

# 新型电力节能金具的试验研究

袁刚<sup>1</sup>, 尹德君<sup>1</sup>, 曾宏<sup>2</sup>

(1 乐山电业局, 四川 乐山 614000; 2 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:**针对普通电力金具耗能较大的问题,在对耗能原因进行深入分析后,研究了一种应用新的铸钢奥氏体合金材料制造的新型电力节能金具;论述了新材料与新型节能金具的技术特点;介绍了对新型节能金具所作的耗能试验,结果表明,该金具具有非常良好的节能效果。

**关键词:**节能;金具;铸钢奥氏体合金

**Abstract:** In view of the problems that the common electric power fittings consume much energy, a new material which is called cast-steel austenite alloy is studied after the causes of energy loss are analyzed in detail. Based on the result, the new energy-saved electric power fittings which are made of the new material are put forward. Then its technical characteristics are described and the laboratory tests are introduced. The experimental results show that the new electric power fittings have a better effect of energy conservation.

**Key words:** energy conservation; electric power fittings; cast-steel austenite alloy

**中图分类号:** TM753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0007-04

早在 20 世纪 40 年代,国外就开展了对电力节能金具的试验研究。英国曼彻斯特大学和美国 Ohio Brass 公司都曾对铁磁金具和铝合金金具进行过能耗对比试验,发现电力线路中所用的铁磁金具的耗电量很高,而铝合金金具的耗电量却很少。中国直到 20 世纪 70 年代,才开始对电力节能金具进行试验研究,结果表明,铝合金金具的节能效果明显,但由于当时国内制造条件的限制,使得铝合金金具的推广应用受到障碍。随着中国制造技术的不断提高,用国产铝合金材料制造的铝合金金具已完全满足电力金具的各项技术要求,但由于铝合金金具的造价较高,目前国内还主要应用在 330 kV 及以上电压的输电线路。对于 220 kV 及以下电压的输配电线路,仍大量使用着造价较低但耗能却较高的铁磁金具。虽然铁磁金具的一次性建设投资较小,但却每时每刻在消耗着大量的电能,日积月累,其耗电量十分惊人,在给国家造成巨大经济损失的同时,还很不利于环境保护,这对于中国正在建设资源节约型和环境保护型的社会目标来说,是非常不适应的。

## 1 电力金具耗能原因分析

在电力线路输送交变电流过程中,电力金具的耗能主要由金具上的磁滞损耗 $\Delta P_h$ 和涡流损耗 $\Delta P_e$ 产

生。

### 1.1 磁滞损耗 $\Delta P_h$

在线路传输交变电流过程中,电力金具会受到相应的交变磁化,产生磁滞损耗。在交变磁场下,当磁感应强度  $B > 1\text{T}$  (特斯拉) 时,可用下面公式简化计算 $\Delta P_h$ <sup>[1,2]</sup>。

$$\Delta P_h = \gamma B^2 G \quad (1)$$

式中,  $\gamma$ ——金具材料的磁滞损耗常数,随材料的特性不同而发生变化,其变化范围在 0.024~0.047 之间。

$f$ ——交变磁场的频率;

$B$ ——磁感应强度;

$G$ ——金具材料的重量。

当导线通过交变电流时,包裹在导线上的金具所产生的磁感应强度为

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi R} \quad (2)$$

式中:  $B$ ——金具内由导线电流产生的磁感应强度;

$\mu_0$ ——常数,真空磁导率;

$\mu_r$ ——金具材料的相对磁导率,其取值由金具材料的磁导特性决定。例如,铸铁为 250~450,普通碳素钢为 300~1000,而铝、铜和空气都为 1。

$I$ ——通过导线的电流;

$R$ ——金具上某点至导线中心的距离。

由式 (1) 和 (2) 看出, 当导线通过的电流  $I$  相同, 而金具材料的相对磁导率  $\mu_r$  不同时, 在金具内部所产生的磁感应强度  $B$  不同, 所产生的磁滞损耗  $\Delta P_h$  也不同。且由于  $B$  与  $\mu_r$  成正比,  $\Delta P_h$  与  $B$  的平方成正比, 使  $\Delta P_h$  与  $\mu_r$  的平方成正比。因此, 对于铸铁和普通碳素钢等铁磁材料来说, 由于其  $\mu_r$  值是铝  $\mu_r$  值的 250~1 000 倍, 这就意味着用铸铁和普通碳素钢等材料制造的铁磁金具, 其产生的磁滞损耗  $\Delta P_h$  要比用铝合金制造的金具高 (250~1 000) 的平方倍。

### 1.2 涡流损耗 $\Delta P_e$

当导线通过交变电流时, 在金具上会产生感应电动势和感应电流 (涡流)。根据楞次定律和法拉第电磁感应定律, 金具上产生的感应电动势为

$$e = K \frac{d\varphi}{dt} = -K \frac{\mu_0 \mu_r H dS}{dt} \quad (3)$$

式中,  $e$  —— 感应电动势;

$K$  —— 金具材料的涡流损耗系数;

$\varphi$  —— 磁通强度;

$\mu_0$  —— 常数, 真空磁导率;

$\mu_r$  —— 金具材料的相对磁导率;

$H$  —— 磁场强度, 与通过导线电流  $I$  的大小成正比;

$S$  —— 金具中垂直于磁力线方向的横截面积;

$t$  —— 时间。

根据式 (3), 感应电动势与通过导线电流的大小、金具材料的相对磁导率  $\mu_r$  等参数成正比。当通过导线的电流相同, 且金具的磁路结构和几何尺寸也相同时, 影响感应电动势大小的唯一参数就是金具材料的相对磁导率  $\mu_r$ 。 $\mu_r$  的数值越高, 则产生的感应电动势  $e$  就越高, 所产生的涡流损耗就越大。

磁滞损耗  $\Delta P_h$  和涡流损耗  $\Delta P_e$  在金具上以内能的形式消耗, 散发热量。故当导线传输相同的交变电流时,  $\Delta P_h$  和  $\Delta P_e$  较大的金具比  $\Delta P_h$  和  $\Delta P_e$  较小的金具在运行中所产生的温度要高。已有的试验表明<sup>[3]</sup>, 在同一环境温度下, 当截面积为  $300 \text{ mm}^2$  的导线通过 400 A 的交变电流时, 在铸铁金具上产生的温度高达  $77^\circ\text{C}$ , 而在铝合金金具上产生的温度仅为  $37^\circ\text{C}$ 。这就是说, 由于铸铁金具存在较高的  $\Delta P_h$  和  $\Delta P_e$ , 使得它的温升比铝合金金具高了  $40^\circ\text{C}$ 。

因此, 如要减少电力金具的能耗, 就必须减少金具的磁滞损耗  $\Delta P_h$  和涡流损耗  $\Delta P_e$ 。而要减少  $\Delta P_h$  和  $\Delta P_e$ , 最根本的途径就是要研究新的能用于制造电

力金具的低耗能材料, 该材料应当在相对磁导率  $\mu_r$  的值尽量小且满足机械强度等技术指标的同时, 其制造价格也较低。

## 2 新材料研究与节能金具的技术特点

### 2.1 制造电力金具新材料的研究

普通金属材料的相对磁导率  $\mu_r$  与该材料的金相组织密切相关。当金属材料为铁素体组织时, 其具有较强的磁性,  $\mu_r$  的值较大; 当金属材料为奥氏体组织时, 其磁性较弱,  $\mu_r$  的值较小。根据这一理论, 通过相关试验并进行了大量的研究工作后, 发现了一种以碳素钢为主要原料, 在加入少量的锰等有色金属材料并经过特殊的冶炼和热处理工艺后, 所得到的一种新型的铸钢奥氏体合金材料, 其磁性已变得十分微弱, 相对磁导率  $\mu_r$  的值已变得很低。由于这种材料的主要成分是碳素钢, 因而其仍然很好地保留了碳素钢材料的优良特性, 造价不高, 这就为大量使用这种新材料制造电力节能金具创造了良好条件。

### 2.2 新型电力节能金具的技术特点

研究表明<sup>[3]</sup>, 当用铸铁或铸钢制造的铁磁金具本体部件不形成磁回路时, 将使本体部件内磁场强度  $H$  的值极大减小 (这时的  $H$  主要由漏磁通产生), 从而使该部件内产生的涡流损耗极大降低。这时, 尽管该部件内仍然存在磁滞损耗, 但由于涡流损耗被极大降低后已使该部件的总能耗得到了较大程度的降低。

根据这项研究成果, 考虑到在金具制造过程中, 金具本体部件所用材料要占金具全部材料绝大部分的生产成本的实际, 从有利于节约资源和提高产品的性能价格比出发, 则在研究和设计新型节能金具时, 仍采用铁磁材料制造不形成磁回路的金具本体部件, 而仅把新型铸钢奥氏体合金材料用于制造金具的压条、U 型螺丝和挂板等部件, 因为这些部件不能通过不形成磁回路的方式来达到降低涡流损耗的目的, 是当前铁磁金具中耗能最大的一部分部件。由于压条、U 型螺丝和挂板等部件所用材料仅占金具全部材料的很小部分, 这就使得整个金具在使用新型材料后所增加的生产成本不是太多, 而取得的节能效果却十分显著。

这种新型节能金具的部件组合模式, 还对已经投运的电力线路进行节能改造十分有利。当线路停电施工时, 就可在保留原有铁磁金具本体部件不变的条

件下,只更换金具的压条、U型螺丝和挂板等部件,所需的施工量较少,施工时间较短,工程费用较低,因而更易于在线路的节能改造计划中安排与实施。当然,对于那些对金具节能要求特别高的线路,将采用新型铸钢奥氏体合金材料制造包括本体部件在内的金具的全部部件。

新型节能金具所达到的节能效果,比之于铝合金金具的耗能会略高一些,但产品的价格却低得很多,且不大量使用铝等贵金属,这无论从产品的性能价格比来说,还是从节约国家资源和降低贵金属的大量消耗来说,都是符合国家发展政策的。因此,新型电力节能金具具有材料优良、价格低廉、部件组合灵活实用、节能效果显著、施工方便等优点,其发展前景十分广阔。

### 3 耗能试验及试验结果分析

#### 3.1 电力金具节能产品的评价标准

2006年 2 月 23 日,中标认证中心(CSC)发布并实施了新的《电力金具节能产品认证技术要求》,电力金具节能评价价值如表 1 所示。

#### 3.2 新型电力节能金具试验样品的制作

以电力金具中的 XGu-4 型悬垂线夹为例,制作了不包括悬垂线夹本体部件在内的悬垂线夹的压条、U型螺丝(其螺帽、平垫圈和弹簧垫圈除外)和挂板等部件的试验样品一套,该试验样品的表面全部采用了热浸镀锌处理,与现在使用的同类铁磁悬垂线夹的

表面镀锌方式一致。试验样品所用的悬垂线夹本体部件和 U型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈仍使用铁磁悬垂线夹的相应镀锌部件。与此同时,作为试验的参照物,取用一套普通的 XGu-4 型铁磁悬垂线夹的全套部件,由此,得到了以下两组试验样品。

1)全部为普通的 XGu-4 型铁磁悬垂线夹的部件,表面都已热浸镀锌。这组样品称之为普通铁磁悬垂线夹的试验样品,简称试验样品 A。

2)本体部件和 U型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈采用现在使用的 XGu-4 型铁磁悬垂线夹的相应部件,而悬垂线夹的压条、U型螺丝(其螺帽、平垫圈和弹簧垫圈除外)和挂板等部件采用新型铸钢奥氏体合金材料制作的节能部件,且节能部件的表面已热浸镀锌。这组样品称之为新型节能悬垂线夹的试验样品,简称试验样品 B。

#### 3.3 对悬垂线夹试验样品进行耗能试验的线路构成与耗能的测量方法

在对以上两组试验样品进行耗能试验时,其试验线路的构成和对试验样品进行耗能测量的方法都是按照《电力金具节能产品技术认证要求》中相关的规定进行的。具体的试验线路接线图如图 1 所示。

图中,试验所用的大电流发生装置,通过连接与 XGu-4 型悬垂线夹所对应的标称导线即 LGJ-240/30 型钢芯铝绞线后构成完整的试验线路。两组电力金具的试验样品在做耗能试验时,按照测量要求分为两次试验被接入到试验线路上。测量耗能所用仪表

表 1 电力金具节能评价价值

单位:W

导线截面 /mm <sup>2</sup>	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	≥ 630
悬垂线夹		0.41	0.72	1.14	1.65	2.71	4.85	7.21	12.7	20.4	32.4
耐张线夹	0.16	0.37	0.84	1.73	3.08	4.86	8.67	14.1	21.9	33.0	50.7
防振锤		0.22	0.28	0.31	0.40	0.50	1.72	1.86	3.45	6.79	12.0

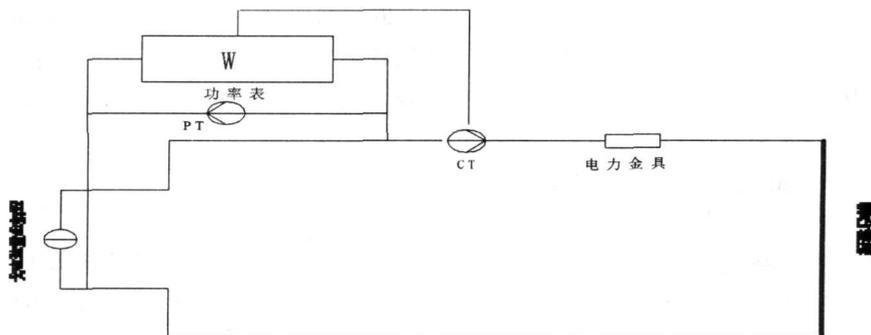


图 1 电力金具耗能试验线路接线图

为高精度的有功功率表 W,且 W 通过电流互感器 TA 和电压互感器 TV 与试验线路连接,用于测量试验线路总的有功功率损耗。同时,通过连接在 TA 二次回路上的电流表 A,持续监测试验线路总的运行电流。

试验样品耗能测量采用的是差值法。按照电力金具节能评价规定的对应于 XGu-4 型悬垂线夹的经济载流量为 240 A 的考核要求,仔细调整大电流发生装置的输出电流,使试验线路持续保持在 240 A 的稳定电流下运行。在此试验工况下,第一次试验是试验线路为空载即未接入任何试验样品时,测量试验线路总的有功功率损耗值  $P_1$ 。第二次和第三次试验是试验线路分别接入试验样品 A 和 B 时,测量试验线路总的有功功率损耗值  $P_{\Sigma A}$  和  $P_{\Sigma B}$ 。由此可得

$$P_j = P_{\Sigma j} - P_1 \quad (j = A, B)$$

式中,  $P_j$ ——试验样品 A 或 B 实际的有功功率损耗;

$P_{\Sigma j}$ ——包含试验样品 A 或 B 时试验线路总的有功功率损耗;

$P_1$ ——不包含试验样品时试验线路总的有功功率损耗。

### 3.4 耗能试验结果

本耗能试验在四川电力试验研究院的相应实验室进行。所用试验设备与测量仪器均符合国家相关技术标准,试验运行工况稳定,试验运行环境良好,在试验线路周围注意避免了其他铁磁物质可能对试验样品产生的电能损耗影响。

按照差值法的测量要求,首先在试验线路中分别对试验样品进行了 3 次耗能试验,试验结果如表 2 所示。

表 2 电力金具试验样品的耗能试验结果

项目	总的有功功率损耗 /W	A 和 B 的有功功率损耗 $P_j$ /W	B 对 A 减少的有功功率损耗 $\Delta P$ /W	B 对 A 的节能率 %
线路空载时	42.6	/	/	/
接入试验样品 A	52.0	9.4	/	/
接入试验样品 B	44.4	1.8	7.6	80.85

之后,按照《电力金具节能产品认证技术要求》中对金具表面温度的相关考核规定,接着对试验样品 A 和 B 进行了温升试验。做该项试验时,试验线路周围的环境温度为 9.8℃,在试验线路中同时接入了试验样品 A 和 B 并使试验线路在安全运行电流 400 A 的条件下持续运行一小时以上。与此同时,用高精度的红外线测温仪对 A 和 B 的表面温度变化过程进行测量。从得到的温度变化测量图可知,试验样品 A

和 B 的表面温度分别从最低值的 10.7℃ 和 10.4℃ 逐步升高到最高值的 39.0℃ 和 20.2℃,并在温度最高值时保持不变。由此得出, A 和 B 表面温度的升高值分别为 28.3℃ 和 9.8℃,即是说, A 和 B 在 400 A 的相同运行条件下, A 表面的温升值已接近为 B 表面温升值的三倍。该项温升试验,在准确测出 A 和 B 表面温度变化过程的同时,也进一步表明了试验样品 B 确实具有非常良好的温升特性和节能效果。

### 3.5 试验结果分析

1) 试验样品 A 的有功功率损耗  $P_A = 9.4$  W。用电力金具节能评价的标准进行对照,由于  $9.4$  W  $>$   $4.85$  W,因此,试验样品 A 的节能评价不满足国家规定的《电力金具节能产品认证技术要求》。由此判定,现在使用的普通铁磁悬垂线夹不是电力金具的节能产品。

2) 试验样品 B 的有功功率损耗  $P_B = 1.8$  W。由于  $1.8$  W  $<$   $4.85$  W,因此,试验样品 B 的节能评价已满足国家规定的《电力金具节能产品认证技术要求》。由此判定,新型节能悬垂线夹已属于电力金具的节能产品。

3) 试验样品 B 比试验样品 A 的有功功率损耗降低了 7.6 W,其节能率高达 80.85%,相当于有功功率损耗降低了 5 倍以上,其节能效果相当显著。

4) 试验表明,新型节能悬垂线夹比之于普通铁磁悬垂线夹在表面温度的温升特性方面要优良得多。这种结果,对于提高线路的安全运行水平是十分有利的。在电网实际运行中,线路输送电流往往会达到较高数值,这就使得与这两种不同金具相连接的导线会受到两种不同金具表面温度的影响。对于与新型节能金具相连接的导线,可长期处于较低金具表面温度的影响下,从而避免了导线因受到金具表面持续高温的影响所导致的机械性能下降,进而导致导线断股甚至断线等故障的发生。新型节能金具的这项优点,为保证线路的长期安全运行和提高线路的运行年限,以及为线路的增容创造了良好条件。

## 4 结 语

试验表明,应用新型铸钢奥氏体合金材料并按照新的金具部件组合模式所制造的试验样品 B,不仅其节能评价已满足国家规定的《电力金具节能产品

(下转第 15 页)

重燃后过电压波形基本恢复到零点附近波动如图 12。

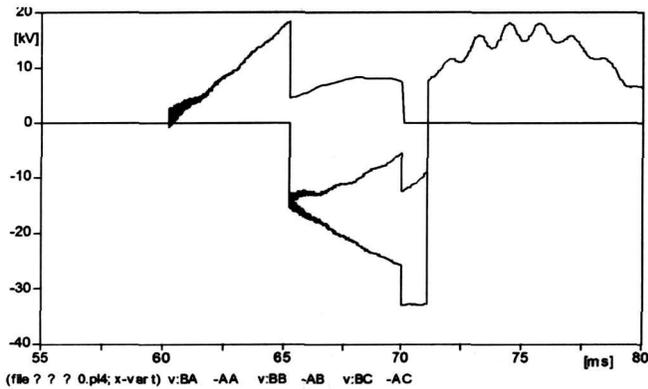


图 12 断路器断口恢复电压波形

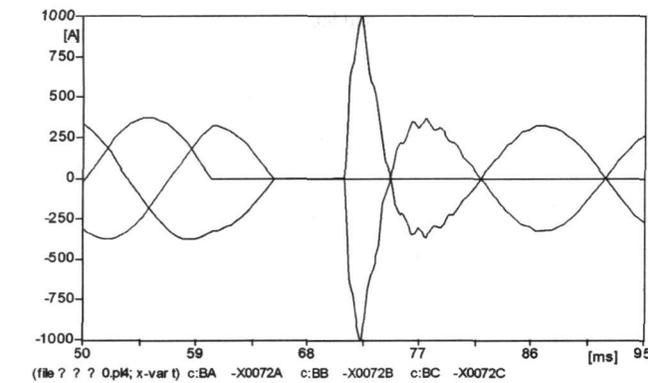


图 13 流经电容器组三相电流

## 5 结 论

借助 ATP-EMTP 仿真平台,建立了贵州某变电站仿真模型,对投切电容器组过电压情况进行了仿真分析,得到以下结论。

1) 在分析真空断路器开断交流电弧物理过程的基础上建立了真空断路器的仿真模型。

2) 投切补偿电容器组过程中电容器上承受的过电压幅值均未超过  $2.0 p.u$  不会对电容器造成威胁,但在电容器入口端会产生较高的对地过电压,达  $3.0 p.u$ 。

3) 在切除电容器组过程中发生断路器两相重燃时,由于断路器相间电压较高,将会在重燃相产生上千安的涌流,对电容器组的通流能力要求较高。

## 参考文献

- [1] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1993.
- [2] 沈黎明. 变电站补偿电容器投切过电压的仿真与测试 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2006.
- [3] Dawn M. Dunsmore, Edgar R. Taylor, Bernard F. Wirtz et al. Magnifica Lion of Transient Voltages in Multi-voltage-level Shunt-capacitor-compensated circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992 (7): 664-673.

(收稿日期: 2010-06-09)

(上接第 10 页)

认证技术要求》,而且,其节能率高,制造产品需要的贵金属材料又较少,因此,产品无论在符合国家的产业发展政策方面还是在性能价格比方面都具有十分明显的优势。下一步,在把 U 型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈等全部改用新型铸钢奥氏体合金材料制造后,将进一步提高产品的节能率和性能价格比。

虽然本次试验的样品仅为一种节能型悬垂线夹,但其试验结果,从原理上是普遍适用于各型悬垂线夹、耐张线夹和防振锤等电力金具的。今后,将对各型电力节能金具进行全面的试验研究,以期得到更加完善的结果。

## 参考文献

- [1] 余虹云. 电力金具能耗与节能的探讨 [J]. 浙江电力,

1999, 18(4): 58-59.

- [2] 秦曾煌主编. 电工学 (第四版) [M]. 北京:高等教育出版社, 1990.
- [3] 吴国宏. 节能金具的研制 [J]. 吉林电力, 2002(4): 14-16, 19.
- [4] 徐乃管. 论节能金具的开发与应用 [J]. 输配电设备网, 2007.
- [5] 中标认证中心. 《电力金具节能产品技术认证要求》 [S]. 2006.

## 作者简介:

袁 刚,男,助理工程师,从事电力勘测设计工作。

(收稿日期: 2010-06-30)