

# 民用建筑配电系统谐波防治技术 阶段性研究报告



上海建筑设计研究院有限公司

陈众励

2010-8-26



# 1.民用建筑配电系统中的主要谐波源分析

1.1 电力变压器，特征频率为150Hz（3次谐波）

1.2 荧光灯，特征频率150Hz（3次谐波）

1.3 整流装置、变频装置，特征频率为  
( $k - 1$ )  $\times 50\text{Hz}$  ( $k$ 为脉波数)

简而言之（特例除外），非线性配电设备和非线性用电负载导致配电系统中的谐波电流，而谐波电流流经配电系统的阻抗，又导致了谐波电压。



## 2. 谐波对电能损耗和配电系统设计工作的影响

### 2.1 谐波对电能损耗的影响

在理想正弦波的情况下，无功功率 $Q$ 仅仅反映了电能在电源与负载之间交换或传递的幅度，而极少消耗功率（仅仅是相位滞后引起的工作电流增量部分所致的导线发热损耗）。

但是，在谐波环境中的无功功率 $Q$ 中，一部分反映了电能在电源与负载之间交换的幅度，还有一部分则主要作了无用功。谐波导致了配电系统和用电设备的额外电能损耗（其最明显的现象就是谐波使得设备工作电流增大）。



## 2.谐波对电能损耗和配电系统设计工作的影响

### 2.2谐波对功率因数计算方法的影响

功率因数计算

$$PF = \frac{P}{S}$$

**P**: 有功功率; **S**: 视在功率

$$\cos\phi = \frac{P_1}{S_1}$$

$P_1$ : 基波有功功率;  $S_1$ : 基波视在功率

当谐波存在时,  $PF < \cos\phi$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{S_1}{S} = PF_{disp} \cdot PF_{dist}$$

$PF_{disp}$ : 位移功率因数

$PF_{dist}$ : 畸变功率因数



## 2.3 谐波对功率因数补偿方法的影响

- 传统的静电电容补偿方法只能解决由于电流相位滞后导致的无功功率问题，而对由于谐波、间谐波等频率不合所致的无功功率却无能为力。
- 因此，在谐波环境中，计算静电补偿电容的容量时，应当扣除非相位所致（即畸变所致）的无功功率，而且这部分无功功率必须用配置电抗器、滤波器等治理谐波的方法来解决。
- 简言之，在谐波环境中，无功补偿必须相位校正和谐波抑制双管齐下。



## 2.4 谐波对无功补偿电容器耐压参数的影响

根据谐波源设备的拥有量 ( $G_h/S_n$  的比值) 来确定补偿电容器的耐压参数A 据  $G_h/S_n$  的比值确定补偿电容器的参数

$\frac{G_h}{S_n} < 15\%$	$15\% \leq \frac{G_h}{S_n} \leq 25\%$	$25\% < \frac{G_h}{S_n} < 60\%$
标准电容器	电容器额定电压增加10%	电容器额定电压增加10%并配置谐波抑制电抗器

**G<sub>h</sub>**: 连接到有电容器组的母线上所有产生谐波源装置 (静态变换器、变频器、速度控制器等) 的视在功率额定值的矢量和。

**S<sub>n</sub>**: 系统中变压器视在功率额定值的矢量和。



## 2.4 谐波对无功补偿电容器耐压参数的影响

### 2.4.2 根据实测总谐波畸变率 $THD_{i_{来}}$ 确定补偿电容器的耐压参数B

根据总谐波畸变率测量值 $THD_i$ 确定补偿电容器的参数

$THD_i \times \frac{S}{S_n} < 5\%$	$5\% \leq THD_i \times \frac{S}{S_n} \leq 10\%$	$10\% < THD_i \times \frac{S}{S_n} < 20\%$
标准电容器	电容器额定电压增加 10%	电容器额定电压增加10% 并配置谐波抑制电抗器

$S_n$ : 变压器视在功率;

$S$ : 变压器副边实测的视在功率 (满负荷且不带电容器);

$THD_i$ : 变压器副边电流畸变率。

应当注意的是, 谐波还会导致电容器过载、过热, 故谐波还会影响电容器的容量选择。



## 2.5 谐波配电系统的谐振风险增大

- 为避免发生系统谐振，必要时应作谐振计算。系统的谐振频率可按下式计算：

$$h = \sqrt{\frac{SCC}{Q_c}}$$

$Q_c$  : 电容器的额定容量 (Mvar)

$SCC$  : 母线短路容量 (MVA)

- 电容器容量的增加，导致谐振频率向低值偏移；反之，系统短路容量的增加，则导致谐振频率向高值偏移。
- 补偿电容的分组也应避开系统谐振点，必要时可以接入适当的电抗器来改变系统参数，以防发生谐振。



### 3. 民用建筑配电系统谐波状况调查与测试情况

上海院于**2007**年完成了对上海市三级甲等医院医技楼的测试及分析工作，并推导出了具有实用价值的谐波计算经验公式。

九家医院**A**相电流畸变率和**K**系数的测试结果见下表

目前已初步完成了对上海市**15**栋高层、超高层办公建筑的谐波测试工作，数据分析及经验公式的推导工作仍在进行中。



变压器	A相电流畸变率(%)	K系数 (实测值)
医院一 1#变压器	8.3%	1.3
医院一 2#变压器	12%	1.4
医院一 3#变压器	18.4%	3.4
医院二 1#变压器	12.4%	1.3
医院二 2#变压器	5.2%	1.1
医院三 1#变压器	5.3%	1.2
医院四 1#变压器	11%	1.6
医院四 2#变压器	21.6%	3.7
医院四 3#变压器	13.2%	1.9
医院五 1#变压器	6.3%	1.2
医院五 2#变压器	4.2%	1.1
医院六 1#变压器	3.8%	1.1
医院六 2#变压器	5.9%	1.3
医院六 3#变压器	7.4%	1.3
医院六 4#变压器	4.7%	1.1
医院七 1#变压器	7.7%	1.3
医院七 2#变压器	8.8%	1.4
医院八 1#变压器	2.8%	1
医院八 2#变压器	2.6%	1
医院八 3#变压器	4.9%	1.2
医院八 4#变压器	5.3%	1.1
医院九 1#变压器	5.3%	1.1
医院九 2#变压器	9.4%	1.9
医院九 3#变压器	6%	1.9
医院九 4#变压器	9.8%	1.5
医院九 5#变压器	7.8%	1.4
医院九 6#变压器	10.5%	1.4
医院九 7#变压器	9.8%	1.3

## 4. 与谐波相关的工程计算方法

- 4.1 谐波环境中变压器谐波系数K和降容系数D的计算
- K系数是描述供电给非线性负载变压器额外发热的参数，反映变压器承受谐波时所致额外温升的能力。它的定义为：

$$K = \sum_{h=1} \left( h \frac{I_h}{I_1} \right)^2$$

- 用流过变压器的电流有效值将上式规格化，规格化的K系数为

$$K = \frac{\sum_{h=1} (hI_h)^2}{\sum_{h=1} (I_h)^2} = \frac{\sum_{h=1} (hI_h)^2}{I_{rms}^2} = \frac{\sum_{h=1} (hI_h / I_1)^2}{(I_{rms}^2 / I_1^2)} = \frac{\sum_{h=1} (hI_h / I_1)^2}{1 + THD_i^2}$$

- 谐波电流畸变率是谐波畸变的度量方法之一，它的定义为：

$$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}$$

$I_1$  —— 基波电流峰值

$I_h$  —— h次谐波电流峰值



## 4. 与谐波相关的工程计算方法

- 如果K系数超过4，就有必要使用K系数变压器或降低标准变压器的额定出力。变压器降容系数与K系数之间的关系：

$$D = \frac{1.15}{1 + 0.15K}$$

K	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
D	1	0.94	0.88	0.84	0.79	0.75	0.72	0.69	0.66

- 根据上海现代建筑设计集团的科研成果，对于（上海地区）三级甲等医院医技楼而言，谐波电流畸变率一般在2.6%到22%之间，此时K系数可以按一下经验公式估算：
- **$K = (2 \times \text{THD}_i^3 + 2.7 \times \text{THD}_i^2 - 9.9 \times \text{THD}_i) \times 10^{-4} + 1.084$**
- 上式的置信区间（适用区间）为：电流畸变率在2.6%到22%之间。
- 我们可以通过以上方程计算出医技楼的K系数。再通过降容系数D和K系数之间的关系，计算出降容系数D，并用来指导医院建筑配电变压器的降容设计。



## 4.2 谐波环境中功率因数的计算

考虑谐波影响时功率因数补偿容量的计算：

功率因数计算

$$PF = \frac{P}{S}$$

**P**：有功功率； **S**：视在功率

$$\cos\phi = \frac{P_1}{S_1}$$

$P_1$ ：基波有功功率；  $S_1$ ：基波视在功率

当谐波存在时，  $PF < \cos\phi$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{S_1}{S} = PF_{disp} \cdot PF_{dist}$$

$PF_{disp}$ ：位移功率因数

$PF_{dist}$ ：畸变功率因数



## 4.2 谐波环境中功率因数的计算

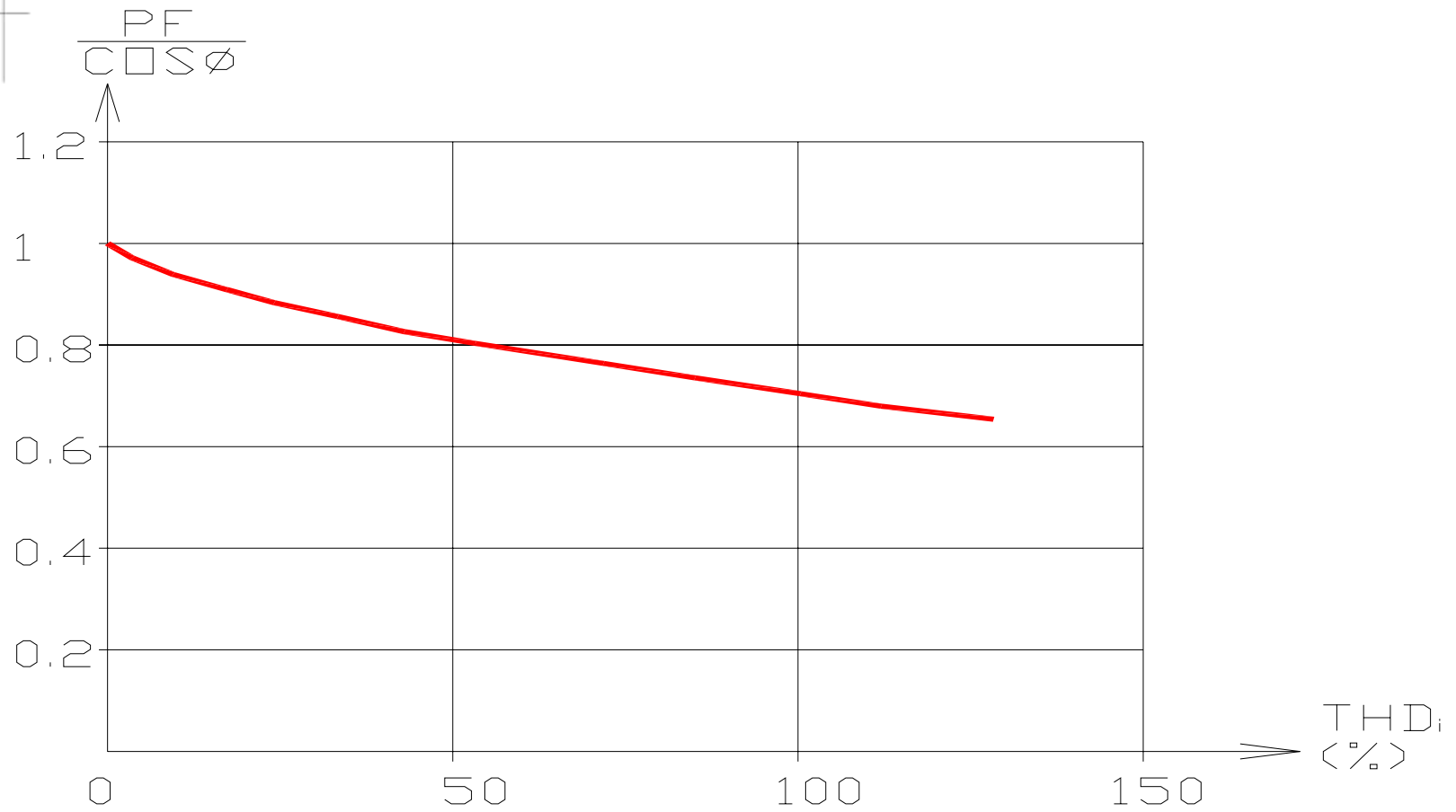
- 也可以利用基波因素来计算谐波环境中的功率因数**PF**:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \phi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \phi_1 = v \cos \phi_1$$

- 式中， $v$ 为基波因数，它等于基波电流有效值与总电流有效值之比，即： $v = I_1 / I$
- 上式说明了实际功率因数是由基波电流位移和电流波形畸变两个因素决定的。

## 4.2.2 工程估算方法

- 在实际工程设计中，谐波所致的无功功率很难估算，故上述算法实际上不可行。由于电网规模巨大，通常可以认为电力系统的内阻为零（视作无限大系统），因而仅考虑谐波电流而忽略谐波电压的影响，即 $\text{THD}_V=0$ 。此时，功率因数与 $\text{THD}_i$ 之间的关系如下图所示：
- 图中，**PF**为实际功率因数； **$\cos \phi$** 为理想正弦波的功率因数，即基波功率因数（我们传统算法所得即为此值）； **$\text{THD}_i$** 则可用专门软件粗略估算得到。



THDi 变化对  $\frac{PF}{\cos\phi}$  的影响，其中  $THD_U=0$

## 5. 谐波的预防

- 5.1 清源与截流并重，一方面要减少配电和用电设备的谐波产出；另一方面，要在配电网中采取简便有效的谐波拦截措施，例如Dyn11型配电变压器等。
- 5.2 谐波源相对集中布置，便于日后治理。



## 6.常用的谐波治理方法

- 6.1利用串联电抗器抑制谐波
- 背景谐波含量较高或可能发生并联电容器组的电容与系统电感间并联谐振时，并联电容器组应串接消谐电抗器，并注意电抗器参数选择，防止发生系统谐振。
- 串联型调谐电抗器配比计算方法：

在调谐频率 $f_h$ 处，

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

$X_L$  :电抗器基波感抗值

$X_C$  :电容器基波容抗值



理论调谐次数	理论调谐频率	实际调谐频率 ( 举例)	实际调谐次数 ( 举例)	实际电抗器配比
3	150 HZ	135HZ	2.7	13.7%，可选12.5~14%，通常取12.5%或14%
5	250 HZ	215HZ	4.3	5.4%，可选4.5~5.5%，通常取5%
7	350 HZ	315HZ	6.3	2.52%，可选2~3%，通常取3%
9	450 HZ	415HZ	8.3	1.45%，可选1.35~1.6%
11	550HZ	515HZ	10.3	0.94%，可选0.9~1.1%
13	650HZ	615HZ	12.3	0.66%，可选0.63~0.7%



## 6.2 设置滤波器

包括无源滤波、有源滤波、混合滤波等方法。

### 6.2.1 无源滤波器的设置原则：

当配电系统中具有相对集中且持续工作的大容量（如，200kVA或以上）非线性负载时，宜选用无源滤波器。

### 6.2.2 有源滤波器的设置原则：

当配电系统中具有大容量（如，200kVA或以上）非线性负载，且变化较大（如，断续工作的设备等），用无源滤波器不能有效工作时，宜选用有源滤波器。



## 6.2 设置滤波器

### 6.2.3 无源有源复合滤波器的设置原则：

由无源滤波器和有源滤波器组合而成，由无源滤波器吸收一个或数个功率较大且稳定的特定频率的谐波，再由有源滤波器消除其余谐波。

当配电系统中既具有相对集中且长期稳定运行的大容量（如，200kVA或以上）非线性负载，又具有较大容量的经常变化的非线性负载时，宜选用有源无源组合型滤波器。

### 6.3 设置静止无功发生器（SVG）

无功功率变化较大且谐波严重的系统中宜采用静止无功发生器，在进行功率因数补偿的同时，也能在一定程度上实现对谐波的抑制。

必须注意的是，如果在变电所低压配电室中设置SVG装置，对高压侧（公共电网）而言，谐波治理的效果较好，但对用户侧（低压电网）的电能质量却毫无改善。

## 7.结束语

- 在谐波环境中，实际电流由三部分组成，即基波有功电流、基波无功电流、谐波及间谐波电流。在供配电工程设计中，谐波的早期估算也仍是一大难题。然而，谐波所致的无功功率是客观存在的，它对无功功率补偿计算、电容选型、导线选择、开关整定等方面的影响应当引起我们的足够重视。

谢谢各位！

