Aero-Power Sci-tech Center

# 双Buck逆变器技术研究

肖 岚

南京航空航天大学

# 报告内容

- 研究背景
- 三相双Buck逆变器的控制技术
- 三电感双Buck逆变器
- 级联双Buck逆变器
- 总结

# 化石能源

能源危机

环境污染

开发可再生能源

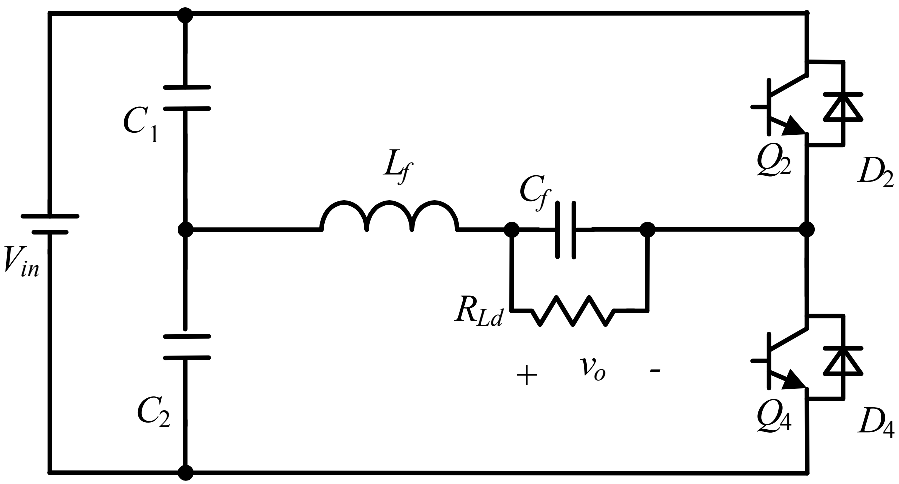
# 可再生能源发电



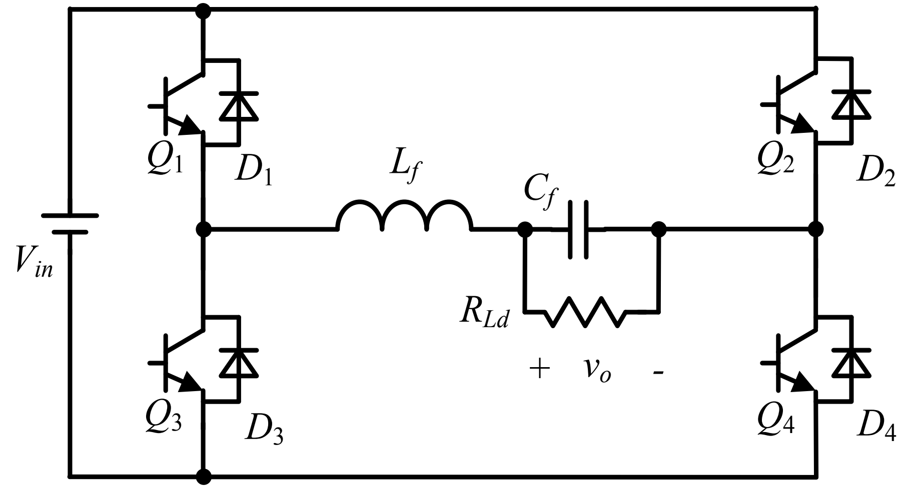

电力电子变换器

并网

# 桥式逆变器拓扑




半桥逆变器

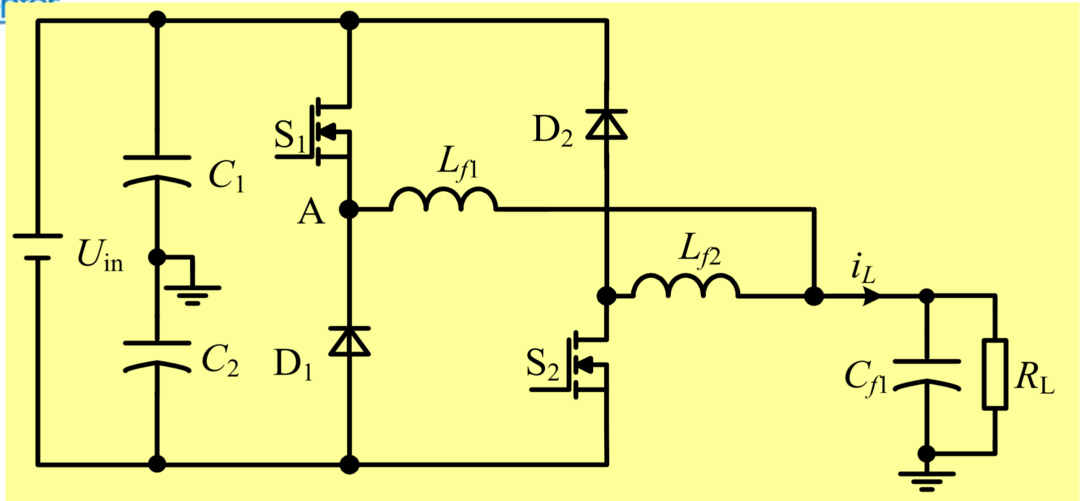



全桥逆变器

问题？

- 上下桥臂开关管可能存在直通，影响可靠性。
- 死区设置，影响输出电压失真度。
- MOSFET体二极管反向恢复时间长，效率低。

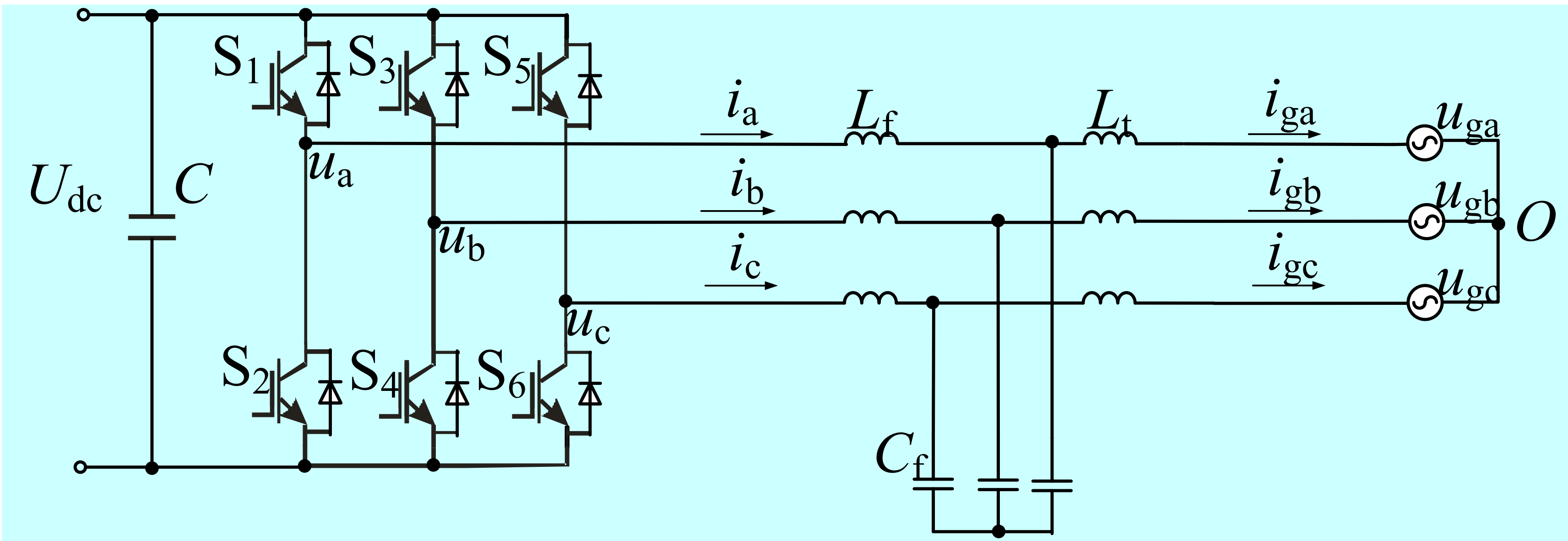
# 双BUCK半桥逆变器



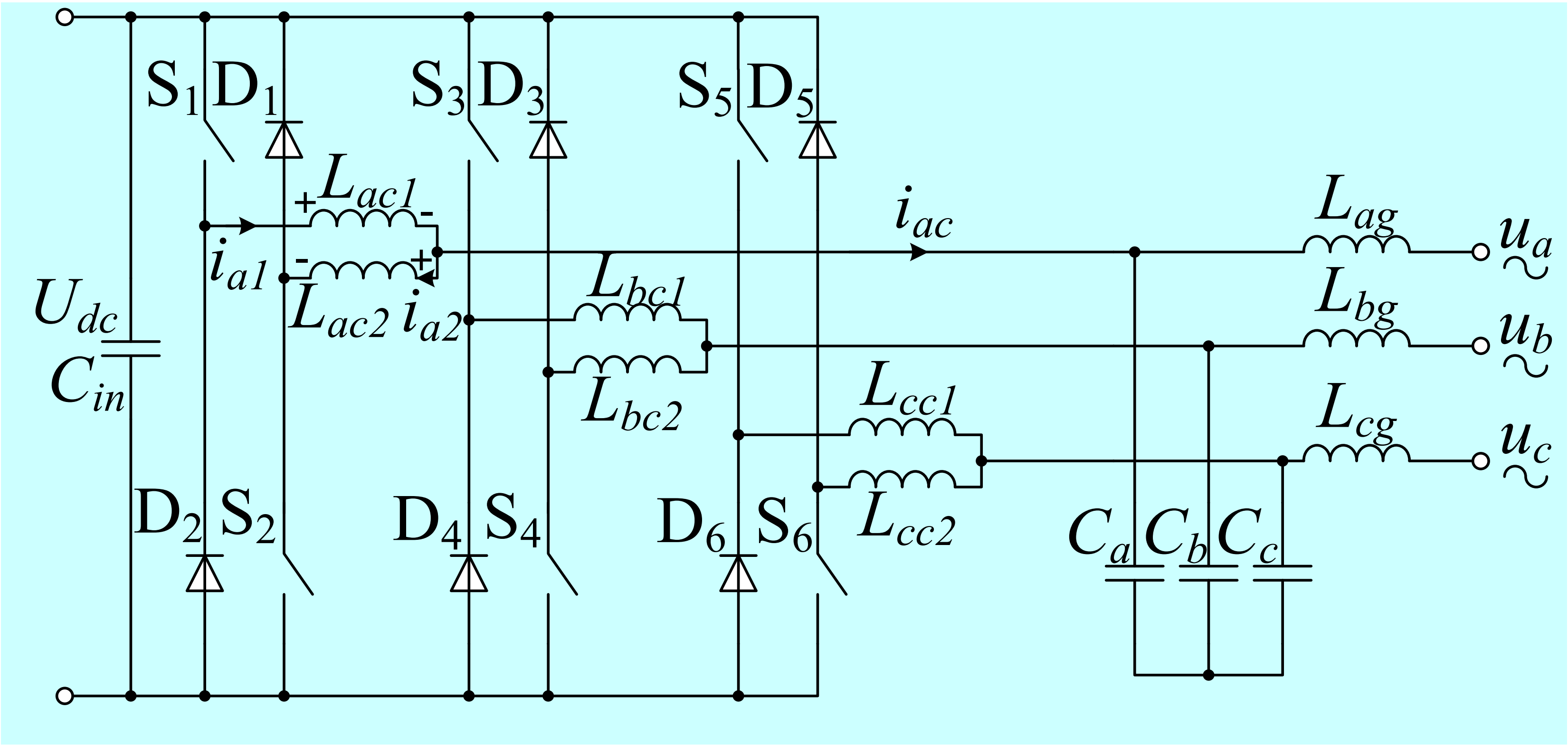

优点：

- 不存在传统桥式逆变器桥臂直通问题，可靠性提高；
- 所有功率管和电感半个输出周期高频工作；
- 续流二极管采用独立二极管，可以优化设计，提高变换效率；
- 无死区设置问题。

# 三相桥式并网逆变器主电路



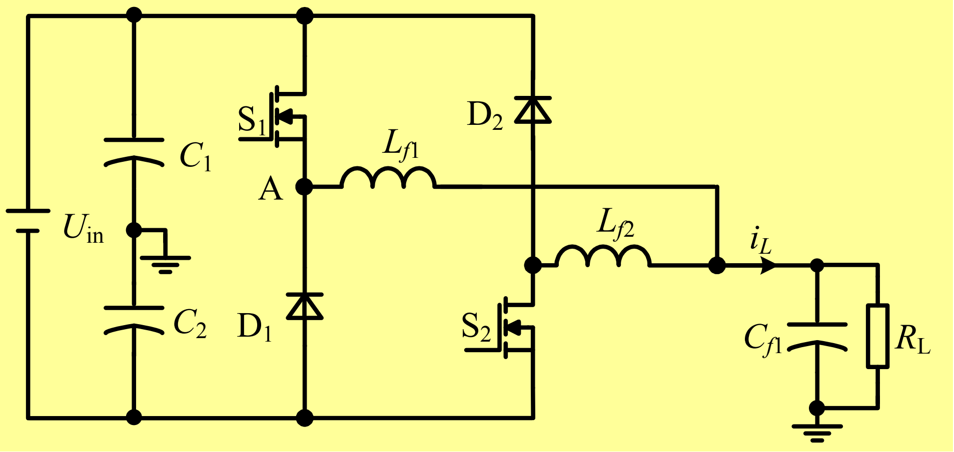
# 三相双Buck逆变器主电路

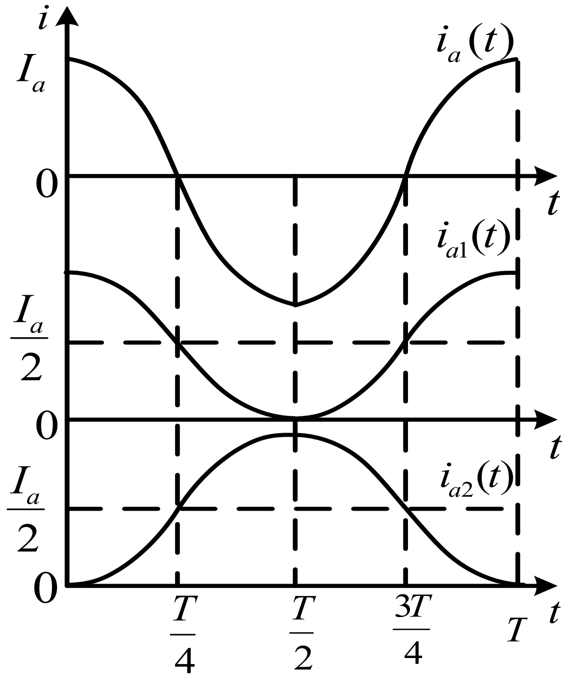


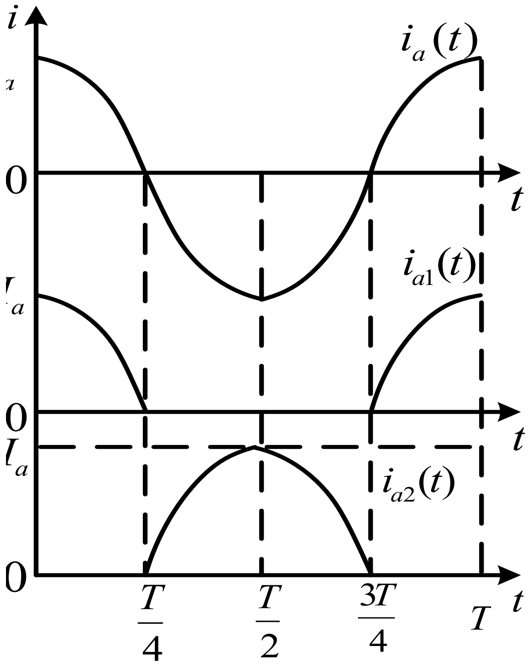
# 报告内容

- 研究背景
- 三相双Buck逆变器的控制技术
- 三电感双Buck逆变器
- 级联双Buck逆变器
- 总结

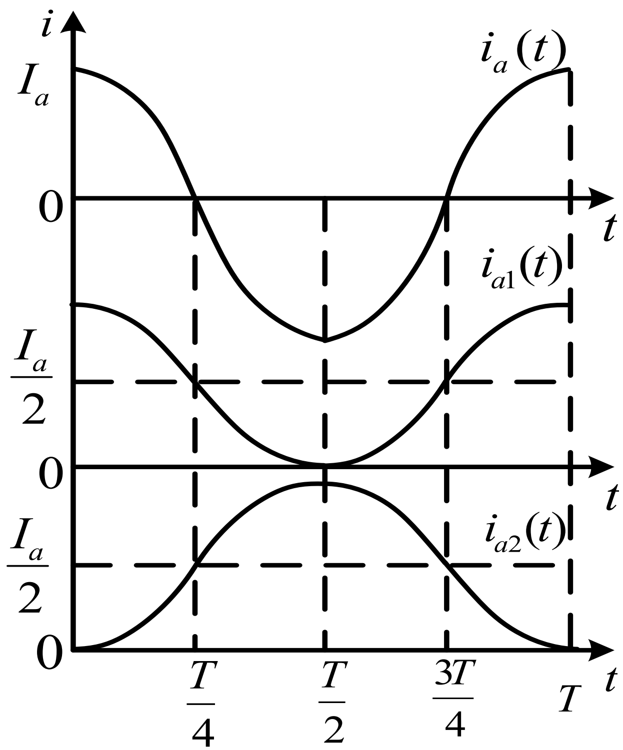
# 全周期和半周期工作模式

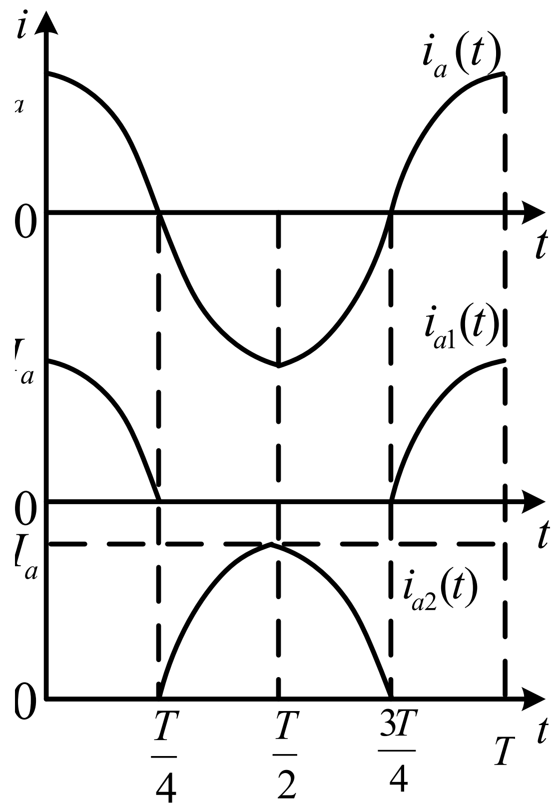


# 全周期和半周期工作模式

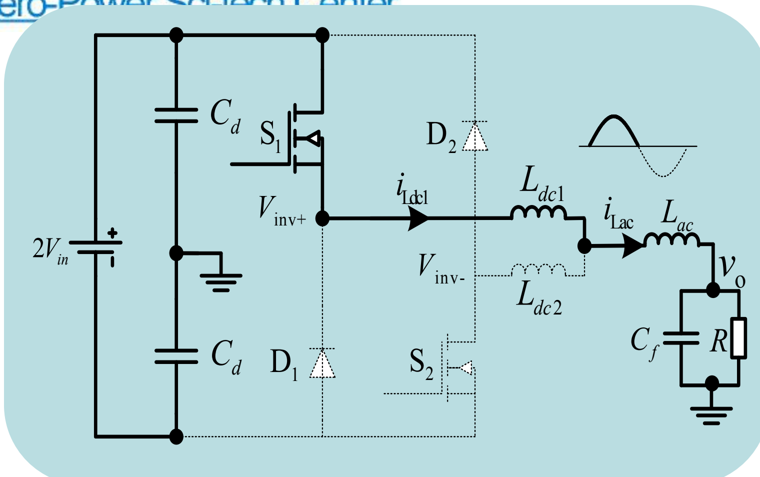


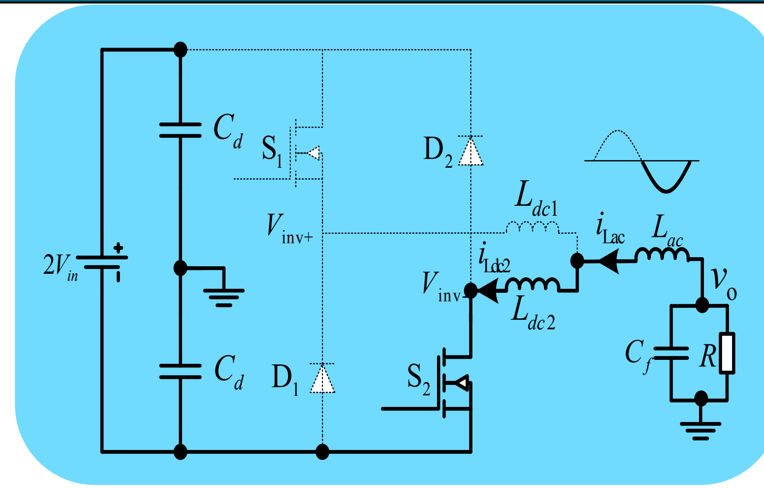

全周期：导通损耗大；输出波形质量好

半周期：效率高；输出波形存在过零畸变

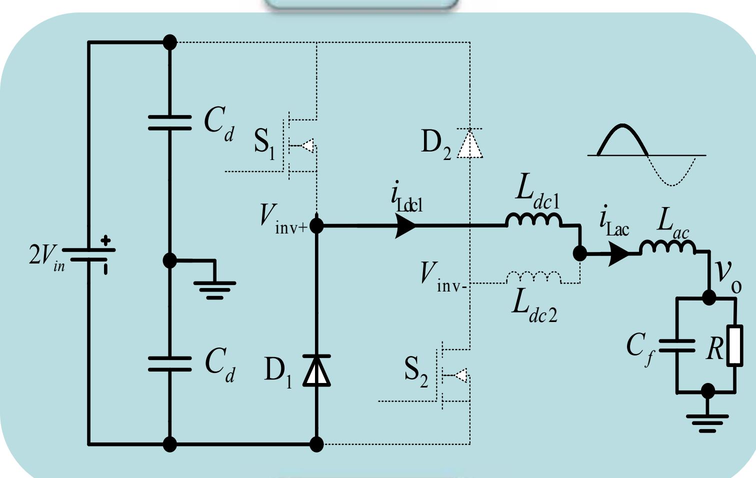
# 工作原理



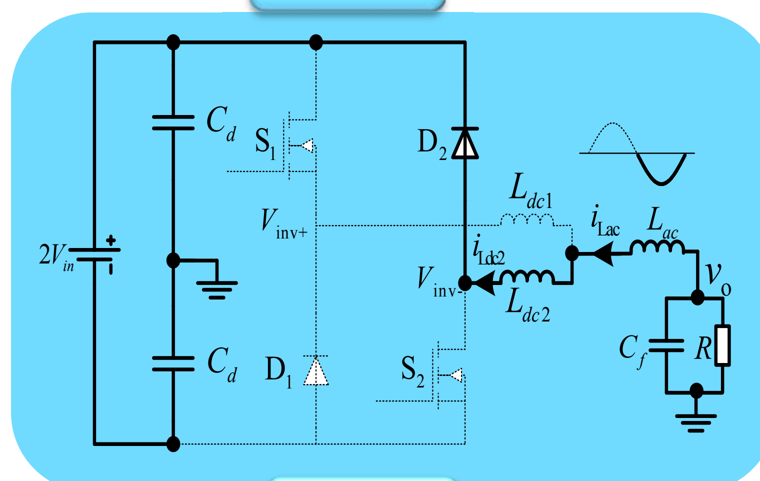

S1导通




S2导通

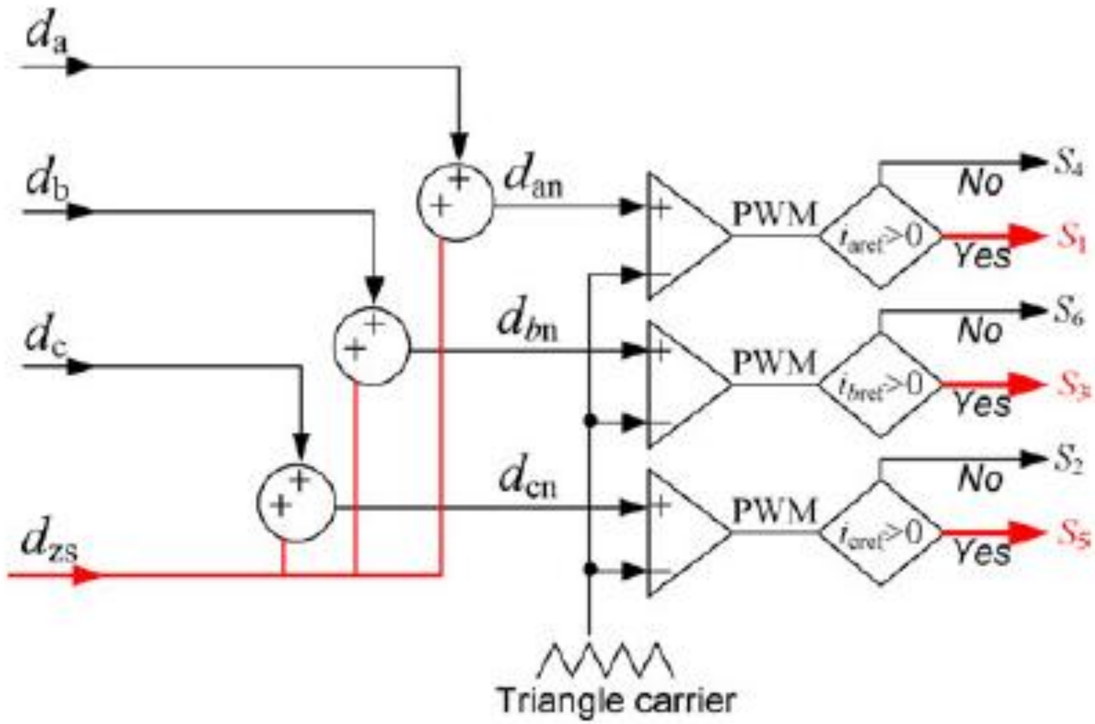



D1导通

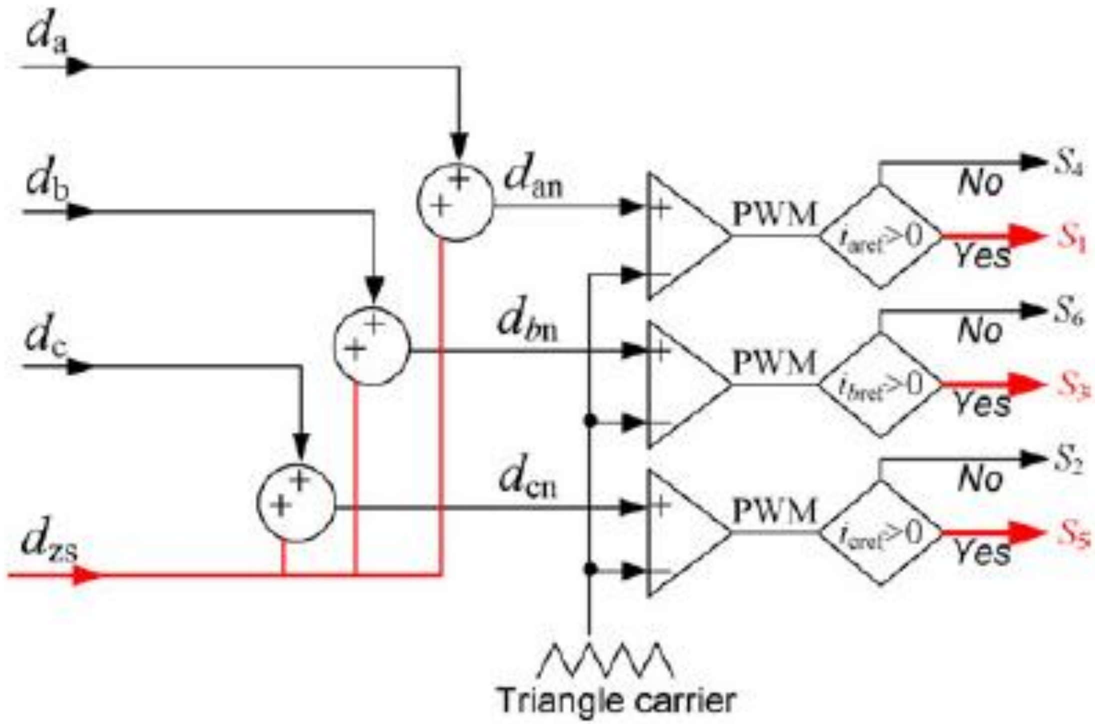



D2导通

# 统一的PWM载波交截控制




- SPWM
- SVPWM：注入三次谐波
- DSVPWM：电流峰值对应的中间60°不开关

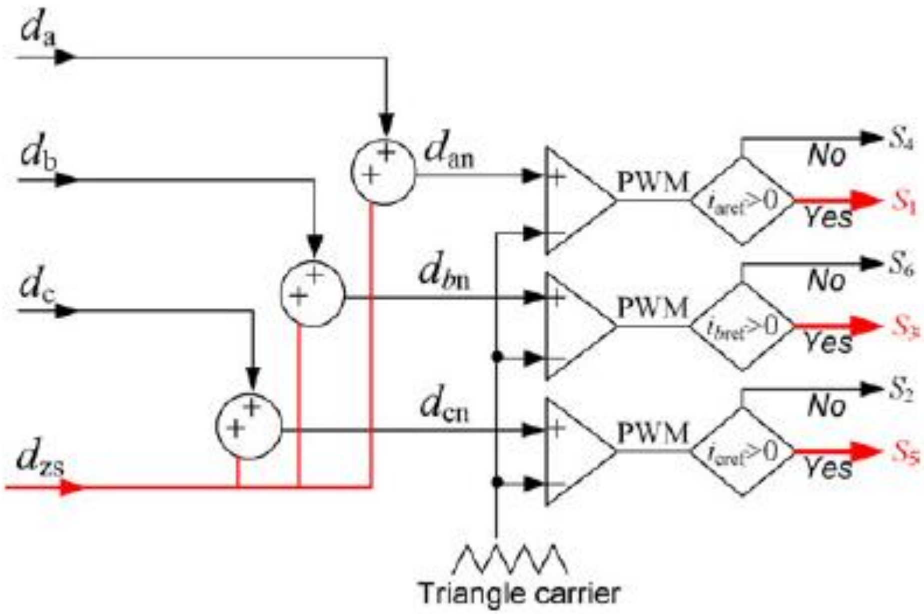



注入的占空比：

$$d_{zs} = -[(1-2k_0) + k_0 d_{\max} + (1-k_0) d_{\min}]$$

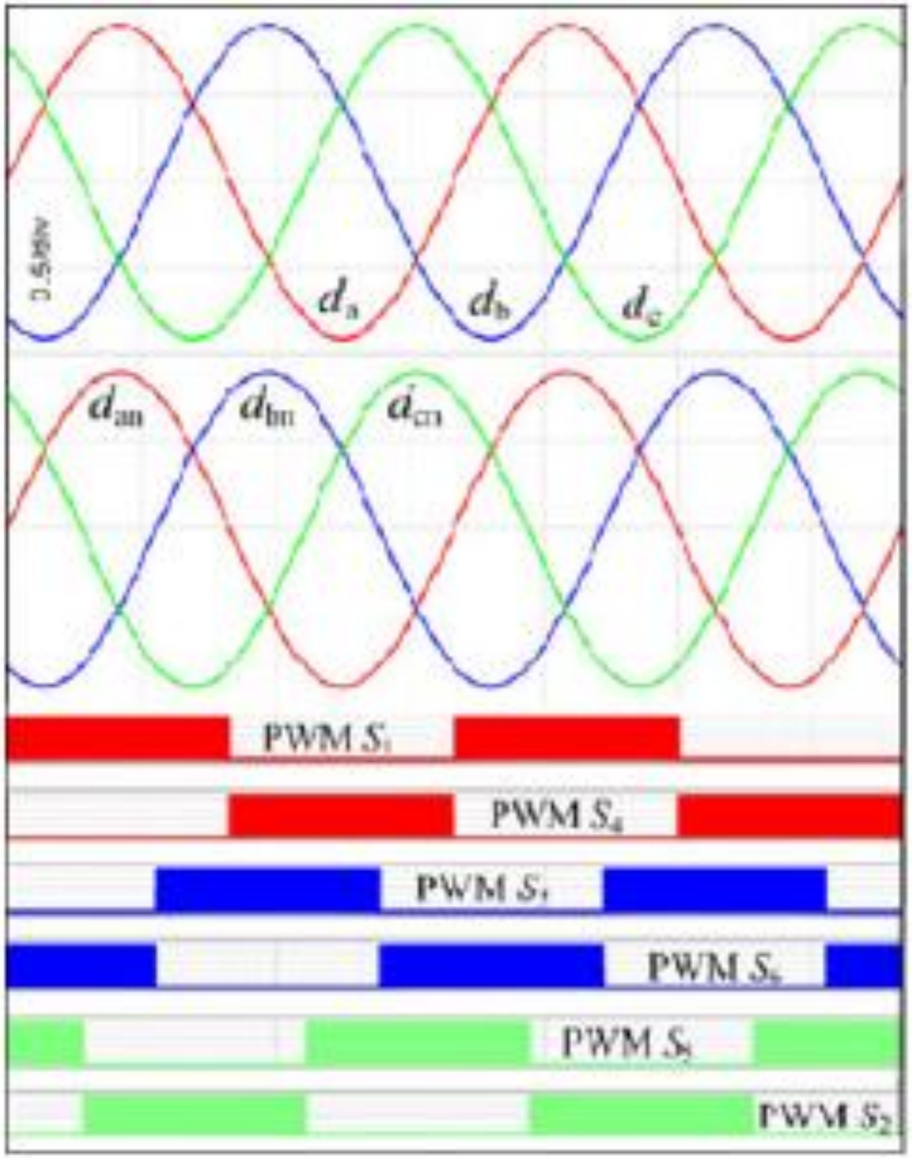
$$d_{\max} = \max(d_a, d_b, d_c) \qquad d_{\min} = \min(d_a, d_b, d_c)$$

# SPWM控制



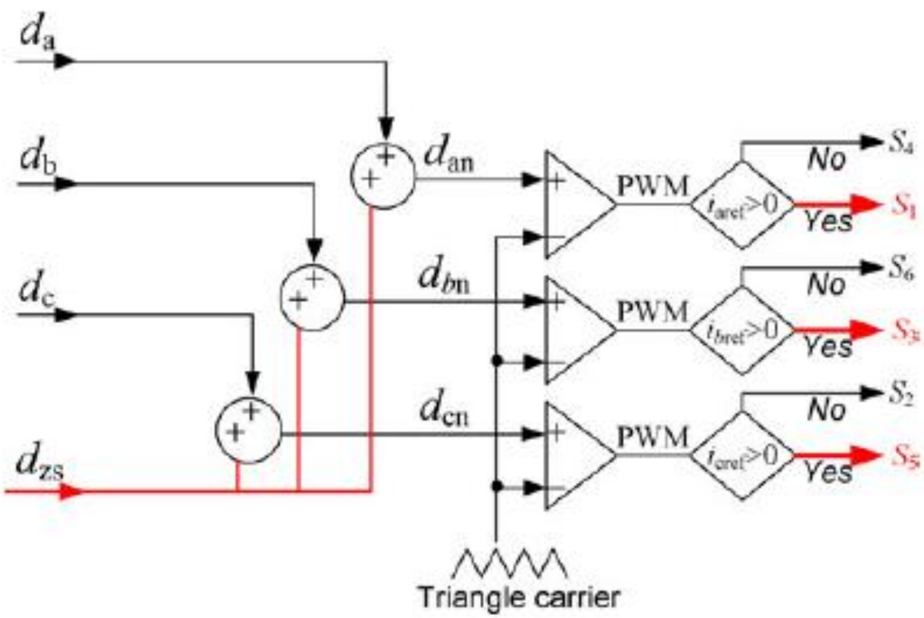
$d_a$
$d_b$
$d_c$
$d_{zs}$
$d_{an}$
$d_{bn}$
$d_{cn}$
PWM
PWM
PWM
$i_{aref}>0$
$i_{bref}>0$
$i_{cref}>0$
No
Yes
$S_4$
$S_1$
$S_6$
$S_3$
$S_2$
$S_5$
Triangle carrier

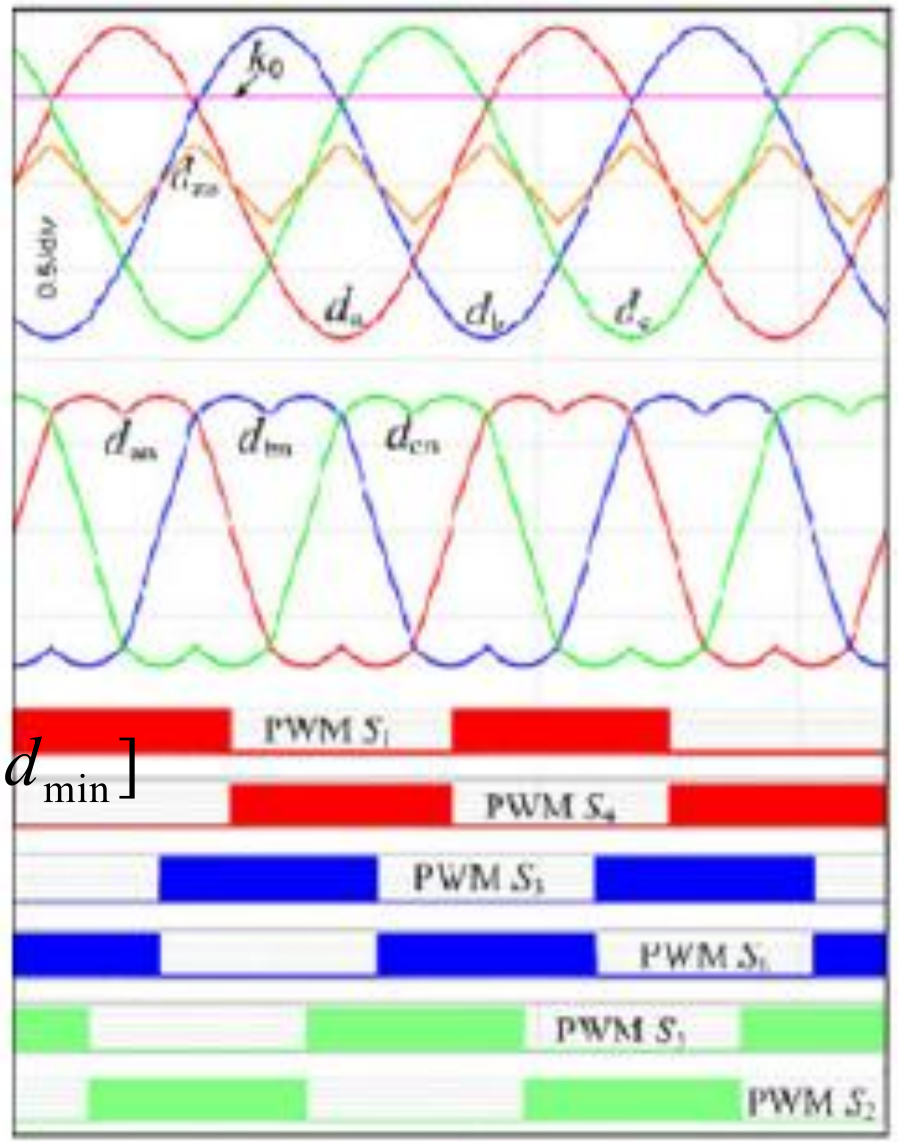

$$d_{zs} = 0$$



$d_a$
$d_b$
$d_c$
$d_{an}$
$d_{bn}$
$d_{cn}$
PWM $S_1$
PWM $S_4$
PWM $S_3$
PWM $S_6$
PWM $S_5$
PWM $S_2$

# SVPWM控制



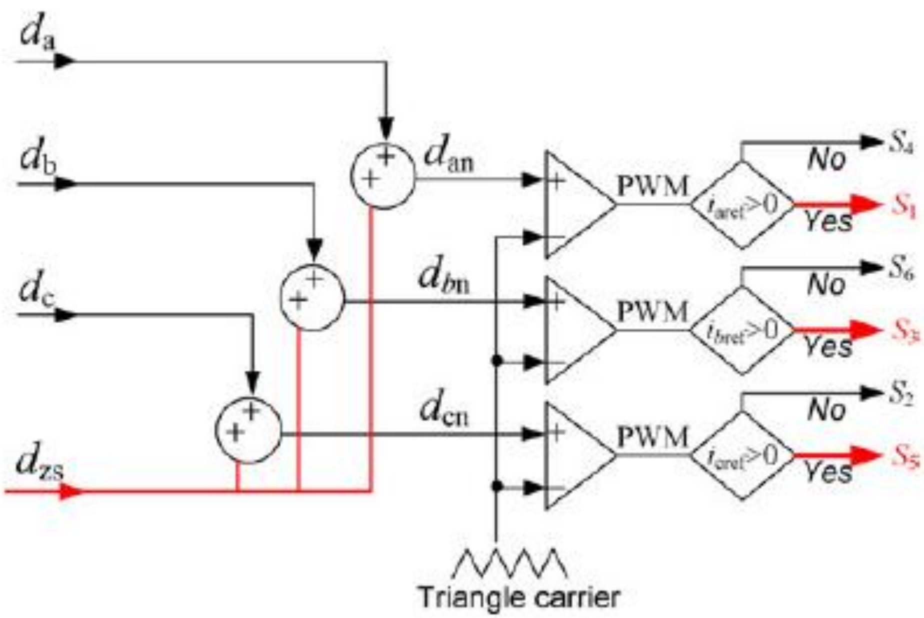

$$d_{zs} = -[(1-2k_0) + k_0 d_{\max} + (1-k_0) d_{\min}]$$

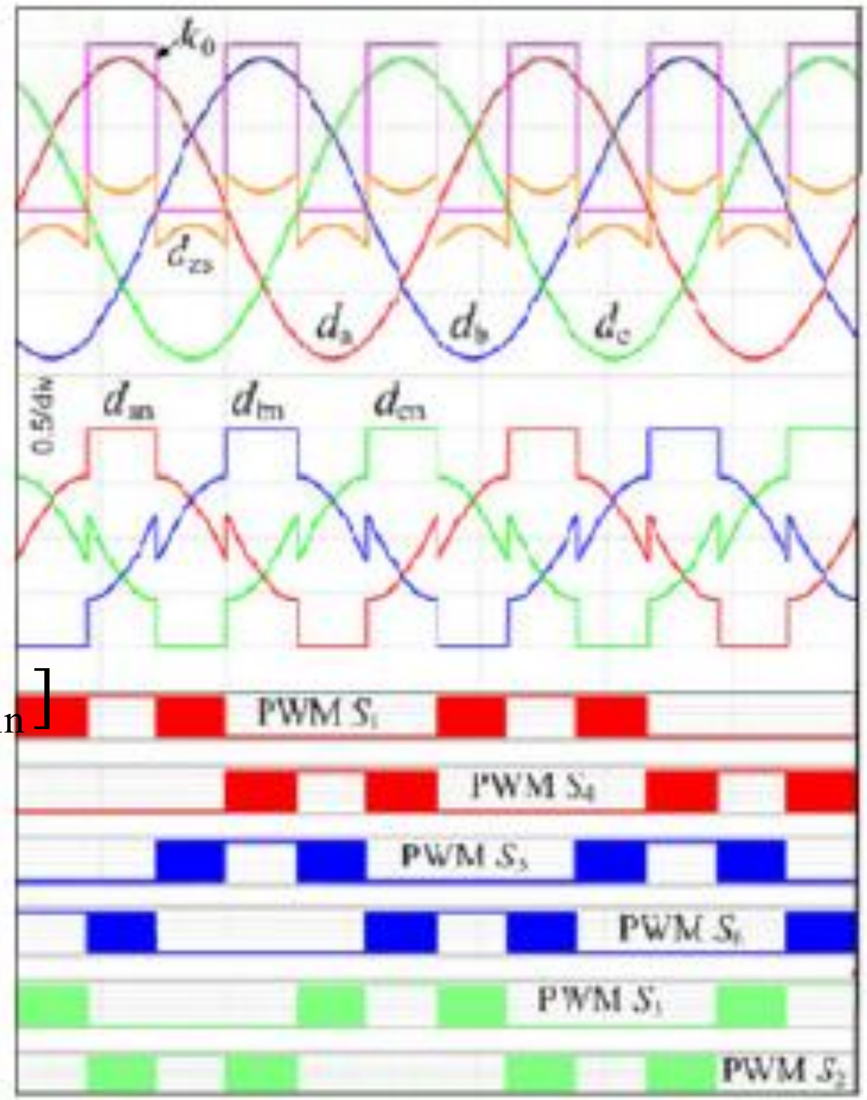
$$k_0 = 0.5$$

$$d_{zs} = -0.5(d_{\max} + d_{\min})$$

APSC

# DSVPWM控制



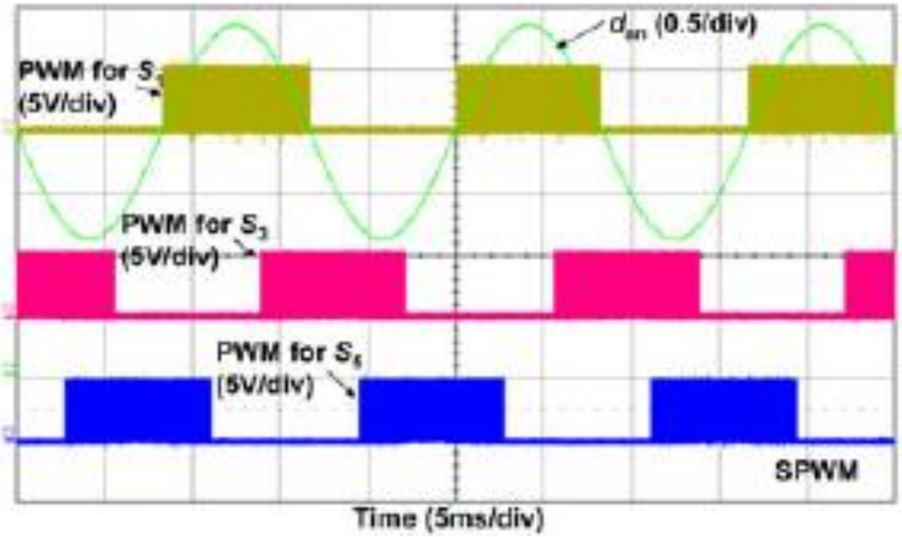




$$d_{zs} = -[(1-2k_0) + k_0 d_{max} + (1-k_0) d_{min}]$$

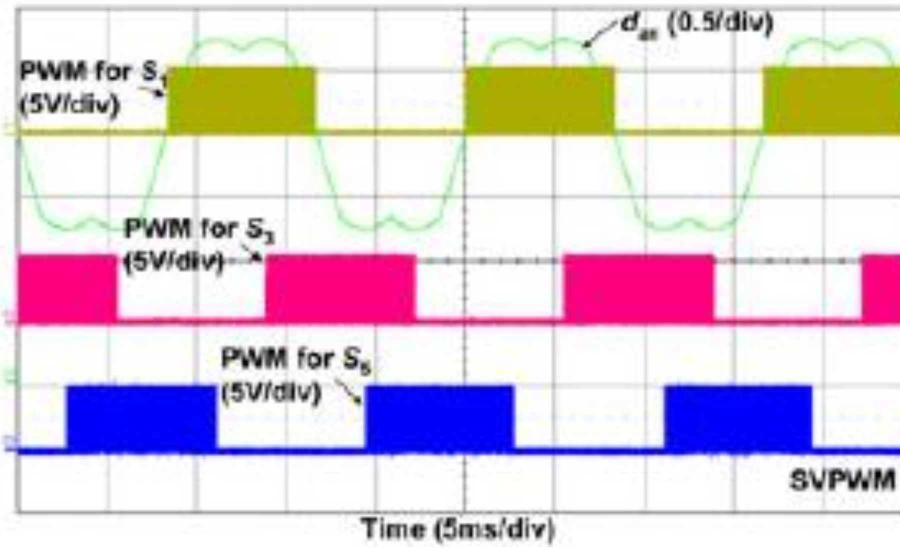
$$\begin{cases} k_0 = 1 & J > 0 \\ k_0 = 0 & J < 0 \end{cases}$$

$$J = \max(i_{aref}, i_{bref}, i_{cref}) + \min(i_{aref}, i_{bref}, i_{cref})$$

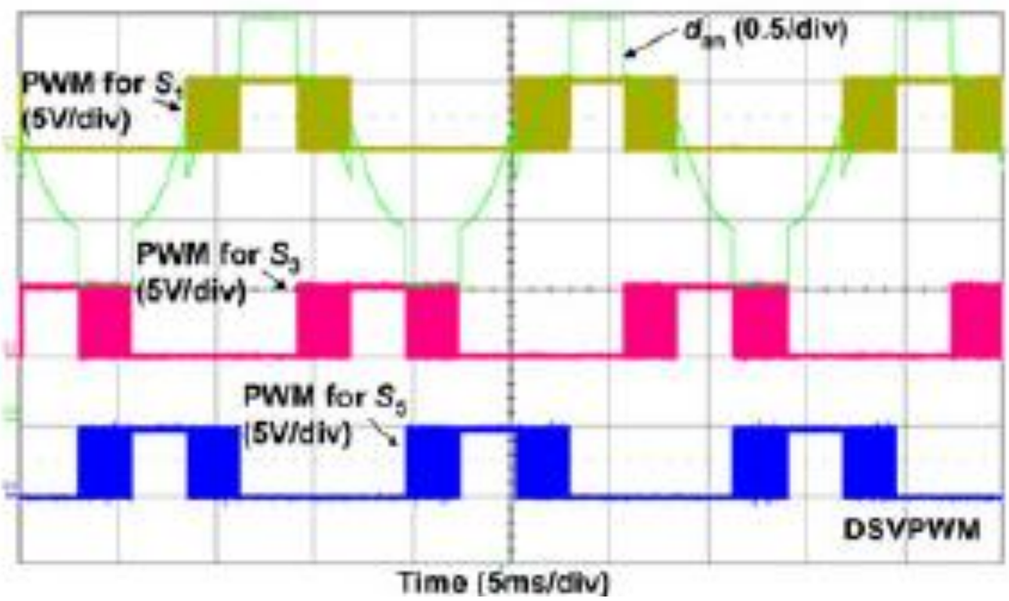
# 统一的PWM载波交截控制




SPWM

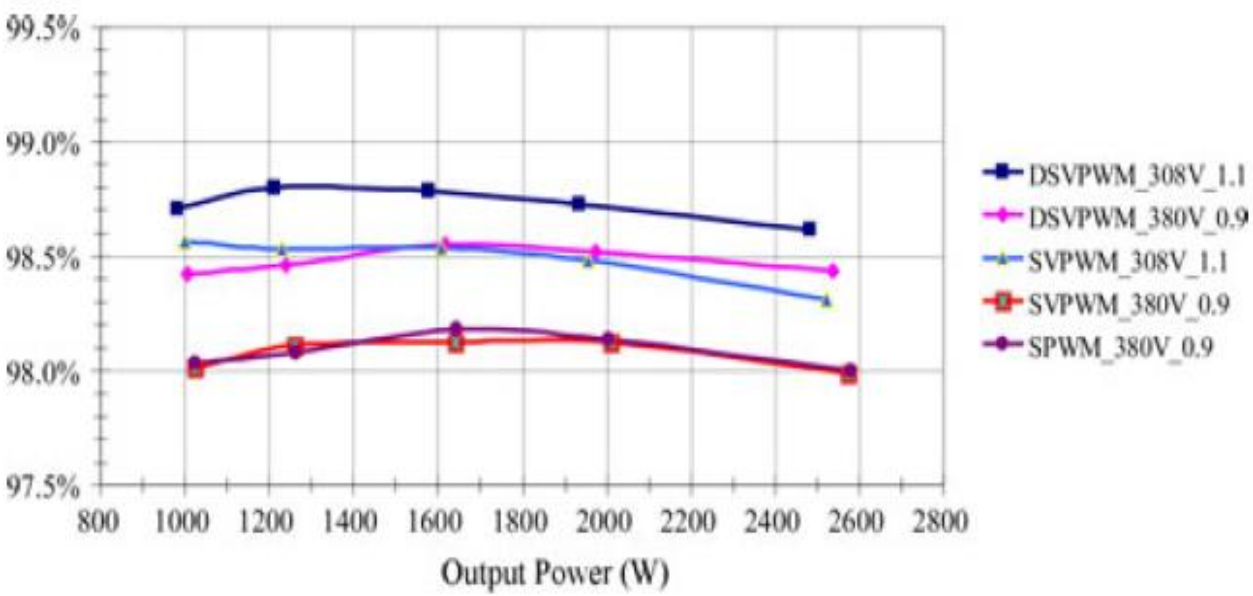



SVPWM




DSVPWM

# 统一的PWM载波交截控制



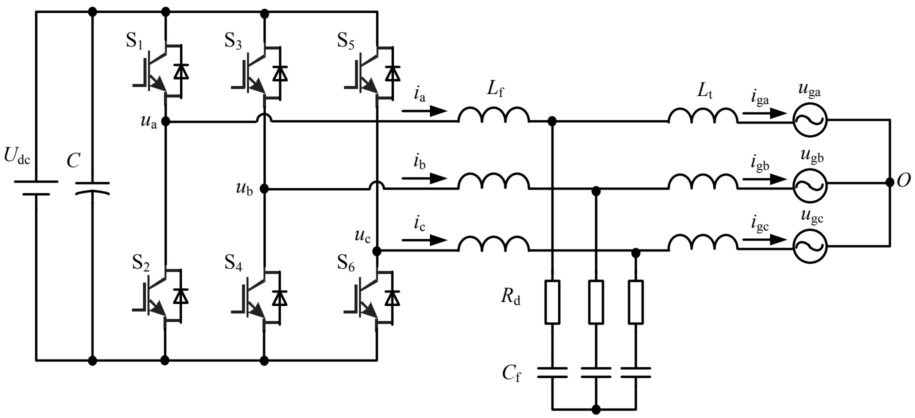

2.5 kW, 120V/208VAC
20kHz，Lp=Ln= 250μH
Lf=1mH, Cf =2.4μF

- SPWM：dmax=1
- SVPWM：相占空比提高到1.15，损耗同SPWM
- DSVPWM：相占空比提高到1.15，损耗减小

# 控制：系统数学模型

Aero-Power Sci-tech Center

## 低频模型




电网电压为三相对称的纯正弦波

电感电容均为理想器件且参数相同

均为理想器件，忽略死区时间

## $abc$三相静止坐标系

$$\begin{bmatrix} L\dfrac{di_{ga}}{dt} \\ L\dfrac{di_{gb}}{dt} \\ L\dfrac{di_{gc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad L=L_f+L_t$$

控制量较多且为交流信号

## $\alpha\beta$两相静止坐标系

$$\begin{bmatrix} L\dfrac{di_{g\alpha}}{dt} \\ L\dfrac{di_{g\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix}$$

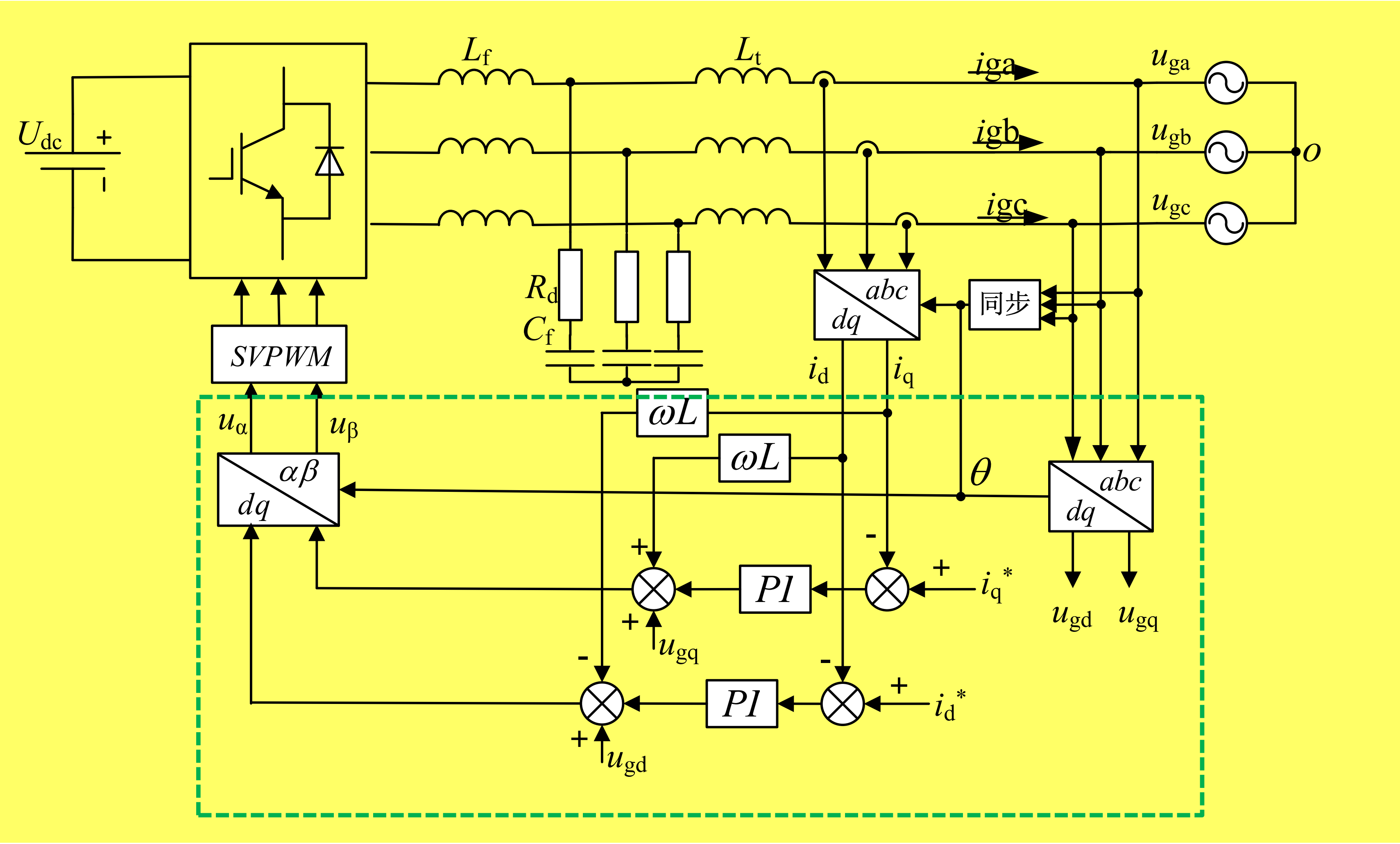
控制量减少仍为交流信号

## $dq$两相旋转坐标系

$$\begin{bmatrix} L\dfrac{di_{gd}}{dt} \\ L\dfrac{di_{gq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{gd} \\ u_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix}$$

控制量为直流信号

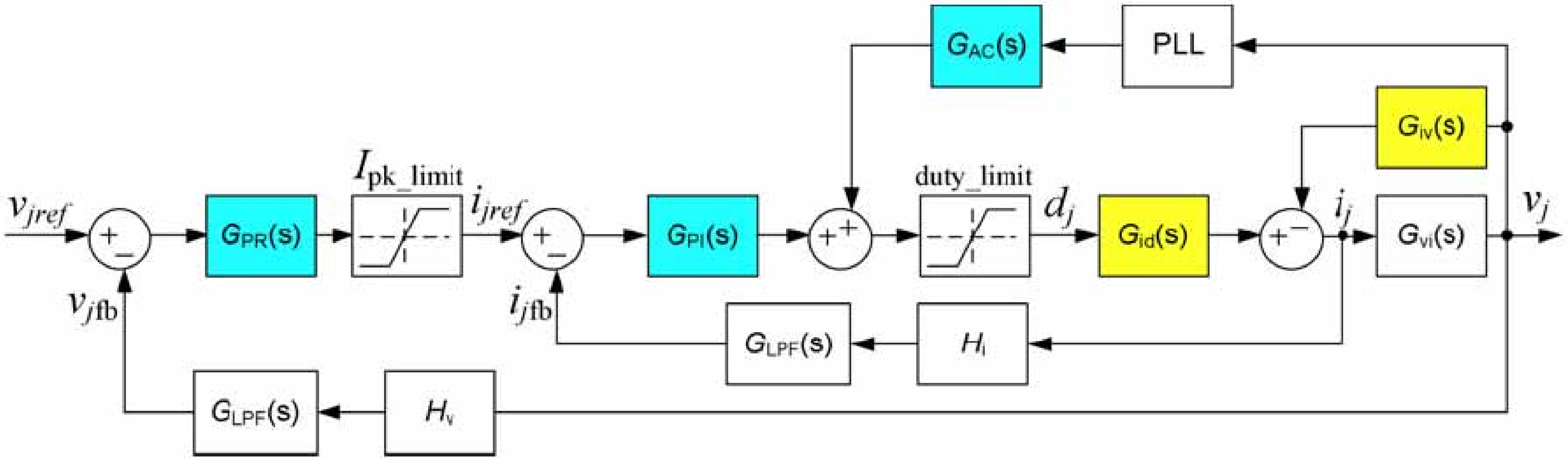
# 系统控制框图




Control

APSC
Aero-Power Sci-tech Center

# 统一的PWM载波交截控制

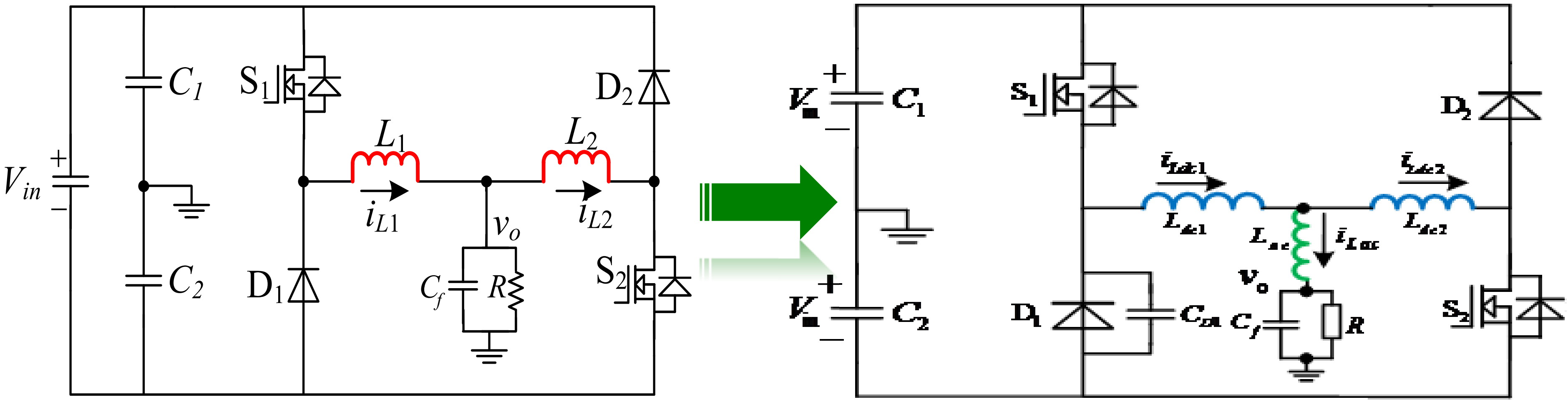



- 载波交截法，无坐标变换，DSP压力小
- 交流信号，需要高增益控制器

# 报告内容

- 研究背景
- 三相双Buck逆变器的控制技术
- **三电感双Buck逆变器**
- 级联双Buck逆变器
- 总结

# 三电感双Buck逆变器




- 保留传统双　　拓扑的优点
- 提高功率密度

1）根据电流纹波和控制器对滤波器截止频率的要求。

滤波电感：限制电流纹波15%

$$\Delta i = \frac{U_{\mathrm{dc}}}{7L_{\mathrm{f}}f_{\mathrm{s}}} \le 15\% I_{\mathrm{n}}$$

滤波电容：无功功率3~5%

$$C_{\mathrm{f}} = 3\% \times \frac{P_{\mathrm{n}}}{3 \times 2\pi f U_{\mathrm{g}}^2}$$

谐振频率约束条件

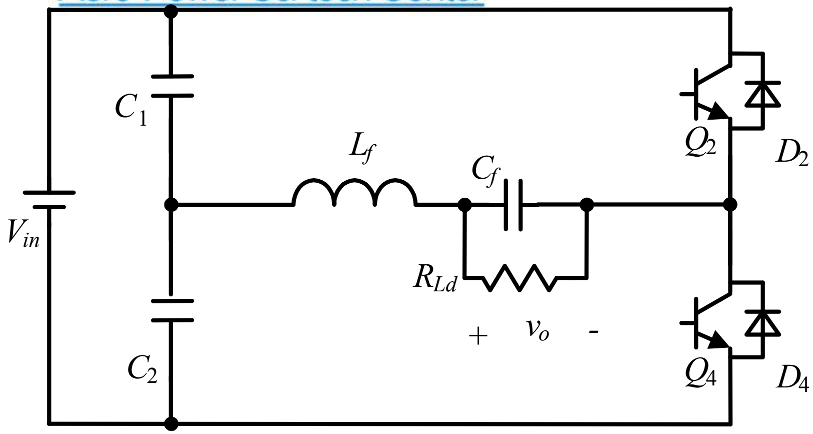
$$10 f_{\mathrm{b}} \le f_{\mathrm{res}} \le \frac{1}{2} f_{\mathrm{s}}$$

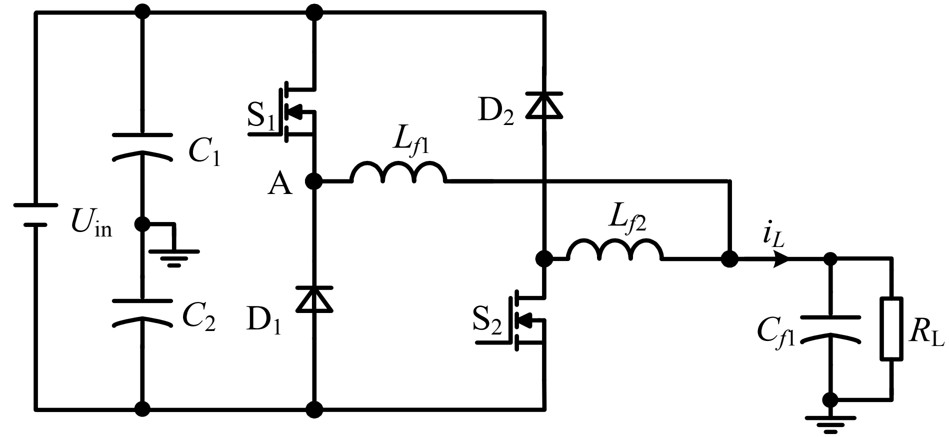
1）根据电流纹波和控制器对滤波器截止频率的要求。
L=1.25mH

2）Lp和Ln：故障状态下保护直通，限制器件di/dt，提供足够时间使保护电路动作。

- 两电感：共6个电感，电感是常规桥式VSI的电感两倍。
- 三电感：公共电感Lf=1mH，Lp=Ln=0.25mH，节省3mH（6*1.25mH-6*0.25mH-3*3mH=3mH）。

所以要在总电感量和故障保护之间折衷。




$V_{Fe} \propto F_{\max}$　　最大磁势　$F_{\max} = NI_{o\max}$

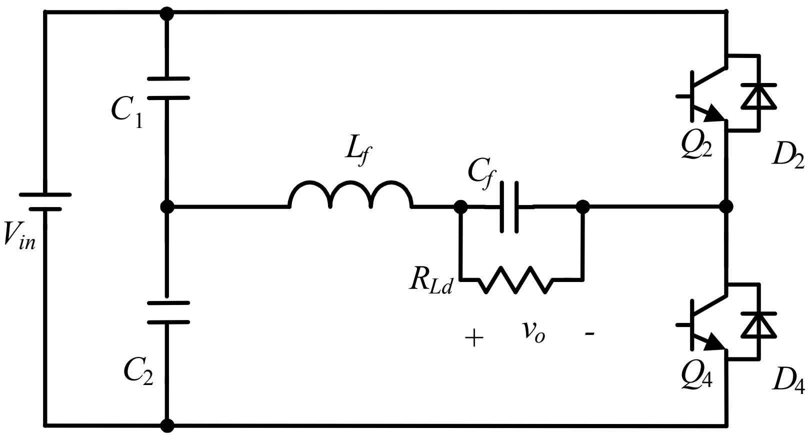
DBI单个电感铁心同桥式电感

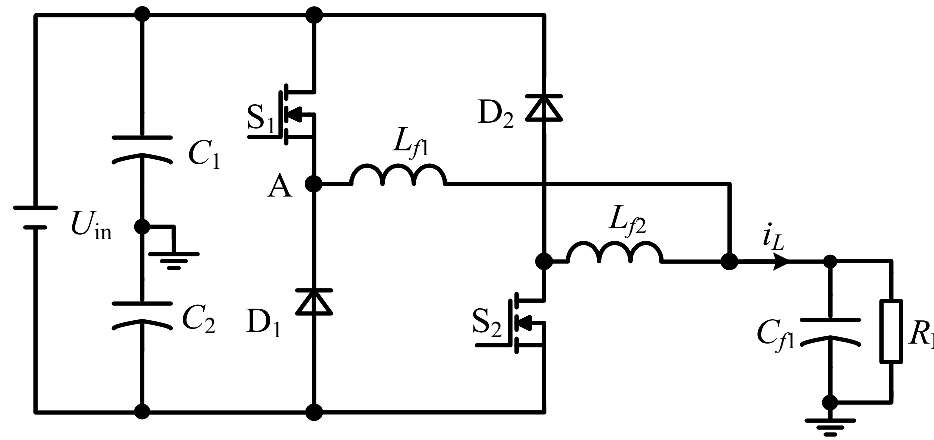
$V_{Cu} \propto NI_{RMS}$　　$I_{RMS} = 0.707 I_o$

DBI单个电感绕组体积是桥式电感0.707倍

□ 问题：两个电感，体积重量大

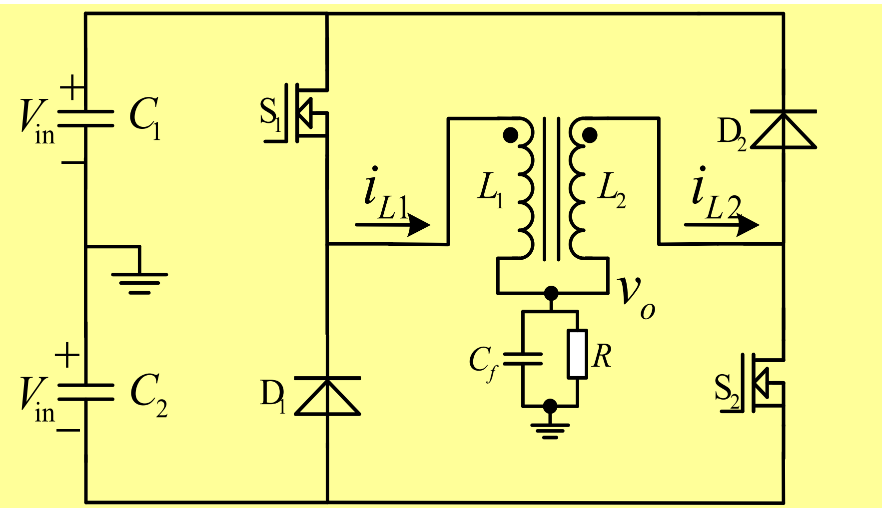
# 磁集成



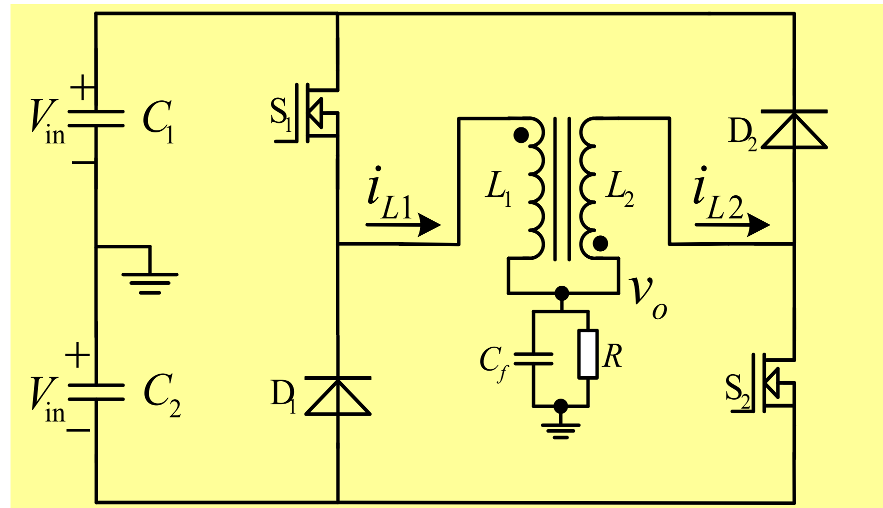




- 磁集成：减小磁件的体积和损耗

## 共用磁芯直接耦合



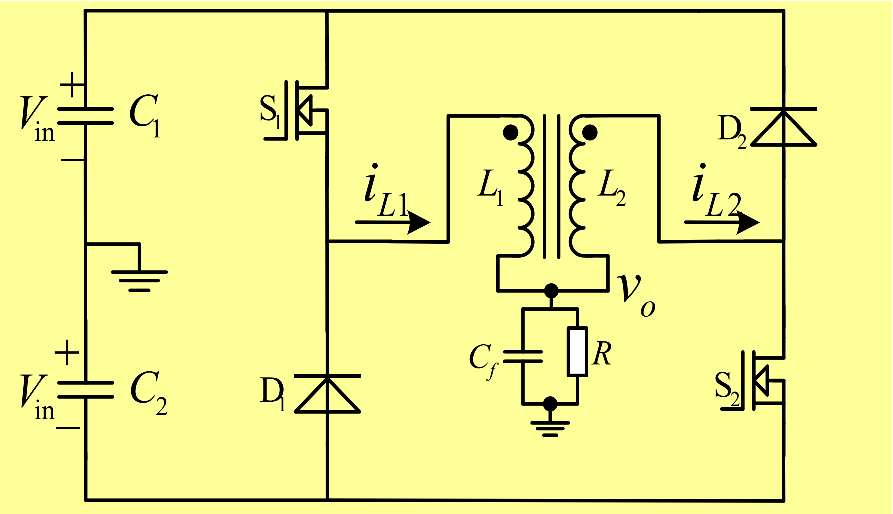

同名端相连

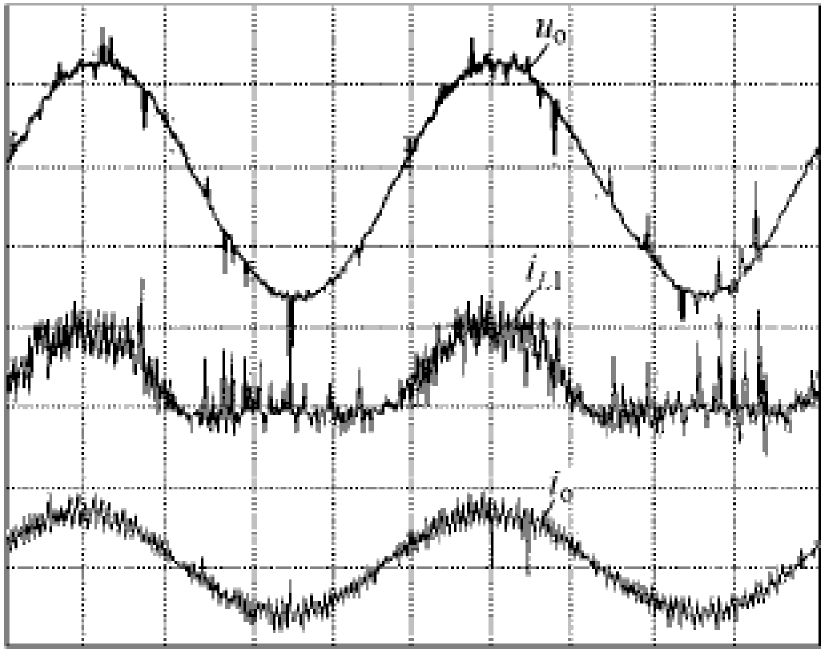



异名端相连

- 会因为耦合电感匝数的不一致出现环流，影响效率

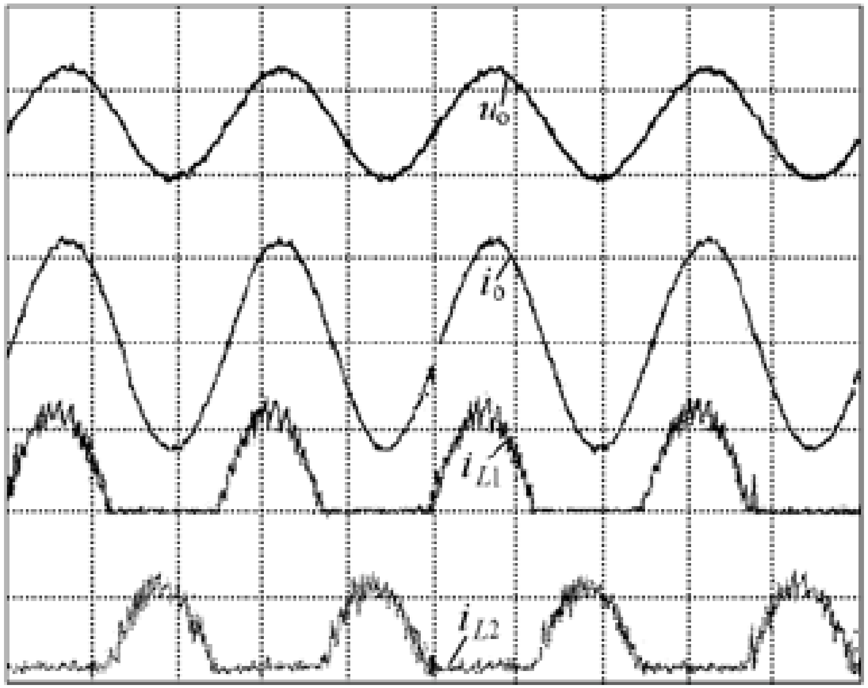
## 共用磁芯直接耦合



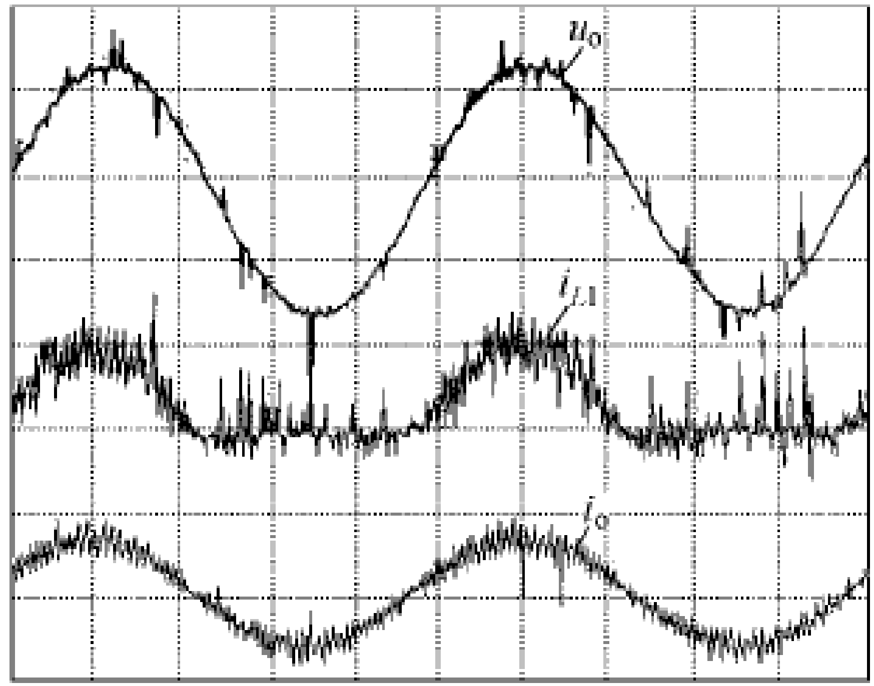




同名端相连

- 会因为耦合电感匝数的不一致出现环流，影响效率

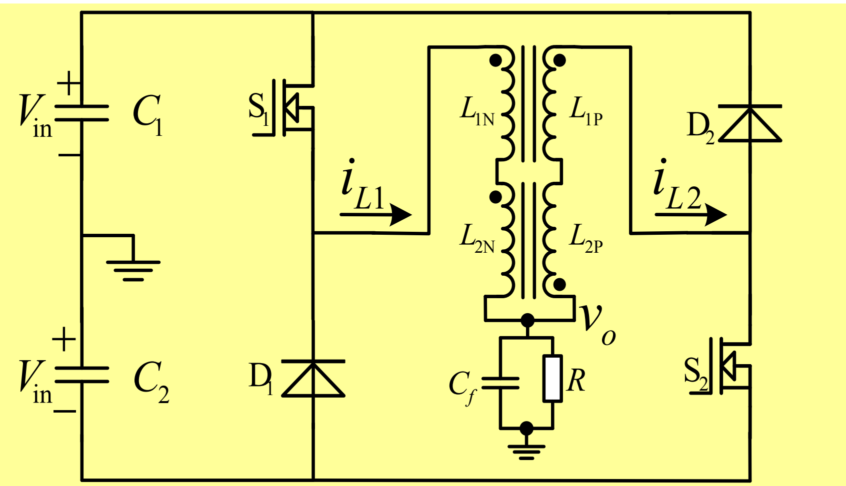


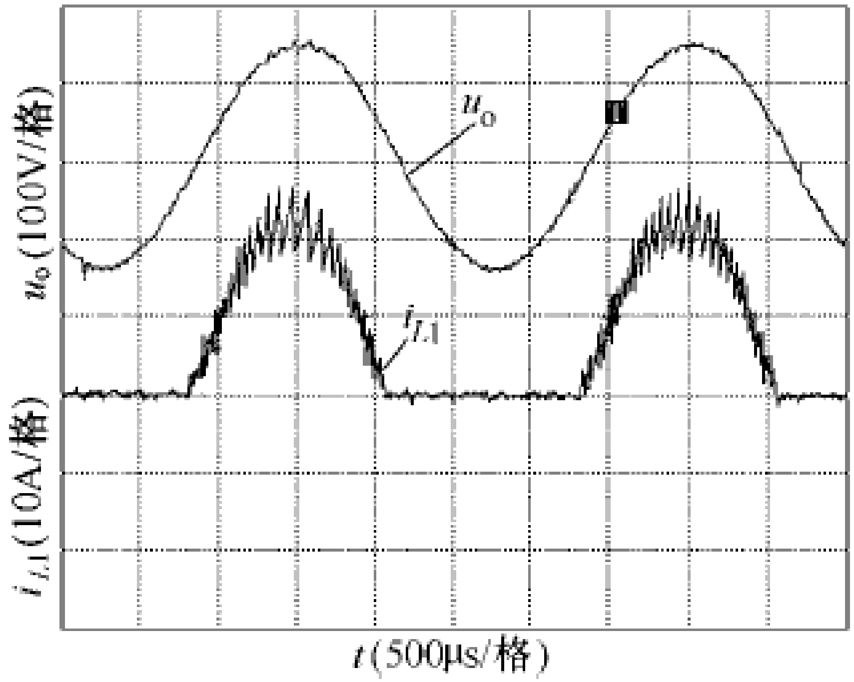

独立电感




耦合电感

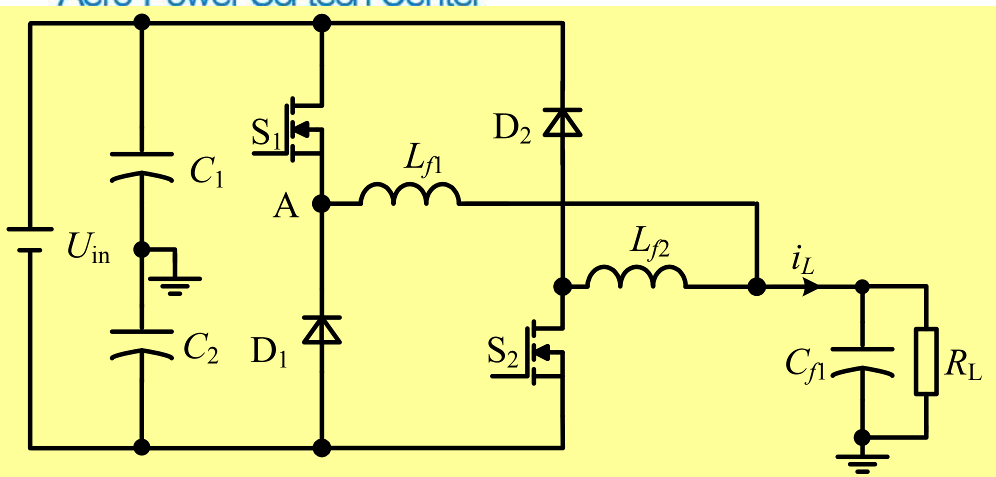
## 双磁芯四绕组耦合

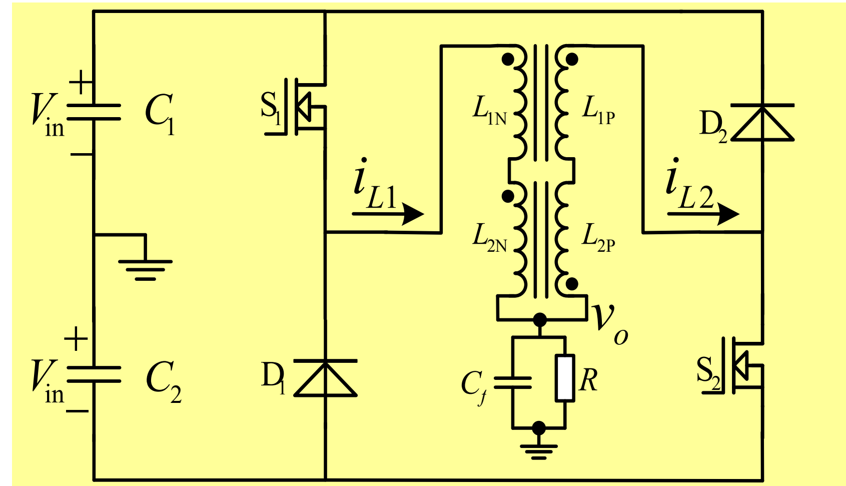



- 一个BUCK工作，两耦合电感绕组的感应电势相互抵消，不会出现环流

# 磁集成

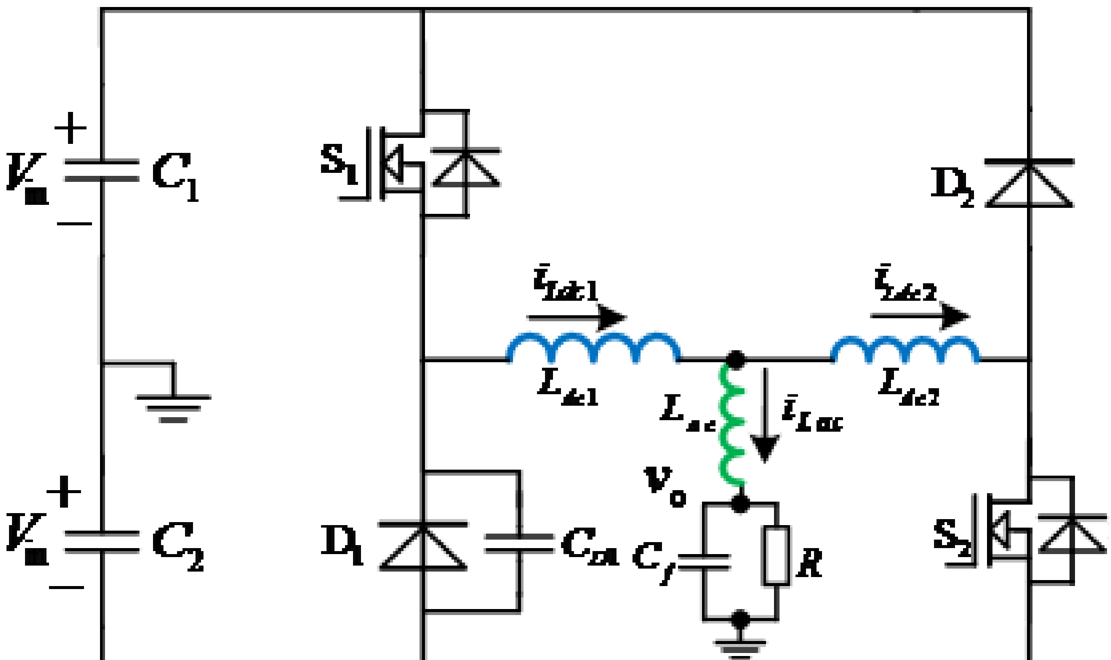



| | 磁势 | 绕组安匝 |
| --- | --- | --- |
| 独立电感： | $F_{\max} = 2 * NI_{o\max}$ | $2 * N * 0.707 I_o$ |
| 耦合电感： | $F_{\max} = 2 * \frac{N}{\sqrt{2}} I_{o\max}$ | $4 * \frac{N}{\sqrt{2}} * 0.707 I_o$ |

- 单个磁件铁心减小，线包增大，总体积重量减小

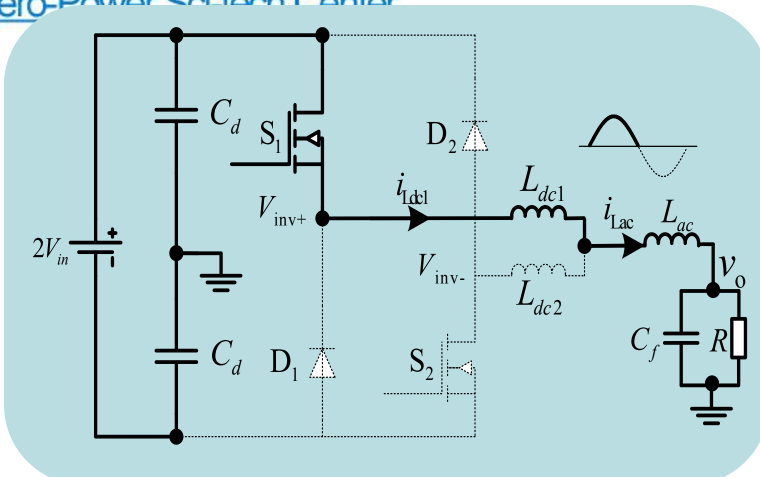
# 磁集成



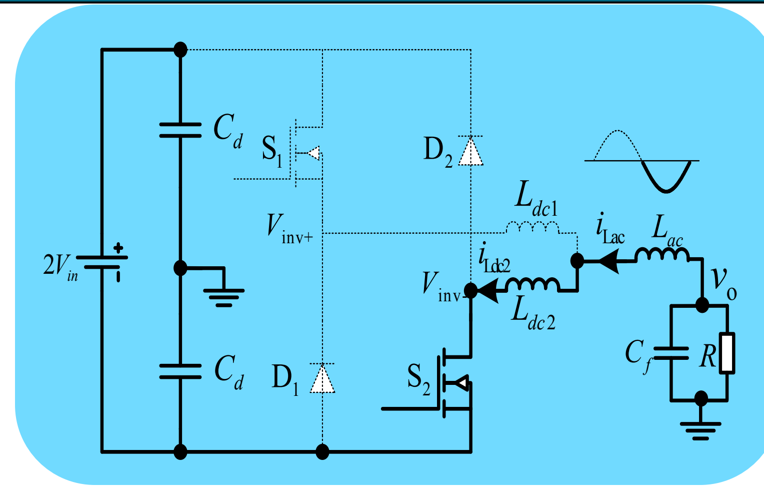
# 报告内容

- 研究背景
- 三相双Buck逆变器的控制技术
- 三电感双Buck逆变器
- 级联双Buck逆变器
- 总结

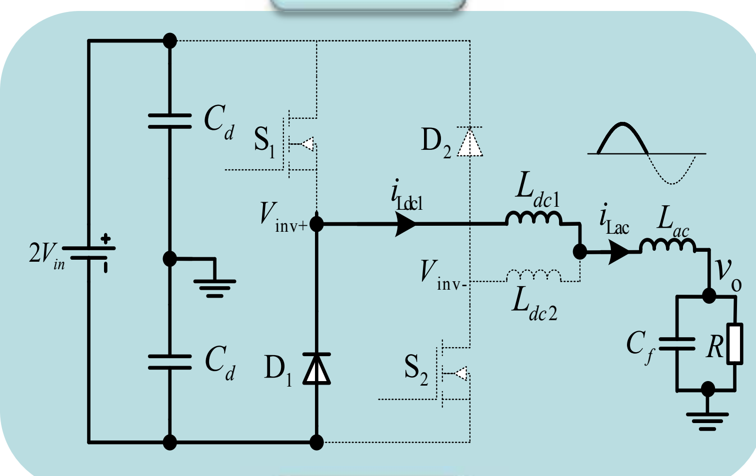
# 输出过零点畸变



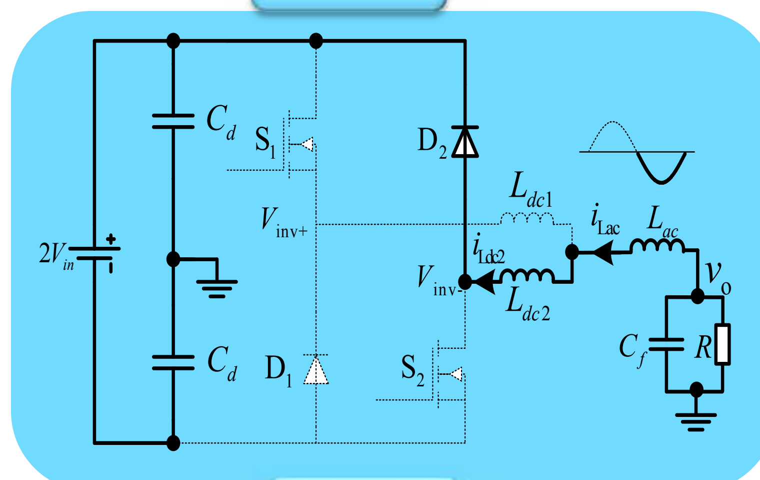

S1导通



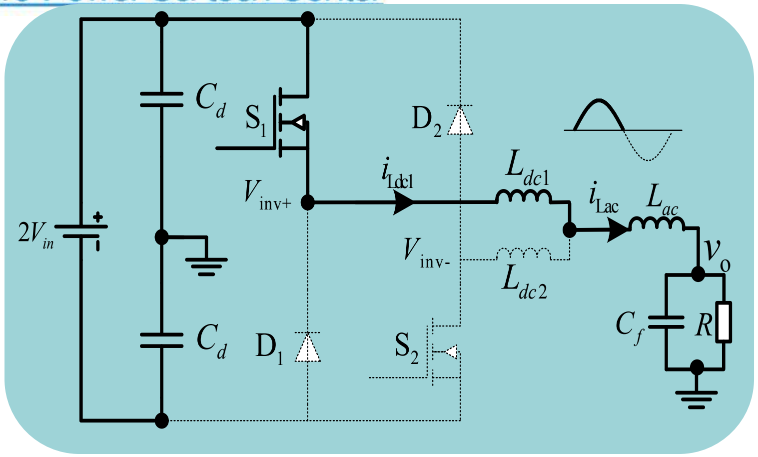

S2导通

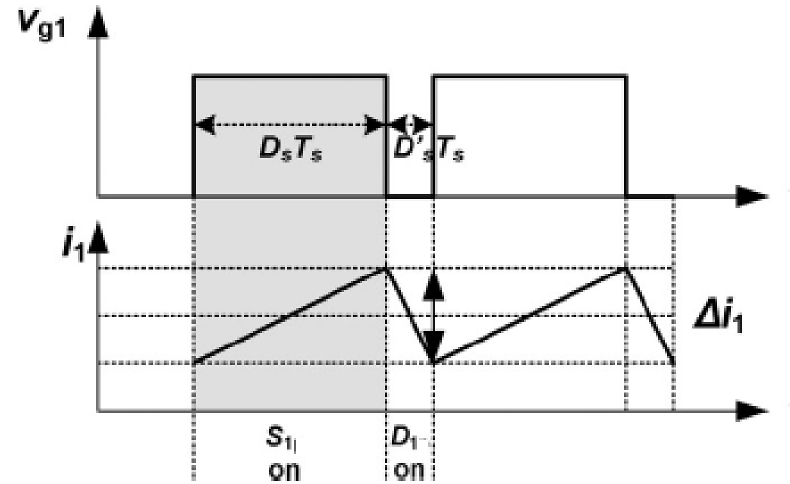



D1导通



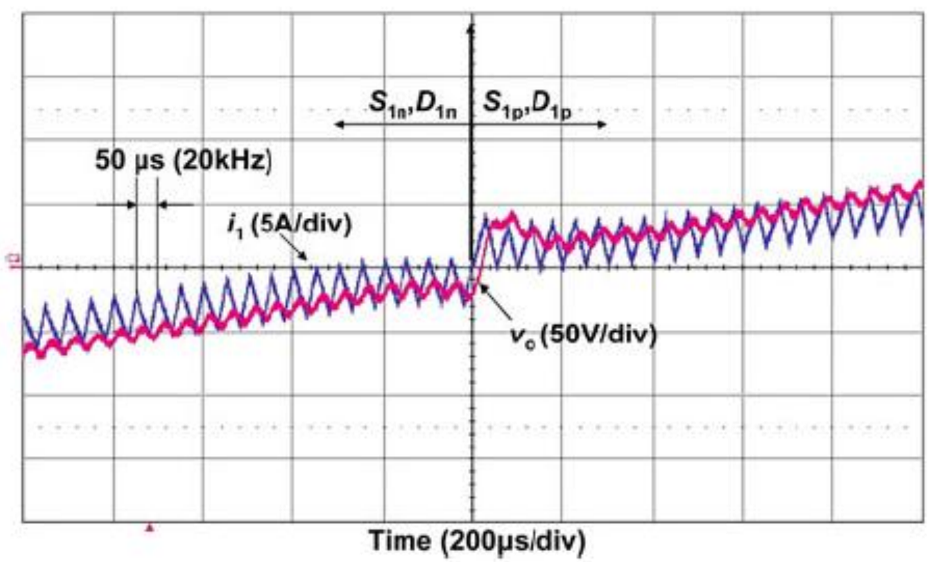

D2导通




S1导通

$$\Delta I=\frac{(V_{in}\text{-}v_o)DT_s}{L_{dc1}+L_{ac}}=\frac{(V_{in}\text{-}v_o)DT_s}{L_{dc}+L_{ac}}$$

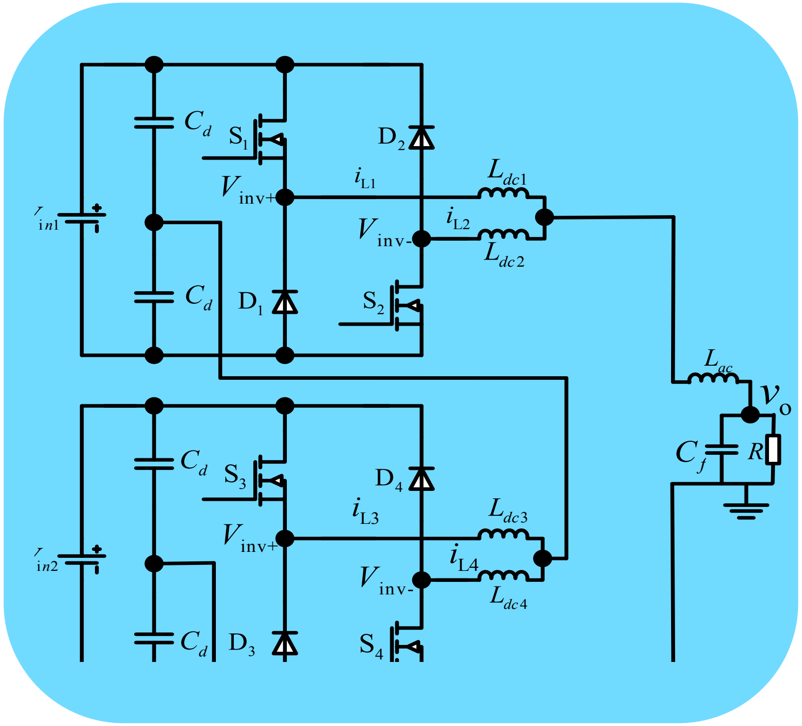



**D=0.5**

$$v_o=(2D-1)V_{in}/2$$

$$\Delta I\neq 0$$

# 级联三电感DBI




## 级联

母线电压为原来一半

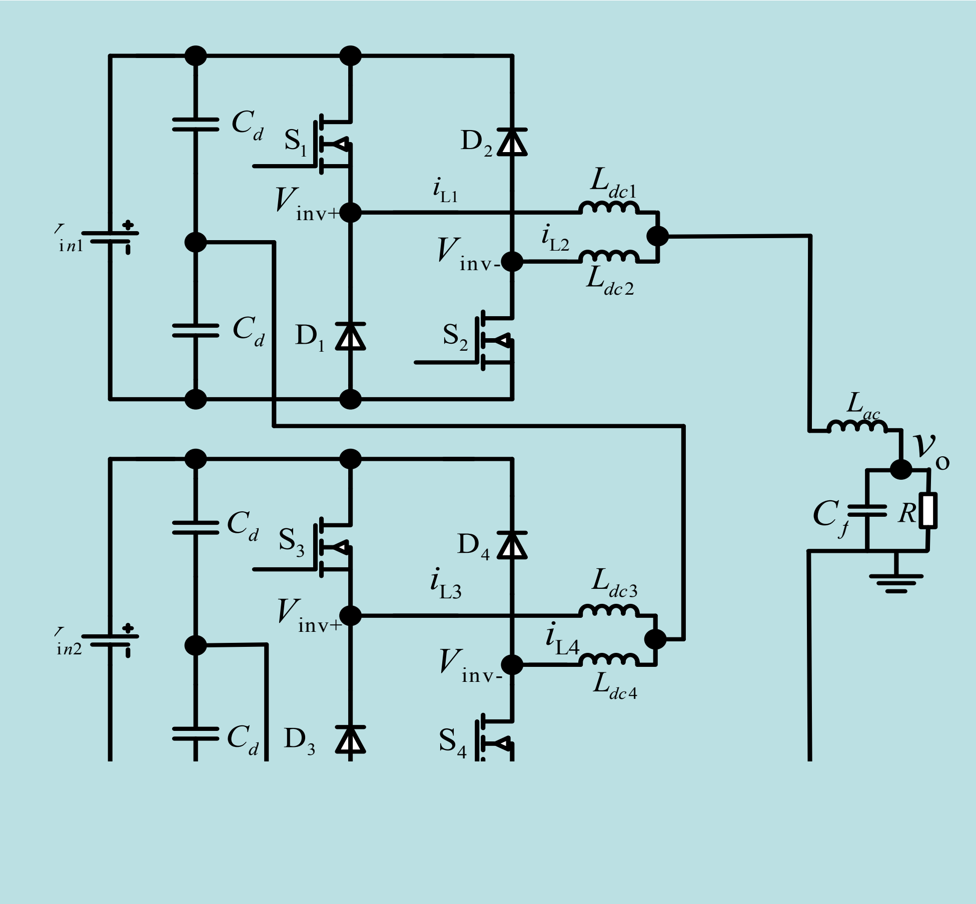
模块化设计，易维护

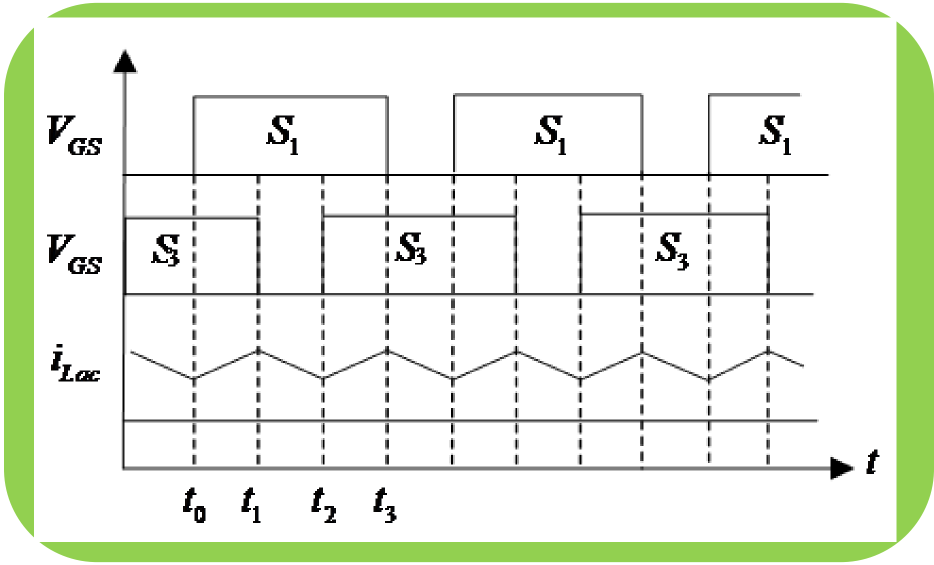
需要独立的直流电源

功率器件数增加

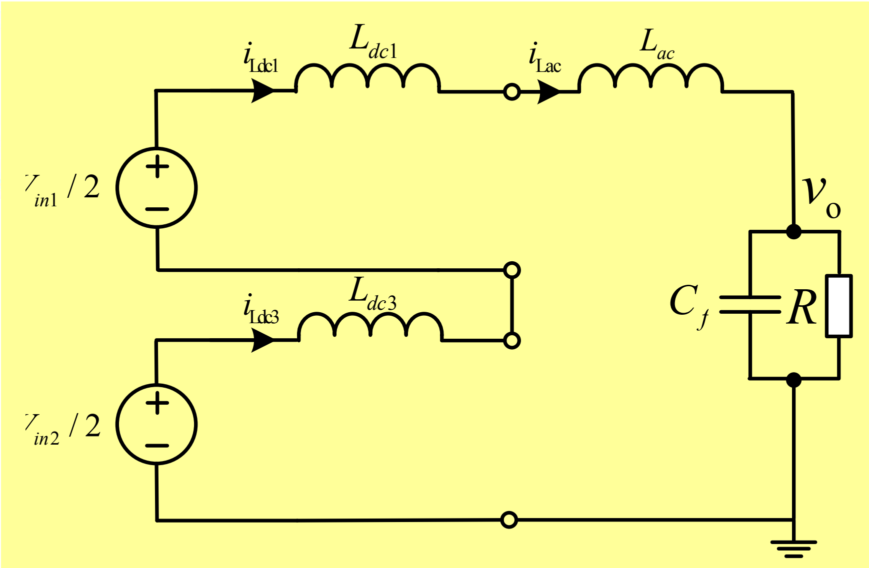
适合作为新能源和电网的接口，如光伏、燃料电池、蓄电池储能、电机驱动等有独立直流源的场合

# 级联DBI的移相控制原理

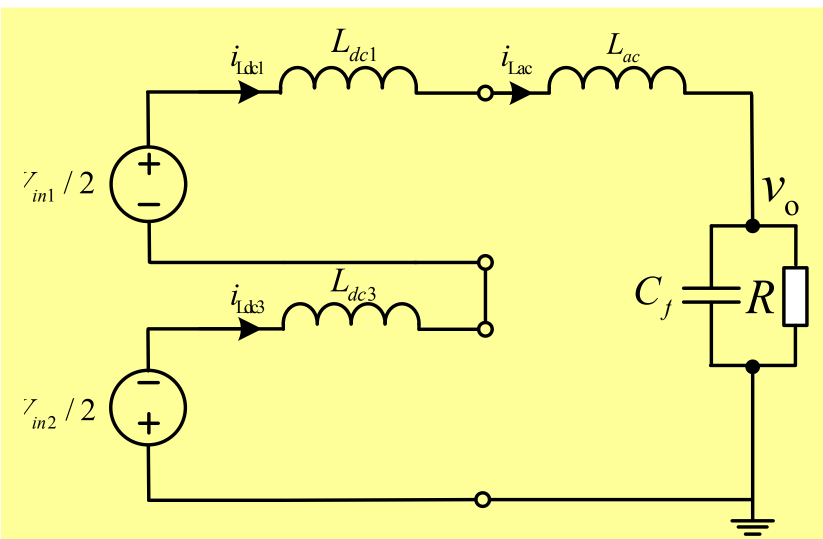


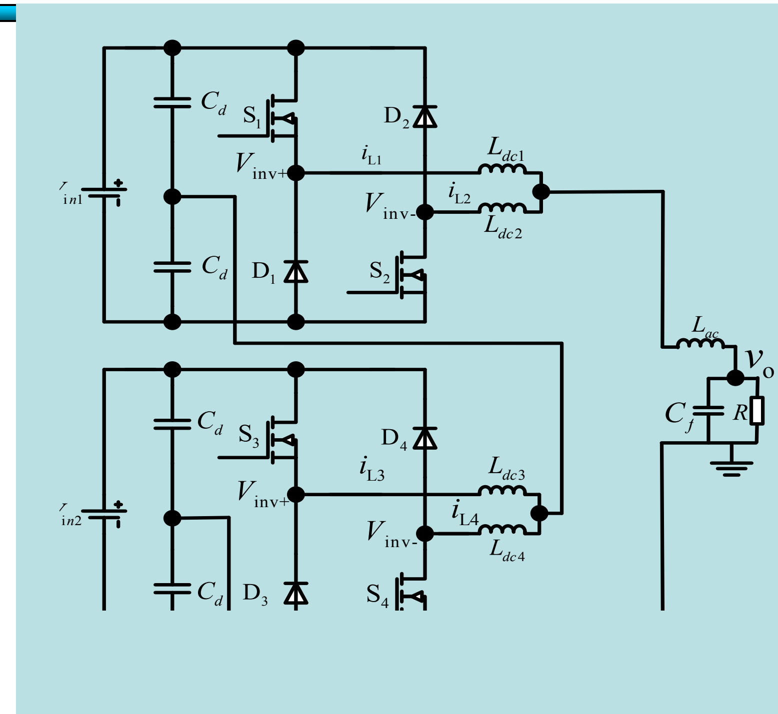
# 级联DBI的移相控制原理

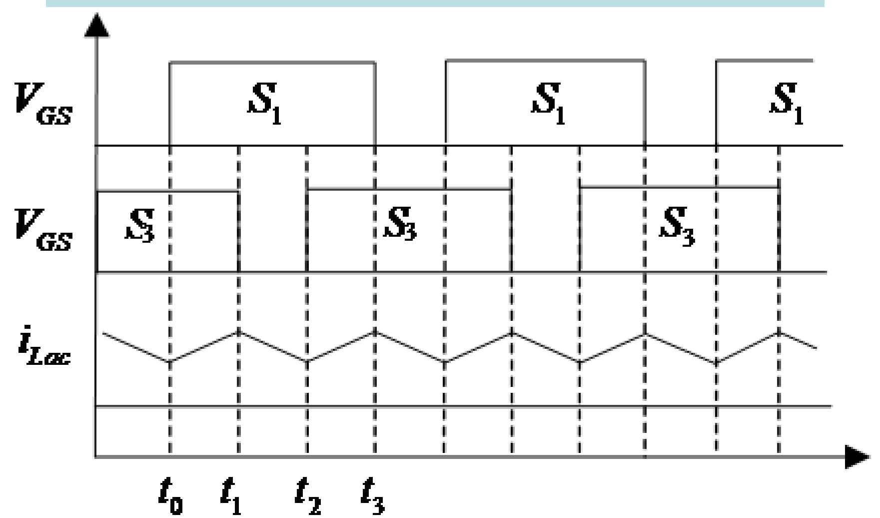



$t_0$-$t_1$ ： $S_1$ 、 $S_3$ on

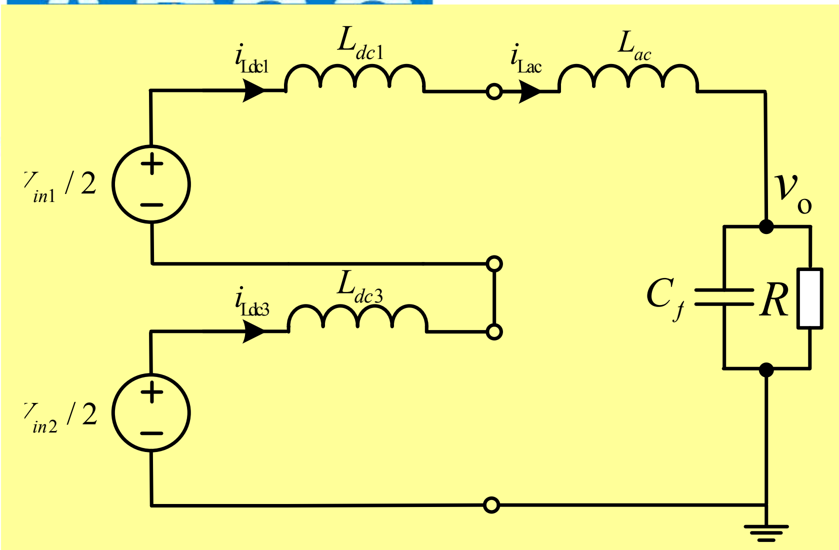



$t_1$-$t_2$ ： $S_1$ 、 $D_3$ on

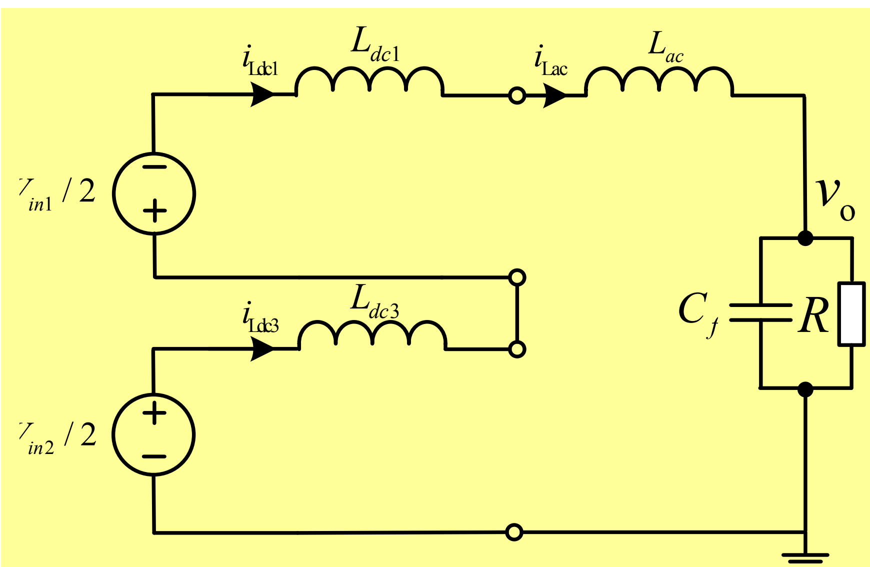


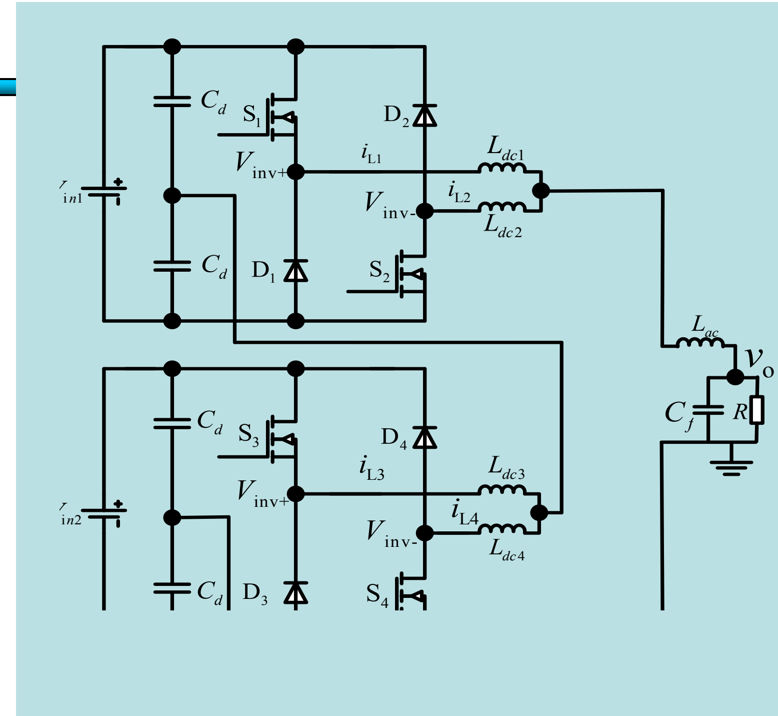
# 级联DBI的移相控制原理

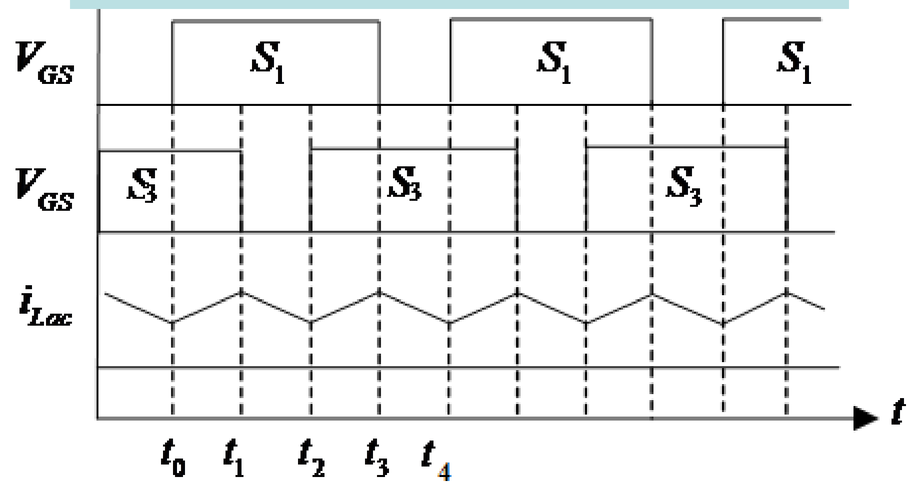



$t_2$-$t_3$ ： $S_1$ 、 $S_3$ on



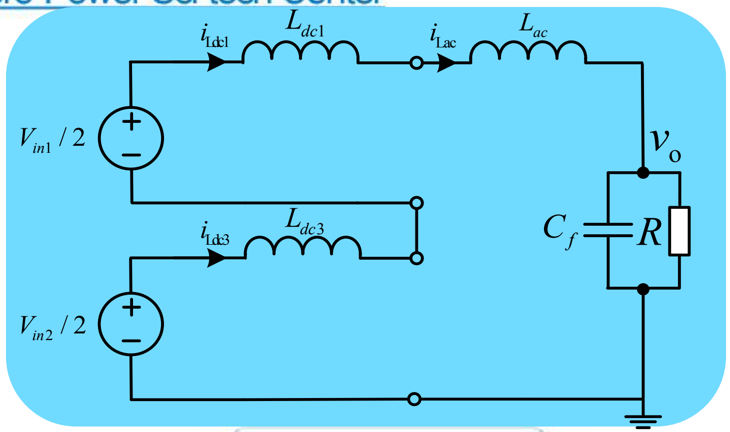

$t_3$-$t_4$ ： $S_3$ 、 $D_1$ on




- 移相控制，频率提高，纹波减小

# 级联DBI输出电压过零点畸变



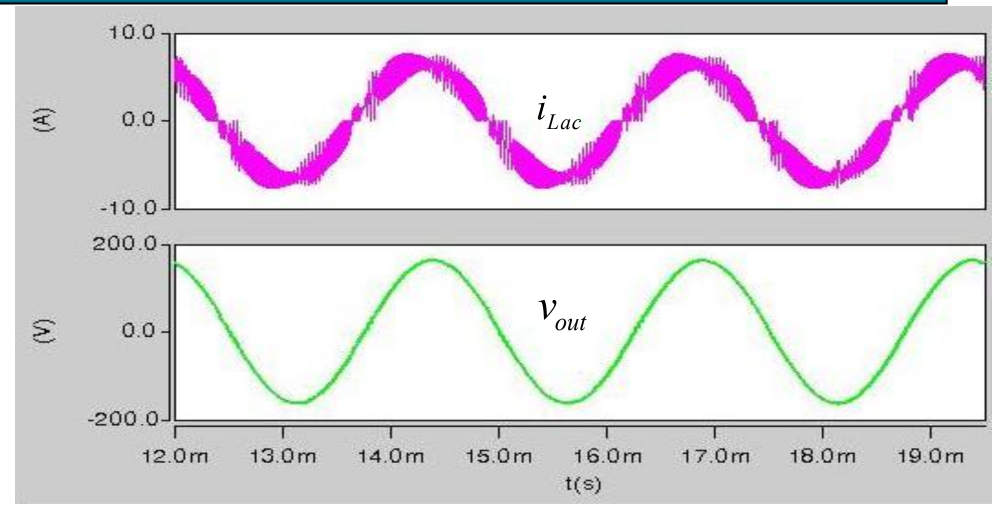

S1 、 S3导通

$$\Delta I = \frac{(0.5V_{in}+0.5V_{in}\text{-}v_o)(D\text{-}0.5)T_s}{L_{dc1}+L_{dc3}+L_{ac}}$$

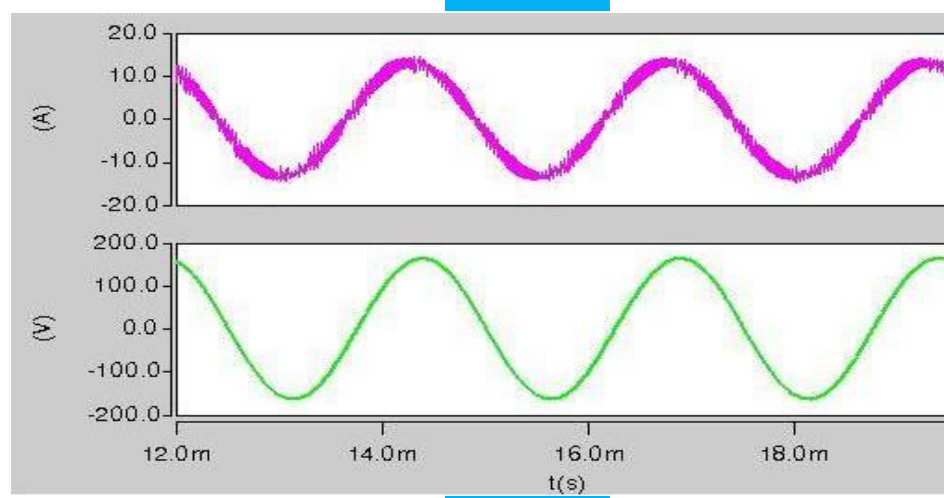
$$\Delta I = \frac{(V_{in}\text{-}v_o)(D\text{-}0.5)T_s}{2L_{dc}+L_{ac}}$$

**D=0.5**

$\Delta I=0$




半载




满载

APSC
Aero-Power Sci-tech Center

# 电流纹波和级联DBI单元的关系

| unit \ current ripple | $\Delta i_j$ |
| --- | --- |
| 3 | $\Delta i_3 = \frac{(\frac{2}{2\cdot 3}V_{dc} - v_o)(D_s - \frac{1}{3})T_s}{3L_{1p} + L_f}$ |
| 4 | $\Delta i_4 = \frac{(\frac{3}{2\cdot 4}V_{dc} - v_o)(D_s - \frac{2}{4})T_s}{4L_{1p} + L_f}$ |
| 5 | $\Delta i_5 = \frac{(\frac{3}{2\cdot 5}V_{dc} - v_o)(D_s - \frac{2}{5})T_s}{5L_{1p} + L_f}$ |

$$\Delta i_n = \frac{((\lceil(n+1)/2\rceil/2n)V_{\mathrm{dc}} - v_o)(D_s - (\lceil(n-1)/2\rceil/n))T_s}{nL_{np} + L_f}$$

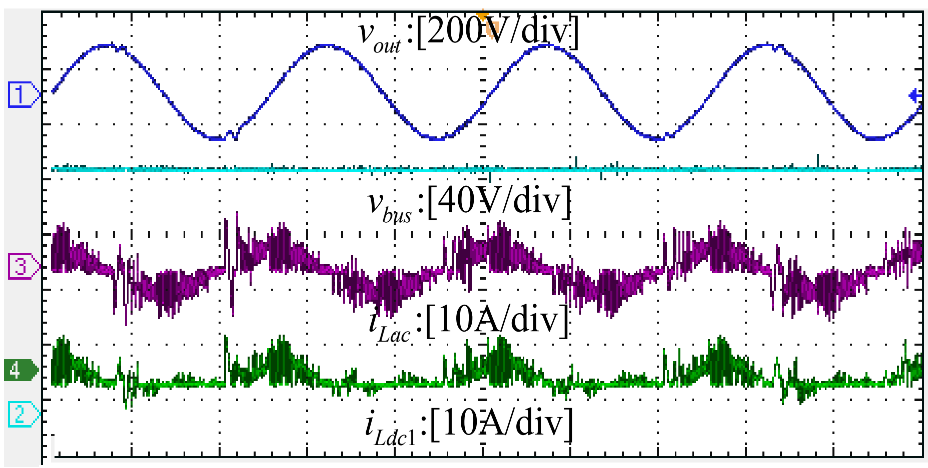
- 偶数级联，可去除过零畸变

Aero-Power Sci-tech Center

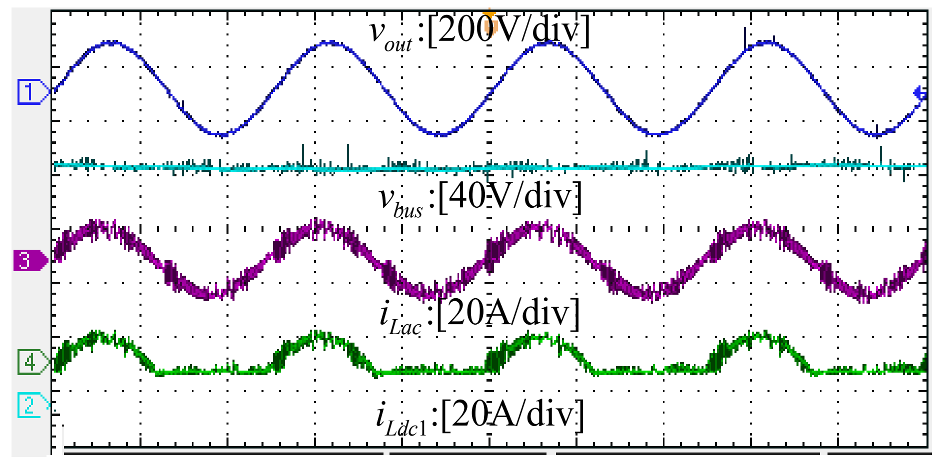
# 实验验证

- 输入电压: 180VDC(±90VDC)
- 输出电压: 115VAc/400Hz
- 输出功率: 1kVA

- 直流滤波电感: 15μH
- 交流滤波电感: 150μH
- 开关频率: 30kHz



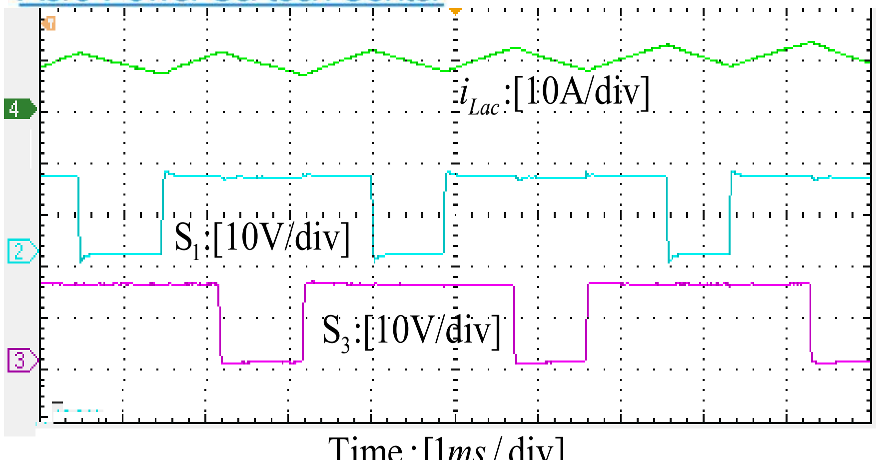

空载时



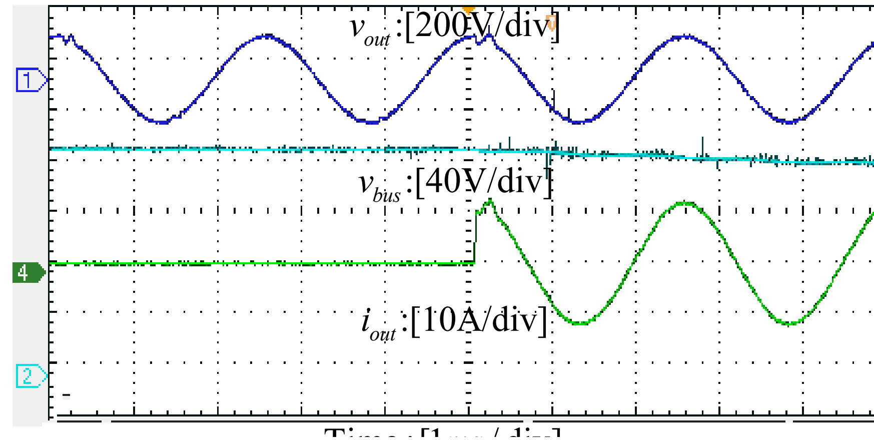

满载时

THD<1%

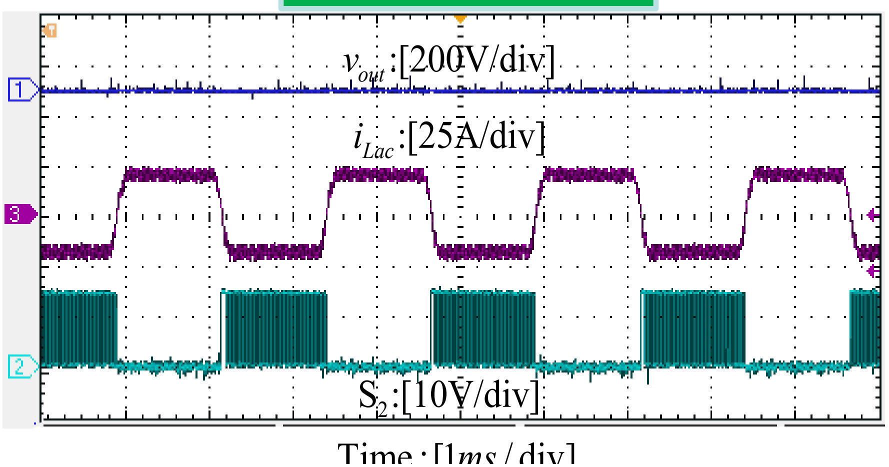
# 实验验证



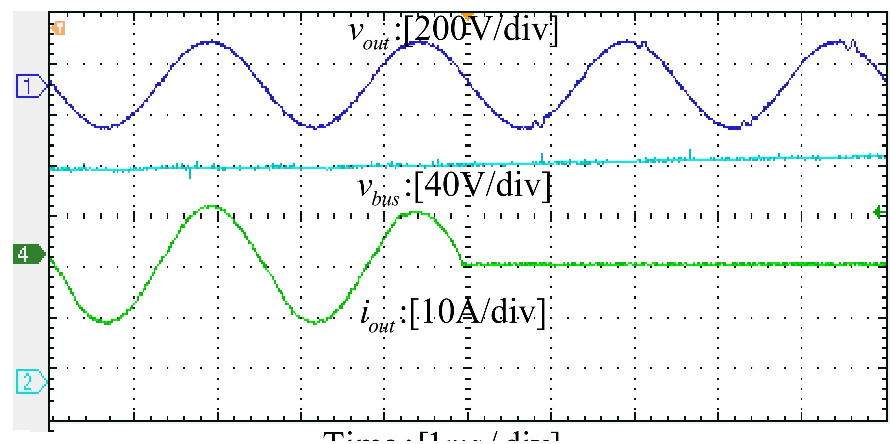

控制波形




突加负载




短路时




突卸负载

# 报告内容

- 研究背景
- 三相双Buck逆变器的控制技术
- 三电感双Buck逆变器
- 级联双Buck逆变器
- 总结

# 总结

双BUCK拓扑无桥臂直通问题，可靠性高；无二极管反向恢复问题，效率高。

## 1 三相双 逆变器的统一 载波交截控制

载波交截控制无需坐标变换；DSVPWM控制直流电压利用率高，效率高。

## 2. 三电感双Buck逆变器结构

三电感结构，避免桥臂功率管直通，有效降低滤波器的体积重量。可通过磁集成来进一步提高功率密度。

## 3. 双Buck逆变器级联技术

双BUCK级联结构，采用移相控制可提高等效频率，消除过零点畸变，减小滤波器尺寸。

# 谢谢！

# 请各位专家批评指正！