

基于 P21^C-M1 模型交直流混合激励下杂散损耗的研究

赵志刚, 刘佳, 郭莹, 尹赛宁, 杨凯

(省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130)

摘要: 本文针对电力变压器漏磁场引起的杂散损耗问题, 基于 TEAM PROBLEM21 基准族中的 P21^C-M1 实验模型, 考察了交直流混合激励条件下, 导磁钢板及取向电工钢叠片内的磁通分布及杂散损耗。通过计算杂散损耗的传统方法, 从交直流混合激励和交流单独激励下的负载总损耗中分别分离出磁屏蔽的杂散损耗值, 从而得到直流分量对磁屏蔽损耗的影响规律, 即直流电流分量引起了磁屏蔽杂散损耗的增加。通过精细建模仿真计算出磁屏蔽的杂散损耗, 与测量结果进行对比, 验证了本文方法的有效性与正确性。

关键词: P21^C-M1 实验模型; 磁通分布; 杂散损耗; 磁屏蔽; 传统法

DOI: 10. 12067/ATEEE1710003 **文章编号:** 1003-3076(2018)09-0010-07 **中图分类号:** TM206

1 引言

电力变压器在电力网络中有着举足轻重的地位, 因此保证变压器的安全、可靠和经济运行对整个电网有着至关重要的影响^[1,2]。随着电力系统不断升级、输电距离和输电功率的不断增大, 电力变压器向高电压、大容量方向发展, 使绕组电流产生的漏磁场也越来越强, 从而引起变压器油箱以及屏蔽等金属结构件中产生了较大的杂散损耗, 并且可能导致局部过热, 影响变压器的制造成本和运行经济性^[3,4]。此外, 交直流混合输电系统的直流输电部分引起电网电压和电流波形畸变, 产生大量的谐波, 对电网中的各类电器设备造成很大危害, 使设备的损耗、温升、振动以及噪声显著增加, 并影响电网的安全、可靠和经济运行^[4]。

在不同的激励条件下, 不同的电工材料及其构件会表现出不同的电磁性能^[5]。因此, 研究交直流混合激励条件下变压器磁屏蔽及其构件中磁场及损耗分布, 对电网的安全稳定运行、产品设计和结构优化具有重要的理论价值, 可在变压器的设计过程中采取有效措施降低杂散损耗。

国内外文献对交直流混合激励所产生的问题进行了许多研究和探讨。文献[6]研究了变压器瞬态场

路耦合模型在直流偏磁时交流磁场和电路等效参数的变化, 讨论不同直流注入方式下变压器的直流偏磁效果。文献[7]在计算直流偏磁环境模型的损耗时, 采用标准条件下测得的交流磁化曲线, 这一简化处理直接影响计算结果的精度。因此, 文献[8]采用爱泼斯坦方圈测量了取向电工钢材料在不同激励下的磁滞曲线并详细阐述了磁化曲线的提取方法, 指出交直流混合激励下可以用直流磁化曲线描述材料的磁性能, 为提高直流偏磁下变压器损耗计算精度提供了参考依据。文献[9-11]分别提出在变压器设备外部采取措施抑制直流电流, 但其方法存在可靠性低、造价高且未保证中性点良好接地等问题。

总之, 变压器的直流偏磁现象非常复杂, 而这一现象会对屏蔽及构件产生什么样的影响, 国内外学者目前还没有一个统一的认识^[12]。本文考虑工程的实用性, 采用实验测量与仿真计算相结合的方法, 对变压器磁屏蔽及其构件在直流偏磁激励条件下的磁性能进行了研究, 并通过对实验和计算结果的对比验证了该方法的有效性。

2 实验模型与原理

2.1 模型及线路

P21^C-M1 模型由两个激励线圈、磁屏蔽和导磁

收稿日期: 2017-10-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(51107026;51237005;51677052)
作者简介: 赵志刚(1981-), 男, 天津籍, 副教授, 博士, 研究方向为工程电磁场与磁技术;
刘佳(1994-), 女, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为工程电磁场与磁技术。

钢板构成。激励线圈由两个规格相同、匝数为 300 匝的铜线反向绕制而成^[13]。模型尺寸如图 1 所示。

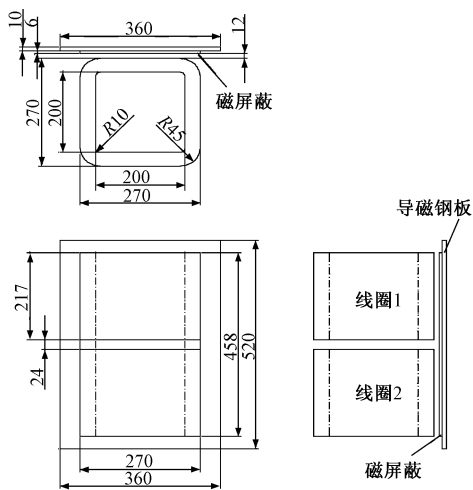


图 1 P21^C-M1 模型尺寸图

Fig. 1 Dimension of P21^C-M1 model

交直流混合激励有串联激励和并联激励两种连接方式。串联激励方式如图 2 所示,其实验线路相对简单,但会有较大的交流电流流经直流电源,而常规的直流电源几乎不能承受电流值很大的交流电流,故电源极易被烧毁。

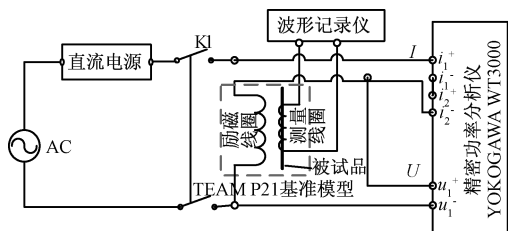


图 2 直流电源与交流电源串联激励线路

Fig. 2 DC and AC power series excitation circuit

并联激励方式如图 3 所示,其实验线路相对复杂,但通过接入合适的电抗器控制流经直流电源的交流电流值在合理的范围内,就能保证实验顺利进行。

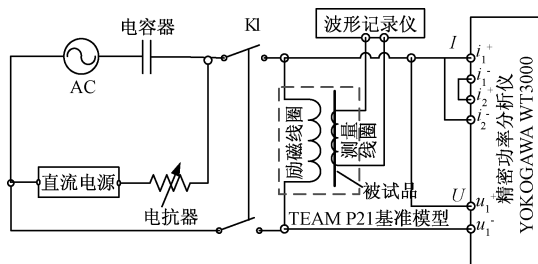


图 3 直流电源与交流电源并联激励线路

Fig. 3 DC and AC power parallel excitation circuit

2.2 杂散损耗的测量原理

基于 P21^C-M1 实验模型,可通过本节介绍的方法确定交直流混合激励条件下磁屏蔽的杂散损耗。

2.2.1 测量交直流混合激励下的负载损耗 P_{Load-1}

$$P_{Load-1} = P_{Cu(ac+dc)} + P_{Stray-1} \quad (1)$$

式中, $P_{Stray-1}$ 为磁屏蔽的杂散损耗,由偏置电流引起; $P_{Cu(ac+dc)}$ 为激励线圈的铜损,包括激励线圈的涡流损耗和交直流电流在激励线圈中引起的电阻损耗,如式(2)所示:

$$P_{Cu(ac+dc)} = \begin{cases} P_{Cu(ac)} & \text{涡流和电阻损耗} \\ P_{Cu(dc)} & \text{电阻损耗} \end{cases} \quad (2)$$

模型负载损耗 P_{Load-1} 通过 P21^C-M1 模型的测量得到,偏置电流激励下的 $P_{Cu(ac+dc)}$ 可通过求解瞬态场问题进行精确计算。因此,杂散损耗 $P_{Stray-1}$ 可以通过式(3)确定:

$$P_{Stray-1} = P_{Load-1} - P_{Cu(ac+dc)} \quad (3)$$

2.2.2 测量交流单独激励下的负载损耗 P_{Load-2}

$$P_{Load-2} = P_{Cu(ac)} + P_{Stray-2} \quad (4)$$

式中, $P_{Stray-2}$ 为磁屏蔽中的杂散损耗,由交流电流引起; $P_{Cu(ac)}$ 为交流电流在激励线圈中感生的涡流损耗和线圈的电阻损耗。

模型负载损耗 P_{Load-2} 通过 P21^C-M1 模型测量得到,交流电流激励下的 $P_{Cu(ac)}$ 可通过求解瞬态场问题进行精确计算。因此,杂散损耗 $P_{Stray-2}$ 可以通过式(5)确定:

$$P_{Stray-2} = P_{Load-2} - P_{Cu(ac)} \quad (5)$$

综上,交流和直流混合激励条件下,直流分量对磁屏蔽杂散损耗的影响定义为 ΔP ,如式(6)所示:

$$\Delta P = P_{Stray-1} - P_{Stray-2} \quad (6)$$

2.3 模型实验

基于 P21^C-M1 实验模型对不同偏置电流激励条件下的空载和负载损耗及磁密进行测量,使用精密功率分析仪(WT3000)分别测量空载、负载实验模型的励磁电流、感应电压和损耗等参数,同时使用波形记录仪(DL850)记录磁屏蔽构件中交链磁通的感应电压,具体实验操作如下:

(1)按图 3 连接线路,并检查无误。

(2)空载实验:移去被试构件并闭合 K1,给定 I_{ac} 且 $I_{dc} = 0$,记录此时的损耗并测量空气中指定位置的法向漏磁通密度;保持 I_{ac} 不变给定 I_{dc} ,记录此时的损耗并测量空气中指定位置的法向漏磁通密度。

(3)负载实验:将被试构件置于与线圈上表面距离为 12mm 的位置,闭合 K1,给定 I_{ac} 且 $I_{dc} = 0$,记

录损耗和测量线圈的瞬态电压,并测量屏蔽指定位置的法向漏磁通密度;保持 I_{ac} 不变,给定 I_{dc} 记录损耗和测量线圈的瞬态电压,并测量屏蔽指定位置的法向漏磁通密度。

(4)将记录的测量线圈的瞬态电压数据用自编的专用程序进行处理,得到构件表面指定位置的平均磁通密度的最大值。

2.4 空载损耗

P21^C-M1 实验模型空载损耗(包括线圈的电阻损耗和涡流损耗)的部分测量结果如表 1 所示。其中两线圈为同向激励。

表 1 空载实验损耗测量结果

Tab. 1 Measurement results of no-load test loss

激励电流/A		空载损耗/W
AC	DC	
15	0	141.35
	10	193.15
	15	256.08
	0	248.65
20	10	301.70
	15	366.43

2.5 负载损耗

P21^C-M1 实验模型在不同激励电流下,负载总损耗(包括被试构件的杂散损耗、线圈的电阻损耗和涡流损耗)的部分测量结果如表 2 所示。其中两线圈为同向激励。

表 2 负载实验损耗测量结果

Tab. 2 Measurement result of load test loss

激励电流/A		负载损耗/W
AC	DC	
15	0	175.25
	10	227.30
	15	291.57
	0	284.70
20	10	336.20
	15	400.60

3 仿真分析

3.1 建模及磁各向异性处理

基于 P21^C-M1 模型对负载工况的磁场和损耗进行了三维瞬态场求解。磁屏蔽一般有立式和平式两种结构,P21^C-M1 模型采用的是立式磁屏蔽结构^[10,14]。由于大部分漏磁通沿平行于硅钢片平面方向进入磁屏蔽,仅有极少量漏磁通沿垂直于硅钢片平面方向进入,因此对其进行仿真时,可以忽略涡

流效应的影响^[14],将磁屏蔽结构建为非叠片的实体。考虑模型的对称性,在 MagNet 软件中建立 1/4 的三维仿真建模,如图 4 所示。

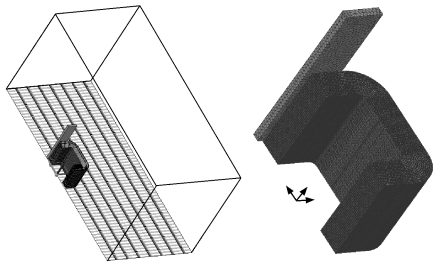


图 4 1/4 三维仿真模型及网格剖分图

Fig. 4 1/4 model of three-dimensional simulation and grid profile map

另外,由于磁屏蔽结构中硅钢平面内的导磁性能(轧制方向与垂直轧制方向)与叠片方向的导磁性能有较大的差异,因此需要采用磁各向异性对磁导率进行处理^[15,16]。

硅钢片叠积方向上均匀化处理如图 5 所示。图 5 中, σ_{eq} 、 μ_{eq} 分别为等效电导率和等效磁导率; σ_0 、 μ_0 分别为真空中的电导率和磁导率; σ_{iron} 、 μ_{iron} 分别为硅钢片的电导率和磁导率; W 为总叠片厚度; L 为叠片长度。另外, C_f 为叠片系数^[16,17]。

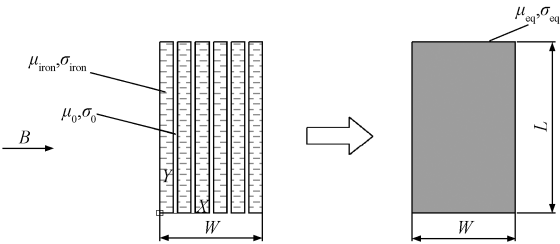


图 5 叠片方向的磁导率均匀化处理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of permeability parallel to stack direction in uniform fashion

在硅钢片叠积方向上,叠片和气隙磁阻串联,根据磁阻串联定理有:

$$R_{eq} = R_{iron} + R_{air} \tag{7}$$

$$\frac{W}{\mu_{eq}L} = \frac{C_f W}{\mu_{iron}L} + \frac{(1 - C_f) W}{\mu_0 L} \tag{8}$$

由式(8)得:

$$\mu_{eq} = \frac{1}{\frac{C_f}{\mu_{iron}} + \frac{1 - C_f}{\mu_0}} \tag{9}$$

硅钢片磁导率与真空磁导率关系为 $\mu_{iron} = \mu_r \mu_0$,则均匀化处理的等效相对磁导率为:

$$\mu_{r_eq} = \frac{\mu_{eq}}{\mu_0} = \frac{1}{\frac{C_f}{\mu_{iron}} + \frac{1 - C_f}{\mu_0}} = \frac{\mu_r}{C_f + (1 - C_f)\mu_r}$$

(10)

当 $B = 1.7\text{T}$ 时,硅钢片的相对磁导率 $\mu_r \approx 20000$,则

$$\begin{aligned}\mu_{r_eq} &= \frac{\mu_r}{C_f + (1 - C_f)\mu_r} \\ &= \frac{20000}{0.98 + (1 - 0.98) \times 20000} = 49.878\end{aligned}$$

(11)

式中, $\mu_r \gg C_f$ 。式(11)可以简化为:

$$\mu_{r_eq} = \frac{1}{1 - C_f}$$

(12)

垂直于硅钢片叠积方向上均匀化处理如图 6 所示。在垂直于硅钢片叠积方向上,叠片和气隙磁阻并联,根据磁阻并联定理有:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{iron}} + \frac{1}{R_{air}}$$

(13)

$$\frac{\mu_{eq} W}{L} = \frac{\mu_{iron} C_f W}{L} + \frac{\mu_0 (1 - C_f) W}{L}$$

(14)

由式(14)得:

$$\mu_{eq} = \mu_{iron} C_f + \mu_0 (1 - C_f)$$

(15)

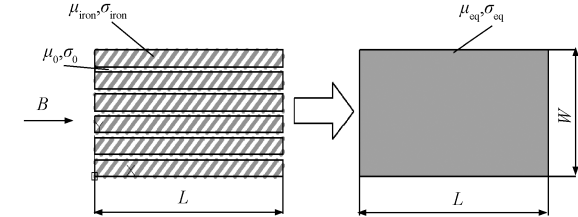


图 6 垂直于叠片方向的磁导率均匀化处理示意图
Fig.6 Schematic diagram of permeability perpendicular to stack direction in uniform fashion

硅钢片磁导率与真空磁导率关系为 $\mu_{iron} = \mu_r \mu_0$,则均匀化的等效相对磁导率为:

$$\mu_{r_eq} = \frac{\mu_{eq}}{\mu_0} = \mu_r C_f + (1 - C_f)$$

(16)

式中, $\mu_r \gg (1 - C_f)$ 。式(16)可以简化为:

$$\mu_{r_eq} = \mu_r C_f$$

(17)

综上,以 x 轴方向作为硅钢片的叠积方向,硅钢片的磁导率可按照式(18)进行处理:

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_0 / (1 - C_f) & & \\ & C_f \mu_y & \\ & & C_f \mu_z \end{bmatrix}$$

(18)

式中, μ_y 、 μ_z 分别为 y 向(垂直轧制方向)和 z 向(顺

轧制方向)的磁导率;磁导率 μ 由相应的直流磁化曲线计算得到。

3.2 磁通密度

采用瞬态法对 P21^C-M1 模型负载工况的磁场和损耗分布进行计算,时间步长设置为 1ms,仿真两个周期 40ms,图 7 为 $t = 5\text{ms}$ 时刻磁屏蔽的上下表面磁通密度 B 有效值的分布($I_{AC} = 5\text{A}$, $I_{DC} = 10\text{A}$)。

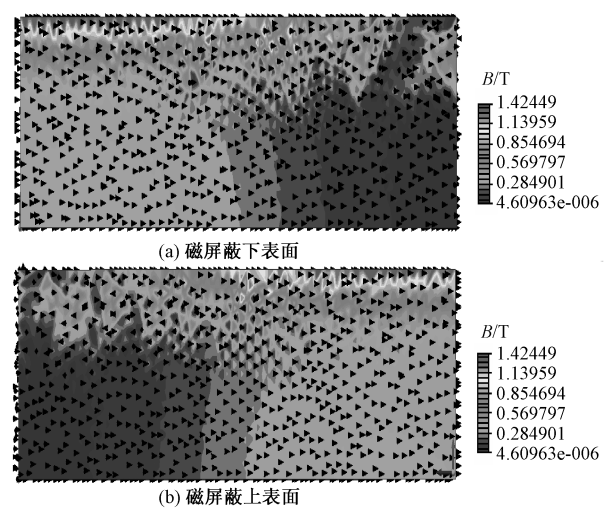


图 7 磁屏蔽表面磁通密度有效值分布($t = 5\text{ms}$)
Fig.7 Distribution of effective value of magnetic flux density on magnetic shield surfaces ($t = 5\text{ms}$)

在 $I_{AC} = 5\text{A}$ 、 $I_{DC} = 10\text{A}$ 激励条件下,磁屏蔽各指定位置(见图 8)的磁通密度波形计算结果如图 9 所示。可知各位置的磁密波形均呈现正弦规律且有明显偏置。

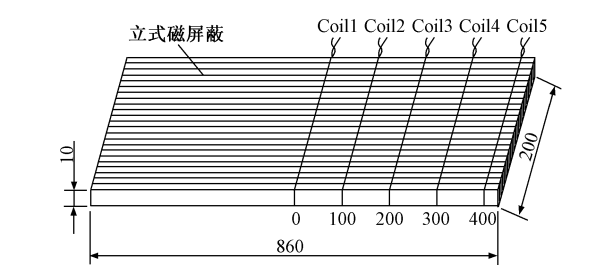


图 8 立式磁屏蔽磁通密度测量线圈布置图
Fig.8 Coil layout diagram of magnetic flux density in vertical magnetic shield

表 3 为磁屏蔽表面指定位置平均磁密最大值测量与计算结果对比。图 10 为磁屏蔽表面指定位置的法向磁密计算与测量结果的比较。可知测量和计算结果具有较好的一致性,验证了 P21^C-M1 模型磁场建模和仿真分析方法的正确性。

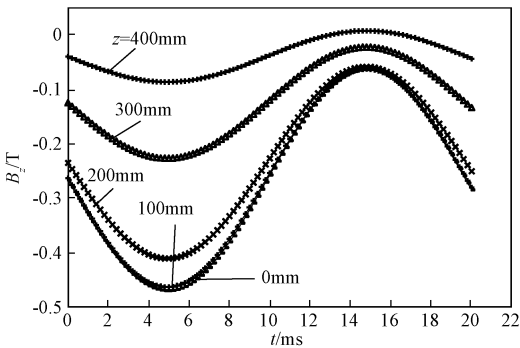


图 9 磁屏蔽不同位置平均磁通密度波形
Fig. 9 Average magnetic flux density waveform in designated spot of magnetic shield

表 3 磁屏蔽平均磁密最大值测量与计算结果对比

Tab. 3 Measurement and calculation results of average magnetic flux density maximum in magnetic shield

激励方式	z/mm	测量 B_m/T	计算 B_m/T
$I_{AC} = 5A$ $I_{DC} = 10A$	0	0. 1816	0. 1938
	100	0. 1895	0. 1950
	200	0. 1611	0. 1660
	300	0. 0816	0. 0920
	400	0. 0222	0. 0351

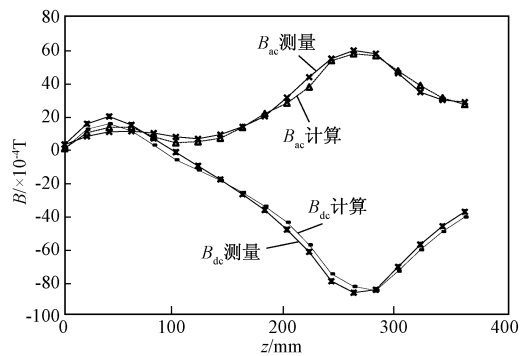


图 10 磁屏蔽表面法向磁通密度测量与计算结果
Fig. 10 Measurement and calculation results of flux density on center line of magnetic shield surface

3.3 杂散损耗

在交直流混合激励和交流单独激励下(取交流电流 20A)分别得到了测量和计算的数据,处理后的结果如表 4、表 5 所示。

表 4 交直流混合激励的损耗数据结果

Tab. 4 Loss data results under AC and DC hybrid excitation

激励电流/A		P_{Load-1} /W	$P_{Cu(ac+dc)}$ /W	$P_{Stray-1}$ /W
AC	DC			
20	10	308. 40	307. 00	1. 40
	15	375. 60	372. 91	2. 69

表 5 交流单独激励的损耗数据结果

Tab. 5 Loss data results under AC independent excitation

激励电流/A		P_{Load-2} /W	$P_{Cu(ac)}$ /W	$P_{Stray-2}$ /W
AC	DC			
20	0	255. 90	255. 47	0. 43

按照式(6)计算直流电流分量对磁屏蔽中杂散损耗的影响,结果如表 6 所示。

表 6 直流分量对磁屏蔽杂散损耗的影响

Tab. 6 Impact of DC component on stray loss of magnetic shield

激励电流/A		$P_{Stray-1}$ /W	$P_{Stray-2}$ /W	ΔP /W
AC	DC			
20	10	1. 40	0. 43	0. 97
	15	2. 69		2. 26

综上可知,在交流叠加直流的混合激励条件下,直流电流分量使得磁屏蔽的磁通密度增大,故其磁滞损耗增加,引起了磁屏蔽杂散损耗的增加(由于磁屏蔽的立式结构,涡流损耗几乎可以忽略)。

4 结论

本文基于 P21^c-M1 模型,对激励线圈、导磁钢板和硅钢片叠成的磁屏蔽进行精确建模,并对该模型进行仿真和分析,应用传统法计算分离出磁屏蔽中的杂散损耗。由实验结果与测量结果的对比,可以得出以下结论:

(1)本文通过空载、负载损耗实验,得到了不同激励条件对 P21^c-M1 模型激励线圈损耗的影响。在交流电流一定的情况下,直流电流分量增大,线圈损耗也增大。

(2)采用精细化建模的方法对模型进行仿真分析,在交直流混合激励条件下,磁屏蔽的杂散损耗的计算和测量结果具有很好的一致性,验证了该方法的有效性。

(3)本文采用实验测量与仿真计算相结合的方法,得到了交直流混合激励和交流单独激励下磁屏蔽中的杂散损耗,给出了直流电流分量对磁屏蔽中杂散损耗的影响规律,即直流电流分量引起了磁屏蔽杂散损耗的增加。

参考文献 (References):

[1] 林湘宁, 杨国稳, 翁汉琨, 等 (Lin Xiangning, Yang Guowen, Weng Hanli, et al.). 直流偏磁下变压器无功消耗增多对系统电压的影响分析 (Analysis of system voltage impact by transformer reactive power con-

- sumption increased under DC bias) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (1): 272-278.
- [2] 陈志伟, 白保东, 陈德志, 等 (Chen Zhiwei, Bai Baodong, Chen Dezhi, et al.). 电力变压器直流偏磁现象形成机理及一种抑制措施的研究 (Research on the formation mechanism and suppression method of transformer DC bias) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (14): 208-214.
- [3] 朱林, 韦晨, 余洋 (Zhu Lin, Wei Chen, Yu Yang). 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 (Analysis of DC bias exciting current of the single-phase transformer and its effect on protection) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2010, 38 (24): 158-162.
- [4] 李龙女, 李岩, 井永腾, 等 (Li Longnv, Li Yan, Jing Yongteng, et al.). 电力变压器漏磁场与杂散损耗计算的研究 (Research of leakage magnetic field and stray loss calculation in power transformer) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (S2): 122-127.
- [5] 刘洋, 景崇友, 李琳, 等 (Liu Yang, Jing Chongyou, Li Lin, et al.). 基于平波电抗器模型的交直流混合激励条件下硅钢叠片磁性能的模拟与验证 (Magnetic properties modeling of silicon steel laminations under AC-DC hybrid excitation and validation based on smoothing reactor model) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 48-52.
- [6] 张艳丽, 彭志华, 谢德馨, 等 (Zhang Yanli, Peng Zhihua, Xie Dexin, et al.). 直流偏磁下不同磁化曲线对变压器铁心损耗仿真的影响 (Effect of different magnetization curves on simulation for transformer core loss under DC bias) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (5): 43-48.
- [7] 潘超, 王泽忠, 李海龙, 等 (Pan Chao, Wang Zezhong, Li Hailong, et al.). 基于瞬态场路耦合模型的变压器直流偏磁计算 (DC-bias calculation for single phase transformers based on transient field circuit coupled model) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (5): 174-181.
- [8] 赵志刚, 刘福贵, 程志光, 等 (Zhao Zhigang, Liu Fugui, Cheng Zhiguang, et al.). HVDC 中直流偏磁电力变压器叠片铁心损耗及磁通分布 (Loss and flux distribution of power transformers laminated core under DC-biased magnetization condition in HVDC) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2010, 36 (9): 2346-2351.
- [9] Albertson V D, Bozoki B, Feero W E, et al. Geomagnetic disturbance effects on power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3): 1206-1216.
- [10] 王升 (Wang Sheng). HVDC 地电流对变压器的影响及其抑制措施 (Influence Of HVDC ground electrode current on grounding transformer and its restraining measures) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2010.
- [11] 于奎营 (Yu Kuiying). 直流偏磁对变压器差动保护的影响及抑制 (The effect of DC magnetic bias to transformer differential protection and its suppression) [D]. 吉林: 东北电力大学 (Jilin: Northeast Dianli University), 2012.
- [12] 董霞 (Dong Xia). 变压器直流偏磁研究 (Study on the transformers under DC bias) [D]. 济南: 山东大学 (Jinan: Shandong University), 2013.
- [13] 赵志刚, 史文军, 王振, 等 (Zhao Zhigang, Shi Wenjun, Wang Zhen, et al.). 不同频率激励下变压器铜屏蔽中涡流损耗的研究 (Research of eddy-current loss of copper shielding in transformer under different frequencies) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 58-64.
- [14] 王晓燕, 程志光, 李琳 (Wang Xiaoyan, Cheng Zhiguang, Li Lin). 改进的基于 TEAM 21 模型杂散损耗测量和验证方法 (Measurement and validation of stray loss base on improved TEAM Problem 21 model) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (6): 21-27.
- [15] 李悦宁 (Li Yuening). 变压器硅钢片磁性能与磁屏蔽模型的铁损研究 (The research on the magnetic properties of silicon steel sheet and the iron losses of magnetic shielding model of transformer) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2014.
- [16] 石建 (Shi Jian). 电力变压器中不同叠积型式磁屏蔽性能研究 (Research on performances of different laminated magnetic shields in power transformers) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2013.
- [17] 程志光, 刘涛, 范亚娜, 等 (Cheng Zhiguang, Liu Tao, Fan Yana, et al.). 基于 TEAM P21 三维杂散场问题建模仿真与验证 (TEAM P21-based validation of 3-D stray-field modeling and simulation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (9): 194-203.

Research of stray loss problem based on P21^C-M1 model under AC-DC hybrid excitation

ZHAO Zhi-gang, LIU Jia, GUO Ying, YIN Sai-ning, YANG Kai
(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The purpose of this paper is to study stray loss caused by leakage magnetic field of power transformers. Magnetic flux distribution and stray loss of magnetic plate and oriented electrical steel lamination under AC-DC hybrid excitation are studied based on the experimental model of P21^C-M1 in TEAM Problem 21 benchmark family. By means of the traditional method of calculating the stray loss, the stray loss of magnetic shielding value is separated from the total load loss under AC-DC hybrid excitation and AC excitation in separate, resulting in the effect of DC component on the stray loss of magnetic shielding. The result of comparison of experimental results with the simulation results that are calculated by fine modeling and simulation shows the correctness and efficiency of this method.

Key words: experimental model of P21^C-M1; magnetic flux distribution; stray loss; magnetic shielding; traditional method