

doi: 10.7690/bgzd.2020.03.010

改进型偏差耦合结构的多电机同步控制系统

何 晋, 曹鲁成, 李 珂, 杨 凡, 周石金, 苏 颖
(云南民族大学电气信息工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为解决多电机同步控制难以满足高精度控制和比例同步控制的问题, 提出一种改进型偏差耦合控制结构系统。根据每台电机的运行状态进行速度补偿, 采用模糊 PID 控制器替换固定增益, 结合速度补偿模块结构原理, 对速度控制器进行改进, 建立永磁同步电动机的控制仿真模型, 并对 3 台电机改进偏差耦合控制进行仿真分析。仿真结果表明: 与传统的固定增益控制策略相比, 该改进型控制系统的自适应模糊 PID 控制策略具有更高的同步稳定性。

关键词: 多电机; 同步控制; 永磁同步电机; 改进偏差耦合

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Multi-motor Synchronization Control System with Improved Deviation Coupling Structure

He Jin, Cao Lucheng, Li Ke, Yang Fan, Zhou Shijin, Su Ying

(College of Electrical Information Engineering, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to solve the problem that multi-motor synchronization control can not meet high precision control and proportional synchronization control, an improved deviation coupling control structure system is proposed. According to the running state of each motor, speed compensation is carried out, and fixed gain is replaced by fuzzy PID controller. Combining with the structure principle of speed compensation module, the speed controller is improved. The control simulation model of permanent magnet synchronous motor is established, and the improved deviation coupling control of three motors is simulated and analyzed. The simulation results show that compared with the traditional fixed gain control strategy, the adaptive fuzzy PID control strategy of the improved control system has higher synchronization stability.

Keywords: multi-motor; synchronous control; permanent magnet synchronous motor; improved bias coupling

0 引言

电机的控制系统对工业生产来说是十分重要的, 因此, 生产者对电机的控制系统要求很高^[1]。近年来, 在绝大多数的产业生产开发过程中, 单纯的单电机独立作业模式已不能达到生产的标准, 尤其是冶金、造纸、数控机床等产业。这些工业生产需要比较高的精准度, 1 台电机无法达到理想的效果, 往往需要多台电机进行同步运转。在生产要求很高的领域中, 高性能的控制系统显得尤为重要。笔者在偏差耦合控制结构的基础上, 对其进行改进, 建立仿真并验证其同步性。

1 偏差耦合控制

偏差耦合控制结构如图 1 所示。偏差耦合是通过交叉耦合改变得来的, 原理是根据每台电机的运行状态进行相应的速度补偿。偏差耦合的补偿信号是由 1 台电机的反馈与其他的电机反馈偏差乘以相应的增益后再相加得到^[2]。

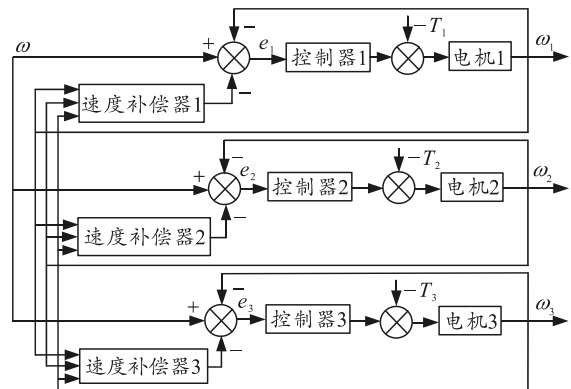


图 1 偏差耦合控制结构

图中的控制器 1、2、3 主要是由跟踪误差控制器组成, 其结构如图 2 所示。

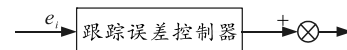


图 2 偏差耦合控制器结构

从图 1 可以看出, 在这种偏差耦合控制中速度反馈模块起到决定性作用。笔者以第 1 台电机为例, 其速度反馈模块结构如图 3 所示。

收稿日期: 2019-12-08; 修回日期: 2019-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61365007)

作者简介: 何 晋(1965—), 男, 云南人, 博士, 教授, 从事模式识别与电机控制研究。E-mail: 52268556@qq.com。

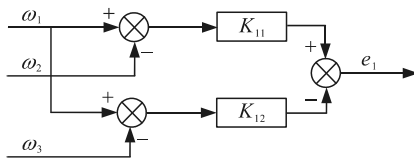


图 3 第 1 台电机速度反馈模块结构

图中的 K_{11} 、 K_{12} 为其反馈增益系数，目的是为了补偿电机之间转动惯量的不同，其大小值可以表示为

$$K_{ir} = J_i / J_r \quad (1)$$

由于文中选取的电机特性一样，因此，增益都是 1。从图 3 可知，第 1 台电机的速度补偿值用下式表示：

$$e_1 = K_{12}(\omega_1 - \omega_2) + K_{13}(\omega_1 - \omega_3) \quad (2)$$

同理可以得到第 2 台电机的速度补偿值：

$$e_2 = K_{21}(\omega_2 - \omega_1) + K_{23}(\omega_2 - \omega_3) \quad (3)$$

第 3 台电机的速度补偿值用下式表示：

$$e_3 = K_{31}(\omega_3 - \omega_1) + K_{32}(\omega_3 - \omega_2) \quad (4)$$

2 改进型偏差耦合控制结构设计

速度补偿模块是控制部分的核心，但只是由相应电机速度偏差乘以增益后相加得到，没有包括另外电机的反馈速度与给定速度的误差^[3]。当其误差存在较大情况时，每个电机之间会存在着较大的误差；因此，笔者对其改进得到一种改进型偏差耦合控制。下面分完全同步和比例同步 2 种情况进行分析，原理如图 4 所示。

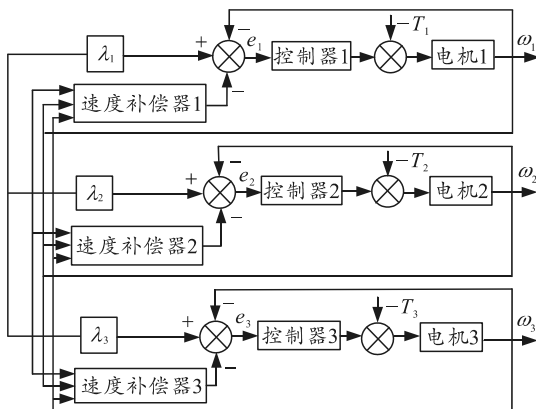


图 4 改进型偏差耦合控制结构

2.1 改进型偏差耦合完全同步控制仿真

图 4 中的 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为同步比例系数，当 $\lambda_i (i=1, 2, 3)$ 均为 1 时，就是完全同步控制，接下来对其进行改进。

首先设定一个速度评价，由函数关系进行表示，其本身特性就是与各个电机速度都存在相应的关

系^[4]。文中的函数与每个电机的速度存在某种必然联系，可以用平均值来进行表示：

$$\omega_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (5)$$

式中： ω_p 代表平均值； ω_i 表示第 i 台电机的速度； n 表示有多少台电机。定义 $\varepsilon_j = \omega_j - \omega_p$ ， ε_j 定义成第 j 台电机的评价跟随误差， ω_j 表示成第 j 台电机速度。

笔者设计 3 台电机进行仿真分析，其中速度补偿模块如图 5 所示。

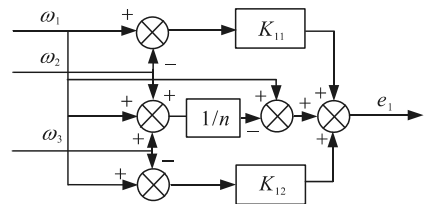


图 5 改进速度补偿模块结构

第 1 台电机的速度补偿值用下式表示：

$$e_1 = K_{11}(\omega_1 - \omega_2) + K_{12}(\omega_1 - \omega_3) + \varepsilon_1 \quad (6)$$

图 5 中： n 的大小为 3，由于 3 台电机一样，所以增益均为 1。式子中的 ε_1 为第 1 台电机的评价跟随误差，用下式表示：

$$\varepsilon_1 = \omega_1 - \omega_p \quad (7)$$

式中： ω_1 为第 1 台电机的反馈速度； ω_p 为 3 台电机的平均速度。

同理可以得出，第 2 台电机的速度补偿值为：

$$e_2 = K_{21}(\omega_2 - \omega_1) + K_{23}(\omega_2 - \omega_3) + \varepsilon_2 \quad (8)$$

第 3 台电机的速度补偿值为：

$$e_3 = K_{31}(\omega_3 - \omega_1) + K_{32}(\omega_3 - \omega_2) + \varepsilon_3 \quad (9)$$

在 Matlab 中建立 3 台电机改进偏差耦合控制仿真，仿真条件设置：初始给定电机的转速 1 000 r/min，仿真时间为 0.4 s，刚开始启动时，3 台电机都是空载启动，运行到 0.2 s 时，给予第 1 台电机 $T_1=10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载，可得到每 2 台电机之间的转速差曲线。笔者选取第 1 台电机与第 2 台电机之间，第 2 台与第 3 台电机之间的转速差作为仿真对象^[5]，转速差曲线如图 6—9 所示。

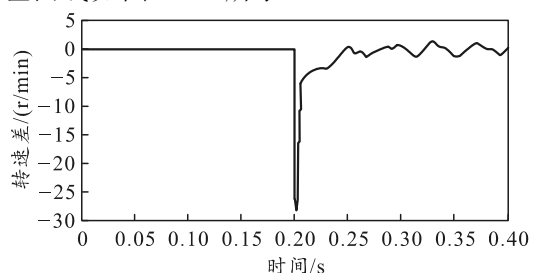


图 6 改进偏差耦合第 1 台与第 2 台间转速差

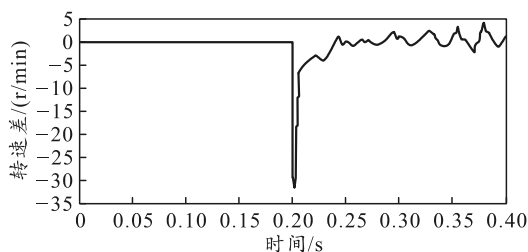


图 7 未改进偏差耦合 1 台与 2 台间转速差

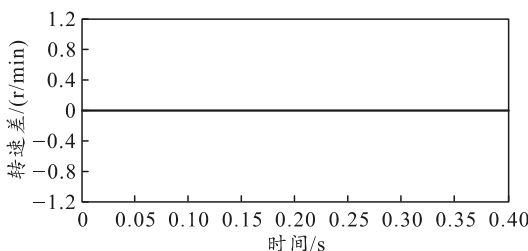


图 8 改进偏差耦合 2 台与 3 台间转速差

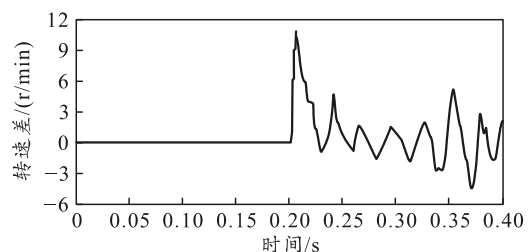


图 9 未改进偏差耦合 2 台与 3 台间转速差

从图 6 中可以看出：当 0.2 s 加入负载时，2 台电机之间瞬间产生的转速差大约为 27 r/min，与图 7 没有改进的偏差耦合方式的 33 r/min 相比降低了 6 r/min，然后在 0.25 s 后振荡的幅度也比较小。图 8 与图 9 的对比说明第 2 台与第 3 台之间转速差为 0，达到了同步的理想效果，证明改进偏差耦合控制仿真可有效降低震荡幅度，同步效果也很好。

2.2 改进型偏差耦合比例同步控制仿真

若电机按一定比例同步运行，则 3 台电机之间转速关系表示为：

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \lambda_1 \omega^* \\ \omega_2 &= \lambda_2 \omega^* \\ \omega_3 &= \lambda_3 \omega^* \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

根据上式可以推算出， $\omega_1/\omega_2=\lambda_1/\lambda_2$ ， $\omega_1/\omega_3=\lambda_1/\lambda_3$ ， $\omega_2/\omega_3=\lambda_2/\lambda_3$ ，显然 3 台电机之间存在一定比例关系。同样以第 1 台电机为例，可以得到其跟随误差如下式^[6]所示：

$$e_1 = K_{11}(\omega_1 - \omega_2) + K_{12}(\omega_1 - \omega_3) + \varepsilon_1 \quad (11)$$

根据式(10)和(11)可以推导出：

$$e_1 = K_{11} \left(\frac{\omega_1}{\lambda_1} - \frac{\omega_2}{\lambda_2} \right) + K_{12} \left(\frac{\omega_1}{\lambda_1} - \frac{\omega_3}{\lambda_3} \right) + \varepsilon_1; \quad (12)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\omega_1}{\lambda_1} - 1/3 \left(\frac{\omega_1}{\lambda_1} + \frac{\omega_2}{\lambda_2} + \frac{\omega_3}{\lambda_3} \right) \quad (13)$$

如果使 3 台电机保持同步的关系，即第 1 台需要与其他的跟随误差收敛，可以用下式表示：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{11} \left(\frac{\omega_1(t)}{\lambda_1} - \frac{\omega_2(t)}{\lambda_2} \right) + K_{12} (\omega_1(t)/\lambda_1 - \omega_3(t)/\lambda_3) + \varepsilon_1 = 0 \quad (14)$$

同样这里的增益均为 1，初始给定电机的转速 $\omega^* = 1000 \text{ r/min}$ ，设定的仿真时间为 0.4 s，刚开始启动时，3 台电机都是空载启动，运行到 0.2 s 时，给予第 1 台电机 $T_f=10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载，同步比例系数取 $\lambda_1=1$ ， $\lambda_2=0.5$ ， $\lambda_3=0.25$ 。在保证其他条件相同的状态下，进行 Matlab 仿真，仿真时间为 0.4 s，刚开始启动时，3 台电机都是空载启动，运行到 0.2 s 时，给予第 1 台电机 $T_f=10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载，可得到每 2 台电机之间的转速差曲线。笔者选取第 1 台电机与第 2 台电机之间，第 2 台与第 3 台电机之间的转速差作为仿真对象，其转速差曲线如图 10、图 11。

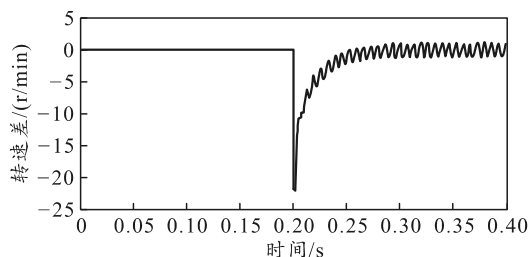


图 10 第 1 台电机与第 2 台电机转速差

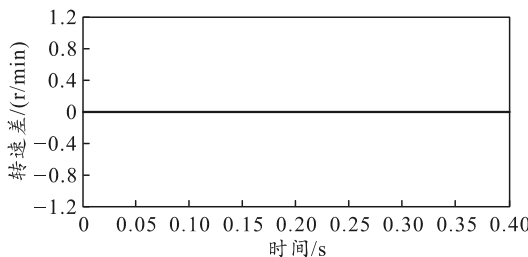


图 11 第 2 台电机与第 3 台电机转速

上图表明：当第 1 台电机加入负载时，第 1 台与第 2 台的转速差变化曲线与完全同步控制出现了类似的变化，第 2 台与第 3 台之间转速差为 0，达到了同步的理想效果。证明这种改进型的偏差耦合方式也符合比例同步控制。

3 基于模糊 PID 的改进型偏差耦合控制

在控制系统中，通常会结合实际产生的误差及其变化率，然后经过一系列的数据调整^[7]。由于固定增益只包括了电机的转动惯量，当负载变化的波动很大时，会出现相应的误差。其中任意 1 台电机

速度的波动对其他电机来说都是一种干扰，可预见其处在一直变化的状态中^[8]。笔者采用模糊 PID 控制器替换固定增益，如果电机出现波动，模糊 PID 就产生相应的作用，快速减少各个电机之间的跟随误差，使其趋于稳定状态并且趋于 0，其结构如图 12 所示。

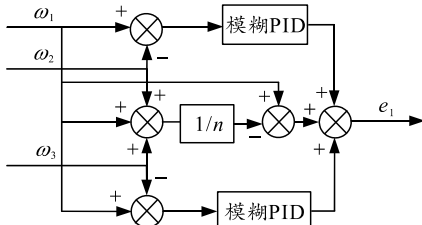


图 12 加入模糊 PID 改进速度补偿模块结构

模糊 PID 的改进型偏差耦合控制仿真。根据上述速度补偿模块结构原理图以及模糊 PID 控制系统，将之前改进的速度补偿器中的增益 K_{11} 和 K_{12} 换成模糊 PID 控制器，得到新的速度补偿器，然后对电机分别在完全同步与比例同步仿真情况下进行 Matlab 仿真，并进行分析^[9]：由于反应的过程较慢，为了方便调试，将仿真时间设定为 0.3 s，刚开始启动时，3 台电机都是空载启动，运行到 0.2 s 时，给予第 1 台电机 $T_f=10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载，同步比例系数取 $\lambda_1=1, \lambda_2=0.5, \lambda_3=0.25$ 得到每 2 台电机之间的转速差曲线，笔者选取第 1 台电机与第 2 台电机之间，第 2 台与第 3 台电机之间的转速差作为仿真对象，研究加入模糊 PID 控制系统后的仿真效果。图 13 是加入模糊 PID 控制系统后电机完全同步仿真转速差曲线图，图 14 是未加入模糊 PID 控制系统后电机完全同步仿真转速差曲线。

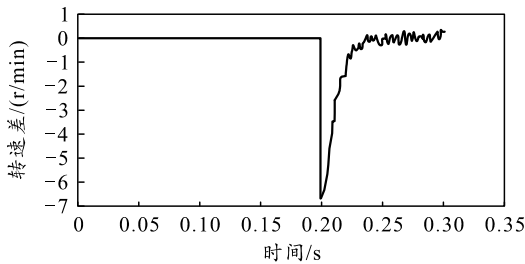


图 13 加入模糊 PID 两电机转速差

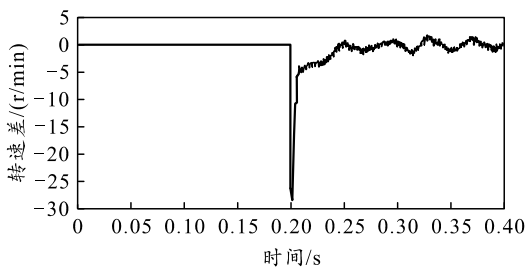


图 14 未加入模糊 PID 两电机转速差

1) 完全同步控制情况。

从图 13 可以看出：在完全同步情况下，当第 1 台电机加入负载后，第 1 台电机与第 2 台电机之间的转速差大约为 6.5 r/min，相比于图 14 没有加入模糊 PID 控制器的转速差 27 r/min，效果更好。并且在 0.25 s 后，振荡幅度基本上趋于 0，几乎达到理想的效果。故加入模糊 PID 改进后的偏差耦合控制方法，其同步精度更加准确，抗干扰性更强。

2) 比例同步控制情况。

从图 15、16 可以看出：在比例同步的情况下，加入模糊 PID 的改进型控制系统中，当第 1 台电机加入负载时，第 1 台与第 2 台之间转速差的波动峰值为 10 r/min，并且没有出现明显振荡，一直趋于 0，转速误差很小，达到了理想的效果。证明加入模糊 PID 的改进型系统比未加入模糊 PID 的系统具有更好的同步特性和抗干扰能力。

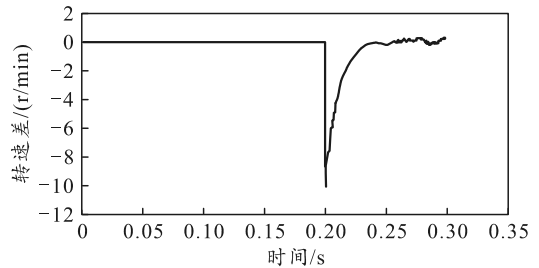


图 15 加入模糊 PID 两电机转速差

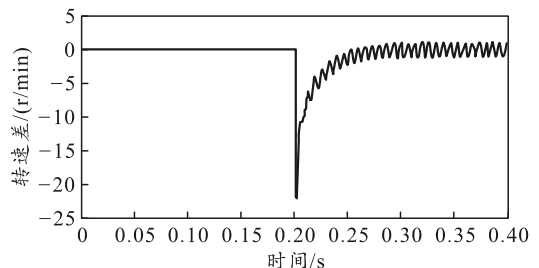


图 16 未加入模糊 PID 两电机转速差

4 结论

笔者提出偏差耦合的控制方法，并在其基础上对速度控制器进行改进，得到一种改进型的控制方法。然后再将模糊 PID 控制系统与之相结合，从完全同步控制和比例同步控制 2 个方面进行仿真研究，并与传统的控制方法进行对比。通过仿真结果可得：电机之间的转速差变化基本稳定在 0 的状态，在一定程度上改善了系统的同步性和抗干扰性。综上所述，笔者设计的基于模糊 PID 改进型偏差耦合结构为有效、可靠的多电机控制方案，具有较高的实际应用价值。

[5] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 孤岛运行交流微电网中分布式储能系统改进下垂控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 180-185.

[6] 孙孝峰, 郝彦丛, 王宝诚, 等. 微电网分布式储能单元荷电状态平衡和电压恢复[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4047-4055.

[7] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371.

[8] RAHBARI-ASR N, ZHANG Y, CHOW M Y. Consensus-based distributed scheduling for cooperative operation of distributed energy resources and storage devices in smart grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(5): 1268-1277.

[9] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Cooperative multi-agent control of heterogeneous storage devices distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2974-2986.

[10] WANG Y, TAN K T, PENG X Y, et al. Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1132-1141.

[11] LI Q F, AYYANAR R, VITTAL V. Convex optimization for DES planning and operation in radial distribution

systems with high penetration of photovoltaic resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 985-995.

[12] JAYASEKARA N, MASOUM M A S, WOLFS P J. Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 250-261.

[13] TAN X Q, WU Y, TSANG D H K. Pareto optimal operation of distributed battery energy storage systems for energy arbitrage under dynamic pricing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(7): 2103-2115.

[14] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 442-450.

[15] 慈松. 能量信息化和互联网化管控技术及其在分布式电池储能系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3643-3648.

[16] BOYD S, EL G L, FERON E. Linear matrix inequality in systems and control theory[Z]. SIAM: Philadelphia, PA, 1994.

[17] RODRIGUES L, BOYD S. Piecewise-affine state feedback for piecewise-affine slab systems using convex optimization[J]. Systems and Control Letters, 2005, 54(9): 835-853.

(上接第 44 页)

参考文献:

[1] 范志龙. 基于永磁同步电机的多电机同步控制系统的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

[2] 彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报, 2013(11): 77-83.

[3] 陆梦羽, 张旭秀, 刘影, 等. 基于改进型的交叉耦合双电机同步控制方法[J]. 大连民族大学学报, 2016(5): 470-473.

[4] 潘亮. 基于模糊控制的多电机同步控制方法[D]. 上海:

东华大学, 2016.

[5] 和佳鑫, 成守宇, 方茂瑶. 多堆核电机组控制策略仿真[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 56-61.

[6] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[J]. Congress on Evolutionary Computation, 2001, 1(12): 101-106.

[7] 徐晓东. 大型液压源温度控制系统研[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[8] 高晗瓔, 孙力, 程树康. 采用模糊控制实现的混合式同步电动机闭环控制[J]. 电气传动, 2003(6): 23-27.

[9] 孙怡. 基于模糊 PID 控制的多电机同步控制系统的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012