

基于分数匝的磁性元件特性分析

The Characters of Magnetic Components with Fraction Turns

陈庆彬¹, 林金城²

¹ 福州大学电气工程与自动化学院, 福建省 福州市 350108

² 厦门南磁电子有限公司, 厦门市 361000

摘要: 磁性元件是电力电子系统中不可或缺的关键器件。在工程应用中, 常由于 PCB 布线等原因而使磁性元件出现分数匝的现象。分数匝磁件的特性是否与整数匝磁件一致, 尚无完整的分析结论。本文在理论上详细分析了分数匝的磁性元件电磁特性的关键影响因素及感量稳定性、偏磁特性和耦合特性。分析结果表明分数匝 UUI 型磁件比传统分数匝 E 型磁件具有更好的感量稳定性、偏磁特性和更小的漏感。最后, 实验结果与理论分析的一致性验证了理论分析的正确性和可行性。

关键词: 磁性元件, 分数匝, E 型磁件, UUI 型磁件

中图分类号: TM55 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2014)10-6-121

1 引言

电力电子技术因其高效率、高功率密度及体积重量小等优点而得到广泛的应用。电力电子系统中磁性元件是唯一的非标准件, 一般需设计者根据设计要求进行设计, 是电力电子系统中最具挑战性的设计之一。但磁性元件(包括电感器和变压器)又是电力电子系统中不可或缺的关键元件^[1-3]。

对于采用铁氧体磁芯的传统 E 型磁性元件, 在工程上其绕组匝数一般采用整数匝的形式, 如图 1 所示。但在一些特殊的场合中, 为了方便 PCB 布线等要求, 也存在绕组多“半匝”或少“半匝”的情况(这里称之为分数匝绕组), 如图 2 所示。整数匝绕组磁件的分析方法目前已经研究较多, 而分数匝绕组的分析则相对较少。

分数匝绕组相对于整数匝绕组的理论分析是否是单纯将整数匝绕组的匝数换成相应的分数匝呢? 它是否与整数

匝绕组具有一样的磁芯饱和特性与变压器耦合特性呢? 目前对于这些问题尚无完整的分析结果。本文详细分析了传统 E 型磁芯下分数匝绕组与整数匝绕组在感量计算、磁芯饱和特性及变压器耦合特性上的特点, 指出其存在的缺点和不足。在此基础上分析了 UUI 型磁件在相应情况下的特性, 通过分析比较得出 UUI 型磁芯磁元件可以有效地克服传统 E 型磁芯分数匝下的缺点和不足。最后, 仿真与实验结果验证了理论分析的正确性与可行性。

2 传统 E 型磁芯分数匝磁件的感量计算和饱和问题

2.1 理论分析分数匝磁件等效感量的计算

对于传统的 E 型磁件, 其整数匝磁件结构图如图 3(a) 所示。图中磁件的绕组设置在磁芯的中柱上。绕组的匝数为 N , 绕组电流为 I 。其等效磁路如图 3(b) 所示。其中:

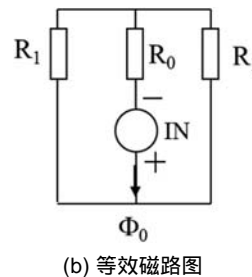
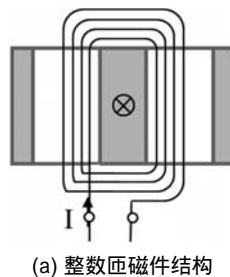
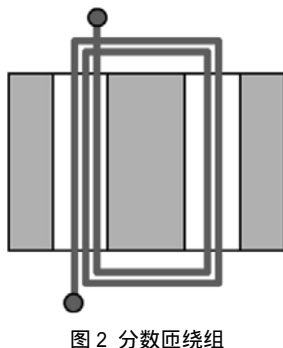
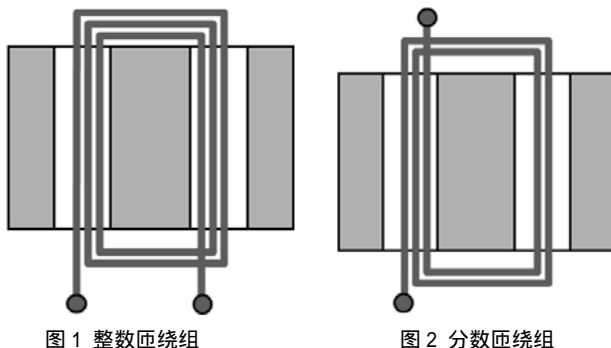


图 3 整数匝磁件感量理论计算图

R_0, R_1 分别为磁芯中柱和边柱的磁阻； Φ_0 为磁芯中柱的磁通。 IN 为磁件绕组的磁动势。

电感量的定义为：单位电流下绕组所产生的磁链大小即为磁件的电感量。根据电感量的定义，设 $I=1A$ 时，图 3(b) 中整数匝磁件的电感量可由公式 1 求得。

$$L = \Phi_0 = \frac{N^2}{R_0 + R_1/2} = \frac{2N^2}{2R_0 + R_1} \quad (1)$$

E 型分数匝磁件的结构如图 4(a) 所示，其绕组由完整的 N 匝绕组加上半匝线圈构成。 N 匝绕组设置在磁芯的中柱上，而多出的半匝线圈在实际应用中，可视为通过边柱形成完整的一匝绕组，其等效磁件结构如图 4(b) 所示。因此，分数匝绕组可视为中柱上 N 匝线圈绕组与 1 匝边柱绕组的串联。其剖面如图 5 所示。

由图 5 可得 E 型磁件分数匝下的等效磁路如图 6 所示。其中， R_0, R_1 分别为磁芯中柱与边柱的磁阻； Φ_0, Φ_1 分别为磁芯中柱和边柱的磁通； IN 为中柱 N 匝绕组的磁动势； I 为边柱 1 匝绕组的磁动势。

由叠加原理可得，图 6 可得磁芯边柱和中柱的磁通分别如公式 (2) 和 (3) 所示。

$$\Phi_1 = \frac{I}{R_0/R_1 + R_1} + \frac{IN}{2R_0 + R_1} \quad (2)$$

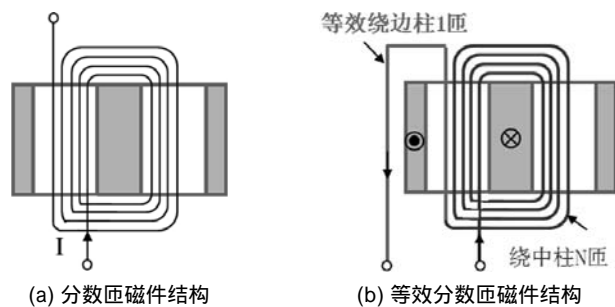


图 4 分数匝磁件结构

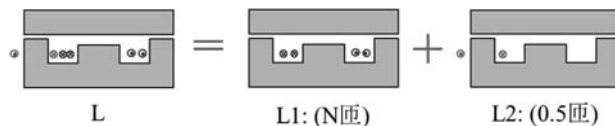


图 5 分数匝磁件剖面图

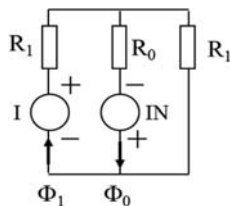


图 6 分数匝绕组等效磁路图

$$\Phi_0 = \frac{I}{R_0/R_1 + R_1} + \frac{IN}{2R_0 + R_1} \quad (3)$$

分数匝磁件绕组的磁链可由公式 (4) 计算得到。

$$\Psi = \Phi_1 \cdot 1 + \Phi_0 \cdot N \quad (4)$$

将式 (2) 和 (3) 代入式 (4) 可得分数匝磁件的电感量。

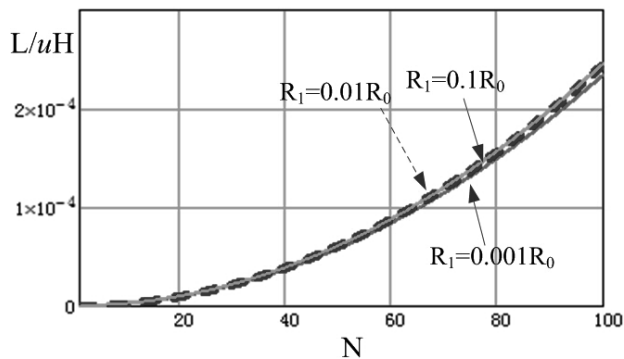
如式 (5) 所示。

$$L = \frac{\Psi}{I} = \left(\frac{1}{R_0/R_1 + R_1} + \frac{N}{2R_0 + R_1} \right) \cdot 1 + \left(\frac{1}{R_0/R_1 + R_1} + \frac{N}{2R_0 + R_1} \right) \cdot N \quad (5)$$

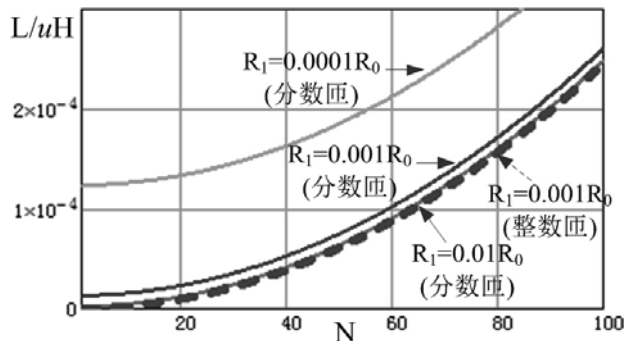
对式 (5) 进行化简可得式 (6) 分数匝磁件的电感量的计算公式。

$$L = \frac{2N^2 + 2N + \frac{R_0}{R_1} + 1}{2R_0 + R_1} \quad (6)$$

从公式 6 中可以看出，分数匝磁件的电感量并不是简单地在式 (1) 中将匝数改为 $N.5$ 或是 $(N-1).5$ ，而是与绕组的中柱磁阻与边柱磁阻的比值 R_0/R_1 有关。当 N 等于整数时， R_0/R_1 取不同值的感量随匝数变化曲线如图 7(a) 所示。从图中可得，当 R_0/R_1 取值不变时在相同的匝数下，感量基本保持一致，即整数匝时 $R_1 < R_0$ ， R_0/R_1 变化不影响整数匝磁件电感值的变化。当 N 取分数匝时， R_0/R_1 取不同值的感量随匝数的变化曲线如图 7(b) 所示。从图中可



(a) 整数匝感量



(b) 分数匝感量

图 7 感量随 R_0/R_1 变化情况

得, 当 R_0/R_1 取值不变时在相同的匝数下, 电感量变化剧烈, 且 R_0/R_1 越大时分数匝磁件的电感量越大。即分数匝时 $R_1 \ll R_0$, R_0/R_1 变化影响分数匝磁件电感值的变化。因此, 传统分数匝 E 型磁件的感量稳定性差。

2.2 E 型分数匝磁件的偏磁特性分析

对于传统的中柱开气隙而边柱无气隙的整数匝磁件中, 其磁通分布如图 8(a) 所示。

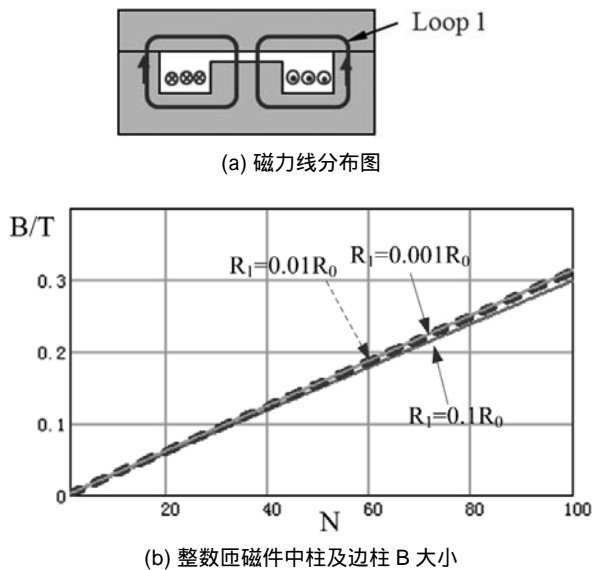


图 8 整数匝磁件中磁芯的 B 的分布

设中柱截面积为 A_0 , 而边柱的截面积通常为 $A_0/2$ 。

当磁件绕组为整数匝时, 中柱中的磁通密度 B_0 , 边柱中的磁通密度 B_1 为:

$$B_0 = B_1 = \frac{\Phi_0}{A_0} \quad (7)$$

综合式 (1) 和式 (7) 可得整数匝磁芯中 B 的大小, 如图 8(b) 所示。图中磁芯中柱中的 B 与 R_0/R_1 无关。

在传统的中柱开气隙而边柱无气隙的分数匝磁件中, 磁芯中的磁力线分布图如图 9 所示。其中 Loop1 是由中柱 N 匝绕组所产生的磁力线分布图; Loop0 为 1 匝边柱线圈所产生的磁力线分布图。这里要说明的是: 在 Loop0 中, 由于磁芯边柱无气隙而使得边柱的磁阻远小于中柱的磁阻, 磁力线集中在边柱中。

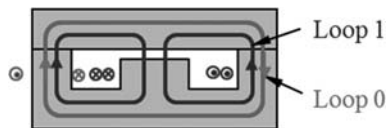


图 9 分数匝磁件中磁芯的磁力线分布图

综合式 (2)、(3) 及 (7) 可得分数匝磁芯中 B 的大小, 如图 10 所示。从图 10(a) 中可看出 $R_1 \ll R_0$ 时, 中柱磁通密度 B 与 R_0/R_1 变化无关。而在边柱中, 边柱磁通密度 B 随 R_0/R_1 的变化而剧烈变化。当 R_1 越小时, 边柱的 B 越大。因而对于传统边柱无气隙的 E 型磁件, 分数匝绕组由于边柱气隙接近于零, 因此极易出现边柱磁芯饱和的问题。

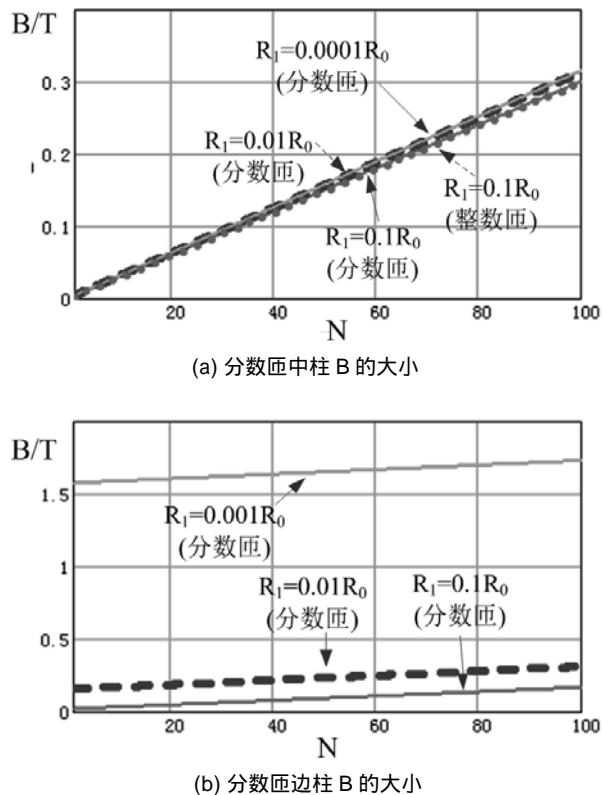


图 10 分数匝磁件中柱及边柱 B 的大小

2.3 E 型分数匝变压器的耦合特性分析

对于传统变压器而言, 评估变压器原、副边耦合特性的参数除了耦合系数外, 还可以采用漏感来评估变压器的耦合情况。当变压器的漏感越大时, 其耦合系数越小; 反之, 则其耦合系数越大。

对于变压器的漏感, 一般采用如图 11 所示的测量方法。即将副边短路测量原边的感量, 此时测量的结果 L_{test} 即为漏感 L_k 的大小。

整数匝时, 变压器的原边与副边安匝平衡, 根据安培

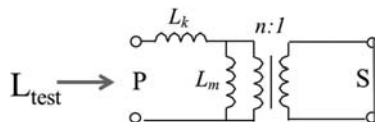


图 11 漏感测量方法

环路定理，磁芯中的磁通很小接近于零，可以忽略；变压器的磁通能量主要存在于线圈窗口中。如图 12 中 L_k' 所示。

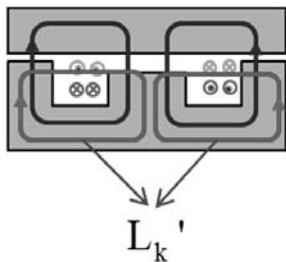


图 12 整数匝时变压器的漏感分布

而对于分数匝变压器结构，如图 13 所示。变压器除了中柱整数匝绕组部分的漏磁通产生的漏感 L_k' 外（如图 14(a)），还包含 1 匝边柱绕组所产生的不与原边绕组相链的漏磁能所产生的漏感 L_k'' （如图 14(b)）。

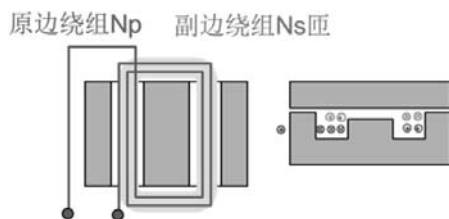
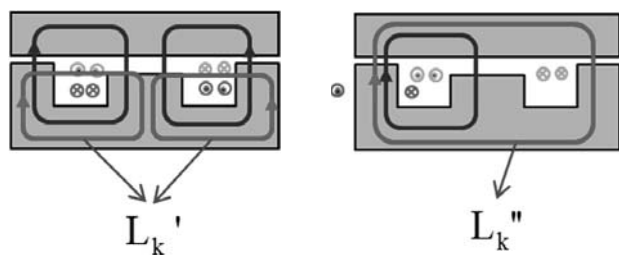


图 13 分数匝式的变压器结构



(a) 整数匝部分漏磁通 (b) 1 匝边柱绕组产生的漏磁通

图 14 分数匝式的变压器漏感分布

此时， L_k'' 可由式 (8) 计算得到。当 $R_1 \ll R_0$ 时， $L_k'' \approx 1/(2 \cdot R_1)$ 。当 $R_1 \rightarrow 0$ 时， L_k'' 趋向于无穷大。

$$L_k'' = \frac{1}{R_0/R_1 + R_1} \cdot \frac{R_0}{R_0 + R_1} \quad (8)$$

分数匝变压器的总漏感为：

$$L_k = L_k' + L_k'' \quad (9)$$

因而，当 $R_1 \rightarrow 0$ 时，分数匝变压器的漏感远大于整数匝变压器的漏感。

3 分数匝 UUI 型磁件的特性

由第 2 部分的分析可知，传统边柱无气隙的 E 型磁件

在分数匝的场合中易出现边柱磁饱和和漏感大的缺点。而导致这两个问题出现的根本原因是：1) 分数匝绕组；2) 磁芯中柱气隙远大于边柱气隙。分数匝绕组在不可避免的情况下，只能通过优化磁芯的结构，使中柱气隙不会远大于边柱气隙。在具体方法上，可采用的一种方法是设置分布气隙，即在 E 型磁件的三个柱上均开气隙，但这增加了磁件的生产和加工难度；可采用的另一种方法是改变传统磁件的磁芯结构。UUI 型磁件在性能和成本控制上有相当的优势，是新生的优秀磁芯结构^[4]。

3.1 UUI 型磁件的优势

UUI 磁件设计成磁路双气隙，与 EE 型中柱开隙磁件相比较，磁密分布更加均匀，气隙附近扩散磁通对线圈的影响很小，旁路磁通产生的内自感大，在磁件性能相当的情况下，UUI 磁件第一组线圈的匝数是 EE 型中柱开隙磁件的 85% 左右；由于邻近效应和趋肤效应的缘故，磁件的线径有个最佳值，太大和太小的线径一样低效。UUI 磁件由于匝数减少，最佳线径跟着减小。UUI 磁件的优势具体表现为：

- | | |
|---------------|----------|
| (1) 性能更高 | (2) 成本更低 |
| 功率损耗小，转换效率高； | 线圈匝数减少 |
| 温升较低，使用寿命较长； | 最佳线径减小； |
| 耦合系数高，漏感较小； | 磁芯成本低； |
| 品质因数（即 Q 值）高； | 一致性好； |
| 纹波电流小，可靠性好； | 合格率高。 |
| 分数匝影响小。 | |

下面我们仅就 UUI 型磁件的分数匝影响小这一特性进行详细地分析。

3.2 UUI 型分数匝磁件的感量特性

UUI 型分数匝磁件的结构如图 17(a) 所示。图中，UUI 型磁件的中柱上无气隙， $R_0 \rightarrow 0$ ，每个边柱上设有两个气隙，

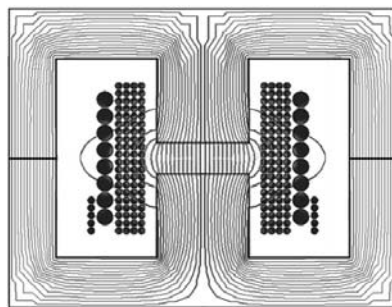


图 15 EE 型磁件磁的通模拟图

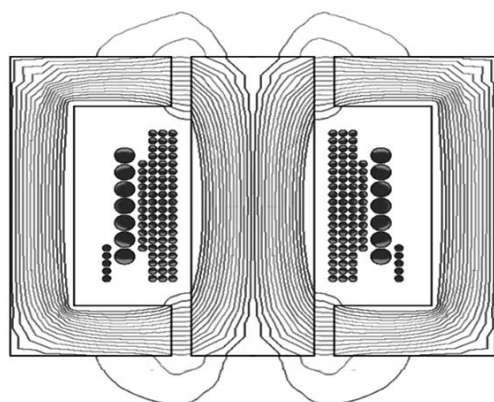


图 16 UUI 型磁件的磁通模拟图

各气隙的气隙量是传统 E 型中柱气隙量的 1/2。则 UUI 型磁件的感量可由式 (6) 变形得到, 如式 (10) 所示。

$$L = \frac{2N^2 + 2N + 1}{R_l} \quad (10)$$

UUI 型磁件的感量特性如图 17(b) 所示, 从图中可看出当 $N \gg 1$ 时, 分数匝的感量与整数匝基本一致, 即: UUI 型磁件中, 分数匝绕组不影响磁件的感量。UUI 型分数匝磁件比 EE 型分数匝磁件具有更稳定的感量特性。

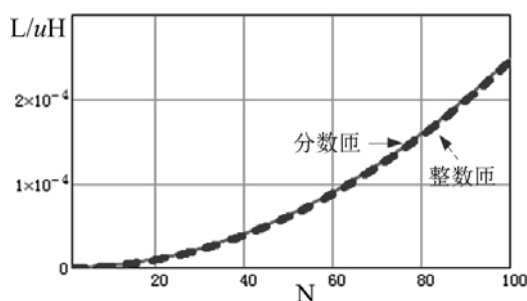
3.3 UUI 型分数匝磁件的饱和特性

在 UUI 型分数匝磁件中, 除了中柱上的整数匝绕组产生磁通 (如图 18(a) 中 Loop1) 外, 边柱上的 1 匝绕组也会与中柱产生磁通 (如图 18(a) 中 Loop0)。

由式 (2) 和 (3) 可得 UUI 型分数匝磁件中柱及边柱磁通, 如式 (11)~(13) 所示。

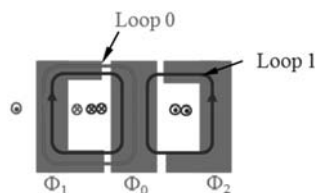


(a) 分数匝 UUI 型磁件结构

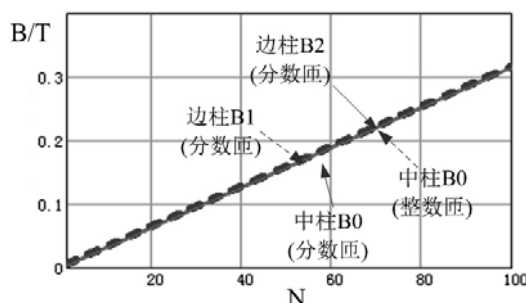


(b) 分数匝 UUI 型磁件感量特性

图 17 分数匝 UUI 型磁件结构及感量特性比较



(a) 磁通分布图



(b) 各磁柱磁通

图 18 UUI 型分数匝磁件的磁通分布图及各磁柱的磁通大小

$$\Phi_0 = \frac{I \cdot (2N + 1)}{R_l} \quad (11)$$

$$\Phi_1 = \frac{I \cdot (N + 1)}{R_l} \quad (12)$$

$$\Phi_2 = \frac{IN}{R_l} \quad (13)$$

将式 (11)~(13) 代入式 (7) 中, 可得 UUI 型分数匝磁件各磁柱 B 的分布情况, 如图 18(b) 所示。图中, UUI 型分数匝磁件各磁柱的 B 与 UUI 型整数匝磁件中柱的 B 值, 在 $N \gg 1$ 时, 基本一致。即: 在 UUI 型磁件中, 分数匝绕组不影响磁件各磁柱的偏磁特性。UUI 型分数匝磁件比 EE 型分数匝磁件具有更好的偏磁特性。

3.4 UUI 型分数匝磁件的耦合特性

由 2.3 部分的分析可知, UUI 型分数匝变压器的漏感由两部分组成, 分别为窗口中的磁场能量所归算的漏感 (如图 19(a) 中的 L_k') 及磁芯中由原边产生但未与副边耦合的磁通所归算的漏感 (如图 19(b) 中的 L_k'')。由于中柱提供了一个低磁阻的回路, 因而如图 19(b) 中的 $L_k'' = 0$, 即 $L_k = L_k'$ 。因而分数匝 UUI 型磁件的漏感基本与整数匝磁件的一致。即: UUI 型磁件中, 分数匝绕组不影响磁件中漏感的大小。UUI 型分数匝磁件比 EE 型分数匝磁件具有更小的漏感特性。

4 实验验证

为了验证 UUI 型磁件与 EE 型磁件在分数匝时的特性,

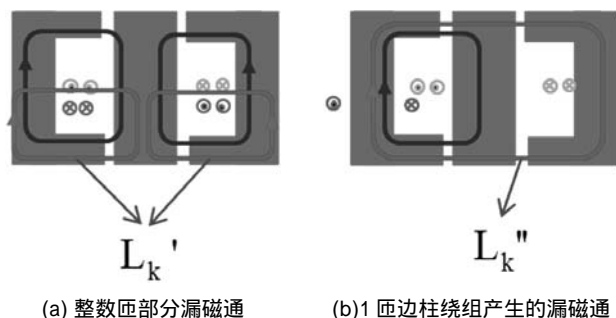


图 19 分数匝式的变压器漏感分布

我们设计了两种反激变压器：1) EE 型分数匝变压器（磁芯为 EF-16，原边匝数 (N_p) 为 180.5 匝，副边匝数 (N_s) 为 6.5 匝）；2) UUI 型分数匝变压器（磁芯为 UUI-12.5/7.5，原边匝数 (N_p) 为 160.5 匝，副边匝数 (N_s) 为 6.5 匝）。两种变压器具有相同的激磁电感，且均采用三明治绕制方法。

这两种变压器偏磁特性的测量结果如图 20(a) 所示。测量结果表明：采用分数匝时，UUI 型磁芯比 EE 型磁芯具有更好的偏磁性能，在 0.8A 时，UUI 型变压器的感量比 EE 型变压器大了 21%。

同时两种变压器的漏感测量结果如图 20(b) 所示。测量结果表明：采用分数匝时，UUI 型磁芯比 EE 型磁芯具有更小的漏感。在整个频率段范围内，UUI 型变压器的漏感比 EE 型变压器小了 20% 左右。

5 结论

本文对分数匝磁件的电感稳定性、磁芯偏磁特性和耦合特性进行了详细地分析和比较，得到的结论如下：

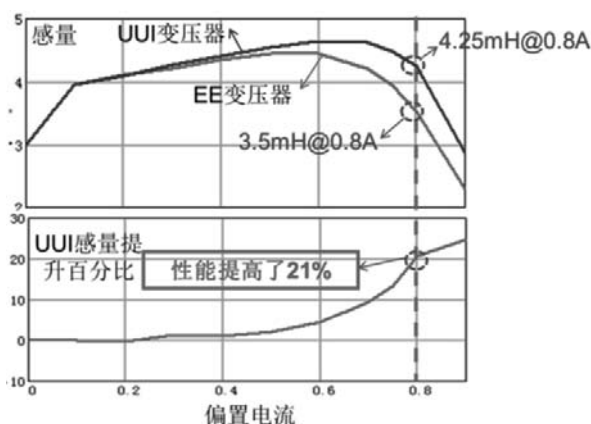
1) 传统的 E 型分数匝磁件的电感值依赖于边柱磁阻与中柱磁阻的比值，感量稳定性差；其磁芯由于 1 匝原边边柱线圈及边柱无气隙的影响，边柱中存在较大的偏磁，极易饱和；同时其变压器漏感除了整数匝绕组所产生的漏感外，还包含由 1 匝原边边柱线圈在磁芯中所产生的未与副边耦合的漏感，其漏感大，变压器的耦合性能下降；

2) UUI 型磁件的电感量、磁芯偏磁及耦合性能在匝数 $N \gg 1$ 时均与匝数无关，相比于 E 型分数匝磁件具有更好的感量稳定性、磁芯偏磁特性及耦合特性；

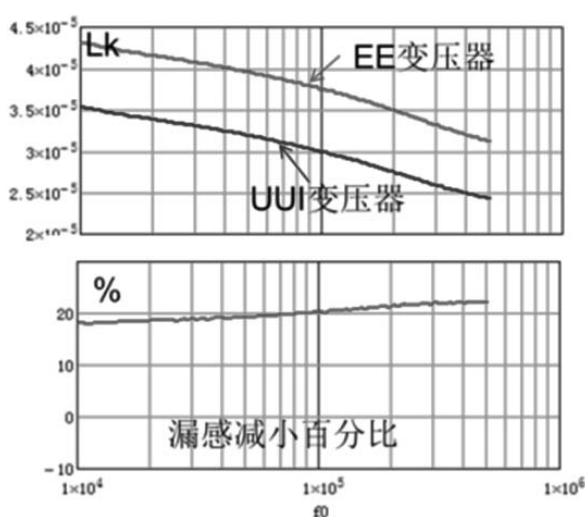
3) 实验结果与理论分析的一致性验证了分数匝磁性元件特性分析的正确性和可行性。

参考文献

[1] 杨玉岗, 冯本成, 韩占岭, 李洪珠. 四相 VRM 中无直流偏磁集



(a) 电流偏置下的感量测量结果



分数匝变压器漏感影响的实测

(b) 漏感测量结果

图 20 漏感测量结果

成磁件 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 88-93.

- [2] 卢增艺, 陈为, 陈志宇. 磁集成正激变换器输出电流纹波减小的分析和设计 [J]. 电工电能新技术, 2014, 33(3): 23-26.
- [3] 陈乾宏, 冯阳, 周林泉, 王健, 阮新波. 输出纹波最小化有源箝位正激磁集成变换器 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 7-13.
- [4] 郑娟娟, 陈为, 徐晓辉. UUI 新型气隙电感器电感特性分析 [J]. 磁性元件与电源, 2012, 10: 122-126.

作者简介

陈庆彬 (1985), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电磁兼容诊断与滤波器和电力电子高频磁技术等, E-mail: cq@fzu.edu.cn, Mobile: 13358261050;

林金城 (1974), 男, 厦门南磁电子有限公司总工程师, E-mail: 451827138@qq.com, Mobile: 18826009244.