

换流变压器基波及谐波作用下损耗分布与特性的研究

王昊天¹, 李军浩¹, 宋颜峰¹, 孙 源¹, 王浩洋²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 国网上海市电力公司检修公司, 上海 200063)

摘要: 换流变压器在实际运行中承受交直流复合电压, 其绕组内部含有较高的谐波分量。谐波电流会影响换流变压器内部磁场从而产生谐波损耗。对此, 本文搭建了 400 kV 换流变压器三维电磁瞬态仿真模型, 对换流变压器谐波对于损耗的影响进行了研究, 并通过对比试验数据验证模型的可靠性。以含谐波分量的电流作为激励, 本文分别将各次谐波叠加在基波电流上进行了损耗计算。通过对比各次谐波电流叠加基波电流作为激励时换流变压器铁心、绕组以及结构件的损耗分布, 总结了谐波对于换流变压器内部损耗的影响机理。

关键词: 换流变压器; 谐波电流; 有限元法; 损耗计算

DOI: 10.12067/ATEEE2104009

文章编号: 1003-3076(2021)10-0010-08

中图分类号: TM411

1 引言

特高压直流输电相比于交流输电方式具有输送距离远、输送容量大、线路造价低、损耗小等优势, 是实现我国优化能源配置的有效途径^[1]。换流变压器作为直流输电系统中的重要设备, 近些年来受到了广泛的关注。相比传统变压器, 换流变压器在运行中承受着交直流复合电压, 其绕组电流中含有大量的谐波分量^[2-4]。工频电流与谐波电流会在变压器内部建立磁场并产生损耗, 进一步影响到换流变压器内部温度。温度的升高会显著地影响到换流变压器的工作寿命。因此, 有必要开展对于换流变压器内部谐波损耗的产生机理及特征的研究。

目前广泛采用的损耗计算方法主要依据 IEC 61378-2 标准^[5]中对于换流变压器各部分损耗的近似计算方法。基于标准对于换流变压器内部损耗的成因以及机理, 国内外学者开展了较为广泛的研究工作并取得了一定研究成果。文献[2]提出了一种换流变压器损耗计算的模型, 对于 IEC 61378-2 的计算模型进行了修正, 提高了含谐波工况下损耗计算精度。文献[6]对于换流变压器含谐波工况下绕组损耗进行了建模计算, 通过引入损耗因子的方法

提高了绕组涡流损耗的计算精度。文献[7]研究了铁磁材料在非正弦激励下的损耗特性, 基于不同谐波在磁化过程中相互影响的现象建立了损耗计算模型。文献[8-10]通过建立数值计算模型, 对于变压器谐波损耗特性与机理进行了探究。文献[11]通过建立三维模型, 依据 IEC 61378-2 对于换流变压器基波及谐波作用下的各部件损耗进行了研究。文献[12, 13]通过仿真建模, 着重研究了变压器内部涡流损耗分布及影响。文献[14]建立了场路耦合模型并通过仿真分析了直流偏磁对于变压器的影响。目前对于换流变压器谐波损耗的仿真研究主要为针对各次谐波作为激励分别计算, 鲜有对于谐波电流在实际工况下产生损耗的研究。

考虑到已有的谐波损耗仿真计算与实际谐波运行条件的偏差, 本文将通过搭建三维仿真模型, 将谐波分别叠加在基波电流上计算来研究各次谐波对于实际换流变压器运行时产生的损耗情况。

2 仿真建模及算法

2.1 换流变压器损耗分析

根据 IEC 61387-2 标准^[5], 换流变压器损耗由空载损耗和负载损耗两部分构成。而其中负载损耗

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(SGSHJX00KXJS1901604)

作者简介: 王昊天(1999-), 男, 陕西籍, 硕士研究生, 研究方向为电气设备绝缘特性;

李军浩(1980-), 男, 河南籍, 教授, 博士, 研究方向为电气设备绝缘特性及检测技术。

主要来源于变压器绕组的电阻损耗、绕组及连接件的涡流损耗和结构件的杂散损耗。根据标准、涡流损耗和杂散损耗的近似计算式为:

$$\Delta P \propto I^2 f^k \quad (1)$$

式中, ΔP 为损耗值; I 为绕组电流; f 为施加激励的频率; k 为频率相关系数, 当计算绕组涡流损耗时取 2, 杂散损耗取 0.8。

因此在实际工程中, 含谐波的换流变压器负载损耗近似计算为:

$$P = I_{LN}^2 R + P_{we,1} K_w + P_{se,1} K_s \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_w = \sum \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_h}{f_1} \right)^2 \\ K_s = \sum \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_h}{f_1} \right)^{0.8} \end{cases} \quad (3)$$

式中, I_{LN} 为含谐波成分的绕组电流; R 为绕组电阻; $P_{we,1}$ 和 $P_{se,1}$ 分别为工频激励下绕组涡流损耗以及杂散损耗值; K_w 和 K_s 为谐波的损耗计算系数; I_h 和 f_h 分别为各次谐波的电流分量及频率。

对于铁心损耗, 国内外目前广泛采用的是 Bertotti 所提出的损耗分离模型^[15], 单位质量的铁心损耗可描述为:

$$P_{core} = k_h f B_m^\alpha + k_e (f B)^2 + k_a (f B)^{1.5} \quad (4)$$

式中, k_h, k_e, k_a 及 α 为常系数, 通过对于特定频率下的硅钢片损耗实测数据拟合得到; f 为磁场频率; B 为磁感应强度。等式右侧三项分别表示磁滞损耗、涡流损耗以及异常损耗。

当负载为非正弦负载时, 铁心损耗可以描述为^[16]:

$$P_{core} = k_h f B_m^\alpha + k_e \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^2 dt + k_a \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{1.5} dt \quad (5)$$

式中, B_m 为磁通密度峰值; T 为负载周期。

本文将基于上述模型对于换流变压器损耗进行计算, 从而对于损耗分布及规律进行探究。

2.2 仿真模型的建立

本文以一台 400 kV 变压器为例, 搭建了如图 1 所示的三维仿真模型。为了研究不同谐波及叠加激励下的磁场及损耗分布情况, 本文中的建模计算采用瞬态计算。

模型主要包括铁心、绕组、拉板、夹件、肢板及箱体, 其中网侧与阀侧绕组采用的材料为铜, 其余部件材料见表 1。

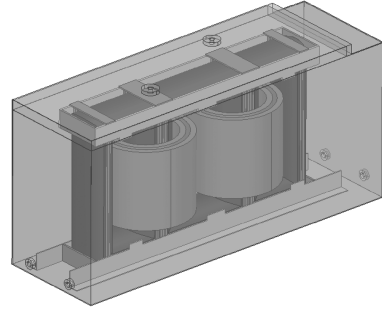


图 1 换流变压器三维仿真模型

Fig.1 Simulation model of converter transformer

表 1 三维建模所采用的材料参数

Tab.1 Parameters of materials applied in simulation

材料	27ZH095	Q345D
电导率/(s · m ⁻¹)	2.22×10 ⁶	6.48×10 ⁶
k_h /(W · m ⁻³)	39.01	—
k_e /(W · m ⁻³)	0.27	—
密度/(kg · m ⁻³)	7 650	7 850

表 1 中所展示的铁磁材料用于计算的 $B-H$ 曲线如图 2 所示。

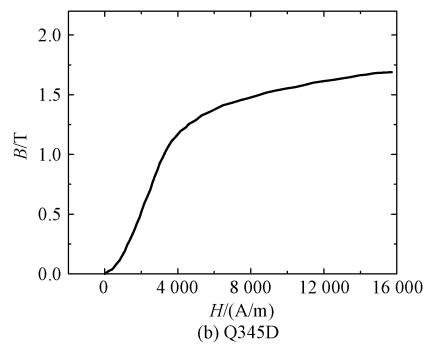
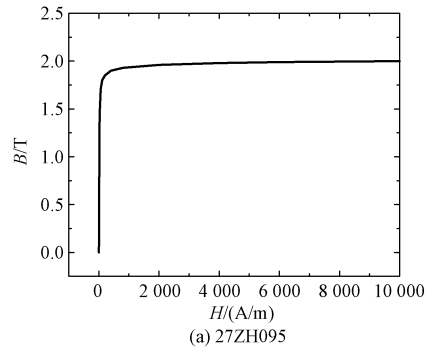


图 2 所采用铁磁材料 $B-H$ 曲线

Fig.2 $B-H$ curve of applied materials

2.3 仿真计算流程

本文中的计算采用 400 kV 换流变压器 Y/Y 接法的仿真数据作为激励, 其波形如图 3 所示, 各次谐波含量见表 2。

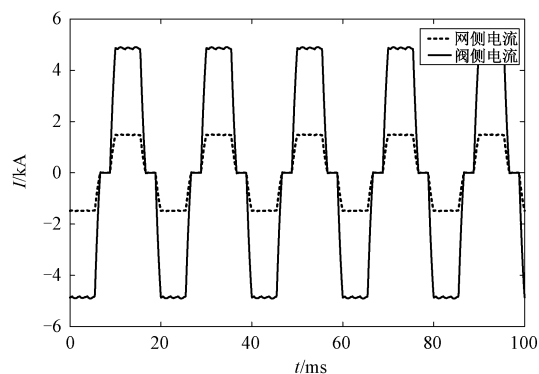


图3 绕组激励信号

Fig.3 Excitation waveform in windings

表2 网侧谐波次数及分量

Tab.2 Harmonics components in line windings

谐波次数	幅值/A	占比(%)
1	1 149.3	100
5	201.0	17.49
7	122.7	10.67
11	44.6	3.89
13	29.3	2.55

对于空载损耗,本文首先将激励电流信号按变比作差,作为励磁电流输入阀侧绕组,进一步得到铁心磁感应强度分布以及损耗分布。而对于结构件和绕组损耗计算,则将各个绕组的电流均按实际值输入,从而得到结构件及绕组的磁场及损耗分布。

为了分别研究各次谐波对于换流变压器内部损耗产生的影响,本文将分别研究基波、各次谐波以及全波几种情况。考虑到换流变压器内部铁心、拉板、箱体等部件材料均为铁磁材料,具有显著的非线性,直接将各次谐波作为激励进行计算会导致与实际有较大的差异。因此本文在研究谐波对于损耗的影响时,将谐波作为分量叠加在基波电流上,随后进行进一步的计算。

3 计算结果

3.1 基波下损耗计算结果

本文首先在基波激励下将模型按照前文所述方法进行计算,得到各部件磁感应强度 B 及损耗 ΔP 分布如图4和图5所示。

由图4和图5可知,换流变压器铁心的磁场强度在主磁路分布较高,铁轭处磁感应强度达到1.8 T,处于临界饱和状态。铁心损耗对于磁感应强度较为敏感,损耗分布与磁感应强度分布相类似,最大损耗处位于铁轭附近。而对于换流变压器拉板、

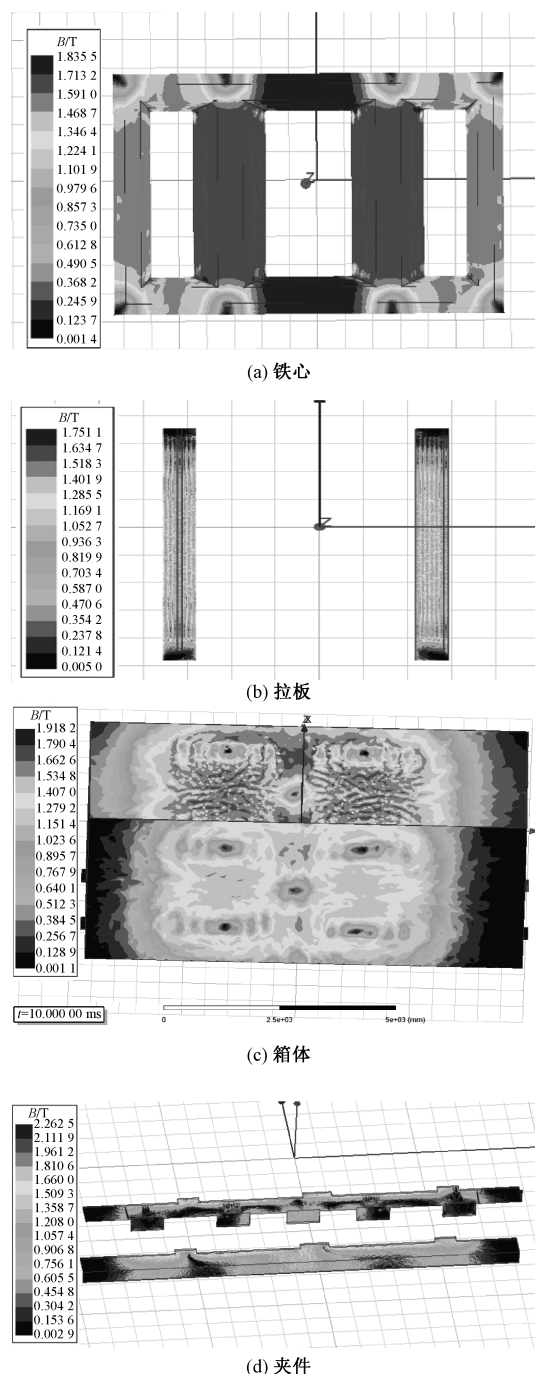


图4 基波作用下各部件磁感应强度分布

Fig.4 Magnetic flux density distribution of each component under fundamental wave

夹件以及箱体等各部件受到漏磁的影响,其磁感应强度最大值为靠近主磁路的部分。结构件损耗的主要成分为磁场所产生的涡流损耗,与磁场变化率成正相关,因而损耗分布近似于磁感应强度。

将基波作用下的损耗计算结果与换流变压器出厂试验得到的损耗值进行对比,结果见表3。

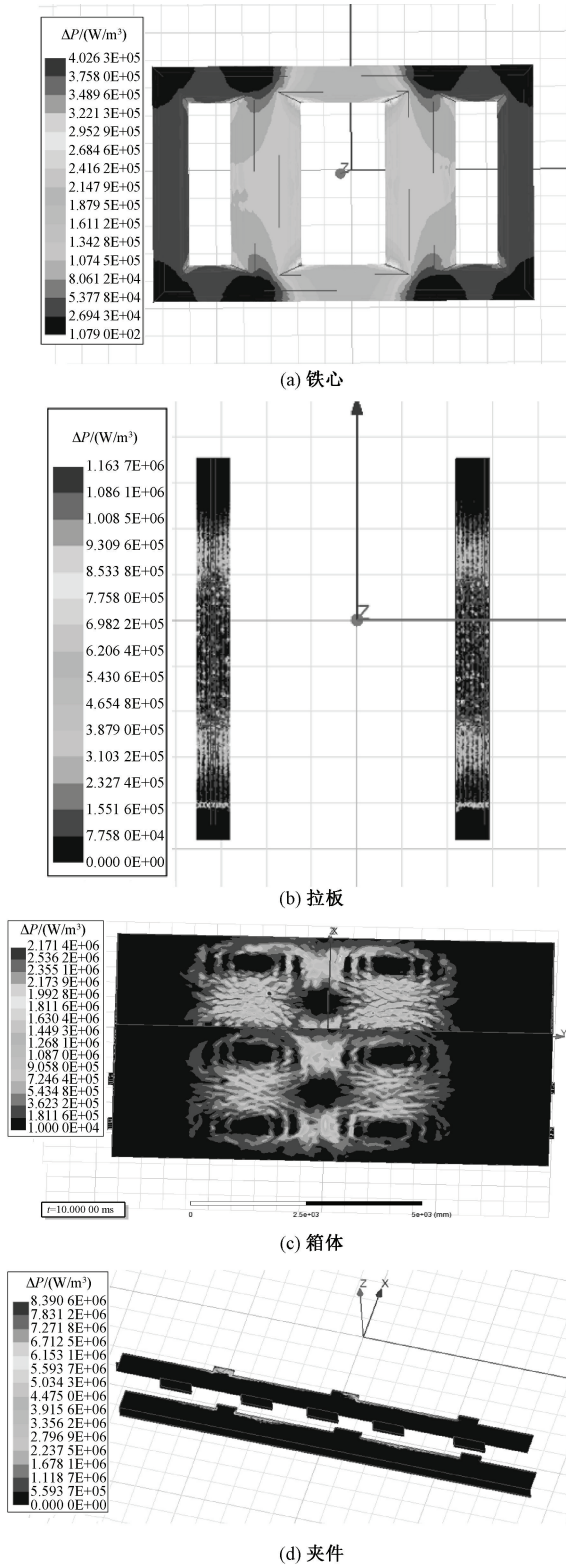


图5 基波作用下各部件损耗分布

Fig.5 Loss distribution of each component under fundamental wave

表3 基波下仿真结果与出厂试验值对比

Tab.3 Simulation results under fundamental wave and comparison to experimental results

	试验值	仿真值	误差(%)
铁心损耗/kW	147	143	2.72
绕组损耗/kW	690	725	-5.07
结构件损耗/kW	115	118	-2.61

仿真模型所计算的结果与出厂试验值相比,误差最大的部分为绕组损耗,其偏差为5.07%,其余部分损耗误差低于3%,因此认为该仿真模型是可靠的。

3.2 叠加谐波时损耗计算结果

为了研究谐波对于换流变压器损耗的影响特性,本文将换流变压器各次谐波分别叠加在基波上进行计算,得到了各次谐波叠加在基波上时损耗的分布结果。基波叠加所有谐波下的磁感应强度及损耗分布如图6和图7所示。由图6、图7可知,相比于基波单独作用下的损耗结果,叠加谐波后的磁感应强度分布以及损耗分布与基波电流单独作用时的分布类似。铁心饱和程度略微增加,空间磁场强度分布与基波单独作用下类似,损耗分布也较为接近。当铁磁部件未饱和时,叠加谐波对于换流变压器内部磁场分布影响不显著,因此分别叠加各次谐波与叠加所有谐波两种工况所计算得到的损耗分布相似,而损耗值有所差异。基波分别叠加各次谐波时的损耗分布如图8所示。

由图8可得,当在基波上分别叠加各次谐波激励时,所得到的损耗值均高于基波单独作用下,且谐波所带来的损耗增量随着叠加谐波次数 h 的升高而下降。对于结构件和绕组而言,基波叠加5次谐波所产生的损耗较高,但是低于全波激励下所产生的损耗。而对于铁心而言,由于材料的非线性特征的影响,在励磁电流时会引入三次谐波分量,因此需要考虑三次谐波电流对于铁心损耗所产生的影响。当激励为铁心与三次谐波电流之和时,所产生的铁心损耗功率为257 kW,高于全波时的230 kW。而三次谐波励磁电流幅值相比于绕组额定电流而言幅值小得多,故在计算其他损耗时忽略这一部分。

4 仿真结果分析

谐波对于换流变压器损耗的影响主要通过影响换流变压器绕组电流的波形以及幅值两个因素,进而影响空间磁场分布。

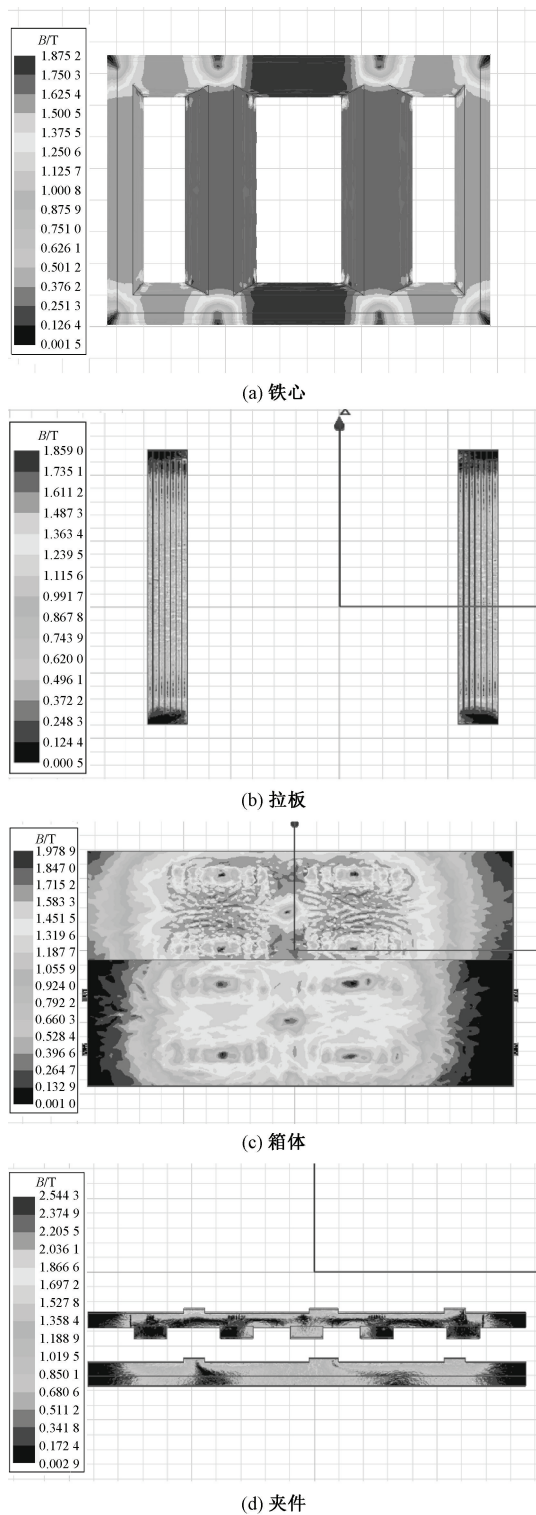


图6 基波叠加谐波作用下各部件磁感应强度分布
Fig.6 Magnetic flux density distribution of each component under fundamental wave and harmonics

根据前文所述,换流变压器铁心损耗的主要成分为磁滞损耗与涡流损耗,二者均与材料内部磁感应强度变化率 dB/dt 成正相关。如图9所示,当励

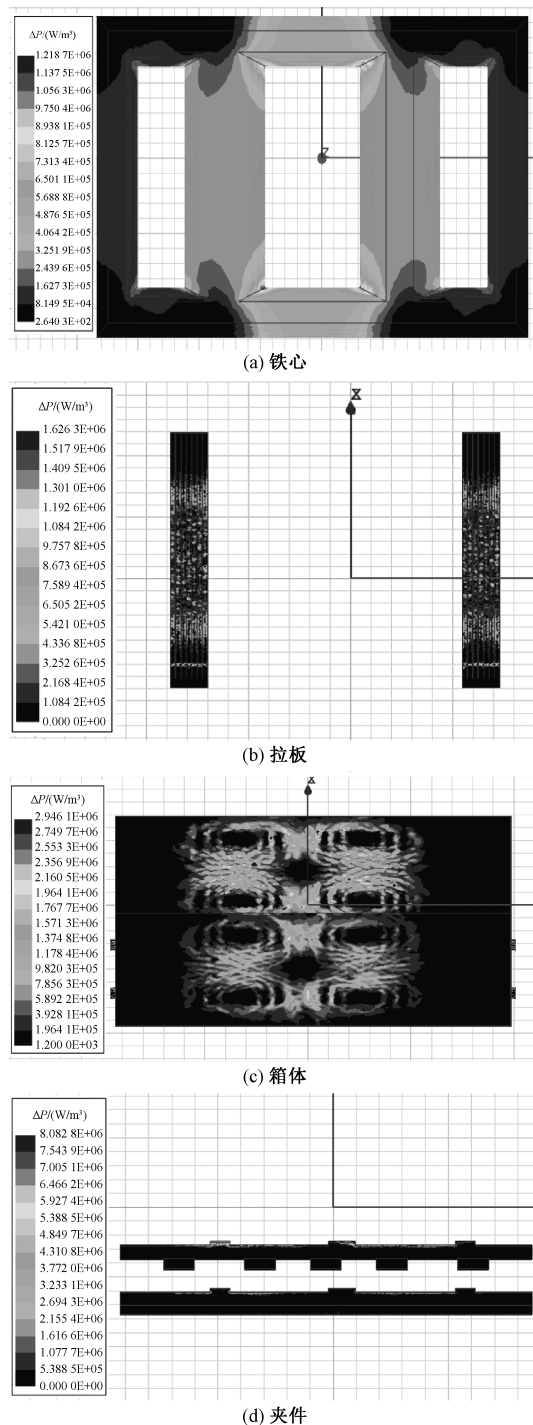


图7 全波作用下各部件损耗分布
Fig.7 Loss distribution of each component under fundamental wave and harmonics

磁电流 I_e 在基波的基础上叠加谐波时会在基波励磁电流峰值附近出现增强区域。该区域会导致励磁电流峰值增大,铁心饱和程度加深,磁感应强度增大从而导致铁心损耗升高。另一方面,叠加区域会增大磁感应强度变化率, dB/dt 受到影响显著增加,从而进一步增大铁心损耗。而上述两种因素在三次谐

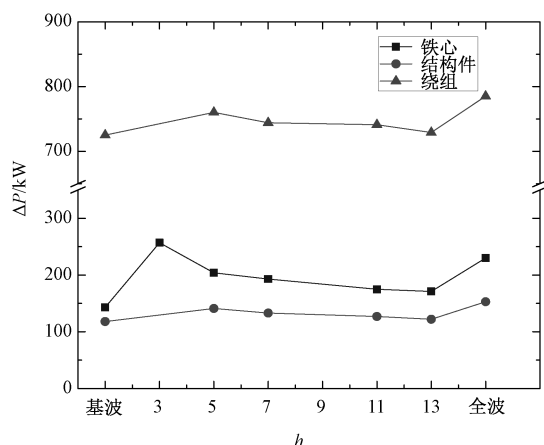


图8 基波叠加各次谐波时损耗

Fig.8 Summary of power loss under superimposed current

波中体现尤为明显,故叠加三次谐波对于铁心损耗影响最大。与铁心损耗相比,谐波对于结构件的损耗影响相对较小。依前文所述,结构件损耗的主要成因因为漏磁场在结构件处会产生涡流。当铁心饱和程度增加时,漏磁会有增大的趋势,从而导致结构件损耗增加。而通常换流变压器工作于未饱和区或磁化曲线的“拐点”处,此时叠加谐波对于漏磁场的分布影响并不显著,因而其他结构件的损耗在受到谐波作用时损耗变化较小。当换流变压器电压高于额定电压或存在直流偏磁现象时,铁心饱和程度加深,此时结构件处的磁感应强度会显著增加,从而增加涡流损耗。

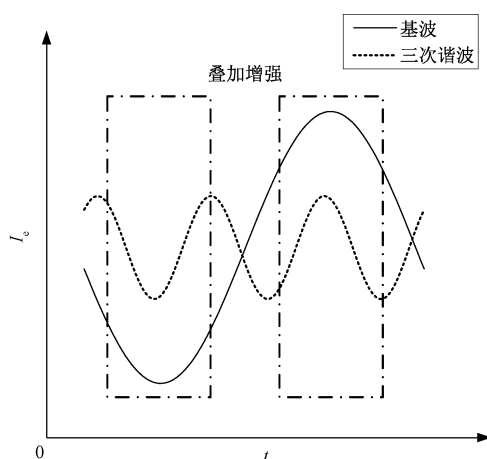


图9 谐波励磁电流的叠加波形

Fig.9 Superimposed waveform of excitation current

谐波的引入对于绕组的损耗主要分为产生绕组涡流以及增加电阻损耗两部分。网侧与阀侧之间由于两绕组电流磁势相互增强,此处存在较强的轴向磁场。因而在换流变压器设备制造时,通常会通过

调整线规尺寸从而削弱绕组纵向涡流,其示意如图10所示。

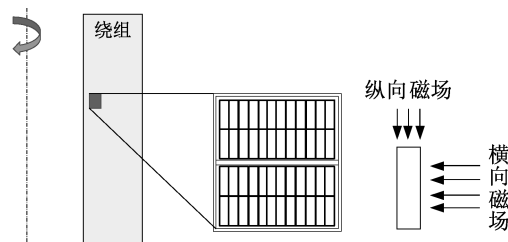


图10 绕组线规及对应磁场分量

Fig.10 Windings structure and magnetic field component

此种设计显著削弱了绕组内部产生的纵向涡流。而在绕组端部,磁场的横向分量增大,且横向涡流所对应截面尺寸大于纵向涡流,从而会产生较大的横向涡流,进一步形成端部热点^[17,18]。相比于电阻损耗,绕组的涡流损耗较小,因而引起的损耗变化较低。

5 结论

本文依据一台400 kV变压器搭建了三维有限元仿真模型,对于换流变压器基波及谐波作用下的损耗进行了计算,并与换流变压器出厂试验损耗值做了对比,验证了模型的可靠性。本文在工频激励的基础上,分别叠加了各次谐波激励,分别计算了叠加各次谐波下的换流变压器损耗值。对比了各次谐波作用下的损耗分布以及损耗值,得到了以下结论:

(1) 换流变压器不同组件由于产生损耗的原因不同,谐波对于各部分损耗影响也有较大的偏差。其中,受到磁滞损耗以及铁心饱和状况的影响,铁心损耗对于谐波最为敏感。

(2) 对于铁心未饱和的换流变压器而言,谐波主要影响产生损耗的时间以及大小,而对于损耗分布影响不大。

(3) 当换流变压器工作于特殊工况而导致铁心饱和时,变压器漏磁加重,位于磁路中的结构件涡流损耗加大。

参考文献 (References):

- [1] 张翠霞, 陈秀娟, 葛栋, 等 (Zhang Cuixia, Chen Xiujuan, Ge Dong, et al.). ± 1000 kV级直流输电工程系统过电压抑制和绝缘配合 (Overvoltage mitigation and insulation coordination of ± 1000 kV and above DC transmission project) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2013, 39 (3): 520-525.

- [2] 周远翔, 刘心曲, 王明渊, 等 (Zhou Yuanxiang, Liu Xinqu, Wang Mingyuan, et al.). 换流变压器损耗现场测试影响因素及仿真 (Influence factor and simulation of the loss of the converter transformer on-site testing) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (5): 1608-1616.
- [3] 韩晓东, 翟亚东 (Han Xiaodong, Zhai Yadong). 高压直流输电用换流变压器 (Converter transformer used for HVDC transmission) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2002, 38 (3): 5-6.
- [4] 张燕秉, 郑劲, 汪德华, 等 (Zhang Yanbing, Zheng Jin, Wang Dehua, et al.). 特高压直流换流变压器的研制 (Development of UHVDC converter transformer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2010, 36 (1): 255-264.
- [5] IEC 61378-2. Converter transformers-Part 2: Transformers for HVDC applications [S]. 2001.
- [6] 张良县, 陈模生, 彭宗仁, 等 (Zhang Liangxian, Chen Mosheng, Peng Zongren, et al.). 非正弦负载电流下特高压换流变压器绕组的谐波损耗分析 (Study on the harmonic losses of UHV converter transformer windings subject to non-sinusoidal load current) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (15): 2452-2459.
- [7] 陈威 (Chen Wei). 铁磁材料复杂激励下的损耗计算方法及其电机应用 (Predicting iron losses in magnetic materials under complex excitations for machine applications) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2016.
- [8] 王释颖, 赵莉华, 卢孔实, 等 (Wang Shiyong, Zhao Lihua, Lu Kongshi, et al.). 谐波电流作用下变压器损耗及绝缘寿命的计算 (Calculation of transformer loss and insulation life under harmonic current) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2016, 28 (7): 79-82, 88.
- [9] 刘书铭, 施红, 冯蕾 (Liu Shuming, Shi Hong, Feng Lei). 考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型 (Transformer harmonic loss model considering skin effect and proximity effect) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2015, 35 (3): 133-139.
- [10] 李琼林, 邹磊, 刘会金, 等 (Li Qionglin, Zou Lei, Liu Huijin, et al.). 电力变压器谐波损耗仿真计算与实验研究 (Simulation calculation and experimental research on harmonic losses in power transformers) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (12): 3521-3527.
- [11] 周伟, 李岩, 井永腾, 等 (Zhou Wei, Li Yan, Jing Yongteng, et al.). 换流变压器谐波损耗的计算与分析 (Calculation and analysis of harmonic loss in converter transformer) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2012, 48 (8): 18-23.
- [12] 朱连双, 董成海, 李冬林 (Zhu Lianshuang, Dong Chenghai, Li Donglin). 基于磁场分析软件的变压器绕组涡流损耗分析 (Eddy current loss analysis of transformer winding based on magnetic field analysis software) [J]. 变压器 (Transformer), 2019, 56 (9): 1-8.
- [13] 李永建, 闫鑫笑, 张长庚, 等 (Li Yongjian, Yan Xinxiao, Zhang Changgeng, et al.). 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测 (Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2020, 35 (21): 4483-4491.
- [14] 王泽忠, 李明洋, 李冰, 等 (Wang Zezhong, Li Mingyang, Li Bing, et al.). 单相四柱试验变压器铁心磁化曲线等效与直流偏磁分析 (Equivalent of magnetization curve of single-phase four-column test transformer and analysis of DC bias) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (8): 29-39.
- [15] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24 (1): 621-630.
- [16] 刘福贵, 赵琳, 蒋嘉诚 (Liu Fugui, Zhao Lin, Jiang Jiacheng). 正弦与非正弦激励下高频变压器磁心损耗计算与验证 (Calculation and verification of core loss of high frequency transformer under sinusoidal and non-sinusoidal excitation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2021, 40 (2): 25-32.
- [17] 叶波 (Ye Bo). 电力变压器绕组涡流损耗的计算与分析 (Calculation and analysis of the eddy current loss of winding in power transformer) [D]. 杭州: 浙江工业大学 (Hangzhou: Zhejiang University of Technology), 2014.
- [18] 王婷婷 (Wang Tingting). 电力变压器绕组的涡流损耗和温升研究 (The research of the eddy current loss and temperature rise of power transformer) [D]. 天津: 河北工业大学 (Tianjin: Hebei University of Technology), 2014.

Study on loss distribution and characteristics under fundamental wave and harmonics of converter transformer

WANG Hao-tian¹, LI Jun-hao¹, SONG Yan-feng¹, SUN Yuan¹, WANG Hao-yang²

(1.State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2.Maintenance Company, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200063, China)

Abstract: In actual operation process, voltage applied on the converter transformers is AC/DC composite voltage, and high harmonic components flow through the windings. The harmonic current will affect the internal magnetic field and generate harmonic losses. To study the process, a three-dimensional electromagnetic transient simulation model of transformer is built, which is based on an actual converter transformer with the stage of 400 kV. And a comparison is made to test the accuracy of the 3D model. Taking the current with harmonics as the excitation, each harmonic component is superimposed on base frequency wave to calculate the power loss. Comparing the distribution of the loss of the core, windings and other parts under these superimposed current, the influence mechanism of harmonics to power loss in converter transformers are summarized.

Key words: converter transformer; harmonic current; finite element; loss calculation