

本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

张东浩, 王英.
基于DTC-SVM的地铁并联牵引电机
控制策略研究.
电机与控制应用, 2021, 48(10): 35.




数据监测
多维数据采集, 全面运行分析
全景可视窗口, 丰富报表类型


预测运维
海量行业数据, 精准趋势预测
生命周期管理, 性能尽在掌握


故障诊断
专业机理模型, 自动故障告警
在线智能诊断, 高效便捷派单


绿色节能
环保绿色先行, 助力低碳生产
节能降耗减排, 合理降本增效


聚汇商机
供需多方互联, 协同合作共赢
有效整合资源, 共享生态未来

SEARI
上电科

上海电器科学研究所(集团)有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

云平台技术支持: 18918675776
固定电话: 021- 52669993

业务垂询: 18801608667
地址: 上海市普陀区武宁路505号9号楼



微信扫码关注我们

基于 DTC-SVM 的地铁并联牵引电机控制策略研究

张东浩, 王 英

(大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 在地铁同一转向架下单逆变器控制两并联异步电机的结构中, 轮径差或电机参数不同等因素会导致电机间转矩差和转矩脉动较大。针对这一问题, 建立了地铁同一转向架下双异步电机并联时速度耦合的负载模型, 采用基于空间矢量调制(SVM)的直接转矩控制(DTC)策略, 引入实时计算的加权系数, 使 DTC 权重偏向于转矩较小的电机。该控制方案具有转矩波动更小、逆变器开关频率恒定和电机间的转矩差较小的特点。仿真结果表明, 相对于平均 DTC, 所提出的加权 DTC 方法有效减小了电机转矩差和降低了转矩脉动。

关键词: 直接转矩控制; 并联电机; 双动轴负载模型; 加权直接转矩; 单逆变器控制

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)10-0035-06

doi: 10.12177/emca.2021.087

Research on Control Strategy of Metro Parallel-Connected Traction Motors Based on DTC-SVM

ZHANG Donghao, WANG Ying

(College of Electrical Information, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: In the structure of two parallel-connected asynchronous motors controlled by a single inverter under the same bogie of metro, factors such as wheel diameter difference or different motor parameters will lead to the large torque difference between the motors and torque ripple. In order to solve this problem, a speed coupling load model of double asynchronous motors in parallel under the same bogie of metro is established. The direct torque control strategy based on space vector modulation is adopted, and the weighting coefficient of real-time calculation is introduced, so that the weight of direct torque control tends to the motor with smaller torque. The control scheme has the characteristics of smaller torque ripple, constant switching frequency of inverter, and smaller torque difference between motors. The simulation results show that compared with the average direct torque control, the weighted direct torque control method can effectively reduce the torque difference between the motors and decrease the torque ripple.

Key words: direct torque control (DTC); parallel-connected motors; load model of double acting shaft; weighted direct torque; single inverter control

0 引 言

在地铁车辆设计和制造中, 为了减少成本以及适应地铁列车狭小的安装空间, 中国地铁车辆普遍采用单逆变器驱动多电机的方案, 从而减少逆变器的数量、降低造价、减轻轴重, 增大乘客的

乘坐空间和载客量。但两并联牵引电机因轮径差、电机参数不同等原因导致电机间负载不平衡^[1-2], 如果不对电机间转矩差进行控制, 有可能出现空转和滑行, 对轮对和钢轨造成损伤, 严重时影响列车运行时的稳定性。因此, 有必要研究先进的控制方法来降低两并联牵引电机的转矩差,

收稿日期: 2021-06-15; 收到修改稿日期: 2021-08-19

作者简介: 张东浩(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机及其驱动控制。

减小转矩脉动,从而提高地铁并联牵引电机控制系统的性能。

文献[3-4]对并联加权矢量控制方法进行了改进,通过 q 轴磁链观测器观测得到的电机转速来实时调整并联矢量控制的权重,但没关注城市轨道交通领域中架控或车控时并联电机的转速是具有相关性的。文献[5]在两并联异步电机加权矢量控制模型的基础上,提出了新型的两速度耦合并联异步电机控制策略,但没讨论在轨道交通领域中并联电机的负载模型。文献[6]提出了两并联异步电机的平均传统直接转矩控制(DTC),但由于传统 DTC 的固有缺点,电机的转矩脉动较大。文献[7]将多台并联电机的参数进行平均化,等效为单电机进行控制,采用改进的基于空间矢量调制(SVM)的 DTC,减小了转矩波动,使磁链波形更加平滑,但没引入加权系数,当电机参数不同或负载有较大差异时,达不到理想的控制效果。

为了解决上述问题,本文在现有的平均 DTC 的基础上进行改进,提出在城市轨道交通领域中同一转向架下速度耦合两并联异步电机加权 DTC,通过实时观测的电机转矩来实时计算加权值,实现了的动态控制。

1 轮轨黏着关系理论和双轴电机负载模型

1.1 轮轨黏着理论

地铁的轮轨接触处因为重力的原因会发生弹性形变,当车辆克服阻力向前行驶或者减速过程中,在钢轨和车轮的轮轨接触面部分会发生压缩和拉伸现象,一般轮轨接触面的前部,也即压缩部分没有相对滑动,称为滚动区,接触面的后部,也即拉伸部分有相对滑动,称为滑动区。滚动区的面积随着轮轨切向力的增大而减小,同时滑动区的面积将增大,当滚动区面积为 0 时即发生了空转和滑行。这种现象也称为蠕滑,会导致在牵引时车轮的圆周线速度比实际车体的移动速度高,制动时则相反,用蠕滑速度 v_s 表示蠕滑程度的大小^[8]:

$$v_s = v_w - v_l \quad (1)$$

式中: v_w 为车轮的圆周线速度; v_l 为车体的移动速度。

正是由于蠕滑的存在,电机的转矩才转变为

轮轨间列车牵引和制动的黏着力,蠕滑程度的大小决定了黏着力的大小。在稳定区时,轮轨间的黏着力随着蠕滑速度的增加而增加,但当蠕滑速度超过临界值到达非稳定区后,蠕滑速度继续增加会导致黏着力急剧减小。其中黏着系数计算公式一般采用经验计算公式^[9]:

$$\mu = c \cdot e^{-a \cdot v_s} - d \cdot e^{-b \cdot v_s} \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为计算参数,不同轮轨接触条件计算参数不同。

地铁车辆的轮周牵引力可表示为

$$F_\mu = \mu \cdot M_m g \quad (3)$$

1.2 转向架双轴模型

图 1 为典型的地铁列车架控驱动系统示意图。对转向架上的动轴进行分析可知,牵引电机的转矩施加到轮对上,产生让列车前进的黏着力^[10],因此:

$$T_l = \frac{F_\mu \cdot r}{i_g} \quad (4)$$

式中: T_l 为牵引电机输出折算后的转矩; r 为动轮半径; i_g 为齿轮箱传动比。

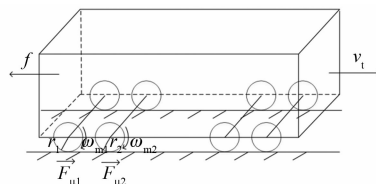


图 1 同一转向架下车体的力传递模型

地铁车辆同一转向架下并联异步牵引电机分别驱动的不同车轴之间具有机械耦合关系,为了研究地铁牵引电机并联运行方式下的控制问题,需要建立起符合列车实际情况的并联异步牵引电机负载模型来对实际负载转矩进行模拟。同一转向架下 2 个动轮的轮缘线速度可以视为近似相同^[11]:

$$\begin{cases} v_w = \omega_{m1} \times r_1 = \omega_{m2} \times r_2 \\ \frac{d\omega_{m1}}{dt} \times r_1 = \frac{d\omega_{m2}}{dt} \times r_2 \\ J_{equ} \times \frac{d\omega_{m1}}{dt} = T_{e1} - T_{L1} \\ J_{equ} \times \frac{d\omega_{m2}}{dt} = T_{e2} - T_{L2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_{m1} 、 r_1 以及 ω_{m2} 、 r_2 分别为动轴 1 和动轴 2 的转速和车轮半径; J_{equ} 为电机侧等效转动惯量。

由式(5)可以推导出 2 台电机负载转矩 T_{L1} 和 T_{L2} 之间的关系:

$$T_{L2} = T_{e2} - \frac{r_1}{r_2} \times (T_{e1} - T_{L1}) \quad (6)$$

1.3 同一转向架的并联牵引电机等效负载

车体的运动方程如式(7), 轮周牵引力克服车体的运动阻力, 并推动车体加速运动。为了简化模型, 式(7)仅考虑基本阻力。

$$(M_m + nM_T) \frac{dv_t}{dt} = F - (M_m + nM_T)g \cdot f \quad (7)$$

式中: n 为动拖比; M_m 为动车质量; M_T 为拖车质量; v_t 为车体速度; f 为地铁车辆的基本阻力。

f 可以表示为

$$f = x + yv_t + zv_t^2 \quad (8)$$

式中: x 、 y 、 z 为计算参数, 不同地铁列车计算参数不同, 本文根据北京地铁 13 号线车辆的数据进行建模研究^[10]。

基于以上运算式, 可以搭建出地铁列车同一转向架下并联牵引电机的等效负载模型, 如图 2 所示, 其中 M_{m1} 为单动轴所承担的车体质量。

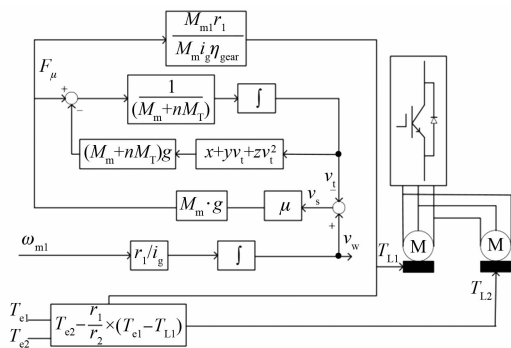


图2 列车并联牵引电机负载转矩模型

2 并联电机 DTC-SVM 策略

传统 DTC 通过查询开关表的方式来选择合适的电压矢量, 通过 2 个滞环比较器实现对磁链和转矩的直接控制。但由于滞环比较器自身的原因, 逆变器的开关频率不固定, 转矩脉动大。为了改善上述缺点, 本文采用基于 SVM 的 DTC 方案, 通过 PI 调节器来实现磁链和转矩的双闭环控制^[12]。单电机的 DTC-SVM 原理如图 3 所示。

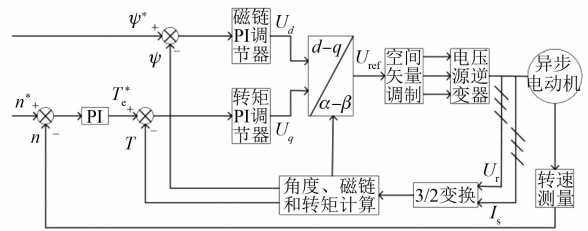


图3 单电机 DTC-SVM 结构

2.1 单逆变器驱动并联异步电机模型

由单逆变器供电的双感应电机如图 4 所示, 逆变器为双并联电机提供相同频率和幅值的电压。但由同一转向架下并联的异步电机所分别驱动的动轮轮径差异等原因导致双并联异步电机间负载不平衡, 会引起双感应电动机的转速和定子电流不同。通常情况下, 并联异步牵引电机的参数基本相同, 因此可以忽略这 2 台电机的参数差异。

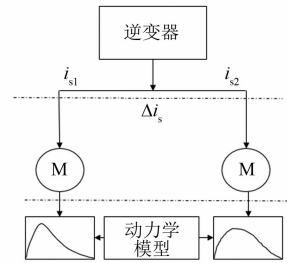


图4 同一转向架下双电机并联的电流模型

2.2 基于平均 DTC-SVM 的并联电机驱动系统

在基于平均 DTC-SVM 系统中, 将 2 台并联异步电机采用平均化理论拟合为 1 台电机进行控制。要实现 DTC-SVM, 首先要精确地估算出磁链和转矩, 然后将结果输入到对应的磁链和转矩 PI 调节器中, 通过磁链当前所属的位置来最终确定逆变器输出的电压空间矢量。

在两相静止坐标系下, 通过容易测得的定子电压和定子电流来计算定子磁链, 即

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s) dt \\ \psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s) dt \end{cases} \quad (9)$$

电磁转矩可通过式(10)进行观测:

$$T_e = p(\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (10)$$

式中: p 为电机极对数。

根据式(9)、式(10)单电机的定子磁链和电

磁转矩观测计算方程写出电机并联运行时的方程,如式(11)、式(12)所示:

$$\begin{cases} \psi_{s1} = \int (u_s - i_{s1} R_s) dt \\ \psi_{s2} = \int (u_s - i_{s2} R_s) dt \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} T_{e1} = p(\psi_{s\alpha1} i_{s\beta1} - \psi_{s\beta1} i_{s\alpha1}) \\ T_{e2} = p(\psi_{s\alpha2} i_{s\beta2} - \psi_{s\beta2} i_{s\alpha2}) \end{cases} \quad (12)$$

将式(11)进行平均和差分处理后可以得到:

$$\begin{cases} \bar{\psi}_s = \int (u_s - \bar{i}_s R_s) dt \\ \Delta\psi_s = - \int \Delta i_s R_s dt \end{cases} \quad (13)$$

且有:

$$\begin{cases} \bar{i}_s = \frac{1}{2}(i_{s1} + i_{s2}) \\ \Delta i_s = \frac{1}{2}(i_{s2} - i_{s1}) \end{cases} \quad (14)$$

在对地铁双电机并联驱动系统进行控制时,平均转矩利用差值公式(15)进行计算:

$$\begin{cases} C = AB \\ \bar{A} = \frac{A_1 + A_2}{2} \\ \Delta A = \frac{A_2 - A_1}{2} \\ \bar{B} = \frac{B_1 + B_2}{2} \\ \Delta B = \frac{B_2 - B_1}{2} \\ \bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2} = \frac{A_1 B_1 + A_2 B_2}{2} = \\ \bar{A}\bar{B} + \Delta A\Delta B \\ \Delta C = \frac{C_2 - C_1}{2} = \bar{A}\Delta B + \Delta A\bar{B} \end{cases} \quad (15)$$

可以得到平均转矩计算公式:

$$\begin{aligned} \bar{T}_e &= p(\bar{\psi}_{s\alpha} \bar{i}_{s\beta} - \bar{\psi}_{s\beta} \bar{i}_{s\alpha}) = \\ &p(\bar{\psi}_{s\alpha} \bar{i}_{s\beta} + \Delta\psi_{s\alpha} \Delta i_{s\beta} - \\ &\bar{\psi}_{s\beta} \bar{i}_{s\alpha} - \Delta\psi_{s\beta} \Delta i_{s\alpha}) \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 基于加权 DTC-SVM 的并联电机驱动系统

上述方法是通过对定子电流和磁场进行平均,来计算需要输入到转矩闭环 PI 控制器中的转矩,虽然可以实现双电机的并联 DTC,但在重度负

载不平衡时,控制效果不太理想,转矩波动较大,电机间输出转矩差较大,转矩较大的电机甚至可能发生颠覆。为了改善控制性能,本文在原平均 DTC 方法上引入加权系数 k_m ,根据实际运行情况来动态调节加权系数。

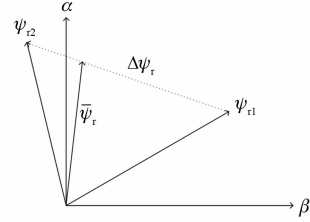


图5 单逆变器驱动的并联电机加权定子磁链模型

在两相静止坐标系下,定子电流和定子磁链的加权值和差值定义如下:

$$\begin{cases} \bar{i}_s = k_m i_{s1} + (1 - k_m) i_{s2} \\ \Delta i_s = \frac{1}{2}(i_{s2} - i_{s1}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \bar{\psi}_s = k_m \psi_{s1} + (1 - k_m) \psi_{s2} \\ \Delta\psi_s = \frac{1}{2}(\psi_{s2} - \psi_{s1}) \end{cases} \quad (18)$$

加权平均差值计算公式如式(19)所示:

$$\begin{cases} C = AB \\ \bar{A} = k_m A_1 + (1 - k_m) A_2 \\ \Delta A = \frac{A_2 - A_1}{2} \\ \bar{B} = k_m B_1 + (1 - k_m) B_2 \\ \Delta B = \frac{B_2 - B_1}{2} \\ \bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2} = \frac{A_1 B_1 + A_2 B_2}{2} = \\ \bar{A}\bar{B} + 2(2k_m^2 - 2k_m + 1)\Delta A\Delta B + \\ (2k_m - 1)\Delta A\bar{B} + (2k_m - 1)\bar{A}\Delta B \\ \Delta C = \frac{C_2 - C_1}{2} = 2(2k_m - 1)\Delta A\Delta B + \bar{A}\Delta B + \Delta A\bar{B} \end{cases} \quad (19)$$

令:

$$\begin{cases} k_a = 2k_m - 1 \\ k_b = 2k_m^2 - 2k_m + 1 \end{cases} \quad (20)$$

运用加权差值计算公式可以得到估算加权平均磁链和转矩的方程:

$$\begin{cases} \bar{\psi}_s = \int (u_s - \bar{i}_s R_s) dt \\ \Delta \bar{\psi}_s = - \int \Delta i_s R_s dt \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_e &= p(\bar{\psi}_{s\alpha} \bar{i}_{s\beta} - \bar{\psi}_{s\beta} \bar{i}_{s\alpha}) = \\ & p(\bar{\psi}_{s\alpha} \bar{i}_{s\beta} + 2k_b \Delta \bar{\psi}_{s\alpha} \Delta i_{s\beta} + k_a \Delta \bar{\psi}_{s\alpha} \bar{i}_{s\beta} + \\ & k_a \bar{\psi}_{s\alpha} \Delta i_{s\beta} - \bar{\psi}_{s\beta} \bar{i}_{s\alpha} - 2k_b \Delta \bar{\psi}_{s\beta} \Delta i_{s\alpha} - \\ & k_a \Delta \bar{\psi}_{s\beta} \bar{i}_{s\alpha} - k_a \bar{\psi}_{s\beta} \Delta i_{s\alpha}) \end{aligned} \quad (22)$$

$k_m = 0.5$ 时加权 DTC 方法计算得到的 $\bar{\psi}_s$ 、 $\bar{T}_e$ 和平均 DTC 方法计算得到的结果相同, 平均 DTC 是加权 DTC 的一个特殊情况。

2.4 加权值的选取

基于地铁列车实际运行时两并联电机的机械耦合并考虑到黏着时两并联电机等效负载转矩的相关性, 本文将前文计算出各电机等效负载转矩的 T_{L1} 和 T_{L2} 作为加权值计算的参数。

加权值计算公式如下:

$$k_m = \frac{T_{L2}}{T_{L1} + T_{L2}} \quad (23)$$

3 系统控制框图

地铁双异步牵引电机并联加权 DTC 系统框图如图 6 所示, 将两并联牵引电机在地铁同一转向架负载模型下运行时得到的定子电流和磁链作为加权直接转矩的输入, 得到加权平均的转矩和磁链, 与给定的转矩和磁链进行比较, 得到的误差经过 PI 调节器得到 dq 轴坐标系下的参考电压空间矢量, 经过坐标变换到 $\alpha\beta$ 轴, 得到参考电压矢量 U_{ref} , 最后, 通过 SVM 得到逆变器的开关信号, 驱动电机运行。

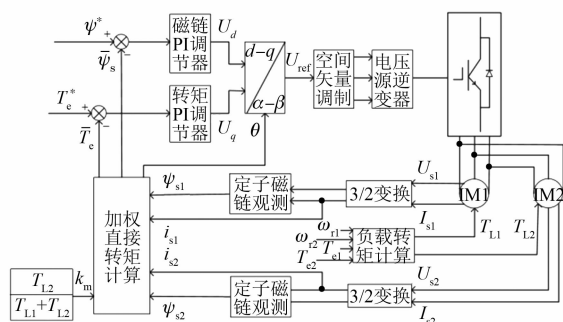


图 6 双异步电机并联加权 DTC 系统框图

4 仿真研究

利用 MATLAB/Simulink 仿真工具, 对上文的控制策略进行仿真研究, 采用北京地铁 13 号线车辆的实际参数进行建模与仿真。参数见表 1, 动拖比为 1:1, 为了简化模型, 忽略列车运行时的轴重转移, 假设每个动轴所承担的车重相同。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
M_m/t	36
M_t/t	29
r_t/m	0.41
$J_m/(kg \cdot m^2)$	3.1
P/kW	180
$\eta/\%$	97.5
额定电压/V	550
i_g	7.69
R_t/Ω	0.065 95
R_s/Ω	0.078 5
L_s/mH	0.117
L_t/mH	0.117
L_m/mH	10.46
极对数	2
$\mu = c \cdot e^{-a \cdot v_s} - d \cdot e^{-b \cdot v_s}$	$0.85e^{-0.15v_s} - 0.85e^{-0.33v_s}$
$f = x + yv_1 + zv_1^2$	$1.65 + 0.024 7v_1 + 0.028v_1^2$

对同一转向架下双动轴负载不平衡程度较大 (即轮径差较大) 时 2 种方法进行对比, 设置 $r_1 = 0.41 m$, $r_2 = 0.39 m$ 。图 7 和图 8 分别为采用平均 DTC 和加权 DTC 得到的 2 台电机转矩、转速特性以及转矩差曲线。通过仿真结果可以证明本文建立的同一转向架下速度耦合的双并联电机等效负载模型和转矩闭环控制模型是正确的。通过对比可以看出, 在负载不平衡程度较大时, 平均 DTC 系统的转矩脉动较大, 且 2 台电机的转矩差大大超过加权 DTC。较大的转矩脉动影响地铁列车运行的稳定性和乘坐的舒适性; 较大的转矩差会使负载较大的电机因电流较大而过热, 还有可能导致黏着状态遭到破坏, 发生空转。因此, 本文所应用的加权 DTC 方法可以在一定程度上减小转矩脉动, 并减小两并联电机的转矩差, 提高地铁电机并联运行时的控制效果。

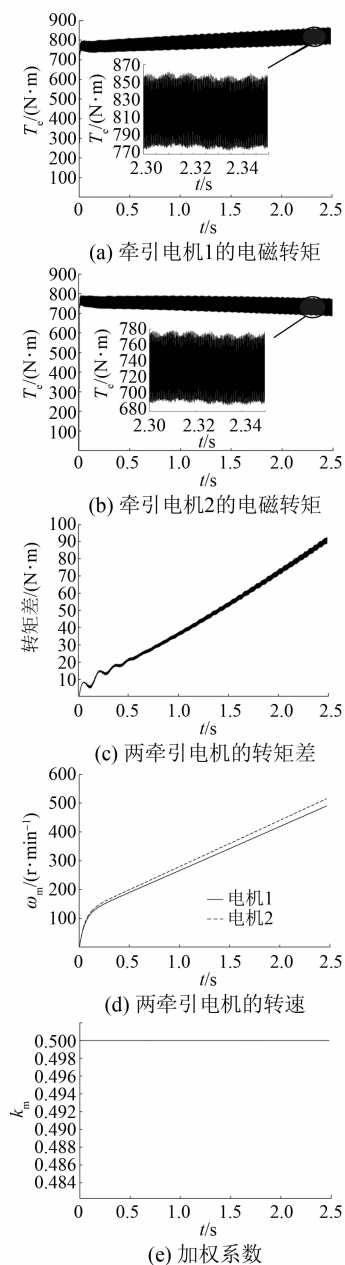


图7 平均 DTC-SVM 的并联电机控制

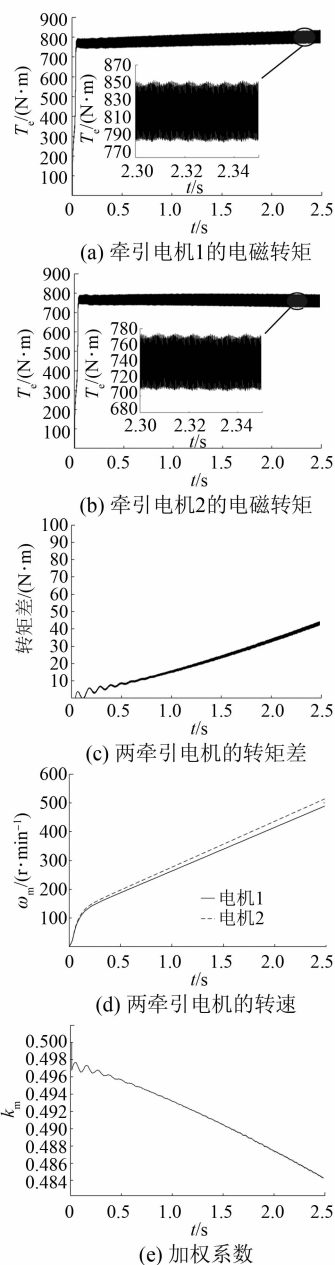


图8 加权 DTC-SVM 的并联电机控制

5 结 语

本文建立了地铁列车同一转向架下双动轴模型来模拟车体实际运行中各电机的负载转矩,结合北京地铁 13 号线实车数据,并在双电机单逆变器平均 DTC 的基础上推导出加权 DTC 方法,通过实时计算的加权值来实现同一转向架下双并联电机的动态控制。仿真结果表明,采用加权 DTC 方法改善了地铁电机并联运行时的控制性能,减小

了转矩脉动,降低了因轮径差等原因导致的不平衡负载下的转矩差。

【参考文献】

- [1] 高翔,张波. 并联电机结构对动车组黏着利用的影响[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(3): 130.
- [2] 汪斌,卢琴芬,黄晓艳,等. 列车牵引电机负荷不平衡问题及控制策略研究[J]. 电气传动, 2012, 42(10): 22.

(下转第 83 页)

具有良好的推广应用价值。

基于现场故障案例库的持续积累和对牵引传动系统各类故障机理认识的不断加深,后续将研究完善相关事件时序特征识别方法并将此方法拓展至牵引传动系统级其他异常表征(如网侧过流、次边短路、四象限输入过流、中间直流电压过高等)的精确故障溯源,以实现列车故障应急处置的自动化和智能化,减少故障停机处置时间,有效提升列车运行安全性和可用性。

【参考文献】

- [1] 周东华,纪洪泉,何潇. 高速列车信息控制系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报,2018,44(7): 3.
- [2] LI X, XU J, CHEN Z, et al. Real-time fault diagnosis of pulse rectifier in traction system based on structural model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, doi: 10. 1109/ITITS. 2020. 3033318.
- [3] 陈志文,李学明,徐绍龙,等. 基于特征相关性的牵引传动系统主回路接地故障诊断[J]. 自动化学报,2021,47(7): 1516.
- [4] 郭晓鹏. 交流电力机车牵引传动系统的保护分析和总结[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [5] 程国永. 对一起牵引电动机过流的分析与探讨[J]. 铁道机车车辆,2008,28(5): 59.
- [6] 罗铁军,徐培刚,丁培义,等. HX_D1C 型电力机车电机过流故障分析[J]. 机车电传动,2014(6): 104.
- [7] 张全明,邓亚波. 基于神经网络的机车牵引传动系统故障诊断研究[J]. 控制与信息技术,2018(3): 74.
- [8] 王同辉,张慧源,许为,等. 基于 EOVS 指数和 C&RT 决策树的电机过流故障诊断及应用[J]. 控制与信息技术,2018(1): 81.
- [9] XU S, LI X, CHEN Z. Real-time diagnosis of sensor fault for traction drive system [C] // 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2020.
- [10] 李学明,彭辉,谭永光,等. HX_N6 大功率混合动力内燃机车传动控制系统[J]. 机车电传动,2017(6): 41.
- [11] 罗铁军,彭军华,彭江山. HX_D1C 型电力机车速度信号故障分析[J]. 机车电传动,2014(4): 57.
- [3] 王琛琛,齐龙,苟立峰,等. 基于无速度传感器的异步电机并联加权矢量控制[J]. 电工技术学报,2015,30(10): 131.
- [4] XU F, SHI L, LI Y. The weighted vector control of speed-irrelevant dual induction motors fed by the single inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5665.
- [5] 徐飞,史黎明,李耀华. 单变频器驱动速度耦合两并联异步电机控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15): 92.
- [6] 万衡,吴韬,徐婧玥,等. 基于直接转矩控制的单逆变器多机驱动系统[J]. 电机与控制应用,2011,38(10): 36.
- [7] 马秀娟,孙洋,张华强,等. 基于 DTC-SVM 的多电机并联驱动系统[J]. 电机与控制应用,2014, 41(6): 5.
- [8] 王壮,王英,徐诗孟. 单逆变器驱动高速列车并联牵引电机控制策略[J]. 电气自动化,2019,41(5): 4.
- [9] 李会子,郭其一. 地铁列车最优黏着控制研究[J]. 铁道机车车辆,2019,39(5): 117.
- [10] 高翔,郭晓燕. 考虑轮轨作用的地铁车辆电机负载模型研究[J]. 铁道机车车辆,2013,33(3): 68.
- [11] 林文立. 地铁动车牵引传动系统分析、建模及优化[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [12] 张华强,王新生,魏鹏飞,等. 基于空间矢量调制的直接转矩控制算法研究[J]. 电机与控制学报,2012,16(6): 13.
- [13] 王凯,孙海阳,张露锋,等. 永磁同步电机转子磁极优化技术综述[J]. 中国电机工程学报,2017,37(24): 7304.
- [14] 陈益广,韩柏然,沈勇环,等. 永磁同步推进电机电磁振动分析[J]. 电工技术学报,2017,32(23): 16.
- [15] MA C, ZUO S. Black-box method of identification and diagnosis of abnormal noise sources of permanent magnet synchronous machines for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5538.

(上接第 40 页)

(上接第 76 页)