

具备故障阻断能力的柔性直流输电DC/DC变换器

李彬彬, 张玉洁, 张书鑫, 赵晓东, 徐殿国

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

摘要: 高压大容量DC/DC变换器作为未来直流电网中的关键设备,近年来成为了国内外关注的热点。文中通过将晶闸管和半桥子模块进行有机组合,提出了一种混合式DC/DC变换器拓扑,通过闭锁子模块和晶闸管实现高低压侧短路故障阻断功能,且具有成本低、效率高的优点。对该拓扑结构的工作原理、故障保护机制、控制策略、参数设计和经济性等方面进行了分析论证。最后,搭建了MATLAB/Simulink仿真模型,仿真结果验证了该拓扑和控制策略的可行性。

关键词: 高压直流输电; 直流电网; DC/DC变换器; 故障阻断能力

0 引言

随着能源短缺和环境恶化问题的不断加重,可再生能源的发展得到越来越广泛的关注。基于电压源换流器的柔性直流输电技术由于具备运行方式灵活以及容易实现潮流反转等优点,成为了解决大规模可再生能源接纳与送出问题的主要技术手段之一^[1-3]。尤其是模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑的提出和应用,使柔性直流输电技术得到了飞跃式发展^[4]。为了优化广域能源资源配置以及提升直流系统稳定性,柔性直流输电技术的发展趋向多端化和网络化^[5]。

在直流电网中不同电压等级的直流线路需要通过高压大容量DC/DC变换器实现互联。高效率、轻量化、低成本的高压大容量DC/DC变换器的研究对于直流电网的发展具有重要意义^[6-8]。此外,直流故障的处理是直流电网技术中无法回避的关键问题。现阶段高压直流断路器技术正处于研究的起步阶段,成本仍较高昂。因此,如果能将直流断路器的故障阻断功能集成到高压大容量DC/DC变换器中,将会带来很高的经济效益,进一步促进直流电网技术的发展和應用。

国内外学者陆续提出了若干具备故障阻断能力的高压大容量DC/DC变换器拓扑。根据这些拓扑是否具备电气隔离^[9],分为了隔离型^[10-13]和非隔离型^[14-23]两大类。隔离型拓扑采用交流变压器进行隔

离,变比大且具有自然的故障阻断能力,但元器件数目较多且功率损耗较大。而对于直流输电过程中不同电压等级线路之间的互联变比较小,因此主要考虑非隔离型拓扑。文献[14-15]提出了一种LCL谐振式模块化多电平DC/DC变换器(LCL-based resonant modular multilevel DC/DC converter, LCL-M2DC),利用LCL谐振网络连接高低压侧MMC换流器可同时实现两换流器的零无功功率运行,提高了装置容量的利用率。当直流侧发生短路故障时闭锁MMC中子模块即可抑制故障电流。但这种拓扑在进行功率传递时需要两级变换,增大了整机的损耗和器件成本。文献[16-17]令MMC直接输出直流电压,形成模块化多电平DC/DC变换器(multilevel modular DC/DC converter, MMDC),在桥臂间注入交流电压和电流来实现上下桥臂的功率交换^[18],但会增大器件的电压、电流应力和系统损耗。另外,需要在输出侧安装笨重的滤波装置得到恒定直流输出^[19]。为实现故障阻断功能,上桥臂子模块需要采用全桥子模块,增加了器件数目,提高了变换器的成本和损耗。文献[20-21]则提出以绝缘栅双极型晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT)作为换流开关的混合级联DC/DC变换器(hybrid-cascaded DC/DC converter with IGBT, HCDC-IGBT),通过控制换流开关使储能桥臂在不同直流侧充放电,从而实现高压侧和低压侧的功率转换。该变换器具有结构简单、成本低、体积重量小的优点,但需要IGBT串联,技术较复杂,并且由于IGBT存在反并联二极管,只能实现低压侧的故障阻断。文献[22-23]采用串联技术更加成熟的晶闸管和反并联二极管串联作为换流开关(hybrid-

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-12-03。

上网日期: XXXX-XX-XX。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904600); 国家自然科学基金资助项目(51807033)。

cascaded DC/DC converter with thyristor and diode, HCDC-T-D), 但同样只能实现低压侧短路故障阻断。

在文献[23]的基础上, 本文将反并联的二极管更换为晶闸管, 提出了一种具备故障阻断能力的DC/DC变换器拓扑。该拓扑利用晶闸管的阻断能力实现直流故障保护, 当检测到故障信号后立即闭锁子模块和晶闸管, 具有成本低、效率高且能进行故障阻断等优点。本文对该拓扑的电路结构、工作原理、故障保护机制、控制方法和调制策略进行了全面的分析。最后, 通过MATLAB/Simulink来搭建仿真模型, 从而验证了拓扑结构、控制策略和故障阻断方法的有效性。

1 DC/DC变换器拓扑结构与工作原理

1.1 拓扑结构介绍

具备故障阻断能力的DC/DC变换器的拓扑结构如图1所示。该拓扑由三相结构相同的电路并联构成, 每相电路包含2组反并联晶闸管和1个储能桥臂, 其中 U_L 和 i_L 分别代表低压侧电压和电流, U_H 和 i_H 分别代表高压侧电压和电流。每个桥臂由 N 个结构相同的半桥子模块与1个电感串联而成。每个半桥子模块则由2个带有反并联二极管的IGBT与1个电容器构成。

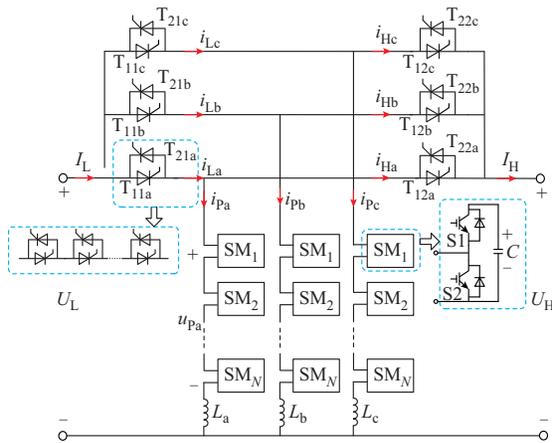


图1 具备故障阻断能力的DC/DC变换器拓扑结构
Fig.1 Topology of DC/DC converter with fault blocking capability

本拓扑的优点在于: 采用晶闸管串联作为换流开关, 导通损耗小、成本低廉以及串联技术成熟; 直流侧发生故障时闭锁子模块和晶闸管, 使得拓扑能够实现故障阻断功能。

1.2 工作原理与电路分析

各相桥臂电流控制成梯形波, 三相交错运行互差 120° 电角度, 消除了直流侧电流纹波, 通过对需要导通的晶闸管施加触发信号控制储能桥臂与高压侧

和低压侧交替连通, 实现 U_H 与 U_L 之间功率的传递。同时, 利用储能桥臂对电流的控制能力, 实现晶闸管的电流换向。

以功率由低压侧向高压侧传递时a相电路为例, 所提的DC/DC变换器的工作原理示意图如图2所示。

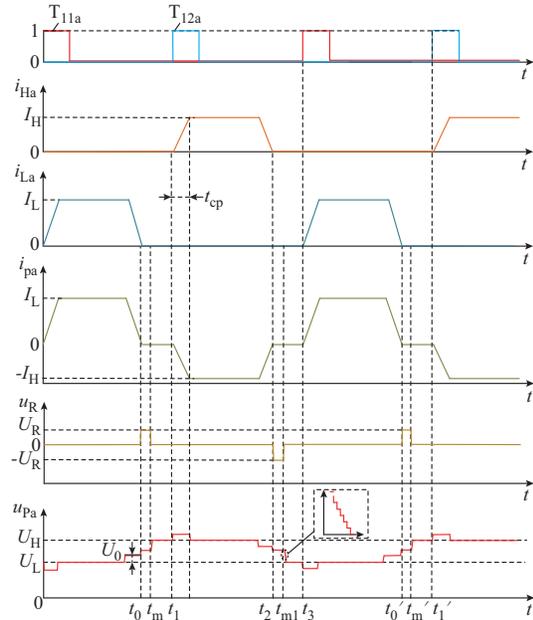


图2 具备故障阻断能力的DC/DC变换器工作原理
Fig.2 Working principle of DC/DC converter with fault blocking capability

在 $0 \sim t_0$ 期间, 零电压开通晶闸管 T_{11a} , 直流低压侧向储能桥臂充电, 此时桥臂两端电压为 U_L ; 在 $t_0 \sim t_m$ 期间, 开环控制桥臂电压为 $U_L + U_R$, 此时晶闸管 T_{11a} 承受 U_R 的反压之后可靠关断; 在 $t_m \sim t_1$ 期间, 桥臂电压变为 U_H , 为了防止换流开关承受较大的 dv/dt , 控制桥臂电压呈阶梯波上升; 在 $t_1 \sim t_2$ 期间, 零电压开通换流开关 T_{12a} , 储能桥臂向直流高压侧放电, 此时桥臂两端电压为 U_H ; 在 $t_2 \sim t_{m1}$ 期间, 开环控制桥臂电压为 $U_H - U_R$, 此时换流开关 T_{12a} 承受 U_R 的反压之后可靠关断; 在 $t_{m1} \sim t_3$ 期间, 桥臂电压变为 U_L 。

1.3 故障保护机制

高压直流输电工程中变换器直流侧短路故障是极为严重的故障工况^[24]。根据故障位置的不同, 可分为直流低压侧短路故障和直流高压侧短路故障, 而根据功率传递的方向和各组晶闸管导通时刻的不同, 变换器的故障情况又有所区别。对于本文提出的DC/DC变换器, 假定功率由低压侧向高压侧传递时 $P > 0$, 功率由高压侧向低压侧传递时 $P < 0$ 。

本文关注桥臂放电时刻发生短路故障对于不能

及时关断晶闸管时各电路电流电压情况,故主要分析 $P>0$ 时直流高压侧短路和 $P<0$ 时直流低压侧短路 2 种情况。而对于 $P>0$ 时直流低压侧短路或者 $P<0$ 时直流高压侧短路这 2 种情况,通过闭锁子模块和晶闸管可使原本导通的晶闸管承受 $U_{C,sum}$ 的反压而快速关断,实现故障阻断的功能。

该 DC/DC 变换器 $P>0$ 时直流高压侧短路故障的电路图如图 3 所示。由于三相交替工作,当 a 相桥臂向高压侧放电时, b 相和 c 相有如下 2 种工作状态。

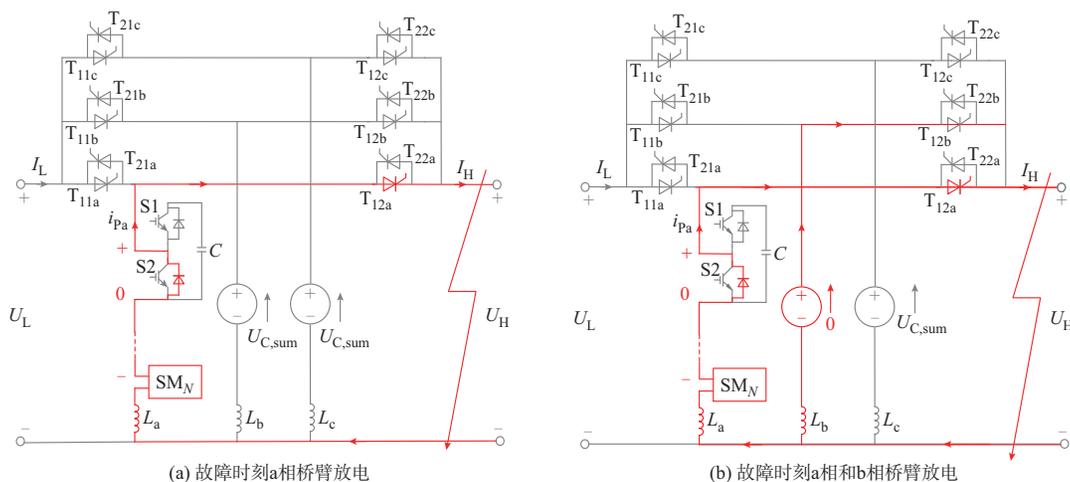


图 3 $P>0$ 时直流高压侧短路故障的电路图
Fig.3 Circuit diagram of short-circuit faults on high-voltage side when $P>0$

经对比分析,三相电路工作独立,互不影响,2 种工作状态原理一致,故以故障时刻 a 相桥臂放电为例进行 $P>0$ 时高压侧短路故障的分析。对于 a 相电路来说,此时晶闸管 T_{12a} 导通,当系统检测到故障时立即闭锁所有半桥子模块和晶闸管。而由于桥臂电感中还储存的一定能量,故通过半桥子模块的反并联二极管和 T_{12a} 流向高压侧短路故障点。经过一定时间,电感缓慢放电直至为零,进而关断晶闸管

状态。

1) 直流低压侧向 b 相和 c 相桥臂充电,即晶闸管 T_{11b} 打开、晶闸管 T_{12b} 关闭、晶闸管 T_{11c} 打开、晶闸管 T_{12c} 关闭。这种情况下故障时刻的电路图如图 3(a) 所示。

2) b 相桥臂向直流高压侧放电,直流低压侧向 c 相桥臂充电,即晶闸管 T_{11b} 关闭、晶闸管 T_{12b} 打开、晶闸管 T_{11c} 打开、晶闸管 T_{12c} 关闭。这种情况下故障时刻的电路图如图 3(b) 所示。

T_{12a} 。对于 b 相和 c 相电路,此时晶闸管 T_{11b} 和 T_{11c} 导通,故障时刻闭锁所有子模块之后桥臂电压为 $U_{C,sum} > U_L$,故晶闸管 T_{11b} 和 T_{11c} 承受反压,进而很快关断,从而实现高压侧短路故障阻断。

$P<0$ 时低压侧短路故障的电路图如图 4 所示,其工作原理与 $P>0$ 时高压侧短路故障的工作原理一致。

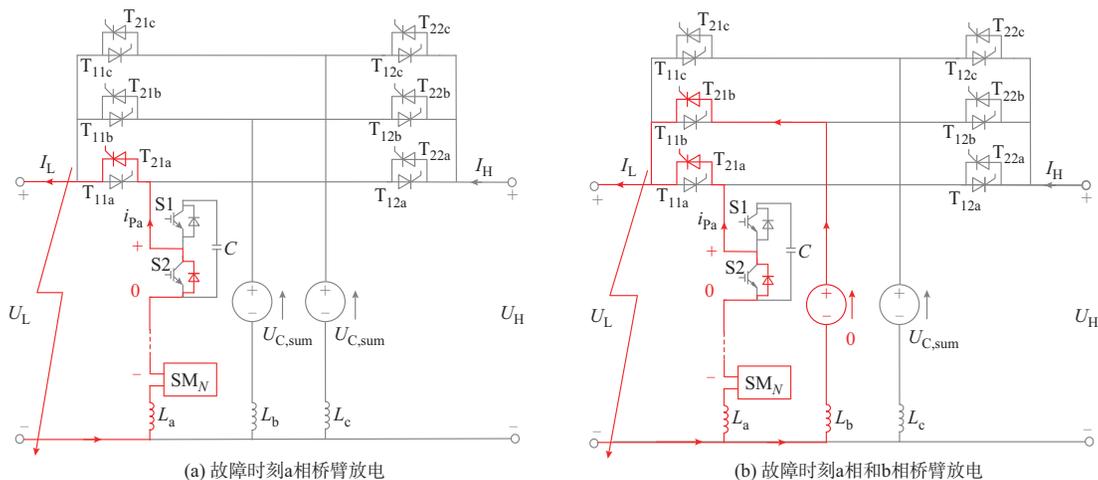


图 4 $P<0$ 时直流低压侧短路故障的电路图
Fig.4 Circuit diagram of short-circuit faults on low-voltage side when $P<0$

图4(a)为a相桥臂向直流低压侧放电,即 T_{21a} 导通, T_{22a} 关断,b相、c相均为直流高压侧对桥臂充电,即 T_{22b} 和 T_{22c} 导通、 T_{21b} 和 T_{21c} 关断;图4(b)为a相、b相桥臂向直流低压侧放电,即 T_{21a} 和 T_{21b} 导通、 T_{22a} 和 T_{22b} 关断,c相为直流高压侧对桥臂充电,即 T_{22c} 导通、 T_{21c} 关断。

1.4 参数设计

本文所提出的DC/DC变换器主要是关于子模块和换流开关数目以及电容值的参数设计。首先,给定电容电压 U_C ,每相桥臂所需要的子模块个数为:

$$N = \frac{U_H + U_0}{U_C} \quad (1)$$

式中:电压 U_0 用于施加在桥臂电感上,进而控制桥臂电流,相比于 U_H , U_0 的值很小^[22]。

在每相相关桥臂联的晶闸管的电压应力应为故障时刻其承受的最大电压 U_H ,每相相关桥臂所需要的晶闸管数目为:

$$N_{thy} = \lambda_d \frac{U_H}{U_B} \quad (2)$$

式中: λ_d 为串联降额系数; U_B 为晶闸管的断态重复峰值电压。相比IGBT,晶闸管具有更为优越的传导特性和更高的耐压能力。

半桥子模块电容值的选取主要考虑2个方面:
①容值较大时可抑制电容电压的波动;②容值较小

时可提高高、低压侧的功率转换速率。半桥子模块的容值范围为:

$$\frac{P}{3NU_C^2 f_h \epsilon} \leq C \leq \frac{2P\tau}{3N^2 U_C^2} \quad (3)$$

式中: P 为DC/DC变换器传输的总功率; f_h 为桥臂与高低压侧交替连通的频率; ϵ 为电容电压波动率; τ 为子模块电容充放电时间常数。

桥臂子模块储存的能量为:

$$W_C = \frac{1}{2} NCU_C^2 \quad (4)$$

桥臂电感的选取主要考虑梯形波桥臂电流的上升/下降的斜率以及抑制桥臂电流纹波 ΔI 的能力,即

$$\frac{U_0 T_{cp}}{I_H} \leq L \leq \frac{U_C}{\Delta I N f_c} \quad (5)$$

式中: T_{cp} 为桥臂电感上升/下降时间; f_c 为每个子模块的开关频率。

2 控制策略

2.1 具备故障阻断能力的DC/DC变换器控制方法

为实现具备故障阻断能力的DC/DC变换器的稳定运行,提出如图5所示的控制方法,以a相电路为例。该控制方法包括以下8个部分:功率控制、能量平衡控制、开环反压控制、半桥子模块电流控制、子模块电容电压控制、载波移相调制、故障判断控制和晶闸管触发控制。

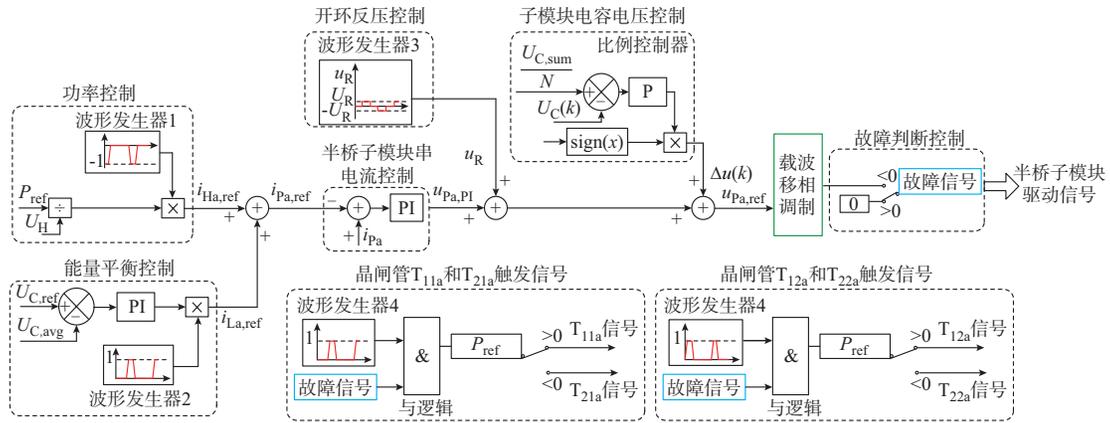


图5 具备故障阻断能力的DC/DC变换器控制框图

Fig.5 Block diagram of control of DC/DC converter with fault blocking capability

通过功率控制得到a相高压侧电流参考信号 $i_{H,ref}$,其中 P_{ref} 为从低压侧传递到高压侧的功率,利用 P_{ref}/U_H 得到 $i_{H,ref}$ 的幅值,利用波形发生器1使得 $i_{H,ref}$ 为梯形波。半桥子模块是功率由输入侧向输出侧传递的媒介,因此,为了实现能量平衡控制,调节低压侧电流指令 $i_{L,ref}$ 来约束电容电压 $U_{C,sum}$ 等于其参考

值 $U_{C,ref}$,进而将高压侧电流参考信号 $i_{H,ref}$ 与低压侧电流参考信号 $i_{L,ref}$ 进行叠加得到总的桥臂电流参考值 $i_{Pa,ref}$ 。该电流经电流内环跟踪控制后桥臂电压输出指令 $u_{Pa,PI}$ 。为了保证变换器的可靠运行,采用波形发生器3即利用前馈控制在对应时刻加入欲关断晶闸管的反压信号 u_R 。最后,将比例-积分(PI)控

制器输出电压指令 $u_{Pa,PI}$ 、反压信号 u_R 以及子模块电压参考调整量 $\Delta u(k)$ 叠加后,经载波移相调制后得到各半桥子模块的驱动信号。此外,利用波形发生器 4 和 5 实现对应时刻给相应的晶闸管导通触发信号。

还需要注意的是,该 DC/DC 变换器的控制器为了实现故障阻断功能,需要对故障信号进行判断,从而决定是否闭锁子模块以及停止给晶闸管触发信号。如附录 A 图 A1 所示,故障判断信号主要包括以下 3 个部分:短路故障即低压侧直流电压是否低于阈值电压和高压侧直流电压是否低于阈值电压^[25],防止晶闸管直通的触发逻辑即预关断的晶闸管流过的电流信号的绝对值是否大于阈值电流。

2.2 具备故障阻断能力的 DC/DC 变换器的载波移相调制与电容电压平衡方法

载波移相调制是将 N 个半桥子模块的三角载波按 $360^\circ/N$ 的相位间隔排布,此时桥臂电压等效开关频率为: $f_s = Nf_c$, 进而显著地降低了开关损耗,非常适合用于 MMC 中。载波移相调制^[26]具有每个子模块的开关频率和功率损耗分布均衡,输出电压波形的谐波畸变率很低和等效开关频率很高等优点。故本文采用载波移相调制方法生成控制半桥子模块

的脉宽调制(PWM)信号。

电容电压平衡是 DC/DC 变换器稳定运行的基础,故对于半桥子模块,首先,通过控制其开关状态保证子模块之间同步实现电容电压的充、放电;其次,对每个半桥子模块采用独立的调制参考信号:当第 k 个子模块($k=1,2,\dots,N$)电压 $u_c(k)$ 与平均电容电压参考信号 $U_{c,sum}/N$ 之间存在偏差时,将偏差信号进行比例放大,将放大的偏差信号与桥臂电流方向函数 $\text{sign}(x)$ 相乘,从而得到桥臂电压参考调整量 $\Delta u(k)$,进而实现子模块电容电压平衡控制。

3 与现有拓扑的技术经济性对比

为证明本文所提出的拓扑的技术经济性,将该拓扑与附录 A 图 A2 所示的 DC/DC 变换器拓扑进行对比分析。为了便于对比,所有拓扑的电容电压均为 U_c 并且采用耐压一致的功率器件,定义 $N_H = U_H/U_c$, $N_L = U_L/U_c$, 高压侧相对于低压侧变比 $k = U_H/U_L$, 不考虑桥臂子模块冗余。定义 IGBT 的耐压为 U_{IGBT} , 在直流侧短路故障下,换流需承受的最大电压应力为 U_H , 故 $N_{IGBT} = U_H/U_{IGBT}$, 同理可得到所需晶闸管数目 N_{thy} 和二极管数目 N_{diode} , 结果如表 1 所示。

表 1 本文所提出的拓扑与其他拓扑的对比
Table 1 Comparison between the proposed topology and other topologies

拓扑类型	全桥子模块个数	半桥子模块个数	IGBT 个数	晶闸管个数	二极管个数
LCL-M2DC	0	$6N_H + 6N_L$	$12(N_H + N_L)$	0	0
MMDC	$3N_L$ 或 $3(N_H - N_L)$	$3N_H$ 或 $6N_L$	$6N_H + 12N_L$ 或 $12N_H$	0	0
HCDC-IGBT	0	$3N_H$	$6N_H + 6N_{IGBT}$	0	0
HCDC-T-D	0	$3N_H$	$6N_H$	$6N_{thy}$	$6N_{diode}$
本文所提拓扑	0	$3N_H$	$6N_H$	$12N_{thy}$	0

特别地,对于 MMDC 拓扑^[17],考虑到该拓扑需要实现故障阻断功能,当高压侧短路故障时,上桥臂需均为全桥模块,且所有全桥子模块电容电压之和与低压侧电压匹配;当低压侧短路故障时,上桥臂须承受的电压应力为 U_H 。故当高低压侧变比 $k \in [1, 2]$ 时,即 $U_H - U_L \leq U_L$, 全桥子模块数目为 $3N_L$, 半桥子模块数目为 $3N_H$, IGBT 数目为 $12N_L + 6N_H$; 当高低压侧变比 $k > 2$ 时,即 $U_H - U_L > U_L$, 全桥子模块数目为 $3(N_H - N_L)$, 半桥子模块数目为 $6N_L$, IGBT 数目为 $12N_H$ 。

通过对比分析可以看出,本文所提出的拓扑所用器件数目相对较少,而且任意侧发生直流短路故障时,均能够实现故障阻断。

4 仿真分析

为了验证该 DC/DC 变换器拓扑结构和故障阻断控制方法的正确性,本文在 MATLAB/Simulink 软件中搭建仿真模型,实现最大传输容量为 $P = 150$ MW 的具备故障阻断能力的柔性直流输电 DC/DC 变换器,其中 $U_L = 200$ kV, $U_H = 300$ kV, 每个半桥子模块电容电压为 2.3 kV, 每个桥臂有 144 个半桥子模块,主要仿真参数如附录 A 表 A1 所示。以能量由低压侧向高压侧传递时高压侧发生短路故障进行仿真分析,仿真结果如附录 A 图 A3 所示。其中,在 $0 \sim t_0$ 期间,从直流低压侧向直流高压侧传递 150 MW 功率,该系统处于稳态运行的状态;在 $t_0 \sim t_w$ 期间,高压侧电压开始跌落,但没有到达高压侧电压故障阈值电压,高压侧电流不断上升,进而控

制器动作使桥臂电压减小; t_w 时刻,高压侧直流电压跌落到高压侧阈值电压,系统判定为高压侧短路故障,闭锁所有半桥子模块,同时闭锁晶闸管触发信号; t_w 之后,如附录A图A3(f)和(g)所示,桥臂电流逐渐减少到零,桥臂电压最后稳定于一定的电压值。整个过程中,稳态期间波形保持平滑,变换器运行稳定,故障之后控制器快速动作,及时阻断故障电流,验证了所提出的DC/DC变换器拓扑结构的原理及控制策略的准确性。

需要注意的是,在该仿真条件下,a相放电回路阈值电压为 $0.5U_H$,故障之前由于控制器动作使得储能桥臂两端电压为 $0.5U_H$,晶闸管 T_{11a} 两端的电压为 $(U_L-0.5U_H)$;故障阻断过程中电流流过半桥子模块下管反并联二极管和晶闸管 T_{12a} ,半桥子模块电压对外呈现为零,而晶闸管 T_{11a} 由于RC缓冲电路的存在,其电压为 $(U_L-0.5U_H)$ 不会突变,所以桥臂电感承受 $0.5U_H$ 的反压使得放电电流快速减小。

5 结语

本文提出了一种具备故障阻断能力的DC/DC变换器,将换流开关改为串联技术更成熟的晶闸管,其具备成本低、效率高的优点,且通过检测直流侧短路故障而闭锁子模块和换流开关触发信号,利用自身的控制性能即可实现故障阻断功能,不需要外加直流断路器,大大减小了变换器的成本。

本文介绍了该DC/DC变换器的工作原理,并提出了相应的控制方法、故障阻断策略和参数设计方法,分析了该拓扑的经济性,最后搭建了150 MW,300 kV/200 kV的MATLAB/Simulink仿真模型,验证了拓扑结构和控制方法的正确性。直流故障判断方法与本文的DC/DC拓扑的综合设计将是下一步研究的工作。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[J]. IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, 2003, Bologna, Italy.
- [2] DORN J, GAMBACH H, STRAUSS J, et al. Transbay cable—a breakthrough of VSC multilevel converters in HVDC transmission[C]// CIGRE San Francisco Colloquium, March 7-9, 2012, San Francisco, USA.
- [3] LIU Gaoren, XU Feng, XU Zheng, et al. Assembly HVDC breaker for HVDC grids with modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 931-941.
- [4] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013. XU Zheng. Flexible DC power transmission system [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [5] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17. TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [6] KISH G J. On the emerging class of non-isolated modular multilevel DC-DC converters for DC and hybrid AC-DC systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1762-1771.
- [7] ADAM G P, GOWAID I A, FINNEY S J, et al. Review of DC-DC converters for multi-terminal HVDC transmission networks[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 281-296.
- [8] PAEZ J D, FREY D, MANEIRO J, et al. Overview of DC-DC converters dedicated to HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 119-128.
- [9] 王新颖,汤广福,魏晓光,等. MMC-HVDC 输电电网用高压 DC/DC 变换器隔离需求探讨[J]. 电力系统自动化,2017,41(8): 172-178. WANG Xinying, TANG Guangfu, WEI Xiaoguang, et al. Discussion on isolation requirement of high voltage DC/DC converter for MMC-HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 172-178.
- [10] KENZELMANN S, RUFER A, DUJIC D, et al. Isolated DC/DC structure based on modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 89-98.
- [11] GOWAID I A, ADAM G P, MASSOUD A M, et al. Quasi two-level operation of modular multilevel converter for use in a high-power DC transformer with DC fault isolation capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 108-123.
- [12] XING Zhongwei, RUAN Xinbo, YOU Hongcheng, et al. Soft-switching operation of isolated modular DC/DC converters for application in HVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2753-2766.
- [13] ENGEL S P, STIENEKER M, SOLTAU N, et al. Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 124-137.
- [14] 王新颖,汤广福,魏晓光,等. 适用于直流电网的LCL谐振式模块化多电平DC/DC变换器[J]. 电网技术,2017,41(4):1106-1114. WANG Xinying, TANG Guangfu, WEI Xiaoguang, et al. LCL-based resonant modular multilevel DC/DC converter for DC grids [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1106-1114.
- [15] 石绍磊,李彬彬,张毅,等. 模块化多电平高压DC/DC变换器的研究[J]. 电源学报,2015,13(6):110-116. SHI Shaolei, LI Binbin, ZHANG Yi, et al. Research on

- modular multilevel high voltage DC/DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6): 110-116.
- [16] FERREIRA A. The multilevel modular DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(10): 4460-4465.
- [17] KISH G J, RANJRAM M, LEHN P W. A modular multilevel DC/DC converter with fault blocking capability for HVDC interconnects [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 148-162.
- [18] NORRGA S, ÅNGQUIST L, ANTONOPOULOS A. The polyphase cascaded-cell DC/DC converter[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, August 26-28, 2013, Denver, USA: 4082-4088.
- [19] LI Binbin, SHI Shaolei, ZHANG Yibo, et al. Analysis of the operating principle and parameter design for the modular multilevel DC/DC converter [C]// 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), June 1-5, 2015, Seoul, South Korea: 2832-2837.
- [20] 杨杰,贺之渊,汤广福,等.一种直流电压变换装置及其桥臂控制方法:CN105375757A[P].2016-11-23.
YANG Jie, HE Zhiyuan, TANG Guangfu, et al. A DC voltage conversion device and its bridge arm control method: CN105375757A[P]. 2016-11-23.
- [21] YANG J, HE Z, PANG H, et al. The hybrid-cascaded DC-DC converters suitable for HVDC application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5358-5363.
- [22] 李彬彬,张书鑫,程达,等.新型混合式高压直流输电 DC/DC 变换器[J].电力系统自动化,2018,42(7):116-122.DOI:10.7500/AEPS20171029002.
LI Binbin, ZHANG Shuxin, CHENG Da, et al. New hybrid DC/DC converter [J]. Power System Automation, 2018, 42(7): 116-122. DOI: 10.7500/AEPS20171029002.
- [23] LI Binbin, ZHAO Xiaodong, CHENG Da, et al. Novel hybrid DC/DC converter topology for HVDC interconnections [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5131-5146.
- [24] 徐子萌.高压直流输电晶闸管换流阀短路故障分析及试验方案[C]//全球能源互联网发展与大学创新发展论坛,2018年9月26日,济南:57-63.
XU Zimeng. Short circuit fault analysis and test scheme of thyristor converter valve for HVDC transmission[C]// Global Energy Internet Development and University Innovation Development Forum, September 26, 2018, Jinan, China: 57-63.
- [25] SONG Qiang, ZENG Rong, YU Zhanqing, et al. A modular multilevel converter integrated with DC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2502-2512.
- [26] LI Binbin, YANG Rongfeng, XU Dandan, et al. Analysis of the phase-shifted carrier modulation for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 297-310.
- 李彬彬(1989—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:柔性直流输电技术、可再生能源发电技术、模块化多电平技术等。E-mail:libinbinhit@126.com
张玉洁(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统柔性一次设备。E-mail:Zhang_Yujie89@163.com
张书鑫(1989—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统柔性一次设备。E-mail:zhang_shu_xin@126.com
- (编辑 蔡静雯)

DC/DC Converter with Fault Blocking Capability for HVDC Transmission System

LI Binbin, ZHANG Yujie, ZHANG Shuxin, ZHAO Xiaodong, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: As the key equipment for the future DC power grid, the high-voltage and high-capacity DC/DC converter has become the hot research topic in recent years. This paper proposes a hybrid DC/DC converter topology combing thyristors with half-bridge sub-modules. The hybrid DC/DC converter can block the short-circuit faults on the high-voltage and low-voltage sides by latching sub-modules and thyristors, and has the advantages of low cost and high efficiency. The working principle, fault protection mechanism, control strategy, parameter design and economy of the topology are analyzed and demonstrated. Finally, the feasibility of the proposed topology and control strategy are verified by simulation results based on MATLAB/Simulink.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0904600) and National Natural Science Foundation of China (No. 51807033).

Key words: HVDC transmission; DC grid; DC/DC converter; fault blocking capability



附录 A

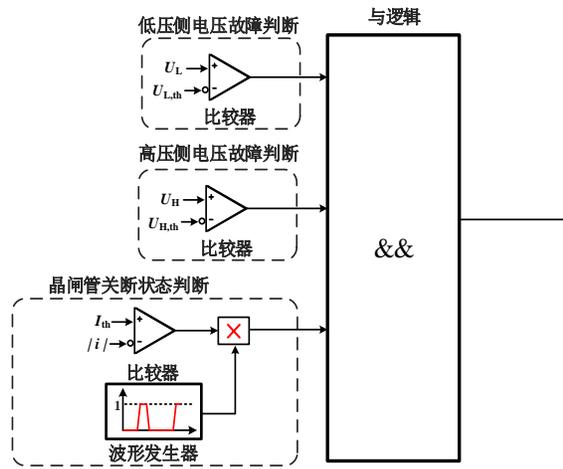


图 A1 故障判断框图

Fig.A1 Block diagram of fault judgment

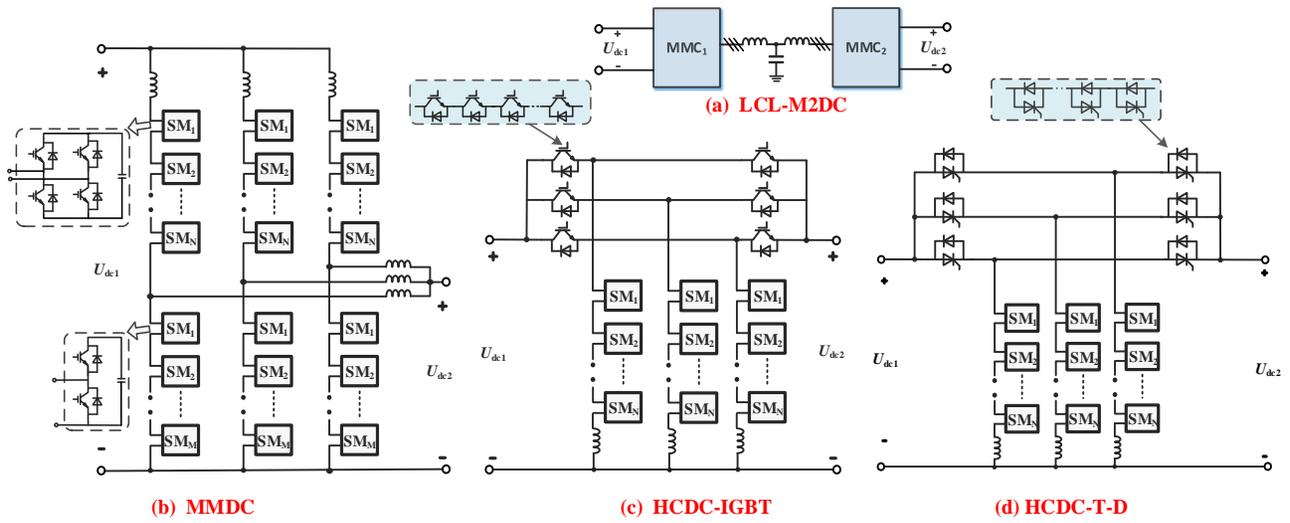
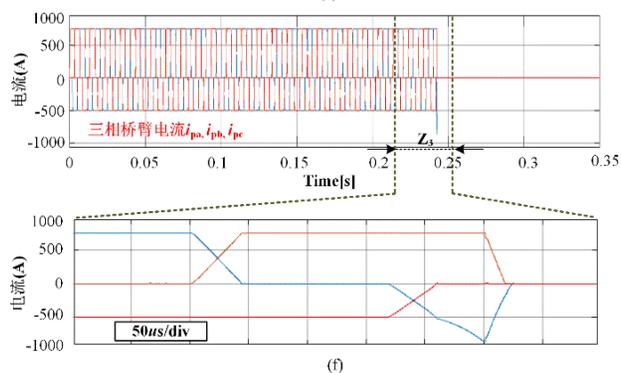
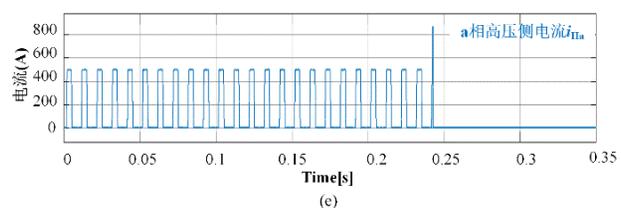
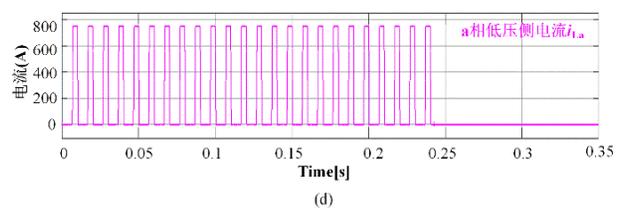
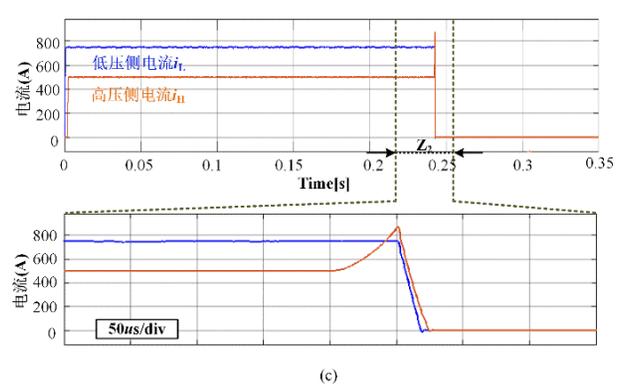
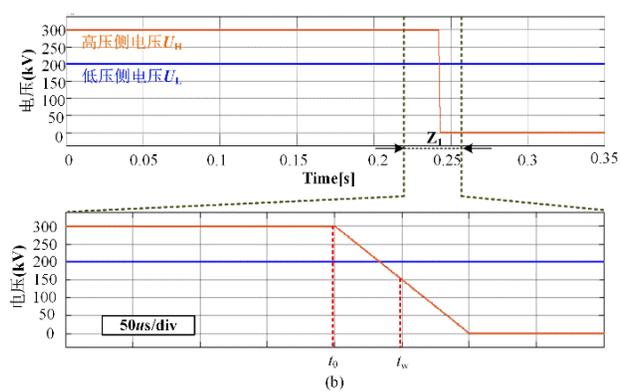
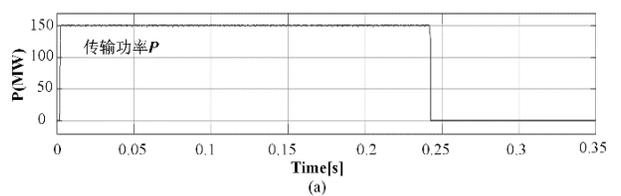


图 A2 高压 DC/DC 变换器拓扑结构图

Fig.A2 Topology of HVDC DC/DC converter



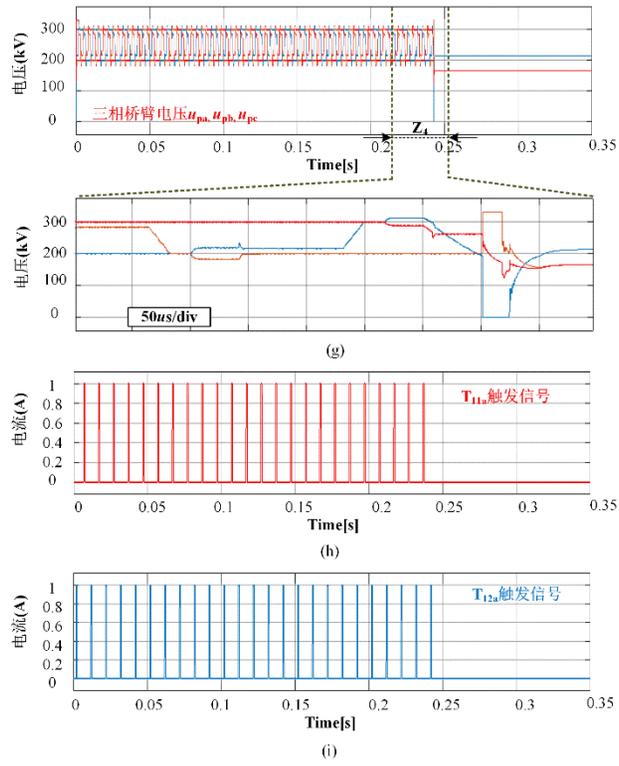


图 A3 具备故障阻断能力的 DC/DC 变换器仿真结果
 Fig. A3 Simulation Results of DC/DC converter topology with fault blocking capability

表 A1 仿真电路参数
 Table A1 Circuit Parameters of the Simulation

仿真参数	数值
最大传输容量	$P=150\text{MW}$
直流变压比	$U_L/U_H=200\text{kV}/300\text{kV}$
桥臂工作频率	$f_h=100\text{Hz}$
每相子模块个数	$N=144$
子模块电容容量	$C=4\text{mF}$
额定子模块电容电压	$U_C=2.3\text{kV}$
桥臂电感	$L=10\text{mH}$
载波移相开关频率	$f_c=800\text{Hz}$
高压侧阈值电压	$U_{H,th}=150\text{kV}$
低压侧阈值电压	$U_{L,th}=100\text{kV}$