

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.11.004

一种由直流后备式熔断器和直流真空负荷开关构成的直流组合电器

刘思远¹, 杨逸¹, 张英², 王浩然¹, 王振兴¹,
王建华¹, 耿英三¹, 刘志远¹

(1. 西安交通大学电气工程学院电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 贵州电网有限责任公司培训与评价中心, 贵州电力职业技术学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要:提出了一种由直流后备式熔断器和直流真空负荷开关串联组成的直流组合电器,对其直流开断特性进行了仿真和实验研究。新型直流组合电器可完成直流电流的全范围开断:当开断额定电流和过载电流时,采用真空直流负荷开关利用人工电流过零法开断电流,此时后备式熔断器不动作;当开断大过载电流和短路电流时,采用后备式直流熔断器直接开断大电流,也可以将大电流限制至较低幅值再采用真空直流负荷开关进行分断。实验结果证明,该直流真空负荷开关可以在5 ms内成功开断200 A至1.7 kA的直流电流,直流后备式熔断器可以开断1.7 kA及以上的直流电流。

关键词:直流组合电器;后备式熔断器;真空灭弧室;人工过零法

DC Combinations by DC Back-up Fuse and DC Vacuum Switch

LIU Siyuan¹, YANG Yi¹, ZHANG Ying², WANG Haoran¹, WANG Zhenxing¹,
WANG Jianhua¹, GENG Yingsan¹, LIU Zhiyuan¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The Training and Assessment Center of Guizhou Power Grid Company with Limited Liability, Guizhou Electric and Vocational Technical College, Guizhou Guiyang 550001, China)

Abstract: The objective of this paper is to propose a DC combinations composed of a DC vacuum switch and a DC back-up fuse in series. The DC interruption characteristics of the proposed combinations are simulated and experimentally investigated. The DC combinations is able for a full-range DC current interruption. The vacuum switch is responsible for load current and over-load current interruption based on an artificial current zero technology. The back-up fuse is responsible for short-circuit current interruption. The fault current can be interrupted by the back-up fuse directly or first the fault current be limited to a low level by the fuse, then the vacuum switch is used. Experimental results show that the DC vacuum switch can interrupted a DC current from 200 A to 1.7 kA in 5 ms, the back-up fuse can interrupted 1.7 kA and above.

Key words: DC switchgear; back-up fuse; vacuum switch; artificial current zero

0 引言

文中提出一种直流后备式熔断器与直流真空开关串联的直流组合电器,见图1。直流后备式熔断

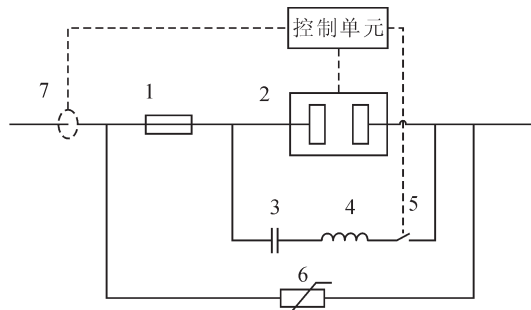
器非常适合于直流系统的短路保护,具有可靠性高、限流特性优越、分断能力强、尺寸小、价格低廉等优点。真空开关则具有开断能力强、寿命长、尺寸小、维护简单、环境友好等优良特性,在中压3.6~40.5 kV领域得到广泛应用^[1]。目前较常见的直流真

收稿日期:2015-07-06; 修回日期:2015-07-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB251005);国家自然科学基金资助项目(51323012,51221005)。

Project Supported by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2015CB251005), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51323012,51221005).

空开断方法为人工过零法^[2],这种方法已成功应用于高压直流短路电流分断^[3]。在直流组合电器中采用真空直流负荷开关,可以在人工过零法直流真空断路器中避免采用饱和电抗器^[1],因此可降低成本,提高可靠性。



1—后备式熔断器; 2—真空负荷开关; 3—电容;
4—电感; 5—触发开关; 6—避雷器; 7—电流传感器。

图1 直流组合电器基本结构

Fig. 1 Structure of DC switchgear

新型直流组合电器可完成直流电流的全范围开断:当开断额定电流和过载电流时,采用真空直流负荷开关利用人工电流过零法开断电流,此时熔断器不动作^[4];当开断大过载电流和短路电流时,采用直流后备式熔断器直接开断大电流,也可以将大电流限制至较低幅值再采用真空直流负荷开关进行分断。直流组合电器的合闸操作由直流负荷开关独立完成。该直流组合电器具有开断能力强、结构简单、可靠性高、成本低廉等优点,能够促进直流电力系统的发展。

1 实验设置

实验电路见图2,电容器组 C_s (100 mF)充电后对电抗器 L_s (0.101 mH)放电产生50 Hz的正弦电流,在二极管D的单向导通作用下,产生一个10 ms的正弦半波来模拟直流系统中故障电流的上升过程。

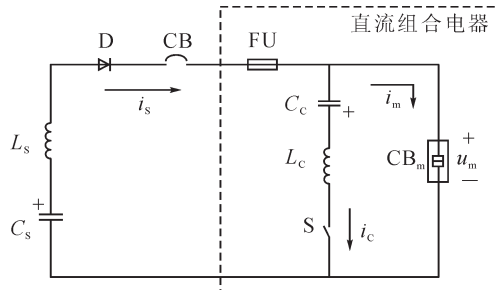


图2 人工过零法实验原理图

Fig. 2 Experimental circuit based on artificial current zero

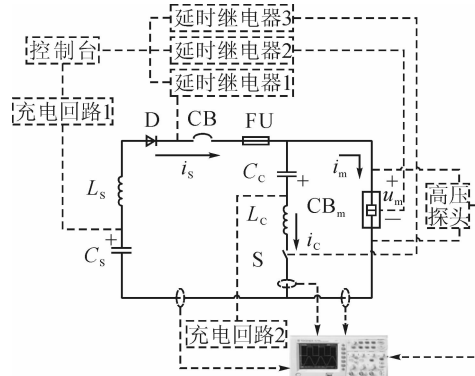
真空直流组合电器由直流熔断器和真空直流负荷开关串联组成。其中真空直流负荷开关的反向电流由预充电的电容器 C_c (4.7 mF)和电感 L_c (0.1 mH)振荡产生,反向电流频率为250 Hz。反向回路电流

注入的时刻由开关S控制。

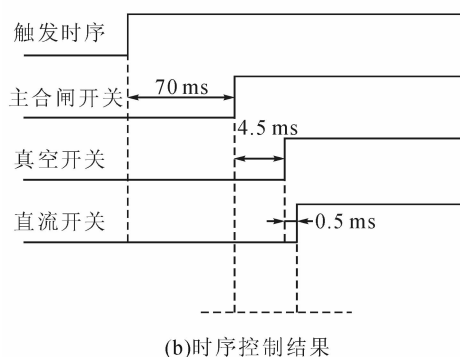
实验前分别对 C_s 和 C_c 进行充电,依次充到预设电压后断开充电回路,与主回路隔离开来。

实验控制及测量装置如图3(a)所示。实验开始时控制台同时给3只延时继电器发出触发指令。 CB_m 两端电压使用高压探头测量。其中电流源电流、反向回路电流和真空负荷开关流过的电流分别由3个霍尔电流传感器测量。4组信号都是由DS4034型示波器记录。

实验中的控制时序如图3(b)所示。实验开始时控制台同时给3只延时继电器发出触发指令。在延时继电器1的控制下,70 ms后电源回路的主合闸开关CB闭合,电流源振荡产生电流。在延时继电器2的控制下,4.5 ms后真空负荷开关打开产生直流电弧。在延时继电器3的控制下,0.5 ms后反向放电支路合闸开关S关合,投入反向电流,使真空负荷开关回路上的电流叠加过零^[5]。真空负荷开关的操动机构选用永磁机构,真空灭弧室额定电压12 kV。



(a)控制和测量方案



(b)时序控制结果

图3 实验控制测量时序图

Fig. 3 Experimental time sequence

2 仿真分析

为了选取开断过程中的电路参数,建立了相应电路模型,在MATLAB/Simulink环境中进行仿真分析^[3]。电路模型见图4。电源电流 i_s 、反向电流 i_c 、主电流 i_m 、 CB_m 触头间电压 u_m 、反向电容两端电压 u_c 的

参考方向均为图 4 中箭头方向所指。

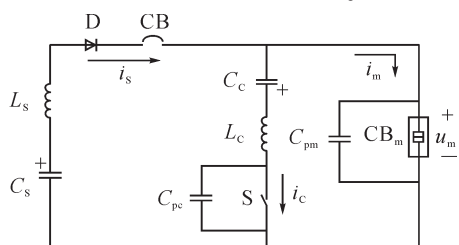


图 4 电路仿真模型原理图

Fig. 4 Simulation model

开断 1.7 kA 时的仿真电流波形见图 5。从图 5 中可以看出,在 4.5 ms 之前,电流源产生的电流逐渐上升,此时反向电流之路为断开状态, $i_m = i_s$ 。4.5 ms 时刻 S 接通,产生振荡电流 i_c 注入主回路中, i_c 幅值迅速上升,致使 i_m 快速下降。5.2 ms 时刻, i_m 下降至零点电弧熄灭;随后电源与反向电流支路形成同一回路, $i_s = i_c$ 。直至 7.1 ms 时, i_c 和 i_s 同时过零,开断过程结束。

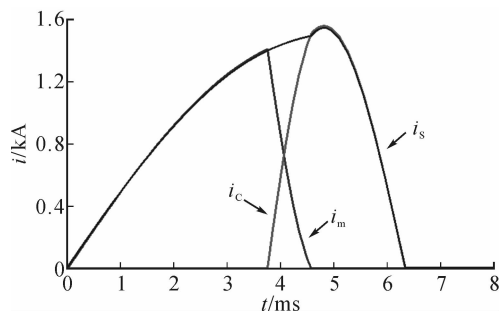


图 5 直流开断电流仿真波形

Fig. 5 Current simulation waveforms of DC interruption

上述开断过程的电压仿真波形见图 6。 u_c 的初始充电电压为 245 V,方向与电源电压方向相反,在 4.5 ms 换流支路导通后,电压逐渐上升,在 7.1 ms 开断完成后停止增长,需要承受反向电压 355 V。初始时刻真空直流负荷开关两端电压为 0 V,负荷开关分开后触头间产生电弧,触头两端电压为电弧电压。5.2 ms 时真空开关支路电流 i_m 过零,真空负荷开关触头间隙出现高频振荡电压,它是由 L_c 和 C_{pm} 之间 LC 振荡产生的。真空负荷开关两端电压 u_m 与电容两端电压 u_c 一同呈正弦趋势上升,直至 7.1 ms,主回路电流过零,电感上电压消失,真空负荷开关两端电压即为电容 C_c 两端电压, $u_m = u_c$ 。

3 实验结果

直流开断实验进行了 200~2 000 A 的直流电流分断测试。当电流小于 1 700 A 时,直流后备式熔断器不动作,仅真空直流负荷开关动作。电流瞬时值 1 400 A 时的直流开断实验波形见图 7。从图 7 中可

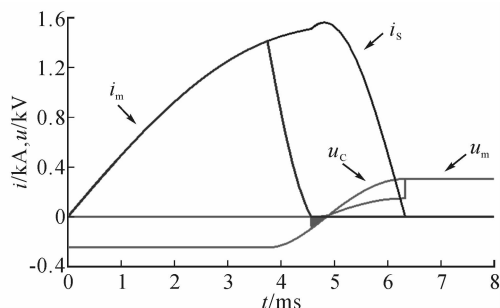


图 6 直流开断电压仿真波形

Fig. 6 Voltage simulation waveforms of DC interruption

以看出,3.6 ms 时真空负荷开关触头分开,电弧电压为 20 V。3.8 ms 时反向电流 i_c 投入,主回路电流下降,4.4 ms 时 i_m 过 0。6.4 ms 时反向支路电流过零,电容 C_c 上产生峰值为 800 V 的振荡过电压,6.5 ms 后电容电压稳定在 380 V,开断成功。

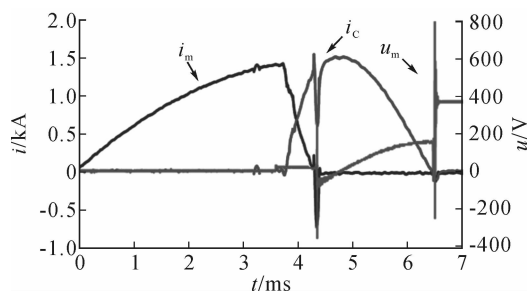


图 7 1 400 A 实验开断波形

Fig. 7 Current and voltage waveforms of DC interruption experiment at 1 400 A

1 500 A 时的实验结果与仿真结果的对比见图 8。实验结果与仿真结果基本吻合。但真空开关支路电流实验结果 i_m 比其仿真结果 i_m' 下降得快,真空开关两端电压 u_m 比其仿真结果 u_m' 上升的慢。这是由于实际的实验电路中存在电阻的原因。可见仿真模型对于实验参数选择有一定的帮助。

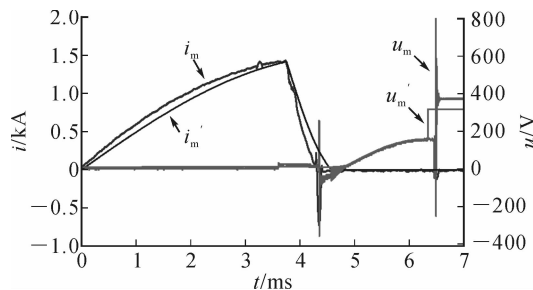


图 8 1 500 A 实验开断波形与仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of experimental and simulation results at 1 500 A

当电流大于 1 700 A 时,由熔断器分断短路电流。熔断器分断电流波形见图 9。图 9 中,主回路电流峰值为 1.75 kA,熔断电流为 1.74 kA,电流在 1.2 ms 内下降到 0,无拖尾电流产生,电流成功分断。

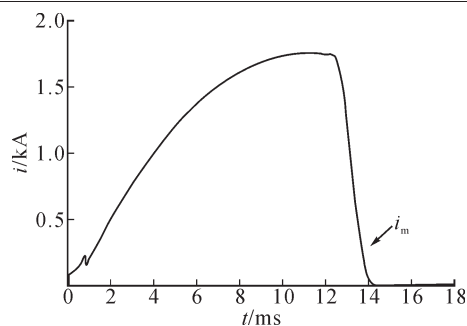


图9 1.75 kA 直流实验开断波形

Fig. 9 DC current interruption by fuse at 1.75 kA

当开断电流增加时,可能产生拖尾电流,见图10。在图10中,电流峰值达到2.7 kA时熔断器在5 ms内将主回路电流限流至300~400 A并保持40 ms,形成“拖尾电流”。

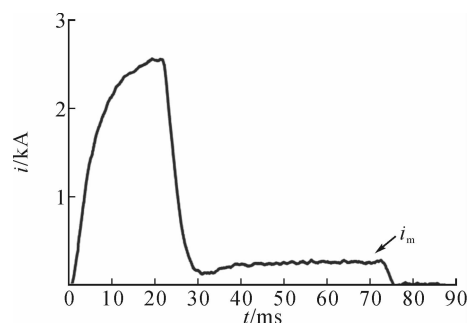


图10 直流后备式熔断器2.7 kA 直流电流开断波形

Fig. 10 DC interruption by fuse at 2.7 kA

这种情况下可由直流真空组合电器与后备式直流熔断器共同配合工作以达到切断直流电流的目的。短路电流和大过载电流发生时,熔断器限制故障电流,其拖尾电流在300~500 A左右。熔断器动作后其撞针撞出,触发直流真空负荷开关动作,由直流真空负荷开关分断熔断器的拖尾电流。直流真空负荷开关成功分断拖尾电流后和熔断器共同

承受恢复电压。

4 结语

文中提出了一种由直流后备式熔断器和直流真空负荷开关串联组成的直流组合电器,并对其开展了直流开断性能的实验与仿真研究。仿真结果与实验结果验证了直流真空负荷开关可以在5 ms内成功开断200 A至1.7 kA的直流电流,直流后备式熔断器可以开断1.7 kA及以上的直流电流。

参考文献:

- [1] ALFEROV D, BUDOVSKY A, EVSIN D, et al. DC vacuum circuit-breaker[C]//International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum. [S.l.]:IEEE, 2008(1): 173-176.
- [2] ZHENG Z F, ZOU J Y, DONG E Y, et al. DC interruption and DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6):445-449.
- [3] SHI Z Q, JIA S L, MA M, et al. Investigation on DC interruption based on artificial current zero of vacuum switch[C]//Proceedings International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum Isdeiv. [S.l.]:IEEE, 2010: 158-161.
- [4] BETTINI P, LORENZI A, MASCHIO A. Parametric analysis of current extinction in counterpulse systems[J]. Plasma Devices and Operations, 1998, 6(1/3): 181-192.
- [5] NIWA Y, FUNAHASHI T, YOKOKURA K, et al. Basic investigation of a high-speed vacuum circuit breaker and its vacuum arc characteristics[J]. IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., 2006, 153(1): 11-15.

刘思远(1990—),男,博士研究生,现从事真空电弧理论研究及其应用。