

新型电机设计与 SVPWM 控制探究

胡双全

(佳木斯电机股份有限公司屏蔽车间, 黑龙江 佳木斯 154002)

摘要 本文整体分成两部分。第一部分是研究新型电机, 一种是研究基于直流盘式电机与单相开关磁阻电机原理的新型复合电机结构, 适用于电动自行车的电机; 另一种是新型无刷直流电机, 适用于卫星姿态的控制, 也对于未来物联网的发展起到了很大作用。第二部分介绍并分析了 SVPWM 控制的概念、原理方法和实际应用。

关键词 新型电机设计 SVPWM 控制 物联网

中图分类号: TM33

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)08-0146-03

1 探究新型电机设计

1.1 新型直流-磁阻单相复合电机

这种电机一般是针对电动自行车设计的。电动自行车目前已经成很多人出行的首选交通方式。电动车作为一种实惠又环保的交通工具, 也获得了良好的市场反馈。随着电动车使用数量的不断增加, 商家和消费者对电动自行车轮毂驱动电机的性价比提出了更高的要求。目前市面上最广泛使用的轮毂驱动电机是永磁式无刷直流电机。这款电机的优势是驱动效率高、工作时声音小、调速性能优异。但目前最大的问题是电机中的永磁体在高温工作或制约振动下可能会消磁, 造成电机性能下降。

开关磁阻电机不具有永磁体, 并且采用凸级式结构。优势是结构不复杂、成本低、不易出现故障^[1]。目前开关磁阻电机在电动自行车电机中备受关注。但是其劣势是转矩纹波大、算法复杂, 而且用于交通工具后舒适性不高。如果将以上两种电机进行组合, 则会在降低转矩脉动的条件下增加输出转矩。据有限元计算软件的分析, 该结构提高了电机的转矩密度和运行效率^[2]。

电机结构以旋转方向对称。在轴向上, 外转子为层状结构。左右各三层导磁层(磁导率很高)严密贴合两层辐条的直流电枢。导磁层材料是压实的硅钢片。辐条直流电枢为带有 18 个辐条的圆盘型金属铜片。辐条轮盘共包含四个辐条直流电枢。工作时, 电流沿着辐条流动, 且四个轮盘上电流方向相同。外转子圆筒是硅钢制品。外转子圆筒、直流电枢和导磁层三个部分组成单相复合电机的外转子部分。

轴向上内定子也为层状分布。内定子槽底冲片叠放, 两端为叠放的圆盘冲片, 形成的槽中绕有轴向励

磁绕组, 内定子的凸极数也为 18 个, 在内定子的各凸极径向顶端设有安装径向励磁绕组的外槽, 槽上绕有径向励磁线圈, 内定子距离外转子 0.3mm, 电机转子径向与轴向都有受力, 电机轴轴承标准需要符合 GB/T297-1994, 球轴承内径需要与电机轴紧配合, 外径需要与左右两边外转子圆盘内径紧密配合, 电机内定子在每个凸极端部用顶部冲片叠压, 填充电枢绕组凹槽, 定转子铁芯由硅钢片冲压制成, 轴向缠绕的励磁线圈会产生轴向磁通, 内定子中一般缠绕 300 圈励磁线圈, 内定子 18 个凸极的端部外缘上预留绕组槽, 槽内设置 18 个串联式径向励磁(匝数为 5 匝), 相邻的凸极互相反方向缠绕, 用于形成 N-S-N-S 型磁场^[3], 磁力线与外转子圆筒的凸极、轭部、定子凸极环绕而形成多个环形短磁路。

直流-磁阻单相复合电机运行原理如下: 48V 直流电源供电后, 径向励磁绕组、辐条直流电枢、轴向励磁绕组三者的驱动主回路互不干扰。 U_s 为电源(直流电), D1、D2、D3 都是二极管(快恢复型), 径向励磁绕组线圈的控制主开关管使得 S1、S2 同时开启或关断, 此装置可向径向励磁绕组中通入电流用于制造脉冲^[4], 径向励磁绕组线圈采用不对称半桥功率变换器结构, 通过控制主开关管 S3、S5 或 S4、S6, 实现在辐条直流电枢中通入方向互逆的电流, 控制电机的正转与反转, 直流供电电源降压后置于轴向励磁阻两侧, 以此生成恒定轴向磁场, 生成定向磁场时需要降压, 此时用到的降压变换器由主开关管 S7、续流二极管 D3、储能电感 L、滤波电容 C 组成。

径向励磁绕组电感 $L(\theta)$ 在直流-磁阻电极旋转时候位置角 θ 呈现周期性变化, 在电感上升区内对径向励磁绕组通电, 将产生电动转矩, 电源的电能一部分转化为机械能, 其他则存储在径向励磁绕组。径向

励磁绕组电感进入电感下降区时,绕组电流将产生反向转矩,会阻碍一部分电机工作,所以需要在电感下降区关闭控制S1、S2。S1、S2是径向励磁绕组电流的主开关,之后管绕组内的电流由二极管D1和D2续流,快速降到0。与此同时,打开主开关管S3、S6或S4、S5,在辐条直流电枢中通过电流。轴向励磁线圈产生轴向磁场,且方向恒定,辐条上的电流在磁场中受安培力作用生成转矩,开关磁阻电机的极数需要增加。与此同时转矩脉动减小, β_r 和与其相关参数也同步减小,增大电枢直径的同时缩小外转子叠厚可以减少电机质量和外转子转动惯量。设直流-磁阻单相复合电机 N_s 、 N_r 均为18, τ_s (内定子极矩角)、 τ_r (外转子极矩角)均为 20° ,可得旋转周期为 20° 。 $\beta_s=14^\circ$ 、 $\beta_r=11^\circ$,则最小电感区 $\alpha_r-\beta_s$ 为 0 ,最大电感重叠角的 $\theta_2\sim\theta_3$ 区域为 $\beta_s-\beta_r=14-11=3^\circ$ 。内定子与外转子凸极的重叠角大于等于 5° 。整个定子与转子的凸极重叠度是 90° 时通入电流就可以使得转子像预设方向旋转。若预设正方向是顺时针,旋转 1° 后各个定子凸极与转子凸极在逆向重叠 3.5° ,正向重叠 1.5° ,此时如果切断转子电枢绕组电流,即可利用磁阻转矩继续向逆方向旋转。若预设正方向是逆时针,当按磁阻电机原理旋转约 7° 后,再给辐条直流电枢绕组通入电流即可使其继续向正向(逆时针向)旋转。经过 13° 后切断辐条绕组电流,按磁阻电机原理旋转。以上过程形成了一组循环。

依据上文原理对电机进行模拟。电机的仿真步长设为 1ms ,每一步旋转角度为 1° 。电机旋转周期是 20° ,所以在周期内有20个 1° 。如果选取它进行仿真,即可得到周期内电机的转矩变化曲线,同时用2D动态仿真法仿照磁阻电机原理仿真,设置仿真时间为 20ms ,仿真步长为 1ms 。

计算结果显示,平均转矩 $6.97\text{N}\cdot\text{m}$,最大转矩为 $8.49\text{N}\cdot\text{m}$,转矩脉动系数为0.21。将直流电机原理和变阻器原理结合起来,可以使得转矩输出倍增,也能运用各阶段的转矩,减少转矩的脉动。如果运行方向不变,则转子电枢绕组运行时候始终只有一个方向的电流,电刷并没有换向火花之类的弊端,所以可以使得电刷十分耐用^[5]。该系统极大地提高了电机的功率密度和电动自行车动力驱动系统的性价比。

1.2 新型无刷直流电机

卫星姿态控制直接影响通信技术的精度和准确性。卫星动量轮具有负载小、控制精度高、环境好、使用年限长等优点。通过动量轮改变转速的大小产生不同力矩,人们可以使卫星姿态得到精准控制。飞轮决定

了电机的性能,电机的性能又决定了转子性能^[6-7]。

针对两种电机在结构的不同,可以使用动态模型仿真法可以对其进行分析,这种新型电机基于气隙磁路,设计了一些高精度控制方法,进行了仿真实验。

飞轮系统组成有:(1)飞轮转子主体;(2)保护轴承系统;(3)双圈无刷直流电机;(4)密封罩组件;(5)控制系统组件。飞轮控制卫星姿态的原理是改变飞轮转速和旋转矢量方向,产生相应的控制力矩,输出扭矩与转子转速有关。由于永磁体固有特性的影响,永磁电机产生的永磁场不易调节,这对电机控制提出了更高的要求。为了提升电机的电磁性能,提升运行特性和机械特性,降低制造成本。

电机结构由内到外为内圈、内圈永磁体、杯形定子、外圈永磁体和外圈。与传统电机结构相比,双圆形磁钢结构电机形成了在相同转矩下,增加了径向气隙磁感应强度(产生偏转转矩的磁感应强度,即有效气隙磁感应强度),增加了总气隙磁感应强度,提高了电机的设计转矩,大大降低了功耗,使电机两极间的磁通密度更均匀,减小了转矩脉动,大大降低功耗。以双磁极间的气隙为分析对象,对单环永磁体的厚度、永磁体的高度、导磁材料的厚度等客观条件进行了有限元分析模拟,并计算了各模拟路径的气隙磁感应强度^[8]。

仿真结果表明,在相同的路径、相同的外部条件和其它参数下,双圈构型电机方案的气隙磁密比传统方案高。当量气隙磁感应强度的最大值增加3%,气隙平顶宽度由 90° 左右增加到 120° 左右,使气隙磁通密度波形更接近理想梯形波形,保证了输出转矩的稳定性,减小了电机的转矩脉动,进一步提高了性能。

霍尔效应传感器确定位置,进而位置信号转为驱动控制电路的电信号,可以控制电机电流的换向系统和电压,定子三相绕组依次充电,从而控制电机的旋转,分别测试动量轮速度增加、速度减小和均速平稳运行三种状态^[9]。

新型电机结构的气隙磁密度显著提高,反电动势波形变化剧烈,更接近理想的梯形波,气隙平顶宽度更接近 120° 。因此,新的电机结构更易于高精度控制电机,新结构的气隙磁密度也有很大提高。因此,新的结构对电机控制更加精确。电机转速稳定、转矩脉动小对于上气隙磁密度的仿真结果,在参数不变的情况下,气隙磁密度的平顶宽度及相应的气隙磁密度和仿真值,传统电机结构和新结构的仿真结果,结构的仿真和分析如下^[10]:

在没有任何控制器的情况下,结果表明两台电机达到稳定转速所需时间基本相同。最大超调速度为

5212rad/s, 超调量为4.24%。最大超调速度为5832rad/s, 超调速度为20.7%。 $t=0.2s$ 时, 新型电机结构的转速响应时间较快, 转速变化率为1%。传统电机结构的转速响应波动较大, 相应的转速变化率为193%。仿真结果表明, 新的电机结构可以改善电机的机械特性和整体性能。

1.3 其他新型电机

超声波电机: 利用超声波频率范围内的机械振动获得动力源并利用摩擦力传输弹性超声波获得动力的装置。压电电动机的超声振动源与压电陶瓷密切相关, 当交流电压被应用到压电陶瓷上时, 压电陶瓷本身或者压电陶瓷和金属的混合物会周期性地膨胀和收缩, 这就是压电效应, 通过这种膨胀和收缩, 马达产生动力。

直线电机: 是一种将电能直接转换成直线运动机械能的电机, 不需要任何中间转换机构的传动装置, 它可以看成是一台旋转电机按径向剖开, 并展成平面而成。特点是结构简单, 系统本身的结构大大简化, 重量和体积大大减少, 定位精度高, 需要直线运动时候直线电机可实现直接传动。

开关磁阻电动机: 调速系统中使用的开关磁阻马达是SRD机电能转换的组成部分, 也是SRD区别于其他电机驱动系统的主要标志。固体火箭发动机定子和转子的凸极由普通硅钢片制成。转子既没有绕组, 也没有永久磁铁。定子极绕有集中绕组, 两个径向相反的绕组相连, 称为“一相”, 定子和转子的极数有许多不同的配置。相位多, 步进角小, 可以减小转矩脉动, 但结构复杂, 脏开关装置多, 成本高^[11-12]。

2 SVPWM 控制

SVPWM是Space Vector Pulse Width Modulation的简写, 是近年来发展起来的一种新型控制方法。三相逆变器由六个功率开关元件组成的特殊开关模式产生了脉宽调制(PWM)波, 其能使输出电流波形尽可能接近理想的正弦波。与传统的正弦脉宽调制不同, 空间矢量脉宽调制(SVPWM)追求整体效果, 其目标是使电机运行在一个理想的圆形轨迹上, 绕组电流波形的谐波比例较低, 这使电机的转矩脉动减小, 并导致旋转磁场现象。

常见的三相全桥是由六个开关器件组成的三个半桥。由于各桥臂的上下部信号相反, 六个部件可以有8种安全开关组合。上桥臂为“1”表示连接, 下桥臂为“0”表示连接, 即 $S_k=1$, 上桥臂连接, 下桥臂闭合。 $S_k=0$ 表示k值对应的上断, 下通。000和111状态不能使电机正常工作, 因为不会产生有效的电路。基于

6种开关组合就可以构成6个有效的向量, 他们平分整个一周(360°)的电压, 每个有60°的扇区, 六个扇区配合上两个零向量就可以合成平面中任意一个向量, 当要合成某一矢量时先找到两个基本向量, 一般是找到距离被表示向量最近的即可, 每个基本矢量起到的作用以时间长度表示, 用电压矢量按照不同的时间比例去合成所需要的电压矢量。

变频电机工作时, 矢量方向也是一直改变的, 因此矢量作用时间也需要不断的修正, 一般采用定时计算法(如每0.1ms计算一次)以便于处理, 此时只需算出在0.1ms内两个基本矢量作用的时间就可以了。空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)的主要特点是:(1)每个开关只涉及一个器件, 即使每个单元之间有多个开关, 但总损耗仍然很小;(2)由于电压空间矢量直接产生三相PWM波, 因此计算简单;(3)输出线的最大基波电压为直流侧电压, 比常规正弦波逆变器高15%。

参考文献:

- [1] 张宇翔. 电动自行车用BLDCM优化设计及控制策略研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2020.
- [2] 郭桂秀. 电动自行车用外转子开关磁阻电机优化设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [3] 祁新梅, 郑寿森, 祁俊才, 等. 电动汽车用外转子开关磁阻轮毂电机研制[J]. 微特电机, 2019,47(12):24-28.
- [4] 李亦滔. 开关磁阻电机转矩脉动抑制综述[J]. 电机技术, 2019(06):53-58.
- [5] 井立兵, 成佳. 开关磁阻电机转矩脉动优化研究[J]. 振动与冲击, 2019,38(21):120-125.
- [6] 黄欣荣. 改变未来世界的6G网络新技术[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2020,41(02):133-143.
- [7] 田晨冬. 卫星导航与5G的融合在位置服务中的应用[C]. 第十一届中国卫星导航年会, 2020.
- [8] 胡自强, 王栋, 龚小雪, 等. 飞轮微振动与整星耦合特性参数补偿算法研究[J]. 光子学报, 2020,49(01):75-88.
- [9] 李祥林, 李金阳, 杨光勇. 电励磁双定子场调制电机的多目标优化设计分析[J]. 电工技术学报, 2020,35(05):972-982.
- [10] 王晓远, 张力, 许卫刚. 基于田口算法的内置式永磁同步电机多目标优化设计[J]. 微电机, 2016,49(05):1-5.
- [11] 高泽梅, 王淑红, 武潇, 等. 基于田口实验的永磁同步电动机优化设计[J]. 微电机, 2015,48(01):16-19,23.
- [12] 张明, 张一鸣, 全江涛. 双余度无刷直流电机电枢绕组结构对比[J]. 微电机, 2012,45(02):16-19,24.