

金属化膜电容器在模块化多电平换流器 工况下温升特性分析*

郭小凡^{1,2}, 查鲲鹏², 曹均正², 唐志国¹, 屈海涛²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200)

摘要:金属化膜电容器凭借自身储能密度高、寿命长、可靠性高而被广泛应用于模块化多电平换流器(MMC)中,温度作为电力电容器寿命与稳定性的主要影响因素成为研究热点。基于厦门柔性直流输电工程,分析电容器在其运行工况下的热应力,在COMSOL有限元仿真软件中建立金属化膜电容器三维温度场仿真模型,对其运行时的温升特性进行研究分析,并进行了试验验证。研究结果表明,金属化膜电容器在MMC换流器子模块中所承受的电流应力和电压应力是相对复杂的交、直流相互叠加的复合变量;电容器最热点位于元件内部,最高温升为11.1℃,外壳温度最热点在侧面,最高温升为7.75℃。为金属化膜电容器在MMC换流器中的运行维护及设计选型提供了参考。

关键词:金属化膜电容器;模块化多电平换流器;温度场

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.015.003

中图分类号:TM83

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2019)15-0014-07

Analysis of temperature rise characteristic of metalized film capacitor under operating conditions in modular multi-level converter

Guo Xiaofan^{1,2}, Zha Kunpeng², Cao Junzheng², Tang Zhiguo¹, Qu Haitao²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China.

2. E-PRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Self-healing metalized film capacitor is widely used in modular multilevel converters (MMC), owing to its high power density, long life, and high reliability. Temperature becomes a hot research topic as the main influencing factors of the stability and life of power capacitor. Based on actual engineering practice of VSC-HVDC in Xiamen, this paper has discussed the thermal stress of capacitor in its operating condition. A 3D temperature field model of metalized film capacitor is formulated based on finite element simulation tool COMSOL, and the temperature rise characteristics of the metalized film capacitor were analyzed and tested. According to the research results, the current stress and voltage stress of the metalized film capacitor in the MMC converters are relatively complex compound variables; The most hot spot is inside the element, the highest temperature rise is 11.1℃, the most hot spot of the shell is on the side, and the highest temperature rise is 7.75℃. It provides reference for the operation, maintenance, design and type-selection of the metalized film capacitor in the MMC converters.

Keywords: metalized film capacitor, modular multi-level converters, temperature field

0 引言

近年来,模块化多电平换流器(MMC)凭借其自身损耗低、谐波畸变小、可扩展性高、易于构建多端直流

* 基金项目:国家电网公司科技项目(52130A17003D)

网络等显著优势^[1-2],在世界范围内广泛应用于柔性直流输电工程。同时,自愈式金属化膜电容器具有自愈特性、可靠性高、干式等优点,应用越来越广泛。电容器在 MMC 工况下所承受的电压电流应力是较为复杂的交、直流叠加在一起的复合变量,同时金属化膜电容器元件对于电压、电流和温度都非常敏感,容易引起发热严重。

在实际柔性直流输电工程中,MMC 换流器用电容器一般采用多个电容器元件串并联形成组件封装于不锈钢外壳中,运行环境温度高且通风条件差。相比油浸式电容器,金属化膜电容器内部只能依靠气体散热,导致经常会发生燃烧甚至爆炸现象^[3-5]。因此,从电容器安全稳定运行方面考虑,有必要对 MMC 换流器用电容器发热功率进行计算,并且研究它的温度场分布,以便对电容器在柔性直流输电工程中的运行维护及设计选型提供参考。

1 厦门柔直工程 MMC 换流器用电容器应力分析

模块化多电平换流器包含三个相单元,每相分为上、下两个桥臂,每个桥臂均由 n 个级联的子模块 (submodule, SM) 和一个阀电抗器 L 串联构成^[6]。每个子模块包含由 IGBT 模块组成的半桥结构以及直流存储电容。其中 IGBT 模块包含两个 IGBT 元件与和其反并联的续流二极管。换流器拓扑结构如图 1 所示,直流侧、交流侧相电流为 I_{dc} 、 i_{ac} ,换流器直流侧电压为 U_{dc} ,子模块电压为 U_{sm} ,子模块电流为 i_{sm} ,子模块电容器电压为 U_0 。

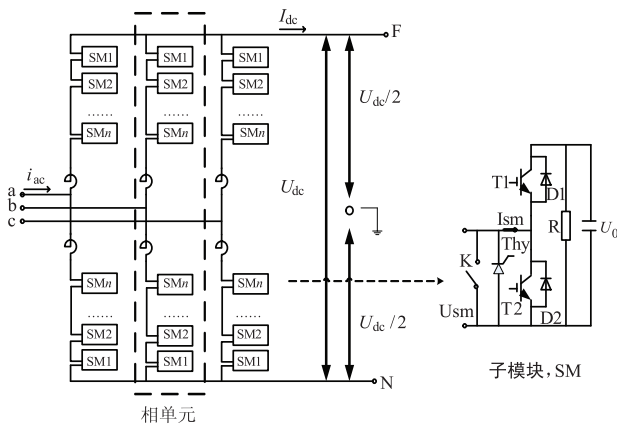


图 1 MMC 换流器拓扑结构图

Fig. 1 Topology of MMC converter

MMC 换流器子模块共有三种状态,六个工作模式。分别为:(1) T_1 、 T_2 均闭锁,“闭锁状态”一般出现在开始启动或发生故障时刻;(2) T_1 导通、 T_2 闭

锁,是工作在“投入状态”,子模块 (SM) 的输出端电压表现为电容电压;(3) T_1 闭锁、 T_2 导通,是工作在“切除”状态,子模块 (SM) 的输出电压为零。通过控制子模块三种状态的切换得到多电平阶梯波,来拟合正弦交流波形^[7]。

理想情况下,MMC 换流阀桥臂上所有子模块的电容器处于不断的充放电过程中,并且当有功功率达到最大时电压波动最为剧烈。理想情况下电压波动是一致的,文献[8]建立了 MMC 的时域解析数学模型,在功率传输过程中,换流器子模块中的电容电压随时间变化关系表达式为^[8]:

$$\begin{cases} u_1 = u_0 - \frac{P_d}{12k\omega n C_0 U_0} [D(2\omega t) - E(\omega t)] \\ u_2 = u_0 - \frac{P_d}{12k\omega n C_0 U_0} [D(2\omega t) + E(\omega t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中 $D(2\omega t) = k\sin(2\omega t + \varphi)$; $E(\omega t) = k^2\cos(\omega t + 2\varphi) + (k^2 - 4) \times \cos(\omega t)$ 。根据电容的电压电流关系,可求出电流时域解析表达式如下:

$$\begin{cases} i_1 = -\frac{P_d}{12knU_0} \left[2D\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - E\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ i_2 = -\frac{P_d}{12knU_0} \left[2D\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - E\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

从解析式中可以看出电容电压除直流分量、基频分量外,还含有与输电功率成正比,与电容容值成反比的 2 倍频分量;电容电流没有直流分量,只含有基频和 2 倍频分量。

根据厦门实际工程额定有功容量为 500 MW,额定直流电压为 320 kV,额定直流电流为 1 600 kA,稳态运行中桥臂串联子模块个数为 200 个,因此子模块电容的直流电压为:

$$U_n = \frac{U_{DC}}{n} = \frac{320}{200} = 1.6 \text{ kV} \quad (3)$$

在仿真软件 PSCAD 中搭建电磁暂态仿真模型,根据上述实际工程参数,电容容值选用 10 mF。根据仿真结果,电容将随着子模块运行状态的改变而处于不断的充放电的反复过程,电容电压在功率传输过程中呈周期性上下波动,电容电压和电流波形如图 2 所示,电压纹波峰峰值约为 0.285 kV。电容器的电流波形为不规则的一系列脉冲,主要集中在基频电流,二倍频电流等谐波分量。通过对电容上的电压电流波形进行傅里叶分析,可以得到电压和电流各次谐波分布如表 1 所示。

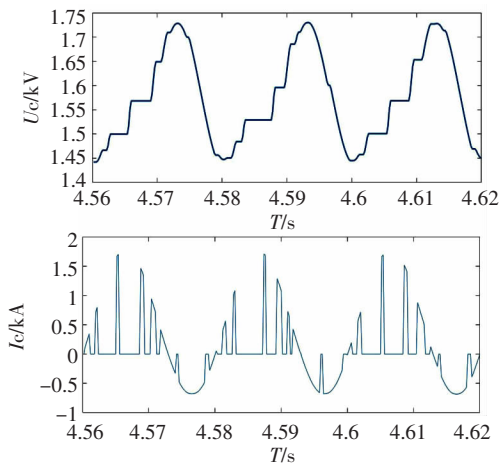


图 2 电容电压和电流波形

Fig. 2 Capacitor voltage and current waveform

表 1 电容电压和电流谐波分布表

Tab. 1 Distribution table of capacitor voltage and current harmonic

谐波次数	电容电压/kV	电容电流/kA
有效值	0.09	0.335
DC	1.575	0.007
1	0.086	0.269
2	0.031	0.198
3	0.0015	0.002
4	0.001	0.007
5	0.0005	0.014
6	0.0005	0.012

2 金属化膜电容器发热与散热过程

2.1 金属化膜电容器热传导过程

金属化膜电容器核心单元是电容器芯子。如图 3 所示,每一个电容器元件是采用非极性绝缘材料(聚丙烯)膜采用无感卷绕的方式,缠绕在圆柱形芯棒上,每一层聚丙烯膜是采用真空蒸镀技术在介质表面蒸镀一层纳米级厚度的金属层,另一侧留边,电极两侧通过喷金工艺引出。通过焊接铜箔引线将电容器元件串联、并联起来构成一个芯子。外壳中除了芯子的部分抽真空灌注绝缘胶实现绝缘。

在 MMC 换流器用电容器整机中,由于承受直流电压叠加交流纹波的复杂应力,电极和介质产生的功率损耗会产生热量。在元件内部,该热量由金属化膜沿着径向向芯棒和元件外侧端面传导,沿着轴向向元件两端传导;在元件外部外壳内部,热量由元件向灌封材料,再到不锈钢外壳传导;在金属整机外部,外壳通过空气对流散热和辐射散热。当电容器发热功率和散热

功率最终达到平衡时,温度分布保持稳定,其内部热传导过程如图 4 所示。

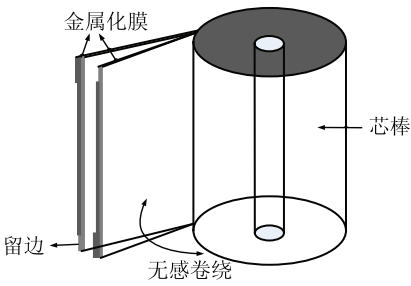


图 3 金属化膜电容器元件结构

Fig. 3 Structure of metalized film capacitor unit

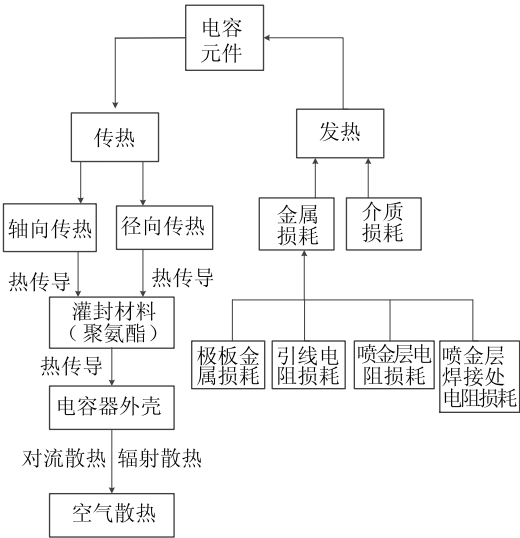


图 4 电容器热传导过程

Fig. 4 Thermal process of capacitor

2.2 金属化膜电容器发热过程分析

应用于 MMC 换流器中的电容器的损耗主要分为金属损耗、漏导损耗和介质损耗三部分。由于薄膜材料采用聚丙烯属于非极性材料,因此不考虑漏导损耗。

介质损耗是电介质材料在电场作用下,通过电导和极化的滞后效应,而引起的能量损耗。介质损耗取决于膜材料,因此采用品质较好的薄膜介质可有效降低损耗。根据 IEC 标准,介质损耗功率 P_D 考虑电流各次谐波分量,由以下公式得到^[9]:

$$P_D = \sum_{i=1}^m \frac{\tan\delta_k \times I_k^2}{k\omega C}$$
 (4)

式中 $\tan\delta_k$ 为介质损耗角正切值; C 为电容量; k 为谐波次数; I_k 为各次谐波电流有效值。这种计算方法避免了直接用有效值等效而忽略了频率波动造成的的计算误差。根据此方法以及表 1 中的谐波分析表,计算

电容器单个元件介质损耗为 0.027 5 W,若直接采用有效值计算则损耗为 0.037 6 W,误差较大。

金属损耗主要分布在电极、喷金层以及喷金层与电极间焊接处等。其中,主要损耗来自于金属电极中的电阻损耗,金属电极中流过的电流分布如图 5 所示。

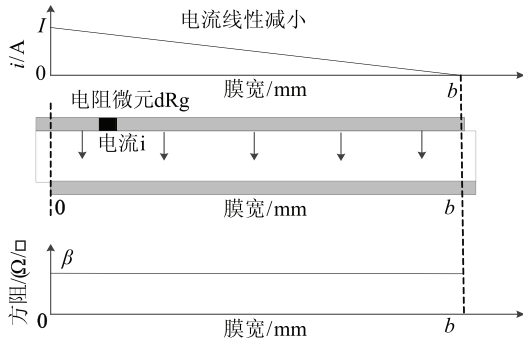


图 5 金属化膜电容器电流分布示意图

Fig. 5 Current distribution schematic diagram of metalized film capacitor

极板上电流沿径向从喷金层到留边区域是线性减小的,假设方阻恒定,对电阻微元发热进行积分,得到上下电极电阻损耗为:

$$P_m = 2 \int_0^b i^2 dR_x = 2 \int_0^b \left(\frac{I}{b} x \right)^2 \frac{\beta}{L} dx = I^2 \times \left(\frac{2}{3} \frac{\beta b}{L} \right) \quad (5)$$

式中 I 为交流电流有效值; β 为金属化膜的方阻; b 为金属化膜有效膜宽; L 为金属化膜卷绕长度。

总金属损耗采用等效串联电阻计算。由于电容材料自身有电阻,会产生损耗。这部分损耗等效为一个电阻与电容串联,称为等效串联电阻。采用式(6)计算总金属损耗功率:

$$P_{rad} = 5.7 \varepsilon \left[\left(\frac{273 + t_w}{100} \right)^4 + \left(\frac{273 + t_0}{100} \right)^4 \right] \times S \quad (6)$$

文中以 DKMJ2.1—10000 电容器为例分析,该电容器外壳长 515 mm、宽 220 mm、高 700 mm。电容器内部约 200 个电容元件采用双排并联的方式,铜排连接。电容器采用双向拉伸耐高温薄膜,芯棒材料为聚碳酸酯,直径 12.5 mm,长 103 mm。

根据表 1 中的谐波分析表,计算电容器单个元件介质损耗为 0.027 5 W,金属损耗功率为 0.102 W,金属损耗功率为介质损耗的 3.7 倍。其中,分布在电极上金属损耗为 0.028 6 W,其余分布在喷金层、喷金层与电极间焊接电阻等。

2.3 金属化膜电容器散热过程分析

根据传热学理论,热量的传递有 3 三种方式,热传

导、热辐射和热对流,分别遵循傅里叶定律、斯忒藩-玻尔兹曼定律和牛顿定律。

热辐射是指物体向外界辐射红外线,从而散发能量。通过物体表面发射率来反映物体辐射散热强度。物体表面热辐射散热功率表达式为^[10]:

$$P_{rad} = 5.7 \varepsilon \left[\left(\frac{273 + t_w}{100} \right)^4 + \left(\frac{273 + t_0}{100} \right)^4 \right] \times S \quad (7)$$

式中 ε 为电容器外壳表面发射率; S 为电容器外壳表面积; t_w 为物体表面温度; t_0 为环境温度。

热对流在文中是指处于无限大空间中的电容器表面对环境散热为自然对流散热。对流换热系数与物体形状、环境空气特性等因素有关。根据经验公式(8)计算对流散热系数^[11-12]。

$$\begin{cases} h = N_u \frac{\lambda}{L} \\ N_u = \begin{cases} 1.076 (G_r P_r)^{1/6} \\ 0.747 (G_r P_r)^{1/6} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中 N_u 是 Nusselt 系数; L 是特征尺寸,垂直平壁取高度,水平长方形取两边平均值,水平窄条取短边值; G_r 是 Grashof 系数,用于表示自然对流中的驱动力大小; P_r 为空气普朗特数; λ 是空气导热系数。经过计算得到外壳各面的对流换热系数如表 2 所示。

表 2 对流换热系数表

Tab. 2 Convective heat transfer coefficients

环境温度/℃	对流换热系数/[W/(m ² ·K)]		
	侧面	顶面	底面
30	3.305 9	4.483 6	2.267 8
50	3.246 7	4.425 8	2.213 1
60	3.220 2	4.420 8	2.198 1

热传导过程主要取决于材料的导热系数,锌铝金属的导热率不同于聚丙烯的导热率,电容器元件是金属化薄膜绕芯棒卷绕而成故而将聚丙烯膜及金属层等效为一种新的材料。等效后的新材料导热系数存在各向异性,串联导热系数换算公式为:

$$\lambda = \frac{h_{zn} + h_m}{h_{zn}/\lambda_{zn} + h_m/\lambda_m} \quad (9)$$

式中 λ_{zn} 和 λ_m 分别为金属镀层和聚丙烯薄膜导热系数。沿着元件轴向为并联导热,导热系数换算公式为:

$$\lambda = \frac{h_{zn}\lambda_{zn} + h_m\lambda_m}{h_{zn} + h_m} \quad (10)$$

3 金属化膜电容器温度场仿真建模与试验验证

3.1 模型简化及基本假设

在电容器物理结构及各层导热材料已知的情況下,利用有限元分析软件绘制电容器的三维模型,然后通过施加边界条件,对电容器内部的热量传递情况进行分析。文中根据实际情况作出合理假设,在有限元仿真软件 COMSOL 上建模求解。

在建立电容器模型之前,做几点假设:(1)忽略套管、内部引线等;(2)由于电容器外壳上不同位置温差很小,因此同一个面上对热换流系数采用相同数值;(3)薄膜上蒸镀镀层为锌铝边缘复合加厚,等效为铝。根据以上假设,建立电容器三维模型。

3.2 模型参数确定

仿真中涉及到的电容器及元件的尺寸参数如表 1 所示,通过查阅相关资料,得到材料的导热系数、密度、比热容等如表 3 所示。

表 3 电容器各材料属性

Tab. 3 Material property parameters of capacitor

材料	比热容 $/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	导热系数 $/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$
聚丙烯(薄膜)	1 780	0.22	900
聚氨酯(灌封胶)	1 705	0.40	1 200
聚碳酸(芯棒)	1 172	0.19	1 200
不锈钢(外壳)	502.4	16.28	7 900
锌(喷金层)	388	121	7 140

在定义材料属性时,对聚丙烯膜及金属层等效的新材料密度、比热系数进行计算,等效后的密度为:

$$\rho = \frac{h_{zn}\rho_{zn} + \rho_m h_m}{h_{zn} + h_m} \quad (11)$$

式中 ρ_{zn} 为金属层密度; h_{zn} 为其厚度; ρ_m 为聚丙烯薄膜密度; h_m 为其厚度。等效后的比热容为:

$$C = \frac{h_{zn}\rho_{zn}C_{zn} + C_m\rho_m h_m}{\rho_{zn}h_{zn} + \rho_m h_m} \quad (12)$$

式中 C_{zn} 和 C_m 分别为金属层和聚丙烯薄膜的密度。

3.3 电容器温度场三维仿真结果及试验验证

为了验证仿真模型准确性,对电容器进行热稳定性试验。测量其内部温升,将测量结果与仿真计算结果进行对比。在电容器外壳以及内部元件断面布置 T 型热电偶,具体位置示意图如图 6 所示。

根据现有试验条件,将被试电容器置于封闭的恒温箱中,温箱中温度设置为 50 ℃。对电容器施加有效值为 780 A 的工频有效电流,试验时间为 48 h。在最后 6

h 内,测量外壳接近顶部处的温度 4 次,保证最后 6 h 内温升变化不大于 1 ℃。

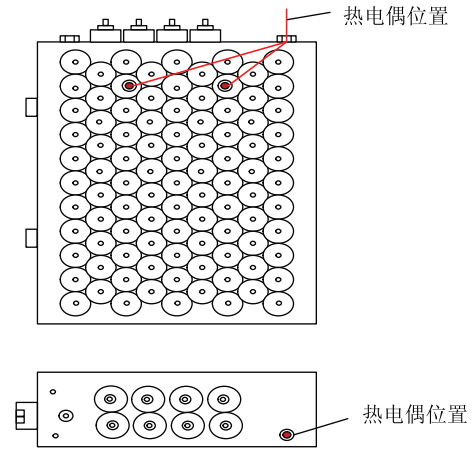


图 6 电容器温度传感器位置示意图
Fig. 6 Layout schematic diagram of temperature sensor of capacitor

在此实验条件下,计算电容器单个元件介质损耗为 0.103 W,金属损耗为 0.275 W。根据上述边界条件,环境温度设置为 50 ℃,在 COMSOL 有限元仿真软件上对金属化膜电容器温度场进行仿真计算,直到模型达到动态热平衡之后,电容器内部温升达到稳定时温度分布云图如图 7 所示,试验得到的温度数据与仿真结果对比见表 4。

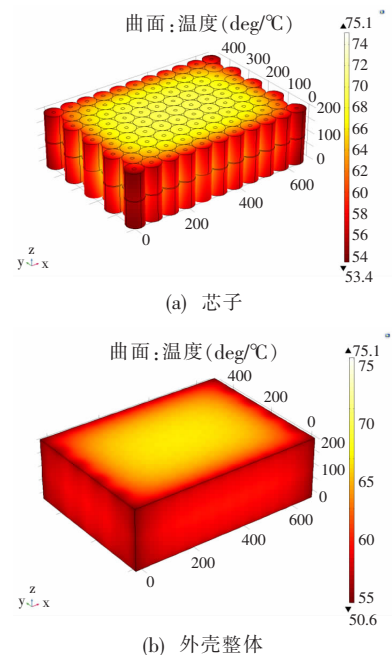


图 7 电容器温度分布云图
Fig. 7 Temperature distribution map of capacitor

表 4 仿真与试验结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation and test results

累计时 间/h	电容器测量位置温度/℃			仿真结果/℃		
	内部 1	内部 2	外壳	内部 1	内部 2	外壳
42	70.5	70	55.3			
44	70.5	70.0	55.1			
46	70.5	70.0	55.1	68.40	65.03	55.36
48	70.2	69.7	55.3			

由表格数据和温度分布图可知,仿真结果与试验数据基本相符,试验验证了仿真模型的准确性,此仿真模型能够用于指导后续实际柔直工程用电容器设计选型及运行维护。

根据 2.2 节计算的电容器在 MMC 换流阀应力下的发热功率以及对电容器施加 2.3 节散热过程的边界条件,在仿真模型上得到的电容器温度分布云图如图 8,内部最高温度分布在芯子内部,最高温度 61.1℃,外壳最高温度分布在最大侧面,最高温度 57.75℃。

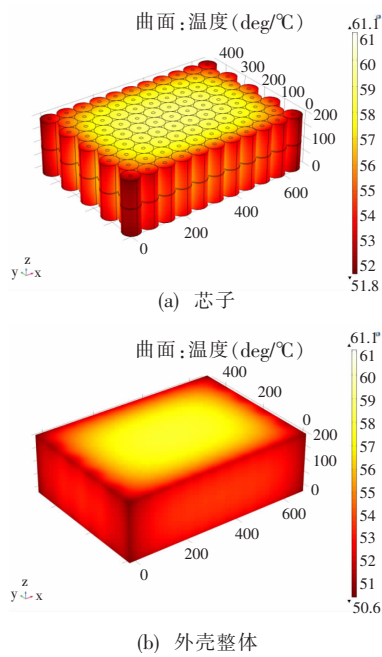


图 8 电容器温度分布云图

Fig. 8 Temperature distribution map of capacitor

4 结束语

根据厦门柔性直流输电工程,分析了金属化膜电容器电流、电压应力,并据此计算了电容器损耗发热功率。在 COMSOL 中建立有限元仿真模型计算电容器温升情况并与试验数据对比,验证了模型的准确性。得到以下结论:

- (1) MMC 用金属化膜电容器电流电压应力为复杂的交、直流复合变量,谐波分布主要集中在基频、二倍频分量,高次谐波很少;
 - (2) 考虑各次谐波分量计算电容器介质损耗可以有效避免直接用有效值计算带来的误差;电容器金属损耗主要分布在电极上,其余分布在喷金层、喷金层与电极间焊接电阻处等;
 - (3) 在厦门柔直工程中,假设环境温度为 50℃,MMC 用电容器内部最高温度分布在芯子内部,最高温度为 61.1℃,外壳最高温度分布在最大侧面,最高温度 57.75℃。
- 为其它柔性直流输电工程,如张北工程、渝鄂工程中 MMC 换流器用金属化膜电容器运行维护与设计选型提供了参考。

参考文献

[1] 周存和. 高压金属化膜并联电容器[J]. 电力电容器, 2002, 23(2): 1-5.
Zhou Cunhe. High voltage metallized film shunt capacitor[J]. Power Capacitors, 2004, (3): 1-5.

[2] 李化, 章妙, 林福昌, 等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 218-223.
Li Hua, Zhang Miao, Lin Fuchang, et al. Study on the theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 218-223.

[3] 马乃兵. 干式高压并联电容器的技术特点分析[J]. 电力电容器, 2002, (2): 7-10.
Ma Naibing. Analysis of the technical characteristics for the dry-type high-voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitors, 2002, (2): 7-10.

[4] SARJEANT W J, ZIRNHELD J, MACDOUGALL F W. Capacitors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(5): 1368-1392.

[5] 黄玲, 黄有祥. 温度对集合式全膜并联电容器使用寿命影响的研究[J]. 电力电容器, 2006, 27(2): 35-45.
Huang Ling, Huang Youxiang. Research for influence of temperature on the operation life of assembled all-film shunt capacitor[J]. Power Capacitor, 2006, 27(2): 35-45.

[6] Antonopoulos A, Angquist L, Nee H P. On dynamics and voltage control of modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.

[7] IEC62543. High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC) [S]. 2011.

[8] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.
Wang Shanshan, Zhou Xiaoxin, Tang Guangfu, et al. Modeling of Modular Multi-level Voltage Source Converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8.

[9] 尹婷, 严飞, 等. 金属化安全膜电容器 ESR 计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1): 54-56.
Yin Ting, Yan Fei, et al. ESR Calculation of Metalized Safe Film Ca-

- pacitor[J]. Power Capacitors, 2015, 36(1): 54-56.
- [10] 陈温良. 金属化电力电容器的热计算问题[J]. 电力电容器, 2003, (8): 53-57.
Chen Wenliang, Thermal calculation of metallized power capacitor[J]. Power Capacitor, 2003, (8): 53-57.
- [11] 赵镇南. 传热学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 254-264.
- [12] 尹婷, 严飞, 王子建, 等. 高压自愈式电容器典型交流工况下温度场分析及优化设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(13): 3996-4004.
Yin Ting, Yan Fei, Wang Zijian, et al. Temperature Field Analysis and Optimization Design of High-voltage Self-healing Capacitor at Typical Operating Conditions in Power System[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(13): 3996-4004.

作者简介:



郭小凡(1994—),女,河北人,硕士研究生,主要从事柔性直流输电的研究。
Email: 132691788252@163.com

查鲲鹏(1977—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事灵活交流输电试验方法和直流输电试验技术的研究。

曹均正(1960—),男,博士,教授级高级工程师,千人计划专家,主要从事直流输电换流阀设计、研制及优化工作。

唐志国(1977—),男,博士,副教授,主要从事电力设备在线监测与故障诊断的研究。

屈海涛(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事柔性直流输电研究。

收稿日期:2018-05-28;修回日期:2018-08-21
(焦阳 编发)

(上接第13页)



闫重熙(1996—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护及控制。Email:785051288@qq.com



高传薪(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护及控制。Email:1261294604@qq.com

收稿日期:2018-05-09;修回日期:2018-08-15
(王克祥 编发)