

谐波对电网电能计量系统影响的研究

黄冰心¹ 龚国兴¹ 赵莉华²

(1. 南安市电力有限责任公司, 福建 南安 362300; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 非线性负载在电网中引起电流和电压波形畸变, 产生谐波电压和谐波电流。电网中谐波的存在对传统的电能计量系统产生影响, 使计量不准确和不公平。就谐波对电网电能计量系统的影响进行了分析研究, 并提出了谐波情况下提高电能计量精度的措施。

关键词: 谐波; 电能计量; 影响

Abstract: Nonlinear load causes the distortion of current and voltage waveform in power grid, and generates the harmonic voltage and harmonic current. The presence of harmonics in power grid will influence the accuracy of traditional electric energy metering. Its influences on the electric energy metering system are analyzed and studied. The measures for improving the accuracy of electric energy metering are proposed.

Key words: harmonics; electrical energy metering; influence

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)06-0032-04

0 引言

随着大量非线性负载在电力系统中的应用, 对电网造成了污染, 使电网电压和电流波形发生畸变, 产生谐波。谐波电压和谐波电流的存在将影响电网及电力负荷的正常运行, 同时也对电网的电能计量系统产生影响。谐波会在电网中产生附加的谐波功率, 而不同结构形式的电能计量表由于其工作原理不同, 对谐波功率的计量不同, 从而造成谐波情况下电能计量系统的计量不准确和不公平。

在对电网中谐波存在时产生的附加功率的分析研究基础上, 讨论了谐波对电网电能计量系统的影响, 并提出了谐波情况下提高电能计量精度的具体措施。

1 非线性负载情况下电网功率的计算

1.1 非正弦电路中有功功率的计算

当电压和电流为非正弦周期函数时, 可用傅立叶级数分解, 分别表示为

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega_1 t + \theta_{uk}) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega_1 t + \theta_{ik}) \quad (2)$$

式(1)和(2)中, U_0 、 I_0 为电压和电流的直流分量; U_{km} 、 I_{km} 为基波及各次谐波电压和电流的幅值。

根据有功功率的定义可知, 负载消耗的有功功率(平均功率)的计算公式为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)中, 可计算非正弦电路的有功功率。当不同频率的正弦电压和电流相乘其乘积的积分为0, 当同频率的正弦电压和电流相乘其乘积不为0, 表明只有频率相同的电压和电流才能产生有功损耗, 所以非正弦电路中有功功率计算公式可表示为

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k + \dots \quad (4)$$

式(4)中, $U_k = \frac{U_{km}}{\sqrt{2}}$ 为各次电压有效值; $I_k = \frac{I_{km}}{\sqrt{2}}$ 为各次电流有效值; $\varphi_k = \theta_{uk} - \theta_{ik}$ 为各次谐波电压和电流相位差。

从上面分析可知, 对于非正弦周期性电路, 有功功率等于恒定分量产生的功率、基波功率和各次谐波功率之和。

1.2 非线性负载消耗的有功功率计算^[1]

一般来说, 由电力部门提供的电网电压为正弦, 当接入电网的负载为非线性时, 将使电流波形畸变,

为非正弦。这里假定电网电压没有畸变,即电网为没有谐波的正弦基波电源,其对线性及非线性负载供电,下面分析讨论含有非线性负载电路有功功率的计算。图1为具有非线性负载的电路模型,模型中把负载看作为电流源,负载中有线性负载和非线性负载,则负载电流既有基波分量又含有谐波分量,模型中用基波电流源和谐波电流源表示。图1中 $u(t)$ 为标准电压源, R 为电源内阻与线路电阻之和, $u_o(t)$ 为负载电压, $i(t)$ 为负载电流, $i_1(t)$ 为基波电流, $i_h(t)$ 为谐波电流, $i(t) = i_1(t) + i_h(t)$ 。

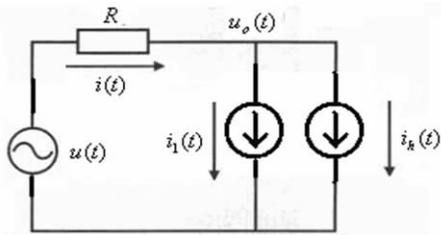


图1 非线性负荷电网模型

由于负载电流含有谐波,所以负载电压 $u_o(t)$ 中除了含有基波分量也含有谐波分量,分别用基波分量 $u_1(t)$ 和谐波分量 $u_h(t)$ 表示,则有

$$u_o(t) = u_1(t) + u_h(t) \quad (5)$$

图1所示电路中电源输出功率 P 为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i_1(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i_h(t) dt \quad (6)$$

式(6)中,第一项为正弦的电源电压与基波电流产生的基波功率,不为0。第二项中,电压为基波,电流为谐波,所以其平均值为0,即电源只输出基波功率。

电源输出功率也可表示为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T R i^2(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_o(t) i(t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T R [i_1(t) + i_h(t)]^2 dt$$

$$+ \frac{1}{T} \int_0^T (u_1(t) + u_h(t)) \times (i_1(t) + i_h(t)) dt \quad (7)$$

由于不同频率的电压和电流不产生功率,式(7)可化简为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T R i_1^2(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T R i_h^2(t) dt$$

$$+ \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) i_1(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T u_h(t) i_h(t) dt \quad (8)$$

式(8)中 $\frac{1}{T} \int_0^T R i_1^2(t) dt$ 为电源内阻和线路电阻上消耗的基波功率; $\frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) i_1(t) dt$ 为非线性负载消耗的基波功率; $\frac{1}{T} \int_0^T R i_h^2(t) dt$ 为电源内阻和线路电阻上消耗的谐波功率; $\frac{1}{T} \int_0^T u_h(t) i_h(t) dt$ 为非线性负载消耗的谐波功率。

由于电源没有输出谐波功率,根据功率平衡关系,回路消耗的总谐波功率应为零,则有

$$\frac{1}{T} \int_0^T u_h(t) i_h(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T R i_h^2(t) dt = 0 \quad (9)$$

从式(9)可知,由于谐波的存在,它使电源内阻和线路电阻上不仅消耗基波功率还消耗谐波功率,谐波的存在增加了线路损耗。因为电阻上消耗的一定是正功率,所以负载消耗的谐波功率一定为负功率,表明非线性负载情况下,非线性负载一方面从电网电源吸收基波有功功率,另一方面向电网输出谐波有功功率,是谐波功率源。非线性负载输出的谐波功率是它从电网吸收的基波功率转化而来的,它消耗在电源内阻和线路电阻上,增加线路损耗,同时使电网电压波形发生畸变,形成电网的谐波污染,同时对电能计量系统计量精度产生影响。

2 谐波对电能计量的影响

电网中谐波的存在将影响电能计量的准确性,当电网谐波含量在国家标准规定范围内时,由其产生的影响较小,可以忽略,但当谐波含量超过国家标准规定时,它所引起的误差较大,不能忽略。谐波含量越大,引起的计量误差也越大。

谐波对电能计量的影响和所选用的电能表类型有关。目前工矿企业中常用的电能表主要有两类:感应式电能表和电子式电能表。下面分别进行讨论。

2.1 谐波对感应式电能表计量的影响

感应式电能表一般由测量机构、辅助部件和补偿调整装置组成。其中测量机构包括驱动元件、转动元件、制动元件、轴承和计度器;辅助部件包括基架、铭牌、外壳和端钮盒;补偿调整装置包括满载调整、轻载调整、相位角调整和防潜装置,有的还装有过载补偿和温度补偿装置。测量机构的驱动元件包

括电压元件和电流元件。

它的工作原理是:当电能表接入被测电路时,它的电流线圈和电压线圈中有交变电流流过,这两个交变电流分别在它们的铁芯中产生交变的磁通;交变磁通穿过铝盘,在铝盘中感应出涡流;涡流又在磁场中受到力的作用,从而使铝盘得到转矩(主动力矩)而转动。负载消耗的功率越大,通过电流线圈的电流越大,铝盘中感应出的涡流也越大,使铝盘转动的力矩就越大。即转矩的大小跟负载消耗的功率成正比。功率越大,转矩也越大,铝盘转动也就越快。铝盘转动时,又受到永久磁铁产生的制动力矩的作用,制动力矩与主动力矩方向相反;制动力矩的大小与铝盘的转速成正比,铝盘转动得越快,制动力矩也越大。当主动力矩与制动力矩达到暂时平衡时,铝盘将匀速转动。负载所消耗的电能与铝盘的转数成正比。铝盘转动时,带动计数器,把所消耗的电能指示出来。

从电能表的工作原理可知,电能表是计量负载所消耗的功率的,电能表产生误差的原因很多,其中谐波的存在是影响其计量精度的一个重要原因。

当电网电压波形为正弦,只有电流含有谐波时,根据前面的分析可以知道,不会产生谐波功率。但是,由于磁路具有饱和性,是非线性的,在磁路饱和情况下正弦波形的电压产生非正弦波形的磁通,其中含有各次谐波分量,磁路中的这些谐波磁通将感应谐波电压,它们与电流中的同次谐波分量作用会有谐波功率,在电能表中产生附加驱动力矩。当电网电压和电流波形均含有谐波分量时,电能表中同样会有谐波功率,从而产生附加驱动力矩。制动力矩的大小与谐波无关,而驱动力矩中附加力矩的产生影响了电能表的计量精度。所以,感应式电能表在计量时,除了计量基波功率外,也能反应部分谐波功率,但是不能反应全部谐波功率,其测量功率为基波功率和部分谐波功率之和。

感应式电能表在计量含有谐波情况下的电能时,随谐波次数和谐波功率的不同,引起的误差大小不同,有可能引起正误差功率,也可能引起负误差功率。

2.2 谐波对电子式电能表计量的影响

电子式电能表的工作原理框图如图2所示,其工作原理为:被测电路的高电压和大电流经电压和电流变换器转换,后送至乘法器,乘法器完成电压和

电流瞬时值的乘法运算,输出值与一段时间内平均功率成正比的直流电压,再利用电压/频率变换器,将该直流电压转换成相应的脉冲频率,将该脉冲分频,并通过一段时间内计数器的计数,显示出相应的电能。

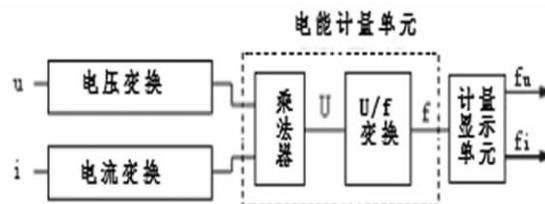


图2 电子式电能表工作原理框图

从电子式电能表的工作原理可知,在电子式电能表计量过程中,不存在磁路的变化过程,但是磁通变化会影响其电压和电流变换器(大多数时候都采用电磁式互感器)的精度,从而直接影响测量精度。如果测量用互感器存在非线性,当电压和电流波形发生畸变时,互感器对各次谐波成分转换比例不一致,从而使被测信号发生变形,产生测量误差。在波形畸变情况下,互感器变换误差随谐波次数的增加而非线性增大。对于电子式电能表,其计量的功率是基波功率与谐波功率之和。

所以从计量全波功率角度考虑,电子式电能表的计量精度较感应式电能表要高。但是不管是感应式电能表还是电子式电能表,当谐波存在时,都会影响其测量精度。

2.3 非线性负载对电能计量的影响

从前面的分析知道,感应式电能表在计量含有谐波的电能时误差较大,它计量的是全部基波功率与部分谐波功率之和,电子式电能表计量的是全波功率,反映了负载实际消耗的电能。但是,这种能反映实际消耗电能的计量方式对用户仍是不合理的。

从1.1和1.2的分析可以知道,非线性负载在从电网吸收基波功率的同时,将向电网发出谐波功率。而非线性用户向电网发出的谐波功率对电网和用户都将产生不利影响。

目前的计量方式下,非线性用户从电网吸收基波电能,其中一部分转化为谐波电能注入电网,即它从电网吸收的谐波功率为负,当采用全波电能表计量时非线性用户从电网吸收的总功率等于其从电网吸收的基波功率减去其注入电网的谐波功率,所以总的计量功率将减小。而线性负载不仅从电网吸收了基波功率,由于电网电压和电流波形的畸变,它还

被迫从电网吸收了谐波功率,虽然谐波功率对于线性负载而言是不希望并且有害的,但是计量时线性负载从电网吸收的总功率是其吸收的基波功率和吸收的谐波功率之和,计量功率增大。所以,这种计量方式下,使非线性负载的谐波源用户由于向电网注入了谐波功率而少交电费,线性负载用户由于被迫从电网吸收了谐波功率而多交了电费,显然是不合理的,变相地鼓励了谐波源用户,使计量不公平。

3 电网谐波下电能计量模式的探讨

从前面的分析知道,在电网电压和电流发生畸变存在谐波成分时,不仅存在基波功率,还有谐波功率,而谐波功率流向可能与基波功率流向相同,也可能相反。为了能准确真实地反应各种负载消耗的电能,在电网存在谐波情况下,应该对基波电能和谐波电能都要进行计量。这要求电能表不仅要能计量基波电能,还要能计量谐波电能,同时还要能显示谐波电能的流向,这样电力系统可以区分谐波源用户和非谐波源用户,按照相关政策法规要求谐波源用户采取相应的谐波抑制措施,保证供电质量。

但是目前的大多数电能表技术水平,无法区分基波电能和谐波电能,也无法判定谐波电能的流向。在这种情况下,可以采取基波电能表和全波电能表结合的方式进行电能计量。由于全波电能表能计量基波电能和全部谐波电能,基波电能表能计量基波电能,全波电能表和基波电能表的计量差值,即为谐波电能值。如果二者差值为正,表明该用户为非谐波源用户,它从电网吸收了有害的谐波;如果差值为负,表明该用户为谐波源用户,它向电网注入了有害

的谐波。

当然,这种办法无法消除谐波对电能表本身造成的计量误差,所以最根本的办法是根据计量情况,要求谐波源用户进行谐波治理,消除电网中的谐波。

4 结 语

非线性负载接入电路,将引起电路电压和电流波形畸变,产生谐波。对谐波在线路和负载上产生的附加谐波功率进行了分析,讨论了谐波对感应式和电子式电能表的计量精度影响,以及由谐波引起的不公平计量问题,并提出了目前谐波情况下提高电能计量精度的措施。

参考文献

- [1] 李军浩,胡泉伟,吴磊,等. 电网谐波对电能计量影响的仿真分析[J]. 陕西电力, 2011(6): 1-5.
- [2] 张鹏,向铁元,余志华. 谐波对感应式电能表计量影响的分析及控制对策的研究[J]. 仪器仪表用户, 2004(2): 4-6.
- [3] 沈华. 基于 LabVIEW 的谐波电能计量与分析系统的研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(1): 47-50.
- [4] 张卓,骆盛军. 对谐波影响下的电能计量方式的探讨[J]. 广东电力, 2002, 15(4): 55-57.
- [5] 卿柏元,李俊健,吴晓明,等. 非线性负荷下电能计量的实用化技术探讨[J]. 广西电力, 2010, 33(5): 6-9.

作者简介:

黄冰心(1979),女,工程师,主要从事电力系统生产、运行与管理工作。

(收稿日期: 2012-06-15)

(上接第 26 页)

- 电状态估计中的应用[J]. 电力系统自动化, 1988, 22(7): 18-22.
- [8] 高赐威,孔峰,陈昆薇. 一种配电网状态估计实用算法的探讨[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 80-83.
- [9] 徐得超,李亚楼,吴中习. 稀疏技术在电力系统状态估计中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 32-36.
- [10] 王启付,王战江,王书亭. 一种动态改变惯性权重的

粒子群优化算法[J]. 中国机械工程, 2005, 16(11): 945-948.

- [11] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [12] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [C]. In: Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks, Perth(Australia): 1995: 1942-1948.

(收稿日期: 2012-06-15)