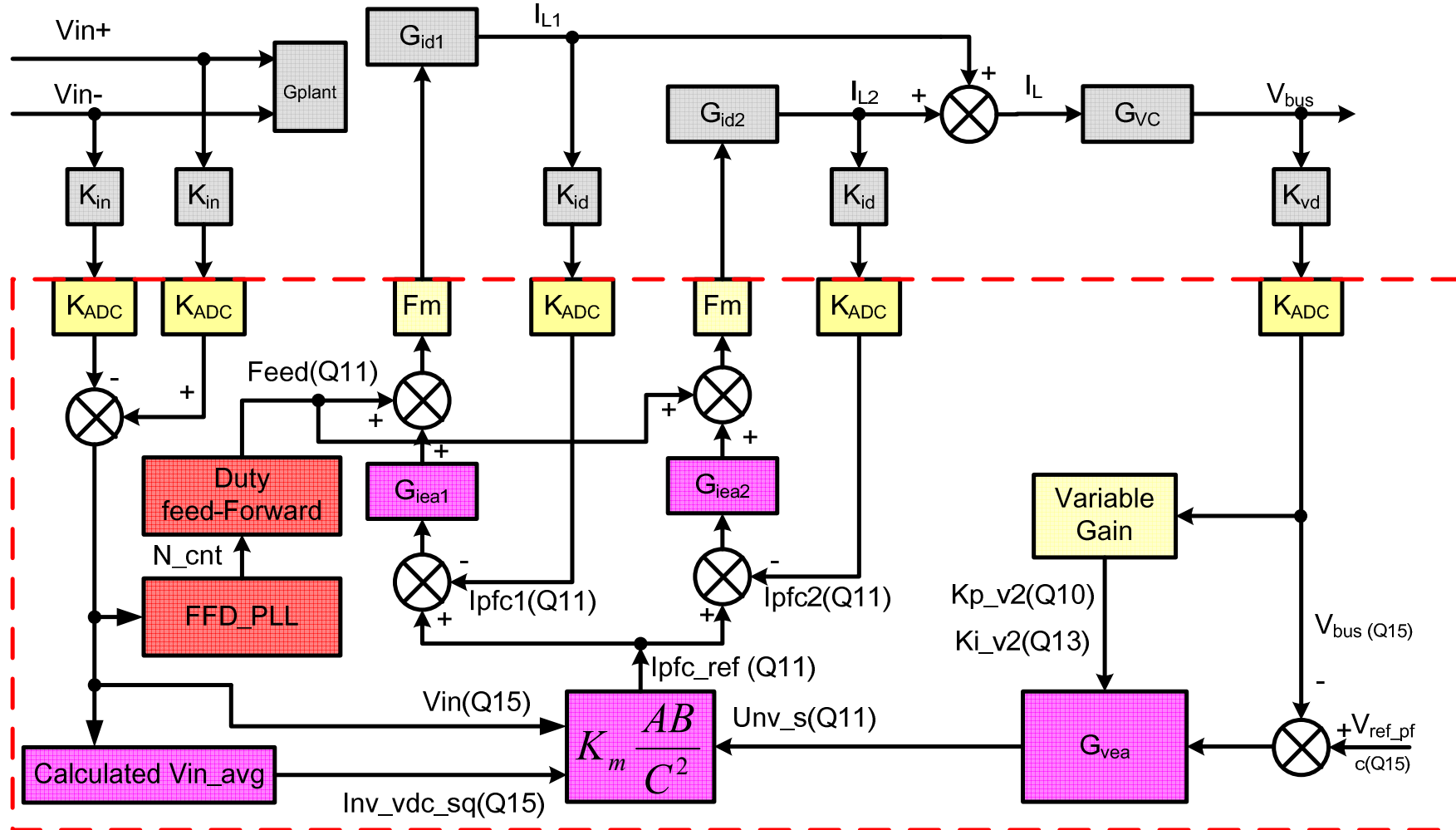


Digital control Train

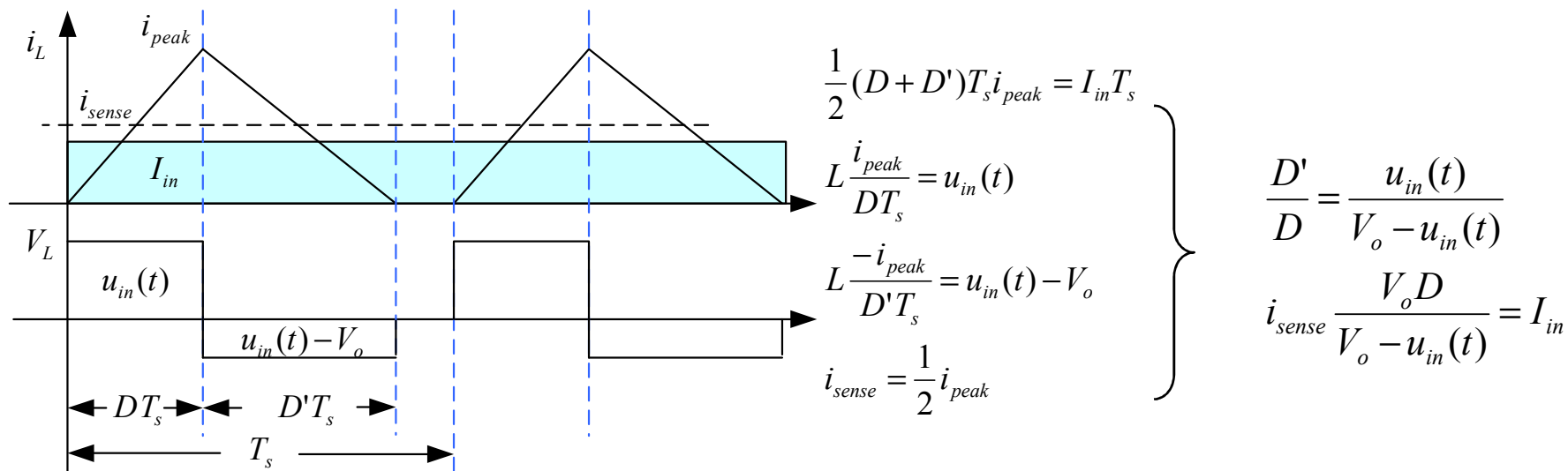
Interleaving PFC的控制框图



目录

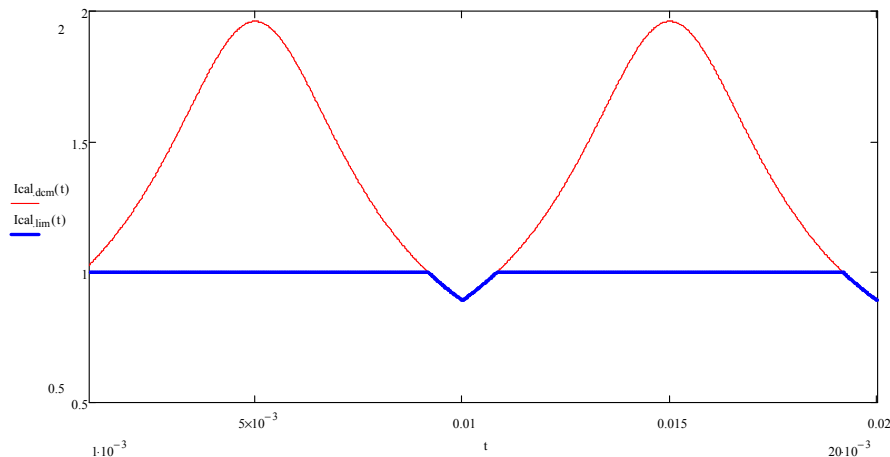
1. Interleaving PFC的系统控制框图
2. DSP中的锁相原理与实现
3. 前馈在PFC控制中的应用
4. 驱动延时带来问题的解决方法
5. PDP 保护
6. AC dropout
7. 变增益
8. AC 电压监控与保护
9. Bus 电压的监控与保护
10. Vbus 电压调整
11. 中断程序的架构

DCM的平均电流



定义矫正系数 I_{cal}

$$I_{cal} = \frac{V_o D}{V_o - u_{in}(t)} \begin{cases} D = D_{ccm}(t) \Rightarrow I_{cal} = 1 \\ D = D_{dcm}(t) \Rightarrow I_{cal}(t) = \frac{V_o D_{dcm}(t)}{V_o - u_{in}(t)} \end{cases}$$

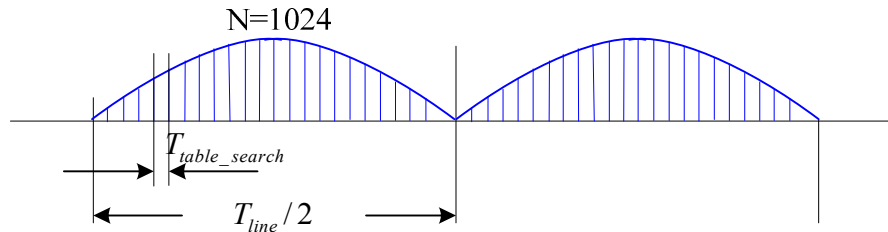


➤通常输入电压和输出电压会使用同样的分压比，因此，他们会使用同一个定标值，上面这个公式可以直接运算

DSP中的锁相原理与实现

锁相在DSP中的原理

在DSP中首先建立一个标准正弦表，它包含1024个点

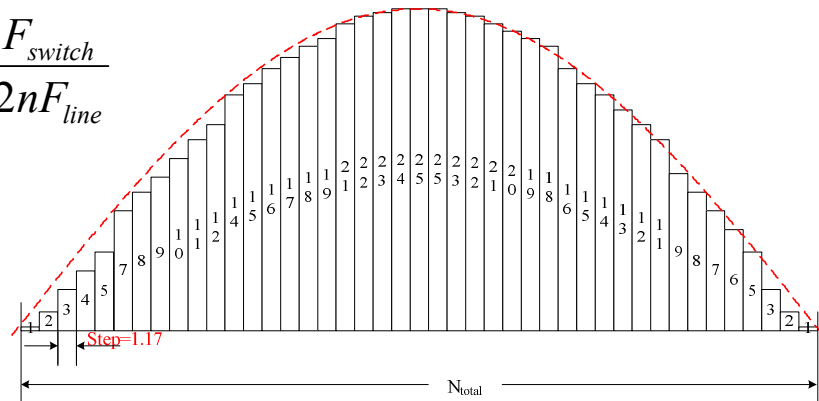
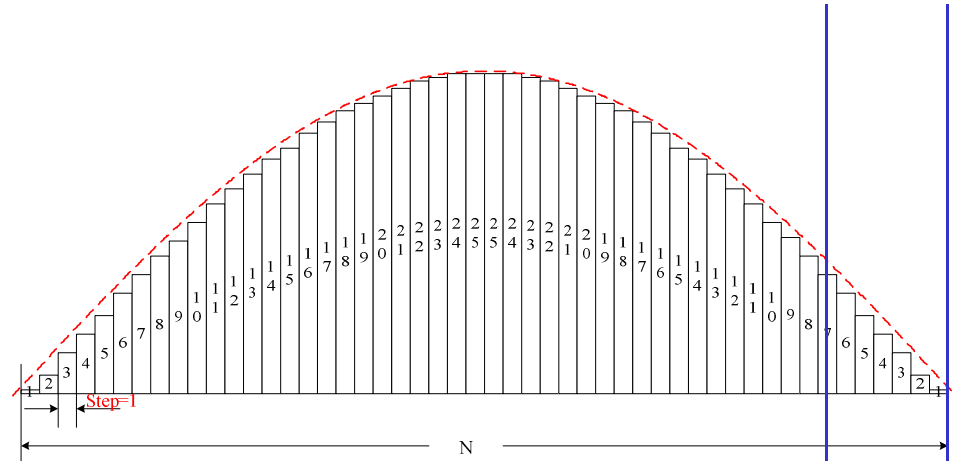


其中每个点之间的间隔是用于查表的时间差，如何让被查表组合起来的图形最接近我们的输入50Hz正弦波，就是锁相环的目的。

$$N_{total} = \frac{T_{line}}{2T_{table_search}} = \frac{T_{line}}{2} F_{table_search} = \frac{T_{line}}{2} \frac{F_{switch}}{n} = \frac{F_{switch}}{2nF_{line}}$$

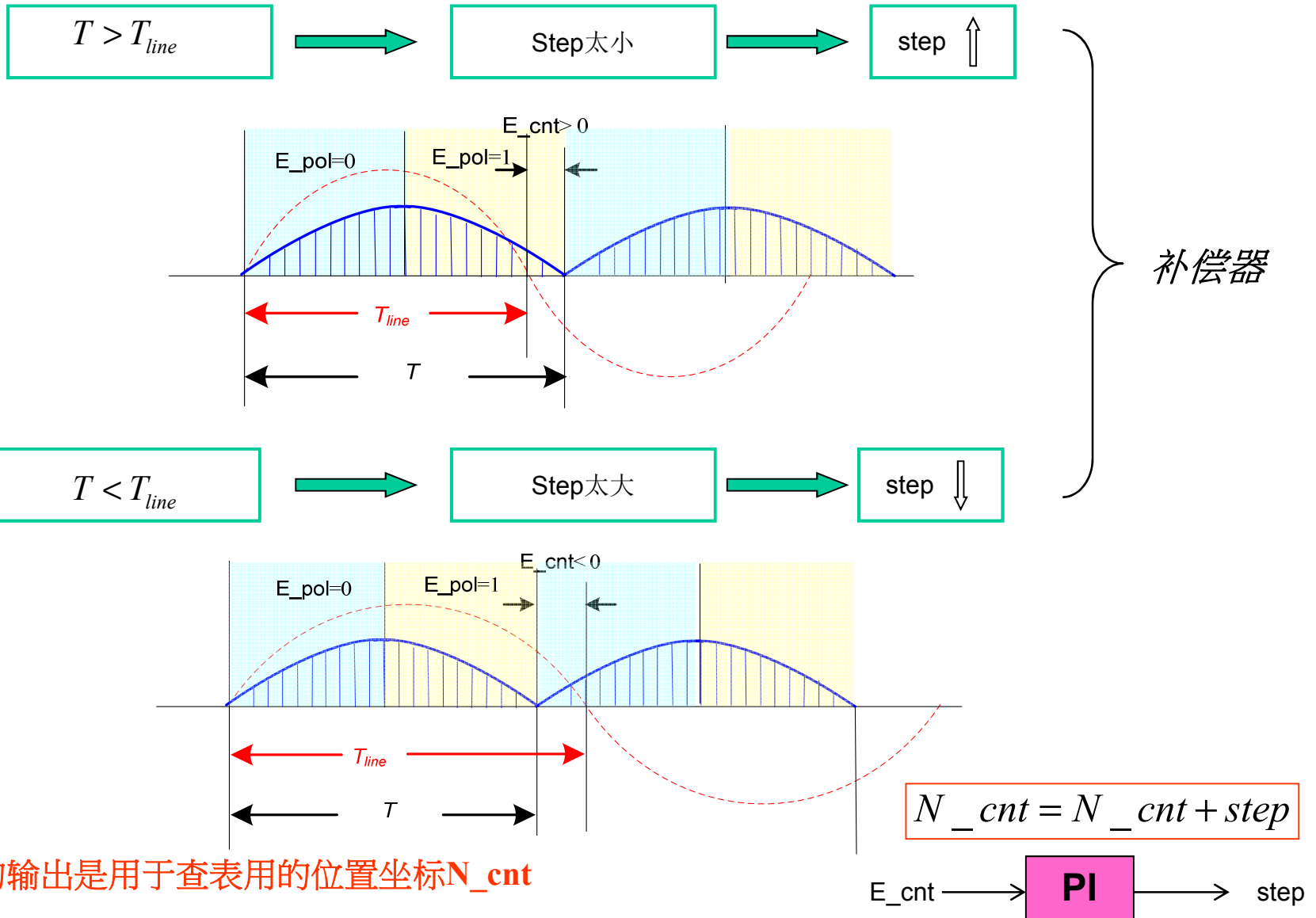
$$Step = \frac{1024}{N_{total}}$$

要让锁相环的结果和实际波形没有无差，Step不是整数，而是小数。因此需要定标，以提高Step的精度



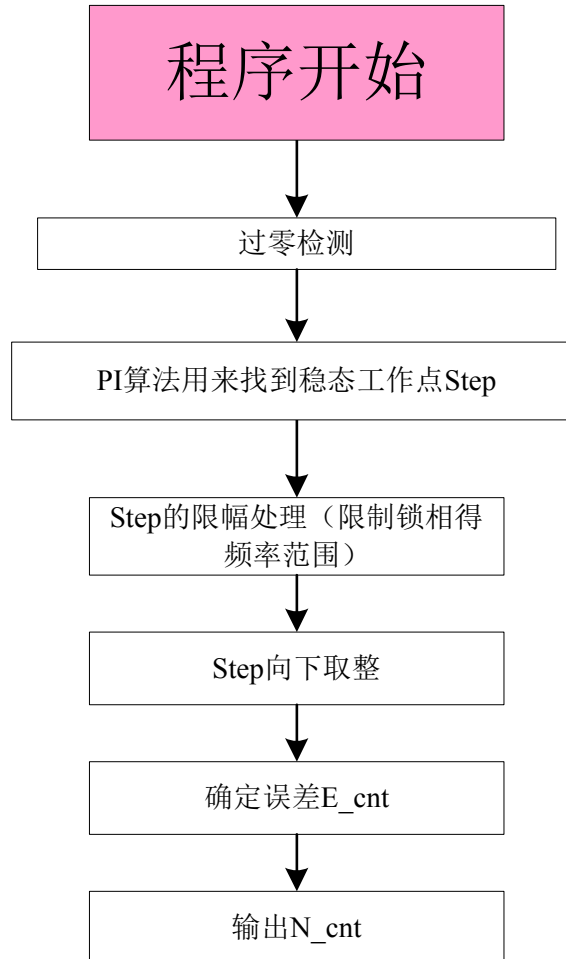
Δt

锁相环的控制



➤ 锁相环的输出是用于查表用的位置坐标 N_{cnt}

锁相环的控制原理



$$F_{limit} = \frac{Step_{limit}}{2^{12}} \frac{f_{switch}}{2n \cdot 1024}$$

前馈在**PFC**控制中的应用

前馈

前馈的概念：

前馈就是预估，也可以理解为主动给一个稳态工作点，这样让调节器的调节范围缩小在稳态点周围，可以让被控量的特性更加接近理想波形。也可以理解为让电路工作在一个特殊的开环工作点上。

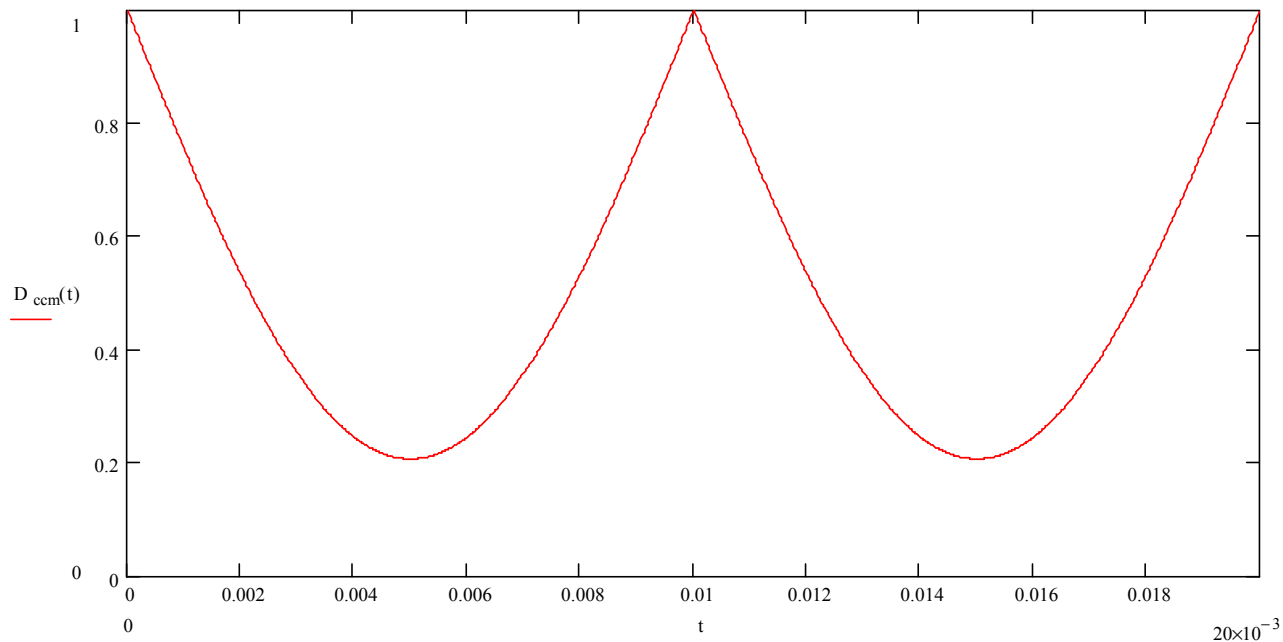
前馈的关键点：

1. 准确的预估
2. 动态下不能因为前馈而影响电路的正常工作，前馈的加入和撤出不能太突然

PFC CCM 工作条件下的稳态duty

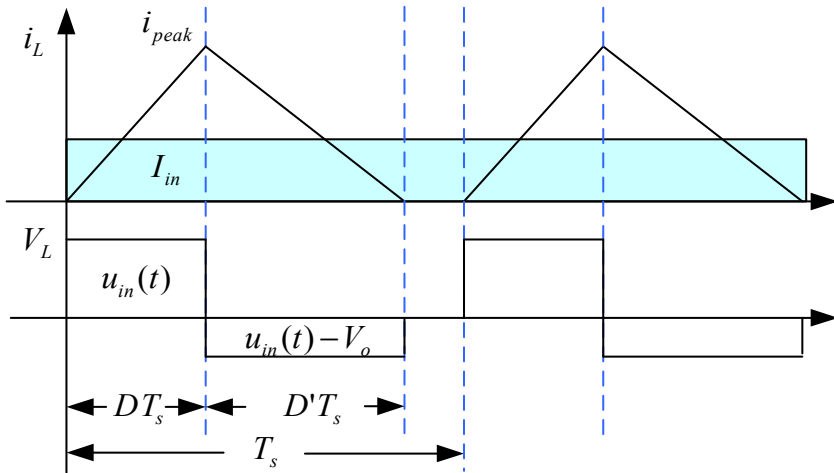
$$V_o = 410 \quad V_{acpeak} = 230\sqrt{2}$$

$$u_{in}(t) = |V_{acpeak} \sin 2\pi f_{line} t| \quad D_{ccm}(t) = 1 - \frac{u_{in}(t)}{V_o}$$



PFC的duty前馈

PFC不是只有工作在CCM条件下，在AC电压过零点附近，有一段时间是工作于DCM状态的，因此，我们需要找到一个正确前馈duty。



$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2}(D + D')T_s i_{peak} &= I_{in} T_s \\ L \frac{i_{peak}}{DT_s} &= u_{in}(t) \\ L \frac{-i_{peak}}{D'T_s} &= u_{in}(t) - V_o \\ D &= D_{dcm} \\ I_{in} &= I_{acpeak} \sin(\omega t) \\ u_{in}(t) &= V_{acpeak} \sin(\omega t) \\ V_{acpeak} \cdot I_{acpeak} &= 2P_{in} \end{aligned} \right\} D_{dcm} = \frac{1}{V_{acpeak}} \sqrt{4P_{in} L f_s \cdot \frac{V_o - u_{in}(t)}{V_o}}$$

PFC DCM status

$$\Rightarrow D_{dcm}(t) = \frac{1}{V_{acpeak}} \sqrt{4P_{in} L f_s \cdot \frac{V_o - u_{in}(t)}{V_o}} = \sqrt{4L f_s} \cdot \frac{1}{V_{acpeak}} \cdot \sqrt{P_{in}} \cdot \sqrt{D_{ccm}(t)}$$

PFC实际工作的duty

$$V_o = 410 \quad V_{acpeak} = 230\sqrt{2}$$

$$P_{in} = 1450$$

$$L = 483\mu H$$

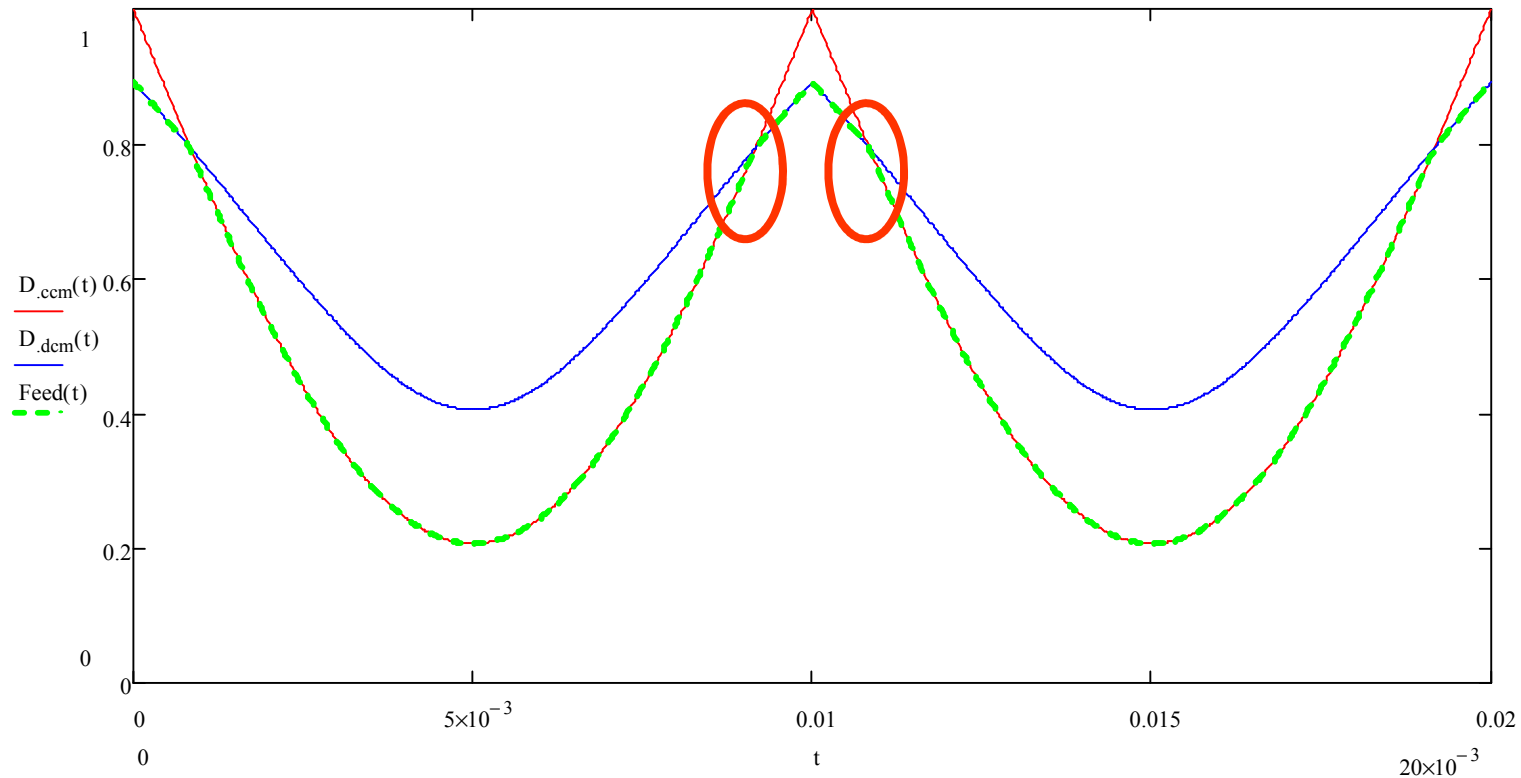
$$f_s = 30kHz$$

$$u_{in}(t) = |V_{acpeak} \sin 2\pi f_{line} t|$$

$$D_{ccm}(t) = 1 - \frac{u_{in}(t)}{V_o}$$

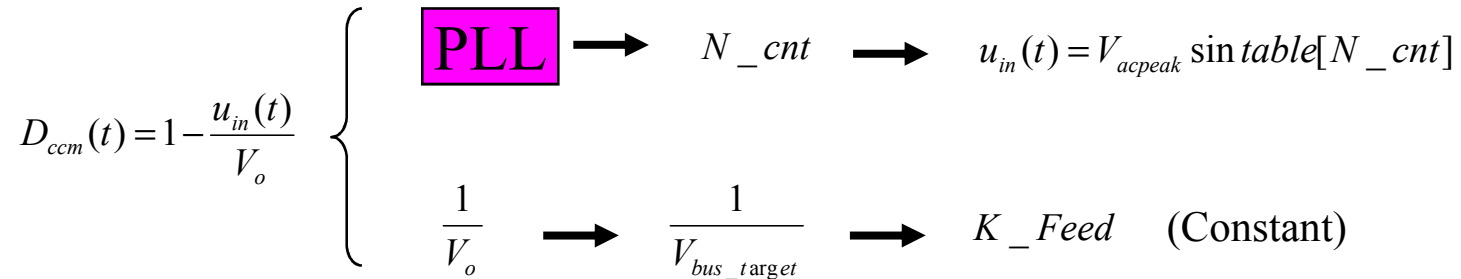
$$D_{dcm}(t) = \sqrt{4Lf_s} \cdot \frac{1}{V_{acpeak}} \cdot \sqrt{P_{in}} \cdot \sqrt{D_{ccm}(t)}$$

$$Feed(t) = \text{Min}[D_{ccm}(t), D_{dcm}(t)]$$



➤切换点会伴随输出功率不同而不同

DSP如何算前馈duty



$$D_{dcm}(t) = \sqrt{4Lf_s} \cdot \frac{1}{V_{acpeak}} \cdot \sqrt{P_{in}} \cdot \sqrt{D_{ccm}(t)}$$

其中会用到根号表，通过查表来获得对应的输入功率和CCM duty的平方根值。

original	Square	Q(10) fix point number
0	0	0
1	1	1024
2	1.414	1448
...
1021	31.953	32720
1022	31.968	32740
1023	31.984	32750

$\sqrt{4Lf_s}$ 常数

$\frac{1}{V_{acpeak}}$ 在乘法其中已经算了1/C2，不过是经过定标后的值，需要化为实际值

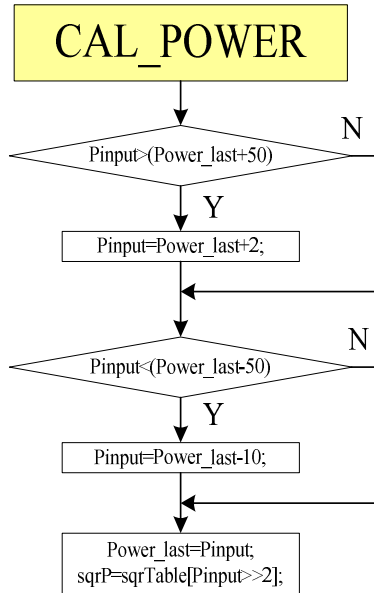
$\left. \begin{array}{l} \sqrt{P_{in}} = \sqrt{V_{acrms} \cdot I_{acrms}} \\ \sqrt{D_{ccm}(t)} \end{array} \right\}$ 使用根号表来查找

For example: $P_{in} = 1450w$ Q0 的真实值

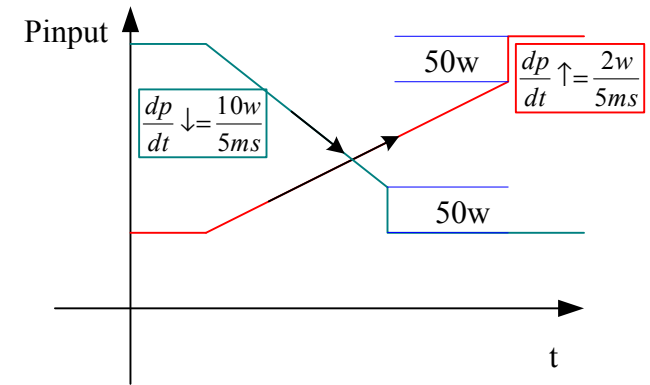
$sqrP = sqrtable[P_{in} \gg 2] = 19483 = 38.05 \times 2^9$ Q9 的定标值

duty加入与撤出

$$P_{input} = I_{inpp1} \cdot V_{acpp1} \cdot P_{fix_TO_P_{real}}$$

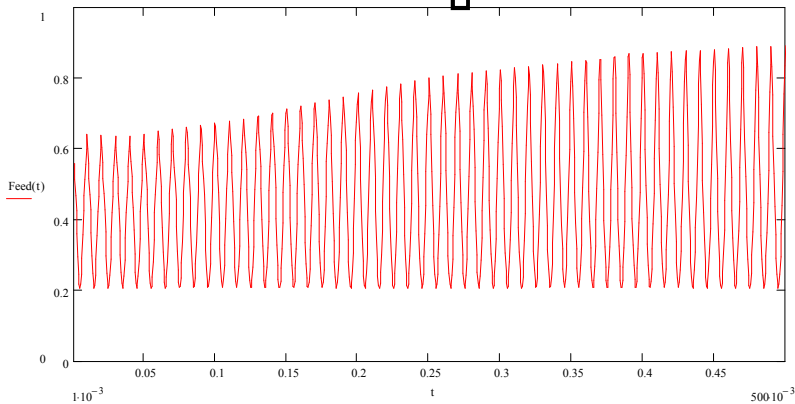


Power dynamic

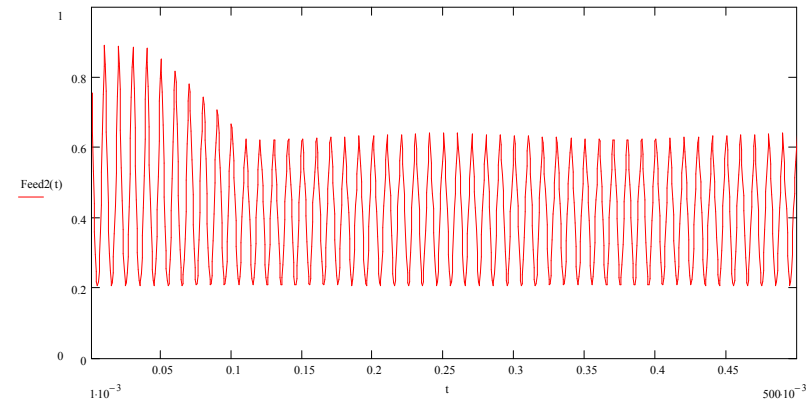


$$D_{dcm}(t) = \sqrt{4Lf_s} \cdot \frac{1}{V_{acpeak}} \cdot \sqrt{P_{in}} \cdot \sqrt{D_{ccm}(t)}$$

Power ↑

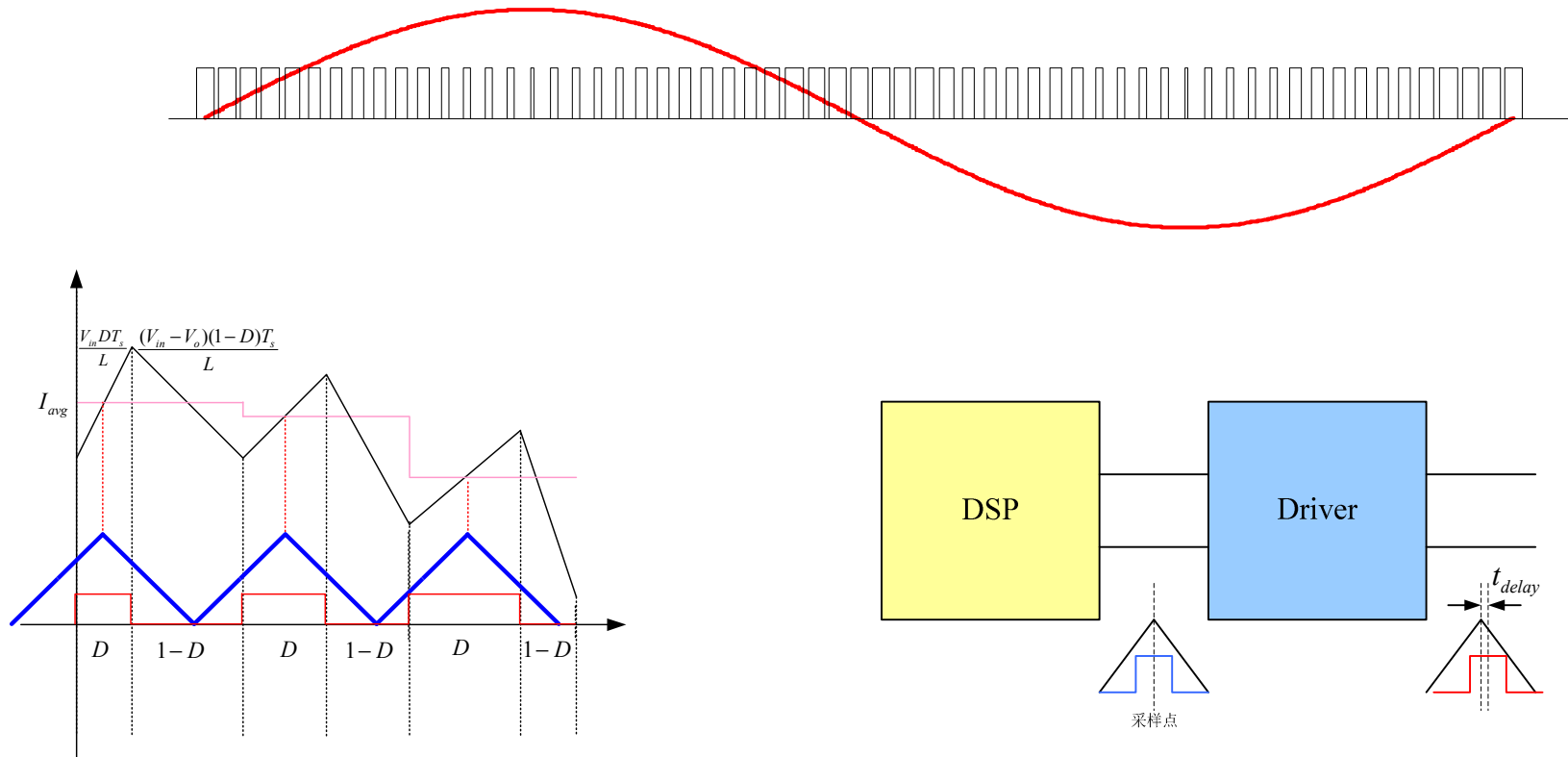


Power ↓



驱动延时带来问题的解决方法

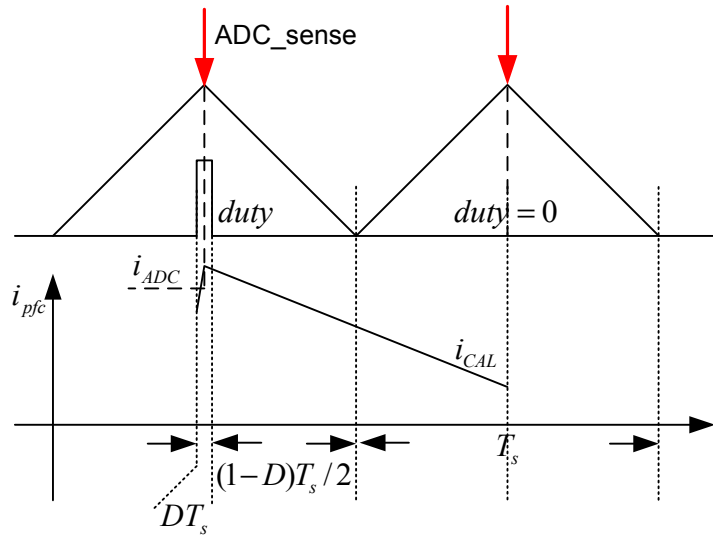
PFC duty的特性



AC电压的峰值点，duty很小，考虑driver的延时 t_{delay} ，可能会出现采样不到电流的情况。此时如果还使用采样电流给电流内环做运算，会发出大duty，直接后果就是冲高bus电压。

因此，引入计算电流的方法。也就是说，当duty小于一定值时，首先让输出duty为0，然后我们不在使用采样值，而是使用计算的方法来获得采样时刻的电流值。

计算电流原则



$$\begin{aligned}
 i_{CAL} &= i_{ADC} + \frac{D \cdot T_s}{2} \cdot \frac{V_{in}}{L} - \frac{V_{bus} - V_{in}}{L} \cdot \left(\frac{1-D}{2} T_s + \frac{T_s}{2} \right) \\
 &= i_{ADC} + \frac{D \cdot T}{2} \cdot \frac{V_{in}}{L} - \frac{V_{bus} - V_{in}}{L} \cdot \left(1 - \frac{D}{2} \right) \cdot T_s \\
 &= i_{ADC} + \frac{T}{L} \cdot [V_{in} + V_{bus} \left(\frac{D}{2} - 1 \right)]
 \end{aligned}$$

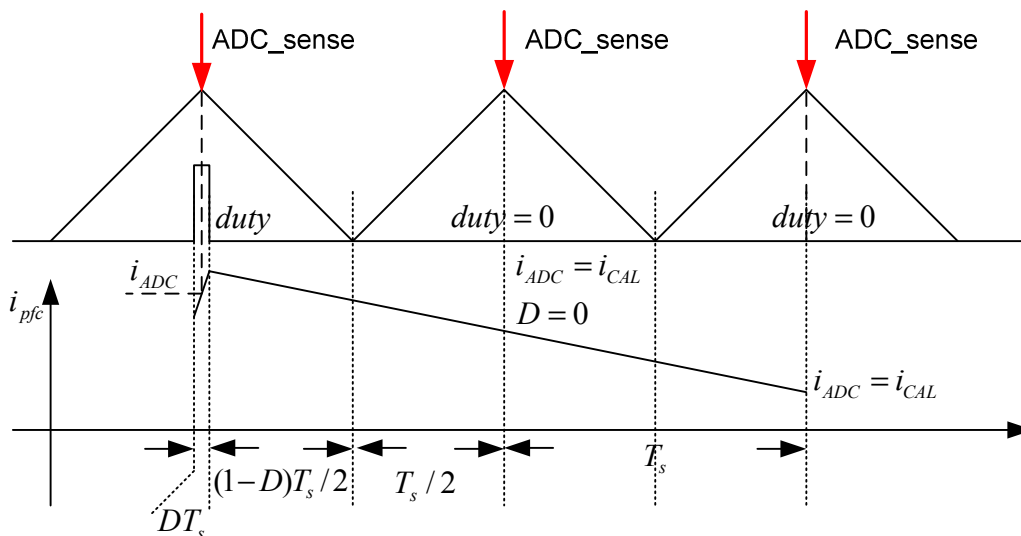
公式中用到的值，全部为实际值，因此为获得DSP所用的定标值，可以考虑直接换算

$$\begin{aligned}
 \frac{i_{CAL}}{i_{max}} \cdot i_{max} &= \frac{i_{ADC}}{i_{max}} \cdot i_{max} + \frac{T_s}{L} \cdot V_{max} \cdot \left[\frac{V_{in}}{V_{max}} + \frac{V_{bus}}{V_{max}} \left(\frac{D}{2} - 1 \right) \right] \\
 \Rightarrow i_{CALDSP} &= i_{ADC DSP} + \frac{T_s}{L} \cdot \frac{V_{max}}{i_{max}} \cdot [V_{inDSP} + V_{busDSP} \left(\frac{D}{2} - 1 \right)] \\
 \Rightarrow i_{CALDSP} &= i_{ADC DSP} + IPFC_CORR_COEFF \cdot [(V_{inDSP} - V_{busDSP}) + V_{busDSP} \cdot \frac{D}{2}]
 \end{aligned}$$

计算电流原则

$$i_{CAL} = i_{ADC} + \frac{T_s}{L} \cdot [V_{in} + V_{bus} (\frac{D}{2} - 1)]$$

i_{ADC} 电流的采样值或上次的计算值（如果上次已经采样不到了，需要用上次的计算值作为本次使用）
 D 实际的输出duty，不是算出来的duty



连续两次duty都小于0时候仍然可以使用上面的公式
计算电路

1. 通用公式

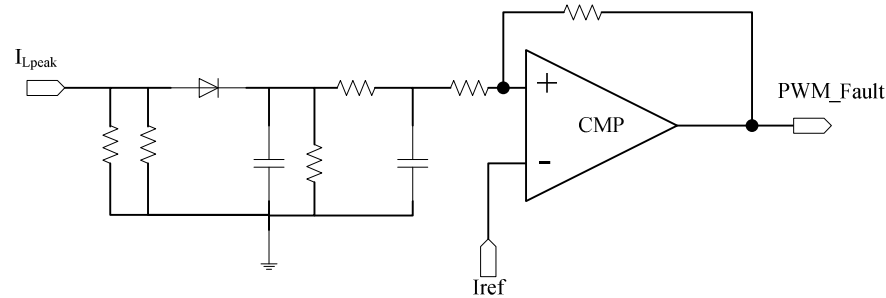
2. 单周期调制的结果

两周期调制的公式？

三周期调制的公式？

PDP 保护

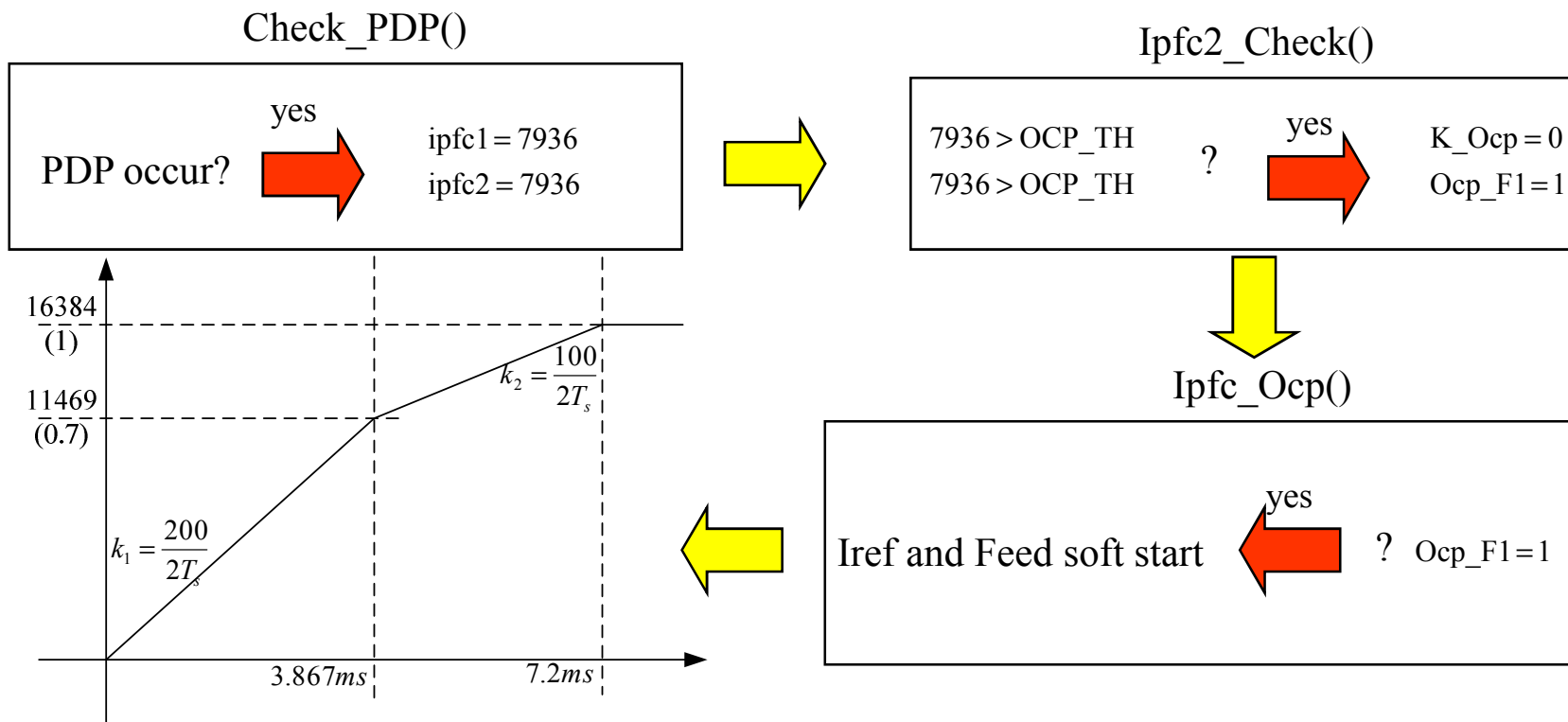
PDP 功能实现



- PDP，一旦过流，立即关掉PWM以保护MOS不坏掉
- 为使保护后Bus电压不掉，需要尽快再次开启PWM，也就是下次PWM来的时候即可解除保护
- 使用DSP内部可以调整 I_{ref} 的功能来灵活的控制恢复时间
- 之后让电感电流的参考有一定的软启动，限制过冲

DSP实现PDP保护

1. 采样PWM的fault输出
2. 发生fault时DSP会首先自动将PWM关闭
3. 在没有PWM后，ADC将无法采样到电感电流，此时如果没有滞环保护，会立刻又开启PWM，因此需要加入滞环，锁死PWM至少一个开关周期
4. 同时由于采不到电流，会让软件算出大duty，因此需要在保护后认为的给采样值赋一个大值，保证软件也看到OCP的发生。
4. 锁死一定时间后，提高比较器的reference，既可以解锁电流保护
5. 让电感电流按照一定的斜率软启动



AC dropout

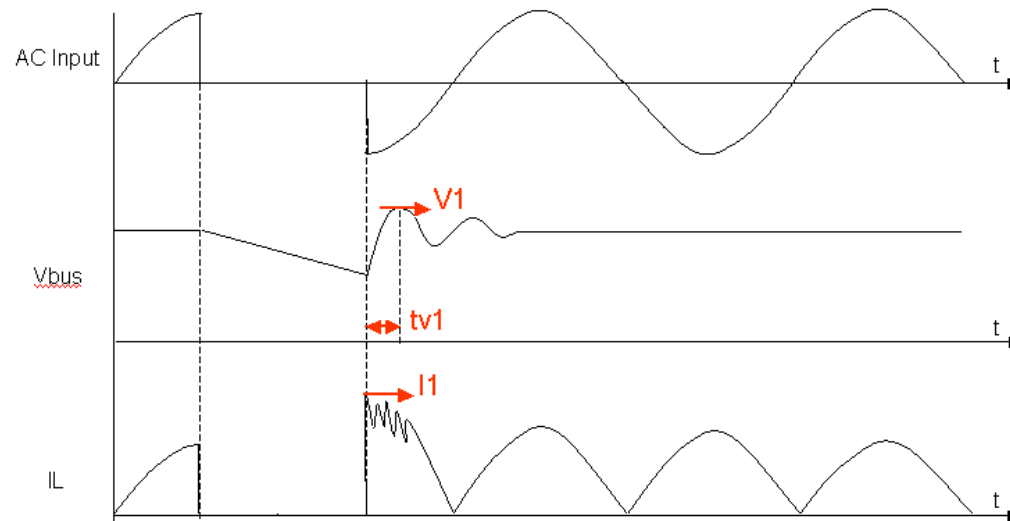
Dropout 原理

AC line dropout 定义： AC电压从任何角度直接掉到0V并维持一段时间(1ms, 2ms, 3ms...10ms). 之后立刻恢复一段时间。

对于PFC，现在测试的要求是掉半周，恢复3周半，也就是 $V_{ac}=0V$ 维持10ms，然后恢复到正常保持70ms。在发生dropout时，由于输入能量丢失，bus电压会掉，然而一旦AC电压恢复，如果维持调节环的特性，会让输出duty维持一段时间的maximum duty以补充bus电压能量的丢失，此时电感电流会有很大的过冲，如果没有可靠的保护，电源很可能损耗。

$V1=450V, I1=22A$ peak ($B_{max}\approx 0.4T$), t_{v1} need to define. If need?

- 可靠的保护（PDP, OVP）
- 适当的电感电流软启动斜率，保证机器不坏，bus电压不掉到UVP的值。

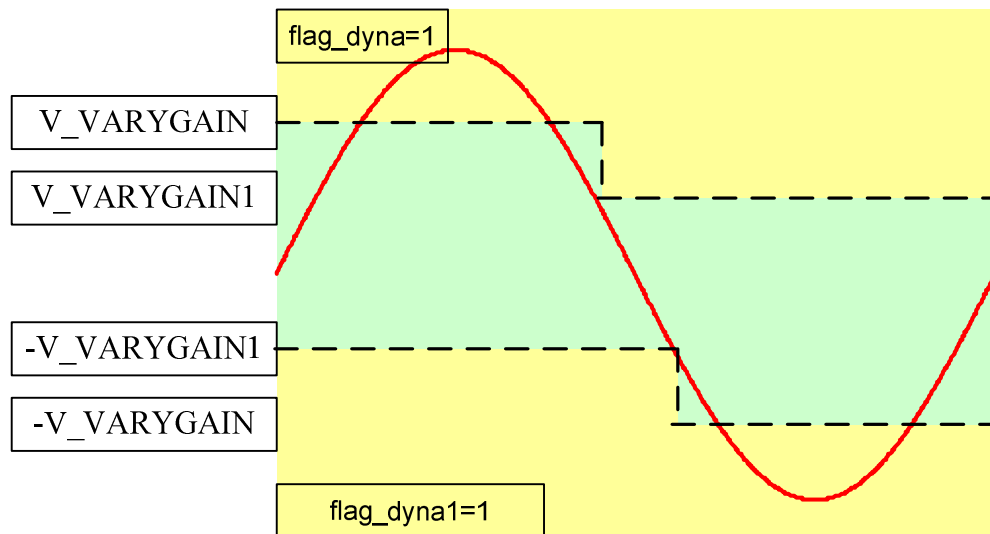


- 1: 识别dropout的发生 \longrightarrow 电压低于 V_{in_DRPTh} ，并连续维持一定的时间
- 2: 保护发生，电流不能过冲太多 \longrightarrow 清除电流环的控制环参数
- 3: 识别AC电压恢复正常 \longrightarrow 一旦AC电压恢复到大雨门檻值，电感电流软启动
- 4: 修正乘法器中所有与AC电压相关量 \longrightarrow 使用完整AC电压周期中的AC值来获得A和 $1/C^2$

变增益

变增益控制

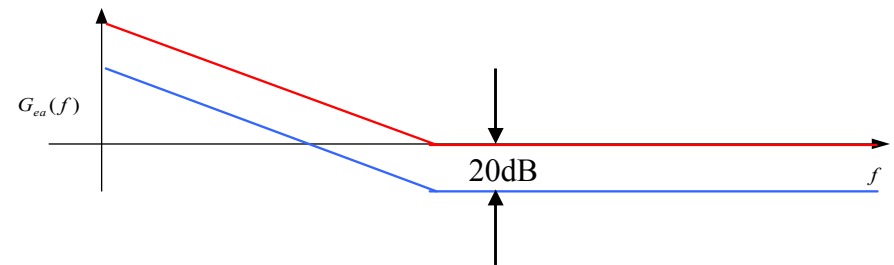
变增益主要是为了改变环路的带宽，从而达到变化的动态响应的特性。在PFC中，由于电压环路非常慢(为了让电流的参考电压能足够的接近于正弦，获得最好的THD效果)，在一些动态情况下，bus电压会有很高的过冲，为了避免由于过冲引起的bus电压OVP或UVP，在电压环中加入变增益环节，一旦发现电压高过一定值，增大调节环增益，提高带宽，让电压很快调整回来，以抑制纹波。



$$G_{ea} = K_p + \frac{K_i}{s}$$



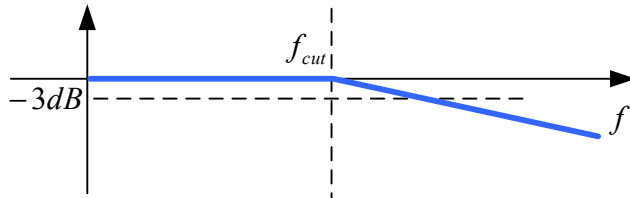
$$G_{ea} = 10 \cdot \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right)$$



加入一定的滞环，不至于让变增益在一个切换点上下震动

Vbus 和 Vin滤波器

Low pass filter



$$G_{filter}(s) = \frac{\omega_{filter}}{s + \omega_{filter}}$$

$$V_{bus_filter} = V_{bus} G_{filter}(s) = V_{bus} \cdot \frac{\omega_{filter}}{s + \omega_{filter}}$$

$$V_{bus_filter}(s + \omega_{filter}) = V_{bus} \cdot \omega_{filter}$$

$$\frac{V_{bus_filter}(n) - V_{bus_filter}(n-1)}{T_s} + V_{bus_filter}(n) \cdot \omega_{filter} = V_{bus}(n) \cdot \omega_{filter}$$

$$V_{bus_filter}(n) = K1 \cdot V_{bus_filter}(n-1) + K2 \cdot V_{bus}(n)$$

DSP implement function

$$K1 = \frac{1}{1 + \omega_{filter} \cdot T_s} = \frac{1}{1 + 2\pi T_s f_{filter}}$$

$$K2 = \frac{\omega_{filter} \cdot T_s}{1 + \omega_{filter} \cdot T_s} = \frac{2\pi T_s f_{filter}}{1 + 2\pi T_s f_{filter}}$$

➤ The filter should not cause additional phase delay to sensed voltage, The filter cut-off frequency should large than 10 times of line frequency.

AC 电压监控与保护

规格

NAME		LEVEL	DETECTING-ACTION TIME	ACTION
OVP level 1	protection	$320 \pm 2V_{ac}$	200msec	1.Transfer alarm to secondary side to disable the D/D 2.Disable the PFC 3.Turn off the AUX relay 4.Delay 60ms turn off the inrush relay 5.Turn on the RFA LED
	recover	$310 \pm 2V_{ac}$	200msec	2.Turn on the AUX relay 3.Delay 500ms turn on the inrush relay
OVP level 2	protection	$300 \pm 2V_{ac}$	500msec	1.Transfer alarm to secondary side to disable the D/D 2.Disable the PFC 3.Turn on the RFA LED
	recover	$290 \pm 2V_{ac}$	500msec	PFC soft start
UVP	protection	$80 \pm 2V_{ac}$	500msec	1.Transfer alarm to secondary side to disable the D/D 2.Disable the PFC 3.Turn on the RFA LED
	recover	$85 \pm 2V_{ac}$	500msec	PFC soft start
Fast UVP	protection	$50V \pm 2V_{ac}$	24msec	1.Transfer alarm to secondary side to disable the D/D 2.Disable the PFC 3.Turn off the inrush relay 4.Turn on the RFA LED
	recover	$60V \pm 2V_{ac}$	300msec	Turn on the inrush relay

No need to soft start

No need to soft start

DSP 实现

		5 0	6 0	8 0	8 5		2 9 0	3 0 0	3 1 0	3 2 0
Flag_ACS1	x	Hys	0	Hys	0	Hys	1	Hys	1	
Flag_ACS2	x	Hys	0	Hys	1	Hys	0	Hys	1	
ACSta_FACL_F1	1	0								
	2Ts ISR	5ms Main								

24ms的Fast UVP在中断中做快速响应

其他由于时间比较长，可以放主程序中

多门槛要求，需要3个标志来作为切换条件



Bus 电压的监控与保护

规格与实现

NAME		LEVEL	DETECTING-ACTION TIME	ACTION
Fast OVP	protection	$450 \pm 2V_{dc}$	sampling once	Disable the PFC
	recover	$430 \pm 2V_{dc}$	sampling once	Enable the PFC <i>Iref soft start</i>
OVP	protection	$440 \pm 2V_{dc}$	500ms	1.Transfer alarm to secondary side to disable the D/D 2.Disable the PFC 3.Turn on the RFA LED
	recover	$420 \pm 2V_{dc}$	500ms	PFC soft start
UVP	protection	$320 \pm 2V_{dc}$	2s	1.Transfer alarm to secondary side to disable the D/D 2.Turn on the RFA LED
	recover	$330 \pm 2V_{dc}$	2s	PFC soft start
Fast UVP	protection	$<50V \pm 2V_{dc}$	sampling once	1.Transfer alarm to secondary side to disable the D/D 2.Disable the PFC 3.Turn on the RFA LED
	recover	$>50V \pm 2V_{dc}$	sampling once	PFC soft start

一次采样就反应的，放中断中，可以尽快响应

其他由于时间比较长，可以放主程序中

实现方式同前面AC电压的监控与保护程序

Vbus 电压调整

Bus电压调整的原则

为了让D2D能工作于最优点，需要适当调整PFC的输出电压，由于LLC电路的特殊性，Bus电压不仅和输出电压相关，还和输出功率相关，PFC还需要考虑输入电压的范围，以保证有足够的AC电压和bus电压差。结合上面几种因素，总结为如下的调整规律。

A: 当 $85 \pm 2V_{ac} \leq V_{in} \leq 300 \pm 2V_{ac}$ ， 则 $V_{bus_A} = V_{in} * 1.414 + 8$

B: $V_{bus_B} = V_{com} * ND2D + V_{bus_B_add}$ ， 并且 $V_{bus_B} \leq 420V_{dc}$

a. 当负载为50%时， $V_{bus_B_add} = 22V_{dc}$ ($V_o = 54V_{dc}$, $I_o = 25A \rightarrow V_{bus_ref} = 400V_{dc}$)

b. 其他负载时， $V_{bus_B_add} = 22 + \frac{20V}{2900W} * P_o - 10 = \frac{20V}{2900W} * P_o + 12$

c. $22V_{dc} \leq V_{bus_B_add} \leq 33V_{dc}$

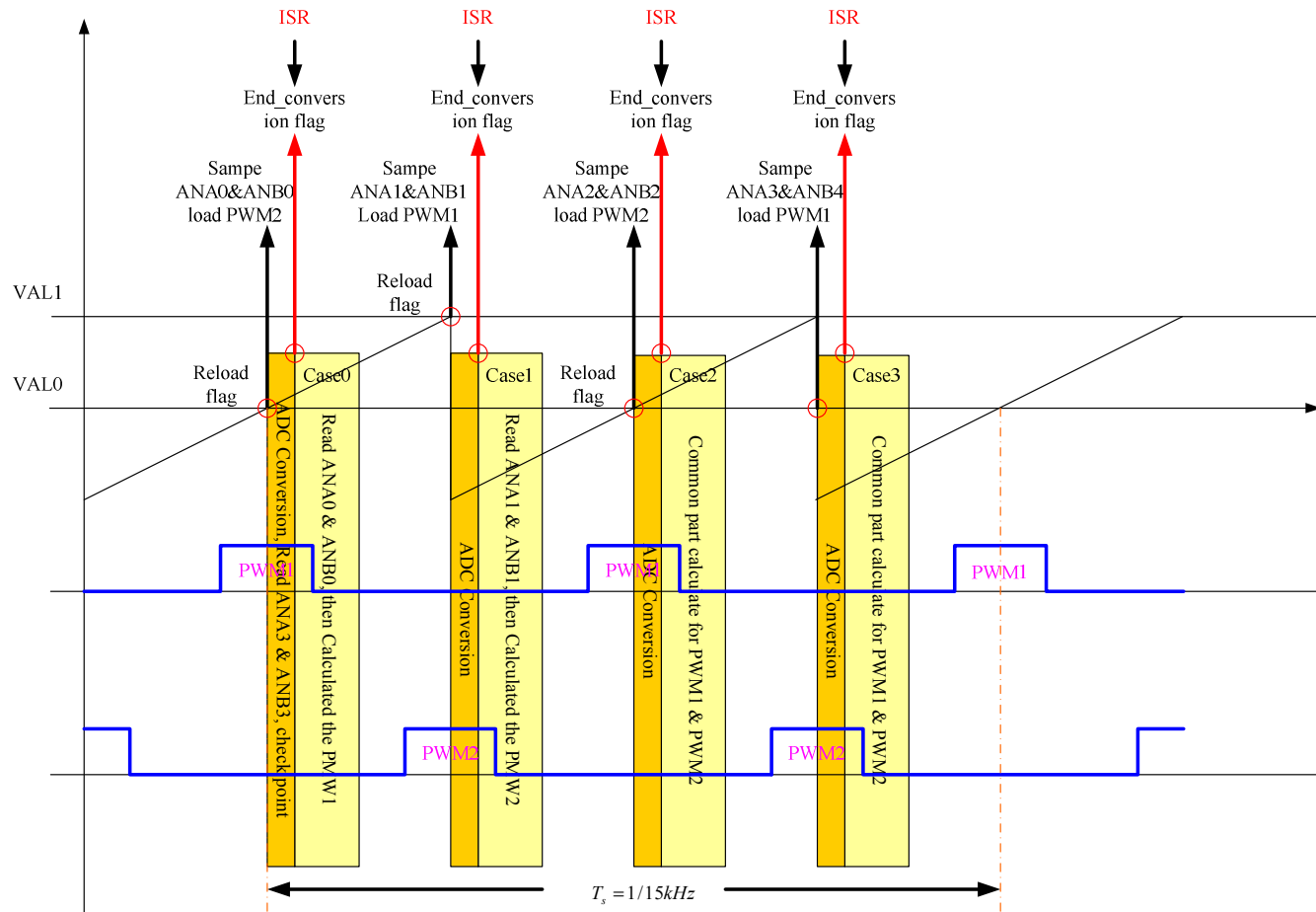
d. $V_{bus_B} = V_{com} * ND2D + \frac{20V}{2900W} * P_o + 12 = V_{bus_B} = V_{com} * ND2D + V_{bus_Const} * P_o + 12$

C: $V_{bus_ref} = \text{Max}[V_{bus_A}, V_{bus_B}]$ ， 且 $360V_{dc} \leq V_{bus_ref} \leq 432V_{dc}$

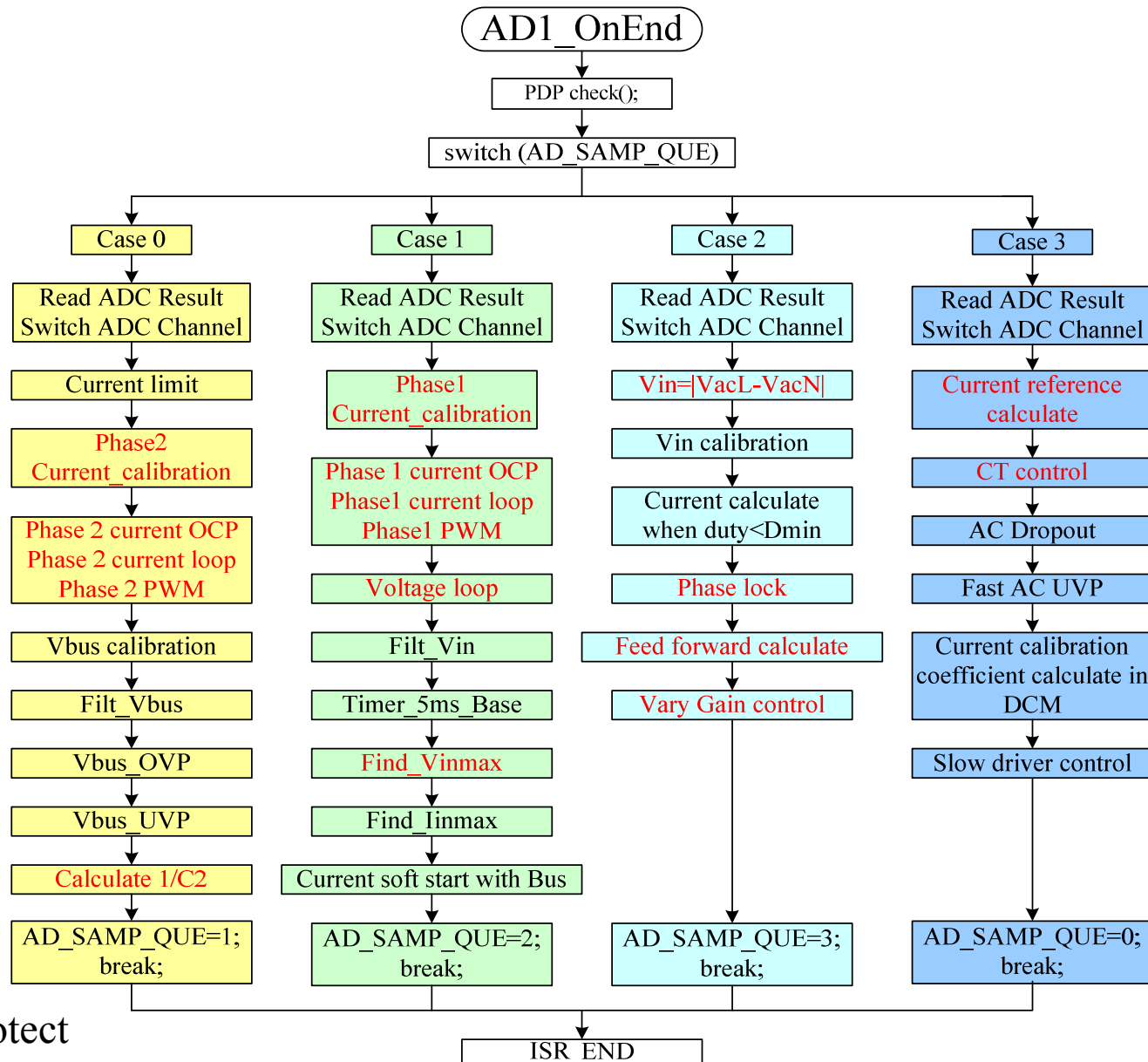
其中 D2D的匝比是 44:6, $N=44/6=7.333$, V_{com} 是一个定标为 Q7 的值，它表征 D2D的输出电压 ($54V=6192$).

中断程序的架构

Interleaving PFC的两周期控制一次的中断设置



中断程序的安排



PFC control

Monitor & protect

小节

DSP控制：

1. 离散控制
2. 有delay的控制
3. 扰动抑制的控制

DSP控制设计流程：

1. 对被控系统建立小信号模型
2. 设计正确的模拟控制器，并使用适当的离散化方法将控制器离散化为DSP用
3. 根据增益不同选择合适的控制器
4. 根据硬件规格需求，增加对应的监控程序

DSP控制注意事项：

1. 选取DSP后，先学会使用DSP的ADC, PWM, TIMER, Interrupt等重要的功能
2. 合理安排程序的位置，运算实时性要求高的，放最快的中断中优先执行，运算实时性要求较低的，可以放二级中断或主程序中执行
3. 调试优先考虑算法的正确性和程序的执行时间是否溢出，逻辑要清晰，很多计算需要预先进行手算以预估结果，方能设计合理的定标值
4. 多整理文档，方便程序的查错以修改
5. 根据各种程序语言的特点优化程序的执行时间

Thank you for your attention

To be continued...