

基于可靠性提升的电力公司配网规划优化研究

黄涛 杨朋凯

国网河北省电力有限公司石家庄市藁城区供电分公司 052160

DOI:10.12238/ems.v7i12.16474

[摘要] 随着社会经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,用户对供电可靠性的要求日益严苛,配电网作为电力系统连接用户的关键环节,其规划的科学性与合理性直接决定了供电服务的质量,传统配网规划往往侧重于经济性与负荷增长预测,对可靠性指标的考量相对薄弱,导致电网在面对故障、自然灾害或负荷突变时,抗风险能力不足,停电事故频发,本文聚焦于“可靠性提升”这一核心目标,系统分析了影响配网可靠性的关键因素,构建了以可靠性为核心的多目标优化规划模型,研究提出融合网架结构优化、设备选型升级、自动化技术应用及分布式电源(DG)协同配置的综合优化策略,并实际案例验证了该模型与策略在提升配网供电可靠性、降低系统故障率与停电时间方面的有效性,为电力公司实现高质量、可持续的配网发展提供了理论依据与实践参考。

[关键词] 供电可靠性;配电网规划;优化模型;网架结构;自动化;分布式电源

引言:

配电网是电力系统中直接面向广大电力用户的终端环节,承担着将电能从高压输电网安全、可靠、高效地配送至千家万户和各类企业的重任,其运行状态直接影响到社会生产生活的正常秩序和人民群众的用电体验,近年来,极端天气事件增多、新能源大规模接入、电动汽车充电负荷激增等新挑战,对配电网的韧性与可靠性提出了更高要求,国家能源局发布的《电力可靠性管理办法(暂行)》等法规也明确要求电力企业持续提升供电可靠性水平,在此背景下,传统的以“满足负荷增长”和“投资成本最小化”为主要导向的配网规划模式已难以适应发展需求,如何在保障经济性的前提下,系统性地提升配网的供电可靠性,成为电力公司面临的核心课题,所以开展“基于可靠性提升的配网规划优化研究”具有重要的现实意义与紧迫性。

一、配电网可靠性影响因素分析

配电网的可靠性受多种因素交织影响,主要可归纳为以下几类:

1. 网架结构因素

网架结构是影响配电网可靠性的根本性因素,单辐射线路多、环网率低、线路分段不合理及联络点不足等问题,导致故障隔离范围大、转供能力差,一旦发生故障,影响范围广且恢复时间长,此外老旧线路和线径过小的电缆容易引发故障,增加了停电频率和时长,优化网架结构,如采用双环网或增加联络开关,可以有效缩小故障影响范围,并提高系统自愈能力,确保供电连续性和稳定性。

2. 设备质量与运维水平

开关设备(断路器、负荷开关、隔离开关)、变压器、电缆等关键设备的质量直接影响系统可靠性,老旧设备由于制造工艺落后、运行年限长,故障频发,增加了系统风险,预防性试验和状态检修不到位会埋下隐患,导致突发故障,所以选用高质量设备并定期进行维护检查,及时更换老化设备,能显著降低系统故障率,提升整体供电可靠性,保障电力系统的稳定运行。

3. 外部环境因素

雷击、大风、冰雪、洪水等自然灾害是导致配网故障的重要原因,这些极端天气可能直接损坏电力设施,还会间接方式(如树木倒伏触碰线路)引发停电事故,此外城市施工外力破坏、树木生长触碰线路以及小动物侵入设备也是常见故障源,为应对这些问题,需加强防护措施,如安装防雷装置、清理线路走廊、设置防护网等,以减少外部环境对电网的影响,提升系统抗灾能力。

4. 负荷特性与增长

负荷密度高、增长速度快的区域,若规划滞后,易导致线路过载、电压质量下降,增加设备损耗和故障风险,季节性负荷波动(如夏季空调负荷)也对系统可靠性构成挑战,科学预测负荷增长趋势,合理规划变电站容量和线路路径,能够有效缓解过载问题,同时应用智能调度技术,优化负荷分配,减少高峰时段压力,提升电网运行效率和供电可靠性。

5. 自动化与智能化水平

配电自动化(DA)系统,如故障指示器、自动化开关、

馈线自动化 (FA) 等的应用程度, 决定了故障的快速定位、隔离和非故障区域的自动恢复供电能力, 缺乏自动化支持, 故障处理高度依赖人工, 耗时长, 部署具备“三遥”功能的终端设备, 实现故障的快速精准定位与隔离, 非故障区域可迅速恢复供电, 大幅缩短停电时间, 提升系统可靠性, 自动化技术的应用是现代配电网提升服务水平的关键手段。

6. 分布式电源 (DG) 接入

光伏、风电等分布式电源 (DG) 的接入改变了传统配电网的潮流方向和短路电流水平, 若规划与控制不当, 可能影响继电保护配合、电压稳定和电能质量, 对可靠性带来双重影响, DG 既可作为备用电源提升局部可靠性, 也可能引入新的不稳定因素, 微电网、虚拟电厂 (VPP) 等技术, 实现 DG 与主网的协调控制, 在主网故障时, 具备条件的微电网可“孤岛运行”, 保障重要负荷不间断供电, 合理规划 DG 接入, 能增强供电灵活性, 提高系统整体可靠性。

二、基于可靠性的配网规划优化模型构建

1. 目标函数

为实现可靠性提升的规划目标, 需建立科学的优化模型, 本文构建了一个以可靠性为核心, 兼顾经济性和适应性的多目标优化模型, 首先最小化系统平均停电频率指标 (SAIFI), 是衡量用户平均每年经历的停电次数的关键指标, 降低 SAIFI 意味着减少用户的停电频率, 提高供电服务质量; 其次最小化系统平均停电持续时间指标 (SAIDI), 用于衡量用户平均每年的停电总时长, 缩短每次停电的时间, 可以显著提升用户的用电体验和满意度, 这两个指标直接反映了配电网的可靠性和服务质量, 是评价配电网规划方案优劣的重要标准, 此外最小化综合年费用是另一个重要目标, 该费用包括电网建设投资 (如线路、设备)、运行维护成本、电能损耗成本以及因停电造成的用户缺电成本 (EUEC), 综合年费用涵盖了初始建设成本, 还包括长期运行中的各种费用, 确保规划方案在经济上具有可行性, 平衡这些目标函数, 可以在保证高可靠性的同时, 控制整体成本, 实现经济效益与社会效益的最大化。

2. 约束条件

为了确保优化模型的有效性和可行性, 本文设置了若干约束条件, 首先是潮流约束即系统必须满足基尔霍夫定律, 保证功率平衡, 这一约束确保了电力在网络中的合理分配, 避免出现过载或电压不稳定的情况; 其次电压约束要求各节点电压保持在允许范围内 (如 $\pm 5\%$ 或 $\pm 7\%$), 以确保电能质量

符合国家标准, 电压波动过大可能导致设备损坏或效率下降, 所以这一约束对于系统的稳定运行至关重要; 第三是线路与设备容量约束, 即线路电流和变压器负载率不能超过其额定值, 这可以防止设备过载引发故障, 延长设备使用寿命, 并提高系统的安全性; 第四是 N-1 安全准则, 即在单一元件 (如一条线路、一台变压器) 故障退出后, 系统仍能备用路径满足重要负荷的供电需求, 这一准则确保了即使在部分设备故障的情况下, 关键负荷也能得到保障, 提高了系统的抗风险能力; 第五是可靠性约束, 规划方案需满足特定区域 (如市中心、工业园区) 的最低可靠性标准 (如 $\text{SAIDI} \leq 1$ 小时/年), 设定明确的可靠性目标, 可以有针对性地进行优化设计, 确保重点区域的供电质量; 最后是 DG 接入约束, 分布式电源 (DG) 的接入容量和位置需满足反向潮流、短路电流、电压波动等技术要求, 合理配置 DG 可以提高局部供电可靠性, 优化整个系统的运行效率, 但必须确保其不会对现有电网造成负面影响。

三、可靠性提升的综合优化策略

(一) 网架结构强化与优化

为了提升配电网的供电可靠性, 首要任务是优化网架结构, 本文建议优先发展“双环网”、“多分段适度联络”的标准化接线模式, 以提高线路的“N-1”率, 这种接线方式能有效减少故障影响范围, 在单个元件故障时迅速恢复供电, 合理规划线路分段, 增加分段开关和联络开关数量, 确保故障发生时可以快速隔离故障区段, 并备用路径恢复非故障区域的供电, 此外对老旧、薄弱线路进行升级改造至关重要, 比如将老化电缆更换为新型高导电率电缆, 选用全绝缘、全密封的环网柜和柱上开关等高可靠性设备, 这些措施提升了系统的物理强度和抗灾能力, 还显著缩短了故障修复时间, 大幅降低了系统平均停电持续时间 (SAIDI) 和系统平均停电频率指标 (SAIFI), 增强了用户的用电体验。

(二) 推广高可靠性设备与技术

推广使用高可靠性的电力设备和技术是提升配电网韧性的重要手段, 在关键节点, 如变电站、开关站和重要负荷点, 应选用全绝缘、全密封、免维护的环网柜和柱上开关等先进设备, 这些设备具有更高的防护等级和更长的使用寿命, 能够有效降低因设备故障引发的停电事故, 此外推广应用电力电子变压器和故障限流器等新型设备, 有助于提升系统的整体韧性和稳定性, 电力电子变压器可以灵活调节电压和功率, 优化电能质量; 故障限流器则可以在短路故障发生时迅速限

制电流, 保护其他设备不受损坏, 这些技术的应用, 可以提高系统的运行效率, 增强其应对突发故障的能力, 确保在极端条件下也能维持稳定的供电服务。

(三) 全面推进配电自动化(DA)建设

全面推进配电自动化(DA)建设是提升配电网可靠性的核心举措之一, 加大投资力度, 实现配电网自动化全覆盖, 部署具备“三遥”(遥测、遥信、遥控)功能的终端设备, 可以大幅提升故障处理效率, 实时监测电网运行状态, 系统能够快速精准定位故障点, 并自动隔离故障区段, 恢复非故障区域的供电, 馈线自动化(FA)功能的引入, 使得非故障区域能够在最短时间内恢复供电, 大大缩短了停电时间, 提升了系统平均停电持续时间(SAIDI), 此外自动化系统还可以大数据分析预测潜在故障, 提前采取预防措施, 进一步提高系统的可靠性, 这种智能化的管理方式减少了人工干预的时间和成本, 还提高了整个配电网的自愈能力和应急响应速度, 为用户提供更加稳定可靠的电力供应。

(四) 科学规划与协同管控分布式电源(DG)

分布式电源(DG)如光伏、风电等的接入, 改变了传统配电网的潮流方向和短路电流水平, 所以需要科学规划和协同管控, 将DG视为提升局部供电可靠性的潜在资源, 在规划阶段就考虑其作为应急备用电源的可能性, 微电网、虚拟电厂(VPP)等技术, 实现DG与主网的协调控制, 在主网故障时, 具备条件的微电网可以“孤岛运行”, 保障重要负荷不间断供电, 比如在工业园区或医院等关键区域, 可以配置一定容量的分布式电源, 并智能控制系统实现与主网的无缝切换, 这提高了局部区域的供电可靠性, 还增强了整个系统的灵活性和适应性, 合理的规划与协同控制, DG可以作为备用电源, 还可以参与调峰调频, 优化电能质量, 提升系统的整体性能。

(五) 应用先进规划与仿真技术

利用先进的规划与仿真技术, 可以更科学地进行配电网的优化设计, 地理信息系统(GIS)、配网潮流计算软件和可靠性评估软件等工具, 能够帮助工程师进行多方案比选与仿真验证, GIS技术, 可以直观展示现有网架结构和负荷分布情况, 便于发现薄弱环节并制定改进措施, 配网潮流计算软件能够模拟不同运行工况下的电网状态, 评估各种规划方案的实际效果, 可靠性评估软件则可以从多个维度评估系统的可靠性水平, 找出潜在的风险点, 采用多目标优化算法(如遗传算法、粒子群算法), 可以在复杂的规划模型中寻找经济

性与可靠性之间的最佳平衡点, 这些先进技术的应用, 提高了规划的科学性和准确性, 还为后续的运维管理提供了有力支持, 确保规划方案能够真正落地实施, 提升配电网的整体性能。

(六) 加强规划与运维协同

加强规划与运维的协同是提升配电网可靠性的另一重要方面, 规划方案要满足当前的需求, 还要充分考虑后期运维的便利性, 比如在设备选型时, 应选择易于维护和检修的设备, 确保在出现故障时能够快速响应和修复, 同时自动化系统的可维护性也应纳入考量, 避免因系统复杂度过高而导致维护困难, 建立规划-建设-运维全链条的数据共享机制, 可以实现信息的无缝对接, 使运维数据能够及时反馈给规划部门, 以便在未来的规划中进行调整和优化, 这种方式, 可以形成一个闭环管理系统, 不断提升配电网的可靠性和运行效率, 此外定期开展培训和演练, 提高运维人员的技术水平和应急处置能力, 也是确保系统稳定运行的关键因素。

结论

提升供电可靠性是现代配电网规划的核心目标, 本文研究表明, 构建以SAIFI、SAIDI和综合年费用为目标的多目标优化模型, 并实施网架优化、自动化升级、DG协同等综合策略, 能够有效提升配电网的抗风险能力和供电质量, 电力公司在进行配网规划时, 应转变观念, 将可靠性置于与经济性同等甚至更优先的地位, 加大在自动化、智能化、高可靠性设备上的投入; 未来, 随着人工智能、数字孪生、5G通信等技术的深入应用, 配电网将向更智能、更自愈、更可靠的方向发展, 为经济社会发展提供更加坚强的电力支撑。

[参考文献]

- [1]陈光华, 杜栋, 庞庆华, 等. 基于可靠性的配电网规划评估体系[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9140.2013.01.009.
- [2]叶涛. 配电网规划提升配网可靠性的研究[J]. 电子乐园, 2021(7): 0387-0387.
- [3]瞿灿, 张凯, 方明利, 等. 基于大数据的配网供电可靠性提升规划研究[J]. 电力设备管理, 2022(4): 201-203.
- [4]朱毅. 探析借助配网规划和改造提升供电可靠性[J]. 企业技术开发, 2013. DOI: CNKI: SUN: QYJK. 0. 2013-23-073.
- [5]段虹. 配电网优化规划的研究与应用[D]. 西安科技大学, 2011. DOI: 10.7666/d.d155760.