

# 电力系统无功电能计量综述

段梅梅

(江苏省电力公司电力科学研究院, 南京市江宁区帕威尔路 1 号 211103)

**摘 要:** 随着新规程 JJG 596-2012《电子式交流电能表》的发布, 无功电能表的检定越来越得到大家的重视。而且电网公司对大用户收取电费时, 采用两部制电价, 除了按实际用电量和最大需量或变压器容量收取电费外, 还有功率因数补偿费。由于无功电量的多少直接关系着功率因数的大小, 从而影响功率因数调整电费, 因此无功电能的准确计量也就显得尤为重要。并且, 随着电气计量技术的不断进步, 无功电能计量原理也在上世纪 90 年代末期取得了突破性进展, 使我国无功电能计量技术水平上了一个新台阶, 为无功电能的准确计量打下了技术性基础。在本文中, 对无功电能表的发展、分类及不同原理无功电能表的误差来源进行了综述, 最后对无功电能表校验的现状进行了介绍。

**关键词:** 无功功率; 无功电能表; 电能表校验

## 0 引言

电网公司对大用户收取电费时, 采用两部制电价, 除了按实际用电量和最大需量或变压器容量收取电费外, 还有功率因数补偿费。由于无功电量的多少直接关系着功率因数的大小, 从而影响功率因数调整电费<sup>[1]</sup>。因此, 大用户会安装无功补偿设备, 进行无功功率就地补偿, 实现功率因数调整。随着居民用户非线性元件的广泛应用, 所需无功容量也越来越大, 而目前居民没有安装功率补偿装置。因此对居民用户收取功率因数调整费时, 会使电价较高。不利于用户电价成本的合理分担。因此可以按用户实际消耗的无功电量计算无功电费, 达到合理分担系统无功供电成本的目的<sup>[2][3]</sup>。虽然目前还没有出台无功电价的相关政策, 但是无功电能的准确计量随着大家的重视程度显得越来越重要。

另外随着电气计量技术的不断进步, 无功电能计量原理在上世纪 90 年代末期取得了突破性进展, 相继研制出基于正弦无功功率理论的标准无功电能表和安装式全电子无功电能表, 使我国无功电能计量技术水平上了一个新台阶<sup>[4]</sup>, 为无功电能的准确计量打下了技术性基础。在本文中, 对无功电能表的发展、分类及不同原理无功电能表的误差来源进行了综述, 最后对无功电能表校验的现状进行了介绍。

## 1 无功电能测量

### 1.1 无功功率定义

传统的无功定义是在假定电压和电流均为正弦波条件下, 当不含谐波或者谐波较小时, 精确度较高。当电压和电流均不含谐波时, 无功功率定义如下:

$$Q = U \times I \times \sin \varphi \quad (1)$$

式中:  $Q$  为无功功率,  $U$ ,  $I$  为电压和电流的有效值,  $\varphi$  为电压和电流的相位差。但是, 对于非正弦系统, 无功功率一直没有普遍的令人接受的定义。

在 IEEE1459-2000 中, 当电压电流存在谐波时, 引入了畸变无功功率  $D_B$  的定义, 也就是非同次谐波引起的无功功率, 并且无功功率定义为每次谐波分量无功的总和。即:

$$Q_B = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2)$$

则畸变无功功率  $D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$ 。这是无功功率定义两大学派之一, 采用频域分析方法的 Budeanu 学派对无功功率的定义, 其定义也被写入 ANSI/IEEE 标准 1459-2000 中。这一定义与正弦系统中无功定义基本吻合, 但是在此种定义中, 当  $Q_n$

非零时,  $Q_B$  可能为零, 因此它失去了无功应代表的物理意义, 不能反映源和负载间存在的能量交换<sup>[5]</sup>。

当系统中电压电流为非正弦波形时, 无功功率的另一定义为 Fryze 无功定义。在定义中:

$$Q_F = \sqrt{U^2 I^2 - U^2 I^2 \cos^2 \varphi} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3)$$

其中,  $S$  为视在功率。在这种定义方式中, 无功功率可以比较简单的计算出来, 为无功电能表的设计提供了一种方法。但是它没有正弦波形下无功功率那样明确的物理意义, 不能提供改善功率因数方面的信息; 或者说在这一定义中, 改善功率因数, 使有功功率因数尽量接近于 1 不能仅仅依靠电感或者电容来实现; 另外, 在这一定义下, 不能确定电力系统中任意节点的无功功率之和为零, 因此这一定义不能用于潮流计算<sup>[6]</sup>。

除以上无功功率定义以外, 有将 Fryze 定义扩展的 Kusters 和 Moore 定义, 为功率因数改进提供了进一步定义; 另外还有 Shepherd 和 Zakikhani 定义、Czarnecki 定义, 均在无功功率的物理意义体现和功率因数的改进方面做出了不同程度的努力<sup>[7]</sup>。

## 1.2 无功电能测量原理及电能表分类

有功功率求解是通过瞬时功率求平均值, 即

$$P = \int u \cdot i dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi。又已知 Q = U \times I \times \sin \varphi,$$

并且  $\cos(\varphi - 90^\circ) = \sin \varphi$ 。而且, 在求解无功功率时, 若直接求相位差来计算正弦值, 引入了角度测量的误差, 所以通过电压或者电流的移相来计算瞬时功率积分实现无功功率测量是必须的。

针对上述几种无功功率的定义, 主要存在三类无功功率测量装置以及对应的无功电能表。传统的无功电能表是在有功电能表的基础上, 通过改变电压、电流线圈接线方式, 或者在电压、电流线圈中串接电阻或者附加线圈, 使电压(或电流)移相  $90^\circ$ , 从而达到无功计量的目的, 因此又被称为跨相无功或者余弦无功。

二十世纪 90 年代, 随着电子技术和数字技术的发展及其在电测量领域中的应用, 自然无功电度表产生。自然无功电度表是从无功的定义出发, 通过乘法器、移相器直接实现无功电能的计量, 因此又被称为真无功电度表。自然无功电度表应用无功

计量原理又可以分为两类, 一类是应用 Hilbert 变换实现所有频率的电压或者电流的  $90^\circ$  移相, 从而实现 Budeanu 无功功率的计量; 一类是通过视在功率及有功功率的计量, 实现 Fryze 无功计量。现在的多功能电能表一般采用真无功计量的方式。

## 2 无功电能表的误差来源及校验现状

### 2.1 无功电能表的误差来源

传统无功电能表在仅考虑了正弦波形的情形下, 对电压、电流线圈中串接的电阻或者线圈, 使电压(或电流)移相  $60^\circ$  或者  $90^\circ$  进行计算。因此当波形畸变严重或者存在较大谐波时, 无功计量的误差显然会比较大。

在计算真无功时, 又会有模拟式和数字式移相之分。模拟式移相是用  $90^\circ$  移相器实现电压移相。但是模拟式移相器在进行设计时, 以频率

$f = 50\text{Hz}$  为中心频率进行电路参数设计。因此,

这种方法也只考虑了基波的情况, 若信号频率产生变化, 有谐波存在时, 基于模拟式移相器的无功功率测量会有较大的误差<sup>[8]</sup>。

数字式移相利用交流采样原理, 采用 A/D 转换器, 将电压、电流信号数字化, 通过软件实现电压  $90^\circ$  移相, 与电流信号相乘后积分求得无功功率; 或者通过 Fourier 变化、小波变换、Hilbert 变换, 对信号频率进行分析, 根据无功功率的定义实现无功电能测量。其中, Budeanu 无功功率即可通过上述的 Hilbert 变换进行所有频率信号的移相, 实现精度高、反应快速的无功计算。

### 2.2 无功电能表校验现状

由于无功功率/电能计量标准装置及其相应的技术规范还不够完善, 目前国内还没有专门的无功计量标准装置<sup>[9]</sup>。中国电科院有研究者通过基于电流比较仪原理的电容桥结构来获取稳定的正交电流, 经高精度交直流转换标准的交流电压值的准确校准及电压、电流、功率因数全覆盖宽量程的无功计量标准装置的建立, 为正弦无功标准的量值传递奠定了实物基础, 可以实现无功表计的校准和测试<sup>[10][11]</sup>。

另外, 由上述不同类型电能表的误差来源可知, 传统的无功电能表即余弦无功电能表仅考虑了基波无功功率, 因此误差属于原理性误差, 而多功能电能表计量无功则不存在原理性误差。因此传统

无功电能表和多功能电能表在校验方法上应该有所不同<sup>[12][13]</sup>，若采用比较法对两种无功电能表校验时需要采用相对应的无功标准表。

### 3 结论

本文简单讲解了无功功率对电价定价的影响，对无功电能表的发展、分类及不同原理无功电能表的误差来源进行了概述，最后介绍了无功电能计量标准装置及无功电能表校验需注意的问题。随着新规程 JJG 596-2012《电子式交流电能表》的发布中对无功电能表检定的相关规定，无功电能计量重要性也将日益得到广泛认识。

#### 参考文献：

- [1] 杨茂涛,张成林. 多功能电能表中无功电能检定的探讨[J]. 湖南电力,2011,31(4):51-53.
- [2] 蒋志平. 电力市场下的无功定价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [3] 黄晓青. 电力系统非正弦和非平衡运行状态功率定义与测量的研究[D].成都: 西南交通大学, 2006.
- [4] 刘桂英,栗时平. 无功电能计量理论技术及其发展[J]. 中国测试技术,2006,32(2):11-14.
- [5] 闫华光,宗建华,杨林. 非正弦情况下无功功率定义的分析[J]. 电测与仪表, 2003,40(466):5-7.
- [6] Costin Cepisca,Horia Andrei, Stergios Ganatsios and Michel Veyssiere. Energy Measurement Techniques for Non-Sinusoidal Situations[C]. International Conference on Metrology and Measurement System, 2002. 27-28.
- [7] Goteborg Sweden. Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 1999.
- [8] 刘金华,刘永强. 非正弦不对称三相三线制系统无功电能的计量[J]. 电测与仪, 2008, 45(507): 1-4.
- [9] 马利人,傅士冀,彭中华. 无功电能测量新技术[J]. 电测与仪表, 2002,39(2): 23-26.
- [10] 李友红. 多功能电能表计量应用的现状与展望[J]. 电测与仪表, 2007,44(496): 32-35.
- [11] 杨林, 王猛. 无功计量标准装置的建立及量值比对[J]. 电测与仪表,2012,49(555): 33-35.
- [12] 杨茂涛, 张成林. 多功能电能表中无功电能检定的探讨[J]. 湖南电力,2011,31(4): 51-53.
- [13] 刘华. 无功功率的测量与多功能电能表数据管理[D].南京: 河海大学, 2004.

#### 作者简介：

段梅梅（1986—），女，山东德州人，硕士研究生，助理工程师，从事电能的标准量值传递工作，E-mail: cbadmm@163.com。