

非正弦和不对称负载情况下的功率流向和计费标准

王葵

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 电力系统谐波和不平衡负载增长迅速,影响了电度表的计量,导致了计量电费的不合理现象。若以有功功率的积分为电度量,将造成供电部门的电费损失,这是由于非线性和不平衡负载向系统倒送谐波和非正序功率影响计量以及这些功率在系统中流通增加线损所致。同时,不产生谐波的线性用户却受到谐波和不平衡电流的影响。该文表明,在单相系统中,以基波功率的积分代替全功率的积分作为计量标准,将会消除这两方面的不利影响。在三相系统中,以正序基波功率的积分作为计量标准,同样可以消除这两方面的不利影响。

关键词: 电力系统; 电能质量; 计费; 非正弦; 不对称; 谐波; 有功功率

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)12-0006-04

0 引言

按照电量的定义,供电部门应以下式计量电量

$$W = \int_0^t p \cdot dt \quad (1)$$

这里 p 是有功功率, t 是计量时间。由于谐波电压和谐波电流会带来测量误差,所以应该深入研究一下计量的标准问题。

若要回答这样一个问题,“如果电能是在非正弦和三相不平衡情况下传输,功率的积分能提供电能计量的正确数据吗?”在非正弦和三相不平衡的系统中,这个问题变得十分复杂。有时谐波和/或负序分量功率不能转化成有用的电能,而只能使电机发热。比如,二次谐波会削弱正向转矩,造成温升。谐波和不对称电流在系统中的流通,对电力设备(发电机、变压器、换流装置、削弧线圈、电机等)产生不利影响^[2],同时增加了线损,加大了供电成本,使供电部门遭受损失。“有功”和“有用的功”只在正弦对称系统中是等价的概念,而在非正弦和不对称系统中却不是这样。

居民生活区,电平车等的充电电池^[3],它充电时的功率相当于或高于一户居民用电功率,每月上百度的谐波电量从单相供电网络中传输,在三相系统中造成了严重的不平衡。

计量技术的提高是合理计费的基础,基于数字信号处理技术的新型“智能”电度表应具有区分基波功率和谐波功率的智能,而不是简单的计量功率 p 和它的积分。

1 算例

图 1 中同一电源供电的 A、B 两用户,消耗功率同为 $p = 5.0 \text{ kW}$ 。

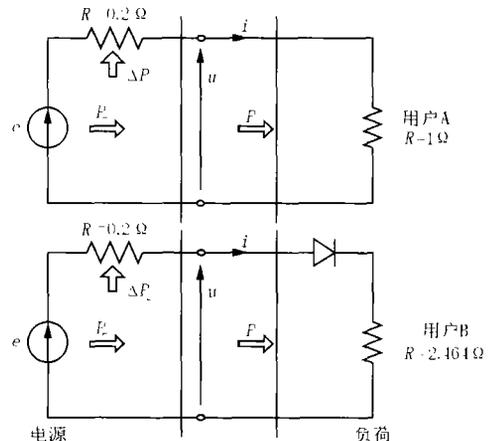


图 1 两电路具有相同负荷功率

Fig 1 Two circuits with the same active power

为了能清楚地说明问题,假定电源具有高内阻 0.2Ω ,电源电势 e 为 $E = 120 \text{ V}$,由于 B 电路中电压电流是非正弦的, i 和 u 用来表示它们的有效值。功率损失 p_s 和负载端的视在功率 $S = i \cdot u$ 列在表 1 中。

表 1 图 1 电路分析结果

Tab 1 Analysis results for circuits shown in Fig 1

用户	u / V	i / A	S / VA	P_s / W	P_e / W
A	45.05	111.00	5.000	406	5.406
B	70.07	110.45	7.810	1.000	6.000

虽然 A、B 两用户消耗功率同为 $p = 5 \text{ kW}$,交费相同,但在 B 电路中供电部门发出的功率为 $p_e =$

6.0 kW, 而 A 电路中供电部门发出的功率却只有 $p_e = 5.4 \text{ kW}$ 。供电成本增加 $(p_e - p_s) = 594$ 。

2 单相电路非线性负载的有功流向

以电路 B 为例, 说明单相电路非线性负载下的有功流向。若电源电势 e 为

$$e = 120\sqrt{2} \sin \omega t$$

则负载电流平均值 (直流分量) 为 $I_0 = 45.05 \text{ A}$, 各次谐波电流有效值定义为

$$I_n = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_0^T i(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (2)$$

相当于

$$I_1 = 50.00 e^{-j/2} \text{ A}, I_2 = 21.22 e^j \text{ A}, I_4 = 4.25 e^j \text{ A}$$

$$I_6 = 1.82 e^j \text{ A}, I_8 = 1.01 e^j \text{ A}, I_{10} = 0.64 e^j \text{ A}$$

负载电压平均值 (直流分量) 为 $U_0 = -9 \text{ V}$, 各次谐波电流有效值为:

$$U_1 = 110.0 e^{-j/2} \text{ V}, U_2 = 4.24 e^j \text{ V}, U_4 = 0.85 e^j \text{ V}$$

$$U_6 = 0.36 e^j \text{ V}, U_8 = 0.20 e^j \text{ V}, U_{10} = 0.13 e^j \text{ V}$$

各次谐波功率定义为

$$p_n = \text{Re}\{U_n I_n^*\} \quad (3)$$

计算得:

$$p_0 = -405.2 \text{ W}, p_1 = 5500.0 \text{ W}, p_2 = -90.2 \text{ W},$$

$$p_4 = -3.6 \text{ W}, p_6 = -0.7 \text{ W}, p_8 = -0.2 \text{ W}$$

各次谐波功率之和为 $\sum p_n = 5000.3 \text{ W}$, 当计入足够多次谐波功率后, 应为 $p = 5000.0 \text{ W}$ 。除了基波功率, 各次谐波功率都是负值。各次谐波功率都是从负载流向电源。负载是谐波源, 谐波功率消耗在电源电阻 R_s 上。从负载流向电源的谐波功率等于

$$p_h = -(p_0 + p_2 + p_4 + \dots) = 500 \text{ W}$$

这个功率是有电源传送至负载的基波功率转换而来的, 基波功率 p_1 比负载有功功率 p 高出 p_h , 则

$$p_h = p_1 - p = R_s I_h^2 \quad (4)$$

这里 I_h 表示谐波电流有效值。传输基波功率 p_1 带来线路有功损耗增加

$$p_1 = R_s I_1^2 \quad (5)$$

总有功损耗 P_s 可以写成

$$P_s = p_1 + p_h = R_s I_1^2 + (p_1 - p) \quad (6)$$

公式 (4)、(5)、(6) 可用图 2 描述, 图 2 表明了单相电路非线性负载的有功流向。

当线路电阻 R_s 已知, 应用公式 (6) 可以计算线路的有功损耗, 而不需要进行富氏变换。

当测量到 I_1 、 p_1 、 p 和负载电流有效值 i , 也

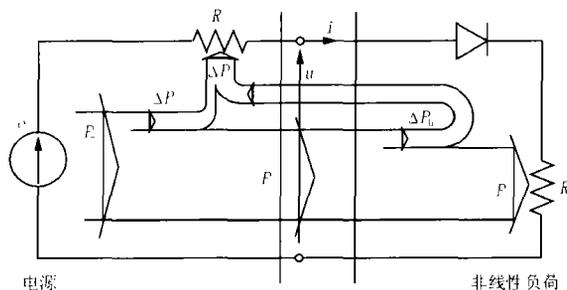


图 2 有功功率流图

Fig 2 Flow chart of the active power

可以计算线路的电阻 R_s , 因为线路的电阻 R_s 满足下式:

$$R_s I_h^2 = p_h \quad (7)$$

并且

$$I_h^2 = i^2 - I_1^2 \quad (8)$$

应用公式 (4) 有

$$R_s = \frac{p_1 - p}{i^2 - I_1^2} \quad (9)$$

3 讨论

公式 (4) 表明负载端测量的基波功率 p_1 包括负载有功功率 p 和谐波损耗 p_h 两部分。若以基波电量 W_1 代替电量 W 作为计费标准, 供电部门的损失将会减少。

$$W_1 = \int_0^T p_1 \cdot dt \quad (10)$$

公式 (10) 提供的基波电量 W_1 不仅包括用户从系统中取用的电量, 而且包括非线性用户造成的谐波线路损耗。许多文献提出采用这种计费方法^[4]。

显然, 线性负载用户 A 计费 $W = 5.0$, 而实际电源送出功率 $W_e = 5.406$, 系数为

$$k_d = \frac{W_e}{W} = \frac{p_e}{p} = 1.0812 \quad (11)$$

若非线性用户 B 是以 $W_1 = 5.5$ 计费, 以同样的系数相乘得:

$$W = 1.0812 \times 5 = 5.95 \text{ kWh}$$

与电源送出功率 $W_e = 6.0$ 几乎相等。这样供电部门的损失又将会减少。进一步考虑一下, W_e 与 W 的差别从何而来, 这是由于非线性用户不仅产生谐波损耗 p_h , 而且增加了基波功率传输带来的损耗, 即增加了 p_1 。

还有一种计费方案, 就是仍然用电量 W 计费, 另外加入谐波损耗部分。

谐波电量 W_h 为

$$W_h = \int_0^t (p_1 - p) dt \quad (12)$$

考虑到谐波对配网和线性用户的危害,电量 W_h 的电价应高于电量 W 的电价。电费 K 为

$$K = kW + K_h W_h \quad (13)$$

若电量 W_h 的电价应等于电量 W 的电价,则

$$K = kW_1 \quad (14)$$

电费 K_c 正比于电量 W_1 。

$$K_c = k_c W_1 \quad (15)$$

实际系统当中, p 和 p_1 差别不像例题当中那样大,例题选择的电路和电路参数在实际系统中很少存在,文献 [5] Arseneau 对工业负荷所测的结果, p 和 p_1 的差仅为 (0.2 ~ 2.9)% 的基波功率。测量的最大电流谐波扰动 i_h / I_1 为 78%。在居民负载的情况下,扰动就明显的低了,文献 [6] 测量了加热泵的电流扰动为 46%。文献 [7] 测量了商业楼的电流扰动数据,为 (5 ~ 30)%。 p 和 p_1 差数正比于 i_h / I_1 的平方,因而可以假定居民负载的差数很低,是一个很小的百分数。但是这个很小的百分数,折算成电费的损失,对一个大的地区局来说大约每年也能达到上百万元。

4 三相不平衡系统的功率流向

以上所述单相系统中的概念,在三相系统中也是适用的。

还有另外一种情况,也会造成供电部门少收入电费,就是供电电压三相对称,而负荷三相不平衡的情况。已知负序电压不能产生有用转矩,只能使感应电机发热。占正序分量 3.5% 的负序分量电压将提高温升 25% [7]。用户的电费不仅包括正序分量部分,而且包括负序分量和零序分量部分。这显然是不合理的。再看一个算例。

用户 A、B 都是由对称三相系统供电,电压有效值 $E = 100$ V。用户 A 是三相平衡负载,用户 B 是单相负载,当用户端功率同样是 $p = 6.94$ kW 时,负载电阻分别为 3.91Ω 和 1Ω 。用户 B 的功率损耗比用户 A 的功率损耗高出 1.03 kW。由于两用户所交电费是相同的,所以向用户 B 供电的电费损失就加大了。用户 B 功率的各序分量计算如下:

$$U_A = 83.33 \text{ V}, U_B = 100e^{-j2\pi/3} \text{ V},$$

$$U_C = 100e^{j2\pi/3} \text{ V}$$

电压的各序分量为

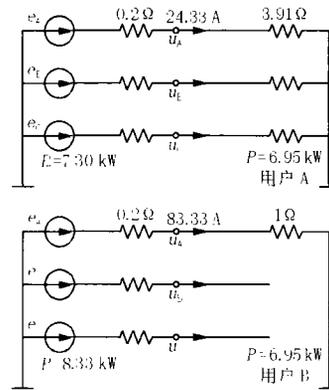


图 3 具有相同功率的平衡和不平衡负荷的三相电路

Fig 3 Two three-phase circuits of balanced and unbalanced loads with the same active power

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_p \\ U_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.53 \\ 94.44 \\ -5.53 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由于 $I_b = I_c = 0$,

所以 $I_p = I_n = I_0 = I_r / 3 = 27.78$ A

各序功率为

$$P_0 = 3U_0 I_0 \cos \phi_0 = -0.46 \text{ kW},$$

$$P_p = 3U_p I_p \cos \phi_p = 7.87 \text{ kW},$$

$$P_n = 3U_n I_n \cos \phi_n = -0.46 \text{ kW},$$

各序功率之和当然为

$$P = P_0 + P_p + P_n = 6.95 \text{ kW}$$

零序和负序功率为负值,这就是说,零序和负序功率是由负荷流向电源的。这部分功率消耗在线路的阻抗上了。如图 4 所示。

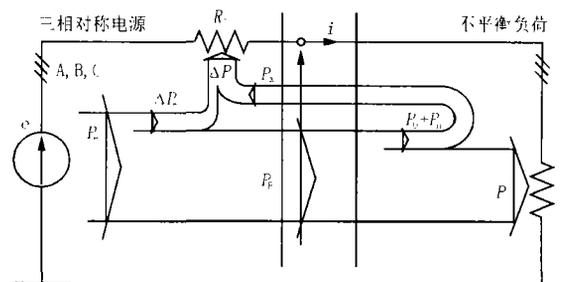


图 4 三相不平衡负荷的功率流图

Fig 4 Flow chart of the active power in the three-phase circuit with unbalanced load

P_n 的出现是因为负荷的三相不平衡,它可以在负荷端测量到, $P_n = -(P_0 + P_n) = 0.92$ kW。

线路损耗 p_p 也有所增加,比用户 A 的线路损耗增加 0.11 kW,这在负荷端是测量不到的。这部分线路损耗是由于电源给用户 B 传送了更多的正序功率 p_e 造成的。给用户 B 传送 8.33 kW,给用户 A 传送 7.30 kW。

若采用正序功率 p_p 的积分作为电度计费,供电部门的损失将会得到弥补。

$$W_p = \int_0^t p_p dt \quad (17)$$

同时平衡负荷也将不在为有害的零序和负序功率而交费了。

综上所述,对非线性性和三相不平衡用户,应按照基波正序功率的积分作为计费的电量。

5 结论

1) 非线性负荷产生谐波功率流向配电网,三相不平衡负荷产生负序和零序功率流向配电网。这不仅使得这些电力用户少交了电费,而且增加了供电网络的线路损耗,加大了供电成本,使供电部门蒙受损失。谐波功率以及负序和零序功率在配电网中流通,造成电能质量的下降,危害其它线性负荷和配网中的电力设备。而这些遭受谐波和三相不平衡电压电流损害的用户,却要为自己得到的这些污染电能而交费。

2) 在单相系统中,以基波功率的积分作为计费的电量,可以减少谐波功率造成的不合理计费。在三相系统中,以正序基波功率的积分作为计费的电量,可以减少谐波功率以及负序和零序功率造成的不合理计费。

3) 分别计量基波功率和谐波功率的计量方法更加合理,奖励无污染用户,惩罚谐波污染用户,有

利于加强电能质量的管理和鼓励用户进行谐波治理。

参考文献:

- [1] 吴竞昌. 电力系统谐波 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
WU Jing-chang Power System Harmonics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] IEEE Task Force Effects of Harmonics on Equipment [J]. IEEE Trans on PD, 1993, 8(2): 672-680
- [3] EPR I Optimizing Transportation Energy Use through Electricity [Z]. Technical Brief
- [4] 同向前, 薛钧义. 考虑谐波污染时用户电量的计量 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 53-55.
TONG Xiang-qian, XUE Jun-yi Consumer Electric Energy Measurement in Consideration of Harmonic Pollution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 53-55.
- [5] Arseneau R, So E. Effects of Harmonics on Revenue Meters [A]. IEEE/PES 94 SM, Panel Discussion on Account on Harmonics by Billing and Rebates 1994.
- [6] McGranaghan M. Harmonics from Residential Customers [A]. IEEE 519 Application Panel Session, PES Winter Meeting 1994.
- [7] Emanuel A E, Orr J A, Cyganski D, et al A Survey of Harmonic Voltages and Currents at the Customer Bus [A]. IEEE 1992 Winter Meeting 92 WM 014-1PWAD.

收稿日期: 2004-10-08; 修回日期: 2004-12-07

作者简介:

王 葵 (1966 -), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置。E-mail: wangkui@sdu.edu.cn

Active power flow and energy accounts with non sinusoidal waveforms and a symmetry load

WANG Kui

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Unbalanced loads and harmonics in the power system are grown. Higher distortion levels can affect the performance of revenue meters and lead to billing inequities between the electrical utilities and industrial customers. Pricing of electric energy is presented based on the value of integral of the load active power measured by energy meters. At such a pricing, the electric power utilities waste some revenues for the energy delivered to customers causing current asymmetry, because the load generated current harmonics and unbalanced currents cause an increase in the active power loss in the distribution system. At the same time, the customers that do not generate harmonics but are supplied with distorted and asymmetrical voltage are billed not only for the useful energy but also for the energy which may cause only harmful effects on their equipment. It is shown in the paper that these two disadvantages of the present tariff in single-phase systems could be eliminated if the energy account based on the value of the integral of the active power with only fundamental harmonic, P_1 , rather than on the integral of the whole active power was based. These disadvantages could be eliminated in three-phase systems if the energy account based on the integral of the active power of the positive sequence component with the fundamental harmonic.

Key words: power system; power quality; billing; nonsinusoidal; asymmetry; harmonic; active power