

中国金属学会电工钢分会 编

2017'

第十四届中国电工钢学术年会

The 14th Chinese Electrical Steel Academic Annual Conference

论文集



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn

中国金属学会电工钢分会 编

2017'

第十四届中国电工钢学术年会

The 14th Chinese Electrical Steel Academic Annual Conference

论文集

北 京

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本论文集共收录了第十四届中国电工钢学术年会论文 55 篇, 内容包括取向电工钢、无取向电工钢、涂层与表面、检测与应用、综述与其他五个部分。本届年会论文反映了近年来我国电工钢生产与技术进步的有关情况以及发展趋势等。

本论文集可供从事电工钢生产、研究、设计、营销和管理等工作的相关人员阅读, 也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

第十四届中国电工钢学术年会论文集/中国金属学会
电工钢分会编. —北京: 冶金工业出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5024-7711-0

I. ①第… II. ①中… III. ①电工钢—中国—文集
IV. ①TM275-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 297714 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7711-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京京华虎彩印刷有限公司印刷

2017 年 12 月第 1 版, 2017 年 12 月第 1 次印刷

210mm×297mm; 20.5 印张; 4 彩页; 657 千字; 318 页

180.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

《第十四届中国电工钢学术年会论文集》

编 委 会

主 任 邹继新

副 主 任 储双杰 李忠武 谢 力 王建伟 高海潮

主 编 陈 卓

副 主 编 胡守天

编 委 陈 晓 王 波 曹 阳 骆忠汉 孙茂林

龚 坚 王立涛 赵 宇 杨 平 孙 跃

肖海航 郭振岩 韩筛根 刘 杰 罗 理

刘 静 张文康 高振宇 黄 坚 薄丹青

吴 英 李中军 周国伟

编 审 裴大荣 陈 卓 胡守天 王若平 冯大军

翻 译 刘 婷

执行编辑 孙 竹

前 言

今年是我国“十三五”规划实施的第二年，中国共产党胜利召开了第十九次全国代表大会，为中国指明了前进的方向。在这重要时刻，我们在宁波迎来了第十四届中国电工钢学术年会的召开。

两年多来，中国电工钢产业在供给侧、去产能的强劲政策指导下，在各生产企业及上下游产业的共同努力下，整个产业取得了可喜的成绩，电工钢产能结构发生了巨变，新标准的颁布实施，落后或低端产品正在全面淘汰，技术改造及工艺的优化及突破，高端产品质量稳定，产量在扩大，中高端产品市场开始初步形成，我国电工钢产业国产化目标已经实现；通过自主研发、技术创新，电工钢品种、规格、牌号已具备了全覆盖的生产能力；通过企业整合及自律，市场秩序开始向好和正在回归合理及稳定；通过多种形式、渠道的相互沟通及对等交流，电工钢学术氛围出现新气象，有更多话题、更深入、更广泛、更开放的交流，也大大地促进和发展了中国电工钢技术进步。

本届年会是我国电工钢产业链参会人数最多、专业面最广、论文数量较多的学术盛会和交流、互动的舞台。电工钢工作者将围绕电工钢生产、新工艺、新技术、新设备、质量攻关、产品研发、测试及涂层技术等专业领域开展广泛的学术交流。同时，大会还邀请部分专家、学者作专题报告。为此，我们对本次年会的论文单位及作者、为会议提供支撑的单位表示衷心的感谢。

本届年会共收录论文 55 篇，共计 65.7 万字，内容涉及取向电工钢、无取向电工钢、检测技术、信息研究、材料应用等多个方面，值得大家学习和参考。

由于时间紧，编辑工作量大，难免有不足之处，敬请批评指正。

中国金属学会电工钢分会
2017 年 12 月 20 日

目 录

取向电工钢

27QH085 取向硅钢的谐波及直流偏磁特性研究	程 灵, 马 光, 孟 利, 等	3
含铈取向硅钢中铈收得率的实验室研究	谭清元, 项 利, 仇圣桃	11
两级别高磁感取向硅钢磁性能和晶粒比较分析	裴大荣, 周 涛, 邱 忆, 等	17
晶粒取向纯铁的国内外发展情况及最新研究进展	荣 哲, 项 利, 刘 磊, 等	22
取向硅钢极薄带制备工艺的研究	杨佳欣, 吴章汉, 骆忠汉, 等	30
取向硅钢带冷轧板形控制浅析	何 冰	38
取向电磁钢板高温退火初期采用 Ar 气作为保护气氛对镁橄榄石被膜 质量的影响	(日本 JFE) 大久保智信, 今村猛	42
薄规格取向硅钢二次再结晶组织中“岛晶”的初步分析	孟 利, 何承绪, 杨富尧, 等	50

无取向电工钢

不同频率下变频电机硅钢片的磁性能研究	王立涛, 夏雪兰, 施立发	57
叠片压力对电机定子铁损的影响	杜 军, 裴英豪, 王立涛	61
低牌号无取向钢柱状晶连铸坯相变法处理后的组织与织构	杨 平, 顾 晨, 王金华, 等	65
渗氮层对无取向电工钢磁性能的影响	李 明, 任 强, 张立峰, 等	72
无取向硅钢中的织构特点和控制方法	杨 平, 王 宁, 顾新福, 等	77
常化和退火温度对 2.4%Si 冷轧无取向硅钢组织和织构 的影响	汪 勇, 朱诚意, Jürgen Schneider, 等	85
热轧工艺对高速冲床用 50BW600 冷轧无取向硅钢组织和性能的影响	李毅伟	93
高硅电工钢轧制性能改善的实验研究	曾 春, 骆忠汉, 李昊泽, 等	98
实验室研制含 Ni 高强度无取向电工钢	潘振东, 林 媛, 侯鹏飞, 等	104
单机架可逆冷轧轧制中牌号无取向硅钢 50BW600 的工艺优化	李毅伟, 李德君	111
无取向硅钢在工艺过程中析出相演变规律	赵艳宇, 罗 艳, 任 强, 等	114
新能源汽车驱动电机用 0.27mm 无取向硅钢的研制	吕 黎, 陈圣林, 冯大军, 等	119
再结晶组织比例对冷轧无取向硅钢性能的影响	林 媛, 张文康	125
中包过滤器在硅钢生产中的应用试验	余小琴, 冷光荣, 裴 伟, 等	130
新型高效冰箱压缩机用电工钢的研制与应用	陆天林, 孟淑娟, 战廷栋, 等	137
剪切应力对硅钢片磁性能的影响	刘青松, 夏雪兰, 王立涛, 等	142

无取向硅钢轧制工艺及表面缺陷对磁性能的影响	罗石念	148
复合型高硅电工钢软磁铁芯的制备及性能研究	江 志, 梁 鹏, 吴朝阳, 等	154
首钢股份公司高效无取向电工钢工艺研究	张保磊, 刘 磊, 胡志远, 等	162

涂层与表面

无取向电工钢退火板表面缺陷分析	王 宁, 杨 平	171
克服零星点状表面漏晶的探讨	洪泉富	179
影响电工钢无铬环保涂层几个主要因素研究	林 安, 齐慧滨, 张 弦, 等	182
无取向电工钢环保半无机涂层的绝缘规律研究	段 辉, 李国明, 吴红兵	187
氧化镁对取向硅钢底层质量影响的研究	蔡 伟, 许洁滨, 孟凡娜, 等	191
氧化镁线滑卷原因分析	戴东火, 林国城, 蔡 伟	196

检测与应用

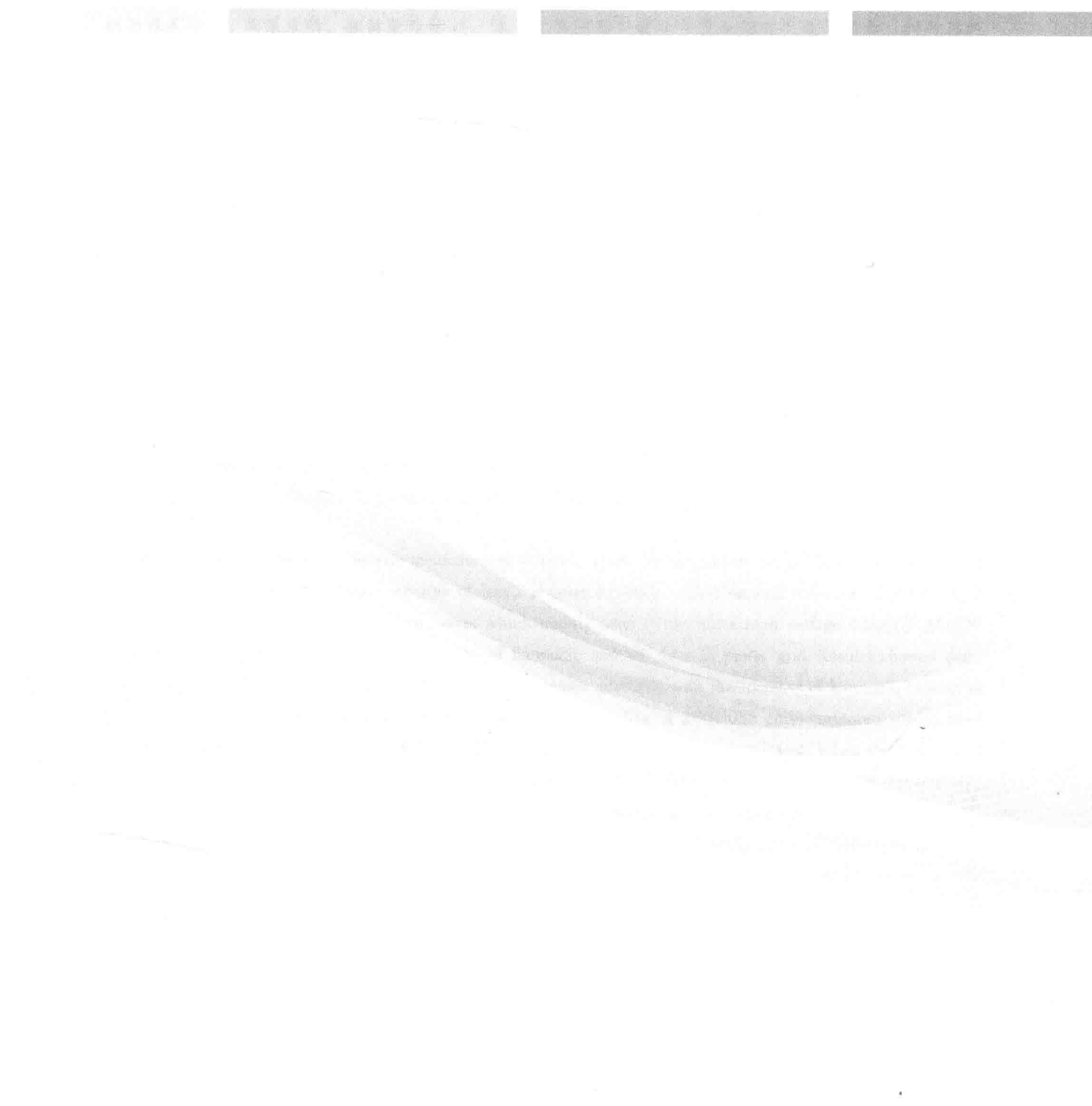
H-Coil 法测量体系助力高性能电工钢发展	周新华, 徐 昱, 邹学良, 等	201
硅钢绝缘涂层膜厚在线检测系统	施振岩, 徐 凯, 朱子平, 等	207
HW2000 高频红外碳硫仪在硅钢检测中的应用	张 勇, 殷世铜	213
红外热导氧氮仪测定硅钢中氮含量的不确定度	彭 沛, 黄 双, 邱 忆, 等	216
取向硅钢碳硫分析仪的常见故障与维护	林一凡, 许洁滨, 蔡 伟, 等	220
X 射线荧光法测定取向硅钢涂层涂布量不确定度评估	张俊鹏, 张 晗, 向 前, 等	223
无取向电工钢在不同频率下的磁性能研究	石国发, 刘志刚, 李春川, 等	227
低压高效电机冲气隙工艺研究	汤惠明, 黄 坚, 程国栋, 等	231
三相异步电动机效率分级浅议	黄 坚	234
立体卷铁心技术剖析	梁庆宁, 许凯旋, 杨剑波, 等	243
无取向硅钢对永磁同步电机性能的影响	裴英豪, 夏雪兰, 王立涛, 等	254
影响电动汽车用驱动电机输出性能的因素分析	李广林, 马 琳, 姜瑞雪, 等	259
新能源高转速驱动电机的转子离心力仿真	马 琳, 李广林, 姜瑞雪, 等	262

综述与其他

我国冷轧电工钢引进生产技术回顾及思考	陈 卓	269
电工钢国际标准化最新动态和相关问题介绍	周 星, 胡守天, 周新华	276
俄新钢取向电工钢研发进展	马长松, 沈侃毅	281
从标准变化看配电变压器和取向电工钢的技术进步	曾 武, 姚昌国, 袁宇峰, 等	288
电工钢冲压模具的重要性及加工过程的研究	汪淳淳	294
全球主要国家和地区电工钢专利发布情况分析	王 媛	300
可控气氛脱碳退火炉用抗渗碳隔热材料的热物性能研究	任以立, 任燕明, 张 清, 等	305
硅钢连退线炉底辊材料的比较	陈天龙, 陈圣贤	309
电工钢涂层的干燥和固化: 最新的挑战和创新	Nicolas Even, Grégory Lepoutre	312

取向电工钢

QUXIANG DIANGONGGANG



27QH085 取向硅钢的谐波及直流偏磁特性研究

程 灵^{1,2}, 马 光¹, 孟 利², 杨富尧¹, 陈 新¹, 韩 钰¹, 董 瀚²

(1. 全球能源互联网研究院电工新材料研究所, 北京 102209;

2. 钢铁研究总院华东分院, 北京 100081)

摘 要: 本文基于励磁信号波形及直流偏置量精确可控的软磁测量系统, 研究了特高压交、直流变压器铁心常用材料——27QH085 牌号高磁感取向硅钢在电网谐波及直流偏磁工况下的损耗、磁致伸缩及振动噪声特性。结果表明, 相位差为 0° 时, 随着电压波形中谐波含量或谐波次数的增加, 材料损耗逐渐上升; 相位差为 180° 时, 随谐波含量的增加, 奇次谐波损耗先下降、后上升, 3 次、5 次、7 次、9 次及 11 次谐波含量依次低于 7.6%、1.9%、0.68%、0.34% 及 0.17% 时, 损耗较正常工况反而降低, 而偶次谐波损耗随含有率的增加呈单调上升趋势。直流偏磁条件下, 27QH085 取向硅钢的铁损及磁致伸缩系数明显增大, 偏置磁场增加至 100A/m 时, 蝴蝶曲线畸变严重, 损耗较正常工况上升 21.9%, 噪声增加约 14dB。研究规律可支撑复杂工况条件下大型电力变压器铁心材料选型与结构设计。

关键词: 电力变压器; 电网谐波; 直流偏磁; 取向硅钢

Study on Harmonic and DC-Bias Characteristic of 27QH085 Grain-oriented Silicon Steel

Cheng Ling^{1,2}, Ma Guang¹, Meng Li², Yang Fuyao¹, Chen Xin¹, Han Yu¹, Dong Han²

(1. Global Energy Interconnection Research Institute, Department of Electrical Engineering New Materials, Beijing 102209, China; 2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the soft magnetic measurement system, which can accurately control both excitation signal waveform and DC bias, the characteristics of loss, magnetostriction, vibration and noise of 27QH085 high magnetic induction grain-oriented silicon steel which mainly used in the ultra high voltage (UHV) AC/DC transformer were researched under the condition of harmonic and DC bias in power grid. Results showed that, when the phase difference is 0 degree, the core loss increases gradually with the increase of harmonic content or harmonic number. While the phase difference is 180 degree, the loss of 27QH085 grain-oriented silicon steel was first increased and then decreased along with the increasing of odd harmonic content. When the contents of 3rd, 5th, 7th, 9th and 11th harmonic are below 7.6%, 1.9%, 0.68%, 0.34% and 0.17% respectively, the core losses are lower than the normal conditions. The even harmonic loss increases monotonically with the increase of the harmonic content. Moreover, the core loss and magnetostriction coefficient of 27QH085 silicon steel increase obviously under DC bias condition. When the magnetic field of DC bias (H_{dc}) increased to 100A/m, the distortion of butterfly curve is serious, and the core loss rises by 21.9% while the noise increases by about 14dB. The conclusions can support the material selection and structure design of large power transformer under complex operating conditions.

Key words: power transformer; harmonic wave; DC bias; grain-oriented silicon steel

1 引言

谐波是指频率为基波频率（50Hz）整数倍的正弦波分量。随着电力系统输电电压等级的提高以及电力负荷种类不断增加，电网中谐波注入量不断增加，高次谐波电压会造成变压器铁心损耗增大、振动和噪声增强等不利影响^[1]。国标 GB/T 14549《电能质量公用电网谐波》^[2]中考虑不同谐波源叠加计算的方法，规定了公用电网中谐波电压限值及谐波电流允许值，但仅适用于 110kV 及以下电压等级交流电网，对于更高电压等级该标准没有指定规范，目前，各国对高压、特高压输电网的谐波电压限值相差较大。与此同时，现有研究大都针对谐波条件下变压器整体损耗进行分析，而从铁心材料角度细致分析取向硅钢在各次谐波工况条件下损耗特性的研究较少。例如，刘成君等^[3]提出了变压器谐波损耗的计算方法，分析了变压器谐波损耗与谐波电流畸变率的关系；汪彦良等^[4]提出了考虑集肤效应时变压器谐波损耗计算方法；张占龙等^[5]考虑变压器负载不平衡及谐波次数对变压器谐波损耗的影响，建立了变压器谐波损耗模型。因此，有必要全面考虑各电压等级变压器中出现的谐波工况，研究取向硅钢材料在不同谐波次数及含量条件下的损耗特性，支撑变压器整体谐波损耗的精细化计算。

与此同时，随着我国±800kV 及以上电压等级直流输电工程的建设及投入运行，变压器的直流偏磁问题受到广泛关注，易造成铁心饱和、温升增大、震动加剧等不利影响。资料显示，三峡-常州直流输电系统采用单级大地返回方式运行时，江苏常州直流换流站附近的常州武南变电站的 2 组 500kV 自耦变压器噪声增大，当直流输送 1540MW 大负荷（地中电流 3320A）时，武南变中性点直流电流最大为 9.4A^[6]；贵广 750MW 单级大地回路运行方式下，春城站主变中性点直流电流达 34.5A，噪声为 93.9dB，谐波电压总畸变率达 2.1%^[7]；受三峡-广州、天生桥-广州等高压直流输电系统的影响，岭澳核电站和大亚湾核电站的主变中性点曾入侵约 4% 以内的直流电流^[8]；此外，太阳等离子风的动态变化与地磁场相互作用产生的地磁暴可引起地磁感应电流，并在接地变压器中产生直流偏磁现象。取向硅钢作为变压器铁心核心材料，研究其在直流偏磁条件下的磁特性及磁致伸缩特性对于指导铁心材料选型与结构设计以及提高变压器抗直流偏磁能力具有重要意义。

本文以特高压交、直流变压器常用铁心材料——27QH085 牌号高磁感取向硅钢为研究对象，系统分析其在正弦波形磁场激励及 2~11 次不同含量谐波工况下的损耗性能，同时，研究直流偏置磁场为 0~120A/m 时取向硅钢的损耗、磁致伸缩及振动噪声特性，支撑变压器铁心结构设计及制造，确保高端取向硅钢材料在高电压等级变压器中安全应用。

2 测试原理与方法

针对取向硅钢在电网高次谐波及直流偏磁工况条件下的磁性能及磁致伸缩特性测试，国内外尚未形成测试方法标准，本文基于励磁信号波形精确可控的 Bruckhaus MPG 200D 软磁测量系统，依据国际上被广泛认可的 IEC/TR 62383^[9]技术报告中的模型及方法测量谐波损耗，依据 IEC/TR 62581^[10]技术报告中的方法测量磁致伸缩系数并进行 AWW(A-weighted magnetostriction velocity level) 噪声等效模拟计算。谐波损耗、磁致伸缩系数、AWV 噪声的测量方法或计算原理如下：

谐波损耗 P_c 的测定（式 1）使用来源于双通道数字转换器的数据、二次感应电压 $U_2(t)$ 以及和初级绕组串联的非感应式精密电阻 R_s 两端的电压 $U_s(t)$ 进行计算：

$$P_c = -\frac{N_1}{n\rho_m N_2 A l_{eff} R_s} \sum_{i=1}^n U_2(i) \cdot U_s(i) \quad (1)$$

式中， i 为整数； n 为每个周期的取样点数； ρ_m 为试样的密度； N_1 为初级绕组匝数； N_2 为次级绕组匝数； A 为试件的横截面积； l_{eff} 为有效磁路长度。

磁致伸缩系数 λ 的测量（式 2）根据样品均匀磁化区域内基线长度的变化计算：

$$\lambda(t) = \frac{\Delta l_0(t)}{l_0} \quad (2)$$

式中， $\Delta l_0(t)$ 为从退磁状态长度到时间为 t 时基线长度的变化值； l_0 为试件的基线长度。

A 计权磁致伸缩振动速度声压水平 (AWV 噪声) 的计算方法 (式 3) 如下:

$$AWV = 20 \log_{10} \frac{\rho c \sqrt{\sum_i \left[(2\pi f_i) \left(\frac{\delta_i}{\sqrt{2}} \right) \alpha_i \right]^2}}{P_{e0}} \quad (3)$$

式中, ρ 为空气密度; c 为声速; f_i 为磁致伸缩时 i 次谐波分量的频率; δ_i 为磁致伸缩时 i 次谐波分量的大小; α_i 为频率为 f_i 时 A 计权系数; P_{e0} 为最小可听声压。

3 正常工况下 27QH085 取向硅钢的磁性能

作为特高压交、直流变压器铁心常用材料, 27QH085 牌号高磁感取向硅钢的磁特性直接关系到变压器铁心的损耗及磁化性能。为了给 27QH085 取向硅钢在谐波及直流偏磁条件下的损耗特性分析提供参照对比, 首先给出材料在 50Hz 正弦波形磁场激励条件下的损耗曲线及磁化曲线, 见图 1。由图可知, 磁感 B_8 为 1.912T, 铁损 $P_{1.7}$ 为 0.826W/kg, 基础磁性能符合国标要求。此外, 磁通密度超过 1.8T 后, 取向硅钢的磁化性能显著下降。鉴于此, 高电压等级交流变压器铁心设计磁密一般取 1.65~1.73T, 直流换流变压器磁密设计不超过 1.78T。

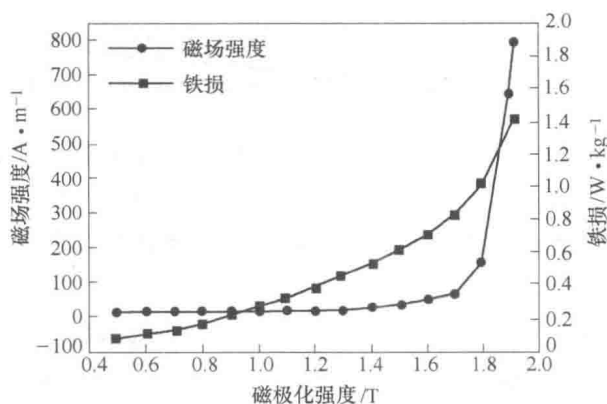


图 1 27QH085 取向硅钢正常工况下铁损及磁场强度随磁密的变化曲线

Fig. 1 Variation curves of iron loss and magnetic field strength of 27QH085 GO steel under normal working condition

4 谐波条件下 27QH085 取向硅钢的损耗

4.1 试验工况设计

研究表明, 接于高压远距离输电线路末端的变压器空载运行时, 受线路充市电流的影响导致工频电压升高, 使励磁电流中的 3 次、5 次、7 次等奇数次谐波分量明显增加^[11]; 取向硅钢材料饱和产生的奇次谐波中, 以 3 次谐波和 5 次谐波为主, 且随着铁心饱和程度的增加, 励磁电流中谐波成分将更大^[12,13]。总体上, 大型电力变压器中奇次谐波中以 3 次 10% 含有率及 5 次 5% 含有率最为常见。此外, 特高压直流输电时直流电流侵入中性点接地的交流变压器后, 励磁电流中常出现 2 次、4 次等偶次谐波, 特别是 2 次谐波含量可达 20%^[11]。

结合上述工况, 针对特高压交、直流变压器铁心常用的 27QH085 取向硅钢谐波损耗测量, 本研究中分别施加的谐波工况包括: 3 次谐波 (0~20% 含量), 5 次谐波 (0~5% 含量), 7 次谐波 (0~2% 含量), 9 次谐波 (0~1% 含量), 11 次谐波 (0~0.5% 含量); 2 次谐波 (0~25% 含量), 4 次谐波 (0~10% 含量)。同时, 课题组已有研究表明^[14], 相位差为 0° 时, 取向硅钢的铁损随谐波次数 (3、5、7 次) 及含量 (谐波电压含量最高约 20%) 的增加而增大, 且与谐波次数呈线性关系。因此, 本节中重点考虑相位差为 180° 时, 取向硅钢的奇次谐波损耗特性。

4.2 奇次谐波损耗测试结果

图 2 给出基波中叠加不同含量三次谐波后 27QH085 牌号取向硅钢的铁损 ($P_{1.7}$) 变化曲线, 以及谐波

电压含量分别为 0、3.3%、10% 时的磁滞回线。由图 2(a) 可知, 随着三次谐波含量的提高, 铁损先下降后上升, 总体上呈开口向上的抛物线分布。当三次谐波含有率为 3.3% 时, 铁损 $P_{1.7}$ 达最小值 0.790 W/kg (对应图 2(b) 中红色磁滞回线的面积最小), 相比正常工况下降 4.4%; 含有率超过 10% 后, 铁损显著上升, 当含有率为 17% 时, 铁损较正弦波形磁场激励条件下上升 24.8%。

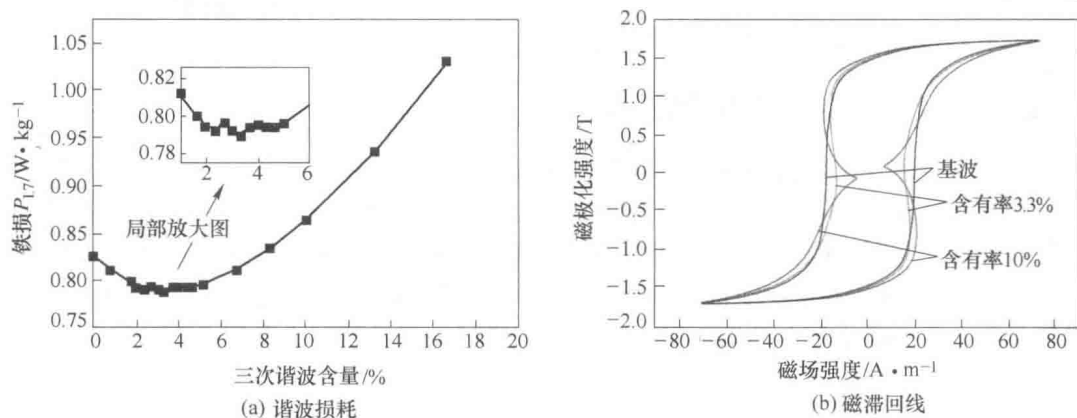


图 2 基波中叠加三次谐波对取向硅钢铁损的影响

Fig. 2 Influence of third harmonic added in fundamental wave on core loss of GO steel

图 3 为基波中叠加不同含量五次谐波后 27QH085 牌号取向硅钢的铁损变化。可见, 随着五次谐波含量的提高, 铁损同样先下降后上升, 总体上呈开口向上的抛物线分布。当五次谐波含有率为 0.8% 时, 铁损 $P_{1.7}$ 达最小值 0.806 W/kg, 相比正弦波形磁场激励时下降 2.4%; 含有率超过 2% 后, 铁损显著上升, 当含有率为 5% 时, 铁损较正常工况上升 33.5%。

图 4 给出 27QH085 牌号取向硅钢的铁损随 7 次、9 次、11 次谐波含量的变化曲线。整体上, 铁损随着各奇数次谐波含量的提高均呈开口向上的抛物线分布, 7 次、9 次、11 次谐波损耗最低值对应的谐波含有率依次为 0.43%、0.17%、0.09%, 且损耗最低值随着谐波次数的增加而增大。此外, 相同谐波含量情况下, 谐波次数越高, 损耗上升幅度明显越大。

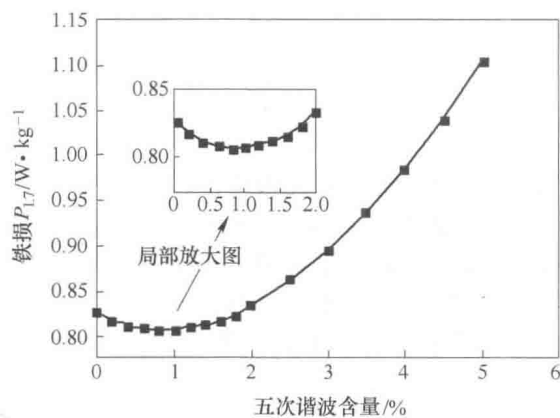


图 3 基波中叠加五次谐波对取向硅钢铁损的影响

Fig. 3 Influence of fifth harmonic added in fundamental wave on core loss of GO steel

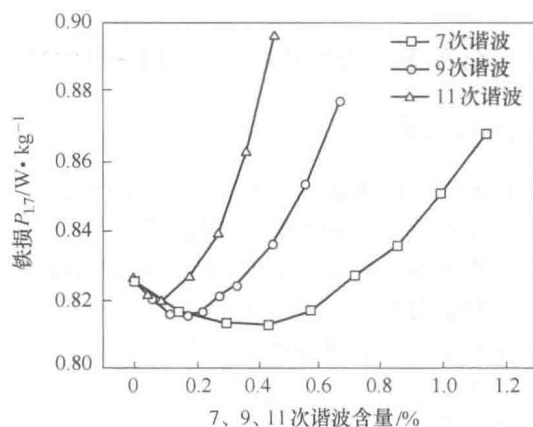


图 4 7 次、9 次、11 次谐波对取向硅钢铁损的影响

Fig. 4 Influence of 7th, 9th and 11th harmonics on core loss of GO steel

表 1 为各主要奇次谐波条件下 27QH085 牌号取向硅钢铁损最小值及对应的谐波含量。由表可见, 随着各奇次谐波含量的上升, 铁损均存在最小值, 最小值相对正常工况时下降了 0.7%~4.4%, 且最小值随着谐波次数的增加而减小。此外, 采用最小二乘法对上述 5 条损耗曲线进行拟合, 得到谐波损耗从最低值上升至正常工况水平 (0.826 W/kg) 时对应的谐波含量, 零增长率位置处对应 3 次、5 次、7 次、9 次、11 次谐波含量

依次为 7.6%、1.9%、0.68%、0.34%、0.17%，即各奇次谐波电压含量在该限值以下时对取向硅钢的铁损无不利影响，反而使材料损耗降低。

表 1 27QH085 牌号取向硅钢在奇次谐波条件下损耗最小值及对应的谐波含量

Table 1 Minimum loss and corresponding harmonic content of 27QH085 GO steel under odd harmonics

谐波次数	基波	3 次	5 次	7 次	9 次	11 次
铁损最小值 $P_{\min}/W \cdot kg^{-1}$	0.826	0.790	0.806	0.813	0.815	0.820
谐波损耗变化率	0	-4.4%	-2.4%	-1.6%	-1.3%	-0.7%
$P_{\min}$ 对应谐波含量	0	3.3%	0.8%	0.4%	0.16%	0.09%
零增长率对应谐波含量	0	7.6%	1.9%	0.68%	0.34%	0.17%

4.3 偶次谐波损耗测试结果

图 5 为基波中叠加 2 次、4 次偶数次谐波后 27QH085 牌号取向硅钢的铁损变化曲线。由图可知，随着偶次谐波含量的增加，取向硅钢的铁损呈单调上升趋势，且 4 次谐波损耗较 2 次谐波损耗增长幅度更大，当含有率为 5% 时，4 次谐波损耗 $P_{1.7}$ 为 0.987W/kg，较正常工况上升 19.5%，此时 2 次谐波损耗仅上升 1.8%。此外，2 次谐波含量为 25% 时，谐波损耗 $P_{1.7}$ 为 1.053W/kg，较正常正弦波形磁场激励时上升 27.5%。

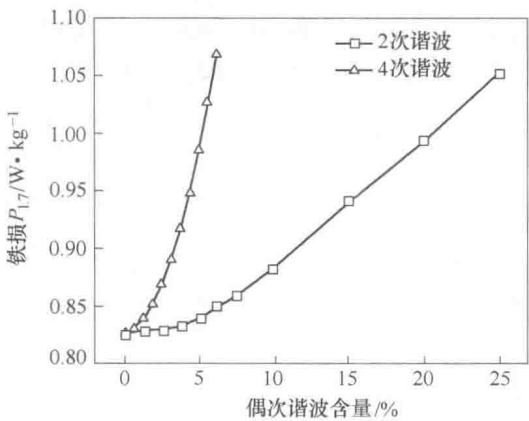


图 5 基波中叠加 2 次及 4 次谐波对取向硅钢铁损的影响

Fig. 5 Influence of second and fourth harmonics added in fundamental wave on core loss of GO steel

5 直流偏磁条件下 27QH085 取向硅钢的损耗及磁致伸缩特性

5.1 试验工况设计

变压器可耐受的直流偏磁电流与变压器结构、铁心结构、工作磁密、震动幅度和噪声水平、波形畸变可接受程度等多种因素有关，目前国内外有关变压器绕组中允许通过的直流量没有形成定论，工程上主要依靠相关经验或规定执行。例如，我国第一条 HVDC 输电线路葛上线工程中采用的标准是小于励磁电流的 1.5 倍^[7]；DL/T 605—2012《高压直流接地极技术导则》规定三相三柱变压器为额定电流的 0.7%，单相变压器为额定电流的 0.3%^[15]；龙政直流输电工程中 ABB 换流变每相最大可承受直流电流为 5A^[16]。

本研究中分析高电压等级变压器铁心常用 27QH085 牌号取向硅钢材料受直流偏磁影响过程中，为了使试验结果具有针对性和代表性，在进行工况设计时（正常工况基础上叠加不同大小的直流偏磁磁场），同时考虑上述标准或规定中的电流值（以 5A 为参考值）和实际监测到的侵入变压器中性点的直流电流（以 34.5A 为参考值），以受直流偏磁影响最大的单相三柱变压器（参数见表 2）为例进行计算，得到等效作用在取向硅钢材料上的偏置磁场强度。产生的偏置磁场 H_{dc} 计算公式为：

$$H_{dc} = \frac{N \cdot I_{dc}}{l} \quad (4)$$

式中, N 为线圈匝数; I_{dc} 为直流电流; l 为磁路长度。

计算得到 5A 和 34.5A 对应的偏置磁场分别为 17.4A/m 和 120A/m。因此, 针对 27QH085 牌号取向硅钢材料进行试验工况设计时, 施加的偏置磁场 H_{dc} 覆盖 5~120A/m, 磁通密度最大值 B_{max} 取 1.7T, 针对材料施加的模拟测试工况尽可能与大型电力变压器实际运行工况保持一致。

表 2 某变压器厂生产的单相三柱式升压变压器参数

Table 2 Parameters of single-phase three-column transformer of a transformer factory

变压器参数	数 值	变压器参数	数 值
额定容量	240MV · A	结构	单相三柱式
额定电压	550/ $\sqrt{3}$ /22kV	高压/低压绕组高度	2.05m/2.08m
铁心高/直径	3.5m/1.5m	高压/低压绕组匝数	508 匝/32 匝
窗口内高/内宽	2.25m/0.6m	高压/低压侧相电流	756A/12000A

5.2 测试结果与分析

直流偏磁条件下 27QH085 牌号磁畴细化高磁感取向硅钢的损耗及磁致伸缩系数直接关系到大型变压器铁心损耗及振动噪声水平。图 6 给出 0~120A/m 直流偏置磁场强度下 27QH085 取向硅钢的铁损值, 随着偏置磁场强度 H_{dc} 的增大 (对应励磁电流中直流分量增加), 损耗明显上升, 当 $H_{dc} = 120\text{A/m}$ 时, 铁损 $P_{1.7} = 1.007\text{W/kg}$, 较正常工况时上升 21.9%。

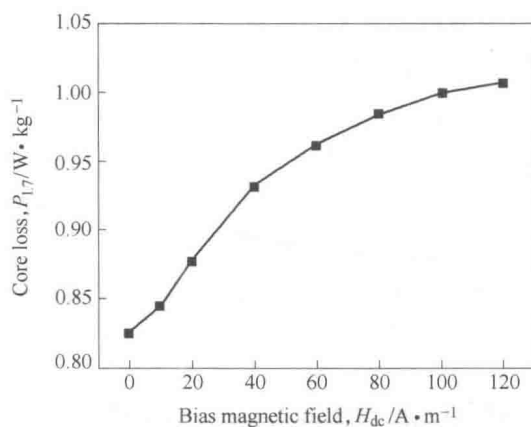


图 6 直流偏磁对 27QH085 取向硅钢损耗的影响

Fig. 6 Effect of DC bias on core loss of 27QH085 grade GO steel

图 7 给出 0~120A/m 直流偏置磁场强度下 27QH085 取向硅钢的磁致伸缩系数 $\lambda_{z-p, 1.7T}$ 及 AWV 等效噪声值。其中, $\lambda_{z-p, 1.7T}$ 表示磁极化强度从 0 增加至 1.7T 时, 取向硅钢沿磁场方向的净应变变量; AWV 为基于测得的磁致伸缩数据间接推导出的 A 计权速度级参数。磁致伸缩与 A 计权速度级之间的定量关系由 E. Reiplinger^[17] 提出, 后经 M. Ishida 等^[18] 基于三相变压器叠片铁心模型扩展至 A 计权加速度级, 现已被 IEC/TR 62581—2010 采用。由图可知, 偏置磁场大于 60A/m 后, 磁致伸缩系数 $\lambda_{z-p, 1.7T}$ 由负转正且快速增大, $H_{dc} = 100\text{A/m}$ 时, 应变变量约为正弦波形磁场激励条件下的 3 倍, 对应 AWV 噪声由正常工况的 52.9dB 增大至 66.8dB, 振动噪声增加了近 14dB。

图 8 给出了不同偏置磁场条件下 27QH085 取向硅钢材料的蝴蝶曲线 (磁致伸缩量随磁极化强度周期性变化), 可知, 随着偏置磁场强度的增加, 曲线不再呈对称分布, 应变幅度不断增大, 蝴蝶曲线在第一象限发生畸变。当直流偏置磁场超过 60A/m 后, 曲线畸变严重, 对应变压器噪声及振动水平明显上升。

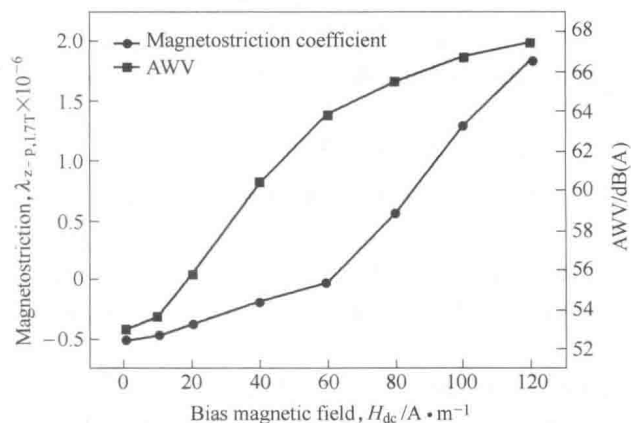


图7 不同偏置磁场强度下27QH085取向硅钢的磁致伸缩系数及AWV噪声

Fig. 7 Magnetostriction coefficient and AWV of 27QH085 GO steel under different DC bias magnetic field

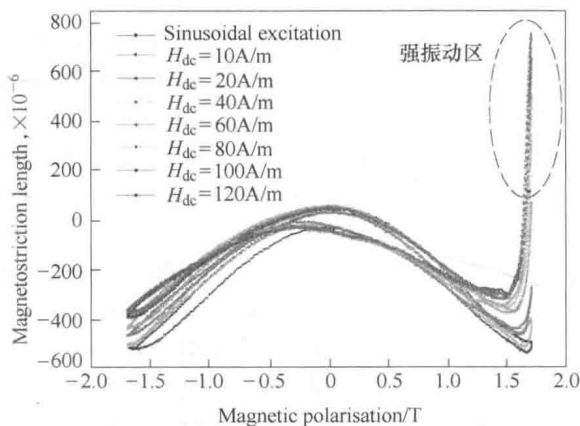


图8 不同偏置磁场条件下27QH085取向硅钢的蝴蝶曲线

Fig. 8 Butterfly loops of 27QH085 grade steel under different DC bias magnetic field

取向硅钢的损耗、磁致伸缩及噪声不仅与外部电磁场环境相关，还与材料内部组织结构，如晶粒尺寸大小及均匀性、织构组分及强度、残余应力及涂层张力等因素密切联系。因此，针对直流偏磁条件下产生的铁心饱和、温升增大、振动加剧等不利影响，不仅可从工程上常用的变压器中性点接地方式^[7]、绕组及铁心结构设计^[19,20]的角度进行削弱，还可从变压器铁心材料选型的角度考虑不同特征参量取向硅钢的直流偏磁特性降低其不利影响。

6 结论

基于设计的试验工况条件，研究了特高压交、直流变压器铁心常用材料——27QH085 牌号高磁感取向硅钢在电网谐波及直流偏磁条件下的损耗、磁致伸缩及振动噪声特性，得到如下结论：

(1) 相位差为 0° 时，随着电压波形中谐波含量及谐波次数的增加，材料损耗逐渐上升；相位差为 180° 时，随谐波含量的增加，奇次谐波损耗先下降、后上升，3次、5次、7次谐波损耗最小值较正常工况时依次降低 4.4%、2.4%、1.6%，并确定了各奇次谐波条件下铁损下降的边界条件；偶次谐波损耗随含有率的增加呈单调上升趋势。

(2) 直流偏磁条件下，27QH085 取向硅钢的铁损及磁致伸缩系数明显增大，直流偏置磁场 H_{dc} 超过 60 A/m 时，磁致伸缩系数快速增大，蝴蝶曲线畸变严重，进入强振动区域， H_{dc} 增加至 100 A/m 时，铁损较正常工况上升 21.9%，噪声增加约 14 dB。研究规律可支撑复杂工况条件下大型电力变压器铁心材料选型与结构设计。

参考文献

- [1] 陈甜甜, 胡蓉, 金祖祥, 等. 临近直流输电落点的城市电网谐波传导特性分析 [J]. 电网技术, 2015, 39(10): 3000-3004.
CHEN Tian-tian, HU Rong, JIN Zu-xiang, et al. Analysis research on harmonic transmission characteristics of urban power network adjacent to UHVDC terminal location [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 3000-3004.
- [2] GB/T 14549—1993 《电能质量公用电网谐波》.
GB/T 14549—1993 《Quality of electric energy supply & Harmonics in public supply network》.
- [3] 刘成君, 杨仁刚. 变压器谐波损耗的计算与分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 33-36.
LIU Cheng-jun, YANG Ren-gang. Calculation and analysis of transformer's harmonic loss [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 33-36.
- [4] 汪彦良, 岳智顺, 王金全, 等. 谐波附加损耗及其降损节能分析 [J]. 电气技术, 2009(2): 15-19.
WANG Yan-liang, YUE Zhi-shun, WANG Jin-quan, et al. Analyzing the addition loss of harmonic and how to reducing it for

- energy-saving [J]. Electrical Engineering, 2009(2): 15-19.
- [5] 张占龙, 王科, 李德文, 等. 变压器谐波损耗计算及影响因素分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 68-72.
ZHANG Zhan-long, WANG Ke, LI De-wen, et al. Transformer harmonic loss calculation and influence factor analysis [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 68-72.
- [6] 蒯狄正, 万达, 邹云, 等. 直流偏磁对变压器的影响 [J]. 中国电力, 2004, 37(8): 41-43.
KUAI Di-zheng, WAN Da, ZOU Yun, et al. Impacts of long-time DC biasing magnetism on transformers [J]. Electric Power, 2004, 37(8): 41-43.
- [7] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.
SHANG Chun. Measure to decrease the neutral current of the AC transformer in HVDC ground-return system [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 52-54.
- [8] 曾嵘, 赵杰, 尚春, 等. HVDC 地中电流对交流系统影响的抑制措施 [J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 919-925.
ZENG Rong, ZHAO Jie, SHANG Chun, et al. Measures to restrain the neutral current of the AC transformer in HVDC ground return system [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 52-54.
- [9] IEC/TR 62383—2006. Determination of magnetic loss under magnetic polarization waveforms including higher harmonic components - Measurement, modelling and calculation methods.
- [10] IEC/TR 62581—2010. Methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens.
- [11] 代志强, 权铁龙, 陆明, 等. 特高压交直流电网谐波传播特性研究 [C]. 第七届电能质量研讨会, 成都, 2014: 111-119.
DAI Zhi-qiang, QUAN Tie-long, LU Ming, et al. Study on harmonic propagation characteristics of UHV AC / DC power grid [C]. The 7th Symposium on Power Quality, Chengdu, 2014: 111-119.
- [12] 雷秋芳. 变压器与高次谐波 [J]. 变压器, 1989(4): 2-5.
LEI Qiu-fang. Transformer and higher harmonic [J]. Transformer, 1989(4): 2-5.
- [13] 李泓志, 崔翔, 刘东升, 等. 直流偏磁对三相电力变压器的影响 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.
LI Hong-zhi, CUI Xiang, LIU Dong-sheng, et al. Influence on three-phase power transformer by DC bias excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [14] 杨富尧, 程灵, 马光, 等. 复杂电磁条件下不同取向硅钢的铁损性能 [J]. 机械工程材料, 2016, 40(10): 85-88.
YANG Fu-yao, CHENG Ling, MA Guang, et al. Iron loss of different oriented silicon steels under complex electromagnetic condition [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(10): 85-88.
- [15] DL/T 605—2012《高压直流接地极技术导则》.
DL/T 605—2012《Technical guide of HVDC earth electrode system》.
- [16] 曾连生. 直流输电接地极电流对电流变压器的影响 [J]. 电力建设, 2004, 25(12): 22-24.
ZENG Lian-sheng. Influence of DC transmission ground electrode current on power transformers [J]. Electric Power Construction, 2004, 25(12): 22-24.
- [17] E. Reiplinger. Assessment of grain-oriented transformer sheets with respect to transformer noise [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1980(21): 257-261.
- [18] M. Ishida, S. Okabe, K. Sato. Analysis of noise emitted from three-phase stacked transformer model core. Kawasaki Steel Technical Report, 39 (1998): 29-35.
- [19] 朱林, 韦晨, 余洋. 单相变压器的直流偏磁励磁电流问题及其对保护的影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 158-162.
ZHU Lin, WEI Chen, YU Yang. Analysis of DC bias exciting current of the single-phase transformer and its effect on protection [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 158-162.
- [20] 赵志刚, 刘福贵, 程志光, 等. 直流偏磁条件下叠片铁心的磁性能模拟 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 14-19.
ZHAO Zhi-gang, LIU Fu-gui, CHENG Zhi-guang, et al. Magnetic property modeling of laminated core under DC-biased condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 14-19.