DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.135 **中图分类号**：TM14 **文献标志码**：A

三相双向 LLC 谐振变换器效率特性优化设计研究

白洪超[1](中国电源学会会员)，赵迎辉[1](中国电源学会会员)，禹金标[1](中国电源学会会员)，
吴晗子[2]，郝嘉涵[2]，黄先进[2](中国电源学会高级会员)
(1.山东艾诺智能仪器有限公司，济南 250104；2.北京交通大学电气工程学院，北京 100044)

摘要：双向 DC-DC 变换器在分布式发电系统、变流装置开发测试和电动汽车等领域得到广泛应用。双向 LLC 谐振变换器以其增益宽、效率高和输入输出隔离等优点而被广泛应用于直流双向 DC-DC 变换器中。以三相双向 LLC 谐振变换器拓扑为基础，建立了损耗模型，并重点分析了变换器的效率特性。同时，考虑变换器的效率与增益指标，提出了效率特性优化的谐振参数设计方法。搭建了 100 kW 的三相双向 LLC 谐振变换器样机，并通过实验证实了所提方法的有效性和可行性。

关键词：LLC 谐振变换器；软开关；效率优化；谐振参数

Research on Optimization Design of Efficiency Characteristics Based on Three-phase Bidirectional LLC Resonant Converter

BAI Hongchao[1], *Member*, *CPSS*, ZHAO Yinghui[1], *Member*, *CPSS*, YU Jinbiao[1], *Member*, *CPSS*,
WU Hanzi[2], HAO Jiahan[2], HUANG Xianjin[2], *Senior Member*, *CPSS*
(1. Shandong Ainuo Instrument Co., Ltd., Jinan 250104, China; 2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Bidirectional DC-DC converters are widely applied in the fields such as distributed generation systems, converter development and testing, and electric vehicles. Owing to their advantages including a wide gain, a high efficiency, and input and output isolation, bidirectional LLC resonant converters are widely used in DC bidirectional DC-DC converters. Based on the topology of a three-phase bidirectional LLC resonant converter, a loss model is established, and the efficiency characteristics of the converter are analyzed in depth. Meanwhile, with the consideration of the efficiency and gain indexes of the converter, a resonant parameter design method for optimizing the efficiency characteristics is proposed. A prototype of a 100 kW three-phase bidirectional LLC resonant converter was built, and the effectiveness and feasibility of the proposed method were verified by experimental results.

Keywords: LLC resonant converter; soft-switching; efficiency optimization; resonance parameter

双向 DC-DC 变换器具有能量双向流动的特性，可以有效地在可再生能源系统和储能系统之间进行能量转换和存储，LLC 谐振变换器是双向 DC-DC 变换器研究的热点之一[1]。对 LLC 谐振变换器效率特性的优化研究主要集中在 3 个方面：改进电路结构[2-7]、改进控制策略和优化谐振参数设计方法[8-11]。然而，通过改进电路结构和控制策略来优化效率特性较为复杂，最简单直接的方法是通过优化谐振参数设计方法来选择合适的谐振参数，从而减小损耗、提高效率，达到优化效率特性的目的。

文献[12]提出了一种利用时域分析法建立数学

收稿日期：2024-05-31；**修回日期**：2024-07-27；**录用日期**：2024-09-02；**网络首发日期**：2024-09-18
基金项目：知识产权许可资助项目(E24ZH200040)
This work is supported by Intellectual Property Licensing Program under the grant E24ZH200040

模型的效率优化的LLC谐振变换器参数设计方法，采用粒子群优化算法来求解参数值，降低功率器件的关断损耗；然而，该方法并未考虑其他器件损耗及整体效率。文献[13]提出了一种使谐振电流有效值最小的参数优化方法，但仅考虑了导通损耗的优化，未对整体损耗进行分析和优化。文献[14]提出了一种恒功率输出的谐振参数设计方法，但仅考虑了最坏情况，无法优化谐振参数设计。文献[15]首先分析励磁电感 L_m 的取值，使其尽可能取得最大值，并在此基础上确定电感比例系数 k 与品质因数 Q 的乘积 P_{kQ}；然后，在 P_{kQ} 固定的情况下，通过电压增益曲线选择 k 值，最终计算得到谐振参数；然而，该方法采用试凑的方式选择 k 与 Q 这 2 个中间参数，导致设计过程中存在设计环路，增加了参数设计的复杂性。文献[16]通过推导关于 k、Q 的效率函数，选择第一谐振频率 f_r，并通过仿真比较候选谐振参数，最终得到经过效率优化的谐振参数；然而，确定最终参数需要对多组候选参数进行比较，设计过程相对烦琐。文献[17]使用布谷鸟搜索算法对 LLC 谐振变换器的谐振腔参数进行智能优化设计，减小了损耗，提高了效率特性；然而，该设计流程相对复杂，需要多次迭代。文献[18]将基波分析法和时域分析法结合，优化了励磁电感 L_m 和第一谐振频率 f_r 的选择；但是该方法没有考虑实现软开关的最大 Q 值的裕量，可能导致在满载运行时失去零电压开关 ZVS(zero voltage switching)特性。文献[19]在谐振参数设计过程中分析了谐振电流与谐振参数的关系，通过调整谐振参数使功率器件导通损耗最小，并通过电感比确定了变换器的增益；然而，该方法只考虑了导通损耗，没有对整体效率进行优化。

本文提出了一种考虑效率特性优化的谐振参数设计方法。该方法综合考虑了三相双向 LLC 谐振变换器的增益和效率因素，通过对谐振参数进行优化设计来提高其效率特性。首先建立了三相双向 LLC 谐振变换器的损耗模型，并对其效率特性进行了分析；然后通过优化选择励磁电感 L_m 和第一谐振频率 f_r，使三相双向 LLC 谐振变换器的效率特性更优；同时考虑变换器的增益模型与增益指标，根据增益指标不等式选择谐振电感 L_r；最后搭建了实验样机，验证了所提方法的有效性和合理性。

1 变换器损耗分析

三相双向 LLC 谐振变换器广泛应用于电动汽车充电桩、电池储能系统和分布式能源系统等应用场景[20]，其电路拓扑结构如图 1 所示。

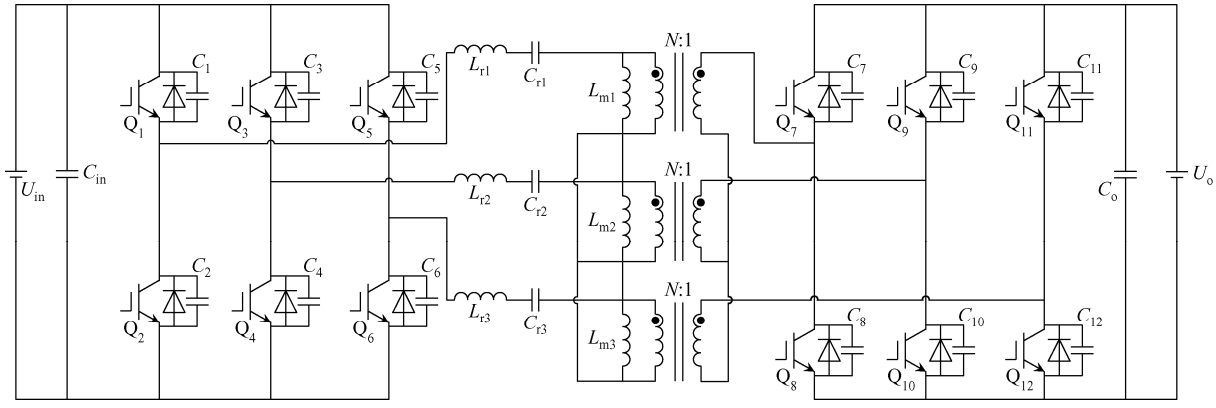


图 1 三相双向 LLC 谐振变换器拓扑

Fig. 1 Topology of three-phase bidirectional LLC resonant converter

三相双向 LLC 谐振变换器主要由逆变桥、谐振腔、整流桥和滤波电容 4 个部分组成。逆变桥由 6 个功率开关管组成，谐振腔包括谐振电感 L_r、谐振电容 C_r 和励磁电感 L_m，整流桥由 6 个功率开关管组成。三相驱动脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)之间采用 120° 相位差的方式工作[21-24]。

三相双向 LLC 谐振变换器的损耗主要包括功率开关管、变压器、电感和电容等元件的损耗[25-27]。

1.1 功率开关管损耗

在硬开关状态下，功率开关管的开通和关断会导致电压和电流出现交截区域，从而产生开通和关断损耗。然而，三相双向 LLC 谐振变换器具有软开关特性[23]，即在一次侧功率开关管开通之前，集射极电压已经降为 0，因此电压和电流曲线不会产生交截区域。因此，在这种情况下，只需要考虑导通损耗和关断损耗，可忽略开通损耗。功率开关管的关断损耗为

$$P_{\text{off}} = m_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{\text{in}} \cdot I_{\text{off}} \cdot t_{\text{f}} \cdot f_{\text{s}} \tag{1}$$

式中：m_1 为开关管个数，本文取 6；t_{f} 为下降时间；U_{in} 为功率开关管两端电压，即输入电压；I_{off} 为关断电流；f_{s} 为工作频率。

三相双向 LLC 谐振变换器的谐振电流可以表示为

$$I_{\text{prms}} = \frac{U_{\text{o}}\sqrt{18\pi^2 L_{\text{m}}^2 + 2R_{\text{o}}^2 T_{\text{s}}^2 n^4}}{18 L_{\text{m}} R_{\text{o}} n} \tag{2}$$

$$I_{\text{srms}} = \frac{\pi U_{\text{o}}}{3\sqrt{2} R_{\text{o}}} \tag{3}$$

式中：I_{prms} 为谐振电流有效值；I_{srms} 为变压器二次侧电流有效值；U_{o} 为输出电压；R_{o} 为等效负载电阻；n 为变压器匝比；T_{s} 为开关周期。

一次侧功率开关管导通损耗 P_{pcond} 和二次侧功率开关管反并联二极管的导通损耗 P_{scond} 的计算公式分别为

$$P_{\text{pcond}} = m_1 \cdot \frac{\int^{T} U_{\text{ce}}(I_{\text{prms}}, T_{\text{j}}) \cdot I_{\text{prms}} \cdot D(t)\mathrm{d}t}{T_{\text{s}}} \tag{4}$$

$$P_{\text{scond}} = m_1 \cdot \frac{T_{\text{s}}}{\int U_{\text{ce}}(I_{\text{srms}}, T_{\text{j}}) \cdot I_{\text{srms}} \cdot D(t)\mathrm{d}t} T_{\text{s}} \tag{5}$$

式中：U_{ce} 为功率开关管在相应条件下的集射极饱和压降；T_{j} 为结温；$D(t)$为开关管的瞬时占空比。因此，功率开关管的导通损耗 P_{cond} 为

$$P_{\text{cond}} = P_{\text{pcond}} + P_{\text{scond}} \tag{6}$$

1.2 磁性元件损耗

本文使用变压器的漏感作为三相双向 LLC 谐振变换器的谐振电感，因此仅对三相双向 LLC 谐振变换器的变压器损耗进行分析。采用修正后的 Steinmetz 方程(即 MSE 方程)，来计算阶梯型电压波激励下的磁心损耗。MSE 方程通过对不同时间点的磁通密度变化速率进行加权平均[24-25]，确定等效的正弦波频率 f_{eq} 为

$$f_{\text{eq}} = \frac{2}{\Delta B^2 \cdot \pi^2} \int_0^T \left(\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \right)^2 \mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：B 为磁心磁通密度；T 为开关周期。使用 f_{eq} 替换传统 Steinmetz 方程中的 f_{s}，可以得到修正 Steinmetz 方程，即 MSE 方程，表达式为

$$P_{\text{cv}} = \left(\frac{8}{\pi^2} \right)^{\alpha - 1} \cdot K \cdot f_{\text{s}}^{\alpha} \cdot B_{\text{max}}^{\beta} \tag{8}$$

式中：P_{cv} 为单位体积磁心损耗；K 、α 、β 为与磁心材料相关的 Steinmetz 系数，可由材料手册查取；B_{max} 为磁通密度的峰值；f_{s} 为工作开关频率。

绕组损耗是变压器绕组中电流通过时产生的能量损耗，可以通过绕组等效电阻上瞬时功率的平均值来表示。变压器的铜损为

$$P_{\text{r}} = I_{\text{prms}}^2 R_{\text{p}} + I_{\text{srms}}^2 R_{\text{s}} \tag{9}$$

式中：R_{p} 为变压器一次侧线圈电阻；R_{s} 为变压器二次侧线圈电阻。

因此，三相双向 LLC 谐振变换器的变压器损耗为

$$P_{\text{b}} = P_{\text{cv}} + P_{\text{r}} \tag{10}$$

式中：P_{cv} 为磁心损耗；P_{r} 为绕组损耗。

1.3 电容损耗

电容损耗主要由等效串联电阻产生。其中，电容的等效串联电阻为

$$R_{\text{ESR}} = \frac{\tan\delta}{2\pi f C} \tag{11}$$

式中：δ 为电容损耗角，其正切值表征电容的介质损耗，可由电容器规格书获取；f 为工作频率；C 为电容值。

因此，电容损耗为

$$P_{\text{c}} = I_{\text{crms}}^2 R_{\text{ESR}} \tag{12}$$

式中，I_{crms}为电容电流有效值。

2 三相双向 LLC 谐振变换器效率特性优化分析

LLC 谐振变换器的谐振电流可以视为励磁电感和开关频率的函数。在谐振点处，变换器通常具有最高效率。将谐振电流有效值表示为第一谐振频率和励磁电感的函数，具体为

$$I_{\mathrm{prms}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})=\frac{U_{\mathrm{o}}\sqrt{18\pi^2L_{\mathrm{m}}^2f_{\mathrm{r}}^2+2R_{\mathrm{o}}^2n^4}}{18L_{\mathrm{m}}f_{\mathrm{r}}R_{\mathrm{o}}n} \tag{13}$$

分析f_{r}和L_{m}与P_{cond}的关系，随着f_{r}和L_{m}的升高，导通损耗降低。通过优化f_{r}和L_{m}的选择来大幅减小功率开关管的导通损耗。同样，将关断电流看作f_{r}和L_{m}的函数，具体为

$$I_{\mathrm{off}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})=\frac{nU_{\mathrm{o}}}{9L_{\mathrm{m}}f_{\mathrm{r}}} \tag{14}$$

根据关断电流表达式，可得功率开关管的关断损耗函数为

$$P_{\mathrm{off}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})=m_{\mathrm{l}}\cdot\frac{1}{2}\cdot U_{\mathrm{in}}\cdot I_{\mathrm{off}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})\cdot t_{\mathrm{f}}\cdot f_{\mathrm{r}} \tag{15}$$

随着L_{m}的增大，关断损耗将以反比例的趋势降低。因此，可通过L_{m}的优化选择来减小功率开关管的关断损耗。同样地，变压器损耗也可看作f_{r}和L_{m}的函数，具体为

$$P_{\mathrm{b}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})=P_{\mathrm{cv}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})+P_{\mathrm{r}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}}) \tag{16}$$

综合考虑三相双向 LLC 谐振变换器的功率开关管损耗和磁性元件损耗，总损耗P_{sum}的计算公式为

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{sum}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})=&P_{\mathrm{cond}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})+P_{\mathrm{off}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})+\\&P_{\mathrm{b}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})+P_{\mathrm{c}}\end{aligned} \tag{17}$$

由式(17)可知，变换器总损耗主要与f_{r}和L_{m}有关，分析f_{r}和L_{m}与变换器总损耗的关系，绘制总损耗三维图，如图 2 所示。

由图 2 可得，三相双向 LLC 谐振变换器的P_{sum}随L_{m}和f_{r}的增大而减小。由三相双向 LLC 谐振变换器的P_{sum}可计算得到效率表达式为

$$\eta(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})=\frac{P_{\mathrm{o}}}{P_{\mathrm{sum}}(L_{\mathrm{m}},f_{\mathrm{r}})+P_{\mathrm{o}}} \tag{18}$$

式中，P_{o}为输出功率。同样可将三相双向 LLC 谐振变换器的效率看作L_{m}和f_{r}的函数，绘制三相双向 LLC 谐振变换器的效率三维图如图 3 所示。在设计谐振参数时，选择较大的f_{r}和L_{m}可以优化三相双向 LLC 谐振变换器的效率特性。

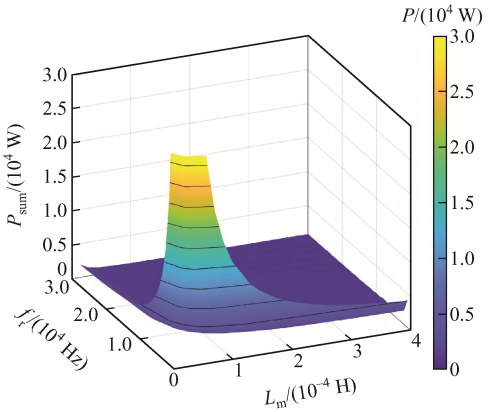


图 2 总损耗三维图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of total loss

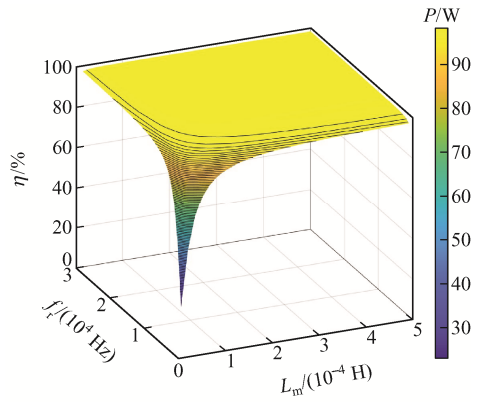


图 3 效率三维图

Fig. 3 Three-dimensional diagram of efficiency

3 效率特性优化的谐振参数设计方法

在设计三相双向 LLC 谐振变换器的谐振参数时，优化其效率特性，形成一套效率特性优化的谐振参数设计方法。首先，根据额定输入电压与额定输出电压的直流增益来确定变压器的变比n，计算公式为

$$n=\frac{U_{\mathrm{in}}}{U_{\mathrm{o}}} \tag{19}$$

建立效率模型和效率指标不等式，并通过求解不等式来确定 L_m 和 f_r 的选择，效率指标不等式为

$$\eta(f_s, L_m) \geqslant \eta_{need} \tag{20}$$

式中：$\eta(f_s, L_m)$ 为三相双向 LLC 谐振变换器的效率模型；η_{need} 为效率指标。

效率指标不等式是二元高阶非齐次、非线性不等式，使用图解法对其进行求解。以 90%的效率指标为例，使用图解法求解效率指标不等式如图 4 所示。根据三维图限定取值范围，利用软件观测图形边界，取 2%的裕量，此时范围内所有值均可满足需求，根据实际应用要求，在范围内对 L_m 和 f_r 进行选择，同时通过分析 L_m 和 f_r 与变换器效率的关系，确保了在所选 L_m 和 f_r 的条件下，变换器能够满足效率指标，具有较优的效率特性。同时，变换器还需要满足电压增益的指标。变换器的增益 M_{dc} 的表达式为

$$M_{dc} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{kf^{*2}}\right)^2 + \left(f^* - \frac{1}{f^*}\right)^2 \cdot Q^2}} \tag{21}$$

式中，f^* 为归一化频率。

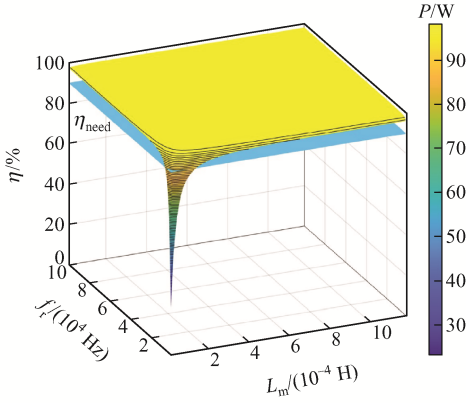


图 4　效率指标不等式的图解法

Fig. 4 Graphical method for solving inequality of efficiency index

根据三相双向 LLC 谐振变换器的软开关边界条件，可以得到品质因数的最大值 Q_{max} 为

$$Q_{max} = 0.95 \frac{1}{kM_{max}} \sqrt{k + \frac{M_{max}^2}{M_{max}^2 - 1}} \tag{22}$$

式中，M_{max} 为最大电压增益。将式(22)代入式(21)，可得增益模型 $M_{dc}(L_r, f^*)$，其以 f^* 和 L_r 为自变量。因此，可通过优化 L_r 的选择来满足变换器的增益指标要求。增益指标为

$$M_{max} = \frac{nU_o}{U_{inmin}} \tag{23}$$

$$M_{min} = \frac{nU_o}{U_{inmax}} \tag{24}$$

使用增益模型和增益指标可建立增益指标不等式，具体为

$$M_{min} \leqslant M_{dc}(L_r, f^*) \leqslant M_{max} \tag{25}$$

增益指标不等式同样是二元高阶非齐次、非线性不等式，同样使用图解法对其求解，如图 5 所示。

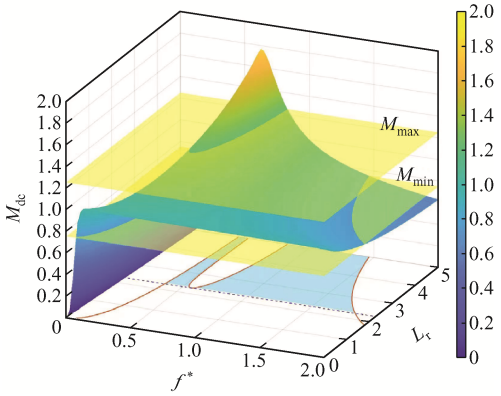


图 5　增益指标不等式的图解法

Fig. 5 Graphical method for solving inequality of gain index

处于电压增益指标平面 M_{max} 和 M_{min} 之间的电压增益曲面向 L_r-f^* 平面的投影为可用区域，即为电压增益不等式的解集。同样，利用软件观测图形边界取 2%的裕量，根据实际应用要求，在投影区域内选取可用 L_r 的值，同时可观测 f^* 的范围以作为变换器工作频率范围的参考。C_r 的计算公式为

$$C_r = \frac{1}{L_r(2\pi f_r)^2} \tag{26}$$

为验证所提方法的有效性，对 1 个 100 kW 的变换器样机进行参数设计，设计指标见表 1。

使用效率特性优化的谐振参数设计方法所设计的谐振腔参数与使用传统谐振参数设计方法所设计的谐振参数见表 2。目标变换器在反向运行时，

电压增益比等于变压器匝比。因此，只需在f_r处工作即可满足反向电压增益指标。

表 1 设计指标

Tab. 1 Design indexes

指标	正向运行	反向运行
功率等级 P_o/kW	100	100
输入电压 U_{in}/V	750~850	600
输出电压 U_o/V	600	800
额定输入电压 U_{1N}/V	800	600
额定输出电压 U_{2N}/V	600	800
开关频率范围 f_s/kHz	≥10	≥10
效率 η/%	≥95	≥95

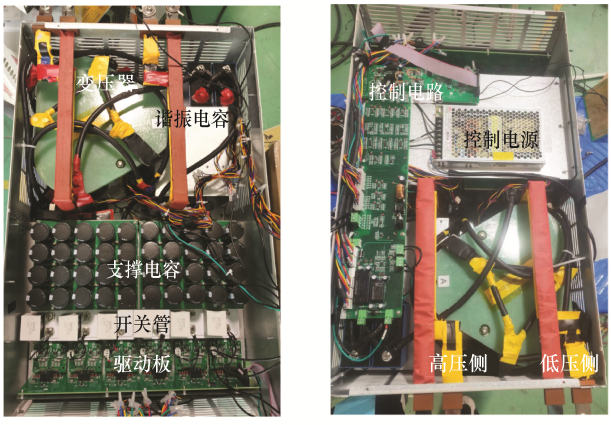
表 2 谐振腔相关元件参数

Tab. 2 Component parameters related to resonant slot

变换器参数	效率优化设计方法	传统设计方法
谐振电容 C_r/μF	10	19
谐振电感 L_r/μH	10	10
励磁电感 L_m/μH	1 000	1 000

4 实验验证

本节搭建了三相双向 LLC 谐振变换器的样机对所提方法进行实验验证，样机实物如图 6 所示，效率测试实验平台如图 7 所示。



(a) 主电路 (b) 控制电路

图 6 样机实物

Fig. 6 Photos of prototype

变换器样机的一次侧 PWM 驱动波形如图 8 所示。由图可得，三相驱动之间存在 120° 的相位差，满足驱动要求。观测变换器的一次侧 C 相上管软开关实现情况，如图 9 所示。

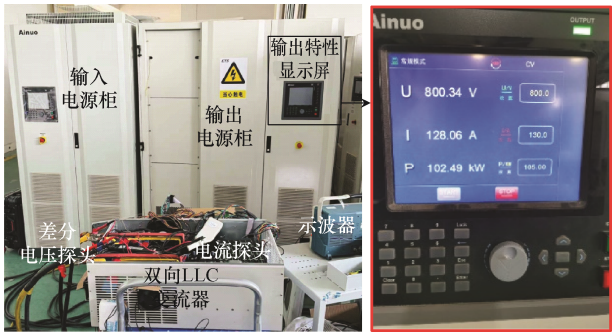


图 7 效率测试实验平台

Fig. 7 Experimental platform for efficiency test

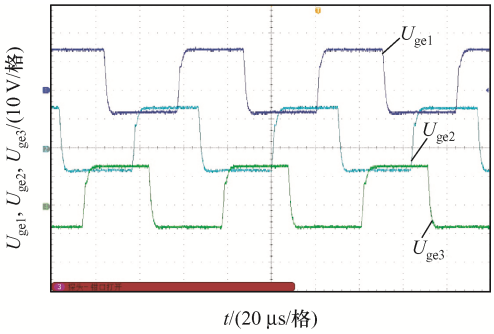
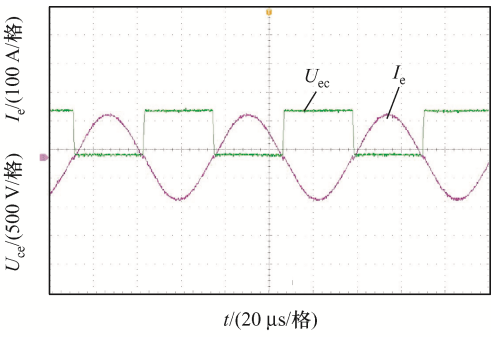
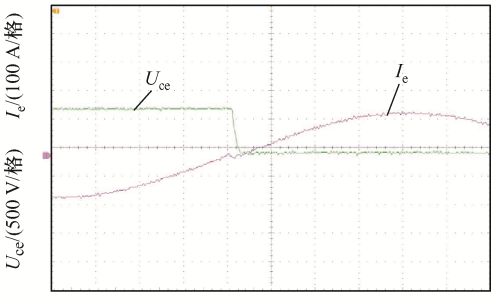


图 8 三相驱动波形

Fig. 8 Three-phase drive waveforms



(a) 功率开关管软开关波形

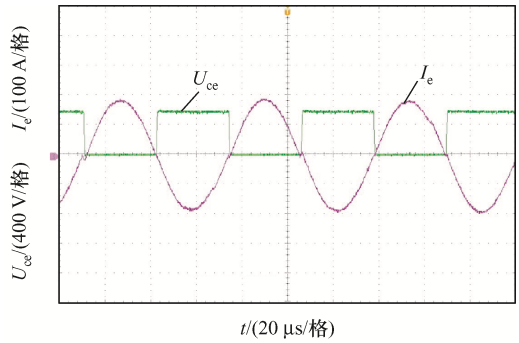


(b) 软开关细节波形

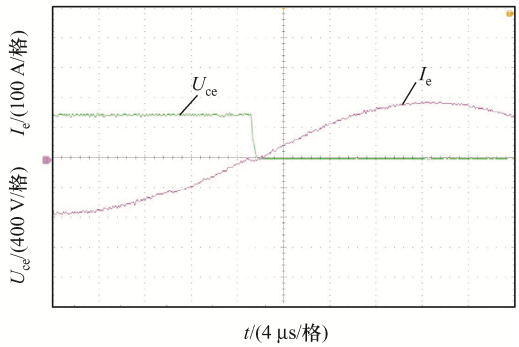
图 9 正向满载软开关波形

Fig. 9 Soft-switching waveforms under forward full-load

变换器样机反向满载运行时的软开关波形如图 10 所示。



(a) 功率开关管软开关波形



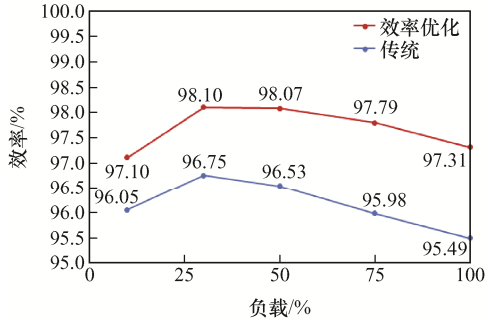
(b) 软开关细节波形

图 10　反向满载软开关波形

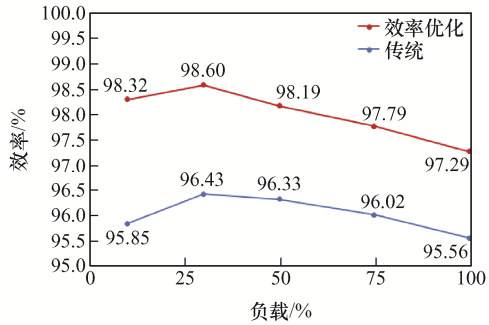
Fig. 10 Soft-switching waveforms under reverse full-load

由图 10 可得，三相双向 LLC 谐振变换器的功率开关管导通之前，器件两端的电压已经变为 0。因此，正向和反向满载运行时，变换器均可实现 ZVS 软开关。对变换器样机进行效率测试，同时为实验样机更换了传统方法得到的谐振电容，其他参数均维持不变，然后进行了效率测试，与经过效率优化设计后的实验数据进行了对比，两者效率不同，效率曲线对比如图 11 所示。

由图 11 分析可得，在相同功率工作情况下，优化前正、反向工作效率差异不大，采用效率特性优化的谐振参数设计方法后，轻载时正、反向工作效率相差 1.20%，在负载率超过 50%的工况下，正、反向运行效率之差小于 0.10%，差异可忽略。优化后，正向运行工况下满载时效率提高 1.82%，反向运行工况下满载时效率提高 1.73%，仅相差 0.09%。因此可以得出，在同一设计方案下正、反向工作效率相差不大，且优化设计后正、反向工作效率都有所提升。本文没有比较优化前后正、反向工况提升效率的差异，因此此处存在的差异无法归结到器件参数或者材料特性上，故认为在测试误差范围内。



(a) 正向运行



(b) 反向运行

图 11　效率曲线

Fig. 11 Efficiency curves

5　结语

本文通过对三相双向 LLC 谐振变换器的功率开关管、磁性元件和输入输出滤波电容的损耗进行分析，建立了损耗模型并进行了效率特性优化分析。由分析结果可知，通过优化选择励磁电感 L_m 和第一谐振频率 f_r 可提高变换器的效率。以效率特性优化分析结果为基础，本文提出了一种效率特性优化的谐振参数设计方法，可在满足变换器增益指标的同时提高其效率特性，并通过实验验证了其可行性和有效性。

参考文献：

[1] 李苏. 储能系统中双向谐振型 DC/DC 变换器研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
Li Su. Research on bidirectional resonant DC/DC conv-

erter in energy storage system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese)

[2] 冯雪. LLC 谐振变换器损耗分析与效率优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
Feng Xue. Loss analysis and efficiency optimization of LLC resonant converter [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[3] 刘晓东, 董保成, 吴慧辉, 等. 基于并联变压器切换的 LLC 谐振变换器宽范围效率优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3018-3029.
Liu Xiaodong, Dong Baocheng, Wu Huihui, et al. Wide range efficiency optimization control strategy for LLC resonant converter based on parallel transformer switching [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3018-3029. (in Chinese)

[4] 史冉. 高频高效率的 LLC 矩阵变压器设计及优化[D]. 南京: 东南大学, 2020.
Shi Ran. Design and optimization of high frequency and high efficiency LLC matrix transformer [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)

[5] 刘晓东, 李宁, 张君扬, 等. 一种可控励磁电感的 LLC 变换器的效率优化[J]. 电力电子技术, 2023, 57(9): 95-98.
Liu Xiaodong, Li Ning, Zhang Junyang, et al. Efficiency optimization of LLC converter with controllable excitation inductance [J]. Power Electronics, 2023, 57(9): 95-98. (in Chinese)

[6] Kim D K, Moon S, Yeon C O, et al. High-efficiency LLC resonant converter with high voltage gain using an auxiliary LC resonant circuit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6901-6909.

[7] Wu Hongfei, Mu Tiantian, Gao Xun, et al. A secondary-side phase-shift-controlled LLC resonant converter with reduced conduction loss at normal operation for hold-up time compensation application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5352-5357.

[8] 程鹤, 徐恺, 李朋圣, 等. 三相 CLLC 谐振变换器磁集成平面变压器设计与优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3774-3786.
Cheng He, Xu Kai, Li Pengsheng, et al. Design and optimization of three-phase CLLC resonant converter with magnetic integrated planar transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3774-3786. (in Chinese)

[9] 王哲, 李驰, 郑泽东, 等. 一种基于耦合电感的高增益软开关谐振变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 194-205.
Wang Zhe, Li Chi, Zheng Zedong, et al. A high step-up ZVS/ZCS resonant converter based on coupled inductor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 194-205. (in Chinese)

[10] 王爱玲. 提高 LLC 谐振变换器轻载效率的改进型间歇控制[J]. 电源学报, 2022, 20(3): 98-104.
Wang Ailing. Improved burst control for improving light-load efficiency of LLC resonant converter [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(3): 98-104. (in Chinese)

[11] 王暄, 王广柱, 孙晓伟, 等. 具有宽范围输出电压的三电平半桥 LLC 谐振变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 24-33.
Wang Xuan, Wang Guangzhu, Sun Xiaowei, et al. Research on control strategy of three-level half-bridge LLC resonant converter with wide output voltage range [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 24-33. (in Chinese)

[12] 袁义生, 张钟艺, 梅相龙, 等. 三电平 LLC 谐振变换器关断损耗的优化设计[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 28-34.
Yuan Yisheng, Zhang Zhongyi, Mei Xianglong, et al. Optimal design of switching-off loss in three-level LLC resonant converters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 28-34. (in Chinese)

[13] 刘大庆, 师宇杰. 一种新的 LLC 倍压谐振变换器参数设计方法[J]. 信息工程大学学报, 2010, 11(4): 402-406.
Liu Daqing, Shi Yujie. New design method for LLC voltage-multiplying resonant converter parameters [J]. Journal of Information Engineering University, 2010, 11(4): 402-406. (in Chinese)

[14] Deng Junjun, Li Siqi, Hu Sideng, et al. Design methodology of LLC resonant converters for electric vehicle battery chargers [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(4): 1581-1592.

[15] 陈辰. 半桥 LLC 谐振变换器参数设计优化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
Chen Chen. Research on parameter design optimization of half-bridge LLC resonant converter [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019. (in Chinese)

[16] 金涛, 肖晓森, 张钟艺, 等. 基于宽范围增益和效率的 LLC 谐振变换器设计方法[J]. 电机与控制学报, 2023,

27(10): 108-119.
Jin Tao, Xiao Xiaosen, Zhang Zhongyi, et al. Design method of LLC resonant converter based on wide range gain and efficiency [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(10): 108-119. (in Chinese)

[17] 江友华, 吴琦娜, 帅禄玮, 等. 基于布谷鸟算法的电子变压器输出端谐振参数优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 476-483.
Jiang Youhua, Wu Qina, Shuai Luwei, et al. Optimization for resonant parameters of output port of power electronic transformer based on cuckoo search algorithm [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(1): 476-483. (in Chinese)

[18] 徐恒山, 尹忠东, 黄永章. 考虑最大输出电压和效率的 LLC 谐振变流器的设计方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 331-341.
Xu Hengshan, Yin Zhongdong, Huang Yongzhang. Design method of LLC resonant converter considering maximum output voltage and efficiency [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 331-341. (in Chinese)

[19] 胡海兵, 王万宝, 孙文进, 等. LLC 谐振变换器效率优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 26-34, 42.
Hu Haibing, Wang Wanbao, Sun Wenjin, et al. Optimal efficiency design of LLC resonant converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 26-34, 42.(in Chinese)

[20] Wang Jianing, Fu Dianli, Yang Zhiqing, et al. Three-phase LLC small-signal modeling and fast-response control design [C]// 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Guangzhou, Guangdong, China, 2022: 1234-1239.

[21] Xue Zhidong, Bai Hongchao, Yu Jinbiao, et al. Wide gain closed-loop control of three-phase bidirectional LLC converter with low Q value [C]// 2023 IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Ningbo, China, 2023: 1106-1111.

[22] Farooq H, Khalid H A, Uzair Khalid M, et al. Loss analysis of full bridge LLC resonant converter with wide input range using Si and SiC switches [C]// 2021 16th International Conference on Emerging Technologies (ICET). Islamabad, Pakistan, 2022: 1-6.

[23] Deng Guoliang, Sun Yao, Xu Guo, et al. ZVS analysis of half bridge LLC-DCX converter considering the influence of resonant parameters and loads [C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA, 2020: 1186-1190.

[24] Syed A, Vakil G, Ram Kumar R M. Impact of steinmetz parameters on the performance of iGSE based core loss prediction [C]// 2021 International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET). Hyderabad, India, 2021: 1-5.

[25] Sun He, Li Yongjian, Yu Xinran, et al. Research of harmonic effects on core loss in soft magnetic composite materials based on three-dimensional magnetic test system [C]// 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China, 2019: 1-5.

[26] 朱浩, 廖志凌. 宽输出三电平 LLC 谐振变换器及控制策略[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 62-70.
Zhu Hao, Liao Zhiling. Three-level LLC resonant converter with wide output range and its control strategy [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 62-70. (in Chinese)

[27] 钱敏华, 李霄, 刘海晨, 等. 基于死区换流时序分析的 LLC 软开关设计方法[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 100-108.
Qian Minhua, Li Xiao, Liu Haichen, et al. Design method for LLC soft-switching based on dead-time commutation timing sequence analysis [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 100-108. (in Chinese)



白洪超

作者简介：

白洪超(1983—)，男，中国电源学会会员，硕士，高级工程师。研究方向：变流器拓扑及控制特性，双向电源拓扑特性。E-mail：81202766@ainuo.com。

赵迎辉(1981—)，男，中国电源学会会员，硕士，高级工程师。研究方向：DC-DC 拓扑及控制，双向电源系统。E-mail：dcm@ainuo.com。

禹金标(1987—)，男，中国电源学会会员，硕士，高级工程师。研究方向：双向 DC-DC 拓扑与控制，双向电源系统。E-mail：pmsd@ainuo.com。

吴晗子(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与电传动。E-mail：23126371@bjtu.edu.cn。

郝嘉涵(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与电传动。E-mail：22126170@bjtu.edu.cn。

黄先进(1980—)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：功率半导体特性与应用，变流器控制特性。E-mail：xjhuang@bjtu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)