基于 Seebeck 效应的配电变压器绕组材质 无损鉴别装置及测试分析

杜 林,王棣生,陈伟根,王有元,姚陈果

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:基于配电变压器绕组回路 Seebeck 效应,研发绕组材质鉴别装置并进行测试分析。结合实际情况分析 了干式变压器绕组回路 Seebeck 效应。根据实际回路温度分布及绕组材料特性,对铜、铝绕组回路的热电势 进行理论计算,得出了绕组材质判断阈值。基于理论研究成果研发变压器绕组材质鉴别装置,对多台配电变 压器进行测试分析。测试结果证明该绕组材质鉴别装置能有效鉴别铜、铝绕组材质。

关键词:配电变压器;绕组;材质鉴别;Seebeck 效应;Seebeck 系数

中图分类号:TM 41 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.002

0 引言

变压器绕组是变压器的重要部件。高电压、大 电流下的变压器绕组工作在较高的温度环境中,并 可能承受较大的冲击机械负荷,因此需要绕组具有 较好的导电性能、机械强度及短时过载和抗短路能 力^[1]。铜、铝是2种常用的绕组材料,铜具有更好的 导电性能、机械性能和热性能,而铝成本低、密度小、 易于加工成型^[23]。铜绕组变压器具有更高的安全 可靠性和更低的全寿命周期使用成本。

除吊罩解体、破坏绕组绝缘进行检测外,目前提 出的绕组铜铝材质鉴别法主要有 X 射线法、温度系 数法和参数对比法等^[48]。X 射线法^[5]通过铜、铝材 料在 X 射线下透射成像灰度对比鉴别金属材质,操 作复杂、测试成本高。温度系数法^[6]实测不同温度 下的绕组直流电阻值,通过计算电阻温度系数 K 值 来鉴别绕组材质。由于变压器内部绕组升温困难, 电阻值测量精度要求严苛,该方法难以实际应用。 参数对比法^[7]实测变压器体积、质量、容量等参数并 与标准数据库进行对比,以实现绕组材质鉴别。由 于设计差异较大,该方法仅适用于单一厂家、系列的 变压器。

目前电气领域关于 Seebeck 效应的研究,主要 集中于利用热电材料 Seebeck 效应产生的热电势供 能的温差发电技术^[9]以及新型热电材料^[10],对常用 金属材料的 Seebeck 效应及其应用研究较少。近年 来,有专家学者提出基于 Seebeck 效应进行金属材 质检测^[8]。文献[8]提出利用首末端建立温差后 铜、铝绕组回路的热电势差异鉴别变压器绕组材质, 但其未考虑实际绕组材料及材料 Seebeck 系数随温

收稿日期:2018-01-02;修回日期:2019-01-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018-CDPTCG0001/31)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018CDPTCG0001/31)

度的变化情况,绕组材质判断阈值无理论依据。

本文在文献[8]的基础上,进一步研究变压器 绕组回路铜、铝材质 Seebeck 效应,结合干式配电变 压器绕组回路结构,推导绕组回路热电势方程;根据 实际回路温度分布及绕组铜、铝材料特性,理论计算 铜、铝绕组回路热电势,提出绕组材质判断阈值。基 于理论研究成果设计变压器绕组材质鉴别仪,对多 台干式配电变压器进行测试,并对回路热电势建立 过程进行分析。

1 原理

1.1 Seebeck 效应原理

Seebeck 效应示意图如图 1 所示。在由 2 种不同导体串联组成的回路中,如果导体的 2 个接点处存在温差 $T_a - T_b(T_a > T_b)$,回路中将产生电动势。当温差 $T_a - T_b$ 较小时,可将导体 Seebeck 系数近似为常数,则热电势 U_x 的计算公式为:

 $U_{zy} = S_{a}(T_{a} - T_{b}) + S_{b}(T_{b} - T_{a}) = S_{ab}(T_{a} - T_{b})$ (1) 其中, S_{a} 、 S_{b} 分别为导体 a、导体 b 的 Seebeck 系数; S_{ab} 为导体 a 与导体 b 的相对 Seebeck 系数^[11]。



图 1 Seebeck 效应示意图 Fig.1 Schematic diagram of Seebeck effect

材料的 Seebeck 系数可由 Boltzmann 方程进行 计算^[12]。常温(T=300 K)下,铜、铝的 Seebeck 系数 理论值分别为 3.138 7 μ V/K 和 1.877 9 μ V/K。理论 计算仅能获得金属单质的 Seebeck 系数,而工程实际 中,纯铜和纯铝均含有一定的杂质,同时合金及表面 镀层等也会影响材料的 Seebeck 系数,因此工程实 际中采用的 Seebeck 系数一般由实际测量得到^[13]。

1.2 绕组回路的 Seebeck 效应理论分析

将测试线(足够长,加热时末端温度为室温)分 别连接于进线端、出线端铜排,忽略连接件,则绕组 回路结构可简化为图 2^[14]。图中, T_1 、 T_2 分别为测 试线、进线端铜排-绕组连接处的温度; T'_2 为交界处 铜排温度; T_0 为室温及未加热前绕组回路初始温 度; S_T 、 S_C 、 S_W 分别为测试线、进出线端铜排及绕组 材质 Seebeck 系数; V_{10} 为绕组回路热电势。



图 2 单相绕组回路简化结构图



铜排材质主要采用紫铜(铜含量高于 99.7%), 多数铜排表面镀锡(锡含量为 92%~97%)。铝绕组 通常采用纯铝(铝含量高于 99.6%),铜绕组采用紫 铜。热电势测试线选用紫铜线。因各金属材料成分 差异及镀层存在, $S_{\rm T}$ 、 $S_{\rm C}$ 、 $S_{\rm W}$ 不等,相对 Seebeck 系数 不为 0。

加热 A 相进线端铜排,通过接触热传导在绕组 回路传递热量,温度稳定后,回路各结构首末段将建 立温差,即 $T_1 > T_2 > T_0$ 。变压器绕组长度较长,同时 会向变压器内部其他结构散热,热传导无法贯穿绕 组,因此绕组末端及后续结构温度可视作不变。在 此温度分布条件下,绕组回路热电势可表达为;

 $S_{T}(T_{0}-T_{1})+S_{C}(T_{1}-T_{2})+S_{W}(T_{2}-T_{0})=-V_{10}$ (2) 合并整理,得:

$$S_{\rm TC}(T_1 - T_0) + S_{\rm CW}(T_2 - T_0) = V_{10}$$
(3)

对于相同型号的铜绕组、铝绕组干式配电变压器,当 T_1 相同且绕组回路温度分布相近时,铜、铝绕组回路热电势 V_{10} 的差异主要体现在 $S_{cw}(T_2-T_0)$ 。 铝绕组回路热电势高于铜绕组回路热电势,差值近 ($b_{A1}-S_{cu}$)(T_2-T_0)。因为 S_{A1} 、 S_{cu} 有明显差异, 理论上,在足够大的温差 T_2-T_0 下,差值明显,回路 热电势 V_{10} 可以区分,即实现铜、铝绕组材质鉴别。

2 绕组回路热电势分析计算

2.1 绕组回路温度分布

绕组回路温度分布是研究回路热电势的基础。 测试线-进线端铜排连接于裸露铜排,其温度 T₁ 可 直接测得。而进线端铜排-绕组连接处由绝缘外皮 包裹,仅顶端部分暴露在变压器主体外,不易直接测量。为了获取实际铜排-绕组连接处的温度 T_2 ,按进线端铜排结构制作包覆绝缘外皮的等比铜排,铜排末端等效于铜排-绕组连接处。加热等比铜排裸露的首端,测量不同温差下等比铜排的 T_2 及铜排上变压器内外交界等效点的绝缘外皮温度 T'_2 。然后,建立等比铜排的仿真模型,仿真铜排温度分布。对照等比铜排的 T_2 、 T'_2 实测值,调整热导率等材料参数,完善仿真。后续分析中,将实测 T'_2 与仿真相对应,即可对应仿真获取真实铜排-绕组连接处温度 T_2 。

通过试验及仿真,获取不同容量(500~1 000 kV·A 范围内)、型号的干式变压器加热稳定后连接处温度 T_1 、 T_2 。当室温及变压器绕组回路初始温度为 298 K 时,加热至 T_1 =418 K,稳定后, T_2 在 368~378 K 范 围内,绕组两端温差在 70~80 K 范围内。

对于同型号铜、铝绕组变压器,进线端铜排材质 基本相同,仅结构有一定的差异,研究中各进线端铜 排上的温度分布近似为相同。因铜、铝性质差异,温 度在铜、铝绕组中传播距离不同,但两端温差不变。 由式(3)可知,在 70~80 K 的温差下,铜、铝绕组回 路热电势已有明显差异。

2.2 不同绕组材料 Seebeck 系数测量

导体的 Seebeck 系数与温度有关。在导体首、 末两端建立温差,测量所得的 Seebeck 系数近似对 应于首、末端平均温度下的 Seebeck 系数^[15]。通过 试验获取了不同绕组材料相对 Seebeck 系数的温变 函数。

相对 Seebeck 系数测量平台如图 3 所示。将试 品放置于测量平台上,一端恒温加热,另一端降温至 接近常温,使试品两端产生明显温差。试品两端分 别连接足够长的测试线,使测试线末端温度降为常 温。在不同温差下,使用高精度电压表测量回路热 电势,使用温度传感器测量试品-测试线首末端连接 点的温度,计算平均温度及对应的相对 Seebeck 系数。



图 3 相对 Seebeck 系数测量平台

Fig.3 Relative Seebeck coefficient measurement platform

分别以相同结构的 T2 紫铜排、镀锡 T2 紫铜排、 6061 铝排为试品进行测试,并将 T2 紫铜线的 Seebeck 系数作为参照。

T2 紫铜线与 T2 紫铜排的相对 Seebeck 系数测 试结果见图 4(a)。由图可见,建立明显温差后,相 对 Seebeck 系数绝对值恒小于 0.1 μ V/K,证明紫铜 线、紫铜排相对 Seebeck 系数可近似取 0。



图 4 T2 紫铜线与测试样品相对 Seebeck 系数测试结果 Fig.4 Test results of relative Seebeck coefficient of T2 copper wire and testing samples

镀锡 T2 紫铜排与 T2 紫铜线连接时,紫铜线、镀 层、紫铜排从内层到外层构成铜-锡-铜的结构。由 于铜排中心温度与表面温度存在差异,会产生一定 热电势。定义等效相对 Seebeck 系数,以考虑镀层 对热电势的影响。镀锡 T2 紫铜排的测试结果如图 4(b)所示,由图可见,等效相对 Seebeck 系数均小于 0。随着首末端平均温度的升高,等效相对 Seebeck 系数首先下降,后因铜排内部、表面温差逐渐平衡而 趋于稳定。在所测温度范围内,镀锡 T2 紫铜-T2 紫 铜相对 Seebeck 系数的拟合方程为:

S=-5.13×10⁻⁶*T*³+5.41×10⁻³*T*²-1.89*T*+219.15 (4) 其中,*T*为试品首末端平均温度。

T2 紫铜线对 6061 铝排的相对 Seebeck 系数测试结果如图 4(c)所示。由图可见,T2 紫铜线对 6061 铝排的相对 Seebeck 系数均大于 0,且随首末端 平均温度升高近似线性上升。在所测温度范围内, 6061 铝-T2 紫铜相对 Seebeck 系数的拟合方程为:

$$S = 2.069 \ 5 \times 10^{-2} T - 5.188 \ 1 \tag{5}$$

相对 Seebeck 系数具有可加减性,将平均温度 代入对应拟合方程并进行加减,可得到两绕组材料 在不同温度下的相对 Seebeck 系数。测试结果表 明,所测铜、铝材料间的相对 Seebeck 系数有明显差异。

2.3 绕组回路热电势计算分析

根据 500 kV·A 干式变压器的现场温度测试结果,对干式配电变压器绕组回路热电势进行理论计算,绕组回路各点温度分别为 T_1 =418 K、 T_2 =378 K、

 $T_0 = 298 \, \mathrm{K}_{\odot}$

对铝绕组变压器,取绕组材质为 6061 铝,铜排 材质为镀锡 T2 紫铜。根据式(4)、(5),计算绕组材 料相对 Seebeck 系数 $S_{TC} = -1.2205 \mu V/K_x S_{CW} =$ 3.027 7 $\mu V/K_o$ 将 S_{TC} 、 S_{CW} 代入式(3),可得铝绕组 变压器回路热电势 $V_{AI} = 95.6941 \mu V_o$

对铜绕组变压器,取绕组材质为 T2 紫铜,铜排 材质为镀锡 T2 紫铜。计算得绕组材料相对 Seebeck 系数: S_{TC} = -1.220 5 μ V/K, S_{CW} = 1.319 2 μ V/K。铜 绕组变压器回路热电势为 V_{Cu} = -40.923 3 μ V。

考虑进线端铜排不镀锡或锡层磨损的情况,对 于铝绕组变压器而言, $S_{TC} = 0$, $S_{CW} = 1.8064 \mu V/K$, $V_{Al} = 144.5146 \mu V$;对于铜绕组变压器而言, $S_{TC} = 0$, $S_{CW} = 0$, $V_{Cu} = 0$ 。

综上, V_{AI}最小值为 95.694 1 μV, V_{CI}最大值为 0。

同理,代人1000 kV·A 干式变压器温度的测试 结果进行计算。绕组回路各点温度分别取 T_1 =418 K、 T_2 =368 K、 T_0 =298 K。对于铝绕组变压器, V_{A1} = 58.181 8 μ V;对于铜绕组变压器, V_{Cu} =-53.498 5 μ V。 考虑紫铜排表面无锡层情况,则有 V_{A1} =119.207 4 μ V、 V_{Cu} =0。综上, V_{A1} 最小值为58.181 8 μ V, V_{Cu} 最大值 为0。

理论计算证明,铜、铝绕组回路热电势有明显差 异,可根据理论计算结果设置热电势判断阈值,进而 判断绕组材质。考虑实际材料特性、温度分布与理 论值的差异,热电势理论计算结果仅作为参考判断 阈值,真实热电势情况需根据实际情况进一步分析。

3 绕组材质鉴别装置

绕组材质鉴别装置主要由加热模块、测试探头、 控制及信号处理单元组成。装置主要结构整体接线 图见图 5。



3.1 加热模块

加热模块安装于干式变压器进线端铜排首端, 最高温度可达 473~503 K,进线端铜排测量探头测

O

试位置 A₁ 处最高温度可达 423~473 K,满足建立绕 组回路温差的要求。加热模块产生的热量既要建立 足够的温度差,其温度又要小于变压器绝缘材料的 允许温度^[16]。干式变压器绝缘材料耐热等级一般 为 F 或 H 级,耐热温度可达 428 K 和 453 K。综合 2.1 节绕组回路温度分布分析可知,加热模块满足干 式变压器绝缘耐热温升标准。

3.2 测试探头

测试探头连接于铜排裸露部分,靠近绝缘外套。 测试探头内,紫铜测量线与线型热电偶探头部分在 测试探头内平行,间隔距离很短(1 mm),保证温度、 热电势近似于同点测量。

3.3 控制及信号处理单元

控制及信号处理单元为绕组材质鉴别装置的主要部分,包括温度传感器电路、温度控制电路、热电势调理电路、采集控制单元,如图6所示。



图 6 控制及信号处理单元

Fig.6 Control and signal processing unit

温度控制电路的主要功能为根据测试过程中的 加热要求,控制加热模块加热功率。

温度传感器电路集成冷端补偿,分别测量 A 相 进线端铜排、中性点出线端铜排上点 A_1 、 A_0 的温度 T_1 、 T_0 。

热电势调理电路对绕组回路产生的 μV 级热电 势进行信号处理及采集。分别采用电感、电阻、电容 构成无源滤波电路及运算放大器构成的二阶有源滤 波电路对干扰进行削弱和滤除,保证热电势信号测 量的准确性。由精密仪用差分放大器及运算放大器 构成有源放大电路对 μV 级电流进行放大,温度漂 移及非线性度低,各级电路偏移均可调。

采集控制单元采集热电势调理电路输出的热电 势信号及温度传感器电路输出的温度信号,同时,根 据所测温度控制加热模块加热功率。采集控制单元 连接上位机,由上位机软件控制。

4 现场实验

4.1 绕组材质鉴别实验流程

绕组材质鉴别实验的主要流程如下。

a. 按前文所述连接绕组材质鉴别装置,系统根据变压器类型、容量自动设置检测时间及判断阈值。

b. 初值测试。采集初始偏移电压 V_{10} ,并调零校准;采集并记录 T_1 、 T_0 的初始值。

c. 加热测试。连续采集信号 V_{10} 、 T_1 、 T_0 ,热电势 值稳定或达到预设加热测试时间,且 $T_1 - T_0 > 110$ K 时停止。

绕组材质鉴别系统软件在上位机运行。系统各 模块通过绕组材质鉴别装置,实现控制、采集及材质 的分析鉴别。温度控制模块根据测试温度控制继电 器开断,实现加热控制。采集模块控制并实现对温 度、热电势信号的滤波、放大等信号处理。分析鉴别 模块对采集到的数据进行计算处理,根据计算结果 判断绕组材质,形成报告。同时记录存储温度、热电 势数据,以供进一步研究分析。

不同容量干式变压器对应的热电势判断阈值由 铜、铝绕组热电势理论计算值确定。对结构体积近 似的 500~800 kV·A 干式变压器,铝绕组热电势理 论计算最小值 V_{A1} =95.694 1 μ V,取 V_{A1} =95 μ V。以 此为标准,绕组热电势判断阈值 V_{d} =95 μ V。对于 1 000 kV·A 以上的干式变压器,铝绕组热电势 V_{A1} 的 理论计算最小值为 58.181 8 μ V,取 V_{A1} =60 μ V,则 判断阈值 V_{d} =60 μ V。

4.2 绕组材质鉴别系统鉴别结果分析

对大量干式配电变压器进行现场测试,部分测 试结果如表1所示。由表可见,绕组材质鉴别系统 鉴别结果均与变压器绕组实际材质相符;铝绕组变 压器热电势测试值均高于理论阈值,铜绕组变压器 测试值均低于理论阈值,热电势区间无交界。由于 被试变压器的实际结构、材料与理论分析存在差异, 实验结果与理论值有一定的误差。

表1 变压器绕组材质鉴别结果

Table 1 Results of winding materials identification

			0			
编号	容量/	进线端	出线端	热电势/	鉴别	实际
	$(kV \cdot A)$	温度/K	温度/K	μV	结果	材质
1	630	448.2	305.2	-23.34	铜	铜
2	630	428.6	306.7	-158.31	铜	铜
3	630	468.1	298.7	261.53	铝	铝
4	800	413.0	305.2	110.47	铝	铝
5	800	426.6	306.1	199.03	铝	铝
6	800	407.2	302.3	-18.04	铜	铜
7	800	415.2	298.5	35.63	铜	铜
8	1 000	477.5	306.7	225.56	铝	铝
9	1 000	454.3	306.0	-211.87	铜	铜
10	1 000	410.7	298.0	136.28	铝	铝

4.3 温度、热电势变化规律分析

绘制温度、热电势随时间的变化曲线,对变压器 绕组回路 Seebeck 效应过程中温度、热电势的变化 规律进行了分析。

首先选择容量相同、体积近似的2台1000 kV·A 干式变压器(编号分别为8号和9号)进行对比,结 果如图7所示。



图 7 干式变压器温度、热电势曲线

Fig.7 Temperature and thermoelectric potential curve of dry-type transformers

8 号变压器初值测试结果为: T_0 =305.92 K, T_1 = 309.3 K,偏移电压 V_{10} =-21.90 μV。实时测试结果 如图 7(a)所示,由图可见, T_0 保持不变, T_1 逐渐上 升直至基本稳定。升温阶段,在温度未传至铜排-绕 组连接处前,连接处温度 T_2 = T_0 。根据 2.3 节的分 析, T_2 - T_0 =0, S_{TC} <0, S_{TC} (T_1 - T_0)随 T_1 上升而下降, 电势值呈下降趋势。随后温度传达到铜排-绕组连 接处, S_{CW} (T_2 - T_0)>0 且逐渐增大,热电势值逐渐上 升。当温度场逐渐稳定时,热电势值也趋于稳定。 测试过程中热电势值无明显波动。最终测试结果 为: T_0 =306.73 K, T_1 =477.5 K,热电势测试值 V_{10} = 203.66 μV。热电势测试值减去偏移电压,得热电势 实际值为 225.56 μV,大于热电势阈值 V_d =60 μV, 判断所测干式变压器为铝绕组变压器。

9 号变压器初值测试结果为: T_0 =305.01 K, T_1 = 305.28 K,偏移电压 V_{10} =16.51 μ V。测试结果如图 7(b)所示,由图可见, T_0 保持不变, T_1 逐渐上升直 至基本稳定。升温初期,在温度未传达到铜排-绕组 连接处前, T_2 - T_0 =0, S_{TC} <0, S_{TC} (T_1 - T_0)随 T_1 上升而 下降。随后温度传至铜排-绕组连接处, S_{CW} (T_2 - T_0)>0 且逐渐增大,同时 T_1 上升速度减缓,因此热电势值 下降趋势减缓。当温度分布稳定时,热电势值也趋 于稳定。测试过程中热电势值存在波动,根据现场 情况,判断为现场地线干扰引入。最终测试结果为: T_0 =306.01 K, T_1 =204.49 K,热电势测试值 V_{10} = -195.36 μV。热电势实际值为-211.87 μV,小于热电势阈值 $V_{d} = 60$ μV,判断所测干式变压器为铜绕组变压器。

铜绕组变压器温差稳定后的热电势值也可能为 正值。以 7 号 800 kV·A 干式变压器测试曲线为例, 进线端温度测试点为铜排上变压器内外交界处的温 度 T'_2 (用于研究铜排-绕组连接处温度 T_2)。初值测 试结果为:出线端温度 T_0 = 298.10 K,铜排交界处温 度 T'_2 = 296.45 K,偏移电压 V_{10} = 0.34 μV。如图 7 (c)所示,热电势值变化趋势为先减后增,类似于铝 绕组变压器。最终测试结果为: T_0 = 298.53 K, T'_2 = 355.209 758 K,热电势测试值 V_{10} = 35.97 μV。热电 势实际值为 35.63 μV,小于热电势阈值 V_d = 95 μV, 判断所测干式变压器为铜绕组变压器。

热电势值为正值的原因分析为:进线端铜排与 铜绕组使用不同铜材,铜排-绕组相对 Seebeck 系数 $S_{cw}>0,但明显小于铜-铝相对 Seebeck 系数,因此热$ 电势曲线发展趋势类似,但热电势值较小。同时由图 7(c)可见,在升温初期,进线端铜排交界处温度 $<math>T'_2$ 基本保持恒定,当温度传达交界处时开始上升, 此后较短时间内,热电势值下降趋势减缓,进而开始 逐渐上升。

5 结论

本文研发了一种基于 Seebeck 效应的绕组材质 鉴别装置,并进行了测试分析。根据干式配电变压 器绕组回路结构及实际绕组材料分析,建立温差后 绕组回路存在热电势。理论计算及实验测量证明, 绕组铜、铝材料 Seebeck 系数有明显差异,结合回路 温度分布及绕组材料相对 Seebeck 系数计算,铜绕 组回路热电势理论值明显大于铝铜绕组回路,据此 可形成绕组材质判断阈值。

采用基于 Seebeck 效应的绕组材质鉴别装置对 多台变压器进行鉴别,鉴别结果符合实际情况。热 电势建立过程中,温度和热电势的变化规律符合 Seebeck 效应理论,但实际绕组材料、构造、温度分布 与理论分析存在差异,热电势理论计算结果仅可作 为参考,回路热电势需根据实际情况进行分析。

参考文献:

- [1]李朋,张保会,郝治国,等. 基于电气量特征的变压器绕组变形监测技术现状与展望[J].电力自动化设备,2006,26(2);28-32.
 LI Peng,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo, et al. Actuality and prospect of transformer winding deformation monitoring based on electric characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (2):28-32.
- [2] 孙定华,李顺利. 论铝线变压器的特点及其他[J]. 变压器, 2015,52(1):15-19.
 SUN Dinghua, LI Shunli. Discussion on the characteristics of aluminum transformer and others[J]. Transformer, 2015, 52(1):15-19.

- [3] OLIVARES J C, LEON F D. Selection of copper against aluminum windings for distribution transformers [J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(6):474-485.
- [4] 陈金猛,潘斌,李志新,等. 配电变压器绕组材质辨识研究现状 及展望[J]. 变压器,2016,53(11):16-19.
 CHEN Jinmeng, PAN Bin, LI Zhixin, et al. Status and prospect of winding material identification research of distribution transformer
 [J]. Transformer,2016,53(11):16-19.
- [5]张仁奇,李小军,蒋欣,等. 配电变压器线圈用材的 X 射线鉴别 方法[J]. 无损检测,2015,37(1):49-55. ZHANG Renqi,LI Xiaojun,JIANG Xin,et al. An X-ray radiographic comparison and identification method for coil materials in distribution transformers[J]. Nondestructive Testing,2015,37(1):49-55.
- [6] 孙云东,董俊国,张明博,等. 基于改进自然降温法的变压器绕 组材质无损检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28 (1):129-133.

SUN Yundong, DONG Junguo, ZHANG Mingbo, et al. Nondestructive detection method of transformer winding material based on improved natural cooling method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1):129-133.

- [7]何良,刘隆晨,毛强. 一种用于配电变压器绕组材质诊断的新方法[J].四川电力技术,2015,38(6):47-50.
 HE Liang,LIU Longchen,MAO Qiang. A new method for the diagnosis of power distribution transformer windings[J]. Sichuan Electric Power Technology,2015,38(6):47-50.
- [8] 杜林,余欣玺,周年荣,等. 基于热电效应的变压器绕组材质鉴别方法[J]. 高电压技术,2016,42(7);2275-2280.
 DU Lin,YU Xinxi,ZHOU Nianrong, et al. Transformer winding material identification method based on thermoelectric effect[J]. High Voltage Engineering,2016,42(7);2275-2280.
- [9] 晏维,邱国跃,袁旭峰. 半导体温差发电技术应用及研究综述
 [J]. 电源技术,2016,40(8):1737-1740.
 YAN Wei,QIU Guoyue,YUAN Xufeng. Application and research of semiconductor thermoelectric power generation technology[J]. Chinese Journal of Power Sources,2016,40(8):1737-1740.
- [10] 石玥,高方圆,董国波,等. 新型高效热电材料研究进展[J]. 金 属功能材料,2014,21(1):31-37.

SHI Yue, GAO Fangyuan, DONG Guobo, et al. Research progress of new high efficient thermoelectric material [J]. Metallic Functional Materials, 2014, 21(1):31-37.

- [11] PLATZEK D, KARPINSKI G. Measuring the spatial resolution of the Seebeck coefficient and the electric potential [C] // 24th International Conference on Thermoelectric. Clemson, SC, USA: [s.n.], 2005:13-16.
- [12] 温亚娟. 典型热电材料的第一原理计算[D]. 杭州:杭州电子科 技大学,2014.

WEN Yajuan. The first principle studies of several typical thermoelectric materials [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.

- [13] LOWHOM N D, WONG-NG W K, ZHANG Weiping. Round-robin studies of two potential Seebeck coefficient standard reference materials[C] // 26th International Conference on Thermoelectrics. Jeju Island, South Korea; [s.n.], 2007;361-365.
- [14] 王雪,王增平. 变压器绕组参数在线计算方法[J]. 电力自动化 设备,2012,32(7):71-75.
 WANG Xue, WANG Zengping. Online calculation of transformer winding parameters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(7):71-75.
- [15] ROWE D M. General principles and basic considerations [M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2005:1-14.
- [16] 陈伟根,苏小平,孙才新,等. 基于有限体积法的油浸式变压器 绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):23-27.
 CHEN Weigen,SU Xiaoping,SUN Caixin, et al. Temperature distribution calculation based on FVM for oil-immersed power transformer windings[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6): 23-27.

作者简介:



杜 林(1971—),男,四川达州人,教 授,博士,主要研究方向为电力设备在线监 测与故障诊断(**E-mail**:dulin@cqu.edu.cn)。

Nondestructive identification equipment of winding materials for distribution transformer based on Seebeck effect and its test analysis

DU Lin, WANG Disheng, CHEN Weigen, WANG Youyuan, YAO Chenguo

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract:Based on the Seebeck effect in winding circuit of distribution transformer, the winding material identification equipment is developed and tested. The Seebeck effect of winding circuit of dry-type transformer is analyzed based on the actual situation. According to the temperature distribution of actual winding circuit and the characteristics of winding material, the theoretical thermoelectric potential of copper and aluminum winding circuits are calculated to obtain the identification threshold. Based on the theoretical results, a transformer winding material identification equipment is developed, and multiple distribution transformers are tested and analyzed. The test results show that the developed winding material identification equipment can effectively identify copper and aluminum winding materials.

Key words: distribution transformer; winding; material identification; Seebeck effect; Seebeck coefficient