



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108039839 B

(45)授权公告日 2020.05.12

(21)申请号 201711291719.5

H02P 6/17(2016.01)

(22)申请日 2017.12.08

H02P 6/28(2016.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108039839 A

(56)对比文件

CN 103731076 A, 2014.04.16,

CN 101505127 A, 2009.08.12,

CN 107272692 A, 2017.10.20,

US 2015194914 A1, 2015.07.09,

CN 102710212 A, 2012.10.03,

(43)申请公布日 2018.05.15

(73)专利权人 重庆邮电大学

地址 400065 重庆市南岸区南山街道崇文路2号

王修岩等.基于干扰观测和前馈补偿的电动加载复合控制.《制造业自动化》.2015,第37卷(第1期),第11-14页.

(72)发明人 王会明 柯梅花 卢青高 鲜娟

李清都 周园

审查员 张琪

(74)专利代理机构 重庆市恒信知识产权代理有

限公司 50102

代理人 刘小红

(51)Int.Cl.

H02P 6/08(2016.01)

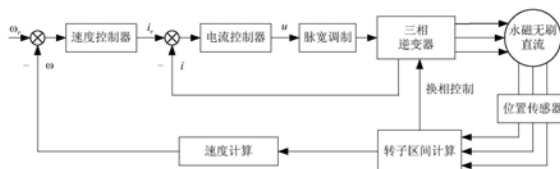
权利要求书2页 说明书6页 附图6页

(54)发明名称

永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统及方法

(57)摘要

本发明请求保护一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统及方法,该方法主要包括抗干扰速度和电流控制器,其中抗干扰速度控制器由速度反馈控制和基于干扰估计 \hat{z}_1 的前馈控制构成,抗干扰电流控制器由电流反馈控制和基于干扰估计 $\hat{\eta}_1$ 的前馈控制构成。与传统的串级控制方法相比,该方法实现简单,抗干扰能力强,能够满足高性能永磁无刷直流电机调速系统的应用需求,同时适用于多种类型干扰抑制情况。



1. 一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统,包括永磁无刷直流电机,其特征在于,还包括:速度控制器模块、电流控制器模块、脉宽调制模块、三相逆变器模块、位置传感器模块、转子区间计算模块以及速度计算模块;其中所述速度控制器模块与电流控制器模块相连接,所述电流控制器模块与脉宽调制模块相连接,所述三相逆变器模块还分别与永磁无刷直流电机与转子区间计算模块相连接,所述永磁无刷直流电机与转子区间计算模块之间设置有位置传感器模块,所述速度计算模块与速度控制器模块相连接;

其中,所述位置传感器模块用于检测安装于永磁无刷直流电机上的位置传感器信号,采用转子区间计算模块得到电机转子位置所在区间,并对三相逆变器模块实施换相控制;检测母线电流得到电流控制器模块所需的实际电流*i*;位置传感器信号经过转子区间计算出的数值,经过速度计算模块得到电机实际速度 ω ;速度控制器模块的输入端为速度参考值 ω_r ,与得到的电机实际速度 ω 的差值,经过速度控制器模块后,得到电流控制器模块输入端的参考电流 i_r ;将得到的参考电流 i_r 与得到的实际电流*i*的差值,输入电流控制器模块后,得到脉宽调制模块的输入电压*u*;电压*u*经过脉宽调制模块,依据调制原则输出所需的脉冲宽度调制电压,传输到三相逆变器的输入端,在转子区间计算模块的换相控制下,驱动永磁无刷直流电机运行;

所述速度控制器模块为抗干扰速度控制器,速度控制器模块与电流控制器模块以串级方式相连;所述抗干扰速度控制器包括速度反馈控制和基于干扰估计 \hat{z}_1 的前馈控制;抗干扰速度控制器的表达式为:

$$i_r = \frac{1}{a}[\dot{w}_r + k_w(w_r - w) - \hat{z}_1]$$

其中, $a = k_t/J$; i_r 参考电流, w_r 为参考速度; \dot{w}_r 表示参考速度的导数, w 为电机实际速度; k_w 为控制增益; k_t 为转矩系数; J 为转动惯量; \hat{z}_1 为干扰 z_1 的估计。

2. 根据权利要求1所述的一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统,其特征在于,所述电流控制器为抗干扰电流控制器,包括电流反馈控制和基于干扰估计 $\hat{\eta}_1$ 的前馈控制;抗干扰电流控制器的表达式为:

$$u = \frac{1}{b}[\dot{i}_r + k_i(i_r - i) - \hat{\eta}_1]$$

其中, $b = 1/L$; u 为电流控制器的输出; \dot{i}_r 表示表示参考电流的导数, i_r 为参考电流; i 为电机实际电流; k_i 为控制增益; L 为定子电感; $\hat{\eta}_1$ 为干扰 η_1 的估计。

3. 根据权利要求1或2所述的一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统,其特征在于,所述抗干扰观测器I和II分别体现在速度控制器和电流控制器中,为广义比例积分观测器GPIO;

所述广义比例积分观测器GPIO的表达式为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_0 = z_1 + ai_r + l_m(z_0 - \hat{z}_0) \\ \dot{\hat{z}}_1 = z_2 + l_{m-1}(z_0 - \hat{z}_0) \\ \dot{\hat{z}}_2 = z_3 + l_{m-2}(z_0 - \hat{z}_0) \\ \vdots \\ \dot{\hat{z}}_m = l_0(z_0 - \hat{z}_0) \end{cases}$$

其中, $z_0 = w$; $z_0 = w$, 即等于电机速度; \hat{z}_0 即该速度的估计; $\dot{\hat{z}}_0$ 估计速度的导数;
 $a = \frac{K_t}{J}$; $z_1 = \frac{K_t}{J}(i - i_r) - \frac{B}{J}w - \frac{T_L}{J}$; i_r 参考电流, m 为正整数; $(l_m, l_{m-1}, l_{m-2}, \dots, l_0)$ 为观测器 I 系数。

4. 根据权利要求1或2所述的一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统, 其特征在于, 所述永磁无刷直流电机的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{w} = \frac{K_t}{J}i - \frac{B}{J}w - \frac{T_L}{J} \\ i = \frac{1}{L}u - \frac{R}{L}i - \frac{K_e}{L}w \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω 为转速信号; J 为转动惯量; $K_t = \frac{3}{2}n_p\psi_f$ 为转矩系数, n_p 为磁极对数, ψ_f 为转子磁链; B 为粘滞摩擦系数; T_L 为负载转矩; i, u 分别为电机定子电流和电压; L 为定子电感; R 为定子电阻; $K_e = n_p\psi_f$ 也为转矩系数。

5. 一种基于权利要求1所述系统的永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

1) 检测三路位置传感器信号, 根据检测到的三路位置信号可以划分出六个区间, 这六个区间可以表示电机转子所在位置, 同时这六个区间的边沿也就是三相逆变器模块的换相点, 从而可以根据三路位置传感器信号实现对三相逆变器模块的换相控制;

2) 检测母线电流得到电流控制器模块所需的实际电流 i ;

3) 位置传感器信号经过转子区间计算出的数值, 结合采样周期经过速度计算模块得到电机实际速度 ω ;

4) 速度控制器模块的输入端为速度参考值 ω_r 与步骤3) 得到的实际速度 ω 的差值, 经过速度控制器模块后, 得到电流控制器模块输入端的参考电流 i_r , 也就是说电流 i_r 为速度控制器的输出;

5) 步骤4) 得到的参考电流 i_r 与步骤2) 得到的实际电流 i 的差值, 经过电流控制器模块后, 得到脉宽调制模块的输入电压 u , 也就是说电压 u 为电流控制器的输出;

6) 电压 u 经过脉宽调制模块, 依据调制原则输出所需的脉冲宽度调制电压, 传输到三相逆变器的输入端, 在转子区间计算模块的换相控制下, 驱动永磁无刷直流电机运行。

永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统及方法

技术领域

[0001] 本发明属于一种永磁无刷直流电机的控制方法,尤其是一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制方法。

背景技术

[0002] 永磁无刷直流电机是随着电力电子技术的发展和新型永磁材料的出现而迅速发展起来的一种新型机电一体化电机,以其结构简单、运行可靠、维护方便、效率高、无励磁损耗以及调速性能好等一系列优点,广泛应用于航空航天、家用电器、仪器仪表、化工、医疗器械等工业领域。

[0003] 传统的永磁无刷直流电机使用线性控制方法如PI控制,因其结构简单、容易实现而被广泛应用。然而,永磁无刷直流电机是一个非线性系统,同时又受到各种类型时变干扰的影响,线性控制方法无法使系统获得满意的控制性能和抗扰能力。随着技术的发展,越来越多的先进控制方法被提出,它们从不同的方面对永磁无刷直流电机系统性能进行了改进。但是其通常基于单纯的反馈控制方法,或者虽然采用了反馈控制-前馈补偿控制的复合控制方法,但这些方法无法有效处理系统各类时变干扰。

[0004] 文献(陈强.无刷直流电机的调速控制研究[D].浙江:东南大学,2005,27-29.)介绍了一种永磁无刷直流电机调速系统串级控制,分为速度外环和电流内环控制,外环和内环均采用PI算法,虽然可以使系统具有较好的动态和稳态性能,但是其无法有效抑制系统各类时变干扰。同时,在一般的永磁无刷直流电机调速系统抗干扰控制中,通常采用先进的控制方法单一的对电机速度环或者位置环进行抗干扰控制,很少对电机电流环进行抗干扰控制,如文献(Li SH,LiuZG.Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor systemwith variations of load inertia[J].IEEE Trans Indust Electron,2009;56(8):3050-9.)仅仅提出单一的对系统速度环进行抗干扰控制;文献(SuYX,Zheng CH,DuanBYAutomatic disturbances rejectioncontroller for precise motioncontrol of permanent-magnet synchronous motors[J].IEEE Trans Indust Electron,2005;52(3):814-23.)仅仅提出单一的对系统位置环进行抗干扰控制。这类控制方法往往难以有效抑制系统各类时变干扰。因此,设计一种永磁无刷直流电机调速系统控制方法,使其系统结构简单,控制性能良好,并有效抑制多种类型时变干扰,对永磁无刷直流电机的应用及推广非常重要。

发明内容

[0005] 本发明旨在解决以上现有技术的问题。提出了一种系统可以达到良好的动态和稳态性能、可以有效提高系统的抗干扰能力的永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统及方法。本发明的技术方案如下:

[0006] 一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制系统,包括永磁无刷直流电机,其特征在于,还包括:速度控制器模块、电流控制器模块、脉宽调制模块、三相逆变器模

块、位置传感器模块、转子区间计算模块以及速度计算模块；其中所述速度控制器模块与电流控制器模块相连接，所述电流控制器模块与脉宽调制模块相连接，所述三相逆变器模块还分别与永磁无刷直流电机与转子区间计算模块相连接，所述永磁无刷直流电机与转子区间计算模块之间设置有位置传感器模块，所述速度计算模块与速度控制器模块相连接；

[0007] 其中，所述位置传感器模块用于检测安装于永磁无刷直流电机上的位置传感器信号，采用转子区间计算模块得到电机转子位置所在区间，并对三相逆变器模块实施换相控制；检测母线电流得到电流控制器模块所需的实际电流*i*；位置传感器信号经过转子区间计算出的数值，经过速度计算模块得到电机实际速度 ω ；速度控制器模块的输入端为速度参考值 ω_r ，与得到的电机实际速度 ω 的差值，经过速度控制器模块后，得到电流控制器模块输入端的参考电流 i_r ；将得到的参考电流 i_r 与得到的实际电流*i*的差值，输入电流控制器模块后，得到脉宽调制模块的输入电压u；电压u经过脉宽调制模块，依据调制原则输出所需的脉冲宽度调制电压，传输到三相逆变器的输入端，在转子区间计算模块的换相控制下，驱动永磁无刷直流电机运行。

[0008] 进一步的，所述速度控制器模块为抗干扰速度控制器，速度控制器模块与电流控制器模块以串级方式相连；所述抗干扰速度控制器包括速度反馈控制和基于干扰估计 \hat{z}_1 的前馈控制；抗干扰速度控制器的表达式为：

$$[0009] \quad i_r = \frac{1}{a} [\dot{w}_r + k_w (w_r - w) - \hat{z}_1]$$

[0010] 其中， $a = k_t / J$ ； i_r 参考电流， w_r 为参考速度； \dot{w}_r 表示参考速度的导数， w 为电机实际速度； k_w 为控制增益； k_t 为转矩系数； J 为转动惯量； \hat{z}_1 为干扰 z_1 的估计。

[0011] 进一步的，所述电流控制器为抗干扰电流控制器，包括电流反馈控制和基于干扰估计 $\hat{\eta}_1$ 的前馈控制；抗干扰电流控制器的表达式为：

$$[0012] \quad u = \frac{1}{b} [\dot{i}_r + k_i (i_r - i) - \hat{\eta}_1]$$

[0013] 其中， $b = 1/L$ ； u 为电流控制器的输出； \dot{i}_r 表示表示参考电流的导数， i_r 为参考电流； i 为电机实际电流； k_i 为控制增益； L 为定子电感； $\hat{\eta}_1$ 为干扰 η_1 的估计；

[0014] 进一步的，所述抗干扰观测器I和II分别体现在速度控制器和电流控制器中，为广义比例积分观测器GPIO；

[0015] 所述广义比例积分观测器I的表达式为：

$$[0016] \quad \begin{cases} \dot{\hat{z}}_0 = z_1 + a i_r + l_m (z_0 - \hat{z}_0) \\ \dot{\hat{z}}_1 = z_2 + l_{m-1} (z_0 - \hat{z}_0) \\ \dot{\hat{z}}_2 = z_3 + l_{m-2} (z_0 - \hat{z}_0) \\ \vdots \\ \dot{\hat{z}}_m = l_0 (z_0 - \hat{z}_0) \end{cases}$$

[0017] 其中， $z_0 = w$ ； $\hat{z}_0 = w$ ，即等于电机速度； \hat{z}_0 即该速度的估计； $\dot{\hat{z}}_0$ 估计速度的导数；

$a = \frac{K_t}{J}$; $z_1 = \frac{K_t}{J}(i - i_r) - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J}$; i_r 参考电流, m 为正整数; $(l_m, l_m-1, l_m-2, \dots, l_0)$ 为观测器 I 系数。

[0018] 进一步的, 所述永磁无刷直流电机的数学模型为:

$$[0019] \quad \begin{cases} \dot{\omega} = \frac{K_t}{J}i - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J} \\ \dot{i} = \frac{1}{L}u - \frac{R}{L}i - \frac{K_e}{L}\omega \end{cases} \quad (1)$$

[0020] 其中, ω 为转速信号; J 为转动惯量; $K_t = \frac{3}{2}n_p\psi_f$ 为转矩系数, n_p 为磁极对数, ψ_f 为转子磁链; B 为粘滞摩擦系数; T_L 为负载转矩; i, u 分别为电机定子电流和电压; L 为定子电感; R 为定子电阻; $K_e = n_p\psi_f$ 也为转矩系数。

[0021] 一种基于所述系统的永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制方法, 其包括以下步骤:

[0022] 1) 检测三路位置传感器信号, 根据检测到的三路位置信号可以划分出六个区间, 这六个区间可以表示电机转子所在位置, 同时这六个区间的边沿也就是三相逆变器模块的换相点, 从而可以根据三路位置传感器信号实现对三相逆变器模块的换相控制;

[0023] 2) 检测母线电流得到电流控制器模块所需的实际电流 i ;

[0024] 3) 位置传感器信号经过转子区间计算出的数值, 结合采样周期经过速度计算模块得到电机实际速度 ω ;

[0025] 4) 速度控制器模块的输入端为速度参考值 ω_r 与步骤 3) 得到的实际速度 ω 的差值, 经过速度控制器模块后, 得到电流控制器模块输入端的参考电流 i_r , 也就是说电流 i_r 为速度控制器的输出;

[0026] 5) 步骤 4) 得到的参考电流 i_r 与步骤 2) 得到的实际电流 i 的差值, 经过电流控制器模块后, 得到脉宽调制模块的输入电压 u , 也就是说电压 u 为电流控制器的输出;

[0027] 6) 电压 u 经过脉宽调制模块, 依据调制原则输出所需的脉冲宽度调制电压, 传输到三相逆变器的输入端, 在转子区间计算模块的换相控制下, 驱动永磁无刷直流电机运行。

[0028] 本发明的优点及有益效果如下:

[0029] 1、相比传统的永磁无刷直流电机调速系统控制方法, 该控制方法算法简单, 结构容易实现, 系统可以达到良好的动态和稳态性能。

[0030] 2、相比一般的串级控制系统, 该控制系统包括反馈控制和基于干扰估计的前馈控制, 可以有效提高系统的抗干扰能力。

[0031] 3、考虑到永磁无刷直流电机易受各类未知时变干扰的影响, 该控制方法可以有效抑制表现形式为常值、斜坡和抛物线等多种形式的时变干扰。

[0032] 该发明优点主要是体现在该系统分别对速度控制器和电流控制器实施抗干扰控制, 这两个控制器分别使用了广义比例积分观测器, 这与其他控制系统不同, 且该观测器可观测三阶及以上系统。其控制效果相对一般控制能够抑制各类时变干扰。动态和稳态性能好。

附图说明

- [0033] 图1是本发明提供优选实施例控制系统原理简图；
 [0034] 图2是本发明的控制系统详细原理框图；
 [0035] 图3是本发明的抗干扰速度控制器原理框图；
 [0036] 图4是本发明的抗干扰电流控制器原理框图；
 [0037] 图5是两种控制方式下的系统速度曲线；
 [0038] 图6是PI控制方式下的系统电流曲线；
 [0039] 图7是本发明推荐控制方式下的系统电流曲线；
 [0040] 图8是两种控制方式下的系统电压曲线；
 [0041] 图9是本发明推荐控制方式下观测器I的输出曲线；
 [0042] 图10是本发明推荐控制方式下观测器II的输出曲线。

具体实施方式

[0043] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、详细地描述。所描述的实施例仅仅是本发明的一部分实施例。

[0044] 本发明解决上述技术问题的技术方案是:

[0045] 本发明所述永磁无刷直流电机的数学模型为:

$$[0046] \quad \begin{cases} \dot{\omega} = \frac{K_t}{J} i - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J} \\ i = \frac{1}{L} u - \frac{R}{L} i - \frac{K_e}{L} \omega \end{cases} \quad (1)$$

[0047] 其中, ω 为转速信号; J 为转动惯量; $K_t = \frac{3}{2} n_p \Psi_f$ 为转矩系数, n_p 为磁极对数, Ψ_f 为转子磁链; B 为粘滞摩擦系数; T_L 为负载转矩; i, u 分别为电机定子电流和电压; L 为定子电感; R 为定子电阻; $K_e = n_p \Psi_f$ 也为转矩系数。

[0048] 通常,为了便于对永磁无刷直流电机设计控制器,可将其表述为如下形式,即:

$$[0049] \quad \begin{cases} \dot{\omega} = a i_r + z_1 \\ i = b u + \eta_1 \end{cases} \quad (2)$$

[0050] 其中, $a = \frac{K_t}{J}$, $z_1 = \frac{K_t}{J} (i - i_r) - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J}$; $b = \frac{1}{L}$, $\eta_1 = -\frac{R}{L} i - \frac{K_e}{L} \omega$ 。

[0051] 一种基于永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制方法,包括速度控制器模块、电流控制器模块、脉宽调制模块、三相逆变器模块、位置传感器模块、转子区间计算模块、速度计算模块以及永磁无刷直流电机;

[0052] 附图1是本发明的控制系统原理简图,附图2是本发明的控制系统详细原理框图,根据这两个附图,易知,

[0053] 本实施例包括以下几个步骤:

[0054] 1) 检测位置传感器信号得到电机转子位置所在区间并对三相逆变器模块实施换相控制;

[0055] 2) 检测母线电流得到电流控制器模块所需的实际电流*i*;

[0056] 3) 位置传感器信号经过转子区间计算出的数值,经过速度计算模块得到电机实际速度 ω ;

[0057] 4) 速度控制器模块的输入端为速度参考值 ω_r 与步骤3)得到的实际速度 ω 的差值,经过速度控制器模块后,得到电流控制器模块输入端的参考电流 i_r ;

[0058] 5) 步骤4)得到的参考电流 i_r 与步骤2)得到的实际电流*i*的差值,经过电流控制器模块后,得到脉宽调制模块的输入电压u;

[0059] 6) 电压u经过脉宽调制模块,依据调制原则输出所需的脉冲宽度调制电压,传输到三相逆变器的输入端,在转子区间计算模块的换相控制下,驱动永磁无刷直流电机运行。

[0060] 本发明所述一种基于永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制方法,包括抗干扰速度控制器和电流控制器,并以串级方式相连;

[0061] 根据附图3可知,本发明所述抗干扰速度控制器包括速度反馈控制和基于干扰估计 \hat{z}_1 的前馈控制;通过分析抗干扰速度控制器原理框图,可得到抗干扰速度控制器的表达式为:

$$[0062] \quad i_r = \frac{1}{a}[\dot{w}_r + k_w(w_r - w) - \hat{z}_1] \quad (3)$$

[0063] 其中, $a = k_t/J$; i_r 为速度控制器的输出; w_r 为参考速度; w 为电机实际速度; k_w 为控制增益; k_t 为转矩系数; J 为转动惯量; \hat{z}_1 为干扰 z_1 的估计;

[0064] 根据附图4可知,本发明所述抗干扰电流控制器包括电流反馈控制和基于干扰估计 $\hat{\eta}_1$ 的前馈控制;通过分析抗干扰电流控制器原理框图,可得到抗干扰电流控制器的表达式为:

$$[0065] \quad u = \frac{1}{b}[i_r + k_i(i_r - i) - \hat{\eta}_1] \quad (4)$$

[0066] 其中, $b = 1/L$; u 为电流控制器的输出; i_r 为参考电流; i 为电机实际电流; k_i 为控制增益; L 为定子电感; $\hat{\eta}_1$ 为干扰 η_1 的估计;

[0067] 本发明中,所述观测器I和II为广义比例积分观测器(GPIO);

[0068] 所述广义比例积分观测器(GPIO)I的表达式为:

$$[0069] \quad \begin{cases} \dot{\hat{z}}_0 = z_1 + a i_r + l_m(z_0 - \hat{z}_0) \\ \dot{\hat{z}}_1 = z_2 + l_{m-1}(z_0 - \hat{z}_0) \\ \dot{\hat{z}}_2 = z_3 + l_{m-2}(z_0 - \hat{z}_0) \\ \vdots \\ \dot{\hat{z}}_m = l_0(z_0 - \hat{z}_0) \end{cases} \quad (5)$$

[0070] 其中, $z_0 = w$; m 为正整数; $(l_m, l_{m-1}, l_{m-2}, \dots, l_0)$ 为观测器I系数。

[0071] 所述广义比例积分观测器(GPIO)II的表达式同广义比例积分观测器(GPIO)I类似。其表达式为:

$$[0072] \quad \begin{cases} \dot{\hat{\eta}}_0 = \eta_1 + bu + \lambda_m(\eta_0 - \hat{\eta}_0) \\ \dot{\hat{\eta}}_1 = \eta_2 + \lambda_{m-1}(\eta_0 - \hat{\eta}_0) \\ \dot{\hat{\eta}}_2 = \eta_3 + \lambda_{m-2}(\eta_0 - \hat{\eta}_0) \\ \vdots \\ \dot{\hat{\eta}}_m = \lambda_0(\eta_0 - \hat{\eta}_0) \end{cases} \quad (6)$$

[0073] 其中, $\eta_0 = i$; m 为正整数; $(\lambda_m, \lambda_{m-1}, \lambda_{m-2}, \dots, \lambda_0)$ 为观测器 Π 系数。

[0074] 如附图5所示, 将本发明(一种永磁无刷直流电机调速系统的串级抗干扰控制方法), 与传统控制方法(PI控制)进行对比, 可知本发明的控制方法使永磁无刷直流电机调速系统在启动后迅速达到稳态值, 系统超调量小, 调节时间短; 当 $t = 8\text{s}$ 时施加负载, 该系统在负载扰动的情况下迅速恢复到稳态值, 调节时间极短。

[0075] 如附图6所示, 为PI控制方式下的系统实际电流与参考电流曲线;

[0076] 如附图7所示, 为本发明推荐控制方式下的系统实际电流与参考电流曲线;

[0077] 对比这两个图, 可看出本发明推荐控制方式使系统实际电流更好的追踪参考电流, 与其基本一致, 且本发明推荐控制方式使系统在 $t = 8\text{s}$ 时施加负载后, 系统几乎无超调, 调节时间极短, 迅速使电流达到稳态值。

[0078] 如附图8所示, 为两种控制方式下的系统电压曲线, 由该图可看出相比传统的PI控制, 本发明推荐的控制方法可以使永磁无刷直流电机调速系统在启动后迅速达到稳态值, 系统超调量小, 调节时间短; 且在 $t = 8\text{s}$ 时施加负载, 系统几乎无超调, 调节时间极短, 迅速使电压达到稳态值。

[0079] 如附图9所示, 为本发明推荐控制方式下的观测器 I 输出曲线。图(a)中所示曲线分别为 z_0 及其估计 \hat{z}_0 , 根据 $z_0 = w$ 可知, 该图随时间的变化趋势与图5一致, 且观测值 \hat{z}_0 表明, 该观测器可以实时准确地观测永磁无刷直流电机调速系统速度环的变化, 包括系统在 $t = 8\text{s}$ 时受到外部负载干扰的情况。图(b)中所示曲线为观测值 \hat{z}_1 , z_1 为子系统 I (速度环) 所受干扰。

[0080] 如附图10所示, 为本发明推荐控制方式下的观测器 Π 输出曲线。图(a)中所示曲线分别为 η_0 及其估计 $\hat{\eta}_0$, 根据 $\eta_0 = i$ 可知, 该图随时间的变化趋势与图7一致, 且观测值 $\hat{\eta}_0$ 表明, 该观测器可以实时准确地观测永磁无刷直流电机调速系统电流环的变化, 包括系统在 $t = 8\text{s}$ 时受到外部负载干扰的情况。图(b)中所示曲线为观测值 $\hat{\eta}_1$, η_1 为子系统 Π (电流环) 所受干扰。

[0081] 以上这些实施例应理解为仅用于说明本发明而不用于限制本发明的保护范围。在阅读了本发明的记载的内容之后, 技术人员可以对本发明作各种改动或修改, 这些等效变化和修饰同样落入本发明权利要求所限定的范围。

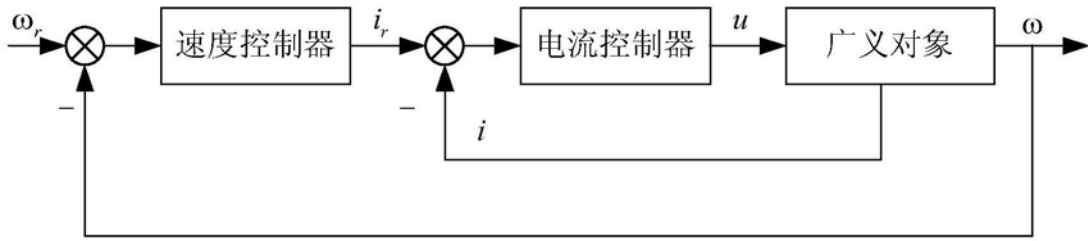


图1

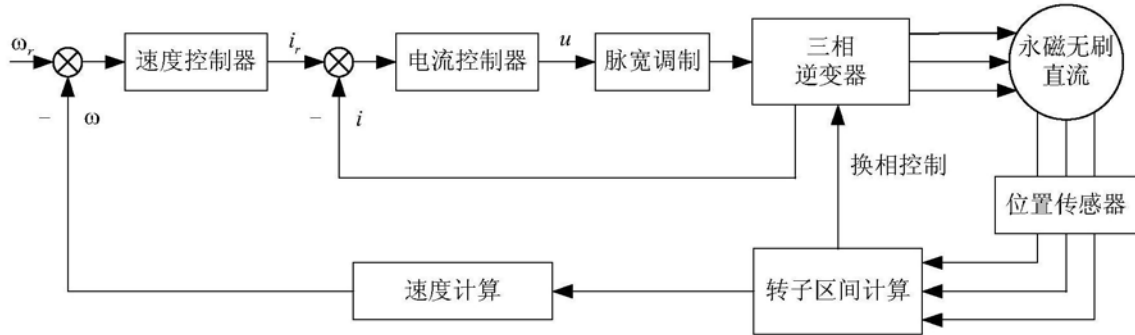


图2

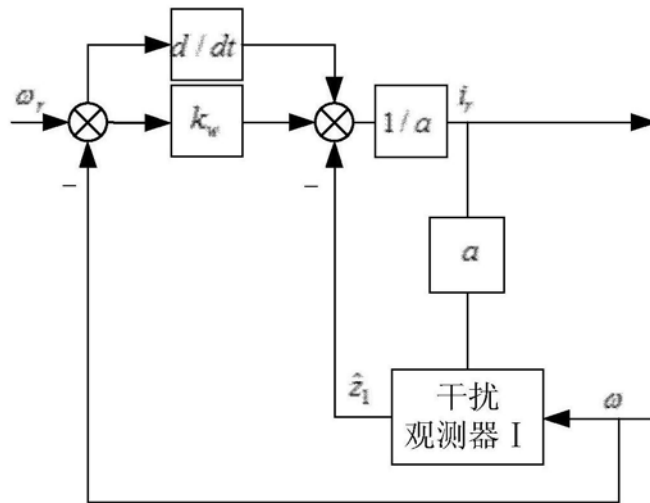


图3

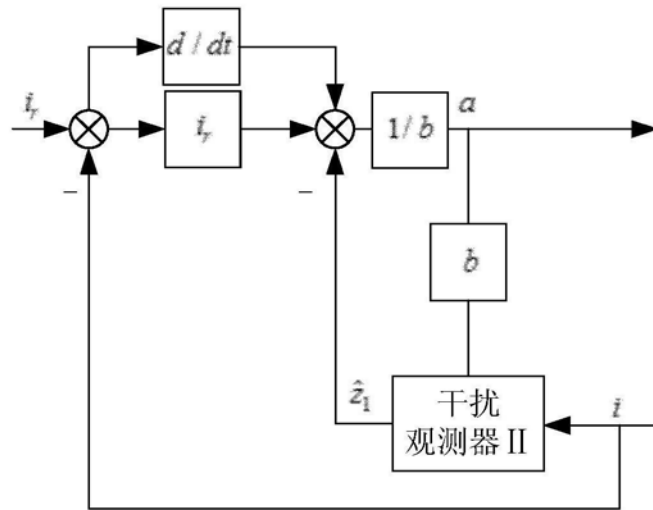


图4

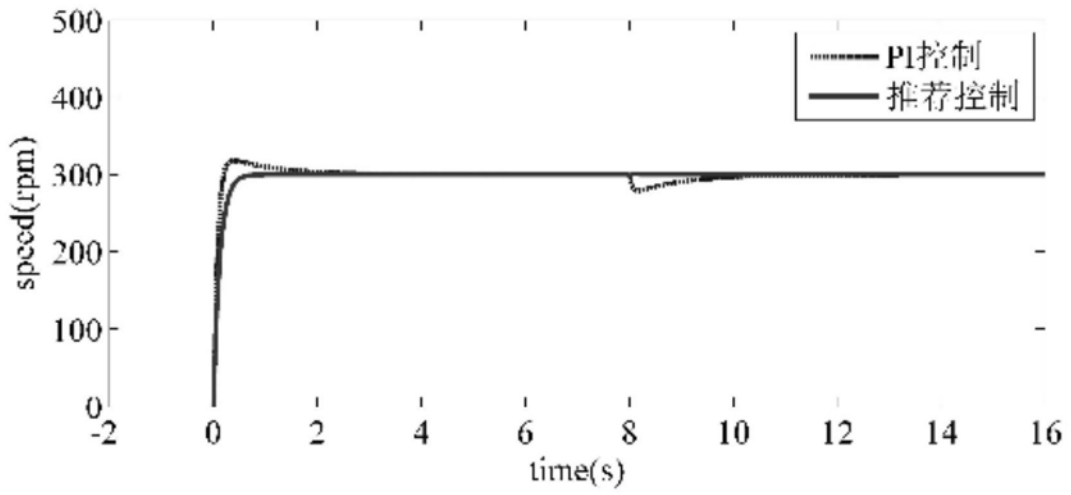


图5

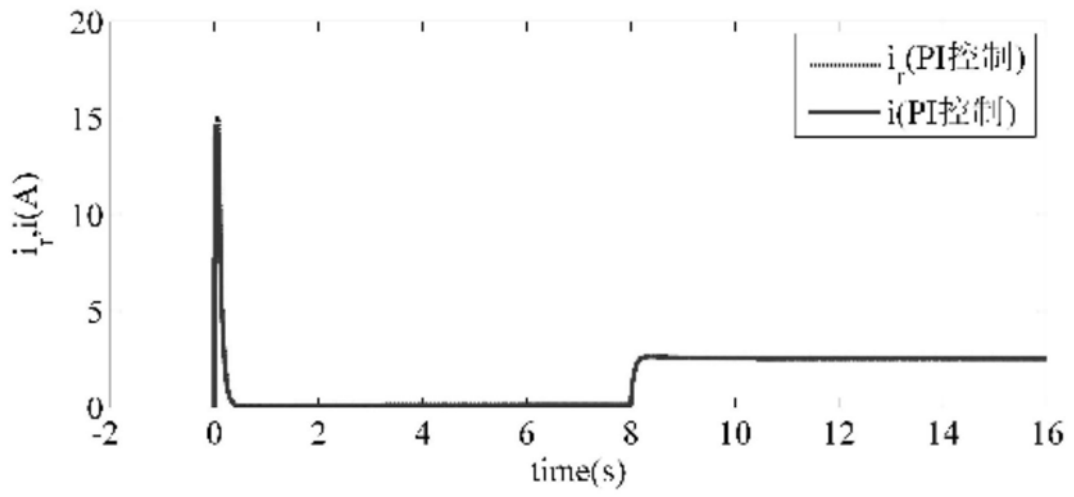


图6

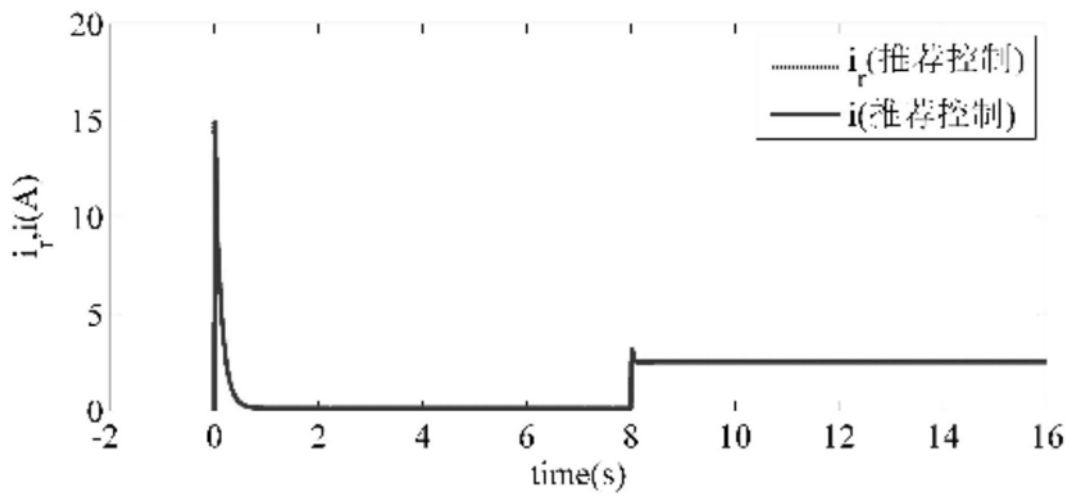


图7

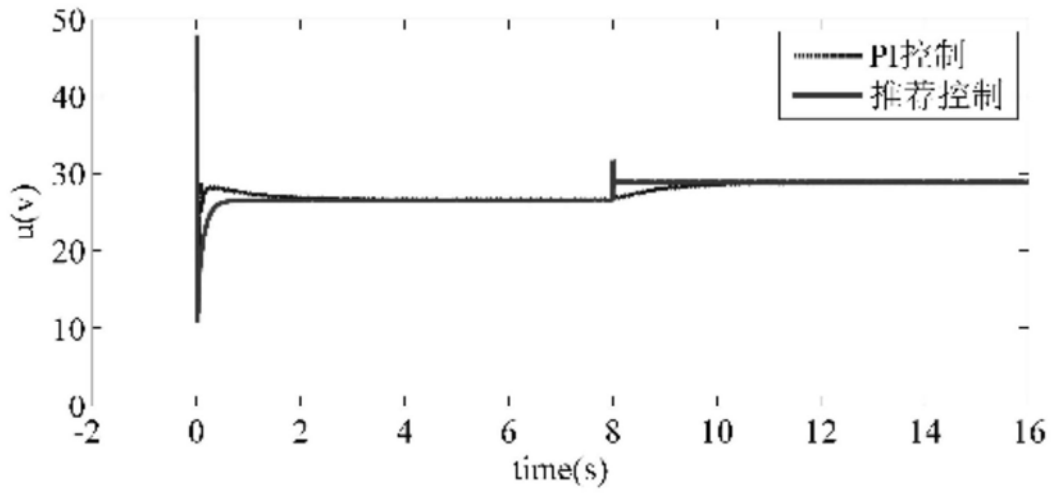
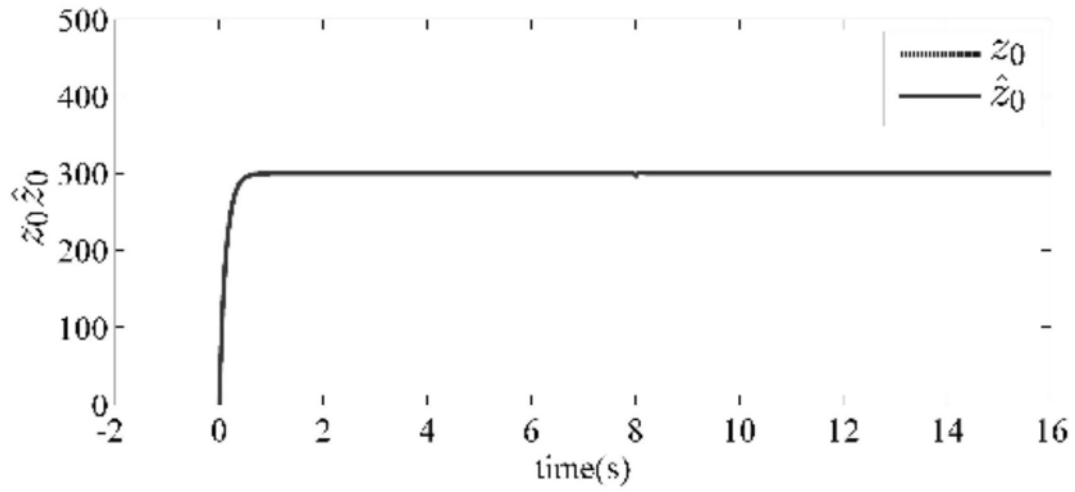
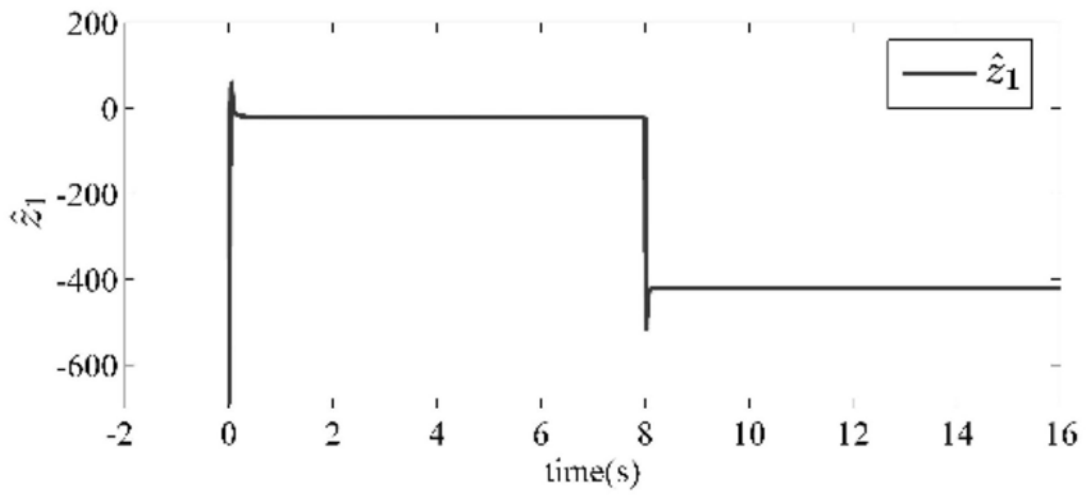


图8

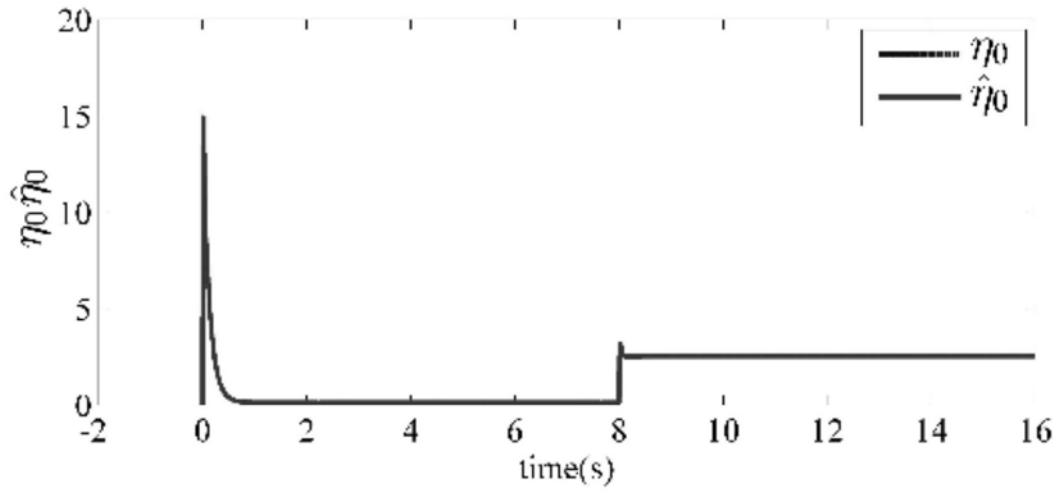


图(a)

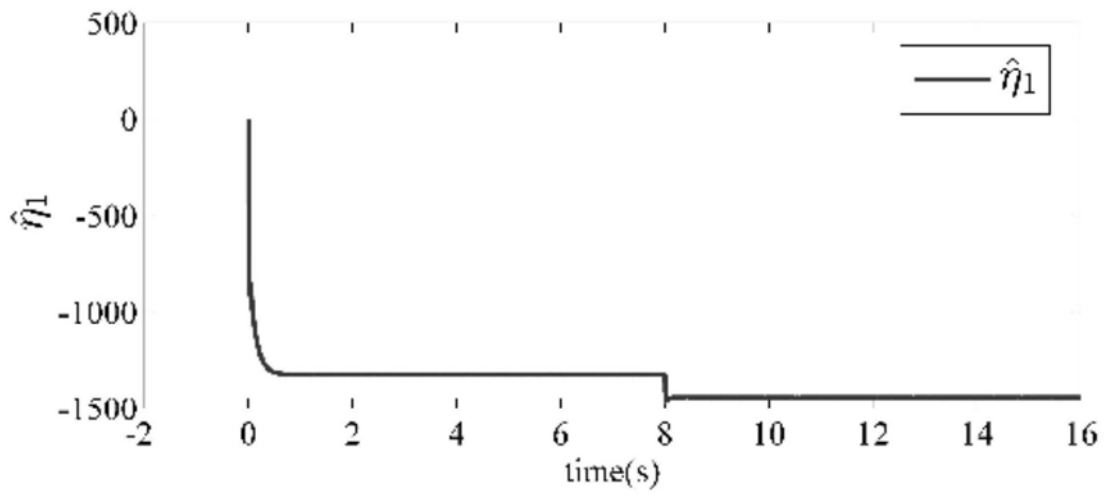


图(b)

图9



图(a)



图(b)

图10