

串联补偿装置用 MOV 工况分析及其关键技术的研究

赵冬一¹, 汤霖², 胡淑慧¹, 李凡³, 常鹏¹, 王川¹

(1. 南阳金冠电气有限公司, 河南 南阳 473000; 2. 中国电力科学研究院武汉分院, 武汉 430000;

3. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 结合串联补偿装置的工作原理, 仔细分析了金属氧化物限压器(metal oxide varistor, MOV)的工况, 比较了 TCSC 与 FSC 不同构成的串联补偿装置中 MOV 的特点, 对 MOV 的过电压保护和控制措施进行了较深入的讨论、总结。对设计 MOV 的关键技术——保护水平、能量耐受和工频电压稳定性、电流分布、特殊的短路电流释放能力等进行了深入研究。笔者根据国内某一 500 kV 交流电力系统串补工程的招标技术要求, 设计了复合外套和瓷外套不同结构的 MOV, 产品通过了中国电力科学研究院的型式试验, 满足工程需要。

关键词: 串联补偿装置; 金属氧化物限压器; 电力系统

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)06-0111-07

Operating Condition Analysis of Metal-oxide Varistor for Series Capacitor Bank and Its Key Technologies

ZHAO Dongyi¹, TANG Lin², HU Shuhui¹, LI Fan³, CHANG Peng¹, WANG Chuan¹

(1. Nanyang Jinguang Electric Co., Ltd., Henan Nanyang 473000, China; 2. Wuhan Branch of China Electric Power Research Institute, Wuhan 430000, China; 3. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Operating condition of a metal-oxide varistor(MOV) is analyzed considering the operating principle of series capacitor bank. The characteristics of the MOVs in the series capacitor banks for TCSC and FSC are compared, and the overvoltage protection of MOV and control measures are discussed. The key technologies for design of MOV are described, including protection level, energy withstand, power-frequency voltage stability, current distribution, and special release ability of short circuit current. According to the requirements in a bids invitation for compensation project of a 500 kV AC power system, two kinds of MOV structures with composite shield and porcelain shield were designed, and the products have passed the type test in the China Electric Power Research Institute, indicating that they meet the engineering requirement.

Key words: series capacitor bank; metal-oxide varistor; electric power system

0 引言

远距离高电压交流输电线路采用串联电容器补偿技术是提高系统输送能力的有效措施之一^[1-2]。串联补偿技术始于 1928 年, 在美国、加拿大、瑞典、前苏联、巴西等国家均有多个电压等级的串补线路在运行, 最高电压等级已达 765 kV^[3-5]。中国自 1966 年在新杭上线建成第 1 组 220 kV 串补站开始, 已经在国内大规模推广、使用串联补偿技术, 特别是 2012 年,

国家电网公司成功投运了晋东南—荆门 1 000 kV 特高压输电线路南阳站串补站, 见图 1。

串联补偿装置分为固定串补(fixed series capacitor, FSC)和可控串补(thyristor controlled series capacitor, TCSC)。TCSC 是具有代表性的柔性交流输电技术, 是常规固定串补技术与电力电子技术相结合而产生的, 在提高电网的输电能力和电力系统稳定性的同时, 可以有效抑制电力系统低频振荡和次同步谐振^[6]。

目前, 串联电容补偿站采用的过电压保护措施主要有单间隙保护、MOV 保护和 MOV+旁路间隙保



图 1 晋东南—荆门 1 000 kV 特高压输电线路
南阳站串联电容器补偿站

Fig. 1 The southeastern Shanxi-Jingmen 1 000 kV UHV transmission lines series capacitor compensation station in Nanyang station

护 3 种方案^[7]。MOV+旁路间隙保护方案具有后备保护功能,可以大幅地降低 MOV 的容量,从而得到了广泛地采用。

1 串联电容补偿装置工作原理及 MOV 工作状态分析

1.1 串联电容补偿装置工作原理

串联电容补偿装置工作原理:利用串联电容器的容性阻抗补偿掉输电线路的部分感性阻抗,使得发电机组间电气距离缩短,同步力矩增加,从而达到改善系统的稳定性,提高输电系统输送能力的目的。

采用串联电容补偿后,输电线路的输送功率 P 与相角差 δ_{12} 的关系见图 2。由于系统间联系阻抗被串联电容补偿掉一部分,系统间联系阻抗减小,功角曲线被提升,因此,在相同的极限输送功角情况下,被补偿过的系统可以输送较多的功率,系统输送能力被提高。

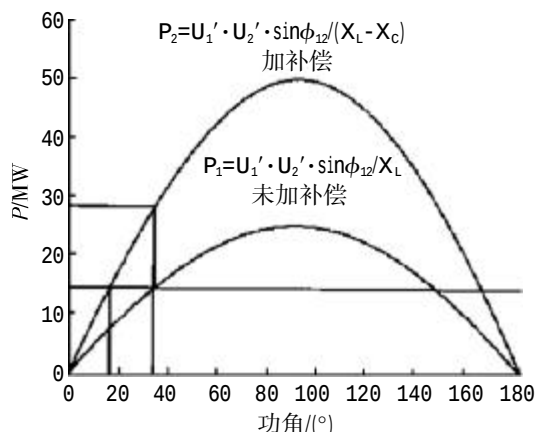


图 2 采用串补前后系统 $P-\delta_{12}$ 曲线图

Fig. 2 The series compensation system before and after $P-\delta_{12}$ curve

1.2 MOV 工作状态

固定串补(fixed series capacitor, FSC)和可控串补(thyristor controlled series capacitor, TCSC)的主电路图见图 3^[8]。

1.2.1 固定串补(FSC)中 MOV 工作状态

固定串补(FSC)中 MOV 工作状态可以简单的分

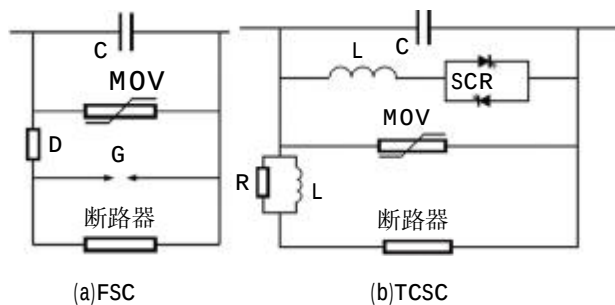


图 3 串联电容补偿的主电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the main circuit of series capacitor compensation

为以下 3 个阶段:

1)当串联补偿装置正常工作时,与电容器组并联的 MOV 呈高阻抗状态,承受电容器两端的工作电压。

$$U_{\text{cov,MOV}} = U_c = I_r X_c \quad (1)$$

式(1)中: $U_{\text{cov,MOV}}$ 为 MOV 的持续运行电压, kV; U_c 为电容器组额定电压, kV; I_r 为电容器组额定电流, kA; X_c 为电容器组的容抗, Ω 。

2)当输电线路发生故障时,如果通过串联电容器的电流过大,使得电容器两端的电压达到了 MOV 的保护水平时,利用 MOV 的非线性伏安特性,可将串联电容器组的工频过电压限制在可以接受的水平以内。典型的串联电容补偿过电流时电容器组、MOV 的电压及电流波形图见图 4(5 cycle fault)^[9]。

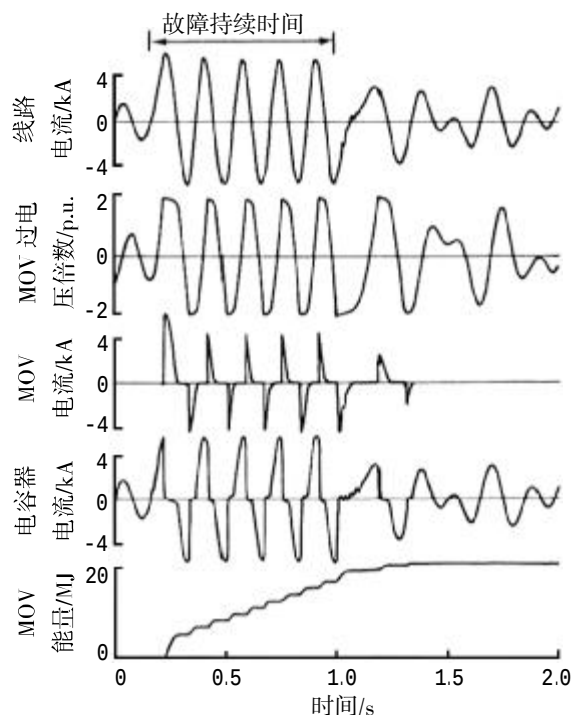


图 4 典型的串联电容补偿过电流时电容器组、MOV 的电压及电流波形图

Fig. 4 Current, voltage and energy waveforms for a phase-to-earth fault

此时,MOV 限制了电容器组两端的电压。典型的 MOV 保护水平在 2.0~2.5 p.u.范围之间。此阶段中,MOV 要吸收巨大的能量。MOV 应按照将要受到电网中规定的故障状态期间的最大能量来设计。将要设计 MOV 所依据的故障状态通常规定表明故障类型、故障时间和多次故障之间的间隔时间的一个故障方式周期。间隔的长短是 MOV 设计的一个重要因素^[6-7]。MOV 吸收的能量高达几十甚至上百 MJ。

3)如果 MOV 吸收的能量小于设定值,在故障电流终止时电容器则立即再投入运行;当 MOV 吸收的能量超过设定值时,旁路间隙触发火花间隙,旁路 MOV,从而保护 MOV。为防止间隙燃弧时间过长,经一时延,旁路开关合闸,短接间隙,保证其灭弧。整套串补装置被旁路,退出运行。根据系统设置,整套串补装置可以重新通入运行。

串补电容器组接入输电线路之后会承受一个波动范围较宽的电流,一般在故障和失去并联线路后,电容器组接入过程中典型的电流—时间曲线见图 5^[10],其耐受过负荷和摇摆电流的能力见表 1^[11]。

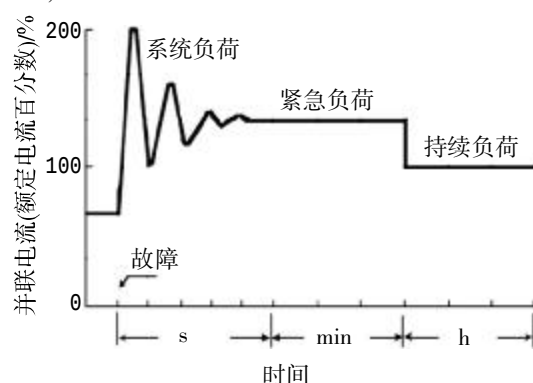


图 5 在故障和失去并联线路后电容器组接入过程中典型的电流—时间曲线

Fig. 5 Typical current-time profile of an inserted capacitor bank following the fault and clearing of parallel lines

表 1 电容器组典型的耐过负荷和摇摆电流的能力

Tab. 1 Power capacitor group typical high overload and swing current

电流	持续时间	典型的范围/p.u.	常见的值/p.u.
额定电流	连续	1.0	1.00
1.1×额定电流	每 12 h 中 8 h	1.1	1.10
紧急情况	30 min	1.2~1.6	1.35~1.50
过负荷电流			
摇摆电流	1~10 s	1.7~2.5	1.70~2.00

相应的,MOV 在吸收巨大故障能量并很快重新投入运行时^[12],需要耐受摇摆电流、紧急情况过负荷电流造成的暂时过电压作用而到达热稳定。

1.2.2 可控串补(TCSC)中 MOV 工作状态

与 FSC 相比较,TCSC 利用晶闸管的快速导通(即旁路运行模式)的功能,替代 FSC 的间隙作为 MOV 的后备保护。TCSC 的工作模式通常有 4 种:

1)闭锁模式(thyristor blocked),晶闸管的触发角 $\alpha=180^\circ$,TSCS 的运行特性如同 FSC。

2)容抗调节模式(capacitive vernier operation),晶闸管的触发角 $\alpha_{\text{cmin}} \leq \alpha \leq 180^\circ$,电感支路导通。TCSC 电容器组电压峰值 U_{cm} ,比同样串补度下的 FSC 上的电压要低。图 6^[10]给出了当输电线路电流峰值 $I_T=2.2 \text{ kA}$,容抗为 2.0 p.u.时,TCSC 与 FSC 的电容器组电压的比较。前者的峰值要比后者低 20%,它们的差别随着 X_{TCSC} 的增加而增加。这一点对 TCSC 中的 MOV 的工作条件无疑是有利的。

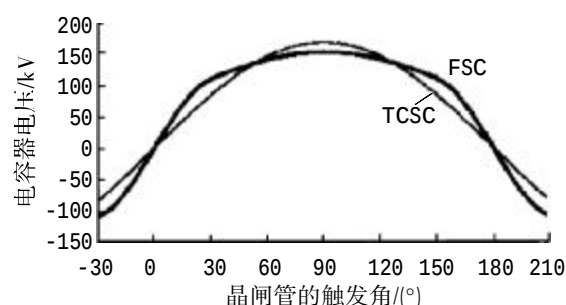


图 6 $I_T=2.2 \text{ kA}$, $X_{\text{TCSC}}=2.0 \text{ p.u.}$ 时 TCSC 与 FSC 电压波形比较

Fig. 6 $I_T=2.2 \text{ kA}$, $X_{\text{TCSC}}=2.0 \text{ p.u.}$, TCSC and FSC voltage waveform comparison

3)旁路模式(bypass),晶闸管的触发角 $\alpha=90^\circ$,串联电容器被电抗器支路旁路。通常 TCSC 是在故障期间,MOV 的能量吸收到达一定水平时,TCSC 进入旁路模式,以降低短路电流,减小 MOV 所吸收的能量,也就是所谓的 TCSC 的主动绝缘配合。

4)感抗调节模式(inductive vernier operation),晶闸管的触发角 $90^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\text{Lmin}}$,当一套 TCSC 装置是由多模块构成时,感抗调节和容抗调节互相配合,可以使整套装置得到较大范围的连续可调特性。但是,在这种模式下线路的谐波较大。一般的 TCSC 不工作在此状态下。

综上所述,工作在 TCSC 装置中 MOV 与 FSC 相比较,其工作电应力较轻。

2 串联电容补偿装置中 MOV 的关键技术及研究

从上节的分析可以看出,串联电容器补偿装置中 MOV 的工作状况比较复杂,需要解决多项设计技术,其中主要的关键技术包括:①保护水平;②重复能量耐受能力;③能量耐受和工频电压稳定性;

④电流分布技术;⑤短路电流时压力释放能力。

2.1 保护水平

不论输电线路出现区内故障还是区外故障时,故障电流流过电容器组造成其两端电压迅速升高,MOV动作从而限制电容器组两端的工频电压。与传统的金属氧化物避雷器不同,MOV主要限制工频过电压,配合电流一般为数千安培^[8,13-14]。

选取 $\phi 105 \times 21$ 规格金属氧化物电阻片,进行了工频残压试验,电流为50~1 000 A。试验结果见表2^[15]。

表2 $\phi 105 \times 21$ 规格金属氧化物电阻片工频残压试验结果

Tab. 2 $\phi 105 \times 21$ specifications of metal oxide varistor frequency residual voltage test results

参数	数值				
配合电流值/A	50	100	250	500	1 000
比例单元残压值/kV	5.93	6.01	6.19	6.32	6.49

注:比例单元直流参考电压, $U_{1mA,DC}=4.98$ kV。

2.2 重复能量耐受能力

在实际工程中,串补装置中的MOV流过的故障电流持续时间与故障方式有很大的关系。图7为成碧可控串补站的MOV电流波形^[16]。

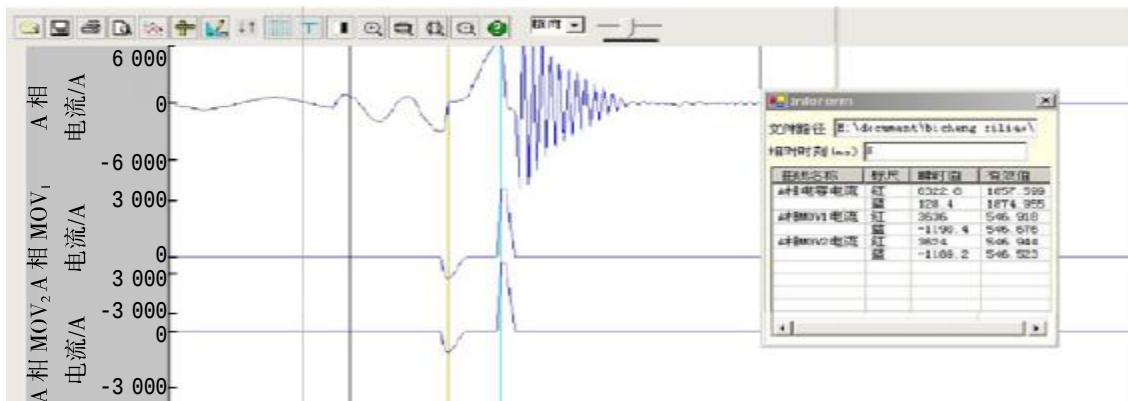


图7 成碧串补站调试中短路电流的MOV波形图

Fig. 7 Cheng-Bi series compensation station diagram waveform of short-circuit current in the MOV debugging

一般情况下,MOV流过的故障电流持续时间为200 μ s~10 s。IEC 60142-2Ed.2/CDV^[7]、DL/T 1156—2012^[17]国际、国内标准规定,可以采用2~4 ms方波冲击电流来考核MOV的重复能量耐受能力。按照标准的试验程序要求,选取 $\phi 105 \times 21$ 规格金属氧化物电阻片,分别采用2、4、6、10 ms方波电流冲击,21次放电分成7组,每组3次,来研究电阻片的重复能量耐受能力。试验结果见表3^[18-19]。

随着方波冲击电流持续时间的增加,MOV重复能量耐受能力不断提高。因此,必须根据工程实际计算中实际的故障电流持续时间来考虑采用何种方波。

2.3 能量耐受和工频电压稳定性

实际工程中,在故障和失去并联线路后,串补电

表3 $\phi 105 \times 21$ 规格金属氧化物电阻片重复能量耐受能力试验结果

Tab. 3 The test results of $\phi 105 \times 21$ specifications of metal oxide varistor repeated energy withstand test

参数	数值			
方波冲击电流峰值持续时间/ms	2	4	6	10
方波冲击电流范围/A	2 166~ 2 231	1 314~ 1 362	1 146~ 1 220	722~ 762
平均注入比能量/kJ	≥ 36	≥ 42	≥ 48	≥ 53

注:比例单元直流参考电压, $U_{1mA,DC}=4.98$ kV。

容器装置重新接入过程中,MOV要耐受住一系列的过电压负荷。可以采用图8的试验程序来考核MOV的能量耐受和工频电压稳定性。

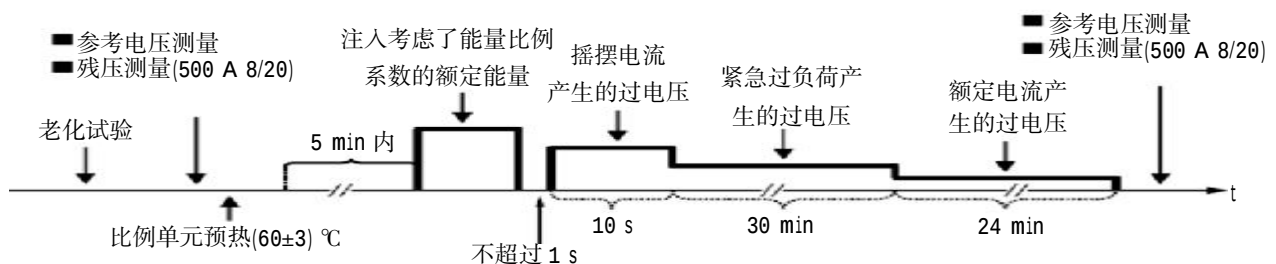


图8 MOV能量耐受和工频电压稳定性试验程序示意图

Fig. 8 Schematic diagram of MOV energy withstand and power frequency voltage stability test procedure

按照标准要求,制作了比例单元试品,见图 9。 试验结果见表 4^[20]。



图 9 MOV 能量耐受和工频电压稳定性试验比例单元

Fig. 9 MOV energy withstand and power frequency voltage stability test section

表 4 MOV 能量耐受和工频电压稳定性试验结果

Tab. 4 MOV energy withstand and the frequency of the voltage stability test results

试验前测量		注入能量/kJ	U_{1ms}/kV	U_{2ms}/kV	U_{3ms}/kV	第 30 min 功耗/mW	试验后测量	
参考电压 (均方根)/kV	残压/kV						参考电压 (均方根)/kV	残压/kV
3.58	6.60	36 (2 ms)	3.71	2.86	2.86	2 789	3.59	6.54
3.63	6.58					2 507	3.62	6.61
3.63	6.60					2 775	3.62	6.61

2.4 电流分布技术

MOV 在实际工况中,需要吸收巨大的能量,高达几十、甚至上百 MJ。这就需要采用多柱并联技术来解决。MOV 的多柱电阻片柱或单元之间的电流分布对 MOV 的能量耐受能力有很大影响,需要深入研究^[21-23]。

采用模糊聚类法对电阻片进行分类,然后采用排列法、对调法实现配组。这一过程已经计算机编程。分别研究 8×9 柱、8×13 柱、4×9 柱、3×9 柱、2×9 柱、44×10 柱在操作冲击电流下的电流分布情况,试验装置和试验电流波形见图 10,试验结果见表 5^[23-25]。



图 10 MOV 多柱电阻片柱电流分布试验情况

Fig. 10 MOV multi column varistors current distribution test

表 5 MOV 多柱并联电流分布试验结果

Tab. 5 MOV multi column parallel current distribution test results

参数	数值					
多柱并联方式	8×9	8×13	4×9	3×9	2×9	44×10
最大电流分布 不均匀系数 η	1.032	1.032	1.018	1.025	1.010	1.046

2.5 短路电流时压力释放能力

当 MOV 自身故障时,如果发生粉碎性爆炸,会伤及周围人员和设备的安全,因此 MOV 必须具有短路电流时压力释放能力。与常规金属氧化物避雷器比较,MOV 在设计压力释放装置时,要考虑具有保护水

平电压的电容器组的放电。

美国 GE 公司按照国内某一串补工程,在均方根值 40 kA、12 个周波短路电流时,经计算电容器组的放电电流为 320 kA、2.2 Hz,能量为 3.3 MJ^[26]。

非常遗憾,国内还没有满足要求的试验条件。笔者进行了 63 kA/0.2 s、600 A/1.0 s 的工频短路电流下压力释放试验^[27-29]。

3 MOV 设计及型式试验

按照国内某一 500 kV 交流电力系统串补工程的招标技术要求,设计了复合和瓷外套不同结构的 MOV。工程主要技术参数见表 6,线路补偿度为 50%。MOV 的主要技术参数见表 7。产品外形图见图 11。

表 6 某 500 kV 交流电力系统串补电容器组主要技术参数
Tab. 6 The main technical parameters of capacitors of a 500 kV AC power systems

串补装置电容器组 额定值	技术要求值	
额定容抗 $/(\Omega \cdot \text{相}^{-1})$	30.16	
额定电流 $I_{rms}/(A \cdot \text{相}^{-1})$	2 700	
摇摆电流 (均方根)/A	4 740	
过载能力(均方根)/ $(A \cdot \text{相}^{-1})$	8 h 过电流(12 h 内)	$\geq 2\,970\ (1.10I_0)$
	30 min 过电流(6 h 内)	$\geq 3\,645\ (1.35I_0)$
	10 min 过电流(2 h 内)	$\geq 4\,050\ (1.50I_0)$
	10 s 过电流	$\geq 4\,860\ (1.80I_0)$
要求保护水平	2.3	

表7 MOV的主要技术参数

Tab. 7 The main technical parameters of MOV

参数	数值
额定电压(均方根)/kV	148.8
持续运行电压(均方根)/kV	82.6
配合电流/kA	40.0
配合电流下残压/kV	268.8
额定能量耐受能力/MJ	43.4
元件数量及冗余数/只	11/2
电阻片规格及数量	$\phi 105 \times 21/1$ 800片(不含冗余)



图11 MOV产品外形图(瓷外套型和复合外套型)

Fig. 11 MOV product contour map (porcelain type and composite coat type)

委托中国电力科学研究院(电力工业设备及仪表质量检验检测中心)按照 GB/T 6115.2—2002、GB 11032—2010 进行了全部型式试验^[19,30]。

4 结语

串联电容器补偿装置保护用金属氧化物限压器(MOV)工作在金属氧化物电阻片的非线性伏安曲线的0.10~1.00 kA区域,并随着串联电容器组的控制策略不同而呈现不同的过电压负荷,具有显著的工况特点。

按照国内典型的工程案例,设计了不同外套的MOV产品,依据相应的国际、国内标准,进行了全部型式试验,试验项目全部满足标准要求。产品于2013年5月19日通过了国家能源局组织的科技技术成果鉴定^[34]。

参考文献:

- [1] 黄振华,陈建业.可控串补(TCSC)技术的应用进展[J].国际电力,2005(3):53-58.
HUANG Zhenghua, CHEN Jianye. Applications of thyristor controlled series compensators[J]. International Electric Power for China, 2005(3): 53-58.
- [2] 牛晓民.串联电容补偿输电线路过电压及串补装置绝缘配合的研究[D].西安:西安交通大学,1998.
NIU Xiaomin. Investigations on overvoltages of transmission lines with series capacitor compensation and insulation coordination of series compensation equipment [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1998.
- [3] 蔡重凯,陈晓宇,金百荣,等.特高压串补电容器内熔丝试验研究[J].电力电容器与无功补偿,2013,34(2):28-33.
CAI Chongkai, CHEN Xiaoyu, JIN Bairong, et al. Research on test of internal fuse for UHV series compensation capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(2): 28-33.
- [4] 韩旭,段晓波,贾萌,等.补偿电容器和串联电抗器的故障分析及整改措施[J].电力电容器与无功补偿,2013,34(5):75-80.
HAN Xu, DUAN Xiaobo, JIA Meng, et al. Fault analysis and improvement measures on compensation capacitor and series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(5): 75-80.
- [5] 刘晓冬.可控串联补偿系统动态模型及串补系统过电压的研究[D].上海:上海交通大学,1998.
LIU Xiaodong. Study on dynamic model of TCSC and overvoltages in series compensation systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 1998.
- [6] 周孝信,郭剑波,林集明,等.电力系统可控串联电容补偿[M].北京:科学出版社,2009.
ZHOU Xiaoxin GUO Jianbo LIN Jiming, et al. Power system controlled series capacitor compensation[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [7] IEC 60143-2 Ed.2.0 Series capacitors for power systems-Part 2: Protective equipments for series capacitor banks [S]. 2011.
- [8] 中华人民共和国. GB/T 6115.2—2002 电力系统用串联电容器 第2部分:串联电容器组用保护设备[S].北京:中国电力出版社,2003.
The People's Republic of China. GB/T6115.2—2002 Series capacitors for power systems-Part 2: Protective equipment for series capacitor banks[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [9] STENSTROM L, LINDBERG P, SAMUELSSON J. Testing procedure for metal oxide varistors protecting EHV series capacitors[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(2):73-78.
- [10] IEEE Std 824TM—2004 IEEE standard for series capacitor banks in power systems.[S]. 2004.
- [11] 中华人民共和国. GB/T 6115.1—2008 电力系统用串联电容器 第1部分:总则[S].北京:中国电力出版社,2008.
The People's Republic of China. GB/T 6115.1—2008 Series capacitors for power systems-Part 1: General [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [12] 何计谋,祝嘉喜.220 kV串联补偿电容器用大容量金属氧化物避雷器[J].电力电容器,2003(4):13-17.
HE Jimou ZHU Jiaxi. 220 kV series compensation capacitor with big capacity of metal oxide surge arrester[J]. Power Capacitor, 2003(4): 13-17.
- [13] 牛晓民,施围,郭洁. ZnO 阀片工频伏安特性在串补电容器 MOV 设计中的应用[J].电瓷避雷器,1997(6):40-44.
NIU Xiaomin, SHI Wei, GUO Jie. ZnO valve U-I characteristics of power frequency application in design of series compensation capacitor MOV[J]. Insulators and Surge Arresters, 1997(6): 40-44.

- [14] HADDAD A, FUENTES J. Characterization of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages [J]. IEE Proceedings A: Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, 1990, 137 (5): 269-279.
- [15] 电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心. $\phi 105 \times 21$ 金属氧化物电阻片残压检验报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.
- Electric Power Industry Electrical Equipment and Instrumentation Quality Inspection and Test Center. $\phi 105 \times 21$ metal oxide resistors residual pressure test report[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2012.
- [16] 董勤晓, 刘之方, 李国富. 国产串补限压器(MOV)的应用[C]//国家电网公司全国避雷器技术交流会论文集. 北京: IEEE, 2009: 10.
- DONG Xiaoqin, LIU Zhifang, LI Guofu. Domestic series compensated pressure limiting device (MOV) applications [C]// State Grid Corporation of Proceedings of the National Lightning Arrester Technology Exchange Meeting. Beijing: IEEE, 2009: 10.
- [17] 国家能源局. DL/T 1156—2012 串联补偿装置用金属氧化物限压器[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- The National Energy Administration. DL/T 1156—2012 metal-oxide varistors for series capacitor banks[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [18] 段振中, 柴健, 朱传林. 限压型低压电涌保护器级间能量配合方式的仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(1): 102-106.
- DUAN Zhenzhong, CHAI Jian, ZHU Chuanlin. Simulation research on energy cooperation mode between levels of voltage-limiting low voltage SPD [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(1): 102-106.
- [19] 赵冬一, 胡淑慧, 王兰义, 等. 智能变电站用金属氧化物避雷器在线监测技术的研究发展[J]. 电瓷避雷器, 2013 (5): 66-72.
- ZHAO Dongyi, HU Shuhui, WANG Lanyi, et al. Research and development of on-line monitoring technology of metal oxide surge arresters for smart substation [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013 (5): 66-72.
- [20] 电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心. $\phi 105 \times 21$ 金属氧化物电阻片能量耐受检验报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.
- Electric Power Industry Electrical Equipment and Instrumentation Quality Inspection and Test Center. $\phi 105 \times 21$ metal oxide resistors energy resistance test report[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2012.
- [21] 电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心. 500 kV 串联补偿电容器组保护用瓷外套金属氧化物限压器(MOV)Y4CR-140/43500 检验报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.
- Electric Power Industry Electrical Equipment and Instrumentation Quality Inspection and Test Center. 500 kV series compensation capacitor bank protection with MOV of ceramic coat (MOV) Y4CR-140/43500 test report[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2012.
- [22] 张节容, 翁晓光. 高压直流断路器吸能装置各柱中电流不平衡性的研究[J]. 高压电器, 1994, 30(3): 28-31.
- ZHANG Jierong, WONG Xiaoguang. High voltage direct current circuit breaker energy absorption device of the current imbalance in each column[J]. High Voltage Apparatus, 1994, 30(3): 28-31.
- [23] 张一鸣, 朱斌, 王新. 避雷器能量吸收与均流技术的研究[J]. 电瓷避雷器, 2008(5): 26-29.
- ZHANG Yiming, ZHU Bin, WANG Xin. Study on energy absorption capability and the current sharing for multi-column arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 1997(6): 40-44.
- [24] 孙自胜, 谭涌波, 冯民学. 串行通信中 RS422 接口浪涌保护器的设计与研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(3): 36-41.
- SUN Zisheng, TAN Yongbo, FENG Minxue. Research and design of surge protective device for serial communication RS422 data interface [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3): 36-41.
- [25] 胡淑慧, 赵冬一, 王家军, 等. 多柱并联电阻片柱冲击电流分布不均匀系数测量方法的研究[J]. 电瓷避雷器, 2012(4): 106-110.
- HU Shuhui, ZHAO Dongyi, WANG Jiajun. Study on measuring methods of non-uniform coefficient of impulse current distribution of multi-column varistors in parallel [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(4): 106-110.
- [26] 电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心. $\phi 105 \times 21$ 金属氧化物电阻片电流分布检验报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.
- Electric Power Industry Electrical Equipment and Instrumentation Quality Inspection and Test Center. $\phi 105 \times 21$ metal oxide resistors current distribution test report [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2012.
- [27] 徐学亭, 赵冬一, 胡淑慧, 等. 高压直流转换开关用避雷器的工况分析及关键技术研究[J]. 电瓷避雷器, 2013 (3): 66-70.
- XU Xueting, ZHAO Dongyi, HU Shuhui, et al. Operating condition analysis and key technologies of surge arrester for HVDC transfer switch [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3): 66-70.
- [28] 崔涛, 曾宏, 刘吕娜, 等. 串补电容器用避雷器在线监测装置的设计[J]. 电瓷避雷器, 2013(4): 64-67.
- CUI Tao, ZENG Hong, LIU Lyuna, et al. Research of MOV online monitoring device used in series compensation capacitor [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(4): 64-67.

(下转第 123 页)

- 机理的探讨[C]//中国电机工程学会第十届青年学术会议.吉林:中国电机工程学会,2008:1-3.
- WANG Kun, ZHANG Guohong, WANG Shixu. Ferro-magnetic resonance over-voltage power system generation mechanism [C]//Chinese Society of Electrical Engineering of the Tenth Conference of Youth.Jilin:Chinese Society of Electrical Engineering, 2008:1-3.
- [9] 戴宪滨. 电磁式电压互感器铁磁谐振及消谐方法的分析[J]. 电气开关, 2011(1):4-5.
- Dai Xianbin. Analysis of electromagnetic voltage transformer ferromagnetic resonance and harmonic elimination method[J]. Electric Switch, 2011(1):4-5.
- [10] 许颖. 过电压防护和绝缘配合[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
- XU Ying. Over-voltage protection and insulation coordination[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2003.
- [11] 平绍勋. 电力系统内部过电压保护及实例分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- PING Shaoxun. Internal power system analysis and examples of over-voltage protection [M]. Beijing:China Electric Power Press, 2006.
- [12] 赵吉东. 配电网几种消谐措施的对比[J]. 西北电力技术, 2004(4):126.
- ZHAO Jidong. Contrast distribution network of several measures for elimination[J]. Northwest Power Technology, 2004(4):126.
- [13] 马朝华, 杨育霞. 基于 MATLAB/SIMULINK 的 CVT 铁磁谐振过程的仿真研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3):209-211.
- MA Zhaohua, YANG Yuxia. Based simulation of MATLAB /SIMULINK ferromagnetic resonance process of CVT [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3):209-211.
- [14] 鲁铁成. 电力系统过电压[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- LU Tiecheng. Electric power system over-voltage[M]. Beijing:China Water Power Press, 2009.
- [15] 杜志叶, 阮江军, 王伟刚. 应用 MATLAB/SIMULINK 仿真研究铁磁谐振[J]. 高电压技术, 2004, 30(9):30-32.
- DU Zhiye, RUAN Jiangjun, WANG Weigang. Application MATLAB/SIMULINK simulation of ferromagnetic resonance[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9):30-32.
- [16] 赵翠宇, 管益斌. 电压互感器与开关断口电容铁磁谐振的分析与预防[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2):72-74.
- ZHAO Cuiyu, GUAN Yibin. Analysis and prevention for voltage transformer and switch capacitor ferromagnetic resonance[J]. Automation of Power Systems, 2002, 26(2):72-74.
- [17] 杨华安. 铁磁谐振过电压原因分析及预防[J]. 江西电力, 2009, 33(4):27-28.
- YANG Hua'an. Ferromagnetic resonance over-voltage analysis and prevention[J]. Jiangxi Electric Power, 2009, 33(4):27-28.
- [18] 刘继军. PT 铁磁谐振过电压的产生原因与抑制措施[J]. 电气开关, 2011(1):4-6.
- LIU Jijun. PT ferromagnetic resonance over-voltage and causes suppression measures [J]. Electrical Switch, 2011(1):4-6.
- [19] 王林峰. 电磁式电压互感器的谐振及主要限制方法[J]. 河北电力技术, 2003, 22(1):15-17.
- WANG Linfeng. Resonance of magnetic voltage transformer and the main limiting method [J]. Hebei Electric Power Technology, 2003, 22(1):15-17.
- [20] 电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册(第5卷)—输变电设备[K]. 北京:机械工业出版社, 1984.
- Editorial Committee of Electrical Engineering Handbook. Electrical engineering handbook (Fifth volumes): Power transmission equipment [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1984.

王淑平(1961—), 女, 高级工程师, 主要从事 252~800 kV GIS 研发和工程设计。

(上接第 117 页)

- [29] The United States GE Company. Pressure relief tests[R]. US:GE Transmition System, 1998.
- [30] 国家绝缘子避雷器质量监督检验中心. Y4CR-140/43500 500 kV 交流电力系统串联补偿电容器组保护用金属氧化物限压器性能试验报告[R]. 西安:西安高压电器研究院有限责任公司, 2013.
- The National Insulator Arrester Quality Supervision and Inspection Center. YH4CR-140/43500 500 kV AC power system series compensation capacitor group of transformer protection using MOV performance test report [R]. Xi'an: Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., 2013.
- [31] 电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心. 500 kV 串联补偿电容器组保护用复合外套金属氧化物限压器(MOV)Y4CR-140/43500 检验报告[R]. 北京:中国电力科学研究院, 2012.
- Electric Power Industry Electrical Equipment and Instrumentation Quality Inspection and Test Center. 500 kV series compensation capacitor bank protection with MOV of composite coat(MOV)YH4CR-140/4350 test report[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2012.
- 赵冬一(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事金属氧化物电阻片、金属氧化物避雷器及其在线监测技术的研究工作。