

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.048

基于遗传算法和云计算的大型水电站发电机自抗扰控制方法

赵远,周亮,朱海,李帅访,周小燕

(向家坝电厂,四川 宜宾 644612)

摘要:针对大型水电站发电机因受到多种扰动因素的影响,致使其运行参数偏离额定数值的问题,提出基于遗传算法和云计算的大型水电站发电机自抗扰控制方法。跟踪微分器对输入信号进行平滑跟踪与微分处理,扩张状态观测器基于处理好的输入信号准确估计发电机的状态变量和未知扰动,非线性状态误差反馈控制律根据发电机状态和误差信息生成控制指令,完成自抗扰控制器的设计。引入遗传算法与云计算平台的并行运算技术,对自抗扰控制器参数进行整定与优化,获取精准的控制指令,实现发电机的自抗扰控制。实验结果显示:该设计方法应用后控制参数与其额定数值之间的误差均显著低于对照方法,并维持在0.5%范围内。

关键词:云计算;大型水电站;发电机;自抗扰控制;遗传算法;控制性能测试

中图分类号:TP29 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0243-06

Active Disturbance Rejection Control Method for Large Hydropower Station Generators Based on Genetic Algorithm and Cloud Computing

ZHAO Yuan,ZHOU Liang,ZHU Hai,LI Shuaifang,ZHOU Xiaoyan

(Xiangjiaba Power Plant,Yibin 644612, China)

Abstract:To address the deviation of operating parameters from rated values in large hydropower station generators caused by multiple disturbance factors, an active disturbance rejection control method based on artificial intelligence and cloud computing is proposed. A tracking differentiator smooths and differentiates the input signal, while an extended state observer accurately estimates the generator's state variables and unknown disturbances based on the processed signal. A nonlinear state error feedback control law generates control commands according to the generator state and error information, completing the design of the active disturbance rejection controller. The genetic algorithm and parallel computing technology of a cloud computing platform are introduced to tune and optimize the controller parameters, obtain precise control commands, and achieve active disturbance rejection control of the generator. Experimental results show that after applying this design method, the errors between the controlled parameters and their rated values are significantly lower than those of the comparative methods and remain within 0.5%.

Keywords:cloud computing; large hydropower station; generator; active disturbance rejection control; genetic algorithm; control performance test

0 引言

在全球能源需求持续增长与能源结构向绿色低碳深刻转型的背景环境下,大型水电站作为可再生能源发电领域的核心力量,其高效、稳定、智能的运行控制不仅关乎能源供应的可持续性,还直接影响到电力系统的整体安全与稳定^[1]。水电站发电机的运行效率与稳定性,直接影响到水电站的发电能力和经济效益,同时也深刻影响着环境友好型社会的构建进程。然而,在实际运行过程中,水电站发电机面临着复杂多变的内外干扰挑战。除了水流波动(自然因素)外,设备自身的

老化磨损、电网负荷的频繁波动、极端天气条件等因素,都会对发电机的稳定运行构成严重威胁^[2]。干扰因素不仅难以预测,而且往往具有非线性和时变性,使得传统控制方法难以全面、精准地应对,从而限制了水电站发电效率的提升,加剧了设备磨损,甚至可能引发严重的安全事故,对人员和财产安全构成威胁。因此,探索更为先进、智能的控制方法,以有效应对水电站发电机面临的复杂干扰,提升其运行效率和稳定性,已成为当前水电站运行管理领域亟待解决的关键问题^[3]。

针对大型水电站发电机自抗扰控制方法进行深入研究,对于保障电力供应稳定、促进能源可持

基金项目:中国长江电力股份有限公司资助项目(Z422202012)

第一作者简介:赵远(1986—),男,湖北天门人,高级工程师,本科,研究方向为智慧电厂、数字化电厂,13287772662@163.com。

续发展具有重要意义,相关研究成果较多。其中,文献[4]利用BDFG-VSG控制正序分量,同时采用降阶广义积分器(ROGI)的直接谐振控制调节负序分量。分析了电网电压不平衡对BDFG的影响,提出5种优化目标。设计方法在实际应用中会受到设备参数变化、电网结构复杂性等因素的影响,无法保障其鲁棒性和适应性;文献[5]提出了结合平均电流控制器的改进策略,并引入惯性系数和阻尼系数的自适应调节。采用小信号模型分析关键参数对稳定性的影响,并通过仿真和实验平台验证其有效性。设计方法虽能提高动态响应和均流效果,但会增加复杂性和成本,且自适应调节方程的设计需考虑多种因素,例如负载变化、电网稳定性等,致使其无法大范围推广及其使用;文献[6]提出了基于CS(充电站)调频能力的VSG控制策略,通过计算EV(电动汽车)调频参与度因子、评估CS调频功率可控边界和功率响应模型,设计自适应转动惯量、阻尼系数及频率-调频功率控制器。设计方法依赖于CS和EVs的调频能力,需考虑EVs的充电需求、行驶模式等因素对调频能力的影响,以及CS与电网之间的协调控制问题,致使设计方法整体运算量过大;文献[7]通过分析GCI的功角曲线和输出特性曲线,推导出输出功率和频率变化率的关系,构造惯性自适应控制算法。设计方法惯性自适应控制算法的设计需考虑多种因素,例如系统参数、电网工况等,且在实际应用中可能受到设备限制和噪声干扰的影响;文献[8]提出了一种线性自抗扰控制(LADRC)方案用于VSG电压外环控制,并采用RBF(径向基函数)在线整定关键参数。虽然LADRC方案具有优异的抗扰动能力和动态响应速度,但RBF在线整定参数的过程会增加系统复杂性和计算量,且需考虑参数整定的准确性和实时性问题。为了解决上述问题或缺陷,提出基于遗传算法和云计算的大型水电站发电机自抗扰控制方法。

1 大型水电站发电机自抗扰控制器设计

依据大型水电站发电机的控制需求,联合快速响应、高精度、强鲁棒性以及易于实现等原则,设计自抗扰控制器。其主要包括3个部分,分别为跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性状态误差反馈控制律。首先通过跟踪微分器对发电机的电流、电压、转速、功率因数与频率等输入信号进行平滑处理和微分计算,消除噪声并提高响应速

度。扩张状态观测器利用发电机状态方程,引入额外状态变量估计未知扰动,实现对发电机状态和扰动的快速、准确估计。非线性状态误差反馈控制律根据发电机状态和误差信息,基于非线性增益函数生成控制指令,调整发电机状态以实现控制目标。为了提升控制精度和效率,系统采用遗传算法和云计算平台的并行运算技术对自抗扰控制器参数进行整定与优化。通过这一系列的处理和流程,实现大型水电站发电机自抗扰控制器系统的设计,确保发电机在复杂多变的环境中高效、稳定运行。

1.1 跟踪微分器设计

跟踪微分器的主要功能是平滑处理输入信号,并快速跟踪其变化,同时提供输入信号的微分信息,对于消除输入信号的噪声、提高设计方法的响应速度和稳定性至关重要^[9]。

设定自抗扰控制器输入信号为 $\mathbf{v}(t) = \{I(t), U(t), V(t), \delta(t), F(t)\}$,其中 $I(t)$ 、 $U(t)$ 、 $V(t)$ 、 $\delta(t)$ 与 $F(t)$ 分别为大型水电站发电机的电流、电压、转速、功率因数与频率^[10]。跟踪微分器采用滤波算法和微分算法相结合的方式对输入信号 $\mathbf{v}(t)$ 进行处理,表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{y}(t) + \tau \frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} = \mathbf{v}(t) \\ \frac{d\mathbf{y}'(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [\mathbf{v}(t) - \mathbf{y}(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}(t)$ 为输入信号 $\mathbf{v}(t)$ 对应的平滑跟踪结果,其由1阶滤波器(滤波算法)输出; τ 代表1阶滤波器的时间常数,决定了滤波器的平滑程度; $\mathbf{y}'(t)$ 为 $\mathbf{y}(t)$ 的微分,即输入信号 $\mathbf{v}(t)$ 的平滑微分,由微分器(微分算法)输出。

通过调整时间常数 τ ,可以平衡跟踪速度和平滑程度之间的关系。常规情况下,较小的 τ 值使跟踪速度更快,但可能引入更多的噪声;较大的 τ 值则使平滑效果更好,但跟踪速度较慢^[11]。由此可见,在实际应用过程中,需要根据发电机自抗扰控制需求,对时间常数 τ 进行适当的调整。

上述过程完成了跟踪微分器的设计,其实现了输入信号的平滑跟踪与微分处理,为自抗扰控制器提供必要的基础信息。

1.2 扩张状态观测器设计

扩张状态观测器用于准确估计发电机的状态变量和未知扰动,为控制器提供必要的反馈信息,其有助于控制器在存在未知扰动的情况下仍能保

持良好的控制性能。

大型水电站发动机状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \alpha \mathbf{x}(t) + \beta u(t) + f(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 为发电机状态向量, 记为 $\mathbf{x}(t) = \{y(t), y'(t)\}$; $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 代表 $\mathbf{x}(t)$ 对时间的 1 阶导数; $u(t)$ 为发电机自抗扰控制输入; $f(t)$ 为未知扰动; α 与 β 分别为大型水电站发动机状态方程的参数, 其需要根据发电机实际运行情况进行具体的配置。

扩张状态观测器引入一个额外的状态变量来估计未知扰动 $f(t)$, 即扩张状态 $\mathbf{z}_f(t)$ 。扩张状态观测器的状态方程为

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \alpha \mathbf{z}(t) + \beta u(t) + \mathbf{L}[\mathbf{x}(t) - \mathbf{z}(t)] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{z}(t)$ 代表观测器状态向量, 记为 $\mathbf{z}(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_r(t)]^T$; $\dot{\mathbf{z}}(t)$ 为 $\mathbf{z}(t)$ 对时间的 1 阶导数; $\mathbf{L}$ 为观测器增益矩阵。需要注意的是, 增益矩阵 $\mathbf{L}$ 是否合适直接关系着扩张状态观测器的整体性能, 即其能否快速、准确地估计发电机状态和未知扰动。

1.3 非线性状态误差反馈控制律设计

非线性状态误差反馈控制律根据发电机状态和误差信息, 生成控制指令, 以调整发电机状态, 从而实现控制目标。

设计方法基于非线性增益函数来设计控制律, 定义发电机状态误差为

$$e(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d(t) \quad (4)$$

式中: $e(t)$ 为发电机状态误差; $\mathbf{x}_d(t)$ 为发电机期望状态。

选择一个非线性增益函数 $g[e(t)]$, 当发电机状态误差 $e(t)$ 较小时具有较小的增益, 当发电机状态误差 $e(t)$ 较大时具有较大的增益, 有助于在保持自抗扰控制器稳定性的同时提高控制精度。

基于发电机状态误差 $e(t)$ 和非线性增益函数 $g[e(t)]$ 设计控制律, 表达式为

$$u(t) = -\zeta \cdot g[e(t)] \quad (5)$$

式中 ζ 为控制增益参数用于调整控制指令。

通过跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性状态误差反馈控制律的设计, 构建出具有平滑输入处理、状态估计和非线性控制能力的自抗扰控制器。将实时采集的大型水电站发电机电流、电压、转速、功率因数与频率信息 $\mathbf{v}(t)$ 输入至自抗扰控制器中, 计算发电机自抗扰控制输入 $u(t)$, 即可实现发电机的自抗扰控制^[12]。

2 自抗扰控制器参数整定与优化

上述设计的大型水电站发电机自抗扰控制器涉及参数较多, 对其进行寻优难度较大。因此, 设计方法引入人工智能算法——遗传算法与云计算平台(并行运算技术), 对自抗扰控制器参数进行整定与优化, 从而提升发电机自抗扰控制的精度与效率^[13]。在大型水电站发电机的自抗扰控制器设计中, 引入“云计算”平台是基于其计算需求、实时性要求以及资源弹性与可扩展性的综合考量。自抗扰控制器的参数整定和优化过程极为复杂, 涉及大量数学运算和模型仿真, 尤其是在处理如电流、电压、转速、功率因数与频率等多变量、非线性系统时, 计算量更是显著增加。为了满足水电站发电机控制的实时性要求, 确保电力系统的稳定运行, 云计算平台以其强大的计算能力成为首选, 它能迅速处理数据并执行算法。此外, 云计算平台支持的并行运算技术能同时处理多个计算任务, 显著加速参数整定和优化过程的收敛, 更有效地探索参数空间, 寻找更优控制策略。例如, 在处理发电机的非线性特性, 如电磁关系和机械特性的非线性变化时, 云计算平台能够高效地进行模拟和优化。同时, 发电机的运行状态随时间、负荷和环境条件而变化, 这种时变性要求控制器能灵活适应, 而云计算平台的资源弹性确保了足够的计算力支持。面对电网波动、机械故障等未知扰动, 云计算平台也能提供有效的扰动估计和补偿策略。随着水电站发电机控制系统的升级和扩展, 云计算平台还能方便地增加计算资源, 满足未来需求。因此, 云计算平台凭借其强大的计算能力、并行运算能力和资源弹性, 成为设计和优化大型水电站发电机自抗扰控制器的理想选择。

基于遗传算法、并行运算技术的大型水电站发电机自抗扰控制器参数整定与优化流程如下所示:

1) 设定遗传个体为 $\mathbf{r}_i = \{\tau, \alpha, \beta, \zeta\}$, 其代表一组大型水电站发电机自抗扰控制器中的参数取值。与此同时, 初始化遗传算法参数, 主要包括种群规模 N_{total} 、最大迭代次数 T_{max} 等。

2) 构建适应度函数, 计算遗传个体适应度值, 表达式为

$$\gamma(\mathbf{r}_i) = \omega_1 \cdot t(\mathbf{r}_i) + \omega_2 \cdot \sigma(\mathbf{r}_i) + \omega_3 \cdot e(\mathbf{r}_i) \quad (6)$$

式中: $\gamma(\mathbf{r}_i)$ 为遗传个体 $\mathbf{r}_i$ 的适应度值; $t(\mathbf{r}_i)$ 、 $\sigma(\mathbf{r}_i)$ 与 $e(\mathbf{r}_i)$ 为遗传个体 $\mathbf{r}_i$ 对应的大型水电站发电机自抗扰控制器的控制响应时间、超调量与状态误差; ω_1 、 ω_2 与 ω_3 分别为 $t(\mathbf{r}_i)$ 、 $\sigma(\mathbf{r}_i)$ 与 $e(\mathbf{r}_i)$

的权重系数。

3) 依据选择概率 P_1 、交叉概率 P_2 与变异概率 P_3 对遗传个体进行选择、交叉与变异操作,并对新遗传个体的适应度值进行计算,采用适应度值低的新个体替代适应度值高的旧个体。

4) 当迭代次数达到最大值 $T_{\max}$ 时,输出最小适应度值 $\gamma_{\min}(r_i)$ 对应的个体,即大型水电站发电机自抗扰控制器中的参数的整定与优化结果 $\{\hat{\tau}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\zeta}\}$ 。

将遗传算法输出结果——参数整定与优化结果 $\{\hat{\tau}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\zeta}\}$ 赋值给大型水电站发电机自抗扰控制器中的参数,基于此对发电机进行实时控制,当发电机状态误差 $e(t)$ 小于或者等于阈值 $\hat{e}$ (需依据发电机实际相关信息进行设定) 时,即实现了大型水电站发电机的自抗扰控制,为发电机的稳定运行提供有效的保障。

综上,基于遗传算法和云计算的大型水电站发电机自抗扰控制流程如图 1 所示。

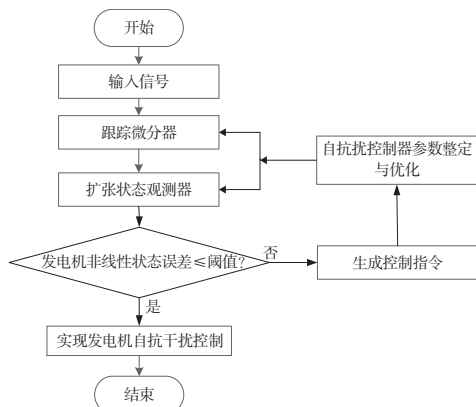


图 1 基于遗传算法和云计算的大型水电站发电机自抗扰控制流程图

3 实验与结果分析

设定基于惯性自适应的发电机控制方法与基于 RBF-LADRC 的发电机控制方法为对照方法 1 与对照方法 2,联合设计方法进行发电机控制对比实验,通过实验数据处理与计算,分析设计方法的应用性能。

3.1 实验准备

选取 SF190-32/8950 型号大型水电站发电机作为实验对象,搭建发电机控制场景,如图 2 所示。

为了不影响最终实验结论的精确性,在实验进行之前对实验对象——发电机基础参数进行配



图 2 发电机控制场景示意图

置,如下所示:

额定功率:190 MW;额定功率因数:0.85;额定电压:13.8 kV;额定电流:9.35 A;额定转速:800 r/min;额定频率:60 Hz。

大型水电站发电机自抗扰控制过程如下:首先设计自抗扰控制器,其包含跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性状态误差反馈控制律 3 部分。跟踪微分器对发电机的电流、电压、转速、功率因数与频率等输入信号进行平滑处理和微分计算,通过调整时间常数平衡跟踪速度和平滑程度;扩张状态观测器利用发电机状态方程,引入额外状态变量估计未知扰动,其增益矩阵影响估计性能;非线性状态误差反馈控制律基于发电机状态误差和非线性增益函数生成控制指令,调整发电机状态。由于该控制器涉及参数较多,寻优难度大,故引入遗传算法与云计算平台的并行运算技术进行参数整定与优化,设定遗传个体代表控制器参数取值并初始化遗传算法参数,构建适应度函数计算遗传个体适应度值,依据选择、交叉与变异概率对遗传个体进行操作,迭代优化直至达到最大迭代次数,输出最小适应度值对应的个体作为参数整定与优化结果。将此结果赋值给自抗扰控制器参数,对发电机进行实时控制,当发电机状态误差小于或等于设定阈值时,实现发电机的自抗扰控制,保障其稳定运行。

3.2 遗传算法参数最佳取值确定

以训练集合为基础,以第 2 节所示算法流程为依据,进行遗传算法迭代训练,记录迭代次数、最小适应度值及其相应的遗传算法参数取值信息,从而确定遗传算法参数最佳取值。

迭代次数与最小适应度值之间的关系如图 3 所示。

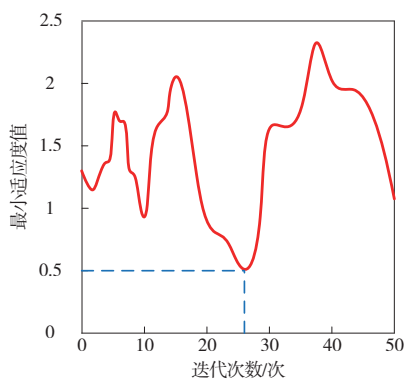


图3 迭代次数与最小适应度值关系图

当迭代次数为26次时,最小适应度值达到极

小值0.5,此时遗传算法参数取值即为最佳取值,如下所示:

种群规模 N_{total} :150;最大迭代次数 T_{max} :26;
选择概率 P_1 :0.01;交叉概率 P_2 :0.5;变异概率 P_3 :0.1;发电机状态误差阈值:0.03。

3.3 实验结果分析

应用设计方法、对照方法1与对照方法2对发电机进行实时控制,记录控制后发电机的电流、电压、转速、功率因数与频率,计算其与发电机额定电流、额定电压、额定转速、额定功率因数与额定频率之间的误差,以此来显示应用方法的性能与效果,如图4所示。

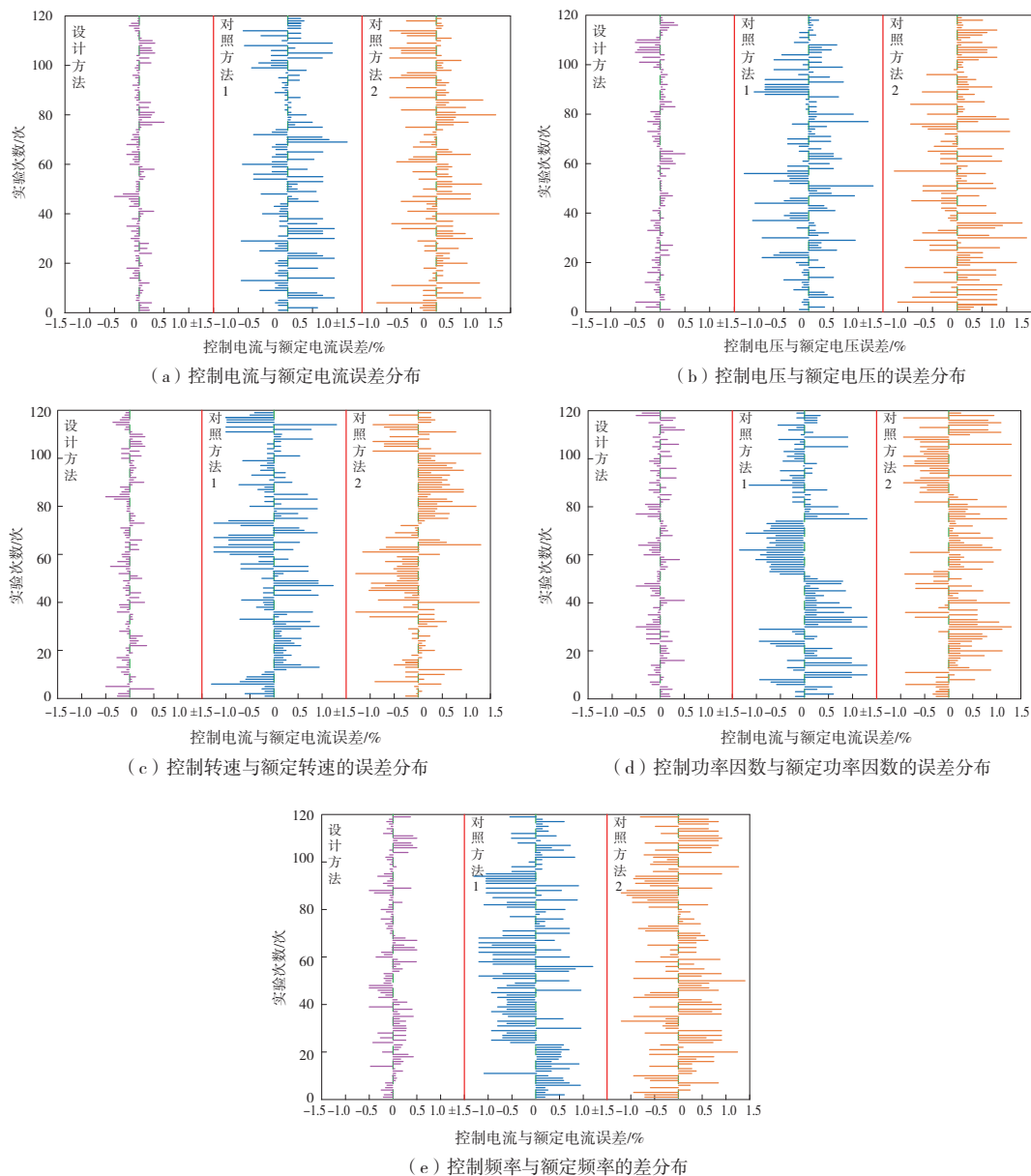


图4 发电机各控制指标实验误差对比

设计方法应用后控制电流、电压、转速、功率因数、频率与其额定数值之间的误差均显著低于对照方法1与对照方法2,并维持在 $\pm 0.5\%$ 范围内。这主要是因为设计方法引入了人工智能算法——遗传算法与云计算平台的并行运算技术。其中,遗传算法作为一种模拟自然选择和遗传机制的搜索算法,能够自动探索并收敛至最优或近似最优的解集,这在自抗扰控制器的参数调优中尤为关键。通过不断迭代,遗传算法能够识别出最小化电流、电压、转速、功率因数、频率与额定数值误差的参数组合,从而实现了自抗扰控制器性能的显著提升。与此同时,云计算平台的并行运算技术为遗传算法的大规模计算需求提供了强有力的支持。通过分布式计算资源的高效调度,云计算平台能够迅速处理遗传算法在搜索过程中产生的海量数据,显著加快了遗传算法的执行速度,并确保了优化过程的稳定性和准确性。此种计算能力的飞跃,使得设计方法能够在更短的时间内找到更优解,进一步缩小了控制参数与额定数值之间的偏差。综上所述,设计方法的成功应用,不仅得益于人工智能算法——遗传算法与云计算平台并行运算技术的深度融合,更在于其能够针对发电机控制的实际需求,提供一套高效、准确且可持续发展的优化解决方法,不仅显著提升了自抗扰控制器的运行效率,也提高了发电机控制的精度。

4 结语

大型水电站作为清洁、可再生的能源来源,对于满足中国能源需求、保护环境具有重要意义。然而,水电站运行过程中产生的振动、噪声等扰动问题也不容忽视。自抗扰控制通过提高发电机的控制精度和稳定性,有助于减少振动、噪声等扰动因素的影响,从而保护周边环境和生态系统。由此可见,自抗扰控制方法的深入探究不仅有助于改善大型水电站稳定性,提高电能品质,降低经济损失,同时还能够提升发电机对于各种不确定性和外部干扰的适应性。因此,提出基于遗传算法和云计算的大型水电站发电机自抗扰控制方法研究。实验结果显示:设计方法应用后有效降低了控制电流、电压、转速、功率因数、频率与其额定数值之间的误差,能够更加有效地控制发电机参数,

为相关研究提供一定的帮助。

参考文献:

- [1] 高长伟,黄翀阳,郭丹,等. 基于导前微分控制的虚拟同步发电机功频特性控制策略[J]. 太阳能学报, 2023,44(4):359-370.
- [2] 李春,马凡,胡祺. 独立电力系统中基于模式切换的虚拟同步发电机控制方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(9):3474-3483.
- [3] 许文浩,马恒瑞,李笑竹,等. 面向即插即用工况的多虚拟同步发电机控制参数自适应协调优化策略[J]. 现代电子技术, 2023,46(5):89-95.
- [4] 金石,梁帅,施隆. 不平衡电网下无刷双馈风电系统的虚拟同步发电机控制[J]. 电网技术, 2024,48(6):2426-2435.
- [5] ZHANG H W,ZHANG Q J,LIU Y C,et al. A modified virtual generator control for DC microgrid with improved dynamic characteristics of DC bus voltage and enhanced current sharing effect [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022,17:3445-3456.
- [6] 丁乐言,柯松,杨军,等. 基于充电站调频能力的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电网技术, 2024,48(6):2416-2425.
- [7] 于晶荣,孙文,于佳琪,等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(4):137-144.
- [8] 杨旭红,杨一矜,潘宇,等. 基于 RBF-LADRC 的虚拟同步发电机控制策略[J]. 太阳能学报, 2024,45(3):319-325.
- [9] 朱慧敏,苑舜,李春来. 含储能环节的光伏电站虚拟同步发电机控制策略与分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5):45-50.
- [10] 王树清,张磊,陈树桥,等. 基于数字孪生的双馈风力发电机功率波动平抑系统[J]. 电子设计工程, 2024,32(20):140-143,148.
- [11] 赵文祥,郝亮,和阳,等. 双三相永磁同步发电机直流母线无电流传感器稳压控制[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(10):3995-4005.
- [12] 黄金旺,梁卓,李海平,等. 基于边频的发电机啸叫分析与控制[J]. 微特电机, 2022,50(4):7-11.
- [13] 朱焜秋,沈良瑜. 采用改进遗传算法优化 LS-SVM 逆系统的外转子无铁心无轴承永磁同步发电机解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2024,44(5):2037-2047.

收稿日期:2024-12-18