

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.04.017

磁控式并联电抗器数值计算研究

邢军强¹, 安振¹, 陈雷²

(1. 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 沈阳 110144; 2. 沈阳工业大学, 沈阳 110870)

摘要: 为了限制长距离输电线路过电压和补偿线路充电功率,需要在超高压交流输电线路装设高补偿度的并联电抗器。磁控式并联电抗器由于受铁心饱和特性影响,网侧绕组电流中不可避免地含有高次谐波。笔者以世界上首套 500 kV 可控示范工程为基础,提出一种基于 2D 有限元场路耦合方法,计算分析可控高抗控制特性,并与江陵荆门换流站 500 kV 磁控式电抗器实测结果对比。最后,基于上述方法对超高压 750 kV 可控并联电抗器网侧绕组励磁特性及谐波含量进行分析,通过与现场运行实测数据对比,验证计算方法满足工程应用的有效性。

关键词: 超高压; 磁控式; 并联电抗器; 谐波分析; 控制特性; 有限元; 数值分析; 场路耦合

Study on Numerical Calculation of Magnetically Controlled Shunt Reactor

XING Junqiang¹, AN Zhen¹, CHEN Lei²

(1. TBEA Shenyang Transformer Co., Ltd., Shenyang 110144, China;
2. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To restrict over-voltage and compensate line charging power, it is necessary to install high compensation shunt reactors on ultra-high voltage AC transmission lines. Due to the saturation characteristic of the core during working process, the magnetically controlled shunt reactor (MCSR) contains higher-order harmonics in its high voltage windings. In this paper, the 500 kV MCSR demonstration project is taken as an example, and a finite element-based field-circuit coupling method is proposed to analyze the controlling characteristic of the high voltage winding. The amplitude and frequency of the harmonic in the current of the high voltage winding are calculated with this method. The calculated results are compared with the measured ones of the 500 kV MCSR in Jiangling Converter Station to verify the validity of the proposed method. In addition, the excitation curve and the harmonic current of a 750 kV MCSR are calculated with the proposed method, and the results agree with the measured data.

Key words: ultra-high voltage; magnetically controlled; shunt reactor; harmonic analysis; control characteristic; finite element; numerical analysis; field-circuit coupled

0 引言

为解决煤炭、风电等一次能源与负荷中心分布极不平衡,交流电力系统骨干网架宜采用超/特高压紧凑型线路实现远距离、大容量的输电,达到资源的集约配置^[1-8]。

可控并联电抗器,因其具有控制灵活、响应时间快等特点,不仅可以平滑地调节系统的无功功率,实现真正的柔性输电,还可以抑制工频和操作过电压,

降低线路损耗,从而可大大提高系统的稳定性和安全性^[9-12],因此可控电抗器是超高压和特高压电网中重要的无功补偿装置。由于可控电抗器的工作原理是基于铁心的磁饱和,不可避免地会产生高次谐波^[13-15],若不采取措施对其加以限制,会给电力系统带来危害,甚至无法投入运行。

由于磁控式并联电抗器正常工作时交直流混合励磁,因此很难通过解析法获得不同控制状态下励磁特性。3D 计算量大,耗时长不能满足工程应用需要。文中主要基于 2D 有限元场路耦合仿真,分析可

收稿日期:2014-10-19; 修回日期:2014-11-21

控电抗器在直流偏磁影响下可控本体励磁电流控制特性及网侧电流谐波含量,计算结果与试验对比,提出满足工程应用计算方法。最后,基于上述方法对 750 kV 磁控高抗进行计算分析。

1 超高压 MCSR 应用、结构及原理

最早应用于工业的超高压 MCSR 为 BBC 公司,于 1979 年率先研究制造了 450 MV·A/750 kV 超高压变压器类可控电抗器。目前磁控可控电抗器典型应用见表 1^[16-17]。

表 1 MCSR 典型应用

Table 1 Typical application of MCSR

参数	数值			
电压等级/kV	110.00	220.00	330.00	500.00
额定电压/kV	121.00	220.00	347.00	525.00
额定容量/(MV·A)	25.00	100.00	180.00	180.00
调节时间/s	2.00	0.40	0.70	0.30
空载损耗/kW	25.00	87.70	138.00	90.00
负载损耗/kW	200.00	558.00	753.00	465.00
励磁功率/(MV·A)	0.16	1.00	1.00	1.80
网侧谐波/%	<4.00	<2.00	<2.00	—

图 1 为磁控并联电抗器单相结构示意图及交直流磁通流通方向。

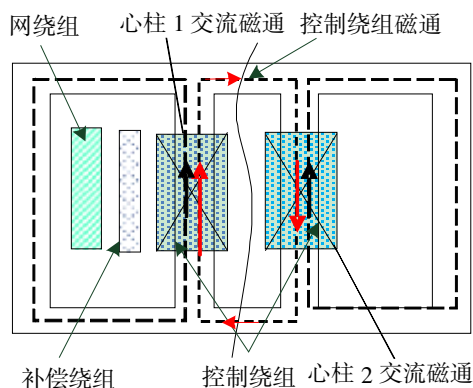


图 1 磁控并联电抗器结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of MCSR

心柱 1、2 在直流磁通和交流磁通叠加后磁化曲线^[18-19]见图 2。

铁心磁密中含有大量奇次谐波,为了降低绕组中三次谐波含量,补偿绕组为角接不仅可以为控制绕组提供电源,也可以为三次谐波电流提供流通通道,消除网侧绕组三次谐波电流。

2 MCSR 励磁特性解析分析

基于图 2 的 MCSR 铁心的磁化特性,其磁化曲线的数学表达式可以简化为^[20]

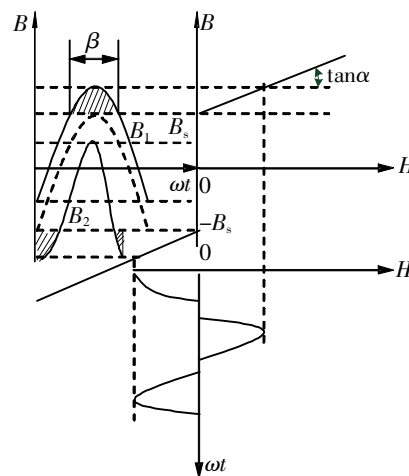


图 2 铁心心柱磁化曲线

Fig. 2 Magnetization curve of core limb

$$H = \begin{cases} \frac{B+B_s}{\mu_0} & B < -B_s \\ 0 & |B| \leq B_s \\ \frac{B-B_s}{\mu_0} & B > B_s \end{cases} \quad (1)$$

当交流磁场发生变化时,根据法拉第感应定律及磁势平衡,由于补偿绕组磁势对励磁关系影响较小,从简化分析角度,忽略不计,简化后电路及磁路方程为^[21-23]:

$$\begin{cases} E_m \sin \omega t = A_s N \frac{dB_1}{dt} = A_s N \frac{dB_2}{dt} \\ E_k = R_k i_k + N_k A_s \left(\frac{dB_1}{dt} - \frac{dB_2}{dt} \right) \\ i_g N + i_k N_k = l H_1 \\ i_g N - i_k N_k = l H_2 \\ H_1 = f(B_1) \\ H_2 = f(B_2) \end{cases} \quad (2)$$

根据磁控电抗器两铁心心柱工作状态对称性,则相应的磁感应强度 B_1 、 B_2 关系为

$$B_1(\omega t) = -B_2(\pi + \omega t); \quad (3)$$

$$B_2(\omega t) = -B_1(\pi + \omega t). \quad (4)$$

对式(3)、(4)进行傅里叶分解,展开后为:

$$B_1(\omega t) = B_d + B_{1m} \sin(\omega t - \varphi_1) + B_{2m} \sin(2\omega t - \varphi_2) + B_{3m} \sin(3\omega t - \varphi_3) + \dots; \quad (5)$$

$$B_2(\omega t) = -B_d + B_{1m} \sin(\omega t - \varphi_1) - B_{2m} \sin(2\omega t - \varphi_2) + B_{3m} \sin(3\omega t - \varphi_3) - \dots. \quad (6)$$

式(5)、(6)中, B_d 为磁感应强度直流分量。

联立式(2)、(3),并根据谐波平衡原理:

$$B_1 = B_d - B_{1m} \cos \omega t; \quad (7)$$

$$B_2 = -B_d - B_{1m} \cos \omega t. \quad (8)$$

由式(9)、(10)可以看出,铁心磁感应强度 B_1 、 B_2 中仅含有工频分量和直流分量,不含其他谐波成分。

由式(2)可得磁控电抗器的工作绕组电流为

$$i_g = \frac{1}{2N} \{f[B_1(\theta)] + f[B_2(\theta)]\}. \quad (9)$$

即

$$i_g = \sum_{n=0}^{\infty} I_{(2n+1)m} \cos[(2n+1)\omega t]. \quad (10)$$

根据式(10)网侧绕组各次谐波幅值为

$$I_{(2n+1)m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{2N} \{f[B_1(\theta)] + f[B_2(\theta)]\} \cos[(2n+1)\theta] d\theta. \quad (11)$$

式(11)中, B_1 、 B_2 分别为图 1 可控模型心柱 1、2 交直流合成磁密。

3 基于场路耦合 500 kV MCSR 控制特性计算及实测对比

由式(11)可以看出, MCSR 不同控制电流下网侧电流基波及各次谐波与心柱磁密存在关系, 解析计算的难点主要在于如何准确得到交直流混合作用下心柱磁密值。为了准确分析可控高抗在系统运行中励磁特性, 笔者提出基于 2D 场路耦合有限元法对 MCSR 不同运行状态进行计算, 对某公司 2005 年研发的 500 kV 磁控式并联电抗器进行仿真分析, 表 2 为湖北江陵(荆门)换流站的 500 kV MCSR 的设计参数。

表 2 500 kV MCSR 的设计参数

Table 2 Design parameters of 500 kV MCSR

参数	数值
额定功率/kvar	40 000
额定线电压/kV	500
额定阻抗/ Ω	2 520
额定电流/A	126
运行频率/Hz	50
冷却方式	ONAN

图 3 为 500 kV 磁控式并联电抗器运行情况。



图 3 运行于江陵换流站的 500 kV MCSR

Fig. 3 500 kV MCSR operating in the Jiangling converter substation

图 4、5 分别为 500 kV MCSR 有限元模型及某时刻铁心内部磁通分布。

由于直流控制电流影响, A、B、C 三相铁心心柱磁密交替饱和, 同时随着直流控制电流改变, 铁心饱

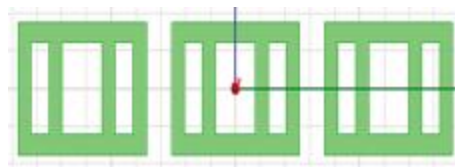


图 4 500 kV 三相磁控式并抗电抗器有限元模型

Fig. 4 Finite element model of 500 kV three phase MCSR shunt reactor

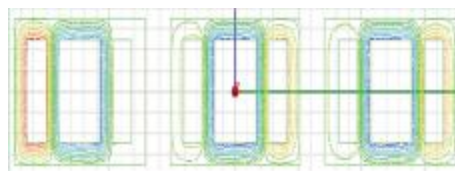


图 5 500 kV MCSR 磁通分布

Fig. 5 Magnetic field distribution of 500 kV MCSR

和度随着变化, 从而实现通过控制磁控并联电抗器阻抗得到控制网侧电流和容量的目的。图 6 为 500 kV 磁控式并联电抗器控制电流和网侧电流对应关系曲线。由图 6 可看出, 模型计算结果与实测数据基本吻合, 因此证明分析方法有效性。在此基础上对控制电流为 1 550 A 时网侧电流谐波傅里叶分析, 与实测结果对比, 对比结果见表 3。

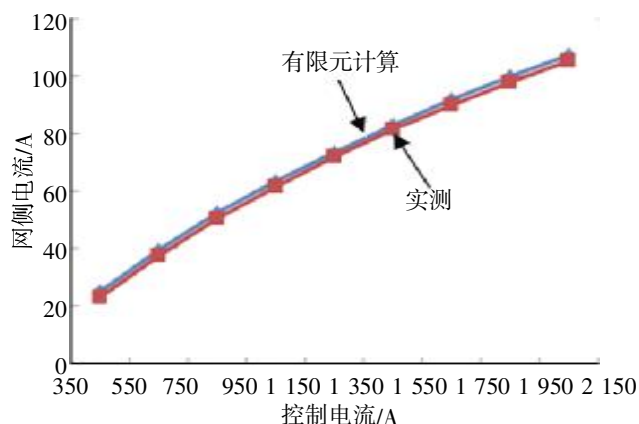


图 6 500 kV 三相磁控式并联电抗器励磁关系曲线

Fig. 6 Excitations curve of 500 kV three phase MCSR

表 3 500 kV MCSR 高压侧电流谐波—直流控制电流 $I_c = 1\ 550\ A$

Table 3 HV-current harmonic of 500 kV MCSR when $I_c = 1\ 550\ A$

谐波次数	三相电流谐波/A			实测基波比/%	计算值基波比/%
	A	B	C		
1	89.90	90.70	90.40	100.00	100.00
3	0.15	0.12	0.31	0.22	0.14
5	3.06	3.01	3.02	3.35	3.74
7	1.45	1.49	1.47	1.62	1.75
9	0.01	0.05	0.04	0.04	0.05
11	0.19	0.19	0.19	0.21	0.24
13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.17

表 3 中可以看到占主要成份为 5、7、11、13 次谐波电流,可控电抗器的谐波电流最大成份为 5 次,励磁电流为 1 550 A 时达到最大的 5 次谐波电流占额定电流比例为 3.35%,有限元计算为 3.74%,有限元计算比实测值略为偏大。

4 基于场路耦合 750 kV MCSR 控制特性计算及实测对比分析

文中研究的 750 kV 可控高抗为西北第 2 通道实现风电无功连续调节的重要组成部分,也是目前运行在海拔最高容量最大的磁控式可控高抗,补偿绕组采用角接降低了高压绕组电流中 3 次谐波,750 kV 磁控并联电抗器参数见表 4。

表 4 750 kV 磁控并联电抗器参数

Table 4 Parameters of 500 kV MCSR

参数	数值
额定功率/kvar	110 000(单相)
额定电压/kV	800
额定阻抗/ Ω	1 939.5
额定电流/A	238.2
运行频率/Hz	50
容量调节范围/%	5~100

图 7 为 750 kV 磁控并联电抗器 2D 有限元模型。

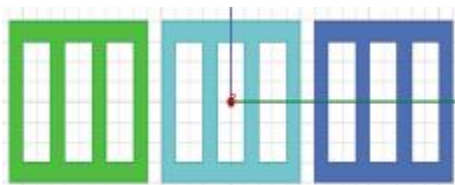


图 7 750 kV 磁控并联电抗器 2D 有限元模型

Fig. 7 2D finite element model of 750 kV MCSR

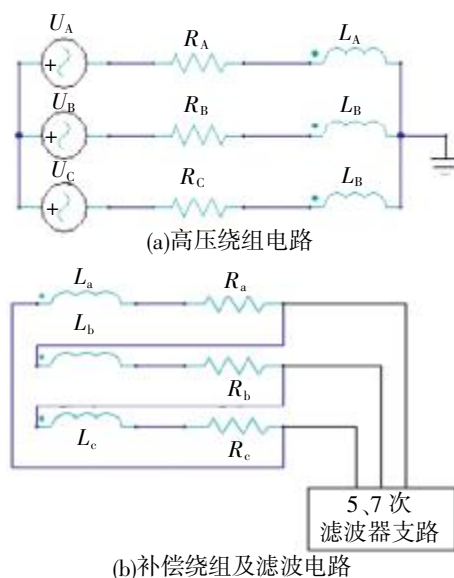
图 8 为 750 kV 磁控式并联电抗器有限元模型耦合的高压侧及控制侧外电路。

图 8 中: U_A 、 U_B 、 U_C 分别代表 750 kV 母线侧每相对应的相电压; R_A 、 R_B 、 R_C 分别为高压绕组 A、B、C 相的相电阻; L_A 、 L_B 、 L_C 为 750 kV 高压侧三相绕组; R_a 、 R_b 、 R_c 分别为补偿绕组每相的相电阻; L_a 、 L_b 和 L_c 为 750 kV 补偿侧三相绕组。

图 9 为 750 kV MCSR 补偿绕组侧加 5、7 次滤波支路前后控制特性计算结果与实测数据,图 10、11 为 750 kV MCSR 补偿绕组侧加 5、7 次滤波支路高压绕组电流谐波变化情况对比。

5 结语

文中分析了 MCSR 励磁特性的解析计算模型,提出基于 2D 场路耦合分析方法对特高压磁控并联



(b) 补偿绕组及滤波电路

图 8 750 kV MCSR 外电路

Fig. 8 External circuit of 750 kV MCSR

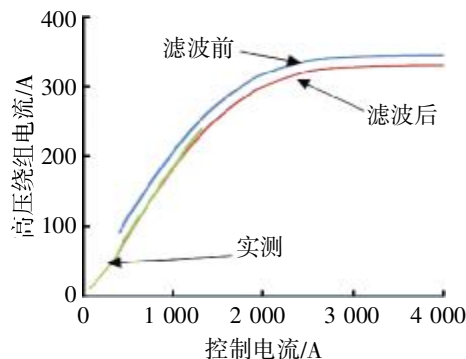


图 9 750 kV 超高压 MCSR 控制特性曲线

Fig. 9 Controlling characteristic curve of 750 kV ultra-high voltage MCSR

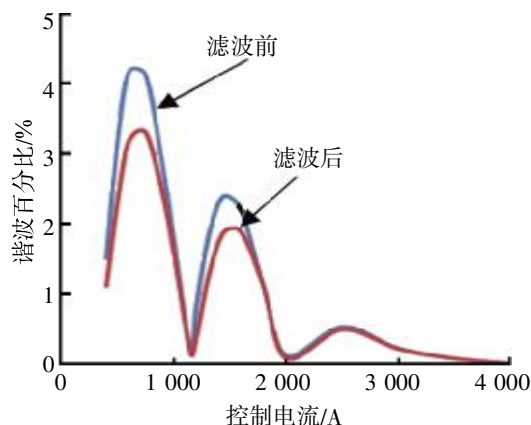


图 10 750 kV 超高压 MCSR 高压绕组电流 5 次谐波变化曲线

Fig. 10 Five harmonic curve for HV winding current of 750 kV ultra-high voltage MCSR

电抗器控制特性进行分析,通过对 500 kV 及 750 kV MCSR 实际运行结果对比分析,验证文中提出 2D 有限元场路耦合分析方法可行性。2D 有限元场路耦合方法相对于 3D 解析更有效,更能满足工程应用需要。

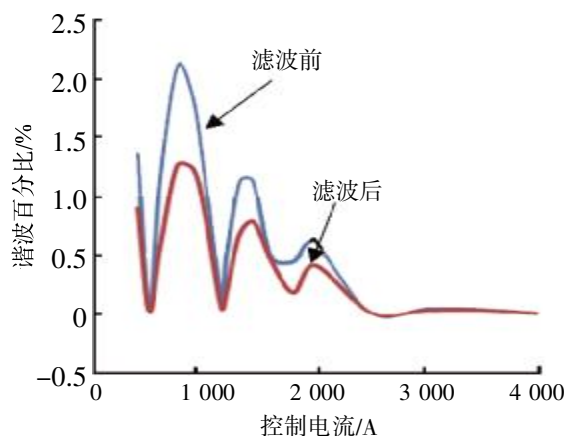


图 11 750 kV 超高压 MCSR 高压绕组电流
7 次谐波变化曲线

Fig. 11 Seven harmonic curve for HV winding current of
750 kV ultra-high voltage MCSR

参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压电网 [M]. 北京:中国经济出版社,2005.
- [2] 刘 媛,董 明,吴雪舟,等.66 kV 干式空心并联电抗器抗震特性仿真分析[J]. 电网与清洁能源,2014,30(2):1-6.
LIU Yuan,DONG Ming, WU Xuezhou, et al. Simulation analysis on anti-seismic characteristics of the 66 kV dry type hollow shunt reactor[J]. Power System and Clean Energy, 2014,30(2):1-6.
- [3] 杜斌祥,张友鹏,田铭兴,等.特高压可控并联电抗器补偿度的研究[J]. 高压电器,2010,46(11):5-11.
DU Binxiang,ZHANG Youpeng, TIAN Mingxing, et al. Research on compensation degree of UHV controllable shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(11):5-11.
- [4] 姚 尧,阮 羚,沈 煜.超高压可控电抗器抑制潜供电流研究[J]. 高压电器,2009,45(2):22-26.
YAO Yao, RUAN Ling, SHEN Yu.Research on compensation degree of UHV controllable shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(2):22-26.
- [5] 田翠花,陈柏超.磁控电抗器在 750 kV 系统中的应用[J]. 电工技术学报,2010,46(11):5-11.
TIAN Cuihua,CHEN Baichao. Application of magnetically controlled reactor in 750 kV power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(1):31-37.
- [6] 蒋 琳,贺应华,王 波.磁控电抗器在调节电网电压中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(1):36-43.
JIANG Lin, HE Yinghua,WANG Bo. Application of magnetically controlled reactor to the grid voltage regulation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013,34(1): 36-43.
- [7] 陈柏超,陈维贤.超高压可控电抗器限压特性及谐波分析[J]. 中国电机工程学报,1997,17(2):122-125.
CHEN Baichao,CHEN Weixian.Analyses of harmonics and overvoltage limitation characteristics of EHV controlled reactor[J]. Proceedings of the CSEE,1997,17(2):122-125.
- [8] 王凤翔,耿大勇.移相电抗器对变流器供电系统谐波抑制的机理研究[J]. 中国电机工程学报,1997,17(2):122-125.
WANG Fengxiang, GENG Dayong.Study on harmonic repression of converter-fed power system by using phase-shifting reactor [J]. Proceedings of the CSEE,1997,17(2): 122-125.
- [9] 罗隆福,陈 波,许加柱.磁饱和可控电抗器等效模型在设计中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(5):70-74.
LUO Longfu,CHEN Bo,XU Jiazhu.Application of equivalent physical model of magnetically saturated controllable reactor in the design [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011,23(5):70-74.
- [10] 尤丹华,蒋光祖.单相感应调压器直接构成可调电抗器的实施方案[J]. 高压电器,2013,50(10):52-55.
YOU Danhua, JIANG Guangzu. Implementation plans of single-phase induction regulator form adjustable reactor[J]. Transformer,2013,50(10):52-55.
- [11] 周勤勇,李 晶,秦晓辉,等.串补和可控电抗器在特高压电网的应用[J]. 中国电力,2010,43(2):36-38.
ZHOU Qinyong,LI Jing,QIN Xiaohui,et al.Application of series compensators & controllable shunt reactors in UHV power grid[J]. Electric Power,2010,43(2):36-38.
- [12] 段力勇,王承民,亚历山大洛夫·戈·尼.变压器式可控电抗器静态无功功率双向控制原理研究[J]. 电网与清洁能源,2013,29(1):9-15.
DUAN Liyong, WANG Chengmin, ALEXANDROV G N. Research on the bidirectional control principle of reactive power based on a transformer type controllable shunting reaction[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(1):9-15.
- [13] BRYANTSEV A,BRYANTSEV M,BAZYLEV B,et al. Power compensations based on magnetically controlled shunt reactors in electric networks with a voltage between 110 kV and 550 kV [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition.New Orleans,Louisiana:IEEE, 2010:239-244.
- [14] 陈绪轩,田翠花,陈柏超,等.多级饱和磁阀式可控电抗器谐波分析数学模型[J]. 电工技术学报,2011,26(3):57-67.
CHEN Xuxuan,TIAN Cuihua,CHEN Baichao,et al.Mathematical model for harmonics analysis of the multi-stage saturable magnetic-valve controllable reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(3):57-67.
- [15] KARYMOV P R,EBADIAN M.Comparison of magnetically controlled reactor (MCR) and thyristor controlled reactor (TCR) from harmonics point of view[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2007,29(3): 191-198.
- [16] 钟俊涛,安 振,章海庭.超高压可控并联电抗器的研发及制造[J]. 电力设备,2006,7(12):7-10.
ZHONG Juntao,AN Zhen,ZHANG Haiting.R & D and manufacturing of EHV controllable shunt reactor[J]. Electrical Equipment,2006,7(12):7-10.

(下转第 103 页)

- LIN Xin, SHI Kejian, XU Jianyuan. Analysis on seismic performance of ultra-high voltage HGIS equipment [J]. Journal of Shenyang University of Technology (Social Science Edition), 2013, 35(2): 121-125.
- [12] GB/T 13540—2009 高压开关设备和控制设备的抗震要求[S].2009.
GB/T 13540—2009 Seismic qualification for high voltage switchgear and controlgear[S].2009.
- [13] GB/T 2424.25—2000 电工电子产品环境试验第三部分: 试验导则 地震试验方法[S].2000.
GB/T 2424.25—2000 Environmental testing for electric and electronic products — Part3: Test guidance— Seismic test methods[S]. 2000.
- [14] GB 50260—2013 电力设施抗震设计规范[S].2013.
GB 50260—2013 Code for seismic design of electrical installations[S].2013.
- [15] 李洪泉, 高占阳, 陈 飞. 陶板幕墙抗震性能振动台试验研究[J]. 世界地震工程, 2012, 28(3): 11-14.
LI Hongquan, GAO Zhanyang, CHEN Fei. Shaking table test on seismic behavior of ceramic plate curtain wall[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(3): 11-14.
- [16] 楼 丹, 武 奇. 72.5 kV 气体绝缘开关设备的抗震计算分析[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 78-80.
LOU Dan, WU Ji. Anti-seismic analysis of 72.5 kV gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 78-80.
- [17] 谢 强, 王健生, 杨 雯, 等. 220 kV 断路器抗震性能地震模拟振动台试验[J]. 电力建设, 2011, 32(10): 10-14.
XIE Qiang, WANG Jiansheng, YANG Wen, et al. Shake table test on seismic performance of 220 kV circuit breaker [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(10): 10-14.
- [18] 曹枚根, 周福霖, 谭 平, 等. 地震作用下断路器动力时程分析及阻尼效应研究[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 27-35.
CAO Meigen, ZHOU Fulin, TAN Ping, et al. Analysis on dynamic time-history of circuit breaker and damping ratio effect under earthquake[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 27-35.
- [19] 柳永玉, 王均梅, 王晓琪, 等. 500 kV 电流互感器抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 219-223.
LIU Yongyu, WANG Junmei, WANG Xiaoqi, et al. Seismic performance analysis of 500 kV current mutual transformer[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(1): 219-223.
- [20] 赵 阳, 黄新波, 朱海涛, 等. 智能高压开关柜 IED 设计[J]. 陕西电力, 2014, 42(7): 69-74.
ZHAO Yang, HUANG Xinbo, ZHU Haitao, et al. Design on intelligent electronic device of high voltage switchgear[J]. 2014, 42(7): 69-74.
- [21] 顾云霞, 孙海文, 金 虎. TEV 与超声波法在开关柜局部放电检测中的应用[J]. 陕西电力, 2012, 40(12): 12-16.
GU Yunxia, SUN Haiwen, JIN Hu. Probe into partial discharge detection and location of switchgear based on TEV and ultrasonic wave methods [J]. Shaanxi Electric Power 2012, 40(12): 12-16.
- [22] ANG A S, PIRES J, VILLAVARDE R, et al. Seismic probabilistic reliability assessment of electric power transmission systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 51(1): 7-12.
- [23] IEEE Std 693—2005 Recommended practice for seismic design of substations[S]. 2005.
- [24] 张 杰, 马宏伟. 矿用高压开关柜的弧光监测与保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 141-145.
ZHANG Jie, MA Hongwei. Online monitoring and protection system for the arc fault of the mining high-voltage switchgear [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 141-145
- 赵明帅(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程抗震减灾研究。 (编辑 袁 妮)
-
- (上接第 97 页)
- [17] 欧阳璋, 刘全峰, 梁艺超, 等. 干式空心电抗器工频磁场屏蔽方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6): 66-73.
OUYANG Zhang, LIU Quanfeng, LIANG Yichao, et al. Study on power frequency magnetic field shielding method of dry air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(6): 66-73.
- [18] BRYANTEEV A, DOROFEEV V, ZILBERMAN M, et al. Magnetically controlled shunt reactor application for AC HV and EHV transmission lines[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2006: 66-71.
- [19] 蔡宣三, 高越农. 可控饱和电抗器原理、设计与应用[M]. 北京: 中国水利电力大学出版社, 2008.
- [20] CHEN Xuxuan, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. Modeling and harmonic optimization of a two-stage magnetically controlled reactor for an arc suppression coil [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2824-2831.
- [21] 陈伯超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [22] 周丽霞, 尹忠东, 张 华, 等. 可控电抗器及其谐波抑制的研究[J]. 现代电力, 2006, 23(2): 10-14.
ZHOU Lixia, YIN Zhongdong, ZHANG Hua, et al. Research on controllable reactor and its harmonic suppression[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(2): 10-14.
- [23] LIANG Yanping, ZHANG Yue, ZHANG Haiting, et al. The 500 kV MCSR modeling and steady-state characteristics analysis[C]//International Conference on Electrical Machine and Systems (ICEMS). Beijing, China: IEEE, 2011: 1-6.
- 邢军强(1979—), 男, 工程师, 博士, 主要从事高电压的研究。
安 振(1971—), 男, 教授级高工, 博士在读, 主要从事变压器的研究。 (编辑 袁 妮)