(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109347344 B
(45)授权公告日 2020.12.25

(21)申请号 201811200844.5

(22)申请日 2018.09.28

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109347344 A

(43)申请公布日 2019.02.15

(73)专利权人 中国人民解放军空军工程大学
地址 710051 陕西省西安市长乐东路甲字1号空军工程大学

(72)发明人 韩建定 齐蓉 李雪丰 雷晓犇 王传奇 曾家齐

(51)Int.Cl.
H02M 7/44(2006.01)
H02M 7/483(2007.01)
H02M 1/32(2007.01)
H02M 7/5387(2007.01)

(56)对比文件
JP 2002209314 A,2002.07.26
US 2006082350 A1,2006.04.20
CN 104333208 A,2015.02.04
CN 1477656 A,2004.02.25
CN 105319465 A,2016.02.10
韩建定.MLD模型下逆变电路改进型直接功率预测控制.《空军工程大学学报》.2018,

审查员 王红

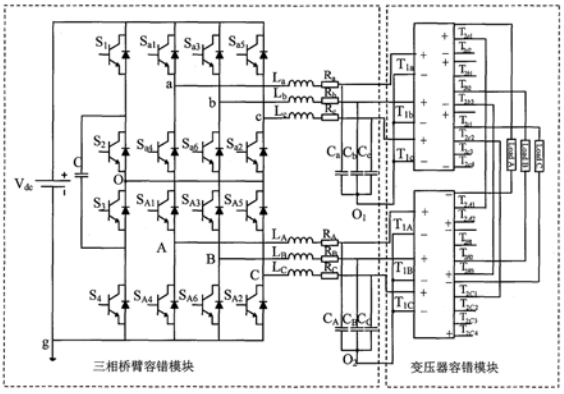
权利要求书3页 说明书7页 附图7页

(54)发明名称

一种三电平组合容错逆变电路

(57)摘要

公开一种三电平组合容错逆变电路,包括三相桥臂容错模块和变压器容错模块。利用变压器在逆变电路正常工作时对三相输出电压波形进行优化;故障后,将故障桥臂切除,可利用桥臂部分结构实现单臂、双臂、以及三臂故障容错;可利用变压器将两相电压合成三相进行输出,实现单相容错保证电路正常工作。三相电平逆变电路容错拓扑具有良好的容错功能,且控制与拓扑结构简单,易于实现。



CN 109347344 B

1.一种三电平组合容错逆变电路，包括用于实现某一相或多相桥臂单管或多管故障的容错功能的三相桥臂容错模块，和在某一相整个桥臂出现故障后，由剩余两相电路实现输出三相电压的输出功能的变压器容错模块，其中

三相桥臂容错模块分为4个桥臂，第一桥臂为中位点调节桥臂，由自上而下的四个功率管S_1、S_2、S_3、S_4和它们各自的反并联二极管、以及钳位电容C组成；每个功率管的集电极接反并联二极管的负极，发射极接反并联二极管的正极，形成一个功率管单元，因此，自上而下共形成相串联的四个功率管单元：功率管S_1单元、S_2单元、S_3单元和S_4单元；其中，由上至下，功率管S_1的集电极与电源正极相连，功率管S_1的发射极与功率管S_2的集电极相连，功率管S_2的发射极与功率管S_3的集电极相连，功率管S_3的发射极与功率管S_4的集电极相连，功率管S_4的发射极接地；并且，钳位电容C的“+”端与功率管S_1的发射极连接，钳位电容C的“-”端与功率管S_3的发射极连接；将功率管S_2的发射极与功率管S_3的集电极之间的连接点，以下将这样的连接点称为两个功率管的“中点”，定义为点O；

三相桥臂容错模块中剩下的三个桥臂分别为三相输出桥臂，其中，A相桥臂自上而下由功率管S_{a1}、S_{a4}、S_{A1}、S_{A4}以及它们各自的反并联二极管组成，共形成自上而下的四个功率管单元：功率管S_{a1}单元、S_{a4}单元、S_{A1}单元、S_{A4}单元，四个功率管单元的连接方式与上述中位点调节桥臂的连接方式完全相同；将相串联的功率管S_{a1}单元和功率管S_{a4}单元称为A相桥臂的上桥臂，将相串联的功率管单元S_{A1}和功率管S_{A4}单元称为A相桥臂的下桥臂；a点为上桥臂功率管S_{a1}、S_{a4}的中点，A点为下桥臂功率管S_{A1}、S_{A4}的中点；作为上桥臂的延伸，滤波电感L_a、滤波电阻R_a相串联，在滤波电阻R_a后并联了一个滤波电容C_a；并且，滤波电感L_a的正端与a点相连，负端与滤波电阻R_a相连，滤波电阻R_a的另一端与滤波电容C_a的正端相连，将滤波电容C_a的负端定义为点O_1；作为下桥臂的延伸，滤波电感L_A、滤波电阻R_A相串联，在滤波电阻R_A后并联了一个滤波电容C_A；其中滤波电感L_A的正端与A点相连，负端与滤波电阻R_A相连，滤波电阻R_A的另一端与滤波电容C_A的正端相连，将滤波电感C_A的负端定义为点O_2；

三相输出桥臂结构相同；

由于三相桥臂结构相同，所以在B、C两相的上桥臂中分别有滤波电感L_b、L_c，滤波电阻R_b、R_c，以及滤波电容C_b、C_c，所有滤波电容C_a、C_b、C_c的“-”端均连接于O_1点；在B、C两相的下桥臂中分别有滤波电感L_B、L_C，滤波电阻R_B、R_C，以及滤波电容C_B、C_C，三相下桥臂的滤波电容C_A、C_B、C_C的“-”端均连接于O_2点；A相上桥臂滤波电阻R_a通过连接变压器模块与A相负载LoadA与下桥臂R_A串联在一起构成回路；

在三相桥臂容错模块中，定义U是A相上桥臂a点与O点之间的输出电压，U_{Ag}是A相下桥臂A点与接地点g之间的输出电压，S_{a1}-S_{a6}、S_{A1}-S_{A6}分别为上、下桥臂的6个功率开关管；三相输出电压分别由上下工作的两部分电路叠加；R_X、L_X、C_X，X＝a，b，c，A，B，C，分别为各相桥臂的滤波电阻、滤波电感和滤波电容；将三相桥臂容错模块中的三相输出桥臂各自的上桥臂统称为电路上部三桥臂，三相输出桥臂各自的下桥臂统称为电路下部三桥臂；

变压器容错模块为两组三相变压器，具体包括上桥臂a、b、c三相变压器和下桥臂A、B、C三相变压器；

在变压器容错模块中，A相绕组的原副边变比T_{1a}:T_{2a1}:T_{2a2}＝1:1:0.5，B相绕组的原副边变比$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}= 1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$，C相绕组的原副边变比

$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$；

上桥臂变压器a相的原边线圈与副边两个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1a}:T_{2a1}:T_{2a2}=1:1:0.5$；b相的原边线圈与副边三个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}= 1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$；c相的原边线圈与副边四个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$；

变压器容错模块的两个变压器结构相同，其中，对于与上桥臂相连的变压器而言，三相变压器的原边绕组由T_{1a}、T_{1b}、T_{1c}三个绕组组成，三个绕组的“+”端分别与上桥臂a、b、c的滤波电阻输出端相连，三个绕组的“-”端并在一起与O_1点相连；变压器副边绕组众多，将依次说明，上桥臂变压器a相的副边绕组由三个抽头两组线圈组成，在三个抽头中第一个为“+”，最后一个为“-”；b相的副边绕组由四个抽头三组线圈组成，在四个抽头中第一个为“+”，最后一个为“-”；c相的副边绕组由五个抽头四组线圈组成，在五个抽头中第一个为“+”，最后一个为“-”；与上桥臂变压器不同的是下桥臂变压器副边抽头的正负极方向与之相反，均是第一个为“-”最后一个为“+”，其余构成均相同，具体为：下桥臂变压器A相的副边绕组由三个抽头两组线圈组成，在三个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；B相的副边绕组由四个抽头三组线圈组成，在四个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；C相的副边绕组由五个抽头四组线圈组成，在五个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；上下桥臂变压器副边通过该相的负载连接起来构成回路。

2.如权利要求1所述的三电平组合容错逆变电路，其中功率管、变压器、二极管、电容、电感、电阻的大小及型号均由逆变电路的输出功率决定。

3.如权利要求2所述的三电平组合容错逆变电路，其中，直流电压源为270V，功率管选用IGBT，滤波电感L_a＝2mH，滤波电容C_a＝40μF，滤波电阻R_a＝25mΩ。

4.一种基于权利要求1所述的三电平组合容错逆变电路的三电平组合容错逆变电路工作方法，具体为，LoadA，LoadB，LoadC分别为三相负载，在每一相输出中，电路的负载通过上下桥臂的变压器连接；当电路正常工作时，每一相上下桥臂的控制信号不同，需根据不同控制方法选择合适控制信号；当某一相桥臂上桥臂或下桥臂故障时，电路将把故障桥臂切除，同时将该相正常桥臂的输出加在故障桥臂的变压器侧，使得该故障桥臂变成两电平逆变电路输出；

表1是A相开关状态与A桥臂输出电压关系；如表1所示，A相开关状态与A桥臂输出电压关系，可以满足三电平输出要求，表1中0表示开关处于开通状态，1表示开关处于关断状态；

表1 A相开关状态与A桥臂输出电压关系

(S_{a1}, S_{a4}, S_{A1}, S_{A4})	(U_{ao}, U_{Ag})	A相输出电压
(1,0,1,0)	(V_{dc}/2,V_{dc}/2)	V_{dc}
(0,1,0,1)	(0,0)	0
(0,1,1,0)	(0,V_{dc}/2)	V_{dc}/2
(1,0,0,1)	(V_{dc}/2,0)	V_{dc}/2
(0,0,0,0)	(0,0)	0

在三电平组合容错逆变电路正常工作时，每相的输出电压为上下桥臂输出电压的叠加经过滤波电容以及滤波电感输出三相正弦波；

当A相上半桥臂发生故障时，将A相上桥臂从电路中切除，将A相上桥臂负载接入A相下桥臂输出端，此时A相桥臂作为两电平逆变电路输出；其他相某一侧桥臂发生故障时，处理方式类同；

当A、B相上半桥臂发生故障，将A、B相上桥臂从电路中切除，将A相上桥臂负载接入A相下桥臂输出端，B相上桥臂负载接入B相下桥臂输出端；其他两相桥臂发生故障时，处理方式类同；

当A、B、C相上半桥臂发生故障，将A、B、C相上桥臂从电路中切除，将A、B、C三相上桥臂负载接入A、B、C三相下桥臂输出端；

当电路A相发生故障时，将A相整个电路切除，将B、C两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即B相超前C相90°；

当电路B相发生故障时，将B相整个电路切除，将A、C两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即A相超前C相90°；

当电路C相发生故障时，将C相整个电路切除，将A、B两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即A相超前B相90°。

一种三电平组合容错逆变电路

技术领域

[0001] 本发明涉及三相逆变电路技术，具体涉及一种由逆变电路功率桥臂以及变压器组合的新型逆变电路容错拓扑结构。

背景技术

[0002] 三相逆变电路若要实现容错功能往往需要增加较多的功率管以增加冗余桥臂，从而在逆变电路故障时实施容错控制。相对于传统的两电平逆变电路，多电平逆变电路具有良好的容错性能，在这种电路中，每种电压矢量均有冗余矢量来保证电路的容错运行。但是，多电平逆变电路中功率管较多，因而控制较为复杂，并且往往需要为电路故障前、后设计不同的控制策略，实际应用较为复杂。冗余桥臂在电路正常工作时往往作用不是很大，若仅仅用于备份故障桥臂，不仅导致控制策略复杂，而且增加了经济成本。

发明内容

[0003] 针对现有技术存在的问题，本发明提供一种三电平组合容错逆变电路，包括用于实现某一相或多相桥臂单管或多管故障的容错功能的三相桥臂容错模块，和在某一相整个桥臂出现故障后，由剩余两相电路实现输出三相电压的输出功能的变压器容错模块，其中

[0004] 三相桥臂容错模块分为4个桥臂，第一桥臂为中位点调节桥臂，由自上而下的四个功率管S_1、S_2、S_3、S_4和它们各自的反并联二极管、以及钳位电容C组成；每个功率管的集电极接反并联二极管的负极，发射极接反并联二极管的正极，形成一个功率管单元，因此，自上而下共形成相串联的四个功率管单元：功率管S_1单元、S_2单元、S_3单元和S_4单元；其中，由上至下，功率管S_1的集电极与电源正极相连，功率管S_1的发射极与功率管S_2的集电极相连，功率管S_2的发射极与功率管S_3的集电极相连，功率管S_3的发射极与功率管S_4的集电极相连，功率管S_4的发射极接地；并且，钳位电容C的“+”端与功率管S_1的发射极连接，钳位电容C的“-”端与功率管S_3的发射极连接；将功率管S_2的发射极与功率管S_3的集电极之间的连接点，以下将这样的连接点称为两个功率管的“中点”，定义为点O；

[0005] 三相桥臂容错模块中剩下的三个桥臂分别为三相输出桥臂，其中，A相桥臂自上而下由功率管S_{a1}、S_{a4}、S_{A1}、S_{A4}以及它们各自的反并联二极管组成，共形成自上而下的四个功率管单元：功率管S_{a1}单元、S_{a4}单元、S_{A1}单元、S_{A4}单元，四个功率管单元的连接方式与上述中位点调节桥臂的连接方式完全相同；将相串联的功率管S_{a1}单元和功率管S_{a4}单元称为A相桥臂的上桥臂，将相串联的功率管单元S_{A1}和功率管S_{A4}单元称为A相桥臂的下桥臂；a点为上桥臂功率管S_{a1}、S_{a4}的中点，A点为下桥臂功率管S_{A1}、S_{A4}的中点；作为上桥臂的延伸，滤波电感L_a、滤波电阻R_a相串联，在滤波电阻R_a后并联了一个滤波电容C_a；并且，滤波电感L_a的正端与a点相连，负端与滤波电阻R_a相连，滤波电阻R_a的另一端与滤波电容C_a的正端相连，将滤波电容C_a的负端定义为点O_1；作为下桥臂的延伸，滤波电感L_A、滤波电阻R_A相串联，在滤波电阻R_A后并联了一个滤波电容C_A；其中滤波电感L_A的正端与A点相连，负端与滤波电阻R_A相连，滤波电阻R_A的另一端与滤波电容C_A的正端相连，将滤波电感C_A的负端定义为点O_2；

[0006] 三相输出桥臂结构相同；

[0007] 由于三相桥臂结构相同，所以在B、C两相的上桥臂中分别有滤波电感L_b、L_c，滤波电阻R_b、R_c，以及滤波电容C_b、C_c，所有滤波电容C_a、C_b、C_c的“-”端均连接于O_1点；在B、C两相的下桥臂中分别有滤波电感L_B、L_C，滤波电阻R_B、R_C，以及滤波电容C_B、C_C，三相下桥臂的滤波电容C_A、C_B、C_C的“-”端均连接于O_2点；A相上桥臂滤波电阻R_a通过连接变压器模块与A相负载LoadA与下桥臂R_A串联在一起构成回路；

[0008] 在三相桥臂容错模块中，定义U是A相上桥臂a点与O点之间的输出电压，U_{Ag}是A相下桥臂A点与接地点g之间的输出电压，S_{a1}-S_{a6}、S_{A1}-S_{A6}分别为上、下桥臂的6个功率开关管；三相输出电压分别由上下工作的两部分电路叠加；R_X、L_X、C_X，X＝a，b，c，A，B，C，分别为各相桥臂的滤波电阻、滤波电感和滤波电容；为了描述简单起见，现将三相桥臂容错模块中的三相输出桥臂各自的上桥臂统称为电路上部三桥臂，三相输出桥臂各自的下桥臂统称为电路下部三桥臂；

[0009] 变压器容错模块为两组三相变压器，具体包括上桥臂a、b、c三相变压器和下桥臂A、B、C三相变压器；

[0010] 在变压器容错模块中，A相绕组的原副边变比T_{1a}:T_{2a1}:T_{2a2}＝1:1:0.5，B相绕组的原副边变比$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}= 1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$，C相绕组的原副边变比$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$；

[0011] 上桥臂变压器a相的原边线圈与副边两个线圈的线圈匝数比分别为T_{1a}:T_{2a1}:T_{2a2}＝1:1:0.5；b相的原边线圈与副边三个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}= 1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$；c相的原边线圈与副边四个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$；

[0012] 变压器容错模块的两个变压器结构相同，其中，对于与上桥臂相连的变压器而言，三相变压器的原边绕组由T_{1a}、T_{1b}、T_{1c}三个绕组组成，三个绕组的“+”端分别与上桥臂a、b、c的滤波电阻输出端相连，三个绕组的“-”端并在一起与O_1点相连；变压器副边绕组众多，将依次说明，上桥臂变压器a相的副边绕组由三个抽头两组线圈组成，在三个抽头中第一个为“+”，最后一个为“-”；b相的副边绕组由四个抽头三组线圈组成，在四个抽头中第一个为“+”，最后一个为“-”；c相的副边绕组由五个抽头四组线圈组成，在五个抽头中第一个为“+”，最后一个为“-”；与上桥臂变压器不同的是下桥臂变压器副边抽头的正负极方向与之相反，均是第一个为“-”最后一个为“+”，其余构成均相同，具体为：下桥臂变压器A相的副边绕组由三个抽头两组线圈组成，在三个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；B相的副边绕组由四个抽头三组线圈组成，在四个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；C相的副边绕组由五个抽头四组线圈组成，在五个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；上下桥臂变压器副边通过该相的负载连接起来构成回路。

[0013] 在本发明的一个具体实施例中，在变压器容错模块中，A相绕组的原副边变比T_{1a}:T_{2a1}:T_{2a2}＝1:1:0.5，B相绕组的原副边变比$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}=1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$，C相绕组的原副边变比$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$；

[0014] 上桥臂变压器a相的副边绕组的原边线圈与副边两个线圈的线圈匝数比分别为T_{1a}

：T_{2a1}：T_{2a2}＝1：1：0.5；b相的副边绕组的原边线圈与副边三个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}= 1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$；c相的副边绕组的原边线圈与副边四个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$。

[0015] 在本发明的一个实施例中，功率管、变压器、二极管、电容、电感、电阻的大小及型号均由逆变电路的输出功率决定。

[0016] 在本发明的一个具体实施例中，，直流电压源为270V，功率管选用IGBT，滤波电感L_a＝2mH，滤波电容C_a＝40μF，滤波电阻R_a＝25mΩ。

[0017] 上述三电平组合容错逆变电路的工作方法为，LoadA，LoadB，LoadC分别为三相负载，在每一相输出中，电路的负载通过上下桥臂的变压器连接；当电路正常工作时，每一相上下桥臂的控制信号不同，需根据不同控制方法选择合适控制信号；当某一相桥臂上桥臂或下桥臂故障时，电路将把故障桥臂切除，同时将该相正常桥臂的输出加在故障桥臂的变压器侧，使得该故障桥臂变成两电平逆变电路输出；

[0018] 表1是A相开关状态与A桥臂输出电压关系；如表1所示，A相开关状态与A桥臂输出电压关系，可以满足三电平输出要求，表1中0表示开关处于开通状态，1表示开关处于关断状态；

[0019] 表1 A相开关状态与A桥臂输出电压关系

(S_{a1}, S_{a4}, S_{A1}, S_{A4})	(U_{ao}, U_{Ag})	A相输出电压
(1,0,1,0)	(V_{dc}/2,V_{dc}/2)	V_{dc}
(0,1,0,1)	(0,0)	0
(0,1,1,0)	(0,V_{dc}/2)	V_{dc}/2
(1,0,0,1)	(V_{dc}/2,0)	V_{dc}/2
(0,0,0,0)	(0,0)	0

[0020]

[0021] 在三电平组合容错逆变电路正常工作时，每相的输出电压为上下桥臂输出电压的叠加经过滤波电容以及滤波电感输出三相正弦波；

[0022] 当A相上半桥臂发生故障时，将A相上桥臂从电路中切除，将A相上桥臂负载接入A相下桥臂输出端，此时A相桥臂作为两电平逆变电路输出；其他相某一侧桥臂发生故障时，处理方式类同；

[0023] 当A、B相上半桥臂发生故障，将A、B相上桥臂从电路中切除，将A相上桥臂负载接入A相下桥臂输出端，B相上桥臂负载接入B相下桥臂输出端；其他两相桥臂发生故障时，处理方式类同；

[0024] 当A、B、C相上半桥臂发生故障，将A、B、C相上桥臂从电路中切除，将A、B、C三相上桥

臂负载接入A、B、C三相下桥臂输出端；

[0025] 当电路A相发生故障时，将A相整个电路切除，将B、C两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即B相超前C相90°；

[0026] 当电路B相发生故障时，将B相整个电路切除，将A、C两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即A相超前C相90°；

[0027] 当电路C相发生故障时，将C相整个电路切除，将A、B两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即A相超前B相90°。

[0028] 本发明在逆变电路正常工作时，利用变压器对三相输出电压波形进行优化；故障后，将故障桥臂切除，利用变压器将两相电压合成为三相进行输出，保证电路正常工作。三相三电平逆变电路容错拓扑对于单桥臂故障具有良好的容错功能，且控制与拓扑结构简单，易于实现。

附图说明

[0029] 图1是本发明逆变电路拓扑结构图；

[0030] 图2是逆变电路单臂故障的容错电路；

[0031] 图3是逆变电路双臂故障的容错电路；

[0032] 图4是逆变电路三臂故障的容错电路；

[0033] 图5是A相故障，拓扑结构容错方案及切除A相后变压器模块接线图，其中图5(a)示出A相故障拓扑重构方案，图5(b)示出A相故障变压器侧接线方案；

[0034] 图6是B相故障，拓扑结构容错方案及切除B相后变压器模块接线图，其中图6(a)示出B相切除后电路重构拓扑，图6(b)示出B相故障变压器侧接线方案；

[0035] 图7是C相故障，拓扑结构容错方案及切除C相后变压器模块接线图，其中图7(a)示出C相切除后电路重构拓扑，图7(b)示出C相故障变压器侧接线方案。

具体实施方式

[0036] 为了使本发明的目的、技术方案以及优点更加清楚明白，以下结合附图和实施例，对本发明进行进一步详细说明。

[0037] 如图1所示，本发明三电平组合容错逆变电路的主电路拓扑分为两个模块，左边部分为三相桥臂容错模块，右边部分为变压器容错模块，分别用两个虚线框表示。两个模块的容错功能不同，能够满足逆变电路多种复杂情况下电路故障时的容错工作。

[0038] 在三相桥臂容错模块中分为4个桥臂，第一桥臂为中位点调节桥臂，由自上而下的四个功率管S_1、S_2、S_3、S_4和它们及其各自的反并联二极管、以及钳位电容C组成；每个功率管的集电极接反并联二极管的负极，发射极接反并联二极管的正极，形成一个功率管单元，因此，自上而下共形成相串联的四个功率管单元：功率管S_1单元、S_2单元、S_3单元和S_4单元；其中，由上至下，功率管S_1的集电极与电源正极相连，功率管S_1的发射极与功率管S_2的集电极相连，功率管S_2的发射极与功率管S_3的集电极相连，功率管S_3的发射极与功率管S_4的集电极相连，功率管S_4的发射极接地；并且，钳位电容C的“+”端与功率管S_1的发射极(也就是功率管S_2的集电极)连接，钳位电容C的“-”端与功率管S_3的发射极(也就是S_4的集电极)连接；将功率管S_2的发射极与功率管S_3的集电极之间的连接点(以下将这样的连接点称为两个功率管

的“中点”)定义为点O。

[0039] 三相桥臂容错模块中剩下的三个桥臂分别为三相输出桥臂,三个桥臂结构相同,以A相桥臂为例进行说明。A相桥臂自上而下由功率管S_{a1}、S_{a4}、S_{A1}、S_{A4}以及它们各自的反并联二极管组成,共形成自上而下的四个功率管单元:功率管S_{a1}单元、S_{a4}单元、S_{A1}单元、S_{A4}单元,四个功率管单元的连接方式与上述中位点调节桥臂的连接方式完全相同,不再累述。其中,将相串联的功率管S_{a1}单元和功率管S_{a4}单元称为A相桥臂的上桥臂,将相串联的功率管单元S_{A1}和功率管S_{A4}单元称为A相桥臂的下桥臂。a点为上桥臂功率管S_{a1}、S_{a4}的中点,A点为下桥臂功率管S_{A1}、S_{A4}的中点。作为上桥臂的延伸,滤波电感L_a、滤波电阻R_a相串联,在滤波电阻R_a后并联了一个滤波电容C_a;其中滤波电感L_a的正端与a点相连,负端与滤波电阻R_a相连,滤波电阻R_a的另一端与滤波电容C_a的正端相连,将滤波电容C_a的负端定义为点O_1。作为下桥臂的延伸,滤波电感L_A、滤波电阻R_A相串联,在滤波电阻R_A后并联了一个滤波电容C_A;其中滤波电感L_A的正端与A点相连,负端与滤波电阻R_A相连,滤波电阻R_A的另一端与滤波电容C_A的正端相连,将滤波电感C_A的负端定义为点O_2。

[0040] 由于三相桥臂结构相同,所以在B、C两相的上桥臂中分别有滤波电感L_b、L_c,滤波电阻R_b、R_c,以及滤波电容C_b、C_c,所有滤波电容C_a、C_b、C_c的“-”端均接在一点即O_1点。在B、C两相的下桥臂中分别有滤波电感L_B、L_C,滤波电阻R_B、R_C,以及滤波电容C_B、C_C,三相下桥臂的滤波电容C_A、C_B、C_C的“-”端均接在O_2点。A相上桥臂滤波电阻R_a通过连接变压器模块与A相负载LoadA与下桥臂R_A串联在一起构成了回路。

[0041] 在三相桥臂容错模块中,定义U是A相上桥臂a点与O点之间的输出电压,U_{Ag}是A相下桥臂A点与接地点g之间的输出电压,S_{a1}-S_{a6}、S_{A1}-S_{A6}分别为上、下桥臂的6个功率开关管。三相输出电压分别由上下工作的两部分电路叠加。R_X、L_X、C_X(X=a,b,c,A,B,C)分别为各相桥臂的滤波电阻、滤波电感和滤波电容。为了描述简单起见,现将三相桥臂容错模块中的三相输出桥臂各自的上桥臂统称为电路上部三桥臂,三相输出桥臂各自的下桥臂统称为电路下部三桥臂。

[0042] 变压器容错模块为两组三相变压器,具体包括上桥臂三相变压器和下桥臂三相变压器,其中A相绕组副边有二组抽头,原副边变比T_{1a}:T_{2a1}:T_{2a2}=1:1:0.5,B相绕组有三组抽头,原副边变比$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}= 1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$,C相绕组有四组抽头,原副边变比$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$。

[0043] 变压器容错模块的两个变压器结构相同,下面以与上桥臂相连的变压器为例描述其结构。三相变压器的原边绕组由T_{1a}、T_{1b}、T_{1c}三个绕组组成,三个绕组的“+”端分别与上桥臂a、b、c的滤波电阻输出端(即相应滤波电容的正端)相连,三个绕组的“-”端并在一起与O_1点相连。变压器副边绕组众多,将依次详细说明,上桥臂变压器a相的副边绕组由三个抽头两组线圈组成,在三个抽头中第一个为“+”,最后一个为“-”,原边线圈与副边两个线圈的线圈匝数比分别为T_{1a}:T_{2a1}:T_{2a2}=1:1:0.5;b相的副边绕组由四个抽头三组线圈组成,在四个抽头中第一个为“+”,最后一个为“-”,原边线圈与副边三个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1b}:T_{2b1}:T_{2b2}:T_{2b3}= 1:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2:1$;c相的副边绕组由五个抽头四组线圈组成,在五个抽头中第一个为“+”,最后一个为“-”,原边线圈与副边四个线圈的线圈匝数比分别为$T_{1c}:T_{2c1}:T_{2c2}:T_{2c3}:T_{2c4}= 1:1:0.5:\sqrt{3}/2:\sqrt{3}/2$。与上桥臂变压器不同的是下桥臂变压器副

边抽头的正负极方向与之相反，均是第一个为“-”最后一个为“+”，其余构成均相同，具体为：下桥臂变压器A相的副边绕组由三个抽头两组线圈组成，在三个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；B相的副边绕组由四个抽头三组线圈组成，在四个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”；C相的副边绕组由五个抽头四组线圈组成，在五个抽头中第一个为“-”，最后一个为“+”。上下桥臂变压器副边通过该相的负载连接起来构成回路。

[0044] 本发明是对变电路结构的发明，其中功率管、变压器、二极管、电容、电感、电阻的大小及型号均由逆变电路的输出功率决定，故此对其不作限定。在本发明的一个实施例中，直流电压源为270V，功率管选用IGBT，滤波电感L_a＝2mH，滤波电容C_a＝40μF，滤波电阻R_a＝25mΩ）

[0045] LoadA，LoadB，LoadC分别为三相负载，在每一相输出中，负载通过上下桥臂变压器连接。当电路正常工作时，每一相上下桥臂的控制信号不同，需根据不同控制方法选择合适控制信号。当某一相桥臂上桥臂或下桥臂故障时，电路将把故障桥臂切除，同时将该相正常桥臂的输出加在故障桥臂的变压器侧，使得该故障桥臂变成两电平逆变电路输出。

[0046] 三相桥臂容错模块主要是实现某一相或多相桥臂单管或多管故障的容错功能，而变压器容错模块主要是实现某一相整个桥臂出现故障后，由剩余两相电路实现输出三相电压的输出功能。

[0047] 表1是A相开关状态与A桥臂输出电压关系。如表1所示，A相开关状态与A桥臂输出电压关系，可以满足三电平输出要求，表1中0表示开关处于开通状态，1表示开关处于关断状态。

[0048] 表1 A相开关状态与A桥臂输出电压关系

[0049]

$(S_{a1}, S_{a4}, S_{A1}, S_{A4})$	(U_{ao}, U_{Ag})	A相输出电压
(1,0,1,0)	$(V_{dc}/2, V_{dc}/2)$	V_{dc}
(0,1,0,1)	(0,0)	0
(0,1,1,0)	$(0, V_{dc}/2)$	$V_{dc}/2$
(1,0,0,1)	$(V_{dc}/2, 0)$	$V_{dc}/2$
(0,0,0,0)	(0,0)	0

[0050] 如图1所示电路正常工作时，每相的输出电压为上下桥臂输出电压的叠加经过滤波电容以及滤波电感输出三相正弦波。

[0051] 当电路单相桥臂发生故障时，如A相上半桥臂发生故障，拓扑重构方案如图2所示，将A相上桥臂从电路中切除，将A相上桥臂负载接入A相下桥臂输出端，图中用虚线表示连接线。此时A相桥臂作为两电平逆变电路输出。其他相某一侧桥臂发生故障时处理方式相同，虚线表示电路重构部分。

[0052] 当电路两相桥臂发生故障时，如A、B相上半桥臂发生故障，拓扑重构方案如图3所示，将A、B相上桥臂从电路中切除，将A相上桥臂负载接入A相下桥臂输出端，图中用虚线表示连接线，B相上桥臂负载接入B相下桥臂输出端。

[0053] 当电路三相桥臂发生故障时，如A、B、C相上半桥臂发生故障，拓扑重构方案如图4所示，将A、B、C相上桥臂从电路中切除，将A、B、C三相上桥臂负载接入A、B、C三相下桥臂输出端，图中用虚线表示连接线。

[0054] 当电路A相发生故障时，将A相整个电路切除，将B、C两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即B相超前C相90°。拓扑结构容错方案及切除A相后变压器模块接线如图5所示，图中用虚线表示连接线。

[0055] 当电路B相发生故障时，将B相整个电路切除，将A、C两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即A相超前C相90°，拓扑结构容错方案及切除B相后变压器模块接线如图6所示，图中用虚线表示连接线。

[0056] 当电路C相发生故障时，将C相整个电路切除，将A、B两相的电压参考信号调节成相位互差为90°的电压信号，即A相超前B相90°，拓扑结构容错方案及切除C相后变压器模块接线如图7所示，图中用虚线表示连接线。

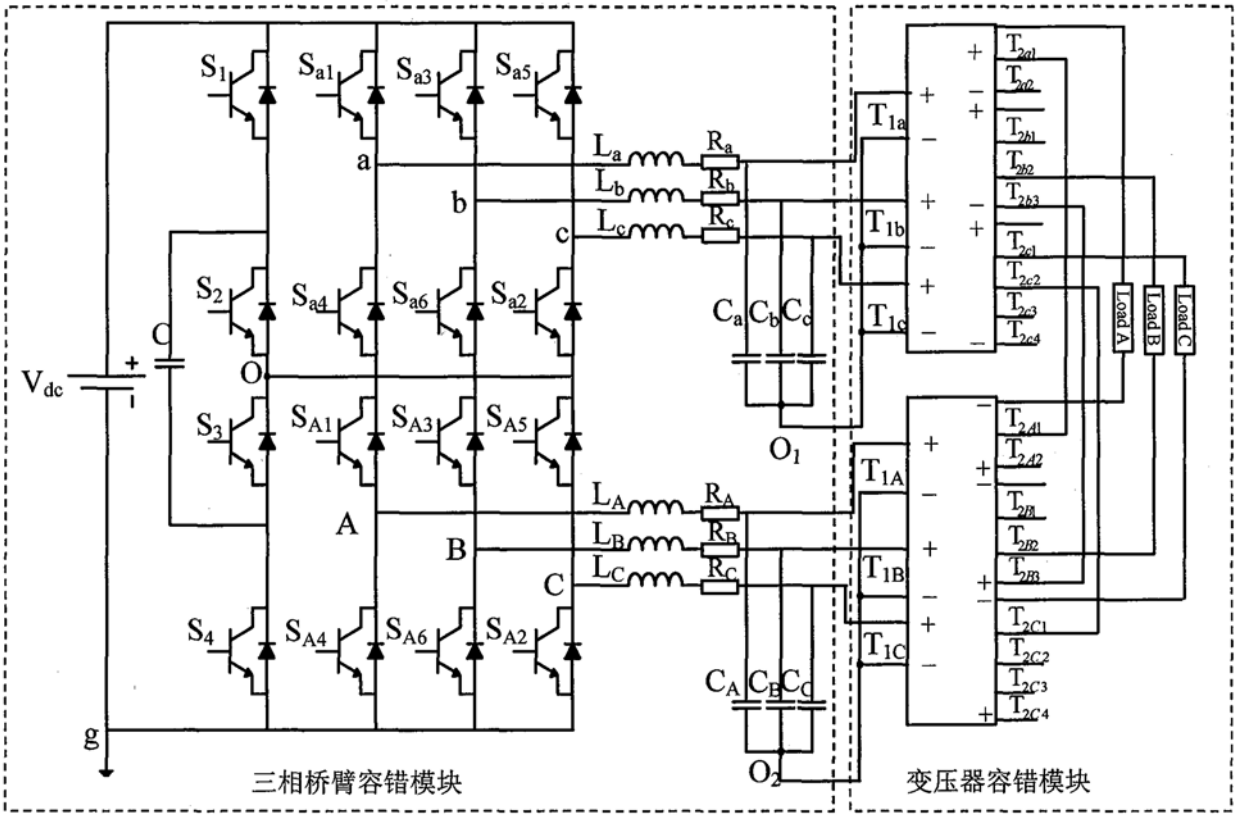


图1

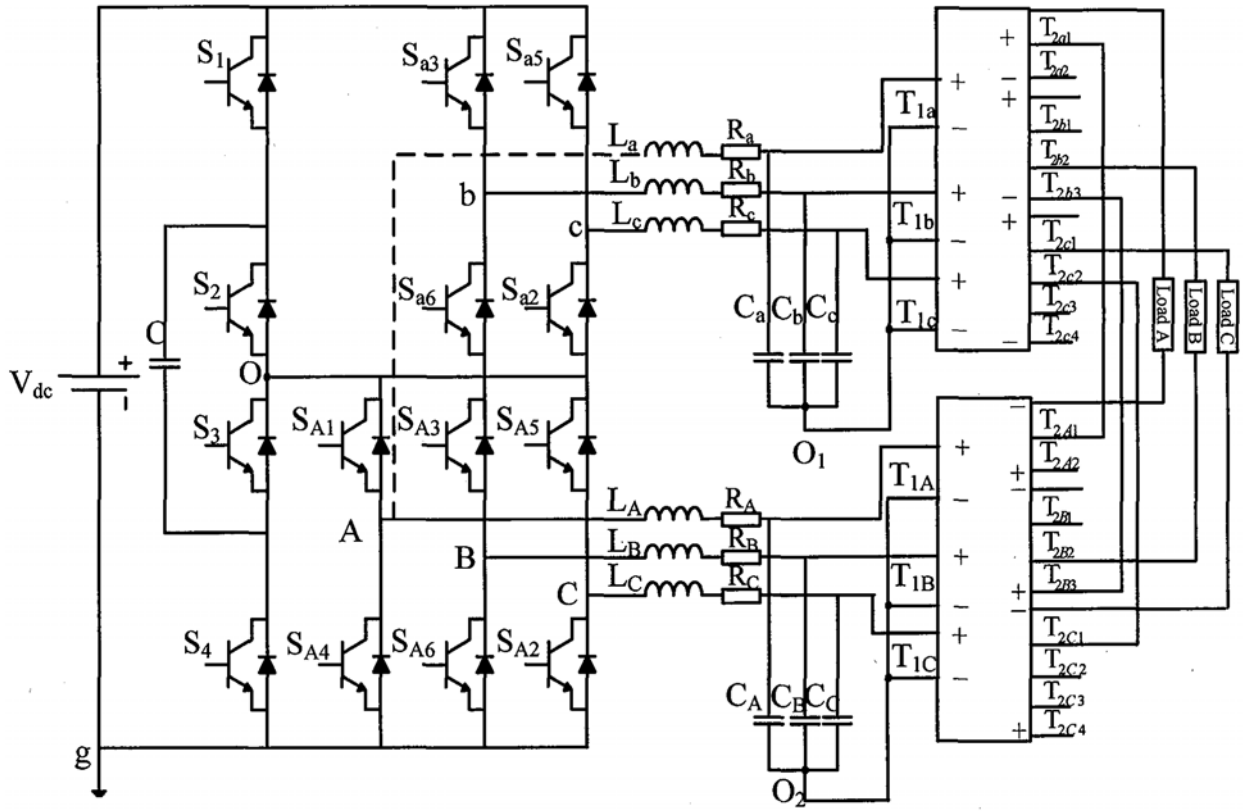

S1
Sa3
Sa5
S2
Sa6
Sa2
S3
SA1
SA3
SA5
S4
SA4
SA6
SA2
Vdc
C
O
g
A
B
C
La
Lb
Lc
Ra
Rb
Rc
b
c
Ca Cb Cc
O1
LA
LB
LC
RA
RB
RC
CA CB CC
O2
T1a
T1b
T1c
T1A
T1B
T1C
T2a1
T2a2
T2b1
T2b2
T2b3
T2c1
T2c2
T2c3
T2c4
T2A1
T2A2
T2B1
T2B2
T2B3
T2C1
T2C2
T2C3
T2C4
Load A
Load B
Load C

图2

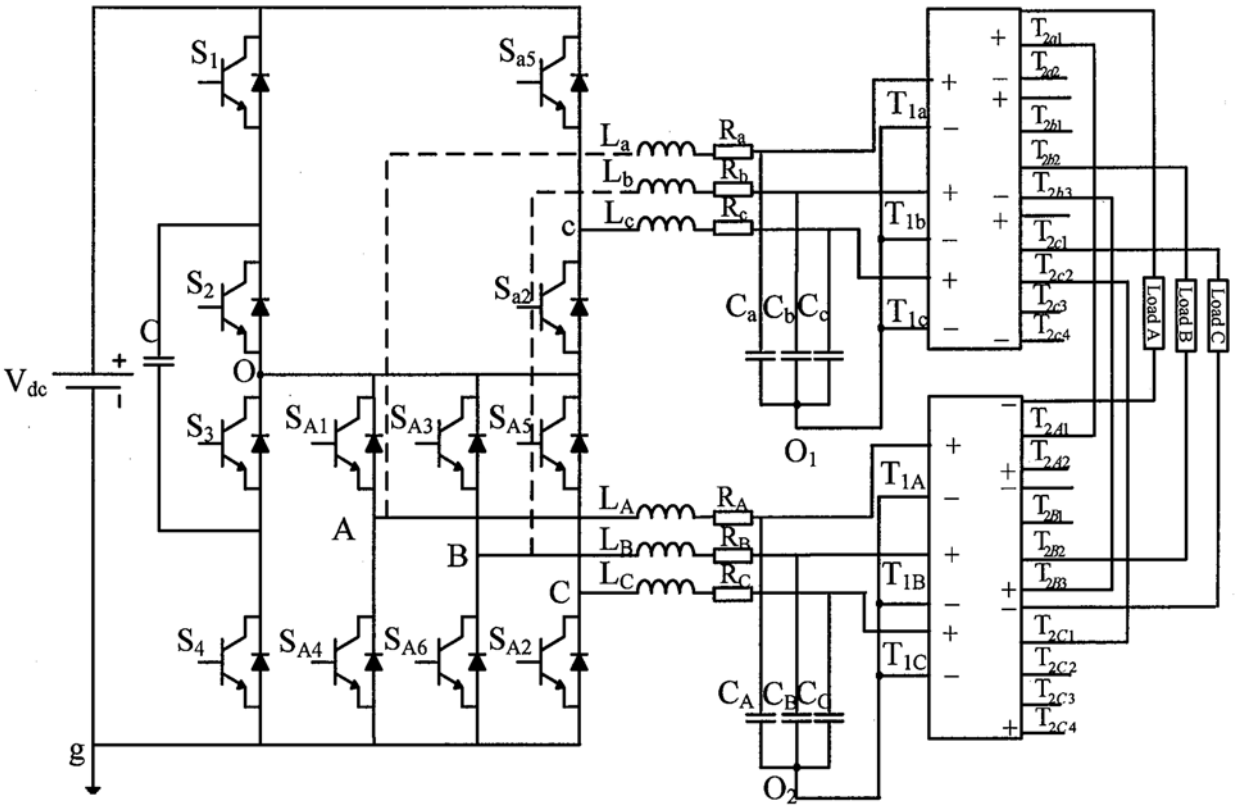

S1
Sa5
La
Ra
Lb
Rb
Lc
Rc
c
S2
Sa2
C
Ca Cb Cc
Vdc
+
-
O
S3
SA1
SA3
SA5
O1
T1a
T1b
T1c
Load A
Load B
Load C
A
B
C
LA
RA
LB
RB
LC
RC
S4
SA4
SA6
SA2
CA CB CC
T1A
T1B
T1C
g
O2

图3

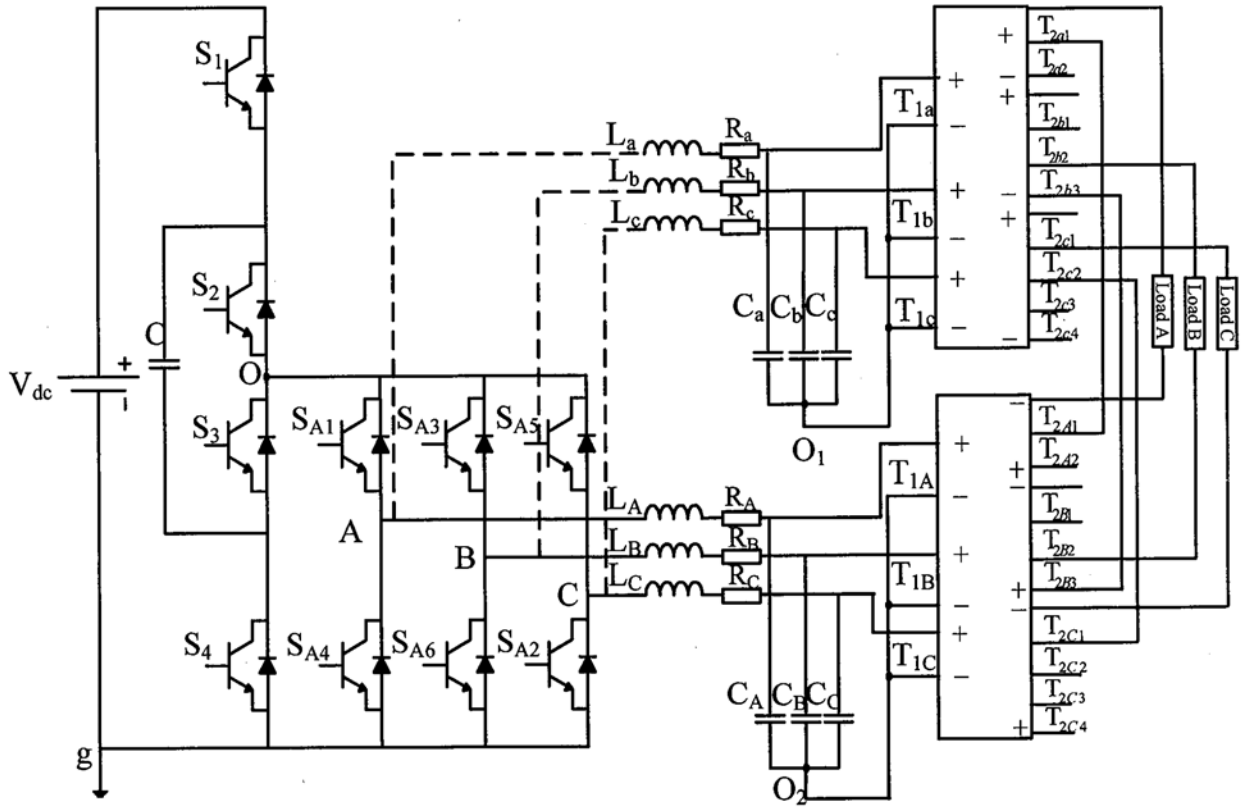
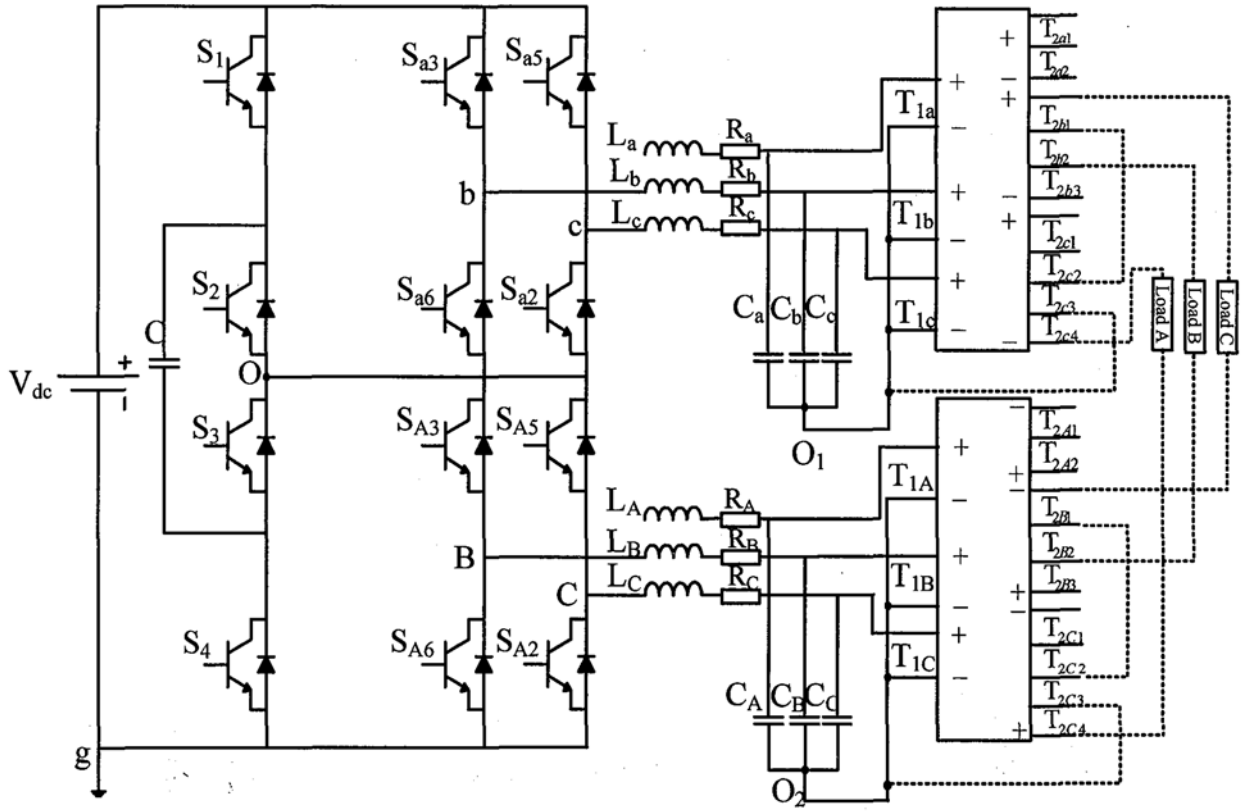
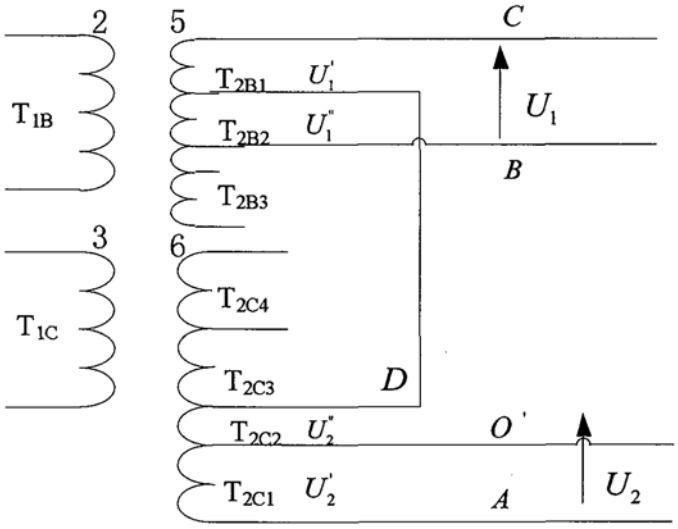

S1
S2
S3
S4
C
O
Vdc
+
-
g
SA1
SA3
SA5
SA4
SA6
SA2
A
B
C
La
Lb
Lc
Ra
Rb
Rc
Ca Cb Cc
O1
T1a
T1b
T1c
T2a1
T2a2
T2b1
T2b2
T2b3
T2c1
T2c2
T2c3
T2c4
Load A
Load B
Load C
LA
LB
LC
RA
RB
RC
CA CB CC
O2
T1A
T1B
T1C
T2A1
T2A2
T2B1
T2B2
T2B3
T2C1
T2C2
T2C3
T2C4

图4

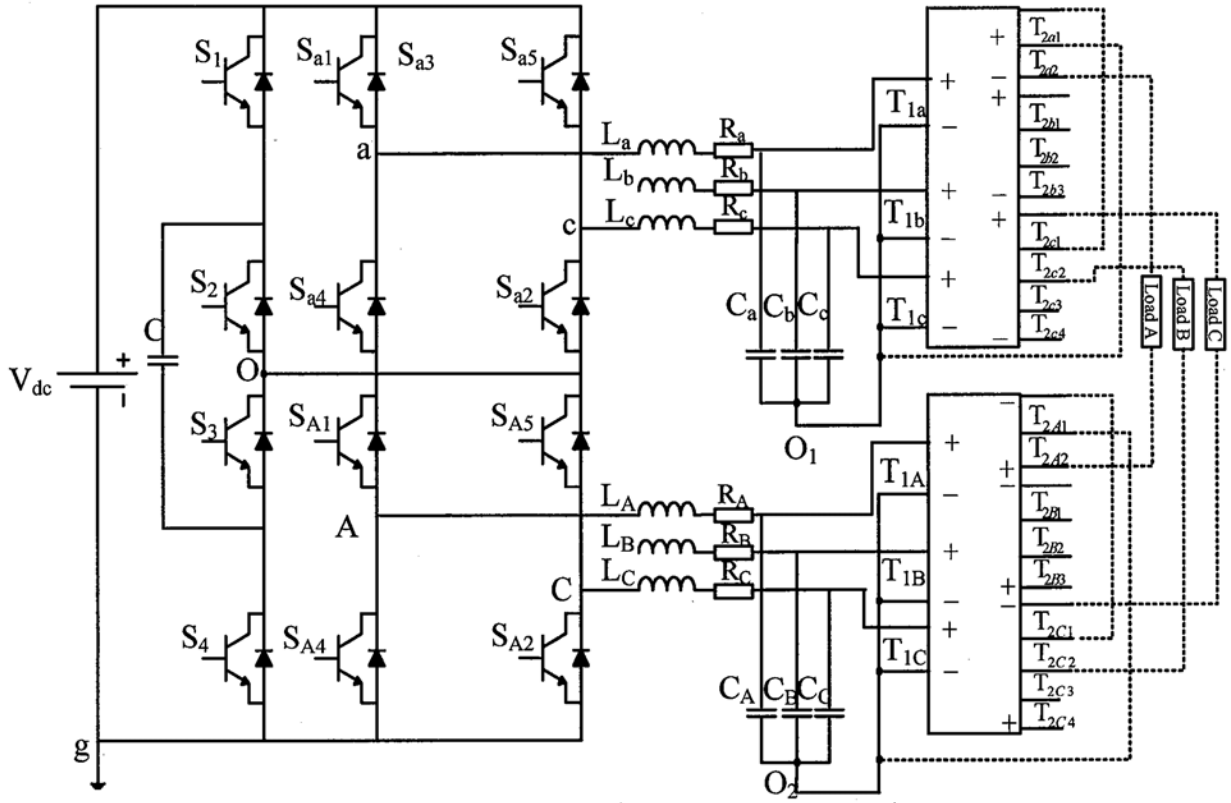

S1
Sa3
Sa5
S2
Sa6
Sa2
S3
SA3
SA5
S4
SA6
SA2
Vdc
C
O
g
b
c
B
C
La
Lb
Lc
Ra
Rb
Rc
LA
LB
LC
RA
RB
RC
Ca Cb Cc
CA CB CC
O1
O2
T1a
T1b
T1c
T1A
T1B
T1C
T2a1
T2a2
T2b1
T2b2
T2b3
T2c1
T2c2
T2c3
T2c4
T2A1
T2A2
T2B1
T2B2
T2B3
T2C1
T2C2
T2C3
T2C4
Load A
Load B
Load C

(a)

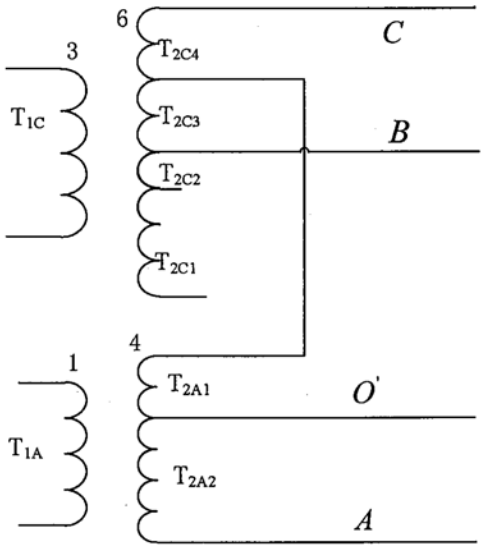

2
5
C
T1B
T2B1
U'1
T2B2
U''1
U1
B
T2B3
3
6
T1C
T2C4
T2C3
D
T2C2
U''2
O'
T2C1
U'2
A
U2

(b)

图5

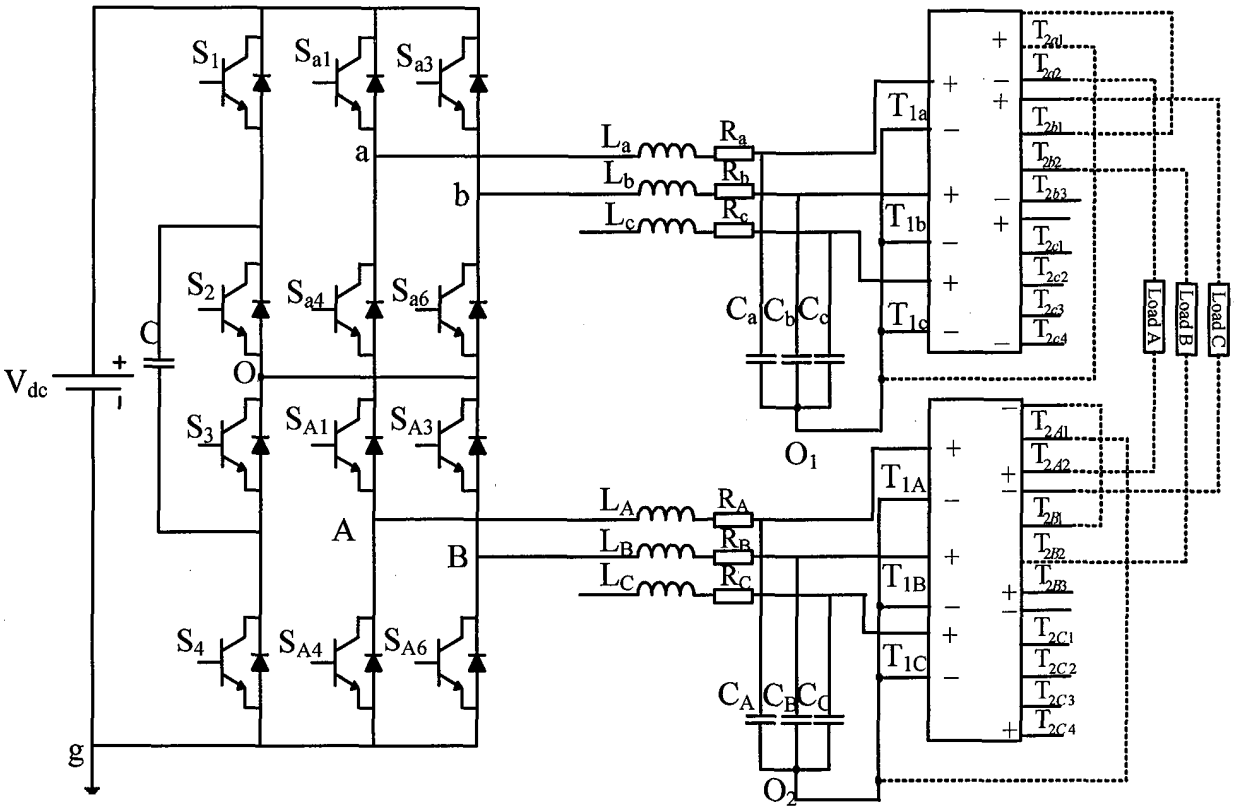

S1
Sa1
Sa3
Sa5
a
La
Lb
Lc
Ra
Rb
Rc
c
S2
Sa4
Sa2
C
Vdc
+
-
O
Ca Cb Cc
T1a
T1b
T1c
T2a1
T2a2
T2b1
T2b2
T2b3
T2c1
T2c2
T2c3
T2c4
Load A
Load B
Load C
S3
SA1
SA5
A
O1
LA
LB
LC
RA
RB
RC
T1A
T1B
T1C
T2A1
T2A2
T2B1
T2B2
T2B3
T2C1
T2C2
T2C3
T2C4
C
S4
SA4
SA2
CA CB CC
g
O2

(a)

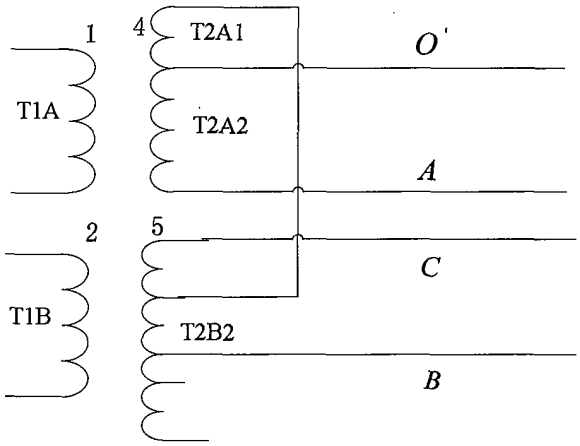

6
3
T2C4
C
T1C
T2C3
B
T2C2
T2C1
4
1
T2A1
O'
T1A
T2A2
A

(b)

图6


V_{dc}
+
-
C
O
g
S_1
S_{a1}
S_{a3}
S_2
S_{a4}
S_{a6}
S_3
S_{A1}
S_{A3}
S_4
S_{A4}
S_{A6}
a
b
A
B
L_a L_b L_c
R_a R_b R_c
L_A L_B L_C
R_A R_B R_C
C_a C_b C_c
C_A C_B C_C
O_1
O_2
T_{1a} T_{1b} T_{1c}
T_{1A} T_{1B} T_{1C}
T_{2a1} T_{2a2} T_{2b1} T_{2b2} T_{2b3} T_{2c1} T_{2c2} T_{2c3} T_{2c4}
T_{2A1} T_{2A2} T_{2B1} T_{2B2} T_{2B3} T_{2C1} T_{2C2} T_{2C3} T_{2C4}
Load A
Load B
Load C

(a)


1
2
4
5
T1A
T1B
T2A1
T2A2
T2B2
O'
A
C
B

(b)

图7