

# 自适应光学电流互感器与保护一体化运行研究

李岩松, 刘 君, 杨以涵, 于文斌, 及洪泉, 谢晓梅

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

## Research on Whole Operating of Adaptive Optical Current Transducer and Protection

LI Yan-song, LIU Jun, YANG Yi-han, YU Wen-bin, JI Hong-quan, XIE Xiao-mei

(North China Electric Power University School of Electrical Engineering, Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** Magnetism saturation of traditional current transformer is one of the main reason for relay wrong operation. It is applying new transducer with no saturation and its protection that can solve these problems thoroughly. The new practical adaptive optical current transducer (AOCT) is manufactured, on the basis of perfecting the theory system of AOCT, and the operating system of AOCT and its transmission line differential protection is applied in the 35kV transmission line in BaoDing city HeBei province. The operating results indicate that AOCT take on the excellent measurement performance and can provide the real measurement datum of current for its protection; when fault out of protecting area occurring the operating system of AOCT and its protection do not act reliably, by contrast when fault in protecting area occurring do act reliably; therefore the system can meet the need of operation in the substation.

**KEY WORDS:** optical current transducer; protection; Faraday effect

**摘要:** 电磁式 CT 的磁饱和问题一直是影响继电保护正确动作的主要原因之一, 只有应用新型的无磁饱和互感器以及相应的保护系统才能从根本上解决这些问题, 为此, 该文在完善了新型自适应光学电流互感器(AOCT)理论体系基础上, 研制了实用化的 AOCT, 将 AOCT 与新型线路差动保护构成的一体化系统应用于河北省保定供电公司的一条 35kV 输电线路运行。运行结果表明, AOCT 具有优良的测量性能, 能够为保护提供高保真的测量数据; 整套一体化系统当发生多次区外故障时均可靠不动, 在一次区内故障时正确动作, 满足了现场实际运行的要求。

**关键词:** 光学电流互感器; 继电保护; Faraday 效应

**基金项目:** 国家自然科学基金(50347023); 高等学校博士学科点专项科研基金(20030079007)。

Project Supported by National Science Foundation of China (50347023).

## 0 引言

基于 Faraday 磁光效应<sup>[1]</sup>的光学电流互感器(OCT)具有很多优点<sup>[2-4]</sup>, 如不饱和、信号传输距离远、抗干扰性能好<sup>[5-6]</sup>。这些优点决定它在很多方面能够发挥作用, 而继电保护应用是OCT发挥作用的最主要舞台之一。

制约OCT实用化的 2 个世界难题是测量精度的温漂问题和长期运行稳定性问题<sup>[7]</sup>。新型的自适应光学电流互感器(AOCT)应用自适应光学传感技术和螺线管聚磁光路结构技术解决了这 2 个难题<sup>[8]</sup>, 为OCT在继电保护中的应用奠定了基础。为此, 本文选择输电线路差动保护作为AOCT的应用研究, 为电力生产解决实际问题。

传统的电磁式电流互感器饱和对各种继电保护都有影响<sup>[9]</sup>, 对中、低压短距离输电线路纵差动保护影响更为严重。因为中、低压线路负荷小, 电磁式电流互感器的额定电流小, 而线路距离短, 阻抗小, 区外短路时的穿越性短路电流比较大, 故电磁式电流互感器的短路电流倍数大, 容易出现严重饱和的情况。输电线路纵差动保护的原理是比较输电线路两端电磁式电流互感器的二次电流。在正常运行和区外短路时, 输电线路两端电流大小相等, 方向相同, 差电流为零, 保护不会误动作。但是在电磁式电流互感器饱和时, 将有很大的不平衡电流使保护误动作。这是一直困扰着保护人员的难题。

导致纵联差动保护误动的主要因素是两侧P级CT暂态传变特性不一致, 而且要求两侧CT的暂态传变特性一致是完全不可能的。专家建议采用OCT来解决保护误动问题<sup>[10]</sup>。基于Faraday磁光效应的自适应光学电流互感器<sup>[11]</sup>没有饱和问题, 非周期电流能高保真地传递到二次侧, 从而解决纵联差动保

护的误动难题。AOCT与线路差动保护的一体化试验研究在河北省保定市一条35kV输电电路上进行。

## 1 自适应光学电流互感器

### 1.1 自适应光学电流传感技术

研究表明,以Faraday旋光效应为基本传感原理的OCT主要问题是测量精度的温漂问题和运行稳定性问题。对于这2个关键问题的解决,归纳为2个关键学术与技术问题,就是自适应光学电流传感原理、螺线管聚磁光路结构技术。应用2个关键技术研制成功了AOCT,并且构成了AOCT的理论技术体系,如表1所示。

表1 自适应光学电流互感器的理论技术体系  
Tab. 1 Theory and technology architecture of adaptive optical current transducer

| 理论技术内容         | 解决的问题     |
|----------------|-----------|
| 自适应光学传感原理      | 测量精度的温漂问题 |
| 平方根Kalman自适应滤波 |           |
| 故障辨识技术         | 运行稳定性问题   |
| 螺线管聚磁光路结构      |           |

自适应光学电流传感原理是利用两组相互独立的电流信号——与双折射和法拉第旋光角有关的电流和基波电流,经过自适应<sup>[12]</sup>运算处理后,得到与温度漂移无关的高精度测量输出,如图1所示。当被测电流处于稳态时,稳态电流参考模型的测量输出作为期望信号,应用自适应滤波对光学电流传感器的测量输出进行实时自适应校正,消除外界因素对OCT准确度的影响,获得相应的自适应校正系数阵。当电力系统出现故障时,立即停止计算新的校正参数,采用故障前一时刻稳态所计算出的自适应校正系数,通过横向滤波器组直接输出。由于外界因素对OCT的影响在暂态过程中是不变的,因此在故障前后的自适应校正系数也就不变,因而在故障后测量的准确度就达到了参考模型稳态准确度的水平。由于故障后的校正参数并不是以故障后参考模型的输出为基础计算出的,因此故障后由饱和等引起的参考模型输出误差就不会对OCT暂态测量准确度产生影响。电力系统由稳态向暂态转变瞬间会在被测电流中出现奇异点,应用实时小波分析就可以检测出转变时刻,以闭锁计算校正参数的自适应滤波<sup>[13]</sup>。

以IEC60044-8标准为依据的试验表明<sup>[8]</sup>,在40~60℃温度变化范围内AOCT的比差和角差均在0.2级的允许误差限值内,非周期分量电流的最大峰值瞬时值误差小于±1%。

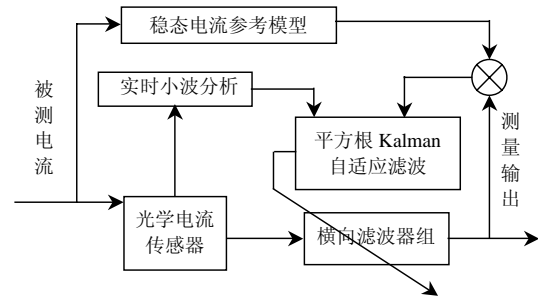


图1 自适应光学电流互感器的系统原理图

Fig. 1 Structure of adaptive optical current transducer

### 1.2 平方根Kalman自适应滤波

针对AOCT自适应过程的实时性和准确性要求,将具有递推特性的Kalman滤波引入到自适应滤波<sup>[14]</sup>中,并引入矩阵理论得到了一种具有时变噪声统计的平方根Kalman自适应算法如下:

$$A(n) = S^T(n-1)U(n) \quad (1)$$

$$B(n) = [U^T(n)S(n-1)S^T(n-1)U(n) + T_M(n)]^{-1} \quad (2)$$

$$S(n) = S(n-1) - r(n)G(n)A^T(n) \quad (3)$$

$$r(n) = \frac{1}{1 + \sqrt{B(n)T_M(n)}} \quad (4)$$

$$G(n) = B(n)S(n-1)A(n) \quad (5)$$

$$W_k(n+1) = W_k(n) + W(n) \cdot e(n) \quad (6)$$

$$Y(n) = U^T(n) \cdot W_k(n) \quad (7)$$

$$e(n) = d(n) - Y(n) - r(n) \quad (8)$$

$$r(n) = (1 - c_n)r(n-1) + c_n[Y(n) - U^T(n)W(n)] \quad (9)$$

$$T_M(n) = (1 - c_n)R(n-1) + c_n[e^2(n) - U^T(n)S(n)S^T(n)U(n)] \quad (10)$$

式中:  $G(n)$ 为Kalman比例向量;  $T_M(n)$ 为测量噪声的协方差;  $r(n)$ 为测量噪声的均值;  $d(n)$ 为期望信号;  $U(n)$ 为采样输入向量; 通过自适应滤波实时得到自适应校正系数阵  $W(n)$ , 并通过式(10), 最终得到Kalman自适应滤波的输出  $Y(n)$ 。

### 1.3 螺线管聚磁光学传感原理

将光学传感系统制成直线型光路,位于通电的非密绕螺线管轴线上,即偏振光通过螺线管的轴向方向测量电流,如图2所示。这种新型光学电流测量系统与传统的“偏振光围绕通电导体旋转”的OCT<sup>[15]</sup>在光学测量上是一致的。与“光绕电”的光学传感原理相对偶<sup>[16]</sup>,这种“偏振光通过螺线管的轴向方向测量电流”的传感原理实际上就是“电绕光”光学传感原理<sup>[17]</sup>。由于采用了螺线管方式使偏

振光光路上的磁场聚集且均匀，因此，将“偏振光通过螺线管的轴向方向测量电流”称为螺线管聚磁光学传感原理，基于这种原理构成的光路结构成为螺线管聚磁光路结构。

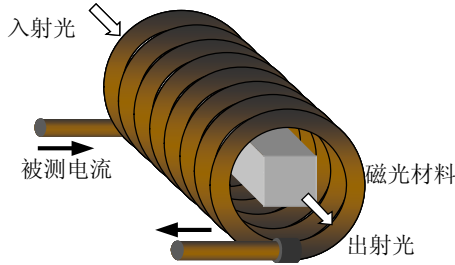


图 2 螺线管聚磁光路结构

Fig. 2 Solenoid collecting magnetic field optical structure

## 2 自适应光学电流互感器的型式试验

由于 AOCT 是运行于电力系统高压侧的一次设备，其安全性和测量的准确性必须得到充分保证，为此，需对 AOCT 进行高压试验和短时电流试验。试验在中国电力科学研究院高压研究所和大功率试验站进行。试验设备包括：1050 kV 工频试验变压器、1200 kV 高压电容分压器及 TYPE51 交流峰值电压表、3600 kV 冲击电压发生器、1000 kV 电阻分压器、局部放电测试仪、电力变压器、多磁路调压变压器、微机测量系统等。试验情况如表 2~5 所示。其中，工频干耐受电压试验大气条件及校正系数为  $b=101.4\text{kPa}$ ,  $t_d=10.5^\circ\text{C}$ ,  $t_w=6.5^\circ\text{C}$ ,  $L=0.60\text{m}$ ,  $K_f=0.994$ ；雷电冲击干耐受电压试验大气条件及校正系数为  $b=101.4\text{kPa}$ ,  $t_d=10.5^\circ\text{C}$ ,  $t_w=6.5^\circ\text{C}$ ,  $L=0.60\text{m}$ ,  $K_f=0.984$ 。

表 2 工频干耐受电压试验  
Tab. 2 Power-frequency voltage withstand test

| 试品<br>编号 | 规定值         |              | 耐受电压<br>校正值/kV | 试验值         |              | 试验<br>结果 |
|----------|-------------|--------------|----------------|-------------|--------------|----------|
|          | 耐受电<br>压/kV | 持续时<br>间/min |                | 耐受电<br>压/kV | 持续时<br>间/min |          |
| 1        | 80          | 1            | 80             | 81          | 1            | 耐受       |

表 3 雷电冲击干耐受电压试验  
Tab. 3 Lightning impulse voltage withstand test

| 试品<br>编号 | 规定<br>值/kV | 校正值/kV |         | 试验值/kV  |      | 闪络/耐受次 | 试验<br>结果 |
|----------|------------|--------|---------|---------|------|--------|----------|
|          |            | 正极性    | 正极性     | 负极性     | 正极性  |        |          |
| 1        | ±185       | 182    | 185~189 | 184~189 | 0/15 | 0/15   | 通过       |

表 4 局部放电试验  
Tab. 4 Partial discharge measurement

| 试品<br>编号 | 规定<br>电压/kV | 规定放<br>电量/pc | 试验电<br>压/kV | 实测放<br>电量/pc | 试验<br>结果 |
|----------|-------------|--------------|-------------|--------------|----------|
| 1        | 42          | <5           | 42          | <5           | 通过       |

表 5 动热稳定试验  
Tab. 5 Short-time current test

| 试验项目         | 相别 | 短时耐受<br>电流/kA | 峰值耐受<br>电流/kA | 通流<br>时间/s | 热稳定<br>值/(kA) <sup>2</sup> s |
|--------------|----|---------------|---------------|------------|------------------------------|
| 短时耐受<br>电流试验 | A  | 6.8           | —             | 4.017      | 186                          |
|              | B  | —             | —             |            |                              |
|              | C  | —             | —             |            |                              |
| 峰值耐受<br>电流试验 | A  | —             | 16.6          | 0.314      | —                            |
|              | B  | —             | —             |            |                              |
|              | C  | —             | —             |            |                              |

## 3 AOCT 与线路差动保护现场运行

### 3.1 应用 AOCT 的线路纵差保护运行

以 AOCT 作为电流测量的数字化设备，配置相应的线路光纤纵差保护装置，构成了 AOCT 与保护一体化系统以实现线路纵差保护。在保定电网 110kV 上陈驿变电站至开关站一条 35kV 并网线上投入运行，如图 3 所示。到目前为止已经连续运行 1 年以上。



图 3 运行于 35kV 开关站的自适应光学电流互感器  
Fig. 3 Adaptive optical current transducer in 35kV station

(1) 分相电流差动保护。各侧保护利用本地和对侧电流数据按相进行差动电流计算，任一相满足条件即动作。根据电流差动保护的制动特性方程进行判别，判为内部故障时动作跳闸，判为外部故障时保护不动作。

$$\begin{cases} I_{op} > I_{dzcl} \\ I_{op} > 0.6 \times I_{res}, & 0 < I_{op} < 3I_{cd} \\ I_{op} > I_{res} - 2I_{dzcl}, & I_{op} \geq 3I_{cd} \\ I_{op} = \left| \dot{I}_m + \dot{I}_n \right| \\ I_{res} = \left| \dot{I}_m - \dot{I}_n \right| \end{cases}$$

式中： $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$ 分别为线路两端的相电流； $I_{dzcl}$ 为差动启动定值； $I_{op}$ 为分相差动电流值； $I_{res}$ 为分相制动电流值。

(2) 微机自适应方向纵差动保护。以图 4 为

例,对于M端,当 $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ,  $120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ 时,保护的动作为

$$F = I_m (K'I_m + K''I_n \cos \varphi) \quad (11)$$

当 $90^\circ < \varphi < 120^\circ$ 时,保护的动作为

$$F = I_m (K'I_m - K''I_n \cos \varphi) \quad (12)$$

式中: $F$ 为保护的动作为; $F_{dz}$ 为保护的动作为定值; $I_m$ 、 $I_n$ 两端的相电流以从母线流入线路为正; $K'$ 、 $K''$ 为比例系数; $\varphi$ 为两端电流的夹角。 $m$ 和 $n$ 调换即为 $n$ 端的动作为方程。

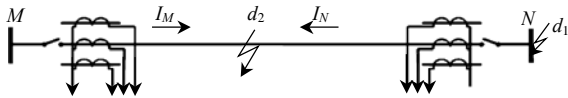


图4 被保护输电线路示意图  
Fig.4 Transmission Line Protected by Relays

从动作为方程可见,外部短路时,电流方向相反,接近 $180^\circ$ 。判据式(11)中右端括弧内第二项为制动量。内部短路时,电流方向接近同相,该项变为动作为量。故 $K''/K'$ 愈大,外部短路时制动量愈大,而内部短路时动作为量也愈大。因外部短路时, $\varphi$ 不会小于 $120^\circ$ ,内部短路时不会大于 $114^\circ$ ,故当 $90^\circ < \varphi < 120^\circ$ 时,仍为内部故障,保护装置可以根据 $\varphi$ 值,自动选用判据式(12),仍然具有上述特性。由于 $K''/K'$ 的选取不受任何限制,故线路分布电容等其它影响都可以用增大制动系数 $K''/K'$ 加以消除<sup>[18-19]</sup>。

### 3.2 现场运行结果

与AOCT现场配套安装的二次系统中,包含有一套工控机波形记录装置。该装置与AOCT的二次输出相接,分别记录AOCT的稳态测量数据和异常电流数据<sup>[20]</sup>。在这里仅显示了运行过程中所发生的几次线路故障及异常情况的电流波形,如图5~8所示,其中,横坐标为每分钟的观测点数。为了比较AOCT与CT的故障电流检测性能,分别记录了异常和故障电流的AOCT与CT的输出,并在同一曲线图中表示出。在变电站和开关站的原有线路中,仅安装了A相和C相CT,因此在记录的波形中,A相和C相电流曲线图中分别标示出AOCT与CT的波形,而B相电流曲线图仅有AOCT的电流输出波形。

从图5可以看出,在线路故障电流的1/4周波时刻,CT发生饱和现象,电流波形严重失真;AOCT能够输出完整的电流波形。图6显示的是图5故障电流的后续电流波形。从图中可以看出,在故障后的前几个周波中,CT与AOCT的电流波形并不相

同,表明CT的饱和现象并未消除;在后几个周波中,两者电流波形逐渐趋于一致。运行记录的电流波形数据表明,正是由于CT的故障电流测量失真,导致了线路差动保护和其他保护的误动或拒动。AOCT能够保真地记录故障电流波形,因此应用了AOCT的线路差动保护装置能够正确动作。

在图7、8波形曲线中,可以看出当故障电流为平滑的工频电流量时,AOCT与CT的电流波形是重合的;由于CT在测量工频电流时有很好的测量品质,这表明AOCT与CT一样也具有良好的工频电流测量品质。

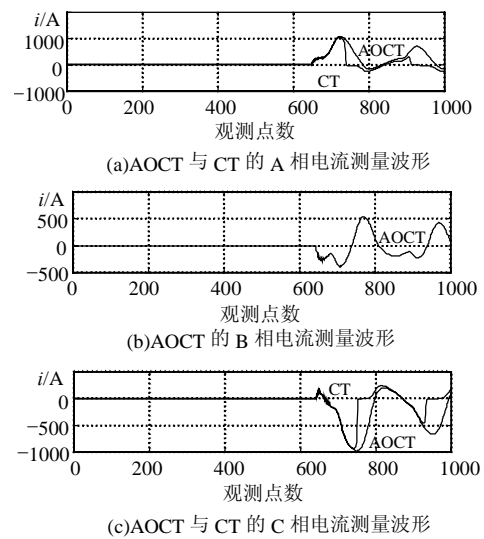


图5 安装于开关站的AOCT和CT故障电流测量波形曲线  
Fig.5 Curves of fault current measurement of AOCT and CT Installed in Station

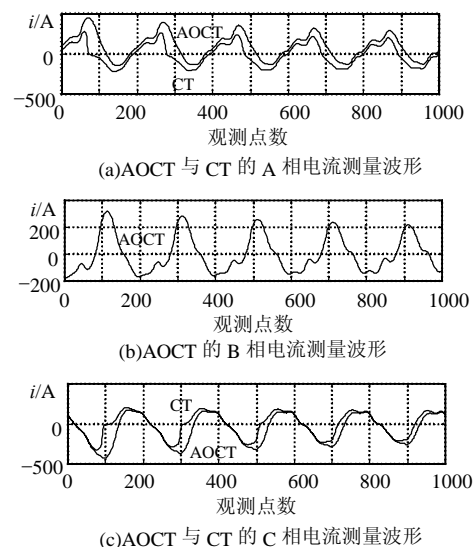


图6 安装于开关站AOCT和CT故障后电流测量波形曲线  
Fig.6 Curves of current measurement after fault of AOCT and CT Installed in Station

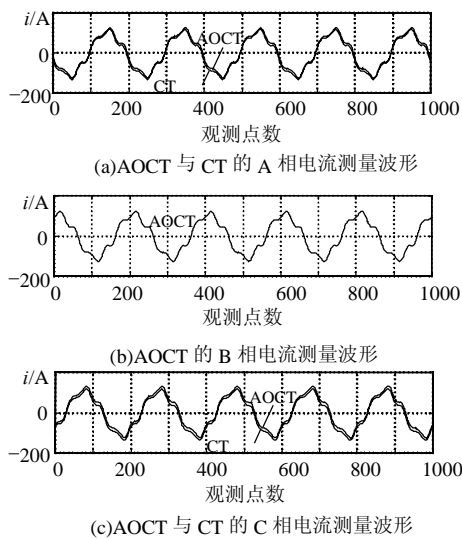


图 7 安装于开关站的 AOCT 和 CT 的电流测量波形曲线  
Fig. 7 Curves of current measurement of AOCT and CT installed in station

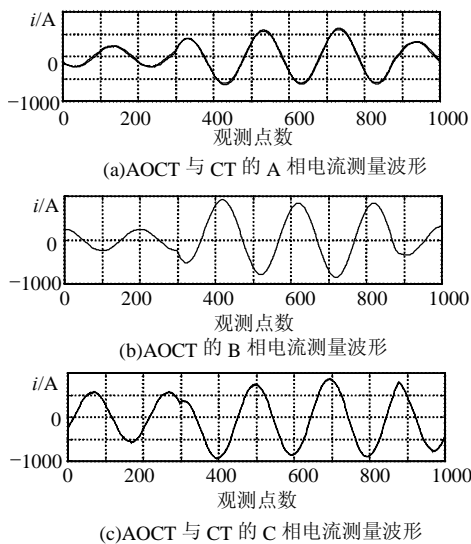


图 8 安装于开关站的 AOCT 和 CT 的电流测量波形曲线  
Fig. 8 Curves of current measurement of AOCT and CT installed in station

### 3.3 保护运行结果

现场运行记录表明, AOCT 能够将非周期电流能高保真地传至保护。在整个运行期间, AOCT 与线路光纤纵差保护构成的一体化系统, 当发生多次区外故障时均可靠不动, 在 1 次区内故障时正确动作, 满足了现场实际运行的要求。

## 4 结论

(1) 构成并完善了自适应光学电流互感器的理论体系, 在此基础上研制了实用化的 AOCT, 并通过了相应的型式试验。

(2) 现场运行结果表明, AOCT 具有优良的测

量性能, 能够高保真地传变被测电流, 从而能够大幅度提高继电保护的性能。

(3) 实现了 AOCT 与线路光纤纵差保护一体化的现场运行, 运行结果表明, 整套系统运行正常稳定, 保护正确可靠动作。

## 参考文献

- [1] Michie W C, Cruden A, Niewczas P. Harmonic analysis of current waveforms using optical current sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 1023-1026.
- [2] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.  
Luo Sunan, Tian Chaobo, Zhao Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 108-113(in Chinese).
- [3] Stephan Mohr, Thomas Bosselmann. A high dynamic range magneto-optic current transformer with advanced signal processing [J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(6): 744-751.
- [4] Hrabiluk J D P. Optical current sensors eliminate ct saturation [C]. Power Engineering Society Winter Meeting, New York, 2002.
- [5] 赵本刚, 徐静, 高翔, 等. 基于微电子机械系统的光学电流传感器原理与设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 89-94.  
Zhao Bengang, Xu Jing, Gao Xiang, et al. Theory and design of optical current sensor based on MEMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 89-94(in Chinese).
- [6] Higaki Masaru, Fujii Kunio, Yamaguchi Shizuo. Optical DC current and voltage measurement by superposing AC magnetic or electric field[C]. SPIE Conference on Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology, Yokohama, Japan, 1999.
- [7] Madden W L, Michie W C, Cruden A. Temperature compensation for optical current sensors[J]. Optical Engineering, 1999, 38(10): 1699-1707.
- [8] 李岩松, 郭志忠, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 21-26.  
Li Yansong, Guo Zhizhong, Yang Yihan, et al. Research on the basic theory of adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 21-26(in Chinese).
- [9] 刘青, 王增平, 徐岩, 等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 11-14.  
Liu Qing, Wang Zengping, Xu Yan, et al. Research on the influence of optical current transducer on protective relaying system[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 11-14(in Chinese).
- [10] 王维俭, 李芙英. 纵联差动保护原因不明误动的分析与对策—兼论光电流传感器的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 17-19.  
Wang Weijian, Li Fuying. Analysis and countermeasure for misoperation of longitudinal differential protection with unclear reason [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 17-19(in Chinese).
- [11] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 100-105.  
Li Yansong, Zhang Guoqing, Yu Wenbin, et al. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 100-105(in Chinese).
- [12] 及洪泉, 张健, 杨以涵, 等. 计及电子式电流互感器的差动保护性

- 能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 61-66.  
Ji Honhquan, zhang Jian, Yang Yihan, et al. Comment on performance of differential protection taking into account electronic current transducer[J]. Power System Technology 2006, 30(23): 61-66(in Chinese).
- [13] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 基于自适应滤波的光学电流互感器的信噪分离[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 64-67.  
Li Yansong, Zhang Guoqing, Yu Wenbin, et al. Signal noise decomposed in optical current transducer based on adaptive filter [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 64-67(in Chinese).
- [14] Simon Haykin. Adaptive filter theory [M]. Fourth edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [15] 于文斌, 高桦, 郭志忠. 光学电流传感头的可靠性试验和寿命评估问题探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 55-59.  
Yu Wenbin, Gao Hua, Guo Zhizhong. A discuss on reliability test and life period assessment for optical current sensing head[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 55-59(in Chinese).
- [16] 王政平, 刘晓瑜. 线性双折射对不同类型光学玻璃电流互感器输出特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 75-79.  
Wang Zhengping, Liu Xiaoyu. Effects of linear birefringence upon performances of different designs optical glass current transducer [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 75-79(in Chinese).
- [17] 李岩松. 高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.  
Li Yansong. Research on high-accuracy adaptive optical current transducer and its operating stability[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004(in Chinese).
- [18] 韩小涛, 李伟, 尹项根, 等. 应用电子式电流互感器的变压器差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 47-53.  
Han Xiaotao, Li Wei, Yin Xianggen, et al. Applying electronic current transformer to transformer differential protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 27(4): 47-53 (in Chinese).
- [19] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [20] 于文斌, 张国庆, 李岩松, 等. 虚拟仪器在混合式光学电流互感器中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 40-43.  
Yu Wenbin, Zhang Guoqing, Li Yansong, et al. Application of virtual instrument technology in research of hybrid optical current transducer [J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 40-43(in Chinese).

收稿日期: 2007-02-05。

作者简介:

李岩松(1970—), 男, 博士后, 主要研究领域为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制, liyansong811@126.com;

刘君(1970—), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制以及光学技术及其在电力系统中的应用;

杨以涵(1927—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制;

于文斌(1978—), 男, 现华北电力大学博士后研究人员, 主要研究领域为光学技术及其在电力系统中的应用;

及洪泉(1972—), 男, 博士研究生, 主要研究领域为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制。

(编辑 王剑乔)