

旋阀结构可变磁阻器

伍家驹, 刘杰, 刘浩广, 王长坤, 刘斌

南昌航空大学, 南昌 330063

摘要: 研制了一种嵌入主磁路铁芯的可变磁阻器, 它融合了蝶阀和球阀的概念, 用非铁磁质阀板和铁磁质阀板夹共同构成阀芯, 通过改变阀板的法线与铁磁质阀座主磁通方向的夹角, 改变主磁通方向铁磁质的有效截面造成局部饱和的方式来调节磁阻, 将可变磁阻器串接于主磁路中构成可变电抗器进行了实验, 表明该实物模型不需外加电生磁动势, 便能对铁芯有效磁阻率进行直接、实时和平滑地调节. 文中基于正弦波磁感应强度的幅值推导出可变磁阻器的有效磁阻率, 定性地描述了旋阀的受力状态, 分析了实验结果并对扩大磁阻调节范围和提高线性度等问题给出了改进措施, 可望为探索磁元件新结构、提高磁类参数调节效果的研究提供参考.

关键词: 铁磁质, 磁阻率, 可变, 概念

Variable Reluctance Device of Rotary Valve Structure

WU Jia-ju, LIU Jie, LIU Hao-guang, WANG Chang-kun, LIU Bin

Nanchang HangKong University, Jiangxi 330063

Abstract: In a magnetic component, said valve is connected in tandem with valve housing and seat in soft magnetic core to form a series circuit. Valve shaft of said core is perpendicular to the main magnetic flux core controlled by said valve. Said valve body is constituted by insulating and diamagnetic butterfly valve plate and soft magnetic valve plate. These plates can revolve around valve shaft to do continuous angular displacement and angular positioning. Insulating and diamagnetic butterfly plate can have a maximum reluctance value of the valve, wherein a closed state of the valve is maintained. The present solution is advantageous in that: it does not require coil tap, additional coil and associated circuitry. Yet it can control magnetic flux through the valve, achieve the reluctance stepless adjustment and control the opening and closing state of the magnetic circuit where the valve is located. It overcomes the disadvantages, like power circuit, interrupter and cost increasing caused by additional electrical switches. In this solution, there is no air gap in the magnetic component. In addition to controlling opening and closing state of the magnetic circuit where valve is located, this solution can not only control flux through the valve without changing the size of the air gap, but also achieve reluctance stepless adjustment. It overcomes noise, vibration and electromagnetic interference brought about by core air gap. This paper provides photographs and experimental waveform. The experimental results and theoretical analysis can verify each other.

Keywords: ferromagnetic, reluctance rate, variable, Concept

0 引言

人们从电阻这一物理量中引申出了对应的元件电阻器, 方便了电类参数的调节; 磁阻 R_m 也是物理量, 但与

之对应的元件却鲜有报道, 磁类参数也难以直接且无级地调节. 磁阻的定义表达式、单位和量纲分别为 $R_m = l/(\mu\mu_0 S)$ 、 H^{-1} 和 $L^{-2}M^{-1}T^2I^2$, 电感的定义表达式、单位和量纲分别为

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51167014)

$L=(N\Phi)/I$ 、 H 和 $L^2MT^{-2}I^{-2}$ ，两者的单位和量纲均互为倒数的关系在调节磁阻或电感时常被用到，其主要的调节策略及其结构缺陷有^[1-3]：(1) 线圈抽头 ----- 能按预设的匝数比改变电感量，属有级调节，在高压大电流的工况下需要断流量和断流容量均很大附属开关来投切线圈；象调压器那样滑动地改变匝数虽能连续地调节电感量，但带负载调节匝数会产生火花，既限制了容量又难以满足防爆要求。(2) 外加励磁 ----- 控制附加线圈中的电流可改变磁路饱和程度，能实现无火花且连续地调节电感量，其铁芯结构有同磁质的田字形、立体 EU 形、三相 18 柱 12 芯和异磁质的旁路组合之分，它们的共同特点是通过采取共用磁路部分对冲或交互垂直等措施减少了交直流间的干扰，但是仍然有半波局部饱和、交越失真、电磁干扰大和动态响应慢等结构缺陷；调节特定次谐波电流来改变该频段感抗的策略虽无偏磁之虞，但有需特定的变流装置和线圈间扰动大等问题。(3) 改变气隙 ----- 虽然可直接调节磁阻改变电感量，但噪音大、敏感尺度小和直线调节精度低；用非铁磁质取代气隙可减小噪音，多级式磁阀具有电流分段饱和特征，再加上直流线圈还可实现无级调节控制，不但会随之带来前述附加线圈的若干缺点而且存在着输出与自变量直流电流平行的盲区；将永磁体作气隙形成预偏磁干预主磁路，能构筑大电流高感抗区域限制短路电流，并可减小继电器类器件的体积和损耗，但却均只能按预定的阈值动作。

铁磁质具有多值非线性，对温度、频率、气隙的依赖性和参数测算的艰巨性等特点，常令人困惑。但学者们仍在作不懈的努力，如文献 [1] 分析了偏磁饱和的成因，以外激励和优化铁心材料的方式防止了累积磁偏饱和，文献 [2] 阐明了铁磁质非线性是导致波形畸变主要因素，文献 [1] [2] 分析了铁磁系统的无功分量和热损耗，文献 [3] 对恒磁链控制的电感器作了分析，这些都为研制可变磁阻器的尝试提供了很好的借鉴。

作者尝试着融合蝶阀和球阀的概念并移植到磁路中来构成可变磁阻器，以调节铁芯局部饱和和截面的方式来平滑且实时地调节磁阻，所涉旋阀刚被授权发明专利^[4]，本文结合阀芯角位移分析了电磁力矩、磁阻和电感量的变化，以期改进电磁元件结构和电磁参数的调节效果提供点参考。

1 模型描述和实验记录

1.1 旋阀结构

可变磁阻器模型的结构示意如图 1 所示，其材质和尺寸均对应于原磁件，使用时须先切割掉原磁件相应的磁芯，再将可变磁阻器装配于其中。

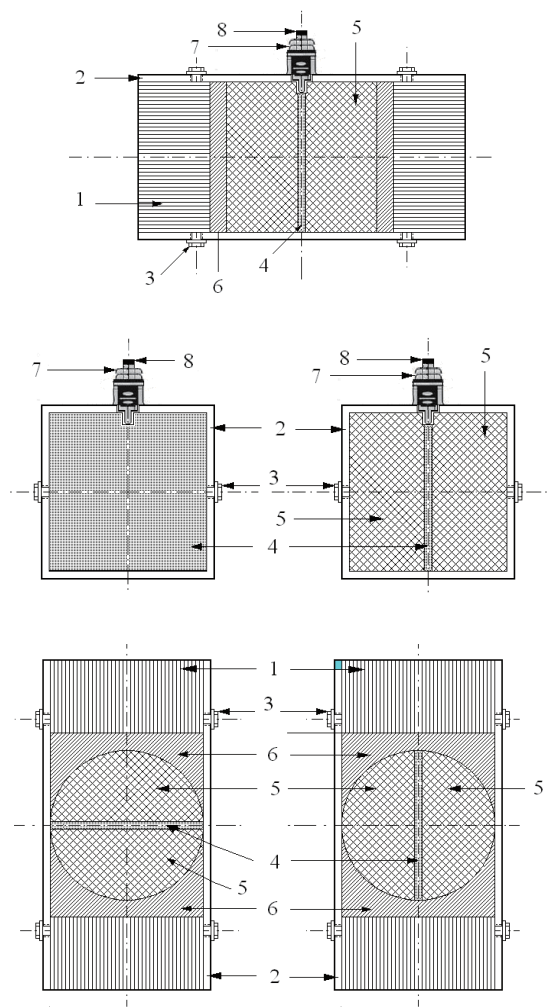


图 1 旋阀状可变磁阻器结构

1—原磁件铁磁质磁芯，2—在原磁件上固定阀门的非铁磁质阀套，3—定位螺钉，4—非铁磁的阀板，5—铁磁质的阀板夹，6—非铁磁质的阀座，7—固定旋阀角位移的阀轴定位器，8—可输入外力矩操纵旋阀角位移的阀轴。

阀座 6 与原磁件 1 间为过盈配合，接触磁阻可忽略不计；阀轴 8 与磁件磁芯主磁通方向垂直，阀板 4 和阀板夹 5 构成阀芯，阀芯与阀座 6 间为过渡配合，阀芯能围绕阀轴 8 作角位移和角定位，阀芯与阀座间的接触磁阻亦可忽

略。

①当阀板平面的法线向量与磁件磁芯主磁通方向平行时，主磁通都须经过非铁磁质的阀板（本例用玻璃纤维绝缘板），因其磁阻率远大于铁磁质磁芯的磁阻率，可变磁阻器的磁阻最大；

②当阀板平面的法线向量与磁件磁芯主磁通方向垂直时，主磁通直接经过阀板两边的铁磁质阀板夹，因该阀板夹与阀座均为型号为铁磁质（本例用 30Q120 的顺取向硅钢片），可变磁阻器的磁阻最小；

③从阀轴上输入外力矩可任意改变阀芯相对于阀座的角位移，选择所需磁阻值后，旋紧阀轴定位器上的两螺母，将阀轴上的螺杆固定在阀套上；

④通过阀轴输入力矩使阀芯产生角位移时，需要作功以克服将阀芯推向磁阻最小位置的电磁力的作用，定位后虽受力但不产生位移故阀轴不需有功率输入。

1.2 实验电路

可控电感器（电抗器）并联于交流电压源上，能起到控制无功电流、调节受端电压、抑制谐波分量和提高系统稳定性等作用。将可变磁阻器串联于电感器主磁路的铁芯中，便可以方便且连续地对电抗器进行控制，其电磁系统示意图如下。

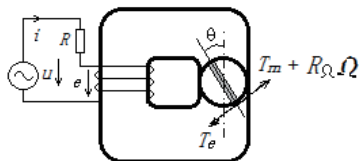
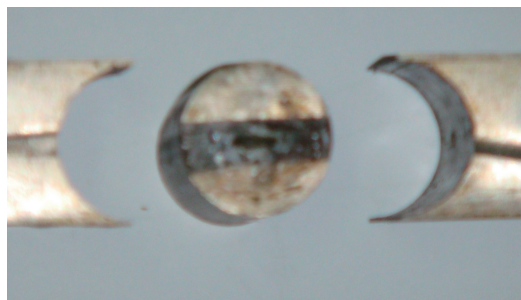


图 2 实验电路

工频电压源 u 、电流 i 、磁链 ψ 、线圈的感应电动势 e 、线圈电阻 R 、电磁转矩 T_e 、机械转矩 T_m 、机械阻力系数 R_Ω 、阀板角位移 θ 和角速度 Ω ；主线圈匝数为 280 匝，电压采样线圈为 36 匝，铁芯为 SD20×32×64，所用取向硅钢片牌号也为 30Q120。

在 u 作用下线圈将产生与之对应的正弦感应电势 $e=d\psi/dt$ ，如 θ 增大导致铁芯磁阻增大而使 ψ 减小， e 也将随之减小，从而导致 i 和磁势增大，使得 ψ 基本不变。反之亦然。因此，图 2 可视为恒磁链系统。

实物照片见图 3，(a) 图为阀芯和阀座，(b) 图为主磁路串接有可变磁阻器的被试电抗器。



(a) 组装前



(b) 组装后

图 3 可变磁阻器实物

为减小漏磁通简化计算，可变磁阻器串接在芯柱上，线圈分为上下两部分，当中留出 8mm 间隙供外力矩操纵旋阀角位移的阀轴（如图中螺丝刀），下部线圈外层的细胶线为获取铁芯铁磁质电磁特性所需的电压信号而附加的采样线圈，上部线圈的白线为本应剪掉的线圈绕制过程中的捆扎带。此外，将重绕的两线圈分别套在铁芯的两边柱上，将能清楚地摄取阀芯阀座和原铁芯中间的相对位置的照片，但较大的漏感会影响计算结果。

当正弦电压源激励于图 2 线圈两端时，其铁芯的磁感应强度 $B \approx B_m \sin \omega t$ ， B_m 为正弦波的幅值，受制于铁磁质的磁滞回线，相应的磁场强度 H 却是非正弦周期的。因此用呈正弦变化的 B 作为自变量来表达磁阻率 $\nu=\nu(B(\omega t))$ 较为方便，本研究用 $H-B$ 图来揭示多值非线性的铁芯铁磁质磁阻率的变化规律。

1.3 记录波形

以线圈输入电压均为 55V，阀芯角位移 θ 分别等于 0° 、 45° 、 90° 为例，各自的输入电流、输入电压和 $H-B$ 回线如图 4~6 所示。实验中所用记录仪器为 TDS3032B 型示波器及其所附属的 A622 电流探头。

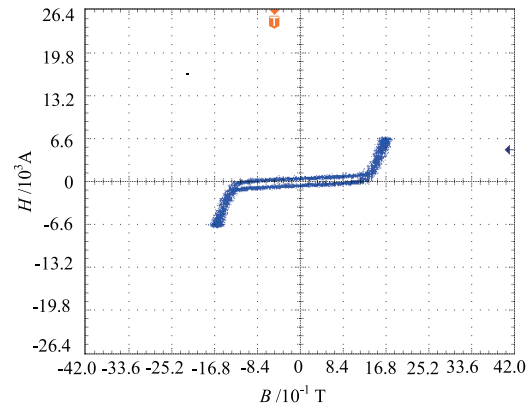
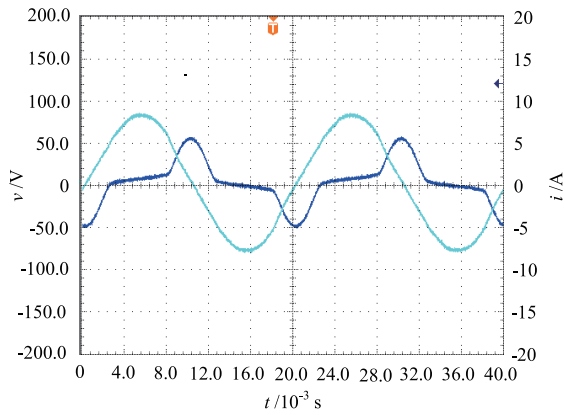


图 4 $\theta=0^\circ$ 时的输入电压、输入电流和 $H-B$ 回线

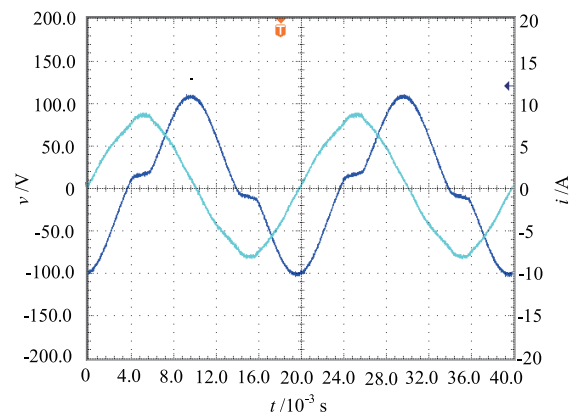
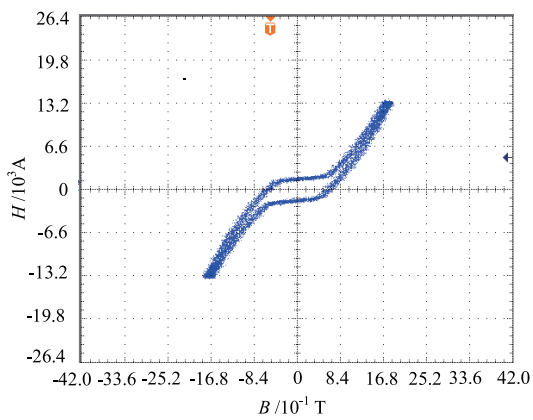


图 5 $\theta=45^\circ$ 时的输入电压、输入电流和 $H-B$ 回线

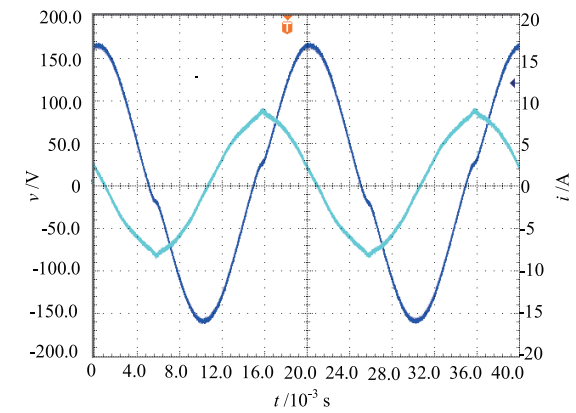
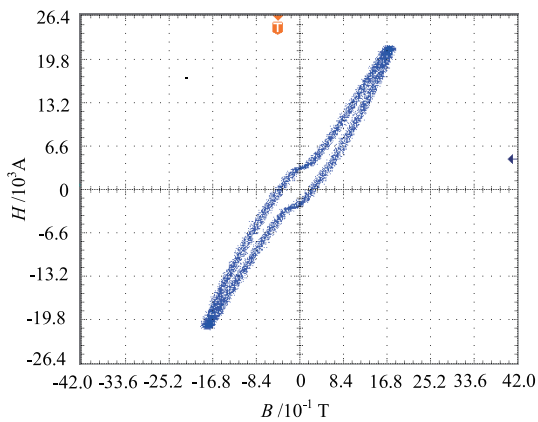


图 6 $\theta=90^\circ$ 时的输入电压、输入电流和 $H-B$ 回线

图 4~6 提示： θ 越大进入饱和态的电角度越小，饱和电流幅值亦越大；饱和持续的电角度越大、饱和电流越大， $H-B$ 回线所围的铁损面积也越大；结合图 1 还可以看出

越大可变磁阻器的等效截面越小、磁阻也就越大。

2 定量分析和讨论交流

2.1 饱和电角度

通常电机/电器铁芯铁磁质工作范围在膝点之内,膝点之上的磁导率常被简化为略大于真空磁导率;永磁故障限流器等电器在正常时工作于膝点之上,膝点之内磁特性往往不过分关注。然而,可变磁阻器是通过调整铁芯局部铁磁质的磁饱和程度来改变等效磁阻率的,因此需要描述膝点以上部分的磁特性。

关注图4~6各右分图所示的 $H-B$ 回线,当 θ 为某常数时,自零开始依次改变 B 并连接各个 $H-B$ 回线的顶点还可得各自的基本 $H-B$ 曲线。描述一个周期内进入饱和态的电角度 a 与基本 $H-B$ 曲线的关系的示意图如下所示。

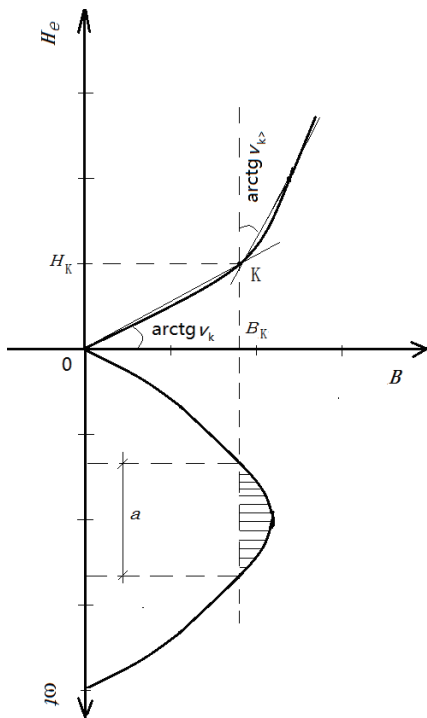


图7 $H-B$ 曲线、饱和电角度

以膝点 $K(B_k, H_k)$ 为界,用折线逼近基本 $H-B$ 曲线,则磁阻率 $\nu=\nu[B(\omega t)]$ 可分段表为:

$$\nu = \begin{cases} \nu_1 = \nu_k = \frac{H_k}{B_k}, & 0 \leq B(\omega t) \leq B_k \\ \nu_2 = \frac{H_k}{B(\omega t)} - \frac{\nu_{k>} B_k}{B(\omega t)} + \nu_{k>}, & B(\omega t) > B_k \end{cases} \quad (1)$$

$\nu_{k>}$ 为用斜率表示的膝点之上的磁阻率,如图所示:
 $\nu_{k>} = \Delta H / \Delta B$.

$B(\omega t)$ 的阴影部分电角度为 a ,铁磁质已进入饱和状态,基于对应的 $H-B$ 回线, H 以及输入电流 I 会急剧增大,若

定义饱和度 $K = a/\pi$,则图4所示 $\theta=0^\circ$ 时 $K \approx 0.43$;图5所示 $\theta=45^\circ$ 时 $K \approx 0.80$;图6所示 $\theta=90^\circ$ 时 $K \approx 0.96$ 。显然, K 还要受到幅值 B_m 的影响,应该表示为 θ 和 B_m 的 $K(\theta, B_m)$ 。

2.2 有效磁阻率

如(1)式所示,当 $B_m < B_k$,可测算出 ν 为某常数, $\nu = \nu_1 = \nu_k$;但当 $B_m > B_k$ 时, $\nu = \nu[B(\omega t)]$ 为时变的,解析表达不直观。因此有必要引入工作范围跨越图7膝点两端的有效磁阻率 ν_e ,使得由 ν_e 与正弦稳态 B 的幅值 B_m 在一个周期内所算出的磁能密度,与用瞬时磁阻率 $\nu(t)$ 和按正弦规律变化的瞬时磁感应强度 $B(t)$ 在一个周期内所计算出的磁能密度相等,则非正弦周期函数 $H(t) = \nu(t) B_m \sin \omega t$ 的有效值可以表示为 $H_e = \nu_e B_m$ 。这样,当 $|B| > B_k$ 时,也可以通过测算的某常数 ν_e 来取代时变的 $\nu = \nu[B(\omega t)]$ 。

时变的磁能密度 w_m 在周期 T 的平均值如(2)式所示

$$\overline{w_m} = \frac{1}{T} \int_0^T w_m dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B} dt = \frac{1}{4} \nu_e B_m^2 \quad (2)$$

考量正弦函数的对称性可得

$$\frac{1}{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} \nu(\alpha) B_m^2 \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{1}{4} \nu_e B_m^2 \quad (3)$$

$$\nu_e = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \nu(\alpha) \sin^2 \alpha d\alpha \quad (4)$$

如前所述, $\nu(\omega t)$ 可简化为分段线性的,当 $0 \leq B_m \leq B_k$ 时

$$\nu_e = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \nu_1 \sin^2(\alpha) d(\alpha) = \nu_k \quad (5)$$

提示当 B_m 小于膝点处的磁通密度 B_k 时,有效磁阻率 ν_e 也为膝点处的磁阻率 ν_k 。

当 $B_m > B_k$ 时,因 $\omega t_k = \arcsin(B_k/B_m)$ 为膝点处的电角度, $B(\omega t) = B_m \sin \omega t$,则

$$\begin{aligned} \nu_e &= \frac{4}{\pi} \left[\int_0^{\omega t_k} \nu_1 \sin^2 \alpha d\alpha + \int_{\omega t_k}^{\pi/2} \nu_2 \sin^2 \alpha d\alpha \right] \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\omega t_k} \nu_k \sin^2 \alpha d\alpha \\ &\quad + \frac{4}{\pi} \int_{\omega t_k}^{\pi/2} \left[\frac{H_k}{B(\alpha)} - \frac{\nu_{k>} B_k}{B(\alpha)} + \nu_{k>} \right] \sin^2 \alpha d\alpha \quad (6) \\ &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\omega t_k} \nu_k \sin^2 \alpha d\alpha + \frac{4}{\pi} \int_{\omega t_k}^{\pi/2} \frac{H_k}{B_m} \sin \alpha d\alpha \\ &\quad - \frac{4}{\pi} \int_{\omega t_k}^{\pi/2} \nu_{k>} \frac{B_k}{B_m} \sin \alpha d\alpha + \frac{4}{\pi} \int_{\omega t_k}^{\pi/2} \nu_{k>} \sin^2 \alpha d\alpha \end{aligned}$$

当 B_m 大于膝点处的磁通密度 B_k 时,膝点的磁阻率 ν_k 和膝点以上磁阻率 $\nu_{k>}$ 等参数会共同影响着 ν_e ,从定积分表达式可得

$$v_e = \frac{2(\omega t_k)H_k}{\pi B_k} + \frac{2H_k}{\pi B_m^2} \sqrt{B_m^2 - B_k^2} - \left[\frac{2(\omega t_k)}{\pi} + \frac{2B_k}{\pi B_m^2} \sqrt{B_m^2 - B_k^2} - 1 \right] v_{k>} \quad (7)$$

上式中当线圈、铁芯和 θ 确定之后,膝点处的电磁角速度 ωt_k 、磁场强度 H_k 、磁感应强度 B_k 、基本磁化曲线膝点前、后的斜率分别为 v_k 、 $v_{k>}$, π 为圆周率等均为已知,故有效磁阻率仅为 B_m 的函数 $v_e=f(B_m)$ 。当改变阀板角位移 θ 时,磁路系统的基本磁化曲线会随之改变, ωt_k 、 H_k 、 B_k 、 v_k 和 $v_{k>}$ 等的变化,则可变磁阻器的有效磁阻率应表示为 $v_e(\theta, B_m)$ 。如解读图4可测算出上述信息再代入(7)式即可得其电感器磁路等效磁阻率 $v_e=2900(\text{m}/\text{H})$,同理可得图5电感器磁路等效磁阻率 $v_e=7630(\text{m}/\text{H})$,图6电感器磁路等效磁阻率 $v_e=13580(\text{m}/\text{H})$ 。

图2提示若 B_m 不变, θ 旋转一周会出现两个 v_e 的最大值 $v_{e\max}$ 和两个最小值 $v_{e\min}$,当 B_m 确定之后, $v_e(\theta, B_m)$ 可视作仅随 θ 呈 $\cos 2\theta$ 变化的函数

$$v_e(\theta) \approx 0.5(v_{e\max} + v_{e\min}) + 0.5(v_{e\max} - v_{e\min})\cos 2\theta \quad (8)$$

将 $v_{e\max}=13580(\text{m}/\text{H})$, $v_{e\min}=2900(\text{m}/\text{H})$ 代入,可得当 $B_m=1.68\text{T}$ 时,电感器铁芯的有效磁导率是可变磁阻器旋角位移 θ 的函数: $v_e(\theta) \approx 8240+5340\cos 2\theta (\text{m}/\text{H})$ 。

2.3 实际应用例

将可变磁阻器串联于电感器(工频环境下的电感器常被称作电抗器)主磁路的铁芯中,便可以方便、连续且实时地对铁芯的有效磁阻率进行控制,达到调节电抗器容量和电感器电感量的目的。无功分量的定义、物理意义和计量方法至今仍是研究热点,本稿实验所涉工频环境下正弦电压与非正弦波电流状态下的无功容量测算,常采用近似线性化的方法来计算电抗器容量,即取非正弦电压 U 或电流 I 的有效值来表示 $S=UI$,但是,对铁芯常处于饱和态的可控电抗器来说,在工频环境下其高次电流谐波是必须滤除的,因此其容量宜用并联电压有效值 U 和基波电流有效值 I_1 来表示 $S \approx UI_1$ 。

通过快速富氏变换FFT可得图4左分图电流基波幅值为3.1A,进而可算出其有效值再得工频容量为 $120V_{ar}$,工频电感为80mH;同理可从图5左分图电流基波幅值为8.7A,算出工频容量为 $340V_{ar}$,工频电感为28mH;从图6左分图电流基波幅值为16.2A,算出工频容量为 $630V_{ar}$,工频

电感为15mH。

实验表明:①调节 θ 可以连续且平滑地改变 v_e ,电抗器工作于膝点之上时, $dv_e/d\theta$ 较小,电抗器工作于膝点之下时, $dv_e/d\theta$ 较大;②从 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ 或 $180^\circ \rightarrow 270^\circ$ 调节 θ , v_e 是递增的;从 $90^\circ \rightarrow 180^\circ$ 或 $270^\circ \rightarrow 360^\circ$ 调节 θ , v_e 是递减的,磁阻值的变化均是实时的;③本例调节倍率大于5;④磁阻的变化与阀芯角位移的关系是非线性的;⑤作阀芯角位移时需外力做功(如图3的2"螺丝刀),角定位用M2螺母即可且不需外力做功。

3 结束语

用非铁磁质阀板和铁磁质阀板夹构成阀芯,阀芯与铁磁质阀座间为过渡配合,改变阀芯阀座间的夹角能构成与可变电阻器对应的可变磁阻器。这一初步概念已通过实物实验和数学分析得到验证,其主要特性为:不需外加电生磁动势也能直接、连续和平滑地改变磁阻/电感量,磁阻值受阀芯角位移和磁感应强度的共同影响;通过改变铁磁质磁路的局部截面来调节磁阻会凸显磁饱和带来的非线性,用有效磁阻率可以表达对应的非正弦周期的磁场强度,还可以计算出主磁路串有可变磁阻器的铁芯电抗器的容量。可变磁阻器避免了电控可变电抗器局部磁路的半波饱和,磁阀和线圈抽头调节的有级局限,直线调节气隙的噪音和精度低等结构缺陷,可望为改善磁类参数调节效果的研究提供一点参考。

参考文献

- [1] Hurley W G, Wölfle W H. Transformers and inductors for power electronics: theory, design and applications[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.
 - [2] 日本电气学会, 电力用磁気デバイスの最新動向[R]. 電気学会技術報告, 第1274号, 2012.
 - [3] 堤晋太郎. 特殊な巻装方法によるTwo-stage誘導分圧器[J]. 電気学会論文誌A, 基礎・材料・共通部門誌, 2012, 132(10): 924-929.
- Tsutsumi S. Two-stage inductive voltage divider

using special winding method[J]. The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. A, A publication of Fundamentals and Materials Society, 2012, 132(10): 924-929(in Japanese).

[4] 伍家驹. 一种能控制磁通的阀门: 中国, ZL 201310076477.3[P]. 2015-09-09.

作者简介

伍家驹(1951—), 男, 教授, 从事功率变换器的优化设计。

电话: 13065103615, E-mail: wujiaj2003@aliyun.com

详细通信地址: 南昌航空大学信息工程学院 330034

上接144页



图6 江阴市星火电子科技有限公司生产的罗氏线圈及积分器

但由于制造工艺和材料的限制, 对于正常 50Hz 正弦波来说其准确级不及带铁芯的常规电流互感器, 但它具有

电流可实时测量、响应速度快、不会饱和、几乎没有相位误差的特点, 故其可应用于继电保护用电流互感器。

柔性罗氏线圈非常柔软, 容易折叠, 所以非常适用于空间比狭窄、不易于安装普通开合式电流互感器的环境, 加上它不会产生饱和, 所以也深受业内人士欢迎。

当然本文不能一一介绍低压电流互感器其他很多重要的指标, 只是通过以上文章, 希望大家能够对低压电流互感器有个初步的认识, 目前针对低压互感器的国家标准还没有出台, 但 IEC38 505 506 已经在出草案, 用不了多久, 我国也会相继出好国家标准。

上接147页

(2) 产品用万能试验机进行加压实验, 重复性好, 没有残余应力累积。对不同抛光时间的样品, 随着外加应力的升高, 电感差逐渐减小, 电感趋于一致。

(3) 不同抛光时间样品, 经过涂层工艺, 其电感量基本保持不变。

抛光是高导产品出货前重要工序, 关系到产品合格率高低。抛光时间对产品特性影响讨论只是客观摸清现状, 为改善产品抗应力特性, 后续还需要检讨不同工艺产品抛光跌落情况, 验证烧成温度、晶体结构等对抛光跌落的影响, 开发具有抗应力特性的高性能材料。

参考文献

[1] 黄永杰. 磁性材料 [M]. 成都: 电子工业出版社, 1994.

[2] 朱成. 磁性物理与铁氧体

[3] 陈会丽, 钟毅, 王华昆等. 残余应力测试方法的研究进展 [J]. 云南冶金, 2005, 34(3): 52-54.

作者简介:

王鑫, 男, (1986—), 2011年4月毕业于南京航空航天大学, 获应用化学工学硕士学位, 2011年至今, 在天通控股股份有限公司从事高性能软磁铁氧体开发工作。联系地址: 浙江海宁市盐官镇郭店建设路1号; 联系电话: 0573-87682057; 邮箱: wx@tdgcore.com。