开关电源环路设计与计算

On-Bright Electronics (Shanghai) Co. Ltd

On-Bright Confidential to Tenpao

内容

- 开关电源简介
- 开关电源环路分析(以反激变换器为例)
- 开关电源的环路补偿(以反激变换器为例)
- 一个基于OB2263的12W电源环路设计实例
- 讨论

On-Bright confidential to Tenpao

开关电源简介

- 用途： AC/DC， DC/DC， DC/AC (inverter)

- 基本拓扑结构：
  - 非隔离型： Buck， Boost， Buck-Boost……
  - 隔离型： Forward, Flyback, Half Bridge,
    Full Bridge, Push-Pull
  - 整流型： 全桥型整流
    全波型整流
    同步整流(SR)

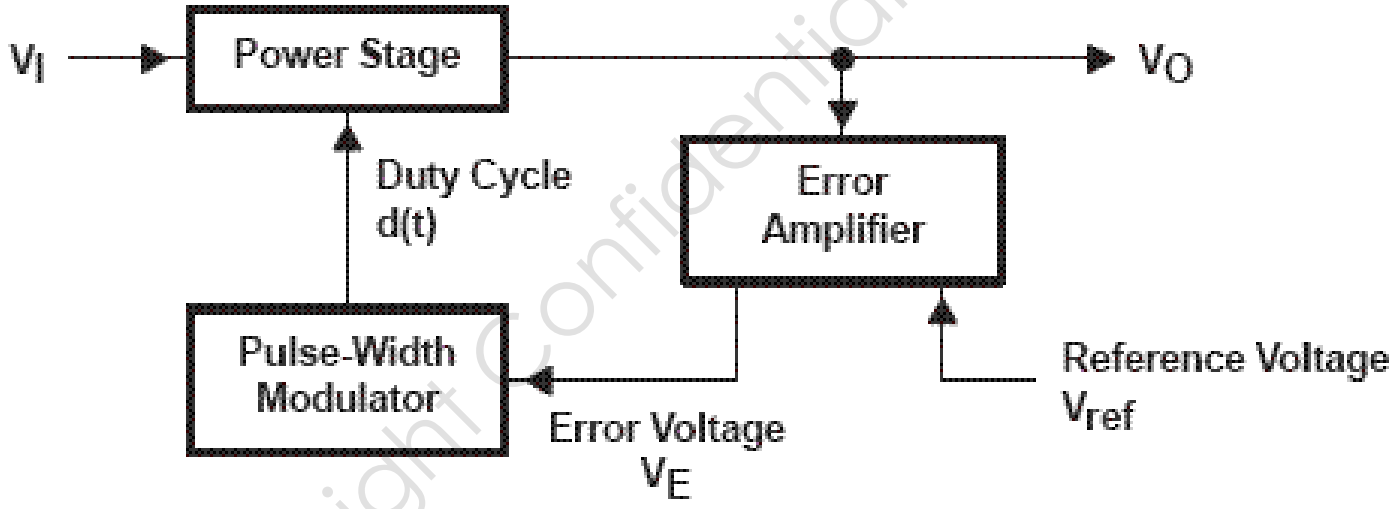
On-Bright Confidential to Tenpao

开关电源简介

- 调制方式
  - PWM (pulse width modulation)
  - PFM (pulse frequency modulation)
  - 其它衍生调制方式
- 控制模式
  - 电压模式
  - 电流模式
- 开关电源系统可分为两大块
  - 负反馈回路(feedback loop)
  - 保护功能(OVP, OCP, OTP ……)

On-Bright Confidential to Tenpao

开关电源系统基本组成部分
(Voltage Mode PWM System)



On-Bright Confidential to Tenpao

开关电源环路分析和设计流程

- 确定环路基本组成模块， 辨认环路。
  - EA (error amplifier)
  - Compensation network
  - Power Stage
  - PWM Stage
- 画出环路的信号流程图，确定环路的小信号传输函数
- 确定环路的带宽，设计补偿网络
- 根据实际应用，设计和调整外围参数

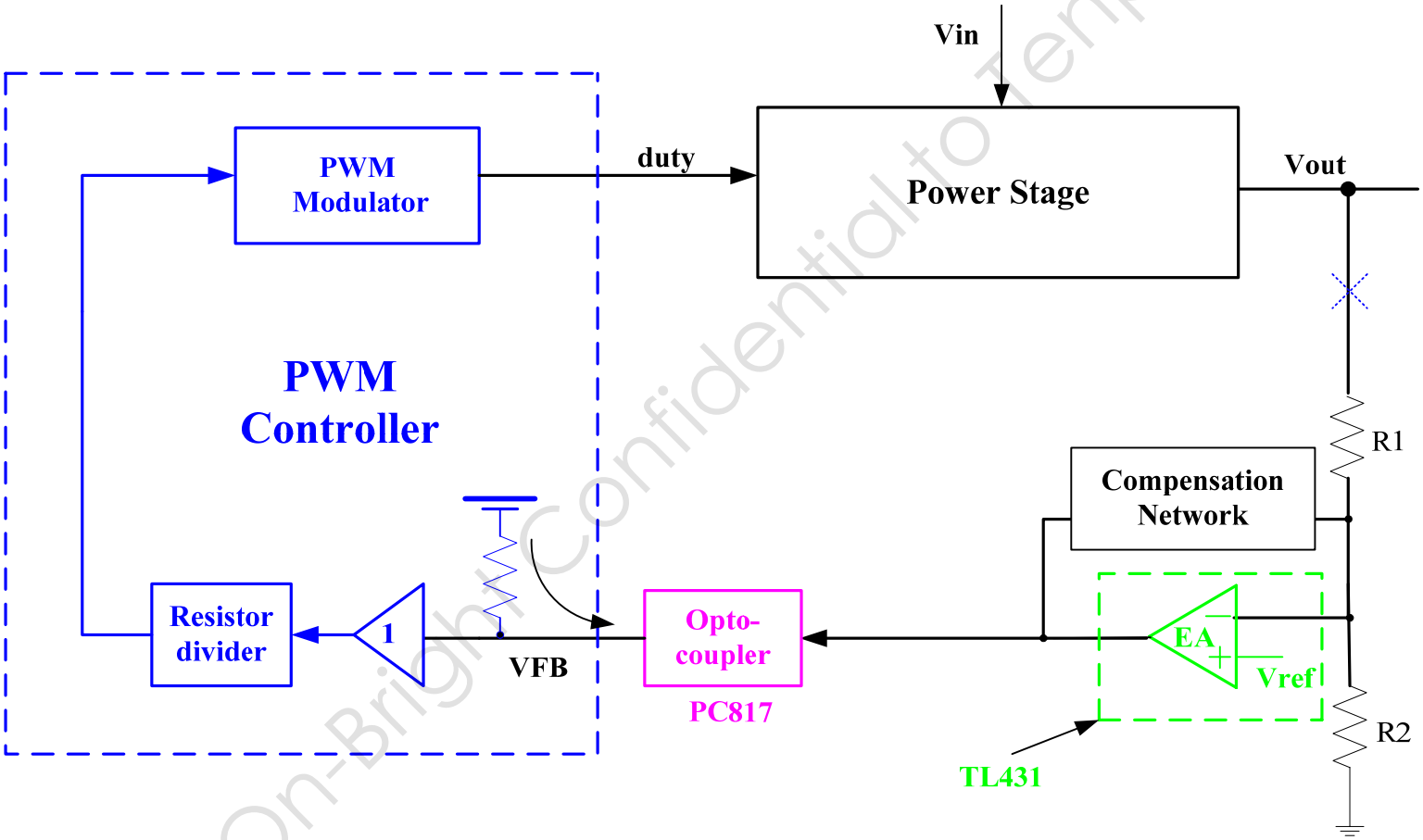
On-Bright Confidential to Tenpao

开关电源环路的小信号传函

- EA（例如TL431）及其补偿网络的传函
- PWM Stage传函
- Power Stage 传函（可参考[1]）
  - CCM small signal model
  - DCM small signal model
- 考虑斜率补偿后的Power stage 传函

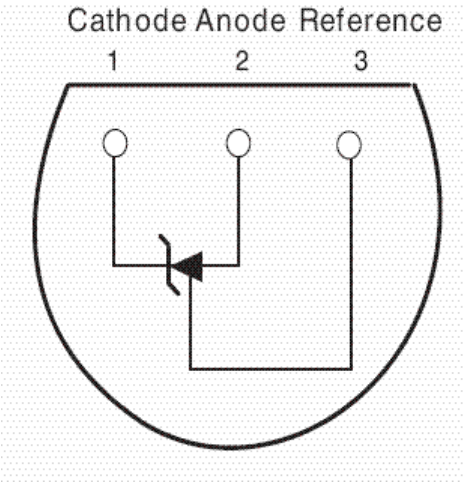
On-Bright Confidential to Tenpao

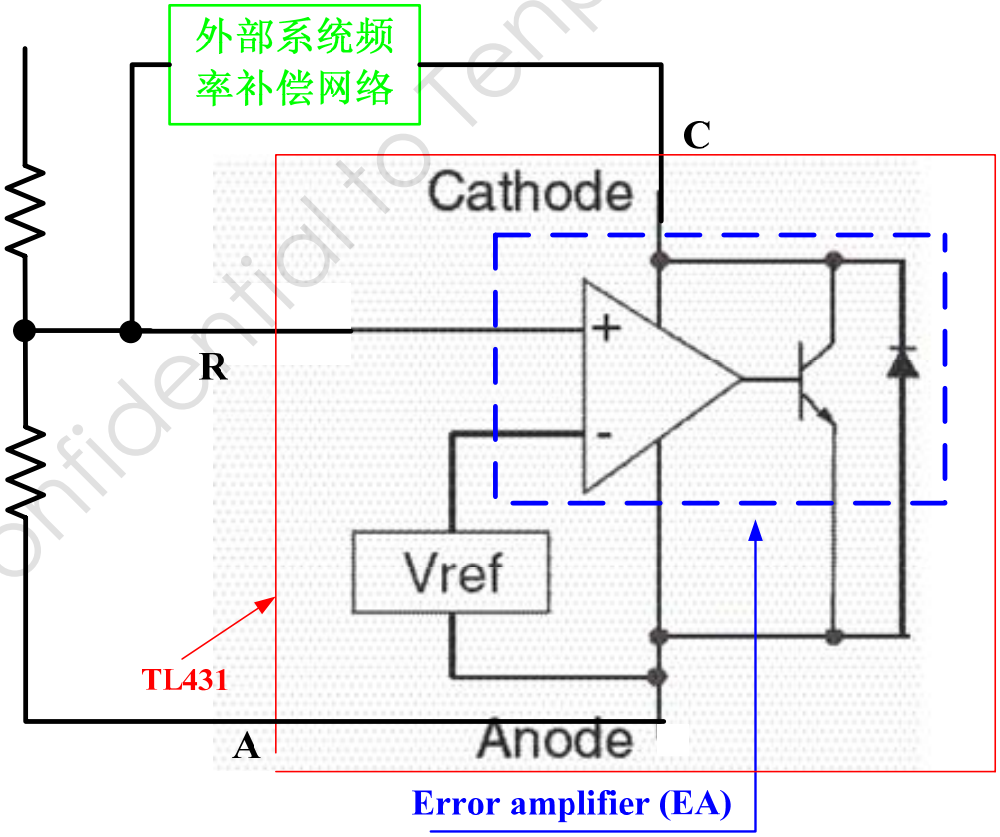
Flyback 系统控制流程图



On-Bright Confidential to Tenpao

TL431 及其等效模型





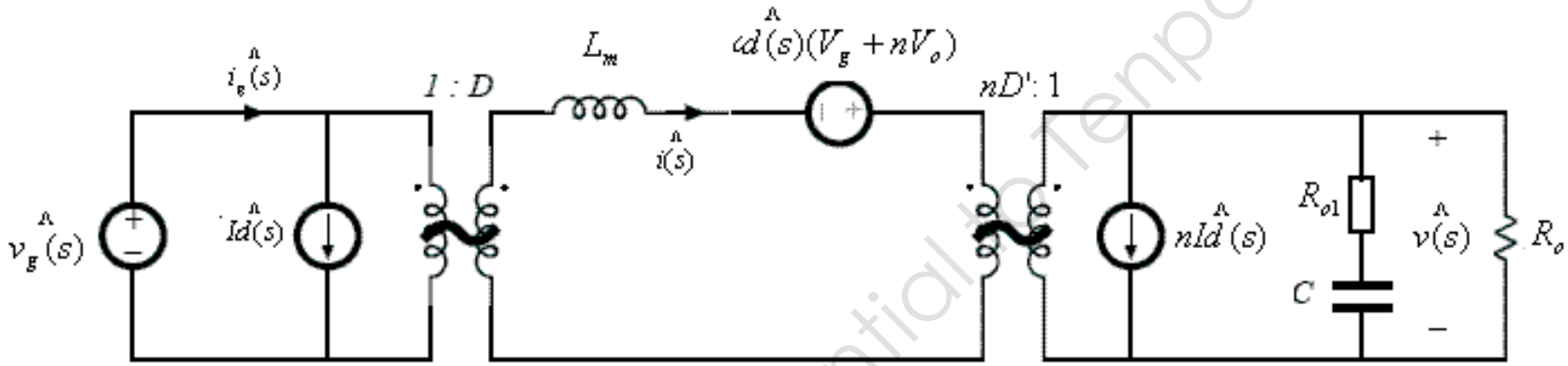
On-Bright Confidential to Tenpao

Power Stage小信号模型建立流程

1. 建立Power Stage中电感，电容等器件的时域微分方程组
2. 对方程组作状态空间平均化(state space averaging)， 也就是对一个开关周期内作平均
3. 微扰(perturbation)， 即对方程组作小信号扰动
4. 对方程组作线形化(linearization)
5. 得到等效的小信号模型

On-Bright Confidential to Lenpac

Flyback PWM Stage小信号模型(CCM)



- Power Stage传函：

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} \approx \frac{V_g}{nD'^2} \frac{(1+R_{o1}Cs)(1-\frac{sL_mD}{n^2R_o(1-D)^2})}{1+s\frac{L}{n^2D'^2R_o}+s^s\frac{LC_{o1}}{n^2D'^2}}$$

- 系统右半平面零点：

$$w_{rz} = \frac{n^2R_o(1-D)^2}{L_mD}$$

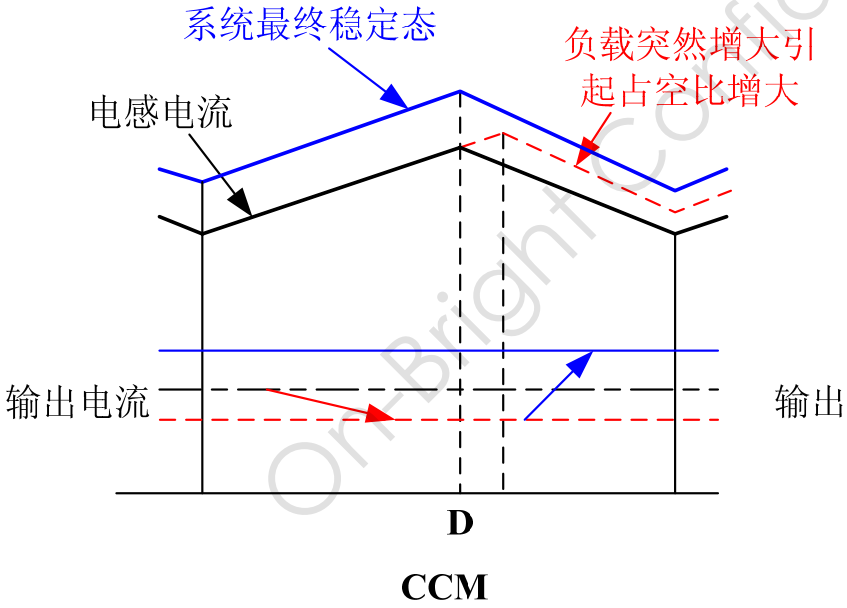
- 负载电容ESR 零点：

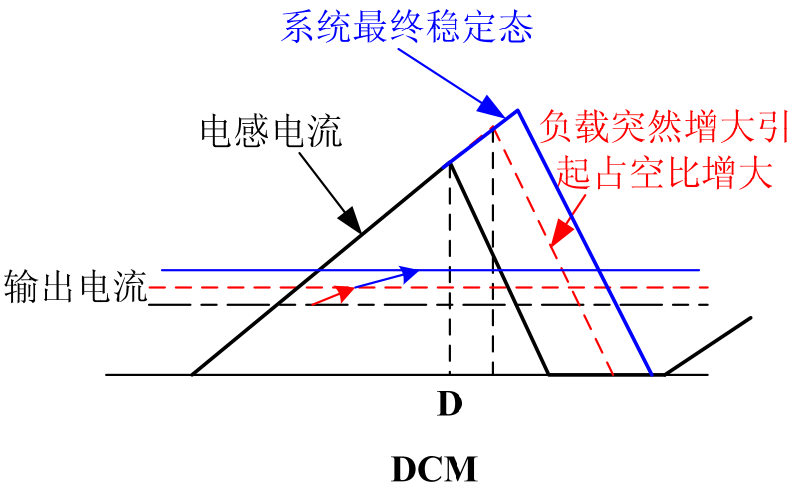
$$w_z = \frac{1}{R_{o1}C}$$

On-Bright Confidential to Tenpao

右半平面零点(RHZ)的直观理解

- RHZ在boost, buck-boost, flyback（占空比由输入输出电压和匝比决定)CCM中都存在, 而DCM中没有RHZ。
- 负载突然增加→输出电压下降→EA+PWM 反应→占空比**增大(Wrong Way)**→反激时间减小→输出电流减小(通过输出diode)→输出电压下降更多(临时)。此即典型RHZ响应特性。
- 在DCM中，占空比增大导致输出电流增大，故不存在此RHZ



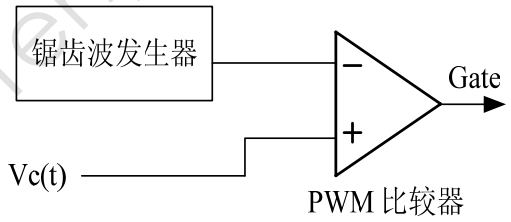


On-Bright Confidential - Template

PWM Stage 的小信号建模

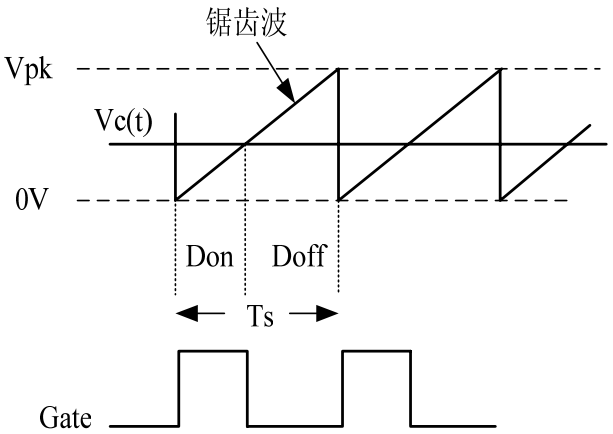
- 写出时域方程

$$d(t)=\frac{V_c(t)}{V_{pk}} \qquad for \qquad 0\le V_c(t)\le V_{pk}$$



- 微扰和线性化

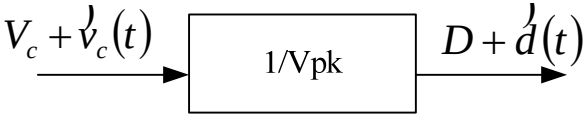
$$\begin{cases} v_c(t)=V_c+\hat{v}_c(t) \\ d(t)=D+\hat{d}(t) \\ D+\hat{d}(t)=\dfrac{V_c+\hat{v}_c(t)}{V_{pk}} \end{cases}$$



- 直流方程组、 交流小信号方程组

$$D=\frac{V_c}{V_{pk}} \qquad \hat{d}(t)=\frac{\hat{v}_c(t)}{V_{pk}}$$

- PWM Stage小信号模型



On-Bright Confidential to Tenpao

考虑斜率补偿后的Power Stage 传函

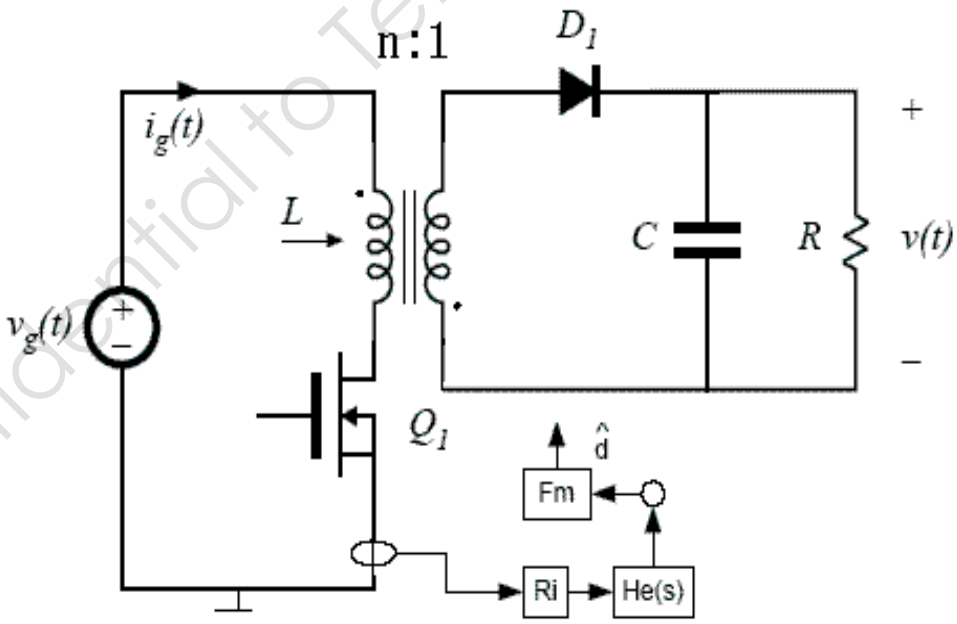
- 电流模式工作的PWM系统的电压环路内嵌入一个局部的电流环，从而改善系统的瞬态响应
- 电流模式PWM系统当D>50%时，存在Sub-harmonic震荡
- 斜率补偿能够消除此震荡
- 电流环小信号模型

On-Bright Confidential to Tenpao

考虑斜率补偿后的Power Stage传函(CCM)

- 采用电流模式控制，等效在电压环路内引入超前相位补偿，相当于引入微分函数He(s)：

$$H_e(s) = \frac{sT_s}{e^{sT_s} - 1}$$



On-Bright Confidential to Tenpo

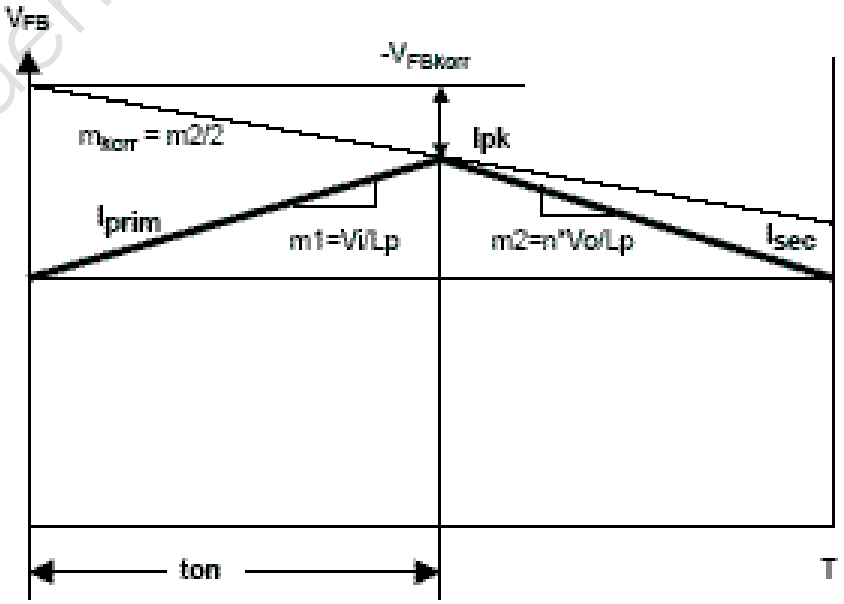
考虑斜率补偿后的Power Stage传函(CCM)

- CCM模式Flyback的斜率补偿

$$m_1 = \frac{V_g}{L}$$

$$m_2 = \frac{nV_o}{L}$$

$$m_{korr} = \frac{m_2}{2} = \frac{nV}{2L}$$

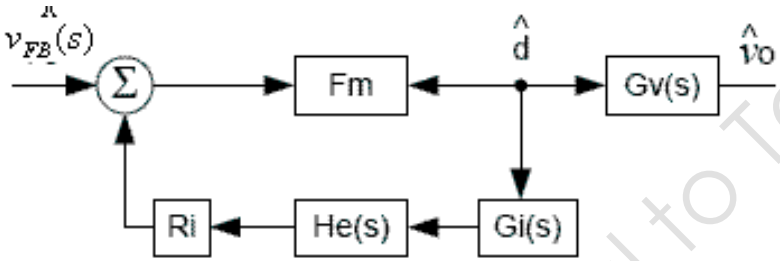


- Fm:

$$F_m = \frac{1}{(m_1 + m_2)T_s}$$

On-Bright Confidential to Tenpo

考虑斜率补偿后的Power Stage传函(CCM)

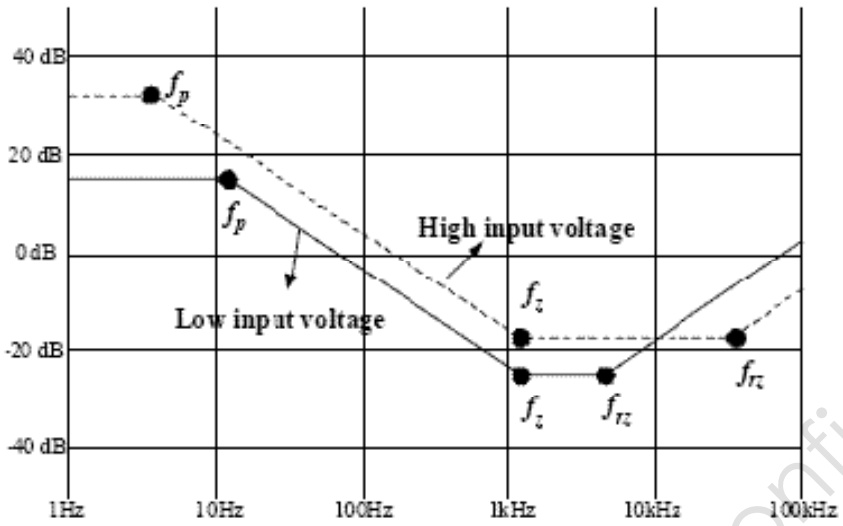


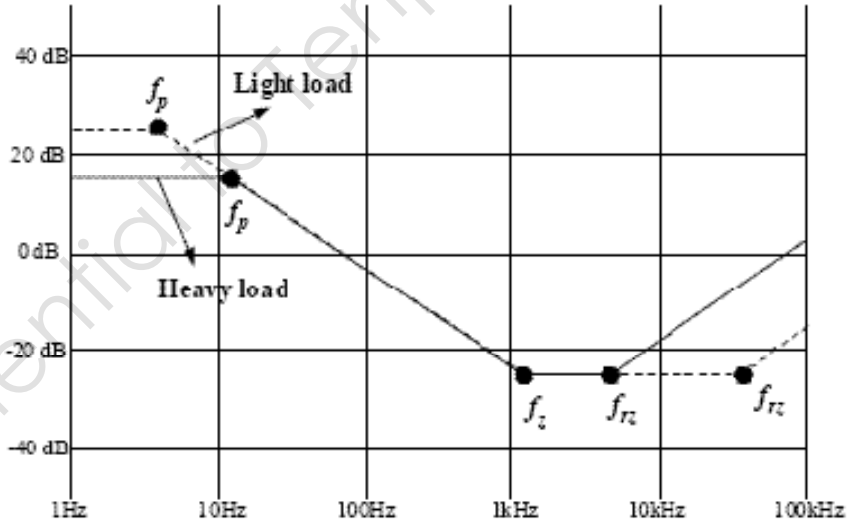
$$G(s)=\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_{FB}(s)}\approx\frac{nR_oV_g}{(2nV_o+V_g)R_{sense}}\frac{(1+R_{o1}Cs)(1-\frac{sL_mD}{n^2R_o(1-D)^2})}{1+\frac{CR_0s}{1+D}}$$

- 存在一个与负载等效电阻有关的滤波极点
- 存在一个电容ESR引起的零点
- 存在一个右半平面零点，该零点与输入电压、负载、电感量有关，很难补偿，设计时应该使环路带宽应该远离这个零点，以减小其影响

On-Bright Confidential to Tenpao

考虑斜率补偿后的Power Stage传函(CCM)





- 输入电压越低，右半平面零点频率越低→低压输入时有不稳 定倾向！
- 满载条件下的右半平面零点低于轻载状态→满载有不稳定倾向！

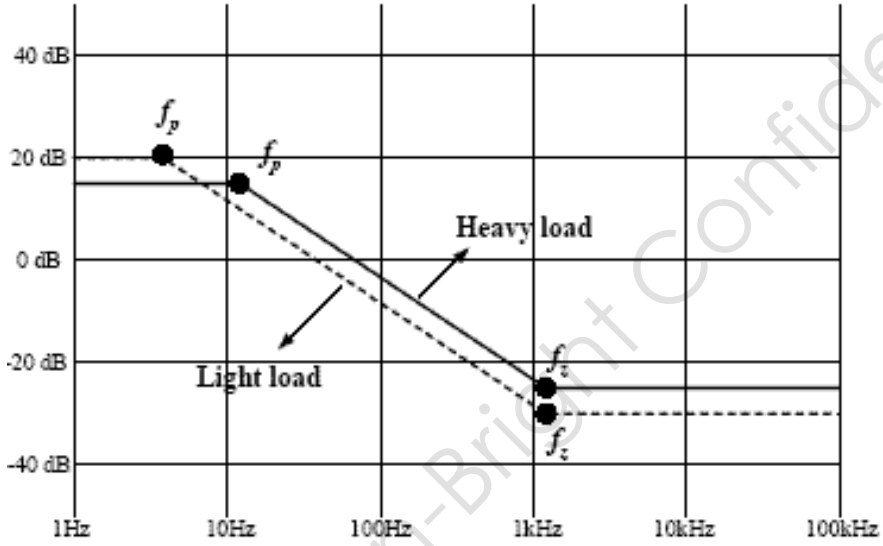
On-Bright Confidential Tenpdo

DCM模式下Power Stage 小信号传函

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_{FB}(s)} \approx \frac{V_0}{V_{FB}} \cdot \frac{1+R_{o1}C_{o1}S}{1+\frac{R_oC_{o1}}{2}s}$$

$$w_p = \frac{2}{R_oC_{o1}}$$

$$w_z = 1/R_{o1}C_{o1}$$

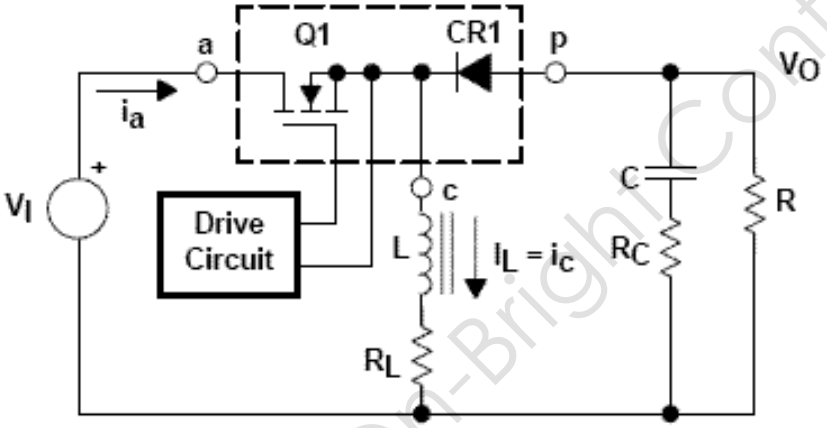


- 由于Power Stage 无右半平面零点(RHPZ)，所以相对于CCM而言，DCM Flyback系统更容易补偿！

On-Bright Confidential to Tenpao

电流模式与电压模式的直观理解

- 电压模式是**占空比直接调制**，变压器电感是开环状态，在外围电压回路中引入一个DC极点(s=0)
- 电流模式是**占空比间接调制**，变压器电感是闭环状态。
- 反激变换器类似于buck-boost架构，以buck-boost为例分析。
- 无论是电压还是电流模式，CCM中RHZ始终存在，且频率相同。



Buck-boost 电感两端压降为：

$$V_L = V_I D - V_O(1-D) = (V_I + V_O)D - V_O$$

小信号化后：

$$\hat{v}_L = (V_I + V_O)\hat{d} - \hat{v}_O(1-D) \cong (V_I + V_O)\hat{d}$$

电感电压电流小信号关系为： $\hat{i}_L = \hat{v}_L / sL$

输出电流与电感电流关系为(CCM)：

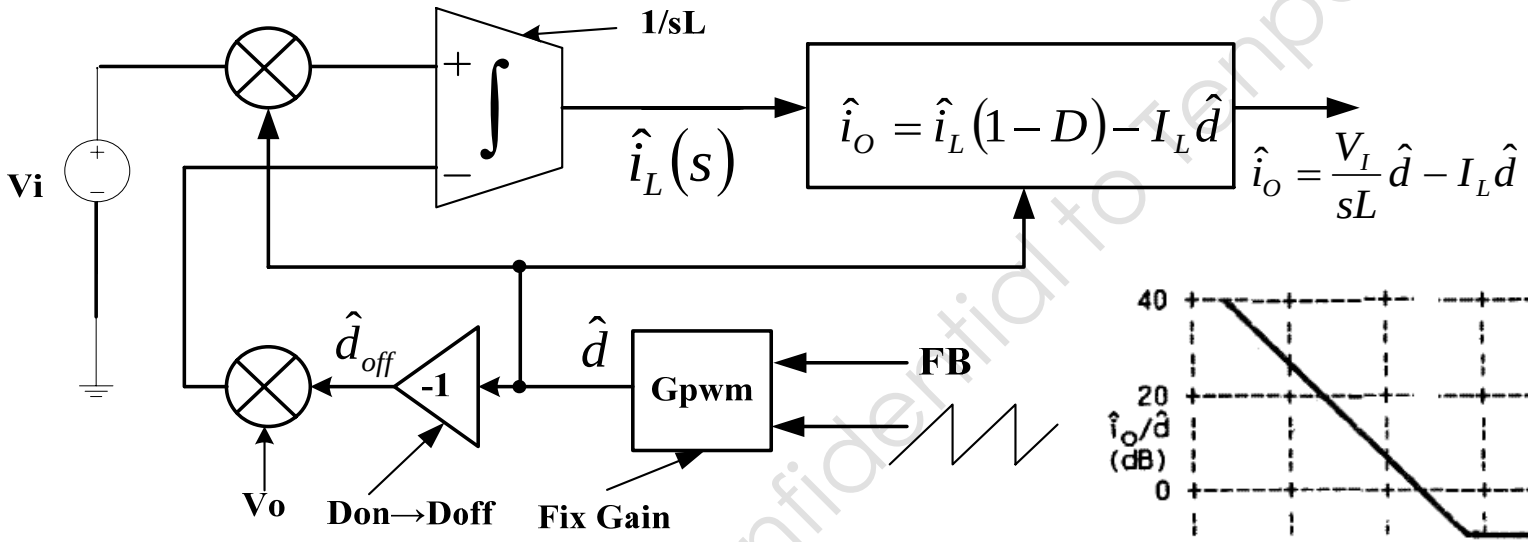
$$I_O = I_L(1-D)$$

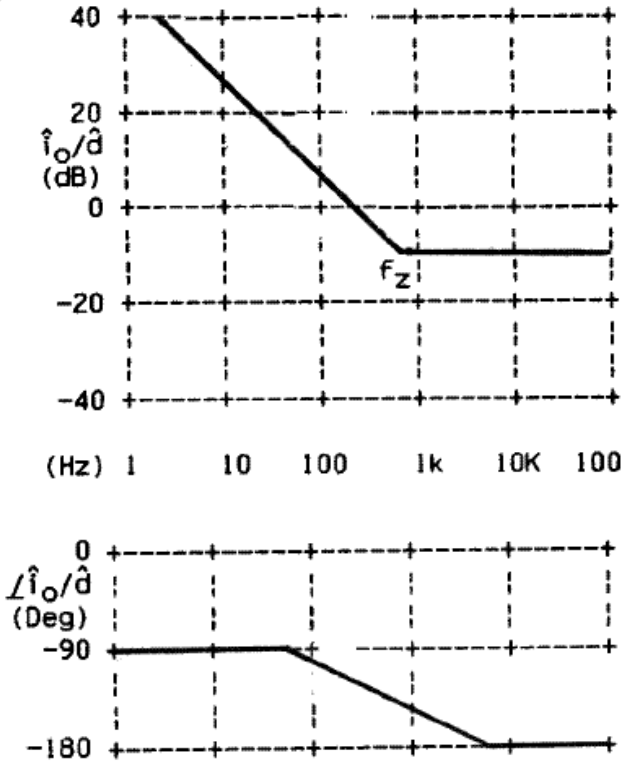
小信号化后：

$$\hat{i}_O = \hat{i}_L(1-D) - I_L\hat{d}$$

On-Bright Confidential to Tenpo

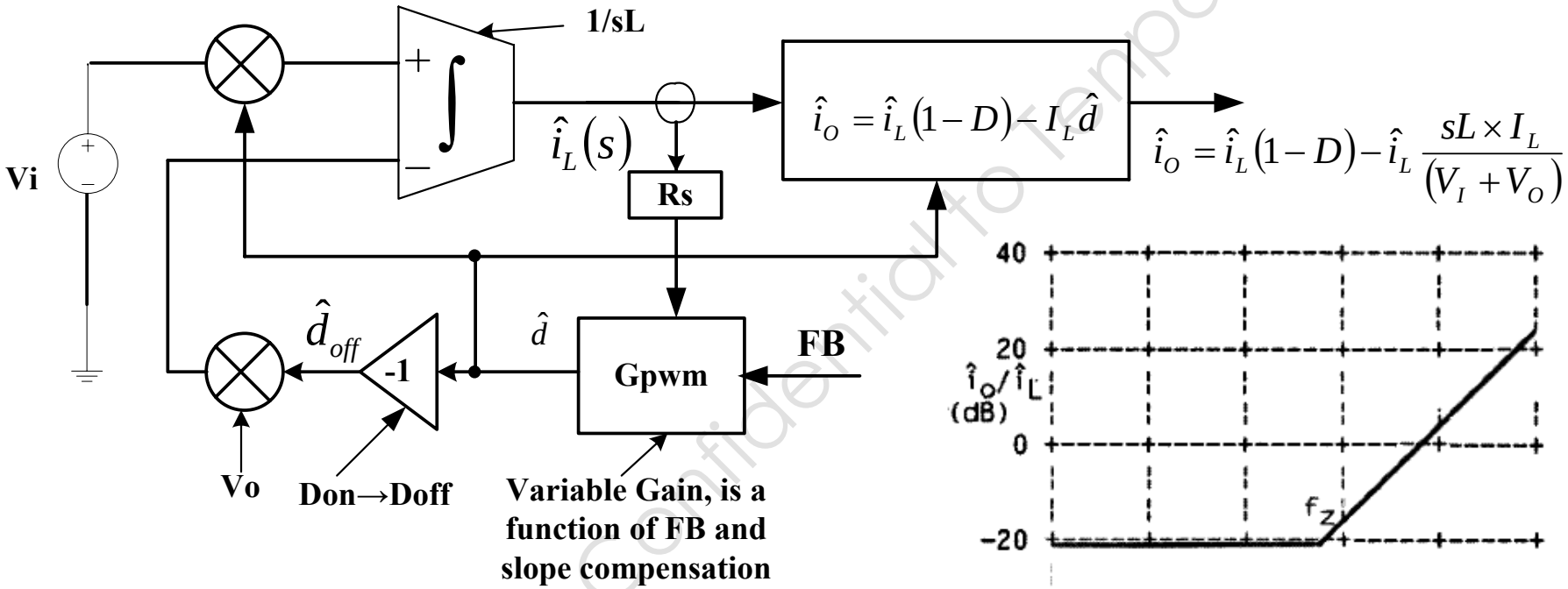
电压模式的信号流程图

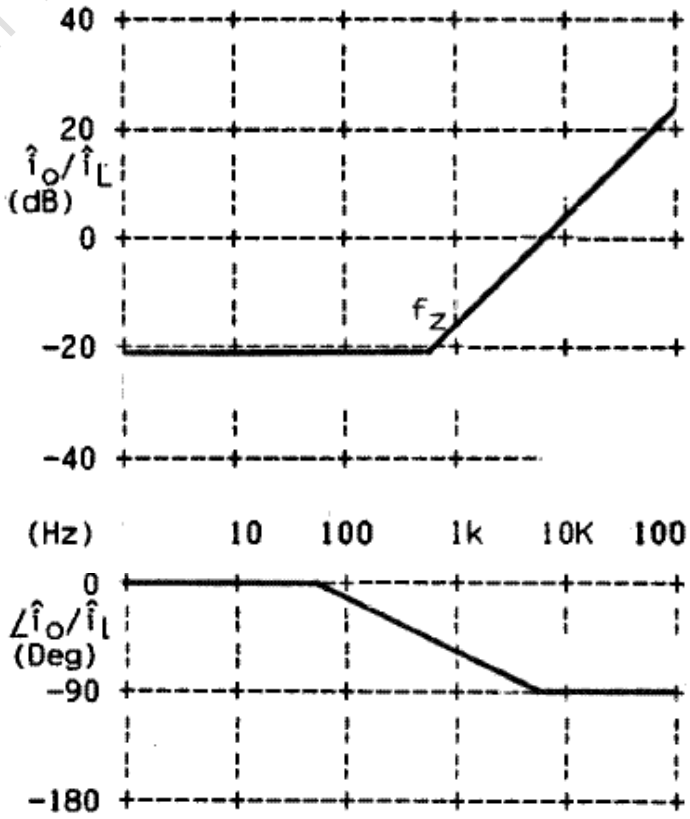




On-Bright Confidential to Tenpao

电流模式的信号流程图





On-Bright Confidential to Tenpao

负反馈环路稳定性

- 环路增益[loop gain T(s) T(s)包含了系统稳定性信息]
- 幅频-相频曲线，波特图
- 单位增益带宽(frequency @ T=0dB)
- 相位裕量(Phase margin)　>45°
- 增益裕量(Gain margin)　>-12dB

On-Bright Confidential to Renpao

零极点对环路稳定性的影响及环路带宽选择标准

1. 左半平面极点:　增益衰减，引起-90度相移
   右半平面极点:　不稳定，导致系统震荡
   左半平面零点:　增益增大，引起90度相移
   右半平面零点:　增益增大，引起-90度相移
2. 负反馈系统DC固有180度相移，　系统的剩下的零极点将对系统稳定性产生影响。
3. 系统的环路补偿必须使系统满足稳定性条件，而且要考虑所有负载和所有电压输入的情形。
4. 在flyback系统中，为了减小右半平面零点影响，可取单位增益带宽为1/6-1/10fs(开关频率)

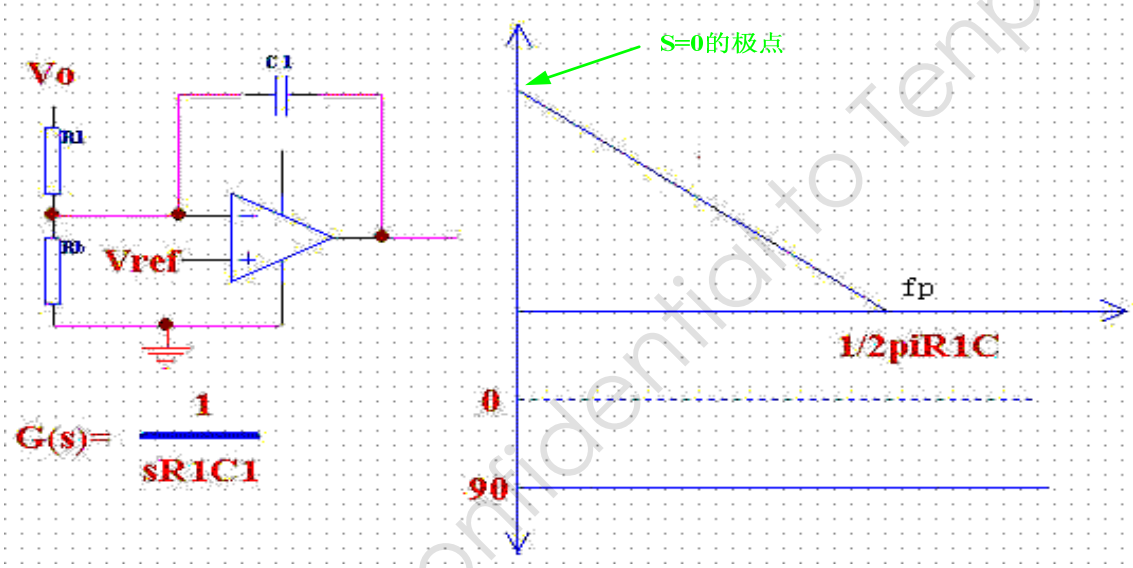
On-Bright Confidential for Tenpao

环路的补偿考虑

- 环路需要补偿以获得足够的相位裕量(Phase margin) 和增益裕量(Gain margin)，因为环路存在很多零极点， 低频的或者高频的。
- 环路补偿的目的是：**在带宽内等效为单极点系统.** 环路单位增益带宽内只有一个极点(一个导致90° 相移， 从而系统有180−90=90° 相位裕量)， 或者一个极点和一个零极点对(这样等效为环路带宽内只有一个极点)...
- 通常补偿网络放在EA (error amplifier, 例如TL431)的输入输出跨接，或者输出到地。在环路的其他地方，根据实际情况也可以适当引入一些零点或者极点以抵消环路带宽外的一些高频极点或者零点。

On-Bright Confidential to Senpao

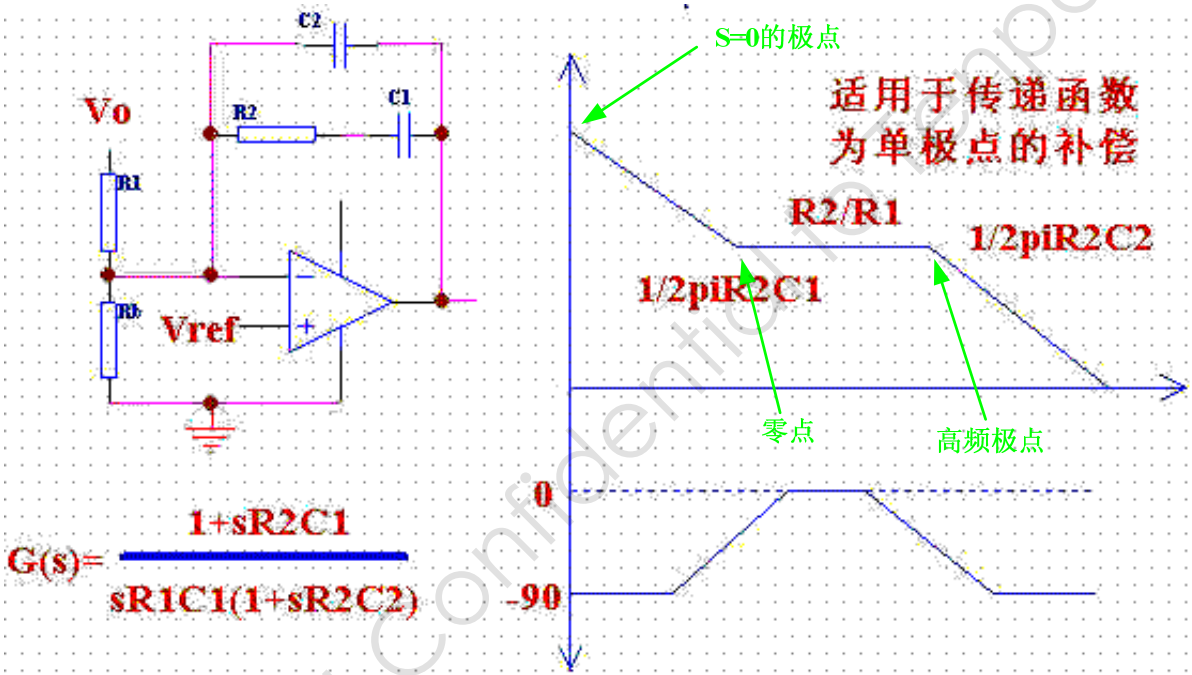
环路的补偿方法(1): 单极点补偿



- 补偿网络产生一个s=0(DC)极点
- 把控制带宽拉低，在功率部分或加有其他补偿的部分相位达到180度以前使其增益降到0dB
- 补偿所需元器件少，但闭环带宽小，暂态响应慢

On-Bright Confidential to Tenpao

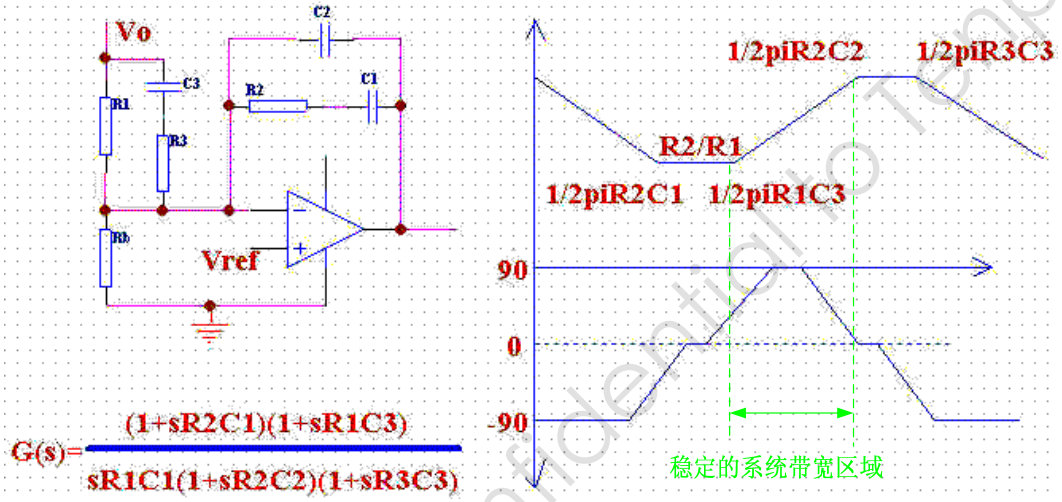
环路的补偿方法(2): 极点-零点补偿



- 常用的补偿方式.补偿网络产生一个s=0(DC)极点，而且通常负载及其滤波电容会产生一个低频极点， 所以补偿网络需要产生一个零点，而且位于系统带宽之内以稳定系统。
- 补偿网络的高频极点抵消输出滤波电容的ESR零点。

On-Bright Confidential to Tenpao

环路的补偿方法(3): 双极点-双零点补偿



- 复杂，适用于输出带LC滤波的拓扑结构中.
- 补偿网络产生一个s=0(DC)极点，以及两个零点和两个极点，其中两个零点补偿输出LC滤波引起的双极点。补偿网络的高频极点抵消输出滤波电容的ESR零点。
- 系统带宽在一定频率范围内稳定

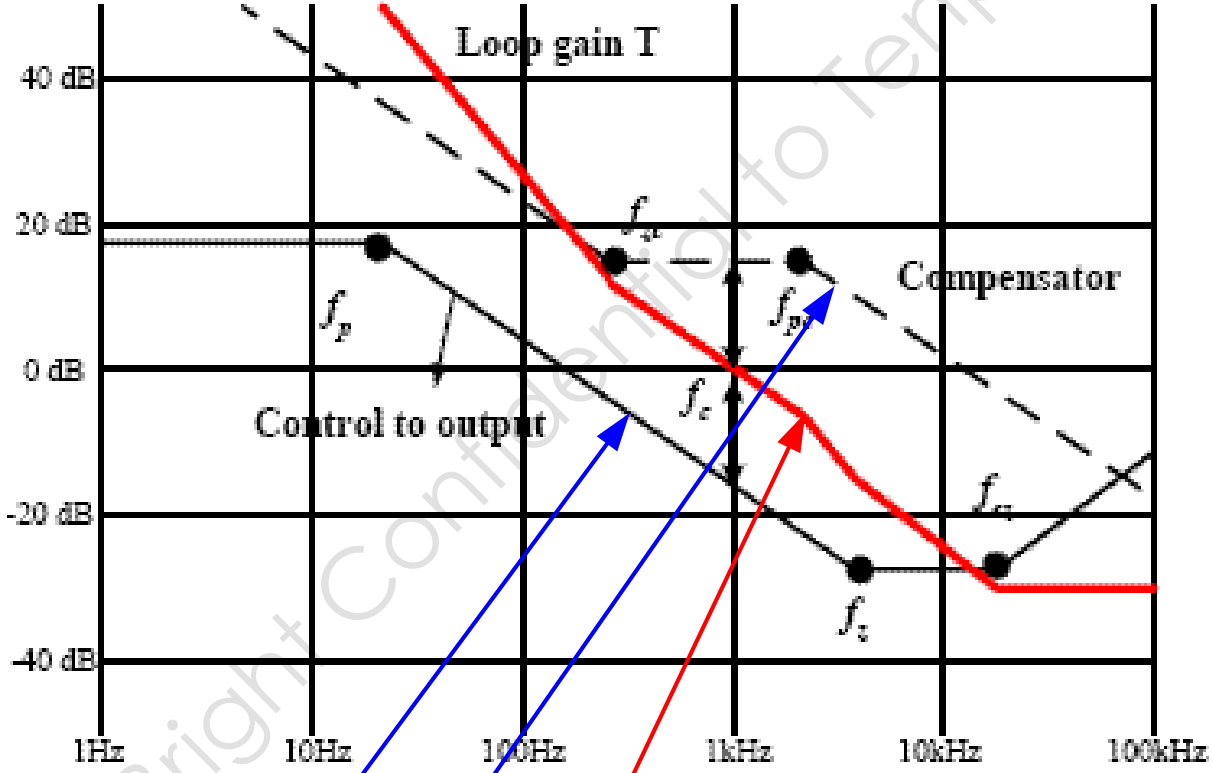
On-Bright Confidential to Tenpao

反激变换器反馈回路的设计[采用补偿方法(2)]

- 确定环路带宽fc：对于CCM工作模式，应将fc设定在低于1/3右半平面(RHP)零点的频率上， 以最大限度地减小RHP零点的影响。对于DCM模式，可将fc设定在较高的频率上，因为此时没有RHP零点。
- 当采用附加LC滤波器时，应将fc设定在低于1/3LC滤波谐振频率的地方以减小其影响，因为LC滤波器会导致系统电压回路有180°相移。
- 确定EA及其补偿网络的中频增益以抵消fc处的Power Stage增益。
- 将EA补偿网络产生的零点设置在fc/3附近。
- 将EA补偿网络产生的极点设置在3fc以上。

On-Bright Confidential to Lenovo

采用补偿方法(2) 的系统增益图



Power Stage Gain

Gain of EA with Compensation Network

Total Loop Gain

On-Bright Confidential to Tenpao

一个基于OB2263的12W反激变换器的控制回路设计案例

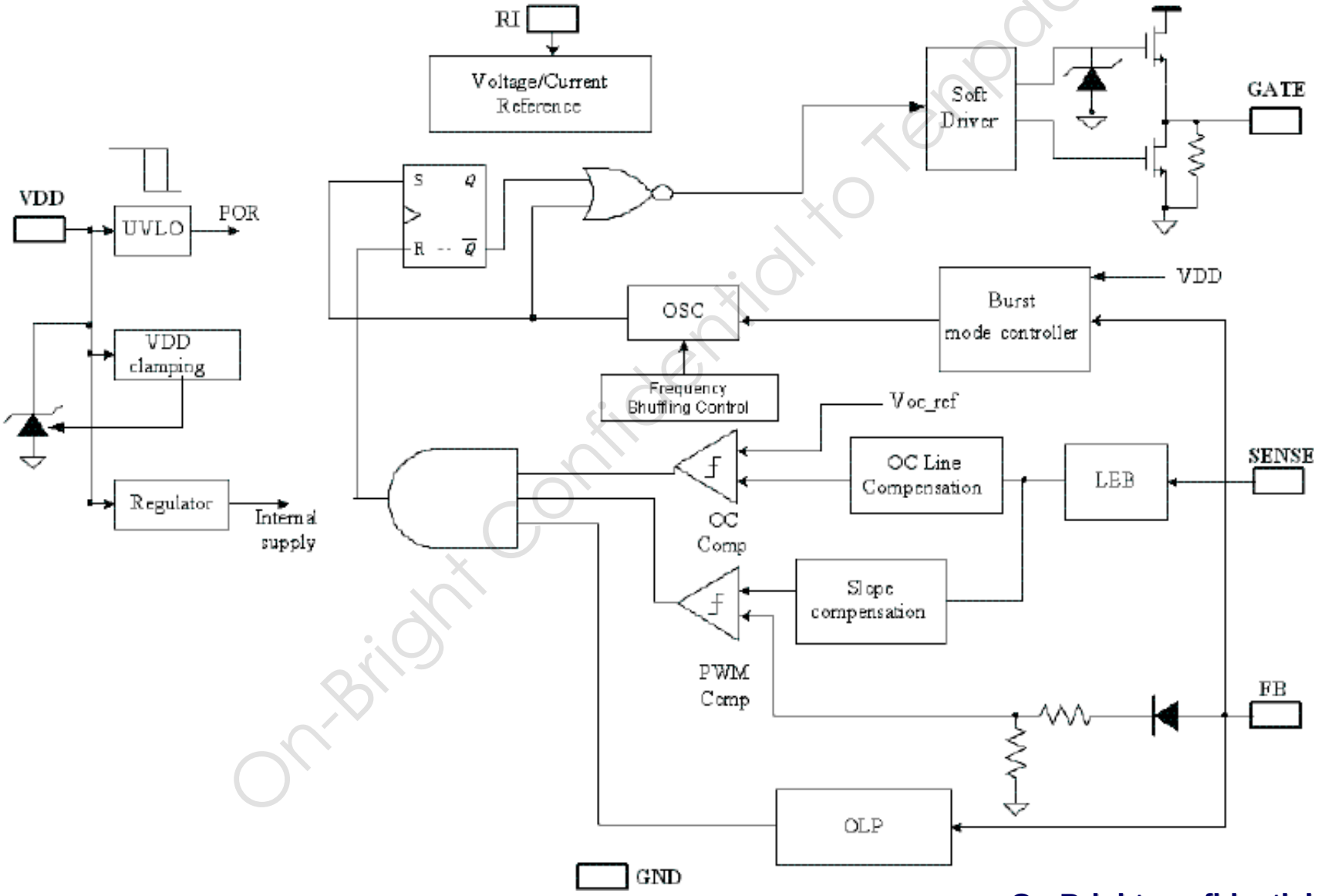
On-Bright Confidential to Tenpao

OB2263简介

- OB2263是昂宝电子推出的“绿色引擎”系列芯片之一的适用于中低功率的高性能、高度集成的电流模式PWM控制器。
- 相对于OB2262， OB2263内置了昂宝电子专利的频谱扩展技术以降低传导EMI。
- 内置的**Duty Cycle OCP**补偿减小系统外围器件。
- 昂宝电子专利的“Extended Burst mode”技术能大大提高系统待机时的效率。

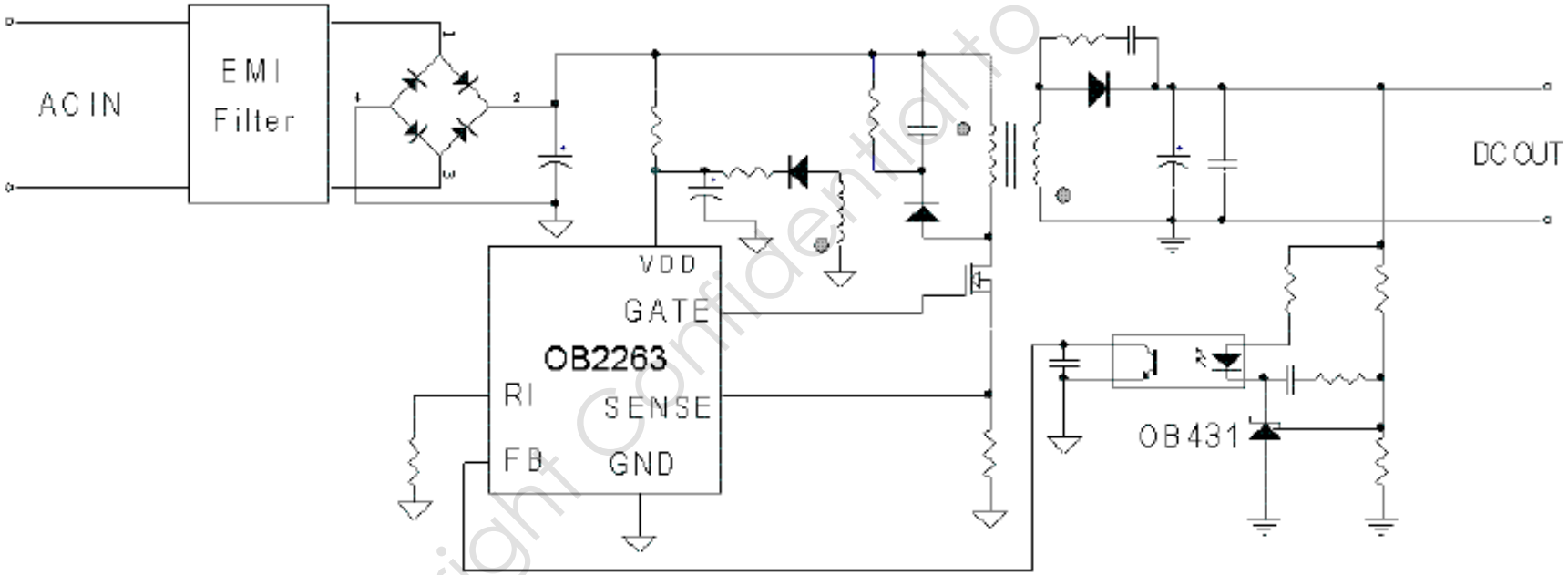
On-Bright Confidential to Taobao

OB2263 控制芯片内部模块图



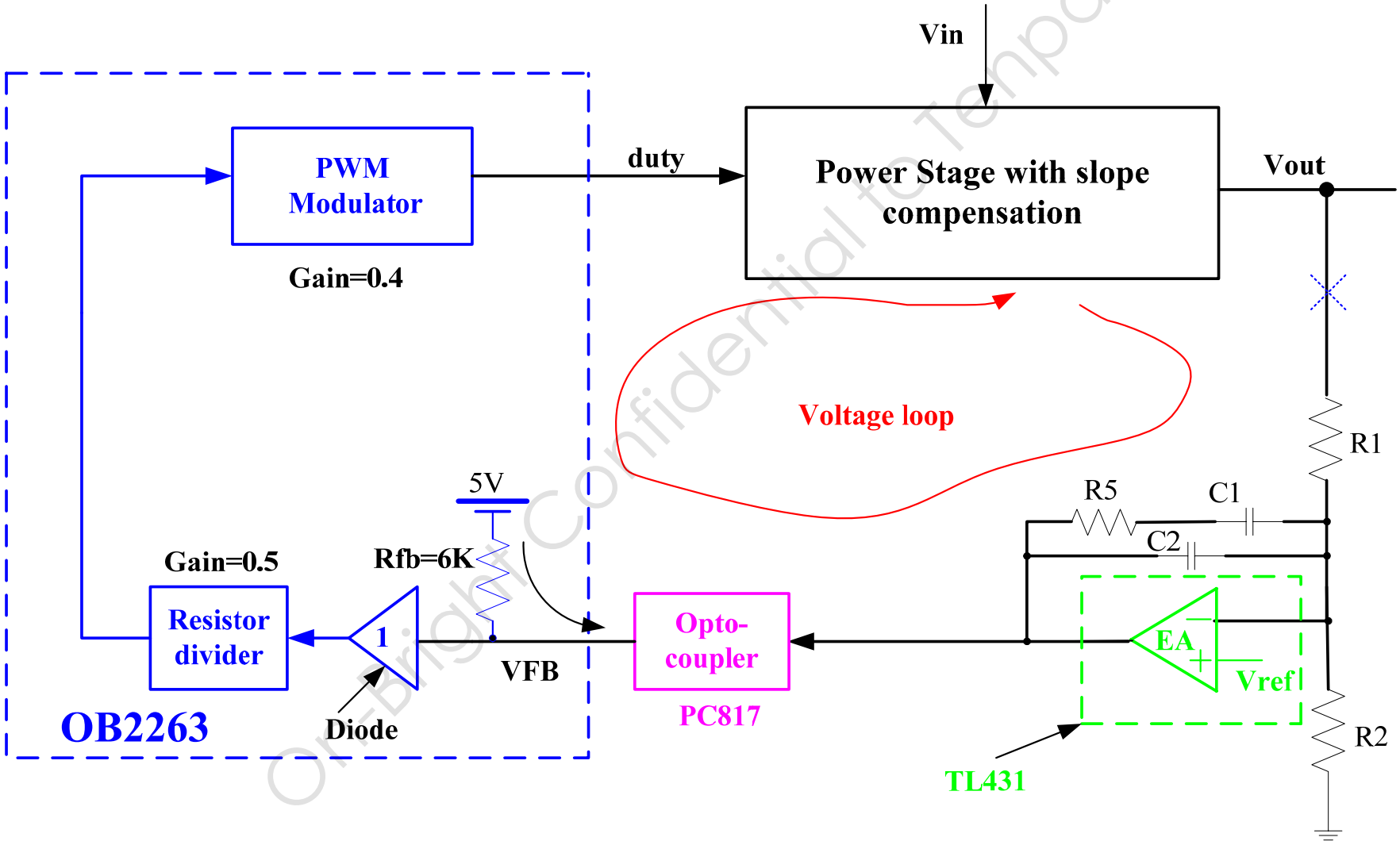
On-Bright Confidential to Tenpao

OB2263 控制芯片典型应用图



On-Bright Confidential to Tenpao

OB2263 系统控制流程图



On-Bright Confidential to Tenpao

基于OB2263的12W反激变换器控制回路设计实例

已知参数：

- 输入电压：90-264Vac
- 输入频率：47-63Hz
- 输出12V/1A（Po=12W）， 最低0.3A(CCM)
- 效率> 75%（Pin=12W）
- 初级电感量2.6mH
- 初级匝数140T 次级匝数 23T
- 输出滤波电容 220+470=690uF
- ESR=55mΩ/470UF
- 开关频率 fs=50kHz
- 电流检测电阻Rs=1.5欧姆
- 占空比Dmax=0.48

On-Bright Confidential to Tenpao

基于OB2263的12W反激变换器控制回路设计实例

Power Stage传递函数

$$G(s)=\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_{FB}(s)}\approx\frac{nR_oV_g}{(2nV_o+V_g)R_{sense}}\frac{(1+R_{o1}Cs)(1-\frac{sL_mD}{n^2R_o(1-D)^2})}{1+\frac{CR_0s}{1+D}}$$

采用极点-零点补偿放大器，传递函数 (参看附录)

$$\frac{\hat{v}_{FB}}{\hat{v}_o}=-\frac{K\cdot R_{FB}}{2\cdot R_3}\cdot\frac{1}{sR_1C_1}\cdot\frac{1+sR_5C_1}{1+sR_5C_2}$$

1) 确定Power Stage直流增益

$$A_{DC}=\frac{nR_oV_g}{(2nV_o+V_g)R_{sense}}=\frac{nR_o(1-D)}{(1+D)R_{sense}}=\frac{6.09\times12\times0.52}{1.48\times1.5}\approx17.1=24.7dB$$

On-Bright Confidential to Tenpao

基于OB2263的12W反激变换器控制回路设计实例

2) 确定最大的闭环系统单位增益带宽fc

- 右半平面零点频率

$$f_{RHPZ}=\frac{n^2R_o(1-D)^2}{2\pi L_m D}=\frac{6.09^2\times12\times0.52^2}{2\pi\times2.7\times10^{-3}\times0.48}=14.77K$$

- 开关频率fs=50kHz，所以选择单位增益带宽fc=1.5K

3) 确定输出滤波器极点。电源负载最轻时，输出滤波器极点位置最低

$$f_{fp}=\frac{1}{2\pi R_L C_o}=\frac{1}{2\pi\times\frac{12}{0.3}\times690\times10^{-6}}=5.77Hz$$

$$G_{xo}=20\lg\left(\frac{f_{xo}}{f_{fp}}\right)-G_{DC}=20\lg\frac{1500}{3.8}-24.7=23.6dB \qquad A_{xo}=10^{\left(\frac{G_{xo}}{20}\right)}=15.1$$

4) 确定在fc处使Power Stage增益提升到0dB所需要增加的增益量

On-Bright Confidential to Tenpao

基于OB2263的12W反激变换器控制回路设计实例

5) 确定EA补偿网络的零点和极点的位置

$$f_{ez} = f_c / 3 = 500Hz$$

$$f_{ep} > 3 f_c = 4.5KHz$$

取 $f_{ep} = 5KHz$

6) 计算EA补偿网络的参数

已知TL431参考电位Vref=2.5V，光藕PC817A传输比为K≈1，导通压压降为Vfd=1.2V，最大工作电流为Ifmax=10mA， 计算R1, R2, R3, R4, C1, C2, C5

1. 取为R2=9.3K， 则R1为 $R_1 = R_2\left(\frac{V_o}{Vref}\right) - 1 = 50.22k$

   取R1=51K

2. 根据PC817A的最大工作电流选择R3，TL431的最小工作电流选择R4

Ifbmax=5V/Rfb=5/6K=0.83mA Ifbmin=(5-Vfb)/Rfb=(5-4.2)/6K=0.13mA

$$R3 \geq \frac{(Vo - (V_{FD} + V_{ref}))}{I_{f\max}} = \frac{12 - 1.2 - 2.5}{10mA} = 830$$

On-Bright Confidential to Tenpao

基于OB2263的12W反激变换器控制回路设计实例

$$R4 \le \frac{\left(V_{FD} + (R3 \cdot \frac{I_{FB\min}}{K})\right)}{I_{KA\min}} = \frac{1.2 + 1k \cdot \frac{0.13mA}{1}}{1mA} = 1.33k$$

取R3=1k　R4=1k

3. 计算EA补偿网络参数C1, C2, C5

$$R_5 = A_{xo} \frac{2 \cdot R_3 \cdot R_1}{K \cdot R_{FB}} = 15.1 \times \frac{2 \times 1k \times 51k}{3 \times 6k} = 85.6K$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \times f_{ep} \times R_5} = \frac{1}{2\pi \times 5k \times 85.6K} = 0.37nF$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{ez} R_5} = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 85.6k} = 3.7nF$$

取C1=4700pF, C2=470pF, R5=84K

误差放大器提升的相位量如下：

$$\varphi_{Boost} \approx 90^0 - arctg\left(\frac{f_{ex}}{f_c}\right) - (90^o - arctg\left(\frac{f_{RHPZ}}{f_c}\right)) = 69.5^0$$

On-Bright Confidential to Tempo

基于OB2263的12W反激变换器控制回路设计实例

补偿后环路带宽以及实际零极点频率分布为：

1) 补偿网络产生的s=0 (DC)极点
2) 输出滤波极点: f=5.8Hz (轻载）
3) 补偿网络产生的零点: f=394Hz (C1=4.7nF)
4) 单位增益带宽：fc=1.5KHz
5) 输出滤波电容ESR产生的零点：

$$f_{z(ESR-\min)} \approx \frac{1}{2\pi \times 55 \times 10^{-3} \times 690 \times 10^{-6}} = 4.2KHz$$

6) 补偿网络产生的高频极点：f=4KHz (C2=470pF)
7) Flyback系统Power Stage 右半平面零点：f=14.77KHz
8) 其他高频极点： 比如FB端口的RC产生的极点，等等

On-Bright Confidential to Tenpao

附录: 431及其补偿网络传函的推导(补偿方法2)

$$v_{FB} = -I_{FB} \cdot R_{FB}$$

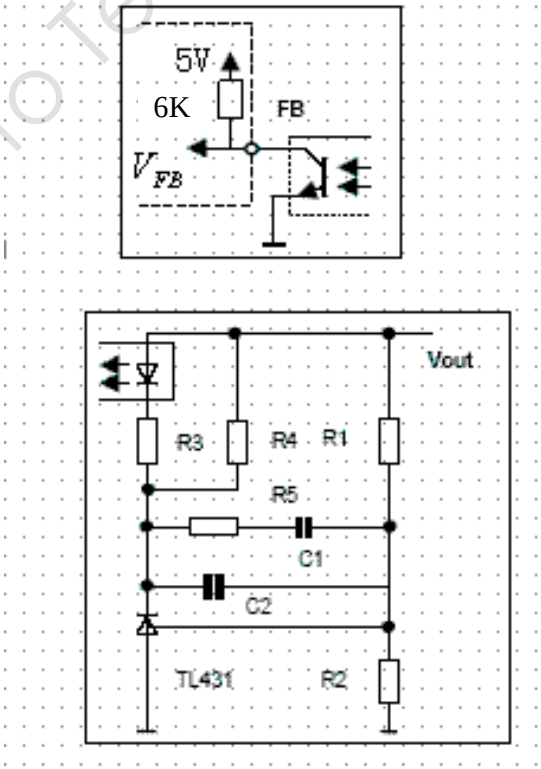
$$I_{FB} = k \cdot I_{LED}$$

$$I_{LED} = \frac{v_o - (V_f + v_z)}{R_3}$$

$$v_z \approx -\frac{v_o}{R_1 C_1 s} \cdot \frac{R_5 C_1 s + 1}{R_5 C_2 s + 1} \quad if \quad C_1 >> C_2$$

$$I_{LED} = \frac{v_o + \frac{v_o}{R_1 C_1 s} \cdot \frac{R_5 C_1 s + 1}{R_5 C_2 s + 1}}{R_3}$$

$$I_{LED} \approx v_o \cdot \frac{1}{R_3 R_1 C_1 s} \cdot \frac{1 + R_5 C_1 s}{1 + R_5 C_2 s}$$



整理上式，则传递函数为

$$\frac{\hat{v}_{FB}}{\hat{v}_o} = -\frac{K \cdot R_{FB}}{R_3} \cdot \frac{1}{R_1 C_1 s} \cdot \frac{1 + R_5 C_1 s}{1 + R_5 C_2 s}$$

On-Bright Confidential to Tenpao

总结

1) 以反激变换器为例讨论了开关电源环路分析方法

2) 以反激变换器为例讨论了开关电源环路补偿方法

3) 一个基于OB2263的12W系统的环路参数设计实例

On-Bright Confidential for Tenpao

参考文献

1. “Fundamentals of Power Electronics”, Second Edition, Robert W Erickson, Dragan Maksimovic, University of Colorado, Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-7270-0, 2000

2. OB2263 datasheet

On-Bright Confidential to Tenpao

Thank you
Any Questions?