

利用高温超导变压器的小型、轻量交流电源及其状态监视系统的开发

邓隐北, 谢志平, 赖正泷, 刁卉 编译

赣州诚正钕铁硼永磁材料分厂

1 前言

作为能有利于实现低碳社会的设备, 并且又作为智能电网的主要构成设备, 期望着将高温超导电力设备的实用化。对于高温超导设备而言, 主要是利用了高温超导线。即使是市售的高温超导线, 也可在液氮温度和自身的磁场下, 电阻为零在 1mm^2 断面积上流过 200A 以上的电流。这一电流密度, 对比一般导线使用良好的铜线的电流密度, 将要大 100 倍以上。因此, 利用高温超导线可望实现小型高效的电力设备。

为了对这种设备进行开发, 必须在设计阶段充分掌握高温超导导线的通电特性, 要掌握这一通电特性的试验, 必须具有能通过 200A 以上的大电流电源。考虑到今后超导线的发展及多根线束电缆的使用, 在确保 1KA 通电的场合下, 市售特殊的交流电源中, 一般为体积约 0.7m^3 、重量约 400kg, 由于设置场所的限制及设置后的难于移动等, 其利用性的弊端大, 也难于引入到大学的研究室中, 进而妨碍了高温超导电力设备的开发。

这里, 对利用单相高温超导变压器的小型、轻量又高效的交流大电流电源进行了开发。同一变压器的一次侧接入逆变器 (inverter) 等小电流电源, 二次侧能获得大电流结构的电源。在现阶段, 实现了体积 0.02m^3 、重量 16kg 的电源通过 500A 的电流。

而且, 本变压器中所用的高温超导线, 由于线材的时效变化 (老化) 和冷却的不合适等原因, 通电中会出现电阻。要在细线上通过大电流。有电阻的地方将产生过大的发热, 引发烧损等事故 (该问题不限于本变压器, 也是超导设备上普遍存在的问题)。为确保变压器的安全, 应采取相应的对策很重要。具体说, 监视运行中的变压器, 产生电阻时必须迅速的进行保护不至于事故发生。为此, 对于电阻的产生应正确无误地检测出来。进一步在开发的变压器中,

掌握好电阻产生的原因, 同时确定电阻产生的位置, 设计阶段就要采取有效措施, 以防患于未然。如果能够将超导线的电压端子多个安装, 通过各端子间电压的计测, 则可计测电阻的产生及其位置。但是, 超导线上如加有绝缘覆盖, 安装电压端子时必须清除绝缘覆盖层, 这将导致线圈的绝缘特性降低。

这里, 以上述高温超导变压器作为对象, 提出了超导线上采取非接触的超导线电压计测方法, 根据本方法开发了电阻产生状态的监视。

本文对有关利用以上高温超导变压器的小型、轻量交流电源及 [状态监视系统] 予以介绍。

2 利用高温超导变压器的小型轻量交流电源

2.1 电源的设计

电源的组成如图 1 所示, 一次侧、二次侧都是利用高温超导线圈的高温超导变压器, 在其一次侧连接小电流电源, 连接到二次侧的测定对象的超导试样, 则为流过大电流的电源结构。

图 2 为高温超导变压器的概略图, 图 3 是其外观图。将高温超导线以圆筒型线圈 (solenoid) 形状绕制在 GFRP (玻璃纤维增强塑料) 的线圈架 (bobbin) 上。并将直径不同的两个线圈作为一次与二次线圈, 同轴上组合在一起, 再穿过铁芯, 这就组成了高温超导变压器。变压器的一次线圈采用住友电工公司的 Bi2223 高温超导 DI-BSCCO、S 型 1 组; 二次线圈为相同规格, H 型 5 根为一束的电缆。绕制成圆筒形状的线圈, 因为能降低垂直施加于线圈的本身磁场, 以便抑制临界电流 (电阻为零时流过电流的最大值) 的降低, 并能减小交流损耗 (流过交流电流时, 超导线上产生的损耗)。而且同轴的组合还可减小磁场的泄漏。

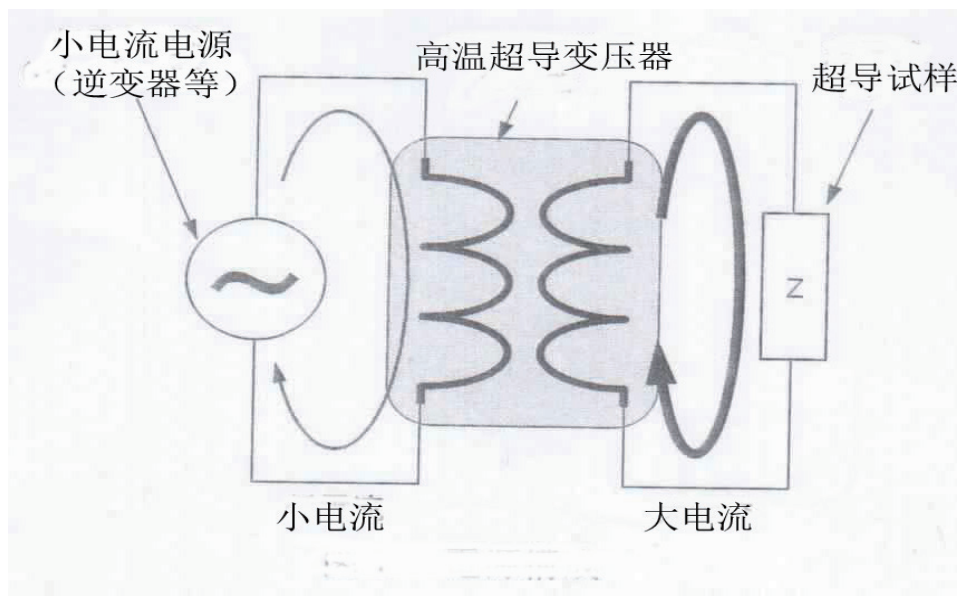


图1 电源的组成

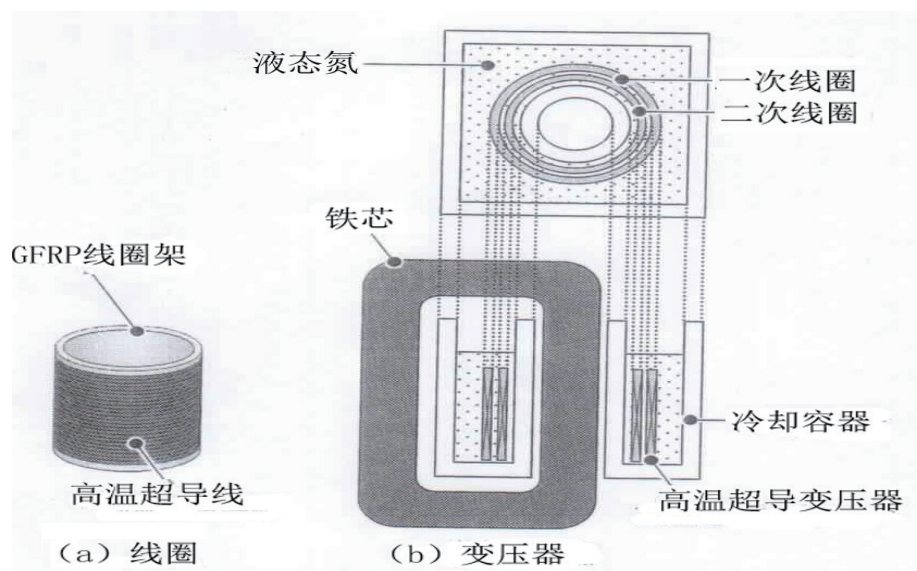


图2 为高温超导变压器的概略图

冷却容器,是在铁芯插入部贯穿形状的泡沫苯乙烯(德文 styrol) 容器。利用液态氮仅对变压器的线圈部分进行冷却。因铁芯为置于室温空间的结构,提高了抑制铁损的冷却效率。泡沫苯乙烯使用了发泡倍率高 30 倍的材料,具有高的强度和隔热性。

所制作变压器的各项参数列于表 1。设计是一次侧 30A 的通电,而二次侧能达到 500A。本变压器加上一侧电源的总体积为 0.02m³,重量 16kg。与市售 6V/500A 输出的电源比较,约达到 1/12 的尺寸和重量。

表1 高温超导变压器的各项参数

	一次线圈	二次线圈
内径	100 mm	8 mm
外径	110 mm	89 mm
高度	100 mm	100 mm
匝数	83	5
容量	100 V / 30 A	6 V / 500 A

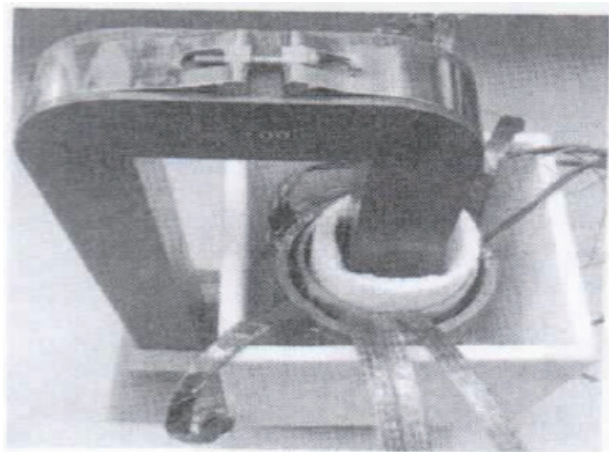


图3 高温超导变压器的外观

2.2 通电试验

线路的连接如图1所示,由一次侧的滑动变压器 (slide transformer, 也即自耦变压器) 通电 60Hz、30A 时,其通电的波形示于图4。当如图4(a)那样给一次侧通电时,已确认得到了图4(b)那样二次侧无畸变的 60Hz、500A 良好的通电特性。

现在,一方面进行变压器的效率测定等,一方面进行由 1KA 级电源优化设计构成的全部开发。

3 状态监视系统

3.1 非接触式电压计测法

为了检测变压器线圈中电阻的产生及其产生位置,作

为非接触超导导线计测超导导线电压的方法。提出了由图5所示电容器型电压端子(以下,简称电容器端子)的计测方法。图5右边所示为超导导线断面图。这样的超导导线覆盖着绝缘层。为了电压计测,电压端子一旦挂上焊锡,则一定要清除绝缘覆盖层,线圈的绝缘特性便会降低。因此在图5的线圈表面上贴付2枚导电片,并将其连接到外接的电容器上。此时,在贴付导电片的地方,因形成了导电片与超导导线夹入绝缘覆盖层的结构,故形成了平行平板型电容器。导电片上形成的电容器的各静电容量为 C_1 、 C_2 , 外接电容器的静电容量为 C_0 , 将外接电容器的电压表示为 v_c , 在两枚导电片之间的超导导线电压 v 则由下式决定

$$v = \frac{C_1 C_2 + C_1 C_0 + C_2 C_0}{C_1 C_2} v_c = \alpha v_c \quad \dots (1)$$

也就是说,由于电容器的分压,就可以计测出超导导线的电压。本方法积极有效的利用了绝缘覆盖层,可以非接触超导导线的方式计测电压。而且,按照需要能外接简单的导电片,故非常方便。

此外,由导电片形成电容器的实质的静电容量,相应于电阻产生的位置其容量小,故利用这点就可同时确定位置。图6所示为电容器端子安装部位的放大图。这里,考虑电阻产生于导电片间或者导电片底下的场合。在导电片之间产生时,式(1)成立;另一方面,在导电片底下产生时,电压的关系式如下:

式中,各参数表示为:

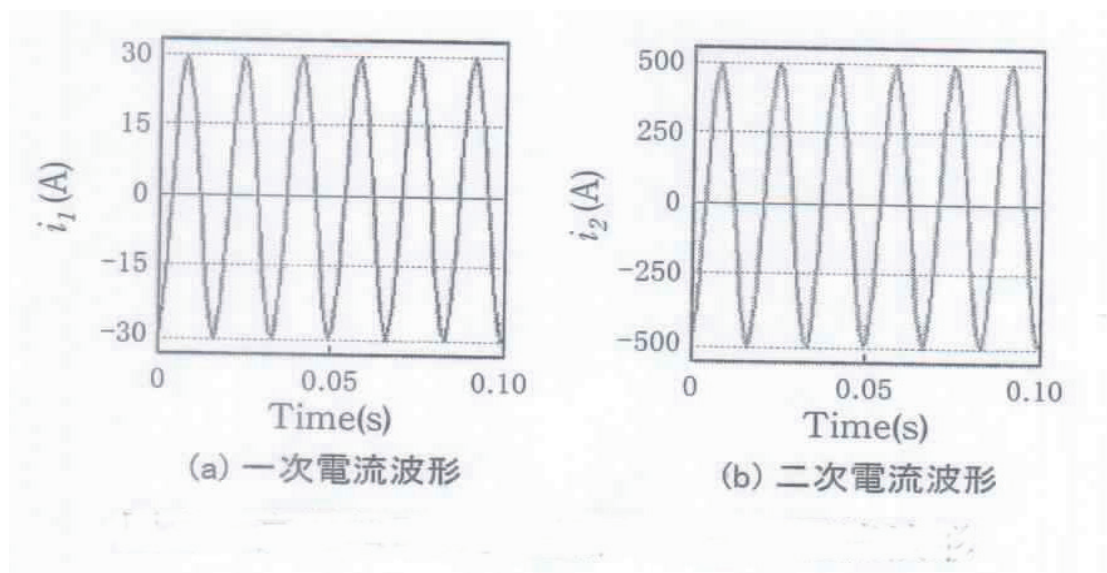


图4 高温超导变压器的输入/输出电流波形

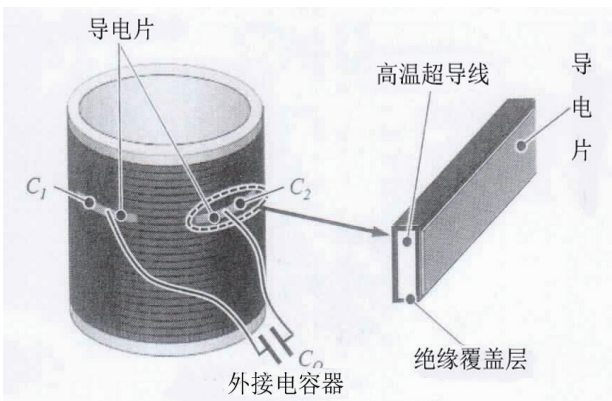


图5 电容器型的电压端子

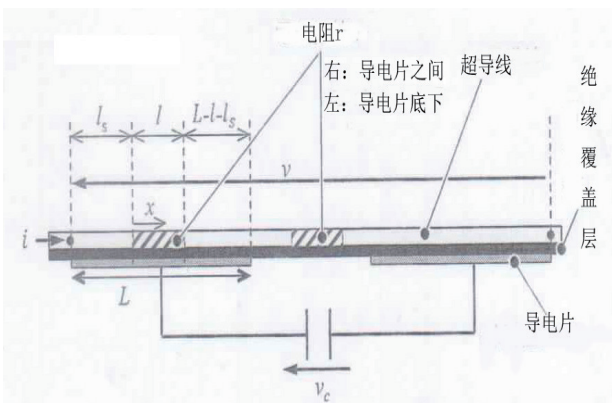


图6 电容器端子安装位置的放大图

$$v = \alpha v_c + \left\{ \frac{L-l-l_s}{L} r(l) + \frac{1}{L} \int_0^l r(x) dx \right\} i \quad \dots (2)$$

- L——导电片的长度 (m)
- l——电阻产生部位的长度 (m)
- l_s——从导电片左端到电阻部左端的长度 (m)

x——从电阻部左端的任意距离 (m)

r(x) ——在 x 段的电阻 (Ω)

i——通电电流 (A)

(2) 式还考虑到电压的符号

$$|V| > |aV_c| \quad \dots (3)$$

总之，超导线相同尺寸的情况下，尽管电压 V 在导电片底下产生时，|aV_c| 也小。

3.2 电压检测实验

利用上节的特性，横过高温超导线圈安装如图 7 所示的 2 组电容器端子，在同图的 A--E 5 个区域上，无论在哪一个产生电阻时均得到以下的关系

$$\left. \begin{aligned} A: & |\alpha_{34} v_{c34}| = 0 \\ B: & |\alpha_{12} v_{c12}| > |\alpha_{34} v_{c34}| \\ C: & |\alpha_{12} v_{c12}| = |\alpha_{34} v_{c34}| \\ D: & |\alpha_{12} v_{c12}| < |\alpha_{34} v_{c34}| \\ E: & |\alpha_{12} v_{c12}| = 0 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

这里，各个参数如下：

C₁--C₄——由导电片形成电容器的静电容量

C₀₁₂、C₀₃₄——外接电容器的静电容量

v_{c12}、v_{c34}——外接电容器的电压

$$\alpha_{12} = \frac{C_1 C_2 + C_1 C_{012} + C_2 C_{012}}{C_1 C_2} \quad \dots (5)$$

$$\alpha_{34} = \frac{C_3 C_4 + C_3 C_{034} + C_4 C_{034}}{C_3 C_4} \quad \dots (6)$$

在 A 区段一旦产生电阻，测定 v_{c34} 的端子上因处于测定范围外，v_{c34}=0。在 B 区段，测定 v_{c12} 的端子在导电片之间，测定 v_{c34} 的端子在导电片的底下，故 |a₁₂v_{c12}| > |a₃₄v_{c34}|。在 C 区段，无论哪个端子都

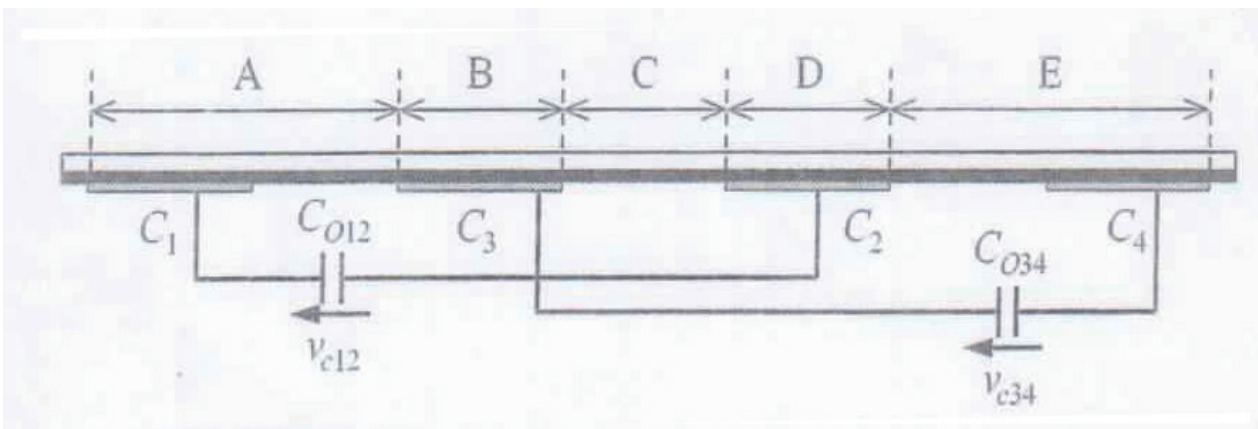


图7 与 2 组电容器端子对应的区段

在导电片之间,故 $|a_{12}v_{C12}| = |a_{34}v_{C34}|$ 。在 D 和 E 区段,分别与 B 和 A 区段相同。所以,按照这 2 个电压的大小关系,在 A--E 的 5 个区段中,则可判别哪个区段产生了电阻。

表2 试验用Bi2223高温超导线圈的参数

内径	140 mm
外径	150 mm
高度	230 mm
匝数	28
临界电流	121 A

这里,由实验进行了验证。表 2 所列 Bi2223 (DI-BSCCO) H 型试验用高温超导线圈的 1--2 匝安装了图 7 所示的电容器端子,在液态氮中一面通电 60Hz、117A 的电流,一面将加热器安装于 A--E 各区段使升温;使在各区段产生电阻,各电容器的参数列于表 3。

表3 各电容器的参数

外接电容器C012, C034		100 nF
导电片电容器	C1	0.179 nF
	C2	0.182 nF
	C3	0.189 nF
	C4	0.150 nF
导电片长		100 mm
导电片宽		4.2 mm
导电片的间隔		100 mm

表 4 列出试验结果显示了从大的方向的电压实效值达到 33mv,也显示了在这一时刻另一方向的电压实效值。

表4 电压测定结果

	A	B	C	D	E
$ a_{C12}v_{C12} $ (mV)	33	33	33	20	0
$ a_{C34}v_{C34} $ (mV)	0	30	33	33	33

同表格中的电压大小关系与式 (4) 是一致的。从而,按照本方法,通过 2 个电压的大小关系对比,可检测出电阻的产生及其产生位置的同时确定。

把电压端子直接挂锡焊接在超导线上,对 A--E 5 个区段进行区别时,各区段的两端须要电压端子,计 6 个,应安装成 5 组。本方法中经常仅 2 组,且为非接触式测量,故由简单的配线就能完成,操作很方便。

4 结束语

本文阐述了有关利用“高温超导变压器的小型、轻量交流大电流的电源”和基于“非接触电压计测法的状态监视系统”。对于小型、轻量交流大电流电源,目前已能输出 500A 的电流,与市售的电源对比,可以制造尺寸、重量为 1/12 的电源。今后将扩展到 1KA 的目标。在状态监视系统中,达到了非接触的电压计测与电阻产生位置的同时确定,今后特别在位置同定方面,不仅比较电压的大小,而且要对数值差等进行研讨,实现进一步高分辨率化。

原文出处:七 户 希,高温超電導変压器を用いた小型・軽量交流電源およびその状態監視システムの開発,《电气评论》2016. 增刊 P59--63