

电力系统故障诊断与保护策略研究

马智强

国能准能集团生产服务中心 内蒙 鄂尔多斯 010300

摘要：随着电力系统规模的不断扩大和复杂性的增加，故障诊断与保护策略成为确保电网安全稳定运行的关键。本文首先分析了电力系统故障的特点和分类，然后探讨了基于贝叶斯网络、机器学习等先进技术的故障诊断方法，并研究了电力系统保护的基本原理和策略。最后，提出了未来电力系统故障诊断与保护技术的发展趋势。

关键词：电力系统；故障诊断；保护策略；贝叶斯网络；机器学习

引言

电力系统作为现代社会的基础设施，其稳定性和安全性至关重要。然而，由于各种原因，如设备老化、自然灾害、人为误操作等，电力系统故障时有发生。因此，研究高效的故障诊断与保护策略，对于提高电力系统的可靠性和安全性具有重要意义。

1 电力系统故障概述

1.1 故障的特点与分类

电力系统故障，作为影响电网稳定运行的关键因素，其特点主要体现在电流、电压、频率等核心电气参数的显著异常上。这些异常往往源于多种物理现象，包括但不限于短路、接地不良、线路断裂等。从故障性质及表现形态出发，我们可以将电力系统故障进一步细分为几大类：短路故障，以其高发性与严重性位居首位，常因线路间不当接触或设备内部绝缘失效引发；断路故障，即线路或设备连接中断，导致电流无法正常流通；接地故障，则是指电气设备或线路与大地之间出现异常连接，影响系统正常运行。每类故障均携带特定的电气特征，对系统的稳定运行构成不同层面的威胁。

1.2 故障的深远危害

电力系统故障不仅直接威胁设备安全，可能导致变压器、开关设备等关键组件损坏，还可能引发系统电压波动、频率偏移，进而破坏电网的稳定性，甚至触发大规模的停电事故。此类故障不仅造成巨大的经济损失，影响工业生产和商业运营，还严重干扰居民日常生活，如通讯中断、交通混乱等，社会影响广泛而深远。

2 电力系统故障诊断方法

2.1 基于贝叶斯网络的故障诊断

贝叶斯网络，作为一种强大的概率图模型，能够直观地表示变量之间的依赖关系和不确定性。在电力系统故障诊断领域，贝叶斯网络通过构建故障与症状之间的概率关系图，为诊断提供了有力的数学工具。传统的

贝叶斯网络故障诊断方法主要依赖于先验知识和历史数据来构建网络结构，并计算各节点（即故障和症状）的条件概率。然而，在实际应用中，由于电力系统规模庞大、故障类型多样，且存在诸多不确定因素，如天气变化、设备老化等，使得先验知识的获取和准确概率的计算变得异常困难。为了克服这些挑战，本文提出了一种扩展贝叶斯网络的故障诊断方法^[1]。该方法在传统贝叶斯网络的基础上，引入了异常信息和模糊规则。异常信息来源于实时监测数据，能够反映系统当前状态与正常状态的偏差，从而为故障诊断提供即时线索。而模糊规则则用于处理那些难以精确量化的信息，如“设备轻微发热”或“电压略有波动”，这些模糊信息在故障诊断中往往具有不可忽视的价值。通过引入异常信息和模糊规则，扩展贝叶斯网络能够在信息不完备或模糊的情况下，更准确地计算故障发生的概率，从而提高诊断的准确性。此外，该方法还具有良好的可扩展性，可以随着新故障类型和症状的出现而不断更新和完善网络结构。

2.2 基于机器学习的故障诊断

机器学习，作为人工智能领域的一个重要分支，通过让计算机从数据中自动学习并提取规律，为电力系统故障诊断提供了新的思路。支持向量机（SVM）、人工神经网络（ANN）等机器学习算法，因其强大的数据处理能力和泛化能力，在故障诊断中得到了广泛应用。SVM是一种二分类模型，通过寻找一个超平面将不同类别的数据点分开，从而实现故障的分类诊断。在电力系统故障诊断中，可以将故障类型和症状作为输入特征，通过训练SVM模型来识别新的故障样本。SVM的优点在于其分类效果好、计算速度快，且对于高维数据具有较好的处理能力。ANN则是一种模拟人脑神经元结构的网络模型，通过多层神经元的连接和权重调整来实现复杂的非线性映射。在故障诊断中，ANN可以通过学习大量历史故障数据，建立故障与症状之间的非线性关系模

型。当新的故障发生时, ANN能够快速准确地输出故障类型, 实现故障的快速定位。基于机器学习的故障诊断方法具有自动化程度高、诊断速度快、准确率高等优点。然而, 其性能高度依赖于训练数据的质量和数量。在实际应用中, 由于电力系统故障数据的稀缺性和不平衡性(即正常数据远多于故障数据), 使得机器学习模型的训练变得具有挑战性。此外, 模型的可解释性也是一大难题, 对于复杂的神经网络模型, 往往难以解释其决策过程, 这在一定程度上限制了其在电力系统故障诊断中的广泛应用。

2.3 基于专家系统的故障诊断

专家系统是一种模拟人类专家决策过程的计算机系统, 通过集成大量领域知识和推理机制来解决复杂问题。在电力系统故障诊断中, 专家系统通过收集和整理电力专家的故障诊断经验和知识, 构建知识库和推理机, 实现对故障的智能化诊断。专家系统的核心在于知识库和推理机的设计。知识库中包含了大量的故障规则、诊断方法和经验案例, 是专家系统进行故障诊断的依据。推理机则负责根据输入的症状信息, 在知识库中搜索匹配的规则或案例, 并通过逻辑推理得出故障类型。基于专家系统的故障诊断方法具有知识集中、推理能力强、易于理解和解释等优点。它能够模拟电力专家的思维过程, 对复杂故障进行逐步推理和分析, 得出准确的诊断结果^[2]。此外, 专家系统还可以根据实际需求进行知识库的更新和扩展, 以适应不断变化的电力系统环境。然而, 专家系统也存在一些局限性。首先, 知识库的构建和更新需要耗费大量的人力和时间, 且受限于专家经验的有限性, 可能无法覆盖所有故障类型。其次, 推理机的效率和准确性受到知识库质量和推理规则的影响, 对于复杂或未知的故障类型, 可能无法给出准确的诊断结果。最后, 专家系统的自适应能力和学习能力较弱, 难以应对电力系统中的新设备、新技术和新故障类型。

3 电力系统保护策略

3.1 隔离保护

隔离保护, 作为电力系统保护的基础策略之一, 其核心思想是在故障发生时迅速切断故障电路, 将故障部分与电力系统的其他健康部分隔离开来, 从而有效防止故障范围的扩大和对整个系统造成的潜在危害。这一策略的实现主要依赖于断路器、隔离开关等关键设备。断路器, 作为隔离保护的核心组件, 具有快速切断电路的能力。当系统检测到故障信号时, 断路器会迅速动作, 将故障电路从系统中隔离出来。为了确保断路器的可靠动作, 通常会配备相应的继电保护装置, 用于实时监测

电力系统的运行状态, 并在故障发生时迅速发出跳闸信号。隔离开关, 则主要用于在维修或检修时隔离设备或线路, 确保工作人员的安全。与断路器不同, 隔离开关通常不具备灭弧能力, 因此不能用于切断负载电流或短路电流。但在隔离保护策略中, 隔离开关与断路器相互配合, 共同构建电力系统的安全屏障。隔离保护策略的优点在于其简单有效, 能够快速响应并隔离故障, 减少故障对系统的影响。然而, 也需要注意到, 隔离保护策略的实施需要依赖准确的故障检测和快速的设备动作, 否则可能会因延迟或误动而导致故障范围的扩大。

3.2 过电压保护

过电压, 即电力系统中的电压异常升高, 是电力系统运行中常见的故障之一。过电压不仅会对设备造成直接损害, 还可能引发连锁反应, 导致系统崩溃。因此, 过电压保护成为电力系统保护中不可或缺的一环。过电压保护装置, 如避雷器、电压继电器等, 是过电压保护策略的核心设备。当系统电压超过设定值时, 这些装置会迅速动作, 通过切断故障电路或降低电压至安全水平来保护设备免受损害。避雷器, 作为过电压保护的主要设备之一, 其工作原理是基于非线性电阻的特性。在正常工作电压下, 避雷器呈现高阻状态, 对系统几乎没有影响。但当电压异常升高时, 避雷器会迅速变为低阻状态, 将过电压引入大地, 从而保护设备免受损害。电压继电器, 则是一种根据电压变化而动作的继电器。当系统电压超过或低于设定值时, 电压继电器会发出信号, 触发相应的保护措施^[3]。在过电压保护中, 电压继电器通常与断路器或隔离开关配合使用, 实现快速切断故障电路的功能。过电压保护策略的优点在于其能够有效防止电压异常升高对设备造成的损害, 确保电力系统的电压稳定。然而, 也需要注意到, 过电压保护装置的选择和安装位置对于保护效果具有重要影响。因此, 在设计过电压保护策略时, 需要充分考虑系统的实际情况和设备的特性。

3.3 欠电压保护

与过电压相反, 欠电压即电力系统中的电压异常降低, 同样会对设备造成损害或影响其正常工作。因此, 欠电压保护成为电力系统保护中另一重要的策略。欠电压保护装置, 通常包括电压监测器、欠电压继电器等设备。这些设备能够实时监测系统电压, 并在电压低于设定值时发出报警信号或切断故障电路。电压监测器, 是一种能够实时监测电力系统电压的设备。当电压低于设定值时, 电压监测器会发出信号, 提醒操作人员注意并采取相应的措施。在一些高级系统中, 电压监测器还可

以与自动控制系统相连接,实现欠电压保护的自动化。欠电压继电器,则是一种根据电压变化而动作的继电器。与电压继电器类似,当系统电压低于设定值时,欠电压继电器会发出信号,触发相应的保护措施。在欠电压保护中,欠电压继电器通常与断路器或隔离开关配合使用,实现快速切断故障电路或启动备用电源的功能。欠电压保护策略的优点在于其能够确保设备在电压不足的情况下不会受损或无法正常工作。然而,也需要注意到,欠电压保护策略的实施需要依赖准确的电压监测和快速的设备动作。此外,对于一些对电压波动较为敏感的设备,还需要考虑采取更为精细的保护措施。

3.4 差动保护

差动保护,作为一种基于电流比较的保护技术,其核心思想是通过对比各个设备的电流差异来判断是否存在故障。当某个设备的电流异常增大时,差动保护装置会迅速动作,切断故障电路,防止故障扩大。差动保护装置,通常由电流互感器、差动继电器等组件构成。电流互感器用于将设备电流转换为适合差动继电器处理的信号;差动继电器则根据输入信号的比较结果来判断是否存在故障,并发出相应的动作指令。在差动保护中,最关键的是如何准确获取各个设备的电流信号,并进行有效的比较。为了实现这一目标,通常会采用高精度的电流互感器,并确保其安装位置正确、接线无误。此外,还需要对差动继电器的设定值进行精细调整,以确保其能够在故障发生时迅速动作,同时避免误动。差动保护技术广泛应用于变压器、发电机等重要设备的保护中。这些设备在电力系统中具有举足轻重的地位,一旦发生故障,将对整个系统造成严重影响^[4]。因此,采用差动保护技术能够实现对这些设备的精准保护,确保电力系统的安全稳定运行。差动保护策略的优点在于其能够精准定位故障点,并迅速切断故障电路,防止故障扩大。然而,也需要注意到,差动保护装置的复杂性和成

本相对较高,且对安装和调试的要求也较高。因此,在实际应用中需要充分考虑其经济性和可行性。

4 未来发展趋势

一是智能化保护技术:随着人工智能技术的不断发展,智能化保护技术将成为未来电力系统保护的重要方向。通过引入深度学习、强化学习等先进技术,可以实现保护装置的智能决策和自适应调整。二是广域保护技术:广域保护技术利用广域测量系统(WAMS)提供的信息,实现快速、准确的故障定位与隔离。通过整合多个数据源的信息,广域保护技术可以提高保护的可靠性和准确性。三是多源信息融合技术:多源信息融合技术通过对来自不同传感器和监测系统的数据进行整合和分析,提高故障诊断的准确性和可靠性。未来,随着物联网技术的不断发展,多源信息融合技术将在电力系统故障诊断中发挥更加重要的作用。

结语

电力系统故障诊断与保护策略是确保电网安全稳定运行的关键技术。通过引入贝叶斯网络、机器学习等先进技术,可以实现对电力系统故障的快速准确诊断。同时,通过合理保护策略,可以确保在故障发生时能够迅速切断故障部分,防止故障的扩大。未来,随着智能化、广域化、多源信息融合等技术的发展,电力系统故障诊断与保护技术将迎来更加广阔的发展前景。

参考文献

- [1]董典帅.电力系统变电运行设备故障诊断和维护技术浅析[J].科技视界,2024,14(11):99-102.
- [2]高雪玲.电力系统变电运维中的智能监测与故障诊断研究[J].光源与照明,2024,(06):93-95.
- [3]苏照元.电力系统自动化中的高压直流输电线路故障诊断与恢复策略[J].家电维修,2024,(08):89-91.
- [4]谭国俊.电力系统设备状态监测与故障诊断技术探讨[J].中国设备工程,2024,(10):154-156.