

# 四种NPC型三电平半桥逆变器 的分析与对比

谢 少 军

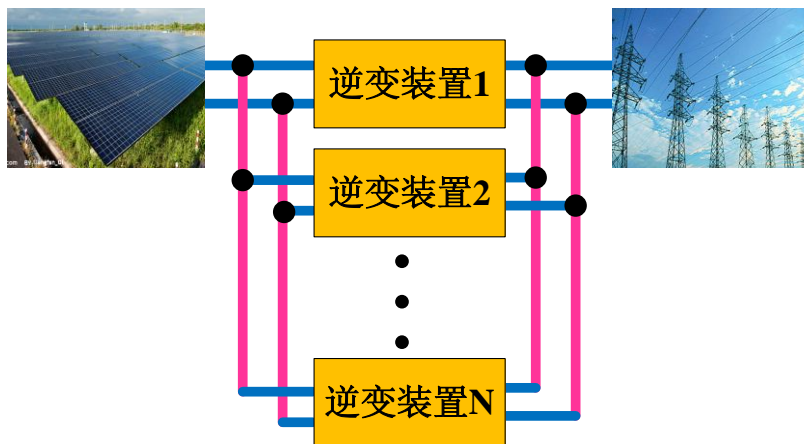
南京航空航天大学

2013. 9. 14

- 1 研究背景
- 2 NPC型三电平半桥逆变器调制策略
- 3 NPC型三电平半桥逆变器损耗分析
- 4 实验结果
- 5 小结



规模增大



## 研究大容量、高性能光伏并网逆变器

经济、高效

电能质量

- ◆单级式
- ◆高质量进网电流
- ◆适于高压输入电压
- ◆并网控制
- ◆非隔离
- ◆低漏电流

L

NPC型三电平半桥逆变器

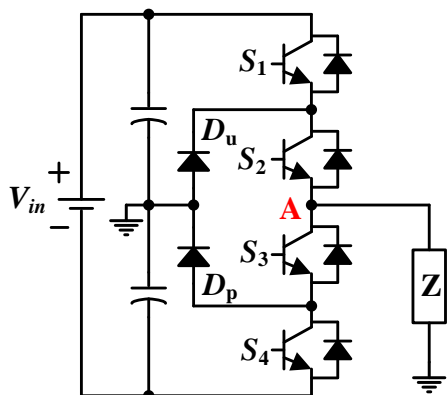
3L-NPC: 开关器件损耗不均衡

多种NPC型三电平半桥拓扑

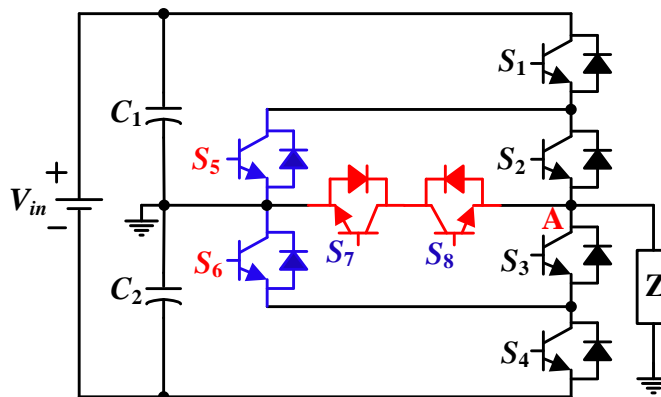
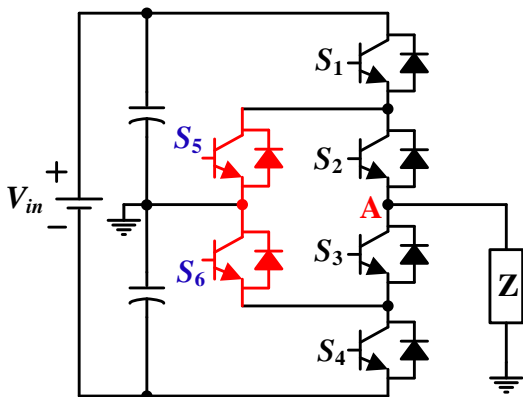
可控器件多 → 调制策略多样化

电路的特性差异?  
如何选取拓扑及调制方式?

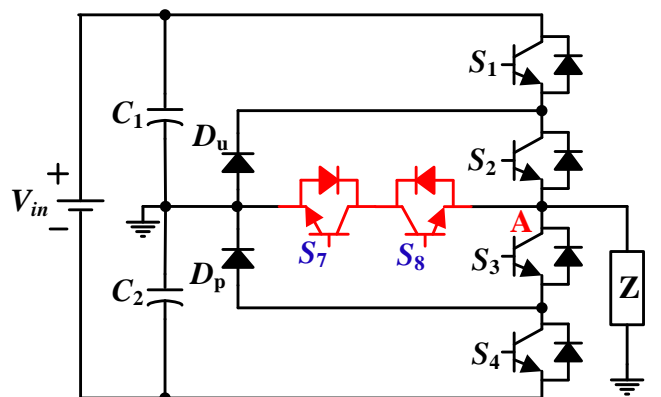
3L-NPC



3L-ANPC

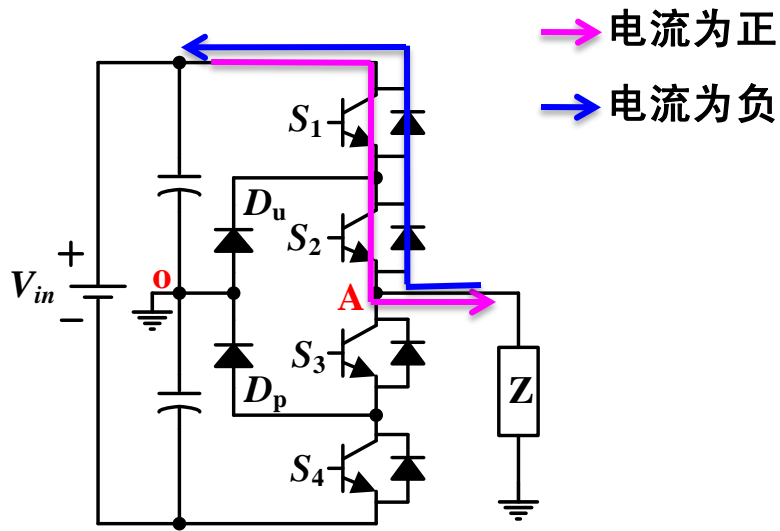


3L-ASNPC

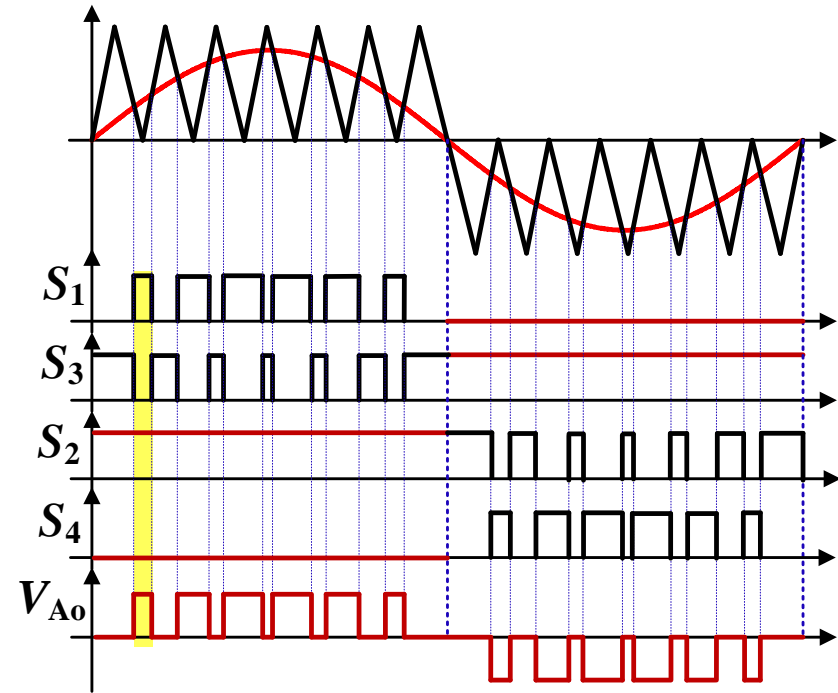


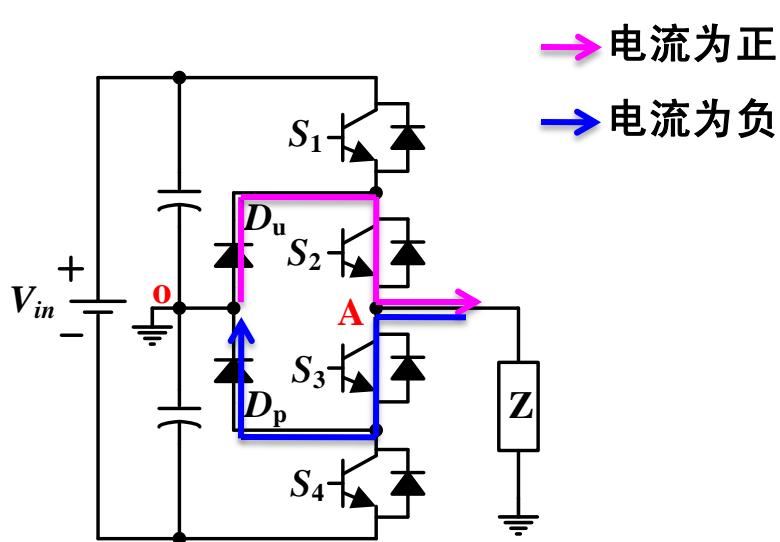
3L-SNPC

- 1 研究背景
- 2 NPC型三电平半桥逆变器调制策略
- 3 NPC型三电平半桥逆变器损耗分析
- 4 实验结果
- 5 小结

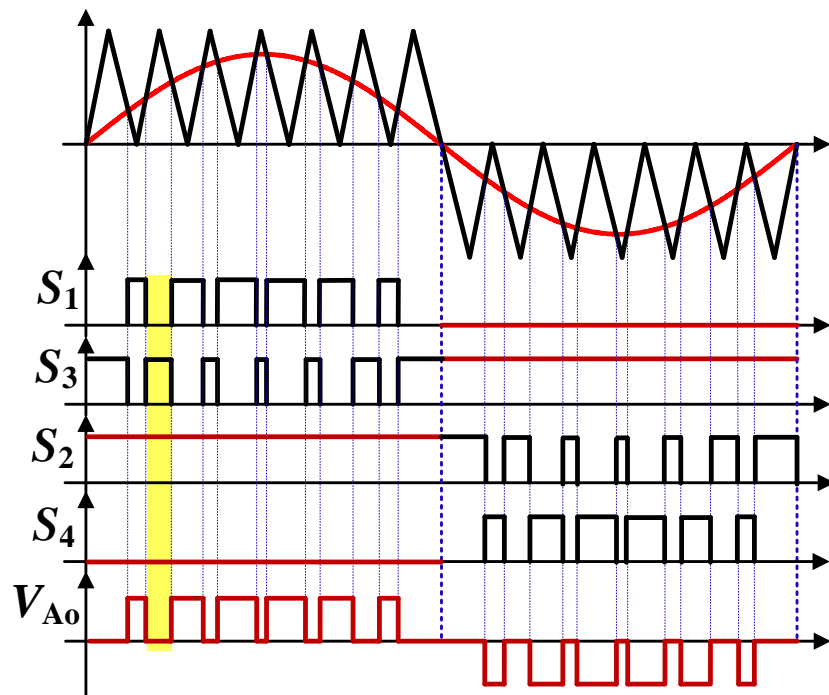


(1) **S1 ON**, **S2 ON**, S3 OFF, S4 OFF





(2) S1 OFF, **S2 ON**, **S3 ON**, S4 OFF



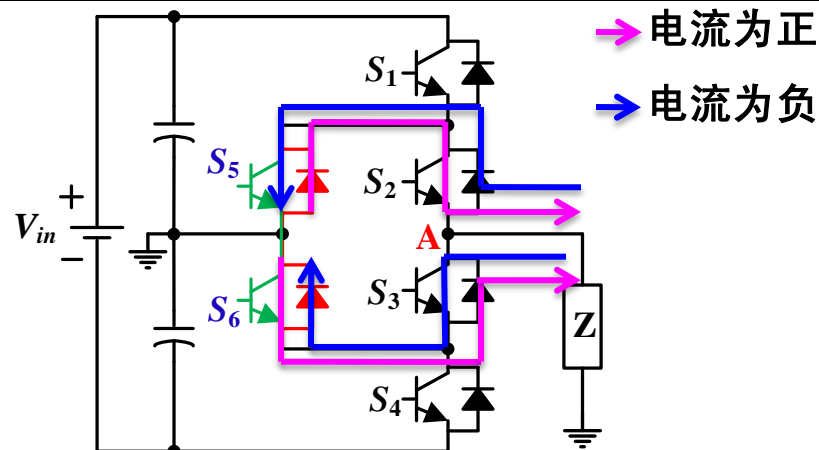
3L-NPC	调制特点		损耗(PF=1)
	工作半周	非工作半周	
外管 $S_1/S_3$	高频	OFF	$con_1$ 、 $swi_1$
内管 $S_2/S_4$	ON	高频	$con_2$
箝位管 $D_u/D_d$	——	——	$Dcon_3$ 、 $Drev_3$

注：可工作在任意功率因数

# 3L-ANPC调制方式1

3L-ANPC	零电平续流路径
有功电流	2条
无功电流	2条

- ◆ 并联续流
  - ◆ 交替续流
- ➔ 调制方式多样化

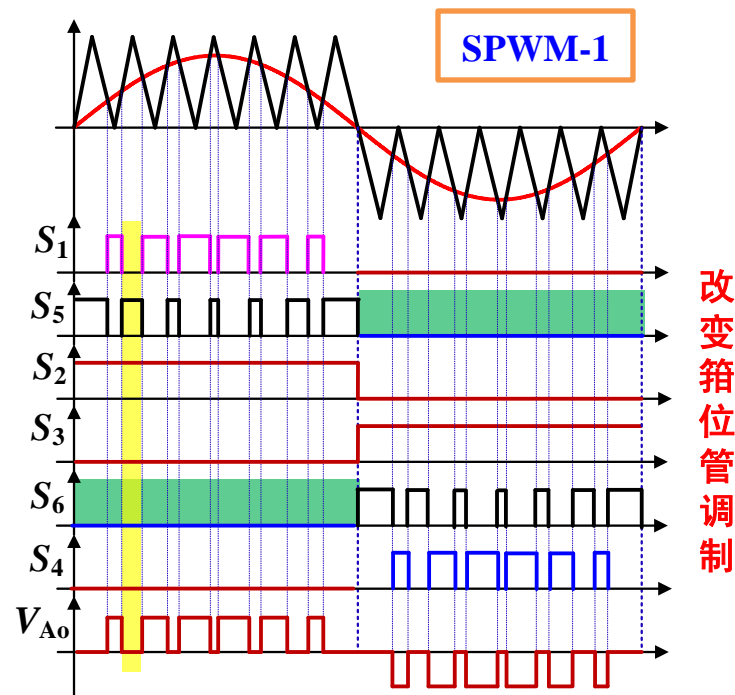


➔ 电流为正  
➔ 电流为负

◆ SPWM-1: 箝位管有半周一**直**关断  
无**并**联、无**交**替续流

拓扑	损耗(PF=1)		
	外管 $S_1/S_4$	内管 $S_2/S_3$	箝位管 $S_5/S_6$
3L-NPC	con <sub>1</sub> swi <sub>1</sub>	con <sub>2</sub>	Dcon <sub>3</sub> Drev <sub>3</sub>
3L-ANPC-1	con <sub>1</sub> swi <sub>1</sub>	con <sub>2</sub>	Dcon <sub>3</sub> Drev <sub>3</sub>

注: 可工作在任意功率因数





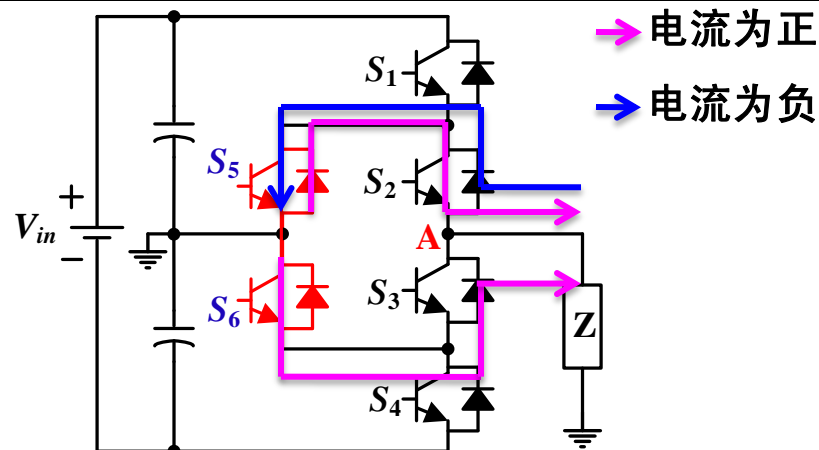
# 3L-ANPC调制方式2

3L-ANPC	零电平续流路径
有功电流	2条
无功电流	2条

◆ 并联续流  
◆ 交替续流

➔

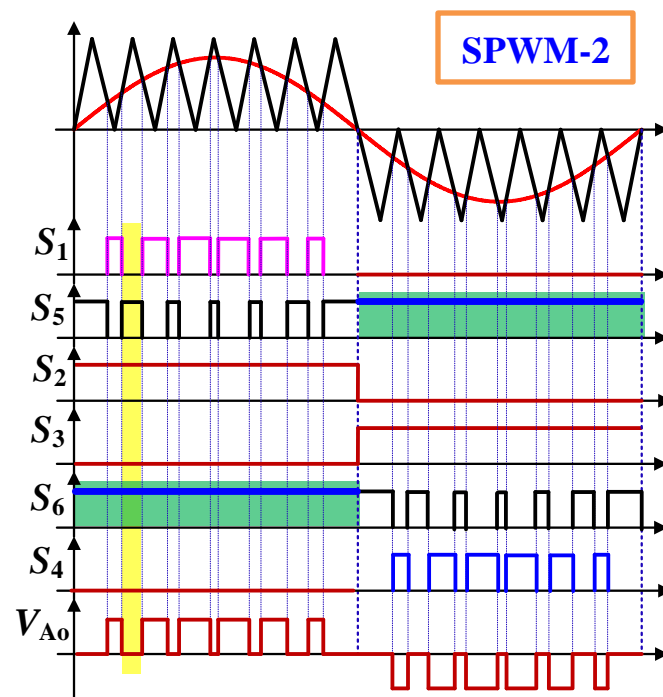
调制方式多样化



◆ SPWM-2: 箝位管有半周一直通  
有并联、无交替续流

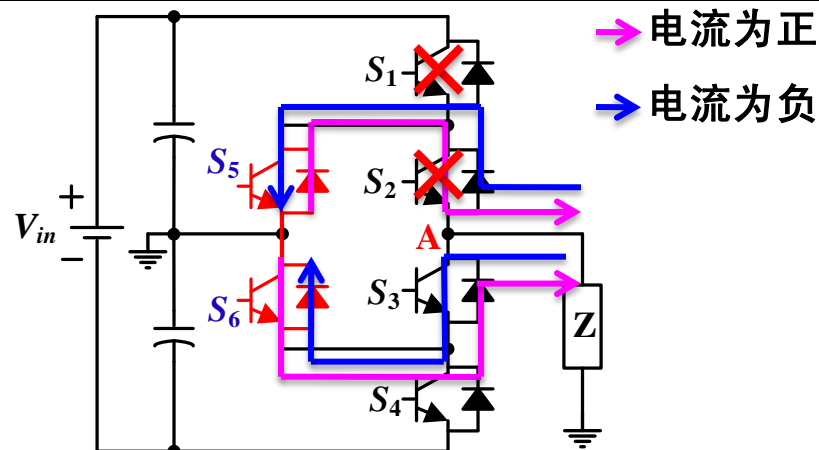
拓扑	损耗(PF=1)		
	外管 $S_1/S_4$	内管 $S_2/S_3$	箝位管 $S_5/S_6$
3L-NPC	$con_1$ $swi_1$	$con_2$	$Dcon_3$ $Drev_3$
3L-ANPC-2	$con_1$ $swi_1$	$con_2 \downarrow$ $Dcon_2$ $Drev_2$	$Dcon_3 \downarrow$ $Drev_3 \downarrow$ $con_3$

注：可工作在任意功率因数

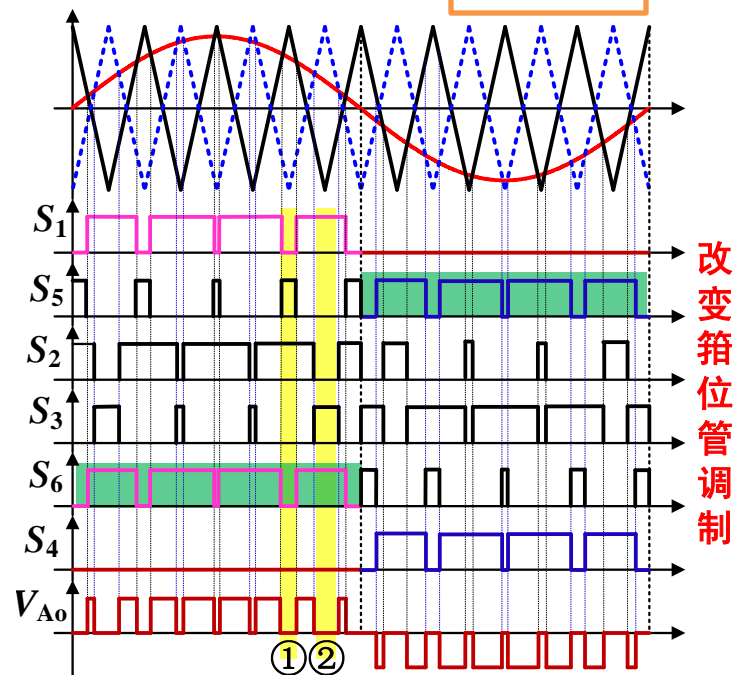


3L-ANPC	零电平续流路径
有功电流	2条
无功电流	2条

◆ 并联续流  
 ◆ 交替续流 → 调制方式多样化



SPWM-3



改变箝位管调制

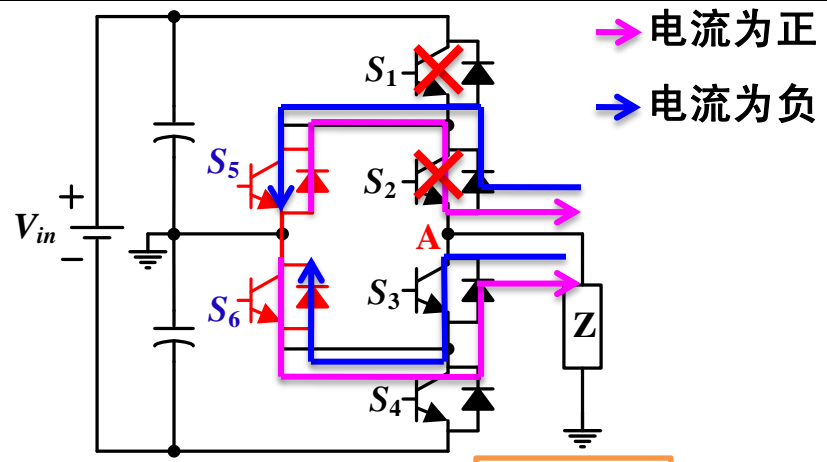
◆ SPWM-3: 箝位管全周期高频开关  
 无并联、有交替续流 → 桥臂电压倍频

拓扑	损耗(PF=1)		
	外管 $S_1/S_4$	内管 $S_2/S_3$	箝位管 $S_5/S_6$
3L-NPC	$con_1$ $swi_1$	$con_2$	$Dcon_3$ $Drev_3$
3L-ANPC-3	$con_1$ $swi_1 \downarrow$	$con_2$ $swi_2$ $Dcon_2$ $Drev_2$	$Dcon_3 \downarrow$ $Drev_3 \downarrow$ $con_3$

注：可工作在任意功率因数

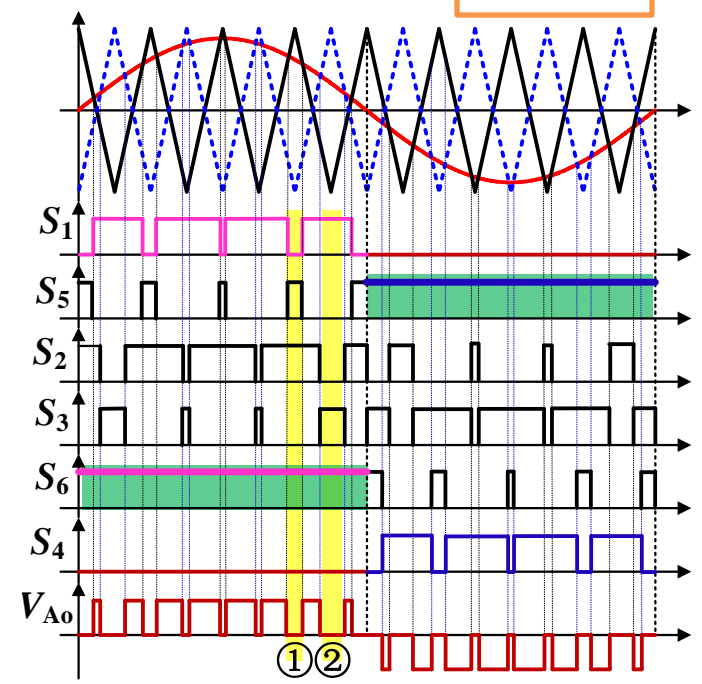
3L-ANPC	零电平续流路径
有功电流	2条
无功电流	2条

◆ 并联续流  
 ◆ 交替续流  
 → 调制方式多样化



SPWM-4

◆ SPWM-4: 箝位管半周一直导通, 另半周高频开关有并联、有交替续流 → 桥臂电压倍频



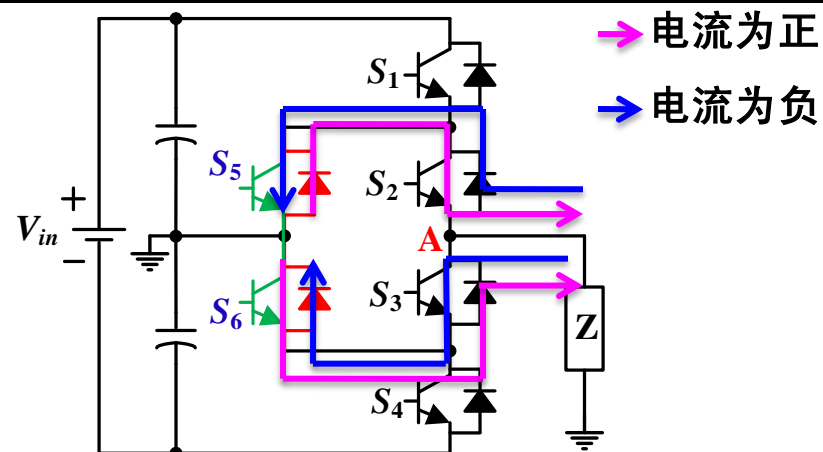
拓扑	损耗(PF=1)		
	外管 $S_1/S_4$	内管 $S_2/S_3$	箝位管 $S_5/S_6$
3L-NPC	$con_1$ $swi_1$	$con_2$	$Dcon_3$ $Drev_3$
3L-ANPC-4	$con_1$ $swi_1 \downarrow$	$con_2$ $swi_2$ $Dcon_2$ $Drev_2$	$Dcon_3 \downarrow$ $Drev_3 \downarrow$ $con_3$

注: 可工作在任意功率因数

3L-ANPC	零电平续流路径
有功电流	2条
无功电流	2条

- ◆ 并联续流
- ◆ 交替续流

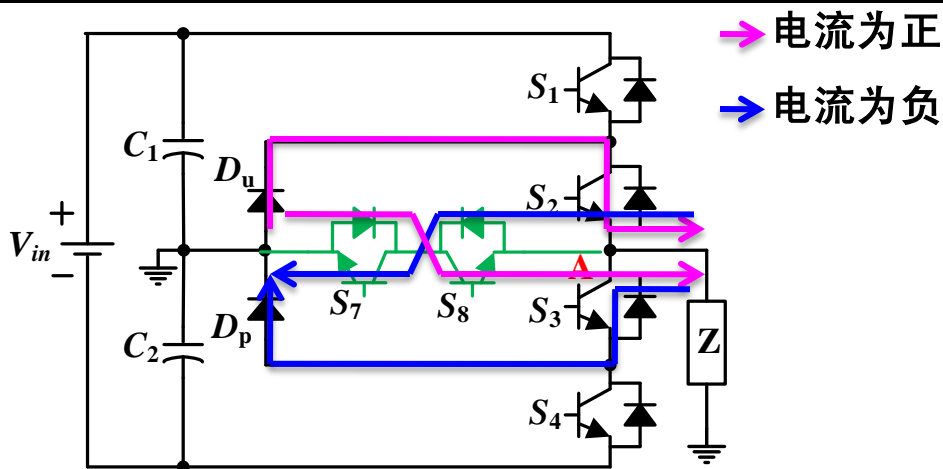
➔ 调制方式多样化



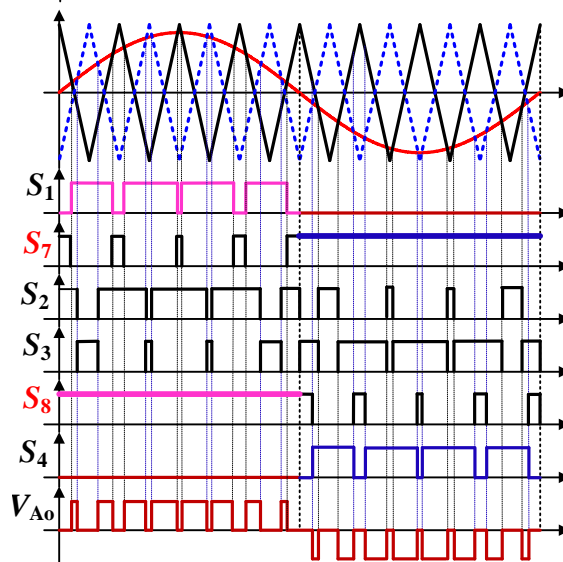
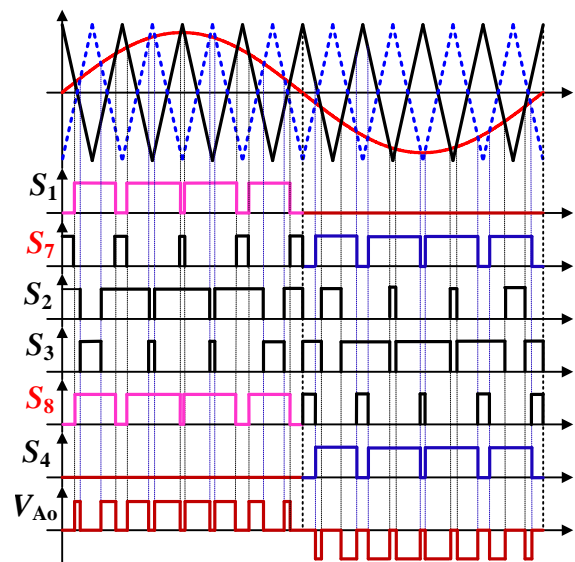
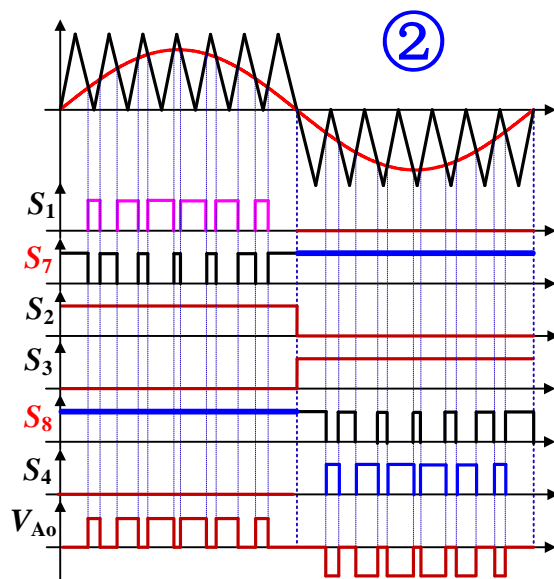
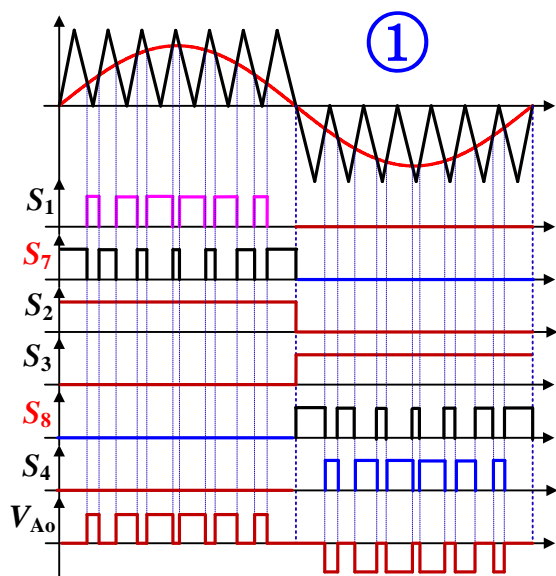
调制方式	调制特点		定义名称	备注
	并联续流	交替续流		
SPWM-1	×	×	<b>SPWM</b>	普通SPWM
SPWM-2	√	×	<b>PF-SPWM</b>	Parallel-Freewheeling SPWM
SPWM-3	×	√	<b>DF-SPWM</b>	Double-Frequency SPWM
SPWM-4	√	√	<b>PFDF_SPWM</b>	PF & DF SPWM

3L-SNPC	零电平续流路径
有功电流	2条
无功电流	2条

- ◆ 并联续流
  - ◆ 交替续流
- ➔ 调制方式多样化



拓扑	调制方式	损耗(PF=1)			
		外管 $S_1/S_4$	内管 $S_2/S_3$	箝位管 $D_u/D_d$	中间管 $S_7/S_8$
3L-NPC	SPWM	con <sub>1</sub> swi <sub>1</sub>	con <sub>2</sub>	Dcon <sub>3</sub> Drev <sub>3</sub>	—
	SPWM	con <sub>1</sub> swi <sub>1</sub>	con <sub>2</sub>	Dcon <sub>3</sub> Drev <sub>3</sub>	无
3L-SNPC	PF-SPWM	con <sub>1</sub> swi <sub>1</sub>	con <sub>2</sub> ↓	Dcon <sub>3</sub> ↓ Drev <sub>3</sub> ↓	con <sub>4</sub> Dcon <sub>4</sub> Drev <sub>4</sub>
	DF-SPWM	con <sub>1</sub> swi <sub>1</sub> ↓	con <sub>2</sub> ↓ swi <sub>2</sub>	Dcon <sub>3</sub> ↓ Drev <sub>3</sub> ↓	con <sub>4</sub> Dcon <sub>4</sub> Drev <sub>4</sub>
	PFDF-SPWM	con <sub>1</sub> swi <sub>1</sub> ↓	con <sub>2</sub> ↓ swi <sub>2</sub>	Dcon <sub>3</sub> ↓ Drev <sub>3</sub> ↓	con <sub>4</sub> Dcon <sub>4</sub> Drev <sub>4</sub>

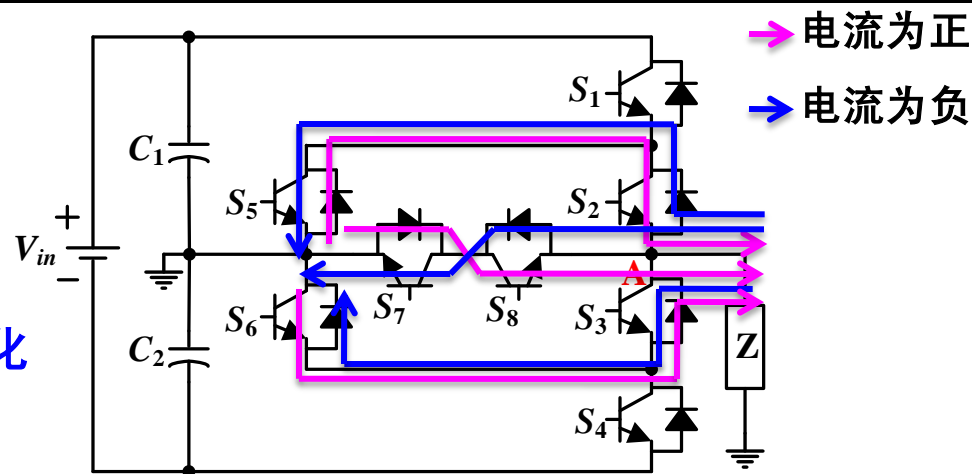


① → SPWM  
② → PF-SPWM  
③ → DF-SPWM  
④ → PFDF-SPWM

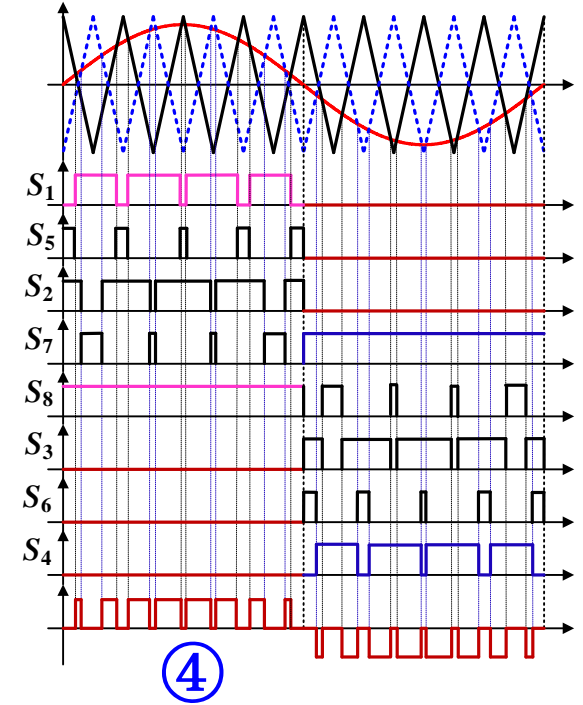
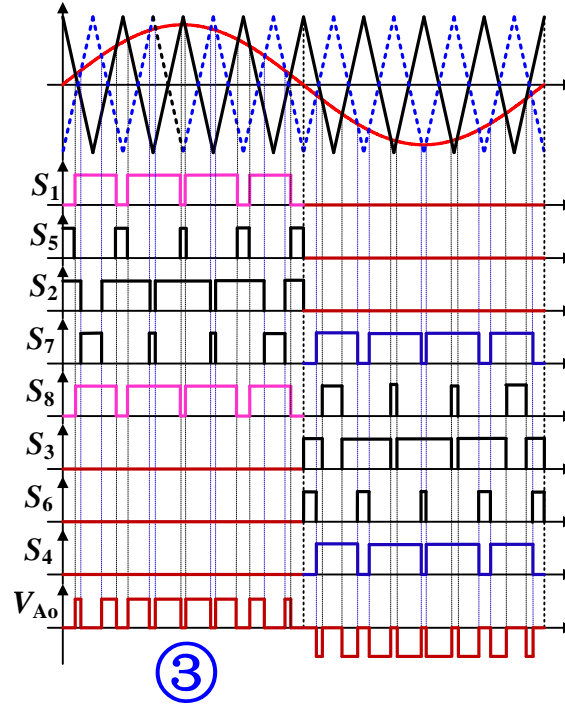
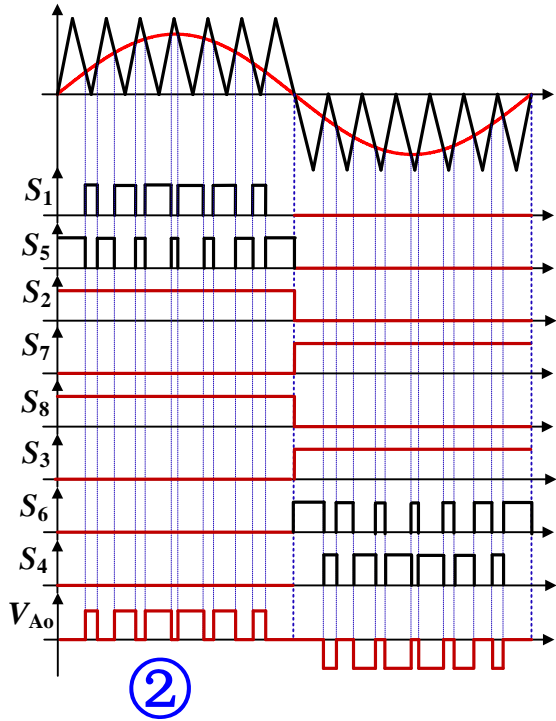
注：可工作在任意功率因数

3L-ASNPC	零电平续流路径
有功电流	3条
无功电流	3条

- ◆ 并联续流
  - ◆ 交替续流
- ➔ 调制方式多样化



拓扑	调制方式	损耗(PF=1)			
		外管 $S_1/S_4$	内管 $S_2/S_3$	箝位管 $S_5/S_6$	中间管 $S_7/S_8$
3L-NPC	SPWM	$con_1$ $swi_1$	$con_2$	$Dcon_3$ $Drev_3$	—
	SPWM			不实用	
3L-ASNPC	PF-SPWM	$con_1$ $swi_1$	$con_2 \downarrow$	$Dcon_3 \downarrow$ $Drev_3 \downarrow$	$con_4$ $Dcon_4$ $Drev_4$
	DF-SPWM	$con_1$ $swi_1 \downarrow$	$con_2 \downarrow$ $swi_2$	$Dcon_3 \downarrow$ $Drev_3 \downarrow$	$con_4$ $Dcon_4$ $Drev_4$
	PFDF-SPWM	$con_1$ $swi_1 \downarrow$	$con_2 \downarrow$ $swi_2$	$Dcon_3 \downarrow$ $Drev_3 \downarrow$	$con_4$ $Dcon_4$ $Drev_4$



② → PF-SPWM

③ → DF-SPWM

④ → PFDF-SPWM

注：可工作在任意功率因数



- ◆衍生的NPC型拓扑：可控器件增多 → 存在多条零电平续流路径 → 调制策略多样化
- ◆调制策略：
  - ◆SPWM：非倍频，无并联续流路径
  - ◆PF-SPWM：非倍频，有并联续流路径
  - ◆DF-SPWM：倍频，无并联续流路径
  - ◆PFDF-SPWM：倍频，有并联续流路径

- 1 研究背景
- 2 NPC型三电平半桥逆变器调制策略
- 3 NPC型三电平半桥逆变器损耗分析
- 4 实验结果
- 5 小结

## ◆ IGBT损耗计算模型

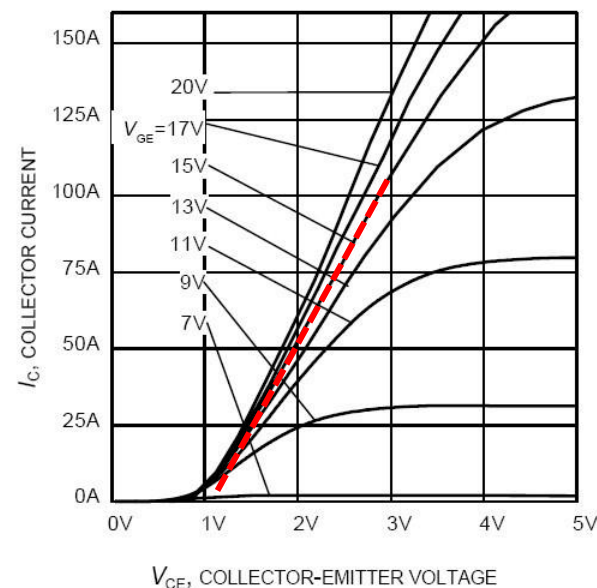
### ◆ 导通损耗： $I_C$ 与 $V_{CE}$ 曲线→线性化

$$v_{CE}(i_C) = V_{CE0} + R_{CE}i_C$$

$$P_{con} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{CE}(i_C) \cdot i_C(t) dt$$

### ◆ 开关损耗： $E_{on}$ 与 $E_{off}$ 包含由电流拖尾及二极管反向恢复引起的损耗

#### ◆ 近似认为在特定电压和电流范围内→ $E \propto V_{CE}$ 且 $E \propto I_C$



Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
<b>IGBT Characteristic</b>						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_j=25^\circ\text{C}$ ,	-	33	-	ns
Rise time	$t_r$	$V_{CC}=600\text{V}$ , $I_C=40\text{A}$ ,	-	28	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	$V_{GE}=0/15\text{V}$ ,	-	314	-	
Fall time	$t_f$	$R_G=12\Omega$ ,	-	94	-	
Turn-on energy	$E_{on}$	$L_{\sigma}^{(2)}=80\text{nH}$ ,	-	3.2	-	mJ
Turn-off energy	$E_{off}$	$C_{\sigma}^{(2)}=67\text{pF}$	-	2.05	-	
Total switching energy	$E_{ts}$	Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	5.25	-	

$$P_{swi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ E_{on} \frac{v_{CE}(t_{on})i_C(t)}{V_{CE}I_C} + E_{off} \frac{v_{CE}(t_{off})i_C(t)}{V_{CE}I_C} \right] dt \cdot f_s$$

## ◆ 二极管损耗计算模型

### ◆ 导通损耗： $I_F$ 与 $V_F$ 曲线→线性化

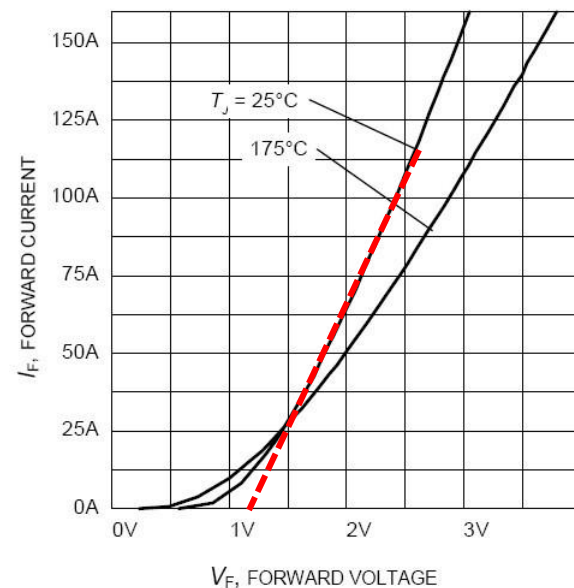
$$v_F(i_F) = V_{F0} + R_F i_F$$

$$P_{con} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_F(i_F) \cdot i_F(t) dt$$

### ◆ 反向恢复损耗：与反向恢复电荷 $Q_{rr}$ 及反向耐压 $V_R$ 有关

◆  $Q_{rr} \propto I_F$ 且 $Q_{rr} \propto di_F/dt$ ，近似简单认为 $Q_{rr} \propto I_F$

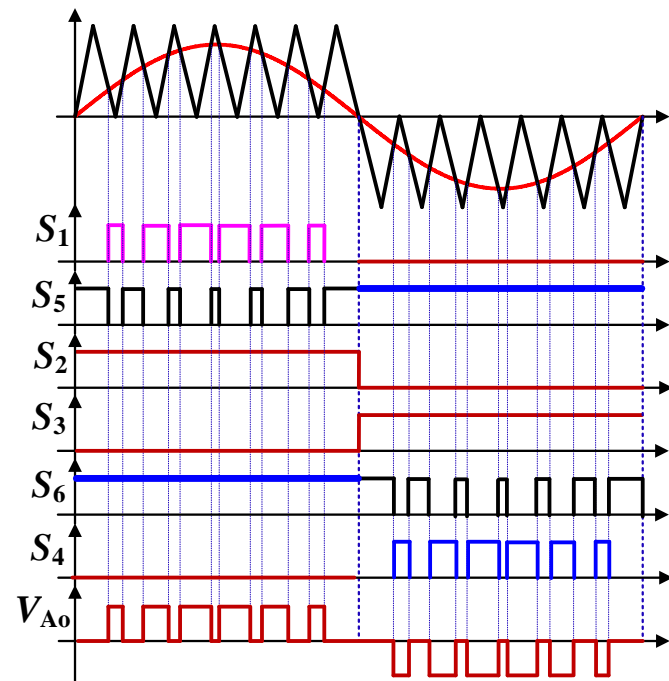
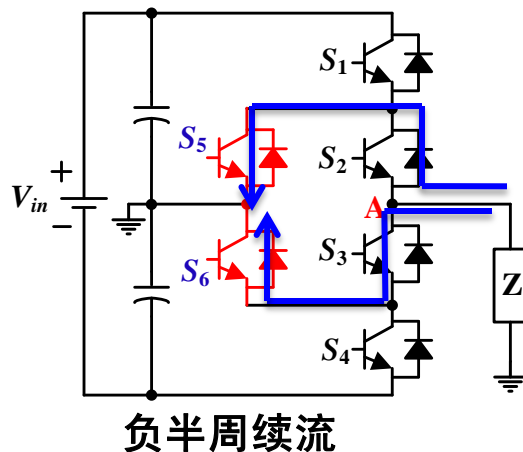
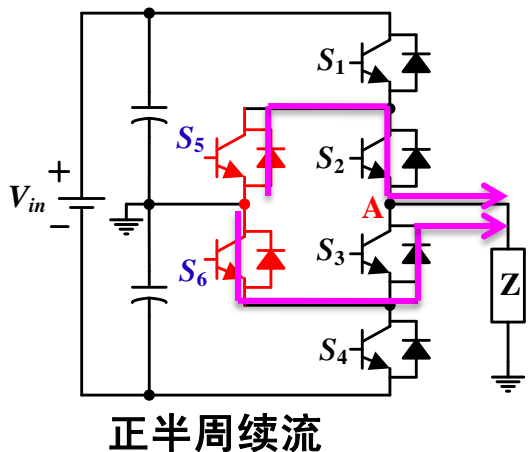
$$P_{rev} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ \frac{i_F(t)}{I_F} Q_{rr} V_R \right] dt \cdot f_s$$



## ◆3L-ANPC: PF-SPWM→**并联续流**, PF=1

3L-ANPC	正半周	负半周	损耗
外管 $S_1$	IGBT $i_o(t) D(t)$	0	con、swi
内管 $S_2$	IGBT $i_o(t) D(t) + i_o(t)/2 \cdot [1-D(t)]$	体二极管 $i_o(t)/2 \cdot [1-D(t)]$	con、Dcon、Drev
箝位管 $S_6$	IGBT $i_o(t)/2 \cdot [1-D(t)]$	体二极管 $i_o(t)/2 \cdot [1-D(t)]$	con、Dcon、Drev

## ◆ $D(t)$ : $v_{Ao}$ 的等效占空比



◆桥臂输出电压 $v_{Ao}$ 的等效占空比 $D$ :

$$D(V_{in}, V_o, t) = \frac{\sqrt{2}V_o \sin t}{V_{in}/2}$$

◆输出电流 $i_o$ :

$$i_o(V_o, t) = \frac{\sqrt{2}P_o \sin t}{V_o}$$

◆外管 $S_1/S_4$ 损耗: 导通损耗、开关损耗

$$P_{S1\_con}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi v_{CE}(i_o(V_o, t)) \cdot i_o(V_o, t) \cdot D(V_{in}, V_o, t) dt$$

$$P_{S1\_swi}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ E_{on} \frac{v_{CE}(t_{on}) i_o(V_o, t)}{V_{CE} I_C} + E_{off} \frac{v_{CE}(t_{off}) i_o(V_o, t)}{V_{CE} I_C} \right] dt \cdot f_s$$

◆内管 $S_2/S_3$ 损耗: 导通损耗、体二极管导通损耗及反向恢复损耗

$$P_{S2\_con}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ v_{CE}(i_o(V_o, t)) \cdot i_o(V_o, t) \cdot D(V_{in}, V_o, t) + v_{CE}\left(\frac{i_o(V_o, t)}{2}\right) \cdot \frac{i_o(V_o, t)}{2} \cdot [1-D(V_{in}, V_o, t)] \right] dt$$

$$P_{S2d\_dcon}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ v_F\left(\frac{i_o(V_o, t)}{2}\right) \cdot \frac{i_o(V_o, t)}{2} \cdot [1-D(V_{in}, V_o, t)] \right] dt$$

$$P_{S2d\_rev}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ \frac{i_o(V_o, t)}{2\sqrt{2} \cdot I_F} \cdot Q_{rr} \cdot \frac{V_{in}}{2} \right] dt \cdot f_s$$

## ◆ 箝位管 $S_5/S_6$ 损耗：导通损耗、体二极管导通损耗及反向恢复损耗

$$P_{S6\_con}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ v_{CE} \left( \frac{i_o(V_o, t)}{2} \right) \cdot \frac{i_o(V_o, t)}{2} \cdot [1-D(V_{in}, V_o, t)] \right] dt$$

$$P_{S6d\_con}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ v_F \left( \frac{i_o(V_o, t)}{2} \right) \cdot \frac{i_o(V_o, t)}{2} \cdot [1-D(V_{in}, V_o, t)] \right] dt$$

$$P_{S6d\_rev}(V_{in}, V_o) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[ \frac{i_o(V_o, t)}{2\sqrt{2} \cdot I_F} \cdot Q_{rr} \cdot \frac{V_{in}}{2} \right] dt \cdot f_s$$

## ◆ 各开关器件损耗及总损耗

$$P_{s1\_tot}(V_{in}, V_o) = P_{s1\_con}(V_{in}, V_o) + P_{s1\_swi}(V_{in}, V_o)$$

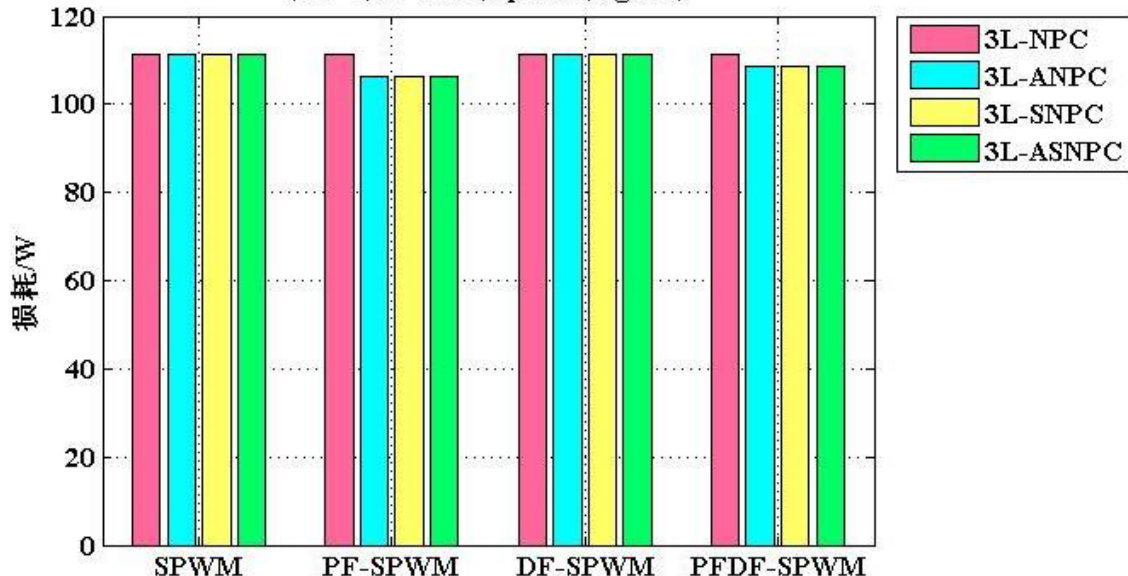
$$P_{s2\_tot}(V_{in}, V_o) = P_{s2\_con}(V_{in}, V_o) + P_{s2d\_con}(V_{in}, V_o) + P_{s2d\_rev}(V_{in}, V_o)$$

$$P_{s6\_tot}(V_{in}, V_o) = P_{s6\_con}(V_{in}, V_o) + P_{s6d\_con}(V_{in}, V_o) + P_{s6d\_rev}(V_{in}, V_o)$$

$$P_{tot\_loss}(V_{in}, V_o) = 2 \left[ P_{s1\_tot}(V_{in}, V_o) + P_{s2\_tot}(V_{in}, V_o) + P_{s6\_tot}(V_{in}, V_o) \right]$$

# NPC型三电平半桥逆变器损耗分析

4种3L-NPC开关器件总损耗比较图  
(PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvm</sub>, U<sub>gmin</sub>)

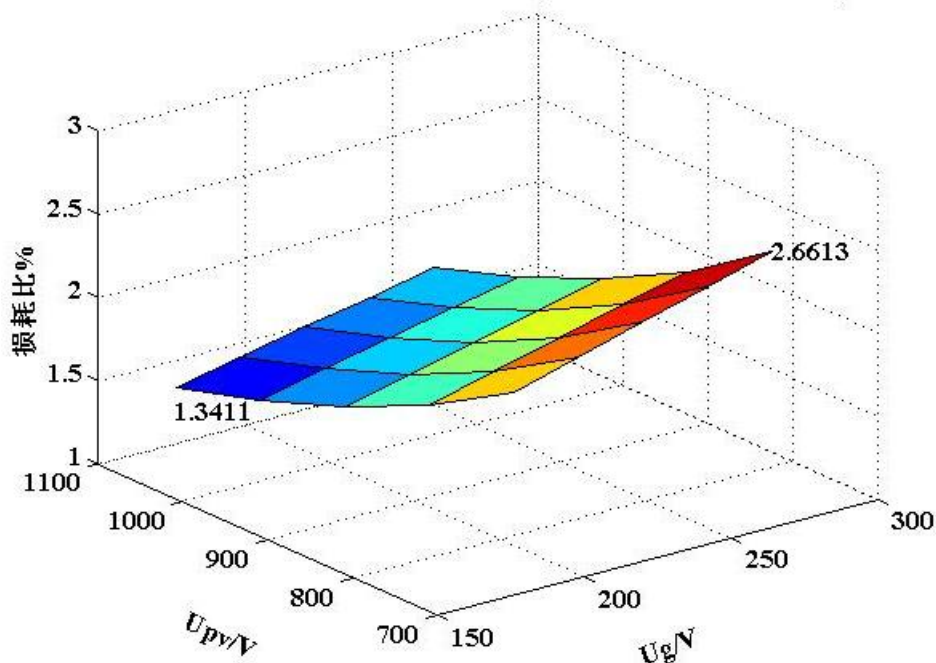


损耗分析条件	参数
$V_{in}$	700V~1100V
$V_g(\text{rms})$	176V~264V
$P_o$	5kW
$f_g$	50Hz
输出等效频率	15KHz
IGBT	IKW40N120T2
DIODE	IGBT-体二极管
PF	1

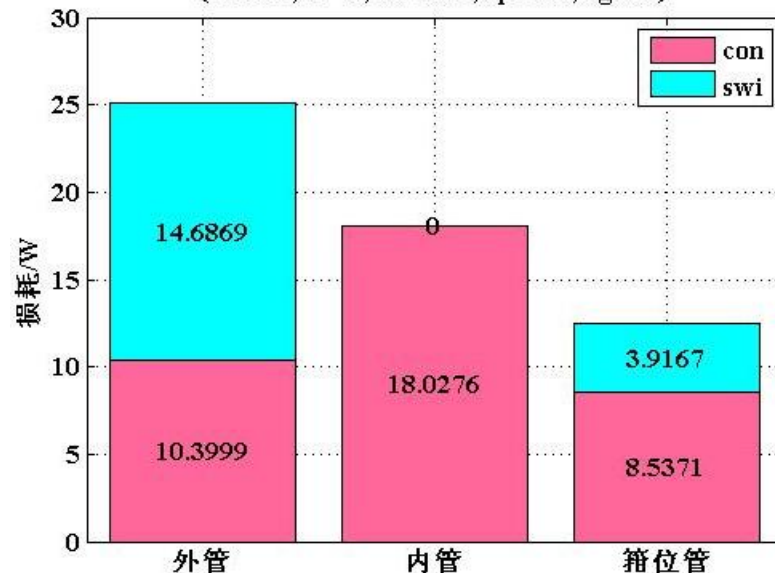
- ◆在相同调制方式下，各NPC拓扑开关器件总损耗基本一致；
- ◆在不同调制方式下，同一NPC拓扑的开关器件总损耗基本一致。



3L-NPC开关器件总损耗比图(SPWM,PF=1,Po=5kW)

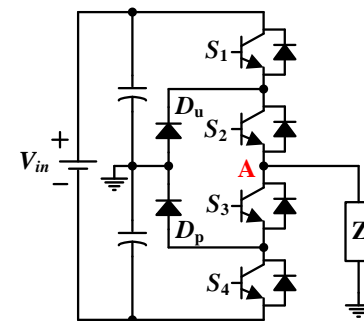


3L-NPC开关器件损耗分布图  
(SPWM,PF=1,Po=5kW,Upvmin,Ugmin)

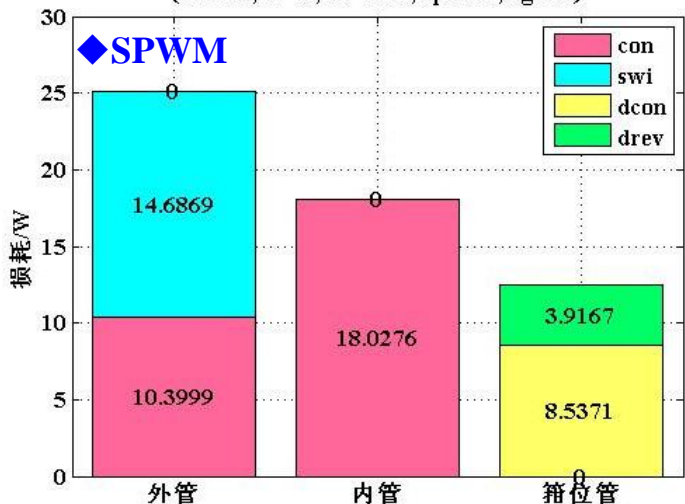


3L-NPC	外管	内管	箝位管	总损耗
器件总损耗	50W	36W	28W	111W
损耗比	1.0%	0.72%	0.5%	2.22%

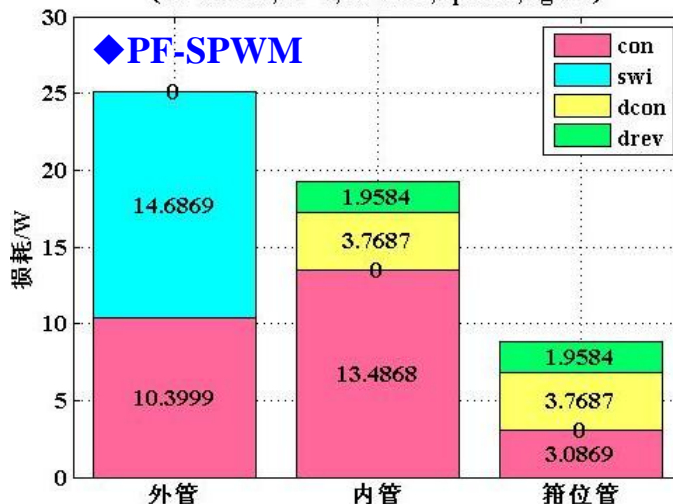
◆3L-NPC: 容量提高时, 内外管损耗差异加大, 散热设计困难, 因此不易扩容。



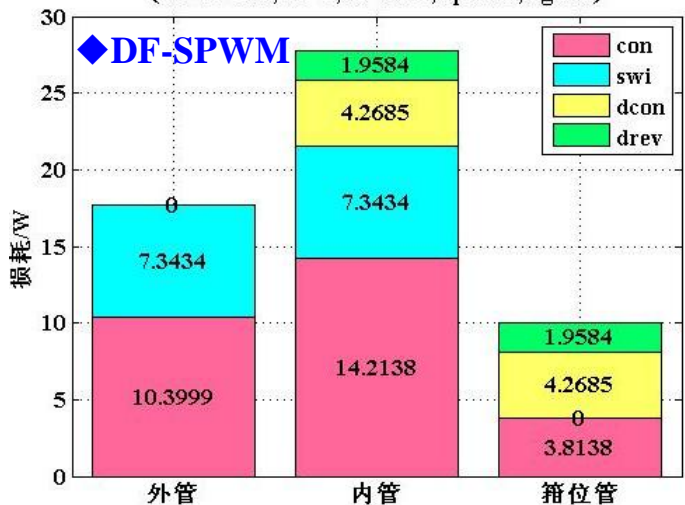
3L-ANPC开关器件损耗分布图  
(SPWM, PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvmin</sub>, U<sub>gmin</sub>)



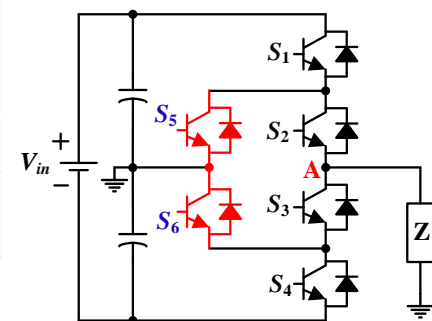
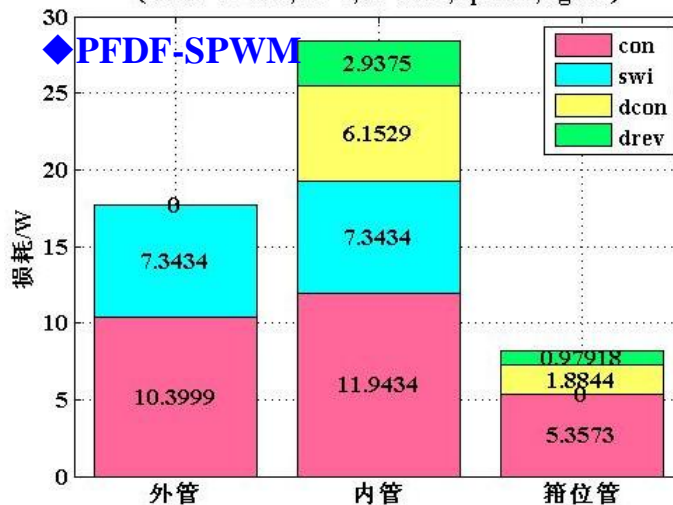
3L-ANPC开关C器件损耗分布图  
(PF-SPWM, PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvmin</sub>, U<sub>gmin</sub>)



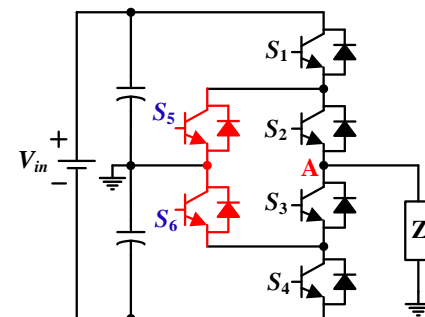
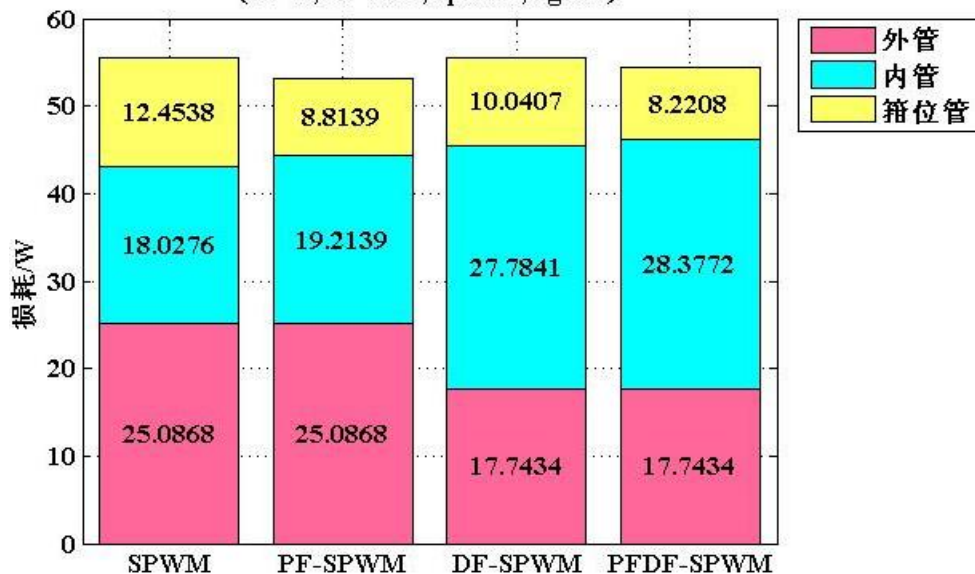
3L-ANPC开关器件损耗分布图  
(DF-SPWM, PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvmin</sub>, U<sub>gmin</sub>)



3L-ANPC开关器件损耗分布图  
(PFDF-SPWM, PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvmin</sub>, U<sub>gmin</sub>)



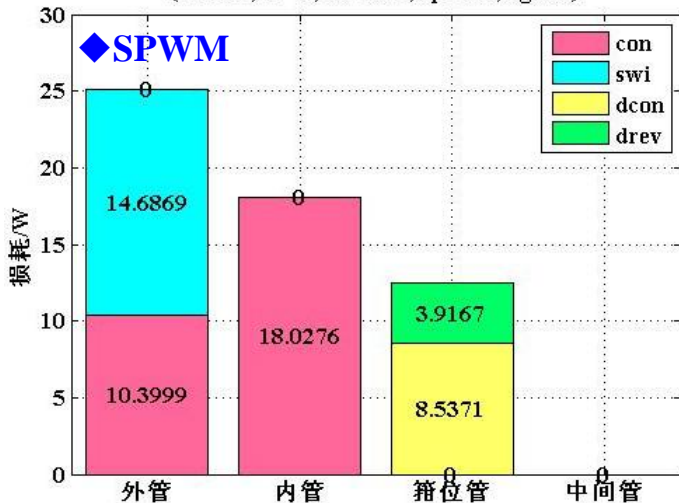
在不同调制策略下，3L-ANPC开关器件损耗分布图  
(PF=1, Po=5kW, Upvmin, Ugmin)



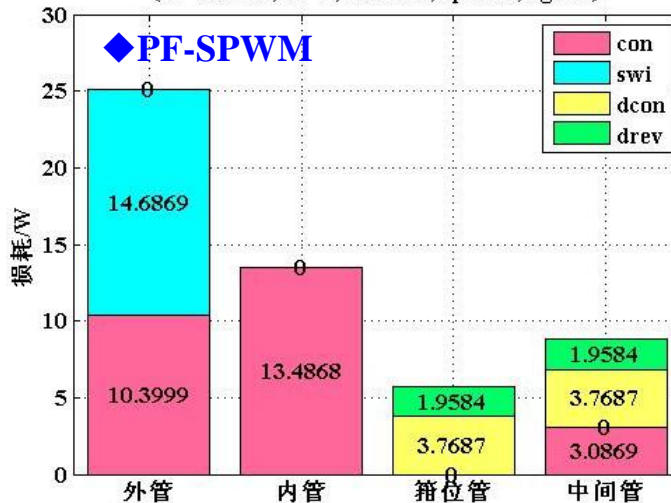
3L-ANPC	调制方式	总损耗	外管	内管	箝位管
损耗比	SPWM	111W	1.0%	0.72%	0.5%
	PF-SPWM	106W	1.0%	0.769%	0.353%
	DF-SPWM	111W	0.71%	1.11%	0.4%
	PFDF-SPWM	108W	0.71%	1.135%	0.33%

◆3L-ANPC: 开关器件损耗 差异较大，不易于扩容。

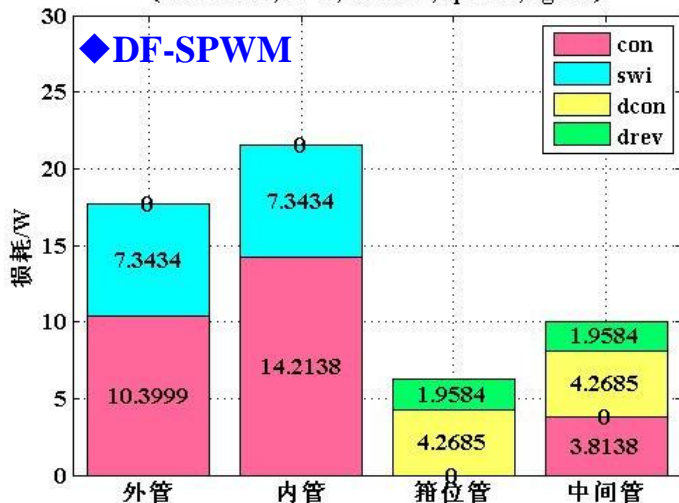
3L-SNPC开关器件损耗分布图  
(SPWM, PF=1, Po=5kW, Upvmin, Ugmin)



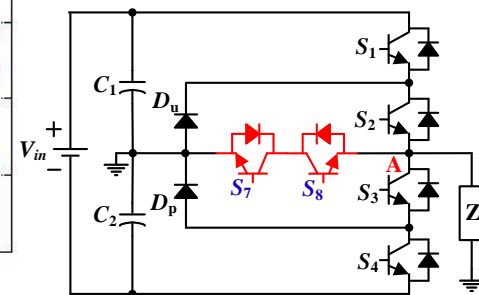
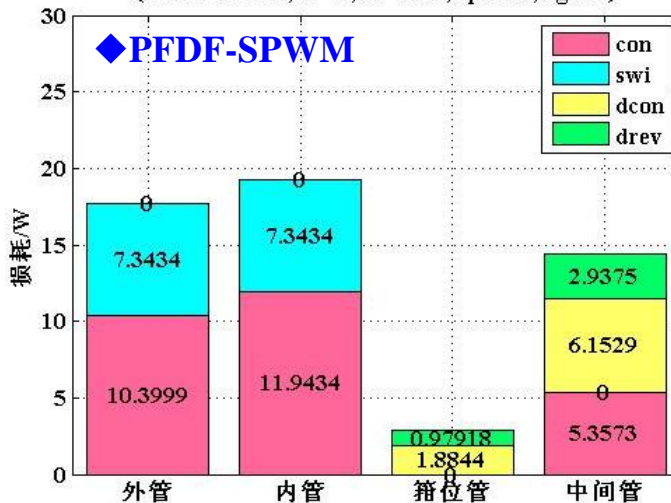
3L-SNPC开关器件损耗分布图  
(PF-SPWM, PF=1, Po=5kW, Upvmin, Ugmin)

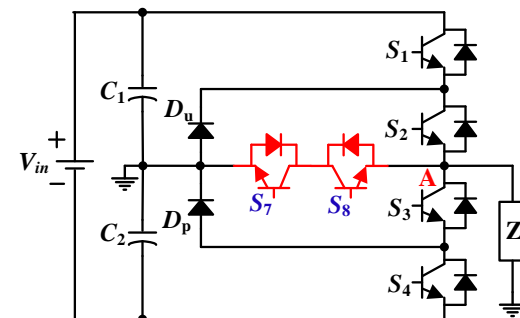
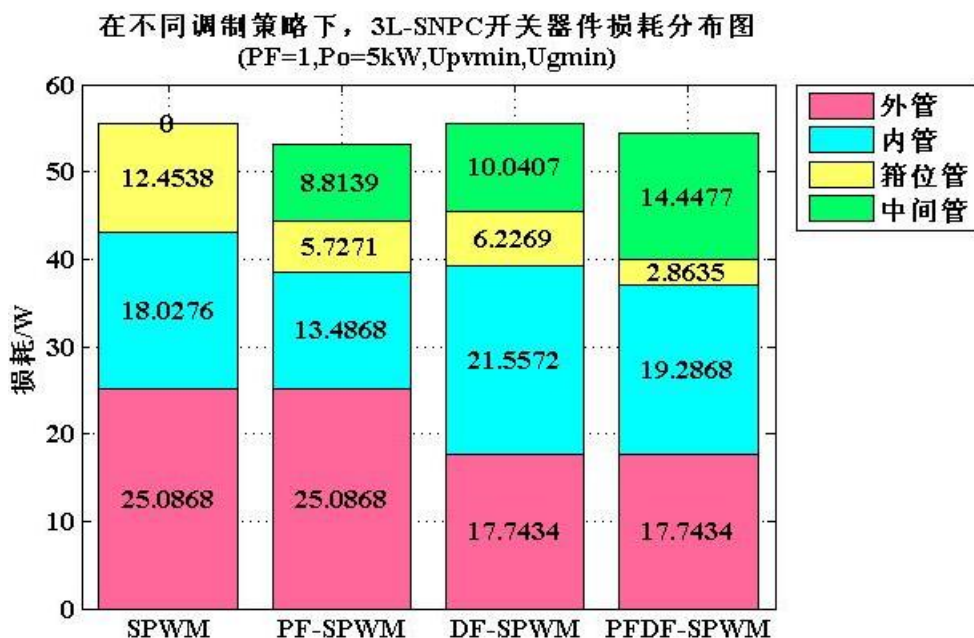


3L-SNPC开关器件损耗分布图  
(DF-SPWM, PF=1, Po=5kW, Upvmin, Ugmin)



3L-SNPC开关器件损耗分布图  
(PFDF-SPWM, PF=1, Po=5kW, Upvmin, Ugmin)

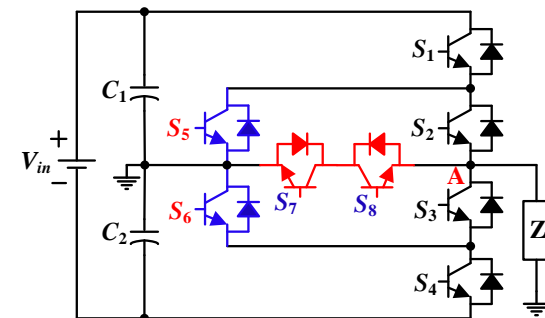




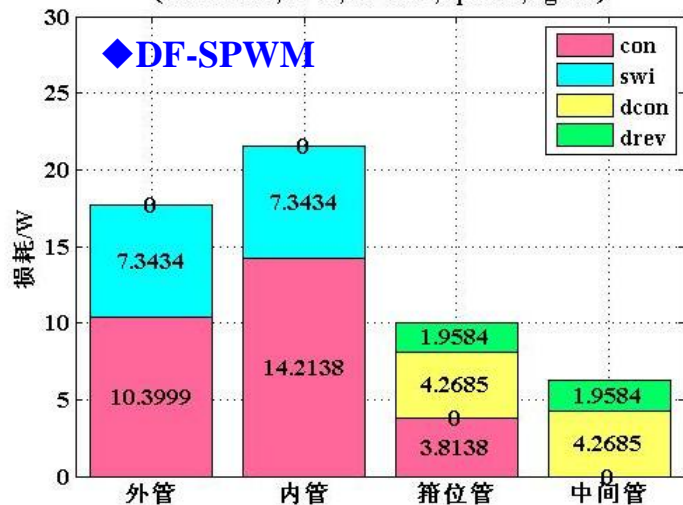
3L-SNPC	调制方式	总损耗	外管	内管	箝位管	中间管
损耗比	SPWM	不实用，退化为3L-NPC				
	PF-SPWM	106W	1.0%	0.54%	0.23%	0.353%
	DF-SPWM	111W	0.71%	0.86%	0.25%	0.4%
	PFDF-SPWM	108W	0.71%	0.77%	0.115%	0.578%

◆3L-SNPC: 在DF-SPWM及PFDF-SPWM下，内外管损耗较为均匀，便于扩容。

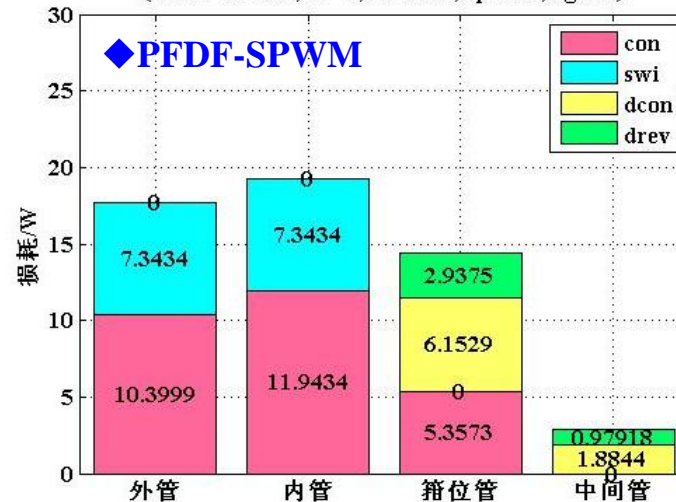
3L-ASNPC器件损耗分布图  
(PF-SPWM, PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvmin</sub>, U<sub>gmin</sub>)

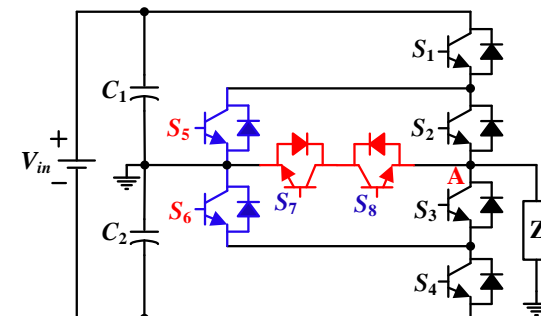
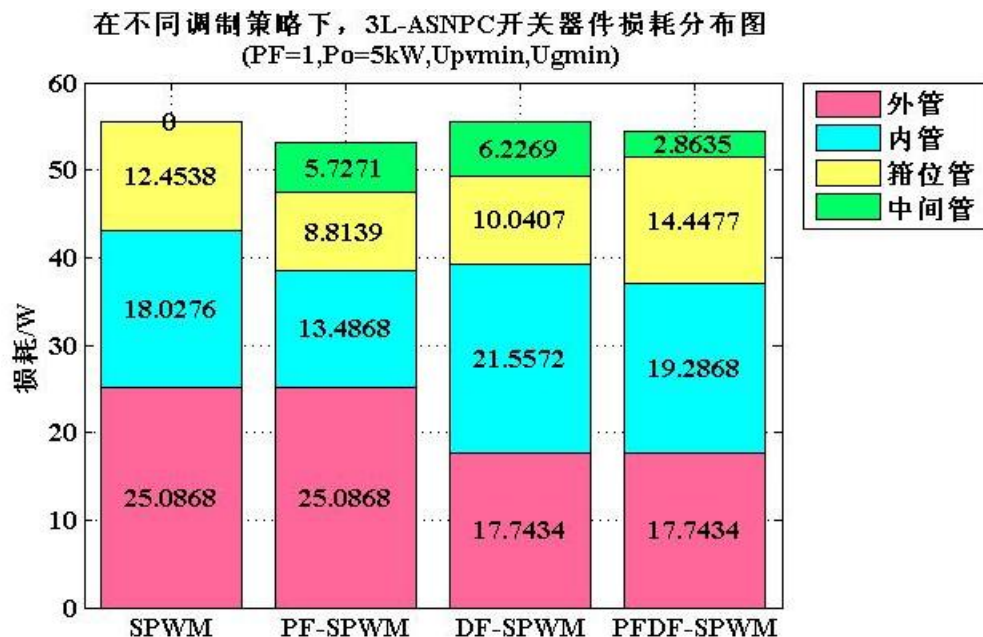


3L-ASNPC器件损耗分布图  
(DF-SPWM, PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvmin</sub>, U<sub>gmin</sub>)



3L-ASNPC器件损耗分布图  
(PFDF-SPWM, PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, U<sub>pvmin</sub>, U<sub>gmin</sub>)





3L-ASNPC	调制方式	总损耗	外管	内管	箝位管	中间管
	SPWM	不实用，退化为3L-NPC				
损耗比	PF-SPWM	106W	1.0%	0.54%	0.353%	0.23%
	DF-SPWM	111W	0.71%	0.86%	0.402%	0.25%
	PFDF-SPWM	108W	0.71%	0.77%	0.578%	0.115%

◆3L-ASNPC: 在DF-SPWM及PFDF-SPWM下，内外管损耗较为均匀，便于扩容。

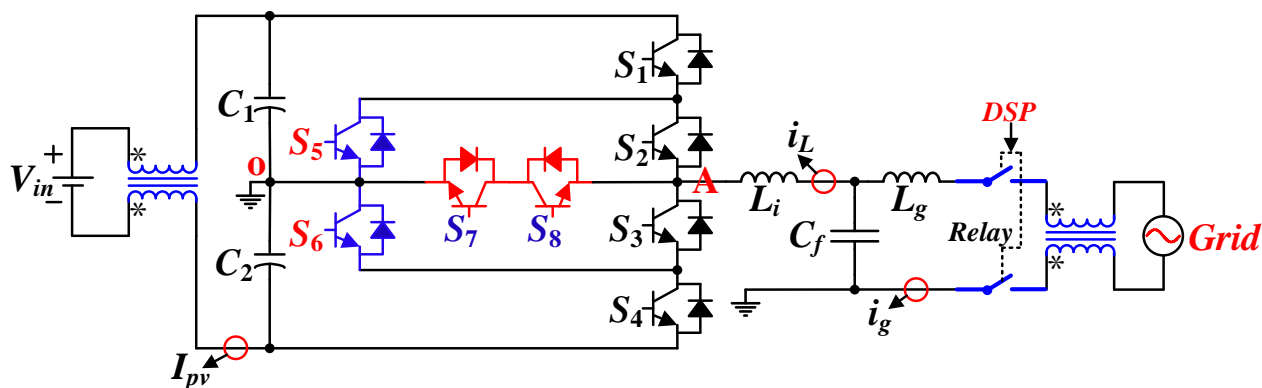
- ◆NPC拓扑及调制策略多样化，分别对各NPC拓扑在不同调制方式下进行损耗分布分析
  - ◆3L-NPC、3L-ANPC、3L-SNPC、3L-ASNPC：在不同调制方式下，其开关器件总损耗基本一致；
  - ◆3L-ANPC：开关器件损耗差异较大，不易扩容；
  - ◆3L-SNPC、3L-ASNPC：在DF-SPWM及PFDF-SPWM下，内外管损耗分布较为均衡；
- ◆衍生NPC型拓扑
  - ◆合理分配零电平续流路径——开关器件损耗趋于均衡
  - ◆效率不会因拓扑复杂化而降低
  - ◆合理选取调制策略——可扩容

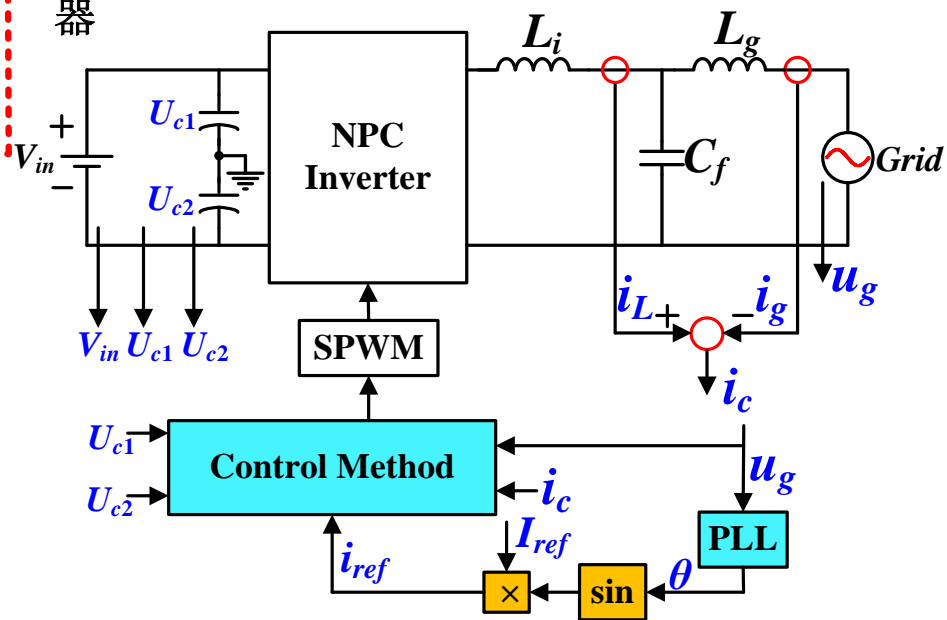
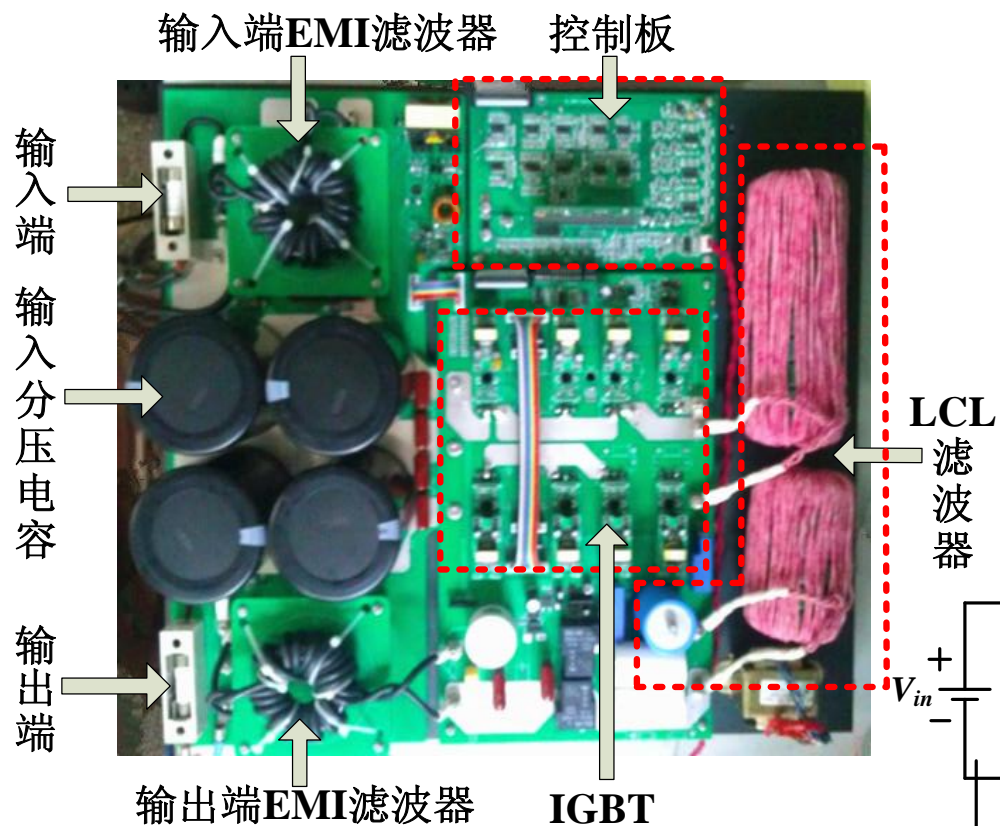


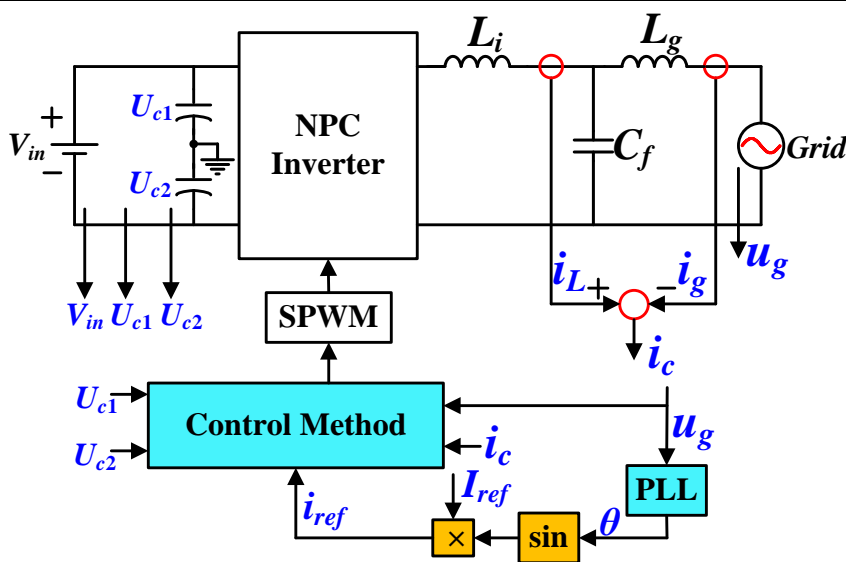
- 1 研究背景
- 2 NPC型三电平半桥逆变器调制策略
- 3 NPC型三电平半桥逆变器损耗分析
- 4 实验结果
- 5 小结

## ◆NPC型三电平半桥逆变器：统一实验平台

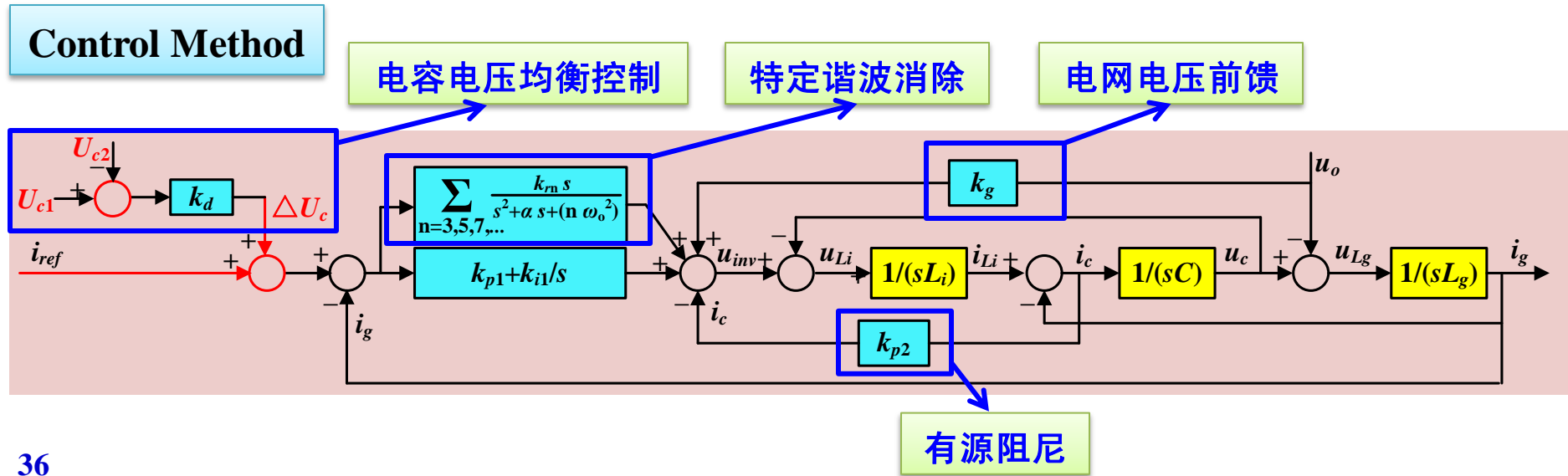
NPC型逆变器统一实验平台参数			
$V_{in}$	700V~1100V	$V_g$	176V~264V
$C_1/C_2$	1800 $\mu$ F	$L_i$	0.6mH
等效开关频率	15kHz	$L_g$	0.36mH
$S_1\sim S_8$	IKW40N120T	$C_f$	10 $\mu$ F



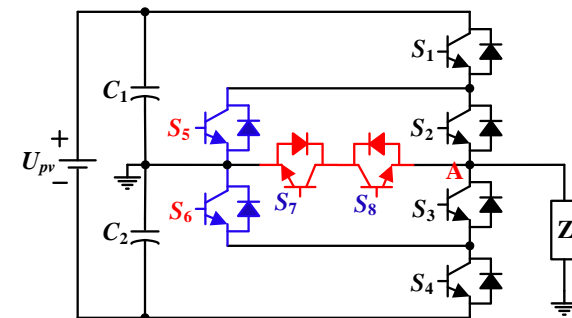
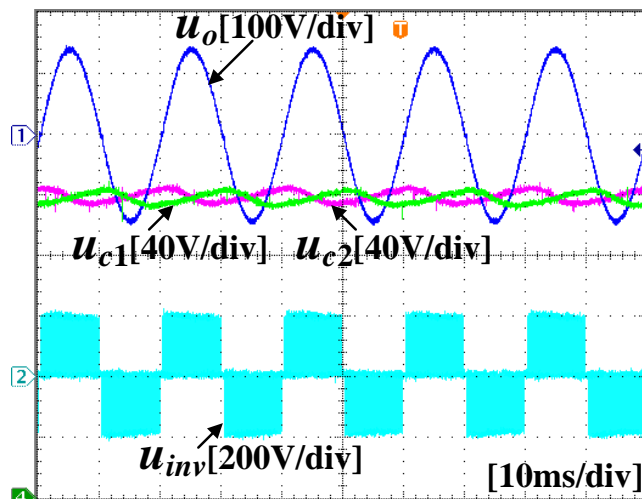




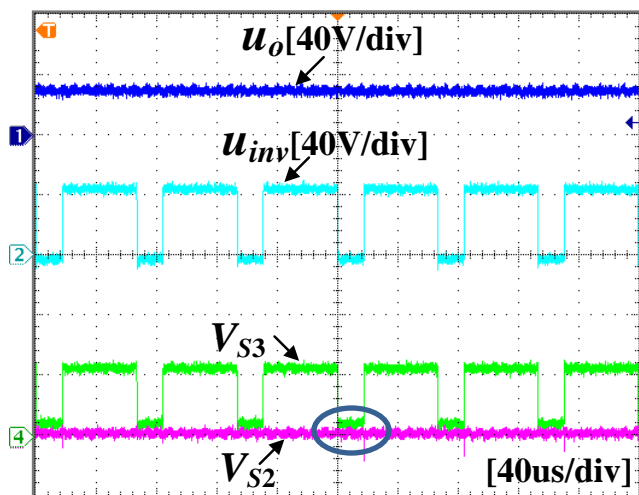
- ◆ **电容电压均衡控制:**  
加入电容压差前馈
- ◆ **有源阻尼:**  
电容电流比例反馈 → 谐振抑制
- ◆ **电网电压前馈:**  
电网电压比例前馈 → 抑制电网谐波对进网电流的影响
- ◆ **特定谐波消除:**  
准谐振调节器 → 抑制进网电流低频谐波



◆开环:  $V_{in}=400V, R_L=17\Omega, m=0.73, f_s=15kHz$

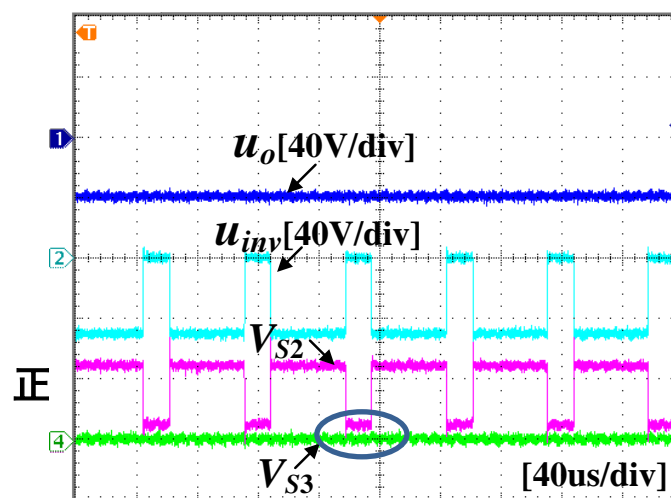


SPWM: 无并联通流路径



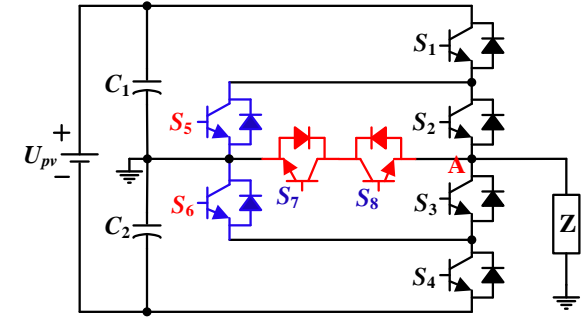
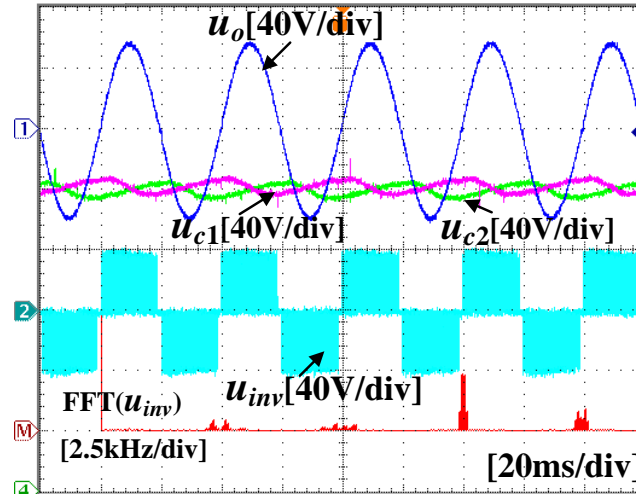
37

正半周

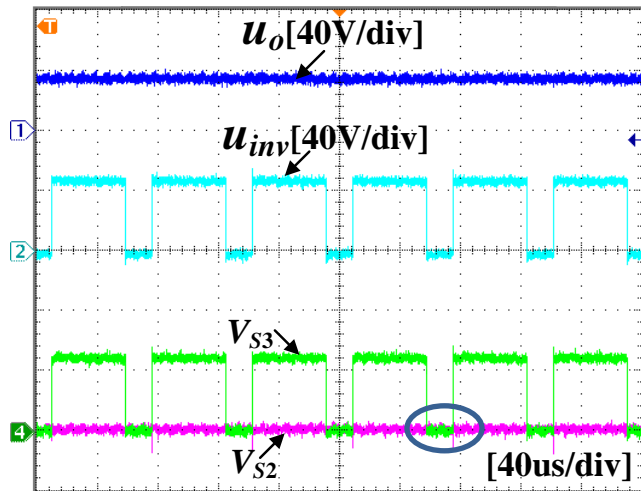


负半周

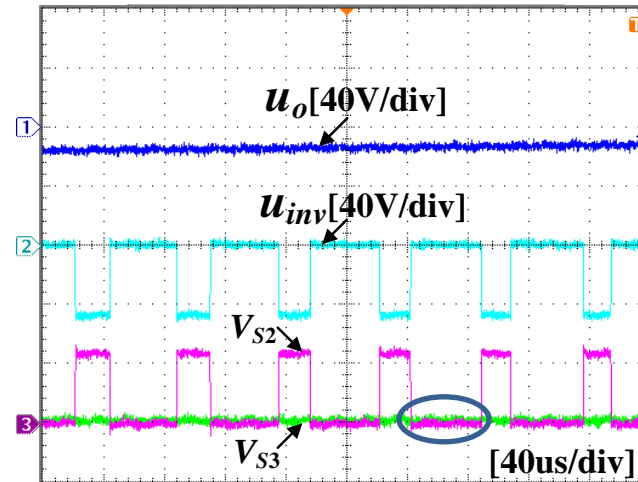
◆开环:  $V_{in}=400V, R_L=17\Omega, m=0.73, f_s=15kHz$



**PF-SPWM:**  
存在并联续流路径

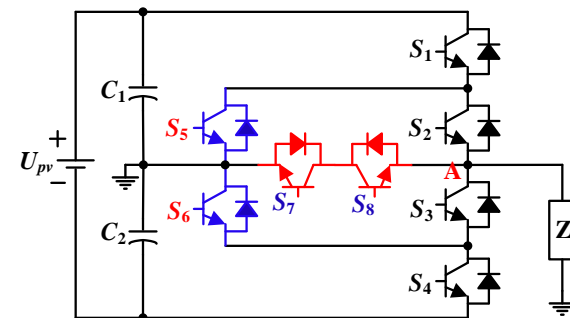
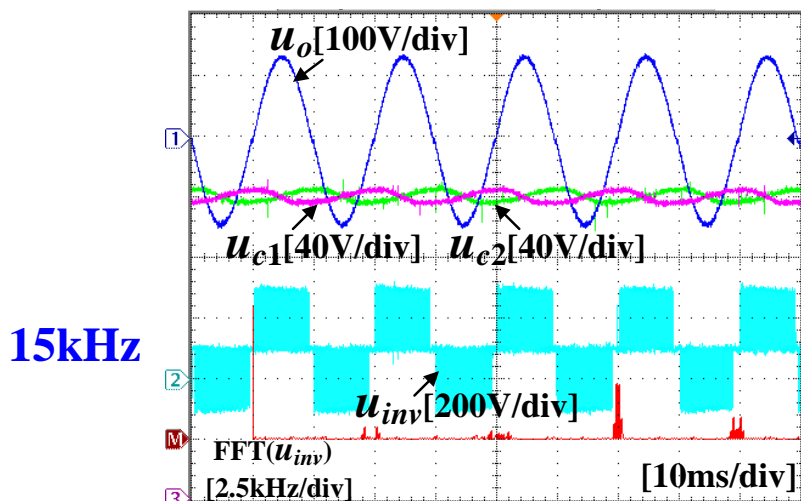


正半周

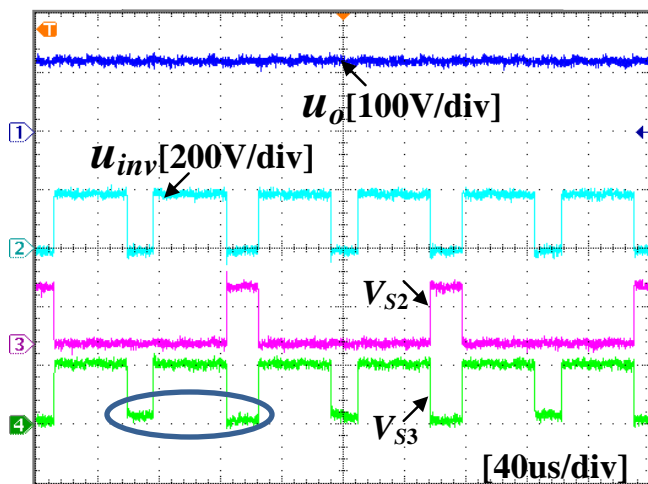


负半周

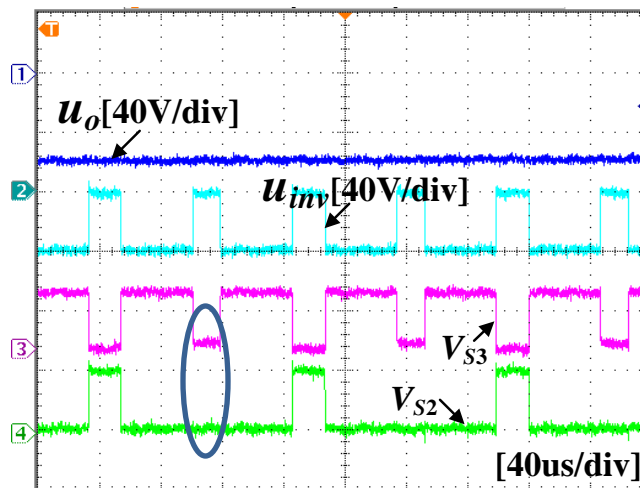
◆开环:  $V_{in}=400V$ ,  $R_L=17\Omega$ ,  $m=0.73$ ,  $f_s=7.5kHz$



**DF-SPWM:**  
实现桥臂输出电压倍频  
无并联储流路径

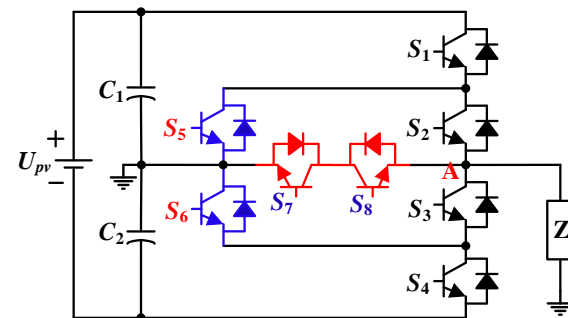
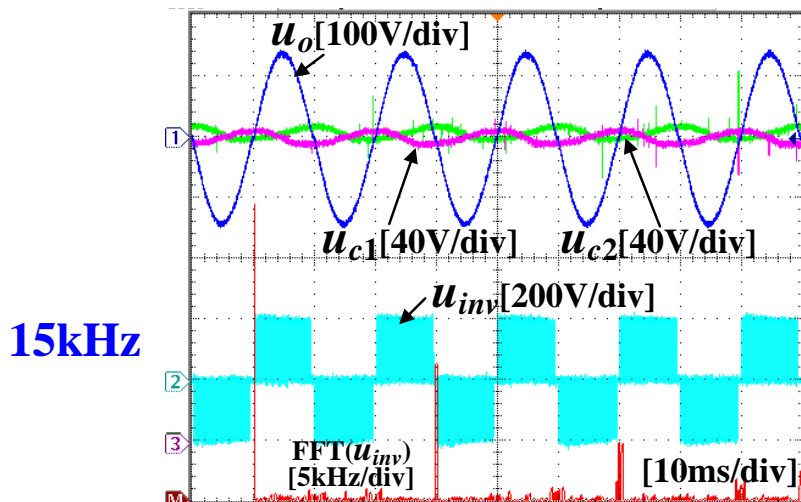


正半周

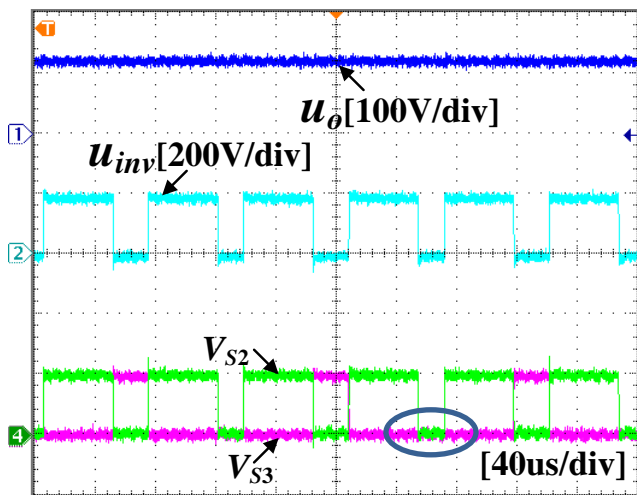


负半周

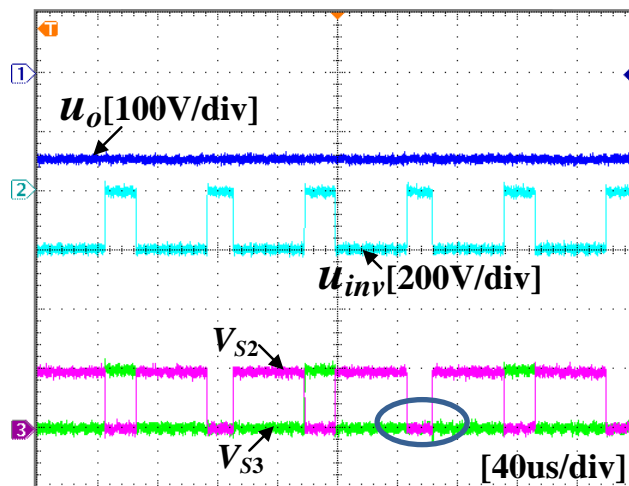
◆开环:  $V_{in}=400V$ ,  $R_L=17\Omega$ ,  $m=0.73$ ,  $f_s=7.5kHz$



**PFDF-SPWM:**  
实现桥臂输出电压倍频  
存在并联续流路径



正半周

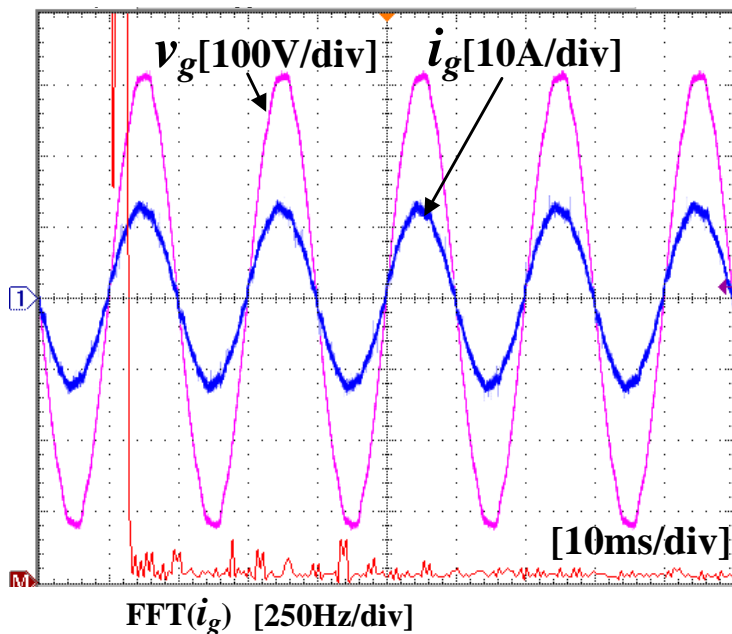


负半周

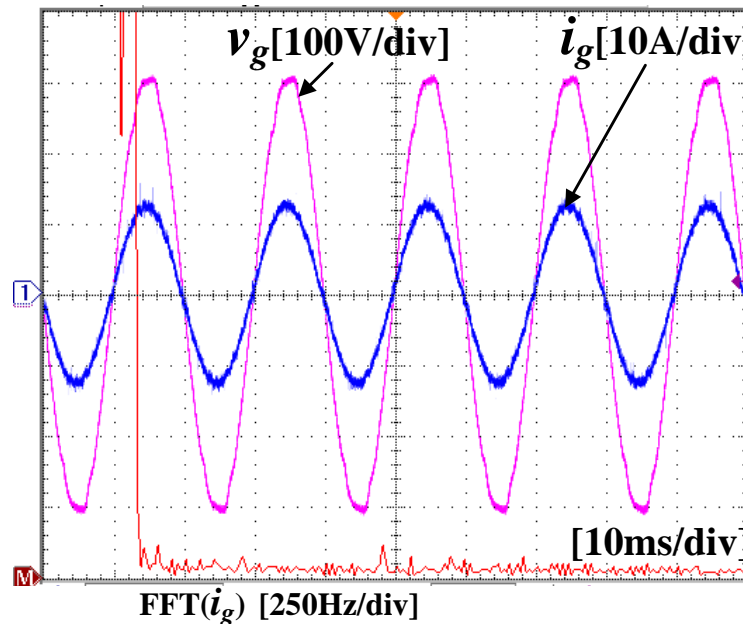


◆并网:  $V_{in}=800$ ,  $V_g=220\text{Vrms}$ ,  $I_g=12\text{Apk}$ 。

◆电容压差前馈+电网电压前馈+有源阻尼



◆未加特定谐波消除控制

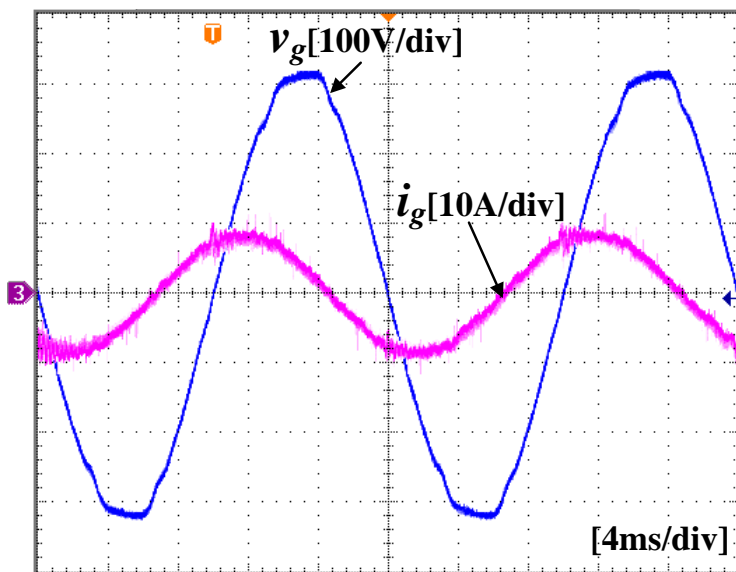


◆加入3~17次特定谐波消除控制

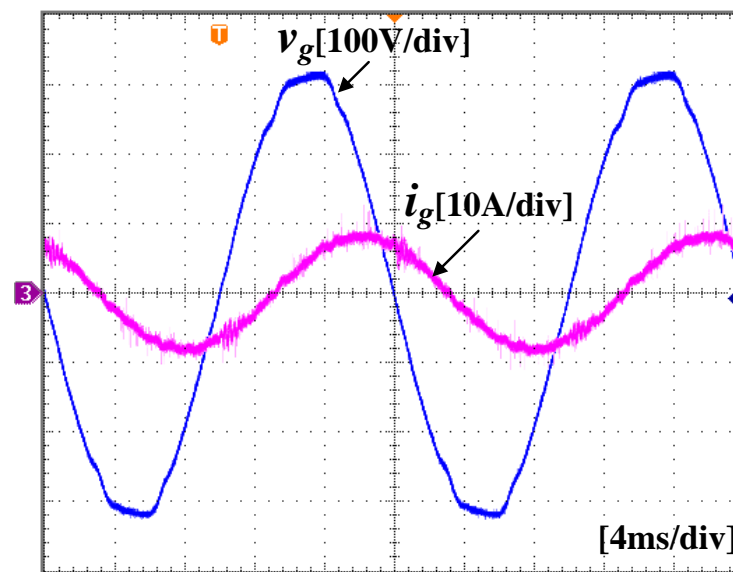
◆并网:  $V_{in}=800, V_g=220V_{rms}$

◆—电容压差前馈+电网电压前馈+有源阻尼+3~17次特定谐波消除

◆非单位功率因数



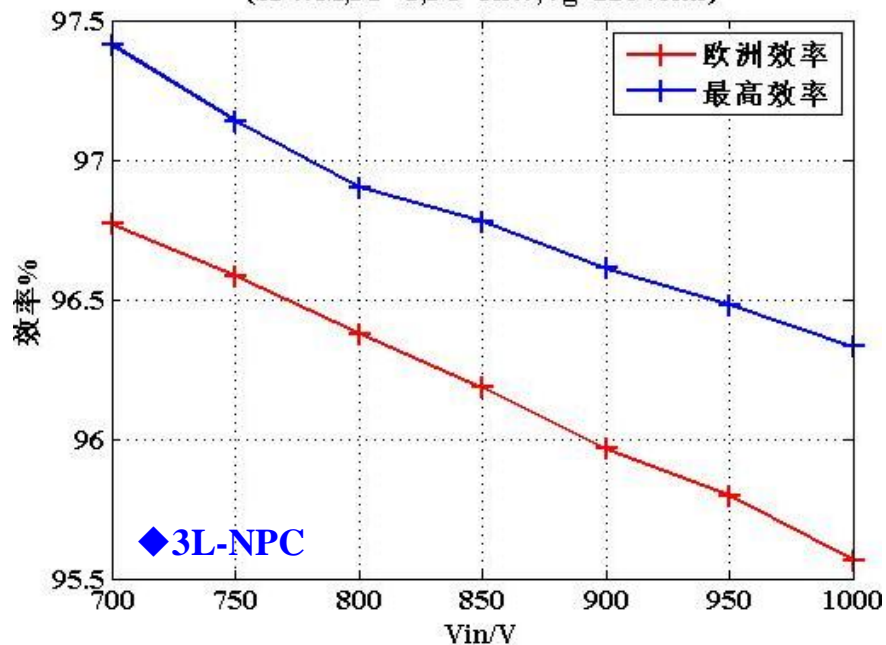
进网电流 **超前** 电网电压  $60^\circ$



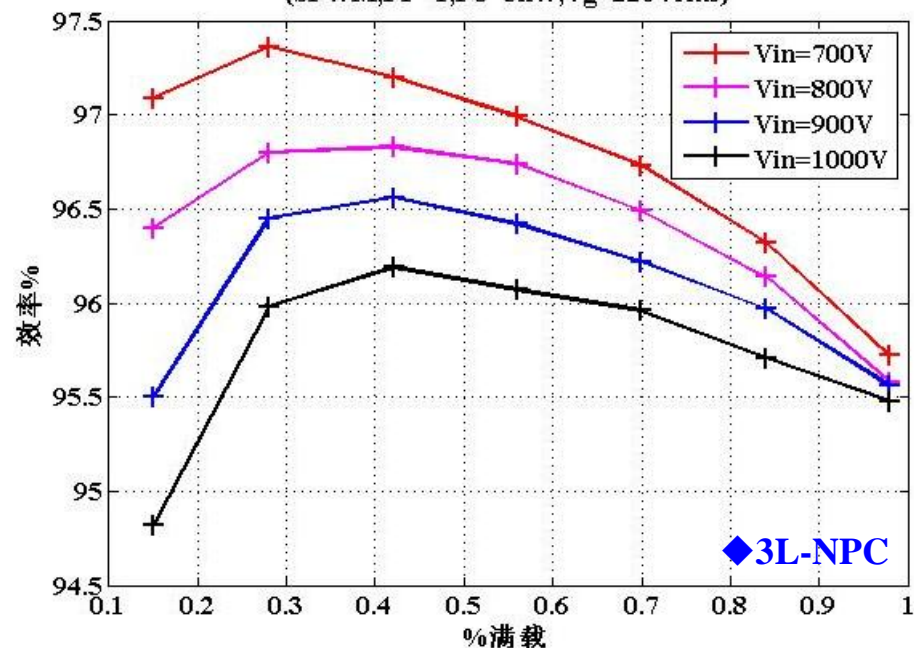
进网电流 **滞后** 电网电压  $60^\circ$

◆并网：电容压差前馈+电网电压前馈+有源阻尼+3~17次特定谐波消除

不同输入电压下3L-NPC的效率曲线  
(SPWM,PF=1,Po=5kW,Vg=220Vrms)



不同输入电压下3L-NPC的效率曲线  
(SPWM,PF=1,Po=5kW,Vg=220Vrms)

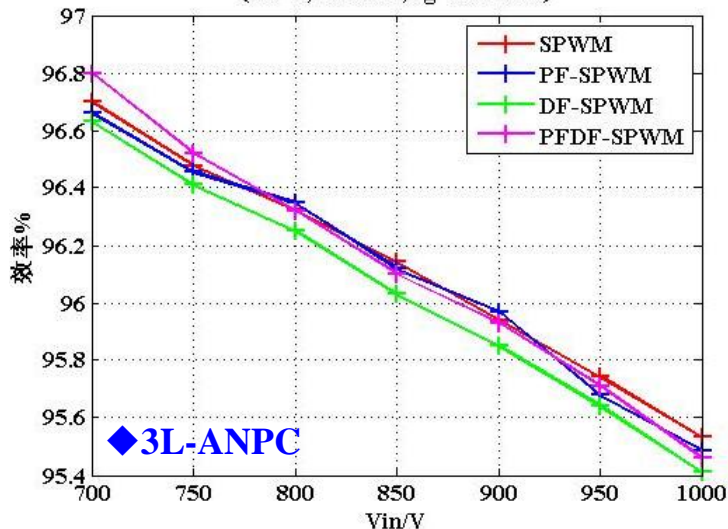


$V_{in}=800V$

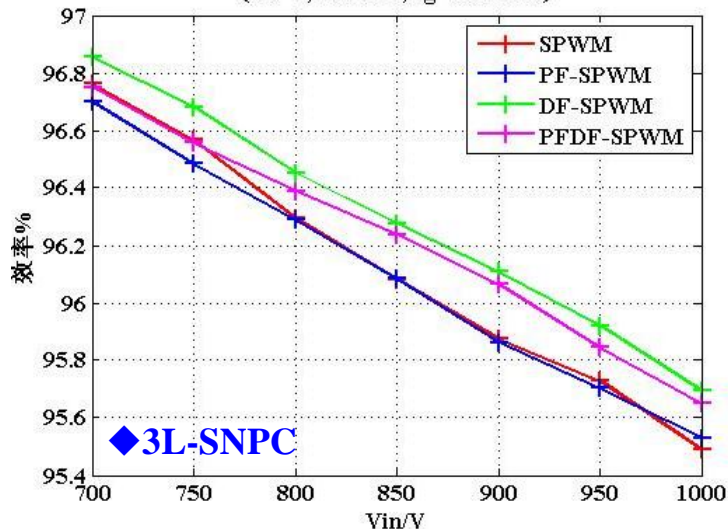
负载	5%	10%	20%	30%	50%	100%
PF	0.969	0.992	0.996	0.997	0.997	0.997
THD%	24.820	11.790	7.101	4.912	3.133	1.487

# NPC型三电平半桥逆变器并网效率比较

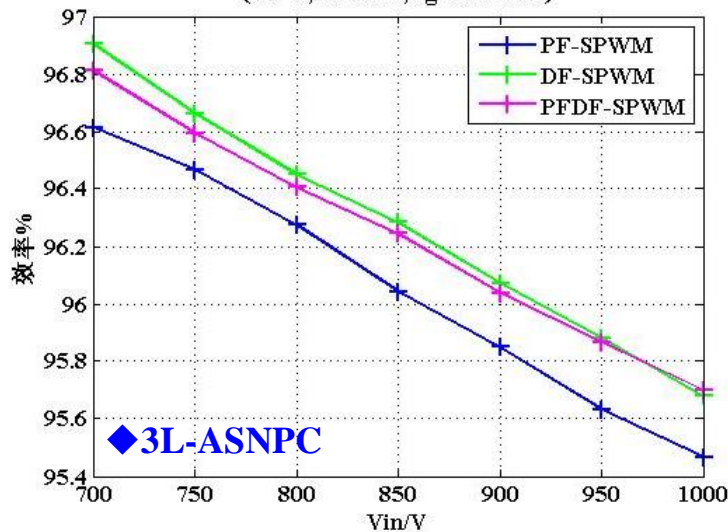
3L-ANPC半桥逆变器欧洲效率比较  
(PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, V<sub>g</sub>=220Vrms)



3L-SNPC半桥逆变器欧洲效率比较  
(PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, V<sub>g</sub>=220Vrms)



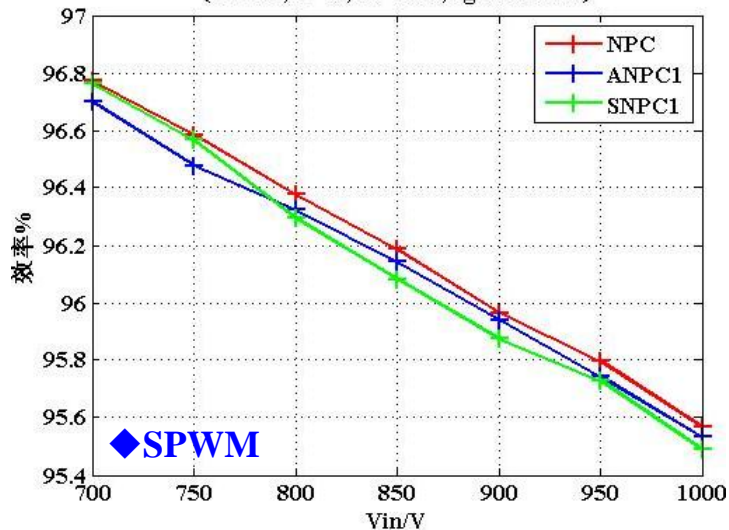
3L-ASNPC半桥逆变器欧洲效率比较  
(PF=1, P<sub>o</sub>=5kW, V<sub>g</sub>=220Vrms)



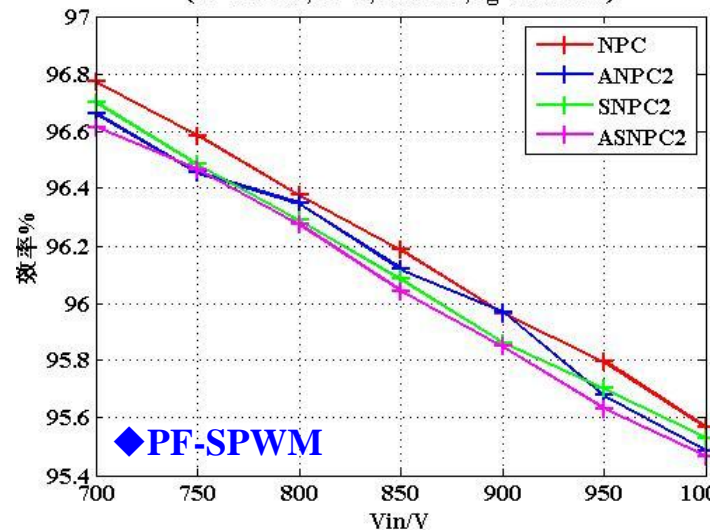
◆3L-ANPC、3L-SNPC、3L-ASNPC：  
在4种调制方式下，其欧洲效率基本一致，在96.2%左右。

# NPC型三电平半桥逆变器并网效率比较

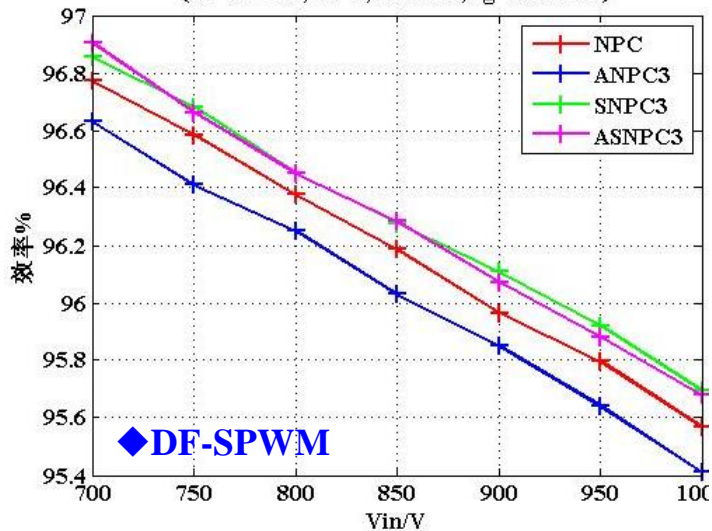
NPC型三电平半桥逆变器欧洲效率比较  
(SPWM, PF=1, Po=5kW, Vg=220Vrms)



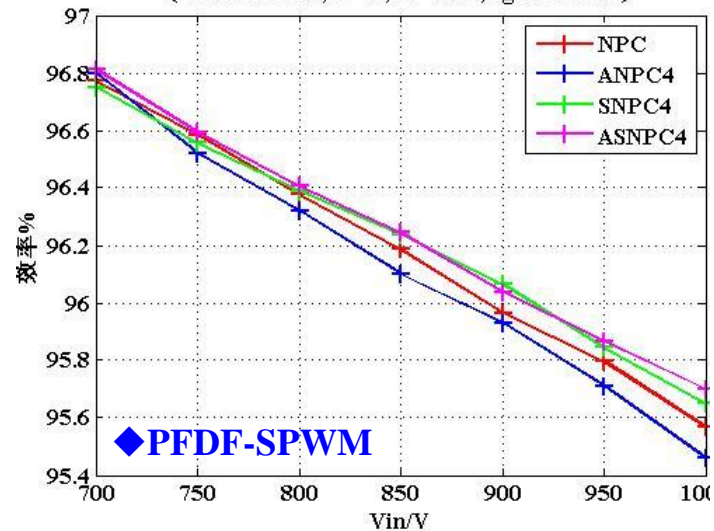
NPC型三电平半桥逆变器欧洲效率比较  
(PF-SPWM, PF=1, Po=5kW, Vg=220Vrms)



NPC型三电平半桥逆变器欧洲效率比较  
(DF-SPWM, PF=1, Po=5kW, Vg=220Vrms)



NPC型三电平半桥逆变器欧洲效率比较  
(PFDF-SPWM, PF=1, Po=5kW, Vg=220Vrms)



- ◆ 在统一的NPC实验平台上，各NPC型逆变器在4种调制策略下，其并网效率差异不大；
- ◆ 其欧洲效率在96.2%左右，最高效率达97.3%左右；
- ◆ 各NPC型拓扑，在不同调制策略下，均可工作在非单位功率因数条件。

- 1 研究背景
- 2 NPC型三电平半桥逆变器调制策略
- 3 NPC型三电平半桥逆变器损耗分析
- 4 实验结果
- 5 小结

## 1、调制策略多样化

- ◆ 衍生NPC型拓扑：可控器件增多→存在多条零电平续流路径→调制策略多样化
- ◆ 根据零电平续流路径的配置方式，基本可总结为4种SPWM调制策略：
  - ◆ SPWM、PF-SPWM、DF-SPWM、PFDF-SPWM

## 2、选取合理调制策略，均衡损耗，实现扩容

- ◆ 3L-ANPC开关器件损耗不易均衡，3L-SNPC与3L-ASNPC在DF/PFDF-SPWM下，内外管损耗较为均衡，易实现扩容
- ◆ 4种3L-NPC逆变器总损耗基本一致，系统效率不会因拓扑复杂化而降低

## 3、各NPC型拓扑并网实验效率基本一致

- ◆ 在统一的NPC实验平台上，各NPC型逆变器在4种调制策略下，其并网效率差异不大；
- ◆ 其欧洲效率在96.2%左右，最高效率达97.3%左右；
- ◆ 各NPC型拓扑，在不同调制策略下，均可工作在非单位功率因数条件。



NPC型拓扑	结构	SPWM	PF-SPWM	DF-SPWM	PFDF-SPWM
3L-NPC	简单	小功率	——	——	——
3L-ANPC	简单	小功率	小功率	×	×
3L-SNPC	复杂	×	×	大功率	大功率
3L-ASNPC	最复杂	×	×	大功率	大功率

- 1、功率较小时可采用3L-NPC；
- 2、3L-ANPC不具备明显优势；
- 3、功率较大时可采用3L-SNPC；
- 4、3L-ASNPC电路复杂，实用价值不大。

Thanks for your attention

请批评指正！

谢少军

南京航空航天大学

