

基于 PWM 逆变器的 LC 滤波器

俞杨威, 金天均, 谢文涛, 吕征宇
(浙江大学 电力电子研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要:为了使脉宽调制(PWM)逆变器具有较好的输出波形,针对 PWM 逆变器谐波次数较高的特点,采用二阶 LC 低通滤波网络。从逆变器无功容量最小的角度,介绍了一种单相电压型 PWM 逆变器 LC 滤波器的设计方法,该方法综合考虑了滤波器的频率特性、功率因数等要素,根据该方法选择 LC 参数,可以优化滤波器性能。

关键词:脉宽调制;逆变器;LC 滤波器;无功容量

中图分类号:TM46

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2007)05-0050-03

LC filter based on PWM inverter

YU Yang-wei, JIN Tian-jun, XIE Wen-tao, LV Zheng-yu

(Institute of Power Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The orders of the harmonics of PWM inverter's output voltage are very high. Two orders LC lower-pass filter net was used to get better sinusoidal output waveform. A designed approach of filter for single-phase voltage-source PWM inverter based on the minimum reactive capacity of filter was proposed. This approach considers multi-element such as frequency characteristic, power factor, etc. The performance of the filter would be optimized if the parameters of LC are choosed by the approach presented.

Key words: pulse-width module (PWM); inverter; LC filter; reactive capacity

0 前 言

目前的逆变技术主要采用脉宽调制方式,由于 PWM 调制本身的特性决定着逆变器的输出电压中含有较多的高次谐波分量,因而必须在逆变器的输出侧加低通滤波器来减小谐波含量,以得到平滑的正弦波^[1]。一般的 PWM 逆变器采用 LC 低通滤波器,对于 LC 滤波器的设计,首先考虑滤波器的截止频率,这样可以消除逆变器输出电压中高于截止频率的大多数低次谐波。但是仅依据截止频率不能确定滤波器的参数,除去截止频率的因素,还需综合考虑滤波器的功率容量、体积等要素对逆变器的功率密度、重量、性价比等指标的影响。

本研究从滤波器无功容量的角度来设计 LC 滤波器,在分析滤波器性能对输出特性影响的基础上,提出了一种新的 LC 滤波器设计方法。

1 LC 滤波器的分析

单相电压型 PWM 逆变器拓扑,如图 1 所示。在本研究的分析中,假设:①直流电压 E_d 为理想电压源;②逆变器的开关为理想开关;③忽略电感与电容的寄生参数;④负载为线性负载。

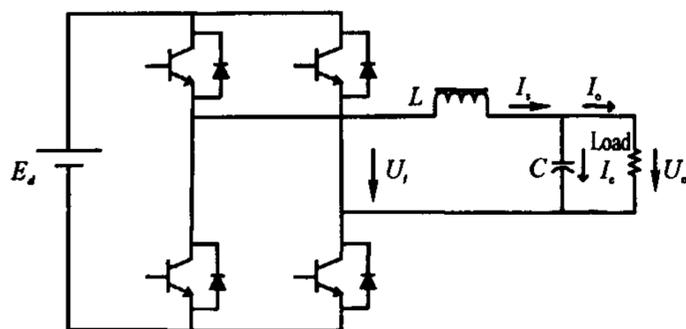


图 1 单相电压型 PWM 逆变器拓扑图

由于逆变器以高频 PWM 方式工作,输出滤波器的作用是滤掉高次谐波分量,使输出电压接近正弦波,同时也要考虑逆变器系统的功率密度等因素。

因此,滤波器设计目标包括:①输出电压的谐波含量小;②滤波参数和体积小;③滤波器的阻频特性好;④滤波系统消耗的功率小^[2]。根据以上原则,即可对滤波器的特性进行分析。

LC滤波器的传递函数为:

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_L^2}s^2 + \frac{2\xi}{\omega_L}s + 1} \quad (1)$$

式中 ω_L —LC 谐振角频率, $\omega_L = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; ξ —阻尼系数, $\xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$; $U_o(s)$ —滤波器输出电压; $U_i(s)$ —滤波器输入电压; s —拉普拉斯变换算子。

2 LC 滤波器参数设计

2.1 滤波器截止频率的确定

对于单相 PWM 逆变器输出电压 U_o 的频谱分析,各次谐波形成以 $n = jk (j = 1, 2, 3, \dots)$ 为中心幅值递减的上、下边频谐波带,其中 k 为调制比(载波频率与基波频率之比),带中各次谐波可以表示为 $n = jk \pm b$,其中 $j + b \neq$ 偶数,逆变器输出电压频谱图,如图 2 所示^[3]。

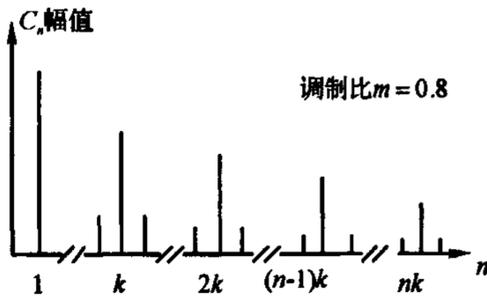


图 2 逆变器输出电压频谱

由图 2 可以看出, PWM 逆变器输出电压的最低谐波群为: $n = k \pm b$, 由于边频带谐波幅值是衰减的,足以产生影响的 b 值不会很高,故低谐波群的位置取决于 k 值,即 k 值越高,最低的一个下边带离基波就越远。为了使滤波器输出电压接近正弦波同时又不会引起谐振问题, LC 滤波器的截止频率 $f_L = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 必须要远小于 PWM 电压中所含有的最低次谐波频率,同时又要远大于基波频率。文献[4]中, LC 截止频率 f_L 选为:

$$10f_1 < f_L < f_{har(\min)}$$

f_1 —基波频率; $f_{har(\min)}$ —最低次谐波频率。

对于高频的 PWM 逆变器,载波频率远大于 10 倍的基波频率, f_L 选为载波频率的 1/10 ~ 1/5。

2.2 滤波器无功容量

滤波器的截止频率由 L 、 C 的乘积决定,在确定截止频率后, L 和 C 的参数还需要分别确定。本研究从滤波器无功容量的角度来选择 L 、 C 参数。滤波器无功容量也间接反映了滤波器尺寸、成本等要素。LC 滤波器结构图,如图 3 所示。

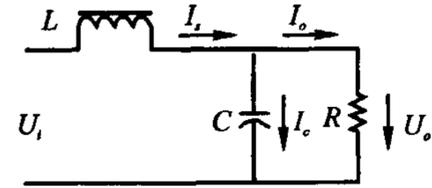


图 3 LC 滤波器结构图

PWM 逆变器输出滤波器的无功容量 Q 可以表示为^[5]:

$$Q = [\omega_1 \bar{I}_1^2 + \sum_{m=2}^{\infty} \omega_m \hat{I}_{mL}^2] + [\omega_1 \bar{U}_o^2 + \sum_{m=2}^{\infty} \omega_m \hat{U}_{mC}^2] \quad (2)$$

式中 ω_1 —基波角频率; ω_m — m 次谐波角频率; \bar{I}_1 —电感电流的基波有效值; \hat{I}_{mL} — m 次电感电流的谐波有效值; \bar{U}_o —电容电压的基波有效值; \hat{U}_{mC} — m 次电容电压的谐波有效值。

对于 PWM 逆变器的输出电压而言,谐波分量相对于基波来说非常小,因而式(2)可以简化为:

$$Q \approx \omega_1 \bar{I}_1^2 + \omega_1 C \bar{U}_o^2 \quad (3)$$

$$\text{LC 滤波器的截止角频率: } \omega_L = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

通常电容器为定型产品,其容量和体积有标准可循,而电感器则因绕线圈数和磁芯材料的变化,电感值可以任意确定。此外,滤波器体积和重量主要由电感决定。因而,主要应考虑电感取值对 LC 无功特性的影响。

$$\text{由式(4)可得: } C = \frac{1}{\omega_L^2 L} \quad (5)$$

把式(5)代入式(3),可得:

$$Q = \omega_1 \bar{I}_1^2 + \frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2 L} \quad (6)$$

对于阻性负载,有:

$$\bar{I}_1 = \sqrt{\bar{I}_o^2 + (\omega_1 C \bar{U}_o)^2} \quad (7)$$

$$\text{则 } Q = \omega_1 L [\bar{I}_o^2 + (\omega_1 C \bar{U}_o)^2] + \frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2 L} \quad (8)$$

把式(5)代入式(8),得:

$$Q = \omega_1 \bar{I}_o^2 L + \left(\frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2} + \frac{\omega_1^3 \bar{U}_o^2}{\omega_L^4} \right) \frac{1}{L} \quad (9)$$

式(9)中, \bar{U}_o, \bar{I}_o 为给定值, 故 Q 是关于 L 的函数, 要使 Q 值最小, 则 $\frac{\partial Q}{\partial L} = 0$,

$$\frac{\partial Q}{\partial L} = \omega_1 \bar{I}_o^2 - \left(\frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2} + \frac{\omega_1^3 \bar{U}_o^2}{\omega_L^4} \right) \frac{1}{L^2} \quad (10)$$

$$\text{故 } L = \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2} + \frac{\omega_1^3 \bar{U}_o^2}{\omega_L^4} \right)}{\omega_1 \bar{I}_o^2}} \quad (11)$$

L 值确定以后, 根据式(5), 得到 C 值。

3 设计实例

本研究针对单相 PWM 逆变电源进行了滤波器参数设计, 逆变器参数如下: 输出电压 $U_o = 240 \text{ V}$, 容量 6 kVA , 输出基波频率 $f_1 = 50 \text{ Hz}$, 载波频率 $f_c = 20 \text{ kHz}$ 。逆变器主电路拓扑, 如图 1 所示, 控制电路用数字控制实现。

综合考虑滤波器输出电压 THD、系统的动态响应以及体积、重量等因素, 选取截止频率 $f_L = 0.1f_c = 2 \text{ kHz}$, 结合式(11), 选取: $L = 700 \mu\text{H}$; $C = 10 \mu\text{F}$ 。

此时, 滤波器传递函数为:

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{7 \times 10^{-9} s^2 + 7.3 \times 10^{-5} s + 1} \quad (12)$$

LC 滤波器传递函数的 bode 图, 如图 4 所示。根据 bode 图, 可以看到角频率在 400 rad/s 以内的基波可以无衰减通过, 即工频 50 Hz 可以无衰减通过。对开关频率 20 kHz 的主电路而言, 所产生的高频分量 (即角频率在 10^4 rad/s 以外的谐波) 均可以得到很好的抑制。

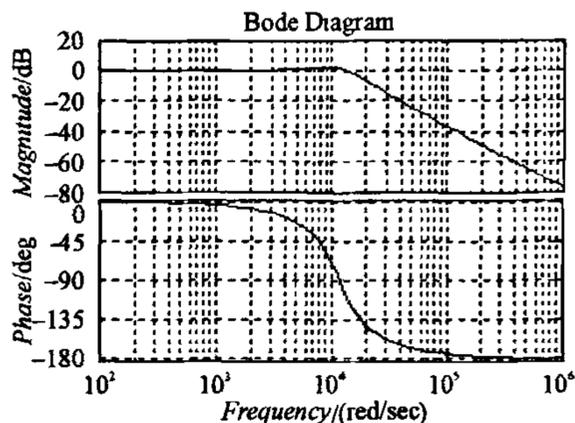


图 4 滤波器传递函数 bode 图

根据设计的滤波器参数进行试验, 逆变器带阻性负载时, 经滤波器滤波后输出的电压波形, 如图 5 所示。输出电压有效值为 240 V , 输出电压的最大畸变率为 2.9% 。由图中可以看出, 经 LC 滤波后, 逆变器输出电压平滑, 谐波大大减少, 符合逆变器性能指标要求。

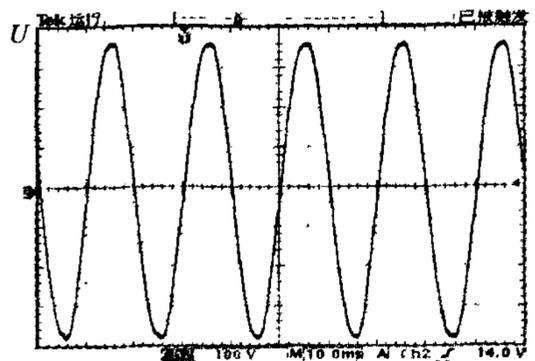


图 5 逆变器输出电压波形

4 结束语

本研究针对 PWM 控制逆变器输出电压需消除高次谐波的要求, 通过分析 LC 滤波器性能对逆变器的影响, 研究了从无功容量角度来设计逆变器输出滤波器的方法, 根据滤波器截止频率和无功容量最小这两个条件来确定 LC 的参数。理论分析和实践证明该方法是可行的, 并具有一定的实用价值。

参考文献 (Reference):

- [1] 伍家驹, 章义国, 任吉林, 等. 单相 PWM 逆变器的滤波器的一种设计方法[J]. 电气传动, 2003, 33(3): 12-15. WU Jia-jv, ZHANG Yi-guo, REN Ji-lin, et al. A method to design of filter for single-phase PWM inverter [J]. *Electric Drive*, 2003, 33(3): 12-15.
- [2] 谢运祥, 蒋麟征. 消谐控制逆变器的输出滤波器参数分析及设计[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 1-4. XIE Yun-xiang, JIANG Lin-zheng. Output filter parameter analysis and design of harmonic elimination control inverters [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2004, 32(5): 1-4.
- [3] 林渭勋. 现代电力电子电路 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [4] 宋强, 刘文华, 严平贵, 等. 大容量 PWM 电压源逆变器的 LC 滤波器设计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(3): 345-348. SONG Qing, LIU Wen-hua, YAN Ping-gui, et al. LC filter design for high-power PWM vdtage source inverter [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2003, 43(3): 345-348.
- [5] DAHONO P A, PURWADI A, QAMARUZZAMAN. An LC filter design method for single-phase PWM inverters [C]//Power Electronics and Drive Systems. Proceedings of 1995 International Conference on Feb 21-24, 1995: 571-576.

[编辑: 李 辉]