「有源滤波」

高功率模块式有源电力滤波器结构和散热系统设计

文/安科瑞电气股份有限公司　赵　军　季晓春　杨欢欢　刘建春
山东省建筑设计研究院　王永军

针对典型设计的模块式有源电力滤波器功率密度小、散热性能不佳等缺点，提出了一种高功率模块式有源电力滤波器结构设计和散热系统设计方案，包括外壳设计、风道设计、风机设计和散热器设计。试验结果表明，该设计方案能够满足380 V／80 kW模块式有源电力滤波器运行要求。

近年来，随着电力电子技术的飞速发展，大量具有非线性特性的负载被广泛使用，如变频器、开关电源等。这些负载的使用导致电网中的谐波含量不断升高，对电力系统安全、稳定和经济运行构成极大威胁。

有源电力滤波器（简称APF）作为治理电网谐波污染的有效手段，已经成为保证电力系统安全运行的重要设备。目前，主流的APF为“模块式”结构，虽然这种结构具有体积小、方便扩容等优点，但由于APF使用的IGBT和磁环电感在运行时均会产生大量的热量，且APF体积越小热量积聚越严重，元器件温升越高，当某些元器件达到使用温度极限时，就会失效、爆炸甚至燃烧。所以，如果APF在结构和散热系统设计上存在缺陷，将不能在预设功率下长时间运行，只能被迫降功率以减少发热量，最终导致APF功率密度减小、使用效率降低。

提出了一种高功率模块式有源电力滤波器结构设计和散热系统设计方案，并通过实物运行验证了该设计方案的可行性，可以使体积仅为485 mm×615 mm×215 mm的模块式APF长时间稳定运行在380 V/80 kW的工况下。

模块式APF结构和散热系统设计方案

为了克服现有模块式APF热设计不足而从结构和散热系统上提出一种解决方案，包括外壳设计、风道设计、风机设计和散热器设计，从而在较小的尺寸内尽可能提高APF的运行功率，降低各元器件温升，保证其安全可靠运行。

1. 外壳设计

模块式APF的外壳包括底板、前盖板、后盖板、上盖板、挂耳和把手，所有部件通过沉头螺钉进行有效装配，可通过喷塑进行防腐处理，挂耳用于固定，把手用于搬运。液晶屏置于前盖板，一次接线和二次接线端子都置于后盖板，确保操作人员正面操作时不会发生触电危险。具体外壳设计如图1所示。

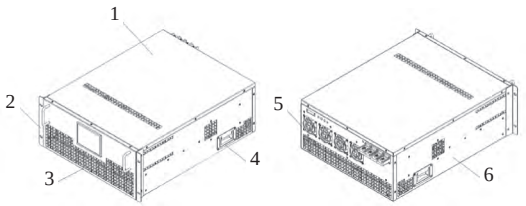

图1　模块式APF外壳设计示意图

1—上盖板　2—挂耳　3—前盖板　4—把手
5—后盖板　6—底板

2. 风道设计

传统的模块式APF在进行散热系统设计时，习惯将内部所有元器件共用一个散热风道，这会导致高温高热器件散发的热量随着热流影响发热

量低和温度敏感的器件，使其无法稳定工作。提供的设计方案将模块内部空间分为上腔体和下腔体两个独立的腔体空间，上腔体布置低温低热和温度敏感元器件，下腔体布置高温高热元器件，上下腔体热流互不干扰。具体风道设计如图2所示。

IGBT将热量传导到散热器上，散热器和磁环电感属于高温高热器件，通过两块导风板将它们一起隔开形成下腔体，整个下腔体为独立的直通风道，进风风机将外部空气吹进下腔体进行强制风冷散热，空气依次流过散热器和磁环电感后流出下腔体。上腔体也为独立的直通风道，通过出风风机将腔内热量抽出进行散热。直通风道可以避免气流转弯，使风压损失降到最小。上腔体内布局的都是低温低热和温度敏感元件，各区域换热强度相差不大，要求流场均匀且呈现层流，故采用抽风方式；下腔体内布局的都是高温高热元件，抽风方式会使风机电动机过热影响其使用寿命，不宜采用，故采用吹风方式。

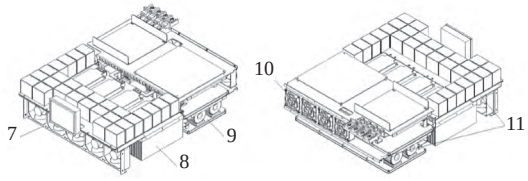

图2　模块式APF风道设计示意图

7—进风风机　8—散热器　9—磁环电感
10—出风风机　11—导风板

3. 风机设计

本设计方案采用强制风冷散热方式，根据散热系统所需的风量和风压确定好风机，为了保证有足够的风量，可采用风机并联的方式，风机并联时风量增加，风压保持不变。

很多电力电子热设计人员在进行变流器散热设计时，习惯将风机紧靠着散热器，这会导致风机后的流场没有足够的空间充分发展，加之风机旋转惯量（SWIRL）的影响，风机后的流场在到达散热器前存在明显的死区，所以在采用吹风方式的下腔体，必须保证风机到散热器间的距离大于一个风机的直径，以使得流场尽可能充分发展而变得均匀。同时，风机远离散热器可有效降低装置噪声，距离以大于风机直径最佳。

4. 散热器设计

散热器有两种设计方案被广泛采用，一种是插片式方案，另一种是一体式方案。插片式散热器的基板和齿片是独立的，在基板上铣槽，然后将齿片插进槽里固定好；一体式散热器是先通过铝挤压技术形成散热器型材，然后将散热器型材锻造加工形成散热器。相对于插片式方案而言，一体式方案最大的优势是散热器基板和齿片间无间隔介质，热阻小，热导率高。

散热器基板厚度以10～15 mm为最佳，太薄热容量太小，太厚热阻太大，影响热导率；经试验，当齿片厚度为1.5～2 mm、齿片间距为3～5 mm时，散热器散热性能最佳；可采用波纹齿的方式增加散热面积，波纹齿深度一般小于0.5 mm。

本设计采用一体式散热器方案，制造材料为6063铝合金，其具有导热性好、价格便宜和重量轻等优点。散热器左右横穿于下腔体内以使散热面积最大。散热器具体设计如图3所示。

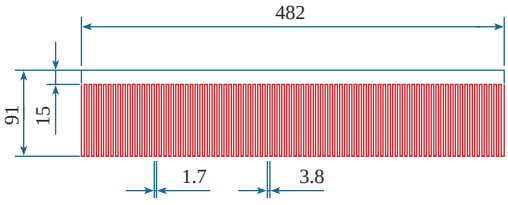

图3　模块式APF散热器设计示意图

380 V/80 kW模块式APF运行试验

为了验证所提设计方案的可行性，搭建了实物平台，如图4所示，为三相四线制模块式有源电力滤波器试验平台，工作线电压380 V，预设功率80 kW，磁环电感安全温升设为80 ℃，IGBT安全温升设为60 ℃。

图4　380 V/80 kW模块式APF实物试验平台

逐步将试验平台功率调到80 kW，监测磁环电感和IGBT温度。图5显示各监测点在满功率运行条件下的稳定温度，其中CH01－CH11为磁环电感温度，CH12～CH15为IGBT温度，CH16为环境温度。计算得磁环电感线圈最高温升为71.1℃，IGBT底板最高温升为57.99 ℃，皆满足

图5　380 V/80 kW模块式APF各监测点温度

380 V/80 kW模块式有源电力滤波器运行要求。

结束语

针对模块式有源电力滤波器进行了结构和散热系统优化设计，提出了一种高功率模块式有源电力滤波器结构设计和散热系统设计方案，并搭建了试验平台对设计方案进行了验证，试验结果表明，该设计方案能够满足380 V/80 kW模块式有源电力滤波器运行要求，且体积仅为485 mm×615 mm×215 mm，具有很好的市场前景。EA

（收稿日期：2017.12.05）

（编辑：刘群垚）

（上接第98页）

3）在电压互感器开口三角形绕组上装设灯泡或者专用消谐器。

4）在电压互感器一次绕组的中性点上装设专用消谐器。

5）在电网中装设四级式自控式阻容吸收器，当其动作时，在零序回路中突然接入电阻和电容，对破坏谐振条件、阻尼谐振有一定的作用。

目前，在渤海某组网项目中6.3 kV/35 kV变压器高压侧采用带有自动跟踪装置的消弧线圈，容量为3 200 kV·A，电压为21.22 kV，调节范围为65～145 A。其他海上项目中也有在PT控制回路安装了消谐电阻。

4. 中压电网绝缘配合的原则的简单说明

结合以上分析，在中压电网，绝缘配合原则有以下特点。

1）针对不同的过电压，采取不同的限压措施。

2）由于设备和装置的绝缘水平在正常情况下能够耐受操作过电压，因此一般不采用特别措施来限制操作过电压，也不要求避雷器在内过电压下动作。但保护真空断路器操作过电压的情况除外。

3）对单相接地间歇性弧光接地过电压和谐振过电压，要避免其发生，而不采取特别措施加以保护。一般的电气设备要能够耐受这两种过电压的作用。

结束语

对于开断感性负载引起的操作过电压，在保护旋转电机等弱绝缘设备的情况下，还存在一些需要进一步探讨的问题：虽然大部分中高压电机都装有避雷器，但是电机匝间绝缘损坏的问题仍比较严重，主要原因就是传统的避雷器基本没有保护匝间过电压的能力，因此建议在降低电网高次谐波的前提下，应用阻容吸收器来保护操作过电压，在安装配置时通盘考虑，注意抑制因增大接地电容而引起的接地电容电流大和与电压互感器匹配不好形成铁磁谐振的问题。EA

（收稿日期：2018.03.11）

（编辑：刘群垚）