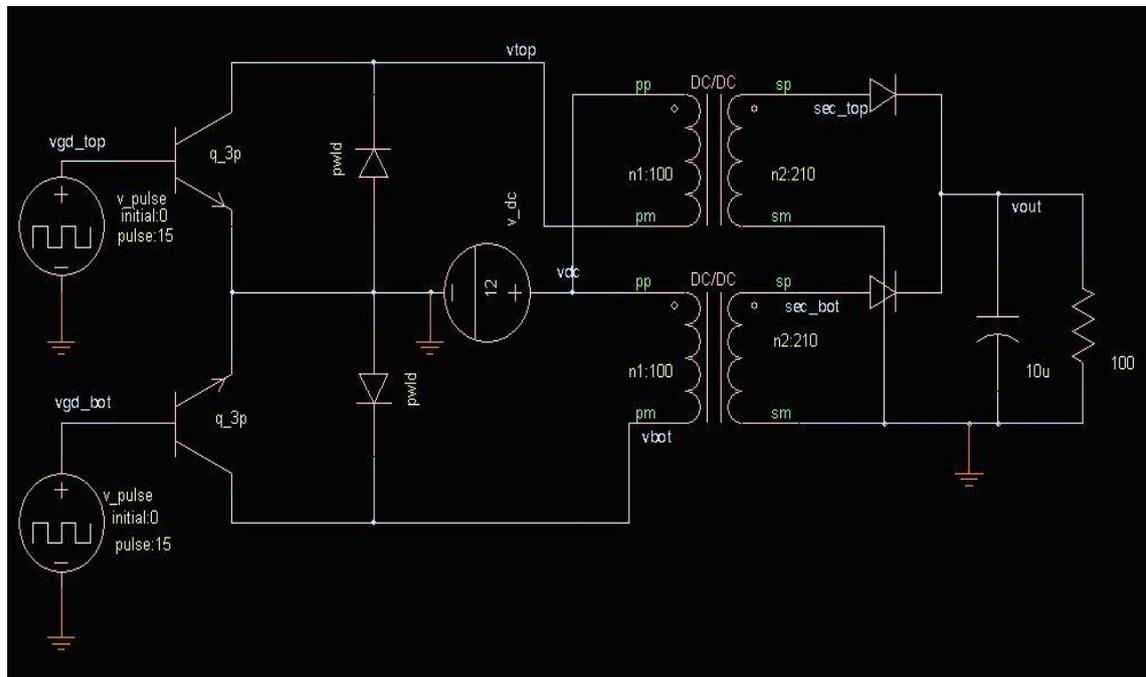
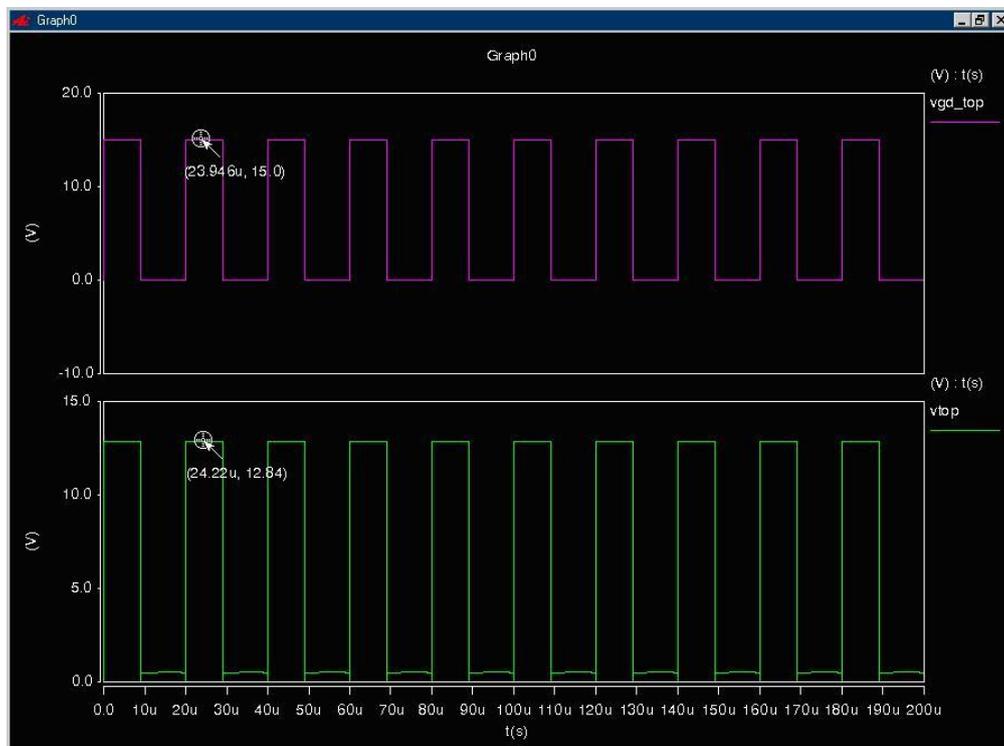


前段时间收到一位网友的来信，对我博客中的一篇文章《半桥推挽电路的开环仿真》提出了疑问。疑点主要在于当驱动电压为高时，三极管 CE 两端电压应该趋于饱和，但在仿真中确看到为高电平；而当驱动电压为低时，三极管两端电压应该为高，但在仿真中确看到为低电平。具体情况如下图所示：

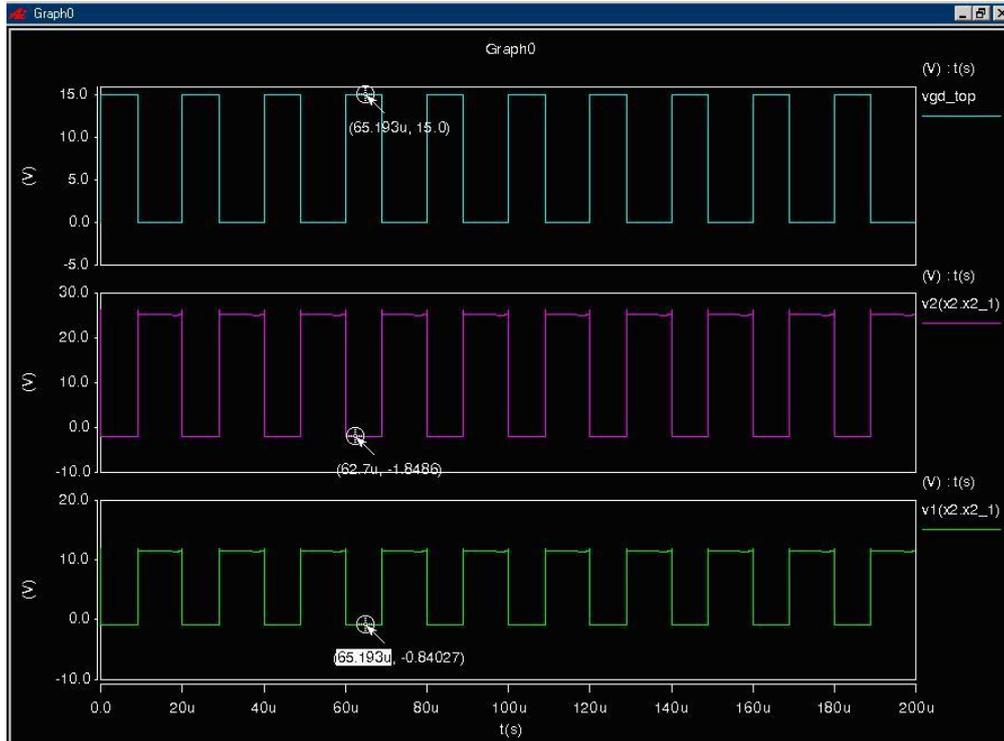


仿真原理图



三极管 C 极以及驱动电压

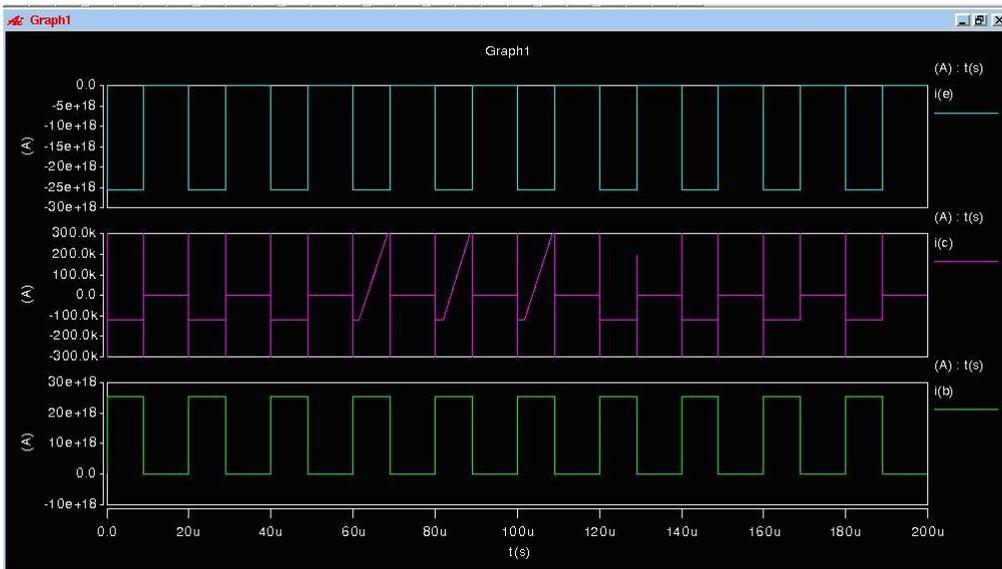
上图中  $V_{top}$  其实就是三极管 CE 两端的电压。仔细查看当时用作分析的电路以及分析结果后发现，这个电路的仿真实存在问题。观察变压器原副边的端压如下图所示：



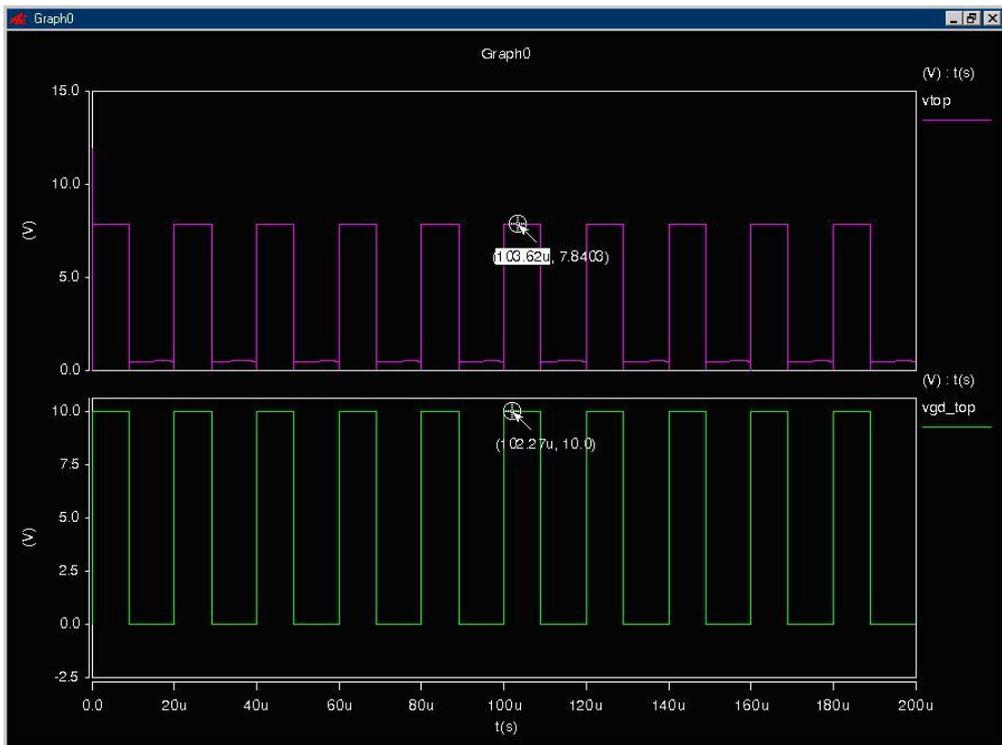
从上图看，当驱动为高电平时，变压器原副边电压都为低，这与工作原理是不一致的。实际上当驱动为高时，变压器原边电压应该为高，相应的副边电压也应该为高。反之亦然，当驱动电压为低时，变压器原副边电压也响应为低。而这个电路仿真的波形确恰好相反。所以，该仿真电路的结果并没有真实反映推挽的工作原理。那么，为什么能得出貌似正确的结果呢？有待进一步分析..... 仔细分析电路，发现该电电路存在以下问题：

1. 电路中采用的是 X2 变压器模板，改模板虽然设置简单(只用设置原副边匝数就可以)，但确非常理想，相当于一个 VCVS，而不是通过电流传递能量；
2. 三极管 B 极没有驱动电阻，因此 B 极的电流  $I_b = 15/\text{三极管基极电阻}$ ，B 极电流非常大。并且当驱动电压为高电平时，B 极电压(+15V)比 C 极电压(+12V)还高。

通过观察三极管 B/C/E 极电流可以看出三极管处于非正常工作状态，如下图所示：



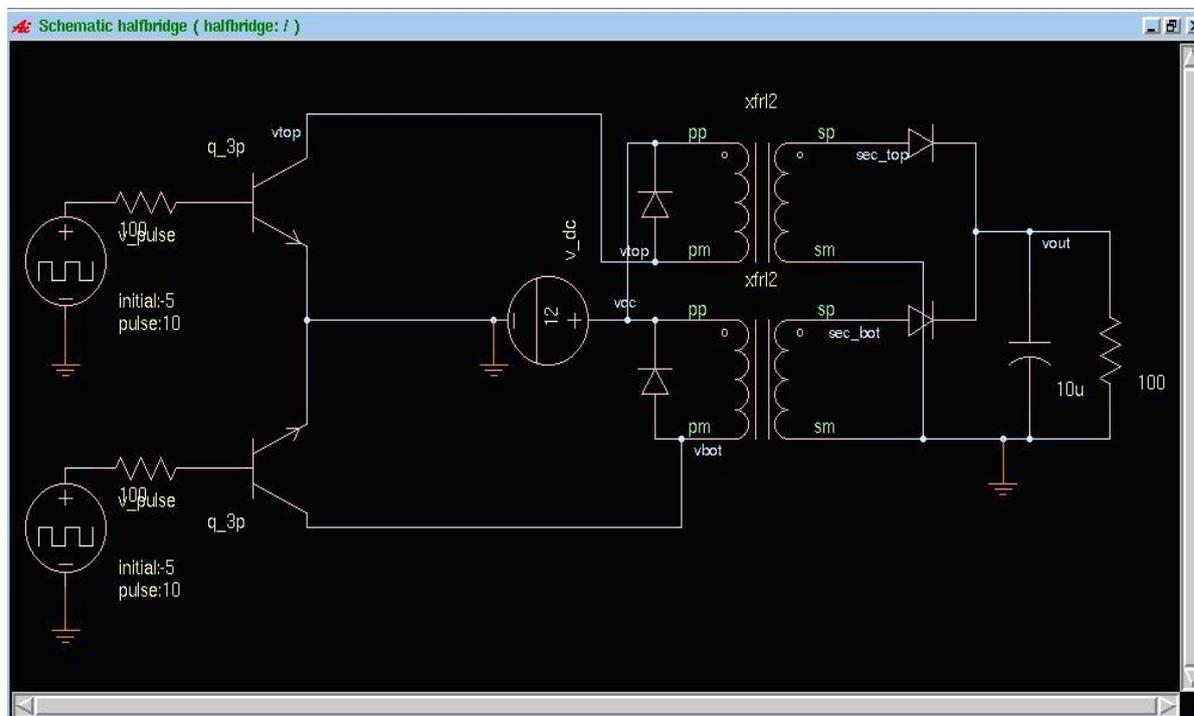
在这种情况下，三极管 C 极的电压由 B 极电压决定，比 B 极电压低一个 PN 结的压降。因此才会出现当驱动为高时，C 极电压也为高。此时，变压器原边电压为 12V 电压和三极管 C 极电压之差，因此为低。如果将驱动电压高电平改为 10V，则三极管的 C 极电压高电平会随之减小，如下图所示：



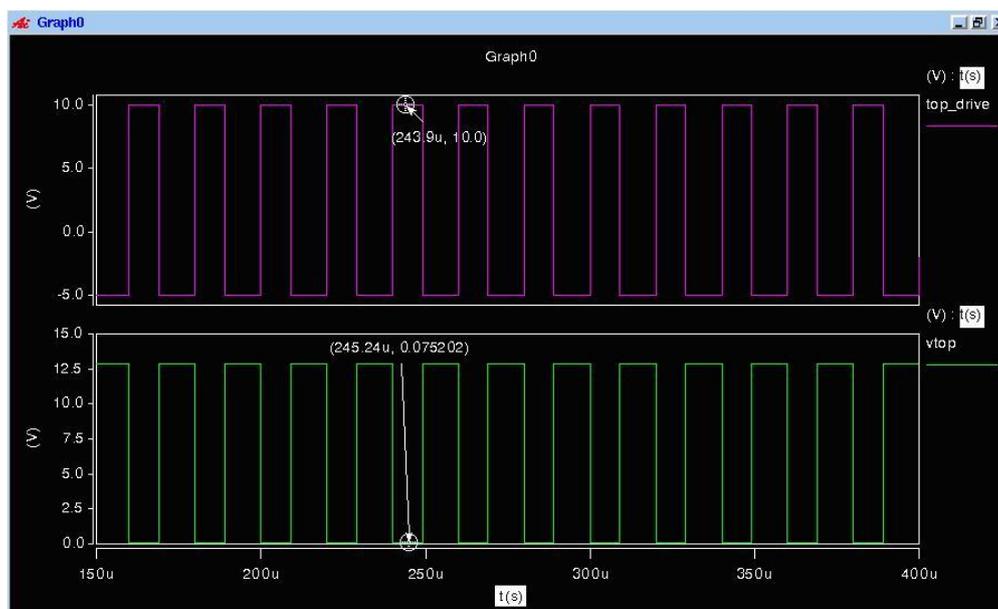
而当驱动电压为低时，由于三极管关断。但由于变压器的原边输入阻抗要比三极管的关断阻抗大很多(VCVS 的输入阻抗无穷大)，因此，按照阻抗分压，三极管 C 极的电压很小，就出现了低电平的情况。此时，变压器原边电压为 12V 电压和三极管 C 极电压之差，因此为高。对于 X2 变压器模板，由于相当于 VCVS，因此主要根据原边电压决定副边电压而非电流，因此就出现了前面提到的那种貌似正确的结果。针对前面的分析,对该电路做如下修改:

1. 采用 xfr12 变压器模板代替 X2 模板, 变比与原来一致;
2. 调整二极管的位置, 便于吸收开关关断时由变压器电感产生的尖峰电压;
3. 在三极管 B 极增加驱动电阻;
4. 将三极管驱动电压改为 -5V~10V, 加速三极管结电容的放电.

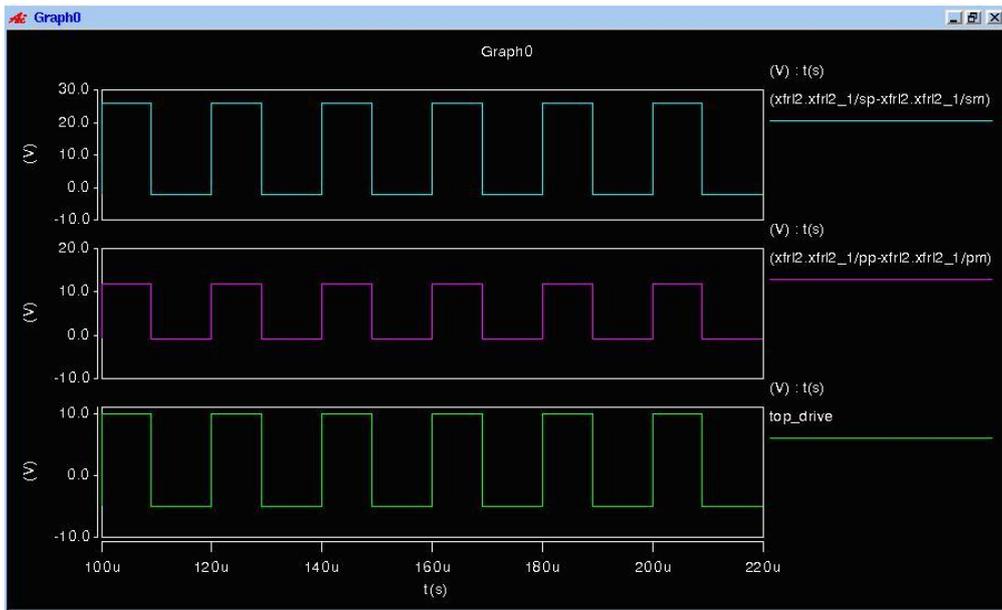
具体情况如下图所示:



其仿真结果如下图所示:

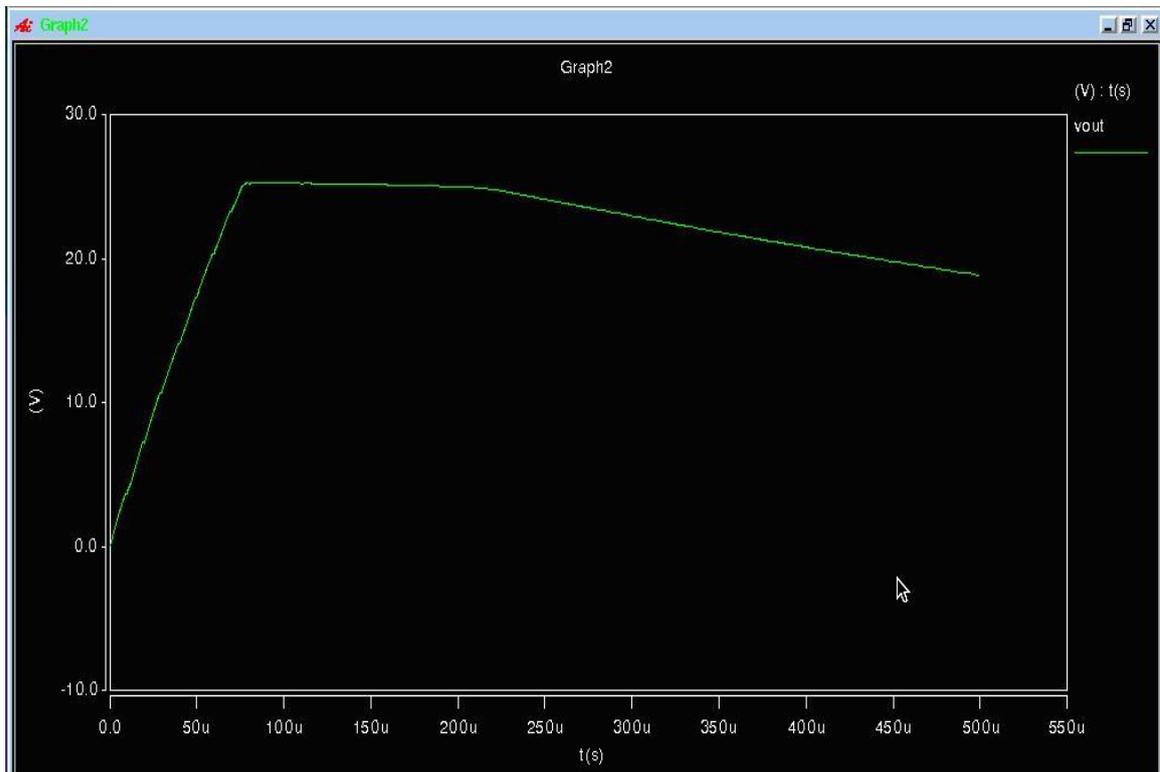


驱动电压与三极管 C 极电压

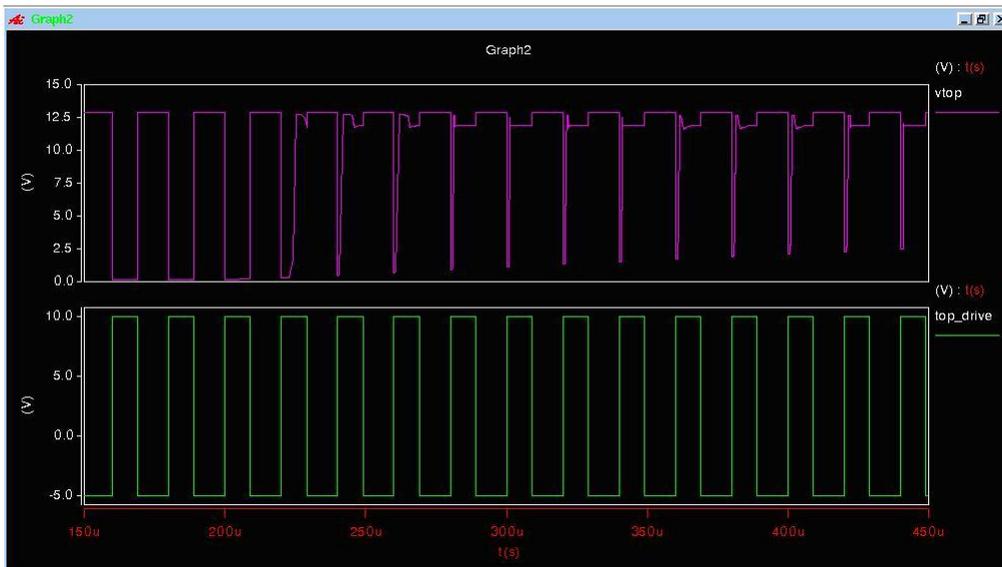


驱动电压与变压器原副边电压

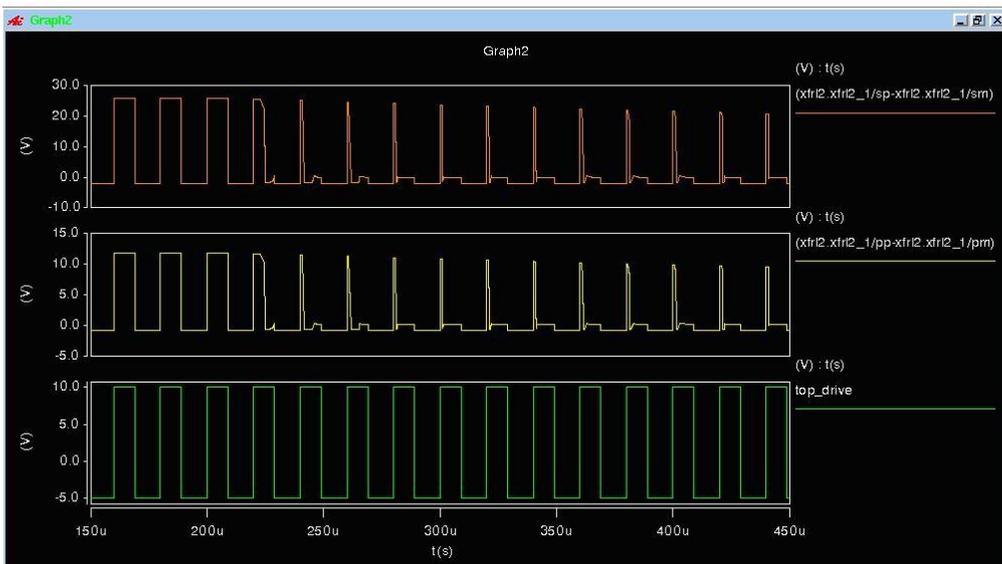
从以上分析结果看，修改以后的仿真电路和结果似乎符合了实际的工作原理，但细心的网友会发现，这个电路其实仍然有问题，能看出问题所在网友不防指出来，大家一起讨论。对前面修改过的原理图进行 TR 分析，设置 TEND=500u，会发现输出电压出现异常。如下图所示：



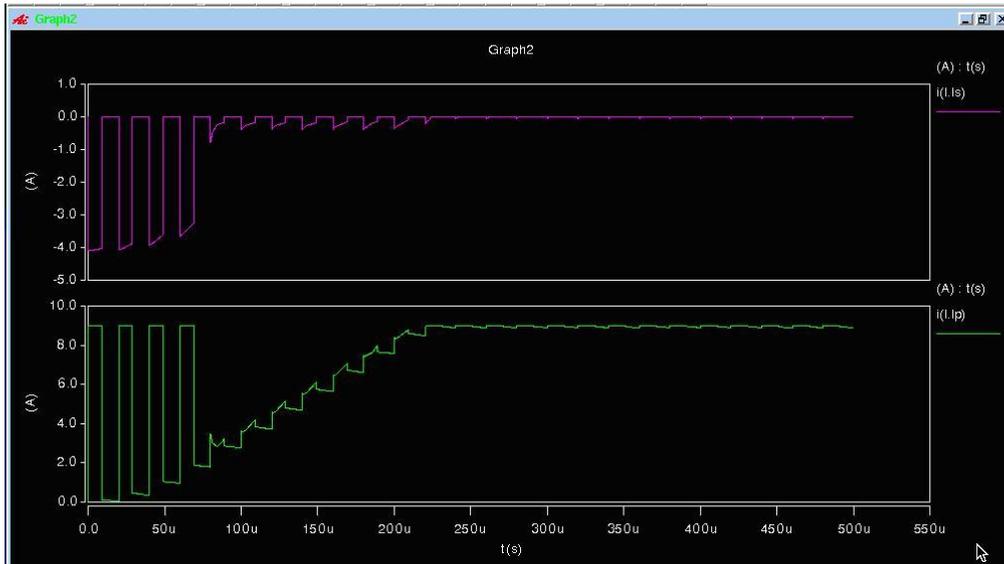
三极管 C 极电压也出现异常,如下图所示:



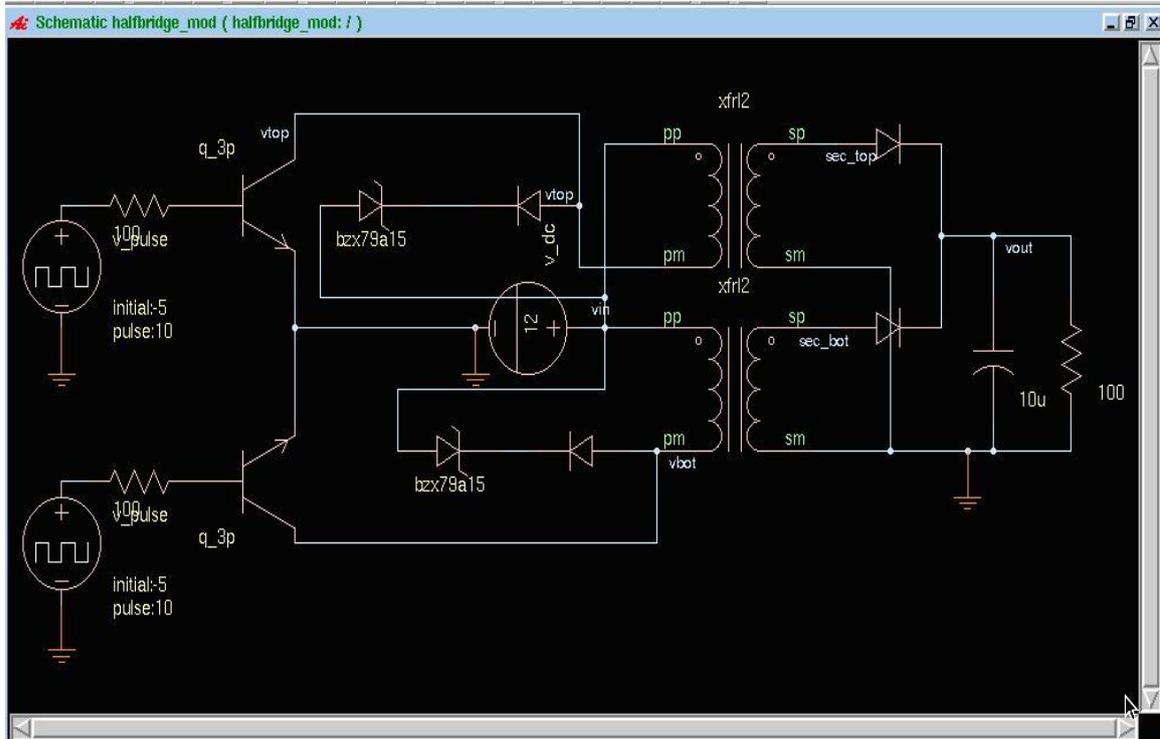
变压器原副边电压同样出现异常，如下图所示：



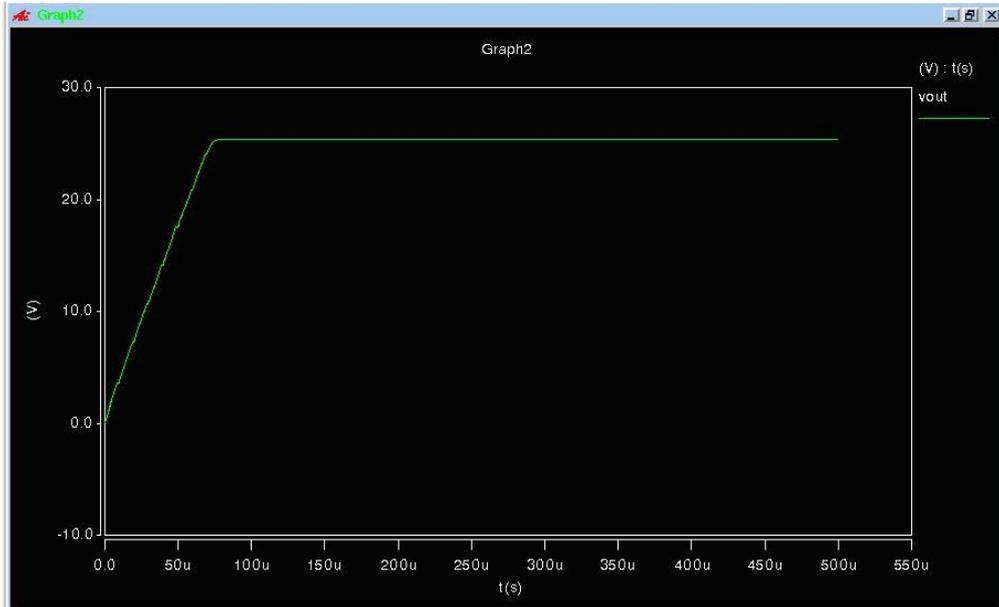
是什么原因导致输出电压和一些关键节点电压在运行一段时间以后出现异常呢？查看变压器原副边电流发现似乎原边电流出现饱和。如下图所示：



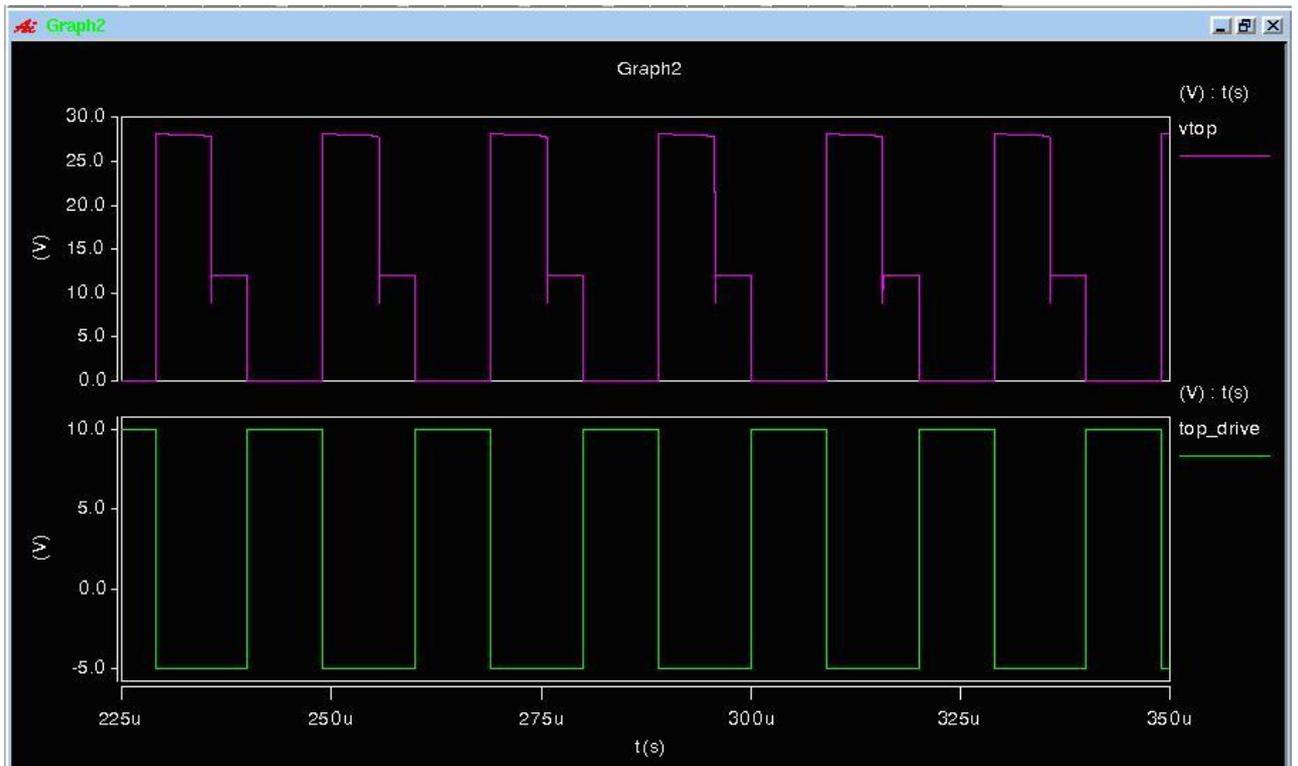
仔细观察电路发现，由于钳位变压器尖峰电压的二极管只是提供了快速放电的通路，但不具备将能量回馈给输入电压或者消耗掉的能力，因此在每个开关周期以后，剩余能量都会贮存在变压器中，导致变压器电流逐步上升，引起变压器的磁饱和。但是电路中采用的 xfr12 变压器模板是线形变压器模板，不具备磁饱和特性。因此不是变压器引起原边电流限流，考虑三极管 B 极有 100 欧姆的驱动电阻，其 B 极最大电流为  $10/100 = 100\text{mA}$ ，Saber 中三极管模板的电流放大倍数默认为 100，因此 C 极电流最大为  $I_c = 100\text{mA} \times 100 = 10\text{A}$  左右，这与上图中的仿真结果相似，因此可以判断，引起原边电流限流的原因在于三极管。根据前面的分析，考虑在二极管放电通路上提供一个消耗能量的器件，以保证在每个开关周期内，将剩余能量消耗掉，辅助变压器电流复位到零，这样才是正确的工作状态。对电路稍作修改如下图所示：



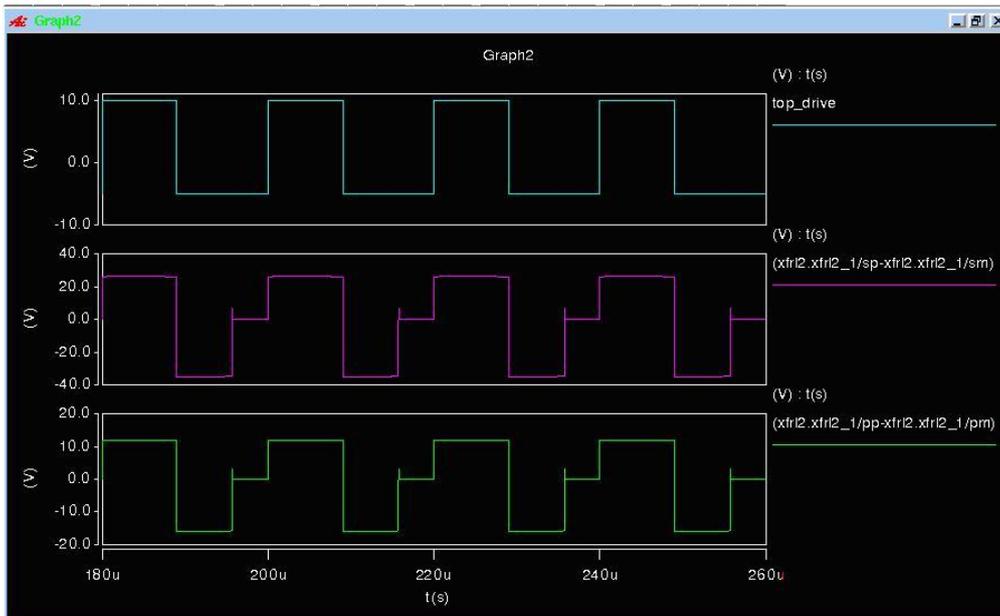
仿真结果如下所示：



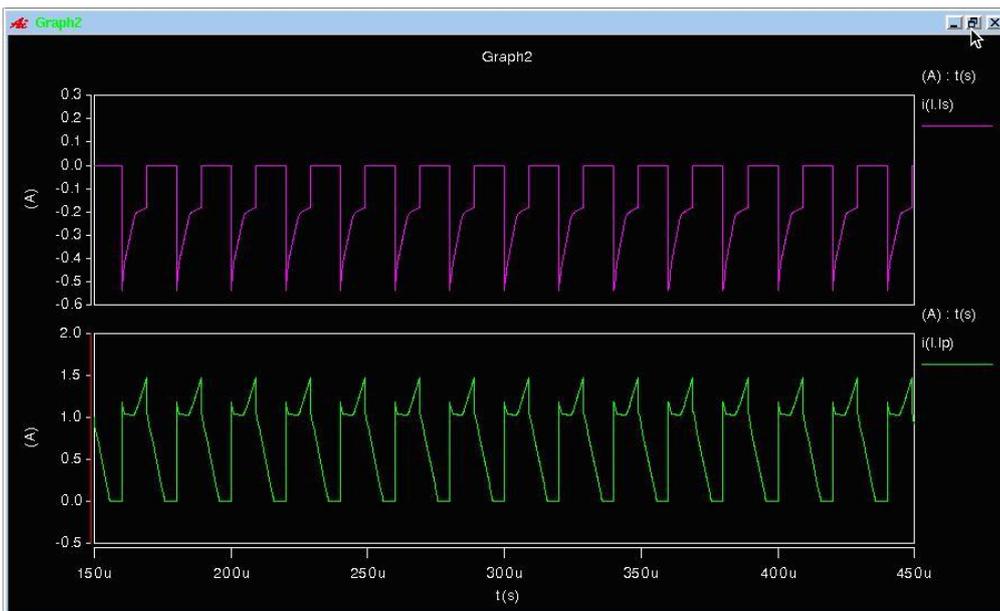
输出电压



三极管驱动电压与 C 极电压



变压器原副边电压



变压器原副边电流

思考:

1. 从此电路的分析过程可以看出，对于软件中的各种理想模板，在使用前要考虑清楚其适用的条件，谨慎使用。
2. 很多情况下，需要对仿真结果仔细分析，多方验证，而不能只看到一个相似的结果，就认为仿真验证正确，swordman 此次就犯了这个错误，希望其它网友在使用 saber 是以此为鉴。