「电动机」

变频电动机谐波分析及治理方案的研究

文/西安工程大学电子信息学院　付超楠
国网平顺县供电公司　杨　帆

某公司所使用的电负荷中，变频电机负荷不仅功率因数低而且是一种严重的谐波源，变频电机装置产生大量的谐波，导致电能质量下降，增加设备损耗。同时谐波及电压质量指标严重超过了国家规定要求。从测试数据查出西安某集团橡胶有限公司现在的谐波水平状况非常严重。测试结果表明：系统的谐波电压和电流超过国标GB／T14549—1993《电能质量公用电网谐波》允许值许多。主要是5次谐波电流表现最为严重，其次就是7次和11次谐波电流，系统波形畸变的主要影响仍是变频电机装置产生较大的谐波电流所致。为限制变频电机装置产生的谐波电流注入系统，需安装滤波补偿成套装置，降低对系统的谐波污染，改善工厂用电设备的运行环境，使功率因数满足供电部门的要求。

在工业调速传动领域中，与传统的机械调速相比，用变频器调速有诸多优点，故其应用非常广泛。西安某集团橡胶公司10 kV/0.4 kV 配电系统中使用了大量的低压变频器，以变频器为代表的电力电子装置在节能的同时也是配电网中最主要的谐波源之一，其对电力系统中电能质量有着重要的影响。治理好谐波，不仅能降低电能损耗，而且能延长设备使用寿命，改善电磁环境，提高产品的品质。解决谐波污染和无功功率不足主要有两种方案：无源滤波技术和有源滤波技术，相应的滤波器称为无源滤波器（PPF）和有源滤波器（APF）。APF有源滤波器因其具有良好的动态补偿效果，在电力系统谐波抑制和无功补偿方面有良好的效果，但其安装容量受到开关器件水平和补偿性能的限制，而且初期投资较高。无源滤波器PPF（Passive Power Filter，PPF，PF）或称为LC滤波器，它具有体积小，运行稳定，成本低的特点，故本文选用LC。文献提出一种多目标优化设计方法，即将初期投资，无功功率补偿容量和滤波后电网谐波含量作为目标，利用遗传算法对PPF的参数进行优化设计，取得了良好的效果。LC滤波器安装在电力电子设备的交流侧，是由电容元件、电感元件和电阻元件按照一定参数配置一定的拓扑结构连接而成的滤波装置。LC滤波器是出现最早的滤波装置，虽然存在一些较难克服的缺点，但因其结构简单、运行可靠性较高、运行费用较低、设备投资少等优点，因此至今仍是应用最多的滤波方法。

负荷概况

在某集团橡胶公司提供的信息中，1台编号TD51容量为2 000 kV·A变压器，一次电压为10 kV，二次电压为0.4 kV。馈供用电负荷：负荷主要有交流变频电机和直流电机，生产过程为连续三班制，负荷变化较大，其中 TD51变压器最大负荷电流可达2 217 A，功率因数很低，只有0.56左右。

低压配电室0.4 kV侧总的计算负荷为：有功功率896 kW；无功功率1 326 kvar；视在功率1 600 kV·A；功率因数为0.56。由此可见0.4 kV供电系统自然功率因数低于供电部门0.92以上的基本要求，同时由于系统内的直流整流装置将产生大

量谐波，故0.4 kV在供电系统需要进行无功补偿与谐波治理。

谐波治理的原则

国内外经验表明当电压波形畸变率在大于8%时对电子设备和运行中电气设备造成较大影响，大于10%时对其它用户电气设备有严重影响。在这种工况下，纯无功补偿电容器根本不能投运，对电缆、变压器等设备使用寿命有不良影响，产生大量的谐波电流会造成谐波发热损耗。因此，有必要加以治理。在设计低压滤波器时，通常应结合实际情况，给出具体的设计要求和谐波源及设备的运行资料。

根据了解的负荷情况，采取在谐波治理的同时结合全厂的无功补偿需求，使谐波指标满足国标，同时实际功率因数达到0.92以上。

具体滤波方案的确定

（1）谐波电流的确定

在额定负荷运行时，经测量产生的5次谐波对基波含有率接近20%，7次接近14%，11次接近9%，13次接近7%。

测量TD51变低压侧的谐波电流（A）如下表。

表1　谐波电流测量值

（A）

变频电机	基波电流	5次	7次	11次	13次	19次
实测值	2 217	327	20.8	65	8.73	15.9

根据上表中实际运行时允许流入滤波支路中的额定谐波电流，在短时内允许有1.2倍的过电流。也就是滤波支路可将此谐波电流90%以上谐波消除。其产生的谐波电流主要是5次谐波，7次相应次之，11、13次及以上相对较小，但考虑到11次以上高次谐波对电压畸变率的贡献影响，对11次也需加以限制，实际滤波支路将以5次为主，7次为辅，同时考虑11次以上的高通滤波。另外，还需防止对3次和其他谐波的放大影响，在各支路设计时需全面考虑。

（2）滤波方案和补偿容量的确定

滤波原则是以5次谐波为主，在装设5次调谐支路时主要用于滤除5次谐波电流，其对7次及以上高次谐波也有一定的滤效，装设7次滤波器支路容量不宜过大，且要防止对5次的不良放大，这对11次以上谐波也有一定滤效，装设11次及以上谐波的高通支路，对11次有较强的滤波效果，对13次及以上谐波也有明显抑制作用，但对7次谐波有一些放大作用。所以各滤波支路容量应综合考虑，避免滤波器的投运对其他谐波的过度放大。总体应保证滤波及补偿效果达到实际要求。

补偿容量的确定：已知负荷有功功率P，补偿前的功率因数为$\cos\phi_1$，需提高功率因数到$\cos\phi_2$，所需电容器的补偿容量Q，可按下式计算

$$Q=P\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_1}-1}-\sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_2}-1}\right) \quad (1)$$

式中，$P=S\cos\phi_1$，S为负荷的额定视在功率。

$$\cos\phi_1=0.56 \quad (2)$$

$$\cos\phi_2=0.94 \quad (3)$$

$$P=S\cos\phi_1=1\,600\times0.56=896\ \text{kW} \quad (4)$$

$$Q=P\left(\sqrt{\frac{1}{0.56^2}-1}-\sqrt{\frac{1}{0.94^2}-1}\right)$$
$$=896\times1.12=1\,003.52\ \text{kvar} \quad (5)$$

电容器安装容量Q_C和实际补偿容量Q与电容器额定电压U_C和补偿线路额定电压U之比的平方成正比，经计算

$$Q_C=\frac{U_C^2}{U^2}Q=\frac{0.56^2}{0.4^2}1\,003.52=1\,967\ \text{kvar} \quad (6)$$

安装容量为$Q_C=1\ 967$ kvar。5次、7次、11次三个支路分别安装983 kvar、491 kvar、491 kvar。

5次谐振点：1/52＝4%，设计串电抗率值：4.5%。7次谐振点：1/72＝2.04%，设计串电抗率值：2.3%。11次谐振点：1/112＝0.826%，设计串电抗率值：0.9%。串联电抗率k值在选取的时候应注意适当偏离某次谐波的谐振点，否则串联支路易和电网发生谐振，使得大量谐波电流流入电抗器，造成电抗器的发热甚至烧坏。在确定滤波支路和消谐次数后，再根据已确定的安装容量进行各支路容量和装置的控制方式。

依据实际谐波电流和其他电量测量数据及变化曲线，在变压器低压侧采用一套动态无源滤波成套装置，强力消谐5次调谐，7次调谐支路，11次及以上谐波的高通支路。装置运行寿命长，维护费用低。在谐波得到治理，无功充分补偿后，其使变压器和线路节能效果要远大于此。总之，针对该企业的负荷特点，谐波大且负荷较平稳，采用动态无源滤波装置。

仿真验证

（1）某集团橡胶公司系统配置如表2所示

表2　变压器参数及所带负荷

变压器型号	变压器容量/kV·A	一、二次侧电压/kV	V1/V	VTHD(%)	I1/A	I5/A	I11/A	PF
TD51	2 000	10/0.4	384	10.3	2 217	168	65	0.56

（2）0.4 kV侧的谐波电流

测量出0.4 kV侧的谐波电流发生量如表3所示。

表3　变压器TD51的谐波电流发生量

谐波次数	2	3	5	7	11	13	19	25
谐波电流/A	11.3	20.7	327	21	65	9	16	9

基波电流计算值：2 217 A

（3）仿真计算软件用配电系统简化图如图1所示。

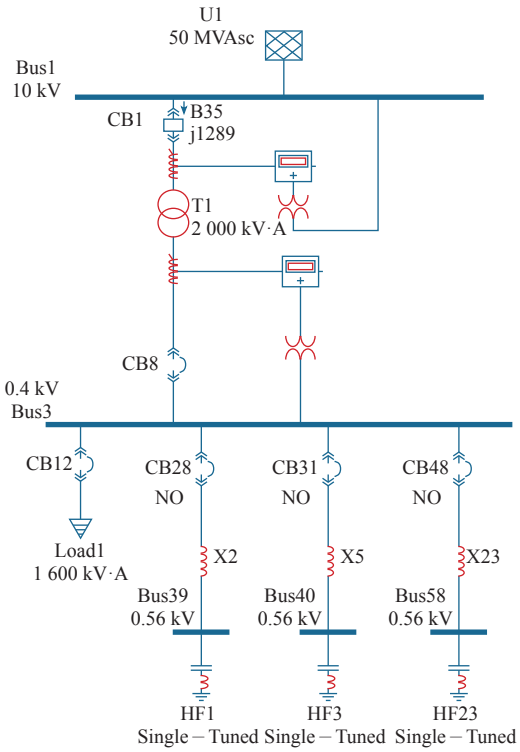

图1　仿真计算软件用配电系统简化图

未装设滤波补偿装置时的仿真计算结果

该项目补偿前0.4 kV侧功率因数只有0.56。

各节点上的电压总畸变率THD（%）如下表。

表4　各母线上的电压总畸变率

节点号	节点名称	谐波电压总畸变率(%)	标准限值(%)
1	10 kV母线	4.01	4
2	0.4 kV母线	10.32	5

以上考虑的谐波源电流是较严格条件。

滤波补偿效果

该项目补偿后0.4 kV侧功率因数可以达到0.94左右。

各节点上的电压总畸变率THD（%）如下表：

表5　各母线上的电压总畸变率

节点号	节点名称	谐波电压总畸变率(%)	标准限值(%)
1	10 kV母线	0.88	4
2	0.4 kV母线	2.33	5

总之，针对该企业的负荷特点，在TD51变压器低压侧配置无源动态滤波装置。可使功率因数达到0.94以上。

结果分析

0.4 kV供电系统无功补偿与谐波治理装置投运后测试分析。

表6　LC装置投入前的实测数据

时间	U/kV	I/A	P/kW	Q/kvar	cos ϕ
2017－2－10 15：43：57	0.384	2 217	826	1 222	0.56

表7　LC装置投入后的实测数据

时间	U/kV	I/A	P/kW	Q/kvar	cos ϕ
2017－2－10 16：48：12	0.395	1 355	875	307	0.94

由以上图表数据可得出以下结论：

1）LC滤除谐波装置投运后，有效地滤除了大量的谐波电流，使主要的5、7、11次谐波电流由327 A、21 A、65 A降低为50 A、10 A、5 A，5次谐波滤除率达84%，注入系统的谐波电流已控制在国标要求的允许范围内。

2）LC滤除谐波装置投运后，谐波电压畸变得到了很大的改善，TD51变压器正常运行时的低压侧电压波形总畸变率由未投时的10.32%，降低到2.23%。各次谐波电压含有率均在国标要求的允许范围内。可见，滤波装置的投运效果非常显著。

3）LC滤除谐波装置投运后，功率因数也得到了很好的补偿，TD51变压器低压侧的功率因数从0.56提高到0.94以上，达到国标要求，运行经济效益十分可观。

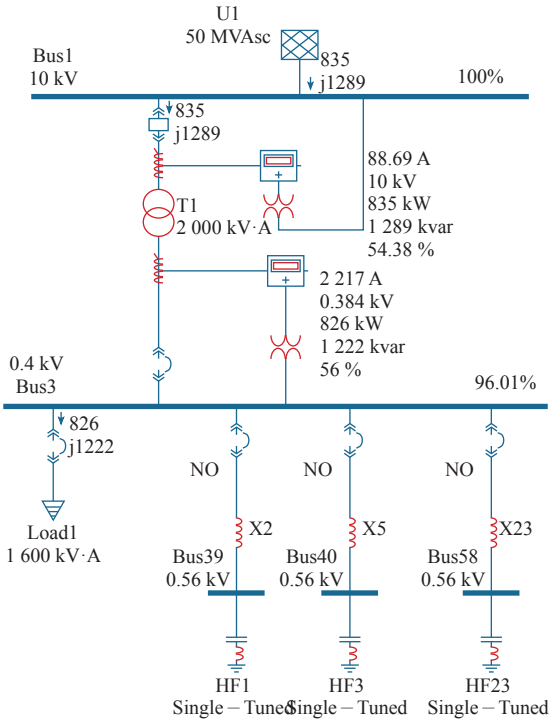

图2　潮流计算仿真结果

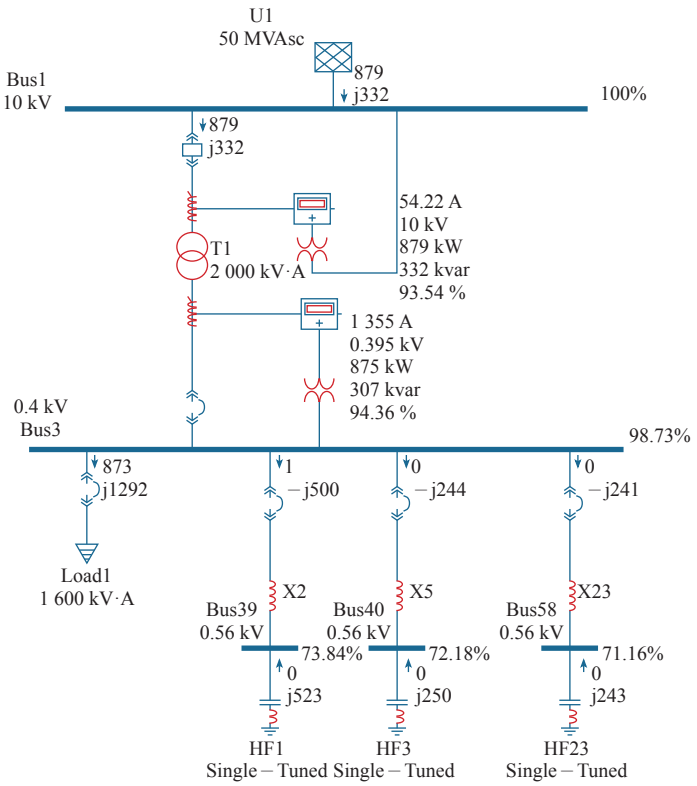

图3　潮流计算仿真结果

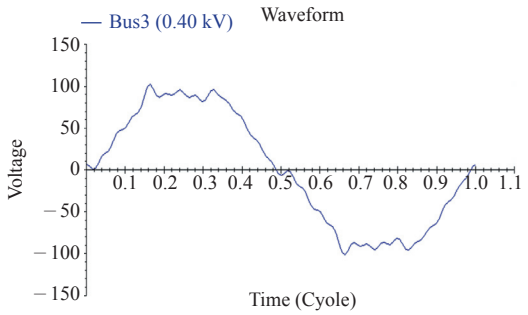

图4　滤波前的波形图

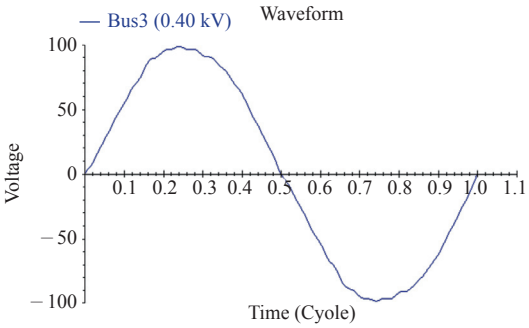

图5　滤波后的波形图

4）LC滤除谐波装置投运后，TD51变压器低压侧母线的电压提高了11 V，负荷电流减少了862 A。

5）经调试投运后，LC滤除谐波装置稳定可靠，可长期投入运行。

结束语

通过对非线性负载产生谐波形式的分析，并分别从补偿和滤波两种思想出发，对非线性负载产生谐波采用不同的抑制策略的研究，可以得到以下几点结论：

1）非线性负载直接产生的谐波形式为谐波电流，谐波电流流过电源等效电阻时转变为电源端的谐波电压。

2）治理非线性负载引起的谐波应首先考虑治理谐波电流，而不是治理谐波电压。**EA**

（收稿日期：2017.05.03）

（编辑：白文亭）