**湘潭大学**

**自动化与电子信息学院**

**先进控制理论及应用课程作业**

**题 目： 永磁同步电机模型预测磁链控制**

**学 院： 自动化与电子信息学院**

**专 业： 能源动力**

**学 号： 202221623216**

**姓 名： 黄来庆**

**指导教师： 王昭鸿**

永磁同步电机模型预测磁链控制

**摘要**：针对占空比模型预测磁链控制(DC-MPFC)存在输出电压矢量范围受限、转矩脉动与电流谐波过大等问题，提出一种基于磁链误差的永磁同步电机(PMSM)双矢量模型预测磁链控制(TV-MPFC)方法。首先，通过在线模型预测和价值函数判断选择出最优电压矢量。在此基础上根据磁链矢量误差最小化原理，得到最优电压矢量磁链预测值和参考值之间误差来选取第二电压矢量。然后，通过引入*d*轴和*q*轴磁链瞬时变化率，建立计算最优电压矢量作用时间终值法。最后，通过仿真实验表明该方法能有效减小电流谐波和转矩脉动。

**关键词**：模型预测磁链控制；转矩脉动；磁链误差；双矢量

# **1引言**

近年来，模型预测控制（Model prediction control，MPC）因其动态响应快、控制灵活简单和跟踪精度高等优点而被广泛关注[1]，为了解决直接转矩控制中因滞环控制造成的转矩和磁链脉动大问题，国内外学者尝试将模型预测控制引入到直接转矩控制中取代滞环控制，并取得了一定成效[2][3]。传统模型预测转矩控制（model predictive torque control, MPTC）是以转矩和定子磁链为控制目标，需要引进权重系数来对两者所占权重进行调整，但是目前没有具体方法求取权重系数，大多数采用试凑法确定权重系数的选取，此过程十分复杂繁琐。文献[4]提出一种在线对权重系数进行优化的方法，能够有效减小转矩脉动和磁链脉动，但是计算量较大；文献[5]提出一种无权重系数的价值函数，价值函数中仅包含转矩一个变量，从而避免权重系数选取问题，降低价值函数计算复杂度；而文献[6]和文献[7]分别通过电压矢量作用时间和定子磁链矢量来替换价值函数，有效消除了权重系数。

传统模型预测磁链控制（model predictive flux control, MPFC）采用单矢量控制方法，在一个采用周期内只作用一个有效电压矢量，因此电压矢量选择范围受限，从而造成较大的转矩和磁链脉动。为了提高模型预测磁链控制的稳态性能，文献[8]引入占空比控制方法，该方法在一个采样周期内采用两个电压矢量，前半部分采用有效电压矢量，后半部分采用零矢量，进而调整输出有效电压矢量幅值，但该方法不能最大限度减小转矩脉动和磁链脉动。文献[9]针对占空比MPFC控制方法提出双矢量MPFC控制方法，第二电压矢量不在固定为零矢量，而是在最优电压矢量左右两个有效电压矢量中进行选择，可选电压矢量范围有限，转矩依然存在较大脉动。文献[10]将第二电压矢量选择范围进行扩大，改善了系统的稳态性能，但是需要在一个周期内进行14次预测，增加了预测次数。

为了有效改善DC-MPFC转矩脉动过大和作用时间仅考虑*q*轴磁链矢量的问题，本文提出了一种基于磁链误差的双矢量模型预测磁链控制，首先，根据预测模型选择以单个周期内使价值函数最小的电压矢量为最优电压矢量，其次，通过分析磁链误差矢量所处扇区位置，根据电压矢量选择表进行第二最优电压矢量选取，最后，通过引入*d*轴和*q*轴磁链变化率，构成计算电压矢量作用时间最终值法，对两个最优电压矢量进行时间分配。该方法将电压矢量选择范围进行扩大，且采用最终值法使每个采样周期结束时*d*轴和*q*轴的磁链矢量的综合误差最小，并通过仿真实验对本文所提方法和占空比MPFC进行对比验证，结果表明本文所提方法能够有效减少转矩脉动和电流谐波。

# 2 PMSM离散数学模型

## 2.1电压矢量选择

本文所考虑的电机是一种表面永磁同步电动机，定子采用三相分布式绕组。永磁同步电机在转子坐标系下的电压方程为:



采用一阶欧拉法对公式（1）进行离散化可以得到下一时刻的定子磁链矢量预测模型为：



根据永磁同步电机电磁转矩的表达式，将定子磁链幅值和负载角作为控制变量，可得到表达式为



对于表贴式PMSM来说，通常有*Ld*=*Lq*=*Ls*，则可得到定子磁链幅值参考值和电磁转矩参考值之间的关系式：



因此可求得负载角的表达式：



由MTPA算法计算得到定子磁链幅值参考值的表达式：



由公式（5）和公式（6）可以得到*d-q*旋转坐标系下的定子磁链矢量参考值的表达式：



## 2.2 作用时间分配

DC-MPFC只考虑*q*轴磁通而不考虑*d*轴磁通。本文主要考虑了*d*轴和*q*轴的磁通变化率，建立了计算最优电压矢量持续时间的终值法，使*d*轴和*q*轴磁通在每个周期结束时的综合误差降至零。假设电压*u*opt1作用下*d*轴和*q*轴的磁通变化率分别为*s*dopt1和*s*qopt1，第二最优电压向量作用下*d*轴和*q*轴的磁通变化率分别为*s*dopt2和*s*qopt2。可得两个非零电压矢量作用下的磁通变化率:





式中*u*dopt1、*u*qopt1、*u*dopt2、*u*qopt2分别为*u*opt1和*u*opt2在*d*轴和*q*轴上的分量。

根据最终值法，引入相应的权重因子*λ*来调整*d*轴通量在持续时间中的比例。结合代价函数和电压矢量持续时间，代价函数可表示为：



式中，∆*𝜑sd*=*φsd*(*k*)-*φsd*\*为*d*轴通量的瞬时误差，∆*𝜑sq*=*φsq*(*k*)-*φsq*\*为*q*轴通量的瞬时误差。

通过解∂*D*/∂*topt*=0，得到*uopt1*的最优时间为:



# 3改进型双矢量模型预测磁链控制

TV-MPFC控制图1所示。在该模型中主要由以下几个部分组成:定子磁链估计与预测、磁链误差和有效电压矢量选择、成本函数最小化、参考转换、矢量作用时间计算、脉冲产生。转矩参考值是通过采用PI控制器的外部速度控制回路获得的，定子磁链参考值则通过MTPA算法获取。



图. 1 TV-MPFC控制框图

TV-MPFC的思想是基于T-MPFC选择最优有效电压矢量*u*opt1，然后优化第二最优电压矢量*u*opt2。选择原理如下：将通量误差扇区数对应的电压矢量和零电压矢量作为替代电压矢量，通过两个模型预测和成本函数对电压矢量进行优化。

第一步，依次将6个有效电压矢量代入磁链模型预测中，得到每个电压矢量所对应的定子磁链矢量预测值，并将该参数值代入价值函数中，选择使价值函数最小的定子磁链矢量值所对应的电压矢量为第一最优电压矢量*u*opt1。

第二步，由磁链模型预测公式可知第一最优电压矢量*u*opt1所对应的定子磁链矢量预测值，然后计算该磁链矢量预测值与定子磁链矢量参考值之间的误差为：



将误差值error s,dq进行反派克变换，可得到*αβ*坐标系下的磁链矢量误差*error* s,αβ，根据该误差所处扇区来选择有效电压矢量*u*2，该电压矢量选取的原则为减少第一最优电压矢量磁链矢量预测值与磁链矢量参考值之间的误差，由表1选择出有效电压矢量*u*2：

表. 1 电压矢量选择表

Tab.1 Voltage vector selection

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *error* s,αβ所处扇区 | *u*2 | *error* s,αβ所处扇区 | *u*2 |
| Ⅰ | ***U***1 | Ⅳ | ***U***4 |
| Ⅱ | ***U***2 | Ⅴ | ***U***5 |
| Ⅲ | ***U***3 | Ⅵ | ***U***6 |

第三步，将有效电压矢量*u*2和零电压矢量代入磁链模型预测中, 得到两个电压矢量所对应的定子磁链矢量值，并将该参数值带入价值函数中，选择使价值函数最小的定子磁链矢量值所对应的电压矢量为第二最优电压矢量*u*opt2。

# 4数值仿真

为了验证所提出的TV-MPFC的性能，在MATLAB/Simulink环境下对DC-MPFC和所提出的TV-MPFC进行了仿真，PMSM的主要参数如表2所示。为了实现两种方法的公平比较，速度PI控制器配置相同的参数，每种方法的采样频率为20*k*Hz。两种方法在额定负载下的工作转速均为1500*r/min*。

表. 2 SPMSM主要参数

Table 2. Paraments of the SPMSM.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数 | 符号 | 数值 | 参数 | 符号 | 数值 |
| 母线电压 | *U*dc | 310 *V* | 定子电阻 | *R* | 1.44 Ω |
| 额定转矩 | *T*e | 3 *N·m* | 定子电感 | *Ls* | 3.2 *mH* |
| 额定功率 | *P*N | 0.75 *kW* | 定子磁链 | *φf* | 0.13232 *Wb* |
| 额定转速 | *N*r | 3000 *r/min* | 极对数 | *pn* | 4 |

仿真中，速度设置为1500*r/min*，当*t*=0.4*s*时，负载指令由0 *N·m*变为3 *N·m*，两种控制方式对应的速度响应、转矩纹波、单相定子电流纹波和电流THD如图3所示：









(a) (b)

图. 2 DC-MPFC与TV-MPFC仿真实验结果对比图

# 5结论

针对DC-MPFC策略中电流谐波和转矩波动大的问题，提出了一种基于磁链误差的TV-MPFC控制策略。该策略通过电压矢量选择表选择第2个最优电压矢量，以减小磁通误差。通过分析两种策略的电压选择范围，发现TV-MPFC控制策略的电压矢量选择范围更宽，使得逆变器输出的电压矢量更准确。仿真结果表明，本文提出的基于磁通误差的TV-MPFC策略能够有效地提高系统性能。

# 参考文献

1. 史婷娜，张维，肖萌，等．基于矢量作用时间的永磁同步电机预测电流控制[J]．电工技术学报，2017，32(19)：1-10．
2. 牛峰,李奎,王尧.永磁同步电机模型预测直接转矩控制[J].电机与控制学报,2015,19(12):60-67+74.
3. Preindl M, Bolognani S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, part 1: maximum torque per ampere operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1912-1921.
4. Davari S A, Khaburi D A, Kennel R. An improved FCS-MPC algorithm for induction motor with imposed optimized weighting factor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1540-1551.
5. 徐艳平,李园园,张保程,周钦.一种消除权重系数三矢量模型预测转矩控制[J].电工技术学报,2018,33(16):3925-3934.
6. 夏长亮, 仇旭东, 王志强, 等. 基于矢量作用时间的新型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3045-3053.
7. 牛峰,韩振铎,黄晓艳,张健,李奎,方攸同.永磁同步电机模型预测磁链控制[J].电机与控制学报,2019,23(03):34-41.
8. 吕帅帅,林辉,李兵强,潘勉,李训根.一种改进的PMSM模型预测直接转矩控制方法[J].电机与控制学报,2020,24(07):102-111.
9. 翟良冠,王家乐,张蔚,石懿晨,温志威,杨泽贤.永磁同步电机双矢量模型预测磁链控制[J].微电机,2020,53(11):75-80+119.
10. 徐艳平,张保程,周钦.永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J].电工技术学报,2017,32(20):222-230.