

文章编号:1001-1609(2007)05-0387-02

LCL 型谐振变换器的分析与研究

张春林^{1,2}, 张东辉^{1,2}, 严萍¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

Analysis and Study on LCL Resonant Converter

ZHANG Chun-lin^{1,2}, ZHANG Dong-hui^{1,2}, YAN Ping¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

摘要: 提出了一种适于电容恒流充电的 LCL 型电路拓扑, 分析了电路的工作原理和恒流特性, 给出了电路参数的确定方法。同时还介绍了该电路恒压工作的原理及其特性。实验结果表明, 该电路具有良好的恒流特性, 适于高压电容充电。

关键词: LCL; 恒流; 电容充电; 恒压

中图分类号: TM832

文献标志码: A

Abstract: This paper presented a LCL resonant converter which was suitable for constant-current charge. The structure and the constant current characteristic of the circuit were analyzed. This paper also put forward a method of the resonant parameter selection. With the experimental results, the constant-current characteristic which could be applied in capacitor charging was well shown. In addition, the constant voltage mode was also mentioned in this paper.

Key words: LCL; constant current; capacitor charging; constant voltage

0 引言

对高压电力电容器充电时, 为了避免过大的充电电流冲击设备和储能元件, 一般采用恒流充电方式, 这样既可保证充电速度, 又可保护设备和储能元件。当前常见的充电电源基本上采用谐振式开关电源, 通过不同的串并联拓扑和反馈、变频等控制策略实现恒流。但由于该电路具有诸如串联谐振对负载的适应性差、并联谐振在轻载时效率低等缺点, 其应用受到很多限制^[1]。笔者提出一种 LCL 型电路拓扑, 当根据充电要求选定电路工作参数后, 无须任何控制和闭环反馈, 即可实现很好的恒流特性。

1 主电路分析

主电路见图 1, 全桥逆变器将整流所得直流逆变成高频的交变电压, 再通过 LCL 谐振电路供给负

载。考虑逆变电压的基波成分, 设其基波分量为 $U\sin(\omega t)$, 对电路进行稳态分析, 可得

$$I_r = \frac{U(jX_p + jX_s + Z_L)}{jX_j X_p + (jX_s + Z_L)(jX_p + jX_r)} \quad (1)$$

$$I_L = \frac{UX_p}{Z_L(X_s + X_p) + j(X_s X_p + X_r X_s + X_r X_p)} \quad (2)$$

其中 I_r 、 I_L 分别为谐振电流和负载电流; $X_r = \omega L_r$ 、 $X_s = \omega L_s$ 、 $X_p = -\frac{1}{\omega C_p}$ 分别为三个谐振元件的阻抗值; Z_L 为折合到原边的等效负载阻抗。

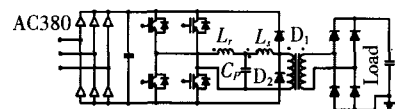


图1 LCL 电路拓扑

由式(2)可知, 要使负载电流不随负载阻抗变化, 则 $X_p = -X_s$, 此时开关频率 $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_p}}$, 同时令 $X_r = X_s$, 则

$$I_L = \frac{-jU}{X_r} \quad (3)$$

因此, 负载电流仅与谐振电感有关, 当电路参数确定后, 负载电流将表现为恒流而不随负载变化^[2]。此时, 谐振电流为

$$I_r = -\frac{UZ_L}{X_r^2} \quad (4)$$

可见, 当负载为阻性负载时, 谐振电流与逆变电压同相, 其大小随着负载的增加而成正比增大。

由于充电电流不随负载变化, 理论上来说, 该电路可以将电容电压充到很高, 但实际上由于电容的等效电阻值随着电压的升高逐渐升高, 此时母线电流需要很大的值才能实现恒流, 这对开关管和供电电源都是个压力。另外当电压加到一定值时, 相当于

收稿日期: 2007-03-22; 修回日期: 2007-05-25

作者简介: 张春林(1981-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要从事高压变流技术及数字控制的研究。

在输出侧并上一个很大的反电势,使得电路前后平衡,能量不再传递,电容电压也就不再上升,见图2。

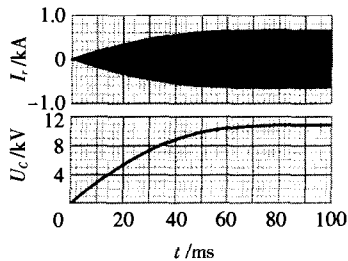


图2 电容极限电压仿真波形

因此当电路参数确定后,电容上能冲到的最大电压有个极限值,充电电压值应远小于该极限值,才能确保电路安全稳定的工作。实际运行中,可以在谐振回路中接入2个快速恢复的钳位二极管 D_1 、 D_2 (见图1),当变压器原边电压高于母线电压时,二极管导通,使得电压稳定在母线电压大小^[3]。

由式(3)、(4)可知,负载电流和谐振电流的大小关系为 Z_L/X_r ,即负载和谐振电感阻抗的比值。而另一方面,电容器的等效阻抗可近似认为是电容当前电压值除以充电电流,折合到变压器原边侧,结合式(3)可得: $Z_L = \frac{U_c}{I_r} X_r$,当电压被二极管 D_1 、 D_2 钳位在母线电压时, $Z_L = X_r$,此时 $I_r = I_L$ 。因此,当采用带有钳位二极管的LCL型充电电路时,电容等效阻抗的变化范围在 $0 \sim X_r$ 之间,而充电电压的大小为变压器变比和母线电压的乘积。图3是带有钳位二极管的电路仿真波形,从波形可以看到,谐振电流随着负载电容电压的增大而慢慢增加,负载电流恒定。当钳位二极管导通时,负载电流减小到0,谐振电流和电容电压都不再增加,和分析完全吻合。

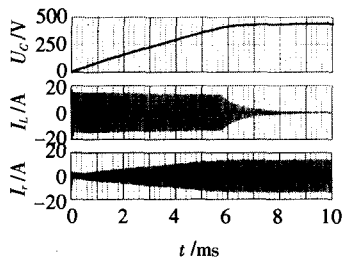


图3 带钳位二极管的仿真波形

2 实验结果

根据以上分析,当充电电容的大小、充电时间、充电电压确定后,充电电流也就随之确定。根据式(3)和已知的电源电压,即可确定 X_r 值,从而当电路工作频率确定后,整个电路参数包括开关管的选择、电容电感大小都可确定。

该例中首先以一可变电阻作为负载,工作频率为20kHz,充电电源用35V直流供电, $L_s = L_r = 130 \mu\text{H}$, $C_r = 0.49 \mu\text{F}$ 。当电阻从 40Ω 由大变小时,负载电流

表现出很好的恒流特性,图4所示的是当电阻在不同阻值时的实验波形,从上到下分别为谐振电流、负载电流和负载电压。

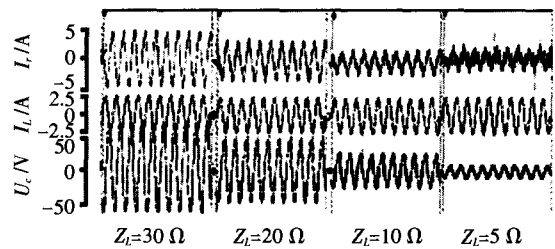


图4 LCL恒流特性实验结果

在验证负载电流不随负载变化后,对 $2200 \mu\text{F}$ 的电容进行充电实验,用三相交流整流供电,开关管采用IPM100DSA模块,变压器变比1:2.2,其他电路参数不变。用DSP做控制核心,为保证电路安全运行,被充电电容电压不宜太高,故设定充电时间为60ms,此时可认为负载阻抗在十欧姆以下。图5为实验波形,从上到下分别为谐振电流,负载电流和负载电容电压。 t_1 时刻,电容开始充电,60ms后的 t_2 时刻,控制电路停止驱动,充电停止。可以看到整个充电过程中电流保持恒定,电压线性上升。

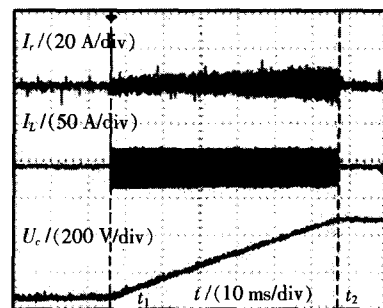


图5 电容充电波形

3 拓扑的恒压特性

该LCL拓扑不仅可以工作在恒流模式下,还可以工作在恒压模式下^[4]。由电路分析可知,负载电压大小可表示为式(5)

$$U_L = \frac{UX_P}{(X_s + X_p) + j(X_s X_p + X_r X_s + X_r X_p)/Z_L} \quad (5)$$

由式(5)可知,要使负载电压不随负载变化,则 $X_s X_p + X_r X_s + X_r X_p = 0$,设计时同样令 $X_r = X_s$,则 $X_s = -2X_p$,此时开关频率

$$f_s = \sqrt{2} f = \frac{\sqrt{2}}{2\pi \sqrt{L_r C_p}} \quad (6)$$

$$U_L = -U, I_r = \frac{U[Z_L + (-jX_p)]}{Z_L(-jX_p)} \quad (7)$$

可以看到,当电路工作在恒压模式下时,负载所得电压大小即为输入电压值,但相位相反。由谐振电流的表达式可知,谐振电流随着负载增大而减小。

同样采用上述实验的电路参 (下转第393页)

(1)研究出的基于小波变换的广义时延估计和基于小波的二次加权法时延估计算法均具有对带噪声信号进行时延估计的能力,其中,仿真得出:二次加权法具有更强的抗干扰能力,在信噪比较小时时延估计能力更强。

(2)基于小波的广义相关法在一定信噪比(-10 dB以内)时,无论信噪互不相关或互相关,均能较准确地对XLPE电缆内的局部放电进行定位。

(3)在低信噪比(如-15 dB)时,采用基于小波的二次加权法,在 $2^3, 2^4$ 尺度上具有较强的抗干扰能力,能较准确地对XLPE电缆内局部放电进行定位。

参考文献:

- [1] 陈巧勇, 文习山, 王 一, 等. 交联聚乙烯电缆在线绝缘检测的现状与发展[J]. 绝缘材料, 2003(4): 51.
- [2] 罗俊华, 马翠姣, 邱毓昌. XLPE 电力电缆局部放电的在线检测[J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 32-34.
- [3] Piersol A U. Time Delay Estimation Using Phase Data[J]. IEEE. ASSP-29, 1981(3): 471-477.

- [4] FEINTUCH P L, BERSHAD N J, REED F A. Time Delay Estimation Using the LD1S Adaptive Filter-dynamic Behavior [J]. IEEE. 455P-29, 1981(3): 571-576.
- [5] YOUNG ATIMED D H, CARTER G C. On Using the LMS Algorithm for Time Delay Estimation[J]. IEEE. ASSP-30, 1982(5): 798-801.
- [6] 唐 炬, 孙才新, 彭文雄, 等. GIS 局部放电检测中的小波包变换提取信号[J]. 电力系统自动化, 2003, 28(5): 25-29.
- [7] 崔雪梅, 孙才新, 李 新, 等. 实小波与复小波变换对局部放电在线监测中提取信号特征的特点研究 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 90-94.
- [8] 许高峰, 孙才新, 唐 炬, 等. 基于小波变换抑制 GIS 局部放电监测中白噪声干扰的新方法研究 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 87-90.
- [9] KNAPP C H, CARTAR G C. The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay [J]. IEEE. ASASSP-24, 1976, 32(327): .
- [10] 张贤达, 保 铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [11] MASHIKIAN M S, PALMIERI F, BANSAL R, et al. Location of Partial Discharges in Shielded Cables in the Presence of High Noise [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1992, 27(1): 37-43.

(上接第 388 页)数,仅将工作频率根据式(6)改变为 28.2 kHz,当负载电阻从小到大变化时的实验波形见图 6。可以看到,此模式下负载电压恒定而负载电流变化。另外,由式(7)可知,当 $Z_L \ll X_p$ 时, $I_r \approx U/Z_L = I_L$;而 $Z_L \gg X_p$ 时, $I_r \approx U/(jX_p)$,保持恒定,这从实验波形中也可以看出。

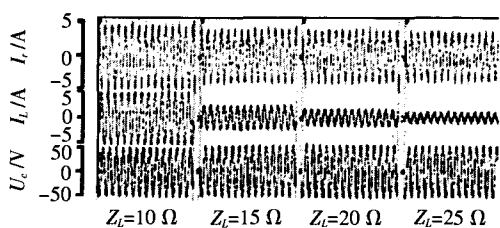


图 6 LCL 恒流特性实验结果

4 结语

由仿真计算和实验结果可知,LCL 型谐振拓扑有

很好的恒流特性,应用于电容充电电源的研制中具有恒流特性好、电路控制简单等优点。另外,此拓扑也有很好的恒压特性,在对输出电压恒定的场合也有一定实用价值。

参考文献:

- [1] BORAGE M, TIWARI S, KOTAIAH S. Constant-current, Const-voltage Half-bridge Resonant Power Supply for Capacitor Charging [J]. IEEE Proc.-electr. Power Appl, 2006, 153(3): 343-347.
- [2] BHAT A. Analysis and Design of LCL-type Series Resonant Converter[J]. IEEE Trans, Power Electron, 1994, 9(1): 64-73.
- [3] LOIATI K, SADARNAC D. Analysis of a Resonant Converter with LCL-type Commutation [J]. Proc. 5th EPE Conference, Brighton13-16 September, 1993(3): 141-147.
- [4] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理和设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

《电力电容器》已出版

新书介绍

《电力电容器》中文版 2007 年 7 月由机械工业出版社出版,原著由 CRC/Taylor & Francis 出版集团于 2005 年出版,作者为美国 Ramasamy Natarajan 博士,译者为浙江大学徐政教授。该书对电力电容器的原理和应用进行了十分系统和全面的阐述,内容包括电力电容器的基本原理、电力电容器的主要应用场合、电力电容器的保护方法、电力电容器的维护、电力电容器应用对系统的影响以及采用电力电容器进行功率因数校正的经济性分析等。书中包含大量的工程实例,可为解决实际工程问题作参考,该书适合于从事电力系统科研、规划、设计、运行的工程师与电力电容器设计、制造和应用的技术人员以及高等学校电气工程及其自动化专业的学生和教师阅读。全书 335 页,43 万字,定价 40 元。

购书联系电话:010-88379639 88379641;

汇款到:北京市西城区百万庄大街 22 号机工书店邮购部,邮编:100037,加 15% 邮寄费。