

感应电机无权重分配有限集模型预测控制设计

顾明¹, 邢勐², 葛贤军³

(1. 中国石油化工股份有限公司 广州分公司, 广东 广州 510725;

2. 中国石油化工股份有限公司 炼油事业部, 北京 100728;

3. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

摘要: 针对感应电机驱动系统采用有限集模型预测控制时权重系数整定复杂的问题, 设计一种感应电机驱动系统的无权重分配优化有限集模型预测控制方案。新方案采用顺序级联预测控制形式, 即对系统中的每个控制目标使用单独的成本函数优选开关状态, 可在无权重系数设置的同时完成转矩和磁链预测控制。相对于传统方案, 新有限集模型预测控制方案逻辑简单、易于实施, 可规避与权重系数设置有关的所有问题。利用感应电机驱动系统测试平台开展了实验, 实验结果验证了新方案可实现快速动态, 控制性能较好。

关键词: 感应电机; 驱动系统; 模型预测控制; 无权重分配

中图分类号: TM921 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22497

Design of the Finite Set Model Predictive Control Without Weight Distribution for Induction Motor

GU Ming¹, XING Meng², GE Xianjun³

(1. Guangzhou Branch Company, Sinopec Corp, Guangzhou 510725, Guangdong, China;

2. Refinery Business Division, Sinopec Corp, Beijing 100728, China;

3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the complex problem of weight factors tuning when the induction motor driving system adopts the finite set model predictive control, an optimal finite set model predictive controller without weight distribution for induction motor driving system was designed. In the new scheme, the form of sequential cascading prediction was adopted, that is, independent cost functions were used to select the switching state for each control target in the system, and the torque and flux linkage predictive control could be completed without setting the weight factors. Compared with the traditional scheme, the new finite set model predictive control scheme is simple in logic and easy to implement, and can avoid all problems related to the setting of weight factors. Experiments were carried out using the induction motor driving system test platform, and the experimental results verify that the new scheme can achieve fast dynamics and better control performance.

Key words: induction motor; drive system; model predictive control; no weight distribution

感应电机驱动控制一直是电力传动领域最为经典和应用价值最广泛的研究内容之一^[1-2]。随着新能源汽车产业的爆炸式发展, 电机驱动系统的控制策略更是引起了学术界和工业界广泛的关注^[3-4]。

目前感应电机控制的方案主要有磁场定向控制方案和直接转矩控制(direct torque control,

DTC)方案。前者于1972年首次提出^[5-6], 而DTC则是于稍晚的1986年发明^[7], 但当时都没有现代化的微处理器芯片。此后随着微处理器的发展, 磁场定向控制和DTC技术都得到了一些改进和发展^[8-9], 性能虽逐步提升, 但理论上无重大变化。随着微处理器实时计算能力从量变到质变, 各种新颖的计算密集型算法得以在电机驱动控制中

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903300); 国家自然科学基金(51737007); 中国石化总部项目(2300934892)

作者简介: 顾明(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: guggminn229@126.com

通讯作者: 葛贤军(1978—), 男, 硕士, 副教授, Email: gexj2010@163.com

应用,其中最具有代表性的就是有限集模型预测控制^[10-14],其已用于感应电机^[12]、永磁同步电机^[13]和开关磁阻电机^[14]等。有限集模型预测控制中的控制集合即电力电子装置的开关状态组合,由于有效开关状态组合是有限的,故数学上属于有限集。基于有限集和预测模型可进行成本函数评估,从而选择最优开关状态输出,其中成本函数则是根据系统约束和控制目标设计,故有限集模型预测控制可处理系统非线性和多个控制目标,且其计算密集,故具有动态响应极快的优势。

目前,绝大多数文献中用于感应电机转矩和磁链控制的有限集模型预测控制器均使用了含多个权重系数的单个成本函数设计^[15-17]。而权重系数的选择则是一个难度较大的问题,通常是由反复试验实际测试得到的,这将耗费大量时间,在工程上也难以实践^[18-20]。

本文提出了一种用于感应电机驱动系统的无权重分配优化有限集模型预测控制方案,可实现预测转矩和磁链控制。新方案是一种顺序模型预测控制,不使用权重系数,而是对系统中的每个控制目标使用单个成本函数的顺序结构,其中第一顺序为转矩控制,第二顺序为磁链控制。这便以一种非常简单的逻辑解决了与权重系数设置有关的所有问题。最后,实验结果验证了所设计的优化有限集模型预测控制器的性能。

1 感应电机驱动系统数学模型

1.1 逆变器数学模型

使用三相两电平逆变器的常规感应电机驱动系统电路见图1,逆变器每相桥臂两个功率开关器件以互补方式工作,采用开关函数 S_a, S_b 和 S_c 描述,其中上管导通为“1”,反之为“0”。

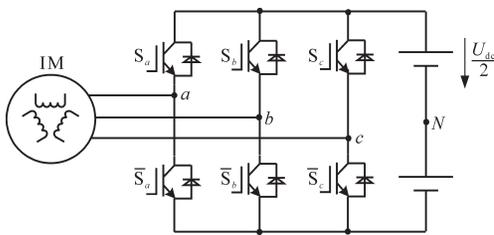


图1 逆变器电路拓扑

Fig.1 Circuit topology of the inverter

图2给出了空间矢量图,图中包含有8个电压矢量,分别为 $u_0, u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$ 和 u_7 ,其中 u_0 和 u_7 为零矢量。电压矢量和开关状态之间的对

应关系见表1。

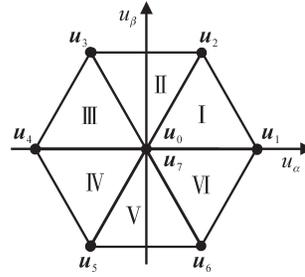


图2 空间矢量图

Fig.2 Diagram of the space vectors

表1 电压矢量和开关状态之间的对应关系

Tab.1 Correspondence between voltage vectors and switching states

电压矢量	开关状态			矢量分解	
	S_a	S_b	S_c	u_α	u_β
u_0	0	0	0	0	0
u_1	1	0	0	$2U_{dc}/3$	0
u_2	1	1	0	$U_{dc}/3$	$\sqrt{3}U_{dc}/3$
u_3	0	1	0	$-U_{dc}/3$	$\sqrt{3}U_{dc}/3$
u_4	0	1	1	$-2U_{dc}/3$	0
u_5	0	0	1	$-U_{dc}/3$	$-\sqrt{3}U_{dc}/3$
u_6	1	0	1	$U_{dc}/3$	$-\sqrt{3}U_{dc}/3$
u_7	1	1	1	0	0

描述三相两电平逆变器的数学模型为

$$u_a = S_a U_{dc} / 2 \quad (1)$$

$$u_b = S_b U_{dc} / 2 \quad (2)$$

$$u_c = S_c U_{dc} / 2 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: u_a, u_b, u_c 为逆变器三相输出电压; U_{dc} 为直流电压; u_α, u_β 为逆变器输出电压 α, β 轴分量。

1.2 感应电机数学模型

将定子磁链和电流作为状态变量,可得到感应电机数学模型为

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \quad (5)$$

$$0 = R_r i_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\frac{\omega}{p} \Psi_r \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \Psi_r = L_r i_r + L_m i_s \end{cases} \quad (7)$$

$$T = 3pL \Psi_s \otimes i_s / 2 \quad (8)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_L \quad (9)$$

式中: u_s 为定子电压矢量; i_s, i_r, Ψ_s, Ψ_r 分别为定、转子电流和磁链矢量; R_s, L_s, R_r, L_r 分别为定、转子电阻和电感; L_m 为励磁电感; ω 为转子转速; T, T_L

分别为电磁转矩和负载转矩; J 为转动惯量; p 为极对数。

2 预测模型

首先在第 k 个采样周期估计定子磁链 Ψ_s 和转子磁链 Ψ_r , Ψ_r 可计算如下:

$$\Psi_r + \tau_r \frac{d\Psi_r}{dt} = L_m i_s \quad (10)$$

其中 $\tau_r = L_r / R_r$

式中: τ_r 为转子时间常数。

设采样周期为 T_s ,使用反向欧拉离散化,估计转子磁链的离散时间域方程为

$$\Psi_{r,k} = L_m \frac{T_s}{\tau_r} i_{s,k-1} + (1 - \frac{T_s}{\tau_r}) \Psi_{r,k-1} \quad (11)$$

式中:下标“ k ”和“ $k-1$ ”分别代表第 k 个和第 $k-1$ 个采样周期。

推导得定子磁链估计方程为

$$\Psi_{s,k} = \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r,k} + (1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}) i_{s,k} \quad (12)$$

通过正向欧拉离散化可得定子磁链预测方程为

$$\Psi_{s,k+1} = \Psi_{s,k} + T_s u_{s,k} - T_s R_s i_{s,k} \quad (13)$$

定子电流预测也可通过正向欧拉离散化获得:

$$i_{s,k+1} = C_1 i_{s,k} + C_2 \Psi_{s,k} + \frac{T_s}{L_\sigma} u_{s,k} \quad (14)$$

其中

$$C_1 = 1 - (\frac{R_\sigma T_s}{L_\sigma})$$

$$C_2 = \frac{L_m T_s}{L_r L_\sigma} (\frac{1}{\tau_r} - j\omega_k)$$

$$L_\sigma = \sigma L_s$$

$$R_\sigma = R_s + (L_m / L_r)^2 R_r$$

式中: R_σ 为等效电阻; L_σ 为漏感。

最后可得预测转矩为

$$T_{k+1} = \frac{3}{2} p |\Psi_{s,k+1} \otimes i_{s,k+1}| \quad (15)$$

3 感应电机优化有限集模型预测控制设计

3.1 无权重分配优化有限集模型预测控制设计

感应电机驱动系统的优化有限集模型预测控制器采用顺序级联预测控制形式,即应用一簇成本函数来实现多个控制目标,当每个控制目标都具有单独的成本函数时,就规避了传统包含权重系数设置的成本函数的使用,从而无复杂的权重系数整定过程。

值得注意的是,在有限集模型预测控制器实现中,由于采样、数字处理和算法执行都需要时间,即非瞬时,故必须考虑最优矢量应用的延迟。为了补偿该延迟,采用两步预测法^[21],即将预测延伸至第 $k+2$ 个预测控制变量以补偿数字延迟。图3为新型无权重分配优化有限集模型预测控制器框图。

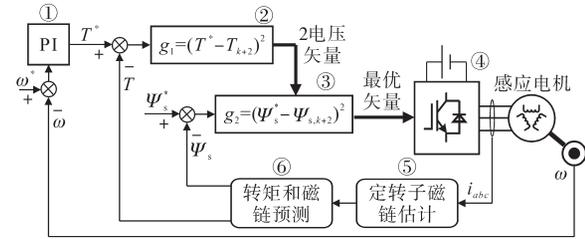


图3 新型无权重分配优化有限集模型预测控制器框图

Fig.3 Block diagram of novel optimal finite set model predictive controller without weight distribution

如图3中所示,首先将参考转速 ω^* 和测量转速 ω 间的误差送入PI调节器以输出参考电磁转矩 T^* ,见标注①。转矩控制的成本函数 g_1 由下式给出:

$$g_1 = (T^* - T_{k+2})^2 \quad (16)$$

其中 $T_{k+2} = \frac{3}{2} p |\Psi_{s,k+2} \otimes i_{s,k+2}|$ (17)

式中: T_{k+2} 为第 $k+2$ 个采样周期的预测电磁转矩。

成本函数 g_1 在图3框图中用②标注,计算中将代入逆变器7个有效电压矢量进行计算和评估,而输出使 g_1 最小(即具有最小转矩误差)的2个电压矢量给到磁链控制成本函数 g_2 。评估 g_2 可得使磁链误差最小的最优矢量, g_2 为

$$g_2 = (\Psi_s^* - \Psi_{s,k+2})^2 \quad (18)$$

其中

$$\Psi_{s,k+2} = \Psi_{s,k+1} + T_s u_{s,k+1} - T_s R_s i_{s,k+1} \quad (19)$$

式中: $\Psi_{s,k+2}$ 为第 $k+2$ 个采样周期的预测磁链。

将前一步骤中得到的2个电压矢量代入式(18)进行计算和评估可得最终输出最优矢量,见图3框图中标注③。此外,图3框图中标注④代表逆变器输出最优电压矢量;标注⑤代表式(11)和式(12)的磁链估计;标注⑥代表式(17)和式(19)的转矩和磁链预测。

图4为新型无权重分配优化有限集模型预测控制的算法流程图。其中主要步骤如下:1)在步长 k 测量定子电流 i_s 和转速 ω ;2)在系统中应用上一步长 $k-1$ 得到的最优矢量;3)在步长 k 估计定

子和转子磁链;4)将7个有效矢量代入 g_1 计算;5)选择使 g_1 最小的2个矢量;6)将选出的2个矢量代入 g_2 最小计算得到最优矢量。

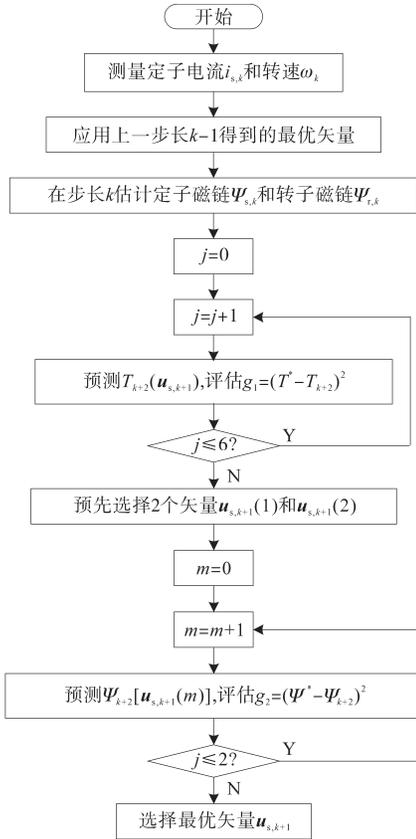


图4 新型无权重分配优化有限集模型预测控制流程图

Fig.4 Flowchart of novel optimal finite set model predictive control without weight distribution

3.2 无权重分配优化有限集模型预测控制设计

图5a和图5b分别为传统DTC方案和传统有限集模型预测控制方案的框图。

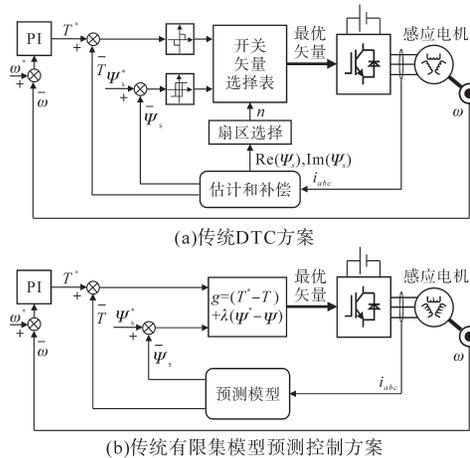


图5 传统DTC方案和有限集模型预测控制方案框图
Fig.5 Block diagram of traditional DTC and finite set model predictive control schemes

对比图4和图5可总结出优化后的新有

限集模型预测控制方案较之传统DTC方案和传统有限集模型预测控制方案的优势如表2所示。

表2 三种方案对比汇总表

方案类型	优化后有限集模型预测控制方案较传统方案的优势
传统DTC方案	传统DTC方案需使用两个滞环比较器,并必须预知每个电压矢量对转矩和磁链的影响。新方案无需使用滞环比较器和分析对每个电压矢量的影响
传统有限集模型预测控制方案	传统有限集模型预测控制方案需进行复杂的权重系数整定。新方案规避了权重系数,无需进行整定和设置

4 实验验证

为验证所设计的应用于感应电机驱动系统的无权重分配优化有限集模型预测控制策略,利用对轴安装的两台2.2 kW鼠笼式感应电机为主体搭建了图6所示的实验平台,开展了测试。其中负载电机由3 kW丹佛斯逆变器(VLT FC302)驱动,而测试主电机由14 kW科尔摩根(SERVOTAR620)逆变器驱动,改进该逆变器后可实现三相IGBT独立控制,控制器由dSPACE实时仿真系统实现,转速由增量编码器测量。

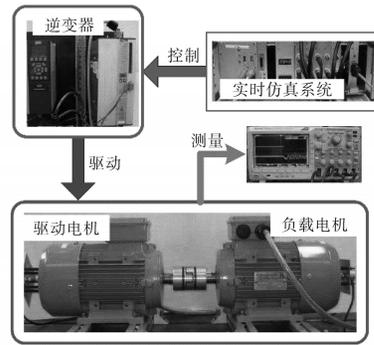


图6 实验平台

Fig.6 Experimental platform

其他实验系统主要参数如下:采样频率 $f_s=16$ kHz,直流电压 $U_{dc}=582$ V,感应电机定子电阻 $R_s=2.68$ Ω,感应电机转子电阻 $R_r=2.13$ Ω,感应电机励磁电感 $L_m=275.1$ mH,感应电机额定转速 $\omega_{nom}=2772$ r/min,感应电机额定转矩 $T_{nom}=7.5$ N·m,感应电机额定电压 $U_{nom}=380$ V,感应电机定子电阻 $L_s=283.4$ mH,感应电机转子电阻 $L_r=283.4$ mH,感应电机极对数 $p=1$,感应电机转动惯量 $J=0.005$ kg/m²。

由于新型无权重系数有限集模型预测控制器已规避权重系数设置,故控制器参数主要是采

样频率和模型参数,其中采样频率为16 kHz,而控制器中感应电机模型参数和实际电机参数保持一致,见上述参数设置。

图7为在新型有限集模型预测控制器作用下的感应电机驱动系统在正、反转测试下的动态响应测试结果波形图。图8为感应电机驱动系统稳态实验波形图。

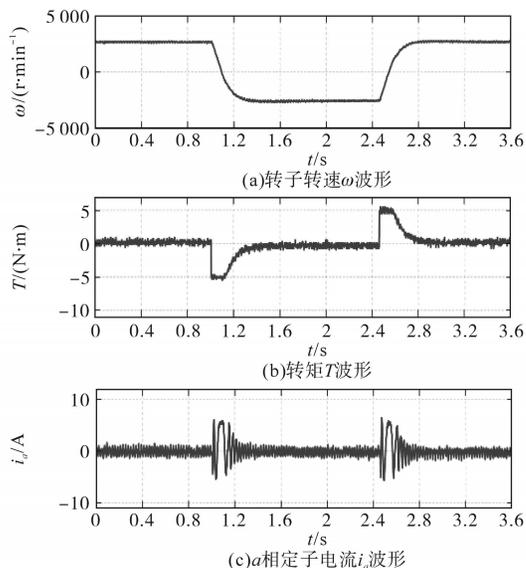


图7 感应电机正、反转测试结果

Fig.7 Test results of the induction motor forward and reverse rotation

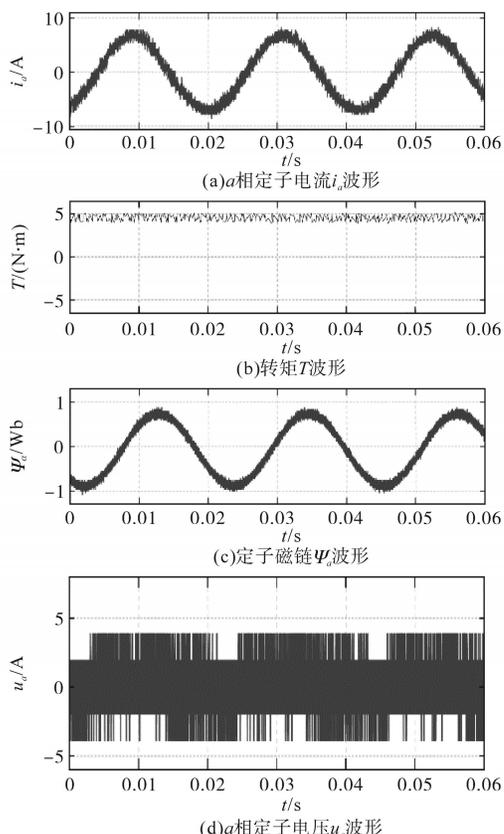


图8 稳态测试结果

Fig.8 Test results of the steady state

图7a~图7c分别为转速 ω 、转矩 T 和 a 相定子电流 i_a 的波形,测试结果显示动态过程定子电流幅值快速增加,从而产生了转矩快速变化,转速则从正转2772 r/min(额定转速)平稳过渡到反转-2772 r/min。

图8a~图8d分别为定子电流 i_a 、转矩 T 、定子磁链 Ψ_a 和定子电压 u_a 波形,其中 u_a 波形显示在有限集模型预测控制器作用下,呈现出不同于传统PWM调制的电压波形。

图9a为转矩参考和实测值细节波形,图9b为对应定子电流 i_a 波形,结果显示转矩动态响应非常快,其上升时间小于1 ms,且无超调,转矩参考跟踪性能非常好,这是有限集模型预测控制器固有的优点。

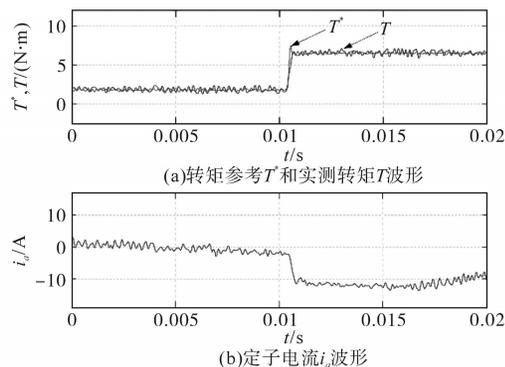


图9 转矩动态细节波形

Fig.9 Detail waves of the torque dynamic

5 结论

就感应电机驱动系统应用有限集模型预测控制器时的优化设计问题,本文提出了一种无权重分配的简便有限集模型预测控制方案。

经由感应电机驱动系统预测模型推导和实际实验测试可总结结论为:

1) 新型有限集模型预测控制方案为每个控制目标赋一个独立的成本函数,并采用顺序级联预测方式进行输出控制,可避免权重系数难以整定的问题,从而降低了控制器设计难度,便于工程实现;

2) 实验结果证实了新方案可对感应电机转矩和磁链有效控制;

3) 新型有限集模型预测控制方案在概念上不同于传统交流电机既有控制策略,其以简单的方式利用了现代微处理器的高运算能力以及实现了与控制对象(即电机和逆变器)的离散时间域模型的内在关联。

进一步的研究方向是考虑新型控制方案的无速度传感器的实现。

参考文献

- [1] 彭忠,郑泽东,刘自程,等.基于虚拟绕组和全阶观测器的五相感应电机无速度传感器容错控制策略[J].电工技术学报,2018,33(21):4949-4961.
Peng Zhong, Zheng Zedong, Liu Zicheng, *et al.* A novel sensorless fault-tolerant control of five-phase induction machine using virtual winding and full-order observer[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(21):4949-4961.
- [2] 孙嘉伟,郑泽东,李永东.无差拍直接转矩控制的MRAS参数辨识方法[J].电气传动,2018,48(5):3-7.
Sun Jiawei, Zheng Zedong, Li Yongdong. Parameter identification based on MRAS deadbeat-direct torque and flux control[J].Electric Drive,2018,48(5):3-7.
- [3] 刘和平,刘庆,张威,等.电动汽车用感应电机削弱振动和噪声的随机PWM控制策略[J].电工技术学报,2019,34(7):1488-1495.
Liu Heping, Liu Qing, Zhang Wei, *et al.* Random PWM technique for acoustic noise and vibration reduction in induction motors used by electric vehicles[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(7):1488-1495.
- [4] 张镇东,杜倩.基于准Z源逆变器的电动汽车调速策略[J].微电机,2020,53(2):91-96.
Zhang Zhendong, Du Qian. Implementation of quasi-Z source inverter for the speed governing strategy for electric vehicle[J].Micromotors,2020,53(2):91-96.
- [5] Blaschke F. The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control system for rotating field machines[J].Siemens Review,1972,34(5):217-219.
- [6] Gabriel R, Leonhard W, Nordby C J. Field-oriented control of a standard AC motor using microprocessors[J].IEEE Transactions on Industry Applications,1980,16(2):186-192.
- [7] Takahashi I, Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor[J].IEEE Transactions on Industry Applications,1986,22(5):820-827.
- [8] 孙晓,史黎明,张志华,等.并联双边直线感应电机次级定向控制[J].中国电机工程学报,2019,39(4):1181-1190.
Sun Xiao, Shi Liming, Zhang Zhihua, *et al.* The secondary field oriented control of parallel connected double sided linear induction motors[J].Proceedings of the CSEE,2019,39(4):1181-1190.
- [9] 于建国,肖海峰,许宇豪.感应电机滑模磁链观测器的直接转矩控制研究[J].控制工程,2019,26(4):735-739.
Yu Jianguo, Xiao Haifeng, Xu Yuhao. Novel flux sliding-mode observer for direct torque controlled induction motor driving systems[J].Control Engineering of China,2019,26(4):735-739.
- [10] 赵争鸣,施博辰,朱义诚.高压大容量电力电子混杂系统控制技术综述[J].高电压技术,2019,45(7):2017-2027.
Zhao Zhengming, Shi Bochen, Zhu Yicheng. Control technologies for power electronic hybrid systems in high-voltage high-power applications: a review[J].High Voltage Engineering,2019,45(7):2017-2027.
- [11] 郭楚佳,燕天,张爱民,等.离散集模型预测控制在电力电子装置中的应用[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(5):167-171.
Guo Chujia, Yan Tian, Zhang Aimin, *et al.* Applications of finite control set model predictive control in power electronics device[J].Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2018,39(5):167-171.
- [12] 齐昕,吴文昊,吴琳,等.基于时间辅助信息的感应电机预测电流控制[J].中国电机工程学报,2019,39(16):4927-4934.
Qi Xin, Wu Wenhao, Wu Lin, *et al.* Predictive current control of induction machines based on time auxiliary information[J].Proceedings of the CSEE,2019,39(16):4927-4934.
- [13] 谢云辉,郑常宝,胡存刚,等.永磁同步电机模型预测的优化控制策略[J].电力电子技术,2019,53(7):39-42.
Xie Yunhui, Zheng Changbao, Hu Cungang, *et al.* Optimization of model prediction control for permanent magnet synchronous motor[J].Power Electronics,2019,53(7):39-42.
- [14] 颜宁,曹鑫,张蕾,等.基于直接转矩控制的开关磁阻电机模型预测控制方法[J].中国电机工程学报,2017,37(18):5446-5453.
Yan Ning, Cao Xin, Zhang Lei, *et al.* Direct torque control-based model predictive control of switched reluctance motors[J].Proceedings of the CSEE,2017,37(18):5446-5453.
- [15] 郑泽东,陈宁宁,李永东.基于模型预测控制的异步电机弱磁控制新方法[J].电工技术学报,2014,29(3):33-40.
Zheng Zedong, Chen Ningning, Li Yongdong. A novel flux weakening method for induction motors based on model predictive control[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(3):33-40.
- [16] 缪仲翠,余现飞,张文宾,等.三相六开关容错逆变器驱动异步电机FCS-MPTC[J].控制与决策,2020,35(6):1377-1383.
Miao Zhongcui, Yu Xianfei, Zhang Wenbing, *et al.* Three-phase six-switch fault-tolerant inverter drives induction motor FCS-MPTC[J].Control and Decision,2020,35(6):1377-1383.
- [17] 陶雪华,彭喜英.五相感应电机有限控制集模型预测容错控制[J].电气传动,2019,49(8):17-21.
Tao Xuehua, Peng Xiying. Finite control set model predictive fault tolerant control for five-phase induction motor[J].Electric Drive,2019,49(8):17-21.
- [18] 史婷娜,杨雨要,周湛清,等.基于二次型价值函数的双电机转矩同步系统有限集模型预测控制[J].中国电机工程学报,2019,39(15):4531-4541.
Shi Tingna, Yang Yuyao, Zhou Zhanqing, *et al.* FCS-MPC for dual-motor torque synchronization system based on quadratic form cost function[J].Proceedings of the CSEE,2019,39(15):4531-4541.

(下转第15页)

- tuator [J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2012, 20(5): 1133–1145.
- [11] Isiet M, Gadala M. Sensitivity analysis of control parameters in particle swarm optimization[J]. Journal of Computational Science, 2020, 41(1): 101086.
- [12] Bian Qi, Nener B, Li Ting, *et al.* Multimodal control parameter optimization for aircraft longitudinal automatic landing via the hybrid particle swarm-BFGS algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(12): 4482–4491.
- [13] Wang Pengfei, Yan Xu, Zhao Fuyu. Multi-objective optimization of control parameters for a pressurized water reactor pressurizer using a genetic algorithm[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 124: 9–20.
- [14] Feng Hao, Yin Chenbo, Ma Wei, *et al.* Parameters identification and trajectory control for a hydraulic system [J]. ISA Transactions, 2019, 92(8): 228–240.
- [15] Ochoa P, Castillo O, Soria J. Optimization of fuzzy controller design using a differential evolution algorithm with dynamic parameter adaptation based on type-1 and interval type-2 fuzzy systems[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2020, 24(1): 193–214.
- [16] 刘若辰, 李建霞, 刘静, 等. 动态多目标优化研究综述[J]. 计算机学报, 2020, 43(7): 1246–1278.
Liu Ruochen, Li Jianxia, Liu Jing, *et al.* A survey on dynamic multi-objective optimization[J]. Chinese Journal of Computers, 2020, 43(7): 1246–1278.
- [17] 周英超, 常思勤, 李波, 等. 机械式自动变速器直线换挡执行器位移串级控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(7): 1–7.
Zhou Yingchao, Chang Siqin, Li Bo, *et al.* Position cascade control for a linear gearshift actuator in automated mechanical transmission[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(7): 1–7.
- [18] Swevers J, Ai-bender F. An integrated friction model structure with improved presliding behavior for accurate friction compensation [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(4): 675–686.
- [19] Liu Hao, Zhang Jiansong, Xi Jianxiang, *et al.* Robust controller design for uncertain delayed systems and its applications to hy-
- personic vehicles[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(4): 1579–1588.
- [20] Lu Jiayu, Chang Siqin. Precise motion control of an electromagnetic valve actuator with adaptive robust compensation of combustion force[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(4): 1750–1770.
- [21] 王东, 宋保业. 基于PSO的永磁同步电机分数阶滑模控制器设计[J]. 电气传动, 2020, 50(7): 8–12.
Wang Dong, Song Baoye. Design of fractional-order sliding mode controller for permanent magnet synchronous motor based on PSO [J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 8–12.
- [22] 路艳洁, 席志红, 王姜铂. FFT法与数字相关法在相位测量上的比较[J]. 信息技术, 2007(12): 105–108.
Lu Yanjie, Xi Zhihong, Wang Jiangbo. Analysis and comparison between FFT and digital correlation theory in phase difference measurement[J]. Information Technology, 2007(12): 105–108.
- [23] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]// International Conference on Networks. IEEE, 2002: 1942–1948.
- [24] Lee J H, Song J Y, Kim D W, *et al.* Particle swarm optimization algorithm with intelligent particle number control for optimal design of electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1791–1798.
- [25] 李志刚, 吴文传, 张伯明, 等. 一种基于高斯罚函数的大规模无功优化离散变量处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 68–76, 10.
Li Zhigang, Wu Wenchuan, Zhang Boming, *et al.* A large-scale reactive power optimization method based on gaussian penalty function with discrete control variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 68–76, 10.
- [26] 张晓莉, 王秦飞, 冀汶莉. 一种改进的自适应惯性权重的粒子群算法[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(3): 66–70.
Zhang Xiaoli, Wang Qinfei, Ji Wenli. An improved particle swarm optimization algorithm for adaptive inertial weights[J]. Microelectronics & computer, 2019, 36(3): 66–70.

收稿日期: 2020-09-25

修改稿日期: 2020-11-11

(上接第8页)

- [19] 牛峰, 韩振铎, 黄晓艳, 等. 永磁同步电机模型预测磁链控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(3): 34–41.
Niu Feng, Han Zhenduo, Huang Xiaoyan, *et al.* Model predictive flux control for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(3): 34–41.
- [20] 林泓涛, 姜久春, 贾志东, 等. 权重系数自适应调整的混合储能系统多目标模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5538–5547.
Lin Hongtao, Jiang Jiuchun, Jia Zhidong, *et al.* Multi-objective model predictive control for hybrid energy storage system with adaptive adjustment of weight coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5538–5547.
- [21] Cortes P, Rodriguez J, Silva C, *et al.* Delay compensation in model predictive current control of a three-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59(2): 1323–1325.

收稿日期: 2020-09-29

修改稿日期: 2020-10-20