

三相三柱电抗器异侧出排感量 不平衡解决方案

李宾

上海兆启新能源科技有限公司

摘要：在我国大功率电力电子变流器的滤波电路（LC或LCL）中，部分型号产品由于结构尺寸及电气安全距离的要求造成滤波电器中的电抗器（L）输入输出分别在铁芯两侧，这样就造成了三相匝数和磁路的不平衡，从而增加了制造成本和加大输出电路中的谐波含量。本文基于对该系统中电抗器重新优化设计（主要是从磁路上考量），从而降低制造成本和输出电路中的谐波含量。

关键词：滤波电抗器，电感平衡率，制造成本

Abstract: In the filter circuit of power electronic converter (LC or LCL), due to structure size and electrical safety distance requirements, the input and output parts of some filter electric appliance's reactor place on both sides of the iron core, thus cause the imbalance of three-phase winding and magnetic circuit, thereby increase the manufacturing cost and harmonic wave of output circuit. This article is based on the reactor optimization design in the system (mainly magnetic circuit design), thereby reduce the manufacturing cost and the harmonic wave of output circuit.

Keywords: Power electronic converter, filter reactor, inductor balancing rate manufacturing cost

0 前言

电抗器是随着电力电子发展而应用广泛，也叫电感器，是电力电子是最常用的一个磁性元件，主要作用是限流、滤波。目前滤波电路运用中电抗器主要分三类：一类是用三台单相电抗器，单相电抗器的优点是三相电感不平衡率低，并机环流少，缺点是体积大成本高效率低；第二类是三相四柱（或五柱），优点同样是三相电感不平衡率低，并机环流少，缺点是体积成本还是较高；另一类用一台三相三柱电抗器，优点是体积小成本低效率高，缺点是三相电感不平衡率差（会在系统中引起谐波），并机是会产生环流。目前变流器厂家因为成本的考虑都是用三相电抗器，同时对三相电抗器的电感不平衡率要求控制在≤2%以下。生产厂家在实际生产时发现此类电抗器测试时一次通过率过只有66%，不良现象主要是三相电感不平衡率在5-10%，超出小于2%要求。原因主要是客户要求电抗器的出线排在前后两侧造成三相匝数不平衡（从左往右通常是A相感

量高B相正常C相低）加上磁路的不平衡所导致。解决方案是调整三相气隙，但光调整气隙会造成三相芯柱不一样高，气隙大的地方漏磁大，造成损耗大及铁芯发热，处理不好还会引起噪音和震动。

笔者对此项目设想是同时调整三相电抗器的三相气隙和芯柱钢片高度来弥补三相匝数和磁路的不平衡，保证三相电感不平衡率≤2%，把产品测试时一次通过率从66%提高到95%以上，从而提高生产效率和降低返修率及返修引起的次生问题。

1 电抗器总体设计方案

1.1 电抗器电气设计

1.1.1 设计输入

用户对产品的要求（结构、使用条件、主要技术参数、外形尺寸等）：主要设计指标要求请参照下表，请用铝材设

表 1 设计输入表

项目描述	要求	备注	项目描述	要求	备注
工作电流 (A)	930A		电感值 (uH)	$170 \pm 10\% \mu\text{H}$	热测
电网频率 (Hz)	50Hz		开关频率 (Hz)	3000Hz	
干式 / 油浸	干式		绝缘测试 (P-E P-P)	3000V AC	1 分钟
绝缘等级	H 级		海拔高度 (m)	<3000	
环境温度	-25°C +50°C		温升 (K)	<90	
噪音	<75dB		散热方式	自然风冷	
安装方式	立式	螺栓安装	尺寸 :	两侧出排	

计：

1.1.2 设计输出

(1) 电路结构 (图 1)

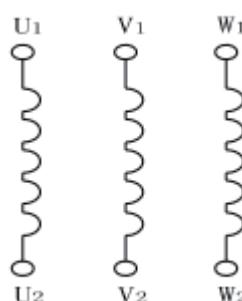


图 1 电抗器电气原理

(2) 额定电流 : 930A

(3) 电感值 : $0.17\text{mH} \pm 10\%$

(4) 三相电感不平衡率 $\leq 2\%$

(5) 匝数 : 14 匝

(6) 绕组 : 铝箔 $400*2.6\text{mm}$

(7) 铁芯截面积 : 145.5cm^2

(8) 高压测试 : 相对地 3000VAC 1Min

相对相 3000VAC 1Min

1.2 机械尺寸 (外形图 2)

1.3 电气设计

1.3.1 理论设计

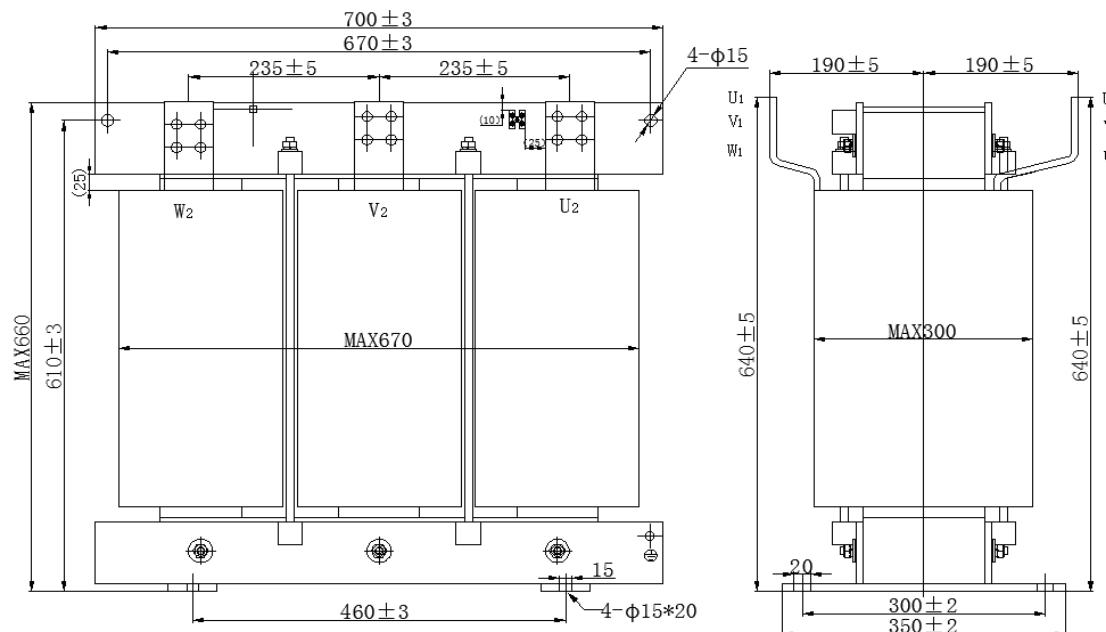


图 2

根据电感计算公式（忽略漏感）：

$$L = L_L = \frac{0.4\pi N^2 S_c}{l_g + \frac{l_c}{\mu_\infty}} \times 10^{-8}$$

式中：L--- 电感 (H)

L_L --- 主电感 (H)

l_g --- 铁芯磁路中实际的气隙总长度 (cm)

l_c --- 铁芯平均磁路长度 (cm)

μ_∞ --- 铁芯交流磁导率

N--- 电抗器线圈匝数

S_c --- 铁芯有效截面积 (cm^2)

$$= \text{铁芯宽度 } a \text{ (cm)} * \text{铁芯叠厚 } b \text{ (cm)} * \\ \text{叠片系数 (0.93-0.98)}$$

从公式中可以看出，影响电感量的因素有 5 个，分别是铁芯交流磁导率、线圈匝数、铁芯有效面积、铁芯平均磁路长度及铁芯中非磁性气隙长度。因为三相铁芯选的是同一材质及同一截面尺寸，所以第一个和第三个因数可以排除。又因为三相铁芯柱中非磁性气隙长度一致，所以第五个因数也被排除。那我们可以从剩下的两个因素（线圈匝数和磁路长度）来分析：

1.3.2 磁路长度分析

我们目前采用的是三相三柱结构，又称三相心式铁芯，是目前市场上应用最广泛的。这种铁轭面积和芯柱面积相等，三个铁芯中磁通量矢量和等于零。三相三柱磁路具体分析如下（图 4）：

从图中可以看出，A 相等效磁路长度与 C 相等效磁路长度相等，B 相等效磁路长度等于 A 相等效磁路长度和 C

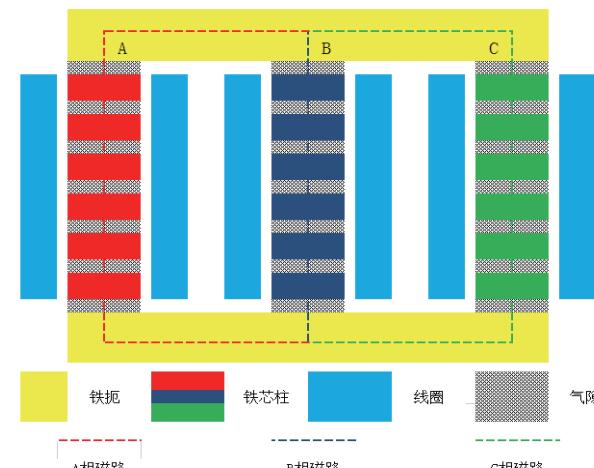


图 3 三相三柱式铁芯结构图（剖面）

相等效磁路长度两相的并联之和。根据电感公式（图忽略漏感）：在等效磁路长度不相等的情况下，会导致线圈出现三相不平衡，进而出现三相磁阻不平衡、三相励磁电流不平衡的情况，体现在电抗器的感量参数中就是 B 相电感量要高于 A/C 两相。

1.3.3 线圈匝数分析

匝数，在变压器理论里面称为电气匝数，是指能产生感应电压的、或能在铁芯中产生主磁通的导线，凡是不能产生电压或不能在铁芯中产生磁通的匝数不能称为电气匝数，只能称为几何匝数。因磁通是矢量，所以不同相位磁通相链的匝数相加也必定是矢量相加。与全部磁通相链的一匝才是一匝，与部分磁通相链的匝数为部分匝数。以下图实例说明：

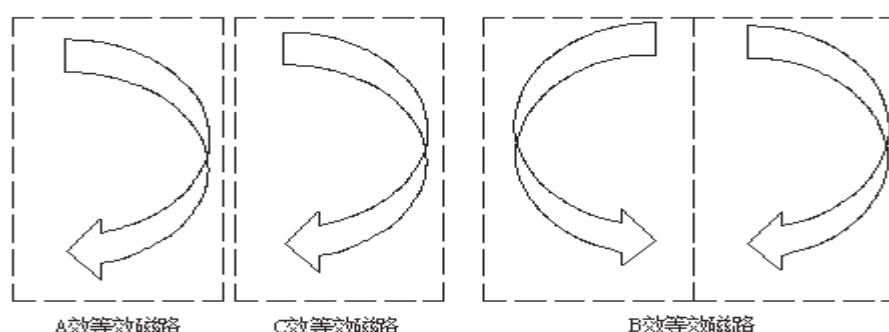


图 4 三相三柱式铁芯等效磁路 (Ic)

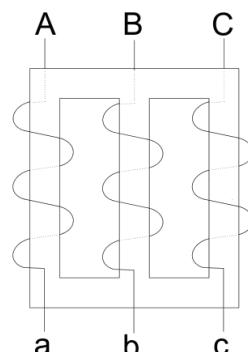


图 5 三相三柱铁芯匝数说明（平视图）

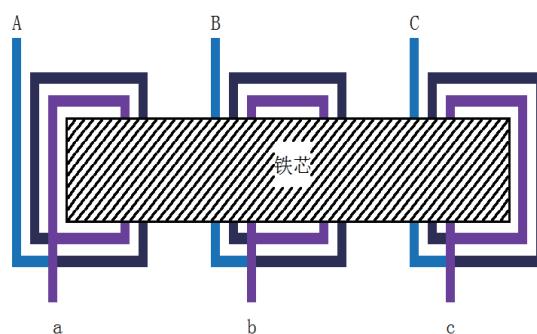


图 6 三相三柱铁芯匝数说明（俯视图）

以上图 5/6 为例，ABC 三相的几何匝数都一样，全部是 3 匝。但 A 相绕组右侧穿过铁芯几何匝数为 2 匝，左侧未穿过铁芯几何匝数为 3 匝，所以电气匝数仅为 2 匝。B 相绕组左右两侧均穿过铁芯，但电气匝数为矢量和 2.87 匝。C 相绕组同 A 相正好相反，右侧的穿过铁芯几何匝数为 3 匝，左侧未穿过铁芯的几何匝数，所以电气匝数为 3 匝。同样当三相的几何匝数都是 14.5 匝时，A 相绕组的电气匝数为 14 匝，B 相绕组的电气匝数为矢量和 14.87 匝，C 相绕组的电气匝数为 15 匝，下面根据电感计算公式分别计算三相电感量（由于是大气隙，可以忽略磁路长度的影响）：

铁芯电抗器量 $mH(L) = \text{主电感 } (L_L)mH + \text{漏感 } (L_S)mH$

$$\text{主电感 } (L_L) = 1.256 * N^2 * Sc * 0.00001 / lg'$$

$$\text{漏感 } (L_S) = 1.256 * \rho_s * N^2 * Ss * 0.00001 / hm$$

式中 : lg' ——考虑气隙磁通扩散后的气隙有效长度 (cm) $= lg * Sc / Sg$

hm ——线圈高度 (cm)
 ρ_s ——洛式系数 $= 1 - 2 * (Dm + \sigma_0) / (3.14 * hm)$
 Dm ——线圈总厚度 (cm)
 σ_0 ——线圈与铁芯之间隙 (cm)
 lg ——铁芯磁路中实际的气隙总长度 (cm)
 $= \text{单个气隙厚度 (cm)} * \text{气隙总个数}$
 Sg ——考虑气隙磁通扩散后的气隙导磁面积 (cm^2)

$$(a + \frac{lg}{2}) (b + \frac{lg}{2})$$

(a = 铁芯宽度, b = 铁芯叠厚, lg = 单个气隙厚度)

Ss ——线圈漏磁等效面积 (cm^2)

$$\frac{1}{3} D_m l_m + (a + \delta_0) (b + \delta_0)$$

l_m ——线圈平均匝长 (cm)

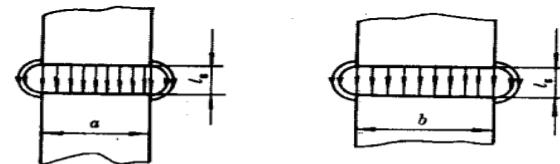


图 7 铁芯柱截面图（气隙磁通的扩散现象）

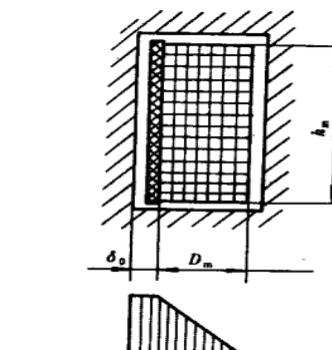
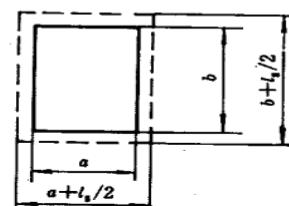


图 8 线圈结构图（单线圈心式铁芯的漏感）

最后理论计分析计算的结果是：A 相 0.168mH ，B 相 0.181mH ，C 相 0.185mH 。每相数据单独看是都符合要求： $0.17\text{mH} \pm 10\%$ ($0.153\text{-}0.187\text{mH}$)，但电感不平衡率达到 11% 远大于小于 2% 的要求，最主要是由电气匝数不平衡加上磁路不平衡所造成。所以在正常作业过程中都要把 C 相的气隙增加，A 相气隙不变，B 相增加，由于材料及工艺的累积公差都有近 2mm ，产品一次检验合格率非常低，几乎每台都需要在装配过程中重新调整气隙。

1.4 可实施改进方案

从上面的公式中可以看出，当铁芯的材质和尺寸选定后，感量与匝数的平方和铁芯面积成正比，与气隙成反比。当 A 相的感量为额定感量时，C 相的感量将是 A 相感量的约 1.1 倍，B 相将是 A 相感量的约 1.08 倍，所以该电抗器三相感量不平衡率将远大于规定值。根据上图公式及计算值，如果要把三相感量不平衡率调整到规定值及以内，我们如下 5 种方式可以选择：

1.4.1 从铁芯交流磁导率上调整

芯柱用不同的导电率材料以平衡电感量：换不同的导电率材料对损耗及电感饱和曲线有影响，在此项目上不可行。

1.4.2 从匝数上调整

调整 B 相及 C 相的匝数，各减少一匝。这样操作可以调整好感量，但同时又造成了三相直流电阻不平衡，一般标准上规定直流电阻不平衡率也要小于 2% ，所以这种方法不可行（在匝数大于 50 匝的电感上可以实施即小功率电抗器上可以实施）。

1.4.3 从铁芯面积上调整

减少 B、C 两相片宽及叠厚以降低电感量，这样会造成三柱外观差异大，一般客户无法接受，同样不可行（小功率电抗器铁芯截面积小可以实施）。

1.4.4 从气隙上调整

增加 B、C 两相气隙厚度以降低电感量，原有三相铁芯气隙厚度都在 24mm （含铁轭与芯柱间，要使 B、C 两相感量降低至 A 相接近，则 B 相需要增加 1.6mm ，C 相需要增加 2.2mm ，也就是 C 相高出 A 相 2.2mm ，产品上端面不在同一水平，而且铁轭与芯柱接缝处不在是 90 度平面，而是一个近 10 度的斜角，在以后的长期运行中将产生位移及噪音，产品的可靠性将受影响，所以也不可行。

1.4.5 从气隙和钢片高度两方面调整

同样改变 B、C 两相气隙厚度以降低电感量，但同时改变芯柱钢片尺寸以保持和 A 相芯柱同样高度，这样既保证了三相感量的一致性也保证了高度的一致性，产品的性能和可靠性都有保障，缺点是作业过程需要控制好尺寸，A/B/C 三相芯柱需要分开标识和装配，这个考虑在作业过程中引入条码或序列号管理则可以避免类似问题发生。

所以，综上所分析，我们选择第 5 个方案来进行验证。

2 电抗器总体设计改良方案

根据前面的数据，我们重新做了铁芯结构图，由三相三柱统一参数（ABC 三相不区分）改成三相三柱分别绘制，每个芯柱的气隙尺寸和硅钢片略有差异（根据每相实际气隙厚度来调整每相芯柱的硅钢片尺寸，保证总体尺寸一样），



图 9 实际产品图片

实测的结果如下：

A 相 0.168mH , B 相 0.170mH , C 相 0.169mH 。每相数据都符合要求： $0.17\text{mH} \pm 10\%$ ($0.153\text{--}0.187\text{mH}$)，同时电感平衡率达到 1.18% ，满足小于 2% 的要求。

3 结论

3.1 方案改善前后对比

3.2 改良方案优点

(1) 产品测试时一次通过率从小于 66% 提高到 95% 以上

(2) 三相感量不平衡率低 (由 $5\text{--}10\%$ 降至 $\leq 2\%$)

(3) 外观一致性好 (只改气隙不改芯柱铁芯尺寸会造成产品左边比右边高出约 $1\text{--}5\text{mm}$)

(4) 噪音低 (三相芯柱不平时在铁芯接缝处会有空气隙，当产品通电工作铁芯磁质伸缩引起空气震动而产生噪音)

(5) 效率高 (一台三相电抗器与同容量的三台单相电抗器相比铁芯损耗降低三分之一)

3.3 改良方案缺点

(1) 堆铁芯和绕线工序工时较长

(2) 堆铁芯和绕线工序 A/B/C 三相需要区分以防止混用

(3) 铁芯柱片有两种或两种以上的规格，采购和仓库管理都增加了一定的难度

4 总结与展望

电抗器类产品主要是与电力电子相配套，随着我国社

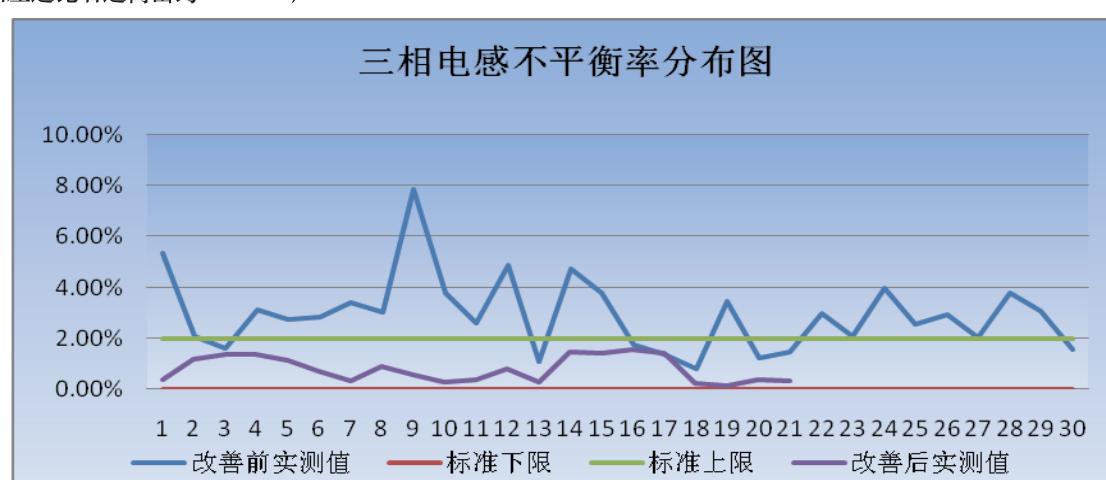


图 10 方案改善前后性能对比 (一次检验实测数据)

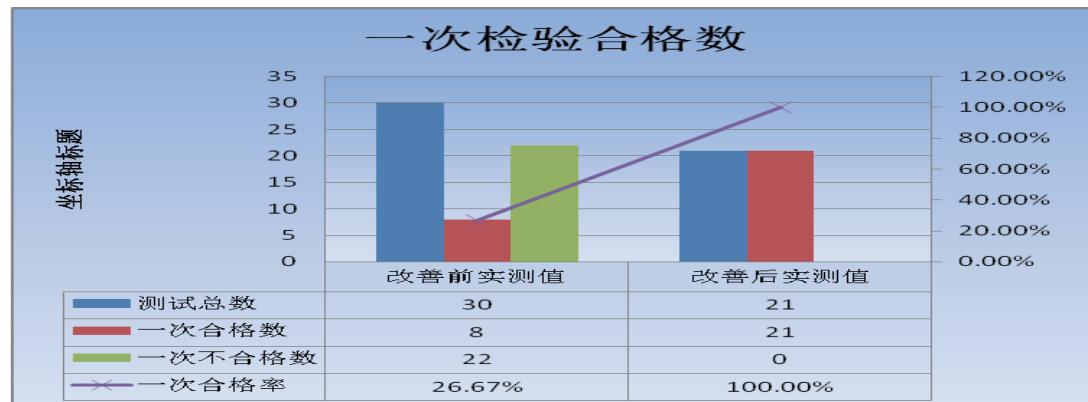


图 11 方案改善前后性能对比 (一次检验合格数)

下转151页