

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103346726 A

(43) 申请公布日 2013. 10. 09

(21) 申请号 201310285012. 9

(22) 申请日 2013. 07. 08

(71) 申请人 合肥工业大学

地址 230009 安徽省合肥市屯溪路 193 号

(72) 发明人 杨淑英 占琦 张兴 谢震

郭磊磊

(74) 专利代理机构 合肥和瑞知识产权代理事务

所(普通合伙) 34118

代理人 任岗生

(51) Int. Cl.

H02P 21/14(2006. 01)

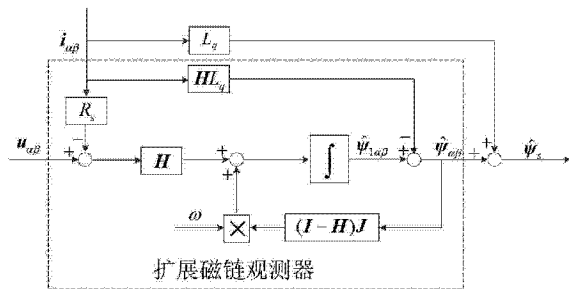
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种永磁同步电机(简称 PMSM)定子磁链观测方法,其特征在于,根据采集并运算得到的两相静止坐标系(简称  $\alpha\beta$  坐标系)下电机定子电压相量  $u_{\alpha\beta}$ 、定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$  和转子电角速度  $\omega$ ,基于状态观测器理论,依据永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下的数学模型建立一种扩展磁链观测器,然后利用定子磁链与扩展磁链的关系观测定子磁链  $\psi_s$ 。本发明能够避免采用纯积分定子磁链观测方法造成的直流偏置和积分饱和问题,也不存在改进型积分器带来的幅值和相位偏差或波形畸变问题,并且保留了纯积分定子磁链观测器参数鲁棒性好的优点。本发明只需设计最小阶观测器,利于工程实践。本发明提出的定子磁链观测方法可以应用于表贴式永磁同步电机(简称 SPMSM)和插入式永磁同步电机(简称 IPMSM),具有普适性好的优点。



1. 一种基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法,其特征在于包括如下步骤:

步骤一、采集永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下的定子电压相量  $u_{\alpha\beta}$ 、定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$  和转子电角速度  $\omega$ ;

步骤二、在  $\alpha\beta$  坐标系下建立永磁同步电机的状态空间表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{\alpha\beta} &= \omega J \psi_{\alpha\beta} \\ \frac{u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta} - L_q p i_{\alpha\beta}}{y} &= \omega J \psi_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,  $\psi_{\alpha\beta}$  为扩展磁链,  $\dot{\psi}_{\alpha\beta}$  为  $\psi_{\alpha\beta}$  的微分,  $y$  为输出相量,  $R_s$  为定子电阻,  $L_q$  为交轴电感,  $p$  为微分算子,  $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ;

根据式(1)建立形如式(2)的扩展磁链观测器对  $\psi_{\alpha\beta}$  进行观测:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}}_{\alpha\beta} &= \omega J \hat{\psi}_{\alpha\beta} + H (u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta} - L_q p i_{\alpha\beta} - \omega J \hat{\psi}_{\alpha\beta}) \\ \hat{y} &= \omega J \hat{\psi}_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,  $\hat{\psi}_{\alpha\beta}$  为  $\psi_{\alpha\beta}$  的观测值,  $\dot{\hat{\psi}}_{\alpha\beta}$  为  $\hat{\psi}_{\alpha\beta}$  的微分,  $\hat{y}$  为输出相量  $y$  的观测值, 反馈增益矩阵  $H = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\rho}{\omega} \\ -\frac{\rho}{\omega} & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\rho$  为正实数;

步骤三、对式(1)中第二式进行整理并积分得:

$$\int (u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta}) = L_q i_{\alpha\beta} + \psi_{\alpha\beta} \quad (3)$$

式(3)等式左边为定子磁链的纯积分观测表达式, 由此得定子磁链与扩展磁链的关系为:

$$\psi_s = L_q i_{\alpha\beta} + \psi_{\alpha\beta} \quad (4)$$

根据式(4)得, 在采用扩展磁链观测器实现扩展磁链观测时, 定子磁链观测值  $\hat{\psi}_s$  的表达式为:

$$\hat{\psi}_s = \hat{L}_q i_{\alpha\beta} + \hat{\psi}_{\alpha\beta} \quad (5)$$

式(5)中,  $\hat{L}_q$  为实际使用的交轴电感值。

2. 根据权利要求1所述的一种基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法,其特征在于,步骤一中所述的永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下的定子电压相量  $u_{\alpha\beta}$  的采集方式包括以下两种:

(1) 采样得到实时测得的永磁同步电机定子线电压  $u_{ab}$  和  $u_{bc}$  并经式(6)的坐标变换获得  $u_{\alpha\beta}$ ,

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(2) 直接采用电机控制器运算单元计算出的逆变器调制信号  $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*$  代替  $\mathbf{u}_{\alpha\beta}$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法,其特征在于,步骤一中所述的永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下的定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$  的采集过程如下:

(1) 采样得到实时测得的永磁同步电机三相定子电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ ,

(2) 利用公式(7)的坐标变换获得永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$ :

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法,其特征在于,步骤一中所述的永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下的转子电角速度  $\omega$  的采集过程如下:

(1) 在相邻采样时刻  $t_1$ 、 $t_2$  采样安装在电机轴上的光电式旋转编码器发出的脉冲数  $N_1$ 、 $N_2$ ,所述相邻采样时刻之差为采样周期  $T$ ,

(2) 根据转子电角速度  $\omega$  与光电式旋转编码器的脉冲采样值  $N_1$ 、 $N_2$  以及采样周期  $T$  之间的关系可以计算出转子电角速度  $\omega$ ,其表达式为:

$$\omega = \frac{N_2 - N_1}{M \times T} \times N \times 2\pi$$

上式中,  $M$  为光电式旋转编码器旋转一周产生的脉冲数,  $N$  为永磁同步电机极对数。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法,

其特征在于,步骤二所述的永磁同步电机的状态空间表达式(1)按如下步骤得到:

首先,将永磁同步电机在两相同步旋转坐标系即  $dq$  坐标系下的电压方程写作如下形式:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中,  $d$  表示直轴分量,  $q$  表示交轴分量,  $u_d$  和  $u_q$  为定子电压,  $i_d$  和  $i_q$  为定子电流,  $L_d$  为直轴电感,  $\psi_f$  为转子永磁体磁链;

将式(8)所示的永磁同步电机电压方程重新表述为如下形式:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f + (L_d - L_q)i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d - L_q)pi_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其次,选定式(9)中等式右边第三项为 0,并将式(9)变换到  $\alpha\beta$  坐标系下得如下形式:

$$u_{\alpha\beta} = R_s i_{\alpha\beta} + L_q p i_{\alpha\beta} + p \psi_{\alpha\beta} \quad (10)$$

$$p \psi_{\alpha\beta} = \omega J \psi_{\alpha\beta} \quad (11)$$

式(10)中,  $\psi_{\alpha\beta} = [\psi_f + (L_d - L_q)i_d] \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}$ ,  $\theta$  为转子磁链位置角;

根据式(10)和式(11)在  $\alpha\beta$  坐标系下建立永磁同步电机的状态空间表达式(1):

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{\alpha\beta} &= \omega J \psi_{\alpha\beta} \\ \frac{u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta} - L_q p i_{\alpha\beta}}{y} &= \omega J \psi_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (1) \quad \circ$$

## 基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种磁链观测方法,具体地说是一种永磁同步电机定子磁链观测方法。

### 背景技术

[0002] 永磁同步电机(简称PMSM)具有效率高、功率密度大、转矩输出大脉动小、动态响应快、调速范围宽等优点,目前在风力发电系统和电动汽车电驱动系统领域得到了广泛应用。

[0003] 常见的PMSM调速系统通常由速度外环和电流内环构成双闭环控制形式,并且内环电流给定值是由转速闭环调节器给定,因此一般无需准确的电磁转矩观测。而在风力发电和电动汽车系统中,PMSM驱动控制器自身一般无需速度闭环控制,常常要求其对于主控系统下发的转矩指令进行跟踪控制,而电机的实际运转速度则由主控系统决定。因此在电磁转矩反馈的基础上,进行转矩闭环控制可以获得所需电流指令,进而确保PMSM驱动控制系统对主控系统下发的指令转矩进行准确跟踪。然而,实际系统通常不会安装扭矩仪之类的扭矩传感器,因此高精度的电磁转矩估计是实现准确转矩闭环控制的关键。依据PMSM的数学模型,其电磁转矩可基于定子磁链与定子电流的叉乘得到,因此定子磁链观测的准确度直接决定了电磁转矩的观测及其跟踪控制精度。

[0004] 常规的PMSM定子磁链观测方法可以分为两类。一类是根据实测定子电压、电流,基于PMSM在两相同步旋转坐标系(简称dq坐标系)下的数学模型直接计算得到定子磁链在dq坐标系下的值。该方法计算简单,但要使用永磁体磁链和交、直流电感,而这些参数易受温升和磁饱和的影响,造成定子磁链计算误差。另一类方法是直接基于定子电压模型的积分运算获取磁链,尽管这一方法具有较好的参数鲁棒性,但存在其固有的积分运算问题。针对纯积分问题,一些学者进行了改进研究,提出的方法有:一、采用低通滤波器代替纯积分器,可以克服纯积分所产生的直流偏置和积分饱和,但会带来相位和幅值偏差;二、采用饱和反馈的改进积分器,可以抑制积分饱和,但可能会造成波形畸变;三、采用幅值限定的改进积分器,可以克服方法二造成的波形畸变,但恒定的限幅基准设定方式难以满足PMSM实际运行的需要;四、根据反电动势与定子磁链的正交原理,构建磁链幅值自适应的补偿方法,获得了适应较宽调速范围的补偿效果,但其磁链观测精度仍然受限。

[0005] 和常规定子磁链观测方法相比较,基于状态观测器的观测方法不仅能够避免纯积分的问题,而且可以实现磁链的闭环观测。有方法在dq坐标系下构建了定子磁链的全阶状态观测器,但该方法既需要准确的转子磁链定向角,同时又使用了较多的电机参数,其电机参数依赖性较强。

### 发明内容

[0006] 本发明是为了克服常规定子磁链观测技术和dq坐标系下的状态观测器方法存在的不足之处,提供一种闭环的、工程实现较容易的、参数鲁棒性好的定子磁链观测方法。本

发明在两相静止坐标系即  $\alpha\beta$  坐标系下, 构建一种扩展磁链观测器, 并利用定子磁链与扩展磁链的关系计算定子磁链。所采用的扩展磁链观测器只有 2 阶, 且仅需要定子电阻和交轴电感两个电机参数, 并且定子磁链的观测精度不受交轴电感影响, 参数鲁棒性好。

[0007] 为了实现上述目的, 本发明提出的一种基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法。该方法首先根据采集并运算得到的两相静止坐标系(简称  $\alpha\beta$  坐标系)下电机定子电压相量  $u_{\alpha\beta}$ 、定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$  和转子电角速度  $\omega$ , 基于状态观测器理论, 依据永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下的数学模型建立一种扩展磁链观测器, 然后利用定子磁链与扩展磁链的关系观测定子磁链  $\psi_s$ 。

[0008] 本发明的技术方案按照下述步骤实现。

[0009] 步骤一、采集永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下的定子电压相量  $u_{\alpha\beta}$ 、定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$  和转子电角速度  $\omega$ ;

[0010] 所述的定子电压相量  $u_{\alpha\beta}$  的采集方式包括以下两种:

[0011] (1) 采样得到实时测得的永磁同步电机定子线电压  $u_{ab}$  和  $u_{bc}$  并经式(6)的坐标变换获得  $u_{\alpha\beta}$ ,

$$[0012] \quad \mathbf{u}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0013] (2) 直接采用电机控制器运算单元计算出的逆变器调制信号  $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*$  代替  $u_{\alpha\beta}$ ,

[0014] 所述的定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$  的采集过程如下:

[0015] (1) 采样得到实时测得的永磁同步电机三相定子电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ ,

[0016] (2) 利用公式(7)的坐标变换获得永磁同步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下定子电流相量  $i_{\alpha\beta}$ :

$$[0017] \quad \mathbf{i}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0018] 所述的转子电角速度  $\omega$  的采集过程如下:

[0019] (1) 在相邻采样时刻  $t_1$ 、 $t_2$  采样安装在电机轴上的光电式旋转编码器发出的脉冲数  $N_1$ 、 $N_2$ , 所述相邻采样时刻之差为采样周期  $T$ ,

[0020] (2) 根据转子电角速度  $\omega$  与光电式旋转编码器的脉冲采样值  $N_1$ 、 $N_2$  以及采样周期  $T$  之间的关系可以计算出转子电角速度  $\omega$ , 其表达式为:

$$[0021] \quad \omega = \frac{N_2 - N_1}{M \times T} \times N \times 2\pi$$

[0022] 上式中,  $M$  为光电式旋转编码器旋转一周产生的脉冲数,  $N$  为永磁同步电机极对数。

[0023] 步骤二、在  $\alpha\beta$  坐标系下建立永磁同步电机的状态空间表达式:

$$[0024] \quad \dot{\psi}_{\alpha\beta} = \omega J \psi_{\alpha\beta}$$

[0025]

$$\frac{u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta} - L_q p i_{\alpha\beta}}{y} = \omega J \psi_{\alpha\beta} \quad (1)$$

[0026] 式(1)中,  $\psi_{\alpha\beta}$  为扩展磁链,  $\dot{\psi}_{\alpha\beta}$  为  $\psi_{\alpha\beta}$  的微分,  $y$  为输出相量,  $R_s$  为定子电阻,

$L_q$  为交轴电感,  $p$  为微分算子,  $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ;

[0027] 根据式(1)建立形如式(2)的扩展磁链观测器对  $\psi_{\alpha\beta}$  进行观测:

$$\dot{\hat{\psi}}_{\alpha\beta} = \omega J \hat{\psi}_{\alpha\beta} + H (u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta} - L_q p i_{\alpha\beta} - \omega J \hat{\psi}_{\alpha\beta}) \quad (2)$$

$$\hat{y} = \omega J \hat{\psi}_{\alpha\beta}$$

[0030] 式(2)中,  $\hat{\psi}_{\alpha\beta}$  为  $\psi_{\alpha\beta}$  的观测值,  $\dot{\hat{\psi}}_{\alpha\beta}$  为  $\hat{\psi}_{\alpha\beta}$  的微分,  $\hat{y}$  为输出相量  $y$  的观测值, 反

馈增益矩阵  $H = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\rho}{\omega} \\ -\frac{\rho}{\omega} & 1 \end{bmatrix}$   $\rho$  为正实数;

[0031] 步骤三、对式(1)中第二式进行整理并积分得:

$$\int (u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta}) = L_q i_{\alpha\beta} + \psi_{\alpha\beta} \quad (3)$$

[0033] 式(3)等式左边为定子磁链的纯积分观测表达式, 由此得定子磁链与扩展磁链的关系为:

$$\psi_s = L_q i_{\alpha\beta} + \psi_{\alpha\beta} \quad (4)$$

[0035] 根据式(4)得, 在采用扩展磁链观测器实现扩展磁链观测时, 定子磁链观测值  $\hat{\psi}_s$  的表达式为:

$$\hat{\psi}_s = \hat{L}_q i_{\alpha\beta} + \hat{\psi}_{\alpha\beta} \quad (5)$$

[0037] 式(5)中,  $\hat{L}_q$  为实际使用的交轴电感值。

[0038] 本发明基于扩展磁链观测器的永磁同步电机定子磁链观测方法的技术方案由上述三个步骤组成。

[0039] 在上述步骤中, 步骤二所述的永磁同步电机的状态空间表达式(1)按如下步骤得到:

[0040] 首先, 将永磁同步电机在两相同步旋转坐标系即 dq 坐标系下的电压方程写作如下形式:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0042] 式(8)中,  $d$  表示直轴分量,  $q$  表示交轴分量,  $u_d$  和  $u_q$  为定子电压,  $i_d$  和  $i_q$  为定子电流,  $L_d$  为直轴电感,  $\psi_f$  为转子永磁体磁链;

[0043] 将式(8)所示的永磁同步电机电压方程重新表述为如下形式:

$$[0044] \quad \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_q & -\omega L_q \\ \omega L_q & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f + (L_d - L_q)i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d - L_q)p i_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0045] 其次,选定式(9)中等式右边第三项为0,并将式(9)变换到  $\alpha\beta$  坐标系下得如下形式:

$$[0046] \quad u_{\alpha\beta} = R_s i_{\alpha\beta} + L_q p i_{\alpha\beta} + p \psi_{\alpha\beta} \quad (10)$$

$$[0047] \quad p \psi_{\alpha\beta} = \omega J \psi_{\alpha\beta} \quad (11)$$

[0048] 式(10)中,  $\psi_{\alpha\beta} = [\psi_f + (L_d - L_q)i_d] \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$ ,  $\theta$  为转子磁链位置角;

[0049] 根据式(10)和式(11)在  $\alpha\beta$  坐标系下建立永磁同步电机的状态空间表达式(1):

$$[0050] \quad \dot{\psi}_{\alpha\beta} = \omega J \psi_{\alpha\beta}$$

[0051]

$$\underbrace{u_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta} - L_q p i_{\alpha\beta}}_{\mathbf{y}} = \omega J \psi_{\alpha\beta} \quad (1)$$

[0052] 与已有技术相比,本发明有益效果体现在:

[0053] 1、和常规定子磁链观测方法相比较,本发明不仅能够避免纯积分方法造成的直流偏置和积分饱和问题,还可以避免改进积分器方法带来的相位和幅值偏差、波形畸变和应用场合受限问题。

[0054] 2、和 dq 坐标系下全阶状态观测器相比,本发明构建的状态观测器阶数小,易于工程实现;所获得的定子磁链观测与定子电压积分法一样具有较高的参数鲁棒性。

[0055] 3、本发明不仅可以应用于表贴式永磁同步电机(SPMSM),而且可以应用于插入式永磁同步电机(IPMSM),普适性好。

## 附图说明

[0056] 图1为本发明的定子磁链观测结构图。

## 具体实施方式

[0057] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的阐述。

[0058] 参见图1,信号采集部分,  $u_{\alpha\beta}$  和  $i_{\alpha\beta}$  是通过采样定子线电压  $u_{ab}$ 、定子线电压  $u_{bc}$ 、定子A相电流  $i_A$ 、定子B相电流  $i_B$ 、定子C相电流  $i_C$ ,并经过三相静止坐标系到两相静止坐标系变换获得,实际电角速度  $\omega$  是利用光电式旋转编码器获得。本实施例按如下过程进行:

[0059] 步骤一、采样得到实时测得的电机定子线电压  $u_{ab}$  和  $u_{bc}$ 、三相定子电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  和转子电角速度  $\omega$ ,并对  $u_{ab}$ 、 $u_{bc}$ 、 $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  进行坐标变换获得  $\alpha\beta$  坐标系上的电压和电流  $u_{\alpha\beta}$ 、 $i_{\alpha\beta}$ ;

[0060] 1)、首先利用霍尔电压传感器采样定子A、B两相之间的线电压脉冲和定子B、C两相之间的线电压脉冲,然后输入带有低通滤波电路的电压采样通道,获得正弦电压信号  $u_{ab}$ 、 $u_{bc}$ ;在数字信号处理芯片中对获得的电压采样值  $u_{ab}$ 、 $u_{bc}$  进行如式(1)所示的坐标变换,获得  $\alpha\beta$  坐标系上的定子电压信号  $u_{\alpha\beta}$ 。

$$[0061] \quad \mathbf{u}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0062] 2)、利用霍尔电流传感器采集定子A相电流  $i_A$ 、定子B相电流  $i_B$ 、定子C相电流  $i_C$ ，然后将其输入电流采样通道；在数字信号处理芯片中对获得的电流采样值  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  进行如式(2)所示的坐标变换，获得  $\alpha\beta$  坐标系上的定子电流信号  $i_{\alpha\beta}$ 。

$$[0063] \quad \mathbf{i}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0064] 3)、利用安装在电机轴上的光电式旋转编码器获取相邻采样时刻  $t_1$ 、 $t_2$  的脉冲采样值  $N_1$ 、 $N_2$ ，根据转子电角速度  $\omega$  与相邻脉冲采样值  $N_1$ 、 $N_2$  以及采样周期  $T$  的关系可以计算出  $\omega$ ，其表达式如式(3)所示。

$$[0065] \quad \omega = \frac{N_2 - N_1}{M \times T} \times N \times 2\pi \quad (3)$$

[0066] 式(3)中， $M$  为光电式旋转编码器旋转一周产生的脉冲数， $N$  为永磁同步电机极对数。

[0067] 以下参见图1。

[0068] 扩展磁链观测器的建立按如下过程进行：

[0069] 步骤二、将永磁同步电机在  $dq$  坐标系上的电压方程写作如下形式：

[0070]

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0071] 上式中， $d$  表示直轴分量， $q$  表示交轴分量， $u_d$  和  $u_q$  为定子电压， $i_d$  和  $i_q$  为定子电流， $R_s$  为定子电阻， $L_d$  为直轴电感， $L_q$  为交轴电感， $\psi_f$  为转子永磁体磁链， $\omega$  为转子电角速度， $p$  为微分算子。

[0072] 将式(4)所示的永磁同步电机电压方程重新表述为如下形式：

[0073]

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_q & -\omega L_q \\ \omega L_q & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f + (L_d - L_q)i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d - L_q)p i_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0074] 步骤三、由于电流环使得电流响应迅速，可以选定式(5)中等式右边第三项为0，并将式(5)变换到  $\alpha\beta$  坐标系上得如下形式：

$$[0075] \quad u_{\alpha\beta} = R_s i_{\alpha\beta} + L_q p i_{\alpha\beta} + p \psi_{\alpha\beta} \quad (6)$$

[0076] 式(6)中， $\psi_{\alpha\beta} = [\psi_\alpha \quad \psi_\beta]^T = [\psi_f + (L_d - L_q)i_d] \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}$ ， $u_{\alpha\beta}$  为定子电压相量， $i_{\alpha\beta}$

为定子电流相量， $\psi_{\alpha\beta}$  为扩展磁链， $\theta$  为转子磁链位置角。

[0077] 由于电流的快速跟踪性,可以认为扩展磁链  $\psi_{\alpha\beta}$  的幅值微分为 0,得  $\psi_{\alpha\beta}$  的微分表达式:

$$[0078] \quad p \psi_{\alpha\beta} = p[\psi_f + (L_d - L_q) i_d] + \omega J \psi_{\alpha\beta} \quad (7)$$

$$[0079] \quad = \omega J \psi_{\alpha\beta}$$

$$[0080] \quad \text{式(7)中, } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

[0081] 步骤四、根据式(6)和式(7)建立以扩展磁链  $\psi_{\alpha\beta}$  为状态变量的状态空间表达式为:

$$[0082] \quad \dot{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta} = \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_{\alpha\beta}$$

[0083]

$$\frac{\mathbf{u}_{\alpha\beta} - R_s \mathbf{i}_{\alpha\beta} - L_q p \mathbf{i}_{\alpha\beta}}{\mathbf{y}} = \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_{\alpha\beta} \quad (8)$$

[0084] 式(8)中,  $\dot{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta}$  表示  $\psi_{\alpha\beta}$  的微分,  $\mathbf{y}$  表示输出相量。

[0085] 由于电机的电气时间常数远比机械时间常数小,可以认为在两个相邻的采样时刻电机角速度  $\omega$  不变,可以将式(8)所示系统看成定常系统,于是建立扩展磁链状态观测器为:

[0086]

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\psi}}}_{\alpha\beta} = \omega \mathbf{J} \hat{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta} + \mathbf{H} (\mathbf{u}_{\alpha\beta} - R_s \mathbf{i}_{\alpha\beta} - L_q p \mathbf{i}_{\alpha\beta} - \omega \mathbf{J} \hat{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta}) \quad (9)$$

$$[0087] \quad \hat{\mathbf{y}} = \omega \mathbf{J} \hat{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta}$$

[0088] 式(9)中,  $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta}$  为  $\psi_{\alpha\beta}$  的观测值,  $\dot{\hat{\boldsymbol{\psi}}}_{\alpha\beta}$  为  $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta}$  的微分,  $\hat{\mathbf{y}}$  为  $\mathbf{y}$  的观测值,反馈增益矩阵

阵  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 \\ h_2 & h_1 \end{bmatrix}$ ,  $h_1$ 、 $h_2$  为待定系数。

[0089] 比较式(8)和(9)得扩展磁链观测误差方程为:

[0090]

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\psi}}}_{\alpha\beta} = \omega (\mathbf{I} - \mathbf{H}) \mathbf{J} \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta} = \omega \begin{bmatrix} h_2 & h_1 - 1 \\ 1 - h_1 & h_2 \end{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta} \quad (10)$$

[0091] 式(10)中,  $\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta} = \hat{\boldsymbol{\psi}}_{\alpha\beta} - \boldsymbol{\psi}_{\alpha\beta}$  为扩展磁链观测误差。

[0092] 将式(10)所示的微分方程系数矩阵  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_2 & h_1 - 1 \\ 1 - h_1 & h_2 \end{bmatrix}$  的极点配置为同一负实数  $-\rho$ , 所述  $\rho$  为正实数,即系数矩阵的参数  $h_1$ 、 $h_2$  满足特征方程  $(-\rho - \omega h_2)^2 + \omega^2 (1 - h_1)^2 =$

0, 计算得  $h_1 = 1$ 、 $h_2 = -\frac{\rho}{\omega}$ , 即得反馈增益矩阵为:

$$[0093] \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\rho}{\omega} \\ -\frac{\rho}{\omega} & 1 \end{bmatrix}$$

[0094] 若直接依据式(9)的形式设计状态观测器结构,需对定子电流进行微分运算,易于引入噪声,为此引入中间变量,如下所示:

[0095]

$$\hat{\psi}_{\lambda\alpha\beta} = \hat{\psi}_{\alpha\beta} + \mathbf{H}\mathbf{L}_q \mathbf{i}_{\alpha\beta} \quad (11)$$

[0096] 将式(11)代入式(9),可将状态观测方程重新表述为:

[0097]

$$p\hat{\psi}_{\lambda\alpha\beta} = \omega(\mathbf{I} - \mathbf{H})\mathbf{J}\hat{\psi}_{\alpha\beta} + \mathbf{H}(\mathbf{u}_{\alpha\beta} - R_s \mathbf{i}_{\alpha\beta}) \quad (12)$$

[0098] 步骤五、定子磁链观察过程。

[0099] 参见图 1,定子磁链观测按如下过程进行:

[0100] 在电机运行过程中,电机参数会随着运行工况发生变化,在扩展磁链观测器中实际使用的电机参数为 $\hat{L}_q$  ( $\hat{L}_q \neq L_q$ )。依据式(6)和(9),在扩展磁链观测器实现磁链观测时,有式(13)恒成立:

[0101]

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = R_s \mathbf{i}_{\alpha\beta} + \hat{L}_q p \mathbf{i}_{\alpha\beta} + p \hat{\psi}_{\alpha\beta} \quad (13)$$

[0102] 对式(13)进行整理并积分得:

[0103]

$$\int (\mathbf{u}_{\alpha\beta} - R_s \mathbf{i}_{\alpha\beta}) = \hat{L}_q \mathbf{i}_{\alpha\beta} + \hat{\psi}_{\alpha\beta} \quad (14)$$

[0104] 式(14)等式左边为定子磁链电压模型的纯积分表达式,由此可得定子磁链观测值 $\hat{\psi}_s$ 的表达式为:

[0105]

$$\hat{\psi}_s = \hat{L}_q \mathbf{i}_{\alpha\beta} + \hat{\psi}_{\alpha\beta} \quad (15)$$

[0106] 由于式(14)也恒成立,使得本发明提出的定子磁链观测方法不受交轴电感 $\hat{L}_q$ 准确度影响,使用的另一个电机参数 $R_s$ 可以通过在定子绕组中埋入温度传感器实时获得。

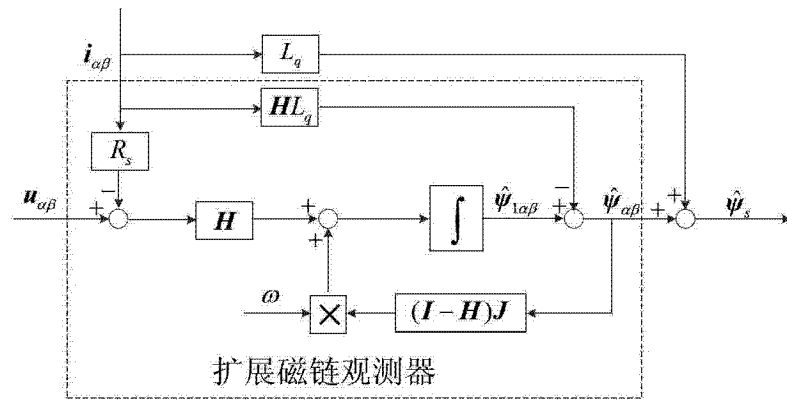


图 1