

# 非晶配电变压器的开发与节能

石松耀

(上海钢铁研究所, 上海 200940)

当前国际上很重视非晶配电变压器的产业化应用研究. 国内已研制成功一小批容量为 3—200kVA 的各种结构的非晶配电变压器, 空载损耗比 S<sub>7</sub> 型硅钢变压器降低 60%, 节能效益显著, 并网运行可靠. 根据我国农用配电变压器负载率低、能耗高和数量多的特点, 低损耗且售价适宜的非晶配电变压器在我国农村电网的改造中将大有可为.

## 一、非晶变压器的开发应用有巨大的节能效益

采用外圆离心急冷法制备的铁基非晶态合金, 具有高磁导率、低损耗的特性, 是取代硅钢作为节能高效配电变压器的理想铁芯材料, 使用量大面广, 是非晶态合金发展产业化的基石.

1974 年, 美国 Allied 公司用铁基非晶合金制成世界上第一台 10kVA 非晶合金铁芯变压器. 它与冷轧硅钢变压器相比, 铁损降低 75%. 这项重大创造引起电力部门和变压器厂商的密切注意. 据估计, 采用非晶合金变压器替换现用的 3500 万台配电变压器, 每年可节省发电能力 7000MW. 据日本三菱公司估计: 日本总发电量为 7000 亿度, 现用硅钢变压器损耗占 1.5%, 如用非晶态合金取代硅钢, 则损耗可下降 2/3, 即可节电 70 亿度. 结合我国电网损耗情况, 初步计算输变电系统的电力损失约占总发电量的 8%, 其中输电占 2.7%, 变电占 1.3%, 配电占 4%. 配电变压器年耗电 200 亿度, 若以铁损占 2/3 计算, 则年耗电量为 133 亿度. 如用非晶态合金取代硅钢, 每年铁损可下降 75%, 即相当每年节电 100 亿度, 效益可观<sup>[1]</sup>.

## 二、非晶配电变压器的开发与商品化

### 1. 国外非晶配电变压器的开发与研究

在国外, 美国和日本是非晶变压器开发与商品化的主力. 在美国, 由电力研究协会物理

(EPRI) 统筹安排非晶变压器材料制作(由 Allied 公司负责)和变压器制造(由 GE 公司负责)、开发及并网运行. 1979—1988 年间, 投资 2560 万美元, 其中 GE 公司承接制造 1000 台容量为 25kVA 的变压器任务, 重点研究非晶变压器设计、制造工艺, 进行现场并网运行及测试, 论证经济上的可靠性. 80 年代后期(1986—1990 年), GE 公司非晶变压器的开发与商品化取得飞跃发展, 先后推出 10—100kVA 单相和 45—1500kVA 三相非晶变压器两个产品系列, 年产 2 万台, 拟扩大到 4 万台. 目前正以降低成本、实现铁芯制造机械化为目标, 进行生产工艺和设备上的大量投资建造.

1979—1986 年间, Allied 公司承接铁基非晶变压器铁芯材料的研究开发, 产品牌号为 Metglas2605S-2, 带厚 25 $\mu$ m, 宽 100—200mm, 填充系数为 0.85, 年生产能力达 7000t. 1987 年, 该公司又在美国东南地区建立一座年产 6 万吨的非晶合金带材生产工厂.

由于美国和日本之间在非晶合金专利与市场方面的竞争, 日本非晶变压器开发, 要在 1997 年以后(那时美国在日本专利失效)才大量投产. 日本已掌握非晶合金及变压器大规模生产的配套技术. 其生产目标是: 1995 年后, 非晶态合金将取代 10% 的冷轧硅钢. 已有众多的公司、厂商进行非晶配电变压器的开发. 例如: 大坂变压器厂, 东芝电机、三菱电机、日立、高岳、爱知电机等公司. 近年来他们很注意大型三相叠片式非晶变压器(如 500kVA3 $\phi$ )研制开

发.

## 2. 我国非晶配电变压器的开发与研究

“七五”期间,国家重大科技攻关项目“非晶合金铁芯配电变压器研制”是由上海钢铁研究所承担,冶金工业部钢铁研究总院、北京冶金研究所、上海变压器厂、长沙变压器厂、中国科学院电工研究所和上海冶金设备总厂参加研制,联合天水农电公司和上海供用电研究所负责协调并网运行试验.从1985年5月起至1990年12月为止,先后研制成功11台非晶配电变压器,容量为3—100kVA,非晶带材为国产铁基

非晶和美国S-2型两种.铁芯设计采用多种方式,包括:100kVA叠装式,50kVA叠片式椭圆截面,叠片式矩形截面,30kVA七级卷铁芯,RO型卷铁芯,10kVA粘合叠片式铁芯等六种结构形式.这些铁芯料的剪裁、粘合、卷绕、磁退火等工艺,均由上海钢铁研究所承担.与S<sub>7</sub>产品相比,非晶配电变压器空载损耗都下降了1/2(叠片式)—2/3(卷绕式).这充分显示出非晶配电变压器的节能效果,性能达到80年代中期国际水平.“七五”期间,我国开发研制的非晶铁芯配电变压器主要特征见表1.

表 1

No.	完成日期	型号	容量 (kVA)	相数 φ	结构	空载损耗			说 明
						变压器	铁芯	为 S <sub>7</sub> 的	
1	1986年5月	DG-3/0.5	3	1	卷铁芯	3.85W		1/6	国内首创
2	1986年6月	S <sub>14</sub> -30/10	30	3	卷铁芯	27W		1/5	1987年12月国内首次并网
3	1988年9月	SFJ-100/10	100	3	叠装式	187W	174W	1/2	国内首创大容量叠片式
4	1989年3月	SFJ-10/10	10	3	叠片式		47.7W	1/3	国内小型农用配电变压器第一台产品
5	1989年8月	S <sub>3</sub> -30/10	30	3	卷铁芯	40.5W	33.5W	1/3	自行加工非晶铁芯
6	1989年12月	SFJ-50/10	50	3	椭圆叠式	150W		4/5	按常规结构
7	1990年8月	S <sub>14</sub> -50/10	50	3	卷铁芯	61W	56W	1/3	首台国产非晶变压器
8	1990年12月	S <sub>14</sub> -50/10	50	3	矩形叠式	98.2W		1/2	矩形铁芯及线圈
9	1990年12月	SFJ-50 I /10	50	3	卷铁芯	67W		~1/3	国产铁基料
10	1990年12月	S <sub>14</sub> -50/10	50	3	矩形叠式	86.3W		1/2	矩形铁芯及线圈
11	1990年12月	SFJ-50 I /10	50	3	卷铁芯	108W			国产铁基料

## 3. 并网运行试验

1985年,美国中央电力研究所购买GE公司生产的1000台25kVA非晶变压器,分散到90个用户并网试验,连续运行两年以上,运转正常.据分析,在75—120℃范围内,非晶变压器能可靠使用20—30年.日本东京电力公司将

20kVA和50kVA单相变压器各20台并网进行试验.从1987年起至1990年止,对负载发热的影响和雷击电磁力的影响等进行重点观察,未发现异常现象.日本爱知电机公司对叠片式三相500kVA非晶变压器进行了各种试验和运行考验,包括空载特性、温度特性、噪声、负载

特性、绝缘特性、瞬时短路试验、耐振试验、长途运输试验、挂网试验等项目,可以证明试制的叠片式三相 500kVA 非晶变压器能长期使用<sup>[2]</sup>。

国内非晶配电变压器并网试验情况如下:

在华东电力局和甘肃省电力局大力支持下,上海宝山和天水暖和湾建立了两个试验站。1987年起,先后对具有不同结构(卷式、叠式),不同容量(30, 50, 100kVA)的三相非晶配电变压器并网试验。最长历时两年零三个月,积累了大量数据,分析验证非晶配电变压器的可靠性。目前已并网的有上海宝山供电所的三台(30, 50, 50kVA),天水市农电公司一台(100kVA)和河北涿州电力局一台(50kVA)。现以两例说明。

(1)30kVA3 $\phi$ 非晶配电变压器,并网两年零三个月,出厂检验空载损耗 $P_0$ 为27W,空载电流 $i_0$ 为0.15%;其间运行检测15次, $P_0$ 值随网路电压波动,变化在28—35W之间。1990年3月下网复测,测得 $P_0$ 为28.2W, $i_0$ 为0.18%。试验的结果如下:S<sub>14</sub>-30/10非晶配电变压器经两年现场运行,对历次采集的数据进行分析,看不出有明显变化,说明这台变压器应用的非晶合金材料,未发生老化现象,磁特性也未变。

(2)100kVA3 $\phi$ 叠片式非晶配电变压器,从上海长途运输到天水,经天水农电公司电修班复测,空载损耗为160W,1990年4月在水南市郊并网运行,每月检测一次,空载损耗随网路电压而波动,到1991年5月进行复测,空载损耗仍为160W,基本没有变化。

以上各种试验证明,非晶配电变压器能经受住各种考验,能长期可靠地使用。

### 三、市场开发及经济效益

#### 1. 市场开发

GE公司已有4.5万台投入运行,用料4000t估计到1993年,美国非晶电力变压器市场年需求量为5—6万吨,欧洲需10万吨。据预测,2000年全世界配电变压器用非晶合金的市物理

场销售额将达每年10亿美元。今后国际市场开发的主要对象是日本、印度和欧洲。我国能源紧张,农村电力急待改造,因为农用配电变压器年利用率低,平均负载率仅14%,容量小于或等于100kVA的小型变压器总台数占80%以上。非晶变压器的突出优点是铁损很低,最适于农村电网使用。农用配电变压器市场有两个方面:(1)每年新增加的中小型变压器容量为500万kVA,如每台平均以50kVA计算,则每年需增加10万台;(2)改造原高能耗变压器,能源部文件规定限期改造64型,逐步更新73型。全国农村需更新的配电变压器容量为1亿kVA,如每台以50kVA计算,则共需更新约200万台;如按10年更新完毕计算,则每年需更新20万台。

(1),(2)项合计,农村每年需30万台50kVA低能耗配电变压器。如以每kVA需2—3kg非晶材料计,一台50kVA非晶变压器用100—150kg材料,全部农用配电变压器市场每年需3—4.5万吨非晶材料。因此,市场是很大的。然而要将这一市场从预测变为现实,需要一个培育过程。通过“非晶金属与合金”研究课题攻关,国内市场开发已有良好的基础。这表现在:

(1)1990年我国已建立起具有在线自动卷取装置的铁基非晶材料百吨级中试生产线,可成批提供宽100mm合格的铁基非晶带材。

(2)1985—1990年间,完成了3, 10, 50, 100kVA共11台非晶配电变压器的研制,铁损与S<sub>7</sub>相比,都下降1/2(叠式)—2/3(卷式),具有明显的节能效果。非晶配电变压器的研制成功,标志我国非晶变压器的开发已跨入国际先进行列,为90年代非晶配电变压器的商品化,打下良好基础。

(3)根据1991年5月能源部文件,“八五”期间,全国农村电网技术改造、技术进步的首要任务,就是更新改造高能耗变压器35万台,其中64型和非标准的劣质配电变压器均需就地报废处理,73型需进行改造。

(4)1991年能源部和机械电子工业部根据农电变压器容量小,负载率低的特点,起草制定了农村专用变压器标准, $P_0/P_k$ 值( $P_0$ 为空载

损耗,  $P_k$  为负载损耗)由原来工业用的 1/5 改为 1/7, 从而使非晶配电变压器  $P_0$  低的优点得到充分发挥. 因此, 在我国西北、华北等地区农村电网技术改造中, 以非晶铁芯代替高能耗产品, 大大节约了能源, 带来了巨大的经济效益, 同时也使市场对非晶配电变压器的需求更加迫切.

## 2. 推行变压器经济运行、损耗评价制度

非晶合金应用的主要障碍是价格问题, 据调查<sup>[3]</sup>, 一般认为只有当非晶材料售价  $\leq 2$  倍硅钢片售价, 非晶配电变压器售价  $\leq 1.25-1.3$  倍硅钢变压器售价时, 非晶配电变压器才能为广大用电部门所接受. 据此, 必须推行变压器经济运行、损耗评价制度. 目前国内评价方法计有<sup>[4]</sup>:

(1) 按变压器制造行业的 10 年运行费用计算公式

$$D = H(V_E + V_K L^2) \quad (1)$$

进行评价, 其中  $D$  为 10 年运行费用,  $H$  为 10 年运行小时数,  $V_E$  为空载损耗降低值 (kW),  $V_K$  为负载损耗降低值 (kW),  $L$  为负载率, 标称容量小于或等于 6300kVA 和耐电压小于或等于 35kVA 的变压器, 它们的负载率为 19—52%.

(2) 按华东电业管理局的投资回收年限计算公式

$$\frac{K}{N} \leq \left[ \left( \frac{1}{1+i} \right)^1 + \left( \frac{1}{1+i} \right)^2 + \dots + \left( \frac{1}{1+i} \right)^n \right] \quad (2)$$

进行评价, 其中  $K$  为多增投资,  $N$  为每年由于损耗降低可回收的资金,  $i$  为投资利用率 (14%),  $n$  为运行年限 (20 年).

全国统一设计的  $S_7$  型三相 30kVA, 10/0.4kV 硅钢铁芯变压器与非晶配电变压器性能比较如表 2 所示.

表 2

铁 芯	$P_0, P_K$ (W)	$G_{Fe}$	$G_{Cu}$ (kg)	$G_0$	允许价格比	
					按(1)式	按(2)式
Z10-0.35 硅钢	150 800	88.5	35.2	85		
非晶合金(S-2)	27 744	103	84	98	2.76	1.65

注:  $G_{Fe}$  为变压器铁芯重量,  $G_{Cu}$  为变压器铜绕组重量,  $G_0$  为变压器油重量.

按两种损耗评价, 非晶带售价为硅钢带售价的 1.65—2.76 倍. 根据我国国情, 目前因缺电造成的国民经济损失, 预计每千瓦小时约 2 元. 从总的社会效益来看, 非晶合金的价格高于硅钢的两倍以上, 也还是有推广价值的. 希望电力工业部和能源部制定相应的优惠政策, 以协调社会效益与企业效益之间的矛盾.

## 3. 经济效益

农用配电变压器市场广阔, 全国有 200 万台, 改造农电高能耗变压器需非晶材料数十万

吨. 农用配电变压器  $P_0$  为  $S_7$  的 1/3, 如取代硅钢变压器, 每年可节电 100 亿度, 价值 20 亿元以上, 相当于 114 万千瓦发电机组一年全负荷发电量. 可见开发农用配电变压器, 节能意义十分重大.

- [1] 郁增基, 上海钢研专辑, No. 4(1989), 7.
- [2] 深川裕正, 上海钢研专辑, No. 4(1991), 28.
- [3] 张传历等, 非晶态合金及其应用, 冶金工业部科学技术司, (1990), 286—298.
- [4] 顾家楨, 上海钢研专辑, (1987), 73.