



中国电源学会专家委员会
电源学会磁技术专业委员会

委员
委员

邵革良 主讲

2016/7/30上海
2016/8/25深圳

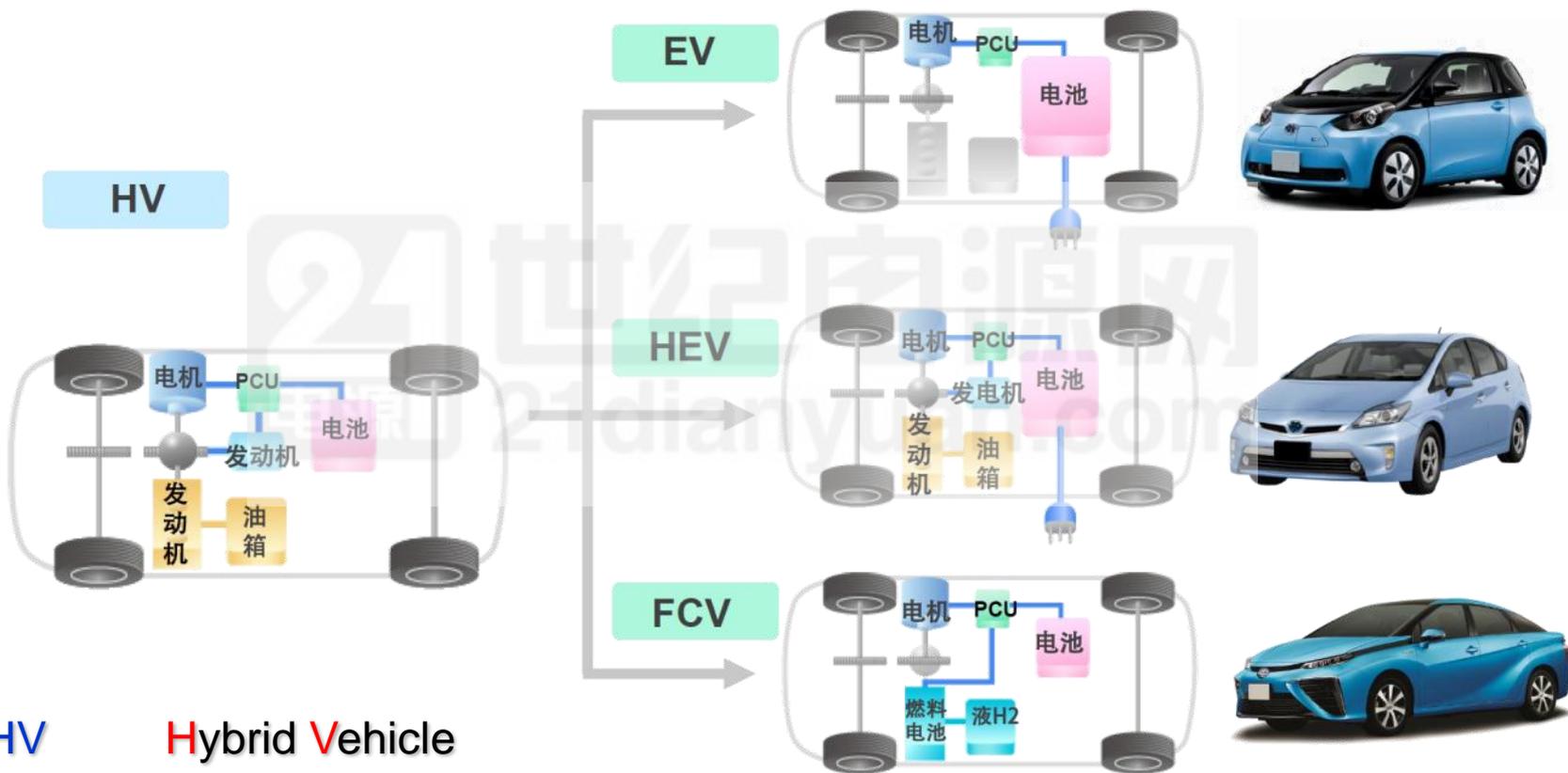
充电桩· EV/HEV电源技术及其磁元件

技术设计培训



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

新能源汽车 (EV-HEV-FCV)



HV Hybrid Vehicle
HEV Hybrid Electric Vehicle
EV Electric Vehicle
FCV Fuel Cell Vehicle

PCU Power Control Unit 电驱
ECU Electronic Control Unit 电控

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

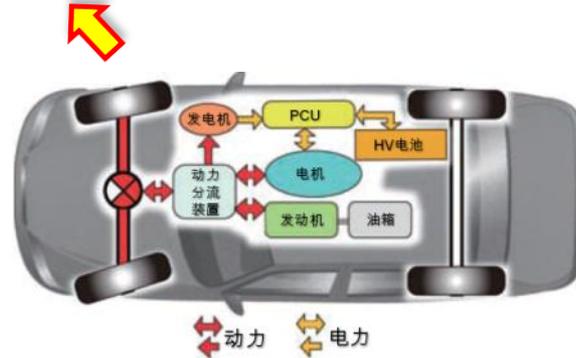
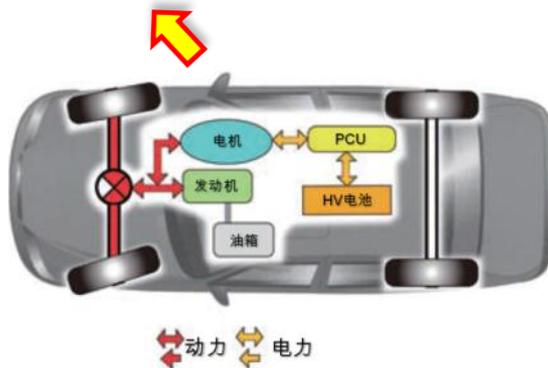
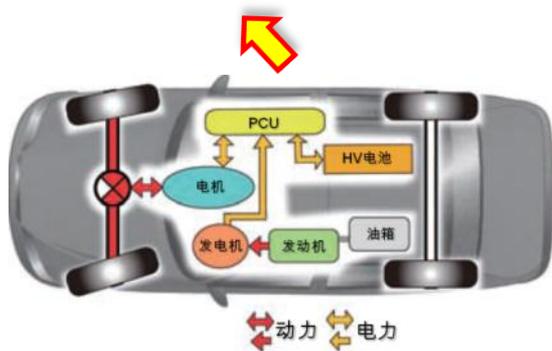
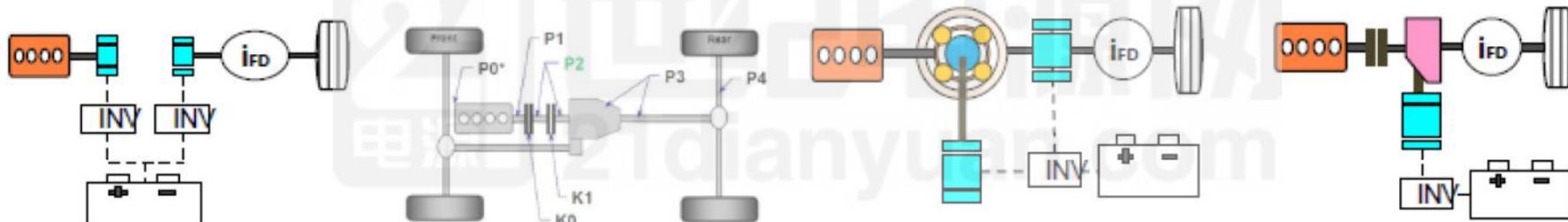
国际混合动力汽车发展现状

串联式混合动力汽车

并联式混合动力汽车

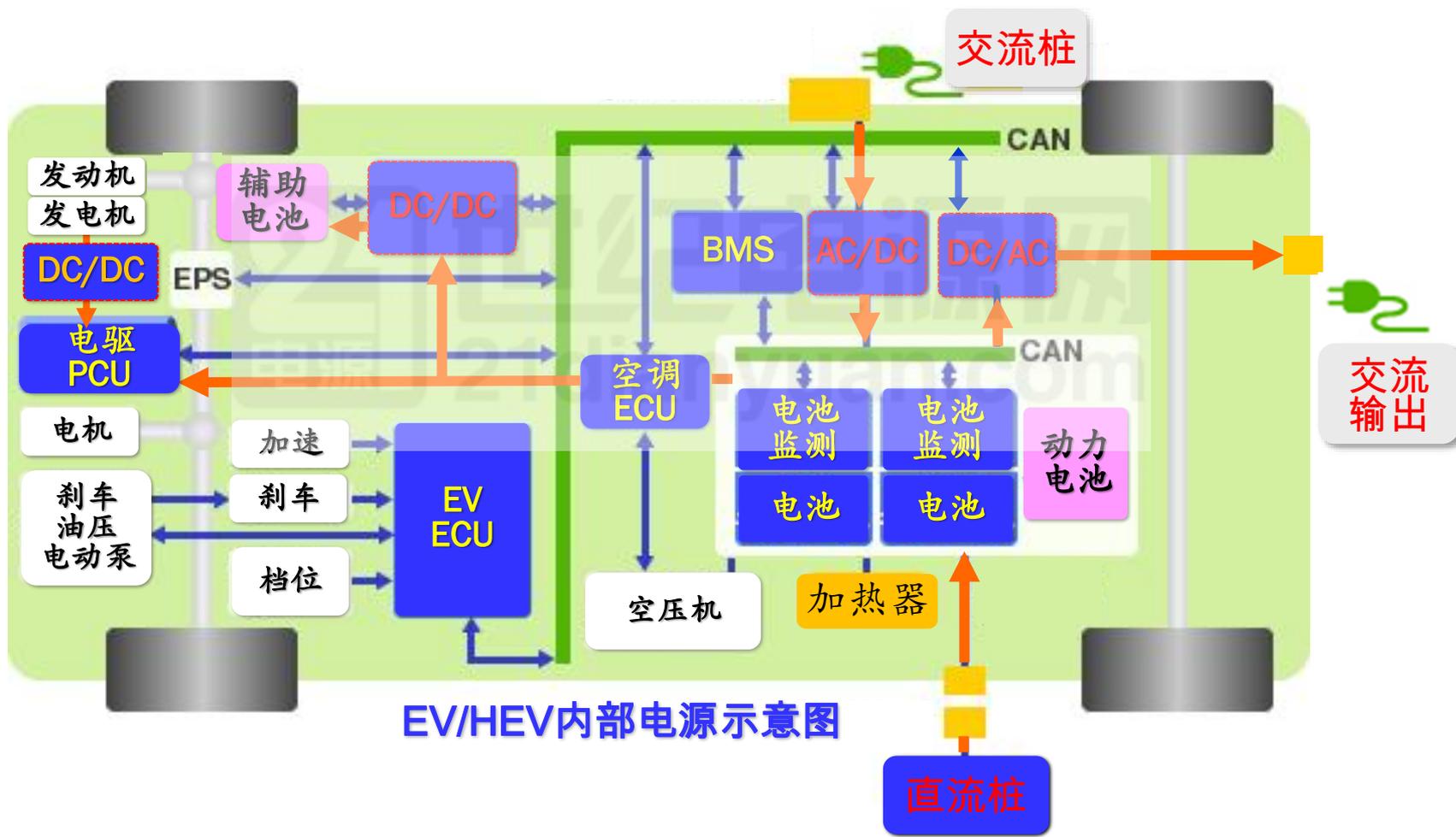
功率分流混合动力汽车

其他



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

(HV) · EV · HEV中的AC/DC、DC/DC、DC/AC



EV/HEV内部电源示意图

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

车载电源、充电桩电源的电路特点

- 高效率·宽温度·高密度

充电桩



- 高性价比
- 宽电压范围
- 高电流电压控制精度
(直流桩)
- 大功率
- 良好电磁兼容性
- 电网谐波质量控制
- 可靠性



车载电源

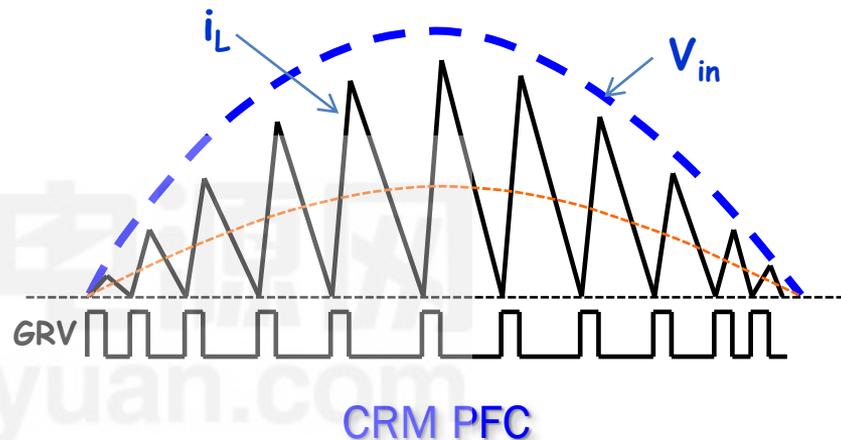
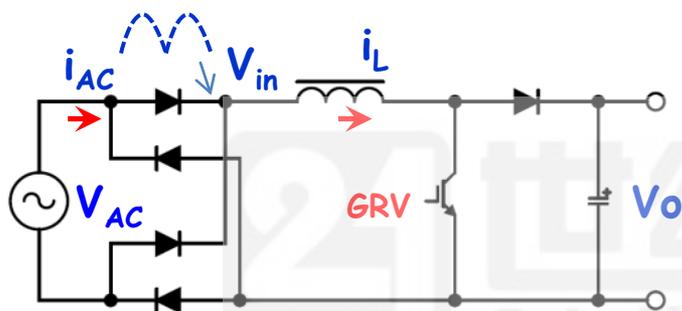
- 抗震动、密封性
- 小体积、轻重量
- 极致的电磁兼容性
- 高可靠性



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

PFC电源技术

● 单相PFC电源技术



两种PFC控制模式的特点对比

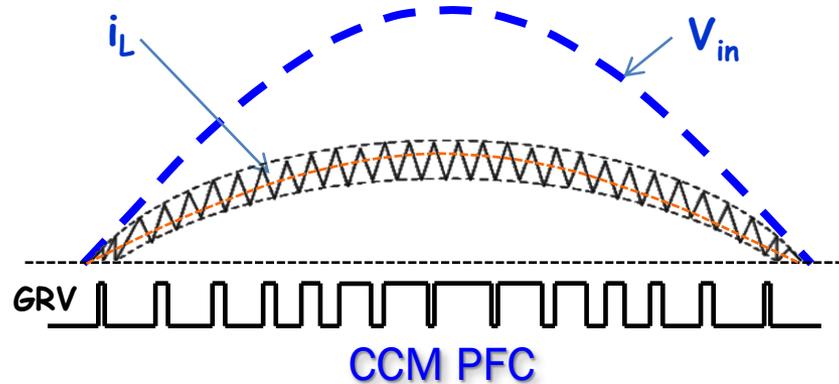
特征因素

电感量
纹波电流
快恢复电流
零电流开通
开关频率

关注点

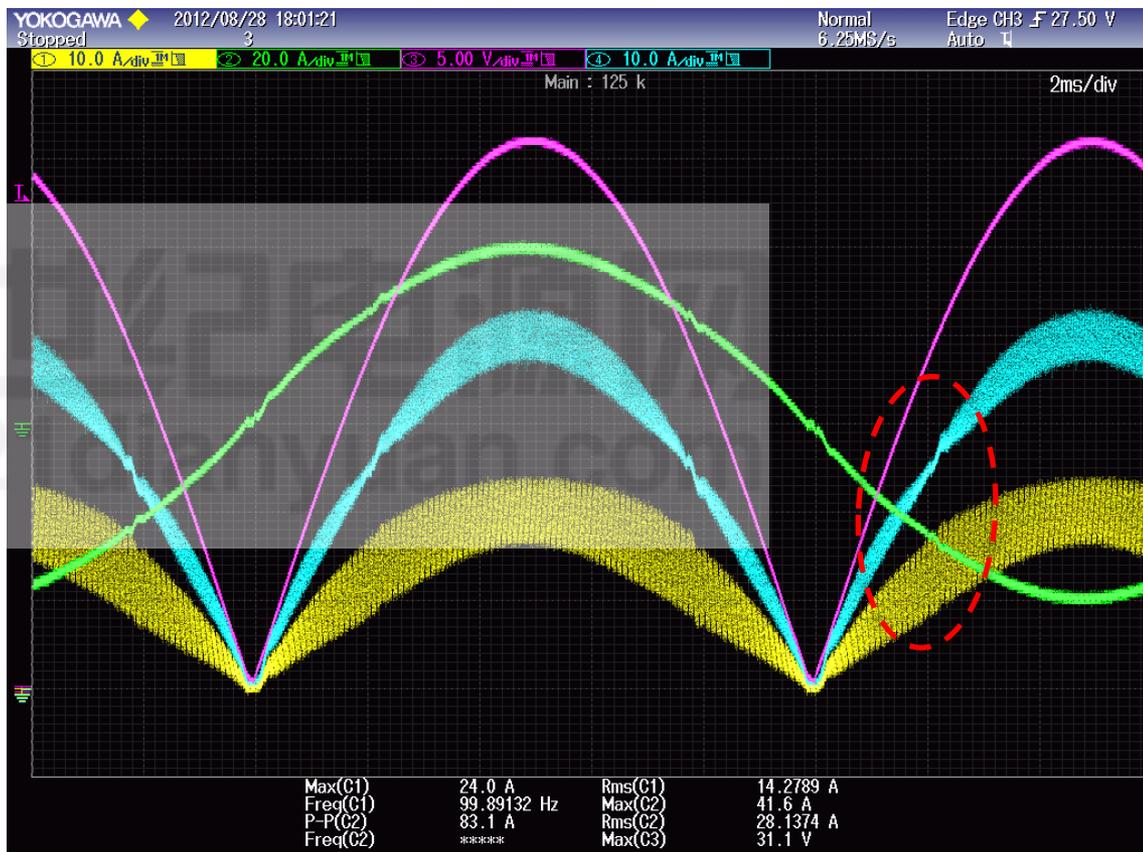
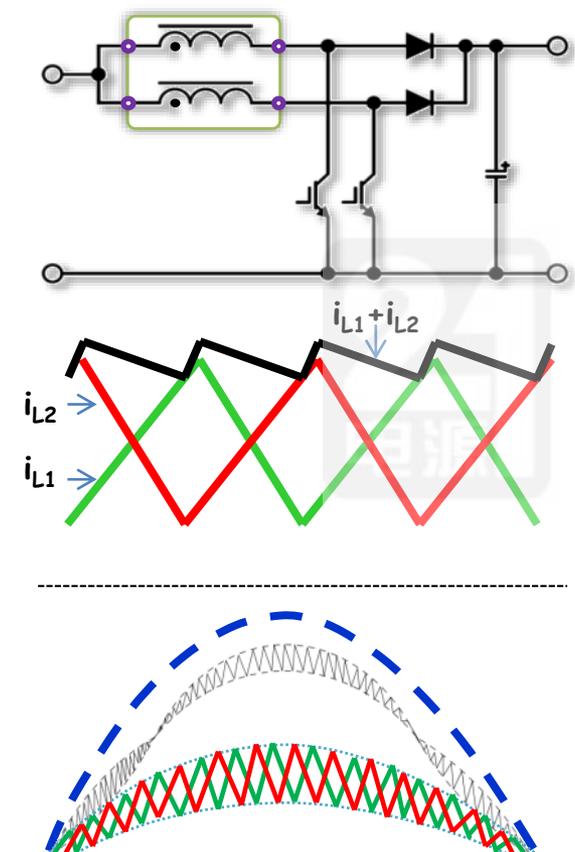
高次谐波
EMC
器件损耗
电感损耗
成本
其他 (尺寸、器件)

效率



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

● 双路、多路交错并联PFC技术



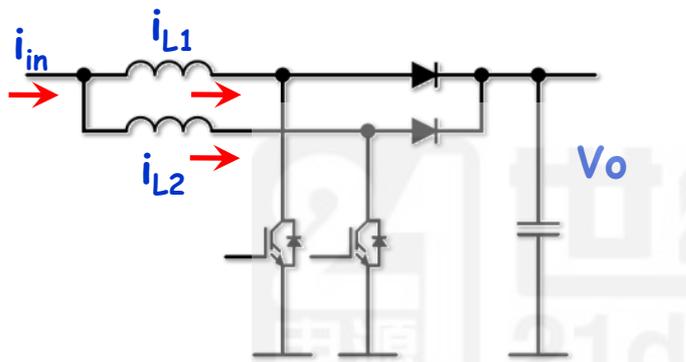
交错驱动大幅减小输入电流高频纹波
→ 2只小感值L实现低纹波
→ 减半的电流大幅降低电感成本

6KW 交错CCM PFC实测波形
350uH/30A × 2

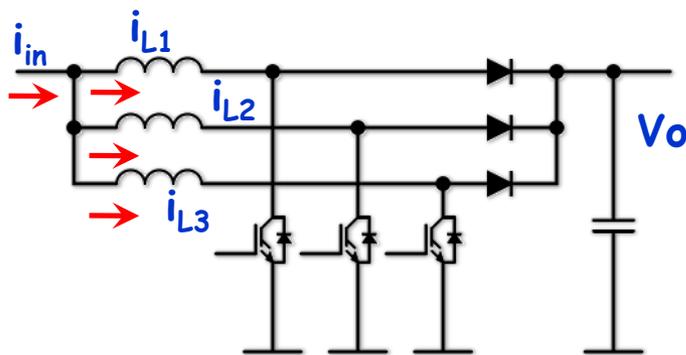
充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

PFC电路技术特点

● 双路、多路交错并联PFC技术



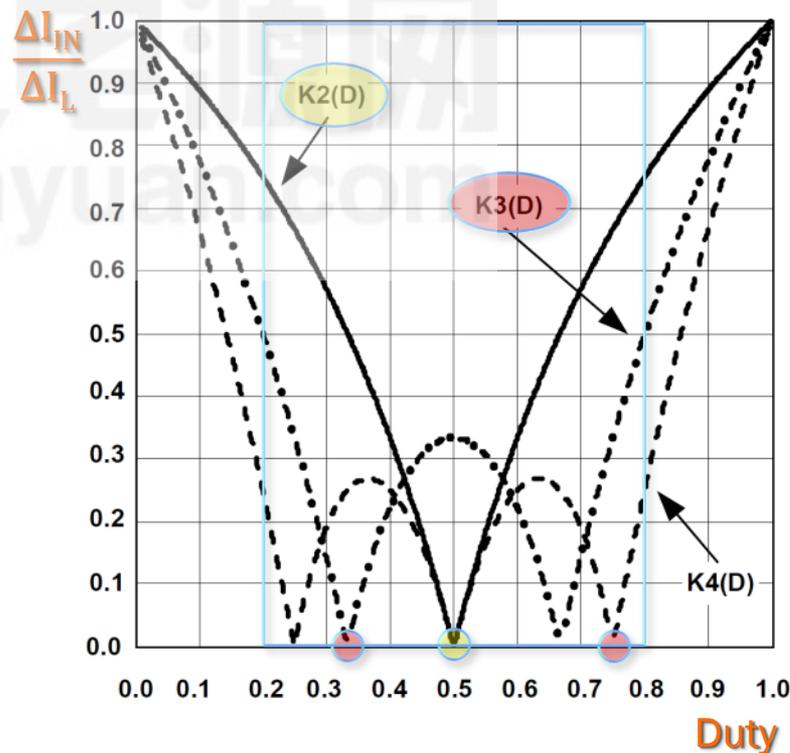
180° Interleave PFC



120° Interleave PFC

交错并联的本质目的：大功率低成本

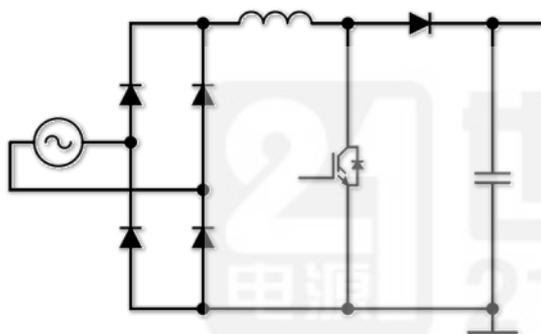
- 电流 = 1/N
- 感量 L (2~4 Φ : 70%、50%、30%)



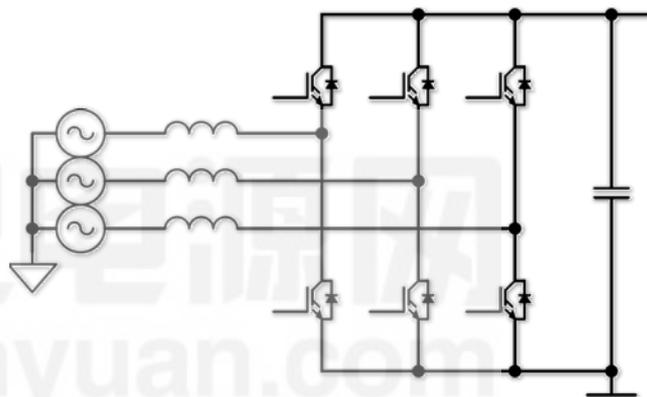
充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

PFC电路技术特点

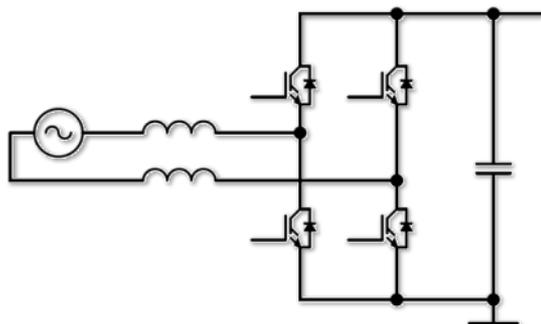
- 单相、三相无桥、三电平无桥PFC技术



单相全桥整流



三相无桥整流



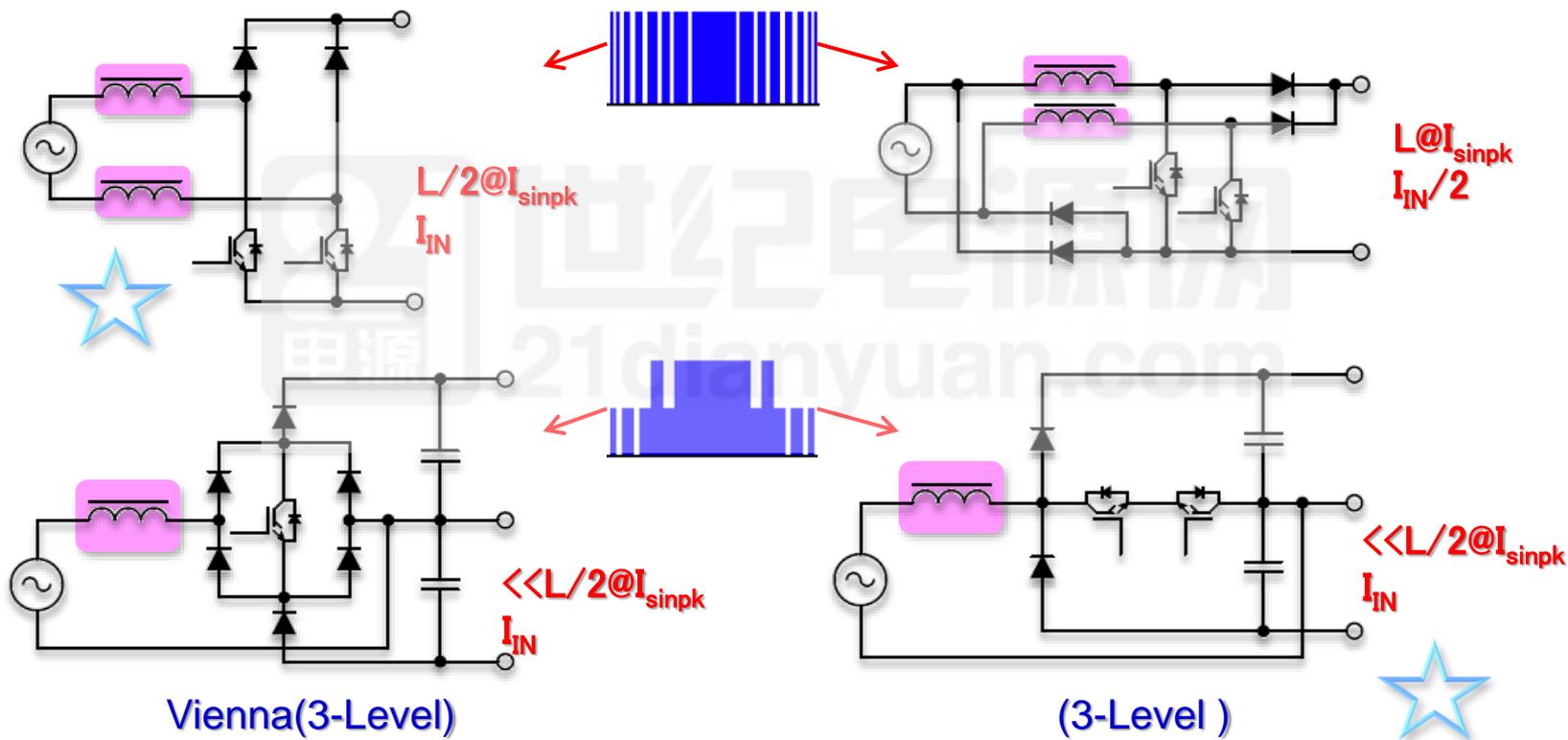
单相无桥整流

无桥PFC的本质目的：提高电源效率

- 高次谐波抑制 (IEC61000-3-2)
- 升压· 稳压

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

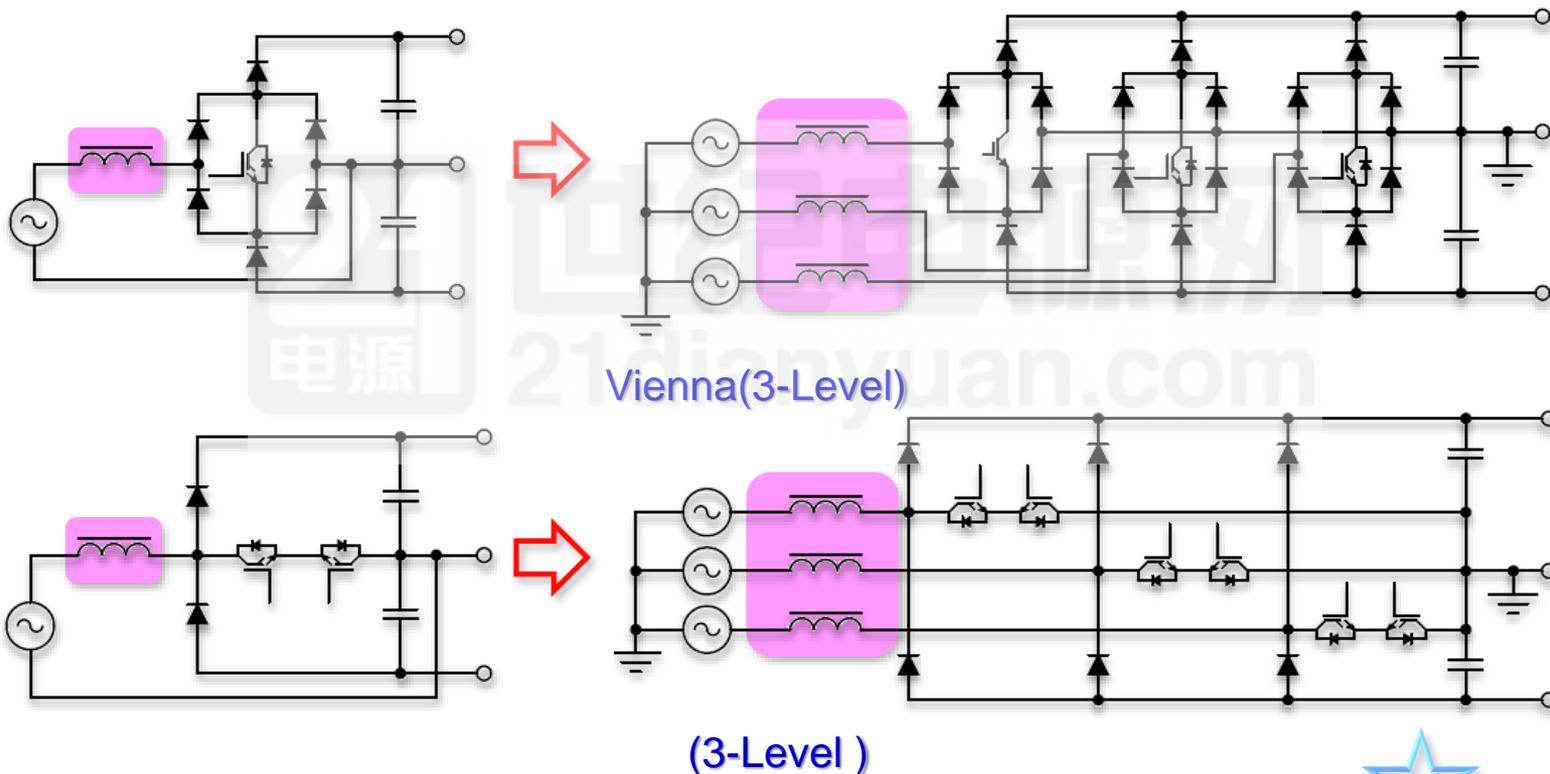
高次谐波控制方案：（单相）无桥CCM PFC方案



各种单相无桥PFC (CCM)

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

高次谐波控制方案：（单相→三相）无桥CCM PFC方案



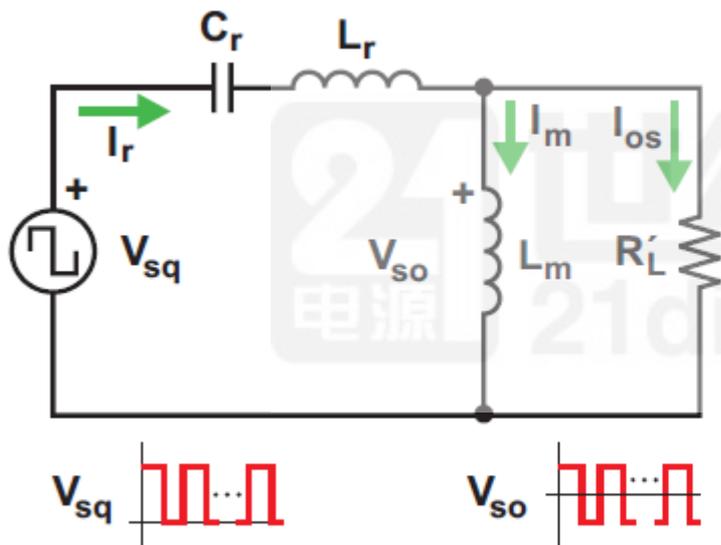
三相三电平无桥PFC (CCM)



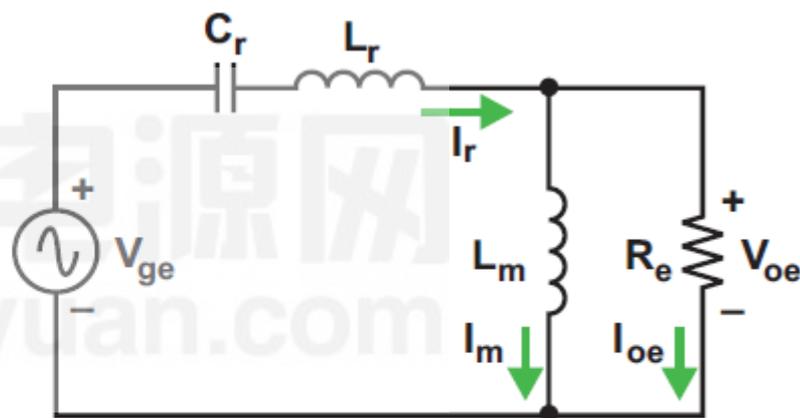
充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

DC/DC电源技术—全桥LLC电路及其大功率化

- 全桥LLC电路工作原理及其特点



a. Nonlinear nonsinusoidal circuit.

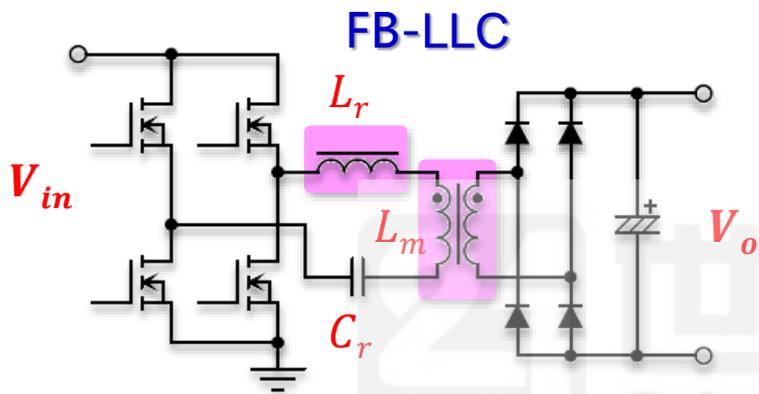


b. Linear sinusoidal circuit.

First Harmonic Approximation (FHA) method

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

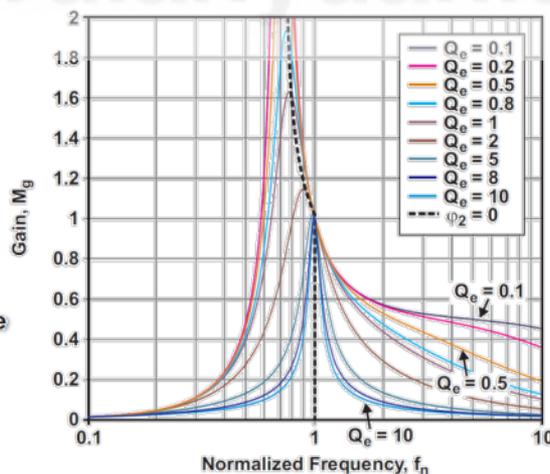
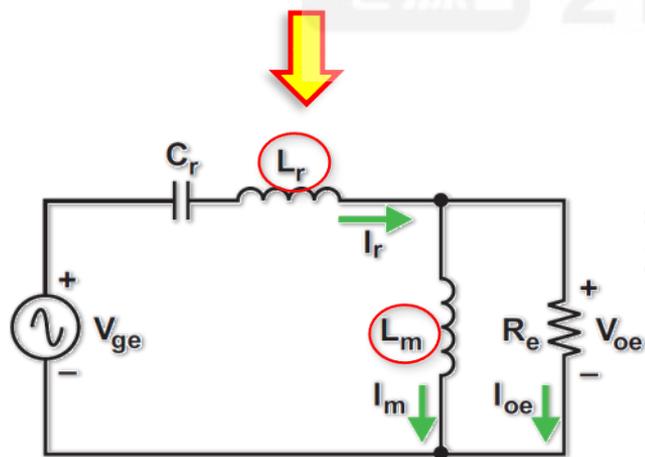
● 全桥LLC电路工作原理及其特点



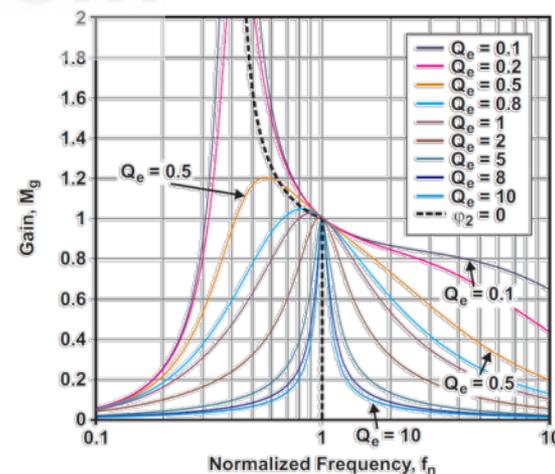
$$M_g = \left| \frac{L_n \cdot f_n^2}{[(L_n + 1) \cdot f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \cdot f_n \cdot Q_e \cdot L_n]} \right|$$

$$V_o = M_g \cdot \frac{1}{n} \cdot V_{in} = M_g(f_n, L_n, Q_e) \cdot \frac{1}{n} \cdot V_{in}$$

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_0} \quad L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad Q_e = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_e}$$



a. $L_r = 1$



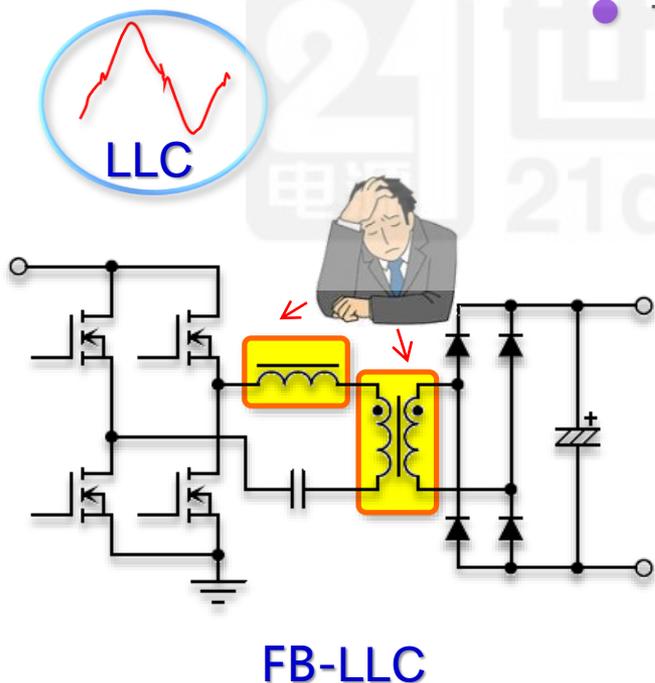
b. $L_r = 5$

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

● 全桥LLC电路工作原理及其特点

谐振电感
电流波形
对电感设计的影响

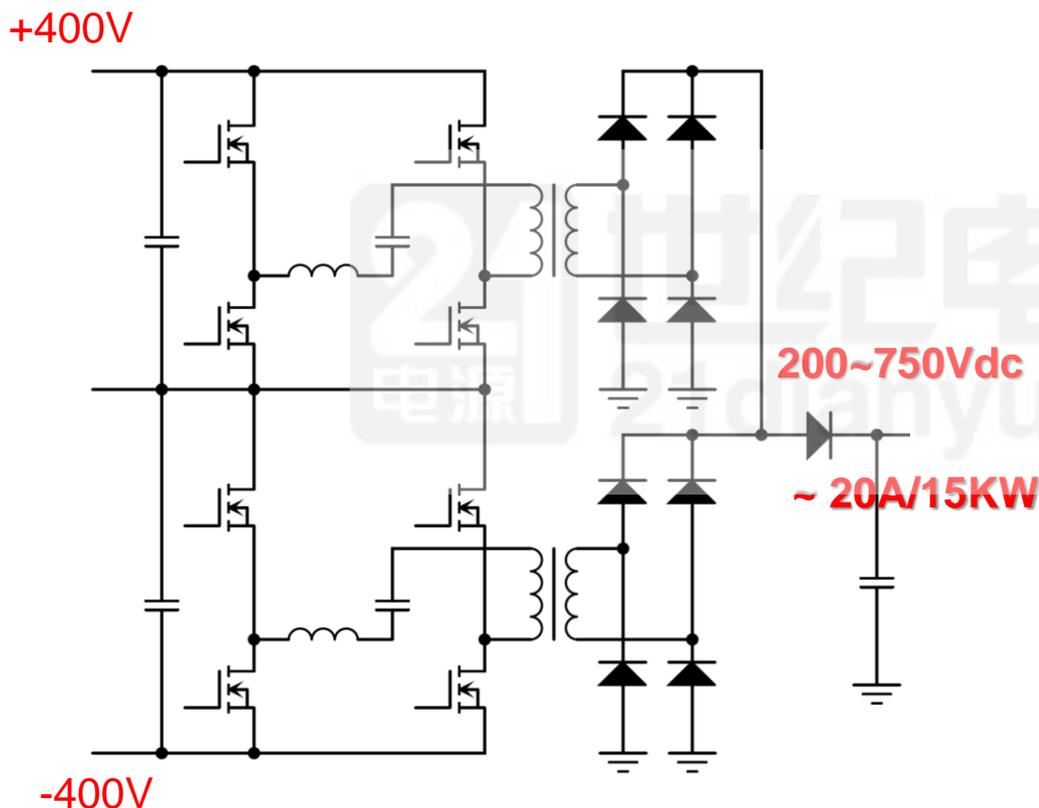
- L_n 越大，效率越高，输出增益越小，不利于宽范围
- L_m, L_r, C_r 精确取值，用于设定增益，谐振频率箱
- 谐振电感1、3象限工作，高频峰值、有效值电流大



- 易高频化、高功率密度
- 更好的EMC兼容性
- 采用MOSFET
- 宽电压范围设计控制较复杂
- 铁氧体变压器
- 励磁感量要求不利变压器设计

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

● 全桥LLC电路交错并联实现大功率



大功率化的途径 90° 交错并联技术

优点：

- 高频、高效率、良好EMC、副边电压电流开关应力小，特别适合高输出电压电源

缺点：

- 控制输出增益和电源效率的矛盾难以解决！
- 谐振电感、变压器励磁电感均需要严格精度控制，必须采用励磁线绕制，不利于大功率设计

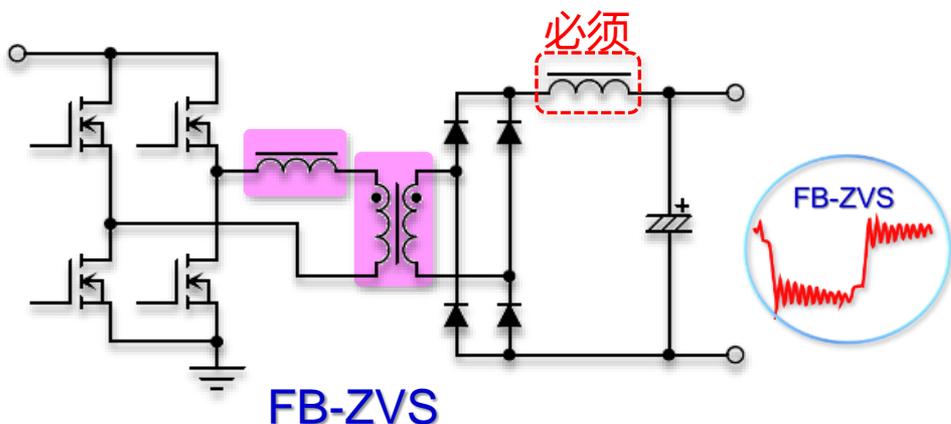
- 高频、高效率
- 高性价比
- 高功率密度
- 宽范围控制困难
- 难以实现更大容量

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

● 移相全桥的工作原理与特点

电路特征

- 主动臂、被动臂的区别
- ZVS的范围取决于被动臂 C_{oss} 与谐振电感的能量
- 原边始终有两只MOS开通
- 2次侧二极管寄生电容的影响 (损耗、EMI)
- 原边存在占空比丢失现象
- 副边实现功率的方波传输



优点：

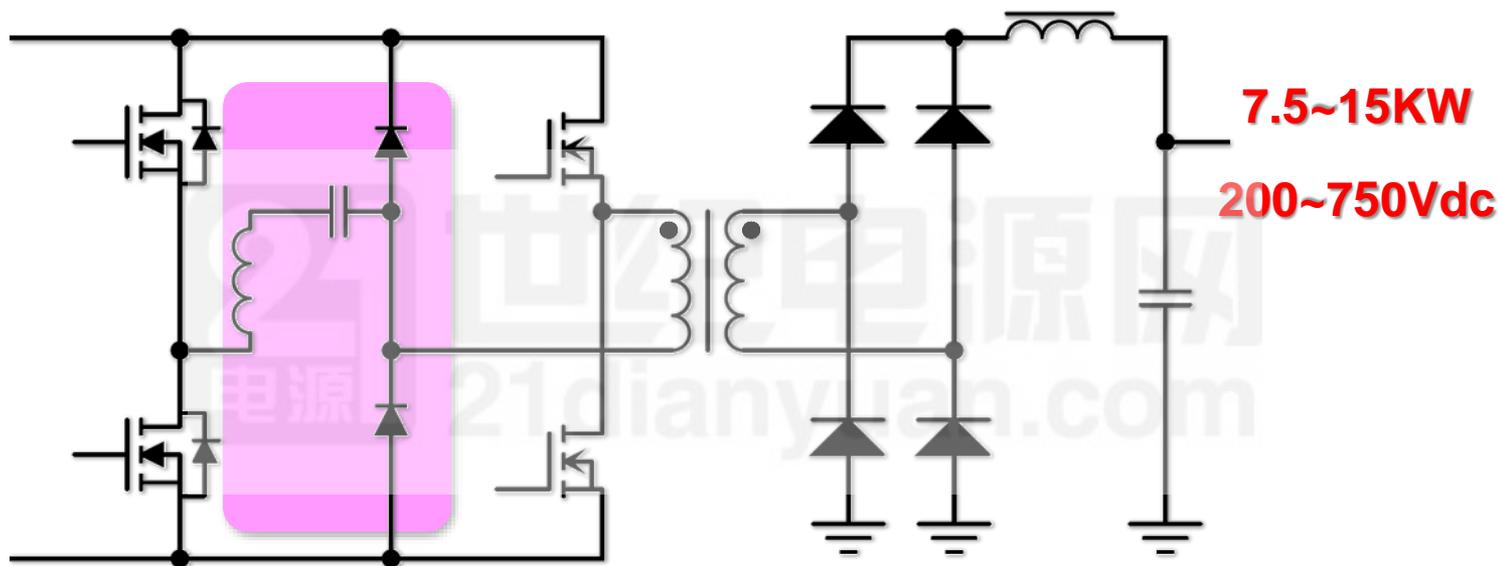
- 变压器漏感、谐振电感剩余能量被返回DC母线，效率高；
- 电压方波、电流梯形波功率传输，电压、电流赢利小
- 变压器不需要气隙，有利于磁元件功率密度的提升

缺点：

- 输出二极管寄生电容能量必须被消耗
- EMC效果较差、磁元件高频损耗高
- 不利于高电压输出的电源

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

- 改进型移相全桥

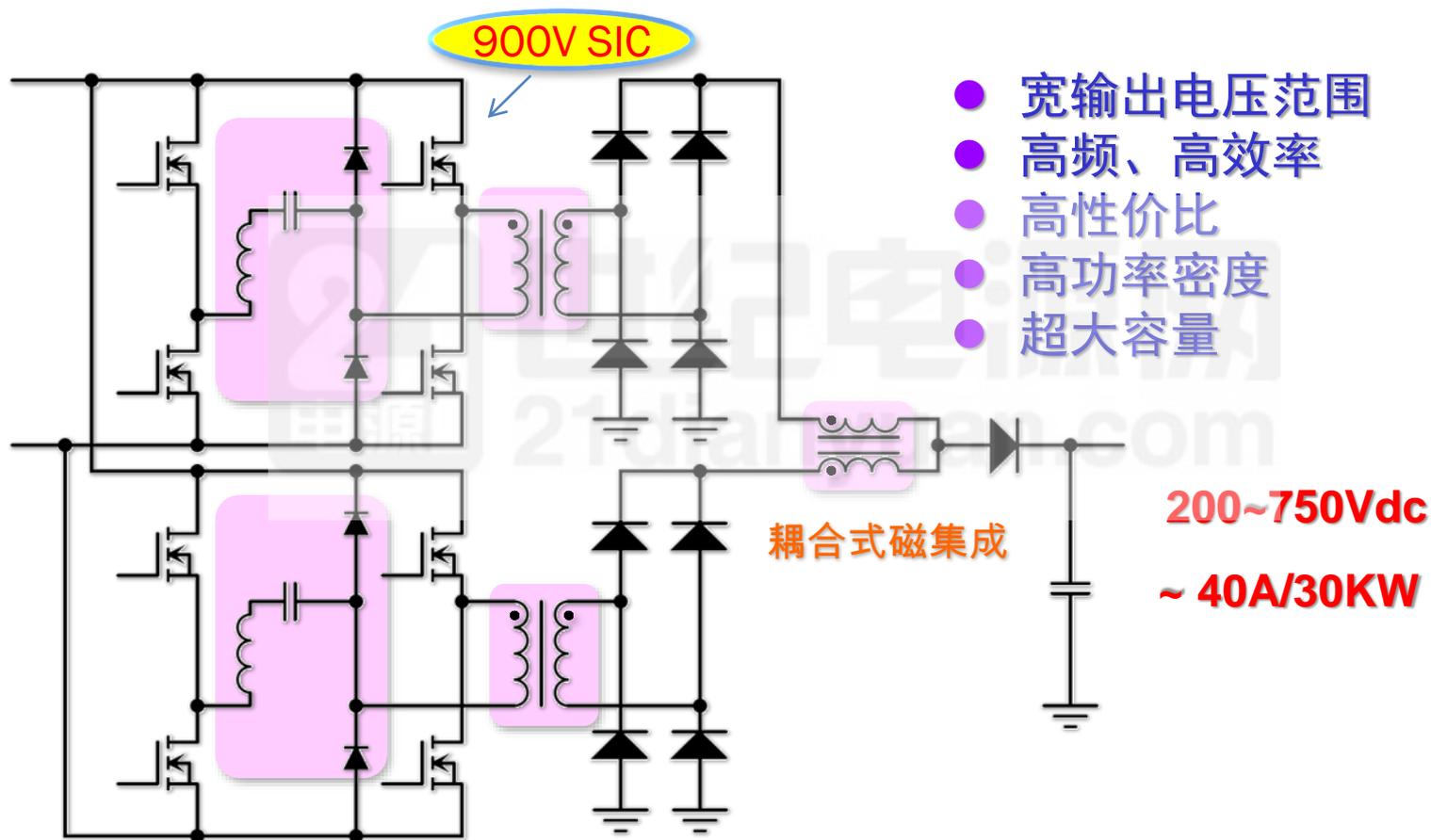


- 宽范围
- 大容量
- 高效率

适合于充电桩的移相全桥改进方案

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

● 移相全桥的交错并联---大功率的实现

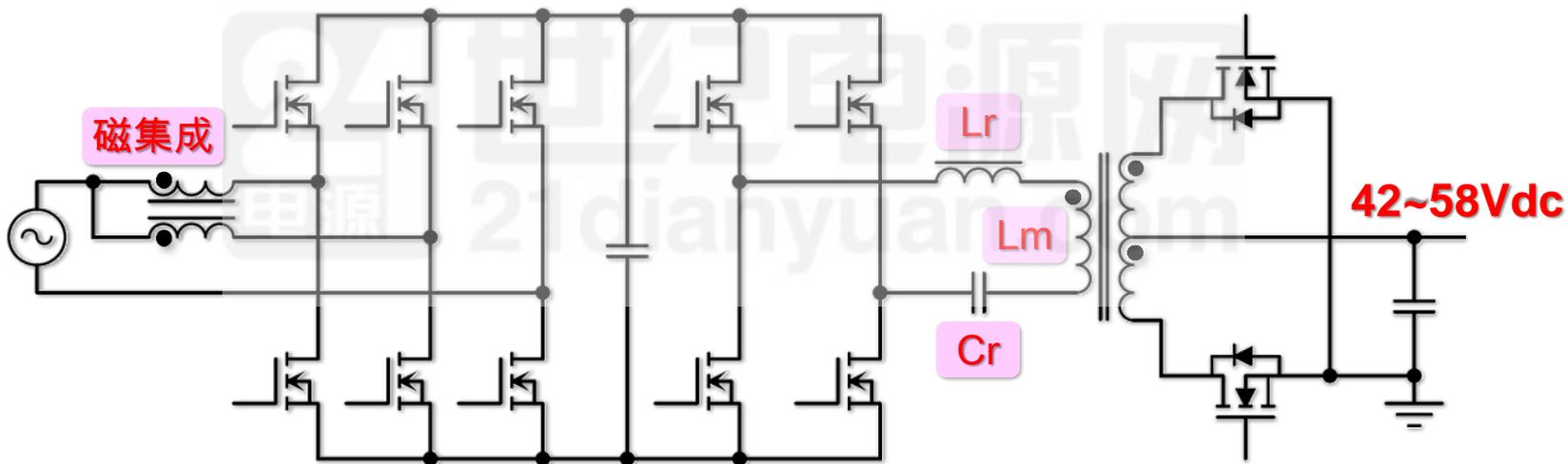


适合于充电桩的SiC移相全桥高频 (100~200KHz) 方案

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

大功率AC/DC电源的热点应用

- 3KW高功率密度服务器电源方案



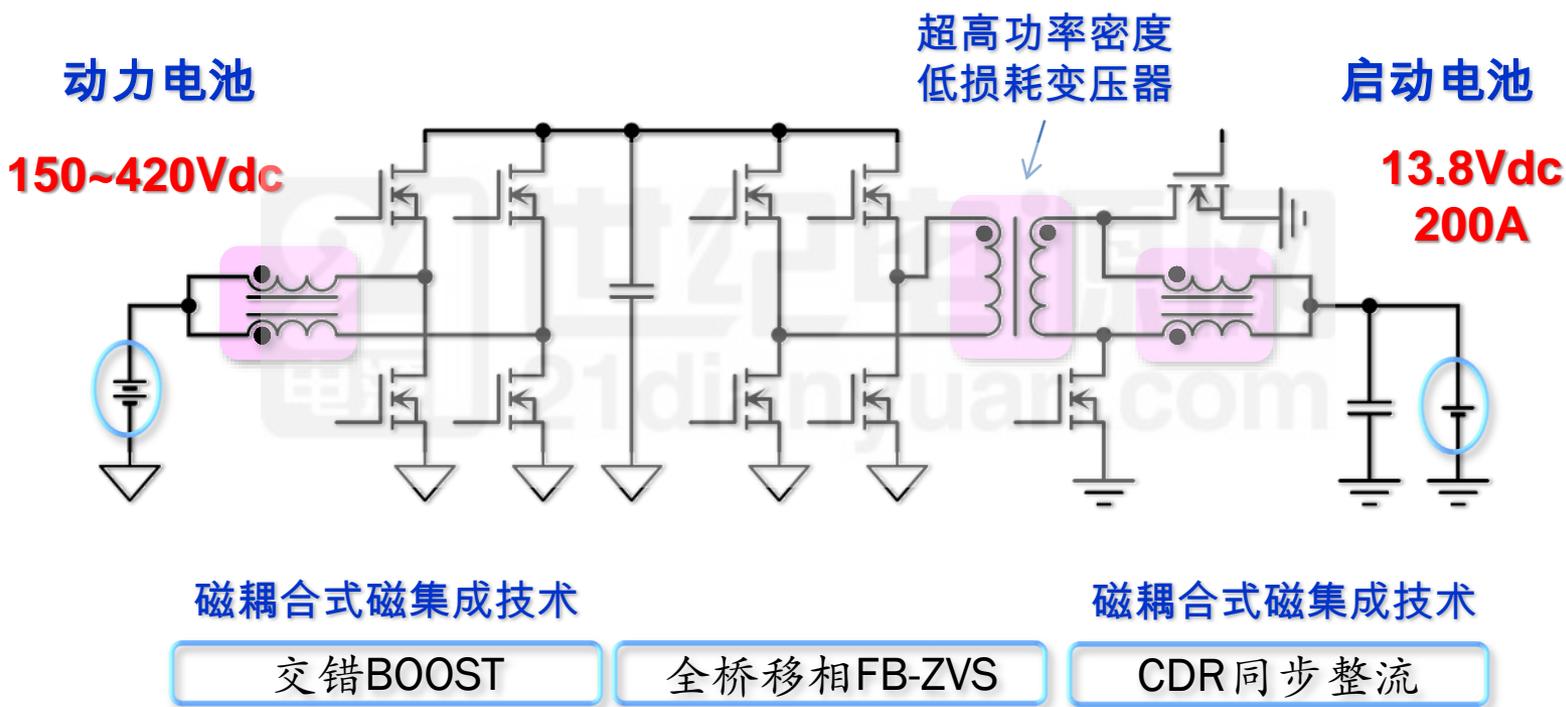
无桥交错并联PFC

全桥LLC

同步整流

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

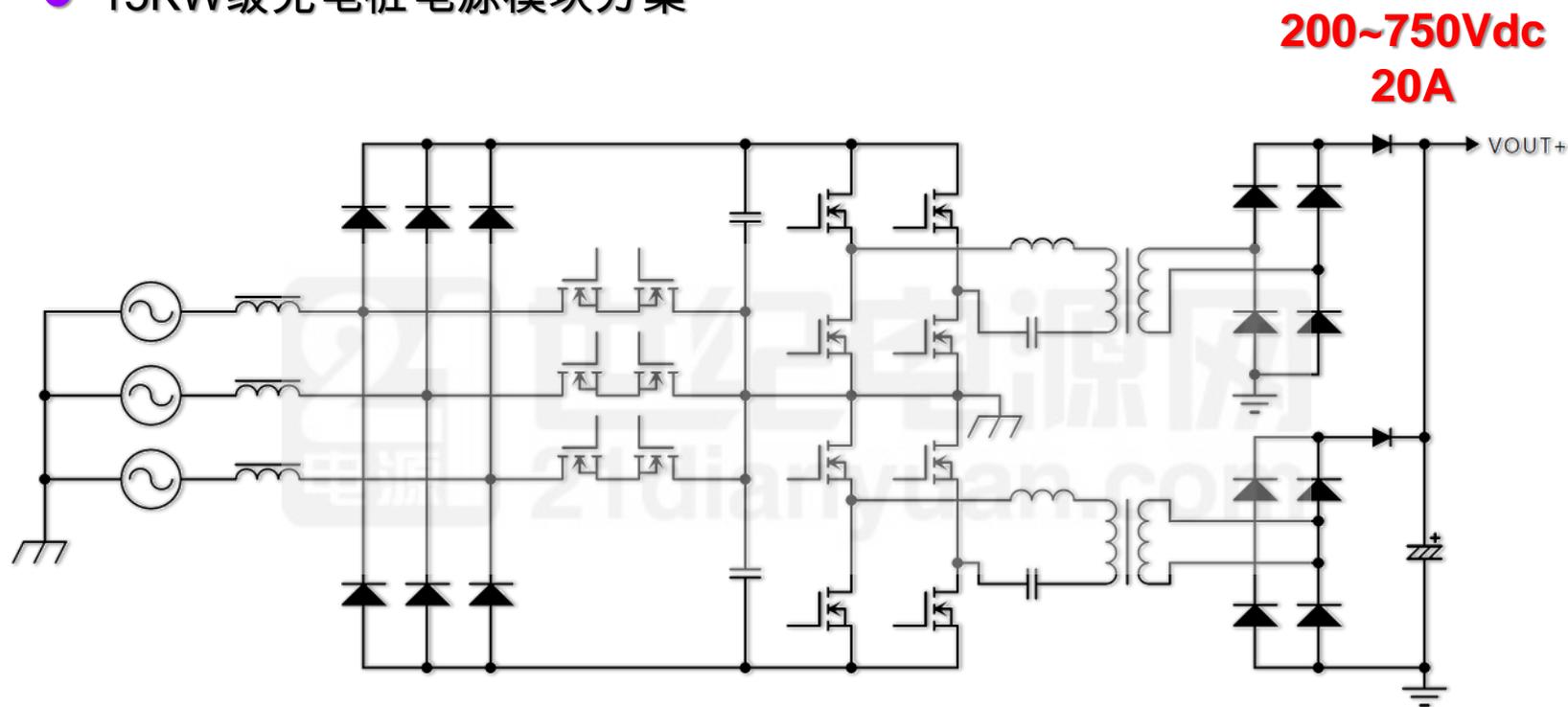
● EV/HEV车载充DC/DC电源方案



最新3KW级超高效率的混动车载DC/DC方案

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

- 15KW级充电桩电源模块方案

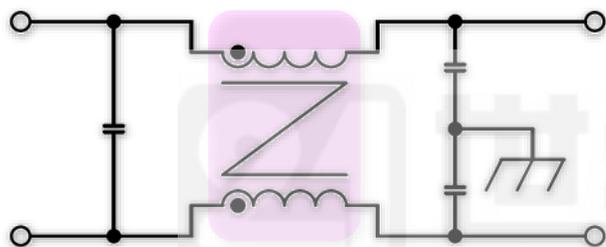


三相Vienna+交错LLC充电桩方案

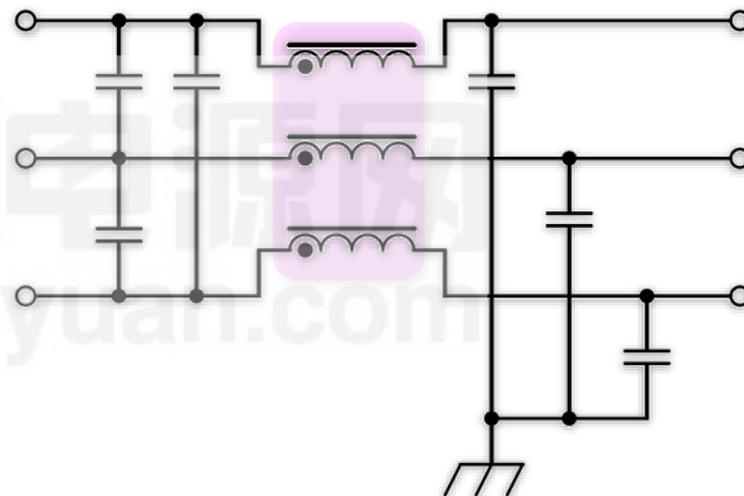
充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

大功率磁元件主要电气性能指标

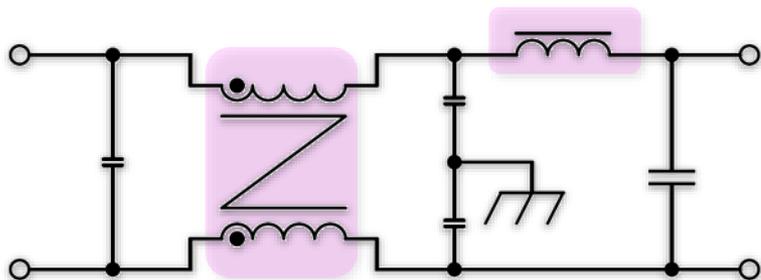
● PFC电路EMI滤波器技术



单相共模滤波



三相共模滤波



单相共模+差模滤波

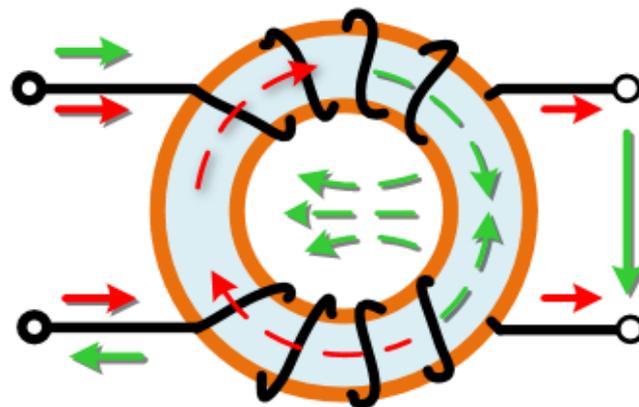
充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

EMI滤波电感电气性能指标

● EMI滤波器电感

- ◆ 阻抗特性 $Z-f$ @150KHz~30MHz, ~100MHz
- ◆ 电感特性 $L-f$ @1KHz, 100KHz~1MHz
- ◆ 最低谐振频率 f_{SRF} $\geq 1\text{MHz}$ or Higher
- ◆ 饱和共模电流 I_{Sat} Higher is Best
- ◆ 差模电感 L_{NOR} Higher is Best
- ◆ 总体损耗 P_{Loss} $P_{coil(LF)} + P_{core(HF)}$

- 差模电流
- 共模电流
- - - 差模磁通
- - - 共模磁通

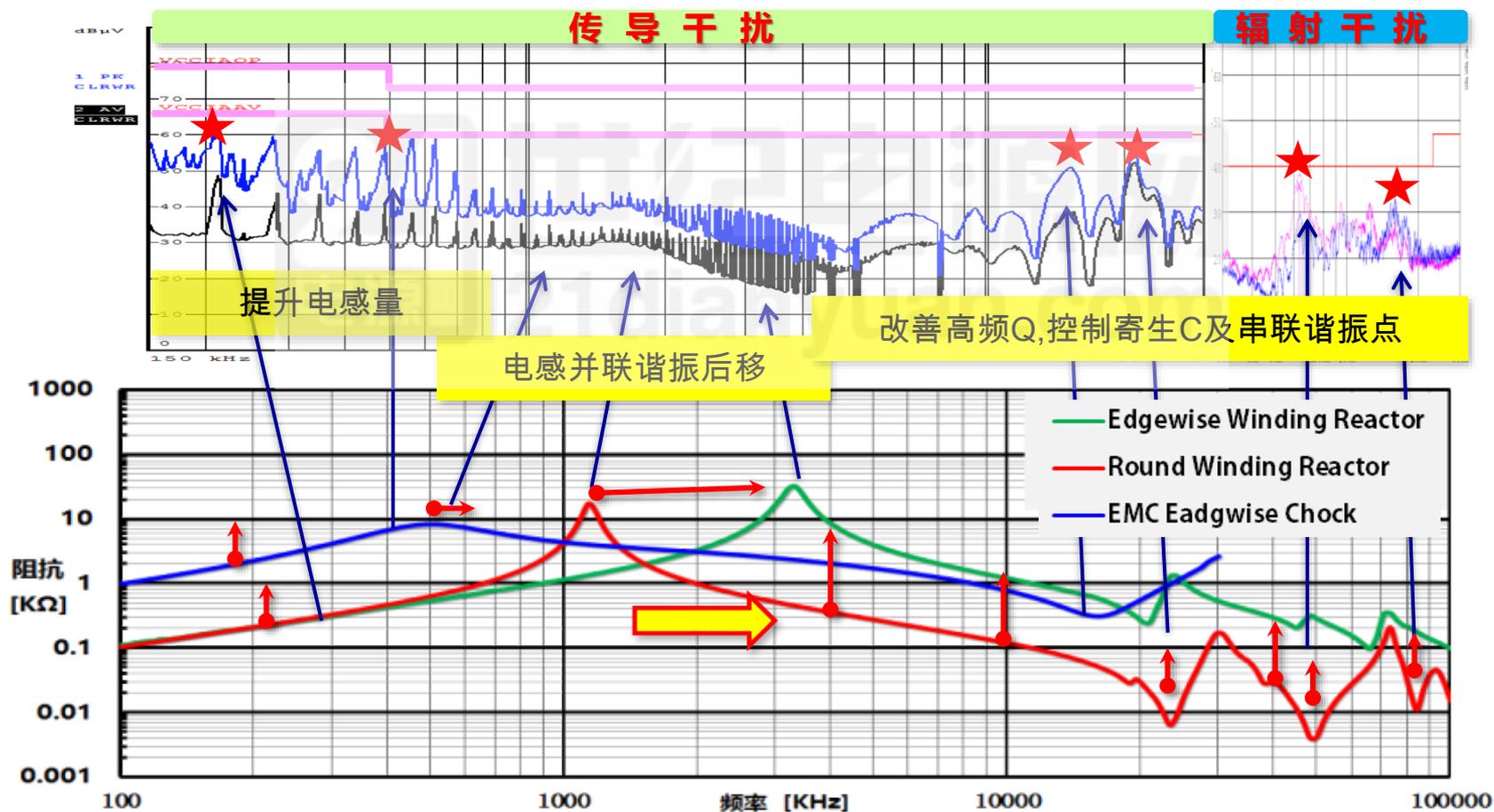


充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

EMI滤波电感电气性能指标

● 滤波电感电气指标与EMI效果影响

电感阻抗特性与EMC兼容性

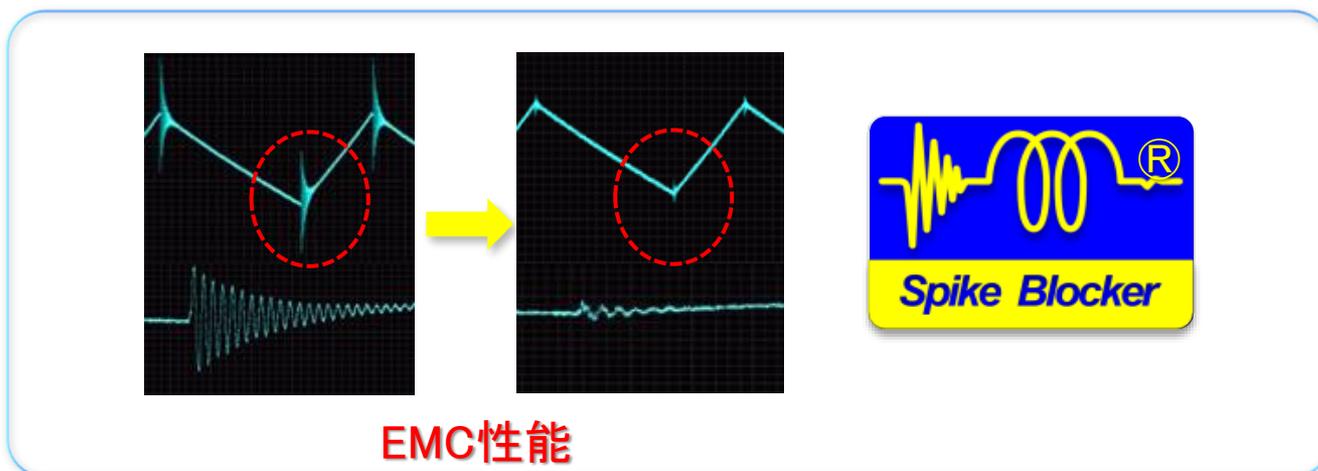


充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

高频电感的电气性能指标

● 高频电感的电气性能指标

- ◆ 电感电流特性 $L-I$ $L-I @0A, I_{rating}, I_{sat}$ 纹波控制
- ◆ 电感阻抗特性 $Z-f$ $@100KHz \sim 30MHz$
- ◆ 最低谐振频率 f_{SRF} $\geq 1MHz$ or Higher } EMC控制
- ◆ DCR & Q
- ◆ 总体损耗 P_{Loss} $P_{coil} + P_{core}$ } 损耗设计

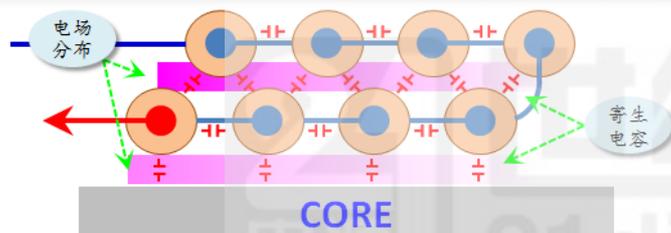


充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

高频电感的电气性能指标

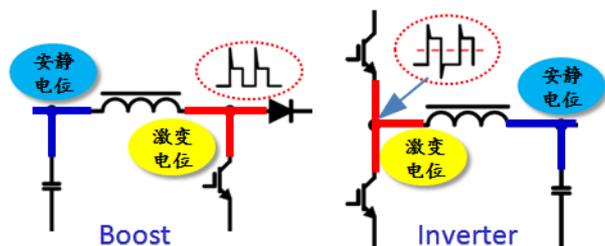
● 高频电感的电气性能指标

电感的EMC电磁兼容问题（机理）



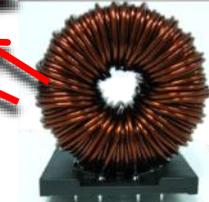
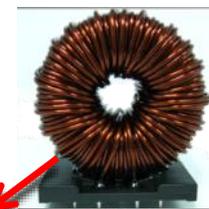
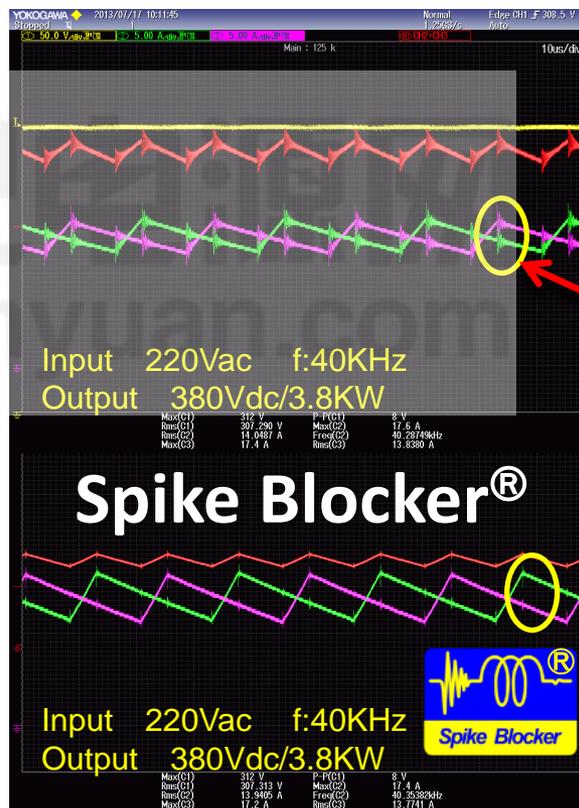
Parasitic capacitor construction

绕线间存在大量复杂的分布电容和漏感



电感两端始终存在高 dV/dt 对电容高频充放电

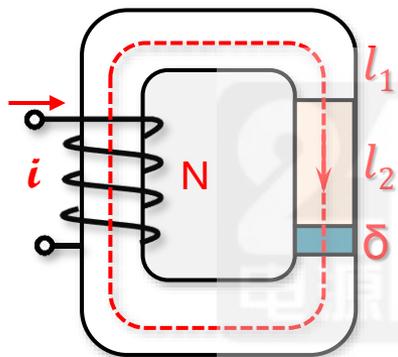
电感的复杂的LCR网络产生1MHz以上频谱丰富的高频振荡电流能量，电感成为**大能量EMI干扰源!**



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

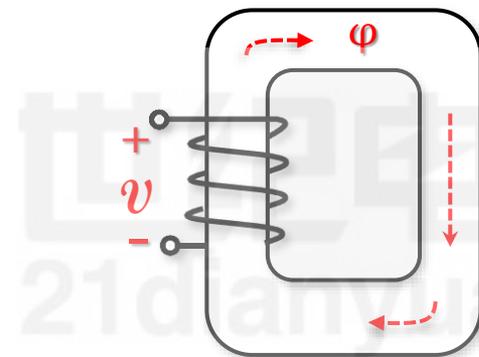
磁元件技术理论基础

◆ 磁路、磁通密度、磁感应强度、电感、变压器定义及基本模型



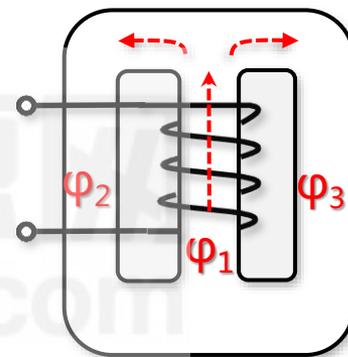
安培环路定律

$$i \cdot N = H \cdot l_e = \mathcal{U}_m$$



法拉第电磁感应定律

$$v = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = N \cdot A_e \cdot \frac{dB}{dt}$$



磁通连续性定律

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_3$$



磁路欧姆定律

定义 $\phi = B \cdot A_e$ $B = \mu \cdot H = \mu_0 \mu_r H$

$$\mathcal{U}_m = H \cdot l_e = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \cdot l_e = \phi \cdot \left(\frac{l_e}{\mu_0 \mu_r A_e} \right) \leftarrow \text{磁阻 } \mathcal{R}$$

$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta = \Phi_1 R_{m1} + \Phi_2 R_{m2} + \Phi_\delta R_{m\delta}$$

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

磁设计基本理论

◆ 磁路、磁通密度、磁感应强度、电感、变压器定义及基本模型

安培环路定律

$$\mathcal{U}_m = i \cdot N$$

磁路欧姆定律

$$\mathcal{U}_m = \varphi \cdot \frac{l_e}{\mu_0 \mu_r A_e} = \varphi \cdot \mathcal{R}$$

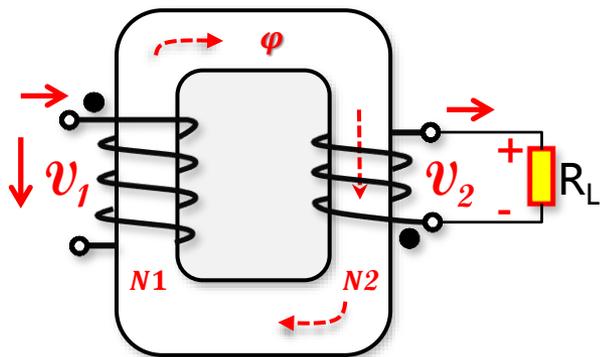
磁阻

$$\Rightarrow \varphi = i \cdot N / \mathcal{R}$$

电感定义

$$L = \frac{N\varphi}{i} = N^2 \cdot 1/\mathcal{R} = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu_r A_e}{l_e}$$

AL



理想变压器

$$v_1 = N_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad v_2 = N_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

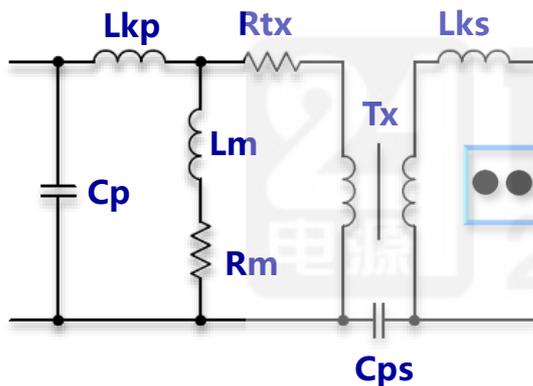
$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = \varphi \cdot \mathcal{R} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1}$$

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

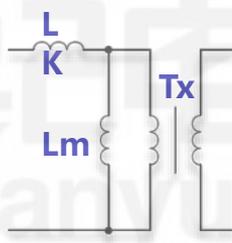
磁设计基本理论

◆ 磁路、磁通密度、磁感应强度、变压器定义及基本模型

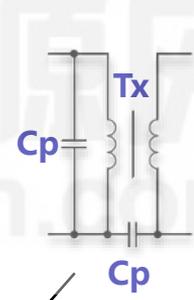
变压器模型例



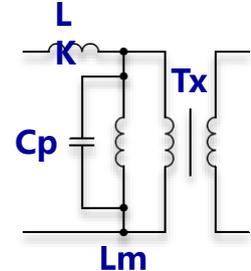
电气设计简化模型



EMI分析简化

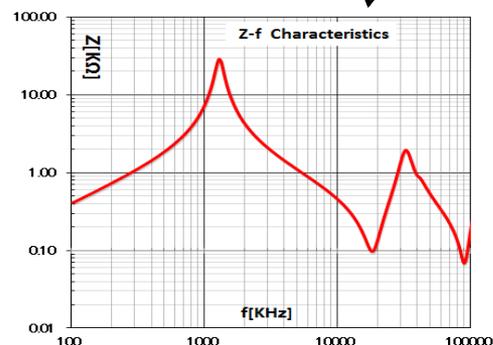
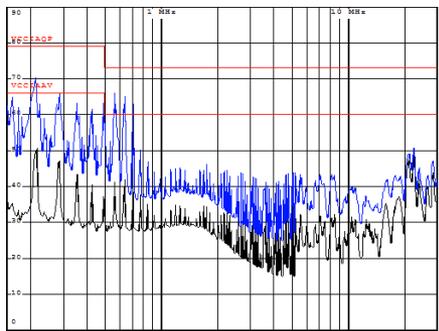


阻抗频谱分析



$$L = \frac{\mu_e \cdot \mu_0 \cdot N^2}{\sum \frac{1}{A}}$$

$$A_L = \frac{L}{N^2} = \frac{\mu_e \cdot \mu_0}{\sum \frac{1}{A}}$$



充电桩·EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

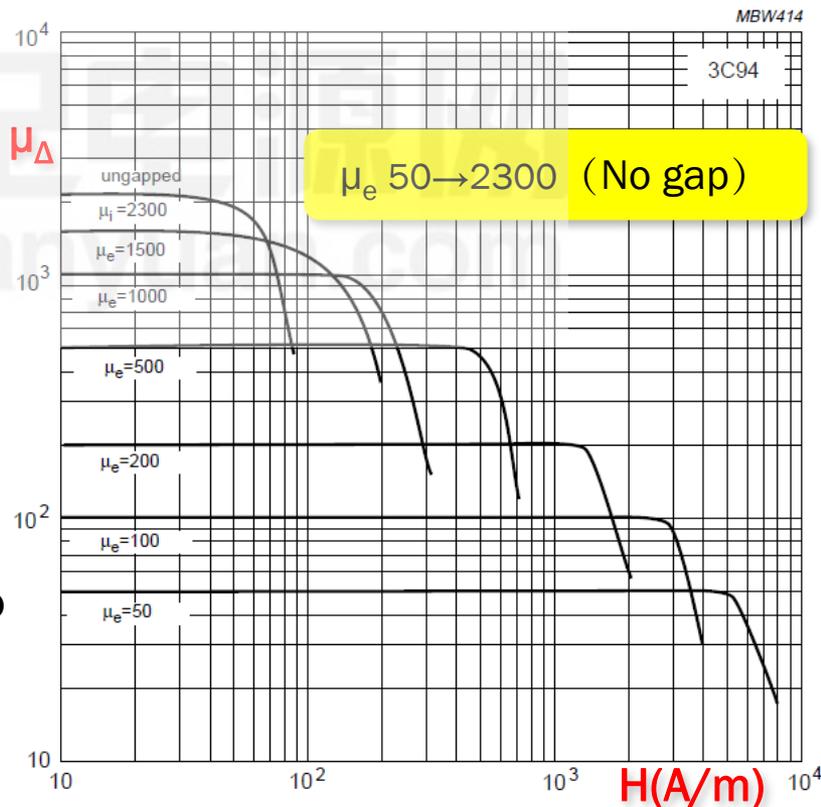
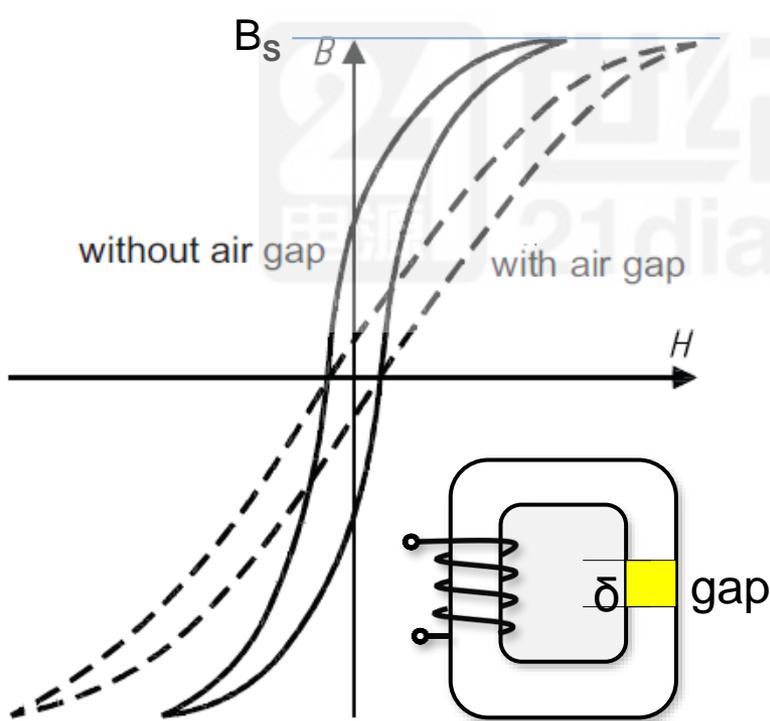
磁设计基本理论

◆ 磁元件的基本概念

【磁芯】BH特性、磁饱和、磁损耗、气隙、磁耦合和漏磁

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu_r A_e}{l_e} = \mathcal{N} A_e \cdot \frac{\mu_0 \mu_r \cdot N}{l_e}$$

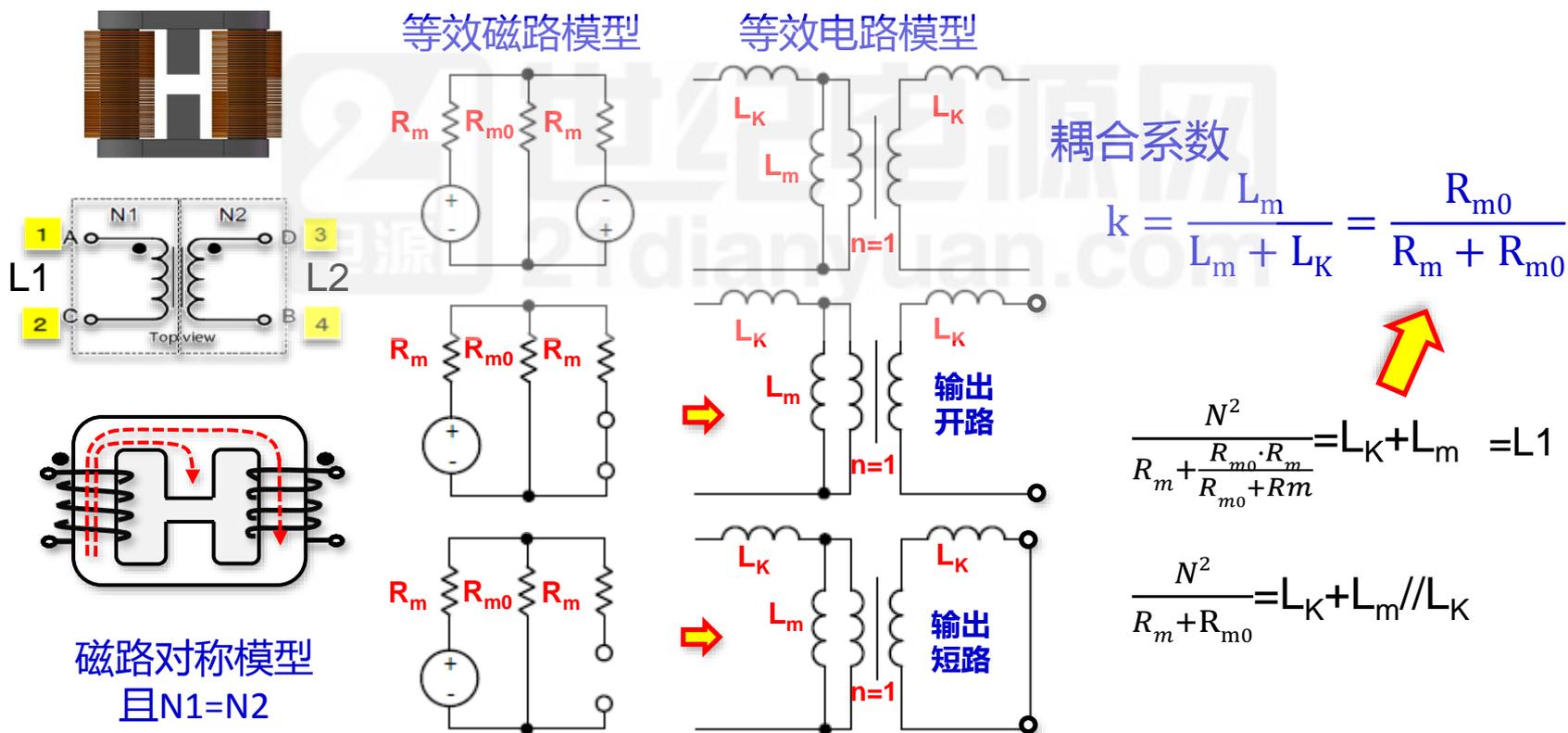
$$H = \frac{NI}{l_e}$$



磁设计基本理论

◆ 磁元件的基本概念

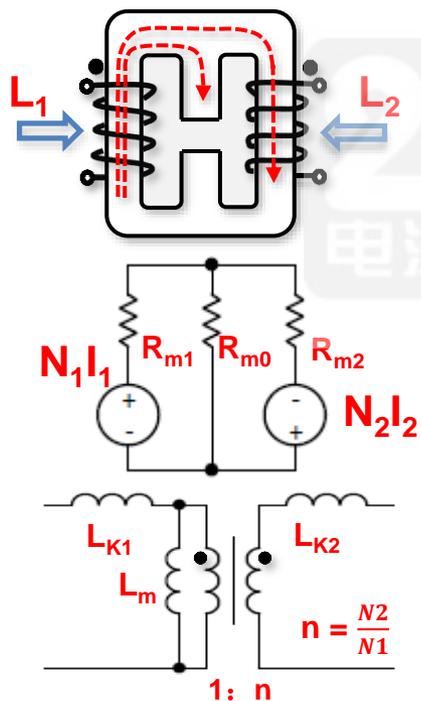
【磁芯】BH特性、磁饱和、磁损耗、气隙、磁耦合和漏磁



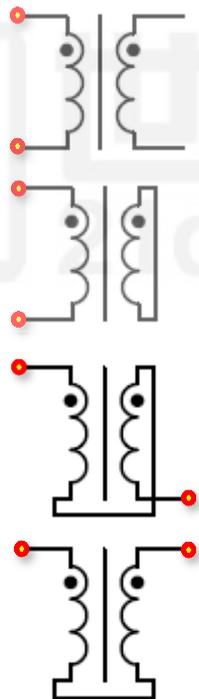
磁设计基本理论

◆ 磁元件的基本概念

【磁芯】BH特性、磁饱和、磁损耗、气隙、磁耦合和漏磁



任意磁路、 $N_1 \neq N_2$



测量方法

$$L_1 = L_{K1} + L_m$$

$$L_2 = L_{K2} + n^2 L_m$$

$$L_{s1} = L_{K1} + L_m // \left(\frac{L_{K2}}{n^2} \right)$$

$$L_{s2} = L_{K2} + (L_{K1} // L_m) \cdot n^2$$

$$L_F = L_1 + L_2 + (1 + n^2) L_m$$

$$L_R = L_1 + L_2 - (1 + n^2) L_m$$

耦合系数

$$k_1 = \frac{L_m}{L_1}$$

$$k_2 = \frac{n^2 \cdot L_m}{L_2}$$

磁设计基本理论

◆ 磁元件的基本概念

【线圈】

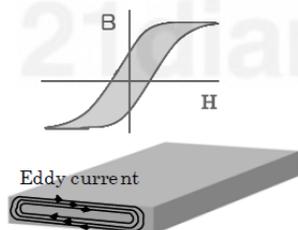
直流损耗、趋肤效应、临近效应、涡流损耗、阻抗特性、寄生电容、耦合系数

① P_{core}

磁滞损耗

涡流损耗

残留损耗



$$P_V(f) \sim f^{(1+x)} \quad 0 \leq x \leq 1$$

$$P_V(B) \sim B^{(2+y)} \quad 0 \leq y \leq 1$$

② P_{coil}

LF: 直流损耗、

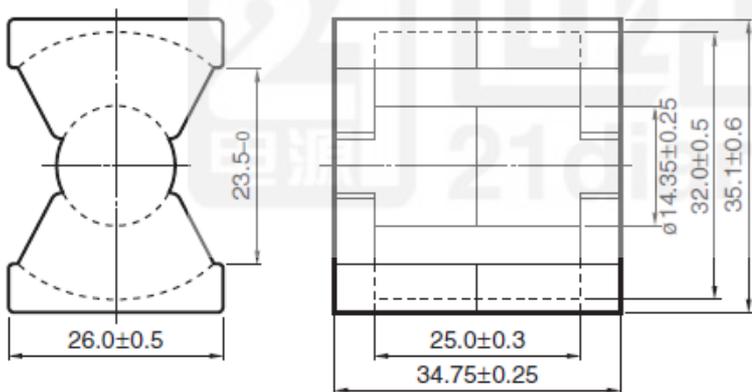
HF: 涡流损耗、趋肤效应、临近效应

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

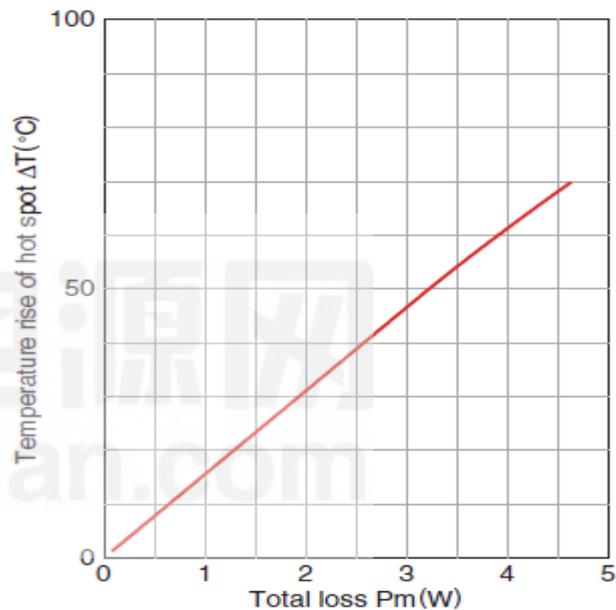
磁设计基本理论

◆ 磁元件的基本概念

【元件】 温升、热阻

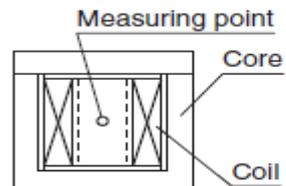


温度上升 vs. 总损耗特性 (Typ.)



测定条件

- 室内空间: 大体 400x300x 300cm
- 环境温度: 25 $^{\circ}\text{C}$
- 湿度: 45(%)RH.

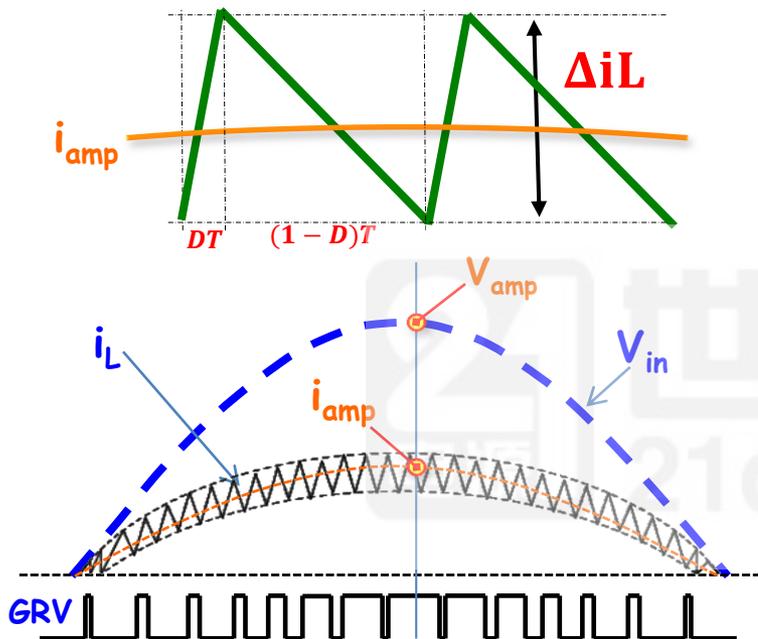


大功率磁元件设计计算实例

- CCM交错并联PFC电感的计算
- 谐振电感的设计计算实例
- 高功率密度主变压器的设计实例

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

● CCM模式PFC电感的设计计算



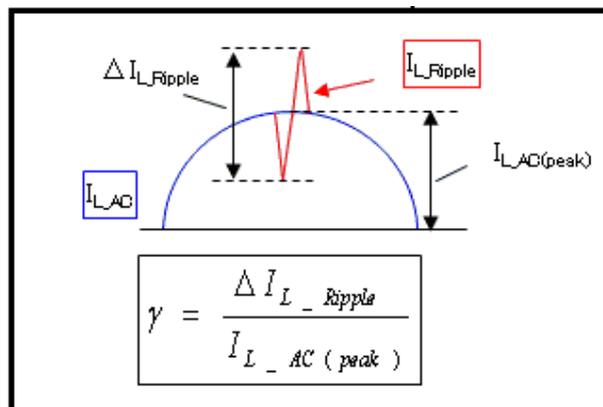
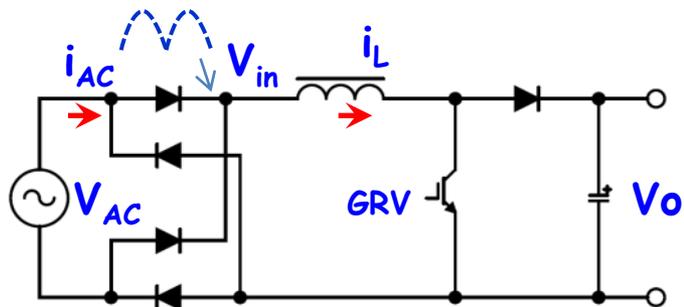
$$i_{amp} = \frac{\sqrt{2}}{V_{AC}} \cdot \frac{P_o}{\eta \cdot PF} \quad V_{amp} = \sqrt{2} \cdot V_{AC}$$

$$V_{amp} \cdot D = (V_o - V_{amp}) \cdot (1 - D) \Rightarrow D$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{amp}}{L} \cdot DT$$

$$\gamma = \frac{\Delta i_L}{i_{amp}} \quad (EMC) \Rightarrow L, \Delta i_L$$

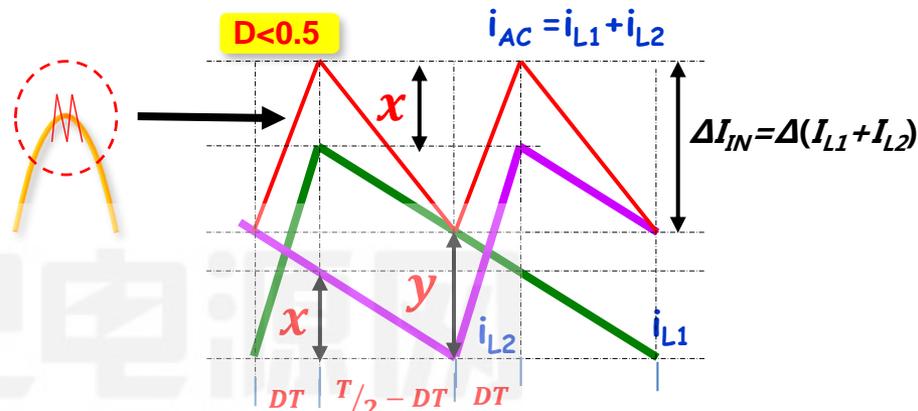
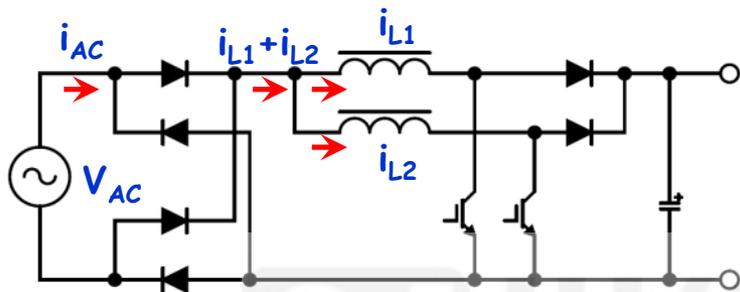
$$i_{L_rms} = \sqrt{i_{amp}^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12}} \Rightarrow i_{Lpk}, DCR, PDCR$$



- ↓
- L@I_pk**
- I_pk**
- I_L_rms**

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

● CCM Interleave PFC电感的设计计算



$D < 0.5$

$$\begin{aligned} \Delta I_{L1+L2} &= \frac{V_{in}}{L} \cdot DT + \frac{V_{in}}{L} \cdot DT - \frac{V_o - V_{in}}{L} \cdot \frac{1}{2} \\ &\quad - \left(\frac{V_{in}}{L} \cdot DT - \frac{V_o - V_{in}}{L} \cdot \left(\frac{1}{2} - D \right) T \right) \end{aligned}$$

同理

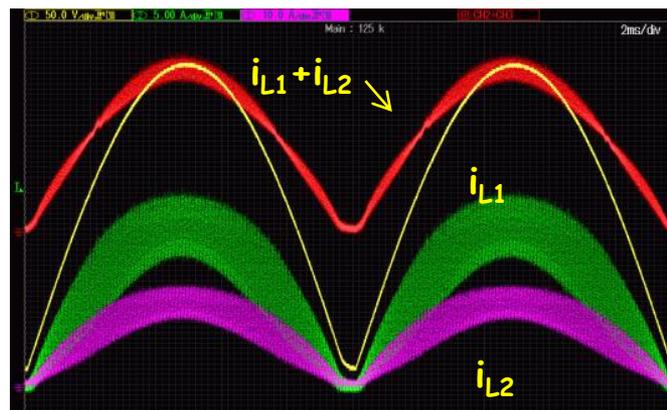
$D > 0.5$

$$\Delta I_{L1+L2} = \frac{2V_{in} - V_o}{L} \cdot DT$$

交错并联电感电流纹波叠加

其中

V_{in} 交流输入工频峰值电压、
 V_o PFC直流输出电压
 L 单个PFC电感感量



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

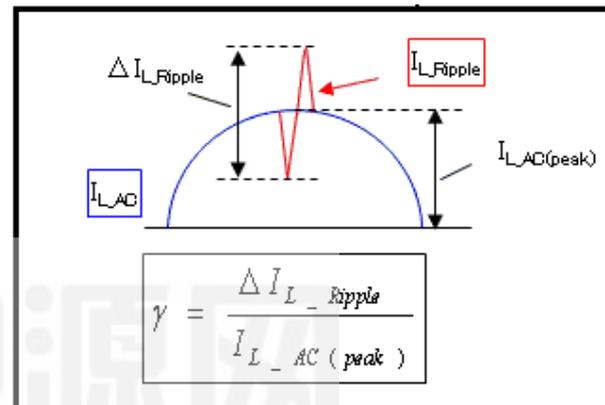
交错式PFC电感值计算 (2.8KW PFC实例)

- 传导EMI低频段影响
- 滤波电容高频耐力
- 主电路开关应力损耗

例： $\gamma \leq 15\%$



180uH @11A
6.5A.rms



Vinac-nom	Vbus-nom	fsw1
220 Vac	418 Vdc	110KHz
Vo-nom	Io-nom	η
54.5 V	50.0 A	97%

CCM Interleave PFC Tools

Discription	Variable Names	Vin min.		Vin nom		Vin max
Input rms Voltage	V_in_rms	176 V	200 V	220 V	240 V	264 V
Output Voltage	V _{OUT}	418 V	418 V	418 V	418 V	418 V
Output max Power	P _{out(max)}	2725 W	2725 W	2725 W	2725 W	2725 W
PFC Efficiency	η	95.4%	96.1%	97.0%	97.8%	98.8%
Reactor Induct	L1,L2(assume)	180 uH	180 uH	180 uH	180 uH	180 uH
Fixed Frequency	Frequency	110 KHz	110 KHz	110 KHz	110 KHz	110 KHz
Input Sine PK Current	I _{in_ac_pk}	23.0 A	20.0 A	18.1 A	16.4 A	14.8 A
Duty at Sine PK	Duty _{sin_pk}	40.5%	32.3%	25.6%	18.8%	10.7%
Max Current at sine PK of L1	I _{max(L1,L2)_sin_pk}	14.0 A	12.3 A	11.0 A	9.8 A	8.4 A
RMS current of each reactor	I _{rms(L1,L2)}	8.2 A	7.2 A	6.5 A	5.9 A	5.3 A
Input current ripple (I _{L1} +I _{L2})	$\Delta I(in)_pk$	1.63	2.41	2.64	2.48	1.77
Boost Inductor Ripple/AC Current(pk-pk)	γ	7.1%	12.0%	14.6%	15.1%	12.0%

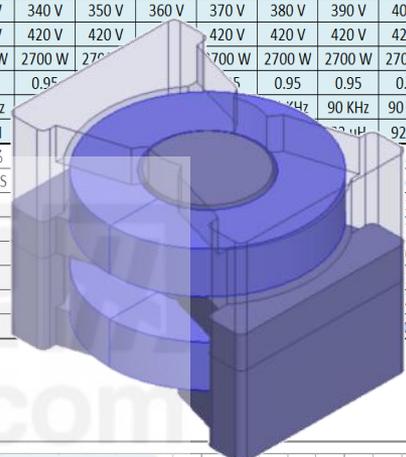
充电桩·EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

EV/HEV交错式Boost电感计算 200~420V/2.7KW@90KHz

Interleave Boost Calculation Tools for EV-HEV DC/DC V1.0 20160720

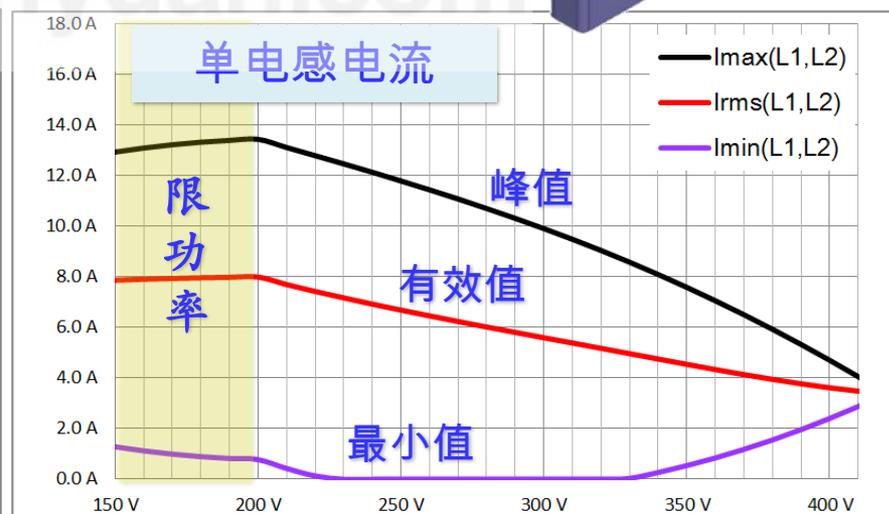
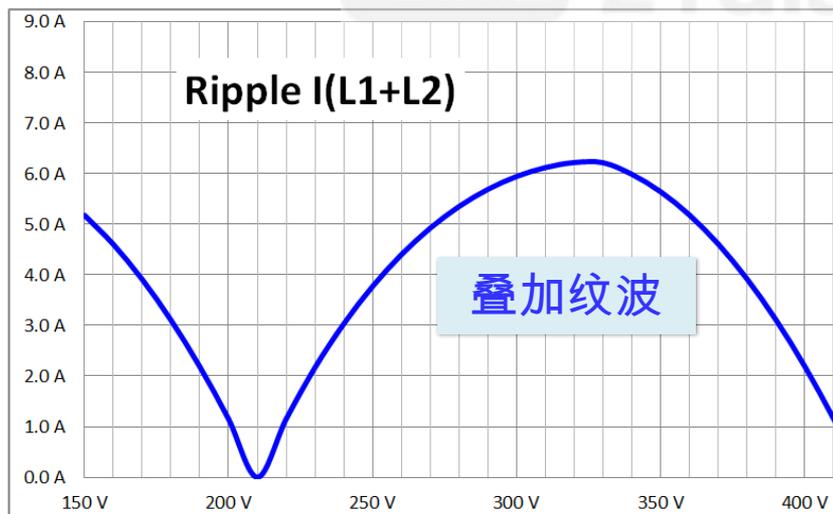
Vin	150 V	160 V	170 V	180 V	190 V	200 V	210 V	220 V	230 V	240 V	250 V	260 V	270 V	280 V	290 V	300 V	310 V	320 V	330 V	340 V	350 V	360 V	370 V	380 V	390 V	400 V	410 V	420 V	
Vo	420 V	420 V	420 V	420 V	420 V	420 V	420 V	420 V	420 V	420 V																			
Po	2025 W	2160 W	2295 W	2430 W	2565 W	2700 W	2700 W	2700 W	2700 W	2700 W	2700 W	2700 W	2700 W	2700 W															
η	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	
f	90 KHz	90 KHz	90 KHz	90 KHz	90 KHz	90 KHz	90 KHz	90 KHz	90 KHz	90 KHz																			
L	92 uH	92 uH	92 uH	92 uH	92 uH	92 uH	92 uH	92 uH	92 uH	92 uH																			
Duty	64.3%	61.9%	59.5%	57.1%	54.8%	52.4%	50.0%	47.6%	44.9%	41.8%	39.0%	36.4%	34.0%	31.6%	29.4%	27.3%	25.3%	23.4%	21.4%										
Ton	7.14 uS	6.88 uS	6.61 uS	6.35 uS	6.08 uS	5.82 uS	5.56 uS	5.29 uS	4.98 uS	4.65 uS	4.34 uS	4.05 uS	3.77 uS	3.51 uS	3.27 uS	3.04 uS	2.81 uS	2.60 uS	2.38 uS										
ΔI(L1,L2)	11.6 A	12.0 A	12.2 A	12.4 A	12.6 A	12.7 A	12.7 A	12.7 A	12.5 A	12.1 A	11.8 A	11.4 A	11.1 A	10.7 A	10.3 A	9.9 A	9.5 A	9.0 A	8.5 A										
I _{max} (L1,L2)	12.9 A	13.1 A	13.2 A	13.3 A	13.4 A	13.4 A	13.1 A	12.8 A	12.5 A	12.1 A	11.8 A	11.4 A	11.1 A	10.7 A	10.3 A	9.9 A	9.5 A	9.0 A	8.6 A										
I _{rms} (L1,L2)	7.9 A	7.9 A	7.9 A	8.0 A	8.0 A	8.0 A	7.7 A	7.4 A	7.2 A	6.9 A	6.7 A	6.5 A	6.2 A	6.0 A	5.8 A	5.6 A	5.4 A	5.2 A	5.0 A										
ΔI(L1+L2)	5.2 A	4.6 A	3.9 A	3.1 A	2.2 A	1.2 A	0.0 A	1.2 A	2.2 A	3.0 A	3.8 A	4.4 A	4.9 A	5.3 A	5.7 A	5.9 A	6.1 A	6.2 A	6.2 A										
I _{min} (L1,L2)	1.3 A	1.1 A	1.0 A	0.9 A	0.8 A	0.8 A	0.4 A	0.1 A	0.0 A																				
D/CCM	CCM	DCM	CCM																										

磁集成双电感



限功率区域

电流不连续区域



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

FB-ZVS谐振电感设计计算

谐振电感电感量确定

MOS Coss能量

续流能量损失
轻载条件(例20%负载)

谐振感量L

 **infineon** IPW60R099C7
600V CoolMOS™ C7 Power Transistor

Eoss@400V 4.95 μJ



续流时原边电流 $I_{P_F.W}$

$$I_{P_F.W} = I_{P2} - \Delta I_m = 11.25A$$

$$P_{mos} = E_{oss} \cdot f_{sw} \cdot \left(\frac{V_{bus\ nom}}{400}\right)^2 \cdot 2 = 1.2 W$$

20%负载时谐振电感能量

$$P_{L_resonant} = \frac{1}{2} \cdot L_{resonant} \cdot I_{P_F.W}^2 \cdot f_{sw} = 0.84 W \quad (@ 3\mu H)$$

MOS Coss电容器残留能量 $< \frac{1}{3}$ 相当于Vds剩余20%的电压，由此断定：3uH 足够

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

FB-ZVS谐振电感设计计算

谐振电感电感设计 3uH , 7Arms , 35Ap-p 150%过载

PC95PQ20/20Z-12

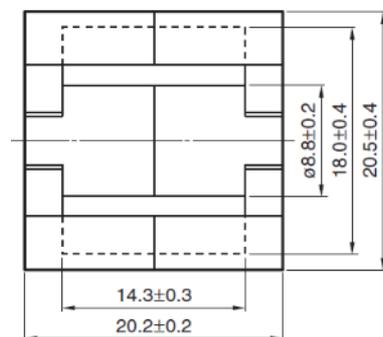
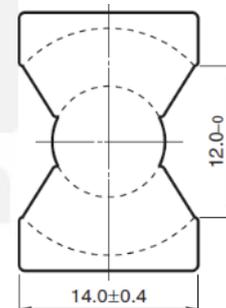
$$N|_{20\%} = 23708 \times AL^{-1.0232}$$

$$AL = 103.22 \times I_g^{-0.7272}$$

$$N = \left(\frac{23708 \cdot L_{resonant}^{-1.0232}}{I_{P2} \cdot 150\%} \right)^{\frac{1}{1-2 \cdot 1.0232}} = 9.6T \rightarrow 10T$$

$$P_{loss} = P_{CORE} + P_{COIL} = 0.09 + 0.22 = 0.31W$$

$$\Delta T = 11K$$

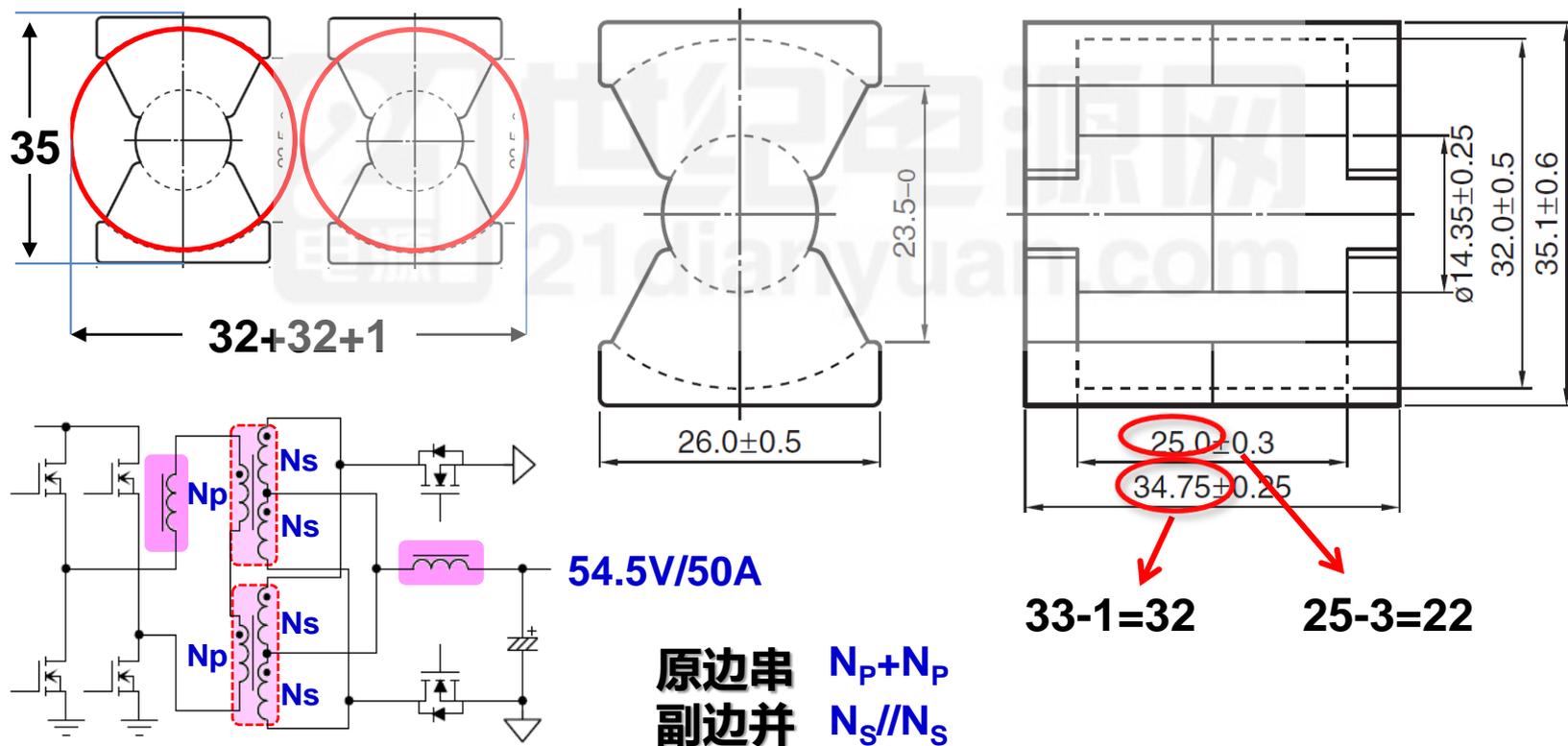


Ae	Ve	Acw	Rt	Ires.P-P	fsw	IP-rms
62	2790	65.8	35 K/W	23.2A	110 KHz	7 A
L _{resonant}	I _{pp_max}	N	real N	AL	gap	ΔB/2
3 uH	35 A	9.6 T	10 T	30 nH/N ²	5.5 mm	0.056 T
real Acw/T	Cu-Ae	Length/T	DCR	Pcoil	Pcv	Pcore
4.61 mm ²	2.30 mm ²	45.6 mm	4.5 mΩ	0.22 W	33 KW/m ³	0.09 W
					ΔT	11 K

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

主变压器设计计算 (3KW AC/DC电源)

电源尺寸要求：1U，变压器空间要求：65mm*36m*33m

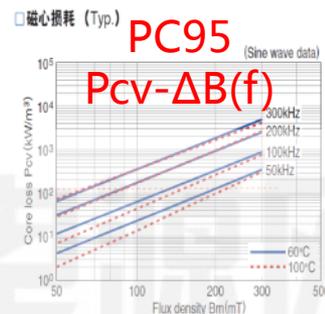


充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

主变压器设计计算 (3KW AC/DC电源)

$$n = 2N_p:N_s = \frac{V_{bus_min} \cdot D_{max}}{V_{o_max} + V_d} = 5.11$$

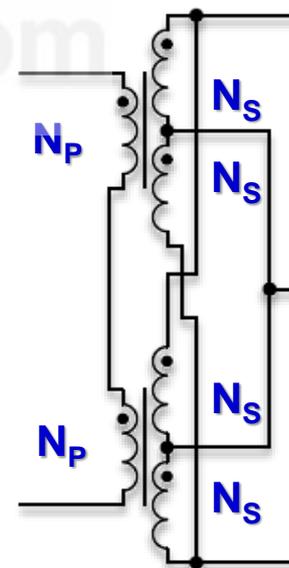
$$N_p = \frac{V_{in_min} \cdot T_{on_max}}{2 \cdot \Delta B \cdot A_e} = 13.91$$



温度上升 vs. 总损耗特性 (Typ.)



PC95-PQ3532 (35)			Winding Window	
Ve	Ae	AL	Width	Height
17300	196	7320	10.4	22
Rt	Tmax	Ta-max	ΔT →	Pmax-PQ35
15K/W	110°C	55°C	55K	3.67W
→ Pcore		→ Pcv	→ ΔB	→ Np
50%	1.83W	106 KW/m ³	0.248T	13.91
real Np	← Np ←	Ns ←		n ↓
15 T	15.3	6 T	← 5.4	5.1



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

主变压器设计计算 (3KW AC/DC电源)

$$real. P_{core} = 1.71W$$

strap length I_{rms}
 strap area \rightarrow DCR \rightarrow P_{DCR}
 $P_{Cu(100^\circ C)}$

$$D_{pen} = \sqrt{\rho / (\pi \mu_0 \mu_r f_{sw}^2)} = 0.229mm$$

$$Q = \text{Layer Thickness} / D_{pen}$$

$$Q_p = 0.20 / 0.229 = 0.87$$

$$Q_s = 0.25 / 0.229 = 1.09$$

$$R_{AC-P} = 1.24 R_{DC-P}$$

$$R_{AC-S} = 1.60 R_{DC-S}$$

$$P_{Coil-P} = 0.40 * (1 + 1.24) = 0.89$$

$$P_{Coil-S} = 0.61 * (1 + 1.60) = 1.60$$

$$P_{Total} = P_{CORE} + P_{COIL} = 1.71 + 2.49 = 4.2W$$

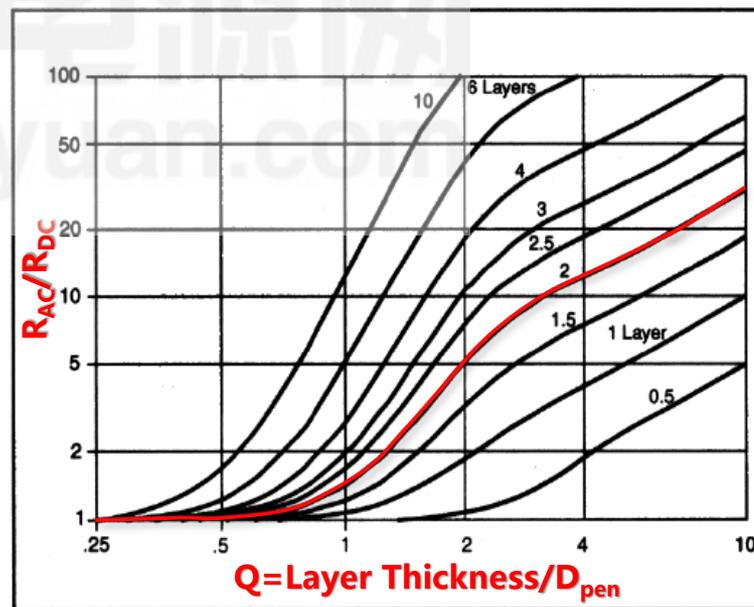


Figure. 3-5 Eddy Current Losses -- R_{AC}/R_{DC}

充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

主变压器设计计算 (3KW AC/DC电源)

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{CORE}} + P_{\text{COIL}} = 1.71 + 2.49 = 4.2\text{W}$$

$$P_{\text{CORE}} = 41\% P_{\text{total}}$$

$$P_{\text{COIL}} = 59\% P_{\text{total}}$$

$$\Delta T = 4.2 \times 15 = 63\text{K} \quad \text{自然冷却}$$

同样可分别假定： $P_{\text{CORE}}/P_{\text{Total}} = 40\%, 60\%$

假定	Results							
	N_p		N_s		P_{CORE}	P_{COIL}	P_{TOTAL}	ΔT
40%	18 T	0.15x8 2P	7 T	0.20x8 2P	2.30 W	2.03 W	4.33 W	65 K
50%	15 T	0.20x8 2P	6 T	0.25x8 2P	1.71 W	2.49 W	4.20 W	63 K
60%	12 T	0.20x8 3P	5 T	0.23x8 3P	1.02 W	2.82 W	3.84 W	58 K

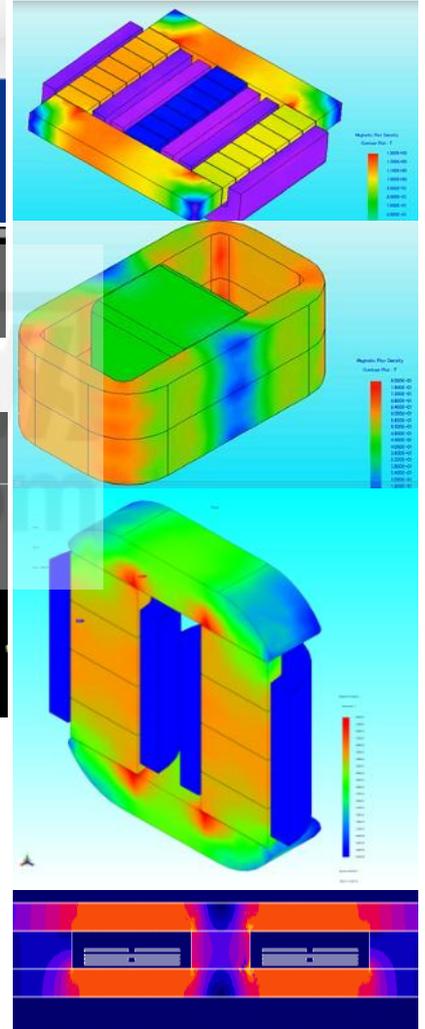
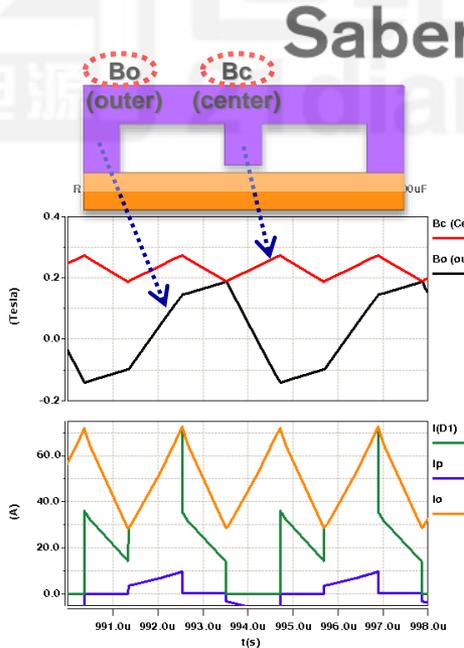
大功率磁元件最新技术前沿介绍

磁元件仿真技术介绍

常用磁仿真软件

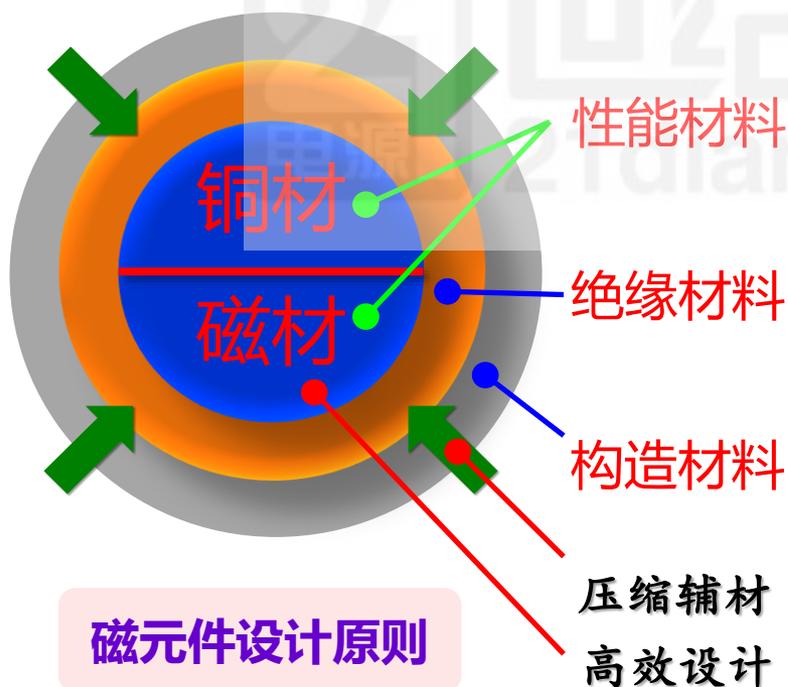
- ◆ Maxwell 2D 3D , PExprt
- ◆ JMAG
- ◆ FLUX
- ◆ Saber

- 资源要求
- 解析速度
- 建模效率
- 应用技巧
- 精度局限



改变世界的磁元件设计创新

世界最先端パワー磁気技術 Innovation & Creation



材料技术

- 材料改性
- 材料创新
- 工艺创新

根本

应用技术

- 高性能低损耗
- 高附加价值
- 简单化低成本
- 自动化设计

途径

自动化技术

- 高品质生产
- 高效率生产
- 快速成本摊销

手段

核心竞争力

突破
关键工艺瓶颈
关键质量瓶颈
关键成本瓶颈

改变世界的磁元件设计创新

Magnetics Technologies

**Integrated
Magnetics**

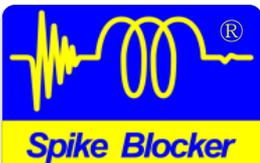
磁気複合技術
磁集成技术

**Hybrid
Technique**

ハイブリッド磁気技術
混合磁路技术

**L-I Trimming
Technique**

L-Iトリミング技術
L-I Trimming技术



低EMCノイズ技術
Spike Blocker技术

**Acoustic
Technique**

低騒音技術
静音技术

**Big Powder
Technique**

大型粉末コア技術
超大型磁粉芯技术

**Edgewise
Technique**

エッジワイズ設計
大功率立绕工艺



充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

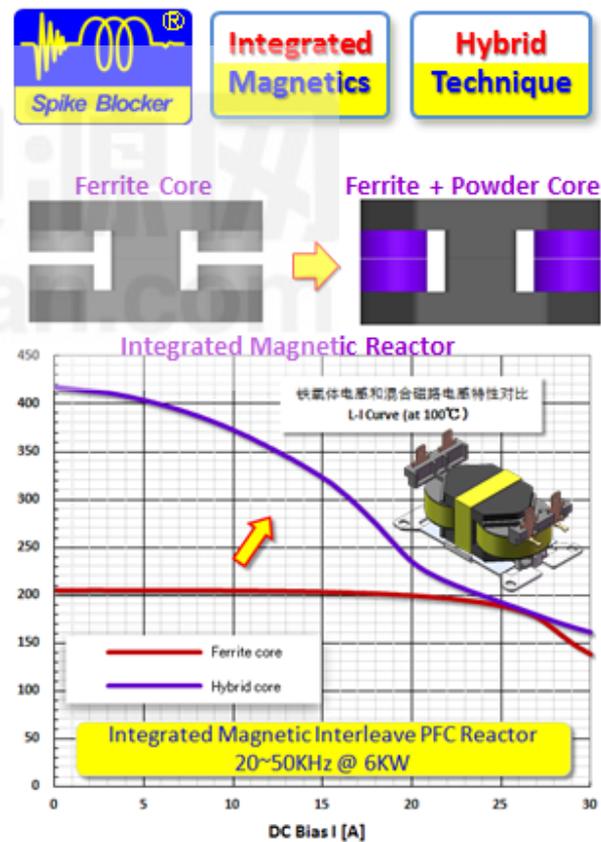
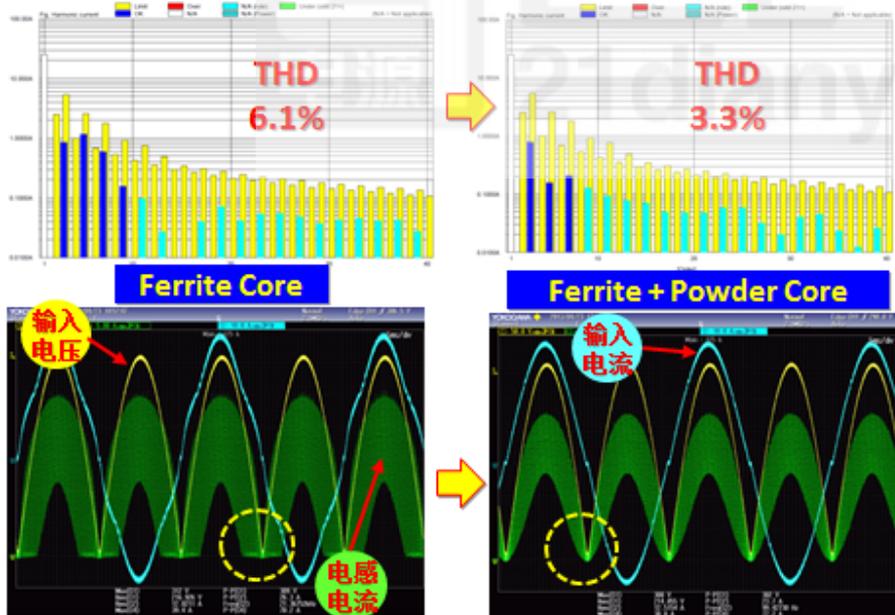
改变世界的磁元件设计创新

磁集成技术、混合磁路技术、L-I trimming技术、SpikeBlocker技术等

6KW混合磁路CCM PFC磁集成电感

高效率, 大容量, 低成本, 高功率密度, EMC优异

- 铁氧体与铁硅混合磁路
- 极少的漏磁提高功率密度
- L-I特性利于更低的THD
- 混合磁路提高电源效率

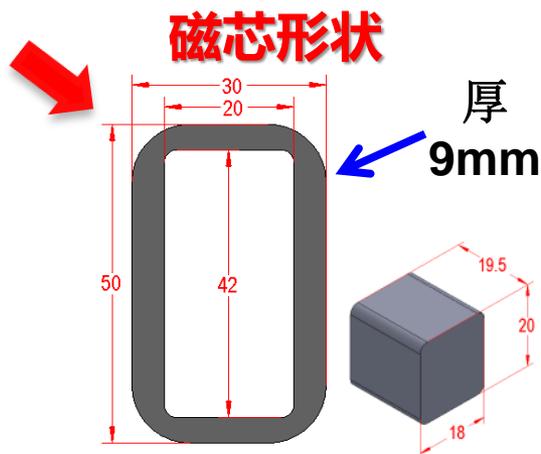
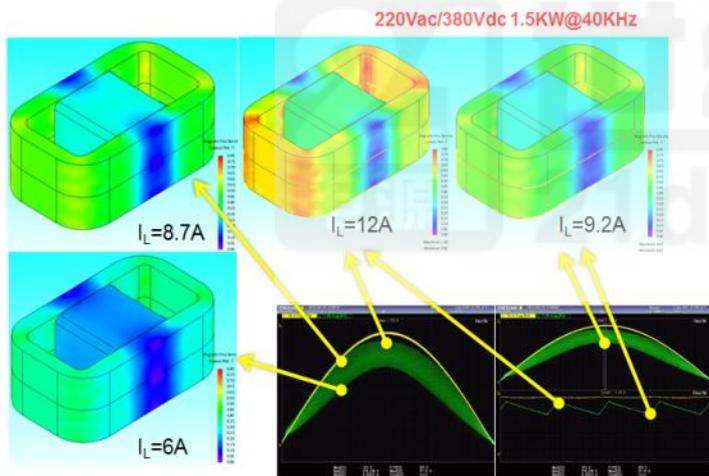


充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

改变世界的磁元件设计创新

磁集成技术、混合磁路技术、L-I trimming技术、SpikeBlocker技术等

最佳磁芯尺寸确定



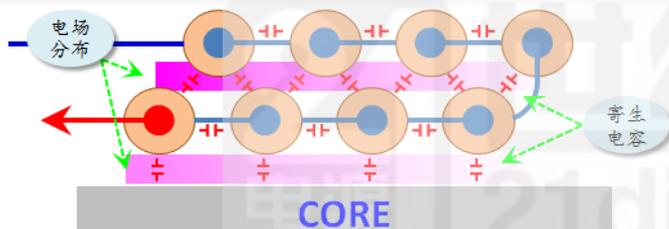
性能、可靠性、品质
量产性、成本竞争力
150s 一次性解决！

充电桩·EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

改变世界的磁元件设计创新

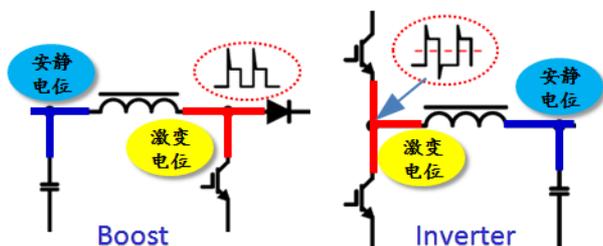
磁集成技术、混合磁路技术、L-I trimming技术、SpikeBlocker技术等

电感的EMC电磁兼容问题（机理）



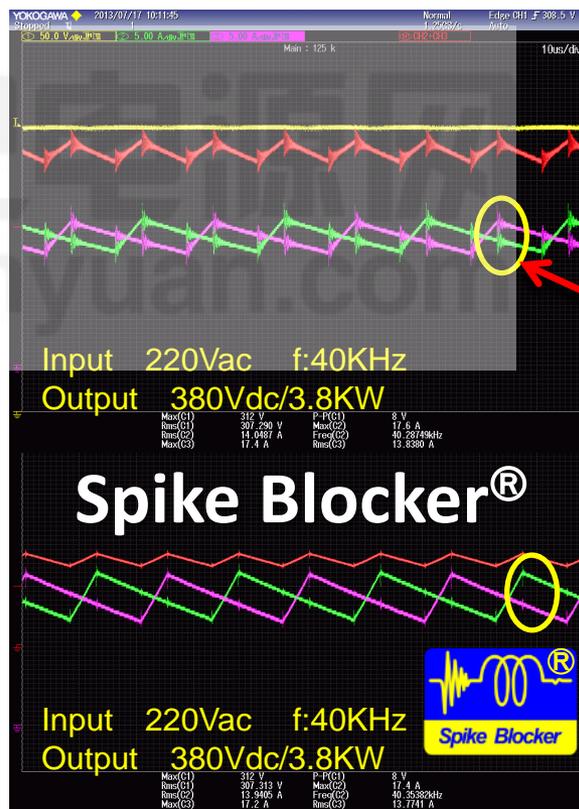
Parasitic capacitor construction

绕线间存在大量复杂的分布电容和漏感



电感两端始终存在高dV/dt对电容高频充放电

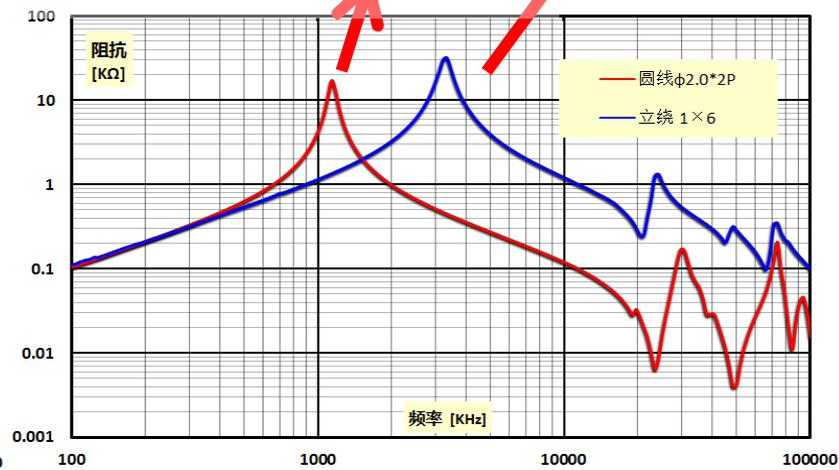
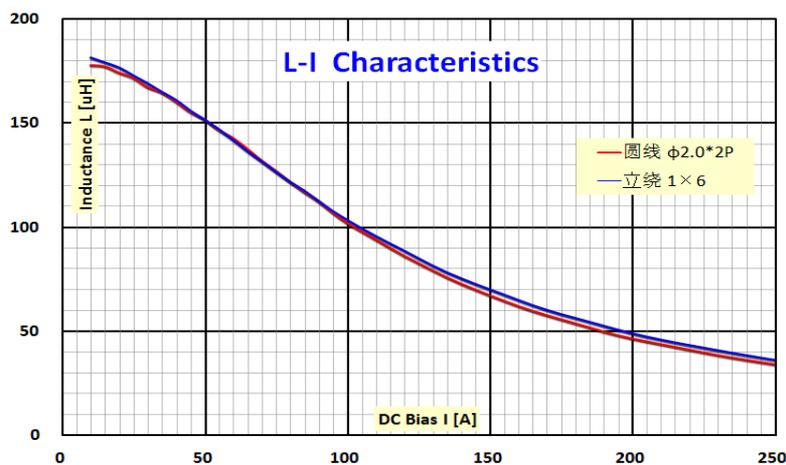
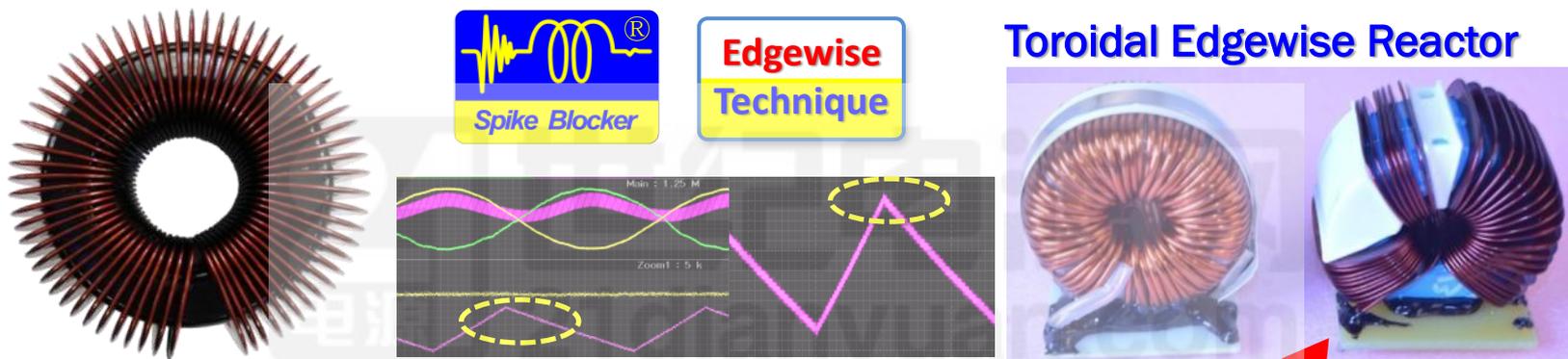
电感的复杂的LCR网络产生1MHz以上频谱丰富的高频振荡电流能量，电感成为**大能量EMI干扰源!**



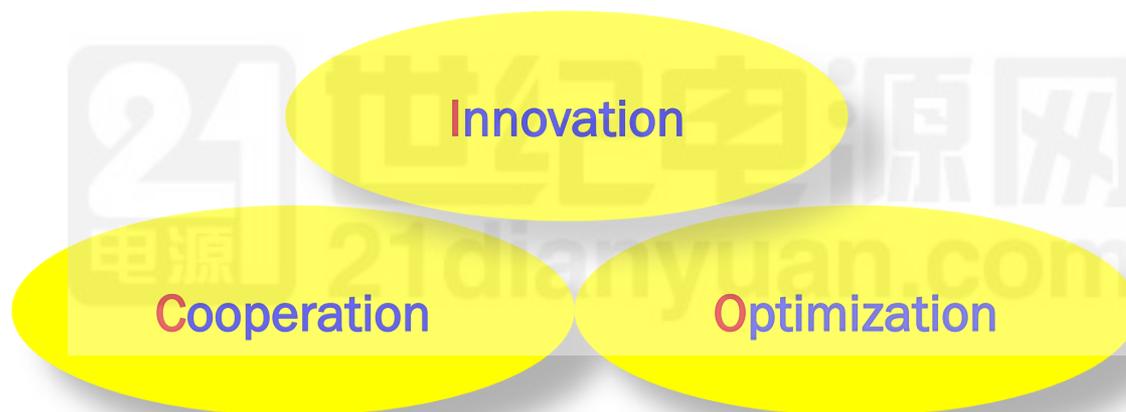
充电桩· EV/HEV电源及其磁元件技术设计培训

改变世界的磁元件设计创新

磁集成技术、混合磁路技术、L-I trimming技术、SpikeBlocker技术等



Change the World (Q&A)



Thank you !