

传统 LC 滤波器与新型阻尼滤波器的比较

刘 琚¹, 邵 亮²

(1. 江西理工大学 信息工程系, 江西 南昌 330013;
2. 无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘要: 输出滤波器多采用传统的 LC 无阻尼滤波器, 该滤波器电路结构因无阻尼, 在输出端极易产生振荡分量而严重影响电器性能。阻尼滤波器由于采用改进了的电路结构: 用一电容与电阻串联之后与另一电容并联构成的组合电路来取代传统 LC 无阻尼滤波器的滤波电容, 并通过计算与计算机仿真, 合理选择参数, 使电路具有适当阻尼比的同时, 系统损耗较小, 抑制振荡效果显著, 增加了系统的稳定性, 改善了系统的性能。将 2 种滤波器利用仿真进行研究分析, 用实例证明新型阻尼滤波器的有效性且电路结构简单、成本低。

关键词: 滤波器; 阻尼; 振荡

中图分类号: TN 713⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)11-0049-03

0 引言

输出滤波器在各种功率变换器中均扮演着重要角色, 用于平滑输出电压波形, 使负载在适合的供电条件下工作, 它的优劣严重影响变换器的动态输出特性。输出滤波器对设计开关调节器反馈控制线路保证系统稳定有着重要的影响, 并且它本身也必须满足输出波形性能要求。文献[1]中的滤波器更多考虑 EMI, 并且结构复杂成本较高, 不利于工业上的设计应用。文献[2-3]研究的 LRC 滤波器简单但其效果特别是空载时并不理想。文献[4]仍是长期以来沿用的传统 LC 输出滤波器, 它是一个二阶无阻尼或极低阻尼系统, 它的 2 个极点由 L 和 C 的值决定。由于电容的等效串联电阻(ESR)也有一个零点存在^[5], 由于 ESR 不可能也不允许其值太大, 它对

动态性能影响不大, 滤波器仍存在着负载电流脉动较大和通带附近的阻带衰减不够等问题^[6], 如在空载或轻载时, 若滤波器前端出现扰动输入, 传统无阻尼 LC 滤波由于无阻尼或欠阻尼, 在滤波器的输出端极易产生较大振荡^[7], 并且也会由此带来一些电磁干扰(EMI)问题^[8], 因此需采用有抑制振荡功能的新型阻尼 LC 输出滤波器。为此本文将传统 LC 滤波器与一种新型阻尼滤波器分析、比较, 并指出后者的优越性。

1 传统无阻尼 LC 滤波

1.1 空载

等效电路如图 1 所示。图中, U_{ab} 为滤波器输入电压; U_o 为滤波器输出电压; L 为滤波电感; C 为滤波电容; R 为 C 的 ESR。

其传递函数为^[9]

收稿日期: 2006-01-05

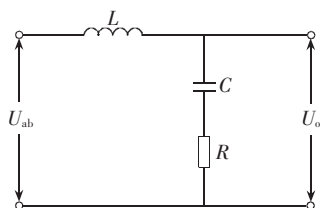


图 1 传统 LC 滤波器空载电路
Fig.1 Traditional LC filter circuit without load

$$G(s)_o = U_o(s) / U_{ab}(s) = \frac{sCR + 1}{s^2CL + sCR + 1} \quad (1)$$

由于 R 的值极小,一般为毫欧级,故有 $CR \approx 0$, 阻尼比 $\xi \approx \frac{1}{2}R\sqrt{\frac{C}{L}} \approx 0$ 。当空载时,系统将处于近似无阻尼状态 $\xi \rightarrow 0$,系统具有一对纯虚数极点,系统的暂态响应为恒定振幅的周期函数,而谐振峰值 $M_p \rightarrow \infty$ 。从滤波器瞬态响应角度看,在空载时,若 LC 滤波器前端出现扰动输入 U_i ,则滤波器输出端相应地出现多次振荡,谐振峰值 $M_p = \frac{1}{2\xi \times \sqrt{1-\xi^2}}$ 。如系统受到频率在谐振频率附近的干扰信号作用,LC 输出滤波器不能对其进行有效抑制和滤除,输出端将有较大的扰动分量,可造成严重后果。

以一台 $3 \text{ kV} \cdot \text{A}$ DC $220 \text{ V} / \text{AC } 115 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ 、开关频率为 20 kHz 的电力逆变器为例,当取输出电感 $L = 500 \mu\text{H}$ 、输出电容 $C = 30 \mu\text{F}$ 时其伯德图如图 2 所示^[10]。

由图 2 可知空载时系统将极不稳定。

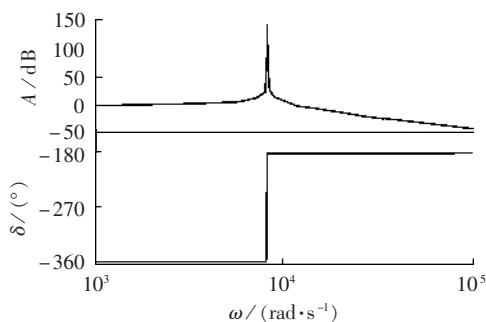


图 2 传统 LC 滤波器空载输出伯德图
Fig.2 Bode diagram of traditional LC output filter without load

1.2 并联假负载

重载或满载时系统是稳定的,由此提出并联假负载以使系统稳定的方案。

仍以一台 $3 \text{ kV} \cdot \text{A}$ DC $220 \text{ V} / \text{AC } 115 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ 、开关频率为 20 kHz 的电力逆变器为例,当取 $R_o = 1000 \Omega$ 、 $L = 500 \mu\text{H}$ 、 $C = 30 \mu\text{F}$ 时其伯德图如图 3 所示。

由图 3 可知,如取假负载 $R_o = 1000 \Omega$,此时电路性能并不理想,而在电阻 R_o 消耗的功率却高达 13.2 W ,显然该方案较差。

2 阻尼 LC 输出滤波器

阻尼 LC 输出滤波器电路如图 4 所示。

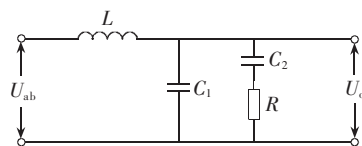


图 4 阻尼 LC 输出滤波器
Fig.4 Damping LC output filter

与传统 LC 滤波器显著的区别在于:用电容 C_2 与电阻 R 串联后与电容 C_1 并联构成的组合电路取代电容 C 。其中, C_1 滤除输出电压中的高频谐波分量,电阻 R 与 C_2 串联抑制振荡且可使电阻 R 损耗大为减小。

阻尼 LC 输出滤波器传递函数为

$$G(s)_o = U_o(s) / U_{ab}(s) = \frac{sRC_2 + 1}{s^3RC_1C_2L + s^2(C_1 + C_2)L + sRC_2 + 1} \quad (4)$$

式中 U_{ab} 为滤波器输入电压; U_o 为滤波器输出电压; L 为滤波电感; C_1 为滤波电容; R 为阻尼电阻; C_2 为与阻尼电阻串联的滤波电容。

由式(4)可知,滤波器传递函数多了一个零点,正是有了这个零点使得系统的性能有了极大的改善,根轨迹向左移,增加了系统的稳定性,缩短了系统响应的调整时间。

通过合理选择参数,可以极大改善系统的性能。 C_2 值应尽可能的小以减小电阻 R 上的损耗,一般约为 $(C_1 + C_2)$ 的 $1/3 \sim 1/2$;电阻 R 一般取几十欧姆,与 C_2 的容抗比较,原则上要求 R 远小于 C_2 容抗并可适当取大,同时要求其损耗要小,一般可通过计算、仿真确定。 R 上的损耗^[5]:

$$P_R = \frac{U_o^2}{R^2 + 1/\omega^2 C_2^2} R \quad (5)$$

仍以一台 $3 \text{ kV} \cdot \text{A}$ DC $220 \text{ V} / \text{AC } 115 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ 、开关频率为 20 kHz 的电力逆变器为例,取 $R = 10 \Omega$ ($P_R = 1.30 \text{ W}$)、 $L = 500 \mu\text{H}$ 、 $C_1 = 20 \mu\text{F}$ 、 $C_2 = 10 \mu\text{F}$ 时其伯德图如图 5 所示。易见与传统 LC 滤波器相比性能有了较大改善。

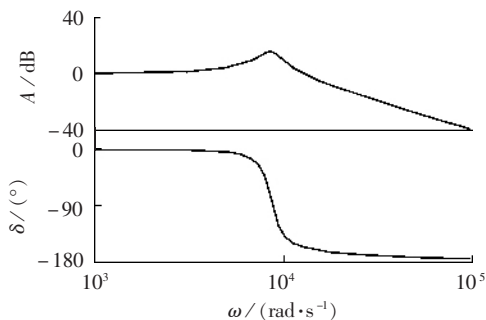


图 5 阻尼 LC 输出滤波器空载伯德图
Fig.5 Bode diagram of damping LC output filter without load

综上所述,在轻载时采用传统 LC 滤波器不能稳定地变换系统,而在采用新型的阻尼 LC 输出滤波器后,在空载时也非常稳定。

以 $3 \text{ kV} \cdot \text{A}$ DC $220 \text{ V} / \text{AC } 115 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ 、开关频率为 20 kHz 的电力逆变器为例:传统 LC 滤波器输

出电感为 $L=500\ \mu\text{H}$ 、输出电容为 $C=20\ \mu\text{F}$,空载输出波形如图 6 所示。阻尼 LC 输出滤波器,取 $R=10\ \Omega$ 、 $L=500\ \mu\text{H}$ 、 $C_1=20\ \mu\text{F}$ 、 $C_2=10\ \mu\text{F}$,空载输出波形如图 7 所示。

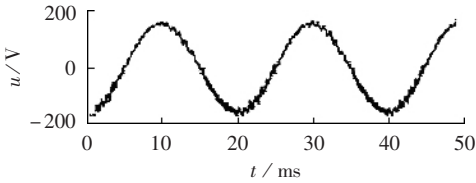


图 6 传统 LC 滤波器空载输出电压波形

Fig.6 Output voltage waveform of traditional LC filter without load

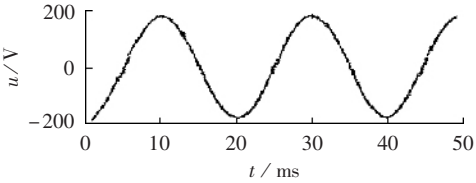


图 7 阻尼 LC 输出滤波器空载输出电压波形

Fig.7 Output voltage waveform of damping LC filter without load

试验比较说明采用阻尼 LC 输出滤波器空载输出电压波形光滑,其性能明显优于传统 LC 滤波器。

3 结语

阻尼 LC 输出滤波器能有效抑制扰动的谐波振荡、效果明显,损耗小,与其他多种电路比较相对简单,易于在工程上推广应用。

参考文献:

[1] 姜艳妹,徐殿国,刘宇,等. 一种新颖的逆变器输出无源滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(11):134-138.
JIANG Yan - shu,XU Dian - guo,LIU Yu,et al. Research on a novel inverter output passive filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(11):134-138.

[2] 颜斌,陈希有. 变频器输出 RLC 正弦波滤波器的工程设计[J]. 电机与控制学报,2002(9):256-260.
YAN Bin,CHEN Xi-you. The engineering RLC design of sine -wave VVVF output filter[J]. Electric Machines and Control,

2002(9):256-260.

[3] 王毅,李和明,石新春,等. 多电平 PWM 逆变电路谐波分析与输出滤波器设计[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):78-82.
WANG Yi,LI He-ming,SHI Xin-chun,et al. Harmonic analysis and output filter design for multilevel PWM inverters [J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(10):78-82.

[4] 林力,武和雷. 交流滤波器分析与设计问题研究[J]. 南昌大学学报:理科版,2000(3):97-100.
LIN Li,WU He-lei. Research on the analysis and design of AC wave filter[J]. Journal of Nanchang University:Natural Science, 2000(3):97-100.

[5] GARCIA O,SEBASTIAN J,COBOS J A,et al. A comparison of output filter size in DC/DC converters[C]// PESC'96 Record, 27th Annual IEEE. [S.l.]:IEEE,1996:638-644.

[6] 陈道炼. DC-AC 逆变技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[7] MITECHELL D M. Power line filter design considerations for de - dc converters[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1999(11/12):16-26.

[8] KODALI V P. Engineering electromagnetic compatibility [M]. New York:IEEE,1996.

[9] 孙亮,杨鹏. 自动控制原理[M]. 北京:北京工业大学出版, 1999.

[10] 薛定宇,陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[11] HANIGOVSZKI N. A novel output filter topology to reduce motor overvoltage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004,40(3):845-852.

[12] SOZER Y,TORREY D A,REVA S. New inverter output filter topology for PWM motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000,15(6):1007-1017.

[13] LOH P C,HOLMES D G. Analysis of multiloop control strategies for LC-CL-LCL-filtered voltage-source and current -source inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005,41(2):644-654.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

刘 珺(1975-),男,江西丰城人,助理工程师,硕士,主要研究方向为电力电子应用、电力系统(E-mail:jimliujun@163.com);
邵 亮(1976-),男,江苏宜兴人,助理工程师,主要从事电力系统电网运行调度工作。

Comparison of LC filters and damping filters

LIU Jun¹,SHAO Liang²

(1. Jiangxi Sci. & Tech. University,Nanchang 330013,China;
2. Wuxi Power Supply Co.,Wuxi 214061,China)

Abstract: Since its electric circuit structure has no damping,the traditional LC filter,which is normally applied to output filters,is inclined to generate oscillations at the output port. The damping filter is introduced,which replaces the capacitor C of traditional LC filter with a damping circuit of two capacitors and one resistor. Circuit parameters are set properly by calculation and simulation to ensure the output filter has both good damping effect and low power loss,which suppresses vibration and enhances system stability and performance. Analysis with simulations shows the damping filter is effective,simple and cheap.

Key words: filter; damping; vibration