

电气自动化系统智能控制技术研究与应用

常天雷

邢台纳科诺尔精轧股份有限公司, 河北 邢台 054001

[摘要]电气自动化系统正在发生着一场由传统的控制到智能化的转变。PLC 智能控制技术以及自适应控制技术和智能检测以及故障诊断等一系列新技术的应用使整个系统的性能得到了极大的提升。新一代的 PLC 不仅是一个简单的继电器替代品, 而且是一个具有实时计算能力和强大的通讯协议的复杂控制系统, 为实现更高层次的先进控制技术奠定了良好的前提条件。自适应 PID 控制器通过对 PID 控制器的增益参数进行在线调节, 在非线性和动态环境下的控制性能比传统 PID 控制器提高了 75% 左右的稳态误差减少及 33% 左右的响应速度提高。智能故障诊断技术融合了红外热成像技术和无接触传感器, 经过两步无监督建模学习, 即第一步自组织映射学习与第二步堆叠自编码器学习后, 得到的平均故障识别精确度达 99% 以上。但是还存在着稳定性和安全性以及控制精度等问题, 可以通过改进结构设计、增强信息安全保护以及加强人工智能融合程度这三个方面来提高智能控制技术的应用水平。

[关键词]电气自动化; 智能控制; PLC 技术; 自适应控制; 故障诊断

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19772

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research and Application of Intelligent Control Technology for Electrical Automation Systems

CHANG Tianlei

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054001, China

Abstract: The electrical automation system is undergoing a transformation from traditional control to intelligence. The application of a series of new technologies such as PLC intelligent control technology, adaptive control technology, intelligent detection, and fault diagnosis has greatly improved the performance of the entire system. The new generation of PLC is not only a simple relay substitute, but also a complex control system with real-time computing capability and powerful communication protocols, laying a good prerequisite for achieving higher-level advanced control technology. The adaptive PID controller improves the control performance in nonlinear and dynamic environments by about 75% in steady-state error reduction and about 33% in response speed improvement compared to traditional PID controllers by adjusting the gain parameters of the PID controller online. The intelligent fault diagnosis technology integrates infrared thermal imaging technology and contactless sensors. After two steps of unsupervised modeling learning, namely the first step of self-organizing mapping learning and the second step of stacking autoencoder learning, the average fault recognition accuracy obtained is over 99%. However, there are still issues with stability, security, and control accuracy. The application level of intelligent control technology can be improved through three aspects: improving structural design, enhancing information security protection, and strengthening the integration of artificial intelligence.

Keywords: electrical automation; intelligent control; PLC technology; adaptive control; fault diagnosis

引言

伴随信息技术特别是工业互联网、人工智能等相关技术的发展, 电气自动控制系统也逐渐朝着更加智能的方向发展, 在实际中很多情况下传统的 PID 控制对于非线性及时变性的系统效果并不是很好, 因此智能控制技术和相应的技术被提出来。模糊控制技术和神经网络技术和专家系统以及自适应控制技术等这些方法的应用, 对解决复杂

工业过程控制问题有很大帮助。本文主要围绕着智能控制系统中的三个关键技术: PLC 智能控制、智能监控、自适应控制展开论述, 对其应用于工业生产、电力系统、新能源等方面的具体情况做了详细的介绍, 并对控制系统稳定性问题、信息安全、准确度等问题进行了阐述, 并提出了具体改进措施, 希望能对进一步实现电气自动化系统的智能化有所帮助。

1 电气自动化系统概述

电气自动化系统就是采用电气技术、电子技术和控制理论以及计算机技术来对工业生产和电力设备进行自动监视、控制、管理的一种综合性系统,它一般由被控对象、传感器、控制器、执行器和人机接口等组成。电气自动化系统目前发展的三大特点有以下三点:第一,系统日趋庞大从单机控制到网络化、分散式控制;第二,控制的对象越来越复杂出现了非线性、强关联、大滞后的新类型;第三,对于实时性和可靠度的要求越来越高传统的控制技术已经显得力不从心。以人工智能、大数据、物联网及边缘计算等为代表的技术革新,给电气工程自动化控制系统开辟了崭新的发展方向,智能控制技术模仿人脑的学习、决策过程来解决复杂的控制问题,是推动电气自动化系统发展的主要推力。在以后的发展过程中,电气自动化系统会逐步向智能化方向发展——自主感知、自主决策、自主执行。

2 电气自动化系统中的关键智能控制技术

2.1 PLC 智能控制技术

可编程逻辑控制器是工业自动化系统中重要的控制系统之一,它的发展对整个电气自动化系统的进步有着极大的推动作用。目前 PLC 不再只是代替传统继电器的简单控制工具,已经升级成为带有一定的实时运算能力和较强通讯能力的一种综合性设备了,给一些高级控制算法如自适应 PID 的应用提供了一个很好的平台。PLC 智能化的主要特点如下:首先是将一些模糊逻辑、神经网络等智能控制算法用功能块的形式整合到 PLC 中去,使得应用起来更加方便;其次是兼容多种工业现场总线协议,可以构成一个分布式的智能控制网络;最后是稳定性好、抗干扰能力强,在恶劣的工作环境下也能保持良好的运行状态。在实际运用中,利用 PLC 智能化控制系统已经在电动机变频,温度控制,位移伺服等方面取得了良好的效果。实验结果表明,结合自适应 PID 算法的 PLC 智能控制系统在恒定及变动负荷下分别比传统的 PID 控制器减少了 75% 的稳态误差以及 33% 的调节时间。

2.2 智能检测与故障诊断技术

智能监测与故障诊断是保证整个系统可靠性的基础保障手段,传统的诊断方式采用阈值的方法很难检测出初期及复杂的故障现象。而智能检测通过综合利用多种传感器和机器学习算法从而实现整个过程的数据收集直至最后对故障的判断都实现了智能化。而无接触的方式则是采取红外热成像以及无监督模型建立的方法,在经过一次自

组织映射和两次堆叠自编码器的学习过程之后可以快速获取机电系统的故障特征。只需要使用一个红外热像仪对系统进行摄取温度云图就可以对电机以及齿轮箱进行多项故障识别,五次交叉验证的结果都在 99% 以上。基于深度学习的故障预报技术也正在向实际工程项目过渡。

2.3 自适应控制技术

自适应控制解决的是参数变化及模型误差的情况,传统的控制器面对操作条件的变化会失去原有的作用,但自适应控制可以实时监测到变化情况并及时更新相应的参数,使整个系统处于较好的工作状态,在串级自适应模型预测控制和 PID 方法中,外回路不断地对模型进行重构,而内回路的作用就是迅速做出反应,这种方法通过使用带有遗忘因子的递推最小二乘法来辨识参数,用时变的卡尔曼滤波器来估计状态,从而很好地解决了负载扰动情况,在发电系统的负荷频率及电压调节仿真过程中可以发现,它的效果远超出了传统的 PID,而在工程应用上需要考虑计算效率以及收敛稳定性的问题,限制记忆递推算法与遗忘因子的方法可以在保证精度的基础上降低计算量。

3 智能控制在电气自动化系统中的应用

3.1 智能控制在工业生产中的应用

工厂生产是最广泛的应用智能控制技术的领域,在过程工业里,PLC 和自适应控制为基础的设备层独立运行已经很普遍,现在的趋势是整个工厂独立运行。例如化工行业的无人驾驶系统由 AI 控制全厂多个生产线、不同种类的物料之间的实时分配调度,克服了跨单元协作以及全厂物料配比难题,将 AI 与机理模型结合,形成覆盖全场域感知到实时计算分析、自主判断决策再到自动化实施的完整链条式智能化闭环体系,达到全场域内生产情况互相监控、异态状况相互协助处理和运行过程相互调节的全厂自主运行水平。针对离散生产的智能化控制主要是指机器人轨迹控制方面的智能化以及柔性生产线调度及质量管理,在焊接机器人自动焊缝跟踪方面,装配机器人力位协作控制等方面的应用都充分展示了智能化控制对于提高产品质量和柔性的作用,智能控制在智能制造生产线的安全保护中也起到重要作用,通过对设备身份进行可信认证,对控制命令采用多签的方式进行签名,配合工业入侵监测机制可以防止设备冒充连接,恶意篡改控制命令等安全隐患。

3.2 智能控制在电力系统中的应用

电力系统也是智能控制技术的应用之一。负荷频率控制以及自动电压调节是保持电网平稳运行的重要部分,二者之间存在着必然联系,传统分立的设计方式达不到最好

的控制效果。级联自适应模型预测控制和 PID 控制策略把它们放在同一个体系中,在外层设置自适应模型预测控制器实时调整预测模型并且管理系统的限制条件,在内侧放置 PID 控制器用来保证即时跟踪以及方便性。对于单区以及双区电力系统的模型仿真结果证明,在阶跃负荷变动以及参数大幅变动的情况下,频率与电压偏差衰减特性、过调抑制和调节速度都有了很大的提高。在电网调度端,基于强化学习的调节智能体已经上线了。华东电网研制的具有实时推断以及终身学习功能的 AI 调节大脑,结合专家知识以及强化学习算法,训练收敛时间缩短到传统方式的十分之一,以自注意力机制及动态掩码联合框架保障策略的精确可控以及可解释性,在 $\pm 110\text{kV}$ 特高压交流通道潮流优化问题上和在直流闭锁故障应对等方面获得了良好的效果。2025 年华东电网新能源消纳率为 99.21%,位列全国省级电网第一。

3.3 智能控制在新能源系统中的应用

新能源系统(光伏、风电、储能、微电网等)发展迅速也给智能化控制技术带来了巨大的市场,表 1 简单总结出各种新能源系统中智能化控制系统的一般功能。

对于微电网而言,智能控制技术对光伏、储能、市电、备用电源进行多方协调控制,智能管理系统能够动态调配每一度光伏发电能,优先供应客户的日常生活需要并且多余的能量储存在储能设备里,在极端场景下模拟断电且无阳光的状态可以单独供电超过 8 个小时。分布式储能群体性互动调控是当前的一个研究趋势,即把分散的储能装置聚合成一个虚拟电厂单元参与到电网的需求侧响应中,使得新能源消纳水平以及系统的调节性能有了很大的提高。

4 电气自动化系统智能控制中的问题分析

4.1 系统稳定性问题

智能控制系统稳定性的研究比普通控制系统更加复杂,模糊控制及神经网络具有非线性,因此传统的奈氏判据、李雅普诺夫定理无法直接使用,在具体工程上常见的系统不稳定现象有:智能控制器参数设定不合理而引起的临界环振荡,模型误差造成的失控,还有多个智能体间互相作用产生的耦合振荡等,理论上设计出来的控制策略往

往是在连续域内建立起来的,但是在计算机上是以离散形式运行的,这会造成一部分理论上的结论不能够被实现,同时自适应控制在参数识别完成之前的过渡阶段会出现很大范围内的扰动作用,会给执行元件带来损伤。所以构建针对智能控制系统稳定性的检测及验证方法论是非常有意义的。

4.2 数据安全与网络风险问题

在电气自动化技术向着网络化以及云计算方向发展的同时,信息安全事件也越来越多。工控系统所遭受的攻击来自三个层次:设备层、网络层、应用层。对于设备而言,在没有严格的认证措施下,可以冒充设备进行接入从而传递虚假信息;在网络层面来说工艺参数以及控制命令在传输的过程中有可能会泄露给旁观者或者被更改,使得控制系统作出错误判断。某汽车焊接生产线曾经出现过机器人伪造身份接入的情况从而造成大批量车体焊接质量问题。智能控制算法对于采集到的数据要求非常高,一旦传感器的信息遭到篡改,就会使机器做出错误行为。控制命令的劫持及篡改也是一种常见风险,生产开停机及参数调节等控制命令在传输过程中被篡改会导致机器的误动作及不必要的损耗,而智能化控制系统信息安全的问题也必须通过技术和管理两方面共同加以应对。

4.3 控制精度与实时性问题

智能控制策略一般具有巨大的算力需求,这同工业自动化领域对于微秒到毫秒级别快速反应的要求相冲突;神经网络控制器有大量的矩阵乘法操作,而模糊控制器在大系统的规则匹配上也有性能瓶颈;自适应控制策略中的在线模型建立也将占用大量的算力资源,在高频率采样的情况下甚至出现控制超前的现象;另外智能控制策略本身的准确性受到所采集训练样本质量以及数量的影响,在遇到从未见过的情形时会有拟合现象的发生。目前针对流处理系统实时性、离散化误差问题、时序性误差等问题的测试手段比较简单,缺少从理论上保证与实际行为一致性的系统性验证方式。怎样在不影响系统控制精度的基础上减少算法复杂度、在工程应用端设立实时性检验机制,是智能控制技术逐步趋于完善所面临的难点。

表 1 新能源系统中智能控制技术的典型应用

新能源类型	典型应用场景	常用智能控制技术	主要控制目标
光伏发电	最大功率点跟踪	模糊控制、神经网络	提高发电效率、适应光照变化
风力发电	变桨距控制、并网控制	自适应控制、MPPT	稳定输出功率、减少机械应力
储能系统	充放电管理、SOC 均衡	模糊逻辑、优化算法	延长循环寿命、保障运行安全
微电网	能量管理、功率分配	多智能体、预测控制	经济运行、离并网平滑切换

5 电气自动化系统智能控制优化策略

5.1 完善智能控制系统架构

对于稳定性问题,应该从系统的构建方面来进行改进,以分层递阶的方式把智能控制系统分为管理层、协调层、执行层三个层次,每一层负责的时间跨度以及复杂程度都不相同,可以大大减少系统之间的相互影响的程度。在控制软件上,需要设计出统一化的智能化控制系统算法库及试验平台,对控制系统的离散化处理进行全面性的检验,保证其理论指标能够落实到应用当中去。使用硬件在环仿真的方法,在投入使用之前对其进行全方位的试验,找出可能存在的不稳定因素等。

5.2 提高系统抗干扰能力

提高智能控制系统鲁棒性的方法就是解决系统适应性问题。从算法上来说,采取滑模控制加自适应控制策略,用滑模项来补偿不确定性和外界扰动,扩大了系统的抗扰度范围;在设计方面,加入多重模型切换控制理念,根据不同的工况提前制定出一系列的子控制器,在线通过一定的判据选择最优控制器。在执行方面,增加冗余传感器通道并对多个传感器读数进行一致性检查来防止单个传感器失效造成的失常现象发生,使用一定的滤波器降低传感器读取值中的随机误差带来的不利影响。

5.3 强化数据安全防护

建立纵深防护的数据安全保障体系是保证智能化控制系统稳定工作的前提条件,在接入端给工业终端颁发唯一的数字证书,使用设备证书加硬件标识的双因子认证方式来确保只有合法授权过的设备可以连接控制系统;在传输端利用工业级加密方案对接收来的控制命令及传感器采集的信息进行全过程的加解密处理,并结合数字签名保

证信息的真实性和不可抵赖性;在控制端安装工业防火墙及入侵检测装置,设置控制指令白名单模式只容许预先设定的合法指令通行其他未知的控制信号都会中断报警。以上这些做法结合起来就可以很好地防御住设备冒充接入、数据被篡改以及指令被克隆三种主要攻击策略。

6 结语

智能化控制技术正在对电气自动化的体系结构以及应用方式产生深远的影响。本文综述了 PLC 智能控制、智能检测与故障诊断、自适应控制三项核心技术的研究现状,在此基础上探究了它们在工业生产和电力系统以及新能源方面的具体应用情况,探讨了系统的稳定性和数据的安全性、控制准确性等问题所面临的难题,提出了健全系统设计结构,提升抗电磁干扰性能、加强信息安全防护以及加快与人工智能深度融合等建议。未来,当边缘计算、数字孪生以及大模型技术逐渐成熟,智能控制会向着更加高级别的自主智能化发展,从而给打造更加安全、可靠、环保的新型电气自动化系统提供强大的技术支持。

[参考文献]

- [1]马红杰.基于 PLC 技术的电力系统电压自动调节和控制方法[J].自动化技术与应用,2025,44(8):42-46.
- [2]李传龙.电气自动化系统中的智能化技术应用[J].集成电路应用,2024,41(4):168-169.
- [3]刘永豹,成佳,王莹.智能化技术在电气控制系统中的应用研究与探讨[J].时代汽车,2024(11):7-9.

作者简介:常天雷(1995—),男,汉族,河北邯郸人,毕业于河北机电职业技术学院电气自动化专业,本科,现主要从事非标设备电气控制系统设计。