

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H02P 23/00 (2006.01)

H02P 27/04 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610086385.3

[43] 公开日 2007年1月3日

[11] 公开号 CN 1889358A

[22] 申请日 2006.7.11

[21] 申请号 200610086385.3

[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 张兴 童克文 张昱 谢震

杨淑英

[74] 专利代理机构 安徽省合肥新安专利代理有限责
任公司

代理人 何梅生

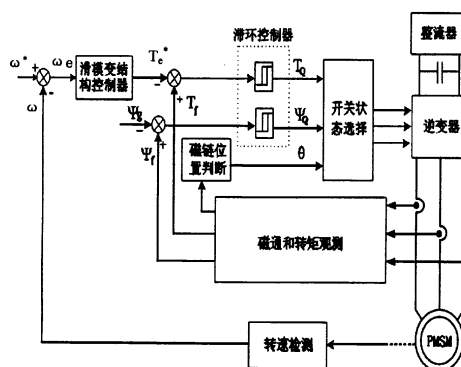
权利要求书1页 说明书6页 附图1页

[54] 发明名称

基于自适应滑模变结构的永磁同步电机控制系统

[57] 摘要

基于自适应滑模变结构的永磁同步电机控制系统，由主电路和控制电路构成，控制电路包括磁链控制环、转矩控制内环，以及转速控制外环；其特征是在转速控制外环中加入滑模变结构控制器。位于转速控制外环的滑模变结构控制器，是以转子角速度与给定转速之间的转速差为输入信号，输出转矩指令控制信号。本发明将自适应滑模变结构控制方法在永磁同步电机的直接转矩控制中进行应用，可以有效提高系统稳定性、可靠性和动态品质。



1、基于自适应滑模变结构的永磁同步电机控制系统，由主电路和控制电路构成，所述控制电路包括磁链控制环、转矩控制内环，以及转速控制外环；

其特征是在所述转速控制外环中加入滑模变结构控制器，所述滑模变结构控制器在转速控制外环中，以转子角速度 ω 与给定转速 ω^* 之间的转速差 ω_e 为输入信号，输出转矩指令控制信号 T_e^* ，所述输入信号 ω_e 与输出转矩指令控制信号 T_e^* 的关系为：

$$s(t) = C[-\omega_e + \int_0^t (-\frac{B_w}{J} - K \frac{1}{J})\omega_e dt]$$

$$T_e^* = K\omega_e + f \operatorname{sgn}[s(t)] \quad K > 0$$

$$\operatorname{sgn}[s(t)] = \begin{cases} +1 & s(t) > 0 \\ -1 & s(t) < 0 \end{cases}$$

C, K, f 为可调参数；

设计参数 f 进行参数自适应估计为：

$$\hat{f} = -\lambda C \frac{1}{J} \int_0^t |S(t)| dt \quad 0 < \lambda < 1 \quad \lambda \text{ 为自适应因子}$$

$$\text{则控制率变为 } T_e^* = K\omega_e + \left[-\lambda C \frac{1}{J} \int_0^t |S(t)| dt \right] \operatorname{sgn}[s(t)] \quad K > 0$$

式中， J 为转动惯量， B_w 是粘性摩擦系数， T_e 是电磁转矩， ω 是转子角速度， ω_e 为转速差， $s(t)$ 为滑模面， T_e^* 为转矩控制指令。

基于自适应滑模变结构的永磁同步电机控制系统

技术领域:

本发明涉及永磁同步电机的控制系统。

背景技术:

直接转矩控制(DTC)技术,是继矢量控制技术之后发展起来的一种高性能的交流变频调速技术,近年来逐渐把研究热点转移到调速范围更广、效率更高的永磁同步电机(PMSM)上来。与传统的矢量控制相比,DTC具有控制直接、计算过程简化,不需要进行坐标变换,不需要电流调节器,直接对逆变器的开关状态进行最佳控制,转矩的动态响应快,需要的传感器少等特点,且除定子电阻外,不依赖于电机的其它参数。但由于PMSM DTC本身存在的缺陷,控制系统中存在以下问题:①磁链和转矩脉动较大。②逆变器开关频率不恒定。③低速时系统难以精确控制。典型的解决方案是加入PI调节器,但是加入的同时也引入了PI调节器直接转矩控制中对电机参数扰动,负载变化敏感和鲁棒性差等缺点。

滑模变结构的控制方法非常适合非线性系统,该控制方法是根据系统当时的状态,通过一定的控制策略让控制量不断切换,即系统的结构不停的变化,有目标地强迫系统进入预先设定的滑模面滑动。系统如果进入了滑模状态后,系统参数扰动与外部干扰对系统无作用,系统的稳定性与动态品质仅取决于滑模面及其滑模面的参数。由于滑动模态是可以设计的,且与系统的参数变化及外部扰动无关,因此鲁棒性强、可靠性高。但是,迄今为止,自适应滑模变结构控制方法在永磁同步电机的直接转矩控制中尚未得到应用。

发明内容:

本发明是为避免上述现有技术所存在的不足之处,提供一种基于自适应滑模变结构的永磁同步电机控制系统,将自适应滑模变结构控制方法在永磁同步电机的直接转矩控制中进行应用,以提高系统稳定性、可靠性和动态品质。

本发明解决技术所采用的技术方案是:

本发明系统由主电路和控制电路构成,所述控制电路包括磁链控制环、转矩控制内环,以及转速控制外环;

本发明的结构特征是在所述转速控制外环中加入滑模变结构控制器,所述滑模变结构控制器在转速控制外环中,以转子角速度 ω 与给定转速 ω^* 之间的转速差 ω_e 为输入信号,输出转矩指令控制信号 T_e^* ,所述输入信号 ω_e 与输出转矩指令控制信号 T_e^* 的关系为:

$$s(t) = C[-\omega_e + \int_0^t (-\frac{B_w}{J} - K \frac{1}{J})\omega_e dt]$$

$$T_e^* = K\omega_e + f \operatorname{sgn}[s(t)] \quad K > 0$$

$$\operatorname{sgn}[s(t)] = \begin{cases} +1 & s(t) > 0 \\ -1 & s(t) < 0 \end{cases}$$

C, K, f 为可调参数；

设计参数 f 进行参数自适应估计为：

$$\hat{f} = -\lambda C \frac{1}{J} \int_0^t |S(t)| dt \quad 0 < \lambda < 1 \quad \lambda \text{ 为自适应因子}$$

$$\text{则控制率变为 } T_e^* = K\omega_e + \left[-\lambda C \frac{1}{J} \int_0^t |S(t)| dt \right] \operatorname{sgn}[s(t)] \quad K > 0$$

式中， J 为转动惯量， B_w 是粘性摩擦系数， T_e 是电磁转矩， ω 是转子角速度， ω_e 为转速差， $s(t)$ 为滑模面， T_e^* 为转矩控制指令；

与已有技术相比，本发明的有益效果体现在：

1、本发明通过在转速控制外环中加入滑模变结构控制器，使转速差成为状态变量，受到控制器控制进入滑模面滑动，使得转速稳定且与电机的参数变化及外部扰动无关，直接满足永磁同步电机调速及抗扰的目的；

2、本发明设置带系统参数的积分滑模面，这种形式的滑模面和传统的滑模面相比，带有电机系统参数的积分滑模面设计可以保证转差状态量由初始时刻到最终时刻都具有鲁棒性，并让非线性的电机系统稳定到渐近线，同时在较大范围内具有抗扰动作用。同时在前馈环路加入积分调节，可减小稳态误差。并且转差状态进入滑模面的时间短，电机系统进入稳态快；

3、如果可调节参数 f 选择一个比较大的数值，不仅会造成抖振过大，还会激发系统中的高频成分，让系统不稳定。为了保证积分滑模控制的条件的同时减小抖振，本发明采用了自适应参数估计，实时估计速度控制系统不确定边界，有效地减小了滑模变结构的抖振现象；

4、传统的 PI 调节器直接转矩控制中对永磁同步电机参数扰动，负载变化敏感和鲁棒性差。本发明滑模变结构控制器与 PI 调节器相比，有很强鲁棒性强、可靠性高。对电机系统参数变化不敏感，抗不确定扰动能力强。

附图说明：

附图为本发明系统原理图。

以下结合附图，并通过实施例对本发明作进一步说明：

参见附图，本实施例由主电路和控制电路构成，主电路是由逆变器对于来自整流器的直

流电源逆变后为电机提供工作电源；

控制电路由磁链控制环、转矩控制内环和转速控制外环构成，其中磁链控制环和转矩控制内环按常规结构设置，包括转矩控制内环设置在转矩控制指令 T_c^* 的后面，用于抑制磁链变化对转速系统的影响，使转速和磁链实现近似的解耦；磁链控制环是为保持磁链幅值的恒定，以保证实现变频调速。

转速控制外环用于使转速 ω 快速跟随给定转速 ω^* 的变化，采用自适应滑模变结构控制后，二者之差 ω_e 进入滑模面滑动。不受系统参数变化和外部干扰变化的影响。

具体实施中，位于转速控制外环中的滑模变结构控制器以转子角速度 ω 与给定转速 ω^* 之间的转速差为 ω_e 输入信号，输出为转矩指令控制信号 T_c^* ，所述输入信号 ω_e 与输出转矩指令控制信号 T_c^* 的关系为：

$$s(t) = C[-\omega_e + \int_0^t (-\frac{B_w}{J} - K \frac{1}{J})\omega_e dt]$$

$$T_c^* = K\omega_e + f \operatorname{sgn}[s(t)] \quad K > 0$$

$$\operatorname{sgn}[s(t)] = \begin{cases} +1 & s(t) > 0 \\ -1 & s(t) < 0 \end{cases}$$

C, K, f 为可调参数；

设计参数 f 进行参数自适应估计为：

$$\hat{f} = -\lambda C \frac{1}{J} \int_0^t |S(t)| dt \quad 0 < \lambda < 1 \quad \lambda \text{ 为自适应因子}$$

$$\text{则控制率变为 } T_c^* = K\omega_e + \left[-\lambda C \frac{1}{J} \int_0^t |S(t)| dt \right] \operatorname{sgn}[s(t)] \quad K > 0$$

式中， J 为转动惯量， B_w 是粘性摩擦系数， T_c 是电磁转矩， ω 是转子角速度， ω_e 为转速差， $s(t)$ 为滑模面， T_c^* 为转矩控制指令；

按已有技术进行设置，本发明系统的控制回路从功能上可以分为三个部分：第一部分是电机状态观测环节，即图中所示的磁通和转矩观测单元，该单元根据电压、电流和转速反馈值，通过相应的算法 $\psi_f = \int (u_s - i_s R_s) dt$ ； $T_f = 1.5 p_n (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha})$ 求取转矩反馈值 T_f 、磁通反馈值 ψ_f 和磁链位置信号 θ ；第二部分是调节环节，即反馈值与给定值比较后经滞环控制器形成转矩调节信号 T_Q 、磁链调节信号 ψ_Q ，同时由磁链位置判断单元输出磁链位置角 θ ；第三部分是开关状态选择环节，通过选择相应的开关状态，输出对应的电压空间矢量用

于控制永磁同步电机。其中转矩指令信号 T_e^* 是由转速误差 ω_e 通过滑模变结构控制器后产生的，通过对转矩的控制最终控制电机转速。

关于本实施例中的滑模变结构控制器：

一、滑模面的设计：

电机的机械动态方程为：
$$\omega = \frac{1}{JS + B_w}(T_e - T_L)$$

化为状态方程为：
$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = -B_w \omega(t) + T_e(t) - T_L(t)$$

化简后得：

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= -\frac{B_w}{J}\omega + \frac{1}{J}T_e - \frac{1}{J}T_L \\ \text{令 } \omega_e &= \omega^* - \omega \\ \omega^* &\text{是转速指令, } \omega \text{是实际转速, 上式变为:} \\ \dot{\omega}_e &= -\frac{B_w}{J}\omega_e - \frac{1}{J}T_e - \frac{1}{J}(-T_L - B_w\omega^* - J\dot{\omega}^*) \\ \text{令 } A &= -\frac{B_w}{J} \quad B = -\frac{1}{J} \quad E = -T_L - B_w\omega^* - J\dot{\omega}^* \\ \dot{\omega}_e &= A\omega_e + BT_e + BE \end{aligned} \quad (1)$$

如果，参数 A、B 变化，则： $\dot{\omega}_e = (A + \Delta A)\omega_e + (B + \Delta B)T_e + BE$ ； 同样可变为，

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_e &= A\omega_e + BT_e + BE + \Delta A\omega_e + \Delta BT_e \\ \text{令 } E' &= E + B^{-1}\Delta A\omega_e + B^{-1}\Delta BT_e \quad E' \text{为广义扰动} \\ \text{得 } \dot{\omega}_e &= A\omega_e + BT_e + BE' \end{aligned}$$

合适滑模面的设计是保证滑模变结构强鲁棒性，优良的动态品质的基础。积分滑模面能够保证状态量由初始时刻到最终时刻都具有鲁棒性，让不确定动态系统稳定到渐近线，在相当大的范围内抗扰动作用强。

根据该状态方程（1）设计积分滑模面和滑模控制策略为：

$$\begin{aligned} s(t) &= C[-\omega_e + \int_b (-\frac{B_w}{J} - K\frac{1}{J})\omega_e dt] \\ T_e^* &= K\omega_e + f \operatorname{sgn}[s(t)] \quad K > 0 \\ \operatorname{sgn}[s(t)] &= \begin{cases} +1 & s(t) > 0 \\ -1 & s(t) < 0 \end{cases} \\ C, K, f &\text{为可调参数;} \end{aligned}$$

二、广义滑模条件证明:

$$\begin{aligned}
 \dot{s} &= C[-\dot{\omega}_e + (-\frac{B_w}{J} - K\frac{1}{J})\omega_e] \\
 &= C[\frac{B_w}{J}\omega_e + \frac{1}{J}T_c^* + \frac{1}{J}E + (-\frac{B_w}{J} - K\frac{1}{J})\omega_e] \\
 &= C\{\frac{1}{J}[K\omega_e + f\operatorname{sgn}(s)] + \frac{1}{J}E - \frac{K}{J}\omega_e\} \\
 &= C\frac{1}{J}[f\operatorname{sgn}(s) + E] \\
 E &= -T_L - B_w\omega^* - J\dot{\omega}^* \\
 s\dot{s} &= \frac{C}{J}(f|s| + Es) = -CB(f|s| + Es) \\
 C \text{ 和 } B \text{ 应同号, } B &= -\frac{1}{J} < 0, \text{ 则 } C < 0 \\
 \text{且 } f > |E|, \text{ 则 } s\dot{s} &< 0,
 \end{aligned}$$

满足广义滑模条件。因此,所设计的滑动模态满足存在性和可达性。

三、自适应参数估计:

根据积分滑模变结构控制器进入滑模状态的条件可知,参数 f 必须大于不确定部分 E 的绝对值,才能保证广义滑模条件。众所周知,在实际的控制中,整个不确定部分的上界或下界很难知道,如果参数 f 选择一个比较大的数值,不仅会造成抖振过大,还会激发系统中的高频成分,让系统不稳定。为了保证积分滑模控制条件的同时减小抖振,采用了自适应参数估计,实时估计速度控制系统不确定边界。设扰动分量 E 的上界大于下界,上界为 \bar{f} , $\bar{f} > |E|$, \hat{f} 是 E 的上界估计值,滑模控制律则变为:

$$T_c^*(t) = K\omega_e(t) + \hat{f}\operatorname{sgn}[s(t)]$$

自适应律设计为:

$$\dot{\hat{f}} = \lambda CB \int_0^t |s(t)| dt \quad 0 < \lambda < 1$$

λ 为自适应因子

根据广义滑模条件可知：

$$s\dot{s} = -CB(\bar{f}|s + Es) \quad \bar{f} > |E| \quad \text{必然满足广义滑模条件}$$

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= -CB(\bar{f}|s| + Es + \hat{f}|s| - \hat{f}|s|) \\ &= -CB(\hat{f}|s| + Es - \hat{f}|s| + \bar{f}|s|) \\ &= -CB(\hat{f}|s| + Es) + CB(\bar{f} - \hat{f})|s| \end{aligned}$$

令 $\tilde{f} = \hat{f} - \bar{f}$ 则 $CB(\bar{f} - \hat{f})|s| = CB\tilde{f}|s|$ 加上自适应因子 λ ，则：

$$\dot{\tilde{f}} = CB|s|$$

$$\text{则 } \dot{\hat{f}} = CB|s|$$

$$\hat{f} = \int CB|s| dt$$

$$\tilde{f} = \lambda \int CB|s| dt$$

很容易证明该自适应积分滑模控制在 Lyapunov 函数 $L = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\lambda}\tilde{f}^2$ 下是稳定的，因此该自适应参数估计满足设计要求。

\bar{f} 是不确定部分的上界； \hat{f} 是不确定部分估计值； \tilde{f} 是不确定部分的估计值和上界之差；B 是电机系统参数；C 是可调参数应与系统参数 B 同号；E 是电机系统不确定部分；S 是滑模面。

