

文章编号: 1001-1609(2006)03-0201-04

# 用于高压直流输电的晶闸管换流阀 运行试验回路等价性比较

贺恒鑫, 何俊佳

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

Equivalence Evaluation of Operational Test Circuits of HVDC Thyristor Valves

HE Heng-xin, HE Jun-jia

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 现代晶闸管阀的大容量使得难以采用传统的背靠背试验回路对其进行运行试验。替代型等效试验回路的应用显著地降低了运行试验所需的设备容量, 但其试验等价性是一个值得讨论的问题。对替代型试验回路等价性进行考核的核心在于其是否正确再现作用在晶闸管阀上的负荷。笔者基于 EMTP/ATP 对现有的三种等效试验回路进行周期性触发和关断试验的仿真, 仿真结果表明 ABB 合成试验回路具有更好的试验灵活性和试验等价性。

关键词: 晶闸管阀; 试验回路; 运行试验; 等价性

中图分类号: TM721.1; TN34 文献标识码: A

Abstract: Modern thyristor valves for HVDC are of high power rating and difficult to be tested in a conventional back-to-back test circuit. The application of some equivalent test circuits significantly reduces the size of test facilities, but the test equivalence of those test circuits is worth to be discussed. The core to evaluate the equivalence of those test circuits is whether it can reproduce the stress applied on the valves correctly. Three types of test circuits are introduced in this paper, periodic firing and extinction test have been carried out based on EMTP/ATP simulation. The simulation result verifies that the ABB synthetic test circuit is more flexible in setting test condition and more accurate in reproducing the stress applied on the valves.

Key words: thyristor valve; test circuit; operational test; equivalence

## 1 引言

高压直流输电晶闸管阀的运行试验传统上采用背靠背直接试验回路。由于现代晶闸管的容量大幅增加, 使得直接试验回路的试验容量也成比例增加。同时 IEC60700<sup>[1]</sup>和 IEEE857<sup>[2]</sup>中规定: 运行试验时,

被试阀组件至少应包含 5 个串联晶闸管, 试验才具有充分的试验等价性。若要满足 IEC 和 IEEE 的要求进行试验, 直接试验回路需要提供巨大的试验容量(达 100 MV·A 以上), 而增加直接试验回路的容量既不经济也不实际。因此, 在过去 10 年中, 一些等效替代型回路被开发并应用于各个 HVDC 工程之中。其中最具代表性的有东芝(Toshiba)试验回路、西门子(Siemens)和 ABB 合成试验回路。替代型试验回路的应用显著地降低了试验容量, 但其试验等价性成为一个值得关注的问题。

该文在对以上 3 种典型替代型试验回路的结构进行分析之后, 采用 EMTP/ATP 仿真计算程序对 3 种回路进行了周期性触发和关断试验仿真, 根据仿真结果对其等价性进行了初步的评估。

## 2 试验等价性评估原则

为了拟订等价性评估原则, 必须考核晶闸管阀运行时的电压和电流负荷, 特别是晶闸管阀在 触发导通; 导通态; 关断和反向电压这 3 种工作状态下的某些关键负荷<sup>[3]</sup>。

触发导通: 在触发后, 由于晶闸管的杂散电容和阻尼电容与刚导通的晶闸管形成放电回路, 流过晶闸管的起始  $di/dt$  很高, 可能使得硅片中局部导通区域的功率密度过高, 从而导致局部熔焊而引起晶闸管的损坏。起始  $di/dt$  是一个等价性评估的关键参数, 其值是由杂散电容值和触发前杂散电容上的电压决定的。

导通态: 晶闸管稳态导通时产生通态损耗。通态损耗使得结温升高, 使晶闸管阻断能力恶化, 为了验证晶闸管的热性能, 保证通态电流的幅值和持续时

收稿日期: 2005-07-28

作者简介: 贺恒鑫(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事高压电器及过电压计算方面的研究。

间特别重要。

关断和反向电压: 关断时刻的  $di/dt$  将影响晶闸管的恢复电荷水平。在关状态下的反向恢复电压和反向阻断电压的电压跃变决定了阻尼回路和电抗器上的损耗, 因此, 关断状态和反向电压波形的值应该等于或超过运行值。

同时注意到传统的 6 脉冲背靠背试验回路<sup>[4]</sup>与实际的 HVDC 输电系统的拓扑结构完全相同, 图 1 为用于葛洲坝-上海 HVDC 工程的 6 脉冲背靠背试验回路, 其两个 6 脉冲桥一个处于整流工况, 另一个处于逆变工况。因此 6 脉冲背靠背试验回路有着最好的试验等价性。该文将被试阀在 6 脉冲背靠背试验回路中运行时的关键负荷参数作为等价性比较的标准。

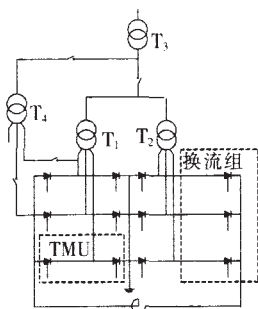


图 1 用于葛洲坝-上海 HVDC 工程的 6 脉冲背靠背试验回路

### 3 晶闸管阀运行试验的试验回路

#### 3.1 东芝试验回路

东芝试验回路<sup>[5]</sup>是一种典型的替代型试验回路, 该试验回路已经应用于日本的 6 个 HVDC 工程, 通过近十年良好的运行经验证明了其有效性。

东芝试验回路主体由电源、L-C 振荡回路和电压反向电路组成, 见图 2。电容  $C_1$ 、电感  $L_1$  与被试阀  $M_1$  组成振荡回路, 其中电感  $L_1$  模拟换相电感; 电容  $C_1$ 、电感  $L_2$  与辅助阀  $M_2$  组成电压反向回路, 电感  $L_2$  可以调节关断时的电压变化率  $du/dt$ ; 电阻  $R_d$  和电容  $C_0$  模拟同一换流组中另两个阀臂的阻尼回路; 电容  $C_0$  模拟杂散电容。

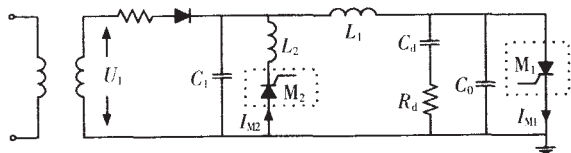


图 2 东芝试验回路主回路

试验时, 当电容  $C_1$  两端电压被充电至  $U_1$  后, 被试阀  $M_1$  被触发, 电容  $C_1$  和电感  $L_1$  组成的振荡回路开始工作, 被试阀流过振荡电流  $I_{M1}$ , 同时充电后的  $R_d$ - $C_0$  以及  $C_0$  支路对被试阀放电, 形成导通初始的  $di/dt$ ; 当电容  $C_1$  上电压反向后, 被试阀  $M_1$  在反向电压作用下阻断; 经过一段延时后, 触发辅助阀  $M_2$ , 使得  $C_1$  上的

电压再次反向, 形成被试阀两端的反向恢复电压; 此后再由电源补充由于损耗引起的压降。东芝试验回路正常工作时被试阀上的电压电流波形见图 3。

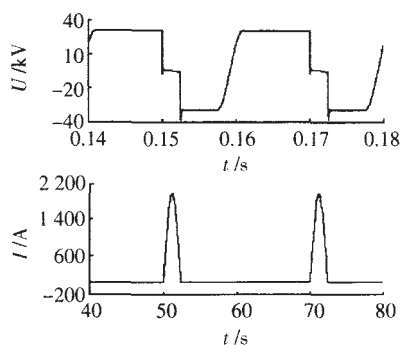


图 3 东芝试验回路周期性触发和关断试验仿真波形

#### 3.2 西门子合成试验回路

西门子合成试验回路<sup>[6,7]</sup>由德国 Erlangen 的 Simens A&DDS TH 和 Simens AG 联合成立的项目小组开发并实施, 已经成功应用于美国的 Sylmar 换流站重建工程和我国的天-广 HVDC 工程中。

图 4 为西门子合成试验回路主回路, 其中包括电压源(高电压小电流源)和由 6 脉冲桥构成的电流源(低电压大电流源), 被试阀  $D_1$  作为 6 脉冲桥的一个桥臂,  $C_A$  与被试阀  $D_1$  并联代表阀的杂散电容,  $D_1, D_2, D_3$  为辅助阀, 门极可关断晶闸管 GTO 用来实现电流续流,  $L_2$  为换向电抗, 辅助阀  $D_3$  在进行故障电流试验时被触发造成桥内两相短路。

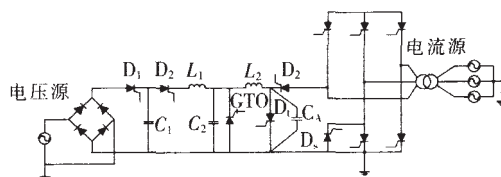


图 4 西门子合成试验回路主回路

西门子合成试验回路的工作原理在文[6]中已有详述。当电容  $C_2$  充电以后, 触发导通被试阀  $D_1$ , 被试阀  $D_1$  流过一正弦半波电流, 在该电流达到最大值时触发导通 GTO 和辅助阀  $D_3$ , 在引入电流源大电流的同时通过 GTO、电感  $L_2$  和被试阀  $D_1$  组成的回路使正弦半波电流保持其最大值不变, 两个电流叠加后持续约 7 ms (0.02/3 s), 在引入电流源电流过零时, 关断辅助阀  $D_3$  和 GTO, 电感  $L_2$  对电容  $C_2$  反向充电, 获得被试阀上的反向电压, 然后触发辅助阀  $D_2$ , 电容  $C_1$  对  $C_2$  充电, 使被试阀上呈现正向阻断电压。西门子合成试验回路正常工作时被试阀上的电压电流波形见图 5。

#### 3.3 ABB 合成试验回路

ABB 合成试验回路<sup>[8-9]</sup>是由 ABB Power Systems 和 ABB Switchgear 两公司联合成立的项目小组联合开发并实施, 已经成功应用于我国的三峡-常州 HVDC 工程以及巴西的 Garabi HVDC 工程中。

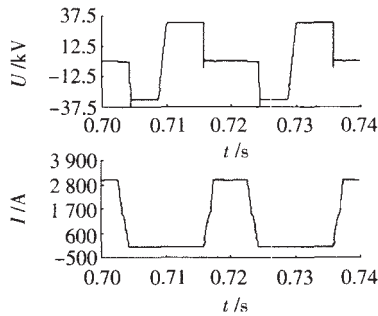


图 5 西门子合成试验回路周期性触发和关断试验仿真波形

ABB 合成试验回路的主回路见图 6, 包括电压源(高电压小电流源)和由 6 脉冲背靠背回路构成的电流源(低电压大电流源)。被试阀  $D_1$  作为整流桥的一个桥臂,  $D_1 \sim D_5$  为辅助阀, 与被试阀  $D_1$  并联的电容  $C_1$  代表被试阀的杂散电容, 电感  $L_1$  代表换向电感, 辅助阀  $D_5$  在进行故障电流试验时被触发造成桥内两相短路。

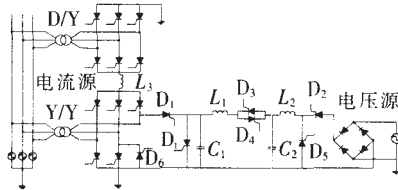


图 6 ABB 合成试验回路主回路

ABB 合成试验回路的工作原理在文[8]中已有详述, 被试阀  $D_1$  在触发之后导通一运行电流。在换向(主电流过零点)结束之前, 电压源通过触发辅助阀  $D_3$ , 引入一正弦半波电流与被试阀流过主电流叠加形成合成电流。在电流源电流被辅助阀  $D_1$  切断以后, 被试阀继续导通引入电流约  $600 \mu s$ , 电压回路电感  $L_1$  和  $C_1$  的电压应选择使得引入电流零点前大约  $200 \mu s$  内有一与实际运行条件相似的电流变化率。辅助阀  $D_4$  和  $D_5$  在规定时刻触发, 以获得被试阀上的反向恢复电压和正向电压。ABB 合成试验回路正常工作时被试阀上的电压电流波形见图 7。

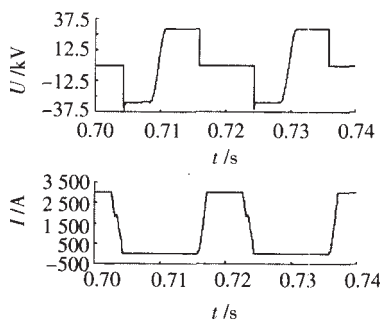


图 7 ABB 合成试验回路周期性触发和关断试验仿真波形

#### 4 试验回路等价性比较

基于 EMTP/ATP 仿真计算程序, 建立了 6 脉冲背靠背、东芝、西门子和 ABB 这 4 种试验回路的仿

真模型, 以灵宝背靠背工程所用换流阀参数<sup>[10]</sup>建立了被试阀阀段模型, 该模型包括 11 个晶闸管层和 2 个饱和电抗器单元。仿真条件及其计算结果见表 1~表 3。

表 1 额定试验仿真参数

	$\alpha / ^\circ$	$n_{th}$	$\mu / ^\circ$	$U_{ur} / kV$	$I_{ur} / A$
周期性触发和关断试验	15.2	11	21.2	32.1	3000

$\alpha$ ——触发角  $n_{th}$ ——串联晶闸管层数  $\mu$ ——额定换向重叠角  
 $U_{ur}$ ——额定试验电压  $I_{ur}$ ——额定试验电流

表 2 仿真模型主回路参数

	$C_0 / pF$	$C_1 / \mu F$	$C_2 / \mu F$	$L_1 / mH$	$L_2 / mH$
东芝	1000	50.0	-	14.0	14.0
西门子	1000	30.0	30.0	14.0	19.0
ABB	-	0.001	11.0	14.0	40.0

表 3 试验仿真结果

	阀端电压 (含过冲) / V	电流幅 值 / A	$(di/dt)_on /$ ( $A \cdot \mu s^{-1}$ )	$(di/dt)_off /$ ( $A \cdot \mu s^{-1}$ )
东芝	39 504	2 046.6	71.60	4.59
ABB	38 951	3 009.7	51.10	4.27
西门子	38 914	3 013.9	51.20	4.34
6 脉冲背靠背	33 352	2 931.5	27.78	3.93

晶闸管阀的运行试验是为了考核晶闸管阀电流相关的特性, 所以各个试验回路的不同之处在于对电流负荷的重现方式不同, 图 8 为各个回路中被试阀上通过的电流波形。

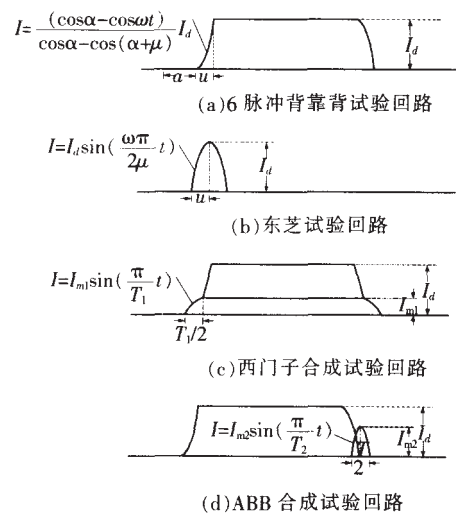


图 8 4 种回路的电流波形

在触发导通时, 3 种回路的  $(di/dt)_{on}$  均大于实际工况下的值, 其中西门子合成回路和 ABB 合成回路仿真得到的  $(di/dt)_{on}$  值相近, 这是由于两回路并联在被试阀两端的杂散电容值相等。而东芝回路得到的  $(di/dt)_{on}$  值略大, 是因为回路中被试阀两端还并联了 RC 支路, 来模拟其它未开通阀臂的阻尼回路对开通时  $(di/dt)_{on}$  的增加值, 仿真结果证明这是不必要的, 仅

需合理选择并联在被试阀两端的杂散电容值就可以准确地给被试阀施加触发导通时的  $(di/dt)_on$  值。

在稳态导通时, 西门子合成回路和 ABB 合成回路能提供的电流负荷幅值和持续时间都和实际工况一致, 而东芝回路在导通态时提供的峰值电流持续时间不足, 不能完全考核晶闸管的热性能。

在关断和反向电压作用期间, 3 种试验回路均采用 L-C 振荡回路来提供试验所需的正反向电压, 仿真得出被试阀上反向电压(包括其换向过冲)均大于实际的工作电压负荷, 由 L-C 振荡回路来提供试验所需电压是有效的。此外, 在进行最大短时运行方式试验时, ABB 试验回路通过在一个周内两次触发被试阀, 模拟了阻断时被试阀端电压的 8 次跃变, 见图 9, 考核了因电压跃变在阻尼回路和电抗器上产生损耗引起的热效应。

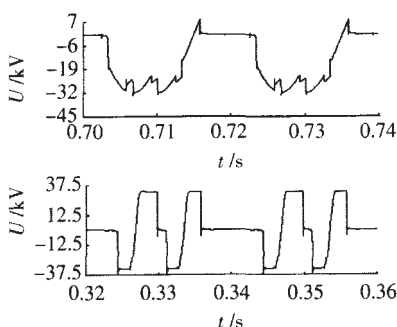


图 9 阀端电压的 8 次跃变

在同一试验电压下、选择相同参数的换向电感值后, 3 种回路的  $(di/dt)_{off}$  仿真结果相近, 满足关断时刻的电流下降率  $(di/dt)_{off}$  决定于回路中的模拟换向电感值与被试阀中的饱和电抗值之和:

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{off} = -\frac{V_{ult}}{(L_1 + L_{AL})} \quad (1)$$

其中:  $L_1$  为回路模拟换向电感;  $L_{AL}$  为被试阀饱和电抗。而且  $(di/dt)_{off}$  值均大于实际工况值, 达到了考核的目的。但是对于东芝回路, 在满足式 (1) 的同时, 还要求满足电流持续时间对应两倍换向角的条件, 由这两个条件确定的 L-C 回路中的电容参数不能保证提供足够大的电流, 仿真中仅得到幅值为 2.05 kA 的电流, 低于额定电流; 同时西门子和 ABB 回路要求引入半波电流持续时间分别为 2 ms 和 1.2 ms, 加上条件 (1) 同样可以确定电容参数, 要提供同样的  $(di/dt)_{off}$  值, 西门子回路需要引入幅值更大的电流(仿真中西门子回路引入电流幅值为 1.48 kA, ABB 回路为 0.89 kA), 而西门子回路电流引入方式使其引入电流幅值的调节范围较 ABB 要小, 可能导致其不能对阀施加足够的  $(di/dt)_{off}$  负荷。在 Sylmar 换流站重建工程中, 采用西门子回路进行周期性开通和关断试验时, 被试阀组建上测量得的  $(di/dt)_{off}$  值仅为额定值的 91% (引入电流幅值为 1 kA) [6]。

## 5 结论

运行试验是验证 HVDC 晶闸管阀设计是否符合要求的一个重要手段, 替代型试验回路的应用使得可以更经济地对现代大容量晶闸管阀进行运行试验。对仿真结果的分析表明:

(1) 在触发导通时, 通过在被试阀两端并联一模拟杂散电容, 3 种回路均能准确地施加  $(di/dt)_{on}$  负荷。

(2) 在稳态导通时, 东芝试验回路提供电流的峰值持续时间不足, 不能完全考核被试阀的热性能。

(3) 在反向电压作用时, ABB 合成试验回路能模拟 8 次电压跃变在阻尼回路和阀电抗上的损耗, 对热性能的考核较西门子合成回路更接近实际工况。同时在关断时, 欲提供相同的  $(di/dt)_{off}$  负荷, ABB 合成回路引入电流幅值较西门子合成回路要小得多, 因此 ABB 合成回路  $(di/dt)_{off}$  调节范围更大。

此外, 在进行断续直流试验时, 西门子合成试验回路需要重新调整回路结构, 而 ABB 合成试验回路不需调整回路结构就可以进行所有的运行试验项目。

综上所述, ABB 合成试验回路相比其它两种试验回路具有更好的试验等价性和调节的灵活性。

## 参考文献:

- [1] IEC60700-1-1998. Thyristor Valves for High Voltage Direct Current (HVDC) Power Transmission Part1: Electrical Testing [S].
- [2] IEEE 857-1990. IEEE Guide for Test Procedures for HVDC Thyristor Valves [S].
- [3] Task Force 01 of Working Group 14.01. Voltage and Current Stresses on HVDC Valves [J]. *Electra*, 1989, 25(7): 58-87.
- [4] G Neeser, G Thiele, G Aldrovandi. Operational Test on Thyristor Modules for the Gezhouba-Shanghai HVDC Transmission Project [C]// IEEE/CSEE Joint Conference on High Voltage Transmission Systems in China, October 17-22, 1994: 528-534.
- [5] S Tanaba, S Kobayashi. Operational Test Method on Valves Sections for HVDC Thyristor Valve [C]// CIGRE Tokyo Symposium, May 22-24, 1995: 420-422.
- [6] T Bauer, H P Lips, G Thoele. Operational Tests on HVDC Thyristor Modules in a Synthetic Test Circuit for the Sylmar East Restoration Project [J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1997, 12(3): 1151-1158.
- [7] 李梅, 王朝晖, 孙宏伟, 等. 一种晶闸管阀的合成试验回路研究 [J]. *高压电器*, 2004, 40(3): 205-207.
- [8] 盛宝良, E Jansson, A Blomberg, 等. 用于 HVDC 晶闸管模块运行试验的新合成试验回路 [J]. *高压电器*, 2002, 38(5): 1-4.
- [9] 盛宝良, Hans-Old Bjarme, Pierre Riffon 等. 使用合成试验回路对三峡-常州 HVDC 晶闸管阀进行运行试验 [J]. *高压电器*, 2002, 38(6): 1-4.
- [10] 崔东, 李彦明, 王建生, 等. 晶闸管换流阀冲击电压特性研究 [J]. *高压电器*, 2005, 41(1): 39-44.