

基于热等效电路模型的干式变压器 温度变化规律研究

冯建勤, 赵楠, 康国平

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:根据热电类比原理,建立了干式变压器的热等效电路模型.利用计算机仿真软件 ATPDraw5.4 对该热等效电路模型进行了计算机仿真,研究正常负荷变动、过载情况以及二次侧短路时干式变压器温度变化的规律.仿真结果表明:正常负荷变动或过载情况下,干式变压器温度按指数规律变化.负荷增加时,其温度呈指数曲线上升;负荷减小时,其温度按指数函数下降.当干式变压器的二次侧发生短路时,其温度则会依照幂函数曲线急剧上升.

关键词:干式变压器;热电类比;计算机仿真;热等效电路模型

中图分类号:TM401⁺.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.01.023

Research on temperature variation of dry-type transformers based on thermal equivalent circuit model

FENG Jian-qin, ZHAO Nan, KANG Guo-ping

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the principle of thermal-electrical analogy, a thermal equivalent circuit model of one dry-type transformer was built. The temperature variation of the dry-type transformer was studied through simulating the thermal equivalent circuit model by software ATPDraw5.4 when its load changed within the limits of rated load or overload, or it was shorted in secondary circuit. The simulation results showed that the temperatures of the dry-type transformer change in accordance with exponential functions when its load changes within the limits of rated load or overload, and increase rapidly and greatly in accordance with power functions when it is shorted in secondary circuit.

Key words: dry-type transformer; thermal-electrical analogy; computer simulation; thermal equivalent circuit model

0 引言

变压器的内部温度情况对于它的使用寿命和运行安全都很重要,过高的温度会降低绕组的绝缘

性能,甚至会导致变压器出现故障.树脂绝缘干式变压器因其良好的绝缘性能和耐热性能得到了广泛的应用,但由于其导热性能较差,散热效果不理想,因此,掌握它的内部温度情况非常重要.目前,

收稿日期:2012-10-11

基金项目:河南省科技攻关项目(102102210141)

作者简介:冯建勤(1962—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为电力系统自动化、微机测控技术和智能仪器仪表.

对于干式变压器温度问题的研究多集中在内部温度的静态分布上^[1-5],或在干式变压器温度的简单在线监控和简单的阈值保护上^[6-7],较少触及干式变压器内部温度的动态变化规律研究.事实上,仅仅研究干式变压器内部热点温度和内部温度场的分布对于保证它的安全运行是远远不够的.只有同时掌握了内部温度的变化规律,才算全面掌握了它的内部温度情况.因此,研究干式变压器的温度变化规律,对于改进其温度在线监控技术、提高温度保护性能都是很有意义的,甚至有可能催生出新型的变压器温度保护.本文拟利用热等效电路模型,通过计算机仿真,研究干式变压器在负荷变动时的温度变化规律,进而得出温度随时间变化的函数关系.

1 研究对象及其仿真模型

研究对象选用一台 SCB8 系列树脂浇注干式变压器,其结构、材料及参数见文献[1].根据该干式变压器的结构、材料等参量,利用热电类比原理,建立其热等效电路模型^[8-10],如图1所示.其中,各电学参量的值见表1.

利用计算机仿真软件 ATPDraw5.4 对图1所示模型进行仿真,可以得到干式变压器铁芯内部温度 θ_{Cint} ,铁芯表面温度 θ_{Crsup} ,低压绕组内部温度 θ_{LVint} ,高压绕组内部温度 θ_{HVint} ,高压绕组外表面温度 θ_{HVsup} 的变化规律曲线.

干式变压器的发热主要由负载损耗和空载损耗引起.负载损耗与高、低压绕组中电流的平方成正比,与其线圈电阻成正比.空载损耗与变压器绕组上的电压大小有关,受负载电流的影响并不大.

当变压器的负载在正常负荷范围内或者过载情况下发生变动时,其高、低压绕组中电流随之发生变化,变压器的负载损耗也会相应地发生变化,这时可以忽略铁心损耗产生的热量变化.当变压器二次侧发生短路时,通过高、低压绕组的电流急剧增大,可达到额定电流的 20 ~ 30 倍,负载损耗随之急剧增加,绕组的发热功率变成额定负载时的 400 ~ 900 倍,此时可忽略铁芯的发热功率.

因此,在对图1所示模型进行仿真时,可以通过改变发热功率来模拟各种负荷变动或者短路故障.

2 额定负荷及过负荷时的温度变化

以变压器从稳定的空载状态过渡到额定负载状态,再从稳定的额定负载状态过渡到过负荷状态时的温度变化为例.仿真中,空载状态下发热功率 $Q_{core} = 2.07 \text{ kW}$, $Q_{LV} = 0 \text{ kW}$, $Q_{HV} = 0 \text{ kW}$;额定负载状态下发热功率 $Q_{core} = 2.07 \text{ kW}$, $Q_{LV} = 4.227 \text{ kW}$, $Q_{HV} = 3.033 \text{ kW}$;过负荷状态下(过载 20%)发热功率 $Q_{core} = 2.07 \text{ kW}$, $Q_{LV} = 1.44 \times 4.227 \text{ kW}$, $Q_{HV} = 1.44 \times 3.033 \text{ kW}$.仿真从施加额定负载开始, $t = 0$ 时刻以前变压器处于空载状态, $t = 0$ 时刻切换到额定负载状态, $t = 25 \text{ ks}$ 时刻切换到 120% 额定负载状态,仿真结果如图2所示.

从图2可以看出,当变压器的负荷从空载状态切换到额定负载状态以及从额定负载状态切换到过负荷状态时,它内部各处的温度均从一个稳定状态过渡到另一个稳定状态,其间的过渡过程符合上升的指数函数规律.推而广之,在正常负荷范围内或者过载情况下,变压器负荷增加时,它各处的温度

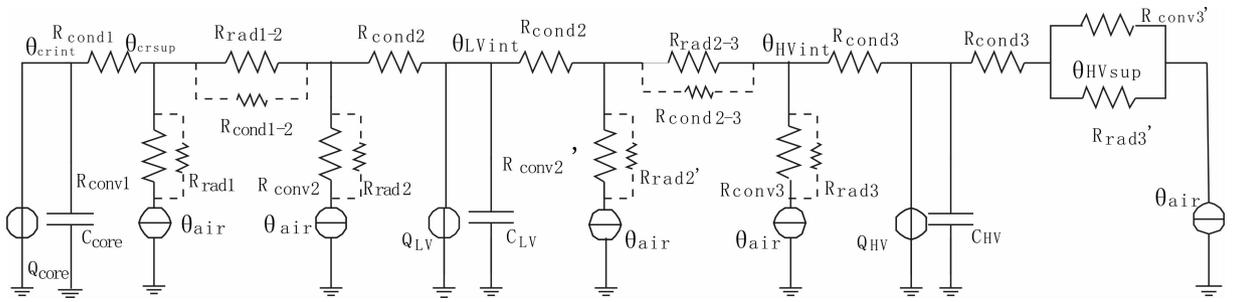


图1 干式变压器热等效电路模型

表1 热等效电路模型参数

参数	发热功率/kW			热等效电阻/(K · W) ⁻¹											等效热容值/(Ws · K) ⁻¹		
	Q_{core}	Q_{LV}	Q_{HV}	R_{cond1}	R_{cond2}	R_{cond3}	R_{conv1}	R_{conv2}	R_{conv3}	R_{rad1-2}	R_{rad2-3}	R_{conv2}'	R_{rad3}	R_{rad3}'	C_{core}	C_{LV}	C_{HV}
参数值	2.070	4.227	3.033	0.053	0.024×10^{-2}	3.690×10^{-3}	0.385	0.331	0.253	3.640	2.400	0.247	0.105	0.186	135 587.8	101 922.1	132 236.9

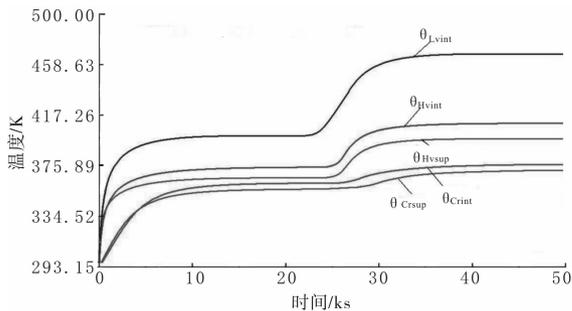


图2 额定负荷及过负荷时的温度变化曲线

均呈指数函数曲线上. 若以负荷发生变动的时刻为起始时刻, 则温度变化规律可表示为

$$\theta(t) = \theta_0 + (\theta_m - \theta_0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

式中, θ 是变压器的实时内部温度, θ_0 是变压器负荷变化前的初始温度, θ_m 是负荷变化后的稳态温度, τ 是代表变压器温度变化快慢的时间常数.

比较图2中各温度变化曲线可以发现, 变压器负荷增加后, 高、低压绕组的温度上升较快, 过渡过程持续时间较短(约为6 ks), 时间常数较小(约为1.5~2 ks); 铁芯温度上升较慢, 过渡过程持续时间较长(约为9 ks), 时间常数较大(约为2.25~3 ks). 另外, 在任意时刻, 低压绕组的温度总是高于高压绕组的温度, 高压绕组的温度总是高于铁芯的温度.

3 二次侧短路及变压器切除时的温度变化

仿真从施加额定负载开始($t = 0$ 时刻), 先使干式变压器在额定负荷状态下工作至温度稳定, $t = 25$ ks时刻使变压器二次侧短路, $t = 35$ ks时刻将变压器切除. 仿真中, 短路状态下的发热功率取 $Q_{core} = 0$ kW, $Q_{LV} = 400 \times 4.227$ kW, $Q_{HV} = 400 \times 3.033$ kW, 仿真曲线见图3.

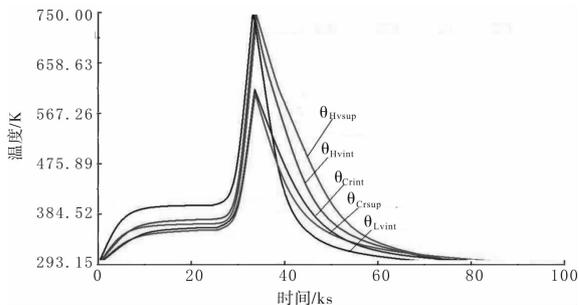


图3 二次侧短路及变压器切除时的温度变化曲线

由图3可以看出, 当干式变压器二次侧发生短路时, 其高、低压绕组的温度以及铁芯温度都会同时急剧上升, 在很短时间内达到很高的数值. 这时, 变压器各处的温度变化曲线较符合幂函数. 若以短路发生时刻作为初始时刻, 则该幂函数可表示为

$$\theta(t) = \theta_0 + kt^n \tag{1}$$

式中, θ_0 为短路发生时刻变压器各部件的初始温度, k 和 n 为经验系数.

式①中的经验系数 k 和 n 可以利用曲线拟合的方法求得^[11]. 这里仅以高压绕组内部温度变化曲线为例进行曲线拟合. 在二次侧短路状态下高压绕组内部温度变化曲线上选取12个点, 其时间和温度值列于表2.

表2 高压绕组内部温度曲线数据

t_i /ks	θ_i /K	t_i /ks	θ_i /K	t_i /ks	θ_i /K
0	375.38	4.50	418.78	7.00	578.68
1.50	375.95	5.00	441.62	7.50	635.79
2.50	381.66	5.75	487.31	8.00	692.89
2.75	401.65	6.25	539.25	8.75	749.67

设

$$\theta'(t) = kt^n \tag{2}$$

对式②两边取对数, 则有

$$\lg \theta'(t) = \lg k + n \lg t$$

记 $u(t) = \lg \theta'(t)$, $c_0 = \lg k$, $c_1 = n$, 得

$$u(t) = c_0 + c_1 \lg t$$

建立正规方程组 $G^T Gk = G^T \theta$ 并求解, 可得到 $c_0 = 1.06$, $c_1 = 2.64$, 从而 $k = 11.43$, $n = c_1 = 2.64$.

故所求的最小二乘拟合函数为

$$\theta'(t) = 11.43t^{2.64}$$

则高压绕组内部温度变化曲线函数为

$$\theta(t) = 375.38 + 11.43t^{2.64}$$

用同样的方法可求得干式变压器铁芯和低压绕组在二次侧短路状态下温度变化曲线的函数, 其 k 值分别为 8.61 和 11.97, n 值分别为 2.26 和 2.77.

通过分析图3所示各温度变化曲线不难看出, 干式变压器二次侧短路过程中, 它各处的温度相差不大, 近乎相等.

由图3还可看出, 变压器切除之后, 各部件的温度均按指数规律下降. 若以变压器切除时刻为初始时刻, 则相应的指数函数可表示为

$$\theta(t) = \theta_m + (\theta_0 - \theta_m)e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3}$$

式中, θ_0 是变压器切除时刻的初始温度, θ_m 为变压器最后的稳定温度。

由图3可知, 低压绕组的温度下降较快, 其时间常数约为 3.75 ~ 5 ks; 铁芯温度与高压绕组的温度下降较慢, 其时间常数约为 6.25 ~ 8.33 ks。

通过仿真可以证明, 在正常负荷范围内或者过载情况下, 变压器负荷减少时, 它各处的温度均按指数函数规律下降, 温度变化函数可用式③描述。

4 结论

本文根据热电类比原理, 建立了干式变压器的热等效电路模型。利用计算机仿真软件 ATP-Draw5.4 对该热等效电路模型进行了计算机仿真, 研究正常负荷变动、过载情况以及二次侧短路时干式变压器温度变化的规律。得出如下结论:

1) 正常负荷变动或者过载情况下, 干式变压器的温度变化规律可以用指数函数描述。负荷增加时, 变压器温度呈指数曲线上升; 负荷减小时, 其温度按指数规律下降。

2) 负荷增加时, 高、低压绕组的温度上升较快, 铁芯温度上升较慢; 负荷减小时, 低压绕组的温度下降较快, 铁芯温度与高压绕组的温度下降较慢。

3) 干式变压器的二次侧发生短路时, 它各处的温度按照幂函数曲线急剧上升。

4) 干式变压器在额定负载或者过载情况下, 低压绕组的温度最高, 高压绕组的温度次之, 铁芯的温度最低。

5) 干式变压器二次侧短路过程中, 它各处的温度相差不大, 近乎相等。

参考文献:

- [1] 颜寒, 郭永基, 林兆庄. 树脂绝缘干式变压器内部温度场分布仿真研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(7): 1.
- [2] 刘兴鹏. 基于热电类比理论的油浸式电力变压器热点温度计算模型[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 10-11.
- [3] 张强, 姚寿广, 马哲树. 干式变压器绕组温度场的数值计算与分析[J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2006(6): 80.
- [4] 李永刚, 崔伟, 张喜乐, 等. 干式变压器绕组热点温度的一种计算方法[J]. 变压器, 2011, 48(8): 5.
- [5] 周清泉. 大型变压器绕组温升计算的修正[J]. 变压器, 2008, 45(9): 5.
- [6] 钱政, 孙焦德, 袁克道. 电力变压器绕组热点状态的在线监测技术[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 26.
- [7] 季承. PLC 在干式变压器分布式监控系统中应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 79.
- [8] Swift G, Molinski T S, Lehn W. A fundamental approach to transformer thermal modeling—Part I: Theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171.
- [9] Eslamian M, Vahidi B, Eslamian A. Thermal analysis of cast-resin dry-type transformers[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52: 2479.
- [10] Moonhee Leea, Hussein A Abdullah, Jan C Jofriet, et al. Thermal modeling of disc-type winding for ventilated dry-type transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80: 121.
- [11] 于寅. 高等工程数学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 387.