

居民用户谐波调查及仿真分析

王葵¹, 李建超¹, 潘贞存¹, 侯源红², 吴钦坊²

(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: 调查了多种低压民用负荷的谐波情况和典型配电网变压器低压侧的中性线电流和相线电流情况。低压民用负荷会产生大量的谐波和畸变功率, 且功率因数较低, 是影响配电网无功含量和功率因数的主要因素。配电网中性线电流中的三倍次谐波含量很高, 相电流中奇次谐波含量很高, 而且配电网的谐波网损很大。利用电磁暂态仿真程序 ATP 建立了两类主要的低压民用负荷模型, 模型的仿真结果与实测数据基本吻合。

关键词: 低压民用负荷; 谐波; 畸变功率; 功率因数

Harmonic investigation of resident customer and simulation analysis

WANG Kui¹, LI Jian-chao¹, PAN Zhen-cun¹, HOU Yuan-hong², WU Qin-fang²

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

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

Abstract: The effect of harmonic distortion on the low-voltage home-used equipments is studied in this paper. It also investigates the phase current distortion levels and the neutral current behind the low voltage side of the transformer in the realistic distribution systems. The field data shows that nonlinear loads can produce much harmonics and distortion power. They dramatically decrease the power factor. So they are dominant effect with respect to reactive power and power factor of distribution network. Investigation presents an extremely amount of neutral current full with triple harmonics and phase current full with odd harmonics. In addition, harmonic losses are very large in distribution network. The analysis uses the time domain approach and utilizes the Alternative Transients Program (ATP) to model the different harmonic producing devices. The analysis proves that the models are identical with the realistic distribution systems.

Key words: low-voltage appliance loads; harmonic; distortion power; power factor

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0088-05

0 引言

配电网中大型的非线性谐波源设备, 如变频调速电机, 整流器等一直被广泛关注, 已经做过了大量研究^[1], 然而单个容量不大, 但数量巨大的小型非线性设备却没有受到应有的重视^[2]。现在, 我国居民用电占总需求的比例为 12%, 而美国为 36%, 我国居民用电还有非常大的增长空间, 所以研究低压民用负荷的谐波状况具有长远的意义。总体来讲, 低压民用负荷主要包括两大类: 一类是电容滤波二极管桥式整流型负荷, 例如电脑, 彩色电视机等。它们的谐波电流畸变率能够达到 100%^[3], 荧光灯, 热泵的小型调速设备, 充电器也属于这类负荷。还有一类是应用相角控制原理的电压控制器负荷, 这类负荷通过控制晶闸管的导通角来控制交流电压和功率的大小, 例如单相感应电压控制器。由于这些

非线性设备的广泛应用, 使得配电网中的谐波含量很高, 这将造成配电网变压器、线路的过负荷和过热; 发电机、电动机的机械振动; 电容器的绝缘损坏; 电压波动和保护装置误动作等。而三倍次零序谐波在中性线上的叠加, 容易造成中性线电流过大被烧断, 电磁力增加, 中性线电压过高等不利后果。

本文对常用的家用电器和典型的配电网作了实测分析, 并利用电磁暂态仿真程序 ATP 进行了仿真研究。

1 畸变功率的讨论

功率分析结果显示, 家用电器中存在着大量的畸变功率, 而传统的基波无功功率却不是很大。然而目前对于畸变功率的认识还不是很清楚^[4-9]。我们根据 C. Budeanu 提出的畸变功率 D 的计算公式^[7-10], 分析了畸变功率的特性。假设电压、电流

同前。则:

$$S^2 = \sum_{n=1}^N U_n^2 \sum_{n=1}^N I_n^2 \quad (1)$$

$$P^2 + Q^2 = \left(\sum_{n=1}^N U_n I_n \cos \varphi_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N U_n I_n \sin \varphi_n \right)^2 \quad (2)$$

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)可得:

$$D^2 = \sum_{n=1}^{N-1} U_n^2 \sum_{m=n+1}^N I_m^2 (\cos^2 \varphi_m + \sin^2 \varphi_m) + \sum_{n=1}^{N-1} I_n^2 (\cos^2 \varphi_n + \sin^2 \varphi_n) \sum_{m=n+1}^N U_m^2 - 2 \sum_{n=1}^{N-1} U_n I_n \cos \varphi_n \sum_{m=n+1}^N U_m I_m \cos \varphi_m - 2 \sum_{n=1}^{N-1} U_n I_n \sin \varphi_n \sum_{m=n+1}^N U_m I_m \sin \varphi_m =$$

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N (U_n I_m \cos \varphi_m - U_m I_n \cos \varphi_n)^2 + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N (U_n I_m \sin \varphi_m - U_m I_n \sin \varphi_n)^2$$

记:

$$D_{mp}^2 = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N (U_n I_m \cos \varphi_m - U_m I_n \cos \varphi_n)^2 \quad (5)$$

$$D_{mq}^2 = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=n+1}^N (U_n I_m \sin \varphi_m - U_m I_n \sin \varphi_n)^2 \quad (6)$$

在式(5)中, $I_n \cos \varphi_n$ 为 n 次谐波电流的有功分量, D_{mp} 中包含了各次谐波电压与其它不同次谐波电流有功分量的乘积; 在式(6)中, $I_n \sin \varphi_n$ 为 n 次谐波电流的无功分量, D_{mq} 中则包含了各次谐波电压与其它不同次谐波电流的无功分量乘积。它们都是谐波所引起的, 故可将其称为畸变功率。因为电压和电流的频率不同, 所以畸变功率 D 仅具有功率的因次而已^[5]。由三角函数的正交性可知, 畸变功率 D 所对应的瞬时功率在一个周期内的平均值为零, 对有功功率没有贡献, 所以畸变功率 D 也具有无功功率的特征。畸变功率 D 的存在, 增加了总的视在功率 S (如图1所示), 降低了功率因数, 从而间接地增大了网损。

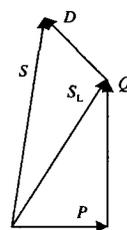


图1 畸变功率和视在功率的关系

Fig.1 Relation of distortion power and apparent power

经过以上分析可见, 畸变功率本质上也是在供电用电之间形成的能量往返传输, 但它可以使瞬时导通电流密度增加、占用系统设备容量、产生高频加热损失、降低电源效率甚至引起供电设备损坏等危害, 而且大量畸变功率的存在会使功率因数严重下降, 进一步造成电网的损失增大。然而, 目前电力部门对于畸变功率大部分还不能计量, 所以目前普遍存在功率因数计量偏高的情况。

2 单个设备谐波含量调查分析

我们采用可实现对电压电流同步采样的数字式示波器 FlukeView190C 对彩色电视机、计算机、空调、电冰箱等家用电器进行了实测调查, 并对它们进行了谐波、功率的分析计算。其中彩色电视机的实测电压电流波形如图2所示。测量结果表明, SONY 29 英寸彩色电视机的电流谐波总畸变率为 79.354%。

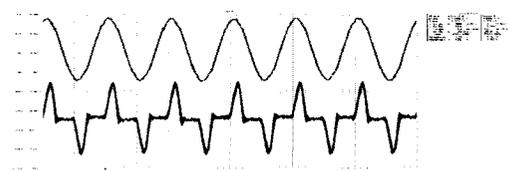


图2 彩色电视机的电压电流波形

Fig.2 Voltage and current waveforms of colour television

然后, 将 FlukeView 中的电压电流波形以数据文件的格式导入到 Matlab 中。利用编制的 m 函数进行谐波分析和各种功率的计算, 取波形稳定后任意一周期的数据为原始数据, 分析计算出彩色电视机的前 11 次谐波电流含有率如图3所示, 其余几种低压电器的谐波分析结果及其功率因数如表1所示。可见低压民用负荷产生极大的谐波, 其中以 3、5、7 等奇次谐波为主, 偶次谐波很小, 甚至可以忽略。而图4、5中彩色电视机和计算机的各种功率比较及其功率因数显示出, 由于谐波的存在, 产生了很大的谐波畸变功率, 有些甚至大于基波有功功率, 而传统的无功功率和功率因数则很小。

可见,家用电器会产生大量的高次谐波,而且功率因数较低;另一方面,家用电器虽然功率不大,但数量众多,分布广泛,其发出的谐波在电网中产生了大量的谐波畸变功率,会使得系统功率因数下降,网损增加,影响电网的经济运行。

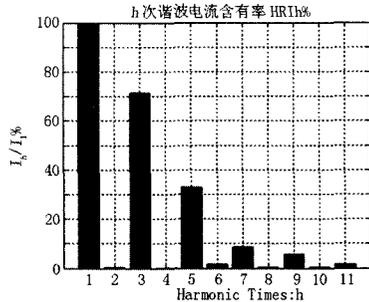


图3 彩色电视机的谐波电流频谱

Fig.3 Harmonic current spectrum of colour television

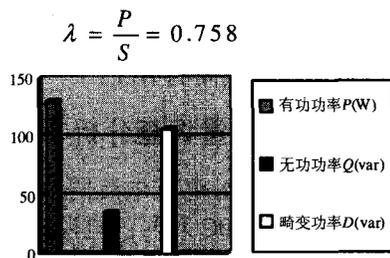


图4 彩色电视机的畸变功率,无功功率和有功功率

Fig.4 Distortion power, reactive power, and real power of colour television

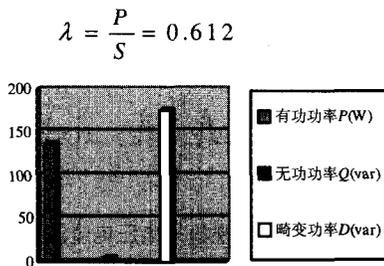


图5 计算机的畸变功率,无功功率和有功功率

Fig.5 Distortion power, reactive power, and real power of a computer

表1 家用电器各次谐波电流含有率及功率因数

Tab.1 The ratios of harmonic current and power factors in household appliances

	3次	5次	7次	9次	11次	λ
计算机	92.640	72.627	48.261	25.999	8.996	0.612
空调	33.884	20.431	4.134	5.225	4.861	0.916
音响	53.138	37.709	19.916	6.999	5.801	0.755
电冰箱	3.651	2.062	0.973	0.165	0.618	0.640

3 功率因数的讨论

电压、电流都存在谐波畸变的情况下,设电压、电流的有效值分别为 U 、 I ,基波电压、电流的有效值分别为 U_1 和 I_1 ,相角差为 ϕ_1 , n 次谐波电压、电流有效值分别为 U_n 、 I_n 。

基于上述电压和电流的有效值,则视在功率为:

$$S = UI = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 I_n^2} = U_1 I_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (7)$$

$$S_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}$$

式中: S_1 为基波视在功率。

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \text{ 为电流谐波畸变率。}$$

$$THD_V = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \text{ 为电压谐波畸变率。}$$

功率因数是有功功率与视在功率的比值。即

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}} = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (8)$$

可见,在电压、电流都接近正弦波的情况下,功率因数小于1,主要是由于电压、电流间的相移所引起的。而当电压、电流发生畸变时,功率因数小于1是由于电压、电流间的相移和波形畸变两大因素所引起的。所以谐波畸变是引起家用电器功率因数较低的一个重要因素。

4 低压配电网的谐波调查分析

现代商业办公楼等低压配电网中存在着大量的计算机、空调、电视机等非线性负荷,我们选择了济南几个典型的办公楼配电网进行了谐波调查,调查结果可以说是触目惊心,如图6、7所示。相线中都含有大量的谐波成分,其中3、5、7、9等奇次谐波是引起电流畸变的主要成分,但不同性质负荷的不均衡分布造成了相线中各次谐波及相电流畸变率的差异。而3倍次零序谐波电流在中性线上的叠加,导致了中性线电流的畸变率大都在90%以上,其中3次谐波电流含有率在85%左右,而三相不平衡和非线性负荷的不均衡分布造成了中性线电流中也含有基波不平衡电流和5、7次等正负序谐波电流。

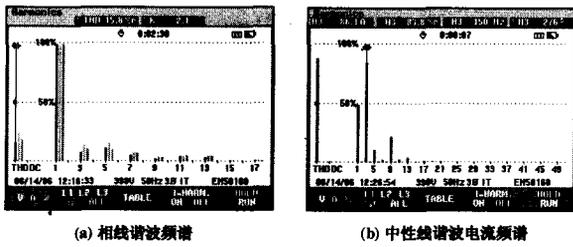


图 6 某局办公大楼相电流和中性线电流的谐波频谱
Tab.6 Phase current and neutral current spectrum of some office building

我们根据办公楼低压配电网的实测数据, 利用等值电阻法^[6]计算了考虑集肤效应情况下的配电网谐波网损, 结果如表 2 所示。这些低压配电网的谐波网损占总网损的比例很大, 有些高达 7.58%, 显著提高了线损率。其中中性线的线损占到了很大的比例, 最低也为 2.5% 左右, 有些达到了 5.44%, 甚至更高。这不但增加了网损, 还极易造成中性线过载, 引发火灾。可见, 谐波在电网中流动不但增大了网损和供电成本, 降低了电能利用率, 还可能引起各种故障, 影响电网的安全稳定运行。

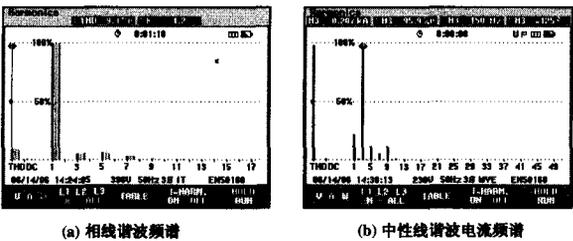


图 7 某银行大楼相电流和中性线电流的谐波频谱
Fig.7 Phase current and neutral current spectrum of some bank building

表 2 配电网的网损及其比例

Tab.2 Network losses and its ratio of distribution system

	P_h/W	P_N/W	P_h/P (%)	P_N/P (%)
某办公大楼	1283.24	921.23	7.58	5.44
某银行大楼	5533.434	3963.330	3.63	2.60

注: P_h 为谐波网损; P_N 为中性线线损; P 为配电网总网损。

5 非线性负载模型

民用负荷主要包括两大类, 一类是电容滤波二极管桥式整流型负荷, 另一类是应用相角控制原理的电压控制器。我们利用电磁暂态仿真程序 ATP 在时域内建立了这两类负荷的仿真模型。

5.1 电容滤波二极管桥式整流型负荷模型

低压民用负荷中最常用的就是应用电容滤波二极管桥式整流的单相负荷。这种单相交流静态转

换负荷造成了配电网电流的严重畸变。其电路模型如图 8 所示, 当其直流侧接 $20\ \Omega$ 的电阻时, 该负荷满载运行。其缓冲电路由电阻和电容串联组成, 与二极管平行连接, 其中电阻 $R=33\ \Omega$, $C=1\ \mu\text{F}$ 。电源的基准频率为 $50\ \text{Hz}$ 。在电源电压为 $220\ \text{V}$ 时, 该负荷吸收 $3.025\ \text{kW}$ 的功率。该负荷产生的脉冲电流波形如图 9 所示, 与图 1 中彩色电视机的波形相同。将采样数据导入到 Matlab 中, 利用编制的 m 函数进行谐波分析, 如图 10 所示, 各次谐波的含量与图 2 中彩色电视机的实测结果非常吻合。而各种功率的平方所占视在功率平方的比例如图 11 所示, 其中畸变功率 D 的平方占视在功率平方的 81%, 而传统无功功率 Q 的平方仅占 1%, 远小于畸变功率。由于仿真计算考虑的谐波次数较多, 所以畸变功率的仿真计算结果比实测数据的计算结果要大。

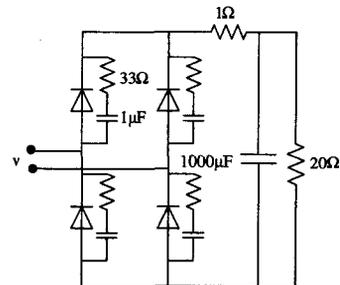


图 8 电容滤波二极管桥式整流型负荷模型

Fig.8 Capacitor filtered diode bridge rectifier load model

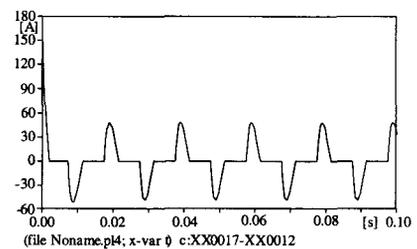


图 9 仿真电流波形

Fig.9 Waveform of simulation current

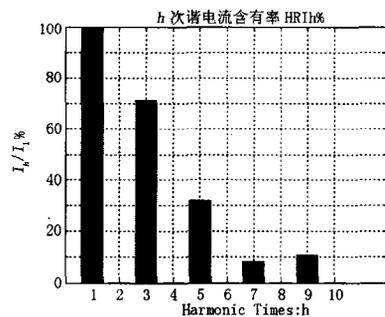


图 10 仿真电流的谐波频谱

Fig.10 Harmonic spectrum of simulation current

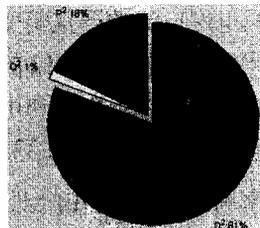


图 11 电容滤波二极管桥式整流型负荷各功率比率

Fig.11 Some powers ratio of capacitor filtered diode bridge rectifier load

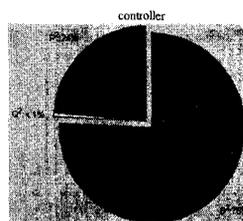


图 14 相角控制的电压控制器负荷的各功率比率

Fig.14 Some powers ratio of single phase-angle voltage controller load

5.2 相角控制的电压控制器模型

采用相角控制的电压控制器负荷模型如图 12 所示,由两个可控硅晶闸管交叉连接而成,且每个晶闸管都与 $R=200\ \Omega$ 的电阻和 $C=1\ \mu\text{F}$ 的电容器串联组成的缓冲电路并联。当电压瞬时值大于 $220\ \text{V}$ 时,可控硅晶闸管导通。在电源端连接有效值为 $220\ \text{V}$ 的电压源,该模型的仿真电流波形如图 13 所示。其各种功率平方所占视在功率平方的比例如图 14 所示,可见,其畸变功率 D 和传统无功功率 Q 所占的比例均小于电容滤波二极管桥式整流型负荷中相应功率所占的比例,也就是说在考虑畸变功率的情况下,相角控制的电压控制器的功率因数要大于电容滤波二极管桥式整流型负荷的功率因数。

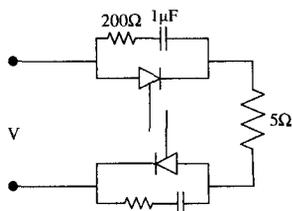


图 12 相角控制的电压控制器负荷模型

Fig.12 Single phase-angle voltage controller load model

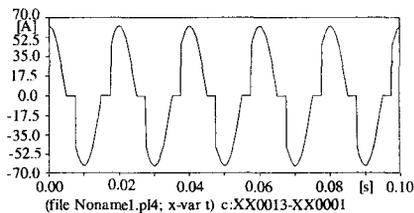


图 13 电压控制器仿真电流

Fig.13 Simulation current of phase-angle voltage controller

6 结论

通过对常用的家用电器以及办公楼配电网进行实测计算分析和 ATP 仿真,得到如下结论:

1) 家用电器会产生很大的谐波和畸变功率,而

传统的无功功率和功率因数则很小。

2) 当电压或电流发生畸变时,谐波畸变率是影响功率因数的一个重要因素。

3) 畸变功率本质上与传统无功功率一样,也是在供电和用电之间往返传输的能量。

4) 低压配电网相电流中含有大量的奇次谐波,而中性线中三倍次零序谐波的含量很高,而且谐波网损和中性线线损均占配电网网损的比例很大。

5) 现在,大量的低压民用负荷是配电网的一个主要谐波扰动源,并且其对配电网的影响会越来越严重。

参考文献

- [1] Koval D O, Carter C. Power Quality Characteristics of Computer Loads [J]. IEEE Trans, 1997, 33(3):613-621.
- [2] Dwyer R, Khan A K, McCluskey R K, et al. Evaluation of Harmonic Impact from Compact Fluorescent Light on Distribution System[J]. IEEE Trans, 1995, 10(4):1772-80.
- [3] El-Saadany E F. Parameters Affecting Harmonic Propagation and Distortion Levels in Non-Linear Distribution Systems[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2002.1010-1016.
- [4] Kusters N L, Moore M. On the Definition of Reactive Power Under no Sinusoidal Conditions[J]. IEEE Trans Power Appl Syst, 1980, 99:1845-1854.
- [5] 周勇, 王文峰, 赵慧光, 等. 剖析非线性负荷的无功功率[J]. 继电器, 2006, 36 (10) :85-88. ZHOU Yong, WANG Wen-feng, ZHAO Hui-guang, et al. Analysis of Reactive Power of Nonlinear Load [J]. Relay, 2006, 36(10):85-88.
- [6] 陈海涵, 程启诚. 等值电阻法计算配电网损耗的理论和实践[J]. 广东电力, 2004, 17(3):5-8. CHEN Hai-han, CHENG Qi-cheng. Theory and Practice of Distribution Network Loss Calculation Through Method of Equivalent Resistance[J]. Guangdong Electric Power, 2004, 17 (3): 5-8.
- [7] 吴竟昌, 等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.

(下转第103页 continued on page 103)

收合格后,方能实际使用,以免误控设备;③已经过变电站程序化操作测试的间隔设备,在测试完成后,不能擅自向程序化操作系统添加新的变电站程序化操作票,或对原程序化操作票进行修改,如需添加或修改变电站程序化操作票,应由自动化专业人员负责,经变电运行专业验收合格后,方能实际使用;④对变电站程序化操作功能未进行测试的间隔设备,其程序化操作票禁止下载到保护、测控装置中,不得使用变电站程序化操作功能进行倒闸操作,只能使用人工单步遥控操作。

4 结束语

程序化操作在 110 kV 三江数字化变电站进行了试点,工程实践证明,在变电站电气一、次间隔设备的支持以及程序化操作系统在变电站自动化系统的拓展应用下,能有效地提高变电站自动化水平和电网运行的水平,可以明显地提高变电站电气倒闸操作速度和效率。在实际应用中,应在操作的安全性、对运行方式的灵活性和操作效率等方面对程序化操作进行全面的考虑,并依靠完善的运行维护管理制度,落实管理责任,才能保证程序化操作的有效、持续实施。在电力企业越来越注重提高工作效率的今天,程序化操作能有效地缩短对用户的停电时间,落实社会服务承诺,树立企业良好形象,

今后将会有良好的发展前景。

参考文献

- [1] 张军涛.程序化操作在变电站自动化系统中的实现[J].中国高新技术企业,2007,(5):79-79,81.
ZHANG Jun-tao. The Realization of Sequence Control for the Automation System in Substation[J]. Hi-tech Enterprise in China, 2007, (5): 79-79, 81.
- [2] 高翔.数字化变电站应用展望[J].华东电力,2006,34(8):47-53.
GAO Xiang. Application Prospects of Digital Substations[J]. East China Electric Power, 2006, 34(8): 47-53.
- [3] 徐大可,赵建宁,张爱祥,等.电子式互感器在数字化变电站中的应用[J].高电压技术,2007,33(1):79-82.
XU Da-ke, ZHAO Jian-ning, ZHANG Ai-xiang, et al. Application of Electronic Transformers in Digital Substation [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 79-82.

收稿日期:2008-01-28; 修回日期:2008-04-24

作者简介:

黄文韬(1972-),男,高级工程师,从事继电保护运行管理工作。E-mail: huangwentao@gzpsc.com

(上接第92页 continued from page 92)

- [8] 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.
- [9] 王兆安,等.谐波抑制和无功功率补偿(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [10] 许克明,等.电力系统高次谐波[M].重庆:重庆大学出版社,1991.

收稿日期:2008-01-15; 修回日期:2008-03-10

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;

潘贞存(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置。

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告