

电能质量产品技术交流

上海坤友电气有限公司

上海坤友电气公司简介

上海坤友电气有限公司是一家专注于电能质量和电气化铁路领域的高新技术企业。公司成立于2004年，经过多年的发展，现已成为集科研、生产、销售、国内外贸易、服务于一体的现代化企业，通过了国家ISO9001-2008质量体系认证。2010年2月上海市政府正式颁发“上海市高新技术企业”证书。是中国民参军联盟理事长单位，拥有20多项专利技术。

上海坤友电气有限公司本着“创新为先导，质量为保证，服务为宗旨，用户为上帝”的企业文化，努力为上海地区和全国各地社会经济服务。得到了广大用户的认可和青睐，也使公司发展蒸蒸日上。获得省部级奖励两项，即上海市技术发明三等奖和甘肃省科技进步三等奖，拥有30多项专利技术。

上海坤友电气在技术实施方面，始终贯彻以“客户需求为本”、“一个客户，一个设计”的服务理念，为每个用户量身定做最优解决方案，始终致力于成为高性能、高可靠、高效率和长寿命、环保的绿色电能系统的领导者。

公司生产基地



- 1、KYYLB 有源电力滤波装置
- 2、KY-KYLB-S 低压动态无功补偿及谐波治理成套装置
- 3、KY-SVC 高压动态无功补偿及谐波治理成套装置
- 4、KY-FC 高压无功补偿滤波成套装置
- 5、KY-TBB 高压线路无功补偿成套装置
- 6、KY-MK 低压无功补偿成套装置

什么是电能质量

- 1、电能质量是衡量供电方为用电客户供应的电力是否符合要求，以及用电客户对供电方电网是否造成污染的指标体系，它直接影响着供、用电双方的安全性、可靠性和经济性。
- 2、电能质量一般是指电压、电流的副值、频率、波形等参量和国际或国内规定值得偏差。

电能质量的内容

- 1、公用电网谐波污染
- 2、电压偏差
- 3、频率偏差
- 4、三相电压不平衡
- 5、电压波动与闪变

什么叫无功?

- 电源能量与感性负载线圈中磁场能量或容性负载电容中的电场能量之间进行着可逆的能量交换而占有的电网容量叫无功，无功功率 表达式如下：

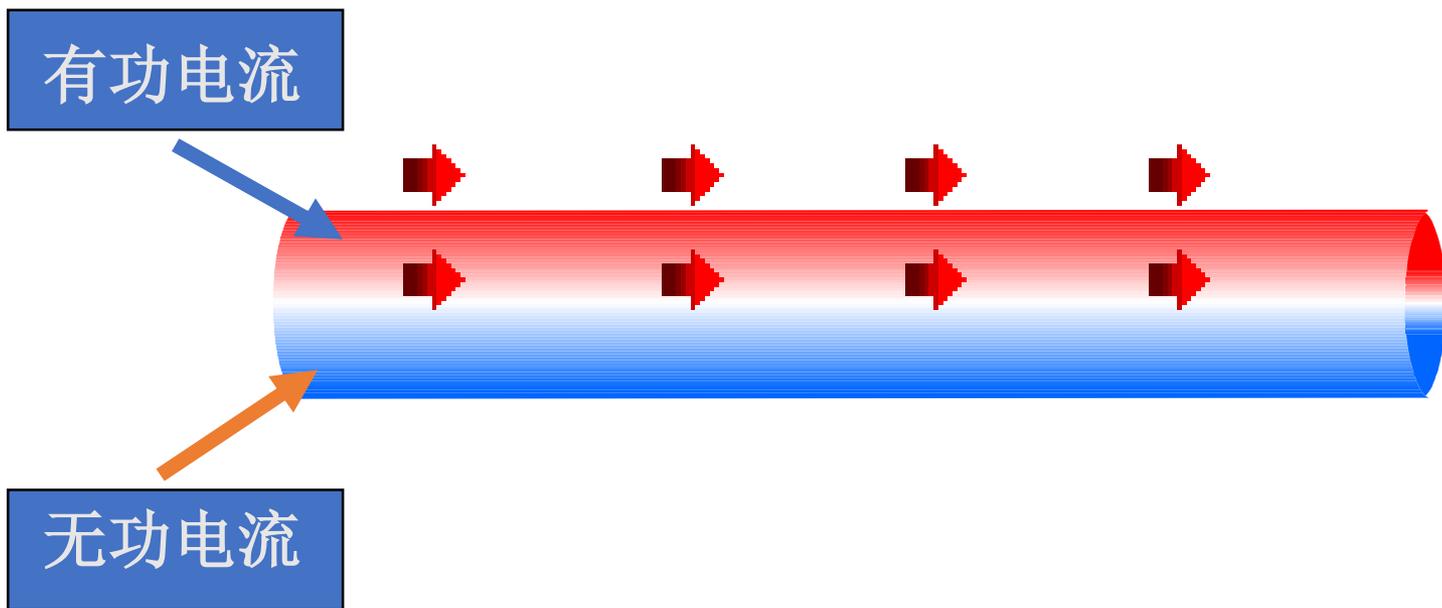
$$Q = UI \sin \varphi$$

式中无功量 的单位为Var（乏），线电压的单位为V（伏），视在电流I单位为A（安）。

Q

无功电流示意图

- 1、红色部分为有功电流
- 2、蓝色部分为无功电流



什么是无功功率

所谓无功功率通俗地讲就是不消耗电能的用电设备所消耗的功率。比如把一只电容器接入交流电路中，电路就会对电容器进行充放电，这样就引成电流，充电时电容器蓄存电能，放电时电容器把电能又还给电源，这样电容器这个用电设备本身并不消耗电能，然而它却有功率（功率等于电压乘以电流强度），这就是无功功率，电容器虽然不消耗电能，但是因为是有电流，所以电力线路上会消耗电能（电线都有电阻），对供电的电源变压器来说更是一种负担，因为变压器的容量（它能提供的功率）是有限的，无功功率会占用变压器的容量，使正常供电受到限止。同样，把一只电感器接入交流电路，也会产生无功功率。不过电容器使电流相位超前，而电感器使电流相位滞后，它们的作用正好相反，可以相互抵消。一般的用电设备都是电感性的，如工厂里的电动机，它会产生感性无功功率，不但使电力线白白消耗电能，增加电力线路的负担，更是白白占用电源变压器的容量，是非常有害的。这时在电动机上并联电容器，使感性负载与容性负载的作用相互抵消，这对电力线路和变压器来说就没有无功功率的影响了。无功补偿装置说白了就是配套的电容器（由许多只电容器并联而成），它由自动控制设备自动接入电路，既不会补偿不足，也不会补偿过头。

- 1、**感性无功**： 电流矢量滞后电压矢量90度，
如：电动机、变压器线圈、晶闸管变流设备等；
- 2、**容性无功**： 电流矢量超前电压矢量90度，
如：电容器、电缆输配电线路、电力电子超前控制设备等；
- 3、**基波无功**： 与电源频率相等的无功；
- 4、**谐波无功**： 与电源频率不相等的无功。

什么是无功补偿?

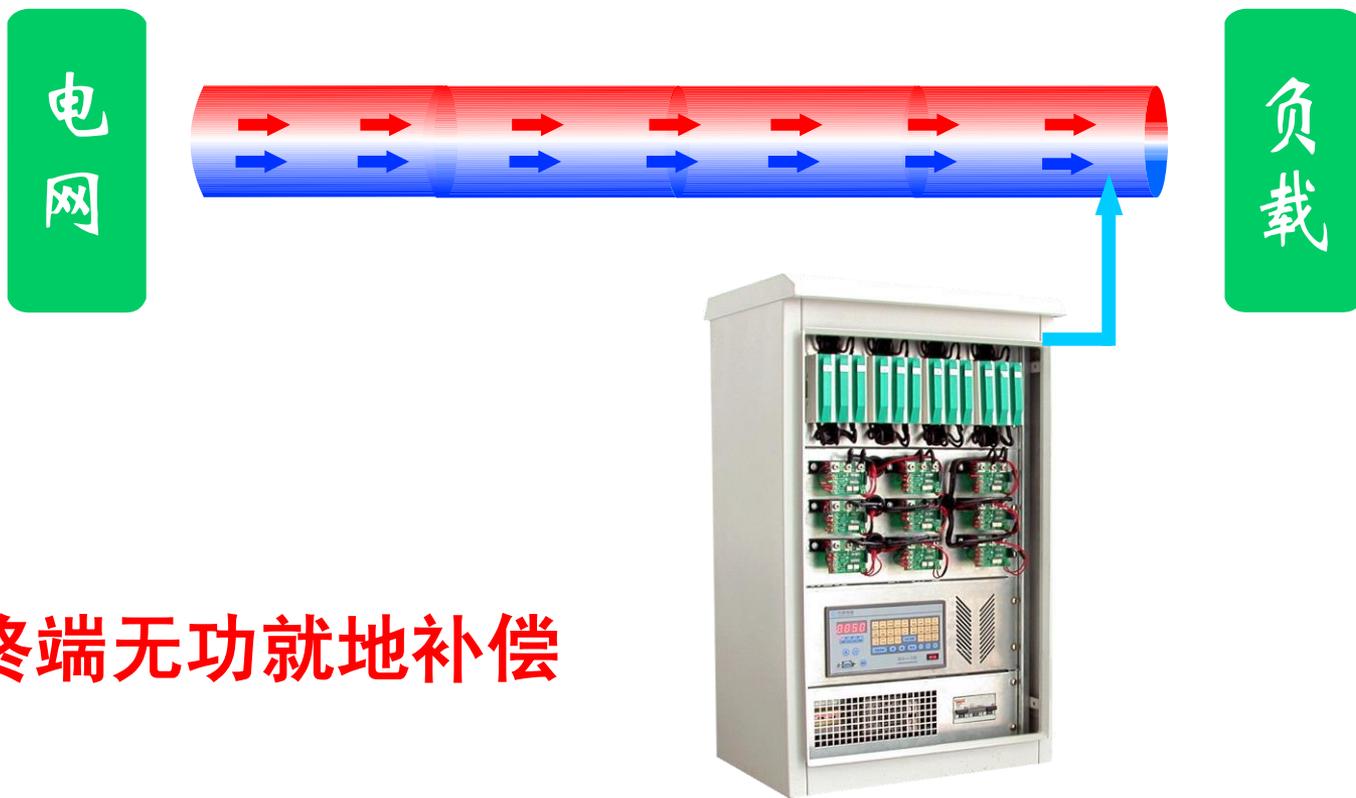
➤ 无功补偿:

指根据电网中的无功类型，人为地补偿容性无功或感性无功来抵消线路中的无功功率。

➤ 无功功率有那些危害:

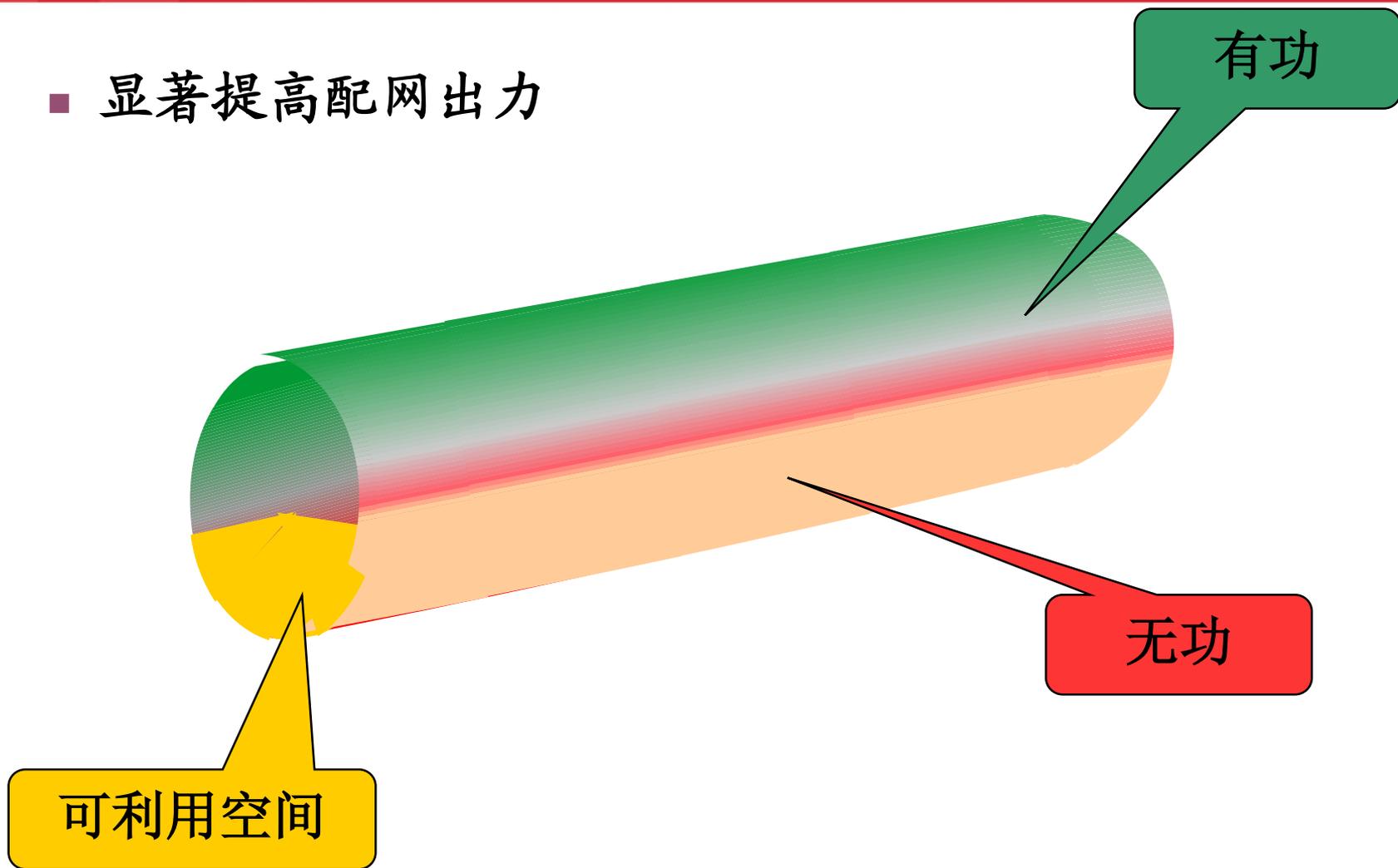
— 无功功率不做功，但占用电网容量和导线截面积，造成线路压降增大，使供配电设备过载，谐波无功使电网受到污染，甚至会引起电网振荡颠覆。

• 无功补偿示意图



用户终端无功就地补偿

■ 显著提高配网出力



什么是动态无功补偿?

➤ 动态无功补偿

根据电网中动态变化的无功量实时快速地进行补偿。

➤ 为什么要进行无功功率补偿

—是为了减小供配电线路中往复交换的无功功率，提高供配电线路的利用率。

➤ 就地动补的意义

——是能将用电设备至发电厂全程供配电设备、线路、都得到补偿，降损节能效果显著，特别是低压线路及变压器的损耗大幅度降低，企业和用户直接受益。

➤ 就地动补的有功节能

——是减小供配电设备线路损耗，变压器损耗等一切无功电流引起的发热功率。这部分损耗功率 P_s 可由下式表达：

$$P_s = i^2 r_{\Sigma}$$

式中 i 为视在电流， r_{Σ} 为供配电设备线路电阻和。

—补偿后视在电流的平方与补偿前视在电流的平方之比。

$$\text{即： } I_2^2 r_{\Sigma} : I_1^2 r_{\Sigma}$$

式中 I_1 为补偿前视在电流， I_2 为补偿后视在电流， r_{Σ} 为供配电设备线路电阻之和。

动补与静补的主要区别及优点

- 静补投切速度慢，不适合负载变化频繁的场所，容易产生欠补或者过补偿，造成电网电压波动，损坏用电设备；并且有触点投切设备寿命短，噪声大，维护量大，影响电容器使用寿命。
- 动补可对任何负载情况进行实时快速补偿，并有稳定电网电压功能，提高电网质量，无触点零电流投切技术增加了电容器使用寿命，同时具备治理谐波的功能。

什么是谐波?

➤ 谐波

指电网中非基波（50Hz中国）的其他频率的电流或电压，如高次谐波，谐波亦属于无功类别。

➤ 谐波的危害

谐波是供配电系统中的公害，可造成供配电线路，用电设备发热，产生趋肤效应，使电气设备、电动机产生机械振荡。干扰无线电设备不能正常运行。电网中谐波量过大，可引起电网振荡，造成电网颠覆的严重事故。

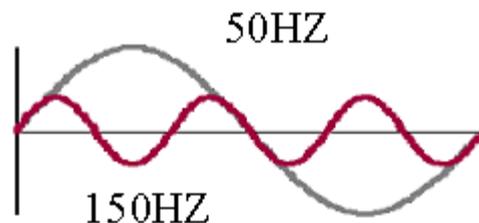
谐波的概念

周期性非正弦波可以利用傅立叶级数分解为基波和谐波两部分。

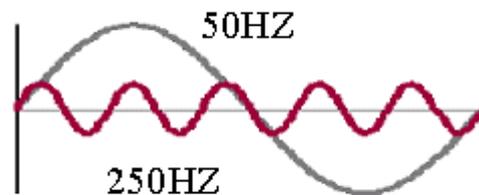
基波 f_1 ——指频率为 F （中国为50Hz）的正弦波

谐波 f_n ——指频率为 F 正整数倍的正弦波

谐波次数 n ——谐波频率与基波频率的比值（ $n=f_n/f_1$ ）



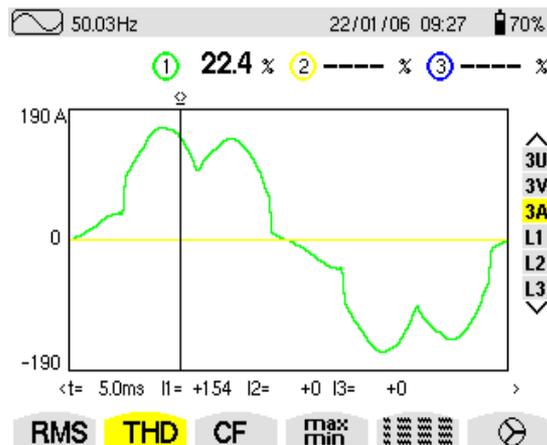
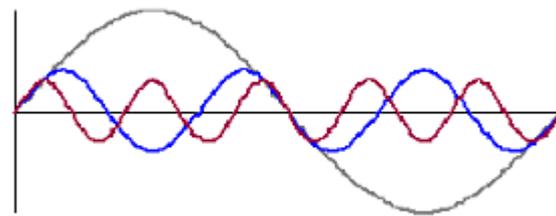
基波与三次谐波



基波与五次谐波

谐波的产生

- 当正弦波电压施加在非线性负载上时，电流就畸变为非正弦波，非正弦波电
- 流在电网阻抗上产生压降，会使电压波形也变为非正弦波。



谐波的危害



谐波电流和谐波电压的出现对公用电网是一种污染，同时它使用电设备所处的环境恶化，也对周围的通讯系统和公用电网以外的设备造成危害。其中对设备寿命和线损的影响是逐渐积累其效应的慢过程，一般在一定时期后才暴露，因此很多问题并不能及早被发现。

近年来，各种电力电子装置的迅速普及使公用电网的谐波污染日趋严重，由谐波引起的各种故障和事故也不断发生，谐波危害的严重性也逐渐引起人们的注意。以下进行详细说明：

谐波的具体影响

- 谐波对电网的影响
- 对旋转电机影响
- 对变压器的影响
- 对电容器组的影响
- 并联电容器对谐波的放大
- 其它影响

谐波对电网的影响

- 谐波电流在电网中的流动会在线路上产生有功功率损耗，虽然谐波电流与基波电流相比所占比例不大，但谐波频率高，导线的趋肤效应使谐波电阻比基波电阻增加很多，因此谐波引起的附加线路损耗增大，增大线损，降低安全。
- 对于采用电缆的输电系统，谐波除了引起附加损耗外，还可以使电压波形出现尖峰，加速电缆绝缘老化，使温升增高，缩短了电缆的使用寿命。

对旋转电机影响

- 由于趋肤效应使电机的转子绕组过热，危及绝缘
- 谐波引起机械振动、噪声、谐波过电压

对变压器的影响

- 谐波电流流入变压器，增加了变压器的铜损和铁损，随着频率的提高，趋肤效应更加严重，铁损也更大。有可能引起变压器的局部严重过热。
- 当发生谐振时，会使铁心严重饱和，励磁中的谐波电流会大大增加。
- 引起变压器的噪声

对电容器组的影响

- 谐波电流叠加在电容器的基波电流上，使电容器电流有效值增大，温升增高，甚至引起过热而降低电容器的使用寿命或使电容器损坏。
- 谐波电压叠加在电容器基波电压上，不仅使电容器电压有效值增大，并可能使电压峰值大大增加，使电容器运行中发生的局部放电不能熄灭。这往往是使电容器损坏的一个主要原因。

并联电容器对谐波的放大：

在工频频率下，电容器的容抗比系统的感抗大得多，不会产生谐振。但对谐波频率而言，系统感抗大大增加而容抗大大减小，达到谐振条件，就可能产生并联谐振或串联谐振。使谐波电流（谐波电压）放大几倍甚至数十倍。无功功率补偿装置（电容器直接补偿）投入后，一些供电设备中的电元件（包括变压器、电抗器、电容器、自动开关、接触器、继电器）经常损坏，这就是谐波电流被电容器直接补偿引起的谐波放大后而造成的。

其它影响

- 1、对开关设备的影响：使开关设备的遮断能力降低，延缓甚至阻碍熄弧
- 2、导致继电保护和自动装置的误动作
- 3、使电气测量仪表不准确
- 4、对邻近的通信系统产生干扰

谐波治理措施简介

• LC滤波器

在谐波源附近安装若干单调谐及高通滤波支路，以吸收谐波电流，可以有效地减小谐波量。出现较早，具有结构简单、设备投资少、运行可靠性高、运行费用低等优点，因此至今仍是应用最多的方法。

• ZN-KYLB-S型LC滤波器。

• 增加换流装置的脉动数是一种较为积极的做法，可以有效地减小谐波量。

• 采用高功率因数整流器。

• 有源电力滤波器

降低装置的价格，增大装置的容量，提高系统的可靠性。

什么是无源电力滤波器

- 1、滤波电路由无源元件（电阻、电容、电感）组成。
- 2、无源电路中的器件不需要工作电源支持。
- 3、无源电路中的信号如果没有外部信号补充最后将衰减为零。

无源电力滤波器



什么是有源电力滤波器

- 1、滤波电路不仅由无源元件，还由有源元件（双极型管、单极型管、集成运放）组成。
- 2、有源电路就是元件必须有工作电源支持，这里可理解源就是电源。
- 3、有源元件定义为可以给外部电路提供大于零的平均功率的元件，而且该平均功率可以持续无限长的时间，这时候可理解源就是有源元件提供的信号源。

有源电力滤波器

坤友电气®
KUNYOU



无源电力滤波器的优缺点

一般无源滤波指通过电感和电容的匹配对某次谐波并联低阻（调谐滤波）状态，给某次谐波电流构成一个低阻态通路。这样谐波电流就不会流入系统。无源滤波的优点为成本低，运行稳定，技术相对成熟，容量大。缺点为谐波滤除率一般只有60-70%，对基波的无功补偿也是一定的。目前在容量大且要求补偿细致的地方一般使用有源加无源混合型，即无源进行大容量的滤波补偿，有源进行微调。

无源电力滤波器的特点

无源滤波器具有投资少、效率高、结构简单、运行可靠及维护方便等优点。由于无源滤波器是通过在系统中为谐波提供一并联低阻通路，以起到滤波作用，其滤波特性是由系统和滤波器的阻抗比所决定的。

无源电力滤波器的缺点

- 1、滤波特性受系统参数的影响较大；
- 2、只能消除特定的几次谐波，而对某些次谐波会产生放大作用；
- 3、滤波要求和无功补偿、调压要求有时难以协调；
- 4、谐波电流增大时，滤波器负担随之加重，可能造成滤波器过载；
- 5、有效材料消耗多，体积大。
- 6、在滤波时都有补偿，如系统本身功率因数较高，有可能会产生过补。

有源电力滤波器的优缺点

有源滤波自身就是谐波源。其依靠电力电子装置，在检测到系统谐波的同时产生一组和系统幅值相等，相位相反的谐波向量，这样可以抵消掉系统谐波，使其成为正弦波形。有源滤波除了滤除谐波外，同时还可以动态补偿无功功率。其优点是反映动作迅速，滤除谐波可达到95%以上，补偿无功细致。缺点为价格高，容量小。由于目前国际上大容量硅阀技术还不成熟，所以当前常见的有源滤波容量不超过600kvar。其运行可靠性也不及无源。

有源电力滤波器的特点

与无源滤波器相比，有源电力滤波器具有高度可控性、快速响应性，不仅能补偿各次谐波，还可抑制闪变、补偿无功，有一机多能的特点，其具体特点如下：

- a. 滤波特性不受系统阻抗的影响，可消除与系统阻抗发生谐振的危险；
- b. 具有自适应功能，可自动跟踪补偿变化着的谐波。
- c. 尽管有源电力滤波器有着无源滤波器所不具备的巨大技术优势，但目前要想在电力系统中完全取代无源滤波器还不太现实。这是因为与无源滤波器相比较，有源电力滤波器的成本较高，这一点是限制其推广使用的关键。

➤ 三相六脉波整流电路有哪些高次谐波

— 三相整流设备含有5、7、11、13等次 ($6n \pm 1$)

的高次谐波，含量为基波的 $1/5$ ， $1/7$ ， $1/11$ ，

$1/13 \dots 1/(6n \pm 1)$ ，高次谐波含量为：

即
$$\sqrt{\sum_1^n \left(\frac{1}{6n \pm 1}\right)^2}$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{7}\right)^2 + \dots}$$

➤ 六相十二脉波整流电路有哪些高次谐波

— 六相十二脉波整流电路含有：11、13、23、25... ($12n \pm 1$) 次高次谐波，高次谐波电流含量是：

即
$$\sqrt{\sum_1^n \left(\frac{1}{12n \pm 1}\right)^2}$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{11}\right)^2 + \left(\frac{1}{13}\right)^2 + \dots}$$

KYLB-S型动态补偿的主要特点

- 用于低压电网，靠近负载，采用TSC（晶闸管投切电容器）动态无功功率补偿技术，晶闸管以10ms速度直接将电容器投入电网，实现了低成本、高效益。
- 采用计算机数字化控制技术，对三相对称或非对称供配电线路中的无功功率进行实时、动态跟踪补偿，使功率因数始终保持在0.92以上。在电网电压高低不同时采用不同的补偿算法以确保不发生欠补偿和过补偿。过补偿会引起电网电压升高。
- 本技术可以抵销三相非对称负载引起的零序电流和负序电流，补偿后，三相非对称负载和本装置对电网等效于三相对称负载。

KYLB-S型动态补偿的主要特点

- 本装置的微机故障自诊断系统可以对多种故障进行处理，如过电流、过电压、电源缺相和相序错等，容错运行技术的应用，提高了补偿装置在无人值守下的运行可靠性。
- 本装置的投切时间为10ms，系统动态响应一般工业型为40ms，快速型为30ms。电容投入电网和退出电网均在电流过零点，入网电流为正弦，确保8421码投切方式对电网不产生冲击电流，保证晶闸管安全工作，延长补偿电容器运行寿命。

KYLB-S系列动补治理谐波指标

坤友电气®
KUNYOU

- 治理五次谐波量50%以上;
- 非标准设计, 可以对各次谐波进行治理, 达到国家标准。

➤ 适用场合

—适用于如: 冶金、化工、造纸等工矿企业, 及居民生活小区, 商业区域。

KYLB-S型动态补偿量计算公式



—补偿前和补偿后负载容量不变的情况下：变压器容量为S，补偿前功率因数为 $\cos \varphi_1$ 补偿后功率因数要求提高到 $\cos \varphi_2$

那么补偿容量为

$$Q = S \times \cos \varphi_1 \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right)$$

—补偿前和补偿后满负载容量的情况下：变压器容量为S，补偿前功率因数为 $\cos \varphi_1$

补偿后功率因数要求提高到 $\cos \varphi_2$

那么补偿容量为 $Q = S \times (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2)$

➤ 无功功率的计算方法

$$Q = S \times \sin(\cos^{-1} \varphi)$$

式中 S 为视在功率, $(\cos^{-1} \varphi)$ 为功率因数角。

➤ 线路损耗的计算公式 $P_S = I^2 r_\Sigma$

式中 I 为视在电流 r_Σ 为供配电设备线路内阻和。

➤ 变压器的损耗的计算公式 $P_B = r_B I^2$

式中 I 为视在电流, $\sqrt{3}r_B$ 为变压器内阻。

➤ 谐振频率的计算公式 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

➤ 变压器阻抗的计算公式

$$Z_B = n\omega_0 L_B = \frac{3nU_2^2 U_k}{100S}$$

式中n为谐波次数， ω_0 为电网角频率， L_B 为变压器漏感， U_2 为变压器二次线电压， U_k 为变压器阻抗压降比，S为变压器容量。

➤ 滤波器阻抗的计算公式 $Z = \frac{n^2 \delta - 1}{3n\omega_0 C} \omega_0$

式中n为谐波次数， δ 为感性无功于容性无功容量之比， ω_0 为电网角频率。

计算补偿电容的容量

- 如何计算安装KYLB-S动态无功补偿装置后的增容容量？
- 如何计算安装KYLB-S动态无功补偿装置后的节电量？

示 例

例如：某配电的一台1000KVA/400V的变压器，当前变压器满负荷运行时的功率因数 $\cos = 0.75$ ，现在需要安装KYLBS动补装置，要求将功率因数提高到0.95，那么补偿装置的容量值多大？在负荷不变的前提下安装KYLBS，动补装置后的增容量为多少？若电网传输及负载压降按5%计算，其每小时的节电量为多少？

解

答

$$\text{补偿装置容量} = [\sin(\cos^{-1} 0.75) - \sin(\cos^{-1} 0.95)] \times 1000 = 350(K \text{ var})$$

$$\text{安装KYLBS动补装置前的视在电流} = \frac{1000}{0.4 \times \sqrt{3}} = 1443(A)$$

$$\text{安装KYLBS动补装置前的有功电流} = 1443 \times 0.75 = 1082(A)$$

$$\text{安装KYLBS动补装置后视在电流降低} = 1443 - 1082 / 0.95 = 304(A)$$

$$\text{安装KYLBS动补装置后的增容量} = 304 \times \sqrt{3} \times 0.4 = 211(KVA)$$

$$\text{增容比} = 211 / 1000 \times 100\% = 21\%$$

$$\text{每小时的节电量} = \frac{304 \times 400 \times 5\% \times \sqrt{3} \times 1}{1000} = 11 \text{ (度)}$$

动态无功功率补偿装置的功能



- *抵消负载产生的基波无功功率
- *抵消负载产生的谐波无功功率
- *解决三相不平衡负载的平衡化问题

抵消负载产生的基波无功功率

- 感应异步交流电动机的功率因数: $\cos\phi=0.9\sim 0.6$
- 在中、轻载运行时, $\cos\phi=0.8\sim 0.4$
- 在起、制动过程中 $\cos\phi=0.4\sim 0.2$

例如: 北京造纸厂打浆机的电动机功率为180KW, 软起动时, 电动机的电流达到1500A, 而采用动态无功功率补偿装置后, 电动机的起动电流为400A, 并且网压跌落由 $\Delta U=60V$ 下降为 $\Delta U=3V$

- 变流装置 (SCR) 的功率因数: $\cos\Phi \approx \cos\alpha$ α 为整流角
- 当 $\alpha_{\max}=30^\circ$ 时, 功率因数: $\cos\Phi \approx \cos\alpha=0.866$ $Q=50\%$ S
- 当 $\alpha=60^\circ$ 时, 功率因数: $\cos\Phi \approx \cos\alpha=0.5$ $Q=87\%$ S
- 当起动或低速咬钢时, $\alpha \approx 80^\circ$, 功率因数: $\cos\Phi \approx \cos\alpha=0.17$; $Q=98\%$ S

例如: 衡水京华焊管厂在轧钢车间使用变流装置, 采用KYLBS型动态无功功率补偿装置 (2.4MVAR) 后, 在整个轧钢过程中, 功率因数始终保持在0.95以上。

抵消负载产生的谐波无功功率



——谐波无功功率主要由非线性负载产生

- 变流装置（SCR）产生谐波无功，理论证明：三相全控桥整流逆变装置，六只晶闸管对称触发时产生 $6N \pm 1$ 次谐波，幅值为 $\frac{1}{6N \pm 1}$
- 十二相变流装置产生 $12N \pm 1$ 次谐波，幅值为 $\frac{1}{12N \pm 1}$
- 交流电弧炉非对称产生偶次谐波。

解决三相不平衡负载的平衡化问题

※根据不平衡三相负载理论：三相负载电流由三相平衡的正序电流和三相不平衡的负序电流及零序电流组成。（无零线的系统无零序电流）

- ※如果系统无零序电流，通常将解决三相不平衡负载的平衡化问题归结为消除三相不平衡负载的负序电流。
- ※理论证明：三相负载电流 I_a 、 I_b 、 I_c 中如果没有无功电流，并且零序电流为零，负序电流必然为零，即三相电流对称。那么三相不平衡负载的平衡化问题就转为各相无功电流的补偿问题。
- ※无功功率补偿装置具有由从变压器输出有功电流小的相抽取一定的有功电流，送到有功电流大的相上去的作用，使变压器输出个各相对负载只输送有功
- 电流，其幅值为原负载总有功电流的三分之一。
- ※例如；玻璃行业、晶体制造、三相供电单相使用等都是三相不平衡负载，都
- 可以选取无功功率补偿装置解决平衡化问题。（举例，成都二零八厂负载严重非对称）

- 降低供配电系统的损耗
- 提高供配电系统的利用率（增容）
- 稳定供配电系统的网压
- 动态无功功率补偿可以降低谐波电流对供电系统的破坏作用

降低供配电系统的损耗

供配电系统的损耗于供配电系统通过的总电流的平方成正比，系统总电流下降到0.707，损耗将下降50%。

例如：一台315KVA的供电变压器，高峰负荷时，电流达到额定值，功率因数 $\cos_1 = 0.7$ ，如果通过无功功率补偿将功率因数提高到 $\cos_2 = 0.93$

问： A、改善功率因数以后，电能损耗下降的百分数为多少？

B、挖掘除变压器容量潜力S 为多少？

C、变压器及 线路每年减少损失为多少？

解： A 将功率因数 \cos_1 提高到 \cos_2 ，那么最大电流将由 I_1 下降到 I_2 ，

因为负荷有功功率不变；

$$\therefore S_1 \cdot \cos_1 = S_2 \cdot \cos_2 \text{ 即 } I_2 = I_1 \times$$

损耗于电流平方成正比，故其下降值为： $\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}$

B 因为负荷有功功率不变 $\frac{I_1^2 - I_2^2}{I_1^2} \times 100\% = 43.35\%$

$$\therefore S_1 \cdot \cos_1 = S_2 \cdot \cos_2 \text{ 即 } S_2 = S_1 \frac{\cos_1}{\cos_2}$$
$$\Delta S = S_1 - S_2 = \left(1 - \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}\right) \times S_1 = \left(1 - \frac{0.7}{0.93}\right) \times 315 = 78 \text{ (KVA)}$$

• C 变压器额定输出时，自身损耗在3%~5%左右，那么变压器每年减少损耗为： $365 \times 24 \times 315 \times 4\% \times 43.35\% = 47848$ (KW.h)

• 根据华北电管局统计资料，线损耗一般为5%，那么线路每年减少损耗为： $365 \times 24 \times 315 \times 0.75\% \times 43.35\% = 41867$ (KW.h)

• 注：动态无功功率补偿装置的有功节能只是降低了补偿点至发电机

之间的供配电的损耗。所以高压网侧的无功补偿不能减少低压侧的损耗，亦不能使低压供电变压器的利用率提高，根据最佳补偿理论，就地动态无功功率补偿节能效果最为显著。

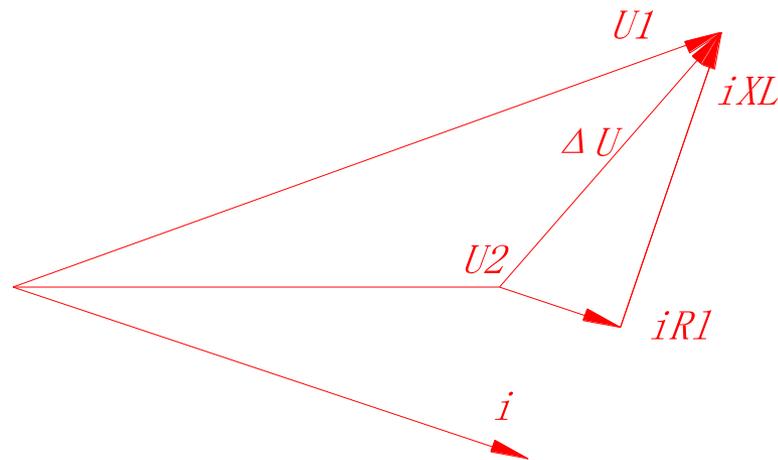
提高供配电系统的利用率（增容）

- 由于供配电系统中无功功率的存在，使得功配电系统利用率下降至 $\cos \phi$ ，当功配电系统功率因数从 $\cos \phi_1$ 提高到 $\cos \phi_2$ 时，
- 供配电系统的增容率 $= \frac{\cos \phi_2 - \cos \phi_1}{\cos \phi_1} \times 100\%$
- 例1：某供电系统通过无功功率补偿将功率因数由 $\cos \phi_1 = 0.7$ 提高到 $\cos \phi_2 = 0.95$ ；
- 那么增容率 $= \frac{0.95 - 0.7}{0.7} \times 100\% = 35.7\%$
- 例2：某一独立的供配电变流系统动态功率因数最低为 $\cos \phi_1 = 0.2$ ，通过动态无功功率补偿将功率因数提高到 $\cos \phi_2 = 0.9$
- 那么动态增容率 $= \frac{0.9 - 0.2}{0.2} \times 100\% = 350\%$
- 由此可见动态无功功率补偿的效果非常显著。

稳定供配电系统的网压

供配电系统的电压下降是由于系统内阻抗上的压降造成的。供配电系统内阻抗一般可以认为是变压器漏抗和系统阻抗组成，变压器漏抗一般大于系统阻抗，低压远距离供配电系统反之。

- $E = U + \Delta U$
- 路电压 E ----- 系统开
- 行电压 U ----- 系统运
- ΔU 压降 U ----- 系统电
- 在电流 I ----- 系统视



无功补偿稳定系统电压



- 分析1: 负载为纯阻抗时, 变压器最大输出电压:

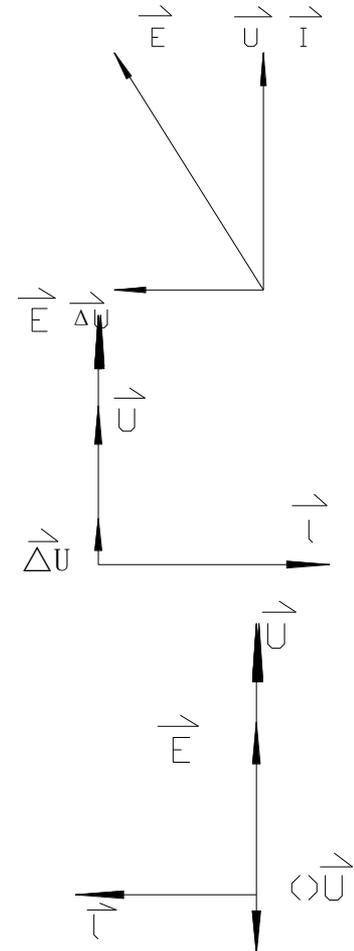
$$U = \sqrt{E^2 - I^2 R^2}$$

其中: 当变压器输出为额定电流时, $U_k = \frac{\leq U}{E} \times 100 \approx 4 \sim 7$

结论: 负载为纯感性时, 变压器输出电网U比变压器开路电压E有所降落, 但是很小。

- 分析2: 负载为纯感性时,
- 变压器最大输出网压: $U = E - \Delta U$
- 结论: 负载为纯感性时, 变压器输出网压U比变压器开路电压E有所降落, 最大电压降落 $\Delta U =$
- 分析3: 负载为纯容性时, 变压器最大输出网压: $U = E + \Delta U$
- 结论: 负载为纯容性时, 变压器输出网压U比变压器开路电压E有所升高 $\Delta U =$

- 稳定网压的方法:
- 提高功率因数, 减少视在电流。
- 改变 ΔU 的方向使系统容性。 $\frac{U_k \times E}{100}$
- 综上所述, 动态无功功率补偿可以通过对功率因数的调整实现对供配电系统网压幅值的控制, 例如电弧的动态无功功率的补偿



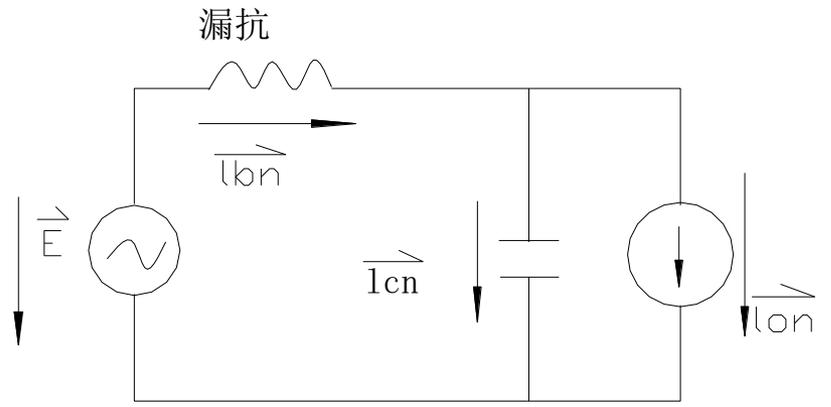
动态无功功率补偿可以降低



- 工业电网向非线性负载供电，不仅可以基波无功电流，还可以电网供电频率的整倍数的谐波无功电流。谐波电流的危害有以下几个方面：
- 谐波电流在变压器磁路中产生附加高频涡流铁损，使变压器过热，降低了变压器的功率。
- 谐波电流趋肤效应是导线等效截面变小，增加线路损耗。
- 谐波电流使供电电压产生畸形，影响电网上其他各种电器设备的正常工作，导致自动装置的误动作，仪表计量不准确。
- 谐波电流对临近通讯系统产生干扰。
- 谐波电流通过一般补偿电容器产生谐波放大，造成电容器使用寿命缩短，甚至损坏。
- 谐波电流会引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振，造成严重事故。

电容直接补偿引起的谐波放大现象

随着电力电子技术的飞跃发展，我国的工矿企业中大量的使用以晶闸管为主要开关器件的整流及变频设备，这些设备都是产生大量谐波的发源地。我们在许多工矿企业中，经常遇到这样的情况，无功功率补偿装置（电容器直接补偿）投入后，供电设备中的电元件（包括变压器、电抗器、电容器、自动开关、接触器、继电器）经常损坏，这就是谐波电流被电容器直接补偿引起的谐波放大后而造成的。



当 $\omega > \omega_0$ 或 $\omega < \omega_0$ 时，均称为n谐波电流大。其中：

- I_{bn}^p n次谐波流入变压器的电流
- I_{cn}^p n次谐波流入补偿电容器的电流
- I_{on}^p n次谐波源电流
- I_{on}^p

电容直接补偿引起的谐波放大现象时如何产生的呢?

- 当负载中存在n次谐波电流 I_n 时，补偿电容器所在电网上级变压器流入谐波电流 I_{bn} ，补偿电容器所流入谐波电流 I_{cn} ，下面使它们的表达式：
- $$I_{bn} = \frac{1}{1 - \lambda_c n^2 U_k \%} \times I_n \quad (1) \quad I_{cn} = \frac{1}{1 - \lambda_c n^2 U_k \%} \times I_n \quad (2)$$
- n——谐波次数
- U_k ——上级变压器短路电压比
- λ_c ——电容器静补电力与上级变压器额定电流比
- 公式 (1) 和 (2) 表明当 I_{bn} 和 I_{cn} 大于负载产生的谐波电流 I_n 时，所造成的谐波放大现象是由于分母的绝对值小于1导致的。
- 当公式 (1) 和 (2) 的分母等于0时，对应电容器和变压器漏抗并联谐振，即：
- $$\lambda_c = \frac{1}{n^2 U_k \%} \quad (3)$$
- 这时谐波放大倍数相当大（理论上无穷大），实际上变压器和电容器流入的谐波电流时负载谐波电流的10~100倍，甚至引起电网谐振颠覆。
- 例如对5次谐波，当 $\lambda_c = 0.06$ ， $U_k = 67\%$ 时，即产生5次并联谐振。再例如对7次谐波，当 $\lambda_c = 0.06$ ， $U_k = 34\%$ 时，即产生7次并联谐振。
- 谐波放大时，大量的谐波电流在电网与补偿电容之间往复交换，使包括变压器放大是动态无功功率补偿设计中要考虑的首要问题

LC滤波补偿，使滤波器对谐波呈感性

- 综上所述，作为谐波源负载的补偿装置对谐波呈容性时必然引起谐波放大，必须用。这是我公司生产LC滤波补偿装置与市场上其他补偿装置的根本区别。
- LC滤波器的谐振频率为 $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，当电网频率时，滤波器呈容性，用于补偿负载感性无功功率。对频率为的谐波有以下两种情况：
- 当 $f < f_n$ 时，滤波器呈容性，如果电网上并联对谐波呈感抗的滤波器，由于变压器漏抗的存在，概率波器对频率为 f 的谐波呈放大作用。
- 当时，滤波器呈感性，概率波器对频率为 f 的谐波器滤波作用。滤波效果取决于 f 和 f_n 的接近程度，如果 $f = f_n$ 滤波器呈很小的阻抗，几乎所有的谐波量都被滤波器吸收，而不流入电网。

滤波器的设计思想

选择滤波谐振频率 f_n ， f_n 接近要滤除的谐波频率，虽然滤波效果好，但是由于谐波大量进入补偿装置，将大大提高补偿装置的成本。选择谐振频率 f_n 一般要根据用户对谐波滤出的要求，解决好滤除滤与成本的矛盾。

- 当谐振频率 f_n 确定出来后，根据公式 $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，即L和C的乘积一定。大量的设计选用C大L小的原则其好处是电容器较电感器价格便宜，同时，提供较大的基波容性无功功率。但是，在一些基波无功功率很小，谐波较大的场合，就需要C小L大的，这样当滤波器投入后，在滤除谐波的同时不会出现基波无功功率过补的现象。

工业生产中集中典型的非线性负载的谐波抑制方案

- 可控硅整流器带感性负载
- 二极管整流器带容性负载
- 交流电弧炉负载

可控硅整流器带感性负载



- 例如：直流调速系统；交-交变频调速系统；直流电弧炉等。其特点是5次谐波量的20%；7次谐波量约占14%；11次谐波量约占9%；13次谐波量约占8%。对谐波滤除率要求不严格的场合可选用上海坤友电气有限公司生产的标准KYL B无功功率补偿装置。标准KYL B无功功率补偿装置内部由若干路按8421比例配置的谐波滤波器，每路滤波对5次及5次以上谐波均呈感性，因而不会产生谐波放大现象。对谐波的电抗值随投入的基波无功量的增大而减小，使滤波效果变好。换句话说，单位电容器流入的谐波量大量基本一定，投入的电容器越多，滤波的效果越好。这种标准无功功率补偿装置可以不用事先测量负载谐波电流实际值。对谐波滤除率按国标要求的场合，就要设计对谐波接近谐振的各次滤波器。这种滤波器投入电网可以吸收负载95%以上的谐波电流。因此必须根据用户提供的最大可能的谐波电流值选择电容器及电抗器的电压及电流参数，所以属于非标准设计

二极管整流器带容性负载



典型的是电压变频器。其特点是，只包括5次及5次以上的谐波。并且随进线电抗大小不同，各次谐波比重也不同，各次谐波比重也不同，但是，高频谐波含量往往超过可控硅整流器带感性负载的情况。这类负载的另一个特点是功率因数在0.97以上，基本不需要补偿。当变压器所接触这类负载外还有较大的基波无功功率负载时，可以采用上述的补偿方案，在补偿基波无功功率的同时，滤除谐波电流。如果变压器只接这类负载，就要设计专用的滤波装置，它能吸收较大的谐波电流，而输出基波容性无功电流较小，不会出现过补偿现象。这种滤波器由于C小L大，因而成本较高。

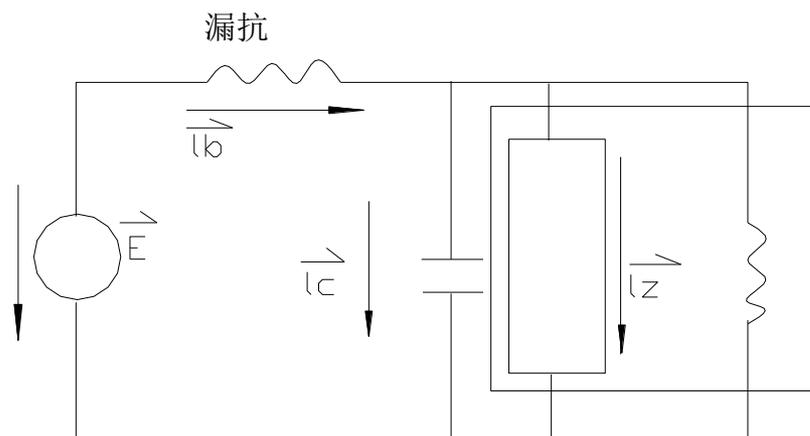
其特点是2次、3次、4次、5次及6次谐波电流含量较大，为避免谐波放大，2次、3次、4次、5次、继6次谐波器几乎工作在谐波状态，并且要按客户提供的实际谐波情况设计个次谐波滤波器，属于非标准设计，而且目前针对电弧炉闪变的问题解决成本很高，一般用户难以承受。

- 系统中基波感性无功的去除
- 系统中谐波感性无功的去除
- 三相不平衡负载平衡化

系统中基波感性无功的去除

利用同等电压的感性电流与容性电流方向相反进行抵消。

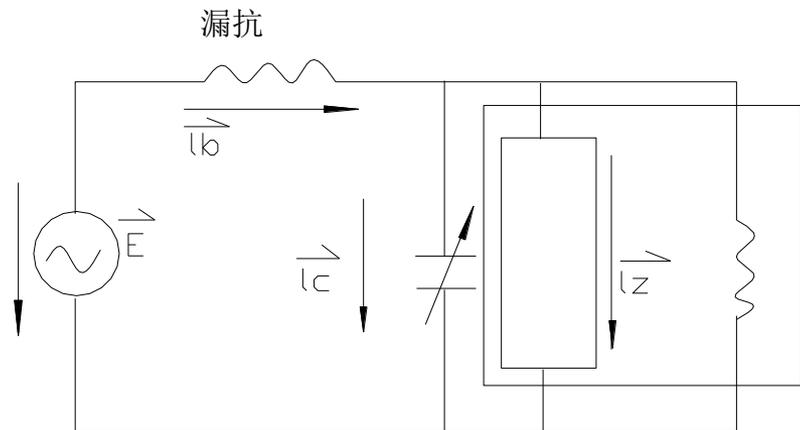
- 如果实现全补偿，系统无功电流等于零。
- 即： $I_c = I_z \times \sqrt{1 - \cos^2 \phi}$
- 其中：
- I_c —— 容性补偿电流
- I_z —— 负载电流
- $\cos \phi$ —— 功率因数



工程方案两大类

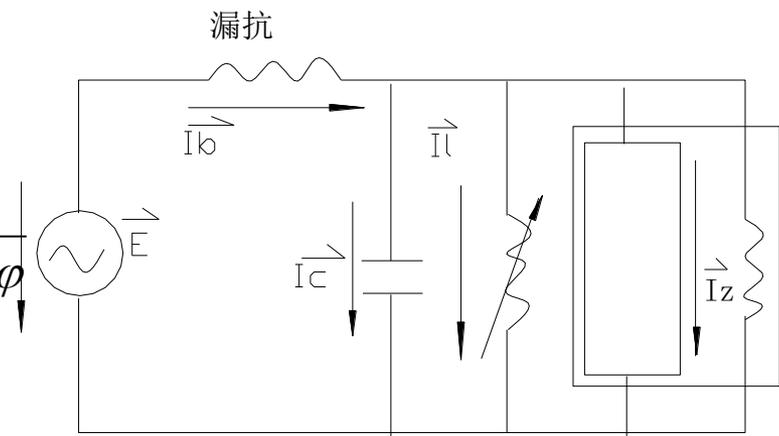
a.TSC方案，对感性负载系统配置可补偿电容器，使总电流中无功电流等于零。

- 通过调节补偿电容器，使补偿容性电流为： $I_c = I_z \times \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$



b.TCR方案，对感性负载系统配置固定补偿电容器，再配置可调补偿电抗器，使总电流中无功电流等于零。

- 通过调节补偿电抗器，
- 使补偿容性电流为： $I_c = I_z + I_z \times \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$



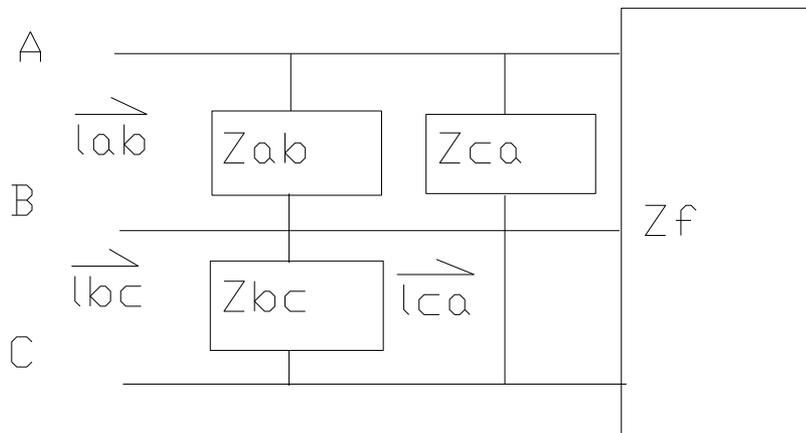
系统中谐波感性无功的去除



- 例如：5次谐波滤波器，LC谐振频率低于250Hz为236Hz，此时LC阻抗 Z 对250Hz呈微感性，而对50Hz呈容性，谐波滤波原理实际上变为分流原理，按照分流公式得知：当 $Z=Z_b$ 时谐波电流50%流入电网，
- 其余50%流入LC滤波器支路，当 $Z=25\%Z_b$ 时，谐波电流20%流入电网。
- 注意：流入电网的谐波电流与流入LC滤波器的谐波电流之和等于负载谐波电流，不产生谐波放大现象。
- 如果谐波滤波器的谐振点为270Hz,对5次谐波呈容性，那么将出现谐波放大现象。
- 电网谐波电流等于负载谐波电流加上滤波器电流，所以工程上谐波滤波器的谐振点应设计在低于所要滤除的谐波频率。

三相不平衡负载平衡化

- 在无零序电流的情况下，可采用分相补偿算法，使各相无功电流为零。使三相系统平衡化。
- 其中：电流 I 、 I_{bq} 、 I_{cq} 分别为电流 I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} 中的无功电流； Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 为无功元件。
- 当电流 I 为正值时， Z_{ab} 为容性元件；反之， Z_{ab} 为感性元件。
- 当电流 I_{bc} 为正值时， Z_{bc} 为容性元件；反之， Z_{bc} 为感性元件。
- 当电流 I_{ca} 为正值时， Z_{ca} 为容性元件；反之， Z_{ca} 为感性元件。
- 有零序电流时，可采用加装感性元器件的方法，进行平衡化。（根据实际情况，进行非标设计）



- 静态无功功率补偿电容柜
- 高压侧RLC滤波器对基波呈容性过补，利用电抗器式高漏抗变压器晶闸管调节
- 就地改变电容器及谐波治理补偿方式TFC

- 优点：造价低。
- 缺点：
 - a. 不是合负载急剧变化的工况；
 - b. 对谐波电流产生放大作用，增加电网负担
 - c. 电容器容易损坏。

利用电抗器式高漏抗变压器晶闸管调节

- 优点：

- a. 调节电感，电流变化平滑；
- b. RLC滤波器，滤波效果好；
- c. 无功补偿调节速度快。

- 缺点：

- a. 造价昂贵，不适合应用在低压系统；
- b. 产生高次谐波，增加了谐波滤波器的负担；
- c. 不能解决低压用户负载非对称问题；
- d. 不能解决低压用户的增容问题，将损节能不明显；
- e. 自身损耗大（5%~8%），有功换无功得不偿失；
- f. 系统谐波振荡问题（解决振荡是国际上的难题，目前只有增加系统阻尼损耗；
- g. 高压阀塔造成及维护困难。

动态无功补偿及谐波治理装置案例

- 山西建龙（海鑫钢铁集团）
- 江苏浩威新材料有限公司
- 扬州宏远电子有限公司
- 大同新铁科轨道科技有限公司
- 新疆宏远电子有限公司

结束语



我们对产品进行科学的规划是建立在广泛的征询用户意见及建议的基础之上的，我们产品的不断发展，离不开诸位的大力支持，上海坤友电气的产品及服务还有很多不足之处，我们真诚欢迎各位专家领导多提宝贵意见。

谢谢！