

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.11.006

非线性负荷特性等值阻抗的获取方法

陈治道¹,朱 茜²,肖代波¹,刘天慈¹,李达炜³

(1.国网湖北省电力公司 随州供电公司,湖北 随州 441300;2.国网四川省电力公司 天府新区供电公司,成都 610213;3.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 400044)

摘要:由于电力电子技术的发展,非线性负荷在电网中所占的比重越来越大。非线性负荷在电力系统中容易产生谐波,造成谐波污染,因此有必要对其特性做出分析。提出了一种基于高阶微分方程和信号拟合,通过实时求取非线性负荷的等值阻抗来获取非线性负荷特性的方法。利用改进的矩阵束方法拟合端口电压电流信号,将电压电流信号代入到约束端口电压电流的高阶微分方程中,通过数学变换,得到负荷的等值电抗参数。依据负荷的等值参数的变化特点,来获取非线性负荷的特性。仿真实验表明该方法可行,可实时有效地求取负荷的等值阻抗参数,进而可获取非线性负荷特性。

关键词:非线性负荷;谐波污染;信号拟合;参数辨识

中图分类号:TM762

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)11-047-09

A method for obtaining equivalent impedance of nonlinear load characteristic

CHEN Zhidao¹, ZHU Qian², XIAO Daibo¹, LIU Tianci¹, LI Dawei³

(1.Suizhou Power Supply Company, Hubei Electric Power Corporation, Suizhou 441300, Hubei, P.R.China; 2.Tianfu New Area Power Supply Company, Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610213, P.R. China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: With the development of power electronics technology, the proportion of nonlinear load in the power grid is increasing. It is easy for nonlinear load in the power system to produce harmonics which result in harmonic pollution, therefore, it is necessary to make an analysis for its characteristics. In this paper, a method to obtain the nonlinear load characteristic by obtaining the real-time equivalent impedance of the nonlinear load based on the high order differential equation and the signal fitting is proposed. With using improved matrix beam method to fit the port voltage and current signal and putting voltage and current signal into the high-order differential equation which is to constrain port voltage and current, the equivalent reactance parameters of the load can be obtained through mathematical transformation. The characteristics of the nonlinear load are obtained according to the change characteristics of the equivalent parameters of the load. Simulation results show that the method is feasible and the equivalent impedance parameters of the load can be obtained in real time so that the nonlinear load characteristics can be obtained.

Keywords: nonlinear load; harmonic pollution; signal fit; parameter identification

收稿日期:2017-07-12

作者简介:陈治道(1972—),男,主要从事输变电设备运行管理研究,(E-mail)szchenzhidao@sina.com。

随着先进电力电子技术在智能电网中的广泛使用,非线性负荷(例如常用的有电弧炉、电气化铁路等)在电网中所占比重越来越大。非线性负荷的等值阻抗随电量变化而变化,因此可能会产生严重的谐波危害,例如谐波造成电气设备过热,降低设备使用寿命,导致继电保护和自动装置误动作,威胁电力系统的安全稳定运行、干扰通讯线路,甚至对通信设备和人员安全造成影响^[1-3]。

谐波对电力系统危害极大,因此有必要对非线性负荷的负荷特性进行研究。目前对非线性负荷特性的分析主要是利用快速傅里叶变换、prony 算法、小波变换等谐波分析法分解谐波成份^[4-5],结合国家标准,研究非线性负荷所造成的谐波污染程度。谐波分析法能够定性地研究非线性负荷所能造成的谐波污染程度,目前发展十分成熟,在工程中得到了大量应用,但不能从本质上研究非线性负荷的负荷特性。

非线性负荷产生谐波的本质原因是非线性负荷等值阻抗随电量变化,而线性负荷等值阻抗与电量变化无关。因此,通过求取非线性负荷的等值阻抗能够从本质上提取非线性负荷的负荷特征。对非线性负荷特征的提取,对电力系统的调度、运行、维护有很大作用,能够用于负荷分解、负荷预测、设备检查等诸多方面。

2000年,Ahmed从定位谐波源的目的出发,提出了一种可以实时求取非线性负荷等值阻抗参数的辨识方法^[6]。该方法以戴维南定律为基础,将负荷等值为一个电阻与电感串联的电路,并假设负荷的等值阻抗参数在一个很小的时间微元上保持不变,得到电路方程。利用最小二乘法解电路方程,得到负荷的实时等值阻抗参数,用以表征负荷特性。该方法简单易行,当负荷本身电路结构简单,且非线性变化缓慢时能够得到较好的效果,能够简单直接地判断非线性负荷的位置、划分谐波责任^[7-10]。但由于非线性负荷电路结构往往比较复杂,因而一个简单的电阻与电感串联的电路模型无法包含所有的暂态信息,由于模型的不对等,会造成负荷特性呈现很大的跳变。此外,该方法所采用的近似线性化手段不适用于所有非线性负荷,当负荷的非线性特性变化剧烈时,该方法失去准确性。

为此,提出一种基于高阶微分方程和信号拟合,通过实时求取非线性负荷的等值阻抗来获取非线性负荷特性的方法。首先建立高阶微分方程,使端口电压电流信号约束于该微分方程。然后利用改进的矩阵束方法拟合端口电压电流信号,将电压电流信号代入到约束端口电压电流的高阶微分方程中,最后通过数学变换,得到负荷的等值电抗参数。依据负荷的等值参数的变化特点,可获取非线性负荷的特性。本方法较之Ahmed等所提出的方法,其有效性更高,能够提取非线性负荷的负荷特性,区别线性负荷与非线性负荷。

1 信号拟合

非线性负荷产生的谐波信号可以表示为时域形式,其中 A_n 、 φ_n 、 α_n 和 ω_n 可由矩阵束方法^[11-15]获取。

$$y(t) = \sum_{n=1}^M A_n e^{-\alpha_n t} \cos(\omega_n t + \varphi_n), \quad (1)$$

令

$$A_n(t) = A_n e^{-\alpha_n t}, \quad (2)$$

$$\varphi_n = (\omega_n - \omega_0)t + \varphi_n, \quad (3)$$

将式(1)变形,可以得到

$$y(t) = \sum_{n=1}^M A_n(t) \cos \varphi_n \cos \omega_0 t - \sum_{n=1}^M A_n(t) \sin \varphi_n \sin \omega_0 t. \quad (4)$$

现在令

$$A(t) = \sum_{n=1}^M A_n(t) \cos[(\omega_n - \omega_0)t + \varphi_n], \quad (5)$$

$$B(t) = - \sum_{n=1}^M A_n(t) \sin[(\omega_n - \omega_0)t + \varphi_n], \quad (6)$$

故

$$y(t) = A(t) \cos \omega_0 t + B(t) \sin \omega_0 t, \quad (7)$$

或

$$y(t) = C(t) \sin(\omega_0 t + \varphi(t)), \quad (8)$$

式中

$$C(t) = \sqrt{A(t)^2 + B(t)^2}, \quad (9)$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{A(t)}{B(t)}. \quad (10)$$

根据上述推导,将电压电流可以表示为正弦函数形式

$$u(t) = A_u(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_u(t)), \quad (11)$$

$$i(t) = A_i(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_i(t)), \quad (12)$$

或

$$u(t) = A_u(t) \cos \omega_0 t + B_u(t) \sin \omega_0 t, \quad (13)$$

$$i(t) = A_i(t) \cos \omega_0 t + B_i(t) \sin \omega_0 t. \quad (14)$$

矩阵束方法能够提取电压、电流信号中的主要谐波成份,首先利用矩阵束将电压电流信号分解为多个谐波相加的形式,再通过等式变换,将其等效为正弦函数的形式,与原有信号进行对比如果存在误差较大,则对误差信号再次分解、变换、比较,直至误差在 5% 以内。

2 非线性负荷阻抗参数的辨识求取方法

在电力系统中,任何电路的电压电流都约束于高阶微分方程

$$\sum_{k=0}^K a_k u(t)^{(k)} = \sum_{k=0}^K b_k i(t)^{(k)}. \quad (15)$$

利用奇异值分解方法和最小二乘法,可以对上述高阶微分方程求解,解出其中的常系数 a_0, a_1, \dots, a_k 和 b_0, b_1, \dots, b_k [16]。将式(11)和式(12)代入式(15)中,通过化简和归纳可以得到

$$M(t) \cos \omega_0 t + N(t) \sin \omega_0 t = P(t) \cos \omega_0 t + Q(t) \sin \omega_0 t, \quad (16)$$

式中: $M(t), N(t), P(t), Q(t)$ 分别为等式两边正弦分量与余弦分量的系数和; ω_0 为 $f = 50$ Hz 对应的角频率;

$$M(t) = \sum_{r=1}^n a_r A_{ur}(t), \quad (17)$$

$$N(t) = \sum_{r=1}^n a_r B_{ur}(t), \quad (18)$$

$$P(t) = \sum_{r=1}^n b_r A_{ir}(t), \quad (19)$$

$$Q(t) = \sum_{r=1}^n b_r B_{ir}(t), \quad (20)$$

$$A_{ur}(t) = A'_{u(r-1)}(t) + \omega_0 B_{u(r-1)}(t), \quad (21)$$

$$B_{ur}(t) = B'_{u(r-1)}(t) - \omega_0 A_{u(r-1)}(t), \quad (22)$$

$$A_{ir}(t) = A'_{i(r-1)}(t) + \omega_0 B_{i(r-1)}(t), \quad (23)$$

$$B_{ir}(t) = B'_{i(r-1)}(t) - \omega_0 A_{i(r-1)}(t), \quad (24)$$

$$A_{u0}(t) = A_u(t), \quad (25)$$

$$A_{i0}(t) = A_i(t). \quad (26)$$

2.1 感性负荷参数辨识

如图 1 所示,为系统的时域等值模型。对于感性负载,负荷可以等值为一个电阻与电感串联的电路。 $u(t)$ 为负荷端口电压, $i(t)$ 为端口电流。

基于上述等值网络,可以得到端口的电路方程

$$u(t) = R(t)i(t) + L(t) \frac{di(t)}{dt}, \quad (27)$$

将(14)化简、合并,并令

$$\eta_1 = \frac{P(t)M(t) + Q(t)N(t)}{M^2(t) + N^2(t)}, \quad (28)$$

$$\eta_2 = \frac{P(t)N(t) - Q(t)M(t)}{M^2(t) + N^2(t)}, \quad (29)$$

再由式(25),可以得到

$$\begin{bmatrix} A_i(t) & A_i'(t) \\ 0 & A_i[\omega_0 + \varphi_i'(t)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(t) \\ L(t) \end{bmatrix} = A_u(t) \begin{bmatrix} \eta_1 \cos \varphi_\Delta(t) - \eta_2 \sin \varphi_\Delta(t) \\ \eta_1 \sin \varphi_\Delta(t) + \eta_2 \cos \varphi_\Delta(t) \end{bmatrix}, \quad (30)$$

式中 $\varphi_\Delta(t) = \varphi_u(t) - \varphi_i(t)$ 为阻抗角。解(30)即可得出负荷的等值阻抗参数 $R(t), L(t)$ 值。

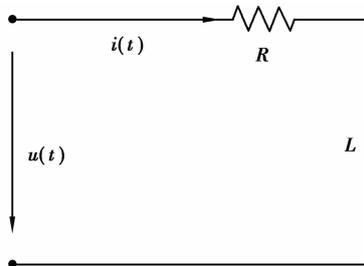


图 1 感性负荷时域等值模型

Fig.1 Time domain equivalent model of Inductive load

2.2 容性负荷参数辨识

如图 2 所示,对于容性负荷,可以等效为电阻与电容串联的电路。

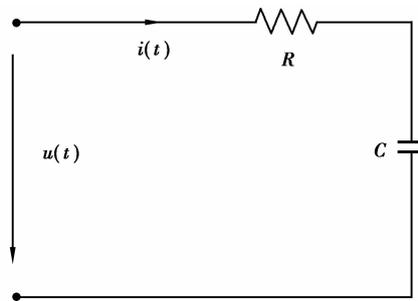


图 2 容性负荷时域等值模型

Fig.2 Time domain equivalent model of capacitive load

对于该电路,有如下电路方程

$$\frac{du(t)}{dt} = R(t) \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C(t)} i(t), \quad (31)$$

同样将电压电流代入式(13)中,再令

$$\xi = P(t) - M(t) + A_u(t)[\omega_0 + \varphi_u'(t)], \quad (32)$$

$$\eta = Q(t) - N(t) + A_u'(t), \quad (33)$$

通过化简与归纳可得

$$A_u(t) \begin{bmatrix} A_i(t)[\omega_0 + \varphi_i'(t)] & 0 \\ A_i'(t) & A_i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(t) \\ \frac{1}{C(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi \cos \Delta\varphi + \eta \sin \Delta\varphi \\ -\xi \sin \Delta\varphi + \eta \cos \Delta\varphi \end{bmatrix}. \quad (34)$$

利用数学方法解式(34)即可求得负荷的等值阻抗参数 $R(t), C(t)$ 。若求出的等值阻抗参数随电量变化而变化,则负荷为非线性负荷;反之,负荷为线性负荷。需要说明的是,非线性负荷计算出的 $R(t), L(t), C(t)$ 值,不完全代表负荷的实际参数,而是体现出负荷电压和电流间的数学关系。

研究来用高阶微分方程作为数学模型,代表端口电压电流之间的关系,利用最小二乘法确定模型的阶

数,该模型具有较好的准确性,能够包含系统中大部分的暂态特性。此外,本方法避免使用分段线性化手段计算等值阻抗,提高了辨识的准确性,能够辨识短时剧烈的非线性特性,适用于分析非线性负荷的负荷特性。由于电力系统中负荷大多呈感性,因此采用式(30)对负荷特性进行分析。

3 算例分析

为了验证方法的准确性,文中对下述仿真算例进行分析。如图 3 所示,其中 f_1 为感性线性负荷 $R_1 = 1 \text{ k}\Omega, L_1 = 0.01 \text{ H}$ 。 f_2 为纯阻性非线性负荷,其阻抗值随电流变化,当电流为正时,电阻为 $500 \text{ }\Omega$,否则为 $100 \text{ }\Omega$ 。 f_3 为纯阻性非线性负荷,其电阻值为 $i_3(t) + 1000$,单位为 Ω 。 f_4 为容性线性负荷。 f_5 为单相桥式全控整流负荷,其上所接负载为 $R_d = 1 \text{ k}\Omega, L_d = 0.07 \text{ H}$,触发角为 90° 。

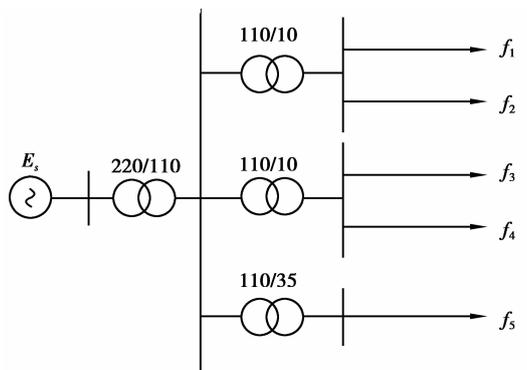


图 3 仿真算例模型示意图

Fig.3 Model diagram of a simulation example

由于非线性负荷等值阻抗参数随电量变化而变化。当系统所提供的正弦电压加在负荷 f_2, f_3, f_5 上时,将会产生畸变的电流,该电流在系统阻抗上产生非正弦的电压降,最终在公共母线处引起电压畸变,即产生谐波电压。110 kV 母线电压如图 4 所示,采样频率为 10 kHz 。

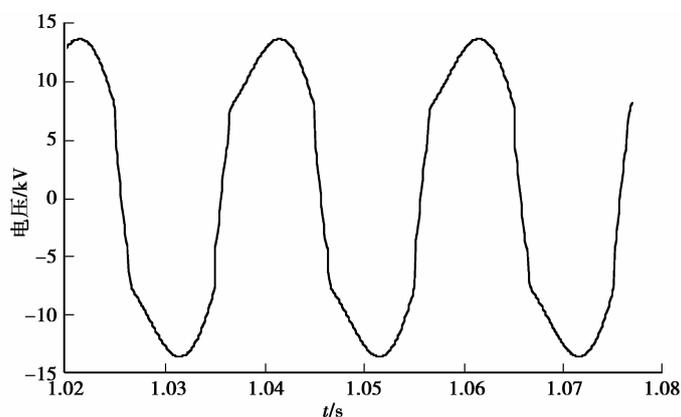


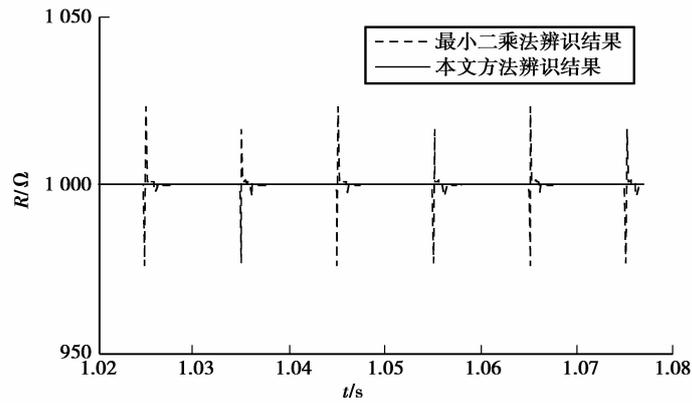
图 4 110 kV 母线电压波形

Fig.4 110 kV bus voltage waveform

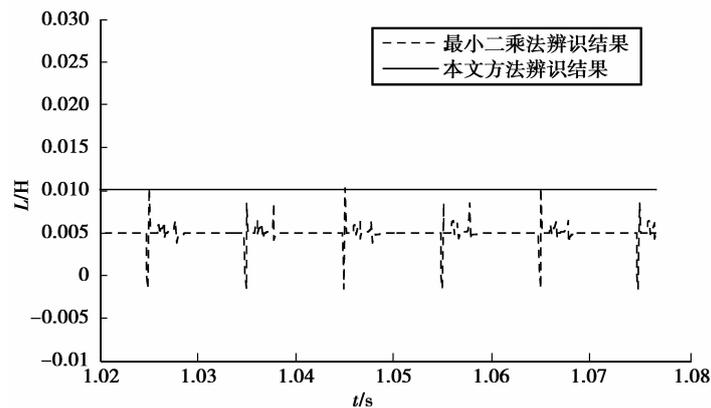
3.1 谐波干扰下的线性负荷参数辨识

为了验证方法的准确性,首先对线性负荷的等值参数进行辨识。图 5 给出了最小二乘法 and 文中方法辨识结果。

可以看出,当系统中存在谐波污染时,利用最小二乘法得出的辨识结果存在较大跳变,等值电阻参数波动较大,且等值电感参数约为 0.005 H ,与设定参数差距很大。文中方法参数辨识较为理想,与实际值较为接近。



(a) 负荷1等值电阻参数辨识结果



(b) 负荷1等值电感参数辨识结果

图 5 负荷 1 等值阻抗参数辨识结果

Fig.5 Equivalent impedance parameter identification results of load 1

3.2 非线性负荷参数辨识

为了进一步验证方法的可行性,文中利用所提方法辨识算例中的非线性负荷等值阻抗(图 6)。

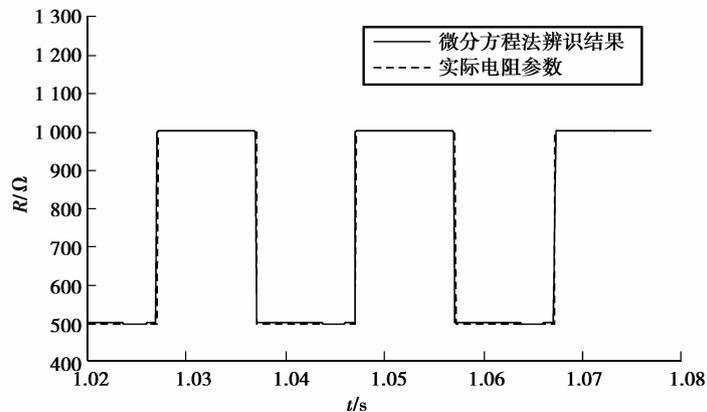


图 6 负荷 2 等值电阻参数辨识结果

Fig.6 Equivalent resistance parameter identification results of load 2

可以看出,负荷 2 的等值电阻参数在 500 Ω 和 1 kΩ 之间周期性变换。当电流为正时,电阻为 500 Ω,电

阻为负时,电阻为 $1\text{ k}\Omega$, 辨识精度较高, 误差在 0.1% 以内。负荷 3 的等值阻抗参数基本符合理论值(图 7)。

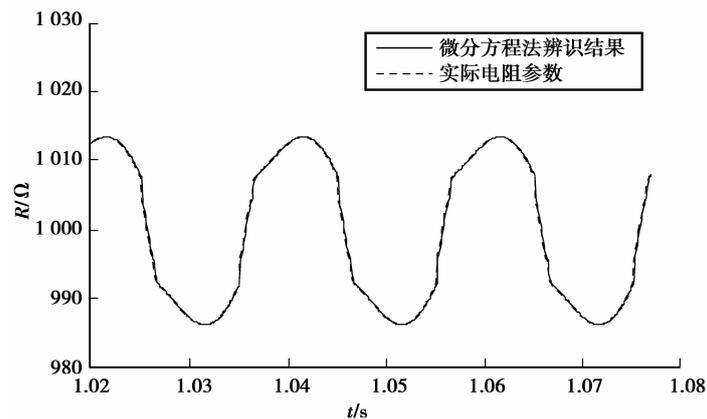


图 7 负荷 3 等值电阻参数辨识结果

Fig.7 Equivalent resistance parameter identification results of load 3

对整流负荷的分析以 35 kV 母线电压采样值为端口电压, 变压器低压侧电流为电流采样值。所采样得到的电压信号如图 8 所示。

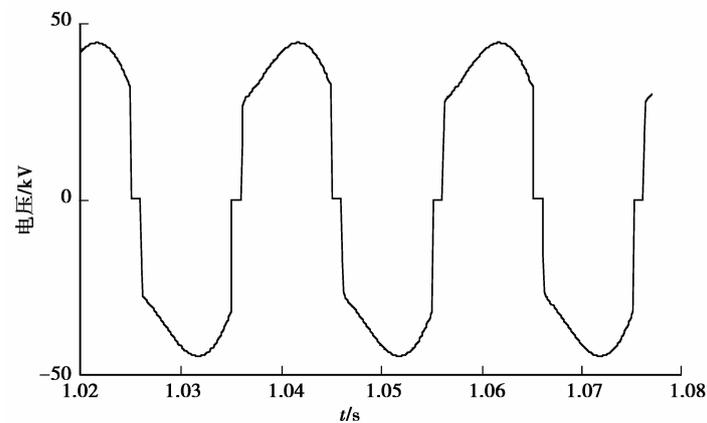
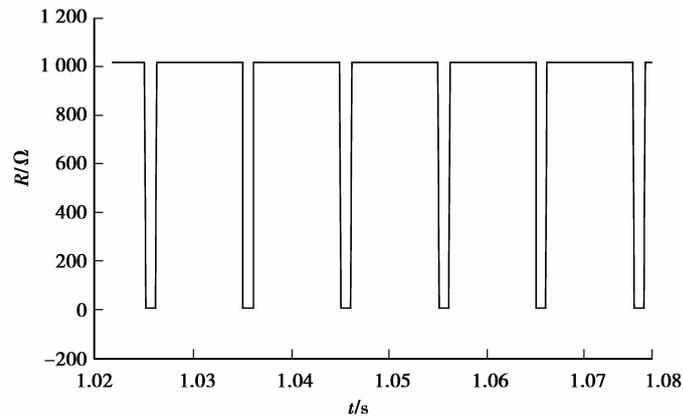


图 8 35 kV 母线电压波形

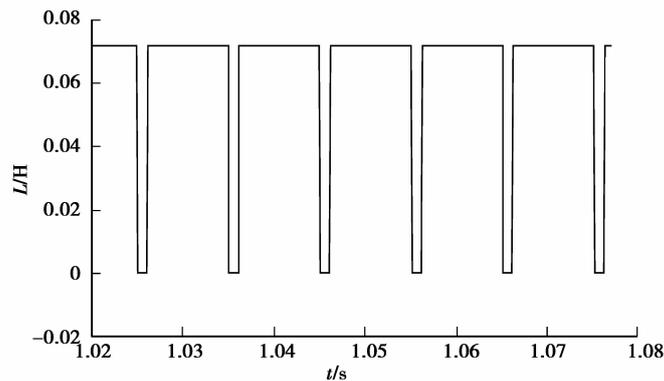
Fig.8 35 kV bus voltage waveform

整流负荷的特性与其开关状态有关。当 VT_1, VT_4 或 VT_2, VT_3 导通时, 该电路相当于 $1\text{ k}\Omega$ 电阻与 0.07 H 电感串联, 此时的等值电阻参数应为 $1\text{ k}\Omega$, 等值电感参数应为 0.07 H ; 由于系统中各个负荷综合作用, 整流负荷端口电压存在一段采样值很小(小于 5 V)的时间段, 此时整流负荷等值电阻与电感参数应接近 0。从仿真结果(图 9)可以看出, 整流负荷的等值阻抗参数 R 在 $0\sim 1\text{ k}\Omega$ 、 L 在 $0\sim 0.07\text{ H}$ 之间周期性变化, 与理论分析结果一致。

从上述例子可以看出, 文中所提出的方法可以准确提取非线性负荷等值阻抗, 辨识精度较高, 能准确提取突变且剧烈的非线性变化。整流负荷在受到系统中各个负荷综合作用的情况下, 端口电压为零的时间较长, 因此其等值阻抗在 $0\sim Z$ 之间变换。本方法适用于系统中多个非线性同时作用时的负荷等值阻抗参数辨识。



(a) 整流负荷等值电阻参数辨识结果



(b) 整流负荷等值电感参数辨识结果

图 9 整流负荷等值阻抗参数辨识结果

Fig.9 Equivalent impedance parameter identification results of rectifier load

4 结论

非线性负荷在电力系统中容易造成大量谐波,影响电能质量。非线性负荷从本质上说,是等值阻抗参数随电量变化而变化。利用高阶微分方程求取非线性负荷的等值阻抗参数,能够有效获取非线性负荷的特性,从而达到治理污染、探测非线性负荷、设备检查的目的。提出了一个辨识负荷等值阻抗的方法,并通过 EMTDC/PSCAD 平台搭建仿真模型,利用 Matlab 编程实现算法,并对算例进行分析。实验证明,该方法在辨识负荷等值阻抗参数时精度较高,可有效获取非线性负荷的特性。

参考文献:

- [1] 邢颖,李宝树.非线性负荷对电网电压和电流的影响[J].电气应用,2007,26(8):25-52.
XING Ying, LI Baoshu. The impact of nonlinear load on the voltage and current of the grid[J]. Electrical application, 2007, 26(8):25-52. (in Chinese)
- [2] 姚金雄,张涛,林榕,等.牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J].电网技术,2008,32(9):61-88.
YAO Jinxiong, ZHANG Tao, LIN Rong, et al. Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures[J]. Power System Technology, 2008, 32(9):61-88. (in Chinese)
- [3] 陈刚,潘心斌,肖伸平.非线性负荷对配电网电能质量的影响研究[J].湖南工业大学学报,2016,30(4):16-20.
CHEN Gang, PAN Xinbin, XIAO Shenping. A research on the influence of nonlinear loads on the power quality of distribution networks[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(4):16-20. (in Chinese)

- [4] 周厚奎,张昱,金心宇.基于傅里叶和小波变换的电网谐波分析[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(6):59-99.
ZHOU Houkui, ZHANG Yu, JIN Xinyu. Power harmonic analysis based on fourier and wavelet transform [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005,17(6):59-99. (in Chinese)
- [5] 郭成,李群湛,贺建闽,等.电网谐波与间谐波检测的分段 Prony 算法[J].电网技术,2010,34(3):21-25.
GUO Cheng, LI Qunzhan, HE Jianmin, et al. Segmentation Prony algorithm on harmonics and inter-harmonics detection of power networks[J].Power System Technology,2010,34(3):21-25. (in Chinese)
- [6] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems[C]//9th ICHQP Proceedings, Orlando, 2000, (3): 1035-1040.
- [7] Liu Y, Gong H, Xiao X Y, et al. Harmonic source location at the point of common coupling based on the nonlinearity index of load[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2009:1-5.
- [8] 唐昆明,蔡明,罗建,等.基于奇异值分解的非线性负荷谐波源定位方法[J].电力系统自动化,2012,36(01):96-100.
TANG Kunming, CAI Ming, LUO Jian, et al. Harmonic source location based on singular value decomposition method[J].Automation of Electric Power Systems,2012,36(01):96-100. (in Chinese)
- [9] 蔡明,唐昆明,张太勤.基于参数辨识方法的谐波源定位[J].电网技术,2011,6(06):134-138.
CAI Ming, TANG Kunming, ZHANG Taiqin. Harmonic source localization based on parameter identification[J].Power System Technology, 2011,6(6):134-138.(in Chinese)
- [10] 仇淑敏,杨浩,殷家敏,等.参数辨识方法的三相不对称负载电能计量研究[J].中国电力,2013,46(8):129-132.
QIU Shumin, YANG Hao, YIN Jiamin, et al. Study on measurement of Three-Phase asymmetric loads based on parameter identification[J].Electric Power,2013,46(8):129-132. (in Chinese)
- [11] Hua Y, Sarkar T K. Matrix pencil method and its performance[C]// International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 1988(4):2476-2479.
- [12] Hua Y, Sarkar T K. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing,1990, 38(5):814-824.
- [13] 康小宁,屈亚军,焦在滨,等.基于最小二乘矩阵束算法的工频分量提取方法[J].电力系统自动化,2014,38(21):66-113.
KANG Xiaoning, QU Yajun, JIAO Zaibin, et al. Power-frequency phasor extraction based on least-square matrix pencil algorithm[J].Automation of Electric Power Systems,2014,38(21):66-113. (in Chinese)
- [14] 吴勃,高俊山,王姗姗.矩阵束算法的改进及应用[J].哈尔滨理工大学学报,2011,16(3):41-45.
WU Bo, GAO Junshan, WANG Shanshan. Modifications and applications of matrix pencil algorithm[J].Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011,16(3):41-45. (in Chinese)
- [15] Marija Dodig. Completion of quasi-regular matrix pencils[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2016, 501:198-241.
- [16] 罗建,徐馨,杨桦,等.微小扰动状况下的戴维南等值参数辨识方法[J].中国电机工程学报,2014,34(S1):61-66.
LUO Jian, XU Xin, YANG Hua, et al. Identification method for thevenin equivalent parameters under tiny disturbance conditions[J].Proceedings of the CSEE,2014, 34(S1):61-66. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)