Development of Energy Science
February 2014, Volume 2, Issue 1, PP.1-7

Structure and Performance Research of New Hybrid Excitation Synchronous Motor

Guihong Feng [#]***, Yue Meng***

Shenyang University of Technology, Electrical Engineering Department, Shenyang 110870, China

[#]Email: 78908410@qq.com

Abstract

As the air-gap flux is not weakening adjustable easily at the high speed in permanent magnet synchronous motor, Research of hybrid excitation motor is meaningful. With the development of rotating rectifiers, rotating rectifiers' hybrid excitation permanent magnet synchronous motor received wide attention for its wide range of excitation regulator and advantage of easy adjustment. As traditional rotating rectifiers hybrid excitation mostly use double-tier stator structure with large volume and low material utilization, a new single-tier stator rotating rectifier hybrid excitation synchronous motor was designed, much improved the material utilization and decreased the volume. Design a prototype and analyze the performance of the motor. Simulation results show the feasibility and advantages of the proposed structure of the new motor. To improve the sinusoidal flux density, the stator exciting windings will use sine type winding.

Keywords: PMSM; Hybrid Excitation; Rotating Rectifier; Single-tier; Performance Analysis

新型混合励磁同步电动机的结构和性能研究*

冯桂宏，蒙越

沈阳工业大学 电气工程，辽宁 沈阳 110870

摘　要：传统永磁同步电动机由于气隙磁通调节困难在导致其调速范围窄，限制了其在电动汽车等领域的应用。而混合励磁同步电动机由于其励磁可调同时具备永磁电机的优点，对其的研究很有意义。混合励磁电机有很多种类，其中旋转整流器式混合励磁电机由于其励磁调节方便调节范围广的优势收到广泛关注。已有的旋转整流器式混合励磁电机均采用双电机双定子的两级结构，电机体积大、材料利用率低，针对此问题本文提出了一种单电机单定子的单级结构新型旋转整流器式混合励磁同步电动机。本文介绍了新型电机的结构，解决了新型电机励磁绕组和功率绕组的电磁解耦问题，比对了不同功率下单双级电机的体积，并对新型电机的性能进行了分析。最后得出如下结论，功率越低单级混合励磁电机的材料利用率优势相对双级来说越明显，新型电机的励磁系统可正常工作，起动性能高于调速永磁电机，低于异步起动永磁电机，最高转速能达到4倍额定转速。

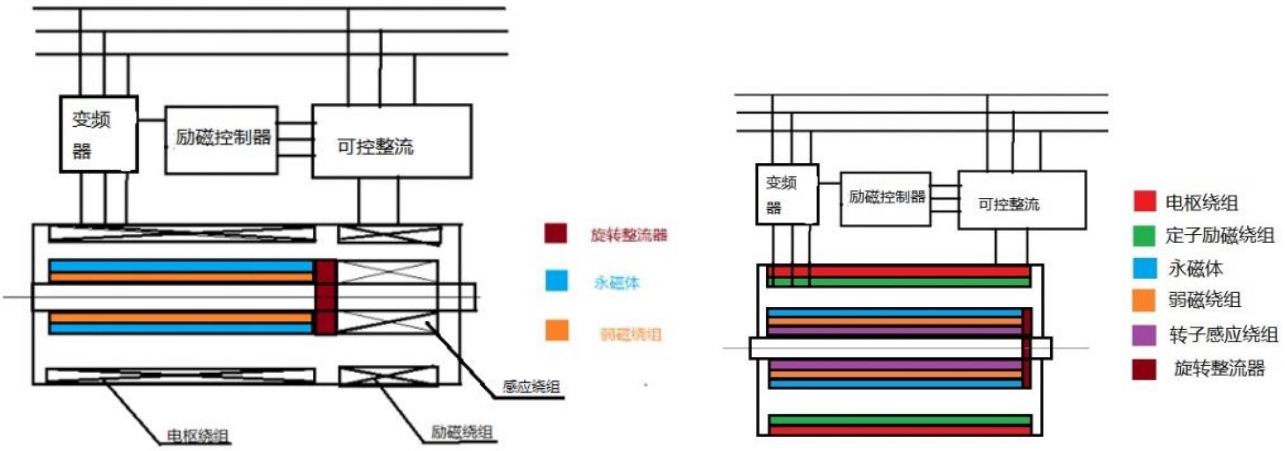
关键词：混合励磁同步电动机；单级结构；旋转整流器；性能分析

引言

众所周知，永磁同步电动机的弱磁调速困难，一般只能在 2 到 3 倍，限制了其在电动汽车等领域的发展，混合励磁是解决这一途径的有效办法之一。然而，我国对混合励磁电机的研究起步较晚，混合励磁电机的种类较少，有大量工作有待进一步深入研究[1]。在现有的混合励磁电机的结构中，旋转整流器式混合励磁电机随着旋转整流器的发展已经越来越收到重视。因为旋转整流器式混合励磁电机具有励磁调节方便，励磁调节范围宽广的优越性。已有的旋转整流器式混合励磁电机大多采用双电机双定子的两级结构，如图 1（a）所示。

*基金资助：1.受教育部创新发展计划资助（IRT1072）；2.受国家重大科学仪器设备开发专项资助（2012YQ05024207）

定子电枢绕组为三相交流主绕组，用于实现与转子间的机电能量转换。定子励磁绕组，转子感应绕组和转子励磁绕组共同构成电机的励磁系统。当定子励磁绕组通入直流电时在气隙中产生一个位置恒定的励磁磁场，转子感应绕组因为转子旋转切割该磁场感应出交流电流，交流电流经过旋转整流器的作用转化成转子弱磁绕组中随着转子同步旋转的直流励磁电流，对气隙磁场起去磁作用。这种两级式电机实际上是两个定子安装在一个机座内构成，不仅体积较大，而且安装和检修都很不方便[2]。为解决此问题研究了如图 1（b）所示的单级电机结构。单级混合励磁同步电动机的绕组利用两套独立的极数互为偶数倍的定子绕组，其中一套为功率绕组，通入工频交流电，另一套为控制绕组，通入直流电。两套定子绕组形成两个磁场，一个是由主绕组产生的圆形旋转磁场，另一个是由励磁绕组产生的恒定静止磁场。理论上两个磁场之间没有直接的磁耦合关系，这两个磁场通过特殊转子的耦合作用进行间接耦合。



（a）两级式混合励磁电机示意图　　（b）单级式混合励磁电机示意图

图 1 传统两级和新型单级混合励磁电机示意图

1　新型电机的结构与运行原理

本文在原有的两级式混合励磁同步电动机的基础上，提出了一种新型的单级混合励磁电机结构。并以一台 15kW 单级旋转整流器式无刷混合励磁同步电动机作为研究对象，通过理论分析和仿真研究，验证了其在电机高速状态下弱磁的可行性，并在此基础上对电机进行了优化设计。

1.1　电机结构

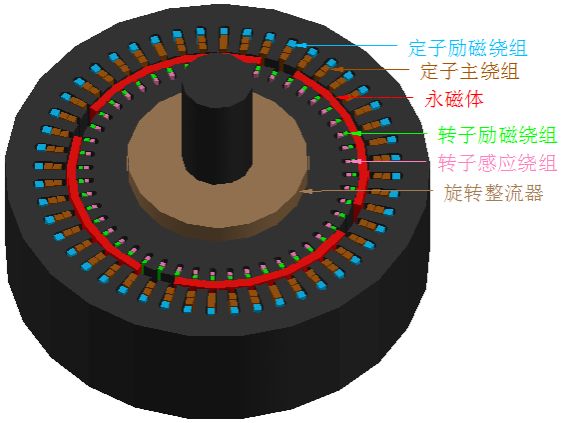


图 2 新型单级混合励磁电机结构示意图

传统两级混合励磁电机和新型单级混合励磁电机示意图，如图 1 所示。本文提出的新型单级式子混合励磁电机的机构示意图，如图 2 所示。新型电机为单级电机结构，即定子励磁绕组和定子主绕组共享同一个定

子冲片，共享定子槽，转子励磁绕组和转子弱磁绕组也共用同一段转子，共享转子槽。因为只有一段定子，因此单级电机结构又称为单定子结构[3]。各个绕组的功能与传统双级式混合励磁电机相同。

1.2 运行原理

旋转整流器混合励磁电机的弱磁调速和传统永磁同步电机的矢量控制或者直接转矩控制的调速方法的本质区别，是励磁电流分量和负载电流分量的分离[6]。这也是旋转整流器式混合励磁电动机的最大优势。在两级式电机中，因为励磁绕组和电枢绕组下在不同的定子中，磁路之间互不影响。而本文提出的单级混合励磁电动机中，由于定子电枢绕组，定子励磁绕组，转子感应绕组，永磁体和转子弱磁绕组共用同一磁路，磁动势在空间上相互重合，如果各绕组极数相同，要使其相互直接没有直接耦合关系是很困难的[7]，这是单级式混合励磁同步电动机的难点所在。

然而定子电枢绕组和定子励磁绕组并不要求极数相同，因此，只要使得定子励磁绕组与定子电枢绕组极数相差偶数倍（令转子弱磁绕组极数等于定子主绕组极数，转子感应绕组极数等于定子励磁绕组极数），即可实现励磁绕组和永磁体以及弱磁绕组之间、电枢绕组和转子感应绕组之间的电解耦。

以励磁绕组和转子弱磁为例，假设励磁绕组为 p 极，转子弱磁绕组为 2p 极。则励磁绕组沿气隙圆周产生的基波磁动势为：

$$F_c = \frac{2\sqrt{2}NI_f}{\pi P}\cos(v\theta)$$

而穿过弱磁绕组每极的磁通：

$$\Psi_f = \int_0^{\frac{\pi}{P}} F_c \Lambda d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{P}} \Lambda \frac{2\sqrt{2}NI_f}{\pi P} cos(v\theta)\, d\theta = 0$$

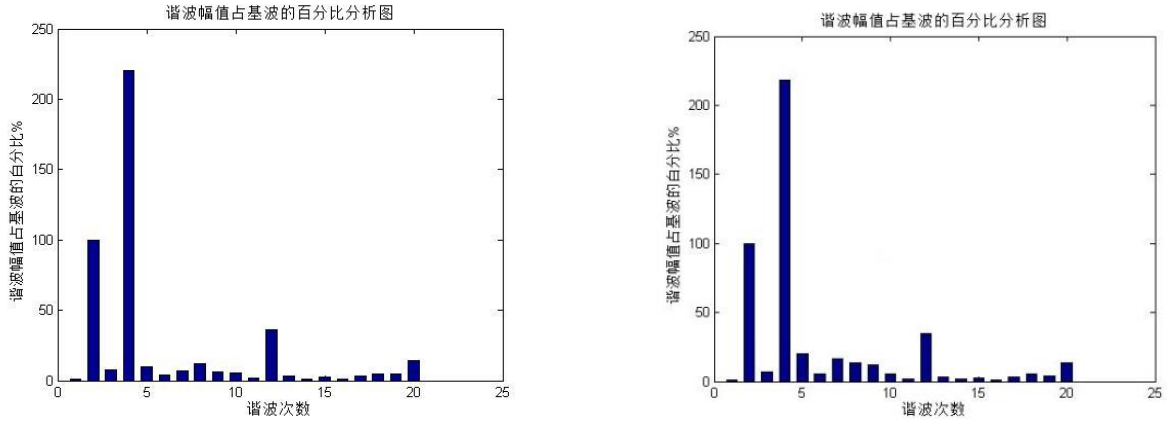
其中，F_c ——励磁绕组磁动势；

I_f ——励磁电流；

Λ ——气隙磁导。

2 电机设计

设计了一台样机，因为只考虑高速时的弱磁升速，不考虑低速时增磁提高转矩，在正常速度范围内励磁绕组不工作，所以设计时定子铁心和磁钢厚度等按普通永磁同步电动机设计。设计励磁系统时，将其设计为励磁能力与永磁体相同。由于定子励磁绕组和主绕组共用同一定子，因此发热计算需要同时考虑两套绕组。电机参数为：额定 15kW，额定电压 380V，额定频率 50HZ，定子外径 400mm，定子内径 285mm，气隙宽度 1mm，铁心长度 250mm，定子主绕组 8 极，转子励磁绕组 8 极，定子励磁绕组直流 4 极，转子感应绕组单相 4 极，定子 72 槽，转子 72 槽，旋转整流器由两个二极管组成。



（a）直流正弦励磁绕组谐波分布　　（b）直流普通励磁绕组谐波分布

图 3 直流正弦励磁绕组与直流普通励磁绕组谐波对比

由于励磁绕组是直流绕组，因此可以通过线圈匝数的正弦分布，达到空间磁动势正弦化、削弱高次谐波的目的。如图 3 是两种控制绕组形式各自的谐波含量分布。可以看出图 7（a）代表的正弦绕组，相对于图 7（b）代表的普通绕组的高次谐波总量有所下降，大约下降 9%左右。因此定子引入单相正弦励磁绕组，它能获得接近正弦分布的磁动势，通过混合转子的磁场调制作用，使电机的气隙磁势接近正弦，有效地把高次谐波分量削弱到很小的程度，降低电机的杂散损耗和电磁噪音，从而改善电机的特性。

由于励磁绕组为直流正弦绕组，沿定子铁芯磁场分布不均匀，且幅值最大处位置不变。拟采用如图 4 所示的类八边形异性槽冲片改善定子磁密分布和槽满率。如图 5 类八边形冲片轭部厚处与轭部薄处磁密大小相差不大，而正常冲片磁密分布非常不均匀。普通冲片最小轭部磁密为 0.05T，类八边形异性槽冲片最小轭部磁密是 0.1T。因此定子铁心冲片采用类八边形冲片，槽型采用异型槽，提高了定子槽满率和有效材料利用率，且定子齿轭部磁密分布更加合理[5]。

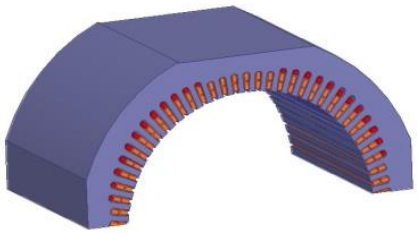
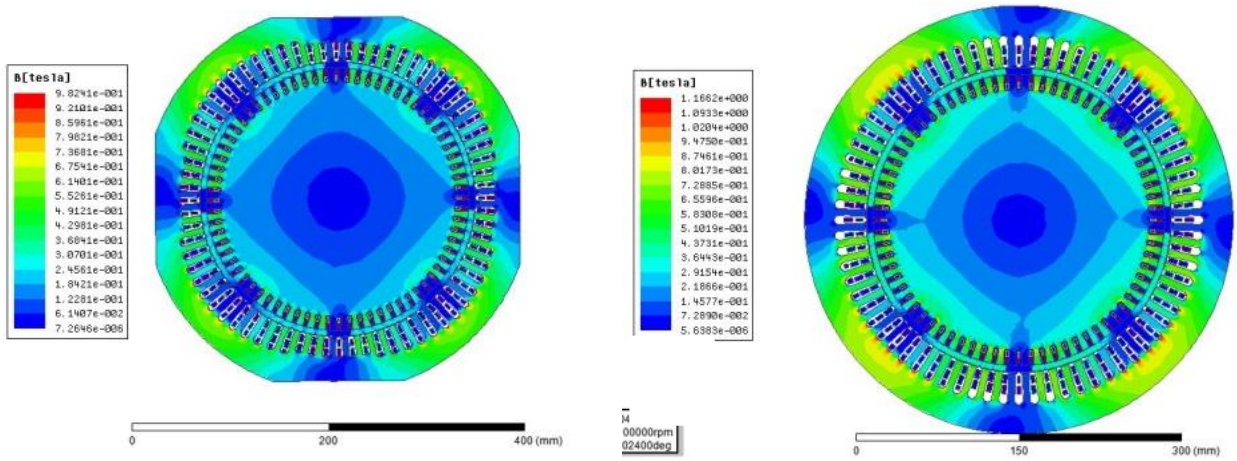


图 4 类八边形异性槽结构冲片



（a）类八边形磁密云图　　（b）普通冲片磁密云图

图 5 类八边形异性槽结构与普通冲片磁密云图

设计了各个功率等级的电动机进行比对，数据如表 1 所示。可见在小功率的电动机中，单级混合励磁电机的体积优势比较明显，而且越小越明显，但在大功率电机中单级电机的优势依然存在。

表 1 各功率等级单双级混合励磁电机体积对比

功率等级/kW	双级相对单级增加体积%
0.55	22
3	21
5.5	18.3
7.5	15
11	16
15	11
22	8

3 电机性能分析

3.1 励磁系统的性能研究

在 ansoft 软件中建立上述电机模型。先对励磁系统的电流转换性能进行了仿真研究，在 3000r/min 时运行状态下得到电流的仿真结果如图 4 所示。图中，转子感应电流 A 和转子感应电流 B 分别为转子感应绕组的两相绕组中的电流，转子感应电流 A 和转子感应电流 B 相位相差 180 度，幅值相同，经整流器后形成转子励磁绕组的直流电流，即图 6 中红线所示。在理想状态下，转子励磁直流电的大小接近于转子感应电流的幅值。另外容易得出，电机的转速越高，转子励磁直流电流越平滑。

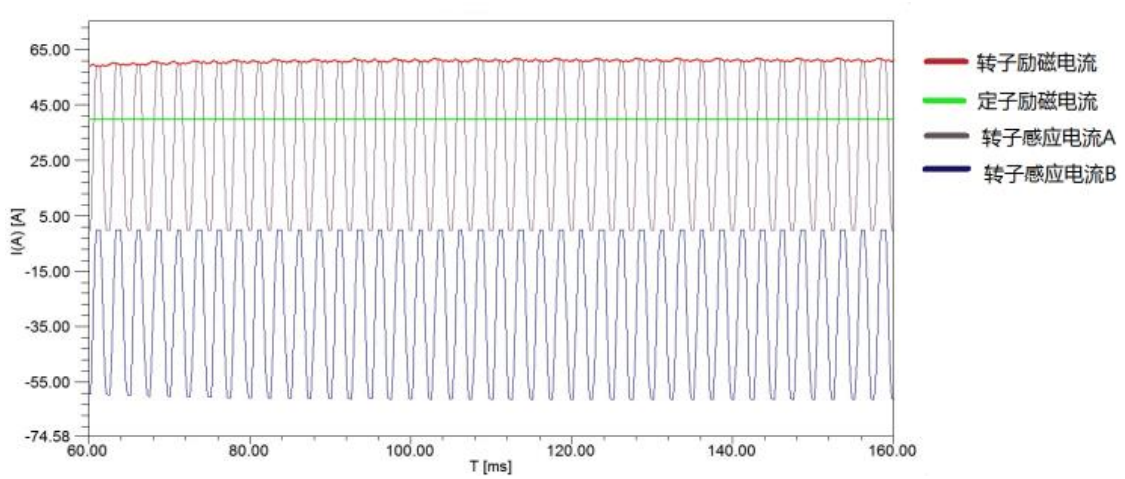


图 6 励磁系统各部分电流

在逐步提高电机转速的同时调节励磁电流使得空载反电动势保持不变，得到图 7 所示随着转速升高随需励磁电流曲线。从图中可以看出，由于转速越高弱磁效应越明显，所以该种弱磁调速电机的定子励磁电流只需小围调节即可实现大范围的弱磁升速。

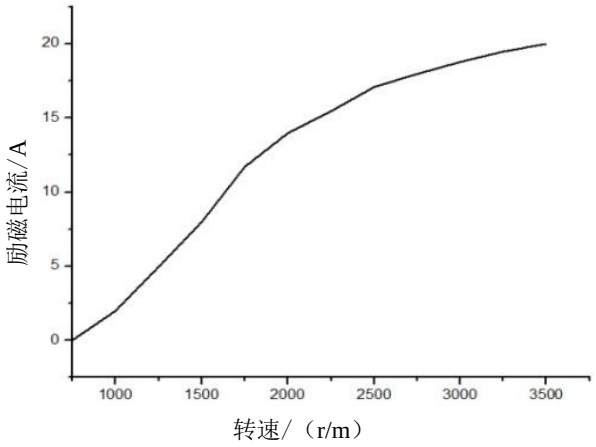
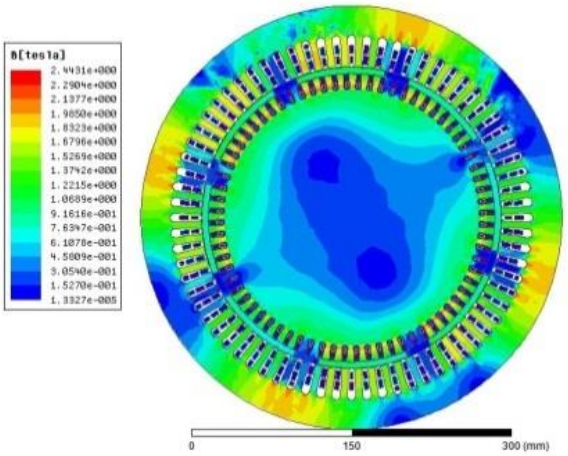


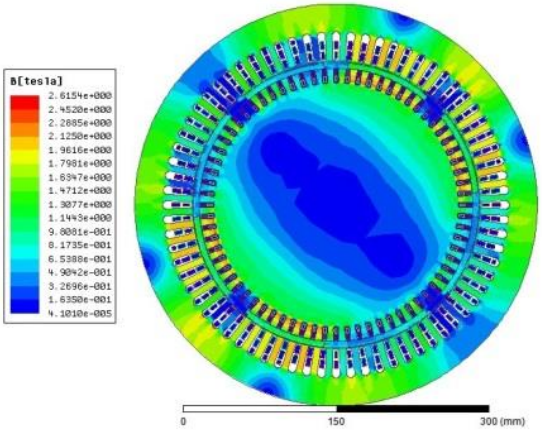
图 7 $E=E_N$ 时励磁电流随速度变化曲线

3.2 弱磁性能

电动机的弱磁性能决定了其调速范围为了分析新型电机的弱磁性能，在同一转速，空载状态下，分别对励磁绕组工作和不工作两种工作状态进行了仿真，得出如图 8 的磁密云图。从图中可以看出，由于励磁绕组的弱磁作用，定子磁通密度显著减小，约降低为原磁通密度的 40%左右。可见通过励磁绕组的弱磁作用，可以显著降低定子合成磁场。



（a）励磁电流 I_f = 0A，v= 4500 r/min



(b) 励磁电流 I_f = 30A，v= 4500r/min

图 8 磁通密度仿真比较

3.3 转矩特性

由于弱磁绕组的存在，单级旋转整流器式混合励磁电动机在启动时可以视为异步起动。该电机起动转矩约为 270N.m，为额定转矩 190N.m 的 1.42 倍。由于不可控旋转整流器的作用，弱磁绕组中的电流只有能产生半个周期。因此相对于类似的异步起动电机来说，该电机的异步起动转矩相对要小一些，牵入同步时间更长，如图 9 所示。在电机启动时，可以配合使用变频起动，以获得更好的起动性能。

额定转速时，先给电机加 50N.m 的负载，在某时刻突然将负载变为 110N.m，观察电机电磁转矩的变化曲线，如图 10。可以看出，电机完成负载变化的时间约为 100ms，因为由于弱磁绕组的存在，电机对负载突变的响应强于调速永磁电机，又因为旋转整流器的存在，其响应能力要弱于异步起动永磁电机。

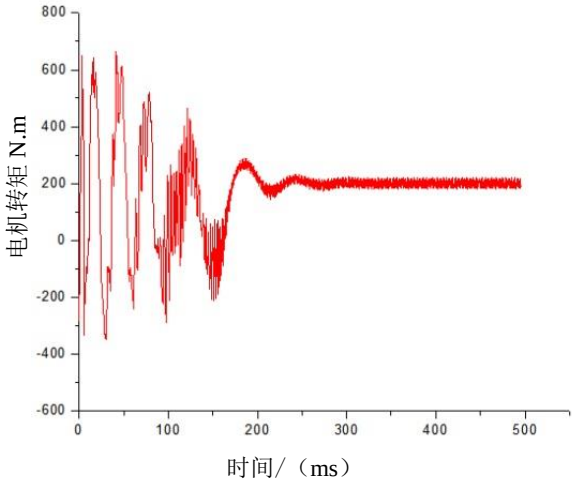


图 9 新型电机异步起动转矩随时间变化曲线

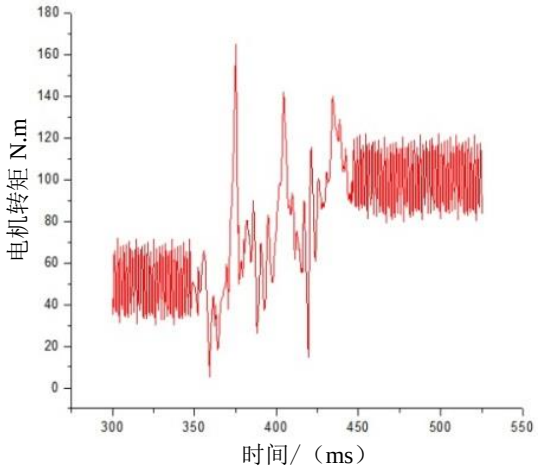


图 10 新型电机负载突变后转矩随时间变化曲线

3.4 调速范围

低于额定转速时励磁绕组不工作，电机相当于一台普通永磁同步电动机，因此重点研究了转速高于额定转速时的机械特性曲线。当电机转速高于额定速度时，电机调速方法为恒功率调速。不同转速时，若限制电枢电流幅值的最大允许给定值，使其恒等于额定转速时对应的电枢电流幅值最大允许给定值，便可得到图 11 所示的恒功率曲线。因此，可以使用 PI 调节器方便地实现弱磁调速。弱磁励磁电流给定由反电势 PI 调节器给出，调节器的反电势给定值为转速等于额定转速时的永磁反电势幅值。只要转速小于额定转速，电动势反馈信号也就小于反电势给定值，反电势调节器就处于上限限幅状态（饱和上限设定为 0），相当于开环。当转速上升至额定转速以上时，电动势反馈信号大于额定转速反电动势，使电动势调节器退出饱和，弱磁励磁

电流给定增加，通过励磁电流 PI 调节器实现弱磁调速。由仿真结果可知，电机极限速度为约为 3000r/m，调速范围约为 4 倍的额定转速，而永磁同步电动机的传统弱磁方法如矢量控制，仅能达到 2 倍到 3 倍左右的额定转速。

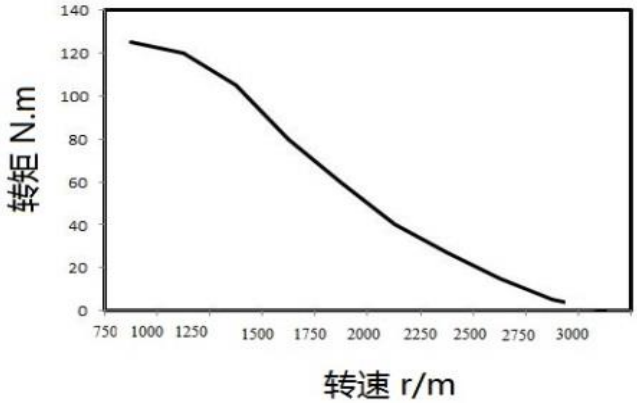


图 11 电动机性能仿真曲线

4 结论

通过理论分析验证了该种电机弱磁的可行性。电机结构采用特殊单电机不分段结构，大大提高了有效材料利用率，并且减小了电机体积缩短了电机长度。并且功率越小效果越明显。

建立该种电机的模型，设计了一台 20kW 无刷电励磁同步发电机，对正弦绕组在该电机的应用进行了比较分析，采用正弦绕组使电机的气隙磁势接近正弦，有效地削弱高次谐波分量，电机可采用异性槽和类八边形冲片进一步提高材料利用率，为无刷电励磁同步发电机系统设计及优化提供了有效依据。

对所设计电机的性能进行分析，得出了其启动转矩特性介于调速永磁电机和异步起动电机之间的结论。

REFERENCES

[1] Gaynor, P. Frary, D. Krusemark. R. Induction vs. synchronous motors - Different perspectives end user/motor manufacture. PCIC 2010-16

[2] A. Zulu, B. Mecrow, and A. Armstrong. A wound-field three-phase flux-switching synchronous motor with all excitation sources on the stator. IEEE Trans. Industry Applications, 2010, 46(6): 2363-2371

[3] Zhao-yong Zhou, Tie-cai LI. FPGA Implementation of the High-Performance Vector-controlled Speed Servo Controller for AC Drives [J]. Proceedings of the C see, 2004, 30(5): 168-173

[4] AYDIN M.HUANG SR.LIPOT A new axial flux surface mounted permanent magnet machine capable of field control 2002(07).IEEE industry applications Society Annual Meeting, 2002: 1250-1257

[5] Tapia J A, Aydin Metin, Huang Surong, et a1. Sizing equation analysis for field controlled PM machines unified approach. IEEE International Electric Machines and Drives Confefence, 2003: 1111-1116

[6] Thomas Finken, Kay Hameyer.Study and geometry Optimization of Hybrid Excited Synchronous Alternators for Automotive Applications Proceedings of IEMDC, 2007: 124-128

[7] WANG Dong, MA Weiming. A novel stand-alone dual stator winding induction generator with static excitation regulation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(4): 826-835

[8] Amara Y, Vido L., Gabsi M., et a1. Hybrid excitation synchronous machines energy efficient solution for vehicle propulsion[C]. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC'06. 1EEE 6. 8 Sept. 2006: 1-6

【作者简介】

[1]冯桂宏，女，汉族，教授，特种电机及其控制。Email: 78908410@qq.com

[2]蒙越（1989-），男，汉族，硕士，电气工程，沈阳工业大学 2011 级研究生。Email: 413988405@qq.com