

Fryze 时域无功与通用无功定义的一致性条件分析

付志红¹,熊学海^{1,2},侯兴哲³,李春燕¹,张淮清¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030;

2. 贵州电网公司电力调度控制中心,贵州 贵阳 550002;

3. 重庆电力科学试验研究院,重庆 401123)

摘要: 从时域无功理论的角度,根据理论定义分析论证 Fryze 时域无功与基于周期函数空间的通用无功定义对于无功计量相同和差异的原因,分析其无功电能计量统一性条件和非一致性情况。基于 dSPACE 平台构建电能计量实时仿真系统,进行三相四线制电路的无功计量建模和实验研究。理论分析和实验结果表明,2 种功率理论的有功功率定义统一,物理意义明确;2 种功率理论对于无功功率的定义适用于正弦和非正弦的情况,在对称时 2 种功率理论的无功功率定义一致,无功计量结果相同,而在不对称时 2 种无功功率定义不一致,无功计量结果不相同。经对比分析,认为基于周期函数空间的通用无功定义具有更大的优越性。

关键词: 电能计量; 无功计量; 功率理论; dSPACE 平台; 仿真; 无功

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.010

0 引言

在发展智能电网的新形势下,电能计量是高级量测体系(AMI)的重要组成部分^[1-7],需要研究分布式能源、储能装置带来的电能质量与电能计量新问题;充电站、微网等新型负荷,在接入中产生了丰富的谐波、非线性冲击,以及双向、随机、间歇和瞬变的潮流等都为电能计量带来了新的难题。随着对无功功率的日益关注,无功计量收费是大势所趋,而新能源接入电力系统对无功的需求,也有促成无功市场的趋势。目前提出的各种功率理论的有功功率定义统一,具有明确的物理意义,但是对于非正弦情况下的无功功率理论定义尚未统一,缺乏非线性负荷无功

计量标准,无功计量问题存在较大争议^[8-13]。目前,非正弦无功功率理论主要有 3 种类别:第 1 种是频域功率理论^[14],建立在傅里叶变换的基础上,以 Budeanu 功率理论为代表,其定义已写入 ANSI/IEEE1459—2000 标准;第 2 种是时域功率理论^[15],以 Fryze 功率理论为代表,该理论被国际电工委员会(IEC)推荐使用;第 3 种是瞬时无功功率理论^[16],以 20 世纪 80 年代 H. Akagi 从无功补偿和谐波消除角度提出的三相电路瞬时无功功率理论为代表。

论文从时域无功理论的角度,根据理论定义分析论证 Fryze 时域无功与基于周期函数空间的通用无功定义对于无功计量相同和差异的原因,分析其无功电能计量统一性条件和非一致性情况。由于算法复杂,实现的计算量较大,而又要求实时处理以便满足实际需要,因此基于 dSPACE 平台构建电能计量实时仿真系统,进行三相四线制电路的无功计量建模和实验研究,从实验的角度验证此 2 种无功理论对于无功电能计量的一致性条件。

收稿日期:2011-10-21;修回日期:2013-01-14

基金项目:国家“111”计划资助项目(B08036);重庆市科技攻关项目(CSTC,2011AB3003)

Project supported by the National “111” Program of China (B08036) and Chongqing Science and Technology R & D Program(CSTC,2011AB3003)

Earthing schemes in low-voltage microgrid

LI Botong, LI Bin, LI Yongli, YAO Chuang

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the personal safety and reliable operation as the targets, the earthing schemes of low-voltage microgrid are studied. As to the system earthing of low-voltage microgrid, the necessity of including the neutral line of DG is analyzed; it is suggested to set the unique earthing spot for the neutral points of all power supplies in one building to avoid the harm of stray current; the rules for reliable earthing of neutral points in a system should be established according to different operating modes. As to the protection earthing, the applicability of TN and TT earthing modes used in traditional low-voltage distribution network to low-voltage microgrid is analyzed; with the consideration of distributed power generators and appliances in low-voltage microgrid, a mixed earthing scheme is proposed and the configuration scheme of its auxiliary equipment is researched.

Key words: system earthing; protection earthing; low-voltage microgrid; stray current; RCD

1 Fryze 时域无功与基于周期函数空间的通用无功定义

1.1 Fryze 时域无功理论

1932 年, Fryze 提出单相非正弦电路功率理论的时域分析方法^[15], 该方法把电流按照电压波形分解成有功电流 i_p 和无功电流 i_q , 其中有功电流 i_p 的波形与电压 u 完全一致, i_q 、 i_p 正交, 其定义如下:

$$i_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u i dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} u = \frac{P_F}{U^2} u \quad (1)$$

$$i_q = i - i_p \quad (2)$$

$$S_F = UI \quad (3)$$

$$Q_F = UI_q = \sqrt{S_F^2 - P_F^2} \quad (4)$$

其中, i_p 、 i_q 分别为有功电流和无功电流; I_q 为 i_q 的有效值; U 、 I 为电压、电流有效值; S_F 、 P_F 、 Q_F 分别为视在功率、有功功率和无功功率; T 为周期。

Fryze 时域功率理论是对于单相电路提出的, 将其推广应用于三相四线制电路。在三相四线制电路中, 每一相都用 Fryze 时域功率理论计算有功功率、无功功率, 把各相计算结果相加得三相总有功功率、总无功功率, 并基于此计算有功电能和无功电能。

1.2 基于周期函数空间的通用无功定义

2005 年, 马伟明教授提出基于周期函数空间的通用功率定义^[13], 简要介绍该功率定义如下。

构建一个 n 维周期函数空间 $X = \{[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T | \forall x \in \mathbf{R}, f_i(x) = f_i(x \pm T), T \in \mathbf{R}, i = 1, 2, \dots, n\}$ 。令 $\mathbf{a} \in X, \mathbf{b} \in X, \mathbf{a} = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T, \mathbf{b} = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x)]^T$ 。

定义此空间中的内积为:

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{m=1}^n f_m(x) g_m(x) dx \quad (5)$$

定义此空间中的范数为:

$$\|\mathbf{a}\| = \sqrt{\langle \mathbf{a}, \mathbf{a} \rangle} \quad (6)$$

对于一个 n 相电路系统, 令系统的相电压向量 $\mathbf{u}_{ph} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$, 相电流向量为 $\mathbf{i}_{ph} = [i_1, i_2, \dots, i_n]^T$, 其中 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 和 $i_1, i_2, \dots, i_n$ 分别为系统各相相电压和相电流的时间周期函数, 周期为 T 。显然有 $\mathbf{u}_{ph} \in X, \mathbf{i}_{ph} \in X$ 。

定义 1 有功电流向量 $\mathbf{i}_{Mp}$ 等于相电流向量 $\mathbf{i}_{ph}$ 对相电压向量 $\mathbf{u}_{ph}$ 的投影。

$$\mathbf{i}_{Mp} = \begin{bmatrix} i_{p1} \\ i_{p2} \\ \vdots \\ i_{pn} \end{bmatrix} = \frac{\langle \mathbf{u}_{ph}, \mathbf{i}_{ph} \rangle}{\langle \mathbf{u}_{ph}, \mathbf{u}_{ph} \rangle} \mathbf{u}_{ph} = G \mathbf{u}_{ph} \quad (7)$$

$$G = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{m=1}^n u_m i_m dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{m=1}^n u_m^2 dt} \quad (8)$$

其中, G 为常数。

定义 2 无功电流向量 $\mathbf{i}_{Mq}$ 等于相电流向量 $\mathbf{i}_{ph}$ 与有功电流向量 $\mathbf{i}_{Mp}$ 之差。

$$\mathbf{i}_{Mq} = \mathbf{i}_{ph} - \mathbf{i}_{Mp} = \begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{q2} \\ \vdots \\ i_{qn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 - i_{p1} \\ i_2 - i_{p2} \\ \vdots \\ i_n - i_{pn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

定义 3 有功功率 P_M 等于相电压向量范数 $\|\mathbf{u}_{ph}\|$ 和有功电流向量范数 $\|\mathbf{i}_{Mp}\|$ 的乘积。

$$P_M = \|\mathbf{u}_{ph}\| \|\mathbf{i}_{Mp}\| = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{m=1}^n u_m i_m dt \quad (10)$$

定义 4 无功功率 Q_M 等于相电压向量范数 $\|\mathbf{u}_{ph}\|$ 和无功电流向量范数 $\|\mathbf{i}_{Mq}\|$ 的乘积。

$$Q_M = \|\mathbf{u}_{ph}\| \|\mathbf{i}_{Mq}\| = \sqrt{\langle \mathbf{u}_{ph}, \mathbf{u}_{ph} \rangle} \sqrt{\langle \mathbf{i}_{Mq}, \mathbf{i}_{Mq} \rangle} \quad (11)$$

定义 5 视在功率 S_M 等于相电压向量范数 $\|\mathbf{u}_{ph}\|$ 和相电流向量范数 $\|\mathbf{i}_{ph}\|$ 的乘积。

$$S_M = \|\mathbf{u}_{ph}\| \|\mathbf{i}_{ph}\| \quad (12)$$

定义 6 广义功率因数 λ 等于有功功率 P_M 与视在功率 S_M 的商。

$$\lambda = \frac{P_M}{S_M} = \frac{\langle \mathbf{u}_{ph}, \mathbf{i}_{ph} \rangle}{\|\mathbf{u}_{ph}\| \|\mathbf{i}_{ph}\|} = \cos \theta \quad (13)$$

其中, θ 为 $\mathbf{u}_{ph}$ 和 $\mathbf{i}_{ph}$ 的夹角。

2 无功电能计量一致性理论分析

从 Fryze 功率理论和通用功率理论的定义出发, 分析 2 种功率理论对于无功计量在各相对称或不对称时(正弦和非正弦)计量一致性的条件。

在三相四线制电路中, 由 Fryze 功率理论对于有功电流的定义式(1)得:

$$\begin{aligned} i_{pa} &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_a i_a dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_a^2 dt} u_a = K_a u_a \\ i_{pb} &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_b i_b dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_b^2 dt} u_b = K_b u_b \\ i_{pc} &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_c i_c dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_c^2 dt} u_c = K_c u_c \end{aligned} \quad (14)$$

其中, i_{pa} 、 i_{pb} 、 i_{pc} 分别为 Fryze 功率理论定义的 a、b、c 相有功电流。

由 Fryze 功率理论对于无功电流的定义式(2)得:

$$i_{qa} = i_a - i_{pa}, \quad i_{qb} = i_b - i_{pb}, \quad i_{qc} = i_c - i_{pc} \quad (15)$$

由 Fryze 功率理论对于无功功率的定义式(4)得:

$$Q_{Fa} = U_a I_{qa} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_a^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{qa}^2 dt} \quad (16)$$

b 相、c 相的无功功率可类似得到,将 Fryze 功率理论推广应用于三相四线制电路,由式(16)可得:

$$Q_F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_a^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{qa}^2 dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_b^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{qb}^2 dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_c^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{qc}^2 dt} \quad (17)$$

在三相四线制电路中,由通用功率理论对于有功电流向量的定义式(7)得:

$$\mathbf{i}_{Mp} = \begin{bmatrix} i_{p1} \\ i_{p2} \\ i_{p3} \end{bmatrix} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) dt} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, i_{p1} 、 i_{p2} 、 i_{p3} 分别为通用功率理论定义的 a、b、c 相有功电流。

由通用功率理论对无功电流向量的定义式(9)得:

$$\mathbf{i}_{Mq} = \mathbf{i} - \mathbf{i}_{Mp} = \begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{q2} \\ i_{q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 - i_{p1} \\ i_2 - i_{p2} \\ i_3 - i_{p3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

由通用功率理论对于无功功率的定义式(11)得:

$$Q_M = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{q1}^2 + i_{q2}^2 + i_{q3}^2) dt} \quad (20)$$

在三相四线制电路中,当对称时,由于各相电压、电流的对称性,根据式(14)和式(18)分析可知:

$$\begin{aligned} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_a i_a dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_a^2 dt} &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_b i_b dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_b^2 dt} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_c i_c dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u_c^2 dt} = \\ &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) dt} \end{aligned} \quad (21)$$

即有:

$$K_a = K_b = K_c = G \quad (22)$$

因此,由式(14)、式(18)、式(22)对比分析可知,在对称的三相四线制电路中,Fryze 功率理论和通用功率理论对于有功电流的定义是相同的,且由于各相电压、电流的对称性,这 2 种功率理论定义的各相有功电流之间在一周期平方的积分也相等。即有:

$$i_{pa} = i_{p1}, \quad i_{pb} = i_{p2}, \quad i_{pc} = i_{p3} \quad (23)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_{pa}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{p1}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{p1}^2 dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_{p2}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{p2}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{p3}^2 dt \quad (24)$$

将式(23)代入式(15)和式(19)对比分析可知,在对称的三相四线制电路中,Fryze 功率理论和通用功率理论对于无功电流的定义是相等的,且由于各相电压、电流的对称性,这 2 种功率理论定义的各项无功电流之间在一周期平方的积分也相等。即有:

$$i_{qa} = i_{q1}, \quad i_{qb} = i_{q2}, \quad i_{qc} = i_{q3} \quad (25)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_{qa}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{q1}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{q1}^2 dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_{q2}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{q2}^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{q3}^2 dt \quad (26)$$

其中, i_{qa} 、 i_{qb} 、 i_{qc} 分别为 Fryze 功率理论定义的 a、b、c 相无功电流; i_{q1} 、 i_{q2} 、 i_{q3} 分别为通用功率理论定义的 a、b、c 相无功电流。

在对称的三相四线制电路中,由于各相电压、电流的对称性及根据式(26),可将式(17)化简整理得:

$$Q_F = 3 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_a^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{qa}^2 dt} \quad (27)$$

相似地,在对称的三相四线制电路中,由于各相电压、电流的对称性以及根据式(26),即可将式(20)化简整理得:

$$Q_M = \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^T u_1^2 dt} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^T i_{q1}^2 dt} \quad (28)$$

所以,根据式(26)——(28)对比分析可知:

$$Q_F = Q_M \quad (29)$$

这意味着,在对称的三相四线制电路中,Fryze 功率理论和通用功率理论对于无功功率的计算结果是相等的。

但是,在不对称的三相四线制电路中,由于各相电压、电流不具备对称性,式(21)、式(22)不能成立,从而式(23)——(26)不能成立。所以式(27)——(29)也不能成立,于是在不对称时 Fryze 功率理论和通用功率理论对于无功功率的计算结果不相等。

从上面的推导论证过程可知,2 种功率理论的无功电能计量一致性条件不受电路系统相数影响,对于任意 n 相电路系统(有中线)都可以有类似的推导和得出一样的结论。

一般地,对于 n 相电路系统(有中线),每一相都用 Fryze 功率理论计算有功功率、无功功率,把各相计算结果相加得 n 相总有功功率、总无功功率,这样扩展应用 Fryze 功率理论于 n 相电路系统时,则与基于周期函数空间的通用功率理论应用于 n 相电路系统相比具有如下结论。

a. 在各种工况、各种波形情况下,2 种功率理论的有功功率定义是一致的,有功功率的物理意义明确,这 2 种方法的有功计量结果都相同。

b. Fryze 功率理论和通用功率理论对于无功功率的定义适用于正弦和非正弦的情况。在对称时 2

种功率理论的无功功率定义是一致的,无功计量结果都相同;在不对称时 2 种功率理论的无功功率定义不一致,无功计量结果不相同;即这 2 种功率理论的无功计量结果相同与否只与各相电路是否对称有关,而与电压、电流是正弦或非正弦无关。在各相电路不对称时,若不对称性越小,则 2 种功率理论的无功计量结果相差越小;若不对称性越大,则 2 种功率理论的无功计量结果相差越大;即各相电路不对称的程度决定了 2 种功率理论的无功计量结果相差的程度。

3 基于 dSPACE 平台的无功电能计量仿真

3.1 电能计量实时仿真系统设计

由于算法复杂,且要求具有较高的计算精度和很强的实时性,因此基于 dSPACE 平台构建电能计量实时仿真系统进行实时仿真验证。电能计量实时仿真系统结构框图如图 1 所示。PC 机负责和实时仿真平台通信,完成算法和模型编辑、仿真、编译下载、实时显示、人机交互操作等。实时仿真平台运行嵌入算法和模型,控制、协调整个系统的运行,完成数据采集、处理和输出等。输入接口完成电参量信号变换以及产生同步采样的触发信号,以便实时仿真平台与外部设备连接和同步采集外部输入信号。谐波源接口和谐波源完成谐波信号产生、放大输出,这部分采用现有的标准谐波源设备来实现。

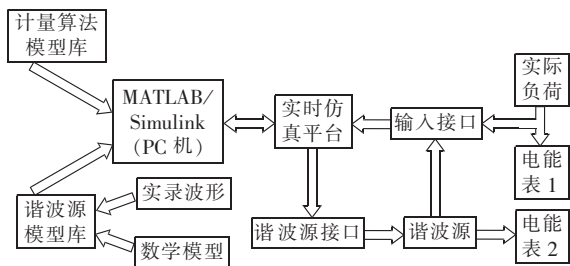


图 1 电能计量仿真系统组成结构框图

Fig.1 Structure of simulation system of electric energy measurement

一方面,实际负荷或虚拟负荷通过输入接口变换、调理后输入到实时仿真平台进行计算和处理,与电能表 1 比较,即可进行算法性能分析、优化以及电能表校验等。另一方面,实时仿真平台输出预定谐波信号,经谐波源接口,谐波源放大输出一定功率的、含有预定谐波的虚拟负荷,再从输入接口采集输入到实时仿真平台进行计算、分析和处理,实现闭环控制处理,即可进行谐波分析、计量,算法性能分析、优化,与电能表 2 比较实现对比研究等。

论文选用的 dSPACE 平台硬件资源及主要技术指标为:处理器板 DS1006,CPU 主频 2.8 GHz,内存 15 GB;A/D 板 DS2004,16 位分辨率,转换时间 800 ns;

D/A 板 DS2102,16 位分辨率,建立时间 $1.6\ \mu\text{s}$;数字 I/O 板 DS4002;串口板 DS4201-S;通信板 DS814 和 DS819。

3.2 建立实时模型

根据上述 2 种时域功率理论,并进行必要的离散化处理,分别进行三相四线制电路的总有功功率、总无功功率计量算法设计和建立实时模型。建立实时模型时,积分方法统一采用 Cotes 积分法。

实验装置输出电压、电流信号,经过接口电路采集输入到 dSPACE 平台进行计算处理。设置各 A/D 通道完成连续单周期采样 512 点,分别用 Embedded MATLAB Function 模块嵌入 2 种功率理论的计量算法程序,分别实现三相四线制电路的总有功功率、总无功功率计量,这样即可对这 2 种功率理论的计量特点进行分析比较研究。

3.3 三相四线制电路电能计量实验

把实时模型下载到 dSPACE 平台运行,并接入相关设备进行三相四线制电路的总有功功率、总无功功率计量实验。用德国 EMH 公司的准确度为 0.02 级的 MTE F3-10.03-CI.0.01 三相功率电能表标准装置输出电压、电流,德国 EMH 公司的准确度为 0.01 级的 K2006 三相高准确度多功能功率电能比较仪计量标准装置输出功率,以此比较仪与电能计量实时仿真系统的计量结果作对比分析。

实验分三相对称和三相不对称 2 种工况,每种工况又分正弦和非正弦(即含谐波,谐波次数为 1~9 次)2 种情况。在各次实验中,各种工况下统一设置三相四线制电路各相的电压、电流。基波频率为 $f=50\ \text{Hz}$,功率因数为感性 0.5。在三相对称和三相不对称以及正弦和非正弦的情况下,分别设置各次实验的各相相电压、相电流有效值及各次谐波含量。在各次实验中,每隔 10 min 记录一组数据,共记录 5 组。

3.3.1 三相对称

a. 正弦。

设置三相四线制电路各相相电压为 57.7 V,相电流为 5 A。记录计量结果实验数据如表 1 所示。

从表 1 可见,在三相对称正弦时,2 种功率理论对于有功功率、无功功率的计量结果都是一致的,且与 K2006 比较仪的计量结果相比均在误差范围内,也是一致的。这表明,在三相对称正弦且功率因数为感性的情况下,这 3 种方法的计量一致,2 种功率理论都和经典正弦功率理论一致,这时的有功计量和无功计量都没有争议。

b. 非正弦。

设置三相四线制电路各相基波相电压为 57.7 V,基波相电流为 5 A,各次谐波电压、谐波电流的含量如表 2 所示。记录计量结果实验数据如表 3 所示。

从表 3 可见,在三相对称非正弦时,2 种功率理论对于有功功率、无功功率的计量结果都是一致的,但与 K2006 比较仪的无功计量结果差别较大。这表明,在三相对称非正弦时,有功计量是一致的;对称时 Fryze 功率理论和通用功率理论对于无功功率计量是一致的,但 K2006 比较仪采用经典正弦无功功率定义,不能准确反映非正弦时的无功功率,因此与 2 种功率理论均不相同。

3.3.2 三相不对称

a. 正弦。

设置三相四线制电路:a 相相电压为 60 V,相电流为 6 A;b 相相电压为 57.7 V,相电流为 5 A;c 相相电压为 55 V,相电流为 4 A。记录计量结果实验数据如表 4 所示。从表 4 可见,在三相不对称正弦时,2 种功率理论对于有功功率的计量结果是一致的,而对于无功功率的计量结果不相同。K2006 比较仪的无功功率计量与 Fryze 功率理论是一致的,但与通用功率理论不相同。这表明,在三相不对称正弦的情

况下,有功计量也是一致的;K2006 比较仪是计量各相的功率后求代数 and 得总功率,因此与 Fryze 功率理论的扩展一致,而由于不对称,故通用功率理论与此两者均不一致。

b. 非正弦。

设置三相四线制电路:a 相基波相电压为 60 V,基波相电流为 6 A,各次谐波含量如表 5 所示;b 相基波相电压为 57.7 V,基波相电流为 5 A,各次谐波含量如表 2 所示;c 相基波相电压为 55 V,基波相电流为 4 A,各次谐波含量如表 6 所示。记录计量结果实验数据如表 7 所示。从表 7 可见,在三相不对称非正弦时,2 种功率理论对于有功功率的计量结果是一致的,且与 K2006 比较仪的计量结果相比在误差范围内,因此是一致的,但对于无功功率的计量结果不一致。2 种功率理论与 K2006 比较仪三者的无功功率计量结果差别较大。这表明,在三相不对称非正弦的情况下,有功计量仍是一致的,而无功计量结果差异较大,非正弦无功功率计量不一致。

表 1 三相四线制电能计量实验数据(对称正弦)

Tab.1 Experimental data of three-phase four-wire electrical energy measurement for symmetric and sinusoidal wave

时间	K2006 比较仪有功 功率计量值/W	Fryze 功率理论有功 功率计量值/W	通用功率理论有功 功率计量值/W	K2006 比较仪无功 功率计量值/var	Fryze 功率理论无功 功率计量值/var	通用功率理论无功 功率计量值/var
00:10:00	434.356	432.387 6	432.387 6	751.454	750.086 3	750.136 4
00:20:00	434.204	430.152 8	430.152 8	751.574	750.085 3	750.128 7
00:30:00	434.124	432.226 7	432.021 7	751.213	749.149 2	750.429 3
00:40:00	434.103	430.401 7	430.401 7	751.113	747.168 0	747.219 6
00:50:00	434.678	433.529 7	433.529 7	751.232	749.362 3	749.412 4

表 2 三相对称电压、电流谐波含量

Tab.2 Percentage of harmonics in three-phase symmetric voltage and current

谐波 次数	谐波含量/%		谐波 次数	谐波含量/%		谐波 次数	谐波含量/%	
	电压	电流		电压	电流		电压	电流
1	100	100	4	2	2	7	3	3
2	3	3	5	5	5	8	0.5	0.5
3	10	10	6	1	1	9	2	2

表 3 三相四线制电能计量实验数据(对称非正弦)

Tab.3 Experimental data of three-phase four-wire electrical energy measurement for symmetric and nonsinusoidal wave

时间	K2006 比较仪有功 功率计量值/W	Fryze 功率理论有功 功率计量值/W	通用功率理论有功 功率计量值/W	K2006 比较仪无功 功率计量值/var	Fryze 功率理论无功 功率计量值/var	通用功率理论无功 功率计量值/var
00:10:00	419.125	414.793 0	414.793 0	740.784	759.661 3	759.702 6
00:20:00	419.841	418.714 6	418.088 5	740.455	757.744 2	758.215 7
00:30:00	419.787	418.004 2	418.004 2	740.558	758.789 2	758.852 8
00:40:00	419.445	416.957 9	416.957 9	740.697	759.553 1	759.612 0
00:50:00	419.753	417.987 0	417.987 0	740.882	759.817 2	759.860 3

表 4 三相四线制电能计量实验数据(不对称正弦)

Tab.4 Experimental data of three-phase four-wire electrical energy measurement for asymmetric and sinusoidal wave

时间	K2006 比较仪有功 功率计量值/W	Fryze 功率理论有功 功率计量值/W	通用功率理论有功 功率计量值/W	K2006 比较仪无功 功率计量值/var	Fryze 功率理论无功 功率计量值/var	通用功率理论无功 功率计量值/var
00:10:00	435.437	435.021 0	435.021 0	754.214	751.490 7	759.705 4
00:20:00	435.575	435.581 4	431.877 4	754.523	752.455 3	758.127 2
00:30:00	435.181	432.857 2	432.857 2	754.265	750.558 3	758.088 3
00:40:00	435.233	433.844 2	433.844 2	754.784	752.336 4	760.425 3
00:50:00	435.212	433.348 9	433.348 9	754.986	753.978 5	762.012 9

表 5 a 相电压、电流谐波含量

Tab.5 Percentage of harmonics in voltage and current wave of phase a

谐波 次数	谐波含量/%		谐波 次数	谐波含量/%	
	电压	电流		电压	电流
1	100	100	6	1	1
2	3	3	7	4	4
3	11	11	8	0.5	0.5
4	2	2	9	3	3
5	6	6			

表 6 c 相电压、电流谐波含量

Tab.6 Percentage of harmonics in voltage and current of phase c

谐波 次数	谐波含量/%		谐波 次数	谐波含量/%	
	电压	电流		电压	电流
1	100	100	6	1	1
2	3	3	7	2	2
3	9	9	8	0.5	0.5
4	2	2	9	1	1
5	4	4			

表 7 三相四线制电能计量实验数据 (不对称非正弦)

Tab.7 Experimental data of three-phase four-wire electrical energy measurement for asymmetric and nonsinusoidal wave

时间	K2006 比较仪有功 功率计量值/W	Fryze 功率理论有功 功率计量值/W	通用功率理论有功 功率计量值/W	K2006 比较仪无功 功率计量值/var	Fryze 功率理论无功 功率计量值/var	通用功率理论无功 功率计量值/var
00:10:00	420.554	419.467 3	419.467 3	742.035	759.975 1	767.715 1
00:20:00	420.421	418.839 0	418.839 0	742.207	761.105 7	768.711 4
00:30:00	420.856	420.226 6	419.196 7	742.538	763.015 9	770.728 8
00:40:00	420.962	420.726 3	420.726 3	742.217	761.342 7	769.232 2
00:50:00	420.433	418.646 6	418.646 6	742.292	761.564 5	769.377 9

K2006 比较仪是采用经典正弦无功功率定义来计量每相的无功功率,然后求代数和得总无功功率,故 K2006 比较仪不能准确反映非正弦时的无功功率。而在正弦且负载为感性时,Fryze 功率理论的无功功率定义与经典正弦无功功率理论定义一致,并且扩展应用 Fryze 功率理论时,也是对各相结果求代数和而得。所以 K2006 比较仪与 Fryze 功率理论对于无功功率计量在正弦时相同而在非正弦时不相同,与各相电路是否对称无关。

3.4 2 种功率理论的对比分析

单相电路中 Fryze 功率理论的有功、无功和视在功率满足功率三角形关系,但在多相电路中若简单地采用各相的有功、无功和视在功率相加获得总的有功、无功和视在功率,则总的有功、无功和视在功率不再始终满足功率三角形关系(各相对称时仍满足),同时功率因数在这一概念体系下也很难定义。

基于周期函数空间的通用功率定义应用于单相电路时可以得到与 Fryze 功率理论完全一致的结论。该通用功率定义中有功、无功和视在功率始终满足功率三角形关系,同时功率因数定义为 $\cos \theta$,见式(13),物理意义明确。有功电流的波形与相电压在波形上完全一致,仅相差一个比例系数,该性质具有较好的工程应用价值。该通用功率定义的无功可以较全面地反映同频率电压、电流之间产生的无功功率以及不同频率电压、电流之间产生的无功功率,可以较全面地反映多相电路中功率交换情况。因此,基于周期函数空间的通用功率定义具有更大的优越性,适用于更普遍的情况。

4 结论

论文从理论定义的角度分析论证了 Fryze 时域无功与基于周期函数空间的通用无功定义对于无功

计量相同和差异的原因,分析其无功电能计量统一性条件和非一致性情况。由于算法复杂,计算量较大,而又要求较强的计算实时性以满足实际需要,因此基于 dSPACE 平台构建电能计量实时仿真系统,开展无功计量建模和实验研究,从实验的角度验证无功电能计量一致性理论分析。理论分析与实验结果表明,此 2 种功率理论的有功功率定义统一,物理意义明确;Fryze 无功理论和通用无功理论对于无功功率的定义适用于正弦和非正弦的情况,在对称时 2 种功率理论的无功功率定义一致,此时无功计量结果相同,而在不对称时 2 种无功功率定义不一致,此时无功计量结果不相同。经对比分析,认为基于周期函数空间的通用无功定义具有更大的优越性,适用于更普遍的情况。

国际电工界对非正弦无功功率理论的研究给予了极大的关注,但非正弦无功功率尚无统一的理论定义,还没有满意的物理解释。因此,发展更合理的非正弦无功功率理论以及更先进的无功电能计量技术尤为必要和迫切,也是今后电能计量领域需要密切关注的课题。

参考文献:

[1] HAASE P. Intelligrid:a smart network of power[J]. EPRI Journal, 2005(Fall):17-25.
[2] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
YU Yixin,LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(34):1-8.
[3] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序[J]. 南方电网技术,2009,3(2):1-5.
YU Yixin. Technical composition of smart grid and its implementation sequence[J]. Southern Power System Technology, 2009,3(2):1-5.

- [4] 吕干云,方奇品,马世平. 基于鲁棒锁相环的谐波环境下电能计量方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):79-82.
LÜ Ganyun,FANG Qipin,MA Shiping. Electric energy measurement with harmonics based on robust PLL[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):79-82.
- [5] 栾文鹏. 高级量测体系[J]. 南方电网技术,2009,3(2):7-12.
LUAN Wenpeng. Advanced metering infrastructure[J]. Southern Power System Technology,2009,3(2):7-12.
- [6] MELIOPOULOS A P S,COKKINIDES G,HUANG Renke,et al. Smart grid technologies for autonomous operation and control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(1):1-10.
- [7] 张惠刚. 完全不平衡三相电路无功功率测量精度的探讨[J]. 电力自动化设备,1997,17(4):19-21.
ZHANG Huigang. Research on improving reactive power measure precision for complete unbalanced three-phase circuit[J]. Electric Power Automation Equipment,1997,17(4):19-21.
- [8] 戴先中,唐统一,孙树勤. 非正弦三相电路中瞬时无功量的普遍化定义[J]. 中国电机工程学报,1998,18(6):388-394.
DAI Xianzhong,TANG Tongyi,SUN Shuqin. A generalized definition of instantaneous reactive quantity in nonsinusoidal three-phase systems[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(6):388-394.
- [9] 王茂海,孙元章. 三相电路中功率现象的解释及无功功率的分类[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):63-66.
WANG Maohai,SUN Yuanzhang. Analysis of power phenomenon and classification of reactive power in three-phase circuit[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(10):63-66.
- [10] 丁洪发,段献忠. 基于四维复数概念的瞬时功率定义[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):45-50.
DING Hongfa,DUAN Xianzhong. Defining instantaneous power components based on the concept of four-dimension complex number[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(11):45-50.
- [11] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁. 基于 Hilbert 变换的非正弦电路无功及瞬时无功功率定义[J]. 电力系统自动化,2004,28(12):35-39.
XUE Yongduan,XU Bingyin,FENG Zuren. Average and instantaneous reactive power of non-sinusoidal circuit based on Hilbert transformation[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(12):35-39.
- [12] 同华光,杨林,宗建华. 无功及视在功率物理意义的剖析[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):17-22.
YAN Huaguang,YANG Lin,ZONG Jianhua. Analysis of physical meaning of reactive power and apparent power[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(11):17-22.
- [13] 胡文彪,马伟明. 基于周期函数空间的通用功率定义[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19):64-70.
HU Wenbiao,MA Weiming. A universal definition of power based on periodic function space[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(19):64-70.
- [14] FILIPSKI P S,BAGHZOUZ Y,COX M D. Discussion of power definitions contained in the IEEE dictionary[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1994,9(3):1237-1244.
- [15] FRYZE S. Active,reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current(in Polish)[J]. Przegląd Electrotechniczny,1931(7):193-203.
- [16] AKAGI H,KANAWA Y,NABAE A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits[C]//1983 IEEE International Power Electronics Conference,IPEC'83. Tokyo,Japan:IEEE,1983:1375-1386.

作者简介:

付志红(1966-),男,重庆人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电能计量仿真技术、电力电子、电磁探测技术(E-mail:fuzhihong@cqu.edu.cn);

熊学海(1981-),男,贵州台江人,硕士,研究方向为电力系统继电保护与控制、电能计量仿真技术(E-mail:xiongshuehai@sohu.com)。

Analysis of coherence condition for Fryze time-domain reactive power definition and universal reactive power definition

FU Zhihong¹,XIONG Xuehai^{1,2},HOU Xingzhe³,LI Chunyan¹,ZHANG Huaqing¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University,Chongqing 400030,China;2. Power Dispatch and Control Center of

Guizhou Power Grid Corporation,Guiyang 550002,China;

3. Electric Power Experimental Research Institute of Chongqing,Chongqing 401123,China)

Abstract: Based on the theory of time-domain reactive power,the difference between the reactive power definition in Fryze time-domain and the universal reactive power definition based on periodic function space is theoretically analyzed in respect to reactive power measurement and the coherence conditions of reactive power measurement are studied. A real-time simulation system of electrical energy measurement is constructed on dSPACE platform and the model of three-phase four-wire circuit for reactive power measurement is built and tested. Theoretical analysis and experimental results show that,with clear physical meaning,the active power definitions by two power theories are coherent;the reactive power definitions by two power theories are applicable for both sinusoidal and nonsinusoidal conditions,but only in symmetric conditions,two reactive power definitions are coherent and the measurements are same;the universal reactive power definition based on periodic function space has greater superiority.

Key words: electrical energy measurement; reactive power measurement; power theory; dSPACE platform; computer simulation; reactive power