

一种大规模配电网的供电可靠性计算方法

黄泽杰 张少峰 徐展鹏

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要 在大范围(省级、市级)内开展配电网供电可靠性分析时,需要建立宏观规划指标与供电可靠性之间的关联关系,而现有方法依赖详细的配电网拓扑结构,难以满足区域供电可靠性分析的要求。本文首先建立规划、建设、运行和管理环节的配电网供电可靠性宏观指标体系;然后考虑配电网自动化隔离和预安排停电相关因素,提出计及规划和管理环节的供电可靠性计算方法,通过等效评估模式划分和子模型参数计算,提出基于宏观指标体系的大规模配电网供电可靠性计算方法;最后通过某地市实际数据进行算例验证。结果表明,本文所提方法的计算结果与实际值的相对偏差在 11%以内。本文所提方法仅利用宏观指标即可分析区域供电可靠性的整体水平,为配电网规划、可靠性管理和可靠性目标制定提供了一种具有一定精确度且操作性较强的方法。

关键词: 配电网; 大规模系统; 供电可靠性; 指标体系; 故障后果分析法

A calculation method of power supply reliability for large-scale distribution network

HUANG Zejie ZHANG Shaofeng XU Zhanpeng

(China Energy Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510663)

Abstract Establishing the correlation between macrolevel indexes and power supply reliability is essential to analyzing the power supply reliability of distribution network on a large scale (provincial and municipal). However, the existing methods rely on the detailed distribution network topology, which is difficult to meet the requirements of regional power supply reliability analysis. This paper firstly establishes a macrolevel index system of power supply reliability for planning, construction, operation and management of distribution networks. Then a calculation method of power supply reliability is proposed by taking into account the automated isolation of distribution networks and pre-scheduled outages. On this foundation, the calculation method of power supply reliability based on the macrolevel index system is proposed by dividing the equivalence assessment sub-models and calculating the parameters of the sub-models. Finally, a case study is carried out to verify the proposed method. The results show that the relative deviation between the calculation results of the proposed method and the actual data is within 11%. The method proposed in this paper can analyze power supply reliability in the region by using only the macrolevel indexes, which provides a certain degree of accuracy and operability for the planning of distribution networks, reliability management and reliability target setting.

Keywords: distribution network; large-scale system; power supply reliability; index system; fault consequence analysis method

0 引言

随着电网主网架逐渐完善,配电网的可靠性逐渐成为制约用户供电可靠性提升的主要瓶颈^[1-3]。配电网高质量发展的新形势,对配电网投资的精准性

和投资效益有了更高的要求^[4-6]。

目前,配电网理论供电可靠性计算已有较多相关研究^[7-20]。其中,以行标 DL/T 1563《中压配电网可靠性评估导则》所给出的故障后果分析法和最小路法为经典^[20],这些方法基于详细的配电网拓扑结

构和元件参数进行计算,适用于馈线级的供电可靠性计算。国内外研究针对复杂配电网拓扑结构搜索、拓扑简化等进行了深入改进,提出了包括蒙特卡罗模拟法^[14]、最小割集法^[15]、前推法^[16]和分块法^[17]等多种方法,但均依赖详细的配电网拓扑结构。部分研究基于配电网供电可靠性历史数据,采用深度Q学习^[21]、决策树^[22]、深度强化学习^[23]、深度置信网络^[24]等方法,开展配电网可靠性影响因素^[25-27]和可靠性预测^[28-29]研究,相关研究思路还进一步拓展至不确定性网络^[30-33]。然而,计算结果与配电网网架脱离,仅代表数据趋势,难以诠释可靠性与影响因素之间的机理机制。

在更大区域范围(如省级、市级)内开展配电网规划时,需要建立宏观规划指标与供电可靠性之间的关联关系^[19-20]。区域供电可靠性计算方法主要面向网级、省级或市级等大范围区域的配电网。由于区域范围的中压馈线数量庞大,现有供电可靠性计算方法多基于配电网的详细拓扑结构,不适应区域供电可靠性计算的应用场景,主要存在以下问题:

1) 前期准备工作复杂。现有供电可靠性评估方法均依赖对配电网的详细建模、参数更新、拓扑迭代等一系列基础工作,开展区域供电可靠性计算的前期准备过程冗长。

2) 计算过程耗时巨大。现有供电可靠性评估方法基于拓扑搜索或故障穷举的思路,需要对建立的配电网模型进行反复迭代计算和分析工作,计算耗时巨大。

3) 相关参数更新迭代困难。现有供电可靠性评估方法基于配电网详细模型,涉及复杂的拓扑结构和大量的设备参数,其维护、更新和迭代依赖大量重复工作,且易出现数据失真或数据不同步等问题。

4) 无法建立与指标体系的关联关系。宏观指标体系是目前配电网规划管理中广泛采用的配电网统计和描述手段。然而,宏观指标的变动难以直接映射到配电网详细模型的变化上,故无法基于详细模型开展指标敏感度分析和可靠性预测。

因此,区域供电可靠性计算方法应能不依赖区域范围内每回馈线的具体拓扑,避免依赖大量的拓扑结构数据收集、整理和分析工作,仅从宏观指标体系就能分析区域供电可靠性整体水平。

为此,本文首先建立规划、建设、运行和管理环节的配电网供电可靠性宏观指标体系,然后考虑配电网自动化隔离和预安排停电相关因素,提出计

及规划和管理环节的供电可靠性计算方法;再通过等效评估模式划分和子模型参数计算,提出适用于大规模配电网系统的供电可靠性计算方法;最后通过某地市实际数据进行算例验证。

1 配电网供电可靠性宏观指标体系

1.1 供电可靠性宏观指标体系建立原则

为建立适应大规模系统的供电可靠性计算方法,支撑宏观区域供电可靠性计算和可靠性目标制定工作,需要建立一套涵盖规划、建设、运行和管理环节的供电可靠性宏观指标体系。

供电可靠性评估指标体系建立和指标的选取主要考虑以下原则:

1) 选取的指标应能与配电网供电可靠性建立较强的关联性。

2) 选取的指标应具备可控制性,方便支撑配电网规划工作。

3) 选取的指标应涵盖配电网规划建设和运行管理不同环节的影响因素。

4) 选取的指标应与现有配电网规划指标体系和相应的国内外标准具有一定衔接性。

为此,结合理论供电可靠性评估过程,从基础参数、规划建设指标和运行管理指标3个维度建立供电可靠性评估指标体系。

1.2 供电可靠性宏观指标体系

配电网供电可靠性宏观指标体系见表1。

1) 基础参数

理论供电可靠性评估所需的基础参数是描述地区配电网设备规模水平、线路长度、用户数量的统计性指标,具体见表1。

2) 规划建设指标

规划建设指标应选取直接影响配电网供电可靠性且具备可控性,方便支撑配电网规划建设工作的相关指标。为此,结合配电网规划和供电可靠性评估相关理论和方法,提炼与规划环节相关的指标,主要涉及配电网网架水平、配电自动化水平、线路绝缘化水平3个方面,具体定义见表1。

3) 运行管理指标

运行管理指标主要涵盖配电网故障处理时间、配电自动化管理水平、设备可靠性水平和预安排停电等相关指标,具体定义见表1。

(1) 故障处理时间

配电网故障抢修流程与时间间隔如图1所示。

表1 配电网供电可靠性宏观指标体系

| 分类 | 指标 | 定义 | 单位 | |
|--------------|------------|-----------------|---|-----------|
| 基础参数 | 中压公用线路回数 | | 回 | |
| | 中压公用线路总长 | | km | |
| | 架空线低压用户总数 | | 户 | |
| | 电缆线路低压用户总数 | | 户 | |
| 规划建设指标 | 网架水平 | 联络率 | 具备联络点的线路回数/线路总回数 | |
| | | 可转供电率 | 可完全转供电线路回数/线路总回数 | |
| | | 主干线长度比例 | 主干线长度/总线路长度 | |
| | | 大分支平均数 | 支线始端配置了支线断路器且用户数较多的支线（可 选取1000户或10台变压器以上的支线） | 个 |
| | | 主干线平均分段数 | 每回公用中压线路的主干线分段的平均数量 | 段 |
| | 配电自动化水平 | 自动化覆盖率 | 配电自动化覆盖线路回数/线路总回数 | |
| | | 自动化有效覆盖率 | 配电自动化有效覆盖线路回数/线路总回数 | |
| | | 自愈覆盖率 | 配电自愈线路回数/线路总回数 | |
| | 线路绝缘化水平 | 绝缘化率 | (公用线路架空绝缘线长度+公用线路电缆长度)/公用 线路总长度 | |
| | | 电缆化率 | 公用线路电缆长度/公用线路总长度 | |
| 运行管理指标 | 故障处理时间 | 定位、隔离、转供时间（自动化） | 通过配电自动化装置进行故障定位、隔离和转供所需 时间 | h |
| | | 定位时间（人工） | 在不依赖配电自动化的情况下，故障发生到定位故障 点所需时间 | h |
| | | 隔离时间（人工） | 在不依赖配电自动化的情况下，故障定位到隔离故障 设备所需时间 | h |
| | | 转供时间（人工） | 在不依赖配电自动化的情况下，故障隔离到可转供电 用户转供电所需时间 | h |
| | | 架空线故障修复时间 | 架空线路故障时，可恢复用户恢复供电到全线恢复供 电的时间 | h |
| | | 电缆线故障修复时间 | 电缆线路故障时，可恢复用户恢复供电到全线恢复供 电的时间 | h |
| | | 开关修复时间 | 开关故障时，可恢复用户恢复供电到全线恢复供电的 时间 | h |
| | | 配变故障修复时间 | 配变故障时，可恢复用户恢复供电到全线恢复供电的 时间 | h |
| | 配电自动化管理水平 | 配电自动化终端在线率 | 配电自动化在线终端数量/配电自动化终端投运总数 | |
| | | 配电自动化终端投运率 | 配电自动化终端投运数量/配电自动化终端总数 | |
| | 设备可靠性水平 | 架空裸导线故障率 | 架空裸导线年平均故障次数/架空裸导线总长度 | 次/(百公里·年) |
| | | 架空绝缘线故障率 | 架空绝缘线年平均故障次数/架空绝缘线总长度 | 次/(百公里·年) |
| | | 电缆线故障率 | 电缆线年平均故障次数/电缆线总长度 | 次/(百公里·年) |
| | | 开关故障率 | 开关年平均故障次数/开关总台数 | 次/(百台·年) |
| | | 配变故障率 | 配变年平均故障次数/配变总台数 | 次/(百台·年) |
| | 预安排停电指标 | 中压配电网基建项目投资 | 中低压配电网基建项目投资额 | 万元 |
| | | 不停电作业率 | 预安排停电计划中采用不停电作业而避免停电的占比 | |
| 预安排停电中施工停电占比 | | 施工停电时间/预安排停电时间 | | |

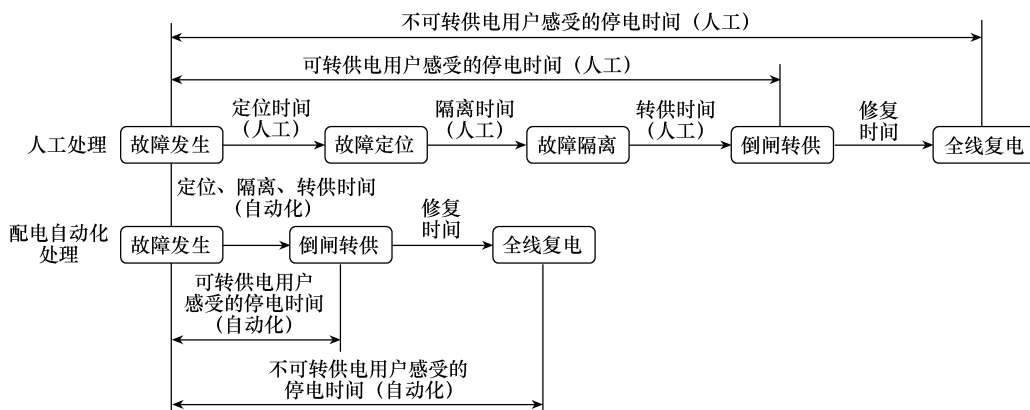


图1 故障抢修流程与时间间隔

当线路不配备配电自动化功能，或用户处于非自动化隔离区时，从故障发生到故障修复可划分为：

①定位时间（人工）。指从系统接收到故障信息或用户报障的时刻，到运维人员定位故障位置的时间。

②隔离时间（人工）。指运维人员定位故障位置后，到隔离故障设备所需时间。

③转供时间（人工）。指运维人员隔离故障设备后，通过倒闸操作，将可转供电用户恢复供电所需时间。

④修复复电时间。指运维人员完成转供后，修复故障设备并使全线复电的时间。其中，故障修复时间根据设备类型的不同，可以细分为架空线故障修复时间、电缆线故障修复时间、开关修复时间和配变故障修复时间。

当线路配备了自动化功能且用户处于自动化隔离区时，故障定位、隔离和转供电由自动化装置完成，所需时间远远小于人工处理时间。

(2) 设备可靠性水平

设备可靠性水平指标是描述配电设备年平均故障次数的指标，在配电网运行管理中，设备老化、外力破坏和极端天气等因素导致的设备失效，均通过设备可靠性指标进行反映。设备可靠性指标可以细分为架空裸导线故障率、架空绝缘线故障率、电缆线故障率、开关故障率和配变故障率。

(3) 配电自动化管理水平

配电自动化管理水平指标，主要包括配电自动化终端在线率和配电自动化终端投运率。

(4) 预安排停电相关指标

预安排停电时间与众多因素相关，不仅与当年的中低压配电网基建项目投资额有关，还涉及其他管

理指标，包括不停电作业应用情况和施工停电占比等。

2 线路级供电可靠性计算方法

2.1 故障停电时间计算

目前，行标 DL/T 1563《中压配电网可靠性评估导则》等给出了线路级故障停电时间的计算方法，但均未充分考虑配电自动化对停电时间的具体影响。在中压线路配置了自动化节点后，根据故障位置的不同，可以将中压线路划分为多个区域，不同区域感受到的停电时间各有差异。

故障隔离分区示意图如图2所示，在架空线发生永久性故障后，可以根据故障点、自动化节点的相对位置进行区域划分，具体如下。

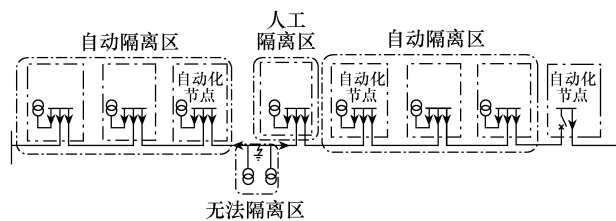


图2 故障隔离分区示意图

1) 自动隔离区：故障点上游最近的自动化节点所带用户及其上游用户；故障点下游最近的自动化节点所带用户及其下游用户。

2) 无法隔离区：故障点所在无法隔离的最小区域。

3) 人工隔离区：故障点上游最近的自动化节点（不含）至故障点下游最近的自动化节点（不含）所包围的区域中，可与故障点实现隔离的区域。其中，下游无法转供电的用户归入无法隔离区。

处于以上几类隔离区内的用户感受到的停电时间如下。

1) 自动隔离区的用户感受到的停电时间为定位、隔离、转供时间(自动化)。

2) 人工隔离区的用户感受到的停电时间为定位时间(人工)+隔离时间(人工)+转供电时间(人工)。

3) 无法隔离区的用户感受到的停电时间为定位时间(人工)+隔离时间(人工)+转供电时间(人工)+故障设备对应的修复时间。

定义第 j 个分区的用户数为 N_j , 故障概率为 λ_j , 当第 i 个分区故障时, 第 j 个分区感受到的停电时间为 t_{ij} , 则按照故障后果分析法的思想, 加总所有故障情形的停电时户数, 计算该中压馈线的户均停电时间为

$$t_{SAIDI} = \sum_i \lambda_j N_j t_{ij} \quad (1)$$

2.2 预安排停电时间计算

预安排停电的主要原因为设备检修和工程停电, 其中设备检修停电需求基本稳定, 工程停电需求主要与上一年度的中压配电网基建项目投资额有关。实际预安排停电还与线路转供电能力和不停电作业率相关。

定义现状年预安排停电时间为 t_{S0} , 不停电作业率为 α_0 , 可转供电率为 β_0 , 联络率为 γ_0 , 主干线平均分段数为 n_0 , 预安排停电中施工停电占比为 ρ_0 , 则还原不停电作业和可转供电等因素后, 预安排停电中施工停电时间 t_{S0C} 和非施工停电时间 t_{S0N} 分别为

$$\begin{cases} t_{S0C} = \rho_0 \frac{t_{S0}}{(1-\alpha_0) \left(1-\beta_0 - \frac{\gamma_0 - \beta_0}{n_0}\right)} \\ t_{S0N} = (1-\rho_0) \frac{t_{S0}}{(1-\alpha_0) \left(1-\beta_0 - \frac{\gamma_0 - \beta_0}{n_0}\right)} \end{cases} \quad (2)$$

考虑还原不停电作业和可转供电等因素后, 预安排停电中施工停电时间与配电网基建项目投资成正比, 则可以根据现状年配电网基建项目投资计算相关系数 k 。

$$k = \frac{t_{S0C}}{I_0} \quad (3)$$

式中, I_0 为现状年配电网基建项目投资。

根据评估年配电网基建项目投资情况和相关系

数, 可以计算评估年还原的预安排停电中施工停电时间 t_{S1C} , 即

$$t_{S1C} = k I_1 \quad (4)$$

式中, I_1 为评估年配电网基建项目投资。

进一步计算评估年的预安排停电时间为

$$t_{S1} = (t_{S1C} + t_{S0N}) (1-\alpha_1) \left(1-\beta_1 - \frac{\gamma_1 - \beta_1}{n_1}\right) \quad (5)$$

式中, α_1 、 β_1 、 γ_1 和 n_1 分别为评估年的不停电作业率、可转供电率、联络率和主干线平均分段数。

3 基于宏观指标体系的大规模配电网供电可靠性计算方法

本文提出典型供电可靠性评估模型, 利用典型模型表征区域配电网特点, 基于典型模型和规划指标, 建立基于规划指标体系的供电可靠性提升分析方法。

3.1 等效评估模式划分

中压线路供电可靠性的主要影响因素为配电网网架结构和配电自动化。网架结构通过影响可转供电用户数而影响供电可靠性, 配电自动化通过影响故障定位、隔离和转供电的时间而影响可靠性。

1) 网架结构典型模式

通过联络率和可转供电率可将区域配电网线路划分为非联络线路、联络但不可完全转供电线路、可完全转供电线路。3类线路在发生故障时的转供电情况各有差异, 具体如下。

(1) 非联络线路: 故障发生后, 下游用户不可转供电。

(2) 联络但不可完全转供电线路: 故障发生后, 下游用户可部分转供电。

(3) 可完全转供电线路: 故障发生后, 下游用户可完全转供电。

2) 配电自动化典型模式

通过配电自动化覆盖率、配电自动化有效覆盖率和自愈覆盖率可将区域配电网线路划分为非自动化线路、自动化覆盖但非有效覆盖线路、有效覆盖但非自愈线路、自愈线路。4类线路在发生故障时的故障处理时间各有差异, 具体如下。

(1) 非自动化线路: 此类线路未安装任何配电自动化装置, 在故障发生后, 通过人工定位+人工隔离+人工投联络的方式进行故障处理。

(2) 自动化覆盖但非有效覆盖线路：此类线路安装了自动化装置，但开关类自动化建设数量不符合规范要求，因此故障处理方式为自动定位+自动隔离+人工投联络，但自动化节点覆盖数量设置为 1。

(3) 有效覆盖但非自愈线路：此类线路的自动化建设模式符合配电网自动化导则要求，但未实现自愈功能，可视为仅支持自动定位和自动隔离功能，因此故障处理方式为自动定位+自动隔离+人工投联络，自动化节点覆盖数量取值范围为 2~3。

(4) 自愈线路：此类线路可实现完全自愈，因此故障处理方式为自动定位+自动隔离+自动投联络。

3) 典型模式划分

将 3 类网架结构典型模式和 4 类自动化典型模式进行组合，考虑到自愈线路必须为可转供电线路，则最多可划分 10 类典型模式。等效模式划分示意图如图 3 所示。

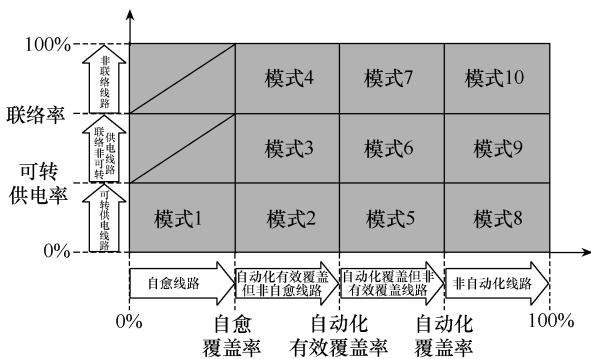


图 3 等效模式划分示意图

根据上述 10 类典型模式的划分，可以利用 10 回等效线路模型对区域配电网中压线路进行整体等效，各等效模式的权重计算见表 2。

表 2 等效模式权重计算

| 等效模式 | 权重计算公式 |
|------|-------------------------------|
| 1 | 自愈覆盖率 |
| 2 | 可转供电率×(自动化有效覆盖率-自愈覆盖率) |
| 3 | (联络率-可转供电率)×(自动化有效覆盖率-自愈覆盖率) |
| 4 | (1-联络率)×(自动化有效覆盖率-自愈覆盖率) |
| 5 | 可转供电率×(自动化覆盖率-自动化有效覆盖率) |
| 6 | (联络率-可转供电率)×(自动化覆盖率-自动化有效覆盖率) |
| 7 | (1-联络率)×(自动化覆盖率-自动化有效覆盖率) |
| 8 | 可转供电率×(1-自动化覆盖率) |
| 9 | (联络率-可转供电率)×(1-自动化覆盖率) |
| 10 | (1-联络率)×(1-自动化覆盖率) |

根据规划指标进行等效评估模式划分后，建立等效评估子模型。其中，主干线和大分支的长度可利用线路总长度、主干线长度比例、大分支平均数、绝缘化率、电缆化率等规划指标计算得到。等效评估子模型线路长度见表 3。

表 3 等效评估子模型线路长度

| 分类 | 等效模型参数 | 计算公式 | |
|-----|------------|------------------------------------|---|
| 架空线 | 主干 | 裸导线长度/km | 线路总长度×主干线长度比例×(1-绝缘化率)/公用线路回数 |
| | | 绝缘线长度/km | 线路总长度×主干线长度比例×(绝缘化率-电缆化率)/公用线路回数 |
| | 大分支 | 裸导线长度/km | 线路总长度×主干线长度比例×(1-绝缘化率)/(公用线路回数/大分支平均数) |
| | | 绝缘线长度/km | 线路总长度×主干线长度比例×(绝缘化率-电缆化率)/(公用线路回数/大分支平均数) |
| 电缆 | 主干电缆长度/km | 线路总长度×主干线长度比例×电缆化率/(公用线路回数/大分支平均数) | |
| | 大分支电缆长度/km | 线路总长度×主干线长度比例×电缆化率/公用线路回数 | |

线路平均用户数类参数的计算可根据低压用户总数、主干线各类型线路长度、大分支各类型线路长度进行计算。等效评估子模型用户数见表 4。

表 4 等效评估子模型用户数

| 分类 | 等效模型参数 | 计算公式 |
|-----|--------|--|
| 全线 | 低压用户数 | 低压用户总数/公用线路回数×子模式权重 |
| 大分支 | 低压用户数 | 低压用户总数×(1-主干线长度比例)/(公用线路回数/大分支平均数)×子模式权重 |

3.2 区域供电可靠性计算

根据等效评估模型的建立，区域配电网供电可靠性评估问题近似转换为对所建立的等效评估子模型的供电可靠性评估。区域供电可靠性评估流程如图 4 所示。

利用上述考虑自动化隔离分区的供电可靠性评估方法，对所分割的等效子模型进行供电可靠性评估，获取各个子模型的可靠性评估结果。将第 i 个等效评估子模型（架空线路、电缆线路）记为 $M_{i-(O,C)}$ ，将所述考虑自动化隔离分区的供电可靠性评估方法简记为函数 $f_R(\cdot)$ ，则第 i 个子模型（架空

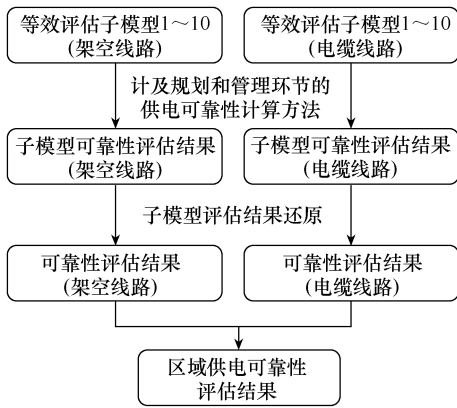


图 4 区域供电可靠性评估流程

线路、电缆线路) 计算所得用户平均故障停电时间 (架空线路、电缆线路) $t_{Fi-(O,C)}$ 可表示为

$$t_{Fi-(O,C)} = f_R (M_{i-(O,C)}) \quad (6)$$

记等效评估子模型 (架空线路、电缆线路) $M_{i-(O,C)}$ 的用户数为 $C_{i-(O,C)}$, 等效评估子模型个数为 $n_{M-(O,C)}$, 则可通过等效评估子模型的供电可靠率效果还原架空线路和电缆线路供电可靠率 $t_{F\Sigma-O}$ 和 $t_{F\Sigma-C}$, 即

$$t_{F\Sigma-(O,C)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{M-(O,C)}} C_{i-(O,C)} t_{Fi-(O,C)}}{\sum_{i=1}^{n_{M-(O,C)}} C_{i-(O,C)}} \quad (7)$$

根据架空线路和电缆线路的供电可靠性, 按照用户比例可以还原区域供电可靠性计算结果为

$$t_{F\Sigma} = \frac{C_O t_{F\Sigma-O} + C_C t_{F\Sigma-C}}{C_O + C_C} \quad (8)$$

式中, C_O 和 C_C 分别为架空线路和电缆线路的用户数, $C_{(O,C)} = \sum_{i=1}^{n_{M-(O,C)}} C_{i-(O,C)}$ 。

至此, 根据网架水平和自动化水平进行评估模式划分, 建立等效评估子模型, 利用考虑自动化分区的分段供电可靠性评估方法, 可对等效评估子模型的供电可靠性进行评估, 从而建立起宏观指标与区域配电网供电可靠性之间的关联关系。

4 算例验证

4.1 算例 1

选取 40 条实际线路并统计其宏观指标 (见表

5), 采用所提方法进行模式等效和可靠性估算, 并在行标 DL/T 1563 的基础上考虑本文所提配电自动化分区方法, 基于详细拓扑开展供电可靠性计算。两种方法的计算结果对比见表 6。

表 5 算例 1 宏观指标

| 分类 | 指标 | 取值 | |
|------------|------------|-------------|---------|
| 架空线为主线路 | 基础参数 | 中压公用线路回数/回 | 10 |
| | | 中压公用线路总长/km | 156.17 |
| | | 低压用户总数/户 | 17 950 |
| | 网架水平 | 联络率/% | 50 |
| | | 可转供电率/% | 40 |
| | | 主干线长度比例/% | 74.78 |
| | | 大分支平均数/个 | 0.3 |
| | 配电自动化水平 | 主干线平均分段数/段 | 2.6 |
| | | 自动化覆盖率/% | 100 |
| 自动化有效覆盖率/% | | 60 | |
| 电缆线为主线路 | 基础参数 | 自愈覆盖率/% | 40 |
| | | 中压公用线路回数/回 | 30 |
| | | 中压公用线路总长/km | 132.566 |
| | 网架水平 | 低压用户总数/户 | 48 570 |
| | | 联络率/% | 93.75 |
| | | 可转供电率/% | 90.62 |
| | | 主干线长度比例/% | 85.41 |
| | 配电自动化水平 | 大分支平均数/个 | 0.267 |
| | | 主干线平均分段数/段 | 3.17 |
| 自动化覆盖率/% | | 96.87 | |
| 配电自动化水平 | 自动化有效覆盖率/% | 75 | |
| | 自愈覆盖率/% | 53.12 | |

表 6 详细拓扑与本文所提方法计算结果对比

| 分类 | 用户平均停电时间/(h/户) | | 偏差 | |
|----------|----------------|-------|-----------|--------|
| | 所提方法 | 详细模型 | 绝对值/(h/户) | 相对值/% |
| 架空线为主线路 | 5.024 | 4.936 | 0.088 | 1.783 |
| 电缆线为主线路 | 0.482 | 0.432 | 0.050 | 11.574 |
| 还原的区域可靠性 | 1.707 | 1.647 | 0.060 | 3.643 |

从表 6 可以看出, 所提方法与基于详细拓扑的供电可靠性计算方法在架空线为主和电缆线为主的线路中, 计算结果偏差的相对值不超过 12%, 经还原为区域供电可靠性后, 偏差的相对值不超过 5%。

可见,所提方法能够较好地实现基于宏观指标而不依赖详细建模的供电可靠性估算,对宏观指标的管控具有一定的指导意义。

4.2 算例 2

以某城市的宏观指标(见表 7)为输入参数,对本文所提大规模配电网系统供电可靠性计算方法进行验证。

表 7 算例 2 宏观指标

| 分类 | 指标 | 取值 | |
|----------------------|--------------------|----------------------|-------|
| 基础参数 | 中压公用线路回数/回 | 581 | |
| | 中压公用线路总长/km | 6 636.71 | |
| | 低压用户总数/户 | 507 851 | |
| 规划建设指标 | 联络率/% | 85.20 | |
| | 可转供电率/% | 55.25 | |
| | 主干线长度比例/% | 32.20 | |
| | 大分支平均数/个 | 2.30 | |
| | 主干线平均分段数/段 | 2.69 | |
| | 配电自动化水平 | 自动化覆盖率/% | 100 |
| | | 自动化有效覆盖率/% | 74.53 |
| | | 自愈覆盖率/% | 18 |
| | 线路绝缘化水平 | 绝缘化率/% | 96.13 |
| | | 电缆化率/% | 48.12 |
| 运行管理指标 | 故障处理时间 | 定位、隔离、转供时间(自动化)/h | 0.033 |
| | | 定位时间(人工)/h | 0.90 |
| | | 隔离时间(人工)/h | 0.37 |
| | | 转供时间(人工)/h | 0.37 |
| | | 架空线故障修复时间/h | 2.38 |
| | | 电缆线故障修复时间/h | 1.31 |
| | | 开关修复时间/h | 1.51 |
| | 配电自动化管理水平 | 配电自动化终端在线率/% | 96.50 |
| | | 配电自动化终端投运率/% | 100 |
| | 设备可靠性水平 | 架空裸导线故障率/[次/(百公里·年)] | 6.81 |
| 架空绝缘线故障率/[次/(百公里·年)] | | 5.98 | |
| 电缆线故障率/[次/(百公里·年)] | | 1.02 | |
| 开关故障率/[次/(百台·年)] | | 1.51 | |
| 配变故障率/[次/(百台·年)] | | 0.62 | |
| 预安排停电指标 | 中压配电网基建项目投资(现状)/万元 | 38 318 | |
| | 不停电作业率(现状)/% | 99.52 | |

(续表 7)

| 分类 | 指标 | 取值 |
|--------|-----------------------|--------|
| 运行管理指标 | 预安排停电时间(现状前一年)/h | 0.43 |
| | 中压配电网基建项目投资(现状前一年)/万元 | 62 567 |
| | 不停电作业率(现状前一年)/% | 99.22 |
| | 预安排停电中施工停电占比(现状前一年)/% | 4.01 |

根据本文所述大规模配电网供电可靠性计算方法,开展等效模式划分,采用考虑自动化隔离分区的故障停电时间计算方法,计算各个模式的故障停电时间见表 8。

表 8 等效子模式故障停电时间计算结果

| 模式 | 权重/% | 故障停电时间/h |
|------|-------|----------|
| 模式 1 | 18.00 | 1.031 |
| 模式 2 | 31.23 | 1.404 |
| 模式 3 | 16.93 | 1.890 |
| 模式 4 | 8.37 | 1.888 |
| 模式 5 | 14.07 | 2.112 |
| 模式 6 | 7.63 | 2.492 |
| 模式 7 | 3.77 | 2.492 |

子模型评估结果还原后,可以计算得到故障停电时间为 1.683h,根据预安排停电时间计算方法,可以计算预安排停电时间为 0.247h,相加可得所在地区停电时间为 1.930h,与当年该地区统计的停电时间对比见表 9。

表 9 供电可靠性计算结果对比

| 分类 | 用户年平均停电时间(实际)/(h/户) | 用户年平均停电时间(计算)/(h/户) | 偏差绝对值/(h/户) | 偏差相对值/% |
|-----|---------------------|---------------------|-------------|---------|
| 故障 | 1.880 | 1.683 | -0.197 | -10.48 |
| 预安排 | 0.250 | 0.247 | -0.003 | -1.20 |
| 合计 | 2.130 | 1.930 | -0.200 | -9.39 |

根据上述计算结果可知,所述大规模配电网供电可靠性计算方法具有一定的准确性,计算结果与实际值的相对偏差绝对值在 11%以内。

5 结论

本文首先建立了规划、建设、运行和管理环节的配电网供电可靠性宏观指标体系,然后考虑配电网自动化隔离和预安排停电相关因素,提出了计及

规划和管理环节的供电可靠性计算方法；通过等效评估模式划分和子模型参数计算，提出了大规模配电网的供电可靠性计算方法；最后以某地市实际数据进行验证。结果表明，本文所提方法的计算结果与实际值的相对偏差绝对值在11%以内。本文所提方法仅利用宏观指标即可分析区域的供电可靠性整体水平，且具有一定的准确性，为配电网规划、可靠性管理和可靠性目标制定等提供了一种操作性较强的新方法，可减少大规模配电网供电可靠性评估工作的人力需求。

参考文献

- [1] 黄向成. 考虑设备全寿命周期的配电网可靠性评估研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [2] 肖茂然. 含高渗透率分布式电源的配电网可靠性评估[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [3] 章晓凯. 龙湖区配电网供电可靠性提升策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [4] 丁俊, 王欣怡, 邵焯楠, 等. 新型电力系统的影响因素分析[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 42-45.
- [5] 廉永乐. 空管供配电系统可靠性分析[J]. 电气技术, 2021, 22(5): 89-96.
- [6] 王照, 刘浩. 配电设备生命周期管理研究[J]. 电气技术, 2020, 21(12): 119-123.
- [7] 杨潇. 配电网设备的供电可靠性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [8] 丁吉. 配电网规划的综合效益评估方法研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
- [9] 马乐. 配电网供电可靠性分析及提高措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- [10] 王正国. 配电网可靠性评估与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [11] 李志铿, 杨海森, 陈超. 计及转供电概率的配电网可靠性评估[J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 30-33.
- [12] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 35-39.
- [13] 张鹏, 王守相. 大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 77-84.
- [14] 梁惠施, 程林, 刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 76-81.
- [15] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 等. 基于最小割集的含环网配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 52-58.
- [16] 咎贵龙, 赵华, 吴延琳, 等. 考虑容量及电压约束的配电网可靠性评估前推故障扩散法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 61-67.
- [17] 刘柏私, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 40-45.
- [18] 中压配电网可靠性评估导则: DL/T 1563—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [19] 冯新龙, 孙岩, 林声宏, 等. 配电网综合评价指标体系及评估方法[J]. 广东电力, 2013, 26(11): 20-25, 53.
- [20] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 36-40.
- [21] GAUTAM M, BHUSAL N, BENIDRIS M. Deep Q-learning-based distribution network reconfiguration for reliability improvement[C]//2022 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), New Orleans, LA, USA, 2022.
- [22] LI Yajie, SONG Xiaohui, ZHAO Shanshan, et al. A line-fault cause analysis method for distribution network based on decision-making tree and machine learning[C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chengdu, China, 2020.
- [23] GAUTAM M, BENIDRIS M. Distribution network reconfiguration using deep reinforcement learning[C]//2022 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Manchester, United Kingdom, 2022.
- [24] SHAN Hongtao, SUN Yuanyuan, ZHANG Wenjun, et al. Reliability analysis of power distribution network based on PSO-DBN[J]. IEEE Access, 2020, 8: 224884-224894.
- [25] LIU Yuanhong, WEI Tao, LIU Wei, et al. Big data based analysis between power distribution network reliability parameters and economic and social external environment[C]//2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA), Shenyang, China, 2021: 528-531.
- [26] WU Yingjun, FAN Tingting, HUANG Tao. Electric power distribution system reliability evaluation considering the impact of weather on component failure and pre-arranged maintenance[J]. IEEE Access, 2020, 8: 87800-87809.
- [27] SAHRANAVARD M R, GHALENO M R, BANDEI M, et al. Reliability analysis of electricity distribution

- networks with sampling method; a case study of Sistan and Bluchestan network[C]//2023 27th International Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), Mashhad, Islamic Republic of Iran, 2023: 102-107.
- [28] ZHANG Ruifeng, HAO Shuqing, DENG Donglin, et al. Low voltage power supply reliability evaluation of distribution network based on data quality governance[C]//2020 4th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Xiamen, China, 2020: 75-78.
- [29] CHEN Biyun, QIN Hong, DING Jin. A reliability forecasting method for distribution network based on data mining[C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, China, 2018: 2503-2506.
- [30] 朱继忠, 骆腾燕, 吴皖莉, 等. 综合能源系统运行可靠性评估评述 I: 模型驱动法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2761-2776.
- [31] 朱继忠, 骆腾燕, 吴皖莉, 等. 综合能源系统运行可靠性评估评述 II: 数据驱动法与模型-数据混合驱动法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3227-3240.
- [32] 马钰, 韦钢, 李扬, 等. 考虑孤岛源-荷不确定性的直流配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4726-4738.
- [33] 宋宇, 李涵, 楚皓翔, 等. 计及可靠性的风光互补发电系统容量优化配比研究[J]. 电气技术, 2022, 23(6): 49-58, 68.
-
- 收稿日期: 2024-12-02
修回日期: 2025-01-17
作者简介
黄泽杰(1994—), 男, 硕士, 研究方向为配电网规划、配电网供电可靠性和直流配电网等。
-
- (上接第16页)
- [10] 王先发, 顾卫祥. 光伏系统直流侧故障电弧的检测与判别[J]. 电气技术, 2019, 20(5): 10-13.
- [11] WANG Yao, BAI Cuiyan, QIAN Xiaopeng, et al. A DC series arc fault detection method based on a lightweight convolutional neural network used in photovoltaic system[J]. Energies, 2022, 15(8): 2877-2877.
- [12] 王尧, 张彦风, 牛峰, 等. 光伏直流电弧电磁辐射特性分析与测量方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 2913-2921.
- [13] XING Qing, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. A novel DC arc fault detection method based on electromagnetic radiation signal[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(3): 472-478.
- [14] 舒奇航, 刘希喆, 王阳. 基于电弧电流和超声波的串联故障电弧的检测[J]. 电气自动化, 2023, 45(3): 23-25, 29.
- [15] 吴振跃, 肖登明. 新型弧光保护装置的设计[J]. 电气技术, 2014, 15(5): 5-11.
- [16] VASILE C, IOANA C, DIGULESCU A, et al. Electromagnetic and acoustic bimodality for the detection and localization of electrical arc faults[C]//Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII, Constanta, Romania, 2016.
- [17] CATTIN V, PERICHON P, DAHMANI J, et al. Detection of electric arcs in large batteries[C]//World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, Spain, 2013: 1-9.
- [18] 刘云鹏, 来庭煜, 刘嘉硕, 等. 特高压直流换流阀饱和和电抗器振动声纹特性与松动程度声纹检测方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1375-1389.
- [19] 高云鹏, 李峰, 陈婧, 等. 基于 Teager-Kaiser 能量算子 Rife-Vincent 窗频谱校正的电压闪变测量[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 248-256.
- [20] 韩绍禹, 李新辉. 基于信息熵和节点导纳矩阵的光伏谐波路径初探[J]. 电气技术, 2019, 20(5): 55-58.
- [21] 严爱军, 和世潇, 汤健. 基于节点评估与最大类间方差的孤立森林异常值检测[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(10): 1188-1197.
- [22] GAO Wei, WAI R J. Series arc fault detection of grid-connected PV system via SVD denoising and IEWT-TWSVM[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2021, 11(6): 1493-1510.
- [23] 邬洲, 张军, 李隆, 等. 基于 Kmeans++ 聚类的光伏系统直流电弧故障检测研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 320-329.
-
- 收稿日期: 2025-01-09
修回日期: 2025-02-12
作者简介
黄晨昊(2000—), 男, 福建省宁德市人, 硕士研究生, 主要从事光伏系统电弧故障检测与定位方面的研究工作。