

文章编号:1000-582X(2008)04-0413-04

# 电网畸变下功率因数的定义

李绍铭,刘红锐

(安徽工业大学 电气信息学院,安徽 马鞍山 243002)

**摘要:**提出一种适应电网电压畸变下的功率因数定义,引入电压波形因数、电流波形因数和相位因数共同决定负载的功率因数,克服了原功率因数定义下电网畸变时,纯电阻功率因数不为1的不足。定义了负载吸收转化的电功率占电网提供总视在功率的百分比,真实地反映了电网存在谐波时负载对电功率的吸收转化情况。在电网电压不发生畸变时,能很好地兼容现有的功率因数。

**关键词:**电力系统;畸变电网;功率因数

中图分类号:TM711

文献标志码:A

## Power factor definition under power network deformation

LI Shao-ming, LIU Hong-rui

(School of Electrical Engineering & Information, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, P. R. China)

**Abstract:** A new definition of power factors based on network voltage deformation was proposed. Three parameters—voltage waveform, the current waveform and phase—were introduced to express the power factors. Thus, it can successfully overcome the defects of the common methods, which often induce that the power factors of pure resistance cannot reach one. The transform percent of loading absorption in the amount of apparent power was defined. This definition well reflected electric loading absorption the situation power under network deformation and had good compatibility with current power factors when no voltage distortion was present.

**Key words:** power system; network deformation; power factor

随着非线性负荷的日益增加,特别是一些大功率变流设备和电弧炉的大量应用,导致电网中产生大量的高次谐波,进而引起电网电压电流波形发生严重畸变<sup>[1]</sup>。谐波电流和电压产生的谐波功率,既增加了电能损耗,又污染了电网,使电能质量下降,功率因数降低。现有的功率因数是基于电网电压为正弦情况下定义的: $PF = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1$ 。很明显,当负载为纯电阻时,畸变的电压必然也会产生同样畸变的电流,从而使纯电阻的功率因数  $PF = \frac{I_1}{I} < 1$ ,这显然不符合常理。因此有笔者对畸变电网下的功率因数

进行分析和研究,提出一种新的更为科学合理的功率因数的定义,使功率因数真正反映畸变电网下功率的转换情况。

### 1 现有功率因数的定义

1)对于正弦电路,电路的有功功率就是平均功率,即

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} ui d(\omega t) = UI \cos \varphi \quad (1)$$

视在功率  $S = UI$ , 功率因数为

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (2)$$

收稿日期:2007-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50407017);安徽省教育厅科技资助项目(KJ2008B043)

作者简介:李绍铭(1965-),男,安徽工业大学副教授,主要从事电力电子技术应用,自动控制等方向研究,

(Tel)0555-2311331;(E-mail)lism@ahut.edu.cn.

2)非正弦电路下,是在不考虑电压畸变,即电压为正弦波,而电流为非正弦波的情况下定义的功率因数。设正弦波电压有效值为  $U$ ,畸变电流有效值为  $I$ ,基波电流有效值及与电压的相位差分别为  $I_1$  和  $\varphi_1$ ,这时有功功率为  $P=UI_1 \cos \varphi_1$ ,功率因数为<sup>[2]</sup>

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \nu \cos \varphi_1, \quad (3)$$

式中: $\nu = I_1/I$ ,即基波电流有效值和总电流有效值之比; $\cos \varphi_1$  为位移因数或基波因数。

式(3)为现阶段大家普遍接受的功率因数的定义,它是在忽略电压畸变情况下得出的。但当电压畸变时,即便是纯电阻负载,由于  $I_1 < I$ ,所以功率因数也小于 1。一方面电网谐波从一定程度上影响了纯电阻负载的性能,另一方面现定义下又使其功率因数低于 1,显然有失公允。

## 2 畸变电网下功率因数的新定义

设电网电压  $u$  和电流  $i$  均有畸变,分别表示为

$$u = \sqrt{2}U_1 \cos \omega t + \sum_{n=2}^N \sqrt{2}U_n \cos n\omega t; \quad (4)$$

$$i = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^N \sqrt{2}I_n \cos(n\omega t - \varphi_n)。 \quad (5)$$

式中: $U_1, I_1$  分别为基波电压电流的有效值; $U_n, I_n$  分别为  $n$  次谐波电压电流的有效值; $\varphi_1$  为基波电压和电流的相位差; $\varphi_n$  是  $n$  次谐波电压和电流的相位差。

有功功率是瞬时功率在一个周期内的平均值,只有同频的电压、电流才能产生有功功率,即:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ui = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum_{n=2}^N U_n I_n \cos \varphi_n。 \quad (6)$$

此时的视在功率为  $S = UI = \sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2} \times \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}$ ,

其中  $U, I$  分别为电压、电流总有效值。

定义  $\lambda_n = \frac{I_n^2}{I^2}, \eta_n = \frac{U_n^2}{U^2}$ ,则满足

$$\sum_{n=0}^N \lambda_n = 1, \sum_{n=0}^N \eta_n = 1。 \quad (7)$$

则功率因数  $PF$  可定义为

$$PF' = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=0}^N U_n I_n \cos \varphi_n}{UI} = \frac{\sum_{n=0}^N \sqrt{\eta_n} \times U \times \sqrt{\lambda_n} \times I \times \cos \varphi_n}{UI} = \sum_{n=0}^N \sqrt{\lambda_n \eta_n} \cos \varphi_n。 \quad (8)$$

## 3 新定义的解释

1)若负载为纯电容、电感,则  $\cos \varphi_n = 0$ ,所以  $PF' = 0$ 。

2)若负载为纯电阻,则  $\sqrt{\lambda_n} = \sqrt{\eta_n}$ ,并且  $\cos \varphi_n = 1$ 。由式(7)可知,此时功率因数  $PF$  为

$$PF' = \sum_{n=0}^N \lambda_n \cos \varphi_n = \sum_{n=0}^N \lambda_n = 1。$$

3)若电压、电流均无畸变时, $\lambda_1 = 1, \lambda_n = 0 (n = 0, 2, 3, \dots)$ ;  $\eta_1 = 1, \eta_n = 0 (n = 0, 2, 3, \dots)$ ;此时  $PF' = \sqrt{\lambda_1 \eta_1} \cos \varphi_1 = \cos \varphi_1$ ,与式(2)完全一致。

4)若电压无畸变,即  $\eta_1 = 1, \eta_n = 0 (n = 0, 2, 3, \dots)$ ;此时  $PF' = \sqrt{\lambda_1 \eta_1} \cos \varphi_1 = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1$  与式(3)完全一致。说明电压无畸变时,现功率因数只是新定义功率因数的一种特殊情况,这一点可以通过图 1 的仿真实验得到验证。

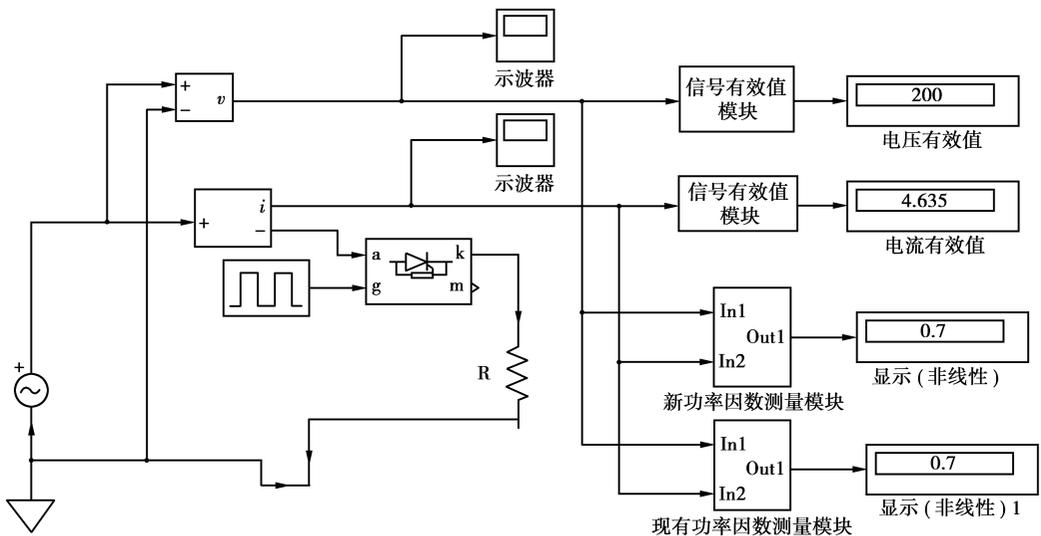


图 1 电压无畸变时 2 种功率因数的对比仿真电路  
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

通过 MATLAB-SIMULINK 仿真<sup>[3-4]</sup> 可得  $PF = PF' = 0.7$ 。可见电压是标准正弦波,电流发生畸变时,新定义的功率因数与现有的功率因数是一致的。

5) 当电压、电流均畸变时,2 种功率因数的比较:

① 负载为非线性时

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{+\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega t),$$

$$i(t) = \frac{I_m}{2} + \frac{2I_m}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{+\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega t),$$

其中  $U_m, I_m$  分别为电压、电流的幅值。

$$PF' = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{+\infty} \sqrt{\lambda_n \eta_n} \approx 0.816,$$

$$\text{而 } PF = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \frac{\frac{2}{\pi} I_m}{\frac{\sqrt{2}}{2} I_m} \approx 0.9, \text{ 此时 } PF > PF'.$$

② 负载为线性时

$$\text{电压 } u(t) = 200\sqrt{2} \times$$

$$\left[ \cos(\omega t) + \frac{1}{3} \cos(3\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) \right],$$

负载为  $Z=R+jX$ , 其中  $R=30$ , 基波时  $X=10$ , 仿真电路如图 2 所示。通过 MATLAB-SIMULINK 仿真可得

$$PF' = \sum_{n=1,3,5,7} \sqrt{\lambda_n \eta_n} \cos \varphi_n = 0.9095,$$

$$PF = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = 0.9141, \text{ 此时 } PF > PF'.$$

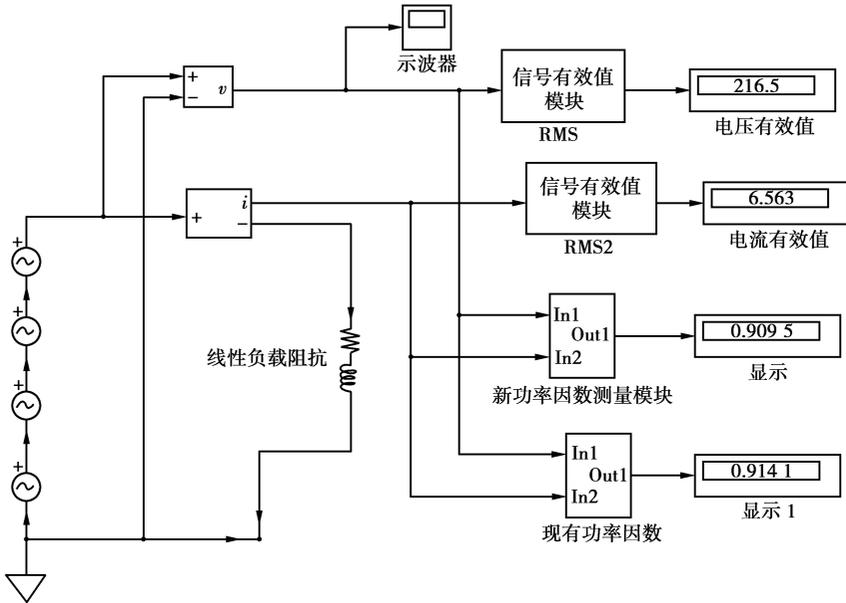


图 2 电压电流均畸变时 2 种功率因数的对比仿真电路

通过上面的分析可知,纯电容、纯电感负载时存在  $PF = PF' = 0$ ; 电压无畸变时任何负载的功率因数都存在  $PF = PF'$ ; 电压畸变时,根据负载的不同要分 2 种情况:纯电阻负载时  $PF' = 1, PF < 1$ ; 其他负载(纯电阻负载除外)时,  $PF > PF'$ 。

可见在电压畸变的情况下 2 种定义的结果相差较大。在电网畸变时,只有纯电阻负载的能量转换率为 1,而其他负载的能量转换率都会降低。可见,由基波能量转换来的谐波电功率降低了电力负载对基波电功率的吸收和转换。现有功率因数的定义是在忽略电压畸变的理想条件下得出的,不能真实地反映负载对能量的转换状况<sup>[5-6]</sup>。

$$\text{新定义中, } \frac{I_1}{I} = \sqrt{\lambda_1}, \frac{I_n}{I} = \sqrt{\lambda_n}, \text{ 所以 } \frac{I_1}{I_n} = \frac{\sqrt{\lambda_1}}{\sqrt{\lambda_n}},$$

即  $I_n = \frac{I_1 \sqrt{\lambda_n}}{\sqrt{\lambda_1}}$ 。将其代入到式(8)得

$$PF' = \sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{\lambda_n \eta_n} \cos \varphi_n = \frac{I_1}{I} \frac{\sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{\lambda_n \eta_n} \cos \varphi_n}{\sqrt{\lambda_1}}.$$

现有功率因数  $PF = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1$ , 新定义的功率因

数是用  $\frac{\sum_{n=1}^{+\infty} \sqrt{\lambda_n \eta_n} \cos \varphi_n}{\sqrt{\lambda_1}}$  来修正  $\cos \varphi_1$ , 从而在电压畸变情况下的功率因数更具合理性和准确性<sup>[7]</sup>。

#### 4 新功率因数的检测思路

利用检测谐波的方法来确定新功率因数中的 3

个要素( $\sqrt{\lambda_n}, \sqrt{\eta_n}, \cos \varphi_n$ ), 基于快速傅立叶变换的谐波检测是当今应用最多也是最广泛的一种方法。模拟信号经采样、离散化数字序列信号后, 经微型计算机进行谐波分析和计算, 得到基波和各次谐波的幅值和相位<sup>[8]</sup>, 确定新功率因数的3个要素, 计算出电压畸变下的功率因数。通过 MATLAB-SIMULINK 工具箱的模块分别搭建了新功率因数和现有功率因数的测量模块, 仿真结果证明它能够快速并准确地计算出新功率因数和现有功率因数的数值, 这样就实现了新的功率因数的实时检测。文献[4]对畸变电网下功率因数也作了较深入的探讨, 但文献[4]中讨论的功率因数既可能小于、等于原功率因数, 还可能大于原功率因数, 且不易实现工程检测。这里定义的功率因数当电压畸变时只在纯电阻负载下大于现功率因数且为1, 其他负载下均小于现功率因数, 且容易实现工程测量。

## 5 结 语

在现有的有功功率、视在功率定义的基础上讨论了畸变电网下的功率因数新定义, 现有的功率因数可看作是定义的一个特例, 新定义的功率因数与现有功率因数可以兼容, 但适用范围更宽广, 并且工程上容易实现。在电网电压畸变情况下, 新定义的功率因数保证了线性纯电阻负载的功率因数为1; 纯容性、纯感性负载的功率因数为0; 其他负载的功率因数介于0~1之间。新定义的功率因数中包含了畸变电流、电压和相位角, 这3个量同时决定了功率因数的大小。新定义的功率因数更能如实反映畸变电网下功率因数的真实含义, 对其测量可以工程实现。

### 参考文献:

[1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版

社, 2002.

- [2] 凌志斌, 邓超平, 叶芑生. 单相任意周期波形系统中功率因数定义的探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 39-43.  
LING ZHI-BIN, DENG CHAO-PING, YE PENG-SHENG. The discussion on power factor definition in single phase system with arbitrary waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 39-43.
- [3] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 张学武, 闫萍. 电力系统分析及仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(9): 195-199.  
ZHANG XUE-WU, YAN PING. Harmonics analysis and simulation study on power system[J]. Computer Simulation, 2003, 22(9): 195-199.
- [5] 刘申明. 电力系统谐波对电能计量的影响[J]. 仪表技术与传感器, 2005(11): 57-58.  
LIU SHEN-MIN. Power measured infection caused by power system harmonics[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005(11): 57-58.
- [6] 周莉, 刘开培. 电能计量误差分析与电能计费问题的讨论[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 63-68.  
ZHOU LI, LIU KAI-PEI. Error analyzing for electric metering and discussion about pricing of electric energy[J]. Transactions of China Electrometrical Society, 2005, 20(2): 63-68.
- [7] 陈文光, 唐少农. 功率因数的概念及测试方法探讨[J]. 电气电子教学学报, 2002, 24(10): 73-75.  
CHENG WEN-GUANG, TANG SHAO-NONG. The discuss of power factor's concept and measure[J]. Journal of IEEE, 2002, 24(10): 73-75.
- [8] 范春菊, 郁惟镛. 功率因数的实时精确测量方案探讨[J]. 继电器, 2003, 31(7): 47-49.  
FAN CHUN-JU, YU WEI-YONG. Discussion of accurate measurement scheme of power factor[J]. Relay, 2003, 31(7): 47-49.

(编辑 侯 湘)