

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2014.02.026

基于Matlab的变频器输出RLC dv/dt 滤波器仿真

王家校

(上海鹰峰电子科技有限公司, 上海 201604)

摘要: 针对工业变频器驱动感应电机采用长电缆时会产生电压反射的现象,导致感应电机端过电压和高频阻尼振荡的发生,使电机绝缘加速老化,最终造成绝缘击穿等事故的问题,研究了将传输线理论结合电机系统模型分析应用到RLC dv/dt 滤波器的详细设计中。首先通过分析长电缆传输时,变频器PWM输出脉冲对电机侧电压的影响,建立了“传输线—滤波器”一体化系统模型,并进行了具体的计算,得出了二阶RLC dv/dt 滤波器的基本设计方法,推导出了相应公式以及电缆长度、电缆特性参数、电压反射系数等对滤波器参数的影响,最后用Matlab进行了仿真,并对按照该方法设计的产品进行了模拟实际工况试验测试,将仿真结果与试验数据进行了比较,两者基本吻合。研究表明,针对变频器输出 dv/dt 滤波器的设计,采用该方法具有可行性、有效性和高准确性。

关键词: 过电压; 传输线理论; RLC dv/dt 滤波器; 反射; 脉冲

中图分类号: TM743 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)02-0249-05

Simulation and design of inverter output RLC dv/dt filter based on Matlab

WANG Jia-xiao

(Shanghai Eagtop Electronic Technology Co., Ltd., Shanghai 201604, China)

Abstract: Aiming at the problems of when as the long cable was connected industry inverter to driving induction motor, led to the voltage reflection was happened, which caused overvoltage and high-frequency damped oscillation, aged and break-down the motor insulation and so on, the transmission line theory with motor system model analysis was studied and applied to RLC dv/dt filters design. First, by analyzing the long cable transmission, the motor side voltage was effected on the inverter PWM output pulse voltage, the transmission line - filter integrated system model was established, deduced specifically, and the fundamental method was presented to design of tow order RLC dv/dt filter. The corresponding formulas were derived and the cable length, cable parameters, voltage reflection coefficient parameters of the filter were found. Finally simulation with Matlab, and the design of the product in accordance with this method were tested specifically. The simulation results were verified by experimental data. The experimental results show that about the method of dv/dt filter design. was feasibility effectiveness and high accuracy.

Key words: over-voltage; transmission-line theory; RLC dv/dt filter; reflection; pulse

0 引 言

变频技术已经广泛应用于现代工业、农业及国防等各个领域,正扮演越来越重要的角色,特别是高速功率开关器件的普遍使用,在提高了变频器性能的同时也带来一些风险^[1]。尤其当PWM变频器直接驱动

感应电机系统时,会产生与开关频率相同的高 dv/dt 共模与差模电压,使电机承受的应力大为增加,导致线圈绝缘失败,甚至出现绝缘击穿,从而缩短电机的使用寿命,严重时会使电动机烧毁,电缆爆裂,同时还会加速电机轴承的损坏,增强电磁干扰^[2]。高 dv/dt 共模电压还会通过定子与转子之间的耦合电容产生轴电压与轴承电流,造成轴承的损坏,降低电机的使用寿

命^[3]。面对这些严重的问题,国内外科技界和工程应用领域很多公司(如ABB,艾默生,西门子等)都开展了多项研究工作,并提出了多种解决办法,取得了一定成绩。

本研究首先是通过从分析传输线理论出发,结合控制理论,从电缆长度和电缆分布参数等电缆性能开始,对PWM脉冲的影响着手,提出RLC滤波器的设计的方法,推导出计算公式,并解决变频器长电缆传输高dv/dt和高漏电流的问题,最后给出具体的应用。

本研究特别对二阶RLC dv/dt滤波器作重点分析,该滤波器系统如图1所示,这种滤波器通过设法加长变频器输出PWM脉冲的上升时间,使其超出临界的传输时间,即把很高的dv/dt减小^[4],因此能够减小逆变器输出线电压的dv/dt,从而消除电压反射现象,减轻电动机绕组的绝缘压力,同时也可以减小对地漏电流^[5]。

1 理论分析与计算

1.1 基本理论

根据文献[6]所示,由传输线理论分析知,在传输线上的节点处,有阻抗的变化就会造成波的反射。如果电缆终端外接阻抗与电缆特性阻抗匹配,则反射系数为零,不产生反射,端部电压就等于入射电压。一般情况下,电机的输入端阻抗可以是电缆特性阻抗的数十倍,因而可以把电机看作开路,而逆变器的输出阻抗可以近似为零^[7]。基于以上原理,本研究将反射系数分3种情况进行讨论。

首先定义传输线反射系数,为终端处反射波电压与入射波电压之比,用N表示:

$$N = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} \quad (1)$$

式中: Z_C —传输线特性阻抗, $Z_C = \sqrt{L_0/C_0}$; Z_R —负载特性阻抗; L_0, C_0 —线缆单位长度电感、电容。

所以反射系数可分为3种特殊情况:

(1) 终端开路,即 $Z_R \rightarrow \infty$:

$$N_2 = N = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} = \frac{1 - Z_C/Z_R}{1 + Z_C/Z_R} = 1$$

(2) 终端短路,即 $Z_R \rightarrow 0$:

代入式(1),得 $N = -1$, 此时变频器输出的PWM的反射波与入射波大小相等,相位相反。

(3) 负载阻抗等于传输线阻抗,即 $Z_R = Z_C$:

代入式(1)得: $N = 0$, 此时终端处无反射波。

1.2 PWM上升时间与电缆长度

通过上述对电压反射现象的具体分析并结合传输线理论,可以得到PWM脉冲从变频器到电动机所需要的传输时间,记 t_i :

$$t_i = \frac{l}{v} = l \cdot \sqrt{L_0 C_0} \quad (2)$$

式中: l —电缆长度; v —脉冲传输速度, $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ 。

所以得出原来正向传播的PWM脉冲,在经过 t_i 时刻后,在电动机端将会被反射,并向变频器运动^[8]。因此,又可以分如下两种情况讨论:

(1) 当 $t_i < t_r$ 时(即反向行波):

PWM传输脉冲幅值为:

$$V_i = \frac{t_i V_{dc} N_2}{t_r} \quad (3)$$

(2) 当 $t_i \geq t_r$ 时:

$$V_i = V_{dc} N_2 \quad (4)$$

式中: V_{dc} —变频器直流母线电压; t_r —变频器输出PWM脉冲上升时间。

由文献[9-10]知,电缆的长度和电缆的分布参数都会影响PWM脉冲在电缆上传输一次的时间 t_i , 当电缆的分布参数一定,传输时间 t_i 与电缆的长度成正比。由文献[11]及分析得到电缆一定存在一个临界长度 l_c , 对应确定的PWM脉冲上升时间,又可以归纳为如下3种情况:

(1) 当 $l < l_c$ 时(即 $t_i < t_r$):

PWM传输的幅值应采用式(3);

(2) 当电缆长度 $l > l_c$ 时(即 $t_i > t_r$):

上升时间不再与反射电压有关;

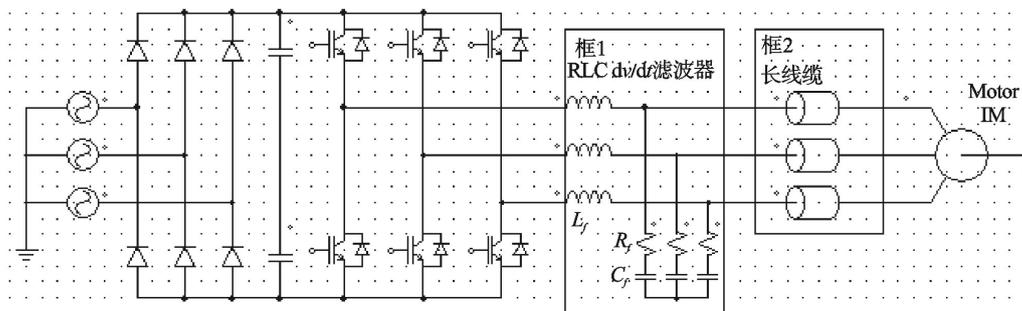


图1 变频器输出RLC dv/dt滤波器系统

(3)当 $l > l_c/3$ 时:

PWM 脉冲经过 3 次电缆长度时间后,可能仍在上升^[12]。由于反向行波以同样的方式在逆变器端反射,其值与起端反射系数 N_1 有关。综上所述,归纳如下:

(1)当 $l \geq l_c/3$ 时:

线电压峰值:

$$V_{\text{peak}} = V_{\text{dc}} N_2 + V_{\text{dc}} \quad (5)$$

(2)当 $l < l_c/3$ 时:

线电压峰值:

$$V_{\text{peak}} = \frac{3lV_{\text{dc}}N_2}{vt_r} + V_{\text{dc}} \quad (6)$$

(3) 当电缆很短时:

可以由式(6)经过归一化处理,有:

$$V_{\text{peak}}/V_{\text{dc}} = \frac{3lN_2}{vt_r} + 1 \quad (7)$$

因为 $3lN_2/vt_r = 1$, 由式(7)可以得到峰值为:

$$V_{\text{peak}} \approx V_{\text{dc}}$$

由实际应用可知,电压最大超调量一般取 20%,直接代入式(7),能够方便地推导出脉冲上升时间为:

$$t_r = \frac{15l_c N_2}{v} \quad (8)$$

因此当已知脉冲上升时间时也同样可以反推出电缆的临界长度:

$$l_c = \frac{vt_r}{15N_2} \quad (9)$$

1.3 变频器输出端加 RLC dv/dt 滤波器的系统模型

变频器输出侧 RLC 滤波器为二阶低通滤波器,如图 1 中框 1 所示,由于三相具有对称性,取其中一相作为分析,其等效传递函数如下式所示:

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{R_f + \frac{1}{sC_f}}{sL_f + R_f + \frac{1}{sC_f}} = \frac{sR_f C_f + 1}{s^2 L_f C_f + sR_f C_f + 1} \quad (10)$$

$$\frac{2\delta_d \omega_d s + \omega_d^2}{s^2 + 2\delta_d \omega_d s + \omega_d^2}$$

式中: δ_d —阻尼比, $\delta_d = R_f \sqrt{C_f/L_f}/2$; ω_d —谐振角频率, $\omega_d = \sqrt{1/L_f C_f}$ 。

由经典控制理论,得到式(10)所示的差模传递函数,它具有低通性能,因此通过选择电路参数使阻尼比大于 1,即取:

$$\delta_d = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} > 1 \quad (11)$$

变频器的输出为高频 PWM 脉冲,由电感的隔直通交和电容的隔直通过交,为达到阻抗匹配,RLC dv/dt 滤波器电阻应与电缆特性阻抗相等来消除反射,所以取:

$$R_f = Z_0 \quad (12)$$

变频器输出 PWM 脉冲决定了 dv/dt 滤波器的截止频率^[13]。由傅立叶级数^[14],最高频分量决定变频器输出 PWM 脉冲信号其边沿上升斜率,所以最高频时的周期 T_c 为临界上升时间的两倍即 $T_c = 2t_{cr}$ 。

所以截止频率为:

$$f_c = \frac{1}{2t_{cr}} \quad (13)$$

同理截止角频率为:

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{\pi}{t_{cr}} \quad (14)$$

综合以上分析推得频率特性为:

$$H(j\omega) = \frac{1 + j\omega R_f C_f}{1 - \omega^2 L_f C_f + j\omega R_f C_f} \quad (15)$$

则对应的截止角频率 ω_c 的衰减为:

$$20 \lg \left| \frac{1}{H(j\omega_c)} \right| = 3 \text{ dB} \quad (16)$$

又由,

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (17)$$

最终通过上述推导公式就可以确定 RLC dv/dt 滤波器各电容和电感参数值。

2 仿真与实验

2.1 参数仿真

仿真条件:Matlab 7.9,采用 SPWM 调制策略,基波频率 50 Hz,载波频率 4 kHz,直流母线电压 510 V,电缆长度 100 m,分布电感 $L = 1.18 \mu\text{H}$,分布电容 $C = 0.033 \text{ nF}$,以及设定电机端过电压超调不超过 20%,根据式(12)计算得到的滤波器参数 $R_f = Z_0 = 189 \Omega$, $L_f = 0.07 \text{ mH}$, $C_f = 100 \text{ nF}$ 。

2.2 实验测试

实验条件:将如图 2 所示的 RLC dv/dt 滤波器样品

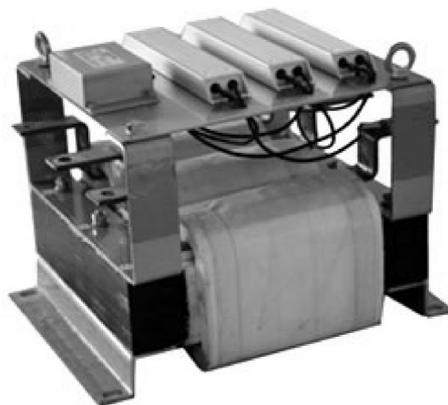


图2 RLC dv/dt滤波器样品

接入系统,系统由两台 15 kW 艾默生变频器,型号为 EV3000,两台 15 kW 异步电机组成共母线的对拖平台,满负荷运行。其他线缆参数等和仿真时一致,实测波形。

2.3 结果与分析

通过 Matlab Simulink 仿真可以看出,系统在未使用 dv/dt 滤波器时测得电机端线电压和电机对地端电压仿真波形如图 3 所示,电压幅值达到 1 000 V 以上。使用 dv/dt 滤波器时电机端线电压仿真如图 4 所示,电压幅值降到 600 V。仿真结果显示,在加上设计的 dv/dt 滤波器后,电机端线电压不超过母线电压 20%,因此,该设计符合要求。

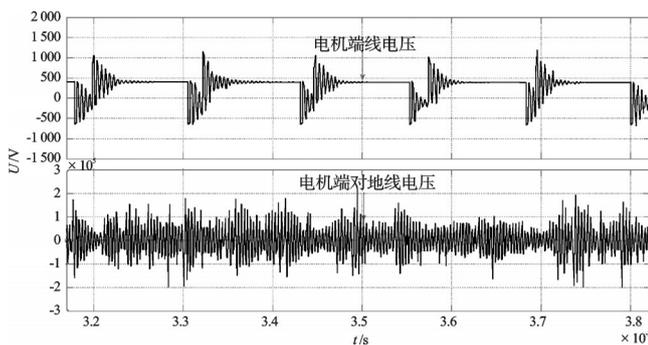


图3 无 dv/dt 滤波器时电机端线电压和对地线电压仿真波形

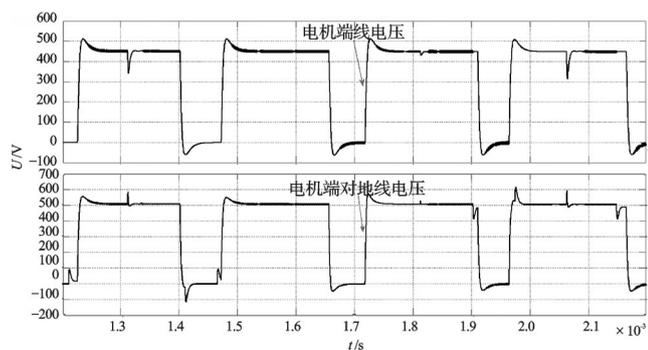


图4 加 dv/dt 滤波器时电机端线电压和对地线电压仿真波形

最后,本研究通过试验用示波器对系统实际测试结果分析,在系统未使用 dv/dt 滤波器时,测得显示电机端线电压实际波形如图 5 所示,可见过电压幅值达到 1 000 V。当使用 dv/dt 滤波器时的电机端线电压实际波形如图 6 所示,电压幅值降到 580 V,电机端对地线电压也基本一致。可见理论和实际是相符的,因此用该方法仿真设计的 dv/dt 滤波器是切实可行的,并对

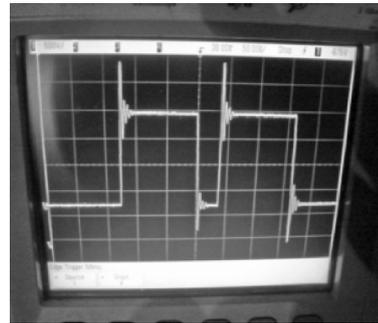


图5 不加 RLC dv/dt 滤波器时线电压波形

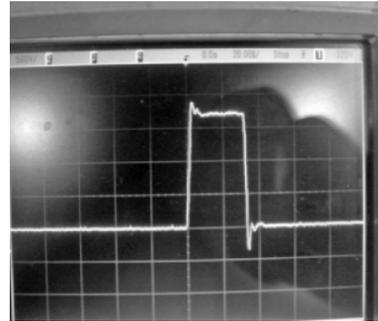


图6 加 RLC dv/dt 滤波器时线电压波形

产品的设计具有实际的指导意义。

3 结束语

本研究基于传输线理论对长电缆线传输到电机产生电压的原因进行了分析,并建立了“线缆—滤波器”一体化模型,推导出了 RLC dv/dt 滤波器的相关参数的设计公式,得出了电缆长度、电缆特性参数、电压反射系数等对滤波器参数的影响,最后通过 Matlab 的 Simulink 进行仿真并结合模拟实际工况实验测试作对比,在变频器的输出端接入二阶 RLC dv/dt 滤波器后,很明显,其结果是减小了电动机端的过电压,消除了高频阻尼振荡现象,从而能够避免电动机绝缘的快速老化和损坏,最终验证了该方法设计的有效性,具有工程实用价值。

参考文献(References):

- [1] 姜艳姝,徐殿国,陈希有,等. 一种新颖的用于消除 PWM 逆变器输出共模电压的有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 125-129.
- [2] 姜艳姝,于晓洋,齐路路. 基于 PWM 长线驱动系统模型的变频器输出端 RLC 滤波器设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36): 93-97.

(下转第 256 页)

本文引用格式:

王家校. 基于 Matlab 的变频器输出 RLC dv/dt 滤波器仿真[J]. 机电工程, 2014, 31(2): 249-252, 256.

WANG Jia-xiao. Simulation and design of inverter output RLC dv/dt filter based on Matlab[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(2): 249-252, 256.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>



图3 界面显示

4 结束语

本研究所研制的继电器多通道耐久测试系统不仅实现了测试系统的开放式、模块化和集成化的特性,提高了测试精度、检测效率和自动化程度,也为出入境机电产品的检验监管和相关产品的认证提供了有力保障,有助于中国企业打破国外技术壁垒,促进国际贸易的发展。

本文引用格式:

张 婧,甘红胜,梁 辉,等. 基于PLC的继电器多通道耐久测试系统研究[J]. 机电工程,2014,31(2):253-256.

ZHANG Jing, GAN Hong-sheng, LIANG Hui, et al. Multi-channel endurance testing system for electromechanical relays based on PLC[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(2): 253-256. [《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn](http://www.meem.com.cn)

(上接第252页)

[3] 马洪飞,徐殿国,陈希有. PWM逆变器驱动异步电动机采用长线缆时电压反射现象的研究[J]. 中国电力工程学报,2001,21(11):109-113.

[4] MELFI M. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1998, 34(4):766-775.

[5] 廖荣辉. 长线传输感应电机系统过电压滤波器的研究[J]. 电气传动,2012,31(6):47-51.

[6] 周克定. 电磁场与电磁波[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[7] 姜艳妹,崔 博,徐殿国. 一种消除PWM逆变器输出共模电压的前馈有源滤波器[J]. 电机与控制学报,2003,7(1):70-74.

[8] 薛向党,吴 倩,李国民. SPWM逆变器死区效应机理分析与数字仿真[J]. 天津大学学报,1999,32(1):9-14.

[9] 万健如,刘英培,周海亮. 基于传输线理论电力高频脉冲在电缆上的传输与反射研究[J]. 物理学报,2010,59(5):

参考文献(References):

[1] 马存宝,成 功,胡云兰. 继电器可靠性影响因素分析[J]. 河南:电力系统保护与控制,2006,34(4):66-68.

[2] 周峻峰. 继电器触点接触失效物理浅析[J]. 电子产品可靠性与环境试验,1999(1):25-30.

[3] 宫豫燕,李志刚,杨晨光. 继电器操作故障模拟装置[J]. 电力系统保护与控制,2007,35(11):57-59.

[4] 陆俭国. 继电器试验与检测技术[J]. 机电元件,2005(1):34-37.

[5] 吴家任,张桂香. 基于PLC-触摸屏的电控柜检测系统设计[J]. 微机计算机信息,2012(2):25-27.

[6] 胡海滨. PLC的编程技巧[J]. 机电工程,2006,23(7):56-58.

[7] 吴金宏,倪向阳,吴 昊. 霍尔电流电压传感器/变送器模块的性能及应用[J]. 国外电子元器件,2001(1):12-15.

[8] 西门子(中国)有限公司自动化驱动集团. SIMATIC HMI设备MP377(WinCC flexible)操作说明[M]. 北京:SIEMENS公司,2007.

[9] 刘雅俊. 西门子Wincc flexible人机界面软件在矫直机中的应用[J]. 山西:山西冶金,2010(1):37-39.

[10] 张玉红. 在Step7和WinCC软件中实现单体设备控制的模块化和标准化——全国冶金自动化信息网2013年会论文集[J]. 冶金自动化,2013(S1):584-589.

[11] 余 丹,于建顺. STEP7模拟调试及实现与WinCC连接的仿真[J]. 现代电子技术,2010(14):81-83.

[编辑:李 辉]

2948-2951.

[10] 张 磊,邓 飙. 基于定量反馈的电液伺服同步加载系统的鲁棒控制[J]. 液压气动与密封,2012(8):14-17.

[11] AKAGI H, MATSUMURA I. Overvoltage mitigation of inverter-driven motors with long cable of different lengths [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2011, 47(4):1741-1748.

[12] SUN Ya-xiu, ESMAELI A, SUN Li. A New Method to Mitigate the Adverse Effects of PWM Inverter [C]//1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. Singapore: [s.n.], 2006: 1-4.

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

[14] 冯卫国. 积分变换[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.

[编辑:李 辉]