

一种具有自限流功能的 LLC 谐振变流器拓扑

谢小高, 张军明, 钱照明
(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 提出了一种新型的具有自限流功能的 LLC 谐振变流器拓扑, 在过流或短路时能有效地限制电流增长, 从而起到保护电路的作用。给出了详细的理论分析和电路参数优化设计考虑以实现较好的限流效果; 针对一台输出为 110 V/10 A 的电力操作电源实例给出了具体参数设计步骤, 并通过计算与仿真来验证参数设计结果, 最后制作了一台相同参数的实验样机, 进行了实验验证。理论分析和实验结果表明, 所提出的拓扑具有结构简单、限流效果好、频率变化范围窄等优点, 特别适合工业应用如电力操作电源等。

关键词: LLC 谐振变流器; 自限流; 电力操作电源

中图分类号: TM461

0 引言

在发电厂和变电站中, 供给二次回路的直流电源称为电力操作电源。电力操作电源主要用于向控制、保护、信号、自动装置回路以及操动机械和调节机械的传动机构供电, 同时还作为独立的事事故照明电源。目前发电厂和变电站普遍应用的操作电源是硅整流型操作电源(又称相控式操作电源), 它采用硅整流型充电装置对蓄电池充电, 由蓄电池向二次回路提供不间断的直流电源。但这种电源存在许多缺陷, 如充电装置效率差、稳压稳流精度低、纹波大、电池保持容量低、寿命短等。随着电力电子技术的发展, 传统的硅整流型电源正在逐渐被高频开关电源取代。高频开关电源具有体积小、重量轻、效率高、电气性能好等许多优点。此外, 由于高频开关电源采用模块化结构和 $n+1$ 备份方式, 使电源装置的可靠性得到大大提高。

在高频开关电源的拓扑选择上, 近年来, LLC 谐振变流器的拓扑受到越来越多的关注^[1~6]。LLC 谐振变流器的拓扑本身具有一些优越的性能, 例如可以实现原边开关管在全负载下的零电压软开关(ZVS), 副边整流二极管电压应力低, 因此高输出电压应用情况下可以实现较高的效率等。这些优点使得 LLC 谐振变流器特别适合高输出电压的应用场合, 如电力操作电源等。

但是 LLC 谐振变流器的拓扑在应用中还存在一些实际问题, 其中一个主要问题是当出现电路启

动、负载过流或短路情况时如何限制电路中的电流以防止电路损坏。针对这个问题, 已有若干种解决方案, 如直接屏蔽控制芯片驱动信号、直接升频控制^[6]、升频控制结合脉宽调制(PWM)控制^[4]和加钳位二极管的变结构 LLC 拓扑^[3]等。但以上方法都存在各自的缺点, 如直接升频控制会导致开关频率过高、开关关断损耗增大; 升频控制结合 PWM 会导致开关管失去软开关条件; 加钳位二极管的变结构 LLC 拓扑的限流阈值受输入电压影响较大, 在高端输入电压下限流效果差。为此, 本文提出一种新型的具有自限流的 LLC 谐振变流器拓扑。

1 理论分析

如图 1 所示, 本文提出的 LLC 拓扑电路主要结构与传统的 LLC 谐振变流器相同, 只增加了一个小功率变压器 T2 以及 2 个二极管 D3 和 D4。具体工作原理简单描述如下: 正常工作下, 辅助电路不起作用, 电路工作与传统的 LLC 谐振电路相同。当过流或短路情况出现时, 谐振电容两端电压升高。当该电压上升到折算到变压器 T2 副边超过输出电压时, 二极管 D3 和 D4 交替导通, 谐振电容电压被钳位, 从而谐振电流也被钳位, 此时谐振电容等效成一个电压源。由于本文提出的拓扑对谐振电容钳位的电压源是输出电压源, 其幅值不会随输入电压变化而改变, 因此负载限流阈值受输入电压变化影响相对较小。此外, 如果在控制上引入限流环, 在过流的情况下限流环起作用使输出电压降低, 从而可以进一步限制电流上升。因此, 本文提出的 LLC 谐振变流器具有更好的限流性能。而且通过优化设计谐振电路参数, 限流阈值变化窗口可以进一步得到优化。

收稿日期: 2005-08-12。

国家自然科学基金资助项目(50237030)。

下文将分析如何优化选择谐振电路参数。

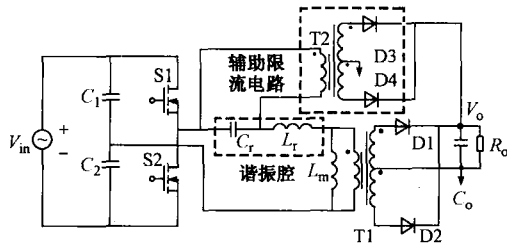


图1 具有自限流功能的 LLC 谐振变流器
Fig. 1 Proposed LLC topology with self current-limitation ability

在 LLC 谐振变流器中,正常工作频率范围主要与 L_m 和 L_r 的比值有关,表示如下:

$$\frac{f_{\min}}{f_r} = \frac{\pi^2}{\pi^2 + 4 \frac{L_m}{L_r} \left(1 - \frac{V_{\text{inmin}}}{2nV_o}\right)} \quad (1)$$

式中: L_m 是主变压器的激磁电感量; L_r 是谐振电感量; f_r 是谐振频率,从电路优化工作的角度考虑通常会选择额定工作情况下(输入电压高端,满载)的电路工作频率为谐振频率 f_r ; f_{\min} 是电路的最低工作频率,出现在最低输入电压处。

根据式(1),可以得到开关频率变化范围与 L_m/L_r 的关系曲线如图 2 所示。可以看出, L_m/L_r 的比值越小,工作频率变化范围越窄。

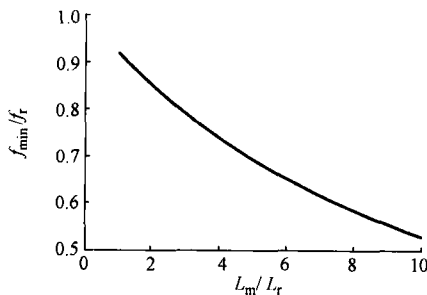


图2 工作频率变化与 L_m/L_r 关系曲线(满载)
Fig. 2 Operating frequency range versus L_m/L_r (full load)

另一方面,由于限流是通过对谐振电容的电压进行钳位实现的,因此限流阈值变化窗口与谐振电容的电压变化相关。为了得到较好的限流效果,要求谐振电容电压变化范围越窄越好。易推出谐振电容电压变化范围与变流器的工作频率相关:

$$\frac{V_{\text{cmax}}}{V_{\text{cmin}}} = \frac{\left(\frac{f_r}{f_{\min}} - 1\right)n}{4I_o L_m \left(1 - \frac{V_{\text{inmin}}}{2nV_o}\right) f_r} \cdot \left[nV_o - \frac{V_{\text{inmin}}}{2} + \frac{4I_o L_m \left(1 - \frac{V_{\text{inmin}}}{2nV_o}\right) f_r}{\left(\frac{f_{\min}}{f_r} - 1\right)n \frac{f_{\min}}{f_r}} \right] \quad (2)$$

式中: n 是主变压器原副边匝比; V_{cmax} 是谐振电容两端电压峰值的最大值,出现在最低输入电压时; V_{cmin} 是谐振电容两端电压峰值的最小值,出现在最高输入电压时。

根据式(2),可以得到谐振电容电压与开关频率的关系曲线如图 3 所示。

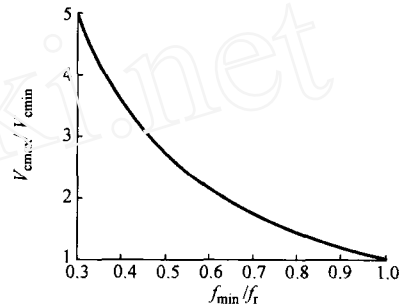


图3 $V_{\text{cmax}}/V_{\text{cmin}}$ 与 f_{\min}/f_r 关系曲线(满载)
Fig. 3 $V_{\text{cmax}}/V_{\text{cmin}}$ versus f_{\min}/f_r (full load)

由图 3 可知, $V_{\text{cmax}}/V_{\text{cmin}}$ 随 f_{\min}/f_r 增大而减小。结合图 2 可以发现,如果 L_m/L_r 越小,则电路正常工作频率变化范围越窄,谐振电容 C_r 上电压变化也越小,从而可以得到较窄的限流阈值变化窗口。

本文提出的 LLC 谐振变流器另一个较突出的优点体现在当短路情况发生时其固有的限流特性,特别是当在控制上结合变频方法时。当短路情况发生时,辅助变压器 T2 副边被短路,得到本文提出的 LLC 谐振变流器的等效电路见图 4。为便于比较,得到传统的 LLC 谐振变流器在短路情况下的等效电路如图 5 所示。可以看出前者的等效回路阻抗为单个电感,而后者是电感和电容组成的谐振单元。计算可知,当频率高于谐振频率时前者的等效回路阻抗远大于后者,因此短路电流也远小于后者。

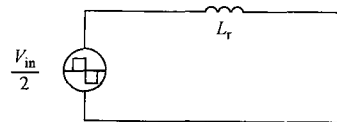


图4 本文提出的 LLC 谐振变流器在短路时的等效模型
Fig. 4 Equivalent model of the proposed LLC resonant converter under short-circuit condition

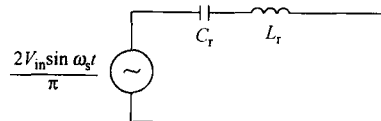


图5 传统的 LLC 谐振变流器在短路时的等效模型
Fig. 5 Equivalent model of conventional LLC resonant converter under short-circuit condition

2 计算与仿真分析

对一个输出为 110 V/10 A 的电力操作电源应用实例进行计算分析,其中电路指标如下:输入电压 300 V~400 V;输出电压 110 V;输出电流 10 A;正常工作频率 150 kHz~200 kHz。

根据上文的分析,优化设计谐振参数过程如下:

1) 设定谐振电容电压峰值为 260 V,可以计算出谐振电容约为 44 nF;

2) 根据谐振电容值以及谐振频率,可以计算出谐振电感约为 13.5 μH ;

3) 根据正常工作开关频率范围由图 2 查到 L_m/L_r 为 3.393,从而计算出变压器激磁电感约为 54 μH 。

电路中的其他参数设计过程与传统 LLC 谐振变流器类似,可以参考文献[6],这里不再详述。计算出的主要参数以及根据计算的参数选定的主要半导体器件型号如下:变压器匝比为 9:5:5;变压器磁心为 EE42C;变压器激磁电感 L_m 为 54 μH ;谐振电感磁心为 RM10;谐振电感 L_r 为 13.5 μH ;谐振电容 C_r 为 44 nF;辅助变压器匝比为 14:5:5;辅助变压器磁心为 RM10;D3,D4 为 MBR2030PT;原边开关管为 IRFP22N50;D1,D2 为 MBR3030PT。

图 6 是计算的短路情况下的平均输出电流与开关频率的关系曲线。由图中可以看出,假设平均输出电流限制在 12.5 A,传统的 LLC 谐振变流器工作频率需要增加到 385 kHz,而本文提出的 LLC 谐振变流器只需要增加到 265 kHz,这意味着电路最大的开关频率得到了大幅降低。

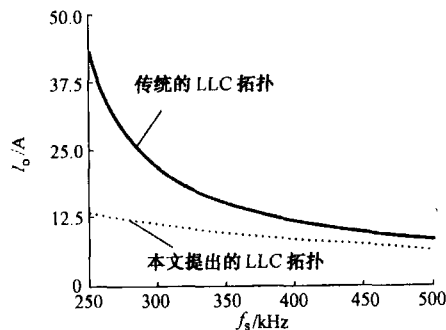


图 6 计算出的短路情况下的平均输出电流与开关频率曲线

Fig. 6 Calculated average output current under short-circuit condition

本文提出的 LLC 谐振变流器在额定输入电压 (400 V) 下短路时的 saber 仿真波形如图 7 所示。从图中可以看出,当开关频率在 265 kHz 时平均输出电流约为 11.92 A。计算与仿真之间的差异主要是由于仿真时多考虑了线路上的一些寄生参数。

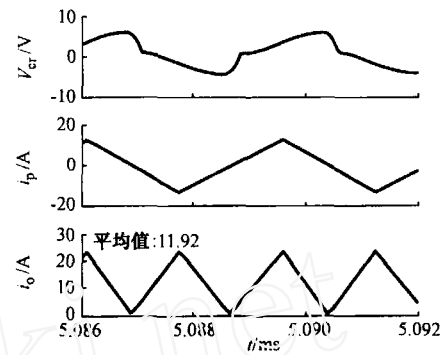


图 7 本文提出的 LLC 谐振变流器在短路情况下原边的仿真波形

Fig. 7 Simulated waveforms of the proposed LLC converter under short-circuit condition

3 实验结果

根据上述的理论计算和仿真分析,制造了一台输出为 110 V/10 A 电力操作电源样机,用来验证本文提出的 LLC 谐振变流器的性能,电路指标、主要参数与主要元器件选择与计算和仿真时的参数相同。

测量出正常工作模式下的主要波形如图 8~图 11 所示。图 8 和图 9 分别是 300 V 输入电压情况下正常工作时测量的谐振电容电压波形和原边的电流波形。

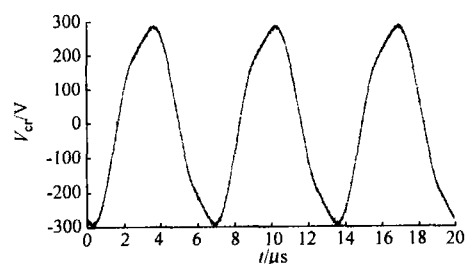


图 8 谐振电容电压波形 ($V_{in}=300\text{ V}$)

Fig. 8 Resonant capacitor voltage waveform ($V_{in}=300\text{ V}$)

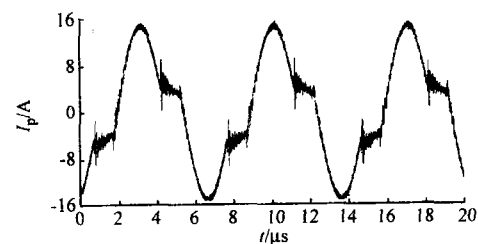


图 9 原边电流波形 ($V_{in}=300\text{ V}$)

Fig. 9 Primary current waveform ($V_{in}=300\text{ V}$)

图 10 和图 11 分别是 400 V 输入情况下正常工作时测量到的谐振电容电压波形和原边的电流波形。根据波形可以看出, V_{cmax}/V_{cmin} 约为 1.67, 而

f_{min}/f_{max} 约为 0.75,与图 2 和图 3 所计算出的曲线值基本一致。

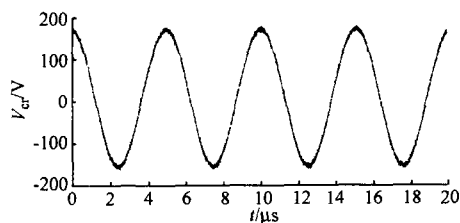


图 10 谐振电容电压波形 ($V_{in}=400\text{ V}$)
Fig. 10 Resonant capacitor voltage waveform ($V_{in}=400\text{ V}$)

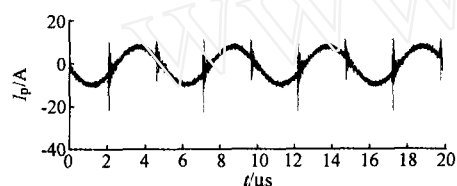


图 11 原边电流波形 ($V_{in}=400\text{ V}$)
Fig. 11 Primary current waveform ($V_{in}=400\text{ V}$)

图 12 所示是 400 V 输入时短路情况下测得的谐振电容两端的电压波形和原边电流波形。将原边电流折算到副边计算出输出平均电流约为 12 A,与理论计算及仿真结果基本符合。

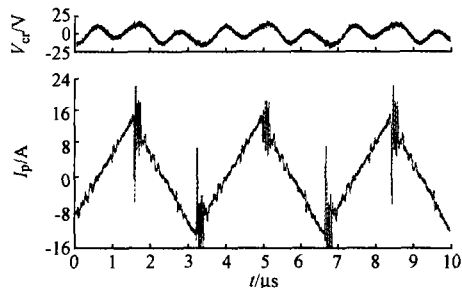


图 12 短路情况下原边的主要波形 ($V_{in}=400\text{ V}$)
Fig. 12 Primary main waveforms under short-circuit condition ($V_{in}=400\text{ V}$)

表 1 所示是测量的效率,可以看出,尽管对电路参数的优化主要是针对限流保护进行考虑的,仍可以获得很高的效率。

表 1 测量的效率曲线
Table 1 Measured efficiency curves

输入电压/V	测量效率/(%)				
	2	4	6	8	10
300	87.1	93.1	94.2	95.5	95.2
400	89.6	93.5	94.9	95.7	96.4

注: 2,4,6,8,10 为输出电流,单位为 A。

4 结语

本文提出和研究了一种新型的具有自限流功能的 LLC 谐振变流器拓扑,其良好的自限流功能使得即使在短路情况发生时也能有效地限制电路电流,防止电路元器件损坏。结合 LLC 谐振变流器自身适用于高输出电压的优点,该拓扑尤其适用于电力操作电源等工业应用场合。本文对电路参数的优化选择进行了详细的理论分析,为优化变流器限流性能提供了理论依据。

参考文献

- [1] YANG Bo, LEE F C, ZHANG A J et al. LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion. In: Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol 2. Dallas (TX, USA), 2002. Piscataway (NJ, USA): IEEE, 2002. 1108—1112.
- [2] YANG Bo, CHEN Ren-gang, LEE F C. Integrated Magnetic for LLC Resonant Converter. In: Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol 1. Dallas (TX, USA), 2002. Piscataway (NJ, USA): IEEE, 2002. 346—351.
- [3] YANG Bo, LEE F C, CONCANNON Matthew. Over Current Protection Methods for LLC Resonant Converter. In: Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol 1. Miami (FL, USA), 2003. Piscataway (NJ, USA): IEEE, 2003. 605—609.
- [4] YANG Bo. Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System, Doctoral Dissertation. Blackburg (VA, USA): Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [5] 黄贵松,顾亦磊,章进法. LLC 串联谐振直流-直流变换器. 电源技术学报, 2002, 1(1): 61—66.
HUANG Gui-song, GU Yi-lei, ZHANG Jin-fa. LLC Series Resonant DC/DC Converter. Journal of Power Supply, 2002, 1(1): 61—66.
- [6] 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. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 67—71.
GU Yi-lei, LÜ Zheng-yu, QIAN Zhao-ming. Analysis and Design of a Three-level LLC Resonant DC/DC Converter. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 67—71.

谢小高(1975—),男,博士,现在浙江大学进行博士后研究,主要研究方向为电力电子系统集成、DC/DC 变换技术、电力电子在电力系统中的应用等。E-mail: vrm@zju.edu.cn

张军明(1975—),男,博士,讲师,主要研究方向为电力电子系统集成及 DC/DC 变换技术等。

钱照明(1939—),男,教授,博士生导师,主要研究领域包括电力电子系统集成及电磁兼容等。

(下转第 99 页 continued on page 99)

Microsoft 公司的 Internet 服务器系统 API (ISAPI)、Netscape 公司的 Neviagat 服务器 API (NSAPI)、O'Reilly 公司的 Websit 服务器 API (WSAPI)。本系统采用自主开发的 API,因为 API 是针对专门的 Web 服务编写,深入 Web 服务器内部编程,极大地利用了服务器自身的性能,并且占用系统资源少,因此执行效率最高,但一般较难移植,安全性也最好,在技术上可以保证系统的安全性和可靠性。任何用户都可以在客户端浏览器输入查询条件,并提交给 Web 服务器,通过数据访问组件将用户的查询转换成后台数据库服务器可识别的命令后,访问数据库,处理生成 HTML 页面,再由 Web 服务器将 HTML 页面返回到客户端浏览器,从而将信息显示给用户。通常情况下,以数据库为平台的站点还具备一个数据维护系统,该系统通过数据访问组件有效地维护后台数据库。

3 服务器管理

网上系统的运行成本主要是服务器管理,通常有 3 种方式设置和管理服务器:

- 1) 自购服务器,自行管理申请专线,其成本高,投资大,还要有专门人员值班管理,加上专线费用,年费用可达 20 万元~30 万元,中小企业难以承受;
- 2) 委托代管服务器,自购服务器和软件,将服务器委托电信部门管理运行,可节省大部分管理费用和人力;
- 3) 硬件、软件全部委托代理,租用外单位的大型服务器空间,软件委托开发,成本最低。

根据电厂缺少专门计算机技术人员实际情况,自购服务器、自行管理申请专线也有困难。为此,本系统采用的是第 3 种方式,即全权委托某计算机公司代理,服务器代理年运行费用仅 2 000 元,另加委托软件开发费用 4 万元,比传统的局域网开发

还节省,解决了服务器管理问题。

4 结语

基于 Internet 的火电厂采购招投标管理系统对火电厂的运行至少可以解决以下问题:

- 1) 节约采购物流成本。网上采购基本上可以不打电话或少打电话,特别是长途电话大大减少,网络计费采取包月制,成天上网就行。采购员只有在非常必要时才具体面谈,出差费用大为降低。
- 2) 提高采购管理工作透明度。由于洽谈、审批、合同都在网上进行,审批不仅只是领导参加,还要有使用者(如操作工人)的意见,可避免个人主观偏见,杜绝个人回扣等腐败行为。
- 3) 极大地提高工作效率。理论上一笔业务可以在几分钟内搞定,基本上不必开会讨论。过去仅审批一项就要几天时间,现在领导可以随时审批,甚至在家中都可以进行。
- 4) 采购范围大。理论上可以是全球采购,当然实际上全国采购是可以的,企业有较大的选择范围和空间,能够货比百家,采购到最便宜的商品。
- 5) 加强了供应商的竞争意识。过去供应商只要和某个领导搞好关系就可以了,现在网上报价,不是某个领导说了就算,而且供应商不知道竞争对手是谁,只有凭实力,加强竞争。

参 考 文 献

[1] 刘涛. 电子商务网站建设. 北京:经济科学出版社,2002.
LIU Tao. Construction of E-commerce Web Site. Beijing: Press of Economic Science, 2002.

毛禹忠(1956—),男,副教授,主要研究方向为管理信息系统和决策支持系统。E-mail: myz@infohong.com
陈 砚(1960—),男,经理,主要研究方向为物流管理自动化。

(上接第 67 页 continued from page 67)

New LLC Resonant Converter Topology with Self Current-limitation

XIE Xiao-gao, ZHANG Jun-ming, QIAN Zhao-ming
(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new LLC resonant converter topology with self current-limitation ability is proposed. The circuit current can be controlled effectively under the over-current or short-circuit conditions, hence the converter can be protected. Detailed theoretical analysis and optimization design considerations are presented to achieve a good current limitation effect. Detailed steps on the parameter design of a 110 V/10 A output electrical power supply are listed. Calculations and simulations are given to illustrate the design results. Finally a laboratory prototype with the designed parameters is built up to verify the theoretical analysis. The analysis and experimental results show that the proposed topology has some attractive merits including simple structure, good current limitation effect and narrow frequency range etc., thus it is very suitable for the industrial applications such as electrical power supply.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50237030).

Key words: LLC resonant converter; self current-limitation; electrical power supply