

交流变频调速系统电机端过电压的仿真研究

文磊, 陆益民

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 分析了交流变频调速系统电机端过电压的产生及抑制机理, 建立了逆变器、电缆、滤波器及电机的仿真模型, 对影响过电压大小的因素及抑制效果进行量化研究。

关键词: PWM 逆变器; 电缆; 过电压; 滤波器

中图分类号: TM86

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)03-0090-03

Research on Simulation of Over-Voltage Caused by AC PWM Inverter-Fed Motor

Wen Lei, Lu Yimin

(College of Electric Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Analyses the producing and inhibiting mechanism of over-voltage at motor terminal of AC variable frequency speed regulation system, develops simulation models of pwm inveter, cable ,filter and motor, and makes a quantitative research on impact factors of over-voltage and its inhibiting effects.

Keywords: PWM inverter ; cable ; over-voltage ; filter

近年来, 生产实践中频繁出现交流变频调速电机过电压损坏, 严重影响了变频调速系统的可靠运行。研究表明, 过电压是由于PWM(pulse wiath modulation)电压型变频器输出电压通过电缆传输时在电机端产生的反射电压与入射电压叠加形成的^[1], 通常抑制方法有2大类: 一类是在变频器端加入滤波器, 另一类是在电机端加入滤波器^[2]。本文在建立逆变器、电缆、滤波器和电机模型的基础上, 在Matlab环境下进行了电机端过电压的仿真分析, 通过量化研究, 达到抑制过电压的目的。

1 过电压产生及抑制机理

1.1 过电压的产生

高频PWM脉冲波在逆变器和电动机之间的传输可看成行波在电缆上传播, 由于电缆与电机特性阻抗不匹配, 当PWM脉冲通过电缆到达电机端时会造成电压

反射, 从而造成入射波与反射波叠加而形成过电压。

在电机端, 当脉冲电压开始从逆变器端传输到电机端时, 会产生一个大小为 ΓU_i 的反射电压, 其中 U_i 为逆变器端电压, Γ ($0 < \Gamma < 1$)为电机端电压反射系数, 可由式(1)表示:

$$\Gamma = \frac{Z_x - Z_c}{Z_x + Z_c}, \quad (1)$$

式中: Z_x 为反射端特性阻抗, 即电机阻抗;

Z_c 为电缆特性阻抗。

反射电压会沿相反的方向向逆变器端传输, 这时, 电机端电压 U_0 的大小为: $U_0 = (1 + \Gamma)U_i$, (2)

而逆变器端电压反射系数为: $\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c}$, (3)

式中: Z_s 为逆变器端电阻。

一般情况下, $Z_s \approx 0$, $\Gamma_s \approx -1$, 因此当反射电压到达逆变器端时, 会再次反射, 以 ΓU_i 向电机端传输,

收稿日期: 2009-03-02

基金项目: 广西科学青年基金资助项目(桂科青0728007), 广西高校优秀人才基金资助项目(桂教人才0805)

作者简介: 文磊(1983-), 男, 山西临汾人, 广西大学硕士研究生, 主要研究方向为检测技术与信号处理,

E-mail: wenlei-121@163.com

到达电机端时, 仍会产生一个反射系数为 Γ 的反射电压, 这时电机端的电压 U_0 变为 $(1+\Gamma)U_i$, 由于 $0 < \Gamma < 1$, 所以, 随着反射次数的增多, 电机端电压会逐渐减小, 并趋近于 U_i 。需要说明的是, 一个周期内, 在逆变器端和电机端传输电压分别会发生 2 次反射, 期间电机端电压会产生一个 $(1+\Gamma)U_i$ 的电压峰值。在通常情况下, 电动机的绕组电感很大, 即 $Z_x \gg Z_c$, 由式 (1) 可知 Γ 接近于 1, 这样入射波与反射波的叠加就会使电机端电压近似于加倍, 这就是所谓的过电压。

1.2 过电压的抑制

由上述可知, 由于电缆与电机阻抗不匹配, 引起脉冲传播时的反射电压, 从而造成电机端过电压。过电压的抑制关键在于减小电机端电压反射系数 Γ , 由式 (1) 可知, 如果在变频器端或电机端匹配一个合适的阻抗, 使得匹配后的阻抗 R 与电缆特性阻抗 Z_c 相等, 则 Γ_i 趋近于 0, 过电压可得到抑制, 如式 (4) 所示为:

$$\Gamma_i \approx \frac{R - Z_c}{R + Z_c} = 0, \quad (4)$$

式中: Γ_i 为匹配后的反射系数。

2 模型的建立与仿真

系统模型主要包括逆变器、电缆、滤波器和电机 4 部分, 系统模型结构图如图 1 所示。

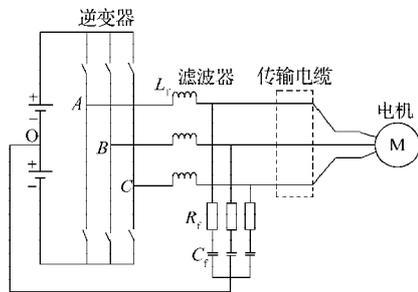


图 1 模型结构图

Fig. 1 The chart of the model structure

2.1 电缆模型

电缆模型可由电报方程建立^[3-4]:

$$C \frac{\partial u(t, z)}{\partial z} = -\frac{\partial i(t, z)}{\partial t}, \quad (5)$$

$$L \frac{\partial i(t, z)}{\partial t} = -\frac{\partial u(t, z)}{\partial z}, \quad (6)$$

式中: $u(t, z)$ 、 $i(t, z)$ 分别代表电缆的电压和电流;

C 、 L 分别为单位电缆长度的电容和电感值。

则电机端和逆变器端的电压电流关系为:

$$\begin{bmatrix} u(t, l) \\ i(t, l) \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} e^{-ds} & 0 \\ 0 & e^{-ds} \end{pmatrix} T \begin{bmatrix} u(t, 0) \\ i(t, 0) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $T = \begin{pmatrix} 1 & Z_c \\ 1 & -Z_c \end{pmatrix}$, $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$, $d = \sqrt{LC}$ 。

由式 (7) 可得到电机端电压与逆变器端电压、电流量化关系为:

$$u(t, l) = \frac{1}{2} \left[(e^{-ds} + e^{ds})u(t, 0) + Z_c (e^{-ds} - e^{ds})i(t, 0) \right], \quad (8)$$

式中: $u(t, l)$ 为电机端电压 U_0 ; $u(t, 0)$ 为逆变器端电压 U_i ; $i(t, 0)$ 为逆变器端电流。

2.2 滤波器模型

通常滤波补偿器的设计有 2 大类^[5]: 一类是滤波器接在电动机端, 称为电动机端滤波; 一类是在变频器端接入滤波器, 称为变频器输出滤波。

本文采用在变频器端加入 LRC 滤波器的方法进行滤波, 滤波器的参数与电缆的特性阻抗、电缆长度、以及终端电压反射系数有关。图 2 为滤波器单相等效电路图。

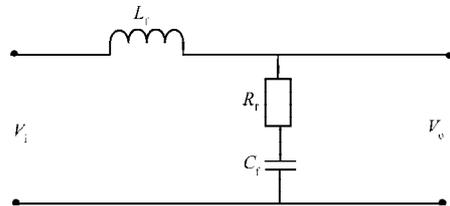


图 2 滤波器的单相等效电路

Fig. 2 The single-phase equivalent circuit of filter

下面具体介绍滤波器参数的计算。设电缆分布参数为: $R=20 \text{ m}\Omega/\text{m}$, $L=1.2 \text{ }\mu\text{H}/\text{m}$, $C=0.03 \text{ nF}/\text{m}$ 。

由于滤波电容在高频时相当于短路, 所以当电缆与电机相连时, 滤波的阻抗应当和电缆的特性阻抗相等, 起到分压的作用, 则:

$$R_f = Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad (9)$$

由图 2 可知, 滤波器单相等效电路的传递函数为:

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_f C_f s + 1}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (10)$$

$$\text{式中: 阻尼比为 } \zeta = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}; \quad (11)$$

$$\text{截止角频率为 } \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} = 2\pi f_c = \frac{\pi}{t_d}. \quad (12)$$

$$\text{由于阻尼比 } \zeta \geq 1, \text{ 则: } R_f \geq 2\sqrt{\frac{L_f}{C_f}}; \quad (13)$$

而滤波器的频率特性可由下式表示:

$$H(j\omega) = \frac{j\omega R_f C_f + 1}{-\omega^2 L_f C_f + j\omega R_f C_f + 1}, \quad (14)$$

对应截止角频率的衰减为:

$$20 \lg \left| \frac{1}{H(j\omega_n)} \right| = 3 \text{ dB}, \quad (15)$$

由式(12)~(15)可得滤波器具体的 C_f 、 L_f 值。

2.3 逆变器和电动机模型

逆变器采用SPWM (sinusoidal PWM) 策略, 该模型中, PWM波的频率为50 Hz, 幅值为380 V, 载波频率为3 kHz, 如图3所示。

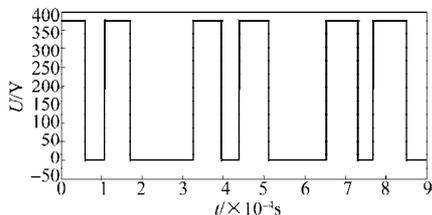


图3 脉冲发生器产生的波形

Fig. 3 The wave of pulse generator

三相异步电动机的电机模型可以采用绕组分布电容与电机波阻抗串联再与电机低频参数并联的结构, 这是由于电机的波阻抗会随着频率而变化的特性所决定的, 该模型采用10 kW电机的模型参数, 即:

$$C_{hf}=600 \text{ pF}; R_{Z_0}=100 \text{ } \Omega;$$

$$R_{lf}=1.76 \text{ } \Omega; L_{lf}=110 \text{ } \mu\text{H}.$$

其中: C_{hf} 、 R_{Z_0} 分别为绕组分布电容与电机波阻抗;

R_{lf} 、 L_{lf} 为电机低频参数。

2.4 仿真分析

对应电缆长度为50 m, 反射系数为0.9, 可得临界上升时间 t_α 为: $t_\alpha=15l/v$, (16)
式中: l 为电缆长度; v 为PWM波在电缆中的传播速度, 大小约为光速的一半。

由式(12)可得到截止角频率 ω_n :

$$\omega_n = \pi/t_\alpha = 6.9 \times 10^5 \text{ rad/s}, \quad (17)$$

由式(9)、(12)、(13)可得到:

$$C_f=216.54 \text{ nF}, L_f=0.58 \text{ mH}.$$

仿真结果如图4、5所示。

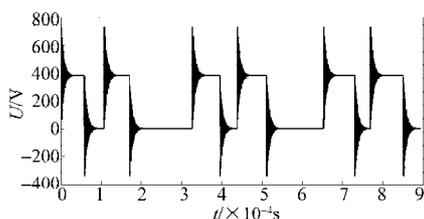


图4 加入滤波前电机端电压

Fig. 4 The voltage at motor terminal without filter

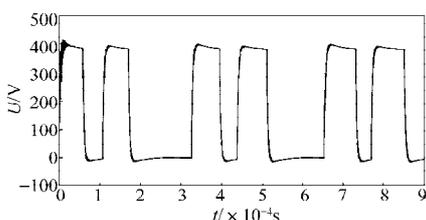


图5 加入滤波器后电机端电压

Fig. 5 The voltage at motor terminal with filter

为了更加清楚地说明加入滤波器前后电压值大小的变化, 以及滤波器抑制过电压的效果, 用图6表示电机端线电压在加入滤波前后的对比。

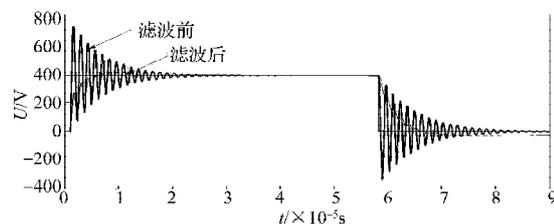


图6 电机端线电压对比

Fig. 6 The comparison of line voltage at motor terminal

3 结语

由图6可以清楚地看到, 在没有加入滤波器前, PWM脉冲波在电机端会产生近似于1.9倍的过电压。通过在逆变器端加入匹配的LRC滤波器后, 可有效抑制过电压的产生, 证实了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 刘学忠, 徐传骧. PWM变频调速电动机端子上电压特性研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 26-29.
Liu Xuezhong, Xu Chuanxiang. The Characteristics of Voltage Waveform Acting on the Terminal of PWM Inverter Fed Motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15 (5): 26-29.
- [2] Lawrence A Saunders, Gary L Skibinski, Steve T Evon, et al. Riding the Reflected Wave-IGBT Drive Technology Demand New Motor and Cable Considerations[C]//IEEE IAS-Petroleum & Chemical Industry Conference. Philadelphia: IEEE Transactions on Automatic Control, 1996: 75-84.
- [3] 邓文, 姜建国, 玉井伸三. PWM逆变器——感应电机系统中的过电压抑制滤波器研究[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(3): 28-31.
Deng Wen, Jiang Jianguo, Tamai Shinzo. Study on Filter for Reducing Terminal Over-Voltage of Motor Fed by PWM Inverter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(3): 28-31.
- [4] Ortega R, Rinaldis A de, Escobar G, et al. A Hybrid Filter Implementation of an Overvoltage Reduction Compensator for in AC Motor Drives[C]//IEEE Int. Symp. Industrial Electronics. Ajaccio: IEEE Transactions on Automatic Control, 2004: 1095-1101.
- [5] 马鸿飞, 徐殿国. 消除PWM逆变器驱动交流电动机长引线电缆影响的无源滤波技术[J]. 电工技术杂志, 2001(6): 26-29.
Ma Hongfei, Xu Dianguo. Passive Filtering Techniques to Eliminate the Effect of Long Motor Leads on PWM Inverter-fed AC Motor Drives [J]. Electrotechnical Journal, 2001(6): 26-29.

(责任编辑: 李玉珍)