# 大功率变流器与电力传动系统应用

汤天浩

上海海事大学

电力传动与控制研究所

# 内容提要

- 引言
- 大功率变频器的结构与控制
- 电力传动系统的应用与需求
- 未来发展趋势
- 结论与展望

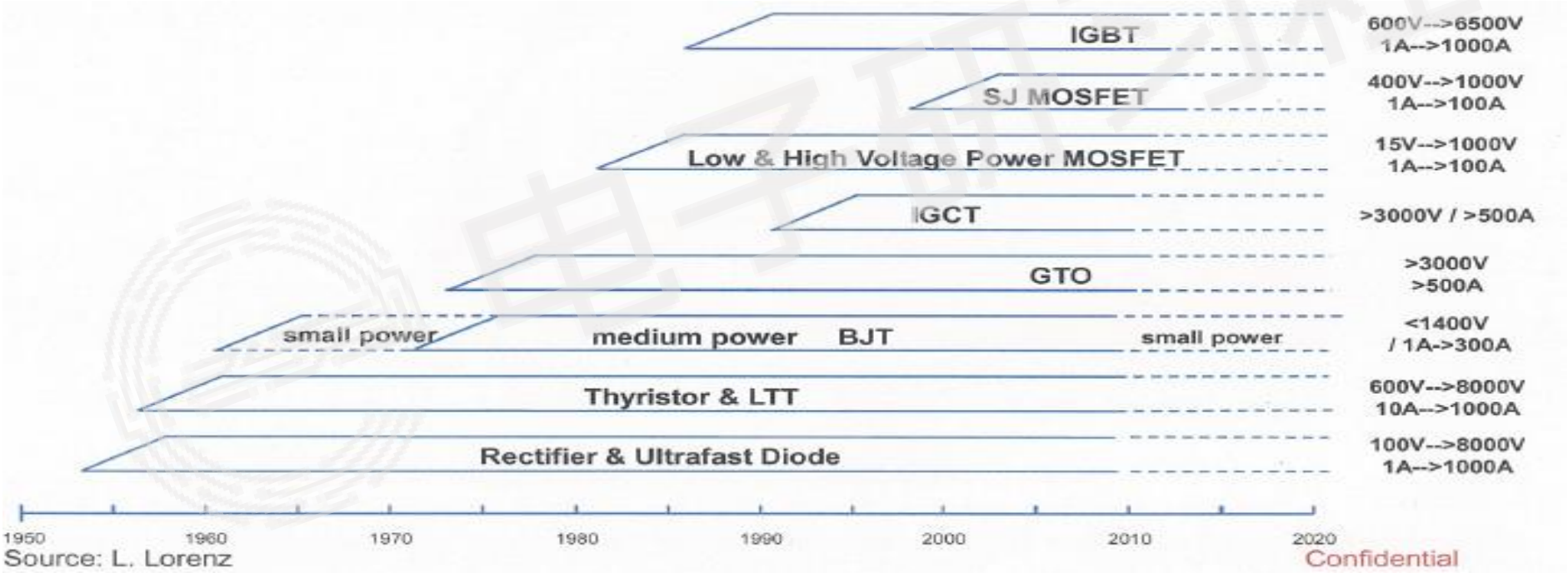
# 一、引言

- 能源短缺、环境污染和气候变化已成为全人类面临的共同问题，世界各国都在寻求解决之路。
- 节能减排与发展新能源是解决上述问题的主要途径。
- 变频技术与电力传动系统的核心作用更加凸显。

# 1.1 电力电子技术的发展历史

- 1948年，晶体管的发明标志着现代电子时代的开始。
- 1956年，晶闸管在Bell实验室诞生，开始了第二次电子革命，从此“电子”进入到强电领域，电力电子器件成为弱电控制强电的纽带。其重要意义在于：电力电子学把机器时代、电气时代和电子时代开创的技术融合在一起。

# • 电力电子器件发展路线图




Confidential

# 1.2 变流技术的应用领域

- 各种电源变换
- 电力传动
- 电力系统

电子研习社

# 各种变流方式

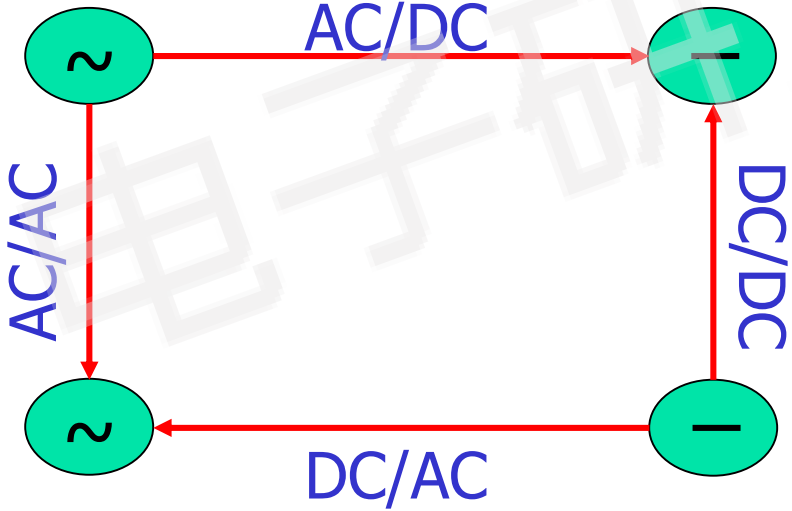



图0-8 现代变流的几种方式

# 电力传动的应用领域

- 风机、水泵类——工矿企业、农业水利、建筑楼宇、各类设备等的通风和冷却；
- 工业生产——矿山机械、轧钢设备、机械加工设备、轻工、纺织和印染机械等；
- 能源开发——石油开采设备、电能的传输、存储与转换，新能源开发等；
- 交通运输——港口机械、船舶设备、电力机车、电动汽车、航空航天设备等。

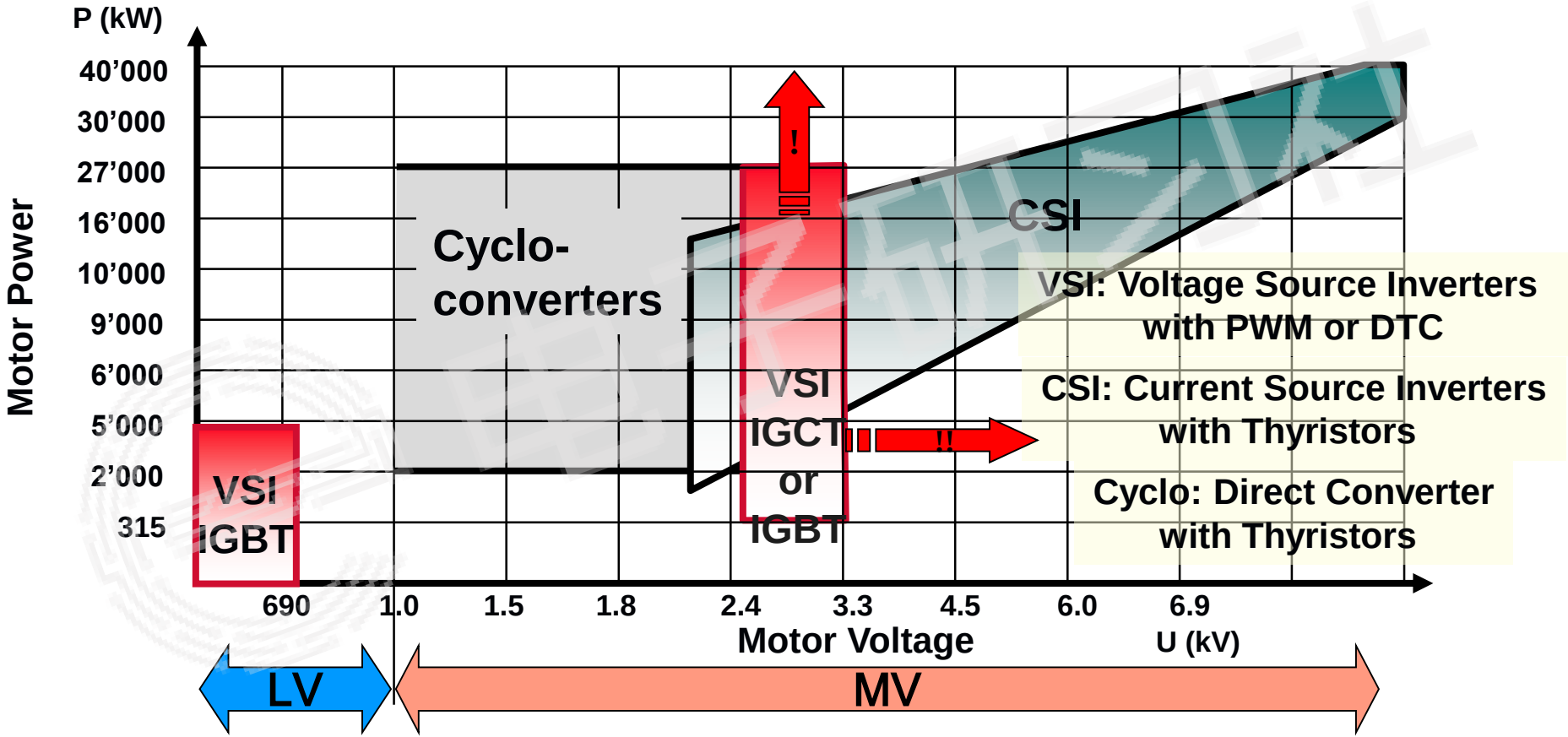
# 二、大功率变频器的结构与控制

- 关键问题与核心技术
- 大功率电力电子器件
- 大功率变频器拓扑结构
- 大功率变频器的调制

# 2.1 关键问题与核心技术

- 大功率电力电子器件，提高其电流、电压及温度
- 高压大容量的变频器拓扑结构
- 提高功率密度与效率
- 提高可靠性
- 提高功率因数和减少谐波

# 2.2 大功率电力电子器件



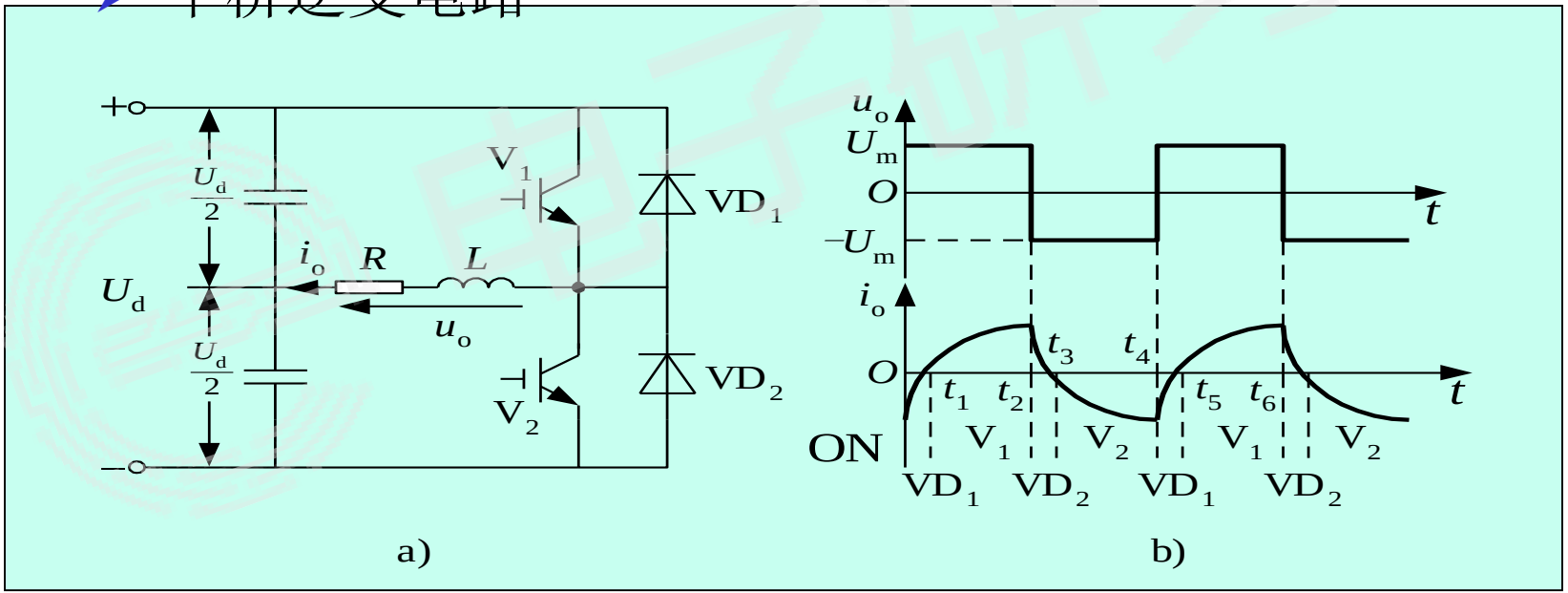
# 2.3 高压大功率的变频器

- 逆变电路的基本拓扑
- 三相逆变电路及其调制方法
- 多电平变换器的构造
- 高压大功率变频器的设计

# 2.3.1 逆变电路的基本拓扑

## （1）基本逆变单元

- 半桥逆变电路



# （2）基本逆变单元的组合方式

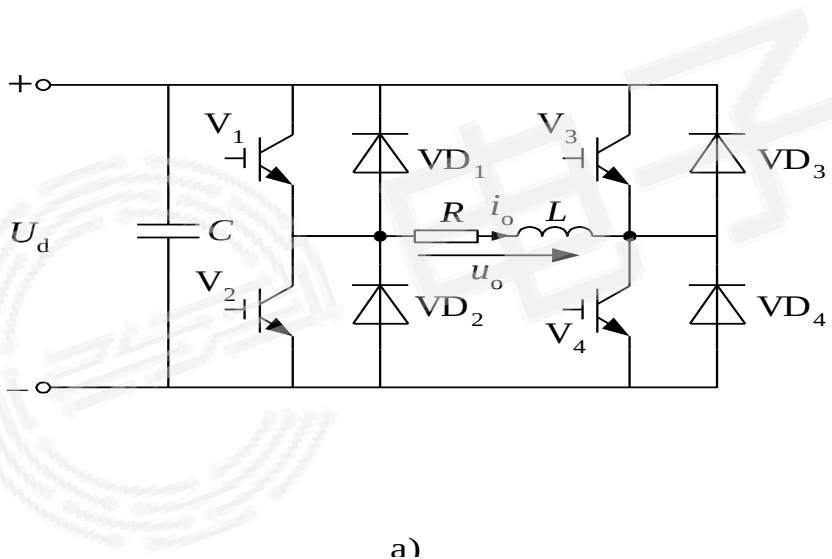
1）基本单元的并联

- 两个半桥逆变单元并联构成单相全桥逆变电路；
- 3个半桥逆变单元并联构成三相桥式逆变电路。

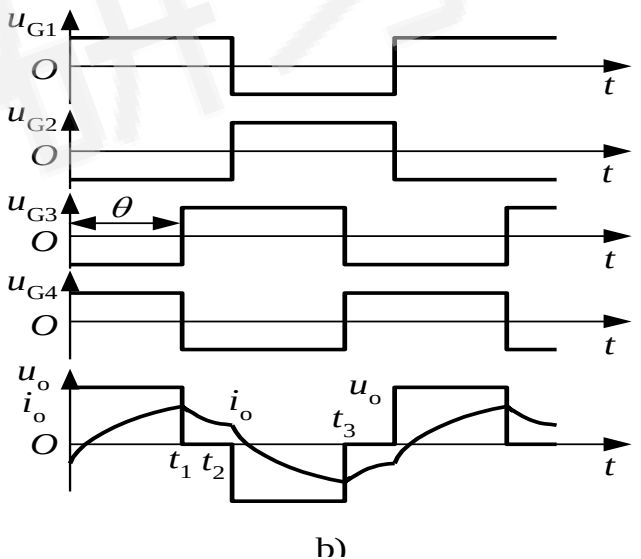
2）基本单元的串联构成多电平逆变电路的基本单元。

3）基本单元的串、并联组合，构成各种多电平逆变电路。

# （3）全桥逆变电路


+
–
$U_d$
C
$V_1$
$V_2$
$V_3$
$V_4$
$VD_1$
$VD_2$
$VD_3$
$VD_4$
R
$i_o$
L
$u_o$

a)


$u_{G1}$
$u_{G2}$
$u_{G3}$
$u_{G4}$
O
t
θ
$u_o$
$i_o$
$t_1$ $t_2$
$t_3$

b)

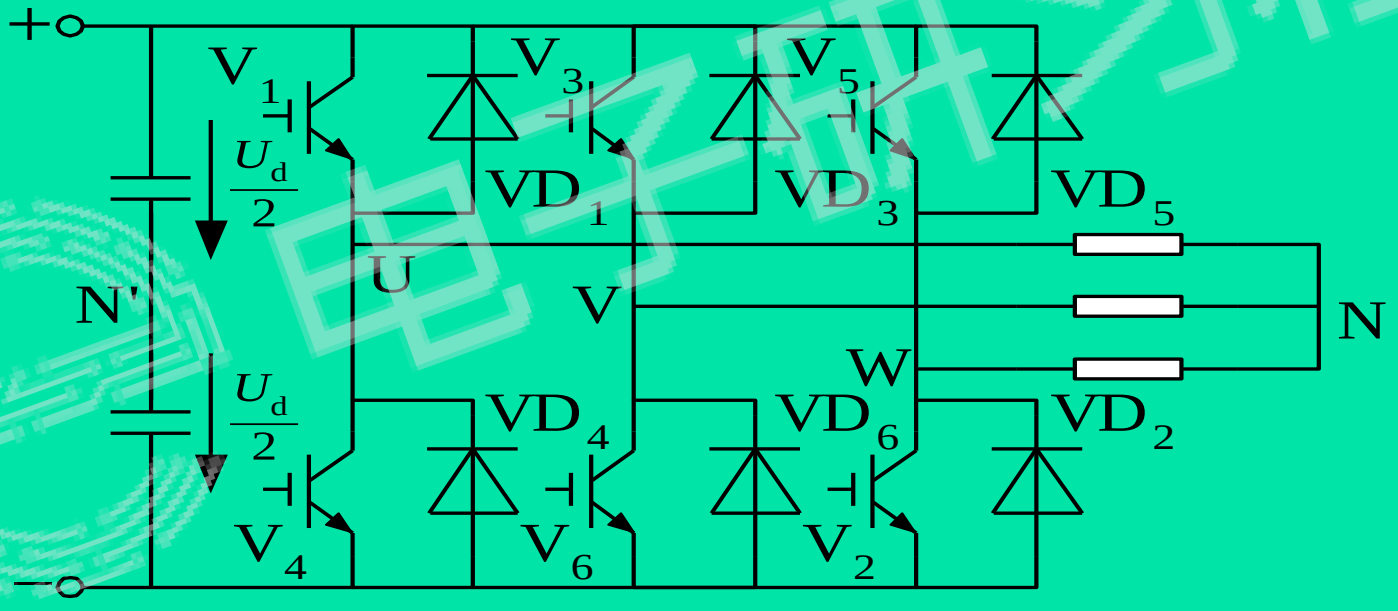
## 工作原理

- 两个半桥电路的组合
- $V_1$和$V_4$为一对开关，$V_2$和$V_3$为另一对开关，同时导通或关断，两对交替各导通180°
- 输出电压$u_o$波形同半桥电路的$u_o$，幅值高出一倍$U_m = U_d$
- 输出电流$i_o$波形和图5-6b中的$i_o$相同，幅值增加一倍。

# 2.3.2 交-直-交逆变器

- 由3个半桥逆变单元并联组成三相桥式逆变电路；
- 由三相桥式整流与逆变电路组成的交-直-交逆变器是应用最广的主电路拓扑，特别在电力传动系统中，用作三相交流电动机的调速。
  - 电压型逆变器
  - 电流型逆变器
  - 双PWM逆变器

# （1）三相电压型桥式逆变电路




三相桥式逆变器主电路结构

# • 逆变器的调制方式

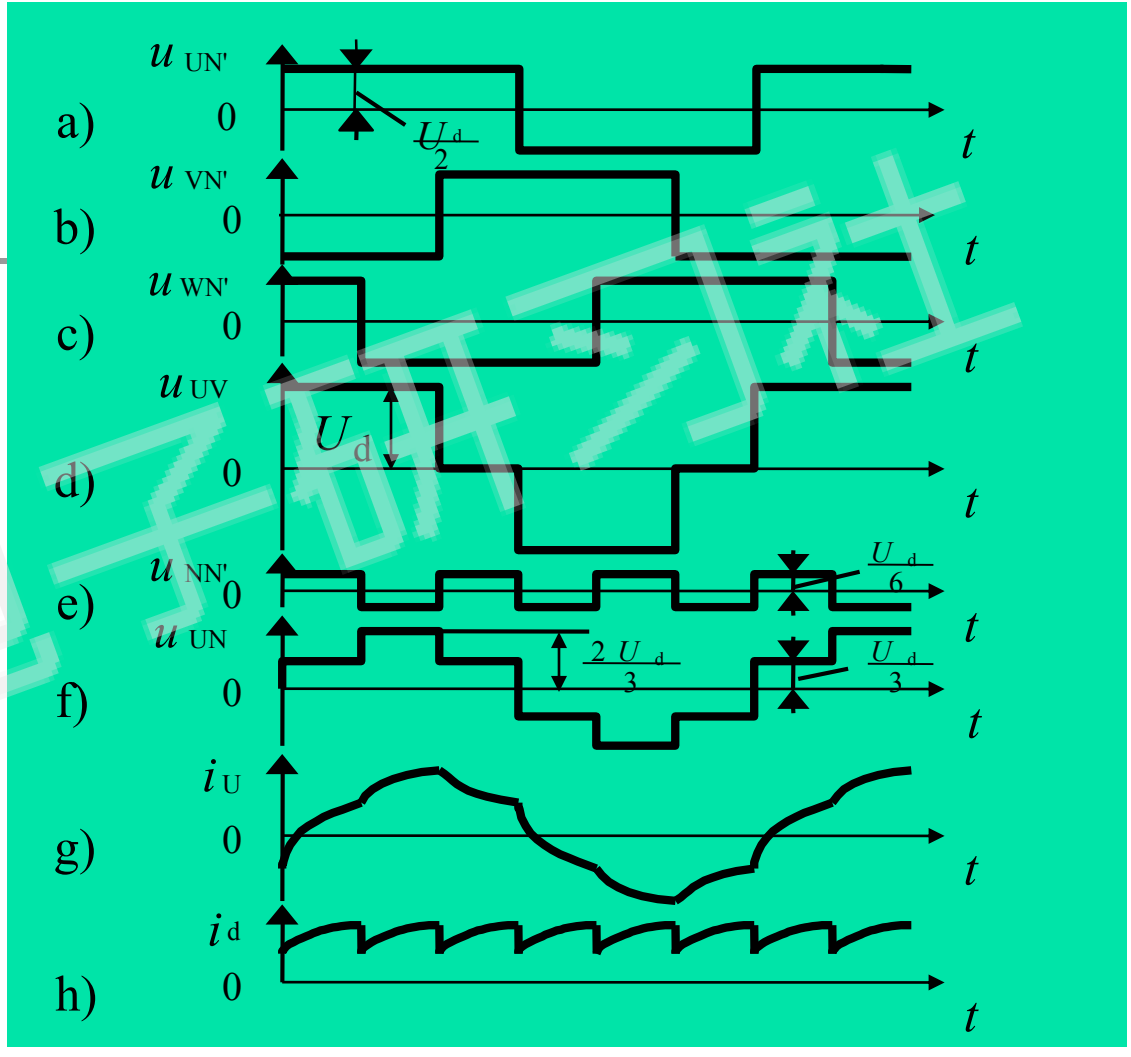
- 基本换流调制
- PWM调制
  - SPWM调制
  - SVPWM调制
  - 电流跟踪型PWM调制
  - 消除指定谐波的PWM调制

电子研习社

- 基本换流调制

同一桥臂上、下两管之间互相换流的逆变器称作180°导通型逆变器。

也可以采用120°导通换流模式。




电压型逆变电路的波形

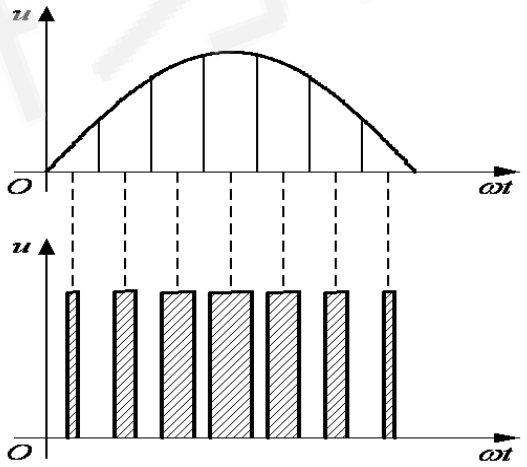
根据180°导通电压型逆变器的输出波形，可推导出逆变器输出的相电压和线电压方程：

$$u_{\mathrm{a}}=\frac{2}{\pi}U_{\mathrm{d}}\sin\omega_{\mathrm{c}}t+\frac{2}{\pi}U_{\mathrm{d}}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+1}}{6k\pm1}\sin(6k\pm1)\omega_{\mathrm{c}}t$$

$$u_{\mathrm{ab}}=\frac{2\sqrt{3}}{\pi}U_{\mathrm{d}}\sin\left(\omega_{\mathrm{c}}t+\frac{\pi}{6}\right)+\frac{2\sqrt{3}}{\pi}U_{\mathrm{d}}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(-1)^{k+1}}{6k\pm1}\sin\left[(6k\pm1)\omega_{\mathrm{c}}t+\frac{\pi}{6}\right]$$

# • PWM控制方式

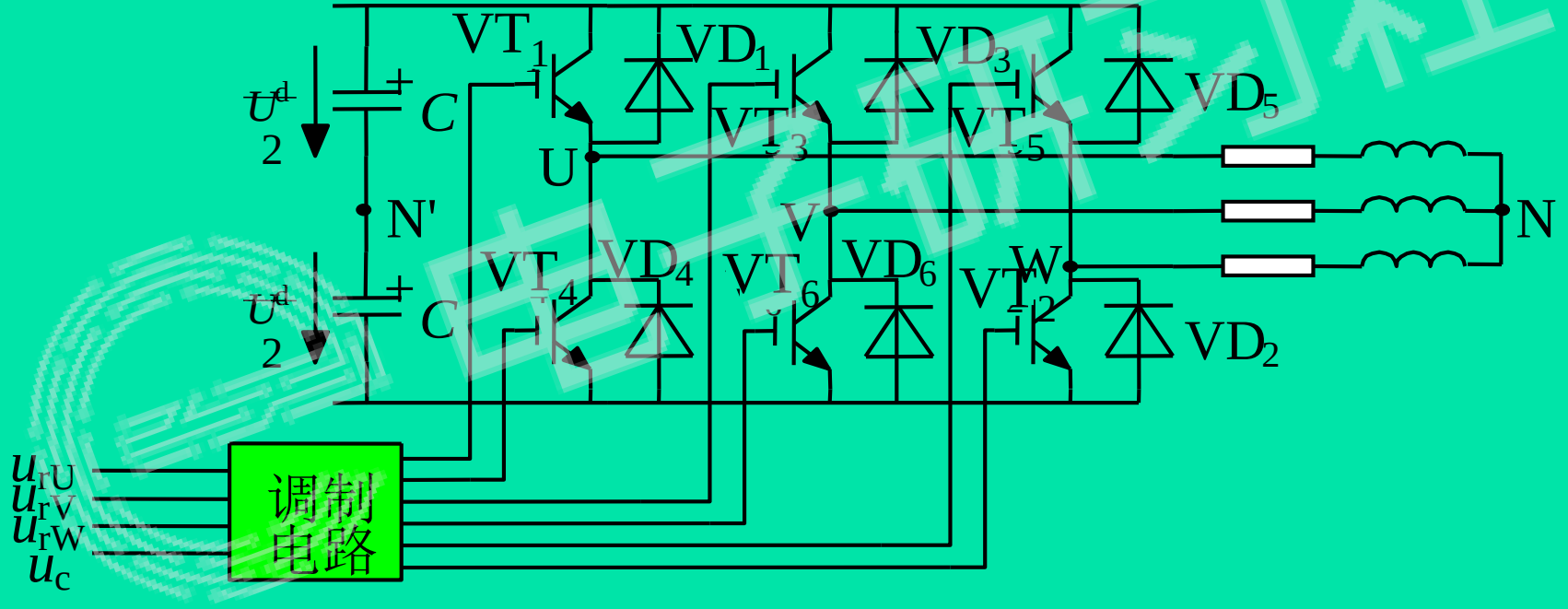
- **PWM调制原理：**交流PWM调制的基本原理是在正弦波的半个周期内，采用两边窄中间宽的一系列等幅不等宽的矩形波，按照波形面积相等的原则，等效所需的正弦波。



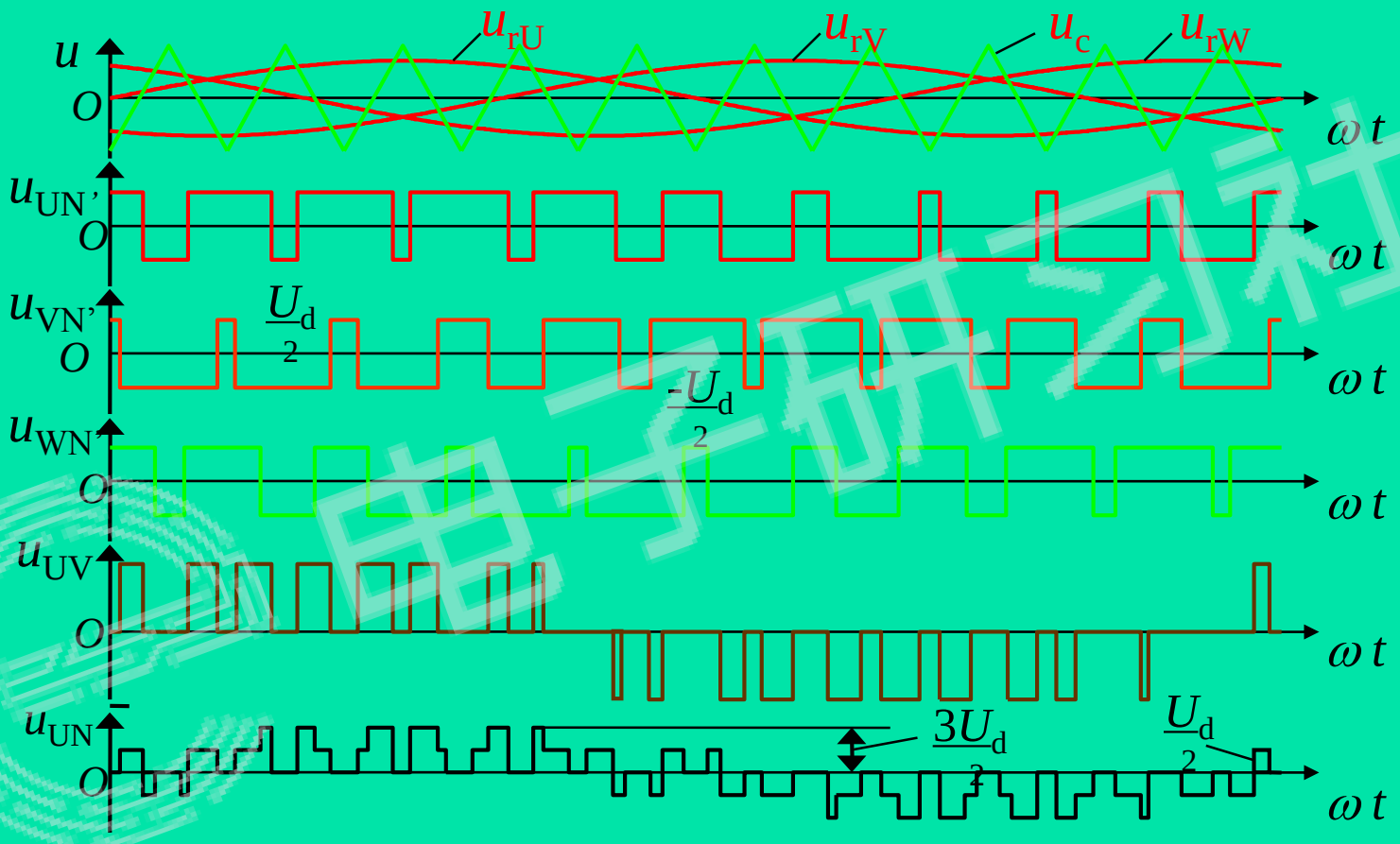

（b）PWM调制原理

图2-13 PWM逆变器的主电路拓扑及调制原理

# • PWM逆变器主电路及输出波形

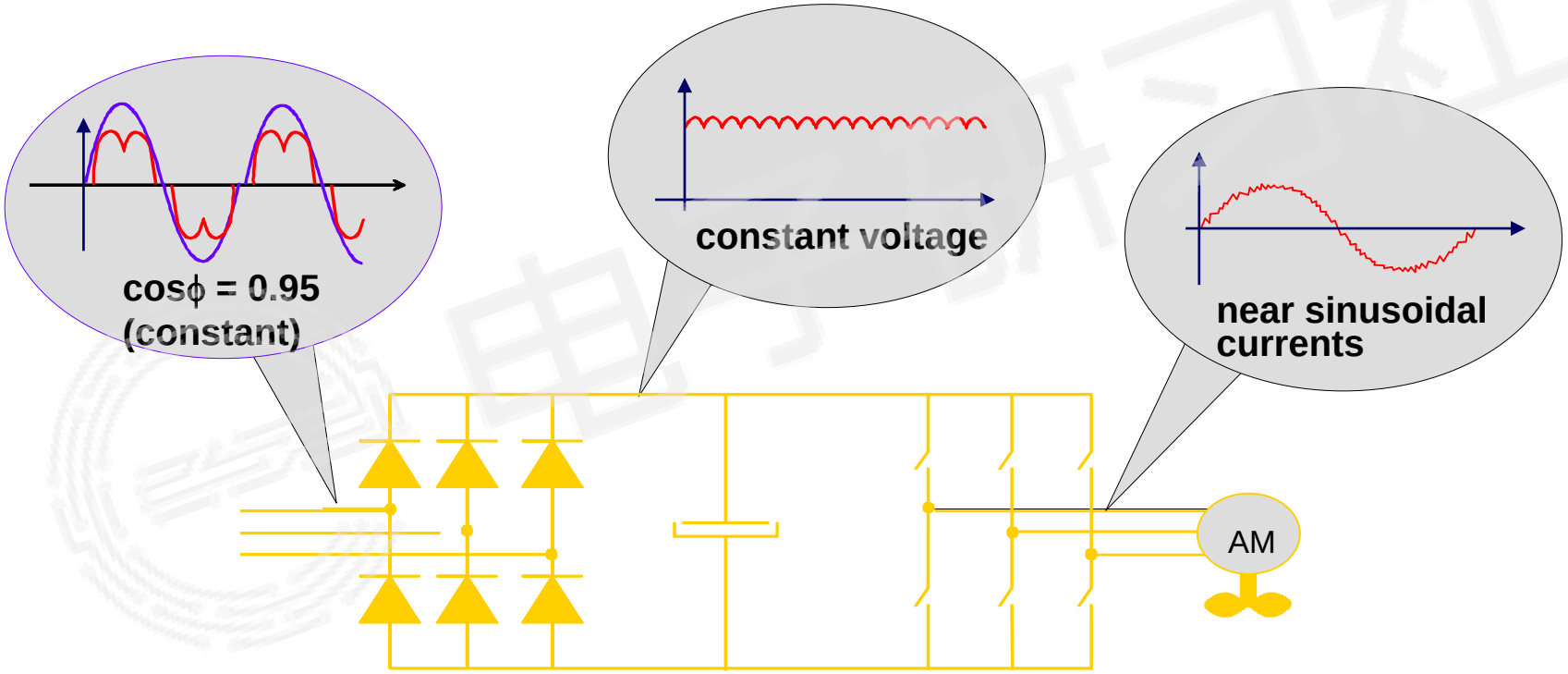



三相桥式PWM逆变器主电路原理图




三相桥式PWM逆变器的双极性SPWM波形

# 例如：Voltage Source Inverters (VSI)



## PWM变压变频器的优点：

1）在主电路整流和逆变两个单元中，只有逆变单元是可控的，通过它同时调节电压和频率，结构简单。采用全控型的功率开关器件，通过驱动电压脉冲进行控制，驱动电路简单，效率高。

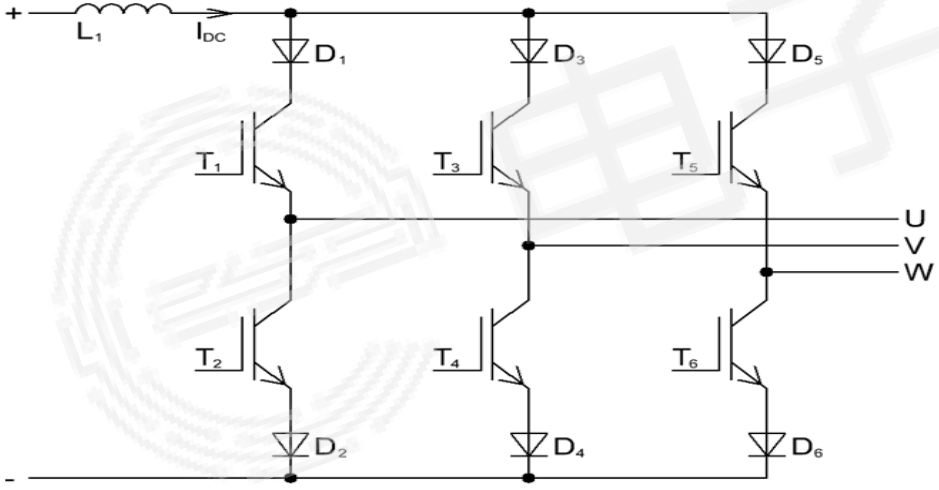
2）输出电压波形虽是一系列的PWM波，但由于采用了恰当的PWM控制技术，正弦基波的比重较大，影响电动机运行的低次谐波受到很大的抑制，因而转矩脉动小，提高了系统的调速范围和稳态性能。

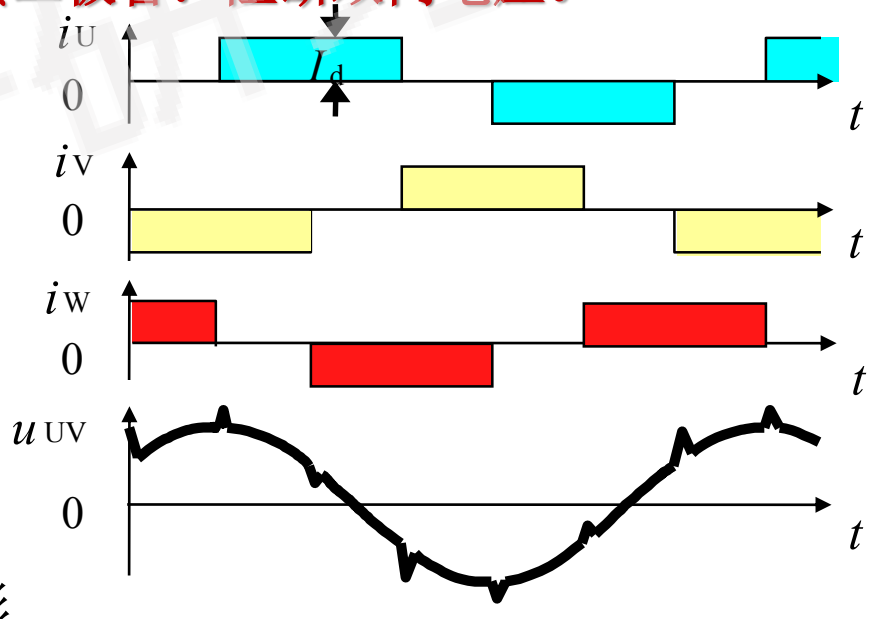
3）逆变器同时实现调压和调频，动态响应不受中间直流环节滤波器参数的影响，系统的动态性能也得以提高。

4）采用不可控的二极管整流器，电源侧功率因素较高，且不受逆变器输出电压大小的影响。

# （2）电流源逆变器

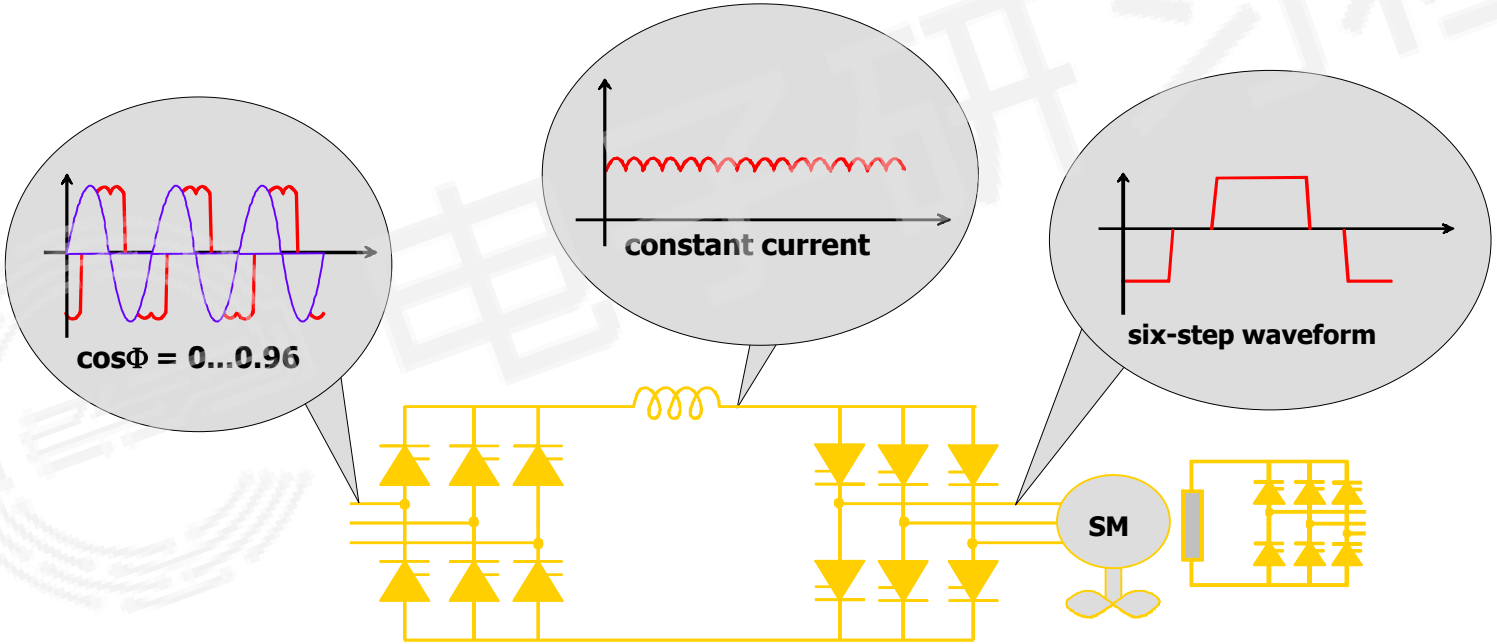
**电流源逆变器（CSI）：**直流母线中需要串一个扼流线圈，使得直流母线电流几乎保持恒定不变。**开关器件串接二极管：阻断双向电压。**




三相电流源逆变器及120导电调制波形

# 例如：CSI Drive and Synchronous motor（LCI）



# （3）双PWM变频器

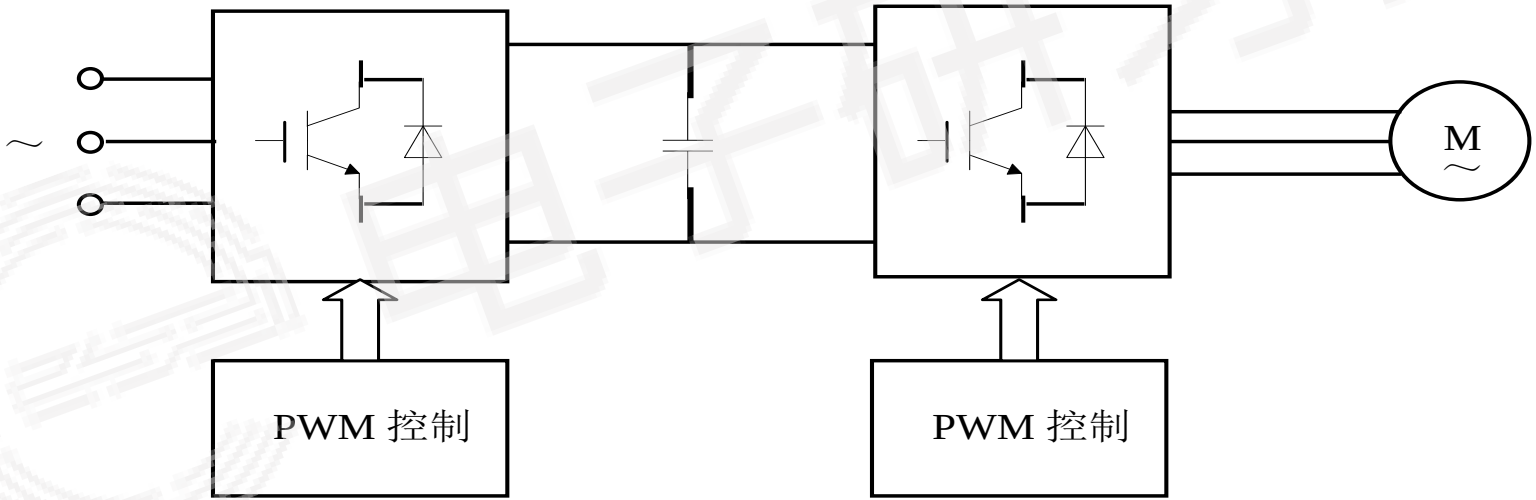



**图1-26　双PWM变频器的基本结构**

## 双PWM变频器有两种工作模式：

（1）当电动机电动运行时，对变频器的网侧变流电路进行PWM整流控制，将电压和频率恒定的交流电变成直流电，负载侧变流器进行PWM逆变控制，输出电压和频率可调的交流电，此时电能由电网向电动机传递。

（2）当电动机发电运行时，则反过来对变频器的负载侧变流器进行PWM整流控制，将交流电变成直流电，网侧变流电路进行PWM逆变控制，输出电压和频率恒定的交流电反馈回电网，此时电能由电机向电网传递。

## 双PWM变频器的特点是：

① 可方便的实现四象限运行；

② 采用PWM整流控制，可任意调节网侧功率因数，使功率因数小于1、等于1或大于1；

③ 也可大大减小电流谐波。

# 2.3.3 交-交变频器的调制原理

交-直-交变频器由于存在直流环节，带来转换损耗和时滞效应。而交-交直接变频器可省去直流环节，由正、反两组晶闸管可控整流装置反并联组成的可逆线路。

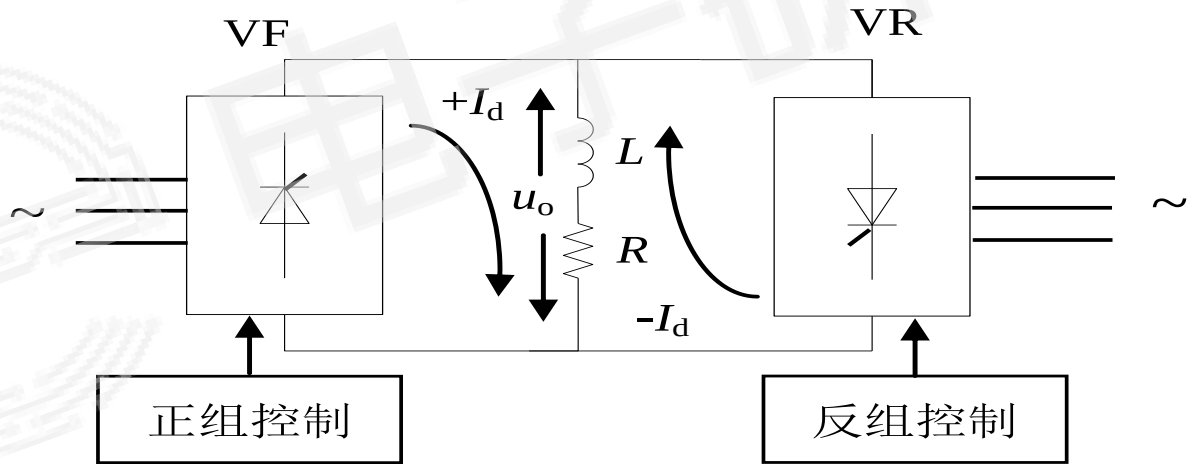



图1-28 单相交-交变频器电路结构

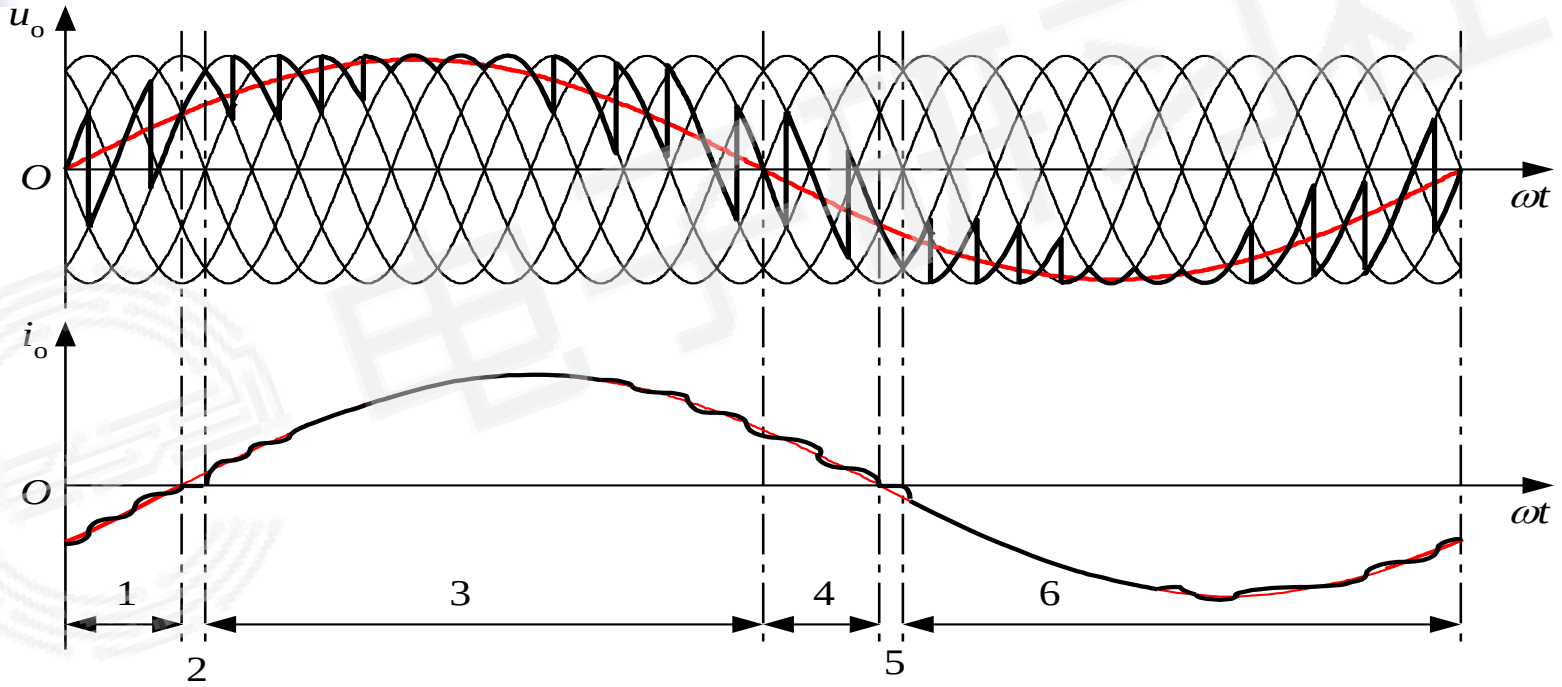





图1-29 采用$\alpha$ 调制的输出波形

- 三相交交变频电路

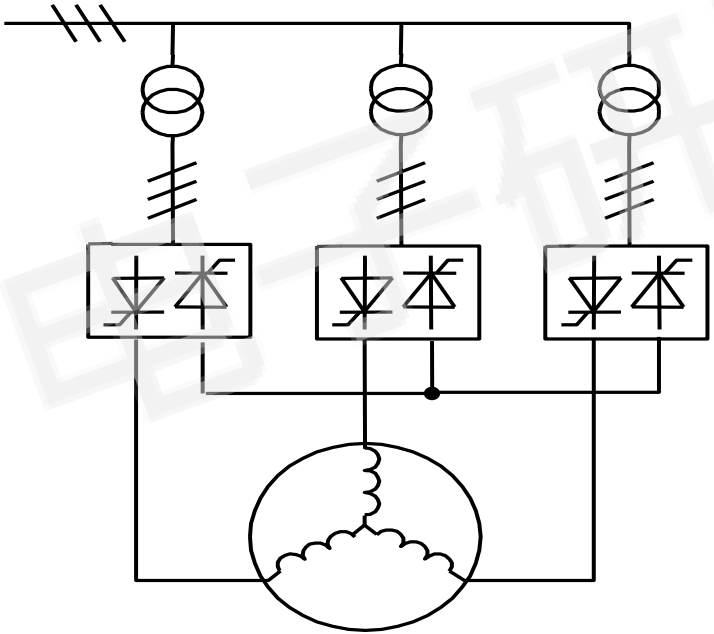
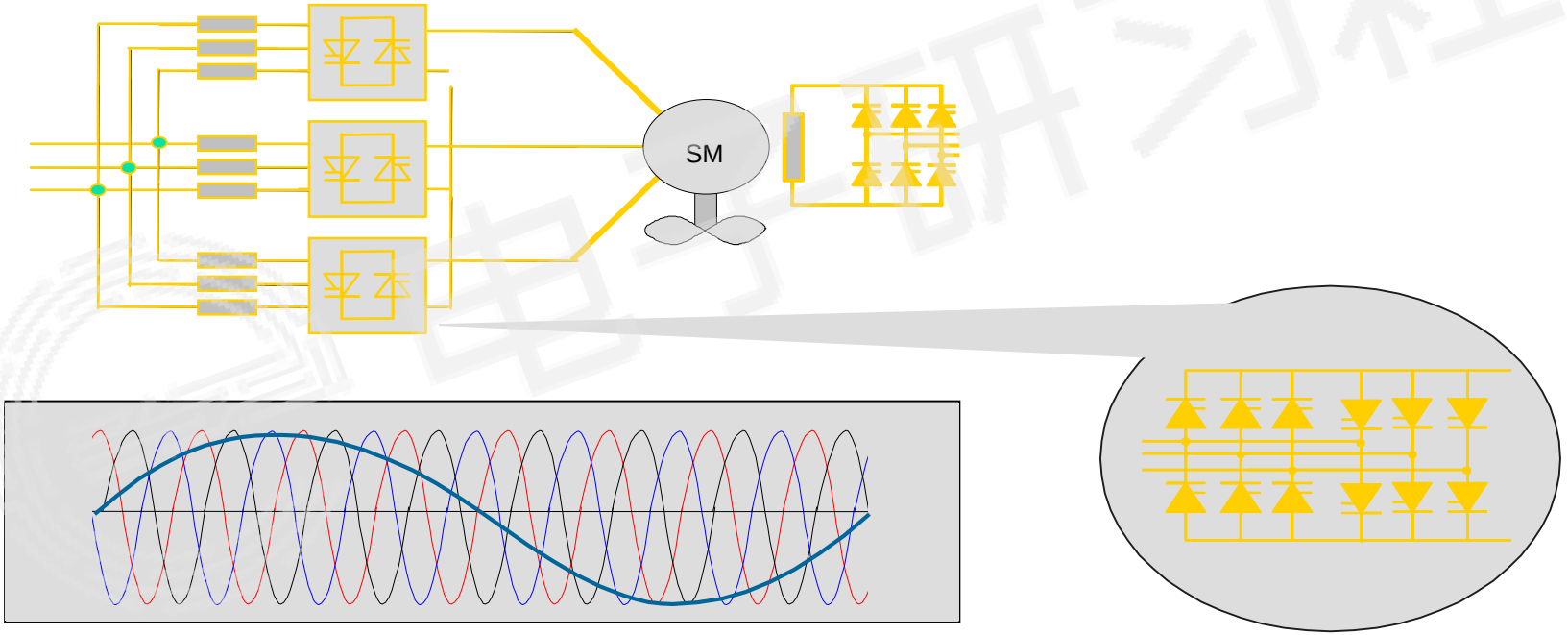


图1-30 三相交-交变频器

# 例如：Cycloconverter and Synchronous Motor



## • 交-交变频器的优缺点：

优点：1) 采用电网自然换流，由一次换流即可实现变压变频，换流效率高；

2) 能量回馈方便，容易实现四象限运行；

3) 低频时输出波形接近正弦。

缺点：1) 使用晶闸管数量多，接线复杂；

2) 输出频率范围窄，只能在1/2~1/3电网频率以下调频；

3) 由于采用相控整流，功率因数低。

## 2.3.4 多电平逆变器

对于高压（电压等级为3kV、6kV或更高）和大容量（功率等级在数百千瓦以上）应用场合，上述两电平变频器，则需要采用耐压高的大功率开关器件，而且需要解决开关器件串联或并联使用的同时导通和关断问题。另外，由于存在很高的d$v$/d$t$和共模电压，这对电机绕组绝缘构成了威胁。为了解决上述问题，自20世纪80年代以来，研究和发展了多电平技术，构造了各种多电平变换器。

# （1）多电平逆变器的组合方式

为了得到更多的输出电平，可将基本单元进行串并联组合，其组合方式有：

（a）先串联后并联——箝位式多电平变换器

（b）先并联后串联——级联式多电平变换器

# （2）多电平逆变器的分类

- 多电平变换器
  - 箝位式变换器
    - 二极管箝位式
    - 飞跨电容箝位式
  - 级联式变换器
  - 模块化变换器（MMC）

# 多电平变换器的特点：

1）每个功率器件仅承受1/（n-1）的母线电压；

2）随着电平数增加，改善输出电压波形，减少THD和EMI；

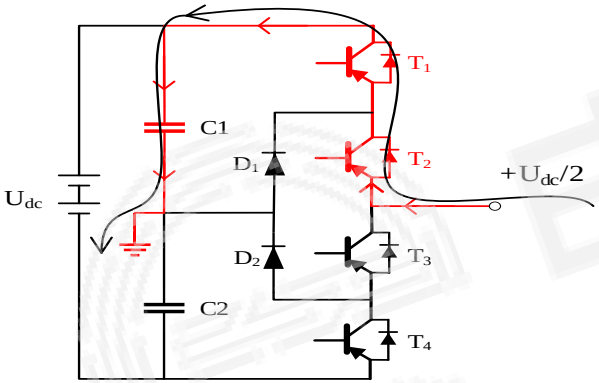
3）可用较低的开关频率获得理想的输出电压波形，因而开关损耗小，效率高；

4）由于电平数的增加，在相同直流母线电压下，减小du/dt，有效防止电机绕组的绝缘击穿；

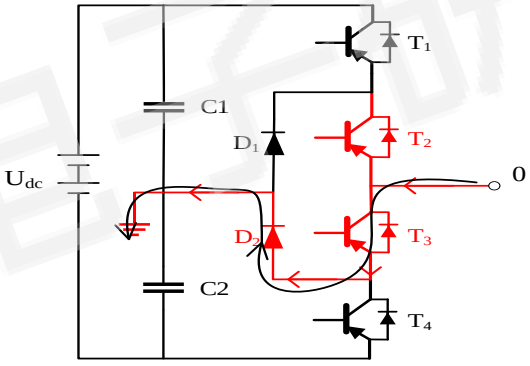
5）无需输出变压器，减少了系统的体积和损耗。

# （3）中点箝位式多电平逆变器

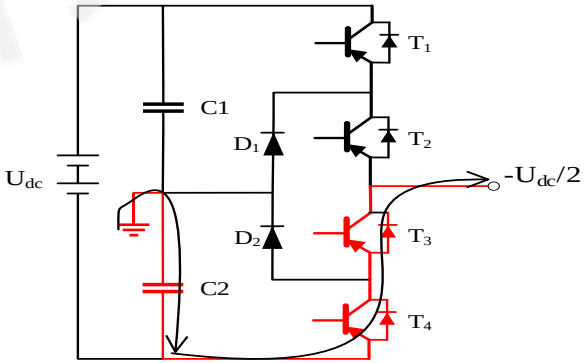
- 二极管中点箝位式3电平变换器的主电路与变流原理




$T_1$、$T_2$导通




$T_1$、$T_2$导通




$T_3$、$T_4$导通

采用二极管中点箝位式的三电平逆变器的拓扑结构。该电路每一相有4个开关元器件、4个续流二极管和两个箝位二极管来构成，有换流模式三种形式：

(1) 当$S_{a1}$、$S_{a2}$导通，$S_{a3}$、$S_{a4}$关断时，$u_{ao}=U_d/2$；

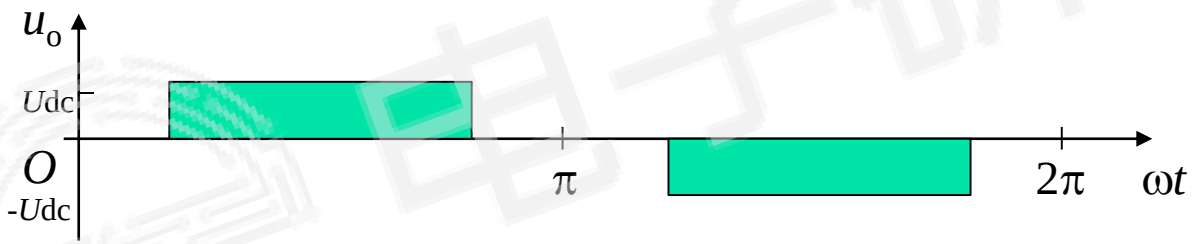
(2) 当$S_{a2}$、$S_{a3}$导通，$S_{a1}$、$S_{a4}$关断时，$u_{ao}=0$；

(3) 当$S_{a3}$、$S_{a4}$导通，$S_{a1}$、$S_{a2}$关断时，$u_{ao}=-U_d/2$。

可见其每相能够输出三个电平，箝位二极管在负载电流反向时可起到箝位和续流的作用。

# 二极管中点箝位式的三电平逆变器输出波形

3电平输出：$U_{dc}$、0、 $-U_{dc}$



## 该拓扑的优点主要有：

1) 三电平NPC逆变电路对器件的耐压要求不高。开关元器件所承受的关断电压为直流回路电压的一半。

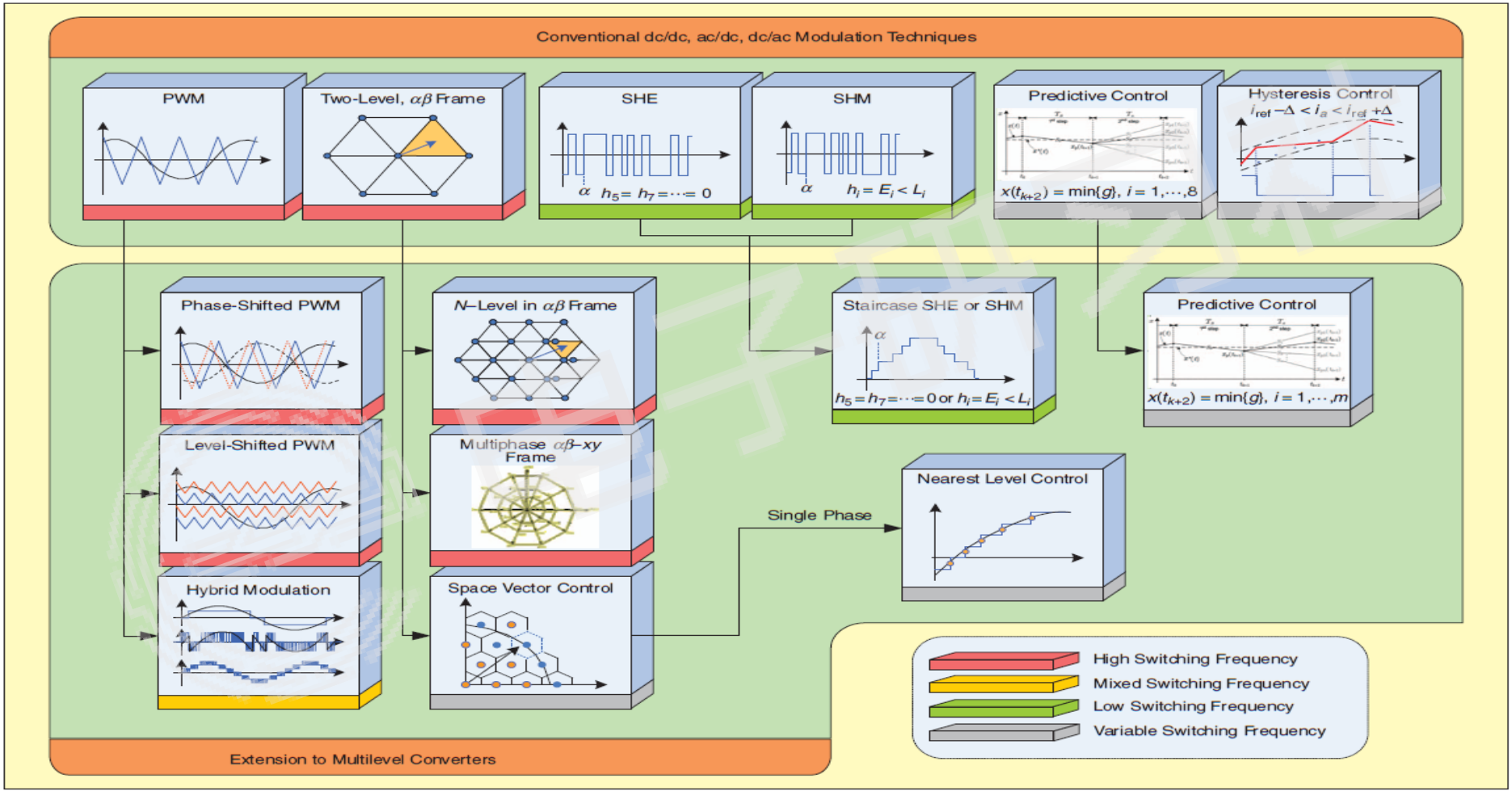
2) 三电平逆变器输出的负载相电压为9电平，相对于两电平拓扑输出5电平，各电平幅值变化降低，这就使得它对外围电路的干扰小，对电机的冲击小，在开关频率附近的谐波幅值也小。

3) 三电平逆变电路输出为三电平的阶梯波，其形状更接近于正弦。在开关频率相同的条件下，谐波比两电平电路要小得多。

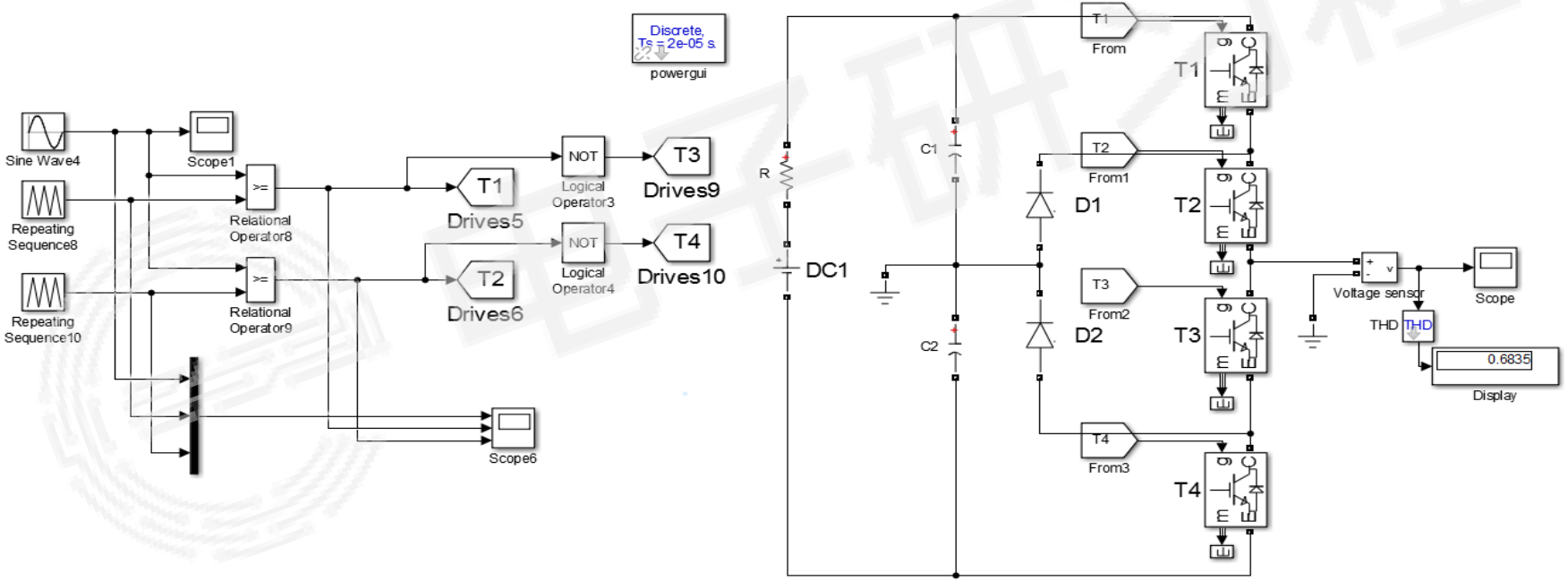
## • 多电平的调制方法

**目前，多电平逆变电路的PWM控制方法主要分为两大类：载波调制法和电压空间矢量（SVPWM）法。载波调制法又有载波移相法（phase shifted carrier PWM）和载波层叠法（carrier disposition PWM）之分；多电平空间矢量调制法也有不同的实现途径。**

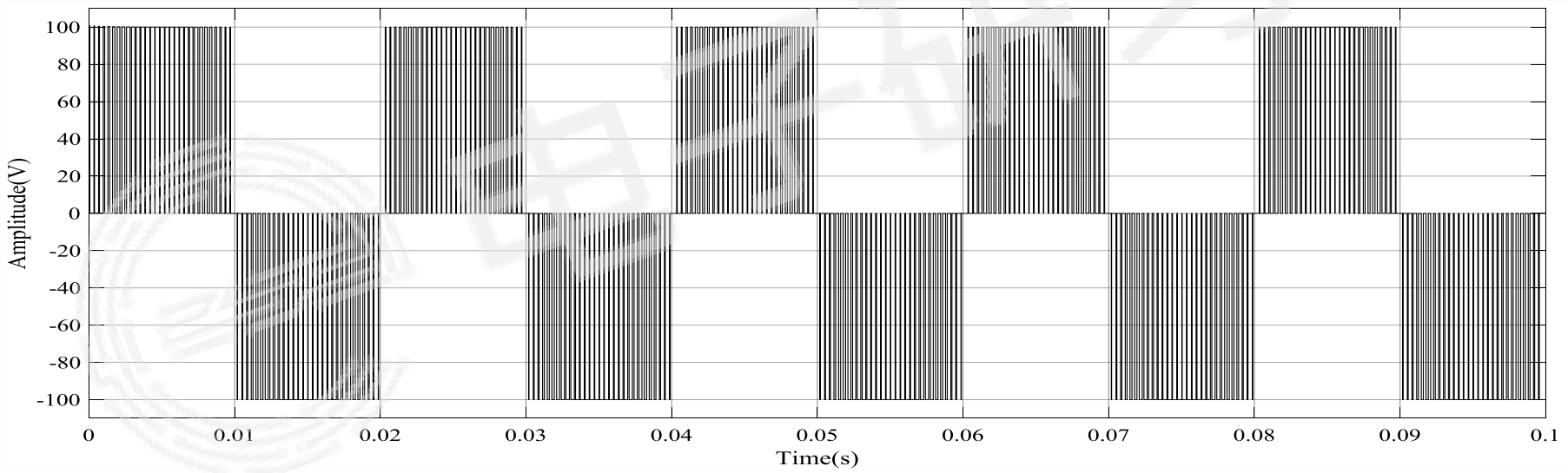
- 各种PWM调制方法


Conventional dc/dc, ac/dc, dc/ac Modulation Techniques
PWM
Two-Level, αβ Frame
SHE
$\alpha$ $h_5 = h_7 = \cdots = 0$
SHM
$\alpha$ $h_i = E_i < L_i$
Predictive Control
$x(t_{k+2}) = \min\{g\},\ i = 1,\cdots,8$
Hysteresis Control
$i_{ref} - \Delta < i_a < i_{ref} + \Delta$
Phase-Shifted PWM
Level-Shifted PWM
Hybrid Modulation
N–Level in αβ Frame
Multiphase αβ–xy Frame
Space Vector Control
Staircase SHE or SHM
$h_5 = h_7 = \cdots = 0$ or $h_i = E_i < L_i$
Predictive Control
$x(t_{k+2}) = \min\{g\},\ i = 1,\cdots,m$
Single Phase
Nearest Level Control
High Switching Frequency
Mixed Switching Frequency
Low Switching Frequency
Variable Switching Frequency
Extension to Multilevel Converters

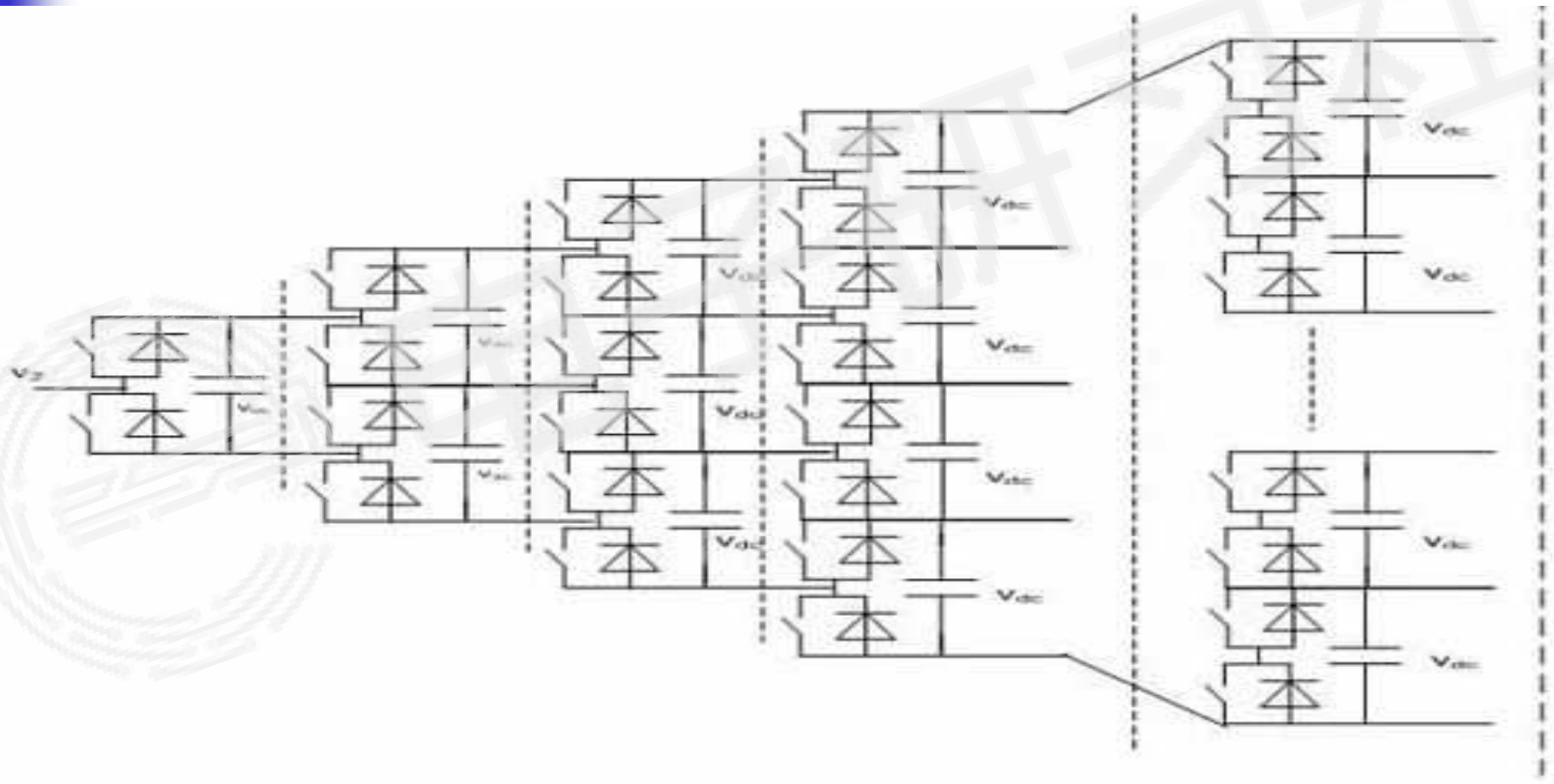
# • 单相载波层叠调制仿真模型



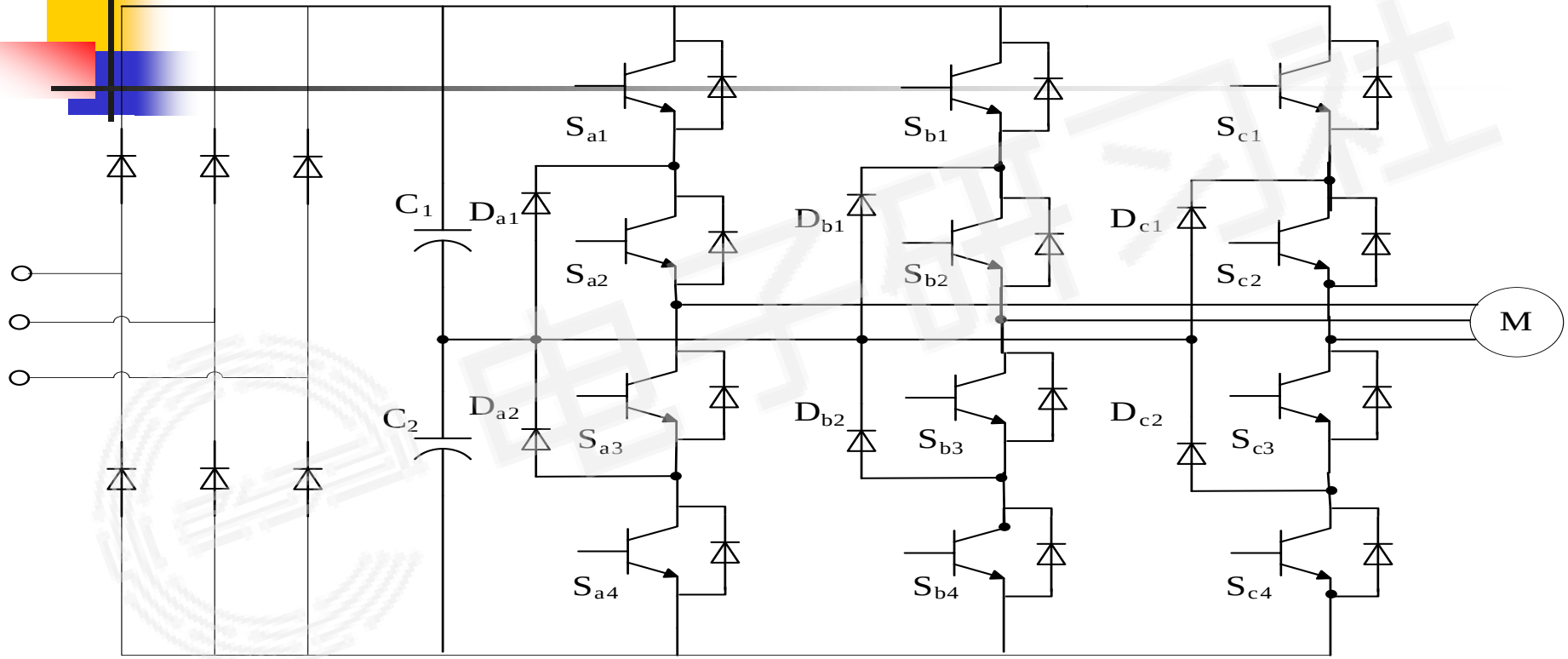
# • 载波层叠调制3电平逆变器输出电压波形



- 箝位式多电平变频器的通用结构形式



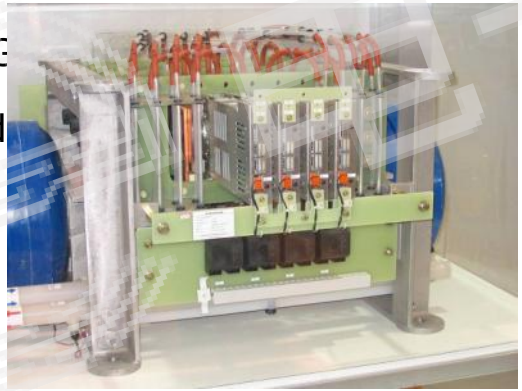
- 三相二极管中点箝位式3电平逆变器

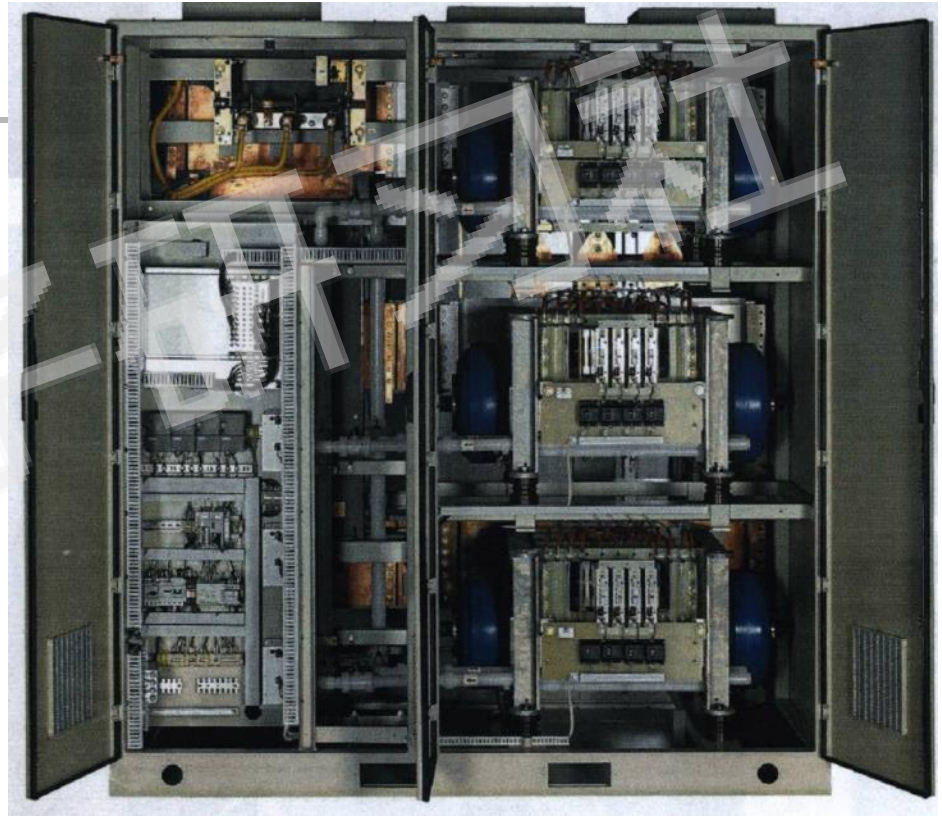



-51-图1-27 二极管中点箝位式三电平变频器的拓扑结构

# IGCT-NPC MVD——Siemens S150

- Power：10-20MVA
- Voltage：3.3KV
- Topology：NPC 3-Level
- Device：IG
- Separate d



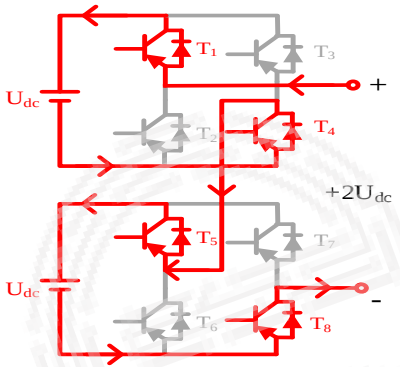


## （4）级联式多电平逆变器

将2个半桥基本单元并联组成全桥逆变电路，再将多个全桥串联起来，构成多电平电路拓扑，这种组合方式级联式多电平变换器。

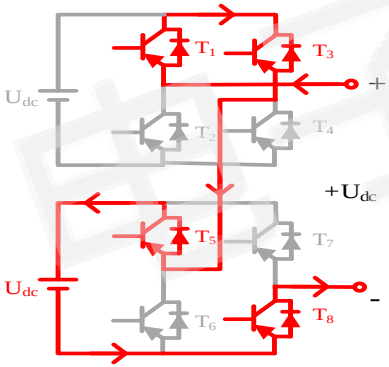
# 级联式变流器的构造原理

由两个H桥串联组成的多电平拓扑及各种原理如下：



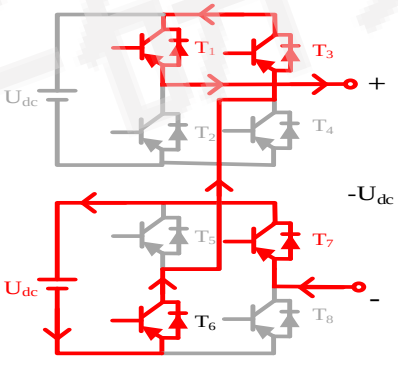

T1、T4以及T5、T8同时开通

（a）



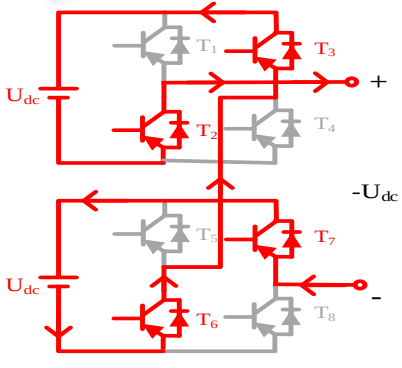

T1、T3或T2、T4同时开通，加上T5和T8开通

（b）




T1、T3或T2、T4同时开通，加上T6和T7开通

（c）



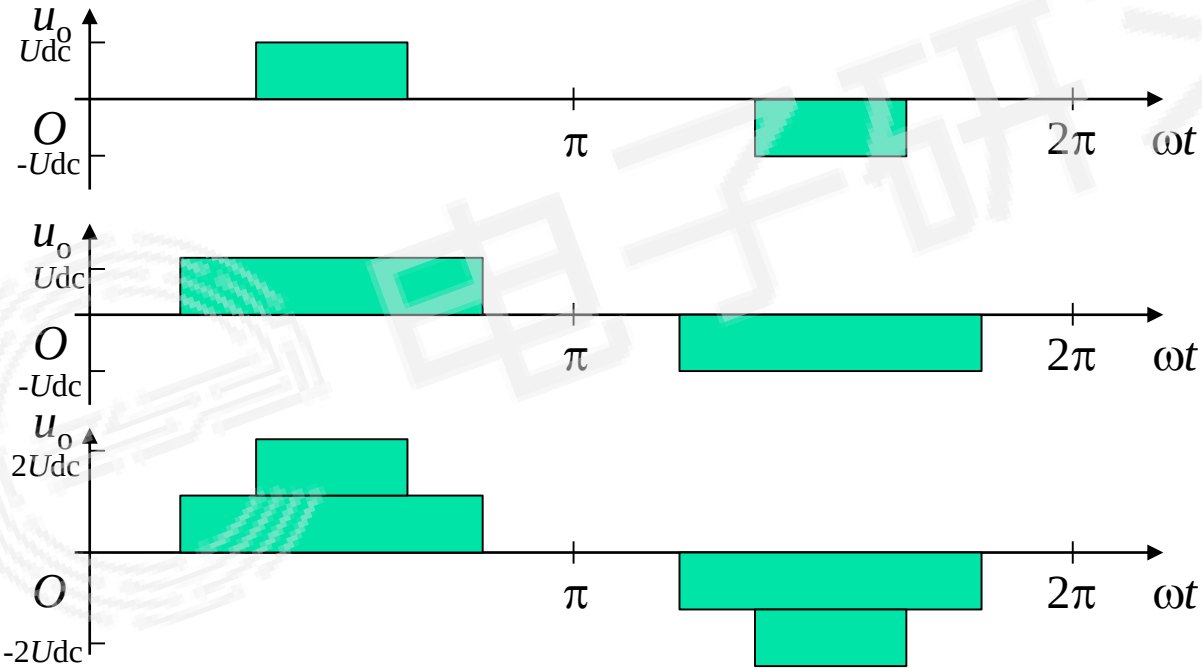

T2、T3以及T6、T7同时开通

（d）

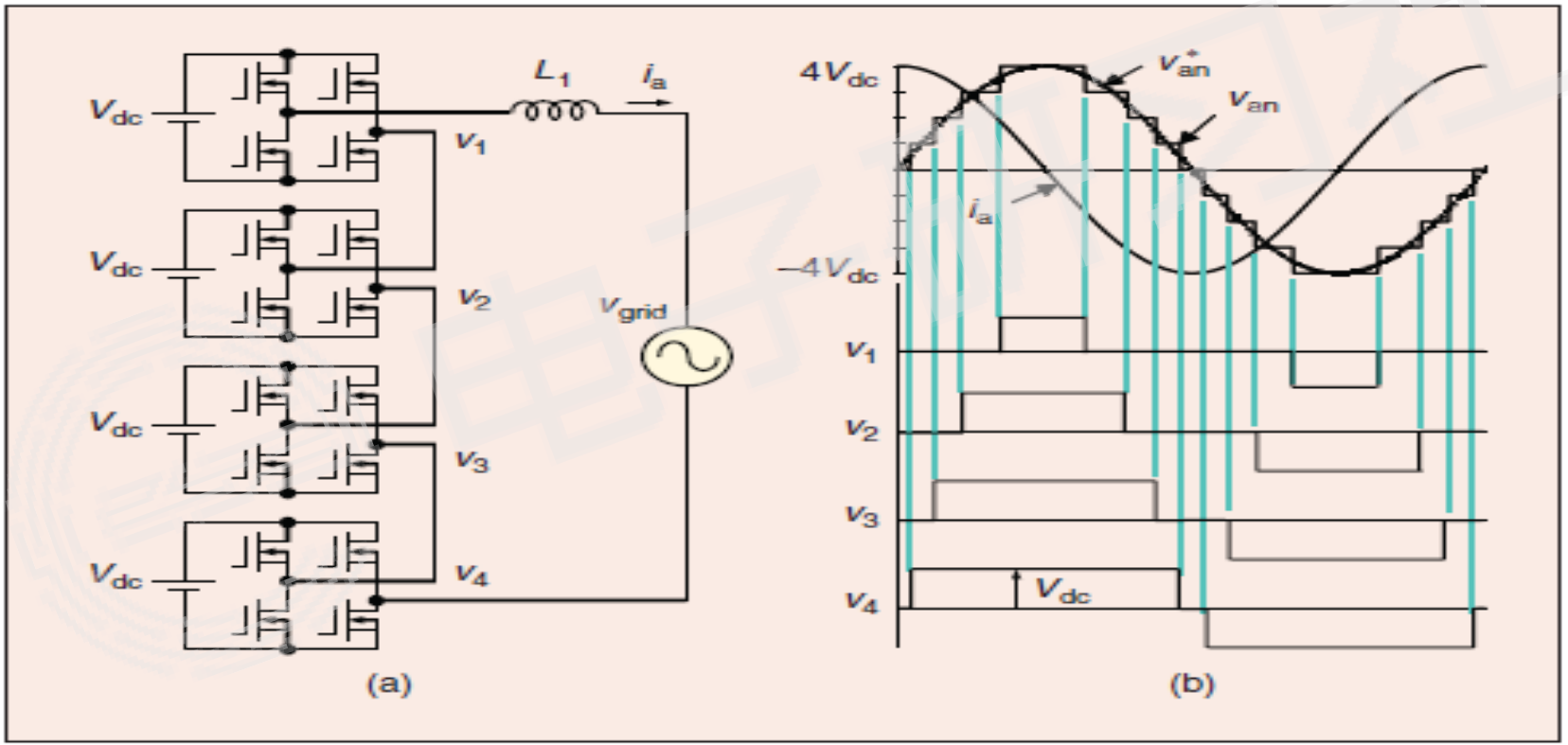
# 开关状态表

| $u_o$ | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_5$ | $T_6$ | $T_7$ | $T_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $2U_{dc}$ | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| $U_{dc}$ | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| $-U_{dc}$ | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| $-2U_{dc}$ | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

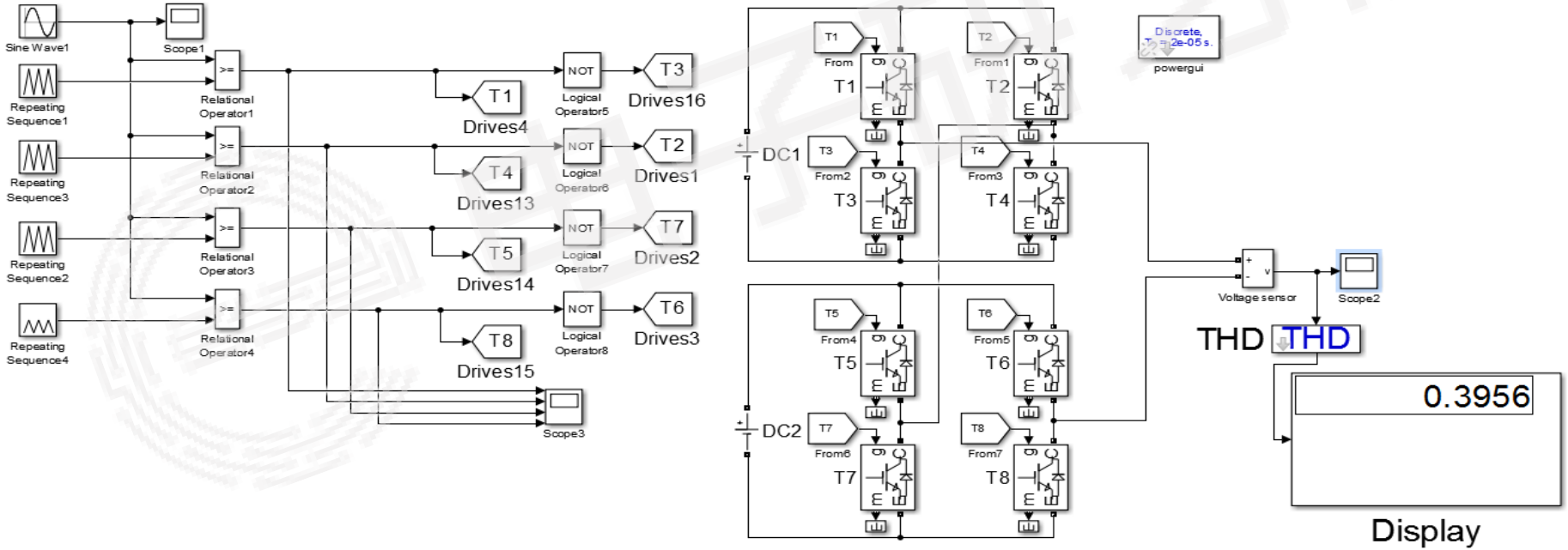
# 2H级联式逆变器输出波形



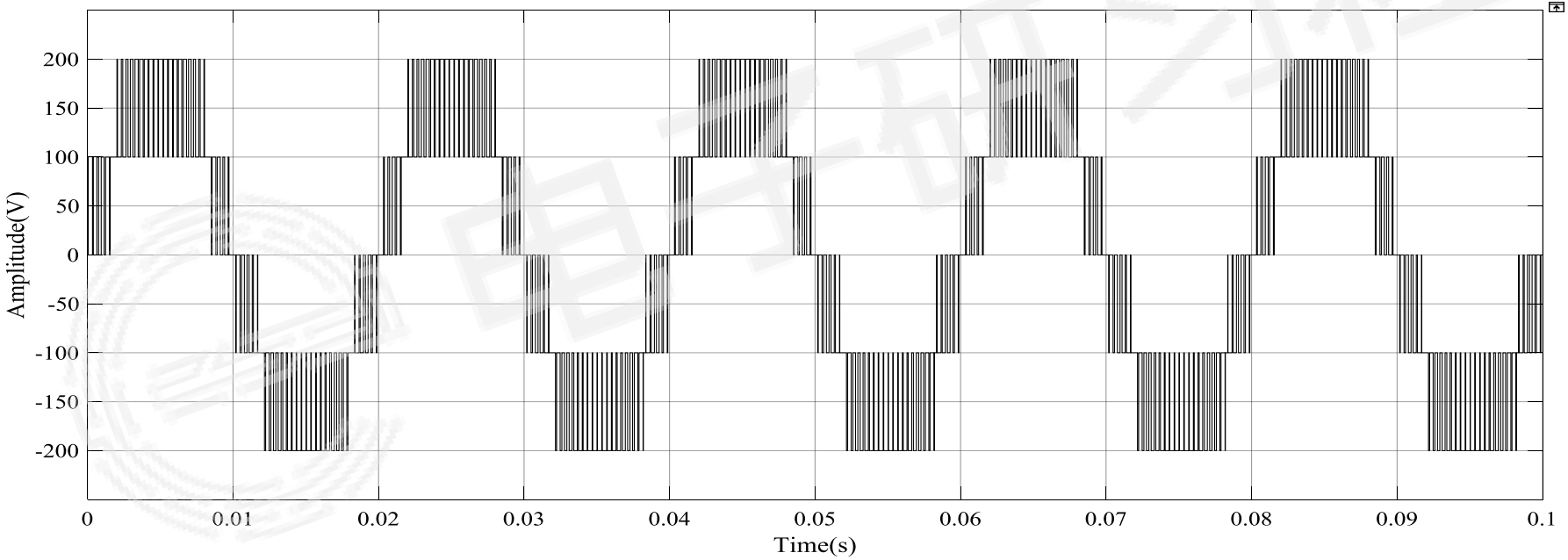
# 级联式多电平逆变器的阶梯波调制



# 载波层叠调制单相级联式变流器仿真模型



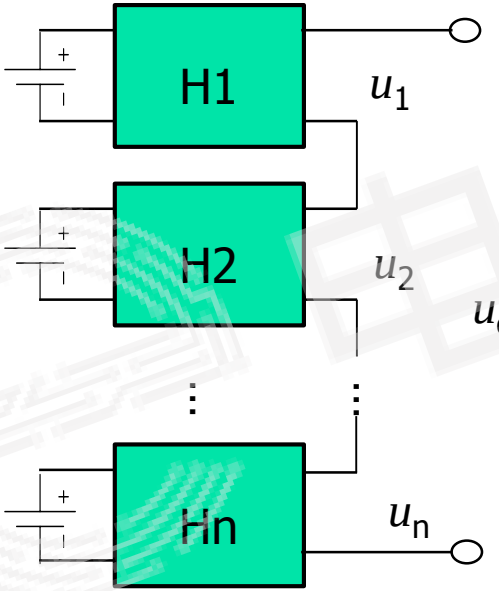
# 输出电压波形（5电平）


200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
Amplitude(V)
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
Time(s)

# 级联式多电平电路的组合方式

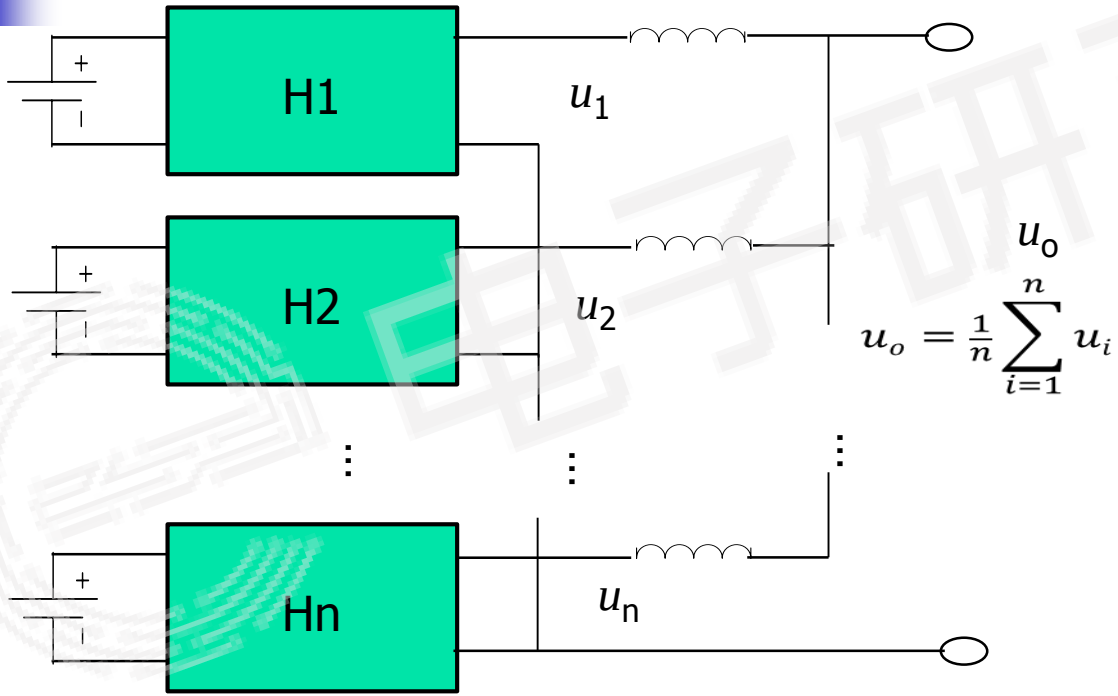
- 串联型多电平连接方式
- 并联型多电平连接方式
- 混合型多电平连接方式

# 1）串联型多电平连接方式



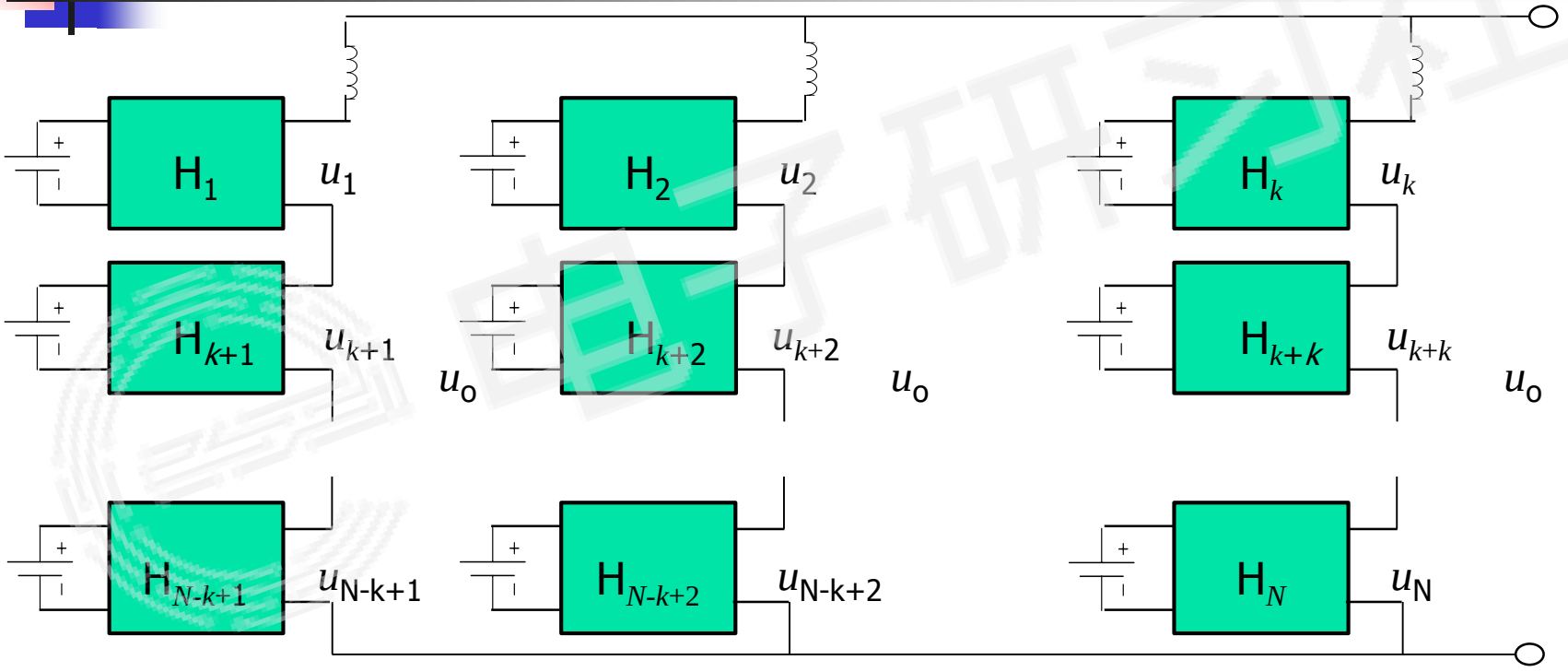

$$u_o = \sum_{i=1}^{n} u_i$$

# 2）并联型多电平连接方式

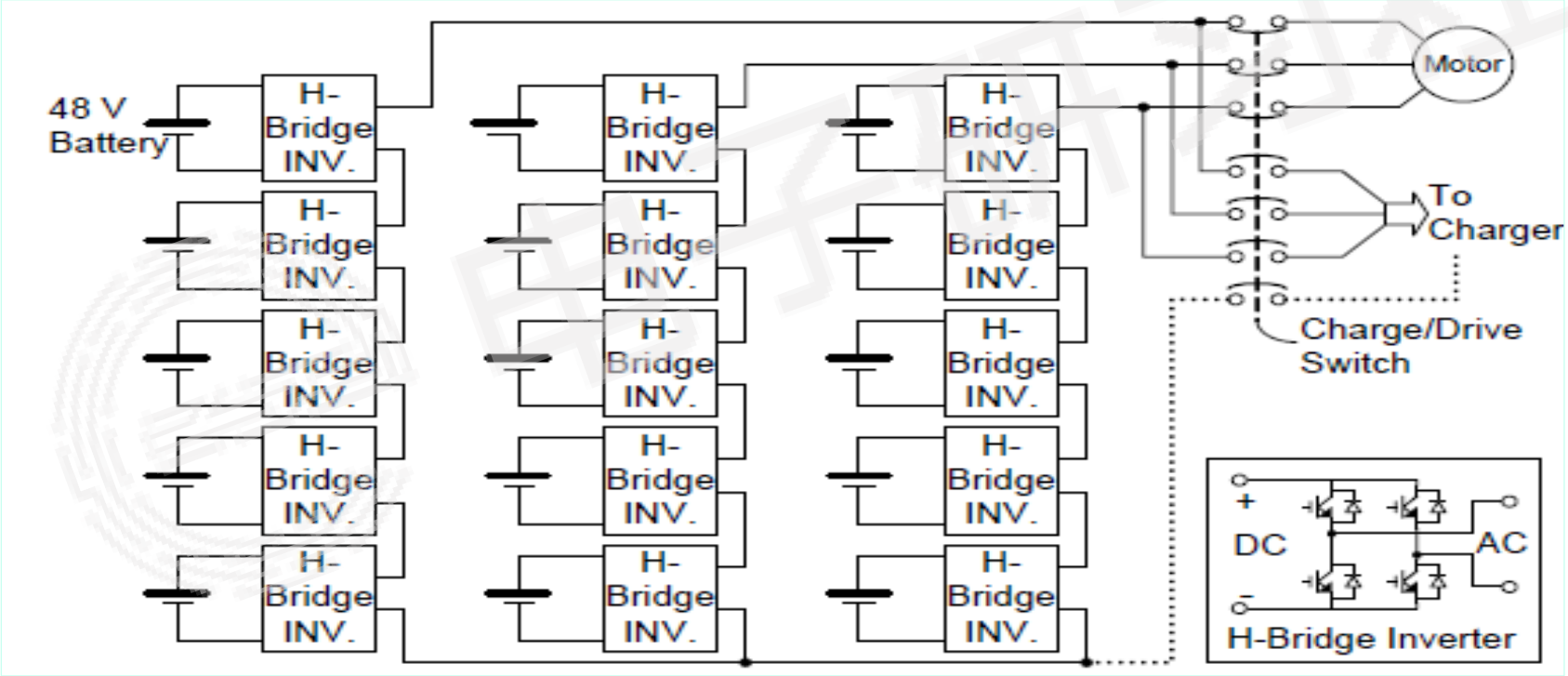


# 3）混合型多电平连接方式

$$u_o = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{N} u_i$$



# Cascade multi-converters



# 级联式多电平变换器的特点

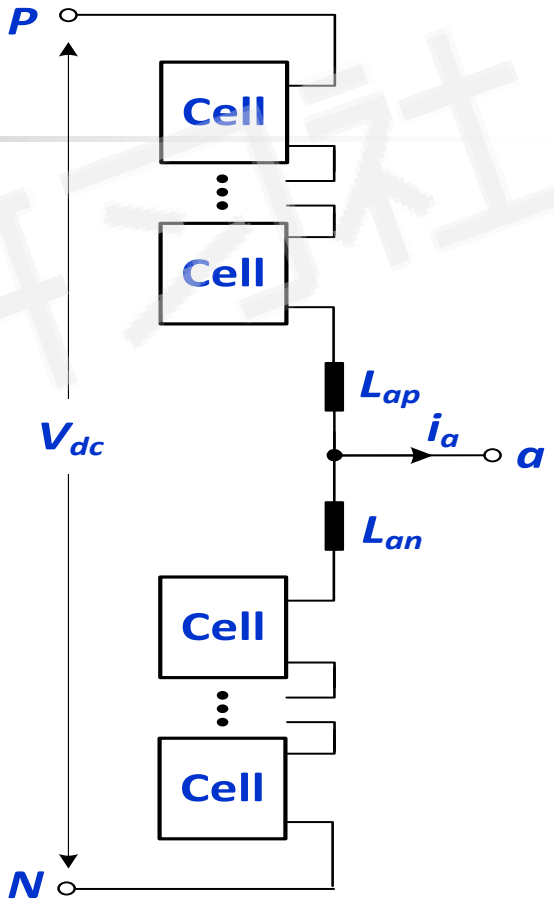
- 优点
  - 电平数越多，输出电压谐波含量越少；
  - 阶梯波调制时，器件在基频下开关，损耗小、效率高；
  - 无需箝位二极管和箝位电容，所需器件数最少；
  - 易于模块化构造。
- 缺点
  - 需要多个独立直流电源，或采用多绕组曲折变压器；
  - 不易实现四象限运行。

# （5）模块化多电平变换器（Modular Multi-level Converter, MMC）

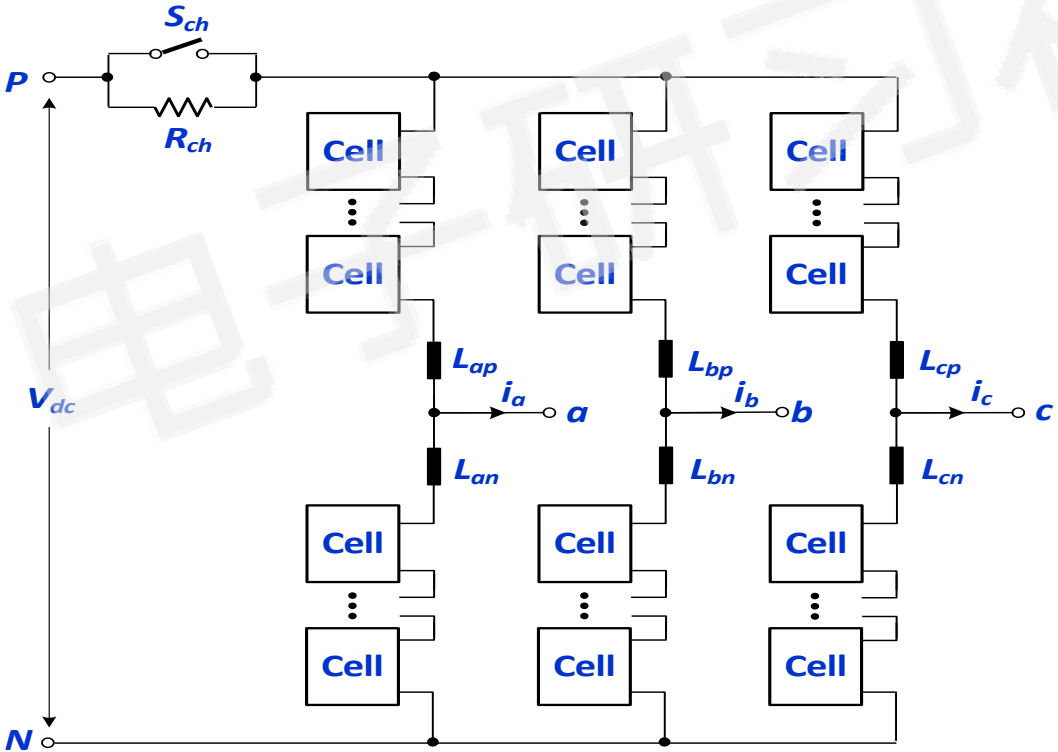
- MMC结合了中性点钳位二极管只有一组直流电源供电以及级联多电平变换器易模块化扩展的特点。
- MMC正常运行时，通过控制开关器件的导通与关断，对子模块的电容电压进行投入与切除操作，以此改变桥臂电压大小，进而在MMC交流侧形成电压阶梯波形。

# MMC的组合原理

将半桥或全桥的单元串联构成的单项MMC多电平逆变电路拓扑如图所示，与级联式多电平变换电路的不同之处在于，仅需要一个直流电源。



# MMC逆变电路拓扑

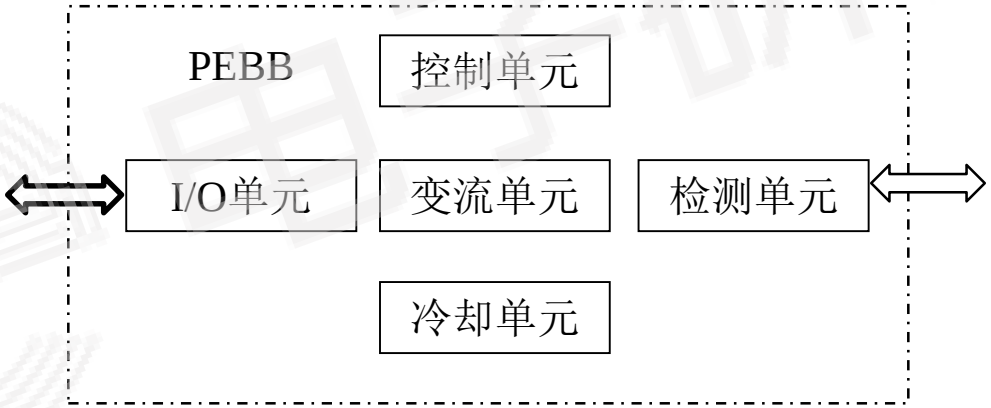


# 2.3.5 大功率逆变器的设计

- 主电路拓扑结构设计
- 直流母线排与有源元件的设计和选择；
- 驱动电路
- 保护电路设计与选择：
  - RC缓冲电路
  - Crowbar保护电路
  - 快速熔断器
- 散热与冷却系统

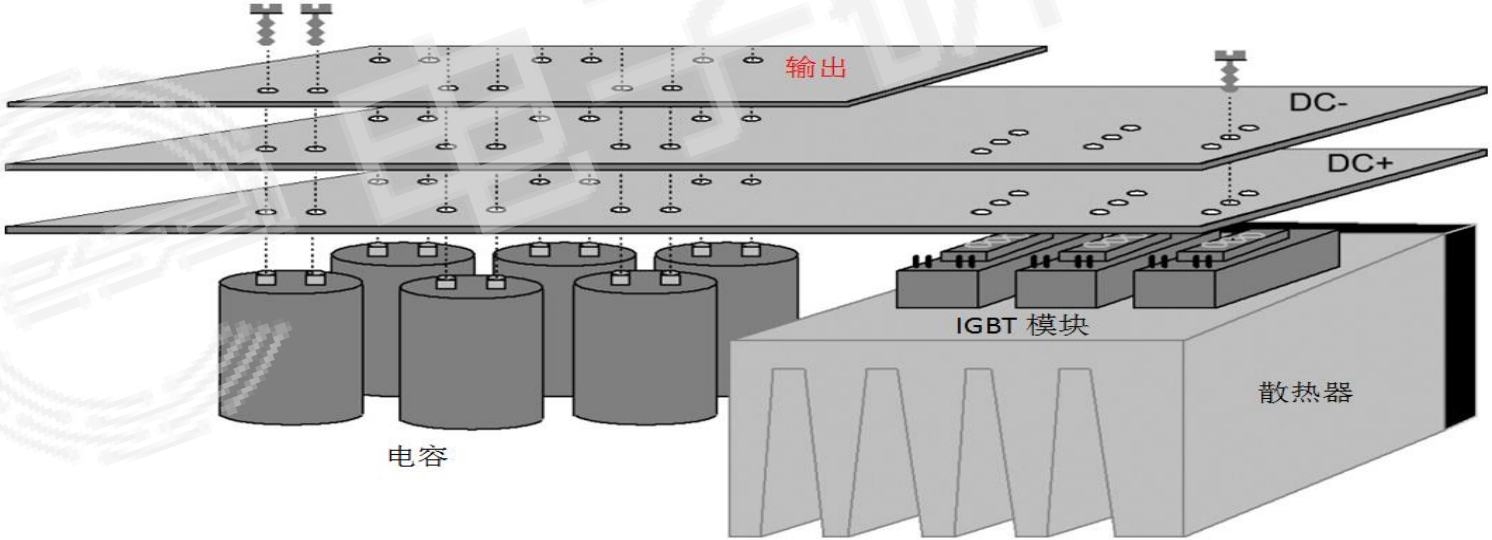
# 高功率密度的变换器

- 模块化结构，构建基本变流单元（PEBB）：



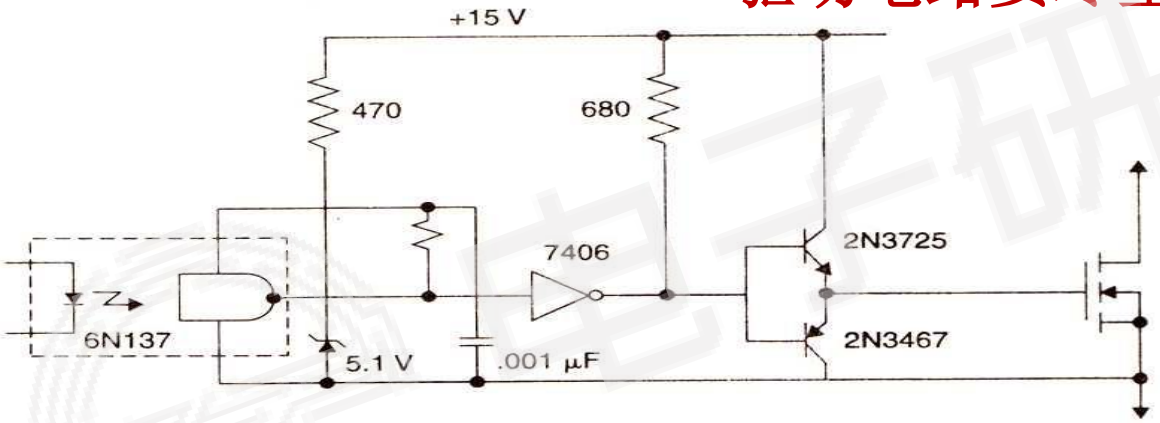
# 直流母线

- 尽可能降低杂散电感
- 连接端子之间的均流

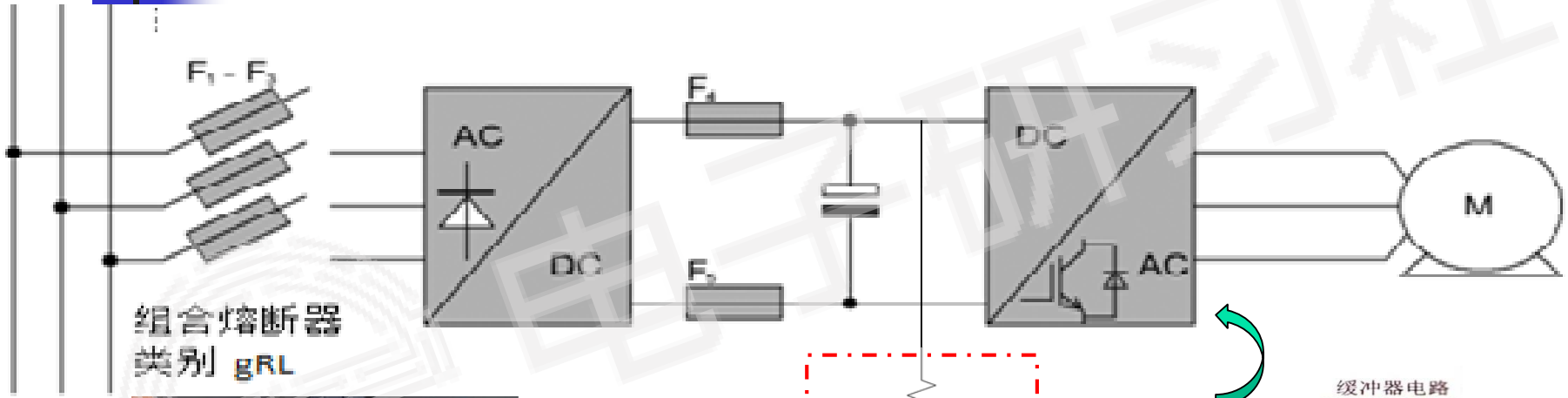


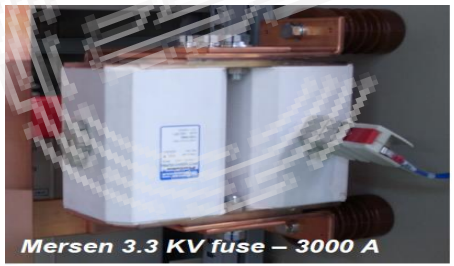
# 驱动电路

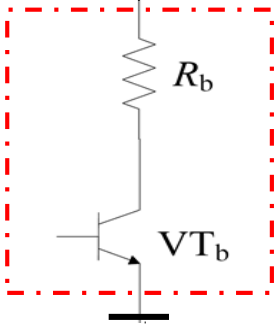
驱动电路要尽量靠近开关器件模块

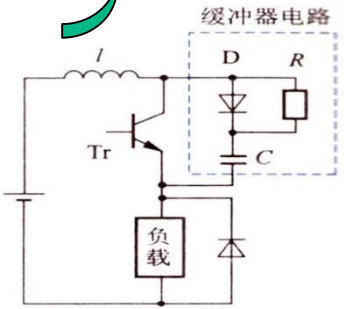


# 保护电路

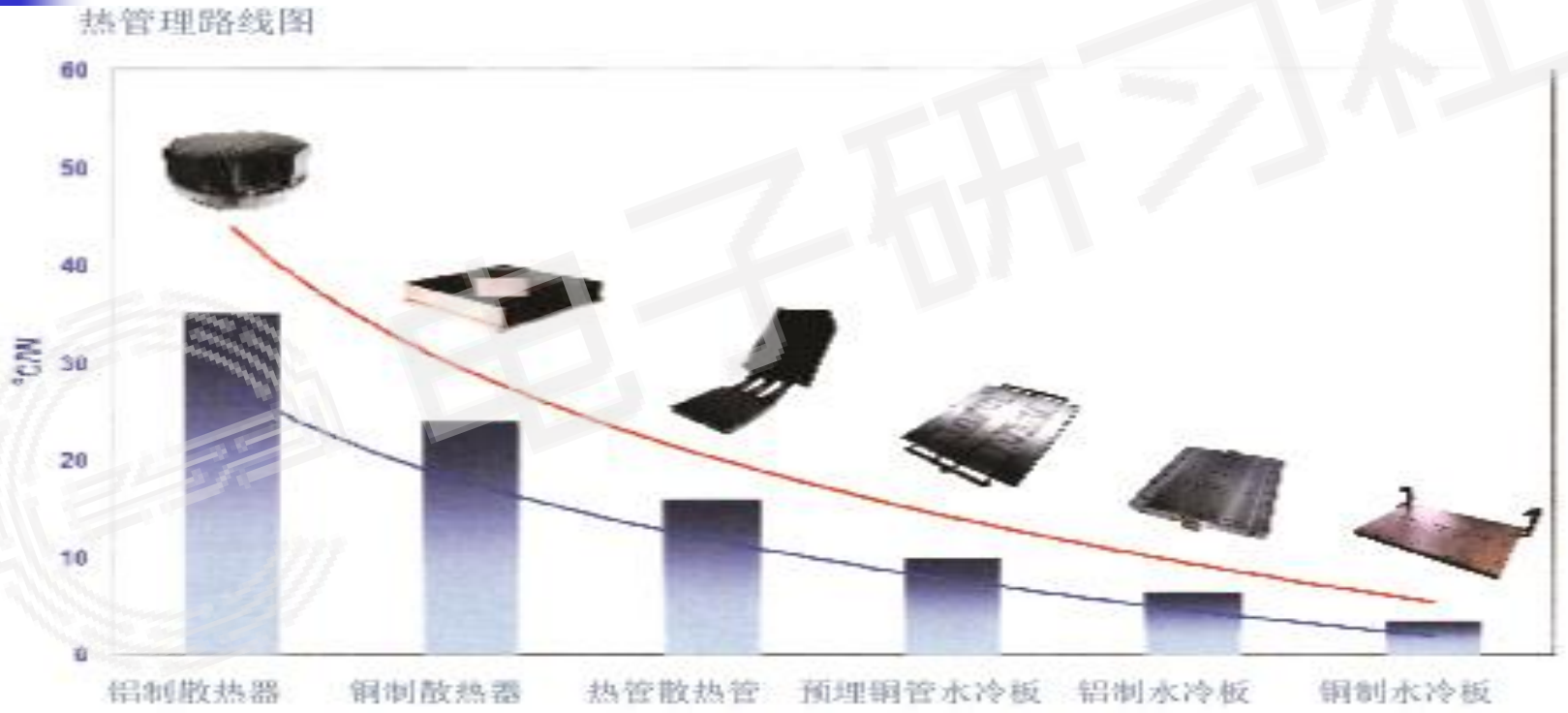

F1 - F3
AC
DC
F4
F5
DC
AC
M
组合熔断器
类别 gRL


Mersen 3.3 KV fuse – 3000 A

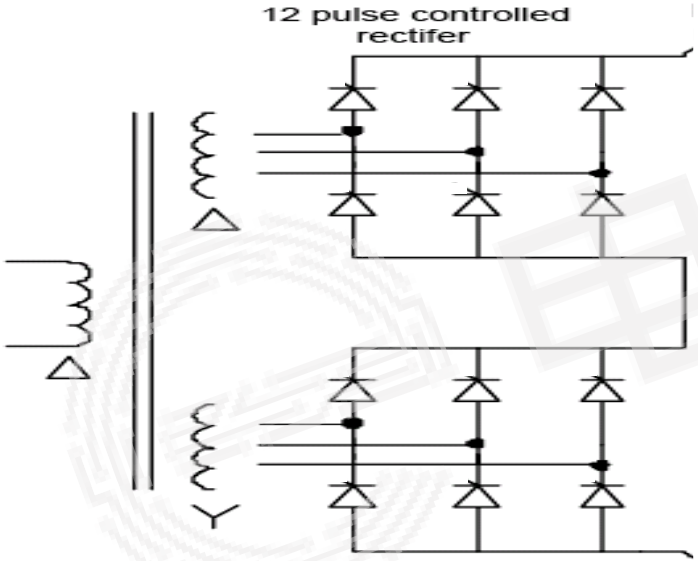

$R_b$
$VT_b$


缓冲器电路
l
D
R
Tr
C
负载

# • 各种散热措施的比较

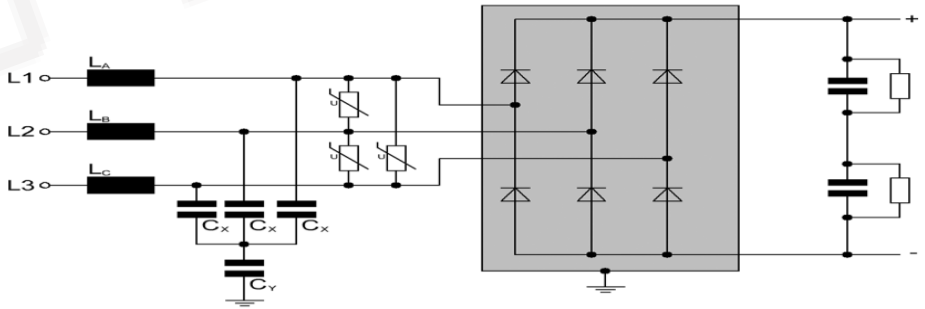

热管理路线图
60
50
40
30
20
10
0
°C/W
铝制散热器
铜制散热器
热管散热管
预埋铜管水冷板
铝制水冷板
铜制水冷板

# 谐波抑制方法



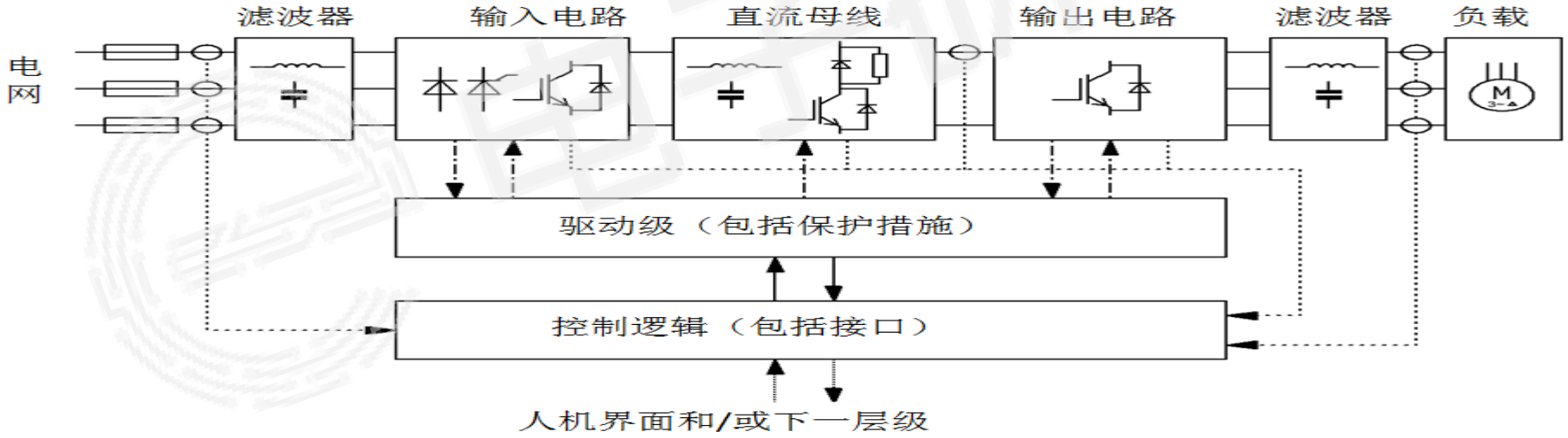

整流器交流输入端存在问题：

- 网侧功率因数（PF）
- 谐波电流（THD）



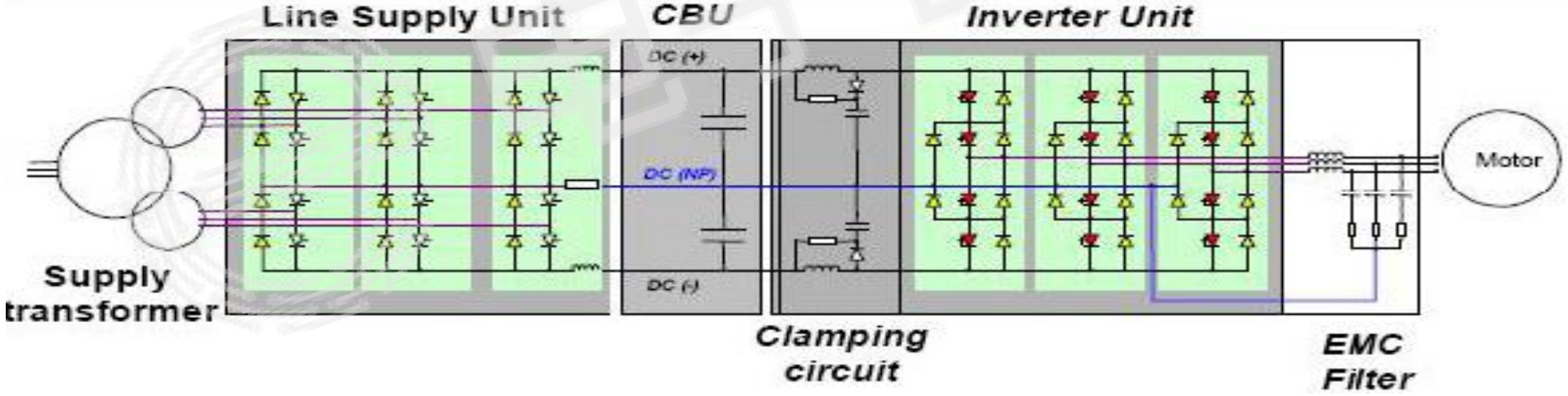

采用移相变压器和多重整流器减少网侧谐波。

一个实际应用的逆变器典型结构如图所示，通常由滤波器、输入（整流）电路、直流母线，输出（逆变）电路、滤波器和驱动控制等装置组成。



# ABB公司针对6kV中压船舶电力推进系统应用，推出了ACS6000系列变频器。

- 采用模块化结构（PEBB），由电源变压器、整流模块、直流母线（DC Link）模



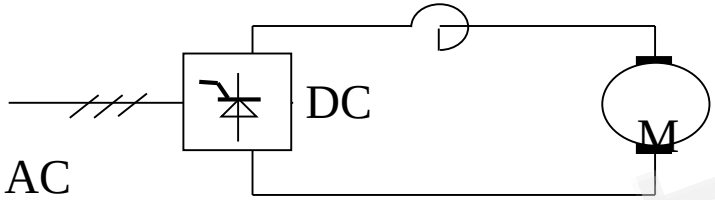
# Example: ABB 3kV 9MVA Drive

# 3 大功率变频器的应用

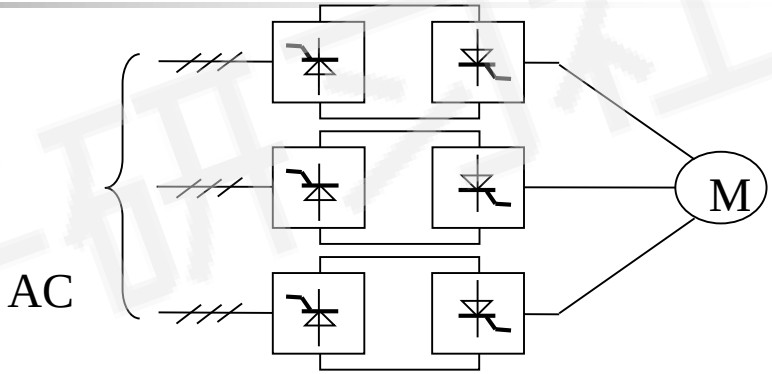
- 各种电源变换
- 电力传动
- 电力系统

电子研习社

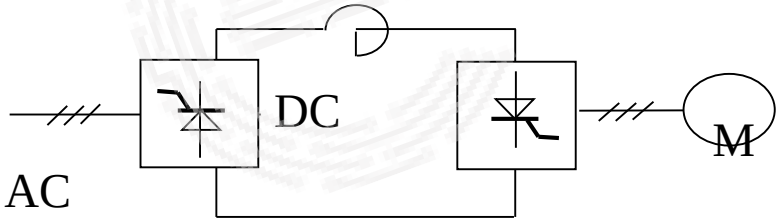
# 3.1电力传动系统的分类



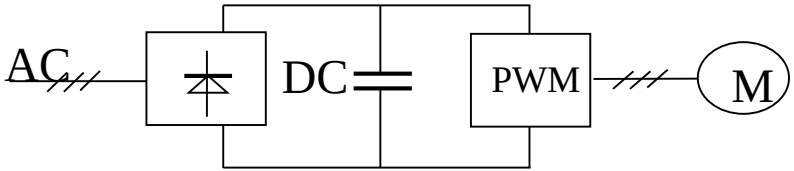

(a) 晶闸管整流直流调速系统




(b) 交-交变频交流调速系统




(c)晶闸管变频调速系统

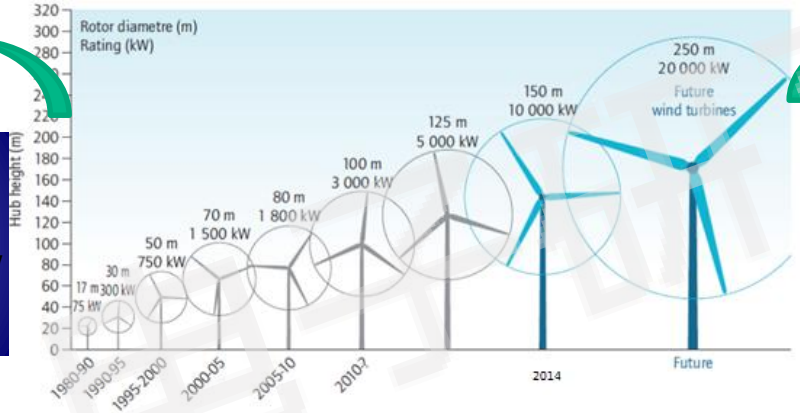



(d) PWM变频调速系统

# 应用案例1、禾望电气开发的中压海上风电变流器

海上风电日益向超大功率、中压化方向发展。

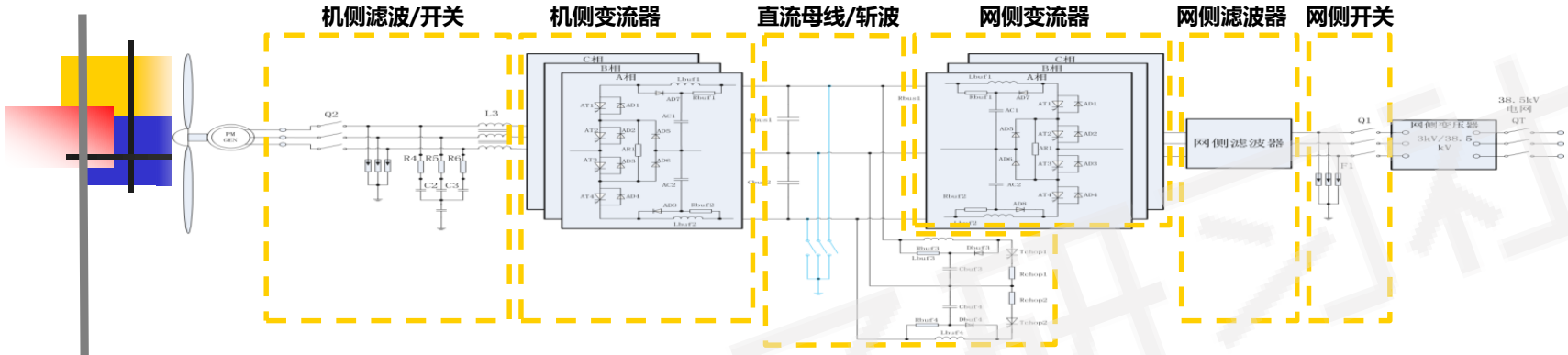
单机容量大功率可分摊塔基建设成本，降低度电成本。




系统电压中压化可降低配电成本，提升系统可靠性和发电效率，解决机舱扭缆问题。

禾望电气是国内风电变流器行业领导者，是国家科技支撑计划“7MW级风电机组及关键部件设计和产业化技术” 的牵头单位，主导中压大功率变流器的研究工作。

# 中压海上风电变流器的结构



秉承禾望电气　器件 → 模块 → 整机　设计理念

# HD8000系列变频器产品

- 两电平/多电平拓扑方案
- PWM逆变技术
- 压接式IGCT和压接式二极管技术
- 宽电压范围：1kV-10kV
- 宽功率范围：3MVA-90MVA
- 宽调速范围： 0-100Hz
- 高度灵活和可拓展性
- 适配异步电机和电励磁、永磁电机

# 应用案例2、上海能传电气有限公司开发的20MW变频器

20MW级高压变频器调速装置

- 中石油广州站20MW变频器

电机、压缩机现场照片

# • 彭阳站20MW VSV项目

装置应用于4号压缩机组，于2017年5月27日完成调试。经现场测试，在彭阳站压缩机全站停机情况下，通过装置的无功补偿功能，固原线供电所功率因数由原来的0.57提高到0.964，清彭线供电所功率因数由原来的0.126提高到0.93，完全满足供电部门对无功考核要求，避免了大量的力调电费罚款，节能效果显著，取得了很好的经济效益。按照设计，设备具有5MVar的无功补偿能力，并且完全满足压缩机驱动用20MW高速电机的调速需求。

Nancal Confidential

# 四、未来发展趋势

- 电力电子器件：宽禁带器件的发展
  - SiC器件
  - GaN器件
- 电力电子技术的新应用与新需求
- 电力传动技术：自动化、信息化、智能化发展

传动控制→智能运动

# 4.1 电力电子器件的发展趋势

- IGBT的发展趋势
  - 高电压
  - 大电流
  - 上结温
- 宽禁带器件的发展
  - SiC器件
  - GaN器件

电子研习社

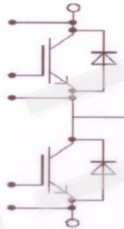
- IGBT+SiC模块

## Infineon IGBT modules with SiC SBD

Infineon

### Power Module FF600R12IS4F

- Half Bridge
- 600A Fast IGBT 1200V
- 360A SiC Diode 1200V



Special silicon IGBT² for high frequency switching

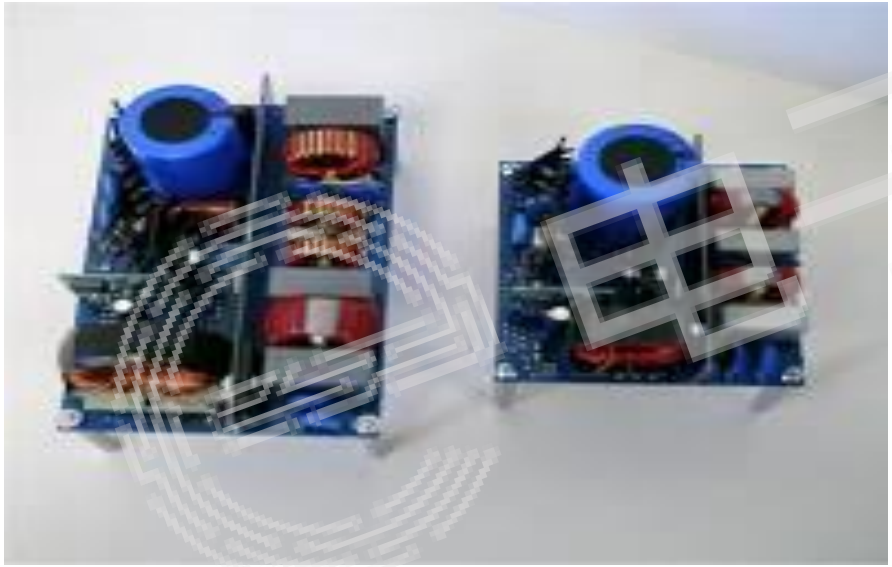
### Upcoming solutions for Solar applications

+SiC

- Further Modules empowered by SiC diodes: DF160R12W2H3F_B11; DF80R12W2H3F_B11; F3L80R12W1H3_B11 und F4-50R07W2H3_B51

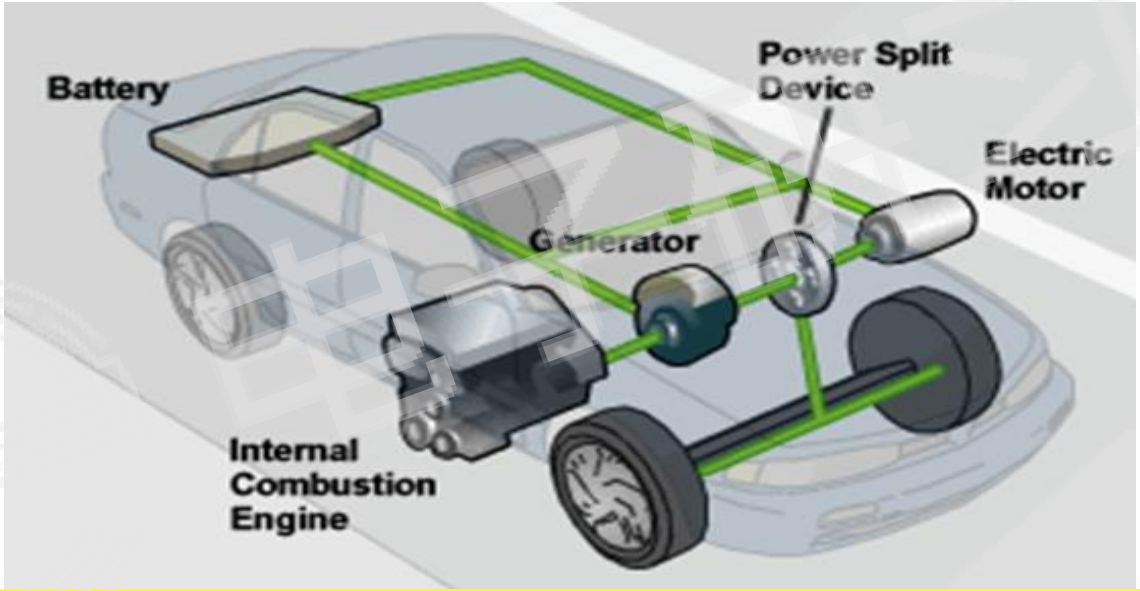

Copyright © Infineon Technologies 2010. All rights reserved.

# 开关电源



- Area reduced 38%
- Weight reduced 44%
- Power density up 61%

# 电力传动




Honda – 680V, 200A SiC MOSFET inverters-> 46% loss reduction
Nissan – SiC hetero-junction diode inverter-> 50% loss reduction

# 4.2 电力传动的新发展—交通电气化

Electric Cars

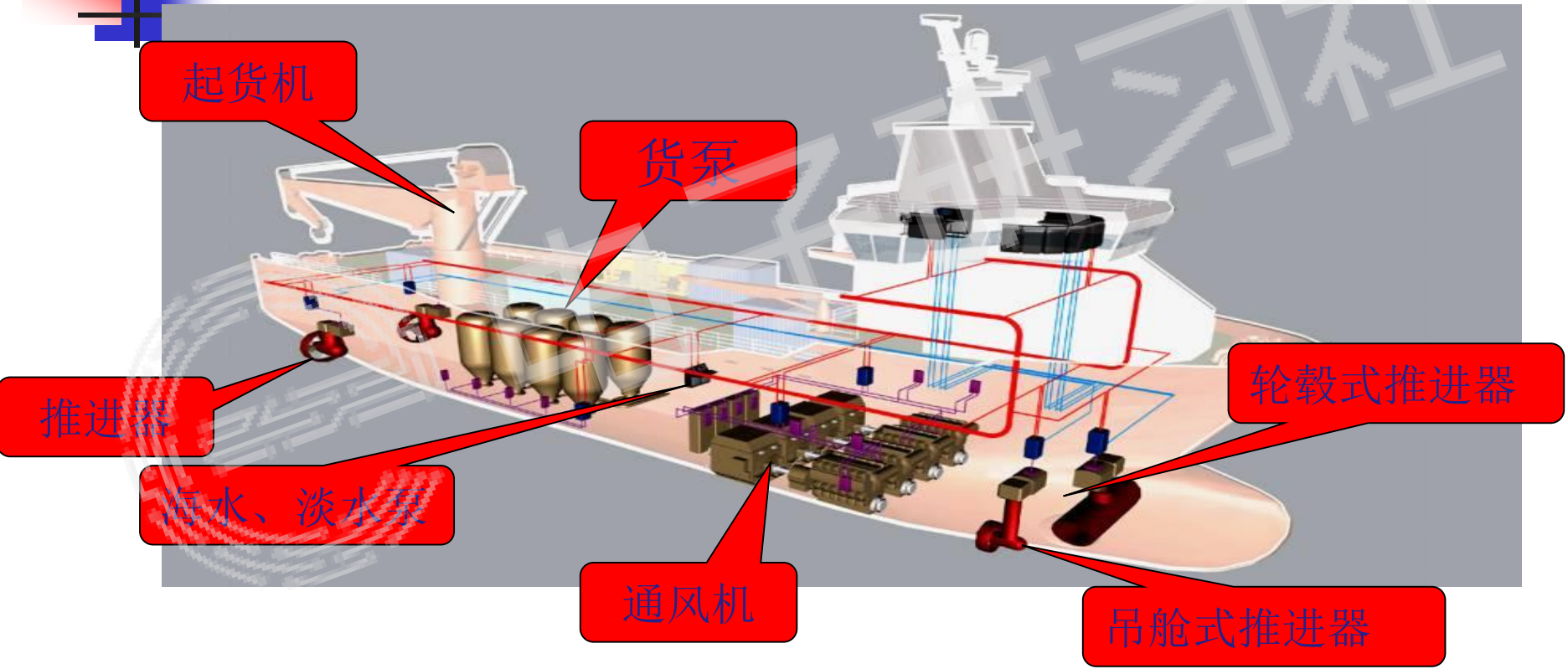
Electric Trains

Transitioning to a group of societies

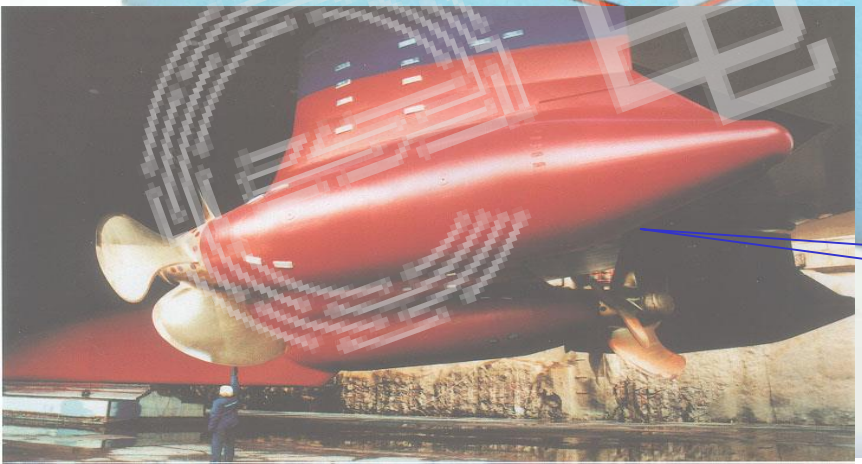
Electric Planes

Electric Ships

# • 主要的船舶设备与电气装置

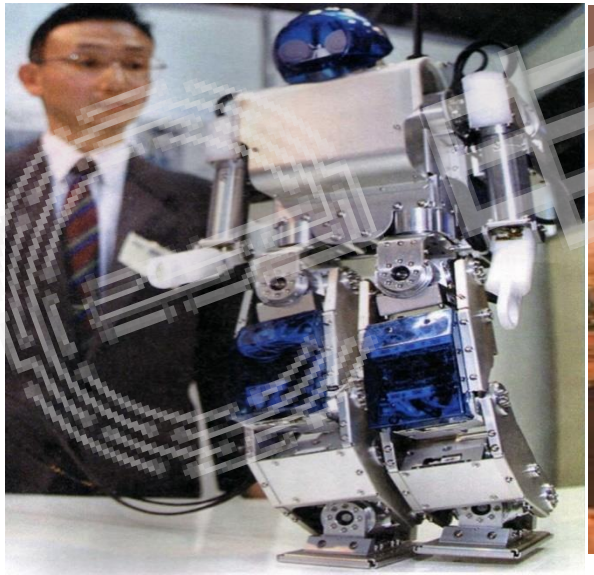


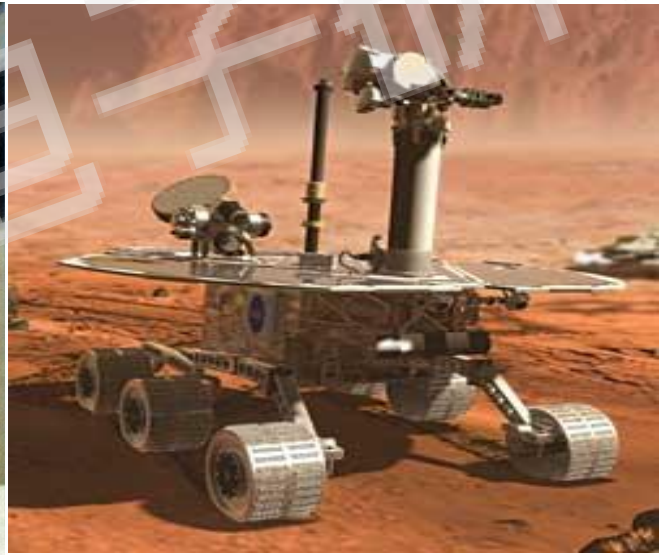
# ●电动机与螺旋桨舵桨合一的推进方式（Podded Propulsor）



# 自主载运工具

- 电力传动是现代运动控制系统的主要形式，目前正在从电气化、自动化、信息化走向智能化。





# 五、结论与展望

- 电力电子技术是新能源发电系统的电能变换、并网、电能质量、储能等装置的关键技术，而电力电子器件是变流装置的核心。
- 新的器件已经取得了研究进展，但其广泛的商业应用还有许多问题亟待解决。特别是需要在材料、制造和工业等技术领域的取得突破。
- 电力传动技术广泛应用与运动控制领域，正在从自动化与信息化走向智能化，其发展前景无可限量。

# •未来的发展轨迹

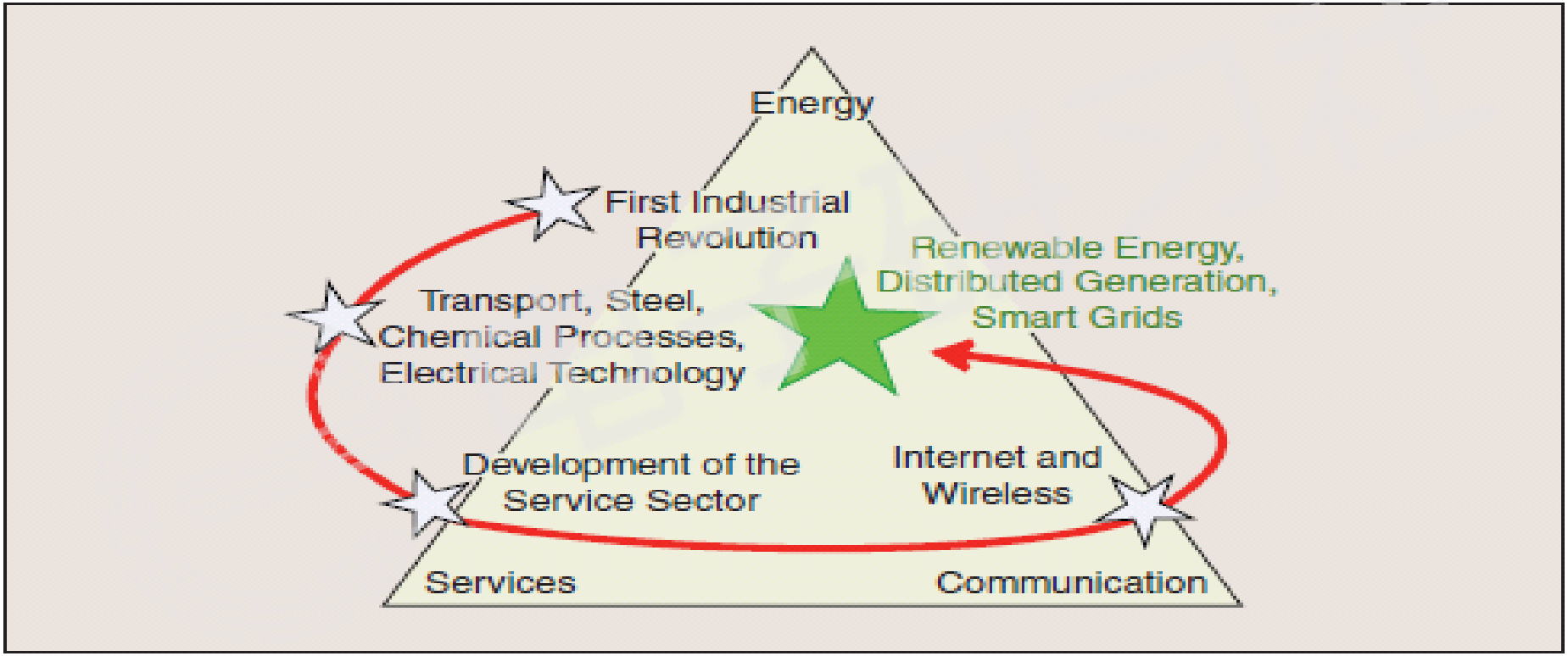



FIGURE 1 – Visual history of industrial revolutions: from energy to services and communication and back again to energy.

# 主要参考书目


- 徐德鸿.电力电子技术.机械工业出版社, 2000
- 李永东、肖曦、高跃. 大容量多电平变换器——原理、控制、应用.科学出版社, 2005
- Andrees Volke等著，韩金刚译. IGBT模块：技术、驱动和应用.机械工业出版社,2016
- 汤天浩.电力传动控制系统上册.机械工业出版社,2015
- 汤天浩.电力传动控制系统下册.机械工业出版社,2019
- [美]博斯.电力电子与变频传动.中国矿业大学出版社,1999
- John Chiasson. Modeling and High-performance Control of Electric Machines. John Wiley & Sons, Inc. 2005
- Paul C. Krause, et al. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. John Wiley & Sons, Inc. 2002

# 谢谢！

电子研习社