

华东电网 500 kV 故障电流限制器晶闸管阀浪涌电流试验方法研究

袁洪亮¹, 任孟干¹, 赵东旭², 昃萌¹, 柴斌¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 东北电网公司, 辽宁省 沈阳市 110179)

Surge Current Test of Fault Current Limiter Thyristor Valve in the 500 kV East China Power Grid

YUAN Hongliang¹, REN Menggan¹, ZHAO Dongxu², ZE Meng¹, CHAI Bin¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. Northeast China Grid Company Limited, Shenyang 110179, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: Instead of the conventional method of half fundamental frequency cycle surge current, a test method of continuous fundamental frequency cycles surge current for thyristors was presented. The method was validated by a circuit simulation with mathematics modeling; and the circuit simulation was compared with the result from surge tests on the sample thyristors. The practical value of the selected thyristor through the model of instantaneous junction temperature rise was validated. Based on an application project, the method for simulation and experiment of thyristor valves was presented, and the test results were provided to support the selection and design of thyristor valves. The thyristor valves used in the fault current limiter were simulated with the method of instantaneous junction temperature rise in the 500 kV East China Power Grid. Combining the results of simulation, experiments and artificial ground short circuit test, the paper validates the reliability of 6-inch thyristor in the fault current limiter project.

KEY WORDS: thyristor; junction temperature simulation; surge current test; fault current limiter

摘要: 针对晶闸管浪涌电流试验采用半波 10 ms 浪涌试验方式, 提出连续多周波浪涌的试验方法, 通过数学建模对试验方法进行仿真研究, 同时与晶闸管样品浪涌试验结果进行分析对比, 验证了通过晶闸管结温温升系列模型仿真计算来选择晶闸管阀的实际指导价值。从实际工程角度出发, 给出晶闸管阀仿真和试验的方法, 为晶闸管阀的选择和设计提供了试验结果支持。对华东 500 kV 故障电流限制器示范工程用晶闸管阀进行结温温升仿真, 及人工接地短路试验的结果分析, 验证了 6 英寸晶闸管在故障电流限制器工程中应用的可靠性。

关键词: 晶闸管; 结温仿真; 浪涌电流试验; 故障电流限制器

0 引言

随着电力系统快速发展, 负荷中心大电源投入及系统间互联都会增加系统的短路电流, 如果短路电流超标, 就必须更换相应的设备, 从而需要高昂的费用和较长的工期。由此诞生了故障电流限制器 (fault current limiter, FCL), 为限制大的故障电流提供了一种解决方案。基于电力电子等高速开关技术的非超导型 FCL 由于技术较为成熟、造价相对较低、性能较为优越, 易于在高压系统中实现, 因此, 成为最有潜力甚至是目前唯一可应用在超高压系统中限制故障电流的技术方案^[1-3]。华东电网 500 kV FCL 正是基于这一原理研制, 并且作为科技示范工程已经投入电网运行。对 FCL 来说, 晶闸管阀体的相关技术无疑是其关键技术。由于超高压系统中短路电流较大, 故障时对短路电流限制器阀体的电流冲击水平会很高, 这给晶闸管的制造工艺、元件选型、参数设计以及相关的定型试验都提出了很高的要求, 对于实际超高压 FCL 工程应用的晶闸管的检验方法、相关阀体的试验验证方法都提出了全新的技术要求。阀体开通前要承受高电压, 开通时有大电流的冲击, 何考察阀体耐受短路电流能力是试验的关键问题。国内外现有的阀体试验标准有静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 和高压直流输电 (high voltage direct current, HVDC) 阀试验标准。SVC 和 HVDC 对阀的运行工况: 断态、通态、开通和关断过程 4 个状态均要考核, 以考核阀所耐

受的电压和电流强度。限流器考核除关断过程之外的3个状态,特别是通态和开通过程。根据运行工况分析,FCL 阀体开通过程和通态电流强度比 SVC 和 HVDC 要大很多。文献中有通过半波浪涌电流试验来探索晶闸管机械损伤失效机理^[4],但在实际工程应用中,从可靠性和安全性角度出发,单靠半波浪涌电流测试数据来推断连续多周波浪涌电流通过晶闸管的情况,仍然存在不确定的风险。晶闸管元件厂家提供的技术手册中给出了元件的通态浪涌电流与周波数的关系曲线,但这个曲线并非试验数据曲线,而是通过测试半波浪涌电流耐受能力给出的最大浪涌电流参数,再通过测试元件的等温通态伏安特性曲线、瞬态热阻抗曲线来求出晶闸管的结温温升曲线,根据结温温升曲线来判断剩下周波数的浪涌耐受能力。在这些环节中,模型测试及仿真计算结果的准确性、合理性,伏安特性曲线测试,环境温度以及最终结温温升的判别标准等因素都会对最终结果造成影响,给元件的连续多周波浪涌能力造成了不确定因素。因此有必要做晶闸管元件的连续多周波浪涌能力的测试试验,以便进一步验证元件的浪涌电流通过能力。

文中针对华东电网 500 kV FCL 工程应用的晶闸管阀的试验方法和试验结果进行讨论和分析,通过对试验数据的分析来总结归纳此类 FCL 晶闸管阀的试验方法,从而验证试验的合理性和实用性。

1 华东 500 kV 故障电流限制器工程晶闸管阀体运行工况

FCL 装置的简化结构如图 1 所示。主要组件有限流电抗器、电容器组、晶闸管阀、可控火花间隙、旁路机械开关、金属氧化物限压器(metal oxide varistor, MOV)和阻尼回路等。限流电抗器主要在短路期间起到限流作用;电容器组主要在正常工作

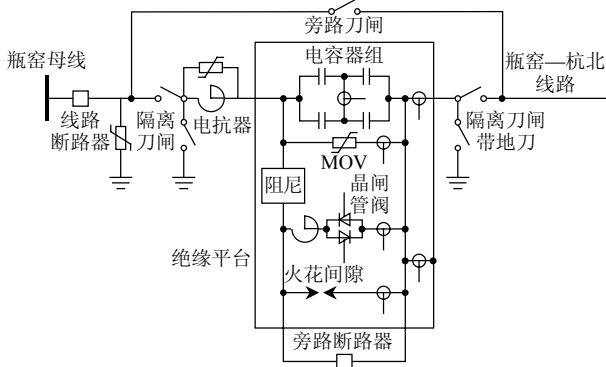


图 1 故障电流限制器结构简图
Fig. 1 Main circuit diagram of FCL

条件下补偿短路限流电抗器感抗,在系统短路期间电容器组被快速旁路,电抗器快速起限流作用;晶闸管阀主要用来旁路电容器组,当发生短路故障后晶闸管阀快速导通,旁路电容器组,使得电抗器起到限流作用;而可控火花间隙、旁路机械开关、MOV 等主要起到辅助后备旁路和保护电容器的作用^[5-6]。

阀体开通前要承受高电压,开通时有大电流的冲击。系统仿真研究表明,系统故障时 FCL 晶闸管相关电流波形如图 2,晶闸管电流峰值为 61 kA,最大冲击电流变化率为 113 kA/ms^[7]。

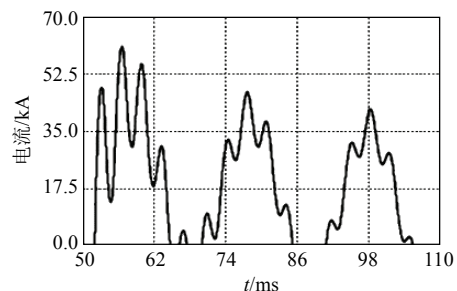


图 2 系统故障时晶闸管电流波形
Fig. 2 Simulation curve of system fault current going through thyristors

2 故障电流限制器用晶闸管电流强度热分析仿真

通过对限流器电磁暂态过程分析,晶闸管阀在开通过程中电流陡度比较大,在导通过程中要承受很大的短路电流。若是旁路断路器故障,晶闸管阀不得不承受 100 ms 的短路电流,直至线路断路器断开。晶闸管阀在导通过程中是正反向轮流导通,无反向恢复过电压。晶闸管阀的热应力是大电流造成的。

阀开通是复杂的物理过程。开通电流陡度很大,扩散速度不均匀,会在导通局部形成很高的电流密度和造成局部温度上升,最终可能会导致硅的损伤和器件失效。阀导通过程中承担大电流,过电流将在晶闸管中产生很高的热量,从而造成晶闸管结温上升^[8]。开通过程的温升计算比较复杂,工程计算一般只考虑导通过程的电流温升。

根据厂家提供的晶闸管通态电压曲线,得到该晶闸管通态电压电热模型及其通态瞬时功耗模型,结合晶闸管结壳热阻抗曲线,依据目前通用的晶闸管热阻抗建模方法^[9]转化成图 3 型式的热阻抗网络模型,图 3 中 $R_i (i=1,2,\dots,n)$ 为热阻, $C_i (i=1,2,\dots,n)$ 为热容,电流源 P_{th} 等效为晶闸管产生的热损耗,电压源 T_c 为假设恒定的壳温, T_a 为等效平均结温。

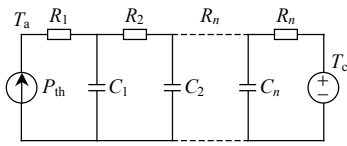


图 3 热阻抗网络模型
Fig. 3 Thermal network

通过这一系列的模型建立，最终可以仿真计算出晶闸管的结温温升^[10-11]。仿真计算中采用 6 英寸晶闸管。当旁路断路器拒动时，晶闸管结温温升变化曲线如图 4 所示。由系统仿真提供最大故障电流数据，将此电流数据导入上述结温仿真模型。依据故障电流仿真分析选择浪涌能力较强的 6 英寸晶闸管作为 FCL 阀体用晶闸管。

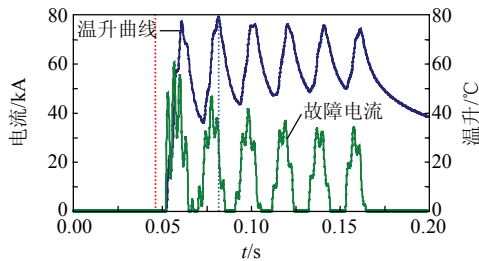


图 4 故障电流下晶闸管结温温升仿真波形
Fig. 4 Simulation curves of thyristor junction temperature rise when the fault current went through

3 晶闸管多周波浪涌电流试验方法

3.1 多周波浪涌试验方案

对于 FCL 阀体来说，主要承受的高电压可以通过选择合适的晶闸管串联层数来满足要求，而故障电流往往强度很大，超过一般 SVC、可控串联电容器补偿(thyristor controlled series compensation, TCSC)及 HVDC 的电流强度，对于所选晶闸管来说是个很大的考验。晶闸管生产厂家仅提供半波浪涌实测数据显然不能满足要求。因此有必要设计晶闸管元件的连续多周波浪涌电流的测试试验，以便进一步验证元件的浪涌电流通过能力。

根据目前试验条件，不能够真实模拟实际工况或仿真出的电流电压条件，针对大电流浪涌试验，尤其多周波的大电流浪涌试验只能提供近似等幅值电流的试验条件。另外，根据系统仿真结果来看，故障电流是一个衰减的电流，第一个周波的峰值很大，为 61 kA，后续周波逐渐衰减，但从工程可靠安全角度考虑试验，需要有一定的安全裕度，这样模拟试验方案采用等幅值浪涌电流，其浪涌能量不小于系统仿真最大故障电流的浪涌能量。图 5 为元件厂家提供的通态浪涌电流与周波数关系曲线，该

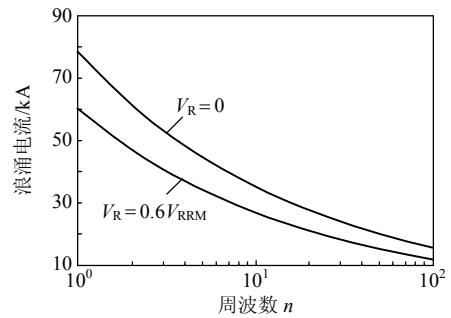


图 5 通态浪涌电流与周波数的关系曲线
Fig. 5 On-state surge current vs. number of pulses (half-sine wave, 10 ms, 50 Hz)

曲线根据半周波浪涌试验数据推算绘制，图中 V_R 为反向电压， V_{RRM} 为反向重复峰值电压。

从图 5 的曲线得知，阀端电压为零时，可耐受 61 kA 10 ms 的浪涌电流 2 次，耐受 50 kA 10 ms 的浪涌电流 3 次，耐受 45 kA 10 ms 的浪涌电流 5 次。试验选取正反并联 6 英寸晶闸管 1 对 3 组，共 6 只元件，元件为随机抽取不同批次生产的晶闸管。试验测试方案如表 1 所示。试验中每次试验间隔在 1 h 以上，保证晶闸管充分冷却，第 1 次和第 2 次为测试试验，第 3 次为检测元件最大浪涌能力的破坏性试验。每次试验结束后，对晶闸管的基本参数进行检测以确定试验中是否损坏。试验中设计 400 ms 的浪涌电流试验是为了工程可靠性需要，留有一定裕度以考察元件的最大浪涌能力。

表 1 晶闸管组件试验项目
Tab. 1 Test items of thyristors

组件号	元件编号	第 1 次		第 2 次		第 3 次	
		电流峰值/kA	试验时间/ms	电流峰值/kA	试验时间/ms	电流峰值/kA	试验时间/ms
A	1	45	100	45	400	70	100
	2	45	100	45	400	70	100
B	3	45	100	50	100	50	400
	4	45	100	50	100	50	400
C	5	45	100	61	100	50	400
	6	45	100	61	100	50	400

试验台由 3 台感应调压器并联和 3 台 380 V/36 V 的变压器并联组成，额定最大输出电流有效值为 80 kA，试验原理如图 6 所示，试验现场布置如图 7 所示。

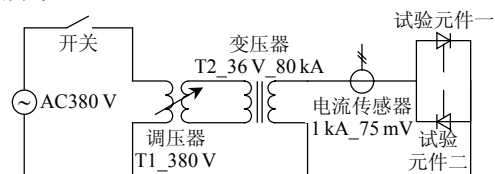


图 6 多周波浪涌试验原理图
Fig. 6 Schematic diagram of continuous fundamental frequency sine cycles surge current test circuit

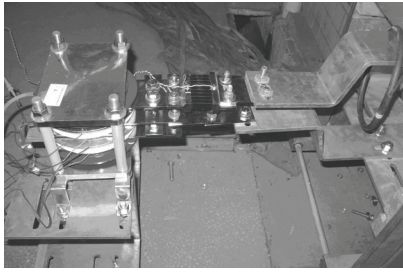


图7 多周波浪涌试验现场

Fig. 7 Continuous fundamental frequency sine cycles surge current test scene

3.2 元件多周波浪涌试验方案仿真

依据表1试验方法顺序,利用前面提到的结温温升仿真方法,通过晶闸管等温通态伏安特性曲线、瞬态热阻抗曲线来仿真计算出晶闸管结温温升曲线,如图8所示(纵坐标温度起始点 0°C ,时间为0时刻)。

从上述仿真来看,45 kA 100 ms 浪涌电流导致晶闸管最高结温升为 95°C ,与根据系统仿真故障电流计算出的晶闸管结温温升 80°C 接近,并有一定裕度。此类型晶闸管最高运行结温为 90°C ,对于FCL来说,阀体导通时间在100 ms以内,这样最高结温可以适当高些。对于故障电流限制器用6

英寸晶闸管来说,其N基区的杂质浓度为 10^{13}cm^{-3} 数量级,只要N基区的本征载流子浓度达到杂质浓度的2倍,按照半导体物理中突变结理论进行估算,晶闸管阻断电压只有额定电压的60%。另外,硅本征载流子浓度在 170°C 时就已达到 10^{14}cm^{-3} 数量级。很显然,在脉冲负半周,结温只有低于 170°C 时才可能保证晶闸管承受60%额定电压不至于损坏^[12]。假定试验环境晶闸管结温初始温度为 25°C ,那么在上述方案中,61 kA 100 ms、70 kA 100 ms 浪涌电流和50 kA 400 ms 浪涌电流通过晶闸管时,试验过程中有可能出现晶闸管损坏的情况,但考虑电流源输出电压较低,达不到晶闸管额定电压的60%,这样对于61 kA 100 ms 浪涌电流通过晶闸管来说,从仿真来看,虽结温超过 170°C ,但短时间内不会引起晶闸管热击穿。对于大功率晶闸管来说,尤其是6英寸晶闸管,盘面很大,门极触发功率、触发脉冲上升速率以及盘面电流扩散速率都会影响到晶闸管硅片的局部结温,如果局部结温上升过快,则会导致晶闸管热击穿^[13]。一般来说,晶闸管硅片面积越大,其持续工作的结温越低。对于中小功率的晶闸管,工作结温一般为 125°C ,瞬时

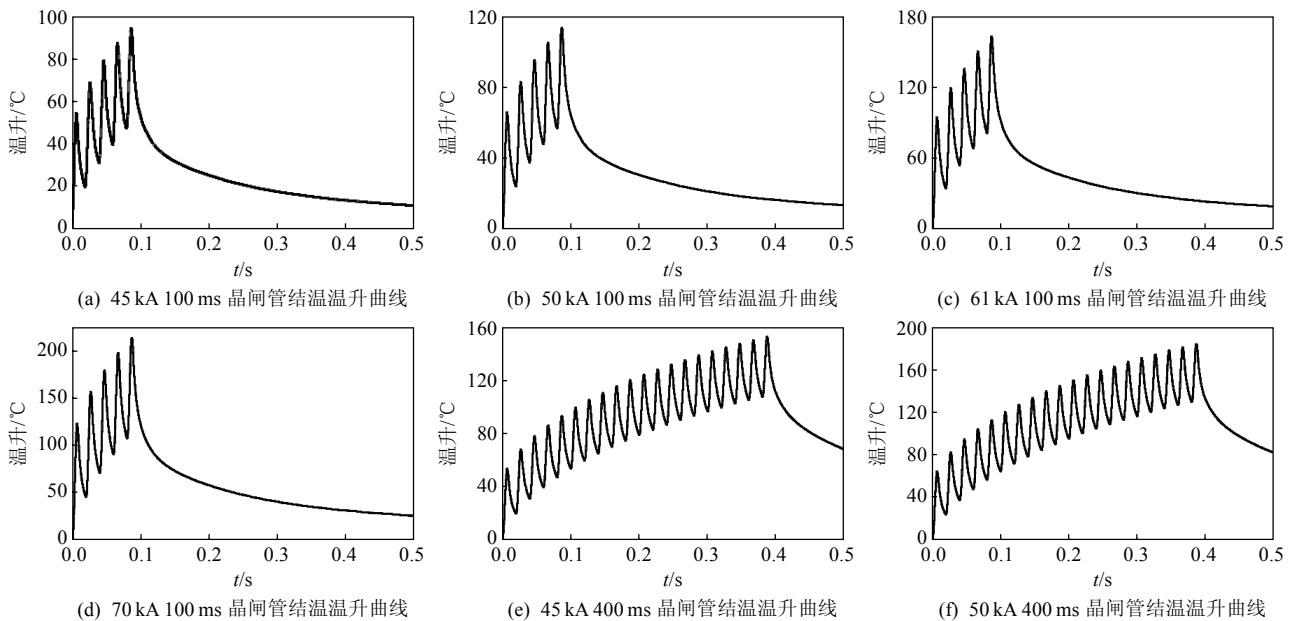


图8 多周波浪涌电流试验晶闸管结温温升仿真

Fig. 8 Simulation curves of thyristor junction temperature rise according to the continuous fundamental frequency sine cycles surge current test

结温达到 200°C 都不会导致其热击穿^[14-15]。

4 元件浪涌电流试验结果分析

按照上述试验方案,随机抽取不同批次晶闸管配对组装进行试验。由于实际试验电源输出的电流

是由调压器及机械开关控制,其精度受到一定的影响,经过预调整后,基本满足要求。试验时环境温度为 30°C 。试验波形如图9所示,其中 I_a 为浪涌电流, U_a 为阀端电压。

按照试验方案,第1次测试试验了A、B、C3组

晶闸管，经过对晶闸管基本参数的测定，所有 3 组晶闸管全部通过测试，通过电流在 44.3~45.2 kA 之间，通流时间在 104~122 ms 之间，波形见图 9。第 2 次测试，通过浪涌电流 48.4 kA 持续时间 383 ms，波形见图 10(a)，通过测试；通过浪涌电流 52.8 kA 持续时间 106 ms，波形见图 10(b)，通过测试；通过浪涌电流 59.8 kA 持续时间 118 ms，波形见图 10(c)，通过测试。在后续测试中，67.3 kA 持续时间 109 ms，波形见图 10(d)，有一只晶闸管损坏；49.4 kA 持续时间 450 ms，波形见图 10(e)，有一只晶闸管损坏；53 kA 持续时间 379 ms，波形见图 10(f)，有一只晶闸管损坏；在第 3 次测试试验中，每组都有一只晶闸管损坏，由于晶闸管是正反配对并联的，一旦有一只击穿短路就保护了另外一只，

这样第 3 次测试中 3 组晶闸管都没有通过试验测试。图 10(e)和图 10(f)中电流 I_a 的最后 3 个周波比前面的浪涌电流要大，电源输出容量一定，电流变大，说明此时晶闸管已经击穿。

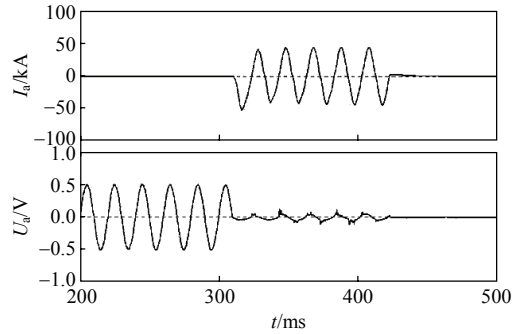


图 9 44.3 kA 112 ms 浪涌电流测试波形
Fig. 9 Waveforms of surge current test (44.3 kA 112 ms)

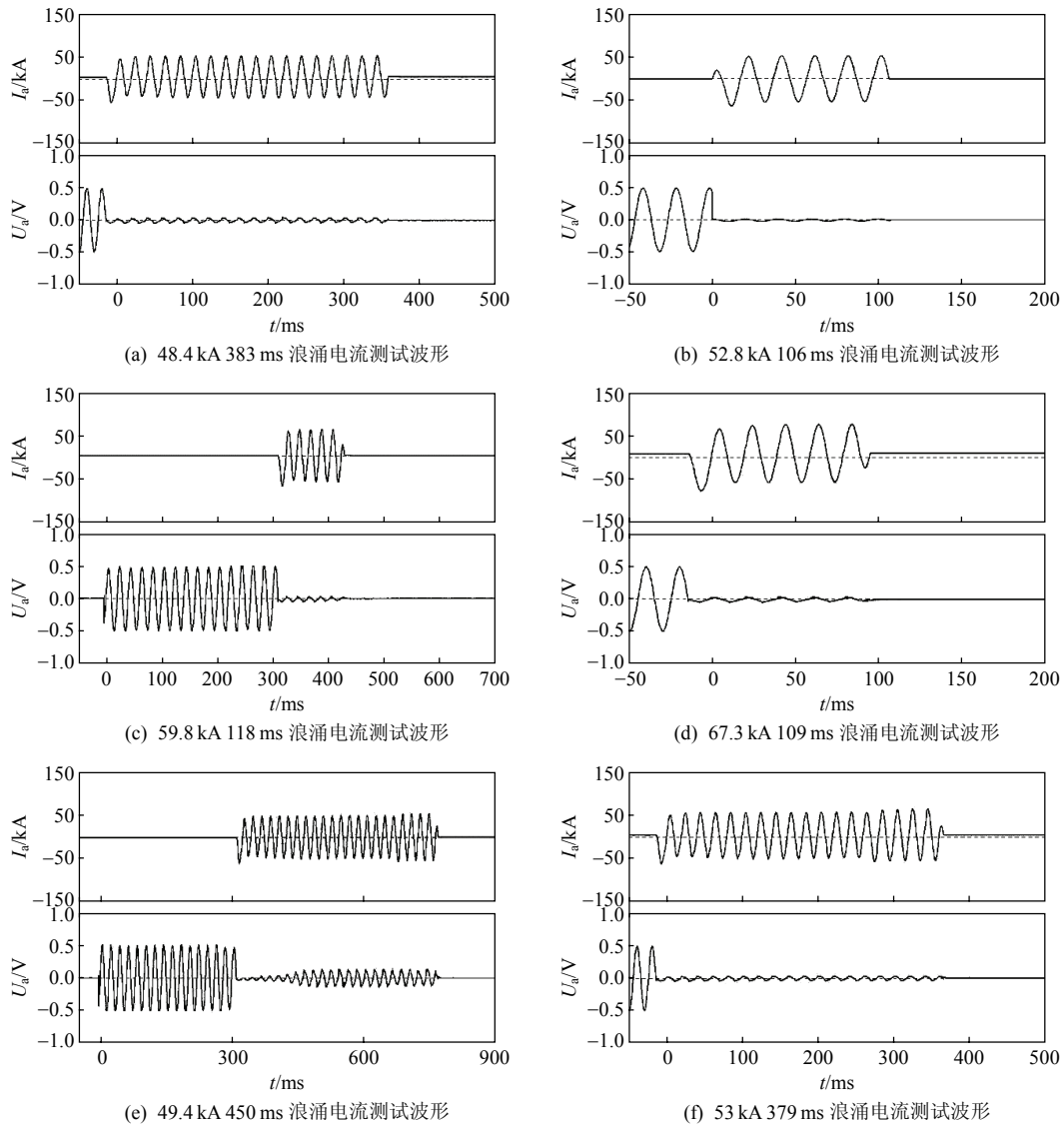


图 10 晶闸管多周波浪涌电流试验波形

Fig. 10 Waveforms of thyristor continuous fundamental frequency sine cycles surge current test

综上所述,试验的结果吻合了预先设定试验方案后的晶闸管结温温升仿真结果,说明仿真计算以及采用的计算模型的参考价值比较强。在晶闸管结温温升仿真计算中,最高结温温升在 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的晶闸管通流试验均通过,如果考虑仿真计算中出现的偏差,则仿真计算结温温升在 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,对于FCL工程晶闸管阀体设计具有实际指导意义。

5 故障电流限制器示范工程现场试验

2009年12月24日,在华东瓶窑 500 kV 变电站对故障电流限制器示范工程进行了包括人工接地短路试验的多项系统试验,在短路试验后晶闸管阀经过测试功能完好,完全符合设计要求。

图11为FCL示范工程现场录波图,记录了在人工接地短路后,晶闸管阀通过约 43 ms 的故障电流的波形,属于正常动作。正常情况下,晶闸管阀同与之并联的旁路断路器同时收到动作信号,由于旁路断路器依靠机械机构开断,一般至少延迟于晶闸管阀2个周波后关合。在晶闸管阀设计和试验过程中,考虑了旁路断路器失灵线路保护动作跳线的情况,所以试验方法中主要考虑了晶闸管连续5周波浪涌电流试验。通过实际工程短路试验及前面多周波浪涌电流试验测试,进一步验证了6英寸晶闸管阀在故障电流限制器装置中应用的优越性。

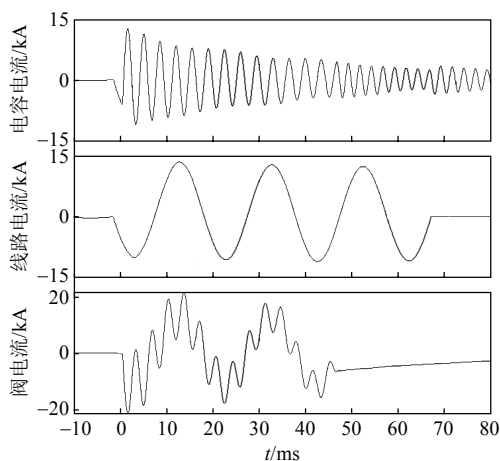


图11 人工接地短路试验录波波形

Fig. 11 Waveforms of artificial ground short circuit test

6 元件浪涌试验方法的改进

传统的元件浪涌电流测试方法为正弦半波 10 ms 浪涌电流测试法,由其在浪涌电流结束时是否立即给元件施加反压分为2种方式,但均为单次半波浪涌电流测试方式。由于测试设备内冲击发生

器充电时间的限制,2次半波浪涌电流之间最小发生间隔在 1 min 以上,通过仿真计算可知第2次浪涌冲击时,晶闸管的结温已比较接近第一次冲击前的初始值,这样的中断使得晶闸管的结温无法连续累积。在实际工程应用中往往通过的浪涌电流在2个周波以上,依靠单次半波浪涌电流测试数据推算连续多周波浪涌电流的方法存在一定风险。由于传统浪涌电流测试方法的局限性,可在晶闸管常用浪涌测试方法的基础上,补充以下连续多周波浪涌电流试验方法作为元件型式试验的一部分:

第1步:抽取元件随机配对组合。

第2步:参照单次半波浪涌试验数据给出类似图5的浪涌电流与周波数关系初图。

第3步:确定试验方案中浪涌电流测试时间,选取5个周波(100 ms),10个周波(200 ms),20个周波(400 ms)3个点进行测试。

第4步:针对3个关键测试点,结合第2步绘制的初图确定相对适合的浪涌电流测试值,完善测试方案。

第5步:按照测试方案对元件组进行浪涌电流测试,并记录测试数据。

第6步:汇集3个关键点数据对浪涌电流与周波数关系初图进行修正得到最终试验数据图。

7 结论

通过对FCL用晶闸管的连续多周波浪涌试验方案设计、仿真探讨、实际试验结果分析及工程应用短路试验结果的分析表明,利用晶闸管结温仿真模型得到的结温边界同实际试验结果吻合较好,说明仿真计算以及采用的计算模型有较好的参考价值。通过系统仿真故障电流数据,进一步仿真计算获取的晶闸管结温温升与实际试验仿真结温温升对比,结合试验结果分析得出,FCL工程所选6英寸晶闸管在工程应用方面有着较大的裕度。通过连续多周波浪涌试验方案的设计和试验,探索了多周波浪涌试验的方法,建议晶闸管生产厂家不只是对晶闸管做半周波的浪涌试验,在型式试验方面进一步探讨进行连续多周波浪涌试验,为用户多用途广泛应用晶闸管提供更多的试验数据。上文针对晶闸管连续多周波浪涌试验方法的探讨不仅仅局限于FCL工程用晶闸管阀,对类似跟开关并联合用的晶闸管阀,如可控并联电抗器、固态复合开关等相关工程用晶闸管阀都具有一定的实际指导意义。

致 谢

本文中实验方案的制定和实验数据的测量记录工作是在株洲南车时代电力电子事业部彭力湘、熊辉等工作人员的大力支持下完成的, 在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 武守远, 荆平, 戴朝波, 等. 故障电流限制技术及其新进展[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 23-32.
Wu Shouyuan, Jing Ping, Dai Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 23-32(in Chinese).
- [2] 李品德, 刘军虎, 王永红, 等. 电力系统故障电流限制器的应用和研制现状[J]. 高压电器, 2000(3): 31-36.
Li Pinde, Liu Junhu, Wang Yonghong, et al. The application and development of fault current limiter on power system[J]. High Voltage Apparatus, 2000(3): 31-36(in Chinese).
- [3] Xue Pinggu, Zhi Longyang. Influences of resistor type super conducting fault current limiter on power system transient stability with asymmetrical short circuit faults[J]. Electronic Science and Technology of China, 2008, 6(2): 101-107.
- [4] Andrei, Silard P. High-temperature physical effects underlying the failure mechanism in thyristors under surge conditions[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, 9(9): 1334-1340.
- [5] 张天凤, 李鹏, 何增科, 等. 一种新型故障电流限制器的原理研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 56-64.
Zhang Tianfeng, Li Peng, He Zengke, et al. Simulation study of novel fault current limite[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(8): 56-64(in Chinese).
- [6] 娄杰, 李庆民, 肖茂友, 等. 基于快速开关的串联谐振型故障电流限制器的仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 80-83.
Lou Jie, Li Qingmin, Xiao Maoyou, et al. Simulation of an series resonant type FCL based on fast transfer switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 80-83(in Chinese).
- [7] 林集明, 项祖涛, 申洪. 华东 500 kV 超高压电网故障电流限制器基本设计与保护控制研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
Lin Jiming, Xiang Zutao, Shen Hong. Basic design and study on protection control of the fault current limiter in east china 500 kV power grid[R]. Beijing: China Electric Power Reseach Institute, 2007(in Chinese).
- [8] Bencic Z, Besic A, Damjanic F, et al. Estimation of transient thermal impedance for constant current of a power thyristor using temperature field calculation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices. 1993, 40(10): 1885-1887.
- [9] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 大功率晶闸管热阻抗分析方法的 研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 1-6.
Lan Yuanliang, Tang Guangfu, Yin Yonghua, et al. Study on analysis methods of thyristor thermal Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 1-6(in Chinese).
- [10] Profumo F, Tenconi A, Facelli S, et al. Instantaneous junction temperature evaluation of high-power diodes (thyristors) during current transients[J]. IEEE Transactions on Power electronics, 1999, 14(2): 292-299.
- [11] Schröder S, De Doncker W R. Physically based models of high power semiconductors including transient thermal behavior[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 231-235.
- [12] 彭勇殿, 李世平, 黄建伟, 等. 高压直流输电系统故障电流下晶闸管的温升计算[J]. 变流技术与电力牵引, 2008(1): 20-23.
Peng Yongdian, Li Shiping, Huang Jianwei, et al. Thyristor's temperature rising calculation in fault current conditions for HVDC systems[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2008(1): 20-23(in Chinese).
- [13] 维捷斯拉夫. 本达, 约翰. 戈沃, 邓肯. 格兰特. 功率半导体器件理论及应用[M]. 吴郁, 张万荣, 刘兴明, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 302-331.
Benda V, Gowar J, Grant D A. Power semiconductor devices: theory and applications[M]. Wu Yu, Zhang Wanrong, Liu Xingming, Translating. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 302-331(in Chinese).
- [14] keda S, Tsuda S, Waki Y. The current pulse ratings of thyristors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1970, 9(9): 690-693.
- [15] Cepek M. Novel techniques and procedures for the assessment of fault current withstand capability of power thyristor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 2(3): 323-328.



袁洪亮

收稿日期: 2010-12-02。

作者简介:

袁洪亮(1974), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力电子技术及柔性输电技术, holy@epri.sgcc.com.cn;

任孟干(1974), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析及柔性输电技术, renmg@epri.sgcc.com.cn;

赵东旭(1972), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析及电力系统自动化;

昞萌(1981), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性输电技术;

柴斌(1976), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性输电技术及无功补偿装置。

(编辑 胡琳琳)