

电抗器阻抗特性的仿真

李小满, 张 乐

(南车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 机车电抗器是用于高铁牵引变流器前后端的重要滤波部件,其阻抗频谱特性分析是机车电抗器设计的重要指标,决定电抗器的滤波范围和牵引变流器的输出特性。针对提高机车配套设施设计制造及运行的安全性、可靠性问题,以机车电抗器为研究对象,仿真分析了电抗器的阻抗频谱特性。介绍了采用有限元软件分析计算出电抗器在高频模式下的电容、电感和电阻等电参数值的方法,然后将电参数代入建立好电抗器的电等效模型,通过仿真计算得到了阻抗频谱的特性曲线;最后,使用扫频分析仪对电抗器进行了阻抗频谱特性测量试验,获取了其测量阻抗特性曲线,与仿真曲线比较,验证了仿真方法的正确性和结果的准确性。研究结果为机车电抗器可靠性设计及运行安全提供了重要依据。

关键词: 电抗器;分布电容;电感;建模

中图分类号: TM47

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)07-0874-04

Simulation impedance characteristic of reactor

LI Xiao-man, ZHANG Le

(CSR ZhuZhou Electric Company Limit, ZhuZhou 412001, China)

Abstract: The locomotive reactor is an important element in the high-speed rail traction converters filter. Simulating impedance spectrum features of the reactor is an important indicator for design, which is the decided by the reactor filter range and the output characteristics of converter. Aiming at improving the security and reliability of the design, manufacture and operation. Taking the locomotive reactor as the research object, the impedance spectrum features of the reactor were simulated. Equivalent lumped circuit model was established, the capacitance, inductor, impedance of the reactor was calculated using the finite element analysis in the high frequency. Then the simulation curve for impedance spectrum features of the reactor was obtained using the value through electric equivalent model. At last, impedance spectrum features test experiment of the reactor was completed using sweep frequency analyzer. Compared to the test curve and the simulation cure, the results indicate that the simulation method is correct and the simulation is accurate. The research results provide an important basis for the reliability design and operation safety of locomotive reactor.

Key words: reactor; distribution capacitance; inductance; modeling

0 引 言

在各种电感线圈中,存在一个共性问题——由于层间及匝间电容与电感的相互作用,电感线圈具有自激振荡的谐振频率,当外部激励接近谐振频率时,使得线圈的阻抗特性发生重大改变,导致线圈失效^[1]。电抗器是用于高铁牵引变流器前、后端的重要滤波部件。

来自牵引变流器的谐波激励、电抗器产生的谐振效应,不但使电抗器丧失了滤波功能,而且改变了牵引变流器的输入、输出阻抗特性,造成整个牵引系统对变流器的不匹配,危害整个牵引系统的安全运行。

针对上述问题,本研究主要利用有限元软件提取电抗器的电参数,加入到建立好电抗器集总电路模型中,接着运用数学软件计算集总电路模型得到电抗器

在使用频段的阻抗特性,通过与实际试验测量的阻抗特性进行比较,验证仿真结果较高的准确性。

1 电抗器集总电路模型建立和电导计算

1.1 模型建立方法

无论何种绕制方法(饼式绕法或层式绕法),电抗器总可以等效为如图1所示的集总电路模型^[2],模型中的每一个单元都通过单层(饼)或几层(饼)线圈等效而成^[3],集总电路模型的频段有效性依据单元的间隔距离而定,将一层(饼)划分为几个单元可以有效地增加集总电路模型的频段有效范围。但也更大增加模型的复杂度^[4],而将几层(饼)等效为一个单元虽可以减小模型的复杂度和计算量,但也限制了总电路模型的应用范围。一般而言,使用单层(饼)作为一个电路单元进行细化,可以满足电抗器在牵引系统中的使用频段。而由于受传输线效应的影响,更进一步地进行过于细致的单元划分并不能使仿真结果在高频领域与实际情况很好地一致。

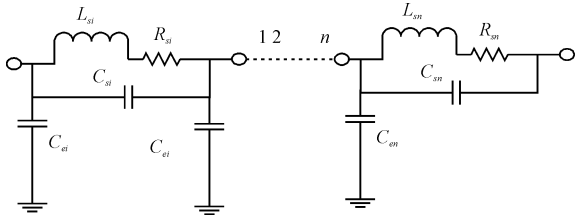


图1 等效集总电路模型

其中各参数如下:

- C_{si} : 每层(饼)等效分布电容
- L_{si} : 每层(饼)自感和层(饼)之间的互感
- R_{si} : 每层(饼)电阻及层(饼)之间的互阻
- C_{ei} : 每层(饼)对地等效分布电容

该模型忽略了每层(饼)间因涡流效应导致的互电阻以及每层(饼)间及其对地的绝缘电阻,因为这些参数主要涉及到阻抗特性的幅值大小,而对阻抗频率特性的影响很小。

1.2 电导的计算公式

分析集总电路模型,利用节点电压法和拉普拉斯方程^[4-5]可建立集总电路的电导线性方程组 $I_{ln} = Y \cdot U$,其转化为矩阵如下:

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad (1)$$

$$Y_1 = A \cdot Z_1 \cdot A^T \quad (2)$$

$$Z_1 = (R_s(s) + S \cdot L_s(S)) / (1 / (S \cdot C_s)) \quad (3)$$

式中: Y —总电路电导; Y_1 —各个层(饼)的电导; Y_2 —各

个层(饼)对地的电导; A —一线点电路转换矩阵; $S=j\omega$ 。

通过将不同频率的 S 值代入到公式(1)中就能获得与频域相关的电导曲线,其为频域下阻抗特性曲线的倒数。 A 为点线转化矩阵,用于将单元线电流转化为节点电流,其推导如下: I_{ln} 为节点电流、 I_n 为线电流,等效电路如图2所示。

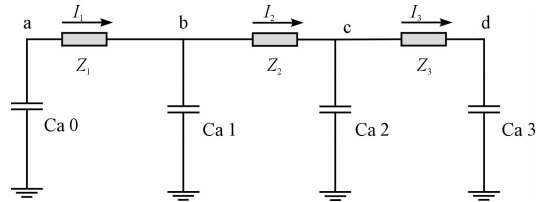


图2 线电流与节点电流等效电路图

则:

$$\begin{aligned} I_{la} &= I_1 \\ I_{lb} &= -I_1 + I_2 \\ I_{lc} &= -I_2 + I_3 \\ I_{ld} &= -I_3 \end{aligned}, I_L = A \cdot I_B, \text{其中 } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

同理可得单元线电压转化为节点电压的矩阵:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_a - U_b \\ U_2 &= U_b - U_c \\ U_3 &= U_c - U_d \end{aligned}, \text{其中 } B = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$U_B = B \cdot U_N$$

由上式可得: $B = A^T$

2 电参数的提取

2.1 分布电容

电抗器线圈为层式绕制,在若干层线圈间存在导气通道,电抗器剖视图如图3所示。由于导气通道两边线圈的直径差异过大,使得实际中导气通道两边线圈的电压分布会有很大差异,不能简单地认为电压等电位的分布在各个层上,所以需要分别计

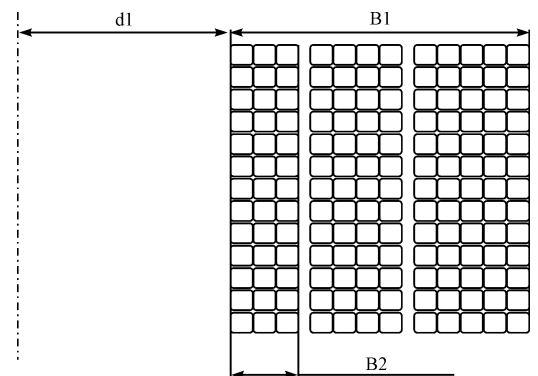


图3 电抗器剖视图

算导气通道两边线圈的电容^[5]。同时由于层与层之间的间隙极小,可以忽略非相邻层的层间电容。

对于这种不规则表面,不管绕组结构如何,线匝和线饼间等效电容的计算式都能按照能量守恒原理推导出来的^[6]。本研究假定出电压在线匝内的分布均匀(无气道分割的若干层绕组由于其内部每层绕组相互间的电感、电容差异很小,近似认为其上面各匝线圈电压分布是均匀的),利用有限元软件仿真计算得到整个电抗器的电场能量,再根据 Stein 法^[7]的原理将电场能量等效到各层绕组。最后利用能量法计算出各层绕组的等效电容。能量法公式如下:

$$E = (C \cdot U^2) / 2 \quad (6)$$

式中: C —绕组等效电容; U —绕组施加电压; E —在施加电压下绕组的电场能量。

同样,每层对地的电容也可用能量法计算出。

2.2 电感和电阻

本研究利用有限元软件计算在额定电流下通过各绕组上的电压来直接计算各层绕组的自感、互感和电阻,计算公式如下:

$$U = I_0(R + j \cdot w \cdot L) + I_1 \cdot j \cdot w \cdot M \quad (7)$$

式中: I_0 —绕组通过的电流, I_1 —邻近绕组通过的电流。

值得注意的是无论电抗器有无铁芯,由于趋肤效应和邻近效应的影响^[8](有铁芯时需考虑涡流对磁导率的影响),在不同频率下的自感、互感和电阻都是不同的,如图4、图5所示。根据仿真结果可以看出,在低频、中频和高频段自感、互感和电阻有着很大的差异,所以对于频段跨度很大的阻抗特性仿真,需要把自感、互感和电阻看成一个随频率变化的参数。

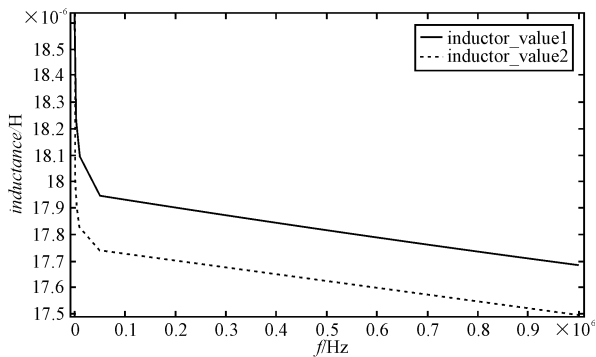


图4 某层绕组自感值(实线)和其对邻近层的互感值(虚线)随频率的变化

3 试验测量及比较

本研究依据电抗器的集总电路模型和 1.2 的电导

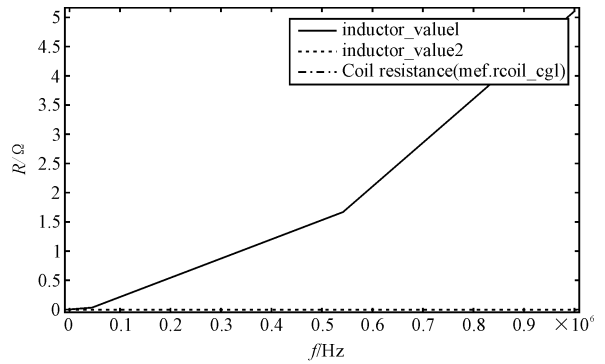


图5 某层电阻值随频率的变化

计算公式编写算法^[9],并代入提取的电参数,得到电抗器的仿真阻抗频谱图如图6所示。

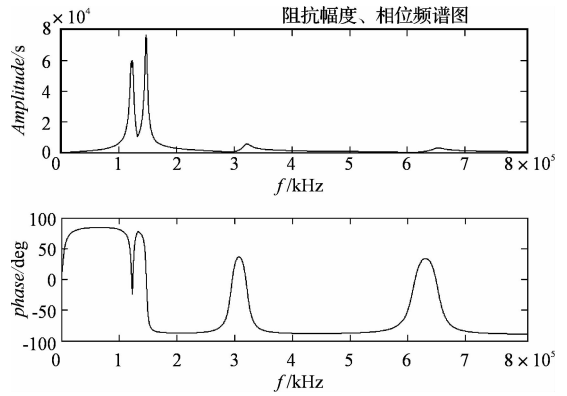


图6 阻抗特性仿真曲线

试验采用扫频分析仪组成的阻抗分析系统进行了测量,扫频分析仪输出 50 Hz ~ 1 000 Hz 频率范围的正弦波信号对变频器进行扫频,采集变压器的电流波形,利用电压、电流的绝对值之比获得阻抗绝对值,通过系统软件将其值绘制随频率变化的阻抗特性曲线如图7所示,利用电压信号、电流信号随频率变化的相位差获得阻抗相位值的变化曲线如图8所示。

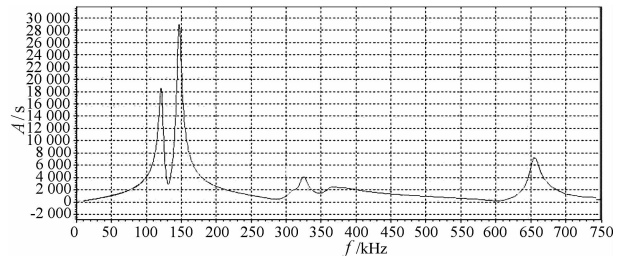


图7 实测阻抗特性(幅度谱)

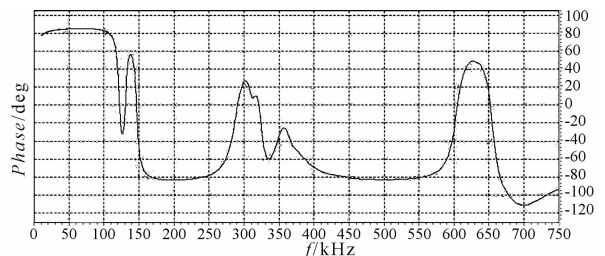


图8 电抗器实测阻抗特性(相位谱)

通过图6~8对比可知,在50 kHz~700 kHz频率变化范围内,实验测量电抗器的阻抗特性曲线与仿真曲线整体变化趋势一致,其幅值跃变与相位反向的频率点保持一致,且发生谐振的频率点基本重合,验证了电抗器阻抗仿真方法的正确性和仿真结果的准确性。对于阻抗特性曲线与实测结果存在的部分谐振幅值、相位差异,主要是因仿真中未考虑涡流损耗导致的随频率变化互阻及测量电阻的影响引起的。

4 结束语

本研究以机车电抗器为研究对象,建立了集总电路模型,研究分析了机车电抗器的阻抗频谱特性。为验证仿真方法的正确性和仿真结果的准确性,使用扫频分析仪对电抗器进行了阻抗频谱特性测量试验。结果表明,在50 kHz~700 kHz频率变化范围内,实验测量的阻抗特性曲线与仿真曲线整体变化趋势一致,其幅值跃变与相位反向的频率点保持一致,且发生谐振的频率点基本重合。充分验证了电抗器阻抗特性仿真方法的可靠性,结果的准确性,为机车电抗器可靠性设计及运行安全提供了重要参考。

参考文献(References):

[1] ABETTI P A. Transformer models for the determination of transient voltages[J]. **AIEE Transactions.**, 1953, 72(2):

468-480.

- [2] RAHIMPOUR E, CHRISTIAN J, FESER K, et al. Modeling of a transformer winding for calculation of its transmission function[J]. **Elektrie**, 2000, 54(2): 18-30.
- [3] 孙海峰. VFTO作用下变压器绕组中波过程及谐振研究[D]. 保定:华北电力大学电气工程学院, 2004: 26-53.
- [4] RAHIMPOUR E, CHRISTIAN J, FESER K, et al. Transfer Function Method To Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings [J]. **IEEE Transactrons on PD**, 2003, 18(2): 493-505.
- [5] BJERKAN E. High frequency modeling of power transformers Stresses and Diagnostics [M]. Trondheim: Norwegian University of Science and technology, 2005.
- [6] OKUYAMA K. Effect of series capacitance on impulse voltage distribution in transformer windings [J]. **Electrical Engineering in Japan**, 1967, 87(1): 27-34.
- [7] STEIN G M. A study of the initial surge distribution in concentric transformer windings [J]. **IEEE Transactions on power Apparatus and systems**, 1964, 83(9): 877-893.
- [8] OKUYAMA K. A numerical analysis of impulse voltage distribution in transformer windings [J]. **Electrical Engineering in Japan**, 1967, 87: 80-88.
- [9] LEIBFRIED T, FESER K, Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method [J]. **IEEE Transactions on PD**, 1999, 14(4): 1333-1341.

[编辑:李辉]

(上接第865页)

过长时间放电实验和在电机负载下的谐波分析实验验证了模型的正确性,为后面的系统仿真及滤波优化奠定了基础,但是该模型在SOC过高或过低时误差偏大,尚需进一步完善。

参考文献(References):

[1] 卢少武. 基于永磁同步电机的电动汽车调速系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学信息工程学院, 2009.

[2] 杨兴辉. 电动汽车驱动系统试验平台的控制研究[D]. 北京:北京工业大学机电学院, 2011.

[3] 夏晴. 电动汽车用锂离子电池荷电状态估计算法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学航天学院, 2011.

[4] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2004.

[5] 陈全世, 林成涛. 电动汽车用电池性能模型研究综述[J]. **汽车技术**, 2005(3): 1-5.

[6] CHENG Min, GABRIEL A. Accurate electrical battery model

capable of predicting runtime and I-V performance[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2006, 21(2): 504-511.

- [7] 邵海岳, 钟志华, 何莉萍, 等. 电动汽车动力电池模型及SOC预测方法[J]. **电源技术**, 2004(10): 637-640.
- [8] 周翔, 杨林, 羌嘉曦, 等. 电动车用新型复合电源系统的设计[J]. **机电工程技术**, 2012, 41(3): 7-11.
- [9] KNAUFF M, MCLAUGHLIN J, DAFIS C, et al. Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed [C]// Proceedings of the ASNE Intelligent Ships Symposium. Philadelphia: [s. n.], 2007.
- [10] 赵仁德. 变速恒频双馈风力发电机交流励磁电源研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院, 2005.
- [11] 洪乃刚. 电力电子和地理拖动控制系统的MATLAB仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [12] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.

[编辑:李辉]