

# 低压配电网谐波网损估计

王 葵<sup>1</sup>, 李建超<sup>1</sup>, 关淑华<sup>2</sup>, 潘贞存<sup>1</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南供电公司, 山东 济南 250012)

**摘要:** 同频谐波电流、电压产生的谐波功率增大了电网的网损, 而了解电网中谐波网损比例对于电力公司制定节能降耗的措施具有指导意义。比较分析了估算电网谐波网损方法的优缺点, 并以实际电网和实测数据为基础, 建立了计算谐波网损的简易模型, 分析计算了电网谐波网损及其所占总网损的比例。通过对电网谐波网损进行论述表明了治理谐波及对谐波功率进行有效计量和收费的重要性。

**关键词:** 谐波功率; 网损; 谐波电流; 配电网

## Estimation of harmonic loss in low-voltage distribution system

WANG Kui<sup>1</sup>, LI Jian-chao<sup>1</sup>, GUAN Shu-hua<sup>2</sup>, PAN Zhen-cun<sup>1</sup>

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

2. Jinan Electric Power Corporation, Jinan 250012, China)

**Abstract:** Harmonic power which is caused by the same frequency harmonic current and voltage increases the loss of power system, and understanding the harmonic loss ratio of the power network has guiding significance for the power company to draw up conserve energy measure. This paper compares and analyzes relative merits of the methods of estimating power system harmonic loss and builds a simple model of calculation harmonic loss based on real power network and actual measured data. Harmonic loss and its share of total net loss ratio are analyzed in the paper. The net harmonic loss shows the importance of harmonics control and effective measures and charges for harmonic power.

**Key words:** harmonic power; network losses; harmonic current; distribution system

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)03-0056-04

## 0 引言

谐波电流在电网中流过时, 与同频谐波电压产生谐波功率。而谐波功率的物理意义就是谐波网损, 所以增大了电网的线损, 对电网的经济运行不利。而对于电力公司来讲, “线损率”是一项重要的考核指标, 这是综合反映电网经济运行管理水平和电力企业经济效益的主要指标之一, 显然谐波功率的产生对“线损率”是不利的。特别是近年来, 随着电力电子技术的飞速发展和人民生活质量的提高, 大量的非线性负荷接入低压电网, 特别是 0.4 kV 民用负荷。这些负荷虽然单个容量不大, 但数量巨大而且分布广泛, 会产生很大的谐波电流。我们对商场、办公楼、居民小区等 16 个 10 kV 配电站测量结果表明 0.4 kV 侧的相电流谐波含量基本都在 5%~20% 之间, 个别高达 40%。中性线中的谐波含量更是在

90%以上, 有些甚至高达 200%。这些非线性负荷发出的谐波功率大部分消耗在低压网络, 真正从低压电网馈入高压电网的只占很少一部分, 所以准确地分析计算低压配电网的谐波网损, 对于电力公司制定节能降耗的措施非常重要。事实上, 围绕电网中谐波网损的分析计算, 在国内已开展了广泛的研究, 但是罕见有关电网或者配电网谐波网损的全面分析论述。针对这个问题, 本文从理论上论述了分析计算电网谐波网损方法, 并以此为基础从实测数据出发计算分析了谐波网损; 对配电网的谐波网损进行了全面论述。

## 1 谐波网损估计方法

谐波功率除了对供热用的电热外, 无任何效益, 只是以发热的形式在传输过程中各环节及用电设备中消耗掉。所以谐波功率实质上就是因谐波而产生

的线损—谐波网损。为了对电网的谐波网损进行估计, 设电流谐波总畸变率  $THD_1$  为:

$$THD_1 = \frac{100 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} (\%)$$

在不考虑集肤效应的情况下, 线路电阻为定值  $R$ 。则无谐波电流时线路损耗为  $I_1^2 R$ , 而有谐波电流时线路损耗为:

$$I^2 R = (I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2) R = I_1^2 R (1 + THD_1^2)$$

所以线损增加率为:

$$\alpha = \frac{I^2 R - I_1^2 R}{I_1^2 R} = THD_1^2$$

因此, 如果总谐波含有率为 30%, 那么线损就会增加 9%。这是在不考虑高次谐波集肤效应引起电阻增加情况下的谐波线损估计<sup>[4]</sup>。

此方法在理论上是完全正确的, 对谐波网损的估计也是相当确切的, 但是其结果仅是一个比例数字而且以很难确定的基波网损为基准, 难以算出具体数字。另外在实际电网中, 各相的电流畸变率  $THD_1$  并不相同, 甚至相差极大。此时上述方法可以计算各相的线损增加率, 但是从全网的角度出发, 难以对全网或配电网的谐波网损做出估计。尤其是在三相四线制配电网中, 中性线线损在配电网总损耗中占很大的比例, 通过我们的测试数据计算结果很好地反映了这一点。而上述方法不能够全面准确地计算中性线的线损, 进一步表明了利用电流畸变率在估计全网谐波网损方面的不足。而等值电阻法则完全可以对全网或配网的谐波网损进行估计计算, 虽然计算上不如上述方法简单以及由于考虑的谐波次数有限可能有些误差, 但是随着谐波次数的增加, 谐波电流甚至递减到可以忽略不计, 由此形成的误差在允许范围内。

## 2 等值电阻法的原理

等值电阻法是一种成熟的网络损耗计算方法。它把配电网电流通过元件的有功损耗视为通过“配电网线路等值电阻  $R_{Leq}$ ”和“配电变压器等值电阻  $R_{Teq}$ ”所产生的有功损耗。全网在某时段  $t$  内的功率损耗, 就等于某时段  $t$  内的均方根电流  $I$  的平方与这些等值电阻之积。即  $\Delta P = I^2 \times (R_{Leq} + R_{Teq})$ 。在不考虑谐波集肤效应, 认为线路和变压器等值电阻为一个常数的情况下, 完全可以用等值电阻法计

算全网或配电网的谐波网损。

## 3 配电网谐波网损分析计算

用美国 FLUKE 公司的示波表, 在几个 0.4 kV 配电网进行了实地测量, 测试数据如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 某银行大楼谐波测试数据

Tab.1 The harmonic test data of some bank building

	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$
$THD_1$	9.4%	9.9%	9.2%	98.5%
$I/A$	1150	1180	1150	220
$I_3/A$	65	69	71	204
$I_5/A$	71	83	65	27
$I_7/A$	42	47	45	14
$I_9/A$				24
$I_{11}/A$				4

注: 测试过程中由于各种原因造成了 9、11 谐波数据的缺失, 表 2 中的 7 次谐波数据如同。

表 2 某供电局大楼谐波测试数据

Tab.2 The harmonic test data of some power supply bureau building

	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$
$THD_1$	16%	23.1%	17.8%	90.7%
$I/A$	352	310	402	102
$I_3/A$	26.8	40.9	42.6	85.6
$I_5/A$	38.7	48.4	39.8	10.5
$I_7/A$				2.6
$I_9/A$	7	12.7	13.3	23.3
$I_{11}/A$	15.5	12.7	19.3	3.2
$I_{13}/A$	13.4	16.4	20.1	4.5

表 3 某商场谐波测试数据

Tab.3 The harmonic test data of some market

	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$
$THD_1$	7.6%	9.6%	8.5%	
$I(A)$	1380	1490	1430	285
$I_3(A)$	95	129	120	281.9
$I_5(A)$	47	53	50	0

以表 1 某银行大楼配电网谐波测试数据为例, 用等值电阻法分析计算配电网的谐波网损。简化的等效电路如图 1 所示。

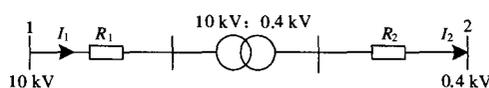


图 1 简化的等效电路

Fig.1 Simplified equivalent circuit

图中  $I_1$ 、 $I_2$  和  $R_1$ 、 $R_2$  分别是 10 kV 侧和 0.4 kV 侧的线路电流和线路阻抗。

此配电网变压器型号 SCB10-1600/10, 按照设计手册的参数计算得变压器归算至 0.4 kV 侧的电阻为:  $R_T = 1.92 \times 10^{-3} \Omega$ 。0.4 kV 侧所选导线型号为 1000V 聚氯乙烯, 导线截面  $120 \text{ mm}^2$ ,  $R = 0.169 \Omega/\text{km}$ 。中性线型号为 1000V 聚氯乙烯, 导线截面  $50 \text{ mm}^2$ ,  $R = 0.407 \Omega/\text{km}$ 。根据配电网实际情况 0.4 kV 侧线路长度取为 0.2 km, 二次侧中性线长度也为 0.2 km, 则相线和中性线的电阻分别为:

$$R_L = 0.169 \times 0.2 = 0.0338 \Omega$$

$$R_N = 0.407 \times 0.2 = 0.0814 \Omega$$

根据上述等效电路参数及所测数据计算得谐波网损如表 4 所示。(说明: 表 4 中的各功率百分比是以配电网总损耗为基准; 图 2 中各次谐波功率百分比是以配电网中的总谐波损耗为基准; 下同。)

表 4 某银行大楼配电网谐波功率

Tab.4 The harmonic power of some bank distribution system

	$P_N$	$P_h$	$P_L$	$P$
功率/W	3939.76	4803.38	142910.88	148155.69
百分比	2.66%	3.24%	96.46%	

注: 表中  $R_N$ —中性线线损;  $R_L$ —总谐波功率;  $P$ —配网总损耗;  $P_L$ —同功率线性负荷功率损耗, 下同。

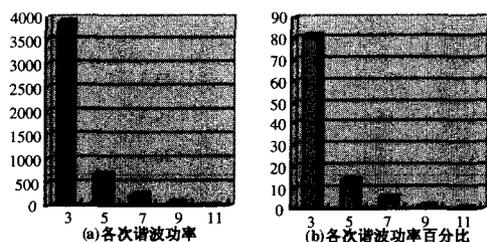


图 2 某银行大楼各次谐波功率及其比例

Fig.2 Some times harmonic power and its ratio of bank building

我们可以对此配电网的谐波网损做一个预算, 由表 4 可知谐波引起的总功率损耗为 4803.38 W。那么此配电网一年由谐波引起的电量损失为 42 077.61 kWh, 按照每千瓦时电量 0.5 元计算, 仅此配电网一年损失的电费将达 21 038.81 元, 而对于全国电网来说有数以万计的这种低供低计的低压民用负荷配电网, 可见由谐波引起的电网损耗是一个多么惊人的数字。而这部分损耗往往由供电公司来承担, 所以应对这部分损耗采取有效的计费方式。

假设此办公楼配电网的负荷全部为线性负荷, 负荷功率不变。此时配电网中不存在谐波。由上面

的测试数据, 根据公式  $I_{L\text{rms}} = I_{\text{rms}} \sqrt{1 - THD_I^2}$  得到各相基波电流。线性负荷情况下, 按功率均匀分配负荷, 三相会基本平衡, 不产生大的基波不平衡电流, 所以不考虑中性线损耗。此时配电网的总网损为:

$$P_L = (I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2) \times (R_L + R_T) =$$

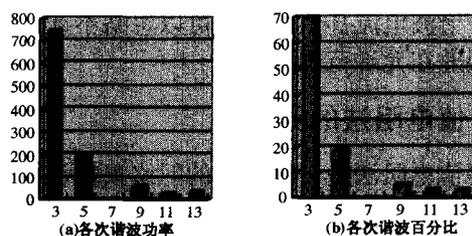
$$(1144.91^2 + 1174.20^2 + 1145.12^2) \times$$

$$(0.0338 + 1.92 \times 10^{-3}) = 142910.88 \text{ W}$$

此网损占非线性负荷情况下配电网总网损的比例为 96.46%。即在同样负荷功率的情况下, 电网需要向非线性负荷配电网多输送大于 3.5% 的电才能满足需求。

说明: 实际上, 高次谐波会使电阻有较大大程度的增大, 若考虑谐波的集肤效应, 算出的谐波损耗会更大。另外在计算中只考虑了几个主要的低次谐波, 而且在计算配电网的谐波网损比例时, 没有考虑变压器的空载损耗。

同样, 用等值电阻法计算表 2、表 3 的数据得到的结果如表 5、表 6 所示。在图 2、3、4 中, 各次谐波功率均为正值且随着谐波次数的增加有递减趋势, 其中三次谐波功率占总谐波功率的 70%~96%。由表 4、5、6 可知, 谐波损耗占配电网总网损的 3.5% 左右, 有些高达 7.8%, 所以应对这部分谐波功率采取有效的计费方式。而中性线的线损竟达到总网损的 2.8% 左右, 有些甚至高达 5.8%。这虽然主要是由谐波在中性线上叠加引起的, 但还是应该在治理谐波的基础上合理选择中性线, 减少线损。在非线性负荷情况下, 电网需向低压民用配电网多输送 3.5% 的电能, 个别配电网甚至需要多输送 9% 的电能才能满足需求。这在很大程度上降低了电能利用率。



注: 由于数据的缺失才使得 7 次谐波功率及其比例低于其他高次谐波功率及比例。

图 3 某供电局大楼各次谐波功率及其比例

Fig.3 Some times harmonic power and its ratio of power supply bureau building

表 5 某供电局大楼配电网谐波功率

Tab.5 The harmonic power of some power supply bureau distribution system

	$P_N$	$P_h$	$P_L$	$P$
功率/W	846.89	1068.56	13151.66	14477.92
百分比	5.85%	7.38%	90.84%	

表 6 某商场配电网谐波功率

Tab.4 The harmonic power of some market distribution system

	$P_N$	$P_h$	$P_L$	$P$
功率/W	6611.72	8202.29	223085.31	231381.47
百分比	2.86%	3.55%	96.42%	

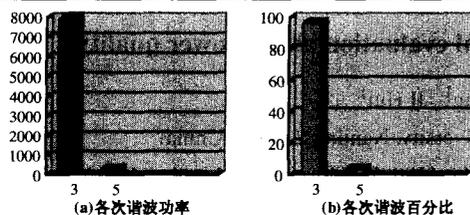


图 4 某商场各次谐波功率及其比例

Fig.4 Some times harmonic power and its ratio of market

## 4 结论

本文分析了利用电流畸变率  $THD_I$  对电网谐波网损进行估计的优点, 以及其在分析计算全网或配电网谐波网损方面的不足。进而阐述了在不考虑谐波集肤效应的情况下, 用等值电阻法计算全网谐波网损的可行性。并根据测试数据计算分析了实际配电网的谐波网损得到以下结论:

(1) 电网中各次谐波功率均为正值, 说明整体上电网是吸收谐波功率的。且电网中各次谐波功率随着谐波次数的增加呈现递减趋势。

(2) 配电网谐波网损占总网损的 3.5% 左右, 个别高达 7.8%。这部分损耗往往由电力公司来承担, 这是不合理也是不公平的, 所以应对这部分损耗采取有效的计量和计费方式。

(3) 配电网中三次谐波功率占到谐波功率的 70%~96%, 所以消除三次谐波对于降低谐波网损来讲是至关重要的。

(4) 通过上面的分析计算可知, 在三相四线制配电网中, 中性线线损占总网损的很大比例。这虽然主要是由谐波引起的, 但还是应该在治理谐波的基础上合理地选择中性线, 尽可能地减少中性线线损, 这对于节能降耗非常重要。

(5) 在非线性负荷情况下, 电网需要向配电网多输送 3.5% 甚至更多的电能才能满足需求。

## 参考文献

- [1] 黄壮盛. 南澳风电场谐波的测量与分析[J]. 电网技术, 2001, 25 (11): 80-82.  
HUANG Zhuang-sheng. Measurement and Snalysis for Harmonics Generated by Nanao Wind Power Plants[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 80-82.
- [2] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(二)——供电网谐波的测量与分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (11): 1-4.
- [3] 王刚军, 王承民, 李恒, 等. 基与实测数据的配网理论网损计算方法[J]. 电网技术, 2002, 26 (12): 18-20.  
WANG Jun-min, WANG Cheng-min, LI Heng, et al. Calculation Method of Theoretical Network Loss in Power Distribution Network on Measured data[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 18-20.
- [4] 程浩忠. 电力系统谐波技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
- [5] 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.
- [6] 吴竟昌, 等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [7] 陈彬, 唐云龙, 徐立明, 等. PCC处谐波分析的新方法[J]. 继电器, 2006,34(9):60-63.  
CHEN Bin,TANG Yun-long, XU Li-ming, et al. New Method for Analyzing the Harmonics on PCC[J].Relay, 2006,34(9):60-63.
- [8] Masoum M A S, Fuchs E F. Transformer Magnetizing Current and Iron-core Losses in Harmonic Power flow[J].IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1):10-20.
- [9] Mansoor A, Grady W M, Staats P T, et al. Predicting the Net Harmonic Currents Produced by Large Numbers of Distributed Single-phase Computer Loads [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4):2001-2006.
- [10] Tanaka T, Akagi H. A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-phase Circuits [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4):1737-1742.
- [11] Valcarce Ml, Mayordomo J G. Harmonic Power Flow for Unbalanced Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(4):2052-2059.
- [12] 江辉, 彭建春, 欧亚平, 等. 输电网损的公正分配[J]. 电网技术, 2003, 27 (5): 10-14.  
JIANG Hui, PENG Jian-chun, OU Ya-ping, et al. Fair Allocation of Transmission Network Power Losses[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 10-14.
- [13] 张峰, 江道灼, 黄民翔. 基于配电监测数据的10 kV配网实时三相线损计算[J]. 继电器, 2003, 31(3): 15-19.  
ZHANG Feng, JIANG Dao-yue, HUANG Min-xiang. A Real Time Loss Calculation for 10 kV Distribution Based on Three Phase Distribution Monitored Data[J]. Relay, 2003,31(3):15-19.

收稿日期: 2007-06-22; 修回日期: 2007-09-10

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

李建超(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置;

关淑华(1965-), 女, 高级工程师, 从事配电网的规划设计工作。