

可关断器件阀运行试验的等效性及稳态试验方法

罗湘, 郑健超, 汤广福, 查鲲鹏, 贺之渊

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Study on Operational Tests Equivalence and Steady-state Test Method for Self-turn-off Valves

LUO Xiang, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, HE Zhiyuan

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The equivalence of operational tests for self-turn-off valves was investigated, which contains the test method, the implementation of test method and the analysis of test equivalence. The test method includes identification of test object, valve stresses analysis and establishment of the mathematic models of the stresses, test requirements as well as analysis of test items and equivalent test method. In this paper the steady-state operational test method of voltage-sourced converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) valve which are modular multi-level converters (MMC) valves based on IGBT was taken as a example to explain the investigation as to the test method, the test circuit and the equivalence of test, etc. In addition, the accuracy of the equivalent test method is verified.

KEY WORDS: self-turn-off valves; equivalence of operational tests; modular multi-level converters (MMC); voltage-sourced converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC)

摘要: 对可关断器件阀运行试验等效性进行研究, 研究内容包括试验方法、方法的实现和试验等效性的分析 3 部分, 其中试验方法包括试验对象的确定、阀应力分析及应力数学模型的建立、试验要求和试验内容的研究和等效试验方法的研究。以基于由 IGBT 组成的模块化多电平换流器(modular multi-level converters, MMC)阀的柔性直流输电装置稳态运行试验为例, 对 MMC 阀的稳态运行试验方法、试验电路和试验等效性分析等内容进行研究, 验证了等效试验方法的正确性。

关键词: 可关断器件阀; 运行试验等效性; 模块化多电平换流器; 柔性直流输电

0 引言

应用基于可关断器件的大功率电力电子装置是解决我国电网提高系统稳定性、增加电网输电能力、改善无功分布和电压支撑等关键问题的途径之一^[1-9]。为了保证装置的可靠运行, 需要在投入运行之前对装置的核心部件——可关断器件阀进行相应的型式试验。国际电工委员会提出了柔性直流输电(voltage-sourced converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)换流阀的试验标准——IEC62501^[10]。标准规定了 VSC-HVDC 换流阀的型式试验包括绝缘试验和运行试验, 其中绝缘试验针对阀对地、阀端间的绝缘进行; 运行试验是模拟阀实际运行工况的试验方式, 是最重要也是最复杂的一种试验方式。虽然国外一些著名公司对于研制的基于可关断器件阀的大功率电力电子装置都要进行必要的出厂试验和型式试验, 但试验等效性研究的相关报道比较少见。而在国内虽然对于半控器件晶闸管阀试验技术的研究已广泛开展^[11-15], 但对于可关断器件阀试验方法的研究还处于起步阶段。

等效试验的核心问题在于, 如何在试验室中以较少的代价, 尽可能真实地再现在各种运行工况下可能作用在被试品上的各种应力, 以便正确评价被试组件的耐受强度。而对于电力电子器件来说, 由于试验电路与器件内部载流子运动过程的相互作用, 等效试验要远比一般的设备的电气试验复杂。本文将着眼于基于可关断器件阀的大功率电力电子装置的核心——可关断器件阀, 对阀的运行试验的等效性进行研究, 研究内容包括 3 方面: 试验方法的研究、试验方法的实现和试验等效性的分析。并以基于 IGBT 的 VSC-HVDC 换流阀为例, 对其稳态运行试验方法、试验电路和试验等效性等内容

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217907); 国家电网公司重大科技项目(PG71-09-002)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB217907); Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (PG71-09-002).

进行研究,验证所建立可关断器件阀运行试验等效方法的正确性。

1 试验方法的研究

1.1 试验对象的确定

可关断器件阀型式试验的对象是由各种可关断器件所组成的阀,即可关断器件及其辅件组成的电气和机械联合体。其中器件的辅件包括驱动电路和散热系统等。

1.2 阀的应力分析及应力数学模型的建立

阀的应力分析,即对试品阀在实际装置中各种运行工况下承受的各种应力的分析,是进行试验的基础。可关断器件的应力主要有5类,即电压、电流、电压变化率 du/dt 、电流变化率 di/dt 和热应力。

阀的应力分析需要采用数学公式推导和仿真相结合的方式。因此可关断器件阀应力分析的结果是要建立如式(1)所示的应力数学模型,同时建立装置的仿真模型,对阀的关键应力进行仿真,从而得到应力的波形^[16]。

$$\mathbf{S}=[u \quad i \quad du/dt \quad di/dt \quad T]^T \quad (1)$$

式中: u 、 i 、 du/dt 、 di/dt 和 T 分别为阀在实际工况下的电压、电流、电压变化率、电流变化率和热; \mathbf{S} 为上述5种应力构成的矩阵。

由于器件的温度与其损耗直接相关,因此实际分析中,通常用阀的损耗代替将阀的温度应力,于是式(1)的应力数学模型改写为

$$\mathbf{S}=[u \quad i \quad du/dt \quad di/dt \quad P]^T \quad (2)$$

式中 P 为阀在实际工况下的各种损耗之和。

阀在实际工况中有稳态和暂态两种工作状态。对阀的稳态,应力分析只关注核心器件的应力;而对于阀的暂态,还要关注阀的保护系统是否能正常工作,因此对阀在暂态下的应力分析,需要分析所有影响阀失效因子的因素,即对阀的失效机制进行分析。此时的应力分析数学模型即阀失效机制的数学模型如式(3)所示:

$$\mathbf{S}_T=[u \quad i \quad du/dt \quad di/dt \quad P \quad \Delta\mathbf{S}]^T \quad (3)$$

式中 \mathbf{S}_T 为暂态下阀失效机制应力矩阵。可以看出式(3)与式(2)类似,但包含内容要丰富一些,除了稳态应力之外,引入了矩阵 $\Delta\mathbf{S}$,这是所有其他影响阀失效因素的集合,需要根据试验的目的来具体分析。

1.3 试验要求及试验内容的研究

试验要求就是基于试验目的,确定需要在试验中反应的关键应力。根据不同的试验要求,需要设计不同的试验来达到不同的试验目的,这就是试验

的内容。

阀的运行工况存在稳态运行工况和暂态运行工况,因此可关断器件阀的运行试验分为两大类:针对阀稳态应力的稳态运行试验和针对阀暂态应力和暂态失效机制的暂态运行试验。

1.4 等效试验方法的研究

由于基于可关断器件阀的大功率电力电子装置容量等级越来越高,为避免对电网造成严重影响,已经很少直接在电网上对装置进行试验,因此必须考虑等效的试验方法,也就是在无法创造实际运行条件,或者无法同时反应所有试验关键应力的情况下,应用等效试验方法来达到分别反应实际工况综合应力的目的^[11]。

等效试验方法主要分为两大类:全载试验方法和合成试验方法。常规直流换流阀全载试验方法的电路拓扑图如图1所示^[12]。

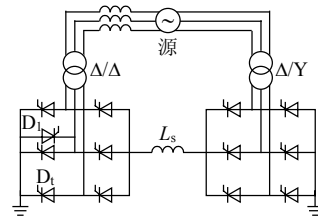


图1 全载试验方法电路拓扑结构图

Fig. 1 Structure diagram of full-load test method circuit

图1中的“源”可以是电机也可以是高压电网, D_1 为试品阀, D_2 为用于故障电流试验的短路阀, L_s 为负载电抗器。这种试验方法的优点是该回路结构简单,容易实现;缺点是单电源供电,试验能力受限于电源容量而难以提高。

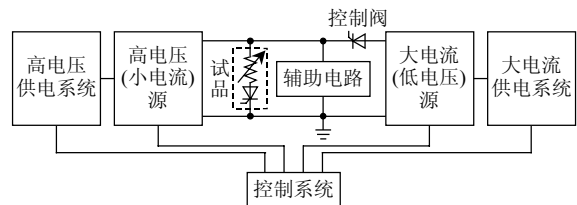


图2 合成试验方法原理框图

Fig. 2 Structure diagram of synthetic test method

图2所示为晶闸管阀合成试验方法的电路原理框图。合成试验方法是用两套或多套电源分别提供试品阀所需的应力的试验方法。这种试验方法的优点在于可以对试品阀在各种工况下的应力进行全面的考核,还有效地降低了对试验电源容量的要求;缺点在于对控制阀和控制系统的要求较高。对于可关断器件阀的等效试验方法,应根据实际需要,可选择采用全载试验方法或合成试验方法。但无论采用哪一种试验方法,都必须建立在全面的应

力分析基础之上,需针对不同的试验内容和试验要求提出相应的试验方法。

2 试验方法的实现

阀试验方法的研究,是阀运行试验的理论基础,基于试验方法研究的结果,需要通过一定的试验电路来实现所设计的试验方法。

试验电路是试验方法的实现,根据电路中电气元件的电气特性和元件之间的配合辅助以一定的控制电路,按照试验方法的设计,在试品阀上产生一定先后次序、大小和方向的应力来达到对试品进行等效试验的目的。

为了对试验电路的等效性进行分析,需要对试验电路中阀的应力进行分析。试验电路中阀的应力分析也需采用数学公式推导和系统仿真相结合的分析方法,需建立起如式(4)所示的试品阀应力数学模型。

$$\mathbf{S}_t = [u_t \quad i_t \quad (du/dt)_t \quad (di/dt)_t \quad P_t]^T \quad (4)$$

式中: u_t 、 i_t 、 $(du/dt)_t$ 、 $(di/dt)_t$ 和 P_t 分别为阀在试验电路中的电压、电流、电压变化率、电流变化率和热; \mathbf{S}_t 为上述5种应力构成的矩阵。

除了数学模型之外,还需在仿真软件中建立起试验电路的仿真模型,得到阀在试验电路中各种应力的仿真波形。

3 试验的等效性分析

试验等效分析有两个目的:1)从理论上保证,在一定的试验条件约束下,试验电路产生的综合应力与被试电力电子装置在实际运行中所遇到的情况具有相同的效果;2)利用可以实现的试验条件对试品的耐受强度做出合理的评价^[15]。试验等效性的“效”,是试验中所需反应的关键应力,是阀在实际工况下承受的应力。因此等效性分析也需要进行数学模型等效性分析和仿真波形等效性分析二者的结合。

对试验等效性评价时,如果试验电路产生的应力稍高于被试品实际所承受的应力,只要能够证明不至于对被试品产生不可恢复的损伤,从而对耐受强度产生误判断,也可认为是等效的。

4 实例验证

4.1 概述

试验方法的研究、试验方法的实现和试验的等效性分析是可关断器件阀运行试验等效机理的3部分内容。该等效机理适用于基于可关断器件阀大功

率电力电子装置的运行试验,本节以基于IGBT组成的模块化多电平换流器(modular multi-level converters, MMC)的VSC-HVDC系统稳态运行试验为例,将等效机理应用于实际中,研究MMC阀的稳态运行试验方法、试验电路和试验等效性分析。

4.2 试验对象分析

可用于构成VSC-HVDC装置的换流器有两种拓扑结构,一种是基于串联IGBT的多电平换流器;一种是基于子模块串联的MMC^[17-19]。以基于MMC的VSC-HVDC为例,型式试验的对象为如图3所示的MMC阀(图中未画出器件的散热器)^[16]。

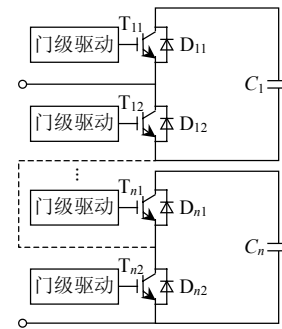


图3 MMC阀结构图

Fig. 3 Structure diagram of MMC valves

图3中: T为IGBT器件; D为续流二极管; C为子模块电容。实际试验中,试品串联的数量需由试验能力的大小来确定。

4.3 稳态试验应力分析及应力数学模型的建立

如果设VSC-HVDC交流侧相电压和相电流的表达式为

$$\begin{cases} u_{ao} = U_N \sin(\omega_N t) \\ i_a = I_N \sin(\omega_N t + \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_N 和 I_N 分别为相电压和相电流的有效值; ω_N 为额定角频率; φ 为电流滞后电压的相位。

同时设 U_{dc} 和 I_{dc} 为VSC-HVDC的直流侧电压、电流的额定值。

参考文献[20-21]中关于MMC阀应力分析的方法,定义常数 m 的表达式为

$$m = \frac{I_N / 2}{I_{dc} / 3} = \frac{3}{2} \cdot \frac{I_N}{I_{dc}} \quad (6)$$

则子模块的电压应力 u_F 为

$$u_F = \frac{U_{dc}}{n} + \Delta u \quad (7)$$

式中: n 为一个桥臂中子模块的数量; Δu 为MMC运行过程中,子模块电容充放电引起的能量波动,并进一步引起的子模块电容电压的波动量,其可由式(8)来表示:

$$\Delta u = \frac{mP_1}{3nC_0U_{dc}\omega_N} \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right)^{3/2} \quad (8)$$

式中： C_0 为子模块电容器的电容值； P_1 为换流站和交流侧之间交换的有功功率。

子模块的电流是一个带直流偏置的交流电流，其中直流偏置的方向与子模块所处的换流站性质和 VSC-HVDC 的运行方式有关。子模块的电流应力 i_F 为

$$i_F = \frac{1}{3}I_{dc} + \frac{1}{2}i_{ac} \quad (9)$$

在正常运行下，如果一个换流站子模块电流中直流偏置为正，则另一端换流站的直流偏置为负。

对于 IGBT 在稳态下 du/dt 和 di/dt 的分析，采用的是估算的办法，由于在开关过程中，可认为电压和电流的上升轨迹是直线，因此可利用电压、电流变化量与时间变化量的比值来估算 du/dt 和 di/dt 。则稳态下阀的 du/dt 和 di/dt 的表达式如式(10)所示。

$$\begin{cases} du/dt = \frac{U_{dc} + \Delta u}{1.25t_r n} + \frac{L_\sigma i_c}{t_f^2} \\ di/dt = 0.8(i_c + I_{rm})/t_r \end{cases} \quad (10)$$

式中： i_c 为 IGBT 的集电极电流； I_{rm} 为续流二极管 (free wheeling diode, FWD) 的反向恢复电流； t_r 和 t_f 分别为 IGBT 的上升和下降时间； L_σ 为换流回路中的杂散电感。

子模块阀的损耗主要是 IGBT 模块，包括 IGBT 通态损耗、开关损耗和 FWD 的平均损耗。通过估算的方法可得到损耗的表达式如式(11)所示。

$$P_F = I_C U_{CE(sat)} + f_c(E_{on} + E_{off}) + I_D U_F \quad (11)$$

式中： I_C 、 I_D 分别为 IGBT 和 FWD 的平均电流； $U_{CE(sat)}$ 和 U_F 分别为 IGBT 和 FWD 对应平均电流下的通态电压； E_{on} 和 E_{off} 分别为 IGBT 单脉冲开通和关断的能量； f_c 为 IGBT 的开关频率。

因此综合式(6)—(10)可以得到 MMC 阀稳态应力的数学模型如式(12)所示。

$$\begin{cases} u = U_{dc}/n + \Delta u \\ i = I_{dc}/3 + i_{ac}/2 \\ du/dt = \frac{U_{dc} + \Delta u}{1.25t_r n} + \frac{L_\sigma i_c}{t_f^2} \\ di/dt = 0.8(i_c + I_{rm})/t_r \\ P = I_C U_{CE(sat)} + f_c(E_{on} + E_{off}) + I_D U_F \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\Delta u = \frac{mP_1}{3nC_0U_{dc}\omega_N} \left(1 - \frac{1}{m^2}\right)^{3/2}$ 。

4.4 稳态试验要求和试验内容分析

稳态试验是为了考察阀对稳态工况下各种应力的耐受性而进行的试验，同时试验还要考察与阀相关电子电路设计的正确性。基于上述稳态运行试验的两个主要目的，可再将稳态运行试验细分为两种试验：最大持续负载运行试验和最小直流电压试验。前者是为了检验阀对稳态工况各种应力的耐受性，后者是为了检验从阀端间电压取能的电子电路在设计的能保证电路正常工作的最小直流电压下是否能够正确动作。

基于不同的试验内容和试验目的，最大持续负载运行试验关键应力包括：阀最大通态电流、阀最大断态电压、阀开通和关断时的最高 di/dt 、 du/dt 及最大开通电流尖峰和关断电压尖峰，此外还包括最高的阀运行温度；最小直流电压试验的关键应力是阀两端的直流电压。

4.5 稳态等效试验方法研究

最大持续运行负载试验方法需使试品阀获得需要再现的基于系统研究所确定的稳态工况下的关键应力，需要操作适当的试验电路以获得与实际运行工况尽可能相近的电流、电压波形，从阀达到稳态运行最大结温开始，运行一个小时后结束试验。需要注意的是，由于 MMC 中电流是带有直流偏置的，且整流站和逆变站子模块中电流的直流偏置方向相反，为了消除用于不同换流站子模块试验电流值的差别，在试验方法上需做一定的调整，即试验电路电流是一个不带直流偏置的标准正弦量，其正向最大值为实际直流偏置为正向时的正向电流最大值；负向最大值为直流偏置为负向时的负向电流的最大值。

最小直流电压试验采取的试验方法为，操作一定的电路使得阀的端电压上升至取能电路的开启电压 U_1 ，取能电路应开始正常工作，而在此之前取能电路控制电源应处于关闭状态。之后将阀的端电压将至 U_2 ，取能电路应退出工作，而在此之前取能电路应处于正常工作状态。之后操作电路将阀电压再上升至 U_1 ，使取能电路正常工作 10 min 之后，结束试验。

4.6 稳态试验电路的设计

通过 1.4 节的分析可知，等效试验方法主要有两种：全载试验方法和合成试验方法。对于晶闸管阀的稳态试验，其实际工况下的工作频率较低，因此使用合成试验方法能够更全面地考核阀对综合

应力的耐受性；而对于可关断器件 IGBT 阀的稳态试验，由于实际工况下其工作频率很高，且对回路中的杂散参数很敏感，如果采用合成试验方法，电路的控制和保护系统及主电路设计会异常复杂；同时由于可关断器件阀在使用中，通常有可以视作是稳定电压源的直流侧大容量电容器。这就决定了在 IGBT 阀的试验中可以利用直流侧大电容和负载电感进行高压谐振来产生大电流，同时利用充电电源对谐振过程中电阻及阀损耗的能量进行补充，这样就可以避免采用分别用两套电源来提供高电压和大电流的合成试验方法。

对于 MMC 的稳态试验，采用全载试验的电路拓扑。试验电路的原理框图如图 4 所示。图 4 中小电流高压电源为直流侧电容器 C 建立高电压，建立起高电压的 C 与负载电感 L 共同产生大电流，通过辅助阀的控制，在试品阀 V_0 上产生试验需要的高电压和大电流。所有设备的控制均有稳态运行试验电路统一控制器完成。

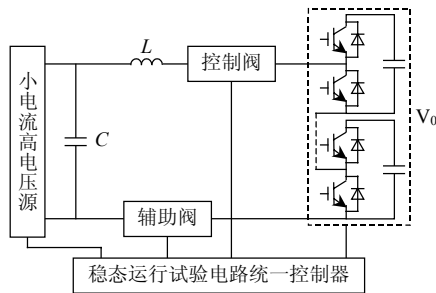
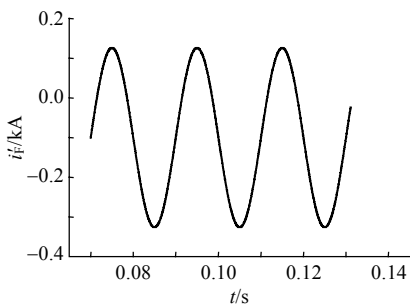


图 4 MMC 阀稳态试验电路拓扑图

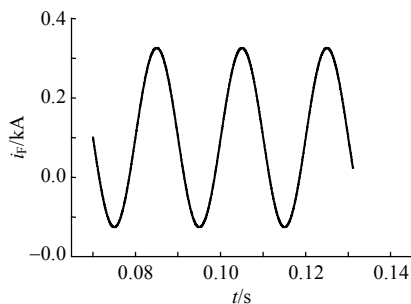
Fig. 4 Structure diagram of the steady state test circuit for MMC valves

可以建立试验电路中阀的稳态应力数学模型：

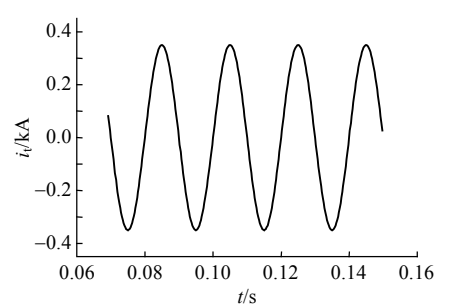
$$\begin{cases} u_t = \sqrt{2}U_{ac} / n' \\ i_t = (\sqrt{2}U_{ac} / \omega L) \sin(\omega t) \\ (du/dt)_t = \Delta u / t_{off} \\ (di/dt)_t = \Delta i / t_{on} \\ P_t = I_{Ct}U_{CE(sat)} + f_C(E_{on} + E_{off}) + I_{Dt}U_F \end{cases} \quad (13)$$



(a) 实际稳态下整流站阀的电流波形图



(b) 实际稳态下逆变站阀的电流波形图



(c) 试验电路中阀的电流波形图

图 6 阀的电流波形对比图

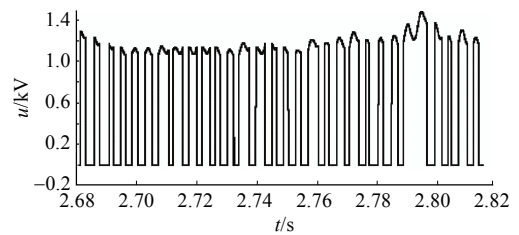
Fig. 6 Contrast of current waveforms of valves

式中： U_{ac} 为小电流高压源的电压有效值； ω 为 L 上电流的角频率； Δu 和 Δi 分别为试验电路中 IGBT 计及电压尖峰和电流尖峰的最大值； t_{on} 和 t_{off} 分别为 IGBT 的开通和关断时间； I_{Ct} 和 I_{Dt} 分别为试验电路中 IGBT 和 FWD 的平均电流； n' 为试品中串联子模块的数量。

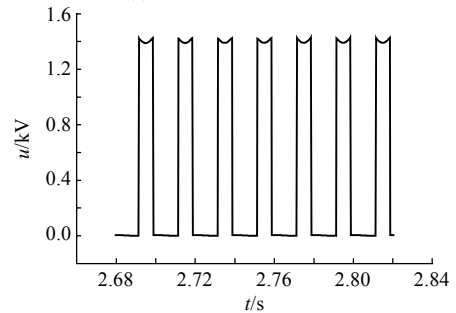
4.7 试验等效性分析

4.7.1 波形对比分析

对实际工况下与试验电路中阀的电压和电流波形分别进行对比如下。电压波形对比如图 5 所示，图 5(a) 为实际稳态下阀的电压波形，图 5(b) 为试验电路中阀的电压波形。



(a) 实际稳态阀的电压波形图



(b) 试验电路中阀的电压波形图

图 5 阀的电压波形对比图

Fig. 5 Contrast of voltage waveforms of valves

电流波形对比如图 6 所示，图 6(a) 为实际稳态下整流站阀的电流波形；图 6(b) 为实际稳态下逆变站阀的电流波形，图 6(c) 为试验电路中阀的电流波形。

试验电路仿真参数如下：直流侧电压 14 kV；

串联子模块数量为 10；负载电抗为 120 mH；负载电流为工频 50 Hz。

4.7.2 数学模型对比分析

将阀在实际工况下的稳态应力数学模型即式(12)和阀在试验电路中的应力数学模型即式(13)进行对比分析如下。

1) 电流的等效。

试验电路的电流为正负最大值相等的正弦波，这样不但可以消除由于试品来自整流站和逆变站的不同所带来试验电流的差别，而且可以实现阀电流与实际工况的等效。

2) 电压的等效。

通过控制试验电路中充电电源电压可以达到控制试品阀子模块电容电压的大小。

对于电容电压波动，在阀试验电路中由于采用了优化的电容平衡控制策略，因此可以实现阀的电压与实际工况的等效。

3) 开通电流尖峰和关断电压尖峰的等效。

由于试验电路中使用了与试品阀性质相同的辅助阀，因此在电流等效的前提下，由于二极管恢复而在对称位置阀上引起的开通电流尖峰参数也可以实现与实际的等效。

阀上出现的关断电压尖峰是由于阀在关断时的 di/dt 作用在主电路杂散电感上引起的，在 di/dt 等效的基础上，且试品是实际工程运行的子模块，因此可以实现阀关断电压尖峰与实际的等效。

4) di/dt 和 du/dt 的等效。

从数学模型的对比上可以看出， di/dt 和 du/dt 是通过电流、电压变化值和变化时间的比值计算的。由于试验中使用的阀与实际相同，其开通和关断时间与实际等效，因此在电流、电压及电流尖峰、电压尖峰等效的情况下，可以实现 di/dt 和 du/dt 与实际的等效。

5) 温度的等效。

阀的温度主要和阀的功耗与散热系统有关。在阀的开关频率等效的基础上，阀的开关损耗与实际等效，但由于采取试验方法的特殊性，阀的通态电流要高于实际，因此在试验电路运行过程中，可以通过阀水冷系统的流量来对阀的温度进行调节，如果流量的调节是以调节阀温度为目的的，则可以认为温度也可以实现与实际的等效。

从对阀在实际工况下与试验电路中的仿真波形及应力数学模型的对比分析中可以得出，阀在所

设计的稳态试验电路承受的五类应力是与实际的等效。

5 结论

1) 研究了可关断器件阀运行试验等效性，包括试验方法、试验方法实现和试验等效性分析 3 部分内容；其中试验方法包括试验对象的确定、阀的应力分析及应力数学模型的建立、试验要求和试验内容的研究和等效试验方法的研究。

2) 试验等效性分析需采用波形对比和数学模型对比相结合的方式，需将仿真得出实际工况下阀应力的波形和试验电路中阀应力的波形进行对比，并结合实际工况阀应力的数学模型和试验电路中阀应力的数学模型进行对比；二者缺一不可。

3) 由于可关断器件阀可控关断的运行特性，以及在实际工况下的开关频率很高、对主电路的杂散参数很敏感的特点，同时基于可关断器件阀实际应用条件的考虑，阀的稳态试验采用的试验方法为全载试验方法，即利用直流大电容与负载电感进行谐振来产生大电流，同时利用单电源对谐振过程中的各种损耗进行能量补充的试验方法。

4) 将可关断器件阀运行试验等效行判别方法应用于基于由可关断器件 IGBT 组成 MMC 的 VSC-HVDC 系统稳态运行试验中，研究了 MMC 阀的稳态运行试验方法、设计了试验电路并对试验方法的等效性进行了分析，验证了等效性判据的正确性。

参考文献

- [1] 赵建军. 静态同步串联补偿器机电暂态及电磁暂态特性研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
Zhao Jianjun. Study on electromechanical and electromagnetic transient performance of static synchronous series compensator [D]. Beijing: Electric Power Research Institute of China, 2005.
- [2] 魏晓光. 电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
Wei Xiaoguang. Research on control strategies of voltage source converter based HVDC and application in wind farm integration system [D]. Beijing: Electric Power Research Institute of China, 2007.
- [3] 王松岑, 于坤山, 汤广福. 动态电压恢复器数字矢量控制方法的性能分析及改进[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 64-71.
Wang Songcen, Yu Kunshan, Tang Guangfu. Performance analysis and improvement of digital vector control algorithm for dynamic voltage restorer[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 64-71(in Chinese).
- [4] 罗湘, 刘兵, 荆平, 等. 动态电压恢复器的检测算法研究[J]. 电力建设, 2008, 29(9): 80-83.

- Luo Xiang, Liu Bing, Jing Ping, et al. Study on inspection algorithm for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(9): 80-83(in Chinese).
- [5] 赵洋, 肖湘宁. 利用 SSSC 阻尼电力系统低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 40-44.
- Zhao Yang, Xiao Xiangning. Damping low frequency oscillation by static synchronous series compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 40-44(in Chinese).
- [6] 王凤川. 电压源换流器式轻型高压直流输电[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 74-76.
- Wang Fengchuan. HVDC light-DC transmission based on sourced converters[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 74-76(in Chinese).
- [7] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电: 一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
- Wen Jun, Zhang Yigong, Han Minxiao, et al. HVDC based on voltage-source converter: a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51(in Chinese).
- [8] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
- Li Gengyin, Lü Pengfei, Li Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Systems, 2003, 27(4): 77-81(in Chinese).
- [9] 汤广福. 2004 年国际大电网会议系列报道: 高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 1-5.
- Tang Guangfu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 1-5(in Chinese).
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC62501-2009 electrical testing of voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current(HVDC)power transmission[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2003: 10-69.
- [11] 贺之渊, 汤广福, 郑健超. 大功率电力电子装置试验方法及其等效机理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 47-52.
- He Zhiyuan, Tang Guangfu, Zheng Jianchao. High power electronics equipment test method and its equivalence mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 47-52(in Chinese).
- [12] 查鲲鹏. 高压阀合成全工况试验装置动态特性的分析研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- Zha Kunpeng. Analysis and research on the dynamic characteristic of the synthetic test equipment for high voltage valves [D]. Beijing: Electric Power Research Institute of China, 2005.
- [13] 贺之渊, 汤广福, 邓占锋, 等. 新型高压晶闸管阀过电流试验回路的建立[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 22-26.
- He Zhiyuan, Tang Guangfu, Deng Zhanfeng, et al. A novel overcurrent test equipment for high voltage thyristor valves[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 22-26(in Chinese).
- [14] 查鲲鹏, 汤广福, 温家良, 等. 灵活用于 SVC 阀和 HVDC 阀运行试验的新型联合试验电路[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 72-75.
- Zha Kunpeng, Tang Guangfu, Wen Jialiang, et al. A new synthetic test equipment for the operational test of SVC and HVDC valves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 72-75(in Chinese).
- [15] 贺之渊. 大功率电力电子组件等效试验方法的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- Zhi-yuan HE. Study on high power electronics component equivalent testing approaches[D]. Beijing: Electric Power Research Institute of China, 2006.
- [16] 罗湘, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 电压源换流器高压直流输电换流阀的试验方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 25-29.
- Luo Xiang, Tang Guangfu, Zha Kunpeng, et al. Test methods of converter valves in VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 25-29(in Chinese).
- [17] Glinka M, Marquardt R. A new AC/AC-multilevel converter family applied to a single-phase converter[C]//IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Singapore, 2003: 662-669.
- [18] Lesnicar A, Marquardt R. A new modular voltage source inverter topology[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Toulouse: EPE, 2003.
- [19] Glinka M, Marquardt R. A new single-phase AC/AC-multilevel converter for traction vehicles operating on AC line voltage[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Toulouse: EPE, 2003.
- [20] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
- Ding Guanjun, Ding Ming, Tang Guangfu, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6(in Chinese).
- [21] Lenicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//IEEE Power Technology Conference. Bologna: IEEE, 2003: 23-26.



罗湘

收稿日期: 2010-11-23。

作者简介:

罗湘(1980), 男, 博士研究生, 研究方向为可关断器件阀试验方法和柔性直流输电技术等, lucky@epri.sgcc.com.cn;

郑健超(1939), 男, 博士生导师, 中国工程院院士, 长期从事高电压技术和能源政策方面的研究, zhengjianchao@cgnpc.com.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)