

优异的高频磁芯应用是提高新能源部件性价比的保障

Excellent application of high frequency magnetic core is a guarantee to improve the cost performance of new energy components

鲁思慧

摘要：本文将从提升新能源逆变器与开关电源及双向DC-DC转换器等相关组件或部件性价比的角度出发对在研发应用中如何选择与应用高频磁件构建脉冲或高频变压器的独特性能作分析说明。

关键词：逆变器拓扑，磁芯损耗，电磁特性，脉冲变压器，转换器

Abstract: this article from the promotion of new energy inverter and switching power supply and two-way DC-DC converter components related to ratio of Angle on how to select and application in the development and application of high frequency magnetic building pulse or the unique properties of high frequency transformer.

Keywords: inverter topological, core loss, electromagnetic characteristic, pulse transformer, converter

前言

多年来伴随新能源如太阳能发电与电动汽车及燃料电池汽车的发展与全方位应用，对其光伏逆变器与开关电源中组件及双向DC-DC转换器、双向有源式转换器等相关部件的要求也随之提高，无论从功能与指标上均要求特性好、省材料、体积小、成本低。为实现与达到此目标，应该说当今有多种技术与举措，但其中很重要的是在设计构建组件中选择与应用高频磁芯是必不可少，它是提高它们性价比的重要保障。这也是拓展这些新能源组件及部件在各个领域应用的元件基础。故在此研发应用中，如何选择与应用高频磁件构建脉冲或高频变压器的独特性能必须有一个清晰的了解。

据此，本文将重点对新型高频磁芯技术在光伏逆变器与开关电源应用中的高频磁件独特功率损耗与电磁特性等二个方面作分析说明，并在其最后用高频磁性元件构建的对应于电动汽车与燃料电动汽车的Buch-Boost感应部件BDC(双向DC-DC转换器)及应用于能源存储PCS(电力控制系统)和公共交通的磁性器件DAB(双向有源式转换器)仅以架构图作介绍。

为方便阐明，本文从逆变器拓扑结构的创新的述起以

导引出应用特征的所在。

1 逆变器拓扑结构创新的导引

为保证电网稳定，或满足负载需求，引导出光伏逆变器规格的重要性是与最大功率点追踪(MPPT)效能是切切相关的理念。应该说光伏系统MPPT效能离不开逆变器的创新及新技术。虽说逆变器只占光伏系统成本的5~10%，却掌控了100%的发电量。它的重要性是毫无疑问的，见图1(a)所示。

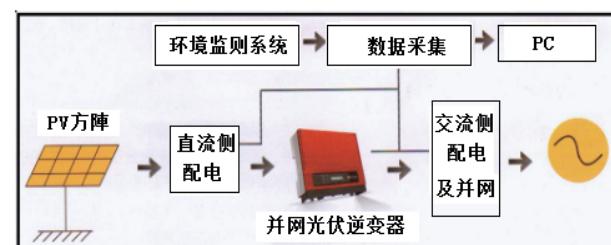


图1(a) 所示为逆变器对掌控发电量重要性的示意图

而逆变器规格、参数及特性，也关乎系统设计与选择高频磁芯选择切切相关。那么如何从逆变器拓扑结构的创新中看出此问题呐？

从逆变器创新角度来分析，仅由上述技术与理念还不够，故接下来看常规逆变器拓扑结构（图 1 (b)）与新型离并网一体的逆变器拓扑结构（图 1 (c)）。会发现无论是图 1 (b) 或图 1 (c) 图中黄色部分均是逆变器核心的“升压电路 + 逆变电路”，即光伏逆变器大都会在逆变电路之前，配置升压电路，这是依据光伏组件的工作特性，提高逆变器的适应性，保证业主的投资收益。而升压电路性价比是否符合设计指标，则取决于脉冲或高频变压器，而实现脉冲或高频变压器高性价比又取决于所选用高频磁芯的独特功率损耗与电磁特性。

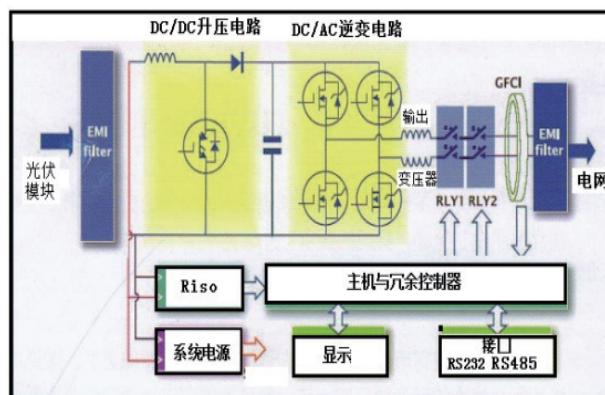


图 1 (b) 为常规逆变器拓扑结构

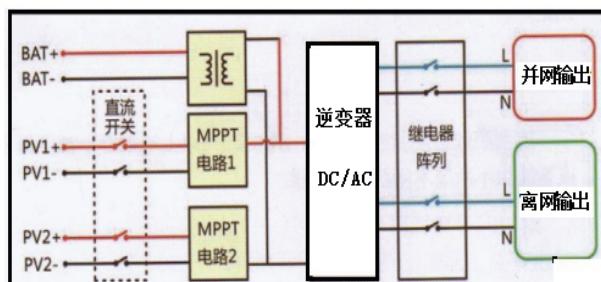


图 1 (c) 所示为新型离并网一体的逆变器拓扑结构示意图

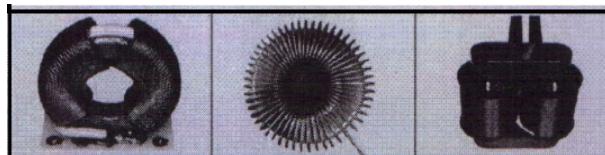


图 1 (d) 所示为太阳能逆变器中的性能
优异的各类电感元件外彤示意

而伴随其中用高频磁性元件构建太阳能逆变器（组串式和集中式太阳能逆变器）中的优异的各类电感元件也尤为关键，见图 1 (d) 所示。

由此可知，引导出高频磁芯在该应用中的高频磁件独特功率损耗与电磁特性的研讨成为关键所在。

2 高频磁件的功率损耗特性

理想脉冲或工频变压器的假设条件是：磁芯材料有足够的磁导率，其值可等效地看作是无限大；励磁电流足够小，其值可等效地看作是零；磁芯的任何损耗都小到可以忽略；线圈绕组的电阻小到可以忽略；所有绕组之间的磁通都是完全耦合，没有磁通“泄漏”；绕组间的电容小到可以忽略。但实际变压器不是这样的，是为什么呐？为此有必要选择影响实现脉冲或高频变压器高性价比有关的特性参数作一说明：

其一是磁芯损耗，磁芯损耗包含磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗，它与磁芯的材质及工作条件有关：磁滞损耗与磁滞回线所围成的闭合曲线面积成正比，闭合曲线面积和工作频率成正比；其二是分布电容，在变压器的绕组中存在寄生电容。最值得注意的是线圈导线和变压器磁芯之间以及各绕组间的寄生电容。电容量的大小与绕组的几何形状、磁芯的介电常数、变压器的封装材料及线圈的匝数有关；其三是漏磁通，磁通不可能完全耦合所有的线圈，即存在漏磁通的影响。漏磁通主要分为扩散磁通和旁路磁通，漏磁通一旦深入线圈将引起涡流损耗，同时影响线圈的电感量。漏磁通的大小与磁件的磁芯几何结构、线圈绕组的布置方式、线圈的绕制工艺和气隙的设置有关；其四是趋肤效应，由于趋肤效应使导线有效导电面积减小，电流密度有所提高，引起铜耗增加，效率下降。因此工作于高频的变压器就需考虑这一影响；其五是邻近效应，邻近效应随绕组层数增加而呈指数规律增加。因此，邻近效应影响远比趋肤效应影响大。

根据上述特性参数理念的引出的高频磁芯的功率损耗和 EMI 特征如下：磁芯损耗 $P \propto B(2.86)$ (B 为磁通密度)；磁通密度 B 与匝数 (N) 及磁路面积 Ae 成正比；在 UUI 替代 EE 型的实际应用中，如果保持线圈匝数不变（或者变化较小），UUI 的气隙量变大，磁通密度减小、磁芯损耗

降低。其开关电源的主要 EMI 干扰源来自如下：有开关功率管、整流二极管及高频变压器；高频变压器的 EMI 主要体现在 di/dt 的快速循环变换。减小漏感可有效地提高其抗 EMI 能力。降低变压器漏感的方法如下：减少线圈匝数，采用三明治绕法。与 EE 型磁件相比较，UUI 磁件短数减少 15%，漏感降低 20%，因而具有较强的抗 EMI 能力。

理论和实践都说明，设计工频变压器时使用的简单方法，对设计高频变压器不适用。在磁芯窗口允许情况下，尽可能使则直径大的导线来绕制变压器。在高频应用中常导致错误，使用直径太大的导线，则会使层数增加，叠加和弯曲次数增多，从而加大了邻近效应和趋肤效应，就会使耗增加。因此太大的线径和太小的线径一样低效。显然由于邻近效应和趋肤效应缘故，绕制高频电源变压器用的导线或薄铜片都有个最佳值。

3 高频磁件电磁特性分析

* 内自感比较 旁路磁通的作用是产生内自感磁链，同时其穿越铁心柱间的线圈窗口，将在线圈上感应出大的涡流和损耗。内自感与内自感磁链成正比，而内自感磁链与绕组窗口旁路磁势以及其所链的匝数有关。通过一些合理的假设，可以对旁路磁通建立数学模型进行分析，得到 UUI 与 EE 磁芯结构绕组窗口旁路磁势以及所链匝数理论分布图，如图 2 所示。

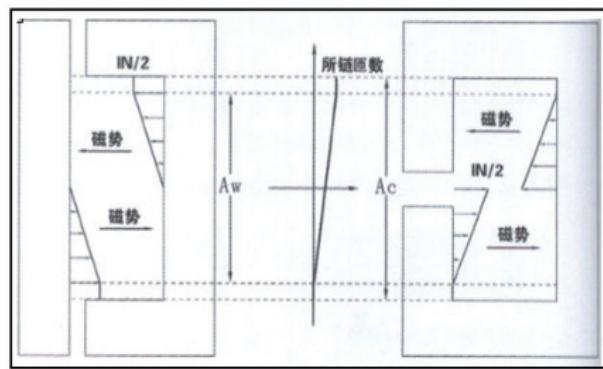


图 2 UUI 与 EE 型磁件的旁路磁势及所链匝数布图

其 Aw 表示绕组高度， Ac 为磁芯窗口高度。从图 2 中可以看出两者磁势最大值虽然相同，都是安匝的一半，但其分布位置不同。故导致内自感不同。通过 Mathcad 数学软件分别计算 UUI 型和 EE 型结构的内自感，得到 UUI

型电感器和 EE 型电感器的内自感与绕组高度的关系如图 3(a)(b) 两磁芯结构的内自感与绕组高度关系图所示。

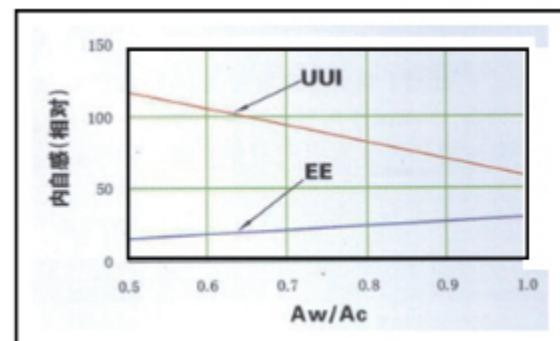


图 3 (a) UUI 结构与 EE 结构的内自感随绕组增加而有所不同

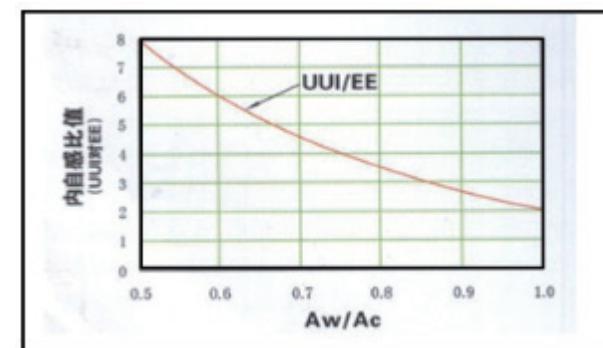


图 3 (b) 两磁芯结构内自感比值与绕组高度的关系示意图

从图 3(a) 可知，UUI 结构的内自感随着绕组高度的增大而减小，相反的，EE 结构的内自感是随着绕组高度（即 Aw/Ac ）的增大而增大，但 UUI 结构比 EE 结构磁芯始终具有更大的内自感。从图 3(b) 中更能看出，当绕组布满整个窗口（即 $Aw/Ac=1$ ）时，UUI 结构比 EE 结构的内自感大一倍；同时绕组高度越小（即 Aw/Ac 越小），UUI 比 EE 结构内自感的增加越大，在绕组高度是磁芯窗口高度的一半时，UUI 结构的内自感已达到 EE 结构的内自感的八倍。

需要提示的是，UUI 与 EE 结构内自感的不同将直接影响磁件结构的大小与窗口高度，而它又关系到脉冲或高频变压器的体积与成本及功耗，也就是说若达到同样指标性能或功率的脉冲或高频变压器，则用 UUI 磁件构建要比与 EE 磁件构建的组件（或变压器）在功耗、体积与成本

上要小得多。

* 磁通密度分布

磁通中密度分布不均匀会导致电感较易饱和，同时也引起损耗增加，利用有限元电磁场分析软件 Maxwell—2D 分别对 UUI 电感器和 EE 电感器进行仿真比较，得到图 4 所示的磁通密度分布图（标号为 1, 2, 3 三条线上磁通密度分布图），其图 4(a) 为 UUI 结构的磁通密度分布图，图 4(b) 为 EE 结构的磁通密度分布图。

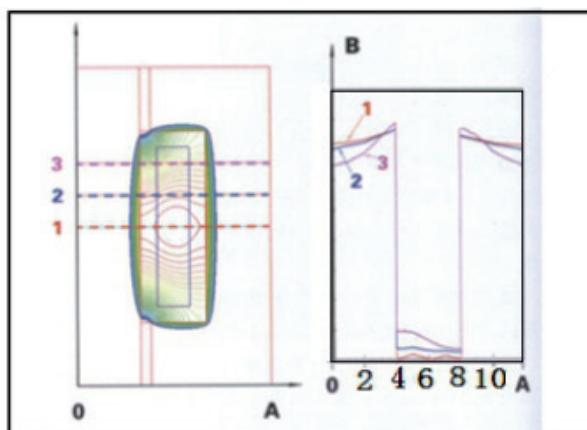


图 4 (a) 为 UUI 结构的磁通密度分布图

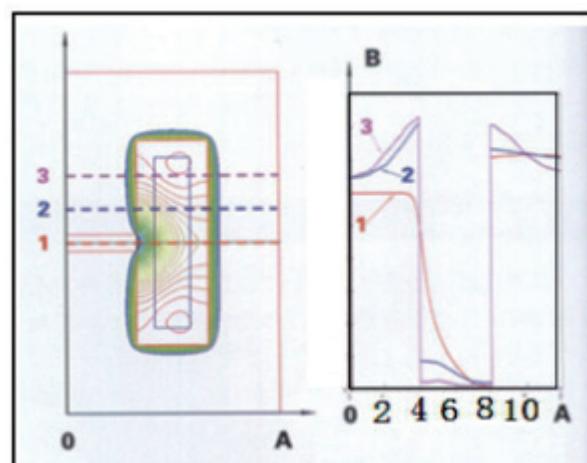


图 4 (b) 为 EE 结构的磁通密度分布图

从图 4(a) 与图 4(b) 磁通密度分布图中可以很清楚的看到，EE 结构磁芯小的磁通密度增加的幅度比 UUI 结构要大，所以 UUI 结构比 EE 结构的磁通密度分布更均匀。

* 抗饱和能力

EE 型磁件由于边柱没有气隙，边柱磁回路的磁阻一般很小，在 1 匝原边电流下容易饱和。UUI 型磁件由于边柱有气隙，且气隙大小与 EE 型磁件气隙大小一样，因而在 1 匝原边电流下的抗饱和能力强。

* 分数匝影响 EE 型磁件由于边柱没有气隙，边柱磁回路的磁阻一般很小，0.5 匝原边会增大变压器的漏感，降低原副边的耦合系数：UUI 型磁件由于边柱有较大的气隙，0.5 匝原边对变压器的漏感和原副边的耦合系数影响很小。其图 5 为分数匝影响示意图。

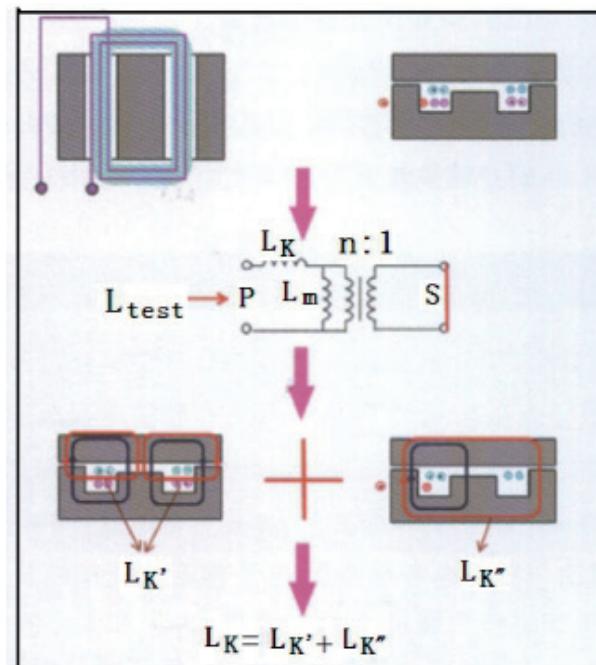


图 5 为分数匝影响示意图

* 关于高频热效应 UUI 的磁力线分布，由于两个气隙的磁势方向是左右相反的，从大范围看，两个磁势是抵消的，因此其扩散磁通只局限在气隙附近，不会形成范围的扩散影响。实验表明，当距离超过 5 倍气隙量时，扩散磁场已经很小，影响可以忽略。在设计与使用 UUI 磁件时，气隙附近 5 倍气隙距离内不应有导电体，否则将在该导电体内产生高频热效应。

4 实现脉冲或高频变压器省材料低成本的关键是选用新型磁件

如今已有不少的新型磁件是实现脉冲或高频变压器的省材之举。值此仅以 UUI 磁件为例作为应用解析。其 UUI

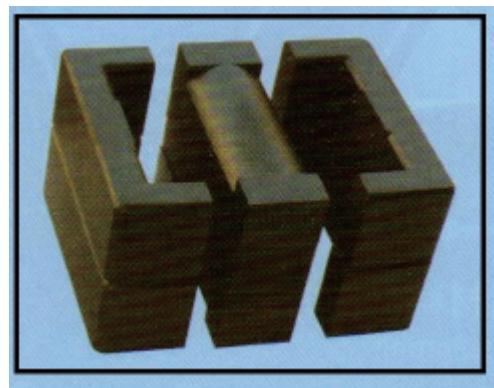


图 6 所示为 UUI 磁件三维外形图

磁件结构外形图见图 6 所示。

* 通过以下 UUI 结构磁件应用特征就可清楚知道 UUI 磁件的省铜的根本所在：UUI 磁件把磁路气隙化一为二，并且从线包中部移到线包的两侧，线圈基本上不受磁通的影响，同时旁路磁通的强度较 EE 型小得多；在骨架窗口的不同区域，UUI 结构的感量均匀，最高感量是 EE 型 1.1 倍 ($5.21/4.71$)，最低感量是 EE 型 1.7 倍 ($4.25/2.46$)，在最大磁密度相同的情况下，EE 型结构 100 匝的感量与 UUI 结构 85 匝相当；在磁芯材质、磁路参数、最高磁密和电气性能相近的条件下，UUI 磁件的匝数降低 15%，由于趋肤效应和邻近效应的缘故，匝数减少最佳线径随之减少；近多年根据应用实例统计，统计结果表明：采用 UUI 磁件时，最佳线径可以减少 10% 左右，同时绕组交流电电阻 (ACR) 可以降低 20% 左右。

* 从交变电流产生交变磁场（即磁通）应用特征来分

析也有助于 UUI 磁件的省铜的理念。磁通分为主磁通、扩散磁通和旁路磁通。其一是主磁通，主磁通存储了磁件的大部分能量，其作用是产生外自感磁链。由于这部分磁通未深入线圈口内，故它不会在绕组上感应出涡流和损耗；其二是而扩散磁通，EE 型气隙附近的扩散磁通进入磁心窗口，会严重削弱气隙附近绕组的电感量，降低线圈的“电 - 磁”转换效率，形成低效的填充线圈，同时在气隙附近的绕组上感应出涡流和损耗。

* 通过从实验中作对比分析 任何一匝线圈处于 UUI 型绕线窗口不同位置时，其电感量变化不大，从图 7(a) 为 UUI 型电感值与线包位置关系图可见曲线较平坦；而处于 EE 型绕线窗口不同位置时，电感量变化特别大，从图 7(b) 为 EE 型电感值与线包位置关系图可见曲线有深凹。则可知 UUI 型每一匝线圈“电 - 磁”转化效果比较均衡。

在此所使用磁芯（磁芯材质为 DTT-P4，磁路气隙量为 1.2mm）作实验对比分析。在本对比实验中，我们用 0.14mm 的漆包线在特制小骨架上缠绕出 6 层每层 8 匝的线包，线圈间缠绕两圈绝缘带作为绝缘层，每层线圈皆制作引出线。线包共有 6 个线圈。线包高度为 1.6mm，小骨架高度为 3.3mm。将带有一上述线包的小骨架分别套在 UUI16.3 磁芯与 EE19 的磁芯的中柱上，小骨架沿磁芯中柱每次移动 1mm，在 0.3V/100KHz 的工作条件下，用 TH2810B 型电感测量仪分别测量各个线圈的电感量，并将实验所得结果绘制成曲线。实验中所使用的磁芯的磁芯材质为 DTT-P4，磁路气隙量为 12mm。

* 结论 UUI 磁件设计成磁蹄双气隙，与 EE 型中柱开隙磁件相比较，磁密分布更加均匀，气隙附近的扩散磁通

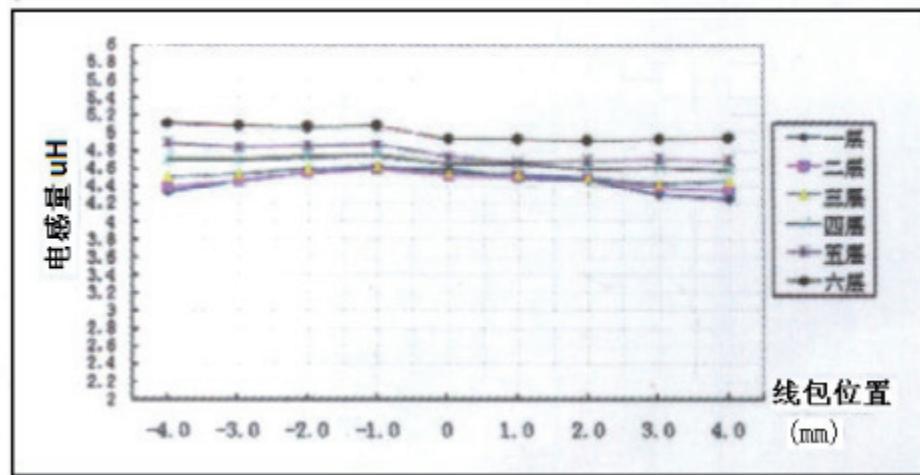


图 7 (a) 为 UUI 型电感值与线包位置关系图

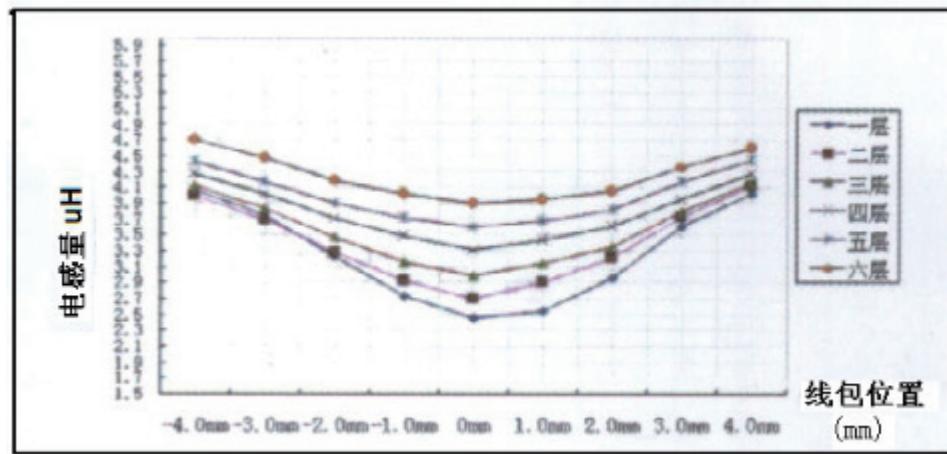


图 7 (b) 为 EE 型电感值与线包位置关系图

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。

理论与实践两者都说明：由于邻近效应和趋肤效应的缘故，高频磁件的线径有个最佳值，太大利太小的线径一样低效。UUI 高频磁件由于匝数减少，最佳线径跟着减小。上述两者的减小直接导致 UUI 磁件用铜量的大幅度降低。

5 后话

(1) 由上基于新型高频磁芯技术在新能源逆变器中的特性解析可知，对光伏应用产生深远影响功能的创新不仅在于逆变器与开关电源本身，同时也与选择应用用新型高频磁芯技术切切相关，它是提升逆变器与开关电源及双向

DC-DC 转换器双向有源式转换器等相关组件或部件性价比的重要举措。它对于我们掌握新能源部件如逆变器及电动汽车与燃料电动汽车的开发及行业发展，有很大帮助。

据此也对高频磁性元件构建的对应用于电动汽车与燃料电动汽车的 Buck-Boost 感应 BDC (双向 DC-DC 转换器) 及应用于能源存储 PCS (电力控制系统) 和公共交通的磁性器件 DAB (双向有源式转换器) 仅作架构图形介绍。

(2) 应用于电动汽车与燃料电动汽车的 Buck-Boost 感应部件 BDC (双向 DC-DC 转换器) 架构图解，见图 8(a) 所示。

* 应用于能源存储 PCS (电力控制系统) 和公共交通的磁性器件 DAB (双向有源式转换器) 见图 8(b) 所示。

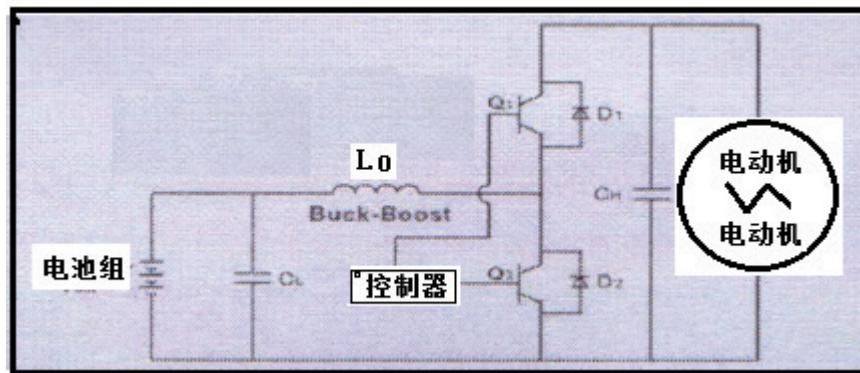


图 8 (a) 所示为应用于新能源电动汽车感应部件 BDC(双向 DC-DC 转换器) 架构图解示意

下转 156 页