

文章编号:1671-251X(2019)03-0082-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018110057

大功率防爆永磁同步电动机多目标优化预测控制

何媛媛, 谷明月, 刘艳

(唐山科技职业技术学院 智能制造系, 河北 唐山 063000)



扫码移动阅读

摘要:针对基于赋权法的传统多目标预测控制方法无法有效处理目标矛盾及权值系数设计复杂的问题,提出了一种基于两层结构相容框架的大功率防爆永磁同步电动机多目标优化预测控制方法。将 d 轴电流跟踪、 q 轴电流跟踪与中点电位平衡划分为相容优化层,通过引入界限区间,有效实现了3个目标的相容控制;将开关损耗划分为最优优化层,提出了一种基于外拓法的开关频率衡量方法,通过对多个控制周期的开关次数的近似衡量,有效减小了系统的平均开关频率。仿真结果表明,所提方法能够实现电流指令跟踪与中点电位的相容控制,并能有效减小系统平均开关频率。

关键词:大功率防爆永磁同步电动机;多目标优化;预测控制;两层结构相容框架;开关频率;外拓法
中图分类号:TD61 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20190226.1712.004.html>

Multi-objective optimization predictive control of high-power explosion-proof permanent synchronous motor

HE Yuanyuan, GU Mingyue, LIU Yan

(Department of Intelligent Manufacturing, Tangshan Vocational College of Science & Technology, Tangshan 063000, China)

Abstract: In view of problems that traditional multi-objective predictive control method based on weighting method cannot effectively deal with contradiction of objectives and complex design of weight coefficient, a multi-objective optimization predictive control method of high-power explosion-proof permanent magnet motor based on two-layer structure compatible framework was proposed. The d -axis current tracking, q -axis current tracking and midpoint potential balance were divided into compatible optimization layers. By introducing boundary interval, compatible control of the three objectives was effectively realized. Switching loss was divided into optimal optimization layer. A switching frequency measurement method based on extension method was proposed. By approximately measuring switching time of multiple control cycles, average switching frequency of the system was effectively reduced. The simulation results show that the proposed method can achieve compatible control of current command tracking and midpoint potential, and can effectively reduce average switching frequency of the system.

Key words: high-power explosion-proof permanent synchronous motor; multi-objective optimization; predictive control; two-layer structure compatible framework; switching frequency; extension method

收稿日期:2018-11-26;修回日期:2019-01-27;责任编辑:胡娴。

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(2014209138)。

作者简介:何媛媛(1983—),女,甘肃白银人,讲师,主要研究方向为电气自动化,E-mail:heyuan2_1983@126.com。

引用格式:何媛媛,谷明月,刘艳.大功率防爆永磁同步电动机多目标优化预测控制[J].工矿自动化,2019,45(3):82-89.

HE Yuanyuan, GU Mingyue, LIU Yan. Multi-objective optimization predictive control of high-power explosion-proof permanent synchronous motor[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(3): 82-89.

0 引言

基于永磁同步电动机的大功率防爆电力传动系统具有效率高、功率密度大、可靠性高等优势,被广泛应用于矿井提升机、带式输送机、刮板输送机与采煤机等矿产开采与运输设备^[1-3]。大功率防爆变频器采用的绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)运行中产生的开关损耗在总热损耗中的比例超过 70%^[4],而变频器机芯被放置在密闭的本质安全型防爆壳体中,在有限的散热条件下,如何保证 IGBT 运行在容许最大结温以下成为大功率防爆传动系统的关键问题。为了从热源角度减小防爆变频器的热损耗,大功率防爆传动系统往往采用“低开关频率”控制方法,通过减小 IGBT 的开关次数来减小其开关损耗。

预测控制作为一种根据系统离散数学模型预测状态变量未来轨迹的控制方法,能够有效解决交流电动机控制中的非线性与耦合问题,被广泛应用于交流电动机的低开关频率控制中^[5-6]。传统的三电平逆变器驱动下的永磁同步电动机预测控制方法包含模型预测与滚动优化 2 个阶段,并通过目标赋权的方法将电动机电流追踪、中点电位控制及开关损耗减小的多目标优化问题转化为单目标优化问题,降低了优化问题的处理难度^[7-8]。其缺点是单个综合目标难以直观反映原问题中每个目标的实现情况,不能直接反映最佳的控制效果,且由于多个目标量纲不一致,传统预测控制方法的各目标权值设计极其复杂,不利于工程应用^[9-10]。另外,传统的赋权法无法有效解决多目标冲突的问题。文献[11-12]研究了一种基于满意优化方法的低开关频率预测控制算法,提出了追求目标满意控制而非最优控制的概念,以解决多个目标的冲突问题,但是其研究对象为整流器,在大功率防爆永磁同步电动机中的研究还未开展。

针对上述传统预测控制在多目标优化过程中存在的问题,提出了一种基于两层结构相容框架^[13]的大功率防爆永磁同步电动机多目标优化预测控制方法。将 d 轴电流跟踪、 q 轴电流跟踪与中点电位平衡划分为相容优化层,通过引入界限区间,有效实现了多目标相容控制。将开关损耗划分为最优优化层,提出了一种基于外拓法的开关频率衡量方法,通过对多个控制周期的开关次数的近似衡量,有效减小了系统的平均开关频率。最后,通过仿真验证了所提方法的正确性与有效性。

1 三电平变频器驱动防爆永磁同步电动机系统模型

三电平变频器驱动防爆永磁同步电动机拓扑结构如图 1 所示。以变频器 A 相为例,其包含 4 个功率开关器件($S_{A1} - S_{A4}$)与 2 个钳位二极管(D_{A1}, D_{A2})。

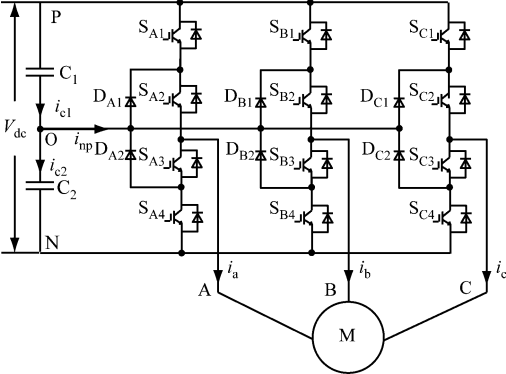


图 1 三电平变频器驱动防爆永磁同步电动机拓扑结构
Fig. 1 Topology of explosion-proof permanent magnet synchronous motor driven by three-level inverter
A 相端电压表达式为

$$V_{ao} = \begin{cases} V_{c1} & S_A = [1, 1, 0, 0] \\ 0 & S_A = [0, 1, 1, 0] \\ -V_{c2} & S_A = [0, 0, 1, 1] \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{c1}, V_{c2} 分别为上下母线电压; S_A 为 $S_{A1} - S_{A4}$ 的开关状态,1,0 分别表示导通与关断。

定义 V_{ao} 等于 $V_{c1}, 0$ 和 V_{c2} 的情况分别为 P、O 与 N 状态,则三相开关状态的组合共有 27 种情况,如图 2 所示。

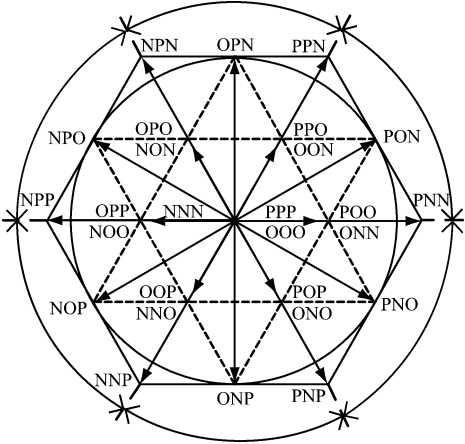


图 2 三电平电压空间矢量
Fig. 2 Vector of three-level space voltage
三电平变频器安全工作的条件之一是上下母线电容电压平衡,二者差值可以按照式(2)计算:
$$C \frac{d(V_{c1} - V_{c2})}{dt} = C \frac{dV_{c.e}}{dt} = i_{c1} - i_{c2} = i_{np} \quad (2)$$

式中: C 为上下母线电容的容值; $V_{c.e}$ 为上下母线电压的差值; t 为时间; i_{c1}, i_{c2} 与 i_{np} 分别为上母线电流、

下母线电流与中点电流。

采用前向欧拉法将式(2)改写为

$$V_{c_e}(k+1)=V_{c_e}(k)+i_{np}T_s/C$$

(3)

式中: k 为控制周期数; T_s 为控制周期。

根据基尔霍夫电流定律, i_{np} 可按照式(4)计算:

$$i_{np}=\sum_{j=a,b,c}H_ji_j$$

(4)

式中: H_j 与开关状态有关,当输出 O 状态时其值为 1,否则为 0; i_j 为三相电流。

在同步旋转坐标系下,永磁同步电动机的电流方程为

$$\begin{cases} di_d/dt=1/(L_d(u_d-Ri_d+\omega_eL_qi_q)) \\ di_q/dt=1/(L_q(u_q-Ri_q+\omega_e(L_di_d+\psi_f))) \end{cases}$$

(5)

式中: i_d,i_q 为 d,q 轴电流; L_d,L_q 为 d,q 轴电感; u_d,u_q 为 d,q 轴电压; R 为定子电阻; ω_e 为电动机角速度; ψ_f 为转子磁链。

永磁同步电动机转矩方程为

$$T_e=1.5p(\psi_fi_q+(L_d-L_q)i_di_q)$$

(6)

式中 p 为电动机极对数。

对于凸极永磁同步电动机, L_d 小于 L_q ,为了减小防爆变频驱动系统的损耗,往往采用最大转矩电流比(Maximum Torque Per Ampere, MTPA)控制,即按照式(7)分配 d,q 轴参考电流:

$$\begin{cases} i_d^*=\frac{\psi_f}{4(L_q-L_d)}-\sqrt{\frac{\psi_f^2}{16(L_q-L_d)^2}+0.5i_s^2} \\ i_q^*=\text{sign}(i_s)\sqrt{i_s^2-(i_d^*)^2} \end{cases}$$

(7)

式中: i_d^*,i_q^* 分别为 d,q 轴参考电流; i_s 为定子电流幅值;sign 为符号函数。

2 传统多目标优化预测控制

三电平变频器共有 27 个开关状态,为了减小电压变化率,每一相的开关状态不能在 N 状态与 P 状态之间跳变,且线电压的跳变台阶不能大于^[14-15]。根据此原则,结合上一个控制周期的最优开关状态,可以确定模型预测控制的有限状态集。以图 2 中 $S=1$ 为例,表 1 给出了上一个周期的最优电压空间矢量落在第 1 扇区内时对应的有限状态集。

选取不同的电压空间矢量,逆变器三相桥臂的总开关次数为

$$N_s(k+1)=2\sum_{j=a,b,c}[S_{j1}(k+1)+S_{j2}(k+1)-S_{j1}(k)-S_{j2}(k)]$$

(8)

式中 $S_{j1}(k),S_{j2}(k)$ 分别为 j 相 1 号、2 号 IGBT 的

开关状态。

表 1 $S=1$ 时各矢量对应有有限状态集

Table 1 Finite state set for each vector when S is 1

矢量	有限状态集
PNN	PNN PON PNO POO ONN
PPN	PPN PON OPN PPO OON
POO	PNN PPN PON POO ONN PPO OON
PON	PNN PON PNO POO PPO OON POP ONO PPP OOO
ONN	PNN PON PNO ONN OON POP ONO NNN OOO
PPO	PPN PON OPN POO ONN PPO OPO PPP OOO
OON	PPN PON OPN POO ONN OON OPO NON OOO NNN

对式(5)所示的电流方程进行离散化,可得

$$\begin{cases} i_q(k+1)=i_q+\frac{T_s}{L_q}(u_q-Ri_q-\omega_e(L_di_d+\psi_f)) \\ i_d(k+1)=i_d+\frac{T_s}{L_d}(u_d-Ri_d+\omega_eL_qi_q) \end{cases}$$

(9)

式(9)、式(3)与式(8)分别构成三电平驱动永磁同步电动机系统的电流、中点电位与开关次数的预测模型。

传统三电平永磁同步电动机多目标优化预测控制方法的滚动优化过程通过构造如式(10)所示的成本函数,以赋权的方式将多目标优化问题转化为单目标优化问题^[16-17]。

$$g=\lambda_1|i_d^*-i_d(k+1)|+\lambda_2|i_q^*-i_q(k+1)|+ \lambda_3|V_{c_e}(k+1)|+\lambda_4N_s(k+1)$$

(10)

式中 $\lambda_1-\lambda_4$ 为目标权值系数。

式(10)中的成本函数是 4 个目标成本函数值的加权和,通过滚动计算有限状态集中各个电压空间矢量的成本函数值,选取成本函数最小值对应的电压空间矢量作为变频器的最优电压空间矢量。

3 改进多目标优化预测控制

传统的多目标模型预测控制方法构造如式(10)所示的成本函数,由于各个目标的量纲不一致,存在不可公度的问题,权值系数的设计往往需要大量实验,调试过程复杂。各目标的控制效果依赖于权值系数的选取,而对于运行工况复杂的场合,难以配置单一的权值系数来实现防爆变频驱动系统的宽域优化控制。为了解决上述问题,提出了一种基于相容优化层与最优优化层的两层结构相容框架的大功率

防爆永磁同步电动机多目标优化预测控制方法。

3.1 相容优化层目标优化设计

针对相容优化层中的目标,以 d 轴电流跟踪目标为例,设定界限跟踪误差值为 $I_d^{\lim}$,定义 d 轴电流界限区间为

$$|i_d^* - i_d(k+1)| \leq I_d^{\lim} \quad (11)$$

图3给出了 d 轴电流的预测轨迹示例,在第 k 周期开始时刻, d 轴电流值处于界限区间的下界限之下,图中 $A_1 - A_7$ 为采用式(9)获取的有限状态集中7个不同电压空间矢量对应的预测值。

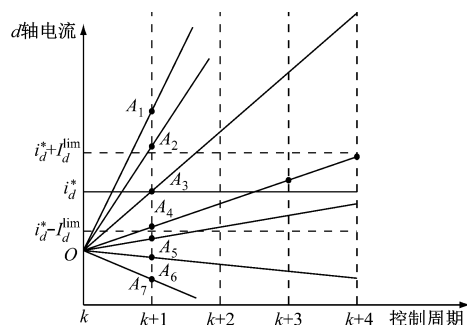


图3 i_d 预测轨迹示例

Fig. 3 Example of predictive trajectory of i_d

根据图3中 $OA_1 - OA_7$ 的轨迹特征,可以将其分为4类:① 穿越界限区间上限,如 OA_1 与 OA_2 。② 落入界限区间,如 OA_3 与 OA_4 。③ 未落入界限区间,但有接近界限区间下限的趋势,如 OA_5 。④ 未落入界限区间,且有远离界限区间下限的趋势,如 OA_6 与 OA_7 。

显然,图3中的第2类轨迹,即 OA_3 与 OA_4 落入 d 轴电流界限区间,对应的电压空间矢量为 d 轴电流跟踪目标的 Pareto 优解。对于其他类未落入界限区间的轨迹,为了兼顾相容优化层中的其他优化指标,将朝着界限区间方向运行且跟踪误差小于当前时刻误差的电压空间矢量也定义为 d 轴电流跟踪目标的 Pareto 优解,可采用式(12)进行判断:

$$|i_d^* - i_d(k+1)| \leq |i_d^* - i_d(k)| \quad (12)$$

式中 i_d^* 为上一时刻的 d 轴电流参考值。

图3中 OA_2 与 OA_5 满足式(12),因此相应的电压空间矢量也是 d 轴电流跟踪目标的 Pareto 优解。

d 轴电流跟踪目标的 Pareto 优解求取流程如图4所示,其中 M 为有限状态集中元素个数, $n=1, 2, \dots, M$; F_n 为有限状态集中的第 n 个元素。由此获取的 Pareto 优解组成的集合定义为 J_1 。

设定 q 轴电流界限跟踪误差值为 $I_q^{\lim}$,中点电位界限跟踪误差值为 $V_{c_e}^{\lim}$,则 q 轴电流与中点电位界限区间分别为

$$|i_q^* - i_q(k+1)| \leq I_q^{\lim} \quad (13)$$

$$|V_{c_e}(k+1)| \leq V_{c_e}^{\lim} \quad (14)$$

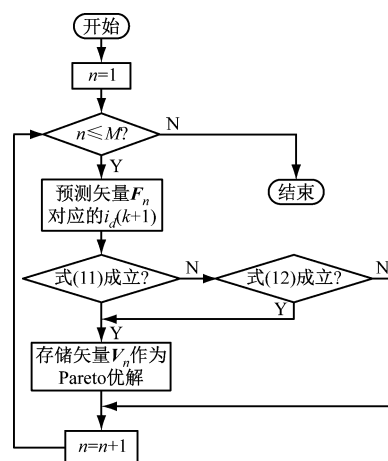


图4 i_d 跟踪目标的 Pareto 优解求取流程

Fig. 4 Flow of Pareto optimal solution for i_d tracking

q 轴电流跟踪目标与中点电位控制目标的 Pareto 优解过程与图4类似,只需要将相应的预测方程与界限区间换成相应的控制目标即可。 q 轴电流跟踪目标的 Pareto 优解集合定义为 J_2 ,中点电位控制目标的 Pareto 优解集合定义为 J_3 ,则相容优化层中的目标的 Pareto 优解集 J 为 J_1 、 J_2 与 J_3 的交集,即

$$J = J_1 \cap J_2 \cap J_3 \quad (15)$$

当 $J \neq \emptyset$ 时,表明可以实现 d 轴电流指令跟踪、 q 轴指令电流跟踪与中点电位控制的三目标相容控制,对于此种情况,将根据3.2节中的最优优化层目标优化设计准则选取最优的 Pareto 优解,以实现开关损耗的最小化。

当 $J = \emptyset$ 时,表明在当前设置的目标界限下无法实现 d 轴电流指令跟踪、 q 轴指令电流跟踪与中点电位控制的三目标相容控制,此时无法兼顾最优优化层中的开关损耗目标,而应优先优化相容控制层中的目标。对于此种情况,本文提出一种新的隶属度函数设计方法,计算公式为

$$\mu_x = \begin{cases} 0 & \mathbf{F}_x \in J_x \\ \epsilon_x / \epsilon_{x_Lim} & \mathbf{F}_x \notin J_x \end{cases} \quad (16)$$

式中: $x=1, 2, 3$, $\mu_1 - \mu_3$ 分别为 d 轴电流指令跟踪、 q 轴电流指令跟踪与中点电位平衡的隶属度函数; ϵ_x 与 ϵ_{x_Lim} 的比值可按照式(17)计算。

$$\epsilon_x / \epsilon_{x_Lim} = \begin{cases} |i_d^* - i_d(k+1)| / I_d^{\lim} & x = 1 \\ |i_q^* - i_q(k+1)| / I_q^{\lim} & x = 2 \\ |V_{c_e}(k+1)| / V_{c_e}^{\lim} & x = 3 \end{cases} \quad (17)$$

以 d 轴电流跟踪目标为例,对于属于 Pareto 优解集中的矢量,其隶属度函数值为0;而对于 Pareto 优解集之外的矢量,其隶属度函数采用如式(17)所示的偏离值与界限值的比值来衡量。

进一步,对于 $J = \emptyset$ 的情况,可以设计如式(18)

所示的整体隶属度函数 μ 来处理 d, q 轴电流指令跟踪与中点电位控制的三目标优化问题,通过对有限状态集中的电压空间矢量进行遍历预测,选取 μ 最小时对应的电压空间矢量作为最优输出。

$$\mu = \sum_{x=1}^3 \mu_x \tag{18}$$

隶属度函数的物理意义是偏离界限区间的程度,因此是一个没有量纲的变量,从而有效解决了传统多目标模型预测控制中多个目标无法公度的问题。由于相容控制层中的 3 个目标优先级相同,采用式(18)所示的隶属度函数可实现偏离程度大的目标优先处理,而无需设计权值系数。

3.2 最优优化层目标优化设计

当 $J \neq \emptyset$ 时,在实现 d 轴电流指令跟踪、 q 轴指令电流跟踪与中点电位控制的三目标相容控制的基础上设计最优优化层,以开关损耗最优为准则选取最优的 Pareto 优解。传统的多目标预测控制方法采用瞬时开关次数衡量开关损耗,只能保证当前采样周期开关次数的优化。然而,在实际的大功率防爆永磁同步电动机系统中,功率开关器件的损耗及温升往往取决于逆变器运行期间的平均开关频率,因此,开关频率的优化过程不仅需要考虑当前采样周期的情况,还要考虑未来采样周期的动作情况。针对该问题,本文提出了基于外拓法的开关频率衡量方法,用以实现开关损耗的优化。

以图 3 中的 d 轴电流预测轨迹为例,假设控制周期 T_s 足够小,机械惯性远大于电气惯性,在外拓周期数 m 足够小的情况下, d 轴电流在第 $k+m$ 控制周期的增量为

$$\Delta i_d(k+m) \approx \frac{mT_s}{L_d}(u_d - Ri_d + \omega_e L_q i_q) \tag{19}$$

式(19)表明, d 轴电流的增量可以近似认为与外拓周期成正比,因此,可以据此计算出集合 J_1 中每个元素对应的 d 轴电流穿越界限所需要的控制周期数 m_1 :

$$m_1 = \begin{cases} \text{roun}\left(\frac{i_d^* + I_d^{\text{lim}} - i_d}{i_d(k+1) - i_d}\right) & i_d(k+1) > i_d \\ \text{roun}\left(\frac{i_d^* - I_d^{\text{lim}} - i_d}{i_d(k+1) - i_d}\right) & i_d(k+1) < i_d \end{cases} \tag{20}$$

式中 roun 为向下取整函数。

以图 3 中的轨迹③与④为例,轨迹③在第 $k+2$ 周期穿越界限区间,其对应的 m_1 值为 1;轨迹④在第 $k+4$ 周期后穿越界限区间,其对应的 m_1 值为 4。

对于 q 轴指令电流跟踪与中点电位控制的目标,穿越界限区间所需要的控制周期数分别定义为

m_2 与 m_3 ,可分别按照式(21)、式(22)计算:

$$m_2 = \begin{cases} \text{roun}\left(\frac{i_q^* + I_q^{\text{lim}} - i_q}{i_q(k+1) - i_q}\right) & i_q(k+1) > i_q \\ \text{roun}\left(\frac{i_q^* - I_q^{\text{lim}} - i_q}{i_q(k+1) - i_q}\right) & i_q(k+1) < i_q \end{cases} \tag{21}$$

$$m_3 = \begin{cases} \text{roun}\left(\frac{V_{c.e}^{\text{lim}} - V_{c.e}(k+1)}{V_{c.e}(k+1) - V_{c.e}}\right) & V_{c.e}(k+1) > V_{c.e} \\ \text{roun}\left(\frac{-V_{c.e}^{\text{lim}} - V_{c.e}(k+1)}{V_{c.e}(k+1) - V_{c.e}}\right) & V_{c.e}(k+1) < V_{c.e} \end{cases} \tag{22}$$

定义相应的开关管动作次数与 m_1, m_2, m_3 中最小值的比例,即开关损耗的隶属度函数为

$$\mu_4 = \frac{N_s(k+1)}{\min(m_1, m_2, m_3)} \tag{23}$$

为了阐明 μ_4 的含义,假设 m_1, m_2, m_3 中最小值为 m_1 ,结合图 3 中的 d 轴电流预测轨迹示例,轨迹③对应的 m_1 值为 1,轨迹④对应的 m_1 值为 4,若选用轨迹④对应的电压空间矢量,则在 $k+1$ 至 $k+4$ 周期中无需切换开关状态,因此, μ_4 能够有效衡量相容优化层中 Pareto 优解跨越界限区间的平均开关次数。

针对集合 J 中的电压矢量,采用遍历法计算 μ_4 ,并选取 μ_4 数值最小时对应的电压空间矢量作为最优 Pareto 优解。改进多目标预测控制方法流程如图 5 所示。

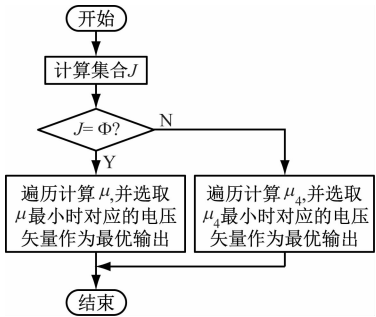


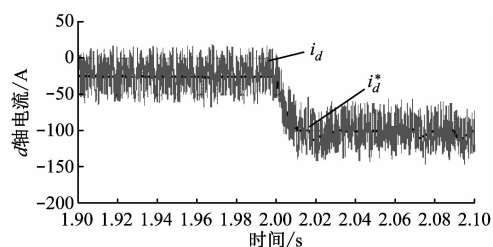
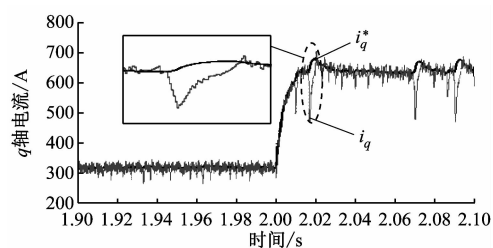
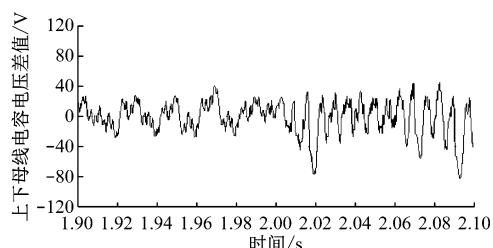
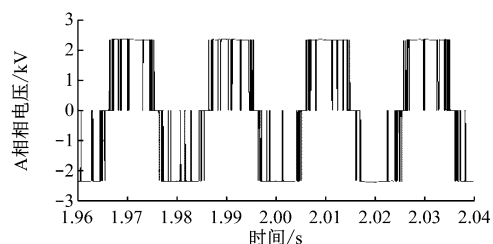
图 5 改进多目标预测控制方法流程
Fig. 5 Flow of improved multi-objective predictive control method

4 仿真及结果分析

为了验证改进多目标模型预测控制方法的有效性,在 Matlab/Simulink 中仿真,仿真参数如下:永磁同步电动机额定电压为 3 300 V,额定电流为 450 A,额定转矩为 15 280 N · m,额定频率为 50 Hz,额定转速为 1 500 r/min,额定功率为 2 400 kW;电动机极对数为 2;仿真时间为 4 s;给定转速为 1 500 r/min;0~2 s 负载转矩设置为额定转

矩的50%, 2 s时负载转矩突变为额定转矩;控制周期为50 s;逆变器直流母线电压为4 690 V,上下直流母线电容均为5 mF;永磁同步电动机定子电阻为0.1 Ω ; d, q 轴电感分别为2, 4 mH;永磁体转子磁链为7.96 Wb。

采用传统多目标预测控制方法的仿真结果如图6所示,包含 d 轴电流波形、 q 轴电流波形、上下母线电容电压差值与A相相电压波形。式(10)中的目标权值系数 $\lambda_1 - \lambda_4$ 分别设置为1, 1, 0.177 3, 5.196 4。整体而言,传统多目标优化预测控制方法能够实现指令电流的跟踪、中点电位的控制与开关损耗的优化,但是也存在一定的问题。

(a) i_d 波形(b) i_q 波形(c) V_{c_e} 波形

(d) A相相电压波形

图6 传统多目标预测控制方法的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of traditional multi-objective predictive control method

图6(b)中的 q 轴电流波形在2.02 s附近出现

了较大跌落。局部放大图表明,此时 q 轴电流给定有上升的趋势,但是其实际值却出现跌落的趋势,且引起的跌落值约为170 A。这主要是因为传统多目标预测控制方法无法有效处理多目标之间的矛盾问题,因过分优化其他目标而导致 q 轴电流跟踪性能恶化。从图6(b)还可以看出,在2 s之前负载为50%额定负载的情况下, q 轴电流波动处于能够接受的范围,但是在相同权值系数的情况下,当负载转矩突变为额定负载时,出现了 q 轴跌落值较大的情况,说明单一的权值系数设置并不能满足多个工况的多目标优化运行,对于经常需要动态切换的场合,传统方法的权值系数整定较复杂且耗时长。

图6(d)给出了A相相电压波形,经计算可得在50%额定负载情况下,逆变器的平均开关频率约为1 347 Hz,而在额定负载情况下,逆变器的平均开关频率为1 410 Hz。虽然可以通过进一步增加权值系数 λ_4 来减小系统平均开关频率,但是在优化开关频率的同时会导致图6(b)中的 q 轴电流跟踪效果更加恶化,其他控制性能也有一定程度的恶化,当 λ_4 足够大时,甚至会引起控制不稳定的问题。

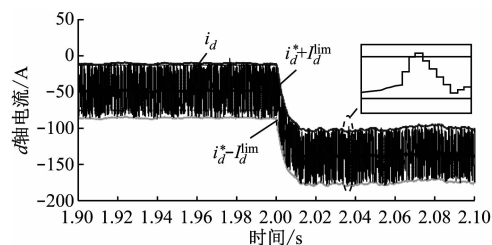
采用改进多目标预测控制方法的仿真结果如图7所示,包含 d 轴电流波形、 q 轴电流波形、上下母线电容电压差值与A相相电压波形。仿真中设置 $I_d^{\lim}, I_q^{\lim}, V_{c_e}^{\lim}$ 分别为30 A, 50 A, 80 V。

图7(a)给出了 d 轴电流波形,可见 d 轴电流能够有效跟踪其给定。局部放大图表明,尽管 d 轴电流会出现超越界限的情况,但由于采用式(18)中的无权值隶属度函数选取的最优控制矢量能够优先处理远离设定界限程度较大的目标,所以,不会出偏离界限值较大的情况。进一步,图7(a)~(c)中的结果也表明本文提出的改进多目标优化预测方法通过相容优化层目标优化设计能够有效解决传统方法中多目标优化过程中存在的矛盾问题。

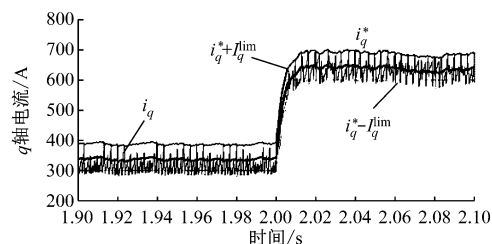
图7(d)给出了A相相电压波形,经计算可得在50%额定负载情况下,逆变器的平均开关频率约为575 Hz,而在额定负载情况下,逆变器的平均开关频率为565 Hz,相对于传统方法,平均开关频率得到有效降低。对于对开关频率限幅要求较高的大功率驱动场合,采用本文提出的改进方法能够在确保其他目标满意控制的基础上实现低开关频率运行。

5 结语

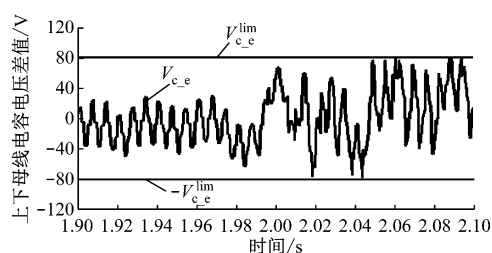
提出了一种基于两层结构相容框架的大功率防爆永磁同步电动机多目标优化预测控制方法,相对于传统方法,该控制方法能够避免权值系数的设计,有效解决了多个目标无法公度以及互相矛盾的问



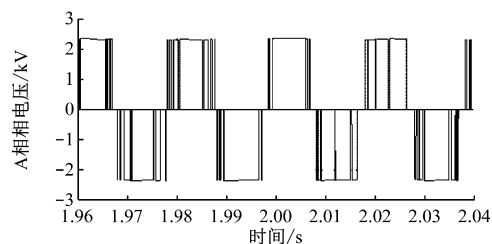
(a) i_d 波形



(b) i_q 波形



(c) $V_{c,e}$ 波形



(d) A 相电压波形

图 7 改进多目标预测控制方法的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of improved multi-objective predictive control method

题。仿真结果表明,该控制方法能够实现电流指令跟踪与中点电位的相容控制,并能有效减小系统平均开关频率。

参考文献 (References):

[1] 祝龙记,张旭立. 防爆变频器在煤矿应用中的关键技术[J]. 工矿自动化, 2012, 38(2): 19-22.
ZHU Longji, ZHANG Xuli. Key technologies of explosion-proof frequency converter applied in coal mine [J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(2): 19-22.

[2] 张艳敏,苏浩,蒋青璋. 隔爆型变频一体化永磁同步电动机研制[J]. 工矿自动化, 2017, 43(11): 98-102.
ZHANG Yanmin, SU Hao, JIANG Qingzhang. Development of explosion-proof permanent magnet synchronous motor with variable-frequency drive

integration[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(11): 98-102.

[3] 朱永平,徐晓建. 浅谈矿用变频器发展趋势[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 18-23.
ZHU Yongping, XU Xiaojian. Development trend of mine frequency converter [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 18-23.

[4] 李剑峰. 煤矿设备防爆变频调速技术的研究与实践[J]. 变频器世界, 2016(2): 39-43.
LI Jianfeng. Research and practice on the technology of frequency conversion and speed control in coal mine equipment [J]. The World of Inverters, 2016 (2): 39-43.

[5] 林茂,李颖晖,吴辰,等. 基于滑模模型参考自适应系统观测器的永磁同步电机预测控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 156-163.
LIN Mao, LI Yinghui, WU Chen, et al. A model reference adaptive system based sliding mode observer for model predictive controlled permanent magnet synchronous motor drive [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 156-163.

[6] 夏长亮,张天一,周湛清,等. 结合开关表的三电平逆变器永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 83-92.
XIA Changliang, ZHANG Tianyi, ZHOU Zhanqing, et al. Model predictive torque control with switching table for neutral point clamped three-level inverter-fed permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 83-92.

[7] WANG Xiaoguang, XU Wei, ZHAO Yun, et al. Modified MPC algorithm for NPC inverter fed disc coreless permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.

[8] KUMAR V, GAUR P, MITTAL A P. Finite-state model predictive control of NPC inverter using multi-criteria fuzzy decision-making [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(5): 876-897.

[9] ZHANG Z, HACKL C M, KENNEL R. Computationally efficient DMPC for three-level NPC back-to-back converters in wind turbine systems with PMSG[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8018-8034.

[10] HABIBULLAH M, LU D C, XIAO D, et al. Selected prediction vectors based FS-PTC for 3L-NPC inverter fed motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3588-3597.

[11] 谭国俊,曹晓冬,王从刚,等. 基于满意优化的三电平 PWM 整流器瞬时开关频率抑制方法[J]. 中国电机

- 工程学报,2014,34(24):4057-4067.
- TAN Guojun, CAO Xiaodong, WANG Conggang, et al. Instantaneous switching frequency suppression method for three-level PWM rectifier based on satisfactory optimization [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(24):4057-4067.
- [12] 曹晓冬,谭国俊,王从刚,等.一种低开关频率PWM整流器的满意预测控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(27):69-77.
- CAO Xiaodong, TAN Guojun, WANG Conggang, et al. A research on low switching frequency PWM rectifiers with satisfactory and model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(27):69-77.
- [13] 胡庆松,徐立鸿.冲突多目标相容预测控制[J].系统仿真学报,2008,20(9):2402-2406.
- HU Qingsong, XU Lihong. Conflicting multi-objective compatible predictive control[J]. Journal of System Simulation,2008,20(9):2402-2406.
- [14] 宋奇吼,杨颀,童岩峰,等.一种模糊电流预测控制算法在永磁同步电机矢量控制上的应用[J].微电机,2015,48(11):81-84.
- SONG Qihou, YANG Yang, TONG Yanfeng, et al. A fuzzy predictive control algorithm in permanent magnet synchronous motor vector control [J]. Micromotors,2015,48(11):81-84.
- [15] 徐向前,徐文静,杨士慧.基于预测模型的永磁同步电机直接转矩控制[J].电机与控制应用,2017,44(1):29-33.
- XU Xiangqian, XU Wenjing, YANG Shihui. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on prediction model [J]. Electric Machines & Control Application,2017,44(1):29-33.
- [16] 王艳霞.基于模型预测的永磁同步电机直接转矩控制及负载角限制[J].微特电机,2016,44(8):126-130.
- WANG Yanxia. Model predictive direct torque control for PMSM with load angle limitation [J]. Small & Special Electrical Machines,2016,44(8):126-130.
- [17] 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):1598-1605.
- DENG Yongting, LI Hongwen, WANG Jianli, et al. Speed control for PMSM based on predictive functional control and disturbance observer[J]. Optics and Precision Engineering,2014,22(6):1598-1605.