

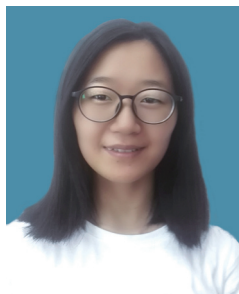
具有能量回馈功能的无级调速系统研究

风机类负载大量运用磁力耦合器进行调速，但耦合器的大量发热造成了能源的浪费。针对这一现象，设计了一种新型系统，该系统由原动机、行星齿轮系、负载、永磁同步电机、整流和逆变并网等部分组成。首先研究整个系统的构造，然后分别研究了各重要组成部分的工作原理和应用，最后分析在原动机恒功率输入时，对负载无级调速的实现和余能的并网，并运用Matlab/Simulink仿真软件搭建模型进行验证。该系统节能效果明显，适用于高压、大功率和调速要求较高的场合。

黄畅畅 莫岳平 梁 可/扬州大学水利与能源动力工程学院
王爱忠/扬州协力传动科技有限公司
史宏云/南京师范大学第二附属高级中学

0 引言

在工业生产中，尤其是石油化工、电力、冶金和建材等行业中，大量使用大功率、高转速的离心泵与离心风机。这些风机类负载的轴输出功率与轴转速的三次方成正比关系（ $P=Kn^3$ ），调速节能的空间巨大。目前，风机类负载的常用调速装置是磁力耦合器，其通过在耦合盘中感生涡流来实现能量传递，只要调节耦合盘间隙或励磁电流的大小便可实现转速的调节。这类调速方法的缺点是涡流引起的损耗很大，造成了能源的浪费，同时大量的能耗会引起耦合盘严重发热。当功率较大时，还要采用水冷等方式降低装置温度，从而大大增加了成本^[1]，于是本文便提出了行星齿轮变速方案。因为行星齿轮变速器的输入轴和输出轴同轴线，可有较大传动比，运行稳定且传输效率高。目前行星齿轮变速箱在汽车、煤矿机械等传动设备中运用较广泛^[2-3]。



黄畅畅/硕士研究生

关键词/Keywords

行星齿轮系 ·
永磁同步电机 ·
无级调速 ·
能量回馈 ·

从行星齿轮变速器中得到启发，本文设计出一种具有能量回馈功能的新型无级调速系统。该系统利用行星齿轮传动机构的分速功能，将输入功率分解后传输到负载和永磁同步电机上，通过调节永磁同步电机的转速来实现负载的无级调速。调速的同时，永磁同步电机还可以将多余的转速功率转换为电能，并通过整流、逆变装置回馈电网，节能效果明显^[4-7]。逆变并网装置还具有反拖电机的能力，可以实现系统的软启动。

1 新型无级调速系统的构成

1.1 基本结构

该新型无级调速系统由原动机、行星齿轮系、负载、永磁同步电机、整流和逆变并网等部分组成。原动机通过行星齿轮系分别与负载和永磁同步电机相连，永磁同步电机发出的电能再通过整流、逆变装置并网。其基本结构如图1所示。

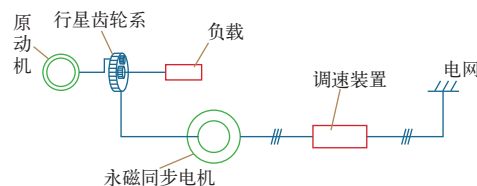


图1 新型无级调速系统基本结构图

1.2 工作原理

该新型无级调速系统中的原动机恒功率输入，因而，保证了原动机的高效率运行。原动机的输入功率分成两部分，通过行星齿轮系的作用分别传输到负载和永磁同步电机并网系统上。即

具有功率分流作用，形成双功率流系统。若负载变小，负载转速下降，负载功率变小，相应的永磁同步发电机的转子转速上升；若负载变大，负载转速上升，那么永磁同步发电机的转子转速下降。由于行星齿轮系的分速功能，调节永磁同步电机的转速，即可完成对负载的无级调速。永磁同步电机输出的非50 Hz的交流电，通过整流逆变装置转换为50 Hz的交流电输出并网，实现了余能回馈，达到了节能的目的。同时，逆变器还具有反拖电机的能力，在系统起动时，逆变器可以使发电机做电动机运行，帮助系统起动，实现系统的软起动。

2 各重要组成部分的设计

2.1 专用行星齿轮系

行星齿轮系起到功率分流的作用，合理的设计可以实现将输入功率一分为二。

2.1.1 NGW行星齿轮系的组成和工作原理

本新型无级调速系统中所采用的是NGW行星齿轮系^[2]。其包含一个太阳轮、一个齿圈和若干个行星轮，其中太阳轮处于中心位置，齿圈在最外圈，行星轮由行星架支撑着处于二者之间，与太阳轮外啮合并与齿圈内啮合。行星轮的运转特点是，在绕着太阳轮公转的同时，自身也可以自转。行星齿轮的结构如图2所示。

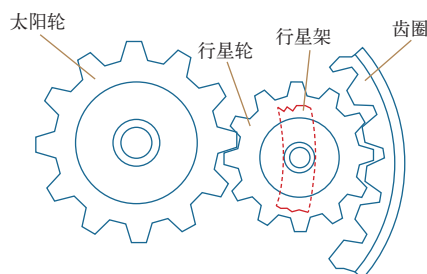


图2 行星齿轮结构图

2.1.2 NGW行星齿轮系的设计

本文所采用的是NGW行星齿轮结构中的2X-H型号机构，其因构件数量少、传动功率和传动比变化范围大等优点而被广泛应用。运动简图如图3所示。若想使得整个轮系以一定的传动比传递动

力，则机构只能有一个自由度，即其中一个构件固定或者恒速运行，另外两构件自由。本设计中令齿圈连接永磁同步电机的转子恒速运行，行星架连接原动机作为主动件输入，太阳轮连接负载作为从动件输出，输入轴和输出轴轴向方向相同。

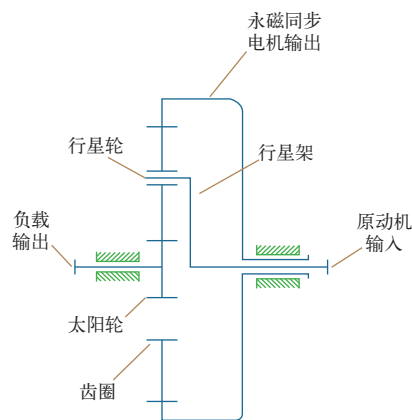


图3 行星齿轮传动运动简图

由能量守恒原理可知，不管三个构件的运动状态如何，其输入的能量与输出的能量始终相等，即代数和为零。因此，单排行星齿轮的运动方程为

$$n_a + an_b - (1+a)n_c = 0 \quad (1)$$

式中， n_a 为太阳轮转速； n_b 为齿圈转速； n_c 为行星架转速； a 为齿圈和太阳轮的齿数比。当三个机构的齿数已知，同时主动件转速 n_c 恒定输入时，只要保持齿圈转速 n_b 恒定，则从动件转速 n_a 也是确定值。即表示，当需要对负载转速（ n_a ）进行调节时，只需要通过对永磁同步电机转速（ n_b ）进行设定。

由于行星架的当量齿数是太阳轮齿数与齿圈齿数之和，其值就最大，因此可使得太阳轮以增速状态输出，实现传动比1:3~6的动力传输^[3]。该部分的功率关系可表示为

$$P_1 = P_2 + P_3 \quad (2)$$

式中， P_1 为原动机输入功率； P_2 为负载的输出功率； P_3 为永磁同步电机的输出功率。由此可见，通过行星齿轮的功率分流作用，将原动机的输入功率分为负载和永磁同步电机输出并网功率两部分。从而在实现能量回馈的同时，对负载进行无级调速。

2.2 专用永磁同步电机

本专用永磁同步电机主要由绕线定子、筒式磁转子和电机轴等部件组成,还包括滚动轴承、挡环、轴承座、支承座和电机端盖等辅助构件。其结构特点是筒式磁转子与行星齿轮系的齿圈相连。其主要结构图如图4所示。

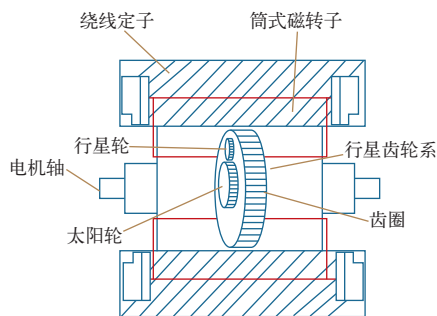


图4 永磁同步电机主要结构图

该永磁同步电机的工作原理和交流电机的相同^[4]。工作时,先要将直流励磁电流通入励磁绕组中,形成一个主磁场,接着原动机带着转子旋转对磁场进行切割。作为载流导体,对称的三相电枢绕组也和主磁场之间有相互切割,进而在电枢绕组上产生对称的三相交变电流,再通过引出线输出。

永磁同步电机的筒式磁转子中含有稀土永磁材料,使得发电机可以产生励磁磁场,去除了励磁绕组和励磁控制屏,使系统构造简易,功率密度大,发电效率可以达到95%以上。同时,该种永磁同步电机特别适合变速工作状态,这是现有其他发电机所难以实现的。因此,采用永磁同步电机用作发电机时可以提高系统发电量 10%~20%。

本新型系统中,将永磁同步电机的转子和行星齿轮的齿圈连接起来,此种结构可以大大减少永磁耦合机构的发热量,并在后续整流和逆变并网环节将多余热能回馈电网,节能效果突出。

2.3 整流及逆变并网环节

因为永磁同步电机的转子和行星齿轮的齿圈组合,电能从定子绕组上输出。若要将永磁同步电机输出的非50 Hz的低频交流电变换成50 Hz的工频电馈入电网,则需要在永磁同步电机的输出端

连接一个调速装置,目前技术最先进、应用范围最广的就是具备四象限运行能力的双PWM控制的功率变流器^[5-6]。其综合控制框图如图5所示。

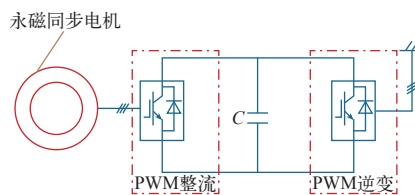


图5 双PWM功率变流器控制框图

(1) 电机侧的控制

电机侧的控制目标是调节永磁同步电机的转速和输出电流。该种控制方案在大幅减少发电机定子电流谐波分量的同时,可以将发电机的铁损与铜损降到最低,并且整流输出的电流正弦性很好。由于永磁同步电机的转子和行星齿轮的齿圈组合,若要对负载调速,即转化为对永磁同步电机调速,因此需要在机侧采用合适的控制策略实现永磁同步电机的调速控制。本设计采用零 d 轴的矢量控制方案。通过采集电机的实时转速和电流,运用电流内环、转速外环的双闭环控制方案,使得转速外环的输出作为电流内环的输入,最终实现电机的有功功率和无功功率的独立解耦调控。其控制框图如图6所示。

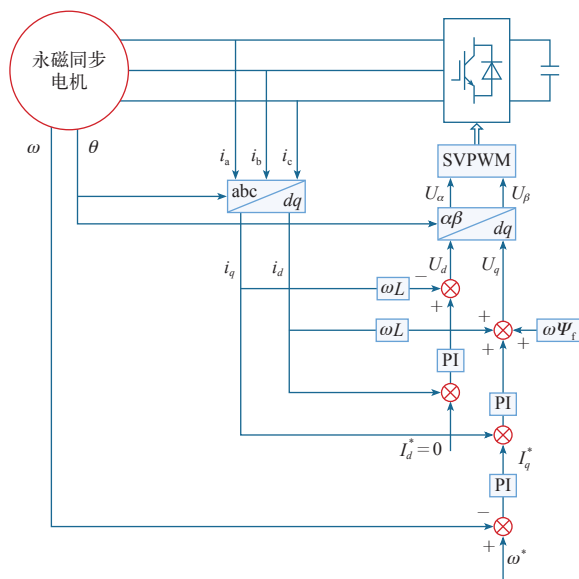


图6 电机侧变流器控制框图

(2) 电网侧的控制

电网侧的控制目标是保持直流环节的母线

电压恒定, 同时将电能并网。网侧变流器不仅将直流电变换为并网所需要的电压、频率恒定的电能, 还通过网侧电压、电流双闭环的控制保持稳定的直流母线电压, 并实现单独控制系统的有功功率和无功功率。通过调节并网侧的有功功率, 根据能量守恒定律, 输入功率不变的情况下, 便可以改变负载上的功率。实现余能并网的同时, 对负载进行调速。其控制框图如图7所示。

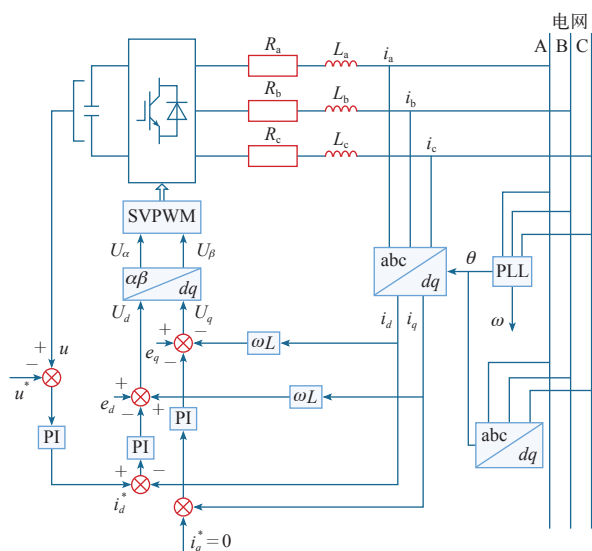


图7 并网侧变流器控制框图

整流、逆变部分的双PWM控制方案使得能量能够双向流动, 运用适当的控制策略, 可以实现通过控制逆变并网的有效功率来控制永磁同步电机的转速。在系统起动过程中, 永磁同步电机用作电动机运行, 利用电网来起动整个系统, 有利于实现系统的软起动, 省去了外接起动装置。又因将发电机与电网进行隔离, 使得机组的故障穿越运行能力更强, 运行更加稳定。下面将运用Matlab/Simulink仿真软件进行仿真验证。

3 仿真实验结果

本部分对所设计的新型无级调速系统进行仿真验证^[7]。根据行星齿轮系各齿轮的齿数关系, 设置其参数如下: 行星轮齿数16, 太阳轮齿数12, 齿圈齿数60, 行星轮个数3个, 求得传动比为1:3。设置永磁同步电机的参数如下: 定子电阻 $R_s = 0.18 \Omega$, 定子电感 $L_d = L_q = 0.000\ 835\text{ H}$, 磁链

$\Psi_f = 1.48\text{ Wb}$, 转动惯量 $0.006\ 2\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 电机极对数26, 电机给定转矩 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ 。当设置的给定转速为300 r/min时, 通过闭环控制使得电机稳定在该转速上, 即外齿圈也保持在该恒定转速下运转, 如图8所示。根据前文行星齿轮各轮齿之间的转速关系公式, 可知此时负载的转速对应为1 500 r/min, 仿真图形如图9所示。直流母线电压仿真图如图10所示, 可以看出直流侧电压基本恒定在650 V, 满足并网的要求。

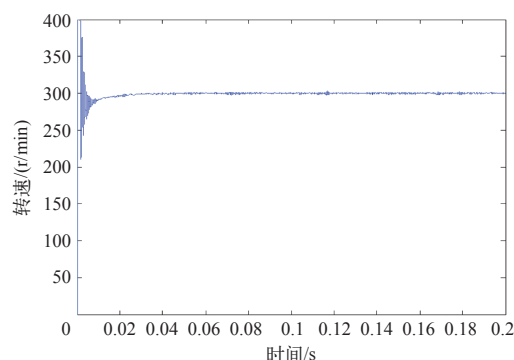


图8 永磁同步电机转速图

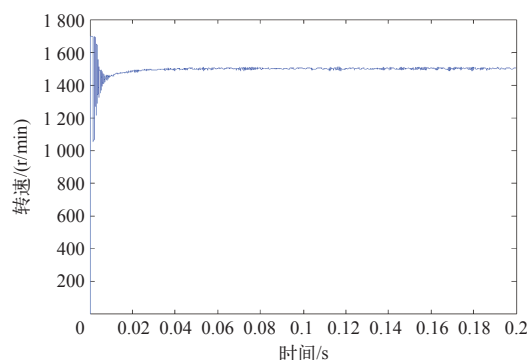


图9 负载转速图

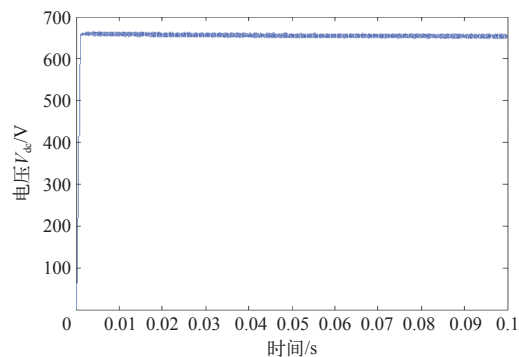


图10 直流母线电压图

在0.05 s将永磁同步电机的转速从300 r/min提高到500 r/min时, 输送到电网的有效功率在0.05 s处

增大,说明可以通过调节并网的有功功率来进行转速的调节,波形图如图11所示。同时无功功率一直保持为零,实现了单位功率因数并网。并网侧的交流电流总谐波失真值0.78%,相对较小,满足并网电流谐波失真值小于5%的要求,电流谐波分析图如图12所示。

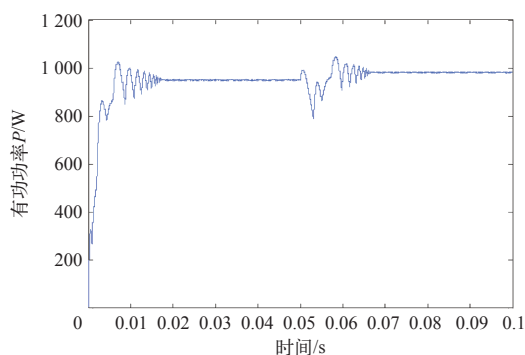


图11 并网侧的有功功率

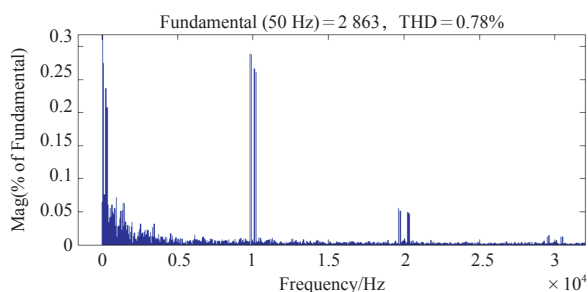


图12 网侧交流电流THD分析结果图

4 结束语

本文设计的具有能量回馈功能的新型无级调速系统,在对负载进行无级调速的同时实现了余能回馈电网,是一种开源节流的新方式。文中的仿真实验也验证了该系统既具有无级调速功能,又可以将余能回馈利用。本新型调速系统在电机

传动领域市场广阔,尤其是在石油化工、电力、冶金、供水、造纸和建材等使用大功率高转速的离心泵与离心风机的行业。该系统符合低碳环保经济特点,具有高效率、高可靠性等特征。广泛应用可极大地节省能源,降低CO₂排放,有利于国家减排目标的实现。同时,随着永磁材料性能的迅速提高和调速方案的日趋完善,该技术在军事和工业等诸多领域具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 郭留英,上官璇峰,杨帅,等. 永磁型涡流耦合器导电层中涡流及其磁场研究[J]. 微特电机, 2015, 43(4): 28-30, 35.
- [2] 吴玉超,刘凯,马朝锋,等. 行星齿轮传动系统的振动能量分析[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(6): 877-882.
- [3] 谭援强,何娟,杨世平,等. NGW型两级行星传动机构构型分析[J]. 机械传动, 2013, 37(11): 18-23.
- [4] 高旭东,许鸣珠,栾东雪. 基于DSP的永磁同步电机调速控制研究[J]. 控制工程, 2017, 24(7): 1318-1322.
- [5] 郭瑾,张友鹏. 永磁直驱同步风电系统并网运行仿真[J]. 电源技术, 2013, 37(4): 617-620.
- [6] 卢东斌,欧阳明高,谷靖,等. 电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 83-91, 12.
- [7] 李强. PMSG的双PWM变换器协调控制策略研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.

(收稿日期: 2017-09-04) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告