[无功补偿]

级联型无功补偿兼有源滤波综合电能治理装置散热仿真分析

文/西安西电开关电气有限公司　丁立晴　赵伟涛
西安高压电器研究院有限责任公司　王弋飞

说明了综合能源质量治理装置功率柜结构及其散热需求，针对额定工况下的最大功耗情况，建立了仿真模型，进行了散热仿真，依据得到的散热器台面温度校核了IGBT结温。研究了不同工作模式、不同环境温度对IGBT结温的影响。对1.15倍过载工况进行了仿真校核，结果表明IGBT结温均能满足要求。

综合电能质量治理装置（SVG+APF）是一种重要的用户电力装置，具有响应速度快、功能强大、性能优良和综合性价比高的特点，能综合地解决配电网中电压波动与闪变、电流畸变和三相电压不平衡等电能质量问题，成为现阶段配电网无功补偿和谐波抑制的发展方向。

电力电子技术的高速发展，导致功率器件的散热问题显得尤为突出。从目前掌握的大量研究数据可以看出，温度已经成为电子设备故障的主要原因。因此有必要对功率设备热性能进行研究。

综合电能质量治理装置主要包括控制柜、电抗柜和功率柜三个组成部分。功率柜中的模块单元是其中主要的热源，本文针对10 kV、6 MW容量的装置功率柜内的功率模块散热进行仿真分析。

首先对功率柜进行了整柜建模仿真分析，校核其额定工况、综合治理工作模式下是否满足散热要求。在此基础上，针对不同环境温度、不同工作模式以及过载工况分别进行了散热仿真，得到了不同工况下的仿真结果，并进行了分析。

功率柜及其散热需求

1. 功率柜结构参数

功率主体由4台功率柜并排摆放，采用900 mm×1 200 mm×2 400 mm的柜体尺寸。为了保证功率部分的散热，每两台功率柜并柜之间没有隔板，使两台功率柜的功率部分成为一个整体，柜顶安装两台离心风机，如图1所示。

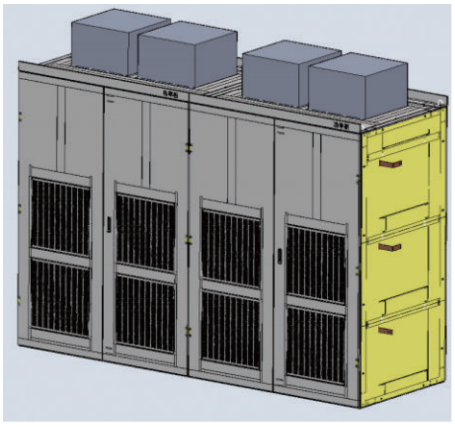
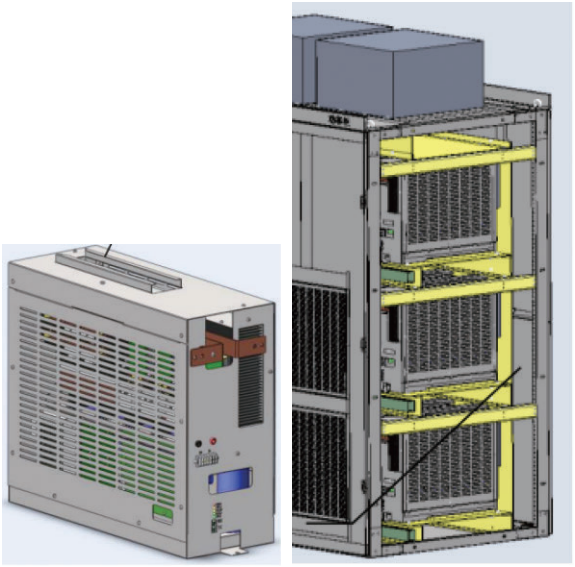


图1　功率柜并柜外形图

模块外形如图2a所示，尺寸为250 mm×635 mm×580 mm。功率模块布置分为上、中、下三排，如图2b所示，每排 12个功率模块，每排为一相，共三相36 个功率模块。按照每个模块内部器件摆设及模块外观尺寸估计，每个柜子可以放置9个模块，四个柜子并列放置，单独散热。

从功率柜热源分布的角度考虑用抽风的形式进

行散热，在机柜顶端放置一个大的离心风机抽风。气流走向为从机柜前门进入，通过各个热源模块内部散热器，再流向机柜后部风道，汇集至离心风机，通过连接于离心风机的出风管道从机柜后部将热量吹出机柜外部环境中。



（a）功率模块　　（b）功率柜内部布置

图2　功率模块及功率柜内部布置图

功率模块散热选用型号为XHX905的散热器，每个功率模块上放置有4个型号为FF450R17ME4的IGBT元件，如图3所示绿色部分，安装在散热器正面前端，对其加强散热。

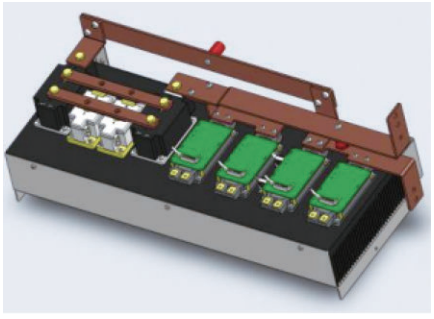


图3　IGBT布置图

2. IGBT功耗与散热要求

综合电能质量治理装置的工作模式包括三种：无功补偿、谐波治理和综合治理。表1列出了三种模式下的工作参数及损耗值。可以看到，其中综合治理模式下的IGBT损耗最高。因此以该模式为例进行散热仿真，校核散热设计是否合理，温度能否达到要求。

综合治理模式下，每个功率模块上共放置4个IGBT，每个IGBT损耗为312 W，总损耗为1 248 W。每个功率柜内的总损耗为1 248 × 9=11 232 W，整个功率柜系统总损耗为44 928 W。IGBT的结温规定不能高于140 ℃。

表1　额定工况、各种工作模式下的损耗

工作模式	IGBT电流/A	开关频率/Hz	直流电压/V	IGBT损耗/W	链节损耗/W
无功补偿	173	500	950	308	1 232
谐波治理	100	500	950	168	672
综合治理	175	500	950	312	1 248

散热仿真过程

1. 传热理论

传热的基本方式有热传导、对流和辐射三种。

（1）热传导

热传导是指相互接触并具有温差的两个物体中或物体由于各部分温度不同，经过分子、原子和自由电子微观运动而引起的换热现象。热传递的方向是从高温物体传至低温物体。导热的基本规律由傅里叶定律得

$$dQ_n = -\lambda dA\frac{\partial t}{\partial n} \tag{1}$$

式中，$\frac{\partial t}{\partial n}$为沿等温面法线方向的温度梯度，℃/m；$dA$为与热流方向相垂直的微元面积，$m^2$；$\lambda$为导热系数，W/（m·℃）；公式中的负号表示热量传递的方向与温度梯度的方向相反。

（2）对流

对流换热是一种十分复杂的换热过程。常用牛顿冷却公式表述

$$Q = hA\Delta t \tag{2}$$

式中，A为换热面面积，m^2；Δt为流体与壁面的温差，℃；h为对流换热系数，W/（m^2·℃）。

（3）辐射

固、液和气体因其温度而产生的以电磁波形式向外的辐射。物体辐射能量的多少及辐射能量按波长的分布都与物体的温度有关。

热辐射所传递的热量为

$$Q = \varepsilon C_0 S\left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] \tag{3}$$

式中，Q为单位时间内物体辐射的热量，W；

ε为物体的辐射系数；C_0为黑体辐射系数，C_0=5.67 W/（m^2·K）；T_1、T_2为热、冷物体的绝对温度，K；S为辐射物体的表面积，m^2。

2. 仿真模型

通过系统结构简化建模如图4所示，由元器件到柜体依次建模为散热器及其上IGBT简化热源、带背面进风口的散热器风道、功率模块、功率柜及其顶部风机。

软件中风机建模将曲线属性代入，9个简化模块放置在机柜内，机柜前门进风口和功率模块侧板开孔率设置30%，模拟系统压力损失。

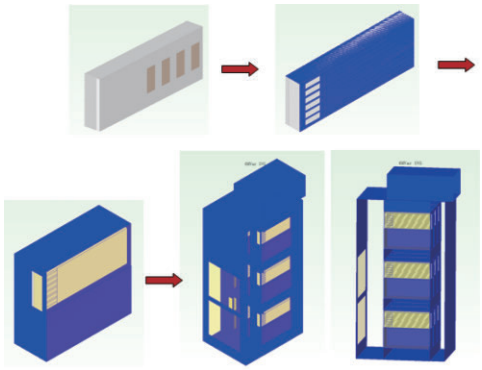


图4　功率柜仿真模型

3. 边界条件的施加

系统放置室内工作，按照平常气温以及设备工作中的环境气温，环境温度设为最严苛情况下的50 ℃，模型外表面对流换热系数设为5 W/（m^2·K）。

IGBT安装位置分别设置功耗312 W，在其位置布置温度监视点，监控发热位置的温度。风机工作性能曲线外部手动输入，如图5所示。实际工作的流量和风压由软件内部计算得到。

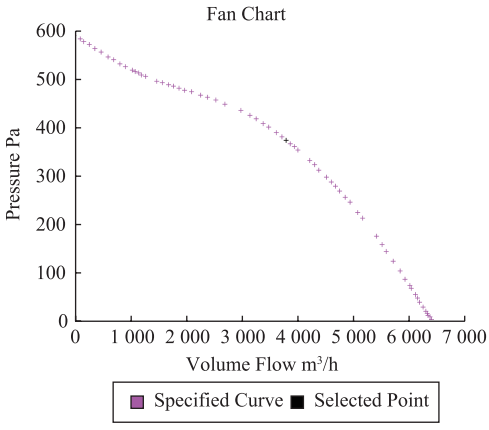


图5　风机性能曲线

4. 仿真结果与分析

风机的工作点如图6所示。风量4 037m^3/h，阻力损失351 Pa。经过每个模块的风量分别为430.56 m^3/h、430.2 m^3/h、426.6 m^3/h、444.96 m^3/h、445.68 m^3/h、441.36 m^3/h、473.76 m^3/h、473.04 m^3/h和474.84 m^3/h（从上到下，从左到右）。每相3个功率模块之间的进风量差别不大。各项之间风量差别较大，尤其是下面一项的风量明显高于中间、上面两项。

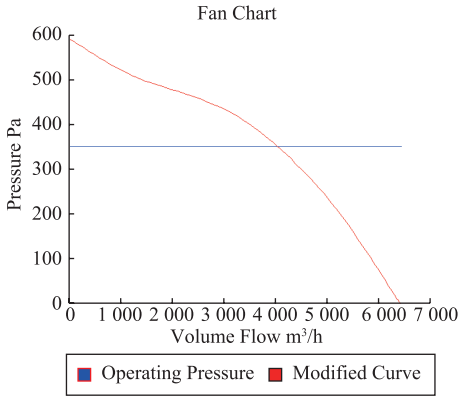


图6　风机工作点

功率柜内气流从机柜前门进入，通过各个热源模块内部散热器，再流向机柜后部风道，流经离心风机，从机柜后部将热量吹出机柜外部环境中，如图7所示。

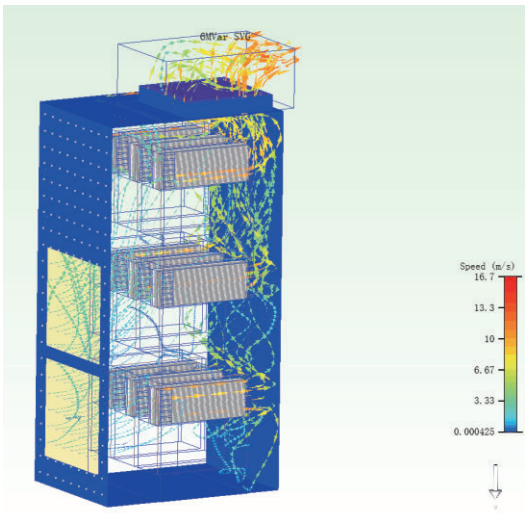


图7　整柜流场图

各个模块的温度分布如图8所示。按照以上仿真得到散热器温度最高的86.8 ℃，IGBT 结温T_j的校核计算如下：

1）IGBT 封装结壳热阻R_{jc}为 0.06 K/W。

2）壳到散热器热阻按照 0.1 mm厚，导热系数为1 W/（m·k），计算壳板热阻R_{cs}=0.013 K/W。

3）IGBT结温为$T_j=T_s+(R_{jc}+R_{cs})P$=86.8+(0.06+0.013)×312=109.6℃≤140 ℃，所以满足要求。

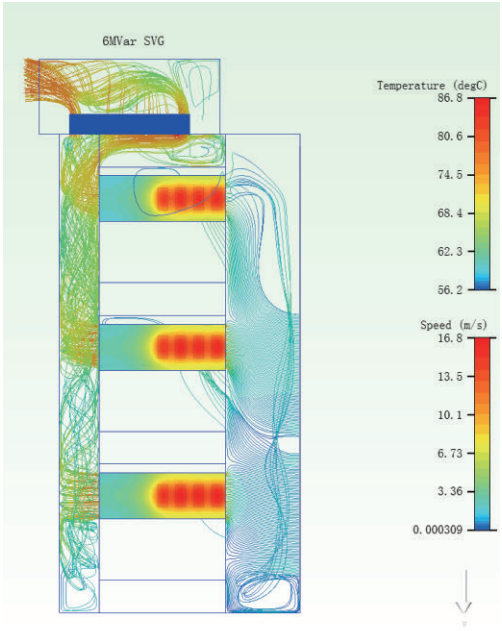


图8　各模块温度分布与整柜流场截面图

针对其他工况的仿真

1. 不同工作模式

综合电能质量治理装置的工作模式包括无功补偿、谐波治理和综合治理三种。单个IGBT损耗分别为308 W、168 W和312 W。以环境温度50 ℃为例，分别仿真各工作模式下的温度情况见表2。

表2　额定工况，不同工作模式下的温度仿真结果

工作模式	IGBT功耗/W	散热器台面温度/℃	IGBT结温/℃
谐波治理	168	68.8	81
无功补偿	308	86.2	108.7
综合治理	312	86.8	109.6

由此可见，综合治理工作模式下的结温最高，无功补偿模式次之，谐波治理模式最低。以上三种工作模式下的IGBT结温均满足要求。

2. 不同环境温度

针对额定工况，综合治理工作模式（即最大IGBT功耗312 W），对不同环境温度下的散热分别进行了仿真，结果见表3。

表3　额定工况，综合治理工作模式下不同环境温度时的仿真结果

（单位：℃）

环境温度	散热器台面温度	IGBT结温
25	61.7	84.5
35	71.8	94.6
40	76.8	99.6
50	86.8	109.6

由仿真结果可知：

1）环境温度50 ℃时，IGBT结温为110 ℃，小于其许可温度上限140 ℃，散热设计在额定工况时满足要求。

2）随着环境温度的升高，IGBT结温近似线性升高。

3）环境温度越低，IGBT结温越低，有利于其寿命和安全可靠性。

3. 过载1.15倍工况

过载1.15倍时的IGBT损耗情况见表4。只需校核IGBT功率366 W、环境温度最大50℃时的散热情况。

表4　过载1.15倍、各种工作模式下的损耗

工作模式	IGBT电流/A	开关频率/Hz	直流电压/V	IGBT损耗/W	链节损耗/W
无功补偿	198.95	500	950	362	1 448
谐波治理	115	500	950	196	784
综合治理	201.25	500	950	366	1 464

经仿真得到散热器台面温度90.9℃，IGBT结温经计算为117.6℃。仿真结果表明过载1.15倍时满足要求。

结束语

综合电能质量治理装置功率柜内的模块单元是主要热源，本文首先针对额定工况时的最大功耗模式，对整柜进行建模仿真，校核了IGBT结温大小，满足要求。基于以上仿真模型和方法，研究了不同环境温度、不同工作模式对IGBT结温的影响。最后针对最恶劣情况，即过载1.15倍工况进行了仿真分析，经计算此时IGBT结温为117.6 ℃，低于许可值140 ℃。表明该功率柜的散热设计合理，满足要求。EA

（收稿日期：2021.08.13）