

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.024

基于磁通门传感器的开关柜母排电流测量方法

张文斌¹, 刘 玺¹, 谭向宇², 何明星³, 于 浩¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650093; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217;
3. 昆明理工大学理学院, 昆明 650093)

摘要: 开关柜在供电系统中起着传输和分配电能的作用, 电流作为开关柜监测的一个重要物理量对其进行准确测量具有重要意义。针对穿心式电流互感器测量电流时易受相间磁场干扰, 体积大, 无法数字化输出问题, 提出了一种基于磁通门传感器的母排电流测量方法, 通过在母排上增加分流槽以及对后端电路进行设计使其具备较强的抗干扰能力。首先对其测量方法和抗干扰原理进行理论分析, 然后在Comsol中建立母排模型对测量方法进行仿真验证, 同时对磁场与电流之间的传递关系进行有限元标定。最后搭建母排电流测量实验平台, 实验结果表明传感器样机误差小于0.8%, 在15 mm处存在干扰磁场时误差仅为2.35%, 证明了该测量方法的准确性和有效性。

关键词: 磁通门传感器; 干扰磁场; 非接触; 有限元标定

Current Measurement Method for Switchgear Cabinet Busbar Based on Fluxgate Sensor

ZHANG Wenbin¹, LIU Xi¹, TAN Xiangyu², HE Mingxing³, YU Hao¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 3. School of Science,
Kunming University of Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Switchgear cabinet plays a vital role in transmitting and distributing energy in power supply system. As current is an critical physical parameter in switch gear cabinet monitoring, its accurate measurement is of great significance. In view of such issues of the spiercing current transformer as susceptibility to interphase magentic field interference, large volume and lack of digital output capability, in this paper a busbar current measurement based on fluxgate sensors is proposed, which has strong anti-interference ability by adding shunt slot on the busbar and designing the back-end circuit. First, the measurement method and anti-interference principle are analyzed theoretically. Then, the busbar model is established in Comsol to simulate and verify the measurement method and, at the same time, the transfer relationship between magnetic field and current is calibrated by finite element method. Finally, an experimental platform for busbar current measurement is set up. The experimental results show that the error of the sensor prototype is less than 0.8%, and the error is only 2.35% in case of interference magnetic field at 15 mm, which proves both accuracy and effectiveness of the measurement method.

Key words: fluxgate sensor; interference magnetic field; non-contact; finite element calibration

0 引言

开关柜作为电网的重要组成部分在电力系统起着传输, 分配和监测电能的作用, 其运行的可靠

和稳定对整个电网的状态和行为都具有很大的影响^[1-3]。电流作为开关柜监测的一个重要物理量对其进行准确测量对保证开关柜和后端负载正常工作起着重要作用^[4-6]。目前国内对开关柜电流监测

收稿日期: 2026-02-09; 修回日期: 2026-04-15

基金项目: 中国南方电网公司科技项目(202104BN050011)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Corporation(202104BN050011).

普遍使用穿心式电流互感器,但其存在体积大、频带窄,与数字微机接口不兼容,安全隐患高,制备成本高,耗费金属多等缺点难以适应智能电网的发展要求。因此,急需一种新的监测技术为开关柜智能化提供支撑^[7-12]。磁传感技术对直流和交流磁场均有好的响应,易于小型化设计,为电流传感器的设计提供了一种吸引力的选择^[13-19]。文[20-21]提出一种基于AMR磁传感阵列的开关柜电流测量方法,通过建立磁传感阵列的数学模型和拓扑模型,对电流进行测量,但是其测量结果易受外界磁场和传感器安装位置影响。文[22]设计了一种16-TMR传感器周向阵列排布方案,用来增强传感器抗外磁场干扰能力,但是大量使用传感器导致成本高昂难以大规模推广。文[23]提出了一种无需固定铜排与传感器位置的电流测量方法,但需要在一块母排上布置至少2颗传感器,且传感器安装困难,占用开关柜空间较大。文[24]根据U形导线上的两个位置磁场大小相等、方向相反的特点,设计了TMR元件构建的开环电流传感器,但U形铜排使用场景较少,且在两侧干扰磁场差异较大时抗干扰能力弱。综上所述,目前采用的基于磁场传感的电流传感器大多容易受到干扰磁场的影响,或者需要大量布置传感器阵列导致测量成本高昂和解析计算复杂。针对以上问题,文中提出一种通过在母排上增加分流槽,合理布置磁通门传感器位置和设计相应后端电路的方法来进行电流测量,极大的减小了传感器体积和干扰磁场对测量精度的影响。采用有限元标定的方法解决矩形母排的磁场计算复杂问题。最后搭建母排电流测量实验平台,实验结果证明了该测量和标定方法的有效性和实用性。

1 母排电流测量原理

1.1 开关柜母排电流空间磁场分布与计算

母排在开柜中承担着电流输送的作用,其形状材质一般为一块铜质的长方体,本次测量采用在母排几何中心处开一个分流槽的方法,使电流 I 在流经分流槽后在分流槽两侧被均匀分为 $I/2$,根据安培右手定则分流槽内侧将形成大小相等方向相反的磁场见图1。

由图1可知,在分流槽内任意一点的磁感应强度等于流经分流槽左、右两侧电流产生的磁感应强度矢量和,故在分流槽的几何中心处的磁感应强度为零。为求解分流槽中任意位置的磁感应强度,可以将分流槽两侧的导体看作矩形导流体,矩形导流

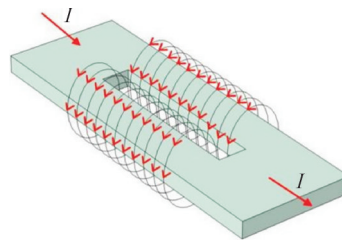


图1 分流槽处的磁场分布

Fig. 1 Magnetic field distribution at the shunt slot

体的磁场计算在国内外期刊均有发表但不完善^[25]。研究矩形导流体电磁场分布规律,传统上都应用麦克斯韦方程求解,这些方法大多计算量巨大,繁杂且边界条件理想化难以符合工程实际,随着计算机技术的进步,基于有限元的磁场模拟计算得到了迅猛发展^[26-27]。为求解电流在分流槽中某点的磁感应强度建立了数学模型见图2。

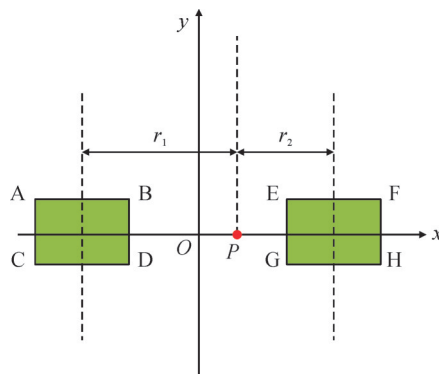


图2 分流槽中一点磁场感应强度计算模型

Fig. 2 Calculation model of magnetic field induction intensity at one point in the flow channel

图2中:截面ABCD、EFGH分别为分流槽两侧的矩形截面;点O为分流槽的几何中心;P点为分流槽中待测点; r_1 为左侧导体几何中心到P点的距离; r_2 为右侧导体几何中心到P的距离; AB 、 EF 为矩形截面的宽度; AC 、 EG 为矩形截面的高度。为了在保证准确性的前提下尽量减少计算量,文中做了如下假设:

1)由于在文中模型中分流槽的宽度远远小于母排的长度所以分流槽一侧的导体产生的磁场可以等效为无限长通流直导线产生的磁场。

2)不考虑集肤和临近效应,电流在分流槽两侧均匀分布。

3)将分流槽两侧导体上的电流等效分布到导体的几何中心轴线上。

无限长直导线在空间中产生的磁场可由毕奥—萨伐尔定律计算,但为准确对矩形母排的磁场进行计算,引入了磁场修正系数 k_1 、 k_2 。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (1)$$

$$B_L = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} k_1 \quad (2)$$

$$B_R = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} k_2 \quad (3)$$

$$B_p = B_L + B_R = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} k_1 + \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} k_2 = \left(\frac{\mu_0 k_1}{2\pi r_1} + \frac{\mu_0 k_2}{2\pi r_2} \right) \times I \quad (4)$$

式(1)-(4)中: μ_0 为真空磁导率; k_1 、 k_2 为磁场修正系数,用于修正等效磁场与实际磁场之间的误差; B_L 为分流槽左侧产生的磁感应强度; B_R 为分流槽右侧产生的磁感应强度; B_p 为分流槽中 P 点的磁感应强度。由式(4)可知,当 P 点的位置确定时,即 r_1 、 r_2 为定值时,式(4)可以化简为

$$B_p = B_L + B_R = (Ck_1 + Dk_2) \times I = k_3 \times I \quad (5)$$

式(5)中, C 、 D 均为常数。

1.2 基于磁通门传感器的母排电流测量和抗干扰方法

磁通门传感器用于弱磁场的测量,目前在电流测量中具有广泛的应用,具有高分辨率、高灵敏度、高精度、温漂小及体积小等优点^[28-29]。将两块磁通门传感器按磁轴方向相反的方式布置在 PCB 板正反两面上,并设计相关电路构成磁通门电流传感器。测量时将电流传感器放置在分流槽的几何中心见图 3,并使磁轴方向与磁场方向相同,左右两块磁传感器将会探测到大小相等方向相反的磁场。定义磁场与磁轴方向同向为正,磁场与磁轴反向为负。其测量原理图见图 4。图 4 中: B_L 为分流槽左侧电流产生的磁场; B_R 为分流槽右侧电流产生的磁场; B_{SL} 、 B_{SR} 为外界的干扰磁场,电流方向垂直纸面向里。

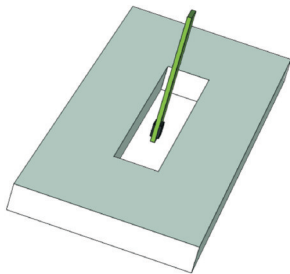


图3 电流传感器布置位置

Fig. 3 Arrangement position of current sensor

于是有:

左侧传感器测量到的磁场 B_1

$$B_1 = B_L + B_{SL} \quad (6)$$

右侧传感器测量到的磁场 B_2

$$B_2 = B_R - B_{SR} \quad (7)$$

两个传感器测量到总磁场 B

$$B = B_1 + B_2 = B_L + B_R + (B_{SL} - B_{SR}) \quad (8)$$

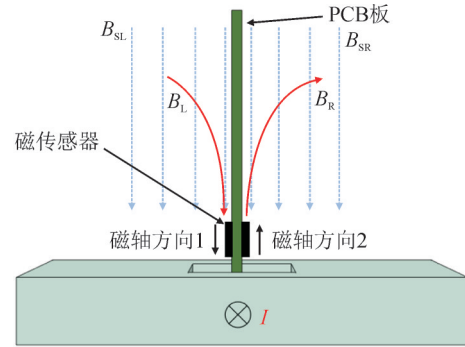


图4 测量原理图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement

由式(8)可以看出,在使用本方法可以有效的减小干扰磁场对测量精度的影响,特别是在干扰磁场相同 ($B_{SL} = B_{SR}$) 的情况下干扰磁场几乎不会影响到母排上电流的测量,即使 ($B_{SL} \neq B_{SR}$) 但由于两个传感器之间的距离很小只有 PCB 板的厚度,两个传感器所感应到的干扰磁场差异也较小,所以此方法可以有效减小外界干扰磁场的影响,提高测量的准确性。

2 仿真研究

2.1 测量原理仿真验证

使用 Comsol Multiphysics 对实验母排见图 5,进行 1:1 三维建模母排。其中母线板的宽 40 mm,厚 6 mm,长 120 mm,分流槽位于母排的几何中心处宽 5 mm,长 60 mm 并施加电流。电流在母排上的分布情况见图 6。从图 6 可以看出,电流 I 被处于几何中心的分流槽分成左右两部份且两部分电流大小相等,这一点与原假设相同,



图5 实验母排

Fig. 5 Experimental busbar

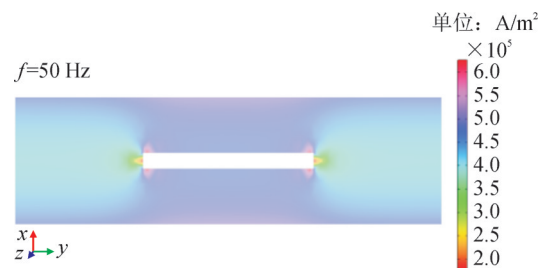


图6 电流在母排上分布情况

Fig. 6 Distribution of current on busbar

但是从仿真结果中可以看出分流槽的两端电流密度出现了较大的突变,所以在测量时为了保证精度应尽量避免将传感器放置在分流槽的两端。分流槽横截面处磁场分布见图7。由图7可知,在分流槽内磁场方向相反,磁场较弱且在其几何中心处的磁场强度数值大小为0,而在在分流槽外的磁感应线分布密集,磁场较大,这一特点为磁通门传感器的使用和大电流的测量提供了基础条件。

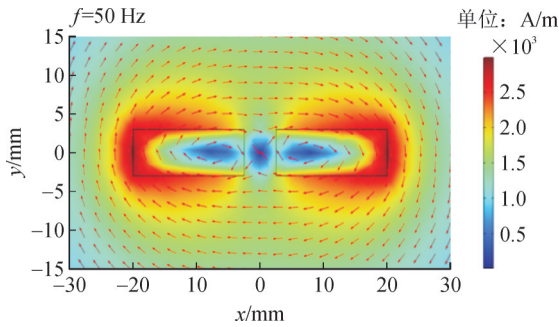


图7 分流槽横截面磁场分布

Fig. 7 Cross-sectional magnetic field distribution of shunt slot

2.2 分流槽中P点磁感应强度的有限元标定

由式(5)知道P点的磁感应强度在电流的大小已知的情况下,只需要对 k_3 的值进行标定便可以得到P点在不同电流下的磁感应强度。为准确计算P点的磁感应强度在Comsol仿真模型中取分流槽中一点 $P=0.8\text{ mm}$ 时,计算不同电流下P点的磁感应强度结果见表1。

表1 不同电流下的P点磁感应强度

Table 1 Magnetic induction intensity at point P under different currents

电流/A	磁感应强度 B/mT	k_3
3	0.006 7	$2.233\ 3 \times 10^{-3}$
12	0.026 8	$2.233\ 3 \times 10^{-3}$
102	0.228 2	$2.237\ 2 \times 10^{-3}$
204	0.456 3	$2.236\ 7 \times 10^{-3}$
624	1.395 7	$2.236\ 7 \times 10^{-3}$
1 200	2.684 1	$2.236\ 6 \times 10^{-3}$
2 600	5.815 6	$2.236\ 7 \times 10^{-3}$

由表1可以看出在不同电流下,P点的电流大小与磁感应强度呈线性关系,在当 $P=0.8\text{ mm}$ 时 $k_3=2.23 \times 10^{-3}$,同时表1的结果也证明了式(5)的正确性。

3 电流传感器电路设计

本次设计的电流传感器电路所有器件全部集中在一块宽20 mm,长40 mm,厚0.8 mm的PCB板上,其测量原理示意图见图8,电流传感器实物见图9。

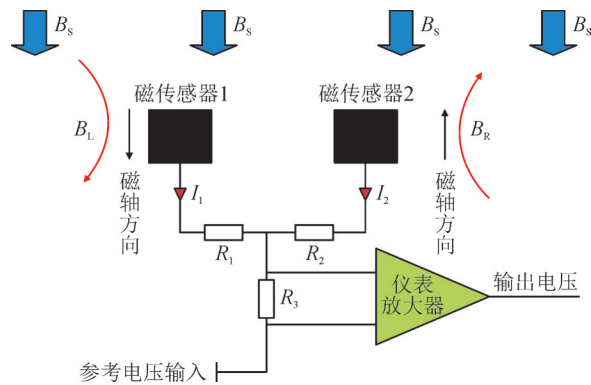


图8 测量原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of measurement principle

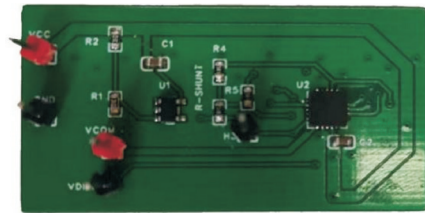


图9 电流传感器实物

Fig. 9 Current sensor

在测量过程中两块磁传感器将感应到的磁场转化为电流信号,电流流经电阻 R_1 、 R_2 汇入到分流电阻 R_3 转化为电压信号输出

$$U_{\text{OUT}} = B_p \times G \times R_3 \times G_{\text{AMP}} \quad (9)$$

式(9)中: B_p 为P点处的磁感应强度; G 为电流的大小与磁场感应强度的比值,为12.2 mA/mT; R_3 为分流电阻; G_{AMP} 为输出电压增益,其值为4 V/V。

$$I_1 = B_L \times G \quad (10)$$

$$I_2 = B_R \times G \quad (11)$$

$$I_3 = I_1 + I_2 \quad (12)$$

$$U_{\text{OUT}} = I_3 \times G_{\text{AMP}} \times R_3 \quad (13)$$

式(10)-(13)中: I_1 、 I_2 为左右侧传感器产生的电流; B_L 、 B_R 为左右侧磁传感器测量到的磁感应强度;通过联立式(5)、(10)-(13)便可以求解出待测电流的大小。

4 实验测试与结果分析

4.1 实验平台搭建

为了测试电流传感器的测量准确性,搭建了母排电流测量实验平台,实验平台示意图见图10,实物图见图11。实验设备包括1 kA, 50 Hz大电流发生器, Tektronix 商用罗氏线圈(测量精度1%), Tektronix MDO3024示波器,福禄克(FLUKE)电流互感器(0.5级),福禄克(FLUKE)数字万用表,HAO XIN ZF-3002D直流电源和带有分流槽的实验母排。传

传感器测量分流槽中 $P=0.8\text{ mm}$ 处的磁场并转换为电压信号输出。通过调节大电流发生器来控制电流输出,以电流互感器测量的电流数值为电流幅值,以罗氏线圈输出电压相位为标准,来评估自制电流传感器的性能。布置通流导线来产生干扰磁场,通过改变通流导线与电流传感器的距离,来评估传感器对外界磁场的抗干扰性能。

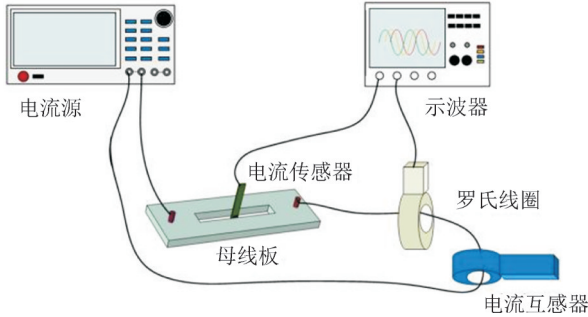


图 10 实验平台示意图

Fig. 10 Schematic diagram of test platform

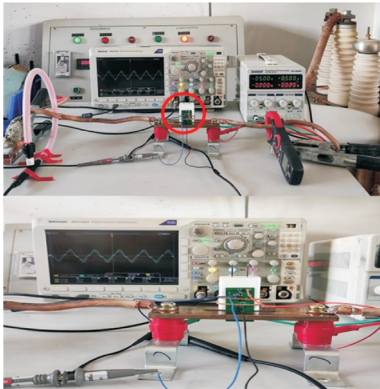


图 11 实验平台实物图

Fig. 11 Physical diagram of the test platform

4.2 实验结果分析

4.2.1 未施加干扰磁场测量结果

未施加干扰磁场时测量结果见表 2,标准电流与传感器输出电压之间的关系见图 12,相对误差变化曲线见图 13,罗氏线圈输出电压与自制传感器输出电压对比见图 14。

由图 12 可以看出,电流传感器样机传感器线性度好,经计算其线拟合度为 0.999 4;由图 13 可以看出,在量程范围内电流测量的相对误差小于 0.8%,测量精度较高;由图 14 可以看出,电流传感器相位与罗氏线圈相位一致,相位误差小。

4.2.2 施加干扰磁场测流实验结果

在母排电流为 100 A 的工况下,在传感器附近施加由 30 A 通流导线产生的干扰磁场,通过改变通流导线与传感器之间的距离(L),来观测传感器输出电压值与未施加干扰磁场时传感器输出电压值之间的关系并计算误差的大小,以此来评估传感器抵

表 2 测试结果表

Table 2 Test results table

标准电 流/A	传感器输出电 压/V	传感器解算电 流/A	相对误差/%
20	0.130	19.910	-0.451
40	0.262	40.126	0.315
60	0.390	59.730	0.451
80	0.523	80.988	0.123
100	0.654	100.162	0.161
120	0.786	120.378	0.314
160	1.050	160.810	0.506
180	1.182	181.570	0.570
200	1.313	201.089	0.544
220	1.448	221.765	0.802
240	1.577	241.521	0.634

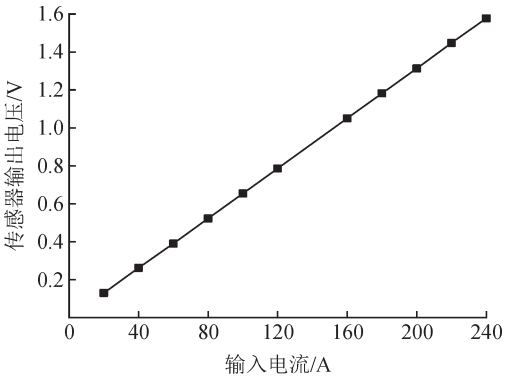


图 12 标准电流与传感器输出电压之间的关系

Fig. 12 Relationship between standard current and sensor output voltage

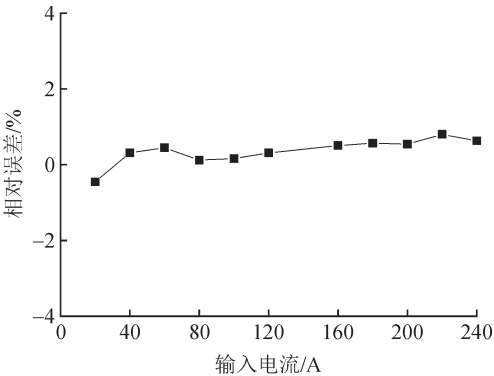


图 13 相对误差变化曲线

Fig. 13 Relative error curve

抗外界干扰磁场的能力,实验结果见图 15。从图 15 可以看出,干扰源距离传感器越近对测量结果影响越大,当外界干扰源距传感器 15 mm 时外界干扰磁场对测量结果仅带来 2.35% 误差,随着干扰源的远离对测量结果的影响逐渐减小,当干扰源距传感器 35 mm 处时对测量结果将不会造成影响,从实验结果中可以看出使用本测量方法可以有效降低外界干扰磁场的影响,提高测量的精确度。

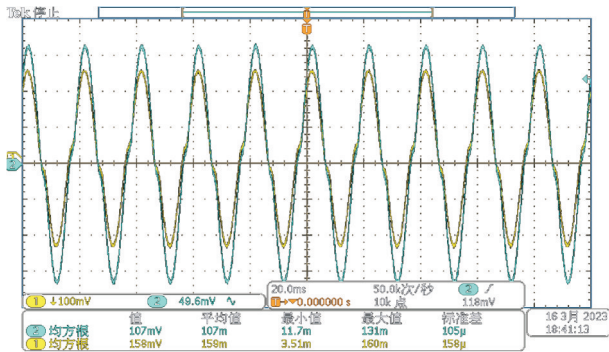


图14 输出电压对比

Fig. 14 Comparison of output voltage

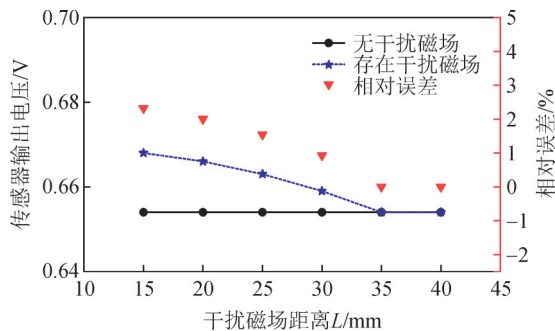


图15 存在干扰磁场时测量结果

Fig. 15 Measurement results in the presence of interfering magnetic fields

5 结语

文中利用磁通门传感器对开关柜母排电流进行测量,通过仿真和实验分析,验证了测量方法的有效性和实用性。在实验中,电流传感器样机相对误差优于0.8%,线拟合度为0.999 4,相位误差小,在干扰源距传感器20 mm以上时对测量结果影响小,具有体积小,抗干扰能力强,测量精度高的特点。本测量方法还可根据实际测量需求来设计分流槽的宽度从而调整电流的测量范围,同时通过在母排上开槽的方式减少了母排金属的使用,有利于降低母排的使用和生产成本,本测量方法为实现母排智能化提供了新的解决方案在母排电流测量领域将会有广泛运用。

参考文献:

- [1] 陈田,程武山. 高压开关柜电流在线测量[J]. 仪表技术与传感器, 2014(3): 85-88.
Chen Tian, Cheng Wushan. Current on-line measurement of high-voltage switch board[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014 (3): 85-88.
- [2] 高升. 智能高压开关柜在线监测系统的研究与开发[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2012.
Gao Sheng. Research and development of an online monitoring system for intelligent high-voltage switchgear[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2012.
- [3] 曾国伟. 10 kV 新型高压开关柜设计及仿真研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.
Zeng Guowei. Design and simulation of 10 kV new high voltage switchgear[D]. Jilin: Jilin University, 2018.
- [4] 吴煜文,田翠华,吴凡,等. 磁阀式电磁型电流互感器[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3154-3163.
Wu Yuwen, Tian Cuihua, Wu Fan, et al. Magnetic-valve-type electromagnetic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3154-3163.
- [5] 周孝信,朱宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
Zhou Xiaoxin, Lu Zongxiang, Liu Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [6] 沈畅,贾雅君,金之俭,等. 基于 MEMS 光纤传感器的油浸式电流互感器在线监测技术[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 166-175.
Shen Chang, Jia Yajun, Jin Zhijian, et al. Online monitoring technology for oil-immersed current transformers based on MEMS fiber optic sensor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 166-175.
- [7] 何金良,嵇士杰,刘俊,等. 基于巨磁电阻效应的电流传感器技术及在智能电网中的应用前景[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 8-14.
He Jinliang, Ji Shijie, Liu Jun, et al. Review of current sensor technology based on giant magneto resistive effect and possible applications for smart grids[J]. Power System Technology, 2011, 35 (5): 8-14.
- [8] 项宇锴,陈坤隆,洪周良,等. 基于 TMR 传感器的非接触式高压直流电流测量方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 185-190.
Xiang Yukai, Chen Kunlong, Hong Zhouliang, et al. Contactless HVDC current measurement method using TMR-based sensors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 185-190.
- [9] 周峰,李鹤,李文婷,等. 大电流测量传感技术综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1905-1920.
Zhou Feng, Li He, Li Wenting, et al. Review of high current measurement and sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1905-1920.
- [10] 和劲延,吴春会,田建君. 电流传感器技术综述[J]. 电气传动, 2018, 48(1): 65-75.
He Shaoyan, Wu Chunhui, Tian Jianjun. Review of the current transducer techniques[J]. Electric Drive, 2018, 48(1): 65-75.
- [11] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [12] Zhang Wenkiang, Tang Guangfu, Zao Peng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2010, 5(18): 132-139.
- [13] Lenz J, Edelstein S A. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.
- [14] 文玉梅,孙登峰,李平,等. 自全式无线霍尔电流传感器[J]. 仪

- 器仪表学报,2014,35(8):1700-1706.
- Wen Yumei, Sun Dengfeng, Li Ping, et al. Self-contained wireless hall current sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1700-1706.
- [15] 吕 华,刘明峰,曹江伟,等.隧道磁电阻(TMR)磁传感器的特性与应用[J]. 磁性材料及器件,2013(3):1-4.
- Lyu Hua, Liu Mingfeng, Cao Jiangwei, et al. Performance and applications of magnetic sensors based on TMR effect[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2013(3):1-4.
- [16] 金 楠,刘家熙,李海龙,等.并网变换器电流传感器故障模型预测容错控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(15):27-35.
- Jin Nan, Liu Jiaxi, Li Hailong, et al. Model prediction fault-tolerant control strategy for grid-connected converters with current sensor faults[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15):27-35.
- [17] 贾本康.单相LCL并网逆变器无阻尼传感器控制策略研究[J]. 电子设计工程,2025,33(18):101-106.
- Jia Benkang. Research on control strategy of non-damped sensor for single-phase LCL grid-connected inverter[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(18):101-106.
- [18] 范伟欣,李开成,陈 浩,等.基于TMR传感器阵列与数值积分的电流测量技术研究[J]. 电测与仪表,2024,61(5):204-211.
- Fan Weixin, Li Kaicheng, Chen Hao, et al. Research on current measurement technology based on TMR sensor array and numerical integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5):204-211.
- [19] 辛守乔,肖立业,马玉鹏.巨磁阻传感器输出非线性与温漂的补偿[J]. 高电压技术,2013,39(5):1178-1183.
- Xin Shouqiao, Xiao Liye, Ma Yupeng. Compensation of nonlinearity and temperature drift for giant magnetic resistance current sensor[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5):1178-1183.
- [20] 高 升,程武山.磁传感阵列在10 kV 开关柜电流测量中的应用[J]. 上海工程技术大学学报,2013,27(1):1-5.
- Gao Sheng, Cheng Wushan. Application of magnetic sensor array to current measurement for 10 kV switch board[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2013, 27(1):1-5.
- [21] 陈 田.基于ARM的高压开关柜在线监测系统的研究与开发[D]. 上海:上海工程技术大学,2014.
- Chen Tian. Research and development of on-line monitoring system for high voltage switchgear based on ARM[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2014.
- [22] 牟宏杰,许 涛,钟贻兵,等.基于周向阵列的TMR电流传感器测量方法[J]. 传感器与微系统,2022,41(8):108-111.
- Mou Hongjie, Xu Tao, Zhong Yibing, et al. Measurement method of TMR current sensor based on circular array[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(8):108-111.
- [23] 田 兵,李 鹏,袁智勇,等.基于磁电阻传感器的配电柜铜排电流测量方法[J]. 南方电网技术,2019,13(7):77-83.
- Tian Bing, Li Peng, Yuan Zhiyong, et al. Current measurement method of copper bar in distribution cabinet based on magnetoresistance sensor[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(7):77-83.
- [24] 王海宝,郭海平,王于波,等.基于TMR元件的电流传感器的研制[J]. 电测与仪表,2018,55(9):103-107.
- Wang Haibao, Guo Haiping, Wang Yubo, et al. Research of current sensor based on TMR device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(9):103-107.
- [25] 邱 捷,钱秀英.多种矩形截面导线的磁场计算解析式及奇异积分处理[J]. 西安交通大学学报,1995(12):11-17.
- Qiu Jie, Qian Xiuying. An analytical formula for computing 3D magnetic field of conductors with rectangular cross section[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995(12):11-17.
- [26] 李伟波.500 kA级铝电解槽内外补偿母线配置磁场及经济性对比[J]. 有色设备,2021,35(6):106-109.
- Li Weibo. Magnetic field and cost-effectiveness contrast of self-compensating and external compensating busbar configuration in 500 kA aluminum electrolytic cell[J]. NonFerrous Metallurgical Equipment, 2021, 35(6):106-109, 113.
- [27] 李思泽.大电流开关柜异形母排多物理场耦合分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2026.
- Li Size. Multi-physical field coupling analysis of special-shaped busbar of high current switchgear[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2026.
- [28] Ripka P, Janosek M. Advances in magnetic field sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(6):1108-1116.
- [29] Yang Xiaoguang, Li Yuanyuan, Zheng Weidong, et al. Design and realization of a novel compact fluxgate current sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3):1-4.
- 张文斌(1976—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电磁测量及电磁场传感器、非接触电压测量、智能传感器及信息处理、电气设备故障监测及诊断(通信作者)(E-mail:17386274821@163.com)。
- 刘 玺(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为电磁测量及电磁场传感器、非接触电压测量(E-mail:991721239@qq.com)。