

DOI: 10.7652/xjtuxb201402009

ZnO 纳米颗粒改性变压器油介质损耗模型研究

缪金¹, 董明¹, 温福新¹, 吴雪舟¹, 沈凉平², 王浩²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 湖北大学物理学与电子技术学院, 430062, 武汉)

摘要: 为了了解添加纳米颗粒对变压器油介质损耗角正切值的影响情况,采用 ZnO 半导体纳米颗粒制备改性变压器油,在此基础上,研究了纳米改性变压器油介质损耗角正切值随纳米颗粒体积分数和环境温度的变化规律,提出了基于电导损耗和纳米颗粒松弛极化损耗的理论模型,并用来解释纳米改性变压器油介质损耗角正切值的变化机理。实验结果表明,添加 ZnO 纳米颗粒将明显增大纳米改性变压器油的介质损耗角正切值,且介质损耗角正切值随纳米颗粒体积分数线性增长,随环境温度呈指数型增大;同时所提模型的计算值较好地吻合了实验测量数据。进一步分析表明,ZnO 纳米颗粒改性变压器油介质损耗角正切值主要取决于电导损耗,纳米颗粒松弛极化损耗的影响很小。

关键词: 纳米改性;变压器油;介质损耗角正切;电导损耗

中图分类号: TM214 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)02-0050-06

Dielectric Loss Model of Transformer Oil-Based Nanofluids with ZnO Nanoparticles

MIAO Jin¹, DONG Ming¹, WEN Fuxin¹, WU Xuezhou¹, SHEN Liangping², WANG Hao²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Faculty of Physics and Electronic Technology, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: A new kind of transformer oil-based nanofluids (NFs) with ZnO semiconducting nanoparticles is prepared to investigate the influences of adding nanoparticles on dielectric loss tangent of transformer oil. The mechanism on how the nanoparticle volumetric concentration and environmental temperature affect the NF dielectric loss tangent is also discussed. A new dielectric loss model based on conduction loss and nanoparticle relaxation loss is proposed. The experiments show that the ZnO NF dielectric loss tangent linearly increases with the nanoparticle volumetric concentration and exponentially increases with the temperature. Meanwhile the calculation of dielectric loss model coincides well with the experiments. The further analysis suggests that for ZnO NFs the dielectric loss tangent is dominantly determined by conduction loss, and the influence of nanoparticle relaxation loss is slight.

Keywords: nanoparticle modification; transformer oil; dielectric loss tangent; conduction loss

油纸绝缘作为一种成熟的绝缘技术,在大型油浸式电力设备(特别是变压器和电感器)中广泛应

用。随着设备运行时间的增加,油纸绝缘结构在电、磁、化学、机械等多种因素作用下,暴露出越来越严

收稿日期: 2013-09-13。 作者简介: 缪金(1988—),男,硕士生;董明(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50907051);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;电力设备电气绝缘国家重点实验室创新基金资助项目(EIPE13311)。

网络出版时间: 2013-12-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131224.0939.003.html>

重的老化和劣化问题,特别是绝缘材料发热引起的热老化^[1],从而大大降低了电力系统的安全可靠性。调查显示,2005年、2010年我国因输变电设备故障所引起的电网停电事故占当年总事故的37%、48%,已居故障起因首位^[2]。因此,优化与改善油纸绝缘系统的绝缘性能及散热特性、提高其绝缘可靠性、延长设备使用寿命已经成为学术及工程应用重点关注的研究领域。1995年纳米微粒首次被添加到变压器油中,以提高油流体的导热能力^[3]。文献[4]的研究表明,通过在变压器油中添加体积分数为0.5%的AlN纳米颗粒,可将油流体的热导率提高8%,整体热效率提高20%。

纳米改性变压器油是指在变压器油中添加纳米颗粒并形成稳定的悬浮胶体,这些颗粒的平均直径为几到几十纳米,比变压器油中常见微粒小2至3个数量级^[5]。进一步研究表明,除了在导热性能方面大幅提高外,纳米改性变压器油和普通变压器油相比还具有较好地电气特性。文献[5]发现添加铁磁材料的纳米改性变压器油和普通变压器油相比,具有更高的工频击穿电压,同时在正极性雷电冲击下,纳米改性变压器油的耐压比普通油高近1倍,且流注的发展速度更缓慢。文献[6]发现纳米颗粒可以提高较大间隙下变压器油的击穿电压,改善其雷电冲击伏秒特性。文献[7]认为油中的纳米颗粒会“捕获”流注发展过程中快速运动的电子,从而降低流注的发展速度。文献[8]发现纳米颗粒增大了变压器油中的浅陷阱密度,阻碍自由电子的运动,从而提高了纳米改性变压器油的放电性能。目前,关于纳米改性变压器油电气特性的研究主要集中在高压放电、导电性能及老化特性等方面^[9-11],尚未对表征电介质材料损耗发热的介质损耗角正切值这一基本参数进行深入研究。

本文在运用ZnO半导体纳米颗粒制备改性变压器油的基础上,着重研究了纳米改性变压器油介质损耗角正切值随温度和纳米颗粒体积分数的变化关系;在电导损耗和极化损耗两部分的基础上,建立纳米改性变压器油介质损耗角正切模型,来解释其介质损耗角正切值的变化规律。

1 实验准备

1.1 纳米颗粒改性变压器油制备

ZnO纳米颗粒通过超声振荡方式均匀分散到25#克拉玛依变压器油中,制备获得ZnO纳米颗粒改性变压器油样。图1为ZnO纳米颗粒分散在乙

醇中的电子透射显微镜(TEM)照片,从中可以看出ZnO纳米颗粒大小均匀,直径约为30 nm。为了防止化学添加剂的干扰,实验中ZnO纳米颗粒未进行表面化学处理,同时上述纳米颗粒改性油样在制备完成后静置12 h,以减小振荡过程中微小气泡对实验测量的不利影响。

此次实验中,ZnO纳米颗粒改性变压器油所含颗粒体积分数分别为0.025%、0.1%和0.2%。图2所示为上述3种纳米颗粒改性油样的真实照片。

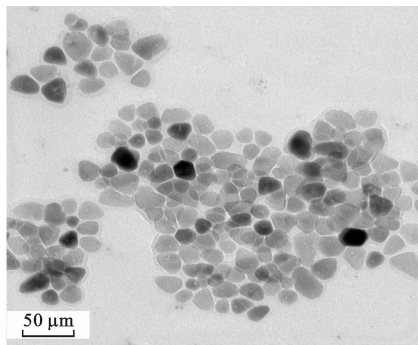


图1 ZnO纳米颗粒TEM照片

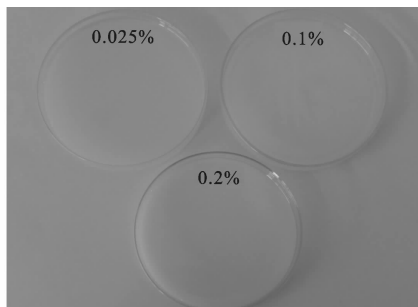


图2 ZnO纳米颗粒改性变压器油样照片

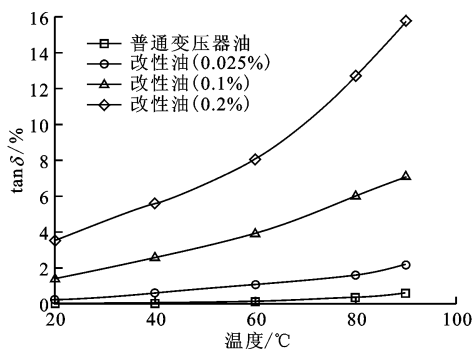
1.2 介质损耗角正切值测量

按照IEC 60247标准测量介质损耗角正切值,测试仪器为DX6100一体化绝缘油电气参数测试仪,采用三极式结构油杯,电极间距为2 mm。实验过程中施加2 kV工频交流电压,测量不同温度下上述3种改性变压器油样的介质损耗角正切值。

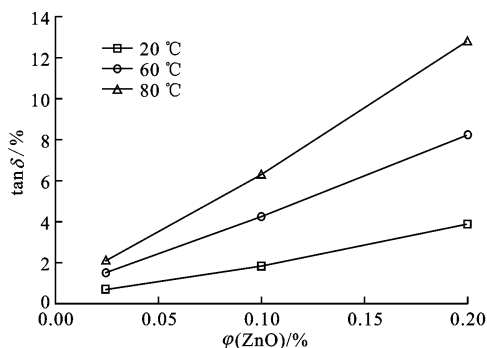
2 实验结果

实验结果表明,ZnO纳米颗粒改性变压器油的介质损耗角正切值随温度指数增大,而随纳米颗粒体积分线性增大。如图3a所示,普通变压器油和纳米改性油的介质损耗角正切值都随温度的升高指数型增加,且对于纳米改性油,颗粒含量越高,指数型增加越明显。当温度从60℃升高到80℃时, $\varphi(\text{ZnO})$ 为0.025%的改性油的介质损耗角正切值

从 1.071% 增大到 1.626%; 对于 $\varphi(\text{ZnO})$ 为 0.2% 改性油, 其介质损耗角正切值从 8.040% 增加到 12.693%。另外, 添加纳米颗粒将显著增大变压器油的介质损耗角正切值。例如, 20 °C 时普通油的介质损耗角正切值为 0.003%, 而 $\varphi(\text{ZnO})$ 为 0.025% 的改性油, 其值为 0.228%, 相比于普通变压器油增大了 75 倍。从图 3b 中可以看出, 改性油的介质损耗角正切值随着颗粒体积分数的增加基本呈线性增大的趋势。



(a) 介质损耗角正切值随温度的变化



(b) 介质损耗角正切值随颗粒体积分数的变化

图 3 温度和颗粒体积分数对介质损耗角正切值的影响

3 介质损耗模型

为了研究纳米改性变压器油介质损耗的形成机理, 认为交变电场下纳米改性变压器油的介质损耗由电导损耗和极化损耗两部分构成, 同时, 考虑到在瞬时位移极化和松弛极化两种极化类型中, 瞬时位移极化几乎不消耗能量, 所以纳米改性变压器油的极化损耗仅由松弛极化构成。根据介电弛豫理论, 类比于平行板电容器介质损耗角正切值表达式, 纳米改性变压器油的介质损耗角正切值可表示为^{[12]149-151}

$$\tan \delta = \left(\gamma + \epsilon_0 (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \frac{\omega^2 \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \right) / \omega \epsilon_0 \epsilon_r \quad (1)$$

式中: γ 为纳米改性变压器油电导率; ϵ_0 为真空介电

常数; ϵ_s 和 ϵ_∞ 分别为纳米改性变压器油的静态介电常数和光频介电常数; ω 为外施交变电场的角频率; τ 为纳米改性变压器油中的松弛极化时间常数; ϵ_r 是纳米改性变压器油相对介电常数。

3.1 纳米改性变压器油电导率

本课题之前的研究^[13]表明, 纳米改性变压器油电导率主要由两部分构成: 第 1 部分为经典 Maxwell 电导公式中描述的固、液间电子迁移过程; 第 2 部分为发生电泳运动时纳米颗粒作为载流子对电导的贡献。纳米改性变压器油电导率模型为

$$\gamma = \sigma_f \left[1 + \frac{3\varphi}{(\alpha + 2)/(\alpha - 1) - \varphi} \right] + \frac{2\varphi \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 \zeta^2}{\eta_0 a^2} e^{\lambda(T - T_0)} \quad (2)$$

式中: σ_f 为纯净变压器油的电导率; φ 为纳米颗粒体积分数; $\alpha = \sigma_p / \sigma_f$ 为颗粒电导率与基液电导率的比值; ζ 为纳米改性变压器油的 Zeta 电位; η_0 为 40 °C 时变压器油动力黏度; a 为纳米颗粒半径; λ 为液体黏度指数; T 为纳米改性变压器油的温度。等号右边第一部分为 Maxwell 电导, 第二部分为电泳电导。

3.2 纳米改性变压器油中的极化

本课题之前的研究^[14-15]表明, 在外施电场作用下, 纳米改性变压器油除了油分子和纳米颗粒的极化外, 带电的纳米颗粒会同时发生布朗运动和沿外电场方向的定向排列, 形成类似极性分子的取向极化。所以, 可以认为在纳米改性变压器油中存在 3 种极化类型: 第 1 种是变压器油分子的极化; 第 2 种是纳米颗粒的内部极化; 第 3 种是两侧带电纳米颗粒的取向极化。图 4 为前 2 种极化类型的示意图。

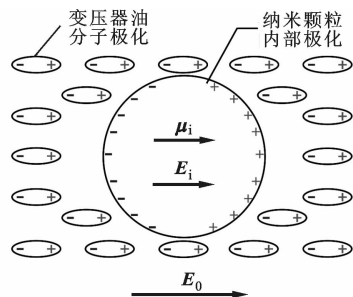


图 4 油中油分子极化和纳米颗粒内部极化示意图

考虑到纯净变压器油作为一种弱极性液体电介质, 在电场作用下主要发生电子极化, 介质损耗角正切值也主要取决于电导, 所以假设在纯净变压器油中不存在松弛极化, 即变压器油分子极化为瞬时位移极化, 而纳米颗粒本身的内部极化主要是电子极化或离子极化。结合上述 3 种纳米改性变压器油中的极化类型, 可以认为在纳米改性变压器油中纳米

颗粒取向极化是唯一的一种松弛极化类型。

由于松弛极化(有惯性极化)与瞬时位移极化(无惯性极化)共同构成电介质的极化现象,同时根据克劳修斯方程,可以将松弛极化强度 $\mathbf{P}_r$ 用静态介电常数 ϵ_s 和光频介电常数 ϵ_∞ 表示^[16]

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{P} - \mathbf{P}_\infty = \epsilon_0(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\mathbf{E}_0 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}_0$ 为外施电场强度。

由于纳米改性变压器油中纳米颗粒取向极化是唯一的松弛极化类型,根据极化强度的微观定义,将纳米颗粒取向极化强度 $\mathbf{P}_n$ 表示成关于极化率和电场强度的表达式为

$$\mathbf{P}_n = N\alpha_d\mathbf{E}_0 \quad (4)$$

式中: N 为单位体积中纳米颗粒数量; α_d 为纳米颗粒取向极化率。对于纳米改性变压器油, $\mathbf{P}_r$ 与 $\mathbf{P}_n$ 具有相同的物理含义,所以令 $\mathbf{P}_r = \mathbf{P}_n$, 即可得到关于 $\epsilon_s - \epsilon_\infty$ 的表达式

$$\epsilon_0(\epsilon_s - \epsilon_\infty) = N\alpha_d \quad (5)$$

3.3 纳米颗粒取向极化率 α_d

图5所示为单个球形纳米颗粒(直径为 $2a$, 相对介电常数为 ϵ_{r2})置于变压器油(相对介电常数 ϵ_{r1})连续介质中,并沿 X 轴方向施加强度为 $\mathbf{E}_0$ 的外部电场。在纳米颗粒表面会有极化电荷聚集,其中正电荷位于 $-\pi/2 < \varphi_p < \pi/2$ 范围内,负电荷位于 $\pi/2 < \varphi_p < 3\pi/2$ 范围内。表面极化电荷密度 σ_p 可以表示为

$$\sigma_p = \epsilon_0 E_0 \left(\frac{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}}{2\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}} \right) \cos\varphi_p \sin\theta_p \quad (6)$$

颗粒表面正极性电荷总量 Q_+ 可以通过对电荷密度 σ_p 积分得到

$$Q_+ = 4 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \sigma_p a^2 \sin\theta_p d\theta_p d\varphi_p = \pi a^2 \epsilon_0 E_0 \left(\frac{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}}{2\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}} \right) \quad (7)$$

为了把两侧带电的纳米颗粒模拟为极性分子,用一个距离为 $2a$ 的电偶极矩代替带电纳米颗粒,如图6所示。假设图6中极性分子的永久偶极矩 μ_c

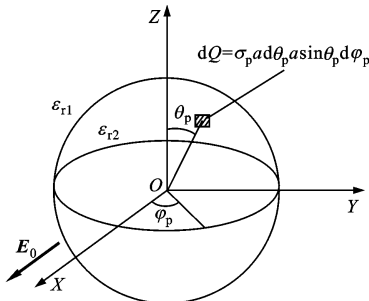


图5 连续介质中纳米颗粒表面极化电荷

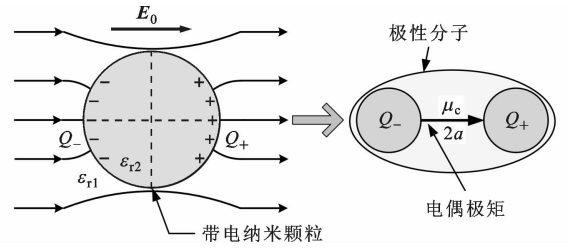


图6 带电纳米颗粒模拟为极性分子

是带电纳米颗粒发生取向极化时的电偶极矩,根据电偶极矩定义, μ_c 数值的计算表达式为

$$\mu_c = 2aQ_+ \quad (8)$$

同时根据偶极子取向极化理论,带电纳米颗粒的取向极化率 α_d 可以通过其电偶极矩来表示

$$\alpha_d = \frac{\mu_c^2}{3kT} = \frac{4}{3kT} a^2 Q_+^2 \quad (9)$$

式中: k 为波尔兹曼常数; T 为热力学温度。

另外,通过纳米颗粒体积分数 φ (ZnO) 和纳米颗粒半径 a , 可以计算得到纳米改性变压器油中单位体积的纳米颗粒数量 N , 其表达式为

$$N = \frac{\varphi}{V} = \frac{3\varphi}{4\pi a^3} \quad (10)$$

结合式(5)、式(7)、式(9)和式(10),可以将关于 $\epsilon_s - \epsilon_\infty$ 的表达式改写成

$$\epsilon_0(\epsilon_s - \epsilon_\infty) = \frac{\pi\varphi}{kT} a^3 \epsilon_0^2 E_0^2 \left(\frac{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}}{2\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}} \right)^2 \quad (11)$$

3.4 松弛极化时间常数 τ

松弛极化时间常数 τ 是标志材料极化弛豫过程快慢的特征量: τ 愈大,极化弛豫过程愈长,反之则极化弛豫过程愈短。根据德拜偶极转向极化理论,液体中电偶极子的运动可以看成半径为 a 的固体小球在宏观黏度为 η 的媒质中有“摩擦”地旋转。运用斯托克斯公式,液体摩擦系数 $\xi = 8\pi\eta a^3$ 。在外施电场作用下,偶极子具有沿电场方向的转动极矩,并克服周围分子的摩擦阻力,使其转动力与布朗运动作用力达到统计平衡。根据电偶极子电场旋转转矩与摩擦转矩平衡的条件,可以推得其松弛极化时间为^{[12]163-165}

$$\tau = \frac{\xi}{2kT} = \frac{4\pi\eta a^3}{kT} \quad (12)$$

结合3.2节的分析结果,纳米改性变压器油中两侧带电的纳米颗粒发生取向极化,形成了极化弛豫,所以将纳米颗粒看作偶极子,直接引用德拜偶极转向理论,纳米改性变压器油松弛极化时间常数可表示为

$$\tau = 4\pi\eta a^3 / kT \quad (13)$$

实际中改性变压器油纳米颗粒含量很少,可以忽略颗粒对黏度的影响。类似于改性变压器油电泳电导的研究,认为纳米流体的动力黏度随温度的变化满足^[13]

$$\eta = \eta_0 e^{-\lambda(T-T_0)} \quad (14)$$

根据式(14),在松弛极化中考虑动力黏度随温度变化后的松弛极化时间常数为

$$\tau = \frac{4\pi a^3}{kT} \eta_0 e^{-\lambda(T-T_0)} \quad (15)$$

式中: η_0 为温度 T_0 时改性变压器油的动力黏度, $\eta_0 = 8.54 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; λ 为液体的黏度指数, $\lambda = 0.02$; $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

取玻尔兹曼常数 $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$,通过式(15)计算可得,在温度从 $20 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ 的变化过程中,松弛极化时间常数 τ 介于 $1.335 \times 10^{-4} \sim 2.658 \times 10^{-5}$ 之间。同时,进一步讨论发现 $\omega\tau$ 的值为 $0.042 \sim 0.008$,即 $\omega\tau \ll 1$ 。对式(1)进行简化,纳米改性变压器油介质损耗角正切值表达式可改写如下

$$\tan \delta = \frac{\gamma + \epsilon_0(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega^2\tau}{\omega\epsilon_0\epsilon} \quad (16)$$

结合式(11)和式(16),可以得到纳米改性变压器油介质损耗角正切值的新模型,其计算表达式为

$$\tan \delta = \frac{\gamma}{\omega\epsilon_0\epsilon} + \frac{N\alpha_d\omega^2}{\omega\epsilon_0\epsilon} \frac{4\pi a^3}{kT} \eta_0 e^{-\lambda(T-T_0)} \quad (17)$$

其中等号右边第一部分为电导损耗,第二部分为纳米颗粒取向极化损耗

3.5 ZnO 纳米改性变压器油介质损耗

对于 ZnO 纳米改性变压器油,研究发现其电泳电导值远大于 Maxwell 电导值,所以在介质损耗角正切值的模型中可以将电泳电导率作为改性变压器油整体的电导率,其计算表达式为

$$\gamma = \frac{2\phi\epsilon_0^2\epsilon_{r1}^2\zeta^2}{\eta_0 a^2} e^{\lambda(T-T_0)} \quad (18)$$

将 ZnO 纳米改性变压器油的电导率和纳米颗粒微观形态参数代入式(18),同时设 $\omega_1 = \gamma$ 代表电导损耗部分, $\omega_2 = \epsilon_0(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega^2\tau$ 代表松弛极化损耗部分。计算结果显示 $\omega_1 \gg \omega_2$,这表明对于 ZnO 纳米改性变压器油电导损耗远大于极化损耗,其介质损耗角正切值主要由电导损耗决定。例如,体积分数为 0.1% 的 ZnO 改性油在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, ω_1 和 ω_2 的数值分别为 2.390×10^{-10} 和 3.212×10^{-16} ,所以 ZnO 纳米颗粒改性变压器油介质损耗角正切值表达式可进一步简化为

$$\tan \delta = \frac{\gamma}{\omega\epsilon_0\epsilon} = \frac{2\phi\epsilon_0\epsilon_{r1}^2\zeta^2}{\omega\epsilon\eta_0 a^2} e^{\lambda(T-T_0)} \quad (19)$$

结合文献[15]的研究结果,由于 ZnO 纳米改性变压器油的相对介电常数随颗粒体积分数和温度的变化比较小,基本介于 $2.18 \sim 2.06$ 之间,所以在式(19)的计算中可以认为 ϵ 为一常数, $\epsilon = 2.14$ 。

图 7 和图 8 为 ZnO 纳米改性油介质损耗角正切值实际测量和理论计算的比较情况,计算中,取 $\epsilon_{r1} = 2.11$, $\zeta = 21 \text{ mV}$, $\lambda = 0.02$,显然 ZnO 纳米改性油介质损耗角正切值的理论计算和实际测量吻合程度较高,但同时随着温度和颗粒体积分数的增大,两者之间的偏差有增大的趋势。这很可能是因为当纳米颗粒体积分数增大时,实际的纳米改性变压器油中存在颗粒团聚现象,电泳电导机理发生改变,原有模型存在一定的局限性。随着温度的升高,一方面由于纳米改性变压器油的黏度降低,有利于带电纳米颗粒的转向运动,增大了改性油中极化损耗;另一方面由于纳米颗粒布朗运动的加强也使得随机到达电极表面的载流子数量增大,促使电导率变大,进而增大了电导损耗。

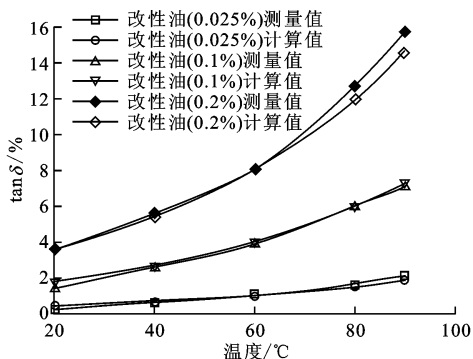


图 7 介质损耗角正切值随温度的变化

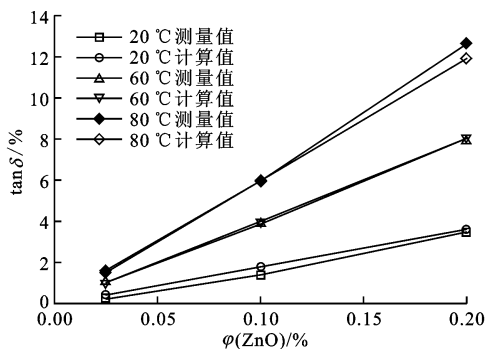


图 8 介质损耗角正切值随颗粒体积分数的变化

4 结 论

(1) 添加 ZnO 纳米颗粒明显增大了变压器油介质损耗角正切值。当纳米颗粒含量较低时,ZnO 纳米改性变压器油的介质损耗角正切值随纳米颗粒体

积分数的增加线性增大,而随环境温度的升高近似呈指数型增大。

(2)基于电导损耗和极化损耗两部分,可建立纳米改性变压器油介质损耗角正切值计算的新模型。其中,电导损耗取决于 Maxwell 电导模型和电泳电导,极化损耗主要表现为由纳米颗粒取向极化构成的松弛极化作用。

(3)对于 ZnO 纳米颗粒改性变压器油,由于纳米颗粒含量很少,其介质损耗角正切值主要由电导损耗决定,松弛极化损耗部分可以忽略不计。

(4)随着温度和颗粒体积分数的增加,介质损耗角正切值的理论计算值和实际测量值之间的偏差变大。这说明在较高的温度和纳米颗粒浓度的情况下,上述基于电导损耗和纳米颗粒松弛极化损耗的模型仍存在一定的局限性。

参考文献:

- [1] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 变压器油纸绝缘热老化特性及特征量研究 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (8): 27-33.
YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Huigang, et al. Investigation on properties and characteristics of oil-paper insulation in transformer during thermal degradation process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (8): 27-33.
- [2] 孙建锋,葛睿,郑力,等. 2010 年国家电网安全运行情况 [J]. 中国电力, 2011, 44(5): 1-4.
SUN Jianfeng, GE Rui, ZHENG Li, et al. Analysis of state grid safety operation in 2010 [J]. Electric Power, 2011, 44(5): 1-4.
- [3] CHOI U S. Developments and applications of non-Newtonian flows [M]. New York, USA: ASME Publication, 1995: 99-105.
- [4] CHOI C, YOO H, OH J. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle in transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants [J]. Current Applied Physics, 2008, 8(6): 710-712.
- [5] SEGAL V, HJORTSBERG A, RABINOVICH A, et al. AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles [C]//IEEE Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, USA: IEEE, 1998: 619-622.
- [6] 周远翔,王云杉,田冀焕,等. 纳米改性变压器油的破坏特性 [J]. 高电压技术, 2010(5): 1155-1159.
ZHOU Yuanxiang, WANG Yunshan, TIAN Jihuan, et al. Breakdown characteristics in transformer oil

modified by nanoparticles [J]. High Voltage Engineering, 2010(5): 1155-1159.

- [7] HWANG J G, ZAHN M, OSULLIVAN F M, et al. Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(1): 014310-014317.
- [8] DU Yuefan, LÜ Yuzhen, LI Chengrong, et al. Effect of electron shallow trap on breakdown performance of transformer oil-based nanofluids [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110 (10): 104104.
- [9] 缪金,董明,吴雪舟. 纳米改性变压器油研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 146-154.
MIAO Jin, DONG Ming, WU Xuezhou, et al. Reviews on transformer oil-based nanofluids [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 146-154.
- [10] DU Yuefan, LÜ Yuzhen, LI Chengrong, et al. Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19 (3): 770-776.
- [11] LI J, ZHANG Z, ZOU P, et al. Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(5): 43-50.
- [12] 陈季丹,刘子玉. 电介质物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [13] 缪金,董明,杨彦博,等. 纳米改性变压器油电导率改进模型 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 87-91.
MIAO Jin, DONG Ming, YANG Yanbo, et al. Modified electrical conductivity model for transformer oil-based nanofluids [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(2): 87-91.
- [14] MIAO Jin, DONG Ming, REN Ming, et al. Effect of nanoparticle polarization on relative permittivity of transformer oil-based nanofluids [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(20): 204103.
- [15] 缪金,董明,任明,等. ZnO 纳米改性变压器油的相对介电常数模型 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47 (8): 121-126.
MIAO Jin, DONG Ming, REN Ming, et al. Relative permittivity model of transformer oil-based nanofluids with ZnO nanoparticles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(8): 121-126.
- [16] 孙目珍. 电介质物理基础 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2010: 105-107.

(编辑 杜秀杰)