

UPS 设备的无变压器技术分析

Analyses of Transformerless Technology on UPS Equipment

薛蕙 供稿

摘要: 文章简要介绍 UPS 设备由多个输出工频变压器到单个输出工频变压器的演变过程、所用技术措施以及随着高性能大功率 IGBT 器件的发展, 从而在 UPS 设备中去掉了输出隔离变压器的技术与物质因素。

关键词: UPS 设备, 工频变压器, IGBT

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2014)03-6-136

1 引言

近几年来, 电力电子设备技术飞速发展, 这与功率器件性能的提高、新器件的不断出现以及电力电子设备本身的创新有着密切的关系。近 50 年中, UPS 设备随着功率半导体器件的发展进步, 经历了由多个输出工频变压器到单个输出工频变压器的演变过程, 而功率更大、性能更优的大功率 IGBT 器件和更先进的控制技术的出现, 为 UPS 设备从根本上去掉输出隔离变压器提供了物质条件和基础, 使 UPS 设备在高频化、小型化、节能化和绿色环保化等方面取得了长足的进步, 这就是人们常说的“高频机”。这类机型集中体现了 UPS 电路技术的发展进步, 代表着 UPS 技术的发展方向。它们与传统的、带有输出变压器的 UPS 相比较, 则在进一步缩小体积、减轻重量、改善性能、提高效率 and 降低成本等等方面, 都取得了明显的改善和进步。

2 UPS 电路的演变及其电路技术的发展历程

初期的 UPS 输出逆变器都是带有输出变压器的, 因为当时的 UPS 逆变器输出电路形式决定了需要采用输出变压器, 而使用中发现, 变压器的存在利少弊多。所以, 在 UPS 逆变器电路技术演变过程中, 一开始就有一个问题: 是否必须使用变压器, 如何配置变压器和是否可以去掉变压器?

图 1 所示为上世纪 70 年代使用的第一代三相 UPS 的典型逆变器电路结构形式。该图所示的 UPS 组成包括一个由降压式自耦变压绕组供电的二极管全波整流器, 一个与

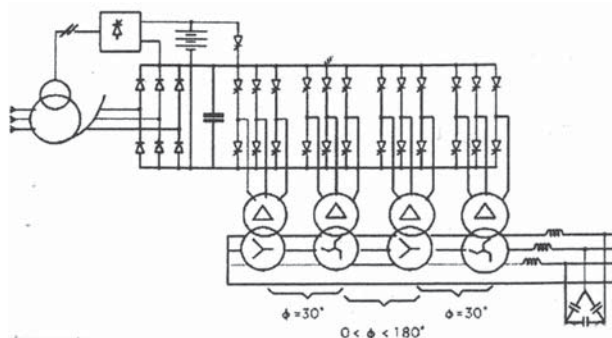


图 1 第一代三相 UPS 的典型逆变电路结构形式

整流器并联的, 由自耦变压器的辅助二次侧绕组供电的可控硅电池充电器。当市电电网停电时, 静态开关立即将电池组连接到直流母线上进行供电。

UPS 逆变器由四个三相逆变器以全波方式运行并按照基波频率进行换向, 每一个三相逆变器都以三角形连接法与变压器的一次侧绕组相连接, 再把开放式变压器 (Open Phase Transformers) 的二次侧绕组以一定方式进行连接, 以获得合成的输出电压。这四个变压器被分成两组, 每一组都包含一个星形和一个 Z 形 (曲折星形) 的二次侧绕组, 这两个二次侧绕组之间存在 30° 的相位差。这种特殊的连接方式可以消除掉 $n=6K+1$ (K 为奇数) 次的电压谐波。这个等效于 12 脉冲整流器中的两个移相式绕组在变压器一次侧中可以抵消 5、7 次谐波。对于在变压器一次侧绕组中每一相可能出现的 3 次和 $3n$ 次电流谐波, 则由一次侧绕组用三角形接线方式来抵消。因此, 输出端首先需要滤除的谐波是第 11 次谐波。输出电压的调整是通过移动两组变压器

之间的相位 ($0 < \phi < 180^\circ$) 完成的。由于首先滤除的是第 11 次谐波, 所以输出滤波器的尺寸较小, 这也使得逆变器对负载变化的动态响应特性加快。

众所周知, 以可控硅(晶闸管)为基本功率器件的电路存在着换向安全和功率损耗的问题。为了减少电路的能量损失和改善控制功能, 接着一代的 UPS 系统开始使用一种新的脉冲电路, 每个晶闸管都有其相应的灭弧电路。其整个设备仅需要两个变压器, 如图 2 所示。对于消除 $n=6K \pm 1$ (K 为奇数) 次的谐波, 只需要一组相位差为 30° 的逆变器, 同时, 这 30° 的相位移是预先设置的, 并且在每台变压器的一次侧以“脉冲宽度调节”(PWM) 来实施对电压的调整。

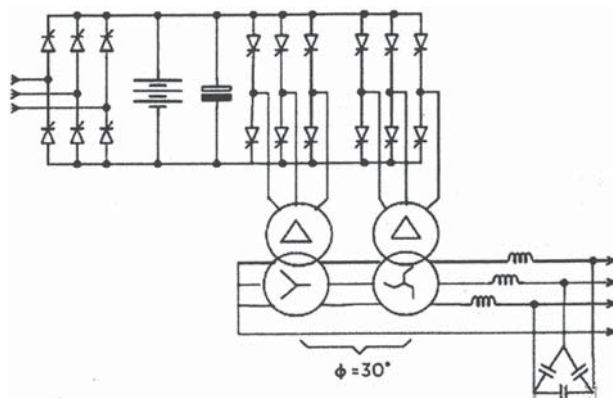


图 2 只用两个变压器的 PWM 控制逆变器电路结构

为了达到预期的输出电压, 可以将上述的换向应用于每周期 6 次固定换向的基本脉宽调制电路 (PWM)。这一代 UPS 设备中变压器的数量从 4 个减少到了 2 个, 但人们期待能进一步减少变压器数量, 这就必须提高逆变电路的性能, 研究发现, 优化 PWM 就能达到目的, 而无需再使用两组变压器耦合的方式。使用两组移相 30° 的变压器是为了减小如 5、7 次低次谐波, 因为其幅值较大, 要滤除它们比较困难。只用一个变压器的 UPS 电路(如图 3 所示)中, 变压器的二次侧绕组为曲折星形连接, 每个逆变器以其基波的 7 倍频率来斩波直流电压。这种斩波方式称为固定频率斩波。在设计 UPS 设备时, 应尽可能减小输出电压的失真度和减小滤波器的尺寸为目标。而输出电压的调整是通过移动两组逆变器之间的相位进行的。

从上世纪 80 年代开始, UPS 逆变器进入了只含有一个变压器的时期。而且, 随着功率半导体器件的创新进步, 双极型功率晶体管以及电子控制级的 IGBT 等功率半

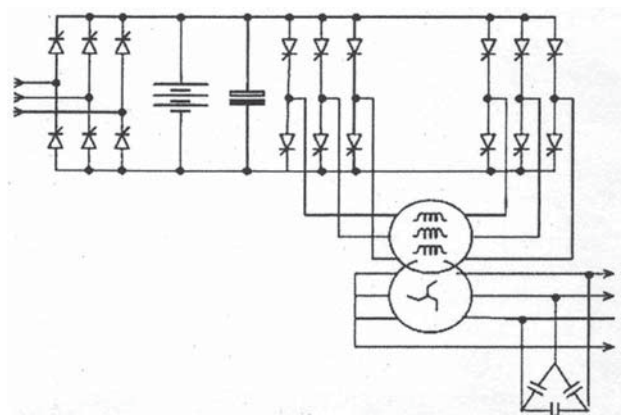


图 3 只用一个输出变压器的 UPS 逆变器电路

导体器件的发明, 逆变器中的可控硅器件被其取代(如图 4、图 5 所示), 但 UPS 设备中存在输出变压器的情况仍然在继续, 并且一直持续到 21 世纪之初, 这一期间, 虽然于 1995 年出现了无输出变压器的逆变器结构, 但此种产品仅适用于功率小于等于 30KVA 的 UPS 设备。其主要原因是功率半导体器件在换向时的损耗较大, 而较高的耐压需要又使得人们很难在不用变压器的状况中成功地设计制造出大容量的逆变器。

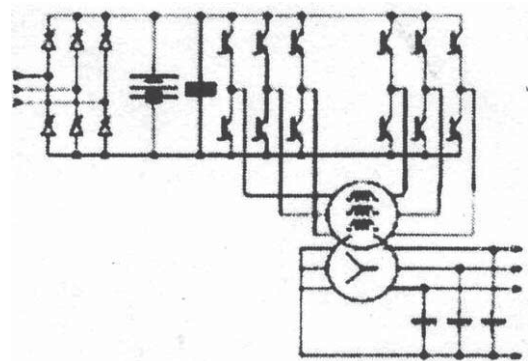


图 4

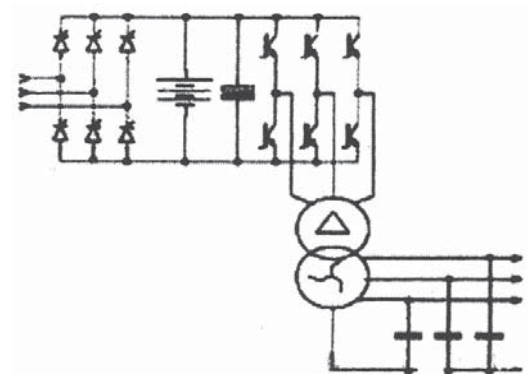


图 5

图4所示逆变器采用IGBT器件,变压器二次侧绕组使用星形连接。变压器的每个一次侧绕组都连接到两个逆变器支路的中点,组成实际上是三个单相全控制的逆变器桥。因此,在二次侧绕组上得到的电压是独立进行调节的,这样,可以有效确保输出电压的良好平衡,而不管三相负载电流是否处于平衡状态,使用桥式组件的连接方式可以使每个支路的变换频率相对于标称变换频率减小1/2,这样,每个支路都只在正弦波的1/2个周期内工作。

图5只有一个三相全桥逆变器,这个变压器的耦合方式采用一次侧三角形/二次侧曲折星形连接。该连接方式可以实现两个额外的功能:首先是可以实时(即刻、瞬间)地调节每一相的输出电压,而且,各相输出电压都与逆变器的逆变支路相对应。其二,变压器二次侧的Z形连接所吸收的负载3n次谐波电流传送到变压器的一次侧绕组,使这些谐波电流只在一次侧绕组内流动,这样,可以降低IGBT的换向电流,从而减少换向损耗。

从以上所述,我们可以大致了解UPS逆变器中变压器是如何逐步发展演变的过程。

3 UPS输出隔离变压器的功能

熟悉传统UPS输出隔离变压器的功能并完全发挥其在电路中的作用,其目的之一正是为了在新产品的研制中设法取消它或替代它。在过去的实践中,人们对逆变器中输出隔离变压器的功能是存在一些误解的:如认为其“具有隔离作用”、能够“抗干扰”、能够“缓冲负载的突变”以及可以“提高UPS设备的可靠性”等等,甚至认为无变压器的UPS将不能可靠地工作...。持有这些认识的人们其实是对UPS逆变器的工作原理理解不深,其实变压器在逆变器中的功能就是升压和产生三相四线输出的零线。

3.1 输出变压器的功能之一是为单相负载提供所需要的零线。

传统的双变换UPS输出变压器的一个重要功能是在UPS输出端产生为单相负载供电时所需要的中性线(通常称其为零线)。

带输出变压器的UPS的DC-AC逆变器通常是由全桥电路组成,如图6和图7所示,其输出端必须加变压器,否则就不能完成单相或三相四线交流电压的功能,所以,此变压器应视为产生输出零线的变压器。

图6所示为单相UPS输出DC-AC逆变器主电路图,

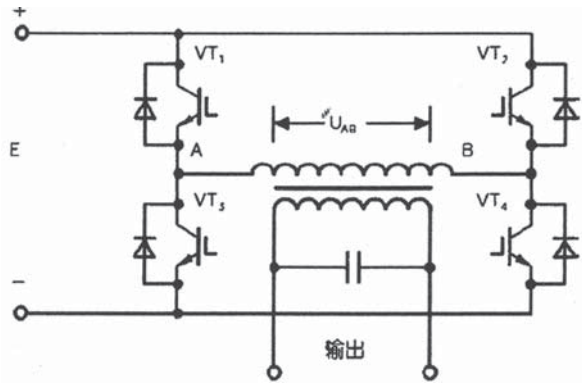


图6 单相UPS输出的全桥DC/AC逆变器电路框图

这是一个全桥逆变电路,每个桥臂上有两个串联的IGBT(即 VT_1 - VT_4),输出交变电压 U_{BA} 由两个桥臂的中点A和B引出。当 VT_1 和 VT_4 同时导通(VT_2 和 VT_3 截止)时,由直流电压 E 形成的电流回路是电压 E 的正端— VT_1 —负载A端—负载B端— VT_4 —电压 E 的负端;而 VT_2 和 VT_3 同时导通(VT_1 与 VT_4 截止)时,由直流电压 E 形成的电流回路是电压 E 的正端— VT_2 —负载B端—负载A端— VT_3 —电压 E 的负端。如果 VT_1 和 VT_4 与 VT_2 和 VT_3 交替导通的周期是50Hz,则加在负载上的电压 U_{AB} 是幅值为直流电压 E 的50Hz方波或者准方波,如果 VT_1 和 VT_4 以及 VT_2 和 VT_3 都以高频正弦波脉宽调制(SPWM)规律导通和截止,则负载端电压 U_{AB} 是幅值可调整的正弦波。

需要注意的是,通常单相负载的输入电压要求有一根零线,而且这根零线在系统中(供电系统输入变压器的输出端)是要接地的,显然,如果把图6单相电路中的A或者B任意一点做输出零线接地,都会使输入电压通过导通的半导体功率器件对零线短路而立即烧毁逆变器。

图7为三相UPS输出的全桥DC-AC逆变器电路框图。为了满足负载必须有零线的要求,于是就设计了一个输出

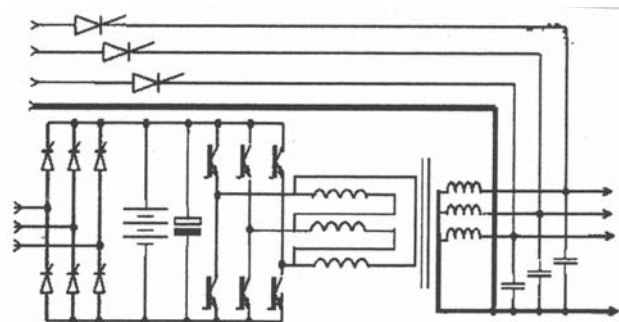


图7 三相UPS输出全桥DC/AC逆变器电路框图及输出零线的连接示意图

隔离变压器，该变压器的初级绕组做成三角形连接，由三相全桥的三个桥臂中点做三相线电压输入，变压器次级绕组是星形连接，产生新的零线按三相四线制向负载供电。在此，不仅需要输出隔离变压器产生零线，为了UPS转入旁路时也能正常供电，输出变压器产生的零线还必须与系统输入的零线连接在一起。

3.2 输出变压器的功能之二是对输出电压的匹配作用

传统的大中型UPS主回路结构采用可控硅整流将输入的交流电整流成为直流电，电池直接挂在母线上。当输入市电正常时，靠整流可控硅的调节作用向电池充电，同时为IGBT结构的桥式逆变器供电。在系统结构上可以看出，从整流到逆变的过程中，每个环节都是降压环节：可控硅整流是为了提供恒定的直流电压而采取的一种整流方式，由于可控硅整流要“斩掉”一部分电压，所以其输出电压恒定的代价是输出电压只能恒定在低于全波整流输出电压的某个数值上；而逆变过程同样是一个降压环节，从可控硅整流输入而来的直流电在通过逆变器逆变出正弦交流电的过程中，通常采用的是脉宽调制(PWM)方法，其结果同样是输出电压等级的再次降低。正是由于上述的原因，在这种结构的UPS逆变器中，输出变压器起着电压匹配和提升的作用，将逆变器输出的电压提升到合适的输出范围。

在实际应用中，输出变压器通常采用图8所示的连接方法，变压器的初级是三角形接法，对于没有升降压作用的隔离变压器，三个初级线圈的电压都是380V，次级是星形接法，三个次级线圈的电压都是220V，所以，初次级线圈的匝比应该是： $N_1:N_2=1:0.579$ 。

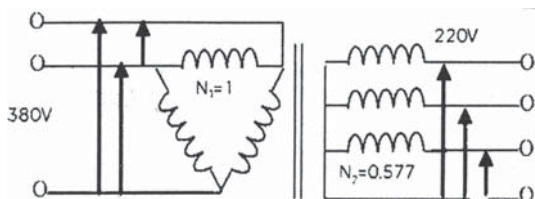


图8 UPS输出变压器电路结构

当要求输出相电压为稳定的220V时，变压器原边的峰值电压（即直流电压E）应该是： $220V \times 1.414 \times 1.732=538.8V$ 。

考虑到逆变器的PWM工作方式，为逆变器供电的直流电压要高于变压器原边峰值电压，最小极限值通常取变压器原边峰值电压的1.2倍左右，即 $538.8V \times 1.2=646.56V$ 。

然而，当考虑到输入电压存在10%的下限变化时，输入三相线电压全波整流得到的最高直流电压的理论值是： $380V \times 1.414 \times 0.9=483V$ 。

在实用中考虑到AC/DC转换过程的降压因素，大中型UPS的电池（直接跨接在直流母线上）通常是配置32~34节，额定电压为384V~408V，浮充电压（即AC-DC转换后的直流母线电压）为432V~459V。电池放电状态下的线电压为340V~362V。UPS直流母线电压的下限值（即340~362V）与输出电压要求的变压器原边的峰值电压（646.56V）之间的差值就应该由输出变压器采用升压方法来解决，所以，输出变压器的升压比应该是： $646.56V/(340V \sim 362V)$ ，即 $n=1.9 \sim 1.78$ 。也就是说，输出变压器的实际匝比应该是：1:1.9或者1:1.78。

上述数据是按照一般情况推算得出的，实际应用中因不同的电路结构形式有直接的关系，输出变压器的参数和接法也不尽相同。但是，不管电路结构的差别有多大，输出变压器总是通过其原、副边匝比的变化担负着匹配逆变器的输入电压与UPS输出电压的作用。

3.3 输出变压器是隔离变压器，但在本系统中没有隔离功能。

在UPS供电系统中，UPS设备的一个至关重要的功能是在输出过载，或者UPS逆变器发生故障时，能够自动转入静态旁路供电；另外，在系统中还设置了维护旁路，当UPS需要维护时，可以手动转入维护旁路向负载供电。执行这两个操作时，都是由旁路输入三相四线电压直接向负载供电，所以，系统的零线与负载端的零线必须短接在一起。这也就决定了带输出变压器的UPS的变压器次级产生的零线必须连接到输入电源系统的零线上，如图9所示。也就是说，UPS设备内的变压器没有电源系统的隔离功能，如果系统存在零—地电压差较大的问题，UPS设备内的逆变器输出变压器对这种电位差是无能为力的。在实际应用

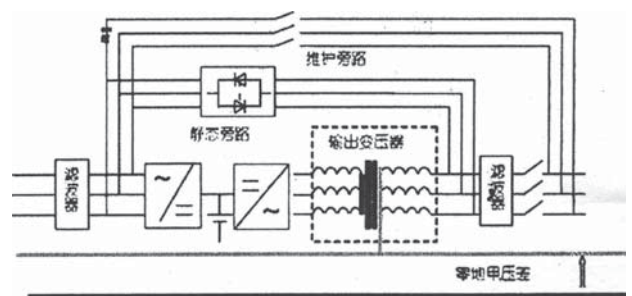


图9 输出变压器零线的连接图

中,当零一地电压差过大而需要降低时,就必须额外配置专门的隔离变压器,如图10和图11所示。

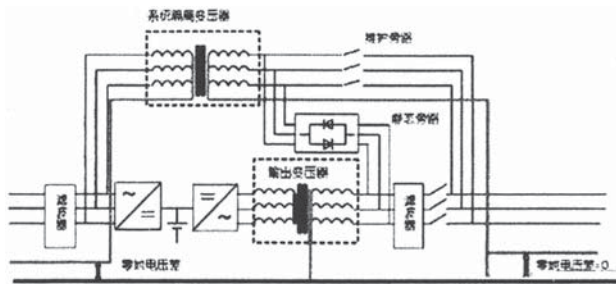


图10 把隔离变压器配在旁路的输入端

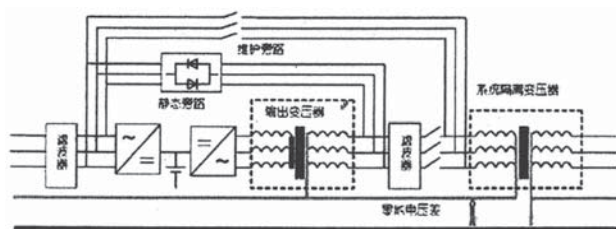


图11 把隔离变压器配置在UPS的输出端

隔离变压器的配置有两种方法：

第一种方法：在旁路输入端配置与UPS同功率的隔离变压器，这样，UPS内置的输出变压器的输出零线和旁路隔离变压器输出零线都可以接在系统地线上重新组成接地系统，这就实现了UPS输出与供电系统的真正隔离，并且使这点的零一地电位差等于零。采用这种接法的优点是，在UPS正常工作模式下，旁路隔离变压器空载运行，不影响UPS的输出性能和系统效率。其缺点是，当UPS转入旁路时，变压器突然带载工作，其输出电压会瞬间低于转换前UPS检测到的电压（即变压器的空载电压），如果转换前UPS检测到的电压已经处于UPS同步运行（限定的可以转入旁路运行）的下限，那么，转换后因变压器的压降（电压调整率）而使输出电压低于负载供电电压的下限，则负载可能会因此而间断或宕机。

第二种方法：把变压器配置在UPS的输出端，这种方法可以使UPS供电系统与负载做到理想的、完全的电气隔离，特别是当UPS供电系统在物理位置上与负载距离较长时，可以把变压器放在接近负载端，例如一些大型数据中心，在负载的输入端加装隔离变压器。此方法之缺点是变压器的阻抗会影响到UPS对负载供电的稳定精度、供电能力和动态特性。

3.4 隔离变压器的抗干扰功能

由于变压器的阻抗有一定的感性成分，因此，这个变压器具有一定的抗电磁干扰作用是可以解释的。但是，逆变器的输出变压器都不是为了抗干扰而设置的，故其抗干扰能力也是有限的。

经常有人认为：当系统中设置有隔离变压器时，其抗干扰功能一定会很强。但这种认识不完全正确。在供电系统中，干扰产生的原因和干扰现象是多种多样的，其中包括诸如高压脉冲、尖峰毛刺、电涌、暂态过电压、射频干扰(RFI)和电磁干扰(EMI)等等。但对于其干扰形式和传输途径而言，可以分为两类：共模干扰和差模干扰。共模干扰存在于电源的任一相线和零线与大地之间，共模干扰有时也称为“纵模干扰”、“不对称干扰”或“接地干扰”，它是由于辐射或串扰耦合到电路中的，是载流导体与大地之间的干扰。差模干扰存在于电源相线与零线之间及相线与相线之间，差模干扰有时也称为“常模干扰”、“横模干扰”或“对称干扰”，是载流导体之间的干扰。目前，人们常用的抑制干扰的措施是，给被保护的设备并联瞬变干扰抑制器和在电子设备的输入端安装电源滤波器。采用变压器提高抗干扰能力具有一定作用，但这种变压器应是特殊的“超级隔离变压器”，而不是普通的线性变压器。因为不是所有的隔离变压器都能抗干扰，普通变压器的抗干扰能力是有限的。对于输入电压中存在的低频干扰和电压畸变，变压器不可能也不允许“抗干扰”，否则，通过变压器传输的电压波形就会失真，对于由地线环路带来的设备间的相互高频干扰有一定的抵制作用，但因绕组间存在分布电容，使它对共模干扰的抑制效果随干扰频率的升高而下降。

由于变压器是靠磁耦合实现原边和副边的电压变换的，因此它不具备抗差模干扰的功能。在1kHz~100MHz的干扰频率范围内，普通隔离变压器对共模和差模干扰的衰减能力都微乎其微。对普通隔离变压器的共模抑制能力分析表明，要提高对共模干扰的抑制能力，关键在于减小变压器绕组的匝间耦合电容，为此可在变压器的初、次级之间加设屏蔽层，如图12所示。

在图12中， C_1 为初级绕组与屏蔽层之间的分布电容， C_2 为次级绕组与屏蔽层之间的分布电容， Z_1 是屏蔽层接地阻抗， Z_2 为负载的对地阻抗， E_1 为初级干扰（共模型）电压， E_2 为 E_1 通过耦合传导到次级的干扰（共模型）电压。

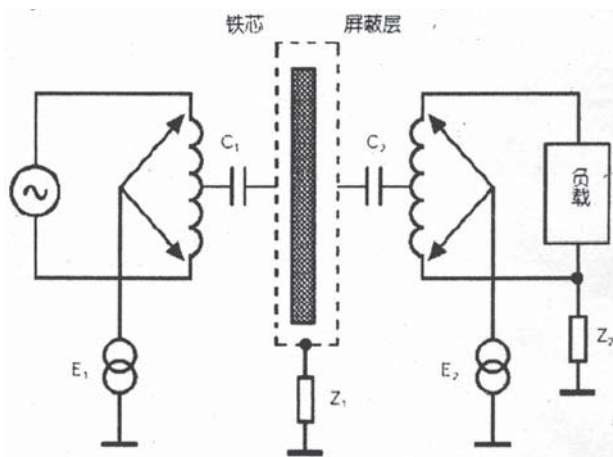


图12 带抗共模干扰屏蔽层的隔离变压器

如果 C_1 和 C_2 的阻抗远大于屏蔽层接地阻抗，则耦合传到次级的干扰电压 E_2 就会远小于 E_1 。

要使隔离变压器同时具备较好的抗差模干扰与共模干扰的功能，就必须把它制作成超级隔离屏蔽变压器。超级屏蔽隔离变压器是性能较完善的多重屏蔽隔离变压器，对

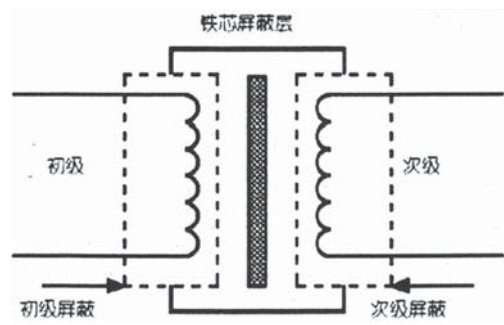


图13 超级隔离变压器

差模干扰和共模干扰都有较强的抑制功能，如图13所示。

超级屏蔽隔离变压器设有三层屏蔽层，靠近初级绕组的屏蔽层连接在初级中性线上，可以滤除掉初级出现的高频差模干扰。而对50Hz的工频电压则不产生任何影响，靠近次级绕组的屏蔽层连接在次级中性线上，可以滤除掉次级出现的高频差模干扰。中间的屏蔽层则与变压器外壳连在一起。再接大地，主要用来滤掉共模干扰。（待续）