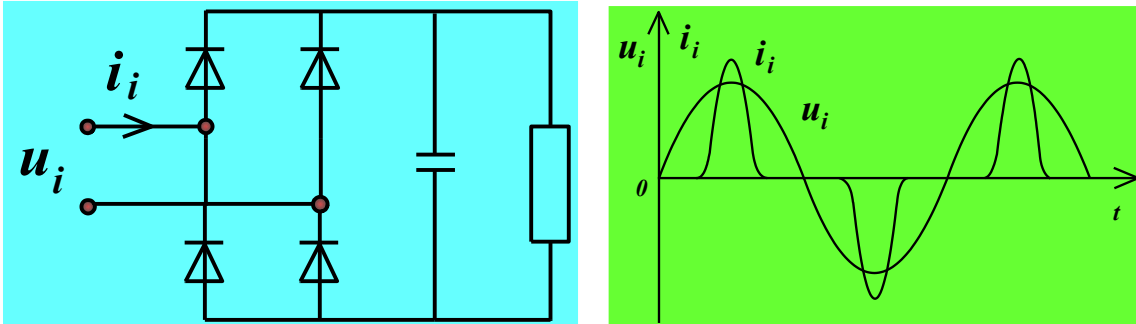


PFC 电路设计概述及其功率电感计算

(深圳谷润数字电源有限公司-2026-3-20 REV1.2)

一、 为什么需要 PFC 电路

AC/DC 普通整流电路及输入电流波形



谐波电流对电网的危害

谐波的
危害

(1) 对电网产生谐波污染

(2) 造成谐波压降

(3) 正弦电压波形畸变

(4) 产生电路故障，
变电设备损坏。

总谐波失真率

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_n^2}{I_1^2}}$$

功率因数与
失真度的关系

$$\text{PF} = \sqrt{\frac{1}{1 + \text{THD}^2}}$$

功率因数
校正的任
务与目的

正弦化：电流失真
因数 $\text{THD}=1$ 。

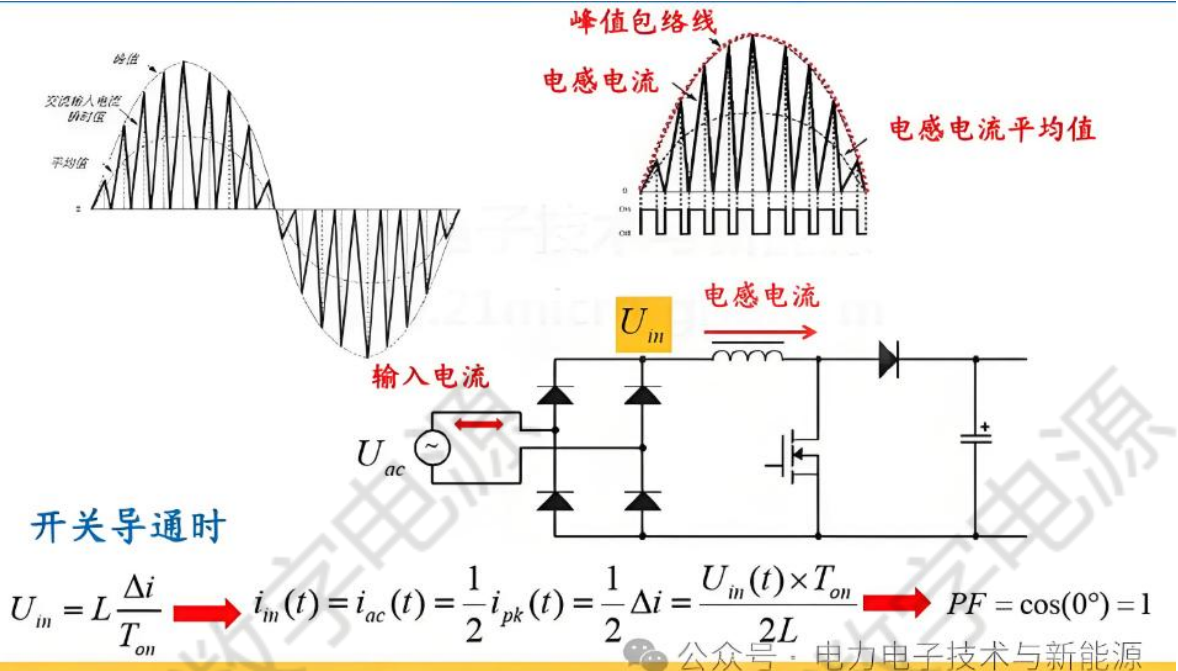
同相位：电流与电压
相位相同， $\text{PF}=1$ 。

二、 几种 PFC 电路的常用拓扑结构

1. 普通整流桥+单电感升压型 (Boost PFC)

拓扑结构: 整流桥 + 升压电感 + 快恢复二极管 + MOSFET。

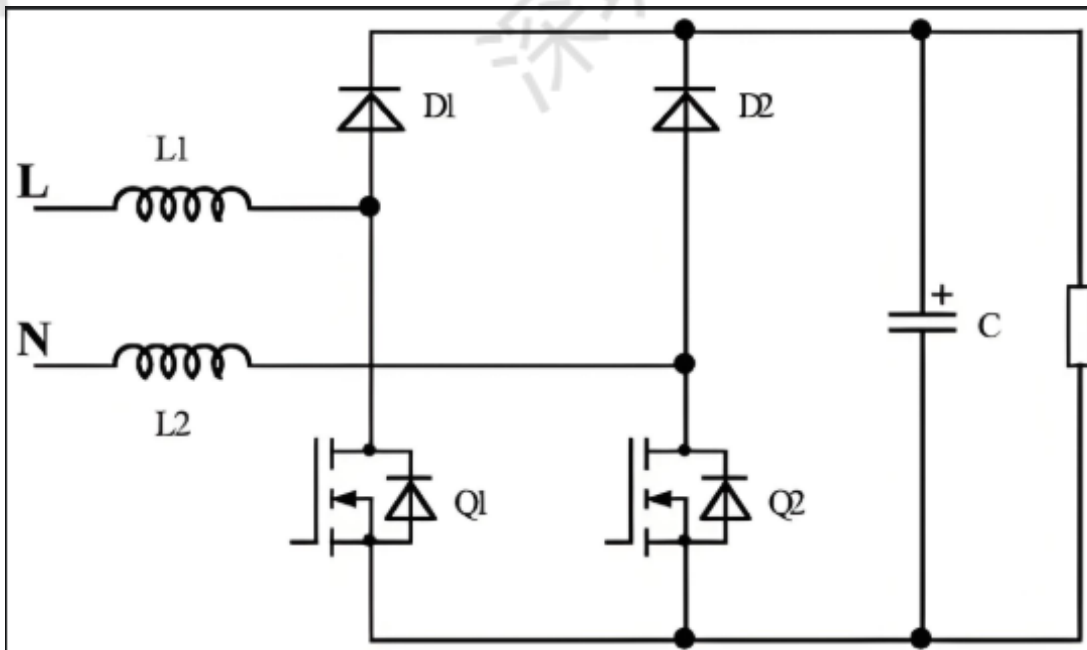
特点: 最经典、控制资料最多、EMI 好处理, 大功率时效率不高, 常用于 400 W 以内功率



2. 无桥升压型 (Bridgeless Boost / Dual-Boost PFC)

拓扑结构: 把整流桥的两个二极管换成两个快管+两个 MOSFET。

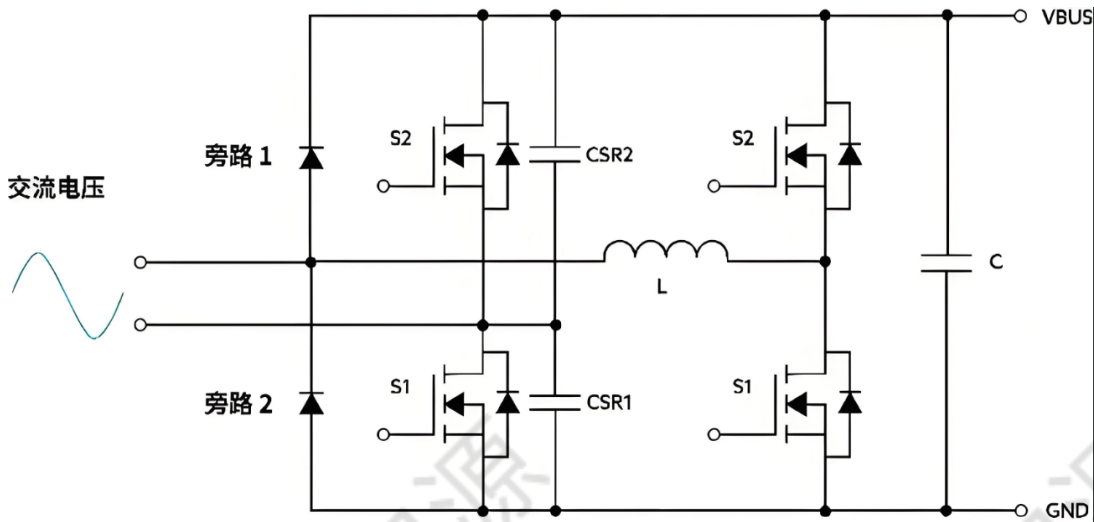
特点: 效率提升 0.5%~1%, 但是共模 EMI 难搞, 需隔离驱动/采样, 适合 500 W 以上



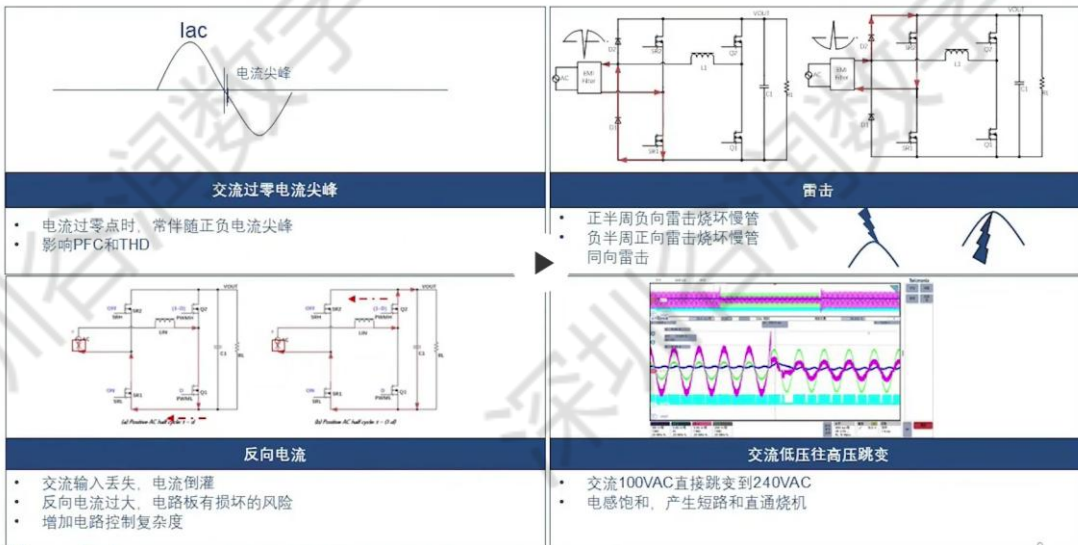
3. 图腾柱无桥 (Totem-Pole PFC)

拓扑结构: 高频桥臂用 GaN/SiC MOSFET 做同步整流, 低频臂用 50 Hz 慢管换向。

特点: 适合 1 kW–4 kW, 最高 99 % 效率; 必须宽禁带器件, 控制复杂, 成本高。



图腾柱无桥PFC的主要挑战



无桥图腾柱 PFC 的“快管”之所以几乎清一色用 GaN 或 SiC 等宽禁带器件, 并不是“噱头”, 而是硅 MOSFET 在拓扑里“先天不足”,

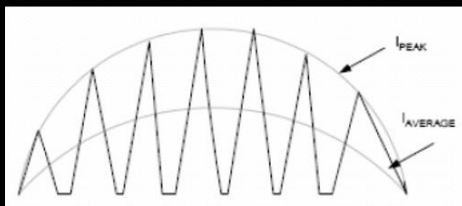
- 1) 反向恢复电荷 Q_{rr} 几乎为零: 图腾柱的“高频桥臂”要充当同步 Boost 管, 也要充当同步整流管。硅 MOSFET 的体二极管 Q_{rr} 高达数百 nC, CCM 模式下每次换流都会把 Q_{rr} 直接“灌”进对管, 产生巨大尖峰与损耗, 管子温升瞬间爆表。GaN 没有体二极管, 反向导通靠二维电子气, $Q_{rr} \approx 0$; SiC MOSFET 体二极管 Q_{rr} 只有同规格硅的 1/100 左右, 换流损耗可忽略。
- 2) 高温、高 dV/dt 裕度大: 图腾柱两管直接挂在母线 400 V, 共模跳变 $60 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 以上; 硅 MOSFET 的 CMTI 仅 $50 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 左右, 极易误触发。SiC/GaN CMTI $150\text{--}200 \text{ kV}/\mu\text{s}$, 结温 $175 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 $R_{DS(on)}$ 仅增加 1.5 倍, 而硅已涨 2.5 倍, 散热片可减半

三、 PFC 电路常用工作模式

BOOST PFC控制模式——DCM

DCM特点

1、占空比近似不变时电感电流的峰值与输入电压成正比。



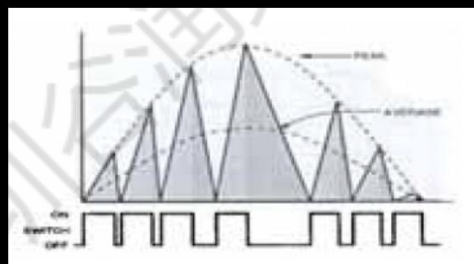
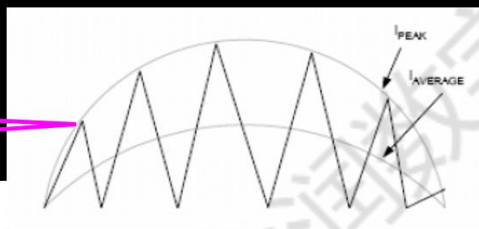
2、输入电流波形自然跟随输入电压波形

3、代价：功率管峰值电流大。

BOOST PFC控制模式——CRM/BCM/QR

CRM (BCM) 特点

电感电流几乎是不间断的三角形



功率因数几乎1，峰值电流较大，适用中小功率场合

BCM/CRM：电感电流降到零就开
QR：电流降到零+谐振到谷底才开

导通时间固定

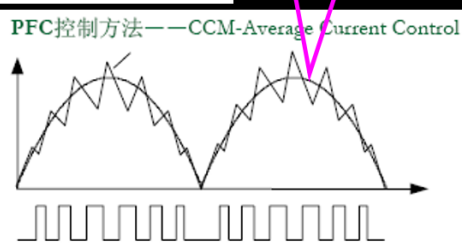
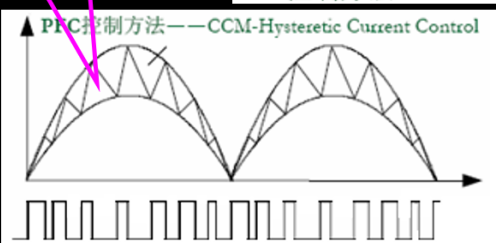
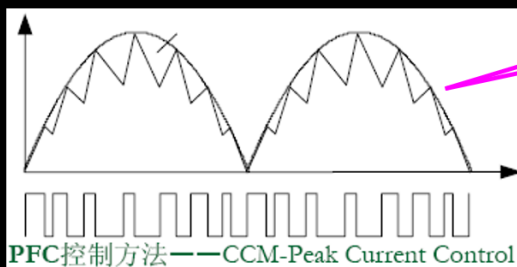
开关频率可变，峰值处最低

PFC的控制方法：CCM的控制方法

峰值电流控制

滞环控制方法

平均电流控制



四、 临界模式 CRM/BCM/QR 下 PFC 电感设计

计算临界模式 (CRM/BCM) PFC 的升压电感的电感量, 只要抓住“最低交流输入、峰值电压处开关频率最低”这一点, 利用电感两端“伏-秒平衡”及“电感电压=L*di/dt”这两个基本概念, 就很容易计算。

$$V_{in_dc} * T_{on} = (V_{out} - V_{in_dc}) * T_{off} \text{ ----(公式 A) (成立条件是升压 BOOST 电路, 电感电流每次开通前都从零开始)}$$

$$(V_{out} - V_{in_dc}) = L * I_{Lpk} / T_{off} \text{ ---(公式 B)}$$

$$P_{in} = V_{in_ac} * I_{in_rms} = V_{in_dc} * \frac{I_{Lpk}}{4.0} \text{ ----(公式 C), 分母的 4.0 是由 } 1.414 * 1.414 * 2 \text{ 运算得到的。}$$

把上面 ABC 三个公式数学求解, 得到:

$$L = \frac{V_{in_dc}^2 * (V_{out} - V_{in_dc})}{4.0 * V_{out}} * T \text{ (成立条件是 } V_{out} > V_{in}, \text{ 里面的 } T \text{ 是 } T_{on} + T_{off}, \text{ 也就是开关周期, 倒数就是开关频率 } f)$$

可以看出, 在输入正弦波的不同相位角 θ (即不同的 $V_{in}(\theta)$), 所需的开关周期 T 是不同的, 以维持临界模式。电感 L 是一个固定值。因此, 我们通常选择输入电压最低、开关频率也最低的点来进行计算, 这个点就是输入电压的峰值处 ($\theta=90^\circ$), 开关频率 $f=1/T$ 达到最小值。

$$L = \frac{V_{min_ac}^2 * (V_{out} - V_{min_pk})}{2.0 * P_{out} * V_{out} * f_{min}} \quad ()$$

式中:

- L : 需要计算的临界模式 PFC 电感量, 单位 H
- V_{min_pk} : 最低输入电压下的峰值电压。
- V_{out} : PFC 电路的输出电压, 宽范围输入时一般取 400VDC 左右
- P_{out} : PFC 电路的最大输出功率, 单位 W, 输出功率除以电源效率就是输入功率
- f_{min} : 在最低输入电压和满载时, 工作在输入电压峰值处的最低开关频率, 单位 Hz
频率太低电感体积大, 但开关损耗小; 频率太高电感体积小, 但开关损耗增加。
通常满载时选择 40k~80kHz (最后需要用公式 D 复核一下高电压输入时频率)

五、 连续模式 CCM 下 PFC 电感设计

计算连续模式 (CCM) PFC 的升压电感的电感量, CCM 模式一般频率固定, 先确最低交流输入时的工作电流最大, 一般选取电感纹波电流为最大工作电流的 20%~30%, 利用电感两端“伏-秒近似平衡”及“电感电压=L*di/dt”这两个基本公式就可算出:

$$V_{in_dc} * T_{on} = (V_{out} - V_{in_dc}) * T_{off} \text{ ----(公式 A)}$$

$$(V_{out} - V_{in_dc}) = L * k * 1.414 * I_{in_rms} / T_{off} \text{ ---(公式 B), } k = \text{电流峰峰值/平均值, 默认取 } 0.3$$

$$P_{in} = 1.414 * V_{in_dc} * I_{in_rms} \text{ ----(公式 C)}$$

把上述 ABC 三个公式求解, 得到的结果如下:

$$L = \frac{V_{min_ac}^2 * (V_{out} - V_{min_pk})}{k * P_{out} * V_{out} * f_{min}}$$

六、重要事项

- **磁芯选择**: 计算出的电感量是电气值。你需要选择合适的磁芯（如铁氧体、粉末磁芯），确保电感在峰值电流下**不**饱和，一般预留 30%~50%的饱和裕量。饱和磁感应强度要查磁芯手册，利用**安培定律**来计算是否饱和以及还有多少裕量，

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \mu_r \Rightarrow B = \mu_0 \mu_r N I / L_e$$

L_e 表示磁路长度。B 就是磁感应强度，N 是电感匝数，I 是电流

μ_0 是真空磁导率常数 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, $\mu_0 \approx 1.25663706127 \times 10^{-6}$

μ_r 是磁芯相对磁导率，锰锌铁氧体是 1000~15000，铁粉芯是 10~100

电感 L 的定义公式是 $L = \mu_0 \mu_r N^2 A_e / L_e = A_L \cdot N^2$,

故安培定律可以写为 $B = L \cdot I / (N \cdot A_e)$, 用此公式验证磁芯是否饱和。

“B 饱和”需要查磁芯数据手册，铁氧体是 0.3~0.5T，铁粉芯是 1.0~1.4T

通常使用计算电感的 AP 值来快速选择磁芯或磁环的大小（见电感 AP 公式推导）:

$$AP = \left(\frac{L \cdot I_{pk} \cdot I_{rms}}{B_{max} \cdot K_u \cdot J} \right) \times 10^4 \text{ (单位: cm}^4\text{)}$$

选好了磁芯和铜线后，用《电感变压器磁性元件损耗》计算电感的理论损耗。

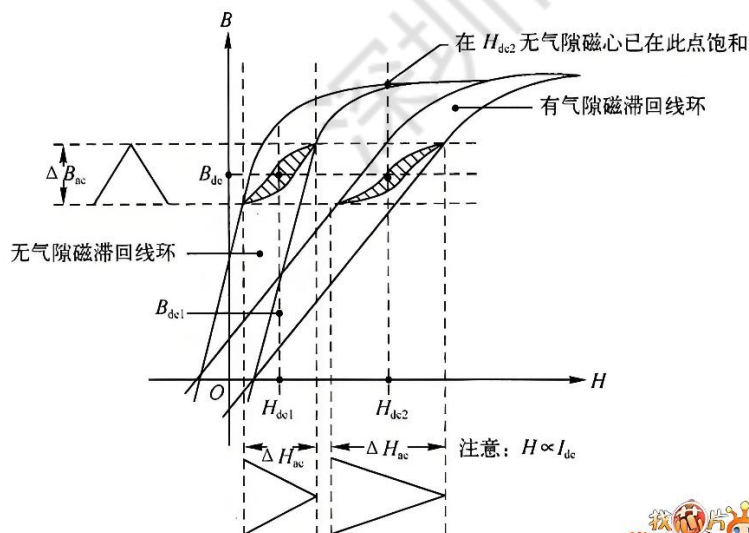
- **频率变化**: 在 CRM 下，开关频率在整个正弦半波内是变化的，在过零点附近频率最高。

• 扩展知识: B 和 H 的关系

B: 磁感应强度 (特斯拉 T) ——“真正决定洛伦兹力的量”

H: 磁场强度 ($A \cdot m^{-1}$) ——“源”，只与自由电流有关

$B = \mu H$, 但 μ 不一定是常数; 在真空中 $B = \mu_0 H$, 在磁性材料里 $B = \mu_0(H + M)$, 而 M 又把 H 自己绕回去, 于是出现非线性、磁滞、饱和。



M 不是 H 的单值函数，而是与“历史”有关 → 出现 磁滞回线:

1. 初始磁化曲线: χ 随 H 剧增 → μ_r 从 1000 飙到 10000
2. 饱和: $M \rightarrow M_s$ (饱和磁化强度), 再增大 H 几乎不再增加 M → $\mu_r \downarrow \downarrow$
3. 降 H 时 M 不走原路 → 剩磁 B_r
4. 使 $B = 0$ 的反向 H 叫 矫顽力 H_c

于是 B-H 图 变成回线, 回线包围面积 = 单位体积每周期磁滞损耗 (J/m^3)