

基于损耗统计理论的动态 J-A 磁滞模型

赵 越¹, 李 琳¹, 刘 任¹, 韩 钰², 刘 洋²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206;
2. 全球能源互联网研究院, 北京 102211)

摘要: 针对传统基于损耗分离经验法的动态 J-A 模型缺乏物理基础、精度较低的问题,通过借鉴磁场强度分离的理念,将损耗统计理论引入原始静态 J-A 模型,提出了一种基于损耗统计理论的新型动态 J-A 模型。其中,静态磁场强度分量利用静态 J-A 模型求解,而涡流及剩余磁场强度分量则根据损耗统计理论推导而得。通过将计算结果与测量结果对比,表明本文所提动态 J-A 模型相比于传统基于损耗分离经验法的动态 J-A 模型精度较高,模型参数物理意义更为明确。

关键词: J-A 磁滞模型; 磁场强度分离; 损耗统计理论

DOI: 10.12067/ATEEE1806077 **文章编号:** 1003-3076(2019)05-0090-07 **中图分类号:** TM271

1 引言

电力变压器、电抗器等电磁装置的铁心通常由硅钢片、非晶合金或铁氧体等铁磁材料制成,磁性材料磁化与损耗特性的精确模拟对于电磁装置的优化设计具有重要作用^[1]。铁磁材料的非线性磁滞特性与它的损耗、饱和磁密等密切相关。同时由于磁性元件通常工作于比较高的频率,因而准确模拟铁磁材料的动态磁滞特性对磁性元件的优化设计尤为重要^[2,3]。目前,模拟铁磁材料磁滞特性的磁滞模型主要有 Preisach 模型和 J-A (Jiles-Atherton) 模型。其中,Preisach 模型是基于宏观磁化理论的纯数学模型,而 J-A 模型则属于将磁性材料的微观结构参数与其宏观表征相结合的物理模型,更符合铁磁材料的本质^[4]。

传统动态 J-A 磁滞模型以损耗分离经验法 (Empirical Method of Loss Separation, EMLS) 为基础,具有使用方便、计算效率高的优点^[5]。D. C. Jiles 考虑到涡流损耗对总损耗的影响,对原始 J-A 模型进行了扩展^[6]。R. Du 等人采用损耗分离经验法对高频条件下的原始 J-A 模型进行了修正,并估算其铁心损耗^[7]。K. Chwastek 等人修正了正弦激励下的动态逆 J-A 模型,从而模拟了铁磁材料的磁

滞回线^[8]。M. Hamimid 等人在动态逆 J-A 模型中引入混合磁场,对动态磁滞回线做出更为准确合理的预测^[9]。A. P. S. Baghel 等人解释了 J-A 模型的能量平衡原理,同时针对动态损耗,提出了一种基于磁场分离法的动态 J-A 模型^[10]。在计算含小磁滞回环及直流偏磁下的铁心损耗时,基于损耗分离经验法的动态 J-A 模型精度较低^[11]。综上所述,基于传统经验公式法的动态 J-A 模型物理意义不明确,计算动态铁损时准确性较差^[12],因此需要对经验的动态 J-A 模型进行改进。

为此,本文借鉴磁场强度分离法的基本思想^[10],将损耗统计理论 (Statistical Theory of Losses, STL)^[13]引入原始静态 J-A 模型,以铁磁材料的能量平衡原理为基础,推导了涡流损耗与剩余损耗对应的磁场强度分量,从而提出了一种新的动态 J-A 磁滞模型。

2 J-A 磁滞模型

2.1 静态 J-A 磁滞模型

J-A 磁滞模型是一种通过描述钉扎效应下的磁畴壁移动规律而构建的磁滞模型,能够描述磁感应强度和磁场强度的非线性关系,在描述铁磁材料的磁滞特性等方面应用广泛^[14,15]。

收稿日期: 2018-06-29
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51677064)、国家重点研发计划项目 (2017YFB0903904)
作者简介: 赵 越 (1993-), 女, 安徽籍, 硕士研究生, 主要研究方向为新型磁性材料磁化机理及磁滞建模;
李 琳 (1962-), 男, 河北籍, 教授, 博导, 主要研究方向为电磁场理论及应用与先进输变电技术。

在铁磁材料中,磁感应强度 B 、磁场强度 H 和磁化强度 M 的关系为:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

式中, μ_0 为真空磁导率。

J-A 磁滞模型将实际磁化强度 M 分解为可逆磁化强度 M_{rev} 与不可逆磁化强度 M_{irr} , 即

$$M = M_{\text{rev}} + M_{\text{irr}} \quad (2)$$

磁畴壁的弹性形变导致了可逆磁化分量 M_{rev} 的产生,磁畴牵制是不可逆磁化分量 M_{irr} 产生的主要原因^[7]。

不可逆磁化强度 M_{irr} 是磁滞存在的主要原因, 可表示为^[8]:

$$\frac{dM_{\text{irr}}}{dH_e} = \frac{\delta_M(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}})}{k\delta} \quad (3)$$

式中, H_e 为有效磁场强度; M_{an} 为无磁滞磁化强度, 用 Langevin 函数描述; δ_M 为防止出现非物理解而引出的系数; δ 为方向系数, 当 $dH/dt > 0$ 时, $\delta = 1$; 当 $dH/dt < 0$ 时, $\delta = -1$ ^[16]。

无磁滞磁化强度 M_{an} 与有效磁场强度 H_e 之间的关系用 Langevin 函数表示为:

$$M_{\text{an}} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right] \quad (4)$$

式中, M_s 为饱和磁化强度; a 为无磁滞磁化曲线形状参数。

有效磁场强度 H_e 可表示为:

$$H_e = H + \alpha M \quad (5)$$

式中, α 为磁畴内部耦合平均场参数。

不可逆磁化强度 M_{irr} 与无磁滞磁化强度 M_{an} 之间的关系可表示为:

$$M_{\text{irr}} = M_{\text{an}} - k\delta \frac{dM_{\text{irr}}}{dH_e} \quad (6)$$

式中, k 为磁畴间的牵制系数。

静态 J-A 磁滞模型的能量守恒方程为^[17]:

$$\mu_0 \delta_M \int M_{\text{an}} dH_e = \mu_0 \delta_M \int M dH_e + \mu_0 k \delta \int \frac{dM_{\text{irr}}}{dH_e} dH_e \quad (7)$$

由式(1)~式(7), 推导 J-A 磁滞模型为:

$$\frac{dM}{dB} = \frac{\delta_M(M - M_{\text{an}}) - k\delta c \frac{dM_{\text{an}}}{dH_e}}{\mu_0 \left\{ (1 - \alpha) \left[\delta_M(M - M_{\text{an}}) - k\delta c \frac{dM_{\text{an}}}{dH_e} \right] - k\delta \right\}} \quad (8)$$

式中, c 为可逆磁化系数。

2.2 基于损耗分离经验法的动态 J-A 模型

根据损耗分离理论, 总磁滞损耗 W 可分为静态磁滞损耗 W_{hys} 、涡流损耗 W_{eddy} 和剩余损耗 W_{anom} 三项^[18, 19]:

$$W = W_{\text{hys}} + W_{\text{eddy}} + W_{\text{anom}} \quad (9)$$

关于涡流损耗、剩余损耗的动态 J-A 磁滞模型能量平衡方程为^[20]:

$$\begin{aligned} & \mu_0 \int M_{\text{an}}(H) dH_e \\ &= \mu_0 \int M(H) dH_e + \mu_0 k \delta (1 - c) \int \frac{dM_{\text{irr}}}{dH_e} dH_e + \\ & k_e \int \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt + k_a \int \left(\frac{dB}{dt} \right)^{\frac{3}{2}} dt \end{aligned} \quad (10)$$

式中, k_e 、 k_a 为参数。

损耗分离经验法中涡流损耗、剩余损耗的表达式为^[21]:

$$W_{\text{eddy}} = k_e \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (11)$$

$$W_{\text{anom}} = k_a \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^{\frac{3}{2}} dt \quad (12)$$

在软磁材料中可假设 $B = \mu_0 M$, 则式(10)可简化为:

$$M_{\text{an}} = M + k\delta \frac{dM}{dH_e} - k\delta c \frac{dM_{\text{an}}}{dH_e} + P_d(t) \frac{dM}{dH_e} \quad (13)$$

式中, $P_d(t)$ 为动态损耗, 可表示为:

$$P_d(t) = k_e \left| \frac{dB}{dt} \right| + k_a \left| \frac{dB}{dt} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

结合铁心损耗分离理论, 采用动态场分离法对磁场强度进行修正:

$$\begin{aligned} H_{\text{total}} &= H_{\text{hys}} + H_{\text{eddy}} + H_{\text{anom}} \\ &= H_{\text{hys}} + k_e \frac{dB}{dt} + k_a \lambda \left| \frac{dB}{dt} \right|^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, λ 为关于 dB/dt 的符号函数; H_{total} 为总磁场强度; H_{hys} 为静态损耗磁场强度; H_{eddy} 为涡流损耗磁场强度; H_{anom} 为剩余损耗磁场强度。

2.3 基于损耗统计理论的动态 J-A 模型

Bertotti 假设铁磁材料内部磁密均匀分布, 并根据磁畴理论与磁畴结构的随机统计分布特性, 推导了涡流损耗、剩余损耗的解析表达式^[2]:

$$W_{\text{eddy}} = k_e \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt = \frac{\sigma d^2}{12} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (16)$$

$$W_{\text{anom}} = k_a \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^{\frac{3}{2}} dt = \sqrt{\sigma SGV_0} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^{\frac{3}{2}} dt \quad (17)$$

式中, k_e 为一个仅与材料物理性质、几何性质相关的参数, $k_e = \sigma d^2/12$, d 为硅钢片厚度, σ 为铁磁材料电阻率; $k_a = \sqrt{\sigma SGV_0}$, S 为材料横截面积, G 为无量纲常数, $G = 0.1357$, V_0 为表征磁体局部磁场分布的统计参数。

结合动态场分离法推导上述动态 J-A 模型表达式, 即可求解出磁场强度。其中, 涡流损耗分量的磁场强度为:

$$\frac{dW_{\text{eddy}}}{dt} = \frac{\sigma d^2}{12} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (18)$$

$$H_{\text{eddy}}(t + \Delta t) = \frac{\sigma d^2}{12} \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (19)$$

磁化过程中畴壁变化会导致剩余损耗, 而基于损耗统计理论的单位剩余损耗可表示为:

$$\frac{dW_{\text{anom}}}{dt} = \sqrt{\sigma SGV_0} \left(\frac{dB}{dt} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (20)$$

剩余损耗磁场强度为:

$$H_{\text{anom}}(t + \Delta t) = \sqrt{\sigma SGV_0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta t} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\Delta B}{\Delta t} = \sqrt{\sigma SGV_0} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

因此, 将动态场分离法引入基于统计损耗理论, 推导得动态 J-A 模型为:

$$\frac{dM}{dB} = \frac{\delta_M(M - M_{\text{an}}) - k\delta c \frac{dM_{\text{an}}}{dH_e}}{\mu_0 \{ (1 - \alpha) [\delta_M(M - M_{\text{an}}) - k\delta c \frac{dM_{\text{an}}}{dH_e}] - k\delta \}} + \frac{\frac{\sigma d^2}{12} \left| \frac{dB}{dt} \right| + \sqrt{\sigma SGV_0} \left| \frac{dB}{dt} \right|^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 [(1 - \alpha)(M - M_{\text{an}} - k\delta c \frac{dM_{\text{an}}}{dH_e}) - k\delta]} \quad (22)$$

涡流损耗 W_{eddy} 表达式(16)仅涉及磁密 B 相对时间 t 导数 dB/dt 的求解, 故可通过涡流损耗的表达式直接求解 W_{eddy} 的数值。取输入 $B = B_m \cos(2\pi ft)$, 磁密关于时间的变化率为:

$$\frac{dB}{dt} = -2\pi f B_m \sin(2\pi ft) \quad (23)$$

式中, B_m 为最大磁密; f 为频率。

损耗统计理论中涡流损耗的表达式为:

$$W_{\text{eddy}} = \frac{(\pi d)^2 \sigma}{6} B_m^2 f \quad (24)$$

剩余损耗表达式(17)推导得:

$$W_{\text{anom}} = 8.76 \sqrt{\sigma SGV_0} B_m^{1.5} f^{0.5} \quad (25)$$

在剩余损耗表达式(25)中, V_0 的大小与交流峰值磁密 B_m 有关, 无法直接求解。由总损耗 W_{total} 与静态损耗 W_{hys} 、涡流损耗 W_{eddy} 、剩余损耗 W_{anom} 的关系可知, 总损耗与涡流损耗之间的差值 $W - W_{\text{eddy}}$ 和频率 f 的均方根 $f^{0.5}$ 之间呈线性关系^[22]。该线性关系对应的函数与纵坐标的交点即为磁滞损耗 W_{hys} 分量, 而斜率 $k = 8.76(\sigma SGV_0)^{0.5}$ 。因而在求出斜率 k 后, 即可快速计算出剩余损耗统计参数 V_0 的大小。

由基于损耗统计理论的动态 J-A 模型推导得到磁场强度 H_{total} 为:

$$\begin{aligned} H_{\text{total}} &= H_{\text{hys}} + H_{\text{eddy}} + H_{\text{anom}} \\ &= H_{\text{hys}} + k_e \frac{dB}{dt} + k_a \lambda \left| \frac{dB}{dt} \right|^{\frac{1}{2}} \\ &= H_{\text{hys}} + k_e (-2\pi f B_m) \sin(2\pi ft) + \\ &\quad k_a \lambda |-2\pi f B_m \sin(2\pi ft)|^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (26)$$

3 实验验证

3.1 实验平台

为验证本文所提计算方法, 使用实验室的 BROCKHAUS-MPG200 电工钢磁性测试系统测取了硅钢单片样品在不同频率下的饱和磁滞回线, 样品参数见表1。用于测试系统的实验平台如图1所示, 由主机、控制显示系统、电源与单片测量仪组成。测量系统通过控制与显示系统输入控制指令, 并将指令传递到主机。主机将接收到的控制指令(波形种类、相角、幅值等)进行数据计算处理, 转化成在样品测试系统端可施加的激励指令(励磁电流等)。单片测量仪完成样品分析后, 由主机进行数据处理后输出。

表1 样品参数

Tab.1 Sample parameters

参数	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	重量/g
数值	600	100	0.27	116.13

将试样放置于单片测量仪中, B 、 H 值可通过安培定律和电磁感应定律获取^[23]:

$$H(t) = \frac{Ni_1}{l_m} \quad (27)$$

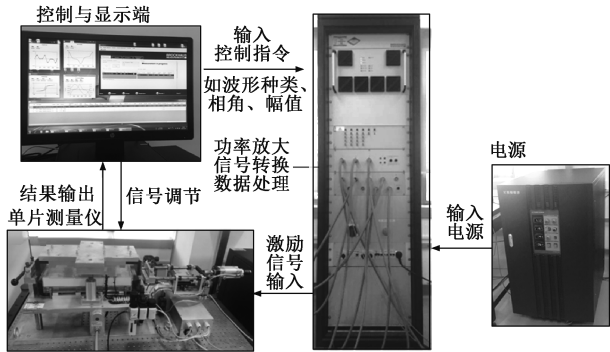


图1 BROCKHAUS-MPG200 实验平台

Fig. 1 BROCKHAUS-MPG200 experimental platform

$$B(t)=\frac{1}{NA}\int_0^t u_2(t) dt$$

(28)

式中, N 为线圈匝数; i_1 为初级线圈励磁电流; l_m 为等效磁路长度; A 为硅钢片等效截面积; u_2 为次级线圈两端电压。

运用人工鱼群与 Levenberg-Marquardt 混合算法求解式(8)的静态 J-A 模型,参数求解结果见表 2。

表 2 静态 J-A 模型参数

Tab. 2 Static J-A model parameters	
参数	算法模拟值
M_s	1.6961e+06
α	7.5479e-06
a	3.0052
c	0.3174
k	13.0718

由损耗计算理论与磁场分离原理可知,表 2 中静态 J-A 模型的参数同时也是动态 J-A 模型的 5 个参数。在已知 J-A 模型 5 个参数的基础上,分别运用传统动态 J-A 模型计算方法与新型动态 J-A 模型计算方法求解动态 J-A 模型的其余参数,并模拟磁滞曲线,比较两种算法计算结果的优劣。

3.2 基于损耗分离经验法与损耗统计理论的动态 J-A 模型模拟结果对比

本文中的损耗分离经验法以 5Hz (静态)、250Hz 与 400Hz 时的饱和磁滞回线实验数据为计算样本,根据基于损耗分离经验法的动态 J-A 模型表达式,提取动态 J-A 模型的参数 k_e 、 k_a ,计算结果为 $k_e=0.0124$ 、 $k_a=0.2832$ 。

基于损耗统计理论的动态 J-A 模型以任意两个不同频率下的实验数据为依据,计算 J-A 模型参数并预测待求频率的磁滞回线。表 3 为实验测量所得不同频率下的损耗数值。

表 3 不同频率下的损耗

Tab. 3 Loss at different frequencies					
频率/Hz	50	100	150	200	250
损耗/(W/kg)	0.8461	2.4387	4.6544	7.3722	10.649
频率/Hz	300	350	400	450	500
损耗/(W/kg)	14.483	18.871	23.799	29.252	35.258

同样地,取 250Hz 与 400Hz 的数据对参数 V_0 拟合,可得 $f^{0.5}$ 与 $W_{total}-W_{eddy}$ 的拟合方程式为:

$$y=9.1256x+34.6521$$

由拟合方程式得斜率 k 为 9.1256,静态磁滞损耗 W_{hys} 为 34.6521W/kg,进而求得参数 $V_0=0.0328$ 。取表 3 中不同频率下的损耗数值对参数 $V_0=0.0328$ 的计算结果进行检验,如图 2 所示。

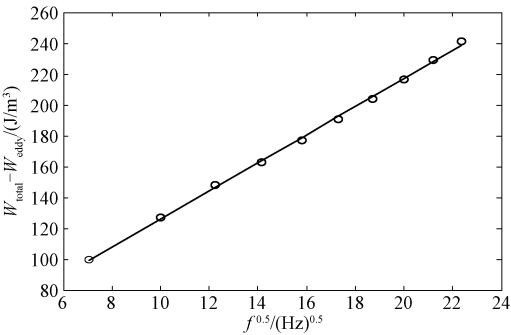


图 2 参数 V_0 数值检验

Fig. 2 Experimental examination of parameter V_0

根据损耗理论中 k_e 、 k_a 的表达式得 $k_e=0.0104$, $k_a=0.4669$ 。以 $f=50\text{Hz}$ 、 $f=100\text{Hz}$ 与 $f=200\text{Hz}$ 为例,预测两种不同频率下的磁滞回线。

在 $f=50\text{Hz}$ 、 $f=100\text{Hz}$ 与 $f=200\text{Hz}$ 情况下,将损耗分离经验法与损耗统计理论两种求解方法的误差进行对比,结果见表 4。

表 4 两种计算方法的均方误差百分数

Tab. 4 MSE percentage of two calculation methods			
(%)			
频率/Hz	50	100	200
损耗分离经验法	11.99	10.44	19.38
统计损耗理论	9.17	9.02	7.83

同样地,在 $f=50\text{Hz}$ 、 $f=100\text{Hz}$ 与 $f=200\text{Hz}$ 情况下,由式(15)与式(26)分别预测损耗分离经验法与损耗统计理论的磁滞回线,并将两种方法的磁滞回线进行对比,预测结果如图 3~图 5 所示。

由图 3、图 5 可知,基于损耗统计理论的动态 J-A 模型模拟的动态磁滞回线与实验曲线的契合程度更高。在图 4 中难以表现出显著差别的原因在于

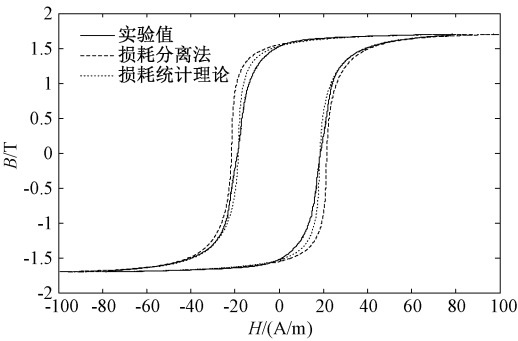


图 3 50Hz 下模拟磁滞回线
Fig. 3 Simulation of hysteresis loop under 50Hz

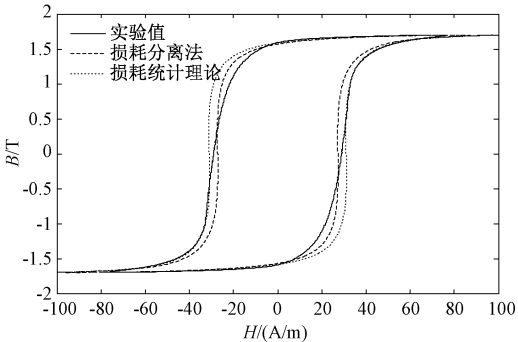


图 4 100Hz 下模拟磁滞回线
Fig. 4 Simulation of hysteresis loop under 100Hz

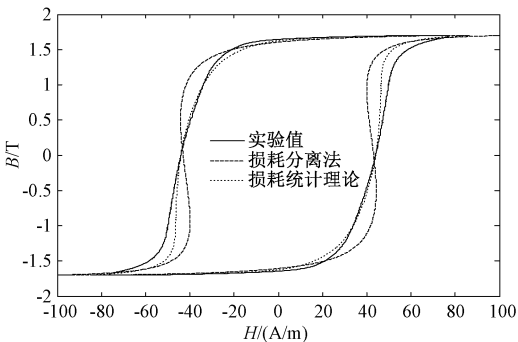


图 5 200Hz 下模拟磁滞回线
Fig. 5 Simulation of hysteresis loop under 200Hz

实验存在偶然性因素,会造成一定的测量误差。但上述整体仿真结果表明,基于损耗统计理论的动态 J-A 模型相比于基于损耗分离经验法的动态 J-A 模型的精度更高。由表 4 可知,损耗统计理论的计算误差小于损耗分离经验法,同样表明损耗统计理论的精度高于损耗分离经验法。

由于实验条件等客观因素的存在,实验数据不可避免会存在误差,影响算法的拟合效果。导致误差的原因主要有:①实验平台的测量误差,在施加指定波形的激励时,实验平台的线圈中可能会出现感

应电流,影响测量数据的真实性;②模型误差,用模型描述实际问题时,是对实际问题抽象简化的近似;③在理论推导中,静态数据样本输入 B 是余弦函数的近似值,并非准确的余弦值。图 6 为理论值 $B = B_m \cos(2\pi ft)$ 与实际值的对比,其中 n 为测量点个数。

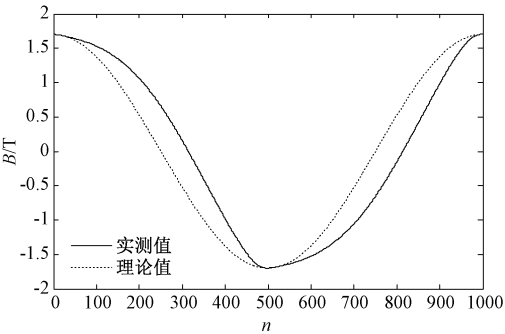


图 6 输入磁密的理论值与实际值
Fig. 6 Theoretical value and actual value of input magnetic density

4 结论

针对现有基于损耗分离经验法的动态 J-A 模型参数辨识方法存在物理意义不清晰、求解精度较低的问题,本文提出了基于损耗统计理论的动态 J-A 模型和参数提取方法,得到以下结论:

(1) 提出的基于损耗统计理论的动态 J-A 模型参数可通过损耗统计理论表达式不同频率下的损耗间接求解,进而求解出动态 J-A 模型参数,并预测磁滞回线。基于损耗统计理论的动态 J-A 模型参数提取具有严格的物理意义。

(2) 基于实验测试结果对比分析了两种计算模型,基于损耗统计理论的动态 J-A 模型参数提取的误差低于损耗分离经验法,证明了损耗统计理论法在模拟磁滞回线时精度高于损耗分离经验法。

参考文献 (References):

[1] Chwastek K, Szczygłowski J, Wilczyński W. Modelling dynamic hysteresis loops in steel sheets [J]. COMPEL International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering, 2009, 28 (3): 603-612.

[2] Olivier de la Barrière, Carlo Ragusa, Carlo Appino, et al. Prediction of energy losses in soft magnetic materials under arbitrary induction waveforms and DC bias [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64

- (3): 2522-2529.
- [3] 刘洋, 杨富尧, 范亚娜, 等 (Liu Yang, Yang Furao, Fan Yana, et al.). 畸变磁通作用下变压器铁心模型损耗的实验研究与模拟分析 (Experimental study and modeling analysis of iron loss in transformer core model under distorted flux) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 65-69.
- [4] Cinzia Beatrice, Samuel Dobák, Enzo Ferrara, et al. Broadband magnetic losses of nanocrystalline ribbons and powder cores [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 420: 317-323.
- [5] Steinmetz C P. On the law of hysteresis [J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72 (2): 197-221.
- [6] Jiles D C. Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials [J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75 (10): 3490-3492.
- [7] Du R, Robertson P. Dynamic Jiles-Atherton model for determining the magnetic power loss at high frequency in permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51 (6): 7301210.
- [8] Chwastek K. Modeling of dynamic hysteresis loops using the Jiles-Atherton approach [J]. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2009, 15 (1): 95-105.
- [9] Hamimid M, Mimoune S M, Feliachi M. Hybrid magnetic field formulation based on the losses separation method for modified dynamic inverse Jiles-Atherton model [J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406 (14): 2755-2757.
- [10] Baghel A P S, Kulkarni S V. Dynamic loss inclusion in the Jiles-Atherton (JA) hysteresis model using the original JA approach and the field separation approach [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50 (2): 7009004.
- [11] 李长云, 刘亚魁 (Li Changyun, Liu Yakui). 直流偏磁条件下变压器铁心磁化特性的 Jiles-Atherton 修正模型 (Modified Jiles-Atherton model of transformer iron core magnetization characteristics with DC bias) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (19): 193-201.
- [12] 李晓萍, 文习山, 陈慈萱 (Li Xiaoping, Wen Xishan, Chen Cixuan). 单相变压器直流偏磁励磁电流仿真分析 (Simulation analysis of DC bias excitation current of single phase transformer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2005, 31 (9): 8-10.
- [13] Liu Ren, Li Lin. Simulated annealing algorithm coupled with a deterministic method for parameter extraction of energetic hysteresis model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (11): 7301105.
- [14] Barbisio E, Fiorillo F, Ragusa C. Predicting loss in magnetic steels under arbitrary induction waveform and with minor hysteresis loops [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40 (4): 1810-1819.
- [15] Fulginei F R, Salvini A. Softcomputing for the identification of the Jiles-Atherton model parameters [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (3): 1100-1108.
- [16] 李泽涛 (Li Zetao). 基于 J-A 模型的单相变压器建模和偏磁研究 (Modeling and magnetic bias of single-phase transformer based on J-A model) [D]. 天津: 河北工业大学 (Tianjin: Hebei University of Technology), 2014.
- [17] 曹林, 何金良, 张波 (Cao Lin, He Jinliang, Zhang Bo). 直流偏磁状态下电力变压器铁心动态磁滞损耗模型及验证 (Dynamic hysteresis loss model of power transformer under DC current biasing and its verification) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2008, 28 (24): 141-146.
- [18] Li Y, Zhu L, Zhu J. Core loss calculation based on finite-element method with Jiles-Atherton dynamic hysteresis model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (3): 1300105.
- [19] 刘任, 李琳 (Liu Ren, Li Lin). 基于损耗分离理论的非正弦激励磁心损耗计算方法研究 (Research on calculation methods for core losses under nonsinusoidal excitation based on loss separation theory) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (9): 1-9.
- [20] Jesenik M, Gorican V, Trlep M, et al. Magnetic field calculation considering the measured hysteresis [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2008, 320 (20): e988-e991.
- [21] 王洋, 刘志珍 (Wang Yang, Liu Zhizhen). 基于蛙跳模糊算法的 Jiles Atherton 铁心磁滞模型参数确定 (Determination of Jiles Atherton core hysteresis model parameters based on fuzzy-shuffled frog leaping algorithm) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (4): 154-161.
- [22] Hussain S, Lowther D A. Prediction of iron losses using Jiles-Atherton model with interpolated parameters under the conditions of frequency and compressive stress [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52 (3): 1-4.
- [23] Yamamoto T, Ohya Y. Single sheet tester for measuring core losses and permeabilities in a silicon steel sheet [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1974, 10 (2): 157-159.

New dynamic hysteresis J-A model based on statistical theory of losses

ZHAO Yue¹, LI Lin¹, LIU Ren¹, HAN Yu², LIU Yang²

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
- 2. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: The traditional dynamic J-A model based on the empirical method of loss separation lacks physical foundation and has low accuracy. Referring to the idea of magnetic field intensity separation, the statistical theory of losses is introduced into the original static J-A model. Therefore, a new dynamic J-A model based on the statistical theory of losses is proposed. Among them, the static J-A model is used to solve the static magnetic field strength component, and the eddy current and anomalous magnetic field strength components are derived from the statistical theory of losses. Comparing the calculated results with the measured results, the dynamic J-A model proposed in this paper is more accurate than the traditional dynamic J-A model, which is based on the empirical method of loss separation. In terms of physical meaning of the parameters, the dynamic J-A model proposed in this paper is more explicit than the traditional one.

Key words: J-A hysteresis model; magnetic field intensity separation; statistical theory of losses