



单级功率因数校正 (PFC) 电路 工程化设计

1.1 功率因数 (PF) 的历史渊源

功率因数 (Power Factor, PF) 一词, 是电源工程师最为熟悉的一个名词, 基本上从刚接触电源伊始, 就会接触到 PF 这个名词。与之相对应的是, PF 的概念及意义, 却是让众多工程师疑惑的问题, 不管新手乃至经验丰富的工程师, 在此概念上都或多或少存在过困惑。本节希望正本清源, 理清 PF 这一概念, 同时希望纠正网络上众多资料中错误的概念及表述。

本书的读者至少在如下一些描述中遇到过令他们头痛的问题, 很多情况是在面试中被问到, 它们看起来是那么理所当然, 但实际回答时却无从下手:

问题 1 : PF 会大于 1 吗?

问题 2 : PF 有负数吗?

问题 3 : PF 与电路负载有关系吗?

问题 4 : 直流电也存在 PF 的概念吗?

问题 5 : PF 是表征电源的特性还是表征输入电网的特性?

问题 6 : PF 是政府与产品生产者 / 使用者之间的博弈吗? 即 PF 代表谁的立场? 或者说为什么对 PF 有要求?

问题 7 : PF 与电源电路拓扑结构有关系吗?

问题 8 : PF 与电源效率有关系吗? PF 高了, 效率会提高吗?

问题 9 : PF 和总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 成反比吗? (这一点后面有一小节专门会讨论到)

问题 10 : 为什么信息技术类设备在 75W 以上会要求 “PF” (而目前国内照明类产品却一般在 25W 以上要求 “PF” (注意: 此处的 PF 都加了引号))?

问题 11 : PF 和 PFC (Power Factor Correction, 功率因数校正) 的混淆 (众多资料混淆了二者的概念) ?

面对上述这些表面看似简单的问题, 我们还是一步步从源头出发, 拿起我们曾经忘记过的课本 (不需要很复杂的数学理论分析, 也不需要很高深的电路理论分析, 只需

要最简单的电路学或是电工学即可),有些电源行业从业者并不一定系统地学过电路分析等专业课程,但是这不妨碍我们的理解,在这里我们试图以一种较为简洁的方式来说明 PF 这一参数的意义和价值,为后面电源电路设计提供一定的理论基础。注意,本书不刻意去强调理论的重要性,因为本书的宗旨即是一本工程化研发笔记,如果过多着墨于理论分析,那就有悖于本书出版的目的,因为大量的公式和理论分析会让 80% 以上的工程技术人员望而却步,从而造成的结果是,一本书总是翻在前几页,而永远不会看完。在海量知识包围的今天,工程技术人员受到“快餐式”研发流程的影响,让他们花大量的时间在阅读理论分析上有点不太现实,所以在本书里,我们只讲最关键最必要的公式,也会把公式讲透。

从图 1-1 中可以看到,功率因数包括两个部分,一个称之为相移因数(这里用 $\cos\varphi$ 表示);一个称之为畸变因数。用数学公式表达为

$$\lambda = \cos\varphi \times \frac{1}{\sqrt{1+\text{THD}^2}} \quad (1-1)$$

注意,在抛出所有的问题之前,读者需要知道的是,PF 的符号是希腊字母 λ ,而不是 $\cos\varphi$ 。

诚如之前所述,读者对公式不太敏感,故我们仍以图形化来表示。

假设:对于从发电装置里出来的电压信号,我们默认将其作为基准,其波形是正弦曲线。在这里,我们定义如下:

相移因数 $\cos\varphi$ 被定义:固定在某一参考点下,电压与电流之间的相位差,即电流与电压不同步,这是从时序上去看,从图 1-2 看到可知,它是有正负向之分的。

$$\text{功率因数 (PF)} \lambda = \cos\varphi \times \frac{1}{\sqrt{1+\text{THD}^2}}$$

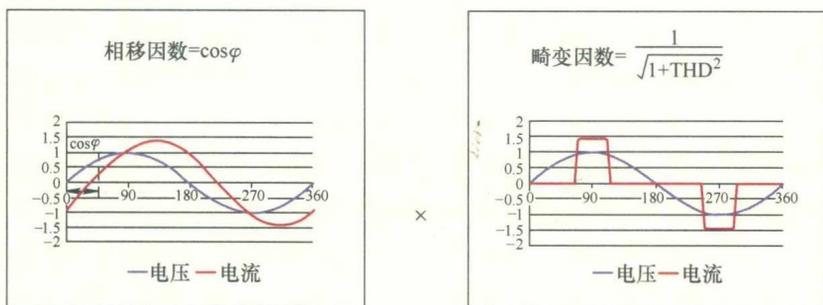


图 1-2 功率因数两个部分的图形化表示

功率因数



图 1-1 功率因数的两个部分

畸变因数被定义为电流与电压的波形形状不同,因为如前面设定,电压为完美的正弦曲线,但电流由于接在电网上的负载不同,导致汲取的电流波形形状与电压波形不同,这是从波形角度来看。

基于式(1-1)我们可以看到,相移因数,其值为 $-1\sim 1$ 。而畸变因数永远 ≤ 1 ,所以我们可以知道PF的数值范围为 $-1\sim 1$,不会超过1,这即回答了问题1。同时我们一般是从电网端去观察,所以PF同时也反映出设备接入电网后,电网受到的影响程度,所以PF是同时反映出电源和电网端的性能。

由于接入电网的负载有各种各样不同的形态,PF会受到负载的不同影响进而不同,一般有如下三种情况:

1. 纯阻性负载,即负载对相移没有影响,对畸变也不构成影响。典型负载如白炽灯泡,加热器等。

2. 纯无功元件(电容或是电感)负载,这只对相移产生影响,同样对畸变不构成影响。典型负载有电机类负载。

3. 非线性负载,是1与2的组合,这样即为我们通常见到的情况,这类负载不仅影响了相移,还导致了畸变的产生。典型负载如各类电子产品,如节能灯、电源类产品等。

仍旧以图形化来表征上述三类情况(见图1-3)。

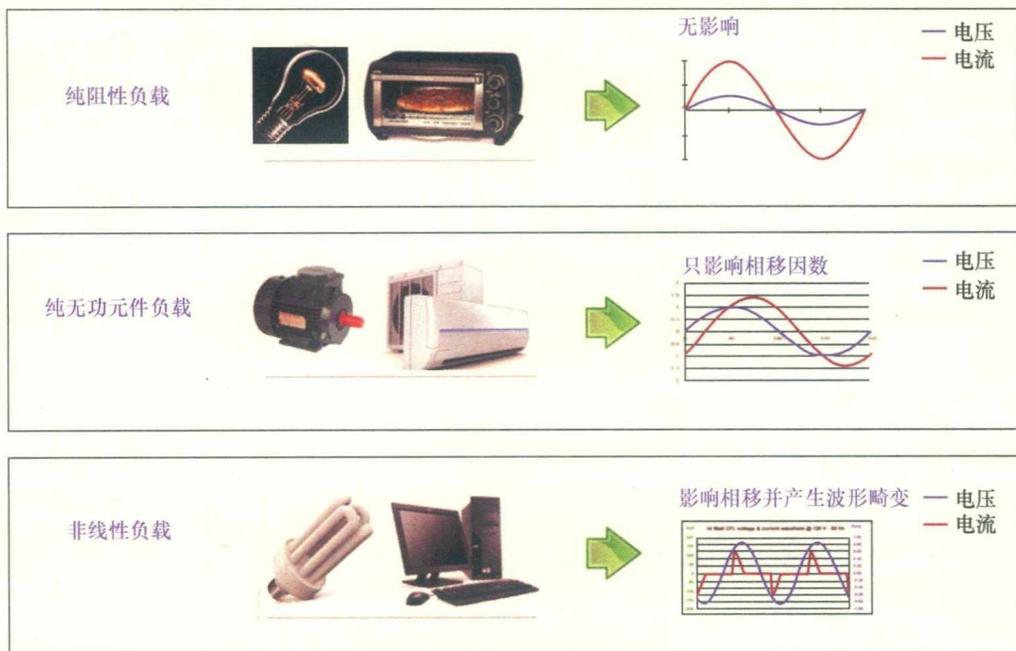


图 1-3 不同负载对 PF 的影响

不同负载下对应的 PF 结果如图 1-4 所示。

$$PF = \cos \varphi \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

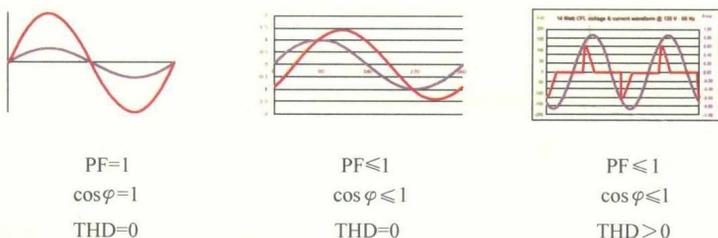


图 1-4 不同负载对 PF 的影响（图形化表示）

当读者看到这里的时候，应该可以回答上面提出的多个问题的其中几个了。

问题 1：PF 会大于 1 吗？

不会大于 1，从数值维度上看，PF 介于 0 到 1 之间，最大为 1，不会超过 1，测量出超过 1 的情况，一般是测试仪器出现了问题或测试方法有误，这里要说明的是，许多低端的 PF 测量仪器，由于受测试准确度和带宽的限制，测出来的 PF 出现超过 1 的情况，这对于输入电流为非标准正弦时，测试结果错误更为明显，所以要尽量选择高带宽（尽量涵盖更多次谐波检测的）仪器来进行 PF（以及 THD）测量。

问题 2：PF 有负数吗？

PF 是可以存在负数的，因为从公式中可以看到，相移这一项，电流如果超前于电压，即为负数，而畸变这一项永远不会为负，这里必须说明下，从本书涉及的产品角度来看，只考虑 PF 的绝对值，即我们常说的 PF 为 0 或正值，处于 0 到 1 之间。

问题 3：PF 与电路负载有关系吗？

有，上述图 1-4 中可以清楚地看到不同的实际应用负载会影响到 PF。

问题 4：直流电也存在 PF 的概念吗？

不存在，因为 PF 定义是在交流供电系统中，而且是以正弦信号作为参考。

再回到更复杂的两个问题：

问题 5：PF 是表征电源的特性还是表征输入电网的特性？

从定义来看，PF 是电源（或是其他负载）与电网共同依赖存在的一个参数，因为参考量即为电网电压，而从电网汲取的电流（不管大小、相位还是形状）却与负载相关。只是我们现在众多场合，以及众多教科书中将其表达简化了，默认电网及其形态是固有存在，而负载总是变化不可预知的，所以 PF 更多时候是用来表征电源（负载）本身。

问题 6：PF 是政府与产品生产者 / 使用者之间的博弈吗？即 PF 代表谁的立场？或者说为什么对 PF 有要求？

这是一个很有意思的问题，当各种标准条例出来后，政府（或者说是供电方）对消费者使用的产品 PF 值提出了要求，后面会详细分析当今全球主流市场 / 国家对 PF 的要求。为什么会出现这样的情况，这还仍然需要从 PF 的定义源头上去看。