

Ansys在HEDS电动机优化设计中的应用

HEDS电动机跟一般同步电动机相比性能更加优良,跟一般异步电动机作比对,HEDS电动机拥有较小的体积,较轻的机身重量,较高的工作效率并且节能性能更加优越。为了进一步提高HEDS电动机输出转矩与输出功率,仍需要对电动机主要结构参数进行最优化设计。电动机的实际运行工况可以通过Ansys软件进行仿真,使电动机模型的分析更加容易。通过利用Ansys仅对HEDS电动机气隙之间的长度、定转子齿相对长度及转子极弧三个主要结构参数对电动机转矩特性的作用进行模拟,通过改变参数的大小观察电动机的转矩特性,实现了对750 W HEDS电动机结构参数的优化,并通过对样机的测试验证了理论分析的合理性。

宋志达¹ 陈国成² 刘伟^{1,3}/1.东北石油大学电气信息工程学院 2.东北石油大学科研处 3.北京工业大学机械工程与应用电子技术学院

0 引言

在当今社会能源节约与环境保护的大前提下,针对电动机系统的节能减排,包括我国在内的许多国家都给予了极高的重视。我国目前正处在国民经济高速发展与深化经济体制改革的重要时期,企业面临着宏观经济调控、能源与环保政策的规范。由于政府对节能产业的大力扶持,高效节能电动机在国家发展与改革委员会制定的中国“节能中长期专项规划”中被列入第11个和第12个五年计划中的重点推广项目,节能的观念已经得到大力推广与深入普及。

HEDS电动机与永磁电动机相比在空间上多了电励磁绕组,解决了永磁电动机在驱动与调压性双方面的不足^[1]。永磁体镶嵌在定子轭部,电励磁绕组放置在与永磁体相邻的定子槽里,这样的结构使得转子部分结构更加简单化^[2-3]。这种新型节能三相同步电动机具有相对于一

般同步电动机性能更为优良,跟一般异步电动机进行比对,HEDS电动机拥有较小的体积,机身重量更轻,效率更高并且节能性能更加优越,与抽油机的运行工况十分匹配。为了进一步提高HEDS电动机输出转矩与输出功率,仍需要对电动机主要结构参数进行最优化设计。

1 初步计算HEDS电动机的结构参数

1.1 定、转子极数的确定

按照不同的设计要求,HEDS电动机定、转子极数也会产生相应的组合。根据HEDS电动机的运行原理,定、转子极数可由下列关系式表出^[4]

$$p_d = 2mk \quad (1)$$

$$p_z = p_d \pm 2k \quad (2)$$

式中, p_d 为定子极数; p_z 为转子极数; m 为相数; k 为正整数。HEDS电动机在做电动运行时,为确保电动机自起动的能力在正反两个方向上均能实现,电动机的相数 m 不得小于3。

当定子极数保持恒定时,转子极数越大,即两个相邻的转子极之间的极距角越小,所产生的转矩脉动也就越小。在电动机以转速 n 恒速工作下,每一相电枢绕组产生的换向频率可用下式表示

$$f = \frac{p_z n}{60} \quad (3)$$

根据式(3)可以看出,由于换向频率与转子极数是正比例关系,开关频率直接影响开关损耗和定子与磁极之间的铁损耗,所以转子极数不应选取的过



宋志达/硕士研究生

关键词/Keywords

HEDS电动机 ·
优化 ·
参数 ·
气隙 ·
转矩特性 ·

大。由于奇数的转子极数会导致在结构上产生不平衡力的作用影响电动机的正常工作,所以常常选取略低于定子极数的偶极数作为转子极数。在HEDS电动机设计中较为常用的定、转子极数比分别为6/4、8/6、和12/8。而12/8极电动机在各结构尺寸相同的前提下,无论从功率密度、电动机的效率和产生的转矩脉动而言都优于其他两个定、转子极数比,所以往往都采用12/8极电动机。

1.2 HEDS电动机尺寸的确定

HEDS电动机的几何尺寸同额定功率的关系可由下列关系式表示

$$D_d^2 l = \frac{P_2}{\frac{\pi^2 p_z}{60 p_d} k_\phi k_d k_e k_i \alpha_d B_\delta A_s n_s \eta} \quad (4)$$

式中, D_d 为定子的内径; l 为电动机的轴向长度; P_2 为电动机额定状态下的输出功率; α_d 为定子的极弧系数; B_δ 为电励磁与永磁励磁共同作用产生的混合励磁下的气隙磁密; A_s 为定子电负荷; n_s 为电动机的额定转速; η 为电动机额定工作时的效率; k_ϕ 、 k_d 、 k_e 和 k_i 分别为电动机不同结构参数所对应的系数。

1.3 永磁体尺寸的确定

当电动机定、转子极数与主要的结构尺寸确定下来以后,永磁体的结构尺寸用下式便可以确定

$$w_{pm} = \frac{S_{pm}}{l_{pm}} = \sigma \frac{B_\delta D_d l}{4 B_m l_{pm}} \alpha_\delta \quad (5)$$

$$h_{pm} = \frac{2 B_\delta g - N_f i_f \mu_0}{\mu_0 H_c (1 - \frac{B_m}{B_r})} \quad (6)$$

式中, w_{pm} 、 h_{pm} 分别为永磁体的宽度和高度; σ 为漏磁系数; α_δ 为定、转子极相互重叠部分的角度的和; B_m 为永磁体所嵌入定子轭部处的磁密; l_{pm} 为永磁体轴向长度且 $l_{pm}=l$; g 为定转子之间气隙的长度; N_f 为直流励磁匝数; i_f 为直流励磁电流; μ_0 为空气相对磁导率; H_c 与 B_r 分别为永磁体矫顽力与剩磁密度。

1.4 绕组匝数的选择

每相绕组匝数初选值

$$w = \frac{U \theta_w \eta}{0.87 k_d l B_\delta \frac{\alpha_d \pi D_d}{p_d} \frac{2 \pi n_s}{60}} \quad (7)$$

式中, w 为每相电枢绕组线圈匝数; U 为电动机电枢绕组的相电压; θ_w 为正、负半周上的通电区间。

2 用Ansys软件分析问题的一般步骤

通过Ansys中的电磁模块将HEDS电动机电磁场进行模拟,相关步骤如下^[5]。

2.1 前处理阶段

1) 在Ansys中创建实体模型。首先要创建物理环境,包括坐标系的选取、布尔公差的选择以及系统单位的设定,以确保单位统一。不同的单元类型用来求解不同的问题,由于本文建立的是二维模型,所以单元类型选择PLANE53。由于是对电动机结构参数的研究所以应该建立参数化模型以便不断调整参数,用APDL编写程序在相应的参数下进行修正即可以大大缩短工作时间。用先确立关键点,再利用关键点确定线,线确定面的方式构建基本的几何形状,最后利用布尔操作完成HEDS电动机的几何模型,最终的模型如图1所示。

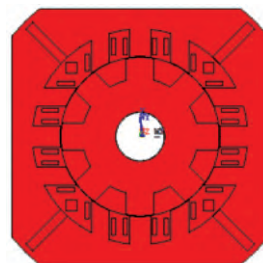


图1 HEDS电动机的物理模型

2) 定义材料属性。需要定义四种材料:气隙与槽的导磁率;绕组线圈的磁导率和电阻率;定、转子铁心的BH曲线;永磁体相对磁导率。矫顽力HC需用矢量表示, MGXX、MGYY分别为永磁体在局部坐标下在X轴与Y轴上的分量。将以上四种材料分别赋予电动机模型上对应的区域并将具有相同特性的区域通过GLUE命令融合起来。

3) 单元网格剖分。在有限元的计算过程里网格剖分作为一个十分关键的步骤,网格剖分的疏

密程度直接影响了求解准确程度与求解所耗费的时间。Ansys自带的智能网格剖分工具可以对网格剖分自动进行控制并得到满意的求解准确度。用户也可手动对模型进行网格剖分,先对线进行剖分再对面剖分,设定理想的网格尺寸以达到所预期的效果。网格剖分后的模型如图2所示。

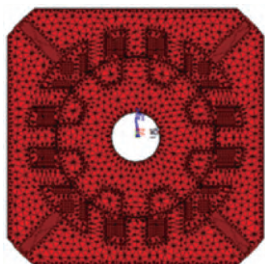


图2 网格剖分后的模型

2.2 求解阶段

1) 加边界条件。在定子铁心外径和转子铁心内径上均赋予边界条件 $A_z = 0$ 以满足第一类边界条件,用以使磁力线平行于电动机的内外边界。

2) 施加载荷。通过安培环路定律可以看出,空载时的磁场分布仅取决于永磁体独自励磁;而负载时的磁场受控于永磁体与电枢电流协同作用。在负载的情况下,只需要在电枢绕组线圈中加载所要求的电流密度即可。

3) 求解。Ansys有很多种求解器,如波前求解器、雅可比共轭梯度求解器及有条件共轭梯度求解器^[6]。对于本文所建立的二维模型常用波前求解器,而对于相对复杂的大模型的求解常用另外两种求解器。

2.3 后处理阶段

求解完成后,如若需要显示磁力线图、磁通密度分布图时则要对求解的结果进行后处理。Ansys提供了强大的后处理功能,如磁力线、等值线、矢量显示、磁力和磁力矩都可以由后处理或通过计算得到^[7]。图3为电动机空载运行下的磁力线图。

3 实验研究

3.1 用Ansys软件分析结构参数对输出转矩的影响

电动机在进行初始设计时,一次设计出符合

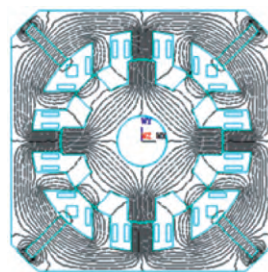


图3 空载运行的磁力线图

要求的电动机是不可能的,往往要对电动机的几个重要结构参数不断地做调试才能得到预期的要求。气隙和定、转子结构影响着HEDS电动机的整个磁路,随着气隙或定、转子结构的改变,磁路状态也随之发生改变,从而HEDS电动机的转矩特性也因为磁路状态的改变而改变。为了弄清HEDS电动机的转矩特性与不同尺寸结构下的关系,本文利用Ansys对HEDS电动机气隙之间的长度、定转子齿相对长度及转子极弧三个主要结构参数对电动机转矩特性的作用进行模拟。

由于电动机的结构参数是在电动机额定工作的情况下计算得到的,而HEDS电动机在额定工作时仅由永磁体单独励磁,所以在对电动机气隙之间的长度、定转子齿相对长度、转子极弧的大小与转矩特性的关系进行仿真时只需考虑永磁体独自励磁不需要考虑电励磁的影响^[8]。所以在整个分析过程里,取电动机的额定转速 $n = 1\,500\text{ r/min}$,电枢电流幅值为 8.2 A 。

3.1.1 气隙长度对转矩特性的影响

电动机的气隙长度 g 分别取 0.2 mm 、 0.4 mm 、 0.6 mm 、 0.8 mm 和 1 mm ,转子外径分别取 74.6 mm 、 74.2 mm 、 73.8 mm 、 73.4 mm 和 73 mm ,对应的转子内径作相应的改变确保电动机其他结构尺寸不变。

伴随气隙长度不断地变小,励磁磁链最大值与最小值之间差值将不断地变大,也就是 $\partial\psi_p/\partial\theta$ 比值变大,若电枢电流保持不变,电动机产生的励磁转矩 $T_p = i\partial\psi_p/\partial\theta$ 也随之变大。因此,减小气隙长度可以提升电动机励磁转矩^[9-10]。

以便更加直观地展现出气隙长度对转矩特性的影响,图4为输出转矩在不同气隙长度下的波

形,表1为对应列出在不同气隙长度时输出转矩最大值、输出转矩最小值、输出转矩平均值以及转矩脉动率。

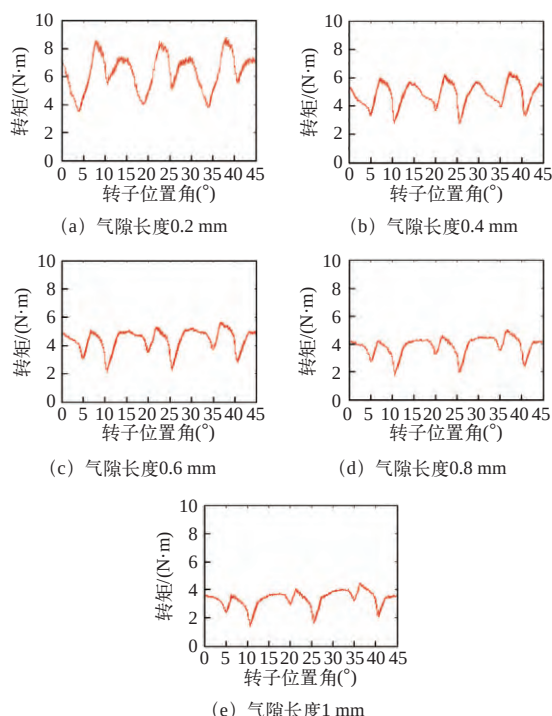


图4 输出转矩在不同气隙长度下的波形

表1 输出转矩在不同气隙长度下的值

气隙长度/mm	0.2	0.4	0.6	0.8	1
转矩最大值/(N·m)	8.51	6.73	5.88	4.97	4.36
转矩最小值/(N·m)	3.35	2.88	2.16	1.73	1.24
转矩平均值/(N·m)	5.77	5.15	4.38	3.76	3.35
转矩脉动率(%)	89	75	85	86	93

从图4和表1可得:气隙长度不断变大使得电动机输出转矩最大值、输出转矩最小值以及输出转矩平均值均单调变小;转矩脉动率却并不伴随气隙长度而进行单调变化,转矩脉动率在气隙长度为0.4 mm时相对气隙长度为0.2 mm时有着明显的减小,然而气隙长度增加到0.4 mm后继续变大时,伴随气隙长度变大输出转矩脉动率也继续变大。

为了进一步提升输出转矩与输出功率应该令电动机气隙长度相应地变小,若气隙长度逐步变大,输出转矩平均值将不断变小;当气隙长度略大时,电动机的转矩脉动率随着气隙长度变小而逐步变小,然而当气隙长度减小到某一数值时,

若继续减小气隙长度,转矩脉动率却逐步变大。根据仿真结果得出在气隙长度为0.4 mm时,电动机转矩脉动率相对最小,这时电动机输出转矩也越稳定。

3.1.2 定、转子齿相对长度对转矩特性的影响

仿真过程中为了使不同的定、转子齿相对长度能够进行合理的对比,应保证绕组匝数不变以及其他结构参数恒定,使定、转子齿长度和维持在一定值仅改变定、转子齿相对长度。定、转子齿相对长度分别为16 mm/7 mm、14 mm/9 mm、12 mm/11 mm、10 mm/13 mm和8 mm/15 mm。

伴随电动机转子齿长度不断地变大,励磁链最大值与最小值之间差值将不断地变大,也就是 $\partial\Psi_p/\partial\theta$ 比值变大,若电枢电流保持不变,励磁转矩 $T_p = i\partial\Psi_p/\partial\theta$ 也随之变大。所以增加电动机的转子齿长度可以使励磁转矩进一步得到提升。

以便更加直观地展现出定、转子齿相对长度对转矩特性的影响,图5为输出转矩在不同定、转子齿相对长度下的波形,表2为对应列出在不同

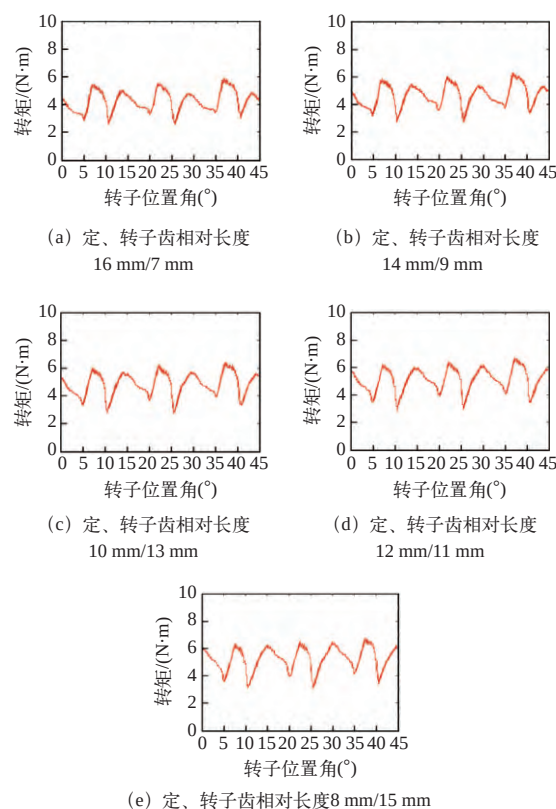


图5 输出转矩在不同定、转子齿相对长度下的波形

定、转子齿相对长度时输出转矩最大值、输出转矩最小值、输出转矩平均值以及转矩脉动率。

表2 输出转矩在不同定、转子齿相对长度下的值

定、转子齿相对长度/mm	16/7	14/9	12/11	10/13	8/15
转矩最大值/(N·m)	5.94	6.47	6.73	6.93	7.07
转矩最小值/(N·m)	2.35	2.66	2.88	2.92	3.01
转矩平均值/(N·m)	4.53	4.88	5.15	5.33	5.38
转矩脉动率(%)	79	78	75	75	75

由图5可以看出,不同的定、转子齿相对长度对输出转矩的波形几乎没有影响,仅仅是垂直方向上的移动;根据表2可以得到,伴随定子齿长度的变小电动机输出转矩最大值、最小值以及平均值均明显变大,而电动机的转矩脉动率随着定子齿长度的变小虽然有逐渐变小的趋势,效果却不是十分明显。

为了进一步提升输出转矩与输出功率应该令电动机定子齿长度相应地变小,当定子齿长度逐渐变大时,输出转矩平均值将不断变小;电动机的转矩脉动率随着电动机定子齿长度的变小呈单调下降的趋势,但是效果不明显。虽然定子齿长度的减小可以相应地提高输出转矩值,由于定子齿长度与电枢绕组匝数息息相关,为了保证绕组匝数不受影响,定子齿长度不宜过小。

3.1.3 转子极弧对转矩特性的影响

定子极弧保持15°不变,转子极弧分别取15°、16°、17°、18°、20°和25°。

伴随电动机转子极弧不断地变大,励磁磁链最大值与最小值之间的差值先是不断地变大,也就是 $\partial\Psi_p/\partial\theta$ 比值变大,若电枢电流保持不变,励磁转矩 $T_p=i\partial\Psi_p/\partial\theta$ 也随之变大。然而当转子极弧变大到某一特定值时,励磁磁链最大值与最小值之间的差值将显著变小,也就是 $\partial\Psi_p/\partial\theta$ 比值变小,若电枢电流维持恒定,励磁转矩 $T_p=i\partial\Psi_p/\partial\theta$ 将大幅度变小。所以选择适中的转子极弧可以使电动机的励磁转矩进一步得到提升^[11]。

以便更加直观地展现出转子极弧对转矩特性产生的影响,图6为输出转矩在各种数值的转子极弧下的波形,表3为对应列出在不同转子极弧时输

出转矩最大值、输出转矩最小值、输出转矩平均值以及转矩脉动率。

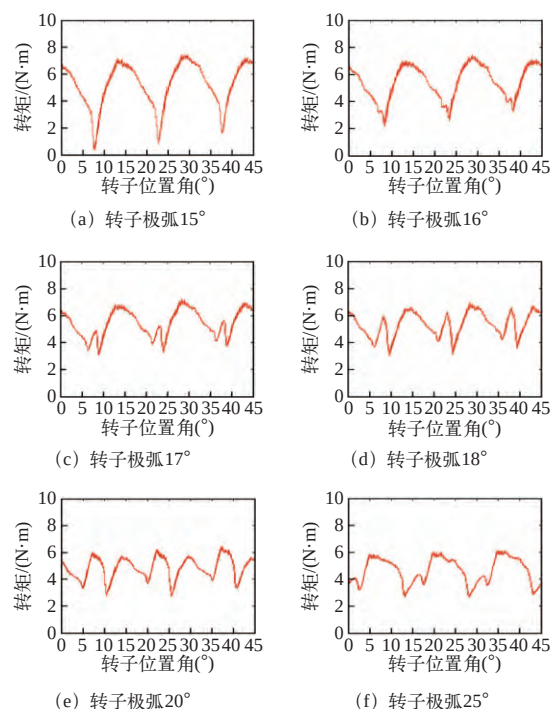


图6 输出转矩在不同转子极弧下的波形

表3 输出转矩在不同转子极弧下的值

转子极弧(°)	15	16	17	18	20	25
转矩最大值/(N·m)	7.58	7.43	7.23	6.88	6.73	6.13
转矩最小值/(N·m)	0.13	2.14	3.02	2.91	2.88	2.7
转矩平均值/(N·m)	5.33	5.44	5.5	5.37	5.15	4.6
转矩脉动率(%)	140	97	77	74	75	75

由图6可以看出,不同数值下的转子极弧在一个通电周期内转矩脉动次数也不一样:15°与16°时波形只有3个脉动波构成,而18°与20°时脉动波的个数却多出一倍且幅值比较接近,但17°与25°时波形虽然也是由6个脉动波构成但幅值却差距很大;根据表3可以得出,伴随转子极弧不断地变大,输出转矩最大值呈下降趋势;而输出转矩最小值先是伴随转子极弧的变大明显提高,至17°达到最大,若再增加转子极弧的大小输出转矩最小值反而变小;转子极弧对转矩脉动率产生的作用十分明显,转子极弧由15°逐步增加至17°转矩脉动率急速减小,但继续提高转子极弧后对转矩脉动率没有起到明显作用而是维持在一稳定数值上。

为了进一步提升输出转矩与输出功率可以适当增加转子极弧的度数,然而当转子极弧过大时,电动机输出转矩的平均值将大幅度变小;电动机的转矩脉动率随着电动机转子极弧的变大先大幅变小最后稳定到一数值。根据仿真结果得出当转子极弧的大小为 17° 时,电动机输出转矩平均值相对最大,转矩脉动率也相应较低。

3.2 样机测试

上文利用Ansys仅对HEDS电动机气隙之间的长度、定子齿相对长度和转子极弧三个主要结构参数对电动机转矩特性的作用进行模拟并进行优化,通过电动机结构参数的相关公式结合有限元修正最终确定了750 W电动机的结构参数如表4所示。

表4 电动机的主要结构参数

参数	数值	参数	数值
定子极	12	转子极	8
定子外形尺寸/mm ²	120 × 120	气隙厚度/mm	0.4
定子内径/mm	75	转子内径/mm	23
定子极弧/ $^\circ$	15	转子极弧/ $^\circ$	17
定子齿高/mm	12	转子齿高/mm	11
铁心长度/mm	80	励磁绕组匝数	250
每相电枢绕组匝数	80	永磁体剩磁/T	1.2
导磁桥厚度/mm	2.8	永磁体矫顽力/(kA/m)	800
永磁体尺寸/mm ³	80 × 23 × 4.5	永磁体材料	Nd-Fe-B

基于上述分析,设计并制造了HEDS电动机的原理样机,如图7所示。图8a为基于Ansys有限元分析得到的最优结构尺寸HEDS电动机在额定工作状态下的输出转矩波形,图8b为额定状态下样机实测的输出转矩波形。从图8中可以看出实测的波形在数值上略低于理论波形,那是由于在仿真的过程中忽略了温度场等作用,但有限元分析的电动机输出转矩波形与实测波形基本保持一致,这充分验证了理论分析方法的合理性与可行性。

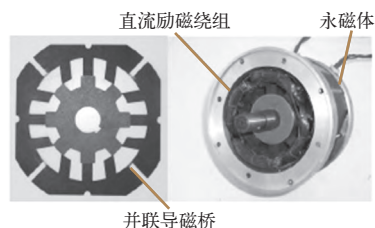


图7 HEDS电动机原理样机

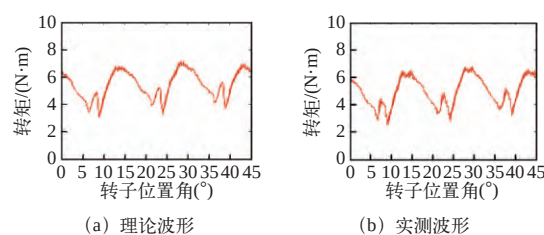


图8 750 W电动机额定状态输出转矩波形

4 结束语

本文通过Ansys有限元分析软件建立了HEDS电动机的二维场路耦合模型,并通过相关结构参数的调整对电动机的转矩特性进行了仿真分析,根据结构参数的相关公式与仿真结果的修正后得到了750 W电动机的最优结构参数,并制造了试验样机。通过样机测试与理论数据比较验证了理论分析的合理性。针对本文的研究内容与不足,得出以下结论。

1) Ansys是目前世界上用户数量增长最快的计算机辅助工程软件,它可以对单一的物理场进行研究,也可以对一个综合的多物理耦合场相互间的作用进行研究。本文忽略了温度场对输出转矩产生的影响,为了更加准确地得到最接近真实的结果仍需要作深入的研究。

2) 为了进一步提升输出转矩与输出功率可以适当减小气隙长度、相应减小定子齿长度以及适当增加转子极弧等通过调节结构参数的方式加以实现。但需要注意的是,过小的气隙长度会增加转矩脉动,过小的定子齿长度直接影响绕组匝数以及过大的转子极弧会令输出转矩急剧下滑。

3) HEDS电动机与永磁电动机相比在空间上多了电励磁绕组,解决了永磁电动机在驱动与调压性双方面的不足,相比永磁电动机具有较宽的磁通调节范围,对于电动汽车等需要较大范围变速驱动等应用场合较为适用。

参考文献

- [1] 张卓然,耿伟伟,戴冀,等. 新型混合励磁电机技术与进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 27-36.

(下转第52页)

参考文献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001 (10): 5-12.
- [2] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析 [J]. 电网技术, 2001 (3): 66-69.
- [3] 李文才, 李燕, 王希平, 等. 低压配电网的谐波损耗与综合治理 [J]. 电气应用, 2009 (3): 48-50.
- [4] 周海涛, 李铎. 浅谈配电网三相不平衡产生的原因与对策 [J]. 中国科技博览, 2011 (24): 80.
- [5] 李彪. 落水洞电厂6 kV母线三相电压不平衡原因分析 [J]. 云南水利发电, 2006, 21 (5): 51-52.
- [6] 宋冰. 35 kV及以下小电流接地系统发生电压不平衡原因分析 [J]. 科技资讯, 2007 (12): 50.
- [7] 袁伟. 浅谈小电流接地系统母线电压不平衡的原因分析及对策 [C]. 云南电力技术论坛论文集, 2010: 1702-1708.
- [8] 周鹰翔. 小电流接地系统发生电压不平衡原因分析 [J]. 中国电力教育, 2009 (2): 308-309.
- [9] 覃翠娥. 中性点不接地系统电压不平衡原因分析及处理 [J]. 安徽电力, 2013 (4): 27-29.
- [10] 林海雪. 电能质量国家标准系列讲座第5讲三相电压不平衡标准 [J]. 建筑电气, 2011 (10): 25-29.
- [11] GB/T 15543—2008 电能质量三相电压不平衡 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [13] Makram E B, Thompson R L, Girgis A A. A new laboratory experiment for transformer modeling in the presence of harmonic distortion using a computer controlled harmonic generator [J]. IEEE Transactions on Power System, 1988, 3 (4): 1857-1863.
- [14] Hurley W G, Gath E, Breslin J G. Optimizing the AC resistance of multilayer transformer windings with arbitrary current waveforms [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 15 (2): 369-376.

(收稿日期: 2015-08-25) EA

(上接第33页)

- [2] 赵朝会, 张卓然, 秦海鸿. 混合励磁电机的结构和原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] Zhang Jianzhong, Cheng Ming, Zhu Xiaoyong. A novel three-phase doubly salient permanent magnet generator [C]. ICEMS, Nanjing, China, 2005: 407-411.
- [4] 张建忠, 程明. 新型直接驱动外转子双凸极永磁风力发电机 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (12): 15-21.
- [5] 黄劭刚, 夏永洪, 张景明. 基于ANSYS软件的电机电磁场有限元分析 [J]. 微特电机, 2004 (5): 12-14.
- [6] 王朔, 冯浩. 双转子异步电动机电磁场的有限元分析 [J]. 机电工程技术, 2007, 36 (10): 25-28.
- [7] 杜杏, 梅顺齐, 王志伟, 等. 圆筒式磁力驱动机构磁转子的耦合磁场分析 [J]. 轻工机械, 2011, 29 (6): 56-58, 62.
- [8] Chen Zhihui, Sun Yaping, Yan Yangguang. Static characteristics of a novel hybrid excitation doubly salient machine [C]. IEEE ICEMS 2005: 718-721.
- [9] 胡勤丰, 孟小利, 严仰光. 双凸极永磁电机气隙对电机静态特性的影响研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37 (1): 25-28.
- [10] 程晓玲, 王晓远. 气隙长度对双凸极永磁电动机转矩的影响研究 [J]. 微电机, 2008, 41 (11): 15-18.
- [11] 孙亚萍, 陈志辉, 严仰光. 转子极弧对永磁双凸极电机性能的影响 [J]. 微特电机, 2006 (12): 10-12.

(收稿日期: 2015-10-14) EA