PSIM 应用案例之
电动汽车无线充电系统设计与验证

文档名称：	电动汽车无线充电系统设计		
文档编号：		文档版本：	v1.0
文档类别：	详细技术资料	密　　级：	公开

INNODRIVE
新驱科技

二零二叁年陆月

未经许可 请勿复制全部或者部分文档
©新驱科技 版权所有

目 录

1. 案例介绍.....1
2. 系统规格要求.....1
3. 设计步骤.....1
3.1. 启动 PSIM 设计套件模板.....2
3.2. 录入输入和输出要求.....3
3.2.1. 计算谐振参数.....4
3.2.2. 计算所需直流增益（G_DC）.....4
3.3. 使用设计曲线工具扫描参数.....4
3.4. 选择 Q_RATED 和 K_IND 的最终设计值.....7
3.5. 计算谐振参数和耦合电感参数.....8
3.6. 在仿真中验证设计.....9
4. 结论.....13
5. 案例获取.....13

1. 案例介绍

无线电力传输（WPT）系统在电动汽车、消费电子、生物医学工程、无线电力技术等许多应用中因非接触式能量转换而备受关注。基于谐振转换器的无线电力传输系统包括了谐振转换器的所有优点，例如在宽负载/线路范围内的软开关特性、高峰值效率、高功率密度、低 EMI 覆盖区域以及诸如非接触式电力传输之类的附加优点等。

然而，基于谐振的 WPT 转换器系统的优化设计是一项不平凡且艰巨的任务，因为转换器是高度非线性的，具有高阶谐振回路，并且设计过程涉及多次迭代。

PSIM 中的电源设计套件提供了谐振转换器的预建模板，用于分析和优化谐振回路的精度。谐振转换器模板可以很容易地修改为谐振 WPT 转换器模板。这些模板还包含两个界面友好的设计工具，用于优化设计，提高稳健性。

本文描述了如何使用全桥谐振 CLLLC 模板为 6.6-kW 电动汽车车载充电器设计串联补偿谐振 WPT 转换器系统的过程。

2. 系统规格要求

谐振 WPT 转换器通常用作电动汽车车载充电器（OBC）的隔离 dc-dc 级。

6.6-kW OBC 的谐振转换器具有以下规格：

Vin_rated = 400V; Vin_min = 390V; Vin_max =410V

Vo_rated = 420V; Vo_min = 300V; Vo_max = 450V

Po_rated = 6.6kW

f_res = 200 kHz

3. 设计步骤

使用电源设计套件设计谐振 WPT 系统需要几个步骤：

- 在“输入参数”面板中定义输入和输出要求以及工作条件。
- 使用设计曲线工具执行设计迭代和设计比较。
- 使用稳态解算器工具分析和验证转换器的零电压开关（ZVS）和零电流开关（ZCS）工作过程，稳态波形，计算结果输出，边界条件和转换器的极端工况条件。
- 更新参数文件并运行时域仿真以验证设计。

下面介绍每个步骤的详细信息。

3.1. 启动 PSIM 设计套件模板

在 PSIM 中，点击菜单设计套件>>电源设计套件，然后选择全桥谐振 CLLLC。解压缩文件后，将显示一个模板电路，如下所示：

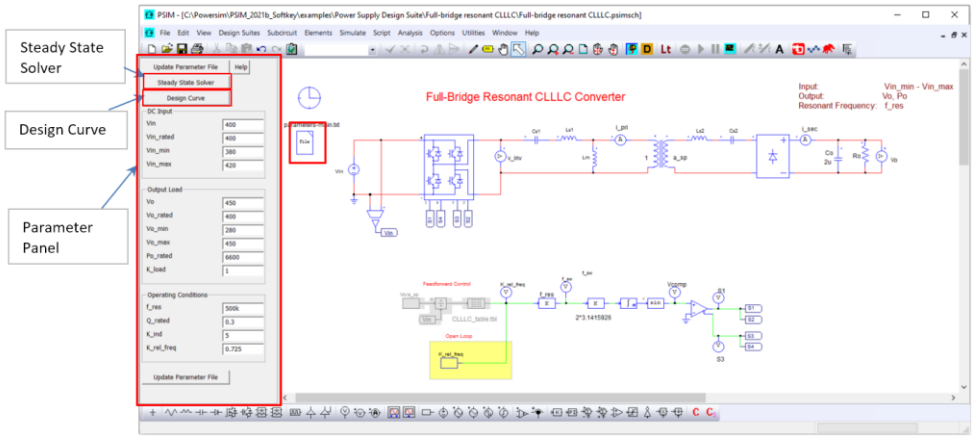


图 1、设计套件自带的谐振 CLLLC 初始模板

在图 1 中，原理图窗口左侧的参数面板允许用户输入设计规范，启动稳态解算器工具和设计曲线工具。电路左侧的参数文件存储 CLLLC 电路的计算参数值。

在谐振转换器中，基于 CLLLC 模板中的额定品质因数（Q_rated）、电感因数（K_ind）和谐振频率（f_res）来计算谐振元件。

在无线电力传输系统中，变压器匝数比 a_sp 通常为 1。据此：

Cs1 = Cs2

Ls1 = Ls2

在电路中，Lm 是磁化电感，Ls1 和 Ls2 是串联电感。串联电感 Ls1 和 Ls2 可以是变压器的漏电感。然而，如果计算值高于漏电感，则需要外部电感器。

变压器可以用耦合电感器代替，自感和互感定义如下：

L11 = Ls1 + Lm

L22 = Ls2 + Lm

L12 = L21 = Lm

电路可以修改如下：

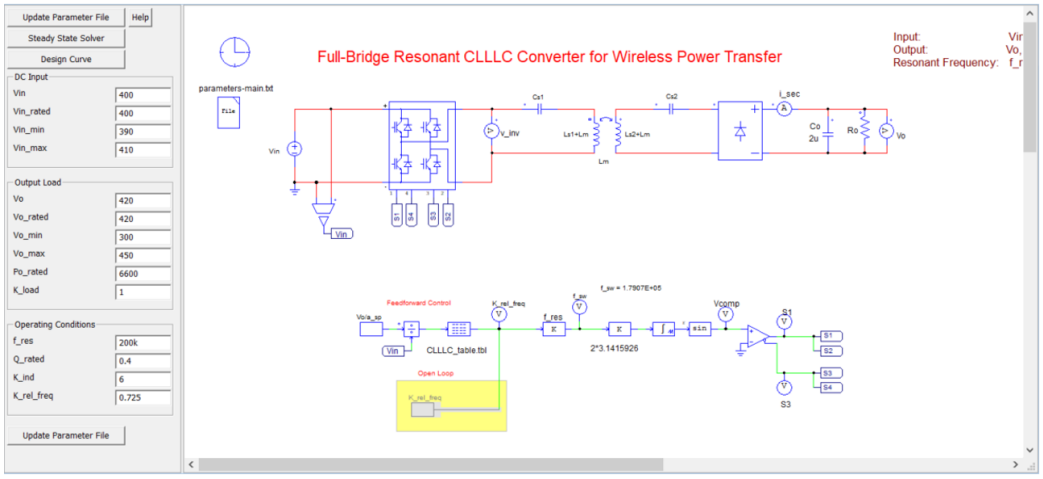


图 2、用于无线功率传输的改进谐振 CLLLC 模板

3.2. 录入输入和输出要求

录入输入和输出要求，并定义 f_res、Q_rated（通常 0.5）和 K_ind（通常 5）的初始设计值。对于本例，请输入以下值：

输入指标：

Vin (operating input voltage) 400

Vin_rated (rated input voltage) 400

Vin_min (minimum input voltage) 390

Vin_max (maximum input voltage) 410

输出指标：

Vo (operating output voltage) 420

Vo_rated (rated output voltage) 420

Vo_min (minimum output voltage) 300

Vo_max (maximum output voltage) 450

Po_rated (rated output power) 6600

K_load (load factor) 1

运行条件：

f_res (resonant frequency) =200k

Q_rated (rated quality factor)= 0.5

K_ind (parallel-to-series inductance ratio Lm/Ls) =5

K_rel_freq (relative frequency factor) =0.75

然后单击左侧面板中的“更新参数文件”，查看参数文件、稳态解算器工具和设计曲线工具中的所有参数，以验证输入和输出规范的准确性。

3.2.1. 计算谐振参数

对于谐振变换器系统，基于选择的 Q_rated、K_ind 和 f_res，谐振元件计算如下：

a_sp = 1

Ls1 = (Q_rated*Ro_rated_pri)/(2*pi*f_res)

Cs1 = 1/(2*pi*f_res*Q_rated*Ro_rated_pri)

Lm = K_ind*Ls

Ls2 = Ls1

Cs2 = Cs1

应该注意的是，谐振 CLLLC 模板具有五阶对称谐振回路，该谐振回路具有五个谐振元件：Cs1、Ls1、Ls2、Cs2 和 Lm。在 a_sp＝1 的情况下，电感 Ls2 和电容 Cs2 与电感 Ls1 和电容 Cs1 相同。

3.2.2. 计算所需直流增益（G_DC）

直流增益所需的最小值和最大值计算如下：

G_dc_min = Vo_min/(Vi_max*1) = 0.73

G_dc_max =Vo_max/(Vi_min*1) = 1.15

我们将在 0.7 至 1.2 的直流增益范围内找到谐振元件的优化值，以补偿实际原型/电路中的小寄生参数。

3. 3. 使用设计曲线工具扫描参数

设计曲线工具提供了扫描 Q_rated 和 K_ind 以确定最佳设计的功能。对于此示例，输入的 Q_rated 值范围在 0.2 到 0.5 之间，K_ind 值范围在 4 到 10 之间。确保设置 a_sp=1。

将使用该工具自动生成两组设计曲线和一个带有输出参数的 Excel 文件。在工具的左侧界面中，可以选择修改输入规范中 Q_rated 和 K_ind 的范围。一个面板显示具有固定 Q_rated 的不同 K_ind 值的曲线，另一个面板则显示具有固定 K_ind 的不同 Q_rate 值的曲线。

单击计算 G_dc 以显示相对于相对频率因子（K_rel_freq）的直流增益曲线（如图 2 所示），从而找到所需直流增益的相对频率范围。同时，自动生成显示不同 Q_rated 和 K_ind 结果的 Excel 文件，如下所示：

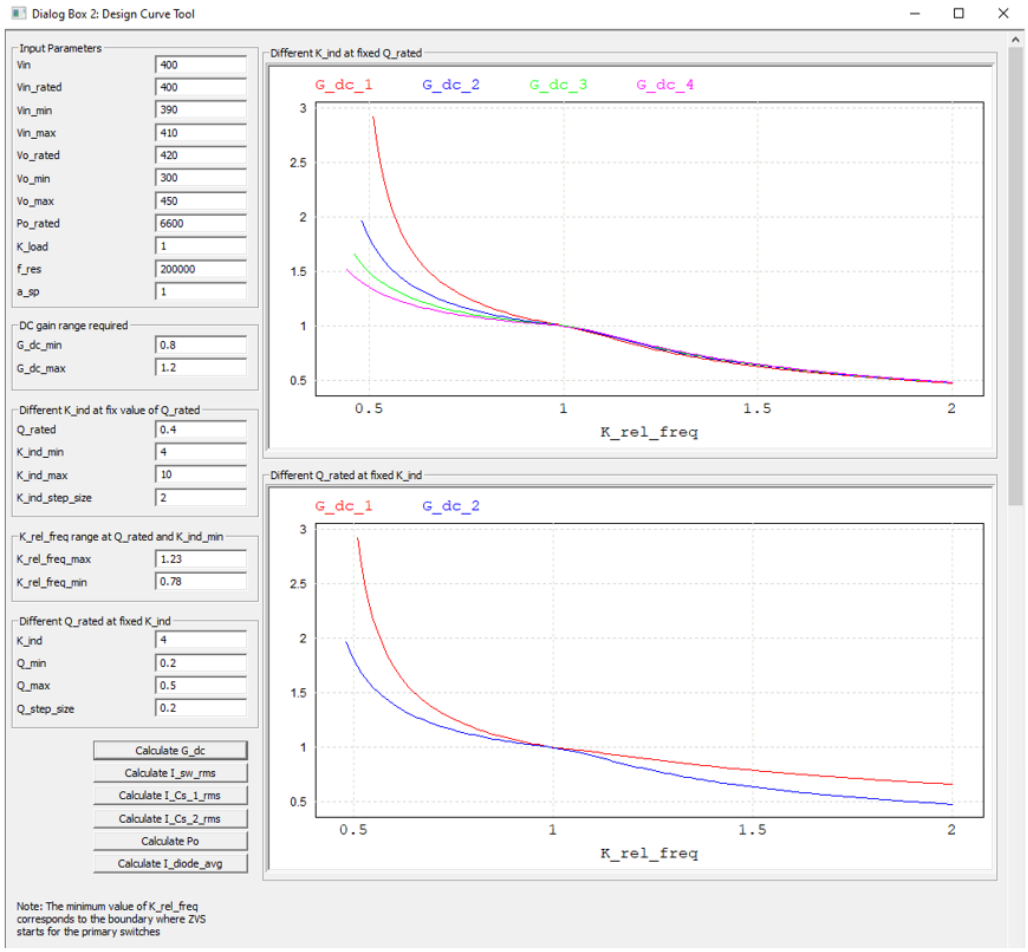
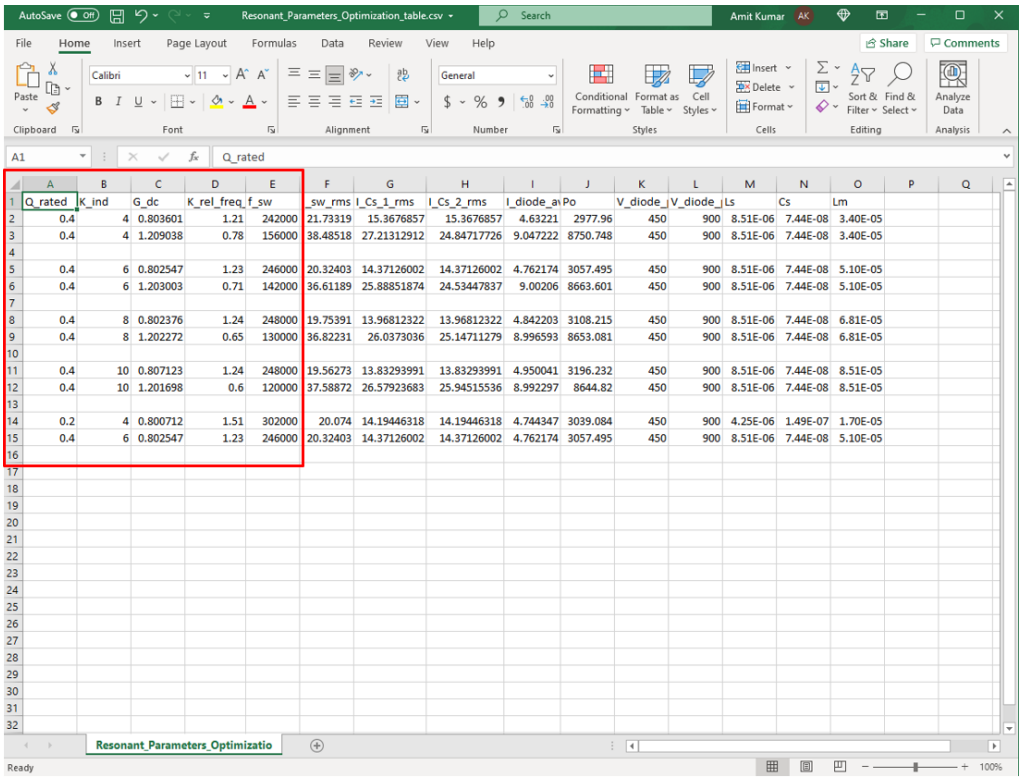


图 3、顶部面板 Q_rated=0.4，K_ind=4 到 10，底部面板 K_ind=4，Q_rated=0.2 到 0.4 的曲线

在图 3 中，产生的直流增益曲线是随着相对频率的变化而变化的，从初级开关的 ZVS 开始（低于谐振的滞后模式）到高于谐振频率。由于实际的设计原因，上述谐振相对频率在这里被限制在 2。

使用图 3，可以直接得出结论，K_ind=4（或最低电感因数）将在低于和高于谐振工作时提供最窄的频率变化，以满足增益要求。Q_rated 的最低值将需要以下谐振区域中的最低频率变化。但也可以得出结论，Q_rated 的最高值将确保上述谐振区域中频率的最低变化。在选择 Q_rated 的值时，显然存在一种权衡。

在图 4 中，详细的输出计算是在每组 Q_rated 和 K_ind 的最小和最大开关频率下生成的。



Q_rated	K_ind	G_dc	K_rel_freq	f_sw	_sw_rms	I_Cs_1_rms	I_Cs_2_rms	I_diode_a	Po	V_diode_	V_diode_	Ls	Cs	Lm
0.4	4	0.803601	1.21	242000	21.73319	15.3676857	15.3676857	4.63221	2977.96	450	900	8.51E-06	7.44E-08	3.40E-05
0.4	4	1.209038	0.78	156000	38.48518	27.21312912	24.84717726	9.047222	8750.748	450	900	8.51E-06	7.44E-08	3.40E-05
0.4	6	0.802547	1.23	246000	20.32403	14.37126002	14.37126002	4.762174	3057.495	450	900	8.51E-06	7.44E-08	5.10E-05
0.4	6	1.203003	0.71	142000	36.61189	25.88851874	24.53447837	9.00206	8663.601	450	900	8.51E-06	7.44E-08	5.10E-05
0.4	8	0.802376	1.24	248000	19.75391	13.96812322	13.96812322	4.842203	3108.215	450	900	8.51E-06	7.44E-08	6.81E-05
0.4	8	1.202272	0.65	130000	36.82231	26.0373036	25.14711279	8.996593	8653.081	450	900	8.51E-06	7.44E-08	6.81E-05
0.4	10	0.807123	1.24	248000	19.56273	13.83293991	13.83293991	4.950041	3196.232	450	900	8.51E-06	7.44E-08	8.51E-05
0.4	10	1.201698	0.6	120000	37.58872	26.57923683	25.94515536	8.992297	8644.82	450	900	8.51E-06	7.44E-08	8.51E-05
0.2	4	0.800712	1.51	302000	20.074	14.19446318	14.19446318	4.744347	3039.084	450	900	4.25E-06	1.49E-07	1.70E-05
0.4	6	0.802547	1.23	246000	20.32403	14.37126002	14.37126002	4.762174	3057.495	450	900	8.51E-06	7.44E-08	5.10E-05

图 4、生成的 Resonant_Parameter_Optimization excel 文件的示例，其中 Q_rated=0.4，K_ind=4 到 10，K_ind=4，Q_rated=0.2 到 0.4。

上面突出显示的部分显示了在 Q_rated＝0.4 时，对于每个输入的 K_ind（从 4 到 10），相对频率因子（K_rel_freq）从最大到最小的变化。底部突出显示的部分显示了在 K_ind=4 时针对每个输入的 Q_rated（从 0.2 到 0.4），K_rel_freq 的变化情况。

注：谐振变换器设计优化过程中的关键思想是找到 Q_rated 和 K_ind 的最佳值，以提供工作频率的窄变化范围。窄的频率范围对于磁性器件的设计、控制器的选择和部件尺寸的确定都很重要。

Excel 文件中关于所需频率范围的一些分析结果如下：

- 在 K_ind=4 和 Q_rated=0.4 时，针对所需直流增益，所需相对频率范围为 0.78 至 1.21
- 在 K_ind=6 和 Q_rated=0.4 时，针对所需直流增益，所需相对频率范围为 0.71 至 1.23

对于其他 K_ind（4 到 10）和 Q_rated（0.2 到 0.4）值也可以进行类似的分析。

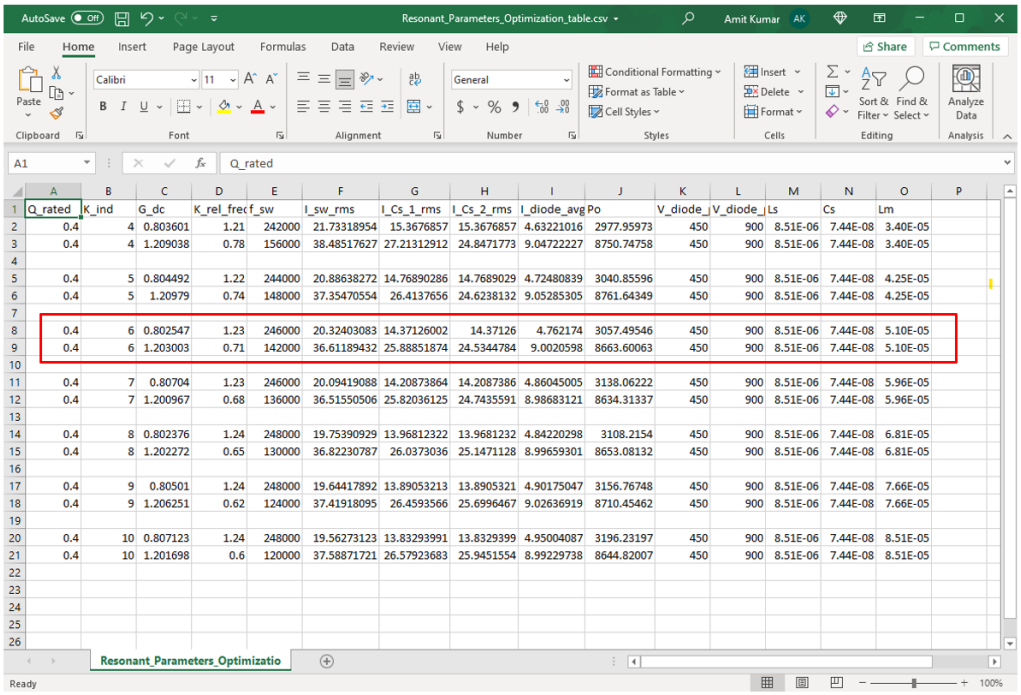
从设计的角度来看，低 Q_rated 值的好处是可以在设计中采用具有较小尺寸的磁性元件，降低电容器上的电压应力。但另一方面，通过增加 Q_rated 的值，可以通过较低的开关频率来获得最小直流增益。此外，较高的 K_ind 可以降低变压器循环电流和功率器件的导通损耗。

为了在设计中获得最佳折衷，Q_rated 选择在 0.5 以下，K_ind 选择在 4 到 10 之间，这样 G_dc 变化就可以获得较窄的频率范围（从 0.7 到 1.3）。这些选择确保了频率的合理窄范围和足够的循环电流，以便在低于谐振的条件下进行升压。这些选择还确保了足够高的品质因数，以在谐振频率以上的频率变化较小的情况下获得最小直流增益。

3.4. 选择 Q_RATED 和 K_IND 的最终设计值

在比较 Excel 文件中的计算输出值后，选择最终设计值，以使整体设计得到良好平衡，从而在效率、功率密度、成本和电压调节方面进行最佳权衡。

图 5 显示了不同 Q_rated 和 K_ind 值下的输出结果。



Q_rated	K_ind	G_dc	K_rel_freq	f_sw	I_sw_rms	I_Cs_1_rms	I_Cs_2_rms	I_diode_avg	Po	V_diode_	V_diode_	Ls	Cs	Lm
0.4	4	0.803601	1.21	242000	21.73318954	15.3676857	15.3676857	4.63221016	2977.95973	450	900	8.51E-06	7.44E-08	3.40E-05
0.4	4	1.209038	0.78	156000	38.48517627	27.21312912	24.8471773	9.04722227	8750.74758	450	900	8.51E-06	7.44E-08	3.40E-05
0.4	5	0.804492	1.22	244000	20.88638272	14.76890286	14.7689029	4.72480839	3040.85596	450	900	8.51E-06	7.44E-08	4.25E-05
0.4	5	1.20979	0.74	148000	37.35470554	26.4137656	24.6238132	9.05285305	8761.64349	450	900	8.51E-06	7.44E-08	4.25E-05
0.4	6	0.802547	1.23	246000	20.32403083	14.37126002	14.37126	4.762174	3057.49546	450	900	8.51E-06	7.44E-08	5.10E-05
0.4	6	1.203003	0.71	142000	36.61189432	25.88851874	24.5344784	9.0020598	8663.60063	450	900	8.51E-06	7.44E-08	5.10E-05
0.4	7	0.80704	1.23	246000	20.09419088	14.20873864	14.2087386	4.86045005	3138.06222	450	900	8.51E-06	7.44E-08	5.96E-05
0.4	7	1.200967	0.68	136000	36.51550506	25.82036125	24.7435591	8.98683121	8634.31337	450	900	8.51E-06	7.44E-08	5.96E-05
0.4	8	0.802376	1.24	248000	19.75390929	13.96812322	13.9681232	4.84220298	3108.2154	450	900	8.51E-06	7.44E-08	6.81E-05
0.4	8	1.202272	0.65	130000	36.82230787	26.0373036	25.1471128	8.99659301	8653.08132	450	900	8.51E-06	7.44E-08	6.81E-05
0.4	9	0.80501	1.24	248000	19.64417892	13.89053213	13.8905321	4.90175047	3156.76748	450	900	8.51E-06	7.44E-08	7.66E-05
0.4	9	1.206251	0.62	124000	37.41918095	26.4593566	25.6996467	9.02636919	8710.45462	450	900	8.51E-06	7.44E-08	7.66E-05
0.4	10	0.807123	1.24	248000	19.56273123	13.83293991	13.8329399	4.95004087	3196.23197	450	900	8.51E-06	7.44E-08	8.51E-05
0.4	10	1.201698	0.6	120000	37.58871721	26.57923683	25.9451554	8.99229738	8644.82007	450	900	8.51E-06	7.44E-08	8.51E-05

图 5、为相对频率（K_rel_freq_min 和 K_rel_freq_max）生成 Excel 文件，Q_rated=0.4，K_ind 从 4 到 10 的变化。

从图 5 中的 Excel 文件中可以发现，与其他条件相比，Q_rated=0.4 和 K_ind=6 提供了更窄的频率变化范围、更低的循环电流、更低的关断电流和最佳的设计平衡。对于这种车载充电器应用，较低的 Q_rated 值（小于 0.5）也将通过减小谐振电容和整个磁性部分的尺寸来降低谐振电容（Cs）上的电压应力和提高功率密度。因此，选择 Q_rated=0.4 和 K_ind=6 作为设计的最终值。

3.5. 计算谐振参数和耦合电感参数

在参数面板中输入选定的参数 Q_rated=0.4 和 K_ind=6，然后单击“更新参数文件”。这将更新参数文件“parameters main.txt”。双击打开参数文件，并手动设置 a_sp=1（请参见下图中的第 49 行）。然后选择“编辑>>显示值”以显示所有参数的值，如下所示：

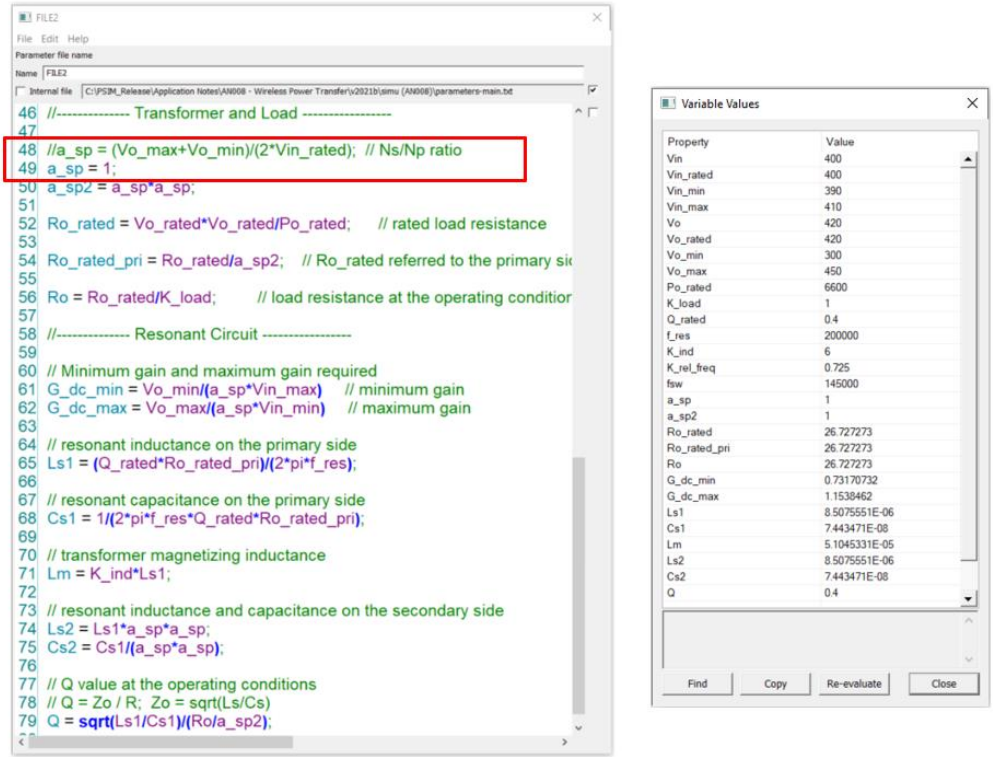


图 6、修改参数文件并计算值

这一步骤是必要的，因为默认情况下，变压器比 a_sp 是基于输入和输出电压计算的，并且可能不是 1。此外，每次单击“更新参数文件”按钮时都需要进行此更改，因为它将覆盖整个文件。

从参数文件中，基于选定的 Q_rated 和 K_ind，Ls、Cs 和 Lm 的设计值如下所示。

谐振参数值为：

Ls1 = Ls2 = (Q_rated*Ro_rated_pri)/(2*pi*f_res) = 8.50e-06 H

Cs1 = Cs2 = 1/(2*pi*f_res*Q_rated*Ro_rated_pri) = 7.44e-08 F

Lm = K_ind*Ls1 = 5.10e-05 H

耦合电感值为：

L11 = Ls1+Lm = 5.95e-05 H

L22 = Ls2+Lm = 5.95e-05 H

L12 = Lm = 5.10e-05 H

3.6. 在仿真中验证设计

用选定的值仿真谐振电源电路。开关或操作频率的所需值可以从设计工具中获得，以调节变化的输出电压。

可以引入包括相关的寄生、死区时间、MOSFET 电容等来完成仿真。工具计算的频率将提供足够精确的结果，以便为非理想或有损系统提供适当的负载和线路调节。

图 7 显示了在 K_rel_freq=0.89（178kHz）（低于谐振模式）时额定输出电压（420V）和额定输入电压（400V）下的仿真结果。

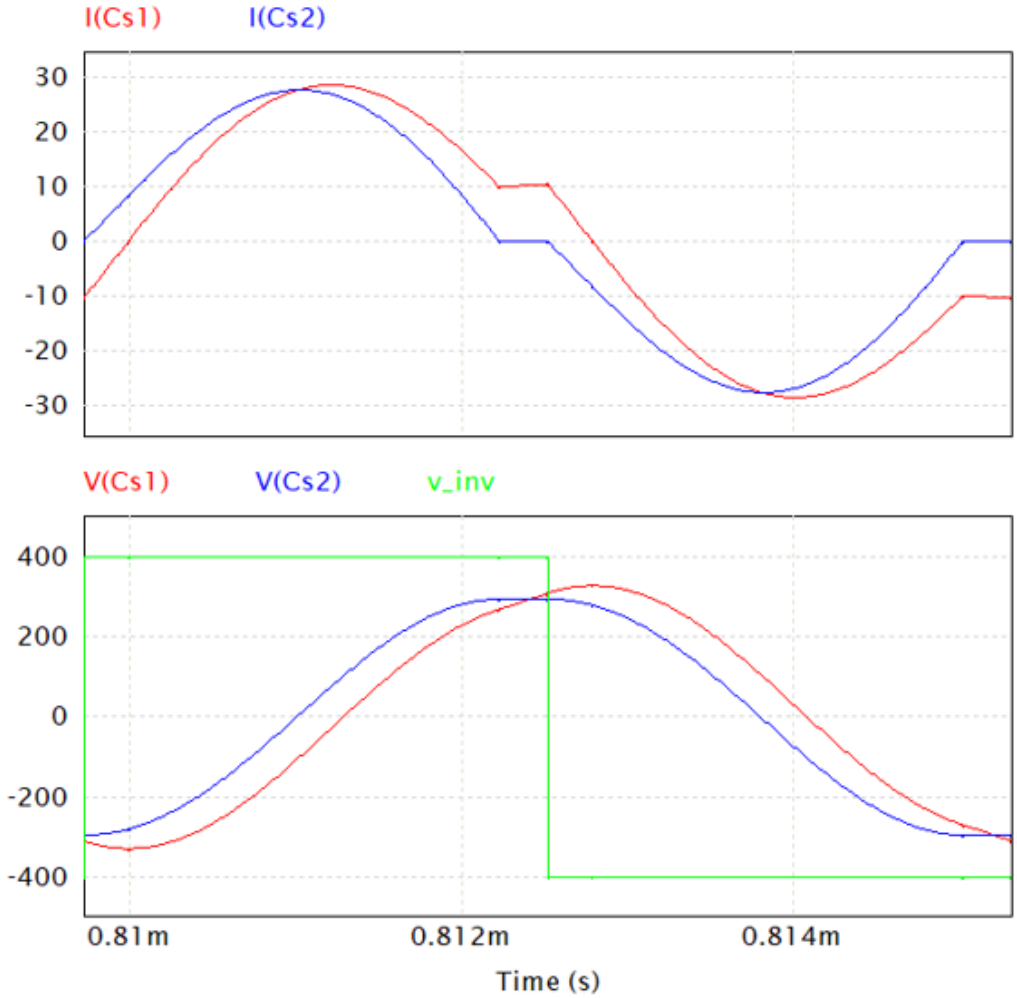


图 7、额定输出电压（420V）和额定输入电压（400V）下 K_rel_freq=0.89@178kHz（低于谐振模式）的仿真结果

图 8 显示了在相同操作条件下但来自稳态工具的相同波形。波形相同，验证了稳态解算器。

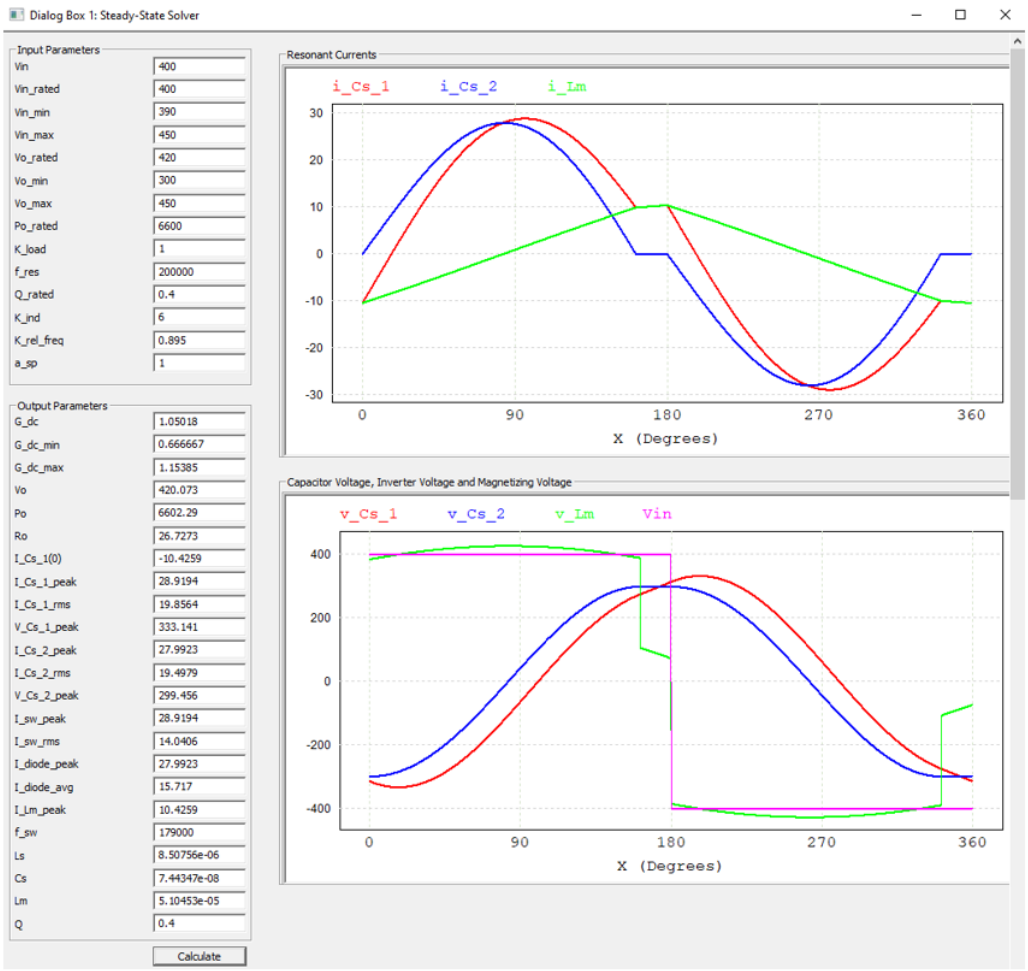


图 8、额定输出电压（420V）和额定输入电压（400V）下 K_rel_freq=0.89@178kHz（低于谐振模式）下稳态工具的波形。

图 9 显示了 K_rel_freq=1.26（252kHz）（高于谐振模式）时，最小输出电压（300V）和额定输入电压（400V）下的仿真结果。

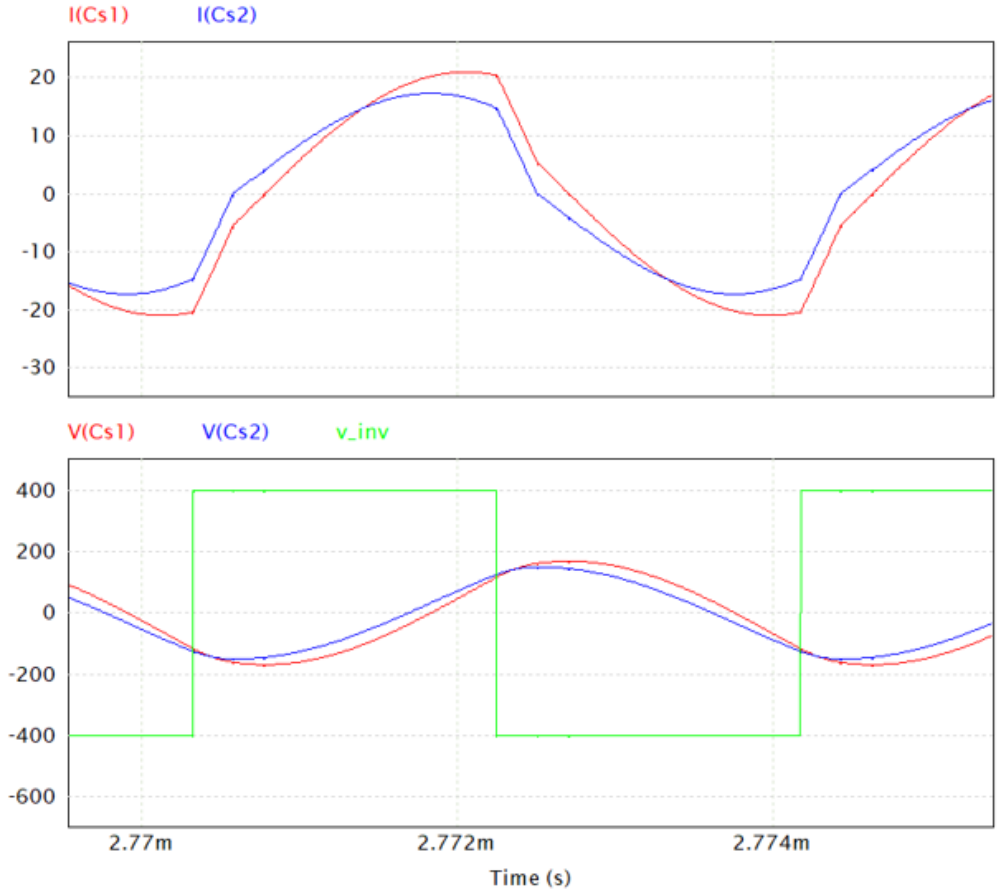


图 9、在 K_rel_freq=1.26@252kHz（高于谐振模式）下，最小输出电压（300V）和额定输入电压（400V）下的仿真结果

如上所示，在额定输出要求下，Q_rated 为 0.4，K_ind 为 6，所需 G_dc=0.7673。当输出电压从额定 420V 降至 300V 时，该工作模式下的 Q 值为 0.56，以验证最坏情况下的设计。

注：车载充电器应用有两种操作模式：恒流充电（CC）和恒压充电（CV）。上述设计选择适用于 CV 模式。请注意，负载电阻（Ro）、负载系数（K_load）和工作时的 Q 值将在 CC 模式下发生变化。例如，在输出电压为 300V 的 CC 模式下， Q 将从 0.4 增加到 0.56。类似地，K_load 将从额定值 1 增加到 1.4。对于用户来说，仔细检查所选的设计参数对于 CC 模式是否仍然有效是很重要的。

通过使用稳态解算器或设计曲线工具，可以得到 CC 模式下工作时的详细结果。

在额定输入电压（400V）的 CC 模式下的一些结果如下表 1 所示：

Vo (V)	K_rel_freq (required)	G_dc	I_sw_rms (A)	I_sw_peak (A)	I_diode_peak (A)	Q	Ro (Ohm)
420	0.89	1.12	13.74	28.57	27.68	0.40	26.72
300	1.26	0.77	8.66	23.56	27.05	0.56	19.09

图表 1、在可变输出电压（CC 模式）下对应不同工作频率的结果

这里应该注意的是，用于初级开关的 ZVS 和用于次级二极管的 ZCS 在所有条件下都保持不变。

4. 结论

有了电源设计套件，针对车载充电器电动汽车应用，设计谐振无线充电系统的过程变得相当容易，稳态工具和设计曲线工具为快速设计迭代和优化提供了必要的信息，并确保转换器在整个输入/输出电压范围内以软开关方式运行。并且最后的设计很容易在 PSIM 的时域仿真中得到验证。

5. 案例获取

如果您需要了解本案例更多信息，可以联系我们索取仿真报告或者现场讲解，联系方式如下：

邮箱：infor@innodrivetech.com

网址：http://www.innodrivetech.com

官方微信公众号：Power_Simulation

更多资讯，敬请扫码进入：