

# 非晶合金变压器的试制验证了其节能降耗效果

邓隐北, 黄仁珠, 丁玲, 袁晓龙 编译

江西森阳科技股份有限公司

**摘要:** 为对非晶合金铁芯变压器 (Amorphous Cores Transformers, AMT) 的可行性和损耗降低效果进行验证, 本文对铁损降低的7t重非晶合金铁芯, 提出了设计方法及支撑结构, 并设计和制造了一台铁芯插入支撑框架内的10MVA单相试验模型。其结构具有应力缓冲的铁芯支撑, 可防护来自绕组的电磁力, 以及降低杂散损耗的屏蔽。由计算和测量结果建立的试验模型, 与相同功率容量的常规硅钢片变压器 (SST) 相比, 其负载总损耗已由50%降低到35%。

**关键词:** 非晶合金卷铁芯, 自重应力, 铁损, 杂散损耗, 涡流, 电力效率

## 1 前言

目前在配电变电站中使用的变压器大部分为硅钢片铁芯变压器 (SST), 连接于电力系统之间, 伴随着变压器铁芯励磁产生的铁损 (空载损耗), 也即待机功率是经常发生的。若由 AMT 取代相同型号等级的 SST, 则铁损降低到 1/3 以下, 可望达到大幅度的节能效果。最新的非晶合金材料的饱和磁通密度  $B_s=1.63T$ , 比硅钢片 (2.0~2.1T) 的小。因此, 与相同功率的 SST 比较, AMT 用铁芯的断面积约为 1.3 倍, 线圈的加大尺寸将导致铜损 (负载损耗) 增加。但是多数配电变压器的平均负荷率为 30~50%, 故铁损的减少量超过铜损的增加量, 因而 AMT 的能量消费率比 SST 的优越, 通过一定期间的运行以后, 经济上是有利的。而且在利用可再生能源的场合下, 因输出功率的不稳定, 低负荷运行时的待机功率将成为仍需解决的问题, AMT 的应用可望实现减少环境负荷的效果。

铁芯用非晶合金材料为厚度 25 $\mu m$  的薄片状, 在现代产品化的小中型受配电 AMT 中, 采用了数千张这样的薄片, 经剪切、叠压、剪切端彼此重合后, 形成环状的卷绕铁芯。为保持毛坯材料的磁性能, 各薄片之间无粘接处理, 故非晶合金卷铁芯具有脆性, 其重量的一部分由线圈支撑以保持结构形状。但当 AMT 大容量化时, 这一支撑方法就有局限性, 应设计其它的结构形式。结果在线圈旁边要配置比 SST 更多的金属构件, 起因于漏泄磁场的杂散损耗将会增加。此外, 因铁芯须保持形状, 铁芯的自重将劣化薄片

之间的绝缘, 出现铁损增大的问题。这样一来, 非晶合金材料的磁特性、物理特性, 与原来硅钢片的比较, 会存在较大的差异。迄今为止, 大容量 AMT 的制造实例尚未见到报导。

面对结构上未健全, 暂时不可能制造的大容量 AMT, 本文提出了既能抑制铁损增加又能支撑铁芯的结构方案。为验证其可行性和有效性, 分别试制了将铁芯装入内部的支撑结构和线圈, 阐述了测定的损耗特性结果。而且, 对具有所提方案的大容量 AMT, 利用了其有关实际负荷运行时对杂散损耗的分析结果, 并对电力效率的提升也进行了研讨。

## 2 国内外的研发概况

美国是世界上最早研制和使用非晶合金变压器 (AMT) 的国家, 1982 年第一台 AMT 就正式运行并批量生产。随后相继在德国、英国、法国、荷兰、比利时等西欧国家都有大量应用。在亚洲, 日本非常重视非晶合金变压器的开发, 早在 2005 年日本规定所有配变必须使用 AMT, 在配电领域彻底淘汰相对高耗能的 SST; 印度从 1992 年开始批量生产 AMT; 我国从 1998 年开始批量生产 AMT, 目前至少有数十万台 AMT 挂网运行。随着对环保意识的增强和节能降耗的重视, 国家鼓励使用 AMT 的具体优惠政策出台, AMT 近年来的使用量已呈现快速上升的趋势。我国的产品制造技术已基本成熟, 应用 AMT 符合国家政策导向。由

于铜价和硅钢片的价格上涨，而非晶合金材料的价格波动较小及实现规模化生产后带来的产品成本降低，使得两者之间的价格差距逐步缩小，也有利于推动 AMT 取代常规变的使用。未来节能、节材、环保、低噪的 AMT 将以其显著的节能优势，在未来广阔的变压器领域占据极其重要的地位。

AMT 是利用非晶合金材料代替硅钢片制造的变压器，其突出特点是空载损耗低，空载电流小，与同型号的 S9 系列变压器相比，空载损耗下降 70%~80%，空载电流下降 40~60%，负载损耗下降 20~30%，因此具有大幅度的节能效果。

### 3 AMT 模型（样机）的结构

#### 3.1 铁芯

旨在对单相 10MVA AMT 进行验证而设计的非晶合金铁芯变压器模型断面，如图 1 所示。下部磁轭 (yoke) 为宽 213mm 的 2605HBIM 型非晶合金薄片，叠合搭接后形成环状的内侧与外侧卷绕铁芯。每侧卷铁芯均为了 3 个单元铁芯，共计 6 个 1 组构成卷铁芯群。将这些卷铁芯群分左右两组配置，断面呈矩形，总重为 7t，形成单相三支柱式铁芯。将内外的卷铁芯制成一体，由于自重的应力导致铁损增加，故对这些卷铁芯群的上部磁轭，设置了独立的支撑梁，为铁芯悬吊式的支撑结构。

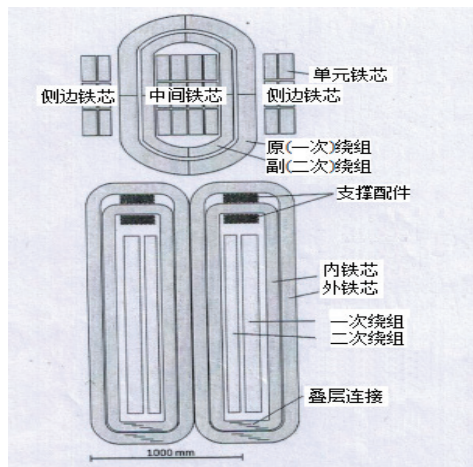


图 1 10MVA 单相 AMT 模型的非晶合金铁芯断面

因按大型铁芯支撑方法的不同，对产生铁损的差异要进行研讨，故在 20KVA 单相 AMT 卷铁芯薄片的叠置方向

施加以压缩应力，对 50Hz 下的铁损特性进行了评价。这一方法的概况，以及在施加应力的区域，每单位重量的铁损密度  $P_i$  (W/kg) 与励磁磁通密度  $B_m$  之间的特性关系如图 2 所示。

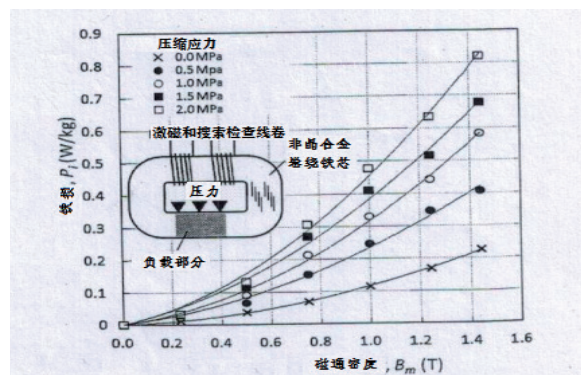


图 2 带压缩应力的非晶合金卷铁芯，在 50Hz 的负载部分，磁通密度  $B_m$  与铁损  $P_i$  变化关系

卷绕了励磁线圈和检查线圈的卷铁芯，在磁支柱的一定面积上施加以压力，求出压缩应力  $\sigma$ ，再据流过励磁线圈的励磁电流与产生于检查线圈的电压，计算出铁损。以纵坐标为铁损密度，将附加  $\sigma$  后测定的铁损增加量除以附加  $\sigma$  区域的铁芯重量，并将这与  $\sigma=0$  时的铁损密度加算一起。按这一结果，由  $\sigma$  导致的铁损增加量  $\Delta P$ ，用  $\sigma$  与  $B_m$  的函数表示，这样  $P_i$  可表示为：

$$P_i = K_i \cdot B_m^\alpha + \Delta P(\sigma, B_m) \dots \dots (1)$$

第一项相当于  $\sigma=0$  时的铁损， $K_i$ 、 $\alpha$  为 50Hz 下的常数。

由三维有限元法 (3D-FEM) 的应力分析求得的，已建立的 1 组作用于非晶合金卷铁芯上的 Mises(应力)分布，与 20 倍加强表示的铁芯变形量进行比较，其结果示于图 3。考虑到铁芯的对称性，仅由剪切一半的模型表示，破断线为变形前侧铁芯外形。图 3 (a) 为与原来 SST 同样在下面支撑的单个卷铁芯；图 3 (b) 为本研究所提出的方案，铁芯分内外两个，上部磁轭为悬吊结构。对铁芯上实测求得的薄片方向与叠置方向的纵弹性模量 (相氏模量) 进行定义，在  $\Delta$  处所示平面的法线方向，附加了约束条件。图(a) 原来的支撑方法中，作用于下部叠置接合部有很大的压缩应力。而且，因自重导致磁支柱的外侧弯曲，Mises 应力值从磁支柱的上部到下部，从水平方向到垂直方向均发生变化。因此，在磁支柱下部，图中箭头所示方向有压缩应

力作用，在薄片叠置方向将产生应力成分。因而，可认为在这一区域的  $P_i$  将增加。与此相应，图 (6) 提案的结构中，磁支柱上部见到的 Mises 应力是起源于白色箭头所示、作用于薄片方向的拉伸应力成分。非晶合金薄片的  $P_i$ ，相对于拉伸应力是一定的，叠置方向的压缩应力成分在磁支柱部几乎不会产生，因此，所提方案结构中  $P_i$  的增加能予以抑制。而且因各个卷铁芯的轻量化，制造设备的负荷减轻，还可望改善叠置接合等的操作工艺。

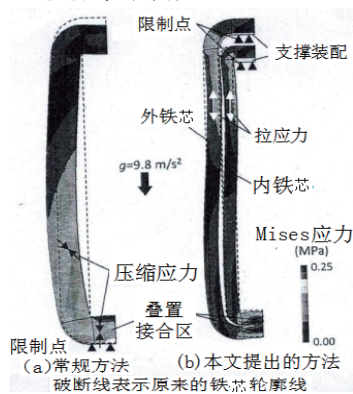


图3 在支撑方法之间，FEM分析的 Mises-应力外形，与 20 倍加强表示的 1 组非晶合金铁芯变形量的比较

### 3.2 线圈

图 1 所示非晶合金卷铁芯的中间磁支柱上，卷绕与同容量的 SST 同一规格的铜线，由外侧为高压一次、内侧为低压二次线圈组成的结构。将大型线圈的横截面制作成与铁芯相同的矩形是有困难的。而且为承受短路试验时产生的电磁机械力（洛伦兹力，Lorentz），必须采取对策。故制成保持短边侧曲率的形状。通过应力分析，求得曲率与耐机械力的函数关系，与在加长线圈尺寸导致铜损  $P_c$  增加之间按照折衷方法确定线圈之最佳形状。

### 3.3 支撑结构

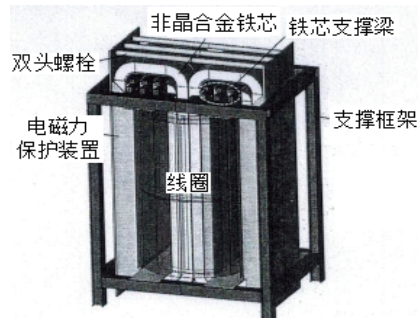
图 4 (a) 为包括 AMT 模型的铁芯、线圈以及支撑结构的外观图。模型外轮廓装设了以黑色表示的支撑框架，支撑着非晶合金卷铁芯的梁与线圈的重量。这些构件中产生的杂散损耗，与主要来自线圈漏泄磁场交链产生的杂散损耗  $P_s$ ，为降低  $P_s$ ，如图 4 (b) 所示，在磁场集中的构件表面，设置了硅钢片材质的屏蔽。

变压器设计中，当低压二次线圈短路，设想在高压一次线圈侧流过最大电流（最大短路峰值电流  $I_s$ ）条件时，

要求线圈的规格是：相对于广方向作用的电磁机械力不至于对线圈造成损坏。 $I_s$  采用一次线圈的额定有效电流  $I_1$  与线圈的百分比阻抗  $\%V$ ，由下式定义：

$$I_s = 2.55 \cdot 100 / \%V^2 \cdot I_1 \dots \dots (2)$$

AMT 模型用的线圈，由这一  $I_s$  向外的电磁机械力，作用于线圈的长边部分，因应力集中而导致变形时，通过绝缘构件，将对连接非晶合金卷铁芯的左右侧铁芯支柱造成损害。故在图 4 (a) 中，把侧边铁芯支柱装入钢板制的箱型构件中加以保护，两侧的保护构件相互间，由上下的双头螺栓连接把紧，结构上，应避免受到电磁机械力对支撑框架造成影响。图 5 所示为由 3D-FEM 应力分析求得的、保护构件最大变形量的分布图。对于线圈与相对方向的保



(a) AMT 模型的所有元件显示

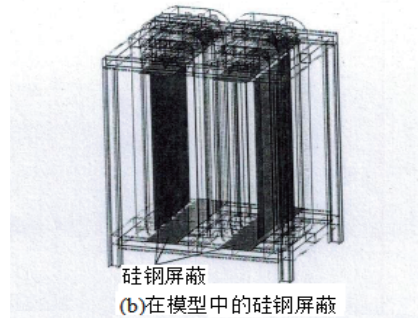


图4 包含支撑结构的 AMT 模型的外观图

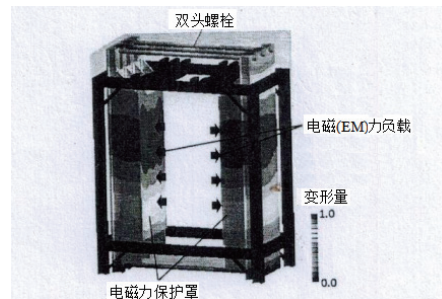


图5 由高压绕组产生的电磁力而采用的保护结构，其变形量的分析

护构件,  $I_s$  产生时, 作为荷重而受到线圈中向外的电磁机械力作用。构件的变形量, 应控制在与装入铁芯的间隙以内, 并以此来确定各部的尺寸。

#### 4 损耗的分析方法与分析结果

##### 4.1 分析方法

借助 3D-FEM 电磁场分析, 在一次线圈上施加额定振幅的 50Hz 正弦波电压, 连接到二次线圈所定的负荷阻抗上, 可求得所设计 AMT 模型的损耗预测值。考虑到非晶合金卷铁芯的占空因数 (填充系数)  $f_c$ , 以定义等值的导磁率, 求得了铁芯内的磁通密度分布。对薄片方向、叠置方向的导磁率分别表示为  $\mu_\rho, \mu_s$  :

$$\mu_\rho = f_c \mu_i + (1 - f_c) \mu_0 \dots \dots \dots (3)$$

$$\mu_s = 1 / (f_c / \mu_i + (1 - f_c) / \mu_0) \dots \dots \dots (4)$$

式中  $\mu_0, \mu_i$  分别为真空中的和非晶合金薄片的导磁率,  $\mu_i$  采用了制造厂公开的数据。根据铁芯内的磁通密度分布, 与由图 3 所示应力分布抽出的叠层方向的压缩应力成分, 从式 (1) 求出了铁芯内的铁损  $P_i$  的分布。如 3.1 节所述, 薄片方向的拉伸应力主导部分中, 几乎无  $P_i$  的增加, 故式 (1) 的第二项为零。模型中的构件, 规定为一般钢材的磁特性和电阻率, 根据相应与构件交链的漏磁场产生的涡流, 可求得支撑结构中产生的杂散损耗  $P_s$ 。此外, 线圈的铜损  $P_c$ , 以及与构成线圈铜线交链的磁场中产生的线圈内杂散损耗  $P_{sw}$ , 均根据同规格 SST 的实测值计算式求得。

##### 4.2 铁损 $P_i$ 的分析结果

对比由 3D-FEM 电磁场分析求得  $B_m=1.30T$  的铁芯内磁通分布, 相应于薄片叠置方向的压缩应力成分  $\sigma$ , 从

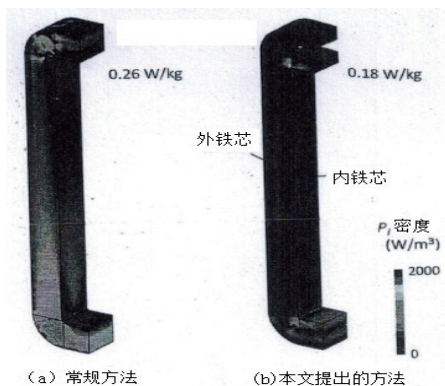


图 6 在两种支撑方法之间,  $B_m=1.30T$  情况下, 按考虑到应力的 FEM 分析略图, 在一组非晶合金铁芯的  $P_i$  体积密度 ( $W/m^3$ ) 的比较

式 (1) 求得模型铁芯内  $P_i$ , 其体积密度分布的比较示于图 6。图 6 (a) 所示为原来支撑方法制作 AMT 时, 铁芯下部的叠层接合部与下部的磁支柱部, 由薄片方向压缩应力导致的  $P_i$  增加, 对整个铁芯每平均单位重量的  $P_i$ , 算定约  $0.26W/kg$ ; 与此相应, 图 6 (b) 所示提出方案的结构中, 由压缩应力导致的  $P_i$  增加得到抑制, 约为  $0.18W/kg$ , 达到了 32% 的下降效果。

##### 4.3 杂散损耗 $P_s$ 的分析结果

在负荷率 50% 情况下, AMT 模型运行之际, 配置了硅钢片屏蔽的支撑结构中产生的  $P_s$ , 对其体积密度分布由 3D-FEM 电磁场分析求得的结果示于图 7。分析时也考虑了 AMT 模型整体, 浸入钢板制的绝缘油箱中产生的  $P_s$ 。图中, 铁芯、线圈均未显示。有很大漏泄磁场的线圈上下开口部,  $P_s$  则集中产生于其开口部附近位置的支撑结构上。铁芯支撑构件, 线圈短路时电磁机械力的防护构件, 以及绝缘油箱中各部产生的  $P_s$ , 其细目解释和相对比较示于图 8。由于添加了图 4 (b) 所示硅钢片制的屏蔽材料, 油箱以外的  $P_s$  均降低。屏蔽本身也有损耗, 包含各部损耗的合计值, 共下降 66%。

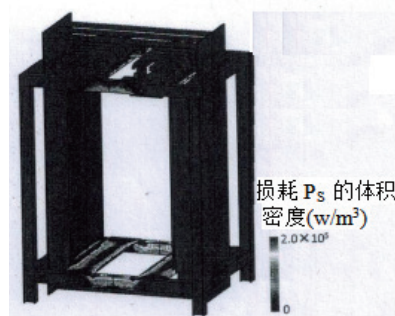


图 7 在负荷系数 50%、带硅片屏蔽的 AMT 模型中, 杂散损耗  $P_s$  的体积密度分布略图

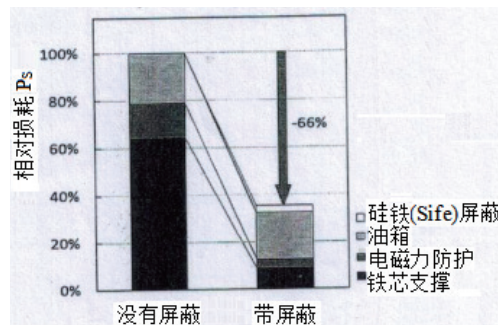


图 8 由于硅钢屏蔽的设置与否, 杂散损耗降低的相对比较

## 5 AMT 模型的试制及损耗特性

### 5.1 试制样机的概况

在第 3 节所述大容量 AMT 模型的铁芯支撑结构中，为对其损耗抑制效果进行验证，试制了支撑结构内仅装入铁芯的模型，对空气中的铁损特性进行了评价。将铁芯装入支撑框架内的 AMT 模型外观图示于图 9 (a)、(b)。图 (a) 为完成时的正视图；图 (b) 为铁芯插入操作过程中，从上部支撑铁芯的梁结构（从下面拍摄的底视图）。对各个卷铁芯在磁场中进行热处理，用绝缘纸对叠层面进行保护之后再装入支撑结构内。线圈为通过设计的规格，另外制作的，并对其直流阻抗进行实测，由此判定了 AMT 实际负荷运行时的铜损  $P_c$ 。

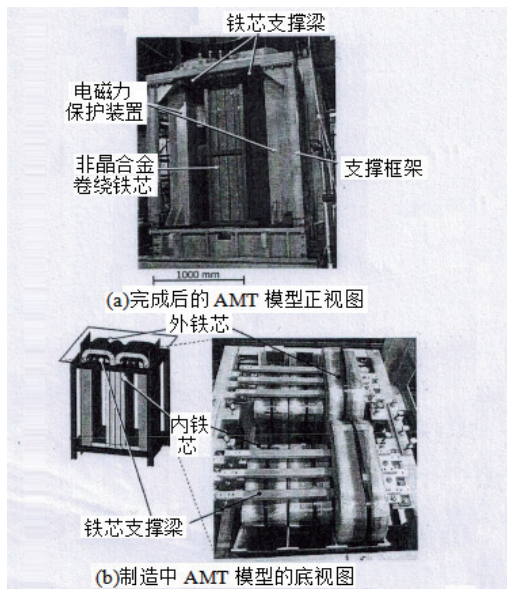


图 9 铁芯已插入支撑框架，制成的 AMT 模型外观图

### 5.2 铁损 $P_i$ 的评价方法

图 10 所示为试制的 AMT 模型  $P_i$  的评价系统。铁芯中间磁支柱上卷绕 4 匝励磁线圈和 2 匝检查线圈 (Searchcoil)。用任意波形的振荡器 (Oscillator) 与 2 台放大器 (amplifier)，组成了单相三线电源，将 50Hz 的正弦波电压施加到励磁线圈上。根据励磁线圈的电流值和检查线圈中产生的电压值，通过功率表求得  $P_i$ 。由这一测定系统测得的（在励磁范围内）非晶合金铁芯的相对导磁率为 800 以上，从线圈到铁芯外漏泄磁场的的影响几乎可忽略。

评价时 AMT 模型的位置方向示于图 11 (a)、(b)。对 AMT 模型的  $P_i$  特性进行评价，图 (a) 所示为站立方向，图 (b) 所示为侧卧状态，根据提案中铁芯的支撑方法，对  $P_i$  的抑制效果进行了验证。AMT 模型装入铁芯由 3 列构成，铁芯相互之间设置着隔板。因而在图 (b) 卧倒状态下，每个铁芯来自外部的荷重以及自重导致的压缩应力几乎没有。在两种姿势下通过对  $P_i$  的比较，将装入 AMT 的铁芯上作用的应力，对  $P_i$  的影响可量化。

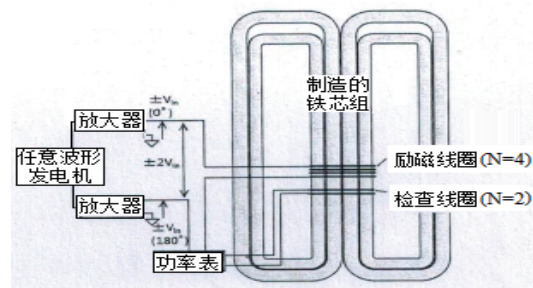


图 10 制成的 AMT 模型对其性能  $P_i$  的评价系统略图

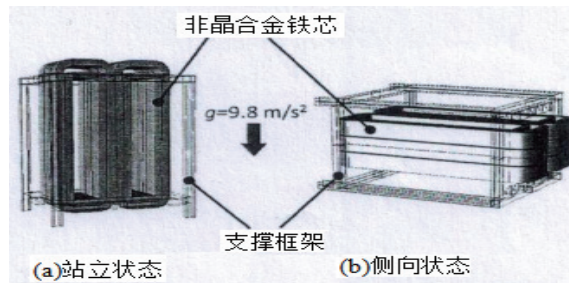


图 11 在  $P_i$  评估时制成 AMT 的位形

### 5.3 铁损 $P_i$ 的评价结果

图 12 所示为试制 AMT 模型铁芯在 50Hz 下的  $P_i \sim B_m$  特性。“·”为站立状态，“o”为侧卧状态，其数

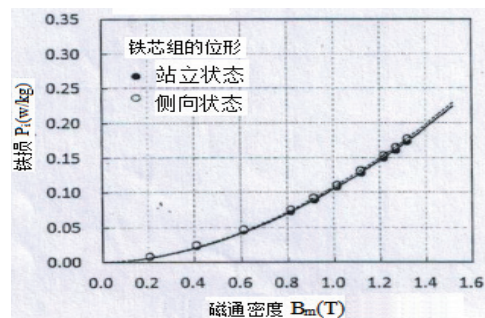


图 12 在铁芯位置形态不同的情况下，制成 AMT 模型的  $P_i$  与  $B_m$  性能关系的比较

值为这两种状态下的测定值，按照  $B_m$  的乘幂式，分别由实线、虚线表示之。但是因铁芯位置的不同，未见到  $P_i$  有大的变化，这认为是大型铁芯站立时作用的压缩应力，在提案结构中起到了抑制的效果。

## 6 对 AMT 效率提高效果的研讨

在本研究中，作为 AMT 降低损耗的对策，考虑了以下两个结构方案：

(1) 由非晶合金铁芯的自重降低压缩应力，抑制  $P_i$  增加的分开支撑结构。

(2) 向  $P_s$  集中部分补加硅钢片屏蔽的支撑框架结构。

图 13 所示为负荷率 50% 时的 AMT 模型，其功率损耗，与以相同功率 SST 的典型例作为基础的相对比较。图中间所示的 (a) 矩形图是未采用上述两种结构而制作的 AMT 的计算结果；图右边所示的 (b) 矩形图是采用了上述两种结构，在本研究中试制的 AMT 模型的结果，也即，将图 12 所示的  $P_i$ ，加上由线圈直流阻抗求得  $P_c$  的各测定结果。包含由分析求得的硅钢片屏蔽损耗的  $P_s$  与通过计算式求得的  $P_{sw}$ 。

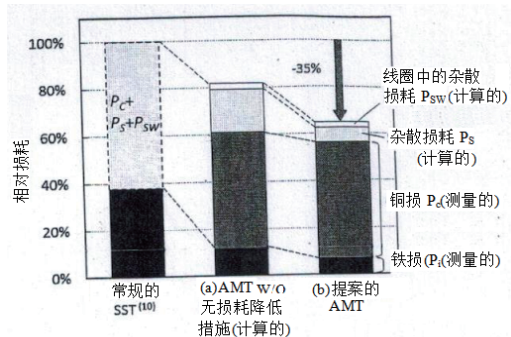


图 13 50% 负载损耗降低的相对比较

在 (a) 的矩形图中的  $P_i$ ，如图 6 (a) 所示，采用压缩应力作用状态下的计算结果，设定线圈的规格相同， $P_c$ 、 $P_{sw}$  采用了与 (b) 相同的数值。然后， $P_s$  则采用了图 8 左侧矩形图所示的计算值。脆弱的大型非晶合金铁芯，与原来 SST 那样，仅在底面上支撑着，实际上 AMT 的结构是不健全的，应增加防止铁芯支座弯曲的支撑构件，以及防止铁芯免受电磁力作用的保护构件。由此，必须设定在不具备硅钢片屏蔽状态下，与试制模型相同程度的金属构件。计算的 (a) 矩形图中，由非晶合金材料的

低损耗特性得到的  $P_i$ ，比 SST 的将减少 70%，故总损耗比 SST 的约降低 20%。与此相应，(b) 矩形图中，由于上述两种降损结构，对比 (a) 矩形图， $P_i$ 、 $P_s$  分别降低 32%、66%，相对于 SST 的总损耗，下降的效果将扩大至 35%。

图 14 所示为试制 AMT 模型的电力效率与负荷率的关系特性。为进行比较，设定与 SST 相同的电力容量，图中给出了所提方案 AMT，与图 13 (a) 矩形图所示的、未采用损耗降低结构的 AMT 模型结果对比。其中，负荷率  $L_f$  (%) 时的效率  $\eta$ ，由下式求得：

$$\eta (\%) = [1 - P_i + (P_c + P_s + P_{sw}) / C] \times 100 \dots \dots (5)$$

式中， $P_c$ 、 $P_s$ 、 $P_{sw}$  分别为负荷率 100% 时的  $P_c$ 、 $P_s$ 、 $P_{sw}$ ； $C$  为变压器的额定电力容量。

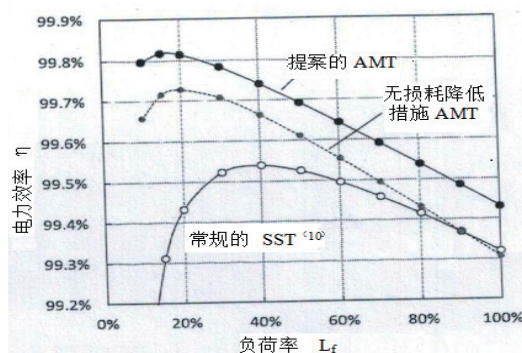


图 14 提案 AMT 模型的电力效率  $\eta$  与负荷率  $L_f$  的特性关系

对比 SST， $P_i$  大幅度降低的 AMT，在低负荷率时的效率  $\eta$  提高效果明显，由可再生能源加入到配电应用中，能得到很大的节能效果。即使在不具备损耗降低结构的 AMT 中，也比 SST 有一定的优越性。但 AMT 的铁芯断面面积比 SST 的大，起因于线圈阻抗的  $P_c$ ，不可避免会增大，加之由线圈的漏泄磁场产生的  $P_s$  也会增加，故高负荷率条件下，效率  $\eta$  大致与 SST 的相同。与此相应，本研究中采用了提案损耗降低结构的 AMT，除  $P_i$  以外，与负荷率相关的  $P_s$  也降低，几乎在全部负荷率条件下，均达到效率提高的效果。支撑结构中装入线圈的 AMT 的试制，及其效率提升效果的验证，是今后的研究课题。

此外，包含支撑结构的 AMT 模型，以包围这一整体的长方体体积所定义的框架体积，对比本研究中作为比较对象的 SST，其体积将大 25%，通过支撑结构的减小，轻

量化等，对框架体积的小型化也是研究课题之一。

## 7 结束语

面对结构上未健全，迄今尚无制造先例的大容量非晶合金铁芯的变压器（AMT），不仅应抑制铁损的增加，还对铁芯的支撑结构已提出方案。分别试制了相当 10MVA 的、装入单相三支柱型铁芯的支撑结构和线圈，对各自的损耗特性进行了评估。考虑的方案是：重量 7t 的非晶合金卷铁芯，缓和了由于自重产生的压缩应力，可抑制铁损增加的支撑结构，为降低支撑构件上产生杂散损耗而配备的屏蔽结构，以及线圈短路时由电磁机械力作用于脆弱铁芯的防护结构。将铁芯分成为内外两层，由于独立的悬吊式支撑结构，铁损可降低 32%；在漏泄磁场集中位置装备屏蔽材料，由此得到杂散损耗降低 66% 的结果。由实测的铁损与铜损，以及按设定的 AMT 实际负荷运转时的杂散损耗分析值，求得负荷率 50% 时的总损耗，预定比相同

电力容量的硅钢片铁芯变压器（SST），可降低 35%（见图 13）。作为今后的研究课题是：对装入线圈的 AMT 的试制及其效率提高效果的验证，以及对比 SST 大 25% 框架体积实现小型化的研讨等。

原文出处：Naoyuki Kurita, Akira Nishimizu, Hisashi Morooka, Chie Kobayashi, Naoya Miyamoto, Yoshio Hamadate, Takashi Lshigani, Yu Yamada, Kouji Sasaki, Takahiro Satake, Tetsuya Fukuyama, 'Demonstration of Loss-reduction Effect of the Amorphous Cores for Larger-Capacity Transformers by Trial Manufacture' «IEEJ Transactions on Power and Energy» vol.138 No.1.2018

## 上接 161 页

另外一些电源拓扑则要求变压器磁芯储存一定的能量。反激式电路中的变压器在开关周期的前半部分通过初级线圈储能。在开关周期的后半部分，能量被释放并通过次级线圈馈向输出。和电感的情况一样，不带气隙的高磁导率磁芯不太适合变压器储能。相反，磁芯必须具有不连续的或分布式的气隙。这会使元件的尺寸比不带气隙时的情况更大一些，但却省去了额外的储能电感，因此更加节省成本和空间。

## 6 后话 —— 正确布局控制 EMI 至关重要

(1) 由上述二大问题的分析研讨，充分说明组件正确布局 and 选择（包括电感器等）对是电子设备或系统控制 EMI 是非常关键的。即元件的选择对于控制 EMI 至关重要，但电路板的布局和互连也具有同等重要的影响。尤其是对

于高密度、采用多层电路板的开关电源，元件的布局和走线对于电路的正常工作具有重要的影响。功率的切换可以在连接线上产生很大  $dv/dt$  和  $di/dt$  的信号，它可以耦合到其它连线上造成兼容性问题。不过，只要在关键回路的布局方面多加注意，就可避免兼容性问题以及花费很大代价去对线路板进行修改。

(2) 对于一个系统来讲，辐射型和传导型电磁干扰很容易区分，但具体到某快电路板或某段导线，问题就变得复杂了。相邻连线之间会有电场的耦合，同时也会通过分布电容传导电流。同样地，连线之间也会像变压器一样通过磁场发生耦合。这种相互作用可以利用集中元件进行描述，也可以采用电磁场理论进行分析。具体采用何种方法取决于系统的精确度要求。