

谐波电流对低压配电网的影响分析

王 蔡¹, 李建超¹, 蒋 丽², 潘贞存¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 淄博市供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 在理论上分析了谐波电流对中性线和变压器的影响。利用数字式示波器 FlukeView190C 对低压民用负荷和办公楼配电系统的谐波状况进行了实测, 实测数据基本代表了非线性负荷和低压电网的谐波现状。根据实测数据, 对谐波电流引起的各种问题及其对配电网的影响进行分析研究, 发现三相四线制建筑配网普遍存在三相不平衡, 谐波电流放大, 中性线电流过大、网损增加, 变压器出力下降等问题。最后简单的提出了一些解决上述问题的对策。

关键词: 谐波电流; 中性线; 变压器; 配电网; 非线性负荷

Influence analysis of harmonic current on low-voltage distribution power system

WANG Kui¹, LI Jian-chao¹, JIANG Li², PAN Zhen-cun¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Zibo Electric Power Corporation, Zibo 255000, China)

Abstract: In this paper, a brief summary of harmonic current on neutral lines and transformers is analysed theoretically. Field measurements on low-voltage appliances and office building supply system are carried out using digital oscilloscope FlukeView190C. Data acquisition presents the harmonic current level of nonlinear loads and low-voltage network. According to the field measurements, a research on problems caused by harmonic current and the influence of harmonic current on distribution system is studied. It is found out that three-phase unbalance is common in the three-phase four-wire supply power system, as well as harmonic current amplifies, neutral current overloads, loss increases, transformer contribution decrease and so on. At last, this paper straightforwardly puts forward the countermeasure for those problems.

Key words: harmonics current; neutral overload; transformer; distribution system; non-linear loads

中图分类号: TM76; TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)07-0024-05

0 引言

现代许多电子设备对于电压波形和幅值变化的敏感性比过去要强得多。因此近年来, 电能质量尤其是谐波电流更加受到关注。其实谐波很早就引起了电力工作人员的注意, 但是对谐波的研究大部分集中在其产生原理及其对各种设备的影响分析上^[1-4], 以及减少谐波对电力设备和电网的影响研究上^[5]。国内很少有关于各类非线性负荷和商业办公楼等低压配电网谐波的监测和分析研究, 但是办公楼等配电网的谐波问题已经引起了国外电力科研人员的关注^[6,7]。

现代办公楼、商场及家庭中的负荷如变频空调开关式电源、计算机等都具有非线性, 会产生很大的谐波。谐波在电网中流动产生的功率损失, 构成了电网线损的一部分, 对电网的经济运行不利。谐

波还会引起电流谐振放大, 变压器过载过热, 中性线过流等。美国对大量的机房监测表明: 22.6%的机房中性线电流比满负荷相电流还要大^[8]。在建筑配电网中, 由于各相所接非线性负荷的性质不同, 可能导致配电网的三相不平衡。总之, 三相四线制配电网中存在网损增大, 谐波电流放大, 中性线、变压器过载, 三相不平衡等问题。本文根据非线性负荷和办公楼、商场等配电网的实测数据, 对这些问题进行分析研究, 并提出了相应的解决方法。

1 对配电网的影响分析

1.1 谐波电流对中性线的影响分析

中性线电流是三个线电流的矢量和, 一般为不大的不平衡电流。但非线性负荷产生的谐波电流尤其是3倍次谐波电流同相位, 在中性线上叠加而不相互抵消, 致使完全平衡的系统也会产生较大的中

性线电流。据有关资料显示, 存在非线性负荷的情况下, 中性线电流可能高达相电流的 1.7 倍^[7]。

中性线电流过大不仅增大了配电网网损而且会使中性线过载过热。这对于办公楼等配电网是很危险的, 因为这些配电网的中性线是按照能够承担很小的不平衡电流而设计的, 通常中性线半径为相线半径的一半, 所以在这种配电网中经常发生由于中性线过载过热、绝缘损坏而发生短路, 引起断线或火灾。根据电工学理论, 中性线断线会使中性点电位偏移, 三相负荷电压波动。中性点电位偏移会对额定电压为 220V 的单相负荷产生不良影响, 还会导致三相设备 (如电机等) 出力下降、过热甚至烧毁等异常现象。

1.2 谐波电流对变压器的影响分析

谐波电流对变压器的主要影响是增大变压器损耗及引起外壳、外层硅钢片和某些紧固件发热、增大噪音、降低变压器的额定容量等。

谐波引起的变压器损耗增加主要是指涡流损耗、磁滞损耗和杂散损耗的增加。其中杂散损耗是决定由非线性负荷引起的变压器铁芯额外发热损耗的最重要因素。涡流损耗与频率的平方成正比, 磁滞损耗也随着频率的升高而增加, 而且由谐波引起的涡流损耗比磁滞损耗大。另外谐波电流, 特别是 3 次 (及其倍数) 谐波侵入三角形连接的变压器, 会在其绕组中形成环流, 使绕组发热, 进一步增大变压器损耗。而且谐波电流使变压器铁芯的磁滞伸缩导致噪音增加, 谐波增大了变压器的铜损、铁损导致变压器温度升高而容量降低。所以在选择变压器的额定容量时必须研究电网中的谐波含量。

1.3 谐波网损估计

谐波增加电网的网损, 谐波网损的估计计算公式如下:

一个电阻消耗的有功功率为:

$$P_R = \sum_{h=1} I_h^2 R_h \quad (1)$$

其中: R_h 为第 h 次谐波下的电阻值。

假设电阻为常数, 即忽略集肤效应时有:

$$P_R = R \sum_{h=1} I_h^2 = I_1^2 R (1 + THD_1^2) = P_{R1} (1 + THD_1^2) \quad (2)$$

其中: P_{R1} 为基频下电阻的功率损耗。

可见在忽略集肤效应的情况下, 谐波损耗增加率取决于电流畸变率 THD_1 。

2 非线性负荷的谐波测量

我们测量了大量的非线性负荷, 主要包括计算机、电冰箱、吸尘器、变频空调等。这些电器的单

个功率对于电力系统来说是很小的, 但是它们数量众多, 而且分布广泛, 同样会对电网造成很大的影响。

2.1 计算机谐波含量的测量

计算机在使用时将产生一定的谐波分量, 目前诸如办公楼、网吧等计算机大量使用的场所越来越多, 计算机负荷相对较大, 会产生大量的谐波。

使用数字式示波器 FlukeView190C 对单台计算机谐波电压电流测试的结果如图 1 所示 (上为电压波形, 下为电流波形)。

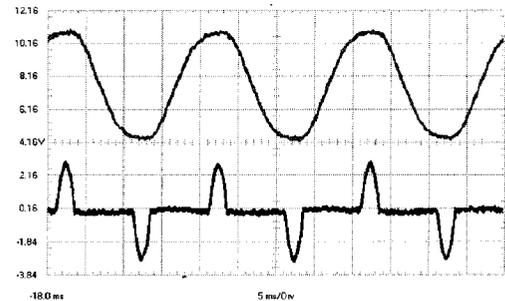


图 1 计算机的电压电流波形

Fig.1 Waveforms of computer voltage and current

将 FlukeView 中的电压电流波形以数据文件的格式导入到 Matlab 中, 编制 m 函数进行谐波分析得谐波电流含有率 THD_1 如图 2 所示。仿真计算结果见表 1。

表 1 计算机的功率和功率因数

Tab.1 Power and power factors of computer

P_0/W	P_1/W	P_2/W	P_3/W	P_7/W
0.2028	148.1505	-4.8115	-1.5115	-0.2238
P_9/W	P_{11}/W	P/W	λ	
-0.1106	-6.6448	141.7260	0.5832	

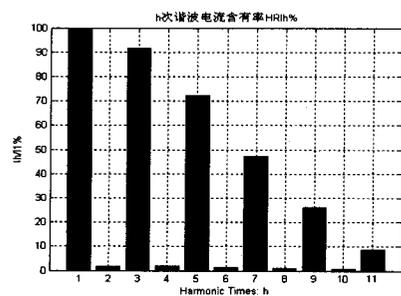


图 2 计算机各次谐波电流含有率

Fig.2 Frequency current spectra of computer

从表 1 可以看出总体上计算机是发出谐波功率的, 但各次谐波功率可正可负。某次谐波功率的正负, 反映了计算机是消耗还是发出该次谐波功率。计算机本身不产生功率, 显然, 负的谐波功率是计

算机转化系统的基波功率而来,而正的谐波功率除了来自系统的基波功率外,还有可能来自系统其他非线性负荷发出的谐波功率,即计算机的功率消耗也处在其它非线性负荷的影响下。

2.2 其它非线性负荷谐波的测量

此外,我们还测量了家庭中常用的空调、吸尘器、电冰箱等低压民用负荷的谐波含量。这些电器的各次谐波电流含有率及功率因数测试结果如表 2 所示。

表 2 低压电器谐波电流含有率及功率因数

Tab.2 Ratios of harmonic current and power factors in low-voltage electric equipment

谐波次数/h	空调(制冷)	吸尘器	电冰箱
3(%)	33.8841	22.2744	3.6512
5(%)	20.4313	1.5673	2.0617
7(%)	4.1336	0.3836	0.9727
9(%)	5.2248	1.0840	0.1647
11(%)	4.8614	0.2549	0.6181
λ	0.9165	0.9600	0.6396

需要说明的是不同型号规格的同种电器其谐波含量很可能不同,以上目的在于说明家用电器会产生很大的谐波及无功,系统中存在大量的非线性负荷用户,从而会对低压配电网产生很大的影响。

3 低压配电网谐波分析

我们还使用 Fluke 数字示波器对办公楼、商场等配电网的谐波进行了测量分析。测量位置均选在变压器低压侧的出线上。

3.1 某大型商城

商城中的非线性负荷以电梯、中央空调以及各种电子镇流器、不间断电源为主。其电压电流波形如图 3 所示,电流波形已严重畸变,电压波形近似为正弦波。电压畸变率为 3.5% 左右,电压畸变主要由 5、7、11 次谐波电压引起。由表 3 和图 4 可以看出,电流中也主要含有 5、7、11 次谐波,各相电流畸变率分别高达 39.3%、40.1%、36.7%,其中仅 5 次谐波电流的平均畸变率就为 33.9%,是电流谐波的最主要组成部分。可见配电网中的电流畸变率远大于电压畸变率。由于在忽略集肤效应的情况下,谐波引起的网损增加率与电流畸变率的平方成正比^[9],即 $\Delta P\% = THD_I^2$ 。由此可得,此商城三相线损分别增加 15.44%、16.08%、13.47%,相当惊人的数字。表 3 中的三相最大 K 因数为 7.2 (式 3),用电流的有效值将上式规格化,规格化后 K_h 为 6.203 (式 4),此时为了向负荷供电,变压器降低了其额

定出力。按照 IEEE C57.110-1986 标准中的方法 1,无谐波额定值的标准变压器的减额系数 D 为 59.57% (式 5),此时使用标准变压器,需明确应减额运行(即不超过 59.57% 的额定负载)。

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} (h \frac{I_h}{I_1})^2 \quad (3)$$

$$K_h = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} (h I_h / I_1)^2}{1 + THD_I^2} \quad (4)$$

$$D = \frac{1.15}{1 + 0.15 K_h} \quad (5)$$

表 3 某商城电流畸变率及 K 因数

Tab.3 Current distortion ratios and K factors of some shop

	THD _I (%)	THD _J (%)	THD _V (%)	THD _{V1} (%)	K
I _A	39.3	34.6	14.1	1.3	7.1
I _B	40.1	35.1	15.3	1.2	7.2
I _C	36.7	32	14.9	0.9	6.1

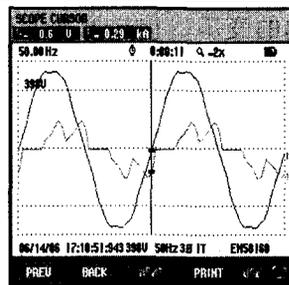


图 3 某商城电压电流波形

Fig.3 Waveforms of some voltage and current

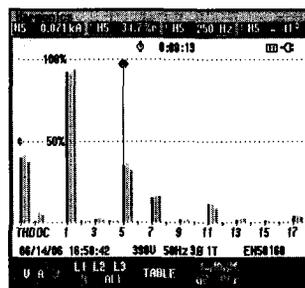


图 4 某商城电流畸变率

Fig.4 Current distortion shop ratios of some shop

3.2 某办公楼

此配电网变压器的容量为 1600 kVA,谐波源主要为计算机及其外部设备、办公自动化设备、空调、电梯等。在供电公司的多次例行检测中发现此办公楼中性线过载,变压器温度及噪声过大,此外还发生过中性线引起火灾的事故。为此我们在绝大部分设备运行期间测量了相线及中性线的电压、电流谐波。结果各相的电压畸变率 THD_V 均小于 5%。表 4

是相电流和中性线电流的测试结果, 可见三相电流畸变率 THD_1 分别为 16%, 23.1%, 17.8%, 三相中都存在很大的谐波成分, 但不同性质负荷的不均衡分布造成了三相电流畸变率的差异。三相电流中各次谐波电流的畸变率如表 4 所示, 可见 3、5、7、9 等较低次谐波是引起电流畸变的主要成分。三相电流分别为 352 A、310 A、402 A, 三相极不平衡, 造成了中性线上高达 48.4% 的基波电流、10.3% 的 5 次谐波电流, 这也是引起中性线过载的重要原因之一。办公楼的中性线电流为 102 A, 是最小相电流的 0.33 倍, 此电流通过中性线在 D/Yn 变压器的一次侧形成环流, 极大地增大了网损及供电成本, 同时提高了变压器的温升, 所以必须重视该问题并加以治理。由图 5 可见, 3、9 次零序谐波电流和基波不平衡电流是中性线电流的主要成分, 3、9 次谐波电流较大是 3 倍次零序谐波电流在中性线上叠加的结果, 而大的基波不平衡电流以及不可忽略的 5、7 等正负序谐波电流则主要是由非线性负荷的不均衡分布和三相不平衡造成的。

3.3 某商场

在商场我们测量了有无补偿电容(600 kvar)两种情况下的数据, 商场采用的是 SOL2-1250 变压器, 负荷以照明装置、电视监控系统、空调等为主。由表 5 的数据可知在无补偿电容的情况下, 此商场配电网的功率因数为 0.76, 平均电压畸变率为 1.33%, 加入补偿电容后, 不仅将功率因数提高到 0.92, 而且使电压平均畸变率降到 0.87%, 但却将 3 次谐波平均含量由 6.87% 提高到了 8.07%, 这都是由补偿电容引起的。虽然电容器本身不产生谐波, 但其接入电网后, 由于系统电感的存在可能引发谐振, 或者虽未谐振, 但放大了谐波电流, 这就是 3 次谐波含量增加的原因。补偿电容器组供应无功功率, 降低了系统的无功功率和视在功率, 提高了系统的功率因数。更进一步, 电容电流引起电压升高, 减少了线路损耗和电压降落, 从而提高了效率, 改善了电压调节。

表 4 某办公楼电流畸变率

	I_A	I_B	I_C	I_N
I/A	352	310	402	102
$THD_1/(\%)$	16	23.1	17.8	90.7
$THD_3/(\%)$	7.6	13.2	10.6	84
$THD_5/(\%)$	11	15.6	9.9	10.3
$THD_7/(\%)$	2	4.1	3.3	21.8
$THD_{11}/(\%)$	4.4	4.1	4.8	3.1
$THD_{13}/(\%)$	3.8	5.3	5.0	4.4

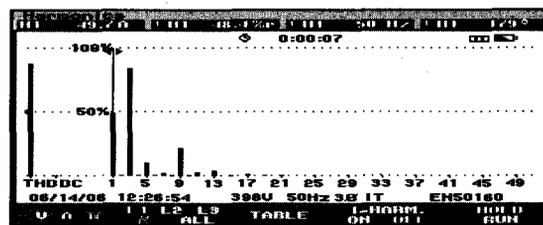


图 5 某办公楼中性线电流频变更

Fig.5 Neutral line current spectra of some office building

表 5 某商场测试数据

	A 相	B 相	C 相
THD_u	1.0%	0.9%	0.7%
THD_u (不加电容)	1.3%	1.4%	1.3%
THD_3	7%	8.9%	8.3%
THD_3 (不加电容)	6.5%	7.3%	6.8%
PF		0.92	
PF (不加电容)		0.76	

4 建议治理措施

低压配电网中存在的大量非线性负荷, 使办公楼等配电网中普遍存在谐波电流过大、三相不平衡及补偿电容与系统电感搭配不合理等问题, 极易引起中性线电流过大、变压器出力下降, 网损增大等问题。对这些问题必须加以重视并对其进行治理。因此可以采取以下建议:

(1) 在三相系统尤其是现代办公楼中, 三相负荷功率相等不代表三相平衡, 因为负荷的自身特性可能导致三相不平衡和非线性^[5], 因此要力求按负荷性质和功率大小合理、均匀地分配三相负荷。这样零序谐波电流以外的中性线电流可以减至最少。

(2) 对办公楼等配电网加装滤波器, 选用谐波性能好的设备可有效地控制谐波。但从经济角度考虑, 每相加装滤波器成本较高。因此可以考虑将补偿电容器设计来滤除某次谐波。

(3) 适当增大中性线截面或选用与相线具有相同截面的中性线。

(4) 并联补偿电容器参数设定一定要考虑与系统电感的配合问题, 避免发生谐振, 严重放大谐波电流而造成重大事故。

(5) 选用专门设计的可以承受谐波的 K 因数变压器。其绕组和磁结构经过特别设计, 可以减少谐波电流的发热效应。

5 结语

本文测量、分析了非线性负荷和商场、办公楼

等配电网的谐波状况及其产生的影响,并提出了一些简单的治理建议。通过分析可知低压民用负荷产生大量的谐波,会对低压电网产生较大的影响,应当引起重视。而当三相四线制电力系统用于向商业大厦、商场中的计算机系统,现代办公设备及其他非线性负荷供电时。其设计应当考虑谐波因素,以避免可能发生的问題。

参考文献

- [1] Subjak J, Macquikin J. Harmonic-Causes, Effects, Measurements, and Analysis: an Update [J]. IEEE Trans Ind, 1990, 26(5):1034-1042.
- [2] Wagner V E, Balda D C J C. Effects of Harmonics on Equipment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(2):672-680.
- [3] Hendleron R D, Rose P J. Harmonics: the Effects on Power Quality and Transformers[J]. IEEE Trans Ind, 1994, 30(3):528-532.
- [4] Sueker K H. Comments on "Harmonics: the Effects on Power Quality and Transformers[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1995, 31(2):405-406.
- [5] 陈斌发. 配电变压器接法对谐波影响的分析[J]. 电网技术, 2001, 25(6):55-58.
CHEN Bin-fa. Influence of Transformer Winding Connection on Harmonic Voltage[J]. Power System Technology, 2001, 25(6):55-58.
- [6] Aintablian H. The Harmonic Currents of Commercial Office Buildings Due to Non-linear Electronic Equipment[A]. In: Southcon/96. Conference[C]. 1996. 610-615.
- [7] Omer GUL, Mehmet BAYRAK. 不平衡和非线性负荷引起的电能质量和中性线电流问题[J]. 供用电, 2001, 18(3):52-56.
- [8] Cheng P T, Huang P T, Hou C C. A New Harmonic Suppression Scheme for Three-phase Four-wire Distribution Systems[A]. In: Proc IEEEAPEC[C]. 2001. 1287-1293.
- [9] 程浩忠. 电力系统谐波技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
- [10] Plow RT. Effect of Switch Mode Power Supply Harmonic Currents on Building Power Systems and Stand-by Engine Alternators[J]. Telecommunications Energy Conference, 1994, 22(2):665-668.
- [11] Jou H L, W U Jinn-chang, WU Kuen-der, et al. Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-phase Four-wire Distribution Power System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2):1168-1173..
- [12] Wakileh G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 收稿日期: 2007-06-08; 修回日期: 2008-02-29
作者简介:
王 葵 (1966-), 女, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置. E-mail: wangkui@sdu.edu.cn
- (上接第 23 页 continued from page 23)
- [2] 祁才君, 王小海. 基于插值 FFT 算法的间谐波参数估计[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 92-95.
QI Cai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 21(12): 83-87.
- [3] 薛蕙, 杨仁刚. 利用 Morlet 连续小波变换实现非整数谐波的检测[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 41-44.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Morlet Wavelet Based Detection of Noninteger Harmonics[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 41-44.
- [4] 马秉伟, 周莉, 刁均伟. 基于现代谱估计方法的间谐波检测[J]. 继电器, 2005, 33(3): 25-27.
MA Bing-wei, ZHOU Li, DIAO Jun-wei. Interharmonics Measurement Using Modern Spectral Estimation Method[J]. Relay, 2005, 33(3): 25-27.
- [5] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 81-84.
SHI Min, WU Zheng-guo, YIN Wei-min. Inter-Harmonics Parameter Estimation Based on Multi-signal Classification and Prony Method[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 81-84.
- [6] 王志群, 朱守真, 周双喜. 基于 Pisarenko 谐波分解的间谐波估计方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 72-77.
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Inter-harmonics estimation by Pisarenko Harmonic Decomposition Method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 72-77.
- [7] Cumulant-Based Approach to the Harmonic Retrieval and Related Problems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1991, 39(5).
- [8] Nikias C L, Petropoulos A P. Higher-order Spectra Analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [9] 张贤达. 时间序列分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [10] 张贤达. 现代信号处理(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- 收稿日期: 2007-07-26; 修回日期: 2007-09-19
作者简介:
张经纬 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统自动化和电能质量的研究工作; E-mail: fengcquzjw@yahoo.com.cn.
周念成 (1969-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统自动化和电能质量的教研和研究工作;
杨 芳 (1982-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统自动化和电能质量的研究工作