

用于调相机-飞轮储能系统的磁齿轮调速器设计

李志强,王东阳,肖洋

(中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:介绍一种用于新能源场站调相机-飞轮储能的磁齿轮调速器的电磁设计。基于同心式永磁齿轮的运行机理,该调速器通过改变定子绕组电流的频率,在调相机的固定转速条件下,实现飞轮的无级变速及其与调相机之间的功率交换,使调相机在传统的无功调节功能基础上,增加有功支撑的能力。确定了磁齿轮调速器的基本结构和调速、供电频率范围等基本运行条件,采用有限元软件计算和对比具有不同的永磁体布置与充磁方向、调制环和定子槽基本结构尺寸的磁齿轮调速器的电磁性能,并选定内置V形永磁体和一定的调制块厚度、宽度及定子槽形,作为最终设计方案。该设计方案显著提高了磁齿轮调速器的转矩密度,并具有较高的运行效率。

关键词:调相机;飞轮储能;磁齿轮调速器;转矩密度;效率

中图分类号:TM31

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202305012

0 引言

随着国家能源战略的推进,新能源比例大幅提高,电力系统的电压支撑、惯量支撑和调频能力持续减弱,安全稳定运行受到前所未有的挑战^[1-3]。目前新型分布式调相机已成为改善新能源场站电压和惯量支撑的关键设备,其在提升新能源场站短路比和动态电压支撑方面发挥了重要作用并得到广泛认可。然而,调相机本身转动惯量相对较小,在改善新能源场站惯量支撑方面的作用还不明显。为提高调相机系统的转动惯量,通常采用增加飞轮的方式。调相机系统对系统惯性时间常数的贡献与其本身的机械储能成正比,为降低设备体积和运行损耗,可采用“调相机+齿轮箱+高速飞轮”的方案。若将齿轮箱改为可变速设备,则飞轮转速可大范围变化以释放或吸收更多的机械能,不仅可以提供更高的惯量支撑,而且能够参与系统一次调频,使调相机具备优异的电压、惯量支撑能力和一定的一次调频能力。飞轮储能装置使用寿命长,能够满足新能源厂站比较频繁的一次调频需求^[4-5],与电化学储能配合可以很好地改善新能源场站的有功调节特性。

基于同心式磁齿轮的工作原理^[6-7],研究者提出了一种具有单电气端口、双机械端口的变速装置,将调相机和飞轮分别与一个机械端口相连,通过变流器调节电气端口的电流频率,可以实现调相机和飞轮之间转速的无级差变换和转矩的传递。基于这种

磁齿轮调速器,调相机和飞轮组成一套兼具无功和有功调节能力的储能系统。磁齿轮调速器电气端口的功率只占储能系统传递的峰值功率的一小部分,大幅降低了变流器容量,极大降低了造价^[8-9]。

近年来,研究人员尝试将类似的多电气/机械端口磁齿轮式电机或调速器应用于风力发电^[10-11]、电动汽车^[12-14]等新能源领域,并提升其转矩、效率、功率因数等方面的性能,以适应各种具体的应用场合。例如,针对应用于风力发电的一台具有双电气端口、单机械端口的磁齿轮式电机,文献^[11]对定子铁心、定子槽、调制块等的几何参数进行了优化设计,以改进转矩性能,并提高效率;针对应用于混合动力新能源汽车的具有单电气端口、双机械端口的磁齿轮式电机,文献^[12-14]则关注影响功率因数、调制环损耗、机械强度等的主要因素,并从电机设计或控制策略方面研究相应的改进措施。磁齿轮式电机或调速器的工作原理源于同心式磁齿轮,两者都具有调制环、永磁体等基本结构。为提升同心式磁齿轮的转矩密度或者转矩性能价格比,研究者对调制环、永磁体等的形状^[15]及永磁体的充磁方式和布置位置^[16-17]进行改进。上述同心式磁齿轮或磁齿轮调速器的研究工作主要是针对中、低转速和功率的应用场合开展的。用于调相机-飞轮储能系统的磁齿轮调速器目前仅存在概念上的设计,还需要在借鉴前人经验的基础上,进一步完成适应其应用场合的具体设计方案。考虑到高转速应用场景对其机械结构可靠性的要求,这种磁齿轮调速器需要采用比较大的气隙,这不利于其转矩密度的提升,因此,提升转矩密度是电磁设计中需要关注的重点之一。

本文介绍了调相机-飞轮储能系统及用于该系统的磁齿轮调速器的基本结构和工作原理,给出了满足一定飞轮转速和变流器频率调节范围的磁齿轮

收稿日期:2022-12-11;修回日期:2023-05-04

在线出版日期:2023-05-30

基金项目:中国电科院自有基金项目(基于磁齿轮耦合的高惯量储能调相机系统设计)

Project supported by Self-funded Project of China Electric Power Research Institute(Design of High-inertia Energy-storage Synchronous Condenser System with Magnetic-gear Coupling)

调速器的基本电磁设计。在此基础上,采用有限元模型,着重计算和对比了具有不同的永磁体布置与充磁方向、调制环和定子槽基本尺寸的磁齿轮调速器的转矩,进一步提出了提升磁齿轮调速器转矩密度的具体结构的电磁设计方案。

1 用于调相机-飞轮储能系统的磁齿轮调速器

1.1 同心式磁齿轮概述

本文所述磁齿轮调速器的基本原理源于英国学者 K. Atallah、D. Howe 等提出的同心式磁齿轮^[6-7],如附录 A 图 A1 所示。这种磁齿轮利用调制块与隔磁块形成的交变磁导对内外磁环磁场的调制作用,使不同极对数和转速的内外磁环之间形成稳定的转矩传递。同心式磁齿轮所有永磁体同时贡献转矩,其转矩密度远高于传统的磁齿轮,基本可以和机械齿轮媲美,使相关研究进入了新阶段。

同心式磁齿轮的主要组成部分包括磁极数较少的内磁环、磁极数较多的外磁环及由导磁的调制块和隔磁块组成的调制环。一般情况下,上述3个组件在工作过程中任意一个固定不动,另外2个转动,其传动比等于2个转动组件的极对数(对调制环而言为调制块个数)的比值。

1.2 磁齿轮调速器及其在调相机-飞轮储能系统中的应用

基于同心式磁齿轮的结构,研究者将其中的1个或者2个磁环替换成带有三相绕组的定子,以静止线圈在电激励下形成的旋转磁场代替转动的永磁体形成的旋转磁场,构成了磁齿轮式电机。例如,将同心式磁齿轮的一个磁环替换成具有三相绕组的定子,调制环和内磁环作为转子,可以形成具有单电气端口、双机械端口的新型电机。在混合动力新能源汽车中,这种电机的三相绕组接变频器,其作用类似双馈风力发电机的控制绕组,调制环和内磁环分别连接车轮转轴上的锥齿轮和发动机,随着三相绕组电流频率的变化,可以实现发动机与车轮转速非固定比值的连续调节^[12-14]。

本文研究的磁齿轮调速器与同心式磁齿轮及磁齿轮式电机的磁场耦合机理一致,它与储能调相机系统中其他装置的连接如附录 A 图 A2 所示。储能调相机系统中的磁齿轮调速器需要实现转速恒为 3 000 r/min 的调相机与转速连续变化的飞轮之间的转矩传递,非固定转速比的技术特点与应用于混合动力新能源汽车的磁齿轮式电机相似,所不同的是前者需要适应高得多的工作转速,并提供更大的功率。

储能调相机系统用磁齿轮式调速器需要采用较大的气隙,以适应高速转子对结构可靠性的需要。

在相同的永磁体用量和定子电流条件下,磁齿轮式调速器采用大气隙相比采用小气隙难以提升转矩/功率密度,造成体积较大,限制其应用。因此,在兼顾结构可靠性的条件下提高转矩/功率密度是储能调相机用磁齿轮调速器电磁设计的关键。另外,高速条件下铁心和永磁体中形成较高频率的涡流及相应的损耗,降低系统的效率;过大的转矩脉动会冲击系统的可控性与稳定性。这些问题也要在电磁设计中予以关注。

2 磁齿轮调速器的工作原理

假设磁齿轮调速器的内转子磁环和定子三相绕组分别形成具有 p_r 对极和 p_c 对极的基波旋转磁场,调制块个数为 N ,根据同心式磁齿轮依靠谐波磁场耦合的工作原理,这些结构满足:

$$N = p_r + p_c \quad (1)$$

内转子磁环、定子基波旋转磁场和调制环的转速 Ω_r 、 Ω_c 和 Ω_m 满足:

$$\Omega_r = \frac{N\Omega_m - p_c\Omega_c}{p_r} \quad (2)$$

工作过程中, Ω_m 和 Ω_r 方向相同,假定二者恒为正,其方向作为所有的转速和转矩的参考方向。当它们与 Ω_m 和 Ω_r 方向相同时为正,否则为负;所有的机械功率和电磁功率对对应的转子或旋转磁场形成驱动性作用的为正,形成制动性作用的为负。如果三相电流的频率为 f_c ,则根据式(2)可得:

$$\Omega_r = \frac{N\Omega_m - 2\pi f_c}{p_r} \quad (3)$$

规定 f_c 的符号与 Ω_c 的符号保持一致:当 $f_c = 0$ 时,三相绕组通入直流电, $\Omega_c = 0$,内转子/飞轮的转速为 $\Omega_{r0} = N\Omega_m/p_r$;当 $f_c > 0$ 时, Ω_c 与 Ω_m 同方向, $\Omega_r < \Omega_{r0}$;当 $f_c < 0$ 时, Ω_c 与 Ω_m 反方向, $\Omega_r > \Omega_{r0}$ 。式(3)说明,通过调节三相电流的频率,就可以在恒定的调制环转速条件下,实现内转子/飞轮的无级差转速调节。

当飞轮转速发生变化时,若忽略损耗,则磁齿轮调速器的3个端口形成如下的功率与转矩平衡:

$$P_r + P_m + P_c = T_r\Omega_r + T_m\Omega_m + T_c\Omega_c = 0 \quad (4)$$

$$T_r + T_m + T_c = 0 \quad (5)$$

式中: P_r 为内转子传递给调制环的功率; P_m 为调相机传递给调制环的功率; P_c 为定子三相绕组的输入电功率; T_r 为内转子磁场对调制环的转矩; T_m 为调相机对调制环的输入转矩; T_c 为定子磁场对调制环的电磁转矩。

综合式(2)、(4)、(5),可以得到 T_c 和 T_m 存在如下关系^[8]:

$$\frac{T_c}{T_m} = -\frac{p_c}{N} \quad (6)$$

为说明磁齿轮调速器的变流器功率与飞轮的调速范围之间的关系,定义 K_p 如下:

$$K_p = \frac{P_c}{P_m} = \frac{T_c \Omega_c}{T_m \Omega_m} \quad (7)$$

考虑到式(6),得到:

$$K_p = -\frac{p_c \Omega_c}{N \Omega_m} \quad (8)$$

根据式(2)和式(8)可得:

$$\Omega_r = \frac{N \Omega_m}{p_r} \left(1 - \frac{p_c \Omega_c}{N \Omega_m} \right) = \frac{N \Omega_m}{p_r} (1 + K_p) \quad (9)$$

根据磁齿轮调速器的上述工作原理,储能调相机系统具有如表1所示的工作状态。式(3)和式(9)说明,变流器的频率调节范围和承担的调频功率与所需要的飞轮变速范围成正比。

3 磁齿轮调速器电磁性能的计算与设计方案的改进

3.1 基本结构设计及其转矩性能

磁齿轮调速器的设计需要综合考虑飞轮的变速范围、变流器的功率和变频范围、最大转矩、效率、转子的机械强度等基本要求和性能。磁齿轮调速器基本结构设计中的首要问题是定子和内转子极数的选取。根据式(1)和式(3),这2个极对数之和(即调制块的个数)不宜选得过大,否则将需要过高的定子电流频率,给变流器的设计与制造以及磁齿轮调速器的效率造成巨大挑战。同时,考虑到在有限直径的定子铁心内绕制多极绕组的难度,定子极数不宜过多。另一方面,根据式(3),内转子的极数不宜过少,否则内转子的转速过高,可能引发机械强度和可靠性问题。本文采用的磁齿轮调速器定子和内转子极对数分别为10和7,原始设计(设计1)的内转子采用表贴式径向充磁永磁体,基本结构截面如附录B图B1所示,主要设计参数如附录B表B1所示。为提高高速运转下整体结构的可靠性,内、外气隙较大,分别为30 mm和20 mm。将定子通直流电流时的内转子转速(即 $\Omega_{r0}=7285.7 \text{ r/min}$)作为内转子/飞轮的额定转速,飞轮的工作转速在额定转速的 $\pm 20\%$ 范围内,即5828.6~8742.9 r/min,相应的定子供电频

率为 $\pm 170 \text{ Hz}$,定子磁场基波转速为 $\pm 1020 \text{ r/min}$ 。

为了验证磁齿轮调速器工作的可行性,建立动态电磁有限元模型,计算定子通入额定电流,内转子/飞轮的转速分别达到8742.9、7285.7、5828.6 r/min,并且以最大转矩储存和释放能量时的动态电磁性能。图1给出表1中6个状态($\Omega_r > \Omega_{r0}$ 加速、 $\Omega_r > \Omega_{r0}$ 减速、 $\Omega_r = \Omega_{r0}$ 加速、 $\Omega_r = \Omega_{r0}$ 减速、 $\Omega_r < \Omega_{r0}$ 加速、 $\Omega_r < \Omega_{r0}$ 减速)下2个转子的动态电磁转矩曲线。由图可知,磁齿轮调速器在各种工作状态下都能够形成稳定的电磁转矩。表2为最大电磁转矩及相应的电磁功率、电磁损耗、效率、转矩脉动等计算结果,其中铜耗按照每相绕组 0.0167Ω 的电阻计算得到。由表可知,磁齿轮调速器在各种工作状态下功率流向与表1给出的理论分析结果一致,并且具有较高的效率。

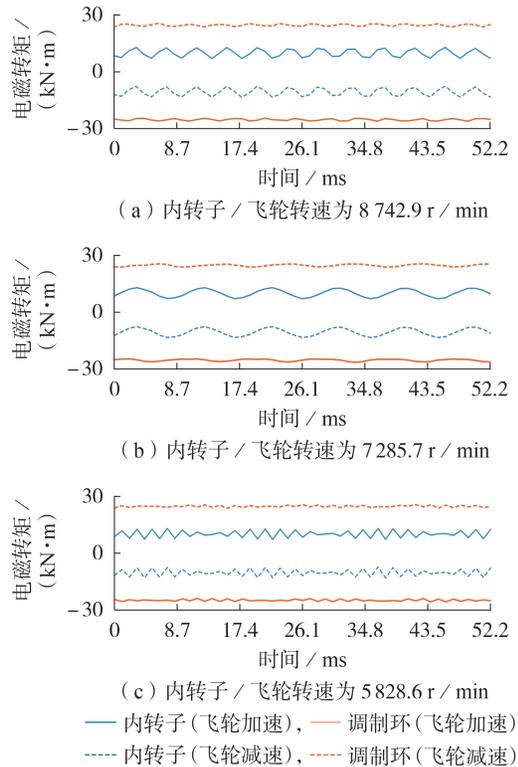


图1 原始设计在不同工作状态下的动态电磁转矩
Fig.1 Dynamic electromagnetic torques of initial design under different operation conditions

表1 储能调相机系统的工作状态

Table 1 Operation status of energy storage system with synchronous condenser

内转子/飞轮	调相机/调制环	变流器/定子		
		电磁转矩	变流器动作情况	功率流向
稳态 $d\Omega_r/dt = 0 (P_r \approx 0)$	$P_m \approx 0$	$T_c \approx 0$	维持供电频率 f_c 不变	$P_c \approx 0$
加速 $d\Omega_r/dt > 0 (P_r < 0)$	从电网吸收功率 ($P_m > 0$)	$T_c < 0$	向负方向调整供电频率 ($df_c/dt < 0$)	若 $\Omega_r > \Omega_{r0} (f_c < 0)$, 则从电网吸收功率 ($P_c > 0$) 若 $\Omega_r = \Omega_{r0} (f_c = 0)$, 则与电网无功功率交换 ($P_c = 0$) 若 $\Omega_r < \Omega_{r0} (f_c > 0)$, 则向电网发出功率 ($P_c < 0$)
减速 $d\Omega_r/dt < 0 (P_r > 0)$	向电网发出功率 ($P_m < 0$)	$T_c > 0$	向正方向调整供电频率 ($df_c/dt > 0$)	若 $\Omega_r > \Omega_{r0} (f_c < 0)$, 则向电网发出功率 ($P_c < 0$) 若 $\Omega_r = \Omega_{r0} (f_c = 0)$, 则与电网无功功率交换 ($P_c = 0$) 若 $\Omega_r < \Omega_{r0} (f_c > 0)$, 则从电网吸收功率 ($P_c > 0$)

表 2 磁齿轮调速器原始设计的电磁性能

Table 2 Electromagnetic performances of initial design of magnetic-gear speed regulator

运行参数	数值					
	$\Omega_r > \Omega_{r0}$ 状态	$\Omega_r = \Omega_{r0}$ 状态	$\Omega_r < \Omega_{r0}$ 状态			
内转子 / 飞轮转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	8742.9	7285.7	5828.6			
定子电流频率 / Hz	-170	0	170			
定子基波磁场转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	-1020	0	1020			
性能	数值					
	$\Omega_r > \Omega_{r0}$ 加速	$\Omega_r > \Omega_{r0}$ 减速	$\Omega_r = \Omega_{r0}$ 加速	$\Omega_r = \Omega_{r0}$ 减速	$\Omega_r < \Omega_{r0}$ 加速	$\Omega_r < \Omega_{r0}$ 减速
内转子电磁转矩 / ($kN \cdot m$)	10.210	-10.249	10.357	-10.060	10.231	-10.240
调制环电磁转矩 / ($kN \cdot m$)	-24.837	24.799	-25.153	24.431	-24.840	24.827
定子电磁转矩 / ($kN \cdot m$)	-14.627	14.550	-14.796	14.371	-14.609	14.587
内转子电磁功率 / MW	9.348	-9.383	7.902	-7.675	6.245	-6.250
调制环电磁功率 / MW	-7.803	7.791	-7.902	7.675	-7.804	7.800
定子电磁功率 / MW	1.545	-1.592	0	0	-1.559	1.550
永磁体损耗 / kW	39.5	41.7	34.6	36.5	38.7	39.2
铁耗 / kW	52.4	46.6	11.0	8.8	48.9	48.6
铜耗 / kW	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
不计摩擦的效率 / %	98.7	98.8	99.1	99.1	98.5	98.5
内转子转矩脉动 / %	28.7	28.8	27.8	28.5	28.2	28.0
调制环转矩脉动 / %	3.3	3.9	3.5	3.6	3.7	4.0

为提高大气隙磁齿轮调速器的转矩 / 功率密度,下文根据相关文献中的经验,首先改进对转矩 / 功率影响较大的结构,即永磁体的布置方式和充磁方向;然后在具有最大转矩的永磁体设计基础上,调整调制环尺寸;进一步在具有最大转矩的永磁体和调制环组合设计的基础上,调整定子槽形设计,并最终形成 3 个结构具体的电磁设计方案。上述设计工作以提高转矩 / 功率密度为首要的改进方向,并兼顾效率和转矩脉动,以使最终选定的设计方案的这 2 个指标在可以接受的范围内。各设计方案都通过对内转子 / 飞轮达到 8742.9 r/min 并以最大转矩储存能量时的电磁性能进行取舍。

3.2 永磁体布置方式和充磁方向的改进

在保持永磁体用量与原始设计相等的前提下,内转子分别采用 V 形内置式(设计 2)和 Halbach 阵列永磁体(设计 3),定子和调制块结构均与原始设计保持一致。内置式永磁体不需要束缚,可以适当减小气隙,因此设计 2 的内气隙减小到 20 mm,设计 2 的外气隙和设计 3 的 2 个气隙均与原始设计一致。尝试按图 2 设置设计 2 的永磁体长度 h_{pm} 、宽度 w_{pm} 和开口角度 θ ,按图 3 设置设计 3 的副磁极充磁角度 α ,以提高 2 个设计的最大电磁转矩。表 3 为设计 2 和设计 3 的电磁性能。

对比设计 1—3 的电磁性能可以发现,在永磁体用量相同的前提下,设计 2 明显地具有最高的转矩和效率。相对于设计 1,设计 2 的内转子转矩脉动略有增加,调制环转矩脉动明显下降。根据永磁电机中的相关经验,采用内置 V 形永磁体可以实现聚磁效果,提升主磁通,并可以增加一定的磁阻转矩,而且内置式永磁体带给转子的可靠性提升为适当调小

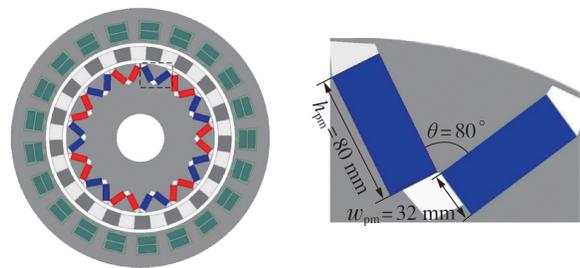


图 2 内转子 V 形内置永磁体设计

Fig.2 V-shaped permanent magnet design of inner rotor

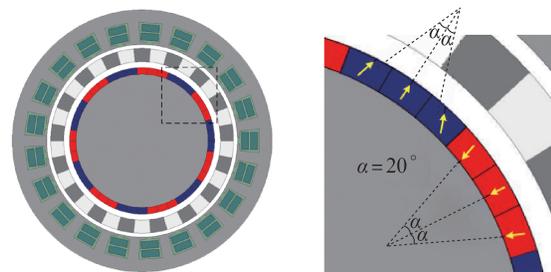


图 3 内转子 Halbach 阵列永磁体设计

Fig.3 Halbach array permanent magnet design of inner rotor

表 3 不同永磁体设计的电磁性能

Table 3 Electromagnetic performances of different permanent magnet designs

性能	数值	
	设计 2	设计 3
内转子电磁转矩 / ($kN \cdot m$)	11.936	11.017
调制环电磁转矩 / ($kN \cdot m$)	-29.149	-26.712
不计摩擦的效率 / %	99.1	98.9
内转子转矩脉动 / %	28.8	28.7
调制环转矩脉动 / %	2.6	3.5

气隙提供了可能,这些因素有助于提升永磁电机的转矩密度。本节的仿真结果表明,将内置 V 形永磁

体拓展到磁齿轮调速器,显著提升了包括转矩密度在内的主要电磁性能。

3.3 调制环的厚度和宽度的改进

调制环是耦合定子和内转子磁场的关键结构,其几何尺寸对转矩的影响在磁齿轮调速器的设计中不容忽视。本节通过改变如附录B图B2所示的调制环的厚度 h_m 和宽度(以极弧系数 $\delta=\theta_{m1}/\theta_{m2}$ 表示, θ_{m1} 为调制块宽度角, θ_{m2} 为调制环极距角),改善调制环对定子磁场和内转子磁场的调制作用,增强耦合效果,从而提高最大电磁转矩。在设计2($h_m=65$ mm)的基础上,保持定子结构和气隙不变,减小 h_m 。在此过程中,增加内转子的直径以维持内气隙不变,并保持永磁体的体积和V形状不变。表4为调制块5个厚度设计的电磁性能。由表可知,转矩随着 h_m 的变化存在一个拐点,当 h_m 达到50 mm(设计7)时,转矩达到最大值。相对于改进永磁体阶段的优选设计(设计2),设计7的转矩脉动有所增加,效率稍有下降。

表4 调制块不同厚度设计的电磁性能

Table 4 Electromagnetic performances of designs with different thicknesses of modulating pieces

设计参数与性能	数值				
	设计4	设计5	设计6	设计7	设计8
h_m / mm	35	40	45	50	55
内转子电磁转矩 / (kN·m)	12.051	12.160	12.203	12.228	12.218
调制环电磁转矩 / (kN·m)	-29.199	-29.587	-29.779	-29.819	-29.686
不计摩擦的效率 / %	98.9	98.9	99.0	99.0	99.0
内转子转矩脉动 / %	33.4	32.0	31.1	30.6	29.3
调制环转矩脉动 / %	4.1	3.5	3.3	2.9	2.8

在设计7($\delta=0.5$)的基础上调整 δ ,以进一步提高转矩。表5为调制块不同宽度设计的电磁性能。对比设计7、9、10可以发现,转矩随着 δ 的变化也存在一个拐点,当 h_m 保持为50 mm, δ 变为0.6(设计9)时,转矩达到最大值。相比设计7,设计9的内转子和调制环转矩脉动分别有所下降和增加,效率稍有下降。

表5 调制块不同宽度设计的电磁性能

Table 5 Electromagnetic performances of designs with different widths of modulating pieces

设计参数与性能	数值	
	设计9	设计10
δ	0.6	0.7
内转子电磁转矩 / (kN·m)	12.593	12.020
调制环电磁转矩 / (kN·m)	-30.734	-29.419
不计摩擦的效率 / %	98.9	98.8
内转子转矩脉动 / %	28.8	28.7
调制环转矩脉动 / %	4.1	6.4

3.4 定子槽形的改进

由于定子外径的限制,用于储能调相机系统的磁齿轮调速器定子槽数不宜过多,往往接近调制块的个数。这种情况下,定子齿槽本身也对磁场形成较强的调制作用,影响内转子磁场与定子磁场的耦合。本节通过改善定子槽形的设计,以进一步提高最大转矩。如附录B图B3所示的定子槽为梯形,以 h_{s1} 表示定子槽的深度,以 h_{s2} 表示定子铁心的径向厚度,定义 $k=h_{s1}/h_{s2}$ 。在设计9($\delta=0.6$)的基础上,保持槽面积和槽满率不变,计算3种具有不同 k 值定子槽形设计的电磁性能,如表6所示。对比设计9与设计11—13可以发现,转矩随着 k 的变化也存在一个拐点,当 k 为0.75(设计12)时,转矩达到最大值。相对于设计9,设计12的最大转矩明显增加,转矩脉动变化不大,效率稍有增加。

表6 不同定子槽形设计的电磁性能

Table 6 Electromagnetic performances of different stator slot geometry designs

设计参数与性能	数值		
	设计11	设计12	设计13
k	0.7	0.75	0.8
内转子电磁转矩 / (kN·m)	13.236	13.313	13.160
调制环电磁转矩 / (kN·m)	-32.295	-32.482	-32.105
不计摩擦的效率 / %	99.0	99.0	98.9
内转子转矩脉动 / %	28.1	28.5	28.3
调制环转矩脉动 / %	4.3	4.5	4.8

3.5 优选设计与原始设计的对比

经过上述设计改进,得到设计12具有最大的转矩,作为优选设计。表7为优选设计与原始设计结构的主要区别,2种设计的其他结构参数相同。在保持永磁体用量与原始设计相等的前提下,优选设计改用内置V形永磁体,同时调整内气隙、调制环的径向厚度和极弧系数,并在保持梯形定子槽面积和槽满率与原始设计相等的前提下,调整槽的径向高度。

表7 优选设计与原始设计的结构对比

Table 7 Structural comparison of selected and initial designs

设计参数	原始设计	优选设计
永磁体设计(体积相同)	表贴径向充磁	内置V形
内气隙 / mm	30	20
内转子直径 / mm	725	775
h_m / mm	65	50
δ	0.5	0.6
k	0.6	0.75

由表7可知,优选设计比原始设计的转矩和转矩密度提高30.8%,不计摩擦的效率提高0.3个百分点。调制环转矩脉动有所增加,但仍在可以接受的范围内。

4 结论

本文介绍了调相机-飞轮储能系统及用于该系统的磁齿轮调速器的基本结构和工作原理。针对这一应用场景,提出了磁齿轮调速器的基本电磁设计方案,并通过有限元仿真分析证明该方案可以实现调相机和飞轮之间的无级变速和能量传递。根据用于储能调相机系统的磁齿轮调速器的结构特点,进一步从永磁体的布置和充磁方向、调制环和定子槽的基本形状方面对电磁设计方案进行了优选。

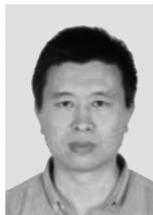
通过对比不同的设计方案发现,在相同的永磁体用量条件下,内转子采用内置V形永磁体比采用径向充磁的表贴永磁体能够明显提高磁齿轮调速器的转矩密度和效率。此外,适当调整调制块的厚度和宽度、定子槽的形状参数也能一定程度地提高磁齿轮调速器的转矩密度。采用改进的优选设计方案能大幅增转矩密度并适当提高效率,并且转矩脉动并未显著增加。本文工作为用于调相机-飞轮储能系统的磁齿轮调速器电磁优化设计提供了可以借鉴的技术思路。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张尧翔,刘文颖,李潇,等. 高比例新能源接入电网光热发电-火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):1-7,32.
ZHANG Yaoliang, LIU Wenyang, LI Xiao, et al. Optimal control method of peak load regulation combined concentrating solar power and thermal power for power grid accessed with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):1-7,32.
- [2] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术研究与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12):1-11,53.
LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12):1-11,53.
- [3] 卫志农,裴蕾,陈胜,等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11):85-94.
WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11):85-94.
- [4] 刘世林,文劲宇,高文根,等. 基于飞轮储能的并网风电功率综合调控策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12):34-39.
LIU Shilin, WEN Jingyu, GAO Wengen, et al. FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12):34-39.
- [5] 罗耀东,田立军,王垚,等. 飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9):71-82.
LUO Yaodong, TIAN Lijun, WANG Yao, et al. Coordinated control strategy and optimal capacity configuration for fly-wheel energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9):71-82.
- [6] ATALLAH K, HOWE D. A novel high-performance magnetic gear[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4):2844-2846.
- [7] ATALLAH K, CALVERLEY S D, HOWE D. Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2004, 151(2):135-143.
- [8] 李志强,孙华东,王东阳,等. 一种无级变速磁齿轮:202110275081.6[P]. 2021-10-19.
- [9] 李志强,孙华东,郭强,等. 一种基于磁齿轮耦合的同步调相机储能方法:202110278510.5[P]. 2021-06-11.
- [10] WANG Y, HO S L, FU W N, et al. A novel brushless doubly fed generator for wind power generation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11):4172-4174.
- [11] CHEN Y, FU W, WENG X. A concept of general flux-modulated electric machines based on a unified theory and its application to developing a novel doubly-fed dual-stator motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12):9914-9923.
- [12] BAI J, LIU J, LIU G, et al. Investigation of the power factor of magnetic-field modulated brushless double-rotor machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1):423-432.
- [13] BAI J, LIU Y, TONG C, et al. Investigation into a magnetic-field-modulated brushless double-rotor machine with the high-strength and low-loss modulating ring rotor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7):8105504.
- [14] ZHENG P, BAI J, TONG C, et al. Investigation of a novel radial magnetic-field-modulated brushless double-rotor machine used for HEVs[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(3):1231-1241.
- [15] KIM S J, PARK E J, JUNG S Y, et al. Transfer torque performance comparison in coaxial magnetic gears with different flux-modulator shapes[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6):8202804.
- [16] SHEN J X, LI H Y, HAO H, et al. A coaxial magnetic gear with consequent-pole rotors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1):267-275.
- [17] UPPALAPATI K K, CALVIN M D, WRIGHT J D, et al. A magnetic gearbox with an active region torque density of 239 N·m/L[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2):1331-1338.

作者简介:



李志强

李志强(1978—),男,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统建模、参数辨识、调相机及工程应用等(**E-mail**: lizhiqiang78@126.com);

王东阳(1977—),男,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统建模、系统工程调试等(**E-mail**: wangdy@epri.sgcc.com.cn);

肖洋(1977—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统建模、分析、控制等(**E-mail**: xiaoyang@epri.sgcc.com.cn)。

(编辑 李莉)

Design of magnetic-gear speed regulator in energy storage system with synchronous condenser and flywheel

LI Zhiqiang, WANG Dongyang, XIAO Yang

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The electromagnetic design of magnetic-gear speed regulator (MGSR) in the energy storage system with synchronous condenser and flywheel for new energy station is introduced. Based on the operation principle of coaxial magnetic gear, by changing the frequency of the stator current, the MGSR achieves stepless change of the flywheel speed and the power flow between the flywheel and the synchronous condenser whose speed is constant. Equipped with MGSR, the synchronous condenser is capable of not only regulating reactive power but also providing active power support. The basic structure, the regulation range of speed and frequency and other basic operation conditions of MGSR are determined. The electromagnetic performance of MGSR with different configurations of permanent magnets and different dimensions of modulating ring and stator slots are calculated and compared by using finite element software, and the V-shaped permanent magnets, the width and thickness of modulating pieces and the shape of stator slots are selected for the final design. This design increases the torque density of magnetic-gear speed regulator significantly and achieves fairly high operational efficiency.

Key words: synchronous condenser; flywheel energy storage; magnetic-gear speed regulator; torque density; efficiency

(上接第57页 continued from page 57)

Coordinated optimal capacity configuration of energy storage equipped by new energy and transmission lines considering consumption level

XIE Yuguang¹, LI Jinzhong¹, WANG Chuan², GAO Bo¹, ZHENG Tianwen³, MEI Shengwei²

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: With the rapid increase of the proportion of renewable energy power generation represented by wind and photovoltaic power, the uncertainty and volatility of the output of wind farms and photovoltaic power plants pose great challenges to the real-time power balance. The configuration of energy storage with reasonable scale can guarantee the economy and improve the utilization rate of new energy. Therefore, aiming at the new energy power station with known capacity, a chance-constrained programming model for coordinated optimal capacity configuration of energy storage equipped by new energy and transmission lines is proposed, which aims to minimize the construction cost of energy storage and transmission lines, and takes the annual new energy abandonment rate not exceeding the specified index as the chance constraints. Since the chance constraints are usually non-convex and lack explicit expressions, the feasible domain corresponding to the chance constraints is conservatively converted into linear constraints based on conditional value at risk to obtain a linear programming problem which can be efficiently solved, and the robustness of the programming scheme to the probability distribution of new energy scenarios is quantitatively analyzed. The example analysis results show that the proposed programming model can effectively solve the capacity configuration problem of energy storage and transmission lines considering the consumption level of new energy, and the capacity of transmission lines can be reduced by rational configuration of energy storage, thus saving the total investment cost.

Key words: new energy; energy storage; capacity configuration; conditional value at risk; chance-constrained programming; coordinated optimization

附录 A

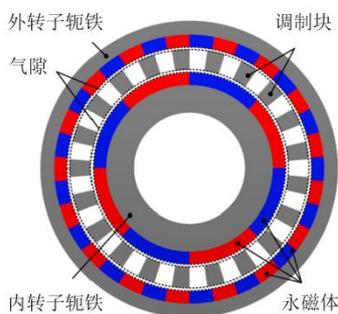


图 A1 同心式磁齿轮基本结构示意图

Fig.A1 Basic structure of coaxial magnetic gear

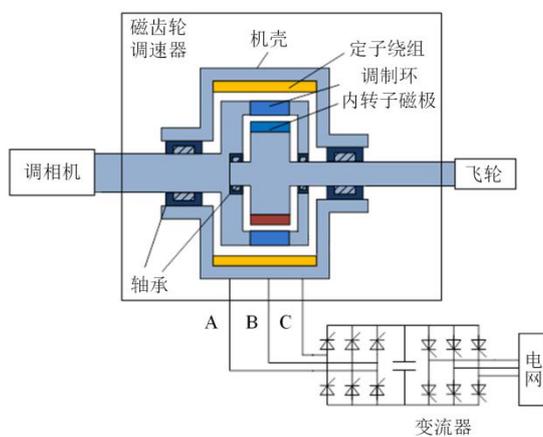


图 A2 磁齿轮调速器及其与调相机和飞轮的连接

Fig.A2 Magnetic-gear speed regulator connected with synchronous condenser and flywheel

附录 B

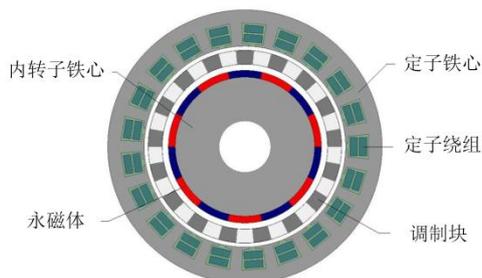


图 B1 磁齿轮调速器原始设计截面

Fig.B1 Initial design of magnetic-gear speed regulator

表 B1 磁齿轮调速器原始设计的基本参数

Table B1 Initial design parameters of MGSR

参数	数值	参数	数值
定子极对数	10	定子槽数	21
定子绕组层数	双层	定子铁心内径/mm	955
定子铁心外径/mm	1300	调制块个数	17
调制环内径/mm	785	调制环外径/mm	915
内转子极对数	7	内转子直径/mm	725
永磁体型号	N35H	永磁体厚度/mm	32
轴向有效长度/mm	1530	定子槽单层额定电流/A	7200
内转子额定转速/(r·min ⁻¹)	7285.7	定子电流最高频率/Hz	170
内转子最高转速/(r·min ⁻¹)	8742.9	内转子最低转速/(r·min ⁻¹)	5828.6

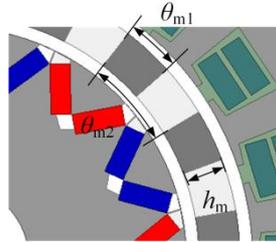


图 B2 调制块的厚度和宽度

Fig.B2 Thickness and width of modulating pieces

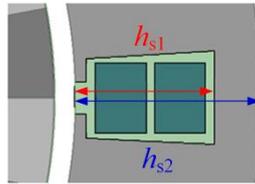


图 B3 定子槽形参数

Fig.B3 Geometric parameters of stator slots