

相控电抗器订货电流的选择推荐

毛 圆 印明春

辽宁荣信兴业电力技术有限公司 辽宁 鞍山 114018

摘要：相控电抗器作为TCR（主要由晶闸管阀组、控制系统及相控电抗器组成）型SVC中的重要电气设备，在用于治理不同类型及容量的负荷电能质量问题时，其订货电流的选择是有差异的。本文通过近5年SVC改造工作中收集的项目资料，分析总结此类项目的相控电抗器的损毁原因，给出用于治理三相不平衡、无功冲击频繁负荷（电弧炉类）电能质量问题的大容量SVC装置中的相控电抗器额定电流的选择建议。

关键词：相控电抗器；订货电流；谐波；损耗；温升；寿命

前言：TCR型SVC中的相控电抗器普遍采用干式、空心结构，经改进绕线工艺、星型架结构，加装防护帽、防护裙，喷涂防闪络RTV涂料及增加假密封等措施，使其成为十分成熟、运行稳定的电气设备。但在近几年的工作中发现用于治理三相不平衡、无功冲击频繁负荷（电弧炉类）电能质量问题的大容量SVC装置中的相控电抗器经常在设备投运后不久就发生损毁情况。经近5年来中对此类项目的改造工作中总结发现，造成此类项目中相控电抗器的损毁原因是相控电抗器的额定电流选择过低，忽略了谐波电流对温升的影响，使绝缘材料寿命骤减，从而导致相控电抗器的损毁。

支路相控电抗器运行短期损毁情况，均为电弧炉类现场，且SVC装置容量均100Mvar以上。选取下表中7个典型项目进行分析。

表1 损毁相控电抗器参数

项目	TCR容量/Mvar	运行寿命/年	损毁时环温/℃	订货电流	过载能力	绝缘耐热等级
一	120	3	28	基波电流	1.2	F（匝间F）
二	160	2	32	基波电流	1.35	B（匝间F）
三	100	2	30	基波电流	1.15	B（匝间B）
四	165	2	34	基波电流	1.2	F（匝间H）
五	150	2	29	基波电流	1.2	F（匝间F）
六	110	1	25	基波电流	1.15	B（匝间F）
七	145	1	31	基波电流	1	B（匝间B）

1 问题现场调研

近5年在SVC改造工作中遇到20余项目现场出现TCR



图1 损毁电抗器的外观图

以上项目经现场解剖检验，确定损毁原因为热点温升过高，绝缘材料寿命骤减并失效，导致匝间短路。

2 温升对绝缘材料的影响

理想状态下干式空心电抗器的使用寿命取决于浇筑封装绝缘材料的寿命。绝缘材料长期在较高温度、电场和磁

场的作用下，会逐渐失去原有的力学和绝缘性能，这个渐变的过程就是绝缘材料的老化。在正常运行时，在保证足够的机械和电气性能下，温度稳定性和热状态是影响绝缘材料寿命的重要指标。因此，国际电工委员会和国家标准局制定了电抗器和电气绝缘材料的温升值和分级。

表2 绕组温升限值

绝缘系统温度/℃	额定电流下的绕组平均温升限值/K
105（A）	60
120（E）	75
130（B）	80
155（F）	100

表3 电气绝缘材料耐热性升级

相对耐热指数	额耐热等级	符号规定
> 90 ~ 105	70	Y
> 105 ~ 120	90	A
> 120 ~ 130	105	E
> 130 ~ 155	120	B

续表:

绝缘系统温度/℃	额定电流下的绕组平均温升限值/K	相对耐热指数	额耐热等级	符号规定
180 (H)	125	> 155 ~ 180	155	F
200	135	> 180 ~ 200	180	H
220	150	> 200 ~ 220	200	N
		> 220 ~ 250	220	R
		> 250	250	-

从表2、表3可以看出,采用不同耐热等级的绝缘材料制造的电抗器运行时的温升限值是不同的。另外电抗器本体中的温度分布在空间上按一定规律显曲线分布,这样就有了最热点温升和平均温升之分。平均温升用来衡量电抗器的发热情况,是检验电抗器设计合理性与经济性的重要指标;最热点温升是用来衡量电抗器绕组寿命和检验是否受损的重要指标。干式空心电抗器的使用寿命可根据蒙特申格尔(Montsinger)寿命定律来计算。

$$T = Ae^{-\alpha\theta} \quad (1)$$

式中 T绝缘材料的使用寿命

A常数(电抗器使用的绝缘材料耐热等级确定)

α 常数,约为0.88

θ 绝缘材料的温度

根据蒙特申格尔(Montsinger)寿命定律可以看出,如电抗器最热点温度比所用绝缘材料最好允许温度低,则绝缘老化缓慢,使用寿命延长;反之,则加速老化,寿命骤减。对于不同耐热等级的绝缘材料的寿命减少一半所升高的温度和寿命增加一倍所降低的温度相同,A级为8℃,B级为8~10℃,H级、N级为12℃。故在电抗器订货时不但要向制造商提供绝缘等级要求,还要提供现场的环境温度。

3 谐波对电抗器温升的影响

电抗器运行时的温度取决于电抗器的损耗。与电动机及变压器类似,当有谐波流过电抗器绕组时,不仅有谐波线损,还有因处于磁场而产生的集肤效应、邻近效应、磁滞、涡流等附加损耗。谐波的幅值越大,频率越高,其在电抗器中产生的损耗越大,故不能忽视谐波对电抗器温升的影响。

谐波损耗的计算方法主要有等值电阻法、谐波畸变率法。对于相控电抗器和滤波电抗器一般采用基于等值电阻的估算法;对于平波电抗器一般采用基于谐波畸变率的估算方法。从表1列举的案例可以看出,一些企业在设计相控电抗器时往往忽略了谐波对相控电抗器温升的影响。当TCR支路中的晶闸管阀组处于不同的触发角度时,产生与其对应的特定频率的谐波(即,触发角所对

应的谐波电流频率不变,数值与该触发角下TCR输出的基波电流有关)。谐波电流为:

$$I_n = \frac{4I_1}{\pi n(n^2-1)}(\cos\alpha\sin n\alpha - n\sin\alpha\cos n\alpha) \quad (2)$$

式中: $I_1 = \frac{U}{\pi X_R}(2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)$ 基波电流, A

U 电压, V

X_R 电抗器基波电抗, Ω

α 控制角

n 谐波级次

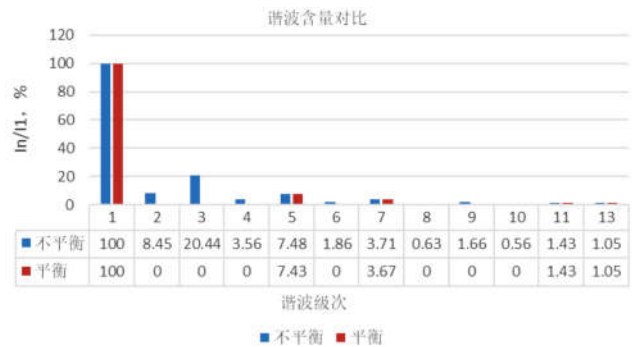


图2 谐波含量对比图

TCR为角型连接,对于不对称三相系统,产生 $n = 3k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$)零序谐波、 $n = 3k+1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$)正序谐波和 $n = 3k-1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$)负序谐波。因半波不对称性产生直流分量并形成偶次谐波。对于对称三相系统,因没有零序电流通道,不会泄漏角外;因半波对称性没有直流分量且偶次谐波被抵消。因SVC用于不同的负荷系统(本文主指不平衡和平衡负荷),因其采用控制策略的不同,TCR在处于各触发角时所产生的的谐波也存在差异。谐波含量(以最小触发角 105° 为例)及其对比如图2。

4 相控电抗器额定电流的选择建议

因电弧炉类负荷无功变动频度很高($10 \leq r \leq 200$, 次/h),用于治理此类快速、频繁无功变动负荷引起的电压波动和闪变问题的SVC装置需要准确、快速的改变晶闸管阀组的触发角跟踪负荷的变动,以达到良好的治理效果。此种运行方式下,频繁变动谐波级次及幅值的

谐波电流造成的谐波线损和附加损耗与基波线损叠加，并在环温的影响下使相控电抗器（自冷却方式）达到一定的运行温度水平。故在设计电弧炉类负荷SVC装置相控电抗器时，不能忽略谐波电流对相控电抗器的影响，尤其是在SVC容量较大时，更应向相控电抗器厂家提供谐波频谱、环温及海拔等参数。根据上述对相控电抗器损坏的分析及对国内外多家知名电抗器生产商的咨询，给出用于治理三相不平衡、无功冲击频繁负荷（电弧炉类）电能质量问题的大容量SVC装置中的相控电抗器的订货电流及附加订货参数的推荐如下：

（1）*不能采用TCR装置的基波电流作为相控电抗器的订货电流。应采用TCR装置的基波电流与谐波电流叠加后的额定电流作为订货电流；

（2）在向电抗器制造商提供相控电抗器必要的订货参数（如订货电流、电感值、电压、频率及绝缘耐热等级等）的同时，还需要提供流过相控电抗器的谐波电流频谱*、现场的温度、海拔高度等环境条件，以便电抗器生产商校验温升。

5 笔者寄语

（1）根据笔者与国内外知名电抗器生产商的咨询与探讨得出：TCR容量在80~185Mvar、环温在45℃以下、海拔高度1200m以下时，相控电抗器的订货电流采用基波

电流与谐波电流叠加后的额定电流设计温升与实际运行的温升值较为接近。

（2）相控电抗器过载倍数，应按订货电流乘以过载系数后进行设计，不应按基波电流乘以过载系数后进行设计。

（3）相控电抗器的成本是按其容量核算的，相控电抗器的容量与订货电流的平方成正比。在设计相控电抗器时不应用降低其寿命的方式来降低成本。

参考文献

- [1] 李树田. 干式空心电抗器的作用和使用寿命. 电气开关, 2006, No3.
- [2] 叶占刚, 孙淑平. 干式空心电抗器的作用和使用寿命. 电工技术杂志, 1999年7月, 第4期.
- [3] 肖彩霞, 李琳, 纪峰, 等. 特高压干式平波电抗器损耗与热点温升计算及实验研究. 高压电器, 2018, 第54卷, 第9期.
- [4] 席国强. 浅谈空心电抗器运行寿命影响因素. 中国新技术新产品, 2017年14期.
- [5] 张静林. 一种使实用的谐波损耗计算方法. 电气开关, 2011, No4.
- [6] 曾林锁, 张良县, 谢德馨. 特高压干式平波电抗器谐波损耗分离计算. 变压器, 2011年4月.