

用于发电机保护的柔性全光纤电流互感器

阎嫦玲,王 耀,罗苏南,须 雷,赵 俊,丁 晔,李权伟

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

摘要:介绍了采用柔性全光纤电流互感器(FFOCT)的发电机保护总体方案和系统结构以及 FFOCT 结构和工作原理。详细介绍了 FFOCT 的关键技术难题并给出了对应的解决方案;采用旋转高双折射(Spun Hi-bi)光纤制作可现场缠绕在导体周围的传感光缆,并对采用 Spun Hi-bi 光纤的 FFOCT 的电流检测灵敏度和抵御外界干扰的能力进行了理论分析;采用四态方波调制和阶梯波反馈的全数字双闭环解调方案改善 FFOCT 动态范围、测量精度以及系统的长期稳定性。测试结果表明研制的 FFOCT 满足测量 0.2 级、保护 5TPE 的精度要求。最后简单介绍了用于观音岩水电站发电机保护的 FFOCT 的现场安装与应用情况。

关键词:发电机; 继电保护; 发电机保护; 柔性全光纤电流互感器; 旋转高双折射光纤; 闭环解调

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.029

0 引言

目前采用常规电磁式电流互感器 CT(Current Transducer)的发电机组保护存在诸多问题:汽轮发电机组中性点空间狭小,无法在分支上安装电磁式 CT,采用纵向零序电压保护应对定子匝间短路故障,灵敏度低;大型水电机组一般仅安装分支组 CT,不能获取所有分支电流信息,主保护配置仍有一定限制;大型水电机组中性点空间有限,CT 磁场屏蔽设计和空间排布困难,可能导致 CT 绕组因温升过高而发生匝间短路故障,且电磁式 CT 存在饱和问题,影响差动保护性能;抽水蓄能机组和燃气轮发电机组在低频启动过程中,由于电磁式 CT 低频传变特性差,可能导致保护不正确动作,且电磁式 CT 存在二次回路断线问题,危及设备和人员安全。

全光纤电流互感器 FOCT(Fiber Optic Current Transducer)^[1-3]是采用光纤作为电流传感材料的光学 CT。与传统 CT 相比,FOCT 具有体积小、重量轻、无磁饱和及铁磁谐振、动态范围大、低频传变特性好、数字量输出、安全且绿色环保等优点,且其一次端是无源的,抗电磁干扰能力强,更能适应发电机组保护的需求^[4]。

柔性全光纤电流互感器(FFOCT)^[5]是 FOCT 发展的方向,其一次传感部分为光缆,它可以现场绕制光纤传感环,其安装和维护更加方便,体积更小、重量更轻;发电机组内部安装空间狭小、振动大、温度高,且发电机额定电流大,FFOCT 可满足这些特殊需求。FFOCT 的传感光缆可任意弯曲,以适应任意

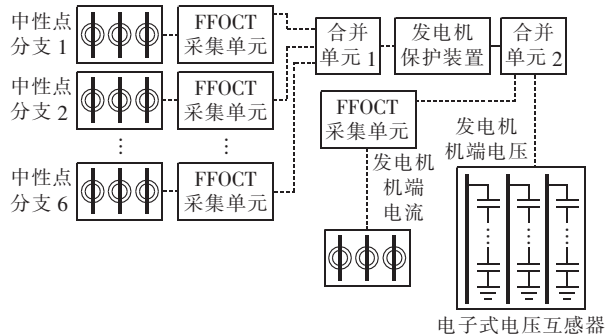
形状的导体;FFOCT 可根据保护配置需要安装,特别是可在发电机中性点所有分支或任意分支组上装设,实现完善的发电机主保护方案,提升发电机内部故障保护整体性能^[6]。

1 发电机组保护方案

本文以观音岩水电站为例说明采用 FFOCT 的发电机保护方案。

观音岩水电站机组容量为 600 MW,发电机中性点有 6 个分支,且中性点各分支导体之间的间距小,部分间距仅为 70 mm;中性点各分支的额定电流约为 3 000 A,故障时电流更大,这就需要保证 CT 的大电流传变精度。但是满足大电流测量和保护要求的常规电磁式 CT 是不可能安装在如此狭小的空间的。

采用 FFOCT 的发电机组保护总体方案如图 1 所示。在发电机机端和中性点的 6 个分支上均装设 FFOCT,将发电机的机端电流和中性点所有分支的电流信息经合并单元同步后全部送至保护装置,完成完全纵差保护、若干套不完全差动保护、若干套裂



◎ FFOCT 柔性光纤传感环, --- 光纤

图 1 采用 FFOCT 的发电机保护的总体方案

Fig.1 System architecture of generator protection adopting FFOCT

收稿日期:2016-06-10;修回日期:2017-01-19

发明专利:一种光学电流互感器(201310252860.X);一种全光纤电流互感器的测量发电机机端零序电流的方法(201310582417.9);一种适用于柔性安装式光学电流互感器的支撑结构及电流精度测量方法(201621079960.2);一种基于偏光纤温度传感器的全光纤电流互感器(201610382142.8)

相横差保护等构成的最完善的发电机主保护;在发电机机端装设电子式电压互感器,机端电压经合并单元同步后送至保护装置,结合 FFOCT 采集到的发电机电流数据,完成发电机后备保护和异常运行保护。本方案使用 FFOCT 基本完整地实现了发电机的所有保护功能。

观音岩水电站的发电组单元已安装完毕,所以不能通过拆卸各中性点分支导体以套入光纤传感环的方法安装 FFOCT。安装于发电机组的 FFOCT 的一次传感光缆需要现场缠绕成环并可靠固定,且需适应多种缠绕直径。另外,发电机组工作时发热量大,导致导体温度变化范围较大,这就要求 FFOCT 在 $-40 \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内精度均需满足 5TPE 的要求。针对上述问题,本文设计了可现场缠绕光纤传感环的 FFOCT。

2 FFOCT

2.1 FOCT 系统结构

FOCT 的系统结构^[1-3]如图 2 所示,其基于石英光纤的 Faraday 磁光效应制成,电流信号的检测基于光纤反射式互易干涉仪原理。

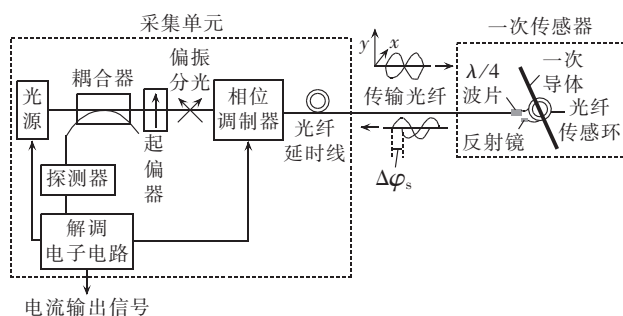


图 2 全光纤电流互感器的结构

Fig.2 Structure of FOCT

对 FOCT,可采用琼斯矩阵^[7-8]进行分析,设给相位调制器施加的调制信号为 $\phi(t)$,可得 FOCT 系统的输出功率为^[7]:

$$I_{\text{out}} = \frac{I_0}{2} \{1 + \cos[\phi(t-\tau) - \phi(t) + \Delta\varphi_s]\} \quad (1)$$

其中, I_0 为与光源输出光功率相关的常数; τ 为光从相位调制器出来后经过光纤延时线和光纤传感环再返回到调制器所需的渡越时间,其决定了 FOCT 的本征频率 $\frac{1}{2\tau}$; $\Delta\varphi_s$ 为 Faraday 相位差。

通过采用与光纤陀螺类似的技术^[9],FOCT 采用高频方波调制,相关解调可实现电流信号的检测,动态范围大、测量精度高且稳定性好。

FOCT 中的 2 束正交偏振光仅在不同时刻经历保偏光纤的快慢轴,往返一次后经过的光路完全相同,是全对称光路^[3]。这种完全互易的结构使得传输回路导致的光学噪声能够相互抵消,可以降低光纤回路温度、振动等对系统的影响,使得光路稳定性提高。它受环境的变化影响更小^[12-3],因而性能也更加优良。

2.2 FFOCT 技术难题及解决方案

2.2.1 传感光纤选取

理论分析和实验都表明,传感光纤中存在的双折射会对 FOCT 的精度产生较大影响^[10-11]。光纤线性双折射越大,FOCT 的测量误差越大。一旦温度或应力改变,传感光纤中的线性双折射也随之改变,FOCT 的测量精度也随之改变。FFOCT 的主要技术难题是难以控制现场缠绕时传感光纤弯曲和形变引入的线性双折射对其柔性光纤传感环性能的影响。为消除线性双折射影响,早期有报道采用退火光纤,但退火光纤存在易碎的问题^[12],无实用性且不能制成现场可缠绕的柔性传感光缆。

对光纤传感环而言,相同线性双折射下,传感光纤中的圆双折射越大,其对 FOCT 引入的误差越小。若对传感光纤引入大量圆双折射,则可抑制线性双折射对 FOCT 性能的影响^[12-13]。为此,有报道采用扭转 (twist) 光纤,即将保偏光纤加热至熔融状态,通过扭转引入形变应力,从而引入圆双折射以抑制线性双折射的影响^[14],提高 FOCT 的温度稳定性。

而本文 FFOCT 采用的是旋转高双折射 Spun Hi-bi (Spun Highly-birefringent) 光纤^[15-16]。其制作方法是将领结型 (Bow-tie) 或者熊猫型 PANDA (Polarization-maintaining AND Absorption reducing) 等高双折射光纤预制棒在拉丝的同时进行高速同轴旋转,使光纤的双折射轴有内在的旋转,从而将光纤变成椭圆双折射光纤,如图 3 所示。



图 3 旋转高双折射光纤

Fig.3 Schematic diagram of Spun Hi-bi fiber

对采用旋转高双折射光纤的 FFOCT,采用琼斯矩阵^[11-13]进行分析,光纤传感环对应的琼斯矩阵如式(2)所示^[15]。

$$\begin{bmatrix} [\Omega \cos(\Omega z) - i(\xi + f) \sin(\Omega z)] \exp(i\xi z) & i(\Delta\beta/2) \sin(\Omega z) \exp(i\xi z) \\ i(\Delta\beta/2) \sin(\Omega z) \exp(-i\xi z) & [\Omega \cos(\Omega z) + i(\xi + f) \sin(\Omega z)] \exp(-i\xi z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\Omega = [\Delta\beta^2/4 + (\xi + f)^2]^{1/2}$; f 为 Faraday 相移引入的圆双折射, 与光纤的 Verdet 常数有关, 且与一次电流大小 I 成正比; $\Delta\beta = 2\pi/L_b$ 为旋转高双折射光纤的线双折射, L_b 为对应的线双折射拍长; $\xi = 2\pi/L_{tw}$, L_{tw} 为光纤扭转节距。

设给相位调制器施加的调制信号为 $\phi(t)$, 采用类似文献[7-8]的方法进行分析, 可得 FFOCT 系统探测器接收到的光强信息如式(3)所示。

$$I_{out} = \frac{I_0}{2} \{1 + \cos[\phi(t-\tau) - \phi(t) + \Delta\varphi_F]\} \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_F = \Delta\varphi(f) - \Delta\varphi(f=0) \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = \arctan \left\{ \left[\sin[2(\Omega - \xi)z] + \frac{(\Delta\beta/2)^2}{[\Omega + (\xi + f)]^2} \sin[2(\Omega + \xi)z] - 2 \frac{(\Delta\beta/2)^2}{(\xi + f)[\Omega + (\xi + f)]} \sin(2\xi z) \right] \times \left[\cos[2(\Omega - \xi)z] - \frac{(\Delta\beta/2)^2}{[\Omega + (\xi + f)]^2} \cos[2(\Omega + \xi)z] - 2 \frac{(\Delta\beta/2)^2}{(\xi + f)[\Omega + (\xi + f)]} \cos(2\xi z) \right]^{-1} \right\} \quad (5)$$

其中, $\Delta\varphi_F$ 为与电流有关的相移。

当 $\phi(t)$ 为方波, 且一次电流不为 0 时, 输出信号 I_{out} 是一个与调制信号同频率的方波信号, 其相邻半周期上的 2 种调制态之差变为:

$$\Delta I_0 = I_1 \sin \Delta\varphi_F \quad (6)$$

其中, I_1 为与光强相关的常数。根据式(6)可求得与电流有关的相移 $\Delta\varphi_F$ 。

旋转高双折射光纤的椭圆双折射拍长 L'_p 如式(7)^[16]所示, 其是衡量抵御外界影响能力的光纤参数。

$$L'_p = \frac{L_b L_{tw}}{(4L_b^2 + L_{tw}^2)^{1/2} - 2L_b} \quad (7)$$

椭圆双折射拍长 L'_p 越小, 光纤抵御外界影响的能力越强。

由式(4)和(5)可知, 对于理想圆双折射 Spun Lobi (Spun Low birefringent) 光纤, 有 $\Delta\beta \ll \xi$, 此时:

$$\Delta\varphi_F = 2 \{ [\Delta\beta^2/4 + (\xi + f)^2]^{1/2} - \xi \} z \approx 2fz \quad (8)$$

即与电流有关的相移与光纤长度成正比增加。但是圆双折射光纤有 $L_{tw} \ll L_b$, 其椭圆双折射拍长 L'_p 达千米数量级, 故该种光纤抵御外界影响的能力弱, 这也是 FFOCT 不能采用圆双折射光纤的原因。

定义灵敏度 S 为采用旋转高双折射光纤时与电流有关的相移与采用理想圆双折射光纤时的电流相移之比, 如式(9)所示。

$$S = \frac{\Delta\varphi(f) - \Delta\varphi(f=0)}{2fz} \quad (9)$$

根据光纤原有的线性双折射, 选择合适的旋转速率, 光纤的椭圆偏振本征模可变得接近圆偏振本

征模, 这样光纤对磁场的响应就接近理想圆双折射。定义旋转高双折射光纤扭转比 $r_t = 2L_b/L_{tw}$, 当旋转高双折射光纤的 $L_b = 7.9 \text{ mm}$, $L_{tw} = 4 \text{ mm}$ 时, 扭转比 r_t 接近 4, 椭圆偏振度为 0.7748; 光纤内仍存在足够大的圆双折射, 因而就能较好地抵御外界扰动^[17]。当 FFOCT 采用的光源为 1310 nm SLED 且谱宽大于 35 nm 时, 式(4)可以在长度 $\Delta z \approx 30 \text{ mm}$ 时内取平均值^[15], 得到采用此参数时 $\Delta\varphi_F$ 、 S 与光纤长度的关系如图 4 所示(图中光纤传感环缠绕直径约为 255 mm, ①、② 分别表示理想圆双折射光纤和旋转高双折射光纤的相移)。由图 4 可知, 在光纤长度为 7~9.8 m 的范围内, 采用旋转高双折射光纤的 FFOCT 电流测量灵敏度在 93% 以上, 而根据式(7)可计算得到此时椭圆双折射拍长 L'_p 为 63.40 mm, 仅为厘米量级, 是比较合理的。

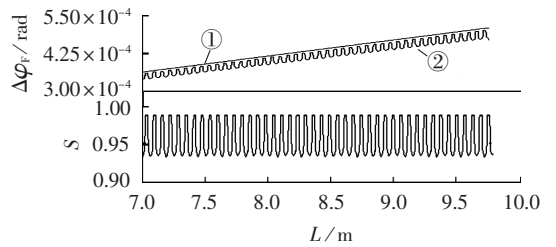


图 4 采用旋转高双折射光纤时相移、灵敏度 S 随光纤长度 L 的变化

Fig.4 Phase shifting and sensitivity, varying along with length of Spun Hi-bi fiber

旋转高双折射旋转光纤是兼顾高线性双折射光纤的偏振保持特性和圆双折射光纤的电流响应灵敏度的折中方案, 其克服了圆双折射光纤的缠绕直径和匝数限制, 缠绕直径可以小到几十毫米且可缠绕多匝; 同时可使电流探测范围小到毫安量级^[16]。故采用旋转高双折射光纤作为传感光纤的 FFOCT 具有优良的温度性能和稳定性, 且传感光缆的现场缠绕不影响其性能。

2.2.2 大电流测量精度和长期稳定性问题

FOCT 系统输出的干涉光强是 Faraday 相移的余弦函数, 在小电流情况下的灵敏度较低, 在大电流输入的情况下, 输出信号的非线性误差将增大, 故需要加入偏置调制和反馈控制等信号处理技术以实现所需的灵敏度和测量动态范围^[9], 偏置调制和闭环反馈控制可以通过在 LiNbO3 集成光学相位调制器上施加合适的调制信号实现。本文的 FFOCT 采用四态方波调制^[18]和阶梯波反馈^[19]的全数字双闭环方案来实现 Faraday 相移的解调。

四态方波调制可以解决 LiNbO3 相位调制器的温度稳定性问题, 还可以避免模拟解调电子线路引起的漂移。FFOCT 系统探测器接收到的光强信息如

式(3)所示。设四态方波调制时引入的调制信号 $\phi_m(t)=\phi(t-\tau)-\phi(t)$,如图 5 所示,使 FFOCT 系统工作在 $\pm 2\pi/3$ 和 $\pm 4\pi/3$ 的偏置点。四态方波调制 FFOCT 系统输出信号如图 6 所示,无电流时,FFOCT 系统输出是一条直线;有电流时,FFOCT 系统输出变成一个与 FFOCT 本征频率相同的方波信号;当调制器半波电压发生漂移时,系统输出则变成一个 2 倍于 FFOCT 本征频率的方波信号。

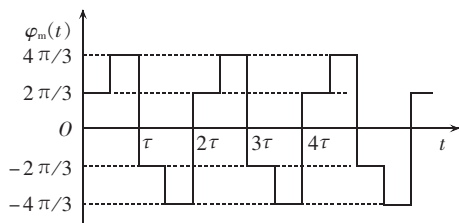


图 5 四态方波调制的调制波形
Fig.5 Waveform of four-state bias modulation

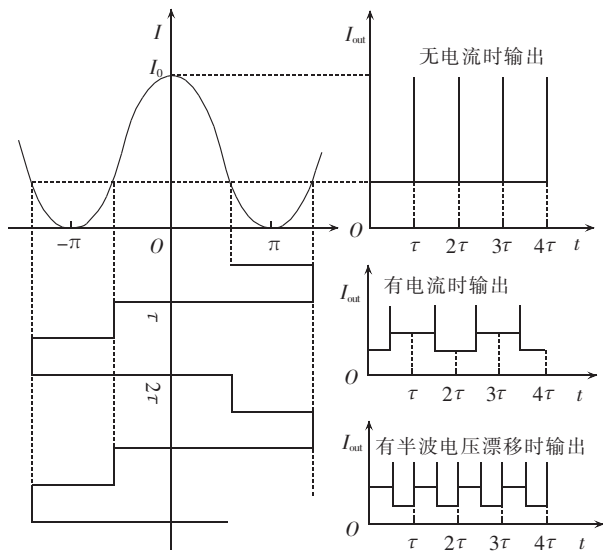


图 6 四态方波调制 FFOCT 系统输出信号
Fig.6 Output signals of FFOCT system with four-state bias modulation

数据采样在输出方波信号的每 $\tau/2$ 时间内进行,第 1 个 $\tau/2$ 时间内和第 4 个 $\tau/2$ 时间内的采样值和减去第 2 个 $\tau/2$ 时间内和第 3 个 $\tau/2$ 时间内的采样值和可以得到 FFOCT 的开环解调数字量 $\Delta\varphi'_F$,相隔半周期的 2 个 $\tau/2$ 时间内采样值相减即得到相位调制器半波电压漂移引起的误差量。根据相位调制器的半波电压误差量,可以实时得到由于温度导致的相位调制器半波电压漂移,从而可实现半波电压的实时跟踪。

采用阶梯波反馈技术^[19]实现 Faraday 相移的闭环跟踪和检测。利用阶梯波反馈调制产生反馈相移 φ_f ,对系统四态方波调制得到的解调结果进行累加积分,积分结果即为阶梯波台阶高度 φ_s 。 φ_s 经过 D/A 转换后形成模拟阶梯波驱动相位调制器,以引入补

偿相移 φ_f ,同时也作为 FFOCT 系统的数字输出,反映 FFOCT 一次电流。

四态方波调制实现了 FFOCT 系统输出微弱信号的检测的同时,也抑制了低频噪声,而且能实时跟踪相位调制器的半波电压;应用阶梯波反馈控制技术实现闭环检测,可扩大系统测量范围、提高响应灵敏度,避免了大电流测量的非线性^[19],也避免了宽带光源输出功率波动的影响。采用四态方波调制和阶梯波反馈的全数字双闭环解调方案可降低相位调制器在高低温环境下及长期缓慢漂移的影响,也可抑制宽带光源输出功率长期漂移对 FFOCT 测量精度的影响,大幅提高了 FFOCT 系统的长期稳定性。

3 FFOCT 性能测试

对于用于发电机保护的 FFOCT 样机,按照国标 GB/T 20840.8—2007 的要求,用电子式互感器校验仪搭建 FFOCT 精度试验系统^[20]进行准确度试验,测试结果显示 FFOCT 的测量精度满足 0.2 级要求。额定电流为 3000 A 时 FFOCT 的准确度测试数据如表 1 所示。在 200 A、 $-40\sim+70^\circ\text{C}$ 的条件下进行温度循环误差测试,测试结果如图 7 所示。参照标准 GB/T 16847—1997,在西安高压电器研究院进行了暂态试验,峰值为 172 kA 的暂态电流响应曲线如图 8 所示。

表 1 额定电流为 3000 A 时准确度测试数据
Table 1 Results of accuracy test when rated current is 3000 A

$p/\%$	试验电流/A	电流误差/%	相位误差/($^\circ$)
5	147	-0.17	5.12
20	603	-0.078	2.04
100	2998	+0.022	-1.29
120	3605	+0.021	-1.03

注: p 为标准电流与额定电流的百分比。

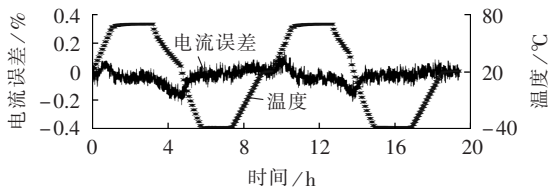


图 7 FFOCT 电流测量误差和温度随时间的变化
Fig.7 FFOCT measuring error and temperature, varying along with time

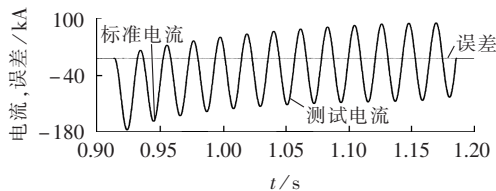


图 8 在峰值为 172 kA 时 FFOCT 的暂态电流测试波形

Fig.8 Experimental transient current of FFOCT when peak amplitude is 172 kA

由图8可知,FFOCT完全能满足5TPE的保护精度要求,暂态误差仅为3.1%。

4 工程现场安装及应用情况

观音岩水电站发电机中性点各分支导体运行时电压为20 kV,单根导体电流约为3 000 A。为实现带电安装,设计的缠绕支架固定板由两瓣组成,卡在铜导体上固定,如图9所示,且所有结构件均采用非金属材料制成。FFOCT安装位置位于户内,运行时环境温度会达到60~70℃,同时考虑到防鼠啃和防火问题,柔性传感光缆外护套经特殊设计,采用耐高温非金属材料,且内有石棉和玻璃纤维。而由于观音岩现场各导体之间间距不一致,故缠绕支架设计为缠绕中心可调节,避免柔性传感光缆与相邻铜导体接触或干涉。

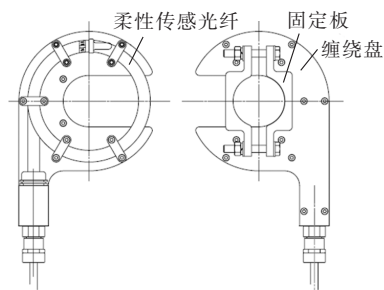


图9 安装在观音岩水电站的FFOCT
Fig.9 FFOCT installed in Guanyinyan hydropower station

观音岩水电站中性点各分支所用FFOCT按额定电流为3 000 A设计;缠绕圈数多在3~5圈之间。6个分支中性点总电流用FFOCT按额定电流20 000 A设计,缠绕圈数仅为1~2圈。

2015年4月底,21台用于发电机保护的FFOCT在观音岩水电站现场安装并运行,至今已正常运行2年。

5 结语

本文结合观音岩电厂发电机变压器组保护项目,首先介绍了采用FOCT的发电机组保护方案,设计了满足发电机保护特殊要求的FFOCT。采用反射式互易干涉仪的系统结构,减少传感光路系统受温度和振动等的影响;采用旋转高双折射光纤制作可以现场缠绕的传感光缆;采用四态方波调制和阶梯波反馈的全数字双闭环方案来实现电流信号的解调,保证了大电流测量的精度并提高了系统的长期稳定性。采用FFOCT的发电机保护可完整地实现发电机的所有保护功能,具有广阔的推广应用前景。

参考文献:

[1] GUIDO F,RENE D. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-

optic Faraday current sensor[J]. Applied Optics,1994,33(25): 6111-6122.

[2] BLAKE J,TANTASWADI P,DE CARVALHO R T. In-line sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(1):116-121.

[3] BOHNERT K,GABUS P,NEHRING J,et al. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology,2002,20(2):267-275.

[4] 沈全荣,严伟. 主设备继电保护技术的现状与发展[J]. 电力设备,2006,7(2):40-45.

SHEN Quanrong,YAN Wei. Development and the present situation of main equipment protection technology[J]. Electrical Equipment,2006,7(2):40-45.

[5] ROSE A,BLAKE J. Free form factor optical current sensor for AC and DC commercial power applications[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Optical Fiber Sensors. Cancun,Mexico:[s.n.],2006:1-4.

[6] 龚翔峰,杨海学,司建红. 抽水蓄能电站机组保护国产化改造[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):33-36.

GONG Xiangfeng,YANG Haixue,SI Hongjian. The domestic reform of pumped-storage power station unit protection[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2012,31(2):33-36.

[7] 丁晔,阎婧玲,许立国,等. 基于正弦波调制的光纤电流互感器传感环误差分析[J]. 智能电网,2014,2(2):28-33.

DING Ye,YAN Changling,XU Liguang,et al. Error analysis of fiber current transformer's sensing ring based on sinusoidal modulation[J]. Smart Grid,2014,2(2):28-33.

[8] KANG Menghua,WANG Yingli,XU Jintao,et al. Vibration immunity fiber optic current sensor employing a spun or twisted highly linear birefringence fiber[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an,China;IEEE,2013:7468-7472.

[9] LEFEVRE H. 光纤陀螺仪[M]. 桂桂才,王巍,译. 2版. 北京:国防工业出版社,2002:28-41,120-125.

[10] 陈安伟,乐全明,冯亚东,等. 全光纤电流互感器温度性能优化方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):142-145.

CHEN Anwei,YUE Quanming,FENG Yadong,et al. Temperature performance optimization of FOCT[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):142-145.

[11] FORMAN P,JAHOA F. Linear birefringence effects on fiber-optic current sensors[J]. Applied Optics,1988,27(15):3088-3096.

[12] 姜中英,张春熹,徐宏杰,等. 线性双折射对光纤电流互感器影响的研究[J]. 光学技术,2006,32(增刊):218-223.

JIANG Zhongying,ZHANG Chunxi,XU Hongjie,et al. Study of fiber optical current transducer error due to linear birefringence[J]. Optical Technique,2006,32(Supplement):218-223.

[13] SHORT S,DE ARRUDA J,TSELIKOV A,et al. Elimination of birefringence induced scale factor errors in the in-line sagnac interferometer current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology,1998,16(10):1844-1850.

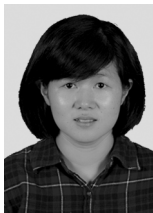
[14] PENG N,HUANG Y,WANG S,et al. Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2013,25(17):1668-1671.

[15] GUBIN V,ISAEV V,MORSHNEV S,et al. Use of spun optical fibers in current sensors[J]. Quantum Electron,2006,36(3): 287-291.

- [16] LAMING R,PAYNE D. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(12):2048-2094.
- [17] 钱景仁,李陆荣. 用于电流传感器的高线性双折射高扭转光纤[J]. 中国科学 A 辑, 1989(6):637-643.
- QIAN Jingren,LI Lushen. Spun highly birefringent optical fibers for current sensors[J]. Scientia Sinica(Series A), 1989(6): 637-643.
- [18] SUN Feng,WANG Lihui,WANG Gang. Study on the drift of modulated phase in interference fiber optic gyroscope[J]. Journal of Computers, 2010, 5(3):394-400.
- [19] 张朝阳,张春熹,王夏宵,等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30):42-46.
- ZHANG Chaoyang,ZHANG Chunxi,WANG Xiaoxiao,et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 42-46.

- [20] 余春雨,叶国雄,王晓琪,等. 电子式互感器的校准方法与技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(4):20-24.
- YU Chunyu,YE Guoxiong,WANG Xiaqi,et al. Calibration technique of electronic instrument transducers[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4):20-24.

作者简介:



阎嫦玲

阎嫦玲(1981—),女,湖北罗田人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统中的光纤传感技术(**E-mail**:yanc1@nrec.com);

王耀(1980—),男,安徽合肥人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统中的光纤传感技术(**E-mail**:wangy@nrec.com);

罗苏南(1966—),男,江苏泰兴人,高级工程师,博士,主要研究方向为电子式互感

器以及光纤传感技术(**E-mail**:luosn@nrec.com)。

FFOCT for generator protection

YAN Changling,WANG Yao,LUO Sunan,XU Lei,ZHAO Jun,DING Ye,LI Quanwei

(NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The structure and working principle of FFOCT(Flexible Fiber Optical Current Transducer) as well as the overall scheme and system structure of generator protection adopting FFOCT are introduced. The key technical issues of FFOCT are introduced in detail and corresponding solutions are given. Spun Hi-bi (Spun Highly-birefringent) fiber is used to manufacture the sensing optical cable, which can wind around the conductor in field. The current detection sensitivity and anti-interference ability of FFOCT using Spun Hi-bi fiber are analyzed. The all digital dual close-loop demodulation scheme with four-state bias modulation and digital ramp feedback is adopted to enhance the dynamic range, measurement accuracy and long-term stability of FFOCT. The test results show the developed FFOCT meets IEC accuracy class 0.2 and 5TPE. The site installation and application of FFOCT for the generator protection of Guanyinyan hydropower station are briefly introduced.

Key words: electric generators; relay protection; generator protection; flexible fiber optical current transducer; spun highly-birefringent fiber; close-loop demodulation

(上接第 184 页 continued from page 184)

Control variable pairing and coordinated commissioning for multiple FACTS components

JIANG Chenyang,LIU Qing,LIANG Xiao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: There are negative interactions among the controllers of multiple FACTS components in a system. Aiming at the limitations and deficiencies of existing variable pairing methods and interaction analysis methods, a pairing method suitable for large-scale and multiple control variables is proposed based on the existing NI index theory, which is used to find the optimal pair combination for making the interactions among multiple controllers minimal. The optimal pair combination is then analyzed to obtain a group of input-output variables, which is mostly related to the severity of interactions, and a corresponding control strategy is set accordingly for the coordinated commissioning of multiple FACTS components. With the second-generation series FACTS devices, SSSC(Static Synchronous Series Compensator), as an example, the simulative calculation and analysis prove the proposed control variable pairing method feasible. A simulation system including multiple SSSCs is built with PSCAD and results show the proposed coordinated commissioning strategy feasible and practical.

Key words: flexible AC transmission system; NI index; multiple control variable pairing; static synchronous series compensator; coordinated commissioning