

[控制系统]

干式空心平波电抗器温升分析研究

文/国网浙江省电力公司金华供电公司 秦威南

平波电抗器作为特高压直流输电系统中的重要设备，起着降低直流侧电流谐波和电压脉动成分、避免在低直流功率传输时电流断续、限制电流突变等作用，在实际运行过程中，平波电抗器往往会因为外部环境、自身结构等原因导致局部过热、绝缘老化甚至烧损等故障。首先通过建立磁场-电路耦合模型计算出平波电抗器各个包封绕组产生的焦耳热损耗，以此作为流场-温度场有限元分析的输入，求解出平波电抗器的温度场分布。分析结果能够为平波电抗器的设计和结构优化提供理论依据。

特高压直流输电具有远距离、大容量输电和加强电网互联等方面优点，在我国西电东送和电网互联工程中得到了广泛应用。平波电抗器作为特高压直流输电的重要组成设备，其主要作用是：防止由直流线路产生的冲击波进入阀厅，使换流阀免于遭受过电压应力而损坏；平滑直流电流中的纹波，避免在低直流功率传输时电流断续；限制快速电压变化引起的电流变化率，降低换相失败率。

干式空心电抗器与传统的油浸式铁心电抗器相比具有结构简单、质量轻、无饱和现象、噪声小及检修和维护简单等优点，在实际应用中得到了推广。高压大容量平波电抗器主要采用干式空心平波电抗器。干式空心平波电抗器的绕组是密封的，绕组包封中线圈匝与匝之间一般采取聚酰亚胺薄膜进行绝缘，线圈绞合后再包绕一定厚度的绝缘材料，最后对绕组进行外绝缘封装构成一个绕组包封。为了选择合适的绝缘材料和对电抗器结构进行优化，改善实际运行中干式空心电抗器易发生局部放电、过热及烧毁等情况，有必要对运行状况下的平波电抗器绝缘特性、机械性能和老化特点进行研究。

温升是评价电气设备使用寿命的一项重要指标，

是决定平波电抗器绝缘老化快慢的主要因素。因此，能否准确计算出温度场分布是对平波电抗器进行优化设计的关键。这一计算涉及电磁、流体、温度多物理场耦合分析。在传统设计中，一般采用基于经验的公式法来计算电抗器绕组的平均温度，或利用设定对流系数的方法来计算温度分布。显然，平均温度法不能计算出电抗器的最热点及其温升，在电抗器整体绝缘水平满足平均温升的情况下，其局部可能没有达到足够温升的要求；而通过设定对流系数来计算温度场则首先需要通过经典模型计算得到努赛尔系数，与实际情况可能存在较大的误差，需要反复调整。

本文首先建立了磁场-电路耦合模型，计算出了平波电抗器中各个绕组包封所产生的热损耗，然后将这些损耗作为流体-温度场计算的激励源，求解出了平波电抗器整体区域的温度场分布。其结果能够为平波电抗器的设计制造提供理论依据，降低试验生产成本，缩短产品设计周期。

磁场-电路耦合计算

干式空心平波电抗器的载流部分由多个绕组包封相互并联而成，每个包封由多匝小矩形铝导线绕

制而成,实物如图1所示。各层导线上含有直流电流分量和谐波电流分量。在圆柱坐标系下,电流产生的磁场满足泊松方程

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial z}\right)=-\mu_0 J \quad (1)$$



图1 干式空心平波电抗器

第*i*个包封中铝导线两端的电压和磁链分别为

$$u=i_i R_i+\frac{d \psi_i}{d t} \quad (2)$$

$$\psi_i=N_i \iint(\nabla \times A) d s=N_i \oint A d l \quad (3)$$

式中, ψ_i 为第*i*个包封中铝导线磁链; N_i 为第*i*个包封中铝导线匝数。

联立方程(1)~(3)可以将电压以矢量磁位*A*来表示,利用有限元数值计算方法求出矢量磁位*A*后,通过式(4)即可计算得到铝导线的热损耗

$$Q=\rho J^2 \quad (4)$$

式中, Q 为焦耳热生成率; ρ 为铝导线的电阻率; J 为电流密度。

流场-温度场耦合计算

平波电抗器的热源主要来源于包封中铝导线的电阻损耗和附加损耗,包封内部通过热传导方式传热,包封外表面与空气通过自然对流和热辐射方式传热。

1. 热传导传热计算

绕组包封内部的稳态热传导方程描述为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(k_r \frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)=-Q \quad (5)$$

式中, k_r 、 k_z 分别为绕组包封径向和轴向的热导率; T 为绕组包封内部各处的温度。

2. 热对流传热计算

本研究中的平波电抗器冷却方式为自然空冷,绕组包封与空气通过自然对流传递热量。此时流体的运动规律可以用动量微分方程和连续性方程描述,并且考虑了流体的惯性力和黏性力在自然对流中的影响。稳态时的空气自然对流可用纳维叶-斯托克斯方程组表达。

质量连续性方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r)}{\partial r}+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0 \quad (6)$$

式中, v_r 、 v_z 分别为绕组包封径向和轴向的热导率。

动量守恒方程为

$$\rho\left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r}+v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r)}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right] \quad (7)$$

$$\rho\left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r}+v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right] \quad (8)$$

式中, ρ 为空气密度; μ 为黏性系数; p 为压强。

能量守恒方程为

$$\rho c\left(v_r \frac{\partial T}{\partial r}+v_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)=k \nabla^2 T+Q \quad (9)$$

式中, c 为比热容; T 为流体温度。

平波电抗器运行时,其附近的空气会因吸收绕组包封所散出的热量而膨胀,导致密度变小,受浮力影响而向上流动。由于气体存在黏性作用,包封表面的空气会出现一个热边界层,处于热边界层下部的空气通过层流形式随着热空气逐渐上升,导致越靠近包封上部的空气越热、散热性越差,对流形式会从层流流动形式逐渐过渡到湍流流动形式。采用流体力学中的标准*k-ε*紊流模型对热对流传热进行描述,方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{C_{1 \varepsilon}}{k} G_k-C_{2 \varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

$$G_k=\mu_t\left\{2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]+\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right\} \quad (12)$$

其中, G_R 为紊流生成率; $\mu_t=\rho C_\mu(k^2/\varepsilon)$ 为紊流黏性系数;常数 $C_{1 \varepsilon}=1.44$ 、 $C_{2 \varepsilon}=1.92$ 、 $C_\mu=0.09$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

3. 辐射传热计算

电抗器的辐射传热量较大,与自然对流传热量相当,因此需要加以考虑。辐射传热的方程为

$$q_{i-j}=A_i F_{ij} \varepsilon \sigma\left(T_i^4-T_j^4\right) \quad (13)$$

式中, q_{i-j} 为热流密度; A_i 为平面*i*的面积; F_{ij} 为平面*i*和*j*的相互辐射角系数; ε 为平面的辐射率; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数; T_i 、 T_j 为平面*i*和*j*的温度。

实例计算与分析

1. 干式空心平波电抗器结构

如果忽略支撑条等构件，则可将电抗器视为轴对称结构，其绕组由多个同轴并联的绕组包封组成。目前平波电抗器绕组导线大多采用特制的多匝轻型内换位矩形铝导线代替以往的单丝圆铝线，铝导线包绕两层单边厚度0.05 mm的聚酰亚胺薄膜充当匝间绝缘，电缆以120~200 mm的节距绞合后，再包绕0.25 mm的H级绝缘层。采用多股内换位绝缘铝导线做绕组，一方面可以节省绕线作业时间，提高生产效率；另一方面可以避免单丝圆铝线因线圈多层并联而存在的层间绝缘承受着电压应力的问题，大幅度降低了绝缘故障风险。根据电抗器的尺寸参数建立二维轴对称模型，如图2所示。

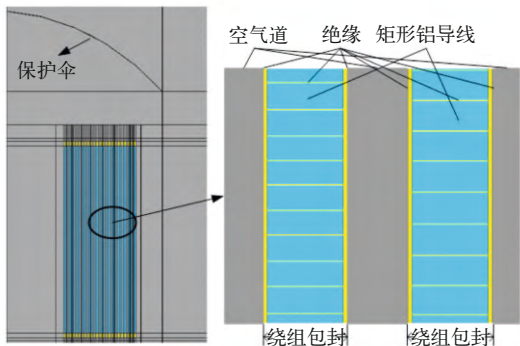


图2 干式空心平波电抗器模型

2. 有限元模型及边界条件设置

建立好模型后，给绕组、保护伞、绝缘及空气赋予相应的材料属性和单元属性，进行网格剖分得到如图3所示的有限元计算模型。其中，灰色部分代表空气，绿色部分代表铝导线，红色部分代表绝缘。模型一共有315 394个节点，323 591个单元。

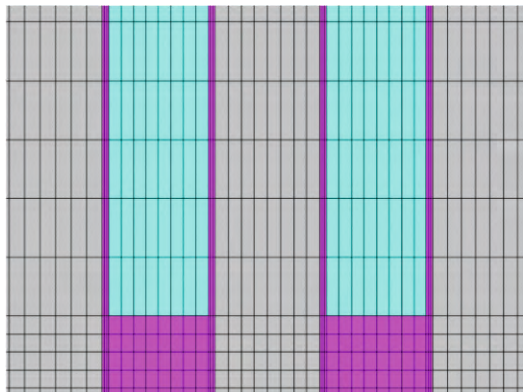


图3 局部有限元模型

将前面磁场-电路耦合模型求得的各个绕组热损耗作为激励源，设置合适的流体-温度场计算边界条件，结合用纳维叶-斯托克斯方程组就可以对平波电抗器的流体场和温度场进行直接耦合求解。设定边界条件如下。

- 1) 固体的表面为无滑移边界条件，即流体速度在固体表面为0 ($v_x=0, v_y=0$)；
- 2) 设定环境温度为28℃，重力加速度为9.8 m/s²，大气压为1.01×10⁵ Pa。
- 3) 空气域外边界上相对压力为0。
- 4) 对称轴上节点的径向流速为0 ($v_x=0$)。
- 5) 绕组包封表面的辐射散热常数为5.67×10⁻⁸，辐射率为0.9。

3. 计算结果与分析

通过磁场-电路耦合模型计算后，求得各绕组的热损耗如表1所示。将其作为激励源，进行流场-温度场耦合计算，进而得出平波电抗器的温度场分布。

表1 各绕组热损耗

包封	热损耗/(MW/m ³)	包封	热损耗/(MW/m ³)	包封	热损耗/(MW/m ³)
1	0.851	9	0.800	17	0.745
2	0.821	10	0.797	18	0.740
3	0.783	11	0.783	19	0.718
4	0.801	12	0.779	20	0.711
5	0.810	13	0.771	21	0.709
6	0.808	14	0.767	22	0.712
7	0.801	15	0.759	23	0.677
8	0.801	16	0.752	24	0.660

图4所示的是一个绕组包封内的温度场分布图，可以看到温度场在绕组包封内的分布是不均匀的，包封顶部与底部绝缘与铝导线区域交界面附近的温度差较大，这是因为铝导线与绝缘的热导率相差较大的缘故。由于空气受热膨胀向上运行，随着高度增加，底部包封绝缘和中间导线区域的温度也逐渐增加，而上部绝缘由于热导率小且受空气对流传热影响，其温度随高度增加反而减小。

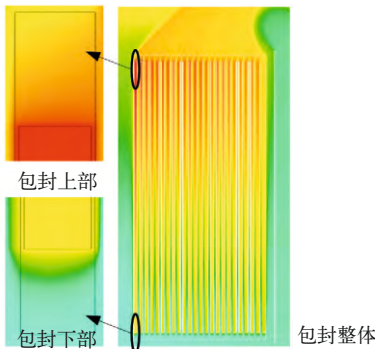


图4 绕组包封温度分布

表2 各绕组温度场计算结果

单位: °C

包封	电抗器包封温度		平均温升	包封	电抗器包封温度		平均温升
	最高温度	最低温度			最高温度	最低温度	
1	109.22	96.78	75.00	13	104.48	83.39	65.94
2	106.53	83.34	66.94	14	102.22	81.39	63.81
3	104.30	82.63	65.47	15	102.40	81.88	64.14
4	104.19	81.37	64.78	16	102.80	82.32	64.56
5	103.28	85.59	66.44	17	102.84	82.39	64.62
6	104.43	82.68	65.56	18	103.03	82.64	64.84
7	103.30	81.82	64.56	19	102.53	82.61	64.57
8	102.29	80.89	63.59	20	102.05	82.29	64.17
9	103.46	81.99	64.73	21	102.08	82.30	64.19
10	104.16	82.61	65.39	22	102.65	82.69	64.67
11	104.07	82.71	65.39	23	102.10	83.03	64.57
12	104.86	83.51	66.19	24	96.14	82.56	61.35

从图5可以看到,空气受热膨胀,热空气向上运行,冷空气集中在下部。由于保护伞顶部没有通风口,遮挡住了电抗器上升的热空气,热空气开始主要通过保护伞外沿与包封间的空气道流出,少部分通过保护伞散出,待保护伞和热空气温度趋近后,热量主要通过保护伞及其周围空气散出。各包封中铝导线的温度如表2所示。

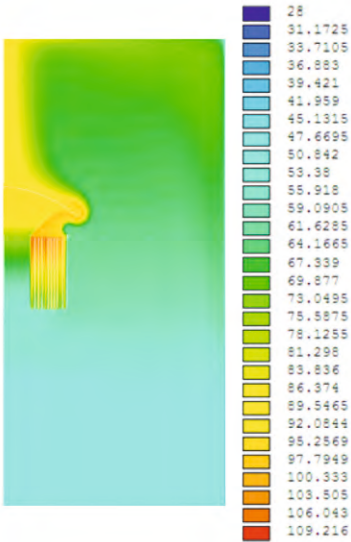


图5 整体温度分布(单位: °C)

通过仿真计算,可以看到计算域内最热点出现在电抗器最内层绕组的最上部,温度为109.22 °C。计算分析所设定的环境温度为28 °C,绕组最热点温升计算值为81.22 °C。对于额定电压等级为800 kV干式平波空心电抗器采用的整体绝缘材料耐热等级F级(耐热温度155 °C,热点温升限值115 °C,平均温升限值100 °C)和绕组绝缘材料耐热等级H级(耐热温度180 °C,热点温升限值140 °C,平均温升限值125 °C)而言,该计算结果还有一定的设计裕度,设计是比较合理的。

结束语

本文建立了±800 kV特高压干式空心平波电抗器的磁场-电路耦合模型以及流体-温度场耦合模型,基于有限元数值计算方法,对电抗器的热损耗和温度分布进行了计算。分析表明,平波电抗器的温度场分布与绕组热损耗、电抗器材料以及结构等因素密切相关。研究结果对生产中平波电抗器的设计、结构优化和实际工程运行维护具有一定的参考意义。EA

(收稿日期: 2016.04.23)

(编辑: 杨得润)