

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201806031



新型换流变压器铁心谐波磁通抑制与损耗计算

邵鹏飞^{1,2}, 徐锡烽^{1,2}, 李勇³, 陈浩¹, 肖华⁴

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;
3. 湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082;
4. 广州西门子变压器有限公司, 广东 广州 510530)

摘要: 为研究新型换流变压器铁心谐波磁通抑制与损耗,以原理样机实测电流为激励,建立有限元二维仿真模型.基于场路耦合方法,对新型换流变压器是否投入感应滤波调谐装置的多种情况进行仿真.结果表明:新型换流变压器在投入感应滤波调谐装置时,能有效抑制铁心谐波磁通,降低铁心损耗,具有良好的节能效果.

关键词: 换流变压器; 谐波磁通; 铁心损耗; 场路耦合

中图分类号: TM 401 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)02-0232-07

Computation of Suppression and Loss of Core Harmonic Magnetic Flux of New Converter Transformer

SHAO Pengfei^{1,2}, XU Xifeng^{1,2}, LI Yong³,
CHEN Hao¹, XIAO Hua⁴

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. National Energy Conversion and Control Engineering Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China;
4. Guangzhou Siemens Transformer Company Limited, Guangzhou 510530, China)

Abstract: In order to study the core harmonic flux suppression and loss of the new converter transformer, the finite element two-dimensional simulation model is established based on the actual sample current measurement. Based on the field-circuit coupling method, the situation of whether the new converter transformer is put into the induction filter tuning device is simulated. The results show that the new converter transformer can effectively suppress the core harmonic magnetic flux when it is put into the induction filter tuning device, and the core loss is reduced, which has good energy saving effect.

Keywords: converter transformer; harmonic magnetic flux; core loss; field-circuit coupling

换流变压器作为直流输电系统的核心设备,对电网输送起着重要作用.在实际运行中,换流阀作为主要谐波源将引起变压器谐波电流增大、振动加剧、铁心损耗增加和过热等问题.直流输电换流站使用

收稿日期: 2018-06-12

通信作者: 邵鹏飞(1982-),男,讲师,博士,主要从事新型电气设备电磁场、温度场优化计算、继电保护等的研究. E-mail: herolampard@hotmail.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377001, 51477058); 高层次人才科研启动项目(14BS103)

晶闸管换流器,造成输电系统在运行中,产生大量的特征次谐波,给电网系统带来诸多负面影响^[1-3]。目前,电力系统谐波抑制技术主要分为无源滤波和有源滤波。无源滤波成本低、结构简单,但滤波效果差;而有源滤波虽然改进了无源滤波方案中的滤波效果,但成本高,技术难度大。传统的换流变压器的滤波装置接在网侧,谐波电流仍然可以在换流变压器内自由流通,铁心和结构件中的谐波磁通量高。在运行过程中,铁心损耗及其谐波损耗都会增大。而感应滤波换流变压器运用感应滤波技术,克服了有源滤波与无源滤波的缺点^[4-7]。换流变压器采用感应滤波技术,即在其内部增设滤波装置,接在阀侧端,就近隔离谐波,可有效地抑制变压器铁心的谐波磁通,同时,还能降低铁心损耗和电磁振动。由于经常在非正弦激励下工作,换流变压器铁心磁通会发生明显的畸变,从而导致变压器常用的经验公式法和传统铁心损耗分离计算方法无法采用^[8-10]。国内外学者提出采用磁滞数学模型的方法,在非正弦条件下,考虑计算畸变磁通对变压器铁心损耗的影响^[11],但该方法在实际应用中较为复杂,很难用简单的解析式来计算表达。近年来,随着有限元仿真技术的不断发展,计算铁心的损耗也逐渐成熟^[12],其计算的基本原理如下:首先,基于损耗分离模型,通过有限元计算得到铁心的磁场分布;然后,依据铁心的磁通密度进行傅里叶分析,提取铁心的磁通密度以计算各次的特征次谐波损耗;最后,分别将各次的特征次损耗相加得到总铁心损耗。本文针对新型换流变压器原理样机^[13-15],根据新型换流变压器的基本滤波机理,采用场路耦合法,建立换流变压器场路耦合电路模型,并搭建二维电磁场有限元模型。

1 新型换流变压器的滤波原理

1.1 接线方案

新型换流变压器与传统的换流变压器不同,具有独特的接线方式^[16],新型换流变压器原理绕组接线,如图 1 所示。图 1 中:网侧绕组由 AO,BO,CO 组成, I_A, I_B, I_C 为对应的电流,采用星形接法,中性点接地;阀侧绕组采用三角形接法,由公共绕组 de,ef,fd 和延边绕组 ad,be,cf 构成,其中, $I_a, I_b, I_c, I_d, I_e, I_f, I_g$ 为对应绕组中的电流;滤波调谐装置(LC 滤波支路)是在新型换流变压器阀侧绕组端接入,由 5, 7, 11, 13 次特征谐波调谐滤波器组成, $I_{f,a}, I_{f,b}, I_{f,c}$ 为各滤波支路中对应的电流,在滤波的同时,可兼顾无功补偿;箭头代表各绕组的电流方向。

1.2 铁心谐波磁通抑制机理

变压器铁心谐波磁通路径,如图 2 所示。图 2 中: Φ_n 为交变谐波磁通; $e_{1,n}, e_{2,n}, e_{3,n}$ 为感生谐波电动势; $I_{1,n}, I_{2,n}, I_{3,n}$ 为谐波电流; $I_{f,n}$ 为流过滤波装置绕组的电流。由图 2 可知:当网侧绕组 1 和滤波绕组 3 开路时,换流阀及直流负载产生的 n 次特征谐波电流 $I_{2,n}$ 将在阀侧绕组 2 上产生谐波磁动势 $N_2 I_{2,n}$,相应地,在铁心中会产生交变谐波磁通 Φ_n 。根据电磁感应定律,该磁通将在 3 个绕组中分别感生谐波电动势,即 $e_{1,n}, e_{2,n}, e_{3,n}$ 。网侧绕组产生的谐波电动势 $e_{1,n}$ 必然在网侧绕组中产生谐波电流 $I_{1,n}$ 。若减弱铁心中谐波磁通 Φ_n ,可大大降低 $e_{1,n}$,从而减小网侧的谐波电流 $I_{1,n}$,实现滤波效果^[17]。

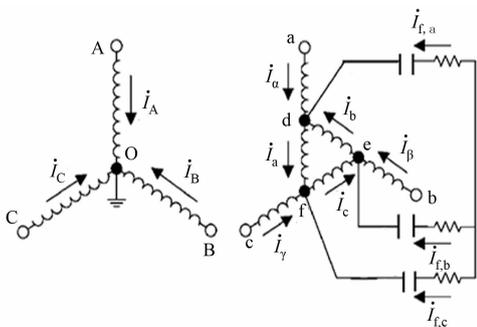


图 1 新型换流变压器原理绕组接线

Fig. 1 Winding wiring of new converter transformer principle

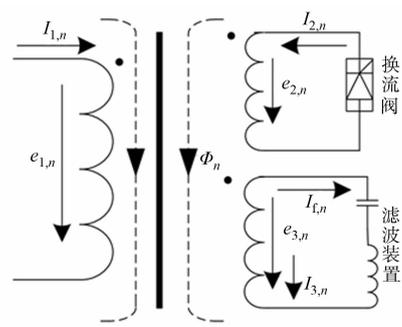


图 2 变压器铁心谐波磁通路径

Fig. 2 Flow path of harmonic magnetic flux in transformer core

1.3 绕组电流计算波形与实测波形的对比

为验证滤波效果,对新型换流变压器的网侧绕组和阀侧绕组的电流进行实测与计算,如图 3 所示。

图3中: I 为电流; t 为时间.由图3可知:投入感应滤波调谐装置前,网侧绕组的电流波形严重畸变(主要为基波和5,7,11,13次特征谐波);投入滤波装置后,电流波形有了极大改善,接近理想正弦波,表明网侧绕组中仅有少量谐波成分,大部分的特征次谐波电流被感应滤波调谐装置和滤波绕组构成的滤波支路滤除,从而实现良好的滤波效果.

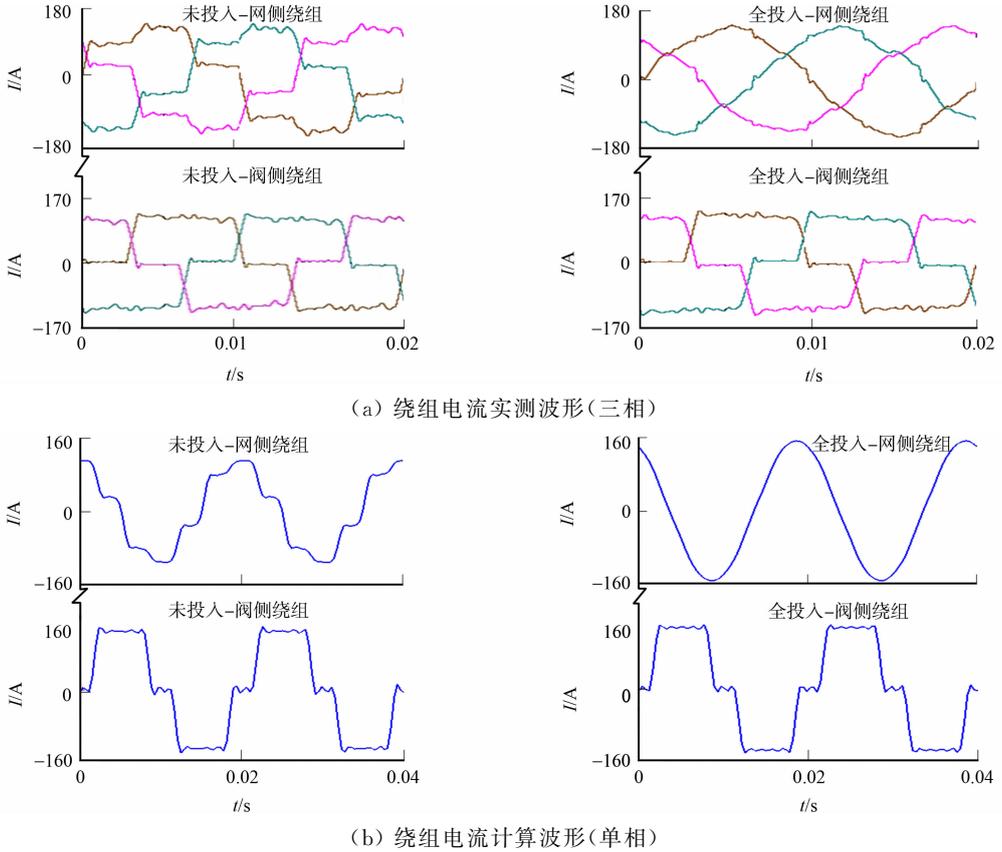


图3 绕组电流波形

Fig. 3 Waveform of winding current

2 新型换流变压器场路耦合模型

依据新型换流变压器原理样机的接线方案,建立对应的有限元二维变压器场路耦合的模型.该新型换流变压器为单相式三绕组结构,为满足12脉波换流要求,即新型换流变压器两套绕组(上桥和下桥)阀侧线电压之间相角差为 30° .根据移相的要求计算,可得3个绕组的额定电压^[18].其中,原理样机基本参数为:额定电压为220.0,195.9,112.9V;额定电流为82.65,46.89,80.96A;频率为50Hz;磁通密度为1.5104T;额定视在容量为18.2395kV·A;绕组型号为同心式;材料为30Q130.

感应滤波换流变压器单相三绕组的绕组结构布置,以及新型换流变压器场路耦合的电路部分模型,分别如图4,5所示.图4中: b_1, b_2, b_3 分别为网侧绕组、滤波绕组和阀侧绕组的径向厚度; H_t 为网侧绕

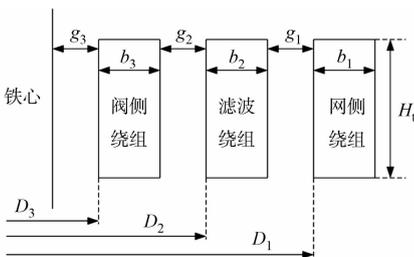


图4 原理样机绕组布置

Fig. 4 Winding arrangement of prototype

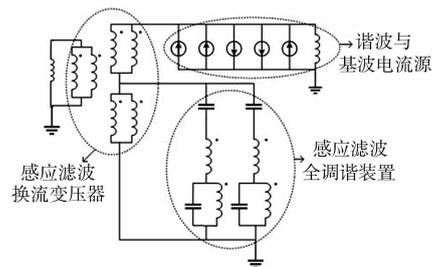


图5 新型换流变压器场路耦合电路模型

Model of new transformer field road coupling circuit

组、阀侧绕组、滤波绕组的轴向高度; g_1, g_2, g_3 为各绕组之间的平均绝缘距离; D_1, D_2, D_3 为各绕组与铁心的距离。

网侧绕组接入对应的系统阻抗, 阀侧绕组端分别并联基波电流和 5, 7, 11, 13 次主要特征次谐波电流, 以模拟阀侧换流阀负载产生电流。在滤波绕组端接入感应滤波调谐装置, 其对应于 5, 7, 11, 13 次特征次调谐滤波器装置。

3 仿真计算与分析

在新型换流变压器的磁场计算与分析中, 采用节点法二维瞬态磁场分析与电磁电路耦合分析对变压器铁心部分进行磁场仿真计算。原理样机电磁分析参数, 如表 1 所示。表 1 中: μ_r 为相对磁导率; ρ 为电阻率。

表 1 原理样机电磁分析参数

Tab. 1 Analysis parameters of prototype electromagnetic

模块名称	单元类型	μ_r	$\rho/\times 10^{-8} \Omega \cdot m$
铁心	PLANE53	B-H 曲线	—
绕组	PLANE53	1	2
空气	PLANE53	1	—

对感应滤波换流变压器进行二维有限元建模, 由于磁场分布的对称性, 可建立变压器铁心、绕组及空气的二分之一模型, 并设各个绕组域内的电流密度分布均匀。

3.1 铁心的磁场特性

以直流输电实验平台原理样机的实测电流作为有限元模型的输入激励, 在阀侧绕组端加载 1, 5, 7, 11, 13 次谐波电流进行场路耦合。模型采用平行边界条件, 即取空气边界为 0。采用节点法二维瞬态磁场分析, 可以得到新型换流变压器在未投入与投入 5, 7 次、投入 11, 13 次和全投入感应滤波调谐装置时, 绕组及其铁心的磁通密度分布云图, 如图 6 所示。

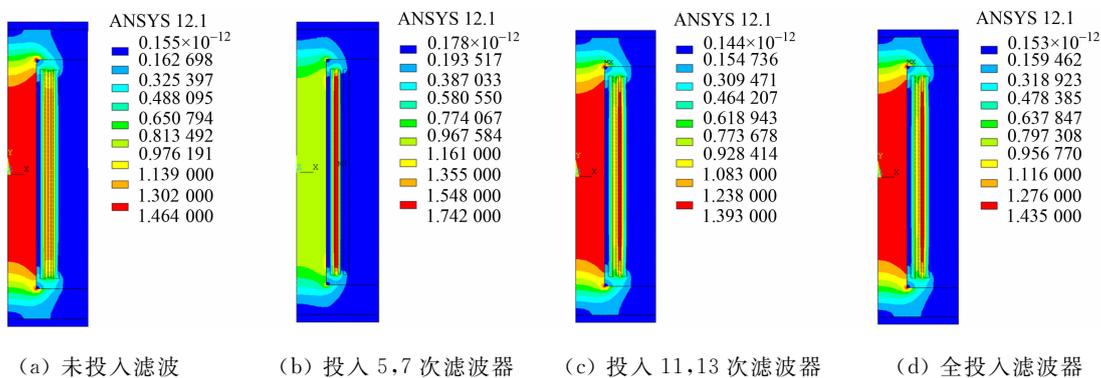


图 6 4 种工况下滤波装置的磁通密度分布云图

Fig. 6 Cloud maps of magnetic density distribution of filter device under four working conditions

由图 6 可知: 未投入感应滤波调谐装置时, 铁心磁通密度饱和度比投入 5, 7 次、投入 11, 13 次和全投入滤波调谐装置时的铁心磁通密度饱和量大; 从铁心部分中最大的磁通密度分析, 未投入感应滤波调谐装置时, 铁心的最大磁通密度为 1.464 T, 投入 5, 7 次、投入 11, 13 次和全投入滤波调谐装置之后的磁通密度分别降低为 1.393, 1.435, 1.355 T。这表明感应滤波调谐装置可有效减小铁心的磁通密度, 并降低铁心的磁饱和度。

为验证投入感应滤波调谐装置时, 对铁心谐波磁通的抑制及降低各特征次谐波的损耗, 在这 4 种工况下, 选取铁心部分中磁通密度最大的节点, 并提取其磁通密度幅值随时间变化的曲线, 如图 7 所示。图 7 中: B 为磁通密度。

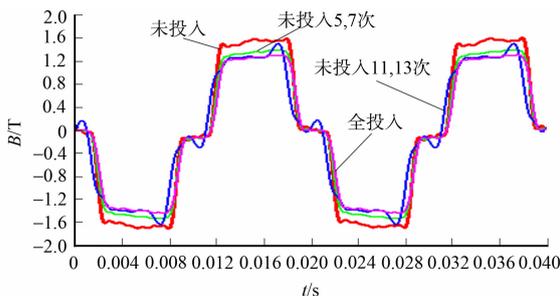


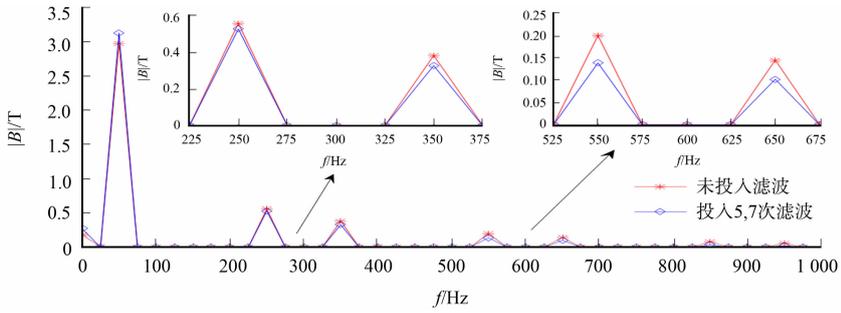
图 7 4 种工况下感应滤波装置磁通密度幅值变化曲线

Fig. 7 Magnetic density variation curve of filter device under four working conditions

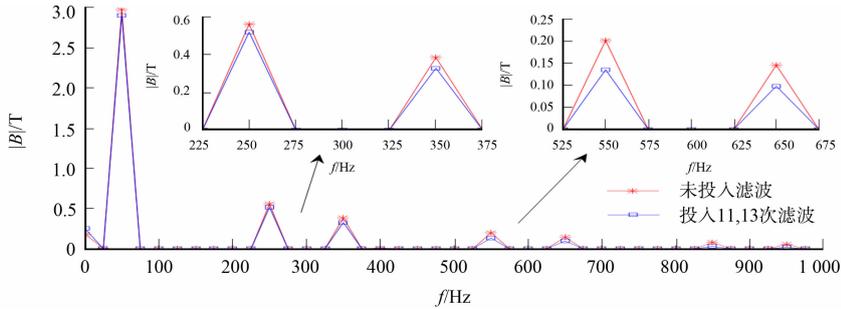
对图 7 中的数据进行傅里叶分析, 得到铁心磁通密度 $|B|$ (取磁通密度的绝对值) 最大的节点幅值-频率分布对比图, 如图 8 所示。图 8 中: f 为频率。铁心磁通密度最大的节点傅里叶分解谐波 $|B|$ 的幅值

大小,如表2所示。

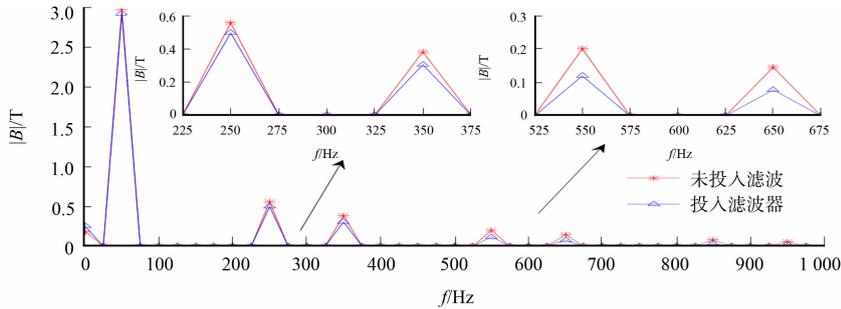
由表2可知:投入感应调谐滤波器后,5,7,11,13次谐波分量的磁通密度 $|B|$ 幅值比未投入滤波调谐装置时略有减小,对铁心的谐波磁通具有一定的抑制作用。



(a) 未投入与投入5,7次滤波装置



(b) 未投入与投入11,13次滤波装置



(c) 未投入与全投入滤波装置

图8 铁心磁通密度 $|B|$ 最大的节点幅值频率

Fig. 8 Maximum amplitude frequency of core magnetic flux density $|B|$

表2 铁心磁通密度最大的节点傅里叶分解谐波 $|B|$

Tab. 2 Amplitude of core magnetic flux density $|B|$ in Fourier decomposition

谐波次数	$ B /T$			
	未投入滤波器	投入5,7次	投入11,13次	全投入滤波器
5	0.560 4	0.529 6	0.518 2	0.498 6
7	0.384 1	0.328 9	0.327 9	0.306 2
11	0.200 7	0.139 2	0.134 9	0.119 5
13	0.145 3	0.102 3	0.098 2	0.077 7

3.2 铁心的损耗分析

铁心中的磁通对损耗(磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗)的计算有较大影响,由于新型换流变压器经常在非正弦条件下工作,因此,必须考虑在畸变磁通条件下对铁心损耗计算的影响,其传统的铁心损耗公式法已不再适用。故提出一种在非正弦激励情况下,考虑畸变磁通影响的铁心损耗计算方法。

基于损耗的分离理论^[19-20],铁心损耗可表示为

$$P = K_h f^\alpha B^\beta + \frac{\pi^2 \alpha d^2}{6} \sum_n f^2 n^2 B_n^2 \quad (1)$$

式(1)中: $K_h f^\alpha B^\beta$ 为磁滞损耗与异常损耗之和; $\frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} \sum_n f^2 n^2 B_n^2$ 为涡流损耗; f 为频率; n 为谐波次数; d 为硅钢片的厚度; σ 为硅钢片的电导率; K_h, α, β 为系数,需结合损耗曲线数据拟合计算. 计算得出 $K_h = 0.003\ 961, \alpha = 1, \beta = 2.010\ 3$. 由此可知,在畸变磁通的条件下,可以利用式(1)中的第2项计算出涡流损耗,而式(1)中的第1项需要进行处理才能得到磁滞损耗与异常损耗.

文献[21]指出,在畸变磁通作用下,磁滞损耗与异常损耗之和等于基波及各次谐波各自作用下产生的损耗之和. 依据 Preisach 磁滞模型计算高次谐波产生的磁滞损耗,依据磁畴理论计算异常损耗的值. 由于 Preisach 磁滞模型在计算损耗时,难度会相对较大,且计算异常损耗所需要的一些参数难以确定. 故在工程的实际运用中,将不采纳上述计算损耗的方法.

假设在高次谐波下,磁滞损耗与异常损耗产生的损耗值与在相应频率和正弦磁化情况下,磁滞损耗和异常损耗产生的损耗值近似相等. 此时,可根据傅里叶分解得到的感应滤波换流变压器铁心磁通密度 B 结合相应的频率值,通过式(1)分别计算各自的磁滞损耗与异常损耗,再将产生的损耗相加,从而得到总的损耗值. 此时,计算磁滞损耗与异常损耗相对简单,适合在实际工程上的应用与操作.

因此,可将式(1)中第1项的磁滞损耗与异常损耗之和的公式变换为

$$P_A = K_h \sum_n f^\alpha B_n^\beta. \quad (2)$$

式(2)中: B_n 为基波及高次谐波的磁通密度.

换流变压器阀侧主要含有 5, 7, 11, 13 次特征谐波,而其他次谐波含量较小,可忽略不计. 对此,基波频率的磁通密度幅值采用铁心中节点磁通密度的最大值,而 5, 7, 11, 13 次谐波的磁通密度幅值可以利用表 2 中的相关数据,再通过式(1), (2)计算出 4 种工况的单位质量铁心损耗,即未投入滤波器的单位质量铁心损耗、投入 5, 7 次的单位质量铁心损耗、投入 11, 13 次的单位质量铁心损耗,以及全投入滤波器的单位质量铁心损耗分别为 1.077 6, 0.877 5, 0.883 9, 0.783 1 W. 计算结果表明,投入感应滤波调谐装置可以使铁心单位质量的损耗下降,从而有效地抑制铁心中高频交变磁场产生的损耗,提高系统的电能质量,改善新型换流变压器的磁场特性.

3.3 节能降耗的对比

对单台新型换流变压器在投入感应滤波调谐装置前、后的功率进行测量,结果如表 3 所示. 表 3 中: S 为视在功率; Q 为无功功率; P 为有功功率; λ 为功率因数.

由表 3 可知:投入之后,功率因数由 0.891 5 提高到 0.967 1,输入的有功功率有所下降,无功补偿的效果良好,表明感应滤波装置能有效降低换流变压器网侧绕组的谐波电流. 利用变压器内部的谐波磁势平衡,可减少换流变压器铁心中的谐波磁通,从而降低换流变压器的谐波损耗,达到节能降耗的效果.

表 3 感应滤波装置投入前后功率对比

Tab. 3 Comparison of power with and without filters

状态	$S/\text{kV} \cdot \text{A}$	$Q/\text{kV} \cdot \text{A}$	P/kW	λ
未投入	16.848	7.631	15.021	0.891 5
投入	14.667	4.733	14.184	0.967 1

4 结束语

根据新型换流变压器的原理样机,建立二维变压器有限元仿真模型. 利用场路耦合的分析方法对未投入与投入感应滤波调谐装置的多种工况进行有限元计算,分析其铁心谐波磁通的抑制,并计算铁心损耗. 结果表明:投入感应滤波调谐装置后,可抑制铁心的特征次谐波磁通,降低铁心磁饱和度和,进而降低铁心损耗;而高次谐波磁通的减少,可以改善换流变压器的运行环境,有利于提高换流变压器的运行寿命和效率.

参考文献:

- [1] 邵鹏飞,罗隆福,宁志豪,等. 感应滤波技术应用于工业定制电力系统的运行经验分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 59-63. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2011.04.013.
- [2] 肖彩艳,文继锋,袁源,等. 超高压直流系统中的换流变压器保护[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 91-94. DOI: 10.

3321/j. issn:1000-1026. 2006. 09. 020.

- [3] 莫丽琼. ± 800 kV 特高压直流输电系统不稳定研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 118-122. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-6047. 2012. 05. 022.
- [4] 李勇, 罗隆福, 刘福生, 等. 变压器感应滤波技术的发展现状与应用前景[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 86-92. DOI:10. 3321/j. issn:1000-6753. 2009. 03. 015.
- [5] 周远翔, 刘心曲, 王明渊, 等. 换流变压器损耗现场测试影响因素及仿真[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1608-1616. DOI:10. 13336/j. 1003-6520. hve. 20160412050.
- [6] 张良县, 陈模生, 彭宗仁, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2452-2458. DOI:10. 13334/j. 0258-8013. psee. 2014. 15. 016.
- [7] 涂玲英, 王胡. 应用于高压直流输电系统的混合有源电力滤波器[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 212-217. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201702015.
- [8] STEINMETZ C P. On the law of hysteresis[J]. Proc. IEEE, 1984, 72(2): 197-221. DOI:10. 1109/PROC. 1984. 12842.
- [9] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferro-magnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(4): 621-630. DOI:10. 1109/20. 43994.
- [10] 刘洋, 景崇友, 李琳, 等. 基于平波电抗器模型的交直流混合激励条件下硅钢片磁性能的模拟与验证[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(1): 48-52. DOI:10. 3969/j. issn. 1003-3076. 2016. 01. 009.
- [11] ENOKIZONO M, TODAKA T, URATA S. Dynamic vector magneto-hysteretic E&S model considering eddy current effect[J]. COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical, 2009, 28(1): 85-97. DOI:10. 1108/03321640910918896.
- [12] 王永强, 郑志宏, 欧阳宝龙, 等. 基于有限元耦合算法的变压器铁芯损耗计算[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(8): 1757-1763. DOI:10. 16182/j. cnki. joss. 2016. 08. 00763.
- [13] ZHANG Zhiwen, WU Bin, KANG Jinsong, *et al.* A multi-purpose balanced transformer for railway traction applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 711-718. DOI:10. 1109/TPWRD. 2008. 2008491.
- [14] SHAO Pengfei, LUO Longfu, LI Yong, *et al.* Electromagnetic vibration analysis of the winding of a new HVDC converter transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 123-130. DOI:10. 1109/TPWRD. 2011. 2174164.
- [15] 王灿, 罗隆福, 陈跃辉, 等. 一种改进型感应滤波高压直流输电系统及其谐波传递特性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 127-132.
- [16] WAGN Can, NING Zhihao, ZHANG Keren, *et al.* Analysis of inductive filtering technology based on multi-winding transformer and its typical practical application[C]// Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing: IEEE Press, 2017: 1-6. DOI:10. 1109/EI2. 2017. 8245488.
- [17] 许加柱, 董欣晓, 梁崇淦, 等. 特高压直流输电系统新型谐波抑制方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(10): 80-86. DOI:10. 16339/j. cnki. hdxzbkb. 2016. 10. 010.
- [18] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的接线方案和原理研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 44-50. DOI:10. 19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 2006. 09. 008.
- [19] REINERT J, BROCKMEYER A, DONCKER R W. Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2001, 37(4): 1055-1061.
- [20] GIRGIS R S. Calculation of winding losses in shell form transformers for improved accuracy and reliability[J]. IEEP PWRD, 1987, 2(2): 398-410. DOI:10. 1109/tpwr. 1987. 4308122.
- [21] Technical Committee ISE/NFE/5. Determination of magnetic loss under magnetic polarization waveforms including higher harmonic components: Measurement, modeling and calculation methods: PD IEC/TR62383[S]. [S. l.]: BST, 2006.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)