

用于光控阀改造的壳式电抗器的设计及验证

杨帆, 黄华, 郑力, 刘磊

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 常规直流换流阀中每个阀模块都包含有至少一台饱和电抗器, 其作用是保护晶闸管不被过大的电流电压变化率损坏。目前工程中应用的饱和电抗器主要有芯式和壳式两种结构, 分别应用于光控型和电控型换流阀中, 但芯式电抗器由于设计问题在工程中曾出现铁心下沉、接口漏水等故障, 而壳式电抗器则表现为稳定可靠, 因此研制完全可替代的壳式电抗器用于光控阀改造十分关键。首先对新壳式电抗器的结构安装、电气及水路连接进行了设计, 使其完全兼容光控阀, 随后基于芯式和壳式两种饱和电抗器的等效电气模型进行仿真对比, 并分析模型及参数对于输出特性的影响规律, 从而得出新壳式电抗器的主要参数设计原则, 最后对新壳式电抗器进行了铁心测温及可替代性验证, 试验结果表明, 新壳式电抗器发热合理, 对晶闸管保护作用较芯式电抗器更优, 满足光控阀改造需求。

关键词: 芯式电抗器; 壳式电抗器; 幅频/相频特性对比分析; 铁心测温; 合成回路试验

Design and verification of shell reactor for retrofit of light triggered thyristor valve

YANG Fan, HUANG Hua, ZHENG Li, LIU Lei

(Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In LCC valve, each module contains at least one saturable reactor (SR), which protects the thyristors from being damaged by excessive di/dt and dV/dt . There are two types of SR called core-type and shell-type, which are used in LTT and ETT valves respectively. However, due to design defects, iron core sinking and water leakage had occurred in few core-type SRs, while shell-type SRs are more reliable. Therefore, it is very important to develop new shell-type SR for replacement of core-type SRs in LTT valve. Firstly, the structural installation, electrical and water connections of the new shell-type SR are designed to make it fully compatible with LTT valve. Secondly, The influence law of the model and parameters on the output characteristics is analyzed, and the design principle of the main parameters of new shell-type SR is obtained. Finally, iron core temperature measurement and substitutable verification of the new shell-type SR are carried out. The test results show that the new shell-type SR has reasonable heating and better protection for thyristor, which can meet the needs of LTT valve retrofit.

Key words: core-type reactor; shell-type reactor; amplitude-frequency/phase-frequency characteristic comparative analysis; core temperature measurement; synthetic circuit test

0 引言

在直流换流阀 (Line Commutated Converter, LCC) 中用于保护晶闸管元件的重要设备, 其作用主要包括^[1]: 限制晶

闸管开通时的 di/dt ；限制晶闸管关断时的 di/dt ；降低反向恢复电荷；抑制反向过冲；抑制电流过零时的振荡涌流^[2]，抑制冲击电压下晶闸管的 dV/dt 等。

不同制造商在设计换流阀时技术路线不同，因此对于饱和电抗器的设计思路也不同。某著名厂商所设计的饱和电抗器采用芯式结构，主要应用于其生产的光触发晶闸管换流阀（简称光控阀）中。芯式电抗器通过两个方形框架将铁心线圈固定，内部采用多条水路并联，结构复杂，水接头数量超过20个。一些芯式电抗器在运行过程中因长期振动出现铁心下沉、硅钢片脱落的现象，除此之外，还出现过起漏水故障，从而影响直流运行。

目前除芯式电抗器外，壳式电抗器也在LCC中广泛应用，其采用缓振材料将线圈铁心填充在外壳内，水路采用串联结构，结构稳固，振动小，水接头数量少，在直流工程中运行多年未出现过故障。虽然常规壳式电抗器设计合理，但是机械、电气结构和芯式电抗器差异明显，且从未在光控阀中和其他部件配合应用，因此无法直接对芯式电抗器进行替换。

为解决现有光控阀工程的芯式电抗器问题，本文做了如下工作：①提出一种新的壳式电抗器，在保留传统壳式电抗器结构优势的基础上，针对光控阀模块的结构安装、电气水路连接等进行了改进设计，使其可以完全兼容替换原芯式电抗器；②分析两种不同电抗器电气模型输出特性差异，研究各参数对特性的影响规律，得出新壳式电抗器电气主参数选取原则，指导电抗器设计；③对新研制的壳式电抗器进行铁心散热性能及核心电气功能全面测试，验证了整体设计可靠性以及对光控阀晶闸管保护作用的有效性。

1 整体结构设计

1.1 结构安装

原芯式电抗器的安装方式为：将位于两个方形框架两侧的4个安装孔通过绝缘子固定在屏蔽罩及金属横梁上，芯式电抗器外形图如图1所示。

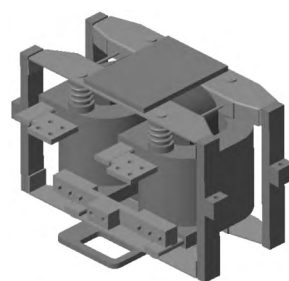


图1 芯式电抗器外形图

Fig. 1 Outline drawing of core-type reactor

而壳式电抗器的安装方式为：先将其安装在底板上，再将底板固定在金属横梁上，如图2所示，该安装方式无法和光控阀模块连接。

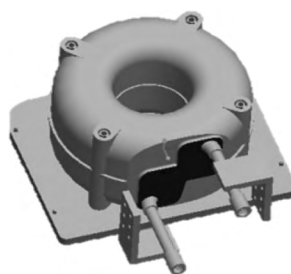


图2 壳式电抗器外形图

Fig. 2 Outline drawing of shell-type reactor

新壳式电抗器采用成对设计，左右两台电抗器结构不完全相同，成对安装在换流阀中芯式电抗器的位置，如图3所示。新壳式电抗器采用立式安装，安装结构设计在外壳的两个侧面，利用热固性树脂的模具一次热压成型，确保了安全尺寸在公差范围内，既提高了电抗器支撑的机械强度，又有利于电抗器的安装。

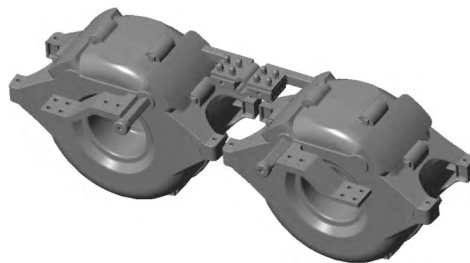


图3 新壳式电抗器结构示意图

Fig. 3 Schematic of new shell-type reactor

1.2 电气连接

由于新壳式电抗器采用立式安装，其线圈出线位置相对原壳式电抗器进行了调整，将其中一

端移至电抗器侧面，相邻两台电抗器通过各自侧面出线进行连接。另一端出线采用“Z”字形连接母线，可以在不更换原光控阀内连接母线的情况下实现电气连接。

1.3 水路设计

光控阀模块采用并联水路设计，如图4所示。

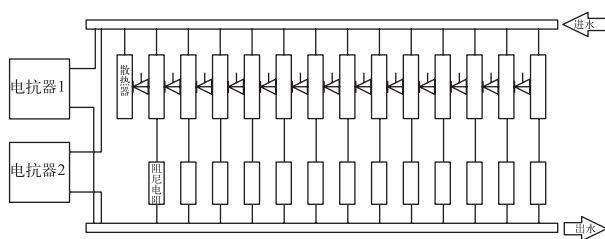


图4 光控阀水路示意图

Fig. 4 Schematic of water circuit of LTT valve

传统壳式电抗器线圈内径较大，其流阻显著小于芯式电抗器，若直接用于光控阀改造，则壳式电抗器将因为水阻小而通过较多流量，导致晶闸管级冷却流量不足而结温过高。

为使改造后阀模块流量分布和改造前保持一致，在新壳式电抗器内部设计专门的水路阻尼器，该阻尼器内径明显小于主线圈，和主线圈串联后可增大整体水阻。整体流量减小后，壳式电抗器铁心温度将升高，为增加铁心散热，将水路阻尼器安装在电抗器的内环中紧贴各铁心，及时将铁心的磁滞损耗及涡流损耗产生的热量带走，保护铁心不过温。壳式电抗器水路示意图如图5所示。

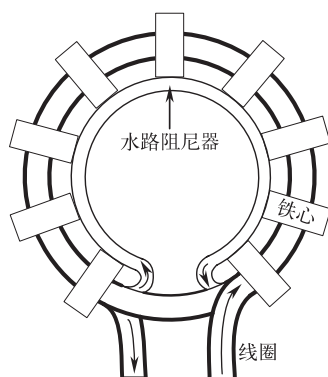


图5 壳式电抗器水路示意图

Fig. 5 Schematic of water circuit of shell-type reactor

整个电抗器仅采用4个水路接口，远少于芯式电抗器的近20个，漏水风险大大降低，提高了壳式电抗器运行的可靠性。

通过上述设计，新壳式电抗器在空间上可实现对原芯式电抗器的完全替代，无须改动光控阀内其他任何部件，实现了改造替换的简化高效。

2 电气主参数设计

饱和电抗器的电气参数和其保护作用息息相关，为确保新壳式电抗器安装在光控阀中，对于晶闸管的保护作用及其他影响同原芯式电抗器基本一致，需对新壳式电抗器的主要电气参数进行研究。

饱和电抗器是一个高度非线性电气元件，为详细研究各项主电气参数对饱和电抗器特性的影响，采用等效电路模型研究两种不同饱和电抗器的幅频/相频特性，根据饱和电抗器主要作用并结合光控阀特点确定新壳式电抗器主要电气参数的选择原则。

两者等效电路如图6所示^[3-4]。图6中， L_H 为主电感； R_{CU} 为铜损等效电阻； R_W 为铁心损耗等效电阻； L_0 为饱和电感； L_S 为阻尼电感； R_S 为阻尼电阻； C_0 为端间杂散电容。

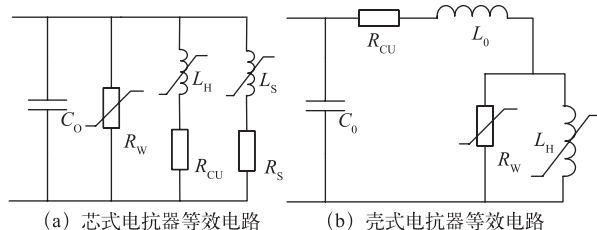


图6 两种电抗器的等效电路图

Fig. 6 Circuit diagram of the two types of reactors

两种等效电路的传递函数为

$$\begin{cases} G_a(s) = \frac{R_W(R_{CU} + L_H s)}{R_W + R_{CU} + L_H s} // \frac{1}{C_0 s} \\ G_b(s) = (R_{CU} + L_0 s + \frac{R_W L_H s}{R_W + L_H s}) // \frac{1}{C_0 s} \end{cases} \quad (1)$$

由于饱和电感 L_0 远小于主电感 L_H ，同时铜损等效电阻 R_{CU} 远小于铁心损耗等效电阻 R_W ，因此忽略 L_0 和 R_{CU} ，简化后的传递函数为

$$\begin{cases} G_a(s) = \frac{R_W L_H s}{R_W + L_H s} // (R_S + L_S s) // \frac{1}{C_0 s} \\ G_b(s) = \left(\frac{R_W L_H s}{R_W + L_H s} \right) // \frac{1}{C_0 s} \end{cases} \quad (2)$$

首先,为观察两种模型本身差异对输出特性的影响,将主要参数均设置为:主电感 $570 \mu\text{H}$;铁损等效电阻 1900Ω ;端间杂散电容 33 pF ;其余参数按照典型工程中的典型值设置。两种饱和电抗器的输出幅频和相频特性曲线如图7所示^[5]。

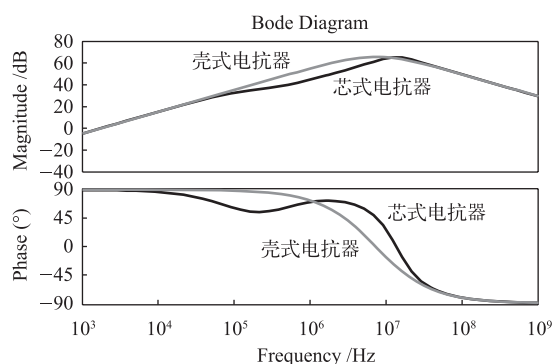


图7 输出特性对比(所有参数相同)

Fig. 7 Characteristic comparison (same parameters)

由图7可知:在主要参数一致的情况下,两种饱和电抗器在低频段($<10 \text{ kHz}$)和高频段($>1 \text{ MHz}$)的输出特性完全一致,中频段($10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$)芯式电抗器模型中的阻尼电阻和阻尼电感特性存在一定差异。

在明确模型差异对输出特性带来的影响之后,进一步分析主电感 L_H 、铁心损耗电阻 R_{CU} 和端间杂散电容 C_0 对输出特性的影响。每次分析只修改一项参数,其他参数不变,可得到这一项参数的影响效果。因为分析的目的在于指导壳式电抗器的参数设计,因此只针对壳式电抗器修改参数。

需要注意的是,电压时间面积决定对晶闸管开通时的保护时间,由于改造前后晶闸管未变,所以电压时间面积必须保持相同,在本文中不再进行分析对比。

2.1 主电感 L_H 不同

将壳式电抗器 L_H 增大2倍,其余参数不变,

特性曲线对比如图8所示。

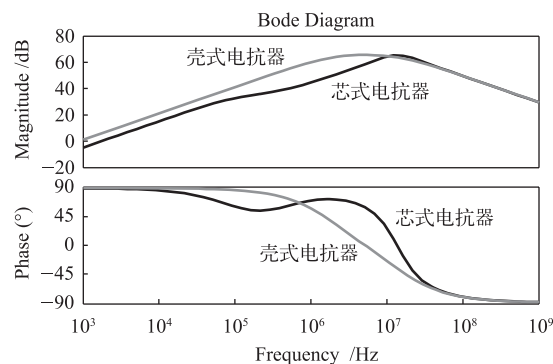


图8 输出特性对比(L_H 不同)

Fig. 8 Characteristic comparison (different in L_H)

由图8和图7对比可知: L_H 主要影响饱和电抗器输出特性的低频段($<10 \text{ kHz}$),主电感越大,幅频特性输出越大,相频特性并未随 L_H 发生明显改变。

2.2 铁心损耗电阻 R_{CU} 不同

将壳式电抗器 R_{CU} 增大2倍,其余参数不变,特性曲线对比如图9所示。

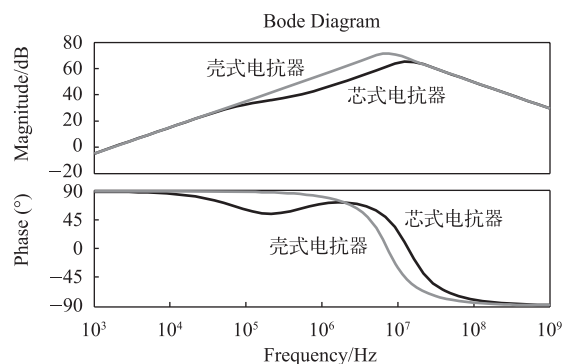


图9 输出特性对比(R_{CU} 不同)

Fig. 9 Characteristic comparison (different in R_{CU})

由图9和图7对比可知: R_{CU} 主要影响饱和电抗器输出特性的中频段($10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$),铁心损耗电阻越大,幅频特性输出越大,相频特性并未随 R_{CU} 发生明显改变。

2.3 端间杂散电容 C_0 不同

将壳式电抗器 C_0 增大2倍,其余参数不变,特性曲线对比如图10所示。

由图10可知: C_0 主要影响饱和电抗器输出特性的高频段($>1 \text{ MHz}$),端间杂散电容越大,电

抗器幅频特性输出越小，相频特性更偏容性。

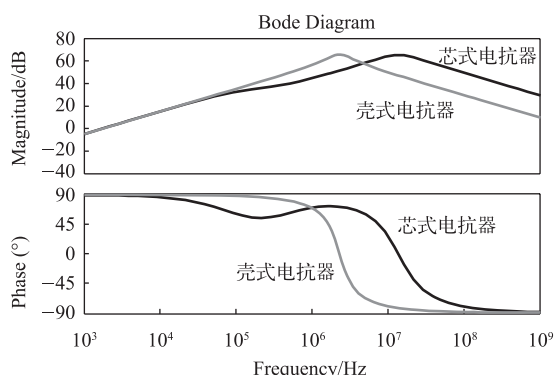


图 10 输出特性对比 (C_0 不同)

Fig. 10 Characteristic comparison (different in C_0)

2.4 新壳式电抗器电气参数设计原则

由于饱和电抗器的最主要作用是对开通暂态过程中的晶闸管进行保护，换流阀中晶闸管开通频率为 50 Hz，因此替换前后饱和电抗器在低频段的输出特性应保持相同；对于中高频段 (> 10 kHz)，光控阀专门设计有阀段均压电容，并联于每个阀模块，其电容值远大于饱和电抗器的端间杂散电容 C_0 ，因此可以大大减小 C_0 对中高频段 (> 10 kHz) 输出特性的影响。

基于上述仿真结果及分析，对于光控阀改造用新壳式电抗器，其电气参数选取原则为：保持主电感 L_H 和电压时间面积与原芯式电抗器相同，其他各项参数在设计和工艺能力范围内尽量优化，无须对标原芯式电抗器。

3 壳式电抗器应用可行性验证

根据结构及电气参数设计研制出新壳式电抗器后，需要对功能及性能进行测试，以验证其是否满足光控阀工程的应用。

3.1 壳式电抗器铁心测温

铁心温度是饱和电抗器的重点关注指标，温度过高易加速铁心本身以及其他部件材料的老化，影响饱和电抗器安全稳定运行，目前要求饱和电抗器运行时铁心最高温度不大于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]。相比原芯式电抗器铁心暴露在空气中的方式，新壳式电抗器铁心封装在外壳内，且其冷却

流量显著小于常规的壳式电抗器，因此专门对新壳式电抗器进行了铁心测温试验。测温采用光纤测温仪的方式，在电抗器浇筑时在不同铁心的不同位置预埋若干路光纤，以获取铁心最高温度 [7]。

3.1.1 专项铁心测温

专项铁心测温是针对饱和电抗器单体进行的铁心测温试验，通过在饱和电抗器两个连接母线上施加高频、小电流的励磁，使饱和电抗器整体功耗基本集中在铁心上，达到使铁心以励磁功率发热的目的。

将铁心功率设置为 600 W，对壳式电抗器进行专项铁心测温试验，结果见表 1。

表 1 专项测温结果

Tab. 1 Temperature measurement with SR only

参数	水温 / $^{\circ}\text{C}$	环温 / $^{\circ}\text{C}$	流量 / (L/min)	最高点温度 / $^{\circ}\text{C}$
值	50	24	6.8L	73.8

3.1.2 模拟运行工况下的铁心测温

模拟某光控阀工程的 1.1 pu 过负荷工况进行阀组件的热运行试验，并测量铁心各点温度，在铁心温度达到稳定后记录数据，具体见表 2。

表 2 运行试验测温结果

Tab. 2 Temperature measurement with valve module

(单位: $^{\circ}\text{C}$)

参数	进水温度	环境温度	铁心温度
值	50	15.8	67.5

通过两种试验结果可见，新壳式电抗器铁心温度距离 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有足够安全裕度，能满足可靠运行要求。

3.2 合成回路试验

饱和电抗器的核心作用是对晶闸管的保护，因此需对比新壳式电抗器和原芯式电抗器对晶闸管的保护效果，为此分别将两种电抗器安装到同一个光控阀组件中，选取电气应力最大的运行试验项目在合成回路进行对比测试。

根据引言中所述饱和电抗器的几个作用，合成回路试验主要通过以下几个关键指标来评估饱和电抗器对晶闸管的保护作用 [8]。

1) 晶闸管开通瞬间电流波头 di/dt 。

- 2) 晶闸管开通瞬间电流波头峰值。
 - 3) 晶闸管开通瞬间电流波头后谷值。
 - 4) 冲击电压下阀电抗器吸收的电压幅值。
- 合成回路试验电流波形对比点如图11所示^[9]。

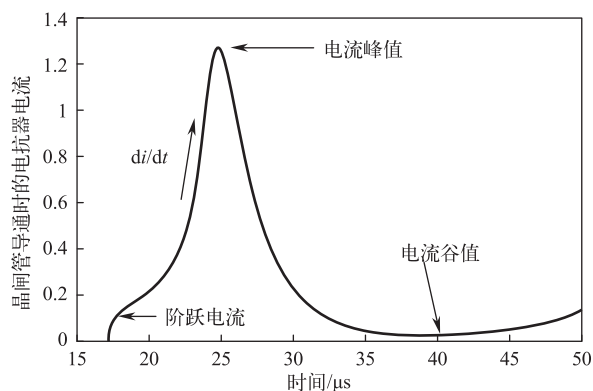


图 11 合成回路试验电流波形对比点
Fig. 11 Comparing point of synthetic circuit test current waveform

合成回路试验项目包括最大连续运行试验和恢复期外暂态正向电压（1 μs波头）试验。其中，最大连续运行试验主要通过观测上述第1)~3)条指标验证饱和电抗器在晶闸管刚开通时限制 di/dt 以及抑制振荡涌流的作用；恢复期外暂态正向电压（1 μs波头）试验则通过观测上述第4)条指标验证饱和电抗器在冲击电压下对晶闸管的分压保护作用。

3.2.1 最大连续运行试验

将两种饱和电抗器安装在同一个阀组件中，试验的电流波形放置在一起进行对比，如图12所示。

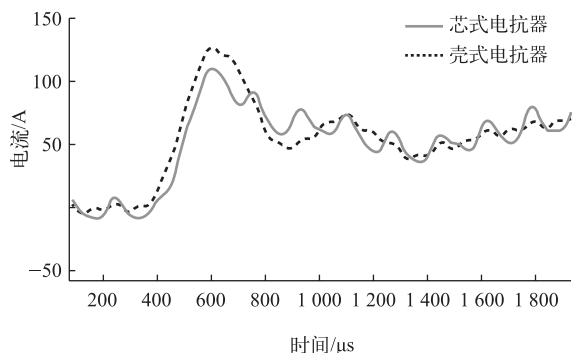


图 12 最大连续运行试验电流波形对比
Fig. 12 Comparison of current in maximum continuous operating duty test

从波形中读取上述第1)~3)条指标，从多个周期读取后取平均值，结果见表3。

表 3 最大连续运行试验电流指标对比

Tab. 3 Comparison of current of the maximum continuous operation test

	芯式电抗器	壳式电抗器
di/dt	$\approx 6 \text{ A}/\mu\text{s}$	
电流峰值 /A	112	123.7
电流谷值 /A	40.3	37.3
峰谷间振幅 /A	71.7	86.4

从表3数据可以看出：

1) 两个饱和电抗器对于 di/dt 的限制作用基本一致。

2) 壳式电抗器阻尼振荡效果略低于芯式电抗器，阻尼振荡的目的在于避免电流在振荡时波谷值小于晶闸管擎住电流而引起异常关断，由于晶闸管擎住电流约为1.5 A，远低于表3中各电流谷值，因此两个饱和电抗器均满足要求且具有较大裕度。

3.2.2 恢复期外暂态正向电压（1 μs波头）试验

将芯式电抗器和壳式电抗器安装在同一个阀组件中进行该项试验，然后将各自电压波形放置在同一张图中对比，如图13所示。

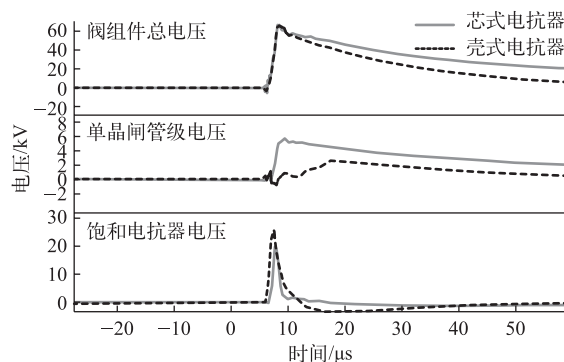


图 13 恢复期外暂态正向电压试验波形对比

Fig. 13 Comparison of transient forward voltage test waveforms outside the recovery period

从波形中读取各电压的峰值数据，见表4。

从表4数据可见，在阀组件冲击电压峰值基本相同的情况下，安装壳式电抗器时的晶闸管电压峰值小于安装芯式电抗器时的晶闸管电压峰值，即壳式电抗器分担了更多冲击电压，对晶闸

管的限压保护作用更优。

表4 恢复期外暂态正向电压试验电压峰值对比

Tab. 4 Comparison of voltage of transient forward voltage test outside the recovery period

	芯式电抗器	壳式电抗器
阀组件冲击电压峰值/kV	71.52	71.98
单级电压峰值/kV	4.42	2.85
电抗器电压峰值/kV	19.1	21.7
单级电压×13/总电压(%)	81.5	51.5

上述试验结果也可以从理论分析得出相同的结论：根据对典型芯式和壳式电抗器的输出特性比较发现，在1 MHz附近，芯式电抗器等效阻抗小于壳式电抗器等效阻抗，因此在整个阀组件中分压较小，晶闸管承受更多电压。

4 结束语

本文首先介绍了壳式电抗器相对芯式电抗器的优点，以及用于光控阀改造的针对性结构设计；随后建立两种饱和电抗器的仿真模型，研究不同模型、电气参数对于输出特性的影响，得出了新壳式电抗器的电气主参数设计原则；最后针对新壳式电抗器进行了功能及性能验证，试验结果表明：

1) 壳式电抗器铁心散热性能优良，满足运行安全稳定性能要求。

2) 壳式电抗器和芯式电抗器对限制晶闸管开通时 di/dt 的作用基本一致。

3) 壳式电抗器对晶闸管开通时振荡涌流的限制作用略低于芯式电抗器，但均满足晶闸管安全运行要求。

4) 壳式电抗器在冲击电压下对晶闸管的限压保护作用优于芯式电抗器。

综合以上，新设计的壳式电抗器整体功能及性能完全满足光控阀改造的需求。

参考文献

- [1] 赵冀川. 高压直流换流阀饱和电抗器基本原理研究[J]. 电子测试, 2016, 23(24): 44-45.
- [2] 刘杰, 张静, 曹均正, 等. 直流输电换流阀阻尼系统特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 16-22.
- [3] 陈鹏, 曹均正, 魏晓光, 等. 高压直流换流阀饱和电抗器的暂态电路仿真模型[J]. 高电压技术, 2014(1): 288-293.
- [4] 纪锋, 陈鹏, 魏晓光. HVDC换流阀用饱和电抗器的建模及仿真[J]. 智能电网, 2013, 1(2): 65-69.
- [5] 孙海峰, 崔翔, 齐磊, 等. 高压直流换流阀器件高频建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 142-148.
- [6] 张建国, 付兴珍. 高压直流输电晶闸管阀用饱和电抗器的设计[J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2010, 28(3): 30-33.
- [7] 张雷, 王康, 杨晓平, 等. 一种改进型换流阀饱和电抗器电流应力分析[J]. 电力电子技术, 2020, 54(8): 22-25.
- [8] 豆孝华, 任孟干, 汤广福, 等. 饱和电抗器设计与运行特性仿真[J]. 变压器, 2014, 51(11): 38-41.
- [9] CAO J, DAVIDSON C, MOULSON S. Dynamic modelling of saturable reactor for HVDC applications[J]. IET Science Measurement Technology, 2007, 1(3): 138-144.

作者简介

杨帆(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事晶闸管阀和无功补偿相关技术研究。

(收稿日期: 2022-07-07)