

文章编号: 1000-582X(2012)12-034-06

电机宽频等效电路模型的快速建模方法

汪泉弟, 孙 宏, 郑亚利, 安宗裕, 彭河蒙

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:提出了电机宽频等效电路模型的建模方法。通过测量获得电机端部阻抗幅频特性, 根据幅频特性的第一个谐振点信息, 将幅频特性曲线划分为若干个区域, 每个区域用一个谐振单元等效, 构建出电机宽频等效电路拓扑; 每个谐振单元的 R 、 L 、 C 参数通过该区域的谐振点和任一非谐振点的频率和对应的阻抗值计算获得。用该方法建立了直流电机和交流电机的宽频等效电路模型, 并在 Saber 软件中进行了仿真。将直、交流电机宽频等效电路模型的阻抗幅频特性仿真结果分别与测试结果和参考文献的仿真结果进行了对比。在直流电机端部阻抗特性拟合频段 0.1~50 MHz 的范围内、交流电机端部阻抗特性拟合频段 0.1~40 MHz 的范围内, 验证了电机宽频等效电路模型的正确性与可行性。

关键词: 直流电机; 交流电机; 阻抗幅频特性; 谐振单元; 宽频等效电路模型

中图分类号: TM13; TM33; TM34

文献标志码: A

Fast modeling of the motor broadband equivalent circuit model

WANG Quandi, SUN Hong, ZHENG Yali, AN Zongyu, PENG Hemeng

(State Key Laboratory of Transmission Equipment and System Safety and Electrical New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper proposes a modeling method of the motor broadband equivalent circuit model. The impedance amplitude-frequency characteristics of the motor terminal through measuring are obtained. The impedance amplitude-frequency characteristics are divided into several regions based on its first resonant point information, and the motor broadband circuit topology is developed with each region equaling a resonance unit. The RLC parameters of resonance unit are extracted through frequency and corresponding impedance of the any non-resonant and resonant point in each unit. This proposed method is used to build DC and AC motor broadband equivalent circuit model. Their impedance amplitude-frequency characteristics are simulated by the Saber software. The measurement results and the simulation result of references are compared. The DC motor simulation results coincide with the measurement results in 0.1~50 MHz, and the AC motor is in 0.1~40 MHz. The results show that the motor broadband circuit model is reliable and feasible.

Key words: DC motors; AC motors; impedance amplitude-frequency characteristics; resonance unit; broadband equivalent circuit model

收稿日期: 2012-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177183)

作者简介: 汪泉弟(1954-), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事电磁场理论及应用、电磁场数值计算及电磁兼容技术等方面的研究, (E-mail) wangquandi@yahoo.com.cn.

对于汽车制造商来说,进行产品的电磁兼容前期设计,是缩短生产周期与降低开发成本的重要保证。电动汽车的雨刮系统和驱动系统工作时产生的电磁干扰是车内主要的电磁干扰源,其中,直流电机是雨刮系统重要组成部分^[1],交流电机是驱动系统的重要组成部分^[2]。国际无线电干扰特别委员会(CISPR, comite international special perturbations radioelectrique)规定的传导干扰频段为 0.15~30 MHz^[3],对于传导干扰的预测^[4-5],系统各部分的宽频电路模型需要覆盖传导干扰规定的频段。电机作为系统的重要组成部分,建立电机的宽频等效电路模型,是预测传导干扰的基础。国内外有很多文献介绍电机的等效电路模型,文献[6]提出了建立直流电机的宽频等效电路的方法,该方法首先通过电机的实际结构构建一个初级模型,初级模型的参数通过不同方式的阻抗测量以及最小二乘法获得,最后对初级模型进行了延伸。虽然该模型精确度高,频率范围上限达到了 1 GHz,但初级模型的参数获取难度大,不易实现。文献[7-9]提出了交流感应电机的建模方法,交流电机等效电路中的参数提取完全通过实验的方式获得,模型的频率上限仅为 10 MHz,且该方法对实验设施要求高,实验过程复杂。文献[10-12]运用电磁场有限元分析(FEM, finite element method)对交流电机的分布参数进行提取,该方法考虑了绕组线圈的集肤效应,邻近效应,以及铁芯的涡流损耗等,但需要知道电机的几何结构和电磁参数,且在软件中建立三维实体模型难度大,难以实施。文献[13]建立了交流电机的行为模型,该方法完全不考虑电机内部结构,用等效电路去拟合电机端部阻抗特性曲线,该方法精度高,通用性强,但没有给出具体的拟合过程。文献[14]仅对交流电机共模等效电路模型进行了研究。

基于上述各种方法存在的问题,笔者提出了根据电机端口阻抗的幅频特性构建电机宽频等效电路的方法,该方法容易实现且通用性强,并能满足预测传导干扰的条件。应用该方法建立了交、直流电机的宽频等效电路模型,并验证了模型的正确性。

1 宽频等效电路拓扑的构建

常见的阻抗幅频特性有 2 种形式,一种是第一个振荡产生波峰,如图 1(a)所示,另一种是第一个振荡产生波谷,如图 1(b)所示。

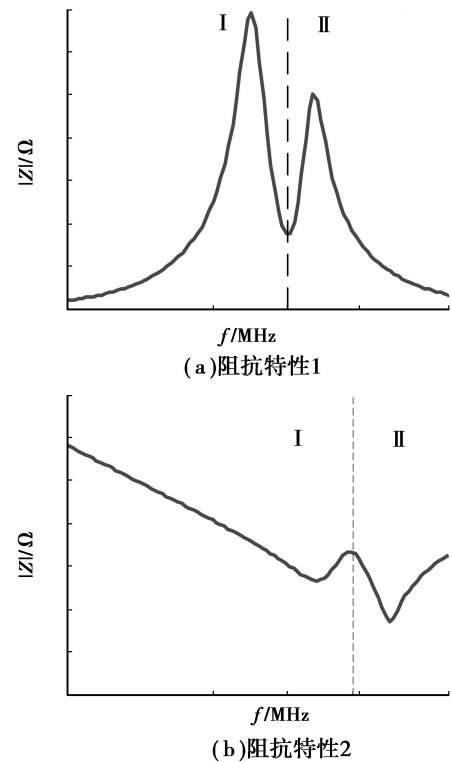


图 1 两种常见的阻抗特性曲线

1.1 并联谐振单元构建宽频等效电路拓扑

由电路基本理论可知,电路发生并联谐振时,阻抗达最大值,在阻抗幅频特性曲线上将出现波峰。所以图 1(a)所示的阻抗幅频特性有 2 个波峰,表明电路在对应的 2 个频点发生了并联谐振。用虚线将图 1(a)分成 2 个区域,每个区域有一个波峰,将每个区域的幅频特性用一个并联谐振单元等效,然后将 2 个并联谐振单元串联就得到了该阻抗幅频特性对应的宽频等效电路拓扑,如图 2 所示。如果阻抗幅频特性第一个振荡产生波峰,且在全频段有 N 个波峰,则用 N 个并联谐振单元的串联电路来等效该阻抗幅频特性。

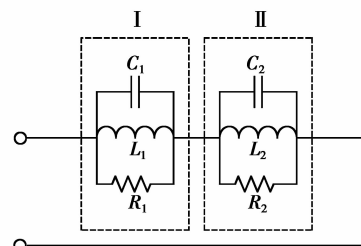


图 2 并联谐振元构造等效电路拓扑

1.2 串联谐振单元构建宽频等效电路拓扑

当电路发生串联谐振时,阻抗达最小值,对应阻抗幅频特性的波谷。图 1(b)所示的阻抗幅频特性有两个波谷,表明电路在对应的 2 个频点发生了串联谐振。用虚线将图 1(b)分成 2 个区域,每个区域有一个波谷,每个区域用一个串联谐振单元等效,然后将两个串联谐振单元并联就得到了该阻抗幅频特性对应的宽频等效电路拓扑,如图 3 所示。若阻抗幅频特性第一个振荡产生波谷,且有 N 个波谷,则用 N 个串联谐振单元的并联电路来等效该阻抗幅频特性。

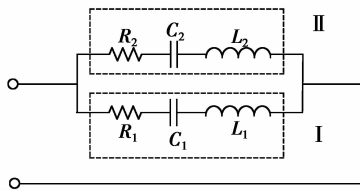


图 3 串联谐振单元构造等效电路拓扑

1.3 近似处理的误差分析

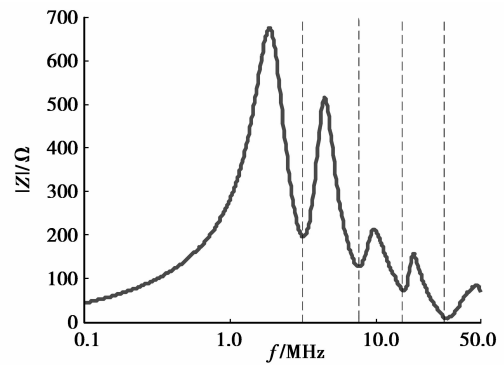
通过建立宽频等效电路拓扑的过程可知,文中提出建模方法在整个幅频特性曲线上按波峰、波谷的个数进行分区,每个区用一个谐振单元等效,相当于把每个区分开考虑,这种近似处理会带来一定的误差。以图 1(a)所示的阻抗幅频特性为例,分成区域 I 和 II 后,区域 I 用并联谐振单元 I 等效,区域 II 用并联谐振单元 II 等效。实际上,对于区域 I 所在的频率范围,谐振单元 II 对图 2 电路的总阻抗是有贡献的,但小于谐振单元 I 在该频段的阻抗,尤其在谐振单元 I 发生并联谐振时的附近频段。由于谐振单元 I 和 II 串联连接,总阻抗可忽略阻抗较小的一个,所以,在确定谐振单元 I 的 R, L, C 参数时,在区域 I 对应的频率范围内,只考虑谐振单元 I 而忽略谐振单元 II 的影响。在确定谐振单元 II 的 R, L, C 参数时,对于区域 II 所在的频率范围,则只考虑谐振单元 II 而忽略谐振单元 I 的影响。同理,对于图 1(b)所示的阻抗幅频特性,分析和处理方法基本一样。唯一不同的是,由于此时电路谐振单元为并联连接,确定谐振单元的 R, L, C 参数时,在每个区域对应的频率范围,电路总阻抗忽略阻抗较大的。

2 直流电机宽频等效电路模型建模方法

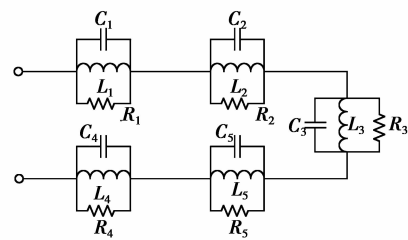
2.1 直流电机等效电路拓扑的构建

图 4(a)为汽车雨刮器普遍采用的 ZD1439 型永磁直流电机阻抗幅频特性 $0.1 \sim 50$ MHz 的实测结果,测量仪器采用 Agilent4294A 阻抗分析仪。从图 4(a)可以看出,在 1.8 MHz 之前的低频段,电机绕组呈感性,随着频率的升高,在电机内部寄生电容、寄

生电感的作用下,幅频特性呈现出振荡衰减的趋势。



(a) 阻抗幅频特性



(b) 宽频等效电路拓扑

图 4 ZD1439 型电机的阻抗幅频特性和电路拓扑

图 4(a)的阻抗幅频特性表明,第一个谐振点出现并联谐振,根据前面介绍的并联谐振单元构建等效电路拓扑方法,将图 4(a)用虚线分成 5 个区域,每个区域包含一个波峰,可用一个并联谐振单元等效该区域的幅频特性,构建出的宽频等效电路拓扑结构如图 4(b)所示。下面要解决的问题是如何获取每个谐振单元的 R, L, C 参数。

2.2 并联谐振单元 R, L, C 参数的提取

图 4(b)的第一个并联谐振单元 R_1, L_1 和 C_1 ,代表图 4(a)中第一个区域的阻抗特性,其幅值为

$$Z_1(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(2\pi f C_1 - \frac{1}{2\pi f L_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_1}\right)^2}}, \quad (1)$$

式中 f 表示频率,当谐振单元发生并联谐振时,设谐振频率为 $f_{1\text{并}}$,对应阻抗值为 $Z_{1\text{并}}$ 。 $f_{1\text{并}}$ 和 $Z_{1\text{并}}$ 可以直接从阻抗特性曲线上读出,因此有

$$f_{1\text{并}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}, \quad (2)$$

$$Z_{1\text{并}} = R_1. \quad (3)$$

另外,在该区域中任意找一个非谐振点 f_1 ,在特性曲线上找出对应的阻抗幅值为 $Z_1(f_1)$,则式(1)为

$$Z_1(f_1) = \frac{1}{\sqrt{\left(2\pi f_1 C_1 - \frac{1}{2\pi f_1 L_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_1}\right)^2}}. \quad (4)$$

对式(2)、式(3)和式(4)联立求解,可解出 R_1 、 L_1 和 C_1 。同理,用相同的方法可求出其余 4 个谐振单元的 R 、 L 、 C 参数,具体参数见表 1。

表 1 ZD1439 型电机宽频等效电路 R 、 L 、 C 参数表

谐振单元	R/Ω	C/pF	$L/\mu\text{H}$
1	672.9	295.7	25.3
2	513.6	230	5.78
3	213.3	212.2	1.31
4	157.1	247.8	0.331 1
5	86.44	96.6	0.113 4

2.3 直流电机宽频等效电路模型验证

将表 1 给出的 R 、 L 和 C 的值,按图 4(b)的电路拓扑在电路仿真软件 Saber 中进行仿真,仿真结果与实际测量的阻抗曲线进行了对比,见图 5。可以看出电机宽频等效电路模型仿真值与实测值吻合得很好,谐振频率和阻抗特性曲线的变化趋势与实测值基本一致。结果表明在 0.1~50 MHz 频率范围内,本文提出的电机宽频等效电路模型能较好的模拟永磁直流电机的阻抗特性。

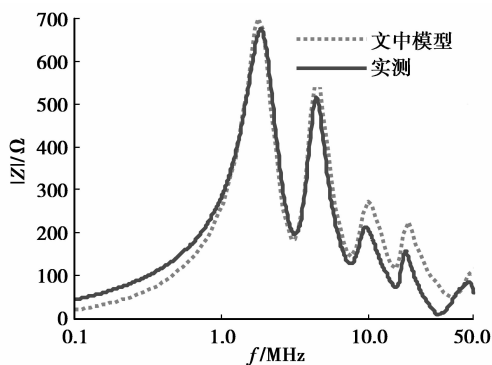


图 5 直流电机宽频等效电路模型仿真结果与实测值对比

3 交流电机宽频等效电路模型建模方法

电动汽车的驱动电机采用三相交流电机,本文采用文献[15]提出的交流电机模型,其单相定子绕组的电路拓扑结构如图 6 所示。模型中的 Z_{dm} 表示

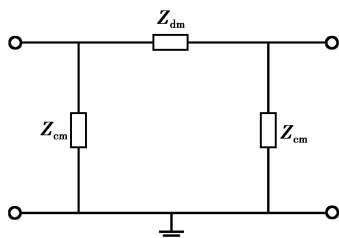


图 6 交流电机单相模型

单相定子绕组的高频阻抗特征,即绕组的差模阻抗。 Z_{cm} 表示定子绕组与机壳(地)之间的高频阻抗特征,即绕组的共模阻抗。对于图 6 的三相交流电机单相宽频等效电路模型需要解决 3 个问题:1)如何获取 Z_{dm} 、 Z_{cm} 的阻抗幅频特性;2)由 Z_{dm} 、 Z_{cm} 的阻抗幅频特性如何构建宽频等效电路拓扑;3)如何得到宽频等效电路的 R 、 L 、 C 参数。

3.1 Z_{dm} 、 Z_{cm} 的阻抗幅频特性

交流电机绕组在寄生参数的作用下,相与相之间是相互联系的,用阻抗分析仪不能直接测量交流电机的单相阻抗特性,更不能直接测量出 Z_{dm} 、 Z_{cm} 的阻抗特性。文献[13]提出了通过不同阻抗测量方式和数据处理获得 Z_{dm} 、 Z_{cm} 阻抗幅频特性的方法,本文根据文献[13]提供的单相绕组模型的 R 、 L 、 C 参数,在 saber 软件中仿真得到了该模型在 0.1~40 MHz 的阻抗幅频特性仿真值,如图 7 所示。利用图 7 的幅频特性,结合本文提出的宽频等效电路建模方法,从而可获得交流电机定子绕组的单相宽频等效电路模型。

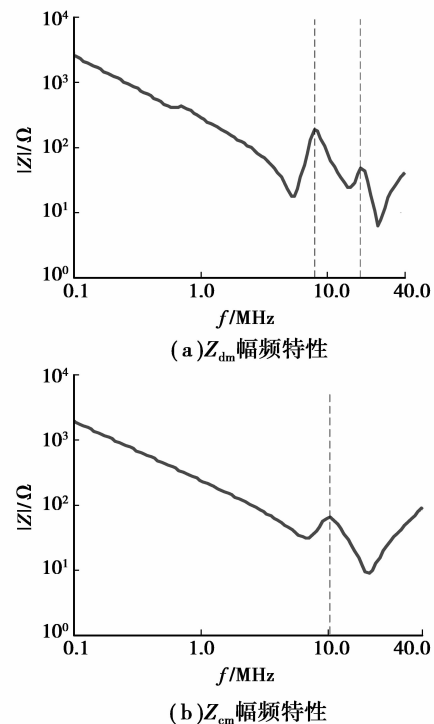


图 7 交流电机单相阻抗的幅频特性

3.2 交流电机宽频等效电路拓扑的构建

图 7 的阻抗幅频曲线第一个震荡均出现波谷,表明此时电路发生串联谐振,根据前面介绍的串联谐振单元构建等效电路拓扑的方法,按波谷个数用虚线将图 7(a)分成 3 个区,图 7(b)分成 2 个区,每个区各包含 1 个波谷。将图 7(a)的每个区用 1 个串

联谐振单元等效, 3 个区共有 3 个串联谐振单元, 然后将 3 个串联谐振单元并联, 形成 Z_{dm} 的电路拓扑。同理, 图 7(b) 的 2 个串联谐振单元并联后, 形成 Z_{cm} 的电路拓扑。将 Z_{dm} 、 Z_{cm} 电路拓扑代入图 6, 最后得到交流电机的单相宽频等效电路拓扑如图 8 所示。

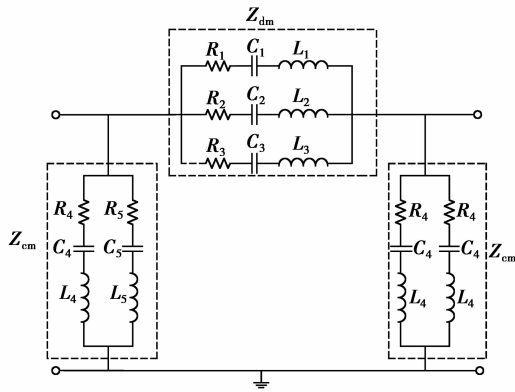


图 8 交流电机单相宽频等效电路拓扑

3.3 串联谐振单元 R 、 L 、 C 参数的提取

图 8 中 Z_{dm} 的第一个串联谐振单元 R_1 、 L_1 和 C_1 等效图 7(a) 第一个区域的阻抗特性, 其幅值为

$$Z_1(f) = \sqrt{R_1^2 + \left(2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C_1}\right)^2} \quad (5)$$

当谐振单元发生串联谐振时, 设此时谐振频率为 $f_{1\text{串}}$, 对应阻抗值为 $Z_{1\text{串}}$ 。 $f_{1\text{串}}$ 和 $Z_{1\text{串}}$ 可直接从图 7(a) 的曲线上读出, 因此有

$$f_{1\text{串}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (6)$$

$$Z_{1\text{串}} = R_1 \quad (7)$$

另外, 在该区域中任意找一个非谐振点, 对应的频率和阻抗幅值分别用 f_1 、 $Z_1(f_1)$ 表示, 同样 f_1 、 $Z_1(f_1)$ 可以直接在曲线上读取, 将其代入(5)式, 可得

$$Z_1(f_1) = \sqrt{R_1^2 + \left(2\pi f_1 L_1 - \frac{1}{2\pi f_1 C_1}\right)^2} \quad (8)$$

联立求解式(6)、式(7)和式(8), 即可解出 R_1 、 L_1 和 C_1 。用相同的方法可提取 Z_{dm} 其它两个谐振单元的 R 、 L 、 C 参数。 Z_{cm} 的参数求取方法与 Z_{dm} 完全样同。 Z_{dm} 和 Z_{cm} 的全部参数见表 2 和表 3。

表 2 Z_{dm} 宽频等效电路参数

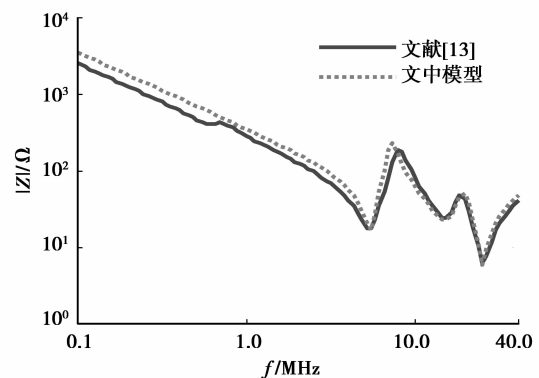
串联谐振单元	R/Ω	C/pF	$L/\mu\text{H}$
单元 1	16.92	215.8	3.98
单元 2	23.47	145.3	0.756 3
单元 3	6	95.67	0.436

表 3 Z_{cm} 宽频等效电路参数

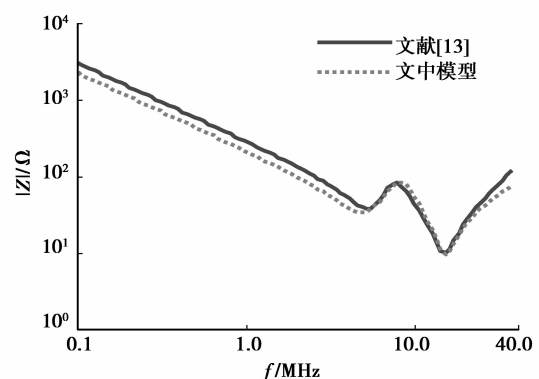
串联谐振单元	R/Ω	C/pF	$L/\mu\text{H}$
单元 1	35.61	518.7	1.66
单元 2	9.501	240.2	0.404 9

3.4 交流电机宽频等效电路模型验证

将表 2 和表 3 中 R 、 L 和 C 的值, 代入图 8 的宽频等效电路拓扑, 并在 Saber 软件中进行仿真, 其仿真结果与文献[13]的仿真结果进行了比较, 见图 9。通过对比可以看出, 在整个 0.1~40 MHz 的频段范围内, 本文建立的宽频等效电路模型的阻抗特性曲线与文献[13]的仿真结果吻合得非常好, 发生串联谐振的频率几乎完全重合, 阻抗特性曲线的变化趋势一致, 说明文中提出的模型能够准确模拟交流电机的阻抗特性。



(a) Z_{dm} 幅频特性对比曲线



(b) Z_{cm} 幅频特性对比曲线

图 9 交流电机宽频等效电路的阻抗幅频特性

4 结 论

提出了直流电机和交流电机宽频等效电路的建模方法。在建模的过程中既不需要电机内部绕组、铁芯等的结构参数, 也不需要电机内部各部分材料

的电磁参数,只需要通过测量获得电机端口的阻抗幅频特性。该方法实施简便,有很好的通用性。建模过程为:1)用阻抗分析仪测量电机端口的阻抗频谱特性,观察阻抗幅频特性在第一个谐振点出现波峰还是波谷;2)在阻抗幅频特性的整个频段上,按波峰(波谷)的个数对其进行分区,使每个区有且仅有一个波峰(波谷)。每个区用一个并联(串联)谐振单元等效,最后将所有并联(串联)谐振单元串联(并联)组成电机的宽频等效电路拓扑;3)根据每个区的谐振点和任一非谐振点的频率和对应的阻抗值计算出该区域的 R 、 L 、 C 参数。

提出的直流电机宽频等效电路模型的频率范围为 $0.1 \sim 50$ MHz,而交流电机宽频等效电路模型的频率范围为 $0.1 \sim 40$ MHz,两者都超过了 CISPR 规定的传导干扰频段 $0.15 \sim 30$ MHz,所以该电机建模方法可以用于传导干扰的仿真预测。

参考文献:

- [1] 孙仁云,付百学. 汽车电器与电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 陈全世,朱家琏,田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [3] Paul C R. 电磁兼容导论[M]. 闻映红,译. 北京:机械工业出版社,2006.
- [4] Chen S, Nehl T W, Lai J S, et al. Towards EMI prediction of a PM motor drive for automotive applications[C]//Proceedings of the Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 9-13, 2003, Miami Beach, USA. Piscataway:IEEE Press,2003,1:14-22.
- [5] Moreau M, Idir N, Le Moigne P. Modeling of conducted EMI in adjustable speed drives[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 665-672.
- [6] Kahoul R, Marchal P, Azzouz Y, et al. HF model of DC motor impedance EMC problems in automotive applications[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 18-22, 2008, Detroit, MI. Piscataway: IEEE Press, 2008:1-5.
- [7] Gries M A, Mirafzal B. Permanent magnet motor-drive frequency response characterization for transient phenomena and conducted EMI analysis [C] // Proceedings of the Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 24-28, 2008, Austin, Tx. Piscataway: IEEE Press, 2008:1767-1775.
- [8] Mirafzal B, Skibinski G L, Tallam R M. Determination of parameters in the universal induction motor model [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1):142-151.
- [9] Mirafzal B, Skibinski G L, Tallam R M, et al. Universal induction motor model with low-to-high frequency-response characteristics [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(5):1233-1246.
- [10] Mohammed O A, Ganu S. FE-circuit coupled model of electric machines for simulation and evaluation of EMI issues in motor drives [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8):3389-3392.
- [11] Maki K, Funato H, Shao L. Motor modeling for EMC simulation by 3-D electromagnetic field analysis[C]// Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May 3-6, 2009, Miami, FL. Piscataway:IEEE Press,2009:103-108.
- [12] Mohammed O A, Ganu S, Abed N, et al. High frequency modeling of PM synchronous machine for use in integrated motor drive[C]//Proceedings of the IEEE Electric Ship Technologies Symposium, May 21-23, 2007, Arlington, VA. Piscataway: IEEE Press, 2007: 245-249.
- [13] Idir N, Weens Y, Moreau M, et al. High-frequency behavior models of AC motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1):133-138.
- [14] 安群涛,姜保军,孙力,等. 感应电机传导干扰频段 II 型共模等效模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 73-79.
- AN Quntao, JIANG Baojun, SUN Li. Novel π -type conducted common-mode EMI model for induction machines[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(36):73-39.
- [15] Boglietti A, Carpaneto E. Induction motor high frequency model[C]//Proceedings of the Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference, May 3-7, 1999, Phoenix, AZ. Piscataway: IEEE Press, 1999, 3: 1551-1558.