

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003028

罗氏线圈与隧道磁阻复合的电流测试方法*

陈昌鑫^{1,2,3} 郭文超^{1,3} 冉召会^{1,3} 马铁华^{1,3} 任一峰³

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 太原理工大学 电力系统运行与控制山西省重点实验室 太原 030024; 3. 中北大学 电气与控制工程学院 太原 030051)

摘要:针对车载微电网中电流频率成分丰富和电磁环境复杂的环境特征,为了实现车载微电网电流测试的问题,利用隧道磁阻传感器低频特性好和罗氏线圈中高频特性好的优点,研究了罗氏线圈与隧道磁阻复合的全封闭式电流测试方法。采用Ansoft Maxwell对屏蔽壳体的屏蔽效能进行了仿真分析,利用罗氏线圈和隧道磁阻传感器进行工频测试实验,并以钳形电流探头作为基准完成标定,将标定后的传感器及测试系统进行微电网储能并/离网过程中的尖峰脉冲电流测试实验,进行了数据复合处理。实验结果表明,复合后的电流测试信号与钳形电流探头测量信号一致性好,特别是尖峰处误差减小,复合后脉冲电流峰值相对误差减少到3.67%。罗氏线圈与隧道磁阻两种传感器数据复合的电流测试方法对于装备的电气化测试具有重要意义。

关键词: 电流测试; 车载微电网; 罗氏线圈; 隧道磁阻传感器; 复合

中图分类号: TN98; TM933.14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on the current measurement technology of the combination of Rogowski coil and tunnel magnetoresistance sensor

Chen Changxin^{1,2,3} Guo Wenchao^{1,3} Ran Zhaohui^{1,3} Ma Tiehua^{1,3} Ren Yifeng³

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Key Lab of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
3. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem of current measurement in vehicle microgrid with rich current frequency components and complex electromagnetic environment, a new closed current measurement method is proposed, which is based on the advantages of low frequency characteristics of tunnel reluctance sensor and high frequency characteristics of rogowski coil. Ansoft Maxwell is used to simulate and analyze the shielding effectiveness of the shielding shell. The power frequency measurement experiment is carried out with Rogowski coil and tunnel magnetoresistance sensor, and the calibration is completed with the clamp current probe as the benchmark. The calibration parameters are applied to the peak pulse current measurement in the process of micro grid parallel and off grid, and the data composite processing is carried out. The experimental results show that the composite current measurement signal is in good agreement with the clamp current probe signal, especially performs as the reduction of the peak error, and the relative error of the composite peak pulse current is reduced to 3.67%. The current measurement method based on the data combination of rogowski coil and tunnel magnetoresistance is of great significance for the electrical measurement of equipment.

Keywords: current measurement; vehicle microgrid; Rogowski coil; tunnel magnetoresistance; compound

收稿日期: 2020-03-25 Received Date: 2020-03-25

* 基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2019L0536)、山西省高等学校青年科研人员培育计划(1912100027MZ)、山西省重点研发计划(201804D131038、201903D421032)、中北大学研究生科技立项(20191671)资助

0 引言

近年来,智能电网及装备电气化对电流测试提出了新的要求,车载微电网中高频与低频复合、交直流混合,其电流频率成分丰富,且电磁环境复杂,传统的单一电流传感器已经难以满足单次测试试验的测试要求^[1-2]。其中脉冲电流测试主要存在两个方面的问题:1) 脉冲电流自身特点,上升沿陡峭,频率丰富(含有高频电流和低频电流信号)^[3];2) 目前常用电流测试传感器的特点,罗氏线圈(Rogowski coil)由于自身原理缺陷不能准确的测量直流分量或者低频分量,而高频电流测量性能优良^[4]以及隧道磁阻(tunnel magnetic resistance, TMR)传感器能够测量低频电流信号,但高频电流测量性能不及罗氏线圈^[5]。

很多学者针对罗氏线圈不能测量低频电流信号的问题,寻找不同方法来提高罗氏线圈对含有低频信号的电流测试精度。曾正华^[6]采用反滤波的方法改善罗氏线圈测量的低频失真问题,修正波形和理论波形吻合;高丽敬^[7]提出了磁滞回线补偿脉冲电流波形的方法,实现脉冲电流波形低频补偿,提高测试电流精度;张郁^[8]利用闭环霍尔传感器测量脉冲电流信号对罗氏线圈测量信号进行补偿,有效改善波形。脉冲电流频率补偿是提高电流传感器电流测试精度和拓宽传感器测量频段的有效方法。在磁阻研究方面,陈亚锋^[9]对隧穿磁阻效应的磁场传感器的电流检测方法进行研究,从传感器的结构设计和消除干扰的方法方面对智能电网的大电流测试技术进行研究。罗氏线圈由于自身原理限制其对脉冲电流的低频信号获取^[10],而隧道磁阻能够很好的测试低频磁场信号,即能对低频电流信号获取^[11]。

本文针对微电网中的大幅值、高低频复合、交直流混合电流测试问题,利用两种传感器测试电流频率优势互补的特点,提出基于罗氏线圈和隧道磁阻传感器复合的电流测试方法。

1 测试原理分析

1.1 载流长直导线的磁场

根据毕奥-萨伐尔定律,真空中载流长直导线的电流元在点 P 处产生的磁感应强度^[12]:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idz \sin\theta}{r^2} \quad (1)$$

式中: μ_0 是真空中相对磁导率; θ 是电流元 Idz 与 r 之间的夹角; I 是直导线的电流; r 是电流元与点 P 的距离。

真空中载流导线的磁场与电流之间的关系,如图 1 所示^[13]。

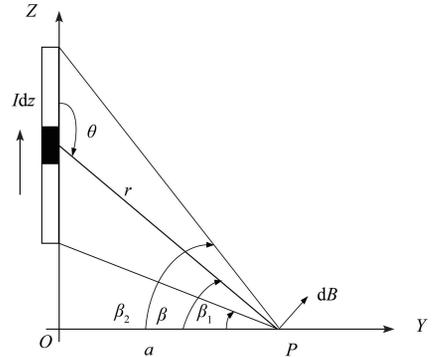


图 1 载流长直导线磁场计算

Fig. 1 Magnetic field calculation of current carrying long straight wire

经代换积分可得^[14]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\sin\beta_2 - \sin\beta_1) \quad (2)$$

如果载流导线为“无限长”,式(2)可写成:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (3)$$

1.2 测试原理

1) 罗氏线圈

将柔性环形线圈套在被测导体上,当导体内部有不断变化的电流通过时,其周围就会感生出变化的磁场,从而在线圈中感应出一个与电流变化率成比例的交流电压信号,用此电流来描述被测电流^[15]。由于罗氏线圈还原的是电流的变化率,故电流的频率越高其测试越准确。

2) 隧道磁阻传感器

隧道磁阻传感器由 4 个隧道磁电阻组成,并将它们构成电桥^[16]。隧道磁阻传感器的工作原理是隧道磁阻材料在一定范围内磁场的的作用下,其阻值会随着磁场的变化产生相应的变化^[17],根据阻值的大小计算出磁场的大小,从而计算出被测电流。在电流测试方面,TMR 与其他电流传感器相比,具有能够测量直流和交流信号、线性度好和体积小等优点,尤其是 TMR 能够测量直流电流^[18]。

1.3 复合原理

综合两个传感器的优点,使用两个传感器测试标准电流进行标定,经过标定后的传感器对待测电流进行测试,对罗氏线圈测得的信号 I_1 进行快速傅里叶变换(FFT)处理,将频率成分小于 f_0 的幅值置为 0,得到信号 S_1 ;对隧道磁阻传感器测得的信号 I_2 进行 FFT 处理,将频率成分大于 f_0 的幅值置为 0,得

到信号 S_2 ; 将 $(S_1 + S_2)$ 进行快速傅里叶逆变换 (IFFT) 处理, 得到罗氏线圈和隧道磁阻传感器复合的电流信号 I_3 。

复合方法实现前, 需要对两个传感器的标定系数进行测量, 测量方法是同时测量工频电流与电流测量标准仪器测量值进行标定系数确定。高频和低频截止频率值是依据两种传感器的测频率测量范围确定的, 罗氏线圈测量频率范围为 1 Hz~2 MHz, 隧道磁阻 TMR2501 测量范围为 DC~100 kHz, 理论上截止频率在 1 Hz~100 kHz 均合适, 考虑磁阻在测量高频响应以及线圈测量低频误差, 多次实验将截止频率设为 1 kHz。复合过程中时域和频域信号转换框图, 反映时域和频域相互变换, 如图 2 所示。



图 2 复合过程的时域频域转换框图

Fig. 2 Time-frequency conversion block diagram of composite process

图 2 中, $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为罗氏线圈测量、隧道磁阻测量标定后电流信号; $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ 为频域信号, 其中 ω 为频率, $X(\omega_i)$ 、 $Y(\omega_j)$ 为截取的高频、低频信号, 其中 $\omega_i \geq 1 \text{ kHz}$, $\omega_j < 1 \text{ kHz}$; $X(\omega_i)$ 和 $Y(\omega_j)$ 频域相加得到 $Z(\omega)$; $z(t)$ 为复合后时域信号, 即脉冲电流信号。

利用仿真电流进行高频部分和低频部分分离, 分离频率设置为 1 kHz。为了更直观看到分离后的高频、低频信号成分, 把脉冲电流进行 FFT 后, $\geq 1 \text{ kHz}$ 的频域信号转换成时域信号, $< 1 \text{ kHz}$ 的频域信号转换成时域信号。这两部分分别代表线圈测量后提取的高频部分、隧道磁阻测量后提取的低频部分, 转化成高、低频时域中的电流信号直观展示两部分数据复合过程。数据复合示意图如图 3 所示。

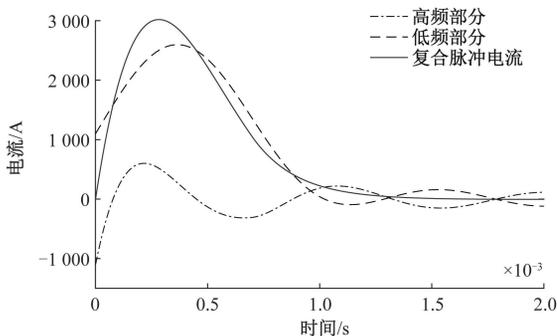


图 3 数据复合示意图

Fig. 3 Data composite diagram

2 屏蔽结构设计与分析

2.1 屏蔽效能

屏蔽体的屏蔽性能用屏蔽效能来度量, 屏蔽效能是指在加屏蔽体之前某一测点的场强 H_0 与同一测点加屏蔽体时的场强 H_s 之比, 其单位是 dB, 屏蔽体屏蔽效能 S 的数学表达式为^[19]:

$$S = 20 \log \left(\frac{H_0}{H_s} \right) \quad (4)$$

2.2 屏蔽结果设计与分析

在实际测试过程中, 由于电流伴随着磁场, 导致在测试过程中需要考虑在复杂电磁环境下的电磁屏蔽效能, 为了使系统电磁环境的独立, 对系统的屏蔽壳体进行了设计, 并使用 Ansoft Maxwell 有限元分析软件对屏蔽壳体的屏蔽效能进行了仿真分析, 根据式 (4) 求得其屏蔽效能。设计的屏蔽壳体如图 4 所示^[20], 导入 Ansoft Maxwell 的模型如图 5 所示。

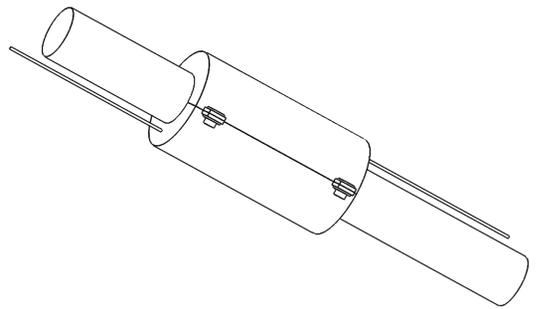


图 4 屏蔽壳体模型

Fig. 4 Shielding shell model

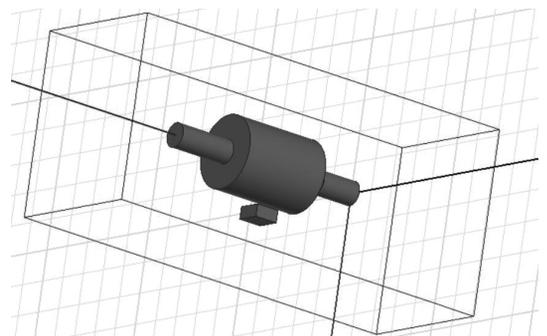


图 5 导入 Ansoft Maxwell 的模型

Fig. 5 The model of Ansoft Maxwell

设置屏蔽壳体的材料为相对磁导率较高的坡莫合金, 仿真结果如图 7 所示。

此时, 根据式 (4) 求得其屏蔽效能为 $S = 24.48 \text{ dB}$, 在实际的工程应用中, 屏蔽效能达到 60 dB 可以视作有屏

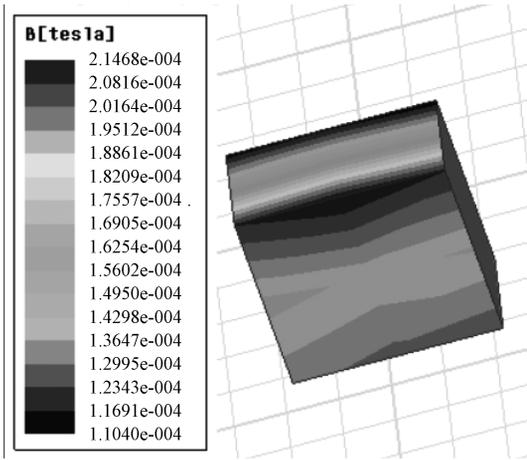


图 6 未加屏蔽壳体
Fig. 6 Unshielded shell

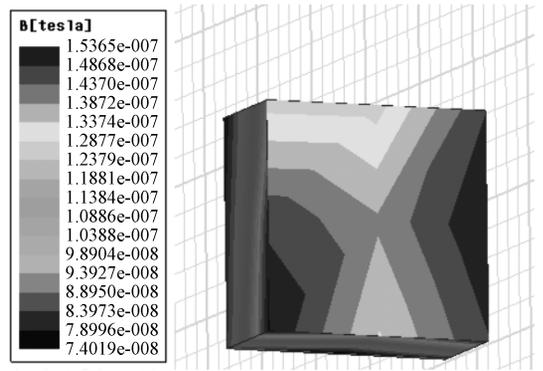


图 9 完全封闭后的仿真结果
Fig. 9 Simulation results after complete closure

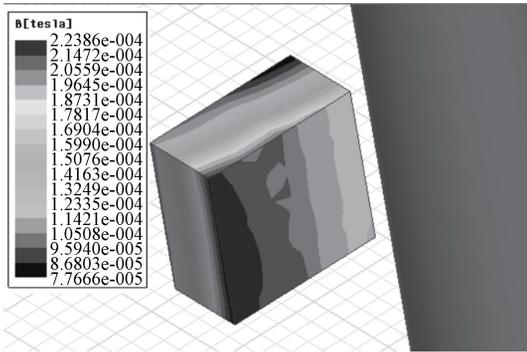


图 7 加屏蔽壳体后的仿真结果
Fig. 7 Simulation results with shielding shell

蔽,在建模过程当中,导线与壳体之间存在缝隙等问题,导致求得的屏蔽效能较差,故把屏蔽壳体完全包覆整个系统,对理想的屏蔽效能进行计算,其模型如图 8 所示,仿真结果如图 9 所示。

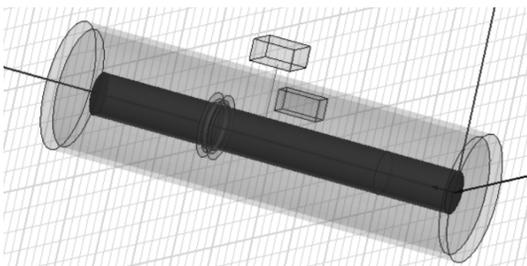


图 8 完全封闭的屏蔽壳体
Fig. 8 Fully enclosed shield housing

当屏蔽壳体完全包覆系统时,其屏蔽效能高达 74.27 dB,故在屏蔽壳体设计工程中,需保证壳体导电的连续性,比如在其接缝中用电磁密封衬垫填充等措施来提高其电磁屏蔽效能^[21]。

3 测试实验验证

本文研究的罗氏线圈与隧道磁阻传感器复合的电流测试方法,利用罗氏线圈对脉冲大电流的高频成分准确测量与隧道磁阻传感器对直流至低频电流信号准确测量的特点,使用钳形电流探头、罗氏线圈与隧道磁阻传感器对同一段载流直导线通过的电流进行测试,以钳形电流探头测得的电流值为基准,罗氏线圈与隧道磁阻传感器测得的电流信号进行统一标定,完成标定后的传感器对微电网储能并/离网过程的电流状态进行检测,通过取罗氏线圈高频、隧道磁阻低频成分进行拟合,实现所测数据的复合。

根据式(3)计算磁感应强度随距离变化曲线,其结果如图 10 所示。

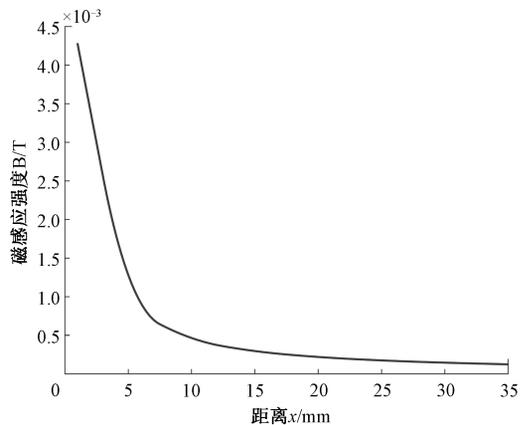


图 10 磁感应强度 B-距离 x 曲线
Fig. 10 Magnetic induction intensity B-distance x curve

测量导线外磁场,通过隧道磁阻传感器输出,经过电路的一级放大后,利用示波器采集测量波形。读取工频下测量磁场数据,经过小波滤波处理,得到隧道磁阻传感

器输出波形峰峰值与距导线不同距离下的曲线,如图 11 所示。

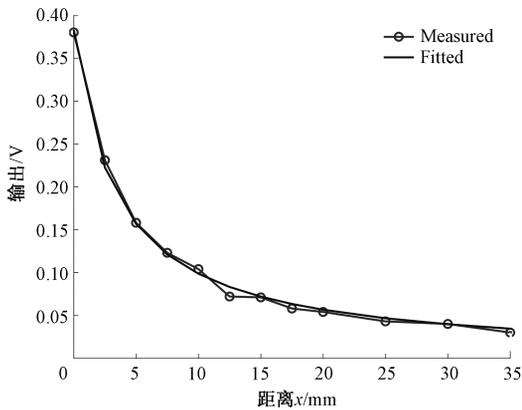


图 11 峰值电压与距离拟合关系

Fig. 11 Fitting diagram of peak voltage and distance

所使用的 TMR2501 的线性范围为 ± 200 Gs,故在之后的实验测量中,隧道磁阻传感器紧靠导线安装,即在其测量的线性范围内,实验现象也比较明显。

3.1 标定

在三相可编程负载的 C 相导线安装罗氏线圈、隧道磁阻传感器以及钳形电流探头,调节三相可编程负载 C 相的功率为 3 333 W,此时理论电流峰值为 21.422 A。对此电流进行测试,测得的信号如图 12 所示。

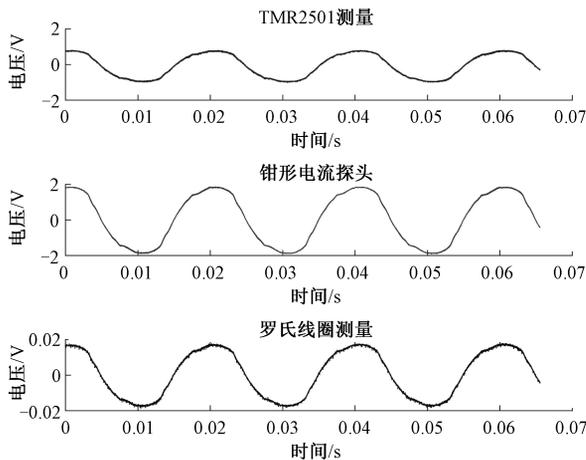


图 12 测试信号

Fig. 12 The measurement signal

罗氏线圈和隧道磁阻测量电流信号滤波后,通过乘系数、减基准进行标定,将其转换为电流值,转换成电流值的信号如图 13 所示,罗氏线圈和隧道磁阻的标定系数分别为 653.49 和 25.40。系统标定:传感器所测得的结果经过滤波后乘以输入/输出比例系数并减去基准电压值后转换为实际的电流大小。

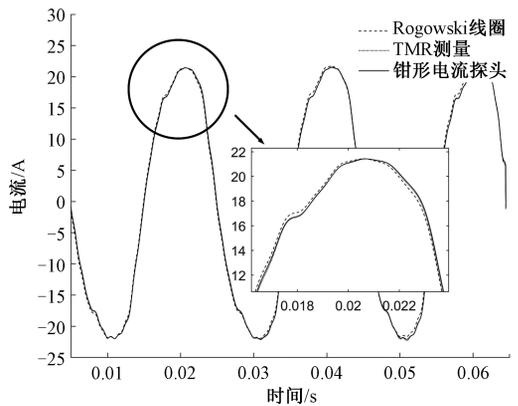


图 13 三种传感器标定后的电流信号

Fig. 13 Current value to complete calibration

从图 13 看出,标定后的罗氏线圈和隧道磁阻测量的正弦电流数据与钳形电流探头测量数据吻合,验证了标定系数的有效性。

3.2 微电网储能并/离网过程电流测试实验

电池储能系统在智能微电网中得到了广泛的应用,储能系统的核心是逆变器,在微电网储能并/离网过程中由于控制开关的通断会产生尖峰脉冲干扰,本文通过对微电网储能并/离网状态电流测试验证罗氏线圈与隧道磁阻复合的可行性。

在双向储能逆变器 (PCS) 负载侧 C 相安装经过标定后的隧道磁阻传感器、罗氏线圈以及钳形电流探头,通过对 PCS 并/离网状态设置来改变电流状态,并使用工控机进行数据采集,进行小波滤波后,将罗氏线圈和隧道磁阻传感器测量得到的数据分别利用标定系数进行处理,截取罗氏线圈和隧道磁阻测量脉冲电流如图 14 所示。

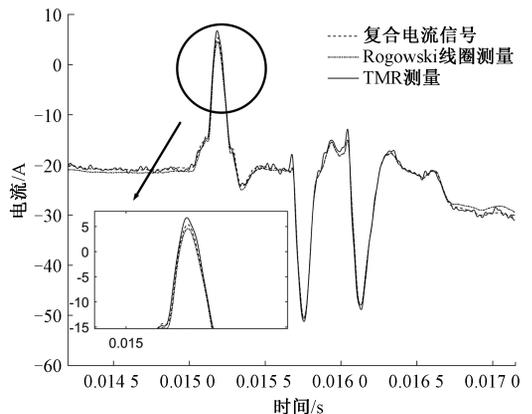


图 14 两种传感器测量脉冲电流波形

Fig. 14 Two sensors measure pulse current waveform

利用复合方法,在频域上截取罗氏线圈测量的脉

冲电流大于等于 1 kHz 高频部分、截取隧道磁阻传感器测量的脉冲电流小于 1 kHz 低频部分,将两部分数据相加,再由频域转换到时域得到复合脉冲电流,如图 15 所示。

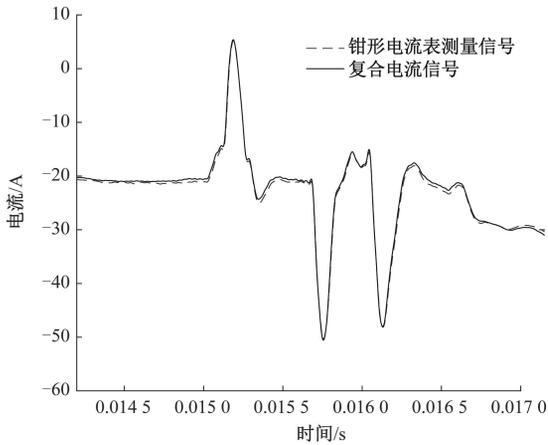


图 15 复合后脉冲电流波形

Fig. 15 Pulse current waveform after recombination

分析图 14 和 15 复合前后脉冲电流部分与锯齿形电流探头测量电流数据,复合前罗氏线圈和隧道磁阻单个传感器测量脉冲电流峰值的最大误差 11.78%,复合后脉冲电流误差减少到 3.67%,且电流波形与锯齿形电流探头测量数据更为吻合。

4 结 论

本文对罗氏线圈与隧道磁阻传感器复合的电流测试方法进行了研究,以锯齿形电流探头测试信号为基准,在微电网实验平台上完成标定后,对微电网储能并/离网过程中的尖峰脉冲电流进行测试并利用复合方法处理。实验结果表明,该方法对微电网储能并/离网过程中的尖峰脉冲电流可以进行有效的测试,即罗氏线圈与隧道磁阻传感器经过复合的信号与作为真值的锯齿形电流探头测得的信号吻合,复合后脉冲电流误差减少到 3.67%。罗氏线圈与隧道磁阻传感器复合的测试方法可以为频率成分复杂的车载微电网脉冲电流测试问题提供新的思路,该电流测试方法对于装备的电气化测量具有重要意义。

参考文献

[1] 胡军,赵帅,欧阳勇,等.基于巨磁阻效应的高性能电流传感器及其在智能电网的量测应用[J].高电压技术,2017,43(7):2278-2286.
HU J, ZHAO SH, OUYANG Y, et al. High performance current sensors based on giant magnetoresistance effect and practical applications in

smart grids [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7):2278-2286.
[2] 单体强,陈雷,赵志宁.电磁炮多路脉冲大电流测试系统设计[J].测控技术,2013,32(2):36-38,41.
DAN T Q, CHEN L, ZHAO ZH N. Design of test system for electromagnetic gun multi-channel large pulsed current[J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(2):36-38,41.
[3] 江伟华.高重复频率脉冲功率技术及其应用:(1)概述[J].强激光与粒子束,2012,24(1):10-15.
JIANG W H. High repetition rate pulse power technology and its application: (1) overview[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1):10-15.
[4] 王旭.基于 Rogowski 线圈脉冲电流检测技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
WANG X. Study on Rogowski coil for research on detection technology of pulse current [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
[5] 李忠晶,鞠登峰,周兴,等.基于巨磁电阻传感器的微弱电流测量方法研究[J].电测与仪表,2016,53(15):28-32.
LI ZH J, JU D F, ZHOU X, et al. Research on the measurement method of weak current based on GMR sensor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016,53(15):28-32.
[6] 曾正华.脉冲大电流测试技术研究[D].南京:南京理工大学,2006.
ZENG ZH H. Research on pulse high current measurement technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
[7] 高丽敬.脉冲电源系统电流检测技术的研究[D].天津:河北工业大学,2017.
GAO L J. Research on current detection technology of pulse power system [D]. Tianjin: Hebei University Of Technology, 2017.
[8] 张郁.一种基于低频补偿的脉冲大电流测试方法研究[D].南京:南京理工大学,2014.
ZHANG Y. Research on a test method of high pulse current based on low frequency compensation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
[9] 陈亚锋.基于 TMR 传感器的大电流测量技术研究[D].成都:电子科技大学,2019.
CHEN Y F. Research on high current measurement technology based on TMR sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2019.
[10] 谢潇磊,刘亚东,刘宗杰,等.高频差分绕线 PCB 罗氏线圈设计[J].仪器仪表学报,2015,36(4):886-894.

- XIE X L, LIU Y D, LIU Z J, et al. Design of PCB Rogowski coil with high frequency differential winding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(4):886-894.
- [11] 梁远远,杨生胜,文轩,等. 脉冲涡流无损检测中缺陷定量化技术研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11):70-78.
LIANG Y Y, YANG SH SH, WEN X, et al. Research on defect quantification in pulsed eddy current nondestructive testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018,39(11):70-78.
- [12] 李培江,周爱萍,聂云豪,等. 基于毕奥-萨伐尔定律的测距仪[J]. 大学物理,2019,38(12):57-60.
LI P J, ZHOU AI P, NIE Y H, et al. Rangefinder Based on Biot Savart law [J]. College Physics, 2019, 38(12):57-60.
- [13] 邝向军. 任意四边形载流线圈的空间磁场计算[J]. 大学物理,2017,36(4):28-31.
KUANG X J. Calculation of space magnetic field of arbitrary quadrilateral current carrying coil [J]. College Physics, 2017,36(4):28-31.
- [14] 孙立红,崔敬花. 载流导线在坐标原点的磁场[J]. 绵阳师范学院学报,2011,30(2):26-29.
SUN L H, CUI J H. Magnetic field of current carrying wire at origin [J]. Journal of Mianyang Teachers' College,2011,30(2):26-29.
- [15] 马子光. 脉冲功率电源超大电流测试技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
MA Z G. Research on super current measurement technology of pulse power supply [D]. Taiyuan: North University of China,2019.
- [16] 朱立超,罗志会,潘礼庆. 三轴高精度磁阻磁强计的设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(7):29-32.
ZHU L C, LUO ZH H, PAN L Q. Design of three axis high precision magnetoresistive magnetometer [J]. Instrument Technique and Sensor,2018(7):29-32.
- [17] 王超,高鹏. 基于GMR的电磁无损检测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(6):783-792.
WANG CH, GAO P. Research on electromagnetic nondestructive testing based on GMR [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6):783-792.
- [18] 李嘉鸿. 智能巨磁阻电流传感器设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学,2017.
LI J H. Design of intelligent giant magnetoresistance current sensor [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University,2017.
- [19] 陈昌鑫,王宇,马铁华. 存储测试仪磁场屏蔽效能仿真分析[J]. 科技与创新,2018(18):144-145,147.
CHEN CH X, WANG Y, MA T H. Simulation analysis of magnetic shielding effectiveness of storage tester [J]. Science and Technology & Innovation, 2018(18):144-145,147.
- [20] 陈昌鑫,郭文超,李帆,等. 一种隧道磁阻与罗氏线圈复合的全封闭式电流测试装置 [P]. 中国: 202010041544.8. 2020-01-15.
CHEN CH X, GUO W CH, LI F, et al. A fully enclosed current measuring device composed of tunnel magnetoresistance and Rogowski coil [P]. China: 202010041544.8. 2020-01-15.
- [21] 李杰,杨志华,王应芬,等. 基于孔缝箱体屏蔽效能的研究[J]. 电力科学与工程,2020,36(5):69-74.
LI J, YANG ZH H, WANG Y F, et al. Research on shielding effectiveness of slotted box [J]. Electric Power Science and Engineering, 2020,36(5):69-74.

作者简介



陈昌鑫,2010年于华北水利水电大学获得学士学位,2015年于中北大学获得博士学位,现为中北大学教师、太原理工大学电气工程博士后,主要研究方向为动态测控与智能装备。

E-mail:chenchangxin@nuc.edu.cn

Chen Changxin received his B. Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2010, Ph. D. degree from North University of China in 2015. Now he is a teacher at North University of China and Postdoctoral at Taiyuan University of Technology. His main research interests include dynamic measurement control and intelligent equipment.



郭文超,2018年于沈阳城市建设学院获得学士学位,现为中北大学硕士研究生,主要研究方向为动态测控与智能装备。

E-mail:successful_chao@163.com

Guo Wenchao received his B. Sc. degree from Shenyang Urban Construction University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at North University of China. His main research interests include Dynamic measurement control and intelligent equipment.



冉召会,2017年于惠州学院获得学士学位,现为中北大学硕士研究生,主要研究方向为动态测控与智能装备。

E-mail:1243046970@qq.com

Ran Zhaohui received his B. Sc. degree from Huizhou University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at North University of China. His main research interests include dynamic measurement control and intelligent equipment.



马铁华(通信作者),1985年于中北大学获得学士学位,1990年于南京理工大学获得硕士学位,1996年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为中北大学二级教授,主要研究方向为动态测控与智能装备。

E-mail:matiehua@nuc.edu.cn

Ma Tiehua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North University of China in 1985, M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1990, Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 1996. Now he is a professor at North University of China. His main research interests include dynamic measurement control and intelligent

equipment.



任一峰,1989年于南开大学获得学士学位,1995年于北京航空航天大学获得硕士学位,2011年于中北大学获得博士学位,现为中北大学教授,主要研究方向为微电网智能控制。

E-mail:renyifeng@nuc.edu.cn

Ren Yifeng received his B. Sc. degree from Nankai University in 1989, M. Sc. degree from Beihang University in 1995, Ph. D. degree from North University of China in 2011. Now he is a professor at North University of China. His main research interest includes intelligent control of micro grid.