# 78．如何认识交流电的功率？

在通有正弦交流电的电路中，电压 *u* 及电流 *i* 都随时间变化，某一瞬时消耗的电功率 *p* = *ui*，瞬时功率 *p* 也是变化的。与瞬时功率相比，更有实际意义的是一个周期内功率的平均值，即平均功率 *P*，它与电流的有效值 *I* 及电压的有效值 *U* 的关系是 *P* = *IU*cos*φ*（*φ* 是 *I* 与 *U* 的相位差）。在纯电阻电路中，电流 *I* 与电压 *U* 同相位，消耗的电功率 *P* = *IU*，在纯电感及纯电容电路中，电流与电压的相位差是 90°，因此消耗的电功率 *P* = 0。这时的电流称为无功电流，电能与磁场能或电场能相互转化而不被消耗。

某段电路如果通有恒定电流 *I*，两端电压 *U* 也为恒定值，消耗的电功率 *P* = *UI*，也是恒定的。但交流电路不同，电压 *u* 与电流 *i* 都是变量，瞬时功率随时间变化，更有实际意义的是一个周期时间内的平均功率。

## 一、瞬时功率与平均功率

某段交流电路两端的电压 *u* 与电流 *i* 都是时间 *t* 的函数，记作 *u*(*t*)和 *i*(*t*)，某瞬时消耗的功率 *p* 也是时间 *t* 的函数，即 *p*(*t*) = *u*(*t*)·*i*(*t*)，这是交流电路与恒定电流电路很大的不同。

交流电路与恒定电流电路另一个不同是，恒定电流电路中只有电阻起作用，而交流电路中除了电阻以外还有电感和电容起作用。在纯电阻电路中，*u* 与 *i* 总是同相位，因此，除了 *u* 与 *i* 都等于零的点以外，瞬时功率 *p*(*t*) 总是正值，如图 1（a）所示。而在纯电感和纯电容电路中，*u* 与 *i* 的相位都相差 90°，因此瞬时功率 *p*(*t*) 有时是正值，有时是负值，交替变化，如图 1（b）和 1（c）所示。

对于如图 1（a）所示的纯电阻电路，我们计算一个周期时间内消耗的总电能 *W*，它等于瞬时功率 *p* 在一个周期时间内的积分，即

*W* = = = = *U*m*I*m*T*

它一个周期时间内的平均功率 *P* = = *U*m*I*m。

（a）纯电阻电路

*u*

*i*

*t*

*O*

图 1 三种电路的电压 *u*、电流 *i* 及瞬时功率 *p*

*p*

（b）纯电感电路

*u*

*i*

*t*

*O*

*p*

（c）纯电容电路

*u*

*i*

*t*

*O*

*p*

对于图 1（b）和图 1（c）所示的电路，一个周期的时间可以分为四段，两段时间做正功，两段时间做负功，正功与负功的绝对值相等，做的总功为零。采用与上面类似的积分的方法求得的结果也相同。对于如图 1（b）所示的纯电感电路，第一个 *T*/4 时间段做正功，即消耗电源的能量而转化为磁场能，第二个 *T*/4 时间段做负功，即磁场能又转化为电能返还给电源，以后重复上面的过程，在电路中形成的往复变化的电流使得能量在电源和线圈的磁场间转化，但总的来说并不消耗电源的能量，因此把这种电流称为无功电流。同样，对于如图 1（c）所示的纯电容电路，从电压 *u* = 0 时开始，第一个 *T*/4 时间段做正功，即消耗电源的能量而将其转化为电场能，第二个 *T*/4 时间段做负功，即电场能又转化为电能返还给电源，以后重复上面的过程，在电路中形成的往复变化的电流使得能量在电源和电容器的电场间转化，这也是无功电流。

## 二、交流电的平均功率与有效值

前面我们已经推导出，对于纯电阻电路，一个周期时间 *T* 内消耗的平均灼功率 *P* = *U*m*I*m，如果改用直流电源，两端电压为 *U*，通过的电流为 *I*，同样在时间 *T* 内消耗的电功率与此相等，即 *UI* = *U*m*I*m，则 *U* = *U*m，*I* = *I*m，*U* 和 *I* 分别为电压和电流的有效值。

一般情况下，一段交流电路的两端电压 *u* 与电流 *i* 的相位既不相同也不相差 90°，而是相差一个 *φ* 角，*φ* 大于 0 而小于 90° 的称为电感性电路，*φ* 小于 0 的称为电容性电路。设某段电路两端电压为 *u*(*t*) = *U*msin*ωt*，通过的电流为 *i*(*t*) = *I*msin(*ωt* + *φ*)，则该电路消耗的电功率 *p*(*t*) = *u*(*t*)·*i*(*t*) = *U*msin*ωt*·*I*msin(*ωt* + *φ*)。

利用三角函数的积化和差公式，得 *p*(*t*) = *U*m*I*m·[cos*φ* – cos(2*ωt* + *φ*)]。

则一个周期时间内平均消耗的电功率 = = *U*m*I*mcos*φ*。

由于 *U* = *U*m，*I* = *I*m，则 = *UI*cos*φ*。一般说的交流电消耗的电功率，指的就是一个周期时间内的平均电功率，它也代表着一段较长时间内的平均功率，再省去平均号，即得 *P* = *UI*cos*φ*，这就是用有效值表示的交流电电功率的表达式，式中 *φ* 是电压与电流间的相位差。

## 三、有功电流与无功电流

用交流电压表和交流电流表测量所得的是交流电压的有效值 *U* 和交流电流的有效值 *I*，设它们的相位差为 *φ*，图 2 表示一个电容 *C* 与电阻 *R* 的并联电路的电压与电流的相位关系：电压 *U* 与总电流（干路电流）*I* 的相位差为 *φ*，流过电阻支路的电流 *I*R 与电压 *U* 同相，称为有功电流；流过电容支路的电流 *I*C 比电压 *U* 超前 90°，称为无功电流。要注意的是，干路电流 *I* ≠ *I*R + *I*C，因为 *I*R 与 *I*C 的相位不同。

*O*

*I*C

*U*

*I*

*I*R

*φ*

*I*

*I*R

*R*

*U*

*I*C

*C*

~

图 2 *R*–*C* 并联电路中的电流和电压

图 3 表示一个电容 *C* 与电阻 *R* 串联的电路，电流 *I* 与总电压 *U* 相位相差 *φ*。在电阻 *R* 中流过的电流与它两端电压同相，是有功电流；在电容 *C* 中流过的电流与它的两端电压相位差 90°，是无功电流。之所以称它为无功电流，是因为该电流不消耗电源的能量，只是使得电源的电能与电容器的电场能相互转化。同样要注意，总电压 *U* ≠ *U*R + *U*C，因为 *U*R 与 *U*C 的相位不同。

*O*

*U*C

*U*

*I*

*U*R

*φ*

*U*C

*U*R

*R*

*U*

*I*

*C*

~

图 3 *R*–*C* 串联电路中的电流和电压

## 四、有功功率、无功功率及功率因数

在上面如图 2 所示的 *R*–*C* 并联电路中，电压 *U* 与电流 *I* 的相位差为 *φ*，消耗的电功率 *P* = *UI*cos*φ*，称为有功功率，也等于电压 *U* 与有功电流 *I*有功 的乘积，即 *P* = *UI*有功，它就是单位时间内电流通过电阻而产生的热量。电压 *U* 与无功电流 *I*无功 的乘积被称为无功功率，即 *P*无功 = *UI*无功。*U* 与 *I* 的乘积被称为视在功率，用 *S* 表示，即 *S* = *UI*。

上面如图 3 所示的 *R*–*C* 串联电路，与如图 2 所示的并联电路有所不同，流过电阻的有功电流 *I*有功 与流过电容的无功电流 *I*无功 的大小和相位都相同，但电阻两端的电压 *U*R 与电容两端的电压 *U*C 的相位不同，造成总电压 *U* 与电流 *I* 的相位差为 *φ*，消耗的电功率 *P* = *UI*cos*φ*，称之为有功功率，也等于电阻两端电压 *U*R 与有功电流 *I*有功 的乘积，即 *P* = *U*R*I*有功，它就是单位时间内电流通过电阻而产生的热量。电压 *U*C 与无功电流 *I*无功 的乘积被称为无功功率，即 *P*无功 = *U*C*I*无功。

为了区别，有功功率的单位用 W 或 kW（瓦或千瓦），而视在功率的单位用 V·A或 kV·A（伏安或千伏安），无功功率的单位则用乏或千乏。变压器的铭牌上额定容量一项上使用的单位就是 kV·A，这是因为它的负载一般都不是纯电阻，有功功率在视在功率中占多大比重无法确定，但变压器的额定电压是一定的，而允许通过的最大电流也是确定的，这就决定了只能控制最大视在功率。

如图 4（a）所示是电阻 *R*、电感 *L* 和电容 *C* 的串联电路，以电流 *I* 为基准，电阻两端的电压 *U*R 与 *I* 同相，电感两端电压 *U*L 比 *I* 超前 90°，电容两端电压 *U*C 比 *I* 落后 90°，如图 4（b）所示。由于 *U*L 与 *U*C 反相，相互抵消一部分，超前于电流 I 的电压为（*U*L − *U*C），总电压的大小 *U* = ，它与电流 *I* 的相位差 *φ* = arctan。

*O*

*U*L − *U*C

*U*L

*U*C

*U*

*I*

*U*R

*φ*

（b）

（a）

*U*L

*U*C

*U*R

*R*

*U*

*I*

*L*

*C*

~

图 4 *R*–*L*–*C* 串联电路中的电流和电压

由于视在功率 *S* = *UI*，而有功功率 *P* = *UI*cos*φ*，视在功率 *S*、有功功率 *P*、无功功率 *P*无功 三者的关系可用一个直角三角形表示，如图 5 所示，*P* = *S*cos*φ*，*P*无功 = *S*sin*φ*，而 = cos*φ*，cos*φ* 称为功率因数，显然，无功功率越少，功率因数越大，即能量的利用率越高。

图 5 功率三角形

*S*

*P*无功

*P*

*φ*

无功电流的存在，表面上看起来不消耗电源的能量，但实际上无功电流过大是非常有害的：一方面，它使得发电机产生的电流不能被有效地利用，而白白地做无用功；另一方面，无功电流反复流过输电线，而输电线有电阻，这样也要消耗能量，因此提高功率因数在实际中有重大意义。实际的交流电路中，电感性负载占多数，这与电动机等在生产与生活中被广泛使用有关，而它们都是电感性负载，因此电路中的电压总是超前于电流，提高功率因数的方法就是在电路中增加电容性负载，使得（*U*L − *U*C）的值减小，从而提高了功率因数，一般应该控制功率因数在 0.9 以上。

## 五、有功电阻、无功电抗

感抗 *X*L 和容抗 *X*C 合称电抗 *X*，电抗 *X* 和电阻 *R* 合称阻抗 *Z*，

*Z* = =

视在功率 *S* = *UI* = *I*2*Z*，有功功率 *P* = *UI*cos*φ* = *I*2*Z*cos*φ* = *I*2*R*，无功功率 *P*无功 = *UI*sin*φ* = *I*2*Z*sin*φ* = *I*2*X*。不难看出，阻抗 Z、电抗 X、电阻 R 三者的关系可以用一个直角三角形表示，如图 6 所示，称为阻抗三角形。它与如图 5 所示的功率三角形是相似三角形，= cos*φ*，cos*φ* 是功率因数。

图 6 阻抗三角形

*Z*

*X*

*R*

*φ*

一般把 *R* 称为有功电阻，把 *X* 称为无功电抗。

对于如图 4 所示的电路（也包括图 2 和图 3 的电路）有两点需要特别注意：

①这是一个等效电路，不能把图中的 *L* 理解为现实中的电感线圈，也不能把图中的 *C* 理解为现实中的电容器，图中的 *R*（有功电阻）理解为现实中的定值电阻。电感线圈是由导线绕制而成的，不可能没有电阻，因此流过线圈的电流也要消耗电能，即包含电阻成分，另外，线圈一般都有铁芯，通有交流电时它被反复磁化，也要消耗电能（称为磁滞损耗），这也等效于串联了一个电阻；电容器也是如此，它一般会有少量的漏电流存在，也相当于串联了一个电阻，另外，电容器两极板间一般充有电介质，通有交流电时，电介质被反复极化，也要损牦一些能量（与磁滞现象类似），这也等效于串联了一个电阻。图中的电阻 *R* 是包含了所有消耗电能的成分，比串联在电路中的定值电阻的阻值要大。

②交流电路中的有功电阻与恒定电流电路中的电阻还有一个显著的不同：恒定电流流过电阻，电能转化为内能，即生成焦耳热，而交流电路中的有功电阻，消耗的电能不一定转化为内能，也可以转化为其他形式的能量，只要是消耗了电能，就属于有功功率，相应的就是有功电阻。例如，在交流电动机中，交流电在定子线圈中流过，转子中产生感应电流，与定子中产生的磁场相互作用而转动，从而消耗了电源的电能而转化为机械能，对于流过定子线圈的电流而言，它有相当大一部分是有功电流，相应地，定子线圈相当于一个有功电阻与一个无功电感串联。