

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.017

基于整流补偿基波近似法的 LCC 谐振变换器参数设计

王 兴¹, 陈功洵², 韩其国^{1*}

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江工业大学 教育科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:为解决因输出整流桥的存在而导致的 LCC 串并联谐振变换器谐振参数分析与计算复杂化这一问题,提出了利用整流补偿基波近似法对静电除尘用的具有电容型滤波器的 LCC 串并联谐振变换器负载进行线性化等效,将谐振变换器的并联电容、整流桥和负载等效为线性的 RC 串联电路,降低了变换器特性分析和参数计算的难度;在此基础上以 18 kV/100 mA 的高频静电除尘高压直流电源为例,给出了具有电容型滤波器的 LCC 谐振变换器参数的设计方法和设计参数,并用 PSIM 仿真软件进行了验证。研究结果表明:通过该方法设计出的谐振电路参数与实际的 LCC 谐振电路误差较小,针对高频高压静电除尘器电源的非线性负载,可以较为简便且准确地获得线性化等效模型;该方法对 LCC 串并联谐振变换器的参数设计和特性分析具有指导意义。

关键词:整流补偿基波近似法;LCC 谐振变换器;电源参数设计

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0088-04

Parameters design of LCC resonant converter base on rectifier-compensated first harmonics approximation

WANG Xing¹, CHEN Gong-xun², HAN Qi-guo¹

(1. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Educational Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to solve the problem of the analysis and calculation of resonant parameters, that is complexed due to the existence of output rectifier in LCC series-parallel resonant converter, the nonlinear load of C-filter LCC series-parallel resonant converter was linearized by using Rectifier-compensated first harmonics approximation (RCFHA) and the equivalent model composes RC series circuit, which simplified the analysis and parameters calculation of the resonant converter. A simple design procedure was presented by the example of an 18 kV/100 mA high-voltage DC power supply applied in the electrostatic precipitators based on the analysis, the accuracy of the equivalent model and design method was verified by the simulation in PSIM. The research results show that there is little error between the parameters designed by the method and the actual LCC resonant converter, the accuracy linearized equivalent model can be obtained easily for the electrostatic precipitators by the method, and that will be guidance significance in parameters calculation and characteristics analysis for the LCC series-parallel resonant converter.

Key words: rectifier-compensated first harmonics approximation; LCC resonant converter; parameters design

0 引 言

随着现代工业的高速发展,环境污染愈加严重,环保形势也愈发严峻。在工业产品的生产过程中会产生大量粉尘,电除尘器是国际上公认的高效率除尘设备,

而相比传统的工频静电除尘器,高频高压静电除尘器具有体积小、效率高等优点,因此已成为研究热点^[1-4]。

LCC 串并联谐振变换器是高频高压静电除尘器中最常用的拓扑之一^[5-7]。然而,高压侧的整流桥是非线性电路,大大增加了电路参数计算的难度,虽然可以用

收稿日期:2015-07-17

作者简介:王 兴(1991-),男,河南郑州人,主要从事柔性电力电子技术方面的研究. E-mail:490421708@qq.com

通信联系人:韩其国,男,高级工程师,硕士生导师. E-mail:hanqiguoguo@163.com

基波法实现线性化等效^[8-9],但在输出电压电流相位不一致时,精度并不太高。此外,详细具体的参数设计方法也比较缺乏,使得实际应用中的电源设计比较困难。

本研究利用整流补偿基波近似法^[10]将负载侧的非线性电路进行线性化等效,简化电路的计算难度,且比传统的基波近似法更加准确,在此基础上以 18 kV/100 mA 高频高压静电除尘器电源为例,给出较为简单的参数设计方法,并用 PSIM 软件仿真结果验证等效电路和设计过程的准确性。

1 LCC 谐振变换器等效计算

静电除尘器电源的具有电容型滤波器的 LCC 串并联谐振变换器如图 1 所示。

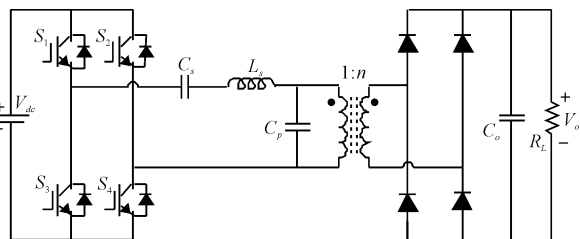


图 1 具有电容型滤波器的 LCC 谐振变换器

V_{dc} —输入直流母线电压; $S_1 \sim S_4$ —组成全桥逆变电路;

C_s —串联电容,起到隔直作用,可防止变压器产生磁偏; L_s ,
 C_p —串联电感和并联电容

谐振电路后接高变比变压器,其高压侧输出经全桥整流后与输出电容 C_o 和负载 R_L 并联。

为了简化分析,本研究将变压器副边的电路映射到原边,可得到的电路如图 2 所示。

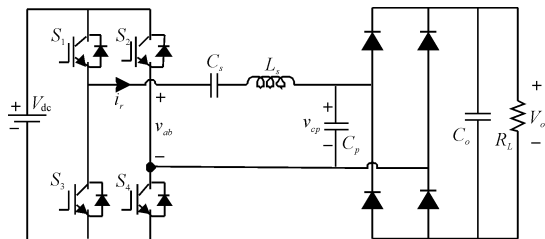


图 2 折算到变压器原边的 LCC 谐振变换器

其关键波形如图 3 所示。

根据 v_{cp} 的波形,可以看到 LCC 谐振变换器的工作过程分为两种: C_p 电压未被箝位时, C_s , L_s 和 C_p 共同参与谐振; C_p 电压被箝位时,仅有 C_s 和 L_s 参与谐振。

基波近似法是谐振电路稳态分析最常用的方法之一,通常用一个等效电阻来代替整流桥和负载,可以大大简化电路的分析。本研究采用整流补偿基波近似法对整流电路和负载进行线性化等效,比传统的基波近似法具有更高的精度^[11]。根据 C_p 上的电压是否被箝位,整流补偿基波近似法将负载电流和电压表达式分

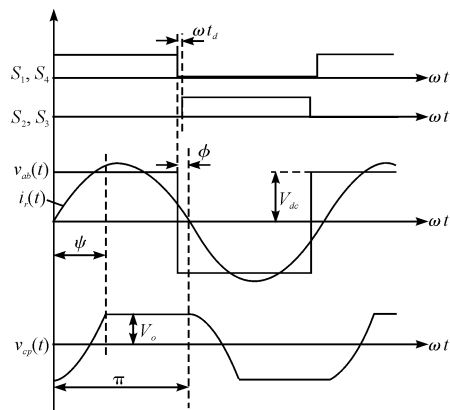


图 3 关键波形

t_d —全桥逆变的桥臂上、下管的死区时间; φ —逆变输出电压和电流之间的相位差; ψ —半个周期内 C_p 电压未被箝位时对应的角度

段考虑,然后根据傅立叶级数求得基波,并用 RC 串联电路作为等效电路。

由图 3 可以看出,谐振电流波形近似为正弦,因此假设谐振电流 i_r 等于其基波,即:

$$i_{r1}(t) = i_r(t) = I_r \sin(\omega_s t) \quad (1)$$

式中: i_{r1} —谐振电流 i_r 的基波, I_r — i_r 的峰值, ω_s —开关频率。

在 C_p 未被箝位的这段时间内,电流 i_r 流经 C_p ,此时无功功率输出, C_p 上的电压 v_{cp} 从 $-V_o$ 上升到 V_o ,根据 C_p 上电荷的变化可得下式:

$$\cos(\psi) = 1 - \frac{2V_o \omega_s C_p}{I_r} \quad (2)$$

在 C_p 电压被箝位至 V_o 时, i_r 流经负载,此时 C_p 上电压不变,有功功率输出到负载侧。因此,根据电流的积分,可得 v_{cp} 的表达式为:

$$v_{cp}(t) = \begin{cases} -V_o + \frac{I_r}{\omega_s C_p} (1 - \cos(\omega_s t)), & 0 \leq t < \frac{\psi}{\omega_s} \\ V_o, & \frac{\psi}{\omega_s} \leq t < \pi \\ V_o - \frac{I_r}{\omega_s C_p} (1 + \cos(\omega_s t)), & \pi \leq t < \frac{\pi + \psi}{\omega_s} \\ -V_o, & \frac{\pi + \psi}{\omega_s} \leq t < 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

通过傅立叶分析, v_{cp} 的傅立叶级数的基波的正弦项和余弦项系数分别为:

$$V_{cpA} = \frac{I_r \sin^2(\psi)}{\pi C_p \omega_s} \quad (4)$$

$$V_{cpB} = \frac{I_r}{2\pi C_p \omega_s} (\sin(2\psi) - 2\psi) \quad (5)$$

对应的阻抗为:

$$Z_{eq} = \frac{V_{cgA} + jV_{cgB}}{I_r} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (6)$$

式中:

$$R_{eq} = \frac{\sin^2(\psi)}{\pi C_p \omega_s} \quad (7)$$

$$X_{eq} = \frac{\sin(\psi) \cos(\psi) - \psi}{\pi C_p \omega_s} \quad (8)$$

因此,并联电容 C_p ,整流桥及负载可等效为 R_{eq} 和 C_{eq} 的串联电路,其中 $C_{eq} = -1/(\omega_s * X_{eq})$ 。再将 C_{eq} 和串联电容 C_s 合并,可得到图 1 所示的具有电容型滤波器的 LCC 串并联变换器的线性等效电路,如图 4 所示。其中, $C_e = C_s * \times C_{eq} / (C_s + C_{eq})$, $R_e = R_{eq}$ 。

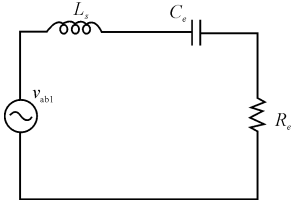


图 4 具有电容型滤波器的 LCC 谐振变换器等效电路

图 4 中的谐振网络的输入阻抗为:

$$Z_{in} = R_e + j\left(\omega_s L_s - \frac{1}{\omega_s C_e}\right) \quad (9)$$

根据式(9)可以推出逆变输出电压和谐振电流之间的相位差 φ ,谐振电流峰值 I_r 的表达式如下:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega_s L_s - \frac{1}{\omega_s C_e}}{R_e}\right) \quad (10)$$

$$I_r = \frac{4V_{dc}}{\pi \sqrt{R_e^2 + \left(\omega_s L_s - \frac{1}{\omega_s C_e}\right)^2}} \quad (11)$$

2 谐振参数设计

本小节利用上述负载线性化等效模型,以 18 kV/100 mA 高压直流静电除尘电源为例,给出了简单的额定工况下电源参数设计方法。

电源的已知额定参数如表 1 所示。

表 1 已知额定参数

参数	值
V_o/kV	18
I_o/mA	100
P_o/kW	1.8
f_s/kHz	50
V_{dc}/V	100
φ	0.314(对应为 1 μs)

根据表 1 可知,参数设计中需要确定的变量为谐振参数 L_s, C_s, C_p 和变压器变比 n ,具体设计步骤如下。

2.1 谐振电流峰值 I_r 和等效电阻 R_e 计算

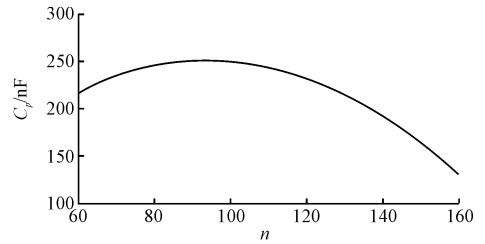
图 4 所示等效电路的功率可由式(12)算得:

$$P_o = \frac{2V_{dc}I_r \cos(\varphi)}{\pi} = \frac{I_r^2 R_e}{2} \quad (12)$$

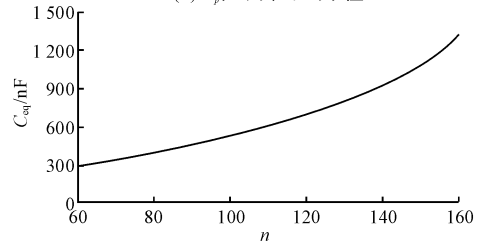
根据式(12)可求得谐振电流峰值 I_r 为 29.7 A,等效电阻 R_e 为 4.7 Ω 。

2.2 变压器变比 n 和并联电容 C_p 计算

根据式(2,7,8),不同变压器变比下的 C_p 和 C_{eq} 值分别如图 5(a)、5(b)所示。由图 5(a)可以看出,随着 n 的增大, C_p 的值先增大后减小,而当 n 过大时, C_p 会变成负值,因此 n 取值不能太大。由图 5(b)可以看出, C_{eq} 随着 n 的增大而增大,当 n 取值较小时, C_{eq} 的值也较小,导致 C_e 也减小,为了保证一定的工作频率,串联电感 L_s 取值会变大,增加了电源的体积和成本,因此 n 的取值也不能太小。为了方便计算,此处 n 取值为 100。此时 C_p 为 248 nF, C_{eq} 为 534.5 nF。



(a) C_p 在不同 n 下的取值



(b) C_{eq} 在不同 n 下的取值

图 5 不同变比所对应各电容值

2.3 串联电感 L_s 和串联电容 C_s 确定

因为 C_e 由 C_s 和 C_{eq} 串联而得,根据式(10)可知,为了保证 C_e 小于 C_{eq} , L_s 的取值应较大,此处取 L_s 为 50 μH 。根据式(10)可求得 C_e 为 221 nF,因 C_{eq} 已知,从而可求得 C_s 为 378 nF。

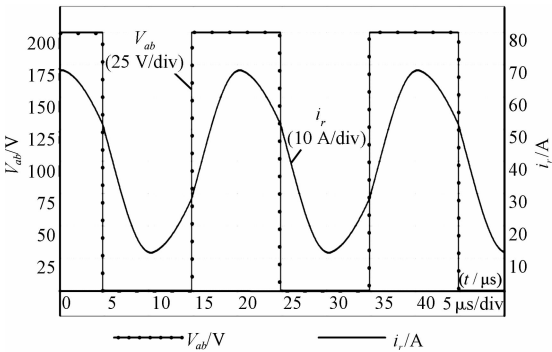
3 实验结果

为了验证上述等效参数设计过程的准确性,本研究在 PSIM 仿真软件中建立仿真电路(如图 1 所示),并代入上一节中设计得到的参数,在 50 kHz 工作频率下进行仿真,其逆变输出电压和谐振电流波形如图 6(a)所示,仿真结果如表 2 所示。

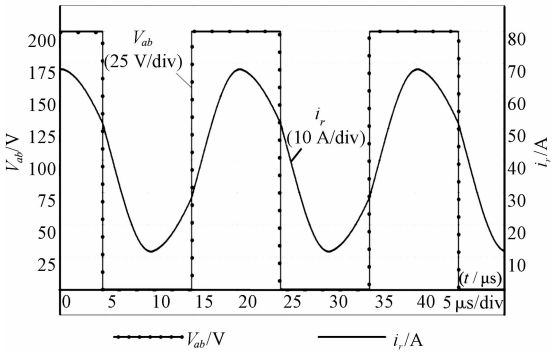
此外,本研究还在 PSIM 中进行了如图 4 所示的等效电路仿真,其逆变输出电压和谐振电流波形如图 6(b)所示,并与图 1 所示的 LCC 谐振电路仿真结果进

表 2 LCC 谐振电路设计结果与要求仿真对比

参数	设计要求	LCC 谐振电路仿真结果
V_o/kV	18	17.3
P_o/kW	1.8	1.72
φ	0.314	0.342



(a) LCC谐振电路仿真波形



(b) 等效电路仿真波形

图 6 仿真波形对比图

行了对比,如表 3 所示。

表 3 LCC 谐振电路与等效电路仿真对比

参数	LCC 谐振电路仿真结果	等效电路仿真结果
P_o/kW	1.72	1.61
I_r/A	28.2	26.1
φ	0.342	0.311

由表 2、表 3 及图 6 可以看出,通过整流补偿基波近似法得到的等效电路参数,以及由该等效电路设计出的谐振电路参数仿真结果与实际的 LCC 谐振电路的仿真结果误差较小,因此,该等效电路及谐振参数计算方法在具有电容型滤波器的 LCC 谐振变换器中是适用的。

4 结束语

针对高频高压静电除尘器电源谐振变换器的参数

设计因非线性负载的存在而复杂化这一问题,本研究利用整流补偿基波近似法对实际工程上常见的具有电容型滤波器的 LCC 串并联谐振变换器负载进行线性化等效,将谐振变换器的并联电容、整流桥和负载等效为线性的 RC 串联电路。

本研究以此为基础,对 18 kV/100 mA 的高频静电除尘高压直流电源进行仿真对比实验,通过 PSIM 软件的仿真结果证明了等效电路和设计方法的准确性。该方法有效降低了变换器特性分析和参数计算的难度,对以后 LCC 串并联谐振变换器的参数计算具有指导意义。

参考文献 (References) :

[1] 熊 新. 高频化高压静电除尘电源[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院,2013.

[2] 左乐乐,张文超. 基于 NCP1396 的 LLC 半桥型谐振变换器[J]. 机电工程,2012,29(2):224-226.

[3] 岳金伟,陈辉明,王正仕. 超高频感应加热电源逆变器负载拓扑的研究[J]. 机电工程,2010,27(6):73-77.

[4] 邹家勇. 静电除尘用高压直流 LCC 谐振变换器研究与设计[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2010.

[5] 张功泽,吴命利,李 腾. 静电除尘用 LCC 谐振变换器的设计与仿真[J]. 电源技术,2013(6):1040-1041.

[6] 马建荣,窦金生,陈 峰,等. 静电除尘高频电源直流电压控制电路[J]. 兵工自动化,2013,32(3):68-70,74.

[7] 杨文霞,张连永,杨明印. 恒流原型源在静电除尘中的特性研究[J]. 兵工自动化,2013,32(4):65-67.

[8] KAZIMIERCZUK M K, CZARKOWSKI D. Resonant Power Converters, 2nd Edition[M]. Hoboken, NJ: Wiley,2011.

[9] 夏 冰,阮新波,陈 武. 高压大功率场合 LCC 谐振变换器的分析与设计[J]. 电工技术学报,2009(5):60-66.

[10] SHAFIEI N, PAHLEVANINEZHAD M, FARZANEHFARD H, et al. Analysis of a Fifth-Order Resonant Converter for High-Voltage DC Power Supplies[J]. **Power Electronics, IEEE Transactions on**,2013,28(1):85-100.

[11] SHAFIEI N, PAHLEVANINEZHAD M, FARZANEHFARD H, et al. Analysis and Implementation of a Fixed-Frequency LCLC Resonant Converter With Capacitive Output Filter[J]. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**,2011,58(10):4773-4782.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

王 兴,陈功洵,韩其国. 基于整流补偿基波近似法的 LCC 谐振变换器参数设计[J]. 机电工程,2016,33(1):88-91.
WANG Xing, CHEN Gong-xun, HAN Qi-guo. Parameters design of LCC resonant converter base on rectifier-compensated first harmonics approximation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(1):88-91.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>