

聚磁式OCT磁饱和和特征的补偿方法研究

韦兆碧^{1,2}, 薛 烨³, 杨银堂¹, 白 洁², 惠培智²

(1. 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;
3. 中国移动通信集团陕西有限公司, 西安 710075)

摘要: 针对聚磁式OCT的磁饱和特性,提出了基于反函数思想的非线性补偿方法,利用直接法建立了磁饱和特性的多项式表达模型,结合矩阵计算法推导出多项式系数的计算方法,根据实验室现有的聚磁式OCT测量结果计算得到非线性补偿模型,并利用该补偿模型对聚磁式OCT的输出进行校正,对非线性补偿方法进行验证,表明具有很强的有效性、准确性和实用性。

关键词: 聚磁式OCT; 磁饱和; 非线性补偿; 模型

中图分类号: TM452; TM93

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)03-0006-05

Compensation Method for the Saturation of Magnetism Gathering OCT

WEI Zhaobi^{1,2}, XUE Ye³, YANG Yintang¹, BAI Jie², HUI Peizhi²

(1. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. China Mobile Group Shaanxi Company Limited, Xi'an 710075, China)

Abstract: We propose an inverse-function-based nonlinear compensation method to deal with the saturation characteristic in the magnetism gathering OCT. A polynomial expression model of the magnetic saturation characteristic is constructed via the direct method, and a computation method for polynomial coefficient is deduced by using the matrix calculation method. The existing parameters of the magnetism gathering OCT measured in the laboratory are used to obtain the nonlinear compensation model for adjusting the output of the magnetism gathering OCT. Experimental results verify the effectiveness, precision and applicability of this compensation method.

Key words: magnetism gathering OCT; magnetic saturation; nonlinear compensation; model

0 引言

光学电流互感器 (optical current transformer, OCT) 是一种以法拉第磁光效应为基础、以光纤为测量和传输介质的电流测量装置。在高压大电流测量的条件下使用 OCT 较之传统的 CT, 具有明显的优越之处: 绝缘性能好, 不会产生磁饱和现象、线性度好、结构紧凑、体积小、重量轻、价格便宜、无爆炸危险等^[1-7]。聚磁式 OCT 利用聚磁铁心的方式增强磁光晶体所处的磁场, 因而其测量灵敏度较之其他

OCT 有所提高, 因此具有一定的应用前景。但由于聚磁铁心的存在聚磁式 OCT 输出又不可避免的具备一些铁磁特征, 虽然由于气隙的存在, 在一定的范围内磁滞和磁饱和可以不考虑, 但当电流较大时磁滞和磁饱和将会影响到聚磁式 OCT 的测量结果, 而且磁滞和磁饱和还将影响到聚磁式 OCT 的测量范围^[1]。目前, 对于聚磁式 OCT 的研究, 国内外已有一些文献和报道^[2,4,8-12], 但聚磁式 OCT 输出在铁心饱和状态下的补偿研究, 目前在国内外的文献中还鲜有提及。笔者通过对聚磁式 OCT 的饱和特征进行研究, 给出了聚磁式 OCT 饱和特征下的非

收稿日期: 2013-11-06; 修回日期: 2013-11-28

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金资助项目(20050698007)。

Project Supported by Research Fund for the Doctoral Program of High Education of China (20050698007).

线性补偿方法,并通过对聚磁式 OCT 的饱和特征下的测量结果进行补偿校准,拓宽了聚磁式 OCT 测量范围。

1 聚磁式 OCT 的饱和特征研究

当电力系统出现故障或电流过大时,磁饱和产生的影响将直接影响到聚磁式 OCT 的输出,导致聚磁式 OCT 的测量结果不能达到要求。为了验证磁饱和对聚磁式 OCT 性能的影响,文中进行了以下实验,选用 YB73-70 D21 型硅钢片,方形铁心内边长 60 mm,铁心外边长 100 mm,铁心截面积 20 mm²,气隙长度 15 mm,用以代替被测母线的一次侧线圈为 208 匝,当一次侧线圈电流从 0 增加到 5.1 A,等同于被测电流对应从 0 增加到 1 061 A。

被测电流有效值从 62 A 到 1 061 A 变化时,聚磁式 OCT(铁心截面积为 20 mm²)的输出实测结果见图 1,从图 1 中可以看出,当被测电流不断增加,聚磁式 OCT 与被测电流的输入输出曲线由线性对应逐步过渡到非线性对应关系,当电流较大时聚磁式 OCT 的饱和特征非常明显。

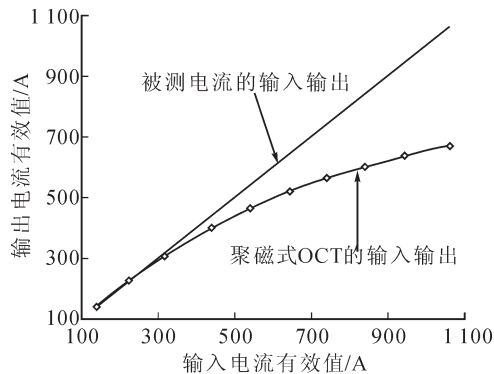


图 1 聚磁式 OCT(铁心截面积 20 mm²)的输入输出实测结果

Fig. 1 Input and output of magnetism gathering OCT

为了定量地对聚磁式 OCT 的饱和特征进行描述,参照电子式电流互感器国标 GB/T 20840.8—2007 对上述测量结果进行电流(比值)误差标定,其中电流(比值)误差是电子式电流互感器测量电流时出现的误差,它由于实际变比不等于额定变比而产生的。对模拟量输出,电流误差百分数为

$$\varepsilon = \frac{K_n U_s - I_p}{I_p} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: K_n 为额定变比; I_p 为二次谐波输出,包括谐波和次谐波分量 $I_{\text{pres}}(t)=0$ 时实际一次电流的方均根值; U_s 为二次转换器输出的方均根值。

表 1 是上述实验模型在实验室条件下,测量得到的聚磁式 OCT 铁心饱和特征下的输出及比值误差数据,从表 1 中可以看出,当被测电流的有效值

超过 223.29 A 时,聚磁式 OCT 电流输出比值误差已经大于 0.5%,并且随着被测电流的增加,比值误差越来越大。

表 1 聚磁式 OCT 铁心饱和特征下的输出及比值误差
Tab. 1 Output and ratio error under the saturation of magnetism gathering OCT

被测 电流 I_{ms}/A	聚磁式 OCT 输出电流 I_{ms}/A	比值误 差 $\varepsilon/\%$	被测 电流 I_{ms}/A	聚磁式 OCT 输出电流 I_{ms}/A	比值 误差 $\varepsilon/\%$
138.10	137.48	-0.45	639.90	514.68	-19.57
223.29	224.40	0.50	740.47	560.25	24.34
315.54	304.49	-3.51	838.44	595.83	-28.97
435.15	404.25	-7.10	947.22	635.32	-32.93
536.89	461.07	-14.12	1 060.71	667.15	-37.10

通过上述试验可以看出,当被测电流超过聚磁式 OCT 的线性测量范围之后再继续增大,将会使聚磁铁心内的磁饱和现象不断加剧,最终导致测量误差越来越大,测量系统不能正确地反映被测电流的变化,从而使测量系统丧失作用。

虽然由于气隙的存在,聚磁式 OCT 在一定的测量范围可以不考虑磁滞和磁饱和现象,然而当被测电流不断增大,铁心内的磁滞和磁饱和就不能被忽视^[13-18]。聚磁式 OCT 的这种饱和输出特征,在大电流时会影响其测量的准确性和真实性,如果不进行补偿,无法使聚磁式 OCT 工作在一个较宽的工作电流范围内并在暂态大电流时满足测量和保护的需要。对于聚磁式 OCT 的饱和特征补偿,如果从传统的硬件补偿很难得到满意的效果,而应用软件补偿的方法,可方便灵活地实现对聚磁式 OCT 饱和特征的非线性补偿。

2 聚磁式 OCT 饱和特征的非线性补偿

2.1 非线性补偿原理

传统互感器的补偿方式大都基于通过外部增加硬件,通过新增硬件在某种特定条件下所表征出与被补偿互感器特征相同或相反的特性,进行相应补偿,但这种方法硬件成本较高且难以实现,此外由于硬件特性的不稳定使得补偿效果有限。随着软件技术的发展,基于数字的补偿技术不但能提高互感器的测量准确度,同时能够实现对互感器系统的实时补偿,并能根据互感器的运行情况通过软件设置调整,实现系统地长期补偿,因而具有良好的应用前景^[19-20]。

聚磁式 OCT 饱和特征非线性补偿的核心思想来自于数学上的反函数思想,即在聚磁式 OCT 的输出

部分增加一个非线性单元(特征函数为 $F(S_i)$),只要该单元的特性曲线与聚磁式 OCT(特征函数为 $G(S_i)$)的特性曲线互补,即 $F(S_i) \cdot G(S_i) = K$ (K 为常数),就可以实现聚磁式 OCT 的线性化。聚磁式 OCT 的非线性补偿原理图见图 2,从图 2 中可以看出,如果能得到对应的非线性补偿函数,那么经过非线性补偿单元校正后,聚磁式 OCT 的非线性失真可以得到恢复。

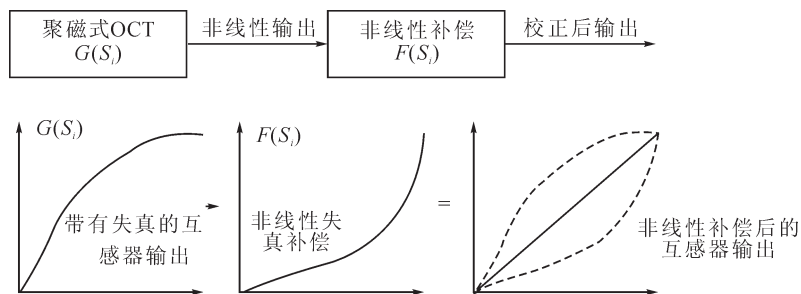


图2 聚磁式 OCT 非线性补偿原理

Fig. 2 Theory of nonlinear compensate the system of magnetism gathering OCT

的非线性补偿。

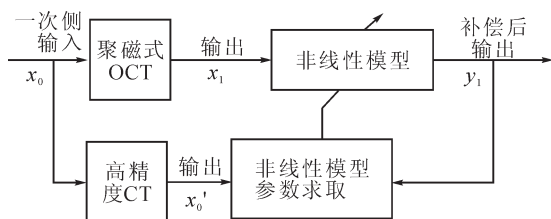


图3 聚磁式 OCT 系统的非线性补偿方案

Fig. 3 Method to nonlinear compensate the system of magnetism gathering OCT

2.2 非线性补偿模型算法

文中选用聚磁式 OCT 在铁心低饱和状态下的输出进行失真分析,建立了一个以高精度 CT 输出信号模值为参量的非线性模型,图 3 中的非线性模型可以描述为

$$X_{\text{Distortion}}(n) = f(P_n) \times X(n). \quad (2)$$

式(2)中: $f(P_n)$ 为非线性模型函数; P_n 为 $f(P_n)$ 的参量,文中取聚磁式 OCT 输出的信号模值; $X(n)$ 为聚磁式 OCT 的输出信号; $X_{\text{Distortion}}(n)$ 为经非线性校正后的互感器输出。

在非线形处理中,非线性表达式 $f(P_n)$ 可以用一个多项式来进行逼近,即式(2)可以表示为

$$f(P_n) = \sum_{k=0}^K a_k P_n^k. \quad (3)$$

式(3)中: a_k 为第 k 阶多项式的系数; K 为多项式逼近的最大阶数; P_n 为实际检测信号第 n 点的模值。

将式(3)代入式(2)中,则模型可以表示为

$$X_{\text{Distortion}}(n) = \sum_{k=0}^K a_k P_n^k \times X(n). \quad (4)$$

聚磁式 OCT 系统的非线性补偿实现方案见图 3,图 3 中,一次侧输入电流(被测电流)同时进入聚磁式 OCT 和高准确度 CT 测量系统,其中,聚磁式 OCT 的输出经过非线性模型进行校正,其输出结果反馈至非线性模型参数求取单元,与高精度 CT 的输出共同作用以获得非线性模型的相关参数,并且经过不断的训练和调整,就可以实现聚磁式 OCT

因此,非线性补偿模型的求解可以表示为一个多项式系数 $W=(a_0, a_1, \dots, a_k)$ 的求取过程。

非线性模型的参数首先是通过高精度 CT 输出信号和非线性模型输出信号训练来得到,即聚磁式 OCT 的输出信号通过非线性模型后等于标准检测信号,其表达式为

$$X_{\text{Distortion}}(n) = y(n). \quad (5)$$

式(5)中, $y(n)$ 为高精度 CT 输出信号。

将式(4)代入式(5)得

$$y(n) = \sum_{k=0}^K a_k P_n^k \times X(n). \quad (6)$$

采用最小二乘法来得到多项式系数 $W=(a_0, a_1, \dots, a_k)$, 令

$$\varepsilon_n = y(n) - \sum_{k=0}^K a_k P_n^k \times X(n). \quad (7)$$

将式(7)写成矩阵形式的预失真表达式,则误差向量为

$$E = Y - X \cdot P \cdot W. \quad (8)$$

式(8)中:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & P_1 & P_1^2 & \dots & P_1^n \\ 1 & P_2 & P_2^2 & \dots & P_2^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & P_n & P_n^2 & \dots & P_n^n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} x_1 & x_1 & \dots & x_1 \\ x_2 & x_2 & \dots & x_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & x_n & \dots & x_n \end{bmatrix};$$

$$W = [\alpha_0 \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_k];$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T; E = [\varepsilon_0 \ \varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_k];$$

“ $\cdot$ ”表示点乘,即矩阵对应元素相乘。

令 $X \cdot P = A$, 则

$$E^2 = Y^2 - 2YA^T W + W^T A A^T W. \quad (9)$$

为得到 E^2 的最小极值,对式(9)求 W 的微分得

$$\nabla = 2RW - 2Q. \quad (10)$$

式(11)中: $R=AA^T$; $Q=YA$ 。

显然式(8)中 W 的极小值(最小二乘解)为 $0=2RW-2Q$, 即

$$W=R^{-1}Q. \quad (11)$$

根据上述推导, 非线性模型的多项式系数 $W=(a_0, a_1, \dots, a_k)$ 的求解可以通过训练样本得到式(11)中的 R 和 Q 矩阵, 并通过式(11)得到多项式的系数的最小二乘解。

2.3 非线性补偿实验验证

在实验应用中, 采集聚磁式 OCT 在铁心低饱和状态下和高准确度 CT 输出的训练样本数据后, 先进行低通滤波处理, 然后将高精度 CT 输出信号和聚磁式 OCT 输出信号进行时延对齐, 按照式(8)进行训练, 得到非线性模型的多项式系数。

图 4 是根据实际采集训练样本, 求解得到的聚磁式 OCT 输出模值补偿曲线, 该曲线即为图 2 中的非线性单元 $F(S_i)$ 所表达的曲线, 其横坐标为聚磁式 OCT 输出的模值, 纵坐标为每一聚磁式 OCT 输出模值所对应的补偿系数。从曲线可以看出, 聚磁式 OCT 的输出模值大于 0.3 时, 随着聚磁式 OCT 输出模值的不断增大, 补偿系数也不断增加。而当聚磁

式 OCT 的输出模值小于 0.3 时, 补偿系数随着聚磁式 OCT 输出模值的增加而减小。

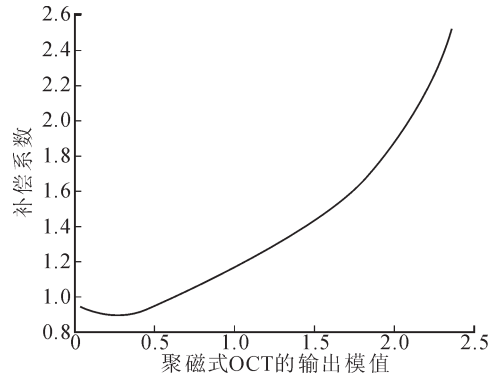


图 4 聚磁式 OCT 模值校正曲线

Fig. 4 Correction curve of magnetism gathering OCT

将图 4 得到的非线性补偿模型代入到图 3 的补偿方案中, 得到饱和特性补偿后的聚磁式 OCT 输出。图 5 分别给出了聚磁式 OCT 非线性补偿前后的时域和频谱对比图。由图 5(a)中可以看出, 聚磁式 OCT 的输出经过非线性补偿后, 无论是幅度还是相位均很难直接分辨出与被测电流的区别, 图 5(b)是聚磁式 OCT 的频谱分析图, 从图 5 中可以清晰的看出, 经过处理后的聚磁式 OCT 输出与处理前相比, 频谱特性已经有了较大的改善。

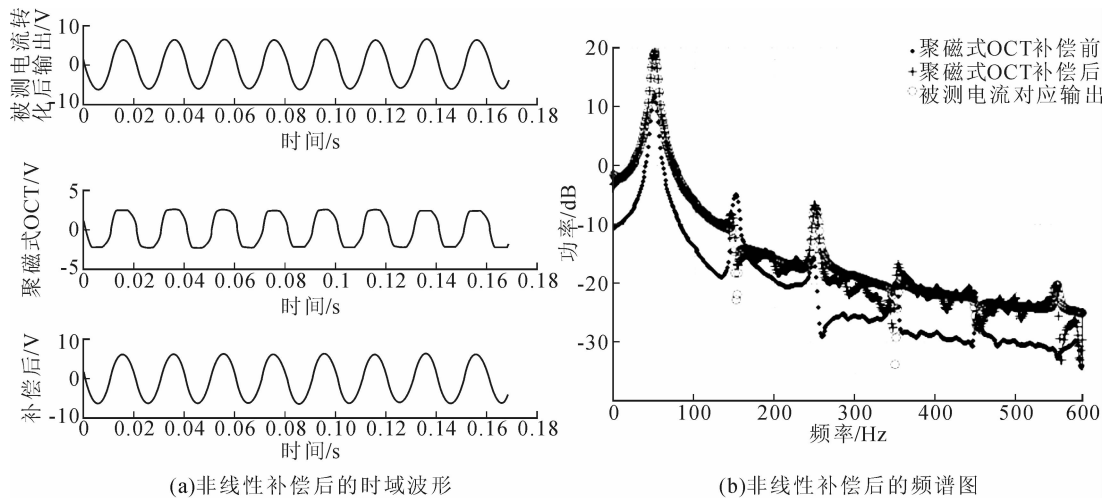


图 5 补偿前后的聚磁式 OCT 时域和频谱分析

Fig. 5 Wave and frequency analysis of the front and rear compensation

当输入电流 947.22 A 时, 聚磁式 OCT 较正前后的模值输入输出对比见图 6。由图 6 中可以看出, 经过非线性模型补偿后, 输出结果与被测电流非常接近; 测量系统的线性度相比传统的聚磁式 OCT 得到明显的改善。

为了对校准前后的区别进行定量的分析, 文中用引入方均根误差(root mean square, RMS)进行说明, 如式(12)所示, 为了方便描述, 文中取输入电流

为 947.22 A 时, 补偿前后的样本的时域 RMS 误差进行说明。

$$RMS(x, y) = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x - y|^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

可以得到: $RMS(\text{被测电流}, \text{聚磁式 OCT 输出}) = 2.656$, $RMS(\text{被测电流}, \text{聚磁式 OCT 输出校准后}) = 0.283$, 即经过校准后聚磁式 OCT 的 RMS 精度提高了约 10 dB。

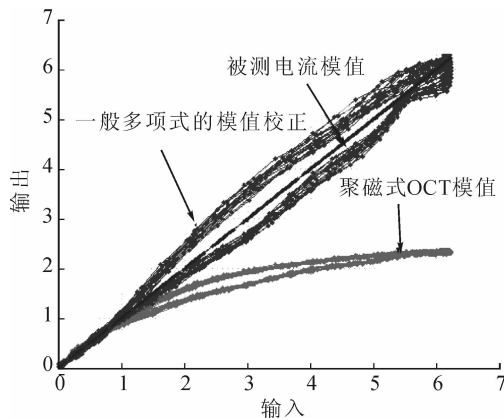


图6 聚磁式OCT模值校正后输出

Fig. 6 Output of magnetism gathering OCT after correction

3 结论

1)笔者对聚磁式OCT的磁饱和特征进行研究,给出了聚磁式OCT铁心在低饱和状态下的非线性特征分析;提出了基于反函数思路的补偿原理,结合这一思想给出了聚磁式OCT的补偿模型,并经过推导给出计算方法,为补偿聚磁式OCT提供了理论基础。

2)聚磁式OCT的磁饱和模型通过其物理机理建模,非常复杂而且难以达到理想的准确度。文中通过多项式逼近法,利用高精度CT测量的数据对系数矩阵的训练达到快速准确的建模要求,方便工程应用。

3)经过试验测试对非线性补偿方法的验证,从试验结果来看,非线性补偿极大的提高了聚磁式OCT在低饱和情况下的线性度,扩展了其有效测量范围;实现了资源的有效利用,为聚磁式OCT应用提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 韦兆碧,马志瀛,董自亮,等. 聚磁式OCT传感头聚磁铁心结构的仿真研究[J]. 高压电器,2007,43(5):336-339.
WEI Zhaobi, MA Zhiying, DONG Ziliang, et al. Research on sensor head structure simulation of magnetism gathering OCT[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 336-339.
- [2] LI Gongde, KONG M G, JONES G R, et al. Sensitivity improvement of an optical current sensor with enhanced faraday rotation[J]. J. Lightwave Technol., 1997(15): 2246-2252.
- [3] MIHAJLOVIC P, PETRICEVIC S, STOJKOVIC Z, et al. Development of a portable fiber-optic current sensor for power systems monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(1): 24-30.
- [4] PETERSEN A E. Portable optical AC-and proposed DC-

current sensor for high voltage applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 595-599.

- [5] 刘 晔,王采堂,韦兆碧,等. 三相光学电流传感器的实验研究[J]. 西安交通大学学报,2002,36(2):127-130.
LIU Ye, WANG Caitang, WEI Zhaobi, et al. Experimental research on three-phase optical current transducer system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(2): 127-130.
- [6] 林 森,杜 林,王士彬,等. 基于法拉第磁光效应的光学电流传感器电气特性研究[J]. 传感技术学报,2010,23(4):490-495.
LIN Sen, DU Lin, WANG Shibin, et al. Study electrical property of the optical current sensor based on faraday magneto-optical effect[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(4): 490-495.
- [7] 张朝阳,张春熹,王夏霄,等. 闭环光纤电流互感器误差分析与实验研究[J]. 高压电器,2008,44(5):417-419.
ZHANG Chaoyang, ZHANG Chunxi, WANG Xiaoxiao, et al. Error analysis and experimental research of closed-loop fiber optic current sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 417-419.
- [8] 王佳颖,郭志忠,李洪波,等. 集磁环式光学电流互感器的结构优化[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):23-26.
WANG Jiaying, GUO Zhizhong, LI Hongbo, et al. Structure optimization of optical current transformer with magnetic concentrator ring[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 23-26.
- [9] 欧中华,李立芳,代志勇,等. 集磁式光纤电流传感器的研究[J]. 光学与光电技术,2008,6(3):8-10.
OU Zhonghua, LI Lifang, DAI Zhiyong, et al. Ferromagnetic collector type fiber-optic current sensor[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(3): 8-10.
- [10] 邓隐北. 高灵敏度的光磁式电流传感器[J]. 光电技术应用,2008,23(1):54-55.
DENG Yinbei. High sensitive photoelectromagnetic current sensor[J]. Electro-optic Technology Application, 2008, 23(1): 54-55.
- [11] 李立芳,刘永智,胡 杨. 集磁式光纤电流传感器[J]. 仪表技术与传感器,2007(10):5-6.
LI Lifang, LIU Yongzhi, HU Yang. Ferromagnetic collector type fiber-optic current sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(10): 5-6.
- [12] 严剑飞,覃统成,汤伟峰,等. 集磁式光纤电流传感器系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2009(5):10-12.
YAN Jianfei, TAN Tongcheng, TANG Weifeng, et al. Design of ferromagnetic collector type fiber-optic current sensor system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(5): 10-12.
- [13] 王程远,陈幼平,张 冈,等. 磁阀式饱和电流互感器的理论研究[J]. 高压电器,2008,44(3):203-207.
WANG Chengyuan, CHEN Youping, ZHANG Gang, et al.

(下转第18页)

- guidance[S]. 2009.
- [14] 刘有为,周 华. 智能高压开关设备信息流方案设计[J]. 电工文摘,2011,47(5):27-30.
LIU Youwei,ZHOU Hua. Intelligent switchgear equipment information flow design[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(1):1-4.
- [15] 苗 新,张 恺,田世明,等. 支撑智能电网的信息通信体系[J]. 电网技术,2009,33(17):8-13.
MIAO Xin,ZHANG Kai,TIAN Shiming,et al. Information communication system supporting smart grid[J]. Power Grid Technology,2009,33(17):8-13.
- [16] 赵祖康,徐石明. 试论智能变电站状态监测技术及应用[J]. 电力自动化设备,2002,20(1):38-42.
ZHAO Zukang,XU Shiming. Try to talk about intelligent substation state monitoring technology and application[J]. Automation Equipment,2002,20(1):38-42.
- [17] 邹积岩,胖质玲,尹承尚. 高压开关设备的状态检修技术[J]. 高压电器,1999,35(5):45-47.
ZOU Jiyan,PANG Zhiling,YIN Chengshang. The state of maintenance technology of high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus,1999,35(5):45-47.
- [18] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- [19] 陈振生. 智能高压开关设备的在线监测技术[J]. 电力设备,2008,9(3):5-8.
CHEN Zhensheng. Intelligent high voltage switch equipment online monitoring technology[J]. Electric Power Equipment,2008,9(3):5-8.
- [20] 王 璐,王步华,宋丽君,等. 基于 IEC 61850 的数字化变电站的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(24):90-92.
WANG Lu,WANG Buhua,SONG Lijun,et al. The research and application of digital substation based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control,2008,36(24):90-92.
- [21] IEC 61850-7-2 Communication networks and systems in substations,Part7-2:Basic communication structure for substation and feeder equipment-abstract communication service interface[S]. 2003.
- [22] 刘 栋,黄 新,曹 辉. 分布式 IEC 61850 MMS 报文监测系统研究与实现[J]. 科技资讯,2012(27):14-18.
LIU Dong,HUANG Xin,CAO Hui. Research and implementation of IEC 61850 MMS message monitoring system[J]. Information Technology,2012,27(10):14-18.

孙银山(1980—),男,博士,工程师,主要研究方向为智能高压开关及其关键技术、智能变电站系统集成及调试技术等。

(上接第 10 页)

- Research on the theory of magnetic valve type saturable current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(3):203-207.
- [14] KANG Y C,UI J L,SANG H,et al. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1642-1649.
- [15] PAN Jiuping,KHOI V,YI Hu,et al. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1623-1628.
- [16] 陈建玉,孟宪民,张振旗,等. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策[J]. 电力系统自动化,2000,24(6):54-56.
CHEN Jianyu,MENG Xianmin,ZHANG Zhenqi,et al. Influence of the current transformer saturation on relay unit and its countermeasures in medium voltage power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(6):54-56.
- [17] 赵满江,李仰平. 保护用电流互感器饱和特性及其误差曲线研究[J]. 高压电器,2010,46(12):29-31.
ZHAO Manjiang,LI Yangping. Research on saturated characteristics and error curve of protective current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(12):29-31.
- [18] 张新刚,王泽忠. 电流互感器铁心饱和引起二次电流畸变的补偿研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(3):36-42.
ZHANG Xingang,WANG Zezhong. Research on compensation of the distortion in secondary current caused by TA saturation[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,2006,26(3):36-42.
- [19] 杜西亮,孙慧明. 多项式回归在智能传感器线性化中的应用[J]. 传感技术学报,2005,18(1):212-214.
DU Xiliang,SUN Huiming. Application of polynomial regression in the smart sensor linearization[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2005,18(1):212-214.
- [20] 林湘宁,刘 沛,高 艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和识别判据[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):44-48.
LIN Xiangning,LIU Pei,GAO Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):44-48.

韦兆碧(1974—),男,博士后,高级工程师,主要从事于电工电能新技术及无线通信射频开发工作。