

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.04.004

非线性负荷对配电网电能质量的影响研究

陈 刚, 潘心斌, 肖伸平

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对非线性负荷影响配电网电能质量的问题, 首先分析2种典型非线性负荷模型的运行特性, 即单相不可控整流滤波电路和单相可控整流滤波电路模型。然后在MATLAB/SIMULINK中建立这2种典型非线性负荷的仿真模型, 根据2种模型的特点, 改变其内外的因素, 观察电源端和负荷端的电能质量。仿真结果表明, 任意次谐波电流与各次谐波电压的幅值、相位以及电路的导通角和截止角均有关; 同时也说明, 配电网出现低电能质量的主要因素是, 配电网中有大量非线性负荷存在, 即谐波源的存在。

关键词: 非线性负荷; 电能质量; 谐波; 畸变率

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)04-0016-05

A Research on the Influence of Nonlinear Loads on the Power Quality of Distribution Networks

CHEN Gang, PAN Xinbin, XIAO Shenping

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract : In view of the influence exerted by nonlinear loads on the power quality of distribution networks, a preliminary analysis has been made of the operational characteristics of two typical kinds of nonlinear load models, i.e. single-phase uncontrolled rectifier filter circuit and single phase controlled rectifier filter circuit model, followed by the establishment of simulation models of these two typical nonlinear load models in MATLAB/SIMULINK. Based on these characteristics, the internal and external factors are modified to observe the power quality of the power supply and the load side. The simulation results show that the amplitude and phase of the harmonic currents are related to the amplitude and phase of each harmonic voltage as well as the conduction angle and the cut-off angle of the circuit. The results also show that the major factor responsible for the low power quality in distribution network lies in the fact that there are a large number of nonlinear loads, namely harmonic source, in distribution networks.

Keywords : nonlinear load; power quality; harmonic wave; distortion rate

0 引言

现代工业和科学技术中的精密仪器设备, 对电能质量的要求越来越高。随着现代工业技术的发展,

电力负荷的种类越来越多, 大量含有整流或逆变电路的装置接入电网, 如: 整流器、逆变器、电弧炉、变频控制的电机、起重机等一系列非线性负荷^[1]。

收稿日期: 2016-06-09

基金项目: 广东省特种光纤材料与器件工程技术研究开发中心开放基金资助项目(2015GH712901)

作者简介: 陈 刚(1977-), 男, 湖南新化人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为网络控制系统,

E-mail: chengang@hut.edu.cn

通信作者: 潘心斌(1990-), 男, 湖南冷水江人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统及其自动化,

E-mail: panxinbin3017@qq.com

这些负荷在容量上、数量上不断增加,产生的谐波超出国家标准,外加上非线性负荷中含有的电容器和电抗器容易造成谐振,此时可能会放大谐波电流,导致电能质量下降,同时对电气设备和用户也造成一定影响。

在电力系统中,发电厂出线端电压一般具有很好的正弦特性,但由于负荷端存在非线性、不平衡冲击性负荷,在生产电能过程中有功和无功功率随机地或周期性地大幅度变动,当其波动电流流过供电线路阻抗时,产生变动的压降,导致同一电网上其他用户电压以相同的频率波动,即电路中有谐波产生^[2]。电网谐波主要来自于3个方面:1)由于发电机三相绕组很难做到绝对的三相对称以及铁芯很难做到均匀,发电端质量不高产生谐波。2)输配电系统中电力变压器的铁芯饱和,磁化曲线的非线性,也容易产生谐波。3)用电设备产生的谐波,主要是用户侧非线性装置产生谐波。文献[3]指出非线性负荷带来的谐波污染将严重影响电力系统及电器设备的安全运行,分析非线性负荷接入电网时,可以将其等效为一个电流源,与非线性负荷本身的阻抗没有关系,从非线性领域过渡到线性领域研究。文献[4]在文献[3]的基础上进一步研究非线性负荷,指出其电压和电流的畸变率不成线性关系,电源端电流畸变只与非线性负荷的特性有关,非线性负荷对电网的影响与电网线路的长短也有关系。文献[5]中,作者采用理论和仿真相结合的方式,验证典型的非线性负荷具有谐波自衰减效应,不同的非线性负荷的谐波注入应当考虑其衰减效应。

对于非线性负荷的研究,须考虑众多因素的影响,本文分析非线性负荷的运行特性,建立典型的非线性负荷模型,在不同条件下,观察电压端和电流端的电能质量。

1 配电网电能质量的标准

国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)对电能质量的定义是:在电力系统中某一指定点上的电特性,这些特性可根据预定的基准技术参数来评价^[6]。从理想角度定义电能质量,它是指恒定幅值、相位和频率的正弦波电压和持续供电。因为电力系统的庞大结构和外在因素,实际的电能质量会处于一种动态过程之中,在允许范围内的波动不会干扰电网和设备的正常运行。

1.1 电能质量参数

电能质量参数主要包括以下内容:

1) 电压质量。表示实际电压值与理想电压值间的偏差,包括电压偏差、电压频率偏差、电压不平衡、电压波动和闪变、波形畸变等。

2) 电流质量。表示实际电流和标准电流的偏差,电流质量通常包括电流谐波、间谐波、电流相位超前与滞后、噪声等。为提高电能质量,用户侧电流不仅要求是单一频率的正弦波电流,而且应保持电流波形和电压波形基本相同。

3) 供电质量。从技术含义上讲,供电质量指的是供电部门提供的电压质量和供电可靠性。从非技术含义上说,供电质量指的是用户对供电部门的满意度。

4) 用电质量。用电质量反映供、用电双方相互作用与影响的责任和义务。从技术含义上讲,用电质量包括对电力系统电能质量技术指标的影响和要求。从非技术含义上说,用电质量指用电责任和义务的履行度。

1.2 电能质量的标准

各个地区和国家根据自身工业的发展水平和电磁特性,来制定电能质量的标准。我国目前已经实施的电能质量标准^[7]主要有:GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》、GB/T 12325—2003《电能质量 供电电压允许偏差》、GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》、GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》、GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》。

根据GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》的规定,各中、高压等级的谐波电压限制见表1。

表1 各中高压等级的谐波电压限制

Table 1 Harmonic voltage limit for medium and high voltage levels

电压等级 / kV	电压总谐波 畸变率 / %	n 次谐波电压含有率 / %	
		奇次	偶次
10	4.00	3.2	1.6
35	3.00	2.4	1.2
110	2.00	1.6	0.8
220	2.00	1.6	0.8

对于注入公共连接点的谐波电流允许值的规定:注入0.38 kV 低压电网的电流总谐波畸变率允许值为3.70%,注入10 kV 中压电网的总谐波电流畸变率允许值为3.22%。

2 非线性负荷的仿真分析

非线性负荷投入使用的影响主要包括:1)产生大量的谐波污染,增加电器设备的附加损耗,影响

其正常运行。2) 电机产生机械振动和噪声影响电气测量仪表的精确度。3) 由于非线性负荷结构的复杂性, 内部电容电感容易与外界电容电感产生谐振, 放大谐波。

非线性负荷产生的谐波带来的电压电流波形变形程度, 用总谐波畸变率^[8] (total harmonic distortion, THD) 来表示。它等于各次谐波含量均方根值与基波均方根值之比, 用百分比表示。

电压总谐波畸变率

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{t=2}^N U_t^2}}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

电流总谐波畸变率

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{t=2}^N I_t^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)~(2)中: U_t 和 I_t 分别表示 t 次谐波电压和电流的有效值;

U_1 和 I_1 分别表示基波电压和基波电流。

2.1 单相不可控整流滤波电路分析

非线性负荷中, 比较常见的是由单相不可控整流滤波电路组成的负荷。这类负荷的特点是桥式电路中的二极管 (D_1, D_2, D_3, D_4) 是不可控器件, 带有 LC 滤波, 容易造成谐振, 单相不可控整流滤波电路见图 1。

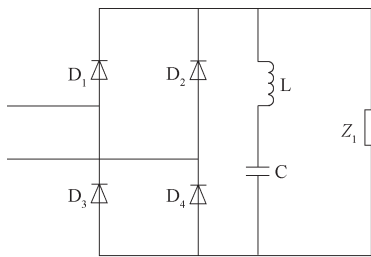


图 1 单相不可控整流滤波电路

Fig. 1 Single-phase uncontrolled rectifier filter circuit

该电路的频域谐波耦合导纳矩阵模型^[9], 即

$$\begin{bmatrix} I_1 \angle \theta_1 \\ I_3 \angle \theta_3 \\ \vdots \\ I_k \angle \theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,1}^+ & X_{1,3}^+ & \cdots & X_{1,n}^+ \\ X_{3,1}^+ & X_{3,3}^+ & \cdots & X_{3,n}^+ \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{k,1}^+ & X_{k,3}^+ & \cdots & X_{k,n}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \angle \varphi_1 \\ U_3 \angle \varphi_3 \\ \vdots \\ U_k \angle \varphi_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{1,1}^- & X_{1,3}^- & \cdots & X_{1,n}^- \\ X_{3,1}^- & X_{3,3}^- & \cdots & X_{3,n}^- \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{k,1}^- & X_{k,3}^- & \cdots & X_{k,n}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \angle -\varphi_1 \\ U_3 \angle -\varphi_3 \\ \vdots \\ U_k \angle -\varphi_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $X_{k,n}^+$ 是谐波电压矩阵的导纳矩阵元素, 且

$$X_{k,n}^+ = \begin{cases} \frac{\sqrt{1+(n\omega Z_1 C)^2}}{\pi Z_1} (\delta - \alpha) e^{j \arctan(n\omega Z_1 C)}, & n = k, \\ \frac{2\sqrt{1+(n\omega Z_1 C)^2}}{\pi Z_1 (n-k)} \sin \frac{(n-k)(\delta - \alpha)}{2} e^{j \left(\frac{(n-k)(\delta + \alpha)}{2} + \arctan(n\omega Z_1 C) \right)}, & n \neq k, \end{cases}$$

其中 k 和 n 分别为谐波电流次数和谐波电压次数, ω 为基波角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为工频取值 50 Hz, C 为电容, Z_1 为阻抗, α 和 δ 分别为电路的导通角和截止角;

$X_{k,n}^-$ 是谐波电压共轭矩阵的导纳矩阵元素, 且

$$X_{k,n}^- = \frac{2\sqrt{1+(n\omega Z_1 C)^2}}{\pi Z_1 (n+k)} \sin \frac{(n+k)(\delta - \alpha)}{2} e^{-j \left[\frac{(n+k)(\delta + \alpha)}{2} + \arctan(n\omega Z_1 C) \right]}$$

$I_k \angle \theta_k$, $U_k \angle \varphi_k$ 分别表示 k 次谐波电流和电压的瞬时值, 其中 θ_k, φ_k 分别为 k 次谐波电流和电压瞬时值的相角, I_k 和 U_k 分别为 k 次谐波的电流幅值和电压幅值。

式(3)可以简写为

$$I_{in} = X^+ U_{in} + X^- U^* \quad (4)$$

式中: I_{in} 为电路输入侧电流向量; U_{in} 为输入端电压向量; U^* 为 U_{in} 的共轭向量。

由式(3)可知, p 次谐波电流不仅与 p 次谐波电压有关, 而且与 l 次 ($p \neq l$, 且均为正整数) 谐波电压的幅值和相位以及电路的导通角和截止角有关。

为研究单相不可控整流滤波电路模型对电能质量的影响, 将一负载 Z_1 与单相不可控整流电路模型并联, 工频 $f=50$ Hz, 初相位为 0° , 改变正弦电压幅值, 观察电源端和负荷端的电压、电流的 THD。仿真中采用快速傅里叶变换 (fast fourier transformation, FFT)^[10] 来计算电压和电流 THD, 计算公式如式(1)和式(2)。在 SIMULINK 中建立如图 1 所示的仿真电路, 取固定的参数值: $L=1.5$ H, $C=2.5$ F, $Z_1=(3-j)\Omega$, 整流所采用的二极管是普通二极管, 内阻为 0.001Ω , 正向电压为 0.8 V, 得到在不同电压幅值下的电流电压畸变率见表 2。

表 2 不同电压幅值下的电压电流畸变率

Table 2 Voltage and current distortion rate under different voltage amplitudes

电压幅值/V	负荷端电压 THD/%	负荷端电流 THD/%	电源端电压 THD/%	电源端电流 THD/%
8	45.09	20.83	0.04	37.80
10	45.09	20.92	0.04	37.79
15	45.08	21.04	0.03	37.79
20	45.08	21.13	0.04	37.79
30	45.09	21.19	0.04	37.79

从表2中的数据可以看出,正弦电压幅值的改变,影响的只有负荷端的电流畸变率,负荷端的电压畸变率和电源端的电流电压畸变率几乎不变;而且随着电源端的正弦电压幅值的增加,负荷端的电流畸变率变化愈明显。实际中,除意外事故的发生外(如雷击等),正弦电压幅值一般不会有大的变化。正弦电压幅值的改变,虽对电源端的电能质量影响不大,但对负荷端电流的电能质量有一定的影响,因此也应该重视电源端电压幅值的监测。

只改变电源电压的初相位角,调整其为 10° ,其他条件不变,得仿真结果如表3所示。

表3 调整初相位后的电压电流畸变率

Table 3 Voltage and current distortion rates after the adjustment of the initial phase

电压幅值/V	负荷端电压 THD/%	负荷端电流 THD/%	电源端电压 THD/%	电源端电流 THD/%
8	42.79	20.62	0.04	47.28
10	42.80	20.66	0.04	47.28
15	42.81	20.75	0.04	47.28
20	42.80	20.82	0.03	47.28

由表2和表3数据可知,改变正弦电压的相位,对负荷端的电流THD影响不大,电源端的电压THD也几乎不受影响;但是对电源端的电流THD有一定的影响。虽然从表中的数据来看,负荷端的电压THD有所下降,但电源端的电流THD呈现增大趋势,这种情况对负荷端的用户不利。

2.2 单相可控整流滤波电路分析

由单相可控整流滤波电路(见图2)组成的负荷与2.1节中的非线性负荷不同之处在于,整流所采用的电力电子器件不同,该负荷采用的是晶闸管(TH_1, TH_2, TH_3, TH_4),晶闸管开通需要一个脉冲信号。

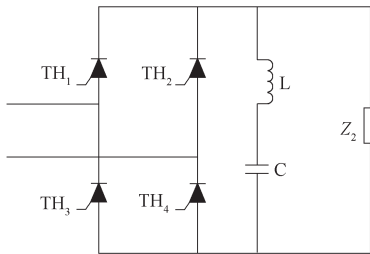


图2 单相可控整流滤波电路

Fig. 2 Single-phase uncontrolled rectifier filter circuit

设计一个脉冲时间不同的发生器,观察电源端和负荷端的电压、电流THD的变化。晶闸管的触发脉冲通过简单的脉冲发生器模块产生,脉冲发生器的脉冲周期取为2倍的系统频率,即为100 Hz。正弦电压 $u = 8\sqrt{2}\sin(100\pi t)$ V,晶闸管的控制角 d 以脉冲

的延迟时间 t_1 来表示, $t_1 = 0.02 \times \frac{d}{360} = \frac{1}{600}$ s,脉冲宽度用脉冲周期的百分比表示,默认值为50%。仿真模拟时取 $L=1.5$ H, $C=2.5$ F, $Z_2=(3-j)\Omega$; d 从 18° 开始取不同的值,步长为 6° 。仿真得到负荷端和电源端的电压、电流的THD随 d 的变化规律,如图3所示。

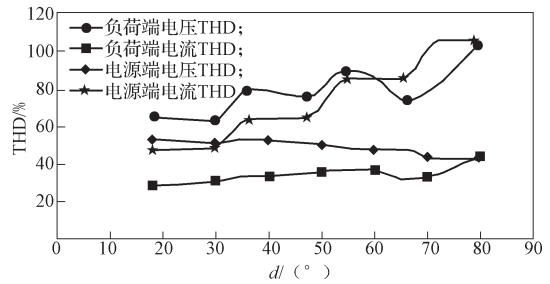


图3 负荷端和电源端的电压、电流的THD随 d 的变化规律

Fig. 3 The variation rule of voltage and current THD accompanied by the change of d at the load end and the power source

从图3的曲线可以看出, d 有4个点比较特殊,分别是取18, 36, 54, 72。负荷端和电源端电压的THD在这4个点附近是呈现一种顶端优势,但是负荷端和电源端电流的THD在这4个点附近处于波谷位置。因为 d 在这4个点的脉冲时间刚好是正弦电压周期的整数倍,而且这4个点的电压和电流的THD处于一种最大差的时刻。从图3看到电源电流的THD甚至达到100%以上,此时严重影响电网的电能质量,所以 d 的取值是相当重要的,可以增大电压电流的THD或者减小其THD。因为非线性负荷结构的复杂性, d 的取值不仅与其结构有关,还与电源的频率相关。因此,从电路自身结构出发,对于一些滤波装置的参数进行调整,不仅可以避免设备与设备之间的谐振发生,而且还可以减少与电网中设备发生谐振,也可减轻自身和设备的负担。

3 结语

本文对2种典型的非线性负荷进行了分析和仿真,仿真结果表明,电源电压幅值的改变对非线性负荷产生的电流THD有明显的影 响,非线性负荷自身的结构对电压电流的THD也有明显影响。在单相带滤波可控整流电路中,晶闸管导通角的不同,会使电压电流的畸变率有明显变化,特殊情况下,畸变率可达到100%以上。这种情况可以通过2种途径来改善:一是优化非线性负荷结构,以减少谐波的产生。二是对配电网的电能质量进行实时监测,投入一定数量的有源电力滤波器,以减少谐波的产生。

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功补偿[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1998: 66-69.
WANG Zhaoan, YANG Jun, LIU Jinjun, et al. Techniques of Harmonics Suppression and Var Compensation[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1998: 66-69.
- [2] 张洪涛, 叶 荧, 安 庆. 基于嵌入式技术的电能质量监测分析系统研究[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(5): 48-51.
ZHANG Hongtao, YE Ying, AN Qing. Study of Power Quality Monitoring System Based on Embedded Technology [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(5): 48-51.
- [3] 薛 军, 汪 鸿, 华 峰, 等. 非线性负荷及其对电力系统的影响[J]. 高压电器, 2001, 37(6): 21-23.
XUE Jun, WANG Hong, HUA Feng. Non-Linear Power Load and Its Influence on Electrical Power System[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2001, 37(6): 21-23.
- [4] 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): 25-28, 52.
XING Ying, LI Baoshu. The Impact of Nonlinear Load on the Voltage and Current of the Grid[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(8): 25-28, 52.
- [5] 雍 静, 娄方桥, 王一平, 等. 低压配电系统单相非线性负荷的谐波衰减效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 55-62.
YONG Jing, LOU Fangqiao, WANG Yiping, et al. Investigation on the Harmonic Attenuation Effect of Single-Phase Nonlinear Loads in Low Voltage Distribution System [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 55-62.
- [6] 粟时平, 刘桂英. 现代电能质量检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 46-51.
SU Shiping, LIU Guiying. Modern Power Quality Detection Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 46-51.
- [7] 许 遐. 公用电网谐波的评估和调控[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 53-57.
XU Xia. Utility Grid Harmonic Assessment and Regulation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 53-57.
- [8] 吴竞昌. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1998: 12-17.
WU Jingchang. Power System Harmonics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1998: 12-17.
- [9] YONG Jing, CHEN Liang, NASSIF Alexandre, et al. A Frequency-Domain Harmonic Model for Compact Fluorescent Lamps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1182-1189.
- [10] 张 宝, 易吉良, 姜建伟, 等. 基于FFT与小波变换的机车谐波电能计量[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(5): 58-62.
ZHANG Bao, YI Jiliang, JIANG Jianwei, et al. Locomotive Harmonic Energy Measurement Based on FFT and Wavelet Transformation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 58-62.

(责任编辑: 邓光辉)