

改进的变压器绕组热点温度估算方法

陈伟根, 赵涛, 江淘莎, 孙才新

(重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 根据变压器铁心和绕组的发热过程, 详细分析了变压器铁心损耗和负载损耗的组成以及其对变压器顶层油温和热点温度的影响, 从实际物理意义的角度详细解释了 GB/T 15164-1994《油浸式电力变压器负载导则》推荐的绕组热点温度计算方程各参数项的含义。在此基础上, 对推荐方程中的绕组指数和油指数项进行了调整和修改, 使其对应的物理意义更加合理。文章最后比较了负载导则中推荐方程和改进方程的计算结果, 二者反映的热点温度变化趋势相近, 计算结果相差较小, 改进方程在安全性方面显示出更高的可靠性。

关键词: 电力变压器; 热点温度; 铁心损耗; 负载损耗

中图分类号: TM411; TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0053-04

Improved Method for Calculation of Hot-spot Temperature in Power Transformer

CHEN Wei-gen, ZHAO Tao, JIANG Tao-sha, SUN Cai-xin

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology of the Ministry of Education, Electrical Engineering Department, Chongqing University, Chongqing 400044, china)

Abstract: According to the thermal process of transformer core and winding, this paper analyzes the compositions of core loss and load loss and their impacts on top oil temperature and hot-spot temperature of a transformer, and discusses the physical meanings of the parameters of the hot-spot temperature calculation equation recommended in the standard GB/T 15164-1994 (loading guide for oil-immersed power transformers). Moreover, the winding temperature exponent and oil temperature exponent of the recommended equation are corrected so that the physical significances corresponding to those items are more reasonable. The comparison results between the recommended equation and the improved equation indicate that the hot-spot temperature trends to being similar with small difference, and the improved equation shows higher reliability in security.

Key words: power transformer; hot-spot temperature; core loss; load loss

0 引言

变压器绕组绝缘的热点温度是限制运行中变压器负载能力的最大因素, 变压器发热引起内部温度的升高也是变压器绝缘材料老化的主要因素。因此, 国内外的变压器相关标准中都规定了变压器运行时的最大温度限值^[1,2], 变压器运行时绕组的顶油温升和最热点温度必须处于指定的最大值以下。但是要得到运行中变压器的绕组热点温度是非常困难的, 变压器内部热的产生、传导、对流等过程非常复杂, 无法建立一个真正准确的温度计算模型。文[3]尝试利用传热对流理论来建立变压器的热模型, 但是真实变压器中的温度分布与油流情况、油道几何结构、

负载情况等关系复杂, 由热传递理论建立的计算公式与真实变压器中的油流情况背离很大, 无法保证计算模型的准确性。目前得到绕组的热点温度主要采取两种方法: 一是直接测量法, 使用光纤温度传感器进行测量, 由于绕组热点位置主要凭借经验来确定, 加之光纤传感器的成本很高, 所以目前这种方法还很少应用; 二是通过变压器内部热过程分析, 建立变压器绕组热点温度计算模型, 根据变压器运行时的环境温度, 易测得变压器特殊位置油温以及实时的负载数据, 进行热点温度的计算。这种方法前人已进行了大量的研究, 提出了各种各样的变压器内部温度预测模型, 能够在保证一定准确度的情况下预测绕组的热点温度^[4-10]。第 2 种方法的模型可分为以下 3 类: IEEE C57.91 和 IEC 354 标准中推荐的热点温度计算模型, 是最基本的且实际应用最为

收稿日期: 2008-02-19; 修回日期: 2008-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(50777069)。

作者简介: 陈伟根(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电气设备在线监测及诊断技术研究。

广泛的模型。在这两个模型中，热点温度由环境温度、顶油或底油温度以及绕组热点对油的温差来计算得到。在预测方程中，针对不同负载情况采用不同的负载系数进行修正，对于不同的冷却方式则采用相应的绕组指数和油指数进行修正。改进的热点温度模型，这类模型是基于以上两标准中推荐的热点温度模型进行的改进。文[4]通过对变压器不同运行情况下的试验发现，当负载增加时，变压器绕组热点温度升高速度要比采用顶油时间常数的指数方程预测值快，因此其对标准中推荐方程进行了修正，在热点升温系数上加入了过冲因子。文[6]在对变压器短路热试验研究的基础上对推荐方程进行了修改，建立了基于底油温度的热点预测方程。基于热电类比的热点温度预测模型。文[7-8]详细介绍了应用热电类比法进行变压器内部温度预测的方法，文[5,9]将热电模型用于绕组热点温度的预测，分别建立了基于顶层和底部油温的热点温度预测模型。此类模型中含有较多的非线性参数，需要采用参数辨识方法来确定。

笔者基于 GB/T 15164-1994 《油浸式电力变压器负载导则》(即 IEC 354 标准) 中推荐的变压器绕组热点温度计算模型，通过分析变压器内部的热产生过程，详细解释了负载导则推荐方程中各参数项对应的物理意义，在此基础上结合变压器内部热产生和冷却过程提出了一种改进的绕组热点温度计算模型，模型中考虑了能够直接引起变压器绕组热点温度升高的导线电阻损耗和涡流损耗对变压器热点温度的影响。通过实际变压器运行数据对模型进行了验证，并且与 GB/T 15164-1994 中推荐的方法进行了比较。

1 负载导则中绕组热点温度计算方法

在 IEC 354 标准(以下简称负载导则)中规定了油浸式变压器绕组热点温度计算方程。

稳态情况，自然油循环(ON)冷却的变压器，任一负载下的最终热点温度由式(1)得出

$$\theta_h = \theta_a + \theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + H_g K^y \quad (1)$$

式(1)中， θ_h 为任意负载情况热点温度， $^{\circ}\text{C}$ ； θ_a 为环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ； θ_{or} 为额定电流下的顶层油温升， $^{\circ}\text{C}$ ； R 为额定电流下的负载损耗和空载损耗之比； K 为负载系数，它是负载电流与额定电流的比值； x 为油的指数，ON 冷却方式的配电变压器取 0.8，中大型电力变压器取 0.9，OF(强迫油循环)冷却方式的变压器取 1.0； H_g 为额定负载下热点对绕组顶部油的温差， $^{\circ}\text{C}$ ； y 为绕组指数，ON、OF 冷却方式的电力变压器均取 1.6。

OF 冷却方式的变压器，在任一负载下的最终热

点温度由式(2)得出

$$\theta_h = \theta_a + \theta_{br} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + 2(\theta_{inr} - \theta_{br})K^y + H_g K^y \quad (2)$$

式(2)中， θ_{br} 为额定电流下的底部油温升， $^{\circ}\text{C}$ ； θ_{inr} 为油平均温升， $^{\circ}\text{C}$ 。

从导则推荐的方程中可知， $\frac{1+RK^2}{1+R}$ 表示变压器

运行时任一负载情况下的总损耗与额定情况下的总损耗之比， H_g 为额定负载下热点对绕组顶部油的温差， K^y 为任一负载情况对额定负载情况的温差系数。

2 变压器铁心和绕组发热机理分析

变压器损耗包括空载损耗(铁心损耗)和负载损耗，可以表示为

$$P_T = P_C + P_L \quad (3)$$

式(3)中， P_T 为总损耗，W； P_C 为空载损耗，W； P_L 为负载损耗，W。

空载损耗由存在于铁心中的磁滞损耗和涡流损耗构成，负载损耗由绕组导线中的电阻损耗、涡流损耗以及变压器夹件、油箱等结构中的杂散损耗构成。在变压器内部，铁心外包有套筒，将铁心油道与绕组油道隔开，所以负载损耗是造成绕组温度升高的最主要原因。

空载损耗可表示为^[11]

$$P_C = P_1 + P_2 = \delta_h f B_m^2 + \delta_e f^2 B_m^2 \quad (4)$$

式(4)中， P_1 为铁心中的磁滞损耗，W； P_2 为铁心中的涡流损耗，W； δ_h 为磁滞损耗系数； δ_e 为涡流损耗系数； f 为电流频率，Hz； B_m 为磁通密度的最大值，Wb/m²。

由式(4)可以看出，铁心损耗与磁通密度最大值 B_m 的平方成正比，因为变压器铁心的磁化曲线具有饱和特性，通常变压器设计时将 B_m 值选择在磁化曲线的接近饱和区，所以当负载电流增大时， B_m 随负载电流的增加并不大。

负载损耗可表示为

$$P_L = I^2 R + P_w + P_z \quad (5)$$

式(5)中， $I^2 R$ 为绕组导线的电阻损耗，由负载电流和绕组的直流电阻决定，W； P_w 为绕组中的涡流损耗，W； P_z 为杂散损耗，W。

式(5)中，绕组导线中的电阻损耗和涡流损耗产生的热量直接作用于绕组，直接引起变压器绕组温度的升高。当变压器运行中负载发生变化时，流经绕组中的电流发生变化，当绕组电流增大时，绕组的电阻损耗和涡流损耗增加，造成绕组热点温度的升高，而此时铁心损耗产生的热量由于磁通饱和的原因基本不会增大。在油循环过程中，铁心散热油道并不与绕组的散热油道直接相连，流经铁心散热油道的热油首先会进入变压器油箱顶部，使顶油温度升高，然后进入散热器循环才会进入到绕组的散热油道，所

以铁心损耗产生的热量对顶油温升会产生直接的影响,对绕组热点温度不产生直接影响,绕组导线中的电阻损耗和涡流损耗产生的热量才是产生绕组热点温升的直接原因。

3 热点温度计算方法的改进

通过分析对变压器铁心和绕组的发热可以对负载导则方程有进一步的理解, $\frac{1+RK^2}{1+R}$ 表示变压器运行时任一负载情况下,铁心损耗不变,负载损耗随电流变化而变化,它是负载电流变化对顶油温度影响程度的反应。 K' 为任一负载电流情况对额定负载电流情况的温差系数,其中不包含铁心损耗,所以它是负载电流变化对热点温度影响程度的反应。

对绕组中的涡流损耗做如下假设:假设涡流损耗与绕组的负载电流平方成正比;假设在绕组的热点位置涡流损耗为电阻损耗的 $1/N$ 。则任一负载情况下,热点对绕组顶部油的温差可以表示为

$$\theta_{gt} = \left[\frac{1 + \left(\frac{I}{I_R}\right)^2 \times \frac{I}{N}}{1 + \frac{I}{N}} \right]^x Hg_r \quad (6)$$

式(6)中, θ_{gt} 为任一负载情况下最终绕组热点相对于油的温升, $^{\circ}\text{C}$; I 为绕组负载电流, A ; I_R 为绕组额定负载电流, A 。

对于实际运行中的变压器,绕组的电阻损耗也会随着绕组电流的增大而增大,所以式(6)分子中的“1”应改为 $(I/I_R)^2$,分母仍为额定情况下电阻损耗与涡流损耗之和,式(6)修改为式(7)

$$\theta_{gt} = \left[\frac{\left(\frac{I}{I_R}\right)^2 + \left(\frac{I}{I_R}\right)^2 \times \frac{I}{N}}{1 + \frac{I}{N}} \right]^x Hg_r = \left(\frac{I}{I_R}\right)^{2x} Hg_r = Hg_r K^{2x} \quad (7)$$

因此,应对 IEC 354 标准中规定的油浸式变压器绕组热点的温度计算方程进行修改。

其中将式(1)修改为

$$\theta_h = \theta_a + \theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + Hg_r K^{2x} \quad (8)$$

同时,由上述分析可知,在估算绕组热点温度时,铁心损耗不直接产生作用,故可只考虑负载系数“ K ”的影响,估算油温时,需要同时考虑变压器负载损耗和铁心损耗的共同作用,所以式(2)修改为

$$\theta_h = \theta_a + \theta_{br} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + 2(\theta_{imr} + \theta_{br}) \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + Hg_r K^{2y} \quad (9)$$

从改进的计算方程中可以看出,当负载系数 $K=1$ 时,式(1)与(8)、式(2)与(9)具有相同的形式。原公式中的 y 被改进方程中的 $2x$ 代替,使热点温度计算所需参数减少了一个。表1中列出了不同冷却形式下 $2x$ 与 y 的数值。对于 ONAN 和 OD 两种冷却方式, $2x=y$, 中大型变压器的 ON 和 OF 冷却方式, $2x>y$ 。这样在 $K>1$ 时,改进方程的计算结果将比负载导则推荐方程的计算结果偏大, $K<1$ 时结果将偏小。

表1 不同冷却形式下 $2x$ 与 y 的数值对比

	配电变压器		中大型变压器	
	ONAN	ON...	OF...	OD...
x	0.8	0.9	1.0	1.0
$2x$	1.6	1.8	2.0	2.0
y	1.6	1.6	1.6	2.0

在负载导则中列出了4种不同冷却方式的电力变压器供计算。计算出的热特性数据实例见表2,在 ONAN 和 OD 冷却方式下 $2x=y$, 改进方程与负载导则方程结果相同,选取另外两种冷却方式 ON... 和 OF..., 分别采用负载导则中推荐的计算热点方程和改进方程,比较不同的负载系数下两种方法的计算结果。比较结果曲线分别列于图1、2。

表2 供计算的变压器热特性数据实例

冷却方式	配电变压器		中大型变压器	
	ONAN	ON...	OF...	OD...
油的指数 x	0.8	0.9	1.0	1.0
绕组指数 y	1.6	1.6	1.6	2.0
损耗比 R	5.0	6.0	6.0	6.0
热点系数 H	1.1	1.3	1.3	1.3
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20.0	20.0	20.0	20.0
热点温升/ K	78.0	78.0	78.0	78.0
绕组平均温升/ K	65.0	63.0	63.0	68.0
热点对绕组顶部油的温差/ K	23.0	26.0	22.0	29.0
油平均温升/ K	44.0	43.0	46.0	46.0
绕组顶部油温升/ K	55.0	52.0	56.0	49.0
底部油温升/ K	33.0	34.0	36.0	43.0

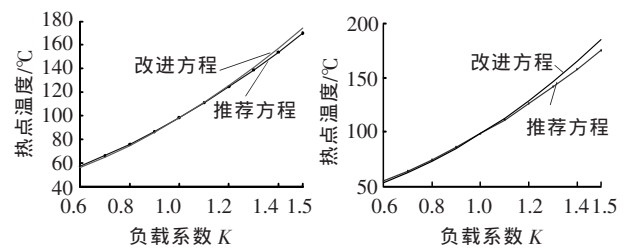


图1 ON...冷却方式计算结果比较 图2 OF...冷却方式计算结果比较

由计算结果的对比曲线可以发现,两种方法的计算结果差别较小,随着负载系数的增大,改进方程热点温度的增长速度比负载导则推荐方程的稍快,当变压器超过额定负载运行时,改进方程的结果比负载导则推荐方程的结果偏大,而且偏大程度随负载系数 K 的增大而加剧。

文[4]应用光纤传感器对不同运行情况、不同散热方式的变压器的绕组热点温度进行了测量,同时分别应用 IEEE 热点模型和 IEC 热点模型进行了计

算,并将3者的结果进行了对比。对比结果显示,对于多数情况,IEC热点模型优于IEEE热点模型。对实际意义最为重要的变压器过载运行情况,除表中的第1种情况外,另外3种情况均表明热点的实际测量值要大于IEEE和IEC的预测值,见表3(对应文[4]中表5)。由于该文中并没有列出用于计算的全部参数,所以不能应用笔者的改进方程进行计算,但通过笔者改进模型与IEC模型结果比较,可以看出笔者的改进模型对于某些过载运行变压器的热点温度会有更准确的预测结果。该改进模型对于过载运行的电力变压器热点温度预测具有更高的安全性^[12-14]。

表3 过载情况下热点温度结果比较

绕组电压等级容量及散热方式	环境温度/°C	负载系数/p.u.	热点温度/°C		
			IEEE模型	IEC模型	测量值
120 kV 400 MV·A ONAF	25.0	1.6	138.1	140.9	132.4
410 kV 400 MV·A AONAF	25.0	1.6	134.9	137.2	140.0
118 kV 250 MV·A ONAF	25.3	2.1	141.6	138.1	140.7
HV 605 MV·A OFAF	26.5	1.3	106.6	113.3	115.8

4 结语

(1)笔者根据变压器铁心和绕组的发热过程,详细分析了变压器铁心损耗和负载损耗的组成,以及对变压器顶层油温和热点温度的影响,从实际物理意义的角度详细解释了GB/T 15164-1994《油浸式电力变压器负载导则》推荐的绕组热点温度计算方程中各参数项的含义,为推荐方程的改进提供了理论基础。

(2)在此基础上,对推荐方程中的相关参数项进行了调整和修改。通过比较推荐方程和改进方程的计算结果,二者反映的热点温度变化趋势相近,计算结果相差较小,对于过载运行情况下的变压器绕组热点温度,改进方程的计算结果比导则推荐方程偏大。

(3)上述改进是基于变压器内部热产生和冷却

过程进行的,改进后的方程各参数项对应的物理意义更加合理,改进方程在安全性方面显示出更高的可靠性。

参考文献:

- [1] GB/T 15164-1994. 油浸式电力变压器负载导则[S].
- [2] IEEE C57.91. IEEE Guide for Loading Mineral-oil-immersed Power Transformers[S]. 1995.
- [3] PRADHAN M K, RAMU T S. Prediction of Hottest Spot Temperature (HST) in Power and Station Transformers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1275-1283.
- [4] NORDMAN H, RAFSBACK N, SUSA D. Temperature Responses to Step Changes in the Load Current of Power Transformers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1110-1117.
- [5] SUSA D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(1): 197-204.
- [6] RADAKOVIC Z, FESER K. A New Method for the Calculation of the Hot-spot Temperature in Power Transformers with ONAN Cooling [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1284-1292.
- [7] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling, Part I-theory and Equivalent Circuit[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
- [8] SWIFT G, MOLINSKI T S, BRAY R. A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling, Part II-field Verification [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(2): 176-180.
- [9] SUSA D, LEHTONEN M. Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers: Further Development-part II [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(4): 1971-1980.
- [10] THAMMARAT C, SUECHOEY B, TADSUAN S, et al. An Analysis of Temperature of Oil-immersed Transformer Under Non-linear Load [C]// 2004 International Conference on Power System Technology-powercon, 2004: 21-24.
- [11] PIERCE L W. Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(3): 633-645.
- [12] 叶东. 电机学[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1995.
- [13] 保定天威保变电气股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [14] GB 1094.2-1996. 电力变压器温升[S].

(上接第52页)

7(1): 339-345.

- [9] PONS A, LECONTE C, WILLIEME J M. Breaking Capacity of SF₆ Circuit-breaker at Low Temperatures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1165-1172.
- [10] ISAAC L T, JONS G R, HUMPHRIES J E, et al. Monitoring Particle Concentrations Produced by Arcing in SF₆ Circuit Breaker Using a Chromatic Modulation Probe [J]. IEE Proc.-Sci. Meas. Technology, 1999, 146(4): 199-204.
- [11] YAN J D, FANG M T C. Dielectric Recovery of a Residual SF₆ Plasma between Two Parallel Plane Electrodes [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8

(1): 129-136.

- [12] ENDO F, SATO M, TSUKUSHI M, et al. Analytical Prediction of Transient Breakdown Characteristics of SF₆ Gas Circuit Breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(3): 1731-1737.
- [13] 林莘, 刘克彬, 狄谦. 自能式SF₆断路器压力特性理论计算与试验研究[J]. 中国电力, 2007, 40(11): 57-61.
- [14] 李一滨, 杨涌, 王其平. 压气式SF₆断路器无载开断过程中触头堵塞现象的研究[J]. 高压电器, 1998, 34(4): 3-11.
- [15] 王程, 林莘. 自能式SF₆断路器灭弧室气压特性及对开断性能的研究[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(5): 108-111.