

DOI: 10.7652/xjtuxb201308021

ZnO 纳米改性变压器油的相对介电常数模型

缪金¹, 董明¹, 任明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相对介电常数的影响情况, 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相对介电常数随纳米颗粒体积分数和环境温度的变化规律, 并提出了基于克劳修斯-莫索提方程的纳米颗粒极化模型来解释纳米改性变压器油相对介电常数的变化机理。实验结果表明, 添加 ZnO 纳米颗粒将小幅度地增大变压器油的相对介电常数, 且相对介电常数随纳米颗粒体积分数线性增长, 随环境温度线性降低, 并且纳米颗粒极化模型的计算值与实验测量数据吻合较好。对所提模型的进一步分析表明, 纳米改性变压器油的相对介电常数主要由普通变压器油决定, 相比于普通变压器油, 纳米改性变压器油相对介电常数的增大主要是由纳米颗粒内部极化造成的。

关键词: 氧化锌纳米颗粒; 变压器油; 相对介电常数; 克劳修斯-莫索提方程; 纳米颗粒极化

中图分类号: TM214 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)08-0121-05

Relative Permittivity Model of Transformer Oil-Based Nanofluids with ZnO Nanoparticles

MIAO Jin¹, DONG Ming¹, REN Ming¹, WU Xuezhou¹, SHEN Liangpin², 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 semiconductive ZnO nanoparticles is prepared to investigate the influences of adding nanoparticles on relative permittivity of transformer oil. How the NF relative permittivity depends on nanoparticles' volumetric concentration and environmental temperature is also discussed. A nanoparticle polarization model following Clausius-Mossotti equation is proposed. Experiments show that the ZnO NF relative permittivity linearly increases with nanoparticles' volumetric concentration and linearly decreases with temperature. The calculation with the nanoparticle polarization model coincides well with the experimental data. The further analysis for the proposed model suggests that NF relative permittivity is dominantly determined by ordinary transformer oil, while the higher relative permittivity of NFs than pure transformer oil mainly results from the inner polarization of nanoparticles.

Keywords: ZnO nanoparticle; transformer oil; relative permittivity; Clausius-Mossotti equation; nanoparticle polarization

收稿日期: 2013-02-09。 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; 西安交通大学电力设备国家重点实验室创新基金资助项目(EIPE13311)。

网络出版时间: 2013-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130617.1818.011.html>

油纸绝缘作为一种成熟的绝缘技术在大型电力设备中广泛应用,特别是在变压器和电感器中。随着设备运行时间的增加,油纸绝缘结构在电、磁、机械等多种物理因素作用下,暴露出越来越严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],进而大大降低了电力系统的安全可靠性。调查显示,2005~2010 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业内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]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 2~3 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的电气特性。

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能力比普通油高近 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]在多物理场仿真的基础上,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]通过热刺激电流法测试纳米改性变压器油的陷阱特性发现,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的研究主要集中在它的导热性能和放电击穿特性等方面^[9-11],尚未涉及相对介电常数、介损值等评价绝缘材料基本电气特性的参数。

本文在制备 ZnO 半导体纳米颗粒改性变压器油的基础上,研究了纳米改性变压器油的相对介电常数随纳米颗粒体积分数和温度的变化关系,提出了基于克劳修斯-莫索提方程的纳米颗粒极化模型来解释纳米改性变压器油相对介电常数的变化规律。

1 实验

1.1 纳米改性变压器油制备

实验中 ZnO 纳米颗粒(Sigma-Aldrich 677450)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 纳米改性变压器油样。图 1 为 ZnO 颗粒分散在乙醇中的电子透射显微镜(TEM)照片,可以看出 ZnO 颗粒大小均匀,直径约为 30 nm。为了防止化学添加剂的干扰,实验中使用的 ZnO 颗粒未进行表面化学处理,同时上述纳米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。

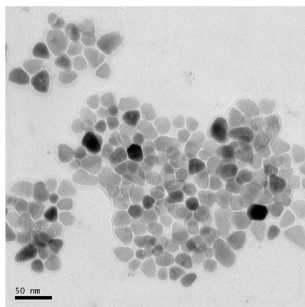


图 1 ZnO 纳米颗粒 TEM 照片

1.2 相对介电常数测量

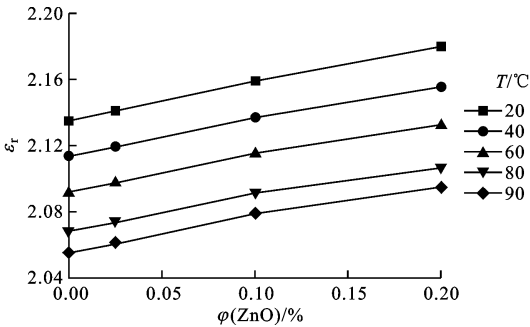
实验中 ZnO 纳米改性变压器油所含颗粒体积分数分别为 0.025%、0.1% 和 0.2%。测量仪器为 DX6100 一体化绝缘油精密参数测试仪,测试油杯按照 IEC 60247 标准,采用三极式结构油杯,电极间距为 2 mm。实验中施加 2 kV 工频交流电压,测量上述 3 种改性油样在不同温度下相对介电常数。

2 实验结果

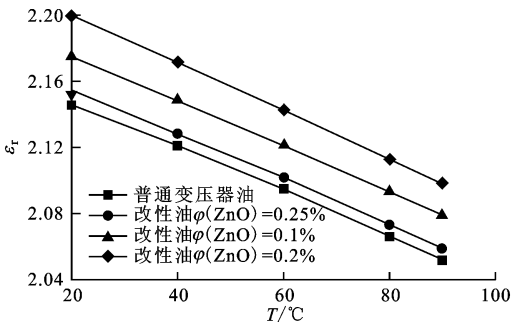
实验结果显示,ZnO 纳米改性变压器油的相对介电常数与纳米颗粒体积分数和温度线性相关。图 2a 所示为不同温度下 ZnO 改性变压器油相对介电常数随颗粒体积分数的变化情况,从图中可以看出,相对介电常数随着颗粒体积分数的增加而线性增大。在 20 °C 时,普通变压器油相对介电常数为 2.135,而此时颗粒体积分数为 0.2% 的改性变压器油的相对介电常数为 2.180,比普通变压器油高了近 2.11%。

图 2b 为普通变压器油和 ZnO 改性变压器油的相对介电常数随温度的变化关系,从图中可以看出,相对介电常数随着温度的升高而线性减小。对于颗粒体积分数为 0.1% 的 ZnO 改性变压器油,当温度

从 20℃ 升高到 90℃ 时,其相对介电常数从 2.159 减小到 2.079。



(a) 相对介电常数随纳米颗粒体积分数的变化



(b) 相对介电常数随温度的变化

图 2 ZnO 纳米颗粒体积分数和温度对普通变压器油和 ZnO 改性变压器油的相对介电常数的影响

3 Maxwell-Garnett 经验公式

目前,针对纳米改性变压器油相对介电常数的研究还比较少,为了解释纳米改性变压器油相对介电常数的变化机理,引入 Maxwell-Garnett 经验公式^[12]。Maxwell-Garnett 公式常用来预测一种球形电介质分散到另一种连续电介质中所形成的新型混合电介质的相对介电常数,其表达式如下

$$\frac{\epsilon_{r,n} - \epsilon_{r2}}{\epsilon_{r,n} + 2\epsilon_{r2}} = \phi \frac{\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1} + 2\epsilon_{r2}} \quad (1)$$

式中: ϵ_{r1} 和 ϵ_{r2} 分别为连续电介质和球形电介质的相对介电常数; $\epsilon_{r,n}$ 是混合电介质的相对介电常数; ϕ 是球形电介质的体积分数。

图 3 所示分别为 20℃ 和 60℃ 下, ZnO 纳米改性变压器油相对介电常数的实验测量值和 Maxwell-Garnett 公式计算值的比较。从图中可以看出, 计算值明显小于实验测量值, 这说明 Maxwell-Garnett 公式并不适用于纳米改性变压器油相对介电常数的预测。

在式(1)中,当颗粒体积分数很小时,球形电介

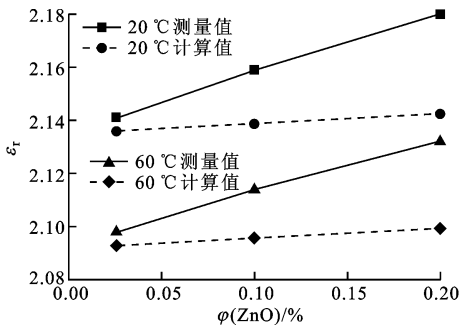


图 3 相对介电常数测量值和计算值的比较

质对混合电介质相对介电常数的贡献几乎可以忽略不计。事实上,对于纳米改性变压器油,纳米颗粒体积分数非常小,从而在计算中忽略了它的作用。为了把纳米颗粒对改性变压器油相对介电常数的贡献考虑进去,提出了纳米颗粒极化模型。

4 纳米颗粒极化模型

4.1 纳米改性变压器油中的极化

对于电场中的纳米改性变压器油,油分子和纳米颗粒都会被极化。在纳米颗粒两侧会出现正负极性的表面极化电荷,从而使得纳米颗粒表面带电。从介观尺度进行分析,两侧带电的纳米颗粒在外施电场中会产生两种运动趋势,一种是纳米颗粒无规则热运动,另一种是两侧带电的纳米颗粒在电场作用下沿着电场方向定向排列。这和极性分子在电场中的运动十分类似,可以认为带电纳米颗粒发生类似极性分子的取向极化。

因此,可以认为在外施电场下的纳米改性变压器油中存在 3 种不同类型的极化现象:①变压器油分子的极化;②纳米颗粒的内部极化;③两侧带电的纳米颗粒发生类似极性分子的取向极化。图 4 所示为前两种极化的示意图。

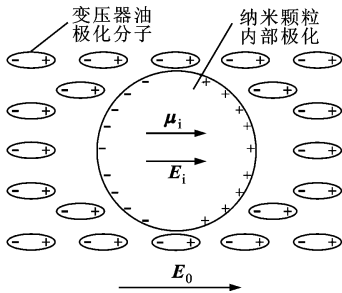


图 4 油分子极化和纳米颗粒内部极化示意图

根据克劳修斯-莫索提方程^[13]所描述的宏观相对介电常数与微观极化参数之间的关系,纳米改性变压器油的相对介电常数 $\epsilon_{r,n}$ 可以表示为

$$\frac{\epsilon_{r,n} - 1}{\epsilon_{r,n} + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} (N_1\alpha_1 + N_2\alpha_2 + N_3\alpha_3) \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为真空的介电常数; α_1 为单个变压器油分子的极化率; α_2 为由内部极化造成的单个纳米颗粒的极化率; α_3 为单个带电纳米颗粒的取向极化率; N_1 和 N_2 分别为单位体积变压器油分子和纳米颗粒数量。

4.2 纳米颗粒表面极化电荷

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(相对介电常数为 ϵ_{r1}) 连续介质中, 沿 X 轴方向施加强度为 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 $-\frac{\pi}{2} < \phi_p < \frac{\pi}{2}$ 范围内, 负电荷位于 $\frac{\pi}{2} < \phi_p < \frac{3\pi}{2}$ 范围内。表面极化电荷密度 σ_p 可以表示为

$$\sigma_p = \epsilon_0 E_0 \left(\frac{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}}{2\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}} \right) \cos\phi_p \sin\theta_p \quad (3)$$

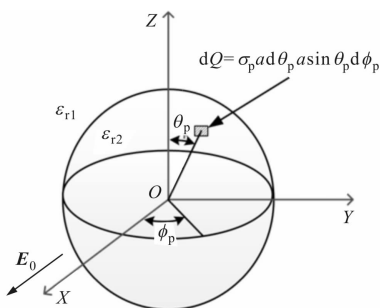


图5 连续介质中纳米颗粒表面产生的极化电荷

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

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

负极性电荷总量 Q_- 和正极性电荷总量 Q_+ 同样大小。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。

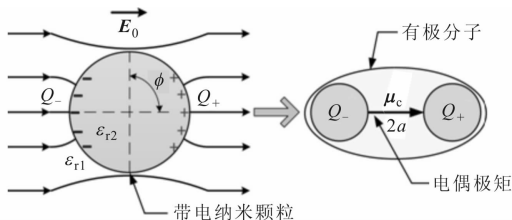


图6 将带电纳米颗粒模拟为极性分子

假设图6中极性分子的永久偶极矩 μ_c 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 的表达式为

$$\mu_c = 2aQ_+ \quad (5)$$

4.3 变压器油分子极化率

对于普通变压器油, 在使用克劳修斯-莫索提方程描述其相对介电常数时, 只需要考虑变压器油分子的极化率 α_1 和单位体积分子数目 N_1 , 其表达式为

$$\frac{\epsilon_{r1} - 1}{\epsilon_{r1} + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} N_1 \alpha_1 \quad (6)$$

为了得到 α_1 和 N_1 的乘积, 将式(6)变换为

$$N_1 \alpha_1 = 3\epsilon_0 \frac{\epsilon_{r1} - 1}{\epsilon_{r1} + 2} \quad (7)$$

将实验测得的不同温度下普通变压器油的相对介电常数代入式(7), 即可得到对应温度下的 $N_1 \alpha_1$ 。

4.4 纳米颗粒极化率

如图4所示, 变压器油中的球形纳米颗粒在外电场 E_0 的作用下, 其内部电场强度 E_i 可以表示为

$$E_i = \frac{3\epsilon_{r1}}{2\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}} E_0 \quad (8)$$

纳米颗粒内部极化矢量为

$$P_i = \epsilon_0 (\epsilon_{r2} - 1) E_i \quad (9)$$

图4中纳米颗粒内部所有电偶极矩的矢量和可以表达为

$$\mu_i = P_i V \quad (10)$$

式中: V 为纳米颗粒体积。根据极化率的定义, 单个纳米颗粒的极化率 α_2 可以表示为

$$\alpha_2 = \frac{\mu_i}{E_i} = \epsilon_0 (\epsilon_{r2} - 1) V \quad (11)$$

另外, 通过纳米颗粒体积分数 φ 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_2 , 其表达式如下

$$N_2 = \frac{\varphi}{V} = \frac{3\varphi}{4\pi a^3} \quad (12)$$

4.5 带电纳米颗粒取向极化率

根据偶极子取向极化的理论, 带电纳米颗粒的取向极化率 α_3 可以通过其电偶极矩 μ_c 来表示, 表达式为

$$\alpha_3 = \frac{\mu_c^2}{3kT} = \frac{4}{3kT} a^2 Q_+^2 \quad (13)$$

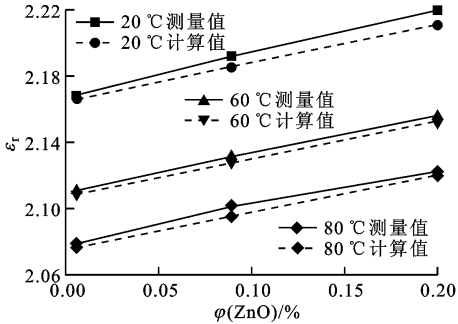
式中: k 为波尔兹曼常数; T 为热力学温度。

结合式(2)、式(4)、式(7)、式(11)、式(12)和式(13), 基于克劳修斯-莫索提方程的纳米颗粒极化模型可以表示为

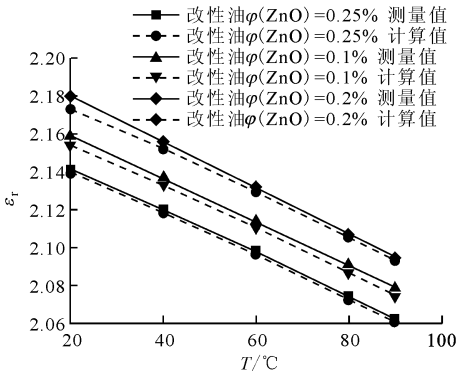
$$\frac{\epsilon_{r,n}-1}{\epsilon_{r,n}+2}=\frac{\epsilon_{r1}-1}{\epsilon_{r1}+2}+\frac{\varphi}{3}(\epsilon_{r2}-1)+\frac{\varphi}{3kT}\pi\epsilon_0a^3E_0^2\left(\frac{\epsilon_{r2}-\epsilon_{r1}}{2\epsilon_{r1}+\epsilon_{r2}}\right)^2\tag{14}$$

由式(14)可以看出:变压器油相对介电常数 ϵ_{r1} 随温度变化,且可以通过实验测量获得不同温度下 ϵ_{r1} 的值;ZnO 纳米颗粒的相对介电常数 $\epsilon_{r2}=11.0$, 为一常数; E_0 为实验油杯内的电场强度,可以通过施加电压和电极间距计算得到, $E_0=1\times10^6$ V/m。

将不同温度下测量得到的变压器油相对介电常数 ϵ_{r1} 和 ZnO 纳米改性油的体积分数 φ 代入式(14),可以得到相应改性油在不同温度下的相对介电常数 $\epsilon_{r,n}$ 。图 7 为根据新模型得到的 ZnO 改性变压器油相对介电常数的计算值和实验测量值的比较,其中纳米颗粒半径 $a=15$ nm。图 7a 所示分别为 20、60 和 80℃下相对介电常数随纳米颗粒体积分数的变化关系。图 7b 为不同纳米颗粒体积分数下相对介电常数随温度的变化。显然,通过在模型中考虑纳米颗粒对改性变压器油相对介电常数的影响,理论计算值和实验测量结果很好地吻合。



(a) 相对介电常数随纳米颗粒体积分数的变化



(b) 相对介电常数随温度的变化

图 7 相对介电常数实验测量值和纳米颗粒极化模型计算值的比较

对上述纳米颗粒极化模型进一步分析,比较变压器油、纳米颗粒内部极化和带电纳米颗粒取向极

化 3 部分对纳米改性变压器油相对介电常数的影响程度。结果显示,由于纳米改性变压器油中纳米颗粒的含量很少,所以 $N_1\alpha_1$ 的值远大于 $N_2\alpha_2$ 和 $N_2\alpha_3$ 的值,这表明纳米改性变压器油的相对介电常数主要取决于变压器油。同时, $N_2\alpha_2$ 的值也比 $N_2\alpha_3$ 的值大很多,说明与普通变压器油相比,纳米改性变压器油相对介电常数较高,主要是由纳米颗粒内部极化造成的。以 60℃时颗粒体积分数 0.1%的 ZnO 纳米改性变压器油为例, $N_1\alpha_1$ 、 $N_2\alpha_2$ 和 $N_2\alpha_3$ 的计算值分别为 7.088×10^{-12} 、 8.854×10^{-14} 和 6.225×10^{-17} 。

5 结 论

(1)当纳米颗粒含量较低时,和普通变压器油相比,ZnO 纳米改性变压器油的相对介电常数有小幅增大,且改性油的相对介电常数随纳米颗粒体积分数的增加而线性增大,而随温度的升高线性减小。

(2)由于纳米改性变压器油中纳米颗粒的含量很少,在 Maxwell-Garnett 经验公式中几乎忽略了纳米颗粒对改性油相对介电常数的贡献,所以 Maxwell-Garnett 经验公式并不适用于对纳米改性变压器油相对介电常数的预测。

(3)在克劳修斯-莫索提方程中,除原有的变压器油分子极化外,通过引入微观纳米颗粒内部极化和带电纳米颗粒取向极化,强化纳米颗粒对改性变压器油相对介电常数的贡献。以上述 3 种极化为基础建立的纳米颗粒极化模型,能够较好地解释 ZnO 纳米改性变压器油相对介电常数的变化规律。对模型的进一步分析认为,纳米改性变压器油的相对介电常数主要取决于变压器油性质;与普通变压器油相比,纳米改性变压器油相对介电常数较高,主要是由纳米颗粒内部极化造成的。

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] // Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, NJ, 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] 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.
- [10] 刘君,周利军,吴广宁. 纳米改性变压器油—纸复合绝缘频率响应特性 [J]. *中国电机工程学报*, 2011,31(28):144-153.
LIU Jun, ZHOU Lijun, WU Guangning. Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation modified by nanoparticles [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011,31(28):144-153.
- [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] 萨法·卡萨普. 电子材料与器件原理 [M]. 汪宏,译. 西安:西安交通大学出版社, 2009:544-545.
- [13] 陈季丹,刘子玉. 电介质物理学 [M]. 北京:机械工业出版社,1982:103-111.

[本刊相关文献链接]

- 张振军,苗军,王学强,等. 改性聚酰亚胺的真空直流沿面闪络特性. 2013, 47(4):51-56. [doi:10.7652/xjtuxb201304010]
- 缪金,董明,杨彦博,等. 纳米改性变压器油电导率改进模型. 2013, 47(2):87-91. [doi:10.7652/xjtuxb201302015]
- 韩龙飞,钱军民,崔宁. ZnO 纳米线的控制生长及在染料敏化太阳能电池中的应用. 2013, 47(1): 90-95. [doi:10.7652/xjtuxb201301018]
- 何良,李盛涛,张拓. $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 绝缘结构的真空沿面闪络特性. 2012, 46(2):93-99. [doi:10.7652/xjtuxb201202016]
- 夏玉静,管自生,贺涛. Co 掺杂 ZnO 纳米粉体的结构和光学性能. 2011, 45(7):65-69. [doi:10.7652/xjtuxb201107013]
- 周健儿,胡学兵,包启富,等. 纳米 ZnO 改性在 ZrO_2 微滤膜油水分离过程中的作用. 2011, 45(2):117-120. [doi:10.7652/xjtuxb201102024]
- 卢为,成永红,王增彬,等. 环氧及其复合材料在变压器油中的快脉冲闪络特性. 2010, 44(10):83-87. [doi:10.7652/xjtuxb201010016]
- 任双赞,钟力生,于钦学,等. 变压器油加速热老化过程中的多参量相关-回归分析. 2010, 44(10):88-92. [doi:10.7652/xjtuxb201010017]
- 任双赞,钟力生,刘强,等. 变压器油流动带电度的微静电测量方法及其影响因素. 2010, 44(8):96-100. [doi:10.7652/xjtuxb201008019]
- 李远洁,李金逵,胡晓芬. 射频溅射功率密度对 Ga:ZnO 透明导电薄膜性能的影响. 2010, 44(8): 58-62. [doi:10.7652/xjtuxb201008012].
- 张雯,张庆腾,贺永宁. ZnO 纳米线膜的可控生长及其量子限域效应研究. 2010, 44(4):82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201004018]
- 陈曦,于钦学,任文娥,等. 变压器油的热分解动力学研究及其寿命预测. 2009, 43(8):112-115. [doi:10.7652/xjtuxb200908023]
- 司文荣,李军浩,袁鹏,等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析. 2008, 42(4):481-486. [doi:10.7652/xjtuxb200804022]
- 朱长纯,陈文会,文常保. ZnO 薄膜声表面波型 SF_6 气体传感器的研究. 2008, 42(4):445-449. [doi:10.7652/xjtuxb200804019]

(编辑 杜秀杰)