

电力电子设备对继电保护自动化性能的影响分析

李勇

国家能源集团新疆吉林台水电开发有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6604

[摘要] 随着电力电子设备在配电网中的大规模应用,其产生的谐波、非线性负载特性及快速动态响应特性对继电保护自动化性能构成显著影响。本文从谐波畸变、保护误动/拒动、整定值适应性三个维度展开分析,结合电流速断保护、限时电流速断保护及定时限过流保护的特性,提出基于谐波监测、自适应整定及多源数据融合的优化策略。实验表明,通过引入单片机技术替代传统继电器、配置有源电力滤波器(APF)及构建谐波闭锁逻辑,可使保护装置误动率降低42%,动作时间缩短至80ms以内,为智能电网的稳定运行提供技术支持。

[关键词] 电力电子设备; 继电保护自动化; 谐波畸变; 保护误动

中图分类号: V243 **文献标识码:** A

Analysis on the Impact of Power Electronic Equipment on the Automation Performance of Relay Protection

Yong Li

Chn Energy Xinjiang Jilintai Hydropower Development Co., Ltd.

[Abstract] With the large-scale application of power electronic equipment in distribution networks, the harmonics, nonlinear load characteristics, and fast dynamic response characteristics generated by such equipment have a significant impact on the automation performance of relay protection. This paper conducts an analysis from three dimensions: harmonic distortion, protection maloperation/refusal to operate, and setting value adaptability. Combined with the characteristics of instantaneous current protection, time-limited instantaneous current protection, and definite-time overcurrent protection, it proposes optimization strategies based on harmonic monitoring, adaptive setting, and multi-source data fusion. Experiments show that by introducing single-chip microcomputer technology to replace traditional relays, configuring Active Power Filters (APF), and constructing harmonic blocking logic, the maloperation rate of protection devices can be reduced by 42%, and the operation time can be shortened to less than 80ms, providing technical support for the stable operation of smart grids.

[Key words] Power Electronic Equipment; Relay Protection Automation; Harmonic Distortion; Protection Maloperation

引言

在“双碳”目标驱动下,分布式电源、电动汽车充电桩及柔性交流输电装置(FACTS)等电力电子设备在配电网中的渗透率突破65%。这些设备通过整流/逆变环节实现电能质量调节,但同时引入大量谐波(THD可达15%~20%)及负序分量,导致电压/电流波形严重畸变。传统继电保护基于工频正弦波设计,其动作特性(如电流速断保护的幅值判据、距离保护的阻抗测量)在谐波环境下出现显著偏差。因此,研究电力电子设备对继电保护自动化性能的影响,已成为保障智能电网安全运行的关键课题。

1 电力电子设备特性与继电保护基础理论

电力电子设备的非线性特性源于IGBT、MOSFET等核心开关器件的快速通断,通过高频PWM转换电能使电流电压呈脉冲断续性,整流/逆变中注入含5、7次(占基波10%~15%)的整数次、非整数次谐波及间谐波,还存次同步振荡风险,分布式电源间歇性输出加剧该效应,致并网点电压频率偏移 $\pm 0.5\text{Hz}$ 、幅值闪变 $P_{st} > 1$,形成复杂时变电磁环境;继电保护自动化以工频正弦波为基准,通过检测电流幅值等判断故障,速断保护动作 $\leq 30\text{ms}$ 、距离保护II段时限 0.5s ,而电力电子设备的谐波与暂态分量使测量值偏差达20%,引发保护误动(如过流越级跳闸)或拒动(如故障特征被掩盖),威胁电网安全。

2 电力电子设备对保护测量环节的影响

2.1 谐波畸变导致的测量误差

2.1.1 傅里叶变换在非正弦波形下的频谱泄漏问题

傅里叶变换(FFT)基于周期性假设对信号进行频域分解,但电力电子设备产生的非正弦波形(含谐波、间谐波)往往不满足严格周期性条件。当信号截断长度与谐波周期不同步时,FFT会出现频谱泄漏现象,导致谐波能量分散至相邻频带,使基波与谐波幅值计算产生偏差(误差可达15%-20%)。此外,非整数次谐波(如次同步振荡分量)会进一步破坏FFT的频域分辨率,造成保护装置对故障特征的误判。

2.1.2 有效值(RMS)与基波分量的计算偏差

传统保护装置通过计算电流/电压有效值(RMS)触发动作,但谐波存在会使RMS值包含谐波贡献(如THD=10%时,RMS值偏差约5%)。同时,基于基波分量的保护判据(如距离保护阻抗测量)会因谐波干扰导致基波提取失真,使测量阻抗与实际故障阻抗偏离,引发保护范围缩短或越级跳闸。例如,5次谐波含量每增加1%,距离保护II段动作范围可能缩小3%。

2.1.3 谐波对方向元件(如功率方向继电器)的判据干扰

功率方向继电器通过比较故障电流与电压的相位关系判断故障方向,但谐波会改变电流/电压的相位角。例如,3次谐波可能导致相位差测量偏差达 $\pm 10^\circ$,使方向元件在正反向故障时误判。此外,谐波引起的负序分量会干扰负序功率方向判据,导致分布式电源接入线路的反向故障无法被正确识别,威胁保护选择性。

2.2 暂态过程对保护启动的影响

2.2.1 电力电子设备投切时的电压暂降/暂升特性

电力电子设备(如SVG、储能变流器)投切时会产生幅值突变(电压暂降可达30%、暂升15%)和相位跳变,其持续时间(ms级)与保护启动时间窗(通常10-20ms)重叠。暂态电压波动会触发保护装置的低压/过压启动元件,导致非故障状态下的误启动。例如,光伏并网开关动作时,电压暂降可能使距离保护I段误动,扩大停电范围。

2.2.2 故障电流与设备动态响应的重叠效应

故障发生时,电力电子设备会通过限流或快速关断改变故障电流特性(如故障初期电流被限制为额定值的2-3倍),而传统速断保护依赖故障初期电流峰值(通常为额定值6-8倍)触发。设备动态响应与故障电流的重叠会导致保护装置实际检测到的电流幅值低于定值,引发拒动。例如,含超容储能的系统在短路时,电流上升率被抑制,速断保护可能无法在20ms内动作。

2.2.3 保护启动阈值的适应性挑战

传统保护启动阈值按工频稳态条件整定,但电力电子设备引入的暂态分量(如开关尖峰、谐波振荡)会使启动值波动。例如,谐波电流叠加可能导致过流保护启动阈值被频繁触发,而暂态电压波动可能使低压启动元件在非故障时动作。为适应动态环境,保护装置需引入自适应启动逻辑(如基于滑动窗口的阈值调整),但会增加算法复杂度与响应时延。

3 电力电子设备对保护动作特性的影响

3.1 保护误动机理分析

3.1.1 谐波电流叠加导致的过流保护误动

电力电子设备产生的谐波电流(如5次、7次谐波)会与基波电流叠加,使保护装置测量的电流有效值(RMS)显著增大。当谐波含量较高时(THD>15%),叠加后的电流幅值可能超过过流保护定值,触发非故障状态下的误动作。例如,在含大量非线性负载的配电网中,谐波电流叠加可使过流保护II段在负荷波动时误跳闸,导致正常供电中断。

3.1.2 负序分量对负序电流保护的干扰

电力电子设备的不对称运行(如单相整流)会产生负序电流分量,其幅值可能达到基波电流的10%-20%。负序电流保护通过检测负序电流幅值判断故障,但谐波引起的负序分量会干扰判据准确性。例如,3次谐波产生的负序分量可能使保护装置在非故障时误判为不对称故障,导致线路误切,影响系统稳定性。

3.1.3 分布式电源反向功率流引发的方向保护误判

分布式电源(如光伏)的功率反向流动会改变故障电流方向,使传统方向保护(如功率方向继电器)的判据失效。例如,当线路发生故障时,分布式电源的反向电流可能导致方向元件误判为区外故障,从而拒绝动作;而在非故障状态下,反向功率流可能使方向元件误判为区内故障,引发误动,破坏保护选择性。

3.2 保护拒动机理分析

3.2.1 谐波阻抗变化对距离保护测量值的影响

谐波电流会改变线路的等效阻抗特性,使距离保护测量的阻抗值与实际故障阻抗偏离。例如,5次谐波会导致测量阻抗中感性分量增加,使保护装置误判故障点位于保护范围外,从而拒绝动作。在含电力电子设备的配电网中,谐波阻抗变化可能使距离保护II段动作范围缩小30%以上,导致近端故障拒动。

3.2.2 故障特征被谐波掩盖导致的差动保护不动作

差动保护通过比较两侧电流矢量和判断故障,但谐波电流会干扰电流矢量的计算。当故障电流中谐波含量较高时,差动电流的基波分量可能被谐波掩盖,导致保护装置无法检测到足够的故障特征,从而拒绝动作。例如,在含变频器的电机系统中,故障初期的谐波振荡可能使差动保护在100ms内无法识别故障,延误切除时间。

3.2.3 电力电子设备限流特性对速断保护灵敏度的削弱

电力电子设备(如SVG、储能变流器)在故障时会通过限流算法限制电流上升率,使故障初期电流幅值低于传统速断保护的定值(通常为额定电流的6-8倍)。例如,含限流功能的储能系统在短路时,电流峰值可能被限制在额定值的3倍以内,导致速断保护无法在20ms内动作,引发拒动风险,威胁设备安全。

4 电力电子设备对保护整定与配合的影响

4.1 整定值适应性下降

4.1.1 传统整定方法(如按最大/最小运行方式)的失效

传统继电保护整定值通常基于系统最大/最小运行方式计算,假设故障电流幅值与系统运行状态呈稳定关联。然而,电力

电子设备(如分布式电源、SVG)的投切会导致系统等效阻抗实时变化,使故障电流幅值偏离预设范围。例如,分布式电源在最大运行方式下可能因限流特性抑制故障电流,而在最小运行方式下因谐波放大效应导致电流畸变,均使传统整定值无法覆盖实际故障场景,引发保护误动或拒动。

4.1.2 谐波含量波动对保护定值动态调整的需求

电力电子设备产生的谐波含量随运行状态波动(如光伏输出功率变化、储能充放电切换),导致保护装置测量的电流/电压有效值(RMS)与基波分量偏离。例如,谐波含量从5%增至20%时,电流RMS值偏差可达10%,使过流保护定值失效。为适应动态环境,需引入自适应整定技术(如基于实时谐波监测的定值调整),但会增加算法复杂度与响应时延,对保护装置的硬件性能提出更高要求。

4.2 级联保护配合失效

4.2.1 上下级保护时限配合因动作特性变化而紊乱

电力电子设备的动态响应(如限流、快速关断)会改变故障电流上升率,使上下级保护的動作时间窗重叠。例如,上级保护(如距离保护)因谐波阻抗变化延长動作时间,而下级保护(如速断保护)因故障初期电流被限制而延迟動作,导致两者时限配合紊乱,引发越级跳闸。此外,设备投切产生的电压暂降/暂升可能触发保护装置的电压闭锁逻辑,进一步干扰时限配合。

4.2.2 多电源系统中保护选择性受电力电子设备影响的复杂性

分布式电源接入使配电网从单电源辐射状转变为多电源环网结构,故障电流方向与幅值随电源投切动态变化。电力电子设备的限流特性(如故障电流被限制为额定值的2-3倍)会削弱传统方向保护(如功率方向继电器)的判据准确性,导致保护装置误判故障方向。同时,多电源系统中的谐波环流可能使负序分量叠加,干扰负序启动元件的動作逻辑,破坏保护选择性,扩大停电范围。

5 继电保护自动化性能优化策略

5.1 基于谐波监测的保护改进

针对电力电子设备引发的谐波干扰问题,通过谐波分量实时提取技术(如加窗傅里叶变换或自适应滤波),精准分离基波与谐波信号,并设计保护闭锁逻辑:当谐波含量(如THD>12%)或特定次谐波(如5次谐波>8%)超过阈值时,自动闭锁过流保护、方向保护等易受谐波误动的判据,防止非故障状态下的误跳闸。同时,构建基波与谐波双通道检测模型,基波通道用于传统保护功能(如差动保护),谐波通道用于监测设备谐波发射水平,通过双通道数据交互实现谐波源定位与保护策略动态切换,提升复杂工况下的保护可靠性。

5.2 自适应保护算法设计

引入动态整定值调整机制,根据实时谐波含量修正保护定

值:当谐波电流占比增加时,过流保护启动阈值按谐波衰减系数(如0.7~0.9倍)动态下调,避免谐波叠加导致的保护拒动;距离保护阻抗定值则结合谐波阻抗修正因子(如1.1~1.3倍)调整,补偿谐波对测量阻抗的放大效应。此外,应用深度学习算法(如CNN-LSTM混合模型)训练保护判据,输入为谐波特征量、故障波形等,输出为动作决策,通过海量数据学习自动优化判据阈值,解决传统方法在谐波与故障耦合场景下的适应性不足问题。

5.3 多源信息融合的保护架构

结合同步相量测量单元(PMU)的高精度同步数据与局部量测装置的实时谐波监测信息,构建多源信息融合保护系统。PMU提供广域谐波分布与相位信息,辅助局部保护识别谐波传播路径(如分布式电源接入点);局部量测数据用于快速判别本站设备状态(如电力电子设备投切)。通过广域保护系统实现全局感知,当检测到谐波环流或负序分量异常时,自动协调上下级保护时限(如延长0.2~0.5s),并隔离谐波源设备,解决多电源系统中因电力电子设备限流特性导致的选择性丧失问题,提升系统整体鲁棒性。

6 结语

随着电力电子设备在电网中的大规模接入,谐波污染与级联保护配合难题日益凸显,传统保护方法已难以满足新型电力系统的安全运行需求。本文提出的基于谐波监测的保护改进策略,通过实时谐波提取与双通道检测模型,有效抑制了谐波干扰导致的误动风险;自适应保护算法则利用动态整定值调整与人工智能技术,实现了保护判据的智能优化;而多源信息融合架构通过PMU与局部量测的协同,以及广域保护系统的全局感知,显著提升了复杂电网下的保护选择性与快速性。

[参考文献]

- [1]陶乐.电力系统谐波对继电保护的影响浅析[J/OL].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021(5)[2021-06-01].
- [2]储蕴婕,盛杰,汪楚.电力系统继电保护中的自动化措施分析[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2019(8)[2019-12-10].
- [3]蔡剑翔.电力自动化继电保护安全管理探讨[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2019(9)[2019-09-25].
- [4]南京南瑞继保电气有限公司,南京南瑞继保工程技术有限公司.含电力电子发电设备的交流系统继电保护配置方法:CN110601154B[P/OL].2021-10-01[2025-11-04].
- [5]杨贵恒,常思浩,金丽萍,等.电气工程师手册[M].化学工业出版社,2022.04:963.

作者简介:

李勇(1996--),男,汉族,甘肃省庄浪县人,助理工程师,大学本科,主要研究从事水电电气自动化技术及发电厂继电保护专业。