

无功补偿装置中电抗器的全电流和全电压分析

谭晓玉¹, 陈熙志²

(1. 国网重庆市电力公司技能培训中心, 重庆 400053; 2. 重庆西威机电有限公司, 重庆 400053)

摘要: 电网中普遍存在谐波, 进入无功补偿装置中电抗器的是全电流、全电压, 若处置不当, 将引起谐振放大, 甚至造成严重事故。当前无功补偿装置中电抗器的设计和生产都是按基波电压设计, 这是造成无功补偿装置安全事故的重要原因。无功补偿装置中电抗器应按全电压设计和生产, 理论和实践都证明电抗器全电压设计方法是无功补偿装置安全运行的重要条件; 相关标准和手册, 需要清晰、准确的描述并有相应的措施; 设计院要正确选型; 无功补偿装置生产企业要对项目系统分析、安全校核, 正确的选用元件; 电抗器生产企业要以全电压设计、生产电抗器。

关键词: 补偿; 谐波; 电抗器; 全电流; 全电压

中图分类号: TH132

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)S2-242-04

稳态电压、电流为理想的正弦波^[1], 即:

$$u(t) = U_m \cos \omega t \quad (1)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

但系统中总存在各种非线性负荷, 或者, 某些元件因运行区域的改变而呈现不能忽视的非线性; 前者最典型的是各种整流元器件, 后者如磁性元件运行于饱和区时。于是, 系统中将产生高次谐波, 即出现频率为基波频率整倍数的正弦波电量^[1]。也就是说输配电系统中存在谐波。

20 世纪 80 年代以来, 随着电力电子技术的飞速发展, 各种新型用电设备越来越多地问世和使用, 谐波的影响越来越严重。电力系统受到谐波污染后, 轻则影响系统的运行效率, 重则损坏设备以至危害电力系统的安全运行^[2]。

1 无功补偿装置中普遍使用电抗器

为补偿无功和滤出谐波, 装设由电容、电抗器及电阻组成的单调谐滤波器和高通滤波器^[4]。

补偿装置为了抑制合闸涌流必须配置电抗器, 在普遍存在谐波的配电环境中为了抑制谐波, 也必须匹配电抗器。电抗器在无功补偿装置中使用, 有 3 种功能: 抑制合闸涌流、抑制谐波放大和滤除谐波。3 种无功补偿装置使用电抗器的功能不同, 电抗器的参数也不相同。且电抗器的选用与谐波源、系统参数和补偿滤波装置功能密切相关。往往同一

性能电抗器在不同环境中使用, 效果大不相同。因此正确选用电抗器, 是补偿滤波装置质量是否优良的关键因素之一。

2 补偿滤波装置三要素

在有谐波的环境, 谐波源作为谐波的电源, 系统和补偿滤波装置对谐波源来讲是一个并联电路:

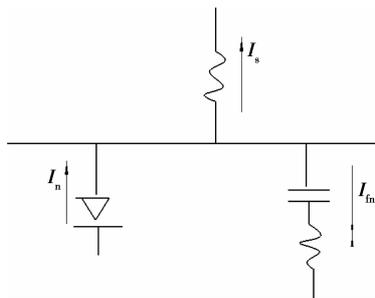


图 1 补偿滤波装置三要素

任何一套补偿(滤波)装置, 其运行效果均与谐波源、系统参数及补偿滤波装置参数等三要素有关^[1,4]。同一套补偿滤波装置, 在不同环境, 由于谐波源状态可能不一样, 系统参数也可能不相同, 运行效果将大不相同。用户现场的谐波源负荷的运行参数是动态变化的, 系统参数也是动态变化的, 因此一套相同的补偿滤波装置在不同的用户现场, 承受的谐波程度不一样、运行效果不可能完全相同。

3 进入无功补偿(滤波)装置中的电流和电压

前面描述中得知,输配电网中普遍存在谐波,电网中运行的电流、电压都是全电流、全电压。

常见的是6脉冲谐波源,通常称为6脉冲换流器。在理想条件下,6脉冲换流器交流侧除基波电流外,只有 $6k \pm 1$ 次谐波,称为6脉冲换流器的“特征谐波”。

6脉冲的电流,A相电流的频域表达式^[3-4]:

$$iA_6 = 2\sqrt{3}/\pi \times I_d \times (\cos\omega t - 1/5 \times \cos(5\omega)t + 1/7 \times \cos(7\omega)t - 1/11 \times \cos(11\omega)t + 1/13 \times \cos(13\omega)t - 1/17 \times \cos(17\omega)t + 1/19 \times \cos(19\omega)t - \dots) \quad (3)$$

即电网中运行的电流除基波电流外,还存在5、7、11、13、17、19…谐波电流。只是不同的输配电环境,这些谐波电流含量不同罢了。谐波电流并在系统阻抗上产生电压——谐波电压。

对谐波而言:谐波源是谐波的电源,系统和无功补偿装置是并联电路。

谐波源发生的5、7、11、13、17、19…谐波电流,经过系统和无功补偿装置参数并联计算,在系统和无功补偿装置中都存在5、7、11、13、17、19…谐波电流^[4];并在系统和无功补偿装置的阻抗上产生谐波电压。因此进入无功补偿装置中除基波电流、基波电压外,还有谐波电流、谐波电压。就是说:进入无功补偿装置中的是全电流、全电压。

4 无功补偿装置中电抗器的全电流、全电压

进入无功补偿装置中的是全电流、全电压。无功补偿装置中的全电流流过电容器和电抗器(两者是串联)。无功补偿装置中的全电流,包括基波电流和谐波电流,以6脉冲谐波源为例,进入无功补偿装置中的谐波电流有:5、7、11、13、17、19…谐波电流。这些谐波电流在电抗器感抗上产生谐波电压:

$$U_{nL} = I_{fn} \times X_L = I_{fn} \times 2 \times \pi \times f \times L \quad (4)$$

$$L = X_L \div (2 \times \pi \times f) \quad (5)$$

无功补偿装置中电抗器的端子电压为全电压^[1,4]:

$$U_L = (U_{1L}^2 + U_{nL}^2)^{0.5} \quad (6)$$

5 无功补偿装置中电抗器的谐波电压及影响因素

进入无功补偿装置中电抗器的谐波电压:

$$U_L = I_{fn} \times 2\pi f L \quad (7)$$

I_{fn} 为进入无功补偿装置中的谐波电流,它与谐波源、系统参数和无功补偿装置参数有关。任何一个参数改变, I_{fn} 也就随之改变,电抗率越小,越接近主次谐波频次,进入补偿装置的谐波越大。

f 为谐波电流的频率,频率越高,相等的 I_{fn} 在电抗器上产生的谐波电压就越高。

L 为电抗器的电感值,电抗器感抗与电容器容抗组成的电抗率越大,电感值越大,相等的 I_{fn} 时在电抗器产生的谐波电压越高。但电抗率越大,其特征谐振频次 n_0 远离主次谐波频次,进入无功补偿装置中的谐波电流变小,具体的影响这要根据项目具体参数分析。

当进入电抗器的基波电压和谐波电压的全电压使铁芯电抗器铁芯磁密进入饱和区时,电抗器铁芯饱和而产生铁磁谐振,电抗器铁芯因铁磁谐振产生谐波电流,而进一步放大谐波。严重时,因电抗器铁芯饱和而产生铁磁谐振将发生严重事故^[1,4-5]。在无功补偿装置的安全事故中,不少都是因为电抗率、电抗器选配不当引起谐振放大,乃是铁磁谐振所致。

6 现行有关标准对电抗率和电抗器端电压却与上述不符

前述有关谐波的专著对于无功补偿装置中的全电流、全电压有明确的分析,但指导工作的现行相关标准却规定无功补偿装置的:

额定电抗率^[5-7]:4.5%、5.0%、6.0%、12.0%、13.0%。

$$\text{电抗器额定端电压}^{[7]}: U_n = K \cdot N \cdot U_m \quad (8)$$

标准中只提及基波电流、基波电压,没有提及谐波电流、谐波电压。基层设计、生产和项目施工单位就缺乏全电流、全电压的指导和设计依据。导致有的设计院、用户选用的无功补偿装置:电抗器(铁芯电抗器)、电抗率都符合上述相关标准规定,在谐波环境运行中却出现安全事故。

7 无功补偿装置中电抗器全电压的设计方法

无功补偿装置中电抗器全电压的设计,首先对无功补偿(滤波)项目系统分析^[1,4]、滤波计算,用计算机仿真进行无功补偿(滤波)装置投运后负荷和功率因数变化、并联谐振安全校核、补偿(滤波)通道安全校核—电抗器全电压的安全校核。以此安全校核得出的全电压,为电抗器端电压的设计电压。

如某用户一台315 kVA变压器带了中频炉等

谐波源, 负荷率 85%, 自然功率因数 0.8, 要求安装一套补偿装置, 月均功率因数达到 0.95。

补偿装置方案主要参数:

315 kVA 变压器负荷率 85%, 自然功率因数 0.8, 要求月均功率因数达到 0.95, 需要有效补偿容量 90.3 kvar。比较好的补偿滤波装置生产企业, 能够选用下列方案:

表 1 补偿滤波装置容量

通道	电容器 安装容量 /kvar	基波有效 补偿容量 /kvar	投切通 道数
H5	128	94.60	4
合计	128	94.60	4

这套补偿滤波装置的主要参数:

表 2 补偿滤波装置主要参数

电容器容量 /kvar	电容器 额定电 压/kV	电抗率 /%	电网电压 /kV	容抗 /Ω	感抗 /Ω	电感值 (没 H)	基波有效 补偿容量 /kvar	基波电流 /A	电容器 额定电 流/A	电容器 基波 电压/V	电抗器基 波端子电 压/V
全套 128	0.48	6	0.4	1.800	0.108	0.344	94.58	136.52	153.98	245.68	14.74
每个支路 32	0.48	6	0.4	7.198	0.432	1.375	23.65	34.13	38.50	245.68	14.74

电抗器的设计, 按国家标准电抗器应能在工频电流为 1.35 倍额定电流的最大工作电流下连续运行。补偿滤波装置设 4 组, 每组容量 32 kvar, 基波电流 34.13 A, 感抗 0.432 Ω。则电抗器的端子电压为

$$U_L = 34.13 \times 1.35 \times 0.432 = 19.9 \text{ V}$$

电抗器传统设计方法: 选用“Q151-35”, 线性段最高磁密为 1.6 T, 则电抗器设计时磁密取“1.55 T”, 认为还留有一定裕度。这样的电抗器设计方案, 是完全符合国家标准的, 也算是“很严谨的”。这样电容器、电抗器配置的补偿滤波装置, 在一般环境中能够正常运行。这也是现行严格按国家标准要求生产的电抗器, 多数能够正常运行, 没有出现过多的质量事故的原因。但若电抗率低, 如取电抗率 4.5%~5%。或电抗器不能保证在工频电流为 1.35 倍额定电流的最大工作电流下连续运行, 则在谐波较重环境很难确保补偿滤波装置能够正常运行。

表 3 进入补偿滤波通道的谐波电流

谐波次数	I_{fn} / A
3	8.15
5	32.29
7	13.15
11	4.41
13	2.75
17	1.37
19	0.91
23	0.81
25	0.80

在电抗器端子上的谐波电压和基波电压如表 4:

表 4 电抗器端子电压

端子谐波电压/V	20.75
端子基波电压/V	14.74
全电压/V	25.45
全电压/基波电压	1.73

从上述计算分析得知, 电抗器端子电压中谐波电压比基波电压还高, 全电压与基波电压的比值系数为 1.73。电抗器厂设计、生产和检验都只能按电抗器端子基波电压进行, 也就是按基波电压“14.74 V”进行。这样的电抗器, 在这个项目中运行, 电抗器端子全电压 25.45 V 时, 全电压设计方法: 铁芯磁密取值为“线性段最高磁密(不饱和磁密) ÷ 1.73”。该项目电抗器铁芯采用的“DQ151-35”硅钢片, 线性段最高磁密为 1.6 T, $1.6 \div 1.73 = 0.925$, 则电抗器基波电压设计时磁密取“0.92 T”^[1]。

按此设计、生产的电抗器, 在该项目谐波严重中运行, 电抗器端子全电压达 25.45 V 时, 电抗器铁芯没有饱和^[1], 电抗器正常运行。实测电抗器端子电压在 18~25 V 间运行(这是因谐波动态变化的原因), 补偿滤波装置正常运行。该补偿滤波装置长期运行没有出现质量问题。这是因为电抗器端子的基波电压磁密低, 谐波严重时电抗器端子最高全电压磁密, 也只在线性段最高磁密处, 没有饱和。电抗器运行铁芯磁密的运行区间磁化曲线如下图 2:

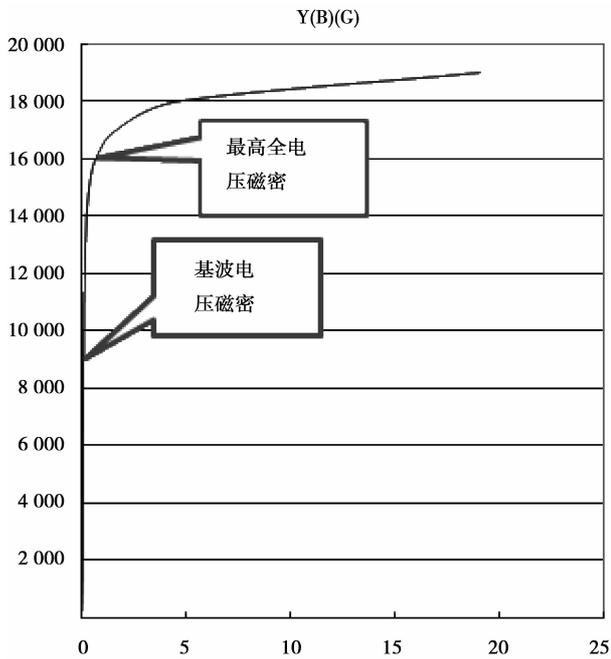


图 2 全电压设计电抗器运行铁芯磁密的运行区间磁化曲线

传统电抗器厂设计、生产的电抗器,在该项目谐波严重的环境中运行,电抗器运行铁芯磁密:基波电压磁密 1.15T(11 500 G),最高全电压磁密 2 T(20 000 G)的运行区间,磁化曲线如下图 3:

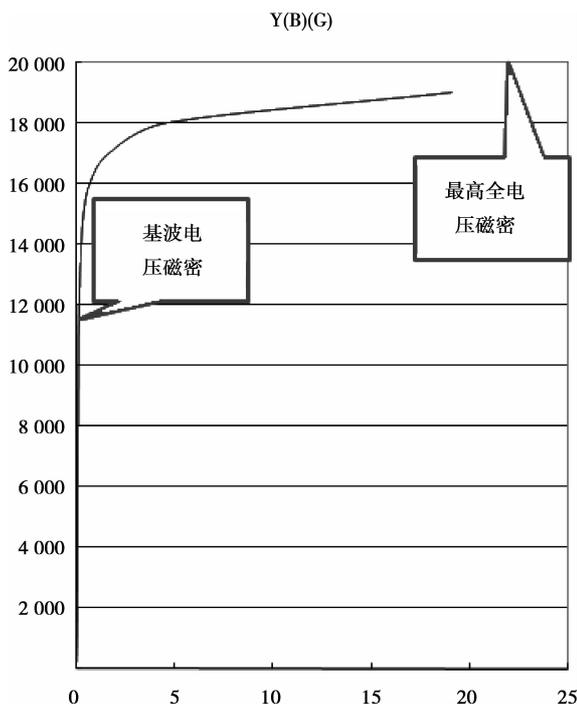


图 3 传统的电抗器运行铁芯磁密的运行区间磁化曲线

该电抗器铁芯的饱和最高磁密都达不到 2 T,因此传统电抗器在谐波严重环境中运行,铁芯会饱和,补偿装置寿命短甚至会因铁磁谐振造成安全事故。

8 正确掌握无功补偿(滤波)装置中电抗器全电流、全电压的意义

前面阐述中理论和实践都证实无功补偿装置中电抗器是全电流和全电压,而目前无功补偿装置配置不当造成的事故中大部分就是由于对无功补偿装置中电抗器的全电流、全电压缺乏清晰的认识所致。虽然现在出现了 SVG 无功发生器、APF 有源滤波装置等新补偿滤波产品,但这些产品不可能全部取代传统的(电容器+电抗器)无功补偿装置。可能 FC((电容器+电抗器)无功补偿装置)+SVG 无功发生器,将有可能在提高电能质量产品中具有较强优势。因此,清晰、准确认识无功补偿装置中电抗器的全电流和全电压,对充分发挥无功补偿装置功能、确保无功补偿装置安全、稳定运行十分重要。要做到这一点,首先必须是无功补偿装置有关的标准、《手册》对无功补偿装置中电抗器是全电流和全电压要清晰、准确的描述及采取相应的措施;设计院要正确选型;无功补偿装置生产企业对项目系统分析、安全校核,正确的选用元件;电抗器生产企业以电抗器端子全电压设计电抗器,确保全电压运行中铁芯不饱和。

参考文献:

- [1] 许克明,徐云,刘付平. 电力系统高次谐波[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991.
- [2] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [3] 张一中,宁元中,宋永华,等. 电力谐波[M]. 成都:成都科技大学出版社,1992.
- [4] 钢铁企业电力设计手册编委会. 钢铁企业电力设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [5] 中华人民共和国电力工业部. 并联电容器装置设计规范 GB 50227—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
- [6] 高压并联电容器装置 JB/T 7111—1993[S]. 北京:机械工业研究院出版社,1993.
- [7] 串联电抗器 JB 5346—1998[S]. 北京:机械工业研究院出版社,1998.