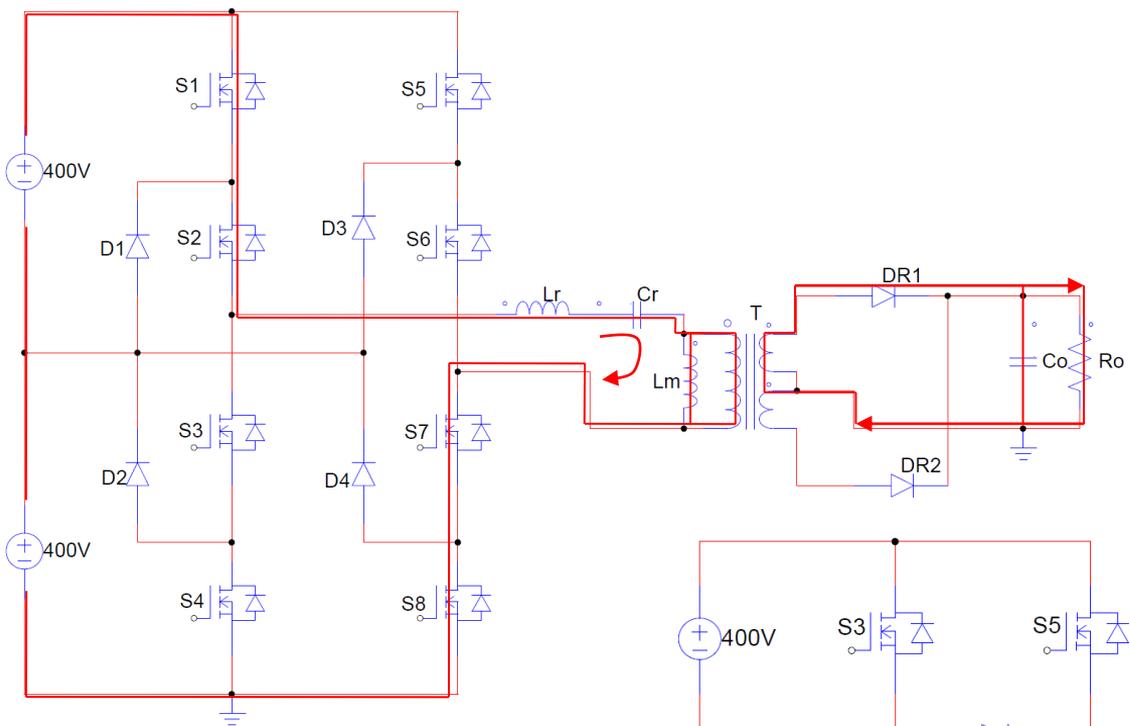
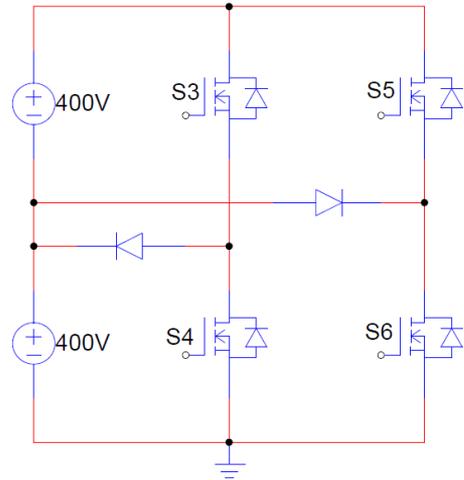


三电平全桥LLC稳态分析

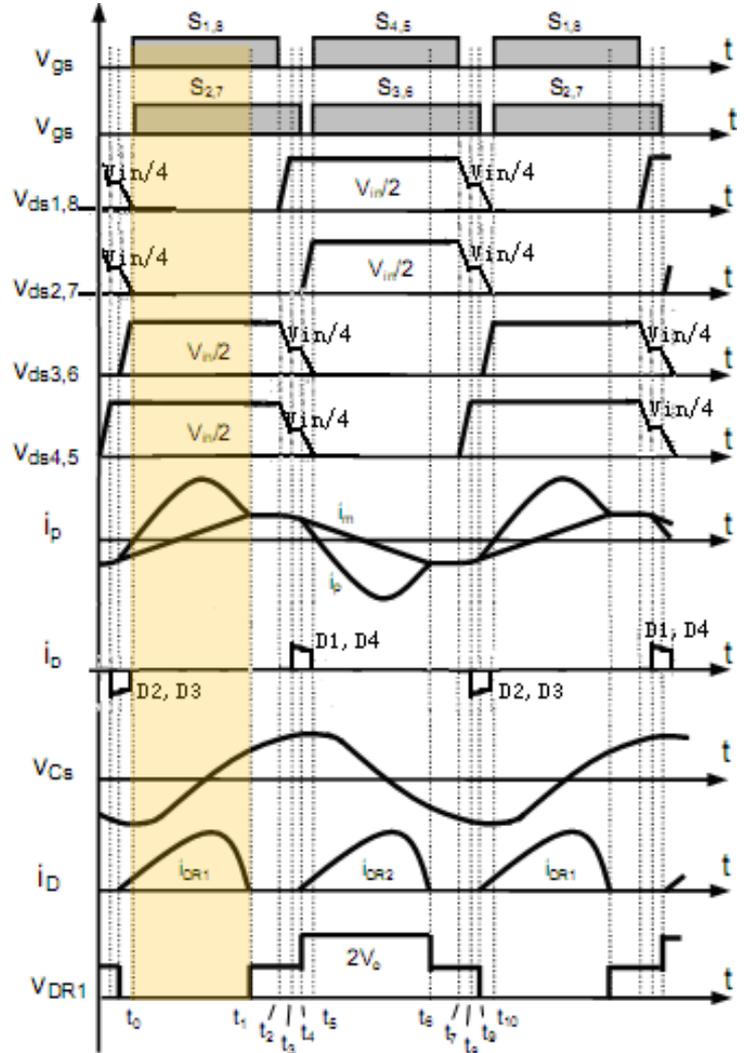
By Westbrook Zhang 2020/12/22

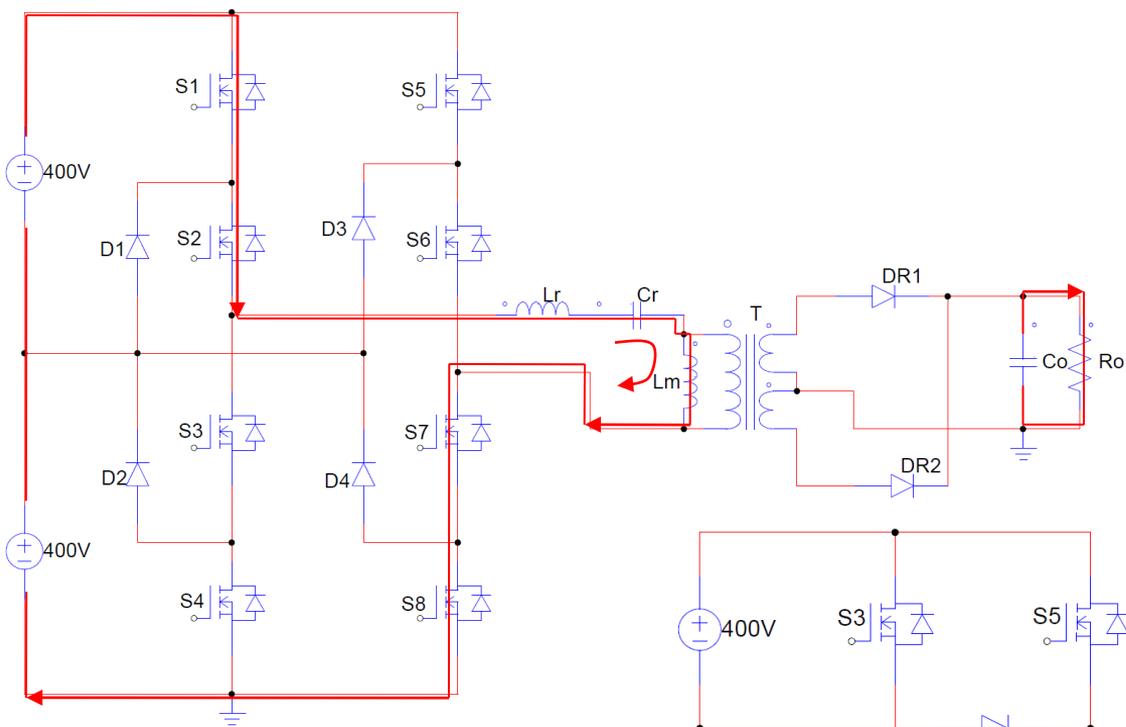


模态 1[t_0, t_1]: 在 t_0 时刻, S1、S2、S7、S8同时开通。谐振网络中的原边电流 i_p 流经上述开关管, 并以正弦形式上升。同时因为变压器副边被输出电压钳位, 故而励磁电流 i_m 线性增加。副边整流二极管中流过的电流取决于原边电流 i_p 和励磁电流 i_m 之差;

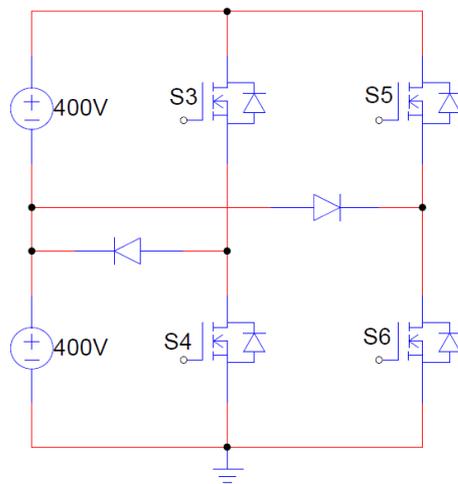


等效电路

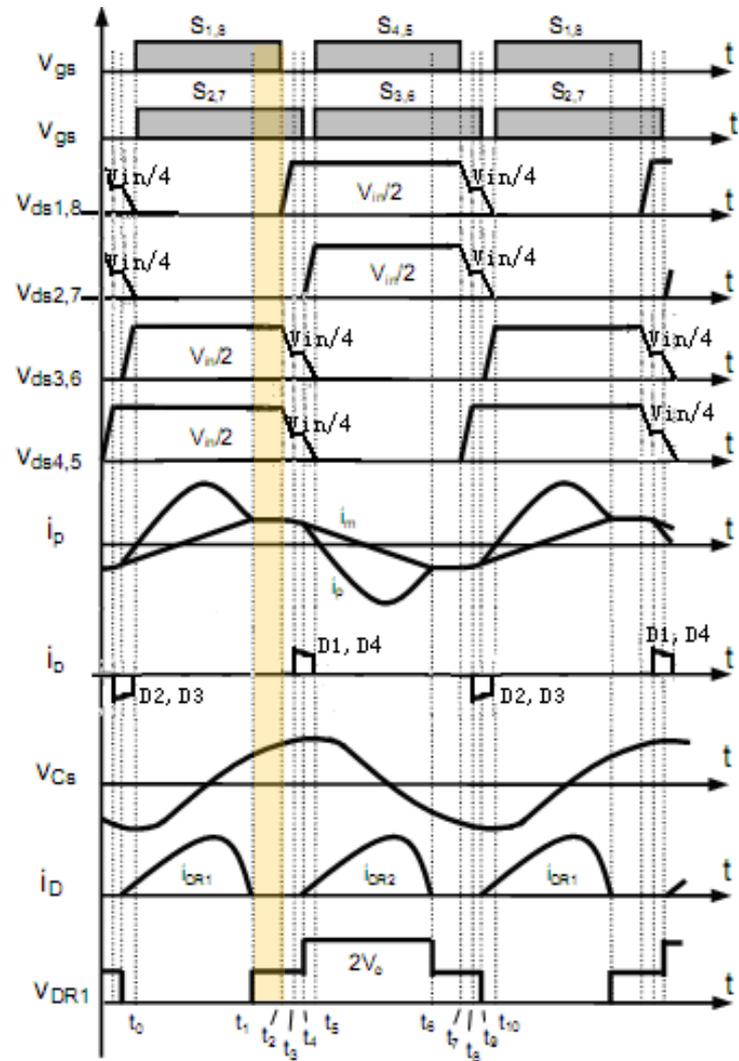


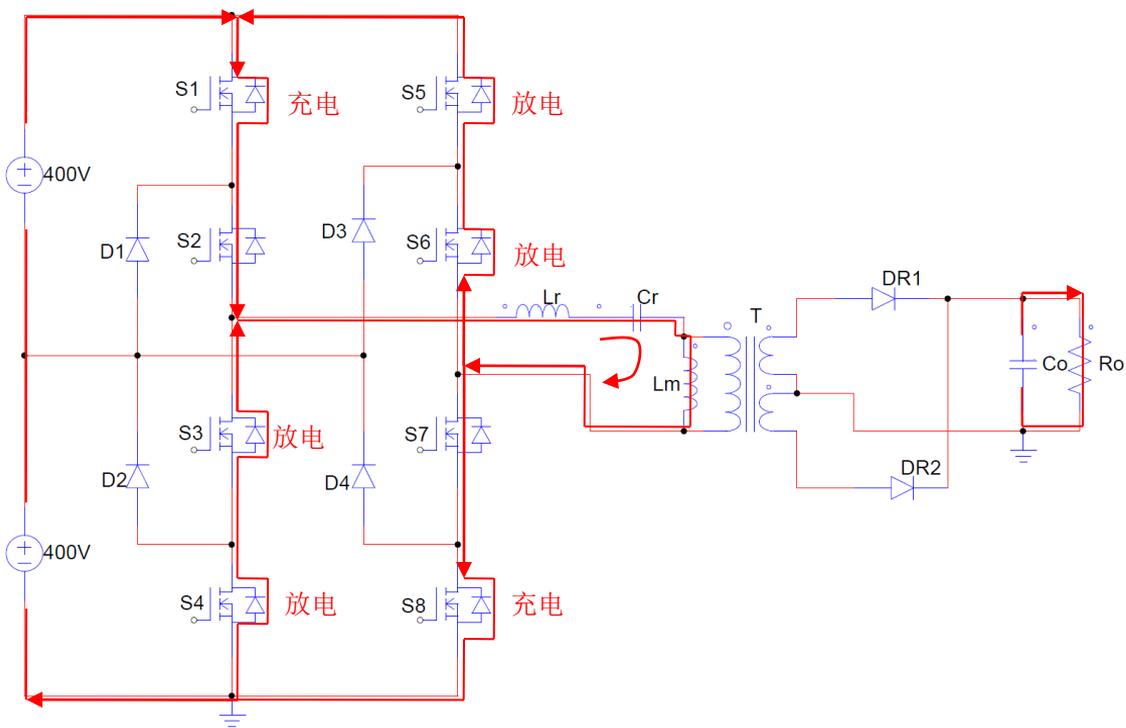


模态 2[t1, t2]: 当原边电流 i_p 谐振过峰值并下降到和励磁电流 i_m 相等时, 副边二极管电流就减小为零, 整流二极管 DR1 零电流关断;

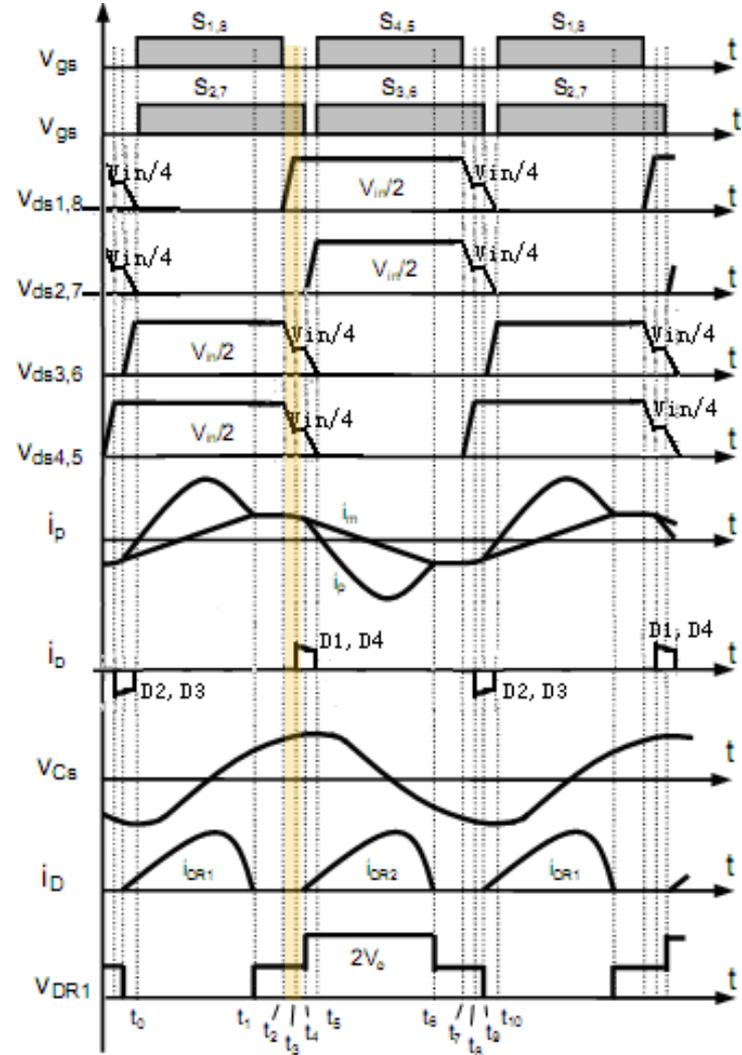


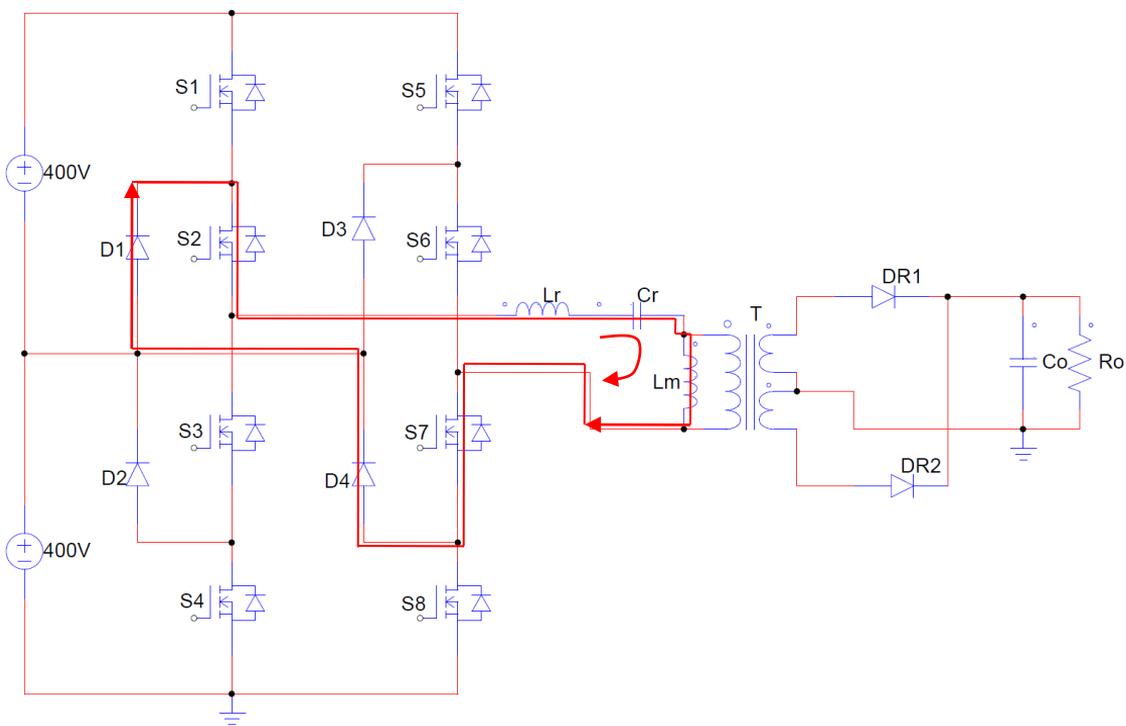
等效电路



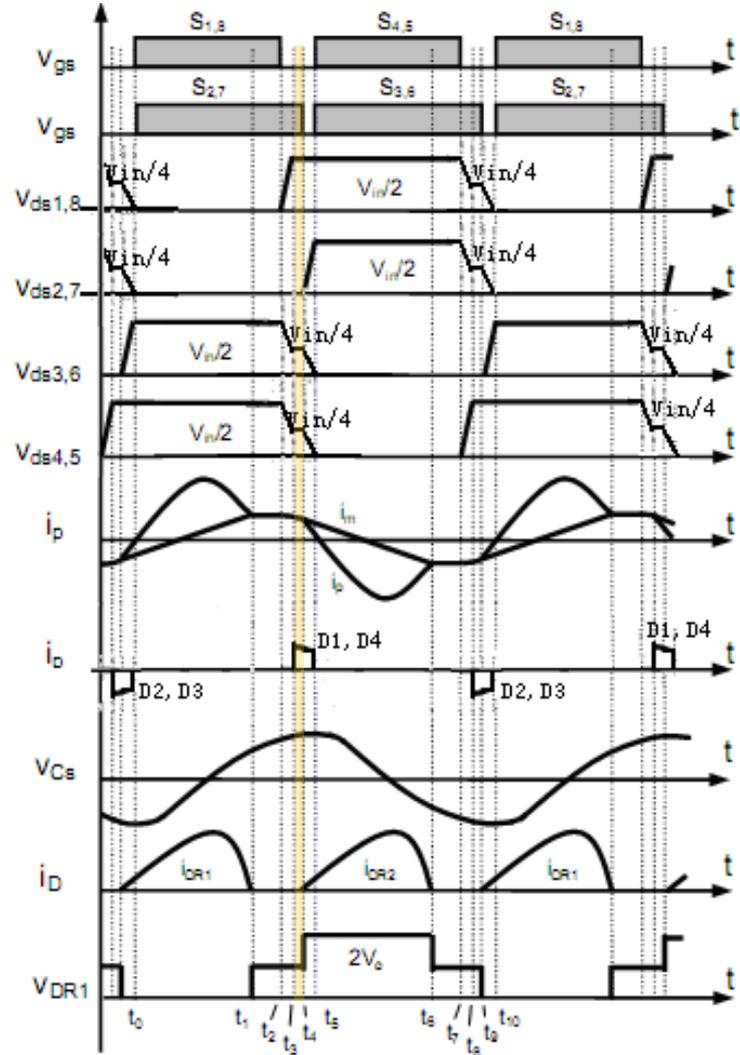


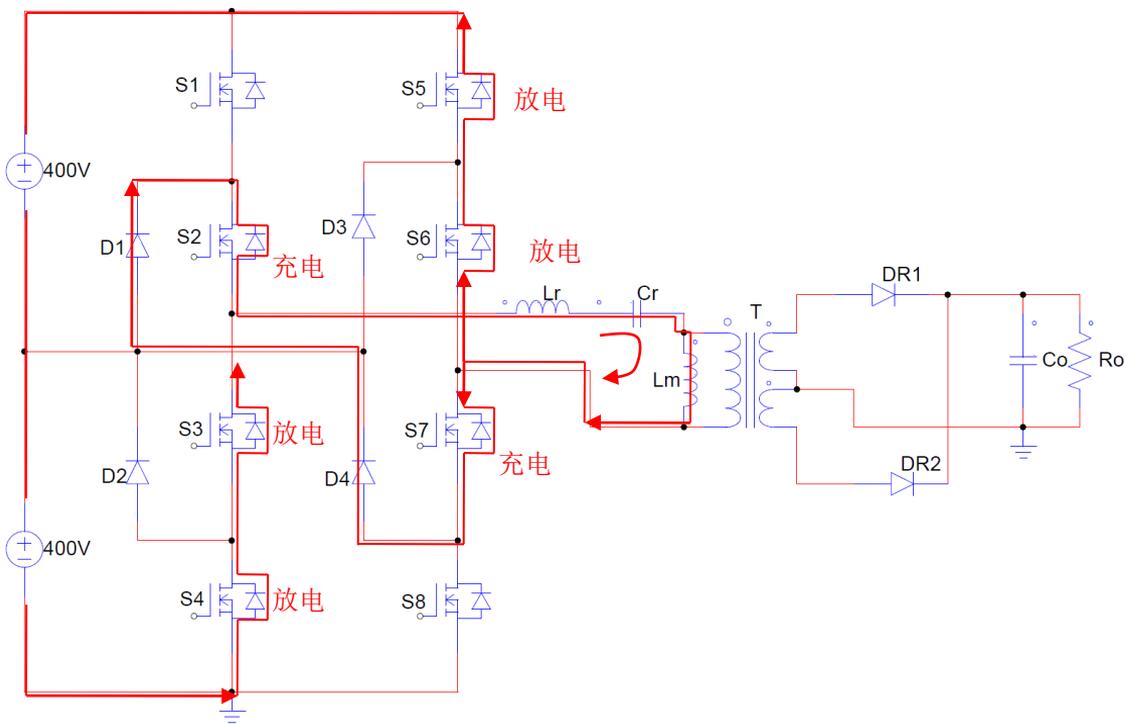
模态 3 $[t_2, t_3]$: 在 t_2 时刻, S1 和 S8 先于 S2 和 S7 关断。原边谐振电流 i_p 开始对 S1 和 S8 的寄生电容 C_{OSS1} 和 C_{OSS8} 进行充电, 同时对 S3/S4/ S5/S6 的寄生电容 C_{OSS3} / C_{OSS4} / C_{OSS5} / C_{OSS6} 放电, 因此上述开关管的寄生电容也参与了谐振过程;



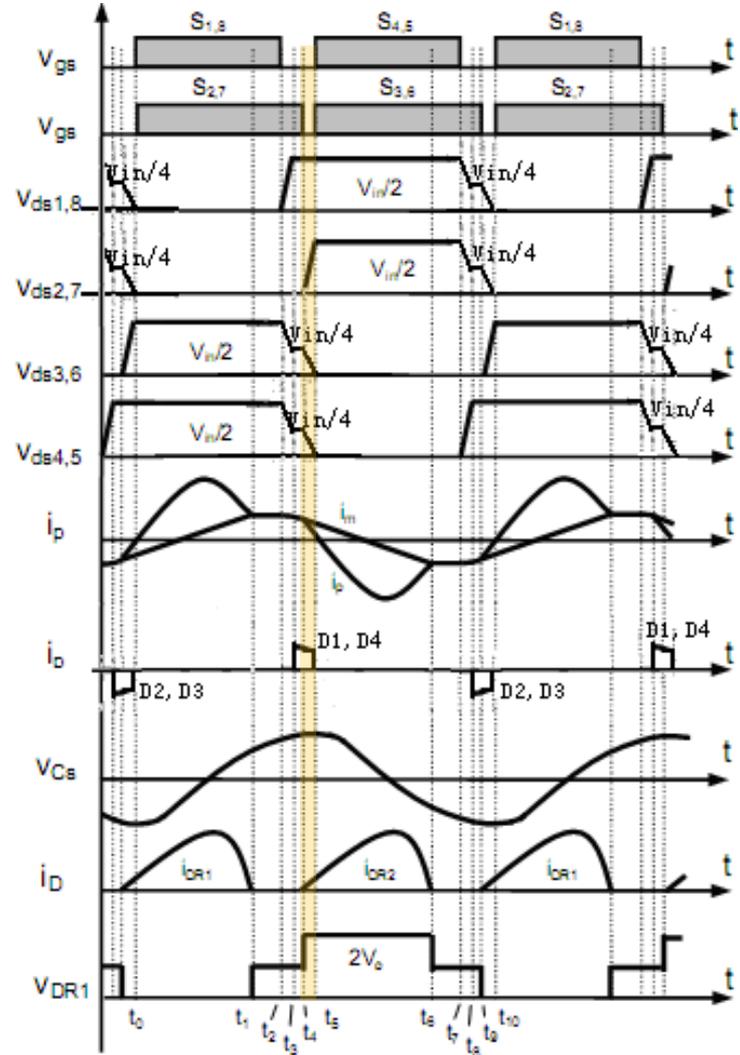


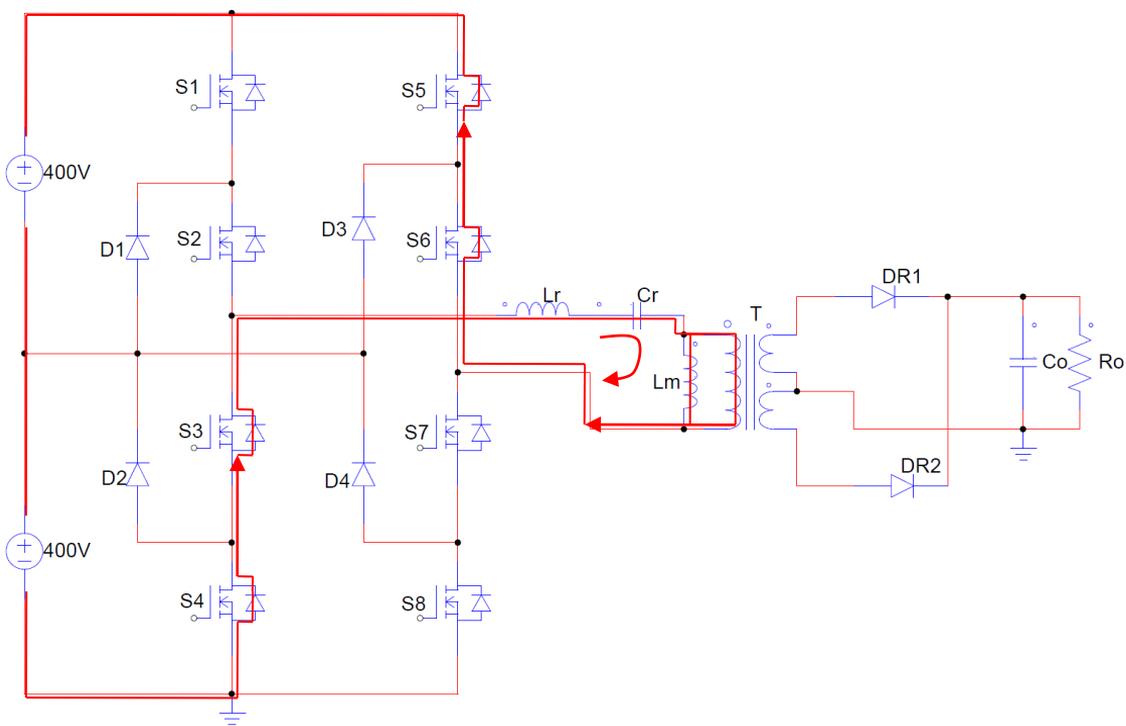
模式 4[t3, t4]: 在 t3 时刻, COSS1 和 COSS8 上的电压上升到了 $V_{in}/2$, 钳位二极管 D1 和 D4 导通, 从而限制了电压进一步上升。同时 COSS3+COSS4 和 COSS5+COSS6 上的电压也被钳位在 $V_{in}/2$ 。此时原边谐振电流流经 S2、S7 和 D1、D4。



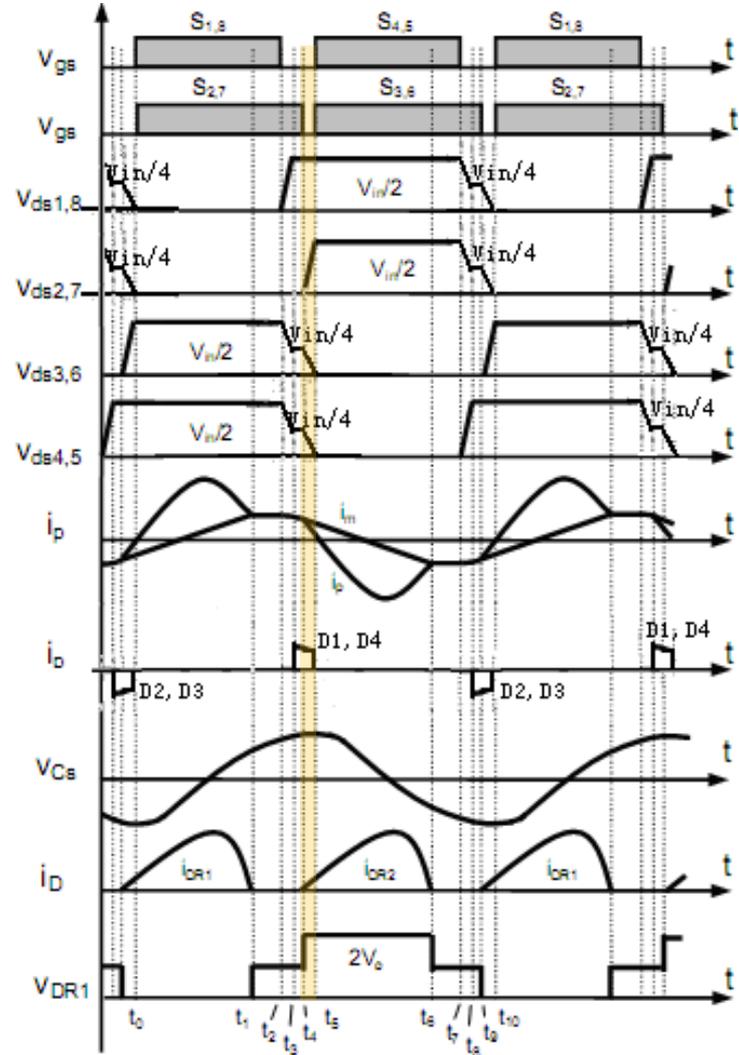


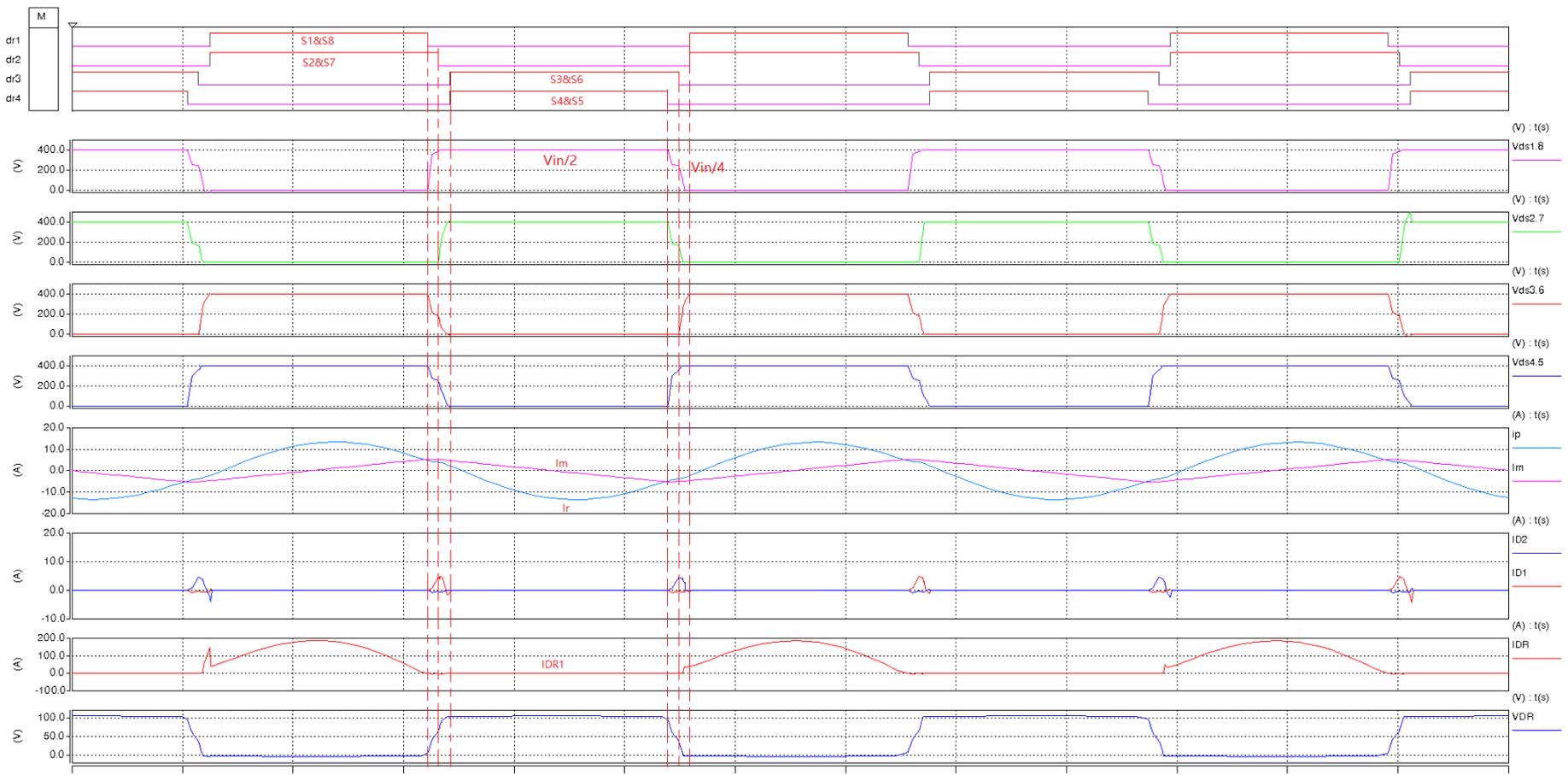
模态 5[t_4, t_5]: 在 t_4 时刻, 开关管 S2 和 S7 关断。与模态 3 相似, 谐振电流 i_p 开始对 COSS2 和 COSS7 进行充电和对 COSS3+COSS4 和 COSS5+COSS6 进行放电。所以此阶段上述 6 个寄生电容也参与了谐振过程。与此同时 S3/S4/S5/S6 的寄生体二极管导通, 不但提供了电流回路使能量回馈至输入端, 也在变压器上产生了反向的电压偏置, 使副边整流二极管 DR2 导通, 励磁电感 L_m 被输出电压钳位从而脱离谐振网络。

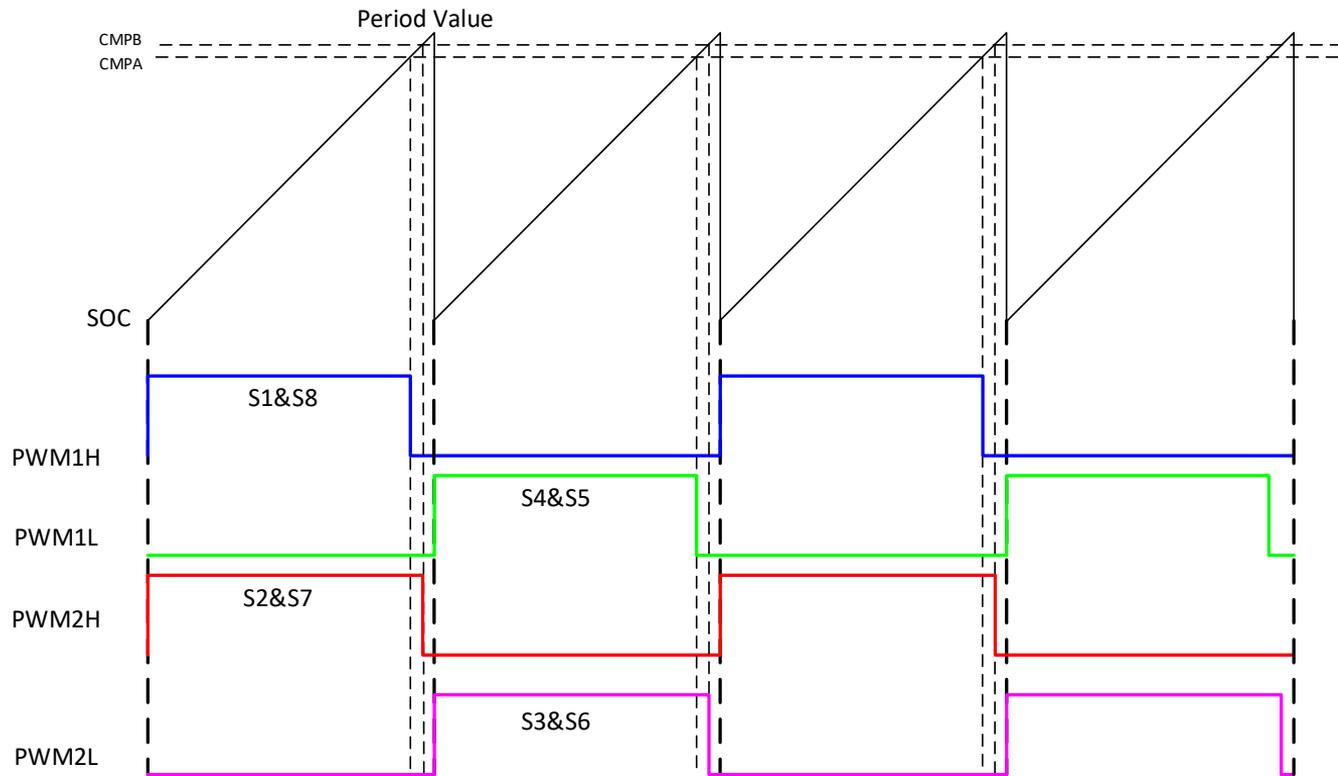




在这一阶段结束的 t_5 时刻，COSS2 和 COSS7 上的电压为 $V_{in}/2$ ，COSS3~COSS6 上的电压保持在零，谐振电流 i_p 流经 S3~S6 的寄生二极管，从而满足了 S3~S6 零电压开启的条件。此时如果 S3~S6 的开通信号来临，变流器将进入后半个工作周期。

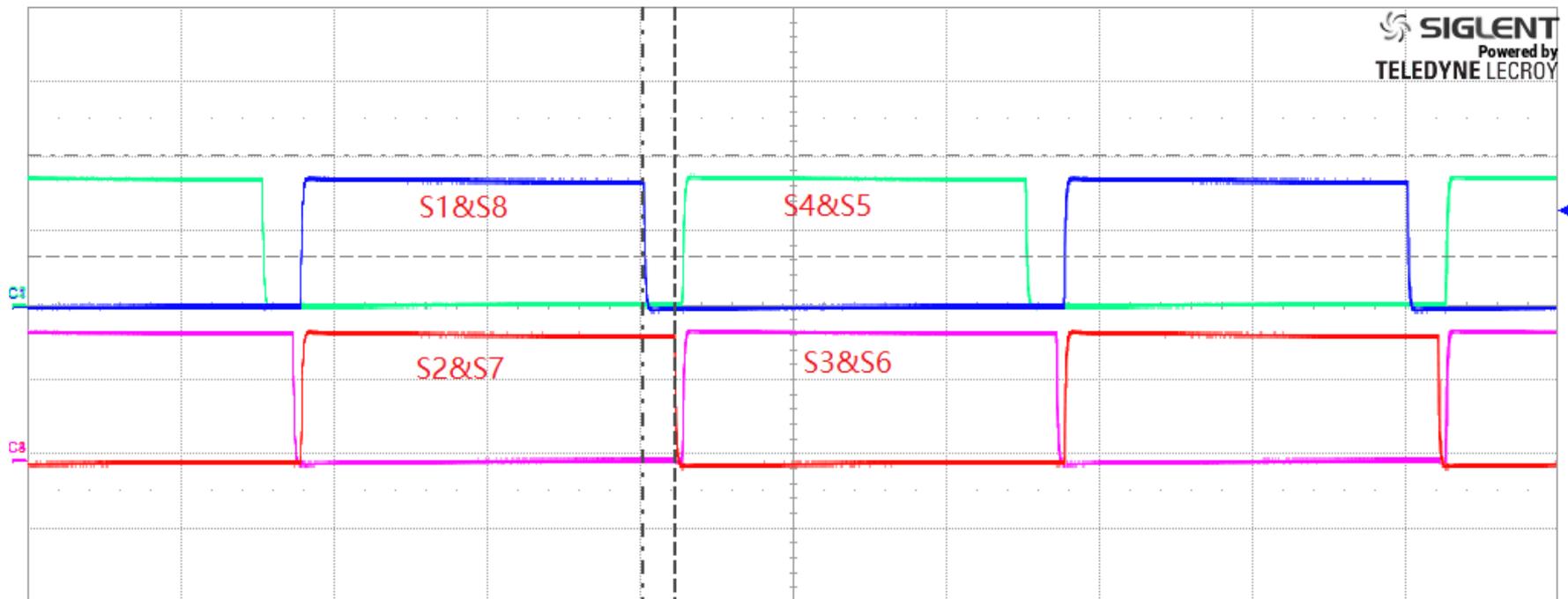






DSP配置：独立边沿模式的推挽输出

(1) PFM控制方式



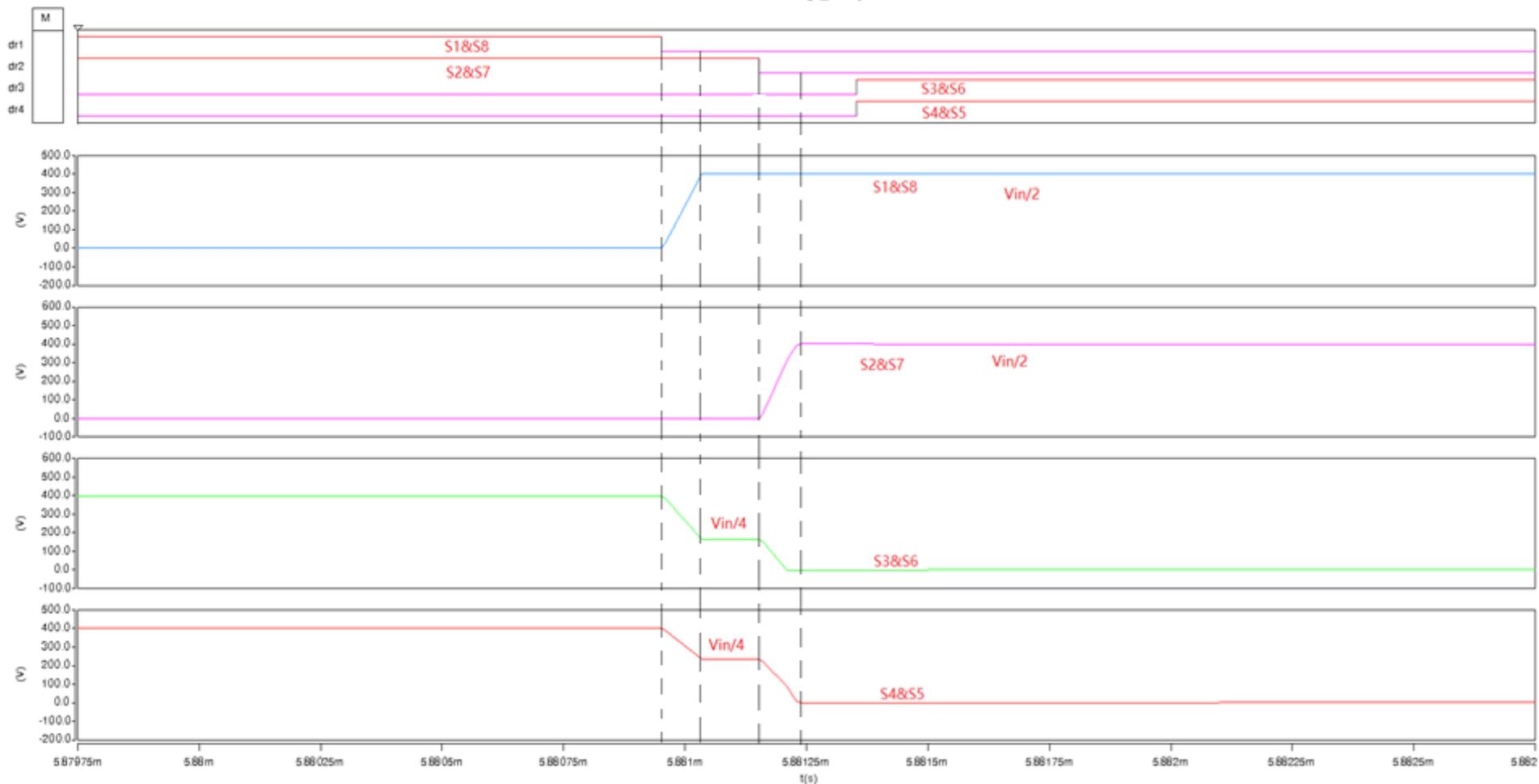
Measure	P1:freq(C1)	P2:freq(C2)	P3:duty(C1)	P4:duty(C3)	P5:---	P6:---
value	200.5616 kHz	200.4309 kHz	44.926 %	48.915 %		

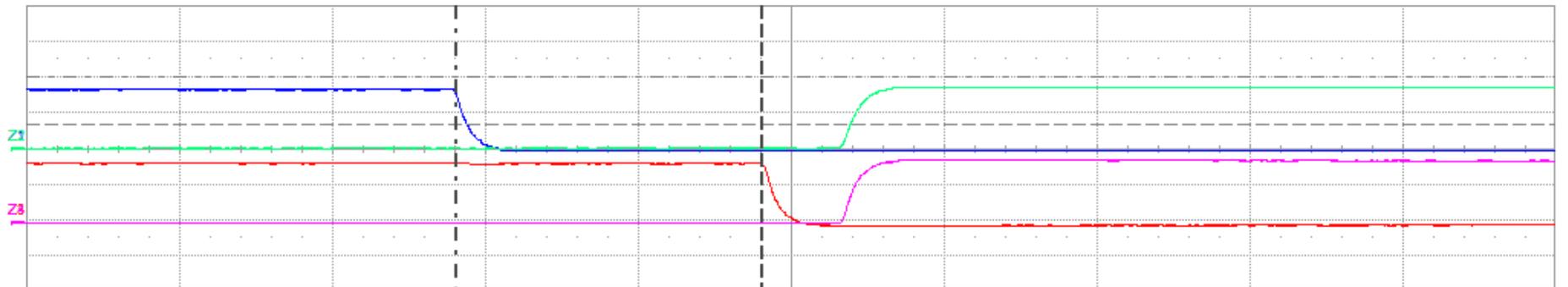
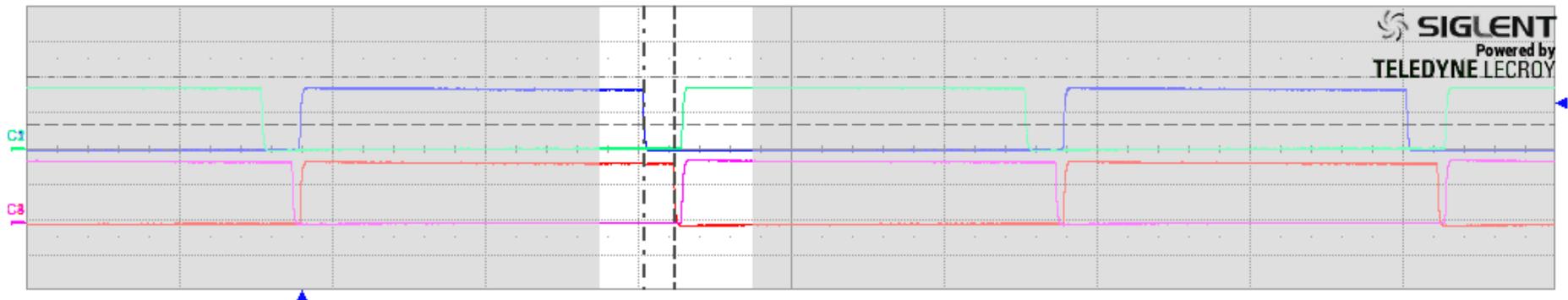
status

C1	BwL	DC1M	C2	BwL	DC1M	C3	BwL	DC1M	C4	BwL	DC1M
2.00 V/div			2.00 V/div			2.00 V/div			2.00 V/div		
-50 mV offset			0.00 V offset			-4.20 V offset			-4.20 V offset		
---- 4.05 V			---- 4.00 V			---- 8.21 V			---- 8.21 V		
---- 1.34 V			---- 1.30 V			---- 5.50 V			---- 5.50 V		
Δy -2.70 V			Δy -2.70 V			Δy -2.70 V			Δy -2.70 V		

时基	-3.20 μs	触发	C1 DC
	1.00 μs/div	自动	2.62 V
20 kS	2 GS/s	边沿	正
X1 = 2.22 μs	ΔX = 200 ns		
X2 = 2.42 μs	1/ΔX = 5.0 MHz		

Voltage_dmonty



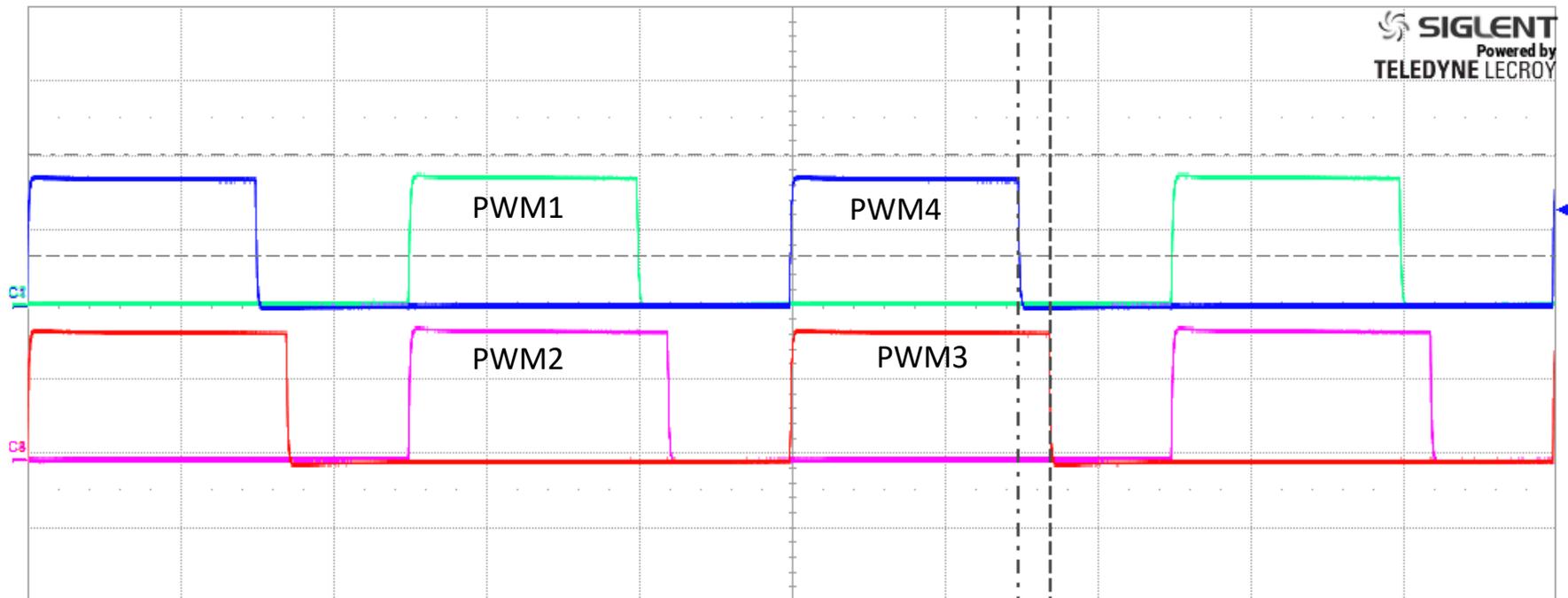


Measure	P1:freq(C1)	P2:freq(C2)	P3:duty(C1)	P4:duty(C3)	P5:---	P6:---
value	200.2603 kHz	200.2804 kHz	44.958 %	48.954 %		
status	✓	✓	✓	✓		

C1	BwL	DC1M	C2	BwL	DC1M	C3	BwL	DC1M	C4	BwL	DC1M	Z1	zoom(C1)	Z2	zoom(C2)	Z3	zoom(C3)	Z4	zoom(C4)	时基	-3.20 μs	触发	C1	DC
2.00 V/div			2.00 V/div			2.00 V/div			2.00 V/div			2.00 V/div		2.00 V/div		2.00 V/div		2.00 V/div	2.00 V/div	20 kS	1.00 μs/div	停止	2.62 V	
-50 mV offset			0.00 V offset			-4.20 V offset			-4.20 V offset			100 ns/div		100 ns/div		100 ns/div		100 ns/div	100 ns/div	2 GS/s	2 GS/s	边沿	正	
4.05 V			4.00 V			8.21 V			8.21 V			4.05 V		4.00 V		8.21 V		8.21 V	8.21 V					
1.34 V			1.30 V			5.50 V			5.50 V			1.34 V		1.30 V		5.50 V		5.50 V	5.50 V					
Δy			-2.70 V			-2.70 V			-2.70 V			Δy		-2.70 V		Δy		-2.70 V	-2.70 V					

X1= 2.232 μs ΔX= 200 ns
X2= 2.432 μs 1/ΔX= 5.00 MHz

(2) PWM控制方式

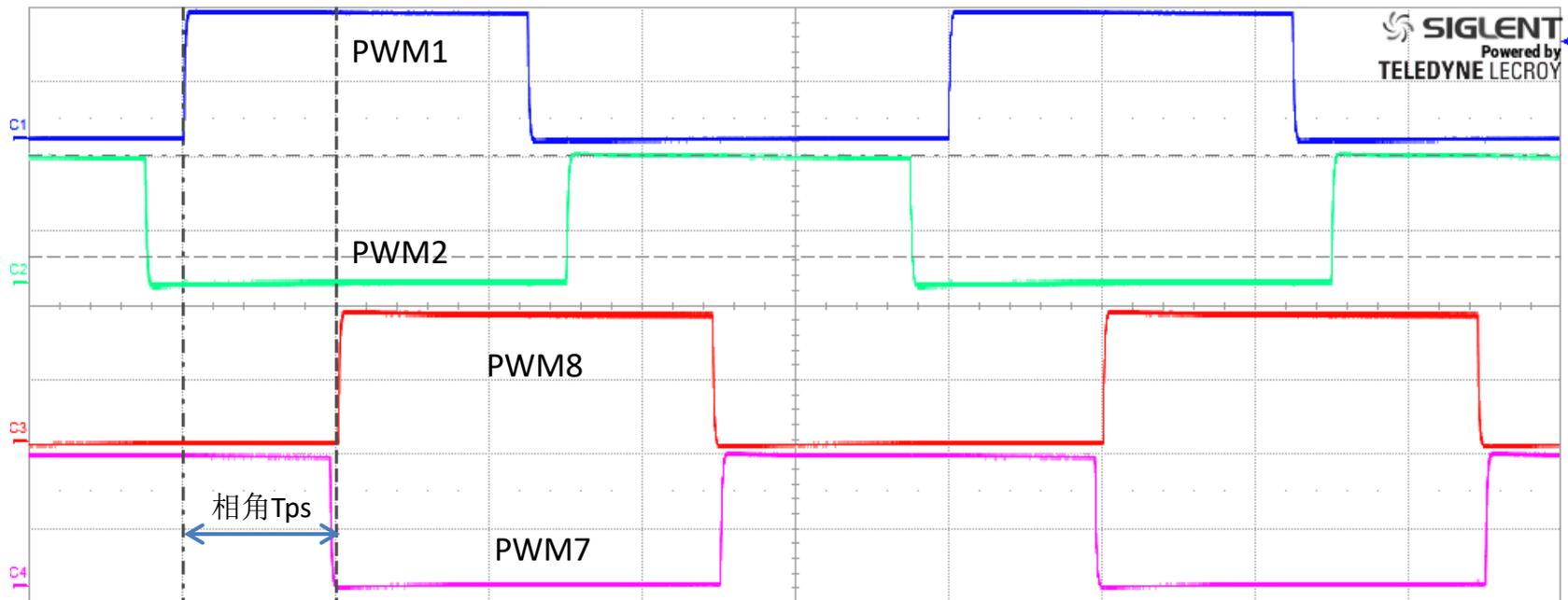


Measure	P1:freq(C1)	P2:freq(C2)	P3:duty(C1)	P4:duty(C3)	P5:---	P6:---
value	200.4812 kHz	200.4395 kHz	29.973 %	33.957 %		

C1		C2		C3		C4	
BwL	DC1M	BwL	DC1M	BwL	DC1M	BwL	DC1M
2.00 V/div		2.00 V/div		2.00 V/div		2.00 V/div	
-50 mV offset		0.00 V offset		-4.20 V offset		-4.20 V offset	
---- 4.05 V		---- 4.00 V		---- 8.21 V		---- 8.21 V	
..... 1.34 V	 1.30 V	 5.50 V	 5.50 V	
Δy -2.70 V		Δy -2.70 V		Δy -2.70 V		Δy -2.70 V	

时基	0.00 μs	触发	C1 DC
	1.00 μs/div	自动	2.62 V
20 kS	2 GS/s	边沿	正
X1= 1.47 μs ΔX= 210 ns			
X2= 1.68 μs 1/ΔX= 4.8 MHz			

(3) 移相控制方式



Measure	P1:freq(C1)	P2:freq(C2)	P3:duty(C1)	P4:duty(C3)	P5:---	P6:---
value	200.3005 kHz	200.3471 kHz	44.987 %	48.976 %		
status	✓	✓	✓	✓		

C1	BwL	DC1M	C2	BwL	DC1M	C3	BwL	DC1M	C4	BwL	DC1M
2.00 V/div			2.00 V/div			2.00 V/div			2.00 V/div		
4.50 V offset			600 mV ofst			-3.65 V offset			-7.55 V offset		
---- -496 mV			---- 3.39 V			---- 7.65 V			---- 11.55 V		
..... -3.20 V		 704 mV		 4.94 V		 8.85 V		
Δy -2.70 V			Δy -2.70 V			Δy -2.70 V			Δy -2.70 V		

时基	1.02 μs	触发	C1 DC
	1.00 μs/div	自动	2.62 V
20 kS	2 GS/s	边沿	正
X1=	-5.01 μs	ΔX=	1.00 μs
X2=	-4.01 μs	1/ΔX=	1.000 MHz