

基于小波变换的实心转子永磁电动机谐波转矩的实验研究

王琛, 张玉婷, 申霞

(江苏省电力公司连云港市供电公司, 江苏 连云港 222000)

摘要: 本文对实心转子永磁同步电动机的谐波转矩进行了实验研究。首先对谐波转矩测取的实验方案进行了设计, 并在永磁电机测试平台上通过实验测定实心转子永磁同步电动机的稳态转矩。然后通过小波算法对测取的实验数据进行了处理, 将处理后的数据作为初值进行时步有限元计算。最后将负载转矩的实验结果与时步有限元的仿真结果进行了对比和分析, 两者结果基本一致。文中所得研究成果对于永磁电机谐波转矩的测试研究以及实验数据的处理具有参考价值 and 积极意义。

关键词: 永磁电机; 小波分析; 转矩波动; 自启动

0 引言

近年来高效节能电机逐步应用在各个领域, 对自启动永磁同步电动机的稳定性能需求也越来越高。反映电机稳定的重要指标之一是稳态转矩, 因此转矩波动引起的电机振动、噪声甚至是安全运行, 直接影响着电机的应用前景。忽略工艺影响, 引起实心转子永磁同步电动机转矩波动的主要原因在于定转子齿结构的不同和绕组的排列不同^[1], 进而使自启动永磁同步电机磁路和参数的测量计算其量值上具有特殊性和复杂性, 这使得转矩分析比较困难。相比于异步电动机, 永磁同步电机有退磁、牵入同步、失步及空载感应电势与电源电压匹配等特殊问题^[2~4]。

目前实验中针对永磁电机测量转矩的方法很多^[5~6], 本文以一台 22 千瓦 8 极实心转子自启动永磁同步电动机为例, 基于测试平台上的高精度扭矩测试仪测试了电机空载和负载状态下的稳态转矩。在实际测试过程中, 针对永磁同步电机退磁、牵入同步等问题设计了实验方案, 解决了永磁体退磁状态下电机转矩的测量。由于传感器的非线性, 外部电磁干扰, 电机内部结构非对称等的影响, 无法得到完全稳定的转矩信号, 从而导致测量结果产生偏移, 影响了实验精度。针对实验数据的误差和对转矩的谐波分析, 本文用小波算法对实验数据进行处理。消除了噪声和高次谐波对实验结果的影响, 所得结果和时步有限元仿真结果对比基本一致, 得出实验方案以及小波

分析的可行性和正确性。

1 实验方案设计

上位机软件提供整个永磁电机测试系统人机交互平台, 通过LABVIEW编程实现系统初始化、试验项目选择、数据存储、报表生成, 以及与下层软件的通信交互^[2]等。

永磁电机测试平台根据需要可有多种不同的方案。本文介绍一种针对永磁同步电动机负载和空载运行实验的实用方案, 由磁粉制动器、直流电机、扭矩仪、被试电机和负载箱等组成。其中: 直流电机既可运行于电动机模式, 作为被试永磁电机的驱动装置; 又可运行于发电机模式, 作为被试永磁电机的动态负载。当模拟被试电机负载启动时, 直流电机作为发电机运行, 通过调节直流机励磁及负载, 可模拟不同功率等级的动态负载, 用于测试启动转矩、牵入转矩等动态转矩以及不同工况下的稳态转矩; 磁粉制动器也可作为被试永磁电机的负载, 主要提供静态负载, 以便测试堵转转矩; 负载箱也可以作为被试永磁电机的静态负载。本文就被试电机稳态负载波动问题进行实验, 直流机运行于发电机状态并接电阻箱作为静态负载, 利用测试平台上的高精度扭矩测试仪提供转矩信号和转速信号, 与转矩处理单元配合, 可以测出每 0.1ms 的转矩变化。

首先调节直流电机励磁进行被试电机并网试验。打开永磁电机微机综合测试平台, 系统初始化, 实验数据采集存储通过上位机软件 LABVIEW 编

程实现, 下层软件使用 MATLAB 编程实现小波分析和傅里叶分解实现被试永磁同步电动机负载电流和负载转矩谐波分析。

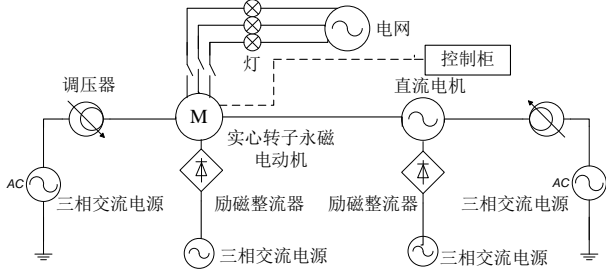


图1 实验接线示意图

图 1 为实验接线示意图, 其中控制柜代表永磁电机测试平台, 测量实验中的实时数据。调压器和励磁整流器分别调节电机电枢电压和励磁电流。图 2 自启动永磁同步电动机实验流程图。

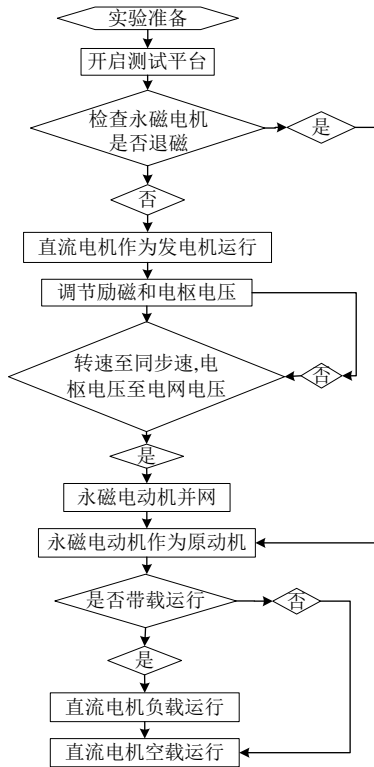


图2 自启动永磁同步电动机实验流程图

2 自启动永磁同步电动机的实验测试

2.1 自启动永磁同步电动机退磁性能测试

永磁同步电动机正常运行时, 定子旋转磁场带动转子磁场以同步转速运转, 同步电磁转矩为驱动性质, 与转子轴上的机械负载转矩相平衡。

永磁电机退磁后, 转子磁势明显减弱, 同步电磁转矩减小, 带载能力减弱。因此实验前应首先检

查被试电机是否退磁, 如果被试电机退磁, 显著的指标是空载感应电动势会明显降低, 另外带载运行时需要从电源吸收大量的无功功率建立转子磁场, 因此功率因数会很低。

实验首先用直流电机把永磁电机拖入同步速, 直流电机运行于电动机模式, 作为被试永磁电机的驱动装置。之后使直流电机运行于发电机模式, 使之空载运行, 作为永磁电机的负载。

完成实验台接线后, 打开电源控制柜电源, 首先打开测试软件, 运行后程序自动进入主页面, 按主页面内的公共安全检查内的提示逐项进行检查, 当某项条件满足后点击该项。当所有条件满足后在主页面相应控件中填入被测电机的额定功率、额定电压(线电压)、额定转速和环境温度等参数; 之后切换至空载起动页面, 按空载安全检查内容逐项检查, 使所有条件满足要求。在空载起动设定中设置相应的起动条件“自启动”, 点击“空载起动电机”按钮, 完成被试电机起动。通过上位机软件 LABVIEW 采集被试电机的空载电势、电压和电流, 计算被试电机的功率因数。

经实验测试处理计算得到被试实心转子永磁电机功率因数若是很低, 证明电机已经处于退磁状态。

2.2 实心转子永磁电动机并网实验

永磁同步电动机退磁后, 带负载能力大为减弱, 通过把永磁同步电动机接入电网, 吸收无功功率建立磁场以达到带负载的效果。实验通过直流电机运行于电动机模式, 作为被试永磁电机的驱动装置, 把被试电机牵入同步转速附近, 同时通过调压器调节被试电机电枢电压和电网电压幅值接近, 满足并网条件, 并通过暗灯法把被试电机接入电网。此时由于永磁电机退磁, 电机处于径向运行状态从电网吸收功率用以补偿永磁电机退磁的影响。被试电机接入电网可以认为电机以同步速稳定运行, 可以驱动直流电机, 这时直流电机运行于发电机模式, 作为被试永磁电机的动态负载。待被试电机和直流电机保持稳定运行一段时间, 使直流电机带负载箱, 完成实验台操作。

2.3 永磁电动机驱动直流机空载运行

待实心转子永磁电机并网实验完成之后, 打开测试软件重复永磁电机退磁测试的前期准备操作,

在负载起动设定中设置相应的起动条件“自启动”，点击“空载起动电机”按钮后电机起动；电机运行后，右上方的示波器上可实时显示电机各电气量的瞬时值，中间的示波器显示实时转速转矩；另外其他显示控件可显示有功、无功、电机效率及有效值等；试验完成后生成永磁电机空载运行电枢电压、电枢电流和空载稳态转矩试验报表。

通过测试数据的回访可得到被试电机实验中电气量的特性曲线，图 3、4 为空载运行电枢电流和空载稳态转矩的动态曲线。

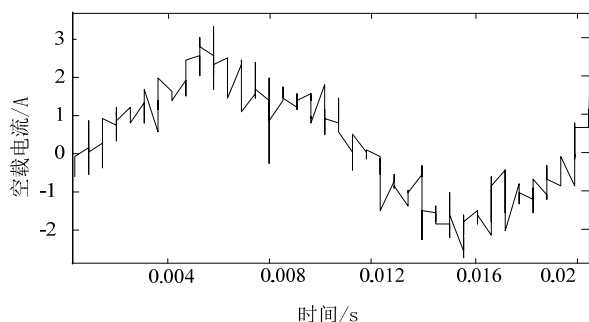


图3 实心转子永磁电动机空载运行时的A相电枢电流

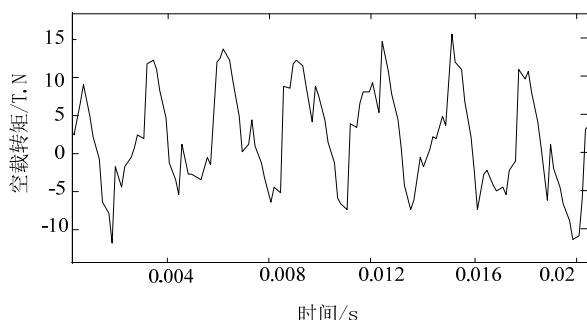


图4 实心转子永磁电动机空载运行时的稳态转矩

2.4 永磁电动机负载运行

待实心转子永磁电机并网实验完成之后，重新进入主页面，之后切换至负载起动页面，按负载安全检查内容逐项检查，使所有条件满足要求；在负载起动设定中设置相应的起动条件，点击“负载起动电机”按钮，完成被试电机负载起动。在负载起动页面上重复空载运行中的操作。实验完成后生成永磁电机负载运行电枢电压、电枢电流和空载稳态转矩试验报表。

通过测试数据的回访可得负载运行电枢电流和负载稳态转矩的动态曲线，如图 5、6 所示。

3 基于小波变化的测试数据分析

通过上位机软件 LABVIEW 生成数据报表，导

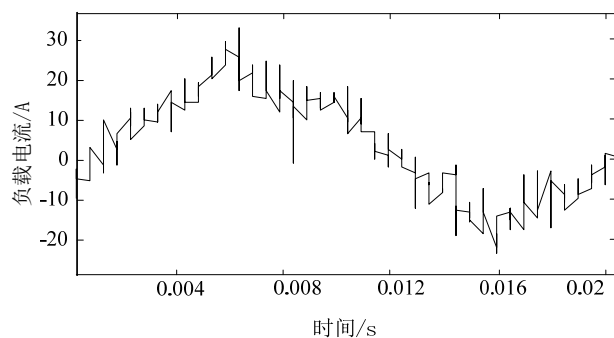


图5 实心转子永磁电动机负载运行时的A相电枢电流

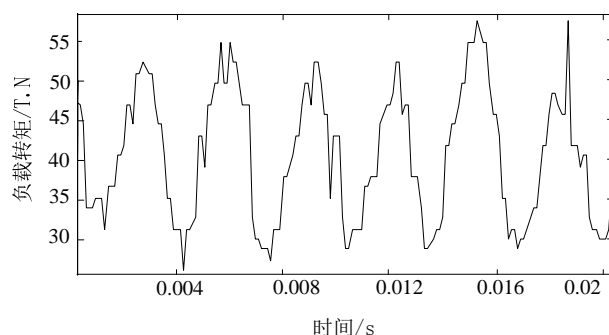


图 6 实心转子永磁电动机负载运行时的稳态转矩

入 MATLAB 软件进行数据处理。由于测试平台仪器的非线性和周围环境的外部干扰，信号中含有高频噪声，通过小波算法可以有效的滤除信号中的高频噪声。

从实验数据可以明显看出，被试电机电枢电流和转矩还有明显的高频噪声和谐波，对数据的正确分析带来很多不便。本文选取空载和负载时永磁电机电流用小波函数对信号做四层小波分解，以比较小波函数对实验数据的滤波和谐波分解所产生的影响。本文小波函数分选取 Daubechies 小波，利用正交小波的“多分辨率逼近”，构造出了有紧支集且光滑的正交小波，得到信号的 WT 分解。

图 7 为空载电流使用 Daubechies 小波函数进行的小波变换，图 8 为负载电流使用 Daubechies 小波函数进行的小波变换。

由图 7 和图 8 可以看出，经 Daubechies 小波分解后，电枢电流曲线光滑，滤除仪器非线性和外部环境的电磁干扰，为时步有限元程序仿真提供了理想的初值，也为稳态转矩的分析提供了可行的仿真初值。同时由于分离出信号中的高次高频噪声，使得测试数据和仿真结果比对更容易，有利于信号的谐波分解。本文用支持向量机法拟合小波分解后的电流曲线，作为时步有限元计算电流初值。为准确

计算自启动永磁电动机负载稳态转矩波动, 建立时步有限元计算模型, 模型包括转子运动方程, 转子转速在谐波转矩作用下也会产生微小波动。采用该模型进行计算时, 通过向定子绕组加载电压进行磁场及转矩计算, 该模型与实际状况一致便于与实测转矩进行对比。首先在 Auto CAD 里进行建模, 然后将模型导入到 ANSYS 进行剖分, 最后将剖分所得数据代入到 MATLAB 里进行仿真计算。

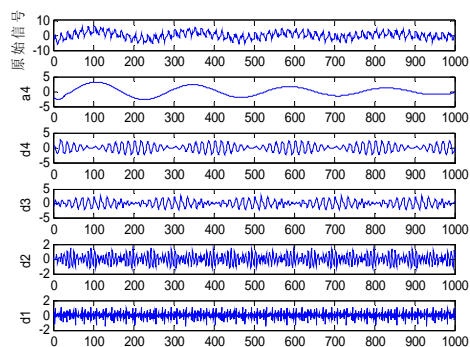


图7 使用Daubechies小波函数的永磁电机空载电流

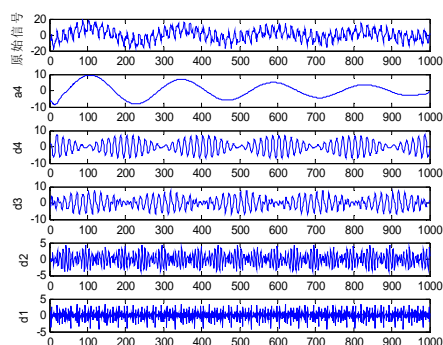


图8 使用Daubechies小波函数的永磁电机负载电流

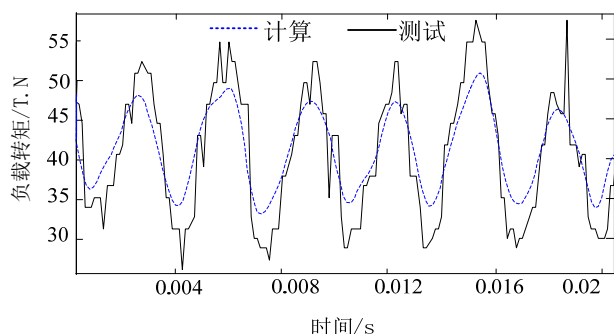


图9 小波分析后测试数据和时步有限元仿真的稳态转矩对比曲线

电机的稳态转矩实验数据与有限元计算对比如图 9 所示, 由图 9 可以看出测试数据处理后和时步有限元计算结果基本一致, 证明了小波分析对永磁同步电动机稳态转矩实验数据处理方法的可行

性, 进一步证明了考虑转子永磁电机的实际结构时时步有限元仿真的正确性。

4 结论

本文提出的实验验证方法考虑了实心转子永磁电机的实际结构, 解决了永磁电机普遍具有的退磁现象。并通过小波分析对实验数据处理, 消除了实验误差对数据的影响, 和时步有限元程序对比结果一致。证明实验数据处理方法具有较高的精度, 同时证明了时步有限元符合实际情况, 可为谐波电流引起的转矩波动的计算方法提供较准确的验证。

参考文献:

- [1] 杜春洋,杨贵杰,李铁才.永磁感应子式无刷直流电动机的转矩特性研究[J].电机与控制学报,2006,1(10): 35~39.
- [2] 徐永向,胡建辉,胡任之,等.永磁同步电机转子涡流损耗计算的实验验证方法[J].电工技术学报,2007,7(22):150~155.
- [3] 祁才君,卜广炎,雷剑虹.电机转速—转矩特性的高精度测量[J].电工技术, 2007(7).
- [4] 刘荣林.永磁电机失磁分析[J].中国民航学院学报,2004,6(22):18~20.
- [5] 李志强,曹彦朝,张健,等.永磁电机微机综合测试系统[J].电机与控制应用, 2009, 36(3): 57~61.
- [6] 陈伟华, 李秀英, 姚鹏.电机及其系统节能技术发展综述[J].电气技术,2008(9): 13-22.
- [7] 唐任远, 安忠良, 赫荣富.高效永磁电动机的现状与发展[J].电气技术, 2008(9): 1-6.
- [8] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [9] 黄进, 黄建华, 陈曦, 等.基于小波分析的直流电机转矩-转速特性测试[J].中小型电机, 2001, 28(2): 49~54.
- [10] 邓乃扬, 田英杰, 数据挖掘中的新方法——支持向量机[M], 北京: 科学出版社, 2004.

作者简介:

王 琛 (1984-), 男, 助理工程师, 通讯作者, 主要研究方向为风力发电并网技术;

张玉婷(1984-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为风力发电并网技术;

申 霞(1964-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为风力发电并网技术。