

中华人民共和国国家标准

GB/T 1094.7—2008
代替 GB/T 15164—1994

电力变压器 第7部分：油浸式 电力变压器负载导则

Power transformers—Part 7: Loading guide for
oil-immersed power transformers

(IEC 60076-7:2005, MOD)

2008-09-24 发布

2009-08-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	Ⅲ
引言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号与缩写	3
5 超铭牌额定值负载效应	5
6 相对老化率和变压器绝缘寿命	6
7 限制	8
8 温度测定	10
9 分接开关的影响	19
附录 A (资料性附录) 非热改性和热改性绝缘纸	21
附录 B (资料性附录) 计算和提供过载数据实例	22
附录 C (资料性附录) 指数方程实例	25
附录 D (资料性附录) 绕组和油时间常数计算	29
附录 E (资料性附录) 微分方程解法的例证	30
附录 F (资料性附录) 附录 C 中例子的流程图	37
参考文献	39

前 言

GB 1094《电力变压器》目前包含了下列几部分：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：温升；
- 第 3 部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙；
- 第 4 部分：电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则；
- 第 5 部分：承受短路的能力；
- 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则；
- 第 10 部分：声级测定；
- 第 10.1 部分：声级测定 应用导则；
- 第 11 部分：干式变压器。

本部分为 GB 1094 的第 7 部分。本部分的前版标准代号为 GB/T 15164，对应的 IEC 标准代号为 IEC 60354。由于 IEC 有关电力变压器的标准代号现均调整为 IEC 60076 系列，为了与 IEC 的标准代号相协调且使用方便，本次修订也将标准代号按新 IEC 标准系列进行调整。

本部分修改采用 IEC 60076-7:2005《电力变压器 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则》(英文版)。

本部分根据 IEC 60076-7:2005 按修改采用原则重新起草。

考虑到我国国情，在采用 IEC 60076-7:2005 时，本部分做了一些修改。有关技术性差异已编入正文中并在它们所涉及的条款的页边空白处用垂直单线标识。本部分与 IEC 60076-7:2005 的主要差异如下：

- 1) 引用了采用国际标准的我国标准，而非直接引用国际标准；
- 2) 为便于使用，本部分还进行了下列编辑性修改：
 - 删除了 IEC 60076-7:2005 的前言；
 - 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“，”；
 - 调整了附录的顺序号，将 IEC 60076-7:2005 中 5.6 关于非热改性和热改性绝缘纸的内容调整为本部分的附录 A(资料性附录)的内容，将 IEC 60076-7:2005 的附录 A 调整为本部分的附录 D，IEC 60076-7:2005 的附录 B 在本部分中调整为附录 C，将 IEC 60076-7:2005 的附录 C、附录 D 和附录 E 依次调整为本部分的附录 E、附录 F 和附录 B；将 IEC 60076-7:2005 正文中的图、表编号在本部分中依次向前调整一个数。

本部分代替 GB/T 15164—1994《油浸式电力变压器负载导则》。

本部分与 GB/T 15164—1994 相比主要变化如下：

- a) 编写格式按 GB/T 1.1—2000《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写规则》和 GB/T 20000.2—2001《标准化工作指南 第 2 部分：采用国际标准的规则》的规定进行了修改；
- b) 标准名称由《油浸式电力变压器负载导则》改为《电力变压器 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则》；
- c) 增加了关于热点、相对热老化率、变压器绝缘寿命、寿命损失百分数、热改性纸、非导向油流、导向油流和设计环境温度的术语和定义；
- d) 增加了一些用于计算温升和损耗的符号和缩写；
- e) 增加了关于非热改性和热改性绝缘纸的内容，并将其作为资料性附录 A；

GB/T 1094.7—2008

- d) 增加了有关绝缘寿命的内容；
- g) 修改了超铭牌额定值负载时的绕组热点温度和金属部件的热点温度；
- h) 增加了用光纤传感器直接测量变压器热点温升的内容；
- i) 增加了确定热点系数时应考虑的一些内容；
- j) 增加了关于在变化的环境温度和负载条件下的顶层油温和热点温度的内容,并提供了两种可用于描述热点温度的方法；
- k) 增加了关于分接开关影响的内容；
- l) 删除了原标准中的正常周期负载图和急救周期负载表；
- m) 对附录的内容进行了调整

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本部分起草单位:沈阳变压器研究所、西安西电变压器有限责任公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司、保定天威保变电气股份有限公司、特变电工衡阳变压器有限公司、上海市电力公司、中电电气集团有限公司、保定天威集团特变电气有限公司、山东达驰电气股份有限公司。

本部分主要起草人:孙军、谢庆峰、孙树波、刘东升、贾贺强、姜益民、徐子宏、孙新忠、白峰君。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:GB/T 15164—1994。



引 言

本部分从运行温度和热老化观点提供了电力变压器的规范和负载导则。它提供了超铭牌额定容量的负载推荐值,并为设计人员选择新设备的适当额定参数和负载条件提供了指导。

GB 1094.2 是合同的基础,它包括了油浸式变压器在连续额定负载下温升值的要求和温升试验。应注意 GB 1094.2 指的是绕组平均温升,而本部分主要指的是热点温度,且该值只作指导用。

本部分给出了一些数学模型,用来判断不同负载在不同冷却介质温度下和在该负载呈瞬时或周期性变化时的结果。该模型用来对变压器运行温度进行计算,特别是对绕组最热部位的温度进行计算。此热点温度又是用来估算在某个特定期间内的额定热老化率和寿命损失百分数。模型涉及小型变压器(本部分称之为配电变压器)和电力变压器。

与 GB/T 15164:1994 的主要差别在于增加了光纤温度传感器在变压器中的应用,因而从根本上增大了获取电力变压器正确热模型的可能性,特别是在负载电流逐级变化的情况下。这种可能性就使得本部分所用的“油指数 x ”和“绕组指数 y ”与 GB 1094.2—1996 所用的有些不同,对电力变压器来说:

——对于 ON 冷却方式,GB 1094.2 中 $x=0.9$;而本部分中 $x=0.8$ 。

——对于 ON 和 OF 冷却方式,GB 1094.2 中 $y=1.6$;而本部分中 $y=1.3$ 。

对于配电变压器,本部分和 GB 1094.2 中所用的 x 和 y 值都相同。

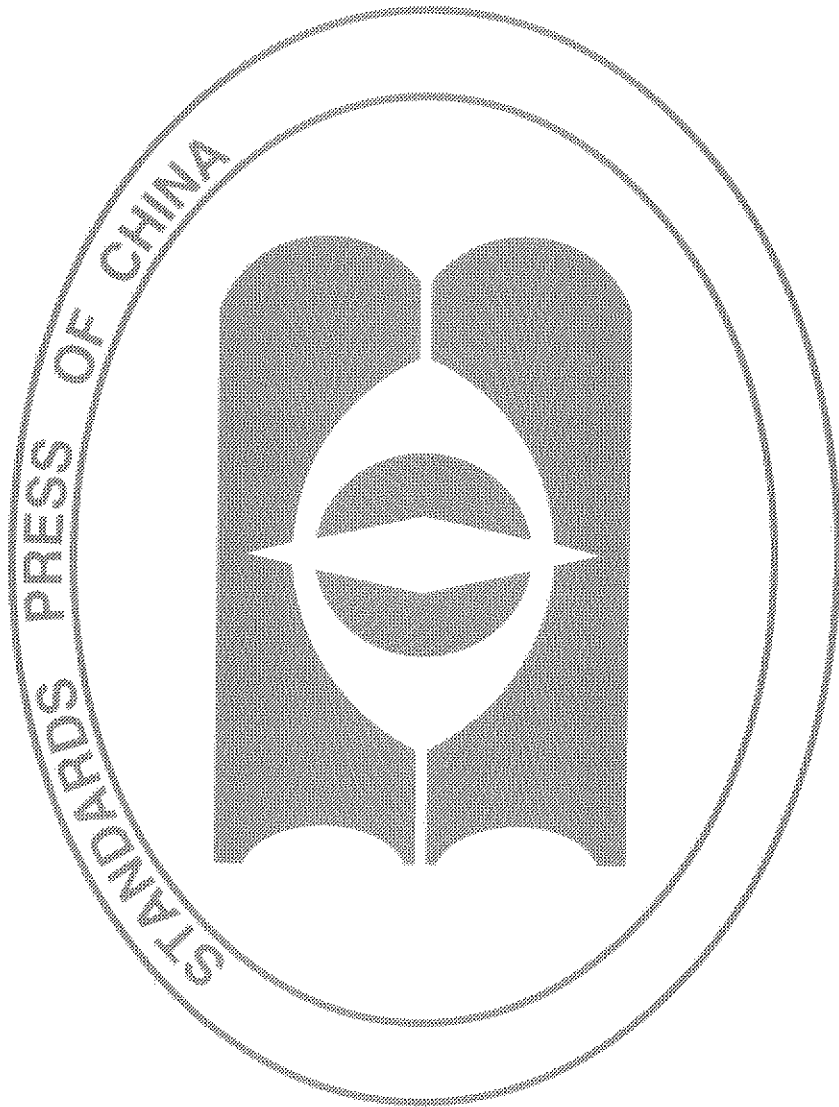
本部分还按温度计算或测量结果推荐了允许的负载限值。这些推荐值涉及不同形式的负载工况——连续负载、正常周期性稳定负载或暂时急救负载。这些推荐值涉及配电变压器、中型电力变压器和大型电力变压器。

第 1 章~第 7 章包括了不同类型变压器的定义、一般的背景信息和运行方面的各种规定限值。

第 8 章包括了温度的确定,提供了用于估算稳态和暂态条件下热点温度的数学模型。

第 9 章包括了分接位置影响的简要说明。

应用实例在附录 B、附录 C 和附录 E 中给出。



电力变压器 第7部分:油浸式 电力变压器负载导则

1 范围

GB 1094 的本部分适用于油浸式变压器。它阐述了变压器在不同环境温度和负载条件下的运行对其寿命的影响。

注:对于电炉变压器,制造方应向用户咨询特殊负载曲线。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB 1094 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB 1094.1—1996 电力变压器 第1部分;总则(eqv IEC 60076-1;1993)

GB 1094.2—1996 电力变压器 第2部分;温升(eqv IEC 60076-2;1993)

GB 1094.5—2008 电力变压器 第5部分;承受短路的能力(IEC 60076-5;2006,MOD)

ANSI/IEEE C57.100 油浸式配电变压器和电力变压器热评定的 IEEE 标准试验程序

ASTMD-982 纸和纸板中有机氮标准试验方法

3 术语和定义

本部分采用下列术语和定义。

3.1

配电变压器 distribution transformer

三相最大额定容量为 2 500 kVA,单相最大容量为 833 kVA 的电力变压器。

3.2

中型变压器 medium power transformer

三相最大额定容量为 100 MVA,单相最大容量为 33.3 MVA 的电力变压器。

3.3

大型变压器 large power transformer

超过 3.2 规定的容量限值的电力变压器。

3.4

周期性负载 cyclic loading

周期性变化的负载(周期持续时间通常为 24 h),该负载是按一个周期内累积的老化量来考虑的,它可以是正常负载,也可以是长期急救负载。

3.5

正常周期性负载 normal cyclic loading

在周期性负载中,在某段时间内环境温度较高,或施加了超额定负载的电流,但可以由其他时间内环境温度较低,或施加低于额定负载电流的电流所补偿。从热老化的观点出发,只要相对热老化率大于 1 的各周期中的老化值能被相对热老化率小于 1 的老化值所补偿,那么,这种周期性负载可以认为与正常环境温度下施加额定负载是等效的。这一原理可用于长时间的周期性负载运行中。

GB/T 1094.7—2008

3.6

长期急救负载 long-time emergency loading

由于系统中某些设备长时间退出运行而引起的一种负载方式,在变压器达到一个新的、较高的稳态温度之前,这些设备不会重新投入运行。

3.7

短期急救负载 short-time emergency loading

由于系统中发生了一个或多个事故,严重干扰了系统的正常负载分配,从而产生的暂态(少于30 min)严重过负载。

3.8

热点 hot-spot

若无另行规定,是指各绕组中的最热点。

3.9

相对热老化率 relative thermal ageing rate

在给定的热点温度下,与参考热点温度下的绝缘老化率相比,变压器的绝缘老化呈降低或加快的速率。

3.10

变压器绝缘寿命 transformer insulation life

从绝缘起始状态到正常运行中由于热老化、绝缘场强、短路应力或机械位移而导致高电气故障危险率发生的最终状态之间的全部时间。

3.11

寿命损失百分数 per cent loss of life

一段时间(通常为24 h)内以小时计的等效老化值乘以100再除以变压器的预期绝缘寿命。此以小时计的等效老化值由相对老化率与小时数相乘得出。

3.12

热改性纸 thermally upgraded paper

经过化学处理的纤维素纸,其分解率得以降低。通过局部消除水分形成的媒质(如在氰乙化物中)或通过使用稳定剂(如在胺化物、双氰胺中)来抑制水分形成以减少老化的影响。如果纸的寿命满足了ANSI/IEEE C57.100 准则的要求:在110℃的密闭管中放置65 000 h或在按下式给出的其他时间/温度组合下仍保持50%的张力,则可认为纸已得到改性:

$$\text{Time (h)} = e^{\left[\frac{110-100}{10} - 28.082\right]} \approx 65\,000 \times e^{\left[\frac{110-100}{10} - 28.082\right]} \dots\dots\dots (1)$$

由于现在使用的热改性化学药品含氮,而在硫酸盐纸浆中没有氮,因此化学改性的程度是通过对处理过的纸中的氮含量进行测定来确定的。当按ASTM D-982进行测量时,热改性纸的含氮量典型值介于1%和4%之间。

注:本定义于2003年10月7日由IEEE变压器委员会热改性纸定义工作组批准。

3.13

非导向强迫油流 non-directed forced-oil flow**OF**

表示从热交换器或散热器泵出的油自由地流入油箱中,不强迫其流过绕组(绕组内部的油流可以在垂直冷却通道中轴向流动,也可以在水平冷却通道中辐向流动,可以带或不带曲折形流动)。

3.14

非导向自然油流 non-directed natural-oil flow**ON**

表示从热交换器或散热器流出的油自由地流入油箱中,不强迫其流过绕组(绕组内部的油流可以在

垂直冷却通道中轴向流动,也可以在水平冷却通道中辐向流动,可以带或不带曲折形流动)。

3.15

导向油流 directed oil flow

OD

表示从热交换器或散热器泵出的油大部分是强迫地流过绕组(绕组内部的油流可以在垂直冷却通道中轴向流动,也可以在水平冷却通道中曲折形流动)。

3.16

设计环境温度 design ambient temperature

用于规定允许绕组平均温升、顶层油温升及热点温升的环境温度。

4 符号与缩写

符 号	意 义	单 位
C	热容	J/K
c	比热容	J/(kg·K)
DP	聚合度	
D	差分方程中的差分算子	
g	绕组平均温度对油平均温度(油箱内)的梯度	K
g_r	额定电流下绕组平均温度对油平均温度(油箱内)的梯度	K
m_A	铁心和线圈装配体的质量	kg
m_T	油箱和配件的质量	kg
m_O	油质量	kg
m_W	线圈质量	kg
H	热点系数	
k_{11}	热模型常数	
k_{21}	热模型常数	
k_{22}	热模型常数	
K	负载系数(负载电流/额定电流)	
L	所考虑时间期限的总老化	b
n	所考虑期间内每个时间间隔的序数	
N	所考虑期间内的时间间隔的总数	
OD	ODAN, ODAF 或 ODWF 冷却	
OF	OFAN, OFAF 或 OFWF 冷却	
ON	ONAN 或 ONAF 冷却	
P	施加损耗	W
P_L	绕组涡流损耗标么值	p. u.
P_w	绕组损耗	W
R	额定电流下负载损耗与空载损耗的比值	
R_L	主分接下负载损耗与空载损耗的比值	

GB/T 1094.7—2008

表 (续)

符 号	意 义	单 位
R_{r+1}	$r+1$ 分接下负载损耗与空载损耗的比值	
R_{\min}	最小分接下负载损耗与空载损耗的比值	
R_{\max}	最大分接下负载损耗与空载损耗的比值	
s	拉普拉斯算子	
t	时间变量	min
tap_r	主分接数	
tap_{r+1}	$r+1$ 分接数	
tap_{\min}	最小分接数	
tap_{\max}	最大分接数	
V	相对老化率	
V_n	第 n 个时间间隔内的相对老化率	
x	总损耗对顶层油(油箱内)温升的指数幂(油指数)	
y	电流对绕组温升的指数幂(绕组指数)	
θ_a	环境温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{Σ}	年加权环境温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_h	热点温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{ex}	月平均温度	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_{\text{ex-max}}$	最热月的月平均温度,按 GB 1094.2 的规定	$^{\circ}\text{C}$
θ_o	所考虑负载下的顶层油(油箱内)的温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{ra}	年平均温度,按 GB 1094.2 的规定	$^{\circ}\text{C}$
τ_o	平均的油时间常数	min
τ_w	绕组时间常数	min
$\Delta\theta_{\text{or}}$	额定负载(空载损耗+负载损耗)下底部油(油箱内)温升	K
$\Delta\theta_h$	所考虑负载下的热点温度对顶层油温(油箱内)的梯度	K
$\Delta\theta_{h_0}$	开始时热点温度对顶层油温(油箱内)的梯度	K
$\Delta\theta_{h_0}$	额定电流下热点温度对顶层油温(油箱内)的梯度	K
$\Delta\theta_o$	所考虑负载下的顶层油(油箱内)温升	K
$\Delta\theta_{o_0}$	开始时的顶层油(油箱内)温升	K
$\Delta\theta_{\text{om}}$	所考虑负载下的平均油(油箱内)温升	K
$\Delta\theta_{\text{omr}}$	额定负载(空载损耗+负载损耗)下平均油(油箱内)温升	K
$\Delta\theta_{\text{or}}$	额定损耗(空载损耗+负载损耗)下顶层油(油箱内)稳态温升	K
$\Delta\theta'_{\text{or}}$	由于包围体而修正的顶层油温升(油箱内)	K
$\Delta(\Delta\theta_{\text{or}})$	由于包围体而附加的顶层油温升(油箱内)	K

5 超铭牌额定值负载效应

5.1 概述

正常预期寿命值通常是以设计的环境温度和额定运行条件下的连续工况为基础的。当负载超过铭牌额定值和/或环境温度高于设计环境温度时,变压器将遭受一定程度的危险,并且老化加速。本部分的目的是要确认这些危险,并指导变压器如何在限定条件下进行超铭牌额定值的负载运行。通过用户明确地规定最大负载条件和供应方在变压器设计中考虑了这些最大负载条件,从而将此危险的程度予以降低。

5.2 一般后果

变压器超铭牌额定值负载的后果如下:

- a) 绕组、线夹、引线、绝缘及油的温度将会升高,且有可能达到不可接受的程度;
- b) 铁心外的漏磁通密度将增加,从而使与此漏磁通耦合的金属部件由于涡流效应而发热;
- c) 随着温度变化,绝缘和油中的水分和气体含量将会发生变化;
- d) 套管、分接开关、电缆终端接线装置和电流互感器等也将受到较高的热应力,从而使其结构和使用寿命受到安全裕度受到影响。

主磁通与增加的漏磁通合在一起,会使铁心过励磁能力受到限制^{[1]、[2]、[3]}。

注:对于带有负载的心式变压器,当其能量由外绕组(通常为 HV)流向内绕组(通常为 LV)时,铁心中的由主磁通和漏磁通合成的最大磁通密度出现于铁轭处。

试验已表明,此磁通小于或等于同一电压值施加于空载变压器的外部绕组端子上时所产生的磁通。对于施加了负载的变压器,其心柱中的磁通由内绕组端子上的电压来决定,其值与空载下施加同一电压值时所产生的磁通几乎相等。

对于能量由内绕组流向外绕组的心式变压器,最大磁通密度出现在铁心柱中。其值仅比空载下施加相同电压时产生的磁通稍大。铁轭中的磁通密度则由外部绕组中的电压来确定。

因此,当施加的负载超过铭牌额定值时,应观察该变压器的两侧电压,只要其励磁侧的电压仍低于 GB 1094.1—1996 第 4 章规定的限值,就不必限制励磁。当某些地区的电网在急救状态下仍能保持正常运行时,则在急救条件下为保持负载电压而出现的过励磁,将使铁心件中的磁密绝不会超过铁心外部漏磁通的值(对于冷轧晶粒取向硅钢片,当其大于 1.9T 时,这种饱和效应便迅速开始出现)。由于漏磁通中含有高频分量,故此漏磁通也可能使铁心表面和附近的金属件(如绕组夹零件,甚至在绕组内部)产生不可预计的高温,从而可能危及变压器。通常,在各种情况下,绕组短时过载时间非常短,因此,铁心不能在这种过励磁下出现过热的现象,这是由于铁心的热时间常数较大的原因。

因此,随着电流和温度的升高,增加了变压器过早损坏的危险性。这种危险可能是直接的短期性质,也可能是由于变压器绝缘热老化多年积累造成的。

5.3 短期急救负载的影响和危害

短期增加负载将会使运行条件中的故障风险增加。短期急救过负载会使导体热点温度上升,可能使绝缘强度呈暂时性的降低。但是,接受这种短时过载条件可能比失去供电更好些。这类过负载预计是很少发生的,然而,一旦出现时,应在短时间内迅速降低负载或切除变压器,以免发生故障。这种负载允许时间小于整个变压器的热时间常数,并且它也与过负载前的运行温度有关。一般来说,它小于半小时。

- a) 短期故障的主要危险是由于在高场强区域内(即在绕组和引线处)内可能出现气泡,使其绝缘强度下降。对于绕组绝缘含水量约为 2% 的变压器,在热点温度超过 140 °C 时,很可能产生气泡。当水分含量增加时,此温度限值将会降低;

1) 方括号中的数字指参考文献的编号。

GB/T 1094.7—2008

- b) 当大金属结构件由于漏磁发热时,在其表面处(油中或固体绝缘内)会出现气泡,或者当油过饱和时也会出现气泡。然而,这种气泡通常是在场强低的区域中产生,且只当它向高场强区域流动时,才会引起绝缘强度明显降低。

变压器内部的裸金属部件(除绕组外),若不是与纤维绝缘材料有直接的热接触,而是与非纤维绝缘材料(如芳族聚酰胺纸、玻璃纤维)和油接触,则其温度可能迅速升高,但它不应超过 180 °C;

- c) 在较高温度下,变压器的机械特性会出现暂时的变劣,这可能降低其短路强度;
- d) 套管内部的压力升高可能会漏油,从而引起故障,如果绝缘的温度超过 140 °C,电容式套管内部也将产生气泡;
- e) 储油柜中的油因油膨胀可能会溢出;
- f) 分接开关在很大电流下可能无法切断。

绕组、铁心和结构件中的最大热点温度限值是按短期危险进行考虑的(见第 7 章)。

当负载降到正常水平时,短期危险一般会消失。但是,它们应当被所有当事人(包括计划员、资产所有者和操作员)确认并接受。

5.4 长期急救负载的影响

它不是正常工作条件,这类过负载预计是很少发生的,然而,一旦出现时,它可能持续数周甚至几个月的时间,并能导致相当可观的老化。

- a) 导线绝缘机械特性在较高的温度下,热劣化过程将加快,如果热劣化到一定程度时,变压器的有效寿命将缩短,若此时遇到系统短路或运行事故,变压器的寿命损失将更加严重;
- b) 其他绝缘件,特别是承受轴向压力的绕组压板,老化率在较高温度下也可能加快;
- c) 由于电流大和温度高,分接开关的接触电阻可能增加,在严重的情况下,可能会出现热失控现象;
- d) 变压器的密封材料在高温下,可能发脆。

相对老化率和寿命损失百分数的计算准则是按长期危险进行考虑的。

5.5 变压器容量的大小

变压器超铭牌额定值负载的效应与其容量大小有关,若容量增加,则:

- 漏磁密度增加;
- 短路力增加;
- 承受高场强作用的绝缘质量增加;
- 确定热点温度的难度更大。

因此,大型变压器超铭牌额定值负载时,较小型变压器更易遭受损坏,故障的后果也比小型变压器更加严重。

为了使变压器在预期负载条件下运行,且把运行危险控制在适当的程度中,本部分将变压器分三种类型进行考虑:

- a) 配电变压器应只考虑绕组热点温度和热劣化;
- b) 中型变压器应考虑各种不同的冷却方式;
- c) 大型变压器的漏磁通影响很大,且故障的后果很严重。

5.6 非热改性和热改性绝缘纸

非热改性和热改性绝缘纸的内容参见附录 A。

6 相对老化率和变压器绝缘寿命

6.1 概述

至今还没有简单且唯一的寿命终止准则可用来定量阐述变压器的剩余寿命,但是,有了这样的准

则,将对变压器使用者有用,因此,还是要适当地关注变压器绝缘的老化过程和老化条件。

6.2 相对老化率

尽管绝缘的老化或劣化是温度、含水量、含氧量和含酸量的时间函数,但是,本部分所展示的模式只是将绝缘温度作为控制参数。

由于温度分布不均匀,在最高温度下运行的那部分一般将遭受最严重的劣化,因此,老化率是以绕组热点温度为基准的。此时,非热改性纸的相对老化率 V 按式(2)确定,热改性纸的相对老化率 V 按式(3)确定^[4]。

$$V = 2^{(\theta_h - 98)/6} \dots\dots\dots (2)$$

$$V = e^{(\theta_h - \theta_{ref})/10} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

θ_h ——热点温度,℃。

式(2)和式(3)表明了 V 对热点温度非常敏感,如表 1 所示。

表 1 由热点温度引起的相对老化率 V

$\theta_h/℃$	非热改性纸绝缘	热改性纸绝缘
80	0.125	0.036
86	0.25	0.073
92	0.5	0.145
98	1.0	0.282
104	2.0	0.536
110	4.0	1.0
116	8.0	1.83
122	16.0	3.29
128	32.0	5.8
134	64.0	10.1
140	128.0	17.2

6.3 寿命损失计算

在一定时期内的寿命损失 L 见式(4):

$$L = \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad \text{或} \quad L = \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \dots\dots\dots (4)$$

式中:

V_n ——按式(2)或式(3),为第 n 个时间间隔内的相对老化率;

t_n ——第 n 个时间间隔的时间;

n ——所考虑期间内每个时间间隔的序数;

N ——所考虑期间内的时间间隔的总数。

6.4 绝缘寿命

参考文献[4]提出了四种不同的剩余寿命标准,即热改性纸四种不同的寿命时间值,如表 2 所示。

GB/T 1094.7—2008

表2 在110℃参考温度下充分干燥、无氧气的热改性绝缘系统的正常绝缘寿命

基数	正常绝缘寿命	
	h	年
绝缘保留了50%张力	65 000	7.42
绝缘保留了25%张力	135 000	15.41
绝缘保留的聚合度为200	150 000	17.12
配电变压器功能寿命试验数据	180 000	20.55

表2中的寿命时间仅供参考,因为大部分电力变压器在其实际寿命期限内都是低于满负载运行。热点温度只要比额定值低6℃,其额定寿命损失就会减半,变压器绝缘的实际寿命时间就会成倍增加。

注:对于连接到作为基本负载发电机的发电机变压器、向不变负载供电的其他变压器或运行在相对恒定环境温度下的变压器,它们的实际寿命需要特殊考虑。

7 限制

7.1 电流和温度限制

当超铭牌额定值负载运行时,不应超过表3中规定的所有的限值,此时,也要考虑7.2~7.4规定的特定限制。

表3 超铭牌额定值负载时的电流和温度限值

负载类型	配电变压器 (见注)	中型变压器 (见注)	大型变压器 (见注)
正常周期性负载			
电流(p. u.)	1.5	1.5	1.3
绕组热点温度和与纤维绝缘材料接触的金属部件的温度/℃	120	120	120
其他金属部件的热点温度(与油、芳族聚酯胶纸、玻璃纤维材料接触)/℃	140	140	140
顶层油温/℃	105	105	105
长期急救负载			
电流(p. u.)	1.8	1.5	1.3
绕组热点温度和与纤维绝缘材料接触的金属部件的温度/℃	140	140	140
其他金属部件的热点温度(与油、芳族聚酯胶纸、玻璃纤维材料接触)/℃	160	160	160
顶层油温/℃	115	115	115
短期急救负载			
电流(p. u.)	2.0	1.8	1.5
绕组热点温度和与纤维绝缘材料接触的金属部件的温度/℃	见7.2.1	160	160
其他金属部件的热点温度(与油、芳族聚酯胶纸、玻璃纤维材料接触)/℃	见7.2.1	180	180
顶层油温/℃	见7.2.1	115	115

注:温度和电流限值不同时适用。电流可以比表中的限值低一些,以满足温度限制的要求。相反地,温度可以比表中的限值低一些,以满足电流限制的要求。

7.2 配电变压器的特定限制

7.2.1 电流和温度限制

负载电流、热点温度、顶层油温及除绕组和引线外的金属部件的温度,均不应超过表3规定的限值,表中未规定配电变压器短期急救负载的顶层油温度和热点温度限值,这是因为要在配电变压器上控制急救负载的持续时间,通常是不现实的。应当注意到,当热点温度超过140℃时,可能产生气泡,从而使变压器的绝缘强度下降(见5.3)。

7.2.2 附件和其他考虑

除绕组外,变压器的其他部件(如套管、电缆终端连接件、分接开关和引线等)在负载电流超过1.5倍额定电流时,可能会对运行有限制。油膨胀及油压力也会使变压器运行受到限制。

7.2.3 户内式变压器

当变压器在户内使用时,由于包围体的影响,应对额定顶层油温升进行修正,这一附加的温升值最好通过试验(见8.3.2)来确定。

7.2.4 户外环境条件

风、雨及阳光会影响配电变压器的负载能力,但由于这种影响无规律性,考虑这些因素是不现实的。

7.3 中型电力变压器的特定限制

7.3.1 电流和温度限制

负载电流、热点温度、顶层油温及除绕组和引线外的各种金属部件的温度,均不应超过表3规定的限值。此外,还应当注意,当热点温度超过140℃时,可能产生气泡,可能使变压器的绝缘强度下降(见5.3)。

7.3.2 附件、配套设备和其他考虑

除绕组外,变压器的其他部件(如套管、电缆终端连接件、分接开关和引线等)在负载电流超过1.5倍额定电流时,可能会对运行有限制。油膨胀及油压力也会使变压器运行受到限制。对于与变压器配套用的设备(如电缆、断路器和电流互感器等)也有必要进行考虑。

7.3.3 承受短路的要求

变压器在超铭牌额定值负载运行期间或紧接其后的期间,可能不满足短路的热要求,GB 1094.5规定的是以2s短路持续时间为基准。但是,运行中的短路电流持续时间,在大多数情况下小于2s。

7.3.4 电压限制

除了已知的对变磁通调压的其他限制(见GB 1094.1)外,应使所施加的电压不超过变压器任一绕组额定电压(主分接)或分接电压(其他分接)的1.05倍。

7.4 大型电力变压器的特定限制

7.4.1 概述

对于大型电力变压器,主要是重视与漏磁通有关的附加限制。因此,在询价或订货时应明确在特定运行条件下所必须的负载能力值。

至于绝缘的热劣化,对所有的变压器都可用相同的计算方法来计算。

根据目前变压器的技术状况,大型变压器最好采用比小型变压器更保守且独特的负载方案,从故障的后果而言,对于大型变压器采用可靠度高的负载方案是非常重要的。因而,应充分重视下述各点:

- 漏磁通和铁心柱或铁轭中主磁通相结合(见5.2),使大型变压器较小型变压器更易受到因过励磁而引起的损坏,特别是当负载超过铭牌额定值时更是如此。漏磁通的增加,使其他金属部件因附加涡流而发热;
- 绝缘材料机械性能劣化(是温度和时间函数的函数)的后果,其中包括热膨胀造成的磨损,使大型电

GB/T 1094.7—2008

力变压器可能比小型变压器更加严重；

- 由正常温升试验得不到绕组以外其他部分的热点温度，即使变压器在额定电流下的试验未出现异常现象，也不能得出在更大电流下的任何结论，因为，这种外推法在设计阶段可能不会予以考虑；
- 根据额定电流下的温升试验结果算出的超过额定电流的绕组热点温升值，对于大型变压器而言，其可靠性要比小型变压器低。

7.4.2 电流和温度限制

负载电流、热点温度、顶层油温及除绕组和引线外的金属部件的温度，均不应超过表 3 规定的限值。此外，还应注意，当热点温度超过 140 °C 时，可能产生气泡，从而使变压器的绝缘强度下降(见 5.3)。

7.4.3 附件、设备和其他考虑

参见 7.3.2。

7.4.4 承受短路的要求

参见 7.3.3。

7.4.5 电压限制

参见 7.3.4。

8 温度测定

8.1 稳态下的热点温升

8.1.1 概述

为了严格准确，热点温度应以其邻近的油温为基准，此处假设是绕组内的顶层油温。测量表明，绕组内的顶层油温可能比油箱内的混合顶层油温高达 15 K，此差值大小与冷却方式有关。

对于运行中的大部分变压器而言，绕组内的顶层油温不是一个准确已知的。从另一方面看，其中大多数变压器油箱顶部处的顶层油温可通过测量或计算得到。

本部分的计算原则如下：

$\Delta\theta_{or}$ ——额定损耗下油箱内顶层油温对环境温度的温升，K；

$\Delta\theta_{wr}$ ——额定电流下热点温度对油箱内顶层油温的温升，K。

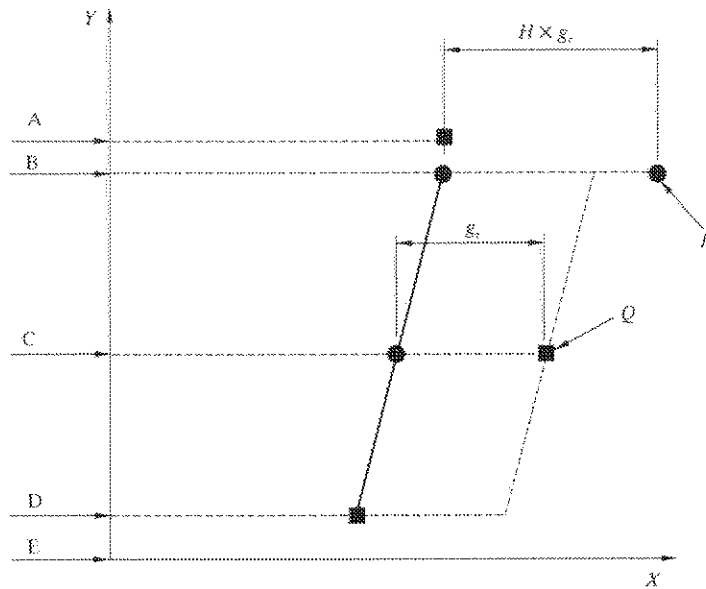
参数 $\Delta\theta_{wr}$ 可在温升试验中用直接测量法来确定，也可以用经直接测量验证的计算方法来确定。

8.1.2 由正常温升试验数据计算热点温升

图 1 所示的热分布图是假设的，它是一个本来很复杂的热分布的简化图。在简化中作了如下假设：

- a) 不论冷却方式如何，油箱内的油温从底部到顶部均是按线性增加；
- b) 作为初始的近似，在绕组任何位置处绕组导线的温升，从下到上呈线性增加，此直线与油的温升直线平行。两平行线之间的差值为常数 g_r (g_r 为用电阻法测出的绕组平均温度与油箱中油平均温度的差值)；
- c) 热点温升比 8.1.2 b) 所述的绕组顶部导线的温升高，这是因为必须就杂散损耗的增加、各局部油流的差别和导线上可能附加的纸层等给出一些裕度。考虑到这些非线性的因素，令热点温度与油箱内顶层油温之差等于 $H \times g_r$ ，即 $\Delta\theta_{wr} = H \times g_r$ 。

注：在很多情况下，已观察到油箱出口处的油温高于油箱温度计座中的油温，这时，油箱出口处的油温应作为负载时的温度。



图中：

A——由油箱出口处油温和油箱温度计座中油温得出的顶层油温；

B——绕组顶部的混合油温(通常假设与 A 的温度相同)；

C——油箱内平均油温；

D——绕组底部油温；

E——油箱底部；

g_r ——额定电流下绕组平均温度对油(油箱内)平均温度的梯度；

H ——热点系数；

P ——热点温度；

Q ——用电阻法测得的绕组平均温度；

X 轴——温度；

Y 轴——相对位置；

■——测量点；

●——计算点。

图 1 热分布图

8.1.3 直接测量热点温升

在 20 世纪 80 年代中期已经可以用光导纤维探头直接进行测量了,从那时起到现在,一直在所选择的变压器上进行实际测量。

经验表明在正常绕组顶部不同位置处可能会有大于 10 K 的温差^[5]。因此,不大可能只插入 1 个~3 个传感器就能检测出真正的热点。这就需要在大量插入探头以发现最佳位置的必要性与由光纤探头引起附加劳力和费用之间进行折衷。建议在每个需要直接测量热点温度的绕组上都安装这种传感器。

通常,靠近绕组顶部的导线处于最大的漏磁场和最高的周围油温区域。因此,很自然地认为顶部导线存在着最热点。但是,测量表明最热点可能移到更低的导线处。因此,建议从绕组顶部处开始,在开头几根绕组导线中安装传感器^[5]。制造方应通过单独的损耗或热计算值来确定这些传感器的位置。

关于绕组顶部温度变化的例子如图 2 和图 3 所示^[5]。光纤探头安装在 400 MVA、ONAF 冷却的变压器上。所示的值是在经过 15 h 过负载试验结束时的稳态值。107 K 和 115 K 是各绕组的热点温升值。试验结束时的顶层油温升为 79 K,即对于 120 kV 绕组, $\Delta\theta_0 = 28$ K,对于 410 kV 绕组, $\Delta\theta_0 = 36$ K。

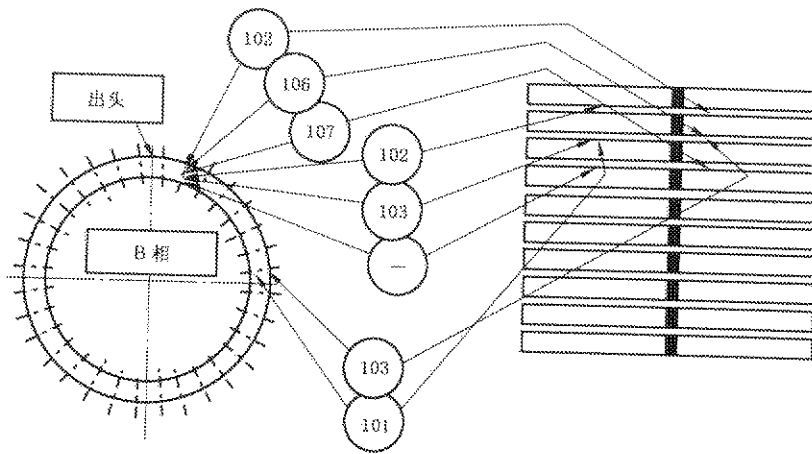


图 2 一个 120 kV 绕组在 1.6 负载系数下高于空气温度的局部温升

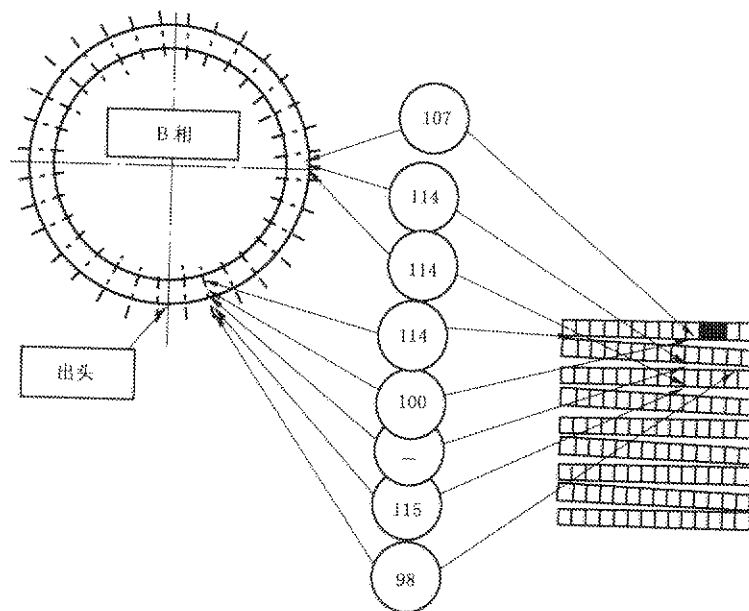


图 3 一个 410 kV 绕组在 1.6 负载系数下高于空气温度的局部温升

传感器置于辐向垫块的长槽内, 这样在传感器和导线金属之间只有导线绝缘和附加的薄纸层(参见图 4)。校准值表明用这种方式得到的数值相当精确^[4]。

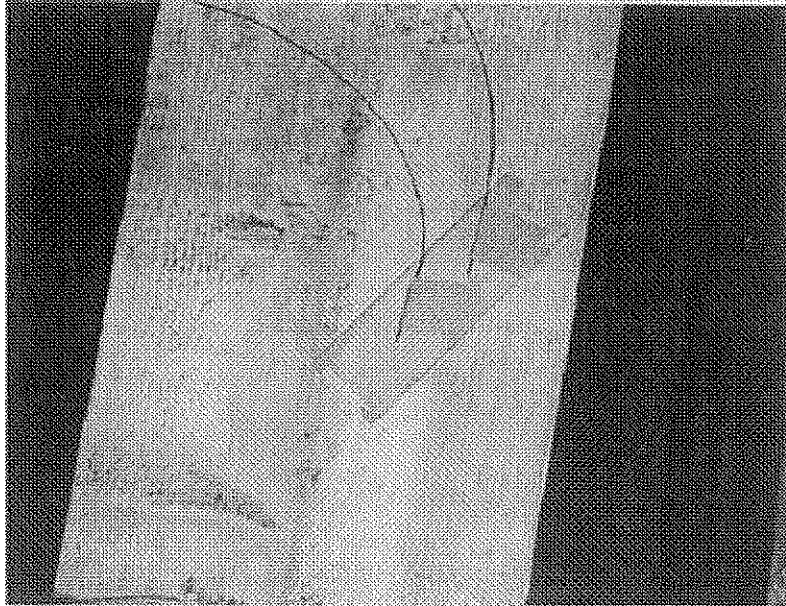


图 4 垫块未装入 120 kV 绕组之前装在该垫块上的二只光纤传感器

热点系数 H 是指最热点探头温度的梯度 $\Delta\theta_m$ 与绕组平均温度对油平均温度的梯度 g_s 的比值。在所举例的测量中,对于 120 kV 绕组, g_s 值为 23 K,对于 410 kV 绕组, g_s 值为 30 K。这意味着 H 值分别为 1.22 和 1.20。

8.1.4 热点系数

热点系数 H 是绕组特有的一个参数,需要时应当按实际情况确定。研究表明热点系数 H 与变压器的容量大小、短路阻抗和绕组结构有关,在 1.0~2.1 之间变化^[7]。热点系数 H 可由直接测量(参见 8.1.3)来确定,也可由以基本损耗和热传递规律为基础的计算方法来确定,并通过在产品上或在变压器模型或绕组模型上直接测量来验证。对于短路阻抗 $\leq 8\%$ 的标准配电变压器, H 取 1.1 对负载研究来说就足够精确了。在附录 B 的计算实例中,对配电变压器,假设 $H=1.1$;对中型和大型变压器,假设 $H=1.3$ 。

以基本损耗和热传递规律为基础的计算方法应考虑下述内容^[4]:

- a) 绕组油道内的油流。对每个冷却油道,都要模拟热传递、流速和由此产生的油温;
- b) 绕组内的损耗分布。绕组导线内的额外的局部损耗,其产生的一个主要原因是绕组端部的辐向涡流损耗,这是由于在端部处漏磁通与导线截面相交而引起的。在这些受影响的导线内的总损耗,应由涡流损耗、环流损耗和直流电阻损耗来确定。承受漏磁发热的接线头也应进行考虑,如线圈与线圈的接线头及一些绕组分接黄铜头;
- c) 由整个绕组中所使用的各种厚度的绝缘使绕组内的热传导受影响;
- d) 局部设计特点或局部油流的限制:
 - 层式绕组中的层绝缘厚度可能不同,且邻近冷却油道的绝缘影响热传递;
 - 在具有曲折形冷却的绕组中,导流圈使进入油中的热传递能力降低(参见图 5)。



图5 各段之间距离均相等的曲折形冷却的绕组,导流圈放在各段之间的油道处

- 端部匝上和穿越端绝缘的绕组出线上的可能的额外绝缘;
- 在配电变压器和小容量电力变压器中,不是所有的冷却油道都伸到绕组周围。有些冷却油道只位于铁心外侧绕组的一部分处(参见图6)。这种“收缩性油道布置”便形成了一种环绕的温度梯度,从铁心下方无冷却油道的绕组中心到铁心外部有冷却油道的绕组中心。

图6 铁轭下具有呈“收缩性冷却油道布置”的矩形绕组俯视图

8.2 在变化的环境温度和负载条件下的顶层油温和热点温度

8.2.1 概述

对于变化的负载电流和环境温度,本条提供了两种可用的方法来描述作为时间函数的热点温度。

a) 指数方程解法,适用于按阶跃函数变化的负载。本法特别适用于通过试验来确定热传递参数,

尤其是由制造方来确定^[9]，且在下列情况下，它能得出正确的结果：

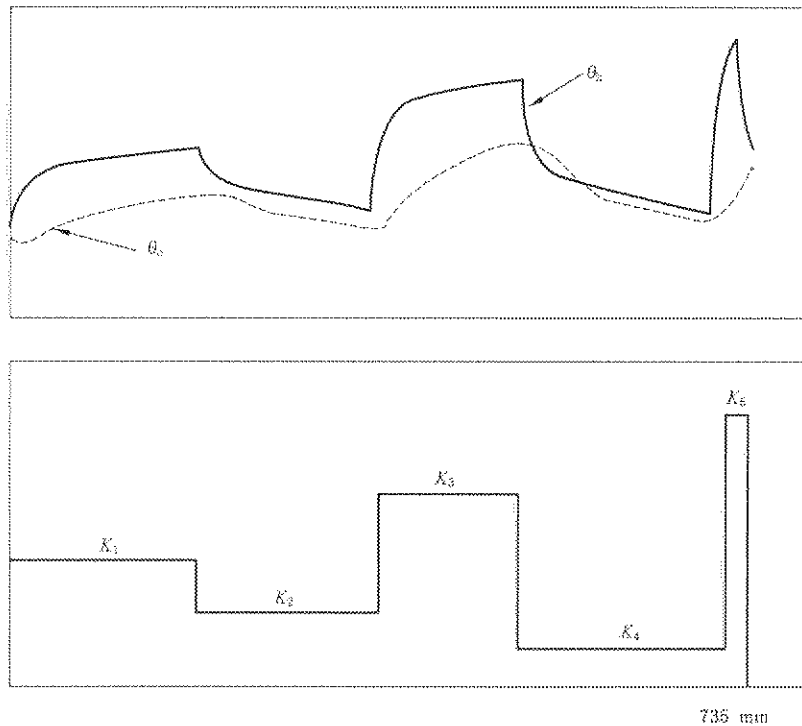
- 每一个增加负载级之后接着的是一个降低负载级，反之亦然；
- 在 N 个连续的增加负载级 ($N \geq 2$) 的情况下，其 $(N-1)$ 个前面各级负载中的每一级时间必须足够长，以使热点对顶层油的温度梯度 $\Delta\theta_h$ 达到稳定值。同样的情况也适用于 N 个连续的降低负载级 ($N \geq 2$)。

b) 差分方程解法，适用于任意的时变负载系数 K 和时变环境温度 θ_a 。本法特别适用于在线监测^[10]，尤其是它对负载图形没有任何的限制。

注：对 ON 和 OF 冷却，油粘度的变化抵消了导线电阻变化的影响。实际上，油粘度变化的冷却效果比电阻变化的加热效果要强烈。表 4 中的绕组指数 1.3 已将其考虑在内了。对于 OD 冷却，油粘度对温升的影响很小，应考虑电阻变化的影响。OD 冷却时，对热点温升的近似修正项(连其符号在内)为 $0.15 \times (\Delta\theta_h - \Delta\theta_o)$ 。

8.2.2 指数方程解法

按阶跃函数变化的负载例子如图 7 所示(有关本例的详细内容参见附录 B)，每一个增加负载级之后是一个降低负载级。



θ_h ——绕组热点温度；

θ_o ——油箱内的顶层油的温度；

K_1 为 1.0； K_2 为 0.6； K_3 为 1.5； K_4 为 0.3； K_5 为 2.1。

图 7 与负载电流级变化相对应的温度响应

热点温度等于环境温度、油箱内顶层油温升和油箱内热点温度与顶层油温之间的温差三者之和。

对应于负载系数 K 的温度增加值由式(5)给出：

$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_o + \left\{ \Delta\theta_m \times \left[\frac{1+R \times K^2}{1+R} \right]^x - \Delta\theta_m \right\} \times f_1(t) + \Delta\theta_m + \{Hg, K^2 - \Delta\theta_m\} \times f_2(t) \quad \dots\dots\dots(5)$$

相应地,对应于负载系数 K 的温度降低值由式(6)给出:

$$\theta_1(t) = \theta_1 + \Delta\theta_w \times \left[\frac{1+R \times K^2}{1+R} \right]^x + \left\{ \Delta\theta_w - \Delta\theta_w \times \left[\frac{1+R \times K^2}{1+R} \right]^x \right\} \times f_1(t) + H_g \times K^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

顶层油指数 x 和绕组指数 y 由表 4 给出^[11]。

函数 $f_1(t)$ 表示了按稳态值为 1 时顶层油温升的相对增加量:

$$f_1(t) = (1 - e^{-(t/k_{11})/\tau_w}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

k_{11} ——表 4 中给出的常数;

τ_w ——平均油时间常数, min。

函数 $f_2(t)$ 表示了按稳态值为 1 时热点对顶层油温度梯度的相对增加量。它模拟了油循环的速度适应增加后的负载水平需要一段时间这一事实。

$$f_2(t) = k_{21} \times (1 - e^{-(t/k_{21})/\tau_w}) - (k_{21} - 1) \times (1 - e^{-(t/\tau_w)/k_{22}}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

常数 k_{11} 、 k_{21} 、 k_{22} 和常数 τ_w 、 τ_o 都是变压器的特性参数。如果从试验开始直至达到稳态时,施加损耗和相应的冷却条件(例如 AN 或 AF)始终未变,则可在延长的“空载损耗+负载损耗”温升试验中来确定这些常数。此时,必须确认此温升试验是在变压器温度接近环境温度时开始的。显然, k_{21} 、 k_{22} 和 τ_w 只有在变压器安装了光纤传感器时才能确定。如果在延长的温升试验中不能确定 τ_o 和 τ_w 值,也可改用计算的方法(参见附录 D)来确定。当没有这些变压器特性参数值时,建议使用表 4 中所列的值。图 8 示出了其相应的曲线图。

注 1: 只有在足够长的温升过程中能保持电流和冷却条件不变,才可求出起始温升曲线的斜率。时间常数不能按国家标准所规定的温升试验来确定。

注 2: 对于配电变压器, $f_2(t)$ 曲线与图 8 中曲线 7 相似,即配电变压器在负载电流逐级增加时,不会出现像 ON 和 OF 冷却方式的电力变压器那样的“尖峰”值。

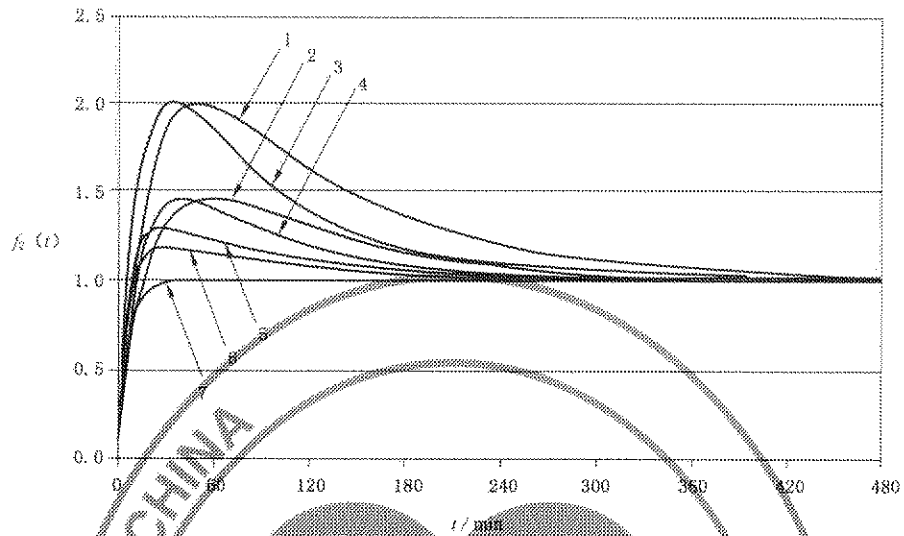
函数 $f_3(t)$ 表示了稳态降低值为 1 时顶层油对环境温度梯度的相对降低量:

$$f_3(t) = e^{-(t/k_{31})/\tau_o} \quad \dots\dots\dots(9)$$

表 4 用于指数方程的热特性参数推荐值

	配电变压器		中型和大型电力变压器					
	ONAN	ONAN 限制 (见注)	ONAN	ONAF 限制 (见注)	ONAF	OF 限制 (见注)	OF	OD
油指数 x	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0
绕组指数 y	1.6	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	2.0
常数 k_{11}	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
常数 k_{21}	1.0	3.0	2.0	3.0	2.0	1.45	1.3	1.0
常数 k_{22}	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0
时间常数 τ_o	180	210	210	150	150	90	90	90
时间常数 τ_w	4	10	10	7	7	7	7	7

注: 如果 ON 或 OF 冷却的变压器,绕组是曲折形冷却的,当辐向垫块厚度小于 3 mm 时,可能会使油循环受到限制,即 $f_2(t)$ 的最大值比垫块厚度 ≥ 3 mm 时要高。



图中:

- 1 ONAN——油流受限制
- 2 ONAN
- 3 ONAF——油流受限制
- 4 ONAF
- 5 OF——油流受限制
- 6 OF
- 7 OD和配有冷却器

图 8 由表 4 中的数值得出的函数 $f_2(t)$

指数方程解法的应用实例见附录 C。

8.2.3 微分方程解法

本条阐述了热传导微分方程的使用,它适用于任意的时变负载系数 K 和时变环境温度 θ_a 。它们是数据处理软件的基础,以确定作为时间函数的热点温度及相应的绝缘寿命损失量。图 9 表示了微分方程的方框图。

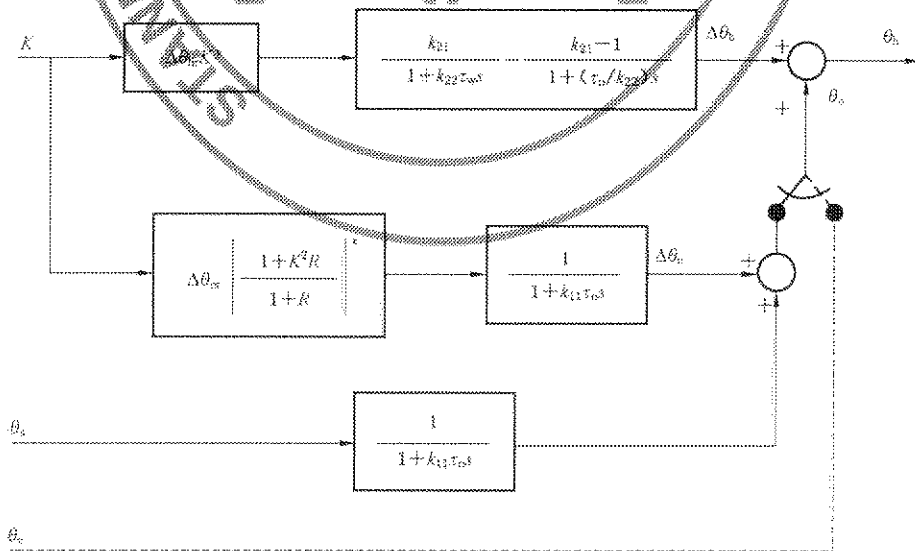


图 9 表示微分方程的方框图

GB/T 1094.7—2008

图 9 的左边列出了输入的负载系数 K 和环境温度 θ_a 。输出为热点温度 θ_h ，列于图的右边，拉氏变量 s 实质上就是微分算子 d/dt 。

在图 9 中，最上面支路中的第二个方框表示动态的热点温升。其第一项(带分子 k_{h1})表示基本热点温升，它不考虑通过热点的油流变化的影响；第二项(带分子 $K_{h1}-1$)表示通过热点的油流变化率，它是一种变化非常缓慢的现象。实际上要考虑这两项的共同作用，即负载电流的突然上升可能导致热点温升紧随负载突变之后，有一个意想不到的高峰值。 k_{h1} 、 k_{h2} 、 k_{h3} 和其他参数已在 8.2.2 中讨论过，它们的推荐值在表 4 中给出。

如果顶层油温可以测量出并表示为电信号输入计算设备中，则图中虚线所示的路径为另一种计算公式，此时，只要开关投向右位。不要求用顶层油的计算路径(开关投向左位)。所有的参数已在 8.2.2 中给出。

为得到适当的准确度，每个时间级应小于最小时间常数 τ_w 的一半。此外， τ_w 和 τ_e 不能设置为零。用常规的差分方程对图 9 中方框图的解释详见附录 E。

8.3 环境温度

8.3.1 户外空气冷却式变压器

出于动态考虑，例如监视或短时急救负载，应直接使用实际的温度分布图。

出于设计和试验考虑，下述等效的温度可作为环境温度。

- a) 热老化计算采用年加权环境温度；
- b) 最高热点温度计算采用最热月的月平均温度。

注：关于环境温度，也可见 GB 1094.2—1996。

如果在负载周期内，环境温度有明显的变化，则加权环境温度就是一个设想的恒值环境温度，它在某一段时间内所引起的老化等效于同一时间内由实际变化的环境温度所引起的老化。对于温度每增加 6 K，老化率加倍，且环境温度可认为是按正弦曲线变化时，其年加权环境温度 θ_e 见式(10)；

$$\theta_e = \theta_{\text{年}} + 0.01 \times [2(\theta_{\text{max-max}} - \theta_{\text{年}})]^{1.85} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$\theta_{\text{max-max}}$ ——最热月的月平均温度(等于 10 年或 10 年以上该月的日最高温度平均值与日最低温度平均值之和除以 2，单位为 $^{\circ}\text{C}$)；

$\theta_{\text{年}}$ ——年平均温度(等于月平均温度之和除以 12，单位为 $^{\circ}\text{C}$)。

示例：用月平均值(用月加权值更精确)

对于 θ_e ：

$\theta_{\text{max-max}} = 30^{\circ}\text{C}$	有 2 个月	}	平均值 $\theta_{\text{年}} = 15^{\circ}\text{C}$ 加权平均值 $\theta_e = 20.4^{\circ}\text{C}$
$\theta_{\text{max}} = 20^{\circ}\text{C}$	有 4 个月		
$\theta_{\text{min}} = 10^{\circ}\text{C}$	有 4 个月		
$\theta_{\text{min}} = 0^{\circ}\text{C}$	有 2 个月		

附录 B 中计算实例所用的环境温度为 20°C 。

8.3.2 变压器在包围体内的环境温度修正

变压器在包围体内运行时，其温升将增加一个附加值，此值约是包围体内空气温升的一半。

因此，安装在金属或混凝土包围体内的变压器，式(5)和式(6)中的 $\Delta\theta_{\text{or}}$ 应由如式(11)的 $\Delta\theta'_{\text{or}}$ 代替：

$$\Delta\theta'_{\text{or}} = \Delta\theta_{\text{or}} + \Delta(\Delta\theta_{\text{or}}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$\Delta(\Delta\theta_{\text{or}})$ ——额定负载下的附加顶层油温升。

推荐此附加温升值由试验来确定。当无试验结果可用时,可用表5中不同包围体形式的推荐值,将这些值被2除后,便可得到近似的附加顶层油温升。

注:当包围体对冷却器没有影响时,不必按式(11)进行修正。

表5 包围体引起的环境温度增加的修正

包围体形式	安装的变压器台数	加到加权环境温度上的修正值/ K			
		变压器容量/ kVA			
		250	500	750	1 000
自然通风的地下拱顶室	1	11	12	13	14
	2	12	13	14	16
	3	14	15	19	22
自然通风不良的地下室和建筑物内部	1	7	8	9	10
	2	8	9	10	12
	3	10	13	15	17
自然通风良好的建筑物和有强风冷却的地下拱顶室及地下室	1	3	4	5	6
	2	4	5	6	7
	3	6	9	10	13
配电小室(见注2)	1	10	15	20	—
注1:上述温度修正值是采用有代表性的变压器损耗值,由典型的配电站负载情况估算出的。它们是在地下拱顶室和变电站中所进行的一系列自然通风和强风冷却试验的基础上得出的,也是以在配电站和变电房中进行的随机测量为基础得出的。 注2:当变压器温升试验是在配电小室中进行,且可以将包围体与变压器看成是一个整体时,则不必进行修正。					

8.3.3 水冷却方式变压器

对于水冷却方式变压器,其环境温度为入口水的温度,它随时间的变化幅度比空气的变化幅度小。

9 分接开关的影响

9.1 概述

式(5)和式(6)中所用的全部参量都必须与变压器运行时的分接相适应。

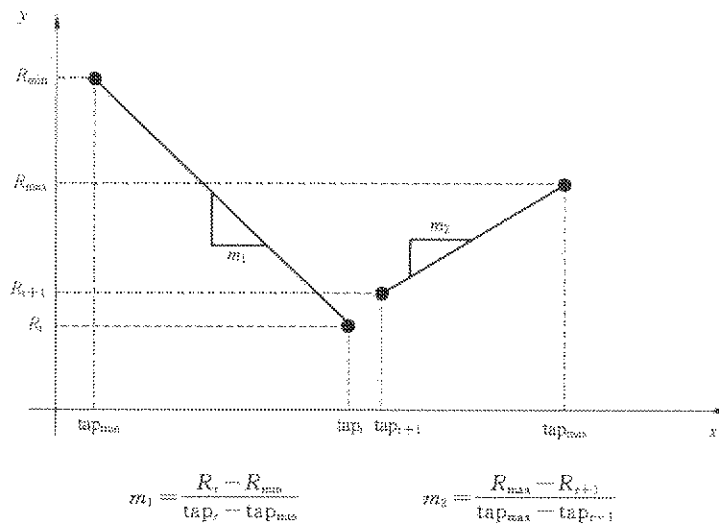
例如,认为高压是恒定的,那么对于一个给定的负载,就需要保持一个恒定的低压。如果此要求是在变压器低压侧位于+15%分接处时,则必须测量或计算该分接上的额定油温升、损耗和绕组对油的温度梯度。

也可以考虑具有线端分接开关的自耦变压器,在分接范围的某一终端,其串联绕组将具有最大的电流,而在分接范围的另一端,其公共绕组也将具有最大的电流。

9.2 短路损耗

变压器的短路损耗是分接位置的函数。分接绕组和主绕组可以有几种不同的连接方式。与分接位置呈函数关系的变压器损耗比的一般计算方法见图10。额定分接位置与最小分接位置和最大分接位置之间的计算是线性函数。

GB/T 1094.7—2008



图中：
 x——分接位置；
 y——损耗比。

图 10 与分接位置呈函数关系的损耗计算原理

9.3 损耗比

变压器顶层油温升是损耗比 R 的函数。假设空载损耗是常数,用线性近似法, R 可按分接位置的函数来确定。

对于高于额定分接位置的分接位置(由 tap_{r+1} 至 tap_{\max}):

$$R(\text{tap}) = R_{r+1} + (\text{tap} - \text{tap}_{r+1}) \times m_2 \quad \dots\dots\dots(12)$$

对于低于额定分接位置以下的分接位置(由 tap_{\min} 至 tap_r):

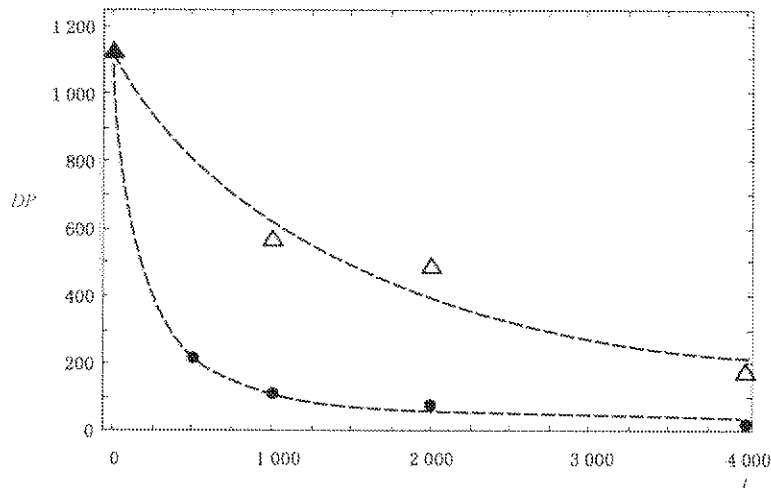
$$R(\text{tap}) = R_r + (\text{tap} - \text{tap}_r) \times m_1 \quad \dots\dots\dots(13)$$

9.4 负载系数

绕组对油的温升主要与负载系数 K 有关,但 K 与分接位置无关。

附录 A
(资料性附录)
非热改性和热改性绝缘纸

使用热改性绝缘纸的目的是中和在变压器使用期限内由材料水解(热降解)产生的酸化物。这种水解在高温下特别活跃,公布的研究结果表明,在高温时,热改性绝缘纸比未经处理过的纸保留了更高的张力和抗裂强度百分值^{[12]、[13]}。类似的参考文献也显示了在 150 °C 下时非热改性纸和热改性纸的 DP 随时间变化曲线(参见图 A.1)。



DP——聚合度;
t——时间(h);
△——热改性纸的值;
●——非热改性纸的值。

图 A.1 密封管在 150 °C 矿物油中加速老化

另一参考文献[14]还阐明了温度和含水量的影响,如表 A.1 所示。

表 A.1 各种不同条件下纸的寿命

纸的类型	老化温度	寿命/年	
		干燥且无空气	有空气且湿度为 2%
木纸浆	80 °C	118	5.7
	90 °C	38	1.9
	98 °C	15	0.8
改性木纸浆	80 °C	72	76
	90 °C	34	27
	98 °C	18	12

所示的热老化特性差异已在工业标准中作了如下的考虑:

● 相对老化率 $V=1.0$, 是取分别相应于非热改性纸在温度为 98 °C 下的老化结果值, 热改性纸在温度为 110 °C 下的老化结果值。

注: 图 A.1 和表 A.1 所示的结果不拟用来计算老化和估算寿命。本文件中之所以将它们列入, 只是想说明非热改性绝缘纸和热改性绝缘纸的老化特性存在着差异。

附录 B

(资料性附录)

计算和提供过载数据实例

本附录包括一个如何利用本部分给出的方程去计算和给出过载数据的实例。

作为一个例子,表 B.1 给出了可能用到的某些性能参数。

表 B.1 与变压器负载能力有关的举例参数

		配电变压器		电力变压器		
		ONAN	ONAN	ONAF	OF	OD
油指数	x	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0
绕组指数	y	1.6	1.3	1.3	1.3	2.0
损耗比	R	5	6	6	6	6
热点系数	H	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3
油时间常数	τ_o	180	210	150	90	90
绕组时间常数	τ_w	4	10	7	7	7
环境温度	θ_a	20	20	20	20	20
热点温度	θ_h	98	98	98	98	98
额定电流下热点对顶层油(油箱内)的温度梯度	$\Delta\theta_{ho}$	23	26	26	22	29
油平均温升 ^{a)}	$\Delta\theta_{avr}$	44	43	43	46	46
顶层油(油箱内)温升	$\Delta\theta_{to}$	55	52	52	56	49
底部油温升 ^{a)}	$\Delta\theta_{bo}$	33	34	34	36	43
k_{11}		1.0	0.5	0.5	1.0	1.0
k_{21}		1.0	2.0	2.0	1.3	1.0
k_{22}		2.0	2.0	2.0	1.0	1.0

^{a)} 油平均温升和底部油温升仅作为信息给出。

用电子表格程序建立一个 24 h 的周期,时间刻度为分钟。用 8.2.2 中的式(5)、式(6)、式(7)、式(8)和式(9)计算作为负载函数的每分钟热点温度。 $\Delta\theta_{ho}$ 和 $\Delta\theta_{bo}$ 的初始条件可用当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f_1(t)=1$ 、 $f_2(t)=1$ 和 $f_3(t)=0$ 来确定。

当热点温度已知时,相对老化率可用 6.2 中的式(2)计算出来。用 6.3 中的式(4),将每分钟相对老化率的总和除以 1 440 就可以得到以正常天数表示的寿命损失。

例如,考虑预加负载(K_1)为 0.8 的情况,然后在 30 min 内的过载 $K_2=1.4$,在其余时间(1 410 min)又回到 $K_1=0.8$ 。变压器为 OF 冷却,因此,可使用表 B.1(OF)的举例参数。

经过稳态预加负载后的初始数值为:

$$K_1 = 0.8$$

$$\Delta\theta_{ho} = 38.7 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{bo} = 16.5 \text{ K}$$

从开始至 $t=30$ min 后,数值为:

$$K_2 = 1.4$$

$$f_1(t=30) = 0.28, f_2(t=30) = 1.20$$

$$\theta_o(t=30) = 76.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$\theta_h(t=30) = 114.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (8.2.2 中方程(5))

从开始至 $t=31 \text{ min}$ 后, 数值为:

$K_1 = 0.8$

$f_2(t=1) = 0.99$

$\theta_c(t=1) = 76.5 \text{ }^\circ\text{C}$

$\theta_h(t=1) = 92.9 \text{ }^\circ\text{C}$ (8.2.2 中式(6))

从开始至 $t=1\ 440 \text{ min}$ 后, 数值为:

$K_1 = 0.8$

$f_2(t=1\ 410) = 1.6E-07$

$\theta_c(t=1\ 410) = 58.7 \text{ }^\circ\text{C}$

$\theta_h(t=1\ 410) = 75.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (8.2.2 中式(6))

这导致寿命损失为 0.14 天, 最高热点温升为 94 K。

可以改变上述方法中所用的参数, 以获得作为 K_1 和 K_2 函数的寿命损失表。当过载时间改变时, 可以得到一套这样的表。

作为例子, 表 B.2 示出了过载时间为 30 min 的表。

表 B.2 负载周期内的允许负载工况和对应的日寿命损失(以正常日计)
以及最高热点温升的举例表

K_1	0.25	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K_2											
0.7	0.001 33	0.004 38	0.02 45								
0.8	0.001 38	0.004 43	0.02 51	0.07 55							
0.9	0.001 43	0.004 49	0.03 56	0.07 61	0.25 66						
1.0	0.001 49	0.004 55	0.03 62	0.08 67	0.26 72	1.00 78					
1.1	0.001 56	0.01 61	0.03 68	0.08 73	0.27 78	1.04 84	4.48 91				
1.2	0.002 62	0.01 68	0.03 75	0.09 80	0.29 85	1.09 91	4.66 98	22.6 105			
1.3	0.004 69	0.01 75	0.04 82	0.11 87	0.33 92	1.19 98	4.94 105	23.6 112	128.9 120		
1.4	0.01 77	0.02 82	0.06 90	0.14 94	0.40 100	1.36 106	5.43 112	26.2 119	135.0 127	827.1 136	
1.5	0.01 85	0.03 90	0.10 97	0.21 102	0.55 107	1.71 113	6.34 120	28.0 127	144.9 135	868.7 144	5 975 153
1.6	0.03 93	0.06 98	0.18 105	0.37 110	0.87 115	2.44 121	8.19 128	33.3 135	162.7 143	938.3 152	6 297 161
1.7	0.07 101	0.15 107	0.40 114	0.76 119	1.64 124	4.12 130	12.3 137	44.6 144	198.0 152	1 067 161	x x
1.8	0.18 110	0.37 115	0.94 123	1.73 127	3.55 133	8.24 139	22.1 145	70.5 153	275.2 161	x x	x x

GB/T 1094.7—2008

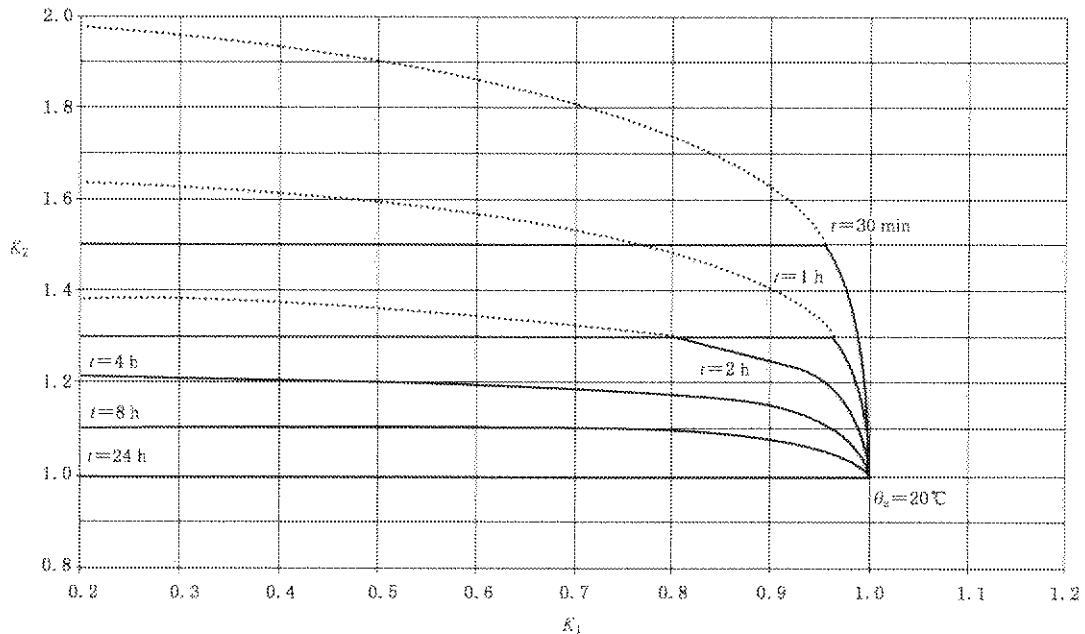
表 B.2 (续)

K_1	0.25	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
K_2											
1.9	0.48	0.95	2.39	4.32	8.58	18.9	47.0	134.7	x	x	x
	<i>119</i>	<i>125</i>	<i>132</i>	<i>137</i>	<i>142</i>	<i>148</i>	<i>154</i>	<i>162</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
2.0	1.34	2.61	6.45	11.5	22.5	48.1	x	x	x	x	x
	<i>129</i>	<i>134</i>	<i>141</i>	<i>146</i>	<i>151</i>	<i>157</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>

冷却方式为 OF, $\theta_o = 20^\circ\text{C}$ 。
 预加载为 K_1 , 负载 K_2 , 施加 30 min, 负载 K_1 , 施加 1 410 min。

注: 表 B.2 中的斜体数值表示不考虑表 3 限值时的计算结果。

这些数据也可以用曲线的形式表示出。图 B.1 示出了 K_2 作为 K_1 的函数时, 在不同过载时间和单位寿命损失下的一个实例。



注: 图 B.1 中的点线表示不考虑表 3 限值时的计算结果。

图 B.1 大型 OF 冷却式电力变压器: 正常寿命损失时的允许负载工况

附录 C
(资料性附录)
指数方程实例

C.1 概述

图 7 的曲线取自一个真实寿命的例子,此例的详情将在本附录中给出。一台 250 MVA、ONAF 冷却的变压器按下述进行试验。在每个时间段内,负载电流保持恒定,即在每个负载级期间,由于电阻变化导致损耗变化。相应的程序框图见附录 F。

表 C.1 250 MVA 变压器的负载级数

时间段 min	负载系数
0~190	1.0
190~365	1.6
365~500	1.5
500~710	0.3
710~735	2.1
735~750	0.0

在两个主绕组上,每个都安装了 8 个光纤传感器。发现最热点是在最里面的主绕组上(118 kV)。本例中,将按 8.2.2 所述的计算方法来确定由 0 min~750 min 时间段内热点温度的变化,并将它与测得的曲线进行对比。

计算所需的变压器的特征参数为:

$$\theta_s = 25.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{or} = 38.3 \text{ K}$$

$$R = 1\ 000 \quad (\text{因为试验是用短路法做的})$$

$$H = 1.4 \quad (\text{由测量确定,见 8.1.3})$$

$$g_r = 14.5 \text{ K}$$

$$\tau_w = 4.6 \text{ min} \sim 8.7 \text{ min} \quad (\text{与负载情况有关。计算将采用表 4 中列出的值 7 min})$$

$$\tau_o = 162 \text{ min} \sim 170 \text{ min} \quad (\text{与负载情况有关。计算将采用表 4 中列出的值 150 min})$$

绕组采用曲折形冷却,垫块隔成的油隙 $\geq 3 \text{ mm}$ 。

C.2 0 min~190 min 时间段

$\Delta\theta_o = 12.7 \text{ K}$ (本试验在早晨 8:20 开始进行,前一天晚上 22:00 已在 1.49 p. u. 下做完了过负载试验)

$$K = 1.0$$

$$\Delta\theta_w = 0.0 \text{ K}$$

式(5)、式(7)和式(8)表示出热点变化是时间的函数,因此,由式(5)可得:

$$\theta_h(t) = 25.6 + 12.7 + \left\{ 38.3 \times \left[\frac{1 + 1\ 000 \times 1.0^2}{1 + 1\ 000} \right]^{0.6} - 12.7 \right\} \times f_1(t) + 0.0 + \{ 1.4 \times 14.5 \times 1.0^{1.3} - 0.0 \} \times f_2(t)$$

GB/T 1094.7—2008

由式(7)可得:

$$f_1(t) = (1 - e^{(-t)/(0.5 \times 150)})$$

由式(8)可得:

$$f_2(t) = 2.0 \times (1 - e^{(-t)/(2.0 \times 7)}) - (2.0 - 1.0) \times (1 - e^{(-t)/(150/2.0)})$$

C.3 190 min~365 min 时间段

$\Delta\theta_a = 36.2 \text{ K}$ (在 C.2 中计算出)

$K = 0.6$

$\Delta\theta_m = 22.0 \text{ K}$ (在 C.2 中计算出)

式(6)和式(9)表示出热点变化是时间的函数,因此,由式(6)可得:

$$\theta_a(t) = 25.6 + 38.3 \times \left[\frac{1 + 1\,000 \times 0.6^2}{1 + 1\,000} \right]^{0.8} + \left\{ 36.2 - 38.3 \times \left[\frac{1 + 1\,000 \times 0.6^2}{1 + 1\,000} \right]^{0.8} \right\} \times f_2(t) + 1.4 \times 14.5 \times 0.6^{1.3}$$

由式(9)可得:

$$f_3(t) = e^{(-t)/(0.5 \times 150)}$$

C.4 365 min~500 min 时间段

$\Delta\theta_a = 18.84 \text{ K}$ (在 C.3 中计算出)

$K = 1.5$

$\Delta\theta_m = 10.45 \text{ K}$ (在 C.3 中计算出)

当用下列数值替换式(5)中的相应数值时,其计算与 C.2 相同:

用 18.84 替换 12.7;

用 1.5 替换 1.0;

用 10.45 替换 0.0。

C.5 500 min~710 min 时间段

$\Delta\theta_a = 64.1 \text{ K}$ (在 C.4 中计算出)

$K = 0.3$

$\Delta\theta_m = 37.82 \text{ K}$ (在 C.4 中计算出)

当用下列数值替换式(6)中的相应数值时,其计算与 C.3 相同:

用 64.1 替换 36.2;

用 0.3 替换 0.6;

用 37.82 替换 22.0。

C.6 710 min~735 min 时间段

$\Delta\theta_a = 9.65 \text{ K}$ (在 C.5 中计算出)

$K = 2.1$

$\Delta\theta_m = 4.24 \text{ K}$ (在 C.5 中计算出)

当用下列数值替换式(5)中的相应数值时,其计算与 C.4 相同:

用 9.65 替换 18.84;

用 2.1 替换 1.5;

用 4.24 替换 10.45。

C.7 735 min~750 min 时间段

$\Delta\theta_{\text{H}}=41.36 \text{ K}$ (在 C.6 中计算出)

$K=0.0$

$\Delta\theta_{\text{L}}=71.2 \text{ K}$ (在 C.6 中计算出)

计算与 C.3 和 C.5 相同。

C.8 与测量值对比

图 C.1 示出了计算和测量的热点温度曲线。图 C.2 示出了相应的顶层油温度曲线。表 C.2 列出了每个负载结束时的数值。

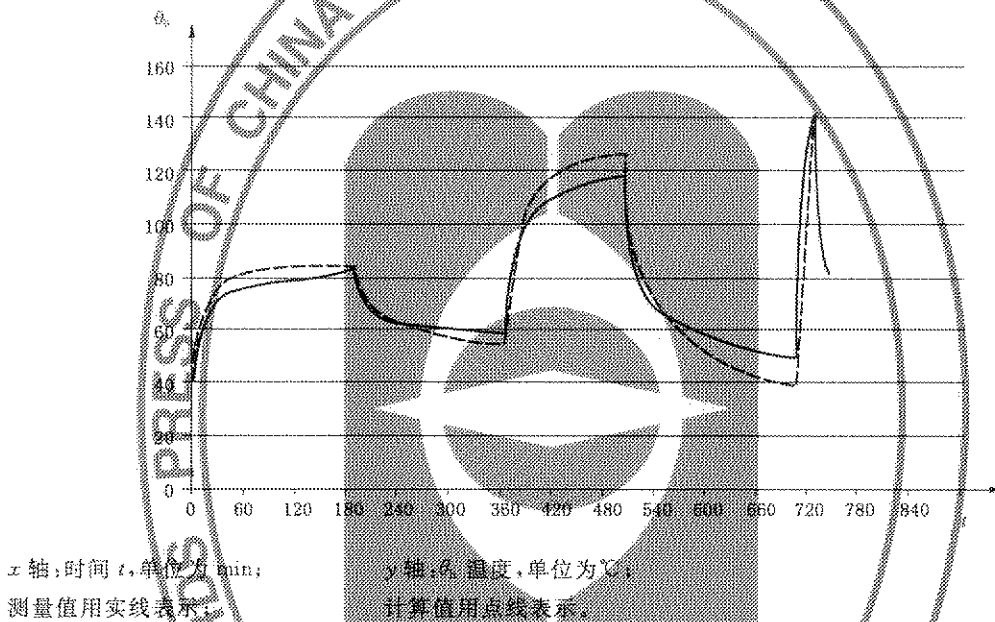


图 C.1 负载电流按级变化时的热点温度值

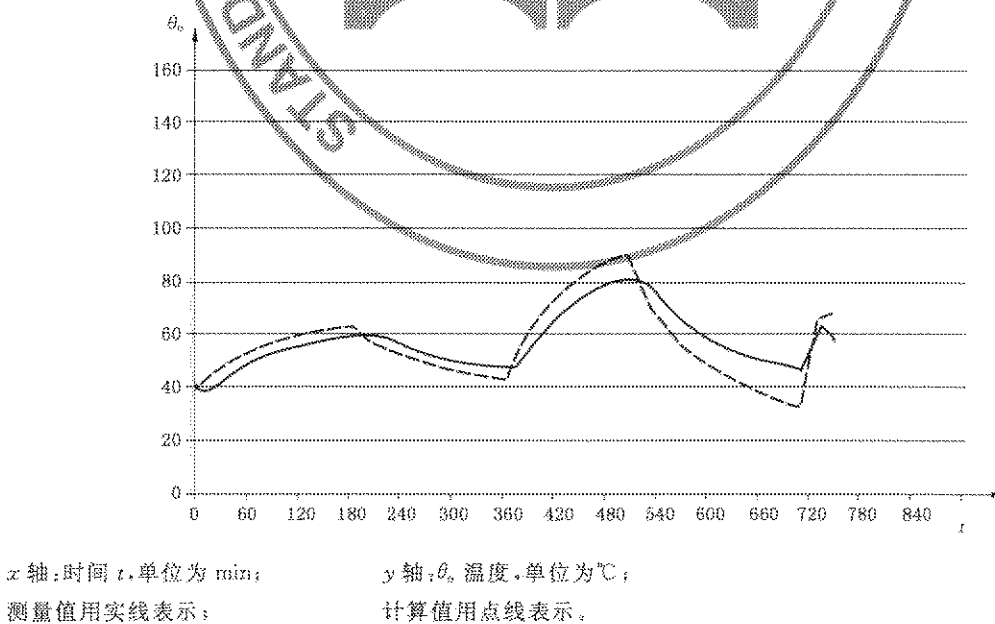


图 C.2 负载电流按级变化时的顶层油温度值

GB/T 1094.7—2008

表 C.2 每个负载级结束时的温度值

时间(min)/负载系数	顶层油温度/ ℃		热点温度/ ℃	
	计算	测量	计算	测量
150/1.0	61.8	58.8	83.8	82.2
365/0.6	44.4	47.8	54.9	58.6
500/1.5	89.7	80.8	127.5	119.2
710/0.3	35.3	45.8	39.5	49.8
735/2.1	67.0	65.8	138.2	140.7
750/0.6	59.5	68.2	59.5	82.4

本部分中的计算方法拟用来给出相关的数值,特别是在负载增加的情况(在表 C.2 中用加粗斜体字注明)下。

附录 D
(资料性附录)
绕组和油时间常数计算

D.1 绕组时间常数

绕组时间常数如式(D.1)所示:

$$\tau_w = \frac{m_w \times c \times g}{60 \times P_w} \quad \dots\dots\dots(D.1)$$

式中:

τ_w ——考虑负载下的绕组时间常数,单位为 min;

g ——考虑负载下的绕组平均温度对油平均温度的梯度,单位为 K;

m_w ——线圈质量,单位为 kg;

c ——导体材料的比热容,单位为 J/(kg·K)(铜为 390,铝为 890);

P_w ——考虑负载下的绕组损耗,单位为 W。

式(D.1)的另一种形式为:

对于铜:
$$\tau_w = 2.75 \times \frac{g}{(1 + P_e) \times s^2} \quad \dots\dots\dots(D.2)$$

对于铝:
$$\tau_w = 1.15 \times \frac{g}{(1 + P_e) \times s^2} \quad \dots\dots\dots(D.3)$$

式中:

P_e ——相关绕组的涡流损耗标么值;

s ——考虑负载下的电流密度,单位为 A/mm²。

D.2 油时间常数

油的时间常数计算按参考文献[4]的原理,即:对于 ONAN 和 ONAF 冷却方式,热容 C 为:

$$C = 0.132 \times m_A + 0.0882 \times m_T + 0.400 \times m_O \quad \dots\dots\dots(D.4)$$

式中:

m_A ——铁心和线圈的质量,单位为 kg;

m_T ——油箱和附件的质量,单位为 kg(仅指与热油相接触的部件);

m_O ——油的质量,单位为 kg。

对于强油冷却方式,OF 或 OD,热容为:

$$C = 0.132 \times (m_A + m_T) + 0.580 \times m_O \quad \dots\dots\dots(D.5)$$

考虑负载下的油时间常数如下:

$$\tau_o = \frac{C \times \Delta\theta_{om} \times 60}{P} \quad \dots\dots\dots(D.6)$$

式中:

τ_o ——平均油时间常数,单位为 min;

$\Delta\theta_{om}$ ——在考虑负载下,高于环境温度的平均油温升,单位为 K;

P ——考虑负载下的施加损耗,单位为 W。

附 录 E
(资料性附录)
微分方程解法的例证

E.1 引言

本附录提供了 8.2.3 中所述的微分方程更详细的信息及如何通过转化为差分方程来求解,并提供了一个实例。

E.2 概述

以指数形式表示的发热方程,实际上特别适合于用试验确定热传递参数和简化的场合。在这个方面,对于任意的时变负载系数 K 和时变环境温度 θ_a ,可能更需要其确定热点温度。

对于这种应用,最好的方法是采用热传递微分方程。如果将其转换成差分方程,则很容易求解,如本附录后面所示。

E.3 微分方程

当将热传递原理应用于电力变压器时,仅在导向油流(OD)冷却方式时,其微分方程才是线性的。对于其他冷却方式,如 OF 和 ON,冷却介质的循环率与它自身的温度有关。换句话说,如果没有风扇,散热器中的气流速度取决于它自身的温度,但是如果有风扇,情况就不同了。同样地,如果没有油泵或者不是导向油流,油的流速取决于它自身的温度,但是如果有油泵和导向油流,情况也就不同了。

结果是,对于 ON 和 OF 冷却,微分方程是非线性的,这意味着对应于逐级变化的负载电流,不论是顶层油温升还是热点温升响应,都不是真正的指数函数^[10]。

但是,为了避免本部分过分复杂,可以使用近似的方法,即不论是 ON、OF 还是 OD 冷却,时间函数仍是指数方程,非线性关系只对已发生温度变化的最终值有影响。可以表明由此带来的误差不大。

因此,顶层油温度的微分方程(输入 K 、 θ_a ,输出 θ_o)为:

$$\left[\frac{1+K^2R}{1+R} \right]^* \times (\Delta\theta_{or}) = k_{11} \tau_o \times \frac{d\theta_o}{dt} + [\theta_o - \theta_a] \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

所有变量和参数的符号,均见本文前面的规定。

热点温升的微分方程(输入 K ,输出 $\Delta\theta_h$)最容易解出,因为它是两个微分方程之和,而

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

这两个方程分别是:

$$k_{21} \times K^2 \times (\Delta\theta_{or}) = k_{22} \times \tau_w \times \frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt} + \Delta\theta_{h1} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

和

$$(k_{21} - 1) \times K^2 \times (\Delta\theta_{or}) = (\tau_o/k_{22}) \times \frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} + \Delta\theta_{h2} \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

将上面两个方程的解代入式(E.2)。

热点温度的最终方程为:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_h \quad \dots\dots\dots (E.5)$$

关于方程(E.2)至(E.4),要考虑其复杂性,因为实际上油冷却介质除了有热惯性外,还有力学惯性。对于电力变压器,它对自然冷却方式(ON)影响最大,对非强油导向冷却方式(OF)影响稍小,对强油导向冷却方式(OD)的影响可以忽略。它对配电变压器的影响也可以忽略(见 8.2.2)。

这些方程的方框图表示见 8.2.3。

E.4 变换为差分方程

对于像用指数函数一类的简单函数表示的输出函数,若输入函数不是简单函数,例如,单一的阶跃函数,则上述的微分方程仍不能解出。对于一台已安装的变压器,负载电流和环境温度不是明确的时间函数。如果进行近似,例如,将负载电流近似地化为一系列阶跃变化的函数,并保持环境温度恒定,则其结果也只是近似值。

如果将微分方程变换为差分方程,则其解十分简单,在一个简单的电子表格上就可以表示出。

式(E.3)的微分方程可写为下述差分方程,其中 D 代表一个小的时间段上的差分。

式(E.1)变为:

$$D\theta_o = \frac{Dt}{k_{11}\tau_o} \left[\left[\frac{1+K^2R}{1+R} \right]^n \times (\Delta\theta_w) - [\theta_o - \theta_a] \right] \dots\dots\dots(E.6)$$

算子“D”表示与每个时间段 Dt 相对应的相关变量的差分。在每个时间段中, D θ_o 的第 n 个值可由第(n-1)个值用下式来计算:

$$\theta_{o(n)} = \theta_{o(n-1)} + D\theta_{o(n)} \dots\dots\dots(E.7)$$

式(E.3)和式(E.4)变为:

$$D\Delta\theta_{h1} = \frac{Dt}{k_{22}\tau_w} \times [k_{21} \times \Delta\theta_w K^2 - \Delta\theta_{h1}] \dots\dots\dots(E.8)$$

和:

$$D\Delta\theta_{h2} = \frac{Dt}{(1/k_{22})\tau_o} \times [(k_{21} - 1) \times \Delta\theta_w K^2 - \Delta\theta_{h2}] \dots\dots\dots(E.9)$$

每一个 $\Delta\theta_{h1}$ 和 $\Delta\theta_{h2}$ 的第 n 个值的计算用与式(E.7)类似的方法进行。

在第 n 个时间段时总的热点温升可由式(E.10)给出:

$$\Delta\theta_{hot(n)} = \Delta\theta_{h1(n)} + \Delta\theta_{h2(n)} \dots\dots\dots(E.10)$$

最后,在第 n 个时间段时的热点温度可由式(E.11)给出:

$$\theta_{o(n)} = \theta_{o(n-1)} + \Delta\theta_{hot(n)} \dots\dots\dots(E.11)$$

为了得到一个精确的结果,时间段 Dt 应尽可能小,不能大于发热模型中的最小时间常数的一半。例如,如果所考虑绕组的时间常数是 4 min,则时间段应不大于 2 min。

注: τ_w 和 τ_o 不应设置为 0。

理论上也有比式(E.6)~式(E.9)中所用的简单方法更精确的数学分析解法,如:梯形法或朗格-昆塔法,但是,考虑到输入数据的不精确,必然会使复杂程度增加。

6.3 中的纤维素绝缘寿命损失的微分方程也可以变换为差分方程。基本的微分方程为:

$$\frac{dL}{dt} = V \dots\dots\dots(E.12)$$

故有:

$$DL_{(n)} = V_{(n)} \times Dt \dots\dots\dots(E.13)$$

和:

$$L_{(n)} = L_{(n-1)} + DL_{(n)} \dots\dots\dots(E.14)$$

E.5 举例

假设所考虑的对象是由一个在线监测装置发出的热点温度和寿命损失的信息,求解步骤如下:

- a) 设置变压器参数;
- b) 设置输入数据;
- c) 计算初始状态;

GB/T 1094.7—2008

- d) 解微分方程；
 e) 将输出数据列表；
 D) 将输出数据绘成曲线。
 详细内容如下；

1——设置变压器参数

所用参数在环境温度为 30 ℃、额定热点温度为 110 ℃时选取。其他参数典型值如下：

$$\begin{array}{llllll} \Delta\theta_{or} = 45 \text{ K} & \tau_o = 150 \text{ min} & R = 8 & y = 1.3 & k_{21} = 2 \\ \Delta\theta_{or} = 35 \text{ K} & \tau_w = 7 \text{ min} & x = 0.8 & k_{j1} = 0.5 & k_{22} = 2 \end{array}$$

2——设置输入数据

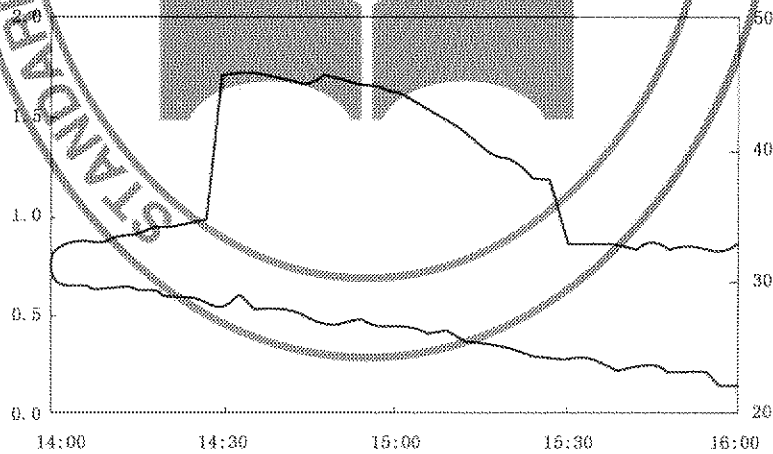
本例中的输入数据列于表 E.1 中，并在图 E.1 中绘出。

表 E.1 举例中的输入数据

段	时间 t_i / min	一天中的时间 h :min	环境温度 θ_a / ℃	负载系数 K
0	0	14:00	30.3	0.81
1	3	14:03	29.9	0.87
2	6	14:06	29.8	0.88
3	9	14:09	29.5	0.86
4	12	14:12	29.6	0.90
5	15	14:15	29.5	0.92
6	18	14:18	29.5	0.95
7	21	14:21	28.9	0.96
8	24	14:24	29.0	0.97
9	27	14:27	28.6	1.00
10	30	14:30	28.0	1.70
11	33	14:33	28.7	1.70
12	36	14:36	27.8	1.73
13	39	14:39	28.1	1.72
14	42	14:42	27.9	1.69
15	45	14:45	27.1	1.68
16	48	14:48	26.9	1.71
17	51	14:51	26.7	1.69
18	54	14:54	27.2	1.67
19	57	14:57	26.7	1.68
20	60	15:00	26.9	1.63
21	63	15:03	26.5	1.69
22	66	15:06	26.2	1.53
23	69	15:09	26.3	1.49

表 E.1 (续)

段	时间 t / min	一天中的时间 h, min	环境温度 θ_a / $^{\circ}\text{C}$	负载系数 K
24	72	15:12	25.4	1.41
25	75	15:15	25.6	1.38
26	78	15:18	25.3	1.32
27	81	15:21	24.8	1.28
28	84	15:24	24.5	1.21
29	87	15:27	24.3	1.19
30	90	15:30	24.1	0.87
31	93	15:33	24.3	0.88
32	96	15:36	24.1	0.87
33	99	15:39	23.7	0.86
34	102	15:42	23.6	0.85
35	105	15:45	23.8	0.87
36	108	15:48	23.1	0.83
37	111	15:51	23.3	0.86
38	114	15:54	23.1	0.85
39	117	15:57	22.3	0.82
40	120	16:00	22.2	0.86



负载系数(上面的曲线,左边坐标轴)

环境温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ (下面的曲线,右边坐标轴)

图 E.1 举例用的输入数据绘图

环境温度和负载系数是取在 3 min 间隔内的值。此时间段是最大的,为了得到精确的结果,它应比方程中的最小时间常数 τ_w 小一半。而本例中的 $\tau_w = 7 \text{ min}$,所以时间段 $Dt = 3 \text{ min}$ 。

GB/T 1094.7—2008

3——计算初始状态

尽管在计算开始时系统可能不是严格意义上的稳态,但这通常是一个最好的假设,且它对最终结果的影响不大。

那么,初始状态可通过在式(E.1)、式(E.3)和式(E.4)中分别设置时间导数为零来计算,形成下列值:

$$\text{从式(E.1)中,初始值 } \theta_o \text{ 为: } \theta_{o(0)} = \left[\frac{1+K^2R}{1+R} \right] \times \Delta\theta_{or} + \theta_e = 63.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{从式(E.3)中,初始值 } \Delta\theta_{h1} \text{ 为: } \Delta\theta_{h1(0)} = k_{21} \times K^2 \times \Delta\theta_{hr} = 53.2 \text{ K}$$

$$\text{从式(E.4)中,初始值 } \Delta\theta_{h2} \text{ 为: } \Delta\theta_{h2(0)} = (k_{21} - 1) \times K^2 \times \Delta\theta_{hr} = 26.6 \text{ K}$$

也可以选择寿命损失的初始状态。这里假设计算的目的是求出局部过载发生时的寿命损失。因此, L 的初始值为 $L_{(0)} = 0$ 。

4——解差分方程

在 $n=0, t=0, \theta_{o(0)} = 63.9$ (单位省略了,温度为 $^\circ\text{C}$,温度差值为K)

$$\Delta\theta_{h1(0)} = 53.2$$

$$\Delta\theta_{h2(0)} = 26.6$$

$$L_{(0)} = 0$$

在 $n=1, t=3 \text{ min}$,由式(E.6)和式(E.7),顶层油温度变化如下:

$$D\theta_{o(1)} = \frac{3}{0.5 \times 150} \left[\left[\frac{1+0.87^2 \times 8}{1+8} \right]^{0.8} \times 45 - [63.9 - 29.9] \right] = 0.121 \text{ 和}$$

$$\theta_{o(1)} = \theta_{o(0)} + D\theta_{o(1)} = 63.9 + 0.121 = 64.0$$

同样地,由式(E.8),热点温升第一项变化如下:

$$D\Delta\theta_{h1(1)} = \frac{3}{2.0 \times 7} (2.0 \times 35 \times 0.87^{1.3} - 53.2) = 1.12 \text{ 和}$$

$$\Delta\theta_{h1(1)} = \Delta\theta_{h1(0)} + D\Delta\theta_{h1(1)} = 53.2 + 1.12 = 54.3$$

同样地,由式(E.9),热点温升第二项变化如下:

$$D\Delta\theta_{h2(1)} = \frac{3}{(1/2.0) \times 150} ((2.0 - 1) \times 35 \times 0.87^{1.3} - 26.6) = 0.104 \text{ 和}$$

$$\Delta\theta_{h2(1)} = \Delta\theta_{h2(0)} + D\Delta\theta_{h2(1)} = 26.6 + 0.104 = 26.7$$

由式(E.10),总的热点温升为:

$$\Delta\theta_{h(1)} = \Delta\theta_{h1(1)} - \Delta\theta_{h2(1)} = 54.3 - 26.7 = 27.6$$

最后,由式(E.11),热点温度为:

$$\theta_{h(1)} = \theta_{o(1)} + \Delta\theta_{h(1)} = 64.0 + 27.6 = 91.6$$

此时间段的寿命损失 L 由式(E.13)给出:

$$DL_{(1)} = V_{(1)} \times Dt = \left[e^{\frac{15.036}{91.6-29.9}} - \frac{15.036}{91.6-29.9} \right] \times 3 = 0.42 \text{ min}$$

(额定状态下的寿命损失为3 min。)

此点总的寿命损失为:

$$L_{(1)} = L_{(0)} + DL_{(1)} = 0 + 0.42 \text{ min, 或 } 0.00029 \text{ 天}$$

在 $n=2, t=6 \text{ min}$ 时,整个计算是重复的,将所有的下标加1,即每个变量 $X_{(1)}$ 变为 $X_{(2)}$ 。在 $n=3, t=9 \text{ min}$ 时,每个变量 $X_{(2)}$ 变为 $X_{(3)}$ 等,直到 $n=40, t=120 \text{ min}$ 为止。

5——将输出数据列表

计算结果示于表E.2和图E.2中。

表 E.2 举例中的输出数据

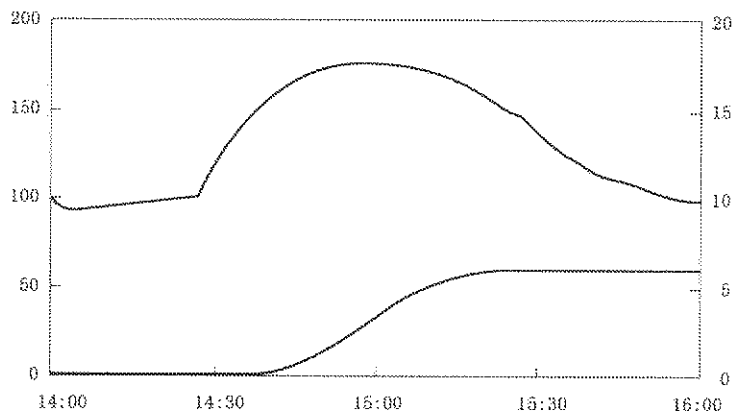
段	时间 t / min	一天中的时间 h :min	热点温度 θ_h / ℃	寿命损失 L / min	寿命损失 L / days
0	0	14:00	90.5	0	0
1	3	14:03	91.6	0	0.00
2	6	14:06	92.7	1	0.00
3	9	14:09	93.2	1	0.00
4	12	14:12	94.3	2	0.00
5	15	14:15	95.5	3	0.00
6	18	14:18	97.2	3	0.00
7	21	14:21	98.6	4	0.00
8	24	14:24	100.0	5	0.00
9	27	14:27	101.5	7	0.00
10	30	14:30	118.6	14	0.01
11	33	14:33	132.1	39	0.03
12	36	14:36	143.5	109	0.08
13	39	14:39	152.4	258	0.18
14	42	14:42	158.8	508	0.35
15	45	14:45	163.6	875	0.61
16	48	14:48	168.2	1 402	0.97
17	51	14:51	171.5	2 076	1.44
18	54	14:54	175.6	2 871	1.99
19	57	14:57	175.7	3 796	2.64
20	60	15:00	176.1	4 754	3.30
21	63	15:03	175.6	5 875	3.94
22	66	15:06	173.8	6 480	4.50
23	69	15:09	171.5	7 156	4.97
24	72	15:12	167.8	7 667	5.32
25	75	15:15	164.2	8 055	5.59
26	78	15:18	160.1	8 335	5.79
27	81	15:21	156.0	8 534	5.93
28	84	15:24	151.1	8 668	6.02
29	87	15:27	146.8	8 761	6.08
30	90	15:30	136.9	8 800	6.11
31	93	15:33	129.1	8 819	6.12
32	96	15:36	122.8	8 830	6.13
33	99	15:39	117.5	8 836	6.14

GB/T 1094.7—2008

表 E.2 (续)

段	时间 t_i / min	一天中的时间 A_i , min	热点温度 θ_{hi} / ℃	寿命损失 L_i / min	寿命损失 L_i / days
34	102	15:42	113.1	8 840	6.14
35	105	15:45	110.0	8 843	6.14
36	108	15:48	106.6	8 846	6.14
37	111	15:51	104.5	8 847	6.14
38	114	15:54	102.6	8 849	6.14
39	117	15:57	100.4	8 850	6.15
40	120	16:00	99.3	8 851	6.15

6——将输出数据绘成曲线



热点温度,单位为℃(上面的曲线,左边坐标轴)

寿命损失,单位为天(下面的曲线,右边坐标轴)

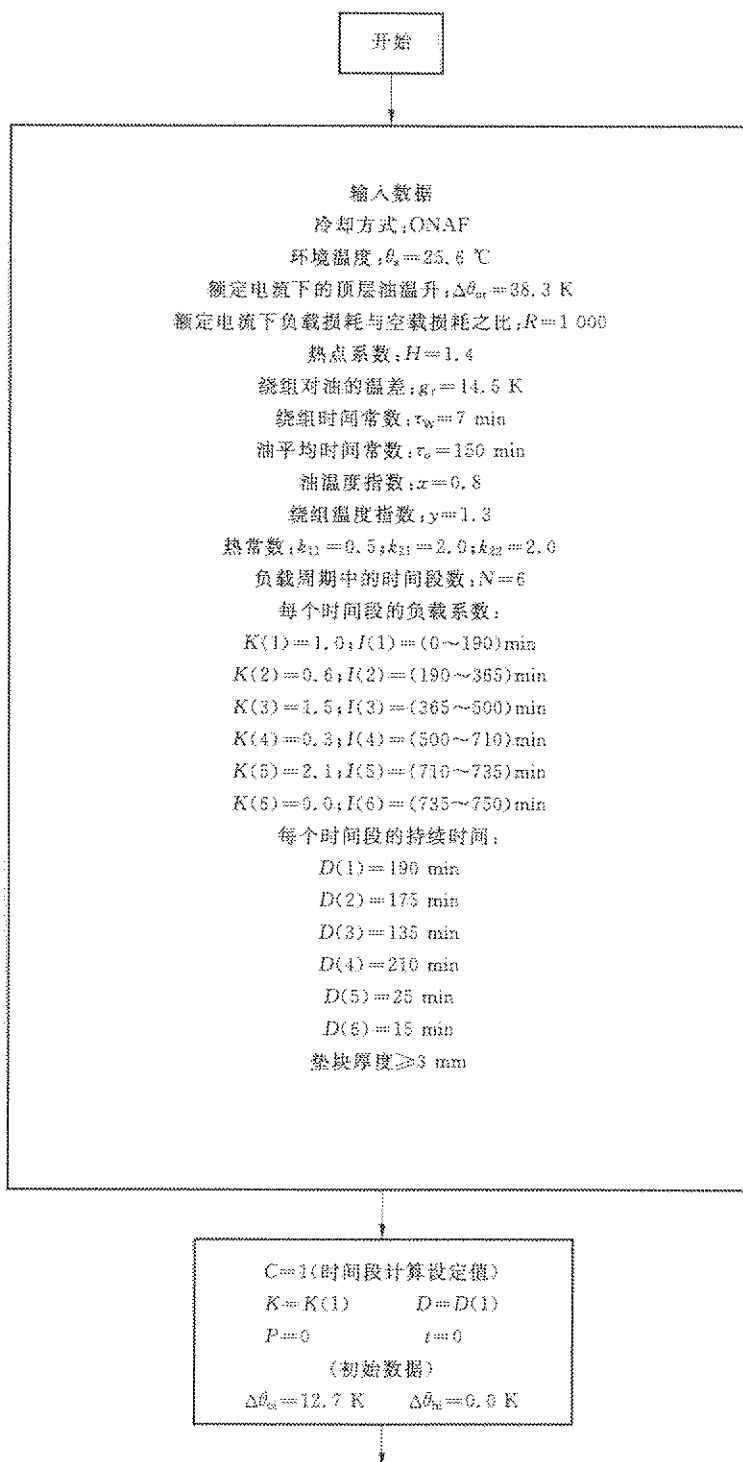
图 E.2 举例用的输出数据绘图

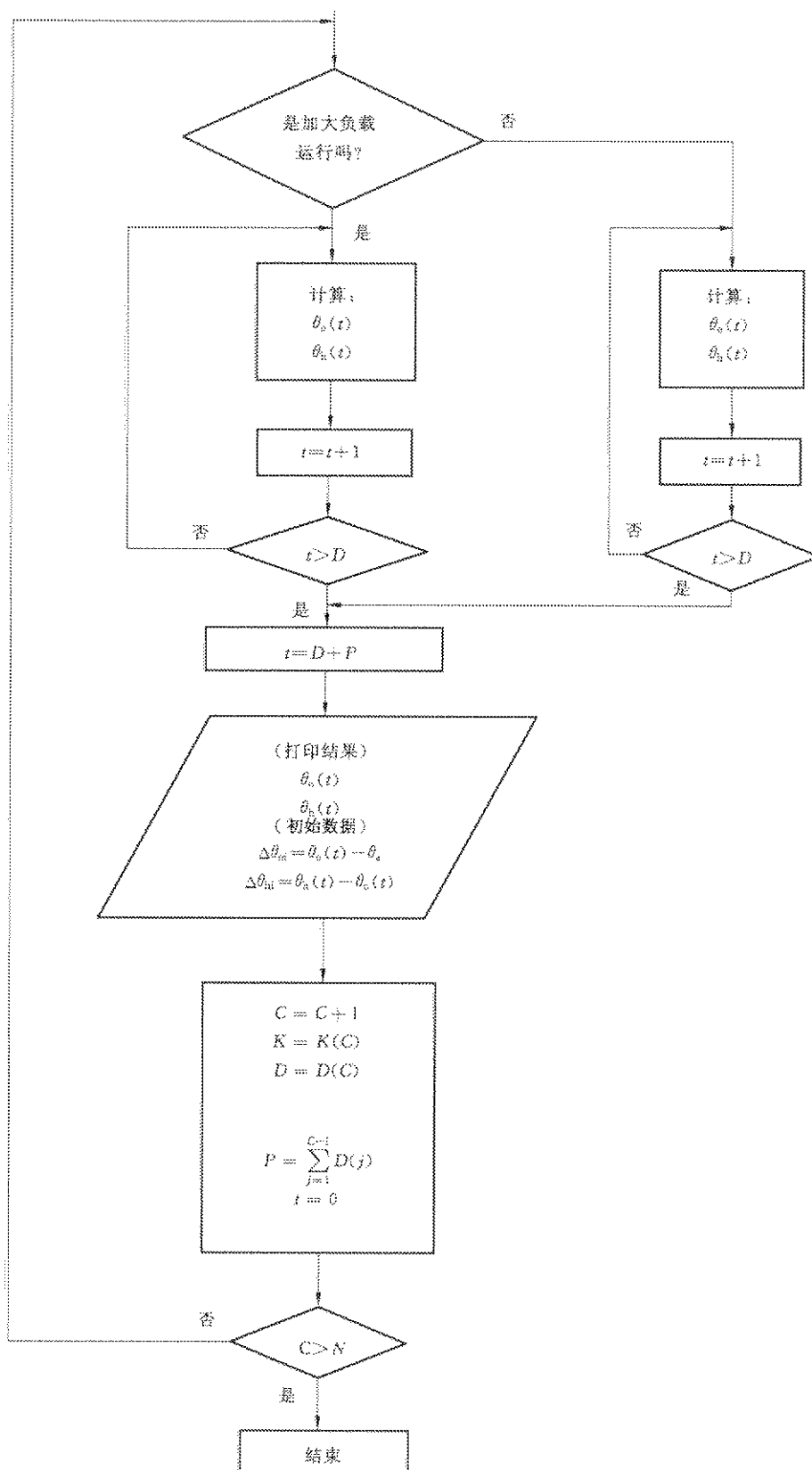
由于图中的时间是 2 h 或 0.083 3 天,并且寿命损失是 6.15 天,因此,此次过载期间的相对寿命损失为 $6.15/0.0833=74$ 倍正常寿命。如果另有一个较长的时间段是处于相对低的热点温度(通常情况),则它并不严重。

E.6 使用测得的顶层油温

如果顶层油温可以测出,例如,以一个 4 mA~20 mA 的信号输入到监测设备上,则计算可以更精确。热点温升可从差分方程(E.8)、(E.9)和(E.10)计算出来,并直接加上每个时间段下测得的顶层油温度数据,见图 9 中的虚线路径。

附录 F
(资料性附录)
附录 C 中例子的流程图





参 考 文 献

- [1] A K Bose and G J Hulsink. Performance of the magnetic circuit of a transformer in service. *Elektrotechnik* 56(1978)(7).
- [2] E Binder und W Felber. Rueckarbeitsverfahren mit zwei 500 MVA Transformatoren. *ELIN-Zeitschrift* 1978 Heft 1.
- [3] A K Bose, C Kroon, J Wildeboer. The loading of a magnetic circuit. CIGRE 1978 session, August 30, September 7.
- [4] IEEE standard C57.91, 1995, IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformers.
- [5] Nordman, H and Lahtinen, M. , Thermal overload tests on a 400 MVA power transformer with a special 2,5 p. u. short time loading capability. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, January 2003, pages 107-112.
- [6] Lampe, W. , Petterson, L. , Ovren, C. , Wahlstrom, B. , Hot-spot measurements in power transformers. CIGRE, Rep. 12-02, 1984.
- [7] Experimental determination of power transformer hot-spot factor. CIGRE WG 12-09, *Electra* no. 161, August 1995.
- [8] IEEE 1538, 2000, IEEE Guide for determination of maximum winding temperature rise in liquid-filled transformers.
- [9] Nordman, H. , Ralsback, N. , and Susa, D. , Temperature responses to step changes in the load current of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 4, October 2003, pages 1110-1117.
- [10] Swift, G. W. , Molinski, T S and Lehn, W. , A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modelling. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 16, No. 2, April 2001, pages 171-177.
- [11] Heat-run test procedure for power transformers. CIGRE WG 12-09. *Electra* no. 129, March 1990, pages 37-45.
- [12] Aging of Kraft Paper in Natural Ester Dielectric Fluid-14th International Conference on Dielectric Liquids, Graz, Austria, July 7-12, 2002, IEEE 0-7803-7350-2/02.
- [13] Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Expo, Oct. 28-Nov. 02, 2001, Atlanta, GA, IEEE 0-7803-7257-5/01.
- [14] Schroff, D H and Stannett, A. W. , A review of paper ageing in transformers. *IEE proceedings* vol. 132, pt C, no. 6, November 1985, pages 312-319.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电 力 变 压 器 第 7 部 分：油 浸 式
电 力 变 压 器 负 载 导 则
GB/T 1094.7—2008

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码：100045

网址 www.spc.net.cn

电话：68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 3 字数 81 千字

2008年12月第一版 2008年12月第一次印刷

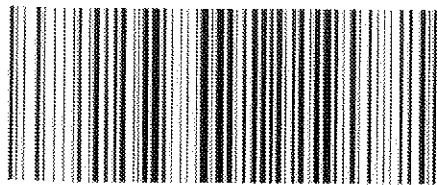
*

书号：155066·1-35075 定价 32.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话：(010)68533533



GB/T 1094.7-2008