

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.025

基于输出电抗器的 PWM 长线驱动系统 反射过电压的抑制*

徐 政¹, 金立军^{1*}, 林秀剑², 阳 林², 张胜锰²

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 浙江冠华电气有限公司, 浙江 乐清 325606)

摘要: 针对 PWM 变频器长线驱动系统电机端产生的过电压问题, 对输出电抗器抑制过电压的机理进行了研究, 提出采用输出电抗器感量、电缆长度以及负载特性阻抗作为正交设计试验因素, 回归正交组合设计法构建了 PWM 长线系统机端过电压峰值的数学模型, 基于此数学模型得到了输出电抗器选型设计的计算设计公式。研究结果表明, 通过该公式确定的输出电抗器可有效抑制机端过电压, 通过 PSPICE 仿真的结果与设计要求误差仅为 1.5%, 此研究结果可以为输出电抗器设计提供理论支持。

关键词: PWM 脉冲; 长线电缆; 输出电抗器; 过电压; 回归正交组合设计

中图分类号: TM

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)03-0378-05

Suppress of over-voltage in PWM Long drive system based on output reactor

XU Zheng¹, JIN Li-jun¹, LIN Xiu-jian², Yang lin², Zhang Sheng-meng²

(1. College of Electronics and Infomation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Zhejiang guanhua Electric Co., Ltd., Yueqing 325606, China)

Abstract: Aiming at the over-voltage phenomenon at motor terminal in long distance PWM driving system, the theory of output reactor suppressing over-voltage was researched, inductance of output reactor, cable length and load impedance characteristics was chosen as orthogonal test factors, and a mathematical model of the over-voltage peak was constructed through orthogonal test design. The formula of inductance of output reactor was proposed based on the model. The results indicate that the over-voltage can be effectively suppressed by output reactor designed through the formula, the error between simulation in PSPICE and design requirement is 1.5%. The work can provide theoretical support for the design of output reactor.

Key words: PWM pulse; long cable; output reactor; over-voltage; orthogonal test design;

0 引言

随着电力电子器件的迅速发展, 交流变频调速在工业电气传动方面的应用日益广泛。PWM 驱动系统作为其中的重要环节, 在带来了显著的经济效益的同时, 也存在一些负面影响。尤其在 PWM 变频器与异步电动机采用长线电缆连接时, 因缆波阻抗和负载电

机特性阻抗的不匹配, 变频器输出的脉冲信号会在电机端出现电压反射并产生机端过电压, 加剧了传输电缆和电动机的绝缘压力, 缩短了电动机的使用寿命, 严重时甚至会出现绝缘击穿, 造成电动机的损坏^[1-5]。

目前常见的抑制机端反射过电压的方法有以下 3 类: 第一种是在电机端加装串并联电阻或 RC 滤波器^[6-8] 以此调整负载阻抗使之与电缆阻抗匹配, 此方法对过电压的抑制效果明显但功率损耗较大, 且在如潜

收稿日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577135)

作者简介: 徐 政(1991-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事磁性元器件优化设计方面的研究工作. E-mail: 271528693@qq.com

通信联系人: 金立军, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: jinlj@tongji.edu.cn.

水泵等电机处于恶劣环境的应用情况下,电机端无法进行改造;第二种是在变频器端进行滤波^[9-12],如 LR 并联滤波、RLC 低通滤波等,这类方法关键在于滤波参数的选择,相关的设计方法研究还很少且结构较复杂,成本较高;第三种是在变频器出口串联输出电抗器^[13]延长脉冲上升时间,从而有效抑制电机端电压幅值,这种方法直接有效,结构简单,应用广泛,但相关设计理论的研究较少,实际应用中多根据经验以输出电抗器分压比进行设计计算,回避了问题的本质。

本研究通过分析 PWM 脉冲波的传输反射过程,在串联输出电抗器的驱动系统参数中选择了对过电压幅值有重大影响的 3 个主要因素,即电缆长度、负载特性阻抗和输出电抗器感量,提出了一种基于回归正交设计的变频器输出端输出电抗器电感参数设计方法,文中采用回归正交试验设计建立了机端过电压幅值的数学模型。据此给出了不同电缆长度、不同负载情况下输出电抗器的感量设计公式,最后通过仿真对设计结果加以验证。

1 PWM 驱动系统机端过电压分析

1.1 PWM 波的电压反射过程

PWM 脉冲波在变频器与异步电机之间的传输可看成行波在传输线上传播,采用传输线理论进行分析,由于电缆与电机、电缆与变频器内阻抗的不匹配,脉冲波在电机端和变频器端都会发生反射现象。电机端的反射系数 K_c 为:

$$K_c = \frac{Z_c - Z_G}{Z_c + Z_G} \quad (1)$$

式中: Z_G —负载电机的特性阻抗, Z_c —电缆的波阻抗。

变频器输出端的反射系数 K_s 为:

$$K_s = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} \quad (2)$$

式中: Z_s —变频电源的内阻抗。

实际应用中,电源端阻抗很小,而电机特性阻抗远大于电缆波阻抗,即 $Z_s \approx 0, Z_c \gg Z_G$,则有 $K_c = 1, K_s = -1$,即可认为脉冲波在电机端发生全反射,而在变频器端反射行波的电压幅值为原来的 -1 倍。脉冲波在电缆上的传播和多次反射过程如图所示。

变频器—长线电缆—电机系统如图 1(a) 所示。长线电缆的参数有单位长度的电感 L_0 、电容 C_0 、电阻 R_0 和电导 G_0 。考虑到 PWM 波的频率较高,始终有 $\omega L_0 \gg R_0, \omega C_0 \gg G_0$,在分析 PWM 脉冲波传输过程中可忽

略 $R_0、G_0$ 的影响,作为无损电缆进行分析。幅值为 V_{dc} 的脉冲电压波从变频器端发出并向电机端传播如图 1(b) 所示。此脉冲波到达电机端时发生全反射,反射电压与原电压波形叠加导致了 $2V_{dc}$ 过电压的出现,如图 1(c) 所示。此反射波到达变频器端则因负反射产生一个 $-V_{dc}$ 的反射波向电机端传播,如图 1(d) 所示。同理, $-V_{dc}$ 脉冲波到达电机端发生的反射现象如图 1(e) 所示。

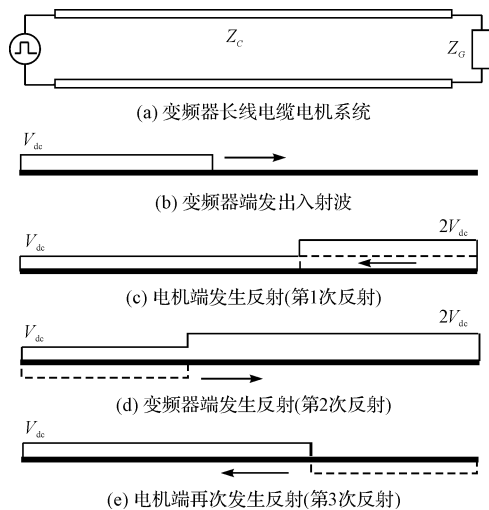


图 1 PWM 驱动系统脉冲波传输反射过程

1.2 脉冲上升时间对机端过电压峰值的影响

实际工程应用中, PWM 变频器输出的脉冲是具有上升沿时间 T_r 的脉冲。根据上节的反射流程分析可知,如在脉冲上升阶段结束前,来自变频器端的负值脉冲到达电机端,电机端的过电压会得到一定的抑制。

变频器端到电机端的信号传播时间记为 τ

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (3)$$

式中: l —为电缆长度; v —脉冲信号在电缆上的传输速度 $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ 。

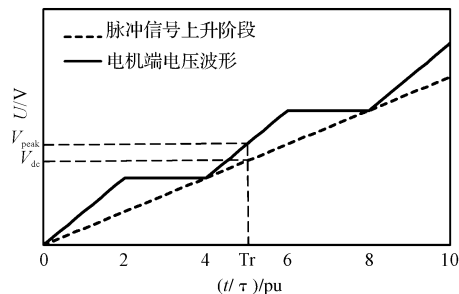


图 2 脉冲上升阶段的机端电压

图 2 以变频器发出的脉冲信号波头传播至电机端为计时原点, $t = 0$ 时,初始正向脉冲波在电机端发生

第一次反射,电机端电压幅值为反射电压和初始电压的叠加, $t = 2\tau$ 时刻幅值为负来自变频器端的反射波传播至电机端,抑制了电机端电压幅值的上升。从图2中可取得对应上升时间 T_r 的机端的过电压极值 V_{peak} 以及PWM脉冲电压幅值 V_{dc} ,进行归一化处理后可得下图

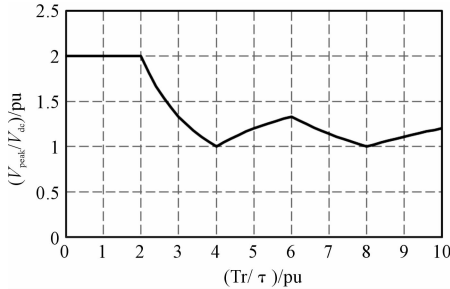


图3 机端归一化过电压峰值与归一化上升时间的关系

可见,通过延长脉冲上升时间,可有效抑制电机端的过电压峰值,而输出电抗器的直接作用即为延长脉冲上升时间,可以较好地解决电机端的过电压问题。

2 变频器串联输出电抗器的影响

变频器串联加输出电抗器的结构如下图所示

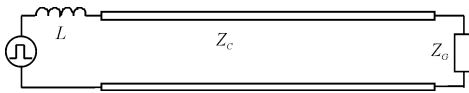


图4 串联输出电抗器系统的模型

从脉冲信号到达电机端开始计时, $t < 2\tau$ 期间,电机端仅有初始信号和电机端反射信号,根据彼得逊法则,可将此分布参数电路的波过程简化为集总参数电路的暂态过程进行分析。

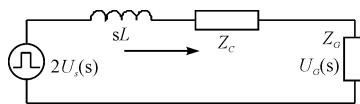


图5 串联输出电抗器系统的集总参数模型

电机端的电压响应为

$$U_c(s) = 2U_s(s) \frac{\frac{Z_G}{L}}{s + \frac{Z_G + Z_c}{L}} \quad (4)$$

实际应用中PWM脉冲电压上升时间 T_r 由开关器件决定,且持续时间极短,通常在 $0.1 \mu\text{s} \sim 0.5 \mu\text{s}$,为便于分析可近似为阶跃响应,即 $U_s(s) = V_{\text{dc}}/s$ 。通过反变换求得电机端的时域响应为:

$$U_c(t) = 2V_{\text{dc}} \frac{Z_G}{Z_G + Z_c} (1 - e^{-\frac{Z_G + Z_c}{L}t}) \quad (5)$$

电缆始端的电压响应为

$$U_G(t) = 2V_{\text{dc}} (1 - e^{-\frac{Z_G + Z_c}{L}t}) \quad (6)$$

可见,变频器输出的脉冲信号经输出电抗器变为指数上升的信号,其时间常数 $T_L = L/(Z_G + Z_c)$ 。因 $Z_G \gg Z_c$,时间常数主要由输出电抗器电感量 L 和负载电机特性阻抗 Z_G 决定。而对确定的电缆,变频器端到电机端的信号传播时间 τ 则由电缆长度 l 决定。相关的研究^[14]认为,电机端的峰值可由下式计算:

$$V_{\text{peak}} = \left(\frac{3\tau}{T_r} K_G + 1 \right) V_{\text{dc}} \quad (7)$$

但因串联输出电抗器,变频器的输出脉冲为指数形式,同时变频器端的反射系数变为

$$K'_s = \frac{sL - Z_c}{sL + Z_c} \quad (8)$$

不符合式(7)假设的前提条件,在设计时会产生较大的误差,导致设计浪费或输出电抗器无法达到目标性能。本研究提出采用回归正交组合设计构建电机端过电压峰值的数学模型,并以此作为输出电抗器的感量设计的依据。

3 回归正交组合设计

回归正交组合设计是现代建模的一种最优化方法,其将方案设计、数据处理与回归方程统一起来,具有设计灵活、计算简便、可靠性高、适用面广等优点,近年来在各领域都有广泛应用。通常,一般非线性的问题,进行二次回归设计就可以满足基本要求^[15]。其寻求的回归模型如下

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{h < j} b_{hj} x_h x_j + \sum_{j=1}^p b_{jj} x_j^2 \quad (9)$$

式中: \hat{y} —试验指标的估计量, b —对应项的回归系数, x —对应的编码自然因素, p —自然因素的个数。

选取输出电抗器电感量 L ,负载电机特性阻抗 Z_G 和电缆长度 l 作为试验因素, $V_{\text{peak}}/V_{\text{dc}}$ 为试验指标,根据工程应用实际^[16-17]确定各因素的范围如下:

$$\begin{aligned} L &\in [1 - 20 \text{ mH}] \\ Z_G &\in [1000 - 1800 \Omega] \\ l &\in [50 - 300 \text{ m}] \end{aligned} \quad (10)$$

设计的试验点由三类构成:

$$N = m_c + m_r + m_0 \quad (11)$$

式中: m_0 —各因素取零水平的试验点数,即中心点个数,一般取3; m_c —各因素取二水平(+1, -1)的全面试验点个数, $m_c = 2^p$; m_r —分布在各坐标轴上的试验

点个数. $m_r = 2p$ 。

此类试验点与中心点的距离为 r , r 的数值可据下式计算.

$$r = \sqrt{\frac{(\sqrt{Nm_c} - m_c)}{2}} \quad (12)$$

本研究中因素个数 $p = 3$, 可计算得 $N = 17, r = 1.353$ 。由此可确定试验因素的各水平取值, 如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

试验因素	单位	水平 r	水平 1	水平 0	水平 -1	水平 - r
L	mH	20	17.5	10.5	3.5	1
Z_c	Ω	1800	1696	1400	1104	1000
l	m	300	267	175	83	50

共进行 17 次仿真试验, 脉冲高电平为 500 V, 电缆参数 $L_0 = 0.24 \mu H/m$, 电容 $C_0 = 0.1 nF/m$, 沿电缆脉冲传播速度 $v = 2 \times 10^8 m/s$, 试验结果如图 6 所示。

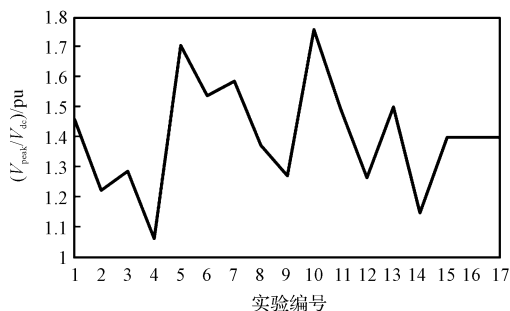


图 6 正交试验结果

整理实验数据并经多元正交多项式回归可得回归方程

$$\hat{y} = 1.047123 - 0.02251x_1 + 0.000271x_2 + 0.001234x_3 \quad (13)$$

式中: \hat{y} —机端过电压的归一化数值 V_{peak}/V_{dc} ; x_1 —输出电抗器电感量 L , 单位: mH ; x_2 —负载电机特性阻抗 Z_c , 单位: Ω ; x_3 —电缆长度 l , 单位: m 。

将上式进行变形可得:

$$L = \frac{0.047123 + 0.000271Z_c + 0.001234l - M_p}{0.02251} \quad (14)$$

式中: M_p —机端电压超调百分比。

考虑到电缆分布参数导致的行波传播速度不同的情况, 对上式电缆长度的常数系数进行如下的修正

$$L = \frac{0.047123 + 0.000271Z_c + xl - M_p}{0.02251} \quad (15)$$

式中: $x = \frac{0.001234}{2 \times 10^8 \sqrt{L_0 C_0}}$ 。

在已知电缆参数、负载电机特性阻抗时, 针对不同

机端过电压超调指标即可计算求出需求的输出电抗器的感量数值。

4 仿真及结果分析

仿真条件: 仿真环境为 Pspice, 仿真基本条件为: 电源信号为高电平 500 V、上升时间 $1.6 \mu s$, 电缆参数为 $L_0 = 0.24 \mu H/m$, 电容 $C_0 = 0.1 nF/m$ 。设定电机端过电压超调指标为不超过 20%, 电缆长度 $l = 120 m$, 负载电机阻抗 $Z_c = 1500 \Omega$ 时, 根据式计算可得需求的输出电抗器电感量为 $L = 17.85 mH$ 。

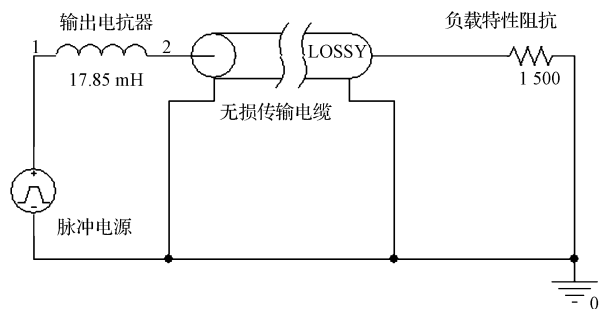


图 7 长线传输仿真模型

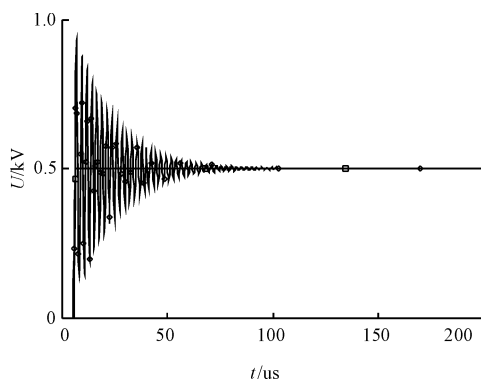


图 8 未加输出电抗器的机端电压波形

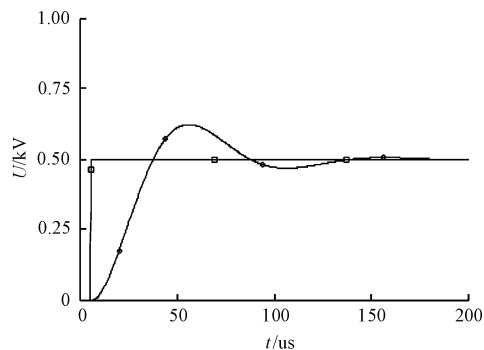


图 9 串联输出电抗器的机端电压波形

从图 8 和图 9 中可以看出, 通过串联 17.85 mH 的输出电抗器, 机端过电压幅值有了很好的抑制, 且抑制后的电压峰值值为 609 V, 与预设指标的 20% 超调

(600 V)误差仅为1.5%。如进一步增大输出电抗器,超调还可进一步降低。

5 结束语

本研究分析了输出电抗器抑制PWM长线驱动系统过电压的机理,探讨了输出电抗器的感量、电缆长度、负载电机特性阻抗对于过电压幅值的影响。

文中采用回归正交组合设计法构建了过电压极值的模型,并据此完成了输出电抗器感量设计,有效地抑制了机端过电压,仿真验证了此公式的正确性和精度,此模型可为不同电缆长度、不同电机负载情况下的变频器输出电抗器感量的选型设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] 薛高飞,胡安,潘启军,等. PWM脉波传输电压反射抑制策略在大功率感应电机驱动中的应用[J]. 电工技术学报,2013,28(10):249-256.
- [2] 王姗姗. 潜油电机端过电压的分析研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学电气与电子工程学院,2009.
- [3] 付纯菲,邓惠文,王建飞,等. 长电缆传输引起的电机端口过电压的研究[J]. 变频器世界,2013(9):104-107.
- [4] Liu Y, Jiang Y, Qi L, et al. A novel approach to analyze over-voltages due to PWM switching patterns in long cable PWM drive[C]// Strategic Technology (IFOST), 2011 6th International Forum on. IEEE,2011:553-558.
- [5] 李晓,王聪,屠幼萍. 电机驱动用长电缆破坏机理分析及防护[J]. 电气传动,2014,44(4):72-76.
- [6] SKIBINSKI G L, KERKMAN R J, LEGGATE D, et al. Re-

flected wave modeling techniques for PWM AC motor drives [C] //IEEE Conference on Applied Power Electronics Conference. Anaheim: IEEE,1998.

- [7] 万健如,林志强,禹华军. 高频PWM脉冲波传输引起电机端子过电压的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(11):43-47.
- [8] 肖道. 长线电缆对PWM系统的影响及过电压的抑制[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学自动化学院,2013.
- [9] 包西平. 基于PSD的提升机双PWM变频调速系统的设计与研究[J]. 机电工程技术,2014,43(11):107-114.
- [10] 洪滨,陈必荣,史太芳. 长线变频系统反射波过电压振荡的解决方案[J]. 煤矿机电,2013(5):55-62.
- [11] 李红钧. 变频器输出过电压抑制方案探讨[J]. 冶金电气,2010,29(20):32-34.
- [12] 廖荣辉. 长线传输感应电机系统过电压滤波器的研究[J]. 自动仪技术与应用,2012,31:47-51.
- [13] 胡浩. 电抗器在变频调速系统中的合理应用[J]. 电工电气,2007(5):39-41.
- [14] 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(36):93-97.
- [15] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [16] 黄志刚,陶锦,张林,等. 长电缆对PWM变频器输出的过电压分析与对策[J]. 变频器世界,2009(6):57-61.
- [17] 沈黎明. 电力电缆应用技术[M]. 郑州:郑州大学出版社,2011.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

徐政,金立军,林秀剑,等. 基于输出电抗器的PWM长线驱动系统反射过电压的抑制[J]. 机电工程,2016,33(3):378-382.

JIN Li-jun, XU Zheng, LIN Xiu-jian, et al. Suppress of Over-Voltage in PWM Long Drive System Based on Output reactor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):378-382.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>