风洞变频调速系统电磁兼容仿真研究

李刚，盖文，韩杰

（中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所，四川 绵阳 621000）

摘要：针对风洞静压测试容易受到干扰这一问题，以结冰风洞H桥级联大功率变频调速系统为研究对象，利用ANSYS Electronics Desktop软件探索了变频调速系统电磁兼容“场-路”协同仿真的方法。通过对变频调速系统动力电缆高频参数、输出谐波干扰、线缆串扰和空间辐射干扰建模仿真，得到了系统传导和辐射干扰波形，为解决风洞静压测试受干扰问题提供了方向和数据。通过整改前后的风洞静压测试结果对比，变频器调速系统的干扰得到了有效抑制，保证了静压测试结果达到了精度要求。

关键词：变频调速系统；“场-路”协同仿真；谐波干扰；线缆串扰；电磁辐射

中图分类号：TM28 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd21492

Electromagnetic Compatibility Simulation Research of Variable Frequency Speed Control System for Wind Tunnel

LI Gang，GAI Wen，HAN Jie

（*Facility Design and Instrumentation Institute*，*China Aerodynamics Research and Development Center*，*Mianyang* 621000，*Sichuan*，*China* ）

Abstract: The field-circuit cooperative simulation method of variable frequency speed control system was explored by ANSYS Electronics Desktop，taking H-bridge cascade large power variable frequency speed control system of icing wind tunnel as reaserch object in view of the static pressure interference problem in wind tunnel. The model of high frequency parameter of motor cables，output harmonic interference，cable crosstalk，and space radiated interference of the variable frequency speed control system were constructed. The system donductive interference and space radiated interference were simulated for providing solution and data to resolve the static pressure interference problem. The interference of variable frequency speed control system was hold-up and the measure result of static pressure fulfilled the accuracy by comparing the rectified result and un-rectified result of the static pressure.

Key words: variable frequency speed control system；field-circuit cooperative simulation；harmonic interference；cable crosstalk；electromagnetic radiation

随着微电子学、电力电子技术、计算机技术、自动控制理论等的不断发展，变频调速系统在交通运输、石油、家用电器、军事等领域得到广泛的应用[1]。变频调速系统具有功率因数高、启动平稳、调速范围宽等优点[2-6]。因此，越来越多的连续式风洞采用变频调速系统驱动风扇或压缩机，从而实现风洞风速的精确控制。

但是，变频器调速系统在工作时会对周围的电磁环境造成一定影响，严重时甚至可能造成系统不能正常稳定工作，因此对由变频调速系统的电磁兼容（electromagnetic compatibility，EMC）研究变得尤为重要[7-9]。风洞中存在大量压力、温度、天平等传感器和高精度测量设备，测量精度高，但是风洞现场传感器信号弱，压力和温度传感器信号为4~20 mA，而天平传感器测量信号为mV级，因此传感器信号容易受到现场的干扰而影响其测量精度。

现在变频调速系统的EMC问题受到越来越

作者简介：李刚（1981—），男，硕士，工程师，Email：19093426@qq.com

通讯作者：盖文（1969—），男，硕士，高级工程师，Email：2420427001@qq.com

多的关注和研究。文献[10]通过Matlab和Simplorer联合仿真，研究了三电平变频器传导干扰的仿真和预测。文献[11]研究了电缆对共模干扰的影响。文献[12]研究了PMW逆变器共模干扰和抑制方法。目前对三电平变频器传导干扰和谐波分析的较多，但是对线缆间串扰、辐射场的研究却很少，尤其是H桥级联变频器的电磁干扰研究则更少。而随着风洞等大型设备对变频器功率的需求越来越大，越来越多的特大功率变频器采用H桥级联形式。

本文以结冰风洞变频器调速系统为研究对象，针对风洞静压测试中出现的干扰问题，利用ANSYS公司的Electronics Desktop仿真平台，对结冰风洞变频调速系统进行电磁兼容仿真，查找影响静压测量的干扰因素，为解决风洞静压测量干扰问题提供数据和解决措施。

1　系统组成

结冰风洞变频调速系统由高压开关柜、大功率变频器、异步电机、增量编码器、核心控制PLC、软启动器、温度传感器、压力传感器、振动传感器、远程I/O、伺服驱动器、伺服电机和绝对值编码器等设备组成。具体组成如图1所示。

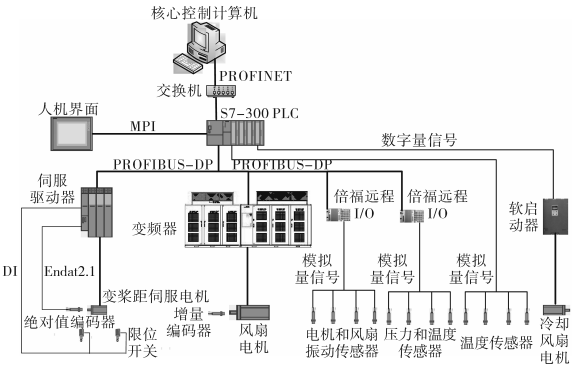

图1　动力系统组成图

Fig.1　The composition diagram of variable frequency speed control system

变频器选用西门子罗宾康完美无谐波系列高压变频器，型号为PH-10-6.9-6000，采用6个单元串联，10.0 kV输入和6.9 kV输出，额定电流660 A，功率单元开关频率为600 Hz，输出相电压等效开关频率为7.2 kHz。电机选用东方电机厂型号为BPY6000-12的变频调速异步电动机，主要技术参数为：12极，额定功率6 000 kW，额定电流625 A，额定电压6 900 V，额定频率47.8 Hz，额定转速475 r/min，功率因数0.83。变频器和电机进线电缆均选择两根并联的YJV22型3×185 mm²铜芯交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆。传感器信号电缆均选择2×0.75 mm²双绞屏蔽电缆。

2　电磁兼容仿真

2.1　仿真原理

仿真原理是：利用ANSYS的电力电子系统仿真工具Simplorer建立移相变压器和变频器的电路模型，利用Q3D提取电缆的寄生参数，并代入到Simplorer的电路模型中，开展变频器传导干扰仿真。将变频器输出接地噪声作为激励源，利用Designer软件实现电缆间串扰的仿真。同时，将变频器输出谐波信号作为激励源，利用HFSS软件实现空间电磁场的仿真。仿真原理如图2所示。

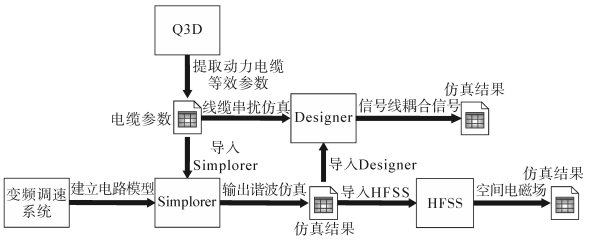

图2　仿真原理图

Fig.2　The principle diagram of simulation

2.2　变频调速系统谐波仿真

大功率变频调速系统的动力电缆较长，在高频情况下电缆的模型比较复杂，通常采用分布电阻R，分布电感L以及分布电容C来建立电缆的高频模型，并且一般情况下可以认为这些参数沿线路均匀分布[13-14]。在变频驱动系统传导干扰建模中，由于IGBT产生的干扰频率较高，且线缆长度与传输信号的波长在同一数量级，此时电机线缆已无法再作为理想传输线考虑，需要建立电机线绳的分布参数模型。电机电缆单位长度高频等效模型如图3所示。

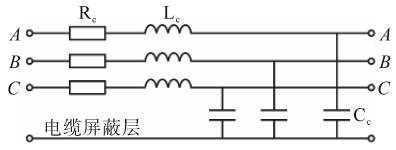

图3　电机单位长度电缆高频等效模型

Fig.3　The unit length high-frequency model of motor cable

由于风洞已经投入运行，且从变频器到电机的电缆距离超过50 m，无法进行对电缆的高频寄生参数进行精确测试，因此根据风洞地沟动力电缆和信号电缆的布置方式，采用Q3D建立动力电缆和信号电缆模型和网格剖分，电缆模型如图4所示，网格剖分如图5所示。

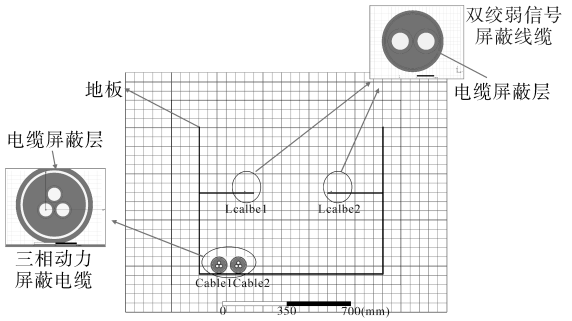

图4　变频器调速系统电缆模型

Fig.4　The cable model of variable frequency speed control system

由于变频调速系统现场干扰以低频为主,频率主要在0.15~30 MHz,因此仿真时,取1 m为单位长度,仿真频率设置为30 MHz,仿真计算结果如图6所示。变频调速系统谐波仿真模型如图7所示。

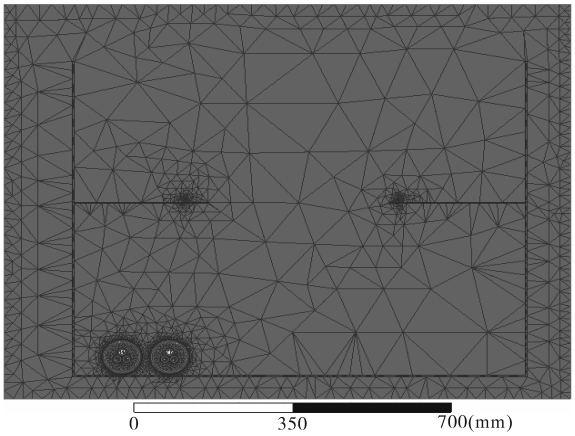

图5　电缆模型网格剖分

Fig.5　The mesh of cable model

Profile | Convergence | Matrix | Tline Data | Mode Data | Mesh Statistics

Conductance Units: mSie　Distributed Max　30 (MHz)　Export...

Capacitance Units: pF　Original　All Freqs

Passivity Tolerance: .0001　Check Passivity　Equivalent Circuit Export...

	Cabel2_shielding (pF/meter)	CABLE1_A	CABLE1_B	CABLE1_C	Cable1_shielding	CABLE2_A	CABLE2_B	CABLE2_C
Freq: 30 (MHz)								
Cabel2_shielding	307.27	-1.3842E-015	-3.0385E-015	2.3588E-015	-25.472	-53.153	-51.856	-51.857
CABLE1_A	-1.3842E-015	139.12	-42.981	-42.982	-53.153	8.1443E-016	-8.4654E-016	1.6051E-015
CABLE1_B	-3.0385E-015	-42.981	142.86	-48.027	-51.855	1.6257E-015	1.3163E-015	-3.5509E-016
CABLE1_C	2.3588E-015	-42.982	-48.027	142.87	-51.857	-3.7014E-015	2.9914E-015	-6.6693E-016
Cable1_shielding	-25.472	-53.153	-51.855	-51.857	311.47	8.3196E-015	-1.3573E-014	-5.107E-015
CABLE2_A	-53.153	8.1443E-016	1.6257E-015	-3.7014E-015	8.3196E-015	139.12	-42.983	-42.982
CABLE2_B	-51.856	-8.4654E-016	1.3163E-015	2.9914E-015	-1.3573E-014	-42.983	142.87	-48.026
CABLE2_C	-51.857	1.6051E-015	-3.5509E-016	-6.6693E-016	-5.107E-015	-42.982	-48.026	142.87
Lcable1_n	2.4136E-017	-3.9328E-018	6.5348E-018	-4.569E-018	9.3155E-019	-4.6481E-018	6.3451E-018	-3.5136E-018
Lcable1_n_1	7.5412E-017	-8.3839E-018	1.1818E-017	-1.4532E-018	4.1731E-018	-6.6146E-018	-1.2814E-017	7.968E-019
LCable1_p	-8.5654E-017	1.983E-017	3.235E-018	-1.1782E-017	-9.6289E-018	1.1958E-019	1.2601E-018	3.8285E-017

图6　电机线缆的高频参数仿真结果

Fig.6　The high-frequency parameter simulation result of motor cable

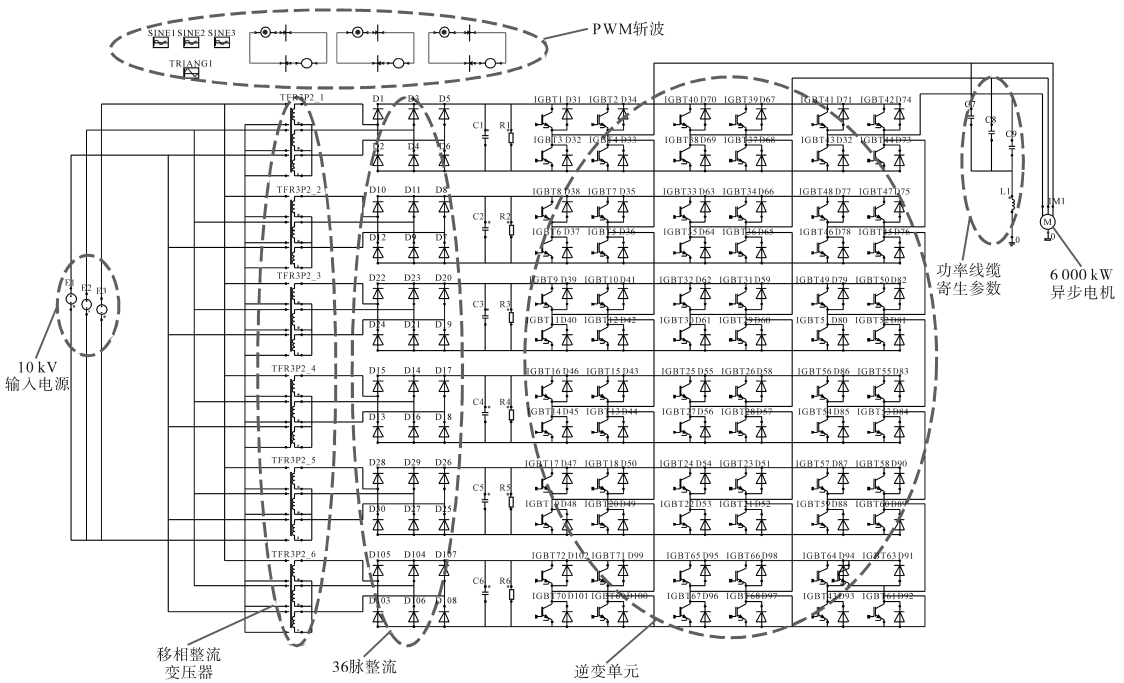

图7　变频调速系统谐波仿真模型

Fig.7　The harmonic simulation model of variable frequency speed control system

通过图6可以得出各相电芯与屏蔽地之间单位长度的寄生电容值约为51 PF。

如图7所示，根据变频调速系统组成，利用Simplorer建立变频调速系统电路模型，包括移相整流变压器模型、变频器整流电路模型、变频逆变电路模型、电机模型、电缆高频参数等。

电机的仿真三相负载波形如图8所示，通过波形可以看出，虽然三相负载接近于正弦，但是波形中存在相当的谐波分量。

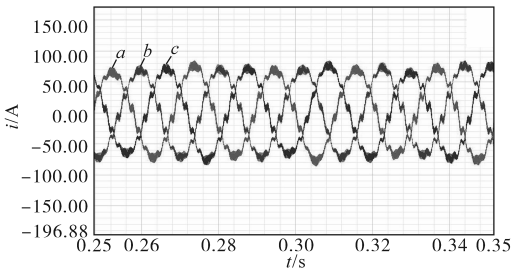

图8　变频调速系统三相输出电流仿真波形

Fig.8　The output three-phase current simulation waveforms of variable frequency speed control system

为了研究变频调速系统输出谐波以及对现场的其他测量设备传导干扰，对变频调速系统输出对地干扰信号的时域和频域波形进行了仿真，仿真结果如图9和图10所示。

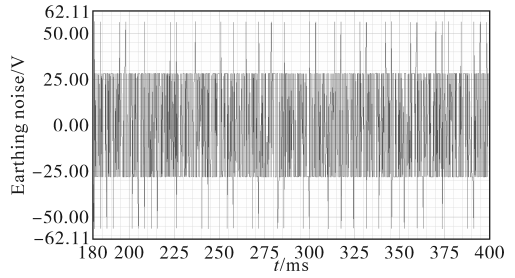

图9　变频调速系统对地干扰时域波形

Fig.9　The time domain waveform of earthing noise from variable frequency speed control system

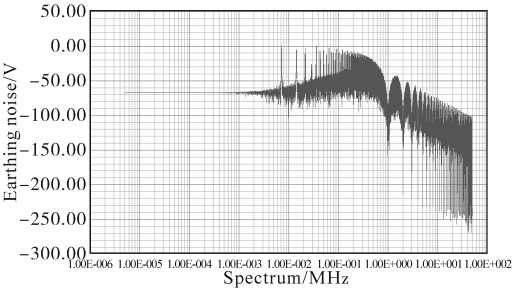

图10　变频调速系统对地干扰频域波形

Fig.10　The spectrum waveform of earthing noise from variable frequency speed control system

通过图9和图10的仿真结果可以看出，变频器调速系统系统对地干扰主要集中在1 kHz~1 MHz之间。

2.3　信号线串扰仿真

将变频器调速系统输出相电压上的谐波作为动力电缆上的噪声源，利用Designer软件建立线缆串扰仿真模型，分别对变频器输出动力电缆单端接地和两端接地时，信号电缆上感应的干扰信号进行仿真，仿真模型如图11所示。

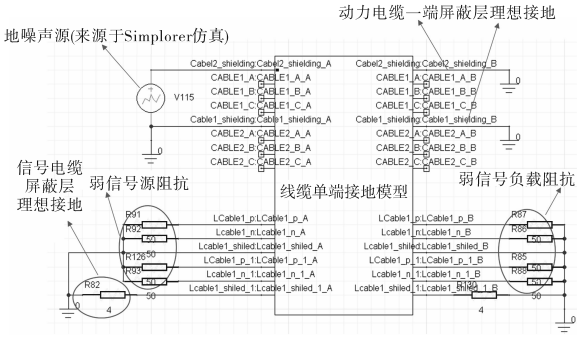

图11　线缆接地串扰仿真模型

Fig.11　Simulation model of cables grounding crosstalk

信号线串扰仿真结果如图12、图13所示。通过仿真结果可以看出，变频器输出动力电缆双端接地时，信号线上耦合的干扰信号要远远小于动力电缆单端接地时的情况，因此变频器输出动力电缆两端接地能够有效降低动力电缆对于信号线的干扰。

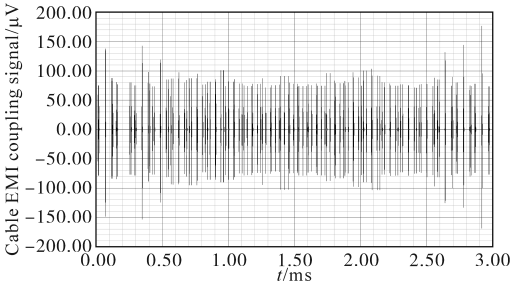

图12　动力电缆单端接地时的仿真结果

Fig.12　Simulation result of single-end earthed power cable

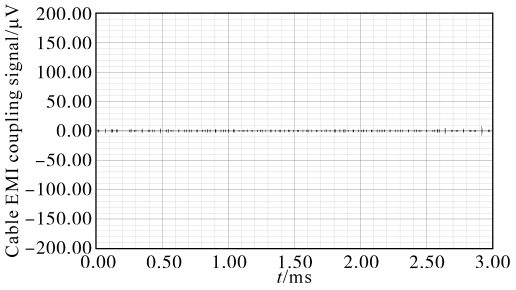

图13　动力电缆两端接地时的仿真结果

Fig.13　Simulation result of two-end earthed power cable

2.4　空间辐射仿真

变频调速系统频率较低，来自控制柜缝隙的电磁泄露几乎可以不计，因此系统中辐射的主要

载体为线缆，一定长度的线缆在某些频段可以表现出高强度天线效应，辐射出电磁能量，所以建模主要对象为线缆模型，另外包含线缆沟槽地板模型等关键结构。采用三维电磁场仿真工具HFSS建立3D模型，如图14所示，设置噪声端口辐射边界等，采用高精度有限元算法求解变频调速系统电缆辐射三维空间电磁场特性，仿真结果如图15所示。

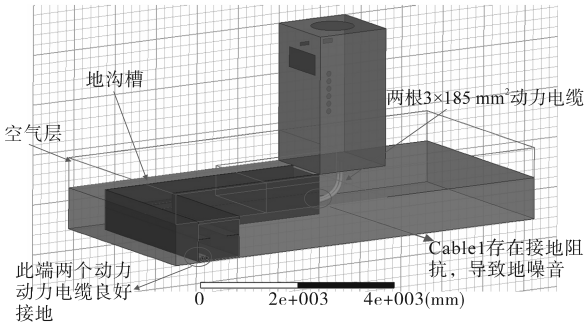

图14　动力电缆三维空间电磁场仿真模型

Fig.14　The three-dimensional electromagnetic field simulation model of power cables

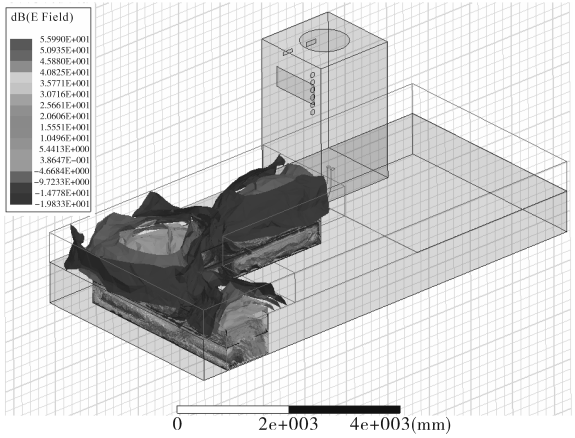

图15　动力电缆三维空间电磁场仿真结果

Fig.15　The three-dimensional electromagnetic field simulation result of power cables

通过仿真结果可以看出，在动力电缆的附近，其30 MHz的电场峰值达到了55.9 dB(μV/m)，超过了GB 4824-2013《工业科学和医疗(ISM)射频设备 骚扰特性 限值和测量方法》中限值要求，如表1所示。

表1　工业设备辐射发射场强限值

Tab.1　Radiation field strength limit of industrial plant

频带/MHz	电磁场强度/dB(μV/m)
30≤f≤230	30
230≤f≤1 000	37

通过对比仿真结果和国家标准可以看出，动力电缆的电磁场辐射强度已经超过了国家标准要求的限值。

3　解决措施及效果

结冰风洞变频器采用6个功率单元H桥级联的形式，移相整流变压器实现36脉整流，因此其电源输入侧谐波很小，且风洞静压测量系统与变频调速系统的采用不同的供电，因此电源侧的谐波干扰对静压测量的影响很小。

而通过分析仿真数据可以看出，影响静压测量系统的电磁干扰耦合途径可能有：接地、空间辐射以及近场耦合。因此根据仿真结果，对现场进行了电磁兼容整改，主要措施包括：

1)单独设置现场静压测量接地，与变频器调速系统接地分开；

2)将变频调速系统的动力电缆采用两端接地；

3)增加测量系统电缆线槽，线槽可靠接地，将静压测量电缆放入线槽，以降低动力电缆的空间辐射对测量电缆的影响。

整改前后的测量结果如图16所示。通过对比可以看出，整改前静压测量受变频调速系统电磁干扰的影响，其静压波动范围为93.4~95.9 kPa，测量平均值为94.6 kPa，因此可以计算出，整改前静压最大测量误差为1.3%，远超过静压测量0.1%的精度要求；而整改后的静压波动范围为94.65~94.68 kPa，根据计算其测量精度达到了0.08%，满足静压测量精度要求。

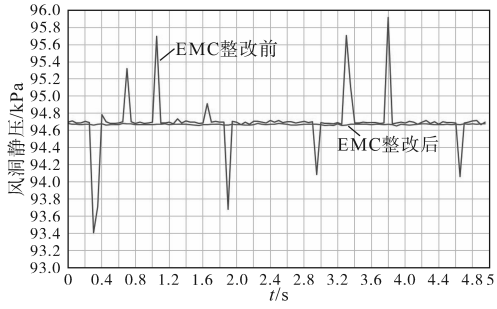

图16　电磁兼容整改前后静压测量结果对比

Fig.16　The static pressure measurement comparison between the rectified and un-rectified EMC solution

4　结论

针对风洞现场测量系统容易受到变频调速系统电磁干扰的问题，利用ANSYS Electronics Desktop软件，通过采用电磁兼容“场-路”协同仿真的方法，对H桥级联型大功率变频调速系统的EMI发射、信号线串扰以及空间辐射等电磁兼容

问题进行了仿真，为解决静压测量电磁干扰问题提供了数据和解决措施，并为风洞大功率变频调速系统电磁兼容设计提供了数据依据。

参考文献

[1] 陈灏. 变频调速系统电磁兼容研究[J]. 自动化仪表，2015，36(9)：57-60.

[2] 刘永喜，舒朝君，李纪三. 变频调速传动系统的电磁兼容分析[J]. 机床电器，2007(6)：12-16.

[3] 朱玉堂，许力. 变频器的电磁兼容及抑制[J]. 机电工程，2005，22(5)：40-43.

[4] 平华，蔡青. 变频调速的电磁兼容设计[J]. 变频器世界，2007(6)：105-109.

[5] 毛军. 变频系统电磁兼容的对策[J]. 纺织机械，2007(2)：18-19.

[6] 曾令华，程亮，张靖宗. 交流变频调速系统仿真建模及谐波特性分析[J]. 发电技术，2019，40(3)：294-299.

[7] Yang Xin，Long Zhiqiang，Wen Yanghai，*et al*. Investigation of the trade-off between switching losses and EMI generation in gaussian S-shaping for high-power IGBT switching transients by active voltage control[J]. IET Power Electronics，2016，9(9)：1979-1984.

[8] 胡亚辉，张卫东，张雷，等. UPFC换流阀IGBT模块近场电磁骚扰分布特性研究[J]. 电气技术，2015，32(9)：1-6.

[9] Yang Xin，Yuan Ye，Zhang Xueqiang，*et al*. Shaping highpower IGBT switching transitions by active voltage control for reduced EMI generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2015，51(2)：1669-1677.

[10] 曹海洋，侯峰，刘帅，等，基于联合仿真的变频调速系统传导EMI预测研究[J]. 电气传动，2019，49(7)：90-93.

[11] Xie Pengkang，Lu Jiazheng，Chen Guozhu，*et al*. Influence of motor cable on common-mode currents in an inverted-fed motor drive system[J]. 信息与电子工程前沿(英文)，2018(2)：273-285.

[12] 蒋保涛，游家发，朱小祥. PWM逆变器共模电磁干扰源及抑制技术探究[J]. 电力电子技术，2011，45(11)，73-75.

[13] 马洪飞，徐殿国，陈希有，等. PWM 逆变器驱动异步电动机采用长线电缆时电压反射现象的研究[J]. 电机工程学报，2001(11)：109-113.

[14] 李晓慧，王卫东. 变频器引接电缆中的高次谐波影响及抑制[J]. 驱动与传动，2006(22)：161-163.

收稿日期：2020-02-19
修改稿日期：2020-03-14

(上接第74页)

[10] Wang C，Ma X，Chen J，*et al*. Information extraction and knowledge graph construction from geoscience literature[J]. Computers & Geosciences，2018，112：112-120.

[11] 高泽璞，赵云，余伊兰，等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(2)：34-43.

[12] 冯新翎，何胜，熊太纯，等. “科学知识图谱”与“Google知识图谱”比较分析——基于知识管理理论视角[J]. 情报杂志，2017，36(1)：149-153.

[13] Zhu G，Iglesias C A . Sematch：semantic similarity framework for knowledge graphs[J]. Knowledge-based Systems，2017，30：30-32.

[14] 刘峤，李杨，段宏，等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机研究与发展，2016，53(3)：582-600.

[15] Xu X，Li K，Sun Q，*et al*. The line loss calculation of distribution network based on power GIS[C]//2011 Asia-Pacific Power & Energy Engineering Conference，IEEE，2011.

[16] 王奇，庄远灿，阎帅，等. 基于随机矩阵理论的交直流输电通道线损大数据关联特性分析[J]. 电力自动化设备，2018，38(5)：70-76.

[17] Feng N，Yu J. Low-voltage distribution network theoretical line loss calculation system based on dynamic unbalance in three phrases[C]//International Conference on Electrical & Control Engineering，IEEE，2010.

[18] 肖勇，赵云，涂治东，等. 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(11)：37-43.

[19] 李亚，刘丽平，李柏青，等. 基于改进K-Means聚类和BP神经网络的台区线损率计算方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(17)：4543-4551.

[20] 胡煜州. 一种推演格及基于推演格的推理方法：中国，CN201610985211.4[P].2017-03-22.

收稿日期：2020-03-10
修改稿日期：2020-03-20