

谐波对变压器绝缘老化的影响分析

张 乾¹, 胡雪凯², 戎士洋², 周 文²

(1. 国网河北省电力有限公司检修分公司, 河北 石家庄 050070;

2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 变压器作为必要的变电设备, 其安全经济运行至关重要。为研究谐波对变压器绝缘老化的影响, 从理论上分析最热点温度与谐波含量的关系, 及最热点温度对变压器热老化率、老化加速因子及剩余寿命 3 个指标的影响, 通过仿真分别绘制了自然油循环、强迫油循环、强迫油循环导向 3 种冷却方式下变压器热老化率、绝缘老化加速因子、剩余寿命与谐波电流总畸变率的关系曲线, 量化了谐波对变压器绝缘寿命的影响。

关键词: 谐波; 变压器; 绝缘老化; 老化加速因子; 最热点温度; 谐波电流畸变率; 冷却方式

中图分类号: TM855 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-9898(2021)04-0006-04

Influence Analysis of Harmonics on Transformer Insulation Aging

ZHANG Qian¹, HU Xuekai², RONG Shiyang², ZHOU Wen²

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch, Shijiazhuang 050070, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: As a necessary transformer equipment, the safe and economic operation of the transformer is essential. In order to study the influence of harmonics on transformer insulation aging, this paper first theoretically analyzes the relationship between the hottest spot temperature and the harmonic content, and its influence on the three indicators of transformer thermal aging rate, aging acceleration factor and remaining life, and then combines the relationship between the hottest temperature and the harmonic content under the three cooling methods of natural oil circulation, forced oil circulation, and forced oil circulation guidance, the curves of transformer thermal aging rate, insulation aging acceleration factor, remaining life and total harmonic current distortion rate are drawn, and the influence of harmonics on transformer insulation is quantified.

Key words: harmonic; transformer; insulation aging; aging acceleration factor; hottest spot temperature; harmonic current distortion rate; cooling method

0 引言

变压器作为必要的变电设备在电力传输和供配电中发挥着巨大的作用, 其安全经济运行至关重要^[1-3]。变压器的铁心以及绕组等部件在运行时会引起损耗产生热量。

随着非线性负荷的迅速增长以及电力电子技术的大规模应用, 导致电网的谐波问题日趋严重^[4-7], 而变压器长期在谐波环境下运行时会产生大量的损耗、发热^[8-9], 使得变压器绝缘老化加速, 不仅会导致相应的寿命降低, 而且会因为绝缘层遭受破坏引发安全事故^[10-12]。关于谐波对变压器

损耗、温升和寿命的研究比较多, 但都只是传统的直接从单方面研究损耗与温升以及温升与寿命的关系^[13-16], 没有从谐波角度出发, 将三者的内在关系联系在一起, 关于谐波对变压器绝缘耐压水平影响的研究更是微乎其微。

为避免温度过高引发事故, 在变压器中会增加冷却装置来降低温度。目前, 变压器的冷却方式包括自然油循环(简称“ON”)、强迫油循环(简称“OF”)、强迫油循环导向(简称“OD”)等冷却方式^[17-18]。本文针对以上 3 种冷却方式的变压器, 结合最热点温度与谐波含量的关系, 分别研究了其热老化率、绝缘老化加速因子、剩余寿命与谐波

收稿日期: 2020-11-24

作者简介: 张 乾(1990—), 女, 技师, 主要从事高压电气变电运检技术与试验工作。

基金项目: 轨道交通电能质量控制与再生制动能量利用技术研究(国网河北省电力有限公司校企合作项目)

含量的量化关系。

1 最热点温度与谐波含量的关系

现场工程中,最热点温度与谐波含量的关系可以根据测量数据表达为:

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} \quad (1)$$

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \frac{P_{LL}}{P_{LL-R}} \quad (2)$$

式中: θ_g 为顶层油对空气的温升; θ_{g-R} 为额定条件下顶层油对空气的温升; θ_{TO} 为最热点导体对顶层油的温升; θ_{TO-R} 为额定条件下导体对顶层油的温升; P_{LL} 为某谐波含量下的负载损耗; P_{NL} 为空载损耗; P_{LL-R} 为额定电流下的负载损耗。

最热点导体相对空气温升为 $\theta = \theta_{TO} + \theta_g$ 。

2 最热点温度对热老化率的影响

上面研究了谐波对最热点温度的影响,下面从寿命损失来看温升对变压器绝缘的影响。温度对变压器的绝缘老化速度起很大影响,运行时的温度越高,氧化反应发展越快,导致绝缘老化的速度加快,对设备的寿命造成的影响越大。由Montesinger公式可以得出相对寿命损失率,即额定负荷条件温度 θ_{Cr} 时的寿命损失率与某一温度 θ_c 时的寿命损失率之比:

$$V = \frac{\theta_c \text{ 时的寿命损失率}}{\theta_{Cr} \text{ 时的寿命损失率}} = e^{0.693(\theta_c - \theta_{Cr})/6} \quad (3)$$

通常,额定负荷条件的温度取值为 98°C 。将公式(3)中的对数换算为以10为底,得到下式:

$$V = 10^{(\theta_c - 98)/19.93} \quad (4)$$

于是,变压器的绝缘寿命绝对损失可以表达为:

$$L = \sum_{i=1}^n V h_i \quad (5)$$

式中: V 为相对寿命损失率; n 为总的时间区间; h_i 为第 i 个时间区间下负载的运行时间。

用Montesinger老化寿命公式的倒数表示热老化率:

$$\text{热老化率} = \text{const} \cdot e^{P\theta} \quad (6)$$

式中: const 为诸多因素的归一化影响因子,如纤维制品的内在质量以及环境参数等因数; P 为环境变化系数,在实际温度为 $80 \sim 140^\circ\text{C}$ 可取为常数。

相对热老化率的定义为:

$$R = \frac{\text{在 } \theta_c \text{ 下的热老化率}}{\text{在 } 98^\circ\text{C 下的热老化率}} = 2^{(\theta_c - 98)/6} \quad (7)$$

相对热老化率随着最热点温度的抬升将变得越来越严重,其关系曲线成指数上升:若变压器温度高于 98°C ,相对热老化率将超过1;若温度达到变压器运行限值 140°C ,绝缘相对热老化率超过120。

3 最热点温度对绝缘老化加速因子与剩余寿命的影响

在IEEE Std C57.19.00^[19]中提出了老化加速因子的概念,并定义老化加速因子 FAA 与最热点温度之间的关系为:

$$FAA = e^{\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_c + 273} \right)} \quad (8)$$

老化加速因子更加明确地反映了变压器绝缘剩余寿命,而最热点温度对热老化率的影响一节是在讨论变压器绝缘的老化速率,对于实际估算变压器绝缘剩余寿命具有理论指导意义,但仍需要更多的数据与参数。当研究老化加速因子在谐波畸变电流下的影响关系时,直接将最热点温度与谐波电流畸变率关系式换算即可(设环境温度为 30°C)。

在IEEE Std C57.19.00中同时提出了利用老化加速因子来判断变压器剩余寿命的计算公式。假设普通变压器的工作寿命(即绝缘寿命)为30a,则剩余寿命可表示为:

$$\text{剩余寿命} = \frac{\text{绝缘寿命}}{FAA} \quad (9)$$

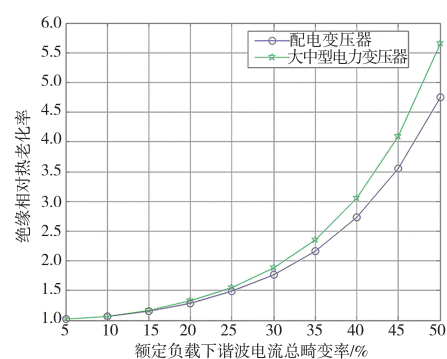
4 仿真分析

根据最热点温度与谐波含量的关系,将最热点温度转换为谐波存在时谐波电流畸变率,在额定负载下,对谐波电流畸变率与变压器的绝缘相对老化率、老化加速因子和剩余寿命3种关系分别进行仿真。对于ON冷却方式的变压器,要考虑配电变压器和大中型变压器2种情况。

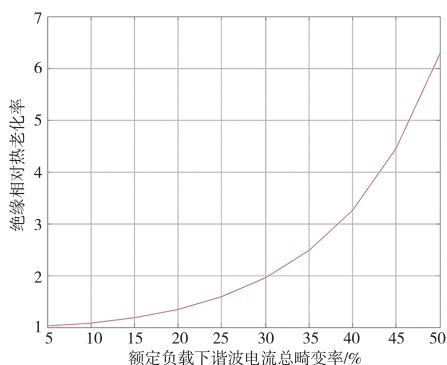
4.1 谐波电流总畸变率对绝缘相对热老化率的影响

结合最热点温度与谐波含量公式,对ON冷却方式、OF冷却方式和OD冷却方式的变压器绝缘相对热老化率与谐波电流总畸变率关系进行仿真,仿真曲线见图1。

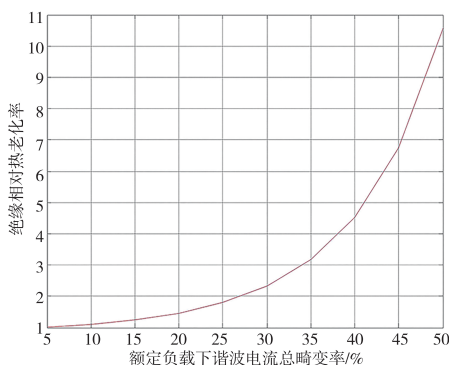
由图1可知,在ON冷却方式下,绝缘相对老



(a) ON 冷却方式



(b) OF 冷却方式



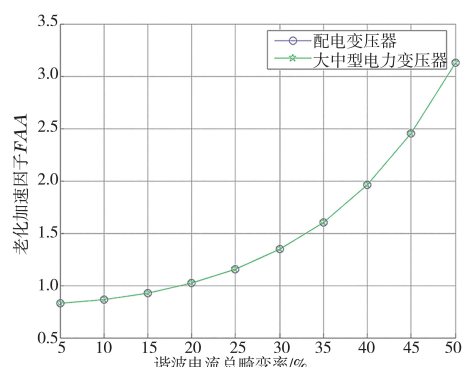
(c) OD 冷却方式

图1 变压器相对热老化率与谐波电流总畸变率关系
率随着谐波电流总畸变率的上升而增加,由于温升离限值有一定距离,老化率变化相对平稳,但老化程度依然很大。在OF冷却方式下,随着谐波电流总畸变率的增加,绝缘相对老化率也相应增加,且上升幅度相对ON冷却方式要高。在OD冷却方式下,绝缘相对老化率随着谐波电流总畸变率的增加而增加,上升幅度相对ON和OF冷却方式的变压器更高。

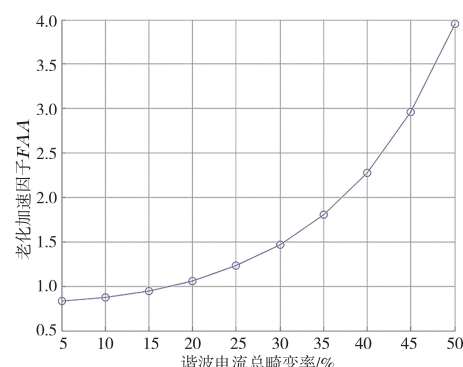
4.2 谐波电流总畸变率对变压器老化加速因子的影响

结合最热点温度与谐波含量公式,在额定负载时,对ON冷却方式、OF冷却方式和OD冷却

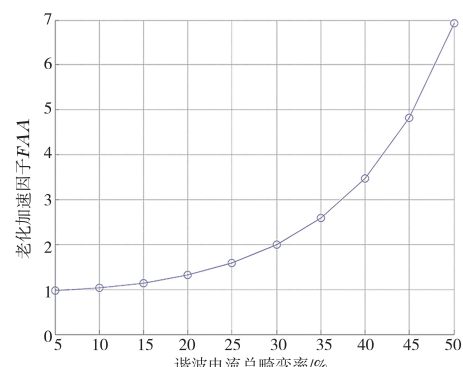
方式的变压器老化加速因子与谐波电流总畸变率关系进行仿真,仿真曲线见图2。



(a) ON 冷却变方式



(b) OF 冷却方式



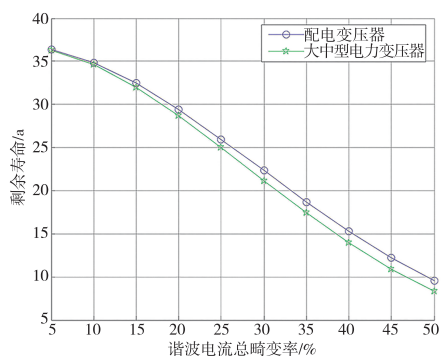
(c) OD 冷却方式

图2 变压器绝缘老化加速因子与谐波电流总畸变率关系
由图2可知,变压器在ON冷却方式下,随着谐波电流含量的增加,老化加速因子也相应变大,谐波总畸变率为20%左右时,老化加速因子达到1。同时,配电变压器和大中型变压器的老化加速因子随着谐波电流总畸变率变化趋势相同,即对于ON冷却方式下的变压器老化加速因子与变压器容量无关。变压器在OD以及OF冷却方式下,随着谐波电流总畸变率的增加,变压器的老化加速因子也在增加,而且2种不同冷却方式下的仿真曲线变化趋势相同,但OD方式下变压器老化加速因子明显

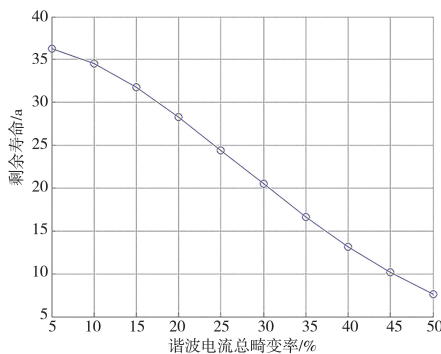
要比 OF 冷却方式下的变化率大。

4.3 谐波电流总畸变率对变压器剩余寿命的影响

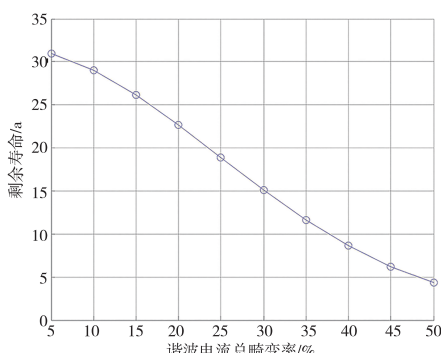
对不同冷却方式下变压器剩余寿命与谐波电流总畸变率的关系进行仿真,仿真曲线见图 3。



(a) ON 冷却方式



(b) OF 冷却方式



(c) OD 冷却方式

图 3 变压器剩余寿命与谐波电流总畸变率关系

由图 3 可知,3 种不同冷却方式下变压器的剩余寿命与谐波电流含量的变化趋势相同,剩余寿命随着谐波电流总畸变率的上升而降低,近似成线性关系。在 ON 冷却方式中,同一谐波电流总畸变率下,大中型变压器剩余寿命相对配电变压器较短。

5 结论

根据 3 种不同冷却方式下绝缘相对热老化

率、老化加速因子、剩余寿命与谐波电流总畸变率的关系分析与仿真,可以发现:相对热老化率曲线变化规律近似成指数关系,与国家标准中变压器温升每上升 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 绝缘相对热老化率增加 1 倍的结论相互验证。随着谐波电流含量的增加,老化加速因子也相应变大,在谐波总畸变率为 20% 左右时,老化加速因子将超过 1。剩余寿命随着谐波电流总畸变率的上升而降低,近似成线性关系。

参考文献:

- [1] 杨 赞.电子电力变压器特性分析与控制[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [2] 王 聪.电力变压器运行状态数据监测处理策略分析[J].通信电源技术,2020,37(4):67-69.
- [3] 蒋 頔.电力变压器电气高压试验技术分析[J].电工技术,2019(20):36-37.
- [4] 贺冬珊,文 俊,耿晓红,等.含多电源的送端电网谐波综合特性研究[J].智慧电力,2020,48(2):1-8.
- [5] 范 旋.电气化铁路对电力系统的影响分析[J].工程建设与设计,2020(4):70-71.
- [6] 徐 路,陈 荣.高次谐波对供电系统的干扰及解决方法[J].水泥技术,2019(6):71-73.
- [7] 刘志凯,郑文悦,李海弘,等.多接入电动汽车充电桩对电网谐波的影响研究[J].浙江电力,2020,39(2):77-82.
- [8] 赵小军,王佳雯,刘 洋,等.谐波激励下变压器结构件杂散损耗的模拟与验证[J].中国电机工程学报,2020,40(2):652-663.
- [9] 夏 军,张壁辉,杨知非,等.电力谐波对变压器套管电容芯子介质损耗的影响研究[J].电瓷避雷器,2020(1):222-227.
- [10] 李 佳,武晓蕊,邓 科,等.一起 500 kV 电力变压器故障分析及预防措施研究[J].节能,2019,38(11):125-126.
- [11] 刘先远.电力变压器的绝缘试验和诊断浅析[J].电子世界,2019(20):72-73.
- [12] 吕 新,于胜斌.大容量变压器绝缘结构的研究[J].电气工程学报,2019,14(3):115-118.
- [13] 张喜乐,何松坡,王建民,等.换流变压器绕组损耗及热点温升的仿真研究[J].变压器,2019,56(7):24-28.
- [14] 苏钟焕,朱志勇,阴祖强,等.变压器三类典型引线的温升计算方法及其求解精度分析[J].变压器,2020,57(3):6-10.
- [15] 陈勉之,郭倩雯,熊 俊.自然循环油浸式变压器绕组热点系数研究[J].变压器,2019,56(11):32-35.
- [16] 王长胜,高 峰,韩雪梅.两种冷却方式换流变压器温升和短路强度对比分析[J].变压器,2015,52(5):19-22.
- [17] 王新程,李永光,王治源,等.变压器冷却方式的研究进展[J].上海电力学院学报,2019,35(3):221-225.
- [18] 陈书敏,石玉美.变压器及其冷却方式简介[J].变压器,2010,47(4):50-53.
- [19] PE/TR-Transformers. IEEE Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings: IEEE C57.19.00-2004[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.

本文责任编辑:王洪娟