

特高压断路器几种开断试验回路比较

裴振江^{1,2}, 姚斯立², 何俊佳¹, 叶会生¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

Comparison of Several Synthetic Test Circuits for Ultra-high Voltage Circuit Breakers

PEI Zhen-jiang^{1,2}, YAO Si-li², HE Jun-jia¹, YE Hui-sheng¹

(1. School of Electrical & Electronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China)

摘要: 特高压断路器开断试验方法的研究是特高压输电技术发展需要解决的关键问题之一。根据开断过程中的电弧特性, 基于 Mayr 电弧方程理论, 建立参数化的 PSCAD 电弧电阻模型, 通过对几种适用于特高压断路器开断试验的合成回路进行系统仿真分析, 模拟了直接试验回路、Hitachi 四参数试验回路和 ABB 的 EPIC 试验回路的开断过程, 以直接试验回路为基准, 对 Hitachi 回路和 EPIC 回路开断前后的电弧过程和恢复电压进行了比较。

关键词: 特高压; 断路器; 合成试验回路;

仿真; Mayr 电弧模型; 暂态恢复电压

中图分类号: TM501+1; TM51 文献标识码: A

Abstract: It is a key problem to research the high power interrupting performance test method of ultra-high-voltage circuit breakers for UHV transmission technology development. Several synthetic test circuits for UHV circuit breakers are simulated in this paper. Firstly, the interrupting arc burning physics is analyzed. Based on the Mayr arc equation, the arc resistance model used in PSCAD simulation is fabricated. Employed this arc resistance model, the circuit breaker interrupting performance of the direct test circuit, the Hitachi four-parameter synthetic test circuit and the EPIC circuit proposed by ABB are simulated. The arc process and transient recovery voltage are compared.

Key words: ultra-high-voltage (UHV); circuit breaker;

synthetic test circuit; simulation; Mayr arc model;

transient recovery voltage (TRV)

0 引言

特高压电网(1 000 kV 级)已成为我国“十一·五”电网建设的重点, 与之相适应的特高压电器设备

的研制和试验技术研究, 尤其是特高压断路器的开断能力试验方法研究, 也成为日益关注的对象^[1]。

由于断路器开断过程的复杂性, 现阶段尚不能完全依靠计算来保证断路器的开断性能, 断路器的实际开断能力目前还只能通过型式试验来进行考核。对于特高压断路器的相关型式试验, 传统的合成试验回路有一定的技术缺陷, 为此, 开发针对特高压、大容量断路器新的试验方法, 并对其等价性进行检验就成为必须进行的工作。

首先分析了特高压断路器大容量试验的要求, 介绍了适用于特高压断路器大容量试验的两种合成试验回路; 基于 Mayr 电弧方程, 建立了参数化的 PSCAD 电弧电阻模型; 在此基础上, 分别模拟了直接试验回路、Hitachi 四参数合成试验回路和 ABB 的 EPIC 合成试验回路的开断过程; 以直接试验回路为标准, 对 Hitachi 回路和 EPIC 回路进行了比较。

1 特高压断路器大容量试验要求

进入特高压领域, 由于试验容量的限制, 一般采用合成试验回路对断路器的大容量开断能力进行考核。为了满足等价性要求, IEC 标准和国标对引入电流的大小和频率都有严格的要求。这些标准的具体规定为^[2]: ①开断电流波形应与实际短路电流的波形基本一致, 以保证燃弧过程和电弧能量与实际基本相同; ②电流零点附近的电流、电压波形应与实际情况一致, 以保证零点附近的物理过程与实际相同; ③恢复电压的大小、频率和波形应与实际情况基本一致, 以保证电压恢复过程和过零后复燃过程与实际相同。

传统的合成试验回路由电流源和电压源两部分组成。电流源提供试验所需的大电流, 而电压源提供电弧熄灭后所需的高的恢复电压。整个开断过程的

收稿日期: 2006-03-24

作者简介: 裴振江(1964-), 男, 高级工程师, 在读博士研究生, 长期从事高压电器试验研究工作。

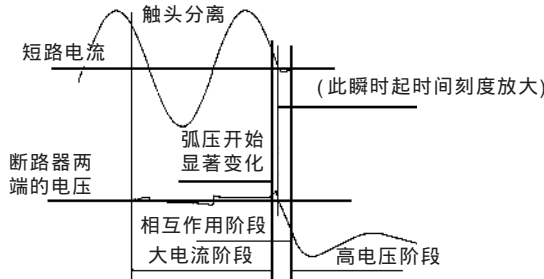


图 1 断路器开断过程

典型描述见图 1。

从被试断路器电弧电压示波图来确定电弧电压显著变化阶段，此阶段决定了试验可采用的引入电流的最高频率 f_{2max} ，这是因为电弧电压显著变化阶段必须比电弧单独由引入电流供给的时间短。为做到这一点，与 f_{2max} 相应的周期至少应是电弧电压显著变化阶段的 4 倍。根据这些要求，对于电流引入型回路，引入电流的频率 f_2 不应大于 f_{2max} ，但 f_2 又应足够高，以防止在燃弧阶段因引入电流和工频电流叠加而引起过度的电流畸变，而且 f_2 还应足够低于瞬态恢复电压的基频，使回路易于调整。通用的引入电流频率为 250 Hz 到 1 000 Hz。

2 适用于特高压断路器的合成试验回路

2.1 Hitachi 回路

日立(Hitachi)合成试验回路见图 2，其基本工作原理参见文[3]。该回路中，流过被试断路器 TB 的大电流来自发电机 U_c ，恢复电压则由回路右侧的振荡回路来提供，图中：AB1、AB2 为两个辅助断路器；Gap 为火花间隙； $R_1-C_1-C_2$ 、 $R_2-C_{21}-C_{22}$ 分别构成两个支回路用来调节回路 TRV。

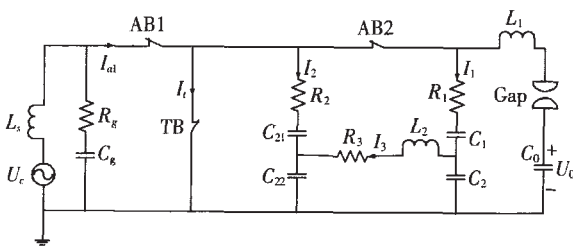


图 2 日立四参数合成仿真试验回路

日立四参数合成试验回路由于使用了第 2 个辅助断路器和更多的电路元件，其提供相同试验环境所需的容量更小，因而显得更加经济。

2.2 ABB 的 EPIC 回路

ABB 公司提出一种增强型的电流引入回路(EPIC 回路)^[4](见图 3)，它像并联电流引入回路一样有着一个辅助断路器(AB1)和一个火花隙(Gap2)。同时还需要一个额外的辅助断路器(AB2)，以便把“第 1 个”电压回路和电压引入回路(“第 2 个”电压回路)孤立起来。

EPIC 回路基本的操作过程分为两步。第 1 个电

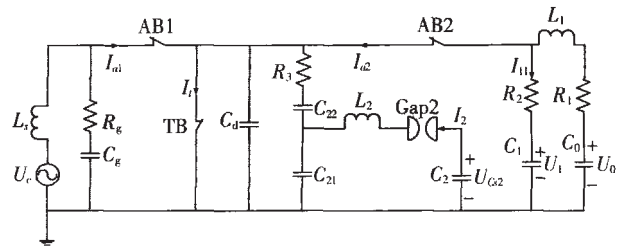


图 3 增强的电流引入合成仿真试验回路

压源回路提供引入电流并负责产生 TRV 的第 1 部分。第 2 个电压源回路使用电压引入完成四参数的 TRV。操作过程详见文[4]。

3 回路仿真和比较

为比较不同合成试验回路的性能，采用 PSCAD 对直接试验回路、Hitachi 四参数回路和 ABB 的 EPIC 回路进行了仿真。仿真过程中所取各回路的元件参数见表 1。

表 1 各回路的元件参数取值

| 元件参数 | 试验回路类别 | | | 元件参数 | 试验回路类别 | | |
|----------------------|--------|------------|---------|--------------------|--------|------------|---------|
| | 直接试验回路 | Hitachi 回路 | EPIC 回路 | | 直接试验回路 | Hitachi 回路 | EPIC 回路 |
| $C_0/\mu\text{F}$ | 0.5 | 6.67 | 5.50 | $R_1/$ | 72.0 | 60.4 | 1 |
| $C_1/\mu\text{F}$ | 2.0 | 4.45 | 1.958 | $R_2/$ | 15.0 | 30.2 | 96 |
| $C_2/\mu\text{F}$ | 1.30 | 3.654 | 3.50 | $R_3/$ | - | 135.0 | 288 |
| $C_{21}/\mu\text{F}$ | - | 0.45 | 26.50 | U_{c1}/kV | - | 750.0 | 790 |
| $C_{22}/\mu\text{F}$ | - | 0.05 | 0.87 | U_{c2}/kV | - | - | 790 |
| L_1/mH | 54.0 | 80.00 | 28.21 | U_{c3}/kV | - | - | 700 |
| L_2/mH | - | 181.00 | 65.00 | | | | |

3.1 电弧电阻模型

为了模拟开断过零时刻的电弧电阻的变化，借助经典的 Mayr 电弧模型，建立了 PSCAD 中可用的电弧电阻模块。Mayr 模型中用于描述电弧阻抗变化的方程为^[1]：

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\theta_M} \left(\frac{ei}{P_{\text{loss}}} - 1 \right)$$

其中： g 为电弧电导； θ_M 为电弧时间常数； e 为电弧电压； i 为电弧电流； P_{loss} 为单位弧长的功率损失。

将该电弧电阻模型参数化后，形成 PSCAD 中的可控阻抗元件，即可实现对开断过程的仿真。图 4 是根据上述模型仿真得到的电弧电阻率的变化。

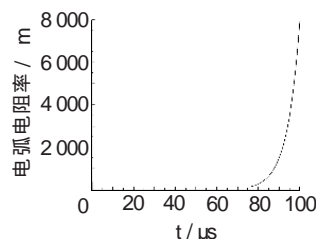


图 4 开断过程中的电弧电阻率变化(电弧时间常数 $\theta_M=6 \mu\text{s}$)

3.2 直接试验回路

针对 800 kV/63 kA 断路器开断试验的要求，对直接试验回路在分断过程中的电压、电流变化进行了仿真计算。

直接试验回路的原理电路见图5。将3.1所建立的电弧电阻模型代入到仿真电路中,采用PSCAD仿真得到开断过程中的电流波形见图6。

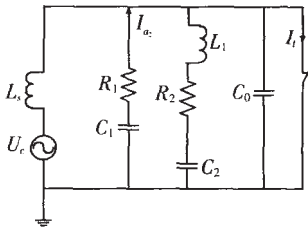


图5 直接试验回路试验原理

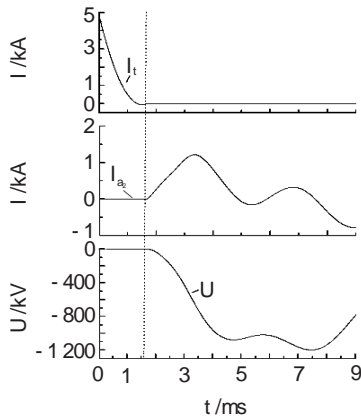


图6 直接试验回路开断时的电流和电压变化过程

3.3 Hitachi 四参数回路

对图3所示的Hitachi四参数回路进行仿真后得到的开断过程中的电压、电流波形见图7。

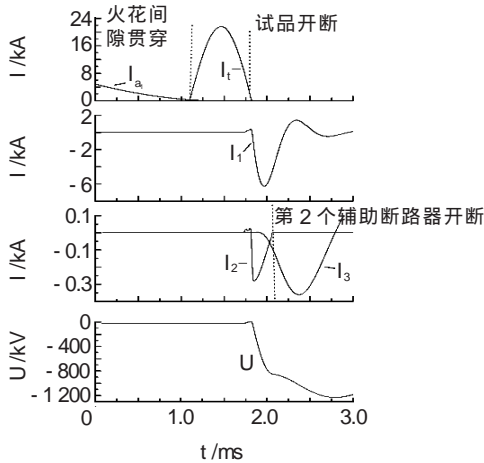


图7 Hitachi回路开断时的电流和电压变化过程

3.4 EPIC回路

对图4所示的EPIC回路进行仿真后得到的开断过程中的电压、电流波形见图8(a), 8(b)。

4 分析和讨论

以直接试验回路的开断参数为标准,总结Hitachi四参数回路和EPIC回路的开断参数见表2。各回路电容器的储能比较见表3。

从表2和表3可看出,EPIC相对于Hitachi回路,其恢复电压第1峰值时间与IEC标准规定值更接近,尤

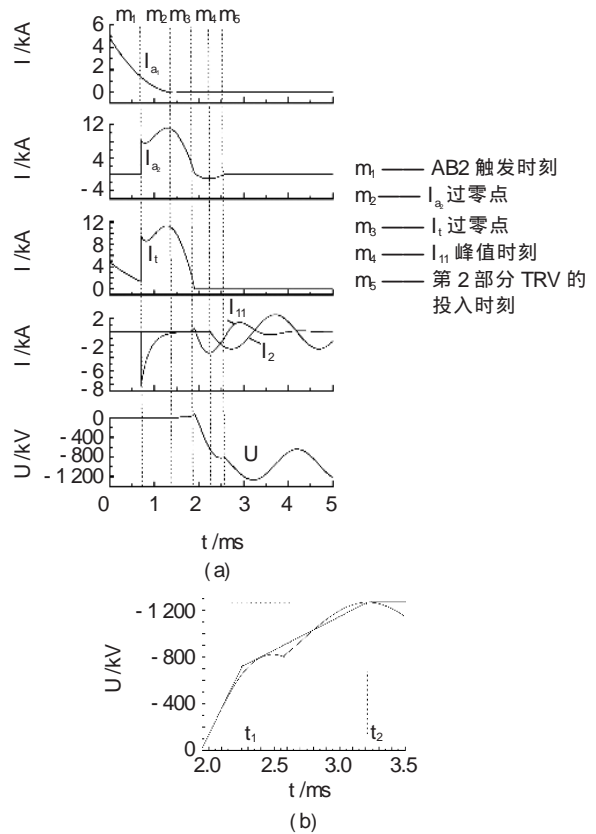


图8 EPIC回路开断时的电流和电压变化过程

表2 各回路的TRV计算参数比较

| 参数 | 试验回路类别 | | | |
|-----------|--------|-----------|--------|----------|
| | 直接试验回路 | Hitachi回路 | EPIC回路 | 800 kV标准 |
| U_1 /kV | 1 030 | 780 | 720 | 637 |
| t_1 /μs | 2 350 | 150 | 300 | 318 |
| U_2 /kV | 1 199 | 1 208 | 1 268 | 1 189 |
| t_2 /μs | 5 500 | 975 | 1 804 | 1 272 |

表3 各回路的电容器储能比较

| 参数 | 试验回路类别 | | | MJ |
|----------|--------|-----------|--------|----|
| | 直接试验回路 | Hitachi回路 | EPIC回路 | |
| C_0 | 0.36 | 1.88 | 1.72 | |
| C_1 | 1.43 | 0.15 | 0.61 | |
| C_2 | 0.98 | 0.16 | 0.86 | |
| C_{21} | - | 0.06 | 0.72 | |
| C_{22} | - | 0.02 | 0.11 | |

其是恢复电压第1峰值时间。同时,电压源主电容 C_0 的储能也更低。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 2006.
- [2] 王章启, 何俊佳, 邹积岩, 等. 电力开关技术——原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [3] Yamashita S, Miyake N, Suzuki K, et al. Short-circuit Testing Method of 3-phase-in-one-tank-type SF₆ Gas Circuit Breaker[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1989, 4(1): 349-354.
- [4] Sheng B L, L Vander Suis. A New Synthetic Test Circuit for Ultra-high-voltage Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1997, 12(4): 1 514-1 519.