

基于软开关技术的CLLC谐振变换器设计

电气2101班：王思妍 指导教师：郭颖娜 论文类型：毕业论文

摘要：CLLC 谐振变换器具备优异的零电压开关特性及高功率密度，已成为电力电子领域的研究热点。本文详细分析了 CLLC 谐振变换器的工作原理，并对其闭环控制系统进行设计与实现。论文首先基于基波等效分析法构建了 CLLC 谐振变换器的基波等效模型，并通过 Mathcad 绘制电压增益特性曲线，经过对曲线进行分析选取了合适的 Q 与 k 的值，在电压增益曲线上划分软开关范围，为后续计算谐振网络参数提供了理论依据；其次，通过对几种常见的小信号建模方法分析比较选择了扩展描述函数法，成功得到了开环传递表达式并进行变换器闭环控制设计；最后，提出一种基于 PI 调节器的电压电流双环竞争控制架构，设计 CLLC 谐振变换器的闭环控制系统。利用 MATLAB/Simulink 建立了仿真模型，通过波形特性分析验证了变换器的零电压开关（ZVS）特性，同时证实了该闭环系统在恒压（CV）与恒流（CC）输出模式下具有良好的静态和动态响应性能。

关键词：CLLC 谐振变换器；软开关；小信号建模；双环竞争

1 研究背景

随着科学技术的飞速迭代与工业化进程的加速推进，人类对天然气、煤、石油等资源的需求剧增，不仅使环境被严重破坏，还导致很多依赖能源进口的国家的经济发展面临地缘政治风险，因此世界各国开始重视再生能源比如太阳能、风能、水能等新能源的研究与利用。

由于可再生能源发电如光伏发电会受到环境因素的制约存在输出电能波动的现象，如果将其加入电网系统可能会影响电网电能质量及稳定性，所以其目前不能被大规模投入使用，为了解决这种问题，本文主要研究将一种双向 DC-DC 变换器——CLLC 谐振变换器作为能量传输的中间桥梁加入到电网系统中从而缓解新能源发电不稳定导致的电力波动问题。

2 发展现状

近年来，双向 DC-DC 变换器在分布式新能源发电系统、电动汽车、储能系统等领域存在广泛的应用，目前存在的 DC-DC 变换器种类繁多，根据不同的功能可以将其分为不同类别。根据其是否具有电气隔离功能可以分为隔离型与非隔离型，比较典型的非隔离型双向 DC-DC 变换器主要有双向 Buck-Boost、双向 Cuk 等，隔离型双向 DC-DC 变换器主要有双向半桥、双向全桥、双向正激/反激等。由于变换器的效率

以及功率密度主要通过软开关技术得以提升，所以根据是否存在软开关功能，隔离型双向 DC-DC 变换器又可以分为谐振型与非谐振型。

CLLC 谐振变换器的稳定运行特性高度依赖于其控制策略的技术实现。其控制策略主要包扩定频控制、变频控制及混合控制三种，本文研究了变频控制下的 CLLC 谐振变换器。

3 CLLC 谐振变换器工作特性分析

3.1 变换器拓扑结构

CLLC 谐振变换器的拓扑结构如图 3.1 所示，变换器由两个完全对称的全桥逆变/整流单元通过谐振网络耦合构成，拓扑结构对称，可通过谐振元件与高频变压器协同作用实现功率的双向高效传输。

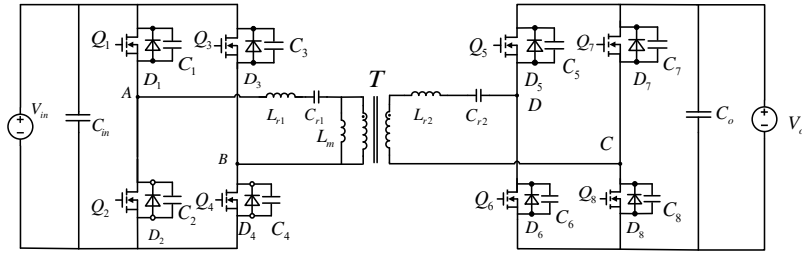


图3.1 CLLC谐振变换器拓扑图结构

3.2 变换器电压增益特性分析

根据基波等效分析法建立了变换器的基波等效模型，并得到变换器归一化的频率 f_n 、电感比 k 和品质因数 Q 的电压增益表达式，如式(3.1)所示：

$$M(k, Q, f_n) = \|H(jf_n)\| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{kf_n^2}\right)^2 + \frac{Q^2}{k^2} \left[(2k+1)f_n - \frac{2k+2}{f_n} + \frac{1}{f_n^3}\right]^2}} \quad (3.1)$$

谐振腔参数设计中，通过设定不同 k 、 Q 值，得到变换器的增益曲线，对不同 k 、 Q 值下电压增益曲线进行分析可知，随着 k 、 Q 值增大，变换器增益曲线均出现衰减趋势，为提高变换器的鲁棒性， k 与 Q 值均需选取较大值，本文取 $Q = 0.3$ 、 $k = 6$ 。

为实现 CLLC 谐振变换器功率开关器件（MOSFET）的零电压开关（ZVS）特性，本研究对其输入阻抗特性进行了深入分析。通过考察不同 Q 值的电压增益曲线，并基于谐振腔设计的对称性条件（ $g=h=1$ ），确定了输入阻抗呈现纯阻性特性的工作轨迹线，划分了变换器可以实现 ZVS 的稳定工作区域。

3.3 变换器谐振网络参数设计

CLLC 谐振变换器通过谐振腔的谐振实现能量从输入侧到输出侧的传输，因此谐振腔元件的参数设计至关重要。表 3-1 是 CLLC 谐振变换器的部分设计参数：

表 3-1 CLLC 谐振变换器设计参数

参数	数值	参数	数值
输入电压范围 V_{in}/V	48-75	谐振电感 L_{r1}/H	3.482×10^{-5}
额定输出电压 V_o/V	24	谐振电感 L_{r2}/H	6.192×10^{-6}
额定输出电流 I_o/A	3	谐振电容 C_{r1}/nF	295.547
开关频率范围 f_s/kHz	35-75	谐振电容 C_{r2}/nF	1.636×10^3
谐振频率 f_r/kHz	50	励磁电感 L_m/H	2.057×10^{-4}
额定负载 R/Ω	8		

3.4 变换器小信号模型建立

针对闭环控制系统设计需求，本文基于扩展描述函数法，建立了 CLLC 谐振变换器在稳态工作点的小信号模型，推导了频率-输出电压传递函数，如式（3.2）所示：

$$G_{vf}(s) = C \cdot [sI - A]^{-1} \cdot B \quad (3.2)$$

其中参数 A 、 B 、 C 如下：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & a_{13} & a_{14} & -L_{eq1} & 0 & -L_{eq2} & 0 & a_{19} \\ -\omega_s & 0 & a_{23} & a_{24} & 0 & -L_{eq1} & 0 & -L_{eq2} & a_{29} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & -L_{eq2} & 0 & -L_{eq3} & 0 & a_{39} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & -L_{eq2} & 0 & -L_{eq3} & a_{49} \\ \frac{1}{C_{r1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{r1}} & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{r2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{r2}} & 0 & 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{93} & a_{94} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{99} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B = [\omega_s I_{1c} \quad -\omega_s I_{1s} \quad \omega_s I_{2c} \quad -\omega_s I_{2s} \quad \omega_s U_{1c} \quad -\omega_s U_{1s} \quad \omega_s U_{2c} \quad -\omega_s U_{2s} \quad 0]^T \quad (3.4)$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (3.5)$$

4 CLLC 谐振变换器控制方法及特性分析

4.1 开环控制系统软开关特性分析

在欠谐振时，由于谐振电感阻抗远远小于励磁电感阻抗，励磁电流会在特定阶段出现短暂缓慢上升；谐振时，原边侧谐振电流波形呈现出典型的正弦特性，励磁电流波形呈线性变化，为标准的三角波；过谐振时，开关管导通期间流过谐振电感的电流迅速增大使波形呈现陡峭上升趋势，励磁电流逐渐上升并在开关管关断后通过续流二极管维持，其波形接近理想正弦波特征。如图 4.1、图 4.2、图 4.3 所示：

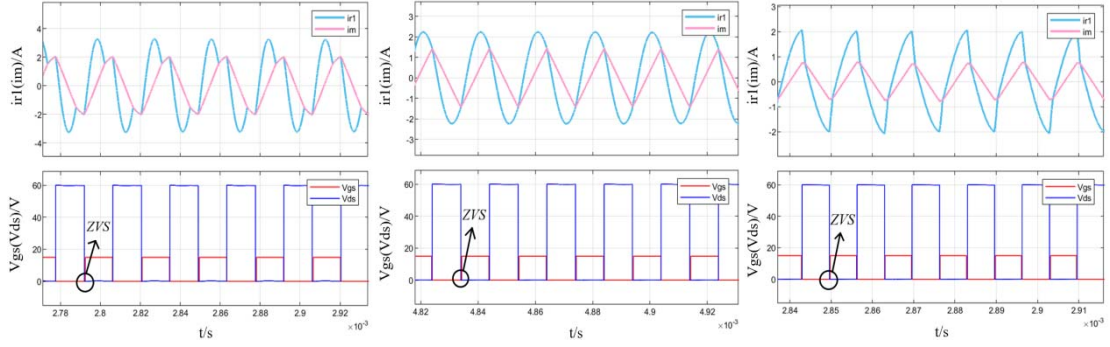


图 4.1 欠谐振 $f_s < f_r$ 图 4.2 谐振 $f_s = f_r$ 图 4.3 过谐振 $f_s > f_r$

可以看出，无论处于哪种工作模态，变换器原边 MOSFET 均可实现 ZVS 功能。

4.2 闭环控制系统的静态及动态特性分析

为设计 CLLC 谐振变换器闭环系统，本文采用基于 PI 调节的电压-电流双环竞争控制策略。该策略采样输出电压/电流，与参考值比较产生误差信号，经独立 PI 调节器补偿后送入最大值选择器。选择器输出两环 PI 结果中的较大值作为控制变量，转换为表征期望工作点的参考频率信号。此信号驱动压控振荡器(VCO)，其输出与预设载波比较，生成驱动功率开关器件的 PWM 信号。

为了验证 CLLC 谐振变换器的稳定性和闭环控制设计的合理性，在变换器副边侧加入可变电阻、在原边侧加入信号发生器进行仿真实验。具体波形图下图所示：

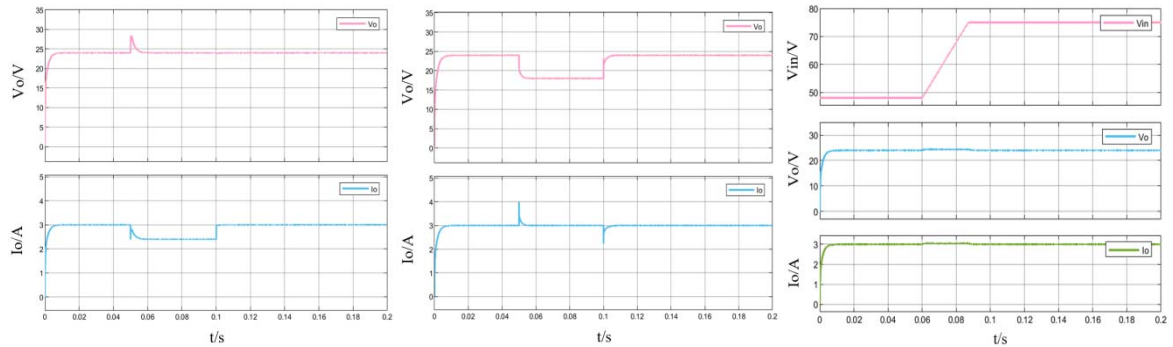


图 4.4 $8\Omega \rightarrow 10\Omega \rightarrow 8\Omega$ 图 4.5 $8\Omega \rightarrow 6\Omega \rightarrow 8\Omega$ 图 4.6 V_{in} 变化对 V_o 、 I_o 的影响

由图 4.4 和 4.5 可知，负载在 0.05 秒至 0.1 秒时发生了不同趋势变化，变化瞬间系统的输出电压电流均产生明显过冲响应；但当负载增大时系统的输出电压保持恒定，实现了恒压控制；负载减小时输出电流保持恒定，实现了恒流控制。在负载恢复到 8Ω 后输出电压电流均恢复到额定输出。由图 4.6 可知， $t = 0.06$ 秒时，输入电压从 48V 线性增长至 75V。当输入电压开始线性增长时，输出端的电压和电流参数均出现了明显微小的波动；但随着输入电压达到并稳定在 75V 时，输出电压和输出电流可以稳定在设定值，保持恒定。

5 结论

CLLC 谐振变换器具有良好的稳定性，并可实现 MOSFET 的 ZVS 开关特性。