

基于模拟负载法 ± 800 kV 换流阀多重阀绝缘试验技术研究张小勇¹, 李 博¹, 李 侠², 行 鹏²,
李 强¹, 党 原¹, 胡 宇², 王建生¹

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 西安西电电力系统有限公司, 西安 710077)

摘要: 针对 ± 800 kV 换流阀多重阀绝缘试验因试验回路尺寸大、试验电压高等造成试验实施难度很大的问题, 笔者通过采用等效模拟负载模拟部分阀段, 试验研究了 ± 800 kV 换流阀多重阀的直流电压试验技术、雷电冲击试验技术、操作冲击试验技术。研究表明, 此种试验方法是可行的。

关键词: ± 800 kV; 换流阀; 绝缘试验; 多重阀

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)05-0020-06

Study on the Dielectric Test Techniques for MVU of ± 800 kV
Thyristor Valves Based on Simulation Load MethodZHANG Xiao-yong¹, LI Bo¹, LI Xia², XING Peng², LI Qiang¹,
DANG Yuan¹, HU Yu², WANG Jian-sheng¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: For the dielectric tests of ± 800 kV thyristor valves, the test of MVU is very difficult to perform due to the large size test circuit and high test voltage etc.. By using equivalent simulation load to replace parts of thyristor valves, the test techniques is studied for the MVU of ± 800 kV thyristor valves, including DC test, lightning impulse test and switching impulse test. The results show that such method is practicable.

Key words: ± 800 kV; thyristor valves; dielectric test; MVU

0 引言

直流换流阀是直流输电工程的核心关键设备, 并且目前 ± 800 kV、 ± 1100 kV 换流阀国产化工作已经全面展开^[1-3]。因此, 研究特高压等级换流阀的试验技术已经迫在眉睫。IEC 60700-1—2008^[4]和 GB/T 20990.1—2007^[5]规定阀的型式试验分为绝缘试验和运行试验。这些试验项目的有效实施对保证换流阀在实际工况中的无故障运行具有重要意义^[6-12]。换流阀 MVU 绝缘试验的主要目的^[1]一是验证 MVU 的外绝缘的电压耐受能力, 考虑其周围环境, 尤其是对连接在极电位的阀; 二是验证 MVU 结构内单阀之间的电压耐受能力; 三是验证局部放电水平在规定限值内。对于 ± 800 kV 换流阀的绝缘试

验, 尤其是 MVU 绝缘试验, 如果按照传统的悬吊完整的四重阀实施试验, 因为试验电压高、试验回路尺寸大等特点, 无论是吊装工作还是试验工作, 其实施难度都很大。例如其吊装高度达到约 30 m 左右, 含阀架在内的吊装总重量达到约 70 t, 加之试验电压高, 会导致试验回路非常大, 试验设备的布置也会非常困难。图 1 为悬吊完整四重阀的照片。综上, 对 ± 800 kV 换流阀的多重阀绝缘试验技术研究是非常必要和急需的。笔者将以某 ± 800 kV 换流阀 MVU 绝缘试验为例, 采用等效模拟负载模拟部分阀段的方法试验研究分析其绝缘试验技术。另外, 2011 年 5 月, 国家电网公司正式发布了 ± 1100 kV 特高压直流输电工程设备研制技术规范^[13]。因此, 此研究工作也将对后续 ± 1100 kV 换流阀多重阀的绝缘试验奠定基础。

收稿日期: 2011-12-22; 修回日期: 2012-01-18

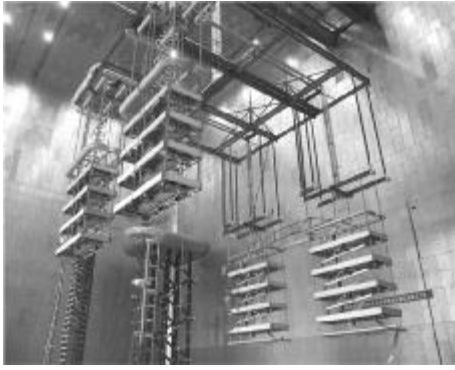


图1 悬吊完整四重阀进行试验的现场照片

Fig. 1 The test photo of hoisting complete valves

1 ± 800 kV 换流阀 MVU 简介

某 ± 800 kV 换流阀 MVU 为 4 个双重阀塔, 在进行绝缘型式试验时, 短接冗余设计 1 个双重阀塔, 由 3 个双重阀塔组成 MVU 进行绝缘试验。其中包含 12 个组件, 每个组件由两个阀段组成, 即 24 个阀段。该次在西安高压电器研究院有限责任公司(简称西高院)特高压试验大厅进行的绝缘型式试验, 吊装一个双重阀塔和用模拟负载等效模拟剩下 2 个双重阀塔, 阀段等效回路见图 2。一个组件单元包含 15 个晶闸管级, 每个晶闸管级包含相对应的阻尼回路, 还包含两台饱和电抗器, 每个阀段设置一个均压电容, 等效回路还考虑了冷却水管路相对应的水电阻 R_{dc} 。MVU 绝缘试验研究电压参数见表 1。

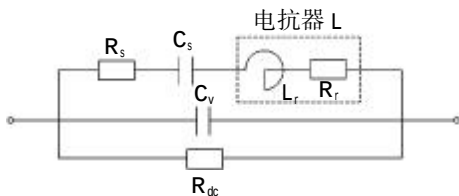


图2 组件单元等效回路

Fig. 2 The equivalent circuit of valve unit

表1 MVU 绝缘试验电压

Tab. 1 The test voltage of MVU

电压类型	试验电压/kV
直流	1 392
操作冲击	1 675
雷电冲击	2 004

2 等效模拟负载法简介

由于特高压直流输电用换流阀具有由多个阀塔组成的特殊性, 在进行绝缘型式试验时往往会遇到以下问题, 如吊装复杂、试验回路接线难度大等。该次试验尝试研究采用实际吊装 1 个阀塔利用等效负载模拟其他阀塔的试验方式, 这种试验方法能够有

效地降低吊装难度, 并且试验中可以降低高压试验回路的搭建难度, 对这种试验方式的研究可以为 ± 100 kV 换流阀 MVU 绝缘试验提供有效的技术支撑。采用此试验方法基本原理是针对不同电气强度下直流换流阀对外展示的电气特性, 利用电容、电感和电阻的组合来等效与试品阀相邻多重阀的影响, 使其与试品阀形成正确的分压关系^[6,14]。

该次试验研究中的模拟负载等效了 2 个双重阀塔包含 8 个组件即 16 个阀段。按照简单的数学分压关系考虑在不同类型过电压下模拟负载应占总电压的 2/3。综合考虑每个晶闸管级的固有电气参数包括电阻、电容、电感以及其他部分如连接、水路等的杂散电容、电阻等。根据对应参数制做了试验研究用的模拟负载。同时, 为了避免参数估算的误差, 该模拟负载装置的电容、电阻及电感参数还设置了一定裕度的可调节范围, 以便试验研究工作的开展。其简化等效回路与组件的等效回路图相同。试验中模拟负载串联在双重阀塔的低压端并接地。回路照片见图 3。

图3 ± 800 kV 换流阀等效负载接线图Fig. 3 The diagram of ± 800 kV valves with equivalent load

3 MVU 绝缘试验研究

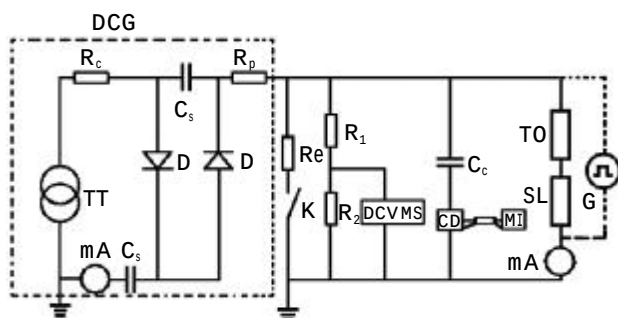
3.1 直流耐压试验

直流耐压试验回路见图 4, 图 4 中 TO、SL 分别是被试的双重阀试品和模拟负载。其余符号分别指代直流发生器各部分和局部放电用脉冲发生器。局放测量采用并联法实施^[15-16]。

直流电压试验中, 为了得到模拟负载电压值, 在模拟负载接地端串联了一电流表进行电流的测量, 在认为负载直流电阻不变的情况下推算出负载两端的电压^[17-19]。模拟负载的参数见表 2。

分别在正负极性下测量了 800 kV 直流耐受电压和直流局部放电测量电压下的回路的总电流和流过模拟负载的电流, 见表 3。

根据直流电压的特性以及模拟负载和阀的等效



DCG—直流发生器;Re&K—发生器接地开关; R_1 —分压器高压臂电阻; R_2 —分压器低压臂电阻;DCVMS—直流电压测量系统; C_c —耦合电容;CD—检测阻抗;MI—局放仪;G—校准方波发生器;TO—阀试品;SL—模拟负载;mA—毫安表。

图 4 MVU 直流电压试验回路

Fig. 4 The test circuit of DC voltage for MVU

表 2 直流试验中模拟负载的电气参数

Tab. 2 The parameters of simulation load in DC test

R_s/Ω	C_s/nF	L_s/mH	R_f/Ω	C_f/nF	$R_{dc}/M\Omega$
13 921.6	4.0470	9.672	3 960	0.103 5	55.2

表 3 直流试验数据

Tab. 3 The datas of DC test

极性	直流电压/kV	直流电流/ mA	模拟负载电 流/mA	模拟负载 电压/kV
+	800	23.5	8.25	455.400
	1 384	40.3	14.28	788.256
	1 060	30.6	10.95	604.440
-	800	22.3	8.15	449.880
	1 381	38.6	14.07	776.664
	1 060	29.4	10.81	596.712

回路图可知,直流时电容视为开路,所以起作用的只有 R_{dc} 支路,表 3 中模拟负载电压就是用模拟负载电流和模拟负载的 R_{dc} 相乘得到的,故理想情况下双重阀和模拟负载的两端直流电压之比为两者的 R_{dc} 之比,由单个晶闸管级的 $R_{dc}=500\text{ k}\Omega$,每个单阀由 60 个晶闸管级,可知双重阀的阻抗为 $60\text{ M}\Omega$ 。

在进行直流电压试验前,为了确定分压关系,短接模拟负载将直流电压施加在双重阀上,根据电压与电流的关系得到的双重阀的直流阻抗为 $17.9\text{ M}\Omega$,计算阻抗与实测值相差甚远。这是因为在双重阀中,除了阀的直流电阻外,还有冷却阀的冷却水管中的水阻,在直流试验中,双重阀和模拟负载的直流电阻均为 $M\Omega$ 级,这时顶部冷却水管水阻就会起到重要作用。水阻可分为在双重阀中的和从双重阀低压端到接地的上阀架两段,前者与双重阀是并联关系,后者和模拟负载是并联关系。双重阀中水阻阻值为

$$\frac{60 \times 17.9}{60 - 17.9} \approx 25.511\text{ M}\Omega \quad (1)$$

表 3 中直流电流为回路的总电流,真正通过双重阀的电流为该总电流减去流过直流分压器的电流。直流分压器的电阻值为 $203.7\text{ M}\Omega$,由此得到的各个电压下通过双重阀的电流见表 4。

表 4 各电压下通过双重阀的电流值

Tab. 4 The current through valves with varied voltage

电压/kV	正极性			负极性		
	800	1 384	1 060	800	1 381	1 060
电流/mA	19.57	33.51	25.40	18.37	31.82	24.20

用正极性 800 kV 通过双重阀的电流减去流过模拟负载的电流就为通过第二段水阻的电流,计算可知第 2 段水阻为

$$\frac{455.4}{19.57 - 8.25} \approx 40.219\text{ M}\Omega \quad (2)$$

所以模拟负载实际的阻值为

$$\frac{55.2 \times 40.219}{55.2 + 40.219} \approx 23.267\text{ M}\Omega \quad (3)$$

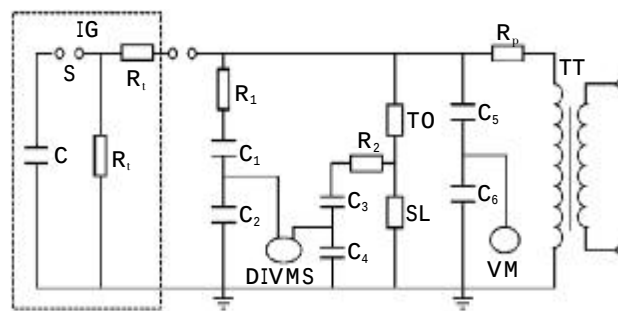
所以得出模拟负载两端电压与总电压的关系为

$$\frac{23.267}{23.267 + 17.9} \approx 0.565\text{ } 2 = 56.52\% \quad (4)$$

计算结果与表 3 中各电压下模拟负载的电压与总电压的比值基本吻合,说明此计算分析与实际情况符合。同时也可以看出,在直流情况下,水管的水阻必须考虑,顶部水管水阻是 MVU 各阀塔之间分压关系的重要影响因素。

3.2 操作冲击电压试验

操作冲击电压试验回路见图 5,图 5 中 TO、SL 分别是被试的双重阀试品和模拟负载。其余符号分别指代冲击电压发生器各参数。



IG—冲击电压发生器; R_1 & C_1 —冲击分压器高压臂; C_2 —冲击分压器低压臂;DIVMS—数字电压测量系统;TT—工频试验变压器; R_p —保护电阻;VM—工频数字仪; C_5 —工频分压器高压臂; C_6 —工频分压器低压臂;TO—阀试品;SL—模拟负载; R_2 & C_3 —模拟负载电压测量用冲击分压器高压臂; C_4 —模拟负载电压测量用冲击分压器低压臂;

图 5 MVU 操作冲击电压试验回路

Fig. 5 The test circuit of SI for MVU

操作冲击试验中, 为了能够同时得到模拟负载上的操作波参数, 故在模拟负载侧并联一个冲击分压器, 其高压臂电容为 481.5 pF。模拟负载的参数见表 5, 测量波形见图 6。图 6 中 CH1 为总电压波形, CH2 为模拟负载上的电压波形。

表 5 操作冲击电压试验中模拟负载的电气参数

Tab. 5 The parameters of simulation load in SI test

R_f/Ω	C_f/nF	L_f/mH	C_v/nF	$R_{dc}/\text{M}\Omega$
8 839	6.493 5	4.96	2 400	0.186 1

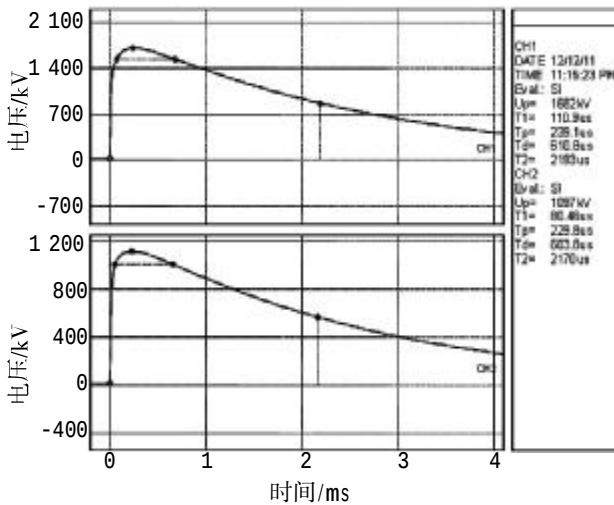


图 6 操作冲击电压试验波形图

Fig. 6 The oscilloscope of SI test

从图 6 中可以看出, 模拟负载的波形参数与总电压的波形参数基本相同, 电压占总电压的 65.01%, 较符合分压关系的要求。

由于操作波形波前和半峰值时间均较长, 相应的其频率也较低, 再加上 R_f 与 C_s 串联, R_{dc} 为 $\text{M}\Omega$ 级阻抗, 所以在双重阀和模拟负载中电压分配主要是按电容分配即按 C_s 与 C_v 进行分配, 而 C_s 与 C_v 是并联关系, 且 C_s 远大于 C_v , 所以简化后仅考虑 C_s 。由单个晶闸管级的 C_s 为 1.6 μF , 双重阀一共有 120 个晶闸管级, 可以得出双重阀总的 C_s 为

$$C_1 = \frac{1.6}{120} \approx 0.013\ 333\ 3\ \mu\text{F} = 13.333\ 3\ \text{nF} \quad (5)$$

模拟负载与分压器总电容量为

$$C_2 = 6.493\ 5 + 0.481\ 5 = 6.975\ 0\ \text{nF}$$

根据电容得出模拟负载占总电压的比例为

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{13.333\ 3}{13.333\ 3 + 6.975\ 0} \approx 0.656\ 5 = 65.65\% \quad (6)$$

可见操作冲击下模拟负载和双重阀间按照电容分配电压的模型与实际情况相符, 基本满足模拟负载和双重阀的电压比例是 1:2 的关系, 此情况下该模拟负载能够满足试验要求。

在操作冲击电压试验中, 按照阀等效参数制作的模拟负载能够按照预期设计与 MVU 高压阀塔进行分压。

3.3 雷电冲击电压试验

相对操作冲击, 雷电冲击电压频率高, 影响电位分布的因素多, 试验实施难度大^[20-22]。雷电冲击试验的回路布置与操作冲击的相同, 而雷电冲击试验时模拟负载的参数与直流试验时的相同, 即模拟负载的 C_v 为 0.103 5 nF。为了尽可能降低测量对于模拟负载分压关系的影响, 此次试验与模拟负载并联的分压器高压臂为 50 pF, 所以与直流试验时相比 C_v 变为 0.153 5 nF。典型测量波形见图 7。图 7 中 CH1 为总电压波形, CH2 为模拟负载上的电压波形。

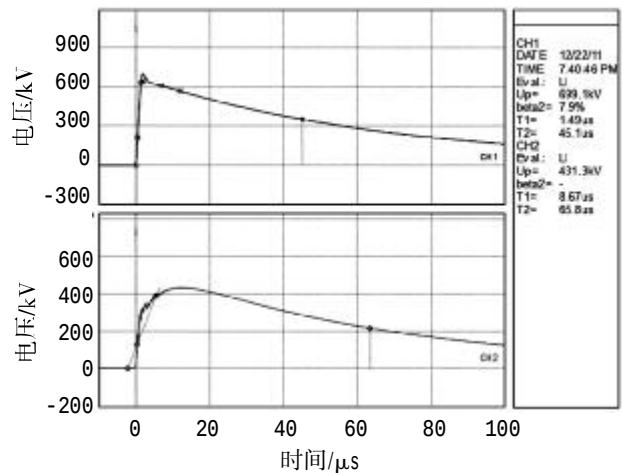


图 7 雷电冲击电压试验波形图

Fig. 7 The oscilloscope of SI test

从图 7 中可以看出, 相对于操作冲击, 负载上雷电冲击的波形和施加试品上的总电压波形相差较大: 波前时间由 1.47 μs 变成 8.66 μs , 半峰值时间从 44.7 μs 增加为 65.7 μs , 变化幅度比较大, 因此其频率也相应改变, 不能按照操作冲击试验的方法对其进行分析。且在总电压波形时间参数变化不大的情况下, 不同电压下相同时刻模拟负载占总电压的比值和模拟负载峰值与总电压峰值的比值基本不变, 为 42.32% 和 61.69%。

根据单阀电气图及参数以及直流试验的结果, 可以得到双重阀简化的电气参数, 见表 6。

表 6 雷电冲击下双重阀简化电气参数

Tab. 6 The simplified parameters for LI test

R_f/Ω	C_f/nF	L_f/mH	C_v/nF	$R_{dc}/\text{M}\Omega$
4320	13.333 3	9.12	0.5	17.9

同时根据试验回路, 双重阀等效回路图和模拟负载等效回路图可以得到雷电冲击试验时双重阀和

模拟负载内电气元件的等效回路,见图 8。

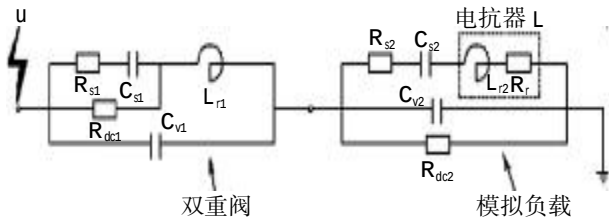


图 8 雷电冲击电压试验时试品的电气参数等效回路图

Fig. 8 The equivalent circuit of test object for LI test

根据试验回路,可列出以下的方程

$$u_1 + u_2 = u \quad (7)$$

$$L_{r2} C_{s2} \frac{d^2 u_{s2}}{dt^2} + (R_r + R_{s2}) C_{s2} \frac{du_{s2}}{dt} + u_{s2} = u_2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{R_{s1} C_{s1} \frac{du_{s1}}{dt} + u_{s1}}{L_{r1} \frac{d}{dt} + R_{dc1}} + C_{s1} \frac{du_{s1}}{dt} + \\ & R_{s1} C_{s1} \frac{du_{s1}}{dt} + u_{s1} = u_1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$C_{s1} \frac{du_{s1}}{dt} + \frac{R_{s1} C_{s1} \frac{du_{s1}}{dt} + u_{s1}}{R_{dc1}} + C_{v1} \frac{du_1}{dt} = i \quad (10)$$

$$C_{s2} \frac{du_{s2}}{dt} + C_{v2} \frac{du_2}{dt} + \frac{u_2}{R_{dc2}} = i \quad (11)$$

式(7)-(11)中: u_1 为双重阀两端电压; u_2 为模拟负载两端电压; u 为试品总电压; u_{s1} 为 C_{s1} 两端电压; u_{s2} 为 C_{s2} 两端电压; i 为流过试品的总电流。

在式(8)中,由于 L_{r2} 是mH级, C_{s2} 是nF级,二者相乘数量级为 10^{-12} ,故可以化简为

$$(R_r + R_{s2}) C_{s2} \frac{du_{s2}}{dt} + u_{s2} = u_2$$

$$\text{解得 } u_{s2} = u_2 - A_2 e^{-\frac{t}{(R_r + R_{s2}) C_{s2}}} \quad (12)$$

式(12)中 A_2 为常数。同理可以解得

$$u_{s1} = u_1 - A_1 e^{-\frac{t}{R_{s1} C_{s1}}} \quad (13)$$

式(13)中 A_1 为常数。由以上各式可得

$$(C_{s1} + C_{v1} + \frac{C_{s1} R_{s1}}{R_{dc1}}) \frac{du}{dt} + \frac{u}{R_{dc1}} = (C_{s1} + C_{s2} + C_{v1} + C_{v2} + \frac{C_{s1} R_{s1}}{R_{dc1}})$$

$$\frac{du_2}{dt} + (\frac{1}{R_{dc1}} + \frac{1}{R_{dc2}}) u_2 + \frac{A_2}{R_r + R_{s2}} e^{-\frac{t}{(R_r + R_{s2}) C_{s2}}} - \frac{A_1}{R_{s1}} e^{-\frac{t}{R_{s1} C_{s1}}}$$

因 R_{dc1} 、 R_{dc2} 为MΩ级,而 C_{s1} 为nF级, L_{r1} 为mH级,所以 $\frac{1}{R_{dc1}}$ 、 $\frac{1}{R_{dc2}}$ 、 $\frac{C_{s1}}{R_{dc1}}$ 可以忽略,则最终可以得

$$\begin{aligned} (C_{s1} + C_{v1}) \frac{du}{dt} &= (C_{s1} + C_{s2} + C_{v1} + C_{v2}) \frac{du_2}{dt} + \\ & \frac{A_2}{R_r + R_{s2}} e^{-\frac{t}{(R_r + R_{s2}) C_{s2}}} - \frac{A_1}{R_{s1}} e^{-\frac{t}{R_{s1} C_{s1}}} \end{aligned}$$

两边积分后解得

$$u_2 = \frac{(C_{s1} + C_{v1})u + A_2 C_{s2} e^{-\frac{t}{(R_r + R_{s2}) C_{s2}}} - A_1 C_{s1} e^{-\frac{t}{R_{s1} C_{s1}}}}{C_{s1} + C_{v1} + C_{s2} + C_{v2}} + A \quad (14)$$

式(14)中 A 是常数。

将 $t=0$ 时 $u=u_2=0$ 代入式(14),得

$$A = \frac{A_1 C_{s1} - A_2 C_{s2}}{C_{s1} + C_{v1} + C_{s2} + C_{v2}}$$

当 t 趋近于 $+\infty$ 时 $u=u_2=0$,得

$$A=0$$

将其中一个波形中 $t=1.45 \mu s$ 时, $u=782.7 \text{ kV}$, $u_2=331.2 \text{ kV}$ 代入式(14),并化简得

$$-269.131 = -0.975 \frac{A_1 C_{s1}}{C_{s1} + C_{v1} + C_{s2} + C_{v2}} +$$

$$0.980 \frac{A_2 C_{s2}}{C_{s1} + C_{v1} + C_{s2} + C_{v2}}, \text{ 与前两个式子联立可}$$

求得

$$\frac{A_1 C_{s1}}{C_{s1} + C_{v1} + C_{s2} + C_{v1}} = \frac{A_1 C_{s1}}{C_{s1} + C_{v1} + C_{s2} + C_{v2}} = -53 \ 601.6$$

将这一结果和 $A=0$ 代入式(14),得

$$u_2 = \frac{(C_{s1} + C_{v1})u}{C_{s1} + C_{v1} + C_{s2} + C_{v1}} + 53 \ 601.6 (e^{-\frac{t}{R_{s1} C_{s1}}} - e^{-\frac{t}{(R_r + R_{s2}) C_{s2}}}) \quad (15)$$

将图 7 波形中 $t=1.47 \mu s$ 、 $u=741.5 \text{ kV}$ 及各电气参数代入式(15),可以计算出

$$u_2 = 0.767u + 53 \ 601.6 (e^{-\frac{t}{57.6 \times 10^{-6}}} - e^{-\frac{t}{72.4 \times 10^{-6}}})$$

$$u_2 = 295.4 \text{ kV}$$

而根据图中读数和比例关系可以算出 u_2 为 313.7 kV ,两者相差为 18.3 kV ,这可能是由于模型比较简化,计算过程中忽略一些值所导致。

从式(15)可以看出,若最后两项之和为零时,即 $(R_r + R_{s2}) C_{s2} = R_{s1} C_{s1}$ 时总电压 u 和 u_1 的关系固定,与时间无关。而由实际情况可知, $(R_r + R_{s2}) C_{s2} = 72.4 \times 10^{-6}$,而 $R_{s1} C_{s1} = 57.6 \times 10^{-6}$,两者相差很大,所以总电压和模拟负载上的电压关系与时间有关,这与实际波形图上显示的是一致的。若想使得模拟负载两端电压与总电压之比不随时间改变,仅根据上式就需要使得 $(R_r + R_{s2}) C_{s2} = R_{s1} C_{s1}$,上式只是为了计算简便而将实际情况简化得来的,实际上要考虑的参数更多,再加上模拟负载和双重阀的杂散电容等的影响,若要使得模拟负载和双重阀阻抗匹配,是非常困难的,可以靠调节模拟负载参数使得它受时间影响尽可能小。

由以上分析可以看出,使用模拟负载方法进行MVU雷电冲击试验时,模拟负载的参数选取比较困难,而且杂散电容等因素也成为不得不考虑的重要因素。

4 完整悬吊阀和模拟负载法优缺点对比

与完整悬吊阀的方法相比, 模拟负载法的优点有:

1) 是进行更高电压等级换流阀试验的一种有效方式, 随着电压等级的升高, 换流阀整形态试品由更多个阀塔组成, 采用等效模拟负载的方法进行试验可有效的简化吊装等问题;

2) 减小了回路尺寸, 有利于试验的进行。

与完整悬吊阀的方法相比, 模拟负载法存在的不足有:

1) 不能考核到 MVU 中处于低压端的单阀间(也就是模拟负载所模拟的那部分阀)电压耐受能力;

2) 模拟负载参数的确定是一个难点, 但是此参数又极为关键;

3) 模拟负载法试验时, 被试阀的电压与总电压的分压关系有要求, 但实际试验时该关系会和要求有偏差, 相关标准没有明确规定允许的偏差范围, 如果试验中出现试品击穿等问题, 无法说明是分压关系所致还是试品本身问题;

4) 对于雷电冲击, 因为总电压波形峰值与模拟负载电压波形峰值存在一定时间差, 此时 MVU 真实阀塔承受的电压是计算波形峰值差还是同时刻电压差无相关标准, 不便得到统一的试验结果。

5 结论

采用模拟负载法进行 MVU 试验时, 由于在空间上的优势, 有利于更高电压等级换流阀试验的进行。对 MVU 试验用模拟负载法进行了直流电压试验、操作冲击电压试验、雷电冲击电压试验, 得到以下结论:

1) 模拟负载法能够很好地完成操作冲击电压试验;

2) 对于直流电压试验也能较好完成, 但试验时必须考虑到阀冷却水管电阻对于电压分配的影响, 以调整模拟负载参数达到要求;

3) 对于雷电冲击电压试验, 要充分考虑模拟负载和阀的各种参数, 调节模拟负载参数使得不仅峰峰值分压能够满足预期要求, 也要使相同时刻的分压关系能够接近预期要求。

模拟负载法的采用为特高压换流阀的 MVU 试验提供了一种新的思路, 今后仍需进一步改进和完善此方法。

参考文献:

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出

版社, 2004。

ZHAO Wan-jun. HVDC engineering [M]. Beijing: Electric Power Press, 2004.

[2] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

LIU Zhen-ya. Smart grid technologies [M]. Beijing: Electric Power Press, 2010.

[3] 刘振亚. 特高压直流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

LIU Zhen-ya. UHV DC electrical equipment [M]. Beijing: Electric Power Press, 2009.

[4] IEC60700-1—2008. Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission - Part 1: Electrical testing[S].

[5] GB/T 20990.1—2007. 高压直流输电晶闸管阀·第一部分: 电气试验[S].

GB/T 20990.1—2007. HVDC thyristor valves ·Part 1: Electrical testing[S].

[6] 彭玲, 杨晓楠. ± 660 kV 直流输电工程换流阀绝缘试验研究[J]. 电力建设, 2011, 32(7):34-38.

PENG Ling, YANG Xiao-nan. Thyristor valve insulation test research for ± 660 kV HVDC transmission project[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(7):34-38.

[7] 盛宝良. Garabi II HVDC 晶闸管阀的运行试验 [J]. 高压电器, 2003, 39(1):4-6.

SHENG Bao-liang. Operational tests of Garabi II HVDC thyristor valves [J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1):4-6.

[8] ZHOU Hui-gao. Simulation and comparison of the STC for thyristor valves for HVDC by software PSCAD [J]. The Journal of CPRI, 2006, 3(1):21-28.

[9] Siemens. Thyristor valves and associated equipment-operational type tests[R]. Shanghai: Siemens, 2003.

[10] SHENG B L, JANSSEN E, BLOMBERG A, et al. A new synthetic test circuit for the operational tests of HVDC thyristor valves [C]//Proceedings of 2001 IEEE 16th Applied Power Electronics Conference. Anaheim, USA: IEEE, 2001:1242-1246.

[11] 李侠, SACHS G, UDER M. ± 800 kV 特高压直流输电用 6 英寸大功率晶闸管换流阀 [J]. 高压电器, 2010, 46(6):1-5.

LI Xia, SACHS G, UDER M. 6 inch high power thyristor valves for ± 800 kV UHVDC transmission [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6):1-5.

[12] 李强, 周敏刚, 陈楠, 等. 特高压直流换流阀单阀交流试验方法研究[J]. 高压电器, 2011, 47(8):1-4.

LI Qiang, ZHOU Min-gang, CHEN Nan, et al. Study on AC voltage test method of UHVDC valve [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8):1-4.

(下转第 32 页)

- [10] KIZILCAY M, PNIOK T. Digital simulation of fault arcs in powersystems [J]. Europe Transaction on Electrical Power System, 1991, 4(3): 55-59.
- [11] TERZIJA V V, KOGLIN H J. On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(3): 1012-1017.
- [12] TERZIJA V, KOGLIN H. Long arc in free air: laboratory testing, modeling, simulation and model-parameters estimation [J]. IEE Proceedings of Generator Transmission and Distribution, 2002, 49(3): 319-325.
- [13] 王其平. 电器中的电弧理论 [M]. 上海: 科学技术出版社, 1963.
- WANG Qi-ping. Arc electric theory [M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1963.
- [14] 李新福. 低压电器电弧仿真研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2004.
- LI Xin-fu. Simulation of low voltage apparatus switching arc [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2004.
- [15] SCHAVEMAKER P H, VANDERSLUIS L. The arc model blockset [C]//In Proc. of the Second IASTED International Conf. Power and Energy Systems. Greece: [s.n.], 2002: 644-648.
- [16] 吴天明, 谢小竹, 彭 彬. MATLAB 电力系统设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- WU Tian-ming, XIE Xiao-zhu, PENG bin. MATLAB design and analysis of power system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [17] 岳 航. 乌海电网弧光接地过电压抑制措施研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- YUE Hang. Study on earthed arc over-voltage inhibiting of Wuhai power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [18] 王艳松, 解 飞. 配电网单相接地故障的仿真分析 [J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 123-127.
- WANG Yan-song, XIE Fei. Simulation and analysis of single-phase to ground fault in distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 123-127.
- [19] 周羽生, 彭 琢, 韦肖燕, 等. 小电流接地系统单相故障的 MATLAB 仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 50-52.
- ZHOU Yu-sheng, PENG Zhuo, WEI Xiao-yan, et al. MATLAB simulation on single-phase-to-earth fault of small current grounding power system [J]. Proceeding of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2009, 21(4): 50-52.
- [20] 艾 琳, 罗 龙. 基于 MATLAB 的小电流接地系统仿真研究 [J]. 华中电力, 2008, 21(3): 16-21.
- AI Lin, LUO Long. Simulation study on non-direct-ground system based on MATLAB [J]. Central China Electric Power, 2008, 21(3): 16-21.
- [21] 梁曦东, 陈昌渔. 高电压工程 [M]. 北京: 清华大学出版, 2003.
- LIANG Xi-dong, CHEN Chang-yu. High voltage engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [22] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- YAO Huang-nian, CAO Mei-yue. Resonance grounding of power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- 陈光会(1976—), 男, 副教授, 从事现代防雷技术研究方面研究。
- 刘 儒(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统过电压与防雷保护。

(上接第 25 页)

- [13] 国家电网公司. ± 1100 千伏特高压直流输电工程设备研制技术规范 [Z]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- SGCC. The technical specification of equipment of ± 1100 kV UHVDC transmission project [Z]. Beijing: SGCC, 2011.
- [14] 田 方, 黎小林. 云广直流输电工程换流阀多重阀单元型式试验研究 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(6): 40-43.
- TIAN Fang, LI Xiao-lin. Study on the multiple valve unit test of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission project [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(6): 40-43.
- [15] IEC 60270—2000. Partial discharge measurement [S].
- [16] GB/T 7354—2003. 局部放电测量 [S].
- GB/T 7354—2003. Partial discharge measurements [S].
- [17] 张仁豫, 陈昌渔. 高电压试验技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- ZHANG Ren-yu, CHEN Chang-yu. High voltage test techniques [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [18] IEC 60060-1—2010. High voltage test techniques-Part 1: General definitions and test requirements [S].
- [19] IEC 60060-2—2010. High voltage test techniques-Part 2: Measuring systems [S].
- [20] 崔 东. ± 500 kV HVDC 换流阀冲击试验技术 [J]. 电力设备, 2006, 7(3): 30-32.
- CUI Dong. Impulsetest techniques for ± 500 kV HVDC thyristor valves [J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 30-32.
- [21] TANABE S. Recent technical advancement of thyristor valve for HVDC transmission system [C]//Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery. Tokyo: IEEE, 1995: 394-398.
- [22] TANABE S, KOBAYASHI S. Discussion of thyristor characteristic optimization for HVDC valves [J]. Electrical Engineering in Japan, 1999, 128(3): 43-52.
- 张小勇(1974—), 男, 硕士研究生, 从事高电压试验技术研究工作。