

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.013

温度对换流变压器绕组端部电场分布的影响研究

周 峰¹, 张丹丹², 刘弘景¹, 户克磊¹, 黎 立², 苗 旺¹, 吴麟琳¹

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100031; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为研究温度对换流变压器绕组端部油纸复合绝缘系统电场分布的影响, 首先测量获取了-40~+50 ℃范围变压器油和油浸纸板的相对介电常数、电导率; 在此基础上利用有限元法研究了交流和直流试验电压作用下500 kV换流变压器端部电场分布的温度特性。研究结果表明: 温度通过影响油纸绝缘的介电特性而影响换流变压器绕组端部电场分布特性; 换流变压器的出厂试验需考虑实际运行条件下内部温度的变化范围做出适当的修正。

关键词: 换流变压器; 油纸绝缘; 相对介电常数; 电阻率; 阀侧绕组; 网侧绕组

Influence of Temperature on the Electric Field Distribution of the Winding End in Converter Transformer

ZHOU Feng¹, ZHANG Dandan², LIU Hongjing¹, HU Kelei¹, LI Li², MIAO Wang¹, WU Linlin¹

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100031, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to grasp the electric field distribution of the oil-paper insulation structure in converter transformer at different temperature, the dielectric properties of transformer oil and pressboard are measured at the temperature range of -40~+50 ℃. In addition, for the 500 kV converter transformer, the temperature characteristics of electric field at the end of the winding under AC test voltage and DC test voltage are studied by finite element analysis. The results show that temperature affects the electric field distribution at the end of the winding by affecting the dielectric properties of the oil-paper insulation. In consideration of the temperature variation in the actual operation, the factory test of the converter transformer needs to be corrected.

Key words: converter transformer; oil-paper insulation; dielectric constant; resistivity; valve side winding; network side winding

0 引言

换流变压器是直流输电系统中实现交流电力系统和整流器或逆变器之间的功率转换的设备^[1], 其安全稳定运行非常重要。目前我国的直流输电工程主要分布在“三北”(西北、东北、华北)地区, 是典型的极寒地区, 冬季气温可低至-30~-40 ℃^[2-3]。根据换流变压器的安装工艺, 在热油循环72小时后需要静置72 h, 此时换流变压器的内部温度会逐渐降至环境温度^[4], 而工作状态下虽然有一定的温度回

升, 但是在极寒环境下也可能导致工作温度偏低。此外, 夏季环境温度较高, 加之换流变压器内部的损耗发热, 变压器内部温度可高达70~80 ℃^[5-6]。换流变压器的主绝缘采用油纸复合绝缘结构, 不同温度下变压器油和油浸纸板的介电特性不同, 导致同一电压作用下变压器油和油浸纸板中的电场强度不同, 即不同温度下换流变压器绝缘耐受强度不同, 而根据相关标准^[7-8], 换流变压器的出厂试验温度为常温(10~30 ℃), 在常温下的耐压试验无法准确检验在高温或低温下的绝缘特性, 不同温度条件下所应

收稿日期:2019-05-04; 修回日期:2019-07-11

基金项目:国家电网公司科技项目资助(52022316001G)。

Project Supported by Science and Technology of SGCC(52022316001G).

施加的试验电压需换算到出厂试验温度条件。因此,有必要对不同温度下换流变压器油纸复合绝缘结构的电场分布特性进行研究,以便对相关出厂试验进行指导。

对于换流变压器的内部电场分布,主要关注其端部电场分布。日本的Takahashi E^[9-10]最早采用有限元法对换流变压器端部油纸绝缘系统在交流、直流、交直流混合电压以及极性反转电压作用下的电场分布特性进行了研究。印度的J.Sundara Rajan^[11-12]研究了不同电极形状、不同电场作用下换流变压器油纸绝缘的击穿特性。近年来,国内沈阳工业大学^[13-15]的研究者利用有限元法对换流变压器端部油纸绝缘系统在不同电压作用下的电场分布特性进行了研究,并考虑了电介质电阻率的非线性变化对电场分布的影响。

对于油纸绝缘系统的介电特性,西安交通大学吴锴^[16]、重庆大学唐超^[17]等人研究了温度对油纸绝缘空间电荷分布的影响,发现不同温度下油纸绝缘空间电荷分布不同,进而影响其介电性能。哈尔滨理工大学池明赫^[18-20]等人基于油和纸板的介电参数温度变化测试数据,研究了平板电极结构下油纸复合绝缘的电场分布特性,发现在交直流复合电压作用下,直流含量越高,温度对油纸绝缘电场分布的影响越大。

以上研究未将换流变压器绕组端部的绝缘结构和绝缘介质介电特性的温度变化特性结合,对此,文中首先测量获取了-40~+50℃范围变压器油和油浸纸板的相对介电常数、电导率,在此基础上通过有限元法研究了温度对换流变压器绕组端部在交流、直流试验电压作用下的电场分布特性的影响,并研究了不同温度条件下换流变压器出厂耐压试验的等效性。

1 不同温度下变压器油和油浸纸板的介电参数

1.1 测量方法

1.1.1 样品处理

变压器油:采用45号变压器油,利用真空滤油机对变压器油进行脱水、除气及过滤除杂,含水率为5.5 ppm(1 ppm=1×10⁻⁶,下同,按标准GB/T 7600—2014测试)。绝缘纸板:利用真空干燥箱对绝缘纸板进行真空干燥处理,之后浸变压器油,放置在真空干燥箱中密闭保存,浸油后的纸板含水率为0.9%(按标准DL/T 449—2015测试)。

1.1.2 测量方法

变压器油的相对介电常数和电导率按照标准

GB/T 5654—2007进行测量。油浸纸板相对介电常数测量方法按照GB/T 1409—2006进行测量,电导率测量方法参照GB/T 10064—2006。

1.2 测量结果

针对变压器油和油浸纸板,分别获取了-40~+50℃温度范围的相对介电常数和电导率。

1.2.1 相对介电常数

变压器油和油浸纸板的相对介电常数温度变化特性分别见图1、2。结果表明:对于变压器油,其相对介电常数随温度的升高几乎呈现线性减小趋势,随着温度的升高,相对介电常数从-40℃时的2.18减小到+50℃时的2.08,减小了0.1,以常温(20℃)时的2.11为基准,变化幅度为4.9%,可见变化幅度不大;对于油浸纸板,其相对介电常数随温度的升高几乎呈现线性增大趋势,随着温度的升高,相对介电常数从-40℃时的4.51增大到+50℃时的5.53,增大了1.02,以常温(20℃)时的5.2为基准,变化幅度为19.6%,可见变化幅度较大。

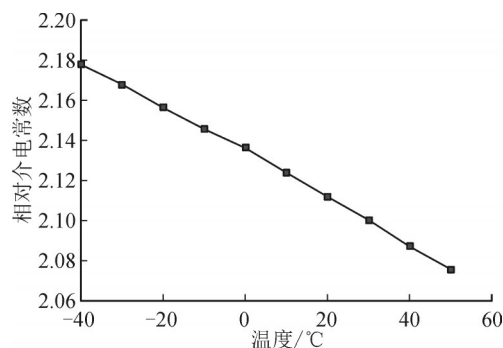


图1 变压器油相对介电常数温度变化特性

Fig. 1 Relative permittivity of transformer oil at different temperatures

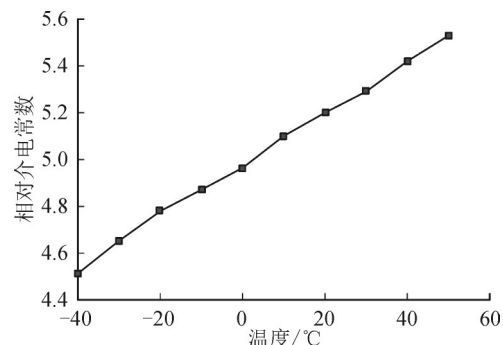


图2 油浸纸板相对介电常数温度变化特性

Fig. 2 Relative permittivity of pressboard at different temperatures

1.2.2 电导率

变压器油和油浸纸板的电导率的温度变化特性分别见图3、4。结果表明:温度对变压器油和油浸纸板的电导率的影响较大,随着温度的升高,变压器油和油浸纸板的电导率呈现指数增长的趋势,

且变化幅度较大。对于变压器油,电导率从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $16.9\times 10^{-16}\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 增大到 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $75.5\times 10^{-16}\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$,以常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)时的 $42.3\times 10^{-16}\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 为基准,变化幅度为138.5%;对于油浸纸板,其电导率从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $7.8\times 10^{-18}\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 增大到 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 $1.68\times 10^{-16}\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$,以常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)时的 $5.97\times 10^{-17}\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 为基准,变化幅度为268.3%。

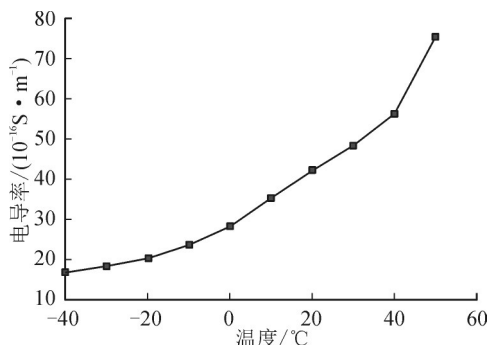


图3 变压器油电导率温度变化特性

Fig. 3 Electrical conductivity of transformer oil at different temperatures

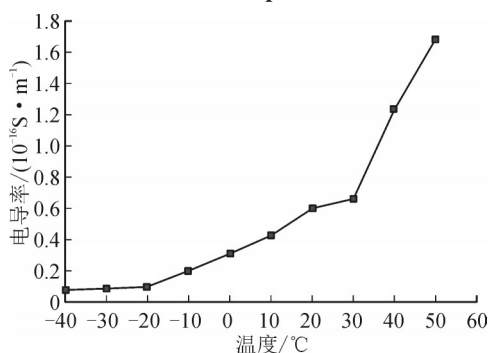


图4 油浸纸板电导率温度变化特性

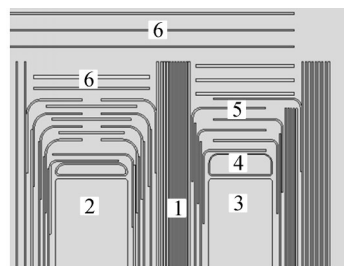
Fig. 4 Electrical conductivity of pressboard at different temperatures

对于油纸复合绝缘,交流电压下的电场分布与介质相对介电常数成反比,直流电压下的电场分布与介质电导率成反比。以上分析可知,低温或高温下变压器油和油浸纸板的相对介电常数、电导率不同于常温,对于变压器内部固定的油纸复合绝缘系统,低温或高温下的电场分布特性不同于常温,这将影响绝缘系统的整体绝缘性能。

2 换流变压器绕组端部绝缘结构仿真建模

换流变压器绕组端部主要由绕组、静电环、角环、纸圈、纸筒、压板等组成,见图5。角环、纸圈、纸筒与其周围的油隙一起构成了换流变压器绕组端部复杂的绝缘结构,其电场分布特性较为复杂。

文中对型号为ZZDFPZ-297100/500的换流变压器的端部结构进行了二维仿真建模,利用有限元



1—绝缘纸筒; 2—网侧绕组; 3—阀侧绕组;
4—静电环; 5—角环; 6—端圈。

图5 换流变压器绕组端部结构图

Fig. 5 End structure of converter transformer winding

法对绕组端部电场分布的温度变化特性进行了研究。仿真模型如图5所示,将绕组间的绝缘纸筒、角环、垫圈视为同一种绝缘纸板,其介电特性相同。

3 换流变压器绕组端部电场分布的温度特性

3.1 换流变压器承受的电压类型

在换流变压器正常运行过程中,网侧绕组和普通电力变压器一样承受系统交流电压,而阀侧绕组除承受工频交流电压外,还要承受直流电压的作用。在对换流变压器进行出厂试验时,其主绝缘除根据GB 1094.3—2008分别进行网侧绕组的额定雷电冲击、操作冲击、外施交流耐受电压试验以及阀侧绕组的雷电冲击、操作冲击耐受电压试验外,还需对阀侧绕组单独进行外施直流电压、外施交流电压的耐受水平测试,其中,阀侧绕组的外施交流试验电压和直流电压分别为^[8]

$$U_{ac} = 1.5[(N-0.5)U_{dm} + \sqrt{2}U_{vm}/\sqrt{3}/\sqrt{2}] \quad (1)$$

$$U_{dc} = 1.5[(N-0.5)U_{dm} + 0.7U_{vm}] \quad (2)$$

式(1)、(2)中: U_{ac} 为外施交流电压的有效值; U_{vm} 为阀侧绕组线电压有效值; U_{dm} 为换流变压器每6个脉动单桥的输出直流电压, $U_{dm}=1.175U_{vm}$; N 为6脉动单桥数量。

仿真采用的换流变压器的额定电压有效值为 $U_{网侧}=515/\sqrt{3}\text{ kV}$, $U_{阀侧}=277.5+157.6/\sqrt{3}\text{ kV}$, 则通过计算得到的施加于阀侧绕组的交流试验电压有效值为 $U_{ac}=431\text{ kV}$, 直流试验电压为 $U_{dc}=582\text{ kV}$ 。以下针对换流变压器端部结构,分别研究在交流和直流试验电压下绕组端部电场分布的温度变化特性。

3.2 交流电压

对阀侧绕组施加交流耐受电压 $U_{ac}=431\text{ kV}$ (有效值),网侧绕组、铁心接地,采用前文测量获取的 $-40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变压器油、油浸纸板的相对介电常数数据,进行仿真计算,记录电压达到峰值时的

电场分布。其中,常温(20℃)下的端部电场强度和电位分布特性计算结果见图6、7。

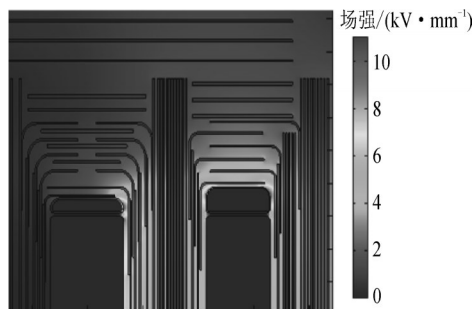


图6 交流电压下绕组端部电场强度分布(20℃)

Fig. 6 Distribution of electric field intensity under

AC voltage(20℃)

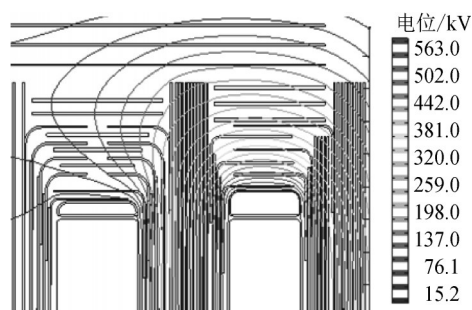


图7 交流电压下绕组端部等电位分布(20℃)

Fig. 7 Potential distribution under AC voltage(20℃)

结果表明:变压器油中的电场强度明显高于油浸纸板,在绕组和静电环表面的油隙中的电场强度较为集中,最大电场强度出现在绕组和静电环表面的圆角处;等电位线主要在变压器油中降落,在油浸纸板中的等电位线分布较少。交流电压作用下油纸绝缘系统电场强度和等电位线分布主要由介质的相对介电常数决定,且电场分布与相对介电常数成反比,变压器油的相对介电常数小于油浸纸板,因此变压器油中的电场强度大于油浸纸板。计算结果与理论分析相符合。

绕组端部变压器油和油浸纸板中最大场强的温度变化特性见图8。从图8分析可知,随着温度的升高,变压器油中最大场强几乎呈线性增大,而油浸纸板中的最大场强几乎呈线性减小。由于交流电压作用下,变压器油中场强大于油浸纸板,且油浸纸板的电气强度大于变压器油,油纸复合绝缘的绝缘性能主要关注变压器油中的最大场强。分析不同温度下变压器油中最大场强相对于常温(20℃)的变化特性,在-40℃时最大场强减小了4.67%,+50℃时最大场强增大了2.03%,即在-40℃~50℃范围,变压器油中的最大场强变化幅度为6.7%。

以上分析可知,在交流电压作用下,温度降低可降低变压器油中的电场强度,提高油浸纸板中的

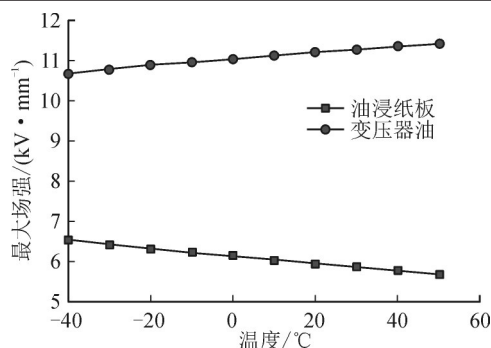


图8 交流电压作用下最大场强温度变化特性

Fig. 8 Change characteristics of maximum field under AC voltage

电场强度,进而改善油纸复合绝缘的电场分布特性;温度升高则使变压器油中的电场强度增大,使油浸纸板中的电场强度减小,进而使油纸复合绝缘的电场分布更加不均衡。温度影响油纸复合绝缘的电场分布,而GB/T 18494.2—2007规定的换流变压器出厂耐压试验的温度范围为10~30℃,施加的交流耐受电压为 U_0 (有效值),该试验电压难以对高温和低温运行环境下的换流变压器主绝缘的绝缘耐受特性进行准确的考核,因此在不同温度条件下所应施加的耐受电压需换算到常温(20℃)条件,文中建议对试验电压进行温度校正。考虑换流变压器实际运行时内部可能出现的温度为 T_1 ,换算到常温(20℃)时应施加的等效交流试验耐受电压为 U_1 , K 为温度校正系数,且有: $U_1=KU_0$ 。对于文中计算的换流变压器,基于不同温度下绕组端部电场分布的计算结果,计算得到阀侧绕组交流耐压试验的温度校正系数 K 见图9。结果表明,温度校正系数 K 随温度的升高而增大,考虑换流变压器在实际运行条件下,内部温度可能高达80℃,在进行换流变压器的出厂试验时,其试验电压需适当提高,以保证高温下的绝缘强度满足要求。

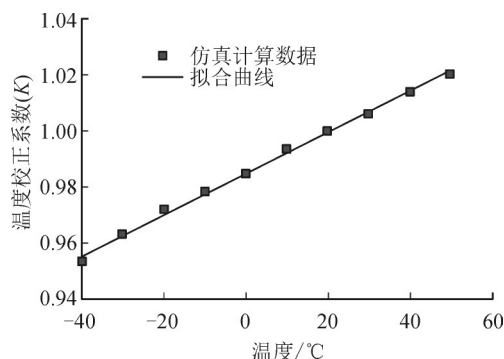


图9 交流电压作用下的温度校正系数

Fig. 9 Temperature correction coefficient under AC voltage

3.3 直流电压

对阀侧绕组施加稳态直流耐受电压 $U_{dc}=582$ kV, 网侧绕组、铁芯接地, 采用测量获取的 $-40\sim 50$ °C 范围内变压器油、油浸纸板的电导率数据依次进行计算。常温(20 °C)下的端部电场分布特性计算结果见图10、11。

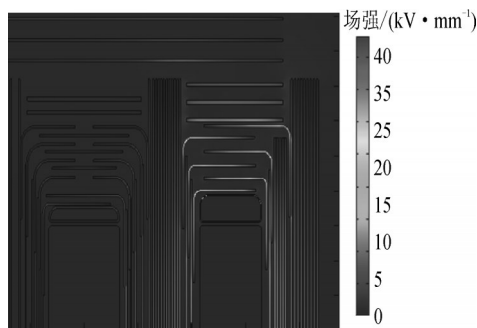


图10 直流电压下绕组端部电场强度分布(20 °C)

Fig.10 Distribution of electric field intensity under DC

voltage(20 °C)

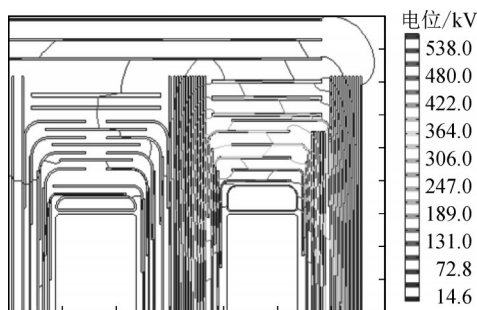


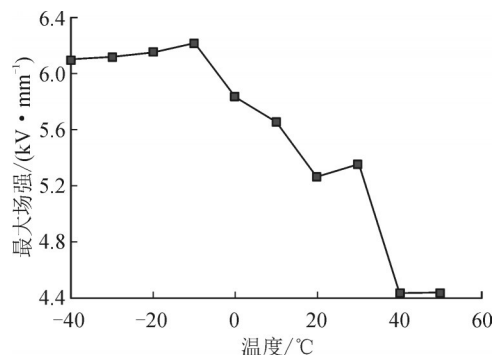
图11 直流电压下绕组端部等电位分布(20 °C)

Fig. 11 Potential distribution under DC voltage(20 °C)

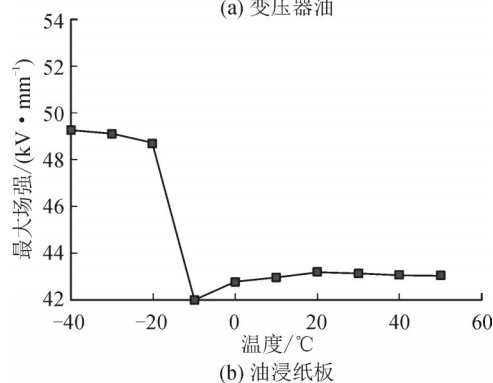
结果表明:油浸纸板中的电场强度明显高于变压器油,最大场强出现在阀侧绕组的静电环和角环的圆角处;等电位线主要在油浸纸板中降落,在变压器油中的等电位线分布较少。直流电压作用下油纸绝缘系统的电场强度和等电位线分布主要由介质的电导率决定,且电场分布与电导率成反比,油浸纸板电导率远小于变压器油,因此油浸纸板中的电场强度大于变压器油。计算结果与理论分析相符合。

直流试验电压作用下,绕组端部变压器油和油浸纸板的最大场强温度变化特性见图12。由图12(a)可知,随着温度的升高,油中最大场强呈抛物线趋势下降,但整体场强较低。由图12(b)可知,在 $-10\sim +50$ °C 范围,随着温度的升高,油浸纸板中最大场强略有增加,但变化幅度不大,最大场强在 43 kV/mm 左右,但在温度低于 -10 °C 后,由于最大场强位置由阀侧绕组右侧第3个角环圆角处,转移到阀侧绕组静电环右侧圆角处,最大场强有一个突变,且大幅

增大,温度低于 -20 °C 后,随着温度的降低,油浸纸板中最大场强略有增大, $-40\sim -20$ °C 时最大场强在 50 kV/mm 左右,相比于常温增加了 13% 左右。这表明,在直流电压下,低温会引起油浸纸板电场强度的大幅度增大,低温环境需增加变压器端部油浸纸板的绝缘裕度。



(a) 变压器油



(b) 油浸纸板

图12 直流电压下最大电场强度温度变化特性

Fig. 12 Change characteristics of maximum field under DC voltage

同样,考虑换流变压器耐压试验的温度等效性,计算在直流耐压试验中的电压温度校正系数。由于在稳态直流电压作用下,油浸纸板中的场强远大于变压器油,油纸复合绝缘的绝缘性能主要关注油浸纸板中的最大场强,因此,选择油浸纸板中的最大场强计算直流耐压试验的温度校正系数。考虑换流变压器实际运行时内部可能出现的温度为 T_s , 换算到常温(20 °C)时所应施加的等效直流试验耐受电压为 U'_s , U'_0 为换流变压器内部温度为常温(20 °C)时施加的直流耐受电压, K' 为温度校正系数,且有: $U'_s = K' U'_0$ 。

对于文中计算的换流变压器,阀侧绕组直流耐压试验的温度校正系数 K' 计算结果见图13。结果表明:考虑换流变压器在实际运行过程中,内部温度可能低至 -40 °C,则在常温下的出厂耐压试验中,所施加的电压需提高到 1.14 倍,才能准确检验其绝缘强度。

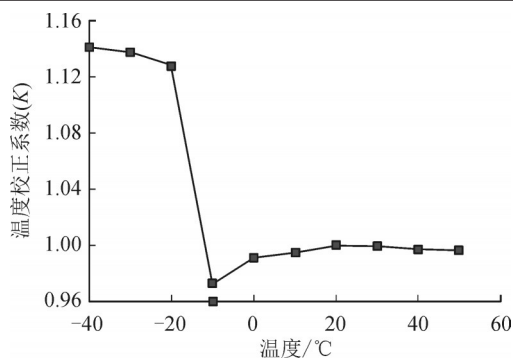


图13 直流电压作用下的温度校正系数

Fig. 13 Temperature correction coefficient under DC voltage

4 结论

文中基于变压器油和油浸纸板的相对介电常数、电导率温度变化特性,研究了换流变压器绕组端部油纸绝缘系统电场分布的温度变化特性。结论如下:

1)在-40~+50 °C温度范围内,变压器油的相对介电常数随温度的升高呈线性减小,油浸纸板的相对介电常数随温度的升高呈线性增大,二者的电导率随温度的升高均呈指数增大。

2)交流电压作用下,低温有利于改善换流变压器绕组端部油纸绝缘系统的电场分布,降低变压器油中最大场强,而高温则会使增大变压器油中最大场强,使油纸复合绝缘的电场分布更加不均衡;直流电压作用下,低温(-20 °C以下)会导致换流变压器绕组端部油浸纸板中最大场强的大幅增加。

3)不同温度下换流变压器油纸绝缘系统的电场分布特性不同,即绝缘强度不同,换流变压器的出厂试验需考虑实际运行条件下内部温度的变化范围做出适当的修正。

参考文献:

- [1] BHUVANESWARI G, MAHANTA B C. Analysis of converter transformer failure in HVDC systems and possible solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2):814-821.
- [2] 张海文, 李哲, 李海学. 严寒地区耐低温外墙外保温系统[J]. 建设科技, 2006(9):24-25.
ZHANG Haiwen, LI Zhe, LI Haixue. Low temperature exterior wall external insulation system in cold area[J]. Construction Technology, 2006(9):24-25.
- [3] 赵晓荔. 高寒地区直接空冷系统防冻热负荷能力匹配原则及应用[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
ZHAO Xiaozhi. Matching principle and application of anti-

freeze heat load capacity of direct air cooling system in alpine area[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

- [4] ±800 kV及以下直流换流站电气装置安装工程施工及验收规程:DL/T 5232—2010[S].2010.
Specification for construction and acceptance of electric equipments in ±800 kV & under converter station: DL/T 5232—2010[S]. 2010.
- [5] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
XIE Yucheng. Power transformer manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [6] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
YIN Kening. Transformer design principle[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [7] 电力变压器第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙:GB/T 1094.3—2003[S].2003.
Power transformers— Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air: GB/T 1094.3—2003 [S]. 2003.
- [8] 换流变压器(第2部分):高压直流输电用换流变压器:GB/T 18494.2—2007[S].2007.
Converter transformers— Part 2: Transformers for HVDC applications: GB/T 18494.2—2007[S]. 2007.
- [9] TAKAHASHI E, SHIRASAKA Y, OKUYAMA K. Analysis of an anisotropic nonlinear electric field with a discussion of dielectric tests for converter transformers and smoothing reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3):1480-1486.
- [10] TAKAHASHI E, TSUTSUMI Y, OKUYAMA K, et al. Partial discharge characteristics of oil-immersed insulation systems under DC, combined AC-DC and DC reversed polarity voltage[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1):411-420.
- [11] RAJAN J S, DWARAKANATH K, MOORCHING S N. Comparative evaluation of dielectric strength of paper-oil insulation under AC, DC, combined, composite AC/DC and impulse voltage[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation. Montreal, Canada: IEEE, 1996:778-781.
- [12] RAJAN J S, DWARAKANATH K, MOORCHING S N. Comparative evaluation of dielectric strength of paper-oil insulation under AC, DC, combined, composite AC/DC and impulse voltage[C]//IEEE 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, USA: IEEE, 1998:236-239.
- [13] 刘国伟. 换流变压器内部混合电场的特性研究及绝缘分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2011.
LIU Guowei. Characteristic research and insulation analysis of mixed electric field in converter transformer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [14] 杨伟光. 复合电场作用下换流变压器阀侧绕组绝缘特性

- 研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2017.
- YANG Weiguang. Study on the insulation characteristics of the winding of valve side in converter transformer under the action of compound electric field[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2017.
- [15] 侯小默. 换流变压器阀侧电场特性仿真及其影响因素分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- HOU Xiaomo. Simulation of electric field characteristics on valve side of converter transformer and analysis of its influencing factors[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [16] 吴 锴, 朱庆东, 王浩森, 等. 温度梯度下双层油纸绝缘系统的空间电荷分布特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2366-2372.
- WU Kai, ZHU Qingdong, WANG Haosen, et al. Space charge distribution characteristics of double layer oil paper insulation system under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9):2366-2372.
- [17] TANG C, CHEN G, FU M, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2010, 17(3):775-784.
- [18] 池明赫, 陈庆国, 王新宇, 等. 温度对复合电压下油纸绝缘电场分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1524-1532.
- CHI Minghe, CHEN Qingguo, WANG Xinyu, et al. Influence of temperature on electric field distribution of oil-paper insulation under compound voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6):1524-1532.
- [19] 朱晓伟, 梁榕珊. 温度对油纸绝缘结构的击穿特性影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(1):64-68.
- ZHU Xiaowei, LIANG Rongshan. Study on influence of temperature on breakdown characteristic of oil-paper insulation[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2014, 35(1):64-68.
- [20] 朱晓伟. 温度对换流变压器油纸绝缘击穿特性影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2011.
- ZHU Xiaowei. Study on the influence of temperature on the breakdown characteristics of oil-paper insulation in converter transformer[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2011.

周 峰(1987—),男,硕士,工程师,主要从事电网设备状态检测与仪器检验等科技研究和管理工作。

张丹丹(1968—),女,博士,副教授,主要从事电气绝缘与放电、电气设备的状态监测与信息融合诊断、高电压新技术与应用方面的研究。

(上接第79页)

- [20] 刘冠兰. 地铁隧道变形监测关键技术与分析预报方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2013.
- LIU Guanlan. Study on key technology and analysis and forecast method of deformation monitoring for subway tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [21] SUN Y J, SHI B, CHEN S, et al. Feasibility study on corrosion monitoring of a concrete column with central rebar using BOTDR[J]. Smart Structures and Systems, 2014, 13(1):41-53.
- [22] 罗建斌. 基于光纤传感技术的高压输电线路覆冰状态监测研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
- LUO Jianbin. Research on icing condition monitoring of high voltage transmission line based on optical fiber sensing technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [23] 吕安强, 李永倩, 李 静, 等. 利用光纤应变判断光电复合海缆锚害程度的有限元分析法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11):261-268.
- LYU Anqiang, LI Yongqian, LI Jing, et al. Finite element analysis of the degree of anchorage of photoelectric composite submarine cable with optical fiber strain[J]. Journal of Electrotechnical Society, 2014, 29(11):261-268.
- 杨照光(1984—),男,硕士,高级工程师,从事电气设备状态检测与诊断技术研究。
- 田 源(1990—),男,博士研究生,从事电气设备状态检测与诊断技术研究。
- 秦 睿(1967—),男,硕士,高级工程师,主要从事风电场机组设备涉网性能检测、智能电网方面的研究。