



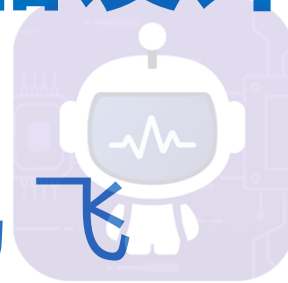
LLC谐振变换器设计与优化



电源网

DianYuan.com

廖 鸿 飞



电子星球

alex.liao@hotmail.com

顺德会议演讲稿

2021.03

2021.3 顺德



CONTENTS

1. LLC谐振变换的应用

2. LLC谐振变换器工作原理

3. LLC谐振变换器的关键参数

4. LLC谐振变换器的设计与优化

顺德会议演讲稿

2021.03



电源网

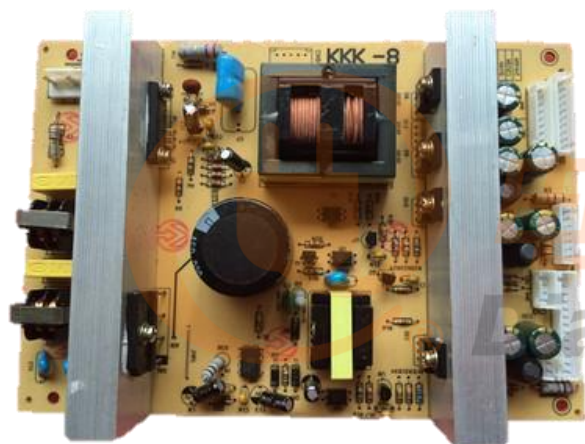
DianYuan.com



电子星球



LLC谐振变换器的应用



液晶电视电源



服务器电源



LED驱动电源



CONTENTS

1. LLC谐振变换的应用

2. LLC谐振变换器工作原理

3. LLC谐振变换器的关键参数

4. LLC谐振变换器的设计与优化

顺德会议演讲稿

2021.03



电源网

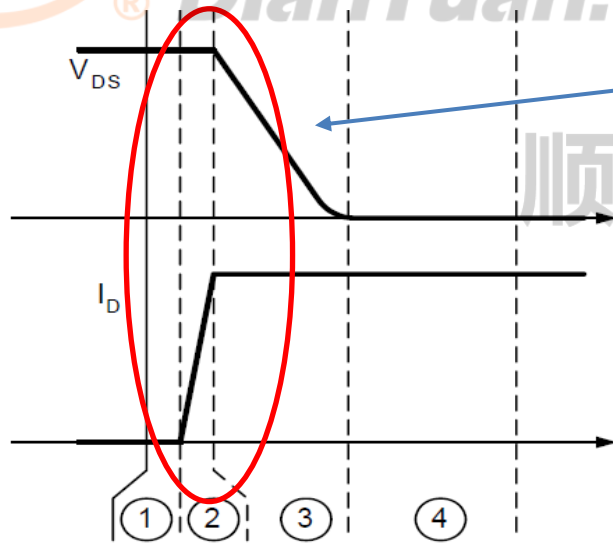
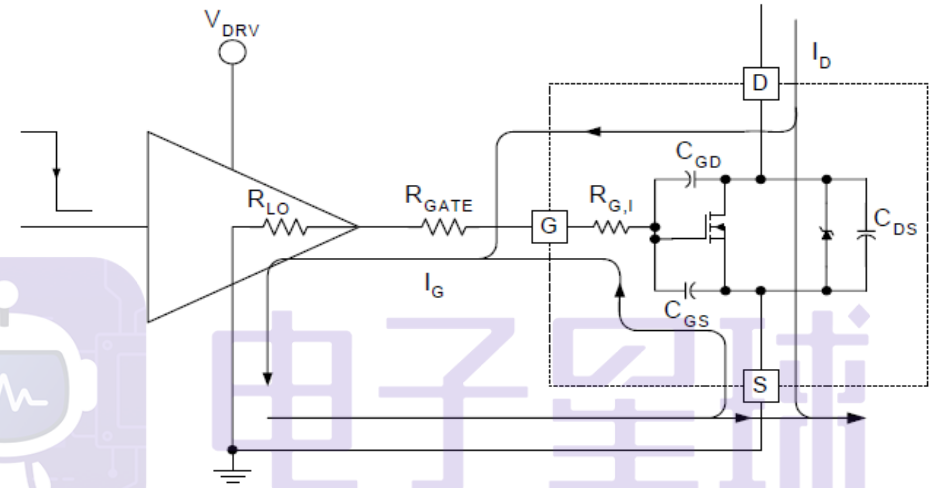
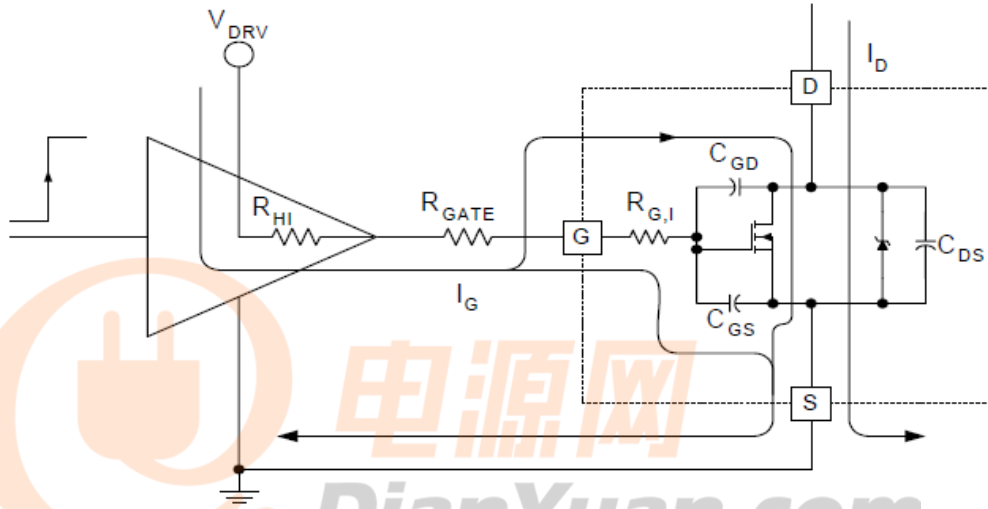
DianYuan.com



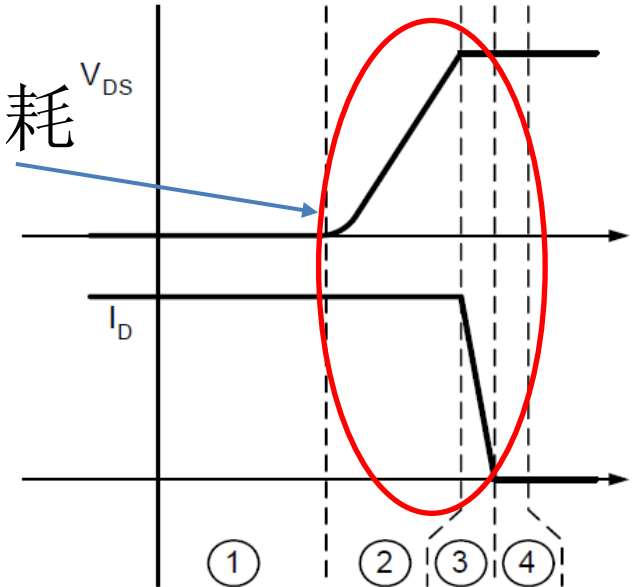
电子星球



开关损耗

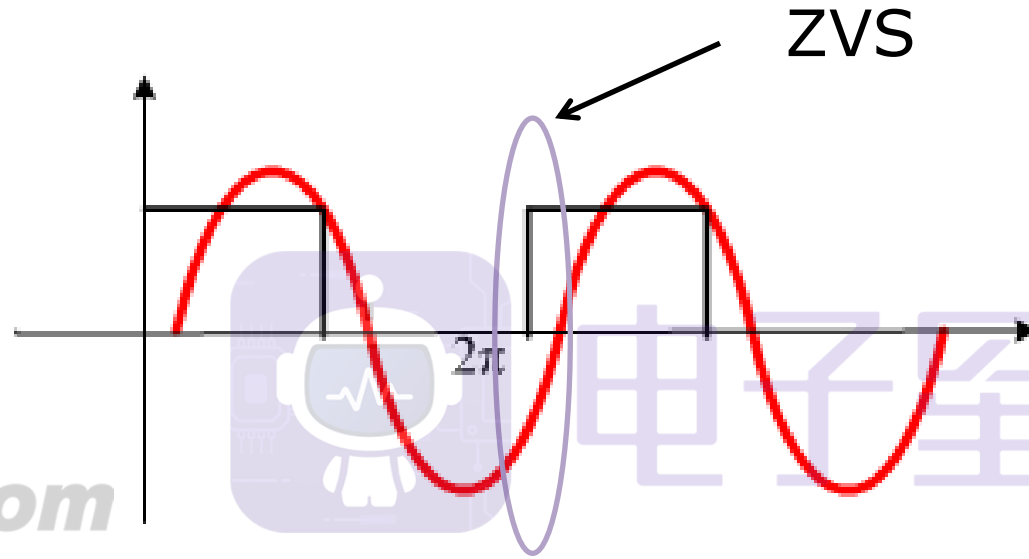
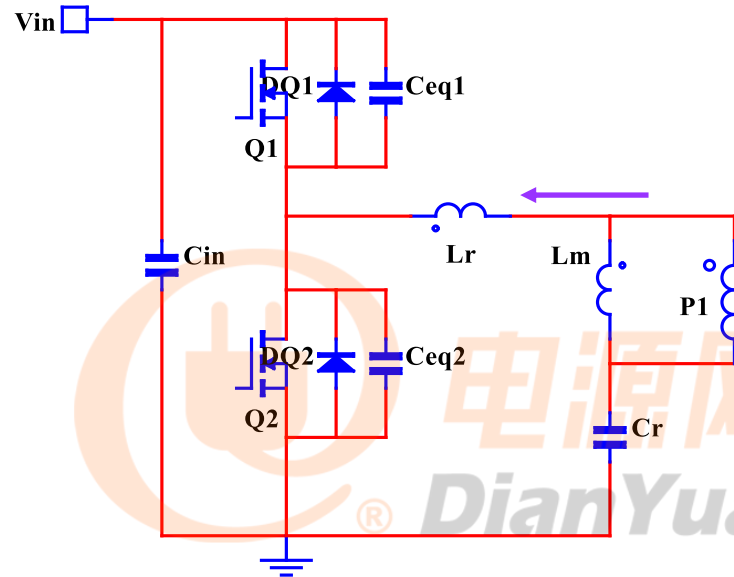


开通损耗 关断损耗





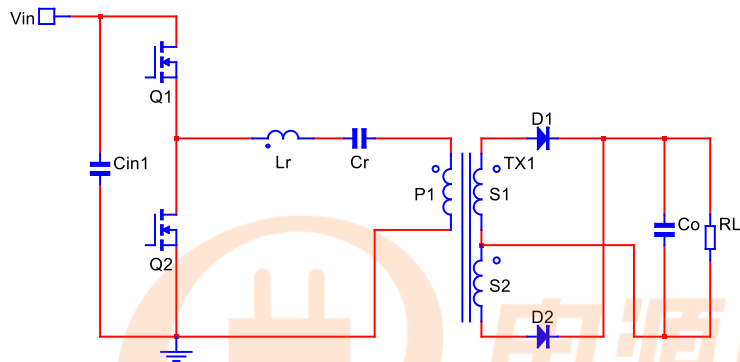
零电压谐振软开关的实现



通过改变开关频率，使谐振网络中电流滞后于电压，即谐振网络呈感性，使得开关管在开通前，其电压已下降到零，从而实现ZVS。

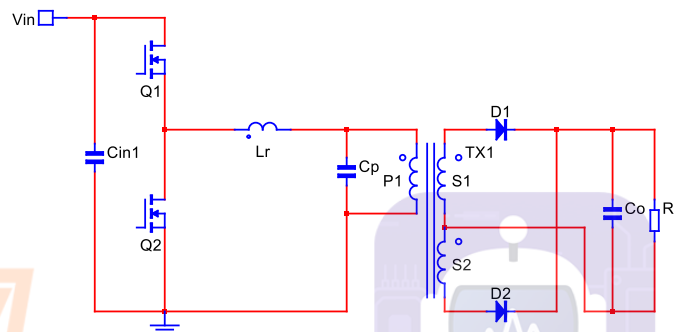


零电压谐振软开关变换器



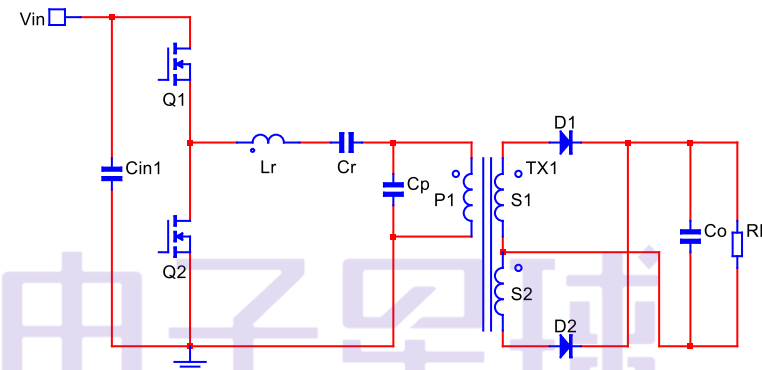
串联谐振变换器：

- 轻载调节特性不好
- 谐振网络增益不大于1



并联谐振变换器：

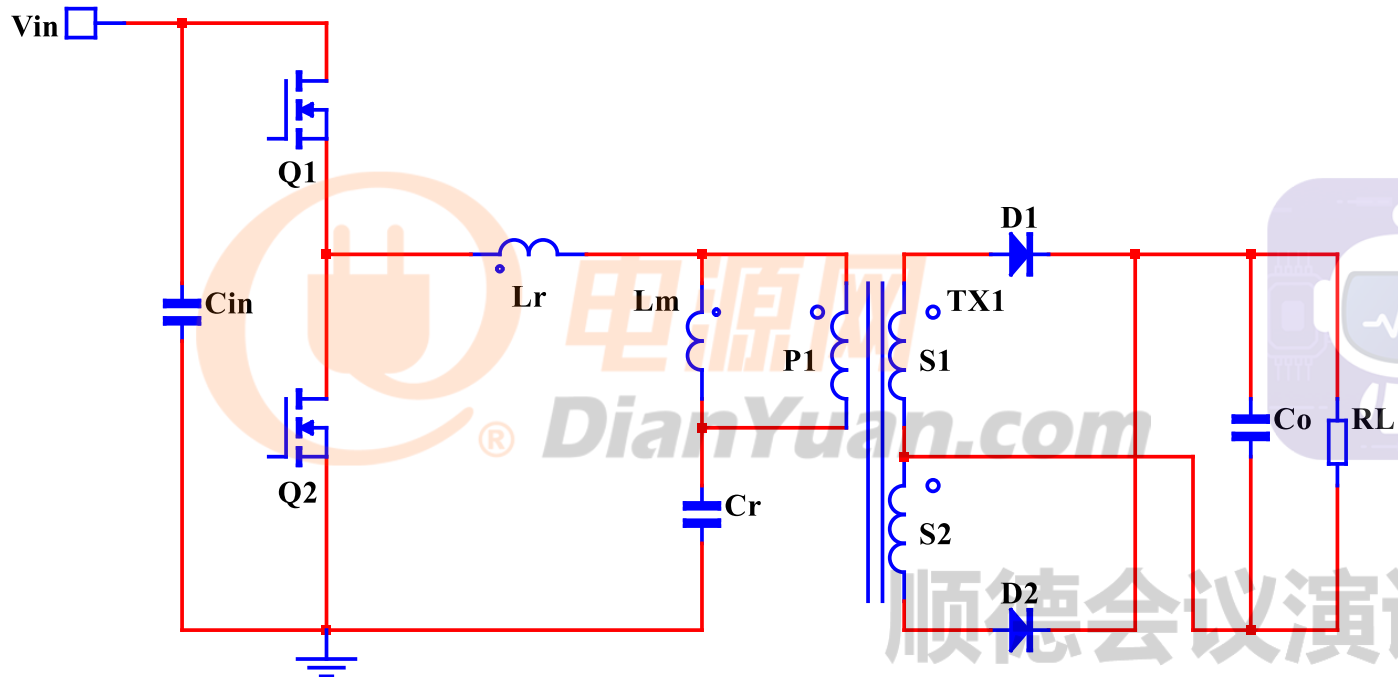
- 重载调节特性不好
- 轻载时无功环流大



串并联谐振变换器：

- 变压器漏感不参与谐振
- 无功环流大

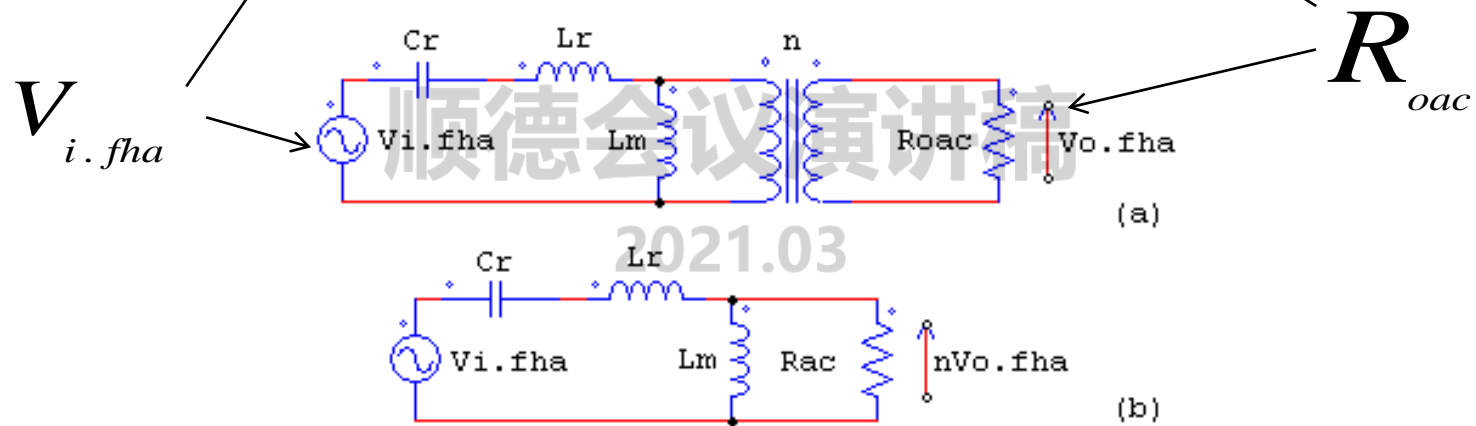
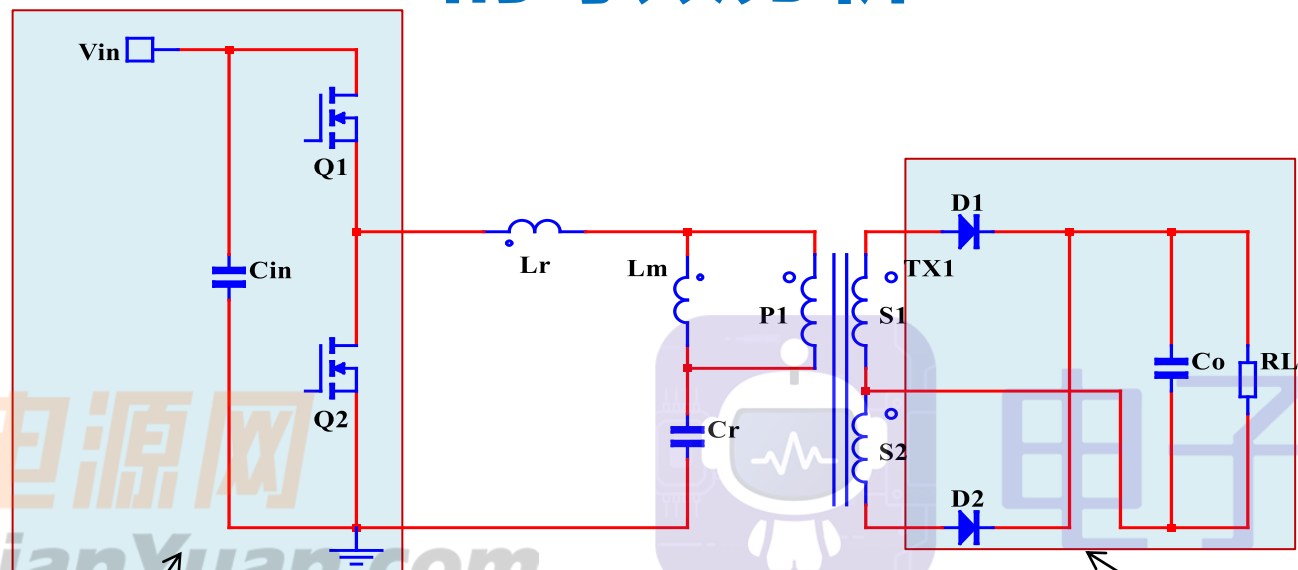
LLC谐振变换器



- 功率器件软开关，效率高
- 负载调节特性好
- 漏感参与谐振，便于磁集成
- EMI小
- 频率高，体积小

2021.03

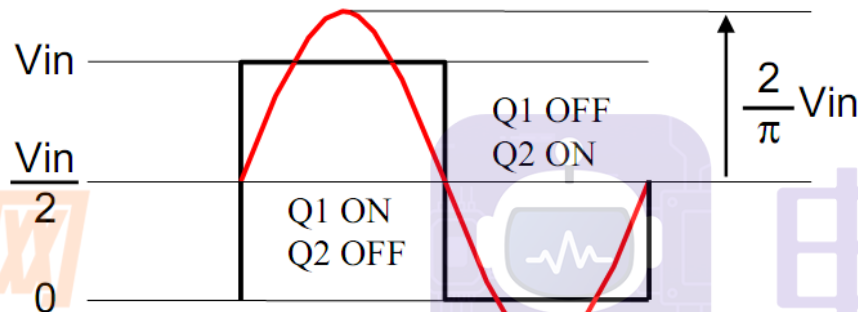
LLC的等效分析





LLC的输入等效

谐振槽路的输入为方波



通过对其进行傅里叶分解得到其基波分量:

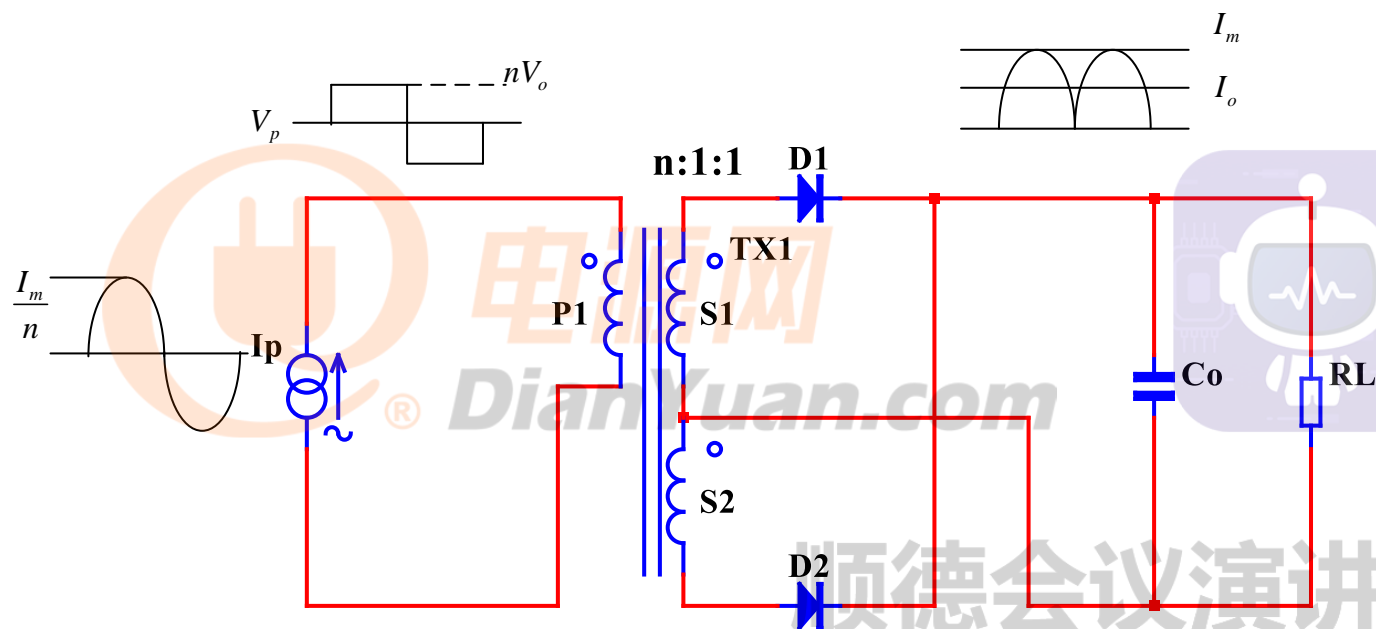
$$V_s = \frac{2V_{in}}{\pi} \sin(2\pi f_s \cdot t)$$

有效值为:

$$V_{iFHA} = \frac{2V_{in}}{\pi}$$

LLC的输出等效

对于全波整流:



$$V_p = \frac{4}{\pi} n V_o \sin(\omega t - \varphi)$$

$$I_p = \frac{I_m}{n} \sin(\omega t - \varphi)$$

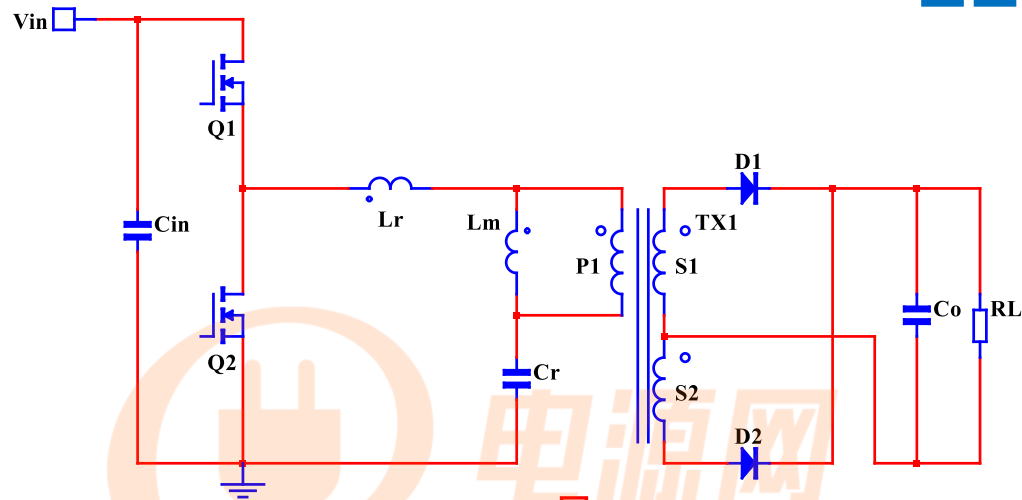
$$I_o = \frac{2}{\pi} I_m$$

$$R_{ac} = \frac{V_p}{I_p} = \frac{n^2 8}{\pi^2} R_L$$

$$R_{oac} = \frac{R_{ac}}{n^2} = \frac{8}{\pi^2} R_L$$

2021.03

LLC的等效模型



谐振槽路的增益为：

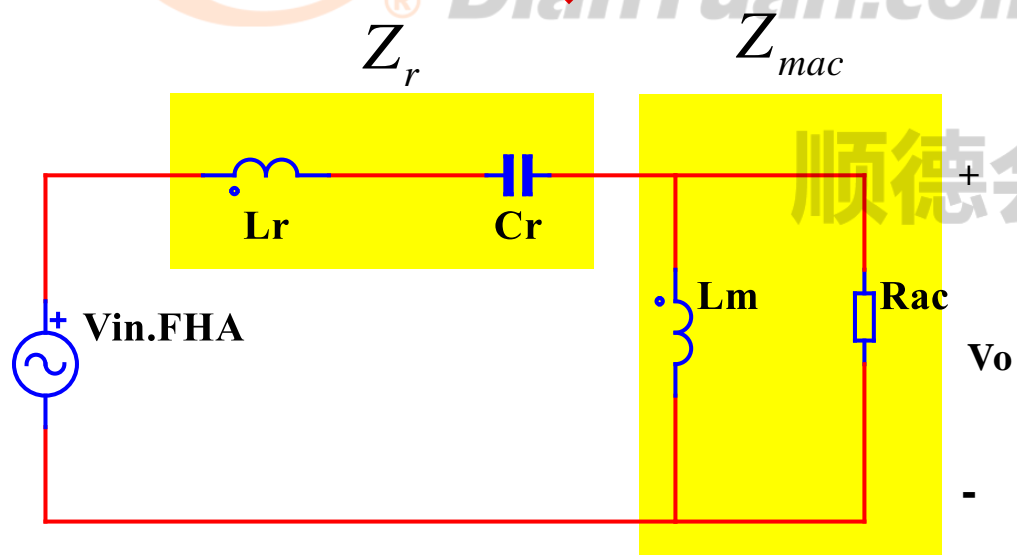
$$M = \frac{V_o}{V_{in.FHA}} = \left| \frac{Z_{mac}}{Z_r + Z_{mac}} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{kf_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}}$$

其中：

$$R_{ac} = 0 \quad f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

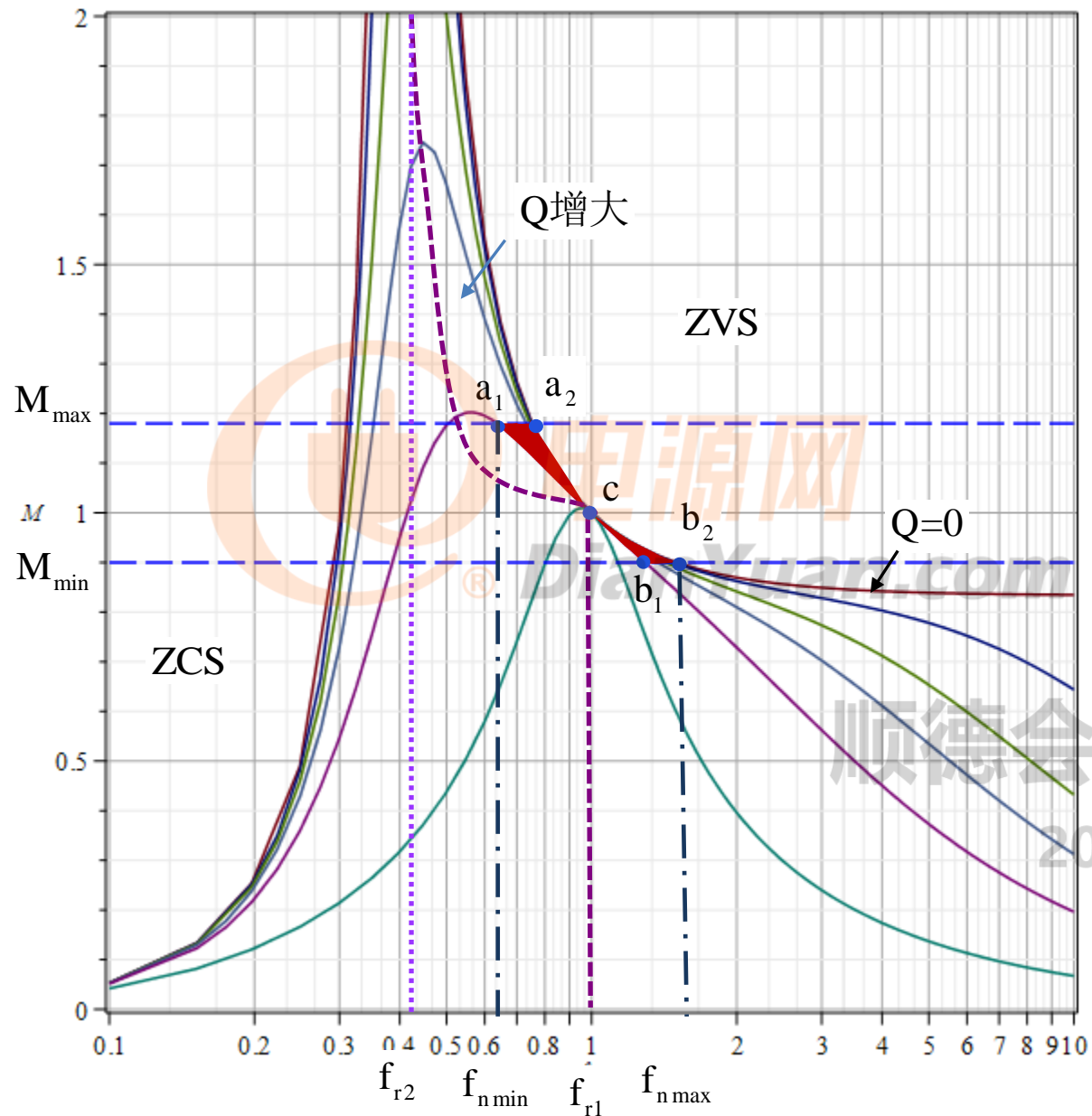
$$R_{ac} \rightarrow \infty \quad f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m) C_r}}$$

$$Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \frac{2\pi f_{r1} L_r}{R_{ac}} \quad f_n = \frac{f_s}{f_{r1}} \quad k = \frac{L_m}{L_r}$$





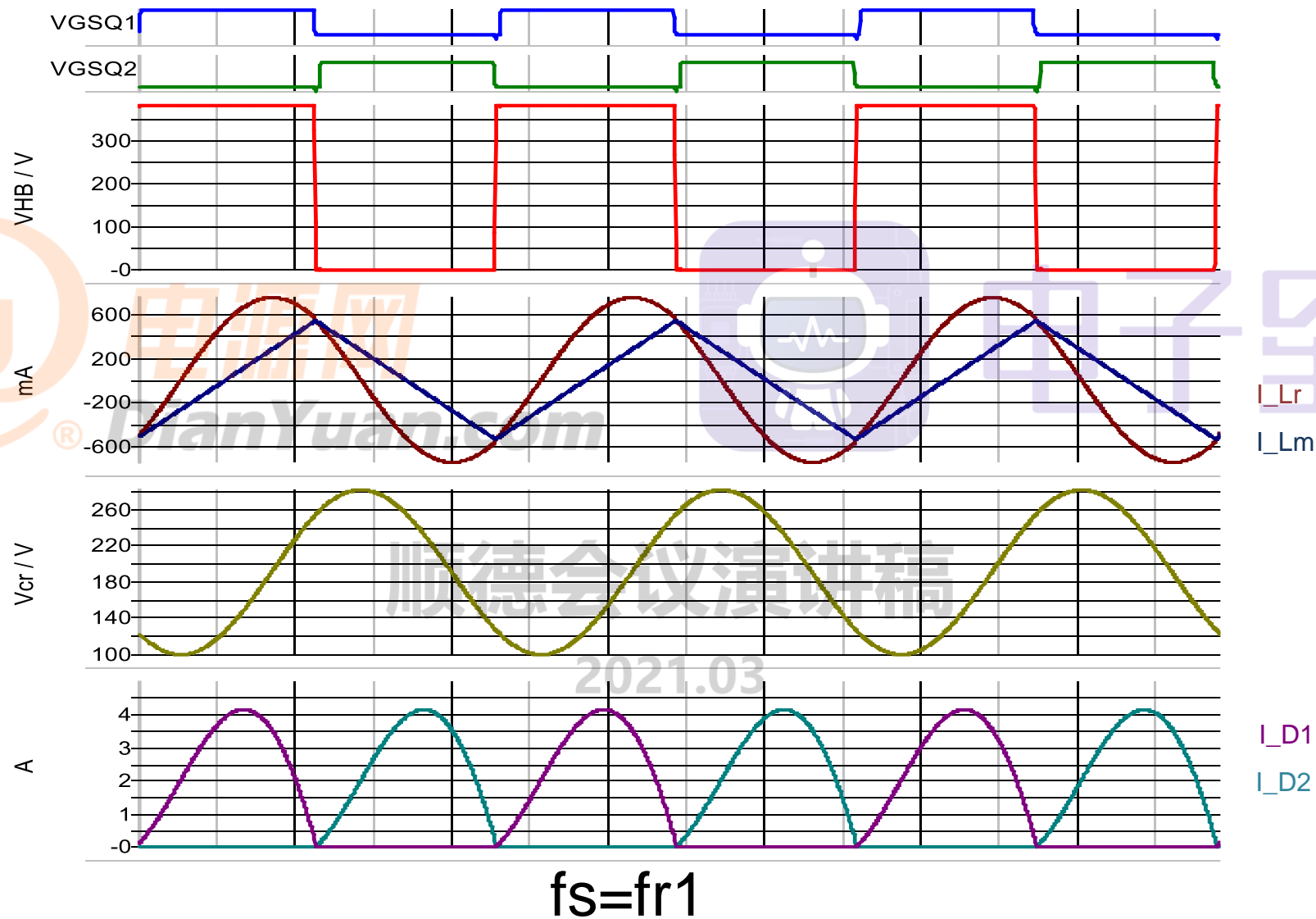
LLC的Q值曲线



- 负载变化时，工作点处于 a_1, a_2 间
- 输入电压变化，负载不变时，工作点在 a, b 间
- C点是最理想的工作点
- 满载最大增益对应最低频率
- 轻载最小增益对应最高频率

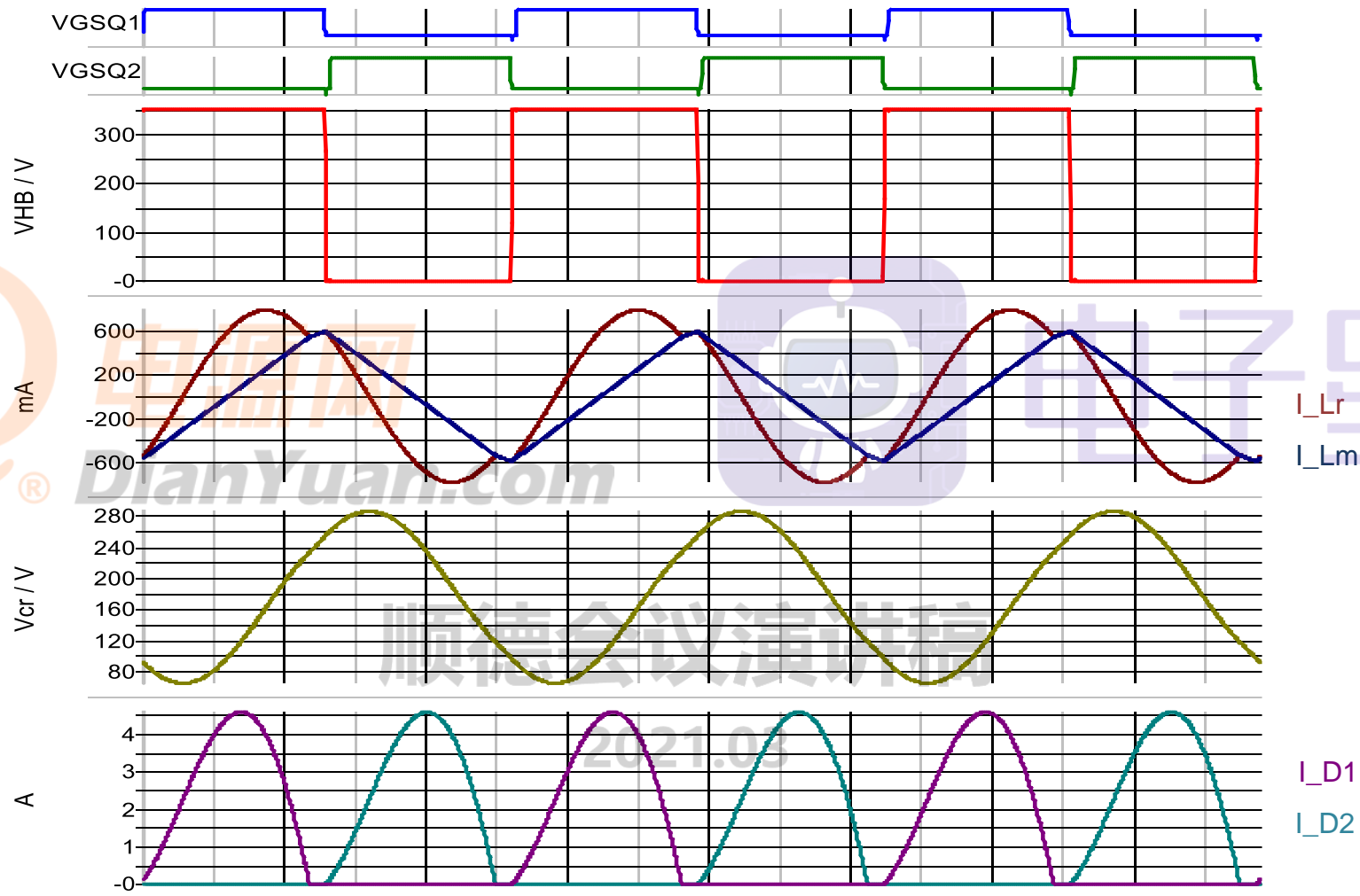


LLC谐振变换器工作波形



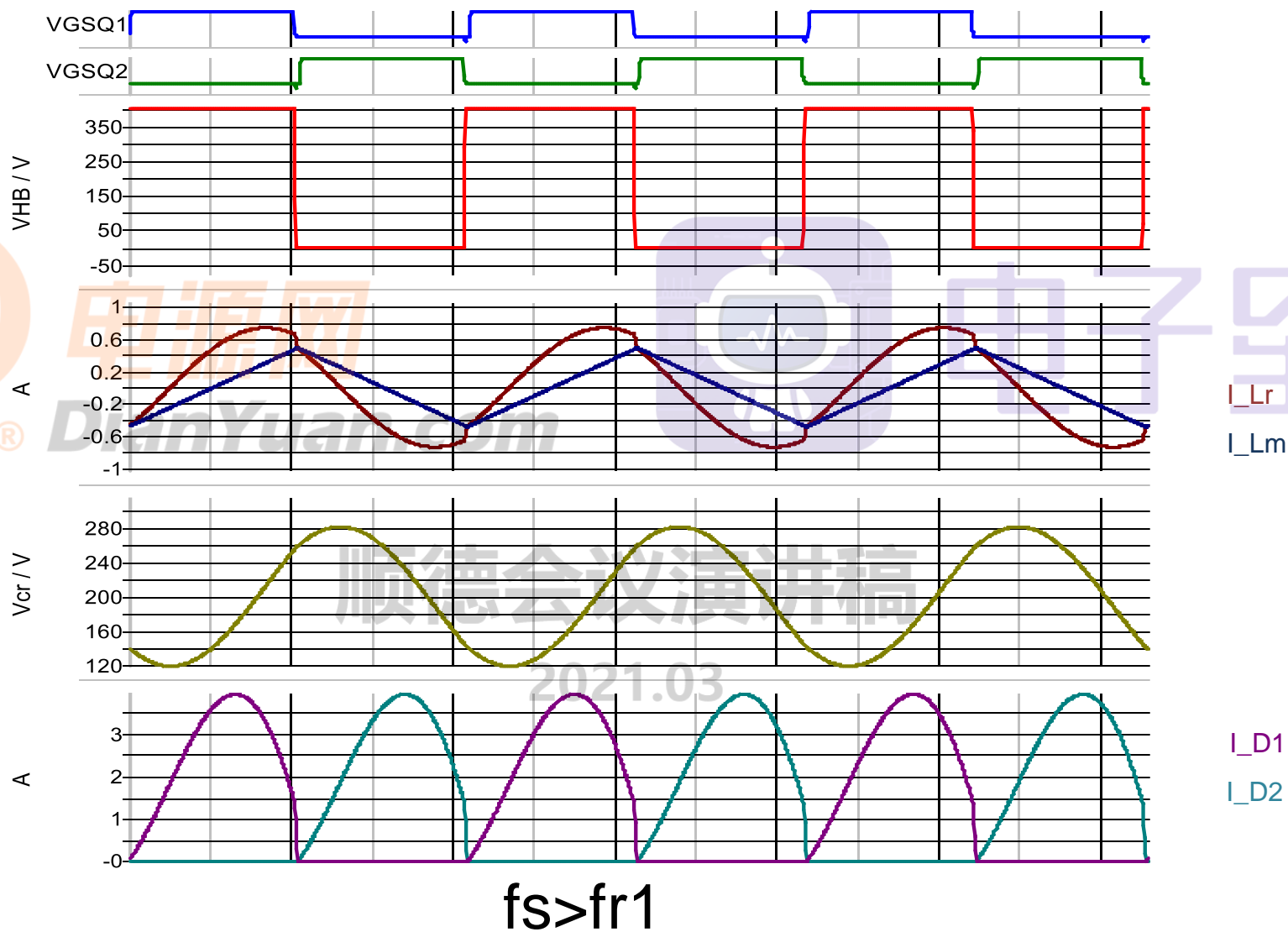


LLC谐振变换器工作波形

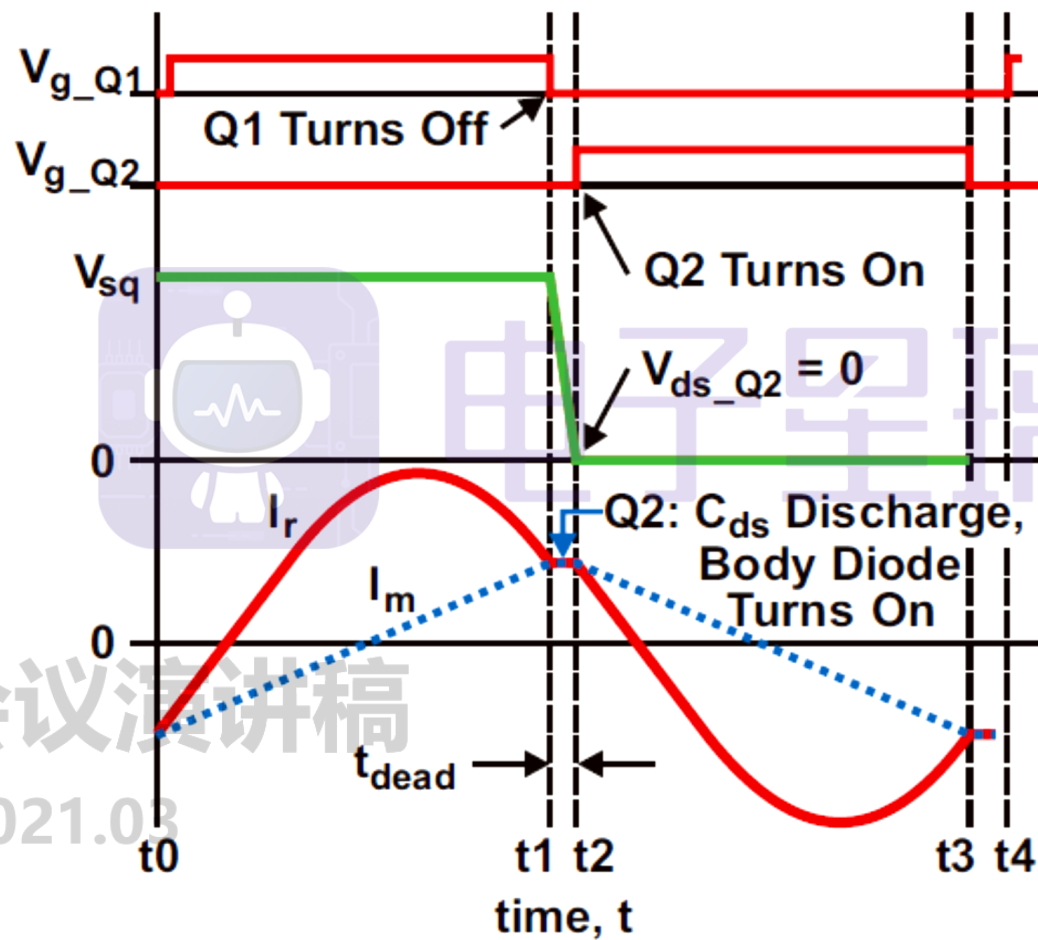
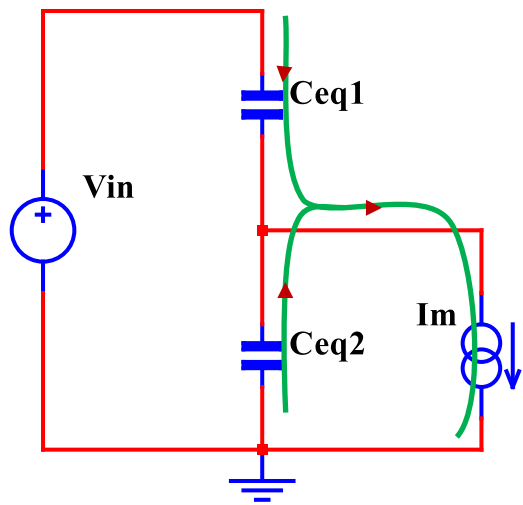
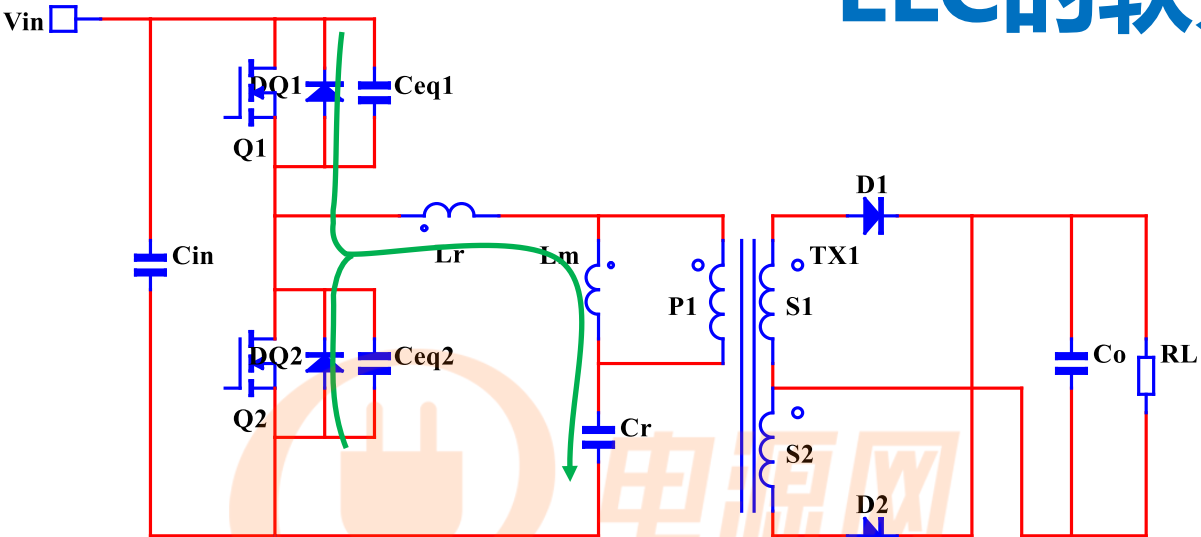


$$f_s < f_{r1}$$

LLC谐振变换器工作波形



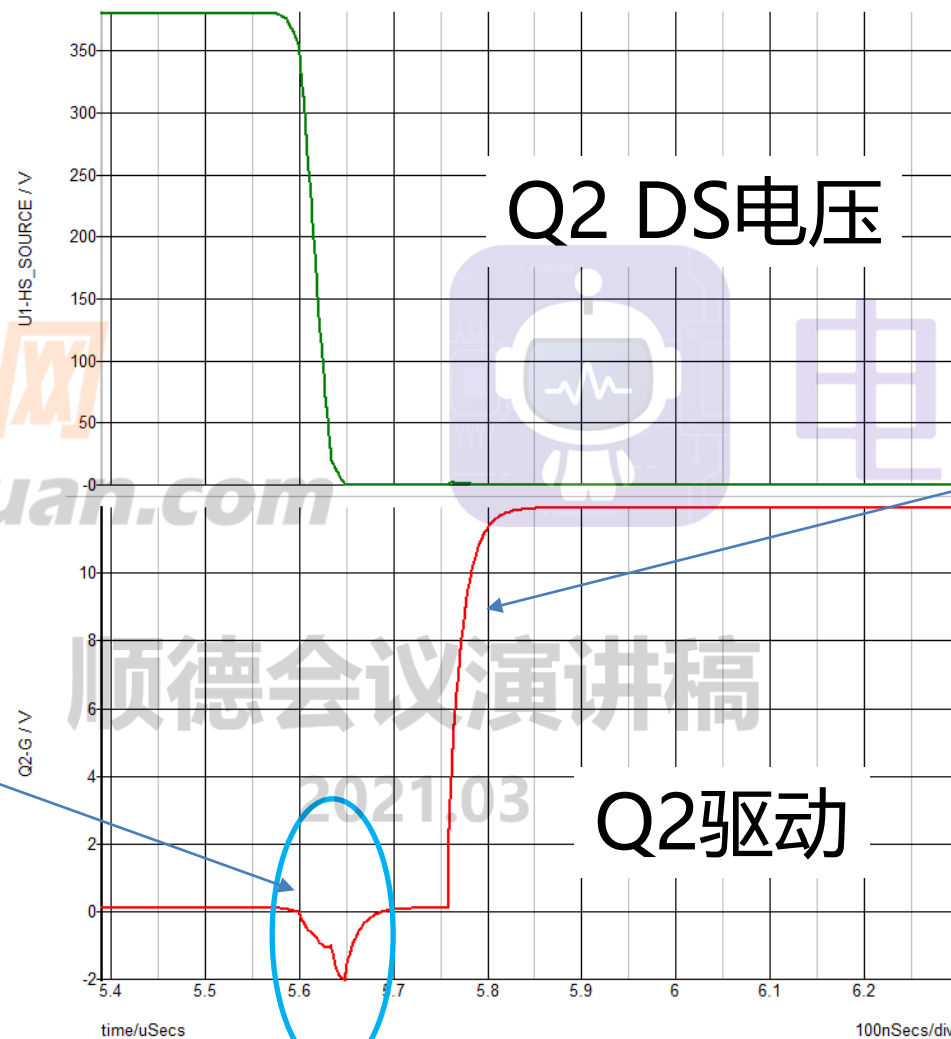
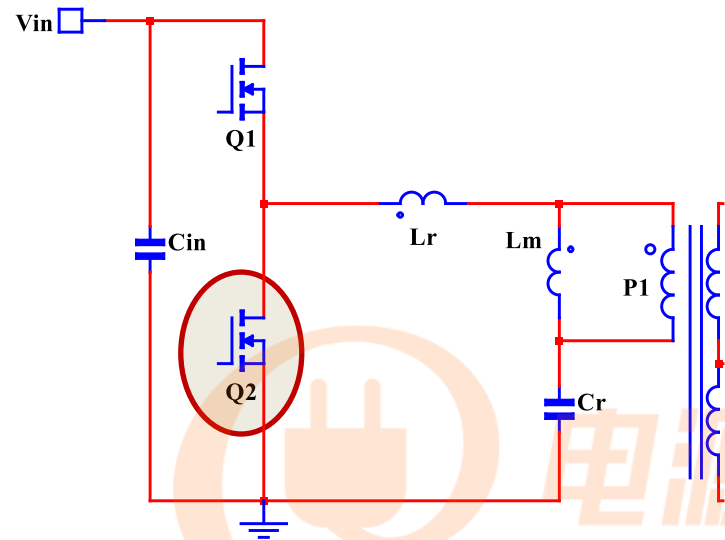
LLC的软开关过程



顺德会议演讲稿

2021.03

LLC的软开关过程



DS电压到零

Q2 DS电压

无米勒效应

Q2驱动



CONTENTS

1. LLC谐振变换的应用

2. LLC谐振变换器工作原理

3. LLC谐振变换器的关键参数

4. LLC谐振变换器的设计与优化

顺德会议演讲稿

2021.03



电源网

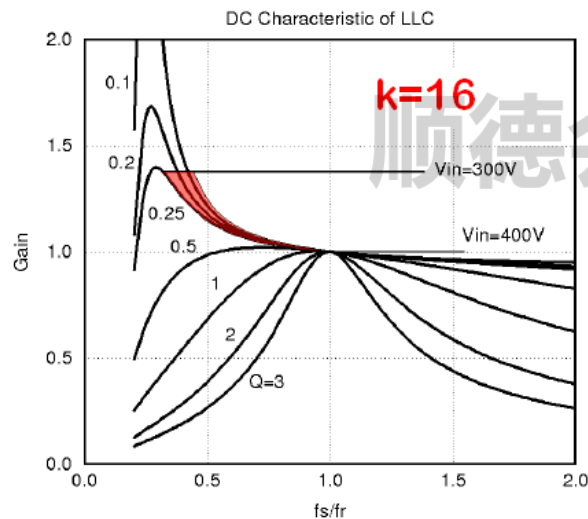
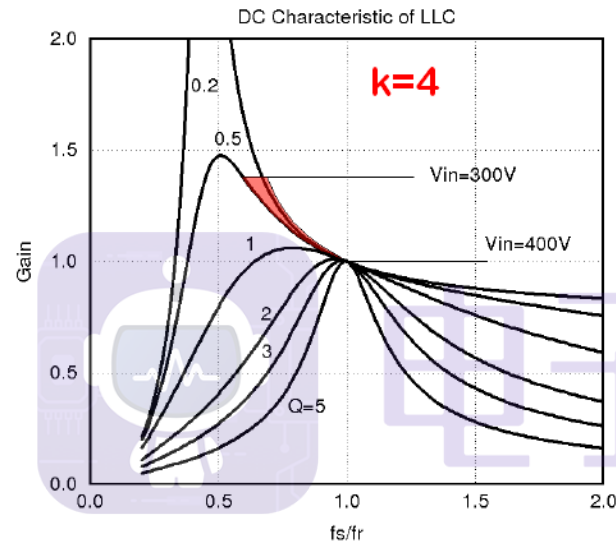
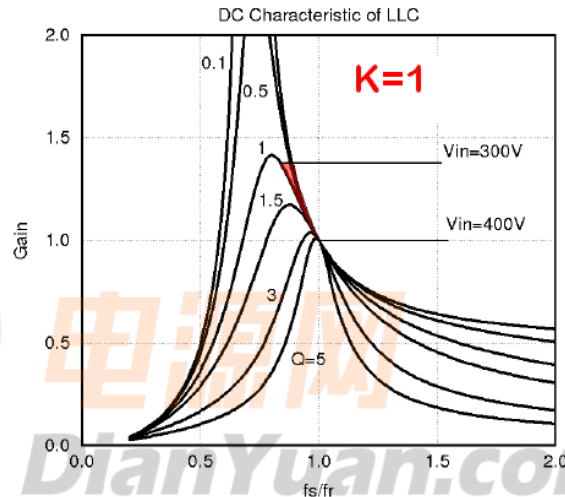
DianYuan.com



电子星球



K值对增益的影响:

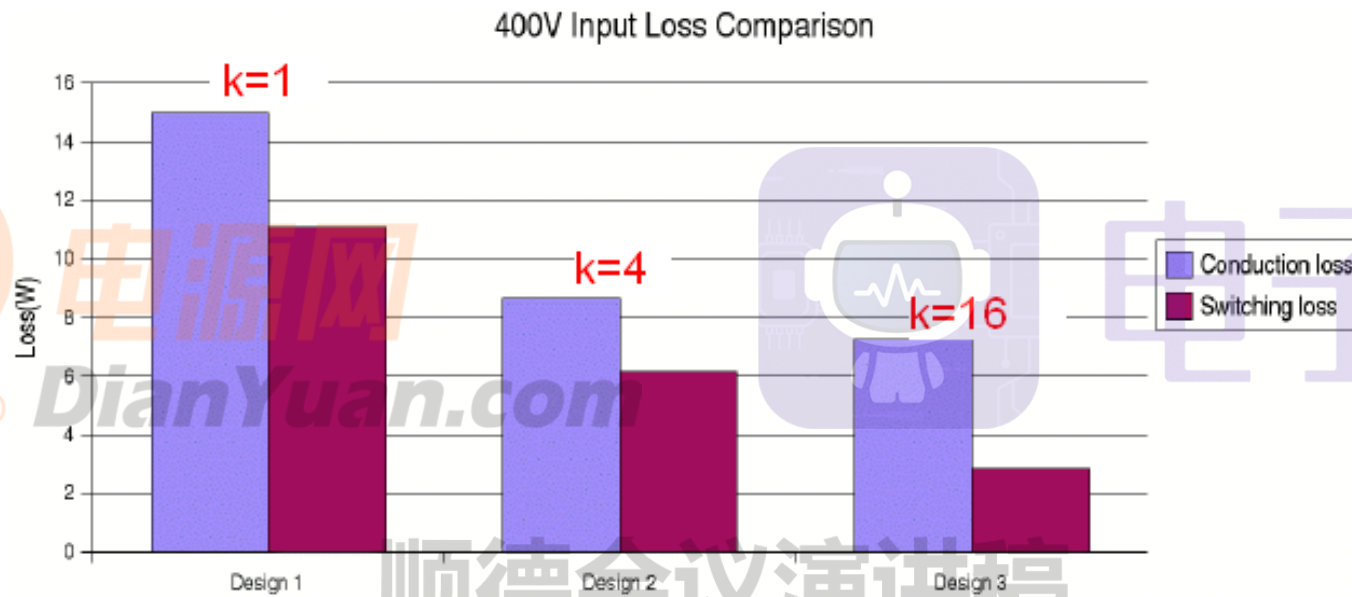


K值越小，Q值曲线越陡峭，要得到相同增益时，频率变化范围越小。

K值越大，Q值曲线越平缓，要得到相同增益时，频率变化范围越大。



K值对效率的影响:



K值越小，意味着对于相同的 L_r ，其励磁电感越小，器件损耗会增大，效率降低。通常取K值在3~7之间。



Q的取值

由：

$$Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \frac{2\pi f_r L_r}{R_{ac}} \quad k = \frac{L_m}{L_r}$$

可以得到：

$$Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \frac{2\pi f_r L_m}{kR_{ac}}$$



电子星球

因此Q值越大，励磁电感越大，励磁电流越小，损耗越小。

但Q值还受到软开关条件及谐振电容电压的限制，不能过大。

$$V_{cr} = \frac{I_r}{\omega C_r} = \frac{Q_s R_e I_r}{f_n}$$

谐振网络阻抗为:

$$Z_{in} = Z_o \left[Q \frac{f_n^2 k^2}{1 + f_n^2 k^2 Q^2} + j \left(f_n - \frac{1}{f_n} + \frac{f_n k}{1 + f_n^2 k^2 Q^2} \right) \right]$$

LLC 要实现ZVS, 谐振网络需呈现感性

$$f_n - \frac{1}{f_n} + \frac{f_n k}{1 + f_n^2 k^2 Q^2} \geq 0$$

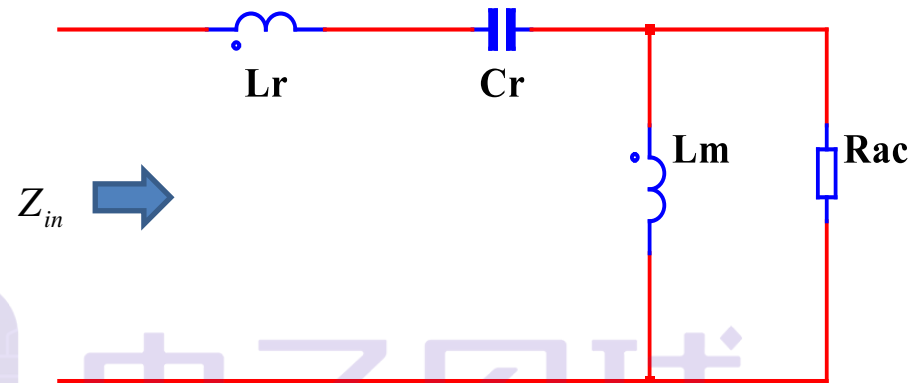
又由于:

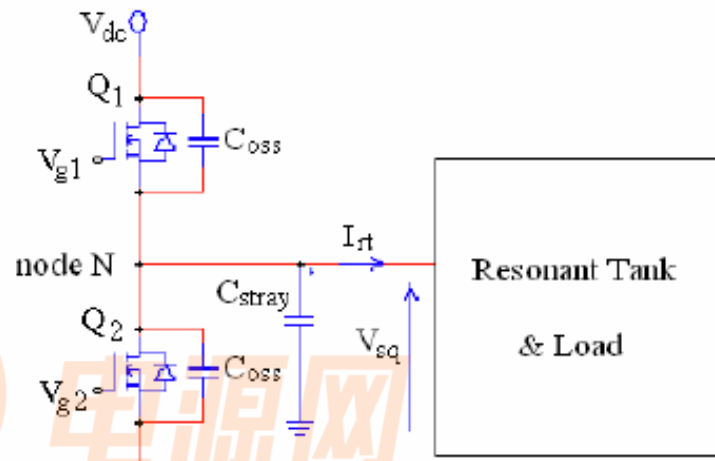
$$M = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{kf_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}}$$

可得:

$$Q_{\max} = \frac{1}{kM_{\max}} \sqrt{k + \frac{M_{\max}^2}{M_{\max}^2 - 1}}$$

为留一定的裕量, 通常取Q为 (0.92~0.95) Qmax





当LLC运行于高输入电压，
 空载的情况下时，原边电流
 最小，需要确保在此情况下
 ，LLC仍能实现软开关。

$$\frac{V_{iFHMAX}}{\|Z_{inol}(f_{n\max})\|} \geq \frac{I_{zvs(vdc\max)}}{\sqrt{2}} \Rightarrow Q_{zvs} \leq \frac{2}{\pi} \frac{f_{n\max}}{(k+1)f_{n\max}^2 - 1} \frac{T_D}{R_{ac} C_{zvs}}$$

$$I_{zvs(vdc\max)} = (2C_{oss} + C_{stay}) \frac{V_{dc}}{T_D}$$

LLC的Q值应该小于Qmax和Qzvs



CONTENTS

1. LLC谐振变换的应用

2. LLC谐振变换器工作原理

3. LLC谐振变换器的关键参数

4. LLC谐振变换器的设计与优化

顺德会议演讲稿

2021.03



电源网

DianYuan.com



电子星球



LLC的设计步骤

1.计算理论匝比(在增益为1的情况下) : $n = \frac{1}{2} \frac{V_{dc.nom}}{V_o}$

2.计算最大, 最小增益:

$$M_{\max} = 2n \frac{V_o}{V_{dc.\min}}$$

$$M_{\min} = 2n \frac{V_o}{V_{dc.\max}}$$

3.负载折算:

$$R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} \frac{V_o^2}{P_{\max}}$$

4.计算最大归一化频率:

$$f_{n\max} = \frac{f_{s\max}}{f_r}$$



5.计算K值:

$$k = \frac{M_{\min}}{1 - M_{\min}} \frac{f_{n\max}^2 - 1}{f_{n\max}^2}$$

6.计算最小输入电压, 最大负载时保证ZVS的Q的最大值:

$$Q_{zvs1} = 0.95 \frac{1}{kM_{\max}} \sqrt{k + \frac{M_{\max}^2}{M_{\max}^2 - 1}}$$

7.计算最大输入电压, 空载时保证ZVS的Q的最大值:

$$Q_{zvs2} = \frac{2}{\pi} \frac{f_{n\max}}{(k+1)f_{n\max}^2 - 1} \frac{T_d}{R_{ac}C_{eq}}$$

8.选择以上Q值中的最小值为最终的Q值:

$$Q_s \leq \min(Q_{zvs1}, Q_{zvs2})$$



9.计算最小开关频率:

$$f_{s\min} = f_r \sqrt{\frac{1}{1+k \left[1 - \frac{1}{M_{\max}^{1+(\frac{Q_s}{Q_{\text{cvs}}})^4}} \right]}}$$

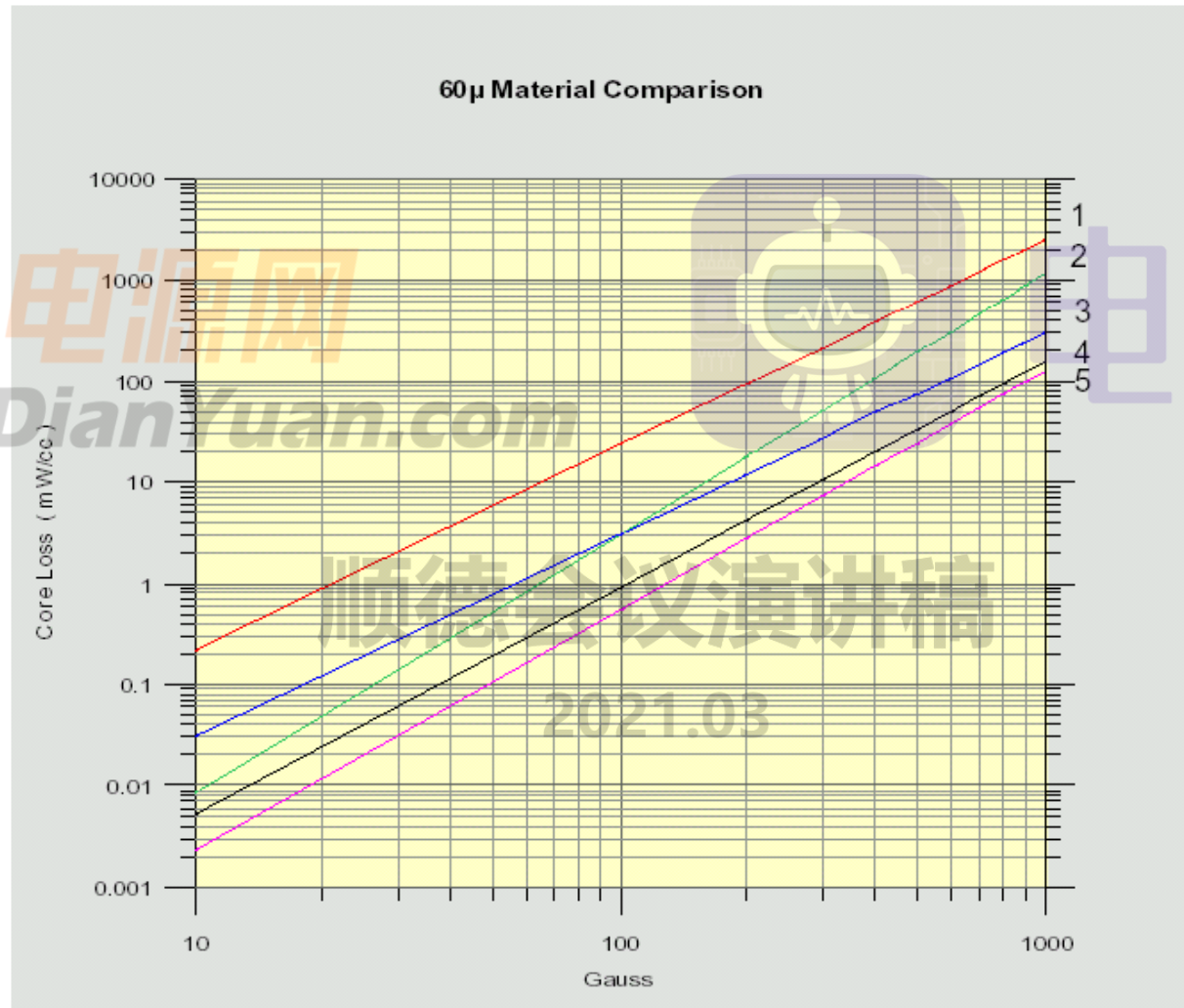
如果计算的最小开关频率太低或者太高，需要调整设定的谐振频率，直到最小开关频率为一个合理的值。

10.计算谐振网络参数:

$$Z_o = Q_s R_{ac} \quad C_r = \frac{1}{2\pi f_r Z_o} \quad L_r = \frac{Z_o}{2\pi f_r} \quad L_m = \frac{L_r}{k}$$

LLC谐振电感设计

LLC谐振电感磁通摆幅大，设计时主要受磁芯损耗限制，一般采用铁氧体磁芯



- 1. Iron
- 2. Hi Flux
- 3. Sendust
- 4. MPP
- 5. Ferrite

LLC谐振电感设计

谐振电感匝数：

$$N = \frac{L_r \bullet \Delta I_{pri}}{\Delta B \bullet A_e}$$

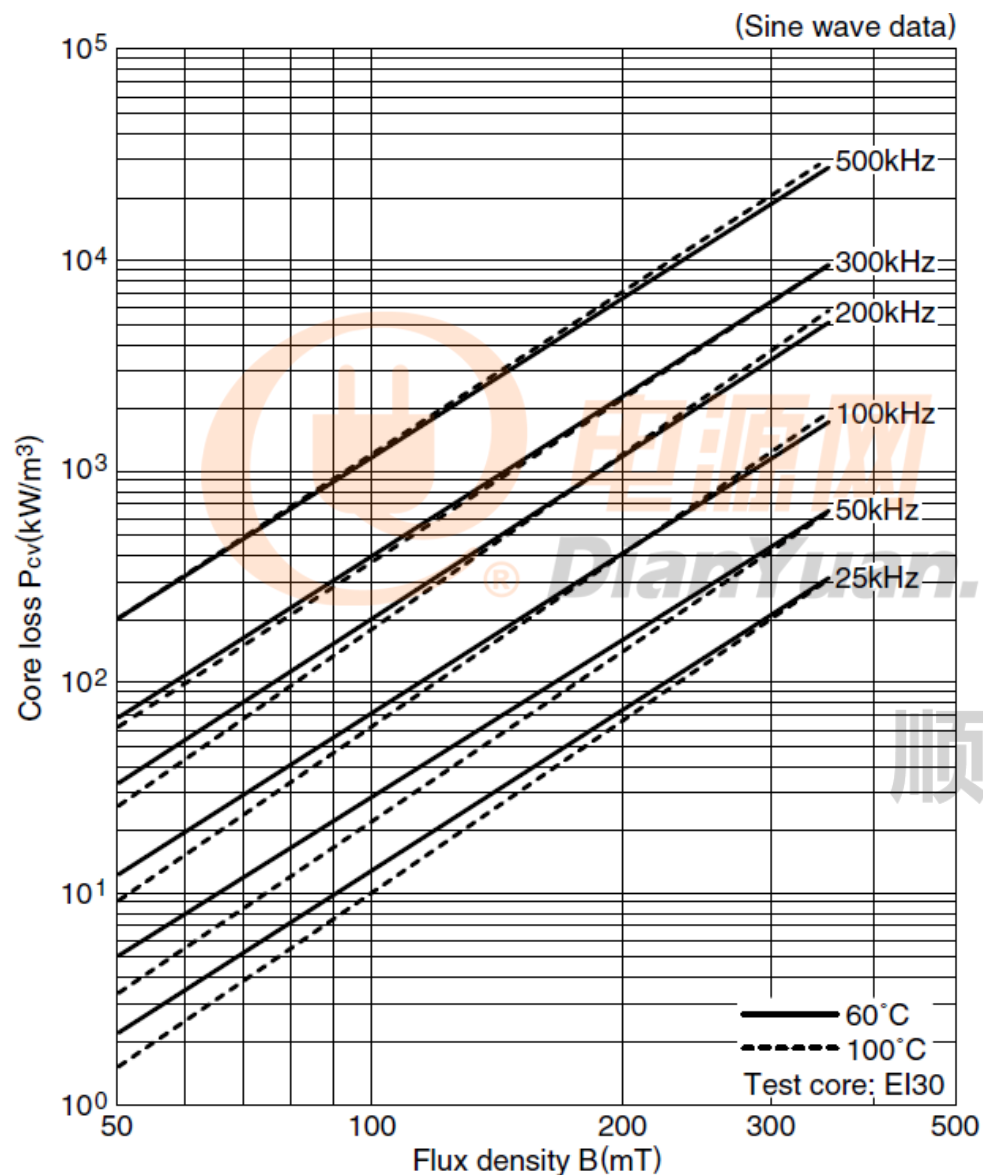
由磁芯允许损耗与温升，可以得到允许的磁通密度摆幅 ΔB

由于谐振电流近似为正弦波：

$$\Delta I_{pri} = 2I_{pri_pk} = 2\sqrt{2}I_{pri_rms} = \frac{\pi P_o}{nV_o}$$

LLC变压器参数设计

根据磁芯允许损耗与温升，确定允许的峰值磁通密度，从而确定最大磁通密度摆幅 ΔB



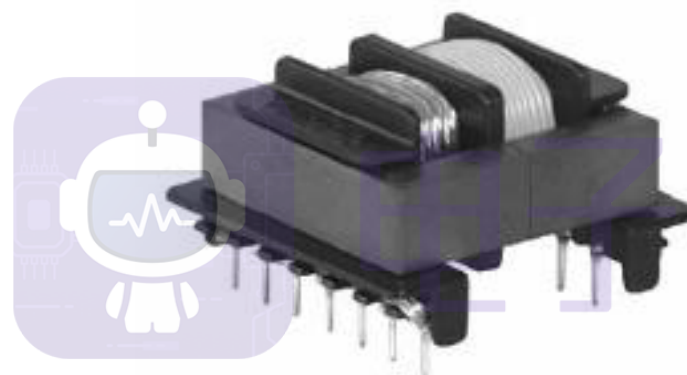
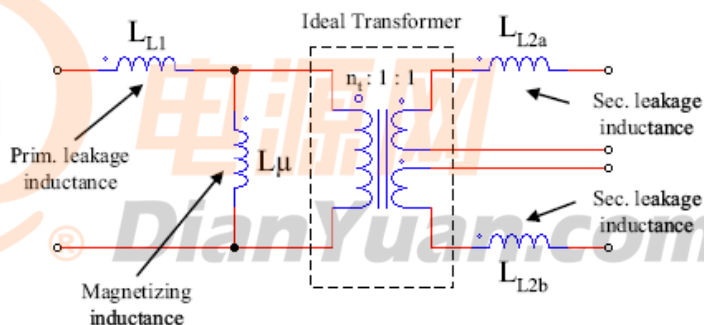
$$N_p = \frac{V_{in}}{4\Delta B \cdot A_e \cdot f_s}$$

为减小线圈交流损耗，一般应采用利兹线绕制。

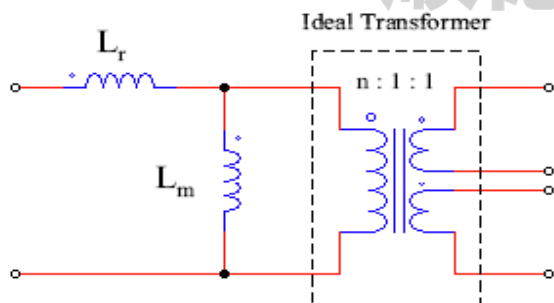
集成漏感LLC变压器设计

集成漏感的LLC变压器的实际匝比与理论匝比有较大差别

实际变压器模型:



理想变压器模型:

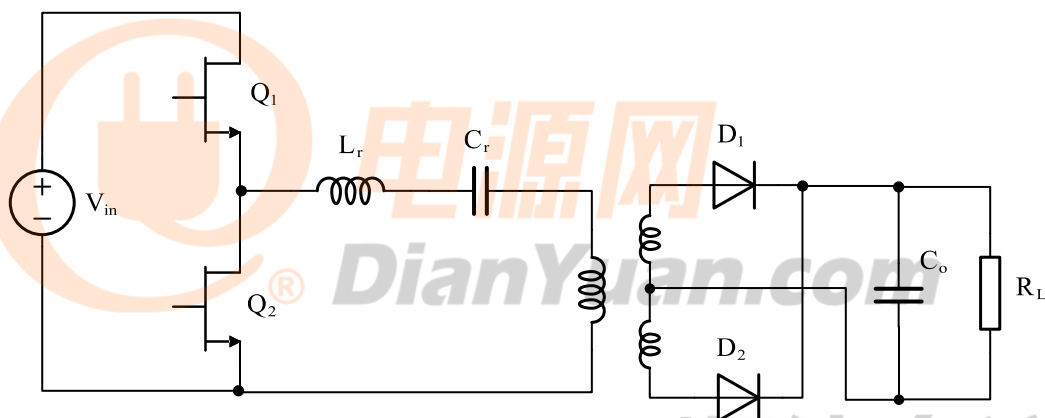


变压器的理论变比:

$$n = n_t \sqrt{\frac{L_m}{L_m + L_r}}$$

因此实际变比要比理论变比大

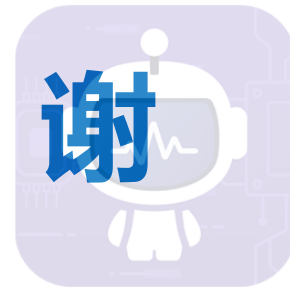
GaN 在LLC中的应用



由于GaN-HEMT没有反向二极管，通过2DEG实现反向导通，反向导通压降大于Si-Mosfet，因此需要合理优化死区时间，减少开关时的反向导通损耗。

顺德会议演讲稿

2021.03



电子星球

顺德会议演讲稿

2021.03