

车载网侧变流器电流谐波优化控制策略

郭其一¹, 冯江华², 张志学², 罗文广²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 交流传动电力机车和电动车组网侧变流器产生的电流谐波频谱分布范围较宽, 容易激起牵引网谐振。在分析了理想条件下网侧电流谐波特性的基础上, 针对网侧变流器目前通常采用的多重化瞬态电流控制策略, 通过对比指出了其在谐波性能方面的问题。为解决这些问题, 提出了基于平均电流反馈和基于原边电流反馈两种优化的瞬态电流控制策略。通过仿真分析和线路运行试验验证了优化控制策略的有效性, 可将原边电流总谐波畸变率降低至 1% 左右, 显著提升了网侧谐波性能, 并有效地抑制了车网谐振。

关键词: 网侧变流器; 电流谐波; 控制策略; 车网谐振

中图分类号: TP15

文献标志码: A

Optimal Control Strategy of Current Harmonic for Onboard Line-side Converter

GUO Qiyi¹, FENG Jianghua², ZHANG Zhixue², LUO Wenguang²

(1. College of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. CSR Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The running of line-side converter of alternating current (AC) drive electric locomotive and electric multiple units will generate current harmonic, and the frequency range of the current harmonic is wide. This will easily cause resonance between the train and the power supply grid. The harmonic characteristic of line-side current in ideal conditions is analyzed; the problem about harmonic performance of usual transient current control strategy for multiple line-side converters is discovered through comparison. In order to solve the problem, two optimal transient current control strategies based on average current feedback and primary current feedback are proposed. The simulation analysis and the line testing verify the validity of optimal control strategy. The total harmonic distortion (THD) for primary current fall to about 1%. The line-side harmonic characteristic is

improved visibly, and the resonance between the train and power grid is suppressed effectively.

Key words: line-side converter; current harmonic; control strategy; resonance between the train and power grid

交流传动电力机车和电动车组目前我国已得到普遍应用, 其牵引变流器的网侧部分通常采用单相电压源型脉宽调制 (PWM) 变流器, 主要有两电平和三电平两种拓扑结构, 具有中间直流电压稳定、功率因数高、功率可双向流动等优点。但网侧变流器的谐波频谱较宽, 通常在 3—200 次之间均有分布, 造成了与既有牵引供电系统的匹配存在问题, 导致了多次车网耦合谐波谐振事故, 引起特定频段谐波电流被放大、谐振过电压、甚至设备烧损, 对系统的安全运行造成威胁^[1-3]。因此, 对作为车网谐振激励源的机车和动车组的网侧变流器谐波特性进行研究, 并加以改进和优化具有十分重要的意义, 是解决车网谐振问题的前提和关键。

车载网侧变流器通常采用瞬态电流控制策略来提高动态响应性能, 同时采用多重化载波移相调制策略来改善整车电流谐波性能。本文以常用的两电平网侧变流器为研究对象, 分析了理想条件下列车网侧电流的谐波特性, 通过对比指出了常用的多重化瞬态电流控制策略在谐波性能方面的不足。在此基础上, 提出了基于平均电流反馈和原边电流反馈两种优化的瞬态电流控制策略, 最后通过仿真和线路试验对优化后的控制策略对网侧电流谐波性能的改善效果进行了验证。

1 多重化瞬态电流控制策略及谐波分析

交流传动电力机车和电动车组的网侧变流器—

收稿日期: 2014-09-29

第一作者: 郭其一(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力牵引与传动控制。E-mail: guogiyi@tongji.edu.cn

通讯作者: 冯江华(1964—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为交流传动系统。E-mail: Fengjh@tcg.cn

i_k 的表达式为

$$i_k = \frac{MU_d \sin \varphi \sin(\omega_s t)}{\omega_s L} + \frac{2U_d}{\delta \omega_s L} \cdot \sum_{m=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1,3,5,\dots}^{\pm \infty} \frac{J_n(mM\delta)}{m} \cdot \frac{\cos(m\delta)}{2mN+n} \cdot \sin[(2mN+n)\omega_s t - n\varphi + \frac{\delta}{2}] \quad (4)$$

对比式(2)和式(4)可知,单重网侧变流器输入电流的谐波分布与 PWM 电压 U_{AB} 的谐波分布一致,但其幅值随着谐波次数的增加而迅速减小,主要谐波次数为 $2N \pm 1$ 和 $2N \pm 3$ 次。

设图 1 中网侧变流器的重数为 k ,牵引变压器的变比为 k_T 。如果使各重网侧变流器的调制波保持相同,而载波相互依次错开 $\beta = \frac{\delta}{k}$ 的相位,则牵引变压器原边电流(或整车电流)的表达式为

$$i = \frac{kMU_d \sin \varphi \sin(\omega_s t)}{k_T \omega_s L} + \frac{2kU_d}{\delta k_T \omega_s L} \cdot \sum_{m=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1,3,5,\dots}^{\pm \infty} \frac{(-1)^{km} J_n(kmM\delta)}{km'} \cdot \frac{\sin[(2kmN+n)\omega_s t - n\varphi + \frac{\delta}{2}]}{2kmN+n} \quad (5)$$

由式(5)可知, $k(k > 1)$ 重网侧变流器通过载波移相合成的列车整车电流的主要谐波次数为 $2kN \pm 1$ 和 $2kN \pm 3$,相当于将单重网侧变流器的开关频率提高 k 倍,从而使网侧电流谐波含量迅速减小。

1.3 瞬态电流控制的谐波分析

瞬态电流控制策略引入了以实际电流作为反馈的电流内环,结合图 2 及式(4)可知,电流内环比例调节器的输入中含有 $2N \pm 1$ 和 $2N \pm 3$ 次谐波分量。实际应用中为提高动态响应性能,比例调节系数的取值通常大于 1(一般取 3 左右),导致调制波 U_m 中以 $2N \pm 1, 2N \pm 3$ 次为主的谐波分量更大,使其不可能为理想正弦波。调制波中大量谐波分量的存在,一方面通过 PWM 调制会引入到单重电流 i_k 中,使式(4)中的谐波分布发生变化;另一方面使得各重的调制波差异较大,达不到多重移相使谐波相互完全抵消的效果,导致整车电流的谐波增加,且频谱分布较宽,不像式(5)那样集中在 $2kN$ 次的边频带。

另外,单相网侧变流器的固有特性决定了直流电压必然含有二次谐波,加上死区时间的客观存在,这些因素都导致了网侧电流中含有较高的 3,5 次等低次谐波^[7],而既有的瞬态电流控制法并没有对这些低次谐波进行有效处理。

2 电流谐波优化控制策略

通过以上分析,车载网侧变流器采用多重化瞬态电流控制的谐波性能与理想条件下还存在差距,主要原因是电流内环以实际电流作为反馈量,导致在调制波中叠加了大量谐波分量。因此,可以对瞬态电流内环进行优化,在不影响对电流基波动态响应的基础上,减小甚至消除谐波分量的引入,达到改善谐波性能的目的。

2.1 平均电流反馈瞬态电流控制

电力机车或电动车组牵引变流器的控制通常由多个分散的控制系统实现,每个控制系统控制同一架或同一动力单元的 2—3 重网侧变流器,一般这几重的输入基波电流基本相等。因此可用这几重输入电流的平均值取代各重实际输入电流作为电流内环的反馈量。

假设 1 个控制系统控制的网侧变流器为两重,两重的实际电流分别为 i_1, i_2 ,则平均电流反馈量 \bar{i}_k 可表示为

$$\bar{i}_k = i_k \times K + i_3 - k \times (1 - K) \quad (6)$$

式中, $k=1$ 或 2; K 为取平均的加权系数,可根据实际效果调整确定。当 $K=0.5$ 时,与原来采用 i_k 相比, \bar{i}_k 的谐波分布从 $2N$ 次边频带提高至 $4N$ 次边频带,谐波幅值也明显降低。基于平均电流反馈的瞬态电流控制的优点在于通过反馈电流取平均减小了调制波的谐波含量,从而使多重载波移相的效果更好,而且对电流基波控制的影响也很小。

2.2 原边电流反馈瞬态电流控制

电力机车或电动车组的牵引变压器通常具有 4 个以上牵引绕组,可为 2 架或 2 个动力单元的 4 重以上网侧变流器供电,其原边电流一般也由 4 重以上的网侧变流器输入电流通过载波移相控制叠加合成。因此根据式(5),采用原边电流作为电流内环的反馈量,可将调制波 U_m 的特征谐波提高到 $8N$ 次(4 个牵引绕组时)的边频带,谐波幅值也会更小,比采用平均电流作反馈量具有更好的效果。

同时,瞬态电流控制引入原边电流作反馈量后,可以对死区时间及直流电压二次脉动等因素导致的 3 次谐波进行闭环控制,以减小原边电流谐波含量。除此之外,还可优化同步锁相以补偿传输线路分布参数造成的误差,并对无功电流进行闭环控制以进一步提高网侧功率因数。

基于原边电流反馈的瞬态电流控制框图如图 4

所示. 电流内环的反馈量为原边电流按变压器变比 k_T 及重数 k 的折算值. 3 次谐波控制环中, 首先将原边电流 i 进行带通滤波(BPF)或陷波得到 3 次谐波电流, 然后通过锁相和幅值计算得到其相位和幅值, 最后采用 PI 调节实现闭环补偿. 无功电流控制环中, 首先通过瞬时无功功率检测法提取出原边电流

中的无功分量, 然后采用 PI 调节实现无功为零的闭环控制. 将各控制环输出的电流参考值换算成电感 L 上的压降, 再与输入电压进行叠加即得到最终的调制波. 图中 i_{h3} 为 3 次谐波电流, i_{h3m} 为 3 次谐波电流分量; U_{Lh3} 为 3 次谐波; LPF 为有源电力滤波器; I_q 为天根电流分量; U_{dref} 为直流电压参考值.

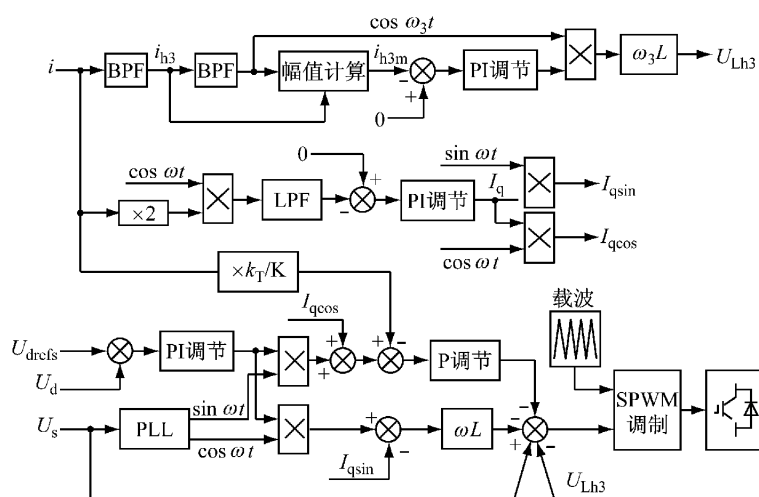


图4 原边电流反馈瞬态电流控制框图

Fig. 4 Diagram of transient current control strategy based on primary current feedback

3 仿真及试验验证

为验证上述分析结果的正确性及优化控制策略的有效性, 通过仿真分析及线路试验进行了对比验证. 选取某型高速动车组为验证对象, 相关参数为: 单个牵引变压器额定功率 4 300 kW, 连接 4 重网侧变流器, 网侧变流器开关频率 350 Hz, 输入电感 3 mH, 额定输入/输出电压为 AC2100V/DC3500V.

3.1 仿真分析

对分别应用 3 种控制策略时牵引变压器原边电流及其谐波情况进行仿真分析, 在电网电压为 AC27.5kV, 网侧变流器发挥额定功率时的相关波形如图 5 所示. 图 5a 为采用传统的瞬态电流控制策略时原边电流波形及频谱, 谐波畸变率 (THD) 为 3.29%, 谐波分布主要在 3, 5 次及 45—65 次特征段之间, 且幅值较大, 而在 19—35 次之间也有不少谐波, 与 1.3 小节的分析结果吻合. 图 5b 为采用平均电流反馈的瞬态电流控制策略时原边电流波形及频谱, THD 为 2.26%, 特征段谐波幅值有所降低, 非特征段 19—35 次之间的谐波也明显减小, 效果优于传

统瞬态电流控制法. 图 5c 为采用原边电流反馈的瞬态电流控制策略时原边电流波形及频谱, 波形明显光滑, 由于进行了补偿 3 次, 谐波明显减小, THD 仅 0.91%, 且频谱分布干净, 更加接近于 1.2 小节理想条件下的谐波分布规律, 效果明显优于其他两种控制策略.

3.2 试验验证

该高速动车组在沪昆线进行网侧谐波性能测试的线路试验时, 选取效果最优的原边电流反馈瞬态电流控制策略与传统控制策略进行了实际谐波性能对比验证. 图 6a 为采用传统控制方法时的原边电流波形及频谱, THD 为 3.31%, 谐波分布范围较宽, 特别是存在较高的 20—40 次之间的谐波, 不但容易使等效干扰电流指标不达标, 而且可能引起牵引网谐振, 产生较大危害. 图 6b 为采用原边电流反馈的瞬态电流控制策略时的试验波形 (左图中幅值高的为电网电压, 幅值低的为原边电流; 右图为原边电流频谱), 电压与电流相位相同, THD 为 0.97%, 谐波分布主要集中在 50 次以上的边频带, 与仿真比较吻合, 20~40 次之间的谐波显著减小, 能够有效地改善网侧谐波性能, 抑制车网谐振.

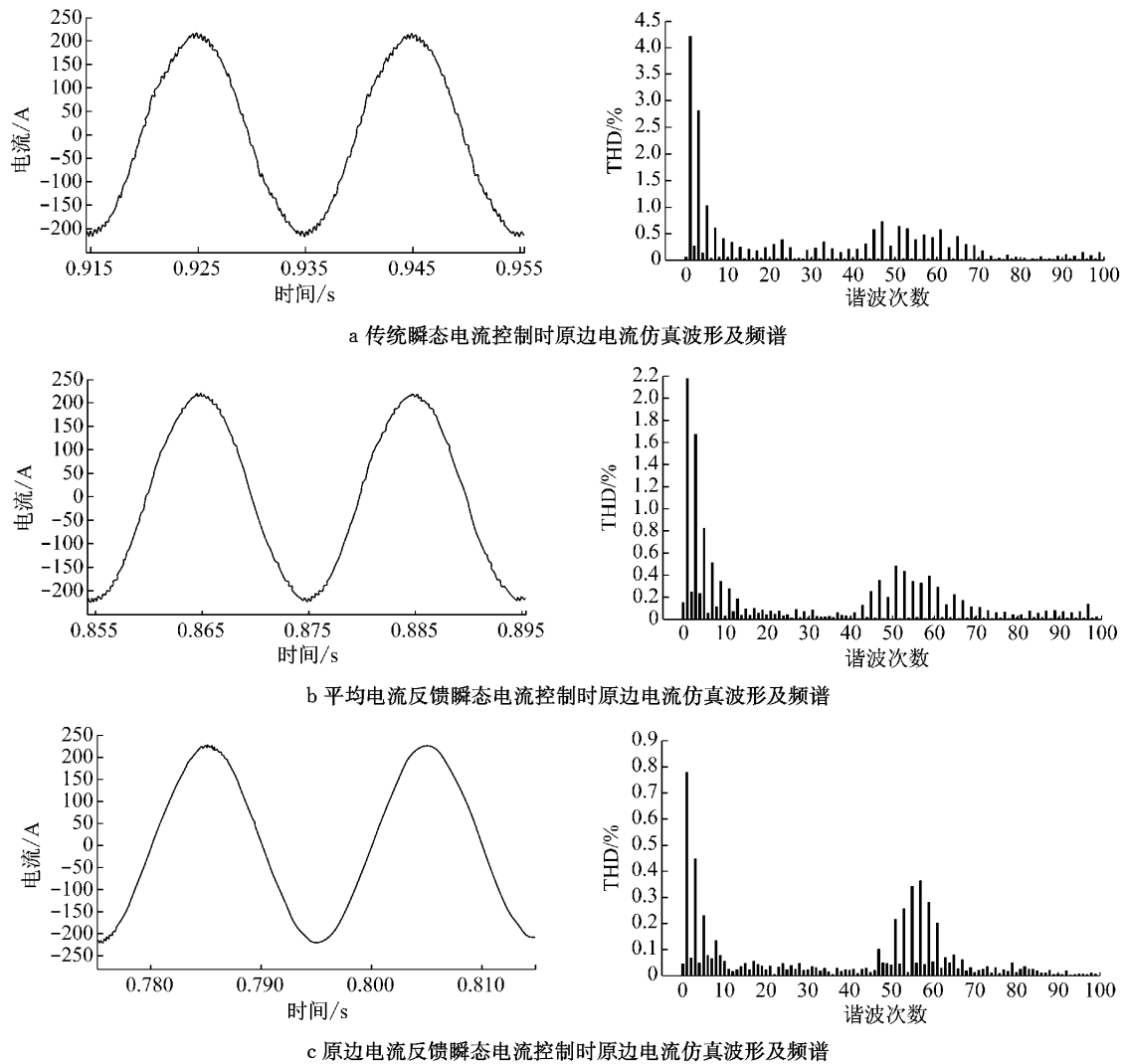


图 5 不同控制策略下原边电流仿真结果对比

Fig.5 Comparison of the simulation results for primary current by several control strategies

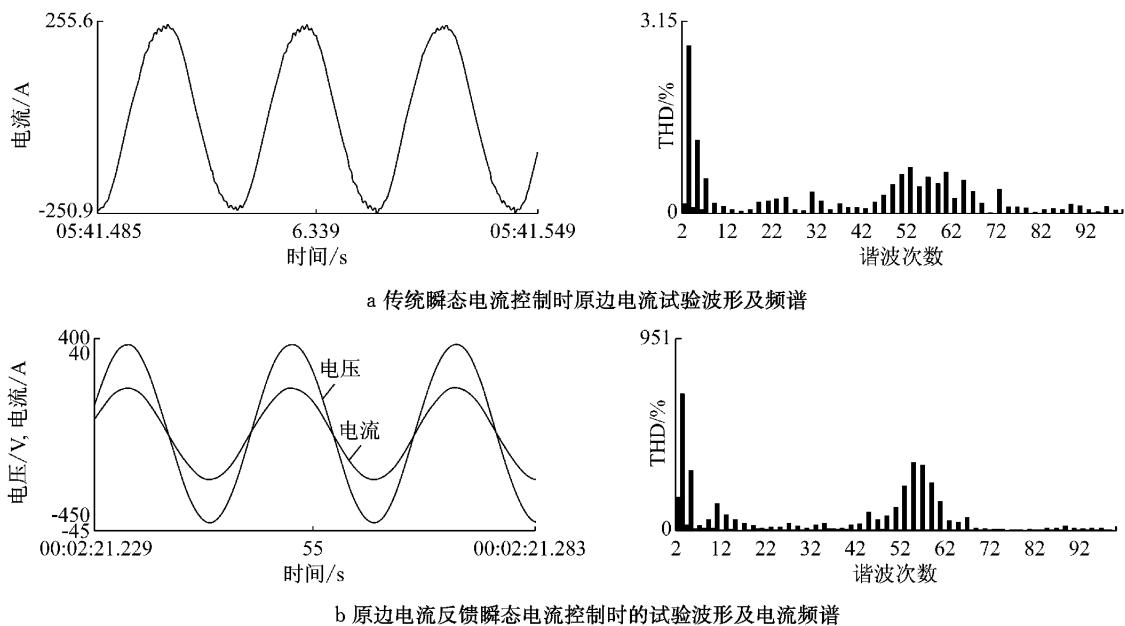


图 6 两种控制策略下原边电流试验结果对比

Fig.6 Comparison of the line test results of the primary current by two control strategies

4 结论

本文首先介绍了交流传动电力机车和电动车组中网侧变流器常用的多重化瞬态电流控制策略,在对理想条件下网侧电流的谐波特性进行分析的基础上,通过对比指出了既有控制策略在谐波性能方面的不足,继而提出了基于平均电流反馈和基于原边电流反馈两种优化的瞬态电流控制策略,并进行了仿真和线路运行试验,验证了基于平均电流反馈的控制策略的谐波性能优于既有控制策略,而基于原边电流反馈的控制策略效果更优,可将原边电流THD大幅减小至1%左右,且频谱分布范围较窄,非常接近于理论值。因此,基于原边电流反馈的瞬态电流控制策略能够显著提升网侧谐波性能,从而有效地抑制车网谐振,对列车及牵引供电系统的安全可靠运行具有重大意义。

参考文献:

- [1] 韩智玲,唐蕾,李伟.交流传动电力机车车网电压不稳定的原因分析与解决[J].铁道学报,2011,33(10):25.
HAN Zhiling, TANG Lei, LI Wei. Causal analysis and resolution of the voltage instability between AC drive electric locomotive and power supply network[J]. Journal of China Railway Society, 2011, 33(10): 25.
- [2] Saha T K, Dennis J C. Investigation of the propagation of harmonic distortion from traction converters into traction and transmission systems [C]//2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal: IEEE, 2006: 1709036.
- [3] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
ZHANG Chongwei, ZHANG Xing. PWM rectifier and its control [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [4] 刘凤君.现代逆变技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
LIU Fengjun. Modern inverter technology and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [5] 张志学.单相电压源 PWM 变流器的谐波分析[J].大功率变流技术,2006(5):17.
ZHANG Zhixue. Harmonic analysis for single-phase voltage source PWM converter[J]. High Power Converter Technology, 2006(5): 17.
- [6] Chang G W, Lin H, Chen S. Modeling characteristics of harmonic currents generated by high-speed railway traction drive converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 766.
- [7] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
WANG Zhaoan, YANG Jun, LIU Jinjun. Harmonics elimination and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.