变频调速系统对牵引电机谐波损耗影响的研究①

佟来生[1], 吴广宁[1], 舒 雯[1], 温凤香[1], 何恩广[2]
(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031;
2. 株洲南车电机股份有限公司研究所, 株洲 412001)

摘要: 变频调速系统输出的脉宽调制波含有丰富的谐波, 谐波引起附加损耗, 使交流牵引电机运行温升增加, 导致绝缘加速老化, 缩短其运行寿命。文章利用MATLAB软件建立了变频调速仿真系统, 对影响变频牵引电机谐波损耗的逆变器参数进行了分析, 并提出一种用谐波总损耗因数表征谐波损耗的方法。

关键词: 逆变器; 牵引电机; 谐波损耗因数; 电压谐波总畸变率
中图分类号: TM 343.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-8930(2005)06-0010-04

Study on Influence of Frequency Control System on Harmonic Losses of Traction Motors

TONG Lai-sheng[1], WU Guang-ning[1], SHU Wen[1],
WEN Feng-xiang[1], HE En-guang[2]
(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Zhuzhou South Locomotive Electric Machine Works, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: This paper focuses on the influence of frequency control system on harmonic losses of traction motors. Output of the inverter in frequency control system contains a great quantity of harmonics, which will give rise to extra losses that are harmful to the insulation of traction motors. Using MATLAB, the frequency control equivalent model is developed based on the principle of sinusoidal pulse width modulation (SPWM). The harmonic spectrum of steady-state operation is simulated using this model. The influence of the following inverter parameters is considered: modulation index and switch frequency. HLF is defined and used to represent the harmonic losses.

Key words: inverter; traction motor; harmonic loss factor (HLF); total harmonic distortion (THD)

1 前言

随着大功率开关元件的技术成熟, 高速牵引机车广泛采用交流传动PWM变频调速系统进行运行控制[1]。牵引机车交流传动系统输出含有大量谐波, 尤其是PWM逆变器的输出波形。谐波造成波形畸变, 使电压峰值上升、交流牵引电机内部涡流和集肤效应增加, 产生附加损耗, 引起交流牵引电机运行温度升高, 缩短电机的绝缘寿命[2,3]。因此, 分析变频调速系统对输出谐波含量和谐波损耗的影响, 有助于优化传动系统设计, 减少交流牵引电机的附加损耗, 提高交流传动系统的可靠性和工作效率。

国内外研究人员对中小功率的电机谐波损耗已经做了一些研究工作。国外研究结果表明, 调制比对铁耗的影响很大, 开关频率对铁耗的影响较小。为了减小铁耗, 调制比应选择允许条件下的最大值[2], 但没有研究变频器参数对电动机铜耗的影响。V. Kinnares等在考虑集肤效应的谐波损耗模型基础上, 引入谐波的杂散损耗, 建立了考虑杂散损耗的模型。但该模型在开关频率高于4.5 kHz时, 谐波损耗计算结果精确度下降[4]。国内研究人员采用类似于V. Kinnares的方法, 对谐波损耗进行了计算[5,6]。在变频调速系统中, 逆变器与交流牵

① 收稿日期: 2005-01-17; 修回日期: 2005-03-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(50377035); 霍英东教育基金项目(91060); 清华大学电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室开放课题基金

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

引电机直接相连, 系统谐波对电机的影响主要是逆变器输出谐波对电机的影响。本文针对国产电力机车的逆变器调制参数, 利用MATLAB 软件, 建立了变频调速仿真系统, 逆变器控制方式采用正弦脉宽调试方式(SPWM)。根据仿真结果, 采用一种用谐波总损耗因数表征谐波损耗的方法, 分析了逆变器调制参数对牵引电机谐波损耗的影响。

2　电压谐波总畸变率和谐波总损耗因数

电压谐波总畸变率是表征逆变器输出谐波频谱分布和含量的重要参数, 也是评价变频调速控制方式的重要指标。电压谐波总畸变率定义为[6]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中: V_n 为 n 次谐波电压幅值; V_1 为基波电压幅值。

逆变器输出的谐波引起交流牵引电机附加损耗, 文献[7]中采用谐波损耗计算公式:

$$P_h = \sum_{n \neq 1} \left(\frac{A}{f_n^{\alpha}} + \frac{B}{f_n^{\beta}}\right) V_n^2 \tag{2}$$

式中: f_n 为谐波频率; A、B、α、β 为损耗特性曲线特征参数。

式(2) 以空载情况为研究对象, 取 $A = 1.1$, $B = 6.2$, $\alpha = 1.5$, $\beta = 0.4$。其中, 公式前一项表征低频分量变化, 主要计算铜耗; 后一项表征高频分量变化, 主要计算磁滞损耗。这里定义谐波损耗值除以基波电压幅值的平方得到的标幺值为谐波总损耗因数 HLF (harmonic loss factor), 利用谐波总损耗因数来表征谐波对交流牵引电机附加损耗的影响。谐波总损耗因数定义为

$$HLF = \frac{1}{V_1^2} \sum_{n \neq 1} \left(\frac{A}{f_n^{\alpha}} + \frac{B}{f_n^{\beta}}\right) V_n^2 \tag{3}$$

3　逆变器参数对谐波损耗的影响

变频调速仿真系统由全桥整流部分、中间直流部分、逆变器、调制部分以及变频牵引电机组成。全桥整流部分和调制部分采用Matlab 软件中的整流模块和调制模块, 逆变器则采用 6 个 IGBT 模块构成逆变桥路。由于逆变器与变频牵引电机直接相连, 输出的高频脉冲对变频牵引电机谐波损耗有直接的影响。逆变器采用 SPWM 调制方式, 开关频率、调制比是影响输出特性的主要参数, 且对输出电压谐波含量有很大影响, 从而影响变频牵引电机谐波损耗的大小。本文通过设定不同的开关频率和调制比, 仿真变频牵引电机谐波损耗, 来分析这些参数对变频牵引电机谐波损耗的影响。

3.1　开关频率对谐波损耗的影响

受到大功率开关器件技术水平的限制, 高速机车牵引逆变器的开关频率大多在 0.1～2 kHz[8]。为了能更好地反映谐波损耗的变化趋势, 在仿真程序中开关频率 f_c 为 0.045～15 kHz。在 0.1～2 kHz 范围内取点密集, 这样就可以更好地反映实际应用中变频牵引电机谐波损耗受开关频率的影响。仿真结果如图 1 和图 2 所示, 基波频率 f_x 为 50 Hz, 调制比 M 为 0.9。

图 1 表明随着开关频率 f_c 的增大, 电压谐波总畸变率 THD 减小, 谐波含量降低。从图 2 中可以看出在 0.045～2 kHz 范围内, 随着开关频率的增大, 谐波总损耗因数 HLF 急剧下降; 而 f_c 大于 2 kHz 的较高频率段, 谐波总损耗因数 HLF 减小缓慢, 最后趋于稳定。f_c 越高, 谐波含量越少, 谐波损耗越小。考虑到开关器件本身的损耗, 实际牵引逆变器的开关频率 f_c 一般不超过 2 kHz, 从仿真的结果来看, 开关频率选择在 2 kHz 左右是比较合理的, 这时的载波比 N 为 40 左右。

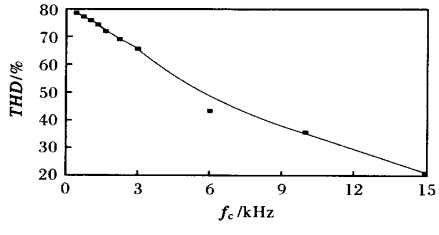

图 1　电压谐波总畸变率随开关频率变化曲线

Fig. 1　Curve of the THD with respect to carrier frequency

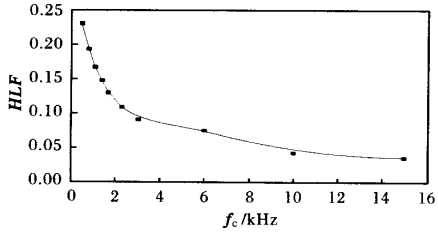

图 2　不同开关频率下谐波总损耗因数

Fig. 2　Curve of the HLF with respect to carrier frequency

3.2　调制比对谐波损耗的影响

在 SPWM 调制方式的逆变器中, 直流电压 U_d

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

恒定的情况下, 调制比M 的变化直接影响基波电压幅值V_1的大小。逆变器输出的基波电压幅值V_1与调制比M 和直流电压U_d有关: $V_1 = \sqrt{3} M U_d$。所以在直流环节电压U_d不变的情况下调制比发生改变, 基波电压幅值V_1就会出现变化。图 3 是开关频率f_c为 1.65 kHz, 基频f_x为 50 Hz 的仿真结果。图 3 看出, 随着调制比M 的增大, 基波电压幅值V_1明显变大。在$(0 < M < 1)$的正弦脉宽调制区域, 基波电压幅值与调制比M 的大小成线性关系。在$(1 < M < 3)$的过调制区, 基波电压幅值V_1随调制比M 的递增呈非线性增加, 增加趋势平缓。图 4 和图 5 是基波电压幅值V_1不变, 中间直流电压V_d变化情况下得到的曲线。在线性调制区域$(0 < M < 1)$, 电压谐波总畸变率 THD 和谐波总损耗因数 HLF 随调制比M 的增大下降很快。但在过调制区域$(M > 1)$, 电压谐波总畸变率 THD 和谐波总损耗因数HLF 变化趋于平缓, 受调制比M 的影响较小, M 为 1 是HLF 变化的转折点。前面分析可知, 提高调制比M 能够减少牵引电机的谐波损耗。但是, 为了保持输入变频牵引电机中的基波电压幅值V_1不变, 变频调速系统中的直流部分电压将降低。因此, 实际牵引逆变器的调制比范围为 0.8～1.2。

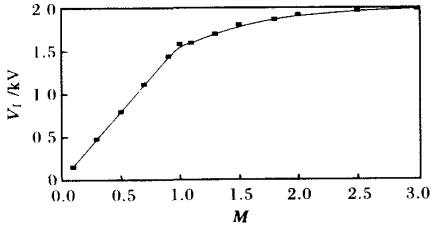

图 3 基波幅值与调制比的关系

Fig 3 Curve of fundamental voltage magnitude with respect to modulation ratio

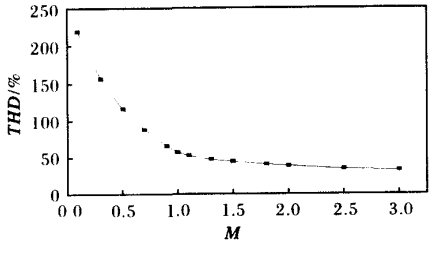

图 4 不同调制比下的电压谐波总畸变率

Fig 4 Curve of the THD with respect to modulation ratio

3.3 基波频率变化对谐波总损耗因数的影响

图 6 是在开关频率f_c为 1.65 kHz, 调制比M 为 0.9 时的仿真结果。基波频率f_x为 10 Hz 的谐波总损耗因数HLF 比基波频率f_x为 50 Hz 的谐波总损耗因数HLF 要小。这是因为基波频率f_x为 10 Hz 时, 谐波电压幅值比基波频率f_x为 50 Hz 时的小。随着f_x的增大, HLF 也增大, 但增长趋势逐渐减慢, 最后趋于平缓。

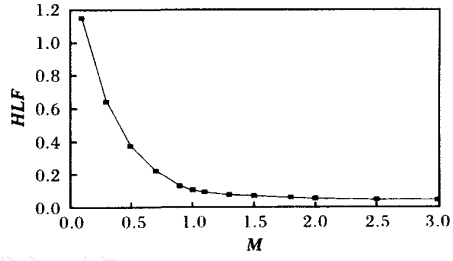

图 5 不同调制比下的谐波总损耗因数

Fig 5 Curve of the HLF with respect to modulation ratio

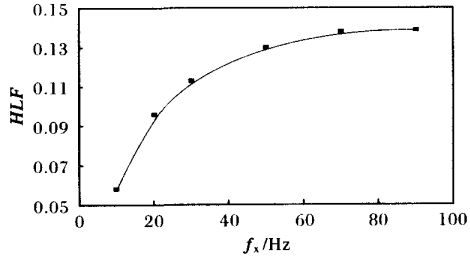

图 6 谐波总损耗因数随基波频率变化曲线

Fig 6 Curve of the HLF with respect to fundamental frequency

4 结论

论文根据谐波总损耗计算公式, 定义了谐波总损耗因数HLF, 并用其变化曲线表征变频调速系统对变频牵引电机谐波总损耗的影响。

仿真结果表明, 为了减少变频牵引电机谐波损耗, 逆变器 SPWM 调制参数选取应按以下原则:

1) 开关频率越大, 变频牵引电机的谐波损耗越小, 对运行越有利。由于开关频率越高, 开关器件本身损耗越大, 而且开关频率大于 2 kHz 时, 谐波损耗随开关频率增大下降趋势不是很明显, 所以开关频率在 2 kHz 比较合理。

2) 调制比选取越大越好, 调制比越大交流牵引电机谐波损耗越小。但为了不过多降低中间直流电压, 调制比选择在 1 左右比较合理。

以上原则从减少交流牵引电机谐波损耗的角度出发, 没有考虑开关器件本身的损耗以及变频牵

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

引电机运行控制等因素。

参考文献:

[1] 高培庆(Gao Peiqing). 铁路牵引用异步电动机的发展(Development of asynchronous motor for railway traction) [J]. 机车电传动(Electric Drive for Locomotives). 2002(1): 10- 13.

[2] Boglietti A, Ferraris P, Lazzari M, *et al*. Influence of the inverter characteristics on the iron losses in PWM inverter-fed induction motors[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(5): 1190- 1194.

[3] Yin Weijun, Bultemeier K, Barta D, *et al*. Critical factors for early failure of magnet wires in inverter fed motor [A]. In: Proceedings of the 8th Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. Virginia Beach, USA: 1995, 258- 261.

[4] Kinnares V, Potivejkul S, Sawetsakulanond B. Modified harmonic loss model in PWM fed induction machines [A]. In: Proceedings of the 3th IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems [C]. Chiangmai, Thailand: 1998, 535- 538.

[5] 孙成明, 袁峰, 李敏, 等(Sun Chengming, Yuan Feng, Li Min, *et al*). 变频调速系统对交流电机的谐波效应分析(The analysis on harmonic effect of a synchronous motor by variable-frequency speed control system) [J]. 沈阳建筑工程学院学报(Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute), 1999, 15(4): 392- 393.

[6] 万健如, 林志强, 禹华军(Wan Jianru, Lin Zhiqiang, Yu Huajun). 变频器谐波对负载影响的仿真分析(Simulation analysis for effect of transducer harmonic on loads) [J]. 电力电子技术(Power Electronics). 2001, 35(5): 52- 54.

[7] Undeland T M, Mohan N. Overmodulation and loss considerations in high-frequency modulated transistorized induction motor drives [J]. IEEE Trans on Power Electronics 1988, 3(4): 447- 452.

[8] 李立中, 蔡彬芬(Li Lizhong, Cai Binfen). 交直交机车变频调速异步牵引电动机 H 级绝缘结构(H class insulation structure of inverter-fed traction motor in AC-DC-AC locomotive) [J]. 绝缘材料通讯(Journal of Electrical Insulating Material). 2000(3): 38- 42.

作者简介:

佟来生(1977-), 男, 博士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术的研究。Email: tonglaisheng@263.net

吴广宁(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术的研究。Email: Gnwu@home.swjtu.edu.cn

舒　雯(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术的研究。Email: sjsswlh@163.com

(上接第 4 页)

[5] Burnett R O, Butts M M, Sterlina P S. Power system applications for phasor measurement units[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1994, 7(1): 8- 13.

[6] Martin K E, Benmouyal G, Adamiak M G, *et al*. IEEE standard for synchrophasors for power systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1): 73- 77.

[7] 李建, 谢小荣, 韩英铎(Li Jian, Xie Xiaorong, Han Yingduo). 同步相量测量的若干关键问题(Some key issues of synchrophasor measurement) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems). 2005, 29(1): 45- 48.

[8] 高厚磊, 江世芳, 贺家李(Gao Houlei, Jiang Shifang, He Jiali) 利用卫星时间作基准的电力系统同步相量测量(Synchronized phasor measurements in power system using satellite time reference) [J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSA), 1995, 7(4): 33- 40.

作者简介:

董　存(1973-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统的安全性和稳定性。Email: dongcun@eyou.com

余贻鑫(1936-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统的安全性和稳定性、配电规划和配电自动化、电力市场。Email: yixinyu@tju.edu.cn

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net