

10kV配电系统中熔断器选型对短路故障保护的精细化设计

许超¹ 汪春来²

1. 盐城鑫珑电力科技有限公司 江苏盐城 224000

2. 上海思源输配电工程有限公司南京分公司 江苏南京 210000

摘要: 10kV 配电系统作为工业园区电力供应的核心架构, 其熔断器选型的精准度直接影响短路故障保护效能与供电可靠性。当前系统普遍存在熔断器额定电流与变压器容量匹配偏差、分断能力不足导致的误动作问题, 同时故障特征识别能力缺失造成故障定位效率低下。针对上述技术瓶颈, 本研究提出系统性解决方案: 首先构建基于 GB13539.1/IEC60269 标准的熔断器多维参数匹配模型, 通过理论计算确定额定电流 (1.1-2 倍变压器最大工作电流)、分断能力 (\geq 系统预期短路电流) 及环境适应性参数, 实现熔断器与配电网络的动态匹配; 其次开发融合暂态录波技术的智能故障指示系统, 采用分布式无线传感网络实现故障点 ± 50 米级精确定位; 最后建立基于设备全生命周期数据的运维决策模型, 通过在线监测与预防性维护策略优化保护装置运行状态。

关键词: 10kV 配电系统; 熔断器选型; 短路故障保护; 供电可靠性; 智能故障指示

引言

在工业蓬勃发展的当下, 10kV 配电系统作为工业园区电力“大动脉”, 其可靠运行极为关键。但现实中, 该配电系统线路故障问题突出, 熔断器时有误动作, 故障发生时保护滞后, 故障排查也极为艰难, 这些极大地制约了供电的稳定性与持续性, 不仅干扰园区企业的日常生产, 还导致了相当巨大的经济损失。

一、10kV 配电系统短路故障特征

(一) 故障电流冲击强

在常见的工业供电线路场景中, 正常运行时电流一般处于 100-300A 区间。然而, 一旦突发短路故障, 短短毫秒内电流便会急剧飙升至 5000-10000A, 达正常电流的数十倍。以 10kV 电压等级下 1000kVA 容量的电力变压器来说, 其绕组短时热稳定电流被限定在 12-15 倍额定电流范围。当遭受远超阈值的短路冲击电流时, 绕组绝缘会迅速老化、损坏, 严重时绕组短路, 致使变压器报废。电缆绝缘层也难以承受冲击, 可能撕裂致使线芯裸露, 进而引发相间短路, 造成停电范围扩大, 影响众多用户的正常用电。

(二) 故障点定位难

在某中型城市的配电网络架构中, 单条 10kV 线路的

平均覆盖半径能够达到 10-15 公里, 沿线分支线路繁杂且数量众多, 约在 20-30 处。一旦短路故障发生, 由于线路走向蜿蜒曲折、分支分布密集, 以及周边存在电磁干扰等因素, 想要精准定位故障点面临极大挑战^[1]。以传统人工巡线方式为例, 在某次城区 10kV 线路短路故障处理时, 运维团队派遣 5-6 人沿着 8 公里且包含 15 个分支的线路徒步进行排查。从故障发生直至初步锁定疑似故障点, 整个过程耗费了 3-4 个小时, 在此期间大面积用户只能无奈忍受停电等待。即便使用简易故障指示器, 因受其精度和功能的限制, 也仅仅能将故障范围缩小至 1-2 公里, 后续仍需投入大量精力细致排查, 显然难以满足快速抢修以恢复供电的实际需求。

(三) 故障类型多样

当三相短路故障突发, 三相线路即刻直接短接, 故障电流会毫无预兆地瞬间飙升至最大值, 这股强大的电流轻而易举就能突破电气设备的短路耐受电流极限。比如某大型工业厂区的 10kV 供电线路, 曾出现三相短路故障, 电流峰值高达 15000A, 这一冲击瞬间让接入线路首端高压开关柜内的断路器跳闸, 下游多台大型电机因失压而停止运转, 整个生产流程被迫中断, 造成了数额巨大的经济损失。两相短路故障的电流幅值相较三相短路略小, 可对线路和设备造成的损害却不容忽视, 其故障电流通常约为三相短路电流的 0.8-0.9 倍。在单相接地短路初期, 故障电流相对较小, 一般在 100-500A 范围, 可能仅使接地保护装置出现轻微动作。但如果不及时排查

作者简介: 许超 (1989—), 女, 汉族, 江苏盐城人, 本科, 电力工程师, 研究方向: 电力设计。

处理,随着故障持续发展,长时间的接地电流会逐渐改变周围土壤的电气特性,产生跨步电压伤人的风险。非故障相电压升高,可能击穿绝缘薄弱处,引发更为复杂的相间短路故障,使故障危害不断扩大,给配电系统的安全稳定运行留下长期隐患。

二、熔断器在10kV配电系统短路保护中的作用及选型要点

(一) 熔断器的保护原理

在正常运行状态下,电流按照既定路径平稳流动,流经熔断器的电流处于稳定区间,保障着系统各环节的有序供电。像常见的城市10kV配电线路,日常承载电流在200~400A波动,此时熔断器内熔体温度稳定,确保线路持续通电。但当线路突发状况,如恶劣天气致树枝碰导线短路或负载故障过载,电流会急剧上升。若短路电流瞬间达1500~2000A,远超熔体额定熔断电流800A,依据焦耳定律,熔体会因大电流短时间积聚大量热而熔断,切断电路,避免下游如10kV/500kVA配电变压器等设备受大电流冲击,维护系统稳定。

(二) 选型关键参数

1. 额定电压

系统标称电压稳定处于10kV,根据标准,其允许的合理波动范围约为 $\pm 7\%$,也就是9.3kV~10.7kV。熔断器所选定的额定电压必须精确匹配这一区间,这样在日常供电的平稳阶段以及遭受雷击、系统切换等导致电压扰动的故障场景中,熔断器都能保持正常工作状态^[2]。如果错误地选用额定电压为8kV的熔断器用于10kV系统,在系统电压受外界因素影响而接近上限值时,熔断器内部的绝缘介质就会承受过高的电场强度,致使绝缘性能迅速恶化,极容易引发绝缘击穿的严重问题。一旦绝缘击穿,短路保护机制失效,配电线路将直接暴露在故障风险之下,一系列连锁反应随之而来,最终会造成无法挽回的供电中断损失。

2. 额定电流

以某综合性医院的10kV配电线路为例,其负载类型多样,包含医疗设备、照明、空调等,用电峰谷情况差异明显。在白天诊疗高峰期,大型影像设备频繁运作、病房照明全部开启、中央空调全力制冷,此时线路最大持续电流能够达到700~900A;而在深夜时段,仅应急照明和关键设备处于待机状态,电流会急剧下降至100~200A。

3. 熔体额定电流

在工业车间,常见的大功率电动机群组启动瞬间,

电流会达到额定运行电流的4~6倍。例如一组10kV、300kW的电动机,其额定电流约为180A,启动电流峰值却能飙升至720~1080A。若在这种情况下,熔体额定电流按照常规静态负载来考量设定,那么在电动机启动的最初时刻,熔体就会发生误熔断。针对这类负载,必须综合考虑其启动的频繁程度、每次启动持续时长占比以及运行稳定性等因素,来选择合适的同态额定电流。

4. 开断能力

当短路故障突发,某大型制造基地10kV供电网络中,因电源容量充沛、线路架构紧凑,短路电流峰值可达25~30kA。在此极端工况下,熔断器需迅速响应展现强大开断能力。其内置灭弧系统借助特殊材料与创新设计,熔体熔断时将电弧引入灭弧室,利用气流吹拂、金属栅片切割等在15~20毫秒内灭弧。熔断器机械架构与热稳定性要过硬,经得住短路电流与灭弧热应力冲击,灭弧后保持完整,隔离故障线路,避免二次故障,为抢修争取时间恢复系统。

三、案例分析

(一) 某10kV配电线路工程概况

某10kV配电线路承担着为某工业园区输送电力的重要任务。此线路架构独特,总长度近15km,其中架空线路约6km,在园区主干道上纵横交错,以较高架设高度避开低矮障碍物,确保电力传输顺畅;电缆线路长约9km,深埋于地下,避开地面交通与人流,为园区核心区域和对景观有要求的地段稳定供电。该线路沿线连接着30余家工业企业,这些企业所属行业多样,包括机械加工、化工、电子制造等^[3]。机械加工企业车间内,大型设备频繁启停,用电负荷波动大,高峰时单机耗电量可达50~100kW;化工企业因反应釜、泵机等设备运行,用电需求复杂,部分设备对电压稳定性要求极高;电子制造企业单台设备功率虽小,但数量多,对电能质量的谐波含量、电压暂降等指标敏感。该线路日用电负荷曲线波动剧烈,峰谷差值可达平均负荷的40%~60%。如此复杂的用电情况,对供电可靠性要求极为严苛,哪怕短暂停电都可能导致企业生产停滞、产品报废,进而造成巨额经济损失。

(二) 现状短路故障问题剖析

1. 频繁误动作

深入探寻问题根源,核心在于熔断器额定电流选型出现偏差。若额定电流过大,便会与线路实际用电特性严重不符。比如某机械加工企业,其配备的多台大功率冲压机床,在启动瞬间会产生300~500A的冲击电流,且

持续3-5秒，而机床正常运行时电流仅在100-150A区间。该企业原本配置的熔断器额定电流为400A，如此一来，在日常机床间歇性启动过程中，熔断器会错误地将冲击电流判定为故障电流，从而熔断并切断供电。这一情况频繁发生，极大地扰乱了企业的生产节奏，进而导致原材料浪费、订单交付延迟等一系列负面连锁反应。

2. 保护不及时

经详细分析可知，问题的关键在于所选熔断器的熔体额定电流与潜在短路电流不匹配。在园区内某化工企业配电室发生三相短路故障时，短路电流峰值瞬间飙升至18-20kA。但当时所安装的熔断器，其熔体额定电流的设计仅考虑了常规运行工况，面对这种高强度短路电流冲击，适配能力严重不足。在强大电流冲击下，熔体熔断耗时竟长达100-150毫秒，远远超出安全熔断的时间限制。这致使下游多台对电流敏感的电气控制设备和精密配电柜，因长时间遭受大电流冲击，绝缘层遭到破坏，内部元件被烧毁。事后企业面临高昂的维修成本，且复工复产进程也因设备维修难度大而变得艰难漫长。

（三）基于精细化选型的改进措施及效果

1. 精准选型

对于汇聚大量电动机负载的分支线路，选用具有反时延特性的熔断器是合适选择。这种熔断器可智能辨别电动机启动时的浪涌电流，有效避免误动作。通过精准测量电动机启动频次、时长、运行电流等关键参数，仔细匹配熔体额定电流，使其既能承受频繁启动冲击，又能在短路故障瞬间迅速熔断。比如，某分支线路连接5家机械加工企业，有20余台大功率电动机，经精确测算，为其配备熔体额定电流在350-400A的反时延熔断器，能完美满足负载需求^[4]。

2. 增设故障指示

熔断器触发动作时，智能故障指示器能在毫秒级时间内精准捕捉故障信号，并通过无线传输模块将故障位置信息加密上传至运维监控平台。运维人员不管在园区的哪个角落，只需操作手机APP或查看监控终端，就能清楚地看到故障点的精确坐标。某次故障发生后，运维人员利用该智能系统，仅15分钟就锁定了故障点。相比以往，故障定位时间大幅缩短至1小时以内，为快速抢修争取到了宝贵时间，有效减少了园区停电时长，将企业生产受影响的程度降到了最低。

3. 优化运维策略

定期安排专业运维团队，使用红外测温仪对熔断器

的关键部位进行温度检测，实时跟踪温度变化，以便提前察觉潜在的过热问题。借助在线监测系统，对熔断器的电流、电压、动作次数等参数进行24小时不间断地采集和分析，根据分析结果预测熔断器性能的劣化趋势。一旦发现异常情况，便及时更换性能下降的熔断器，保证线路的保护功能始终可靠。实施这一系列改进措施后，该10kV配电线路运行状况大为改善^[5]。

表1 10kV 配电线路案例分析关键数据展示

| 分类 | 详情 | 数值 |
|------|--------------------|---------|
| 线路架构 | 总长度 (km) | 15 |
| | 架空线路长度 (km) | 6 |
| | 电缆线路长度 (km) | 9 |
| 负载特性 | 机械加工单机高峰功率 (kW) | 50-100 |
| | 化工设备用电波动频次 (首次/小时) | 2-3 |
| 故障剖析 | 原熔断器额定电流 (A) | 400 |
| | 短路电流峰值 (kA) | 18-20 |
| | 分支线路数量 (一条) | 40-50 |
| 改进措施 | 适配电动机熔断器熔体电流 (A) | 350-400 |
| | 故障定位最短时间 (min) | 15 |
| | 停电次数降低比例 (%) | 80 |

结语

经对10kV配电系统熔断器选型开展精细化研究与实践，众多难题得以成功破解。通过精准选型、设置智能故障指示以及优化运维策略等综合举措，供电稳定性得到显著提高，企业生产获得有力保障。这为类似配电系统的运维工作提供了可借鉴范例，有力推动工业电力供应朝着更高水平迈进。

参考文献

- [1] 张立坚, 刘涛, 卞春兵. 35 kV 铠装柜熔断器手车弧光短路故障分析及处理[J]. 电世界, 2021, 62 (08): 10-13.
- [2] 魏礼华. 基于继电保护电力系统的短路保护关键技术分析[J]. 自动化应用, 2019, (02): 101-102+105.
- [3] 张元林, 赵燕峰, 郭锐, 等. 风电机组短路故障与安全保护对策[J]. 大功率变流技术, 2016, (01): 43-48.
- [4] 杨旭, 梅旭. 根据熔断器熔断的形态分析仪器器短路故障[J]. 医疗卫生装备, 1996, (04): 47.
- [5] 韩银凤. 建筑供配电中短路电流的研究与设备校验[D]. 长安大学, 2015.