

船舶发电机组容错的 StateFlow 模糊 PID 控制研究^①

郑孝常^② 施伟锋 张 威 王桂艳

(上海海事大学电气自动化系 上海 201306)

摘 要 为了提高单个传感器故障情况下船舶柴油发电机组转速的稳定性,运用基于 State Flow 的模糊 PID 容错控制策略研究了船舶柴油发电机组传感器故障后的转速控制。研究中建立了基于 Matlab 的传感器故障模拟模型,基于 StateFlow 的故障判别方法,通过对故障传感器的估算和模糊 PID 控制,实现了对传感器故障后船舶柴油发电机组的转速控制。仿真结果验证了故障模型的正确性和基于 StateFlow 的模糊 PID 控制方法对传感器故障后船舶柴油发电机组转速控制的有效性。上述建模与控制的研究为进行多个传感器故障的容错控制研究奠定了基础。

关键词 船舶发电机组,容错估算,StateFlow,模糊 PID,转速控制

0 引言

容错控制^[1](fault tolerant control, FTC)方法涉及多学科融合的研究领域。某些容错控制方法用冗余来实现故障容错,即在某些部件发生故障的情况下,通过系统重构等进行故障控制,保证设备仍能按原定性能指标继续运行,或以牺牲部分性能为代价,保证设备在规定时间内完成预定功能。容错控制在各领域都有应用,比如以线性参数变化为基础实现对两轮差动机器人进行容错控制^[2]、用硬件和解析冗余对风机机组传感器故障进行容错控制^[3]、基于控制器区域网络的设计对无人机进行容错控制^[4]。未来舰船必须有强大的故障容错能力^[5],因此国内外研究者一直在探索提高控制性能的新方法、新技术,以使整个舰船系统生命力更强。目前研究的内容有通过神经网络对船舶发电机组转速进行容错控制^[6],通过预测故障以减少非必要负荷对船舶发电机组进行容错控制^[7],通过基于参数估计的故障检测和定位对柴油机进行容错控制^[8],以及模糊容错

控制在控制风力柴油混合动力系统传感器故障中的应用^[9]。可见,目前对船舶发电机组容错控制的研究大多集中在基于故障诊断的容错控制、对已知故障预测的容错控制及基于系统重构的容错控制。有关故障传感器的容错估算研究还处于起步阶段。容错估算相对于其他容错控制,其优势在于不需要对系统进行重构和任何结构上的改变,对系统本身没有影响,只需在故障发生时调用规则库进行控制,其对故障反应灵敏的特点对发生故障的系统尤为重要,难点主要是如何提升控制灵敏度。针对这些情况,本研究将 StateFlow 逻辑判别的模糊 PID 容错控制作为控制策略用于船舶发电机组传感器故障后的转速控制,研究中对所建模型进行了仿真验证,将容错控制结果与无故障普通 PID 控制结果、故障时普通 PID 容错控制结果进行了比较。

1 船舶柴油发电机组传感器建模

在船舶柴油发电机组中,主要有以下四种传感器:转速(speed)传感器,节气门(throttle)开度传感

① 高等学校博士学科点专项科研基金(20123121110003),上海海事大学研究生创新基金(2014yex056)和上海海事大学研究生学术新人专项基金(YXR2014031)资助项目。

② 男,1990年生,硕士生;研究方向:船舶柴油发电机组及其电力系统的控制;联系人,E-mail:tianranben@126.com (收稿日期:2015-01-23)

器,进气歧管绝对压力 (manifold absolute pressure, MAP)传感器和废气中氧气含量 (exhaust gas oxygen, EGO) 传感器。

1.1 传感器故障模拟

针对船舶柴油发电机组主要传感器建模的系统如图 1 所示。该模型首先根据实际情况设定各个传感器值的正常范围,并用在这个正常值范围内的数值或者波形模拟正常工况,对于速度传感器、进气歧管绝对压力 (MAP) 传感器和废气中氧气含量 (EGO) 传感器的正常工况值直接从建立的模型中反馈得到,同时用正常值范围外的一个值模拟故障工况,通过一个选择开关切换工况,用来模拟任意一个或者几个传感器故障。

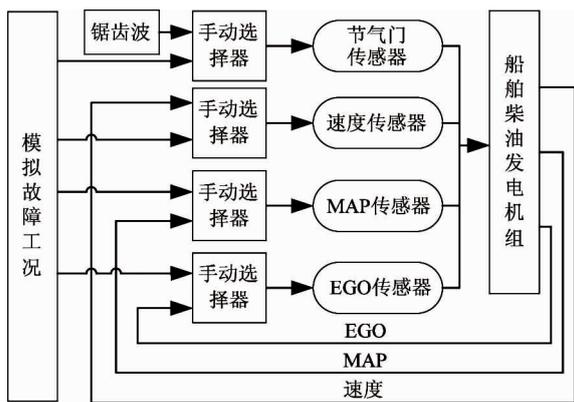


图 1 船舶柴油发电机传感故障模型

1.2 StateFlow 逻辑判别

StateFlow 的原理^[10]基于有限状态机理论。有限状态是指系统含有可数的状态,在相应的状态事件发生时,系统会从当前状态按一定逻辑转移到与之对应的状态。在有限状态机中实现状态的转移是有一定条件的,同时相互转换的状态都会有状态转移事件发生,这样就构成了状态转移图。用 StateFlow 对传感器是否处于正常工况进行逻辑判别,根据设定的数值范围进行故障判别,把这个逻辑判别加在图 1 中的传感器和柴油发电机组之间。如图 2 所示,根据传感器的个数,可能出现的传感器故障的个数为 0、1、2、3、4,将传感器故障划分为正常工况、单个传感器故障及多个传感器故障。

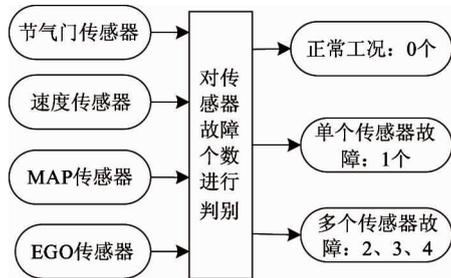


图 2 基于 Stateflow 的传感器故障判别

2 船舶柴油发电机组容错控制原理

船舶在海上航行时,船舶的摇摆、振动等会导致传感器失灵。单个传感器故障发生的概率比较大,若对传感器故障产生误判,会对船舶发电机组带来损害以致造成船舶的损失,影响船舶安全运行,因而对控制单个传感器故障的算法的研究有实际意义。

2.1 单个传感器故障时的容错估算

单个传感器故障时,基本容错估算思想如图 3 所示。由于 EGO (废气中氧气含量) 传感器的特殊性,EGO 不仅与柴油发电机的转速、节气门开度有关,而且还与喷油时刻、燃油质量等诸多因素有关。EGO 的值仅反映燃烧室内的燃烧情况,与其他传感器的数值没有很大的相关性,其值对船舶发电机组的整体控制没有明显的效果,故当 EGO 传感器故障时,仅发出 EGO 传感器故障的报警信号。

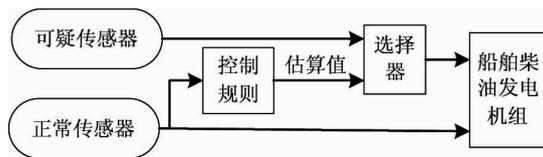


图 3 单个传感器故障容错控制结构图

当可疑传感器 (假设为速度传感器,实际可为速度、节气门开度和 MAP 三个传感器中的任意一个) 经 StateFlow 判定为没有故障时,此时速度传感器的值和其他正常传感器一起对船舶发电机组进行控制,即

$$speed_{out} = speed_{in} \quad (1)$$

当速度传感器有故障时经 StateFlow 判定为故障,此时就没有速度反馈信号,这时就可以通过另外两个

传感器的值和规则库,估算出故障传感器的值,即

$$speed_{out} = \text{Rule}(MAP, throttle) \quad (2)$$

控制规则库为正常工况时的历史记录值,控制规则的训练均采用离线训练,然后再通过选择器选择这个速度估算值对船舶发电机组进行控制。

2.2 船舶柴油发电机转速模糊 PID 控制

船舶柴油发电机组的控制主要包括发电机组电压控制和频率控制,电压控制是通过控制发电机组的励磁系统来实现,频率控制是通过调节原动机的转速来调节。本课题主要对转速控制进行研究。传统的船舶柴油发电机组的调速器是 PID 控制器,而模糊 PID 有更好的动态响应能力^[11,12]。为了使船舶柴油发电机组转速得到更好的动态控制性能,用模糊 PID 控制器代替常规 PID 控制器,如图 4 所示。

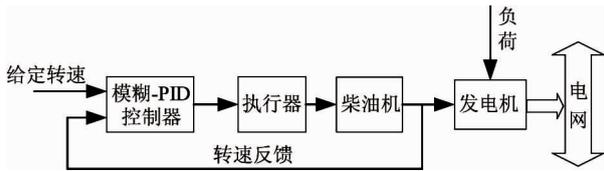


图 4 发电机组转速模糊 PID 控制

2.2.1 模糊 PID 控制器

模糊 PID 控制器^[13]可以实现对系统的动态控制、参数实时调整,模糊推理以偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为系统输入,经模糊规则对 PID 参数 K_p 、 K_i 和 K_d 在线整定,以满足不同的偏差 e 和偏差变化率 e_c 对控制器参数的不同要求,从而使发电机组具有良好的动态性能。

2.2.2 模糊 PID 控制原理

模糊 PID 控制的重要任务是自动整定 PID 参数与偏差 e 、偏差变化率 e_c 之间的模糊关系,在运行中不断检测偏差 e 和偏差变化率 e_c ,根据确定的模糊控制规则来对三个参数进行在线调整,以满足不同 e 和 e_c 对三个参数的不同要求。

模糊 PID 系统有两个输入量 e 和 e_c ,首先对这两个量进行模糊化处理,经模糊规则进行推导,然后再通过解模糊输出三个参数变量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。模糊 PID 系统输入的两个变量 e 和 e_c ,以及输出的三个变量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊子集均为 $\{PB,$

$PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$,子集中的元素分别代表正大、正中、正小、零、负小、负中、负大。设定其论域为 $[-4, 4]$,量化等级为 $[-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4]$ 。由于系统实际输入偏差 E 和偏差变化率可能不在设定的论域内,故在对输入参量进行模糊化处理时需要乘以较小模糊化因子 k_e 和 k_{ec} ,以保证这两个参量在论域范围内;同理,解模糊时,输出的三个参量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 也需要分别乘以解模糊因子 f_p 、 f_i 和 f_d 。

根据各个参量的模糊控制模型和模糊子集隶属度赋值表,应用模糊规则推导出模糊参数矩阵表,并代入下面的计算式计算:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \times f_p \quad (3)$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i \times f_i \quad (4)$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d \times f_d \quad (5)$$

其中, K_p 、 K_i 和 K_d 是整定后的模糊 PID 参数, K_{p0} 、 K_{i0} 和 K_{d0} 为初始值, ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 经模糊规则推导后的输出, f_p 、 f_i 和 f_d 为解模糊因子。

模糊因子、解模糊因子的整定和 PID 参数整定一样,需要在整定规则下,根据实际模型和经验,通过不断的调整,使系统达到最佳控制状态。

2.3 船舶柴油发电机组全局控制

船舶柴油发电机组的控制主要对其转速进行控制,图 5 为容错控制系统结构图。为了简洁的表达,这里只画出了一个转速反馈测量环节,虚线框部分为本课题所设计的控制器,图中故障模拟模块可以同时模拟一个或多个传感器故障。

当系统无传感器故障时,StateFlow 逻辑判别系统为正常工况,把传递过来的速度信号直接传递给模糊 PID 控制器,从而在给定转速下对船舶发电机组转速进行控制。当系统有一个传感器故障时,StateFlow 逻辑判别系统为单个传感器故障,把传递过来的信号经容错估算,并从中分离速度信号送入模糊 PID 控制器中,实现带故障运行,其他信号则引出用于其他控制,比如船舶发电机组的监控、燃烧工况分析等。当有两个或两个以上传感器故障时,StateFlow 逻辑判别系统多个传感器故障,此时直接给油门执行器供油为 0 的指令,使船舶发电机组停机。

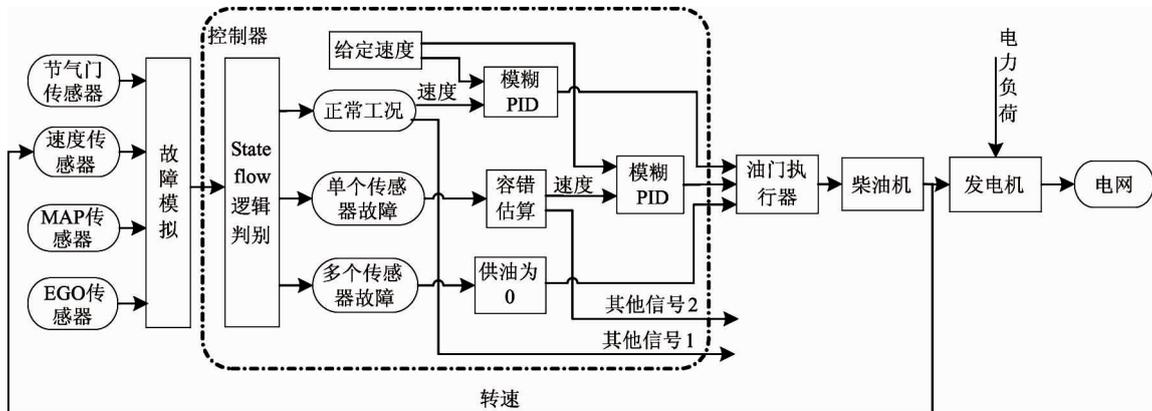


图5 船舶柴油发电机容错控制系统结构图

3 船舶发电机组容错控制仿真

本研究所涉及的传感器故障模拟模型、故障判别模型和容错控制算法,都在 MATLAB/Simulink 的基础上采用变步长的 Runge-Kutta 算法进行了仿真。由于正常工况和多个传感器故障时,实际模型和仿真实现较为简单,且本研究的核心是单个传感器故障时的容错控制,故下文主要介绍单个传感器(速度传感器)故障时的模糊 PID 容错控制。

3.1 StateFlow 逻辑判别建模与仿真

如图6所示,以速度传感器为例,把经故障模拟的数据 $es_i.speed$ 进行判定是否在正常范围内,如果在正常范围内,就把值赋给 $es_o.speed$ 直接输出;如果判定不在正常范围时(传感器故障),立即生成一个 Fail. INC 的广播事件进行扩散,这个广播

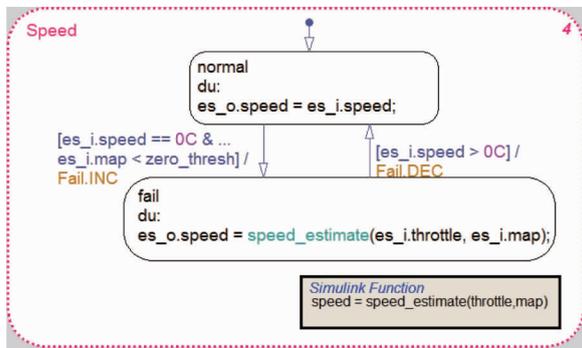


图6 速度传感器逻辑判别

事件就会扩散到图7中,使其从没有故障(None)变为单个故障(One),如果其他传感器也产生 Fail. INC 事件扩散,图7就会根据实际情况判定传感器故障个数增加,最后分为没有故障、单个故障和多个故障输出。当故障的传感器被替换或排除时,会产生一个 Fail. DEC 事件扩散到图7中使传感器故障个数减少。

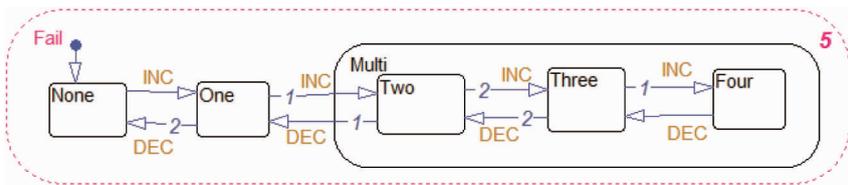


图7 传感器故障个数判别

3.2 容错估算建模

在图6中,当判定为速度传感器故障时,除了产生一个 Fail. INC 事件进行扩散之外,同时对故障速度传感器的值进行估算,通过气门开度、MAP 这两个传感器的数值结合估算规则最后可得到估算速

度值。

3.3 船舶发电机组带负载运行分析

船舶发电机组的转速控制原理如图8所示,图中有两个输入:给定转速 w_{ref} (pu, per unit) 和经故障模拟后的转速 w_x (pu)。两个转速输入主控制器

中,输出一个燃油信号 F 和一个经容错估算后的估算转速信号 $speedx$ (pu),燃油信号作用于油门执行器经积分器得到转矩 $Torque$ (pu),该转矩经过机组

延时环节作用后乘以估算转速,得到柴油原动机输出的机械功率 $Pmec$ (pu)。

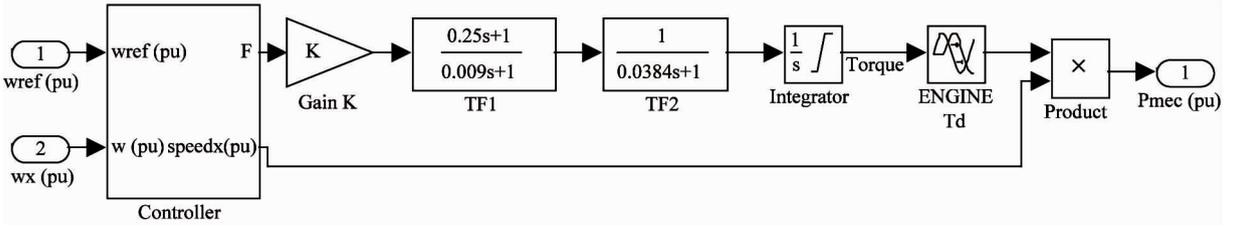


图8 柴油发电机组转速控制模型

船舶发电机组带负载运行结构如图9所示,图中有三个输入量,分别是参考转速 $Wref$ (pu) = 1、参考端电压 $Vtref$ (pu) = 1 和转矩 T ,对于转矩设定一个阶跃信号, $t = 10s$ 时,转矩 T 从 0 上升到 800。柴油发电机组通过控制柴油原动机输出的机械功率

$Pmec$ 和励磁电压 Vf ,实现对发电机组的转速和电压控制,并通过测量模块得到发电机组的实际转速 w (pu)。同时,发电机组向 2250HP (HP, 马力) 的电动机和 1MW (MW, megawatt) 的三相负载供电,测出电动机运行工况下的电网频率。

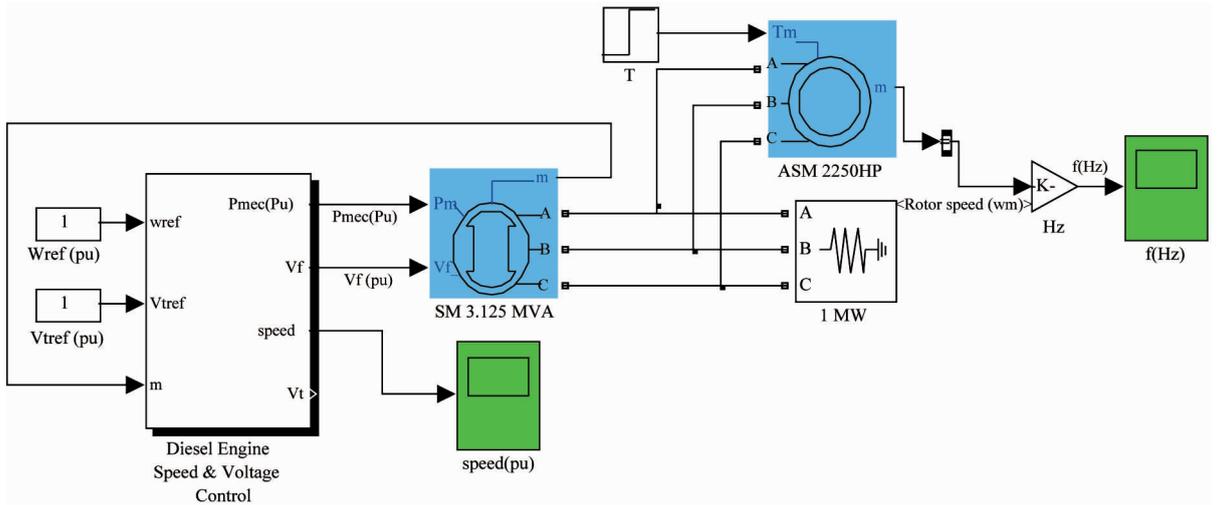


图9 柴油发电机组带负载运行仿真系统

3.4 仿真分析

3.4.1 无故障模糊 PID 控制

模糊 PID 的控制效果如图 10、图 11 所示。在 10s 时负载转矩从 0 突增至 800 (N·m)。图 10 为此状态下原动机转速的波形图,图 11 为此状态下电网的频率波形图。图中实线为在无故障时模糊 PID 控制效果图,虚线为在无故障时普通 PID 控制效果图。模糊 PID 的参数:初始值 $K_{p0} = 4.93$, $K_{i0} = 0.04$, $K_{d0} = 0.25$;模糊化因子 $k_e = 4.23$, $k_{ec} = 0.3$;解模糊因子 $f_p = 0.2$, $f_i = 0.001$, $f_d = 0.01$ 。

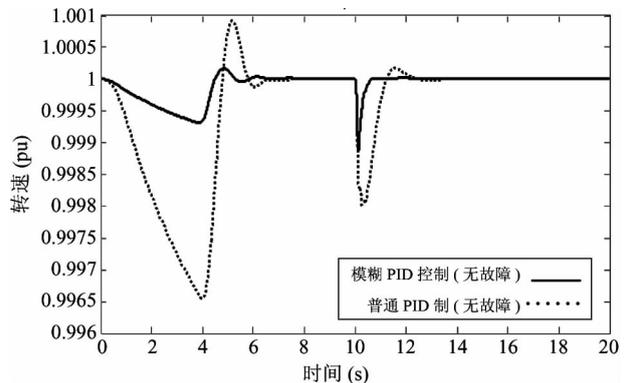


图10 模糊PID控制作用下原动机转速

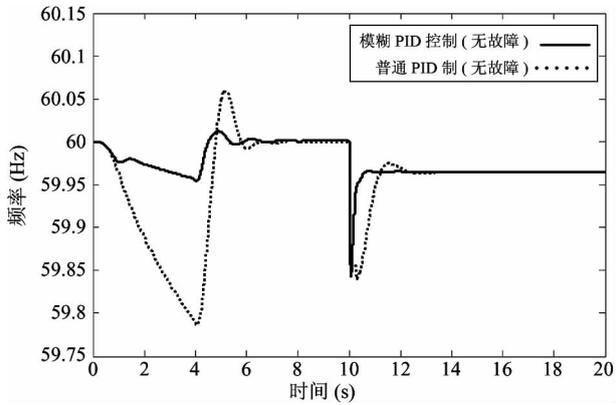


图 11 模糊 PID 控制作用下电网频率波形

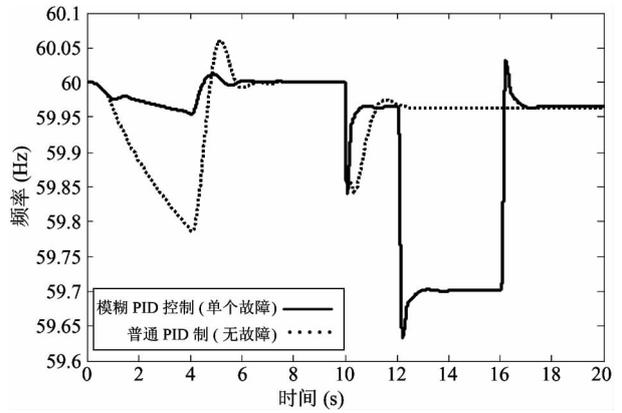


图 13 单个传感器故障模糊 PID 作用下电网频率

由图 10 可知,无故障时模糊 PID 的控制效果比普通 PID 控制效果要好。启动时,PID 控制在 $t = 6s$ 时稳定,而模糊 PID 则在 $t = 5s$ 时就能达到稳定状态,且模糊 PID 控制速度的波动幅度为 0.05%,比普通 PID 控制的波动幅度(0.4%)要小;当 10s 出现负载扰动时,其转速波动幅度和恢复平衡状态的时间也优于普通 PID 控制。由于电网频率由原动机转速决定,故图 11 中的频率与图 10 中转速的波动幅度、达到稳定的时间基本一致。

3.4.2 单个故障模糊 PID 容错控制

图 12、图 13 为船舶柴油发电机组启动稳定后某个时刻出现单个故障后的容错控制仿真结果图。故障出现在第 12s 至第 16s,在 10s 时负载转矩从 0 突增至 $800(N \cdot m)$,图 12 为此状态下原动机转速的波形图,图 13 为此状态下的电网频率波形图。图中实线为单个传感器故障后模糊 PID 控制效果图,虚线为没有故障时的普通 PID 控制效果图。

和实际应该达到的转速还有一定偏差,在第 12s 至第 16s 速度传感器故障后,经容错控制的转速为 0.995(标准为 1),电网的频率为 59.7Hz(标准为 60Hz)。对误差分析如下:由于所建模型不够精确和传感器个数少,造成在容错估算的规则库里面数据不够精准(例如输入两个值,出现几个故障传感器的估算值与输入相对应),在数据处理计算精度上可以进一步提高。

3.4.3 单个故障模糊 PID 与 PID 容错控制

图 14、图 15 为船舶柴油发电机组稳定运行状态下,某个时刻突然发生单个故障后的容错控制数据,故障出现在第 12s 至第 16s,在 10s 时负载转矩从 0 突增至 $800(N \cdot m)$ 。图 14 为此状态下原动机转速的波形图,图 15 为此状态下电网的频率波形图。图中实线为单个传感器故障后模糊 PID 控制效果图,虚线为单个传感器故障后普通 PID 控制效果图。

由图 12、图 13 中的数据可知,容错估算的转速

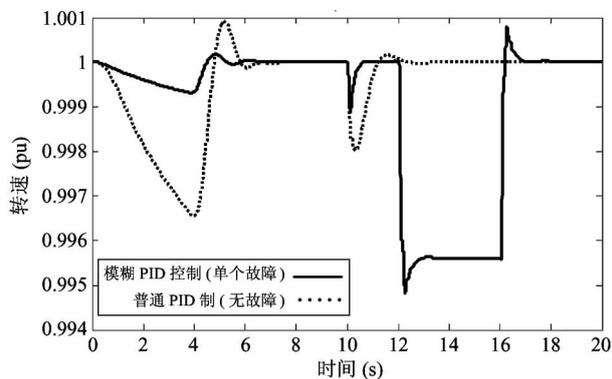


图 12 单个传感器故障模糊 PID 作用下原动机转速

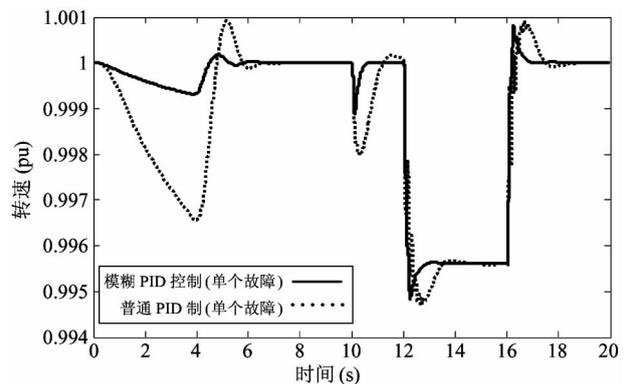


图 14 单个传感器故障模糊 PID 与普通 PID 作用下转速对比图

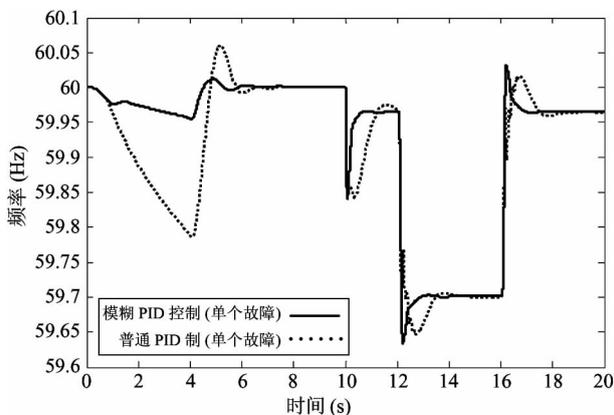


图 15 单个传感器故障模糊 PID 与普通 PID 作用下电网频率对比图

由图 14、图 15 中的数据可知,在单个传感器故障的情况下,模糊 PID 的控制性能优于普通 PID 控制。在故障发生和故障排除时,虽然它们控制转速的波动效果并无很大差异,但是模糊 PID 在控制其转速达到稳定所用的时间优于普通 PID,模糊 PID 在故障发生、排除时分别用时 0.6s、0.5s 达到稳定转速,而普通 PID 用时分别为 1.4s、2s。模糊 PID 使其容错控制灵敏度得到提升。

4 结论

针对船舶发电机组传感器故障影响其电力系统的频率稳定问题,本文将基于 StateFlow 的模糊 PID 容错控制策略用于研究船舶发电机组的转速控制,主要从故障模拟、StateFlow 逻辑判别、容错估算和模糊 PID 控制四个方面进行研究。仿真结果表明:在单个传感器故障的情况下,基于 StateFlow 的模糊 PID 容错估算,能够使发电机的转速输出有效跟踪模型的给定转速;无论是在故障条件下,还是非故障条件下,模糊 PID 的控制性能都要优于普通 PID。但是,由于系统的复杂性,只对单个传感器故障时进行控制研究是远远不够的。同时,少量传感器建立的控制规则使得估算值更容易受到扰动,这进一步增加了系统对多个传感器建模的需求。找到多个传感器故障时的控制方法和建立更大的传感器规则库需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 周东华, DingX. 容错控制理论及其应用. 自动化学报, 2000, 26 (6): 788-797
- [2] Rotondo D, Nejari F, Puig V. Passive and active FTC comparison for polytopic LPV systems. In: Proceedings of the 2013 European Control Conference (ECC), Zurich, Switzerland, 2013. 2951-2956
- [3] Sami M, Patton R J. Wind turbine power maximization based on adaptive sensor fault tolerant sliding mode control. In: Proceedings of the Mediterranean Conference on Control & Automation, Barcelon, Spain, 2012. 1183-1188
- [4] Zhang Z G, Chen X, Zhou Y P. Implementation of a distributed fault-tolerant computer for UAV. In: Proceedings of the International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, China, 2010. 5266-5269
- [5] Vander Meer J, Bendre A, Krstic S, et al. Improved ship power system-generation, distribution, and fault control for electric propulsion and ship service. In: Proceedings of the Electric Ship Technologies Symposium, 2005. 284-291. Doi: 10.1109/ESTS.2005.1524690
- [6] 施振华. 船舶柴油发电机组转速神经网络容错控制. 船电技术, 2009, 29(6): 41-45
- [7] Bo T I, Johansen T A. Scenario-based fault-tolerant model predictive control for diesel-electric marine power plant. In: Proceedings of the OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE, Bergen, Norway, 2013. 1-5
- [8] Belaidi A A, Chafouk H, Langlois N. Detection and localization of faults based on parametric estimation applied to diesel engine. In: Proceedings of the Mediterranean Conference on Control & Automation, Marraken, Morocco, 2010. 1359-1364
- [9] Kamal E, Aitouche A, Oueidat M. Fuzzy Fault-Tolerant Control of Wind-Diesel Hybrid Systems Subject to Sensor Faults. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 2013, 4(4): 857-866
- [10] 文凌波, 王玉海, 李兴坤等. 基于 MATLAB/STATEFLOW 的 AMT 控制策略仿真系统. 车辆与动力技术, 2005, 97 (1): 18-22
- [11] 郭鹏. 模糊前馈与模糊 PID 结合的风力发电机组变桨距控制. 中国电机工程学报, 2010, 30(8): 123-128
- [12] 齐学义, 蔡艾江, 吴疆等. 变风量空调系统模糊 PID 控制的仿真. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26

(4): 364-368

- [13] 沈承, 沈锐, 卢刚. 一种柴油发电机模糊 PID 调速控制方法. 机械与电子, 2011, 229 (10):44-47

StateFlow fuzzy PID control research on fault tolerant of marine generator set

Zheng Xiaochang, Shi Weifeng, Zhang Wei, Wang Guiyan

(Department of Electrical Automation, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306)

Abstract

In order to improve the speed stability of a marine diesel generator set subject to a single sensor fault, this study focused on the generator set's speed control using the StateFlow based fuzzy fault-tolerant PID control strategy. In the study, a Matlab-based sensor fault simulation model was developed, and based on the StateFlow identification for faults, the speed control of the diesel generator set in a sensor fault was realized through fault sensor estimation and fuzzy PID control. The simulation results verify the correctness of the fault model and show the effectiveness of the fuzzy PID based on StateFlow in speed control for the diesel generator set in a sensor fault. The study lays the foundation for the study of fault tolerant control under multiple sensor faults.

Key words: marine generator set, fault tolerant estimation, StateFlow, fuzzy PID, speed control