

电能计量装置过电压与过电流保护机制研究

王登越

内蒙古电力(集团)有限责任公司巴彦淖尔供电分公司 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要: 本文聚焦电能计量装置过电压与过电流保护机制。先阐述装置结构、过压过流成因分类及影响,接着设计过压过流的硬件保护方案与软件保护策略,并构建综合保护机制。通过搭建仿真模型,设置多种故障场景测试,依据响应速度、精度等指标评估保护效果。针对性能短板优化设计,经再次测试确保各项指标达标,为保障电能计量装置稳定运行提供有效方案。

关键词: 电能计量装置; 过电压保护; 过电流保护; 保护机制

引言: 电能计量装置在电力系统中至关重要,其准确性与可靠性关乎电力计量公平与系统稳定。然而,过电压与过电流现象频繁发生,对装置造成严重损害,影响电能计量准确性,甚至引发安全事故。因此,深入研究电能计量装置的过电压与过电流保护机制迫在眉睫。本文将详细剖析装置工作原理、故障成因,设计全面保护机制,并通过仿真验证其有效性,为实际应用提供理论支撑。

1 电能计量装置工作原理与故障分析

1.1 电能计量装置基本结构

电能计量装置的基本结构主要由计量单元、信号转换单元、数据处理单元、通信单元和电源单元五部分组成。计量单元是核心,包含电压互感器、电流互感器和电能计量芯片,负责信号的采集与电能计算;信号转换单元将互感器输出的模拟信号转换为计量芯片可识别的标准信号,同时进行滤波、放大处理,消除干扰信号的影响;数据处理单元由微处理器、存储器等组成,完成电能数据的存储、运算、误差修正,并实现数据的本地显示;通信单元支持RS485、LoRa等通信协议,实现计量数据的远程传输与监控;电源单元为整个装置提供稳定的工作电源,通常采用宽电压输入设计,适配不同的电力环境。

1.2 过电压/过电流的成因与分类

过电压的成因主要分为内部因素和外部因素:内部因素包括电力系统操作过电压(如断路器合闸、切负荷)、谐振过电压(如铁磁谐振);外部因素主要是雷电过电压,即雷电击中输电线路或附近区域,在系统中感应产生瞬时高电压^[1]。过电压按持续时间可分为瞬时过电压(持续时间小于1ms)、暂时过电压(持续时间1ms-1min)和永久过电压(持续时间超过1min)。过电流的成因同样包括内部和外部因素:内部因素有设备绝缘损坏导致的短路

电流、电路元件参数异常引发的过载电流;外部因素包括电力系统故障(如三相短路、单相接地短路)、用户侧大功率设备启停产生的冲击电流。过电流按性质可分为短路电流(幅值大、上升快,破坏性强)、过载电流(幅值超过额定电流,持续时间较长)和冲击电流(瞬时幅值大,持续时间短)。

1.3 过电压/过电流对计量装置的影响

过电压对电能计量装置的影响主要体现在:瞬时高电压会击穿电压互感器、计量芯片等元器件的绝缘层,导致元器件永久性损坏;暂时过电压会干扰计量芯片的正常工作,造成采样数据失真,进而影响电能计量的准确性;长期反复的过电压冲击会加速装置内部电子元件的老化,缩短装置的使用寿命,同时可能引发绝缘老化失效,增加安全隐患。过电流的危害主要包括:短路电流产生的巨大热量会烧毁电流互感器、接线端子等部件,甚至引发火灾;过载电流会导致装置内部线路发热,加速绝缘老化,同时可能使计量芯片因过流冲击出现损坏或性能衰减;冲击电流会干扰计量芯片的采样时序,导致计量误差增大,严重时可能造成芯片死机,使装置停止工作。

2 过电压与过电流保护机制设计

2.1 过电压保护机制

2.1.1 硬件保护方案

过电压硬件保护方案主要采用被动保护与主动保护相结合的设计:在电压互感器输入端并联氧化锌压敏电阻(MOV),其具有非线性伏安特性,当电压低于额定值时,电阻值极大,不影响正常工作;当过电压发生时,电阻值迅速减小,将过电压幅值钳位在允许范围内,泄放过剩电荷。同时,串联气体放电管(GDT)作为第二级保护,当压敏电阻钳位后的电压仍超过阈值时,气体放电管击穿导通,进一步泄放电流^[2]。在计量芯片输入端

设置TVS管（瞬态抑制二极管），针对瞬时过电压进行精准钳位，保护芯片不受冲击。采用屏蔽接地设计，减少过电压产生的电磁干扰，在电源单元输入端增设浪涌保护器（SPD），防止过电压通过电源线路侵入装置。硬件保护方案的优势是响应速度快（动作时间可达纳秒级），无需软件干预，能有效应对瞬时过电压冲击。

2.1.2 软件保护策略

过电压软件保护策略基于实时电压监测与自适应控制实现：通过计量芯片内置的ADC模块对输入电压进行高频采样（采样频率不低于1kHz），实时获取电压幅值数据；在微处理器中预设过电压阈值（分为预警阈值和动作阈值），当采样电压超过预警阈值时，系统启动预警机制，记录过电压发生时间、幅值等信息，并通过通信单元上传至监控平台；当电压超过动作阈值且持续时间超过设定值（如50 μ s）时，微处理器发送控制信号，触发硬件保护模块中的可控开关（如晶闸管）动作，切断电压输入路径，同时切换至备用电源，确保装置核心电路不受损坏。软件还具备过电压类型识别功能，通过分析电压波形特征，区分瞬时过电压、暂时过电压和永久过电压，针对不同类型采取差异化保护策略，如瞬时过电压触发瞬时钳位保护，永久过电压则启动断电保护并发出告警信号。

2.2 过电流保护机制

2.2.1 硬件保护方案

过电流硬件保护方案采用分级保护设计：在电流互感器输出端串联快速熔断器，当短路电流发生时，熔断器在毫秒级时间内熔断，切断电流回路，防止大电流烧毁后续元器件；同时，并联自恢复保险丝（PTC），针对过载电流进行保护，当电流超过额定值时，PTC电阻迅速增大，限制电流幅值，当故障排除后，PTC自动恢复低阻状态，无需更换。在计量芯片电流输入端设置电流采样电阻和过流检测电路，当电流超过设定阈值时，检测电路输出触发信号，控制功率开关管关断，切断电流输入。在接线端子处采用耐高温、阻燃材质，并优化散热结构，减少过电流产生的热量积聚，降低火灾风险。硬件保护方案的核心优势是动作迅速、可靠性高，能在过电流发生瞬间切断故障路径，最大限度减少损失。

2.2.2 软件保护策略

过电流软件保护策略基于电流信号的实时监测与智能判断实现：通过计量芯片对电流信号进行高频采样，结合数字滤波算法（如滑动平均滤波）消除干扰，准确获取电流幅值和变化率；在微处理器中预设不同类型过电流的阈值和动作延时，如短路电流阈值高、动作延时短（如

10ms），过载电流阈值较低、动作延时较长（如30s），冲击电流则设置专门的峰值阈值和持续时间阈值。当检测到电流超过对应阈值时，系统首先判断过电流类型：短路电流触发硬件保护模块快速动作，同时软件记录故障信息；过载电流则先发出过载告警，若持续时间超过设定值，再触发硬件保护动作；冲击电流则通过软件算法进行识别和补偿，避免误触发保护，同时记录冲击电流的参数，为后续故障分析提供数据支持。另外，软件还具备过电流自恢复功能，当故障排除后，自动检测电流是否恢复正常，若恢复则控制硬件保护模块复位，使装置恢复正常工作。

2.3 综合保护机制

综合保护机制是在过电压保护机制和过电流保护机制的基础上，针对复合故障（如同时发生过电压和过电流）和边界故障（如故障参数处于保护阈值附近）设计的协同保护方案。该机制通过硬件层面的信号联动和软件层面的智能决策，实现保护动作的协同性和准确性。硬件层面，在电压、电流保护模块之间设置联动开关，当检测到复合故障时，优先切断电源输入，避免故障能量叠加对装置造成更大损坏；同时，优化保护模块的布局，减少各模块之间的电磁干扰，确保保护动作的同步性。软件层面，采用多参数融合判断算法，综合分析电压、电流信号的幅值、变化率、持续时间等参数，准确识别故障类型和严重程度，制定最优保护策略；此外，综合保护机制还具备故障自诊断和自愈功能，能够自动检测保护模块的工作状态，若发现保护模块故障，及时发出告警信号，并切换至备用保护通道，确保保护功能不失效^[1]。

3 保护机制的性能分析与优化

为验证保护机制的有效性和可靠性，需通过仿真分析和实验测试对保护机制的性能进行评估，并根据评估结果进行优化设计。性能分析主要围绕保护响应速度、保护精度、抗干扰能力、可靠性等关键指标展开，优化设计则针对性能短板，从硬件电路、软件算法、结构设计等方面进行改进，提升保护机制的整体性能。

3.1 仿真模型搭建

基于MATLAB/Simulink仿真平台，搭建电能计量装置过电压/过电流保护机制仿真模型，模型主要包括电力系统仿真模块、电能计量装置模块、过电压/过电流发生模块、保护机制模块和数据采集分析模块。电力系统仿真模块模拟10kV配电网正常运行状态，输出标准电压、电流信号；电能计量装置模块按照实际装置的结构和参数，搭建电压互感器、电流互感器、计量芯片、微处理

器等子模块,实现电能计量功能;过电压/过电流发生模块通过设置不同的故障参数(如过电压幅值、持续时间,过电流类型、幅值),模拟各种故障场景;保护机制模块包含硬件保护子模块(如压敏电阻、熔断器、TVS管等模型)和软件保护子模块(如采样算法、阈值判断算法、控制逻辑等);数据采集分析模块实时采集仿真过程中的电压、电流、保护动作时间等数据,为性能评估提供依据。仿真模型的参数设置参考实际电能计量装置的技术指标,确保仿真结果的真实性和有效性。

3.2 过电压/过电流场景仿真

在搭建的仿真模型中,设置多种过电压/过电流故障场景,进行仿真测试。过电压场景包括:雷电瞬时过电压(幅值为额定电压的3倍,持续时间50 μ s)、操作过电压(幅值为额定电压的1.5倍,持续时间10ms)、谐振过电压(幅值为额定电压的2倍,持续时间1s);过电流场景包括:三相短路电流(幅值为额定电流的10倍,持续时间20ms)、单相接地短路电流(幅值为额定电流的8倍,持续时间30ms)、过载电流(幅值为额定电流的1.2倍,持续时间5min)、冲击电流(幅值为额定电流的6倍,持续时间100 μ s);复合故障场景为同时发生雷电过电压和三相短路电流。在每种场景下,重复仿真10次,记录保护动作时间、钳位后的电压/电流幅值、计量误差变化等数据,分析保护机制在不同故障场景下的响应特性和保护效果。

3.3 保护效果评估指标

保护机制的性能评估指标主要包括以下四个方面:一是保护响应速度,即从故障发生到保护动作完成的时间,过电压保护响应时间应不超过1 μ s,过电流保护响应时间应不超过10ms;二是保护精度,即保护动作后钳位的电压/电流幅值与设定阈值的偏差,偏差应不超过 $\pm 5\%$,同时计量误差应控制在 $\pm 0.2\%$ 以内(符合国家电能计量装置误差标准);三是抗干扰能力,即在正常电压/电流波动、电磁干扰等情况下,保护机制不发生误动作的能力,误动作率应低于0.1%;四是可靠性,即保护机制在长期运行过程中稳定工作的能力,通过连续仿真1000小时,统计保护机制的失效次数,失效次数应不超过1次。另外,还需评估保护机制的自恢复能力,即故障

排除后装置恢复正常工作的时间,应不超过5s。

3.4 优化设计

根据仿真测试结果,针对保护机制的性能短板进行优化设计。在硬件方面,若保护响应速度不足,可更换响应速度更快的元器件(如采用纳秒级TVS管、快速熔断熔断器),优化硬件电路的布线,减少信号传输延迟;若保护精度偏差较大,可调整压敏电阻、自恢复保险丝等元器件的参数,使其与保护阈值更匹配,同时优化互感器的变比精度,减少信号转换误差^[4]。在软件方面,若抗干扰能力不足,可改进数字滤波算法(如采用卡尔曼滤波算法),增强对干扰信号的抑制能力;若阈值判断准确性不高,可引入机器学习算法(如支持向量机),通过训练样本优化阈值判断模型,提升故障识别的准确性。在结构设计方面,若散热效果不佳,可优化装置的散热结构,增加散热片或采用导热性能更好的材质,减少过电流产生的热量积聚。还可增加保护模块的冗余设计,如设置备用保护通道,提升保护机制的可靠性。优化后再次进行仿真测试,验证优化效果,确保保护机制的各项性能指标均满足设计要求。

结束语

本文围绕电能计量装置过电压与过电流保护机制展开研究,从成因分析到保护机制设计,再到仿真验证与优化,形成了一套完整方案。通过硬件与软件协同保护,以及综合保护机制,有效提升了装置应对故障的能力。仿真结果表明,优化后的保护机制各项性能指标满足要求。未来,可进一步结合实际运行数据,持续完善保护机制,为电力系统的安全稳定运行提供更坚实保障。

参考文献

- [1]张琳婧.基于电能数据采集系统的计量装置电压异常诊断分析[J].品牌与标准化,2025(6):130-132.
- [2]白雪.基于暂态过程中电能计量装置准确度评估方法[J].电力设备管理,2025(9):149-151.
- [3]刘衡.电能计量装置中电压比值差与相位差对计量误差的影响分析[J].科学技术创新,2021(27):189-190.
- [4]范佳,王岚青,倪颖,等.基于数据挖掘的电能计量装置异常自动检测方法[J].自动化技术与应用,2024,43(11):78-82.