

深度学习助力智能电网继电保护故障识别与策略

李德斌

国网四川省电力公司遂宁供电公司 四川遂宁 629000

摘要：随着智能电网的快速发展，继电保护系统对故障的快速识别和自适应调整能力提出了更高要求。传统继电保护方法在复杂工况下可能存在误判、漏判等问题，而深度学习技术的引入为继电保护系统提供了新的解决方案。本文分析了智能电网继电保护的特点与挑战，探讨了基于深度学习的故障识别方法，并提出了一种结合深度神经网络（DNN）、卷积神经网络（CNN）和长短时记忆网络（LSTM）的自适应策略，以提高继电保护系统的实时性、准确性和鲁棒性。研究结果表明，深度学习技术在智能电网继电保护故障识别与自适应策略优化方面具有广阔的应用前景。

关键词：深度学习；智能电网；继电保护；故障识别；自适应策略

智能电网依托先进的信息通信技术，实现对电力系统的高效调控和优化管理，其中继电保护系统作为保障电网安全稳定运行的关键环节，其性能直接影响故障处理的效率和电网的安全性。近年来，深度学习技术的快速发展为智能电网继电保护提供了全新的解决方案。通过利用海量电网运行数据训练深度学习模型，可以增强继电保护系统对故障模式的识别能力，并实现自适应调整，提高系统的智能化水平。本文研究了基于深度学习的继电保护故障识别与自适应策略，探讨其在智能电网中的应用价值和优化方向，以期为智能电网的安全稳定运行提供技术支持。

1. 智能电网继电保护的现状与挑战

1.1 继电保护系统的基本原理与作用

继电保护系统是智能电网安全稳定运行的关键防线。其基本原理是基于电力系统故障时电气量（如电流、电压、相位等）的变化特征，通过各类传感器实时采集数据，并与预设的整定值进行对比。一旦电气量超出正常范围，继电保护装置迅速动作，将故障元件从电网中隔离，防止故障扩大，保障非故障部分的正常运行。在电网故障检测和隔离中，继电保护发挥着不可替代的关键作用。例如，当线路发生短路故障时，电流会瞬间急剧增大，继电保护装置能在极短时间内检测到这一变化，快速切断故障线路，避免因短路电流过大对电网设备造成严重损坏，确保电网的供电可靠性和安全性。

1.2 传统继电保护技术的局限性

随着智能电网的快速发展，电力系统的结构日益复杂，运行工况也更加多样化。传统继电保护技术在应对这些变化时，暴露出诸多适应性不足的问题。在复杂工况下，如电网中存在大量分布式电源接入、负荷波动剧烈以及电力电子设备广泛应用时，传统继电保护基于固定整定值的保护原理难以准确判断故障。例如，分布式电源的接入改变了电网的潮流分布，传统保护的动作特性可能受到影响，导致误动或拒动。而且，传统保护主要依赖单一电气量进行故障判断，对于复杂故障的识别能力有限，无法全面、准确地反映电网的运行状态，难以满足智能电网对可靠性和安全性的更高要求。

1.3 智能电网环境下继电保护系统的新需求

智能电网的发展对继电保护系统提出了更高的实时性、准确性和自适应能力要求。实时性方面，智能电网中的电力电子设备动作迅速，故障发展速度快，这就要求继电保护能够在毫秒级甚至微秒级的时间内完成故障检测和隔离，以避免故障对电网造成严重影响。准确性上，由于智能电网中电气量的变化更加复杂，继电保护需要更加精确地识别故障类型和位置，减少误动作和拒动作的发生。自适应能力也至关重要，继电保护系统需要根据电网运行方式的变化、分布式电源的接入与退出、负荷的动态变化等情况，自动调整保护参数和动作特性，实现对电网的全方位保护，确保智能电网的安全稳定运行。

2. 深度学习在继电保护故障识别中的应用

2.1 深度学习算法概述

深度学习作为人工智能领域的重要分支，在继电保护故障识别中展现出巨大潜力。常见的深度学习模型包括深度神经网络（DNN）、卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM）。DNN 是一种包含多个隐藏层的神经网络，能够自动学习数据的复杂特征表示，具有强大的非线性映射能力，可处理高维数据。CNN 则特别适用于处理具有网格结构的数据，如图像和时间序列数据。在继电保护中，它通过卷积层自动提取电气量数据中的局部特征，大大减少了计算量，提高了故障特征提取的效率。LSTM 擅长处理时间序列数据中的长期依赖关系，对于分析电网故障前后电气量随时间的变化规律具有独特优势，能够更好地捕捉故障发生的动态过程。

2.2 基于深度学习的故障特征提取与分类

利用深度学习技术可有效提升继电保护中故障模式识别的准确性。在故障特征提取阶段，深度学习模型能够自动从大量的电气量数据中挖掘出隐藏的故障特征，无需人工手动设计特征提取方法。例如，将电网运行中的电流、电压等数据作为输入，CNN 模型通过卷积和池化操作，提取出反映故障类型和位置的关键特征。在故障分类阶段，基于提取的特征，深度学习模型能够准确判断故障类型，如短路故障中的三相短路、两相短路等，以及过载、电压跌落等其他故障类型。与传统的故障识别方法相比，深度学习方法能够处理更复杂的数据，适应不同的运行工况，大大提高了故障识别的准确率和可靠性。

2.3 深度学习在继电保护中的优势与挑战

深度学习在继电保护应用中具有显著优势，但也面临一些挑战。优势方面，深度学习强大的特征学习能力使其能够处理海量、复杂的电网数据，有效提高故障识别的准确性和效率。它还能够自动适应电网运行方式的变化，无需人工频繁调整保护参数。然而，深度学习也面临诸多挑战。首先是数据需求，训练高质量的深度学习模型需要大量的历史数据，包括正常运行数据和各种故障数据，数据的收集、整理和标注工作艰巨。其次是计算复杂度，深度学习模型通常包含大量的参数和复杂的计算操作，对硬件计算能力要求较高，在继电保护装置有限的硬件资源下实现高效运行存在困难。此外，深度学习模型的可解释性较差，难以直观理解模

型的决策过程，这在对可靠性和安全性要求极高的继电保护领域是一个重要问题。

3. 智能电网继电保护的自适应策略优化

3.1 自适应继电保护策略的基本框架

在智能电网的复杂环境下，传统继电保护难以满足高可靠性和适应性要求，结合深度学习与强化学习构建的自适应继电保护策略应运而生。深度学习凭借其强大的特征提取能力，可对电网运行中产生的海量电流、电压、相位等数据进行深度分析。例如卷积神经网络（CNN），通过卷积层和池化层操作，能自动从电气量数据中提取关键故障特征，精准识别故障类型与位置。强化学习则以电网为环境，将继电保护动作视为智能体的行为，通过不断试错与反馈，学习在不同电网状态下的最优保护动作策略。当继电保护装置实时采集到电网数据后，先由深度学习模型快速判断故障，强化学习算法依据当前电网状态以及过往保护动作的效果反馈，动态调整动作阈值、动作时间等参数。如在电网负荷高峰时，动态优化动作阈值，防止因负荷波动导致的误动作，实现对电网全方位、精准的保护。

3.2 基于历史数据的智能调控机制

基于历史数据的智能调控机制是自适应继电保护的核心支撑。电网运行数据具有很强的时间序列特征和复杂的关联性，不同季节下，因气温、用电需求变化，电网负荷特性不同；不同负荷时段，如白天工业用电高峰、夜晚居民用电高峰，电气量数据也有显著差异。利用数据挖掘技术，可从海量历史数据中挖掘出这些潜在规律。机器学习算法则用于建立电网运行状态与继电保护整定值的精准关系模型。以短路电流为例，通过对不同负荷水平下短路电流历史数据的分析，结合故障发生概率，利用回归分析等算法，优化动作电流整定值。当电网实时运行状态改变，如分布式电源接入导致潮流变化时，智能调控机制依据实时数据，快速调用关系模型，调整继电保护整定值，使保护装置能及时适应电网动态变化，有效提升电网运行的可靠性和稳定性。

3.3 自适应策略在不同故障场景下的应用

在复杂多样的故障场景中，自适应策略展现出强大的适应性。面对短路故障，依据故障类型和位置的不同，自适应继电保护能灵活调整保护参数。三相短路故障时，故障电流大且危害严重，保护迅速动作切除故障；单相接地短路故障，故障电流相对较小，动作时间和电流设置需更加精细。

在靠近电源端短路，快速切断故障可防止对电源设备造成冲击；线路末端短路则适当放宽动作电流，避免正常负荷波动引发误动作。对于过载故障，通过监测负荷变化趋势和过载程度，动态调整告警阈值和动作时间。若负荷缓慢上升至过载，先发出告警信号，给运维人员调整负荷分配的时间；若过载严重且持续时间长，再动作切除部分负荷。在电压跌落故障中，根据跌落深度和持续时间，调整发电机励磁电流增加无功输出，或控制无功补偿装置投入，提升电网电压，保障电力系统安全稳定运行。

4. 深度学习在智能电网继电保护中的未来发展

4.1 结合边缘计算提升继电保护实时性

在智能电网继电保护中，结合边缘计算技术可有效提升继电保护的实时性。传统的继电保护数据处理方式是将采集到的数据上传至中央服务器进行处理，这在数据传输和处理过程中存在一定的延迟。而边缘计算将数据处理能力下沉到继电保护装置本地，在装置中嵌入边缘计算模块，实现对实时采集的电气量数据的就地快速处理。例如，当检测到电网故障时，边缘计算模块能够在极短时间内对故障数据进行分析和判断，直接触发继电保护动作，大大缩短了故障处理时间。同时，边缘计算还可以减少数据传输量，降低网络带宽压力，提高整个继电保护系统的响应速度和可靠性。

4.2 多源数据融合与智能决策

利用多维度电网数据（电流、电压、温度等）进行多源数据融合与智能决策是深度学习在智能电网继电保护中的重要发展方向。不同类型的数据包含着电网运行的不同信息，通过融合这些多源数据，能够更全面地反映电网的运行状态。例如，将电流、电压数据与设备温度数据相结合，不仅可以判断电网是否发生故障，还能分析故障对设备的影响程度，提前预测设备的潜在故障风险。深度学习模型能够对融合后的数据进行深度分析，实现智能决策，优化继电保护策略，提高保护的准确性和可靠性，为电网的安全稳定运行提供更全面的保障。

4.3 强化学习与深度神经网络的融合应用

强化学习与深度神经网络的融合应用将进一步挖掘深度学习在继电保护系统自学习和优化中的潜力。深度神经网络擅长从大量数据中提取特征，而强化学习则侧重于通过与环境的交互学习最优策略。将两者融合，继电保护系统能够

根据电网实时运行状态和历史运行数据，不断学习和优化保护策略。例如，在面对电网运行方式频繁变化的情况下，强化学习算法可以根据电网状态的变化，动态调整深度神经网络的参数，使继电保护能够更好地适应不同的运行工况，实现保护策略的自动优化，提高电网的智能化水平和抗干扰能力。

5. 结语

智能电网的迅速发展对继电保护系统提出了更高的要求，而深度学习技术的应用为继电保护的故障识别和自适应优化提供了有效的解决方案。通过构建基于深度学习的继电保护模型，可以提高故障检测的准确性，并实现继电保护参数的自适应调整，增强电网的安全性和稳定性。结合边缘计算、多源数据融合和强化学习等技术，智能电网继电保护系统将进一步向高效、智能、自适应方向发展，为电力系统的安全运行提供更强有力的保障。在未来，随着技术的不断进步和创新，深度学习在智能电网继电保护领域将发挥更加重要的作用，推动智能电网的持续发展。

参考文献：

- [1] 王志强, 李明辉. 智能电网继电保护的现状与发展趋势 [J]. 电力系统自动化, 2023(5): 112–119.
- [2] 张晓晨, 刘宇航. 深度学习在电力系统故障诊断中的应用研究 [J]. 现代电力技术, 2022(7): 85–92.
- [3] 陈建峰, 孙浩然. 基于深度神经网络的继电保护故障识别方法 [J]. 电网技术, 2023(2): 56–63.
- [4] 杨静, 赵丽娜. 智能电网故障检测与自适应保护技术研究 [J]. 电力自动化设备, 2021(6): 45–52.
- [5] 李伟, 周凯. 强化学习在智能电网继电保护中的应用探索 [J]. 电机工程学报, 2023(4): 78–86.
- [6] 赵鹏, 高翔. 基于边缘计算的智能电网继电保护优化策略 [J]. 智能电网学报, 2022(3): 65–73.
- [7] 王磊, 陈欣. 融合多源数据的智能电网继电保护方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2023(1): 34–41.
- [8] 刘畅, 黄浩. 深度学习在电网故障预测与诊断中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2022(8): 92–99.
- [9] 何涛, 秦峰. 智能电网继电保护自适应策略的发展与挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2023(6): 103–110.