

一种组合式直流断路器的供能方法

张旭阳^{1,2}, 张茂松^{1,2}, 王秀芹^{1,2}, 陈忠³, 王群京^{1,2}

(1. 安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽大学 工业节电与电能质量控制安徽省协同创新中心, 安徽 合肥 230601;

3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 针对当前高压直流断路器的转移支路多采用不可控全桥的变压器耦合供能, 不利于可控稳定的供电, 且能量利用率低的问题, 提出了一种组合式直流断路器的供能方法。方法采用带储能装置(蓄电池或者超级电容)的双向DC-DC变换器拓扑对组合式直流断路器谐振转移支路中的预充电电容进行电压控制和能量回收及再利用; 开发了以双有源桥变换器(DAB)为例DC-DC供能的控制策略。改进的供能方法既可以保证直流电网故障时组合式高压直流断路器迅速开断期间转移支路能量的快速稳定供给, 又能够将回收的能量用于故障恢复后的重合闸过程。仿真及实验结果表明: 所提出的双向DC-DC变换器代替不可控全桥的组合式高压直流断路器供能方法输出电压更加稳定, 并且提高了系统的能量利用率。

关键词: 直流断路器; 供能; 故障开断; 双有源桥变换器

中图分类号: TM561 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25289

An Energy Supply Method of Combined DC Circuit Breaker

ZHANG Xuyang^{1,2}, ZHANG Maosong^{1,2}, WANG Xiuqin^{1,2}, CHEN Zhong³, WANG Qunjing^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China;

2. Anhui Provincial Collaborative Innovation Center for Industrial Power Saving and Power

Quality Control, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China; 3. State Grid

Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: In view of the problem that the transfer branch of the current high-voltage DC circuit breaker mostly adopts uncontrollable full-bridge transformer coupling energy supply, which is not conducive to controllable and stable power supply, and low energy utilization, a combined DC circuit breaker energy supply method was proposed. A bidirectional DC-DC converter topology with energy storage device (battery or super capacitor) was used to control the voltage control and energy recovery and reuse of the precharged capacitor in the resonant transfer branch of the combined DC circuit breaker. A control strategy for DC-DC energy supply using dual-active-bridge (DAB) was developed as an example. The improved energy mode of supply can not only ensure the fast and stable supply of transferred branch energy during the rapid opening of the combined high-voltage DC circuit breaker in the event of DC power grid failure, but also use the recovered energy for the reclosing process after fault recovery. The simulation and experimental results show that the proposed bidirectional DC-DC converter replaces the uncontrollable full-bridge combined high-voltage DC circuit breaker energy supply method, and the output voltage is more stable, and the energy utilization rate of the system is improved.

Key words: DC circuit breaker; energy supply; fault breaking; dual-active-bridge (DAB) converters

当前, 全球各地正在快速改变能源的开发和使用方式。柔性直流输电网络是互联网远距离信号传输和清洁能源安全可靠并网的重要技术方法, 当前, 国家电网正在研发和建设用以开断

大电流的直流断路器, 这也是未来电网发展的重要方向^[1]。当前直流电网中尚未加入技术成熟的直流断路器, 这使得在系统发生故障时, 线路上的故障大电流难以快速高效被切断, 所以目前直

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202220110A-1-1-ZN)

作者简介: 张旭阳(1999—), 男, 硕士, 主要研究方向为高压直流断路器供能, Email: zhangxuyang8@163.com

流电网切除直流故障电流还是依赖于交流测的断路器,这样会给系统正常运行带来负担。如果能研发出可以在ms级开断故障电流的直流断路器,用以针对性地快速切除故障设备,这样直流系统的正常运行就可以得到保障,从而使系统整体的稳定性得到极大的提高^[2]。所以,研发出快速高效的直流断路器对电网的意义至关重要。

当前主流的直流断路器可以分为3种:机械式^[3]、混合式^[4]和固态式^[5]。机械式直流断路器利用振荡电路振荡的原理,使电路产生过零点,以在过零点断开开关,完成线路开断;混合式直流断路器通过将主支路电流转移至转移支路中实现开断^[6];固态式直流断路器则利用半导体开关器件实现开断。但是,不管采用何种方案,由于电力系统的开关设备难以实现在高电压等级的供能,当电压等级在高等级时,高电位的隔离供能将难以实现^[7]。近年来,随着技术的发展与应用,其中的决定性装置——双向隔离型直流变换器也逐渐被大众所关注,并且得到了快速的发展,而双有源桥(dual-active-bridge, DAB)变换器由于原理简单、可以双向传输能量的特点备受瞩目^[8]。DAB具有电气隔离、能量双向流动、适用于高电压环境、易于实现软开关等优点,非常适配直流电网的供电需求,从而得到广泛的应用^[9]。相较于不可控全桥供能,DAB供能可适用于更高的电压等级并能显著地提高功率密度及性能。

本文从组合式直流断路器入手,重点对其供能进行深入研究,首先阐述了组合式直流断路器的总体运行方案;进而介绍了当前其供能的不足及DAB供能的优点;之后介绍了直流断路器DAB供能的策略;最后进行了运行实验。实验结果表明,相对于不可控全桥供能,DAB供能更加稳定可控,且能量利用率高。

1 组合式直流断路器的供能方法

1.1 电路拓扑

如图1所示,本文所提的组合式直流断路器主要由主支路、转移支路、耗能支路这3个部分组成^[10],它们为互相并联的连接方式,为故障电流的转移提供路径。

主支路由快速机械开关构成,主要用于在系统正常工作时导通电流。转移支路由谐振电感、谐振电容、晶闸管和预充电电容 C_0 构成,其中谐振电感和谐振电容组成谐振电路;谐振开关由

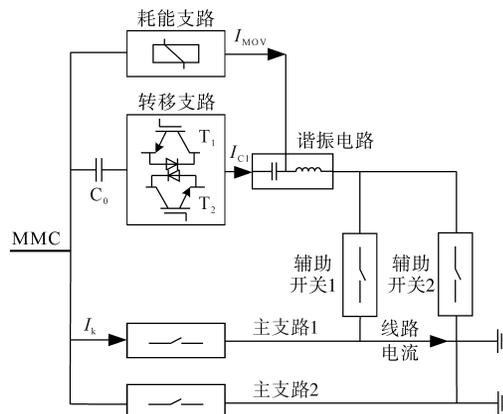


图1 组合式直流断路器拓扑

Fig.1 Combined DC circuit breaker topology

T_1, T_2 反并联构成,用于交替开断使谐振电路产生谐振。转移支路主要用于转移故障电流和使耗能支路达到触发电压。耗能支路由避雷器(metal oxide varistors, MOV)串联构成,主要用于在系统故障时吸收故障能量。断路器开断各支路电流波形如图2所示。

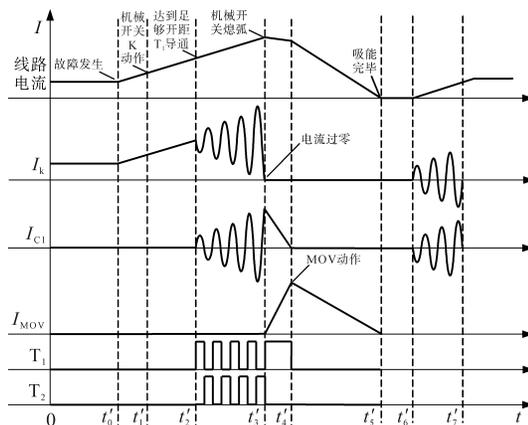


图2 断路器开断波形

Fig.2 Circuit breaker breaking waveforms

图2中,断路器工作可分为预充电电容阶段、正常运行阶段、故障转移阶段、故障电能消耗阶段和重合闸阶段。以主支路1为例,预充电电容阶段在0s前,此阶段需要把预充电电容 C_0 两端电压在0.02s内充至2kV;正常运行阶段在0— t_0 时间段,此阶段系统运行在正常阶段,电流经主支路1流通;故障转移阶段为 t_0 — t_4 时间段,此时线路1出现故障,系统将故障电流转移至转移支路;故障电能消耗阶段为 t_4 — t_5 时间段,此时故障电能通过避雷器吸收;重合闸阶段为 t_6 — t_7 时间段,此时谐振电路开始谐振,给预充电电容充电,为下一次开断做准备。

1.2 供能方法介绍

由于高压直流断路器内部的电力电子器件

无法进行自取能工作,不同支路的电位关系由于其导通运行和开断暂态过程的不同也不相同,这使得其供能难以实现^[11]。为解决该问题,使供能系统能够为高压直流断路器稳定可靠地供能,目前多使用分层隔离供能方法供能。组合式直流断路器分层供能原理图如图3和图4所示。

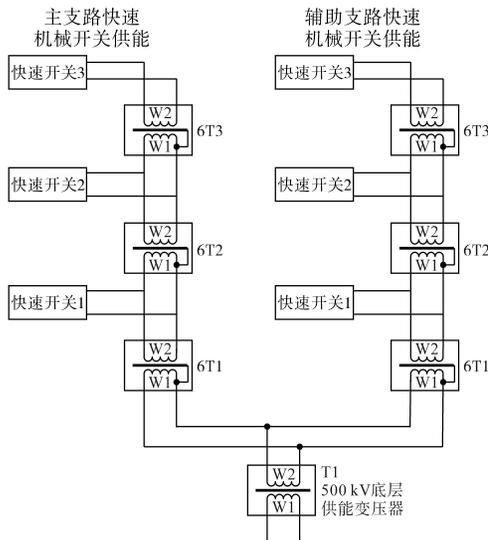


图3 快速机械开关供能图

Fig.3 Energy supply diagram of fast mechanical switch

如图3所示,由500 kV底层供能变压器作为总供能。每个支路的主支路快速机械开关及辅助支路快速机械开关分别采用一路隔离变压器供电,以解决快速机械开关供能问题。

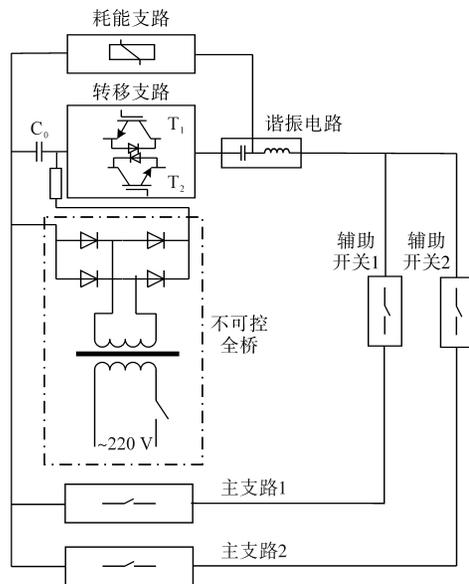


图4 转移支路供能图

Fig.4 Energy supply diagram of transfer branch

如图4所示,转移支路由一变压器耦合的不可控全桥提供能量,用于给预充电电容 C_0 和谐振开关 T_1, T_2 供能。其中,谐振开关需要在故障转

移阶段交替导通,使谐振电路产生谐振,以触发避雷器导通,将故障能量消耗,在重合闸阶段,谐振电容的能量通过谐振开关上的单向晶体管续流,将预充电电容两端电压重新充至2 kV,为下次开断做准备。预充电电容需在断路器开始运行前,在0.02 s内通过不可控全桥将两端电压充至2 kV,为之后故障转移阶段时给谐振电容充电做准备,在故障电能消耗完毕后,谐振电容两端电压会低于2 kV,此时需要重新充电。

综上所述,使用不可控全桥供能,不利于预充电电容精确可控地充电,不能达到所需电压;在故障电能消耗阶段,故障电能将完全通过避雷器消耗,系统能量利用率低。

为解决上述问题,本文对不可控全桥进行优化,提出了DAB供能的方式取代不可控全桥,如图5所示。首先,在预充电电容充电阶段,DAB由于其可控性,将更加精准高效地将电容两端电压提升至所需值;在故障电能消耗阶段,DAB凭借其双向导通特性,可以将部分故障电能存储起来,以降低避雷器两端电压,同时存储的能量也可为重合闸阶段预充电电容充电,这样,不仅降低了避雷器要求,也大大增加了系统的能量利用率。

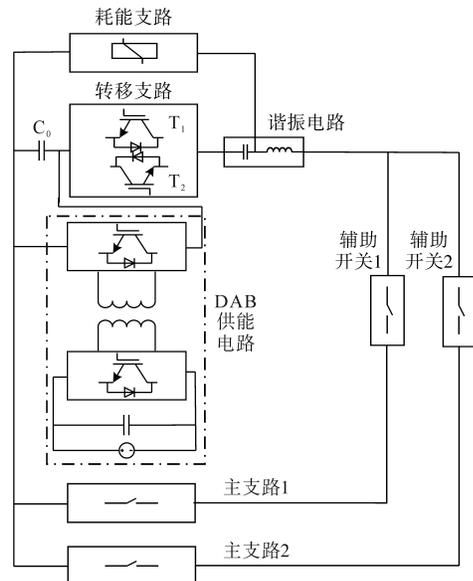


图5 DAB供能的组合式直流断路器

Fig.5 DAB-powered combined DC circuit breaker

在重合闸阶段,DAB可利用其存储的能量为预充电电容充电,无需像不可控全桥那样重复向电源取电。两种方式预充电电容电压对比如图6所示。

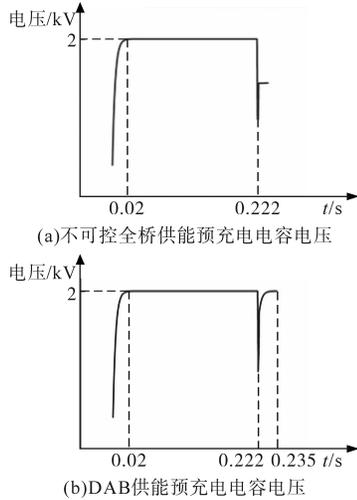


图6 两种供能方式下预充电电容两端电压
Fig.6 Voltage across the precharged capacitor in two energy supply modes

2 直流断路器 DAB 供能系统介绍

2.1 DAB 主电路拓扑结构

相较于不可控桥式整流电路,使用DAB为预充电电容供能可以更好地控制预充电电容两端电压,将其两端电压控制在需要的值;且在故障电能消耗阶段,可以利用DAB的反向传输特性,将故障电能送回一次侧,增加能量利用率,同时能减小避雷器两端电压。

图7为双有源桥DC-DC变换器的经典主电路拓扑结构。其主电路主要由可控型晶体管 $Q_1\sim Q_8$ 、高频隔离型变压器 T 、电感 L_s 、一次侧H桥 H_1 和二次侧H桥 H_2 5个部分构成。图中,一次侧输入电压为 U_1 ,二次侧输出电压为 U_2 ; C_{in} 和 C_{out} 分别为输入、输出侧的滤波电容; $Q_1\sim Q_4$ 为一次侧可控型晶体管,其自体二极管为 $D_1\sim D_4$,结电容为 $C_1\sim C_4$; $Q_5\sim Q_8$ 为二次侧可控型晶体管,其自体二极管为 $D_5\sim D_8$,结电容为 $C_5\sim C_8$;高频隔离变压器 T 主要起隔离和设定原副边变比来使两侧电压相匹配;磁性元件 L_s 为电感和变压器原边漏感之和,其作为存储和释放能量的元件^[12]。

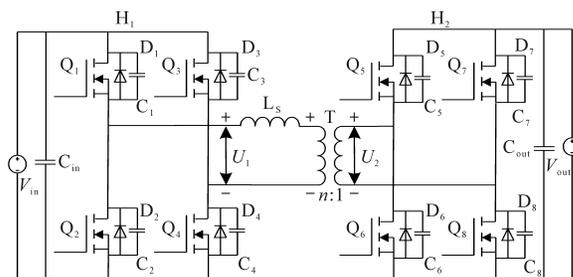


图7 双有源桥DC-DC变换器拓扑

Fig.7 Dual active bridge DC-DC converter topology

双有源桥DC-DC变换器的拓扑也可以简化为如图8所示的等效电路^[13],其中, U_{ab} 为H桥一次侧输入电压, U_{cd} 为H桥二次侧输出电压,因为变压器变比为 $n:1$,所以电感两端电压可以折算为 U_{ab} 和 nU_{cd} ; L 为一次侧电感与变压器一次侧漏感之和; i_L 为经过电感的电流。

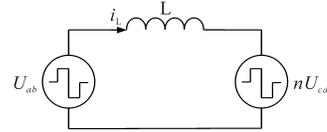
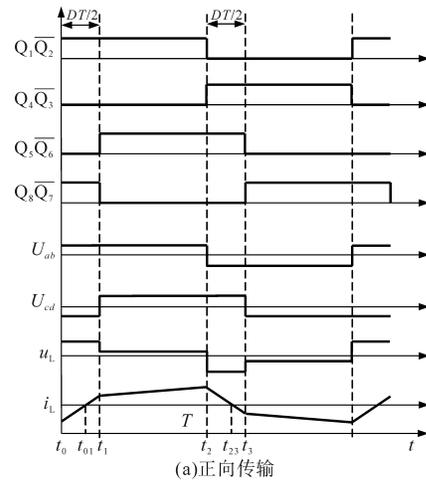


图8 双有源桥DC-DC变换器等效电路

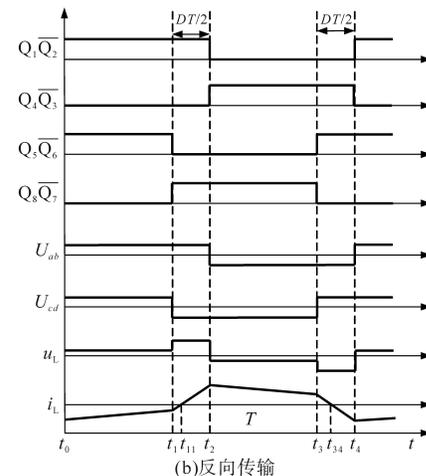
Fig.8 Equivalent circuit of a dual active bridge DC-DC converter

2.2 直流断路器 DAB 供能策略

使用单移相(single phase shifting, SPS)PWM (SPS-PWM)控制,DAB变换器的电流、电压波形如图9所示。图中, D 为移相比, T 为1个开关周期。通过控制调制波的相位来改变移相比 D ,从而控制功率传输方向^[14], $D>0$ 时,功率正向传输; $D<0$ 时,功率反向传输。假设变压器、晶体管均为理想器件^[15]。



(a)正向传输



(b)反向传输

图9 SPS-PWM控制下的工作波形

Fig.9 Operating waveforms under SPS-PWM control

由图9a可知,流过电感的电流具有对称性,由此可推导出半周期 $T/2$ 内流过电感的电流表达式为

$$i_L(t) = \begin{cases} i_L(t_0) + \frac{U_1 + nU_2}{L}(t - t_0) & 0 \leq t \leq t_1 \\ i_L(t_1) + \frac{U_1 - nU_2}{L}(t - t_1) & t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} t_0 = 0 \\ t_1 = DT/2 \\ t_2 = T/2 \end{cases} \quad (2)$$

结合式(1)与式(2),进一步得半个周期 $T/2$ 内各时刻电感电流为

$$\begin{cases} i_L(t_0) = \frac{nU_2}{4f_s L}(1 - 2D - k) \\ i_L(t_1) = \frac{nU_2}{4f_s L}(1 - k + 2kD) \\ i_L(t_2) = \frac{nU_2}{4f_s L}(-1 + k + 2D) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} f_s &= 1/T \\ k &= U_1/nU_2 \end{aligned}$$

式中: f_s 为晶闸管的开关频率。

结合式(3),对半个周期内的瞬时传输功率积分,计算可得DAB的平均传输功率为

$$P = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_2} U_{ab}(t) i_L(t) dt = \frac{nU_1 U_2}{8f_s L} D(1 - D) \quad (4)$$

对平均传输功率进行标么化:

$$P^* = \frac{P}{P_{\max}} = D(1 - D) \quad (5)$$

其中

$$P_{\max} = nU_1 U_2 / (8f_s L)$$

式中: P_{\max} 为DAB传输功率的最大值。

根据式(5)可以绘制出正向传输时移相比 D 和功率 P 的曲线图,如图10所示。在预充电电容充电阶段,DAB正向传输,将电容 C_0 两端电压充

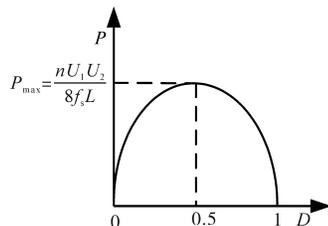


图10 移相比与正向传输功率的曲线图

Fig.10 Graph of phase shifting ratio and forward transmission power

至所需大小,如图11所示。预充电电容 C_0 上的电压 U_C 为

$$U_C = U_2(1 - e^{-\frac{t}{RC_0}}) \quad (6)$$

式中: R 为预充电电容的串联电阻。

由式(6)可以计算出为预充电电容充至所需电压的充电时间。相较于不可控桥式电路,可以通过控制DAB来精确控制充电时间以达到所需的预充电电容电压。

在故障电能消耗阶段,故障电流有两个流向,即流向耗能支路经避雷器消耗和通过DAB功率逆向传输送到电容储存。同时,由于避雷器承受功率减小,两端电压也同样减小,此时DAB工作原理如图12所示。

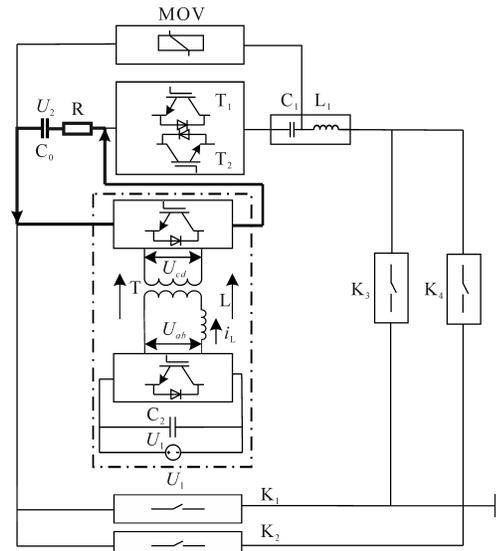


图11 预充电阶段DAB工作原理图

Fig.11 Working principle of DAB in the precharge stage

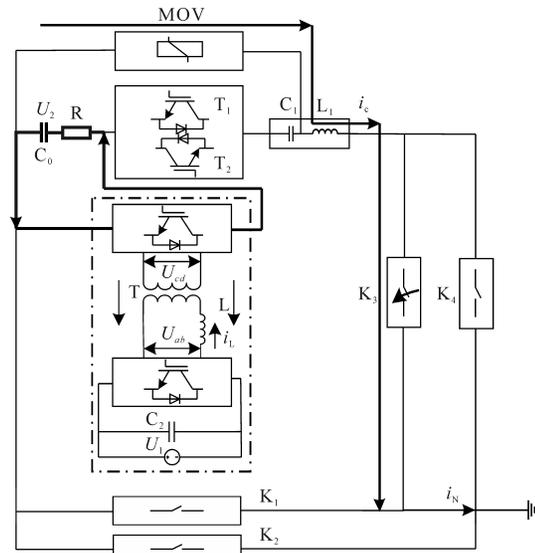


图12 耗能阶段DAB工作原理图

Fig.12 Working principle of DAB in the energy consumption stage

由于DAB变压器两侧的转换电路是对称的,亦可以根据上面方法得到DAB在反向传输时的功率表达式:

$$P = -\frac{nU_1U_2}{8f_sL}D(1+D) \quad (7)$$

同样的,由式(7)可以得到反向传输时移相比 D 和功率 P 的曲线图,如图13所示。

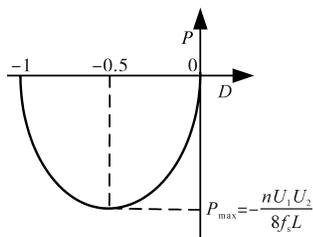


图13 移相比与反向传输功率的曲线图
Fig.13 Graph of phase shifting compare and transmit power in reverse

预充电电容 C_0 上的电压 U_C 为

$$U_C = U_1(1 - e^{-\frac{t}{R_1C_0}}) \quad (8)$$

式中: R_1 为储能电容串联的电阻。

由式(8)可以得到储能电容吸收电能后可达到的电压值。相较于不可控桥式电路,利用DAB双向性可以将故障电能存储起来,大大增加能量利用率,同时可以降低避雷器两端电压,以降低避雷器要求。

3 仿真验证

3.1 系统介绍

为验证本文所述基于DAB供能的组合式直流断路器理论的准确性和实际应用性,基于PSCAD仿真软件搭建了如图14所示的模型^[16]。

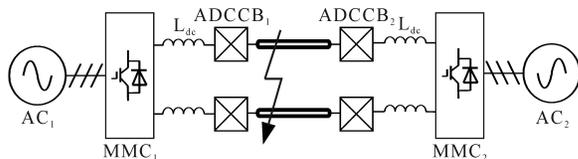


图14 仿真系统结构图

Fig.14 Simulation system structure diagram

图14中, MMC_1 , MMC_2 为模块化级联多电平换流器,其输出直流电压 ± 100 kV,对应连接的交流系统为 AC_1 和 AC_2 。直流线路的两端均设有50 mH的电感。直流断路器仿真参数为:直流母线额定电压100 kV,母线等效电阻1.19 Ω ,MOV暂态分断电压60 kV,振荡电感 $L_1 = 0.09$ mH,振荡电容 $C_1 = 20$ μ F,预充电电容 $C_0 = 4\ 000$ μ F。

DAB仿真参数如下:额定电压为245 V,变压

器变比为1:1,变压器容量为0.5 kV·A,储能电容 $C_2 = 9\ 000$ μ F。

3.2 结果分析

仿真波形如图15~图19所示,在0 s之前,系统工作在正常状态,电流经主支路流通。在0.02 s时刻前,DAB功率正向流动,将预充电电容两端电压加至2 kV,为之后谐振电路谐振提供能量,谐振完成后,预充电电容两端电压会降低至2 kV水平,如图15所示。在0.220 s时刻,主支路触发故障信号,此时主支路电流快速上升,达到设置阈值,如图16所示,此时主支路快速机械开关将立即分断,在0.222 s时,完成带弧分断,此时故障电能将转移至转移支路。同时使用调制波,使转移支路双向IGBT交替导通,使谐振电感和谐振电容发生振荡,先导通 T_2 ,经过135 μ s后导通 T_1 ,并关断 T_2 ,谐振电流最大值约为30 kA,如图17所示。如此交替导通4个周期,使谐振电容两端电压不断上升,在约0.222 9 s时达到避雷器触发电压,此时避雷器导通,同时DAB开始反向传输能量,将故障电能通过DAB和避雷器消耗,避雷器在1 ms内将故障电流消耗至0,如图18所示。之后DAB将在2 ms内将一次侧储能电容两端电压充至2.25 kV,在下次故障发生时,为预充电电容充电,如图15、图19所示。

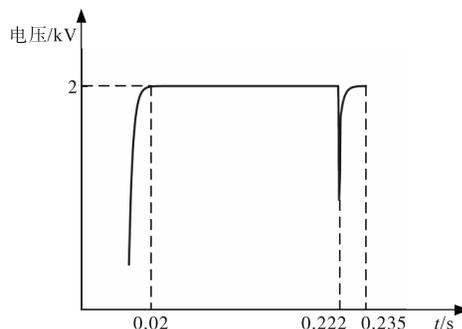


图15 预充电电容电压

Fig.15 Pre-charge capacitor voltage

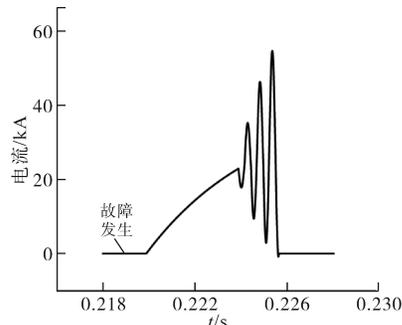


图16 主支路电流

Fig.16 Main branch current

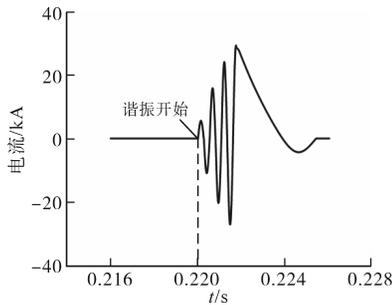


图 17 转移支路谐振电流

Fig.17 Transfer the branch resonant current

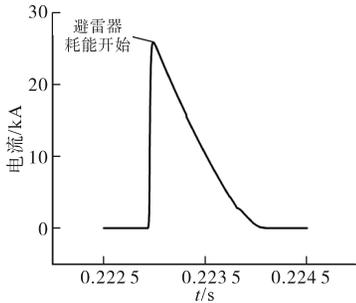


图 18 避雷器电流

Fig.18 Arrester current

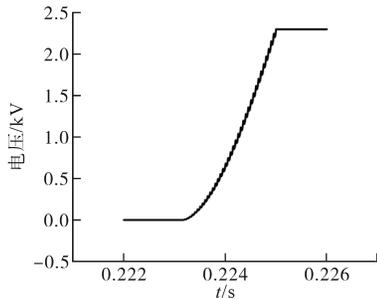


图 19 储能电容电压

Fig.19 Energy storage capacitor voltage

3.3 对比分析

为证实本文所提供能方式的优越性,将本文所提方案与传统不可控全桥供能方式作对比,对比结果如表 1 所示。

在性能方面,比较其为预充电电容充电的可控性和避雷器两端电压的大小。因为传统不可控全桥供能方式难以准确控制充电时间以将预充电电容两端电压充至需要的值,故需要增加一个电压传感器,而 DAB 供能则不需要。另外,仿真结果显示,相较于不可控全桥,DAB 能降低避雷器两端电压,可以减轻避雷器的需求。比较结果如图 20 所示。

由图 20 可知,相较于传统不可控全桥供能,DAB 供能下避雷器两端最高电压从 125 kV 下降至 78 kV,可以显著降低避雷器电压等级。能量的吸收由 DAB 反向传输过程完成,吸收的能量为

$$W = Pt' \quad (9)$$

式中: W 为 DAB 吸收的能量; P 为 DAB 反向传输时的功率; t' 为 DAB 吸收能量的时间。

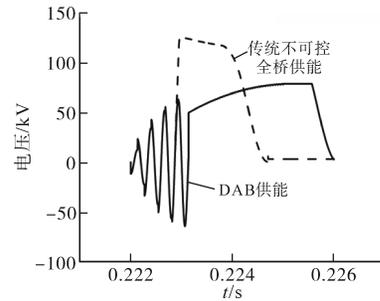


图 20 避雷器两端电压

Fig.20 Voltage across the arrester

表 1 不同供能方法对比

Tab.1 Comparison of different energy supply methods

| 供能方法 | 可控性 | 能量利用率 | 避雷器所需承受电压 | 功率流动 | IGBT 数量/个 | 是否需要反复向电源取电 |
|---------|-----|-------|-----------|------|-----------|-------------|
| 传统不可控全桥 | 不可控 | 低 | 高 | 单向 | 无 | 需要 |
| 本文 DAB | 可控 | 高 | 低 | 双向 | 8 | 不需要 |

4 结论

本文提出一种组合式直流断路器的供能方法,通过理论分析和仿真实验验证了其实用性和可行性。得到如下结论:

1) 该断路器结构简单,易于控制,可以实现双向、快速、可控的供能,实用性强,可以较好地完成直流断路器的供能需要。

2) 该控制方法在直流断路器故障电能开断和重合闸过程中均可以发挥有效作用,能明显增大系统能量利用率。

3) 所述 DAB 供能方式在直流断路器中比较新颖,尚未在直流断路器供能方面广泛应用。但相较于传统不可控全桥给预充电电容供能的方式,所述供能方案具有更加优越的性能,且所提 DAB 有较成熟的研发背景,易于研制并调试其测试平台。

4) 所述供能方式无需额外增加电源,无需改变供能电源的电压等级。

5) 所述直流断路器供能方式有较好的应用前景,符合当前直流断路器供能研究方向。

6) 可考虑相较于不可控全桥供能,如何降低 DAB 供能条件下直流断路器的成本问题。

参考文献

[1] 刘远,张升,詹婷,等. 500 kV 直流断路器隔离供能系统均压

- 设计[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4323-4330.
- LIU Yuan, ZHANG Sheng, ZHAN Ting, et al. Equalization design of isolated power supply system for 500 kV DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4323-4330.
- [2] 张猛, 马骢, 王红斌, 等. 535 kV 耦合负压式直流断路器供能系统设计方案[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2677-2683.
- ZHANG Meng, MA Qiao, WANG Hongbin, et al. Design scheme for power supply system of 535 kV coupled negative voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2677-2683.
- [3] 李宏旭, 项彬, 于书汀, 等. 超导限流器与机械式直流断路器的全电流开断配合方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4497-4505.
- LI Hongxu, XIANG Bin, YU Shuting, et al. Full range currents interruption methods by coupling current injection DC circuit breakers with superconducting fault current limiters[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4497-4505.
- [4] 刘晓明, 田俊, 贾冠龙, 等. 具有耦合电感的限流型混合直流断路器拓扑设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8885-8897.
- LIU Xiaoming, TIAN Jun, JIA Guanlong, et al. Topology design and analysis of current-limiting hybrid DC circuit breaker with coupling inductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8885-8897.
- [5] 韩乃峥, 樊强, 贾秀芳, 等. 一种具备限流能力的多端口直流断路器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5172-5181, 5298.
- HAN Naizheng, FAN Qiang, JIA Xiufang, et al. A multi-port DC circuit breaker with current limiting capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5172-5181, 5298.
- [6] 万重山, 裴翔羽, 周万迪, 等. 基于电流注入的新型混合式直流断路器[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4726-4736.
- WAN Chongshan, PEI Xiangyu, ZHOU Wandi, et al. Novel hybrid DC circuit breaker based on current injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4726-4736.
- [7] 许元震, 谢晔源, 吕玮, 等. 混合式高压直流断路器供能系统设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3856-3863.
- XU Yuanzhen, XIE Yeyuan, LÜ Wei, et al. Design of power supply system in hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3856-3863.
- [8] 黄匀飞, 钟启濠, 欧阳有鹏, 等. 双有源桥变换器拓扑结构与控制策略研究综述[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 53-65.
- HUANG Yunfei, ZHONG Qihao, OUYANG Youpeng, et al. Overview of topologies and control strategies for dual-active-bridge converter[J]. Journal of Power Sources, 2024, 22(4): 53-65.
- [9] 王攀攀, 徐泽涵, 高利强, 等. 新扩展移相角下的双有源桥 DC-DC 变换器优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 727-738.
- WANG Panpan, XU Zehan, GAO Liqiang, et al. Optimal control strategy for dual active bridge DC-DC converter with new extended-phase-shift angle[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 727-738.
- [10] CHEN H, YUAN J, XU S, et al. Research on a secondary active limiting DC fault current limiter topology[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 14547-14561.
- [11] 吕玮, 许元震, 曹冬明, 等. 高压直流断路器电力电子器件供能技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2783-2790.
- LÜ Wei, XU Yuanzhen, CAO Dongming, et al. Power electronic device power supply technology of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2783-2790.
- [12] 沙广林. 电力电子变压器中双有源桥 DC-DC 变换器的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- SHA Guanglin. Research on dual-active-bridge DC-DC converter for power electronics transformer[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016.
- [13] 徐泽涵. 双有源桥 DC-DC 变换器性能优化控制策略研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- XU Zehan. Research on performance optimization control strategy of dual active bridge DC-DC converter[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [14] 宋超超. 双有源桥式 DC-DC 变换器优化控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- SONG Chaochao. Optimal control strategies for dual active bridge DC-DC converter[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [15] 温洪宇. 双有源桥式 DC-DC 变换器线性自抗扰控制策略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- WEN Hongyu. Research on linear active disturbance rejection control strategy of dual active bridge DC-DC converter[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.
- [16] 胡裕杭. 直流配网中混合直流断路器的研究与开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- HU Yuhang. Research and development of hybrid DC circuit breakers in DC distribution networks[D]. Changsha: Hunan University, 2020.

收稿日期: 2023-07-28

修改稿日期: 2023-10-07