

750 kV 并联电抗器研制

宓传龙, 汪德华, 李银行, 陈 荣

(西安西电变压器有限责任公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 750 kV 并联电抗器是我国正在建设的西北地区 750 kV 骨干输电网络中不可缺少的关键设备, 研制性能优良、安全可靠的 750 kV 电抗器产品意义重大。为此, 国内变压器制造厂结合西北 750 kV 输变电工程要求, 开展了 750 kV 并联电抗器绝缘结构、降低振动和噪声、防止局部过热等关键技术的研究。通过计算分析和试验研究, 掌握了 750 kV 并联电抗器设计制造的关键技术, 研制的 750 kV 并联电抗器局部放电量小于 100 pC, 振动小于 60 μm , 噪声水平低于 75 dB(A), 无局部过热, 主要性能指标达到国际同类产品先进水平。目前, 该类型 750 kV 并联电抗器已挂网运行, 且运行情况良好。

关键词: 750 kV 并联电抗器; 输电网络; 研制

中图分类号: TM472

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0001-04

Development of 750 kV Shunt Reactor

MI Chuan-long, WANG De-hua, LI Yin-hang, CHEN Rong

(Xi'an XD Transformer Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: 750 kV shunt reactor is a key device in the Northwest 750 kV backbone power transmission network under construction in China. For the purpose to develop a 750 kV shunt reactor with high performance and reliability, many transformer manufacturers in China have made researches on the key technologies for 750 kV shunt reactor, such as dielectric structure, vibration and noise reduction, prevention of local overheat, etc., according to the requirements for the Northwest 750 kV Backbone Power Transmission Network. Progress has been achieved in the design and manufacture through calculation analysis and testing study. 750 kV shunt reactors have been developed with partial discharge less than 100 pC, vibration less than 60 μm , noise less than 75 dB (A), and without local overheat. Their main performance indexes reach the advanced international levels of the same type products. The 750 kV shunt reactors have been put into operation in the transmission network with satisfied operation.

Key words: 750 kV shunt reactor; power transmission network; development

0 引言

随着西北电力工业的发展, 尤其是黄河上游大型梯级水电站的不断开发, 西北 330 kV 电网的输电容量和输电线路数量不断增加, 使得输电线路走廊变得十分紧张, 大容量长距离送电效率下降, 迫切需要发展更高电压等级的输电线路。通过多年的研究和论证, 在西北地区建设 750 kV 输电线路, 并逐步建成西北 750 kV 骨干网架^[1]是必要的、可行的, 也是经济合理的。从 2003 年起, 西北电网开始筹划 750 kV 输变电工程建设。与此同时, 为保证该工程顺利实施和关键设备的国产化, 国内企业相继开展了 750 kV 并联电抗器、主变压器、开关等关键设备的研制工作。在本文中, 笔者将主要针对 750 kV 并

联电抗器的研制工作进行论述。

1 超高压并联电抗器的应用及国内外发展概况

1.1 国外研发水平和应用情况

目前, 俄罗斯、加拿大、美国、巴西、委内瑞拉等国已采用了 735~800 kV 输电线路, 这些线路的总长度超过 15 000 km。中国、印度正在进行 750 kV 输电线路建设。但目前, 国外只有乌克兰扎布罗热变压器厂(ZTR)、瑞典 ABB、法国阿尔斯通等少数几家变压器制造厂掌握 750 kV 并联电抗器设计制造技术, 而且还没有很好地解决电抗器振动、噪声和局部过热等关键技术问题。

1.2 项目开展前国内研发水平和应用情况

由于我国超高压输电起步晚, 超高压并联电抗器的设计制造技术发展也相对较晚。西安西电变压

收稿日期: 2009-03-24; 修回日期: 2009-05-04

作者简介: 宓传龙(1952), 男, 西安西电变压器有限责任公司总工程师, 副总经理, 从事高压电抗器和变压器技术的研究。

器有限责任公司(简称西变公司)是我国并联电抗器生产的主导厂家,在上世纪七十年代先后自主研发了我国第一条 330 kV 和 500 kV 输电线路用的并联电抗器。1980 年,西变公司引进法国 ALSTHOM 公司并联电抗器的设计制造技术,并于 1984 年 8 月成功试制出第一台样机。随后,不断地开展超高压并联电抗器关键技术的科研攻关工作,电抗器的设计制造技术得到了快速的发展。上世纪九十年代,自主研发了新一代的低损耗 500 kV 并联电抗器,并成功地解决了当时国内外超高压并联电抗器普遍存在的局部过热和噪音、振动大等关键技术问题,电抗器的设计制造技术逐步处于国际领先水平。西变公司等国内变压器制造企业从上世纪九十年代中期开始开展 750 kV 并联电抗器的关键技术研究工作,并取得具有实用价值的科研成果,但由于当时没有依托工程,

没有研制 750 kV 并联电抗器样机。

2 750 kV 并联电抗器技术性能要求

西北 750 kV 电网很大一部分地处高海拔地区,风沙大,运行条件恶劣,对 750 kV 并联电抗器技术性能要求十分严格。工程中常用的几种规格的 750 kV 并联电抗器的主要技术参数如下: 型式为单相、油浸、间隙铁心、户外式并联电抗器; 相数为单相; 冷却方式为油自然循环空气冷却(ONAN); 额定频率为 50Hz; 额定容量为 60、70、80、100、120、140 Mvar; 额定电压为 $800/\sqrt{3}$ kV; 中性点接地方式为经小电抗接地; 励磁特性为在 $1.4 \times 800/\sqrt{3}$ kV 电压下磁化特性为线性,在 1.4 至 1.7 倍额定电压下磁化特性连线斜率不低于原斜率的 2/3; 绝缘水平:并联电抗器绝缘水平见表 1。

表 1 并联电抗器绝缘水平

| 设备最高工作电压(有效值) | 雷电冲击耐受电压(峰值) | | | 操作冲击耐受电压(峰值) | | 短时工频耐受电压(有效值) |
|---------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|---------------|
| | 内绝缘 | 外绝缘 | 截波 | 内绝缘 | 外绝缘 | |
| 高压侧 | 800 | 2 100 | 2 350 | 2 250 | 1 550 | 900 |
| 中性点 | 126 | | 480 | | | 200 |

3 750 kV 并联电抗器关键技术研究

并联电抗器一般安装在输电线路两端变电站或中部开关站^[2],工作电压较高,且容易遭受雷击。考虑西北高海拔地区使用条件,并联电抗器选取了较高的绝缘要求,已接近百万伏变压器绝缘水平。这样,750 kV 并联电抗器绝缘结构的设计十分关键,直接关系到产品研制的成败。

750 kV 输电线路长,无功补偿容量大,单台电抗的容量也大。目前,单相 750 kV 并联电抗器最大容量为 140 Mvar。大容量并联电抗器的漏磁量很大,漏磁引起导线和金属结构件中的涡流损耗很大,很容易造成局部过热,危及并联电抗器的安全可靠运行。

另外,并联电抗器铁心柱是由多个铁心饼和间隙交替组成的,在运行中交变电磁力在铁心饼间产生强烈的机械振动和噪声,750 kV 大容量并联电抗器的振动和噪声问题更为突出。

上述问题是 750 kV 并联电抗器研制的关键技术问题。

3.1 线圈绝缘结构选择

750 kV 并联电抗器绝缘水平和容量要求高,单台容量达 60~140 Mvar,铁心采用单柱带两旁轭结构比较合适。通过反复对比研究和技术论证,最后选用宝塔形多层圆筒绕组(简称层式绕组),见图 1。这种线圈结构型式不仅能保证产品绝缘的可靠性^[3],而且设计和制造技术非常成熟。

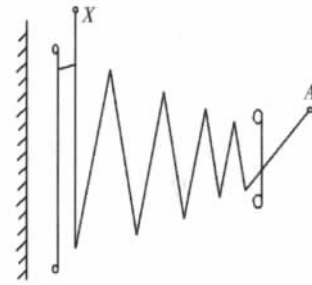


图 1 宝塔形绕组排列示意图

宝塔形绕组主要特点有: 高压出头在最外层,电压最高,从外层到最内层,电压越来越低,匝数却越来越多,绕组端部到铁轭绝缘距离也越近,主绝缘距离分布比较合理; 多层圆筒绕组层间电容大,在冲击电压作用下,不均匀系数小于 1.3,层间电位梯度分布比较均匀,纵绝缘可靠; 填充率高,适合特高压、多匝数绕组设计; 层间竖直油道设计油路通畅,温度场分布均匀,可有效避免线圈过热。

3.2 线圈主绝缘计算和分析

通过对该产品线圈雷电全波、雷电截波、操作波、工频电压的分析计算后发现,工频电压的考核最为严格。工频电压下,线圈最大场强出现在线圈外静电屏的上、下端部,通过计算静电屏的屏蔽形状,覆盖绝缘厚度,绝缘筒分割油隙^[4]及采取绝缘成型件等措施,油中最大场强控制低于 8.5 kV/mm,油和纸中的绝缘强度的安全系数不小于 1.25。图 2 为并联电抗器的绝缘结构在 900 kV 工频电压下的电场分布。

为保证线圈绝缘结构的可靠性,对线圈端部绝

缘表面的沿面爬电场强进行了认真的校核,并根据计算结果不断优化线圈端部绝缘设计,避免沿面爬电场强引起的局部放电。线圈端部绝缘表面的沿面爬电校核计算结果见图3。从图3中可以看出,沿面爬电绝缘强度的最小安全系数为1.89。

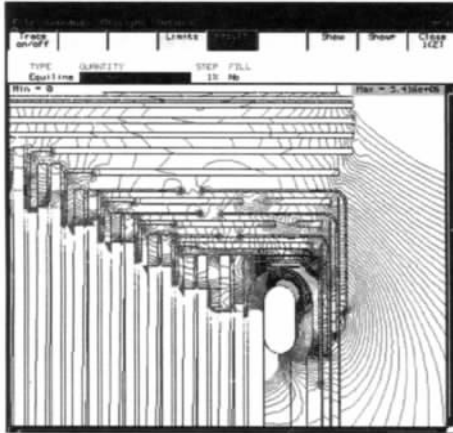


图2 900 kV工频电压下器身电场分布

| | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| 爬电距离为 200 mm 安全系数 为 1.998 | 爬电距离为 100 mm 安全系数为 2.4 | |
| 爬电距离为 60 mm 安全系数 为 2.913 | 爬电距离为 40 mm 安全系数 为 3.453 | |
| 爬电距离为 20 mm 安全系数 为 4.13 | | |

图3 绕组端部的爬电场强计算结果

3.3 线圈纵绝缘计算和分析

由于750 kV并联电抗器采用了层式线圈结构,线圈的冲击分布十分均匀,梯度小,冲击电压作用下的绝缘安全可靠,尽管如此,通过冲击计算程序对750 kV并联电抗器线圈在耐受雷电冲击、操作冲击时的电场分布和绝缘强度进行了计算,并与同结构型式的500 kV并联电抗器进行了对比,以保证750 kV并联电抗器线圈在雷电冲击、操作冲击电压作用下,绝缘裕度不低于同类型500 kV并联电抗器的水平。利用相关校核软件,对750 kV并联电抗器线圈在雷电冲击电压下的绝缘性能计算结果见图4。由图4可知,油中的最大允许场强为36.5 kV/mm。750、500 kV并联电抗器在雷电冲击电压下线圈中最大场强计算值见表2。

3.4 电抗器线圈出线结构

为保证750 kV并联电抗器出线绝缘的可靠性,线圈首、末端出线均采用直接从箱盖引出的方式,结构简单,避免使用结构复杂的绝缘出线装置,见图5。

3.5 漏磁场分析计算和防止局部过热措施

750 kV并联电抗器单台容量大,饱和特性要求

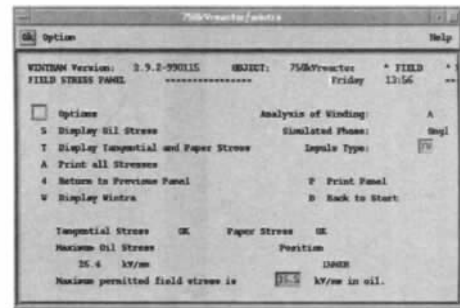


图4 750 kV电抗器线圈在雷电冲击电压下的最大场强计算程序

表2 750、500 kV并联电抗器线圈在雷电冲击电压下的最大场强比较

| | 雷电冲击场强/(kV·mm ⁻¹) |
|--------------|-------------------------------|
| 500 kV 并联电抗器 | 27.5 |
| 750 kV 并联电抗器 | 26.4 |

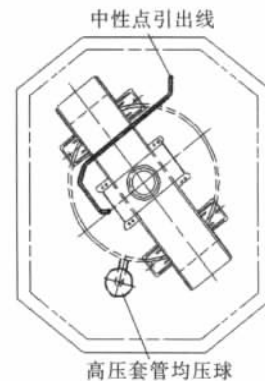


图5 750 kV线圈引出结构示意图

高,漏磁通量大,极易引起漏磁通区域的金属结构件局部过热^[5]。为确保750 kV并联电抗器无局部过热,采用有限元(FEM)法对并联电抗器进行了三维磁场分析计算。图6是750 kV并联电抗器铁心、线圈和磁分路中的磁场分布,图7是铁心夹件中的磁场分布,图8是油箱壁中的磁场分布。

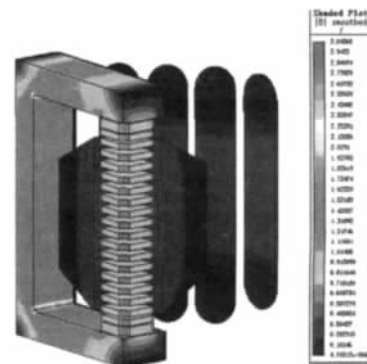


图6 铁心、线圈和磁分路中的磁场分布

通过对并联电抗器各部分磁场的分析计算可知,研制出的750 kV并联电抗器铁心磁密较低,不仅保证了电抗器有很好的线性度,而且也很好地控制了铁心中的损耗;线圈中的漏磁分布也十分合理,塔型线圈有效地避开了横向漏磁通较密集区域^[6];

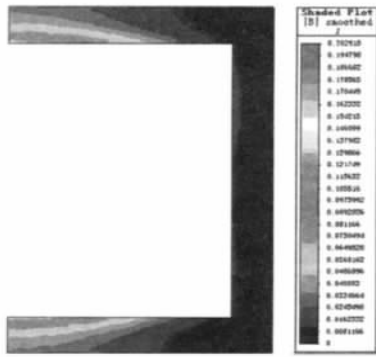


图7 铁心夹件中的磁场分布

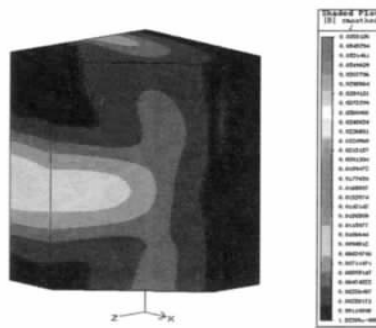


图8 油箱壁的磁场分布

油箱上使用磁分路降低了箱壁涡流损耗。通过采取这一系列措施，有效地避免了电抗器漏磁引起线圈

和内部金属结构件的发热。对 BKD-100000/750 并联电抗器样机进行了 48 h 长时温升试验,没有过热现象,证明计算是可靠的,采取的措施是有效的。通过成功研制样机,总结防止电抗器局部过热的经验,主要采取以下 3 种措施: 选择适当的主漏磁通的比例,在保证电抗器伏安特性的基础上,限制漏磁通的量值; 合理地选择产品结构、金属构件材料及位置布置,避免漏磁集中而发生局部过热; 良好的散热结构能增强散热效果,消除局部过热。

3.6 降低振动和噪声措施

并联电抗器铁心是分段的,分段铁心饼之间存在着 2 倍于电抗器工作频率的电磁脉动力,这是产生振动和噪声的根源。为了减小振动,通过研究采用了下列措施^[7]: 适当增加压紧力和铁心大饼的填充系数以提高其弹性模量,减小铁心饼在脉动力作用下的振幅; 合理地设计铁心尺寸,避免发生谐振; 提高振动系统中各部分的刚度和强度,增强阻尼作用; 铁心和油箱间设置减振装置,削弱传递效应; 适当降低铁心的工作磁密。

4 国内外产品技术水平比较

新研制的 750 kV 并联电抗器与国外同类型产品的主要性能参数比较见表 3。

表 3 与国外同类型产品的主要性能参数比较

| 名称 | 西变公司 | 瑞典 ABB 公司 | 莫斯科电工厂 |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 型号 | BKD-100Mvar/750 | BKD-133Mvar/750 | родд-110000/750 |
| 冷却方式 | ONAN | ONAN | ONAF |
| 额定电压/kV | $800/\sqrt{3}$ | $765/\sqrt{3}$ | $787/\sqrt{3}$ |
| 额定容量/Mvar | 100 | 133 | 110 |
| 额定损耗/kW | 169.32 | 240 | 255 |
| 电感/H | 6.94 | 4.67 | 5.98 |
| 噪音/dB(A) | 74 | 85 | 85 |
| 局放保证值/pC | 100 | 500 | 500 |
| 振动/ μm | 45 | 100 | 200 |
| 绕组温升/油面温升(K) | 43.6/34.3 | 58/53 | - |
| 铁心重/t | 29.73 | 35 | - |
| 器身重/t | 49 | 59 | - |
| 总重/t | 127 | 108 | 99.95 |

从表 3 可以看出,西电研制的 750 kV 并联电抗器与国外同类型产品相比较,振动和噪音小、损耗低,局放小,并且节约了铜线、硅钢片等原材料。由于采用了 ONAN 冷却方式,产品无油流带电问题,套管位于油箱顶,紧凑型油箱结构既能保证密封性能无渗漏,合理的屏蔽又能减少油箱壁的涡流损耗,防止局部过热。

5 结语

西电研制的 750 kV 并联电抗器样机一次性通过了全部的型式试验和例行试验,并且振动小、噪声低、局放小、损耗低,无局部过热,各项性能指标完全满足设计要求。目前,研制的 70、100、140 Mvar 3 种

容量的 750 kV 并联电抗器均已挂网运行,且运行状况良好。

参考文献:

- [1] 高兴耀. 21 世纪初我国电力变压器技术发展展望[J]. 变压器, 2000, 37(1): 6-7.
- [2] 程浩忠, 吴浩. 电力系统无功与电压稳定性 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法与实践 [M]. 沈阳: 沈阳科学技术出版社, 2002.
- [4] 路长柏, 朱英浩. 电力变压器计算 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1990.
- [5] 徐基泰. 电抗器品种及其发展 [J]. 变压器, 2000, 37(1): 19-21.
- [6] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.