

基于 Jiles-Atherton 逆模型的磁阀式可控电抗器特性计算

张慧英^{1,2}, 田铭兴^{1,2}, 柴佐时^{1,2}, 王田戈^{1,2}

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:在分析计算磁阀式可控电抗器(MCR)的特性时,必须考虑交、直流共同激励和铁芯磁路各部分磁化状态不同的特点。提出了基于 Jiles-Atherton 逆模型的 MCR 等效磁化特性模型,该模型考虑了磁滞、直流偏磁和小截面磁阀等因素对磁化特性的影响,适用于不同结构参数下的 MCR;基于等效磁化特性模型提出了 MCR 电流特性、控制特性和损耗特性的计算公式和方法;针对一个 MCR 样机进行了理论计算和实验测量,同时与基于理想小斜率模型的计算结果进行了对比。结果表明,提出的 MCR 等效磁化特性模型及其电流特性、控制特性和损耗特性计算方法是正确有效的,对 MCR 的工程计算有一定的参考和指导意义。

关键词:磁阀式可控电抗器;Jiles-Atherton 逆模型;磁化特性;计算

中图分类号:TM 47

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.019

0 引言

电流特性、控制特性和损耗特性等特性的计算分析是研究和设计磁阀式可控电抗器(MCR)的重要内容,而磁化特性模型是这些特性计算的基础。目前,理想小斜率模型^[1-3]、分段函数模型^[4]、基本磁化曲线^[5]和拟合函数模型^[6]等单值磁化曲线模型因计算简单而受到青睐,其中应用最多的是理想小斜率模型。但是,这些单值磁化曲线模型忽略了铁芯材料的磁滞这一显著特征。因此,采用包括理想小斜率模型在内的单值磁化模型来计算分析 MCR 特性时,不可避免地会存在误差。

为满足工程上对 MCR 特性计算精度的要求,研究学者开始尝试使用磁滞回线模型计算分析 MCR 的磁化特性。目前基于磁滞回线模型的 MCR 特性计算中,以计算磁化特性和电流特性为主,重视计算方法本身,但对计算结果的准确性关注还不够。文献[7]采用 J-A(Jiles-Atherton)原模型结合瞬时磁导率建立 MCR 偏磁暂态模型,通过仿真计算 MCR 的磁化特性和电流特性,但未验证计算结果的准确度。J-A 原模型^[8]以电流源为激励源(即已知磁场强度 H)计算 $B-H$ 磁滞回线,不符合 MCR 激励源为电压源(即已知磁通密度 B)的工程实际。文献[9]给出基于改进的 Preisach 模型计算铁芯材料的磁滞回线和 MCR 绕组电流的方法,但并未采用该模型对

MCR 特性进行具体计算。Preisach 模型将磁滞回线分为上、下支分别计算,只在宏观上模拟磁滞回线形状,忽视了铁芯材料磁化是连续变化的物理过程。文献[10]基于 MCR 实验样机的测量数据建立了 BP 神经网络磁化特性模型,使用非线性映射网络代替 B 和 H 之间的函数关系,并基于该模型计算样机的电流特性。由于训练样本来自样机的实验数据,故该磁化特性模型仅适用于样机或与样机结构参数相同的 MCR,其使用范围受到限制。

综上,本文提出基于 J-A 逆模型的 MCR 等效磁化特性模型,并基于该模型计算电流特性、控制特性和损耗特性。同时,考虑到目前文献在计算 MCR 特性时使用得最多的是理想小斜率磁化特性模型,所以将本文模型与理想小斜率模型进行了比较,并进行了实验分析。

1 MCR 等效磁化特性模型

单相 MCR 的基本结构原理图如图 1 所示^[3]。图中, $N_A = N_1 + N_2$, 为铁芯柱上绕组匝数; l_e 为磁阀长度; u_A 、 i 分别为工作电压和工作电流; i_{T1} 、 i_{T2} 为绕组电流; i_D 为直流环流(控制电流); V_D 为二极管; V_{T1} 、

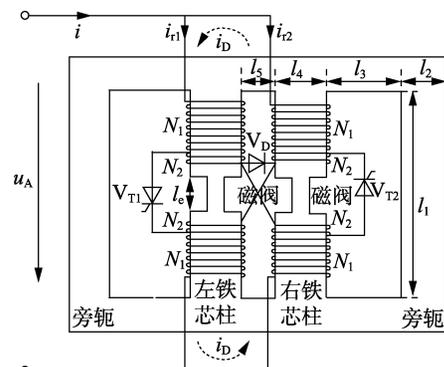


图 1 单相 MCR 结构原理图

Fig.1 Structure principle diagram of single-phase MCR

收稿日期:2017-07-27;修回日期:2018-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51367010,51167009);
甘肃省科技计划项目(17JR5RA083);兰州交通大学优秀科研
团队项目(201701)

Project supported by the National Natural Science Foundation of
China(51367010,51167009), the Science and Technology Pro-
gram of Gansu Province(17JR5RA083) and the Program for
Excellent Team of Scientific Research in Lanzhou Jiaotong Uni-
versity(201701)

V_{T2} 为晶闸管;单相 MCR 的铁芯结构为对称结构, l_1-l_5 为铁芯不同部分的磁路长度。额定工作电压下,通过调节 V_{T1} 、 V_{T2} 的触发角,改变直流环流 i_D ,可使铁芯磁化状态改变,达到调节 MCR 输出容量的目的。

在电压源和电流源的分别激励下,计算得到的同一材料的磁滞回线有一定的差别^[10]。为了满足 MCR 以电压源为激励源(已知 B) 的工况,本文采用 Sadowski^[11] 提出的 J-A 逆模型(如式(1)所示)计算铁芯材料的 $B-H$ 磁滞回线。根据式(1)可知,当给定磁通密度 B 时,就可算出磁场强度 H 。

$$\begin{cases} \frac{dM}{dB} = \frac{\delta_M(1-c)(M_{an}-M) + k\delta c \frac{dM_{an}}{dH}}{\mu_0\delta_M(1-\alpha)(1-c)(M_{an}-M) + \mu_0 k\delta + \mu_0 k\delta c \frac{dM_{an}}{dH}} \\ M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H+\alpha M_{an}}{a}\right) - \frac{a}{H+\alpha M_{an}} \right] \\ B = \mu_0(H+M) \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_M = 0.5[1 + \text{sign}(M_{an}-M) dB/dt] \quad (2)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & dB/dt > 0 \\ -1 & dB/dt < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, a 为无磁滞磁化曲线的形状参数; k 为磁滞损耗系数; α 为平均场参数; c 为磁畴壁弯曲常数; M_s 为饱和磁化强度; M_{an} 为无磁滞磁化强度; M 为磁化强度; μ_0 为空气磁导率; δ_M 为防止出现非物理的系数; δ 为方向系数。本文将式(1)描述的 J-A 逆模型的 $B-H$ 关系记作:

$$f_{J-A}(B, H) = 0 \quad (4)$$

J-A 逆模型不仅适用于描述 MCR 铁芯材料交流磁化特性,也能描述铁芯材料的偏磁特性^[12-13]。

文献[14]依据“总磁通、总磁势不变”的等效准则,提出了基于铁磁材料理想小斜率磁化特性的 MCR 的等效磁化特性模型。本文借鉴该思想,提出基于铁芯材料 J-A 逆模型的 MCR 等效磁化特性模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} B_e = m_{r1}^2 B_{ts} + (1-m_{r1}^2)\mu_0 H_e \\ f_{J-A}(B_{ts}, H_e) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, B_e 为等效磁通密度; H_e 为等效磁场强度; B_{ts} 为磁阀段磁通密度; m_{r1} 为磁阀小截面半径与铁芯柱大截面半径之比。已知 B_e , 可通过求解式(5)得到 MCR 的 B_e-H_e 磁滞回线。

式(5)的第1个公式描述了对磁阀的等效,第2个公式描述了磁阀段铁芯的磁通密度和磁场强度之间的关系。因此,式(5)表示的 MCR 等效磁化特性模型考虑了磁滞、直流偏磁和磁阀等因素对 MCR 磁

化特性的影响。只要给出铁芯材料 J-A 逆模型参数、磁阀参数和交直流磁通密度,就可以计算磁场强度。式(5)是含有微分方程的方程组,可采用离散数值积分法编程求解。

2 MCR 电流特性

单相 MCR 左、右铁芯柱中的等效磁通密度 B_{e1} 和 B_{e2} 的计算表达式分别如式(6)和式(7)所示^[11]。

$$B_{e1} = -m_{r1}^2 B_{ts} \cos(2\pi f_N t) + B_{dc} \quad (6)$$

$$B_{e2} = -m_{r1}^2 B_{ts} \cos(2\pi f_N t) - B_{dc} \quad (7)$$

其中, B_{ts} 为铁磁材料饱和磁通密度; B_{dc} 为直流磁通密度; f_N 为电源电压频率。

直流偏磁随触发角减小而增大,本文经过推导得到触发角 θ 与 B_{dc} 的关系式为:

$$\cos \theta = \frac{R_A l_e m_{r1}^2 B_{ts}}{2\lambda U_m N_A \mu_0} \left\{ \sin \left[\arccos \left(\frac{m_{r1}^2 B_{ts} - B_{dc}}{m_{r1}^2 B_{ts}} \right) \right] - \frac{m_{r1}^2 B_{ts} - B_{dc}}{m_{r1}^2 B_{ts}} \arccos \left(\frac{m_{r1}^2 B_{ts} - B_{dc}}{m_{r1}^2 B_{ts}} \right) \right\} - 1 \quad (8)$$

其中, $\lambda = N_2/N_A$, 为抽头比; R_A 为 N_A 匝绕组的电阻; U_m 为电源电压幅值。

已知触发角 θ , 由式(8)求得对应的 B_{dc} , 将其代入式(6)、(7)中可得到等效磁通密度,然后将 B_{e1} 、 B_{e2} 分别代入式(5),可得到的左、右两铁芯柱中等效磁场强度 H_{e1} 、 H_{e2} 。

基于电流回路定律, MCR 的工作电流 i 和左、右铁芯柱绕组电流 i_{r1} 、 i_{r2} 的计算公式分别如式(9)~(11)所示^[15]。

$$i = \frac{l_e}{2N_A} (H_{e1} + H_{e2}) \quad (9)$$

$$i_{r1} = \frac{l_e H_{e1}}{N_A} \quad (10)$$

$$i_{r2} = \frac{l_e H_{e2}}{N_A} \quad (11)$$

MCR 的控制特性是指额定正弦电源电压下工作电流幅值 i_m 随触发角 θ 变化的关系^[1]。已知触发角,由式(9)计算对应的 i_m , 可得到在整个容量调节范围内 MCR 的 $\theta-i_m$ 关系曲线。

3 MCR 损耗特性

MCR 的损耗 ΔP 主要包括铁芯损耗 P_f 和绕组损耗 P_{cu} , 控制回路的绕组电阻很小故其损耗可忽略不计。本文将基于 J-A 逆模型计算 MCR 的铁芯损耗。

单位体积铁损指一个周期内 $B-H$ 磁滞回线包围的面积^[16-17], 其随磁化状态变化而变化。MCR 的

轭部、铁芯柱(大截面段)和磁阀在同一时刻的磁化状态不同且各部分的磁化状态在一个周期内的变化规律也不同,单位体积铁损不相等,它们的损耗也不同。针对 MCR 的铁芯磁密分布不均的特点,本文提出根据磁化状态计算铁芯各部分的铁损,再通过求和得到 MCR 总铁损 P_t ,如式(12)所示。

$$P_t = f_N(V_1 W_1 + V_2 W_2 + V_3 W_3 + V_4 W_4) \quad (12)$$

其中, W_1 — W_4 分别为铁芯柱(大截面段)、旁轭、上下轭和磁阀段的单位体积铁损; V_1 为 2 个铁芯柱(大截面段)的体积; V_2 — V_4 分别为旁轭、上下轭和磁阀体积。

忽略涡流的影响,计算 MCR 绕组损耗的表达式为:

$$P_{cu} = I_{r1e}^2 \times (2R_A) + I_{r2e}^2 \times (2R_A) \quad (13)$$

其中, I_{r1e} 、 I_{r2e} 为绕组电流的有效值。

基于 J-A 逆模型计算 MCR 损耗的步骤如下:确定触发角,由 J-A 逆模型计算得到铁芯各个部分的 B - H 曲线,求出磁滞回线面积,得到铁芯各部分的单位体积铁损 W_1 — W_4 ;将单位体积铁损代入式(12)得到铁损 P_t ;已知触发角 θ ,由式(8)得到 B_{dc} ,再联立式(5)—(7)、(10)、(11),计算得到 I_{r1e} 和 I_{r2e} ,代入式(13)中求得 P_{cu} ;求 P_t 和 P_{cu} 之和,得到 MCR 的损耗 ΔP 。

4 算例分析

单相 MCR 样机主要参数见表 1。J-A 逆模型参数取值来自于文献[18],具体如下: $M_s = 1\ 427\ 394$ A/m, $\alpha = 1.032 \times 10^{-5}$, $a = 56.35$ A/m, $k = 70.1$ A/m, $c = 0.098$ 。

表 1 MCR 样机参数

Table 1 Parameters of MCR prototype

参数名	参数值	参数名	参数值
额定电压 U_N	220 V	饱和磁通密度 B_s	1.65 T
额定电流 I_N	13 A	铁芯截面积比	1/3
额定频率 f_N	50 Hz	l_1	180 mm
有效磁阀长度 l_e	10 mm	l_2, l_4	65 mm
铁芯横截面积	42.25 cm ²	l_3	47.5 mm
绕组匝数 N_A	213 匝	l_5	85 mm
抽头比 λ	0.03	绕组电阻 R_A	0.33 Ω

4.1 MCR 磁化特性

当 MCR 额定容量为 S_N , θ 分别为 180° 、 130° 、 85° 、 0° 时, MCR 输出容量分别为 0 、 $20\% S_N$ 、 $60\% S_N$ 、 S_N 。将表 1 中 MCR 参数和 J-A 逆模型参数代入公式求解,计算并绘制 θ 为 180° 、 130° 、 85° 、 0° 时,基于 J-A 逆模型的 MCR 样机的左铁芯柱的磁化特性曲线(虚线)如图 2 所示。为方便比较,同时也计算并绘制基于理想小斜率模型的 MCR 样机的左铁芯柱的磁化特性曲线(实线)。需要说明的是,左、右铁

芯柱的磁化特性曲线关于原点对称。

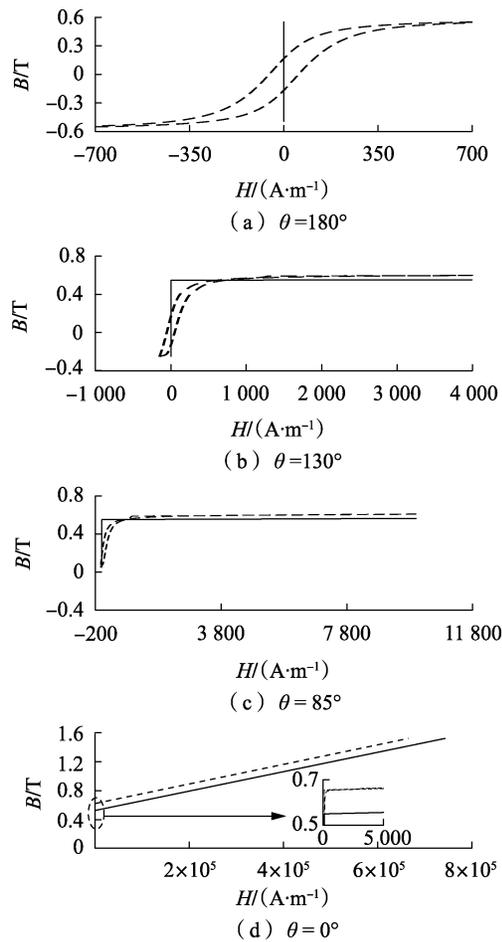


图 2 MCR 的磁化特性

Fig.2 Magnetization characteristic of MCR

从图 2 可以看出,不同的触发角下,基于 J-A 逆模型计算得到的磁滞回线较好地描述了磁化过程和偏磁的影响结果;随着 θ 的减小,磁滞回线向 $B > 0$ 、 $H > 0$ 的方向收缩偏移,但磁化特性曲线始终是封闭的回线;对比发现,相同触发角下基于理想小斜率模型计算得到的 H 值更大,故基于其计算得到的电流值会比基于 J-A 逆模型的更大。

4.2 MCR 电流特性

当触发角 θ 为 180° 、 130° 、 85° 、 0° 时,工作电流 i 随时间 t 变化的稳态波形分别如图 3—6 所示。

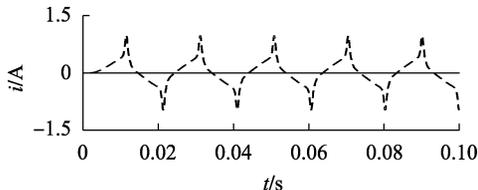
从图 3—6 可以看出,随着触发角 θ 的减小,偏磁增加,工作电流增大,波形畸变程度降低。从图 3 可以看出,基于 J-A 逆模型计算得到的结果能很好地描述 MCR 的空载电流特性。在铁芯材料饱和磁通密度以下时,理想小斜率模型对应的磁场强度 $H = 0$,代入式(9)—(11)计算得到电流为 0。基于 2 种模型计算得到的工作电流有效值与实测值相比的误差如表 2 所示,表中的“+”和“-”分别表示比实测值大和小。

从表 2 中的计算结果可以看出, J-A 逆模型下的计算值与实测值更接近;除空载状态之外,理想小斜

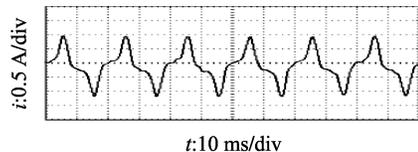
率模型下的电流计算结果比实测值偏大,这与其斜率取值比实际饱和后 MCR 磁化曲线斜率小有关。

4.3 MCR 控制特性

当 θ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化时,基于 J-A 逆模型和理想小斜率磁化模型计算得到对应的工作电流幅值 i_m 和实验测量结果如图 7 所示。实验中,是通过数字示波器测量并记录 MCR 工作电流幅值。从图 7 中可以看出,基于 J-A 逆模型计算得到的工作



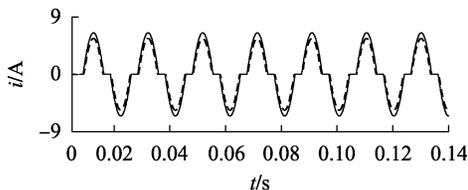
(a) 基于 2 种模型计算得到的工作电流



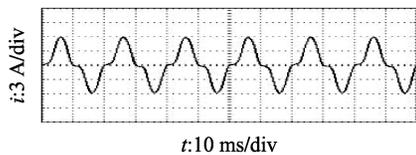
(b) 工作电流的实测结果

图 3 $\theta=180^\circ$ 时 MCR 的工作电流

Fig.3 Operating current of MCR with $\theta=180^\circ$



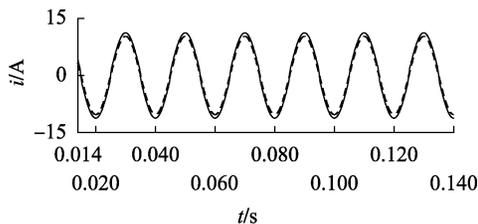
(a) 基于 2 种模型计算得到的工作电流



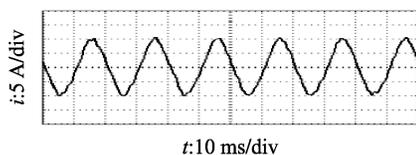
(b) 工作电流的实测结果

图 4 $\theta=130^\circ$ 时 MCR 的工作电流

Fig.4 Operating current of MCR with $\theta=130^\circ$



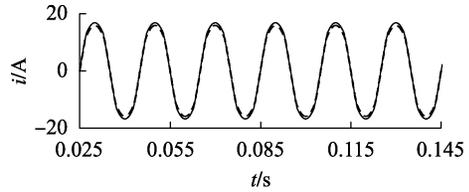
(a) 基于 2 种模型计算得到的工作电流



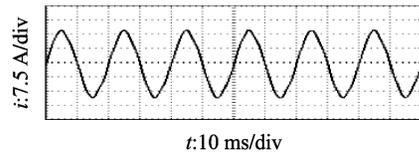
(b) 工作电流的实测结果

图 5 $\theta=85^\circ$ 时 MCR 的工作电流

Fig.5 Operating current of MCR with $\theta=85^\circ$



(a) 基于 2 种模型计算得到的工作电流



(b) 工作电流的实测结果

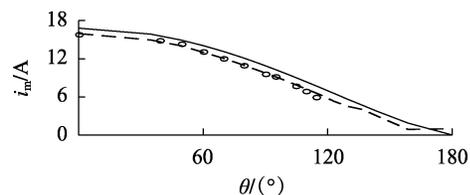
图 6 $\theta=0^\circ$ 时 MCR 的工作电流

Fig.6 Operating current of MCR with $\theta=0^\circ$

表 2 MCR 工作电流有效值对比

Table 2 Comparison of operating current RMS values of MCR

触发角 $\theta/$ ($^\circ$)	i 的计算误差/%	
	J-A 逆模型	理想小斜率模型
180	-10.1	-100.0
130	-2.5	+17.6
85	-1.8	+8.2
0	+2.8	+6.8



-- J-A 逆模型, — 理想小斜率模型, \circ 实测值

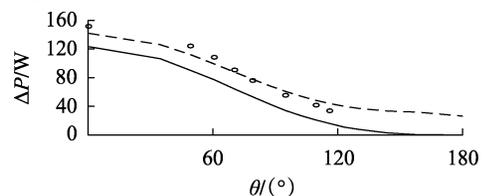
图 7 MCR 的控制特性

Fig.7 Control characteristic of MCR

电流理论值与实测值吻合较好。

4.4 MCR 损耗特性

当改变触发角 θ 时,MCR 铁损 P_i 和绕组损耗 P_{cu} 随之变化。按照上文所述的基于 J-A 逆模型的计算损耗的步骤,计算 θ 值对应的 MCR 损耗;同时也给出基于理想小斜率模型计算得到的损耗。采用电力质量分析仪 PW3198 对 MCR 样机的损耗进行测量。图 8 给出了基于 2 种磁化模型的样机的损耗和实测值与触发角的关系曲线。可见,基于 J-A 逆模型的损耗计算值与实测值吻合较好,并验证了本文提出的基于 J-A 逆模型的 MCR 损耗计算方法的可行性。



-- J-A 逆模型, — 理想小斜率模型, \circ 实测值

图 8 MCR 的损耗特性

Fig.8 Loss characteristic of MCR

5 结论

a. 本文提出的基于 J-A 逆模型的 MCR 等效磁化特性模型考虑了磁滞、直流偏磁和磁阀对 MCR 磁化特性的影响,并能够适用于不同结构参数下的 MCR。

b. 采用本文提出的 MCR 等效磁化特性模型计算电流特性、控制特性和损耗特性,所得结果比采用理想小斜率磁化模型更准确,实验测量结果也验证了这一结论。

参考文献:

- [1] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999;24-25.
- [2] 袁剑,田翠华,田成,等. 新型磁控电抗器快速响应技术[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):166-170.
YUAN Jian, TIAN Cuihua, TIAN Cheng, et al. Fast response technology of MCR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):166-170.
- [3] 田铭兴,石鹏太,马亚珍. n 级饱和磁阀式可控电抗器结构特性和仿真方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):95-101.
TIAN Mingxing, SHI Pengtai, MA Yazhen. Structural property and simulation method of n -stage saturable magnetic-valve controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2):95-101.
- [4] 刘海鹏. 基于分布式小截面磁路设计的磁控电抗器研究[D]. 保定:华北电力大学,2015.
LIU Haipeng. Magnetic controllable reactor based on magnetic pH circuit design of distributed small sections[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [5] 赫志远. 磁饱和和可控电抗器的分析[D]. 济南:山东大学,2015.
HE Zhiyuan. Analysis of magnetic saturation controllable reactor[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [6] 李亚坤. 磁控电抗器的动态特性优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
LI Yakun. Research on dynamic characteristics optimization of magnetically controlled reactor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] 何绍洋. 电抗器电磁特性的关键技术研究与应用[D]. 广州:广东工业大学,2012.
HE Shaoyang. Research and application on the key technologies of reactor electromagnetic characteristics[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012.
- [8] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6):2115-2120.
- [9] 欧振国. 磁控电抗器的损耗研究[D]. 广州:广东工业大学,2014.
OU Zhenguo. Loss research of magnetic controlled reactor[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [10] 姜翠玲. 磁控电抗器直流偏磁建模及算法研究[D]. 广州:广东工业大学,2015.
JIANG Cuiling. Research on the DC-biased magnetization model and algorithm of magnetic controlled reactor[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
- [11] SADOWSKI N, BATISTELA N J, BASTOS J P A, et al. An inverse Jiles-Atherton model to take into account hysteresis intime-stepping finite-element calculation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2):797-800.
- [12] LIORZOU F, PHELPS B, ATHERTON D L. Macroscopic models of magnetization[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(2):418-428.
- [13] 白保东,赵晓旋,陈德志,等. 基于 J-A 模型对直流偏磁条件下变压器励磁电流的模拟及实验研究[J]. 电工技术学报,2013, 28(增刊2):162-166.
BAI Baodong, ZHAO Xiaoxuan, CHEN Dezhi, et al. Simulation and experiment research on transformer excitation current under DC magnetic bias based on J-A model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(Supplement 2):162-166.
- [14] 马亚珍. 磁阀式可控电抗器的磁化曲线拟合与应用[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
MA Yazhen. Research on magnetization characteristic of magnetic-valve controllable reactor[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [15] 田铭兴,励庆孚. 磁饱和式可控电抗器的等效电路及仿真分析[J]. 电工技术学报,2003, 18(6):64-67.
TIAN Mingxing, LI Qingfu. An equivalent circuit and simulation analysis of magnetically-saturated controllable reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6):64-67.
- [16] 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):369-372.
- [17] 张兴华,童歆渝,刘伟. 考虑铁芯损耗的内置式永磁同步电机模型参数测量[J]. 电力自动化设备,2018, 38(3):194-198.
ZHANG Xinghua, TONG Xinyu, LIU Wei. Parameter measurement of interior permanent magnet synchronous motor model considering iron losses[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3):194-198.
- [18] WANG Yang, LIU Zhizhen. Determination of JA core hysteresis model parameters based on fuzzy-shuffled frog leaping algorithm[C]//2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Shanghai, China: IEEE, 2016: 318-319.

作者简介:



张慧英

张慧英(1980—),女,河南商丘人,博士研究生,主要研究方向为磁饱和式电抗器的磁化特性和运行特性数值分析(**E-mail**: zhanghlyz@163.com);

田铭兴(1968—),男,甘肃武威人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统无功补偿和电压控制、电机电器设计分析及电磁场分析(**E-mail**: tianmingxing@mail.lzjtu.cn);

柴佐时(1990—),男,山西大同人,硕士研究生,研究方向为可控电抗器及其控制;

王田戈(1993—),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为变压器式可控电抗器的磁集成结构设计与电磁场计算。

(下转第 140 页 continued on page 140)

- [18] 赵孔双. 介电谱方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008:95-125.
- [19] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1988:131-137.
- [20] BADICU L V, GORGAN B, DUMITRAN L M, et al. Assessment of transformer mineral oil condition based on DC and AV conductivity [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5):1544-1551.
- [21] 王东阳, 周利军, 朱少波, 等. 不同温度油隙频域介电谱的归算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23):6586-6592.
WANG Dongyang, ZHOU Lijun, ZHU Shaobo, et al. Method of normalizing the frequency domain dielectric spectrum of oil gap tested in different temperatures [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23):6586-6592.
- [22] ŻUKOWSKI P, KONSTUNOWICZ T N, KIERCZYŃSKI K, et al. Permittivity of a composite of cellulose, mineral oil, and water nanoparticles: theoretical assumptions [J]. Cellulose, 2015, 23(1):175-183.
- [23] GAO J, YANG L, WANG Y, et al. Effect of moisture and thermal degradation on the activation energy of oil-paper insulation in frequency domain spectroscopy measurement [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(9):2042-2049.
- [24] ŻUKOWSKI P, KOŁTUNOWICZ T N, KIERCZYŃSKI K, et al. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4):2156-2164.

作者简介:



周利军

周利军(1978—),男,浙江萧山人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究(E-mail:zhoulijun@swjtu.cn);

刘伟迪(1992—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究。

Evaluation of oil-immersed bushing damp state based on frequency-domain dielectric spectroscopy

ZHOU Lijun¹, LIU Weidi¹, WANG Dongyang¹, PAN Gang¹, LI Huize¹, XU Xiaowei²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the damp state of oil-immersed bushing main insulation, the Cole-Cole double relaxation model considering DC conductivity is built. By testing 72.5 kV oil-immersed bushing model with 0.53%, 1.78%, 2.97%, 1.78% and 5.03% moisture contents prepared in the laboratory, the corresponding frequency-domain dielectric spectroscopy is obtained. The frequency-domain dielectric spectroscopy is fitted and parsed by the Cole-Cole double relaxation model, then the characteristic parameters representing the moisture content of oil-immersed bushing insulation are extracted and the assessment formula is fitted. Considering the influence of temperature on the field testing results, the oil-immersed bushing damp state assessment method suitable for the field is proposed. Results of case analysis verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: power transformers; bushing; insulation; frequency-domain dielectric spectroscopy; Cole-Cole model; moisture content; quantitative assessment

(上接第133页 continued from page 133)

Characteristic calculation of magnetic-valve controllable reactor based on inverse Jiles-Atherton model

ZHANG Huiying^{1,2}, TIAN Mingxing^{1,2}, CHAI Zuoshi^{1,2}, WANG Tiange^{1,2}

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Province Engineering Laboratory for Rail Transit Electrical Automation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In the calculation and analysis of the characteristics of the MCR (Magnetic-valve Controllable Reactor), it is necessary to consider the characteristics of both AC and DC excitation and different magnetization states of the core magnetic circuit. Firstly, an equivalent magnetization characteristic model of MCR based on inverse Jiles-Atherton model is proposed. This model considers the effects of hysteresis, DC magnetic bias and small section magnetic-valve on the magnetization characteristics, and it is suitable for MCR with different structural parameters. Subsequently, the calculating formulas and methods for current characteristics, control characteristics and loss characteristics of MCR are proposed based on the equivalent magnetization model. Finally, the theoretical calculation and experimental measurement for a MCR prototype are carried out, and the results are compared with those based on the ideal small slope model. Test results indicate that the proposed MCR equivalent magnetization characteristic model and its current characteristic, control characteristic and loss characteristic calculation method are correct and effective, which provides a certain reference and guidance for engineering design and calculation of MCR.

Key words: magnetic-valve controllable reactor; inverse Jiles-Atherton model; magnetization characteristic; calculation