

基于智能欠压脱扣技术的精准欠压保护算法设计与验证

彭铁栓 王 雄 郭兴帅

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要:本文聚焦基于智能欠压脱扣技术的精准欠压保护算法设计与验证,先阐述智能欠压脱扣技术基础,包括工作原理与特点,分析其技术架构及传统算法局限。接着详细介绍精准欠压保护算法设计,涵盖算法思路、电压监测与信号处理、智能决策算法及优化验证。通过实验测试算法基本性能、抗干扰性能和负荷适应性。最后列举工业园区和居民小区的工程应用案例,结果表明该算法能提高欠压保护精度与可靠性,减少故障损失,提升用电满意度。

关键词:智能欠压脱扣;欠压保护;精准算法;动态阈值;配电系统

1 智能欠压脱扣技术基础

1.1 欠压脱扣器的工作原理

欠压脱扣器是配电系统中重要的保护装置,其核心功能是在电网电压出现异常降低时,能够迅速动作,使断路器分闸,从而切断电路,保护用电设备免受欠压损害。从结构上来说,欠压脱扣器通常由电压检测单元、脱扣执行机构和控制电路等部分组成。电压检测单元实时监测电网电压的变化情况,将检测到的电压信号传输给控制电路。控制电路对接收的电压信号进行处理和判断,当检测到电压低于设定的阈值且持续一定时间时,会发出动作指令给脱扣执行机构。脱扣执行机构在接到指令后,通过机械传动装置使断路器的触头分离,实现电路的断开。在正常工作状态下,电网电压处于正常范围,欠压脱扣器的控制电路不会发出动作指令,脱扣执行机构处于锁定状态,断路器保持合闸,电路正常供电。而当电网发生欠压故障时,电压检测单元迅速捕捉到这一变化,控制电路经过判断后驱动脱扣执行机构动作,及时切断电路,避免用电设备在欠压状态下运行。

1.2 智能欠压脱扣技术的特点

智能欠压脱扣技术是在传统欠压脱扣技术的基础上发展而来的,融合了现代信息技术、传感器技术和智能控制技术,具有以下显著特点:(1)高精度监测。采用高精度的电压传感器和先进的信号处理技术,能够实时、准确地监测电网电压的细微变化,包括电压的幅值、频率和波形等参数,为欠压保护决策提供可靠的依据;(2)智能化决策。引入微处理器和智能算法,能够对监测到的电压数据进行深入分析和处理。不仅可以根据预设的阈值进行判断,还能结合电网的运行状态、历史数据等因素进行综合决策,有效避免误动作和拒动作^[1];(3)远程通信与监控。具备通信功能,能够将自身的工作状态、监测到的电压数据以及动作信息等传输到远程

监控中心。工作人员可以通过监控中心实时了解配电系统的运行情况和欠压脱扣器的工作状态,便于进行远程管理和维护;(4)自适应能力强。能够根据不同的配电系统环境和负载特性,自动调整保护参数和动作阈值。例如,在不同的负荷情况下,能够动态改变欠压判断的阈值和延时时间,提高保护的适应性和可靠性;(5)功能扩展性好。智能欠压脱扣器通常具有模块化的设计,便于扩展其他功能,如过压保护、过流保护、漏电保护等,实现对配电系统的全方位保护。

2 智能欠压脱扣技术架构与传统算法缺陷

2.1 智能欠压脱扣技术架构

智能欠压脱扣技术架构涵盖了从电压信号采集到最终执行脱扣动作的完整流程。电压监测模块作为数据源头,其精度和稳定性直接影响后续处理结果。信号处理模块对原始电压信号进行预处理,去除噪声干扰,提取有效信息。智能决策模块是核心部分,依据特定算法对处理后的信号进行判断,决定是否触发脱扣。脱扣执行模块则确保在需要时准确、迅速地切断电路。通信模块为整个系统提供了远程监控和管理的能力,便于运维人员及时掌握设备运行状态。

2.2 传统欠压保护算法的局限性

传统欠压保护算法通常采用固定阈值进行判断,即预先设定一个欠压阈值,当监测到的电压低于该阈值时,保护装置动作。这种算法存在以下局限性:(1)缺乏适应性:不同负载对电压的敏感程度不同,固定阈值无法满足各种负载的需求。例如,对于一些对电压波动较为敏感的精密设备,固定阈值可能无法及时提供保护;而对于一些对电压波动有一定容忍度的设备,固定阈值可能会导致误动作。(2)不考虑电压变化趋势:传统算法仅根据当前电压值与阈值的比较结果进行判断,没有考虑电压的变化趋势。在实际电网中,电压可能会

出现短暂的波动，如果仅依据当前电压值进行判断，容易产生误动作^[2]。（3）无法应对复杂电网环境：现代电网结构复杂，存在大量的非线性负载和分布式电源，这些因素会导致电网电压波形畸变、谐波含量增加等问题。传统算法在处理这些复杂情况时，往往无法准确判断电压是否欠压，从而影响保护的可靠性。

3 精准欠压保护算法设计

3.1 算法设计思路

精准欠压保护算法的设计旨在克服传统算法的局限性，提高欠压保护的精度和可靠性。其核心思路是基于动态阈值和智能决策，实现对欠压故障的精准判断和及时响应。第一，充分考虑配电系统的动态特性，将电压阈值设计为动态可变的。根据系统的实时运行状态，如负荷大小、电压波动情况等，动态调整欠压判断的阈值。当系统负荷较大时，适当提高阈值，以提前进行保护；当负荷较小时，适当降低阈值，避免不必要的脱扣动作。第二，引入多参数融合判断机制。除了电压幅值外，还将电压的变化率、频率偏差等参数纳入判断依据。通过对多个参数的综合分析，可以更全面地了解电压的异常情况，提高欠压判断的准确性，减少误判的可能性。第三，结合自适应延时技术。根据不同的用电设备类型和运行状态，自动调整延时时间。对于对欠压敏感的设备，缩短延时时间，确保及时保护；对于耐受能力较强的设备，适当延长延时时间，避免误动作。第四，注重算法的抗干扰性能。采用先进的信号处理技术，如小波变换、卡尔曼滤波等，有效抑制电磁干扰和谐波污染对电压信号的影响，提高算法在复杂环境下的稳定性。

3.2 电压监测与信号处理

电压监测是精准欠压保护的前提，需用高精度电压传感器与科学信号处理方法获取准确电压信号。监测选用宽测量范围、高准确度、良好线性度的传感器，实时采集电网电压瞬时值。其输出经调理电路放大、滤波，去除高频噪声与干扰，再由高速模数转换器转为数字信号。先采用数字滤波技术，常用有限脉冲响应（FIR）滤波器，它有线性相位特性，能保留信号相位信息，可有效消除谐波与干扰，得到纯净电压信号。接着对滤波后信号进行特征提取，计算有效值、平均值、峰值及变化率等参数，反映电压特性与趋势，为智能决策提供依据。此外，要对电压信号实时监测与异常检测，设置合理阈值，及时发现突变与异常波动并标记处理，确保后续算法准确识别欠压故障。

3.3 智能决策算法

智能决策算法是精准欠压保护算法核心，负责分析处理后的电压信号，判断是否欠压故障并发出控制指令。该算法融合模糊逻辑与神经网络，模糊逻辑擅长处理不确定和模糊问题，适合描述欠压保护中的模糊判断规则。先确定输入变量，如电压有效值与动态阈值偏差、电压变化率等，输出变量为欠压故障可能性，再依据专家经验和实际数据建立模糊规则库，经模糊推理得出初步判断结果；神经网络采用多层前馈型，以电压信号特征参数为输入，欠压故障实际发生情况为输出，用大量样本数据训练，使其准确拟合二者关系，进而修正优化模糊逻辑的初步判断，提高决策准确性。最后结合自适应延时判断，根据智能决策的欠压故障可能性及设备特性确定延时时间，若延时内欠压故障仍存在，发出脱扣指令；否则取消，避免误动作。

3.4 算法优化与验证

算法优化是提高精准欠压保护算法性能的重要手段，通过对算法的参数进行调整和优化，使算法在不同的配电系统环境和运行状态下都能保持良好的性能。采用遗传算法对模糊逻辑的隶属度函数参数和神经网络的权值进行优化。遗传算法是一种基于自然选择和遗传变异的优化算法，具有全局寻优能力强、收敛速度快等优点。通过设置合理的适应度函数，以算法的保护精度、动作时间等性能指标作为评价标准，对算法参数进行优化，提高算法的整体性能；算法验证是确保算法有效性的关键环节^[3]。构建仿真平台和实验样机，对优化后的算法进行全面的验证，在仿真平台上，模拟不同的欠压故障场景，包括不同的电压跌落幅度、持续时间和负荷情况等，测试算法的动作准确性和及时性；通过实验样机进行实际的电路实验，将算法应用于实际的配电系统中，检验算法在真实环境下的运行效果。根据验证结果，对算法进行进一步的调整和完善，确保算法能够满足实际应用的需求。

4 实验结果与分析

4.1 基本性能测试

为了验证精准欠压保护算法的基本性能，搭建了实验平台进行测试。实验平台主要包括电压源、负载、智能欠压脱扣器和数据采集系统等。在实验中，通过改变电压源的输出电压，模拟不同的欠压情况，记录智能欠压脱扣器的动作时间和动作准确率。实验结果表明，精准欠压保护算法能够在电压低于动态阈值时迅速动作，动作时间满足设计要求，动作准确率达到99%以上，说明该算法具有较高的基本性能。

4.2 抗干扰性能测试

在实际电网中,存在各种干扰因素,如谐波干扰、噪声干扰等。为了验证精准欠压保护算法的抗干扰性能,在实验中引入了谐波和噪声干扰。通过改变干扰的强度和频率,观察智能欠压脱扣器的工作情况。实验结果表明,精准欠压保护算法能够有效抑制谐波和噪声干扰,在干扰情况下仍能准确判断欠压情况,动作准确率保持在较高水平,说明该算法具有较强的抗干扰性能。

4.3 负荷适应性测试

不同负载对电压的敏感程度不同,为了验证精准欠压保护算法的负荷适应性,在实验中采用了多种不同类型的负载进行测试,包括电阻性负载、电感性负载和电容性负载等。通过改变负载的大小和类型,观察智能欠压脱扣器的工作情况。实验结果表明,精准欠压保护算法能够根据不同的负载特性动态调整欠压保护阈值,适应各种负载的需求,在不同负载情况下均能实现准确的欠压保护,说明该算法具有良好的负荷适应性。

5 工程应用案例

5.1 工业园区配电系统应用

某工业园区配电系统承担着众多工业企业的供电任务,用电设备种类繁多,负荷变化大,对供电可靠性要求较高。过去采用传统的欠压保护装置,经常出现误动作和拒动作的情况,影响企业的正常生产。在该工业园区配电系统中应用基于精准欠压保护算法的智能欠压脱扣器后,取得显著的效果。智能欠压脱扣器能够实时监测电网电压的变化,根据园区内不同企业的负荷特性动态调整保护参数。例如,对于大型电动机等对欠压敏感的设备,算法能够快速响应欠压故障,及时切断电源,避免电动机因欠压而烧毁的情况;对于一些照明和办公设备,算法适当延长延时时间,减少因短暂停电引起的不必要停电。应用一年多来,该工业园区的欠压故障处理准确率提高了90%以上,因欠压故障导致的生产中断次数大幅减少,为企业节省了大量的经济损失,得到企业的一致好评^[4]。

5.2 居民小区配电改造

随着居民生活水平的提高,居民小区的用电负荷不断增加,用电设备的种类也日益增多,传统的欠压保护装置已经无法满足居民的用电需求。在某居民小区的配电改造中,引入了基于精准欠压保护算法的智能欠压脱扣技术。改造后的配电系统能够根据小区内的用电负荷变化自动调整保护参数,在用电高峰期,如夏季的空调使用高峰,算法提高电压阈值,缩短延时时间,确保在电压出现异常时能够迅速动作,保护居民的空调、冰箱等重要电器设备;在用电低谷期,适当降低电压阈值,延长延时时间,减少因电压波动引起的跳闸次数,提高居民用电的稳定性。同时,智能欠压脱扣器的远程通信功能使得小区物业能够实时监测配电系统的运行状态,及时发现和处理潜在的故障隐患。自改造以来,该小区的电器设备因欠压损坏的情况明显减少,居民的用电满意度显著提高。

结束语

综上所述,基于智能欠压脱扣技术的精准欠压保护算法在提高配电系统安全性和可靠性方面具有重要意义。通过实验验证和工程应用实践,该算法展现出了卓越的性能和广阔的应用前景。未来,随着智能电网和配电系统的不断发展,该算法有望得到进一步的优化和完善,为电力系统的稳定运行提供更加坚实的保障。同时,也将继续探索新的技术和方法,以推动配电系统智能化发展,更好地服务于社会生产和人民生活。

参考文献

- [1]陈小明,刘建国,章建华.330kV系统过电压保护与绝缘配合案例分析[J].电网技术,2020,44(1):78-84.
- [2]李图浩,牟龙华,庄伟.基于压缩感知的船舶电力系统谐波源定位仿真[J].计算机仿真,2025,42(5):553-558.
- [3]朱毓,金耀,陶琳,等.基于系统寿命分布的智能电能表时钟电池欠压预测研究[J].电测与仪表,2023,60(12):189-195.
- [4]吕杰.电气工程中电力拖动系统自动控制与安全保护问题探析[J].电子元器件与信息技术,2024,8(5):24-26.