，称之为直流公共中点。该混合多电平变流器40与三相交流电压G连接，其中三个相的相应部件用I、II、III来表示。需要说明，该混合多电平变流器40亦可用两相构建或一般而言可以多相构建。

[0069] 混合多电平变流器40的每一相部件，包括一个三电平桥臂、由一个对偶单极电压模块链30和一个电抗器L串联构成的串联支路；其结构连接关系为：所述串联支路的一端接入三电平桥臂的中点U，该串联支路的另一端接入交流电压G，三电平桥臂的正极端P均接入混合多电平变流器40的直流母线正极DC+，三电平桥臂的负极端N均接入混合多电平变流器40的直流母线负极DC-。

[0070] 直流母线正极DC+与直流母线负极DC-之间的直流额定电压为U_{dc}。

[0071] 所述三电平桥臂，其结构类型包括但不限于中点箝位型三电平桥臂和飞跨电容型三电平桥臂。

[0072] 当混合多电平变流器40中的三电平桥臂采用中点箝位型三电平桥臂构建时，如图6所示，还包括第一直流电容器C_1、第二直流电容器C_2。其结构连接关系为：C_1的阳极与直流母线正极DC+相连，C_1的阴极与C_2的阳极相连，作为变流器40的直流公共中点O，C_2的阴极与直流母线负极DC-相连。混合多电平变流器40的每一相部件中的中点箝位三电平桥臂，包括第一全控开关器件单元S_1、第二全控开关器件单元S_2、第三全控开关器件单元S_3、第四全控开关器件单元S_4、第一二极管单元D_1和第二二极管单元D_2构成。每个中点箝位型三电平桥臂中各器件的连接关系为：S_1的集电极作为该三电平桥臂的正极端P，S_1的发射极、S_2的集电极相连的公共端与D_1的阴极相连，S_2的发射极与S_3的集电极相连接的公共端作为该三电平桥臂中点U，S_3的发射极与S_4的集电极相连的公共端与D_2的阳极相连，S_4的发射极作为该三电平桥臂的负极端N，D_1的阳极与D_2的阴极相连接入直流公共中点O。

[0073] 当所述混合多电平变流器40中的三电平桥臂采用飞跨电容型三电平桥臂构建时，如图7所示，其每一相部件中的飞跨电容型三电平桥臂，包括第一全控开关器件单元S_1、第二全控开关器件单元S_2、第三全控开关器件单元S_3、第四全控开关器件单元S_4和箝位电容C_0构成。每个飞跨电容三电平桥臂中各器件的连接关系为：S_1的集电极作为该三电平桥臂的正极端P，S_1的发射极、S_2的集电极均与C_0的阳极相连，S_2的发射极与S_3的集电极相连的公共端作为该三电平桥臂中点U，S_3的发射极与S_4的集电极相连的公共端与C_0的阴极相连，S_4的发射极作为三电平桥臂的负极端N。

[0074] 所述混合多电平变流器40的三电平桥臂，S_1、S_2、S_3、S_4的额定耐压值为$U_{dc}/2$，D_1、D_2的额定耐压值为$U_{dc}/2$，C_1、C_2、C_0的额定耐压值为$U_{dc}/2$。

[0075] 所述全控开关器件单元S_1、S_2、S_3、S_4，均可由m个额定耐压值为U_d的全控开关器件依次串联构成，见图8，以第一全控开关器件单元S_1为例，S_1由全控开关器件S_{11}、S_{12}、…、S_{1m}串联构成(全控开关器件通常为绝缘门极双极型晶体管，IGBT)，各器件连接关系为：S_{11}的集电极作为S_1的集电极，S_{11}的发射极与S_{12}的集电极相连，…，S_{1m}的发射极作为S_1的发射极。

[0076] 所述二极管单元D_1、D_2，均可由m个额定耐压值为U_d的二极管依次串联构成，见图9，以第一二极管单元D_1为例，D_1由二极管D_{11}、D_{12}、…、D_{1m}串联构成，各器件连接关系为：D_{11}的阴极作为D_1的阴极，D_{11}的阳极与D_{12}的阴极相连，…，D_{1m}的阳极为D_1的阳极。

[0077] 所述m为自然数，且m满足：$m \geq U_{dc}/(2U_d)$；

[0078] 记混合多电平变流器40接入的三相交流电压的线电压有效值为U_L，若使该变流器40在直流侧发生直流短路故障时具备短路故障抑制能力，所述对偶单极电压模块链30中模块电容数目M为自然数，且需满足(2)式：

[0079] $$M \geq \frac{\sqrt{2}U_L}{4 \cdot U_c} \qquad (2)$$

[0080] 若使得对偶单极电压模块链具备完全的谐波电压补偿能力，所述对偶单极电压模块链30中模块电容数目M为自然数，通常需满足(3)式：

[0081] $$M \geq \frac{U_{dc}}{4 \cdot U_c} \qquad (3)$$

[0082] 以混合多电平变流器40的任一相部件为例，其交流侧输出电压由两部分组成：一

部分是对偶单极电压模块链30的两个端口之间电压，记为U_{SM}，另一部分为三电平桥臂中点U与直流公共中点0之间的电压，记为U_{U0}；根据图1的结构连接关系，U_{SM}等于N个单极电压模块端口电压u_{SM}之和，即满足关系式：

[0083] $$U_{SM}=\sum_{k=1}^{N}u_{SM,k} \tag{4}$$

[0084] 混合多电平变流器40运行在正常运行时，所述对偶单极电压模块链30中每个单极电压模块内全控开关器件的导通或关断状态的控制方式为：

[0085] 当经过正极性单极电压模块的电流i_{SM}方向为从模块正极端流入，从负极端流出时，其u_{SM}保持零电平、正极性和负极性电平；当电流i_{SM}方向为从模块负极端流入，从正极端流出时，u_{SM}仅保持零电平。亦可具体表述为：当经过正极性单极电压模块的电流i_{SM}方向为从模块正极端流入，从负极端流出时，若该正极性单极电压模块由第一两电平单级电压全桥模块10或第二两电平单级电压全桥模块20构成，其u_{SM}电平近似等于：$+U_c$，0和$-U_c$；若该正极性单极电压模块由三电平交错连接模块100构成，其u_{SM}电平近似等于：$+2U_c$，$+U_c$，0和$-U_c$，$-2U_c$，当电流i_{SM}方向为从模块负极端流入，从正极端流出时，其u_{SM}始终近似等于0。

[0086] 当经过负极性单极电压模块的电流i_{SM}方向为从模块负极端流入，从正极端流出时，其u_{SM}保持零电平、正极性和负极性电平；当电流i_{SM}方向为从模块正极端流入，从负极端流出时，u_{SM}仅保持零电平。亦可具体表述为：当经过负极性单极电压模块的电流i_{SM}方向为从模块负极端流入，从正极端流出时，若该负极性单极电压模块由第一两电平单级电压全桥模块10或第二两电平单级电压全桥模块20构成，其u_{SM}电平近似等于：$+U_c$，0和$-U_c$；若该负极性单极电压模块由三电平交错连接模块100构成，其u_{SM}电平近似等于：$+2U_c$，$+U_c$，0和$-U_c$，$-2U_c$；当经过负极性单极电压模块的电流i_{SM}方向为从模块负极端流入，从正极端流出时，其u_{SM}始终近似等于0。

[0087] 结合(4)式，在混合多电平变流器40运行在正常运行时，对偶单极电压模块链30的端口电压U_{SM}共具有2M+1个电平数目，分别近似等于：0，$\pm U_c$、$\pm 2U_c$、…、$\pm(M-1)U_c$、$\pm MU_c$；控制全控开关器件单元S_1、S_2、S_3、S_4的导通或关断状态，U_{U0}共有3个电平数目，分别近似等于$+U_{dc}$、0和$-U_{dc}$；则混合多电平变流器40的交流电压侧电压，共有2M+3个电平数目。

[0088] 当混合多电平变流器40直流极间发生直流短路故障时，对偶单极电压模块链30中的全部全控开关器件均受控关断，进入闭锁状态，同时全控开关器件单元S_1、S_2、S_3、S_4全部关断，故障电流i_{SM}对模块链30中的2M个电容C充电，直至电流衰减至零。

[0089] 三电平桥臂中的全控开关器件单元通常的开关频率在50Hz～2kHz之间，调制方法可以采用包括但不限于基波调制方法、特定谐波消除方法、载波调制方法等调制方法；对偶单极电压模块链30中的全控开关器件通常的开关频率在300Hz～10kHz之间，其调制方法可以采用包括但不限于最近电平逼近方法、载波调制方法等调制方法。

[0090] 下面以$N_1=N_2=6$，$L_1=L_2=0$，$M=6$，共计15电平的由中点箝位型三电平桥臂构建的混合多电平变流器为例说明本发明的具体实施例。

[0091] 该实施例中的参数见下表。

[0092]

参量	参数
电抗 L/mH	10
单极电压模块电容 C/μF	4000
单极电压模块直流额定电压 U_c/kV	1.7
正极性或负极性单极电压模块电容数 M	6
对偶单极电压模块链 30 模块数目 N	12
全控开关器件单元内 IGBT 数 m	12
二极管单元内二极管数 m	12
交流侧线电压有效值 U_L/kV	22
交流侧电网频率 f/Hz	50
额定视在功率 S/MVA	20
直流额定电压 U_{dc}/kV	40

[0093] 本实施例中三电平桥臂中的全控开关器件单元采用基波调制方法，各全控开关器件单元的开关频率为150Hz；每相部件中，对偶单极电压模块链电路的调制方法采用最近电平逼近方法，电容均压方法采用开环排序法。

[0094] 在本实施例中，t＝0.3s前变流器正常工作，t＝0.3s时直流侧发生双极短路故障，混合多电平变流器40在检测到直流电流绝对值大于1kA时切换到故障闭锁模式。本实施例中混合多电平变流器40的输出功率、网侧电流、直流母线电压、直流电容器电压和直流侧电流的波形分别如图10(a)、(b)、(c)、(d)、(e)所示。从图10可见，本实施例的多电平变流器能够实现对功率的四象限控制，网侧电流谐波特性好，并能维持模块电容和直流电容的电压稳定，可长期平稳运行，实现交、直流变换及能量的传输；在直流短路故障后，变流器可以防止交流电网经直流故障回路形成三相短路，从而可以闭锁直流故障，保存对偶单极电压模块链中电容的能量，从而实现直流故障闭锁。

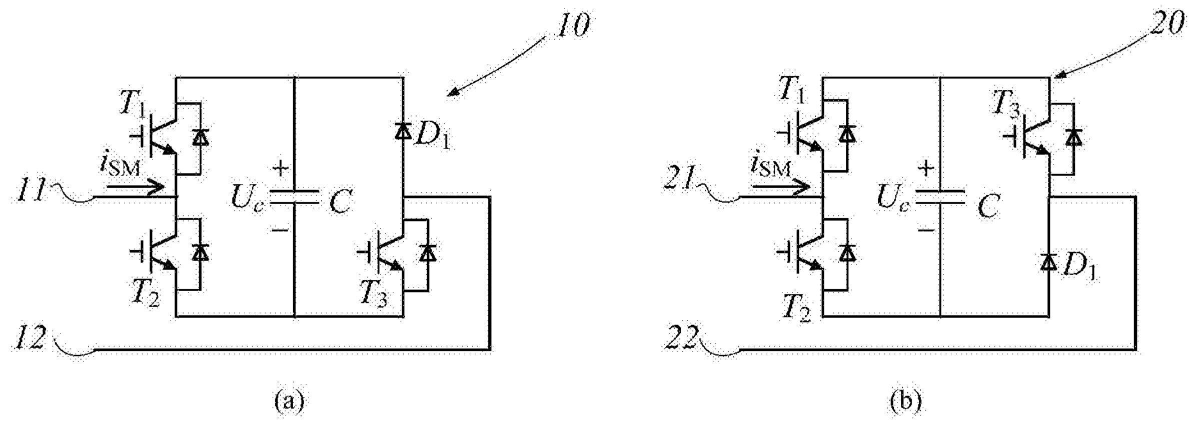

10
20
T1
T2
T3
D1
iSM
11
12
21
22
Uc
C
+
−
(a)
(b)

图1

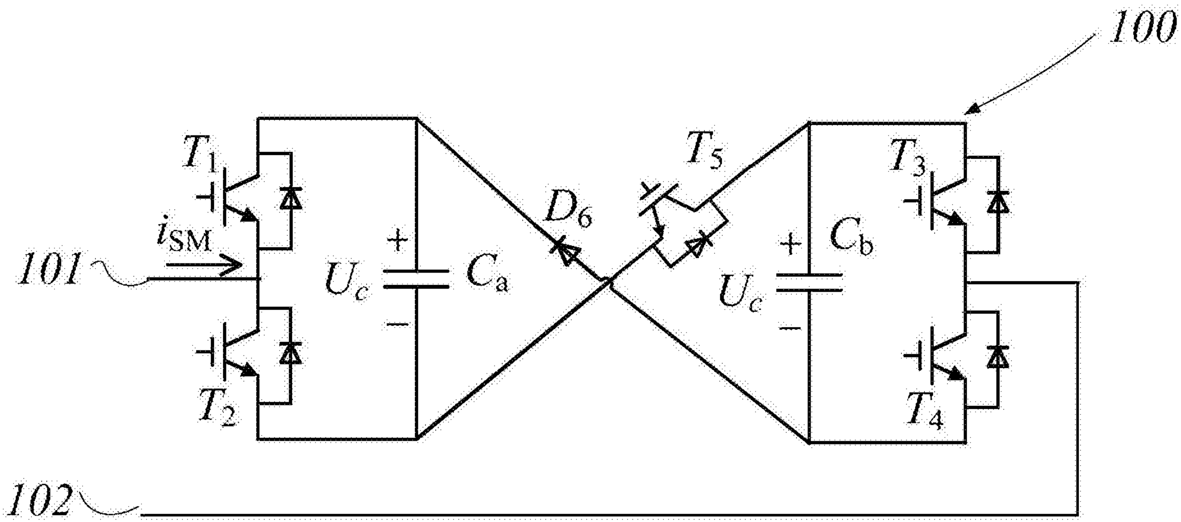

100
T1
T2
T3
T4
T5
D6
iSM
101
102
Uc
Ca
Cb
+
−

图2

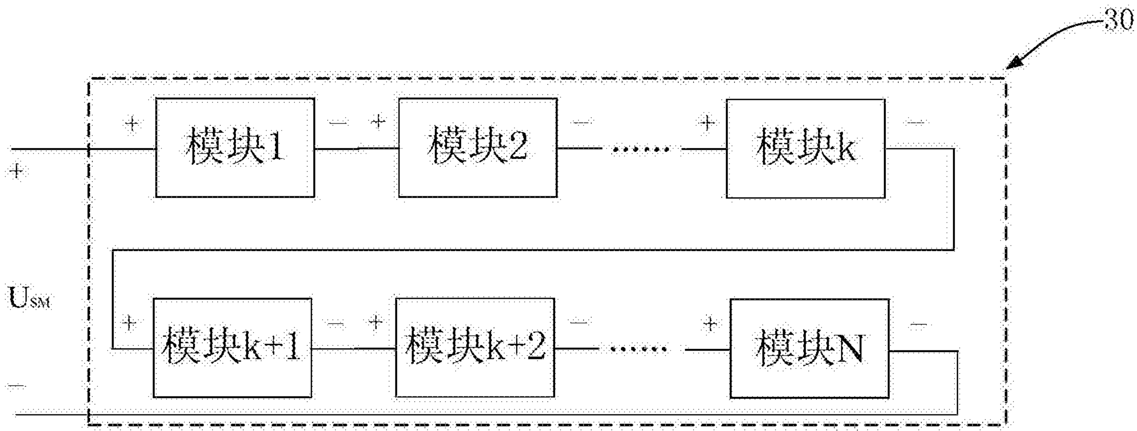

30
模块1
模块2
……
模块k
模块k+1
模块k+2
……
模块N
USM
+
−

图3


i_{SM}
+
u_{SM}
−
单极电压模块

图4

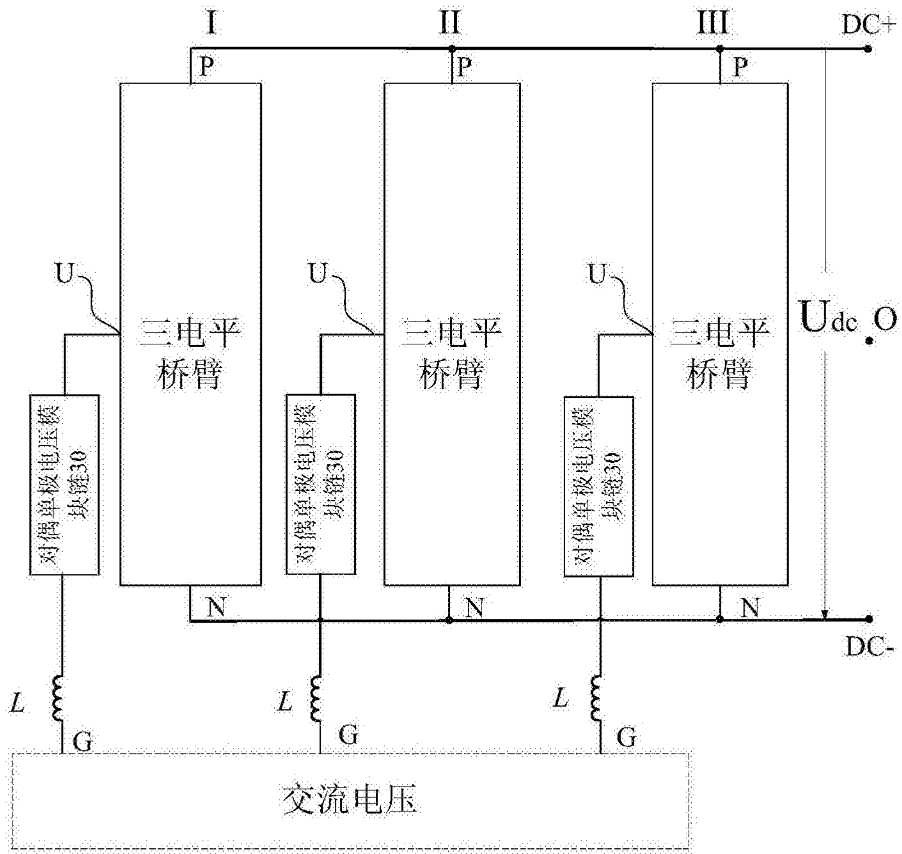

I
II
III
DC+
P
P
P
U
U
U
三电平
桥臂
三电平
桥臂
三电平
桥臂
U_{dc}
O
对偶单极电压模块链30
对偶单极电压模块链30
对偶单极电压模块链30
N
N
N
DC-
L
L
L
G
G
G
交流电压

图5

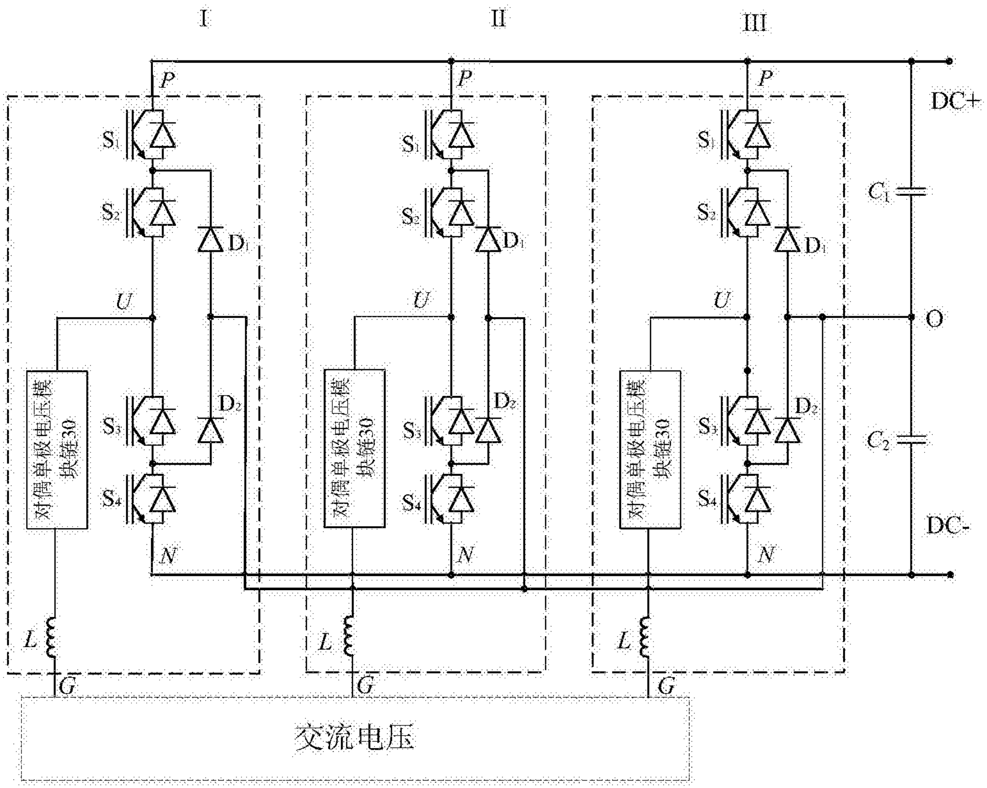

I
II
III
P
S1
S2
D1
U
D2
S3
S4
N
对偶单极电压模块链30
L
G
DC+
C1
O
C2
DC-
交流电压

图6

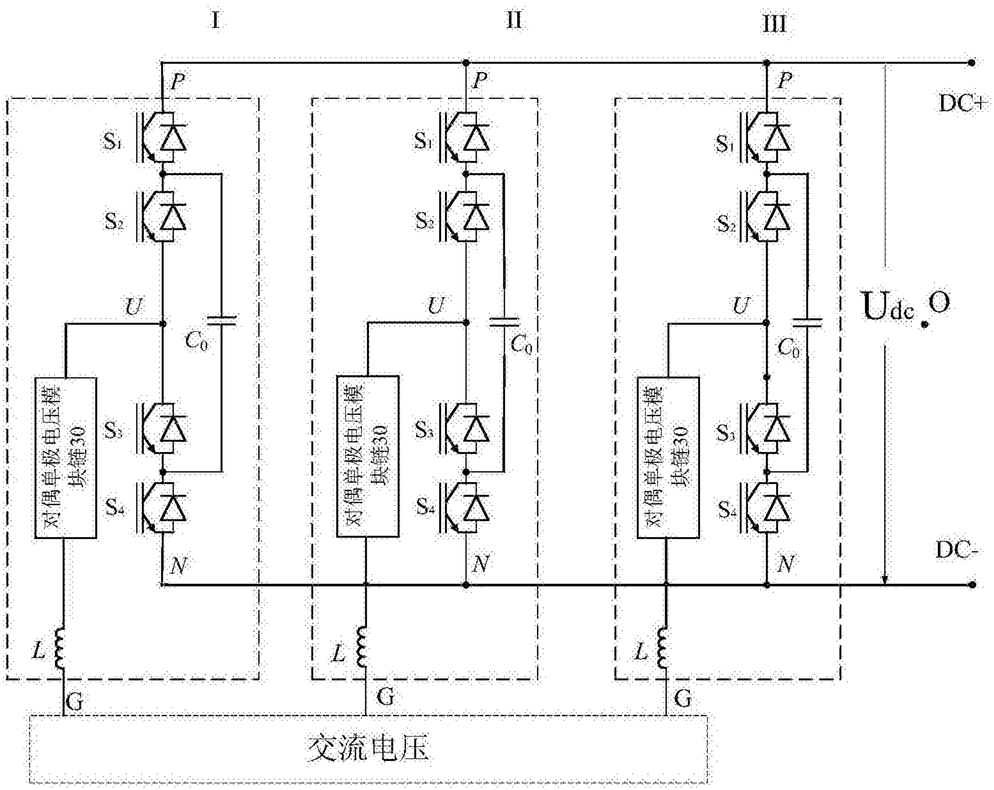

I
II
III
P
S1
S2
U
C0
S3
S4
N
对偶单极电压模块链30
L
G
DC+
Udc
O
DC-
交流电压

图7

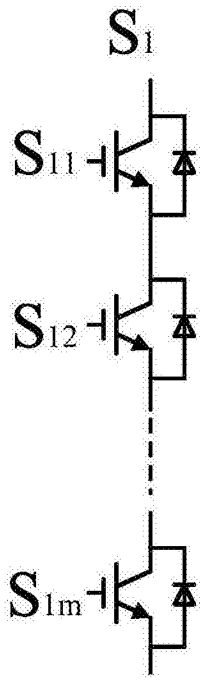

S1
S11
S12
S1m

图8

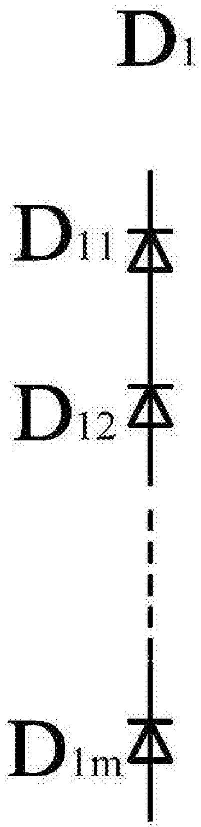
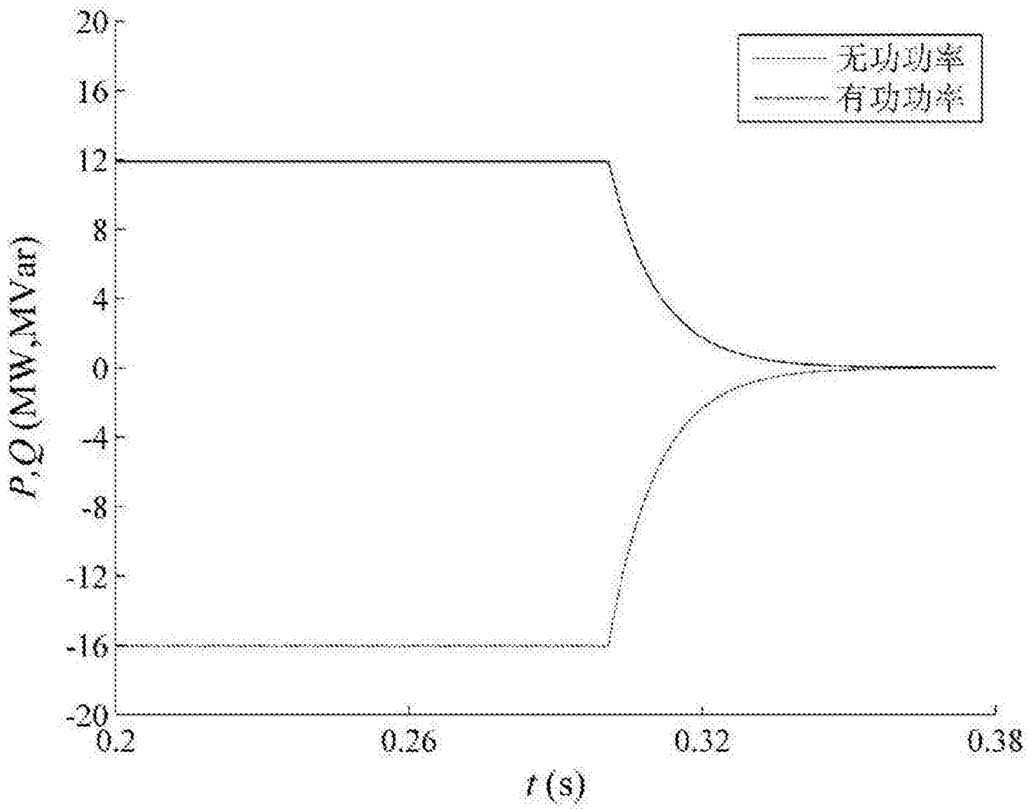
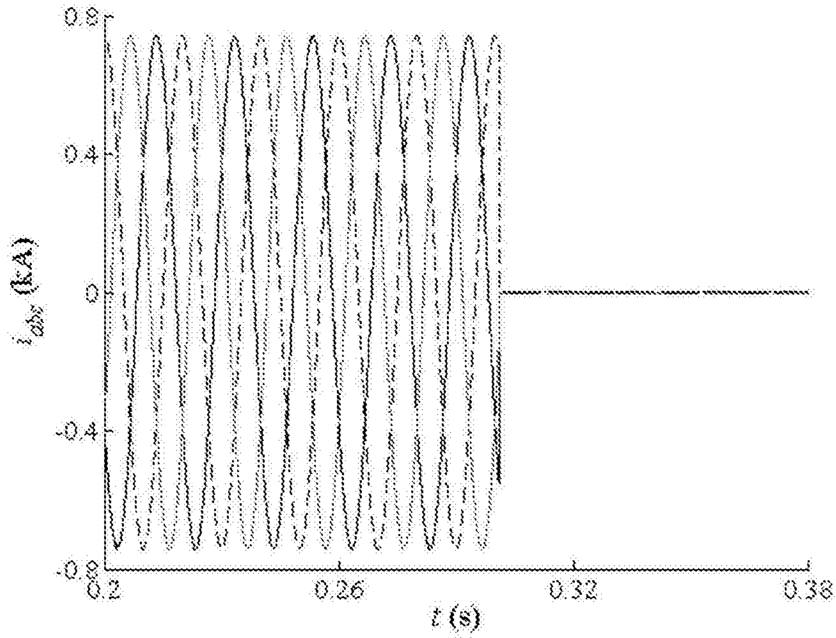


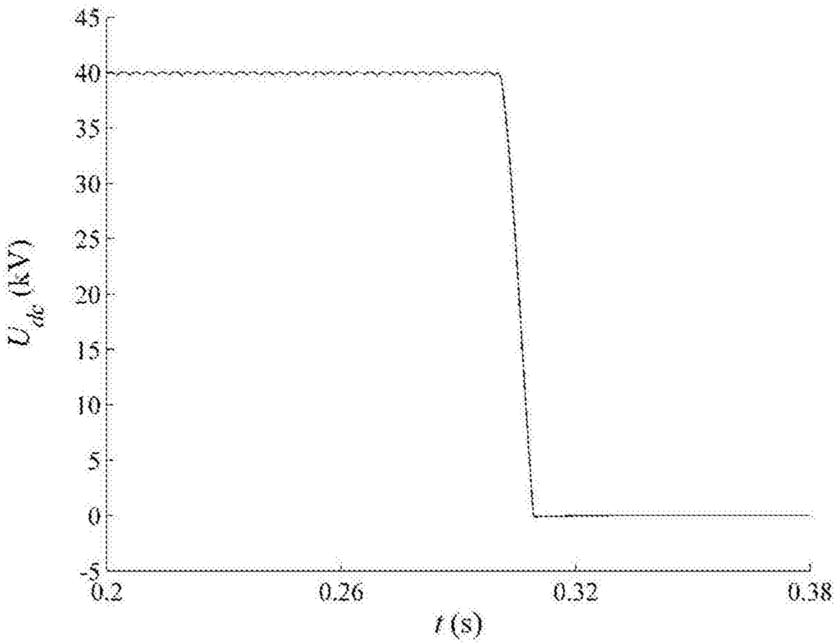
图9



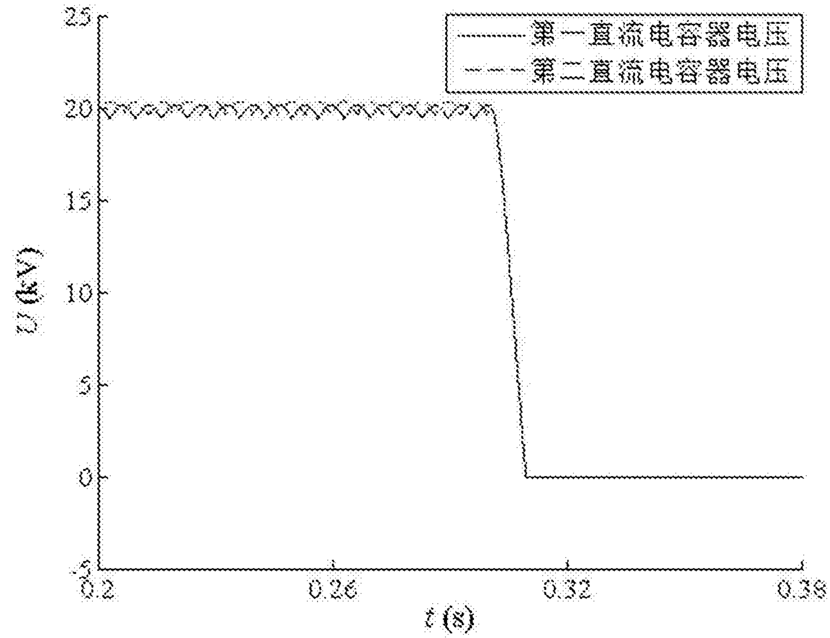
(a)


0.8
0.4
0
-0.4
-0.8
i_{abc} (kA)
0.2
0.26
0.32
0.38
t (s)

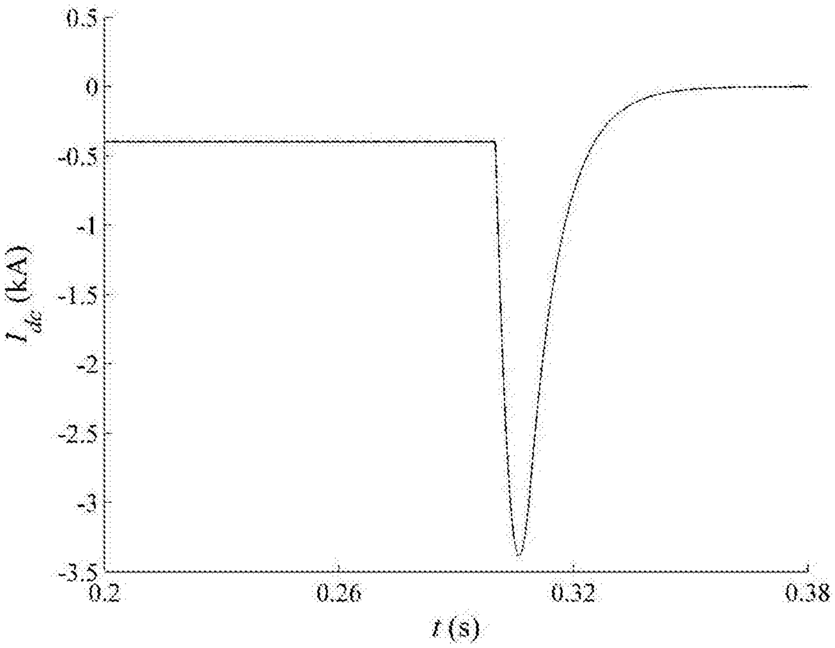
(b)


45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
U_{dc} (kV)
0.2
0.26
0.32
0.38
t (s)

(c)


第一直流电容器电压
第二直流电容器电压
U (kV)
t (s)
25
20
15
10
5
0
-5
0.2
0.26
0.32
0.38

(d)


I_{dc} (kA)
t (s)
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
-3
-3.5
0.2
0.26
0.32
0.38

(e)

图10