

串级预测控制在永磁同步电动机调速系统应用

永磁同步电动机的速度受参数变化、负载扰动影响较大,为提高永磁同步电动机控制系统的抗干扰能力和稳定性,提出一种基于预测控制算法的复合控制策略。该控制策略对永磁同步电动机参数依赖较小,由转速状态观测器实现对PMSM速度变化趋势的预测估算,通过预测控制器产生电流控制增量,进而实现对电动机转速的控制。该算法采用分层控制结构,将预测控制和PI控制结合,实现串级预测控制,并进行了仿真分析。仿真结果表明,该算法较传统PI控制器具有更强的抗干扰能力,更快速的响应,更强的鲁棒性,更优的综合性能。

王 辉 薛珍珠 刘红霞 赵留羊/郑州轻工业学院机电工程学院

0 引言

交流永磁同步电动机具有过载能力强、输出转矩大、跟踪性能好和定位准确高等优点,在航空航天、机器人和数控等领域得到了越来越广泛的应用^[1-2]。由于永磁同步电动机是一个多变量、非线性和强耦合的复杂控制对象,较难建立准确的数学模型,且控制系统中存在参数时变、负载扰动及各种干扰因素^[3-4],对控制策略提出了较高的要求,传统PI易于实现,结构简单,但较难解决快速性和稳态准确度之间的矛盾^[5]。随着控制理论的发展,近年来许多先进的控制策略已经应用到永磁同步电动机的转速调节系统,如线性控制^[6]、滑膜控制^[7]、自适应控制^[8]和无源控制^[9]等,这些控制策略虽然从不同方面提高了永磁同步电动机

机的调速性能,但在一定程度上需要依赖对象的模型,且算法计算量高,控制器设计复杂,因此限制了其在实际中的应用。

预测控制是20世纪70年代兴起的一类建立在启发式基础上的预测算法。突出优点在于控制算法嵌入式过程模型并直接考虑被控过程的输入、状态和输出的约束条件^[10]。动态矩阵控制(Dynamic Matrix Control, DMC)作为预测控制的一种,除了具有预测控制的一般优点外,还可直接采用对象的阶跃响应建模,无须进一步辨识其最小化模型,在线计算量小,鲁棒性强^[11],为解决永磁同步电动机转速的稳定快速调节提供了一种很好的解决途径。

本文在研究永磁同步电动机矢量控制模型的基础上,利用速度的阶跃响应建立了DMC转速状态观测器和预测控制器,与传统观测器相比,无须利用对象的最小化模型^[12]。并且观测器的建立独立于控制器,滚动优化输出最优控制取代了传统观测器最优控制的一次性全局优化。为解决采样周期与观测器重构准确度之间的矛盾,引入分层控制结构,并实现串级预测控制。为验证算法的有效性,在同一数学模型下将串级预测控制和PI控制进行了仿真比较。

1 永磁同步电动机矢量控制数学模型

矢量控制亦称磁场定向控制(FOC),主要利用坐标变换将静止坐标系下的电流或磁链矢量变换到与转子



王 辉/副教授

关键词/Keywords

永磁同步电动机 ·
预测控制 ·
复合控制 ·
状态观测器 ·

河南省重点科技攻关项目(132102110057), 郑州市科技攻关项目(131PPTGG411-3), 郑州轻工业学院校内基金(2015XJJZ024)。

同步旋转的转子坐标系下,实现励磁电流与转矩电流的解耦^[13]。坐标变换的约束条件为功率不变性, $d-q$ 坐标系下永磁同步电动机的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_f \\ T_e = p_n [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_d 、 u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压; R 为电动机绕组电阻; i_d 、 i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为 d 轴和 q 轴电感; Ψ_f 为永磁体基波励磁磁场经过定子绕组的磁链; p_n 为极对数。

由式(1)可知,电流 i_d 和 i_q 之间存在耦合,一般选取 $i_d=0$ 的矢量控制策略,假设电流变化时旋转电动势近似不变,则可认为永磁同步电动机是线性定常系统^[14]。

2 串级预测控制算法

在永磁同步电动机矢量控制的基础上,建立永磁同步电动机串级预测控制系统,其结构示意图如图1所示。

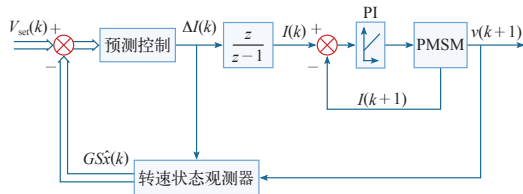


图1 永磁同步电动机串级预测控制系统结构示意图

图1中,本系统采用电流环和速度环双环控制策略。电流环采用PI控制器;速度环采用DMC算法构建转速状态预测观测器和预测控制器,转速状态观测器用来预测转速状态,此向量值和设定转速的差值作为预测控制的输入,通过预测控制器产生电流控制增量,并引入分层控制结构,从而实现串级预测控制,具体算法如下。

对于单输入单输出的渐进稳定对象,已经测定了对象的单位阶跃响应的采样值 $a=[a_1, a_2, \dots, a_N]^T$,以 $\Delta u(k)$ 为输入量对象的状态空间描述如下^[15]

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + a\Delta u(k) \\ y(k) = c^T x(k) \end{cases} \quad (2)$$

对象的状态空间描述与 $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 之间需满足一定的条件

$$c^T A^{i-1} b = a_i \quad i=1, 2, \dots \quad (3)$$

若只考虑式(3)的实现条件,而不考虑式(2)的描述是否最小化,则可取

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}_{(N \times N)} \quad c^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(1 \times N)}$$

依据上述原理,在测定了速度的单位阶跃响应 $v_1, v_2, \dots, v_N$ 后,得到在电流控制增量 $\Delta I(k)$ 作用下,永磁同步电动机速度环的状态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = Sx(k) + \bar{v}\Delta I(k) \\ V(k) = c^T x(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\bar{v}=[v_1, v_2, \dots, v_N]^T$; $V(k)$ 为 $x(k)$ 的首元

素; $c^T=[1 \ 0 \ \dots \ 0]_{(1 \times N)}$; $x(k)=\begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_N(k) \end{pmatrix}$; $S=$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}_{(N \times N)}$$

满足

$$c^T S^{i-1} \bar{v} = \begin{cases} v_i & i \leq N \\ v_N & i > N \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中, S 和 c 均为常数; $\bar{v}$ 为速度阶跃响应的系数。

系统可控性矩阵为

$$Q_c = \begin{bmatrix} v_1 & Sv_2 & \dots & S^{N-1}v_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \det Q_c &= \det \begin{bmatrix} v_1 & Sv_2 & \dots & S^{N-1}v_N \end{bmatrix} \\ &= \det \begin{pmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_N & v_N & \dots & v_N \end{pmatrix} \\ &= (-1)^{\frac{(N-1)N}{2}} v_N (v_N - v_{N-1})^{N-1} \end{aligned} \quad (7)$$

系统可观性矩阵为

$$\mathbf{Q}_c = \begin{pmatrix} \mathbf{c}^T \\ \mathbf{c}^T \mathbf{S} \\ \vdots \\ \mathbf{c}^T \mathbf{S}^{N-1} \end{pmatrix} = \mathbf{I} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, 式 (7) 中由于 v_{N-1} 无限接近于 v_N , 所以 $\det \mathbf{Q}_c \rightarrow 0$, 因此永磁同步电动机调速系统状态不完全可控。但系统的输入输出是可控的, 因此问题可转化为以电流控制增量 $\Delta i(k)$ 为优化形式的离散有限时域优化问题。取如下性能指标最优

$$\min J(k) = \|\mathbf{v}_{\text{set}}(k) - \mathbf{v}(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{i}(k)\|_R^2 \quad (9)$$

式中, $\mathbf{v}_{\text{set}}(k)$ 为设定速度值; $\mathbf{v}(k) = [v(k+1) \cdots v(k+P)]^T$ 为在电流增量 $\Delta \mathbf{i}(k) = [\Delta i(k+1) \cdots \Delta i(k+M-1)]^T$ 作用下未来 P 个时刻的输出速度值。

由式 (4) 可得速度输出的向量形式为

$$\mathbf{v}(k) = \mathbf{G}\mathbf{S}\mathbf{x}(k) + \mathbf{V}\Delta \mathbf{i}(k) \quad (10)$$

式中, $\mathbf{G} = [\mathbf{I}_{p \times p} \vdots \mathbf{0}_{p \times (N-p)}]$, 而

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ v_M & \cdots & v_1 \\ \vdots & & \vdots \\ v_p & \cdots & v_{p-M+1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

将式 (10) 代入优化指标式 (9) 中, 并求 $\min J$, 可得

$$\Delta \mathbf{i}(k) = (\mathbf{V}^T \mathbf{Q} \mathbf{V} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{Q} [\mathbf{v}_{\text{set}}(k) - \mathbf{G}\mathbf{S}\mathbf{x}(k)] \quad (12)$$

为了使控制具有实时性, 取 $\Delta \mathbf{i}(k)$ 首元素, 可得预测控制律为

$$\Delta I(k) = d^T [\mathbf{v}_{\text{set}}(k) - \mathbf{G}\mathbf{S}\mathbf{x}(k)] \quad (13)$$

式中, $d^T = [1 \ 0 \ \cdots \ 0](\mathbf{V}^T \mathbf{Q} \mathbf{V} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{Q}$; $\mathbf{x}(k)$ 中含有元素 $x_j(k) (j=2, \cdots, N)$, 在 k 时刻无法直接测量。由式 (8) 可知系统状态完全可观, 因此通过构造状态观测器重构预测状态 $\hat{\mathbf{x}}(k)$, 观测器如下

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{S}\hat{\mathbf{x}}(k) + \bar{\mathbf{v}}\Delta \mathbf{i}(k) + \mathbf{h}[v(k+1) - \hat{v}(k+1)] \\ \hat{v}(k+1) = \mathbf{c}^T \mathbf{S}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{c}^T \bar{\mathbf{v}}\Delta \mathbf{i}(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\hat{v}$ 分别为重构的状态和速度输出; $\mathbf{h}$ 为 N 维状态观测器反馈向量。

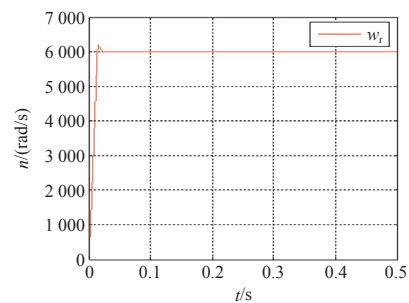
以此重构的状态 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 取代式 (13) 中的真实状态 $\mathbf{x}(k)$, 就可得到预测电流增量的闭环控制律为

$$\Delta I(k) = d^T [\mathbf{v}_{\text{set}}(k) - \mathbf{G}\mathbf{S}\hat{\mathbf{x}}(k)] \quad (15)$$

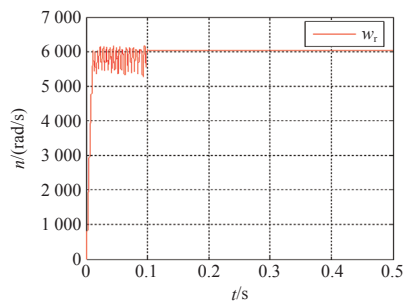
由式 (14) 可实现转速状态的预测, 代入式 (13) 中可得电流控制增量 $\Delta I(k)$, 后通过 PI 控制器产生 q 轴电压控制增量, 进而实现对电动机转速的调节。

3 算法仿真与结果分析

为验证串级预测控制算法的抗干扰能力及快速性, 在 Simulink 中搭建永磁同步电动机的矢量控制模型, 并与同一数学模型下的 PI 控制器进行比较。永磁同步电动机的主要参数如下: 电阻 $R = 5.83 \ \Omega$; 电感 $L_d = 0.012 \ 23 \ \text{H}$, $L_q = 0.030 \ 575 \ \text{H}$; 永磁体磁链 $\Psi_f = 0.038 \ 596 \ \text{Wb}$; 极对数为 $p_n = 4$; 电动机的转动惯量 $J = 0.000 \ 3 \ \text{kg} \cdot \text{m}^2$; 采样周期为 $0.000 \ 01 \ \text{s}$, 分别在空载和负载条件下进行仿真, 仿真曲线如图 2~图 5 所示。

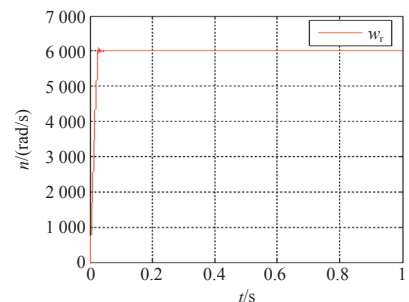


(a) 采用串级预测速度控制器时转速响应曲线

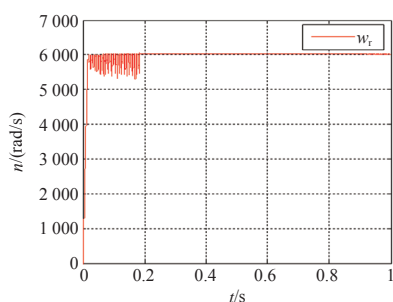


(b) 采用PI控制器时转速响应曲线

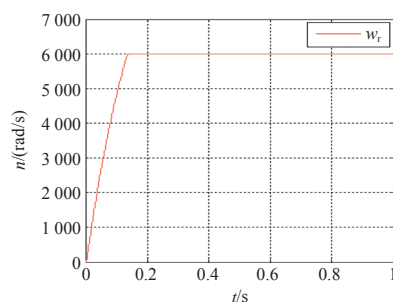
图2 空载条件下转速响应曲线



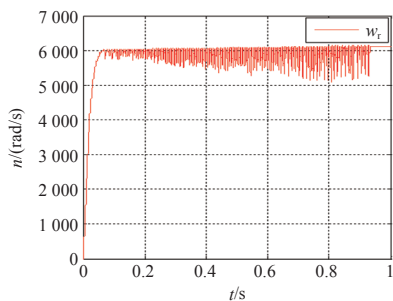
(a) 采用串级预测速度控制器时转速响应曲线



(b) 采用PI控制器时转速响应曲线

图3 $T_1=1\text{ N}\cdot\text{m}$ 时转速响应曲线

(a) 采用串级预测速度控制器时转速响应曲线



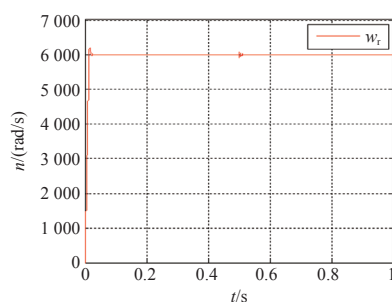
(b) 采用PI控制器时转速响应曲线

图4 $T_1=2\text{ N}\cdot\text{m}$ 时转速响应

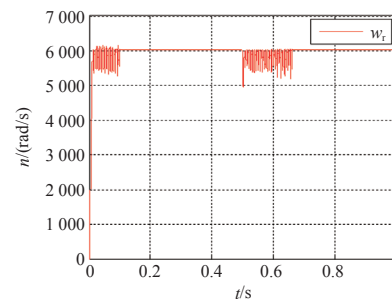
从图2和图3的转速响应曲线可以看出,在空载和加载条件下采用PI控制器,速度超调大且出现振荡,在0.1 s后才进入稳定状态;而采用串级预测控制器时几乎无超调,稳定时间大大缩短,且稳态误差稳定在0.5%,由此可见串级预测控制器在响应时间和稳定性方面优于PI控制器。由图4可以看出, $T_1=2\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,采用PI控制器速度无法达到稳定,采用串级预测控制器很快达到稳定,其带负载能力更强。由图5可知,在负载有冲击时,采用串级预测控制器系统转速几乎不受影响,串级预测控制器抗冲击能力更优。

4 结束语

本文将预测控制算法应用于永磁同步电动机



(a) 采用串级预测速度控制器时转速响应曲线



(b) 采用PI控制器时转速响应曲线

图5 负载变化时转速响应曲线 ($T_1=0\text{ N}\cdot\text{m}\rightarrow 1\text{ N}\cdot\text{m}$)

速度环,设计了基于预测控制的转速状态观测器和预测控制器,实现了转速的快速稳定调节。且与PI控制器的控制结果进行了仿真比较,仿真结果表明串级预测控制器比PI控制器响应快速且抗扰动能力更好。串级预测控制采用滚动优化输出最优控制,取代传统的一次性全局优化,减少了计算量,抗干扰能力强,同时提高了系统整体性能。

参考文献

- [1] Zuh Z Q. Recent advances on permanent magnet machines [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2012, 27 (3): 1-11.
- [2] 鲁文其, 胡育文, 梁骄雁, 等. 永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (3): 75-81.
- [3] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制 [J]. 光学精密工程, 2014, 22 (6): 1599-1600.
- [4] 薛树功, 霍成明, 魏胜利. 永磁同步电机自抗扰反步控制 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (3): 209-210.
- [5] 崔茂振, 张昌凡, 朱剑. 永磁同步电机滑膜调速

- 控制及其实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26 (1) : 84-85.
- [6] Zarchi H A, Markadeh G R A, Soltani J. Direct torque and flux regulation of synchronous reluctance motor drives based on input-output feedback linearization [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51 (1) : 71-80.
- [7] Lai C K, Shyu K K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding mode control method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (2) : 499-507.
- [8] Mohamed Y A R I. Design and implementation of a robust current-control scheme for a PMSM vector drive with a simple adaptive disturbance observer [J]. IEEE Transactions Ind. Electron, 2007, 54 (4) : 1981-1988.
- [9] 侯立民, 张化光, 刘秀翀. 带ESO的自适应滑模调节的SPMSM自抗扰无源控制 [J]. 控制与决策, 2010, 25 (11) : 1651-1656.
- [10] 刘向杰, 孔小兵. 电力工业复杂系统模型预测控制——现状与发展 [J]. 中国机电工程学报, 2013, 33 (5) : 79-80.
- [11] 席裕庚, 张钟俊. 一类新型计算机控制算法——预测控制算法 [J]. 控制理论与应用, 1985, 2 (3) : 1-9.
- [12] 席裕庚. 预测控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [13] 王辉, 张段芹, 王才东. 新型智能PID控制的PMLSM调速系统研究 [J]. 微电机, 2014, 47 (1) : 71-72.
- [14] 蒋学程, 彭侠夫, 等. 永磁同步电机模型自适应补偿速度控制 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15 (10) : 70.
- [15] 席裕庚. 预测空间中数字控制器的设计 [J]. 控制理论与应用, 1987, 4 (3) : 66-67.
- (收稿日期: 2016-02-26) **EA**

广告|AD



Weidmüller 

魏德米勒D系列继电器 —卓越品质和高性价比的完美结合

魏德米勒为全球客户和合作伙伴提供高品质继电器产品。

魏德米勒D系列继电器体积小, 灵敏度高; 多种规格可选, 拥有多种认证; 结构合理, 用途广泛; 可广泛应用于电力行业, 是一款高性价比继电器产品。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 021-22195008 网址: www.weidmuller.com.cn

中国知网 <https://www.cnki.net>