

热老化下换流变压器内油纸绝缘组合理化和电气特性研究

夏彦卫¹, 高树国¹, 成 立², 廖瑞金², 王俊宏²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050011; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 换流变压器是特高压直流输电系统十分重要的电力设备, 其内部的油纸绝缘水平和运行状况直接关系到电力系统的安全与稳定。研究换流变压器内部油纸绝缘在热老化下的理化特性, 将有助于提升换流变压器的油纸绝缘水平。选取了特高压换流变压器可能采用的绝缘油纸作为研究对象, 对四种不同油纸组合展开加速热老化试验, 测量并分析试验过程中绝缘纸聚合度、油中水分含量、油中酸值、绝缘油运动黏度、热稳定性、相对介电常数和介质损耗因数的变化情况, 给出油纸绝缘理化和电气特性的理论参考。

关键词: 油纸绝缘; 聚合度; 油中水分; 油中酸值; 运动黏度; 热稳定性; 相对介电常数; 介质损耗因数

Study on the physicochemical and electrical properties of oil-paper insulation combination by thermal ageing

XIA Yanwei¹, GAO Shuguo¹, CHENG Li², LIAO Ruijin², WANG Junhong²

(1. State Grid Hebei Electric Power Company Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050011, China;

2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The converter transformer is the key electrical equipment of UHVDC system. The safety and stability of power system is directly related to the level of internal oil-paper insulation and operating conditions. It is helpful for improving the level of oil-paper insulation of the converter transformer to study the physicochemical properties of the internal oil-paper insulation within thermal aging. The insulating oil and paper that may be used in the converter transformer are taken as the research objects. Accelerated thermal ageing tests with four different groups of oil-paper is accomplished via analyzing the degree of polymerization(DP) of the insulation paper and the water content, acid value, kinematic viscosity and thermal stability, relative permittivity and dielectric loss factor. Ultimately, the results provide a theoretical reference for the physicochemical and electrical properties of the oil-paper insulation.

Key words: oil-paper insulation; DP; water content; acid value; kinematic viscosity; thermal stability; relative permittivity; dielectric loss factor

0 引言

我国主要的能源基地和负荷中心具有分布散、距离远的特点, 煤炭、水能和陆地风能主

国家电网公司科技项目(5204DY170010)

要分布在西部以及西北部地区, 而三分之二以上的能源需求集中在南部和东部沿海地区, 二者相距甚远, 这就迫切需要电力资源实现经济高效的大规模输送及大范围消纳。建设特高压电网, 就是为实现大规模、远距离和高效的电

力输送以及安全的能源供应^[1-7]。

特高压换流变压器是直流输电工程中十分关键的电力设备，目前换流变压器内部均用绝缘油填充，绝缘油同时起到电绝缘和导热作用。电力系统的安全稳定运行要求变压器能可靠、有效地工作多年，因而变压器内部油纸绝缘的水平起着重要作用^[8]。换流变压器中绝缘油纸是其内绝缘的主要组成部分，在实际运行过程中长期受到电、热和环境等其他因素的影响，油纸绝缘将会发生老化，导致变压器油纸绝缘性能下降^[9-12]。热老化是变压器油纸绝缘老化的主要形式，在老化过程中油纸的理化特性优良，在一定程度上影响了变压器的故障发生和使用寿命。

进行长期热老化试验，主要是为了研究长期运行条件下，换流变压器内部绝缘材料的理化、电气特性参数的变化情况，为变压器内部绝缘仿真设计提供第一手资料。因此本文选取了特高压换流变压器可能采用的绝缘油纸作为研究对象，拟对四种不同油纸组合展开热老化试验，研究不同油纸组合在热老化下的理化特性，并根据试验结果，给出相关理论参考。

1 油纸热老化试验

1.1 材料选择

为研究不同油纸组合热老化下的理化和电气特性，在绝缘材料选择方面，本文选取了国际知名厂家生产的两种特高压换流变压器绝缘用油和两种绝缘用纸，不同绝缘油命名代号为A和B，不同绝缘纸命名代号为C和D，绝缘纸平均厚度为0.125 mm。各种油纸组合类型和符号如表1所示。

1.2 样品制备和试验步骤

本文对油纸绝缘组合样品进行的制备和加速热老化试验流程如下。

1) 将不同绝缘纸样品裁剪为40 mm×40 mm的正方形，厚度为0.125 mm。

2) 将40 mm×40 mm的不同类型绝缘纸

表1 不同油纸组合类型的符号

Tab. 1 Different insulation compositions expressed by alphabet

符号	油纸绝缘组合类型
AC	A号绝缘油+C号绝缘纸
AD	A号绝缘油+D号绝缘纸
BC	B号绝缘油+C号绝缘纸
BD	B号绝缘油+D号绝缘纸

样品分别置于不同的烧杯内，并放入真空干燥箱中，在温度为90 ℃/50 Pa的环境下干燥48 h。

3) 将不同种类绝缘油置于不同容器中并放入90 ℃/50 Pa的干燥箱中进行脱气干燥48 h。

4) 绝缘纸干燥完毕后，设置干燥箱温度为40 ℃，并在40 ℃的温度下，分别向老化罐中加入脱气干燥后的A号和B号绝缘油，油纸比例为20:1并加入适量铜条模拟变压器内部情况，在50 Pa真空环境下浸渍24 h后冷却至室温，取出样品后立即通入氮气并置于130 ℃老化箱。

5) 在老化天数为0、10、20、40、70和100天时取出油纸样品进行理化特性测试，对油纸样品进行绝缘纸聚合度、油中水分含量、油中酸值、绝缘油运动黏度、热稳定性、相对介电常数和介质损耗因数等测试，样品测量后不再放入老化罐中。

2 热老化测试结果

2.1 绝缘纸聚合度测试

Oomen等学者于20世纪80年代提出了用黏度法测量绝缘纸聚合度作为变压器内绝缘老化程度的判别依据^[13]。研究表明，未老化的绝缘纸聚合度可达到1 000~1 500，变压器油纸绝缘的寿命到达中期时，绝缘纸的聚合度约为500；当油纸绝缘进入寿命晚期时，绝缘纸的聚合度通常下降至250。

本文参照ASTM D4243及ASTM D445标准对四种油纸组合进行了绝缘纸聚合度测试，测试结果如图1所示。

图1中给出了130 ℃老化温度下浸渍不同

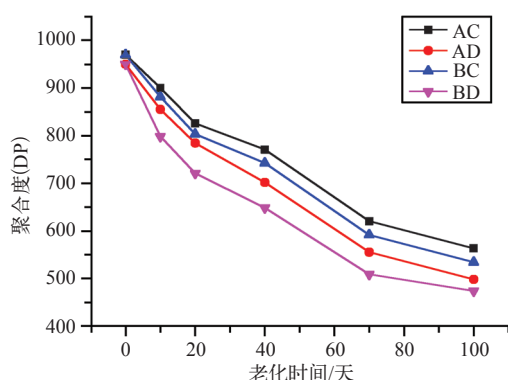


图1 不同油纸组合的绝缘纸聚合度值变化规律

Fig. 1 Change of DP with different oil-paper combinations

绝缘油的两种绝缘纸的聚合度值随老化时间的变化情况。从测试结果可以看出, BC油纸组合的老化速率明显高于其他三种油纸组合, A号绝缘油和C号绝缘纸的油纸组合具有最高的聚合度值。绝缘纸聚合度随老化呈现明显的下降趋势, 在一定温度下浸渍绝缘油的类型对于同一类型的绝缘纸老化速度的影响很大: A号油浸渍的绝缘纸较B号油浸渍的绝缘纸的老化速率高, 聚合度下降幅度较大。C号绝缘纸在不同绝缘油中的抗老化性能表现优于D号绝缘纸, 但AD组合绝缘纸聚合度水平并没有优于BC组合; 同时可以观察到当样品老化到一定程度时, 四种油纸组合的老化速率逐渐放缓。

2.2 油中酸值测试

油中酸值的大小是评定新油质量和判断绝缘油老化程度的一项重要化学指标, 反映了油纸复合绝缘在高温热老化条件下所伴随的理化反应。有研究表明, 油中酸值过高对变压器内部运行环境威胁较大, 大大降低油纸的绝缘强度。本文根据GB/T 7599—1987对绝缘油中酸值进行测试, 测试结果如图2所示。

随着老化的深入, 两种油中酸值含量不断增加, 油中酸值生成速率越来越快, 并呈现自加速的变化过程。从图2中可以看出, 四种油纸组合的油中酸值的差异随着老化时间的增加而逐渐增大, 含有A号绝缘油的两种油纸组合油中酸值大于含有B号绝缘油的油纸组合, 含有C号绝缘纸的油纸组合油中酸值大于D号绝

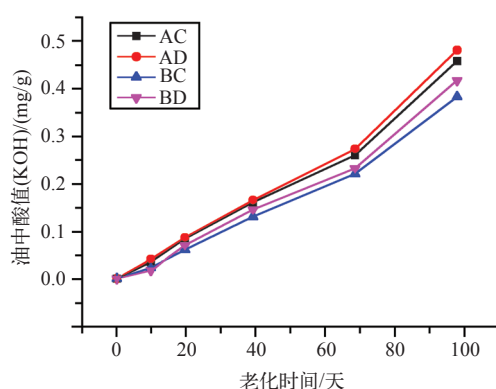


图2 不同油纸组合的油中酸值变化规律

Fig. 2 Change of acidity in oil with different oil-paper combinations

缘纸油纸组合。矿物油老化特征产物中的有机酸主要成分是环烷酸以及其他氧化反应产生的酸性物质^[14], 由于环烷酸是环烷烃衍生物, 若油中环烷烃含量越高, 相应生成的环烷酸也将越多。分析A号和B号绝缘油的环烷烃含量, 发现A号油中环烷烃含量远高于B号绝缘油, 这是含有A号油组合中油酸值高于含有B号绝缘油的原因之一。同时对比2.1节试验结果, 油中酸值含量较高的AC和AD组合中绝缘纸的老化程度要低于BC和BD组合。对于该结果, 主要有以下两个原因。

1) 油纸绝缘中的酸一般分为大分子酸和小分子酸, 大分子酸的分解能力远不及小分子酸, 且能对绝缘纸的水解起催化的作用只有溶解状态的 H^+ 离子。

2) 由于不同分子量的酸极性不同, 电离能力强的小分子酸主要集中于绝缘纸内, 而绝缘油中的酸主要为电离能力弱的大分子酸, 大分子酸几乎不对绝缘纸的老化产生催化作用。所以油中酸值的测量值只能反映绝缘油纸整体的一个老化程度, 不能直接反映绝缘纸的老化程度^[15-16]。

2.3 水分含量测试

变压器绝缘系统中的水分, 对油纸老化速率有着至关重要的影响, 较低的水分含量有利于改善油纸老化环境, 减缓绝缘油纸的老化速率, 提高变压器的运行时长。有研究表明, 当固体绝缘中的水分含量增加一倍时, 其机械寿

命将减半,绝缘纸纤维热老化的速率与其中的水分含量成正比^[17]。水分在油纸绝缘中的存在是一个动态平衡过程,稳定时水分将以一定比例分配于油纸中。有研究表明,在室温条件下矿物油中水分含量和纸中水分含量之比约为1:1 000。与绝缘油相比,绝缘纸中的纤维素为极性物质,水分极易被绝缘纸吸收,纸中水分含量对其老化速率影响很大。通常在现场取油样比取纸样较为容易,可将油中水分含量作为老化程度诊断的一项指标,经一定比例可得到纸中水分含量,反映绝缘纸的老化状态。

图3为本次试验得到的绝缘油中水分含量与老化时间的关系。从图3中可以看出,随着老化程度的加深,四种油纸组合的绝缘油中的水分含量均不断增大,且油中水分含量增加的速率随着老化时间的增加先增大后减少。四种油纸组合的油中水分含量差距不大,油中含水量大小关系为:BD>BC>AD>AC。

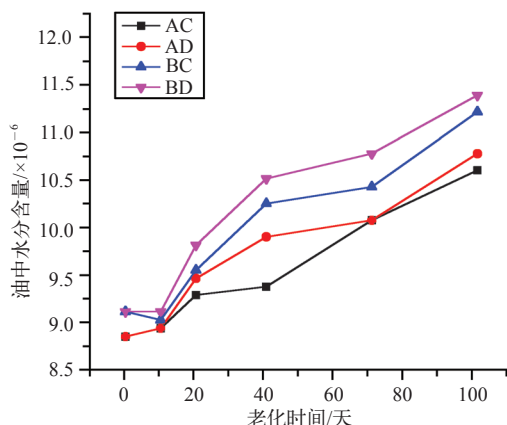


图3 不同油纸组合的油中水分含量变化规律

Fig. 3 Change of water moisture in oil with different oil-paper combinations

由于BD油纸组合油中水分含量均大于其他三种油纸组合,且油中酸值具有较高水平,因此BD组合中的绝缘纸聚合度最低,符合试验情况;而A号绝缘油中水分含量在老化整个阶段小于B号绝缘油,因此A号绝缘油浸渍的绝缘纸的老化速率小于B号绝缘油浸渍的绝缘纸,由此可以看出,油中酸值含量差距不大的绝缘油纸组合,水分含量越多,对于绝缘纸的老化加速作用的影响更为明显。

2.4 绝缘油运动黏度测试

对于换流变压器而言,绝缘油的运动黏度是非常重要的物理性能,是反映变压器油传热方面的一项重要指标,因此很有必要研究不同类型绝缘油在不同热老化程度下的运动黏度。绝缘油作为变压器内部主要的传热介质,必须要求其具有合适的运动黏度,以保证绝缘油在高温运行中起到良好冷却作用。油品的运动黏度过大将导致绝缘油流速下降,散热性较差,极易引起变压器故障;油品的运动黏度过小,也会降低工作安全性。因此,绝缘油的运动黏度保持在合适的范围内,将有效保障变压器运行的稳定性。

图4给出了25℃下四种油纸组合中绝缘油的黏度测试结果。从图4中可以看出,B号绝缘油的初始运动黏度较A号绝缘油高约1 mm²/s,这是因为油的化学组分影响着绝缘油的运动黏度,A号绝缘油的环烷基含量远大于B号绝缘油,环烷基绝缘油在运动黏度方面天然优于石蜡基绝缘油,本质上决定了A号绝缘油与B号绝缘油运动黏度的差异。随着老化程度的加深,两种绝缘油的运动黏度表现出先下降后上升的总体变化规律。在老化初期,运动黏度稍有下降,这是由于绝缘油分子的热解和氧化作用,其分子间的作用力下降;在老化中后期,绝缘油纸绝缘因热老化产生的酸类物质、糠醛等杂质增多,导致了绝缘油的运动黏度的上升。通过对比试验,绝缘纸类型的不同较绝缘油本身的品质对绝缘油黏度的影响较小,两种绝缘油均能满足最小黏度的要求,从散热性能方面考虑,A号绝缘油优于B号绝缘油。

2.5 绝缘油热稳定测试

电力变压器的运行温度一般较高,油纸绝缘结构热点处温度大大高于变压器平均运行温度,因此较高的热点温度要求绝缘油需要具有良好的热稳定性,在高温下依旧保持着良好的绝缘性能。热重法是研究样品在热应力作用下化学变化过程的方法,本文采用该方法对绝缘

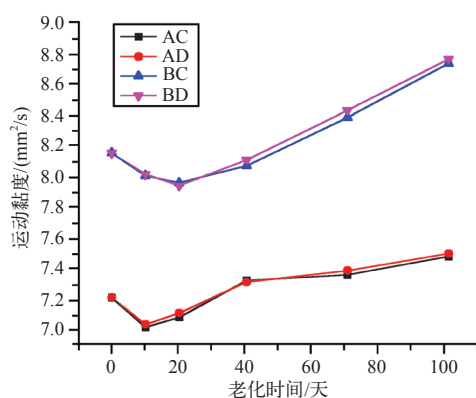


图4 不同油纸组合的绝缘油运动黏度变化规律

Fig. 4 Change of kinematic viscosity of oil with different oil-paper combinations

油热稳定性进行了研究, 试验测试仪器为美国TA仪器生产的Q50型热重分析仪, 获取两种绝缘油初始分解温度以及分解速率最大温度, 试验结果如表2、表3所示。

表2 A号绝缘油热重分析的主要参数

Tab. 2 Parameters of thermogravimetric analysis of insulating oil A

老化时间/天	初始分解温度/℃	分解速率最大温度/℃
0	145.18	187.65
10	145.49	187.47
20	145.02	186.81
40	144.95	187.34
70	145.63	187.73
100	145.21	187.26

表3 B号绝缘油热重分析的主要参数

Tab. 3 Parameters of thermogravimetric analysis of insulating oil B

老化时间/天	初始分解温度/℃	分解速率最大温度/℃
0	209.35	246.96
10	209.54	246.31
20	209.18	247.15
40	208.77	246.52
70	208.94	247.02
100	209.12	246.69

从表2、表3的结果可以看出, B号绝缘油的热重性能优于A号绝缘油, 主要原因为B号绝缘油的分子量均一且杂质含量较低。同时可以发现, 老化程度的加深对两种油的初始分解温度和分解速率最大温度影响不大, 表明热老化对于绝缘油的热重性能几乎没有影响, 这与V. Mentlik等人通过热重分析得到的老化油品的结论类似^[18]。

2.6 绝缘油、纸相对介电常数测试

相对介电常数是与电介质的束缚电荷特性密切相关的一个性能参数, 从分子结构的微观角度研究绝缘材料的介电性能宏观参数十分必要。图5为工频下的绝缘油相对介电常数与老化时间的关系图。从图5中可知, 在整个老化阶段, 绝缘油的工频相对介电常数几乎不发生变化, B号绝缘油的相对介电常数显著低于A号绝缘油。造成B号绝缘油相对介电常数较小主要有以下两个原因。

1) 油中杂质影响绝缘油的介电常数, B号绝缘油由分子量均一及杂质含量极低的基础油组成, 极低的杂质含量使得B号绝缘油的相对介电常数低于A号绝缘油。

2) 绝缘油的相对介电常数与其密度相关, B号油绝缘油的密度比A号绝缘油低9%左右, 绝缘油密度越低, 相对地会减少单位体积内极化粒子的数量, 降低其介电常数。

如图6所示, 绝缘纸的相对介电常数在老化过程中由高至低依次为: AC>AD>BC>BD, 与绝缘油不同, 绝缘纸在整个老化阶段其相对介电常数呈现小幅增大的变化趋势。老化初期, 绝缘纸老化程度较低, 纸中老化极性产物较少, 此时绝缘纸的相对介电常数变化较小; 随着老化程度的加深, 绝缘纸纤维素中大量结晶区转化为无定型区, 绝缘纸内部空隙增大, 因此随着油纸老化程度的深入, 油纸绝缘老化产物增多, 根据同性相吸的原理, 极性较强的

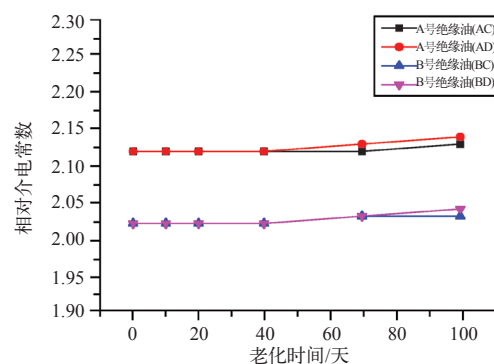


图5 不同油纸组合绝缘油相对介电常数变化规律

Fig. 5 Change of relative permittivity of insulating oil with different oil-paper combinations

绝缘纸会吸收强极性的老化产物（如水分、小分子酸等）并填充于绝缘纸空隙；且老化会导致纤维素分子链变短，纤维素细胞壁厚度逐渐变薄，使得老化后的绝缘纸纤维分子直径降低，比表面积显著下降，纤维素分子之间连接能力快速下降，纤维素分子转向极化增强，因此随着老化的深入，绝缘纸的相对介电常数会整体上呈现上升的趋势。纸中水分和相对介电常数具有相同的变化规律，因此笔者认为，纸中极性产物是影响绝缘纸相对介电常数变化的主要因素。

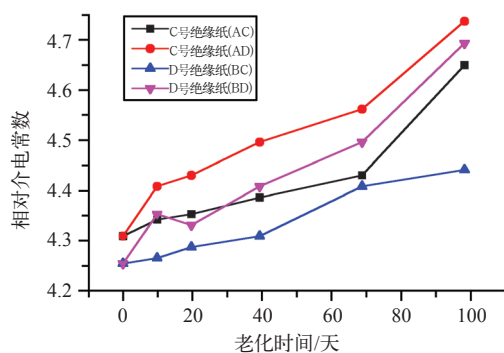


图6 不同油纸组合绝缘纸相对介电常数变化规律

Fig. 6 Change of relative permittivity of insulating paper with different oil-paper combinations

2.7 绝缘油、纸介质损耗因数测试

油、纸绝缘不是理想的绝缘材料，由于少量自由电荷以及极化分子的存在，在电场的作用下，变压器绝缘油、纸不仅通过电容电流，还通过电导电流和极化电流，此时绝缘油、纸将消耗有功功率，较低的介质损耗会降低变压器整体损耗，有利于改善变压器油纸绝缘的运行环境。通常采用绝缘油、纸的 $\tan\delta$ 来衡量其介质损耗大小。图7为老化后绝缘油的介质损耗因数的变化情况。

随着老化程度的加深，绝缘油的介质损耗呈现上升的变化趋势。在介质损耗上B号绝缘油的性能显著优于A号绝缘油，是由于其分子量均一且杂质含量极低；含有C号绝缘纸的同一种绝缘油介质损耗正切角较小，是因为在老化过程中其聚合度下降幅度较小，导致油中杂质较少，降低了介质损耗。绝缘油较低的介质

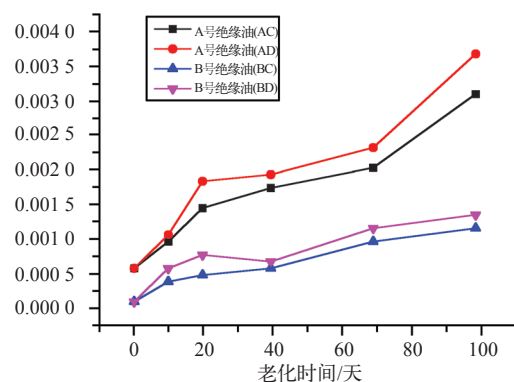


图7 不同油纸组合绝缘油介质损耗因数变化规律

Fig. 7 Change of dielectric loss factor of insulating oil with different oil-paper combinations

损耗有利于降低变压器能量损耗，降低变压器运行温度，有利于改善变压器的运行条件。

绝缘纸的介质损耗因数如图8所示。四种油纸组合介质损耗随着老化均呈现增大的变化趋势，BD组合绝缘纸介损在整个老化阶段明显优于其他三种组合。

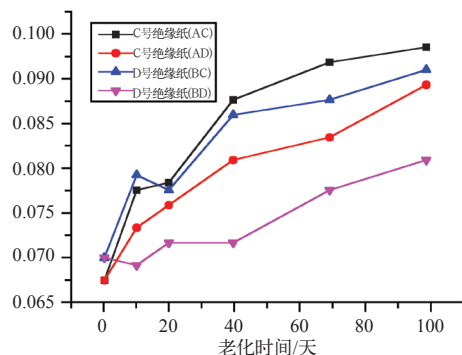


图8 不同油纸组合绝缘纸介质损耗因数变化规律

Fig. 8 Change of dielectric loss factor of insulating paper with different oil-paper combinations

3 结束语

本文通过四种油纸组合的热老化试验，得到了其理化特性随老化程度变化的测试结果，主要结论如下。

1) 不同类型的绝缘油对绝缘纸老化程度的影响存在差异，A号绝缘油在老化过程的油中水分含量较B号绝缘油低，能较好地降低绝缘纸的老化速率。不同类型的绝缘纸抗老化性能也不同，其中C号绝缘纸具有更好的抗老化性能。

2) 热老化对绝缘油的运动黏度影响较小，运动黏度与油品成分关系密切，环烷烃成分越大

的绝缘油的运动黏度较低, 散热性能优异; 老化程度的加深对绝缘油的运动黏度略有提升。

3) 热老化对绝缘油的热稳定性几乎没有影响, 绝缘油的初始分解温度和分解速率最大温度随老化程度加深, 二者波动在1℃范围内。

4) 热老化将导致绝缘纸相对介电常数略微上升, 而绝缘油相对介电常数在整个老化阶段保持不变。

5) 分子量均一旦杂质含量较小的绝缘油介质损耗较低, 含有抗老化性能较好的绝缘纸的油纸组合的介质损耗更低。

参考文献

- [1] 虞菊英. 我国特高压交流输电研究现状[J]. 高压技术, 2005, 31(12): 23-25.
- [2] 吴博, 李慧敏, 别睿, 等. 多端柔性直流输电的发展现状及研究展望[J]. 现代电力, 2015, 32(2): 9-15.
- [3] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
- [4] 周小谦. 我国“西电东送”的发展历史、规划和实施[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 1-5.
- [5] 郑宝森, 郭日彩. 中国互联电网的发展[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 1-3.
- [6] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [7] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10, 25.
- [8] ROUSE T O. Mineral insulating oil in transformers [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998, 14(3): 6-16.
- [9] 杨丽君, 廖瑞金, 孙会刚, 等. 油纸绝缘热老化特性及生成物的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (22): 53-58.
- [10] 廖瑞金, 冯运, 杨丽君, 等. 油纸绝缘老化特征产物生成速率研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (10): 142-147.
- [11] 廖瑞金, 杨丽君, 孙才新, 等. 基于局部放电主成分因子向量的油纸绝缘老化状态统计分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 114-119.
- [12] 杨丽君, 廖瑞金, 李剑, 等. 油纸绝缘老化阶段的多元统计分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 151-156.
- [13] OOMEN T V, ARNOLD L N. Cellulose insulation materials evaluated by degree of polymerization measurements[C]. IEEE Proceedings of the 15th Electrical Electronics Insulation Conference, USA, 1981: 257-261.
- [14] 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.
- [15] LUNDGAARD L E, HANSEN W, INGEBRIGTSEN S, et al. Aging of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis [C]. 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Coimbra, Portugal, 2005: 381-384.
- [16] INGEBRIGTSEN S, DAHLUND M, HANSEN W, et al. Solubility of carboxylic acids in paper (Kraft)-oil insulation systems[C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Boulder, US, 2004: 253-257.
- [17] RAPP K J, MCSHANE C P, LUKSICH J. Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper[C]. 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Coimbra, Portugal, 2005: 393-396.
- [18] MENTLIK V, PROSR P, POLANSKY R. Aging of petroleum and synthetic based insulation oils from the view of structural analyses[C]. IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2008: 1-4.

作者简介



夏彦卫

夏彦卫 (1966—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力用油检测及设备故障诊断。

(收稿日期: 2019-06-28) **EA**