

磁通耦合型饼式线圈短时直流冲击特性研究

刘师卓^{1,2,3}, 夏东^{1,2,3}, 邱清泉^{1,2,3}, 张志丰^{1,2,3}, 刘清峰^{1,2,3}, 王浩男^{1,2,3}

- (1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)技术在经过多年的研究后取得了一定的进展,并且已有多项工程在运行中。然而直流短路故障的处理仍然是VSC-HVDC电网亟待解决的问题之一,目前的断路器难以在短小时内开断如此大的故障电流,因此要与限流器进行配合。电阻型超导限流器(RSFCL)已经在交流情况下进行了大量的研究,它被认为是最具有潜力的直流限流技术。然而传统的双绕无感线圈并不适用于直流输电场合,由于结构特殊使其在直流高压故障中容易发生闪络,造成超导限流器发生不可控的后果,因此需要新型的线圈结构来满足柔性直流输电保护的需求。本文基于连续式单饼限流线圈结构,对不同磁通耦合连接方式的磁场分布进行了仿真分析,建立了短时直流大电流冲击平台;同时设计了磁通耦合型饼式线圈,并对其进行了高压过电流冲击实验与分析,计算了冲击电阻过程中的电阻和热量变化并进行了讨论。本文的分析结果对电阻型直流超导限流器的设计,以及阈值与裕量的确定有一定的指导意义。

关键词: 超导限流线圈; 磁通耦合; 直流冲击

DOI: 10.12067/ATEEE1804026 **文章编号:** 1003-3076(2019)01-0047-07 **中图分类号:** TM26

1 引言

目前,基于电压源型换流器的高压直流输电(Voltage Sourced Converter-High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)技术在我国发展迅速^[1,2],但是直流侧短路故障电流的限制和开断一直是一个亟待解决的问题。国内的VSC-HVDC系统基本上是在闭锁IGBT的情况下通过在交流侧切除故障的方式来解决其系统故障^[3],这种方式响应速度慢,容易对设备造成损害。由于超导材料在短路场合下失超时具有响应快、无需检测即可限流的特性,由其构成的电阻型超导限流器(Resistive Superconducting Fault Current Limiter, RSFCL)配合高压直流快速断路器能够有效限制短路电流对设备造成的损害^[4,5]。

RSFCL通过调节电感和电阻实现限流^[6,7]。其中,电感在故障中会降低电流的上升速率,而电阻在

故障中会降低最大故障电流值。其响应时间通常是毫秒级别^[8,9]。通过电感与电阻的配合,RSFCL会将故障电流在3~10ms中限制到高压直流断路器的可动作范围内,以保证系统的安全可靠。

传统双绕无感饼式线圈具有节省空间、稳态通流能力强等优点^[10]。但由于其相邻线匝电流反向的特点,越靠近线圈外侧,其相邻线匝的电压问题就越严重。在交流场合下,由于开断时间在50ms左右,因此实际故障电流只能达到临界电流的4倍左右,约为1200A^[11,12];而在直流场合下,要求开断时间在5ms左右,故障电流至少可达到临界电流的10倍,约为3000A。如果单饼长度为10m,考虑到超导材料的室温电阻约为0.1Ω/m,交流场合与直流场合下最外侧相邻线匝的电压差将分别达到600V与3000V,直流场合下过高的匝间电压使传统无感饼式线圈不再适用于高压场合。本文从基本单饼线圈

收稿日期: 2018-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB251005)、国家自然科学基金项目(51577179)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC025)

作者简介: 刘师卓(1990-),男,满族,辽宁籍,博士研究生,研究方向为高压直流超导限流器;

夏东(1955-),男,江苏籍,研究员,博导,博士,研究方向为电磁场、电机技术。

出发,仿真不同磁通耦合连接方式的磁场分布,通过仿真与实验对单饼线圈的冲击过程进行分析,并与相同条件下的带材冲击结果进行对比。同时,本文还通过冲击实验对线圈的均压过程进行了分析。

2 线圈磁场特性

2.1 线圈结构

为了避免高压闪络问题,单饼线圈采用连续式绕法,如图 1(a)所示。在增加并联支路数后,线圈的连接方式有相邻线圈绕向相反的磁通反向耦合式与相邻线圈绕向相同的磁通同向耦合式,如图 1(b)和图 1(c)所示。

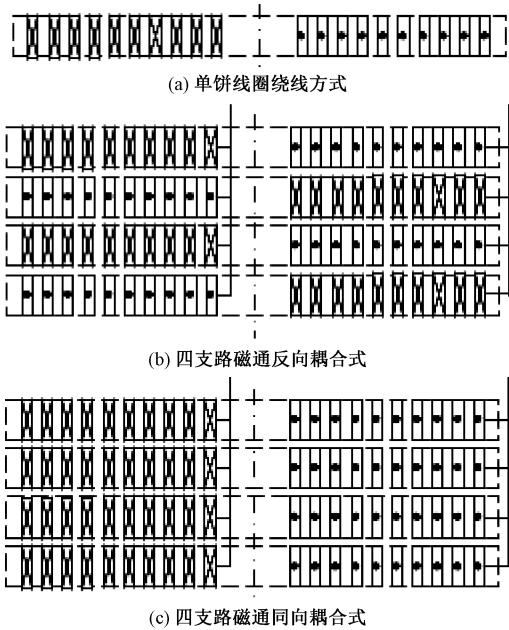


图 1 线圈绕线方式与连接方式

Fig. 1 Winding mode and connection mode of coil

线圈不同的连接方式主要区别在于磁场分布情况,而磁场分布在稳态下会影响超导材料的临界电流值,在冲击过程中会影响受力分布,故需要对不同连接方式的磁场分布情况进行研究。

2.2 磁场特性

为了研究多并联支路下磁场分布,对两种连接方式的线圈组进行了仿真,其中单饼线圈的参数如表 1 所示。饼间距为 5mm,稳态电流为 200A,仿真结果如图 2 所示。

表 1 单饼线圈参数

Tab. 1 Parameters of single pancake coil					
参数	总长度 /cm	最短半径 /mm	匝间距 /mm	匝数	带材宽度 /mm
数值	595	48	8	11	12

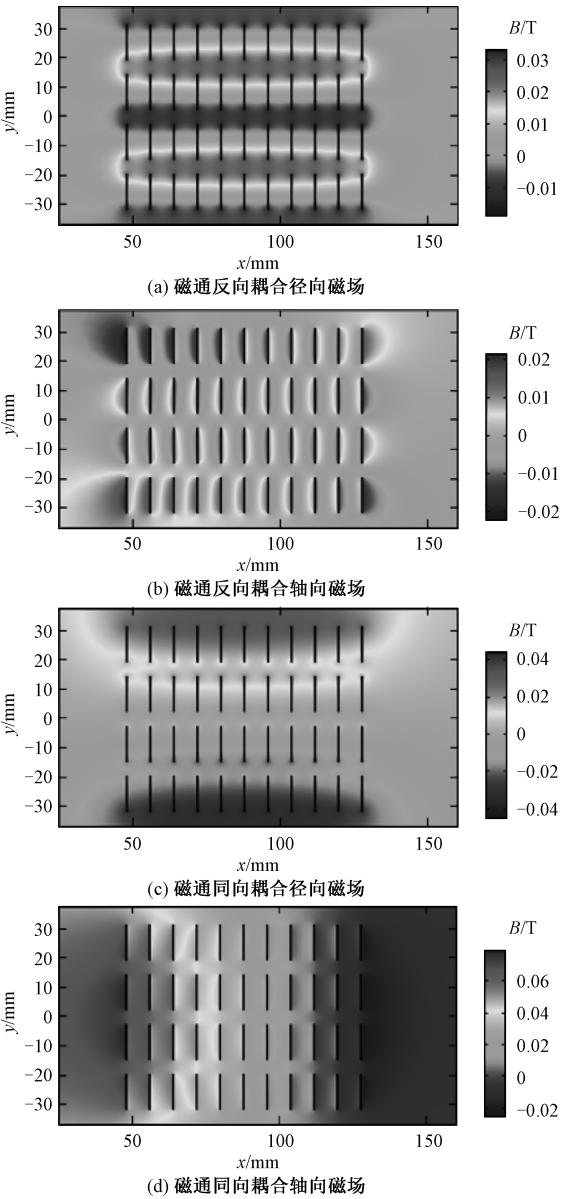


图 2 两种四支路磁通耦合式线圈磁场分布

Fig. 2 Magnetic field distribution of two kinds of four branches flux coupling type coil

从图 2 可以看出,磁通反向耦合下线圈的磁场分布要明显优于磁通同向耦合下线圈的磁场分布。在磁通反向耦合下,线圈最大径向和轴向磁感应强度分别为 0.03T 与 0.02T,而在磁通同向耦合下,线圈最大径向和轴向磁感应强度分别为 0.04T 与 0.08T。由于磁场会降低超导材料的临界电流值,因而在稳态工作环境下,较小的磁场会提高超导带材的稳态工作电流,进而提高超导带材利用率。故磁通反向耦合的连接方式要优于磁通同向耦合的连接方式。

2.3 线圈参数

美国超导公司 (AMSC) 的 8602 号带材具有双层不锈钢加强层,在 77K 下的临界电流为 260A。其耐大电流冲击能力强且临界电流在磁场条件下的各向同性较好,因此实验采用该超导带材。

由于磁通反向耦合连接方式可以等效为多个磁通反向耦合双饼线圈的叠加,故设计了磁通反向耦合型双饼线圈,以单个双饼线圈作为一个限流单元,增加限流单元组合的灵活性。磁通反向耦合型双饼线圈的磁场分布如图 3 所示。从图 3 可以看出,单个双饼线圈结构与多个双饼组合结构对磁场的抑制能力相差不大,因此采用单个双饼线圈结构进行研究。

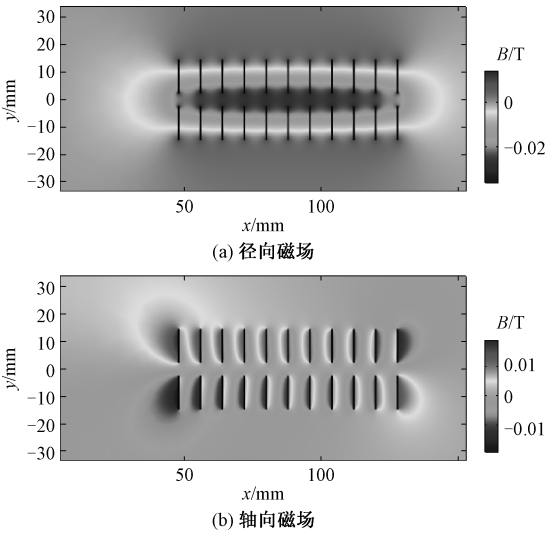


图 3 磁通反向耦合型双饼线圈的磁场分布
Fig. 3 Magnetic field distribution of double-pancake coil with flux coupling in reverse direction

通过仿真与计算确定线圈的匝间距与饼间距^[13],其参数如表 2 所示。加工后的线圈如图 4 所示。

表 2 双饼线圈参数					
Tab. 2 Parameters of double pancake coil					
参数	单饼长度 /cm	最短半径 /mm	匝间距 /mm	饼间距 /mm	单饼 匝数
数值	476	56	8	5	9.5

3 冲击试验

3.1 实验平台

高压直流输电直流端故障主要分为两种,分别为双极短路故障与单极接地短路故障^[14,15]。其故障过程主要分为电容放电、二极管续流、网侧电流作

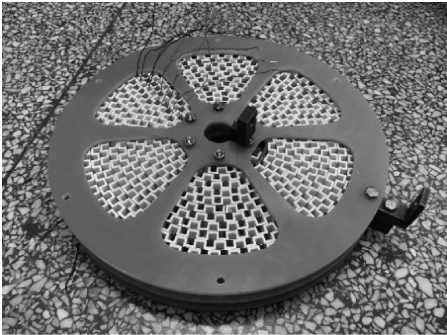


图 4 磁通反向耦合型双饼线圈
Fig. 4 Double-pancake coil with flux coupling in reverse direction

用等几个阶段。为了模拟电容放电阶段的电流电压变化情况,需要建立高压大电流冲击实验平台,其原理图如图 5 所示,冲击平台如图 6 所示。高压直流短路冲击平台利用脉冲充电电源对电容充电,利用电容放电对样品进行冲击。通过调节电感、电容以及线路中的电阻值可实现最大电压 10kV、最大电流 20kA、最短时间 1ms 的冲击水平。

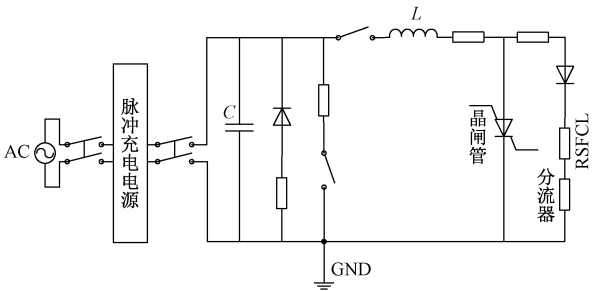


图 5 高压直流短路冲击平台系统原理图
Fig. 5 Principle diagram of high voltage DC short circuit impulse platform



图 6 高压直流短路冲击平台
Fig. 6 High voltage DC short circuit impulse platform

3.2 线圈冲击实验

目前 ABB 公司设计制作了世界范围内最快速

的高压直流断路器,可将动作时间控制在 4 ~ 5ms^[16,17]。高压直流断路器的普遍动作时间仍然在 10ms 左右,因此限流器需要在 10ms 内将电流限制在断路器的可动作范围内。本文通过调整直流大电流冲击平台中的电容、电感和电阻参数以控制冲击时间在 10ms 左右,进行了冲击电流 2255~4064A 的冲击实验,实验结果如图 7 所示。其中, i 、 u 分别为冲击电流和冲击电压。

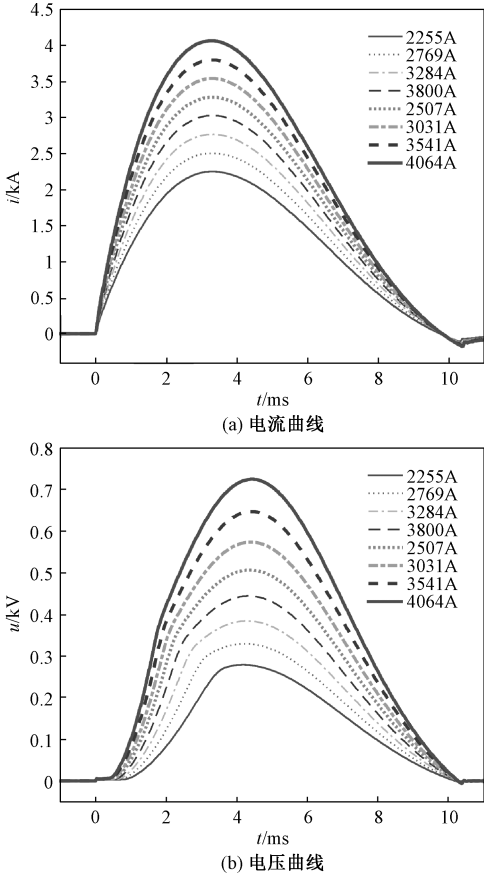


图 7 10ms 冲击时间下的电流与电压曲线

Fig. 7 Current and voltage curves with impulse time of 10ms

4 结果分析

4.1 仿真与实验对比

建立了模拟冲击过程的仿真模型,并进行最大冲击电流 4kA 下的冲击过程对比。仿真中的电路参数与实验平台的电路参数设置相同。超导线圈的模型以超导带的电阻温度曲线为基础,配合比热容等相关数据建立,并利用迭代的方式进行冲击过程的仿真计算。仿真电路满足式(1):

$$LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + (R + R_{\text{RSFCL}}) C \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0 \quad (1)$$

式中, L 为电感; C 为电容; U_c 为电容电压; $C(dU_c/dt)$ 为电路中的电流; R 为电路中的电阻; R_{RSFCL} 为超导线圈的电阻。对于超导线圈需满足式(2):

$$I^2 R_{\text{RSFCL}} \Delta t = cm \Delta T \quad (2)$$

式中, Δt 为单位时间间隔; ΔT 为单位时间间隔下的温度变化; c 为比热容; m 为超导线圈的质量。计算出每个时间间隔下超导线圈的热量变化与温度变化后,通过超导材料的电阻温度曲线计算出下一时刻的超导线圈阻值。超导线圈初始温度为 77K,仿真与实验的对比结果如图 8 所示。

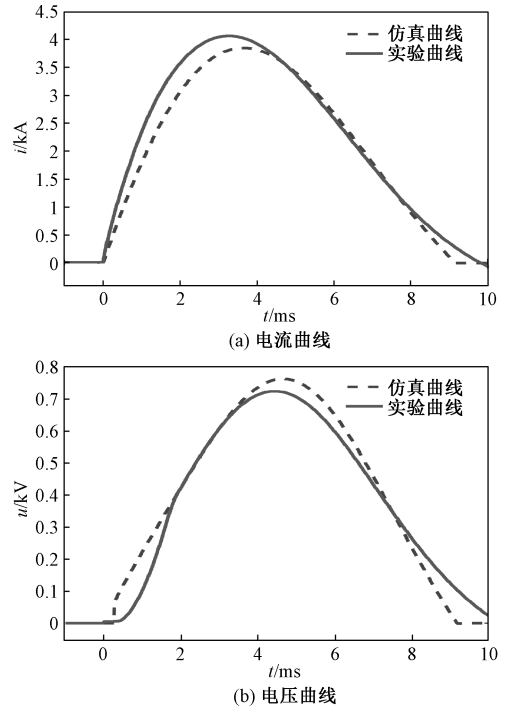


图 8 冲击电流 4kA、冲击时间 10ms 下的仿真与实验对比曲线

Fig. 8 Comparison of simulation and experiment with maximum impulse current of 4kA and impulse time of 10ms

从图 8 可以看出,电流曲线的最大值在 3~4ms 之间,而电压曲线的最大值在 4~5ms 之间,此情况与实验结果相吻合。其发生的原因在于,当电流越过最大值后,电压处于比较大的数值,超导线圈仍然处于发热状态。同时线圈与液氮在短时间内的热交换极小,使电阻仍然处于上升状态,而电阻的上升速率要大于电流的下降速率,因此电压仍然在攀升。在电压达到最大值后,电流的下降速率要超过电阻的上升速率,因此电压出现了下降,最终随着电流归

零。仿真结果与实验结果基本吻合,因此仿真结果具有一定的可信性,可作为限流器设计的参考依据。

4.2 实验结果分析

通过冲击试验结果可计算出冲击过程中线圈的发热量与电阻的变化曲线,如图 9 所示。其中, Q 、 R 分别为总热量和总电阻。通过图 9(a)可知,热量的变化率在 5ms 处达到最大,这与超导线圈的发热功率随时间的变化一致。而电阻的变化率在阻值小于 0.12Ω 时较大,之后变化率趋于稳定,这是由超导带材的基底以及各个金属层的特性决定的。图 10 为磁通耦合型双饼线圈在 10ms 冲击时间下冲击电流与电阻关系曲线。结合图 9(b)与图 10 可知,在总电阻为 0.12Ω 时,曲线均有转折点。图 10 中,不同冲击电流下,曲线转折点的阻值基本相同,由于超导带材的阻值与温度具有确定的关系,故转折位置的温度相同。因此可以确定这种改变与超导线圈流过的电流大小无关,与超导线圈本身的电阻值相关。

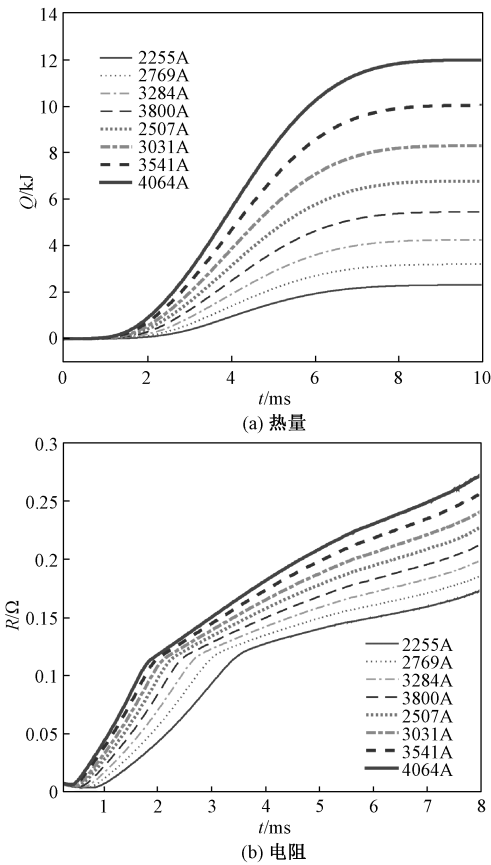


图 9 最大冲击电流在 2255~4064A 时的热量与电阻曲线

Fig. 9 Heat and resistance curves with maximum impulse current of 2255~4064A

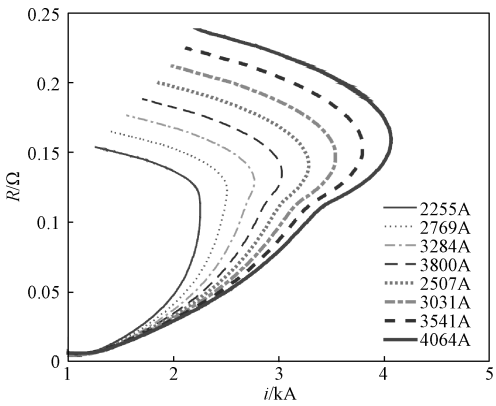


图 10 磁通耦合型超导线圈在 10ms 下的电流-电阻曲线

Fig. 10 Current-resistance curves of flux coupling type superconducting coil with impulse time of 10ms

图 11 为磁通耦合型双饼线圈在 10ms 冲击时间下热量与电阻的关系曲线。可以看出,在线圈产生的总热量较低的情况下,各次实验的热量电阻曲线重合,且曲线的上升速率很快。因此可以得出结论,在温度较低的情况下,较低的总热量可以使超导线圈的电阻快速提升。另一方面,虽然每次冲击实验的最大冲击电流不相同,冲击后线圈的最大发热量也有所不同,但热量电阻曲线基本保持着同一变化。在冲击时间较长的情况下,其热量电阻曲线会略低于冲击时间较短的曲线,这是由于在冲击过程中超导线圈与液氮有微量的热交换,使得实际电阻比理想条件下要小。综上所述,超导线圈的电阻随总热量的变化规律是确定的。

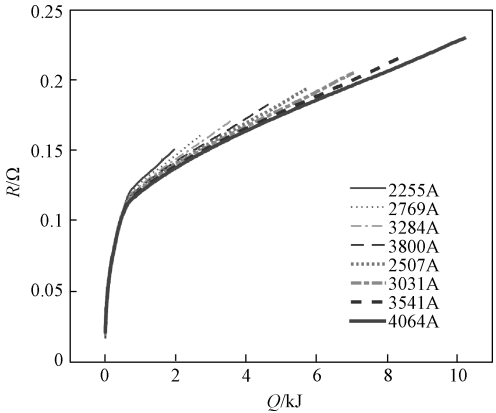


图 11 磁通耦合型超导线圈在 10ms 下的热量-电阻曲线

Fig. 11 Heat-resistance curves of flux coupling type superconducting coil with impulse time of 10ms

5 结论

本文分析了电阻型超导限流器的限流原理,进行了不同连接方式下线圈磁场分布的仿真并设计制作了磁通耦合型双饼线圈。介绍了高压冲击实验平台的原理,在 10ms 的冲击时间下对磁通耦合型双饼线圈进行了不同最大冲击电流的冲击实验,同时与仿真结果进行了对比。研究了超导线圈在冲击过程中电流、电压、电阻和发热量的变化过程,探究了线圈的电阻与冲击电流和热量的关系。结果表明,连续式饼式线圈在磁通反向耦合的情况下,其磁场分布对超导带材的临界电流影响较小,超导线圈在稳态下的利用率更高;仿真模型在一定程度上模拟了超导线圈的冲击过程,可以作为线圈设计的参考;在低温下,超导线圈的电阻随发热量迅速提升,当超过一定数值后,其变化趋于稳定,因此可以通过限流线圈在故障中需要吸收的能量确定其电阻水平,并对线圈进行设计。本文结果对电阻型直流超导限流器的设计和阈值、裕量的选取有着一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] Bathurst G, Bordignon P. Delivery of the Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC system [A]. IET International Conference on AC and DC Power Transmission [C]. 2015. 1-6.
- [2] 信赢,田波,魏子强 (Xin Ying, Tian Bo, Wei Ziqiang). 超导限流器基本概念和发展趋势 (Fundamentals and prospective of superconducting fault current limiters) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 1-7.
- [3] 罗永捷,李耀华,李子欣,等 (Luo Yongjie, Li Yao-hua, Li Zixin, et al.). 多端柔性直流输电系统直流故障保护策略 (DC short-circuit fault protection strategy of multiterminal-HVDC systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 1-6.
- [4] Chen Y, Liu X, Sheng J, et al. Design and application of a superconducting fault current limiter in DC systems [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24 (3): 1-5.
- [5] Morishita Y, Ishikawa T, Yamaguchi I, et al. Applications of DC breakers and concepts for superconducting fault-current limiter for a DC distribution network [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19 (4): 3658-3664.
- [6] Tixador P, Villard C, Cointe Y. DC superconducting fault current limiter [J]. Superconductor Science & Technology, 2006, 19 (3): S118-S125.
- [7] Sharifian M B B, Abapour M, Babaei E. Design and study of a saturated DC reactor fault current limiter [A]. IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications [C]. 2009. 590-594.
- [8] Zhu J, Booth C. Future multi-terminal HVDC transmission systems using voltage source converters [A]. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) [C]. 2010. 1-6.
- [9] 魏晓光,高冲,罗湘,等 (Wei Xiaoguang, Gao Chong, Luo Xiang, et al.). 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案 (A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2013, 37 (15): 95-102.
- [10] Neumueller H W, Schmidt W, Kraemer H P, et al. Development of resistive fault current limiters based on YBCO coated conductors [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19 (3): 1950-1955.
- [11] Sung B C, Dong K P, Park J W, et al. Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: Modeling, simulation, and experimental verification [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (7): 2412-2419.
- [12] 刘路昕,张京业,滕玉平,等 (Liu Luxin, Zhang Jingye, Teng Yuping). 限流器用第二代超导带材大电流冲击过程的物理模型研究 (Study of physical model of resistive superconducting fault current limiter under AC over-current) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 76-80.
- [13] Liu S, Xia D, Zhang Z, et al. Analysis of a flux-coupling type superconductor fault current limiter with pancake coils [J]. Cryogenics, 2017, 87: 18-23.
- [14] 杨洁,刘开培,秦亮 (Yang Jie, Liu Kaipei, Qin Liang). 柔性直流输电系统无保护故障特征及保护策略研究 (Fault feature and protection strategy for flexible HVDC system) [J]. 陕西电力 (Shanxi Electric Power), 2015, 43 (4): 5-10.
- [15] Yang J, Fletcher J E, O'Reilly J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (10): 3827-3837.
- [16] Callavik M, Blomberg A, Häfner J, et al. The hybrid HVDC breaker - An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids [R]. ABB Grid Systems, 2012.

[17] 郑占锋, 邹积岩, 董恩源, 等 (Zheng Zhanfeng, Zou Jiyan, Dong Enyuan, et al.). 直流开断与直流断路器 (DC interruption and DC circuit breaker) [J]. 高压电
器 (High Voltage Apparatus), 2007, 42 (6): 445-449.

Researches on DC instantaneous over current impulse characteristics of flux coupling type pancake coil

LIU Shi-zhuo^{1,2,3}, XIA Dong^{1,2,3}, QIU Qing-quan^{1,2,3}, ZHANG Zhi-feng^{1,2,3},
LIU Qing-feng^{1,2,3}, WANG Hao-nan^{1,2,3}

- (1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Over the last few years, there are exciting advances in voltage sourced converter high voltage direct current (VSC-HVDC) technology and some VSC-HVDC projects have been put in operation. However, how to solve the DC short circuit faults is still an urgent problem of VSC-HVDC power system. The circuit breakers can not meet the requirements of the operation time and current level so they need to cooperate with the current limiter. Resistive superconducting current limiter (RSFCL) is a focus in the development of current limit technology, especially in the field of AC transmission. But the traditional double-wound non-inductive coil has an inevitable defect. Due to its special structure the flashover would occur easily during the fault in high voltage environment. That would make the SFCL working in an uncontrolled state. So a novel coil structure is demand to meet the protection of VSC-HVDC. In this paper the magnetic distribution of different flux-coupling connection modes of the coils has been analyzed through the simulations based on single pancake coil. The high voltage DC short circuit impulse platform has been set up and a flux coupling type pancake coil has been devised and manufactured. The impulse process of the coil has been analyzed through simulations and experiments. The resistance and heat during the impulse have been discussed. The results of this paper have certain guiding significance in both the design of DC RSFCL and the determination of threshold value and allowance.

Key words: superconducting fault current coil; flux coupling; DC over current impulse