

电力变压器油分类及研究进展

胡学超¹,张秀琦¹,赵 靖²,周 攀³,薛守洪¹

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司,内蒙古 呼和浩特 010020;2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司锡林郭勒供电分公司,内蒙古 锡林 026000;3. 江西江投能源技术研究有限公司,江西 南昌 330000)

摘 要:变压器油具有优良的绝缘、冷却、灭弧及信息载体作用,其性能质量直接关系到变压器的稳定运行和服役寿命;随着构建新型电力系统与实现“双碳”战略目标,对变压器油电气性能、理化性能与环保性能提出更高要求,研究替代矿物变压器油的液体绝缘介质成为当前变压器发展的新热点。文中分别介绍了矿物变压器油、植物变压器油、硅油变压器油、合成酯变压器油和纳米改性变压器油的性能优劣与应用情况,指出电气性能优异的植物变压器油和生物降解性良好的合成酯变压器油有望替代传统矿物变压器油广泛应用于新型电力系统。

关键词:变压器油;理化和电气性能;研究进展

中图分类号:TM 215 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)03-0043-05

0 引言

随着新型可再生能源与直流电力电子设备大规模并网,电力系统对设备稳定性的要求持续升级。作为输配电系统的核心,油浸式变压器承担着电能转换与传输的关键任务,而变压器油作为其绝缘、散热、灭弧及状态监测的核心介质,直接关系到设备安全与电网可靠运行。传统矿物变压器油虽凭借低廉成本与良好电气性能沿用138年,但其生物降解率低、氧化安定性不足等缺陷日益凸显,尤其在“双碳”目标驱动下,亟需开发环境友好、性能更优的替代油品以支撑新型电力系统建设。

当前,植物变压器油、硅油变压器油、合成酯变压器油及纳米改性变压器油等新型变压器油展现出差异化优势,但均存在应用局限:植物变压器油(如菜籽油、大豆油衍生物)不仅电气性能优于矿物油,且生物降解率高达97%以上^[1],其亲水性还可延缓绝缘纸老化^[2],但因分子中大量不饱和脂肪酸易氧化变质,需依赖抗氧化剂与实时监测;硅油变压器油以卓越的绝缘性与耐高温特性适配严苛环境,但因

成本高昂且运行温度低,仅限于小容量变压器使用;合成酯变压器油凭借抗燃性高、氧化寿命长等优势,已在国内标准动车组等场景规模化应用^[3],但其原料纯度要求严苛,工艺复杂度推高成本;纳米改性变压器油通过添加 SiO_2 、 TiO_2 等纳米颗粒可提升导热率与击穿电压,但纳米颗粒长期老化行为仍制约其工程化应用。

1 变压器油分类

变压器的液体绝缘介质主要分为矿物变压器油、植物变压器油、硅油变压器油、合成酯变压器油和纳米改性变压器油五类。目前市场常用的变压器油主要为矿物变压器油,约占95%以上,合成酯变压器油、硅油变压器油、纳米改性变压器油和植物变压器油用量较少,仅占不到5%^[4]。

1.1 矿物变压器油

矿物变压器油是电力设备最常用的一种变压器油,主要由石油馏分经处理和精炼而得,价格低廉,但不可再生。矿物变压器油具有优良的电气性能和热工性能^[5],如表1所示,新矿物变压器油击穿电压不小

收稿日期:2024-12-07

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助项目(变压器油复合抗氧化剂的筛选及其电化学检测方法研究,2021BS05005)。

作者简介:胡学超(1987),男,博士,高级工程师,主要从事绝缘电介质材料、电化学储能、电力用油及设备状态感知等的研究与应用工作。

于 70 kV,介质损耗因数不大于 0.5%,油中含气量不大于 1%,界面张力不小于 40 mN/m,酸值不大于 0.01 mg/g。虽然矿物变压器油的绝缘性、散热性、稳定性较好,但其闪点较低,一般在 140 ℃左右,防火性能较差,尤其在高温、高压、强电场等条件下容易发生氧化反应,导致劣化。

表 1 变压器油重要质量指标

特性	检测项目	矿物变压器油
电气特性	击穿电压/kV	≥70
	介质损耗因数(90 ℃)/%	≤0.5
	体积电阻率(90 ℃)/(Ω·m)	≥10 ¹⁰
	油中含气量(体积分数)/%	≤1
物理特性	闪点(闭口)/℃	≥135
	界面张力(25 ℃)/(mN/m)	≥40
	颗粒污染度/粒	≤1 000
	二苯基二硫醚含量/(mg/kg)	<5
	2-糠醛含量/(mg/kg)	≤0.1
	稠环芳烃含量/%	≤3
化学特性	酸值(以 KOH 计)/(mg/g)	≤0.01
	腐蚀性硫	无腐蚀性
	水溶性酸(pH 值)	>5.4

传统的矿物变压器油在 1887 年就应用于电气设备,随着对其性能质量要求的提高,运行中矿物变压器油表现出的氧化安定性无法满足新型电力系统要求;燃点和闪点低难以满足绿色可持续发展要求;全球石油产量逐年下降,不可再生资源面临严重威胁;矿物变压器油难以生物降解,泄漏后会污染环境;随着国内外对变压器油环境友好性的关注^[6],研究替代矿物变压器油的液体绝缘介质成为当前变压器发展的新热点。

1.2 植物变压器油

在探索电力设备新绝缘材料过程中,植物变压器油凭借其优良的电气和理化特性逐渐应用于各类变压器。表 2 列出了植物变压器油的重要指标^[7]。电气性能方面,植物变压器油的击穿电压比矿物变压器油大,电气强度比矿物变压器油高;植物变压器油的介电常数与固体绝缘材料更接近,约为 3,能使变压器中固体绝缘材料的电场分布更均匀,其电气性能优于矿物变压器油。老化特性方面,在 120 ℃~130 ℃热老化状态下,植物油变压器内绝缘材料的老化速率比矿物油变压器内绝缘材料更慢。物理特性方面,植物变压器油的闪点为 325 ℃,明显高于矿物变压器油的 140 ℃,安全性更好;矿物变压器油中主要成分是烷烃、环烷烃和少量芳香烃,对水分的排斥程度很大。而植物变压器油中主要成分是脂肪酸甘油三酯,具有吸水性,因此,变压器固体绝缘材料中的水分会自然

进入油中,从而对变压器绝缘纸起到很好的保护作用,延长绝缘纸使用寿命。植物变压器油的运动黏度为 42.58 mm²/s,明显高于矿物变压器油的 8.99 mm²/s,散热能力较差,但植物变压器油具有较高的热传导率,可在一定程度上弥补运动黏度大的缺陷。此外,植物变压器油的倾点高于矿物变压器油,低温性能有待提高,尤其是其寒冷环境适用性较差。油液来源方面,矿物变压器油主要由石油提炼而成,而植物变压器由油料作物压榨精炼而成,原料来源广泛,产量更加丰富。化学特性方面,因为植物变压器油中的脂肪酸甘油三酯极易水解,所以新植物变压器油的酸值较新矿物变压器油高。

表 2 植物变压器油与矿物变压器油重要指标比较

特性	检测项目	植物变压器油	矿物变压器油
电气特性	击穿电压/kV	73	70
	介质损耗因数(90℃)/%	0.75	0.05
电气特性	体积电阻率/(Ω·m)	7×10 ¹⁰	6×10 ¹⁰
	相对介电常数	2.99	2.19
物理特性	闪点/℃	325	140
	运动粘度(40℃)/(mm ² /s)	42.58	8.99
	倾点/℃	-31	-43
化学特性	酸值(以 KOH 计)/(mg/g)	0.040	0.008

最初开发和使用高燃点植物变压器油的主要目的是满足军事设施、矿山矿井等对防火、消防的安全要求,这些特殊场所要求使用的变压器能够耐受高温,并具有良好的阻燃性能。美国及欧洲等国外研究者对植物油进行了前瞻性研究。ABB 公司于 1999 年生产出可使用植物油的变压器,此类变压器在油箱顶层充入氮气来隔绝空气,以降低植物变压器油的氧化速度^[8]。日本富士电机公司制造出环境性能好、形体轻便的植物油配电变压器,并已投入运行^[9]。此外,美国研究者在不改变现有配电变压器型式结构的情况下,直接用植物变压器油替换矿物变压器油,研究发现,植物油能够在延缓绝缘纸老化、延长变压器寿命方面起到明显作用^[10]。近年来,植物变压器油的介质损耗因数、运动黏度、凝点、倾点、复合添加剂等领域的开发研究也备受关注。

1.3 硅油变压器油

硅油为人工合成的一种化合物,并非从石油中分离和提炼而成,其良好的电气绝缘性和耐高温性,已被应用于特殊变压器中。硅油的分解产物为环状有机硅分子,蒸发到空气中可进一步分解为水、二氧化碳和二氧化硅水合物,对环境无污染,长期使用后硅油不会累积和残留;而使用其它种类变压器油的分解

产物有毒性,会对环境造成污染,美国、日本和欧洲一些国家已用硅油替代矿物油用作变压器液体绝缘介质。

从表3中可以看出,硅油变压器油除拥有优良的电气绝缘性能外,还拥有倾点低、燃点高、黏温性能好等优点^[11-12]。其倾点能达到-60℃,非常适合应用于高寒地区变压器的冷态投运;硅油的自燃温度高达360℃,并且具有自熄灭性能,热稳定性明显高于矿物变压器油。硅油的危害性试验证明其安全性良好,几乎无毒,对皮肤无任何刺激。相较于矿物油,硅油拥有更小的介质损耗因数、更大的体积电阻率,电气性能比较理想。硅油可与变压器中常用的各种材料相容,材料相容性突出。但有研究表明^[13],硅油变压器油运行温度不宜过高,其对击穿分解物很敏感,尤其在电压重复击穿条件下,绝缘强度明显降低,所以当前硅油变压器油只应用于35 kV及以下电压等级的变压器。国内外一些研究者正致力于改善硅油综合性能的研究。

表3 硅油与矿物变压器油的重要指标比较

特性	检测项目	硅油变压器油	矿物变压器油
电气特性	介质损耗因数(90℃)	0.0003	0.0040
	击穿电压/kV	75	70
	运动粘度(40℃)/(mm ² /s)	37.00	8.99
物理特性	倾点/℃	-60	-43
	冷态投运温度/℃	-52	-34
	水分/(mg/kg)	38.0	8.8
	闪点/℃	290	140
化学特性	酸值(以KOH计)/(mg/g)	0.002	0.008

1.4 合成酯变压器油

合成酯变压器油是由合成酯类化合物制备而成,其电气绝缘性、热稳定性、抗氧化性和耐腐蚀性俱佳。合成酯变压器油可以由多元醇酯、双酯和三酯等不同的酯类化合物制成,该类化合物的物理与化学性质多样,使得合成酯变压器油在特定应用中具有不同优势。某些酯类化合物可以在高温下保持稳定的电气性能,而其他酯类化合物则可能在低温下具有更好的流动性,所以对于合成酯变压器油的选择取决于应用场景的具体要求。如表4所示,合成酯变压器油的燃点为315℃^[14],明显高于矿物变压器油的165℃;其拥有更高的击穿电压,可达80 kV;最大的优势为易于生物降解,如图1所示。合成酯变压器油生物降解性优良,在微生物存在的环境中,15天降解率可达到70%以上,30天降解率就能达到90%,降解产物无毒

害^[15]。对于矿物变压器油、硅油变压器油,最大劣势在于生物降解能力差,自然界无法将其分解。当用油设备发生泄漏时会对环境造成严重污染;而合成酯在自然界中能短时间内被活性微生物降解为水和二氧化碳,对环境无污染。

表4 合成酯变压器油与矿物变压器油的重要指标对比

特性	检测项目	矿物变压器油	合成酯变压器油
电气特性	击穿电压/kV	70	80
	介质损耗因数(90℃)	0.004	0.010
物理特性	闪点/℃	140	260
	燃点/℃	165	315
	烟雾指数/min	4	17
化学特性	酸值(以KOH计)/(mg/g)	0.008	0.020
	生物降解性(30天)/%	9.7	90.0

合成酯在欧洲一些国家的风能、海洋、船舶、输电等领域得到广泛应用,逐渐开始替代矿物油,成为高环保要求环境中变压器的重要绝缘介质,并且在大功率电力元件冷却、户内环保型电力变压器领域进行同步开发。由于合成酯的特殊可靠性和优越防火性,近年来,国外市场需求量逐年增加。根据使用经验及综合分析,合成酯的加压稳定性、运行寿命明显优于矿物油和植物油,但是合成酯变压器油的成本较高,水解安定性有待提高。由于合成酯变压器油具有许多优势,阿尔斯通、西门子、ABB等公司正在推动合成酯变压器油成为轨道交通设备、海上风电变压器、油田特种变压器等的首选油,国际学者正在进一步研究制定其相关标准。

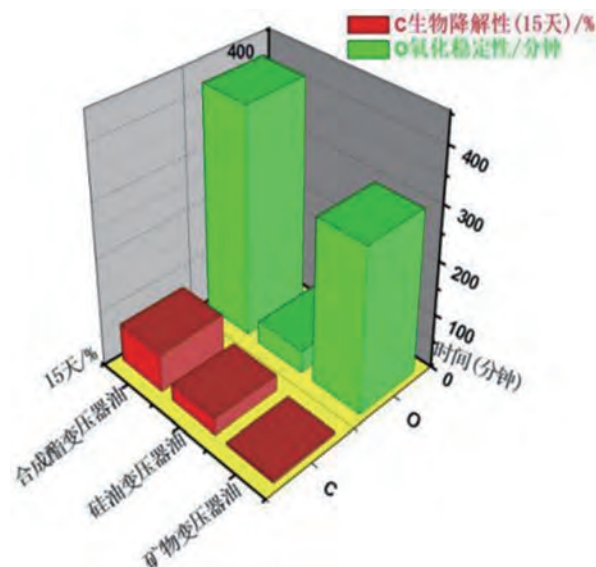


图1 不同类型变压器油的生物降解性及加压稳定性

1.5 纳米改性变压器油

单纯的矿物变压器油热导率不高,击穿电压较

低,近年来,多家机构采用不同纳米改性材料加入矿物变压器油中,进一步提高矿物变压器油的散热性能和电气性能,纳米材料对矿物变压器油质量改进研究受到越来越广泛的关注^[16]。纳米改性变压器油是指在液体绝缘介质中添加纳米颗粒,通过将一定质量的直径小于 100 nm 的固体颗粒均匀分散到变压器油中,形成稳定胶体体系。这种改性变压器油在导热、击穿电压、抗老化、水分含量等方面具有优势,可以提高变压器油的电气性能和可靠性。上世纪九十年代末,美国首次将纳米颗粒添加到传统液体中制备出新型液体绝缘介质,明显提高了液体的介电和导热性能,促进了纳米技术在介质中电学和传热学的应用^[17]。国内外研究发现,利用固体纳米氧化物颗粒对变压器油进行改性可以有效提高变压器油的交直流击穿电压、热传导性能和稳定性等性能^[18]。目前改性变压器油研究中所使用的纳米颗粒绝大多数为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 等单一氧化物粒子。表 5 为常见的一些氧化物对变压器油的改性情况,对比了颗粒含量接近的击穿电压、改性前后的热导率相对值等性能^[19]。在众多氧化物中, Al_2O_3 改善变压器油的击穿电压性能并不是最佳,但其改善变压器油的导热能力较强。此外,用 $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合纳米粒子改性变压油后,其击穿电压性能和热导率都优于单纯 Al_2O_3 改性变压器油,但其介质损耗因数比改性前增大,然而复合纳米粒子改性变压器油研究较少,综合性能还需优化。

表 5 不同氧化物纳米粒子改性变压器油的特性对比

改性变压器油	击穿电压/kV	热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
TiO_2 纳米粒子	65.0	1.09
SiO_2 纳米粒子	70.0	1.11
Al_2O_3 纳米粒子	60.0	1.13
$\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米粒子	63.9	1.15

综上所述,基于变压器油理化性能、电气性能、使用环境及其在电气设备中所起作用,对五种变压器油的综合性能进行对比。矿物变压器油价格低廉,电气和热工性能优良,但其闪点、燃点较低,不易降解也不可再生,尤其在高温及强电场条件下容易劣化。植物变压器油比矿物变压器油具有更好的电气性能、防火性能,对环境无污染,但其运动黏度较大,易水解产生酸性物质^[20],低温性能有待提

高。硅油变压器油比矿物变压器油具有更好的冷态投运温度、耐火性能,但其运动黏度大,电压多次击穿后绝缘强度明显下降。合成酯变压器油合具有诸多优势,尤其生物降解性好,满足高环保要求,对延长变压器使用寿命,降低设备运维成本起到重要作用;但其成本较高,水解安定性还需优化。纳米改性变压器油比矿物变压器油具有更好的导热性、抗老化性、击穿电压,但其介质损耗因数较大,还待进一步研究改善其综合性能。

2 结语

1) 本研究深入探讨了当前变压器油市场的现状及其未来发展趋势。尽管矿物型变压器油因其价格低廉和性能稳定,在市场中占据超过 95% 的份额,但随着全球对清洁、低碳能源体系的追求以及“双碳”目标的实施,环保型替代品如植物变压器油和合成酯变压器油的研究与应用日益受到重视。植物变压器油因其良好的电气性能、抗燃性及氧化安定性,在海上风电、陆地水坝等环保敏感领域展现出巨大潜力,而硅油变压器油以其独特的热稳定性、安全性及理想的电气性能,成为近期研究的热点,尤其在低电压等级、小容量变压器中具有应用优势。合成酯变压器油尽管成本较高,但其优异的电气绝缘性、热稳定性及耐腐蚀性使其广泛应用前景可期。

2) 本研究还揭示了纳米改性变压器油作为一种新兴技术手段的潜在应用价值。通过纳米改性,变压器油在导热性及抗老化性方面表现出显著提升,尽管其介质损耗因数较大且综合性能还需进一步优化,但这一技术为提升变压器油的综合性能、延长使用寿命提供了新的思路。

3) 针对未来研究,建议继续深入探索植物变压器油关键指标的改善方法,以满足更广泛的应用需求;对于硅油变压器油,应进一步研究其高电压等级下的适用性和生物降解性的提升策略;加大合成酯变压器油成本降低技术的研发力度,促进其广泛应用;加强对复合纳米粒子改性变压器油的研究,优化其综合性能,为变压器油行业的绿色发展提供新的技术支撑。

参考文献:

- [1] ROUSE T O. Mineral insulating oil in transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998, 14(3): 6-16.
- [2] 杨涛, 张小勇, 王天, 等. 新型高燃点环保型液体绝缘介质-植物绝缘油[J]. 中国油脂, 2016, 41(11): 41-45.
- [3] 陆阳, 刘诗佳. 变压器油的性能对比与选型[J]. 变压器, 2016, 53(10): 44-45.
- [4] 马书杰. 用高性能变压器油为电力系统保驾护航[J]. 国际石油经济, 2013, 21(8): 93-94.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 电工流体 变压器和开关未使用过的矿物绝缘油: GB/T 2536—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [6] 黄晶. 植物型变压器绝缘油的精炼及改性[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [7] Suleiman A, Muhamad N. Easibility study on the use of vegetable oil(natural ester)in Malaysia power system transformers [J]. Transactions on Electrical and Electronic Materials, 2014, 15(3): 113-116.
- [8] C. P. McShane. Natural and synthetic ester dielectric fluid: their relative environmental, fire safety and electrical performance[C]//IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Sparks: IEEE, 1999: 2-6.
- [9] C. P. McShane, J. L. Corkaran, K. J. Rapp, et al. Aging of kraft paper in natural ester dielectric fluid[C]//IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. Graz: IEEE, 2002: 173-177.
- [10] Y. Bertrand, L. C. Hoang. Vegetable oils as substitute for mineral oils[C]//The 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya: IEEE, 2023: 491-494.
- [11] 韩进贤, 孙攀. 硅油与矿物油用作变压器油的性能比较[J]. 有机硅材料, 2000(5): 18-19.
- [12] 徐毅, 徐言言, 袁彬. 硅油中 Ostwald 系数的测定[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2017, 23(1): 73-80.
- [13] 陈之敏. 变压器油综述[J]. 合成润滑材料, 2018, 45(3): 28-31.
- [14] 贾玉玉, 徐前进. 合成酯作为轨道交通变压器油的必要性[J]. 绝缘材料, 2021, 54(3): 49-53.
- [15] 孙迎伟, 陈红生, 薛长志, 等. 合成酯变压器油热氧老化特性研究[J]. 电工材料, 2022(3): 78-80.
- [16] 迟红锋. 合成酯型变压器油市场分析及展望[J]. 石油商技, 2021, 39(6): 4-7.
- [17] 梁帅伟. 抗老化变压器油及其对绝缘纸热老化影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [18] Cai Shengwei, Chen Jiangbo, Zhou Cuijuan, et al. Study on thermal aging characteristics of vegetable oil-paper composite insulation[J]. Insulation Material, 2015, 48(2): 56-60.
- [19] 郭红兵, 胡学超, 杨玥, 等. 稀土复合粒子改性变压器油绝缘性与导热性研究[J]. 中国稀土学报, 2024, 42(6): 1196-1203.
- [20] 马蕊燕, 甄新平, 张静, 等. 变压器油生产技术及国内外产品介绍[J]. 润滑油, 2017, 32(6): 56-60.