

谐波对电能计量的影响

马晓蕾, 尹忠东

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要:介绍了电能计量的原理,着重研究了感应式电能表和电子式电能表的工作原理和计量特性,并对二者进行了比较。

关键词:谐波;电能计量;频率特性

Abstract: The theory of electric energy metering is introduced. The working principles and metering features of induction watt-hour meter and electronic watt-hour meter are discussed and compared.

Key words: harmonic; electric energy metering; frequency characteristic

中图分类号: TM933.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)03-0084-03

随着电力电子技术的飞速发展,各种大功率整流/换流设备、电弧炉等非线性负荷日益增多,造成供电系统电压、电流波形不同程度畸变,产生大量高次谐波。而大多数仪器、仪表是针对工频正弦波设计的,因而造成数据不正确,即谐波对电能计量的影响。

1 电能计量原理

在单项交流电路中,功率 p 的瞬时值表示为:

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t - \phi)$$

式中: u 、 i 表示电压、电流;

U_m 、 I_m 分别表示电压电流的幅值;

ω 、 ϕ 为角频率和相位角。

三相电能表有两种:三相三线和三相四线电能表两种。

三相四线制电路中,瞬时功率为:

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 、 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 A、B、C 三相的电压电流。

三相三线制中,由于:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

得:

$$p = u_a i_a - u_b (i_a + i_c) = (u_a - u_b) i_a + (u_c - u_b) i_c = u_{ab} i_a + u_{cb} i_c$$

所以可以用二元件电能表来测量三相三线的电能损耗,或者用三只单相合为三相电能表。

电能:

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt$$

电能表测量的电能按上式计算得有功电能^[1]。

2 感应式电能表

感应式电能表的工作原理是:感应式电能表是用铝盘来对电功率进行采样的,它的电压、电流铁芯线圈分别位于铝盘的上下两侧,将铝盘夹在中间,线圈上产生的电压电流交变磁通穿过铝盘时会在铝盘上产生感应电流,磁通和感应电流互相作用,使铝盘转动起来。铝盘的转速与电功率 p 成正比,实现了对电功率的采样,电功率大转一圈用的时间少,电功率小转一圈用的时间就多,每转一圈代表的电能质量是一样大的,用计度器的机械传动机构将铝盘所转圈数记录下来,等效于实现了功率与时间相成,所以计度器所记录的铝盘转的圈数正比于电能量 W ^[2]。

铝盘旋转时,切割永久磁铁的磁通而在其内感应涡流;此涡流与永久磁铁的磁场相互作用产生制动力矩。铝盘旋转越快(转速 n 越大),感应的涡流越大,与永久磁铁相互作用产生的制动力矩 M 制也越大。

$$M_{\text{转}} = K_2 n。$$

当转动力矩与制动力矩大小相等时,

$$K_2 n = K_1 P$$

$$n = K_1 P / K_2 = KP$$

在给定的时间 t 内对上式积分,得该段时间内消耗的电能 A 和对应的总转数 N ,^[3]

$$N = nt = KPt = KA。$$

感应式电能表的计量模型:

与基波相似,谐波既有有功功率又有无功功率。

而有功功率与电网的安全经济运行有着直接、密切的关系,因此本文主要研究谐波有功功率对感应式电能表计量的影响总的有功功率为直流功率、基波功率及各次谐波功率之和在稳态工作状态下,通常认为电网中无直流功率,故有 $P = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n$, 式中, 谐波功率 $\sum_{n=2}^{\infty} P_n$ 不仅不产生有用的功效, 而且会在各类设备中引起附加损耗和发热, 并干扰某些用户正常工作。

感应式电能表的计量模型为 $P = K_1 P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n$, 式中, K_1 的理想值为 1, 故感应式电能表的近似模型为 $P = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} K_n P_n$, 式中 K_n 为电能表对高次谐波电能的响应系数, 因感应式电能表具有单调下降的频率特性如图 1, 故有 $K_n < 1$, 且随 n 的增加而减小; 谐波功率 P_n 的符号可正可负: 当用户为线性用户时, 谐波由系统注入用户, 谐波功率与基波功率同向, P 为正; 当用户为非线性用户时, 用户向系统注入谐波, 谐波功率方向与基波功率相反, P 为负。

从前述不难看出, 感应式电能表不只计量基波电量, 也非正确计量消耗的总电量。对线性用户而言, 感应式电能表少计量了用户消耗的总电能, 但计量的电能大于基波电能; 对非线性用户, 电能表计量的值大于用户消耗的总电能而小于基波电能。按照只计量基波电量的正确观念, 可以认定电能表对线性用户多计了电量, 它们因谐波功率影响要相应地多支付电费。而对非线性用户少计了电量, 它们在向系统注入有害的谐波功率之后反而少支付相应于谐波功率的电费, 从电能损失角度来说, 供电部门损失最大, 因为谐波功率在传播过程中很大一部分损耗在线路和变压器上, 线损明显增大, 对发电部门而言则是煤耗增大了 [4]

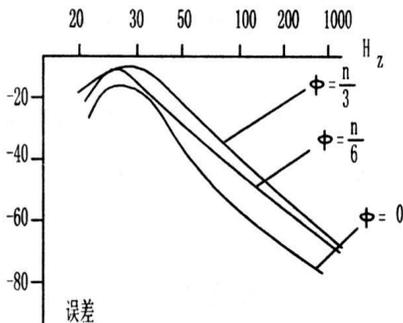


图1 感应式电能表频率误差曲线

3 电子式电能表

3.1 电子式电能表的工作原理

电能的基本表达式为:

$$W(t) = \int p(t) dt = \int u(t) i(t) dt$$

式中, $u(t)$ 、 $i(t)$ 、 $p(t)$ 分别是瞬时电压、瞬时电流、瞬时功率, 所以测量电能的基本方法是将电压、电流相乘, 然后在时间上再累加(即积分)起来。电子式电能表中实现积分的方法, 是将功率转换为脉冲频率输出, 该脉冲成为电能计量标准脉冲 f_H (或 f_L), 其频率正比于符合的功率。

3.2 电子式电能表的组成

电子式电能表一般由输入级、乘法器、变换器、计数显示控制电路、直流电源等几部分组成。

电子式电能表的输入级是将电网中的电压和电流经电压互感器和电流互感器转换成合适的小电压信号, 供给乘法器。乘法器是电子式电能表测量机构的核心部分, 它把两个电压模拟量转换成它们的乘积, 目前使用最普遍的是时间分割乘法器。时间分割乘法器具有精度高、响应快、功率因素变化范围宽等特点。从乘法器输出的电压模拟量送入 V/f 转换电路, 转换成与其成正比的脉冲数字量, 最后输入到计数电路和驱动电路, 完成功率测量。

3.3 电子式电能表的误差分析

图 2 是电子式电能表的频率特性曲线, 相对于感应式电能表的频率曲线而言, 电子式电能表的曲线平坦, 基本没有衰减, 说明它具有宽频带响应。它对基波的响应和高次谐波功率的响应是相同的。

电子式电能表通过对电压、电流的采样计算来计量有功电能, 当采样电压 $u(t)$ 和采样电流 $i(t)$ 含有高次谐波时, $u(t)$ 、 $i(t)$ 可分别表示为各次谐波的叠加:

$$u(t) = \sum_{k=1}^n U_{km} \cos(\omega t + \psi_{km})$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^n I_{km} \cos(\omega t + \psi_{ki})$$

式中: U_{km} 为 k 次谐波电压最大值; I_{km} 为 k 次谐波电流最大值; ψ_{km} 为 k 次谐波电压初相角; ψ_{ki} 为 k 次谐波电流初相角; ω 为基波角频率; n 为谐波次数。则瞬时功率为 $p(t) = u(t) i(t)$, 那么一个采样周期 T 的

$$平均功率为 p = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

(1)当采样信号只有一个发生畸变,另一个信号仍为正弦波时,以电压发生畸变为例,有: $i(t) = I_{1m} \cos(\omega t + \psi_{1i})$, 式中: I_{1m} 为基波电流最大值; ψ_{1i} 为基波电流初相角。

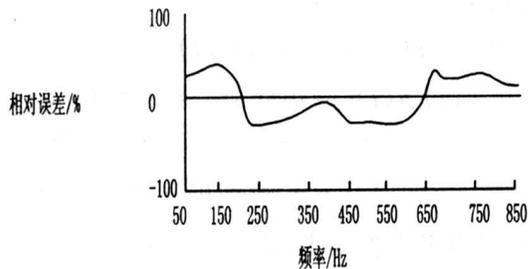


图2 电子式电能表的频率响应曲线

则平均功率:

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^n I_{km} \cos(\omega t + \psi_{ki}) u(t) dt = \sum_{k=1}^n U_{km} \cos(\omega t + \psi_{km}) dt$$

根据电路理论,对不同频率的电压、电流的乘积,积分为零(不产生平均功率);同频的电压、电流的乘积积分不为零。可知上式的积分结果为基波平均功率,电子式电能表在这种情况下计量误差较小,基本反映了基波电能。

(2)当采样信号都发生畸变,不难得出平均功率:

$$p = U_1 I_1 \cos \psi_1 + U_2 I_2 \cos \psi_2 + \dots + U_n I_n \cos \psi_n = \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \psi_k$$

式中: $U_k = U_{km} / \sqrt{2}$ 、 $I_k = I_{km} / \sqrt{2}$ 、 $\psi_k = \psi_{ku} - \psi_{ki}$ 即平均功率等于基波功率和各次谐波功率的代数和。

可见同感应式电能表相比,电子式电能表由于频带较宽,对基波电能和谐波电能都能较准确计量,但值得注意的是它把谐波功率和基波功率同等对待,这样计量误差会增大。^[5]

4 两种电能表的电能计量特性比较

感应式电能表有迅速下降的误差频率特性,使得感应式电能表只能计量谐波的部分。若以 W_1 表示基波电能, W_n 表示谐波电能, W 表示电能表所计量的电能,则感应式电能表反映的电能值近似可表示为: $W = W_1 + \sum K_n W_n$ 其中: K_n 为谐波电能系数,表征谐波被计量的程度。根据前述理论分析,显然 $K_n < 1$,且随谐波频率次数增加而减少。

而对电子式电能表,和感应式电能表计量基波电能和部分谐波电能不同,电子式电能表误差频率特性曲线变化较为平缓,即电子式电能表计量基波电能和几乎全部谐波电能。因此电子式电能表计量可近似表示为: $W = W_1 + \sum W_n$

因此在以全能量为计量标准的计量中,电子式电能表的计量误差接近于零,但是以基波为计量标准电子式电能表的计量误差将比感应式电能表的计量误差大。^[1]

参考文献

- [1] 葛毅. 电力谐波对电能计量的影响研究[D]. 学位论文. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [2] 吴安岚, 李书跃, 郑小平等. 电能质量基础及新技术[M]. 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 陈明. 供电系统谐波及其对电能计量影响的研究[J]. 学位论文. 华北电力大学, 2003.
- [4] 吴彤, 艾敏. 感应式电能表受谐波影响的研究[J]. 华中理工大学学报. 2002, 6(28): 43-45.
- [5] 高笑, 王步云, 龙燕, 赵宏伟, 冯璞乔. 电力谐波及其对电能计量的影响[J]. 后勤工程学院学报. 2004, 2: 53-55.

(收稿日期: 2008-01-21)

(上接第83页) 通过解体检修, 发现了导电触指盘破裂、触指烧伤、导电轴承氧化等在运行中不能及时发现的问题。该类型隔离开关机械回路的防尘、防雨能力一般, 加之负荷过重, 极易由此引发机械故障。为防止隔离开关故障发生, 不但要做好检修维护工作, 还要在日常巡视、操作中注意观察其状态有无异常, 避免缺陷升级, 并根据具体运行状况确定其解体大修

年限及小修维护检查项目, 只有把握住隔离开关检修维护的关键问题, 才能使隔离开关的安全运行得到保障。

参考文献

- [1] GB 50150-2006. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S]. (收稿日期: 2008-02-21)