

Study on Harmonic Flux and Harmonic Eddy Loss for a New Rectifier Transformer

Shubo Sun¹, Zhiwen Zhang², Chun Zeng²

¹TBEA Hengyang Transformer Co., Ltd., Hengyang Hunan

²Hunan University, Changsha Hunan

Email: sunshubo@tbea.com.cn, hdzzw@126.com, 2925558918@qq.com

Received: Aug. 13th, 2015; accepted: Aug. 28th, 2015; published: Sep. 1st. 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This article describes the constitution for the New High-Power Filter and Rectifier System (NHPFRS). The principle to reduce the harmonic flux of its rectifier transformer is analyzed. According to the measured data, the model of the NHPFRS for the engineering prototype is established. Using ANSYS finite element analysis software, a three-dimensional model of the field-circuit coupled for the new rectifier transformer is built. The transformer tank harmonic flux and harmonic eddy losses are calculated under the three conditions. The results validate that the NHPFRS has a few of features such as small harmonic flux and small harmonic losses.

Keywords

New Rectifier Transformer, Filters, Harmonic Flux, Field Circuit Coupled, Harmonic Eddy Loss

新型整流变压器谐波磁通与谐波涡流损耗研究

孙树波¹, 张志文², 曾 春²

¹特变电工衡阳变压器有限公司, 湖南 衡阳

²湖南大学, 湖南 长沙

Email: sunshubo@tbea.com.cn, hdzzw@126.com, 2925558918@qq.com

收稿日期: 2015年8月13日; 录用日期: 2015年8月28日; 发布日期: 2015年9月1日

摘要

本文介绍了大功率新型滤波整流系统的构成,分析了新型整流变压器谐波磁通的减小机理。根据工程样机实测数据确立了新型滤波整流系统的电路模型。使用ANSYS有限元分析软件建立了新型整流变压器的场路耦合三维模型,计算了三种工况下变压器谐波磁通和油箱谐波涡流损耗。结果验证了新型滤波整流系统的变压器具有谐波磁通小、涡流损耗小等特点。

关键词

新型整流变压器, 滤波装置, 谐波磁通, 场路耦合, 谐波涡流损耗

1. 引言

随着近年冶金、化工和轨道交通等行业的高速发展,大功率整流系统应用越来越广泛。由于整流器件工作特性的非线性,整流系统工作时产生大量谐波电流,对电网造成了严重的谐波污染[1]。整流变压器是为整流系统提供电源的专用变压器,其绕组流过大量谐波电流和无功电流。与普通电力变压器相比,该类变压器运行时温升高,振动和噪音较大,效率较低。如何有效地抑制谐波、改善整流变压器的运行状况、降低谐波损耗、提高整流系统的效率是整流行业亟需解决的问题。

目前解决谐波问题的主要方案有电网侧无源滤波、有源滤波、多重化整流等[2]-[4]。电网侧的无源滤波和有源滤波能够有效地抑制流向电网的谐波电流,但这些谐波电流仍然需要通过整流变压器,导致整流变压器的运行状况得不到改善;多重化整流能够使网侧谐波电流降低,减少流向电网的谐波,但每台变压器本身的谐波并没有减小,并且每增加一个6脉波单元需要相应增加整流器件、变压器等设备,投资较高[5]。

文献[6]-[14]介绍了一种大功率新型滤波整流系统。该系统通过添加滤波绕组及其滤波装置,实现对变压器阀侧谐波电流的屏蔽,能有效改善电网侧电能质量,同时还能改善变压器运行状况,降低变压器谐波损耗、噪音和振动等,目前该系统正得到广泛应用。

本文对大功率新型滤波整流系统的谐波磁通减小机理和谐波涡流损耗进行分析计算。

2. 新型滤波整流变压器的降耗机理分析

2.1. 新型滤波整流变压器的构成

图1(a)为常规整流变压器构成的整流单元,其中整流变压器的绕组由网侧绕组和阀侧绕组组成。由于阀侧的谐波电流通过变压器注入到网侧,一般需要在电网侧设置滤波装置,以减少谐波对电网的污染。

新型滤波整流变压器构成的整流单元如图1(b)所示,新型整流变压器除了网侧绕组、阀侧绕组,还添加了一个滤波绕组及其配套滤波装置。与通常的第三绕组滤波不同,该类变压器滤波绕组谐波等值阻抗经过特殊设计,能够有效抑制谐波磁通。根据供电系统的不同需求,该整流单元可构成12、18或24脉波多重化整流系统。

滤波装置是由LC构成对特征次谐波全调谐滤波器,同时通过调整绕组结构与布局,将滤波绕组的等值阻抗设计为零[15],使得滤波绕组回路的谐波阻抗接近零值,抑制谐波电流传入电网侧,起到屏蔽谐波电流作用。当滤波装置不投入,即断路器S断开时,该系统的运行特性与常规整流变压器无异。

2.2. 新型滤波整流变压器的谐波磁通减小机理

新型滤波整流变压器通过其滤波绕组及滤波装置对谐波磁通进行屏蔽。图 2 为整流变压器的谐波磁通流向示意图，其中，图中变量的下标 1、2 和 3 分别代表变压器网侧绕组、阀侧绕组和滤波侧绕组，变量的下标 n 代表 n 次谐波。当不接入滤波绕组及滤波装置时，该变压器相当于一台常规的双绕组整流变压器，流过阀侧绕组的各次谐波电流将产生谐波磁通，经由铁心与网侧绕组交链，在网侧感应谐波电流，对电网侧造成谐波污染，同时加大变压器的铁耗与铜耗，降低变压器的运行效率。

当接入滤波装置时，滤波绕组及滤波装置投入运行。该滤波绕组设计的谐波等值阻抗 Z_{3n} 大小为零，全调谐状态下滤波装置对各次谐波的阻抗 Z_{fn} 也为零，即滤波回路总谐波阻抗之和为 0。通过这种特殊设计，能够将铁心流过的谐波磁通减小至接近零值，从而有效改善整流变压器的运行情况，提高运行效率。

下面分析其原理。

阀侧的谐波电流 i_{2n} 流过其绕组 2 产生谐波磁动势 $N_2 \cdot i_{2n}$ (N_2 为阀侧绕组匝数)，谐波磁动势作用于主磁路产生谐波磁通 ϕ_{2n} 。不计磁路非线性时，由 i_{2n} 产生的谐波磁通也应为同频次谐波。不妨设 $\phi_{2n} = \Phi_{2nm} \cos(n\omega t)$ ，式中， Φ_{2nm} 为谐波磁通幅值。 ϕ_{2n} 交链滤波绕组 3，在滤波绕组 3 中产生谐波电动势 e_{3n0} ， e_{3n0} 将在该闭合滤波回路中产生谐波电流 i_{3n0} ，并感应同频率的谐波磁通 ϕ_{3n} ，可设 $\phi_{3n} = \Phi_{3nm} \cos(n\omega t + \alpha)$ 。因此，由阀侧绕组 2 和滤波绕组 3 产生的谐波合成磁通可通过下式计算：

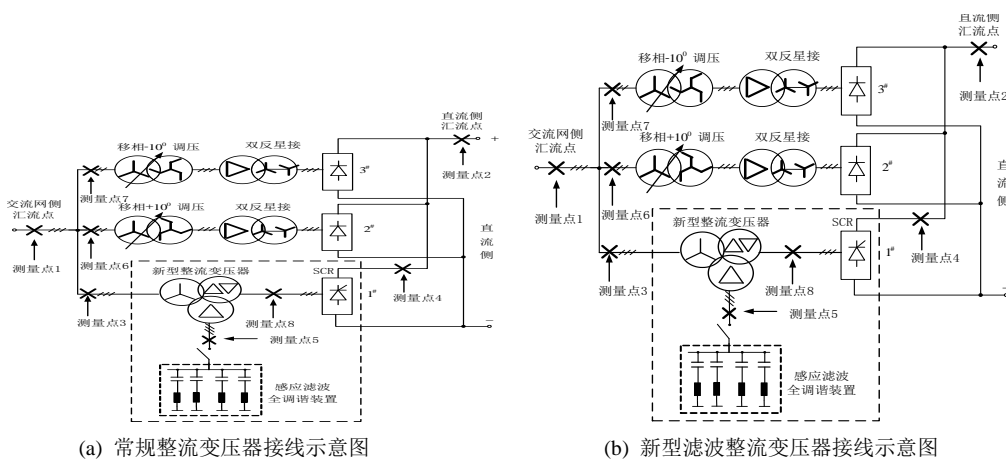


Figure 1. Rectifier transformer and its rectifier unit
图 1. 整流变压器及其构成的整流单元

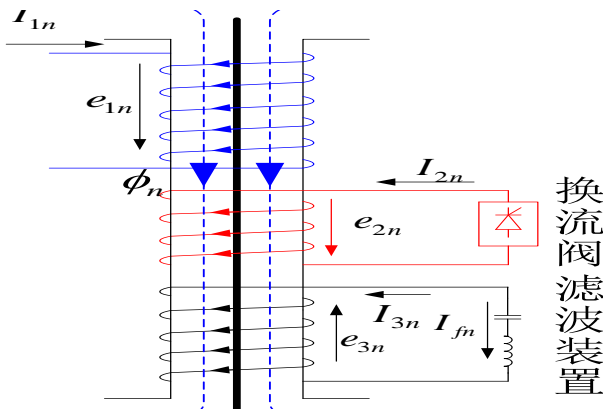


Figure 2. Flow path of rectifier transformer's harmonic flux
图 2. 整流变压器谐波磁通流向示意图

$$\phi = \phi_{2n} + \phi_{3n} = \Phi_{2nm} \cos(n\omega t) + \Phi_{3nm} \cos(n\omega t + \alpha) = \Phi_m \cos(n\omega t + \beta) \quad (1)$$

其中，合成谐波磁通幅值： $\Phi_m = \sqrt{\Phi_{2nm}^2 + \Phi_{3nm}^2 + 2\Phi_{2nm}\Phi_{3nm}\cos\alpha}$

$$\text{合成谐波磁通相角：} \beta = \tan^{-1}\left(\frac{\Phi_{3nm}\sin\alpha}{\Phi_{2nm} - \Phi_{3nm}\cos\alpha}\right)。$$

根据电磁感应定律，该谐波磁通在滤波绕组 3 中产生的总谐波电动势为：

$$e_{3n} = -N_3 \frac{d\phi}{dt} = N_3 n \omega \Phi_m \sin(n\omega t + \beta) = (N_3 n \omega) \Phi_m \cos(n\omega t + \beta - 90^\circ) \quad (2)$$

由于电流、磁通和电势均为同角频率($n\omega$)的交变信号，故可采用相量法进行分析。对滤波回路，由 KVL 定律，有：

$$\dot{E}_{3n} = \dot{U}_{3n} = \dot{I}_{3n} (Z_{3n} + Z_{fn}) \quad (3)$$

通过零阻抗设计方法，可使得 $Z_{3n} + Z_{fn} = 0$ ，而谐波电流 \dot{I}_{3n} 为有限值，故有 $\dot{E}_{3n} = \dot{U}_{3n} = 0$ 。由式(2)的相量形式，有：

$$\dot{E}_{3n} = -j(N_3 n \omega) \dot{\Phi} = 0 \quad (4)$$

式中， $\dot{\Phi}$ 为合成磁通相量。对式(4)， N_3 、 n 、 ω 都为非零常数，故 $\dot{\Phi} = 0$ 。因此，必有 $\Phi_m = 0$ ，即谐波磁通幅值被限制为零。

由以上分析可见，正是由于滤波绕组按零阻抗设计以及滤波装置的全调谐，将谐波磁通限制在零值附近，实现了对谐波磁通的屏蔽。

3. 新型滤波整流变压器谐波涡流损耗计算

整流变压器中的谐波磁通穿过导体时，会产生涡流损耗，这些导体包括油箱、绕组、铁心等构件。谐波磁通在各种铁磁材料中会产生磁滞损耗。感应的谐波电动势在绕组、线路中产生铜耗。这些损耗会降低变压器运行效率，增大变压器的温升，缩短变压器使用寿命。

上面的分析从原理上分析了新型滤波整流变压器的谐波磁通抑制作用，下面的分析计算将对该类变压器的谐波磁通抑制效果进一步论证。但谐波磁通及其损耗不方便直接测量，对新型滤波整流变压器的谐波磁通抑制效果分析需要结合有限元计算软件来进行。

本文通过 ANSYS 有限元分析软件建立新型滤波整流变压器的磁场-电路耦合模型，分析其谐波磁场分布，并对变压器油箱的谐波涡流损耗进行计算，通过与传统网侧滤波方法对比，验证新型滤波整流变压器的谐波磁通屏蔽作用及节能降耗效果。

3.1. 模型的初步分析与确定

研究对象为工程应用中的某化工集团一台容量为 10883kVA 新型滤波整流变压器。在未投入滤波装置工况下，对该变压器阀侧 A 相线电流进行 Fourier 分析，主要含有 5、7、11、13 次谐波，阀侧主要电流成分大小及相位如下：

$$\begin{cases} i_{a1} = 10398.0 \cos \omega t \\ i_{a5} = 1920.0 \cos 5\omega t \\ i_{a7} = 1253.8 \cos(7\omega t + 194.5^\circ) \\ i_{a11} = 617.9 \cos(11\omega t + 174.3^\circ) \\ i_{a13} = 438.2 \cos(13\omega t + 72.6^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

由于模型主要验证对谐波磁通及其引起损耗的抑制效果,故不需要考虑基波电流。剔除基波电流后,以 5、7、11、13 次谐波电流源并联代替阀侧的负载,滤波装置采用 LC 单调谐滤波器,网侧电压源置零,接入系统阻抗,搭建新型滤波整流变压器模型原理图如图 3。

当断开滤波绕组及滤波装置时,该模型相当于一台普通整流变压器。在断开滤波绕组及滤波装置,网侧接入 LC 滤波器时,相当于传统网侧滤波方式。为验证滤波整流变压的谐波磁通屏蔽和节能降耗效果,后面将按以下三种工况进行对比分析:

- a) 无滤波方式,即不接入任何滤波装置;
- b) 传统滤波方式,即仅在网侧接入滤波装置;
- c) 滤波变压器方式,即仅在滤波侧接入滤波装置。

3.2. 滤波变压器有限元模型的建立

(1) 磁场模型建立

由于模型尺寸较大,考虑到计算机容量与计算精度,对变压器进行了适当近似:

- a) 变压器关于铁心中心线所在平面对称,因此只需要建立实体模型的一半;
- b) 绕组内电流密度均匀分布,不计绕组和构件的涡流损耗;
- c) 变压器油箱材料线性、各向同性,箱壁箱盖为直角连接。

参照该新型滤波整流变压器的外形尺寸与材料参数,建立变压器的有限元模型如图 4。由于涡流在导体中存在去磁效应,磁场在导体表面附近分布密集,其强度沿导体纵深按指数规律递减[16]。考虑到涡流区的集肤效应,对油箱厚度方向进行了分层处理,以减少误差。图 4(b)为对模型继续网格划分后的效果图。

(2) 电路模型建立

参照图 3 新型滤波整流变压器模型原理图,使用 ANSYS 软件中 circu124 单元定义绞线圈、电流源、电感电容,并设置好实常数。按照原理图进行连接,建立变压器的电路部分,并对变压器进行磁场 - 电场耦合。

3.3. 变压器谐波磁通分析

为验证新型滤波整流变压器对谐波磁通的抑制效果,在无滤波、传统滤波、滤波变压器等三种工况下分别进行求解,在通用后处理器查看三种工况下的磁通密度。图 5 为同一时刻各工况下的谐波磁通密度云图分布结果。

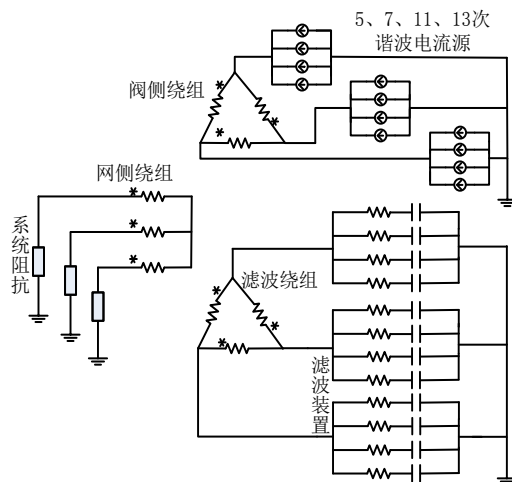


Figure 3. Diagram of the new filtering transformer model
图 3. 新型滤波整流变压器模型原理图

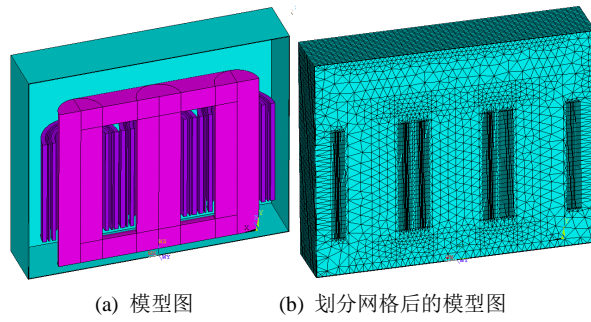


Figure 4. The finite element model for the new filtering transformer

图 4. 新型滤波整流变压器的有限元模型图

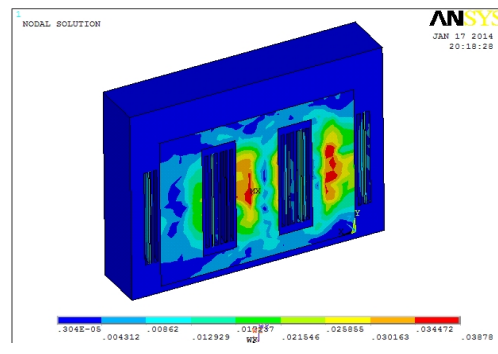
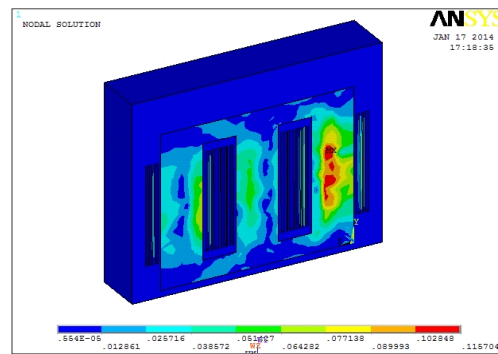
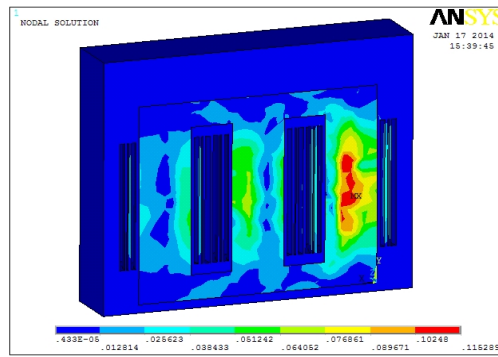


Figure 5. Flux density under three cases

图 5. 三种工况下的磁密云图

观察磁密云图可见，无滤波时的最大磁密为 0.115289 T，传统滤波时最大磁密为 0.115704 T，滤波变压器时最大磁密为 0.03878 T。由此可见，无滤波与传统滤波的磁密都较大，且相差无几，而滤波变压器的磁密很小。

通过以上求解得出结论，带有滤波绕组及滤波装置的整流变压器能够有效抑制谐波磁通，使得铁心、油箱等部件中的谐波磁密大大减小，而传统滤波方式不能抑制谐波磁通。该计算分析证明了前面理论分析的正确性。

从上面数据还可以发现，新型滤波整流变压器方式也存在部分谐波涡流损耗，这主要是由于设计和制造精度所限，滤波绕组谐波等值阻抗 Z_{3n} 和全调谐 LC 阻抗 Z_{jn} 并不严格为零，滤波绕组的谐波电动势 E_{3n} 并不严格为零，也就使得少量的谐波磁通继续存在。

3.4. 油箱谐波涡流损耗计算

下面将通过对比油箱的谐波涡流损耗计算，来验证新型滤波整流变压器降耗效果。

与谐波磁通分析对应，对油箱谐波涡流损耗计算也分为分无滤波、传统滤波、滤波变压器三种工况。参照式(5)，在阀侧施加了 5、7、11、13 次谐波电流后，通过 ANSYS 软件对模型进行三维谐波磁场分析，在通用后处理器中查看油箱上的涡流分布，图 6 为三种不同工况下，箱壁内表面同一时刻的涡流密度分布图。

无滤波、传统滤波、新型滤波变压器的最大涡流密度分别为 $1.68 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 、 $1.68 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 、 833020 A/m^2 ，新型整流变压器油箱涡流密度远小于无滤波和传统滤波。对油箱涡流损耗进行求解，得到三种工况下的油箱谐波涡流损耗如表 1 所示。

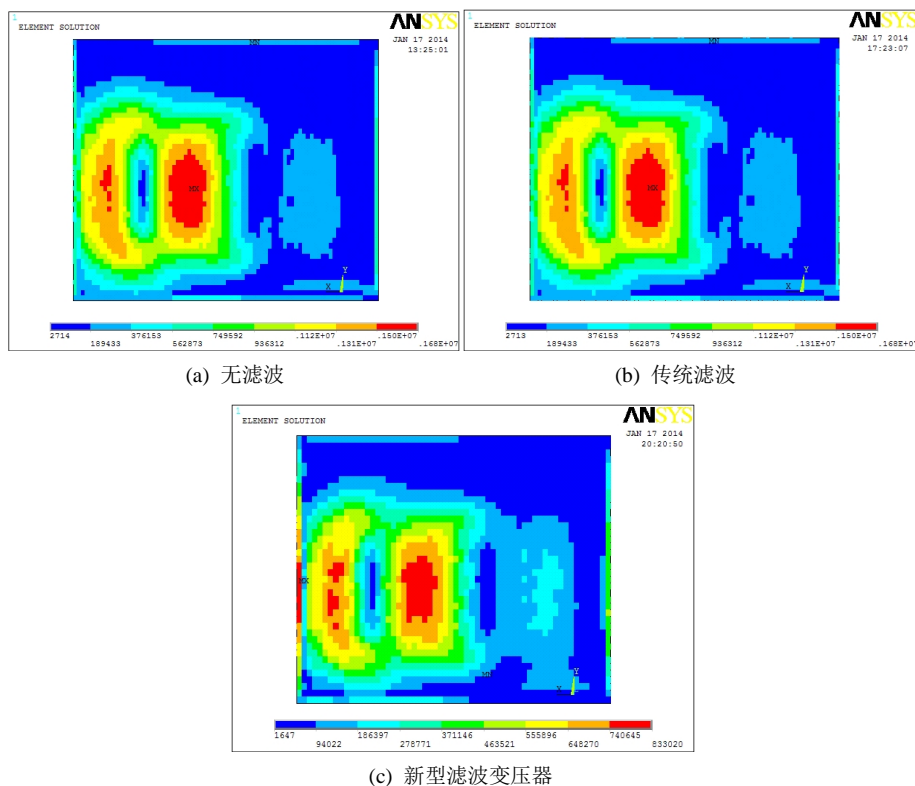


Figure 6. Eddy current distribution under three modes

图 6. 三种工况下的涡流分布图

Table 1. The tank's harmonic eddy loss under three modes
表 1. 三种工作方式下油箱的谐波涡流损耗

无滤波	传统滤波	新型滤波变压器
5.575 kw	5.643 kw	0.890 kw

由表 1 数据可见, 不滤波和传统滤波的油箱涡流损耗比较大, 也即传统滤波方式并不能降低油箱的谐波涡流损耗。而使用新型滤波整流变压器后, 损耗能够得到大幅度减少。该计算证明了新型滤波整流变压器能够有效减少变压器上的涡流损耗, 改善变压器运行状况, 实现节能降耗。

同时上面计算还可以发现, 在新型滤波变压器中也还存在少量涡流损耗, 其原因是由于设计制造精度所限, 滤波绕组的谐波阻抗并不严格为零, 使得少量谐波磁通能够继续存在, 这些谐波磁通的漏磁穿过变压器油箱, 产生少量涡流损耗。提高设计与制造精度, 能够使该部分涡流损耗进一步减少。

4. 结语

本文介绍了大功率新型滤波整流系统的谐波磁通减小机理。通过使用有限元分析软件建立了磁场-电路耦合模型, 求解其谐波磁场分布与油箱涡流损耗。结果表明, 新型整流变压器及其滤波装置的谐波磁通分别比无滤波和传统网侧滤波降低约 66% 左右; 新型整流变压器及其滤波装置的油箱涡流损耗分别比无滤波和传统网侧滤波降低约 84% 左右。由此说明新型滤波整流系统能够有效抑制谐波磁通、降低运行损耗, 改善整流变压器运行状况, 提高变压器寿命, 具有很高的应用价值, 值得进一步推广。

基金项目

湖南省战略性新兴产业科技攻关项目(2014GK1037)。

参考文献 (References)

- [1] Siebert, A., Troedson, A. and Ebner, S. (2002) AC to DC power conversion now and in the future. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **38**, 934-940. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2002.800570>
- [2] 丁国良 (2008) 整流装置多相整流对谐波的影响. *中国氯碱*, **4**, 1-7.
- [3] 程莹 (2010) 低压大电流整流器的谐波治理和无功补偿技术与应用. 硕士学位论文, 湖南大学, 长沙.
- [4] 谢运祥 (1999) 电力系统整流器负载的谐波抑制方法. *电力系统及其自动化学报*, **1**, 24-27.
- [5] 孟凡刚, 杨世彦, 杨威 (2012) 多脉波整流技术综述. *电力自动化设备*, **2**, 9-22.
- [6] Luo, L.F., Li, Y. and Xu, J.Z. (2008) A new converter transformer and a corresponding inductive filtering method for HVDC transmission system. *IEEE Transaction on Power Delivery*, **23**, 1426-1431. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2008.919160>
- [7] 赵志宇, 罗隆福, 许加柱, 陈清玉, 张志文 (2012) 新型整流变压器及其滤波系统的运行参数特性分析. *中国电机工程学报*, **22**, 86-93.
- [8] 罗隆福, 肖华, 李勇, 俞华, 刘福生 (2006) 基于新型换流变压器的 12 相整流和谐波分析. *电力系统及其自动化学报*, **6**, 26-31.
- [9] 李勇, 罗隆福, 张志文, Rehtanz, C., 刘泽洪, 刘福生 (2010) 应用感应滤波原理构建的直流供电系统. *中国电机工程学报*, **22**, 107-112.
- [10] 李勇, 罗隆福, 刘福生, 李季, 张杰, 许加柱 (2009) 变压器感应滤波技术的发展现状与应用前景. *电工技术学报*, **3**, 86-92.
- [11] 王灿, 罗隆福, 李勇, 许加柱, 张志文 (2013) 新型高效工业整流机组的运行特性分析. *中国电机工程学报*, **18**, 80-86.
- [12] 宁志毫, 罗隆福, 许加柱, 邵鹏飞, 赵志宇 (2011) 变压器铁心谐波磁通抑制技术及其在工业整流中的应用. *湖南大学学报(自然科学版)*, **12**, 34-39.

-
- [13] 赵志宇, 罗隆福, 许加柱, 陈清玉, 张志文 (2012) 一种滤波整流变压器的数学模型与工作机理. *电网技术*, **10**, 99-105.
- [14] 吴素平, 尚荣艳, 罗隆福 (2010) 新型直流输电系统中感应滤波技术的影响. *电力系统及其自动化学报*, **4**, 49-55.
- [15] 尹克宁 (2003) 变压器设计原理. 中国电力出版社, 北京.
- [16] 颜威利, 杨庆新, 汪友华 (2006) 电气工程电磁场数值分析. 机械工业出版社, 北京.