

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.01.004

感应取能电源磁芯功率输出特性研究

岳天琛¹, 刘亚东¹, 何志芪², 盛戈皞¹, 曾奕¹, 江秀臣¹, 蔡振飞³

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海工程技术大学, 上海 201620;

3. 上海市电力公司市区供电分公司, 上海 200051)

摘要: 电流互感器取能装置的磁芯是取能装置性能的决定性因素。分析了互感器取能电源的工作原理, 建立了磁芯功率输出模型, 并通过实验验证了模型的有效性。针对实际应用的要求, 提出了取能磁芯的功率密度的概念。理论分析并实验验证了功率密度与气隙、磁芯尺寸以及磁芯材料的关系。

关键词: 感应取能; 取能磁芯; 功率密度; 输出特性

Power Output Characteristics of Magnetic Core in CT Energy Harvesting Devices

YUE Tianchen¹, LIU Yadong¹, HE Zhimin², SHENG Gehao¹,

ZENG Yi¹, JIANG Xiuchen¹, CAI Zhenfei³

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

201620, China; 3. Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200051, China)

Abstract: The magnetic core is the dominant factor of the performance of a current transformer (CT) energy harvesting device. In this paper, a power output model is built and is verified through experiments. According to the actual application requirements, the concept of power density is proposed. The relations of power density to air gap, magnetic core material, and size of magnetic core are analyzed and experimentally verified.

Key words: energy harvesting by induction; magnetic core for energy harvesting; power density; output characteristics

0 引言

能量供应是输电线路在线监测的两大关键技术之一。感应取能技术, 为高压侧监测装置提供能量支撑, 是输电线路高压侧能量获取的主要方式, 其性能直接影响输电线路在线监测装置的稳定性和可靠性。

近几年国内外学者对感应取能技术已经做出初步研究, 大多都集中在取能线圈后的电路设计和验证, 对取电取能磁芯的功率输出特性研究较少。文[1]提出当负载电阻等于取电取能线圈内阻时可获得最大功率, 并用一尺寸为 $\phi 8.5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的磁芯, 验证了上述结论; 文[2]对感应取能线圈的输出

功率与其磁导率、体积等因素作出定性的分析, 但未给出严格定量关系; 为避免取能线圈工作在饱和状态, 文[3-5]中提出在磁芯中加入气隙的方法来改变磁芯的磁化曲线, 从而解决磁芯的饱和问题; 文[6-9]中采用双线圈取能结构, 当一次侧电流过大时, 补偿线圈投入, 以提高取能电源的动态适应范围; 文[10]中通过 CT 变比切换使次级电流保持在预设范围内; 文[11-12]建立了感应取能磁芯的功率输出模型, 并研究了一次侧电流、二次侧线圈匝数等因素对线圈输出功率的影响。

由于线路安全、信号质量等方面的考虑, 线路上监测装置重量有严格限制, 如: 普通输电线路监测装置重量不大于 2.5 kg, 微风振动监测装置重量不超过 1 kg。因此需深入研究取能线圈的功率输出特性以优化取能线圈的设计, 提高取能线圈的功率密度。

收稿日期: 2014-08-19; 修回日期: 2014-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307109); 国家科技部国际合作项目(2013DFG71630); 上海市科委资助项目(13dz1201300)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51307109), the International S & T Cooperation Program of China(2013DFG71630), the Shanghai Committee of Science and Technology(13dz1201300).

笔者从电流互感器基本原理入手,深入研究了取能线圈在工频条件下的功率输出特性,建立了取能线圈的功率输出模型,分别从理论和实验两方面论证了磁芯气隙、磁芯材料、磁芯尺寸等因素对取能磁芯输出功率的影响。

1 取能磁芯的功率输出模型

互感器取能装置的基本工作原理见图 1。

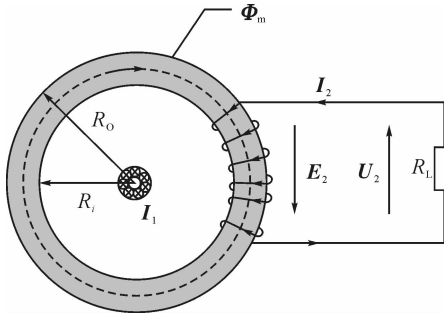


图 1 取能装置工作原理图

Fig. 1 Principle diagram of energy harvesting device

根据电机学基本理论^[13],一次侧导线穿过磁芯,电流为 I_1 ,二次侧感应电动势为

$$E_2 = -j\sqrt{2} \pi f N_2 \Phi_m. \quad (1)$$

式(1)中: f 为 50 Hz 工频; N_2 为副边线圈匝数; Φ_m 为主磁通最大值。阻性负载 R_L 上电压为 U_2 ,二次侧线圈内阻为 R_2 。磁动势平衡方程式为

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = N_1 I_m. \quad (2)$$

式(2)中: N_1 为 1 匝; I_2 为二次侧输出电流; I_m 为励磁电流。 I_m 可分解为磁化电流分量 I_μ 以及铁耗 I_{Fe} 。相量图见图 2 左侧。为简化分析,忽略二次侧内阻和铁耗。图 2 右侧为简化后相量图。

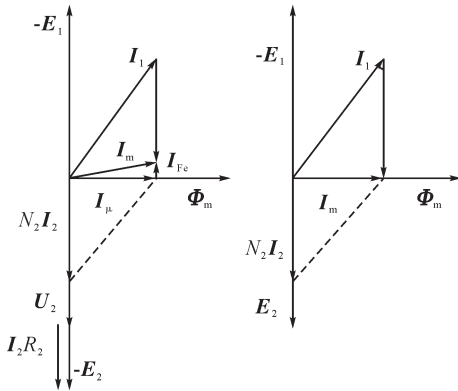


图 2 相量图及简化相量图

Fig. 2 Phasor diagram and simplified phasor diagram

此时,磁化电流即励磁电流,即

$$I_\mu = I_m. \quad (3)$$

磁化电流与原边电流及二次侧电流的关系为:

$$I_\mu = \sqrt{I_1^2 - (N_2 I_2)^2}; \quad (4)$$

$$E_2 = \sqrt{2} \pi f N_2 \Phi_m. \quad (5)$$

主磁通最大值为 $\Phi_m = B_m S$, 其中 S 为磁芯的有效截面积,假定磁芯工作在线性区,则 B_m 与 H_m 的关系为

$$B_m = \mu H_m. \quad (6)$$

由安培环路定律

$$H_m l = \sqrt{2} N_1 I_\mu. \quad (7)$$

式(7)中, N_1 为一次侧匝数,此处为 1。

二次侧输出功率为

$$P_2 = E_2 I_2 = 2\pi f \mu I_\mu S \frac{\sqrt{I_1^2 - I_\mu^2}}{l}. \quad (8)$$

将磁化电流 I_μ 作为自变量,对式(8)求导,并令

$$P_2(I_\mu) = 0, \text{解得在 } I_\mu = \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \text{ 时,输出功率最大,为}$$

$$P_{\max} = \pi f \mu S I_1^2 / l. \quad (9)$$

验证式(8)、(9)的结论,搭建实验电路见图 3。

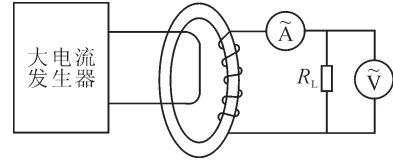


图 3 输出功率实验电路示意图

Fig. 3 Circuit of output power experiment

大电流发生器提供一次侧电流,二次侧接可变阻性负载。实验用磁芯为使用线切割对切后的环形微晶合金磁芯,内径 55 mm,外径 85 mm,宽 20 mm, 200 匝,平均磁路长度 213.1 mm,有效截面积 230.3 mm²。大电流发生器分别输出 10、20、30 A 电流,变化负载,测量负载电流及电压。由式(4)计算得到励磁电流,近似作为磁化电流,得到实测输出功率与磁化电流的关系见图 4、5。可见,实测曲线与使用 MATLAB 计算的曲线的形状一致,最大功率值略小于理论计算值,误差在 10% 以内。实测曲线的变化趋势略微滞后理论计算。造成滞后的原因是式(4)中将励磁电流值近似为磁化电流值,实际由于铁耗分量的存在,磁化电流小于励磁电流。由于可以通过对负载电流的控制^[14]使磁芯总是工作于最大功率输出点,故铁耗带来的曲线整体右移并不影响该模型用于计算磁芯功率输出的有效性。

2 取能磁芯的功率密度

为了对比磁芯的功率输出能力,定义取能磁芯的功率密度 λ 为在一定的原边电流下,磁芯的最大功率输出 $P_{\max}$ 与磁芯体积 V 之比,即

$$\lambda = \frac{P_{\max}}{V} = \frac{\pi f \mu S I_1^2 / l}{V}. \quad (10)$$

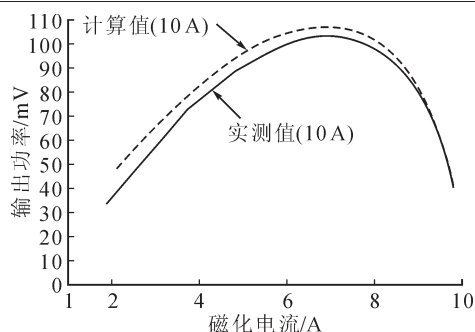


图4 原边电流 10 A 时实测值与理论值对比

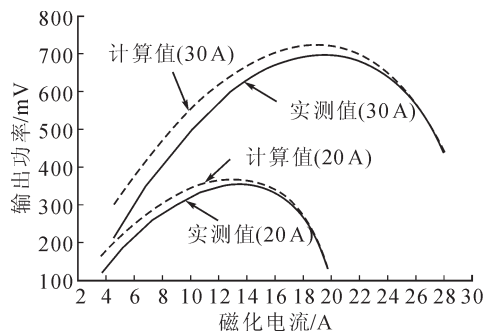
Fig. 4 Measured value and theoretical value ($I_1=10$ A)

图5 原边电流 20、30 A 时实测值与理论值对比

Fig. 5 Measured value and theoretical value ($I_1=20$ A, $I_1=30$ A)

2.1 功率密度与磁芯气隙

相对于软磁材料的低磁阻,气隙有非常高的磁阻。增加气隙后,整个磁芯有效磁导率将会显著降低。图6为引入气隙的磁芯示意图。记磁芯外径为 D_o ,内径为 D_i ,磁芯平均磁路长度为 l_c ,气隙长度为 l_g ,磁芯未切割时的相对磁导率为 μ_r ,绝对磁导率为 μ ,切割后相对磁导率为 μ_{rg} 。

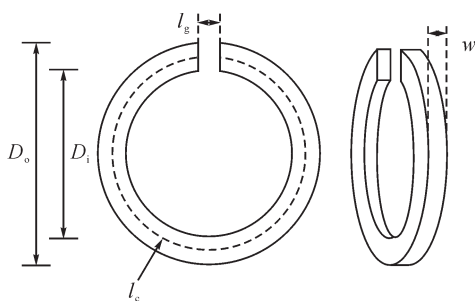


图6 引入气隙的磁芯示意图

Fig. 6 Magnetic core with air gap

根据最常用的引入气隙后的磁芯简化模型^[5],引入气隙后磁芯(包括气隙)的有效相对磁导率为

$$\mu_{rg} = \frac{\mu_r}{1 + \frac{l_g}{l_c} \mu_r} \quad (11)$$

引入气隙的磁芯在一定原边电流下的最大输出功率为

$$P'_{\max} = \pi f \mu_{rg} \mu_0 S I_1^2 / l_c = \pi f \frac{\mu_r}{1 + \frac{l_g}{l_c} \mu_r} S I_1^2 / l_c \quad (12)$$

由式(12)可见磁芯在一定原边电流下的最大输出功率对气隙的长度非常敏感。采用内径 50 mm、外径 70 mm、宽 35 mm、平均磁路长度 183 mm、有效截面积 345.4 mm²、200 匝的环形硅钢磁芯,使用图3中实验电路,变化负载电阻,测出未切割的磁芯在 10 A 原边电流下的输出曲线。观察到磁芯最大功率输出点的电压波形无畸变,最大输出功率为 869 mW,可得对应相对磁导率为 23 363。再使用线切割工艺将磁芯对切,在接合处加不同厚度的气隙垫纸,见图7,测量 10 A 原边电流下加垫纸后的磁芯功率输出曲线,并与未切割时的曲线对比,结果见图8,统计由式(11)、(12)计算出的加不同厚度气隙垫纸后磁芯的理论磁导率、理论最大输出功率,与实测最大输出功率对比并计算误差,结果见表1。

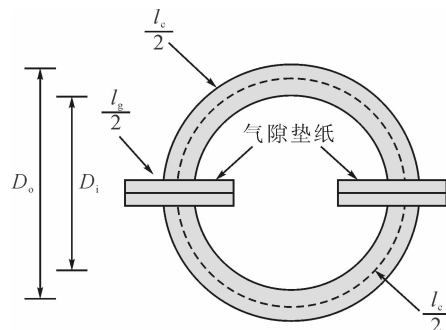


图7 磁芯加垫纸示意图

Fig. 7 Magnetic core with air-gap paper

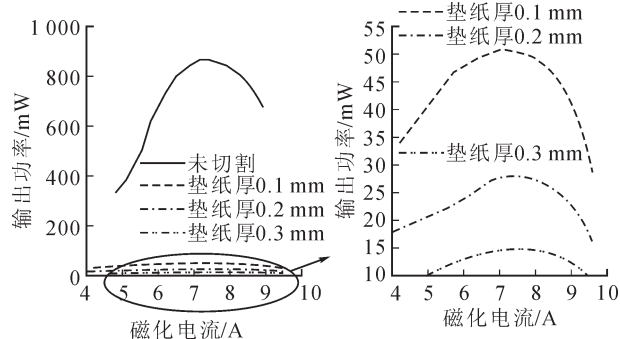


图8 垫纸实验中磁芯的输出曲线对比

Fig. 8 Output power of magnetic core with air-gap paper

可见将垫纸厚度作为气隙长度来计算最大输出功率的误差较大。由于在线切割磁芯时,切割换向会造成切面出现凹凸条纹,切面的表面粗糙度 R_z 通常为 1~50 μm 之间,故此处考虑将线切割后切面粗糙引入的等效气隙考虑在内。去掉气隙垫纸,测得对切后的硅钢磁芯在 10 A 原边电流下最大输出功率为 258 mW,由式(12)可得切面粗糙引起的等效气隙 l_{eq} 长度约为 0.02 mm。将气隙垫纸的厚度加上切面粗糙引入的等效气隙 l_{eq} 长度作为修正的等效气隙长度 l'_g 。采用 l'_g 计算 10 A 原边电流下理论最大

表1 最大功率理论计算值与实测值对比

Table 1 Theoretical value and measured value of maximum output power

l_g/mm	理论相对 磁导率	理论最大 功率/mW	实测最大 功率/mW	误差/%
0.1	1 700.5	63.3	50.6	25.1
0.2	882.8	32.8	28.1	16.7
0.4	450.4	16.8	15.0	12.0

输出功率值并与实测值对比,结果见表2。可见,考虑到线切割引起的等效气隙后,气隙垫纸实验中的理论最大功率与实际最大功率基本一致,误差在7%以内。取能磁芯实际应用于线路上时,为方便安装和拆卸,必须将取能装置的磁芯进行对切,由于任何的切割工艺和抛光工艺都不能保证切割面绝对光滑,因此对切将不可避免地引入气隙,对切后的磁芯有效磁导率及功率密度必然会下降。激光切割的表面粗糙度 R_z 可以控制在 $1.6\sim 6.4\ \mu\text{m}$ 之间,但成本极高,且切割厚度不超过 $20\ \text{mm}$,不适合感应取能磁芯的切割。综合考虑,使用线切割作为对切磁芯的工艺。为了降低线切割引入的等效气隙长度,应使用机械抛光等方式降低切面的粗糙度。

表2 修正气隙长度后最大功率理论计算值与实测值对比

Table 2 Theoretical value and measured value of maximum output power with revised air gap length

l_g/mm	理论磁 导率	理论最大 功率/mW	实测最大 功率/mW	误差/%
0.12	1 434.6	53.4	50.6	5.5
0.22	805.4	30.0	28.1	6.8
0.42	429.4	16.0	15.0	6.7

2.2 功率密度与磁芯材料

目前国内外开发的取能装置,通常考虑硅钢、微晶合金、坡莫合金作为磁芯备选材料^[16-17]。在未经切割的条件下,硅钢具有高饱和磁感应强度,微晶合金具有高磁导率,而坡莫合金的磁导率介于二者之间,饱和磁感应强度最低。

由气隙部分的分析可知,磁芯切割会导致功率输出性能下降。为了对比3种材料的磁芯在切割前后的功率输出性质,以3种材料制备的环型(未切割)的内径 $55\ \text{mm}$ 、外径 $85\ \text{mm}$ 、宽 $20\ \text{mm}$ 、200匝的磁芯各20只为实验样品,搭建图3中所示电路,测量每只磁芯在 $10\ \text{A}$ 原边电流下的最大输出功率,并观察取得最大功率时,电压波形是否畸变,若有畸变,则说明在取得最大功率时磁芯的工作点已经进入饱和区。使用线切割将上述磁芯样品对切,改变负载阻值,测定磁芯在 $10\ \text{A}$ 原边电流下的功率

输出曲线并统计最大输出功率,切割后的典型输出曲线见图9。

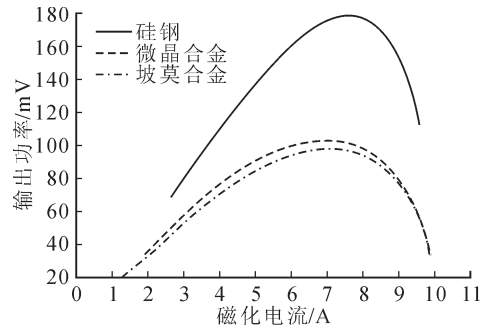


图9 切割后3种材料磁芯的典型输出曲线

Fig. 9 Typical output power of magnetic cores in 3 materials

可见,切割后硅钢磁芯的功率输出显著高于其他两种材料。统计3种材料的样本在切割前的最大输出功率的均值、方差,切割后的最大输出功率的均值、方差,并计算,结果见表3。由样本标准差可见样本的集中程度较为理想,每种材料的20只磁芯的输出特性均较为一致。未切割时,微晶合金磁芯在 $10\ \text{A}$ 原边电流下最大输出功率与硅钢基本相同,但微晶合金最大功率点在饱和区,而硅钢在线性区。假定线切割对硅钢和微晶合金两种材料引入的等效气隙长度相同,则切割后的微晶合金在线性区磁导率应显著高于硅钢,进而微晶合金磁芯切割后最大输出功率应显著高于硅钢。而实测结果与假设结果相反,切割后微晶合金磁芯的均值仅为切割后硅钢磁芯均值的57.5%,且微晶合金磁芯的仅为17.1%。可知线切割对微晶合金磁芯引入的等效气隙长度必然大于硅钢。使用式(12)估算可得,切割硅钢引入的等效气隙长度约为 $0.02\ \text{mm}$,而切割微晶合金引入的等效气隙至少为 $0.05\ \text{mm}$ 。观察切割后样品的切面,硅钢与坡莫合金样品切面较为光洁,而微晶合金的切口毛面明显。对微晶合金磁芯样品进行机械抛光,由于该材料脆性大,抛光过程中极易产生掉碎片现象。测量抛光后该批磁芯样品在 $10\ \text{A}$ 原边电流下的最大输出功率,得其均值为 $106.3\ \text{mW}$,标准差为 $8.2\ \text{mW}$,可见机械抛光对微晶合金磁芯的输出特性无明显改善。

由于感应取能磁芯要套装在线路上,磁芯必须对切后才能安装。坡莫合金磁芯切割后功率密度最低,不考虑作为高功率密度磁芯的备选材料。虽然未切割的微晶合金磁芯磁导率高,但由于微晶合金材料脆性大,韧性差^[18],导致经过切割后性能下降严重。此外微晶合金切割时切缝处会有物相由非晶态向晶态转变^[19],也会导致磁性能下降。在现有切割工

表3 3种材料的磁芯切割前后最大输出功率对比

Table 3 Maximum output power of cut & uncut magnetic cores made of 3 materials

材料	切割前 $P_{\max}$			切割后 $P'_{\max}$			$\frac{P'_{\max}}{P_{\max}}/\%$
	均值/ mW	标准 差/mW	是否 饱和	均值/ mW	标准 差/mW	是否 饱和	
硅钢	603.2	16.77	否	179.8	6.87	否	29.8
微晶	605.1	13.58	是	103.4	7.94	否	17.1
合金							
坡莫	352.1	9.45	是	98.0	7.23	否	27.4
合金							

艺及抛光工艺的限制下,为了取得最大的功率密度,应选择硅钢作为感应取能装置的磁芯材料。

2.3 功率密度与磁芯尺寸

考虑环形磁芯的尺寸对功率密度的影响。记磁芯外径为 D_o , 内径为 D_i , 宽为 w , 依据 IEC 60205-2009 标准^[20], 计算磁芯常数 C_1 和 C_2

$$C_1 = 2\pi \left(w \ln \frac{D_o}{D_i} \right); \quad (13)$$

$$C_2 = 2\pi \left(\frac{2}{D_i} - \frac{2}{D_o} \right) \left(w^2 \ln^3 \frac{D_o}{D_i} \right). \quad (14)$$

磁芯的平均磁路长度为

$$l = C_1^2 / C_2. \quad (15)$$

有效截面积为

$$S = \frac{C_1}{C_2} \times \frac{S_x}{100}. \quad (16)$$

式(16)中, S_x 为磁芯叠片系数。磁芯体积为

$$V = \pi(D_o^2 - D_i^2)w/4. \quad (17)$$

将式(13)-(17)代入式(10)中,可得功率密度 λ 与内外径的关系为

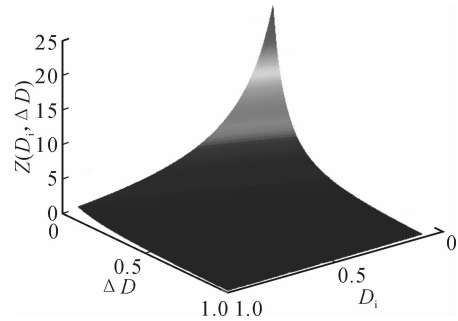
$$\lambda = \frac{\pi f \mu S I_1^2}{V l} = \frac{2 f \mu I_1^2 \ln \frac{D_o}{D_i} S_x / 100}{(D_o^2 - D_i^2) \pi}. \quad (18)$$

可见,选定磁芯材料,固定磁芯体积、磁导率和原边电流后,功率密度正比于 $\ln \frac{D_o}{D_i} / (D_o^2 - D_i^2)$ 。记磁芯内外径之差为 $\Delta D = D_o - D_i$, 考虑二元函数

$$Z(D_i, \Delta D) = \ln \frac{D_i + \Delta D}{D_i} / [(D_i + \Delta D)^2 - D_i^2]. \quad (19)$$

做出该函数图像,见图10。

可见内径越小,内外径之差越小(即外径越小), Z 函数的值越大。可以推断同样体积的磁芯,内径、外径小、宽度大的磁芯输出功率大。为验证上述推断,取表4中环形对切后的硅钢磁芯样品B、C参数作为试验用磁芯,B、C有相同的体积,样品B的内径外径较小、宽度较大。采用图3所示实验电路,测得样品B、C在10A原边电流下最大输出功率分别

图10 $Z(D_i, \Delta D)$ 函数图像Fig. 10 Function image of $Z(D_i, \Delta D)$

为258、180 mW,对应功率密度分别为391、273 W/m³。此外,样品B与样品C的功率密度之比为1.432,与B、C的 Z 函数值之比1.353相差在10%以内,可见实测结果与理论分析是一致的。显然,体积一定的情况下,内外径越小,功率密度越大。但实际情况下,由于磁芯要套接在线路上,对于内径的下限有要求;且磁芯的工艺以及材料强度对磁芯宽度有限制。此外,平均磁路长度过小时,磁芯易饱和。因此在设计取能磁芯时在条件允许范围内应尽量减小内外径,增大磁芯宽度,以获取大功率密度。

表4 磁芯B、C参数对比

Table 4 Parameters of magnetic core B & C

样品	内径/ mm	外径/ mm	宽度/ mm	体积/ cm ³	最大输出 功率/mW	功率密度/ (W·m ⁻³)
B	50	70	35	65.97	258	391
C	55	85	20	65.97	180	273

3 结论

笔者建立了取能磁芯功率输出模型,理论分析并实验验证了磁芯的功率密度与气隙、材料以及尺寸的关系,结论如下:

1)取能线圈的功率输出特性可用其负载模型精确刻画。

2)气隙对取能线圈的输出功率影响非常大,实际使用时应尽量减小气隙,以提高单位功率密度。

3)切割后的取能线圈,其取能效果从好到坏依次为硅钢,超微晶和坡莫合金。

4)取能线圈的物理尺寸影响其功率密度,相同重量的前提下,内径越小,功率密度越高。

参考文献:

- [1] ROSCOE N M, JUDD M D, FITCH J. Development of magnetic induction energy harvesting for condition monitoring[C]//Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). [S.l.]: IEEE, 2009:

- 1-5.
- [2] AHOLA J, AHONEN T, SARKIMAKI V, et al. Design considerations for current transformer based energy harvesting for electronics attached to electric motor[C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. [S.l.]: IEEE, 2008: 901-905.
- [3] 李先志, 杜林, 陈伟根, 等. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 76-80.
LI Xianzhi, DU Lin, CHEN Weigen, et al. A novel scheme of draw-out power supply utilized in transmission line state monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 76-80.
- [4] 毋金涛, 盛戈皋, 曾奕, 等. 输电线路在线监测装置供电电源的设计[J]. 电工技术, 2009(2): 33-35.
WU Jintao, SHENG Gehao, ZENG Yi, et al. Design and development of power supply for transmission line online monitor device[J]. Electric Engineering, 2009(2): 33-35.
- [5] 王赞, 纵飞, 王伟, 等. 输电线路高电位取能电源的研制[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(6): 23-27.
WANG Zan, ZONG Fei, WANG Wei, et al. Development of power supply in high voltage side of transmission lines[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2010, 26(6): 23-27.
- [6] 唐旭晖, 完保娟, 张景超, 等. 光电电流互感器高压端供电电源的设计[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 123-125.
TANG Xuhui, WAN Baojuan, ZHANG Jingchao, et al. Design of power supply for optical current transformer in high voltage side[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 123-125.
- [7] 任晓东, 陈树勇, 姜涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71.
REN Xiaodong, CHEN Shuyong, JIANG Tao. Design of a high side energy extracting device for active electronic current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-71.
- [8] 高迎霞. 电子式电流互感器高压侧电路及电源的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
GAO Yingxia. Research of the high voltage circuit and power supply for electronic current transformer[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.
- [9] 彭韬, 须雷, 尹春, 等. 电子式电流互感器高压侧电源的研制[J]. 变压器, 2010, 47(5): 5-7.
PENG Tao, XU Lei, YIN Chun, et al. Development of HV side power supply for electronic current transformer[J]. Transformer, 2010, 47(5): 5-7.
- [10] 戚栋. 一种适应母线电流动态范围宽的光电式电流互感器供电电源[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 160-164.
QI Dong. A kind of power supply of optic-electric current transformer for accommodating wide bus dynamic current[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(19): 160-164.
- [11] 刘亚东, 盛戈皋, 王葵, 等. 基于相角控制法的电流互感器取电电源设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 72-76.
LIU Yadong, SHENG Gehao, WANG Kui, et al. A new design of current transformer energy harvesting power supply based on phase angle control method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 72-76.
- [12] 刘亚东. 输电线路分布式故障测距理论与关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
LIU Yadong. Distributed fault location theory and the key technologies for transmission line[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [13] 周顺荣. 电机学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHOU Shunrong. Electro mechanics[M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 2007.
- [14] 刘亚东, 盛戈皋, 王又佳, 等. 基于功率控制法的电流互感器取电电源设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 70-74.
LIU Yadong, SHENG Gehao, WANG Youjia, et al. Current transformer draw-out power supply design based on power-controlled method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 70-74.
- [15] FLANAGAN W M. Handbook of transformer design and applications[M]. 2nd edition. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [16] 林杰, 刘刚, 张鸣. 取能电源线圈气隙宽度的影响分析[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 75-79.
LIN Jie, LIU Gang, ZHANG Ming. Impact analysis for the air-gap width of draw-out power supply coil[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 75-79.
- [17] 郭琳云, 尹项根, 严新荣, 等. 配电网智能设备自取能电源的效率提升研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(S1): 217-221.
GUO Linyun, YIN Xianggen, YAN Xinrong, et al. Research of improving power efficiency for intelligent device self-power supply utilized in power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 217-221.
- [18] 张国祥. 新型铁基非晶合金的研究[J]. 金属功能材料, (下转第 29 页)

- ZHANG Xi,ZOU Xuan,HE Zengke,et al.330 kV outdoor switchgear with support type tubular busbar[J]. Shaanxi Electric Power,2013,41(5):66-68.
- [15] 杨 铭,许和平,许其品,等. 自饱和电抗器在大功率电解铝整流中的控制特性分析[J]. 变压器,2014,51(7):6-10.
- YANG Ming,XU Heping,XU Qipin,et al. Control characteristics analysis of self-saturated reactor in lager-power rectifying device for aluminum electrolysis[J]. Transformer, 2014,51(7):6-10.
- [16] 陈世省,陈 益,郭 英. 大型电力变压器几种器身定位结构的介绍[J]. 变压器,2014,51(6):15-17.
- CHEN Shisheng,CHEN Yi,GUO Ying. Introduction of active part fix position structures of large power transformer[J]. Transformer,2014,51(6):15-17.
- [17] 马 斌,周文俊,汪 涛,等. 棒—板模型交流电晕放电紫外数字图像处理及其应用判据[J]. 电力系统自动化, 2008,32(24):74-79.
- MA Bin,ZHOU Wenjun,WANG Tao,et al. An experimental investigations on applicable criterion for AC corona discharge evolvement of rod-plane gap based on UV digital image processing[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(24):74-79.
- [18] 王胜辉,律方成,李和明. 高压设备电晕紫外成像检测图像增强方法的研究[J]. 高压电器,2009,45(6):15-19.
- WANG Shenghui,LYU Fangcheng,LI Heming. Study on image enhancement method of high voltage equipment corona UV imaging detection[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(6):15-19.
- [19] 律方成,戴日俊,王胜辉,等. 极不均匀电场中电晕放电紫外成像图像参量变化特性研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(2):1-7.
- LYU Fangcheng,DAI Rijun,WANG Shenghui,et al. Study on the corona discharge ultraviolet image parameters characteristic in extremely uneven electric field[J]. Journal of North China Electric Power University,2012,39(2):1-7.
- [20] 武建华,付炜平,霍春燕. 外界条件对紫外成像仪检测结果的影响[J]. 河北电力技术,2009,28(5):1-4.
- WU Jianhua,FU Huiping,HUO Chunyan. Influence of external condition on test result of ultraviolet imaging meter[J]. Hebei Electric Power,2009,28(5):1-4.
- [21] 杨 宁,吴旭涛,毕建刚,等. 紫外成像技术在电晕放电检测中影响因素的试验研究[J]. 高压电器,2012,48(12): 59-64.
- YANG Ning,WU Xutao,BI Jiangang,et al. Experimental research of influence factors in detecting corona discharge by UV imaging method[J]. High Voltage Apparatus,2012, 48(12):59-64.
- [22] 孙才新,司马文霞,舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [23] 严 璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- 李 兵(1978—),男,工程师,研究方向为输电设备运维检修。

(上接第 23 页)

- 2003,10(2):13-18.
- ZHANG Guoxiang. A new fe-based amorphous alloy with excellent soft magnetic properties[J]. Metallic Functional Materials,2003,10(2):13-18.
- [19] 刘吉磊,朱正吼,尹 镭,等. 线切割工艺对 Fe78Si9B13 非晶合金铁芯工频软磁性能的影响[J]. 南昌大学学报(理科版),2012,36(4):351-354.
- LIU Jilei,ZHU Zhenghou,YIN Lei,et al. Effect of wire saw technic on the soft magnetic properties of Fe78Si9B13 amorphous alloy under line frequency[J]. Journal of Nanchang University(Natural Science),2012,36(4):351-354.
- [20] IEC 60205-2009 Calculation of the effective parameters of magnetic piece parts[S]. 2009.
- 岳天琛(1989—),男,硕士研究生,研究方向为电力设备在线监测。