

## IGBT 模块可靠性经验分享

随着风力发电、智能电网建设、电力汽车、高压变频器等新兴应用的崛起，大功率 IGBT 模块 的应用越来越多。而与之相应的是 IGBT 可靠性在大功率电源设计中的重要性与日俱增。本人甚至认为基于上述新兴应用领域的特殊性。系统可靠性已经成为最重要的设计指标之一。而大功率开关器件的可靠性问题更是重中之重。

IGBT 模块失效的机理大致可以分作两大类共九个方面。他们分别是；

### **第一类，由于参数余量不足导致的四个问题；**

1. 变压器结电容相对于电压变化率过大，导致的耦合电流干扰问题。这个问题导致的后果是，输出逻辑错误，控制电路被干扰，电路失效等。

2. 驱动电路的工作频率（最小脉宽）相对 IGBT 开关频率（占空比范围）不足，或辅助电源平均输出功率不足，导致的输出不稳定。这个问题导致的后果是，驱动状态发生波动，系统最坏情况出现概率增加。

3. 驱动电路输出电压的上升下降沿速率与 IGBT 开关速率不匹配，或辅助电源峰值功率不足，导致驱动电路达不到满幅值驱动。这个问题导致的后果是，产品批量一致性降低，系统最坏情况出现概率增加。

4. 驱动芯片的额定输出功率密度相对不足，导致的器件老化加速。  
这个问题导致的后果是，延迟时间增加导致死区时间相对不足。

### **第二类，与应用技术相关的五个问题；**

1. 器件选用方面的问题。包括：储能电容的可靠性问题；电容等效直流电阻问题；光敏器件老化与可靠性问题；光线接口的环境粉尘及接口机械强度等问题。

2. 输出逻辑可靠性方面的问题。包括；存储器逻辑错误的一些建议措施；驱动板安装位置建议。

3. 耦合电流路径方面的问题。包括；各单元安装环境，位置。接地问题，耦合电流引导问题，系统敏感带宽，闩锁，电源完整性问题。

4. 输出电阻取值方面的问题。包括；取值上限的制约因素，取值下限的制约因素，IGBT 温度与取值区间的关系。

5. IGBT 安装方面的问题。包括；由于热或机械应力不均导致的失效；热阻及散热条件均匀性导致的失效。

下面逐条具体说明一下；

## 一、变压器结电容相对于电压变化率过大，导致的耦合电流干扰问题。

说起驱动器的隔离效果，一些朋友往往想到参数手册中指出的隔离耐压，或者是能承受的最大电压变化率。但是，这些参数实质上是指驱动在什么样的工作条件下不会被损坏。而不是指驱动器的隔离效果。任何驱动器，包括使用光隔离的驱动器。都至少要有为输出级提供电源的隔离变压器。而变压器本身必然会存在原边与副边之间的耦合电容。当 IGBT 的开关过程导致两边电压出现较大变化率的时候。该电容的充放电必然会产生一个电流。这也将导致变压器两侧共地的电路被干扰。

IGBT 的集电极电压变化率，取决于与门极间等效电容在驱动电流作用下对应的电压变化率。当 IGBT 门极电压变化到门极电流与工作电流相当的时刻，门极电压将不再变化。驱动器输出的电流将对门极和集电极之间的等效电容充放电，实现门极电位的变化。因此这个电位变化过程本身是对应于该条件下对电容的恒流充电过程，其开始和结束都是近似于阶跃性质的。因此，总体上该干扰电流的函数具有门函数的特征。

对于该干扰电流对电路系统影响的分析。应该采用类似小波变换的各类分析工具，从瞬时频谱分析的角度去识别那些携带能量较多的瞬时频率分量的特征。而不应该是采用基于傅氏变换的全时域分析。原因是这一类全时域分析的结果实质上是在瞬时频域分析结果的基础上，进一步在时间上求平均的结果。这将导致信号实时特征的畸变和丢失。不能真实地反映问题。不管采用何种瞬时频率分析方法都将与宏观上的电流函数特征相接近。那就是主要的瞬时频率成分存在于门函数周期对应的频率点以上，且较为接近。同时由于上升下降沿的存在。在相对较高的频段也含有相当一部分分量。这就使该干扰电流的主要瞬时频率分量集中在低频和高频两大部分。其中，低频部分的频率大致是对应 IGBT 上升下降时间所决定的电流持续时间。在数百纳秒至数微秒量级，大致对应 1 至 10 兆赫兹这一区间。而高频部分则是来自门函数的上升下降沿速率决定的频率。但这主要取决于耦合通路自身的频率特性。应该是明显高于低频部分的。进一步考虑到实际中杂散参量对该电流的低通能力。实际中的高频分量应该处于数百兆赫兹的水平。而 1 至 10 兆赫兹又是一个比较敏感的频段。它是 pcb layout 中共点接地和多点接地的混叠区间。这意味着地线系统中感抗成分达到甚至超越阻抗成分成为主要因素。电流的分布路径变得更加复杂且相对比较集中。由于该频段下线路的感抗特征和阻抗特征都比较明显，但还没有高至杂散电容发挥作用，因此表现出的线路电抗值是比较大的。在相互连接的两点之间具备形成较大电压的条件。这部分

的干扰电流虽然占据主体，能量很大。但是频段相对较低，主要的影响还是集中在信号收发端之间形成的地电势差上。这将导致数字信号电平判定阈值裕度的损失。使发生逻辑错误的概率提高。

数百兆赫兹的高频分量，将表现出明显的高频电流特征。并且应该是高于或接近多数主控芯片的工作频率。大家知道，高频数字电路中去耦电容的谐振频率应该是以电路最高工作频率作为最佳点。而如果干扰电流的频率高于电路最高工作频率则很可能使去耦电容表现为感性。结果是在电流对电路整体补充电荷以达成电荷平衡（形成等势体）的过程中，会导致电源电压的较大波动（尤其是电路接地处理不良的时候）。从该电流的功率级别来讲，由于是来自 IGBT 的开关动作。因此具有电流源性质。其能量足以引发电源完整性问题。比如 CMOS 器件最危险的闩锁问题。其危害之大是可想而知的。

说点题外话。电子产品的任何技术参数都是在指定的测试条件下才有意义的。有一个故事，说 ADI 曾推出一款当时号称业内噪声最小的运算放大器。但是有使用者发现，在其设计的产品中换用该运放后的实测噪声，并不比原来的运放小。进一步分析才发现，这个运放指出的噪声参数是在典型的测试频段下测得的。而在该使用者实际使用的频段下却并没有优势。这个事例说明，理解产品的一个参数必须置于实际情况之下。数据，有时仅仅是一种典型代表，并不具有太多实际意义。就比如说这里的变压器结电容。很多驱动产品给出的数值都是很低的。但是实际中如此量级的电容值在实物测试时，必然受到电路杂散电感等因素的影响。而理论值往往又难逃理想化模型的影响。所以该数值的参考意义大于实际意义。如果你要对比结电容这一参数，建议同时比较产品的变压器结构，以便辅助判断结电容谁高谁低。

综上所述，IGBT 开关过程所导致的变压器结电容充放电电流对与之共地的电路系统的影响是很大的。在选择 IGBT 驱动器的时候，需要根据系统的实际情况充分考虑该因素。对于控制电路复杂的系统要尤为注意。需要说明的是。比较不同驱动器在这一方面的差异时，不能仅注意结电容的数值。需要格外关注其变压器结构上的差异。当然对于成熟的驱动产品。相信不同级别的驱动器必然有不同级别的隔离能力。只要不出现小马拉大车的情况即可。但是对于自制的驱动产品就很有必要比较与同类成熟产品之间在变压器结构上的差异。比如绕组的间距，绕组投影面积，绕组结构等因素。以便实现比较可靠的自我评估。切不可仅仅以实测的电容值作为唯一比较参数。

说到瞬时频谱方面的问题。给大家献上一本《小波十讲》。在实际中大家未

必会用到这些方法。但是，我想数学的意义并不是方法本身，而是思想。这本书非常经典，绝对值得收藏！相信研读它对提升工程能力，明晰基本概念，必有裨益。其实，电子技术的学科体系根基之一就是对频谱的认识。而现代技术发展趋势和市场需求趋势都指向了瞬态问题的处理。这使得习惯了传统的基于稳态频谱分析思路的朋友，在处理日渐突出的瞬态问题时往往会面对惯性思维带来的困扰。就如上文提到的对于 IGBT 开关动作产生的耦合电流对电路系统的影响问题。用瞬态的观点和稳态的观点得出的结论是大不相同的。如果概念模糊，分析问题的基本方法有问题，就容易出现错误。在技术问题上，结论和规则是次要的，因为具体条件变化不定。但是思路和方法是重要的，因为万变不离其中。所以非常期望和大家共同探讨一些技术问题的观点思路，深层机理。相信帮助会更大的。

说到这里，再说些题外话。和一些刚毕业的朋友沟通，往往会觉得他们对外界大环境的认识和自身发展策略的规划上把握不好。其实任何事情都不能脱离大背景独立运行。如果从一生的职业生涯跨度上看问题就必须立足于大背景的趋势。企业也好，个人也罢。如果总用静态的眼光看事做事，难免落后一拍，处于被动。我个人的浅见，隐隐觉得。随着国内人口红利的耗尽和经济背景的变化，未来企业的竞争力，亦或技术人员的竞争力都将集中于产品定义的创新和产品可靠性的升级两方面，而以往的面向节约成本或解决有无的复制性研发将不再具有太大的竞争力。从技术层面看，社会大趋势决定了未来世界是建立在电力能源的基础上，在高度智能化背景下，整合机器视觉，运动控制技术等要素成为替代石油，电信等业务的新兴经济增长点。所以，电源行业的技术人员或许进入一个朝阳产业通道。但前提是，你的专长不是以低成本开发类似的产品，而是以高可靠性开发，赋予产品新的技术特点。以迎合市场需要。这就需要更加深入地理解概念实质，理解可靠性制约因素。

## **二、驱动电路的工作频率（最小脉宽）相对 IGBT 开关频率（占空比范围）不足，或辅助电源平均输出功率不足，导致的输出不稳定。**

不知道大家是否有一个疑问。一般来讲限制输出频率的因素是响应速度和耗散功率。但是相比之下很多驱动产品的规定输出频率上限却显得小了很多。这是为什么呢？原因之一，是驱动器经过一次输出翻转后并不能马上恢复稳态。如果在驱动器进入稳态前再次输出翻转，则会引发一些可靠性问题。

另外一个方面是结型晶体管的存储电荷问题。由于控制方式上的优势，驱动电路中往往包含有双结型晶体管而非全部是场效应管。双结型晶体管有一个特点，就是它的关断过程依赖于流经的电荷总量。这个过程也就是基极存储电荷的耗尽

过程。而驱动器的输出并不是连续的，在达到给定电位后就不再有输出。这实质上斩断了存储电荷释放的渠道。因此很多时候驱动器在一次输出以后需要很长的时间来耗尽存储电荷。如果在它恢复至稳态前再次输出翻转。则可能导致响应迟缓，输出幅度不足和耗散功率的骤增等问题。这里需要说明的是，如果上述机理是一款驱动器输出频率的主要限制因素，那么该驱动器的极限工作频率与温度的相关性就会比较大。与之相应地就要注意最高工作频率的实际测试温度，酌情留有裕度。

综上所述，驱动器输出频率应当留有一定的裕度。最好将占空比变化率计算在内。举例来说，如果占空比在相邻两个周期间，可能从 33%突变至 66%。那么对应的最高工作频率就应该是当前值的 1.5 倍。另一方面，驱动器外接的铝电解电容最好选用品质较高的产品，不要在市场上随意采购。尤其推荐一些厂家特制的开关电源专用输出滤波电容。这类电容在 ESR 方面有优势。再有就是，如果产品应用的温度范围很宽。比如野外移动使用的电源设备，可能在极寒酷暑下使用。建议根据情况留有更加富裕的最大工作频率欲度。

从另一个角度来说，上述内容都是从工程角度出发概述的，内容上不连贯。而一般我们学东西却是按照学科体系去学的，内容前后连续。所以两者之间很难同步。如果您对 IGBT 不是很熟悉，我想可能是您对大功率设备接触不多。建议多关注一些与基本概念或模型相关的资料。搞清研究对象的具体情况，自然就能把相关各个学科的东西结合到一起。