

基于重要度的配电网可靠性和弹性分析

刘延春¹ 刘旭²

(1. 国网山东省电力公司烟台市长岛区供电公司, 山东 烟台 265800;

2. 曲阜师范大学, 山东 烟台 265800)

【摘要】随着极端气候事件频发, 我国配电系统大面积停电事故发生率逐年攀升, 造成重大经济损失。由于电力系统的扰动具有难以预测的特点, 因此除了对电力系统的抗灾能力进行研究之外, 还对其在发生灾害后的迅速恢复进行了研究。在复杂网络环境下, 如何在复杂网络环境下, 将网络重要性和弹性模型有机地结合起来, 准确地确定对系统恢复力有显著影响的节点, 成为当前研究的热点。本文基于重要度, 研究了配电网在多节点故障后的可靠性和弹性恢复模型。首先针对配电网的弹性进行分析, 建立配电网的弹性模型。然后建立节点的弹性重要度指标, 对故障节点进行重要度分析。在多个节点发生故障的情况下, 对节点的最佳维护次序进行了判定。最后, 在 IEEE14 节点标准试验平台上对所提模型进行了实验研究。研究发现, 配电网在遇到扰动时, 首先要经过一个抵抗期, 而后逐步适应于扰动的影响。在稳态阶段, 给出了最佳的应急恢复策略, 使得配电网能够迅速地恢复正常的电力供应, 降低了系统的经济损失。

【关键词】重要度; 配电; 网络; 可靠性; 弹性分析

配电网作为保障人类生存与发展的重要基础, 既要保证其在常态下的稳定、可靠运行, 又要保证其在突发事件中的迅速恢复。导致配电网中断的因素主要有自然灾害、信息攻击以及设备故障等。配电网是保障电网安全、稳定运行的重要组成部分, 如何在突发事件后迅速恢复其弹性, 是当前亟待解决的问题。在此基础上, 通过对配电网恢复力的分析, 提出切实可行的对策, 以降低因灾情而带来的损失。配电网弹性是指在突发事件发生后, 配电网感知、抵御、适应并迅速恢复供电的能力。已有研究表明, 在配电网中, 负荷的重要性是影响配电网恢复能力的主要因素之一。

当发生干扰时, 由于干扰事件的存在和不可预知性, 如何在有限资源条件下, 迅速提高配电网弹性, 是实现配电网弹性提升的关键环节。对电力系统中的关键节点进行识别, 有助于电力系统在灾难发生后进行合理的资源配置, 实现电力系统的快速恢复。针对配电网的可靠性问题, 一些学者提出了相应的马尔科夫模型。针对配网中存在的易损线路, 拟建立一套以网络重要性和安全风险脆弱性为基础的配网线路综合易损性评价模型。另外, 还对结点组合的重要性以及对系统可靠度的作用机制进行了研究, 找出了对系统可靠度变动起主要作用的结点。对于具有同一操作级别的配电网, 学者们将其分为若干操作级别, 并对其多状态下的可靠度变化进行了分析。研究表明, 在电力网络中, 网络的灵活性和网络中各节点的重要性相结合, 可以看出网络中各节点的重要性。另一些学者则从最优维护时机和减少弹性值两个角度, 对系统节点的重要性进行了评价。

一、基于可靠性的配电网弹性分析

配电网是一种电力网络, 它从输变电网络或区域电厂接收到的电能, 经配电设施原位分布, 或按照电压顺序分布到各种类型的用户。配电系统具有复杂的网络结构和多样的设备类型, 因而对其运行过程中的扰动事件有很大的影响。整个配电网系统由发电站、升压变压器、输电网、降压变压器以及用户组成。抽取配电网系统的各组件, 以电厂为电力供应节点, 以升压和降压变压器为中转节点, 以输电网为连接节点, 以客户为电力需求节点。将配电网定义为 $G(N, L)$, 也就是由电厂集合 N 和输电线集合 L 组成。电厂的集中 N 由电厂的集中 N_s , 配电站的集中 N_T , 用户 N_A 组成。将 C 作为电网的容量和容量的集合, 并将其归入 R^+ 。输电线 ij 、发电站、配电站和用户的容量能力, 分别由 P_{ij} 、 P^S 、 P^T 和 P^A 来表达, 且 P_{ij} 、 P^S 、 P^T 和 $P^A \in C$ 。

在配电网中, 通常以配电网的供能能力作为衡量系统性能的指标。本文将供电能力视为配电网的系统函数, 以 MVA 为单位, 用 $D(t)$ 来描述在 T 时刻配电网的供电能力。然后, 使用 $D(t_1)$ 来代表在配电网的常规操作条件中的电力供应容量。在 $0-t_1$ 时刻, 配电网处于正常运行状态, 在 t_1 遭遇干扰事件, 此时配电网中的部分节点受损故障, 在 t_1-t_2 阶段配电网自身对干扰事件的抵御过程, 在 t_2-t_3 阶段配电网处于干扰事件发生后的稳定阶段, 在 t_3 时刻配电网采取维修策略恢复受损节点, 使配电网逐步恢复正常供电能力。

在此, 将电力系统的弹性定义为: 当发生突发事件时, 配电系统能够抵抗、适应并快速恢复到正常、

稳定的状态。在恢复阶段 ($t \geq t_3$)，对电力系统的恢复能力与损耗能力之比进行了量化，具体表达式为：

$$R(t) = \frac{\text{recovery}(t)}{\text{loss}(t)} = \frac{\int_{t_3}^t D(t) - D(t_3)dt}{\int_{t_3}^t D(t_1) - D(t_3)dt} \quad (1)$$

根据这个公式， $0 \leq R(t) \leq 1$ ，如果 $D(t)=D(t_1)$ ，则 $R(t)=1$ ，则表示配电网在正常的工作状态；随着 $R(t)$ 向 1 靠拢，配电网中出现的故障节点逐渐被修复，最终恢复了正常的供电能力。

最大供电容量 (TSC) 是在给定的供电范围内，当全部设备都满足 N-1 安全约束时，能够提供的最大负载容量。电网最大负荷容量与变电所负荷容量及电网转供容量有关。基于最大供电能力的理念，引入弹性指数，建立配电网弹性模型，使配电网即使发生局部故障，仍能保证配电网弹性最大，且其他节点无过载。在复杂的外部环境下，配电网中存在多个节点失效的情况下，维护策略的核心是根据故障节点的修复次序，使得配电网的自愈能力最大化，并在规定的时间内尽可能地恢复到最优的状态。本项目着眼于单节点恢复后对配电系统剩余弹性的影响，以保证系统在恢复期间的弹性最大化（即最大供电能力）为目标，研究故障节点的最优维修次序。

首先进行模型假设：

假定 1：每个电厂、每个输电线路的状况是彼此无关的，仅存在两种状况：正常运转与失效；假定 2：配电网在发生了一次扰动之后，发生了故障的发电厂和输电线路都可以进行维修，而且维修的时间是相等的；假定 3：故障还原为分立事件，也就是在一定的周期中，仅有一条电场或输电线路可以被修复；并假定电厂和输电线路的容量是已知的。

当干扰事件发生之后，配电网内出现多节点故障的情况，在配电网经过自我调节稳定之后，供电能力函数 $D(t)$ 达到最小值 $D(t_2)$ 。从图 2 可以看出， $D(t_2)=D(t_3)$ ，也就是当时间 $t=t_2$ 或者 $t=t_3$ 时，配电网的供电能力达到整个供电过程中的最小值。这篇文章的目标是在一个给定的时间周期中，使电力供应达到最大，也就是使残余弹性最大，在配电网中，当遇到干扰事件时，多个故障节点的维修次序是什么，所以给出一个由多个离散时间段构成的时间集合， t 为 $\{0, 1, 2, 3 \dots T\}$ ， T 为 Z^+ 。

设 $d_i(t)$ 为发电站 i 的电源容量，其目标是配电网的最大电源容量，也就是用户的最大电力容量：

$$D(t) = \sum_{j \in N_A} d_i(t) \quad (2)$$

将 (2) 式引入到 (1) 式中，获得 (3) 式：

$$R(t) = \frac{T * [D(t) - D(t_3)] - \sum_{t \in T} [\sum_{i \in N_A} d_i(t) - D(t_3)]}{T * [D(t) - D(t_3)]} \quad (3)$$

其中 $D(t_1)$ 表示代表在干扰事件发生前， N_A 内所有使用者在干扰事件之前的最高电力消耗容量；当 $t=t_3$ 时，开始修补失败的节点。

二、配电网节点弹性重要度分析

重要性是用来衡量系统的可靠性，风险，可用性等指标的重要性。本项目将电力系统的重要性和灵活性有机地结合，通过对各种重要性模型的优化，对出现故障的电力系统进行优化，从而优化电力系统的检修顺序。

Birnbaum 的重要性被扩展到了配电网的弹性模型中，用它来度量节点的状态对系统的弹性值的影响，并将这个重要性定义为，把原来的计算方法改成了损失值和恢复值之间的差分，具体表达式如下：

$$I_i^B = R(T | \sum_{i=1}^T \mu_i(t) = 0) - R(T | \sum_{i=1}^T \mu_i(t) = 1) \quad (4)$$

RRW 被扩展到了配电网的弹性研究中，它的定义是：在维护时的系统弹性与当网络出现故障的节点没有被维护时的系统最优弹性之比，RRW 的弹性重要性可以用 I_i^{RRW} 来表达，公式如下：

$$I_i^{RRW} = \frac{\max R(T)}{\max R(T | \sum_{i=1}^T \mu_i(t) = 0)} \quad (5)$$

将 RAW 技术应用于配电网的弹性分析，定义为当网络出现故障的节点 i 得到维护时，系统的最佳恢复能力与初始恢复能力之比，这一重要性指数以下公式表达为 I_C^{RAW} ：

$$I_C^{RAW} = \frac{\max R(T | \sum_{i=1}^T \mu_i(t) = 1)}{\max R(0)} \quad (6)$$

采用 Copeland 法，对配电网中各结点的重要性进行了综合排序。将节点的重要度指标集定为 $\{1, 2, 3 \dots \omega\}$ ，从系统节点集 N 中任意选取两个节点 i 和 j ，依次对指标集的每个指标进行比较。在对第 k 个重要性指数进行比较之后，结点 i 与结点 j 的 Copeland 分数将会显示为：

$$C_{i,j}^k(i) \begin{cases} C_{i,j}^{k-1}(i) + 1; & v_i^k > v_j^k \\ C_{i,j}^{k-1}(i) - 1; & v_i^k < v_j^k \\ C_{i,j}^{k-1}(i); & v_i^k = v_j^k \end{cases} \quad (7)$$

节点 i 的 Copeland 总分由与节点 i 相关的所有得分求和所得，将节点 i 的 Copeland 总分定义为，其表达式如下：

$$C_{total}(i) = \sum_{j \in N} C_{i,j}^\omega(i), \quad i \neq j \quad (8)$$

三、案例仿真

通过对 IEEE14 节点标准试验系统的实例分析，

验证了该方法的可行性。IEEE14 母线结点标准试验系统包括 14 个结点, 20 个分支; 其中节点 S1、节点 S2、节点 S3、节点 S6 及节点 S8 为配电系统的发电节点; 节点 T7 和节点 T11 为配电系统的配电节点; 节点 D4、节点 D5、节点 D9、节点 D10、节点 D12、节点 D13 及节点 D14 为配电系统中的用户。对于所述系统中的所述发电节点而言, 参考功率是 70kVA, 对于所述分配系统而言, 参考功率是 100kVA, 对于所述用户而言, 参考功率是 50kVA。

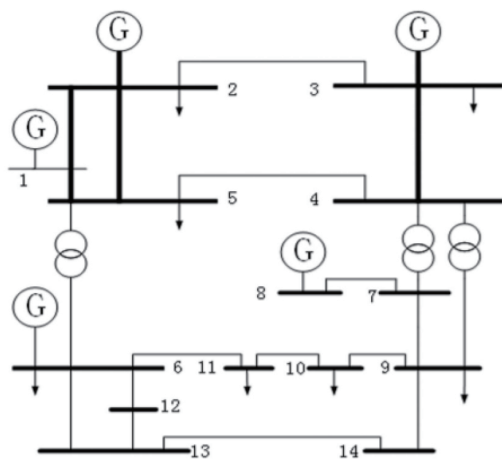


图 1

当遇到干扰事件的时候, 配电网会经历一个抵抗阶段, 之后, 配电网逐步适应干扰事件的影响, 最终达到稳定阶段, 这时, 节点 S2、S6、T11、T7、D4、D10 和 D14 出现了故障。在稳态阶段, 为保证配电网能够迅速恢复正常的电力供应, 应采取相应的应急措施。

在应急抢修时刻 $T=5$ 时, 要从 7 个失效节点中选出 5 个进行抢修, 以保证系统的恢复能力。在此基础上, 以第二个模型为基础, 通过模拟计算, 得到了不同类型的结点经过维修后, 配电网的恢复能力。

从研究的结果中我们可以发现, 与其他故障节点组抢修后的配电网弹性相比, 当故障节点 S6、T7、D4、D10 和 D14 被紧急抢修后, 配电网的弹性恢复值最大, 为 0.7354。相应地, 作为应急抢修, 选定了失效节点 S6、T7、D4、D10、D14。

根据 Birnbaum 弹性重要性的大小, 可以得到较高的节点重要性和较高的修复优先级。所以, 对于失效节点, S6 的维护优先权是最高的, T7 的次之, D4 的次之; 最后是 D10 和 D14。

按照 RRW 弹性重要性模型, 对失效节点 S6、T7、D4、D10、D14 的 RRW 弹性重要性进行了计算。

从仿真中得出, 失效节点 S6 的 RRW 弹性重要性为 1.2636; 在 RRW 中, T7 的 RRW 值为 1.7595;

RRW 弹性重要性在 D4 中为 1.121; RRW 的重要性系数 D10 为 1.121; RRW 的重要性在 D14 中为 1.121。当 RRW 的弹性重要性较高时, 则可以得到较高的维护优先级。由此模拟得到, 失效结点 T7 具有最大的维护优先权, 然后是结点 S6, 最后是结点 D4、D10、D14。失效节点 D4、D10、D14 具有同样的维护优先权。

失效节点 S6 具有最高的维护优先权; T7 与 D4 具有同样的维护优先权, 维护优先权并列第二; D10 与 D14 具有同样的维护优先权, 并排在第三位。

以 Birnbaum、RRW 和 RAW 弹性重要度得出的故障节点的维修顺序为依据, 计算得出故障节点 S6、T7、D4、D10 和 D14 的 Copeland 值。通过 Copeland 法, 得到了对于故障节点来说, Copeland 值的大小顺序为 $\{S6>T7>D4>D10=D14\}$ 。当 Copeland 值较大时, 则表示失效节点具有较高的维护优先权。

在恢复力重要性不同的情况下, 通过对 Copeland 值进行排序, 并对故障节点进行维护, 得到了恢复力的变化曲线。当 RRW 具有弹性重要性时, 配电网的恢复速度显著低于其他重要性程度时。在 $t=1$ 时刻, 应急检修失效节点 S6 对配电网恢复力的影响最大; 当时刻 $t=2$ 时, 应当应急维护失效节点 T7; 当时刻 $t=3$ 时, 失效节点 D4 应当被维护; 最终, 在 D10、D14 的维护次序之前、之后, 节点 D10、D14 的恢复效果是一致的。

结论:

本文提出了以最大供电容量为目标的配电网弹性恢复优化模型。在此基础上, 构建 Birnbaum, RRW, RAW 三个节点的弹性重要性指数, 并对维护群中出现的失效节点进行重要性分析。在此基础上, 对维护群内出现故障的节点, 进行最优维护次序的判定, 使得配电网的弹性迅速回复到最佳状态。与其他失效结点群抢修后的配网弹性比较, 在失效节点 S6、T7、D4、D10、D14 紧急抢修后, 配网弹性恢复值最大。

参考文献:

- [1] 黄翌, 汪飒, 谭阳红, 董旭柱, 吴争荣, 陈春. 基于健康度和重要度的配电网运行风险评估方法 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 136-141.
- [2] 刘春雨, 刘自发, 罗群, 葛磊蛟, 邓文栋, 王月明. 电能计量装置健康度的综合评估与趋势预测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 47-53.
- [3] 郭艳飞, 任雪桂, 鞠力, 蒋诗谣. 基于层次分析法的综合能源系统能效评估方法研究及应用 [J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 121-128.
- [4] 刘志文, 董旭柱, 吴争荣, 陈立明. 基于多种测度的配电网关键设备在线状态评估 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(11): 52-57.