



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112701944 B

(45) 授权公告日 2022.08.16

(21) 申请号 202010223925.8

H02M 7/537 (2006.01)

(22) 申请日 2020.03.26

H02J 3/38 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112701944 A

(56) 对比文件

CN 107994801 A, 2018.05.04

CN 105529710 A, 2016.04.27

(43) 申请公布日 2021.04.23

US 2015333658 A1, 2015.11.19

WO 2015101142 A1, 2015.07.09

(73) 专利权人 南京理工大学
地址 210094 江苏省南京市玄武区孝陵卫
200号

审查员 张利伟

(72) 发明人 汪诚 李磊 彭合 孙乐

(74) 专利代理机构 南京理工大学专利中心
32203

专利代理师 岑丹

(51) Int. Cl.

H02M 7/483 (2007.01)

H02M 1/14 (2006.01)

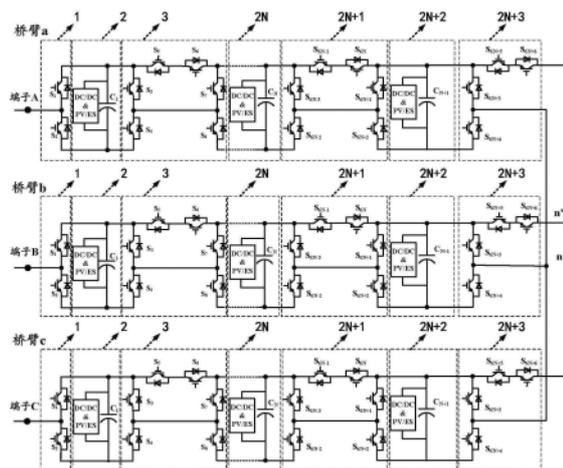
权利要求书5页 说明书16页 附图8页

(54) 发明名称

基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构及控制策略

(57) 摘要

本发明公开了一种基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构及控制策略。所述拓扑结构包括：三条结构完全相同的桥臂a、b、和c；所述桥臂a、b、和c均分别包含1个首模块前级、N+1个发电/储能单元、N个分裂发电/储能功率模块、1个首模块后级；所述桥臂a、b、和c的首模块前级均分别与第1个发电/储能单元连接，所述N+1个发电/储能单元与N个分裂发电/储能功率模块依次间隔连接，所述首模块后级与第N+1个发电/储能单元的电解电容的正负极连接，桥臂a、b、和c的首模块后级相互连接。本发明通过合理安排开关模式，实现开关次数的最少化。



1. 一种基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构的控制策略,其特征在于,包括:建立首模块与分裂发电/储能功率模块的约束性开关模式;进行模块直流功率不匹配控制以及模块直流电容电压脉动抑制;

所述基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构,包括:

三条结构完全相同的桥臂a、b、和c;

所述桥臂a、b、和c均分别包含1个首模块前级(1)、N+1个发电/储能单元(2,4,...,2N,2N+2)、N个分裂发电/储能功率模块(3,5,...,2N-1,2N+1)、1个首模块后级(2N+3);

所述桥臂a、b、和c的首模块前级(1)的输出端均分别与第1个发电/储能单元(2)的输入端连接,所述N+1个发电/储能单元与N个分裂发电/储能功率模块依次间隔连接,所述首模块后级(2N+3)的输入端与第N+1个发电/储能单元(2N+2)的电解电容的正负极连接,桥臂a、b、和c的首模块后级(2N+3)的输出端相互连接;所述桥臂a、b、和c的首模块前级(1)为半桥结构,包括两个开关管 S_1 、 S_2 ,所述两个开关管 S_1 、 S_2 连接成半桥结构,所述两个开关管 S_1 、 S_2 连接成半桥结构的中点为桥臂端子;所述N个分裂发电/储能功率模块均为双半桥六开关组合结构,包括左半桥、右半桥与补偿开关;

所述左半桥包括开关管 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} ,所述右半桥包括开关管 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} ,所述补偿开关包括开关管 S_{6N-1} 、 S_{6N} ;

所述开关管 S_{6N-3} 的漏极分别与第N个发电/储能单元(2N)的电解电容 C_N 的正极、补偿开关的一端连接,所述开关管 S_{6N-2} 的源极与第N个发电/储能单元(2N)的电解电容 C_N 的负极连接,所述开关管 S_{6N-2} 的漏极与开关管 S_{6N-3} 的源极连接;

所述开关管 S_{6N+1} 的漏极分别与第N+1个发电/储能单元的电解电容的正极、补偿开关的另一端连接,所述开关管 S_{6N+2} 的源极与第N+1个发电/储能单元(2N+2)的电解电容 C_{N+1} 的负极连接,所述开关管 S_{6N+2} 的漏极与开关管 S_{6N+1} 的源极连接;所述开关管 S_{6N+2} 与开关管 S_{6N+1} 的连接点与开关管 S_{6N-2} 与开关管 S_{6N-3} 的连接点连接;所述首模块后级包括开关管 S_{6N+3} 、 S_{6N+4} 、 S_{6N+5} 和 S_{6N+6} ,所述开关管 S_{6N+3} 的漏极分别与第N+1个发电/储能单元的电解电容的正极以及开关管 S_{6N+5} 的漏极连接,所述开关管 S_{6N+3} 的源极与开关管 S_{6N+4} 的漏极连接,开关管 S_{6N+4} 的源极与第N+1个发电/储能单元的电解电容的负极连接,所述开关管 S_{6N+5} 的源极与开关管 S_{6N+6} 的源极连接;三条桥臂的开关管 S_{6N+6} 的漏极连接于一点n',三条桥臂的开关管 S_{6N+3} 与开关管 S_{6N+4} 的连接点通过连接线连接于一点n;

所述首模块所采用的约束性开关模式,包括12种,依次为 EF_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_1 导通, S_{6N+4} 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; FE_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 导通, S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; E_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_1 、 S_{6N+4} 导通, S_2 、 S_{6N+3} 关断; E_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_1 、 S_{6N+4} 导通, S_2 、 S_{6N+3} 关断; F_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_{6N+4} 导通、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; F_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; GH_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+3} 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 关断; HG_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_2 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_{6N+3} 关断; G_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; G_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; H_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_2 导通、 S_{6N+3} 、 S_1 、 S_{6N+4} 关断; H_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_2 、 S_{6N+3} 导通, S_1 、 S_{6N+4} 关断;所述分裂发电/储能功率模块所采用的开关模式,包括10种,依次为 AB_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; BA_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 导通, S_{6N-3} 关断, S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; A_1 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 导通, S_{6N-2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; A_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-3} 关断, S_{6N+1} 导通, S_{6N-2} 导通、 S_{6N+2} 关断; B_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-2} 、

S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断； CD_0 ： S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断， S_{6N+2} 导通， S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断； DC_0 ： S_{6N-1} 导通、 S_{6N} 关断， S_{6N+2} 、 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断； C_1 ： S_{6N-1} 导通， S_{6N} 关断， S_{6N+2} 导通， S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断； C_2 ： S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断、 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断； D_2 ： S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断， S_{6N-3} 、 S_{6N+2} 导通， S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断；

所述模块直流功率不匹配控制具体为：将桥臂x所有分裂发电/储能功率模块按发电功率从小到大排序， $x=a$ 、 b 或 c ，发电功率依次为 P_{xk_1} 、 P_{xk_2} ... $P_{xk_{N+1}}$ ，排序后的分裂发电/储能功率模块序号为 k_1, k_2, \dots, k_{N+1} ，其中， $k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_{N+1}$ 且 $k_1, k_2, \dots, k_{N+1} \in (1, 2, \dots, N+1)$ ；

v_{cr} 为设定的载波，且为频率固定、最大值为1、最小值为-1的三角波， i_{xg}^* 为并网电流指令信号； v'_{xr} 为桥臂x的电压调制波信号基波分量，在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v'_{xr} > 0$ 时，当 $v_{cr} > v'_{xr}$ 时，首模块采用开关模式 FE_0 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ；当 $v_{cr} + 1 > v'_{xr} > v_{cr}$ 时，首模块采用开关模式 E_2 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ；当 $v_{cr} + 2 > v'_{xr} > v_{cr} + 1$ 时，首模块采用开关模式 E_1 ，第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $v_{cr} + (N-1) > v'_{xr} > v_{cr} + (N-2)$ 时，首模块采用开关模式 E_2 ，第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $v_{cr} + N > v'_{xr} > v_{cr} + (N-1)$ 时，首模块采用开关模式 E_2 ，第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $v_{cr} + (N+1) > v'_{xr} > v_{cr} + N$ 时，首模块采用开关模式 E_2 ，第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $v'_{xr} > v_{cr} + (N+1)$ 时，首模块采用开关模式 E_2 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；

在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v'_{xr} < 0$ 时，当 $0 > v'_{xr} > -v_{cr}$ 时，首模块采用开关模式 FE_0 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ；当 $-v_{cr} > v'_{xr} > -(v_{cr} + 1)$ 时，首模块采用开关模式 F_2 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ；当 $-(v_{cr} + 1) > v'_{xr} > -(v_{cr} + 2)$ 时，首模块采用开关模式 F_2 ，第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；当 $-[v_{cr} + (N-2)] > v'_{xr} > -[v_{cr} + (N-1)]$ 时，首模块采用开关模式 F_2 ，第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；当 $-[v_{cr} + (N-1)] > v'_{xr} > -[v_{cr} + N]$ 时，首模块采用开关模式 F_2 ，第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $-[v_{cr} + N] > v'_{xr} > -[v_{cr} + (N+1)]$ 时，首模块采用开关模式 F_2 ，第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；当 $-[v_{cr} + (N+1)] > v'_{xr}$ 时，首模块采用开关模式 F_2 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；

在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v'_{xr} > 0$ 时，当 $v_{cr} > v'_{xr}$ 时，首模块采用开关模式 HG_0 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ；当 $v_{cr} + 1 > v'_{xr} > v_{cr}$ 时，首模块采用开关模式 G_2 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ；当 $v_{cr} + 2 > v'_{xr} > v_{cr} + 1$ 时，首模块采用开关模式 G_2 ，第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ，第 k_N 个分裂发电/储能功率模

块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr} + (N-1) > v'_{xr} > v_{cr} + (N-2)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr} + N > v'_{xr} > v_{cr} + (N-1)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr} + (N+1) > v'_{xr} > v_{cr} + N$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{xr} > v'_{xr} + (N+1)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;

在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v'_{xr} < 0$ 时,当 $0 > v'_{xr} > -v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 HG_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $-v_{cr} > v'_{xr} > -(v_{cr} + 1)$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $-(v_{cr} + 1) > v'_{xr} > -(v_{cr} + 2)$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr} + (N-2)] > v'_{xr} > -[v_{cr} + (N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr} + (N-1)] > v'_{xr} > -[v_{cr} + N]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $-[v_{cr} + N] > v'_{xr} > -[v_{cr} + (N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr} + (N+1)] > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;

所述模块直流电容电压脉动抑制具体为:令 $d_0 = -1/2[\max(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc}) + \min(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc})]$ 、 $d_1 = \max(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc}) - \min(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc})$ 、 $v_{dabc} = 2/d_1(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$;

式中, v'_{ar} 、 v'_{br} 、 v'_{cr} 分别为桥臂a、桥臂b、桥臂c的电压调制波信号基波分量, v_{da} 、 v_{db} 、 v_{dc} 分别为桥臂a、桥臂b、桥臂c上的各 $N+1$ 个电解电容电压的平均值;

当 $d_1 > 2(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$ 时,桥臂x输出的电压调制波信号为 $v''_{xr} = v_{dabc}(d_0 + v'_{xr} \cdot v_{dx})/v_{dx}$;

当 $d_1 < 2(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$ 时,桥臂x输出的电压调制波信号为 $v''_{xr} = (d_0 + v'_{xr} \cdot v_{dx})/v_{dx}$;

在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时,当 $v_{cr} > v''_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 FE_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $v_{cr} + 1 > v''_{xr} > v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $v_{cr} + 2 > v''_{xr} > v_{cr} + 1$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + (N-1) > v''_{xr} > v_{cr} + (N-2)$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + N > v''_{xr} > v_{cr} + (N-1)$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + (N+1) > v''_{xr} > v_{cr} + N$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{xr} > v''_{xr} + (N+1)$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;

在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} < 0$ 时,当 $0 > v''_{xr} > -v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 F_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发

电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $-v_{cr} > v''_{xr} > -(v_{cr}+1)$ 时,首模块采用开关模式 F_1 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-(v_{cr}+1) > v''_{xr} > -(v_{cr}+2)$ 时,首模块采用开关模式 F_1 ,第 k_1 到第 k_{N-2} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_{N-1} 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-2)] > v''_{xr} > -[v_{cr}+(N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 F_1 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-1)] > v''_{xr} > -[v_{cr}+N]$ 时,首模块采用开关模式 F_1 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $-[v_{cr}+N] > v''_{xr} > -[v_{cr}+(N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 F_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-[v_{cr}+(N+1)] > v''_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;

在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时,当 $v_{cr} > v''_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 HG_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $v_{cr}+1 > v''_{xr} > v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 G_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $v_{cr}+2 > v''_{xr} > v_{cr}+1$ 时,首模块采用开关模式 G_1 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $v_{cr}+(N-1) > v''_{xr} > v_{cr}+(N-2)$ 时,首模块采用开关模式 G_1 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr}+N > v''_{xr} > v_{cr}+(N-1)$ 时,首模块采用开关模式 G_1 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr}+(N+1) > v''_{xr} > v_{cr}+N$ 时,首模块采用开关模式 G_1 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v''_{xr} > v_{cr}+(N+1)$ 时,首模块采用开关模式 G_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;

在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v''_{xr} < 0$ 时,当 $0 > v''_{xr} > -v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $-v_{cr} > v''_{xr} > -(v_{cr}+1)$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-(v_{cr}+1) > v''_{xr} > -(v_{cr}+2)$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_{N-2} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_{N-1} 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-2)] > v''_{xr} > -[v_{cr}+(N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-1)] > v''_{xr} > -[v_{cr}+N]$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $-[v_{cr}+N] > v''_{xr} > -[v_{cr}+(N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N+1)] > v''_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 。

2. 根据权利要求1所述的基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构的控制策略,其特征在于,所述并网电流指令信号的确定方法为:

将检测的桥臂 x 上的各 $N+1$ 个电解电容电压 $v_{x1} \sim v_{x(N+1)}$ 分别求取平均值分别得到平均直流电压 v_{xd} ,检测桥臂 x 的并网电流 i_{xg} , $x=a,b,c$;

将桥臂a、b、c的平均直流电压 v_{xd} 与设定的桥臂平均直流电压指令值 v_{xd}^* 比较,其差值经过PID算法得出桥臂a、b、c的有功电流 i_{xd} 的指令值 i_{xd}^* ;将无功电流的指令值 i_{xq}^* 设为0;所述有功电流指令值 i_{xd}^* 和无功电流的指令值 i_{xq}^* 经过两相旋转-两相静止坐标变换得到并网电流指令信号 i_{xg}^* 。

3. 根据权利要求2所述的基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构的控制策略,其特征在于,桥臂x的电压调制波信号基波分量的确定方法为:

将并网电流 i_{xg} 经过两相静止-两相旋转坐标变换得到有功电流 i_{xd} 和无功电流 i_{xq} ;将指令值 i_{xd}^* 与有功电流 i_{xd} 比较,其差值经过PID算法得出正序桥臂电压调制波信号的有功分量 v_{xd} ;所述指令值 i_{xq}^* 与无功电流 i_{xq} 比较,其差值经过PID算法得出正序桥臂电压调制波信号的无功分量 v_{xq} ;所述正序桥臂电压调制波信号的有功分量 v_{xd} 和正序桥臂电压调制波信号的无功分量 v_{xq} 经过两相旋转-两相静止坐标变换得到桥臂a、桥臂b、桥臂c的正序电压调制波信号基波分量 v_{xr} ;

将指令值 i_{xd}^* 经过零序有功电流处理,得到零序有功电流指令值 i_{zxd}^* ,零序有功电流指令值 i_{zxd}^* 与电网电压幅值 V_{Ng} 相乘得到零序有功功率指令值 P_{zx}^* ,将零序有功功率指令值 P_{zx}^* 经过桥臂无功功率处理得到零序无功功率指令值 Q_{zx}^* ,将并网电流 i_{xg} 与零序有功功率指令值 P_{zx}^* 经过零序电压有功分量处理得零序电压有功分量指令值 v_{zxd}^* ,将并网电流 i_{xg} 与零序无功功率指令值 Q_{zx}^* 经零序电压无功分量处理得零序电压无功分量指令值 v_{zxq}^* ,将所述零序电压有功分量指令值 v_{zxd}^* 与零序无功功率指令值 Q_{zx}^* 经过d'q'-αβ坐标变换得基波零序电压信号 v_{zx} ;基波零序电压信号 v_{zx} 与正序电压调制波信号基波分量 v_{xr} 相加得到桥臂a、桥臂b、桥臂c的电压调制波信号基波分量 v'_{xr} 。

基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构及控制策略

技术领域

[0001] 本发明属于多电平电力电子变换器及其控制领域,具体为一种基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构及控制策略。

背景技术

[0002] 在大规模光伏发电系统中中高压大功率场合,级联H桥(CHB)模块化多电平变换器的应用越来越广泛。相比于传统的两电平或三电平变换器,模块级联的结构将电池或者电容等分配到H桥(HB)模块,形成的统一物理模块可以灵活控制储能单元,不仅具有完美的电能输出质量与改善的容错性,而且能实现每个储能单元性能的最大化。特别地,CHB的高电能输出质量避免了并网应用中的输出滤波器,并且减小了电机驱动系统中的转矩脉动和绝缘应力。尽管优点很多,但CHB桥臂中的功率波动会产生两倍于电池交流频率的电流纹波。电流纹波可能会导致额外的损耗,影响电池的寿命,从而限制系统输出。在无功负载下,电流纹波会通过充放电微型循环给电池形成压力,从而降低库仑效率和容量。

[0003] 在CHB结构中,高压侧为级联H桥,后级为DC/AC-高频变压器-AC/DC构成的间接DC/DC环节(Dual Active Bridge,DAB),每个DAB形成独立的直流母线供储能单元连接。这类拓扑中每相的交流输入侧含有二次脉动功率,需要较大的直流电容或二次谐振支路吸收,这也成为其系统功率密度进一步提升的主要障碍。无源和有源滤波器是降低CHB电池系统中电流纹波的典型方法。无源滤波器通常指的是一个谐振电路,用于二阶电流纹波的分流。文献提出在三相多电平变换器中通过多绕组变压器构造相间功率通道,结合功率解耦控制使三相输入的脉动功率互相抵消而不进入模块存储,从而减小模块电容的大小。所需的无源器件因为必须吸收整个振荡能量,所以必然会很大。或者,有源功率通道直接控制电池电流,但由于振荡能量较大,仍然需要庞大的无源元件。有一种不同的方法是注入零序分量,以将振荡功率提高到更高的频率,从而缩小滤波器,但该方法不仅增加了系统线路损耗,而且减小了系统的线性调制范围。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供了一种基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构及控制策略。

[0005] 实现本发明目的的技术方案为:一种基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构,包括:

[0006] 三条结构完全相同的桥臂a、b、和c;

[0007] 所述桥臂a、b、和c均分别包含1个首模块前级(1)、N+1个发电/储能单元(2, 4, ..., 2N, 2N+2)、N个分裂发电/储能功率模块(3, 5, ..., 2N-1, 2N+1)、1个首模块后级(2N+3);

[0008] 所述桥臂a、b、和c的首模块前级(1)均分别与第1个发电/储能单元(2)连接,所述N+1个发电/储能单元与N个分裂发电/储能功率模块依次间隔连接,所述首模块后级(2N+3)

与第N+1个发电/储能单元(2N+2)的电解电容的正负极连接,桥臂a、b、和c的首模块后级(2N+3)相互连接。

[0009] 本发明还提供了一种基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构的控制策略,包括:建立首模块与分裂发电/储能功率模块的约束性开关模式;进行模块直流功率不匹配控制以及模块直流电容电压脉动抑制;

[0010] 所述首模块所采用的约束性开关模式,包括12种,依次为 EF_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_1 导通, S_{6N+4} 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; FE_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 导通, S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; E_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_1 、 S_{6N+4} 导通, S_2 、 S_{6N+3} 关断; E_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_1 、 S_{6N+4} 导通, S_2 、 S_{6N+3} 关断; F_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_{6N+4} 导通、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; F_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; GH_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+3} 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 关断; HG_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_2 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_{6N+3} 关断; G_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; G_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断; H_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_2 导通、 S_{6N+3} 、 S_1 、 S_{6N+4} 关断; H_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_2 、 S_{6N+3} 导通, S_1 、 S_{6N+4} 关断;所述分裂发电/储能功率模块所采用的开关模式,包括10种,依次为 AB_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; BA_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 导通, S_{6N-3} 关断, S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; A_1 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 导通, S_{6N-2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; A_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-3} 关断, S_{6N+1} 导通, S_{6N-2} 导通、 S_{6N+2} 关断; B_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-2} 、 S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; CD_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N+2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断; DC_0 : S_{6N-1} 导通、 S_{6N} 关断, S_{6N+2} 、 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断; C_1 : S_{6N-1} 导通, S_{6N} 关断, S_{6N+2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断; C_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断、 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断; D_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-3} 、 S_{6N+2} 导通, S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断;

[0011] 所述模块直流功率不匹配控制具体为:将桥臂x所有发电/储能单元按发电功率从小到大排序,发电功率依次为 P_{xk_1} , P_{xk_2} ... $P_{xk_{N+1}}$,排序后的发电/储能单元序号为 k_1 , k_2 , ..., k_{N+1} ,其中, $k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_{N+1}$ 且 $(k_1, k_2, \dots, k_{N+1}) \in (1, 2, \dots, N+1)$;

[0012] v_{cr} 为设定的载波,且为频率固定、最大值为1、最小值为-1的三角波, i_{xg}^* 为并网电流指令信号; v'_{xr} 为桥臂x的电压调制波信号基波分量,在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v'_{xr} > 0$ 时,当 $v_{cr} > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 FE_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,当 $v_{cr} + 1 > v'_{xr} > v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $v_{cr} + 2 > v'_{xr} > v_{cr} + 1$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + (N-1) > v'_{xr} > v_{cr} + (N-2)$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + N > v'_{xr} > v_{cr} + (N-1)$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + (N+1) > v'_{xr} > v_{cr} + N$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v'_{xr} > v_{cr} + (N+1)$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;

[0013] 在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v'_{xr} < 0$ 时,当 $0 > v'_{xr} > -v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 FE_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分

裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $-v_{cr} > v'_{xr} > -(v_{cr}+1)$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $-(v_{cr}+1) > v'_{xr} > -(v_{cr}+2)$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ...当 $-[v_{cr}+(N-2)] > v'_{xr} > -[v_{cr}+(N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-1)] > v'_{xr} > -[v_{cr}+N]$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $-[v_{cr}+N] > v'_{xr} > -[v_{cr}+(N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-[v_{cr}+(N+1)] > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;

[0014] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v'_{xr} > 0$ 时,当 $v_{cr} > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 HG_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $v_{cr}+1 > v'_{xr} > v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $v_{cr}+2 > v'_{xr} > v_{cr}+1$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ...当 $v_{cr}+(N-1) > v'_{xr} > v_{cr}+(N-2)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr}+N > v'_{xr} > v_{cr}+(N-1)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr}+(N+1) > v'_{xr} > v_{cr}+N$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{xr} > v'_{xr}+(N+1)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;

[0015] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v'_{xr} < 0$ 时,当 $0 > v'_{xr} > -v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 HG_0 、第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $-v_{cr} > v'_{xr} > -(v_{cr}+1)$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $-(v_{cr}+1) > v'_{xr} > -(v_{cr}+2)$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ...当 $-[v_{cr}+(N-2)] > v'_{xr} > -[v_{cr}+(N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-1)] > v'_{xr} > -[v_{cr}+N]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $-[v_{cr}+N] > v'_{xr} > -[v_{cr}+(N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N+1)] > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;

[0016] 所述模块直流电容电压脉动抑制具体为:令 $d_0 = -1/2[\max(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc}) + \min(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc})]$ 、 $d_1 = \max(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc}) - \min(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc})$ 、 $v_{dabc} = 2/d_1(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$;

[0017] 式中, v'_{ar} 、 v'_{br} 、 v'_{cr} 分别为桥臂a、桥臂b、桥臂c的电压调制波信号基波分量, v_{da} 、

v_{db} 、 v_{dc} 分别为桥臂a、桥臂b、桥臂c上的各N+1个电解电容电压的平均值；

[0018] 当 $d_1 > 2(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$ 时，桥臂x输出的电压调制波信号为 $v''_{xr} = v_{dabc}(d_0 + v'_{xr} \cdot v_{dx}) / v_{dx}$ ；当 $d_1 < 2(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$ 时，桥臂x输出的电压调制波信号为 $v''_{xr} = (d_0 + v'_{xr} \cdot v_{dx}) / v_{dx}$ ；

[0019] 在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时，当 $v_{cr} > v''_{xr}$ 时，首模块采用开关模式 FE_0 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ；当 $v_{cr} + 1 > v''_{xr} > v_{cr}$ 时，首模块采用开关模式 E_1 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ；当 $v_{cr} + 2 > v''_{xr} > v_{cr} + 1$ 时，首模块采用开关模式 E_1 ，第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ... 当 $v_{cr} + (N-1) > v''_{xr} > v_{cr} + (N-2)$ 时，首模块采用开关模式 E_1 ，第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $v_{cr} + N > v''_{xr} > v_{cr} + (N-1)$ 时，首模块采用开关模式 E_1 ，第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $v_{cr} + (N+1) > v''_{xr} > v_{cr} + N$ 时，首模块采用开关模式 E_1 ，第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $v_{xr} > v''_{xr} + (N+1)$ 时，首模块采用开关模式 E_1 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；

[0020] 在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} < 0$ 时，当 $0 > v''_{xr} > -v_{cr}$ 时，首模块采用开关模式 F_1 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ；当 $-v_{cr} > v''_{xr} > -(v_{cr} + 1)$ 时，首模块采用开关模式 F_1 ，第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；当 $-(v_{cr} + 1) > v''_{xr} > -(v_{cr} + 2)$ 时，首模块采用开关模式 F_1 ，第 k_1 到第 k_{N-2} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_{N-1} 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ... 当 $-[v_{cr} + (N-2)] > v''_{xr} > -[v_{cr} + (N-1)]$ 时，首模块采用开关模式 F_1 ，第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；当 $-[v_{cr} + (N-1)] > v''_{xr} > -[v_{cr} + N]$ 时，首模块采用开关模式 F_1 ，第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ，第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ；当 $-[v_{cr} + N] > v''_{xr} > -[v_{cr} + (N+1)]$ 时，首模块采用开关模式 F_1 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；当 $-[v_{cr} + (N+1)] > v''_{xr}$ 时，首模块采用开关模式 F_2 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ；

[0021] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时，当 $v_{cr} > v''_{xr}$ 时，首模块采用开关模式 HG_0 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ；当 $v_{cr} + 1 > v''_{xr} > v_{cr}$ 时，首模块采用开关模式 G_1 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ；当 $v_{cr} + 2 > v''_{xr} > v_{cr} + 1$ 时，首模块采用开关模式 G_1 ，第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ，第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ... 当 $v_{cr} + (N-1) > v''_{xr} > v_{cr} + (N-2)$ 时，首模块采用开关模式 G_1 ，第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ，第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ；当 $v_{cr} + N > v''_{xr} > v_{cr} + (N-1)$ 时，首模块采用开关模式 G_1 ，第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ，第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ；当 $v_{cr} + (N+1) > v''_{xr} > v_{cr} + N$ 时，首模块采用开关模式 G_1 ，第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ，第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ；当 $v''_{xr} > v_{cr} + (N+1)$ 时，首模块采用开关模式 G_1 ，第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ；

[0022] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v_{xr}'' < 0$ 时, 当 $0 > v_{xr}'' > -v_{cr}$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ; 当 $-v_{cr} > v_{xr}'' > -(v_{cr}+1)$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ; 当 $-(v_{cr}+1) > v_{xr}'' > -(v_{cr}+2)$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 到第 k_{N-2} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_{N-1} 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ... 当 $-[v_{cr}+(N-2)] > v_{xr}'' > -[v_{cr}+(N-1)]$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ; 当 $-[v_{cr}+(N-1)] > v_{xr}'' > -[v_{cr}+N]$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ; 当 $-[v_{cr}+N] > v_{xr}'' > -[v_{cr}+(N+1)]$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ; 当 $-[v_{cr}+(N+1)] > v_{xr}''$ 时, 首模块采用开关模式 H_2 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 。

[0023] 本发明与现有技术相比, 其显著优点为: 本发明易于接入中高压电网; 本发明采用分布式的发电/储能单元最优充放电、消除直流环节电容的输出功率二次脉动、抑制漏电流、缓解发电/储能单元存在的其他电气隔离问题等。

[0024] 下面结合附图对本发明作进一步详细描述。

附图说明

[0025] 图1是本发明基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构。

[0026] 图2是本发明所述桥臂a、b、c的首模块前级示意图。

[0027] 图3是本发明所述桥臂a、b、c的首模块后级示意图。

[0028] 图4是本发明所述补偿开关示意图。

[0029] 图5是本发明所述分裂发电/储能功率模块示意图。

[0030] 图6是本发明所述发电/储能单元示意图。

[0031] 图7是 $\alpha\beta-d'q'$ 坐标变换示意图。

[0032] 图8是本发明实施例中的分裂发电/储能功率模块开关模式的示意图, (a) 为当 $i_g > 0$ 时, 分裂发电/储能功率模块所采用的开关模式, (b) 为当 $i_g \leq 0$ 时, 分裂发电/储能功率模块所采用的开关模式。

[0033] 图9是本发明实施例中首模块开关模式的示意图, (a) 为当 $i_g > 0$ 时, 首模块所采用的开关模式, (b) 为当 $i_g \leq 0$ 时, 首模块所采用的开关模式。

[0034] 图10是是图10是本发明实施例中在单个桥臂内实现最少化开关次数和较多开关次数的桥臂示意图。

[0035] 图11是本发明实施例中三个桥臂构成单星形三相光伏发电系统的电路拓扑示意图。

[0036] 图12是本发明实施例中的电压调制波信号基波分量生成环节原理图。

[0037] 图13是本发明实施例中开关次数最少的开关模式对应的交流测电压与开关次数波形图。

[0038] 图14是本发明实施例中开关次数较多的开关模式对应的交流测电压与开关次数波形图。

[0039] 图15是本发明实施例中模拟直流侧发电功率不匹配的电路及控制原理示意图。

[0040] 图16是本发明实施例中通过将直流环节并联,实现直流侧发电功率不匹配运行的直流侧电压及直流侧电压参考值波形图。

[0041] 图17是本发明实施例中是三个单相电路的直流环节并联,实现参与并联的直流环节及桥臂平均直流电压的纹波彼此抵消、抑制直流电容纹波的波形示意图。

具体实施方式

[0042] 如图1所示,一种基于分裂功率单元的多电平变换器的拓扑结构,包括:三条结构完全相同的桥臂a、b、和c;

[0043] 所述桥臂a、b、和c分别包含1个首模块前级(1)、N+1个发电/储能单元(2,4,...,2N,2N+2)、N个分裂发电/储能功率模块(3,5,...,2N-1,2N+1)、1个首模块后级(2N+3);

[0044] 所述桥臂a、b、和c的首模块前级(1)与第1个发电/储能单元(2)连接,所述N+1个发电/储能单元与N个分裂发电/储能功率模块依次间隔连接,所述首模块后级(2N+3)与桥臂a上第N+1个发电/储能单元(2N+2)的电解电容的正负极连接,桥臂a、b、和c的首模块后级(2N+3)相互连接。

[0045] 如图2所示,进一步实施例中,所述桥臂a、b、和c的首模块前级(1)为半桥结构,包括两个开关管 S_1 、 S_2 ,所述两个开关管 S_1 、 S_2 连接成半桥结构,所述两个开关管 S_1 、 S_2 连接成半桥结构的中点为桥臂端子。

[0046] 如图6所示,进一步实施例中,所述桥臂a、b、和c的发电/储能单元由双有源桥与电解电容并联组成,所述发电/储能单元电解电容的正、负极与首模块前级(1)连接。

[0047] 如图5所示,进一步实施例中,所述N个分裂发电/储能功率模块均为双半桥六开关组合结构,包括左半桥、右半桥与补偿开关;

[0048] 所述左半桥包括开关管 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} ,所述右半桥包括开关管 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} ,所述补偿开关包括开关管 S_{6N-1} 、 S_{6N} ;

[0049] 所述开关管 S_{6N-3} 的漏极分别与第N个发电/储能单元(2N)的电解电容 C_N 的正极、补偿开关的一端连接,所述开关管 S_{6N-2} 的源极与第N个发电/储能单元(2N)的电解电容 C_N 的负极连接,所述开关管 S_{6N-2} 的漏极与开关管 S_{6N-3} 的源极连接;

[0050] 所述开关管 S_{6N+1} 的漏极分别与第N+1个发电/储能单元的电解电容的正极、补偿开关的另一端连接,所述开关管 S_{6N+2} 的源极与第N+1个发电/储能单元(2N+2)的电解电容 C_{N+1} 的负极连接,所述开关管 S_{6N+2} 的漏极与开关管 S_{6N+1} 的源极连接;所述开关管 S_{6N+2} 与开关管 S_{6N+1} 的连接点与开关管 S_{6N-2} 与开关管 S_{6N-2} 的连接点连接。

[0051] 优选地,如图4所示,所述补偿开关的实现方式为两个MOSFET或IGBT串联构成的双向开关。

[0052] 如图3所示,进一步实施例中,所述首模块后级包括开关管 S_{6N+3} 、 S_{6N+4} 、 S_{6N+5} 和 S_{6N+6} ,所述开关管 S_{6N+3} 的漏极分别与第N+1个发电/储能单元以及开关管 S_{6N+5} 的漏极连接,所述开关管 S_{6N+3} 的源极与开关管 S_{6N+4} 的漏极连接,开关管 S_{6N+4} 的源极与第N+1个发电/储能单元连接,所述开关管 S_{6N+5} 的源极与开关管 S_{6N+6} 的源极连接;三条臂的开关管 S_{6N+6} 的漏极连接于一点n',三条臂的开关管 S_{6N+3} 与开关管 S_{6N+4} 的连接点通过连接线连接与一点n。

[0053] 所述变换器通过端子A、端子B、端子C与外部电路连接,在相应情况下导通或关断

三个桥臂a、b、c的首模块前级(1)的开关管、N分裂发电/储能功率模块的开关管、首模块后级(2N+3)的开关管,形成级联模块结构;级联模块结构中,根据并网电流的约束,调整开关管导通、关断时序,实现桥臂电压的期望输出;

[0054] 导通或关断三个桥臂a、b、c的首模块前级(1)的开关管、N个分裂发电/储能功率模块、首模块后级(2N+3)的开关管,实现直流环节之间的并联与串联,使直流环节功率互通有无,实现不同直流环节的功率不匹配稳定运行;

[0055] 导通或关断三个桥臂a、b、c的首模块前级(1)的开关管、N个分裂发电/储能功率模块、首模块后级(2N+3)的开关管,并控制各桥臂电压相位使各桥臂直流电容彼此并联连接,实现电容纹波抑制。

[0056] 本发明进行并网电能传输系统的控制策略为:如图8、9所示,建立首模块与分裂发电/储能功率模块的约束性开关模式具体为:

[0057] 定义 v_{r1} 为首模块的输出电压、当 $v_{r1}=0$ 时首模块的贡献电平为0、当 $v_{r1}>0$ 时首模块的贡献电平为1、当 $v_{r1}<0$ 时首模块的贡献电平为-1;定义 v_{rj} 为第j个分裂发电/储能功率模块的输出电压、当 $v_{rj}=0$ 时第j个分裂发电/储能功率模块的贡献电平为0、当 $v_{rj}>0$ 时第j个分裂发电/储能功率模块的贡献电平为1、当 $v_{rj}<0$ 时第j个分裂发电/储能功率模块的贡献电平为-1;所述首模块所采用的约束性开关模式,包括12种,依次为 EF_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_1 导通, S_{6N+4} 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为0; FE_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 导通, S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为0; E_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_1 、 S_{6N+4} 导通, S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为1; E_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_1 、 S_{6N+4} 导通, S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为1; F_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_{6N+4} 导通、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为0; F_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为-1; GH_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+3} 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 关断,贡献电平为0; HG_0 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_2 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为0; G_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为1; G_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_{6N+4} 、 S_1 、 S_2 、 S_{6N+3} 关断,贡献电平为1; H_1 : S_{6N+5} 导通, S_{6N+6} 导通, S_2 导通、 S_{6N+3} 、 S_1 、 S_{6N+4} 关断,贡献电平为0; H_2 : S_{6N+5} 关断, S_{6N+6} 关断, S_2 、 S_{6N+3} 导通, S_1 、 S_{6N+4} 关断,贡献电平为-1;所述分裂发电/储能功率模块所采用的开关模式,包括10种,依次为 AB_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断,贡献电平为0; BA_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 导通, S_{6N-3} 关断, S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断,贡献电平为0; A_1 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 导通, S_{6N-2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断,贡献电平为0; A_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-3} 关断, S_{6N+1} 导通, S_{6N-2} 导通、 S_{6N+2} 关断,贡献电平为1; B_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-2} 、 S_{6N-3} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断,贡献电平为-1; CD_0 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N+2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断,贡献电平为0; DC_0 : S_{6N-1} 导通、 S_{6N} 关断, S_{6N+2} 、 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断,贡献电平为0; C_1 : S_{6N-1} 导通, S_{6N} 关断, S_{6N+2} 导通, S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断,贡献电平为0; C_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断、 S_{6N-3} 、 S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 、 S_{6N+2} 关断,贡献电平为1; D_2 : S_{6N-1} 关断、 S_{6N} 关断, S_{6N-3} 、 S_{6N+2} 导通, S_{6N-2} 、 S_{6N+1} 关断,贡献电平为-1;

[0058] 如图12所示,通过电压采样电路检测三条桥臂a、b、c上的各N+1个电解电容电压 $v_{a1} \sim v_{a(N+1)}$ 、 $v_{b1} \sim v_{b(N+1)}$ 和 $v_{c1} \sim v_{c(N+1)}$,将检测的三条桥臂a、b、c上的各N+1个电解电容电压 $v_{a1} \sim v_{a(N+1)}$ 、 $v_{b1} \sim v_{b(N+1)}$ 和 $v_{c1} \sim v_{c(N+1)}$ 分别求取平均值分别得到平均直流电压 v_{ad} 、 v_{bd} 和 v_{cd} ,通过电流采样电路检测桥臂a、b、c的并网电流 i_{ag} 、 i_{bg} 和 i_{cg} ;

[0059] 将桥臂a、b、c的平均直流电压 v_{xd} 与设定的桥臂平均直流电压指令值 v_{xd}^* 比较,其差

值经过PID算法得出桥臂a、b、c的有功电流 i_{xd} 的指令值 i_{xd}^* ；将所述无功电流的指令值 i_{xq}^* 设为0；所述有功电流指令值 i_{xd}^* 和无功电流指令值 i_{xq}^* 经过两相旋转-两相静止(dq- $\alpha\beta$)坐标变换得到并网电流指令信号 i_{xg}^* ；

[0060] 所述并网电流 i_{xg} 经过两相静止-两相旋转($\alpha\beta$ -dq)坐标变换得到有功电流 i_{xd} 和无功电流 i_{xq} ；所述有功电流指令 i_{xd}^* 与有功电流 i_{xd} 比较，其差值经过PID算法得出正序桥臂电压调制波信号的有功分量 v_{xd} ；所述无功电流指令 i_{xq}^* 与无功电流 i_{xq} 比较，其差值经过PID算法得出正序桥臂电压调制波信号的无功分量 v_{xq} ；所述正序桥臂电压调制波信号的有功分量 v_{xd} 和正序桥臂电压调制波信号的无功分量 v_{xq} 经过两相旋转-两相静止(dq- $\alpha\beta$)坐标变换得到桥臂a、桥臂b、桥臂c的正序电压调制波信号基波分量 v_{xr} ；

[0061] 所述三相桥臂协调控制所述有功电流指令 i_{xd}^* 经过零序有功电流处理，得到零序有功电流指令值 i_{zxd}^* ，零序有功电流指令值 i_{zxd}^* 与电网电压幅值 V_{Ng} 相乘得到零序有功功率指令值 P_{zx}^* ，将零序有功功率指令值 P_{zx}^* 经过桥臂无功功率处理得到零序无功功率指令值 Q_{zx}^* ，将并网电流 i_{xg} 与零序有功功率指令值 P_{zx}^* 经过零序电压有功分量处理得零序电压有功分量指令值 v_{zxd}^* ，将并网电流零序 i_{xg} 与零序无功功率指令值 Q_{zx}^* 经零序电压无功分量处理得零序电压有功分量指令值 v_{zxq}^* ，将所述零序电压有功分量指令值 v_{zxd}^* 与零序无功功率指令值 Q_{zx}^* 经过d'q'- $\alpha\beta$ 坐标变换得基波零序电压信号 v_{zx} ；基波零序电压 v_{zx} 与正序电压调制波信号基波分量 v_{xr} 相加得到桥臂a、桥臂b、桥臂c的电压调制波信号基波分量 v'_{xr} 。

[0062] 如图12所示，所述零序有功电流处理为：

$$[0063] \quad i_{zxd}^* = \frac{i_{ag}^* + i_{bg}^* + i_{cg}^*}{3} - i_{xg}^*$$

[0064] 所述桥臂无功功率处理为：

$$[0065] \quad \begin{bmatrix} Q_{za}^* \\ Q_{zb}^* \\ Q_{zc}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin(\frac{2\pi}{3})} \begin{bmatrix} -\cos(\frac{2\pi}{3}) & 1 & 0 \\ 0 & -\cos(\frac{2\pi}{3}) & 1 \\ 1 & 0 & -\cos(\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{za}^* \\ P_{zb}^* \\ P_{zc}^* \end{bmatrix}$$

[0066] 所述桥臂零序电压无功分量处理为：

$$[0067] \quad v_{zxq}^* = \frac{Q_{zx}^*}{i_{xg}}$$

[0068] 所述桥臂零序电压有功分量处理为：

$$[0069] \quad v_{zxd}^* = \frac{P_{zx}^*}{i_{xg}}$$

[0070] 如图7所示为a相 $\alpha\beta$ -d'q'示坐标变换意图，dq同步参考坐标系的d轴与电压矢量

V_{ag} 同相, V_{ag} 由锁相环进行跟踪。 $d'q'$ 同步坐标系是以并网电流矢量 I_{ag} 定位的坐标系。

[0071] 所述 $d'q'$ - $\alpha\beta$ 坐标变换为:

$$[0072] \quad \begin{bmatrix} m_{d'} \\ m_{q'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ix} & \sin \theta_{ix} \\ -\sin \theta_{ix} & \cos \theta_{ix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{\alpha} \\ m_{\beta} \end{bmatrix}$$

[0073] 其中, m 表示电流 i 或电压 v , θ_{ix} 为并网电流 i_{xg} 的相位,由锁相环实时对该相位跟踪;

[0074] 所述 $\alpha\beta$ - $d'q'$ 坐标变换为:

$$[0075] \quad \begin{bmatrix} m_{\alpha} \\ m_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ix} & -\sin \theta_{ix} \\ \sin \theta_{ix} & \cos \theta_{ix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{d'} \\ m_{q'} \end{bmatrix}$$

[0076] 其中, m 表示电流 i 或电压 v , θ_{ix} 为并网电流 i_{xg} 的相位,由锁相环实时对该相位跟踪。

[0077] 所述直流侧发电功率不匹配运行开关模式选择环节具体为:在单个桥臂 x 内有1个首模块、 $N+1$ 个发电/储能单元和 N 个分裂发电/储能功率模块,可以端子A或B或C与 n 点间生成 $2(N+1)+1$ 个电平电压,取载波 v_{cr} 为频率固定、最大值为1、最小值为-1的三角波;令 P_{xj} 为桥臂 x 上第 j 个发电/储能单元的发电功率,所有 $N+1$ 个发电功率从小到大排序,依次为 $P_{xk_1}, P_{xk_2} \dots P_{xk_{N+1}}$,其中, $k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_{N+1}$ 且 $(k_1, k_2, \dots, k_{N+1}) \in (1, 2, \dots, N+1)$;

[0078] 在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v'_{xr} > 0$ 时,当 $v_{cr} > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 FE_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,当 $v_{cr} + 1 > v'_{xr} > v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $v_{cr} + 2 > v'_{xr} > v_{cr} + 1$ 时,首模块采用开关模式 E_1 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ...当 $v_{cr} + (N-1) > v'_{xr} > v_{cr} + (N-2)$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + N > v'_{xr} > v_{cr} + (N-1)$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v_{cr} + (N+1) > v'_{xr} > v_{cr} + N$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $v'_{xr} > v_{cr} + (N+1)$ 时,首模块采用开关模式 E_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;

[0079] 在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v'_{xr} < 0$ 时,当 $0 > v'_{xr} > -v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 FE_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $-v_{cr} > v'_{xr} > -(v_{cr} + 1)$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ;当 $-(v_{cr} + 1) > v'_{xr} > -(v_{cr} + 2)$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ...当 $-[v_{cr} + (N-2)] > v'_{xr} > -[v_{cr} + (N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-[v_{cr} + (N-1)] > v'_{xr} > -[v_{cr} + N]$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;当 $-[v_{cr} + N] > v'_{xr} > -[v_{cr} + (N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1

个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;当 $-[v_{cr}+(N+1)]>v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 F_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;

[0080] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v'_{xr} > 0$ 时,当 $v_{cr} > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 HG_0 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $v_{cr}+1 > v'_{xr} > v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $v_{cr}+2 > v'_{xr} > v_{cr}+1$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ...当 $v_{cr}+(N-1) > v'_{xr} > v_{cr}+(N-2)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr}+N > v'_{xr} > v_{cr}+(N-1)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{cr}+(N+1) > v'_{xr} > v_{cr}+N$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $v_{xr} > v'_{xr}+(N+1)$ 时,首模块采用开关模式 G_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;

[0081] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v'_{xr} < 0$ 时,当 $0 > v'_{xr} > -v_{cr}$ 时,首模块采用开关模式 HG_0 、第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $-v_{cr} > v'_{xr} > -(v_{cr}+1)$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ;当 $-(v_{cr}+1) > v'_{xr} > -(v_{cr}+2)$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ...当 $-[v_{cr}+(N-2)] > v'_{xr} > -[v_{cr}+(N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-1)] > v'_{xr} > -[v_{cr}+N]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $-[v_{cr}+N] > v'_{xr} > -[v_{cr}+(N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N+1)] > v'_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;

[0082] 所述模块直流电容电压脉动抑制策略包括:桥臂电压调制波信号生成与脉动抑制开关模式选择;

[0083] 所述桥臂电压调制波信号生成具体为:令 $d_0 = -1/2[\max(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc}) + \min(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc})]$ 、 $d_1 = \max(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc}) - \min(v'_{ar} \cdot v_{da} + v'_{br} \cdot v_{db} + v'_{cr} \cdot v_{dc})$ 、 $v_{dabc} = 2/d_1(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$;当 $d_1 > 2(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$ 时,桥臂x输出的电压调制波信号为 $v''_{xr} = v_{dabc}(d_0 + v'_{xr} \cdot v_{dx})/v_{dx}$;当 $d_1 < 2(v_{da} + v_{db} + v_{dc})$ 时,桥臂x输出的电压调制波信号为 $v''_{xr} = (d_0 + v'_{xr} \cdot v_{dx})/v_{dx}$;

[0084] 所述脉动抑制开关模式选择具体为:在单个桥臂x内有1个首模块、N+1个发电/储能单元和N个分裂发电/储能功率模块,可以端子A或B或C与n点间生成 $2(N+1)+1$ 个电平电压,取载波 v_{cr} 为频率固定、最大值为1、最小值为-1的三角波;令 P_{xj} 为桥臂x上第j个发电/储能单元的发电功率,所有N+1个发电功率从小到大排序,依次为 $P_{xk_1}, P_{xk_2}, \dots, P_{xk_{N+1}}$,其中, $k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_{N+1}$ 且 $(k_1, k_2, \dots, k_{N+1}) \in (1, 2, \dots, N+1)$;

[0085] 在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v_{xr}'' > 0$ 时, 当 $v_{cr} > v_{xr}''$ 时, 首模块采用开关模式 FE_0 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ; 当 $v_{cr} + 1 > v_{xr}'' > v_{cr}$ 时, 首模块采用开关模式 E_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ; 当 $v_{cr} + 2 > v_{xr}'' > v_{cr} + 1$ 时, 首模块采用开关模式 E_1 , 第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ... 当 $v_{cr} + (N-1) > v_{xr}'' > v_{cr} + (N-2)$ 时, 首模块采用开关模式 E_1 , 第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ; 当 $v_{cr} + N > v_{xr}'' > v_{cr} + (N-1)$ 时, 首模块采用开关模式 E_1 , 第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ; 当 $v_{cr} + (N+1) > v_{xr}'' > v_{cr} + N$ 时, 首模块采用开关模式 E_1 , 第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ; 当 $v_{xr}'' > v_{cr} + (N+1)$ 时, 首模块采用开关模式 E_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ;

[0086] 在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v_{xr}'' < 0$ 时, 当 $0 > v_{xr}'' > -v_{cr}$ 时, 首模块采用开关模式 F_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 ; 当 $-v_{cr} > v_{xr}'' > -(v_{cr} + 1)$ 时, 首模块采用开关模式 F_1 , 第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ; 当 $-(v_{cr} + 1) > v_{xr}'' > -(v_{cr} + 2)$ 时, 首模块采用开关模式 F_1 , 第 k_1 到第 k_{N-2} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_{N-1} 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ... 当 $-[v_{cr} + (N-2)] > v_{xr}'' > -[v_{cr} + (N-1)]$ 时, 首模块采用开关模式 F_1 , 第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ; 当 $-[v_{cr} + (N-1)] > v_{xr}'' > -[v_{cr} + N]$ 时, 首模块采用开关模式 F_1 , 第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_1 , 第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 A_2 ; 当 $-[v_{cr} + N] > v_{xr}'' > -[v_{cr} + (N+1)]$ 时, 首模块采用开关模式 F_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ; 当 $-[v_{cr} + (N+1)] > v_{xr}''$ 时, 首模块采用开关模式 F_2 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 B_2 ;

[0087] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v_{xr}'' > 0$ 时, 当 $v_{cr} > v_{xr}''$ 时, 首模块采用开关模式 HG_0 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ; 当 $v_{cr} + 1 > v_{xr}'' > v_{cr}$ 时, 首模块采用开关模式 G_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ; 当 $v_{cr} + 2 > v_{xr}'' > v_{cr} + 1$ 时, 首模块采用开关模式 G_1 , 第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ... 当 $v_{cr} + (N-1) > v_{xr}'' > v_{cr} + (N-2)$ 时, 首模块采用开关模式 G_1 , 第 k_1 到第 k_3 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_4 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ; 当 $v_{cr} + N > v_{xr}'' > v_{cr} + (N-1)$ 时, 首模块采用开关模式 G_1 , 第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ; 当 $v_{cr} + (N+1) > v_{xr}'' > v_{cr} + N$ 时, 首模块采用开关模式 G_1 , 第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ; 当 $v_{xr}'' > v_{cr} + (N+1)$ 时, 首模块采用开关模式 G_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;

[0088] 在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v_{xr}'' < 0$ 时, 当 $0 > v_{xr}'' > -v_{cr}$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ; 当 $-v_{cr} > v_{xr}'' > -(v_{cr} + 1)$ 时, 首模块采用开关模式 H_1 , 第 k_1 到第 k_{N-1} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 , 第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开

关模式 D_2 ;当 $-(v_{cr}+1) > v_{xr} > -(v_{cr}+2)$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_{N-2} 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_{N-1} 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ...当 $-[v_{cr}+(N-2)] > v_{xr} > -[v_{cr}+(N-1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_2 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_3 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N-1)] > v_{xr} > -[v_{cr}+N]$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_1 ,第 k_2 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 C_2 ;当 $-[v_{cr}+N] > v_{xr} > -[v_{cr}+(N+1)]$ 时,首模块采用开关模式 H_1 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;当 $-[v_{cr}+(N+1)] > v_{xr}$ 时,首模块采用开关模式 H_2 ,第 k_1 到第 k_N 个分裂发电/储能功率模块采用开关模式 D_2 ;

[0089] 当三个桥臂有功功率对称时,向三个桥臂桥臂注入三次谐波零序电压以实现桥臂直流电压的最大利用率。当三个桥臂有功功率不对称时,同时向三个桥臂注入三次谐波零序电压及基波零序电压以分别实现桥臂直流电压的利用率最大化以及三个桥臂并网电流平衡。

[0090] 该方法根据模块工况选择工作模式,当模块直流侧发电功率相互匹配或者轻微不匹配,采用级联模式,从而保证开关次数最小化。当模块直流侧发电功率严重不匹配时,激活并联模式,从而保证系统的稳定运行。通过向三相系统中注入零序电压的方式形成三个桥臂间的多数模块直流环节互相并联,实现模块直流环节功率脉动互相抵消。

[0091] 在本发明实施例中,采用分裂发电/储能功率模块构成模块化多电平变换器,使得在级联模式和并联模式进行切换成为可能。通过合理模式切换,能够保证稳定可靠的输出电能质量、降低开关损耗,并且能够改进传统级联多电平拓扑结构中模块功率差异容忍度小和直流电容体积大等缺点;本发明实用性强,易于实现。

[0092] 本发明的核心在于:1)通过合理安排开关模式,实现开关次数的最少化;2)将同一桥臂上模块的直流环节在合适时机并联,能实现光伏发电功率的不匹配运行;3)三个桥臂能构成单星形三相光伏发电系统,且三个单相电路的直流环节在合适的时机并联,实现参与并联的直流环节的纹波彼此抵消、抑制直流电容纹波。

[0093] 本发明能实现更高的电平输出、无需笨重工频变压器即可接入中高压电网、使用较小的滤波电感就能保证并网电流的质量。不仅如此,相比较传统多电平变换器,所提变换器拓扑结构及其控制系统更有效降低了直流环节二次功率脉动、节省了直流电容,大大提升了系统的功率密度;同时节省了开关管导通、关断次数、降低了开关损耗,从而提高了系统效率。

[0094] 实施例1

[0095] 如图10,取桥臂a为例,当桥臂a向电网输送电能且各模块的直流侧发电功率互为均衡时,用直流电压源代替发电/储能单元。桥臂a选用一个首模块,三个直流电压源2、4和6,两个分裂发电/储能功率模块3和5,外电路为滤波电感L和负载电阻R。桥臂包含一个首模块和三个分裂发电/储能功率模块,因此将首模块和三个分裂发电/储能功率模块的贡献电平叠加时可以在a、n两端合成7电平电压 v_{an} 。无论对首模块还是分裂发电/储能功率模块而言,同一个贡献电平可以对应多种开关模式。开关模式的切换会伴随开关管的导通、关断事件,对图10所示的桥臂,取首模块开关模式+分裂发电/储能功率模块3开关模式+分裂发电/储能功率模块5开关模式为开关模式组合,首模块、分裂发电/储能功率模块3和分裂发

电/储能功率模块5取不同的开关模式可以得到不同的开关模式组合和开关模式组合贡献电平,可以推导出在a、n两端合成7电平电压 v_{an} 所需的最少开关切换次数的开关模式组合。

[0096] 由于以单个桥臂为例,此时开关管 S_{17} 和 S_{18} 常开。在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时,贡献电平为3的开关模式组合只有 $E_2+A_2+A_2$,从贡献电平为3的开关模式组合 $E_2+A_2+A_2$ 切换到贡献电平为2的开关模式组合 $E_2+AB_0+A_2$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为2的开关模式组合 $E_2+AB_0+A_2$ 切换到贡献电平为1的开关模式组合 $E_2+AB_0+AB_0$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为1的开关模式组合 $E_2+AB_0+AB_0$ 切换到贡献电平0的开关模式组合 $FE_0+AB_0+AB_0$ 时,只发生1个开关管的切换,因此,在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时的开关模式组合为 $E_2+A_2+A_2$, $E_2+AB_0+A_2$, $E_2+AB_0+AB_0$ 和 $FE_0+AB_0+AB_0$ 。在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时,从贡献电平为0的开关模式组合 $FE_0+AB_0+AB_0$ 切换到贡献电平为-1的开关模式组合 $F_2+AB_0+AB_0$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为-1的开关模式组合 $F_2+AB_0+AB_0$ 切换到贡献电平为-2的开关模式组合 $F_2+AB_0+B_2$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为-2的开关模式组合 $F_2+AB_0+B_2$ 切换到贡献电平为-3的开关模式组合 $F_2+B_2+B_2$ 时,只发生1个开关管的切换,因此,在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时的开关模式组合为 $F_2+B_2+B_2$, $F_2+AB_0+B_2$, $F_2+AB_0+AB_0$ 和 $FE_0+AB_0+AB_0$ 。当从 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 转变到 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时,贡献电平为0的开关模式组合从 $FE_0+AB_0+AB_0$ 切换到 $HG_0+CD_0+CD_0$,发生6次开关管切换。在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时,从贡献电平为0的开关模式组合 $HG_0+CD_0+CD_0$ 切换到贡献电平为1的开关模式组合 $G_2+CD_0+CD_0$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为1的开关模式组合 $G_2+CD_0+CD_0$ 切换到贡献电平为2的开关模式组合 $G_2+CD_0+C_2$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为2的开关模式组合 $G_2+CD_0+C_2$ 切换到贡献电平为3的开关模式组合 $G_2+C_2+C_2$ 时,只发生1个开关管的切换,因此,在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时的开关模式组合为 $G_2+C_2+C_2$, $G_2+CD_0+C_2$, $G_2+CD_0+CD_0$ 和 $HG_0+CD_0+CD_0$ 。在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时,从贡献电平为0的开关模式组合 $HG_0+CD_0+CD_0$ 切换到贡献电平为-1的开关模式组合 $H_2+CD_0+CD_0$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为-1的开关模式组合 $H_2+CD_0+CD_0$ 切换到贡献电平为-2的开关模式组合 $H_2+CD_0+D_2$ 时,只发生1个开关管的切换,从贡献电平为-2的开关模式组合 $H_2+CD_0+D_2$ 切换到贡献电平为-3的开关模式组合 $H_2+D_2+D_2$ 时,只发生1个开关管的切换,因此在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时的开关模式组合为 $H_2+D_2+D_2$, $HG_0+D_2+D_2$, $HG_0+D_2+CD_0$, $HG_0+CD_0+CD_0$ 。所以开关次数切换最少的开关模式组合为: $E_2+A_2+A_2$ 、 $E_2+AB_0+A_2$ 、 $E_2+AB_0+AB_0$ 、 $FE_0+AB_0+AB_0$ 、 $F_2+AB_0+BA_0$ 、 $F_2+AB_0+B_2$ 、 $F_2+B_2+B_2$ 、 $G_2+C_2+C_2$ 、 $G_2+CD_0+C_2$ 、 $G_2+CD_0+CD_0$ 、 $HG_0+CD_0+CD_0$ 、 $H_2+CD_0+DC_0$ 、 $H_2+CD_0+D_2$ 、 $H_2+D_2+D_2$ 。在单个桥臂内,桥臂中不存在基波零序电压 v_{zx} ,取桥臂a期望输出电压幅值为300V、频率为50Hz,即 $v_{ra}^* = 300\sin 100\pi t \text{V}$;取开关频率为10KHz;设直流电压源2、4、6的电压为100V,即 $V_1 = V_2 = V_3 = 100\text{V}$;取滤波电感值为0.005H,即 $L = 0.005\text{H}$;取负载电阻为 50Ω ,即 $R = 50\Omega$;对上述系统进行仿真分析,在an端合成了7电平电压 v_{an} ,如图13中(a)所示;对 $S_1 \sim S_{15}$ 在一个基波周期切换次数进行累计,结果如图13中(b)所示,波形的峰值为 $S_1 \sim S_{15}$ 在一个基波周期切换次数最少的值,为410次。所述开关次数切换最少的开关模式组合所列开关模式组合涉及的开关管

导通、关断事件次数最少,因此对应的开关管开关损耗最低。

[0097] 作为比较,可以推出开关损耗较高的开关模式组合。

[0098] 在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时,贡献电平为3的开关模式组合只有 $E_2+A_2+A_2$,从贡献电平为3的开关模式组合 $E_2+A_2+A_2$ 切换到贡献电平为2的开关模式组合 $E_2+BA_0+A_2$ 时,发生3个开关管的切换,从贡献电平为2的开关模式组合 $E_2+BA_0+A_2$ 切换到贡献电平为1的开关模式组合 $EF_0+A_2+BA_0$ 时,发生7个开关管的切换,从贡献电平为1的开关模式组合 $EF_0+A_2+BA_0$ 切换到贡献电平为0的开关模式组合 $FE_0+BA_0+AB_0$ 时,发生8个开关管的切换;从 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 切换到 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时,从贡献电平为0的开关模式组合 $FE_0+BA_0+AB_0$ 切换到贡献电平为-1的开关模式组合 $F_2+AB_0+BA_0$ 时,发生5个开关管的切换,在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时,从贡献电平为-1的开关模式组合 $F_2+AB_0+BA_0$ 切换到贡献电平为-2的开关模式组合 $FE_0+B_2+B_2$ 时,发生3个开关管的切换,从贡献电平为-2的开关模式组合 $FE_0+B_2+B_2$ 切换到贡献电平为-3的开关模式组合 $F_2+B_2+B_2$ 时,发生1个开关管的切换。从 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时转变到 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时,贡献电平为0的开关模式组合从 $FE_0+BA_0+AB_0$ 切换到 $HG_0+DC_0+CD_0$,发生6次开关管切换。在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时,从贡献电平为0的开关模式组合 $HG_0+DC_0+CD_0$ 切换到贡献电平为1的开关模式组合 $GH_0+C_2+DC_0$ 时,发生5个开关管的切换,从贡献电平为1的开关模式组合 $GH_0+C_2+DC_0$ 切换到贡献电平为2的开关模式组合 $G_2+DC_0+C_2$ 时,发生3个开关管的切换,从贡献电平为2的开关模式组合 $G_2+DC_0+C_2$ 切换到贡献电平为3的开关模式组合 $G_2+C_2+C_2$ 时,发生1个开关管的切换;在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时,从贡献电平为0的开关模式组合 $HG_0+DC_0+CD_0$ 切换到贡献电平为-1的开关模式组合 $H_2+DC_0+DC_0$ 时,发生5个开关管的切换,从贡献电平为-1的开关模式组合 $H_2+DC_0+DC_0$ 切换到贡献电平为-2的开关模式组合 $HG_0+D_2+D_2$ 时,发生5个开关管的切换,从贡献电平为-2的开关模式组合 $HG_0+D_2+D_2$ 切换到贡献电平为-3的开关模式组合 $H_2+D_2+D_2$ 时,发生1个开关管的切换。所以开关次数切换最多的开关模式组合为: $E_2+A_2+A_2$ 、 $E_2+BA_0+A_2$ 、 $EF_0+A_2+BA_0$ 、 $FE_0+BA_0+AB_0$ 、 $F_2+AB_0+BA_0$ 、 $FE_0+B_2+B_2$ 、 $F_2+B_2+B_2$ 、 $G_2+C_2+C_2$ 、 $G_2+DC_0+C_2$ 、 $GH_0+C_2+DC_0$ 、 $HG_0+DC_0+CD_0$ 、 $H_2+CD_0+DC_0$ 、 $HG_0+D_2+D_2$ 和 $H_2+D_2+D_2$ 。在单个桥臂内,桥臂中不存在基波零序电压 v_{zx} ,取桥臂a期望输出电压幅值为300V、频率为50Hz,即 $v_{ra}^* = 300\sin 100\pi t V$;取开关频率为10KHz;设直流电压源2、4、6的电压为100V,即 $V_1=V_2=V_3=100V$;取滤波电感值为0.005H,即 $L=0.005H$;取负载电阻为50Ω,即 $R=50\Omega$ 。对上述系统进行仿真分析,在an端合成了7电平电压 v_{an} ,如图14中(a)所示;对 $S_1\sim S_{15}$ 在一个基波周期切换次数进行累计,结果如图14中(b)所示,波形的峰值为 $S_1\sim S_{15}$ 在一个基波周期切换次数较多的值,为1046次。所述开关次数切换较多的开关模式组合所列开关模式组合涉及的开关管导通、关断事件次数较多,因此对应的开关管开关损耗较高。

[0099] 如图15,在单个桥臂内,取桥臂a为例,开关管 S_{17} 和 S_{18} 常开,选用一个首模块,三个发电/储能单元,两个分裂/发电功率单元。以受控电流源并联电解电容的形式模拟直流侧发电功率不匹配,在单个桥臂内,桥臂中不存在基波零序电压 v_{zx} ,设受控电流源 I_1 的值为 $i_1=3A$ 、受控电流源 I_2 的值为 $i_2=3.5A$,受控电流源 I_3 的值为 $i_3=4A$;电网电压的幅值为

311V、频率为50Hz,即 $V_g = 311\sin 100\pi t$ V;滤波电感值为0.005H,即 $L = 0.005$ H;载波为最大值为1、最小值为-1、频率为10KHz的三角波;电解电容值为 $C_1 = C_2 = C_3 = 0.002$ F;采用如下的开关模式组合:

[0100] 在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时选用开关模式组合: $E_2+A_2+A_2$ 、 $E_2+A_2+A_1$ 、 $E_2+A_1+A_1$ 和 $FE_0+AB_0+AB_0$,在 $i_{ag}^* > 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时选用开关模式组合: $FE_0+AB_0+AB_0$ 、 $F_2+A_1+A_1$ 、 $F_2+B_2+A_1$ 和 $F_2+B_2+B_2$,在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} > 0$ 时选用开关模式组合: $G_2+C_2+C_2$ 、 $G_2+C_2+C_1$ 、 $G_2+C_1+C_1$ 和 $HG_0+CD_0+CD_0$,在 $i_{ag}^* < 0$ 且 $v'_{ar} < 0$ 时选用开关模式组合: $HG_0+CD_0+CD_0$ 、 $H_2+C_1+C_1$ 、 $H_2+D_2+C_1$ 和 $H_2+D_2+D_2$ 。如图16所示,发电储能模块电解电容电压 v_1 、 v_2 、 v_3 均收敛于平均直流电压指令值 v_{ad}^* 。因此,若此拓扑被运用于光伏系统中,将同一桥臂上模块的直流环节在合适时机并联,能实现光伏发电功率的不匹配运行。

[0101] 如图11为三个桥臂构成的单星形三相光伏发电系统并入电网示意图,电网电压分别为 $V_a = 311\sin 100\pi t$ V, $V_b = 311\sin(100\pi t - 2/3\pi)$ V, $V_c = 311\sin(100\pi t + 2/3\pi)$ V,每个桥臂上的电解电容的值均为0.002F;每个滤波电感 $L = 0.005$ H;载波为最大值为1、最小值为-1、频率为10KHz的三角波,桥臂平均直流电压指令值 $v_{xd}^* = 190$ V,在 $t < 0.3$ s时单星形三相光伏发电系统选用的开关模式组合为:在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时选用开关模式组合为: $E_2+A_2+A_2$ 、 $E_2+A_2+A_1$ 、 $E_2+A_1+A_1$ 和 $FE_0+A_1+A_1$;在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} < 0$ 时选用开关模式组合: $FE_0+A_1+A_1$ 、 $F_2+A_1+A_1$ 、 $F_2+B_2+A_1$ 和 $F_2+B_2+B_2$;在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时选用开关模式组合: $G_2+C_2+C_2$ 、 $G_2+C_2+C_1$ 、 $G_2+C_1+C_1$ 和 $HG_0+C_1+C_1$;在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v''_{xr} < 0$ 时选用开关模式组合: $HG_0+C_1+C_1$ 、 $H_2+C_1+C_1$ 、 $H_2+D_2+C_1$ 和 $H_2+D_2+D_2$ 。

[0102] 在 $t > 0.3$ s时单星形三相光伏发电系统选用的开关模式组合为:在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时选用开关模式组合为: $E_1+A_2+A_2$ 、 $E_1+A_2+A_1$ 、 $E_1+A_1+A_1$ 和 $FE_0+A_1+A_1$,在 $i_{xg}^* > 0$ 且 $v''_{xr} < 0$ 时选用开关模式组合: $F_1+A_1+A_1$ 、 $F_2+A_1+A_1$ 、 $F_2+B_2+A_1$ 和 $F_2+B_2+B_2$,在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v''_{xr} > 0$ 时选用开关模式组合: $GH_0+C_1+C_1$ 、 $G_2+C_1+C_1$ 、 $G_2+C_2+C_1$ 和 $G_2+C_2+C_2$,在 $i_{xg}^* < 0$ 且 $v''_{xr} < 0$ 时选用开关模式组合: $H_1+C_1+C_1$ 、 $H_2+C_1+C_1$ 、 $H_2+D_2+C_1$ 和 $H_2+D_2+D_2$ 。

[0103] 在 $t < 0.3$ s时与在 $t > 0.3$ s时单星形三相光伏发电系统选用的开关模式组合不同之处为:在 $t < 0.3$ s时单星形三相光伏发电系统选用的开关模式组合中的首模块开关模式 E_2 、 F_2 、 G_2 、 H_2 不具备将3个桥臂相互并联的能力、在 $t > 0.3$ s时单星形三相光伏发电系统选用的开关模式组合中的首模块开关模式 E_1 、 F_1 、 G_1 、 H_1 具备将3个桥臂相互并联的能力。如图17中(a)所示,单星形三相光伏发电系统的直流侧电容电压 v_{a3} 、 v_{b3} 、 v_{c3} 在 $t > 0.3$ s时的二次功率脉动均比 $t < 0.3$ s时小,如图17中(b)所示,单星形三相光伏发电系统的桥臂平均直流电压 v_{ad} 、 v_{bd} 、 v_{cd} 在 $t > 0.3$ s时的二次功率脉动均比 $t < 0.3$ s时小,由图17中(a)、(b)知,在 $t > 0.3$ s的首模块开关模式 E_1 、 F_1 、 G_1 、 H_1 将桥臂a、b、c的直流环节并联,实现参与并联的直流环节的纹波

彼此抵消、抑制直流电容纹波。

[0104] 在本发明实施例中,降低中高压大规模模块化多电平发电/储能系统的控制难度,对于模块发电/储能功率匹配具有良好的控制效果,能够保证较高的运行效率;能够改进传统模块化级联多电平发电/储能系统控制方法中开关损耗高、不能承受模块发电功率不匹配和直流环节电压二次脉动幅度大等缺点;本发明实用性强,易于实现。

[0105] 本发明以分裂发电/储能功率模块为主,辅以一个首模块及发电/储能单元,提出了一种于分裂发电/储能功率单元的多电平变换器的拓扑结构。本发明还提出了一种适用于所提拓扑结构的控制策略,能择机并联各传输功率模块、调整模块传输的峰值功率,从而实现直流发电、储能功率不匹配情况下的稳定运行。本发明所提拓扑结构的可扩展性强,典型地,三个变换器桥臂可以连接成星形三相系统。在三相系统中,不同桥臂之间的功率波动的传递可以减少模块中的电流纹波。

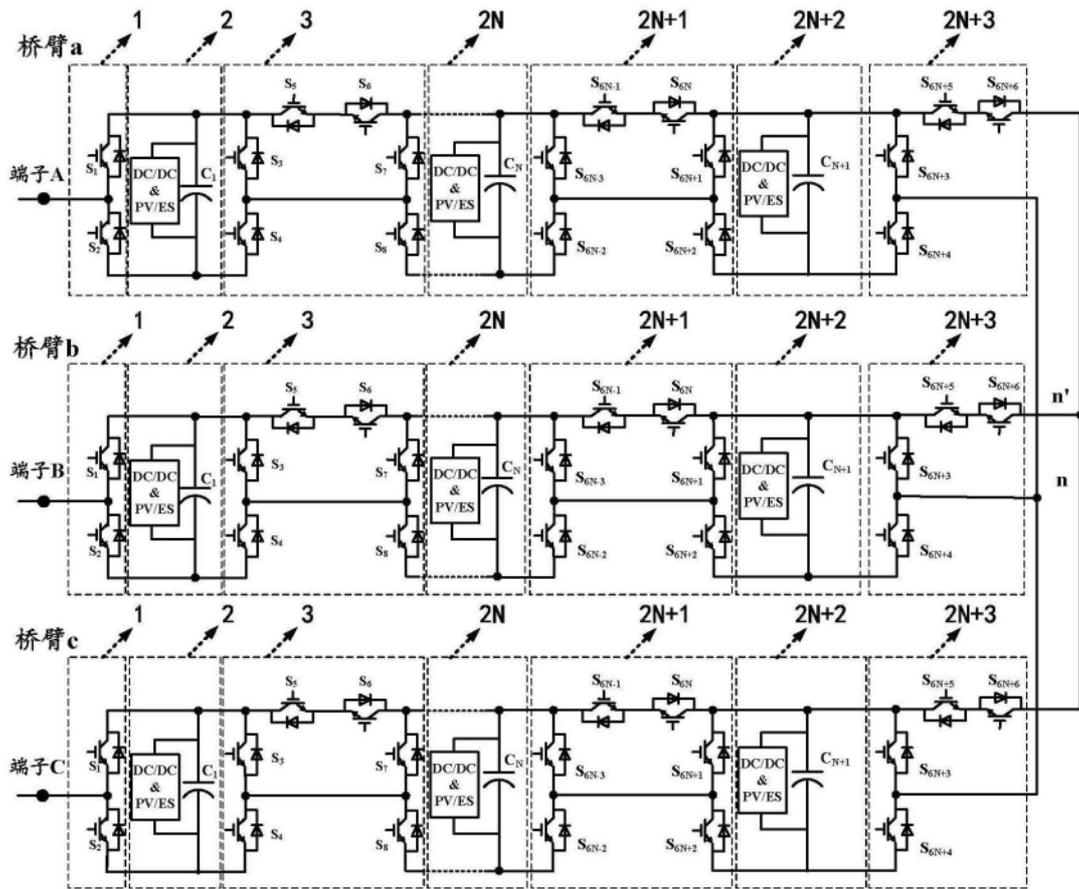


图1

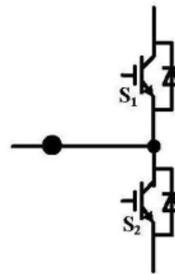


图2

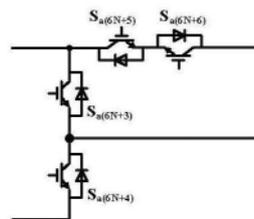


图3

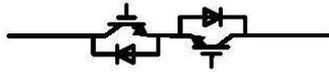


图4

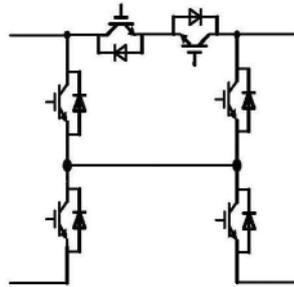


图5

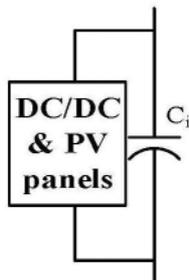


图6

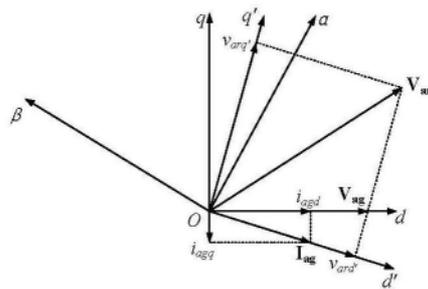
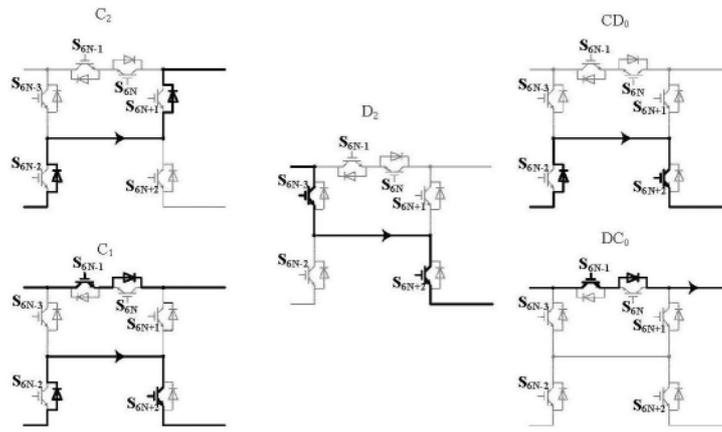
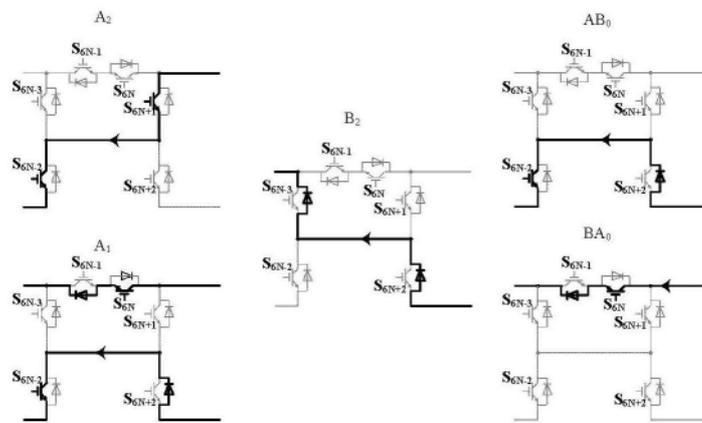


图7

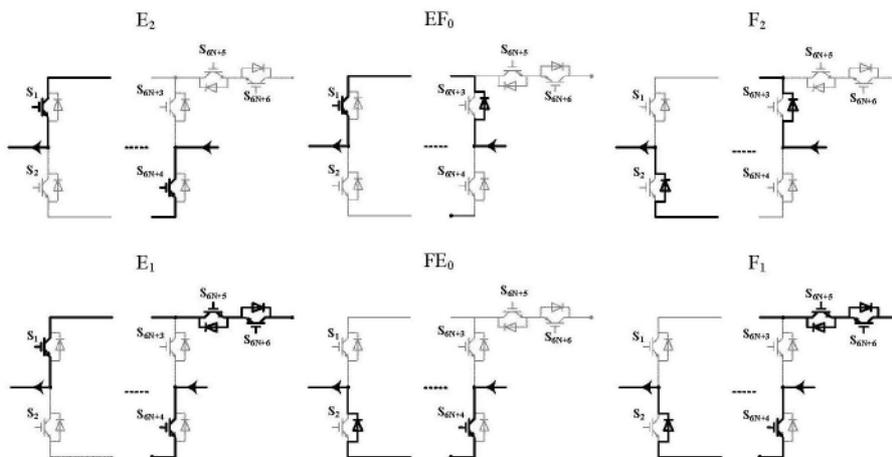


(a)



(b)

图8



(a)

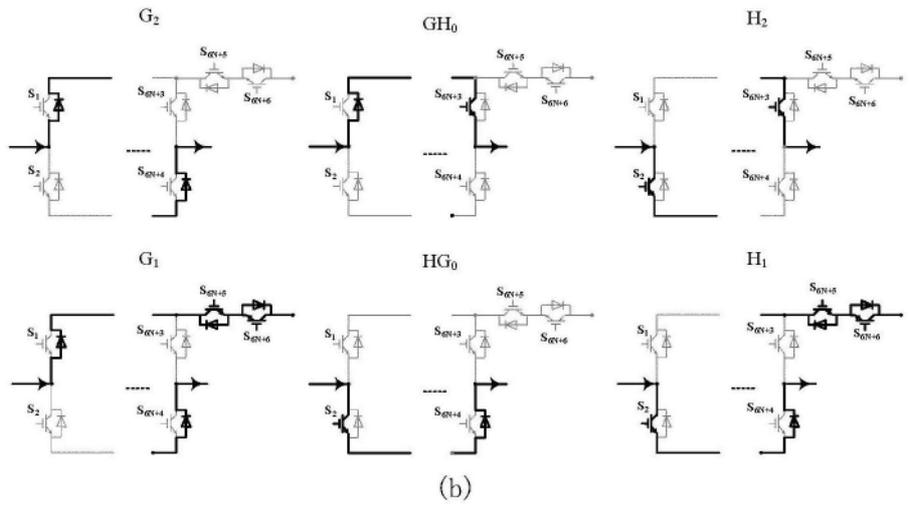


图9

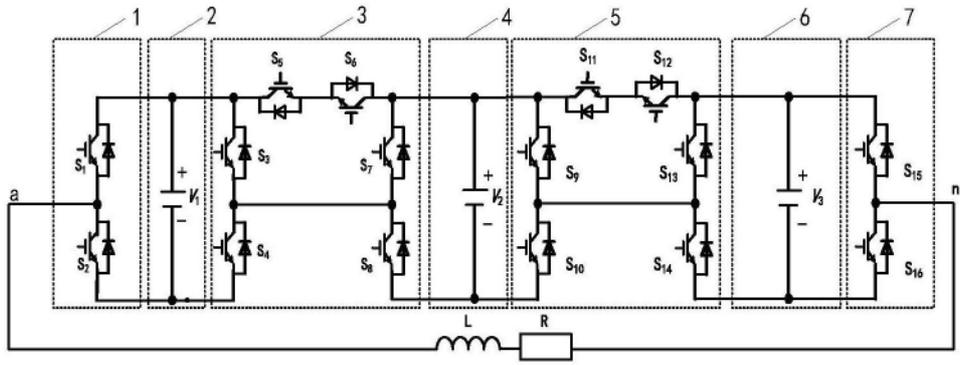


图10

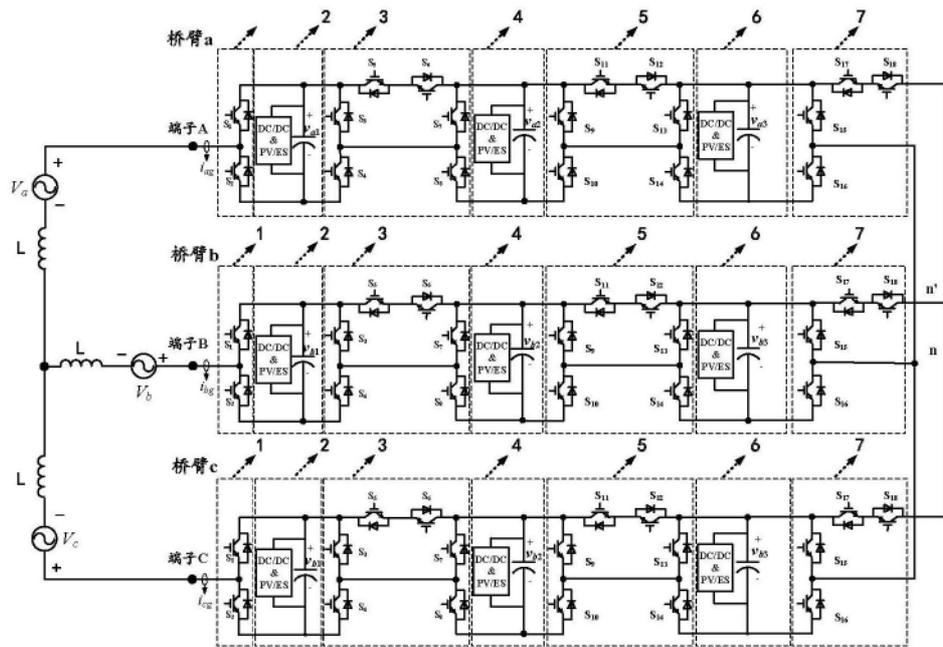


图11

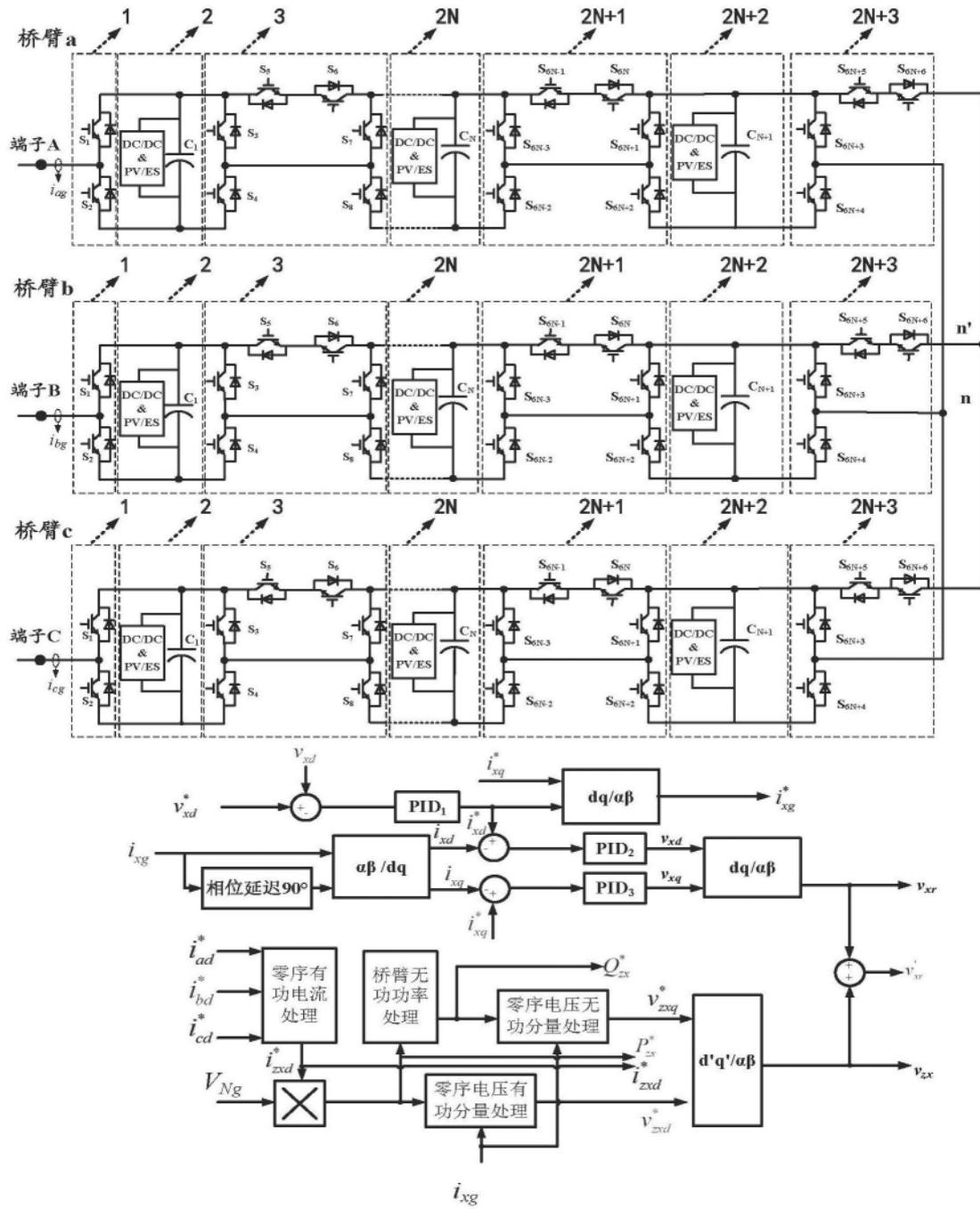


图12

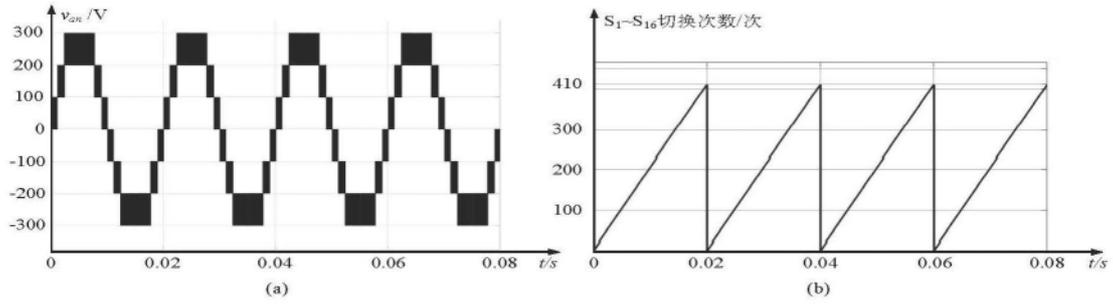


图13

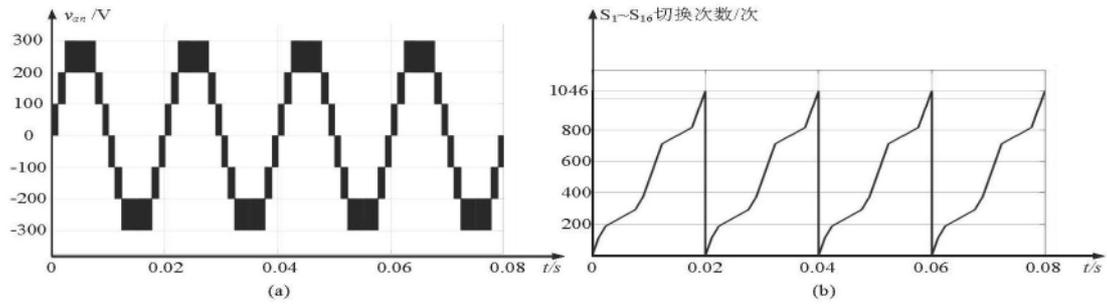


图14

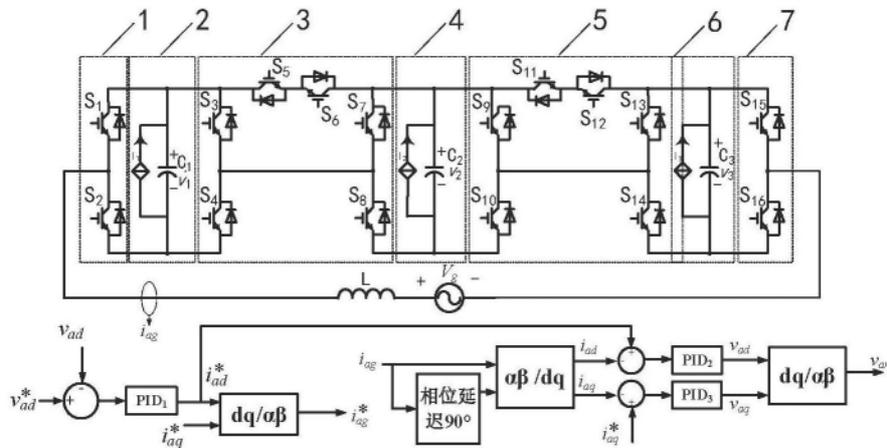


图15

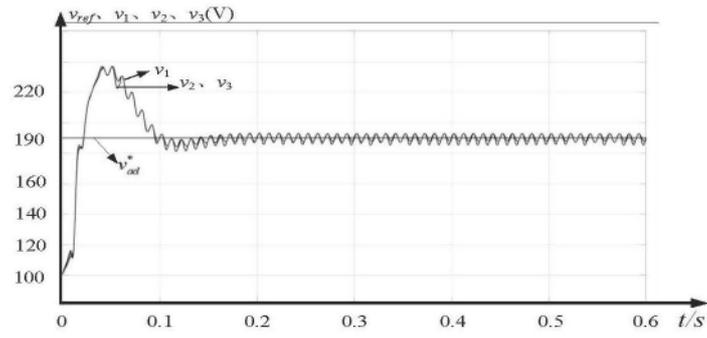


图16

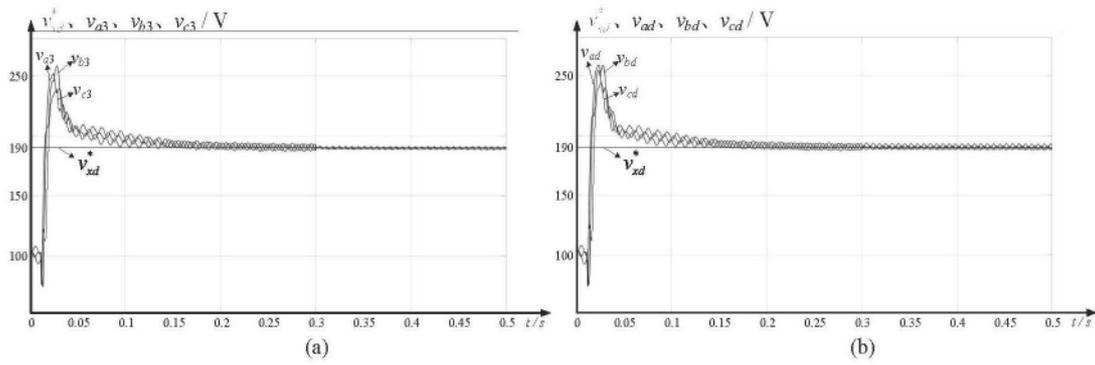


图17