

直流充电桩电源模块磁性器件优化

叶逢春，陈庆彬，陈为

福州大学电气工程与自动化学院，福州 350108

摘要：直流充电桩电源模块将三相380V交流电转换成750V的直流电压，其前级通常采用三相PFC电路，后级DC\DC模块通常采用三电平LLC电路进行功率调节，整个电源模块包含PFC电感、谐振电感、变压器及EMI滤波电感等众多磁元件，磁性器件在体积和损耗上都占了很大一部分。本文通过分析各类磁性器件实际工作的电压电流特点，从磁芯损耗和绕组损耗出发，结合仿真对不同类型的磁性器件进行优化设计，最终提高充电桩电源模块的效率。

关键词：充电桩，磁性器件，绕组损耗，优化设计

Optimal Design of Magnetic Components in DC Charging Piles

Fengchun Ye¹, Qingbin Chen², Wei Chen³

College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108

Abstract: The DC charging piles convert three phase 380V AC to 750V DC, the front stage usually adopts the three phase PFC circuit. And the next stage adopts the three level LLC resonant DC/DC converter. So the whole power module contains several magnetic component such as PFC inductance、resonance inductance、transformer and EMI filter. The magnetic component occupied a large part in volume and the loss. The paper analysis the actual voltage and current characteristic in these magnetic component, consider the core loss and the winding loss, then optimized the magnetic component with the help of the simulation tool. Finally improve the efficiency of the power module.

Keywords: charging pile, magnetic component, winding loss, optimize design

1 引言

随着新能源汽车的日益普及，电动汽车的充电基础设施建设市场规模逐年增长，充电桩设备也迎来新一轮爆发时期。电动汽车充电桩主要包括功率单元、控制单元、计费单元、配电单元以及充电桩和机壳组成，其中最核心的部分就是功率电源模块。功率电源模块通常由PFC及DC/DC两级电路构成，功率等级在5千瓦到15千瓦不等，而其中PFC电感、变压器、滤波电感等磁元件在体积及重量上占了20%~30%，电源模块的很大一部分损耗都是集中在磁元件损耗上。

电源模块电路输入通常由三相380V/50Hz经三相PFC电路直流输出，再通过隔离型DC/DC变换电路对输出电压进行范围调节。三电平半桥LLC电路因其成本低、控制简单、效率高等优点常作为充电桩电源模块DC/DC电路部分。LLC变压器可采用集成谐振电感或者外置谐振电感，集成

谐振电感可以省下一个磁性元件，节省成本，外置谐振电感工艺简单些，可以采用较好的材质做谐振电感，降低损耗，磁性元件优化容易很多。

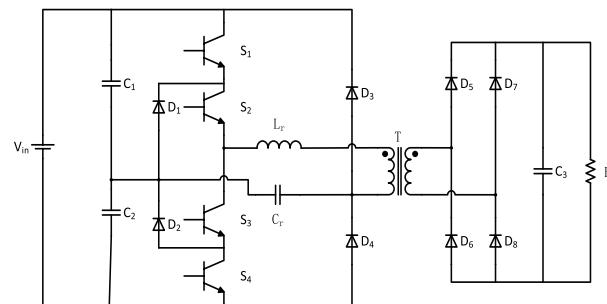


图1 三电平半桥 LLC 谐振变换器电路拓扑

磁性元件设计是否合理将对变换器的效率产生很大的影响，本文针对图1所示的三电平半桥LLC电路拓扑，分析变压器和谐振电感的电压电流，通过对磁芯损耗与绕组

损耗的优化设计，降低变压器的损耗，提高变换器的效率，同时对 PFC 电感进行优化设计，达到节能减排的效果。

2 三电平桥 LLC 拓扑

2.1 稳态分析

为了分析方便，假定所有电路元件均为理想的集总参数元件，四个开关管 $S_1 \sim S_4$ 以及二极管 D_1, D_2 构成了半桥三电平电路结构，副边全桥整流后经 C_5 滤波给负载供电。电路工作时序波形如图 2 所示。

开关管 S_1, S_2 驱动相同， S_3, S_4 驱动相同，只是 S_2 和 S_3 稍微滞后一段时间关断。电路工作状态可以分为八个阶段，由于前半周期和后半周期工作原理相同，故仅分析前半部分电路工作状态。

1) $t_0 \sim t_1$ 阶段：在 t_0 时刻 S_1 和 S_2 导通， L_r 与 C_r 谐振，副边整流桥 D_5 和 D_8 导通，谐振电流流经 S_1, S_2, L_r, C_r, C_1 构成的回路。变压器原边电流 i_p 成正弦上升，励磁电流 i_{Lm} 线性上升。

2) $t_1 \sim t_2$ 阶段：在 t_1 时刻变压器原边电流 i_p 与 i_{Lm} 相等，副边电流下降为 0，此时整流二极管 d_5, d_6 实现零电流关断，谐振回路由 L_r, C_r 和 L_m 构成，由于励磁电感 L_m 相比于 L_r 大得多，故谐振周期也要长得多，原边电流可以认为近似维持不变。

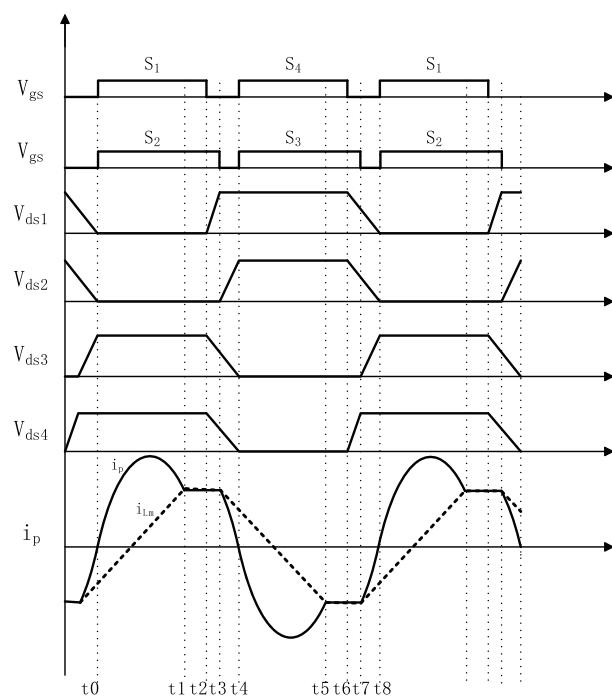


图 2 电路工作主要波形图

3) $t_2 \sim t_3$ 阶段：在 t_2 时刻 S_1 关断， S_2 延迟到 t_3 时刻关断，在 t_2 时刻原边电流 i_p 将 S_1 两端等效电容充电至 $V_{in}/2$ ，原边电流流经 D_1, S_2, L_r, L_m, C_r 续流。

4) $t_3 \sim t_4$ 阶段：在 t_3 时刻 S_2 关断，由于 C_2 限制了开关 S_2 两端的电压变化，故 S_2 实现零电压关断，同时 S_3 两端等效电容放电至 0，原边电流经 S_3, S_4 的体二极管续流， L_m 退出谐振，谐振回路由 L_r 和 C_r 构成，副边整流桥 D_6, D_7 导通，此时 i_{Lm} 线性减小。 t_4 时刻 S_3 和 S_4 同时导通，实现零电压导通。

下半周期电路工作与上半周期相同，可以看出，主开关管全部工作在零电压开关状态，且副边整流二极管均工作在零电流开关状态，整个电路效率很高。

2.2 仿真验证

在电路仿真软件 Saber 中搭建该三电平桥 LLC 电路进行仿真，输入侧直流 800V，输出功率 15kW。变压器原副边电流波形及其傅里叶分解波形如图 3 所示。

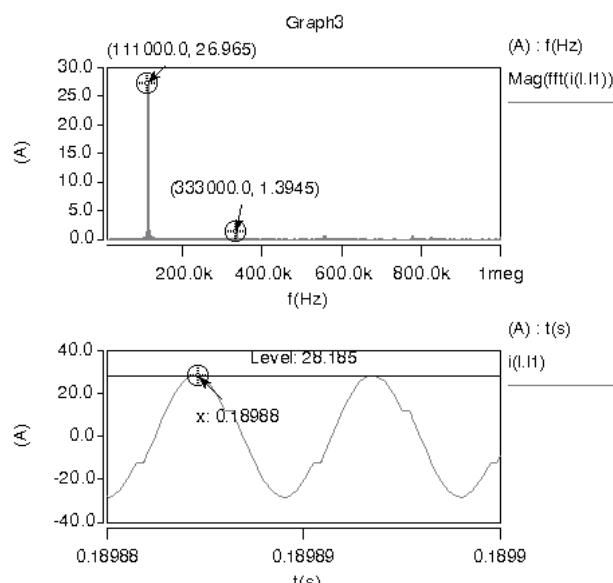
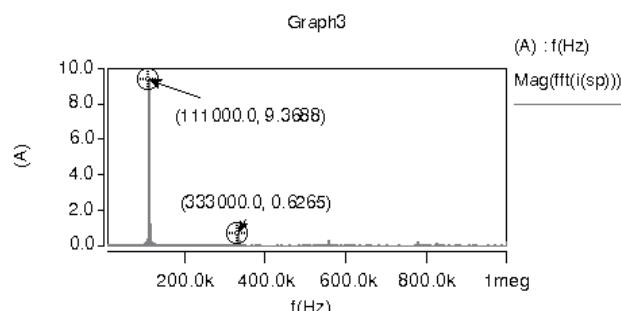


图 3 变压器原边电流



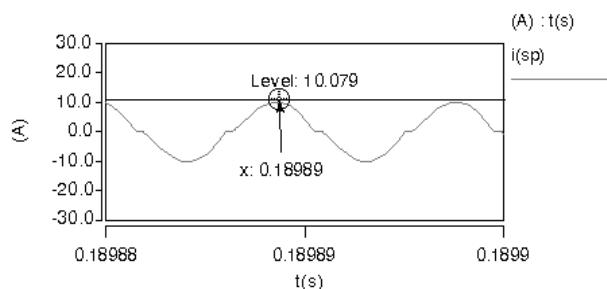


图 4 变压器副边电流

由仿真结果可以看出，原副边电流主要集中在谐振频率及三倍频谐波电流分量上。

3 磁性元件损耗分析

三电平半桥 LLC 电路包含了谐振电感及变压器两类磁元件，磁性元件的损耗又可以分为磁芯损耗和绕组损耗，下面对这两类损耗分别进行分析。

3.1 磁芯损耗

磁芯损耗是磁性元件损耗的很大一部分，C. P. Steinmetz 最早提出了经典的 Steinmetz 公式（SE）用于计算正弦波激励下的磁芯损耗。

$$P_{core} = K \cdot f^\alpha \cdot (\Delta B)^\beta$$

其中 K 、 α 、 β 均为常数

从式中可以看出，增大绕组匝数可以减小磁芯损耗，但增大匝数同时也会增加绕组的交流电阻和直流电阻，总损耗不一定会降低，故需对绕组损耗进行评估设计。精确的磁芯损耗数据可以帮助设计者选择合适的磁芯，减小功率变换器的体积，降低成本，提高可靠性。对于磁芯损耗的优化，也可以选用较低损耗特性的磁芯材料。

3.2 绕组损耗

绕组损耗的计算与其流经的电流波形息息相关，对于 PFC 电感，其电流纹波较大，谐波成分也大，且有直流偏磁。谐振电感和变压器纹波电流大，而谐波成分小且无直流偏磁。绕组损耗可以分为邻近效应引起的损耗和趋肤效应引起的损耗，通常 PFC 电感使用圆导线作为绕组材料，谐振电感和变压器常用 Litz 线作为绕组材料。

$$P_{total} = P_{skin} + P_{pro}$$

3.2.1 PFC 电感优化

PFC 电感使用圆导线作为绕组材料，圆导线趋肤效应损耗较大，邻近效应损耗较小，PFC 电感电流谐波主要分

布在工频 50Hz 及开关频率 22.5kHz 上，因此既要考察其直流电阻和交流电阻。直流电阻随着线径的增大而减小，交流电阻随着线径的增大而增大，总的绕组损耗随着线径变化存在一个最小值。

在 maxwell 软件中建立 PFC 电感仿真模型，如图 5 所示。对线径从 0.6 到 1.8mm 进行扫描仿真，在 50Hz 和 22.5kHz 下得到两组损耗随着线径变化的曲线，从而得到各次谐波对应的交流电阻。则总损耗 P_w 为：

$$P_w = I_0^2 R_{dc} + I_1^2 R_{1ac} + I_2^2 R_{2ac} + \dots + I_k^2 R_{kac} + \dots$$

其中 I_k 为第 K 次电流谐波有效值， R_{kac} 第 k 次谐波对应的交流电阻。从而可以得到总损耗随着线径变化的曲线，如图 6 所示。

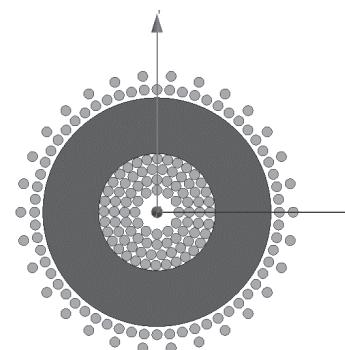


图 5 PFC 电感仿真模型

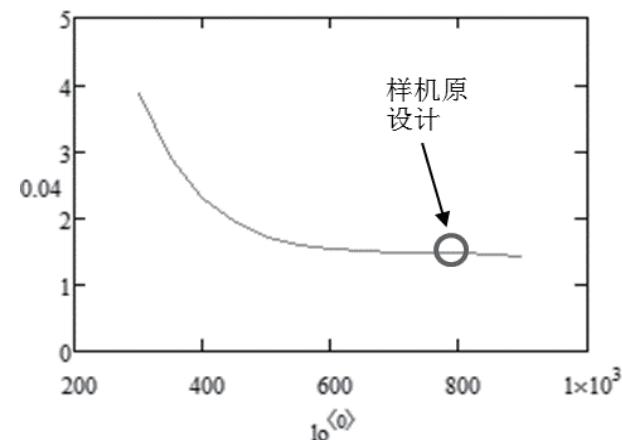


图 6 PFC 电感损耗曲线

可以看出，随着线径的增大绕组损耗明显减小，但其损耗在 1.2mm 至 1.8mm 范围内变化不大，综合考虑可以采用两股 1.2mm 的铜线进行绕制，则每股电流为原来电流的一半，损耗降为原设计的一半左右。

3.2.2 谐振电感优化

谐振电感采用 litz 线作为绕组材料, litz 线作为高频磁元件的常用材料, 相比于圆导线其趋肤效应损耗较小, 但内部邻近效应损耗较大, litz 线的优化主要从线径和股数两方面考虑, 股数越多直流电阻越小, 但其内部邻近效应越强, 因此需要选择具有最小损耗的线径和股数。

谐振电感通过开气隙控制电感量, 带气隙的电感器磁场窗口磁通分布复杂。气隙扩散磁通会在绕组上引起涡流损耗, 因此可以采用气隙避让技术, 通常避开气隙位置 3~4 个气隙长度进行绕制, 或可考虑采用分布气隙, 样机所用谐振电感将气隙开在边柱上, 可以考虑在中柱上采用分布气隙技术。在 maxwell 软件中搭建谐振电感仿真模型, 如图 7 所示, 比较气隙所开位置对绕组损耗的影响。仿真结果如图 8 所示, 可以看出, 采用分布气隙可以有效降低谐振电感的损耗, 且边柱无气隙可以减小气隙扩散磁通对其他电路元件之间的耦合, 降低对 EMI 的影响。

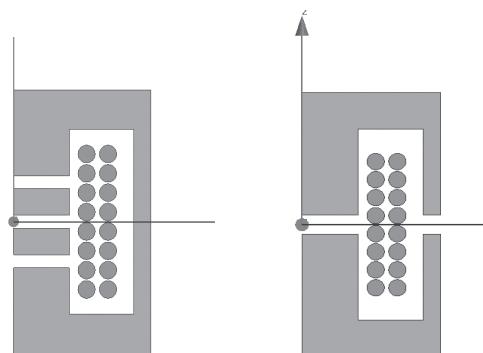


图 7 谐振电感仿真模型

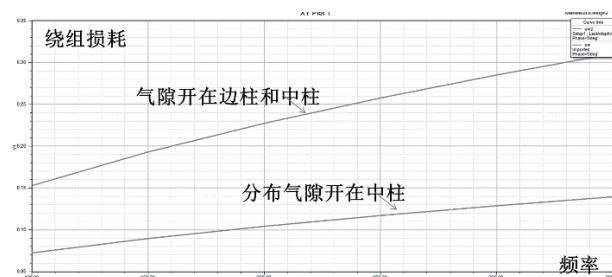


图 8 谐振电感仿真结果型

3.2.3 变压器的优化

变压器的绕组线规及绕线方式是设计变压器的主要方面。不同绕制方式会影响到各层绕组两端的磁场强度大小, 从而影响绕组的损耗。通过合理的绕制方式, 可以控制磁场强度的分布, 减小绕组的损耗。样机所用变压器采用原边三层绕组并联, 副边四层绕组并联结构, 如图所示, 图

中的绕法各层之间的平均匝长不一致, 导致原副边电流分配在各层之间也不均匀, 损耗大小也不一致。因此将原边三根并绕换成一根, 副边也换成一根, 同时增大原副边绕组的股数使其能通过更大的电流, 这样就没有电流分配不均的问题。因副边采用的是全桥整流, 各次谐波电流均在原副边安匝平衡, 不必考虑传统 LLC 中心抽头变压器的奇次谐波和偶次谐波分离的问题。

4 实验验证

本文优化的样机参数指标为输入三相 380V\50Hz, 输出 750V、15kW, 最高效率为 94.26%。

将样机 PFC 由 1 根 1.6mm 换成 2 根 1.2mm 的圆导线, 在不改变样机其他设计的条件下实测效率提升至 94.34%。

在更换优化设计后的 PFC 电感的条件下, 将谐振电感气隙开在中柱, 线规由 0.05mm*850 股换成 0.06mm*400 股, 实测效率提升至 94.44%。

更换全部 PFC 电感、谐振电感及变压器之后, 实测样机效率为 94.45%。

通过优化设计, 将样机效率提升 0.18%, 相当于减少了 27W 的能量损耗。

5 总结

对三电平半桥 LLC 谐振变换器工作原理进行分析, 了解谐振电感及变压器工作状态, 对优化设计提供指导。

通过对 PFC 电感、谐振电感和变压器的电压电流进行分析, 结合仿真对磁元件进行优化设计, 通过实验验证了理论分析的可行性。

样机效率从 94.26% 提升至 94.45%, 同时综合考虑了成本的因素, 达到优化设计的目标。

参考文献

- [1] 顾亦磊, 吕征宇, 钱照明. 三电平 LLC 谐振型 DC/DC 变换器的分析和设计 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16):67-71.
- [2] 白磊成. 电动汽车直流充电桩的设计与研究 [J]. 科技视界, 2016(12).

下转163页