

文章编号:1671-251X(2017)04-0064-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.04.015

刘向昕,谭国俊,胡子豪,等.大功率防爆变频器 EMI 滤波器设计[J].工矿自动化,2017,43(4):64-67.

大功率防爆变频器 EMI 滤波器设计

刘向昕¹, 谭国俊¹, 胡子豪¹, 张玉成², 封安波², 马亮², 王凯²

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008;

2. 江苏省电力传动与自动控制工程技术研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘要:分析了大功率防爆变频器 EMI 产生的机理,并提出了一种大功率防爆变频器 EMI 滤波器设计方法。该 EMI 滤波器采用单级 LC 滤波器+“P”型匹配网络结构,可在防爆变频器阻抗不匹配的情况下实现阻抗匹配,进而改善 EMI 滤波效果。以 1 MW/1 140 V 防爆变频器为实验对象,验证了该 EMI 滤波器的有效性。

关键词:防爆变频器; EMI 滤波器; “P”型匹配网络; 阻抗匹配

中图分类号:TD61 文献标志码:A 网络出版时间:2017-03-28 17:32

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170328.1732.015.html>

Design of EMI filter for high-power explosion-proof inverter

LIU Xiangxin¹, TAN Guojun¹, HU Zihao¹, ZHANG Yucheng²,
FENG Anbo², MA Liang², WANG Kai²

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Jiangsu Electrical Drive and Control Engineering Technology Research Center, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Generation mechanism of EMI in high-power explosion-proof inverter was analyzed, and design method of an EMI filter for high-power explosion-proof inverter was proposed. The EMI filter uses "P" matching network structure based on a single LC filter, and realizes impedance matching of the explosion-proof inverter in the case of impedance mismatching, so as to improve EMI filtering effect. A 1 MW/1 140 V explosion-proof inverter was tested to verify validity of the EMI filter.

Key words: explosion-proof inverter; EMI filter; "P" matching network; impedance matching

0 引言

大功率防爆变频器以其优越的调速性能在煤矿井下得到了广泛应用,其功率开关器件大多采用 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管)。IGBT 的应用使变频器具有低谐波、高功率因数,大大提高了电能质量及电能利用率^[1-2],但也对自身系统和周围电网产生了较为严重的高频电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)^[3]。现有 EMI 滤波器大多用于开关电源^[4-5],

或功率等级较小的两电平整流逆变装置^[6-8],有的则侧重于对逆变侧电动机进行保护^[9-10],而对于大功率防爆变频器 EMI 抑制的研究较少。本文在 IGBT 暂态变化的基础上^[11],研究了防爆变频器 EMI 产生的机理,考虑到阻抗不匹配对滤波器插入损耗的影响^[12-14],提出了一种适用于大功率防爆变频器的 EMI 滤波器设计方法。该滤波器基于单级 LC 滤波器,在系统阻抗不匹配时,通过“P”型网络匹配阻抗来抑制 EMI 信号,且具有较高的低通特性。

收稿日期:2016-09-28;修回日期:2017-02-20;责任编辑:李明。

基金项目:江苏省科技成果转化项目(BA2016017)。

作者简介:刘向昕(1955—),男,河北唐山人,博士研究生,研究方向为大功率交流调速、电力电子与电力传动,E-mail:zyc_cumt@163.com。

1 防爆变频器 EMI 产生的机理

IGBT 在开关暂态产生的高 du/dt (u 为 IGBT 电压, t 为时间) 和 di/dt (i 为 IGBT 电流) 是电力电子设备的主要高频噪声源, 其与 IGBT 中的寄生电容及母排、引线的寄生电感作用, 形成阻尼振荡而出现振荡波。此外, 还存在 IGBT 高开关频率产生的谐波和电网干扰等。EMI 信号按照传播路径可分为差模和共模信号。双三电平防爆变频器 EMI 信号传播路径如图 1 所示。

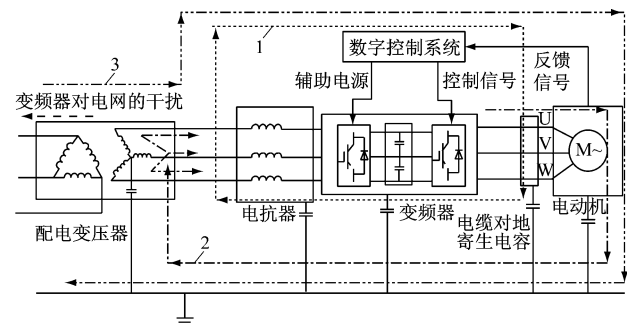


图1 防爆变频器 EMI 信号传播路径

(1) IGBT 开关暂态过程中的 di/dt 与变频器中的母排和滤波电容的寄生电感形成差模噪声, 如图 1 中路径 1 所示。

(2) IGBT 开关暂态过程中的 du/dt 与 IGBT 自身的米勒电容及散热器中寄生电容共同作用, 形成共模噪声, 如图 1 中路径 2 所示。

(3) 电网其他用电设备工作时产生的噪声通过变压器耦合到变频器, 或电网遭雷电干扰等, 均导致电网内部产生共模和差模噪声, 如图 1 中曲线 3 所示。

2 大功率防爆变频器 EMI 滤波器

防爆变频器产生的 EMI 信号一般比 GB 12668.3—2012《调速电气传动系统 第 3 部分: 电磁兼容性要求及其特定的试验方法》规定值高 30~40 dB, 在 0.15~30 MHz 频段, 差模、共模信号共存。由于大功率防爆变频器电压、电流较大时, 一般采用高压探头的方法测量 EMI, 很难分离差模和共模信号, 加上阻抗不匹配等不良因素的影响, 使得滤波器的设计具有一定难度。本文设计了一种大功率防爆变频器 EMI 滤波器, 其基于单级 LC 滤波器, 且在变频器阻抗不匹配时采用“P”型匹配网络来抑制 EMI 信号。

2.1 基于单级 LC 滤波器的 EMI 滤波器

设计 EMI 滤波器时, 将电网侧作为负载, 变频

器作为干扰源。设 U_g 为干扰源电压, U_1 为未经 EMI 滤波器衰减的噪声电压, U_2 为返回电网的噪声电压, Z_g 为源阻抗, Z_L 为负载阻抗。若 $Z_g = Z_L$, 得到基于单级 LC 滤波器的 EMI 滤波器结构, 如图 2 所示。

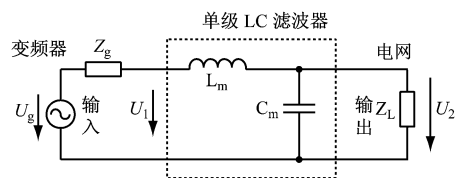


图2 基于单级 LC 滤波器的 EMI 滤波器结构

首先确定单级 LC 滤波器在滤波频段需提供的插入损耗。根据文献[6]中的工程参考图, 确定单级 LC 滤波器的转折频率 f_c , 由 $f_c = 1/(2\pi\sqrt{L_m C_m})$ (L_m 为串联等效电感, C_m 为并联等效电容) 计算 $L_m C_m$ 值。不考虑阻抗变化对滤波器的影响, 可近似计算出单级 LC 滤波器随频率 f 变化可提供的插入损耗 $K(f) = 2\pi f L_m C_m$ 。为了保证足够的裕量, 单级 LC 滤波器提供的插入损耗需高于理论值。

然后对滤波元件进行选型。在不同的频率下, EMI 信号中共模和差模信号共存, 采用高压探头测量 EMI 信号时, 很难分离出共模和差模信号。可采用接入单个滤波元件的方法估算共模和差模信号所处的主要频段。选取共模电感 L_{CM} 和共模电容 C_Y 时, 由于 C_Y 受接地漏电流限制, 所以其值不能太大, 应优先考虑 C_Y ; 选取差模电感 L_{DM} 和差模电容 C_X 时, 应优先考虑 L_{DM} , 使其满足滤波器两端电压要求, 然后选择 C_X 。

为了消除滤波元件高频特性的影响, 可通过并联不同等级的电容来增强滤波频段, 利用电容的引线来改变电容的自谐振点。可采用高磁导率的超微晶磁环制作电感器, 采用铜排就近接地, 以减少滤波器接地电阻对滤波特性的影响。

2.2 阻抗匹配 EMI 滤波器

受阻抗不匹配影响, 基于单级 LC 滤波器的 EMI 滤波器可能达不到理想的插入损耗, 因此, 采用“P”型网络进行阻抗匹配。

设置 Z_L 参考值为 50Ω , 此时可将 Z_g 看成无穷小。为了减少阻抗不匹配带来的干扰, 在源阻抗侧匹配一个由电阻 R_P 和电容 C_P 串联的“P”型匹配网络, 使源阻抗和负载阻抗几乎相等, 如图 3 所示。

“P”型匹配网络中的衰减因数为

$$k = \left| \frac{U_g}{U_2} \right| = \left| \frac{U_g}{U_1} \right| \left| \frac{U_1}{U_2} \right| = \left| \frac{U_g}{U_1} \right| k_0 \quad (1)$$

式中 k_0 为单级 LC 滤波器的衰减量。

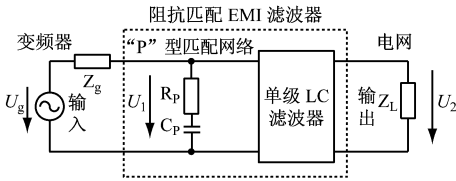


图 3 阻抗匹配 EMI 滤波器

由于匹配电阻 R_p 会引起工频损耗,为了减少工频损耗,要求匹配电容 C_p 的工频阻抗远大于 R_p 值,且在滤波频率下限 f_L (一般为 150 kHz), C_p 阻抗远小于 R_p 值。设 μ 为“P”型匹配网络的匹配效果, $\mu = U_g/U_1$, μ 恒大于 1,且 μ 越小,匹配效果越好,则匹配电阻取值范围为

$$R_p < Z_{10}(\omega_L) \sqrt{\mu^2 - 1} \quad (2)$$

式中 $Z_{10}(\omega_L)$ 为从滤波器输入端看进去的滤波频率下限的开路阻抗, $\omega_L = 2\pi f_L$ 。

同时,“P”型匹配网络必须将从干扰源看进去的输入阻抗降至最小,这样才能消除阻抗不匹配的影响。设 ρ 为“P”型匹配网络对输入阻抗的匹配效果,其为有无匹配网络时输入阻抗的比值, ρ 恒小于 1,且 ρ 越小,匹配效果越好。引入 ρ 后,阻抗限制条件为

$$|Z_g // Z_p| < 2\rho Z_{1\min} \quad (3)$$

式中: Z_p 为“P”型匹配网络的阻抗; $Z_{1\min}$ 为输入阻抗的最小值。

设定较低的 ρ ,单级 LC 滤波器可在近乎理想阻抗匹配的情况下工作。此时 Z_g 取值的变化基本上不会对阻抗匹配 EMI 滤波器的输入阻抗产生影响,因此即使 $\rho < 0.1$,阻抗匹配 EMI 滤波器的电压衰减也会大于或等于单级 LC 滤波器的插入损耗。

为了进一步简化设计,当 ρ 取较小值时,可认为在滤波频率下限,阻抗匹配 EMI 滤波器的输入阻抗的最小值等于开路时的输入阻抗,即

$$Z_{1\min} = Z_{10}(\omega_L) = X \quad (4)$$

设定 μ, ρ 后,即可根据式(4)计算元件参数,如式(5)~式(7)所示。

$$C_p \geq \frac{1}{\mu \omega_L X} \quad (5)$$

$$\mu X - \sqrt{(\mu X)^2 - \frac{1}{(C_p \omega_L)^2}} \leq R_p \leq \mu X + \sqrt{(\mu X)^2 - \frac{1}{(C_p \omega_L)^2}} \quad (6)$$

$$R_p \geq \frac{1}{C_p \omega_L \sqrt{\mu^2 - 1}} \quad (7)$$

阻抗匹配 EMI 滤波器的插入损耗为

$$l_1 \geq k_0 \frac{1 - \rho}{\mu} \quad (8)$$

确定 μ, ρ 后,即可确定“P”型匹配网络中的 R_p, C_p 值。需要注意的是, R_p, C_p 值是根据不等式得到的,可以根据实际情况进行调整,但应使由其引起的工频损耗最小。

3 实验验证

以 1 MW/1 140 V 双三电平背靠背式防爆变频器为实验对象来验证阻抗匹配 EMI 滤波器的性能。采用高压探头测试 EMI 信号。为了保证测试的有效性,在电网侧加装电源滤波器,以隔离来自电网的 EMI 信号,保证耦合到接收机的噪声电压全部来自变频器^[15]。

图 4 为防爆变频器产生的 EMI 信号。可看出实测 EMI 信号超出 GB 12668.3—2012 规定的标准限值约 40 dB。

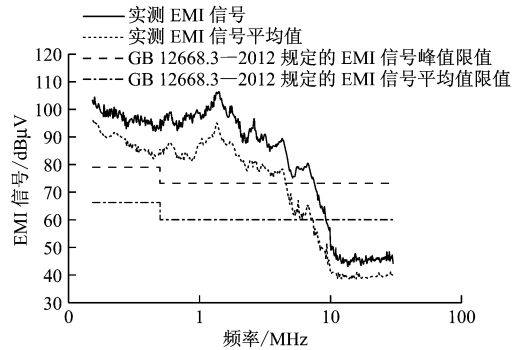
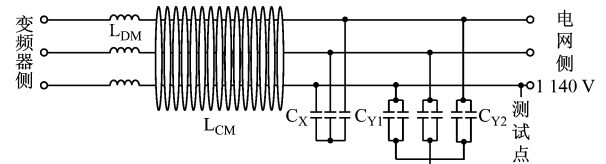
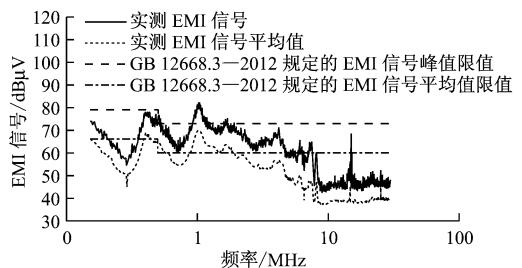


图 4 防爆变频器产生的 EMI 信号

采用如图 5(a)所示的单级 LC 滤波器对防爆变频器产生的 EMI 信号进行抑制。经计算得 $C_X = 1.25 \mu F, C_{Y1} = 0.47 \mu F, C_{Y2} = 0.15 \mu F, L_{DM} = 1.5 \mu H$ 。经测试可知单匝超微晶磁环在 150 kHz 的电感量约为 35 μH ,而所需的共模电感 $L_{CM} \approx 0.5 mH$,可由 15 个磁环串联组成。接入该单级 LC 滤波器时测得的 EMI 信号如图 5(b)所示。



(a) 单级 LC 滤波器



(b) 单级 LC 滤波器的 EMI 滤波效果

图 5 单级 LC 滤波器及其 EMI 滤波效果

从图 5 可看出,变频器 EMI 信号得到较好抑制,但在 0.4,1 MHz 频率点附近,EMI 信号仍超过 GB 12668.3—2012 限值,没有达到理想的滤波效果。

当加入 $C_p=0.1\ \mu\text{F}$, $R_p=20\ \Omega$ 的“P”型匹配网络时,EMI 滤波器结构和测得的 EMI 信号如图 6 所示。可看出此时 EMI 信号得到很好的抑制,低于 GB 12668.3—2012 限值,且有 10 dB 裕量。

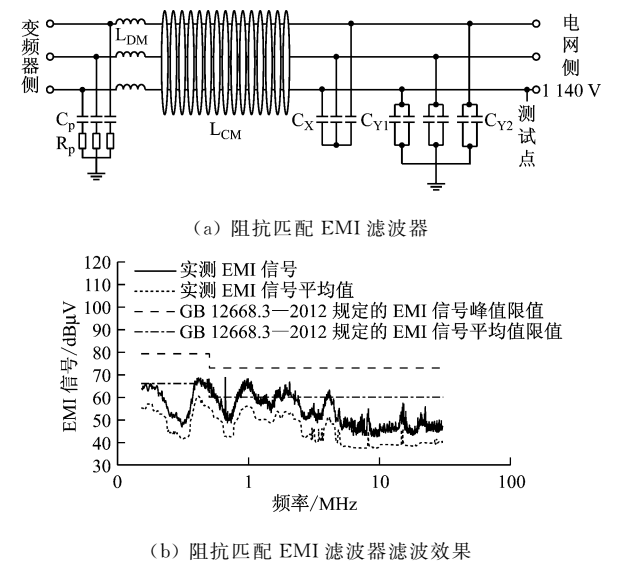


图 6 阻抗匹配 EMI 滤波器及其滤波效果

为了进一步说明阻抗匹配的重要性,改变“P”型匹配网络元件参数,测得的 EMI 信号如图 7 所示。可看出当匹配电阻 $R_p=10,30\ \Omega$ 时,测得的 EMI 信号与未加入“P”型匹配网络时变化不大,均未满足要求。

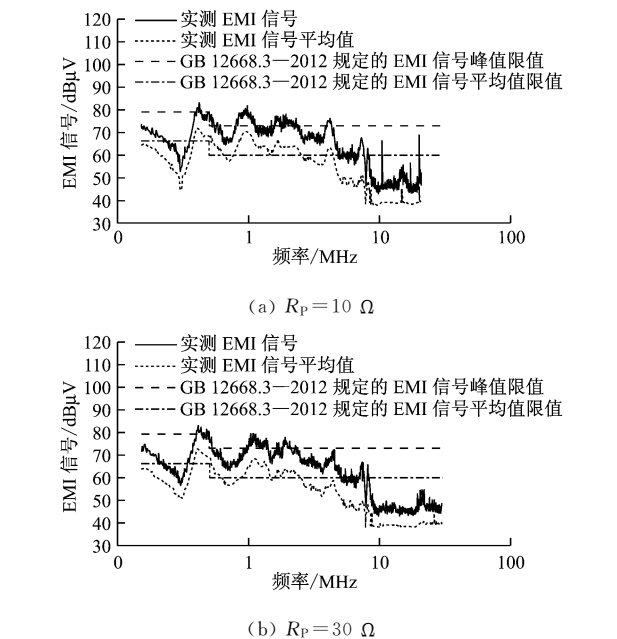


图 7 匹配电阻不同时阻抗匹配 EMI 滤波器滤波效果

4 结语

通过分析大功率防爆变频器 EMI 产生的机理,提出了一种基于“P”型匹配网络的 EMI 滤波器,并验证了该滤波器可以很好地抑制防爆变频器产生的 EMI 信号。

参考文献:

- [1] 曹海洋,沈建辉,王宏震,等. 基于 EMI 滤波器的防爆变频调速系统 EMI 抑制[J]. 电气传动,2015,45(5): 51-55.
- [2] 曹海洋,姜子健,沈建辉,等. 大功率双三电平变频调速系统共模电磁干扰研究[J]. 电工技术学报,2016, 31(5):17-25.
- [3] 杨继深. 现代工业中电能质量与电磁干扰控制[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [4] 鲍敬源,崔杨,王硕威,等. 开关电源传导干扰建模与仿真分析[J]. 舰船电子工程,2014,34(2):82-85.
- [5] 王博,张秀青. 电磁兼容技术及其在开关电源中的应用[J]. 电源技术应用,2008(6):31-34.
- [6] 马伟明,张磊,孟进. 独立电力系统及其电力电子装置的电磁兼容[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [7] 裴雪军,康勇,熊健,等. PWM 逆变器共模传导电磁干扰的预测[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8): 83-88.
- [8] HARTMANN M, ERTL H, KOLAR J W. EMI filter design for a 1 MHz, 10 kW three-phase/level PWM rectifier [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1192-1204.
- [9] 裴雪军,张凯,康勇,等. 基于 EMI 滤波器的逆变器传导电磁干扰的抑制[J]. 电气传动,2007, 37(12): 35-38.
- [10] 贾贵玺,周晓畅,李华. 高压变频器输出差模滤波器设计和共模电压抑制[J]. 电工技术学报,2011, 26(增刊 1):161-165.
- [11] 孟进,马伟明,张磊,等. 基于 IGBT 开关暂态过程建模的功率变流器电磁干扰频谱估计[J]. 中国电机工程学报,2005, 25(20):16-20.
- [12] 姜保军,孙力,赵克. EMI 滤波器阻抗失配与 EMI 信号的有效抑制[J]. 电机与控制学报,2006, 10(3): 252-255.
- [13] 王培康,郑峰,杨小瑜,等. 一种调整共模噪声源阻抗并优化 EMI 滤波器性能的方法[J]. 中国电机工程学报,2014, 34(6):993-1000.
- [14] 宋峥,王世山. EMI 滤波器网络最佳工作状态设计及其平面化实现[J]. 电工技术学报,2016, 31(7): 179-187.
- [15] 吕明珠,刘世勋. 大功率变频调速系统的 EMI 等效测试装置的设计研究[J]. 自动化与仪器仪表,2015(7): 177-180.