

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*

万健如 刘英培[†] 周海亮

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2009 年 7 月 9 日收到; 2009 年 9 月 4 日收到修改稿)

针对电力高频脉冲在电缆上传输过程引起产生谐波等问题, 基于传输线理论, 在建立高频脉冲作用下电缆分布参数模型的基础上, 探讨在高频脉冲驱动下长电缆传输产生的负面效应问题. 论文结合三相交一直一交 PWM 变换电路带电动机负载状态下, 较详细地分析讨论了 PWM 脉冲波在电缆上的传输和反射过程, 研究电机端过电压的产生机理, 分析引起电机定子绕组绝缘过早损坏, 供电电源电压产生谐波的原因, 并通过实验验证了理论分析的有效性.

关键词: 高频脉冲, 传输线, 电缆, 过电压

PACC: 0340K, 9430P, 8760D

1. 引 言

PWM (pulse width modulation) 控制就是对脉冲的宽度进行调制的技术, 即通过对一系列脉冲的宽度进行调制, 来等效地获得所需波形 (含形状和幅值). 在 PWM 变频调速系统中, 电力电子器件的应用, 提高了器件的开关频率, 缩短了脉冲的上升时

间, 并且降低了谐波. 但从另一方面来说, PWM 脉冲开通和关断时间的减小对电机产生了不利影响, 当逆变器与电机之间采用长电缆连接时, 容易引起电机绕组绝缘过早损坏^[1-3].

本文结合三相交一直一交 PWM 变换电路带电动机负载, 研究高频脉冲沿电缆传输和反射过程, 三相交一直一交变频主电路图如图 1 所示.

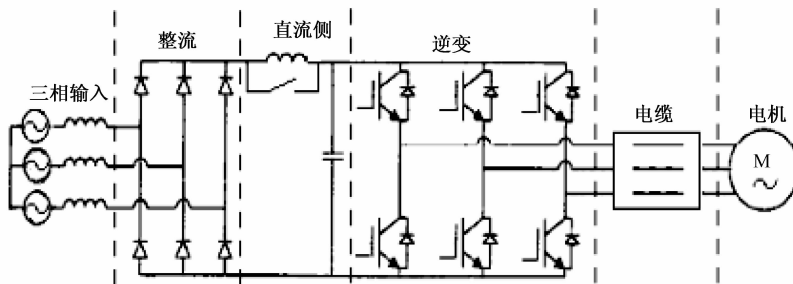


图 1 三相交一直一交变频主电路图

2. 传输线高频等效电路及波的传输和反射

2.1. 电缆高频等效电路

当功率开关器件频率较低时, 可采用集中参数

来表示电缆模型; 但当器件的开关频率较高 (20 kHz) 时, 电缆分布参数对电路的影响增强, 需要建立一个更为精确的电缆高频模型^[4], 图 2 为电缆分布参数等效电路, 其中电阻 R 、电感 L 、线间漏电容 G 和线间电容 C 为电缆分布参数.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60874077), 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20060056054) 和国家质检总局公益性行业科研专项基金 (批准号: 200910097) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: liuyingpei_123@126.com

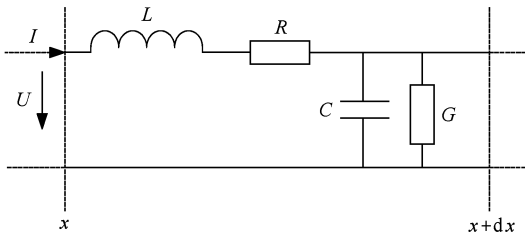


图2 电缆分布参数等效电路

2.2. 波阻抗与波的反射

传输线特性阻抗 (即波阻抗) Z_c 是表征分布参数电路某一点处电压与电流关系的一个复常数, 由线路分布参数决定. 它的模等于某点处同向行波电压和电流有效值之比, 其角度等于该点处同向行波电压和电流的相位差^[5]. 传输线反射系数定义为终端处反射波电压与入射波电压之比, 用 ρ 表示^[6]. 根据传输线理论得

$$\rho = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c}, \quad (1)$$

式中, Z_c 为传输线波阻抗, Z_R 为负载阻抗.

传输线反射系数的三种特殊情况为

- 1) 终端开路, 即 $Z_R \rightarrow \infty$, $\rho = \frac{1 - Z_c/Z_R}{1 + Z_c/Z_R} = 1$, 在

终端处反射波与入射波大小相等相位相同, 这种情况为全反射.

- 2) 终端短路, 即 $Z_R = 0$, $\rho = \frac{-Z_c}{Z_c} = -1$, 反射波与入射波大小相等, 相位相反.

- 3) 当负载阻抗等于传输线波阻抗时, 即 $Z_R = Z_c$, $\rho = 0$, 在终端处没有反射波.

3. 电缆特性对电机端过电压的影响

高频 PWM 脉冲波沿电缆传输和反射的整个过程, 以及过电压产生机理详见文献[7,8]. 由上述分析可知, 电缆波阻抗与电机特征阻抗的匹配程度将直接影响电机端过电压的大小. 研究表明, 不同型号长度的电缆其波阻抗不同, 在电机端产生的过电压不同; 电缆线越长, 电机端过电压越大.

基于上述理论, 结合电路图 1, 实验采用 VARISPEED 616G5 CIMR-G5A4015 变频器和 JO2-31-2 电机, 电缆型号为 SS/V-9. 电缆长度分别选取 4 m, 30 m 和 100 m, 电机端电压的实验波形如图 3 所示, 示波器采样电压为实际电压的 1/30. 实验验证了理论分析的正确性.

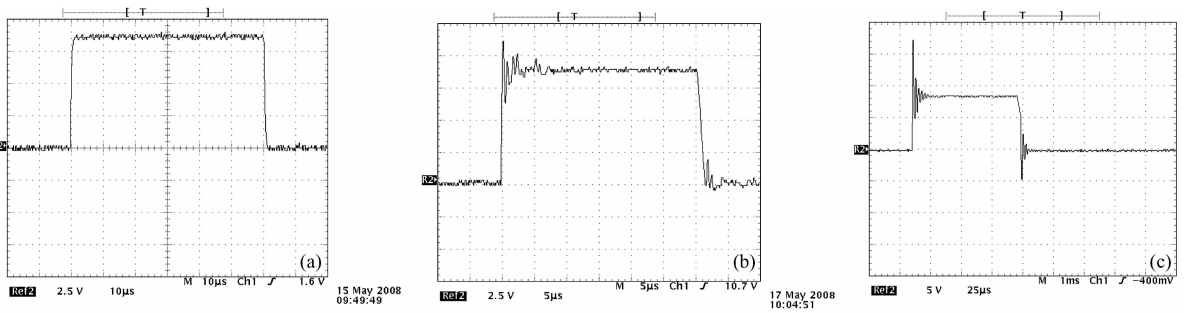


图3 端电压脉冲波形 (a) 电缆长 4 m; (b) 电缆长 30 m; (c) 电缆长 100 m

4. 电源电压电流谐波

PWM 可实现数字信号代替模拟信号, 达到高品质高可靠性控制. 图 4 为用等高不等宽的一系列高频 PWM 脉冲, 产生等效模拟正弦波和实验实测波形. 由图 4(a) 可以看出: 脉冲频率越高等效效果越好; 图 4(b) 为等效 PWM 正弦波还原为模拟正弦波时, 在开关管开通和关断瞬间, 即脉冲的上下沿, 由

于 du/dt 和 di/dt 的作用, 在模拟正弦波上叠加 du/dt 产生的尖峰电流; 图 4(c) 为按照上述理论分析方法, 实验实测的实际电流波形. 图 5 为采用图 1 所示电路, PWM 高频脉冲经电缆传输作用在非线形负载时, 用电能质量分析仪测得的供电电源端口的电压和电流波形, 从图 5 可看电源电压和电流波形产生部分畸变, 且随着脉冲频率增高和电缆线长度加长, 电源电压和电流波形畸变程度加重.

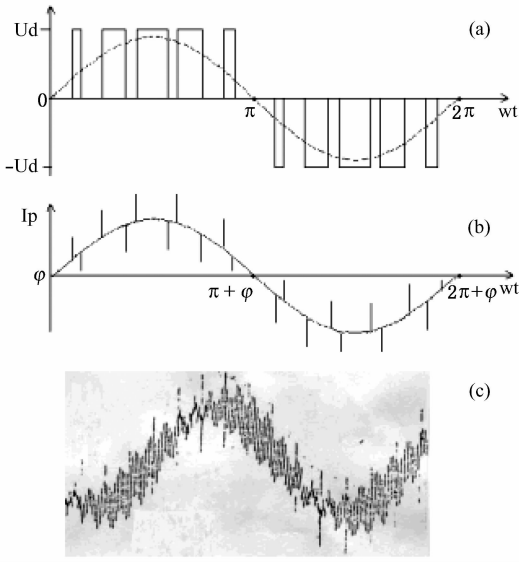


图4 数字等效正弦波和实验波形 (a) 脉冲电压波形; (b) 经滤波后电流波形; (c) 实际电流波形

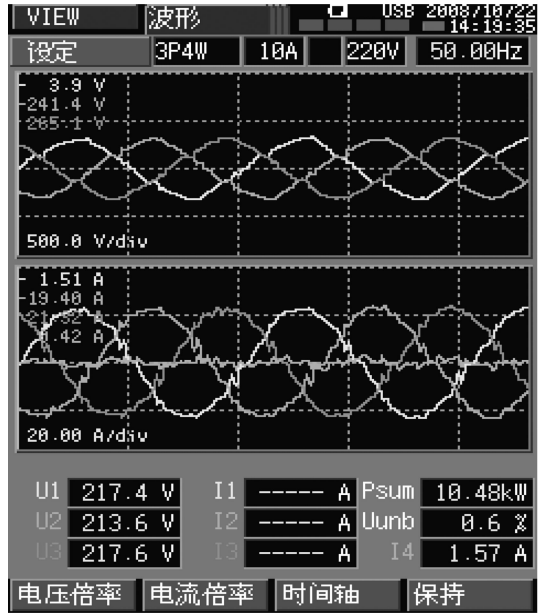


图5 供电电源端电压和电流波形

5. 结 论

本文基于传输线理论,在建立高频脉冲作用下电缆分布参数模型的基础上,实验以三相交一直一交 PWM 变换电路带电动机负载为例,讨论 PWM 脉

冲波在电缆上的传输和反射过程,研究高频脉冲驱动下长电缆传输负面效应的产生机理,分析引起电机定子绕组绝缘过早损坏,供电电源电压产生谐波的原因,理论分析和实验表明:电缆线越长高频脉冲传输和反射过程产生的谐波和过电压越严重。

- [1] Matsukawa M, Miura Y M, Shimada K, Terakado T, Okano J, Isono T, Nunoya Y 2004 *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **14** 1414
- [2] Zornigibel V, Spahn E, Buderer G, Welleman A, Fleischmann W 2009 *IEEE Transactions on Magnetics* **45** 531
- [3] Grivet P 1970 *The Physics of Transmission Lines at High and Very High Frequencies* (London and New York: Academic Press) p26
- [4] Li Y Q, Fu Y Q, Zhang H, Yuan N C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3949 (in Chinese) [李有权、付云起、张辉、袁乃昌 2009 物理学报 **58** 3949]

- [5] Xie A S, Li S T, Zheng X Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3828 (in Chinese) [谢安生、李盛涛、郑晓泉 2008 物理学报 **57** 3828]
- [6] Zeng L R 1982 *Acta Phys. Sin.* **31** 709 (in Chinese) [曾令儒 1982 物理学报 **31** 709]
- [7] Wan J R, Lin Z Q, Yu H J 2001 *Power Electronics* **35** 6 (in Chinese) [万健如、林志强、禹华军 2001 电力电子技术 **35** 6]
- [8] Wan J R, Lin Z Q, Yu J H 2001 *Proceedings of the CSEE* **21** 43 (in Chinese) [万健如、林志强、禹华军 2001 中国电机工程学报 **21** 43]

Transmission and reflection of high-frequency power pulse in cable based on transmission theory^{*}

Wan Jian-Ru Liu Ying-Pei[†] Zhou Hai-Liang

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 9 July 2009; revised manuscript received 4 September 2009)

Abstract

For the problem of harmonic generation caused by power high frequency pulse during transmission, based on the transmission line theory, cable distributed parameter model under the high frequency was established and negative effects caused by long cable transmission were analyzed. Be tied of the states of three-phase AC-DC-AC PWM inverter with motor, not only the article discussed the transmission and reflectance processions of impulse wave over the cable in detail, but also researched the production principle of motor over voltage. In addition, it analyzed the reasons of premature failure of the stator winding insulations and why the supply generated harmonic. The theory of this method has been verified by the experiment.

Keywords: high – frequency pulse, transmission line, cable, over-voltage

PACC: 0340K, 9430P, 8760D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60874077), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20060056054) and the National Quality Inspection Main Office Public Benefit Specialized Research Foundation of China (Grant No. 200910097).

[†] Corresponding author. E-mail: liuyingpei_123@126.com