

基于TMR传感器的非接触式高压直流电流测量方法

项宇锴^{1,2}, 陈坤隆¹, 洪周良¹, 蒋志杰¹

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 国网龙岩供电公司, 福建 龙岩 364000)

摘要:提出一种能够应用于高压直流架空线现场环境中的非接触式直流电流测量方法,该方法使用一个隧道磁电阻(TMR)传感器阵列获取架空线下方地面位置的磁场,并搭配部分已知的架空线几何尺寸,从而估测架空线的电流值。通过架空线空间磁场模型验证所提方法的可行性,并分析所提方法在未知变量误差或TMR传感器自身测量误差影响下的电流测量准确度。最后,通过搭建的等比例缩小的架空线模型验证了所提方法的可行性。

关键词:直流电流测量;非接触测量;架空线;高压直流输电

中图分类号:TM 93

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003022

0 引言

近年来,随着材料科学、微电子技术、制造工艺水平等的不断发展,直流输电的技术瓶颈被不断突破^[1]。直流输电技术因具有运行稳定性好、损耗小、对电网干扰小、线路投资和维护费用相对较低等优点,在电力传输中起到了越来越重要的作用^[2]。

电流值是直流电网检测的一个基本参数,且在多端输电系统中极为重要。文献[3]对现有的电流测量技术在智能电网中的应用进行了探讨,分析了其发展趋势,提出利用网络技术将低成本的传感器获得的信息进行融合来提高系统运行的可靠性。文献[4-5]将大量较低精度的低成本电流测量装置进行组网来构成智能电流传输监测系统,并验证了采用数量较多的微型电流互感器检测电流时,虽然精度较低的电流互感器无法获取全部电流信息,但是可以显著提高测量冗余度,提高估计的精度。现有的直流电流测量装置,如光学电流互感器^[6]、零磁通式直流电流互感器^[7]等,其价格昂贵,且大部分都相当笨重,导致现有的测量地点主要集中于变电站和换流站,限制了装置的大规模布置。这间接导致了获取的信息数量少,使得现有的直流电网的状态估计和检测的预测精度极低^[8]。因此,有必要设计一种成本低且易于大规模布置的智能电流测量方案。

架空线测量技术方面的研究主要集中于交流电流测量,目前国内外均无对架空线上的直流电流测量方法的报道。因此,本文基于交流测量技术设计了一种直流电流测量方案。根据测量距离可以细分为近距测量和远距测量2种方式。对于近距测量的设计,架空线上设备的电磁兼容问题使得电流测量系统变得复杂和不稳定。为了避免上述问题,远距测量方式被许多学者所关注。文献[9]提出采用3个相互垂直的空心线圈来获取三轴的磁通密度,从

而反推三相交流电流大小。根据Faraday定律,空心线圈无法耦合直流磁场,因此其无法适用于直流电流测量。直流稳态磁场的测量常采用半导体磁性材料,例如霍尔(Hall)组件、异向磁阻(AMR)组件、巨磁电阻(GMR)组件、隧道磁电阻(TMR)组件等。文献[10]对比了GMR传感器、TMR传感器和霍尔传感器,得出TMR传感器相较于GMR传感器具有更高的灵敏度,并且其感测特性远优于霍尔传感器的结论。文献[11]提出通过置于塔杆上的横向布置的传感器阵列来测量三相电流,准确度较高,但这种置于钢塔上的方法降低了测量位置布置的灵活性,导致传感器的运行维护极为不易。

针对上述问题,本文提出一种远距离非接触式直流电流测量方法,该方法采用一组垂直布置的TMR传感器阵列放置于架空线下方地面测量磁场,并搭配塔杆规格给定几何初始值,从而反推出架空线的电流值。本文详细阐述了导线直流电流的空间磁场分布MFD(Magnetic Field Distribution)模型,并采用有限元分析来验证其有效性;基于准确的磁场模型,建立垂直布置的TMR传感器阵列结构,设计了远距离电流测量算法;对电流测量算法在给定误差下对电流测量精度的影响进行仿真分析;最后,通过实验验证垂直布置的TMR传感器阵列用于直流电流测量的可行性。

1 直流架空线分析

1.1 分裂导线在空间磁场的分布情况

为了抑制电晕放电,分裂导线被广泛运用于直流输电系统,其目的是为了降低导线周围的电场强度^[12]。为了模拟多股分裂导线对传感器的影响,四分裂导线模型被用于模拟空间磁场分布情况。假设每条分裂导线皆为长直导线,且各导线方向一致且平行于地平面(电流值均为 $I/4$, I 为单一导线上流过的电流)。根据Biot-Savart定律,可得单一分裂导线

上流过的电流在传感器处产生的磁通密度 B_i 为:

$$\begin{cases} B_i = \frac{\mu_0 I}{2\pi L_i} \\ L_i = \sqrt{h_i^2 + d_i^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, L_i 为第 i 根分裂导线与轴心 $(0,0,0)$ 的距离; μ_0 为真空磁导率; h_i 为第 i 根分裂导线的高度; d_i 为第 i 根分裂导线与轴心的水平距离。

现有的直流架空线传输距离很长且下垂高度相对于整体高度非常小, 可视为一长直导线进行分析^[13]。分裂导线模型见图1。图中, h_s 为4根分裂导线的等效中心的对地高度; L_s 为4根分裂导线的等效中心与轴心的距离; W 为传感器与轴心的水平距离。

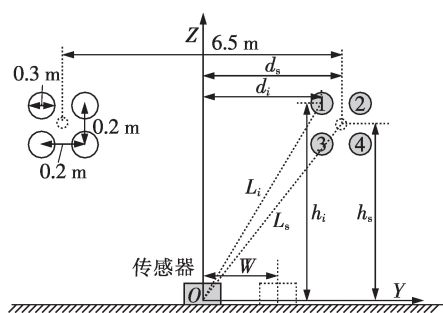


图1 分裂导线模型

Fig.1 Model of bundled conductor

当架空线的几何规格满足 $h_s \gg h_s - h_i$, $d_s \gg d_i$ 时, $L_i \approx L_s$ 。实际上, 直流架空线的高度可达数十米, 式(1)可改写为:

$$B_i \approx \frac{\mu_0 I}{2\pi L_s} \quad (2)$$

同理, 在 YZ 平面上各分裂导线上流过的电流在传感器位置处产生的磁场分量的夹角可认为是相等的。因此传感器感测的合成磁场值 B_{com} 可表示为:

$$\begin{aligned} B_{com} &\approx \frac{\mu_0 I}{2\pi L_1} + \frac{\mu_0 I}{2\pi L_2} + \frac{\mu_0 I}{2\pi L_3} + \frac{\mu_0 I}{2\pi L_4} \approx \\ &\frac{\mu_0 I}{2\pi L_s} + \frac{\mu_0 I}{2\pi L_s} + \frac{\mu_0 I}{2\pi L_s} + \frac{\mu_0 I}{2\pi L_s} \approx \\ &\frac{\mu_0 I}{2\pi L_s} \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 架空线等效模型

根据上文的分析, 对架空线空间磁场的分布建模时, 可利用1根位于分裂导线中心点的等效导线来替代4根分裂导线。

典型直流架空导线对空间磁场分布的影响如图2所示。图中, α 为传感器 x_s 轴与 Y 轴的夹角; 2根等效导线分别置于与传感器距离为 A_1 和 A_2 处, 两者间的水平距离为 D ; 导线方向相同且与 X 轴平行, 流过导线的电流大小相同、方向相反。

针对单一导线上流过的电流 I , 传感器感测到的磁通密度可分解为在该传感器 x_s, y_s, z_s 轴投影的组

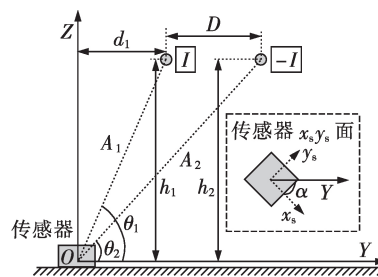


图2 典型直流架空导线模型

Fig.2 Model of typical DC overhead conductor

合, 如式(4)所示。

$$B_s \approx B_{x_s} x_s + B_{y_s} y_s + B_{z_s} z_s \quad (4)$$

$$B_{x_s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} A \sin \theta \cos \alpha \quad (5)$$

$$B_{y_s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} A \sin \theta \sin \alpha \quad (6)$$

$$B_{z_s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} A \cos \theta \quad (7)$$

其中, $B_{x_s}, B_{y_s}, B_{z_s}$ 分别为传感器 x_s, y_s, z_s 轴感测到的磁通密度; x_s, y_s, z_s 为三轴的单位向量; A, θ 为架空导线位置参数。

考虑到 Biot-Savart 定理的线性度关系^[14], 可应用叠加定理拓展式(5)~(7), 从而得到2根架空导线上流过的电流与传感器感测的磁通密度的数学关系。针对图2, 传感器各轴感测到的磁通密度为:

$$B_{x_s} = \sum_{p=1}^2 \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} A_p \sin \theta_p \cos \alpha_p \quad (8)$$

$$B_{y_s} = \sum_{p=1}^2 \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} A_p \sin \theta_p \sin \alpha_p \quad (9)$$

$$B_{z_s} = \sum_{p=1}^2 \frac{\mu_0 I_p}{2\pi} A_p \cos \theta_p \quad (10)$$

其中, I_p 为第 p 根架空导线的电流; A_p, θ_p 为第 p 根架空导线的位置参数, 如图2所示。

1.3 架空线等效模型的验证

基于上述的数学关系, 本文在 MATLAB 上建立架空线空间磁场分布等效模型。为了验证空间磁场分布模型的有效性, 利用有限元分析软件 Maxwell 仿真存在分裂导线时的空间磁场分布情况, 通过对比仿真结果来验证高压架空线等效模型的有效性。

本文的架空线几何尺寸设计参考国家电网标准 Q/GDW 181—2008^[15], 图2中 $h_1 = h_2 = 40$ m, $D = 6.5$ m。需要说明的是, 在 $h_1 = h_2 = 40$ m 的条件下, 间距值 6.5 m 是国家电网标准中允许的最小间距。在该几何尺寸下, 架空线上流过的电流将产生最小的地面磁场。因此, 若基于该极限条件下设计的电流测量方法能满足测量需求, 则该方法也适用于其他工况。

在 MATLAB 中将等效导线的电流设置为 400 A, $h_1 = h_2 = 40$ m, $D = 6.5$ m。在 Maxwell 中将架空线设置为四分裂导线且呈正方形分布, 如图1所示, 每根分

裂导线直径为0.03 m,2根相邻分裂导线的距离为0.2 m,分裂导线的电流设置为100 A, $h_s=40$ m, $D=6.5$ m;分裂导线的传感器被置于地平面,传感器与坐标轴心(0,0,0)的水平距离为 W 。

本文提出的架空线空间磁场分布模型与Maxwell得到的磁场之间的误差如图3所示,由图可见两者的误差不超过0.1%,验证了本文提出的架空线空间磁场分布模型的有效性,因此可以基于该模型设计新型直流电流测量方法。

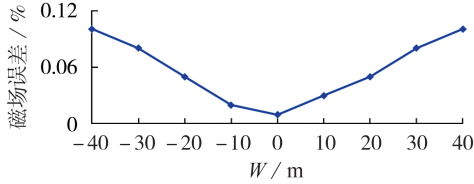


图3 本文空间磁场分布模型和Maxwell仿真结果的比较

Fig.3 Comparison between proposed MFD model and simulative results of Maxwell software

2 新型直流电流测量方法

利用传感器三轴感测磁场大小与架空线电流的关系式,可在已知磁场大小的情况下,反推出待测的架空线电流。假设使用多个传感器来测量2根架空线的电流值,传感器感测的磁场值与待测电流的关系可表示为:

$$[B_s]_{j \times 1} = [P]_{j \times 2} [I]_{2 \times 1} \quad (11)$$

其中, j 为传感器的数量; $[P]_{j \times 2}$ 为导线和传感器的位置几何关系矩阵与常数 $\mu_0/(2\pi)$ 合并而成的矩阵。则待测电流为:

$$[I]_{2 \times 1} = [P]_{j \times 2}^{-1} [B_s]_{j \times 1} \quad (12)$$

2.1 电流测量算法设计

在实际的测量过程中,地磁对传感器的影响是不可忽略的。地磁的磁力线方向是从地磁南极通往地磁北极呈均匀分布,但与地平面存在一磁倾角。在北半球,磁倾角为负值,而在南半球,磁倾角则为正值。因此,需以一未知变量来评估地磁对传感器三轴磁场值的影响。虽然能够从电力公司的架空线规格书中查找架空线的几何尺寸,但在实际建造中必然存在工程误差,这将导致架空线的几何尺寸设计值和真实值之间存在一定的误差。此外,传感器阵列的实际摆放与此架空线必存在一水平偏差。

考虑上述各种情况,针对一个实际的直流架空线系统进行电流测量时,共有6个未知变量:待测架空线电流值 I 、第1根分裂导线的水平位置 d_1 、两架空导线的水平距离 D 、第1根分裂导线的高度 h_1 、第2根分裂导线的高度 h_2 、地磁 B_e ,因此本文采用2个三轴的TMR传感器,共可感测6个磁场值,用于求解6个未知变量。此外考虑户外测量环境的地势情况,

采用垂直布置磁传感器阵列来提高测量的方便性。

本文提出的测量算法如附录中图A1所示。磁传感器阵列测量到6个磁场值,其与架空线的几何尺寸与地磁的初始值共同作为本文核心算法的输入值。架空线的几何尺寸根据电力公司的架空线规格书中的要求给定初始值,地磁以典型地球磁场值0.45 Gs作为初始值。核心算法的设计以“2个三轴TMR传感器将测量到相同的地磁”以及“2个架空导线的电流将大小一致且方向相反”作为优化条件。此外,本算法也给定了迭代求解器的合理限定条件:①优化后两架空导线的水平距离 D 被限制在初始值误差的10%以内;②优化后分裂导线的高度 h_1 、 h_2 被限制在初始值误差的5%以内。

通过核心算法将计算得到最优的架空线几何尺寸与地磁,通过架空线几何尺寸的计算值与原先测量到的6个磁场值反推出实际的架空导线电流。

2.2 TMR传感器设计

在现有磁场测量技术中,有许多不同类型的传感器已经被开发,如采用Hall组件^[16]、AMR组件^[17]、GMR组件^[18]、TMR组件^[19]的传感器等。为了提高磁场测量的灵敏度,本文选择TMR组件作为磁传感器,其相较于AMR组件和GMR组件有更大的电阻变化率,从而提高灵敏度特性。此外,TMR组件相较于Hall组件有更好的温度稳定性及线性度、更高的灵敏度、更低的功耗,无需额外的聚磁环结构^[19]。

2.2.1 电路设计与分析

本文设计中采用多维科技公司的TMR2301三轴磁场传感器,其灵敏度为1 mV/(V·Oe)(1 Oe=1000/(4 π) A/m),工作电压设计为5 V。由于TMR芯片的感测磁场强度对应的输出电压依然较小,为了提高输出信号的强度,利用TI公司的THS4531A芯片设计了一个包含放大器和滤波器的信号处理电路,见图4。图中, $R_{FLT}=10 \Omega$, $C_{FLT}=220$ nF。信号处理电路前级对初始信号放大100倍,信号处理电路后级采用RC滤波对信号传递过程中的噪声频率进行调制,滤波器截止频率设置为4 kHz左右。

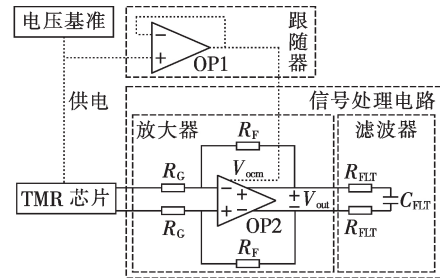


图4 TMR的信号处理电路设计

Fig.4 Design of signal processing circuit for TMR

为验证信号处理电路的传递特性,本文利用函数发生器产生的50 Hz的正弦波进行比差和相位差校验。在实验中,函数发生器的输出电压峰峰值设

定为10~50 mV,通过高精度同步数据采集卡NI USB-6356组成的测量系统获取输入侧和输出侧的信号。为了减少外界噪声的干扰,选择同轴电缆作为信号传输线。由传递特性校验实验结果可知,被测量的6个后端电路中误差最大的情况(函数发生器的输出电压峰峰值为10 mV)为:实际放大比例为1:100.386,相位差为0.0012°。结果表明所设计的信号处理电路在工频50 Hz下具有良好的传递特性。

2.2.2 传感单元信号分析

验证信号处理电路传感特性后,再进一步针对传感单元(TMR芯片与信号处理电路)的传感特性进行测试。由于TMR芯片本身三轴的灵敏度在出厂前已完成校正,且信号处理电路也完成比差测试,因此只需针对传感单元的相位进行校验。校验方法为采用一个50 Hz的电流源产生的磁场来测试传感单元感测到的三轴磁场波形,测量结果如图5所示。图中电流源的电流值以一个精密电流互感器(武汉汉测电气HL-53SC,准确级为0.05 S)作为参考标准。由于本实验只是为了测试传感单元三轴磁场的反应速度,因此摆放方式不要求三轴磁场分量大小一致。此外,图中的三轴磁场分量带有不同的水平偏移,其为地磁所造成。实验结果表明,三轴传感器的 x_s 、 y_s 、 z_s 轴的相位差分别为0.979°、-0.037°、-0.223°,均在 $\pm 1^\circ$ 范围内,基本满足直流架空线的电流测量要求,并且该误差可在电流测量算法中进行修正。

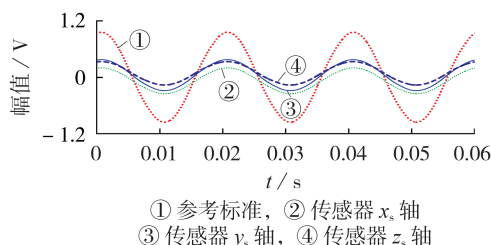


图5 传感单元三轴感测波形与相位误差

Fig.5 3-axis output waveforms and phase differences of sensing unit

3 新型直流电流测量方法的评估

本文提出的直流电流测量方法在实际测量环境将遇到6个未知的变量,根据直流架空线规格书给定的架空线几何尺寸初始值可优化求解这6个未知变量,然后再反推电流值。本节首先针对单一未知变量(其余变量等于理想值,即初始值),分析本文电流测量算法的优化求解能力;然后针对多维未知变量进行电流测量算法的性能评估。然而实际传感器一定存在感测误差,因此本文在合理的TMR感测的误差范围内进行电流测量算法的准确度评估。

3.1 外界误差分析

3.1.1 单一变量分析

本文设计的垂直布置的传感器阵列共有上、下

2层,上、下层结构相同,且各层均装有1个TMR传感器。为了便于分析,下层传感器置于地面且设为参考点(0,0,0),如图2所示,上、下层的间距设置为0.5 m。传感器阵列放置于架空导线1(图2中左边导线)的正下方,架空导线1、2(图2中右边导线)的高度均40 m,两者的水平距离为6.5 m; $\alpha=45^\circ$;地磁 $B_e=0.45$ Gs,且地磁方向与Y轴的夹角为 30° 。

本文除待测架空线电流外,针对其他5个未知变量进行单一变量对电流测量算法的准确度影响分析。针对待分析的未知变量的误差范围与对应的电流误差结果如图6所示。针对未知变量 d_1 ,其初始值为0,误差范围为 ± 0.0325 m,即 $|\Delta X|=0.0325$ m;针对未知变量 D ,其初始值为6.5 m,误差范围为 ± 0.325 m,即 $|\Delta X|=0.325$ m;针对未知变量 h_1 ,其初始值为40 m,误差范围为 ± 1 m,即 $|\Delta X|=1$ m;针对未知变量 h_2 ,其初始值为40 m,误差范围为 ± 1 m,即 $|\Delta X|=1$ m;针对未知变量 B_e ,其初始值为0.45 Gs,误差范围为 ± 0.2 Gs,即 $|\Delta X|=0.2$ Gs。由图6可见,在单一未知变量的误差范围内,电流测量算法的误差皆可以限制在 $\pm 1.5\%$ 范围内。在所有的未知变量中,地磁拥有最好的收敛特性,因此最适合作为约束条件来优化本文方法的求解。

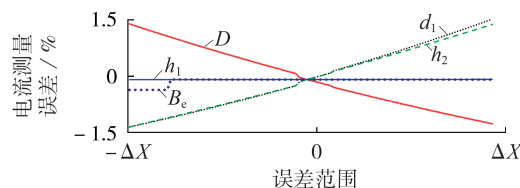


图6 单一未知变量对电流测量误差的影响

Fig.6 Influence of single unknown variable on current measuring error

3.1.2 多维变量分析

在多维未知变量且各未知变量的误差皆为最极端的情况下,进一步分析本文方法的误差,结果如表1所示。表中, ΔX_{d_1} 、 ΔX_D 、 ΔX_{h_1} 、 ΔX_{h_2} 、 ΔX_{B_e} 分别为 d_1 、 D 、 h_1 、 h_2 、 B_e 的误差。由表可见,在不同的未知变量误差情况下,本文方法皆能优化收敛求解,电流计算误差皆在 $\pm 2.5\%$ 范围内,验证了本文方法的可行性。

3.2 传感系统误差分析

除了微机电系统(MEMS)与半导体(semiconductor)制作过程存在工艺误差外,传感器输出的信号传至后端的数据采集卡时也存在测量误差,上述误差均无法避免,因此本节针对合理的测量误差范围($\pm 2\%$)对电流测量算法的影响进行评估。为了便于分析,将测量误差量化为传感器各轴的误差。针对下层传感器,各轴的误差分别记为 s_{1x} 、 s_{1y} 、 s_{1z} ;针对上层传感器,各轴的误差分别记为 s_{2x} 、 s_{2y} 、 s_{2z} 。传感器误差如表2所示,由表可见,在各种误差情况下,

表1 单一未知变量对电流测量误差的影响

Table 1 Influences of multiple unknown variables on current measuring error

$\Delta X_{d_1} /$ m	$\Delta X_D /$ m	$\Delta X_{h_1} /$ m	$\Delta X_{h_2} /$ m	$\Delta X_{B_e} /$ Gs	电流测量 误差 / %
0.325	6.5	40	40	0.5	0.097
-0.325	6.5	40	40	0.5	-0.324
-0.325	7.15	40	40	0.5	-1.384
0.325	5.85	40	40	0.5	0.128
0	6.5	39	39	0.5	-1.059
0	6.5	41	41	0.5	-0.307
0	6.5	41	39	0.2	-0.777
0.325	5.85	39	41	0.6	2.1447
0.325	5.85	41	39	0.2	-0.760
-0.325	6.5	39	41	0.6	1.677
-0.325	6.5	41	39	0.2	-0.777
-0.325	7.15	39	41	0.6	-0.778
-0.325	7.15	41	39	0.2	-0.799
0.325	6.5	39	41	0.6	1.250
0.325	6.5	41	39	0.2	-0.776

表2 传感器误差对电流测量误差的影响

Table 2 Error analysis of sense on current measuring error

传感器误差	最大电流测量误差 / %
$-2\% \leq s_{1x} \leq 2\%$	3.54
$-2\% \leq s_{2x} \leq 2\%$	3.25
$-2\% \leq s_{1y} \leq 2\%$	2.85
$-2\% \leq s_{2y} \leq 2\%$	2.83
$-2\% \leq s_{1z} \leq 2\%$	0.75
$-2\% \leq s_{2z} \leq 2\%$	0.60

本文方法的电流误差皆小于3.6%。另外,根据上述分析可知,相比于外界误差(架空线几何尺寸),本文设计的传感器阵列(包含TMR芯片、信号处理电路、电子电路、信号传输误差以及采集卡的测量误差)的误差更容易造成电流计算算法的误差。

4 实验与讨论

为了证明本文方法所得结果与仿真结果的一致性,本文依据国家电网制定的 ± 500 kV直流架空输电线路设计技术规定中直流架空输电线的最极端情况,制作了一个简单的等比例缩小架空线测量平台模拟架空线实际情况,平台见附录中的图A2。该平台由2个等高支撑塔和2根平行的导线组成。依据本文提出的电流测量方法,垂直摆放的传感器阵列置于某根架空线正下方,并采用水平仪确保传感器阵列的垂直性。两架空线高度均为0.505 m,线间水平距离为0.082 m,平台以一个直流电流源产生的稳定直流电流进行相关实验,以一个电流探棒(Tektronix A622,准确度为4%)的电流作为电流参考标准。平台的测量系统由LabVIEW制作的上位机和高精度同步数据采集卡(NI USB-6356)组成。

实验的电流值设定为0~50 A,通过2个TMR传

感器获得的6个磁通密度反推实时电流值,并与电流探棒测得的电流值进行对比,结果如表3所示。由表可知,在不同的设定电流下,TMR传感器阵列的感测电流误差大小皆在 $\pm 4\%$ 以内。

表3 线性度实验结果

Table 3 Results of linearity experiment

设定电流 / A	探棒电流 / A	感测电流 / A	误差 / %
10	10.940	10.564	-3.44
20	21.609	20.984	-2.89
30	31.970	31.221	-2.34
40	42.153	41.461	-1.64
50	51.607	51.106	-0.97

为了验证TMR传感器阵列的响应特性,在4 s内随机改变电流大小,实验结果如图7所示,由图可见,本文方法具有良好的响应特性。

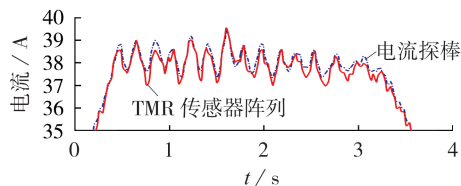


图7 动态响应实验的结果

Fig.7 Results of dynamic response experiment

5 结论

本文针对监测高压直流架空线的运行状态,提出了一可行的解决方案,其通过一个垂直传感器阵列来估算电流大小,且传感器阵列只需被置于任一相架空线正下方的地平面上。所开发的电流测量算法只需以架空线规格书给定初始值,即可优化求解真实架空线几何尺寸,进而准确估算出待测的架空线电流。本文通过数值模拟和实验室实验的方式验证了所提出的传感器阵列和电流测量算法的可行性。在数值模拟过程中,电流重建的误差在 $\pm 4\%$ 以内。对于实验室实验下,电流误差依旧保持在 $\pm 4\%$ 以内。

本文提出的设计极大方便了电力人员在户外特高压直流输电巡检过程中的电流检测。这种非接触和任意布置的设计能够避免绝缘上的问题,并且低成本、小体积和布置灵活性的优点使得其能够被大面积地使用。同时,由于TMR传感器的高线性度和低磁滞特性,其可应用于高压直流输电的电能质量监测,对于高压直流输电的建模有极大的意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 于坤山,谢立军,金锐. IGBT 技术进展及其在柔性直流输电中的应用[J]. 电力系统自动化,2016,40(6):139-143.
YU Kunshan,XIE Lijun,JIN Rui. Recent development and application prospects of IGBT in flexible HVDC power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(6):139-143.

- [2] 王永平,赵文强,杨建明,等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):156-167.
WANG Yongping,ZHAO Wenqiang,YANG Jianming,et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7):156-167.
- [3] YANG Y,LAMBERT F,DIVAN D. A survey on technologies for implementing sensor networks for power delivery systems[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa,FL,USA:IEEE,2007:1-8.
- [4] CHONG C Y,KUMAR S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges[J]. Proceedings of the IEEE,2003,91(8):1247-1256.
- [5] YANG Y,DIVAN D,HARLEY R G,et al. Design and implementation of power line sensor network for overhead transmission lines[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary,Canada:IEEE,2009:1-8.
- [6] 李岩松,欧阳进,刘君,等. 基于 Allan 方差的磁光玻璃型光学电流互感器噪声分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):126-129,137.
LI Yansong,OUYANG Jin,LIU Jun,et al. Analysis on noise of magneto-optical glass type optical current transformer based on Allan variance[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(12):126-129,137.
- [7] 李鹤,李前,章述汉,等. 直流输电用零磁通直流电流互感器的研制[J]. 高电压技术,2012,38(11):2981-2985.
LI He,LI Qian,ZHANG Shuhua,et al. Development of a zero-flux DC current transformer for HVDC projects[J]. High Voltage Engineering,2012,38(11):2981-2985.
- [8] UKIL A. Towards networked smart digital sensors: a review[C]//2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Orlando,FL,USA:IEEE,2009:1798-1802.
- [9] WU J Y,CHEN Z F,WANG C,et al. A novel low-cost multi-coil-based smart current sensor for three-phase currents sensing of overhead conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(6):2443-2452.
- [10] FERMON C,PANNETIER-LECOEUR M. Noise in GMR and TMR sensors[M]//Giant Magneto Resistance (GMR) Sensors. Berlin,Germany:Springer,2013:47-70.
- [11] KHAWAJA A H,HUANG Q. Estimating sag and wind-induced motion of overhead power lines with current and magnetic-flux density measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2017,66(5):897-909.
- [12] ZHOU Linshu,YAN Bo,ZHANG Liang,et al. Study on galloping behavior of iced eight bundle conductor transmission lines[J]. Journal of Sound and Vibration,2016,362:85-110.
- [13] WU Tian,XIAO Bin,LIU Kai,et al. Study on overhead transmission line magnetic field harmonics of VSC-HVDC[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application(ICHVE). Chengdu,China:IEEE,2016:1-4.
- [14] CHEN Kunlong,CHEN Nanming. A new method for power current measurement using a coreless Hall effect current transformer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2011,60(1):158-169.
- [15] 国家电网公司. ± 500 kV 直流架空输电线路设计技术规定: Q/GDW 181—2008[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [16] 黄攀,高新华,谢善益,等. 变压器中性线直流电流监测系统的设计和应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(1):96-99.
HUANG Pan,GAO Xinhua,XIE Shanyi,et al. Design and application of transformer's neutral line direct current monitoring system[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(1):96-99.
- [17] DJUZHEV N A,IUROV A S,MAZURKIN N S,et al. Anisotropic magnetoresistive transducers on the basis of a self-aligned structure[J]. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques,2017,11(2):343-345.
- [18] LUONG V S,LU C C,YANG J W,et al. A novel CMOS transducer for giant magnetoresistance sensors[J]. Review of Scientific Instruments,2017,88(2):025004.
- [19] TARATORIN A. Measurement of effective free layer magnetization orientation of TMR sensors[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2009,45(10):3449-345.

作者简介:



项宇锴

项宇锴(1995—),男,福建龙岩人,助理工程师,硕士研究生,主要研究方向为电力测量技术在电力系统的应用(E-mail: ykxiang1995@163.com);

陈坤隆(1982—),男,台湾台北人,研究员,博士,主要研究方向为非接触式架空线电压与电流传感器、电子式电压与电流互感器、能源监测系统(E-mail: kunlong1210@163.com);

洪周良(1995—),男,安徽芜湖人,主要研究方向为电力测量技术(E-mail: 13067115302@163.com);

蒋志杰(1996—),男,福建莆田人,主要研究方向为电力测量技术(E-mail: Jeson4640@163.com)。

(编辑 任思思)

Contactless HVDC current measurement method using TMR-based sensors

XIANG Yukai^{1,2}, CHEN Kunlong¹, HONG Zhouliang¹, JIANG Zhijie¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. State Grid Longyan Electric Power Supply Company, Longyan 364000, China)

Abstract: A contactless DC current measurement method that can be easily applied in the on-site environment for HVDC overhead lines is presented. The ground-level magnetic field under the overhead line is measured by a TMR sensor array, which is combined with partially known overhead line geometry to estimate the current of the overhead line. A space magnetic field model of overhead line is built up to verify the feasibility of the proposed method and analyze the current measuring accuracy of the proposed method under the influence of errors of unknown variables and TMR sensors. Finally, an equal scale reduction model of the overhead line is built up to verify the feasibility of the proposed method.

Key words: DC current measurement; contactless measurement; overhead line; HVDC power transmission

附录

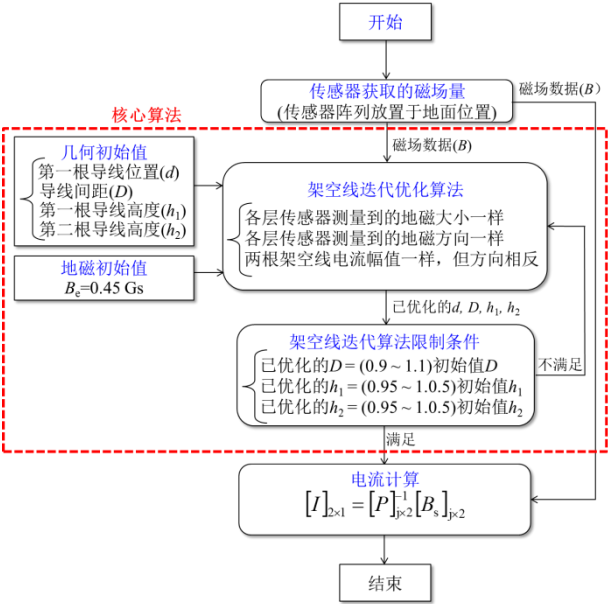


图 A1 算法流程图

Fig.A1 Flowchart of proposed algorithm

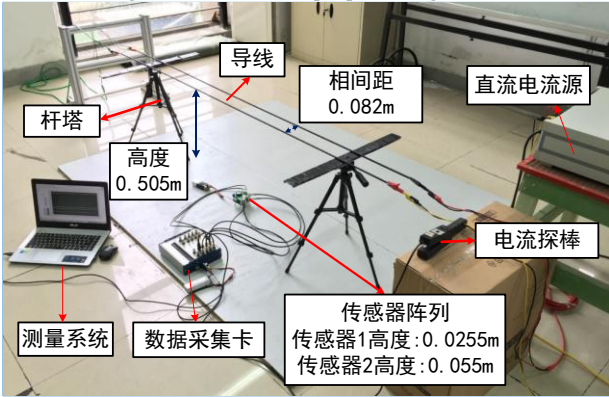


图 A2 实验平台示意图

Fig.A2 Schematic diagram of experimental platform