

文章编号: 1674—8247(2020)05—0020—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.004

高过载牵引变压器相关技术的研究

邓云川 刘 梅

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:牵引变压器是牵引供电系统最为重要的电气设备之一,其运行的经济性与铁路部门的电费支出密切相关。研究表明,通过提高牵引变压器的过载能力,研制高过载牵引变压器,可使牵引变压器的容量利用率趋于合理,并可以此改善牵引变压器运行的经济性。本文对高过载变压器的相关技术和标准进行了介绍,结合牵引变压器的具体技术需求,提出了两种高过载牵引变压器的技术方案。

关键词:牵引变压器;绝缘材料;经济性;技术方案

中图分类号:U224.2+2

文献标志码:A

Research on Technologies Related to High-overload Traction Transformer

DENG Yunchuan LIU Mei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

20

Abstract: Traction transformer is one of the most important electrical devices in the traction power supply system. The economic efficiency of its operation is closely related to the electricity expenditure of the railway sector. The research in this paper shows that through improving the overload capacity of traction transformers and developing high-overload traction transformers, the capacity utilization rate of traction transformers can be rationalized and the economic efficiency of traction transformer operation can be improved. This paper introduces the technologies and standards related to high-overload transformers, and proposes two technical schemes for high-overload traction transformers based on specific technical requirements of traction transformers.

Key words: traction transformer; insulating material; economic efficiency; technical scheme

电气化铁路牵引负荷受线路坡道、运输组织等因素影响,变化较为剧烈,普遍存在瞬时或短时负荷较大,平均负荷较小的现象。牵引变压器安装容量通常按照满足瞬时或短时负荷,并考虑一定的过负荷倍数来确定。在实际运行中,由于牵引变压器并未结合牵引负荷特点针对性地提高牵引变压器的短时过载能力,导致牵引变压器安装容量较大、容量利用率较低、基本电费支出较高的不合理情况普遍存在^[1-3]。

为提高牵引变压器容量利用率,降低安装容量,减少运营电费支出,目前主要采取了以下措施:(1)研制

并应用了单相接线、Vv接线等容量利用率较高的牵引变压器;(2)按最大需量法确定变压器的基本电费。上述措施在一定程度上取得了较好的社会和经济效益,但并未从根本上解决相关问题。根据铁路部门的资料统计,目前,全国牵引变压器的平均容量利用率不足20%。而对于变压器而言,当其容量利用率为30%~70%时,变压器处于经济运行区,当其容量利用率位于20%~30%或70%~100%时,变压器处于不良运行区,而当其容量利用率低于20%时,变压器处于最劣运行区。因此,亟需解决牵引变压器经济运行

收稿日期:2020-03-20

作者简介:邓云川(1974-),男,教授级高级工程师。

引文格式:邓云川,刘梅.高过载牵引变压器相关技术的研究[J].高速铁路技术,2020,11(5):20-24.

DENG Yunchuan, LIU Mei. Research on Technologies Related to High-overload Traction Transformer[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5):20-24.

状况较差,负荷需求与容量配置匹配度较差的不合理现象^[4-6]。

牵引变压器的工作寿命取决于其绝缘系统,而绝缘系统的机械强度是影响工作寿命的决定因素。当绝缘达到老化终点时,变压器将因绝缘系统的机械强度出现问题而发生故障。目前,牵引变压器基本采用油纸绝缘系统,变压器油作为绝缘和散热介质,充满油箱。通常采用燃点为 165 ℃ 的矿物油,绕组导体包绕绝缘纸,线圈对地间以纸板绝缘。牵引变压器绝缘耐热等级为 A 级,长期最高工作温度为 105 ℃,最热点温度不超过 140 ℃。绝缘寿命的决定因素是绝缘工作温度,也就是绝缘最热部分的工作温度。最高温度由环境温度、绕组平均温升、绕组最高温度与平均温度间的梯度构成,目前,牵引变压器绕组的平均温升按 65 K 控制,顶层油的温升按 55 K 控制^[7-9]。

为提高牵引变压器的过负荷能力,可通过改善牵引变压器绝缘材料的热性能,使其能在更高的温度下工作,同时维持使用寿命不变。

1 牵引变压器温升计算

牵引变压器的运行寿命可通过蒙托辛格氏法则计算,即:

$$\text{寿命} = D e^{-p\theta} \quad (1)$$

式中: D ——变压器正常寿命,通常为 30 a。

按照维持正常使用寿命的热点温度为 98 ℃,温度每增加 6 ℃ 绝缘寿命减少 1/2,可得 $p = 0.115 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\theta = \text{变压器热点温度} - 98 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

任意负荷下,变压器的最热点温度为环境温度、顶层油温升加热点与顶层油温升之间的温差:

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

式中: θ_a ——环境温度;

$\Delta\theta_{or}$ ——绕组顶部油温升;

R ——损耗比;

K ——变压器绕组负载率;

x ——油的指数;

y ——绕组指数;

Hg_r ——热点对绕组顶部油的温差。

某牵引变电所采用单相牵引变压器,安装容量为 40 MVA,1 d 负荷电流实测数据如图 1 所示。

根据相关参数,计算变压器顶层油温升、绕组对油温升和最热点温度分别如图 2 ~ 图 4 所示。相关统计数据如表 1 所示。

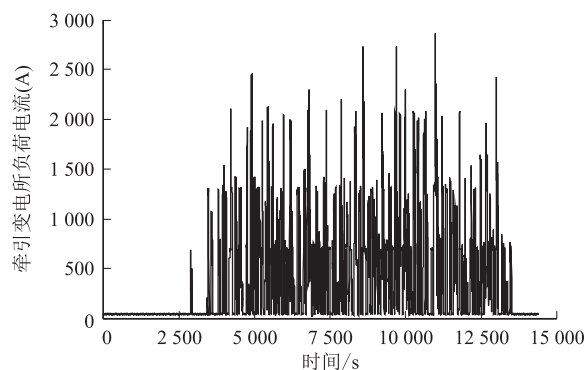


图1 某牵引变电所1d负荷电流实测曲线

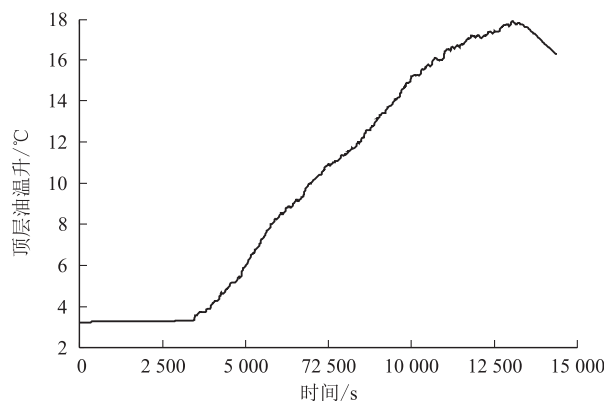


图2 顶层油温升曲线

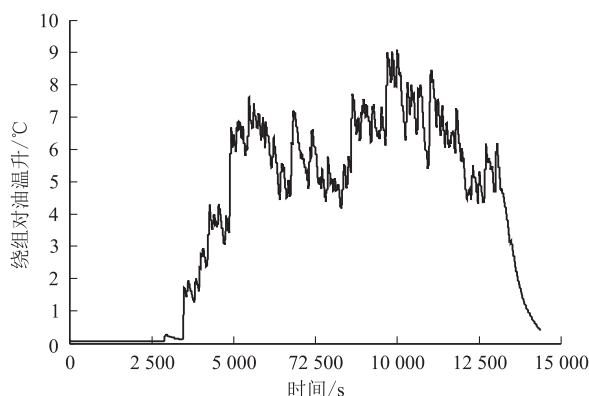


图3 绕组对油温升曲线

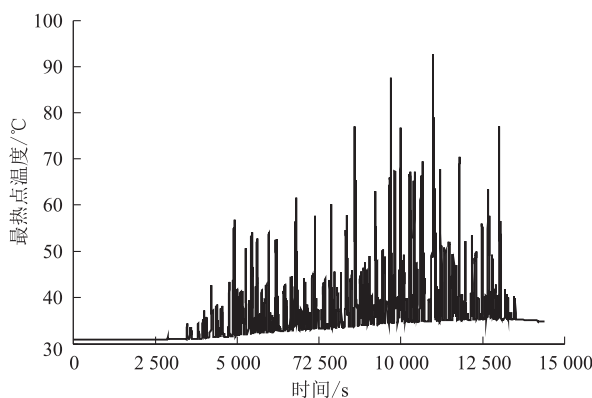


图4 最热点温度曲线

表 1 温升计算结果表

项目	最大值	平均值	有效值
负荷电流/A	2 860	424. 4	670. 02
顶层油温升/℃	17. 9	10. 1	11. 52
绕组对油温升/℃	9. 086	4. 055	4. 939
最热点温度/℃	92. 45	36. 24	36. 85

牵引变压器顶层油温升限值为 55 K,绕组温升限值为 65 K。从计算结果可以看出,该牵引变压器虽短时出现 2 倍左右的过负荷,但温升还有较大富余。

2 牵引变压器绝缘材料

2.1 液体绝缘材料

大型变压器基本都采用油作为液体绝缘材料,油在变压器中主要起三个作用:一是给各带电导体提供包围它们的绝缘介质,同时给设备内部的金属表面提

供一个保护层,抑制金属表面氧化等化学反应;二是作为散热介质,通过油的辐射、传导、对流将线圈和铁心局部温度较高的部件热量传递到周围环境;三是用于指示变压器的运行状态,通过分析变压器油的物理和化学状态可得到变压器的诊断信息。

结合变压器油的作用,其重要的性能要求有:低粘度、低倾点、高闪点、优良的化学稳定性、很高的电气强度。其不太重要的性能要求有:高比热容、高导热率、很好的冲击强度、很高的介电常数、低溶解能力、低密度、好的熄弧性、无毒、环保性。

矿物油是目前性价比最高的变压器液体绝缘材料,因而得到广泛采用。为满足一些特殊场合的特殊需求,硅油、天然脂、合成脂等液体绝缘材料也有被采用。不同液体绝缘材料性能指标如表 2 所示。

表 2 不同绝缘油特性指标表

名称	矿物油	硅油	合成酯	天然酯
基本成分	烃类的复杂混合物	二烷基硅聚合物	季戊四醇/四酯	植物提取天然酯
原料	从石油中提纯	化工生产	化工生产	植物提取
降解性	降解缓慢	不能降解	易于降解	易于降解
耐潮性	性能受湿度影响明显	性能受湿度影响明显	耐潮性非常好	耐潮性好
溶解度(ppm)	55	220	2 600	1 100
闪点/℃	160	> 300	> 250	> 300
燃点/℃	165	350	> 300	360
防火等级	0	K	K	K
20 ℃时的密度/(g/ml)	0. 88	0. 96	0. 97	0. 83
20 ℃时的比热/(J/kg K)	1 860	1 510	1 880	2 000
20 ℃时的导热系数/(W/m K)	0. 126	0. 151	0. 144	0. 17
20 ℃时的运动粘度/(mm ² /s)	22	50	70	—
100 ℃时的运动粘度/(mm ² /s)	2. 6	15	5. 25	8. 4
倾点/℃	- 50	< - 50	- 60	- 21
膨胀率	0. 000 75	N/A	0. 000 75	—
自燃温度/℃	280	435	438	—
击穿电压/kV	56	60	75	52
酸值/(mgKOH/g)	0. 03	0. 01	0. 2	0. 03
90 ℃时的介电损耗因子	< 0. 002	< 0. 001	< 0. 006	< 3. 0
20 ℃的介电常数	2. 2	2. 7	3. 2	3. 1
无烟/不易燃	差	差	优	优
环保性	差	差	优	优
耐湿性	非常低	低	非常高	高
氧化稳定性	抗氧化	抗氧化	抗氧化	不抗氧化

2.2 固体绝缘材料

高压变压器中的固体绝缘介质主要由包绕绕组导体的绝缘纸和绕组对地绝缘的纸板构成。油浸变压器中的固体绝缘材料一般以纤维素为基础材料,目前以由未漂白牛皮纸浆制作的纤维素纸和纸板为主。固体绝缘主要起绝缘、机械强度和耐热三个作用,其主要的性能要求有:(1)具有高的绝缘强度;(2)介电参数与变压器油的介电常数接近;(3)低介电损耗因

子;(4)不含导电粒子。

为提高绝缘纸的延展性,20 世纪 70 年代开发了皱纹纸,后又开发了弹性更好的高伸长率 CLUPAK 纸。为提高绝缘纸的热稳定性,通过在制造过程中添加稳定剂开发了耐高温纸,又称热改性纸。用于绝缘绕组导体和引线的纸品,不提供机械支撑。绝缘纸板的一个主要作用是在短路过程中支撑绕组,纸板分为压光纸板、预压纸板和造型纸板三种。此外,目前有厂

家生产了一种聚酰芳胺绝缘纸,目前主要有 410 型和 910 型,410 型为 C 级耐热材料,910 型为 B 级耐热材料。不同固体绝缘材料的性能指标如表 3 所示。

表 3 不同固体绝缘材料特性指标表

材料		纤维素基纸	纤维素基热改性纸 (丹尼森纸)	纤维素基纸板	聚酰芳胺		
					410	356	910
耐热等级/℃		105	120	105	220	155	130
20 ℃ 的介电常数		3.3 ~ 4.1	3.3 ~ 4.1	2.9 ~ 4.6	1.6 ~ 2.4	1.6 ~ 3.2	3.57
介电损耗 因子	25 ℃	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.009
	100 ℃	0.01	0.01	0.01	0.005	0.005	0.016
吸湿性/%		7.0	7.0	7.0	5.0		
密度/(g/cm ³)		0.97 ~ 1.2	0.97 ~ 1.2	0.8 ~ 1.35	0.72 ~ 0.8	0.55 ~ 0.73	0.9 ~ 1.1
抗拉强度	纵向/(N/cm)	64	890	—	65	37	70
	横向/(N/cm)	28	—	—	32	18	17
伸长率	纵向/%	2	15	—	11	7	2.2
	横向/%	5	—	—	8	6	6.9
撕裂强度	纵向/N	—	—	—	—	10	0.44
	横向/N	0.5	—	—	—	6.3	0.7
击穿电压/(kV/mm)		8.5	9.8	—	22	11	90

3 采用高温绝缘材料的液浸式变压器

3.1 相关标准

变压器通过采用高温绝缘材料,可提高变压器的过载能力和防火能力,延长使用寿命。若绝缘液采用合成脂或天然脂,即便发生泄漏,也可实现生物降解、绿色环保。若绝缘纸采用热改性纸,则可因其具有较好的温度、水分和氧适宜性,从而进一步提高变压器的整体技术优势。为规范采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用,国际电工委员会制定并颁布了 IEC/TS 60076 - 14:2009《电力变压器 第 14 部分:采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用》国际标准,国内引用 IEC 标准,制定并颁布了 GB/Z 1094. 14 - 2011《电力变压器 第 14 部分:采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用》国家标准。

3.2 绝缘系统分类

根据高温固体绝缘材料与高温液体材料组合,GB/Z 1094. 14 - 2011《电力变压器 第 14 部分:采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用》提出了局部混合绝缘系统、半混合绝缘系统、混合绝缘系统和均匀绝缘系统 4 种变压器绝缘系统。

局部混合绝缘系统指位于绕组热点区域内的紧贴绕组导线的绝缘(包括绕组导线绝缘和有必要时与该区域中导线接触的垫块、撑条和纸筒)采用高温固体绝缘材料,而在绕组其余部分和其他温度低的区域中采用耐热等级为 105 限值的绝缘材料能满足要求时,则在这些范围内使用纤维素材料的绝缘系统。半混合绝缘系统指仅在导线绝缘中采用高温绝缘材料的绝缘

系统。混合绝缘系统指所有紧贴绕组导线(裸的或有绝缘)的绝缘(包括导线绝缘和直接与绕组接触的垫块、撑条和纸筒)均采用高温固体材料,仅在温度低的区域中采用耐热等级为 105 限值的绝缘材料能满足要求时,则在这些范围内使用纤维素材料的绝缘系统。均匀绝缘系统指所有高于常规绝缘系统温度的区域都使用高温固体绝缘,同时还使用高温液体绝缘的绝缘系统。

对于前 3 种绝缘系统,变压器的最高运行温度由液体绝缘材料控制。

GB 1094. 2 - 2013《电力变压器 第 2 部分:液浸式变压器的温升》将变压器的顶层油温升定为 60K,按此控制条件,GB/Z 1094. 14 - 2011《电力变压器 第 14 部分:采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用》给出了前 3 种绝缘系统及常规绝缘系统的温升限值和最高过载温度限值,采用高温固体绝缘材料后,按变压器顶层油温升控制,热点温升可增加 12 ~ 52 K,最热点工作温度可提高 10 ~ 50 K,对应变压器的过负荷能力可提高约 25%。对于均匀高温绝缘系统,国标也给出了其温升限值和最高过载温度限值,根据这些限值,可得出采用高温固体和液体绝缘材料后,热点温升可增加 32 ~ 102 K,最热点工作温度可提高 10 ~ 80 K,对应变压器的过负荷能力可提高约 57%。

4 高过载牵引变压器

结合牵引变压器的具体技术需求,本文提出了两种高过载牵引变压器方案,分别采用半混合绝缘系统和均匀绝缘系统相关技术。

4.1 半混合绝缘系统

结合牵引变压器内温度场的实际情况,采用常规

矿物油做为液体绝缘材料,对运行温度高于常规温度绕组的导线绝缘采用高温固体绝缘材料—聚酰芳胺绝缘纸,即仅对某些绕组或所有绕组的导线绝缘采用高温材料,而其余绝缘材料均采用常规绝缘材料。该方案可使牵引变压器提高一个容量等级使用,即(16 + 16)MVA 可满足常规(20 + 20)MVA 牵引变压器的负荷需求。

4.2 均匀绝缘系统

该方案所有高于常规绝缘系统温度的区域均采用高温固体绝缘—聚酰芳胺绝缘纸或热改性纸,由于合成脂或天然脂具有生物降解性、低热膨胀系数、良好的导热特性、高击穿强度、受湿度影响小、高燃点、与变压器其他绝缘材料相互兼容等特点,具有较好的环保性,因此考虑液体绝缘材料采用合成脂或天然脂。天然脂较合成脂具有更好的经济性,因此,在 -20℃ 以下的特殊环境中可优先采用天然脂。值得一提的是,合成脂或天然脂由于具有高燃点、自熄灭、溶水性好、可生物降解等特点,在欧美大量应用于地下变电站中。均匀绝缘系统牵引变压器温升限值如表4所示。

表4 均匀绝缘系统牵引变压器温升限值表

项目	最高温升限值	
	合成脂(天然脂)	
	聚酰芳胺绝缘纸 910 或热改性纸	聚酰芳胺绝缘纸 356 或 410
最低的高温固体绝缘耐热等级/℃	B 级/130	F 级/155
顶层液体温升/K	80	100
绕组平均温升/K	85	100
绕组热点温升/K	95	110
铁心、邮箱及结构表面/K	80	100
热点温升/K	110	160

采用该方案牵引变压器的过负荷能力可提高1.5~2倍。

5 结束语

上世纪90年代电气化铁路行业内曾研制过高过载低阻抗平衡牵引变压器,但由于经济性较差、缺乏标准支撑等原因,未能推广采用。20年后,随着技术的发展、相关标准的颁布,有必要重新审视相关技术,根据不同线路牵引负荷的特点,结合经济性和环保性等要求,差异化地制定技术方案,经济有效地解决牵引变压器经济运行较差、容量利用率较低、不合理电费支出较多等问题。

参考文献:

[1] 马丁 J. 希斯科特. 变压器实用技术大全[M]. 王晓莺,译. 北京:

机械工业出版社, 2004.
Martin J. Heathcote . The J & P Transformer Book [M]. Translated by WANG Xiaoying . Beijing: China Machine Press, 2004.
[2] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
XIE Yucheng. Power Transformer Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
[3] 麦克莱曼. 变压器与电感器设计手册[M]. 龚绍文, 译. 北京: 中国电力出版社, 2009.
MCLYMAN C W. Transformer and Inductor Design Handbook [M]. Translated by GONG Shaowen. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
[4] 姚志松, 姚磊. 新型节能变压器选用、运行与维修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
YAO Zhisong, YAO Lei. Selection, Operation and Maintenance of New Energy-saving Transformers [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
[5] 姚志松, 姚磊. 变压器节能方法与技术改造应用实例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
YAO Zhisong, YAO Lei. Application Examples of Energy-saving Methods and Technical Transformation of Transformers [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
[6] 詹姆斯 H. 哈洛[美]. 电力变压器工程[M]. 保定天威保变电气股份有限公司, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
James H. Harlow . Electric Power Transformer Engineering [M]. Translated by Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd. Beijing: China Machine Press, 2016.
[7] S. V. 库卡尼, S. A. 科哈帕得[印度]. 变压器工程: 设计、技术与诊断[M]. 陈玉国, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde. Transformer engineering: Design, Technology, and Diagnostics [M]. Translated by CHEN Yuguo. Beijing: China Machine Press, 2016.
[8] GB/Z 1094. 14 - 2011/IEC/TS 60076 - 14:2009 电力变压器 第14部分: 采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计 and 应用[S].
GB/Z 1094. 14 - 2011/IEC/TS 60076 - 14:2009 Power Transformers- Part 14. Design and Application of Liquid-immersed Power Transformers Using High-temperature Insulation Materials[S].
[9] 李良威, 邓云川, 高宏. 基于实测数据的客运专线牵引变压器容量及寿命分析研究[C]// 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 第六届电能质量国际研讨会论文集. 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会: 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会秘书处, 2012: 7.
LI liangwei, DENG Yunchuan, GAO Hong. Research and Analysis on the Capacity and Service Life of Traction Transformers for Passenger Dedicated Lines Based on Measured Data[C]// National Technical Committee on Standard Voltages, Current Ratings and Frequencies. Proceedings of the 6th International Conference on Electrical Power Quality. National Technical Committee on Standard Voltages, Current Ratings and Frequencies; Secretariat of the National Technical Committee on Standard Voltages, Current Ratings and Frequencies, 2012: 7.