

基于模糊控制理论集的自适应数据融合 与修正研究

欧志新,李继侠,邓春兰

(安徽交通职业技术学院 城市轨道交通与信息工程系,安徽 合肥 230051)

摘要: 电网电能传输的可靠性和稳定性是行车安全的保障,由于外部干扰波动和电流电弧对电网结构的影响,其参数获取和动态建模变得困难。首先,分析电网结构失真度和模型结构变化的特点,采用基于理论集的模糊控制分析电网动态电能传输的特点。其次,对于采样电流的多变模型进行数据融合,结合自适应控制的策略,在线修正误差超调和抑制波动,并寻求模糊控制约束保持其局部最小的误差均方值稳定。最后,通过实验参数建立 Simulink 模糊仿真模型验证了自适应数据融合技术能有效地修正误差和波动,保证良好的行车电能传输。

关键词: 电网系统;模糊控制理论集;自适应控制;数据融合

中图分类号: TB273 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24944

Research on Adaptive Data Fusion and Correction Based on Fuzzy Control Theory Set

OU Zhixin, LI Jixia, DENG Chunlan

(Department of Urban Rail Transit and Information Engineering, Anhui Communications Vocational & Technical College, Hefei 230051, Anhui, China)

Abstract: The reliability and stability of electric energy transmission in the power grid are the guarantee of driving safety, due to the impact of external interference fluctuations and current arcs on the power grid structure, its parameter acquisition and dynamic modeling become difficult. Firstly, the characteristics of grid structure distortion and model structure changes were analyzed, fuzzy control based on theory sets was used to analyze the characteristics of dynamic electric energy transmission in power systems. Secondly, data fusion was performed for multivariate models of sampled currents, combined with adaptive control strategies to online correct error overshoot and suppress fluctuations, and to seek fuzzy control constraints to maintain the stability of its local minimum error mean square value. Finally, a Simulink fuzzy simulation model was established through experimental parameters to verify that adaptive data fusion technology can effectively correct errors and fluctuations, ensure good driving power transmission.

Key words: power grid system; fuzzy control theory set; adaptive control; data fusion

供电网络中电网作为传输电能环节,具有电能分布集中、传输距离远、高速电流大和运行波动性等特征,要求电能电力机车传输的过程中,具备安全电流供应和传输稳定的技术特点。文献[1]分析了电网运行波动并分析与校正了模糊控制策略建立的比例关系,根据输出特性和设定值的误差,进行多次预估采样量是否靠近标准值,在进行离线计算时找出符合电能供应安全的

策略。电流稳定传输是电网安全的基础,电流运行中的波动特性和误差修正主要依赖传感器采样数据的精确性。但仪器多次采样并连续在线修正,计算任务量很大,会导致误差迭代增大,难以达到设定的标准值极限范围。文献[2]中实验技术人员通过对高速行进中的电网系统进行动态参数检测发现,随着机车运行速度和外部环境的复杂影响,其参数的获取和检测难以通过计算

基金项目:2022年高校学科(专业)拔尖人才学术资助项目(GXBJZD2022150);

2022年安徽省高校自然科学研究重点项目(2022AH052447)

作者简介:欧志新(1982—),男,硕士,副教授,主要研究方向为智能电网技术、数据融合技术,Email:ozxin2008@126.com

和观测获取准确的数据。利用高精度仪器获取实时参数进行分析和判断系统的运行状态,忽略电能传输过程中的预测数学模型给输入量和输出值之间带来的因果关系。文献[3]分析了自适应控制和数据融合算法可以根据电网运行实时建立的动态模型解决数据传输固定的问题,而结构变化造成动态模型失配情形,必须根据自适应跟踪特性实时监测和进行误差校正。采样的输入参数和预估数据进行融合,每一次进行累加和顺延,最终得出一组数据融合迭代的参考值,分析弱电网电流波动压力过大会出现电弧的风险,而这些不安全不稳定的参数特性都是导致系统误差增大的原因。文献[4]分析了电网系统中更高的技术要求,如接触压力过小(即电流测量偏小),电弧闪络会造成关联电气设备跳闸,造成供电中断;实时输入参数采样的精确度需要满足固定参数匹配的数学模型,而电网电流传输和供电负载特点具备不对称性,无法满足电网系统的稳定技术和误差可控精确度要求,因此需要数据融合算法持续修正误差超量,才能达到与设定安全值匹配的自适应控制标准。保证电网系统在一个时间段内的安全和可靠性能,也是建立多结构与多模型状态的电能传输需要。

综上所述,本文拟采用基于自适应数据融合对电网参数进行检测与校正;研究电网系统参数特性,确定建立稳定的电流传输数学模型与方法;电网系统波动产生误差通过模糊控制算法进行调节,基于自适应与数据融合技术可以平衡波动与误差之间的关系;确定控制策略,建立过电流电弧预警及防护与参数修正措施,安全可控地进行误差数据校正。

1 模糊控制理论集

模糊控制理论的特点在于,约束集的广泛采集输入量与实时参数进行比较得出误差的下一运行区间范围,从而在上一次校正的基础上不断进行优化,使最终的参数越来越接近理想值^[5]。结构与模型失真会影响参数的曲线运行效果,使参数校正和补偿方案的制定都难以达到预期的效果。

1.1 模糊控制的结构分析

系统动态参数测量具有不确定性,其固有的模型结构会随着外部环境的波动而发生变化^[6]。波动求解是一个逐步优化和校正失真模型参数的最优解过程。模糊控制系统方框图结构组成如图1所示。

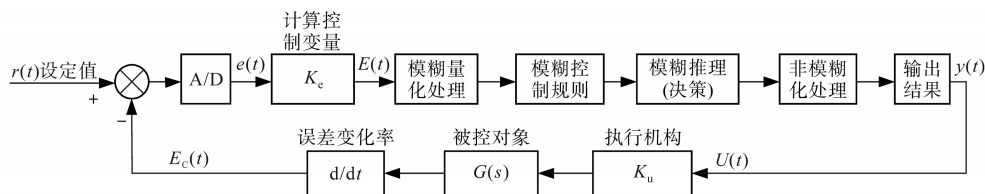


图1 模糊控制系统结构框图

Fig.1 Block diagram of fuzzy control system

图1中, $r(t)$ 为模糊控制系统输入设定值; $E(t)$ 为单位时间内模糊量误差; $E_c(t)$ 为单位时间模糊运算误差变化率; K_c 为模糊执行运算后与设定值误差变化率调节因子; K_0 为执行输出机构反馈量; $G(s)$ 为模糊控制反馈被控对象;系统输出值为 $y(t)$ 。以上这些变量都是精确量。电网若出现电流谐波,会导致运行参数(电流和功率)剧烈波动,此时误差会急剧累加,固有的电网模型会因误差导致出现模型结构参数变化的情形。

假设电网系统参数发生故障,若电网系统中的暂态过电流出现非周期性的参数分量或小于 N 次谐波设定值的各种谐波分量总和^[7],其控制策略是:先设定预估量和曲线/数据运行的上、下限值,再根据经验给出一个控制提前量,每次根据

这个提前量进行误差修补(测量值对标设计标准值)。实时运行的误差进行累加,会造成自适应算法融合数据迭代延迟,稳定性和超调过大而不能满足控制要求。根据每次实际控制效果来辨识、在线校正下一次的控制测量值是一种较好的控制方案。

1.2 模糊规则的选取原则

如图1所示,由于模糊控制器的结构对受控系统的性能有很大影响,选择用于控制器输入的前处理和控制器输出的后处理算法^[8]。取模糊控制器的输入变量(误差信号 E 和误差变化信号 E_c)和输出变量(受控变量的变化 U),离线计算查询表的程序,这属于模糊矩阵运算。另一种方法是计算机在模糊控制过程中在线计算输入变

量(误差 de 和误差变化 de/dt),并将它们模糊化处理,查找查询表后再作输出处理的程序。

模糊控制算法流程如图2所示。模糊推理得到的结果是一个模糊集合或者隶属函数,但是在实际使用中,特别是在模糊逻辑控制中,必须用一个确定的值才能去控制系统输出机构。在推理得到的模糊集合中,取一个相对最能代表这个模糊集合的单值的过程称为解模糊或模糊判决。

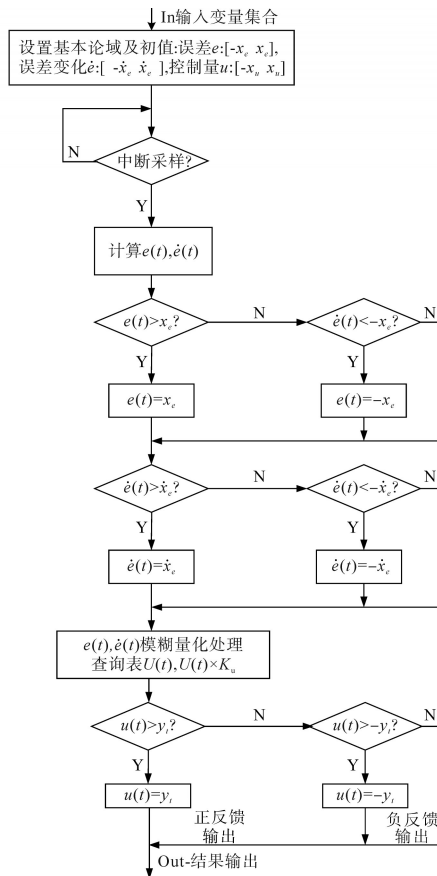


图2 模糊控制算法流程图

Fig.2 Flow chart of fuzzy control algorithm

2 自适应数据融合算法和控制策略

由于机械装置的惯性造成补偿滞后和不稳定的数据传输会增加电流传输的波动并增大超调,导致系统误差带来安全和稳定问题。电网系统运行过程中,存在过电流产生电弧、偏移量拉出值、干扰与参数波动等影响运行曲线的输入特征,为保障电网结构模型和参数选取的正确性,必须建立完整的数据融合修正方案,应对外部干扰和波动造成的误差校正计算量大等问题。而自适应的数据融合策略就是根据实时动态的测量误差与上一次进行比较,得出最优的校正方法,保证系统按照设定的目标值稳定运行。

2.1 自适应控制的模型预估和特征

自适应控制需要结合数据融合的特点建立数学预估模型,其原理特点就是基于多个传感器的信息采样加以决策和估计,对输出信号进行分析和处理^[9]。电网系统中动态运行的输入采样量和实际运行测量的参数的误差波动范围,正是建立模型预估所需的输入融合变量。

根据自适应数据融合特点,指定固有的参数模型,调节运行主要参数值在合适的范围内,若运行刚开始即施加一个控制定量值,得出结果和控制策略后期调节比较困难,此时输入量和输出关系具有非线性特征,难以保证安全运行的速度和控制精度。

自适应会在数据融合过程中实时对数据进行跟踪控制,并对信息数据进行校正^[10]。若单个时间段采集的参数具有模糊性和误差性,也不会影响总系统的可靠性。自适应数据融合在系统参数的计算和校正中具有以下特点:

1) 通过系统分布检测,在线检测暂态过电流,根据系统的波动和误差超调等运行特点,建立以模糊控制为策略的数学模型。

2) 在预防系统出现电气闪络拉出值偏大造成断线等方面,自适应控制具有预估校正的作用。对弓网动态运行产生电弧造成的参数失真在测试具有实时校正功能。

2.2 数据融合的原理与算法

对电网结构内部而言,描述运行的模型结构和参数不一定准确。而外部环境对运行的影响主要有噪声、扰动、谐波等参数反馈至电网输入系统,而测量和统计这些随机量参数都是未知的^[11]。工程控制实际测量参数过程中,同一类型的传感器多次测量也会产生不同的误差值和不同精度的测量误差,应该赋予相应的权值来提高测量精度。

由于电网系统动态运行产生的电弧会造成设备绝缘击穿,特别是过电流和电压增大,具有不确定的动态属性和模型特征,如外部环境、曲线段波动和拉出值的选取,包括一些未知因素和随机因素,则对测量误差小的传感器测量权值比例须取值偏大,对测量误差大的权值比例须取值偏小,使其尽量接近原始设定参数值。

若传感器矩阵中发生突发故障或传感器测量受到环境干扰采集了虚假信息,先要进行数据校正检验,否则会影响信息融合的精度,造成测

量误差扩大。

1)数据检验过程。对若干组数据 $Z_i(i=1,2,\dots,i)$ 检验准则是:其相邻值之差不超过设定限制 ε ,即 $|Z_i-Z_{i-1}|\leq\varepsilon$,其中, ε 是根据传感器测量精度提前预设确定的。

2)算法推导过程。设 n 个传感器的均方差分别为 $\theta_1^2,\theta_2^2,\theta_3^2,\dots,\theta_n^2$;各传感器的测量值分别是 Z_1,Z_2,\dots,Z_n ,彼此之间相互独立; Z 为无偏差预估真值;设各传感器的加权因子分别为 $\varphi_1,\varphi_2,\dots,\varphi_n$,则数据融合后 Z 真值和加权因子满足:

$$Z = \sum_{i=1}^n \varphi_i Z_i \quad (1)$$

其中

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1$$

式中: Z_i 为融合测量数据后的真值。

式(1)中测量数据总均方差为

$$\begin{aligned} \theta^2 &= E(X - X_i)^2 \\ &= E\left[\sum_{i=1}^n \varphi_i^2 (X - X_i)^2 + 2 \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^n \varphi_i \varphi_j (X - X_i)(X - X_j)\right] \quad (2) \end{aligned}$$

式(2)中, $i, j \in (1, 2, \dots, n)$,因为 X_1, X_2, \dots, X_n 彼此独立,为 X 的无偏差估计值,所以有:

$$E = (X - X_i)(X - X_j) = 0 \quad i \neq j \quad (3)$$

式(2)写为

$$\begin{aligned} \theta^2 &= E(X - X_i)^2 = E\left[\sum_{i=1}^n \varphi_i^2 (X - X_i)^2\right] \\ &= \sum_{i=1}^n \varphi_i^2 \theta_i^2 \quad (4) \end{aligned}$$

从式(4)得出,总均方差误差 θ^2 是各传感器加权因子的多元二次函数,必然存在 θ^2 有最小值^[12]。该最小值求解是 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$,满足约束条件的函数极值求解。

设被测估计量 $y(t)$ 是未知 n 维常值向量,一般不能直接测量,只能测量出各分量的线性组合。为得出全部估计值,先用 n 个传感器同时对其进行测量,测量每个的数据表达式为

$$Z_i = \beta_i X + e_i \quad (5)$$

式中: Z_i 为 i 维观测向量; β_i 为 i 维测量矩阵; e_i 为第 i 次随机测量噪声(误差)。

将式(5)改写为

$$Z = \beta X + e \quad (6)$$

其中

$$Z = [Z_1^T, Z_2^T, \dots, Z_n^T]^T$$

$$e = [e_1^T, e_2^T, \dots, e_n^T]^T \quad \beta = [\beta_1^T, \beta_2^T, \dots, \beta_n^T]^T$$

被测估计量 $y(t)$ 进行估计的目标是各传感器测量值 Z_i 与估计值 Z ,确定 $Z_i = \beta X_i$ 平方和最小^[13]。

以上根据各传感器在采样的一个时间段测量值进行的误差预估,估计真值 X 为常数时,可根据各传感器历史采样数据均方值进行预估。设:

$$Z_i(k) = \sum_{i=1}^n X_i(k) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

每个传感器每次测量采集 k 次。记第 k 次($k \in \{1, 2, \dots, i\}$)估计值为

$$Z = \sum_{i=1}^n \varphi_i X_i(k) \quad (8)$$

式(8)中,对 Z 取偏导,令其为0,得出:

$$J = (Z - Z_i)^T (Z - Z_i) = (Z - \beta X_i)^T (Z - \beta X_i) \quad (9)$$

式中: J 为误差限值比例调节加权因子。

令

$$\partial J / \partial \hat{x} = -2(\beta^T Z - \beta^T \beta X_i) = 0 \quad (10)$$

式(10)求导得出传感器数据融合范围。

针对数据动态特性变化多、参数波动、难以直观检测出结果,自适应数据融合根据系统运行特征、外部环境和电弧放电特点,能够实时在线监测误差融合后的曲线和修正超调曲线结果,随时调整系统自身的模型结构,是一种在线计算和优化的控制方案。

2.3 数据融合算法的稳定性分析

模糊控制中常用输出误差反馈校正方法,即将输出误差加到预测的模型上,这称为在线校正或反馈校正。同时,为了避免控制作用的跳变,设定一条指数性的参考轨迹,称为柔化轨迹。此轨迹由参数 N 确定其柔化程度^[14], N 越大,柔性越好,鲁棒性越强,但响应速度越慢。反馈在克服干扰和不确定性、获得闭环稳定性方面有着基本的、不可替代的作用。

选取重心法取模糊隶属函数曲线与横坐标所围面积的重心作为代表点。如图3所示,模糊输入依次表示如下:in1为传感器输入采样函数

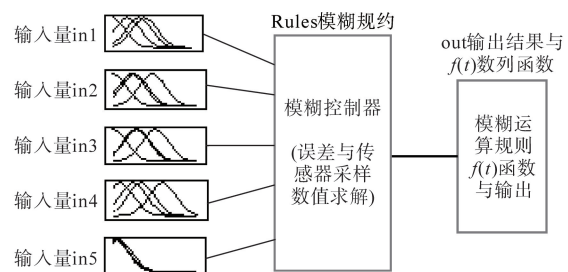


图3 模糊控制的输入-输出数据融合示意图

Fig.3 Input-output data fusion diagram of fuzzy control

为单脉冲, in_2 为自适应滤波器输出估计量, in_3 为第 i 个传感器实际测量数据, in_4 为模糊输入函数采样曲线为双脉冲, in_5 为输入测量估计传感器的权值。这 5 种不同输入参数模糊理论, 其输入为相位差 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的双曲线脉冲波, 取值因子小于 1 (具体取值依据误差是否超出正负限值而定); Rules 模糊规约主要作用是对控制器采样的误差和数值求解, 为模糊控制算法集; out 结果为模糊控制输出函数集。在数据融合理论中, 记原始数列为 $x(t)$, 一次累加生成后得到的数列函数为 $f(t)$, 预测输出值为 $Z(t)$, 这里 $t \in (0, N - 1)$, 则灰微分方程表示如下:

$$df(t)/dt + af(t) = u \quad (11)$$

式中: a, u 为拟融合误差待定参数。

其时间响应模型为

$$Z(t) = [f(0) - u/a]e^{-at} + u/a \quad (12)$$

对灰微分方程(11)进行求解:

$$df(t)/dt = u - af(t) \quad (13)$$

得到:

$$\frac{df(t)}{f(t) - u/a} = -adt \quad (14)$$

式(14)两边积分可得:

$$\int \frac{1}{f(t) - u/a} df(t) = -a \int dt \quad (15)$$

结果为

$$\ln [f(t) - u/a] = -at + C \quad (16)$$

式中: C 为函数求解后的常数。

式(16)方程等价于:

$$f(t) = e^{-at} \cdot e^C = Ce^{-at} \quad (17)$$

式(17)表明, 模糊控制策略下的运算数列函数 $f(t)$ 与设定积分常数 C 成正比关系, 能保持良好的稳定特性, 不受外部干扰和输出与反馈结构变化的影响。

3 仿真建模与实验分析

为验证上述控制方法的效果, 利用 Matlab 进行仿真。在线性条件下, 控制对象随动系统的数学模型可由二阶系数线性微分方程描述。电网失真参数的自适应数据融合估计, 由式(10)、式(12)、式(17)得出的向量方程即为目标函数^[15]:

$$Z(t) = J^T f(t) \\ = [Z - \beta X_i]^T e^{-at} \cdot C = \int_1^t e_1(t) dt \quad (18)$$

式中: β 为测量数组系数; e_1 为误差最优参数估计。

为让式(18)达到误差均值最小, 其融合数据

模型测量误差值在固定时间内达到最优化平方和预测输出结果 Z 。随动系统模型参数差别较大, 会出现波动和误差情况, 现假定其传递函数为

$$Z_i(s) = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\varepsilon_0\omega_i s + \omega_i^2} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (19)$$

式中: ε_0 为阻尼系数; ω_i 为自然频率。

设模糊控制被控对象为

$$Z(s) = \frac{0.0125}{11.5s^2 + s} \quad (20)$$

以单位阶跃信号模拟, 其中脉冲采样时间 $t=0.5$ s。

表 1 为取输入采样数据和实际测量值进行融合比较, 得出误差校正 20 组模糊参考数据。

表 1 模糊控制参数采样输入与融合数据误差校正表

Tab.1 Error correction of sampling input and fusion data of fuzzy control parameters

实验样本采集	J校正输入-输出数据融合		
	测量数据	采样数据	e_1 失真误差(模糊控制)
1	14.630 0+	14.630 1+	-0.000 1+
	14.534 0i	14.533 9i	0.000 1i
2	26.928 1+	26.937 0+	-0.008 9-
	22.700 4i	22.701 3i	0.000 9i
3	28.145 0+	28.007 9+	0.137 1-
	30.254 3i	30.843 2i	0.588 9i
4	37.356 2+	36.987 3+	0.368 9-
	44.864 5i	45.361 2i	0.496 7i
5	40.235 1+	40.103 2+	-0.868 1-
	48.523 1i	49.521 7i	1.998 6i
6	49.978 4+	49.497 6+	0.480 8-
	53.645 2i	54.172 2i	0.527 0i
7	58.567 9+	58.032 5+	0.535 4+
	61.156 7i	60.136 6i	1.020 1i
8	66.248 5+	66.248 1+	0.000 4+
	70.135 4i	70.032 6i	0.102 8i
9	68.210 1+	68.108 1+	0.102 0+
	69.792 5i	69.705 8i	0.913 3i
10	66.623 2+	66.740 0+	-0.116 8+
	70.102 1i	70.438 4i	0.663 7i

图 4 为自适应模糊控制仿真 Simulink 结构图。图中, 输入参数的变量为脉冲函数。发生电网电弧时输入量与测量值具有较大的误差, 采样参数暂态电流值具有变化和波动特性, 需经过模型辨识后在线优化至合理范围, 保证接触良好的电流传输效果。

自适应原始采样与校正后曲线对比如图 5 所示, 横坐标为测量和调节时间, 纵坐标为误差调节限值因子范围, 为标么值。

仿真结果显示, 自适应控制的最大优势就是跟随性, 设定目标后会一直按照标准范围的区间不断校正实时运行中的误差或偏差; 随着参数外部环境的变化符合曲线图衰减的关系, 在调节范围内满足模型确定或建立比较困难, 因此不需要

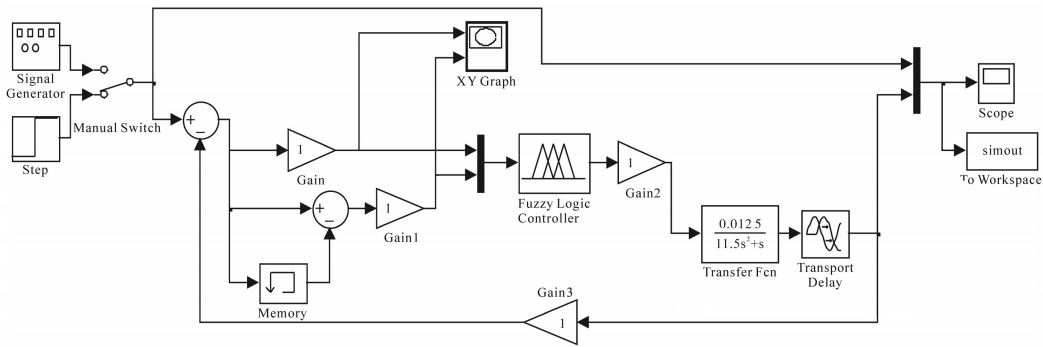


图4 参数自适应模糊控制系统仿真Simulink框图

Fig.4 Block diagram of parameter adaptive fuzzy control system Simulink

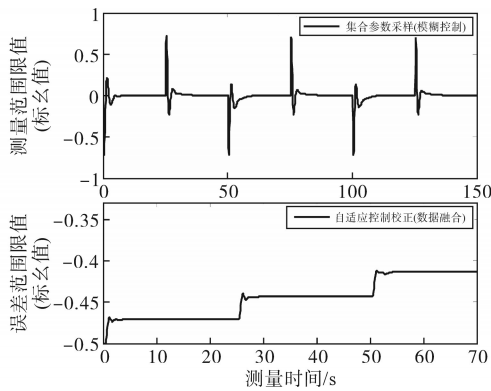


图5 自适应原始采样与校正后曲线对比

Fig.5 Comparison of adaptive original sampling and corrected

建立明确的数学模型就可以得出输出结果,但校正结果无法完成与标准值精确相同,只能让其始终跟踪输出结果进行控制。

模糊控制基础下的自适应控制校正曲线如图6所示,横坐标为测量和调节时间,纵坐标为数据融合后误差输出因子限值,为标么值。自适应数据融合在线校正后误差收敛速度和精度明显更小,如果修正和优化拟合次数多,容易造成电网模型结构失真和参数稳定性下降。因此,自适应数据融合不是修正次数越多越好,而是依据参数模型与测量设定值对比,接近误差范围为止,

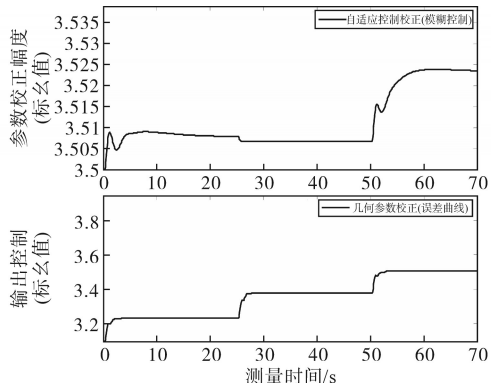


图6 模糊控制基础下的自适应控制校正曲线

Fig.6 Correction curve of adaptive control based on fuzzy control

既不会造成运行稳定性降低,也不会增加电网系统参数失真带来的波动问题。

自适应数据融合法校正后的仿真曲线表明,随着时间增加,在线优化收敛的速度加快,具有输入参数在线调节并辨识模型实时校正的特点。

如图6所示,其算法具有一定的局限性,需要设计拟合明确的目标值,由于外部环境干扰或内容参数结构发生变化,需要对电网模型和参数进行调整达到匹配,直到误差平方和性能指标接近。

第2次参数校正的效果与第1次在线计算与优化的曲线结果比较,误差控制效果接近设计值,其超调量和波动特性得到明显改善。一般而言,自适应数据融合只寻求局部参数在线优化最佳,而不是整个系统所有参数均要符合标准。这些都符合自适应数据融合的结构特点与原理。

4 结论

文中提出基于约束集的模糊控制旨在针对复杂区段的模型,不需要知道确切的输入量先验数据,直接根据输出结果校正输入的变化,将数据融合的理念结合多传感器采样数据,进行综合分析判断和决策。研究表明,具有多波动性运行区段的数学模型建立都难以固定结构,从而增加确保输入参数获取精度和误差控制效果的难度。

虽然可以很大程度地为动态运行实时采集繁多的数据处理带来便捷,但是要真正做到数据集满足所有的运行数据也不可能,只能在局部设定参数的固有约束值,再去不断校正误差过大、不满足运行的参数。

因此本文基于模糊控制理论约束集的自适应数据融合控制应用在系统参数的测量中,研究针对电网系统结构中电能传输关系,其动态运行

时的参数精度检测直接影响着供电稳定和行车安全。具有以下特点:

1)由于外部环境或多变量的干扰,会造成模型失真或参数变化,自适应能够不断校正这些变化的参数,是使其能够按照设定的标准范围进行波动的一种自动控制策略,满足系统安全稳定的电能传输特性,保障电网电流安全可靠传输。

2)基于理论约束集的模糊控制策略可以按照设定的参数去跟踪动态运行时的超量参数,并加以剔除和自动筛选,而不需要建立准确的数学模型才可以得出控制结果。

3)多传感器采样的实时数据可自动进行融合,分析判断和综合决策控制过程,稳定运行的最终目标是参数符合电能输送的安全条件和误差区间,而不要求全局参数均满足控制的要求条件。

参考文献

- [1] 刘志刚,郝峰杰,陈杰,等.城轨牵引供电系统车-地配合参数优化方法[J].北京交通大学学报,2019,43(1):79-87.
LIU Zhigang, HAO Fengjie, CHEN Jie, et al. Optimization method of train-ground coordination parameters for urban traction power supply system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 79-87.
- [2] 王文华,谭小龙,万伟,等.智能电网技术在电力调度自动化中的运用[J].自动化应用,2023,64(8):67-69.
WANG Wenhua, TAN Xiaolong, WAN Wei, et al. Application of smart grid technology in power dispatching automation[J]. Automation Applications, 2023, 64(8): 67-69.
- [3] 王艳,臧天磊,何正友.电网参数变化条件下的谐波状态分段估计方法[J].电力系统自动化,2016,40(17):217-223.
WANG Yan, ZANG Tianlei, HE Zhengyou. Harmonic state segmented estimation method under condition of power grid parameters change[J]. Power System Automation, 2016, 40(17): 217-223.
- [4] 周扬.基于泛在电力物联网的数据融合技术研究[D].北京:华北电力大学,2022:44-51.
ZHOU Yang. Research on data fusion technology based on ubiquitous power IoT[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 44-51.
- [5] 方胜利,侯留军,马春艳,等.基于闭环模糊控制的扰动观察法MPPT研究[J].计算机仿真,2022,39(12):77-83.
FANG Shengli, HOU Maojun, MA Chunyan, et al. Research on disturbance observation method MPPT based on closed-loop fuzzy control[J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 77-83.
- [6] 刘辉,蔡萍.基于模糊控制的高精度时钟同步系统[J].测控技术,2020,39(9):113-117.
LIU Hui, CAI Ping. High-accuracy clock synchronization system based on fuzzy control[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(9): 113-117.
- [7] 马仕任.基于模糊控制算法的智能车运动控制技术[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2022:33-38.
MA Shiren. Research on intelligent vehicle motion control technology based on fuzzy control algorithm[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2022: 33-38.
- [8] 朱其祥.基于模糊算法的风力发电机MPPT控制[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2019,29(4):13-19.
ZHU Qixiang. MPPT control of wind turbine based on fuzzy algorithm[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 29(4): 13-19.
- [9] 郑仰东.采用Smith预估器模型的时滞系统自适应控制[J].控制理论与应用,2021,38(3):416-424.
ZHENG Yangdong. Adaptive control of time delay systems using smith predictor model[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(3): 416-424.
- [10] 孔令歆.多约束条件下不确定非线性系统自适应控制方法研究[D].北京:北京科技大学,2023:25-32.
KONG Lingxian. Research on adaptive control method for uncertain nonlinear systems with multiple constraints[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023: 25-32.
- [11] 宋阳阳.城市轨道交通直流牵引供电系统仿真建模及仿真平台开发[D].北京:北京交通大学,2022:66-71.
SONG Yangyang. Development of simulation modeling and simulation platform for DC traction power supply system of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022: 66-71.
- [12] 王薇.数据融合技术在电网规划中的应用[J].电子技术,2023,52(1):363-365.
WANG Wei. Application of data fusion technology in power grid planning[J]. Electronic Technique, 2023, 52(1): 363-365.
- [13] 那靖,郑昂,黄英博.非线性严格反馈系统自适应非反步输出反馈控制[J].控制与决策,2022,37(9):2425-2432.
NA Jing, ZHENG Ang, HUANG Yingbo. Adaptive non-backstepping output-feedback control of nonlinear strict feedback systems[J]. Control and Decision, 2022, 37(9): 2425-2432.
- [14] 戴海发,卞鸿巍,王荣颖,等.一种改进的多传感器数据自适应融合方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(10):1602-1609.
DAI Haifa, BIAN Hongwei, WANG Rongying, et al. An improved adaptive fusion method for multi sensor data[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2020, 45(10): 1602-1609.
- [15] 李璇焯,高国伟.多传感器时滞系统CI融合滤波算法[J].北京信息科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):14-18.
LI Xuanyue, GAO Guowei. Fusion filtering algorithm for multi-sensor delay systems based on CI algorithm[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University (Natural Science Edition), 2019, 34(2): 14-18.