

用于 C2 级断路器的容性电流开断 试验回路研究及其仿真

成俊奇, 余伟成, 陈 允, 李德阁, 徐 岩
(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)



成俊奇(1979—),男,高级工程师,主要从事高压开关试验研究及检测工作。

摘要: 通过 PSCAD 仿真软件搭建模型,分析断路器在开断单相和三相容性电流后,因重击穿或非持续击穿放电(NSDD)等导致的断口恢复电压及负载电容极板电压变化规律。基于仿真结果,对试验回路进行改造,利用完善后的试验回路开展断路器容性开断试验(以额定电缆充电电流试验为例),试验结果与仿真结果一致。同时,结合 GB/T 1984—2024《高压交流断路器》中关于 C2 级断路器最新规定,对 C2 级断路器试验过程中出现的一些问题进行详细探讨。

关键词: 断路器;容性开断;重击穿;仿真

中图分类号: TM506 文献标志码: A 文章编号: 2095-8188(2025)11-0065-07

DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2025.11.009

Research and Simulation of Capacitive Current Breaking Test Circuit for C2 Level Circuit Breakers

CHENG Junqi, YU Weicheng, CHEN Yun, LI Dege, XU Yan
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A model was established using the PSCAD simulation software to analyze the variation laws of the circuit breaker's fracture recovery voltage and load capacitor plate voltage caused by restrike, non-sustained disruptive discharge (NSDD) and other factors after the circuit breaker interrupted single-phase and three-phase capacitive currents. Based on the simulation results, the test circuit was modified. Using the improved circuit, the capacitive breaking tests of the circuit breaker were conducted with the test of interrupting the rated cable charging current as an example. The test results were consistent with the simulation results. Meanwhile, combined with the latest provisions on class C2 circuit breakers in GB 1984—2024, some problems arising during the testing process of class C2 circuit breakers were discussed in detail.

Key words: circuit breaker; capacitive breaking; restrike; simulation

0 引 言

断路器是电力系统中用于保护电气设备的一种开关。当电路发生过电流、短路等故障时,断路器会迅速断开电路,以保护电气设备不受损坏^[1]。断路器除开断短路大电流外,还有一些工况需要开断容性小电流,如故障检修操作中断路器切除架空线充电电流和电缆充电电流和电容器

组电流等,如果断路器未能正常开断相关容性回路电流,就会在线路上产生一定的过电压,使断路器断口及容性负载回路承受极高电压,严重威胁断路器及相关设备的安全运行。为提高电网中运行设备的可靠性^[2-3],相关标准对断路器开断容性电流能力进行了评定,将标准规定的容性电流开断型式试验中具有非常低的重击穿概率的断路器称为 C2 级断路器^[4]。

余伟成(1981—),男,高级工程师,主要从事高压开关试验运行及管理工作。

陈 允(1986—),男,高级工程师,主要从事高压开关试验管理工作。

出于安全考虑,我国 40.5 kV 及以下电网,电源侧一般采用中性点不接地系统^[5-7],其中一相出现接地故障,其余两相电压会由相电压升为线电压,但不产生故障电流。因此,本文在验证 C2 级断路器试验及仿真中也采用电源侧中性点不接地系统。

配电网中所用断路器,出于经济成本及开断短路电流能力方面考虑,一般采用真空断路器。在实际工况中,容性电流虽然电流不大,触头烧蚀并不严重,但灭弧室在开断电流后要承受过高的恢复电压,往往因灭弧介质绝缘性能还未完全恢复,同时承受过高电压,导致开断失败^[8]。因此,有必要对开断容性电流后回路暂态过程进行仿真分析,为 C2 级断路器相关试验中抑制过电压危害提供理论依据。

1 断路器开断容性电流试验回路分析

1.1 开断单相容性电流回路

开断单相容性电流回路如图 1 所示。图 1 中, U_s 为电源电压, R 为等效电阻, L 为等效电感, C 为负载电容,QF 为开断断路器, U_c 为电容器极板电压, U_{TRV} 为断路器断口恢复电压。

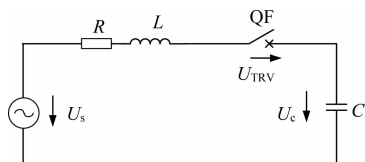


图 1 开断单相容性电流回路

由于回路电流可认为是容性电流(整个回路容抗远大于感抗,功率因数接近 1),断路器 QF 在收到分闸信号开始分闸,电流过零时,电源电压滞后后电流角度为 90° ^[9],电容器极板电压 U_c 接近于电源电压峰值。断路器开断后,电容器极板电压 U_c 保持不变,断路器断口恢复电压 U_{TRV} 为电源电压峰值与电容器极板电压 U_c 之差,即电流开断 10 ms 时,断路器断口恢复电压达到峰值,即 2 倍电源电压峰值。此时触头开距还未充分打开,如果断口间绝缘不能承受这样的电压,断口间将会再次击穿。重击穿后,负载侧电容器所储存的电荷通过电源侧放电,产生的高频电流较易开断,负

载侧的电荷极性反转产生高倍残余电荷电压^[10]。增大的压升使断口开断后产生更高的电压峰值,有引起再次重击穿的可能性,对设备绝缘造成较大威胁。

1.2 开断三相容性电流回路

由于断路器在电网运行中三相同时动作,所以电网中开断三相容性电流工况最为常见。出于安全考虑,配电网运行回路为中性点不接地系统(电源中性点系数 1.5),断路器在开断一相电流后,系统出现暂态过电压,首开相会承受较高过电压^[11],其余两相组成串联回路,后开相暂态恢复电压为相电压的 87%。开断三相容性电流回路如图 2 所示。

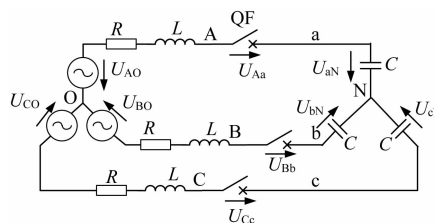


图 2 开断三相容性电流回路

由图 2 可见,电源三相电压分别为 U_{AO} 、 U_{BO} 和 U_{CO} ,相角差为 120° ,即

$$U_{AO} = U_m \cos \omega t \quad (1)$$

$$U_{BO} = U_m \cos(\omega t - \pi/3) \quad (2)$$

$$U_{CO} = U_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (3)$$

式中: U_m ——峰值电压;
 ω ——角频率。

设时间 $t=0$ 时,A 相为首开相开断电流,由于电容器组中性点接地,极板上电压不能发生突变,A 相电容极板上电压 U_{aN} 仍为 U_m 。此时,由于首开相系数为 1.5,A 相电源侧电压为 $1.5U_m$,首开相断口恢复电压 $U_{Aa} = 1.5U_m - U_m \cos \omega t$,A 相开断后 10 ms 时,断口恢复电压上升为 $2.5U_m$ 。

A 相开断后 5 ms 时,断路器剩余两相按灭弧顺序开断 B 相和 C 相形成的单相回路,由于开断后出现暂态过程,电源中性点偏移,此时对应的电源电压瞬时值分别为 $1.37U_m$ 和 $-0.37U_m$ ^[12]。由于电容器中性点接地,电容器极板电压不能突变,B 相和 C 相电容器极板电压保持在 $1.37U_m$ 和 $-0.37U_m$,后开相断口恢复电压为电源电压与电容器极板电压之差^[13],分别为 $1.87U_m$ 和

-1.87 U_m 。根据以往试验结果统计,首开相出现重击穿概率较高,正常开断后较高的恢复电压是开断试验失败的主要原因,因此本文通过电磁暂态分析,重点研究首开相重击穿对设备及系统造成的危害。

2 利用 PSCAD 建立仿真模型及分析

由于 10 kV 及以上电网中,大多数断路器用于电缆回路,此类断路器被称为 S1 级断路器^[14],按照 GB/T 1984—2024《高压交流断路器》相关规定,本文以额定电缆充电电流试验为例进行仿真分析。

2.1 单相容性电流仿真回路

2.1.1 仿真回路介绍

本文仿真回路根据中国电科院开关质检站回路特性建立。断路器开断单相容性电流回路(a)如图 3 所示。仿真模型中,用发电机电压源等效代替 220 kV 架空线经变压器降压至 12 kV 的电源系统,电源模型选用中性点不接地发电机系统。回路参数如下:等效电感为 0.72 mH,包含系统回路电感及变压器漏电感;等效电阻为 0.06 Ω ,包含系统回路电阻及变压器线圈内部电阻;负载电容为 12 μF ;断路器流过电流为 I_a ;电源电压为 U_s ,其有效值为 6.58 kV;电容器极板电压为 U_c ;断路器断口电压为 U_d 。

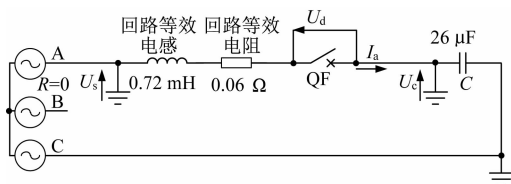


图 3 断路器开断单相容性电流回路(a)

2.1.2 仿真结果分析

本次仿真总时间为 0.300 s,断路器在 0.186 s 时电流过零灭弧开断,开断后发生 4 次动态二次介质击穿(DSDD),时间分别为 0.216、0.226、0.236 和 0.246 s,每次 DSDD 发生时刻均为电源电压峰值。电容器极板电压(无吸收电阻)如图 4 所示。由图 4 可见,非持续击穿放电(NSDD)发生时对应电容器极板电压依次为 -27.7、45.9、63.8 和 81.9 kV。

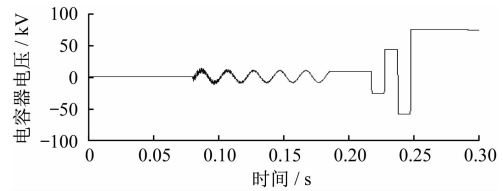


图 4 电容器极板电压(无吸收电阻)

断口恢复电压(无吸收电阻)如图 5 所示。由图 5 可见,NSDD 发生时对应断口恢复电压依次为 18.4、-36.8、57.6 和 -73.6 kV。

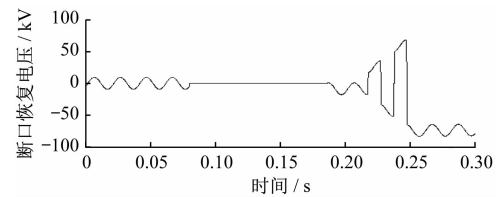


图 5 断口恢复电压(无吸收电阻)

高频脉冲电流(无吸收电阻)如图 6 所示。由图 6 可见,NSDD 发生时对应脉冲电流依次为 -2.5、4.4、-6.8 和 7.6 kA。

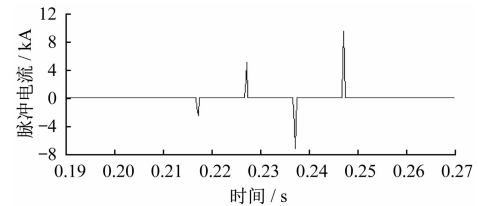


图 6 高频脉冲电流(无吸收电阻)

本次仿真结合图 4~图 6,对发生 NSDD 时产生的过电压数值进行了统计分析。断路器过电流零点开断后,发生 NSDD 时,过电压对电容器极板电压、断路器断口电压、脉冲电流的影响(无吸收电阻)如表 1 所示。由表 1 可知,电容器极板电压和电源电压比值随 NSDD 次数呈奇数倍增长^[15];断口恢复电压与电源电压比值随 NSDD 次数呈偶数倍增长;NSDD 产生的脉冲电流(由于击穿后灭弧介质绝缘恢复强度增加,产生的脉冲电流短时可燃,时间按 2 ms 计算)与稳态下容性电流比值呈非线性增长关系。

综上所述,在发生 NSDD 时产生的过电压,对断路器及电容器绝缘强度都产生较大威胁。为减小过电压产生的危害,一般按照阻容吸收原理,在回路负载中串联适当吸收电阻可抑制过电压峰值,从而不同程度减小其危害。回路串联吸收电

表 1 过电压对电容器极板电压、断路器断口电压、脉冲电流的影响(无吸收电阻)

DSDD 次数及时间/s	电容器极板电压与电源电压倍数	断口恢复电压与电源电压倍数	脉冲电流峰值与电源电压峰值倍数
第 1 次,0.216	3	2	33.3
第 2 次,0.226	5	4	58.6
第 3 次,0.236	7	6	90.1
第 4 次,0.246	9	8	101.1

阻时,断路器开断单相容性电流回路(b)如图 7 所示。

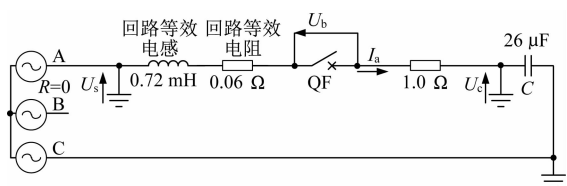


图 7 断路器开断单相容性电流回路(b)

每次 DSDD 发生时刻均为电源电压峰值时,电容器极板电压(有吸收电阻)如图 8 所示。由图 8 可见,NSDD 发生时电容器极板电压依次为 -22.9、33.1、-40.7 和 46.1 kV。

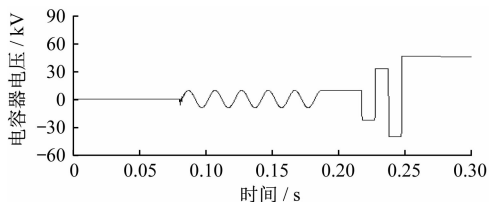


图 8 电容器极板电压(有吸收电阻)

断口恢复电压(有吸收电阻)如图 9 所示。由图 9 可见,NSDD 发生时对应断口恢复电压依次为 15.2、-25.8、32.6 和 -38.6 kV。

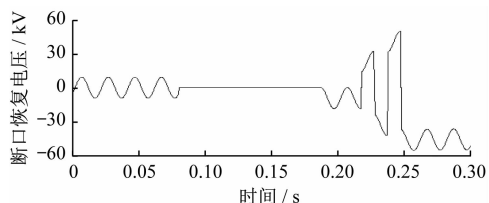


图 9 断口恢复电压(有吸收电阻)

脉冲电流(有吸收电阻)如图 10 所示。由图 10 可见,NSDD 发生时对应脉冲电流依次为 -2.1、3.5、-4.8 和 5.9 kA。

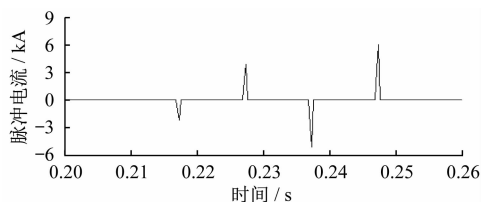


图 10 脉冲电流(有吸收电阻)

本次仿真结合图 8 ~ 图 10,对发生 NSDD 产生的过电压数值进行了统计分析。在回路增加吸收电阻的情况下,断路器过电流零点开断后,发生 NSDD 时,过电压对电容器极板电压、断路器断口电压、脉冲电流的影响(有吸收电阻)如表 2 所示。由表 2 可知,电容器极板电压与电源电压比值、断口恢复电压与电源电压比值、脉冲电流与稳态下容性电流比值与无吸收电阻时相比,都出现不同程度降低。

表 2 过电压对电容器极板电压、断路器断口电压、脉冲电流的影响(有吸收电阻)

DSDD 次数及时间/s	电容器极板电压与电源电压倍数	断口恢复电压与电源电压倍数	脉冲电流峰值与电源电压峰值倍数
第 1 次,0.216	2.46	1.63	26.3
第 2 次,0.226	3.56	2.77	46.0
第 3 次,0.236	4.37	3.50	63.1
第 4 次,0.246	4.95	4.15	77.6

根据以上仿真结果,中国电科院开关质监站进行断路器容性电流开断试验时,结合自身回路特点,为抑制过电压产生对回路影响,加入吸收电阻来减小其带来的影响。

2.2 三相容性电流仿真回路

2.2.1 仿真回路介绍

中国电科院开关质监站按照 GB/T 1984—2024 中第 6.111.9.1 条规定的 C2 级断路器试验要求,结合自身试验设备回路条件,并考虑断路器开断后重击穿和 NSDD 产生过电压的影响,对试验回路进行了优化设计。为减小过电压造成的影响,在现有试验回路基础上,增加了吸收电阻、放电电阻及氧化锌避雷器等保护装置,保证试验满足标准要求且安全可靠运行。额定电缆充电电流试验原理如图 11 所示。图 11 中,MB 为保护开关,MS 为合闸开关,L 为限流电抗器,T 为短路试验变压器,TO 为试品,C_L 为负载电容,I 为测量电流,U 为测量电压,R_L 为吸收电阻。

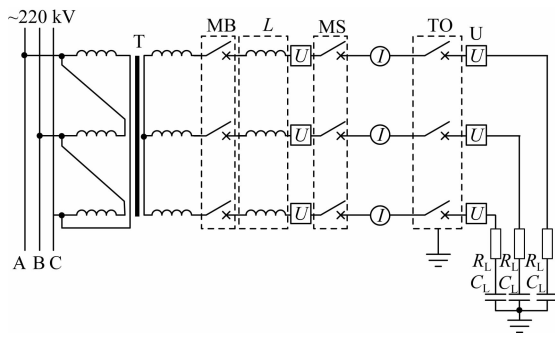


图 11 额定电缆充电电流试验原理

仿真回路参数按照试验中的实际回路参数进行设置,电源侧采用中性点不接地方式,负载电容侧中性点直接接地。试验电压为(相电压)6.58 kV,额定电缆充电电流为 25 A,试验方式为 CC2。

2.2.2 仿真结果分析

本次仿真总时间 0.300 s,断路器在 0.186 s 时三相灭弧开断电流,开断后发生 3 次 DSDD,时间分别为 0.215、0.225 和 0.235 s,每次 DSDD 发生时刻均为电源电压峰值时。开断三相容性电流回路如图 12 所示。

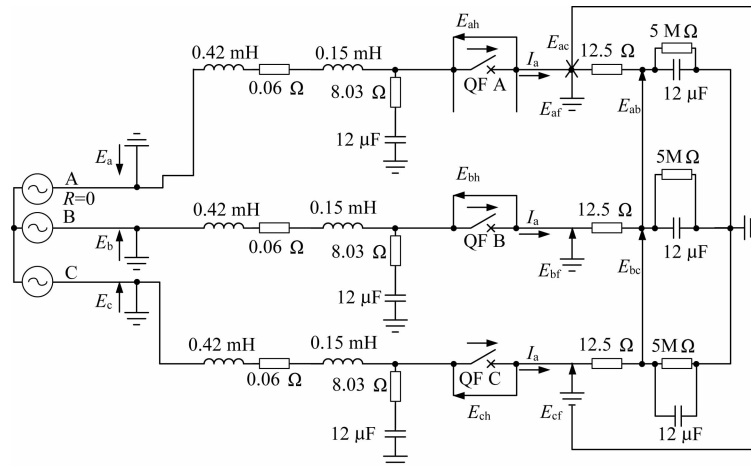


图 12 开断三相容性电流回路

图 12 中: E_a 为 A 相电源电压, E_b 为 B 相电源电压, E_c 为 C 相电源电压; E_{ah} 为 A 相断口电压, E_{bh} 为 B 相断口电压, E_{ch} 为 C 相断口电压; E_{af} 为 A 相电容器极板电压, E_{bf} 为 B 相电容器极板电压, E_{cf} 为 C 相电容器极板电压; E_{ac} 为 AC 相负载侧线电压, E_{bc} 为 BC 相负载侧线电压, E_{ab} 为 AB 相负载侧线电压; I_a 为 A 相电流, I_b 为 B 相电流, I_c 为 C 相电流。

仿真过程:时间 0.180 s 时,断路器 B 相首开相开断三相容性电流,此时,B 相电容器极板电压 E_{bf} 为电源电压峰值 9.3 kV;过 5 ms 后开相开断电流,B、C 相电容器极板电压分别为 1.37 倍电源电压峰值 12.7 kV 和 -0.37 倍电源电压峰值 -3.4 kV,此时 B 相断口电压 E_{bh} 达到最大,为 2.5 倍电源电压峰值 23.3 kV。

0.215 s 时,A 相断口电压峰值处发生第 1 次 NSDD,系统产生电磁暂态过程,A 相电源电压 E_a 上升为 13.6 kV,B、C 相电源电压 E_b 、 E_c 上升为

27.5 kV,A 相断口电压 E_{ah} 降为 0 kV,B 相断口电压 E_{bh} 上升为 36.5 kV,C 相断口电压 E_{ch} 上升为 30.9 kV。

0.225 s 时,A 相断口电压峰值处发生第 2 次 NSDD,系统发生暂态过程,A 相电源电压 E_a 上升为 22.4 kV,B、C 相电源电压 E_b 、 E_c 降为 -1.9 kV,A 相断口电压 E_{ah} 降为 0 kV,B 相断口电压 E_{bh} 降为 7.5 kV,C 相断口电压 E_{ch} 降为 1.9 kV。

0.235 s 时,A 相断口电压峰值处发生第 3 次 NSDD,系统发生暂态过程,A 相电源电压 E_a 上升为 22.4 kV,B、C 相电源电压 E_b 、 E_c 上升为 26.9 kV,A 相断口电压 E_{ah} 降为 0 kV,B 相断口电压 E_{bh} 上升为 36.9 kV,C 相断口电压 E_{ch} 上升为 30.9 kV。

由于负载侧电容中性点接地,其电位不能发生突变,三相电容器极板电压及负载侧线电压与电流开断时相比未发生明显变化(放电电阻导致的电容放电影响可忽略)。

开断后发生3次NSDD仿真结果如图13所示。

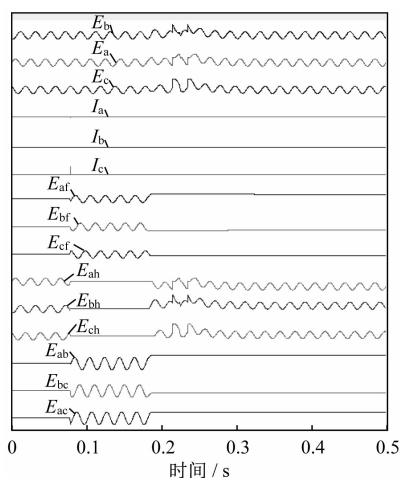


图13 开断后发生3次NSDD仿真结果

断口恢复电压变化放大图如图14所示。

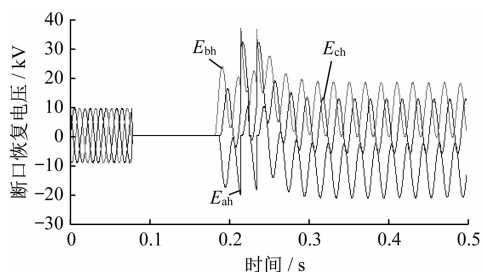


图14 断口恢复电压变化放大图

本次仿真结合图13~图14,对发生NSDD时产生的过电压数值进行了统计分析。断路器后开相过电流零点开断后,发生3次NSDD,过电压对电源侧电压、断路器断口恢复电压的影响如表3所示。

表3 过电压对电源侧电压、断路器断口恢复电压的影响

DSDD 次数 及时间/s	开断后电源电压 U_s 变化倍数			断口恢复电压与 电源电压倍数		
	A 相	B 相	C 相	U_{ah}	U_{bh}	U_{ch}
第1次,0.215	1.46	2.95	2.95	—	3.92	3.32
第2次,0.225	2.41	0.21	0.21	—	0.81	0.20
第3次,0.235	2.41	2.89	2.89	—	3.92	3.32

由于负载电容中性点接地,发生过电压会使电源侧电压快速提高,造成断口电压成倍上升。由于A相发生NSDD断口电压接近于0,电源系统中性点偏移,其余两相电源电压会明显上升,第

1次和第3次NSDD使电源侧电压上升为接近3倍电源电压,第1次NSDD使断口恢复电压最高上升为电源电压的3.92倍,第3次NSDD使断口恢复电压最高上升为电源电压的3.92倍,均对电源侧设备及断路器灭弧室绝缘产生较大威胁,对试验设备安全运行产生较大影响。

3 C2级试验结果分析

按照GB/T 1984—2024,关于C2级断路器试验方法为额定充电电缆电流试验,包括CC1及CC2各24次单分,每种试验方式进行至少6次最短燃弧试验^[16]。用该方式来考核断路器灭弧室触头在触头开距很小、断口恢复电压较大且断口绝缘未完全恢复情况下,能否顺利开断电流的能力。标准中明确规定C2级断路器在整个容性电流试验中应具有非常低的重击穿概率,如果出现一次重击穿,整个试验方式无效,需要重新进行试验,才能认定为C2级断路器。

中国电科院开关质监站,考虑自身回路特性及可能由重击穿和NSDD引起的过电压对设备的影响,采取了一些保护措施,如加入吸收电阻,以减小合闸涌流及抑制过电压产生;加入放电电阻,防止电容器因绝缘损坏发生短路;并联氧化锌避雷器,抑制负载侧及电源侧出现的过电压等。加装的避雷器及放电电阻如图15所示。



图15 加装的避雷器及放电电阻

根据前期理论计算及对仿真结果的分析,按相关标准进行了试验验证,断路器开合容性电流发生1次NSDD波形如图16所示。

由图16可见,断路器开断电流为25A,A相为首开相,后开相在电流过零点灭弧后90.1ms,A相发生NSDD,导致电源侧电压发生突变,电源侧A、B、C相电压分别为13.5、27.4和27.4kV;此时B相和C相断口电压上升为36.54和30.84kV,过电压对电源侧电压及断路器断口恢复电压的影响程度与仿真结果一致。

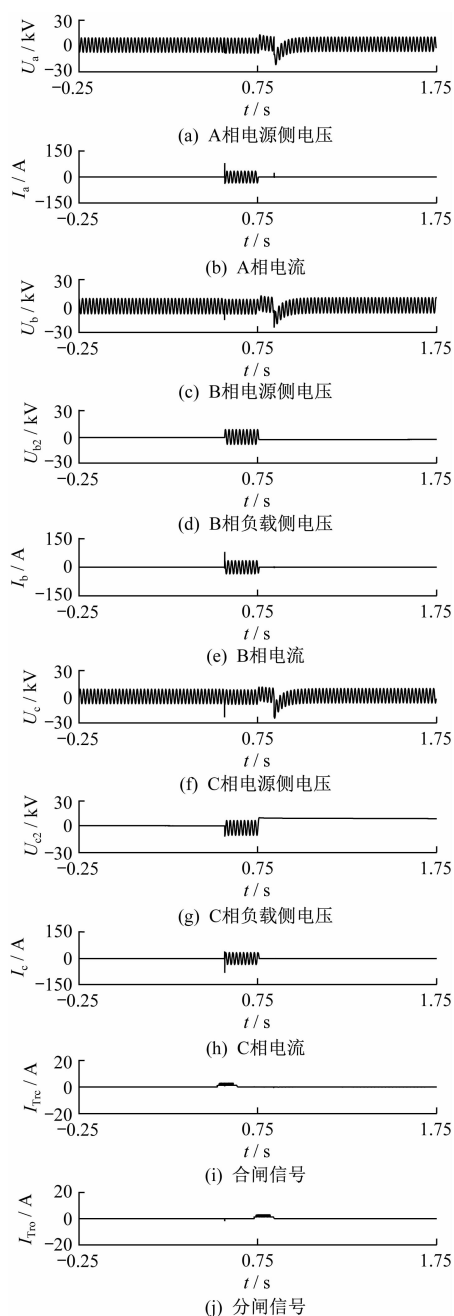


图 16 断路器开合容性电流发生 1 次 NSDD 波形

GB/T 1984—2024 对 C2 级断路器判定给出了一些新的规定：“在所有开断极开断电流后，超过 1/4 工频周期后工频电流的重现是开断失败。”^[17]即：运行中出现 NSDD，但不允许两相或三相同时出现过电压导致的工频续流。另外，新标准删除了 C2 级断路器线路和电缆开合优选的试验顺序等。GB/T 2900.20—2016 对重击穿和 NSDD 重新进行了定义，取消了以发生时间界限区分的规定，对电弧熄灭后，触头间非剩余电流的

重现视为重击穿，对主载回路未产生电流的视为 NSDD，以上标准的新规定，为以后开展试验判定提供了依据。

4 结 语

断路器开断容性电流后会由于重击穿和 NSDD 产生一定过电压，本文分别对容性电流单相回路和三相回路进行理论计算及仿真，通过对仿真结果进行分析，给出了过电压对负载侧及电源侧电压的影响程度。根据仿真结果提出试验回路改进方法，对改进后试验回路进行试验，通过验证试验结果对比，确定仿真结果与试验结果一致，充分证明仿真方法正确、有效，以上分析论证对以后相关试验的开展奠定了基础。

【参考文献】

- [1] 王季梅. 真空开关技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 徐国政, 张节容, 钱佳丽, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电工术语 高压开关设备和控制设备: GB/T 2900.20—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [5] 钱家骊, 张节容, 吉嘉琴, 等. 高压开关开合电容电流和小电感电流[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [6] 电力行业电力电容器标准化技术委员会. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [7] 谷定燮, 王善均, 李小玲, 等. 并联电容器组过电压的研究[J]. 电力电容器, 1991, 11(3): 1-13.
- [8] 董玮, 刘浩军, 何冰, 等. 容性电流开合试验中非保持破坏性放电与重击穿现象的评估[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 175-179.
- [9] 贺仁睦, 徐衍会, 马进, 等. 人工三相短路试验数据验证的负荷实测建模方法[J]. 电网技术, 2017, 31(4): 59-64.
- [10] 杜焯鑫, 周德生, 邹晓峰, 等. 发电机断路器合成试验开断过程仿真与分析[J]. 电器与能效管理技术, 2021(7): 57-60.

(下转第 86 页)

- [3] 李坤,张贺,蹇兰. 固体继电器的抗欠压浪涌设计[J]. 集成电路应用,2024,41(5):242-243.
- [4] 张国明,刘亚锋,杨姣,等. 一种高介质耐电压的光MOS继电器的设计[J]. 机电元件,2024,44(4):23-25.
- [5] 李庆诗,范艺川,罗文天. 拍合式继电器衔铁内折角测试装置的结构设计与实际效果[J]. 电器与能效管理技术,2024(1):38-42.
- [6] 张耀,谭旭,史利兵,等. 一种小型平衡力式密封电磁继电器的设计[J]. 机电元件,2021,41(5):12-14.
- [7] 李文华,赵月山,赵正元,等. 电磁继电器二次释放机理分析及特征研究[J]. 航天控制,2019,37(6):59-65.
- [8] 陈红波. 汽车继电器机械耐久性对释放电压影响的研究[J]. 汽车电器,2018(9):53-56.
- [9] 蔡文智. 基于有限元法的继电器三维稳态温度场分析[J]. 电器与能效管理技术,2015(10):32-36.
- [10] 肖斌,杨文英,翟国富,等. 电磁继电器温度冲击失效机理及工艺控制研究[J]. 电器与能效管理技术,2019(6):13-19.
- [11] 关欣,刘曦,马琳,等. 基于截断正态分布的继电器多元维纳退化过程建模及可靠性评估[J]. 电器与能效管理技术,2024(3):21-29.

收稿日期:2025-09-02

(上接第8页)

- [25] REN W B, HE Y, JIN J B, et al. Investigations of the contact bounce behaviors and relative dynamic welding phenomena for electromechanical relay[J]. Review of Scientific Instruments,2016,87(6):065111.
- [26] NEUHAUS A R, RIEDER W F, HAMMERSCHMIDT M. Influence of electrical and mechanical parameters on contact welding in low power switches[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technology,2004,27(1):4-11.
- [27] SCHRANK C, NEUHAUS A R, REICHART M. The influence of different atmospheres on arc width, arc mobility, and contact welding investigated for low power switches[C]//Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh, PA, USA,2007:130-133.
- [28] 张旭. 电磁继电器触点熔焊特性及失效机理的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [29] 王楠. 直流接触器微观定向骨架触头动熔焊性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2023.
- [30] RIEDER W F, NEUHAUS A R. Contact welding influenced by anode arc and cathode arc respectively [C]//Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts/22nd International Conference on Electrical Contacts. Seattle, WA, USA, 2004: 378-381.
- [31] SCHOEPP T J, ROWLANDS R D, DREW G A, et al. Contact welding at break of motor inrush current [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technology,2006,29(2):278-285.
- [32] 李航宇. 银基触头材料电弧侵蚀行为及机理研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- [33] 李朕,王召斌,刘百鑫,等. 电磁继电器触点材料在阻性负载下的失效退化评价研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2023,37(3):66-72.

收稿日期:2025-09-03

(上接第71页)

- [11] 张靓,周柳,胡锴,等. 双断口直流断路器的仿真与试验研究[J]. 电器与能效管理技术,2023(12):65-70.
- [12] 周柳. 快速真空开关的仿真与试验研究[J]. 电器与能效管理技术,2022(7):59-64.
- [13] 徐政. 免费使用的电磁暂态分析程序[J]. 电网技术,2009,25(13):60-64.
- [14] 颜湘莲,李志兵,王承玉. 特高压输电工程中选相断路器开合电容器组特性分析[J]. 电网技术,2014,38(7):1772-1778.
- [15] 王锡凡. 电力工程基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2009.
- [16] 康志林,胡新明,罗园. 3.6~40.5 kV 断路器容性负载开合试验回路研究[J]. 电工电气,2021(7):52-59.
- [17] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 高压交流断路器:GB/T 1984—2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024.

收稿日期:2025-09-25