

# IPM同步牵引电动机定子电流最优控制关键技术研究

主要是基于电动机电感饱和与交叉耦合非线性效应定子电流矢量的最优控制策略进行研究。在恒转矩区采用最大转矩/电流控制,使电气损耗降到最小,电动机系统效率最高;同时,系统对逆变器额定电流容量要求最低,逆变器的利用率最高。在恒功率区采用弱磁控制,以防止电流调节器饱和。结合实际产品开发,考虑电动机电感饱和与交叉耦合非线性效应,采用数值“寻优”方法建立定子电流矢量控制指令表,解决非线性方程解的难题。

王 旋/贵州电子信息职业技术学院

IPM同步牵引电动机控制系统主要包括控制回路、功率变换器和IPM电动机。电动机作为被控对象,是整个系统中的关键部分,其模型的准确与否直接影响到整个系统的分析结果。其次是功率变化器,当电动机工作在电动状态时,将直流侧的直流电转换为交流电,向电动机提供能量;当电动机工作在发电状态时,将电动机发出的交流电整流,回馈到直流侧,向直流侧充电。最后就是控制回路,它包括硬件和软件,通过对控制指令和反馈值的比较,给出控制信号,作用于功率变换器,实现对电动机状态的控制。本文首先给出IPM同步牵引电动机的定参数数学模型,介绍基于该模型的定子电流最优控制策略,分别就两种模型介绍控制策略的实现方法,并通过仿真对其牵引特性进行比较。

## 考虑电感饱和及交叉耦合效应的同步牵引电动机数学模型

永磁同步电动机 $d$ 、 $q$ 轴数学模型都

是在忽略铁心饱和基础上建立的,因此其 $d$ 、 $q$ 轴电感 $L_d$ 、 $L_q$ 为常值。但是,车用IPM同步电动机设计时极力追求高密度轻量化,电动机设计中电磁负载和热负载取值远远超过常规设计的极限值,以满足不断提高的重量功率密度和体积功率密度指标,使电动机产生显著的磁路饱和。因此,电动机在负载工况下,铁心会出现不同程度的饱和现象,导致 $L_d$ 、 $L_q$ 随着工况的变化而变化<sup>[2]</sup>,即 $q$ 轴电感 $L_q$ 随着通入的交轴电流 $i_q$ 幅值变化而变化; $d$ 轴电感 $L_d$ 随着通入的直轴电流 $i_d$ 幅值变化而变化。此外,当电动机工作在重负载情况时, $d$ 、 $q$ 轴磁路会产生交叉耦合影响<sup>[3]</sup>。为得到最优的控制参数,提高转矩控制质量,并且使模型最大程度地逼近真实,电动机电感变化的参数是不可缺少的。

一般定义 $d$ 轴为永磁体方向,其有效气隙长度比较长,永磁体的相对磁导率接近1,由磁饱和效应造成的励磁电抗变化比较小。相反, $q$ 轴有效的气隙长度比较小,饱和效应比较明显。一般来说, $q$ 轴的饱和度会远大于 $d$ 轴的饱和度,另外, $d$ 、 $q$ 轴之间还存在交叉耦合效应,由此建立的数学模型如下。

电压方程为

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s + L_d(i_d, i_q)p & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & r_s + L_q p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_e \Psi_{\text{mag}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $r_s$ 为电枢相绕组电阻; $\omega_e$ 为电动机电角速度; $\Psi_{\text{mag}}$ 为永磁体提供的磁链; $p = d/dt$ 是微分算子; $L_d$ 为 $d$ 轴电感; $L_q$ 为 $q$ 轴



王 旋/讲师

### 关键词/Keywords

IPM同步牵引电动机 ·  
饱和参数 ·  
定子电流矢量 ·

电感,对于某一确定的电动机,上述各参数的值都为定值。

磁链方程为

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d(i_d, i_q) & 0 \\ 0 & L_q(i_d, i_q) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Psi_{\text{mag}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \{ \Psi_{\text{mag}} i_q + [L_d(i_d, i_q) - L_q(i_d, i_q)] i_d i_q \} \quad (3)$$

式中,  $p_n$  为电动机的极对数。

其电感参数是关于  $d$ 、 $q$  轴电流的函数,随着电流的变化而变化。这就是由于磁饱和与交叉耦合效应所造成的。

根据不同的需求,有时也会忽略交叉耦合效应,并且仅考虑  $q$  轴的饱和效应,不考虑  $d$  轴的饱和效应,这样使得数学模型比较简单。因为  $q$  轴饱和的影响远大于  $d$  轴,此时考虑  $q$  轴电感是  $q$  轴电流的单值函数,  $d$  轴电感作为常数考虑。此外,真实电动机还存在温度以及老化的问题,而且目前都是基于基波正弦磁动势的模型,并没有考虑谐波的影响。因此,要完全建模是非常困难的,基于电感饱和以及交叉耦合效应的数学模型已将主要的电动机性能反映出来,其余的问题在某种程度上可以暂时忽略。

在 Ansoft 电磁场有限元软件平台上计算实验 IPM 同步电动机的饱和电感参数<sup>[4]</sup>。根据 IPM 同步电动机  $d$ 、 $q$  磁链的数学模型,可推导出  $d$ 、 $q$  电感的计算公式<sup>[5]</sup>为

$$L_d = L_1 + \frac{\Psi_d - \Psi_{\text{mag}}}{i_d} \quad (4)$$

$$L_q = L_1 + \frac{\Psi_q}{i_q}$$

式中,  $L_1$  为电动机漏电感,可通过磁路计算求得<sup>[6]</sup>;  $\Psi_d$  的求取方法为将  $d$  轴对准 A 相绕组轴线,只通入  $d$  轴电流,此时计算得出的 A 相磁链即为  $d$  轴磁链  $\Psi_d$ , 改变  $i_d$  的值即可求出不同电流下的  $d$  轴磁链  $\Psi_d$ ;  $\Psi_q$  的求取方法为将  $d$  轴对准 A 相绕组轴线,只通入  $q$  轴电流,此时计算得出的 A 相磁链即为  $q$  轴磁链  $\Psi_q$ , 改变  $i_q$  的值即可求出不同电流下的  $q$  轴磁链  $\Psi_q$ <sup>[7]</sup>。

## 定子电流最优控制的实现方法

### 1. 定参数模型的控制方法实现

定子电流最优控制根据转速的变化,决定运行区域和使用的控制策略。恒转矩区采用 MTPA 控制,弱磁区采用弱磁控制。

控制中必须根据运行条件切换这两种控制,因此对处理器的实时判断和计算要求比较高。对于 DSP 这类高性能的处理器,这样的运算可以实现。但对于一般的处理器(如 DSP 或 MCU)都不具备开方运算的能力,虽然可以通过数学方法逼近开方运算,但误差较大,运算周期也比较长。因此在处理器中,通常使用查表的方法解决非线性运算<sup>[8]</sup>。通过离线运算将指令值存入处理器的 RAM 中,在控制过程中去调用这些指令。表格分辨率越高,控制指令也就更精准;此外,一个合适的表格插值方法也会提高控制指令的准确度。对于定子电流最优控制,本文采用查表方式进行实现。而离线计算方法的优劣成为了整个指令计算的关键。下面就具体介绍基于定参数模型的定子电流最优控制离线指令计算的过程。经过运行条件的判断即可以计算任何运行条件下的控制指令。具体处理流程如图 1 所示。

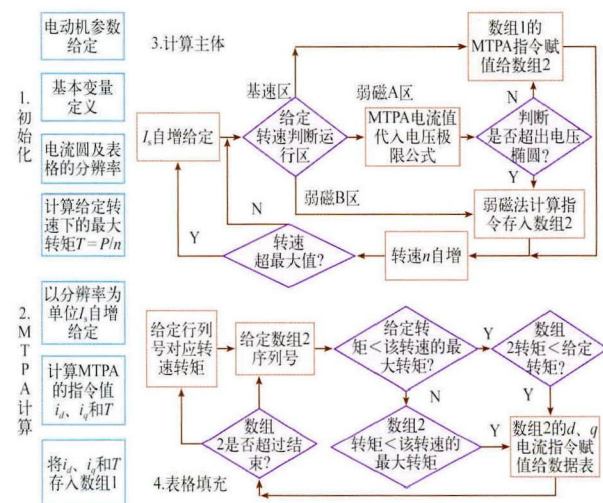


图1 基于定参数模型的定子电流最优控制离线算法流程图

离线计算工作通过 Matlab 中的 .m 文件编写和运行。算法是基于电动机定参数模型实现,概念清晰,利用模型公式进行基本的四则运算,只考虑

稳态的情况,不含微分运算,以此得到最大转矩/电流比控制以及弱磁控制指令表。

## 2. 基于饱和模型的定子电流最优控制的离线计算方法

为使控制更为准确,必须建立电动机饱和和电感的数学模型。本文的被测电动机是自行设计的,因此通过有限元计算可以得到准确的电动机参数。其中 $d$ 、 $q$ 轴的电感参数是一个关于 $d$ 、 $q$ 轴电流变化的二维数据表格,既考虑了电感的饱和效应,也考虑了交叉耦合效应。根据这些参数值,就可以进行离线的控制指令计算。可以看出,计算电流控制指令不仅需要准确的电动机参数值,同时还要考虑参数的变化率 $dL_q/di_q$ ,由于电感随电流的变化无法写成显函数形式,只能以二维表格形式确定,这就无法实现公式法计算,因此基于定参数模型计算控制指令的方法无法用于饱和电感参数电动机模型的指令计算。

从最大转矩/电流比的定义出发,相同电流幅值下求取转矩的最大值,或者在给定转矩的条件下求取电流幅值最小的指令值。利用数值“寻优法”来寻找最佳的控制指令点,同时包含了不同运行点的电感参数。电感的值根据电流值进行二维查表获得,也就是将电感的饱和效应以及交叉耦合效应考虑在内,同时避免了十分困难的公式计算和对电流变化率等的求解。具体的计算框图如图2所示。

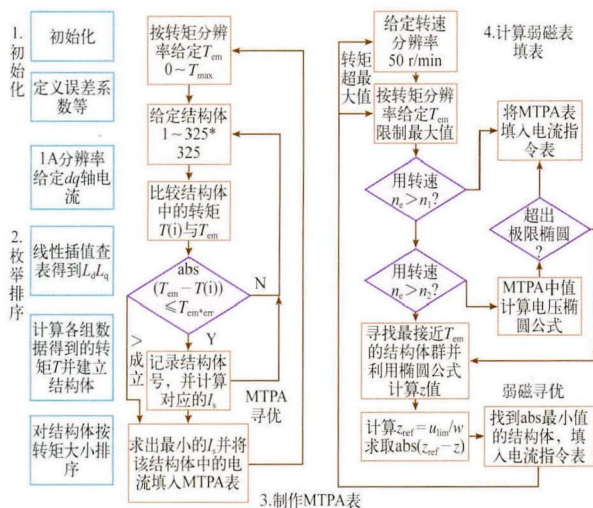


图2 寻优算法定子电流最优控制程序框图

从寻优的思想上出发,概念十分简单清晰。理论上来说,控制指令是比较准确的。当然枚举电流值的分辨率也会决定最后控制指令的准确度。本文采用的电流分辨率为1 A。

依靠Matlab的计算能力,作为离线算法,使用寻优思想的计算量明显要大于使用公式法的计算量,而且电流分辨率越高,计算时间越长,这是寻优控制的缺陷。不过在实时控制中,无论是哪种离线算法,最终控制指令都是一个二维的数据表,即用转速和转矩指令查表得到 $d$ 、 $q$ 轴电流控制指令。因此,离线计算时间长短和实时控制的效果毫不相干,离线计算只关注控制指令的准确性。

## 3. 基于饱和模型的定子电流最优控制的离线测试法

本文采用离线算法,简明直观地得到定子电流最优控制指令,但是需要准确的电感参数,由于本文的实验电动机是自行设计的,因此通过有限元计算可以得到准确的电感值,如果没有准确的电感参数表,可以通过一些其他的方法实现最大转矩/电流比控制和弱磁控制。

离线实验测试法测出控制指令同样以“寻优”的思路,通过实验法也可以得到在不同运行状况下的最佳工作点,同时由于使用实验法进行真实的测试,在不同的工作状态下考虑了饱和效应和交叉耦合效应的影响。测试示意图如图3所示。

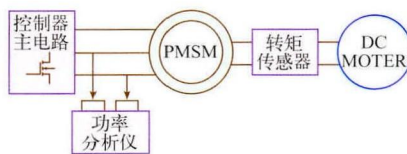


图3 基于饱和电感和交叉耦合电感的定子电流矢量轨迹

实验使用测功机读取电动机的输入功率,一台控速直流机作为负载。测试MTPA曲线,将直流机运行于被测电动机的第一转折速度之下,对被测电动机给定电流矢量幅值,改变电流角 $\beta$ ,观察转矩变化,利用转矩传感器读出最大值。其对应的电流幅值 $I_s$ 和电流角 $\beta$ 就是MTPA轨迹上的指令点。

此外通过检测电动机输入功率也可以得到MTPA轨迹上的指令点,通过测输入功率的最大值(即输入的两相电压和电流)就可以得到转矩的最大值。

## 两种电动机模型运行机械特性对比与仿真分析

在文中利用Matlab中的Simulink对整个系统进行仿真,电动机模型采用考虑饱和效应和交叉耦合效应的变电感模型,控制策略分别基于定参数模型和交叉耦合模型进行设计并加以控制,比较两组控制模型所能达到的电动机牵引特性。首先给出被测电动机的参数值: $\Phi_{\text{mag}}$ 为0.042 6 Wb; $n_{\text{max}}$ 为12 000 r/min; $L_d$ 为0.073 6 mH; $U_{\text{dc}}$ 为280 V; $L_q$ 为0.208 1 mH; $p_n$ 为4;转动惯量 $J$ 为0.025; $R_s$ 为0.003 965 57  $\Omega$ ;最大扭矩 $T_{\text{max}}$ 为118 N·m;额定功率为57.32 kW。

根据前面所述的方法,利用这些参数建立控制指令表,并对电动机进行控制,这就是基于定参数模型的定子电流最优控制。基于饱和及交叉耦合效应的定子电流最优控制,根据前面的实现方法建立控制指令表,再用此表对电动机进行控制。通过两种方法建立基于定参数模型的控制指令表和基于饱和以及交叉耦合参数模型的控制指令表,分别对其进行牵引特性测试。测试结果如图4、图5所示。

从图4中可以明显看出,考虑饱和效应的电动机模型在各个转速下表现出的最大扭矩都要高于普通模型。尤其在MTPA区域,由于 $q$ 轴电流达到

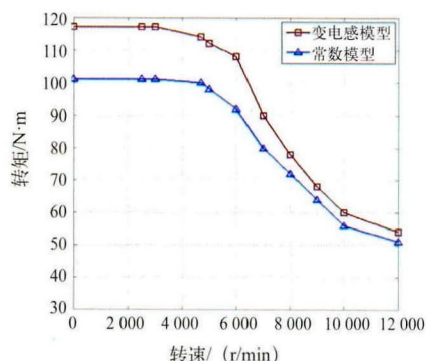


图4 不同模型牵引特性对比

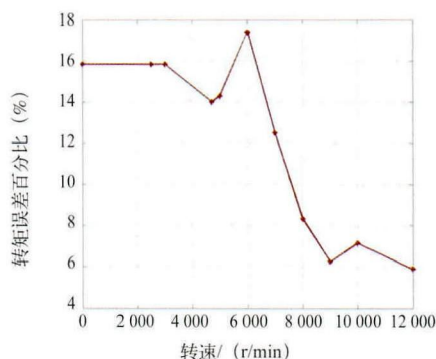


图5 定参数模型最大转矩误差百分比

最大值, $q$ 轴电流随饱和效应明显下降,因此要求 $q$ 轴电流指令要显著提高,这个区域最大扭矩要求的电流指令就会相差很多,从而造成的最大扭矩差别也会非常大。到了高速弱磁区域,由于 $d$ 轴电流比较大,但饱和效应相对比较小,因此对于指令的影响也相对较小,因此这个区域的牵引特性相差要稍小一些。

仿真中将每个转速下的转矩从最大值下降到0,从而得到电动机运行时的电流轨迹,其中包括MTPA曲线以及电压极限椭圆曲线,两种电动机模型的电流轨迹分别如图6和图7所示。

从电流轨迹可以看出,考虑饱和效应后的电压极限椭圆和MTPA轨迹会产生较大的畸变,由于电感受到饱和效应的影响,其值会相应减小,尤其是转矩中的磁阻转矩部分,因 $q$ 轴电感值减小甚多,使得磁阻转矩部分较小,从转矩公式中可以看出若需要得到指定的转矩值,需要放大 $d$ 、 $q$ 轴电流指令值,因此考虑饱和效应模型的电流控制

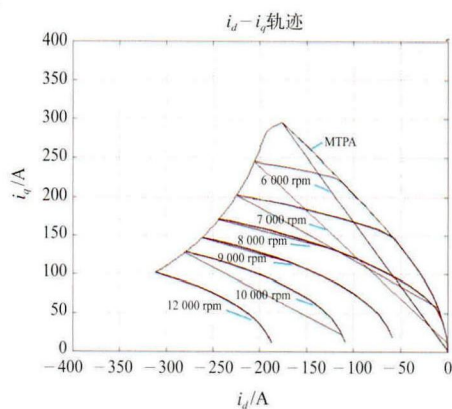


图6 定参数电动机模型的电流轨迹

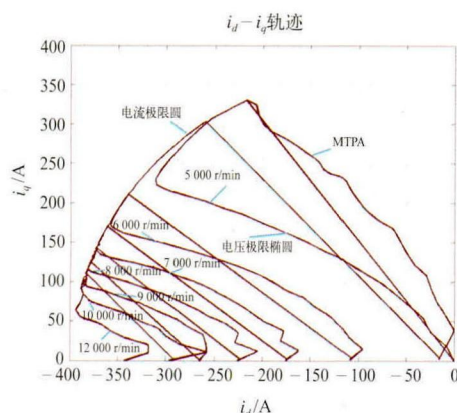


图7 饱和及交叉耦合效应电动机模型的电流轨迹

指令会大于定参数模型的电流指令。也由于定参数模型不考虑电感变化的问题,这种指令值无法使电动机的牵引特性完全发挥,在各个转速下的指令值不够大,造成最大转矩无法达到电动机设计时的要求。尤其在MTPA区的最大转矩点处,考虑饱和效应的电流值为 $-240 \sim 330$  A,而定参数模型在这个点的电流值为 $-180 \sim 293$  A,因此在电感参数已经减小的情况下,仍然当其不变处理,就会导致最大转矩值下降15.84%。

## 结束语

本文首先讲述了电动机建模时考虑电感饱和和效应以及交叉耦合效应的必要性,分别建立电动机的定参数模型和考虑电感饱和和效应的数学模型。IPM牵引电动机在重载区由于电感饱和及交叉耦合效应突出,因此控制中建立饱和和电感模型就有显著的实际意义,随后着重介绍了定子电流最优控制的理论。由于考虑饱和及交叉耦合效应后的电动机数学模型公式存在较多微积分运算,数学公式也比较复杂,因此无法运用数学模型计算出控制指令,限制了IPM电动机定子电流最优控制的发展,成为一大难关。本文通过数学寻优的思想设计了一种指令计算法,将电感根据电流变化的问题考虑在内,避开烦琐的模型计算。分别就电

动机定参数模型的控制指令设计法及考虑电感饱和和效应模型的控制指令表设计法进行了详细的介绍。

最后通过仿真验证,以基于两种电动机模型的定子电流最优控制策略分别控制一台考虑电感饱和以及交叉耦合效应的测试电动机。结果表明,不考虑饱和和效应的控制策略会使每个转速下的最大转矩能力下降5%~18%,电动机牵引特性下降,无法发挥原本设计时的性能指标。因此为了充分发挥电动机的牵引能力,必须要考虑其饱和效应和交叉耦合效应。

本文提出的“寻优法”建立控制指令表必须得到电动机饱和和电感参数表,这一点限制了该方法的应用领域,是其一大缺点。不过,“寻优”的思想仍然运用在指令测试法中,测试法目前也是解决饱和效应的一大手段。本文最后也介绍了指令测试的基本概念和方法。

## 参考文献

- [1] Chen Y S, Zhu Z Q, Howe D. Calculation of d- and q-Axis Inductances of PM Brushless ac Machines Accounting for Skew [J]. IEEE Transactions on Power System, 2005, 41 (10): 3940-3942.
- [2] Ahmed M.El-Serafi, Narayan C Kar. A new method for calculating the q-axis saturation characteristics of salient-Pole synchronous machines [J]. Electrical and Computer Engineering, 2001 (1): 557-562.
- [3] 刘长红,姚若萍,刘彤彦.变频调速永磁同步电动机抗参数的研究[J].大电机技术,2003(5).
- [4] Chen Y S, Zhu Z Q, Howe D. Calculation of d- and q-axis inductances of PM brushless ac machines accounting for skew [J]. IEEE Transactions on Power System, 2005, 41 (10): 3940-3942.
- [5] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.

(收稿日期:2014-12-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告