

电压源型换流阀在绝缘型式试验下电场仿真计算

张 栋¹, 欧阳有鹏¹, 尚慧玉², 赵宏伟², 谢晔源¹, 朱铭炼¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 广东供电局有限公司, 广东 广州 510620)

摘要:模块化多电平电压源型换流器作为柔性环网控制器和统一潮流控制器(UPFC)系统中的关键设备,其运行的可靠性直接影响到整个系统的安全稳定运行。文中以应用于柔性环网控制器及苏南500 kV UPFC工程的换流阀作为研究对象,采用PTC Creo 3D与Ansys混合建模技术,建立了换流阀塔的三维模型,详细计算了换流阀塔在绝缘型式试验下的电场分布。计算结果表明:换流阀塔对地空气间隙、层间空气间隙以及换流阀塔的外表面的空气介质等绝缘强度都能满足换流阀绝缘型式试验的要求,保证换流阀的安全可靠运行。

关键词:柔性环网控制器;统一潮流控制器;模块化多电平电压源型换流器;绝缘型式试验;电场计算

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)02-0076-06

0 引言

电压源型换流器自1990年提出以来,目前已经广泛应用于孤单供电、分布式发电、异步交流电网互联、城市电磁环网以及柔性交流输电技术。如基于电压源型换流器技术的柔性环网控制器可实现电网软分区运行、短路电流抑制、潮流优化、无功支撑等功能,为解决电磁环网问题提供了新的方向。又如统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)可以快速控制输电线路有功和无功潮流,提高线路的输送能力,同时可以提高系统电压稳定性,改善系统阻尼,提高功角稳定性^[1,2]。

目前,基于模块化多电平换流器的柔性环网控制示范工程正在规划中,而世界上第一个基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术的UPFC工程已经在南京西环网220 kV UPFC工程中成功应用^[3-5]。其中,换流阀作为柔性环网控制器和UPFC的核心设备,运行工况非常复杂,能否安全运行直接影响到整个系统的运行可靠性与稳定性,而换流阀的屏蔽与绝缘设计可靠性直接影响到换流阀的安全稳定运行。

国际电工委员会IEC 62501-1标准所规定的型式试验是换流阀必须遵守的试验要求与验收标准。换流阀的型式试验包括运行试验与绝缘试验。其中,绝缘试验包括阀支架电介质试验以及阀端间电介质试验^[6]。阀支架电介质试验可以检验阀支架绝缘介质的对地电压耐受能力、绝缘裕度是否满足要求;阀端间电介质试验可以检测阀塔各组件之间的电压耐受能力、绝缘裕度是否满足要求。因此,

收稿日期:2017-01-04;修回日期:2017-02-11

基金项目:中国南方电网重点科技项目(GZHKJ 00000101)

建立换流阀塔的三维模型,在型式试验中进行电场仿真计算对于检验和优化换流阀的屏蔽与绝缘设计具有重要指导意义^[7]。

本文以苏南500 kV UPFC工程的模块化多电平电压源型换流阀作为研究对象,采用有限元分析方法系统地型式试验中换流阀的进行电场仿真计算,对换流阀塔对地、层间等空气间隙进行电场计算,对换流阀塔外表面进行电场计算,详细分析了换流阀塔的电场分布。

1 换流阀概述与型式试验

1.1 苏南500 kV UPFC工程概述

苏南500 kV UPFC模块化多电平换流阀包括并联侧换流器1套,接入木渎500 kV母线;串联侧换流器2套,分别接入木渎—梅里500 kV双回线路。每套换流器由6个桥臂组成,每个桥臂为1个完整阀塔。其主回路拓扑结构如图1所示。

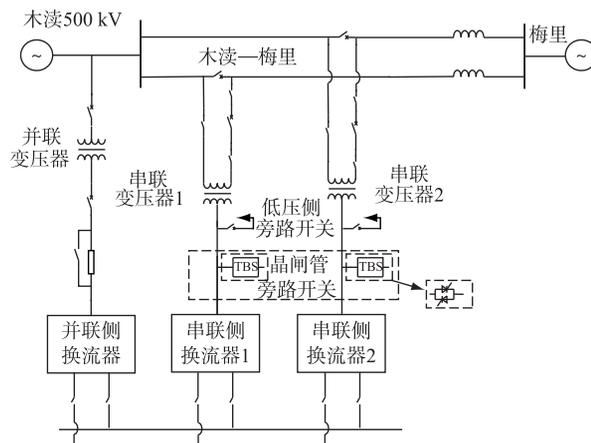


图1 苏南500 kV UPFC主回路拓扑结构

Fig.1 Sunan 500 kV UPFC main circuit topology diagram

1.2 换流阀型式试验

IEC 62501 高压直流输电电压源换流器(VSC)阀电气试验是换流阀在出厂前必须遵守的试验要求和验收标准。其中,绝缘试验包括阀支架电介质试验和阀端间电介质试验,试验电压如表 1 所示。

表 1 换流阀绝缘试验试验电压

试验类别	试验项目	试验要求
阀支架电 介质试验	阀支架直流 电压试验	155 kV(1 min) 101 kV(3 h)
	阀支架交流 电压试验	116 kV(1 min) 76 kV(30 min)
	阀支架雷电冲击试验	峰值电压 450 kV
	阀支架操作冲击试验	峰值电压 360 kV
阀端间电 介质试验	阀交流-直流 电压试验	114+121(ωt)kV(10 s) 104+106sin(ωt)kV(3 h)

2 换流阀塔的有限元模型搭建

2.1 换流阀塔的电场原理分析

换流阀塔主要采用空气绝缘和固体绝缘结构。通过对换流阀塔的电场分布进行计算,可以为换流阀塔的屏蔽系统设计提供理论依据^[8-12]。

根据现有理论,三维空间下的电场定解条件为:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 \\ \beta \frac{\partial \varphi}{\partial n} + \gamma \varphi | \gamma = q \end{cases} \quad (1)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (2)$$

式(1)中: β 为 0 时,为第一类边界条件; γ 为 0 时,为第二类边界条件; β 和 γ 都不为 0 时,为第三类边界条件^[13-16]。具体根据计算模型的实际情况而定。

根据式(2)得出,电场强度可表示标量电位的负梯度。在电位变化剧烈区域,电场强度较大,电场分布比较集中,故在金属组件(高电位)附近的空气区域以及金属组件与绝缘组件的连接区域将是本文研究的重点对象。

2.2 换流阀塔模型建模与处理

采用 PTC Creo 3D 和 Ansys 混合建模技术建立换流阀塔模型。阀塔为 3 层双列环抱式结构,整个阀塔共有 12 根支撑绝缘子,48 根层间绝缘子;阀塔采用屏蔽系统设计,共有 24 个屏蔽罩,顶层对称布置 2 根均压环;共计 126 个功率模块槽位。

由于换流阀塔整体结构复杂,规模庞大,直接网格剖分不仅对于计算机的处理能力有很高的要求,并且可能由于细小零件导致剖分失败。因此,需要对换流阀塔模型进行合理的简化处理,重点关注屏蔽罩、均压环、绝缘子等组件。具体简化步骤如下^[17]:

(1) 忽略绝缘子伞群对电位分布的影响,将绝缘子的伞群简化为圆柱体;

(2) 忽略细小零部件对整体电位分布的影响,在进行计算时不予考虑;

(3) 忽略功率模块内部零部件对整体电位分布的影响,将功率模块简化为长方体;

(4) 忽略部分绝缘组件对整体电位分布的影响,将功率模块支撑的绝缘横梁、水管、光缆槽等绝缘组件在计算时不予考虑。

简化后的有限元模型如图 2 所示。

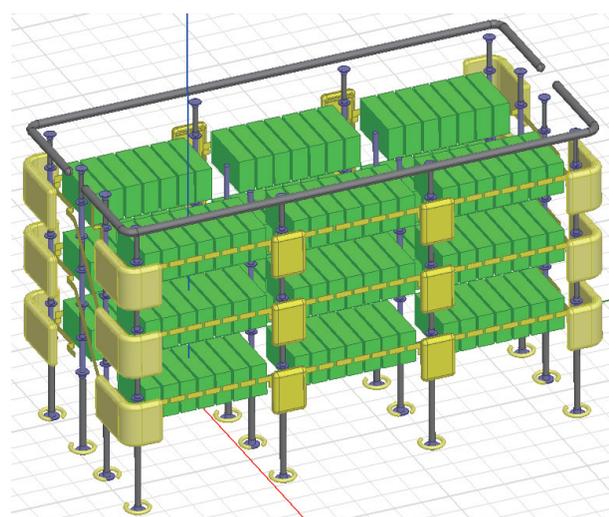


图 2 苏南 500 kV UPFC 换流阀塔的有限元模型

Fig.2 Finite-element model of Sunan 500 kV UPFC converter valve

2.3 换流阀塔电场计算场域与材料属性

根据实际的型式试验大厅尺寸,建立换流阀塔的 60 m×48 m×33 m 的长方体求解域,如图 3 所示。

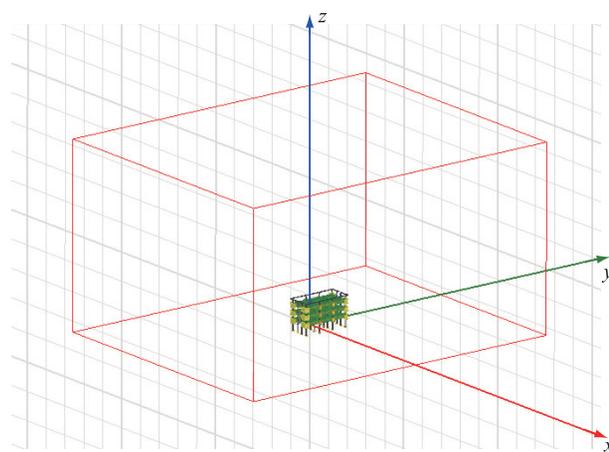


图 3 换流阀塔的计算场域

Fig.3 Solution domain of converter valve

其中,阀塔的支撑绝缘子的金具(包括均压环)、支撑地面以及其他 5 个面均施加零电位。阀塔的其他金属组件根据表 1 所示的试验电压施加相应的载荷即可。根据式(1)可知,本文所计算的边

界条件为第一类边界条件。

在进行换流阀塔的电场仿真计算时,绝缘子相对介电常数为 4.5,空气的相对介电常数为 1。目前,对于金具表面的场强控制值并没有统一标准,本文选取 2.5 kV/mm 作为苏南 500 kV UPFC 模块化多电平电压源型换流阀在型式试验中的金具表面工作场强控制值。

2.4 阀支架电压下的电位分布

在进行阀支架电压试验时,换流阀塔的屏蔽罩、金属框架、顶部均压环、功率模块以及连接母排等金属组件全部短接在一起,承担试验电压;支撑绝缘子的底部金具,电位为 0 V。阀塔电位分布如图 4 所示。

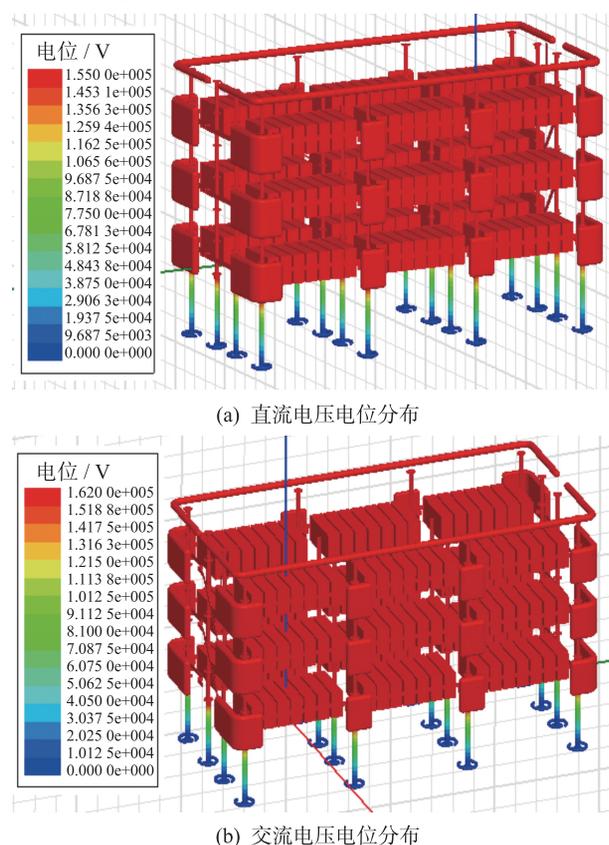


图 4 阀支架电压试验下的电位分布

Fig.4 Potential distribution of valve support in insulation test

2.5 阀端间交流-直流电压下电位分布

在进行阀端间交流-直流试验时,换流阀塔的所有功率模块均匀承担着试验电压,各屏蔽罩、母排、金属框架以及顶部均压环按照“就近原则”进行等电位连接;支撑绝缘子的底部金具,电位为 0 V。阀塔电位分布如图 5 所示。

3 阀绝缘型式试验下的电场计算

3.1 阀支架电压下的电场计算

由于换流阀塔采用的支撑式结构,故计算分析

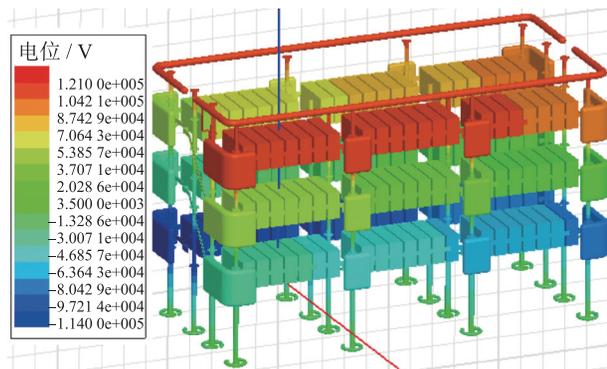


图 5 阀端间交流-直流电压试验下的电位分布

Fig.5 Potential distribution of valve between the head and the tail in insulation test

阀塔与地面之间的空气间隙的绝缘强度非常有必要。阀支架电压下的电场分布如图 6—8 所示。

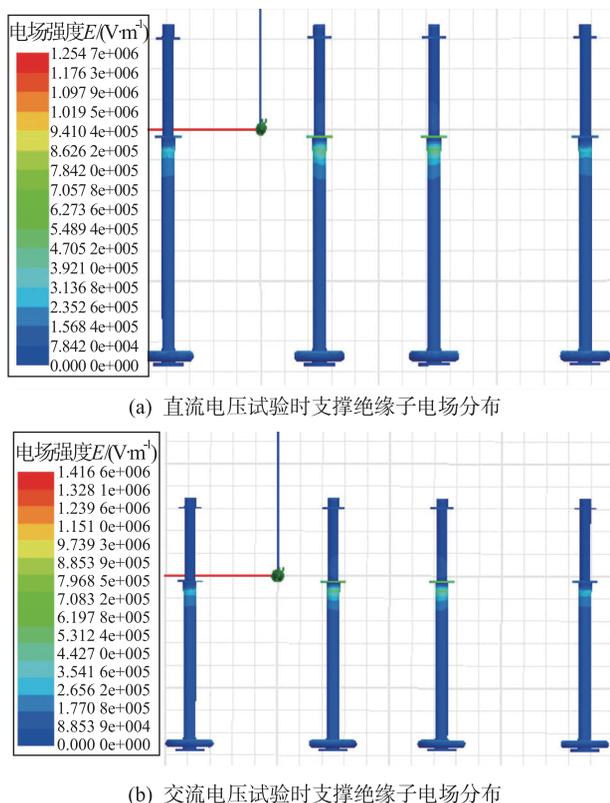


图 6 阀支架电压试验下的最大电场分布

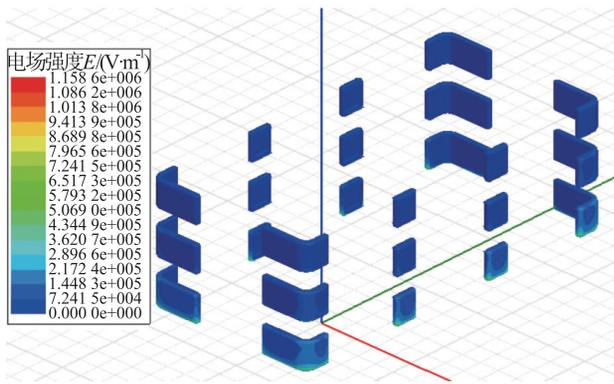
Fig.6 Electric field distribution of valve support

3.2 阀支架电压下的电场分析

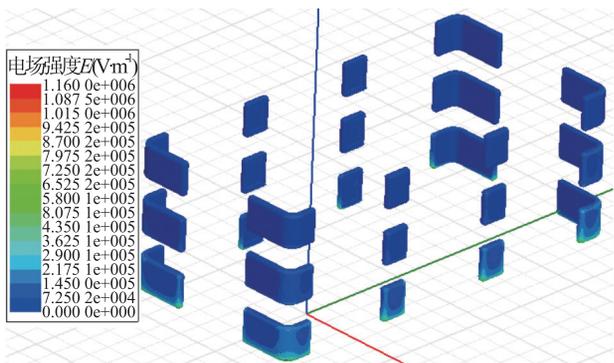
分析阀支架电压下的电场分布图 6—8 可知:

(1) 在阀支架直流电压试验和交流电压试验时,换流阀塔表面的最大电场强度分别为 1.25 kV/mm 和 1.41 kV/mm,都位于支撑绝缘子的金具与绝缘介质连接的区域,这是由于该区域电位梯度变化比较剧烈,因此导致此处电场比较集中,小于空气中的电场击穿场强,不会产生电晕及放电现象。

(2) 在阀支架直流电压试验和交流电压试验下,换流阀塔的屏蔽罩的表面最大电场强度分别为



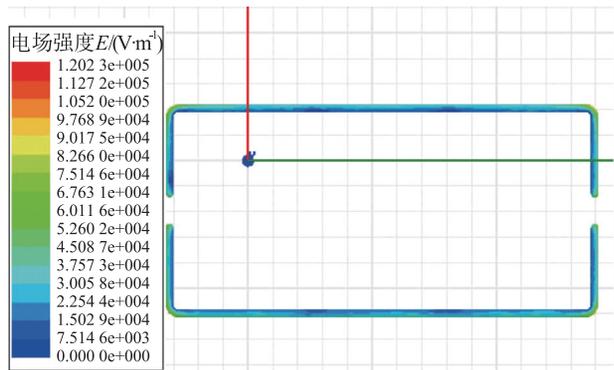
(a) 直流电压试验时屏蔽罩电场分布



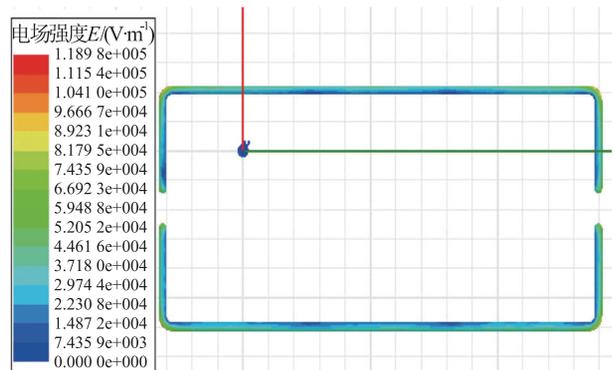
(b) 交流电压试验时屏蔽罩电场分布

图 7 阀支架电压试验下的屏蔽罩电场分布

Fig.7 Electric field distribution of shield covers



(a) 直流电压试验时顶部均压环电场分布



(b) 交流电压试验时顶部均压环电场分布

图 8 阀支架电压试验下的顶部均压环电场分布

Fig.8 Electric field distribution of grading ring

1.15 kV/mm 和 1.16 kV/mm,都位于底层屏蔽罩边缘处,这是由于该区域与地面零电位距离最近,但是由于屏蔽罩在设计时都进行了“倒角”处理并打磨光滑,降低了其表面电场强度。换流阀塔的顶部均压环的表面最大电场强度分别为 0.12 kV/mm 和 0.119 kV/mm,都位于均压环的拐角处。

3.3 阀端间交流-直流电压下的电场计算

在阀端间交流-直流电压试验时,主要校验换流阀塔层间、功率模块之间以及换流阀塔的屏蔽罩表面等空气间隙的绝缘强度。屏蔽罩表面的电场分布如图 9 所示。按照电位升高的顺序,将屏蔽罩进行 1-8 编号,如图 10 所示。表 2 列出了换流阀塔各层屏蔽罩表面的最大电场分布情况。在阀端间交流-直流电压试验下电场分布如图 11-13 所示。

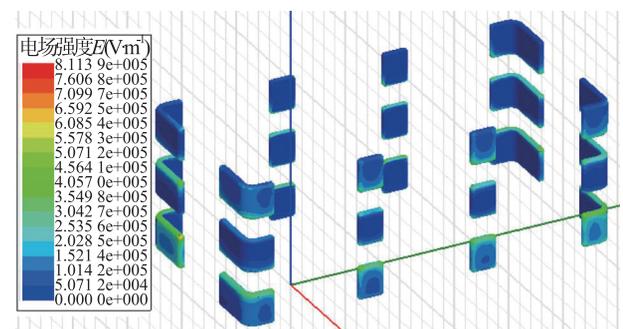


图 9 阀端间电压试验下的屏蔽罩电场分布

Fig.9 Electric field distribution of shield covers

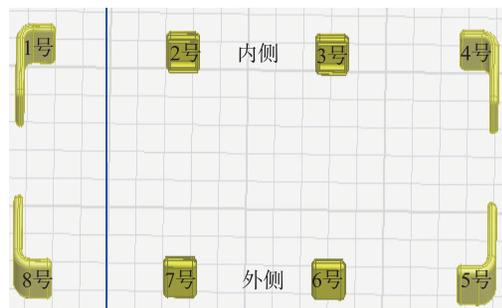


图 10 换流阀塔的屏蔽罩编号

Fig.10 Number of shield covers of converter valve

表 2 换流阀绝缘试验屏蔽罩最大电场分布

Table 2 Max electric field distribution of shield covers (kV · mm⁻¹)

层数	屏蔽罩编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
底层	0.73	0.55	0.56	0.54	0.53	0.50	0.53	0.54
中间层	0.46	0.68	0.40	0.49	0.52	0.81	0.57	0.57
顶层	0.52	0.57	0.79	0.59	0.58	0.77	0.54	0.48

3.4 阀端间交流-直流电压下的电场分析

分析阀端间交流-直流电压下的电场分布图 9-13 可知:

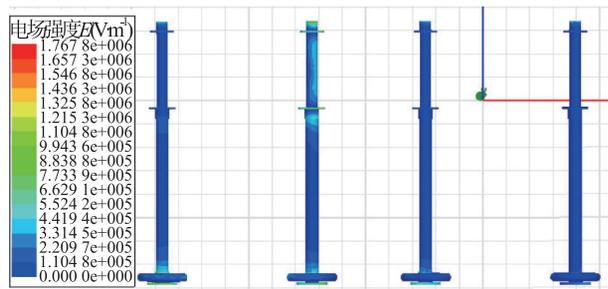


图 11 阀端间电压试验下的最大电场分布

Fig.11 Electric field distribution of insulator surface

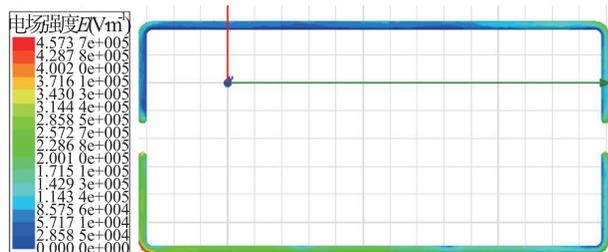


图 12 阀端间电压试验下的顶部均压环电场分布

Fig.12 Electric field distribution of grading ring

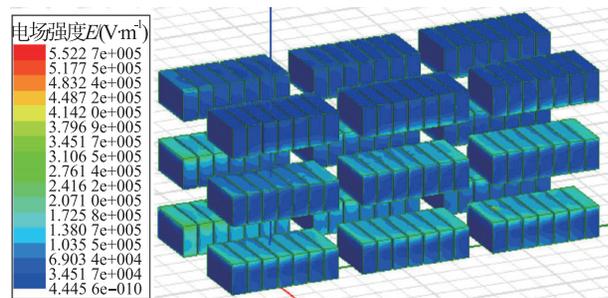


图 13 阀端间电压试验下的功率模块电场分布

Fig.13 Electric field distribution of sub module

(1) 在阀端间交流-直流电压下,换流阀塔的屏蔽罩表面最大电场强度为 0.81 kV/mm ,位于中间层的 6 号屏蔽罩,其他各层屏蔽罩表面电场强度在 $0.4 \sim 0.8 \text{ kV/mm}$,小于空气中的电场击穿场强,不会产生电晕及放电现象,且各个屏蔽罩的电场分布比较均匀。

(2) 在阀端间交流-直流电压下,换流阀塔的表面最大电场强度为 1.77 kV/mm ,位于支撑绝缘子的金具表面;换流阀塔的顶部均压环的表面最大电场强度为 0.45 kV/mm ,位于均压环的拐角处;换流阀塔的功率模块表面的最大电场强度为 0.55 kV/mm ,位于功率模块的边沿处,仿真计算时考虑比较恶化的结构(无倒角)。

4 结语

由于换流阀采用支撑结构,主要校核换流阀对地空气间隙中的绝缘强度,通过绝缘型式试验下的阀支架直流电压试验、交流电压试验进行绝缘性能

评估;由于分层排列布置,主要校核换流阀层间以及模块之间空气间隙的绝缘强度,通过绝缘型式下的阀端间交流-直流电压试验进行绝缘性能评估。

本文根据电磁场基本原理,建立了以苏南 500 kV UPFC 模块化多电平电压源型换流阀的有限元模型,详细研究了换流阀在绝缘型式试验下电场分布,计算结果表明:换流阀塔对地空气间隙、层间空气间隙以及换流阀塔的外表面的空气介质等绝缘强度都能满足换流阀绝缘型式试验的要求,由于采用了屏蔽结构,换流阀的外表面电场分布比较均匀。

参考文献:

- [1] IEC 60633—1998 Terminology for high-voltage direct current (HVDC) transmission[S].
- [2] 朱鹏程,刘黎明,刘小元,等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):45-51.
ZHU Pengcheng, LIU Liming, LIU Xiaoyuan, et al. Analysis and study on control strategy for UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(1):45-51.
- [3] 王莹,甄宏宁,常宝立,等. UPFC 在南京西环网中的应用需求分析[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):53-56.
WANG Ying, ZHEN Hongning, CHANG Baoli, et al. Research on the application of UPFC in Nanjing western grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016,35(1):53-56.
- [4] 凌峰,秦健,戴阳,等. 南京 UPFC 工程运行方式[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):36-40.
LING Feng, QIN Jian, DAI Yang, et al. The operation modes for nanjing UPFC project[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(6):36-40.
- [5] 张军,吴金龙,梁云丹,等. 南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):1-4.
ZHANG Jun, WU Jinlong, LIANG Yundan, et al. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC project[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(6):1-4.
- [6] IEC 62501 Voltage sourced converter(VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission-electrical testing[S]. 2014.
- [7] 曹均正,汤广福,王高勇,等. $\pm 1100 \text{ kV}$ 特高压直流输电换流阀研制及型式试验[J]. 南方电网技术,2012,06(6):67-71.
CAO Junzheng, TANG Guangfu, WANG Gaoyong, et al. The development and type test of converter valve for $\pm 1100 \text{ kV}$ UHVDC Transmission[J]. Southern Power System Technology, 2012,06(6):67-71.
- [8] LI Jing, PENG Zongren, FENG Yong, et al. Electric field calculation and grading ring optimization of composite insulator for 500 kV AC transmission lines[C]//2010 10 th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Xi'an, China: IEEE, 2010:1-4.
- [9] 李鹏,范建斌,李光范,等. 1000 kV 级特高压交流线路绝缘子串电位分布计算和均压环设计[J]. 中国电力,2006,39

- (10):33-36.
- LI Pneg, FAN Jianbin, LI Guangfan, et al. Electric field distribution calculation and grading ring design of insulators string for 1000 kV UHVAC lines[J]. Electric Power, 2006, 39(10):33-36.
- [10] 崔 翔. 应用边界电场约束方程计算第一类边界上的场强分布[J]. 中国电机工程学报, 1987, 07(1):51-58.
- CUI Xiang. Computation of electric field intensity on the dirichlet's boundary surface by the finite element method with constrained electric field equation on the boundary[J]. Proceedings of the CSEE, 1987, 07(1):51-58.
- [11] 孙美玲, 江 山. 有限元方法 Gauss 积分和 Hamme 积分方案[J]. 南通职业大学学报, 2009, 23(3):67-70.
- SUN Meiling, JIANG Shan. The gauss integral scheme and hammer integral scheme in the finite element method[J]. Journal of NanTong Vocational College, 2009, 23(3):67-70.
- [12] JIN Jiangming. The finite element method in electromagnetics [M]. New York: A Wilay-interscience Publication, 2002:180.
- [13] 张 军, 吴金龙, 梁云丹, 等. 基于有限元的模块化多电平换流器绝缘结构分析[J]. 电力建设, 2014, 35(3):31-35.
- ZHANG Jun, WU Jinlong, LIANG Yundan, et al. Finite element analysis on insulation structure of modular multi-lever converter[J]. Electrical Power Construction, 2014, 35(3):31-35.
- [14] 齐 磊, 李 超, 王星星, 等. 柔性直流换流阀塔交流电场仿真计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(11):3537-3543.
- QI Lei, LI Chao, WANG Xingxing et al. Simulation calculation of AC electrical field for valve tower of flexible HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3537-3543.
- [15] 王 栋, 阮江军, 林志叶, 等. ± 500 kV 直流换流站阀厅内金具表面电场数值求解[J]. 高电压技术, 2011, 37(2):404-410.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, LIN Zhiye, et al. Numerical solution of power fittings about surface electric field in ± 500 kV DC converter station valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2):404-410.
- [16] 周学斌, 何东升, 黄大新, 等. 基于 SolidWorks 设计及有限元分析在机械工程中的应用[J]. 科技信息, 2008(31):129-130, 84.
- ZHOU Xuebin, HE Dongsheng, HUANG Daxin, et al. Application of solidWorks design and finite element method analysis for mechanical engineering[J]. Science and Technology Information, 2008(31):129-130, 84.
- [17] 王星星, 罗 潇, 齐 磊, 等. 高压直流换流阀用绝缘子表面电场及均压环设计[J]. 电网技术, 2014, 38(2):289-296.
- WANG Xingxing, LUO Xiao, QI Lei, et al. Calculation of electrical field distribution along composite insulator and design of grading ring of HVDC conver valve [J]. Power System Technology, 2014, 38(2):289-296.

作者简介:



张 栋

张 栋(1977—),男,江苏盐城人,工程师,从事电力系统自动化工作;

欧阳有鹏(1985—),男,湖北襄阳人,工程师,从事柔性直流输电和无功补偿技术研究工作;

尚慧玉(1982—),女,江西南昌人,高级工程师,从事电力系统运行管理工作;

赵宏伟(1982—),男,河北张家口人,高级工程师,从事电网运行方式分析和控制研究工作;

谢晔源(1978—),男,江西九江人,高级工程师,从事柔性直流输电、柔性交流输电和无功补偿技术研究工作;

朱铭炼(1985—),男,江苏靖江人,工程师,从事柔性直流输电技术研究工作。

Electric Field Simulation and Calculation of Voltage Sourced Converter Valve in Insulation Type Test

ZHANG Dong¹, OUYANG Youpeng¹, SHANG Huiyu², ZHAO Hongwei², XIE Yeyuan¹, ZHU Minglian¹

(1. NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102, China; 2. Guangzhou Power Supply Co. Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: As the key equipment in the flexible looped network controller and UPFC, the reliability of the modular multilevel voltage sourced converter directly affects the safe and stable operation of the whole AC system. We established a 3-D model of the flexible looped network controller and Sunan 500 kV UPFC converter using PTC CREO and ANSYS. We calculated the electric field distribution of the converter valve in insulation type test. The results show that the insulation strength of the air gap distance to the ground of converter valve, the air gap between layers of converter valve, the air medium outside of converter valve can meet the requirements of the converter valve in insulation type test, which can ensure safe and reliable operation of the converter valve.

Key words: flexible looped network controller; unified power flow controller (UPFC); modular multilevel voltage sourced converter; insulation type test; electric field calculation

(编辑 徐林菊)