

MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

- 关于申请人有权要求在先申请的优先权 (细则
4.17(iii))

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种用于电励磁双凸极电机的转矩控制方法, 涉及变磁阻类电机控制技术领域, 能够抑制转矩脉动, 提升电励磁双凸极电机的转矩性能。转矩控制方法采用转速转矩双闭环的控制结构, 将转速与转矩作为被控量, 控制量为功率变换器的驱动信号, 其控制原理为: 转速外环的输出作为转矩的给定值, 转矩观测器根据采集的三相电流信号与转子位置信号输出相应的转矩值, 作为转矩的反馈值, 转矩的给定值与反馈值经滞环控制及开关状态查询表, 输出相应的功率变换器驱动信号。适用于针对电励磁双凸极电动机转矩性能的优化。

一种用于电励磁双凸极电机的转矩控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及变磁阻类电机控制技术领域,尤其涉及一种用于电励磁双凸极电机的转矩控制方法。

背景技术

[0002] 电励磁双凸极电机是一种较为常用的磁阻类电机结构,其电机转子的上不存在绕组和磁钢,因此其结构简单牢固、易于维护、可靠性高。在飞机起动/发电系统、风力发电系统、新能源汽车等领域有很好的应用前景。但是,作为磁阻类电机,由于电励磁双凸极电机定转子双边凸极的结构,导致其存在转矩脉动大、噪声大和振动剧烈的问题,在一定程度上制约了其推广应用。

[0003] 目前针对电励磁双凸极电动机转矩性能的优化研究方向主要分为两大类:一类是通过优化电励磁双凸极电动机本体的设计,减小转矩脉动;另一类是结合电励磁双凸极电动机的电磁特性,提出新的电机角度控制策略,并在一定程度上减小了电励磁双凸极电动机的转矩脉动、提升了电机的转矩性能。

[0004] 角度控制策略是在标准角控制策略的基础上,将各开关管按照一定的规则提前或滞后开通、关断和反向的控制策略。现有的角度控制策略本质上仍是电流闭环的控制策略,即通过控制电流的波形,间接的控制电机的转矩。但由于电励磁双凸极电机内部电磁量具有非线性与强耦合性,即使相电流的幅值恒定,电机的转矩仍会存在较大的转矩脉动。

发明内容

[0005] 本发明的实施例提供一种用于电励磁双凸极电机的转矩控制方法,能够抑制转矩脉动,提升电励磁双凸极电机的转矩性能。

[0006] 为达到上述目的,本发明的实施例采用如下技术方案:

[0007] 采用转速转矩双闭环的控制结构,将转速与转矩作为被控量,功率变换器的驱动信号则作为控制量。其控制原理大致为:转速外环的输出作为电机转矩的给定值,转矩观测器根据采集的三相电流信号与转子位置信号,输出相应的转矩值,作为转矩的反馈值,将转矩的反馈值反馈,对转矩进行闭环控制。

[0008] 由于对电励磁双凸极电动机采用直接转矩控制方法,直接对电机的转矩闭环控制,有效地避免了电流闭环控制中直接控制相电流,间接控制转矩而导致的转矩脉动问题。因而该方法能有效地抑制电励磁双凸极电动机的转矩脉动,为电励磁双凸极电动机的推广应用奠定了一定的基础。

附图说明

[0009] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附

图。

- [0010] 图1为采用直接转矩控制方法的电励磁双凸极电动机的调速系统框图；
- [0011] 图2为电励磁双凸极电动机直接转矩控制框图；
- [0012] 图3为电励磁双凸极电动机的电感特性图；
- [0013] 图4为本发明所提出的转矩观测器误差仿真波形图；
- [0014] 图5为现有技术中所提出的转矩观测器误差仿真验证图；
- [0015] 图6为电励磁双凸极电动机直接转矩控制方法的转矩仿真结果；
- [0016] 图7为本发明实施例提供的方法流程的示意图。

具体实施方式

[0017] 为使本领域技术人员更好地理解本发明的技术方案，下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细描述。下文中将详细描述本发明的实施方式，所述实施方式的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施方式是示例性的，仅用于解释本发明，而不能解释为对本发明的限制。本技术领域技术人员可以理解，除非特意声明，这里使用的单数形式“一”、“一个”、“所述”和“该”也可包括复数形式。应该进一步理解的是，本发明的说明书中使用的措辞“包括”是指存在所述特征、整数、步骤、操作、元件和/或组件，但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件和/或它们的组。应该理解，当我们称元件被“连接”或“耦接”到另一元件时，它可以直接连接或耦接到其他元件，或者也可以存在中间元件。此外，这里使用的“连接”或“耦接”可以包括无线连接或耦接。这里使用的措辞“和/或”包括一个或多个相关联的列出项的任一单元和全部组合。本技术领域技术人员可以理解，除非另外定义，这里使用的所有术语（包括技术术语和科学术语）具有与本发明所属领域中的普通技术人员的一般理解相同的意义。还应该理解的是，诸如通用字典中定义的那些术语应该被理解为具有与现有技术的上下文中的意义一致的意义，并且除非像这里一样定义，不会用理想化或过于正式的含义来解释。

[0018] 本发明实施例提供一种用于电励磁双凸极电机的转矩控制方法，本实施例的目的在于实时控制所述功率变换器的工作，实现转矩的闭环控制。采用转速转矩双闭环的控制结构，将转速与转矩作为被控量，功率变换器的驱动信号则作为控制量。其控制原理为：转速外环的输出作为电机转矩的给定值，转矩观测器根据采集的三相电流信号与转子位置信号，输出相应的转矩值，作为转矩的反馈值，将转矩的反馈值反馈，对转矩进行闭环控制。

[0019] 如图7所示，该方法包括：

[0020] 步骤101，获取电流霍尔传感器采集的模拟信号 i_a 、 i_b 和 i_c ，和所述电励磁双凸极电机的转子位置信号 θ ，向所述转矩观测器传输。

[0021] 需要说明的是，在本实施例的实际应用中，电流霍尔传感器采集到的是三相电流的模拟信号 i_a 、 i_b 、 i_c ，而电学领域中通常采用对应的大写的字母表示模电转换后的信号，比如本实施例中可以通过 I_A 、 I_B 和 I_C 分别对应表示模拟信号 i_a 、 i_b 和 i_c 经过一系列转换得到的数字信号。例如：可以在将模数转换的环节设置在霍尔和转矩观测器之间设置电流检测环节将 i_a 、 i_b 和 i_c 转换成 I_A 、 I_B 和 I_C 。

[0022] 其中，电流霍尔传感器指的是如图1中的电流检测环节的输入的 i_a 、 i_b 和 i_c 三条线

的起点的三个圆圈,通常本领域内可以用这种圆圈表示电流霍尔传感器。所述转矩观测器得到转矩反馈值 T_e 并输出。

[0023] 所述电励磁双凸极电机的转子位置信号 θ 具体是由旋转变压器及其旋转解码器(通常指的是与旋转变压器相应的解码芯片)采集的,例如:旋转变压器获取一个和转子位置角相关的模拟信号(幅值与位置角呈函数关系的正余弦信号),解码芯片将该模拟信号转换成DSP等控制器可以识别的转子位置角的数字信号,此处的旋转变压器及其旋转解码器可以采用目前已有的原件,其安装采集方式也可以采用现有的采集方案,本实施例中并不赘述。本实施例在此处的目的仅在于使用所采集的电励磁双凸极电机的转子位置信号 θ 。

[0024] 本实施例中的转矩观测器环节可以理解为:转矩观测器是存储于微处理器(DSP2812)内存中的离线三维查找表 $T(\theta, i_p)$, θ 为转子位置角, i_p 为相绕组电流, p 代表A、B、C中的任一相。转矩观测器是基于大量有限元仿真数据,采用线性插值的方法构建的查找表。电励磁双凸极电机直接转矩控制系统运行时,转矩观测器会根据电流霍尔传感器采集的模拟信号 i_a 、 i_b 和 i_c ,以及旋转变压器及其解码器输出的转子位置信号 θ ,输出相应的转矩反馈值 T_e ,作为转矩反馈值。

[0025] 步骤102,转速外环的输出作为所述电励磁双凸极电机的转矩给定值为 T_e^* ,用所述转矩给定值 T_e^* 减去所述转矩反馈值 T_e ,得到所述电励磁双凸极电机的转矩的控制误差为 T_{e_err} 。

[0026] 本实施例中的转速外环可以理解为:由旋转变压器及其解码器采集转子位置信号,经转速计算环节获取转速的反馈值 n ,转速给定值 n^* 与反馈值作差,经过转速调节器的输出值 T_e^* ,作为转矩的给定值。其中,转速计算环节具体也是存储于DSP内的一段用于计算转速的程序代码。

[0027] 步骤103,将所述转矩的控制误差 T_{e_err} 输入至滞环控制环节,滞环控制环节根据所述转矩的控制误差 T_{e_err} 大小,向开关状态查询表输出误差控制信号 ε_T 。

[0028] 本实施例中的滞环控制环节可以理解为一种由程序代码执行的控制方式,比如滞环控制环节是存储于DSP(digital signal processor,数字信号处理器)内的一段代码。转矩的给定值 T_e^* 与反馈值 T_e 作差,得到转矩的控制误差为 T_{e_err} ,作为滞环控制环节的输入。假定当前为 k 时刻,若 $T_{e_err} \leq -T_{band}$ (T_{band} 为转矩滞环控制的环宽),则滞环控制环节输出的误差控制信号为低电平,即 $\varepsilon_T^k = 0$;若 $T_{e_err} \geq T_{band}$,则滞环控制环节输出的误差控制信号为高电平,即 $\varepsilon_T^k = 1$;若 $-T_{band} \leq T_{e_err} \leq T_{band}$,则滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$ 。其中, ε_T^k 为当前 k 时刻滞环控制环节输出的误差控制信号, ε_T^{k-1} 为上一时刻滞环控制环节输出的误差控制信号。步骤104,所述开关状态查询表结合误差控制信号 ε_T 和所述转子位置信号 θ ,向功率变换器输出驱动信号PWM。

[0029] 本实施例中的开关状态查询表也是存储于DSP内的一段程序代码,开关状态查询表环节的逻辑过程可以理解为:开关状态查询表是基于电励磁双凸极电动机的转矩公式与电感特性设计的。其中,转矩公式为:

$$[0030] \quad T_p = T_{pr} + T_{pe} = \frac{1}{2} \cdot i_p^2 \cdot \frac{dL_p}{d\theta} + i_p \cdot i_f \cdot \frac{dL_{pf}}{d\theta}$$

[0031] 其中, T_p 是单相的总转矩输出, T_{pr} 表示单相磁阻转矩, T_{pe} 表示单相励磁转矩, L_p 表

示相绕组自感, i_f 表示励磁电流, L_{pf} 表示励磁绕组与相绕组互感, θ 表示转子位置角, p 所述电励磁双凸极电机的A、B、C三相中的任一相。电励磁双凸极电机相绕组的自感及励磁绕组与相绕组的互感是关于转子位置角的函数, 即为电励磁双凸极电动机的电感特性, 如附图3所示。

[0032] 定义励磁电流从电源流向励磁绕组为励磁电流的正方向, 反之为励磁电流的反方向, 定义转子逆时针方向旋转为正方向, 反之为反方向。以励磁电流的方向为正方向, 转子的旋转方向为正方向为例, 当 $0 < \theta \leq 120^\circ$ 时, A相通正电流, B相通负电流, 电机会产生正转矩; A相通负电流, B相通正电流, 电机会产生负转矩。若 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq -T_{band}$ (T_{band} 为转矩滞环控制的环宽), 则滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 0$, 开关状态查询表输出的驱动信号应使转矩减小, 即A相上管Q1与B相下管Q6关断; 若 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \geq T_{band}$, 则滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 1$, 开关状态查询表输出的驱动信号应使转矩增加, 即A相上管Q1与B相下管Q6开通; 若 $-T_{band} \leq T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq T_{band}$, 则滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$, 开关状态查询表保持上一时刻输出的驱动信号。本实施例中的功率变换器可以理解为: 开关状态查询表结合转矩误差控制信号 ε_T 和转子位置角 θ , 通过输出驱动信号实时控制功率变换器的工作, 实现对电励磁双凸极电动机转矩的闭环控制。

[0033] 目前针对电励磁双凸极电动机转矩性能的优化研究方向主要分为两大类: 一类是通过优化电励磁双凸极电动机本体的设计, 减小转矩脉动; 另一类是结合电励磁双凸极电动机的电磁特性, 提出新的电机控制策略, 以此来减小转矩脉动。当前已经提出的电励磁双凸极电动机控制策略有: 1、标准角控制策略; 2、提前角控制策略; 3、三相六状态控制策略; 4、三相九状态控制策略; 5、不对称电流控制策略。标准角控制策略是电励磁双凸极电动机最简单的控制方法, 该方法基于电励磁双凸极电动机的电感特性来控制各相开关管的开通和关断。标准角控制策略在电机低速运行时, 可以产生较大的转矩, 但在高速运行时存在较大的转矩脉动。所述的后四种控制策略均加入了角度控制参数, 因此可统称为角度控制策略。上述角度控制策略都从一定程度上减小了电励磁双凸极电动机的转矩脉动、提升了电机的转矩性能。

[0034] 基于目前的业内现状, 本发明旨在提出一种电励磁双凸极电动机的直接转矩控制方法, 从而提升电机的转矩性能。

[0035] 本实施例中具体公开了一种电励磁双凸极电动机直接转矩控制方法, 采用转速转矩双闭环的控制结构, 将转速与转矩作为被控量, 控制量为功率变换器的驱动信号。其控制原理为: 转速外环的输出作为转矩的给定值, 转矩观测器根据采集的三相电流信号与转子位置信号输出相应的转矩值, 作为转矩的反馈值, 转矩的给定值与反馈值经滞环控制及开关状态查询表, 输出相应的功率变换器驱动信号。本发明避免了电流闭环控制中直接控制相电流, 间接控制转矩而导致的转矩脉动问题。本发明由于直接控制电励磁双凸极电机的转矩, 因此能够有效地抑制转矩脉动, 提升电励磁双凸极电机的转矩性能。

[0036] 在本实施例中, 所述转矩观测器包括: 存储于微处理器 (DSP2812) 的内存中的离线三维查找表 $T(\theta, i_p)$, 其中, θ 为转子位置角, i_p 为相绕组电流, p 代表所述电励磁双凸极电机的A、B、C三相中的任一相。转矩观测器是基于大量有限元仿真数据, 采用线性插值的方法构建的查找表。

[0037] 具体的,所述转速外环本质上是一种逻辑计算过程,其中包括:由旋转变压器及其解码器输出转子位置信号 θ ;经转速计算环节获取转速的反馈值,转速给定值与反馈值作差;经过转速PI调节器的输出值 T_e^* ,作为转矩的给定值。

[0038] 其中,转速计算环节输出的是转速的反馈值;转速的给定值可以是人为设定并预先存储的;转矩观测器输出的是转矩的反馈值;转速调节器输出的是转矩的给定值。转速调节器本质上是转速的PI调节环节;转速PI调节的输出应当是一个可以改变转速的物理量;由机械运动方程: $T_e - T_L - T_0 = J \frac{d\omega}{dt}$, T_e 为电机的电磁转矩, T_L 为负载转矩; T_0 为空载转矩; J 是转动惯量, ω 为角速度, ω 和转速有线性关系。由这个公式可见,转矩可以直接改变转速,因此转速外环输出值为转矩给定值。

[0039] 具体的,所述步骤103中根据所述转矩的控制误差 T_{e_err} 大小,向开关状态查询表输出误差控制信号 ε_T ,包括:

[0040] 记录当前为 k 时刻,若 $T_{e_err} \leq -T_{band}$ 则所述滞环控制环节输出的误差控制信号为低电平,即 $\varepsilon_T^k = 0$,其中, T_{band} 为转矩滞环控制的环宽。

[0041] 若 $T_{e_err} \geq T_{band}$,则所述滞环控制环节输出的误差控制信号为高电平,即 $\varepsilon_T^k = 1$ 。

[0042] 若 $-T_{band} \leq T_{e_err} \leq T_{band}$,则所述滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$,其中, ε_T^k 为当前 k 时刻滞环控制环节输出的误差控制信号, ε_T^{k-1} 为上一时刻滞环控制环节输出的误差控制信号。

[0043] 进一步的,所述开关状态查询表是基于所述电励磁双凸极电动机的转矩公式与电感特性设置的,所述转矩公式包括:

$$[0044] \quad T_p = T_{pr} + T_{pe} = \frac{1}{2} \cdot i_p^2 \cdot \frac{dL_p}{d\theta} + i_p \cdot i_f \cdot \frac{dL_{pf}}{d\theta}$$

[0045] 其中, T_p 是单相的总转矩输出, T_{pr} 表示单相磁阻转矩, T_{pe} 表示单相励磁转矩, L_p 表示相绕组自感, i_f 表示励磁电流, L_{pf} 表示励磁绕组与相绕组互感, θ 表示转子位置角, p 所述电励磁双凸极电机的A、B、C三相中的任一相。电励磁双凸极电机相绕组的自感及励磁绕组与相绕组的互感是关于转子位置角的函数,即为电励磁双凸极电动机的电感特性。

[0046] 以励磁电流的方向为正方向,转子的旋转方向为正方向为例,当 $0 < \theta \leq 120^\circ$ 时,A相通正电流,B相通负电流,电机产生正转矩。A相通负电流,B相通正电流,电机产生负转矩。定义励磁电流从电源流向励磁绕组为励磁电流的正方向,反之为励磁电流的反方向,定义转子逆时针方向旋转为正方向,反之为反方向。

[0047] 在本实施例的具体应用中,当 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq -T_{band}$,所述滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 0$,所述开关状态查询表输出的驱动信号使转矩减小,即A相上管Q1与B相下管Q6关断。

[0048] 当 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \geq T_{band}$,所述滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 1$,所述开关状态查询表输出的驱动信号应使转矩增加,即A相上管Q1与B相下管Q6开通。

[0049] 当 $-T_{band} \leq T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq T_{band}$,所述滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$,则开关状态查询表保持上一时刻输出的驱动信号。

[0050] 举例来说:

[0051] 图1为采用直接转矩控制方法的电励磁双凸极电动机的调速系统框图,其中:

[0052] (1) 采集位置和转速信号:采用旋转变压器及其解码器采集转子位置信号 θ ,将转子位置角信号送入微处理器,通过预编写的微处理器程序计算电机转速;

[0053] (2) 采集电流信号:用三个电流霍尔传感器分别采集三相电流的模拟信号 i_a 、 i_b 、 i_c ,三相电流模拟信号经采样电阻转化为电压信号,经过二阶低通有源滤波器滤除高频噪声信号,然后送入A/D转换芯片将模拟信号转换为数字信号 I_A 、 I_B 、 I_C ,电流信号A/D转换的采样频率为 f_s ,然后将A/D转换芯片输出的数字信号送入微处理器;

[0054] (3) 计算转速环:转速给定值 n^* 与反馈值 n 作差,经过转速PI调节器的输出值 T_e^* ,作为转矩的给定值。其中,转速给定值是人为在微处理器中设定的,以上计算过程在微处理器中进行;

[0055] (4) 计算转矩的反馈值:转矩的反馈值由转矩观测器结合三相电流信号和转子位置信号输出。转矩观测器是基于大量有限元仿真数据,采用线性插值的方法构建的,存储于微处理器(DSP2812)内存中的离线三维查找表 $T(\theta, i_p)$ 。其中, θ 为转子位置角, i_p 为相绕组电流, p 代表A、B、C中的任一相。电励磁双凸极电动机直接转矩控制系统运行时,会根据电流霍尔传感器采集的的模拟信号 i_a 、 i_b 和 i_c ,以及旋转变压器及其解码器输出的转子位置信号 θ ,输出相应的转矩反馈值 T_e ,作为转矩反馈值;

[0056] (5) 计算误差控制信号 ε_T :转矩的给定值 T_e^* 与反馈值 T_e 作差,得到转矩的控制误差为 T_{e_err} ,作为滞环控制环节的输入。假定当前为 k 时刻,若

[0057] $T_{e_err} \leq -T_{band}$ (T_{band} 为转矩滞环控制的环宽),则滞环控制环节输出的误差控制信号为低电平,即 $\varepsilon_T^k = 0$;若 $T_{e_err} \geq T_{band}$,则滞环控制环节输出的误差控制信号为高电平,即 $\varepsilon_T^k = 1$;若 $-T_{band} \leq T_{e_err} \leq T_{band}$,则滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$ 。其中, ε_T^k 为当前 k 时刻滞环控制环节输出的误差控制信号, ε_T^{k-1} 为上一时刻滞环控制环节输出的误差控制信号;

[0058] (6) 开关状态查询表:定义励磁电流从电源流向励磁绕组为励磁电流的正方向,反之为励磁电流的反方向,定义转子逆时针方向旋转为正方向,反之为反方向。以励磁电流的方向为正方向,转子的旋转方向为正方向为例,当 $0 < \theta \leq 120^\circ$ 时,若 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq -T_{band}$ (T_{band} 为转矩滞环控制的环宽),则滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 0$,开关状态查询表输出的驱动信号应使转矩减小,即A相上管Q1与B相下管Q6关断;若 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \geq T_{band}$,则滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 1$,开关状态查询表输出的驱动信号应使转矩增加,即A相上管Q1与B相下管Q6开通;若 $-T_{band} \leq T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq T_{band}$,则滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$,开关状态查询表保持上一时刻输出的驱动信号;

[0059] 改变励磁电流方向,改变转子旋转方向,可以得到四组控制逻辑,每组控制逻辑包含六种功率变换器的驱动信号。四组控制逻辑如表1所示,使用直接转矩控制方法时,根据实际情况进行选择。

[0060] 表1

[0061]

转子位置角		0~120°		120°~240°		240°~360°	
转矩变化		$T \uparrow$	$T \downarrow$	$T \uparrow$	$T \downarrow$	$T \uparrow$	$T \downarrow$
转子正转	正向励磁	Q1、Q6 开通	Q1、Q6 关断	Q2、Q3 开通	Q2、Q3 关断	Q4、Q5 开通	Q4、Q5 关断
	负向励磁	Q3、Q4 开通	Q3、Q4 关断	Q5、Q6 开通	Q5、Q6 关断	Q1、Q2 开通	Q1、Q2 关断
转子反转	正向励磁	Q1、Q2 开通	Q1、Q2 关断	Q5、Q6 开通	Q5、Q6 关断	Q3、Q4 开通	Q3、Q4 关断
	负向励磁	Q4、Q5 开通	Q4、Q5 关断	Q2、Q3 开通	Q2、Q3 关断	Q1、Q6 开通	Q1、Q6 关断

[0062]

		开通	关断	开通	关断	开通	关断
--	--	----	----	----	----	----	----

[0063] (7) 功率变换器:功率变换器采用三相全桥逆变电路,如附图1所示。其中,Q1~Q6为金氧半场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor,MOSFET),D1~D6分别为其寄生的反并二极管。开关状态查询表输出的驱动信号控制功率变换器Q1~Q6的导通模式,从而实现转矩的闭环控制。

[0064] 图2为电励磁双凸极电动机直接转矩控制框图。图2所示的控制框图主要包括以下环节:转速反馈环节、转速调节环节、转矩反馈环节、转矩调节环节、开关状态查询表、功率变换器以及电励磁双凸极电动机。其中,转速反馈环节包括旋转变压器及其解码器和转速计算环节;转速调节环节为转速PI调节器;转矩反馈环节由采集三相电流信号的电流霍尔传感器、采集转子位置信号的旋转变压器及其解码器和转矩观测器组成;转矩调节环节为转矩滞环控制环节;功率变换器为三相全桥逆变器。

[0065] 图3为电励磁双凸极电动机的电感特性图,图中 L_{af} 、 L_{bf} 、 L_{cf} 分别为A、B、C三相绕组与励磁绕组之间的互感, L_a 、 L_b 、 L_c 分别为A、B、C三相绕组的自感,图中 θ 为转子位置角。以 0° 、 120° 、 240° 为分界点,将一个电周期内的电感变化划分为三个区间,即电感上升区、电感下降区、电感不变区。分界点分别是A、B、C三相定子极与转子极对齐的位置,此时对应相的电感值最大。

[0066] 为了验证权利要求2所述转矩观测器的准确性,对一台电励磁双凸极电动机进行仿真。图4为本发明所提出的转矩观测器误差仿真波形图,该误差是由电励磁双凸极电动机输出转矩的有限元仿真结果减去转矩观测器输出值的仿真结果得到的。附图4可以看出本案所设计的电励磁双凸极电动机转矩观测器具有良好的准确性。

[0067] 为了验证专利“基于终端滑模的双凸极电动机直接转矩控制装置及方法”所提出的转矩观测器的准确性,对一台电励磁双凸极电动机进行仿真。图5为专利“基于终端滑模的双凸极电动机直接转矩控制装置及方法”所提出的转矩观测器误差仿真验证图,该误差是由电励磁双凸极电动机输出转矩的有限元仿真结果减去转矩观测器输出值的仿真结果得到的。附图5可以看出专利“基于终端滑模的双凸极电动机直接转矩控制装置及方法”所提出的电励磁双凸极电机转矩观测器存在较大的转矩观测误差。

[0068] 为了验证本案所述电励磁双凸极电动机直接转矩方法的有效性,对一台电励磁双凸极电动机进行仿真。图6为电励磁双凸极电动机直接转矩控制方法的转矩仿真结果图。转矩平均值的仿真结果为 $1.87\text{N}\cdot\text{m}$,转矩脉动率为 80.14% 。电励磁双凸极电动机的转矩脉动得到了显著的降低,转矩性能得到了一定程度的提升。(转矩脉动率

$T_{\text{ripple}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{avg}}} \times 100\%$,其中, T_{max} 为单个电周期内的转矩最大值, T_{min} 为单个电周期内的转矩最小值, T_{avg} 为单个电周期内的转矩平均值。)

[0069] 本说明书中的各个实施例均采用递进的方式描述,各个实施例之间相同相似的部分互相参见即可,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处。尤其,对于设备实施例而言,由于其基本相似于方法实施例,所以描述得比较简单,相关之处参见方法实施例的部分说明即可。以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

权 利 要 求 书

1. 一种用于电励磁双凸极电机的转矩控制方法,其特征在于,包括:

步骤101,获取电流霍尔传感器采集的三相电流的模拟信号 i_a 、 i_b 和 i_c ,所述电励磁双凸极电机的转子位置信号 θ 向所述转矩观测器传输,所述转矩观测器得到转矩反馈值 T_e 并输出;

步骤102,将转速外环的输出作为所述电励磁双凸极电机的转矩给定值为 T_e^* ,用所述转矩给定值 T_e^* 减去所述转矩反馈值 T_e 得到所述电励磁双凸极电机的转矩的控制误差为 T_{e_err} ;

步骤103,将所述转矩的控制误差 T_{e_err} 输入至滞环控制环节,滞环控制环节根据所述转矩的控制误差 T_{e_err} 大小,向开关状态查询表输出误差控制信号 ε_T ;

步骤104,所述开关状态查询表结合误差控制信号 ε_T 和所述转子位置信号 θ ,向功率变换器输出驱动信号PWM。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述转矩观测器包括:存储于微处理器(DSP2812)的内存中的离线三维查找表 $T(\theta, i_p)$,其中, θ 为转子位置角, i_p 为相绕组电流, p 代表所述电励磁双凸极电机的A、B、C三相中的任一相。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述转速外环,包括:

获取所述转子位置信号 θ ,和转速的反馈值,转速给定值与反馈值作差,经过转速调节器的输出值 T_e^* ,作为转矩的给定值。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤103中根据所述转矩的控制误差 T_{e_err} 大小,向开关状态查询表输出误差控制信号 ε_T ,包括:

记录当前为 k 时刻,若 $T_{e_err} \leq -T_{band}$ 则所述滞环控制环节输出的误差控制信号为低电平,即 $\varepsilon_T^k = 0$,其中, T_{band} 为转矩滞环控制的环宽。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征在于,还包括:

若 $T_{e_err} \geq T_{band}$,则所述滞环控制环节输出的误差控制信号为高电平,即 $\varepsilon_T^k = 1$ 。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,还包括:

若 $-T_{band} \leq T_{e_err} \leq T_{band}$,则所述滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$,其中, ε_T^k 为当前 k 时刻滞环控制环节输出的误差控制信号, ε_T^{k-1} 为上一时刻滞环控制环节输出的误差控制信号。

7. 根据权利要求1或6所述的方法,其特征在于,所述开关状态查询表是基于所述电励磁双凸极电动机的转矩公式与电感特性设置的,所述转矩公式包括:

$$T_p = T_{pr} + T_{pe} = \frac{1}{2} \cdot i_p^2 \cdot \frac{dL_p}{d\theta} + i_p \cdot i_f \cdot \frac{dL_{pf}}{d\theta}$$

其中, T_p 是单相的总转矩输出, T_{pr} 表示单相磁阻转矩, T_{pe} 表示单相励磁转矩, L_p 表示相绕组自感, i_f 表示励磁电流, L_{pf} 表示励磁绕组与相绕组互感, θ 表示转子位置角, p 所述电励磁双凸极电机的A、B、C三相中的任一相。

当 $0 < \theta \leq 120^\circ$ 时,A相通正电流,B相通负电流,电机产生正转矩;A相通负电流,B相通正电流,电机产生负转矩。

8. 根据权利要求7所述的方法,其特征在于,

当 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq -T_{band}$,所述滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 0$,所述开关状

态查询表输出的驱动信号使转矩减小,即A相上管Q1与B相下管Q6关断;

当 $T_{e_err} = T_e^* - T_e \geq T_{band}$,所述滞环控制环节输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = 1$,所述开关状态查询表输出的驱动信号应使转矩增加,即A相上管Q1与B相下管Q6开通;

当 $-T_{band} \leq T_{e_err} = T_e^* - T_e \leq T_{band}$,所述滞环控制环节保持上一时刻输出的误差控制信号 $\varepsilon_T^k = \varepsilon_T^{k-1}$,则开关状态查询表保持上一时刻输出的驱动信号。

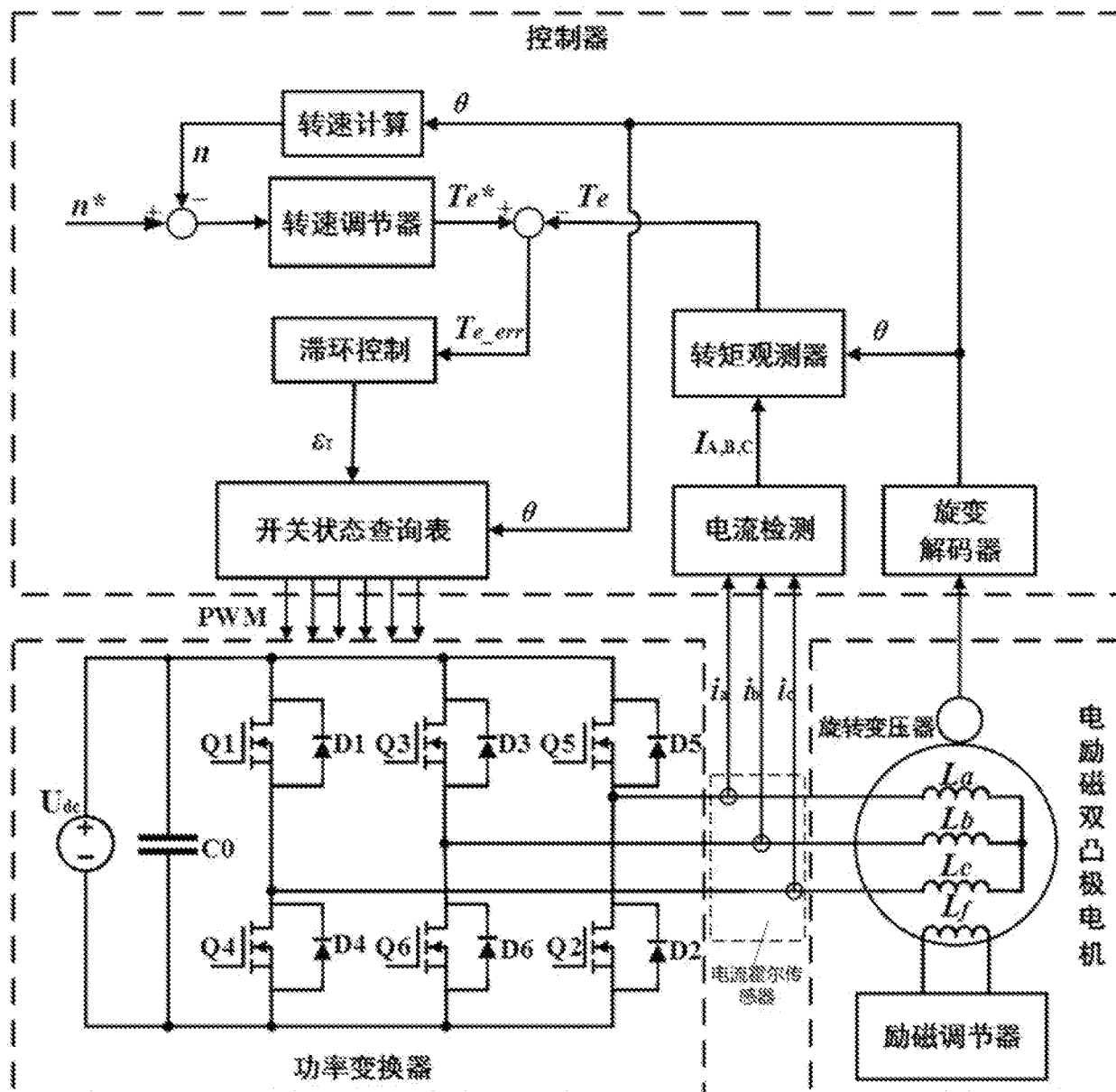


图1

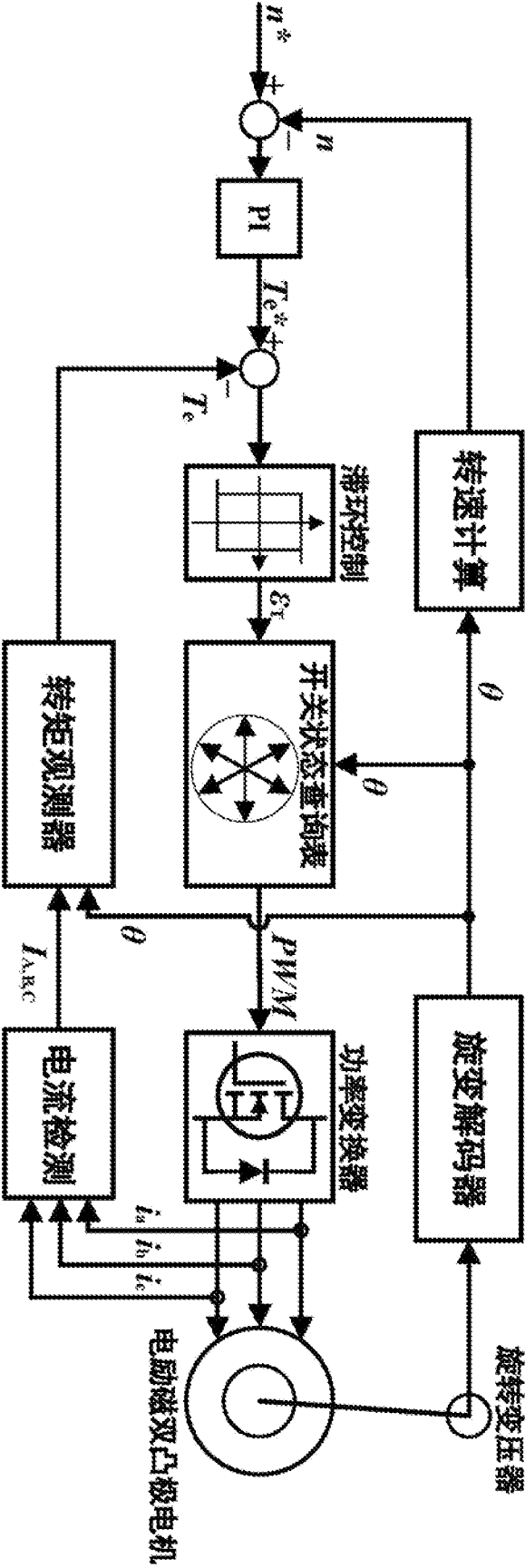


图2

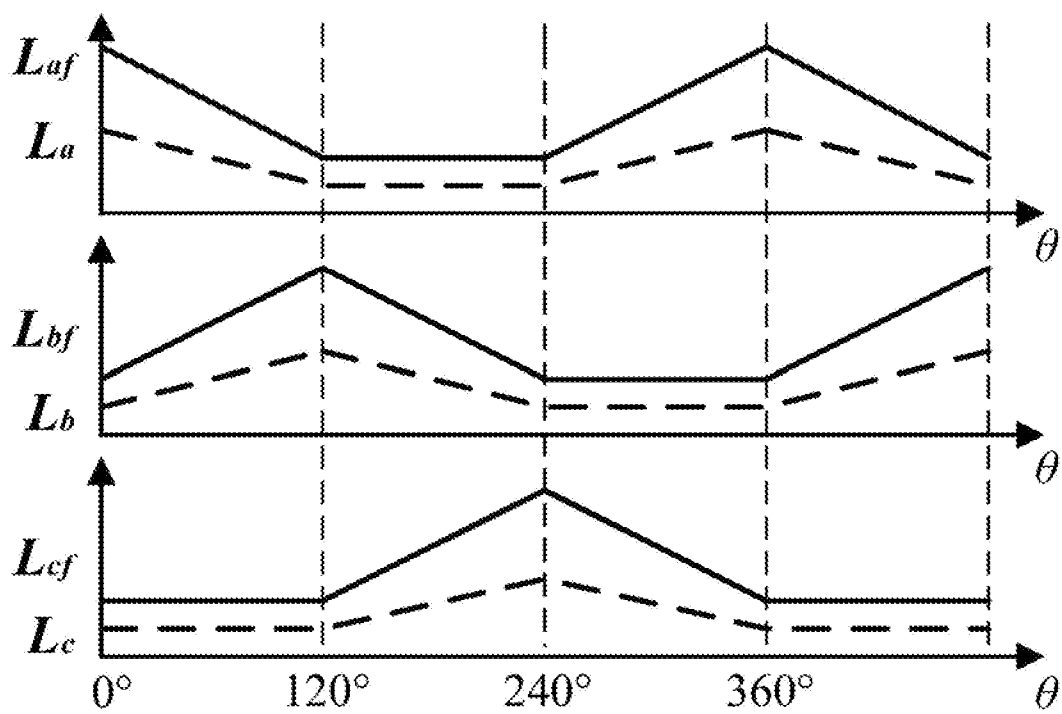


图3

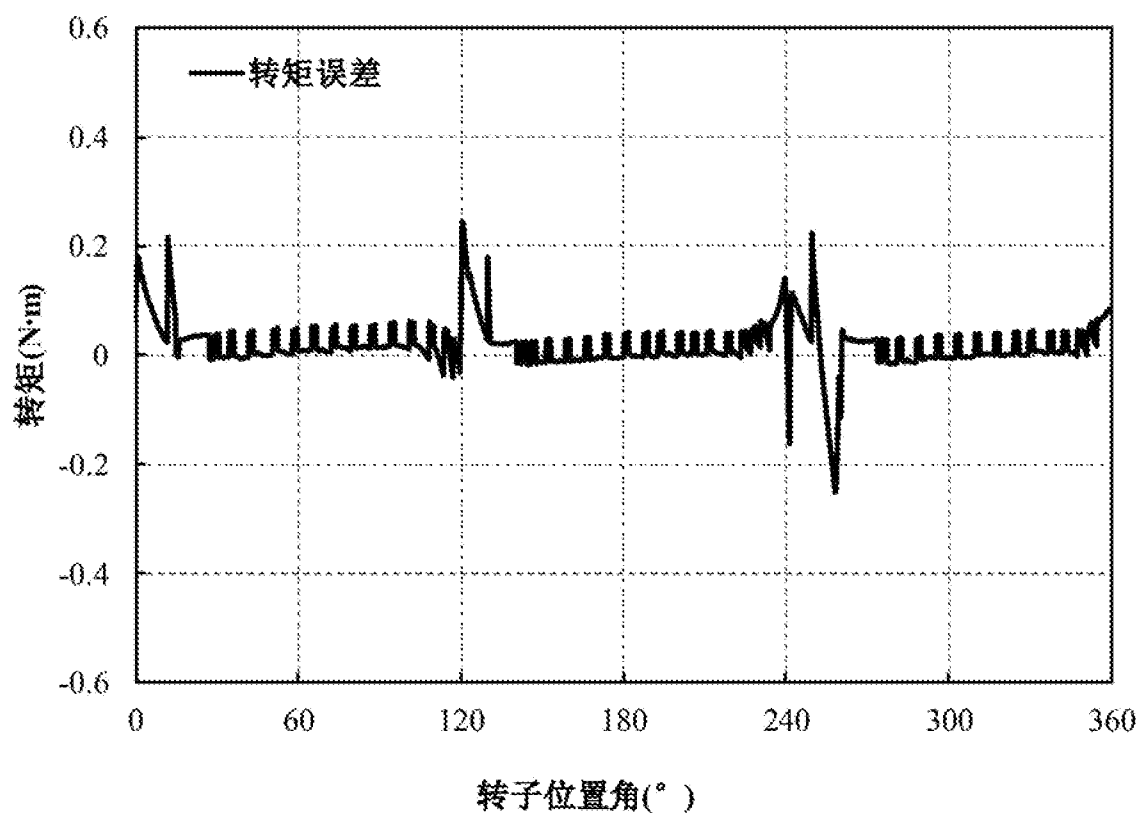


图4

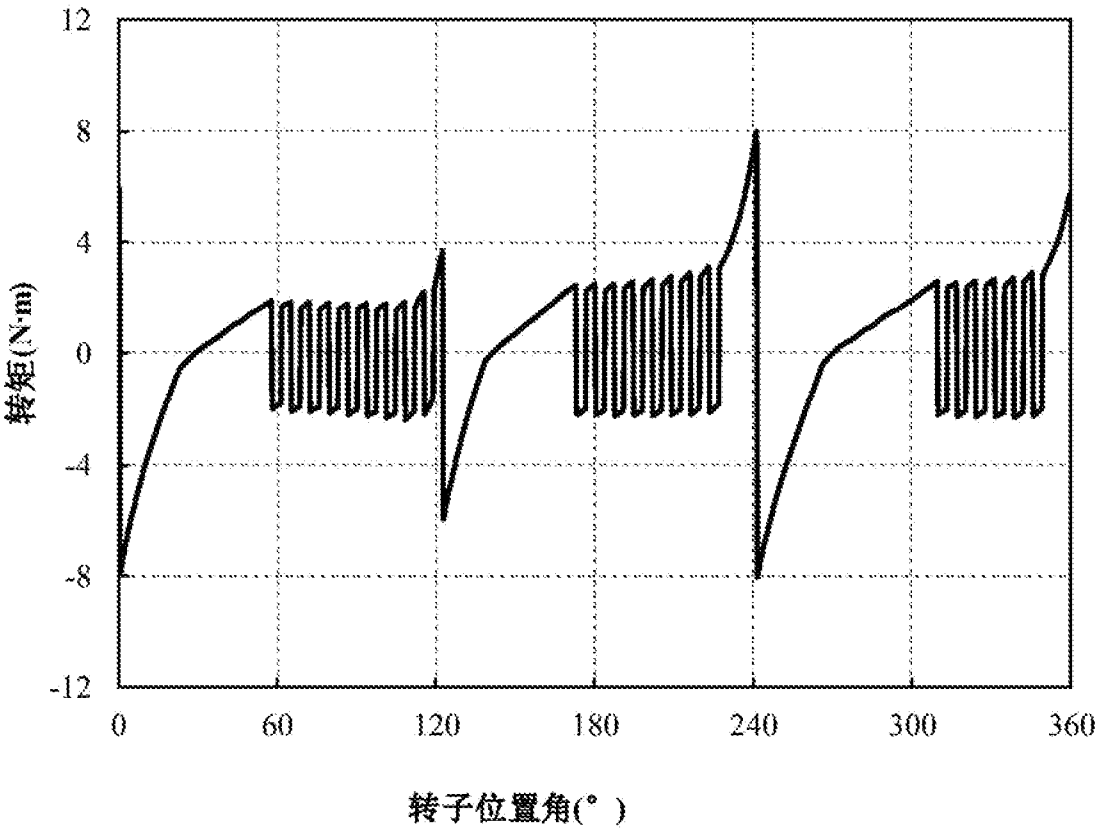


图5

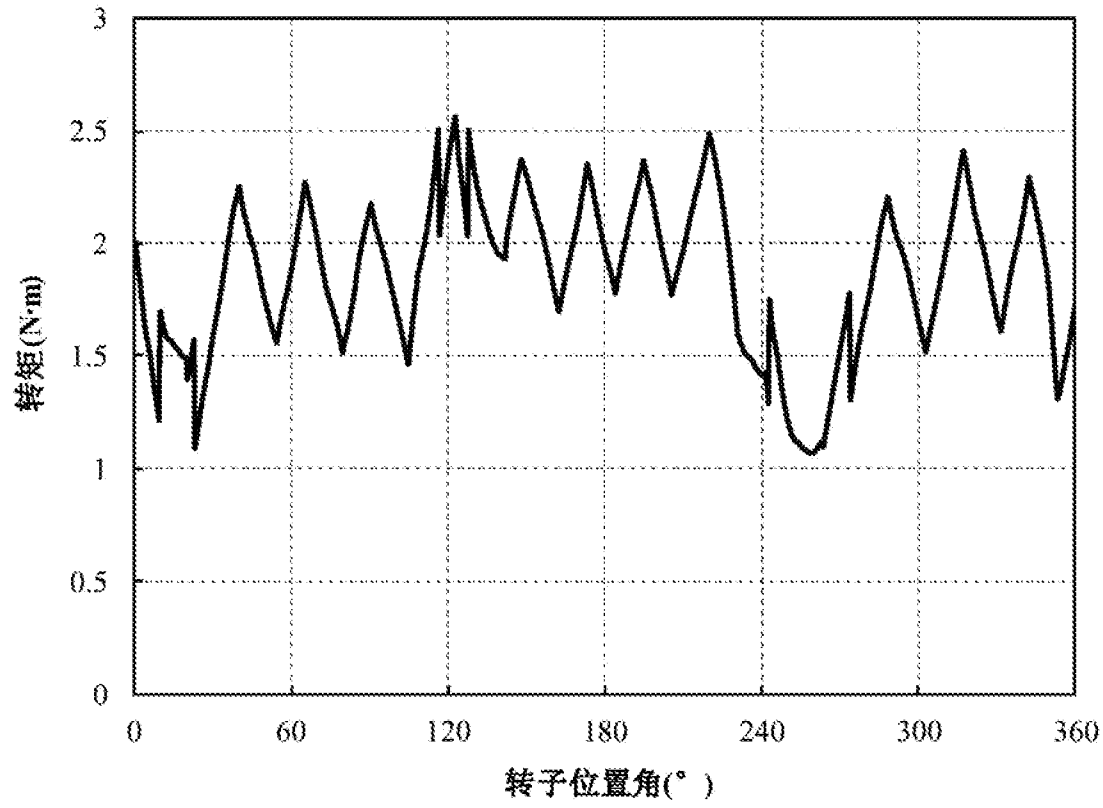


图6

步骤101, 获取电流霍尔传感器采集的模拟信号, 和所述电励磁双凸极电机的转子位置信号, 并向所述转矩观测器传输。

步骤102, 转速外环的输出作为所述电励磁双凸极电机的转矩给定值, 用所述转矩给定值减去所述转矩数值得到所述电励磁双凸极电机的转矩的控制误差。

步骤103, 将所述转矩的控制误差输入至滞环控制环节, 滞环控制环节根据所述转矩的控制误差大小, 向开关状态查询表输出误差控制信号。

步骤104, 所述开关状态查询表结合误差控制信号和所述转子位置信号 θ , 向功率变换器输出驱动信号PWM。

图7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/115897

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02P 23/04(2006.01)i; H02P 23/30(2016.01)i; H02P 27/08(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI: 电机, 电动机, 磁阻, 双凸极, 直接转矩, 直接瞬时转矩, 滞环, 转速外环, 转速环, 转矩环, 转矩内环, motor, direct, instantaneous, torque, hysteresis, doubly salient, switched reluctance, loop, speed

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109450330 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 08 March 2019 (2019-03-08) claims 1-8	1-8
X	CN 105897076 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 24 August 2016 (2016-08-24) description, paragraphs [0065]-[0144], and figures 1 and 5-7	1-8
X	CN 107425782 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 01 December 2017 (2017-12-01) description, paragraphs [0006]-[0038], and figure 1	1-8
A	CN 107425783 A (JIANGSU SHANGQI GROUP CO., LTD.) 01 December 2017 (2017-12-01) entire document	1-8
A	KR 101557579 B1 (KYUNGSUNG UNIVERSITY INDUSTRY COOPERATION FOUNDATION) 06 October 2015 (2015-10-06) entire document	1-8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

09 January 2020

Date of mailing of the international search report

23 January 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/115897

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109450330	A	08 March 2019	None			
CN	105897076	A	24 August 2016	CN	105897076	B	04 May 2018
CN	107425782	A	01 December 2017	CN	107425782	B	11 October 2019
CN	107425783	A	01 December 2017	None			
KR	101557579	B1	06 October 2015	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/115897

A. 主题的分类 H02P 23/04(2006.01)i; H02P 23/30(2016.01)i; H02P 27/08(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) H02P 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT, CNKI, EPDOC, WPI: 电机, 电动机, 磁阻, 双凸极, 直接转矩, 直接瞬时转矩, 滞环, 转速外环, 转速环, 转矩环, 转矩内环, motor, direct, instantaneous, torque, hysteresis, doubly salient, switched reluctance, loop, speed																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109450330 A (南京航空航天大学) 2019年 3月 8日 (2019 - 03 - 08) 权利要求1-8</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 105897076 A (东南大学) 2016年 8月 24日 (2016 - 08 - 24) 说明书第[0065]-[0144]段及图1, 5-7</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 107425782 A (大连理工大学) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 说明书第[0006]-[0038]段及图1</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107425783 A (江苏上骐集团有限公司) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>KR 101557579 B1 (KYUNGSUNG UNIVERSITY INDUSTRY COOPERATION FOUNDATION) 2015年 10月 6日 (2015 - 10 - 06) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 109450330 A (南京航空航天大学) 2019年 3月 8日 (2019 - 03 - 08) 权利要求1-8	1-8	X	CN 105897076 A (东南大学) 2016年 8月 24日 (2016 - 08 - 24) 说明书第[0065]-[0144]段及图1, 5-7	1-8	X	CN 107425782 A (大连理工大学) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 说明书第[0006]-[0038]段及图1	1-8	A	CN 107425783 A (江苏上骐集团有限公司) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 全文	1-8	A	KR 101557579 B1 (KYUNGSUNG UNIVERSITY INDUSTRY COOPERATION FOUNDATION) 2015年 10月 6日 (2015 - 10 - 06) 全文	1-8
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
PX	CN 109450330 A (南京航空航天大学) 2019年 3月 8日 (2019 - 03 - 08) 权利要求1-8	1-8																		
X	CN 105897076 A (东南大学) 2016年 8月 24日 (2016 - 08 - 24) 说明书第[0065]-[0144]段及图1, 5-7	1-8																		
X	CN 107425782 A (大连理工大学) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 说明书第[0006]-[0038]段及图1	1-8																		
A	CN 107425783 A (江苏上骐集团有限公司) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 全文	1-8																		
A	KR 101557579 B1 (KYUNGSUNG UNIVERSITY INDUSTRY COOPERATION FOUNDATION) 2015年 10月 6日 (2015 - 10 - 06) 全文	1-8																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期 2020年 1月 9日		国际检索报告邮寄日期 2020年 1月 23日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 韩菲 电话号码 86-(10)-53961241																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/115897

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109450330	A	2019年 3月 8日	无	
CN	105897076	A	2016年 8月 24日	CN 105897076	B 2018年 5月 4日
CN	107425782	A	2017年 12月 1日	CN 107425782	B 2019年 10月 11日
CN	107425783	A	2017年 12月 1日	无	
KR	101557579	B1	2015年 10月 6日	无	