

电 力 系 统

高次諧波資料汇编

西南電力試驗研究所

一九八七年



## 汇 编 说 明

近二十年来，随着电子技术的发展，半导体器件的研制和生产水平的提高，可控硅整流器已在电气化铁道、轧钢、有色冶金电解、家用电器等方面得到广泛应用。由于非线性负荷大量投入供电系统，使电网产生大量高次谐波，对电网产生不良影响和严重危害。对发、输、配、变电设备、继电保护、测量仪表、自动装置、通讯设备、电子计算机等都受到不同程度的危害。严重时，使电容器损坏、自动失灵、保护误动，瓦解电力系统。因此，国际上已公认谐波源是电力系统的公害，必须采取措施，加以限制。为此，我们收集了大量国内外谐波资料，筛选整理，汇编成册。本文集分为四章，第一章为谐波综述、第二章为抑制谐波的措施，第三章为限制谐波的标准，第四章为谐波的测量，是国内较为系统的谐波资料。本汇编由我所总工洪巨仁同志审阅，田布雷、黄先惠同志编辑，刘坤才、扬百微同志收集整理。如有错误和欠妥之处，希读者提出批评指正。

西南电研所情报室

## 目 录

### 一、谐波综述(论谐波的危害和理论研究)

|                       |       |    |
|-----------------------|-------|----|
| 1、电力系统中的高次谐波          | 张一中   | 1  |
| 2、供电系统中的高次谐波          | 陆亨信   | 11 |
| 3、电气铁路在电力系统中产生不平衡谐波分析 | 吕润余   | 16 |
| 4、在配电系统中的高次谐波和高次谐波实况  | 李启明 译 | 34 |
| 5、电力系统谐波对其设备和负荷影响     | 杨白微 译 | 42 |

### 二、抑制谐波的措施

|                         |             |     |
|-------------------------|-------------|-----|
| 1、电力系统高次谐波的危害和消除        | 张章奎、谢世章     | 52  |
| 2、关于电容器事故的预测和防止         | 王明文 译、金基圣 校 | 61  |
| 3、改变整流变压器的接线方式消除谐波      | 孙水生         | 70  |
| 4、电力电容器过负荷、过热及其预防方法     | 吴惠群 译、朱介人 校 | 76  |
| 5、抑制高次谐波事故的新技术          | 吴惠群 译、刘坤才 校 | 84  |
| 6、电网的高次谐波和对策            | 李景文         | 92  |
| 7、谐波的利用和消除              | 杨白微 译、谢舫 校  | 100 |
| 8、抑制谐波的13条措施            | 异 鹏 译       | 106 |
| 9、谐波对负序电压继电器的影响和对策      | 梁展翼         | 107 |
| 10、配电系统高次谐波的限制方法        | 刘坤才 译       | 114 |
| 11、吸收高次谐波有源滤波器的性能       | 刘坤才 译、黄先惠 校 | 124 |
| 12、防止谐波危害电力系统的一般对策      | 赵同生         | 127 |
| 13、对继电器的抑制谐波措施          | 刘坤才 译       | 128 |
| 14、对可控硅负载和晶体管继电器的谐波抑制方法 | 刘坤才 译       | 130 |

### 三、各国谐波标准

|                                  |             |     |
|----------------------------------|-------------|-----|
| 1、电力系统谐波管理暂行规定                   | 水电部         | 132 |
| 2、近期国内外电网谐波标准介绍                  | 王善均         | 138 |
| 3、可控硅变流装置谐波电流对电网和电气设备的危害、防治和限制标准 | 贺守正         | 143 |
| 4、国外谐波干扰标准                       | 刘长祥 译、韩元盛 校 | 151 |
| 5、电力系统的谐波限制                      | 张一中         | 161 |
| 6、工业设备产生谐波干扰的限制 澳大利亚标准           | 陈宝喜 译       | 165 |
| 7、电力网中的谐波限制                      | 黄先惠 译、杜德立 校 | 180 |
| 8、低压供电特性                         | 杨白微 译、杜德立 校 | 191 |
| 9、家用电器及类似电气设备对供电系统的干扰            | 黄先惠 译、杜德立 校 | 199 |
| 10、高次谐波管理标准                      | 黄先惠 译、朱介人 校 | 206 |
| 11、英国电气委员会总工程师会议关于供电网络谐波有关规定     | 汪启槐 译       | 211 |

### 四、谐波测量

|                           |             |     |
|---------------------------|-------------|-----|
| 1、电力系统中的谐波及其测试实例          | 汪启槐 译       | 222 |
| 2、10KV系统谐波电流注入装置的设计、研究及测试 | 陈宝喜、朱介人     | 232 |
| 3、国外谐波测试设备                | 刘长祥         | 242 |
| 4、谐波电压和谐波电流报警器的研制         | 河北电研所系统室    | 246 |
| 5、估计高次谐波测试准确度             | 吴小冬 译、田布雷 校 | 246 |
| 6、电力系统谐波离线分析程序            | 吴建国         | 251 |

# 电力系统中的高次谐波

张 一 中

电力系统中高次谐波的问题，早在本世纪二十年代就已提出研究，不过那时这一问题还是个局部性的，不难解决的问题，因而并未引起人们的注意。近年来，随着电力系统的发展，负载特性的非线性化，它又引起各国电力系统工程界的密切关注。

## 高次谐波的产生

### 一、磁饱和非线性产生的高次谐波

电力系统中装有大量带铁芯电气设备，如电力变压器和静止补偿器的饱和电抗器等，即使在正弦电压作用下，它们的激磁电流也不是正弦的。而图1所示为电力变压器的稳态激磁（空载）电流  $i_0$  的波形。从图上看激磁电流波形已产生了明显的畸变。这种畸变可分解成基波和高次谐波。

畸变与磁路的饱和程度有关。在稳态工作时，这种由磁路饱和引起的高次谐波一般很小，不会对系统的工作造成严重的危害。如变压器空载励磁电流仅为额定工作电流的2~10%。饱和电抗器正常工作产生的高次谐波，已由设计良好的滤波器滤除。但当变压器流过直流时，增加了变压器的饱和程度，激磁电流显著增加。例如，一台额定电流为1千安的变压器，激磁电流为10~30安，只要2~3安的直流流过绕组，就可产生过热。

值得注意的是在暂态过程中，铁芯磁密或磁通密度的交变，往往偏向饱和一侧，最大磁密或最大磁密密度比正常时成倍增加，由于磁饱和非线性，使激磁电流大大增加，电流波形的畸变更加严重。变压器、饱和电抗器的合闸涌流可达额定电流的6~8倍，这种电流包含很大的非周期分量和高次谐波分量。

激磁涌流波形的严重畸变，将引起系统电压的明显畸变，即系统中出现高次谐波电压。这可能在系统某些元件中激发起谐振而损坏设备。我国就发生过解止无功功率补偿器操作不当的暂态过程而破坏解电电容器的事件。

### 二、半导体换流元件的开关作用产生的高次谐波

半导体换流元件用作整流和逆变都是利用它们的开关作用。它们形成的电流和电压波形，往往不是正弦形的。它们的强行短接和断流破坏了交流侧电压和电流的正弦波形。这样形成的非正弦电压和电压波形同样可分成基波和高次谐波。图2示出理想三相整流桥中交流侧电流的波形以及分解出的基波和主要的几种高次谐波[5, 7, 11]。

用富氏级数分析表明，在理想情况下，静止功率换流器产生的谐波次数  $n$  为：

$$n = kp \pm 1$$

式中， $p$ —换流器畸变畸变脉冲数（或相数），通常为6、12、18、24等。

$k=1、2、3、\dots$  整数。

各次谐波与基波值（以电流为例）的关系为

$$I_n = I_1 / n$$

式中,  $I_n$ —第  $n$  次谐波电流的有效值;

$I_1$ —基波电流的有效值。

根据有关公式计算出, 在理想情况下, 六脉冲整流器谐波电流为:

| $n$       | 5     | 7     | 11    | 13    | 17    | 19    | 23    | 25    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_n/I_1$ | 0.200 | 0.173 | 0.091 | 0.077 | 0.059 | 0.053 | 0.043 | 0.040 |

事实上, 电路中总存在有电感, 它延缓电流的换相, 这样方波的前后缘是圆滑的, 谐波电流减小。上述六脉冲整流器各次谐波电流为

| $n$       | 5     | 7     | 11    | 13    | 17    | 19    | 23    | 25    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_n/I_1$ | 0.175 | 0.111 | 0.045 | 0.029 | 0.015 | 0.010 | 0.009 | 0.008 |

上述计算结果, 均指半导体换流装置在理想运行条件下产生的“特征谐波”。在六脉冲整流器中, 特征谐波是非 3 的倍数的奇次谐波, 如第 5 次、第 7 次、第 11 次、第 13 次等。但是在实际运行中, 运行条件是很难保持的, 因此除特性谐波外, 还有“非特性谐波”。它可能是由于交流系统中电压不平衡、整流器控制角的不对称, 设备陈旧老化等原因造成的。在相阻抗的系统, 各组换流装置特性不一致, 负载不对称, 欲消除的特性谐波不可能被消除干净, 余留部分就成为“非特征谐波”。

固体整流装置还产生谐波电压。这是由换相槽降引起的。在换相过程中, 为了将输出电压从导通着的可控硅转换到未导通的可控硅上, 需要在几个微秒的时间内暂时将交流供电网络短路。在一个六脉冲波系统中, 每相每半周发生一次, 一周共发生六次, 如图 3 所示。换相槽降的数值和持续时间与系统的电感有关; 电感大, 短路电流小, 槽降浅, 换相时间长。在同一组母线上接有几套整流装置, 换相槽降可能带来严重后果。例如一套 500 马力的驱动装置, 可能发生 70% 的换相槽降 1/4 毫秒, 每周 6 次。1/4 毫秒的电压槽降似乎不大, 但每周 6 次就是时间的 10%, 在一组中等容量的母线上有两三套这种装置就会出现严重的问题。

换相槽降形成的谐波与电流的谐波不同, 前者主要是音频谐波, 后者主要是低次谐波。

### 三、电弧的非线性伏安特性形成的高次谐波

在电弧燃烧过程中, 电弧的电阻与通过的电流有关, 电流增大, 电阻以更快的速度降低。这使得电弧的伏安特性呈现明显的非线性, 即使在电弧中通过正弦波形的电流时, 电弧电压的波形也不是正弦形的。这样就产生了高次谐波。交流电弧的伏安特性和电流电压波形如图 4 (a) 及 (b) 所示。

工业负载中的电弧炉、电弧焊、荧光灯等产生的高次谐波就属于这种情况。很明显, 它

们主要产生谐波电压。这种电压波形的畸变形成“闪烁”。

电弧产生的高次谐波在很大程度上决定于电弧的燃烧情况。在工业电弧炉中，电弧电阻是熔渣的移动、熔炼金属的沸腾，以及其它两相对电弧的磁推力等的变化而不断地变化。此外，电弧炉电极间的磁推力，使这些电极晃动，结果使这些电极的电阻变化。上述变化显然是随机的，很难预测。目前对这些谐波特性的谱分析很少，其谐波值只有一些试验数据。试验观察表明，熔炼初期，偶次谐波和奇次谐波都很大；熔解期偶次谐波开始减小；精炼期偶次和奇次谐波都变小。

#### 四、不对称运行引起的高次谐波

同步电机在对称运行情况下，定子绕组只产生与转子同步的旋转磁场。定子绕组旋转磁场的方向与通过定子绕组电流的相序有关。当同步电机不对称运行时，定子绕组出现了负序电流。负序电流在定子上产生一个以同步角速度和转子旋转方向相反的旋转磁场。这种旋转磁场与转子呈现两倍同步角速度相对运动，将在转子绕组中感应两倍同步频率的电流。如果转子上只有励磁绕组，励磁绕组中的两倍同步频率的单相电流，只能产生与转子相对不动的脉动磁场。它的脉动频率是两倍同步频率。这种脉动磁场可以分解成两个大小相等方向相反以两倍同步频率相对转子运动的旋转磁场。与转子旋转方向相反的那个旋转磁场，相对定子以同步转速旋转，它与定子绕组中负序电流产生的旋转磁场相对。与转子方向同向旋转的那个二倍同步角速度的旋转磁场，相对定子以三倍同步角速度旋转，在定子绕组中感应三倍同步频率的三相对称电势，即三次谐波电势。由于定子回路不对称，在定子绕组中将出现三次谐波的负序电流。这种电流在定子上产生以三倍同步角速度反转子方向旋转的旋转磁场，它在励磁绕组中感应的电流是四倍同步频率的交流，即第4次谐波电流。此电流在转子上产生四倍同步频率的脉动磁场。和第2次谐波励磁电流产生的脉动磁场一样可以分解为两个相对于转子以四倍同步角速度旋转的旋转磁场。与转子方向相反的一个与定子第三次谐波磁场相对应；与转子同方向旋转的一个，在定子上感应第5次谐波电势。图5示负序电流作用下，同步电机定子磁通与转子磁通间的关系。图中 $\phi_{-1}$ 、 $\omega_{-1}$ 为定子负序电流产生的负序磁通； $\phi_{2\omega}$ 、 $\omega_{2\omega}$ 为转子第二次谐波电流产生的脉动磁通，它分解为两个旋转磁通 $2\omega$ 及 $-2\omega$ 。图6示出负序电流在同步电机中引起高次谐波的过磁。

综上所述，可得出结论：同步电机在不对称运行下的负序电流，将在定子回路（即电力系统）中感应出奇次谐波电流，在转子回路感应偶次谐波电流。

当然，如果转子上装有纵横轴阻尼绕组，或对于整体转子的汽轮发电机，负序电流在转子感应的是多相电流，它产生的是和负序旋转磁场对应的旋转磁场，这样就不会向系统传送高次谐波。

异步电机转子上装有对称的多相绕组，负序电流不会引起高次谐波。

### 谐 波 的 危 害

#### 一、产生附加损耗，增加发热，降低效率

在电气设备中，出现谐波电流时，这些谐波电流与基波电流相比，所占比例虽然不大，

但设备的有效电阻会因趋肤效应而增大，致使附加损耗大大增加。这方面的影响因设备而异。对于导体，它和谐波频率与导体形状、大小有关。如一300千圆密尔的圆形导体，其基波、5、7、11次谐波的交流电阻分别为直流电阻的1.01、1.21、1.35、及1.65倍。当圆形导体增至450、600及750千圆密尔时，基波交流电阻增为直流电阻的1.02、1.03及1.04倍，而第5次谐波电阻增至直流电阻的1.35、1.50及1.60倍。变压器和旋转电机，它们的有效电阻大约与谐波频率的平方根成正比。

以一典型中等容量的异步电动机为例，设其满载有效电流比基波值约大4%。如果忽略趋肤效应，则电动机的铜耗与总的有效电流的平方成正比例。因此，谐波铜耗为基波铜耗的8%。考虑到由于趋肤效应转子电阻平均可增大两倍，因而电动机的谐波铜耗估计可达基波损耗的24%。如果铜耗占电机总损耗的50%，则谐波铜耗使整个电机的损耗增加12%。这些损耗将引起线圈的严重发热。

谐波成分与基波相比相对低时，谐波铁芯损耗不会超过10%。如果铁耗和杂散损耗占电机损耗的40%，则谐波铁耗仅占电机损耗的4%。摩擦和风阻损耗是不受谐波影响的。电机在这种情况下，4%的谐波使电动机的总损耗增加了16%。如果电动机在50赫正弦电压下的效率为90%，不大的谐波成分就使电动机的效率下降2%。

## 二、加速绝缘老化，缩短设备寿命

除谐波电压产生附加发热影响绝缘寿命外，电压使形畸变，对电机、变压器、电容器及电缆等电气设备的绝缘均产生不利的影响。因介电老化的物理过程，在频率较高的电场下显著加剧。如电容器接到非正弦电压后不久， $\tan \delta$ 便显著升高，而在正弦电压升高时， $\tan \delta$ 升高一般发生在一年以后。即使按某些国家的标准，在允许电压畸变系数为5%的条件下，经计算表明，使用两年后 $\tan \delta$ 将增加两倍。

苏联曾对两部分电缆作了对比试验。一部分电缆加正弦电压，另一部分电缆加非正弦电压，谐波水平为6~8.5%（有第5次和第7次谐波），两组电缆在相似的温度下运行。两年半后，后者的就漏电流平均高出36%，而三年半后高出43%。

高次谐波对绝缘的危害已缘在实际电网中使证实。在数速负就比较大的电网中，电压波形的畸变系数可达8%左右，电缆每年单相相对地短路次数，比电压波形畸变系数小于2%的其它车间的电网约高30~40%。电缆的损坏一般不能自复。

## 三、干扰通讯

在电力系统中谐波电流的传播可能对电讯网络产生干扰。事实上，谐波电流对电力系统的影响就是从这件事上显现出来的。据传在本世纪二十年代，美国犹他州盐湖城(Salt Lake City, UT.)西的一个精炼铜厂，当该厂的整流装置投入运行时，跨越使地区电话的通话受到干扰。经查明是供该厂的交流供电电路与电话线（明线）并行架设所致。

电力系统能干扰通讯系统，是因为通过电力网传送的功率与通讯线传输的功率差别悬殊，前者对后者产生静电感应和电磁感应。电力线路不平衡产生的基波电流与谐波电流的零序分量在空间产生零序磁通，使电力系统与通讯系统产生电磁耦合，在通讯线上产生干扰信号。

干扰与电路的不平衡程度及电路之间的耦合程度有关。电力线路与通讯线路耦合的程度

决定于下列四个因素。

- (1) 两线平行路径长度;
- (2) 两线路间的距离;
- (3) 大地中电流回路路径的等值深度。这取决于土壤的导电率与谐波电流的频率;
- (4) 干扰电流的频率, 它随频率的增高而增强。

#### 四、产生测量误差

对于同一非正弦周期电流和电压, 当我们用不同类型的仪表进行测量时, 就会测出不同的结果。这是因为不同的仪表是根据不同的原理设计的。在测量非正弦周期电流或电压时, 要注意选择合适的仪表, 并注意各种不同类型仪表指示的实际意义。尽管如此, 有效值相同的正弦电流与非正弦电流的发热效应是不同的, 后者比前者更为严重。这就是用一般测量不能保证有大量谐波存在的系统安全工作的原因。电度表的测量误差随频率的谐波急剧增加。此外, 一般谐波谐波方向与负载潮流方向相反。这都使得在电流有效值相同的谐波下, 所计的电度, 有谐波存在时大大减少。

#### 五、对波形畸变敏感的设备有不利影响

计算机、数控机、自动、运动、继电保护及其它一些先进的电子设备对波形的畸变非常敏感, 在波形畸变的情况下, 它们可能对正常输入产生不正确的响应, 错误发信号或完全不响应。在一个连轧机电网中, 曾发生过大型同步电动机无功功率自动调压器不能稳定运行, 调节过程是振荡的, 但轧机空载时, 谐波水平下降一半, 调节器的工作便稳定下来。

运动装置的载波系统如果所产生的谐波与载波相合时, 可能发生谐波的操作。

高次谐波引起继电保护的误动作, 也是有例可鉴的。

#### 六、产生谐振, 危及设备安全

电力系统电感和电容的某些组合, 在某些频率信号的激励下会产生谐振。在谐振条件下, 即使很小的谐振电流也会放大成足以使继电保护动作、危及设备安全的危险过电流。同时, 在高次谐波下阻抗也被放大了, 在系统中可能出现危险的过电压。

可控硅控制换相将影响到功率因数, 延迟换相以降低输出电压就降低了功率因数。对于这种功率因数的降低往往用电容器来补偿, 这就增加了出现并联谐振的机会。

镇流型荧光灯和水银灯有时有电容器, 它激励起谐振就有可能产生过热或故障。

#### 七、谐波产生脉动转矩, 会引起电机保动

定子旋转磁场与转子不相对应的谐波电流相互作用产生脉动转矩。不过, 脉动转矩主要是定子基波旋转磁场与转子谐波电流相互作用产生的。例如, 三相定子电流的第5次谐波是一组负序电流, 它在空间产生的旋转磁场, 转速5倍于基波旋转磁场, 旋转方向与转子旋转方向相反。该磁场在转子上感应出频率为 $(6-s)f_1$  ( $f_1$ -基波频率;  $s$ -转差率)的多相电流, 此



电流在空间产生的旋转磁场,相对于转子以 $(6-s)$ 倍基波旋转磁场的转速反转子方向旋转,它与定子基波旋转磁场相互作用产生6倍频率的脉动转矩。

类似的,定子电流的第7次谐波产生6倍于基波频率的脉动转矩。第11次和第13次谐波产生第12次谐波的脉动转矩。但是,在六梯级波电源情况下,第6次谐波分量是主要的,脉动转矩的存在,造成转一圈中转子角速度是变化的,电动机的转动可能会发生一系列跳动和步进。

尤其是,如果机械系统的自然频率受到这些谐波的激励,就有可能建立危险的共振状态。

## 八、高次谐波影响潮流计算的有效性

当电力系统中出现大的非线性负载或为数众多的分散的非线性负载时,用常规的潮流算法分析潮流不可能得到正确结论。我国西安交通大学夏道止和美国普度大学G. T. 郝爱特对一个两组母线的系统和一个11组母线的系统(与美国中部的一个主要电力系统相近)进行分析的结果表明:直接供非线性负载的线路上的电流发生了显著畸变,电流畸变系数可达27.4%。从线路有功损耗的计算结果发现,如果略去谐波畸变,则损耗计算将产生大约14%的误差。对于无功损耗来说,其误差更加惊人。

在潮流计算中计及与不计及谐波所得结果,可能有相当大的误差。非线性负载的功率因数补偿就是一个很明显的例子。计及与略去谐波所得的结果,有时竟相差20%。在联合电力系统中,谐波的影响更加难于预测,常规的潮流计算可能变得无用。

## 高次谐波的治理

减小谐波电流和电压在电力系统中的传递,防止它的不良影响,是研究谐波问题的主要目的。一般可从五个方面进行:

### 一、用谐波相消的方法,使谐波源传播的谐波尽可能少

电力系统中接入的非线性器件,往往正是利用这些器件的非线性来达到技术上的某种目的,因此不能用降低甚至消除非线性来消除谐波。但是,高次谐波都是一些正弦交流量,它的大小和方向与相位有关,因此总可以设法让次数和同、相位相反的谐波相互抵消。分析推导证明,对于两个三相系统,如果它们的相位相差 $30^\circ$ 时,它们的第5、7、17、19及29、31次谐波可以消除。同样相差 $15^\circ$ 的四组三相系统还可以消除11、13及35、37次等谐波。因此用两个整流桥果成的换流器分别接在有相位移 $30^\circ$ 的三相电路上,组成12脉冲的换流器可以消除第5、7、17、19、29及31次谐波。这样总的谐波量就由6脉冲换流器时的 $0.246I_L$ 降到 $0.117I_L$ 。如果用24脉冲整流器,则谐波成分降为 $0.053I_L$ 。这就是所谓“相数倍增”法。此法形成的典型换流器的谐波成分见表1。脉冲数的增加,大大增加了换流变压器的复杂性,从而使加工难度和成本大大增加。所以,这种相数倍增一果取12脉冲为最大果取。

相数倍增也可用普通整流变压器,配合适当的移相变压器组成12相、18相、24相、36相……换流装置。这时移相变压器使各组换流装置获得 $30^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $15^\circ$ 和 $10^\circ$ 的相位移。图7示组成12相和24相整流装置的例子。这种方式虽然克服了复杂的换流变压器的困难,但增

加了移相变压器的费用，这在经济上是否合算应进行具体的分析比较。

很明显，用相数倍增的方法消除谐波，只有在各组整流器的负载完全一致才是有效的。

表 1

| 换 流 器<br>脉 冲 数 | 谐 波 系 数 |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | 5       | 7    | 11   | 13   | 17   | 19   | 23   | 25   |
| 6              | .175    | .11  | .045 | .029 | .015 | .01  | .009 | .008 |
| 12             | .026    | .016 | .045 | 0.29 | .002 | .001 | .009 | .008 |
| 18             | .026    | .016 | .007 | .004 | .015 | .01  | .001 | .001 |
| 24             | .026    | .016 | .007 | .004 | .002 | .001 | .009 | .008 |

谐波相消也可用注入谐波电流的方法来达到，次法的基本原理是向换流变压器直流侧的绕组注入一定频率的谐波电流以改善其电流波形。电流的注入是通过一谐波电流源与直流侧线圈形成闭合回路注入的。这样此绕组中的电流波形就被注入的谐波电流改善，交流侧电流的谐波分量就被削弱了。

用磁通补偿法也可消除交流谐波。基本原理是对铁芯中的谐波磁通进行补偿。这种方法在自饱和和静止无功补偿装置中广泛采用。具有谐波补偿性能的自饱和电抗器的静止无功补偿装置，能将谐波限止在相当低的水平之下。如国外有人设计了一种三一三柱电抗器，这种电抗器的结构是九柱铁芯，共15个主线圈，9个二次补偿绕组，外加一个可调电抗器。如不用二次补偿绕组，能消除17次以下的谐波，残存的谐波不超过2%。如应用二次补偿绕组及可变电抗器，则基本上能消除35次以下的谐波，残存的谐波就可忽略了。

另外英国和比利时都先后研制成了二一三柱电抗器。它主要是由两台曲折星形联接的电抗器串联而成。前者带二次补偿绕组，大体上能补偿17次以下的谐波；后者省去了二次补偿绕组，结构上较简单，但只能消除11次以下的谐波，残存的11次谐波达15%，13次达3%，因而要与高通滤波器配合使用。我国水利电力部电力科学研究院在这方面已经作了大量工作，并取得了一些有价值的成果。

## 二、滤 波

为了技术经济合理起见，只采用并联滤波器。通过并联电路来滤波，在理论上和实践上都是简单的。将谐波阻抗低的并联谐波器接入系统，将换流器所产生的大部分谐波电流转移出去，从而使系统其它部分的谐波电压降到很小。

在一个给定频率下有低阻抗的最简单电路是R L C串联谐振电路。其优点是在基波下具有容性阻抗。因此接入滤波器可以起到接入无功功率补偿器的作用，可补偿换流器换相所吸收的无功。对于次数较高的高次谐波采用减幅滤波器，通常比每次特征或非特征频率采用分支谐振电路分别进行谐振更为合适，更为经济。因此，对6脉冲换流器一般采用谐振电路

来滤除第5、7、11及13次谐波。有时还采用一个减幅滤波器来滤除高次谐波。对于12脉冲换流器，通常由第11次、13次谐波和一个减幅滤波器来滤波。也有只采用减幅滤波器的。图8表示一个6脉冲换流器的典型配置方式。

滤波器的配置和电力系统的规模有关，它要考虑到无功功率的补偿所需的电容器容量、电容器数目及电力系统的换流负载等。对于短路容量在250兆伏安以下的电力系统可只装第5次谐波的谐波器；短路容量在251~750兆伏安间可装第5、7次调谐滤波器；短路容量为751~1500兆伏安，装第5、7、11次调谐滤波器，短路容量在1500兆伏安以上可装第5、7、11、13次调谐滤波器。

### 三、正确设计和正确布置

上述办法一般可把谐波降至相当低的水平。但是，系统运行方式的变化、负载的波动、设备的陈旧都会影响其效果。此外，在不少情况下，并不一定要增加设备才能防止谐波的影响。正确的设计和正确

的布置有时是很有效的。例如，直流输电的整流器直接由发电机供电而不是由交流系统的母线供电，这样就避免了整流器产生的高次谐波传到交流系统中去。这不仅省去了滤波器，而且将配电装置缩减到每台发电机一组断路器；没有发电机端的变压器，它们由整流变压器代替。又如对于大型整流装置可设计成两组或多组的，这可减少因负载波动产生较严重的谐波。增加整流器到供电母线间的阻抗，可降低母线的电压畸变。把换流器负载与其它交流负载分开布置，也可减轻谐波对其它负载的影响。

从另一方面看，在设计对谐波敏感的设备时，应考虑到这方面的要求。例如在信号引线上加屏蔽或隔离，可以防止谐波对调节和控制的影响。又如，由于线路槽降不能完全避免，为了保证换流器能正常工作，应使其触发脉冲不受影响。经验表明，换流器触发回路应在供电系统电压含有槽降深度为0.7额定最大线电压和感宽250微秒时仍感工作。

### 四、设备的正确使用和操作

各类供电系统和消敏谐波的滤波器都是按某种正常工作条件设计的。当工作条件改变，特别在改变过程中，谐波的危害性可能会突出出来。因此，正确使用和操作设备，对免除谐波的危害是很重要的。例如由多个调谐滤波器组成的滤波装置，每个滤波器与系统都有一个调谐电抗，其并联调谐点低于该滤波器的频率，但在下一个低的调谐滤波器之上。由于这个缘故，使滤波器调谐到较高次谐波而不在较低次谐波是不适宜的。例如，对一个正常12脉冲换流器上加的第11次谐波滤波器，并联谐振点将低于第11次谐波。如果这个并联谐振点是第7次谐波，那么任何7次谐波电流都可感在系统和11次滤波器间放得相当大。这可能引起滤波器的电容器过负载，保险丝烧断，甚至使设备损坏。因此在向电网接滤波器时，应由低次开始逐个往上加。反之，如果要减少电容器的总容量，则应首先切除高次滤波器。

合闸敏感涌流中的谐波成分大大地增长了。为了防止它对并联电容器的影响，在操作时应先接入变压器或静止无功补偿装置的饱和电抗器，然后再接入电容器。

### 五、实行谐波管理

为了保证上述技术措施发挥应有的效果，实行科学的管理是很必要的。这应从技术和经济管理两方面着手。在技术方面，制定谐波限制水平，进行谐波分析设计，操作上制定必要的操作规程。在经济上实行按谐波收费。把谐波水平作为一个收取电费的指标，有如把无功消耗或功率因数作为一个收费指标那样。这不仅是因为谐波的存在使计度减少，而且还在于一般谐波能量都是由基波能量转化成的。谐波的存在使电力系统的设备受损，为了防止其影响而增加设备投资。因此按谐波收取电费不仅是必要的，而且也是合理的。

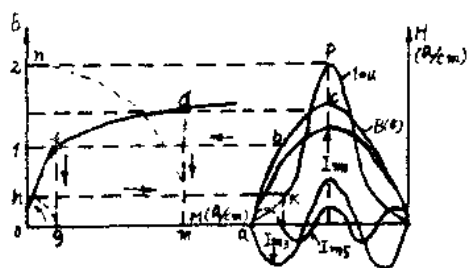


图 1

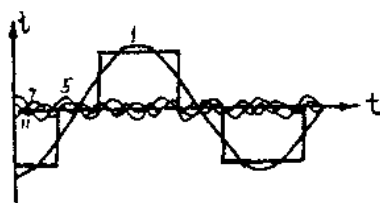


图 2

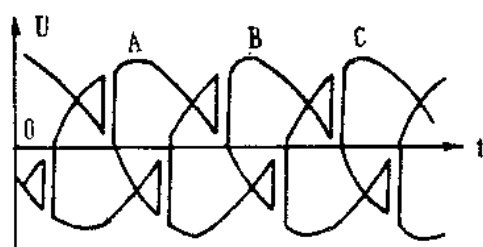


图 3

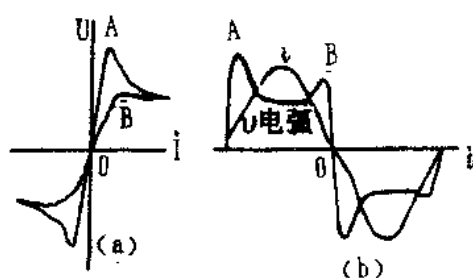


图 4

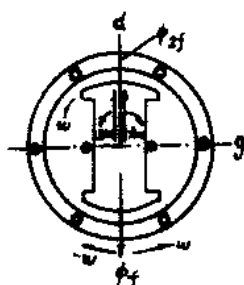


图 5

| 定子   | 转子   |
|------|------|
| 1    |      |
| (1)  | 2    |
| 3    | (3)  |
| (3)  | 4    |
| 5    | (5)  |
| (5)  | 6    |
| 7    | (7)  |
| (7)  | 8    |
| 9    | (9)  |
| (9)  | 10   |
| 11   | (11) |
| (11) | 12   |

图例

- $n$  第  $n$  次谐波电流产生的脉动磁场
- $(n)$  第  $n$  次谐波顺转子方向的旋转磁场
- $n)$  第  $n$  次谐波反转子方向的旋转磁场

图 6

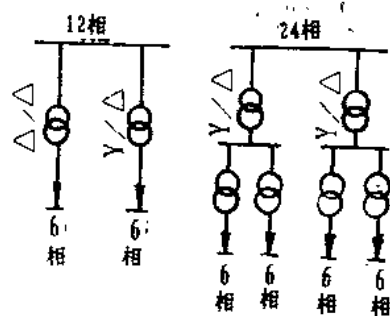


图 7

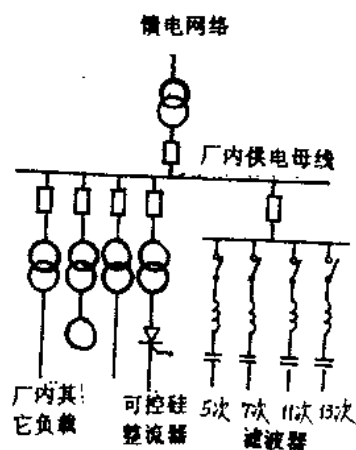


图 8



# 供电系统高次谐波

陆廷信

## 一、前言

近二十几年来,由于电子技术的发展,在供电系统中增加了大量的非线性负载,特别是可控硅,从低压的小容量家用电器到高电压大容量的工业交、直流变换装置,应用广泛。恒速的交流电动机改为可调速的电气传动系统,取得明显的节能效果。随着电力半导体器件研制和生产水平的不断提高,交流调速系统在工业中应用出现了广阔的前景。新型的晶闸管换流变频装置将取代传统的汞弧整流器,电动发电机组,旋转式变频机等,投入供电系统的可控硅装置也将日益增多。据有关资料估计,可控硅生产量将以每年10%的速度增长。由于可控硅装置是开关方式工作,它将引起电网电流、电压波形发生畸变,高次谐波显著增加,尽管供电系统还有电弧炉、电焊机、变压器等其它非线性负载都会在电网中产生不同频率和幅值的高次谐波,但以可控硅装置所产生的高次谐波最为严重,它占总的谐波发生源的73%,成为电网的“公害”。

## 二、高次谐波的危害

众所周知,在非谐振状态下,供电系统中各支路的谐波电流是很小的。但由于系统中谐波次数较多,频率高,持续时间长,所以其幅值虽然不大,但其所产生的不良影响却十分严重,使电机、变压器以及供电系统的损耗增加,电气设备的使用寿命缩短,使补偿功率因数的电力电容器产生谐振,对电网中继电保护自动装置以及远动,通讯系统产生干扰等。现分述如下:

### 1. 对电机的影响

供电系统中的高次谐波,在同步电机定、转子中将产生附加损耗,这是因为,同步机转子中感应的谐波电流,将持续流过在正常情况下无交流通过的或者仅在起动过程中才有电流通过的部分,如凸极机的阻尼绕组,附加损耗如图一所示:

高次谐波电压对异步机的功率因数及附加损耗均有较大影响,这是因为转子中的高次谐波电流所产生的集肤效应至为严重,其交流电阻将比直流电阻大好几倍,对于高起动转矩的电机尤甚,其损耗大小可由下式确定:

$$\Delta P_{r,r} = 3I_r^2 (r_{r,0} + r_{r,r}) \quad (1)$$

上式中  $r_{r,0}$  及  $r_{r,r}$  一定电阻及  $r$  次谐波的转子折算电阻。

$I_r$ — $r$ 次谐波电流。

在实际应用中亦可由图二查出,

图二、异步电机由于高次谐波引起的附加损耗相对值

图中:  $\Delta P_{r,r}$ — $r$ 次谐波引起的附加损耗。

$\Delta P_r$ —异步机的额定损耗。

谐波还会使电动机的稳定转矩略有减小，并产生波动转矩，另外，谐波电流还可使电机的噪音增大。

## 2. 变压器

和电机一样，变压器在高次谐波电压作用下，将产生集肤效应邻近效应，在绕组中引起附加铜耗，铁耗也相应增加，其附加损耗可用下式求得，

$$\Delta P_r = 3 \sum_{r=2}^n I_{r \cdot}^2 r_s K_{r \cdot} \quad (2)$$

式中  $I_{r \cdot}$  — 通过变压器的  $r$  次谐波电流。

$r_s$  — 变压器的短路电阻。

$K_{r \cdot}$  — 考虑集肤效应和邻近效应影响的系数。

|       |       |          |          |
|-------|-------|----------|----------|
| $K_5$ | $K_7$ | $K_{11}$ | $K_{13}$ |
| 2.1   | 2.5   | 3.2      | 3.7      |

## 3. 电力电容器

电力电容器对高次谐波电压反应比较灵敏，在发生谐振的情况下，可能使电容器成倍地过负荷，响声异常，造成电容器的严重损坏或无法运行。

由于电容器的电抗  $X_c = 1/\omega c$  与频率成反比，因此在高次谐波电压作用下，其容抗  $X_c$  比基波电压作用下容抗  $X_{c1}$  小得多，从而  $r$  次谐波电流波形畸变远比电压波形畸变严重，即便是电压中所含高次谐波比例不大，也会产生显著的谐波电流，使电容器过负荷和过电流。据日本电气协同研究会在九个电力公司于73—78年调查结果，以电力电容器在高次谐波作用下受害最为严重。调查结果如下表：

表一 高次谐波危害情况：

| 受害的电力设备 | 受害台数      | 预测而未受害台数 |
|---------|-----------|----------|
| 电力电容器设备 | 34台(83%)  | 3(10%)   |
| 变压器     | 4台(10%)   |          |
| 其它      | 3台(7%)    |          |
| 合计      | 41台(100%) | 3(10%)   |

## 4. 对计量仪表的影响

高次谐波对感应型有功和无功电度表造成的误差值得注意。图三表示感应型电度表相对误差与频率的关系曲线。由图三可知，频率越高，误差越大，而且为负误差，甚至当频率约为1000HZ时，电度表将会停止转动。

### 5. 对电力线路的影响

对于架空线路，谐波电流通过时，可能产生串联谐振，导致危险的过电压。

对于电缆线路，高次谐波电压将加速绝缘的老化，缩短使用寿命，降低运行可靠性。据苏联有关资料介绍，若不考虑谐波影响，电缆的使用年限为25年，若计及谐波电压的作用，由于电缆过载发热，其寿命将降低为9年，所以在选择电缆截面时，应对高次谐波造成的不良后果给予足够的重视。

### 6. 对信息机器的影响

随着各种电子计算机的广泛应用，各种电子仪器灵敏度不断提高。尤其是数字可编程的仪器越来越多，对供电系统的供电要求提出了新的概念，这种新的供电要求，称之为对信息机供电。若是供电电压存在着高次谐波，则会对信息机数据的传输、处理带来严重的影响，特别是运算速度快的计算机会产生误动作，使正常的工作程序遭到破坏，直到损伤信息机的半导体器件。据有关资料介绍，爱伦(George · WALLON)曾对信息机的供电系统所呈现的干扰作了统计和分析，得出由于供电系统的高次谐波致使信息机不能正常工作的比例约为88.5%，其中脉冲占39.5%，减幅振荡占49%。

### 7. 对通讯的干扰

由于供电系统具有多台整流装置，当其在换相期间波形急骤变化，使得原来供电的正弦波电压变成非正弦波且带有波形迅速变化的“缺口”。此“缺口”所包含的谐波频率比较高，甚至达到1 MHz，因而引起电磁干扰。它的通讯线路，通讯设备以及广播接收等电子装置均有明显的影响，表现为杂音。除此，在电力线和通讯线之间还会存在静电感应，它也将对通讯发生干扰。

### 8. 对继电保护、自动装置的影响

当电力系统中谐波电压水平较高时，对供电系统中继电保护、自动装置均有影响。根据有关文献介绍，高次谐波对过电流、欠电压、距离、周波等均会起拒动和误动的倾向，使保护装置失灵和动作不稳定。

高次谐波的危害，除上述外，还对脉冲一相控型可控硅装置本身工作有误触发和脉丢失等所谓“谐波不稳”的现象发生，对于电子显微镜以及图象清晰度等均有一定影响。由此可见，供电系统中高次谐波的危害涉及的面是非常广泛的。不仅如此，它还增加了装置对无功功率的要求，需另加电气设备，影响了供电系统的经济运行。

## 三、供电系统高次谐波含量标准

高次谐波在电网中引起了“公害”，随着电力电子技术的发展，高电压大功率电力变换装置应用范围的扩大，电网电压的质量将会进一步恶化，更加深了高次谐波的危害，因此世界上许多工业发达的国家以电压畸变率作为对谐波含量限制的标准，电压畸变率DF由下式表示：

$$DF = \frac{\sqrt{\sum_{r=2}^{\infty} U_r^2}}{U_1} \quad (3)$$

式中  $U_r$ —为r次谐波电压

$U_1$ —为基波电压

制订限制高次谐波含量标准的目的是,使系统各用电设备能保持正常工作,同时也不过多地增加具有非线性负荷用户抑制谐波的负担。日本对常用的6千伏系统提出电压畸变率为5%,苏联ГОСТ 13109—67条规定,电压畸变率亦为5%,至于其它国家的标准见下表所列:

表二 国外高压供电系统谐波含量标准:

|       | 英     | 美       | 西德           |
|-------|-------|---------|--------------|
| 电压畸变率 | 4%    | 一般系统 5% | 电压畸变率 5.8%   |
| 奇 次   | 3%    | 专用系统 8% | 5, 7 合计 5%   |
| 偶 次   | 1.75% |         | 11, 13、合计 3% |

澳大利亚最近颁布的AS—2279—1979限制谐波含量的标准,把额定容量不超过3.6KVA的家用电器与英类似的电器归为一类,按家用电器的谐波标准加以限制,见表三。除此以外的一切设备均按工业设备的谐波标准来限制(见表四)。

表三

| 谐波序   | 3    | 5    | 7    | 9    | 11   | 13   | 15-19 | 2    | 4-40 |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 电压畸变率 | 0.85 | 0.65 | 0.60 | 0.40 | 0.40 | 0.30 | 0.25  | 0.30 | 0.20 |

表四

| 谐波频率    | 3    | 5    | 7    | 9    | 11   | 13   | 15   | 17   | 19   | 21   | 23-29 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 谐波电流(A) | 2.4  | 1.19 | 0.8  | 0.42 | 0.35 | 0.22 | 0.16 | 0.14 | 0.13 | 0.11 | 0.10  |
| 谐波序     | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22-40 |
| 谐波电流(A) | 1.13 | 0.44 | 0.31 | 0.24 | 0.19 | 0.16 | 0.14 | 0.12 | 0.11 | 0.10 | 0.09  |

目前,我国有关部门参考其它国家谐波含量标准也制订了我国谐波含量的允许值,其征求意见稿中规定如表五:

(编者按:水电部已于最近颁发了《电力系统谐波管理暂行规定》,其中对谐波电压、谐波电流限值均有具体规定。)