

基于 IEEE 1459 标准的非线性负载有功功率测量研究

曹庆,王灿,刘锐,李骁睿,周秉成

(国网四川省电力公司乐山供电公司,四川 乐山 614000)

摘要:针对谐波有功损耗测量问题,文中改进了 Emanuel 功率理论中非线性负载等效模型,并结合基于 Emanuel 功率理论的 IEEE 1459 标准中视在功率分解公式,推导了基于改进的非线性负载等效模型的谐波有功损耗测量表达式;利用 Matlab 仿真分析非线性负载有功损耗的 3 种测量方式;通过比较得出所提测量方法能更准确方便地测量非线性负载有功损耗。最后,利用电能质量测量仪器,实测某电网 10 kV 负载谐波含量,结合所提方法计算负载有功损耗,验证了该方法的有效性及其带来的经济效益。

关键词:谐波有功损耗;非线性负载等效模型;IEEE 1459;功率流;Matlab

中图分类号:TM 933 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)03-0074-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230313

Research on Active Power Measurement of Nonlinear Load Based on IEEE 1459 Standard

CAO Qing, WANG Can, LIU Rui, LI Xiaorui, ZHOU Jiancheng

(State Grid Leshan Electric Power Supply Company, Leshan 614000, Sichuan, China)

Abstract:The nonlinear load equivalent model of Emanuel power theory is improved for harmonic active loss measurement problem. Combined with the apparent power decomposition formula of IEEE 1459 standard based on Emanuel power theory, the harmonic active loss measurement expression based on the improved nonlinear load equivalent model are derived. The results of three measurement methods for nonlinear load active loss is analyzed by Matlab simulation. By comparison, the proposed measurement method can measure the nonlinear load active loss more accurately and conveniently. Finally, the power quality measurement instrument is used to measure the harmonic content of 10 kV load in a power grid. The load loss is calculated by the proposed method, which verifies the effectiveness of the proposed method and the economic benefits.

Key words:harmonic active loss; nonlinear load equivalent model; IEEE 1459; power flow; Matlab

0 引言

随着大量电力电子设备的涌入,电网所受谐波污染已经越来越严重^[1],目前对谐波引起线路损耗的问题已有很多研究^[2-4],而对非线性负载损耗的计量研究相对较少。文献[5-8]利用传统的计量方式评估了谐波对线路损耗的影响,并未考虑传统计量方式计算谐波损耗的合理性。文献[9]分析了感应式和电子式电能表两类计量装置的误差频率特性,指出了现行计量方式存在的不合理性,提出了考

虑背景谐波源的新型电能计量方式,但未进行理论及实验验证。在当今电力系统中,由于智能电网建设的快速推进,智能电能表的功能强化及测量准确性的提高已经成为全面推进智能电网的关键,因此找出一种正确有效计量非线性负载有功损耗的方法是目前电网迫切需要的。

2010年,IEEE发行IEEE 1459正式标准,强调在非正弦系统下,将基波有功功率、无功功率和其余视在功率分量进行分解,重新定义了功率因数,为功率理论的研究和智能电能表的开发提供了坚实的理论依据^[10-12]。

IEEE 1459 利用傅里叶分解方法,将电压和电流分解为各次谐波之和,在此基础上定义了谐波有功功率的计算方法,但该计算方法并不是针对非线性负载所提出,并未规定非线性负载谐波有功损耗为非线性负载两端各次电压、电流以及功率因素的乘积之和。然而,现有的大量文献以及目前市场上很多谐波计量芯片,如上海钜泉光电科技公司开发的 ATT2026A、美国亚德诺公司开发的 ADE7880 等都是依据 IEEE 1459 标准对谐波有功功率的定义,并未考虑非线性负载内部等效模型对谐波有功损耗计量的影响,而是利用采集的非线性负载两端电压电流及相角数据,计算得到非线性负载的谐波有功损耗^[13-17]。

下面,根据 IEEE 1459 功率流理论的主要作者 Emanuel 在《功率定义及功率流的物理机制》书中提到的非线性负载模型^[18],将非线性负载等效为戴维南模型,结合 IEEE 1459 功率流理论推导了非线性负载有功损耗计量方式,仿真分析了基波计量方式、傅里叶分解计量方式以及功率流计量方式在计量非线性负载有功损耗情况下的准确性。最后,通过实际测量电网 10 kV 砂石场负载,与电网计量关口对比分析,验证了用所提方法计量负载谐波损耗的有效性,评估了用该方法计量负载有功损耗的经济效益。

1 有功功率的计量原理

当今电力系统中,由于非线性负荷导致电压电流产生畸变,传统的基于正弦波的计量有功损耗方式已不再适用,需要对谐波所引起的损耗加以考虑,重新定义非正弦情况下,负载有功损耗的计算方法。

1.1 正弦情况下的单相负载有功功率计算

传统有功功率计量方式都是基于电压、电流为正弦波。

$$P = I^2 R_L = VI \cos \theta \quad (1)$$

式中: V 为负荷电压的有效值; I 为负荷电流的有效值; $\cos \theta$ 为功率因数, θ 为电压和电流相角差; R_L 为负载的等效阻值。

1.2 非正弦情况下的单相非线性负载有功功率计算

在谐波环境下,电压和电流曲线发生畸变,此时计量负荷损耗需要对谐波这部分损耗加以

考虑。

1.2.1 IEEE 1459 功率流理论

为了更好地表示功率流理论的含义,文献[19]将非线性负载等效为如图 1 所示电路, R_s 与 L_s 分别为线路的等效电阻与等效电感。将非线性负载等效为基波电压源和谐波电压源串联。由于谐波是由非线性负载产生,所以谐波电压源和电源电压同向,与等效基波电压源反向。

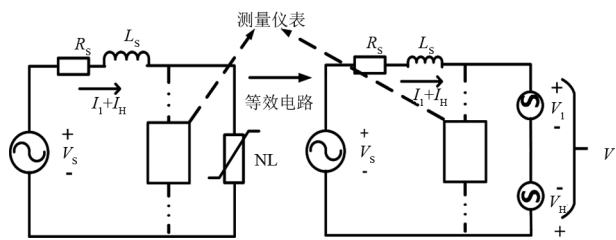


图 1 非线性负载等效电路

根据 IEEE 1459 标准规定,在谐波环境下将电流电压分解为:

$$I^2 = I_1^2 + I_h^2; I_h^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (2)$$

$$V^2 = V_1^2 + V_h^2; V_h^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad (3)$$

式中: I_h 、 V_h 分别为总谐波电流、电压有效值; I_h 、 V_h 分别为 h 次谐波电流、电压有效值; I_1 、 V_1 分别为基波电流、电压有效值。

在非线性负载系统中,线路总谐波电压畸变率 T_{HDV} 与总谐波电流畸变率 T_{HDI} 分别定义为:

$$T_{HDV} = \frac{V_h}{V_1} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \frac{V_h^2}{V_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

$$T_{HDI} = \frac{I_h}{I_1} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \frac{I_h^2}{I_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

对视在功率 S 进行分解。

$$\begin{aligned} S^2 = V^2 I^2 &= (I_1^2 + I_h^2)(V_1^2 + V_h^2) = \\ &= (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_h)^2 + (V_h I_1)^2 + \\ &= (V_h I_h)^2 = S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中:电流畸变功率 D_I 为

$$D_I = V_1 I_h = V_1 \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2} \quad (7)$$

电压畸变功率 D_V 为

$$D_V = V_h I_1 = I_1 \sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2} \quad (8)$$

谐波视在功率 S_H 为

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} = V_h I_h =$$

$$V_1 I_1 T_{HDV} T_{HDI} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2 \sum_{h \neq 1} V_h^2} \quad (9)$$

谐波畸变功率 D_H 为

$$D_H = \left\{ \left(\sum_{h \neq 1} V_h I_h \sin \theta_h \right)^2 + \sum_{m=1}^{\gamma-1} \sum_{n=m+1}^{\gamma} \left[(V_m I_n)^2 + (V_n I_m)^2 - 2V_m V_n I_n I_m \cos(\theta_m - \theta_n) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中, m, n, r 为不同的谐波次数。

非线性负载能量转化如图 2 所示。

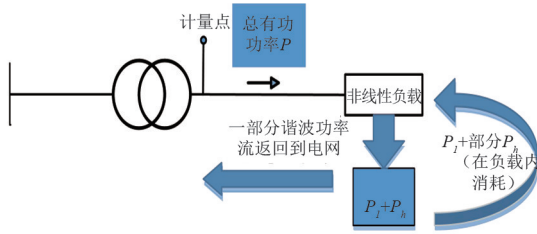


图 2 非线性负载功率流向

1.2.2 基于傅里叶方法分解计量单相非线性负载有功损耗的准确性分析

为了研究非线性负载内部有功损耗,将图 1 中 V_1 等效为阻值 R_L 、等效电感 L_L 串联,再和谐波源 V_H 串联构成等效电路,当电流 I_1 流经 R_L, L_L 时产生 V_1 的压降,如图 3 所示。该电路实际是非线性负载诺顿等效电路的戴维南转换,相比图 1 等效模型,以该等效电路来计算非线性负载损耗,能更贴切地描述非线性负载内部损耗的转换过程。

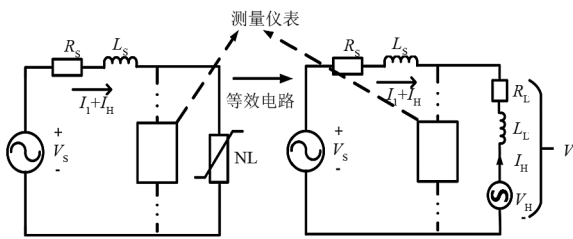


图 3 非线性负载等效电路

利用叠加原理,将图 3 进一步等效为电源单独作用与谐波源单独作用两种情况,当谐波源单独作用时,其等效电路如图 4 所示。

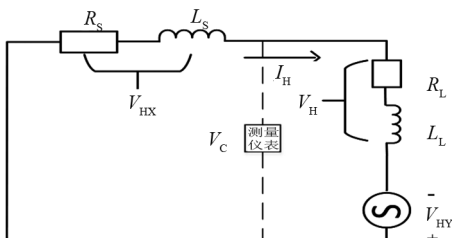


图 4 谐波源单独作用的等效电路

结合图 3、图 4 可得测量仪表两端电压 V_C 等于谐波源在线路上产生的电压 V_{HX} , 测量仪表两端的各次谐波电压 V_C 与各次谐波电流 I_h 关系为

$$V_C = V_{hx} = I_h(R_L + j\omega_h L_L) - V_{hy} \quad (11)$$

式中: V_{hy} 为等效谐波源 V_{HY} 发射的各次谐波电压; V_{hx} 为线路上的各次谐波电压。由上述分析可得,实测各次谐波电压 V_C 受谐波源 V_{hy} 与等效电阻 R_L 以及谐波电流 I_h 共同影响,且等效阻值 R_L 是根据非线性负载基波有功功率 P_1 求得。

$$P_1 = I_1^2 R_L = U_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (12)$$

上述分析证明了实际非线性负载谐波电压和谐波电流的含量与负载所运行的基波有功功率存在着一定的联系,这与实际生活中的情况也相吻合。

谐波源单独作用时,各部件谐波视在功率如图 5 所示。从图中可以看出,以非线性负载两端电压 V_C 来计算得到的谐波视在功率实际为线路的谐波视在功率 S_{HX} 。

$$S_C = S_{HX} = I_H V_{HX} = \sum_{h \neq 1} I_h [I_h(R_L + j\omega_h L_L) - V_{hy}] \quad (13)$$

理论上非线性负载的谐波视在功率 S_H 应与谐波源提供的视在功率 S_{HY} 分开考虑, S_H 应为等效阻值 R_L 和 L_L 上消耗的谐波视在功率。

$$S_H = \sum_{h \neq 1} I_h [I_h(R_L + j\omega_h L_L)] \quad (14)$$

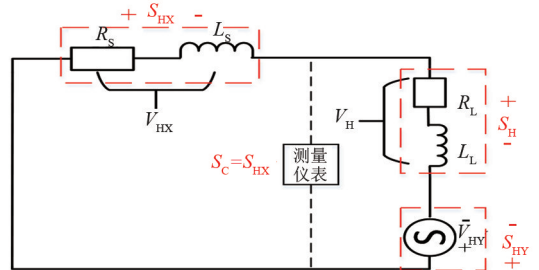


图 5 各部件谐波视在功率

因此以测量仪表两端的谐波电压 V_C 计算得到非线性负载谐波有功损耗势必会带来错误,计算结果如式(15)所示。

$$P_C = \sum_{h \neq 1} I_h [I_h(R_L + j\omega_h L_L) - V_{hy}] \cos \theta_h = \sum_{h \neq 1} V_{hx} I_h \cos \theta_h \quad (15)$$

测量仪表计量结果 P_C 为线路的谐波有功损耗,并不等于非线性负载上消耗的谐波有功功率。

1.2.3 基于功率流分解方法计算单相非线性负载谐波损耗

考虑从功率流分解方法入手,可得非线性负载有功损耗 P 为

$$P = \frac{S^2}{V^2} R_L \quad (16)$$

结合式(2)一式(9)可得

$$S^2 = S_1^2 \left\{ 1 + T_{HD_I}^2 + T_{HD_V}^2 + [(T_{HD_I})(T_{HD_V})]^2 \right\} \quad (17)$$

结合式(16)、式(17)整理可得

$$P = \frac{S_1^2 \left\{ 1 + T_{HD_I}^2 + T_{HD_V}^2 + [(T_{HD_I})(T_{HD_V})]^2 \right\}}{V_1^2 + V_H^2} R_L = \frac{\left\{ 1 + T_{HD_I}^2 + T_{HD_V}^2 + [(T_{HD_I})(T_{HD_V})]^2 \right\}}{1 + T_{HD_V}^2} I_1^2 R_L = (1 + T_{HD_I}^2) I_1^2 R_L \quad (18)$$

分析图 3、图 4 等效电路,由欧姆定律可得非线性负载有功损耗 P 为

$$P = I_1^2 R_L + \sum_{h \neq 1} I_h^2 R_L = (1 + T_{HD_I}^2) I_1^2 R_L \quad (19)$$

基于功率流分解计算方法与基于欧姆定律计算方法得到的结果是相同的,验证了非线性负载谐波有功损耗计算式(18)的准确性。

设功率流修正因子 K 为

$$K = 1 + T_{HD_I}^2 \quad (20)$$

则基于功率流分解方法所测非线性负载总损耗 P 就可以表示为功率流修正因子与传统基波计量损耗的乘积,即

$$P = KP_1 = KI_1^2 R_L = KV_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (21)$$

即非线性负载谐波损耗 P_H 可表示为

$$P_H = (K - 1)P_1 = (K - 1)I_1^2 R_L = (K - 1)V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (22)$$

1.2.4 基于功率流分解方法与基于傅里叶分解方法计量结果的对比分析

设非线性负载基波视在功率 S_1 为 800 kVA,基波有功损耗为 760 kW(基波功率因数为 0.95),代入式(9)和式(22)。由于各次谐波功率角随机性较大难以假定,导致基于傅里叶分解方法计量的非线性负载谐波有功功率很难确定,所以仅做出基于功率流方法计量的非线性负载谐波有功损耗和基于傅里叶分解方法计量的非线性负载谐波视在功率随不同电压、电流畸变率的变化曲面图,以此来对比分

析两种计量方式的准确性,如图 6 所示。

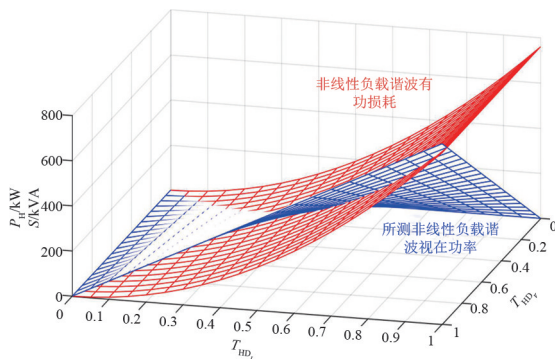


图 6 谐波视在功率与负载谐波功率对比

从图 6 中可以看出,两个空间平面在谐波电压畸变率 T_{HD_V} 与电流畸变率 T_{HD_I} 相等时相交,在 $T_{HD_I} > T_{HD_V}$ 区域内傅里叶分解计量模块计量的非线性负载谐波视在功率小于功率流计量模块计量的非线性负载谐波有功损耗;在 $T_{HD_V} > T_{HD_I}$ 区域内傅里叶分解计量模块计量的非线性负载谐波视在功率大于负载谐波有功损耗。可见以测量仪表(非线性)两端的谐波电压 V_c 代入式(15)得到非线性负载谐波损耗的计算方法是错误的,其未对非线性负载谐波有功损耗正确计量。考虑用所提出的谐波损耗计算方式不仅理论上依据,而且还能更好地评估非线性负载谐波损耗的经济效益。

由式(20)、式(21)可知,当计算非线性负载损耗时,只需知道用户的基波有功损耗及电流畸变率,就可以通过 K 系数修正,准确计量负载的谐波损耗。该运算方法不仅对谐波引起负载有功损耗进行了准确的计量,而且避免了求取电压畸变率的繁琐及引入不必要的计量错误,其理论依据更有说服力。图 7 为 K 系数随电压、电流畸变率变化的三维立体图,可以看出修正系数 K 受电流畸变率的影响,随着电流畸变率的增大, K 系数逐渐增大。

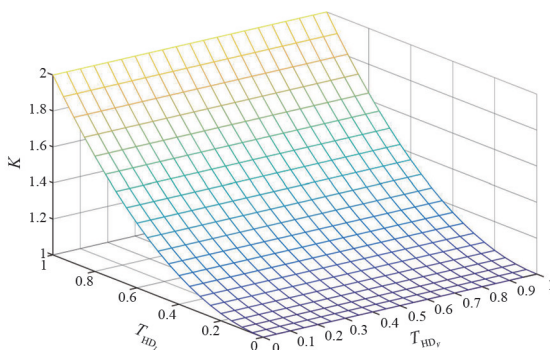


图 7 K 系数与电压、电流畸变率关系

2 实验仿真分析

变频器广泛应用于日常生活中,而其中 AC-DC-AC 电路被广泛用于大功率变频电动机。因此结合 Matlab/Simulink 搭建 AD-DC-AC 变频器模型,变频器将 50 Hz 电网电源变换为直流,再经过无源逆变,变换到 60 Hz 供三相负载使用。其仿真模型如图 8 所示。在 10/0.4 kV 变压器高压侧及低压侧连接测量模块,观察各测量模块对变频负载的损耗计量结果(负载为三相平衡负载,只对一相进行测量)。

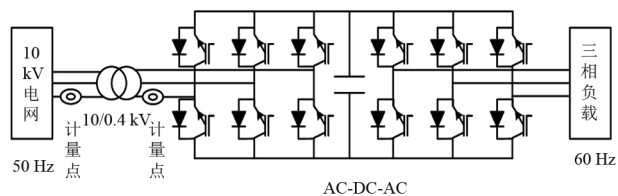


图 8 非线性负载有功损耗测量仿真模型

高压侧电压畸变率为 0.07%, 电流畸变率为 7.49%; 低压侧电压畸变率为 0.65%, 电流畸变率为 7.76%。低压侧仿真的电压、电流波形如图 9、图 10 所示。

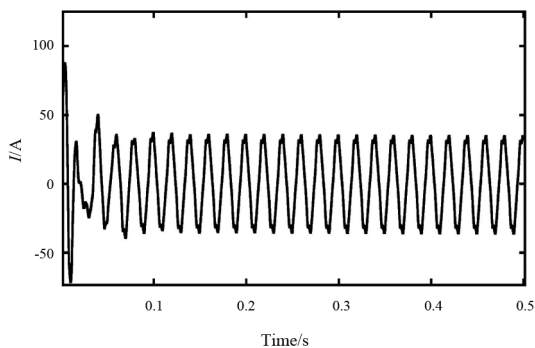


图 9 低压侧仿真电压波形

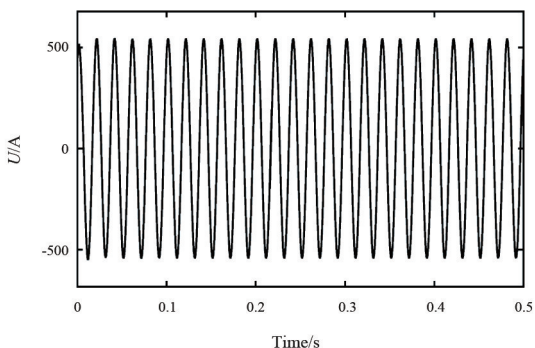


图 10 低压侧仿真电流波形

变压器高、低压侧各计量方式计量结果如表 1、表 2 所示。

表 1 变压器高压侧各计量方式计量结果 单位: W

计量方法	计量有功功率	谐波有功功率
传统计量	5235	0
功率流量计	5271	36(变压器+负载)

表 2 变压器低压侧各计量方式计量结果 单位: W

计量方法	计量有功功率	谐波有功功率
传统计量	4945	0
傅里叶分解计量	4947	2(变压器内部)
功率流量计	4978	33(负载)

传统的基波损耗计量模块只考虑了基波(50 Hz)供给负载损耗,基于傅里叶分解计量模块则考虑了 2~50 次谐波损耗,该计量模块计量的是线路谐波损耗与负载基波损耗;功率流量计模块,则按功率流分解方法计量了所有次数谐波造成的额外损耗,该计量模块计量的是负载谐波损耗与负载基波损耗。从仿真结果可以看出,只考虑基波引起损耗的计量模块并没有计量谐波损耗;且由于电流和电压在非线性负载里发生畸变,导致电网传输的电压电流基波有效值减小,因此影响了基波损耗计量模块的计量准确性,造成计量结果最小。

将低压侧傅里叶分解计量模块的计量结果与基波损耗计量结果对比得出,2~50 次谐波引起的有功损耗功率为 2 W。该计量方法是将各次谐波电压电流及各次谐波对应下的功率因数相乘再求和得到谐波有功损耗,由第 1 章分析可知,该计算方法计量的是系统及线路上的损耗。由于仿真中并未设置线路阻值,所以此计量结果是针对变压器内部谐波有功损耗的计量,并不是对非线性负载谐波损耗的计量,计量的对象有误,所统计的谐波损耗相对较小。

低压侧功率流量计模块计量到非线性负载有功损耗为 33 W, 高压侧功率流量计模块计量到的谐波有功功率(变压器+负载)为 36 W。将高、低压侧功率流模块的计量结果对比可得变压器谐波有功损耗为 3 W;傅里叶分解计量统计到的线路损耗(变压器)为 2 W。两种方法计量变压器谐波有功损耗的结果相差 1 W,造成该误差的原因是基于傅里叶分解方法考虑的是 2~50 次谐波。50 次以后的谐波未统计其损耗,且变压器低压侧傅里叶测量模块测量的变压器谐波有功损耗只计量了低压侧变压器绕组

损耗。谐波传递到高压侧绕组以及变压器磁芯里的谐波有功损耗并未统计到(由图 2 功率流理论分析,一部分谐波功率将返回系统内消耗),造成了傅里叶计量模块计量的变压器谐波有功损耗存在 1 W 的漏记。仿真结果表明,以傅里叶分解计量模块计量谐波有功损耗的对象为变压器,而功率流计量模块才是对非线性负载谐波有功损耗的计量,验证了第 1 章的理论分析。

3 实测数据分析

FLUCK435 是基于 IEEE 1459 标准制造的电能质量分析仪器,它能分析负载电流电压谐波成分。考虑砂石场负载在加工时,会用一些特殊电动机设备(产生谐波),所以利用 FLUCK435 实测某电网的 10 kV 砂石场负载(高供高计),如图 11 所示。在电网计量的关口处加装 FLUCK435 电能质量测试仪器,监测线路谐波含量。

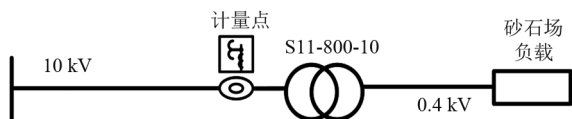


图 11 电网结构计量点

实测线路的电压电流曲线如图 12、图 13 所示。

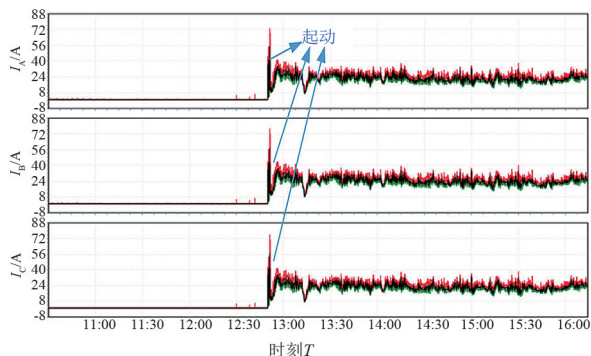


图 12 实测电流曲线

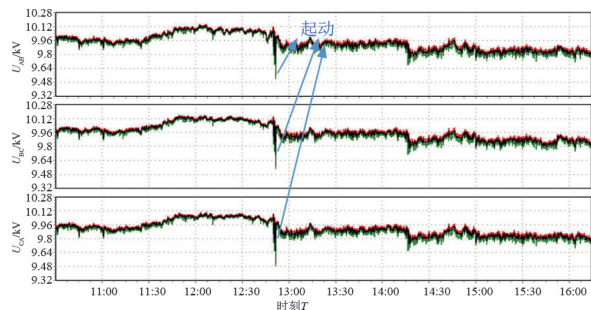


图 13 实测电压曲线

对采集的负载电压电流波形谐波进行分析,其畸变率如图 14、图 15 所示,谐波电流畸变率为 13.713%,谐波电压畸变率为 0.739%。

以第一天 13:45 至第二天 14:00 时间段统计数据分析,负载基波有功功率为 400 kW,功率因数为 0.87。根据式(9),以傅里叶分解计量方式计量的谐波视在功率为 $0.001S_1$;而根据式(18),以功率流方法计算出谐波有功损耗为 $0.019P_1$ 。可以看出,以傅里叶分解计量方式计量的非线性负载有功损耗一定是小于功率流计量方式计量的非线性负载有功损耗。这满足第 1 章理论分析,以傅里叶分解计量方式计量的对象有误,结果并不准确,且在 $T_{HD_I} > T_{HD_V}$ 区域以傅里叶分解计量方式计量非线性负载有功损耗计量结果小于功率流计量方式的标准计量结果,造成错计及少计。

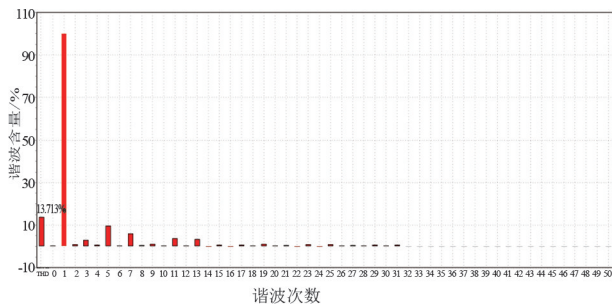


图 14 实测谐波电流含量

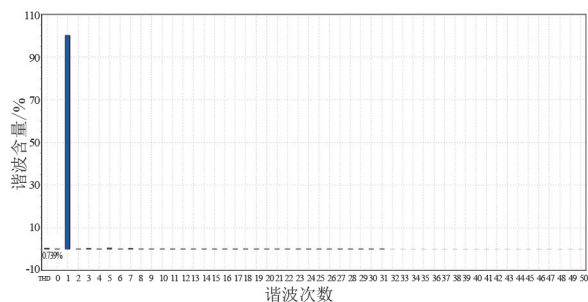


图 15 实测谐波电压含量

从电网系统导出关口表统计的该负载运行时的有功功率如图 16 所示,用所提出的功率流计量方法计量该电网关口谐波有功损耗,评估该方法带来的经济效益。假设运行时间段的电网统计到负载基波平均功率为 400 kW,则有 7.6 kW 谐波功率电网关口表未统计到。在负载运行的 4.5 h 内,有 34.2 kWh 的谐波电量未计量。假设工业用电 1 元/kWh,则 4.5 h 内直接经济损失 34.5 元,占电网关口表计量的 1.9%。可见以所提出的计量方式能有效计量负载谐波损耗,其经济效益也是可观的。

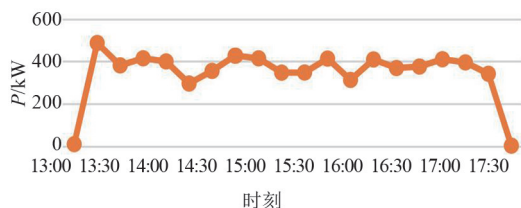


图 16 电网计量负载总有功功率

4 结 论

上面提出了非线性负载戴维南等效模型,结合功率流理论推导了非线性负载谐波损耗的计算公式,通过理论分析并结合仿真验证得出如下结论:

1) 基于傅里叶分解计量,由于其未考虑非线性负载内部等效模型对计量结果的影响,利用非线性负载两端各次谐波电压电流及各次谐波对应下的功率因数相乘再求和得到谐波有功损耗的方法,实际计量的是线路谐波有功损耗,并不是计量的非线性负载谐波有功损耗,计量对象有误,导致计量结果错误。

2) 功率流计量模块,基于功率流分解方法考虑了谐波对负载有功损耗的影响,重新定义了非线性负载有功损耗。理论分析及仿真结果表明,该计量模块有效计量了非线性负载有功总损耗,该方法不仅算法简单,理论上也更具有说服力。

最后,用所提出的非线性负载有功损耗计量方法结合实测电网谐波数据计算表明,考虑将所提出的功率流计量模块用于负载有功损耗计量是有效的,其长期经济效益也相当可观。

参考文献

- [1] 原凯,宋毅,李敬如,等.分布式电源与电动汽车接入的谐波特征研究[J].中国电机工程学报,2018,38(S1): 53-57.
- [2] 林顺富,李扬,汤波,等.基于改进 FastICA 及偏最小二乘法的系统谐波阻抗估计[J].电网技术,2018,42(1): 308-314.
- [3] 王葵,李建超,关淑华,等.低压配电网谐波有功损耗估计[J].继电器,2008,36(3):56-59.
- [4] 刘书铭,施红,冯蕾.考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型[J].电力自动化设备,2015,35(3): 133-139.
- [5] 吴丹,赵婉茹,张永康.电站直流充电桩能效计量智

能预测方法研究[J].电子设计工程,2020,28(3): 157-161.

- [6] 祁顺然.电动汽车充电负荷对电能计量准确性的影响研究[D].南京:东南大学,2019.
- [7] 孙风艳.电网谐波功率计量方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [8] 黄冰心,龚国兴,赵莉华.谐波对电网电能计量系统影响的研究[J].四川电力技术,2012,35(6):32-35.
- [9] 何群.电力谐波对电能计量影响的研究[J].四川电力技术,2009,32(1):45-49.
- [10] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions: IEEE Std1459: 2010[S/OL]. [2022-06-17]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5953405>.
- [11] EMANUEL A E. On the assessment of harmonic pollution [of power systems] [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 3(10): 1693-1698.
- [12] ARSENEAU R, BAGHZOUZ Y, BELANGER J, et al. Practical definitions for powers in systems with non-sinusoidal waveforms and unbalanced loads [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 79-101.
- [13] 赵云斌,李鹏程,尉怡青,等.不平衡畸变负荷无功功率理论分析与应用[J].电测与仪表,2018,55(2):1-7.
- [14] 耿锐,李春燕,郑可,等.谐波电能计量芯片测试分析[J].电测与仪表,2013,50(5):36-41.
- [15] 徐文佳,赵伟,黄洪涛,等.计及间谐波的电能计量方法[J].电网技术,2016,40(2):656-662.
- [16] 邱陶歆.电力谐波对电能计量的影响研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [17] 许仪勋.谐波对电能计量的影响与对策[D].上海:上海交通大学,2008.
- [18] 亚历山大·艾格列斯·伊曼纽尔.功率定义及功率流的物理机制[M].北京:中国电力出版社,2014.

作者简介:

曹庆(1992),男,硕士,研究方向为电能质量对电网的影响;

王灿(1982),男,学士,工程师,从事继电保护工作;

刘锐(1993),男,硕士,研究方向为智能电网、配电网运行与技术;

李骁睿(1994),男,硕士,研究方向为智慧电网、电力建设数字化转型;

周秉成(1994),男,硕士,研究方向为电力电子技术。

(收稿日期:2022-08-07)