

双向DC变换器拓扑的电动汽车电磁干扰仿真

朱显辉^{1,2}, 崔淑梅¹, 师楠^{1,2}, 徐奇伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 黑龙江科技学院 工程训练与基础实验中心, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要: 为了研究带双向DC-DC和DC-AC拓扑结构电动车的电磁干扰,在对电动汽车能量变换器拓扑进行详细分析的基础上,建立了包含两个共模电压系统的传递函数.由于各种电动汽车中能量变换电路拓扑结构的差异,以及连接、固定方式、开关器件的不同,导致了在共模电流回路参数变化时,在车体产生不同的共模电压,对此进行了时域和频域的分析,并建立了仿真模型.仿真结果表明,不同的参数变化时,对共模电压的低频或高频段产生不同的影响.利用仿真结果,可以在设计阶段对电动汽车的电磁干扰进行预测,缩短开发周期.

关键词: 电动汽车; 电磁干扰; 双向DC-DC; 仿真; 预测

中图分类号: TM921.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)04-0018-04

EMI Simulation of Electric Vehicle with Bi-directional DC Transformer Topology

ZHU Xian-hui^{1,2}, CUI Shu-mei¹, SHI Nan^{1,2}, XU Qi-wei¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Center for Engineering Training and Basic Experimentation, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: Electromagnetic interference in EV (electric vehicle) with bi-directional DC-DC and DC-AC transform device was researched. Based on detailed analysis of power transformer topology of EVs, the transfer function of system containing two common voltage sources was given, for different manufacturers or model of electric vehicle, there were discrepant energy transform circuits, various connection, and different fixed ways and switch devices. Total common current circuit parameter changes gave body common voltages different results, simulation research in time domain and frequency domain were carried out, and results were analyzed. The results show parameter variation generates different influences in low or high frequency. Electric vehicle EMI prediction can be carried out in design, and cut down development cycle by simulation results.

Key words: electric vehicle; electromagnetic interference; bi-directional DC-DC; simulation; predicting

0 引言

电动汽车(包括混合动力汽车)内往往集中了

DC-DC、DC-AC两种能量变换设备^[1-3],采用“整流—斩波”和“升压—逆变”相结合的工作方式,以达到提高空间利用率和节约能量的目的.两种工作方式都会带来严重的电磁干扰问题.

收稿日期: 2012-02-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”计划(2012AA111103)

作者简介: 朱显辉(1975—),男,博士研究生,E-mail: zhu_xianhui@sina.com;

通讯作者: 崔淑梅(1964—),女,教授,博士生导师.

工作在“整流—斩波”时,电磁干扰情况和开关电源类似,很多学者对其干扰机理和谐波水平进行了深入研究,取得了较大进展^[4-6];工作在“升压—逆变”时,两种能量变换器并联在不同电压等级的直流母线上,和传统的升压或逆变电路相比,干扰源不同,其干扰情况也更加严峻,不同厂家、不同车型的连接方式和选用器件不同,干扰情况更加复杂多变,实际上,此时 DC-DC、DC-AC 各自的干扰不仅依然存在,而且干扰回路达到一定长度的情况下,车体的共模电流会通过车体向外辐射电磁场,干扰邻近的敏感设备或并行的其他电动汽车,导致电动汽车电磁兼容情况进一步恶化^[7]. 目前尚未有相关文献对“升压—逆变”的数学模型和干扰机理进行整体分析.

本文针对电动汽车这一特定环境,以丰田 PRI-US 的“THS II”为原型,对于“升压—逆变”的工作方式,建立两种干扰源共同作用时电动汽车内部电磁干扰的传递函数模型,并以此搭建了系统的仿真平台,针对某些关键参数可能出现的变化情况,在传导干扰频段进行了仿真分析和比较,给出了各种不同情况下“THS II”车体干扰的仿真结果.

1 共模电压源

以 THS II”为原型的电动汽车内部能量变换系统的电路,如图 1 所示^[8]. 图中含有两个共模电压源: 分别为 DC-DC 变换器,如图 1 中左半部份虚线框所示; DC-AC 变换器,如图 1 中右半部份虚线框所示. 为了叙述方便,本文在假定电容 C_1 、 C_2 上电压恒定不变的前提下,以中点 O' 作为整个系统的参考零点.

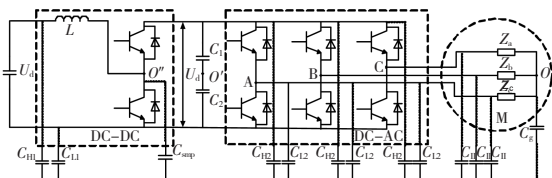


图1 共模电流耦合回路

DC-DC系统中,下桥臂 IGBT 的集电极端的共模电压源可以用一个梯形波来近似,DC-AC 的共模电压波形可用一个四电平阶梯波表示,每一个电平持续的时间和控制策略有关,可以用贝塞尔函数表示. 但贝塞尔函数缺乏直观性和实用性,本文采用持续时间相等的四电平阶梯波来代替 DC-AC 的共模电压源,即简化了问题,又具有普遍性.

2 高频寄生参数

共模电压的存在必然激励共模电流,共模电流的性质由共模电压和回路阻抗共同决定. 为了更好的研究和分析共模电动汽车内各点共模电压的性质,以图 1 为例对系统的主要高频寄生参数进行分析.

图 1 中 C_{smp} 代表 DC-DC 系统开关器件和散热片之间的寄生电容, C_{H1} 、 C_{L1} 分别代表直流电压源正负极对车体的寄生电容; C_{H2} 、 C_{L2} 分别代表 DC-AC 上、下桥臂开关管对散热片的寄生电容; C_{II} 代表电机三相电源电缆对车体的寄生电容; Z_m 、 C_g 分别代表电机三相绕组 $Z_{a/b/c}$ 高频共模阻抗和对机壳的寄生电容. 一般 DC-DC、DC-AC 在一个机箱内通过母线汇流排连接,阻抗较小,因此,忽略了汇流排高频电阻和电感的影响.

电机驱动系统所需要的功率较大,需要较多功率单体进行串并联,较大的单体表面积导致寄生电容 C_{H1} 和 C_{L1} 值较大,一般在 nF 级. 对于高频共模电压来说,直流母线正负极是相当于并联的,一般有 $C_{H1} \approx C_{L1}$, 可以表示为 $C_m \approx C_{H1} \approx C_{L1}$.

开关器件和散热片之间的硅脂,其介电常数大于真空,开关器件的面积较小,因此 C_{H2} 、 C_{L2} 和 C_{smp} 的容值较小,一般在 pF 级,且 $C_{H2} \approx C_{L2} \approx C_{smp}$, 可以表示为 $C_H \approx 3C_{H1}$.

电源电缆对车体的寄生电容 C_{II} 的值也在 pF 级,这是因为电源电缆一般较短,且和车体之间的相对面积较小,与车体的相对距离较大,可以忽略不计.

$Z_{a/b/c}$ 、 C_g 的值和电机的功率、绕组的排列形式有关. 电机的高频模型可以根据文^[9]近似估算.

为了叙述的简洁,本节在说明 DC-AC、DC-DC 共模电流回路时,没有详细阐述由于临近效应和趋肤效应所对应的高频电阻及高频寄生电感等. 必须要澄清的是,在较高频率时,这些参数不仅确实存在,而且会产生很大的影响,是不可忽略的. 本文用相同的下标代表同一器件的其他寄生参数.

3 集总参数模型

基于前述分析,两个电压源同时作用的集总等效电路可以用图 2 表示,用 L_{m1} 和 R_{m1} 分别代表三相电缆和电机绕组的总的高频等效电感和电阻, V_{inv} 和 V_{smp} 代表逆变器和 DC-DC 产生的等效共模电压源,可得到车体共模电压的传递函数为

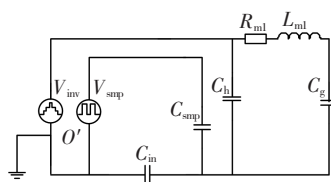


图2 简化等效电路

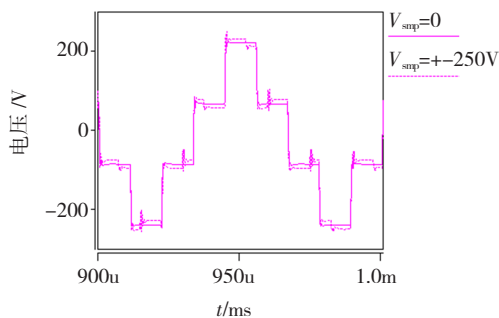
$$G(s) = \frac{s^2 C_h L_{ml} C_g + s C_h C_g R_{ml} + C_h + C_g}{s^2 (L_{ml} C_g C_{in} + L_{ml} C_g C_h) + s (C_{in} C_g R_{ml} + C_h C_g R_{ml}) + C_h + C_g + C_{in}} + \frac{C_{smp}}{C_{smp} + C_{in}} \quad (1)$$

由上式可见,即使不考虑共模电压源在频域内的谐波分量,由传递函数决定的系统在频域内的极大值及相应的频率,也是一个复杂的高阶系统,况且电机本身也是一个比例、积分、微分和振荡环节组成的系统,更进一步增加了在频域内分析模型的复杂性。

4 仿真分析

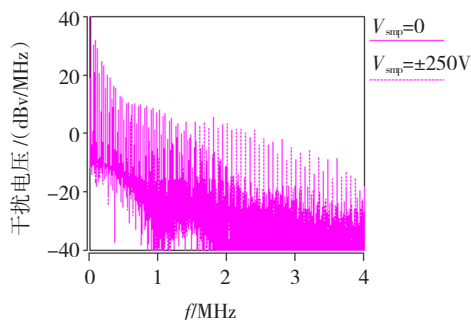
利用仿真软件对图2所示模型进行了仿真分析,模型中采用55 kW 感应电机,其高频参数的意义和数值详见文[8]。

针对DC-DC和DC-AC级联的情况,不同的结构会产生不同的共模干扰。本文根据实际情况,对不同结构和连接方式的电动汽车车体电磁干扰进行了仿真对比分析。图3、4为是否考虑DC-DC产生的 V_{smp} 的时域波形、频域波形。

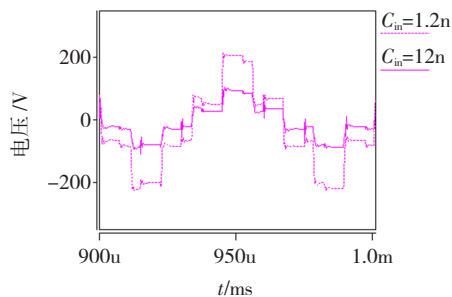
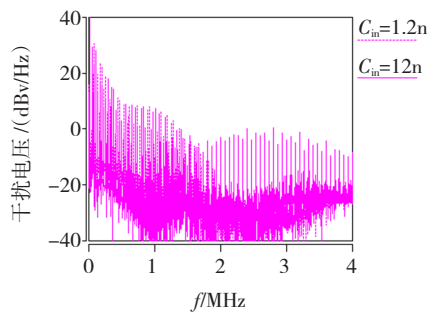
图3 V_{smp} 取不同值的时域波形

如图3所示,在DC-DC的共模电压源 V_{smp} 是否为零情况下,电磁干扰时域和频域波形不同, V_{smp} 不为零时,在DC-DC动作时刻, V_{smp} 叠加在 V_{inv} 上产生新的电平台阶,DC-DC的开关器件和散热片之间电容 C_{smp} 较小,在图4的频域分析中, V_{smp} 是否为零,在 $f < 1.5$ MHz对频谱影响较小,在 $f > 1.5$ MHz, V_{smp} 不为零时, V_{smp} 激励的电流和线路阻抗产生了高频谐振,导致1.5 MHz以上的干扰电压分贝值远大于 V_{inv} 单独作用的情况,不仅会造成其他控制电路的误动作,也使电

动汽车的EMC问题更尖锐。

图4 V_{smp} 取不同值的频域波形

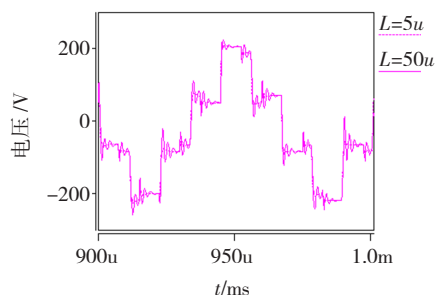
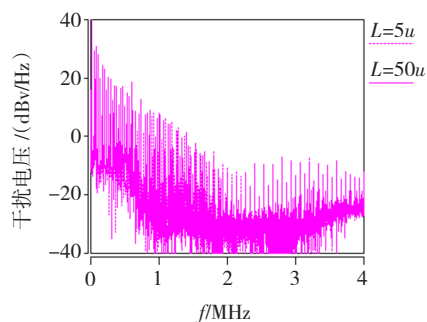
直流电源组主要采用两种固定方式,一种是通过固定在车体的绝缘子支架支撑,另一种不采用绝缘子而直接固定在车体上的支架支撑,两种固定方式导致直流电源组对车体的寄生电容不同,体现在仿真模型中共模电压源等效内阻 C_{in} 的值不同,图5、6针对是否采用绝缘子进行了仿真分析。

图5 $C_{in}=1.2/12nF$ 时域波形图6 $C_{in}=1.2/12nF$ 频域波形

从图5、6可以看出,绝缘子固定电源支架的方式减小了直流电源和车体的等效电容,导致DC-AC的共模电压较多的分配到车体上,在2 MHz以下频段极大的削弱车体的共模电压幅值;较小的电容值把谐振频率推移到更高的频段,因此高频段振荡产生的干扰值比较大。

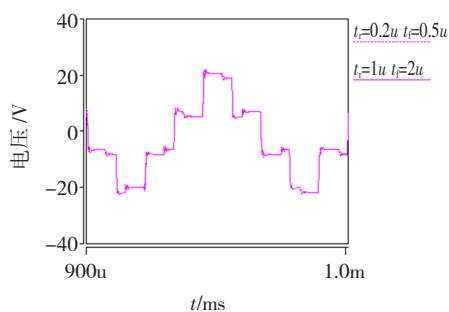
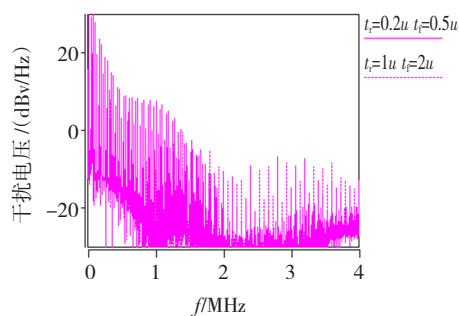
电动汽车形式复杂多样性,决定了连接电源线的多样性,不同的导线形状和长度会极大的影响其高频电感和电阻,针对DC-AC中逆变器到电机不同的电源线,对其主导参数高频寄生电感 L_{ab} ,图7、

8 以不同的数值进行了仿真分析.

图7 $L'_{ab} = 5/50\mu\text{H}$ 时域波形图8 $L'_{ab} = 5/50\mu\text{H}$ 频域波形

从图7、8的仿真结果可以看出,线路中较大电感值会在时域中产生较大的电压过冲,过冲电压的振荡导致在较低频域内干扰较强.

图9、10对DC-DC采用不同的类型的开关器件进行了仿真分析.

图9 $t_r = 0.2/1\mu\text{s}$ 、 $t_r = 0.5/2\mu\text{s}$ 时域波形图10 $t_r = 0.2/1\mu\text{s}$ 、 $t_r = 0.5/2\mu\text{s}$ 频域波形

从图9、10可见,对于DC-DC的开关器件来说,开通、关断过程越快,频域内转折频率越趋向于

较高频段,导致高频处干扰越严重.

通过以上分析可知,在干扰的低频段, V_{inv} 占主导地位,是否考虑 V_{smp} 的影响差别不大, V_{smp} 的影响,主要体现在1MHz以上的较高频段,针对电动汽车不同的系统参数,仿真分析的结果表明;可以采用增大直流电源组对车体的寄生电容,降低开关器件的开关速度,减小电源线的等效电感等方式减小车体的共模电压.

5 结 语

本文以“THS II”为原型,建立了两个电压源共同作用时系统的传递函数,并分析了不同参数时,DC-DC和DC-AC级联的系统的共模电压.结果表明,两个电压源一起作用时,会在高频段产生更高幅值的干扰电压,减小连接线路的寄生电感、电容可以降低电动车体干扰电压的幅值;在允许的情况下,采用上升、下降时间较大的开关器件,也可以在高频处减小干扰的幅值.利用本文的仿真结果,可以使设计者在设计阶段对车体电磁干扰有一个整体的把握,对所关注的频段预先采取必要的措施.具有一定的理论意义和实用价值.

参 考 文 献:

- [1] 吴晓刚,王旭东,井济民. 混合动力汽车电子节气门的模糊自适应PID控制[J]. 哈尔滨理工大学学报,2010,15(1):1-4.
- [2] 崔淑梅,赵天旭. 牵引卡车电传动系统[J]. 电力电子技术,2012,46(1):85-86.
- [3] 周美兰,张昊,卢显淦. 混合动力电动汽车的动力系统参数设计与仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011,16(4):36-39.
- [4] 邓夷,赵争鸣,袁立强,等. 适用于复杂电路分析的IGBT模型[J]. 中国电机工程学报,2010,30(9):1-7.
- [5] 孟进,马伟明. 基于IGBT开关暂态过程建模的功率变流器电磁干扰频谱估计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):16-20.
- [6] 张晓光,和军平,孙力,等. Flyback开关电源近场磁辐射预测与抑制[J]. 电机与控制学报,2010,14(10):21-24.
- [7] MUTOH N, NAKANISHI M, KANESAKI, et al. M. EMI Noise Control Methods Suitable for Electric Vehicle Drive Systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(4): 930-937.
- [8] KAWAHASHI A. A New-generation Hybrid Electric Vehicle and Its Supporting Power Semiconductor Devices[C]//The 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2004: 23-29.
- [9] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A. Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(1): 23-29.

(编辑: 温泽宇)