

两种结构形式特高压换流阀均压设计对比分析

娄彦涛, 刘 宁, 王江平

(西安西电电力系统有限公司, 西安 710075)

摘要: 文中结合 ± 800 kV/5 000 A 溪洛渡—浙江特高压工程受端金华站极1和极2两种结构形式的换流阀,对比分析了其在直流、工频、操作冲击、雷电和陡波冲击下的均压设计,通过PSCAD建立的换流阀宽频模型及雷电冲击下的仿真结果,论证了大组件换流阀冲击均压电容在雷电和陡波冲击电压下可以实现较好的阀段之间的均压作用,同时文中还分析了小组件换流阀在雷电和陡波冲击电压下依靠晶闸管控制单元实现的换流阀自适应耐压能力,两种换流阀均压设计理念都能够较好实现换流阀的均压和保护,对今后更深入研究特高压换流阀电气设计具有重要指导意义。

关键词: 晶闸管换流阀; 冲击均压电容; 杂散电容; 饱和电抗器; TCU

Comparative Analysis on Grading Design of Two Different Structural HVDC Converter Valve

LOU Yantao, LIU Ning, WANG Jiangping

(Xi'an XD Power Systems Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: According to the two different structural HVDC converter valves operate in Jinhua converter station, which is the inverter station of ± 800 kV/5 000 A Xiluodu-Zhejiang HVDC project, this paper comparatively analyzes the two different valves voltage grading design principle under DC, AC, SIPL, LIPL and FWPL voltages. Based on PSCAD, the wide-frequency valve model is established, and the simulation results under the lightning impulse are obtained, it is demonstrated that the voltage grading effect between valve sections under LIPL and FWPL can be realized by the grading capacitor in the big-modular converter valve, at the same time, it is also analyzed that the function of the thyristor control unit (TCU) used in the small-modular converter valve, which can realize the valve self-adapting voltage withstand capability. Both valve grading designs principle can protect the equipment, this paper must have guiding significance to a certain for the subsequent HVDC converter valve design.

Key words: thyristor valve; grading capacitor; stray capacitor; saturable reactor; TCU

0 引言

基于直流输电具有远距离、大容量、低损耗等特点和优势^[1-2],自 20 世纪 90 年代,高压直流输电在中国得到了迅速的发展,已经成为实现中国能源资源优化配置的重要途径^[3-5]。随着电力电子技术的飞速发展,晶闸管从最初的二英寸逐步发展到目前的 8.5 kV/5 000 A 六英寸晶闸管,直流工程电压等级也从最初的 ± 50 kV,逐步提升到 ± 125 、 ± 500 、 ± 660 、 ± 800 kV^[7-8],作为高压直流输电的核心设备换流阀,

随着直流电压的提升带来换流阀串联晶闸管数的增加,换流阀均压设计也变得越来越重要^[9-10],由于各阀厂在换流阀设计上技术路线的不同和阀塔结构的不同,各自在均压上的设计理念也有所不同,目前国内外也很少有对不同换流阀均压设计方面的对比研究。 ± 800 kV/5 000 A 溪洛渡—浙江特高压直流输电工程受端金华站换流阀全部由西安某电力系统有限公司供货,极 1 和极 2 分别采用两种结构形式的换流阀,文中对两种换流阀的均压设计进行深入分析比较,对比其优缺点,为后续特高压换流阀设计提供指导。

1 两种换流阀组件结构形式对比

1.1 大组件换流阀

金华站极 1 采用大组件结构换流阀, 阀塔结构形式见图 1。单阀由两个组件分上下两层组成, 每层组件由两个阀段组成, 阀段为换流阀最小电气单元, 每个阀段由 15 个晶闸管级压接组成的硅堆和两台饱和电抗器串联而成, 每个阀段两端并联一台均压电容器, 单阀电气原理图, 见图 2。



图 1 金华站极 1 低压阀厅

Fig. 1 Pole1 LV valve hall in Jinhua station

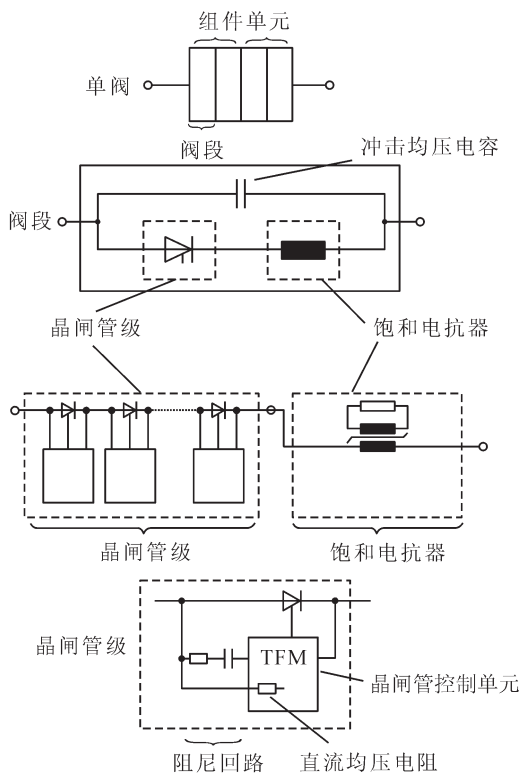


图 2 大组件单阀电气原理图

Fig. 2 Big-module single valve electrical principle diagram

1.2 小组件换流阀

金华站极 2 采用小组件结构换流阀, 阀塔结构形式见图 3。单阀由 8 个晶闸管组件和 8 台饱和电



图 3 金华站极 2 低压阀厅

Fig. 3 Pole2 LV valve hall in Jinhua station pole2 LV valve hall in Jinhua station

抗器分上下 2 层组成, 每层由 4 个组件和 4 台饱和电抗器串联组成, 阀组件为换流阀最小电气单元, 每个阀组件由 7~8 个晶闸管级串联而成, 单阀电气原理图见图 4。

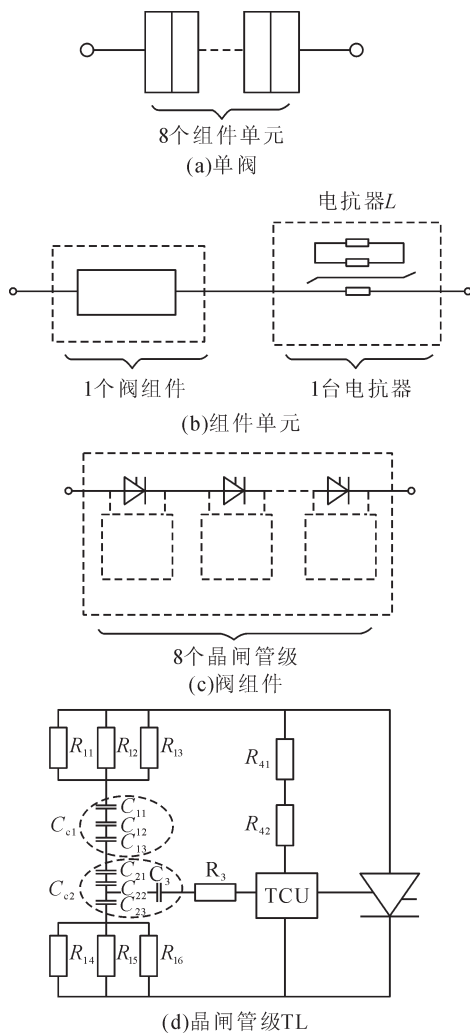


图 4 小组件单阀电气原理图

Fig. 4 Small-module single valve electrical principle diagram

2 两种结构形式换流阀均压设计对比

2.1 工频均压设计对比

如图 2、4 所示,两种结构形式换流阀工频均压都采用单 RC 阻尼回路来实现,阻尼回路参数也相差不多。大组件换流阀阻尼回路参数为 $R=36\ \Omega$, $C=1.6\ \mu\text{F}$, 小组件换流阀阻尼回路参数为 $R=33\ \Omega$, $C=1.8\ \mu\text{F}$, 通过 Pscad 仿真,2 种阻尼参数均可以很好地实现工频均压、抑制阀换相过冲的作用,而且阻尼电容越大,换相过冲越小,但都能满足规范要求;大组件换流阀阻尼电阻采用水冷形式,内冷水直接流过阻尼电阻将热量带走;小组件换流阀阻尼电阻为棒状,嵌入晶闸管两端的散热器内,通过散热器进行冷却。2 种阻尼电阻照片见图 5。

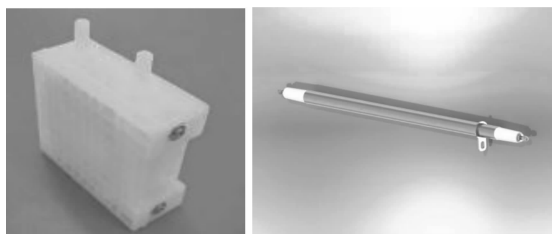


图 5 大、小组件用阻尼电阻实物图

Fig. 5 Big,small-modular snubber resistor pictures

2.2 直流均压设计对比

2 种结构形式的换流阀直流均压都是通过直流均压电阻来实现,大组件换流阀直流均压电阻安装在 TFM 板卡上,原理图见图 2 (d),实物图见图 6(左)圈示位置,由 4 颗 $500\ \text{k}\Omega$ 电阻两两串并联组成,即每个晶闸管级直流均压电阻值为 $500\ \text{k}\Omega$,大组件换流阀直流均压电阻除实现正常的直流均压功能外,同时也是 TFM 板卡采样电阻;小组件换流阀直流均压电阻为方块电阻,安装在硅堆散热器上,原理图见图 4(d)的 R_{41} 和 R_{42} ,实物图见图 6(右),每块方电阻阻值为 $44\ \text{k}\Omega$,即每个晶闸管级直流电阻值为 $88\ \text{k}\Omega$,小组件直流电阻除实现正常的直流均压功能外,同时也为 TCU 提供取样和保护电压值。

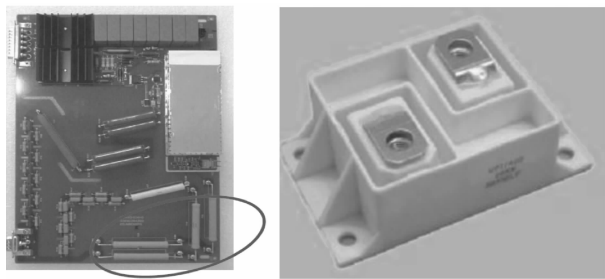


图 6 大、小组件用直流均压电阻实物图

Fig. 6 Big,small-modular DC grading resistor pictures

2.3 冲击电压下均压设计

换流阀可能承受的冲击电压包括操作冲击电压、雷电冲击电压和陡波冲击电压。对两种结构形式的换流阀而言,在操作冲击电压下,与硅堆串联的饱和电抗器等效的阻抗对硅堆的分压几乎没有影响,直流均压电阻对硅堆内部晶闸管级之间的均压也几乎没有影响,晶闸管级之间的均压主要还是靠 RC 阻尼回路实现。尽管由于换流站阀厅的良好屏蔽,换流阀不易遭受来自外部的雷电或者陡波电压冲击,但是由于回路中设备自身电感、换流变套管及换流阀本体对地分布电容和阻尼电容的存在,当阀厅内设备如换流变阀侧套管发生对地闪络故障时,在接地最初几微秒内,各电位来不及作相应的改变,故障相的高层阀及其阀避雷器两端的过电压具有高频陡波性质^[7-8]。在雷电及陡波冲击电压下,首先与硅堆串联的饱和电抗器等效的阻抗可以实现一定的分压作用,电压陡度越高,电抗器分压作用越明显,分担到每个晶闸管级上的电压会随着陡度的增加越来越小,但是,对两种结构形式的换流阀,组件硅堆之间的均压设计略有不同。

如图 2 所示,大组件换流阀每个阀段串联有一个冲击均压电容,该冲击均压电容在阀遭受高频冲击电压时在阀段间起到很好的均压作用,冲击电压频率越高,均压电容呈现出的阻抗 $\frac{1}{\omega C}$ 越小,均压电

容与硅堆并联,阀段整体阻抗取决于阻抗较小的分支即均压电容。由于大组件换流阀单个阀段串联的晶闸管级数比较多,为 15 级,由于杂散电容的影响,阀段内晶闸管级之间的电压分布在高频冲击下本就呈现出一定的不均匀性,在这种情况下,单阀承受高频电压冲击时,阀段之间的均压设计更加重要,大组件换流阀高频冲击电压下的阀段之间的均压即通过冲击均压电容来实现。为分析大组件换流阀冲击均压电容的作用,通过 Pscad 建立金华站极 1 换流阀宽频模型进行雷电冲击电压下的换流阀电压分布仿真,换流阀宽频模型包括阀段间、阀层间、阀对地等杂散电容值^[9-11],单阀雷电冲击保护水平根据设备规范为 $429\ \text{kV}$,单阀由 4 个阀段组成,阀段电气参数按照换流阀实际参数设置,仿真模型见图 7,仿真结果见表 1。通过仿真结果发现,当换流阀没有均压电容时,单阀内阀段之间的电压分布极不均匀,个别阀段承受的电压远高于其他阀段,阀段电压不均匀系数达到 1.1,尽管阀段内饱和电抗器在雷电冲击电压下可以分担一定的晶闸管硅堆的电压,但是依然会导致个别晶闸管级承受较高的过电

压,晶闸管级之间的电压不均匀系数达到 1.18,电压的不均匀性与换流阀杂散电容的数值以及冲击电容的

容值都有很大的关系,冲击电容值越大,均压效果越好,金华站极 1 换流阀冲击电容值最终选取为 4 nF。

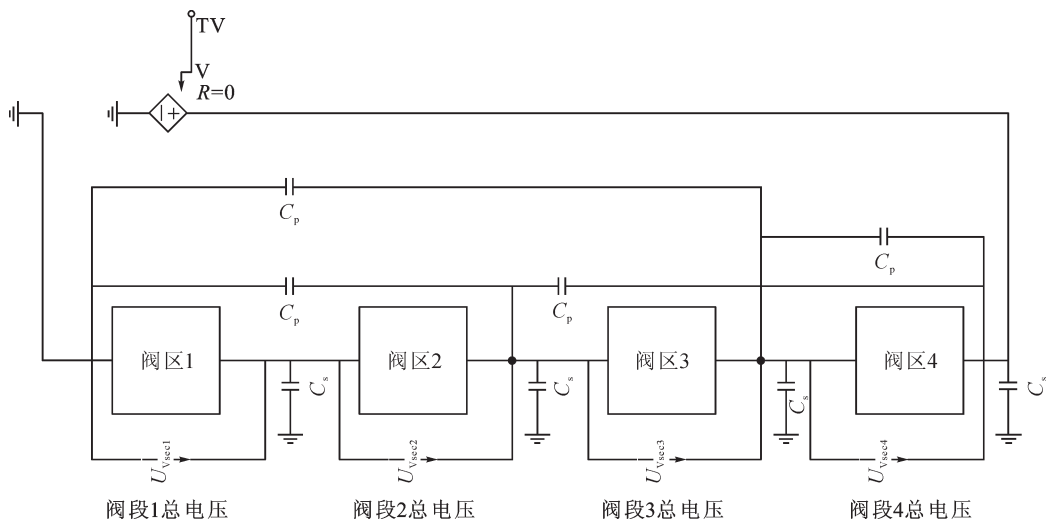


图 7 换流阀雷电冲击仿真模型

Fig. 7 Valve simulation model during lightning impulse voltage

表 1 单阀雷电冲击下仿真结果

Table 1 Simulation result during valve lighting impulse voltage

项目	无均压电容	有均压电容 4 nF
阀段电压/kV	1	103.6
	2	105.1
	3	110.0
	4	119.8
硅堆电压/kV	1	96.0
	2	96.5
	3	98.4
	4	111.1
晶闸管级最大电压/kV	1	6.4
	2	6.4
	3	6.5
	4	7.6

采用冲击均压电容的方式可以实现换流阀高频冲击电压下良好的均压效果,但是也会带来成本增加,冲击电容故障带来的阀段短路等隐患。

小组件换流阀没有采用冲击均压电容进行高频冲击电压下的组件之间均压,高频冲击电压下通过晶闸管 TCU 电路的自适应调节换流阀的电压耐受能力,达到保护换流阀的目的。

TCU 即晶闸管控制单元,它的主要功能是将阀控制监测设备的信号进行光电转换,从而实现高、低压电路之间的光隔离,对晶闸管进行触发、检测和保护^[12-14]。

除正常的触发、监测功能外,TCU 还具有过电压保护功能,小组件换流阀高频冲击电压下的保护就是通过 TCU 的 BOD 保护功能来实现。TCU 通过直流均压电阻(图 4(d)中的 R_{41}, R_{42})检测晶闸管两端电压,当晶闸管两端承受正向过电压并达到保护值时,TCU 将产生保护触发脉冲,使晶闸管导通,从而避免晶闸管击穿。TCU 板卡的 BOD 保护定值不是定值,而是与晶闸管级所承受的过电压陡度有关,陡度超过一定值时,随着电压陡度的升高,正向保护触发电压值逐渐降低,陡度拐点由板卡上的电容 C_{10} 决定^[15],见图 8。

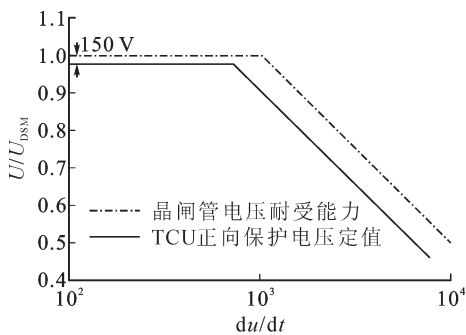


图 8 不同 du/dt 下的正向保护触发电压

Fig. 8 Positive protection firing voltage under different du/dt

3 结论

通过对两种结构形式的换流阀均压设计对比分析,得出如下结论:

1)两种结构形式的换流阀均压设计理念基本相同,结构略有不同,均能够实现很好的均压作用;

2)两种换流阀 RC 阻尼回路参数相近,作用除限制阀在关断时晶闸管的换相过电压应力外,还可以实现工频和操作冲击浪涌电压下晶闸管级间电压线性分布;直流均压电阻阻值虽然不同,但都可以实现很好的直流均压的作用,且两种阻值均远小于与之并联的水路电阻,两种直流均压电阻同时都兼有为晶闸管控制单元板卡提供采样信号的功能;

3)高频(雷电和陡波)冲击电压下,大组件换流阀阀段间均压是通过并联冲击均压电容来实现,而小组件换流阀未设置均压电容,通过晶闸管控制单元TCU的设计自适应调整换流阀高频下的耐压能力,即换流阀承受的冲击电压频率越高,换流阀的电压耐受能力越低,以达到保护换流阀的目的。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压直流电气设备[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
LIU Zhenya. UHVDC equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [2] 詹奕,尹项根. 高压直流输电与特高压交流输电的比较研究[J]. 高电压技术,2001, 27(4):44-46.
ZHAN Yi, YIN Xianggen. Comparative research on HVDC and UHV power transmission[J]. High second Voltage Engineering, 2001, 27(4): 44-46.
- [3] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 第2版.北京:中国电力出版社,2011.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current engineering technology[M]. 2nd ed.. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [4] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京:中国电力出版社,2009.
LIU Zhenya. Research production of UHVDC transmission technique[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [5] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术,2005, 29(14):1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of UHVDC transmission in china[J]. Power System Technology, 2005, 29(14):1-3.
- [6] 王正鸣,陆剑秋.最佳结构6英寸UHVDC晶闸管[J]. 电力电子技术,2008,42(12):20-22.
WANG Zhengming, LU Jianqiu. Six inch thyristor optimized for UHVDC[J]. Power Electronics, 2008, 42(12): 20-22.
- [7] 王东举,邓旭,周浩,等. ± 800 kV溪洛渡—浙西直流输电工程换流站直流暂态过电压[J]. 南方电网技术,2012, 6(2):6-13.
WANG Dongju, DENG Xu, ZHOU Hao, et al. On the DC transient overvoltage in the converter stations of ± 800 kV Xiluodu-Zhexi HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2):6-13.
- [8] 姬大潜,刘泽洪,殷威扬,等. ± 800 kV 直流输电工程高端阀厅内部过电压仿真分析[J]. 电网技术,2012,36(12):54-59.
JI Daqian, LIU Zehong, YIN Weiyang, et al. Simulation analysis on overvoltage inside high-end valve hall of ± 800 kV UHVDC project[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 54-59.
- [9] 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.
SUN Haifeng, CUI Xiang, QI Lei, et al. High-frequency modeling of valve components in high voltage direct current converter stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11):142-148.
- [10] 赵中原,朱周侠,邱毓昌,等. 高压换流阀可控硅组件均压特性的研究[J]. 电力建设,2002,23(12):39-41.
ZHAO Zhongyuan, ZHU Zhouxia, QIU Yuchang, et al. Study on voltage equalizing characters of controlled silicon for HV converter valves[J]. Electric Power Construction, 2002, 23(12):39-41.
- [11] 郭焕,汤广福,查鲲鹏,等. 直流输电换流阀杂散电容和冲击电压分布的计算[J]. 中国电机工程学报,2011, 31(10):116-122.
GUO Huan, SHANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Calculation on stray capacitances and impulse voltage distribution of HVDC converter valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 116-122.
- [12] 陈兴旺,梁帅奇,胡宗亚. 高压直流输电换流阀晶闸管控制单元原理分析[J]. 中国新技术新产品,2011(1):105-106.
CHEN Xingwang, LIANG Shuaiqi, HU Zongya. Analysis principle of thyristor control unit of HVDC converter valve [J]. China new Technologies and Products, 2011(1):105-106.
- [13] 袁清云. HVDC换流阀及其触发与在线监测系统[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
YUAN Qingyun. HVDC thyristor valve and its firing and monitoring system on line[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [14] 郝新,徐文立,张曾科,等. 大功率晶闸管数字触发电路的设计[J]. 电气传动,2001, 31(3):29-31.
HAO Xin, XU Wenli, ZHANG Zengke, et al. The design of high-power SCR digital trigger circuit[J]. Electric Drive, 2001, 31(3): 29-31.
- [15] 任小静,王潇,刘飞超,等. 两种特高压直流输电用晶闸管控制单元工作原理分析对比[J]. 高压电器,2015, 51(7):74-77.
REN Xiaojing, WANG Xiao, LIU Feichao, et al. Comparative analysis operating principles of the two thyristor control unit in UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7):74-77.

娄彦涛(1982—),男,工程师,主要从事输电线路方面工作。