

# 绕组式永磁耦合调速电机设计与分析\*

赵启明<sup>1</sup>, 徐亮<sup>2</sup>, 徐国祥<sup>1</sup>, 杨志勇<sup>2</sup>

(1. 国家能源集团谏壁发电厂, 江苏 镇江 212006;

2. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 变频器调速技术虽可实现调速, 但结构复杂, 易受到电磁干扰, 影响设备运行的可靠性。此外, 当电网电压波动时, 变频器难以保证整个系统正常运行。因此, 在发电厂等苛刻环境下的应用受到限制。针对以上问题, 提出了一种新型绕组式永磁耦合调速电机, 离合采用非机械接触结构, 减少了机械损耗; 可直接对电动转子进行串级调速, 调速迅速, 且具备抗电网低电压穿越的能力。通过建立绕组式永磁耦合调速电机有限元分析模型, 开展了仿真分析研究, 结果表明该电机具备调速功能且转矩稳定, 在工业领域中具有广阔的应用前景。

**关键词:** 绕组式永磁耦合调速电机; 非机械接触结构; 调速; 低电压穿越

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0049-05

doi: 10.12177/emca.2019.159

## Design and Analysis of Winding Type Permanent Magnet Coupling Speed Regulating Motor\*

ZHAO Qiming<sup>1</sup>, XU Liang<sup>2</sup>, XU Guoxiang<sup>1</sup>, YANG Zhiyong<sup>2</sup>

(1. CHN ENERGY Jianbi Power Plant, Zhenjiang 212006, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The inverter speed regulation technology can realize speed regulation. However, the inverter has complex structure and is susceptible to electromagnetic interference, which influences the reliability of equipment running. In addition, when the grid voltage fluctuates, the inverter is hard to ensure the normal operation of the whole system. Therefore, its application in harsh environment such as power plant is limited. For this problem, a new winding type permanent magnet coupling speed regulating motor is proposed. The clutch of the motor adopts a non-mechanical contact structure to reduce the mechanical loss. Then, the rotor is directly adjusted by cascade speed regulation, which has the advantages of quick response and high reliability. The structure has the capability of resisting low voltage ride-through of power grid. Finite element model of the winding type permanent magnet coupling speed regulating motor is established and finite element analysis is carried out. The results show that the motor has good speed regulation ability and steady torque. It has a broad application prospect in industry.

**Key words:** winding type permanent magnet coupling speed regulating motor; non-mechanical contact structure; speed regulation; low voltage ride-through

## 0 引言

随着《中国制造 2025》的提出, 高效逐渐成为

中国工业发展的主要趋势。电机作为工业生产中必不可少的动力设备, 应用十分广泛。电机的调速是电气驱动领域的一大难题, 从 20 世纪 30 年

收稿日期: 2019-11-14; 收到修改稿日期: 2019-12-30

\* 基金项目: 国家能源集团科技项目 (JSKJ-2019-02)

作者简介: 赵启明 (1963—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气自动化技术。

徐亮 (1989—), 男, 博士, 研究方向为高效能电机及其控制。

徐国祥 (1965—), 男, 工程师, 研究方向为电厂电气设备管理。

代后期,研究者就开始研究电机的调速问题<sup>[1]</sup>。为了在不同工况下实现高效的机电能量转换,电机调速系统应运而生。常用的调速方式主要有液力耦合调速、变频调速和永磁调速等<sup>[1-2]</sup>。

变频器调速技术相对成熟,但结构复杂,对环境要求较高,容易受到电磁干扰从而影响设备运行的可靠性,而且当电网电压波动时,变频器无法保证整个系统的正常运行<sup>[2-3]</sup>。液力耦合器调速是通过液体介质将主动机的动力传递给从动机,通过改变工作腔充满程度来达到调速的目的。因为采用液体介质传递动力,液体的温度和充液量可控性差,所以调速过程不稳定,调速范围较窄。与上述方法相比,永磁耦合器不仅具有磁力耦合器的非接触动力传递、减小振动、无摩擦、允许主从动轴不对中等优点,而且具有在线输出速度可调、节能环保、实现电机过载保护及软启动等功能<sup>[4]</sup>。此外,永磁耦合器调速结构简单,性能稳定,基本不受周围环境影响,可靠性高<sup>[5-6]</sup>。但永磁耦合器调速过程中高涡流损耗会产生过多的热量,使传动装置温度上升,从而引发永磁体退磁、传动效率降低等问题。

为此,本文提出绕组式永磁耦合调速电机,将永磁耦合器内转子上的永磁体替换为绕组,正常运行时控制端收集绕组上的感应电流回馈电网,不仅解决了涡流损耗问题,还实现了节能。此外,绕组式永磁耦合调速电机将绕组式永磁耦合器与电机相结合,具备抗低电压穿越的能力。实际运行时,通过控制端给转子绕组回路中串入可调节的附加电动势来改变电机的转差,以实现调速目的。本文从绕组式永磁耦合调速电机原理出发,阐述了电机运行及功率传递过程,通过了有限元仿真分析电机的磁场、转矩和调速等性能,并计算了电机损耗和效率。

## 1 绕组式永磁耦合调速电机运行原理

图1所示为绕组式永磁耦合调速电机,主要由定子、电动转子、绕组转子三部分组成。定子容纳励磁绕组,通入三相电压形成旋转磁场,电动转子的鼠笼导条切割该旋转磁场,从而产生感应电流形成感应磁场,与定子端旋转磁场相互作用产生转矩。永磁体贴在电动转子内侧,跟随电动转子一起转动,旋转的永磁体产生旋转磁场,绕组转

子的感应绕组切割该永磁旋转磁场,从而产生感应磁场,并与电动转子永磁体磁场相互作用产生转矩,带动绕组转子旋转。该感应磁场与旋转磁场相互作用传递转矩,通过串级调速,控制传递转矩以适应转速要求,实现非机械接触的离合以及调速的功能。本文所采用的串级调速是指在绕线式电动机转子回路串入可调节的附加电动势来改变电机的转差,以实现调速目的。此外,永磁调速器置于异步电机转子内部可减小该电机轴向长度,减小占地面积,适用于对电机尺寸及安放空间有较高要求的场合。

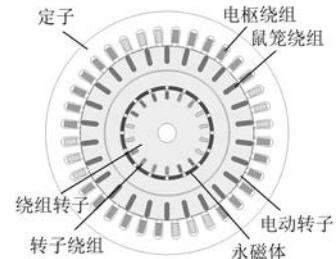


图1 绕组式永磁耦合调速电机

电机的启动关断和调速可以通过绕组转子感应绕组外接控制器来实现;电动转子正常旋转时,感应绕组接通,则产生感应磁场与电动转子永磁体磁场相互作用,电机启动;绕组断开,绕组转子绕组无感应电流,电机关断。当电机在运行过程中需要调速时,控制端会吸收电网功率,调节绕组转子转速差,实现调速功能。此外,该结构具有转差功率回馈功能。当电机稳定工作时,收集绕组转子绕组感应电流,可以回馈给电网,从而实现节能<sup>[6]</sup>,并且通过将转差功率引出,可以有效控制电机的温升。

与单一绕线式异步电机相比,本文电机结构在启动时具有优势。单一绕线式异步电机启动时如需降低启动电流,减小对电机本体的冲击,通常采用2种方法:(1)通过串电阻降压启动等传统有级启动方式;(2)外接软启动器进行软启动。传统有级启动方式将启动过程分成了两级或多级,技术简单、成本较低,然而启动电流呈阶跃式变化,存在二次或多次冲击电流。采用外加软启动器软启动的方法可实现无级调节,有效避免了启动冲击电流,但会在启动过程中产生谐波,对电网产生不利影响。

采用本文电机结构可解决上述问题。该结构电动转子不与负载相连,因此可在空载时令调速电机的异步电机部分起动,使得起动电流大幅降低,从而避免冲击电流,实现软起动功能,并且无需外加软起动器,消除了软起动器引发的谐波及对电网产生的不利影响。

## 2 绕组式永磁耦合调速电机电磁设计

计算电机基本尺寸的功率尺寸方程为

$$D_{i1}^2 l_{ef} = \frac{6.1P}{\alpha_p k_{Nm} k_{dp} A B n_N} \quad (1)$$

式中: $D_{i1}$ 为定子内径; $l_{ef}$ 为电机轴长; $P$ 为计算功率; $\alpha_p$ 为极弧系数; $k_{Nm}$ 为磁场波形系数,对于正弦波分布取 1.11; $k_{dp}$ 为绕组因数; $A$ 为电负荷; $B$ 为磁负荷; $n_N$ 为转子转速。

计算功率的方程式为

$$P = m E_1 I_1 \quad (2)$$

式中: $m$ 为相数; $E_1$ 为相反电动势幅值; $I_1$ 为额定定子绕组相电流。

该电机的额定功率为

$$P_N = m U_1 I_1 \eta \cos \varphi \quad (3)$$

式中: $U_1$ 为额定定子绕组相电压; $\eta$ 为效率; $\cos \varphi$ 为功率因数。

从式(2)和式(3)可以推出:

$$P = \frac{E_1}{U_1} \frac{P_N}{\eta \cos \varphi} \quad (4)$$

设定子绕组满载电动势的标么值为

$$K_E = \frac{E_1}{U_1} \quad (5)$$

则式(4)可以改写为

$$P = K_E \frac{P_N}{\eta \cos \varphi} \quad (6)$$

式中: $K_E$ 为定子绕组的电阻和漏抗,设计初期时均为未知数,因此  $K_E$  只能预取一个值,本文预取 0.96。

假设整个电机的输入功率为  $P_1$ ,则电动转子传递给绕组转子的功率为

$$P_2 = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe1} - P_{eddy1} \quad (7)$$

式中: $P_{Cu1}$ 为定子绕组所消耗的铜耗; $P_{Fe1}$ 为定子铁心和电动转子铁心的铁耗; $P_{eddy1}$ 为鼠笼导条中的涡流损耗。

从上述分析可知,定子绕组所产生功率,除了

损耗外,全部传递给绕组转子,电动转子不消耗额外功率,因此电动转子只承担传递功率的任务。绕组转子的功率可表示为

$$P_3 = P_2 - P_{Cu2} - P_{Fe2} - P_{eddy2} \quad (8)$$

式中: $P_{Cu2}$ 为感应绕组所消耗的铜耗; $P_{Fe2}$ 为绕组转子铁心的铁耗; $P_{eddy2}$ 为永磁体中的涡流损耗。

正常运行时,绕组转子功率一部分是流向转子轴的输出功率  $(1-s)P_3$ ,另一部分是经控制装置回馈电网的转差功率  $sP_3$ ,此时转差功率为正。当电机调速时,转子绕组从控制端吸收功率,此时转差功率为负。转子绕组的功率分配可以表示为

$$P_3 = (1-s)P_3 + sP_3 \quad (9)$$

绕组式永磁耦合调速电机转子绕组感应电流  $I_2$ 可表示为

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (10)$$

式中: $s$ 为转差率, $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ ;  $E_2$ 为  $s=1$  时转子绕组开路相电动势; $R_2$ 为转子绕组电阻; $X_2$ 为  $s=1$  时转子绕组相漏抗。

串级调速是在转子绕组中引入一个附加电动势  $E_f$ 来调节电机的转速,其频率与转子绕组电动势  $sE_2$ 的频率相同,而相位则相同或相反。如果附加电动势  $E_f$ 的相位与转子电流相位相反,附加电动势吸收功率;反之,则发出功率。因此,感应电流  $I_2$ 可表示为

$$I_2 = \frac{sE_2 \mp E_f}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (11)$$

## 3 电机电磁性能分析

绕组式永磁耦合调速电机参数如表 1 所示。根据表 1 建立二维有限元仿真模型。外部电机定子为 36 槽 8 对极,12 个鼠笼导条,8 对永磁体,绕组转子为 18 槽 8 对极。鼠笼导条与永磁体间设计了 1 mm 空气隙,以满足磁路解耦的要求。电机磁力线图如图 2 所示。图 3 所示为电机额定负载时的磁密云图,色卡上上限取 1.8 T,为该硅钢片材料  $B-H$  曲线拐点数值。从图 3 可以看出该设计对铁磁材料利用率较高。图 4 所示为气隙磁密的傅里叶分解。从图 4 可以看出,工作波为 8 次谐

波,工作波幅值为 1.3 T。

表 1 绕组式永磁耦合调速电机参数

参数名称	参数值
额定功率 $P_N/kW$	1.1
定子额定相电压 $U_N/V$	250
定子绕组匝数	28
绕组转子绕组匝数	40
定子绕组极对数 $p_1$	2
永磁体极对数 $p_2$	8
电动转子额定转速 $n_1/(r \cdot \min^{-1})$	1 460
绕组转子额定转速 $n_2/(r \cdot \min^{-1})$	1 314
定子外径/mm	260
内、外气隙/mm	0.5
绕组转子外径/mm	69

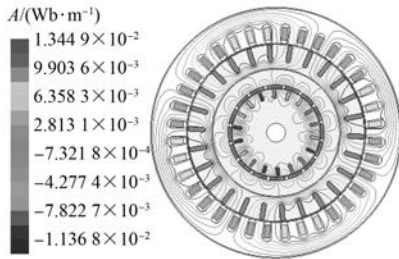


图 2 绕组式永磁耦合调速电机磁力线图

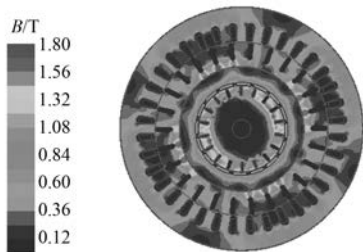


图 3 电机额定负载时的磁密云图

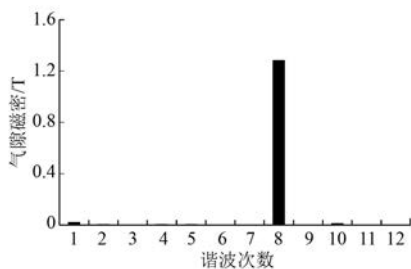


图 4 气隙磁密的傅里叶分解

电机稳定运行时,电动转子转矩如图 5 所示。稳态转矩的均值为 0 N·m,这是由于电动转子同

时受到鼠笼导条的正向转矩和永磁体的负向转矩的作用,鼠笼导条的正向转矩是励磁磁场与鼠笼导条感应磁场之间作用的结果,而永磁体所受的负向转矩,是永磁磁场与感应绕组的感应磁场之间作用的结果,使得鼠笼导条所受转矩全部传递给绕组转子。因此,通过调节电机参数使电动转矩的转子均值约为 0 N·m。

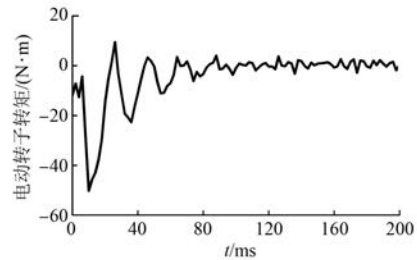


图 5 电动转子转矩

图 6 所示为绕组转子的转矩,是电机的输出转矩。转矩平均值约为 8 N·m,转矩脉动为 18.7%。绕组式永磁耦合调速电机具有抗低电压穿越的能力,因此当电网发生电压跌落时,为了维持鼠笼导条所受转矩不变,需增大定子电流。此时电动转子侧出现较大的感应电流,但由于时间较短且电动转子中不存在功率变换器件,电动转子自身可以承受,不会被烧毁。

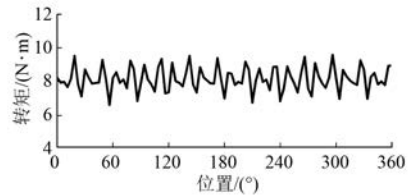


图 6 绕组转子转矩

绕组式永磁耦合调速电机另一个功能是调速,通过外接控制器在转子绕组回路中串入可调节的附加电动势来改变电动机的转差,达到调速目的。如图 7 所示,电机调速时假定负载转矩不变,控制端吸收电网功率,以确保电机在不同转速下转矩不变。图 8 所示为不同转速下的转子平均转矩,说明电机能够稳定调速,且调速范围广<sup>[7-8]</sup>。图 9 所示为电机转速变化时需要提供的附加电动势。

电机稳定运行时的损耗主要是定子铁耗,铁耗与磁通成正比,磁通又与电流成正比,因此铁耗可以近似表示为电流平方的倍数关系,电流越大,

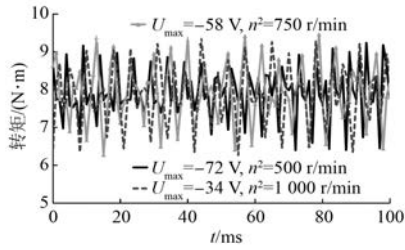


图7 绕组转子调速转矩

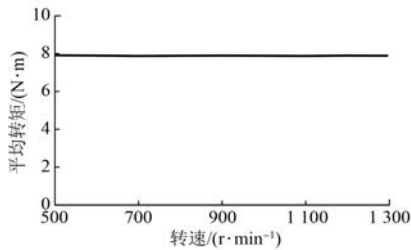


图8 绕组转子转速与转矩

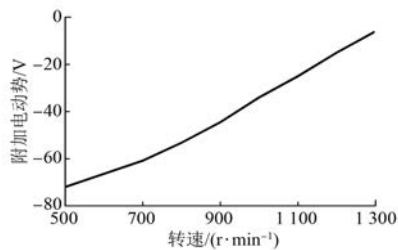


图9 绕组转子转速与附加电动势

铁耗越大。图 10 和图 11 分别为额定运行时,电机的铁耗和永磁体涡流损耗。由图 10、图 11 可知,铁耗约为 25 W,永磁体涡流损耗约为 42 W。

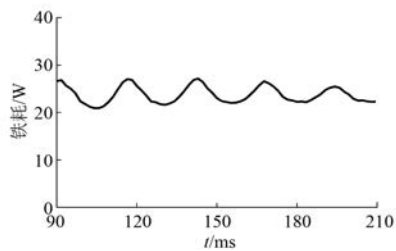


图10 铁耗

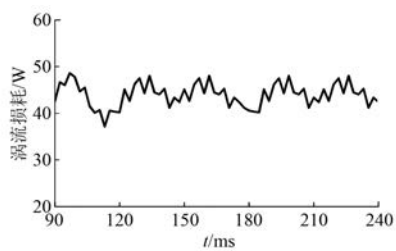


图11 涡流损耗

定子绕组铜耗为

$$P_{Cu1} = mI_{ph1}^2 R = 120 \text{ W} \quad (12)$$

绕组转子铜耗为

$$P_{Cu2} = mI_{ph2}^2 R = 81 \text{ W} \quad (13)$$

电机功率为

$$P = \frac{Tn}{9549} = \frac{8 \times 1314}{9549} = 1100 \text{ W} \quad (14)$$

式中: $I_{ph1}$ 为定子绕组相电流; $I_{ph2}$ 为电动转子绕组相电流; $T$ 为额定转矩; $n$ 为转速。

效率为

$$\eta = \frac{P - P_{Cu1} - P_{Cu2} - P_{Fe} - P_{eddy}}{P} \quad (15)$$

计算可得  $\eta = 75.6\%$ 。

## 4 结 语

本文对新型绕组式永磁耦合调速电机的原理进行了详细的阐述,利用有限元法,建立了该电机的 2D 模型,并对电机进行有限元分析,分析计算了电机的磁场、转矩、损耗等性能。此外,本文还研究了绕组式永磁耦合调速电机的调速,仿真结果表明,该电机可实现稳定调速,为其在实际工业生产中的应用提供了理论依据。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 梁安江,张海燕,柳毅,等.高压同步电机变频调速技术及应用[J].电机与控制应用,2010,37(5): 42.
- [ 2 ] 汪坤,李晨懿,卢文清,等.电压暂降对变频调速永磁同步电机运行性能的影响研究[J].现代电力,2019,36(1): 88.
- [ 3 ] 唐松浩,陶顺,刘颖英,等.变频调速器电压暂降耐受特性试验及量化方法研究 II: 试验及量化方法[J].电工技术学报,2019,34(10): 2207.
- [ 4 ] 上官璇峰,杨帅.盘式永磁涡流耦合器涡流研究[J].微电机,2015,48(6): 32.
- [ 5 ] 刘洋,赵金.考虑铁耗的感应电机间接矢量控制方法[J].微电机,2014,47(11): 26.
- [ 6 ] 上官璇峰,宋伟康,李正修,等.可调速永磁异步耦合器研究[J].机械传动,2018,42(12): 135.
- [ 7 ] 杨景明,张天俊,王亚超,等.变频调速系统中电压的隔离检测与实现[J].电测与仪表,2018,55(12): 120.
- [ 8 ] 马良河,杨洁浩,叶建强.交流电机变频调速性能试验系统的研究[J].电机与控制应用,2010,37(1): 44.