

电力系统故障自愈控制中智能算法优化应用

李楠

国网江苏省电力有限公司溧阳市供电分公司 江苏省常州市 213300

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21185

[摘要] 电力系统故障自愈控制是保证智能电网可靠运行的重要手段，而其本质是通过对故障进行及时发现、辨识以及重配置等操作使其恢复正常工作状态。传统的自愈控制由于难以应对高维、非线性和时变不确定性问题，因此亟须一种新的方法来提高其自愈能力。本文主要针对智能算法在电力系统故障自愈控制中所起的作用进行研究，首先介绍了智能算法的基本概念及其作用机理，其次探讨了智能算法应用于自愈控制的优势，并以故障定位、网络重构和恢复策略三个方面为例进一步说明如何利用智能算法优化故障自愈效果。结果表明，合理地使用智能算法可以有效提高故障自愈的速度、准确率及鲁棒性，有利于建设安全可靠智能电网。

[关键词] 电力系统；故障自愈控制；智能算法；优化应用；网络重构

引言

随着电网规模日益增大以及分布式电源接入比例不断提高，电力系统运行条件越来越复杂。传统的继电保护以及人工恢复方法已不能适应高可靠性的要求，而故障自愈控制是目前智能电网研究的一个重要方向。所谓故障自愈控制就是指当出现故障时，系统能自行检测出故障点，切除故障部分并且迅速给非故障区送电，而且不需要或者少量的人工参与。要达到这个目的就需要有很好的、有效的控制策略。近年来，基于人工智能、群体智能、启发式优化等的智能算法被广泛应用于电力系统中，由于它们具有自主学习、自我调整以及并行计算的特点，从而为故障自愈控制提供了一种新思路。但是如何针对自愈控制的要求对这些智能算法进行改进以更好地应用于实际情况依然是一个难题。本文从这三个方面对智能算法在电力系统故障自愈控制中的应用进行综述，以便全面了解智能算法在电力系统故障自愈控制中的优化应用情况。

一、电力系统故障自愈控制中智能算法应用的理论基础

(一) 故障自愈控制的基本原理与结构

故障自愈控制是基于广域测量、通信及决策系统的一种控制方式，在电力系统受到扰动或者出现故障时，可以自主发现故障、识别故障、切除故障以及恢复供电。它主要由四个部分组成：信息采集层、状态评估层、决策控制层、执行

恢复层。信息采集层利用智能电子设备、相量测量单元等获得当前实际信息；状态评估层对接收到的信息进行初步处理并确定是否发生了故障；决策控制层根据事先制定规则或者优化方法给出相应对策；执行恢复层通过操作断路器、改变潮流分配等方式来达到重新配置的目的。而要使整个过程正常运转，需要有准确合理的计算结果。在一些比较复杂的故障情形中，传统的求解方式很难在短时间内得到最优的结果，因此为智能算法的应用提供了可能。

(二) 典型智能算法的类型与运行机制

应用于故障自愈控制的智能算法主要有：人工神经网络、支持向量机、粒子群算法、遗传算法、蚁群算法以及深度强化学习等。人工神经网络基于神经元间的连接关系，用于故障类型识别和分类；在数据量较少时，支持向量机能较好地进行分类泛化；粒子群算法和遗传算法都是属于进化类型的优化技术，在种群中不断尝试寻找最佳重构方式；蚁群算法模仿蚂蚁的信息素更新过程，可以用于求解配电网中路径选择问题；而深度强化学习结合了对环境感知能力和决策学习能力，可以在变化环境中进行端到端的学习自愈策略^[1]。不同的算法有不同的特点。比如，粒子群算法虽然快速，但是容易陷入局部最优；遗传算法具有较强的全局搜索能力，但是计算复杂度较高；深度强化学习虽然需要大量的训练，但是反应快。了解各种算法的工作原理有助于更好地应用它们。

(三) 智能算法与传统自愈方法的比较分析

传统的故障自愈一般采用基于规则的方法、专家系统或者数学规划的方法。基于规则的方法依靠人的经验和判断力来处理问题,不能解决各种各样的故障情况;专家系统的知识库需要不断更新而且灵活性不够;而数学规划的方法随着系统的增大就会出现“维数灾”,实时性较差。智能算法具有很好的非线性映射能力、自我学习能力以及并行计算能力,在不需要精确的数学模型的情况下,也能找到一个接近最优的解决方案。智能算法也有其自身的缺点,即训练时间很长,且对参数的选择很敏感,还缺乏透明度。因此,仅仅用一种智能算法去代替另一种智能算法并不能解决所有的困难,需要针对电力系统故障自愈的特点,对智能算法的结构或者参数进行改进,使其能够达到一定的精度,且具有较好的实时性和鲁棒性。

二、智能算法优化在电力系统故障自愈控制中的重要意义

(一) 提升故障识别与定位的精确性

故障检测及定位是自愈控制的前提条件,它对后续断开和恢复起着至关重要的作用。在含有分布式电源的配电网中,由于故障电流特征较为复杂,传统的过流保护可能会发生误动作或者拒动作。而经过改进的智能化方法可以从大量的历史故障信息中学习到故障特点,得到高维非线性的映射关系,因此能够极大地提升不同种类故障的辨识精度。在故障测距方面,采用多种群粒子群算法也可以有效地避免陷入局部最优解而导致定位不准确,进而缩小故障停电范围,有利于后续实现自愈控制。

(二) 增强网络重构与恢复决策的实时性

故障隔离后,网络重构以及恢复决策必须尽快做出,以便使停电时间不超过给定的要求。传统的数学规划方法求解时间随着节点数目增加呈指数级增长,不能够满足实时性需求。而智能算法具有并行搜索、快速响应的优势,但是普通的智能算法在实际应用中由于其收敛速度较慢,往往不能得到满意的结果^[2]。因此,改善实时性能可以使自愈控制在转瞬之间找到最优解,大大降低用户的停电时间,这对含有重要用电设备的企业以及重要的公共设施都是非常有意义的。

(三) 提高自愈策略对系统不确定性的适应能力

实际电力系统中有许多不确定因素,例如分布式电源出力波动、负荷随机变化、通信延时以及设备参数漂移等,在传统自愈方法中一般考虑的是确定性问题,而实际情况往往与设定条件有偏差,这时自愈效果会大大降低;改进后的智能化方法可以利用在线学习或者滚动优化来应对不确定性。而基于深度强化学习的自愈控制表明,经过环境交互训练后产生的策略网络能够在各种情况下给出相应的应对恢复措施。

三、智能算法在电力系统故障自愈控制中的优化应用

(一) 面向故障定位的智能算法优化应用

故障定位环节算法优化主要是针对特征提取效率以及定位模型泛化能力进行改进。一种方法是利用混合智能方法,即遗传算法和反向传播神经网络结合使用。遗传算法用于优化神经网络初始权值及阈值以避免传统反向传播算法易陷入局部极小值问题,在此基础上采用小波包变换获取故障暂态信号能量特征作为输入来建立多源信息融合定位模型^[3]。这种方法充分发挥了遗传算法全局搜索能力和神经网络对非线性映射的优良特性,在高阻接地、弧光故障等情况下均有良好表现。对比实验结果表明,在不同过渡电阻以及故障初始角下,此方法所获得定位误差都显著低于单个神经网络定位模型定位误差,平均降低幅度约为30%—45%。

另一种方法是对含有分布式电源的配电网,改进蚁群算法中的信息素挥发因子以及启发因子,使之能够随着故障电流路径的变化而实时调整,从而较好地解决双向潮流造成的定位不确定性的问题。在此过程中,挥发因子随迭代次数增大而逐渐减小,以便保存有用的历史信息;启发因子加入分布式电源容量的权值来进行引导,让蚂蚁更倾向于沿馈线主干线寻找。这几种方法结合起来可以大大提高故障检测的成功率及鲁棒性。在改进的IEEE 34节点分布式馈线上,相比原有的蚁群算法,其正确率达到96%以上,而且收敛速度快25%,符合配电系统自动化对于快速性和可靠性的要求。

(二) 面向网络重构的智能算法优化应用

网络重构是自愈控制的重要步骤,在切除故障之后通过

对开关的操作使非故障部分重新获得电力供应的同时还要考虑网损、负荷平衡以及操作次数等因素的影响。而这是一个多目标优化的问题。普通的粒子群算法容易产生早熟现象,在实际应用中,使用基于帕累托支配关系的多目标粒子群算法,并且使用自适应网格来保存外部存档,保证个体多样性,同时对速度更新公式进行改进,添加变异操作,避免粒子过早收敛至局部最优值。自适应网格将目标空间划分为许多超立方体,在低密度区域的粒子被更多地保留,有利于引导整个群体向着真实的帕累托前沿分布均匀。

对于大规模配电网,利用图论广度优先搜索方法,在编码过程中排除物理上不可能存在的网络结构,缩小不必要的搜索范围。广度优先搜索提前求得所有的连通生成树,使粒子编码局限于可行域内,从而不必进行大量的无效验证工作[4]。此改进措施应用于典型的 IEEE 33 节点以及 IEEE 69 节点系统时,能够及时提供符合各种限制条件下的帕累托最优解集供调度员根据自身需求选取最优恢复方案,明显优于传统的基于单一目标遗传算法。如以网损和操作次数作为优化目标时,多目标粒子群所求得的非支配解集包含了从小到大的所有可能的操作次数与网损关系曲线,而使用穷举法需要花费的时间远大于前者两个数量级以上。

(三) 面向恢复策略生成的智能算法优化应用

恢复策略生成需使系统能够在出现故障时自动生成一系列控制命令序列,包括断路器开闭顺序、分布式电源出力调整以及负荷逐步接入方式。而传统的基于查表法的方式缺乏灵活性,不能应对分布式电源出力变化的情形^[5]。而深度强化学习方法在此能够发挥重要作用,在此方面的应用主要体现在以下三个方面:首先建立马尔科夫决策过程,把系统的各种状态映射成恢复动作的概率分布,其中的状态变量包括节点电压、支路电流以及开关位置等;其次使用双重深度 Q 网络来解决过拟合的问题,使得价值函数能够得到更准确的估计,同时由于分别定义动作的选择器和动作估价器而减少了学习过程中出现的误差;最后设计一种综合奖励函数,考虑恢复花费的时间、恢复的负荷量以及所采取的操作次数等。

训练之后的深度 Q 网络可以在毫秒级的时间内给出当前

最优恢复动作,在真实仿真实验中,此优化策略对于不同类型故障具有很高的平均恢复成功率,在 90%以上并且恢复动作符合电网的安全要求,不同于传统的静态优化方式,由于其可以不断地学习来应对系统的结构变化,从而具备很强的工程应用价值,在经历了拓扑变化或者分布式电源接入或者退出之后,智能体只需要进行很少量的微调就可以再次收敛,相比需要重新建立模型的优化方式减少了大约 80%的计算时间,这也是它能成为一种有效的自适应自愈控制技术的原因。

总结:

电力系统的故障自愈控制是短时间内进行故障识别以及修复的一种复杂的最优化问题。而智能算法由于拥有非线性映射、自主学习以及并行优化的特点,在提高自愈控制的自动化程度上具有很大帮助。从对故障定位、网络重构以及恢复方案的各自特点出发,对粒子群算法、遗传算法、蚁群算法以及深度强化学习等智能算法在结构、参数或者混合策略等方面加以改进,可以有效改善自愈控制的准确率、及时性和鲁棒性。未来,还需要设计更加简洁有效的智能算法,实现不同应用场景之间知识和经验的共享,并且让算法与物理世界有机结合,是今后的研究方向。

[参考文献]

- [1] 吕佩哲, 刘晓宇, 鲁昊伦, 等. 电力系统故障诊断与自愈技术[J]. 灯与照明, 2026, 50(01): 219-221.
- [2] 李勋, 王宏震. 自愈式新型配电系统技术探究[J]. 中国科技纵横, 2026, (03): 19-20+93.
- [3] 冯忠海. 新能源电力系统的故障诊断与自愈技术研究[J]. 家电维修, 2025, (04): 113-115.
- [4] 张泽. 电力系统变电运维中智能监测与故障诊断系统设计[J]. 电气技术与经济, 2026, (04): 273-275.
- [5] 潘宇舞, 于汉普. 配电网高故障线路的整治探讨[J]. 科技创新, 2019, (03): 56-57.

作者简介: 李楠(1995 年 10 月), 女, 汉族, 江苏常州人, 本科, 中级工程师, 研究方向生产运行-电力系统及其自动化。