

江苏电网非晶合金变压器综合评估

吴鹏, 陆云才, 陈铭明, 蔚超, 吴益明

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:根据江苏电网的应用情况及非晶合金变压器的技术特点, 对非晶合金变压器从安全性能、经济性和环境影响3个方面与常规S11、S13及S15型等多种型号常规变压器进行了全面对比分析。在安全性能方面, 非晶合金变压器的过负荷能力和过励磁能力不足; 在经济性能方面, 非晶合金变压器空载损耗低、运行效率高, 节能效果明显; 在环境影响方面, 非晶合金变压器噪声比常规变压器大, 需厂家降低其噪声水平。根据综合评估结果给出了非晶合金变压器选用的建议。

关键词:非晶合金变压器; 综合评估; 过负荷能力; 过励磁能力; 低损耗

中图分类号: TM411

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)03-0001-05

20世纪80年代, 美国通用电气公司(GE)、美国电力研究院(EPRI)和帝国电力研究公司(ES-EERCO)联合研制了非晶合金变压器(AMT)。我国于“七·五”中期开始非晶合金变压器的研制工作, 1995年挂网试运行。2011年8月, 为响应国家节能减排号召, 切实降低配网损耗, 国家电网公司推广采用节能型变压器, 推广应用S13以上型号节能型变压器(不低于25%), 农村和纯居民供电配电变压器优先采用调容变压器(不低于10%)和非晶合金变压器(不低于15%)。非晶合金变压器以其显著的节能效果成为配网节能减排改造和建设的主力之一^[1,2]。江苏电网内首台非晶合金变压器于2000年投运, 截至2012年7月, 江苏省电力公司所属10 kV非晶合金变压器共78 699台, 占配电变压器总台数的12.7%; 油浸式变压器占非晶变总量的99.5%, 型号以SBH11, SBH15, SBH16型为主, 其中SBH15, SBH16型变压器占非晶变总量的65%。为对非晶合金变压器的选用提供参考, 从经济性能、安全性能、环境影响等方面对非晶合金变压器进行综合评估。

1 非晶合金变压器技术特点

用于变压器铁心材料的非晶合金主要以铁、镍、钴等金属为合金基, 并加入少量的硼、硅等元素所制成的合金, 具有良好的铁磁性。非晶态合金薄带的制造工艺与传统的硅钢片制造工艺有很大不同, 硅钢片的制造过程需经过练、轧等多道工序; 而非晶合金材料是以非常快的速度由液体冷却凝固成0.027 mm左右厚的合金薄带, 此工艺比常规硅钢片成材工艺节省了6~8道工序, 节省能耗80%左右。另外, 晶粒取向的硅钢片成材率低, 仅40%~50%左右, 而非晶合金成材率可达90%。非晶合金薄带材具有优异的软磁性能、硬度高、耐蚀性能好等特点。但因受喷出冷却成

型的工艺所限, 带材宽度仅为213 mm, 所以目前还不能制造高电压、大容量变压器铁心^[3]。非金属与硅钢性能比较^[4]如表1和图1所示。

表1 非晶合金与硅钢主要物理性能比较

物理性能	非晶合金	冷轧硅钢
饱和磁感应强度/T	1.54	2.03
矫顽力/(A·m ⁻¹)	< 4	> 30
50 Hz下单位铁损/(W·kg ⁻¹)	0.18	1.2
电阻率/(μΩ·cm)	140	50
密度/(g·cm ⁻³)	7.18	7.65
硬度/(hg·cm ⁻²)	860	170
饱和磁致伸缩系数×10 ⁻⁶	30	10
最大导磁率	> 200 000	> 10 000
厚度/mm	0.027左右	0.3

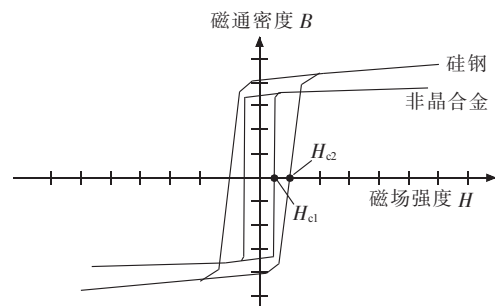


图1 非晶合金与硅钢片磁滞曲线比较

非晶合金变压器主要特点有^[5,6]: (1) 非晶合金没有晶格和晶界存在, 因此, 其磁化功率小, 并具有良好的温度稳定性; (2) 非晶合金带材的厚度为0.02~0.03 mm, 是硅钢片的1/10左右, 电阻率是冷轧硅钢片的3倍左右, 因此, 其涡流损耗很小; (3) 非晶合金的硬度是硅钢片的5倍, 加工剪切比较困难; (4) 非晶合金对机械应力非常敏感, 无论是拉应力还是弯曲应力都会影响其磁性能, 在变压器结构设计时需采取特殊的紧固措施, 以减少铁心受力, 应避免采用以铁心作为主支撑的结构设计方案; (5) 非晶合金的磁致伸缩度比硅钢片高10%以上, 因此不宜过度夹紧, 这将直接增加

变压器的噪声;(6) 非晶合金的矫顽力小于 4 A/m,是冷轧硅钢片的 1/7 左右,其磁滞回线所包络的面积远远小于冷轧硅钢片,因此非晶合金的磁滞损耗比冷轧硅钢片的也小很多。

可见,采用非晶合金取代硅钢片制造变压器虽工艺略复杂,但可使空载损耗和空载电流大幅下降^[7-10],非晶合金变压器 SBH15,SHB16 系统空载损耗与传统 S9,S11,S13 配变比较如表 2 所示。

表 2 非晶系列变压器与传统型配变空载损耗

变压器容量 /(kV·A)	空载损耗/W				
	S9 型	S11 型	S13 型	SBH15 型	SBH16 型
100	290	200	145	75	58
125	340	240	170	85	68
160	400	280	200	100	78
200	480	340	240	120	90
250	560	400	280	140	110
315	670	480	335	170	130
400	800	570	400	200	160
500	960	680	480	240	190
630	1 200	810	600	320	230
800	1 400	980	700	350	280
1 000	1 700	1 150	850	450	330
1 250	1 950	1 360	975	530	390
1 600	2 400	1 640	1 200	630	470

通过对江苏电网内非晶合金变压器和传统变压器进行抽检试验,SBH15-200 kV·A 非晶合金配变空载损耗平均值为 110.7 W,相同容量的 S11 型常规配变空载损耗平均值为 332.5 W,SBH15-200 型非晶合金配变空载损耗比 S11-200 型常规配变要低 66.7%,负载损耗接近;SBH15-400 kV·A 非晶合金配变空载损耗平均值 177.5 W,相同容量的 S11 型常规配变空载损耗平均值为 576 W,SBH15-400 型非晶合金配变空载损耗比同容量 S11-400 型常规配变要低 69.2%,负载损耗接近。以上实验室测试结果验证了非晶合金低空载损耗特性。

2 非晶合金变压器综合评估

2.1 安全性能评估

2.1.1 过载能力

变压器过载能力与线圈的导线电流密度选取、绝缘材料耐热和有效散热面积等因素有关,与铁心材料没有直接联系。当油浸式变压器的绝缘材料选用耐热等级高的,则过载能力也会增强,例如高压线圈导线采用漆包线,过载能力将高于选用纸包线的变压器。

变压器挂网运行后,负载率是一个动态参数,随时变化的,当负载率超过 100%时,变压器处于过负载状态。油浸式变压器的过负载能力应符合 GB/T1094.7,

非晶合金变压器同样需满足上述标准,起始负荷 80%,环境温度 40℃下,过负荷电流倍数为 1.5 时可持续运行 2 h,其热点温度不超过 140℃。另外,部分变压器厂家保证其非晶合金变压器可在 120%负载下长期安全运行。

以上均是理论计算或分析,因非晶合金变压器实际过负载时间与环境温度、初始负载率、过负载要求、铁心及绕组内部真实热点温升限制等因素有关。目前国内并无厂家做过相关过载试验研究,特别是非晶合金变压器内部温升实测。当用户有特殊过载要求时,制造企业仅从设计角度保证其过载满足要求。

非晶合金变压器由于采用全密封结构,漏磁损耗、涡流损耗导致的热点温升问题较为显著,同时厂家对自己产品的实际过负荷能力不够了解。很多负荷特性变化较大的地区(如农忙或抗旱期间,农网负荷骤增,及夏天持续高温,城市空调负荷猛增),易出现变压器长时过载的现象,容易造成非晶合金变压器损坏。在前期投运的非晶合金变压器中有少量出现烧损现象,经总结分析发现设备过负荷能力不强,短时超载变压器就有可能烧损(经统计 2006 年至 2007 年,非晶合金变压器故障以过负荷损坏居多,全省共有 12 台非晶变发生过负荷损坏故障)。随后,江苏电网采取了一系列措施,加强了对此类设备的运行管理工作,适当控制非晶合金变压器的使用范围,并严格控制负荷水平,对负荷超过 80%的非晶变,及时进行增容改造,确保不发生因过负荷烧毁变压器,目前总体运行状况良好。非晶合金变压器近 3 年故障率分别为 0.24%,0.27%,0.22%,与常规变压器近 3 年故障率 0.24%,0.25%,0.21%接近,充分反映了采取一系列措施后,非晶合金变压器故障率得到了有效控制。

由于变压器过载多数只是属于短期(每年 4~5 d)、短时(每天 1~2 h)现象,为避免短时过载,非晶合金变压器必须在负荷接近时立即进行增容改造。江苏目前重载的配电变压器(最高负荷超 80%)有 8 万台,如果大量应用非晶合金设备,安全运行压力较大。

综合以上因素,需从不同角度深入研究非晶合金铁心变压器的运行,包括使用寿命的加速老化、现场运行及空载特性稳定性试验、热点温升及过负荷能力等,提高非晶合金变压器安全运行的可靠性。

2.1.2 过励磁能力

过励磁是指变压器铁心工作磁密超过铁心的饱和磁感应强,原因有多种:电磁计算时铁心的工作磁密取值偏高、变压器运行时电网出现过电压等。无论非晶合金变压器还是传统硅钢变压器,原则上都不允许长时间过电压运行。因此,非晶合金变压器在电磁计算时工作磁密取值在 1.25~1.35 T,与非晶合金带材的饱和磁

感应强度 1.55 T 比,理论上留有足够的裕度。

然而部分运行情况显示,非晶合金变压器在电网存在过电压时,空负载损耗急剧增加,铁心会产生不可逆的形变,长期运行后造成使用寿命降低及产生的噪声变大。此类问题在农网无功补偿不足导致电压波动和闪变地区较为严重,非晶合金过励磁能力还有待进一步深入研究分析。

2.2 经济性能评估

2.2.1 节能效果

变压器的有功损耗是由空载损耗和负载损耗组成,一般国家标准或企业标准上所标注的变压器的负载损耗保证值是指当变压器流通额定电流时所汲取的有功功率,但是变压器在实行运行时,线圈上流通电流并不是一成不变的,是根据实际情况有波动的,即形成负载波峰或波谷等情况,因此评估变压器有功损耗需考虑实际负载率。

空载损耗不会随年平均负载率变化而变化,对某台变压器运行在额定电压情况下是一个恒定值;实际负载损耗是随着年平均负载率变化而变化;在低年平均负载率情况下,由于 SBH15 型非晶配变具有超低空载损耗的优点,从而其总损耗远低于 S11 型硅钢配变。现将年平均负载率 30%,50%,60% 情况下 SBH15 和 S11 的实际负载损耗、有功损耗比较如表 3 所示。

表 3 500 kV·A 额定容量 SBH15 和 S11 低负载率下损耗比较

低负荷下损耗	S11	SBH15
P_0/W	680	240
P_k/W	5 150	5 150
P'_k/W	464	464
$\beta=30\%$ P_z/W	1 144	704
P_z 降低幅度 / %		38.5
P'_k/W	1 288	1 288
$\beta=50\%$ P_z/W	1 968	1 528
P_z 降低幅度 / %		22.4
P'_k/W	1 854	1 854
$\beta=60\%$ P_z/W	2 534	2 094
P_z 降低幅度 / %		17.4

表中: β 为负载率; P_0 为空载损耗; P_k 为额定负载损耗; P'_k 为实际负载损耗; P_z 为有功损耗。

从表 2 中可以看出,当年平均负载率为 30% 时,S11 型硅钢配变的有功损耗是 SBH15 型非晶配变的 1.6 倍还多,当年平均负载率为 50% 时,SBH15 型非晶配变的有功损耗比 S11 型硅钢配变降低 22.4%,所以在低负载率的情况下,通过非晶合金变压器降低空载损耗,从而大幅度降低变压器的总损耗。

2.2.2 运行效率高

500 kV·A 容量 SBH15,SBH16 非晶配变及 S9,

S11 型硅钢配变 4 种产品在负载率从 0 到 150% 范围内的运行效率如图 2 所示。

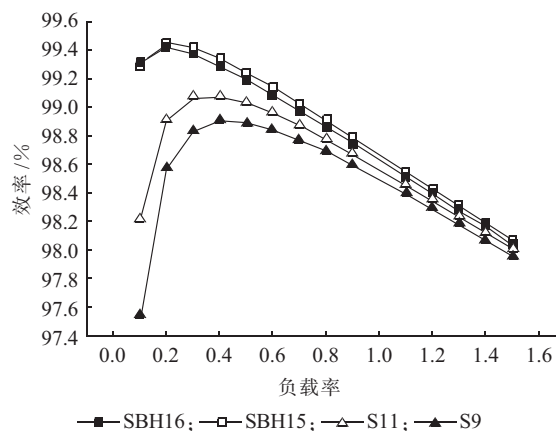


图 2 500 kV·A 变压器运行效率与负载率曲线

从图 2 可以看出,在负载率从 0 到 150% 范围内,SBH15,SBH16 型非晶配变的效率均高于 S9,S11 型硅钢变压器,在负载率低的区域,更能体现非晶配变的高效率的优势。与 S13 立体卷铁心硅钢配变相比,也是同样的情况。

2.2.3 降低电网线损

截至 2007 年底,国家电网公司农电系统综合线损率为 7.06%,10 kV 线损率为 4.90%,农网 10 kV 配变中 S7 及以前型号高耗能变压器比例约为 30%。据统计,农网平均用电负载率在 25% 左右,部分欠发达地区甚至在 10% 左右,配电变压器的空载损耗成为电能损耗主要部分。我国配电网损耗情况与欧洲相比^[11],还存在很大差距,具体如表 4 所示。

表 4 配电网损耗情况对比

配电网损耗 / %	欧洲	中国
配电网损耗 / 全网损耗		70
变压器损耗 / 全网损耗	33	65
配变损耗 / 配电网损耗	40	30~70
配变空载损耗 / 配变损耗		50~80

由表 4 可以看出,我国配电网损耗占全网损耗的 70%,成为整个电网损耗的主要部分。配电变压器损耗占配电网损耗的 30%~70%,成为配电网损耗的主要部分。配电变压器空载损耗又占配电变压器总损耗的 50%~80%,可见降低配电变压器空载损耗,是降低配电网损耗的重要途径之一。江苏部分供电公司采用非晶配变后线损均有不同幅度的降低,降低幅度最大高达 25%。

2.2.4 初购置成本较高但全寿命周期成本较低

2007 年之前,非晶合金变压器设备成本相对较高,价格约是同等级 S11 配变的 1.5 倍,其主要原因是非晶合金铁心加工困难,工艺复杂,在一定程度上增加

了工程建设成本。随着国家节能降耗和低碳经济政策的进一步推进,非晶合金变压器需求不断增长,非晶合金变压器市场的进入者增多,市场竞争加剧,非晶合金变压器的招标价格下行,近年来价格已降至同等级 S11 配变的 1.3 倍左右。由于其节能效果显著,运营成本较低,所以其综合成本较传统变压器低。

非晶合金变压器主要的节能优势还是体现在空载或者平均负荷率低于 50% 运行状态。目前江苏运行的变压器基本没有长期空载运行的,轻载状态的也很少,节能特性体现不明显,靠节能特性收回投资成本的周期较长,运行中为避免长时过载,非晶合金变压器必须在负荷接近时立即进行增容改造,考虑全省负荷随经济增长趋势,非晶合金变压器平均运行 10 年到 15 年即需要增容改造或故障更换,很多地区非晶合金变压器无法持续运行到总体节约成本的运行年限,因此目前节约成效并不明显。

2.3 环境影响评估

影响非晶合金变压器噪音的因素主要有非晶铁心材料的磁致伸缩系数、非晶铁心技术参数、器身装配工艺、模具、装备等因素。与器身结构也有一定关系,例如非晶铁心的结构和重量、夹件结构、器身固定的方式等。铁心片的磁滞伸缩现象是产生变压器噪音的主要原因,这与铁心的尺寸和磁通密度存在密切关系。在同一磁通密度下的磁滞伸缩程度,非晶合金的这一指标比传统晶粒取向冷轧硅钢片高约 10%。但是,冷轧硅钢片的饱和磁通密度较高,约为 2.03 T,而非晶合金的饱和磁通密度较低,约为 1.5 T。因为非晶合金铁心变压器的额定工作磁通密度(1.25~1.35 T)要比冷轧硅钢片铁心变压器的额定工作磁通密度(1.63~1.73 T)要低得多,所以二者实际的磁滞伸缩是接近的。但是,非晶合金铁心变压器与同规格传统铁心的变压器相比,铁心质量大 40% 左右,有效截面积大 50% 以上,这在一定程度上会使变压器噪音增大。

铁心结构也间接影响变压器噪音,通过改进铁心结构,有效降低磁通密度,控制不对称谐波影响。目前国内大多数非晶合金生产厂家采用 4 个框合并成类似三相五柱式有交错铁轭接缝的结构,此结构性能稳定可靠,但存在磁通分布不对称现象,部分厂家在经过磁通密度改进工艺之后,有效降低了变压器噪音 5~10 dB。同时有厂家研究出三相三柱结构的立式非晶合金变压器,在磁通密度控制上更加稳定,性能更佳。

如果不能有效掌握非晶铁心的处理工艺,非晶合金变压器的噪音明显高于硅钢变压器。如何选取合理的热处理工艺,也直接影响非晶合金变压器的噪音水平。目前某些企业掌握了该工艺,再加上其他降噪措施,如在非晶合金变压器外壳加设防音壁或振动传播

性能甚小的遮音钢板,在铁心搭接部位使用多层绝缘吸音胶,在框式夹件与铁心的接触面上用多层高密度创新吸音材料,使非晶合金铁心很好地固定,且富有弹性,也能有效地控制非晶合金的噪音。采取这些降噪措施,容量为 500 kV·A 的非晶合金变压器的噪音可控制在 45 dB 以内,但大多数企业并不能在设计、工艺、制造、使用过程中真正控制变压器的噪音水平,行业标准^[12]中也未明确规定非晶合金变压器的声级限值,仅提出非晶合金铁心变压器的声级限值由制造单位与用户协商确定。目前江苏入网非晶合金变压器技术规范中一般规定非晶合金变压器噪音(2 m)不超过 55 dB。在实验室对同容量非晶合金配变与常规 S11 配变可听噪音进行测试,结果如表 5 所示。

表 5 同容量非晶合金配变与常规 S11 配变空载噪声对比 dB

类型	型号	30 cm 处噪声	2 m 处噪声	背景噪声
非晶变	SBH15	51.4	48.3	44.3
常规变	S11	48.5	46.6	44.2
噪声差		2.9	1.7	0.1

实验环境:温度为 29℃;湿度为 74%。

实验室声级测量显示,非晶合金变压器空载运行时,噪音比普通油浸式变压器略高 2~3 dB,当负荷电流达到额定电流的 70% 时,噪音明显增大,相对同容量、同规格的普通油浸式配电变压器高出 5~8 dB。负荷越大,铁心振动幅值越大,变压器的噪音与变压器的振动状况基本保持一致。目前江苏省各市公司已接到多起非晶合金变压器噪音投诉,解决效果不是很理想。为避免此类问题,一般在居住密集地区内不建议使用非晶合金变压器。

3 建议

3.1 因地制宜选用

由于非晶合金变压器存在过负荷能力不强、噪音水平高等问题,选用时应因地制宜。

(1) 对于配网建设资金紧缺的地区,原则上不推荐使用非晶合金变压器;

(2) 在负荷增长较快的区域(如城乡结合部)、高峰时配变负荷率超过 70% 的区域以及负荷特性变化较大的地区,原则上不推荐使用非晶合金变压器;

(3) 在负荷率偏低,对噪音要求不高,不会出现重载、超载的发展稳定的区域,可适当选用非晶合金变压器,突出降损效果;

(4) 在年均负载率小于 30% 的情况下,可以采用非晶合金变压器(亦可选用低容量的常规变压器节约成本);

(5) 局部地区为满足节能减排要求,可选用 S13

新型卷铁心结构节能变压器。

3.2 有效降低造价

建议生产厂商逐步提高生产能力和生产效率,在确保生产质量的前提下,有效降低设备成本,控制设备造价,为进一步推广应用提供支持。

3.3 改善产品性能

建议生产厂商对变压器负载能力不强、噪音较大问题进行专题研究,不断改进生产制造工艺,改善产品的性能,提高过负荷能力及抗突发短路能力,降低噪音。建议采购协议中增加对非晶合金变压器过负荷能力考核的要求。

3.4 加强运维管理

建立非晶变专项记录,含出厂、投运、使用三方面;针对低载时内部故障情况,组织专项开箱检查,查明故障性质及原因,避免因运输、安装过程中导致非晶合金变压器损坏。

3.5 增加关键点见证,提高入网抽检率

非晶合金变压器对非晶带材的质量要求非常高,涉及铁心冲剪、叠装、固定成型、磁场热处理、冷却、涂胶、铁心紧固等众多生产环节,需对生产制造的多个环节加强关键点见证,着重考察制造厂生产管理、工艺流程,尤其是铁心紧固措施。对涉及变压器运行的关键参数损耗性能及噪声水平,加强抽检,提高入网抽检率。

4 结束语

非晶合金变压器因其低空载损耗特性是配变发展的方向,从安全性能、经济性能、环保影响等三方面对其进行综合评估;安全性能方面存在过载能力差、过励磁能力差的现状,需要厂家改进设计,减小非晶变温升,将工作磁密设计在合理范围内;经济性能方面能够节省能源、提高配变的运行效率、降低电网线损;环境影响方面其可听噪声比传统配变稍大,需要生产非晶变压器的厂家扎实掌握非晶变铁心的处理工艺,加强

入网抽检力度。

参考文献:

- [1] 刘道生.我国非晶合金变压器技术调研分析报告[J].电气制造,2012(2):30-35.
- [2] 侯忠平,陈开全,胡晶金.非晶合金变压器与硅钢片贴片变压器运行参数比较[J].机电工程技术,2012,41(2):72-74.
- [3] 刘盾.非晶合金变压器的运行成效分析[J].农村电工,2012(5):27.
- [4] 薛金喜.非晶合金变压器的设计、应用效果及前景分析[J].中国电力教育,2012(3):150-151.
- [5] 盛万兴,王金丽.非晶合金铁心配电变压器应用技术[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [6] 郑国培,刘忠,陈星,等.SH15型非晶合金铁心配电变压器的技术经济分析[J].变压器,2005,42(6):1-5.
- [7] 陈建荣,游仲东.SH15型非晶合金油浸式变压器的技术与工艺特点分析[J].机电工程技术,2009,38(6):129-130.
- [8] 冯文胜.非晶合金变压器的发展前景[J].广东电力,2001,14(3):8-11.
- [9] 茅建华.非晶合金变压器节能经济效益分析.上海电力学院学报,2005,21(2):177-180.
- [10] 郑国华.非晶合金变压器节能性分析[J].电力需求侧管理,2009,11(6):44-46.
- [11] 周贤土.非晶合金材料变压器[J].变压器,1996(10):15-18.
- [12] JB/T10088—2004,6~500 kV级电力变压器声级[S].

作者简介:

吴鹏(1983),男,河南西平人,工程师,从事线圈类电力设备状态评估研究工作;

陆云才(1982),男,江苏南通人,工程师,从事线圈类电力设备状态评估研究工作;

陈铭明(1986),男,江苏南通人,硕士,从事电能计量技术管理与电能质量研究工作;

蔚超(1984),男,山东莱芜人,硕士,从事线圈类电力设备状态评估研究工作;

吴益明(1964),男,江苏镇江人,高级工程师,从事高电压技术和变压器类设备的研究工作。

Comprehensive Evaluation of Amorphous Alloy Transformer on Jiangsu Power System

WU Peng, LU Yun-cai, CHEN Ming-ming, WEI Chao, WU Yi-ming

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: According to the technical characteristics of amorphous alloy transformer and the application of Jiangsu power, the comprehensive evaluation about amorphous alloy transformer from the safety performance, the economic performance and the environmental impact are studied comparing with S11 type, S13 type and S15 type transformer. In the safety performance, overload capacity and over-excitation ability of amorphous alloy transformer is insufficient; in the economic performance, low no-load loss, high efficiency, energy saving effect of amorphous alloy transformer is obvious; in terms of environmental impact, the audible noise level of amorphous alloy transformer was higher than that of conventional transformer, manufacturers need to study to reduce the noise level. Finally, the application recommends of amorphous alloy transformer is presented based on comprehensive evaluation.

Key words: amorphous alloy transformer; comprehensive evaluation; overload capacity; over-excitation ability; low loss