

基于典型目标网架的“网格化规划” 供电可靠性计算模型 方法

赵 阳¹, 李小明¹, 魏 伟¹, 刘速飞², 金 佳²

¹国网河南省电力公司, 河南 郑州

²上海昌泰求实电力新技术股份有限公司, 上海

收稿日期: 2021年11月15日; 录用日期: 2021年12月22日; 发布日期: 2021年12月29日

摘 要

针对日益复杂配电网的多样化发展要求, 国网公司提出了“网格化规划”理念, 以实现配电网精细化管理和用户的高可靠性需求。然而, 目前仍缺乏反映“网格化规划”特点的供电可靠性计算方法。本文基于改进的故障模式后果解析法, 以典型接线为最小计算单元, 与供电单元、供电网格相对应, 将配电网可靠性指标与负荷密度、配电网目标网架、是否采用配电自动化、配电设备等量化关联, 快速实现配电网“网格化规划”可靠性指标计算, 满足不同网格用户的高供电可靠性需求。

关键词

目标网架, 典型供电模式, 网格化规划, 供电单元, 供电网格, 供电可靠性

Method and Modeling of “Grid Planning” Reliability Calculation Based on Typical Target Grid

Yang Zhao¹, Xiaoming Li¹, Wei Wei¹, Sufei Liu², Jia Jin²

¹State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou Henan

²Shanghai ChangtaiQiushi Electric Power Technology, Co., Ltd., Shanghai

Received: Nov. 15th, 2021; accepted: Dec. 22nd, 2021; published: Dec. 29th, 2021

文章引用: 赵阳, 李小明, 魏伟, 刘速飞, 金佳. 基于典型目标网架的“网格化规划”供电可靠性计算模型方法[J]. 电气工程, 2021, 9(4): 165-176. DOI: 10.12677/jee.2021.94018

Abstract

In response to the diversified development requirements of the increasingly complex distribution network, the State Grid Corporation proposed the concept of “grid planning” to realize the refined management of the distribution network and the high-reliability requirements of users. However, there is still a lack of power supply reliability calculation methods that reflect the characteristics of “grid planning”. Based on the improved failure mode consequence analysis method, this paper uses typical wiring as the minimum calculation unit, corresponding to the power supply unit and the power supply grid, and quantitatively associates the reliability index of the distribution network with the load density, the target grid of the distribution network, whether to use distribution automation, and distribution equipment, etc., to quickly realize the reliability index calculation of the “grid planning” of the distribution network, and meet the high power supply reliability needs of different grid users.

Keywords

Target Grid, Typical Power Supply Mode, Grid Planning, Power Supply Unit, Power Grid, Power Supply Reliability

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的发展，电网规模持续扩大，电网建设外部条件日趋严苛，电力用户对供电可靠性要求却不断提升，配电网建设逐渐进入精细化发展阶段。传统粗放式配电网规划模式，越来越难以满足日益复杂的配电网多样化发展要求。因此，国家电网公司提出了“网格化规划”理念[1][2]，以实现用户的高供电可靠性需求，实现配电网的精细化管理。

国内外有众多学者对供电可靠性计算进行研究。文献[3]围绕配电信息物理系统的影响因素，从信息物理建模方法、供电可靠性模型、物理信息交互、可靠性评估等方面进行概述和展望。文献[4]采用序贯蒙特卡罗方法，建立考虑架空线路实时气象热载流限制模型，分析不同静态、动态热定值下的可靠性指标。文献[5]针对光伏出力随机性影响因素及其设备机械故障率，提出基于综合马尔可夫模型的含分布式电源配电网的可靠性评估方法。文献[6]基于元件优化编号法，利用前推故障扩散法，枚举故障元素的影响范围和隔离范围，提出基于设备载流量和节点电压约束的可靠性计算模型。文献[7]针对现行配电网用户可靠性问题，基于改进熵权法，建立了配电网用电可靠性评价指标体系和模型方法。文献[8]在故障停电基础上，分析了预安排停电事件类型，建立了综合考虑因素的可靠性评估数学模型。

总体来说，配电网供电可靠性计算主要分解析法和模拟法两种。然而，目前仍然缺乏与“网格化规划”层级相对应，以典型供电模式为目标网架的计算方法。而且，模型大多设计复杂，参数设置考虑不足，导致其计算过程相对复杂，准确性、实用性不高，不能有效指导配电网“网格化规划”建设。

本文根据目前配电网规划特点，提出了一种简洁快速计算的方法。基于改进的故障模式后果解析法，以典型供电模式为目标网架最小单元，考虑是否采用配电自动化、预安排停电等，快速实现配电网“网

格化规划”可靠性指标求解,进一步扩展为供电单元、供电网格,满足不同网格用户的高供电可靠性需求,具有重要的实用价值。

2. “网格化”框架层级

2.1. “网格化”目标网架框架

国网公司 2018 年 6 月下发《国家电网有限公司配电网网格化规划指导原则》(试行),要求按照“供电区域、供电网格、供电单元”三级网络[9]目标网架。目标网架构建需要基于网格化建设分区体系逐级展开,不同层级目标网架构建工作任务不同,基于网格化的目标网架构建框架示意,如图 1 所示。

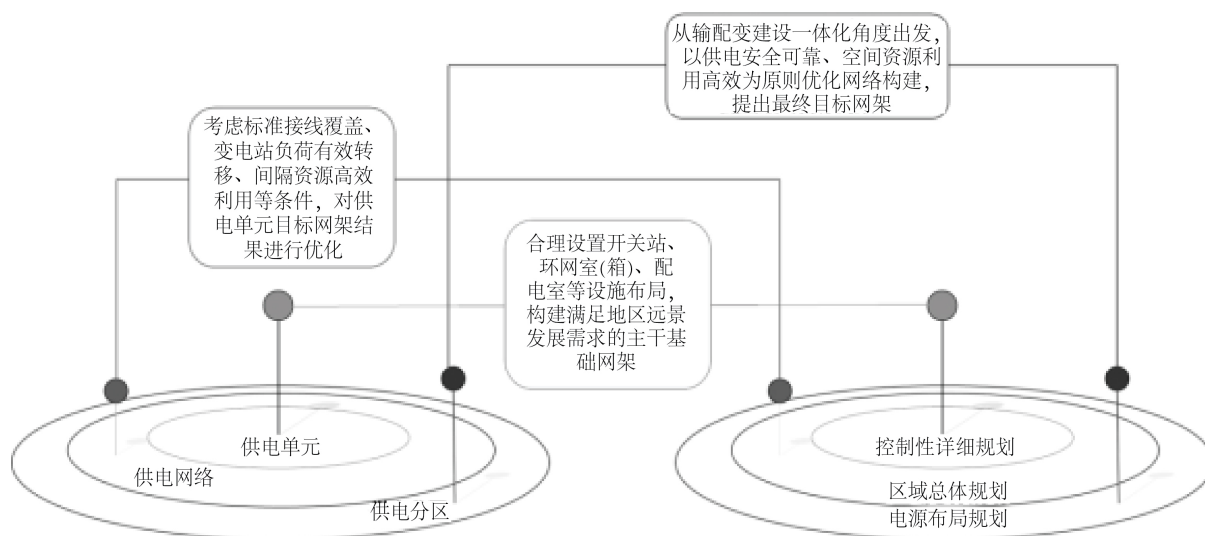


Figure 1. Schematic diagram of grid-based target grid construction framework

图 1. 基于网格化的目标网架构建框架示意图

2.2. “网格化”供电单元模型

本论文按照“网格化规划”理念,设计构建模型,与以上的目标网架构建对应。主要包括高压配电模型、典型供电模式、负荷密度匹配设置等[10] [11]。高压配电模型包括变电设备参数、数量、负荷;中压配电网典型供电模式[12],包括架空线路、电缆线路、环网结构设置(分段数、联络方式)、是否考虑配电自动化[13]、是否考虑预安排停电[14] [15]等方面,满足供电单元内正常供电及负荷增长需求。如图 2 所示。

3. “网格化”可靠性计算模型

3.1. 模型构建的方法

本文在解析法的基础之上改进,提出一种分层故障模式后果分析法:针对当前配电网“网格化”规划,以典型供电模式为最小单元,考虑高压变电站电源点、中压线路、是否自动化[14] [15]、预安排停电[16]、配变容量约束等因素,用算法实现关联度计算及影响因子量化分析,并扩展为供电单元、供电区域,算法简单明了,剪度高,剪度快,具有很强的便捷性和实用性。

1) 故障模式下的配电网可靠性

采用一种由果索因的基于故障模式后果分析法的改进算法[16]。

首先枚举典型供电单元的负荷点,然后采用广度优先搜索技术,搜索影响负荷点可靠性的元件集合,分层划分出负荷点的影响范围和程度。该算法最明显的优点是采用分层思想,提高计算准确性和缩短计算时间。

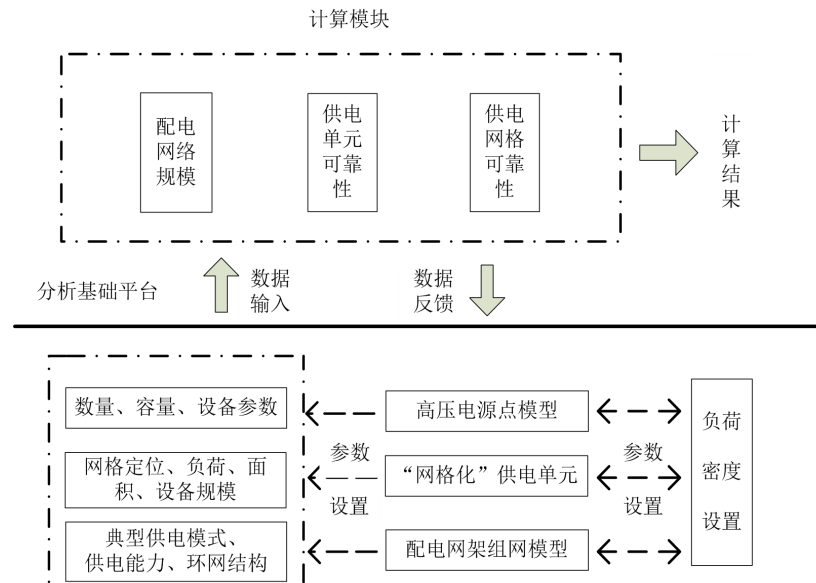


Figure 2. Schematic diagram of model building

图 2. 模型构建示意图

2) 考虑预安排停电的配电网可靠性

考虑预安排停电的时户数影响,检修或施工之前,通过联络转供电概率越大,所需停电时户数就越少。

同样采用遍历算法,迭代故障情况停电频次、停电时间和预安排停电时户数,即可得到可靠性计算结果,使之更吻合实际应用,扩展工具的实用性应用范围。

3) 配电网网格化规划可靠性

不同于运行中的配电网数据比较齐全,在规划目标网架中,包括用户负荷情况、线路路径长度、各级分支的情况、开关数量等均可能不确定。在这种情况下,可以对原始数据做简化处理。

虽然对规划配电网结构做了假设,简化了可靠性计算需要的基础数据,但是研究计算结果表明,与精确算法的计算结果相近,平均停电次数 SAIFI 和平均停电时间 SAIDI 误差在 3%之内,并且供电可靠性 RS 误差在小数点 4 位之后,几乎没有误差。对于配电网规划来讲,这个误差在允许范围之内。通过这些假设,简化了数据的存储,大幅度提高了计算效率。

3.2. 模型计算思路流程

首先设置电网元件可靠性参数,以及高压配电网组网参数;

其次遍历网格内中压线路典型供电模式、是否考虑配电自动化方式、是否考虑预安排停电检修;

然后根据典型供电模式的分段数、是否有联络进行分层;

最后以馈线负荷点末端为起点,逆潮流方向考虑不同分段主干线故障对负荷点的影响,搜索出所有负荷点的故障集合,求得停电频次和时户数,最终求得供电可靠率指标。

限于篇幅,本文仅以典型供电模式中的架空线三分段单联络为例,模拟其故障后果,分析停电范围

和停电时间(图 3)。

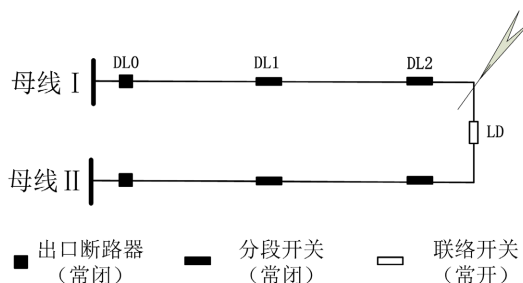


Figure 3. Schematic diagram of three-segment single contact fault diagram

图 3. 架空线三分段单联络故障示意图

首先从馈线负荷点末端开始分析:

若第三段主干线故障, 则联络开关不动作, 第二分段开关断开, 停电范围为该段所有负荷, 即该段为修复域, 其余段为零域;

若第二段主干线故障, 则联络开关动作, 第一分段开关、第二分段开关均断开, 停电范围为该段所有负荷, 即该段为修复域, 第三段主干线负荷由联络线路转带, 但其受到联络开关操作时间的影响, 即隔离切换域, 是否实施配电自动化, 主要影响了隔离切换域的停电时间长短, 其余段为零域;

若第一段主干线故障, 则联络开关动作, 出口断路器、第一分段开关均断开, 停电范围为该段所有负荷, 即该段为修复域, 第二段、第三段主干线负荷由联络线路转带, 但其受到联络开关操作时间的影响, 即隔离切换域, 是否实施配电自动化, 主要影响了隔离切换域的停电时间长短, 其余段为零域;

若出口断路器故障, 则联络开关动作, 出口断路器断开, 该线路负荷将全部由联络线路转带, 但其受到联络开关操作时间的影响, 即隔离切换域, 是否实施配电自动化, 主要影响了隔离切换域的停电时间长短, 其余段为零域。如果该线路和联络线路, 均不满足 $N-1$, 则出口断路器故障将导致停电范围扩大, 部分负荷被迫停电, 成为隔离域。

3.3. 典型单元停电时间

限于篇幅, 以典型供电模式中的五种典型方式为例, 按照算法思路(图 4), 说明其算法公式, 如表 1、表 2 所示。

3.4. 供电单元组合模型

在研究供电单元可靠性时, 首先基于以上基本供电模式, 计算中涉及到最基本的整体单元计算模型是串、并联结构。复杂结构是基于两个基本模型算法, 关联计算区域可靠性情况。

4. 算例分析

4.1. 算例概况

本算例的规划范围为 L 市城市核心区, 总面积约 71.3 平方公里。根据网格化划分原则, 将 L 市核心区划分为 19 个供电单元, 编号为 001、002、……、019, 6 个供电网格, 分别为科技园网格、学府网格、隋唐网格、开元北网格、开元南网格、关林网格。如图 5、图 6 所示。求各供电单元、供电网格目标网架的供电可靠性。

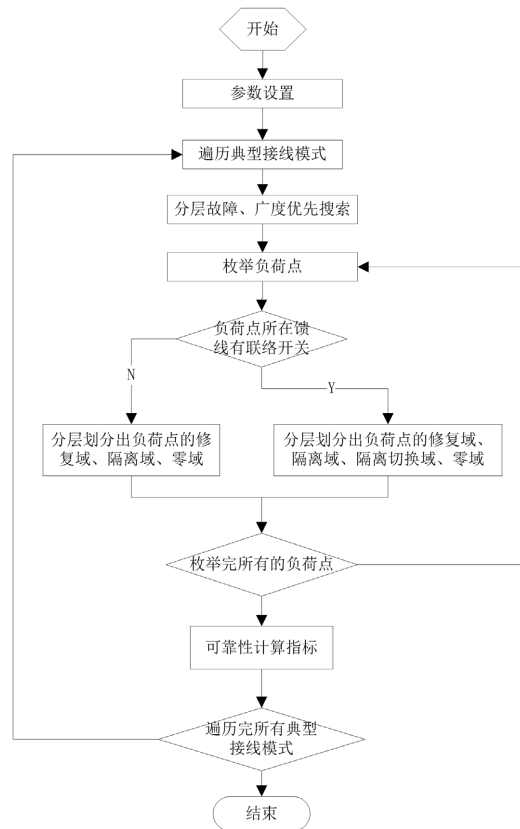


Figure 4. Algorithm flowchart
图 4. 算法流程图

Table 1. Algorithm formulas for power outage time of typical units in medium voltage cable network
表 1. 中压电缆网典型单元停电时间算法公式

典型供电方式	示意图	算法公式
单环网		$\begin{cases} T_i = f_d f_d T_d + \frac{L}{N} f_m f_{fk} \left(\frac{L}{N} f_m T_m + f_{fk} T_f + \frac{L}{N} f_m f_{fk} (T_m + T_f) \right) T_m + f_k T_k; & (i=1) \\ T_i = \frac{L}{N} f_m f_{fk} \left(\frac{L}{N} f_m T_m + f_{fk} T_f + \frac{L}{N} f_m f_{fk} (T_m + T_f) \right) T_m + f_k T_k; & (N > i > 1) \\ T_i = \frac{L}{N} f_m f_{fk} \left(\frac{L}{N} f_m T_m + f_{fk} T_f + \frac{L}{N} f_m f_{fk} (T_m + T_f) \right) T_m + 0.5 f_k T_k; & (i=N) \end{cases}$
双环网		$\begin{cases} T_i = f_d f_d f_d f_d T_d + \frac{L}{N} f_m f_{fk} \left(\frac{L}{N} f_m f_{fk} (T_m + T_f) \right) + f_k T_k; & (i=1) \\ T_i = \frac{L}{N} f_m f_{fk} \left(\frac{L}{N} f_m f_{fk} (T_m + T_f) \right) + f_k T_k; & (N > i > 1) \\ T_i = \frac{L}{N} f_m f_{fk} \left(\frac{L}{N} f_m f_{fk} (T_m + T_f) \right) + 0.5 f_k T_k; & (i=N) \end{cases}$

Table 2. Algorithmic formulas of outage time for typical units in medium voltage overhead network
表 2. 中压架空网典型单元停电时间算法公式

典型供电方式	示意图	算法公式
单辐射		$\begin{cases} T_i = f_d T_d + L \frac{i(N-i+1)}{N} f_m T_m + \frac{L}{N} f_f T_f; (i=1) \\ T_i = f_{fd} T_{fd} + L \frac{i(N-i+1)}{N} f_m (T_m + T_g) + \frac{L}{N} f_f T_f; (i>1) \end{cases}$
单联络		$\begin{cases} T_i = f_d f_d T_d + L \frac{i(N-i+1)}{N} f_m (T_m + 2T_g) + \frac{L}{N} f_f T_f; (i=1) \\ T_i = f_{fd} f_{fd} T_{fd} + L \frac{i(N-i+1)}{N} f_m (T_m + 2T_g + T_z) + \frac{L}{N} f_f T_f; (i>1) \end{cases}$
多分段适应联络		$\begin{cases} T_i = f_d f_d T_d + L \frac{i(N-i+1)}{N} f_m (T_m + 2T_g + T_z) + \frac{L}{N} f_f T_f; (i=1) \\ T_i = f_{fd} f_{fd} f_{fd} T_{fd} + L \frac{i(N-i+1)}{N} f_m (3T_g + T_z) + \frac{L}{N} f_f T_f; (i>1) \end{cases}$

其中： T_i 为第 i 分段主干线及分支线的停电时间； L 为主干线长度，为供电半径乘以地形系数； N 为分段数； i 为第 i 分段数， $1 \leq i \leq N$ ； f_m 为主干线故障率； f_f 为分支故障率； f_d 为出口断路器故障率； f_{fd} 为出分段断路器故障率； f_k 为开关站故障率； f_{fk} 为负荷开关故障率； T_m 为主干线故障修复时间； T_d 为出口断路器故障修复时间； T_k 为开关站故障修复时间； T_f 为负荷开关故障修复时间； T_g 为隔离开关故障操作时间； T_z 为自动重合时间； T_f 为分支故障修复时间。

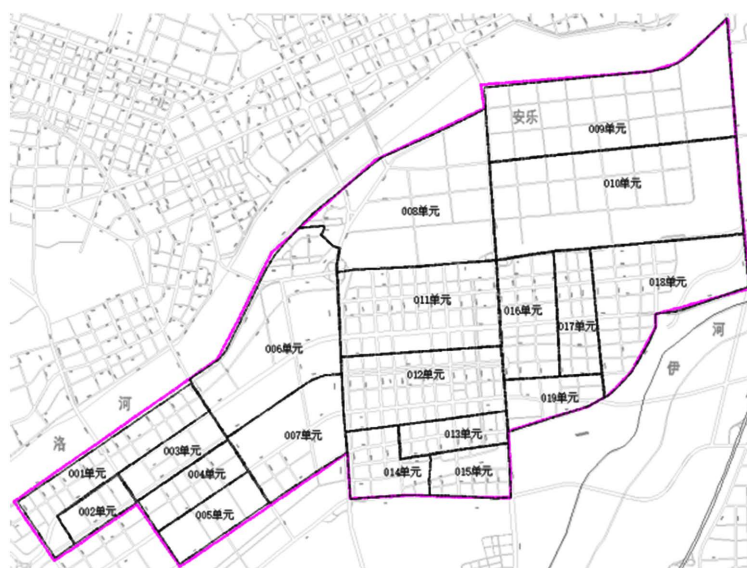


Figure 5. Schematic diagram of the division of power supply units in the core area of L city

图 5. L 市核心区供电单元划分示意图



Figure 6. Schematic diagram of power grid division in the core area of L city

图 6. L 市核心区供电网格划分示意图

4.2. 边界条件参数设置

首先，按照区域电网实际情况，设置设备故障率、平均修复时间、操作时间(出口断路器、分段或联络开关)、高压变电站、中压线路型号、容量等参数。

其次，根据供电单元、不同网格配电网设备实际，主要包括供电网格名称、供电面积、最大负荷、中压线路条数(条)、电缆、架空线路长度(km)、断路器(台数)等参数(表 3)。

最后，运行模型的程序，即可计算出各供电单元、供电网格的可靠性指标，如供电可靠率(%)、故障平均持续时间(分钟)。

Table 3. Reliability parameter setting of power grid components

表 3. 电网元件的可靠性参数设置

设备类型	故障率		平均修复时间(h)	操作时间(h)
	单位	值		
电缆	次/(km·年)	0.0324	6	
架空	次/(km·年)	0.12	3.35	
出口断路器	次/台 × 年	0.001	7.5	1.5
配电变压器	次/台 × 年	0.05	6	
开关站(环网单元)	次/台 × 年	0.0092	12	
分段或联络开关	次/台 × 年	0.0124	4	1

4.3. 典型供电模式可靠性

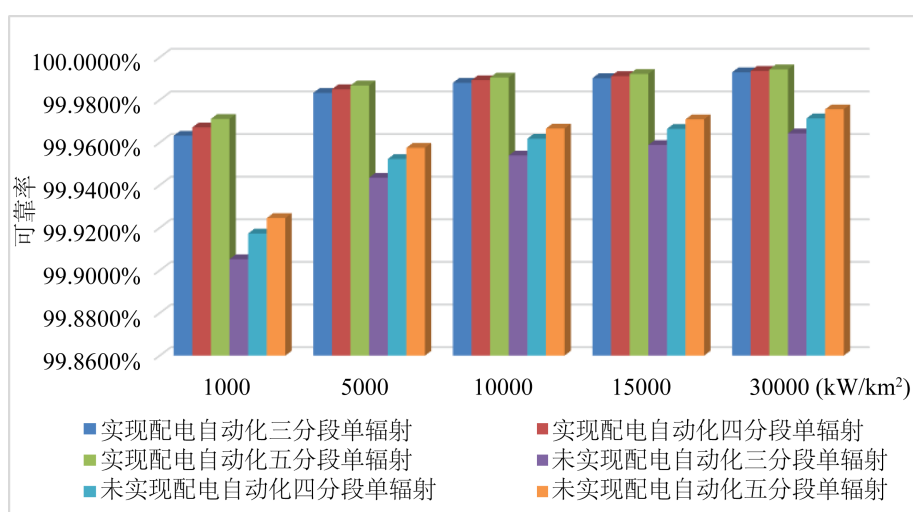
限于篇幅，仅选择架空有联络、电缆单环网、双环网，以 LGJ-240、YJV22-300 为例，模型工具中导线型号可多项选择计算结果如表 4、表 5，图 7、图 8 所示。

1) 架空有联络

架空有联络可靠性计算结果(图 7)。

Table 4. Reliability calculation results for overhead lines with connections**表 4.** 架空有联络可靠性计算结果

型号	负荷密度 (kW/km ²)	实现配电自动化		未实现配电自动化	
		三分段单联络	三分段两联络	三分段单联络	三分段两联络
LGJ-240	1000	99.9774%	99.9866%	99.9320%	99.9412%
LGJ-240	5000	99.9899%	99.9940%	99.9556%	99.9598%
LGJ-240	10000	99.9928%	99.9957%	99.9619%	99.9648%
LGJ-240	15000	99.9942%	99.9965%	99.9649%	99.9673%
LGJ-240	30000	99.9959%	99.9976%	99.9683%	99.9699%

**Figure 7.** Overhead line has contact reliability calculation results**图 7.** 架空有联络可靠性计算结果

2) 电缆单环网、双环网

电缆可靠性计算结果(表 5)。

Table 5. Cable reliability calculation result**表 5.** 电缆可靠性计算结果

型号	负荷密度 (kW/km ²)	实现配电自动化		未实现配电自动化	
		单环	双环	单环	双环
YJV22-300	1000	99.9989%	99.9989%	99.9770%	99.9848%
YJV22-300	5000	99.9989%	99.9989%	99.9848%	99.9873%
YJV22-300	10000	99.9989%	99.9989%	99.9877%	99.9881%
YJV22-300	15000	99.9989%	99.9989%	99.9885%	99.9885%
YJV22-300	30000	99.9989%	99.9989%	99.9890%	99.9890%

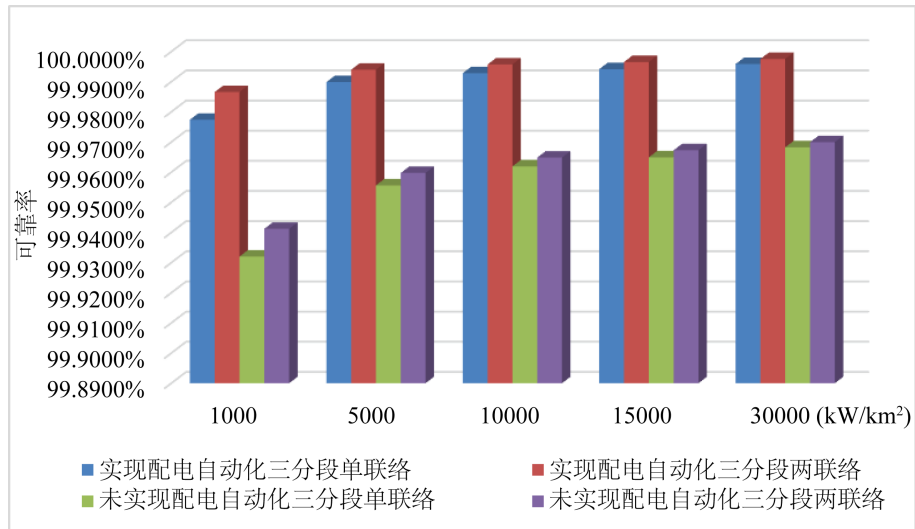


Figure 8. Cable reliability calculation results
图 8. 电缆可靠性计算结果

4.4. 供电单元可靠性

以科技园网格为例，计算其网格内各供电单元可靠性计算结果，如表 6 所示。

Table 6. Reliability calculation results of each power supply unit of the Science and Technology Park grid
表 6. 科技园网格各供电单元可靠性计算结果

所属单元	用地性质	饱和负荷(MW)	供电面积(km2)	接线模式	供电可靠率(%)
001 单元	居住、商业、行政办公	27.94	3.18	1 组双环网， 2 组单环网	99.99894858%
002 单元	居住、商业、行政办公	12.60	1.01	2 组单环网	99.99894890%
003 单元	工业	27.83	1.48	1 组双环网， 2 组单环网	99.99894915%
004 单元	工业	35.11	1.63	2 组双环网， 1 组单环网	99.99894922%
005 单元	工业	36.04	1.69	2 组双环网， 1 组单环网	99.99894921%

4.5. 供电网格可靠性

供电网格供电可靠性计算(表 7)。

Table 7. Power grid reliability calculation
表 7. 供电网格供电可靠性计算

序号	网格名称	供电面积 (km²)	最大负荷 (MW)	中压线路 条数(条)	电缆线路 长度(km)	架空线路 长度(km)	断路器 (台数)	供电可靠率 (%)
1	科技园网格	9.8	14.4	20	100	0	20	99.99402
2	学府北网格	6.7	7.58	4	20	0	4	99.99361
3	学府南网格	3.7	7	4	20	0	4	99.99366

Continued

4	隋唐网格	25	2.7	12	40	15	12	99.9320
5	开元网格	14.1	25.59	20	100	0	20	99.99383
6	关林网格	12	24.57	16	80	0	16	99.99374

4.6. 供电可靠性结果校验

用本方法模型计算的配电网供电网格可靠性, 与《配电网规划设计导则》要求对比, 校验结果如表 8 所示。

Table 8. Power grid reliability calculation
表 8. 供电网格供电可靠性计算

序号	网格名称	供电可靠率(%)	导则要求(%)	校验结果
1	科技园网格	99.99402	≥99.965	满足要求
2	学府北网格	99.99361	≥99.897	满足要求
3	学府南网格	99.99366	≥99.897	满足要求
4	隋唐网格	99.9320%	≥99.828	满足要求
5	开元网格	99.99383	≥99.897	满足要求
6	关林网格	99.99374	≥99.897	满足要求

5. 结语

1) 基于典型目标网架的“网格化规划”中, 采用由果索因的改进故障模式后果分析法, 可以计算典型供电模式可靠性、供电单元和供电网格的供电可靠性。

2) 采用本文设计开发的模型算法, 可以快速分析规划阶段不同供电网格和单元供电可靠率, 满足不同网格用户的高供电可靠性需求, 具有重要的实用价值。

参考文献

- [1] 姚刚, 仲立军, 张代红. 复杂城市配电网网格化供电组网方式优化研究及实践[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1297-1301.
- [2] 国家电网公司. 国家电网公司配电网网格化规划指导原则[EB/OL]. <https://www.doc88.com/p-6002584302211.html>, 2019-05-22.
- [3] 郭经, 刘文霞, 张建华, 等. 主动配电信息物理系统可靠性建模与评估方法综述[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2403-2412.
- [4] 王艳玲, 梁立凯, 韩学山, 等. 计及动态热定值的配电网可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1410-1416.
- [5] 石敏, 周步祥, 张冰, 等. 计及分布式电源不确定性的配电网系统可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12): 114-120.
- [6] 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.
- [7] 欧阳森, 刘丽媛. 配电网用电可靠性指标体系及综合评估方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 222-229.
- [8] 王浩浩, 管霖, 吴煜红. 配电网可靠性评估中预安排停电的实用数学模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 59-63+81.
- [9] 侯佳, 吴志力, 崔凯. 基于双 Q 的新型配电网网格化规划方法[J]. 广东电力, 2019, 32(4): 17-25.

- [10] 姚刚, 刘速飞, 金佳. 计及负荷密度的复杂城市配电网接线模式匹配研究[C]//中国电机工程学会. 2013年中国电机工程学会年会论文集. 成都: 中国电机工程学会, 2013: 7.
- [11] 姚刚, 杨明, 帅浩, 刘速飞, 金佳. 基于“网格化”管理的配电网可靠性分布研究[J]. 华东电力, 2014, 42(9): 1802-1806.
- [12] 国家能源局. DL/T5729-2016. 配电网规划设计技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [13] 商海涛, 吴林, 赵渊, 等. 计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 129-135+141.
- [14] 杨建林, 陈龙, 郭明星, 等. 考虑预安排停电的配电网可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1248-1255.
- [15] 邱生敏, 王浩浩, 管霖. 考虑复杂转供和预安排停电的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011(5): 121-126.
- [16] 赵渊, 赵勇帅, 王洁, 范飞. 复杂配电网可靠性评估的由果索因法[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(7): 1-10.