

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.011

基于可信性理论的有源配电网可靠性分析

梁赞¹, 冯永青²

(1. 筑博设计股份有限公司 广州分公司, 广州 510635; 2. 南方电网公司物资部, 广州 510623)

摘要: 随着分布式发电技术逐步成熟, 需要对有源配电网可靠性进行评估。由于分布式发电设备是新应用的配网元件, 缺少历史统计数据, 进而使得传统可靠性分析方法难以开展。为解决这一难题, 提出了基于可信性理论的配电网可靠性分析方法。首先构建了评估指标, 即随机模糊停电电量期望值、随机模糊用户平均停电持续时间、随机模糊用户平均停电频率指标。然后建立了基于可信性理论的算法, 利用随机模糊期望值求解随机模糊停电电量期望值、随机模糊用户平均停电持续时间, 利用平均机会测度求解随机模糊用户平均停电频率。应用所提方法对 IEEE 系统的计算表明, 本文提出的算法具有一定的实用性, 可以应用于配网的可靠性分析工作。

关键词: 分布式发电, 配网, 可靠性分析, 可信性理论

中图分类号: TM727

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0062-04

Reliability Assessment of Distribution Networks with Distributed Generators Based on Credibility Theory

LIANG Yun¹, FENG Yongqing²

(1. Zhubo Design Group Co., Ltd., Guangzhou 510635, China;

2. Material Department of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China)

Abstract: The reliability of distribution system including distributed generation (DG) need to be analyzed while the DG technology has been used widely now. Traditional reliability assessment theory can hardly to be applied, because basic historical DG reliability data has not been accumulated. The distribution Systems reliability assessment including distributed generation based on credibility theory is proposed to solve this problem. Three new reliability index are proposed: Random-Fuzzy Expected Energy Not Supplied (RFEENS), Random-Fuzzy Customer Average Interruption Duration Index (RFCAIDI), and Random-Fuzzy Customer Average Interruption Frequency Index (RFCAIFI). Assessment procedure for RFEENS and RFCAIDI is based on random fuzzy expected value, while the procedure for RFCAIFI is based on average chance Measure. The test results on IEEE system demonstrate that the proposed method is flexible enough to accommodate system's security objectives.

Key words: distributed generation (DG), distribution system, reliability assessment, credibility theory

随着分布式发电技术的不断发展成熟, 配电网中开始陆续出现分布式电源。而传统上配网侧并不过多考虑分布式发电的作用, 因此, 如何对有源配电网进行可靠性分析成为了新的研究热点问题。

在此研究方向上的难点之一是: 传统的配电网可靠性分析方法, 采用的是长期积累的元件可靠性统计数据进行系统级分析。但是由于风力发电机、

燃料电池、微型燃气轮机等分布式发电装备刚开始在配网中应用, 难以获得长期的历史数据统计, 这使得元件可靠性历史统计数据难以获取, 从而导致系统级的可靠性分析难以开展。

针对上述问题, 本文提出了一种新的解决方法, 即基于可信性理论的有源配电网可靠性分析方法。

1 可信性理论简介

可信性理论是从测度论出发, 研究随机模糊问题的基础数学理论体系。该理论体系于 2004 年建

收稿日期: 2014-12-01

作者简介: 梁赞(1975), 女, 安徽怀远人, 注册电气工程师, 学士, 主要从事电气设计工作(e-mail)1056695242@qq.com。

立, 笔者率先将之应用于电力系统领域。详细的数学基础非常复杂, 具体参见笔者的前期论文^[1-3], 本文不再详细展开。为便于同行理解, 此处对前期成果从数学哲学(Philosophy of mathematics)^[4-6]角度作一简要介绍。

美国电力工业奠基人, 查尔斯·斯坦因梅茨(Charles Steinmetz)在一百多年前说过:“互联的北美电力系统是人类所设计的最大、最复杂的机器。”如何对电力系统这个“最大、最复杂的机器”进行数学分析, 采用华罗庚的应用数学思维^[5], 模型、算法、固定、变动四个因素组合, 对一个研究方向而言, 可以将应用数学的研究工作分为4类:

- 1) 定模定法。这是该方向成熟后的情况, 例如电力系统中 Tinney 的稀疏矢量技术;
- 2) 定模动法。这是该方向研究相当时期时的情况, 例如电力系统 EMS 中的状态估计方法;
- 3) 动模定法。这是一种新方法出现时常见的情况, 例如 SVM(支持向量机)在电力系统中的应用;
- 4) 动模动法。这是一个新领域刚出现时的状态, 可信性理论在电力系统中的应用就属于这种类型。

由于还处于动模动法的起步阶段, 可信性理论在电力系统中的应用, 决非某个研究人员一次研究(或某一篇论文)可彻底解决的, 而是需要长期的持续研究积累, 它的研究是一个“理论-实践-理论”循环往复、螺旋上升的过程, 由于该领域自身的新颖性, 所以需要不断引入新的可信性理论新成果, 并给予适当的应用。

对于纯粹数学(如可信性理论本身)而言, 数学既是科学又是艺术, 真与美同样重要, 它的成果与建筑学中的建筑物类似, “造型美”有时甚至比“功能好”更重要, 即其中的许多定理的出现往往是由于“形式美”。

而对于可信性理论在电力系统中的应用研究来讲, 更确切的表述应该是与军事学(也是科学与艺术的结合)中的战役类比, 在子问题选题、分析、开发、现场应用的环节不断努力实践着辩证逻辑程序, 如图1所示。

在本文中, 由于缺少历史统计数据, 分布式发电设备元件发生故障的可能性与其外部各种影响因素之间的函数关系无法用显式表达, 需要另辟蹊径。因为分布式发电设备故障的可能性同时包含了

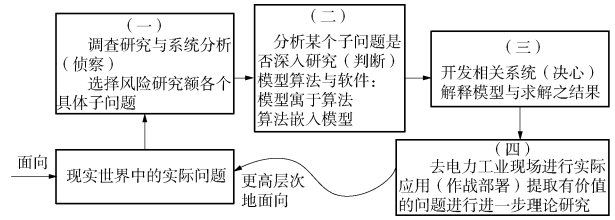


图1 可信性理论在电力系统应用的发展过程

Fig. 1 Development Progress of Credibility Theory Applied in Power System

随机性与模糊性, 所以全系统的不确定性也是同时包含随机性和模糊性的值, 因此, 在可靠性评估中综合考虑随机性和模糊性更为合理。但是受数学工具所限, 以往的电力工程研究人员大都将随机性与模糊性分开进行研究, 在可信性理论发表之前, 数学界尚没有一个在公理化体系之上将两者统一起来的理论。可信性理论为解决这一难题提供了数学上的一条解决之路。

需要特别指出的是, 通过在电力系统中的不断应用可信性理论, 也在数学基础层面提出了新的研究课题, 文献[3]是在基础数学期刊上发表的长达14页的数学研究论文, 用以解决电力系统检修过程涉及的基础数学问题。从长远来开, 通过应用可信性理论, 研究人员将在基础数学和电力系统两个领域不断取得新的进展。

2 基于可信性理论的配网可靠性分析

2.1 指标

基于可信性理论, 可以定义如下配网可靠性指标:

- 1) RFEENS (Random-Fuzzy Expected Energy Not Supplied) 随机模糊停电电量期望值, 单位: kW · h/a。

$$RFEENS_{pro-fuz}[Risk_{pro-fuz}[\xi_{FOR}(\theta)]] = \int_0^{+\infty} Cr\{\theta \in \Theta | EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta))] \geq r\} d_r - \int_{-\infty}^0 Cr\{\theta \in \Theta | EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta))] \leq r\} d_r \quad (1)$$

- 2) RFCALDI (Random-Fuzzy Customer Average Interruption Duration Index) 随机模糊用户平均停电持续时间指标, 单位: h/a。

$$RFCALDI_{pro-fuz}[Risk_{pro-fuz}[\xi_{FOR}(k\theta)]] = \int_0^{+\infty} Cr\{\theta \in \Theta | CALDI_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta))] \geq r\} d_r$$

$$-\int_{-\infty}^0 Cr\{\theta \in \Theta \mid EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta))] \leq r\} d_r \quad (2)$$

3) RFCAIFI (Random-Fuzzy Customer Average Interruption Frequency Index) 随机模糊用户平均停电频率指标, 单位: 次/年

$$C_{hM}^c\{RFCAIFI\}(\xi_{FOR}\theta B) \{ \} \\ = \int_0^1 C_{hp}\{\xi_{FOR} \in B\}(a) d_a \quad (3)$$

2.2 算法

1) RFEENS 的算法流程如下:

Step 1: 令 $e=0$ 。

Step 2: 从分布式发电设备强迫停运的可能性空间 $(\Theta, P(\Theta), P_{os})$ 中产生 $P_{os}\{\theta_k\} \geq \varepsilon$ 。

Step 3: 从概率空间 (Ω, A, P_r) 分析电源、网络等故障, 得:

$$EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta))] \\ = \int_0^{+\infty} P_r\{Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta)) \geq r\} d_r \\ - \int_{-\infty}^0 P_r\{Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta)) \leq r\} d_r \quad (4)$$

Step 4:

$$a = \min_{1 \leq k \leq N} EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta_k))] \\ b = \max_{1 \leq k \leq N} EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta_k))] \quad (5)$$

Step 5: 对 $r \in [a, b]$,

$$e = \begin{cases} e + C_r\{\theta \in \Theta \mid EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta))] \geq r\} \\ \text{若 } r \geq 0 \\ e - C_r\{\theta \in \Theta \mid EENS_{pro}[Risk_{pro}(\xi_{FOR}(\theta))] \leq r\} \\ \text{若 } r < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Step 6: } RFEENS_{pro-fuz}[Risk_{pro-fuz}[\xi_{FOR}(\theta)]] \\ = a \vee 0 + b \wedge 0 + e \times (b - a) / N \quad (7)$$

RFCAIDI 与 RFEENS 的算法流程类似, 均属于随机模糊期望值, 此处不再重复。

2) RFCAIFI 的算法流程如下:

Step 1: 从分布式发电设备强迫停运的 ε 分布 μ_ε 中产生 μ_i 。

Step 2: 从概率空间 (Ω, A, P_r) 分析电源、网络等故障, 得 $p_i = P_r$ 。

Step 3: 重新排列 μ_i 和 p_i 的下标, 使得 $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_N$ 。

Step 4:

$$\omega_i = \frac{1}{2}(\max_{i \leq j \leq N} \mu_j - \max_{i+1 \leq j \leq N+1} \mu_j) + \frac{1}{2}(\max_{1 \leq j \leq i} \mu_j - \max_{0 \leq j \leq i-1} \mu_j) \quad (8)$$

式中: $\mu_0 = \mu_{N+1} = 0$ 。

Step 5: 根据下式计算运行风险指标的随机模糊平均机会:

$$C_{hM}^c\{RFCAIFI\} = \sum_{i=1}^N p_i \omega_i \quad (9)$$

3 算例

本文采用文献^[7]中的 IEEE 算例系统。其结构如图 2 所示, 节点负荷如表 1 所示。

表 1 节点负荷

Table 1 Node Load Values

负荷节点名称	A	B	C	D	E	F	G
平均负荷/kW	482	350	2 108	3 785	2 489	2 067	395
峰荷/kW	626	545	2 737	4 916	3 206	2 684	513

对于图 2 所示配网系统, 为提高电网可靠性, 有两大类改进方案: 第一类是采用常规新建变电站和馈线的方法; 第二类是采用分布式发电, 可以增加分布式电源 DG1、DG2。对于这两大类改进方案, 可以采用本文方法进行分析。DG1、DG2 的故障概率用可信性理论的随机模糊数表示为(2, 5, 5, 8)。

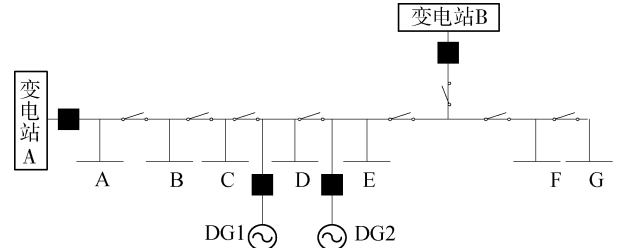


图 2 原始配网结构

Fig. 2 Original Distribution System Structure

研究如下几种增加电网可靠性的方案:

1) 方案 1: 按图 3 加入新变电站 C 以及新馈线。

2) 方案 2: 按图 4 增加两台分布式发电设备 DG1、DG2 容量分别为 1 MW。

3) 方案 3: 按图 4 增加 DG1、DG2 容量分别为 2 MW。

4) 方案 4: 按图 4 增加 DG1、DG2 容量分别为 3 MW。

5) 方案 5: 按图 4 增加 1 台 DG1, 容量为 6 MW。

6) 方案 6: 按图 4 增加 1 台 DG2, 容量为 6 MW。

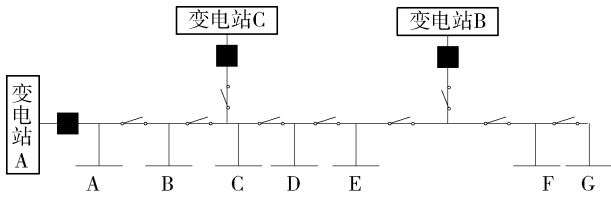


图 3 第一类改进方案

Fig. 3 First Kind of Improvement Schemes

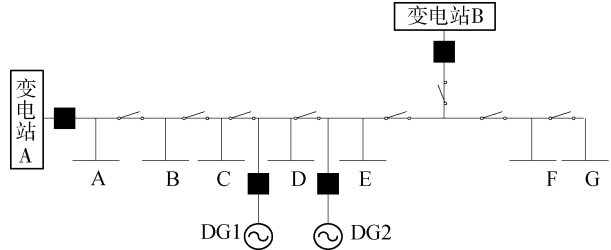


图 4 第二类改进方案

Fig. 4 Second Kind of Improvement Schemes

计算得可靠性指标如表 2 所示。

表 2 不同方案的随机模糊停电电量期望值
Table 2 Random-Fuzzy Expected Energy Not Supplied

Index of Different Schemes		kW · h/年					
方案	改造前电网	1	2	3	4	5	6
RFEENS 值	16 998	4 750	12 034	6 504	4 567	4 586	4 586

由表 2 可见, 通过增加变电站 C, 可以明显提高电网可靠性, 而与之相应, 方案 4 - 方案 6 的分布式发电效果可以达到同类效果。而方案 4 由于采用在 2 个不同节点接入 DG, 可靠性水平更高。

由表 3、表 4 可以看出, 采用不同的方案, 各负荷节点的可靠性指标都有所变化。如果实施电力市场的节点电价, 则分布式发电可以为不同电价的用户, 提供相应的可靠性供电水平。综上, 本文方法可以方便地提供系统级、节点级的可靠性分析。

表 3 不同方案的随机模糊用户平均停电持续时间
Table 3 Random-Fuzzy Customer Average Interruption Duration

Index of Different Schemes		h/年					
方案	改造前电网	1	2	3	4	5	6
负荷点 A	1. 903	0. 386	1. 824	1. 824	0. 373	0. 365	0. 382
负荷点 B	2. 251	0. 386	2. 175	2. 175	0. 372	0. 368	0. 385

表 4 不同方案的随机模糊用户平均停电频率

Table 4 Random-Fuzzy Customer Average Interruption Frequency Index of Different Schemes

Index of Different Schemes		次/年					
方案	改造前电网	1	2	3	4	5	6
负荷点 D	0. 562	0. 178	0. 179	0. 179	0. 179	0. 186	0. 186
负荷点 E	0. 734	0. 572	0. 634	0. 611	0. 571	0. 566	0. 508

4 结论

本文提出了一种新的基于可信性理论的有源配电网可靠性分析方法。可信性理论在数学界正在蓬勃发展, 这也将未来为电力系统提供更多的分析思路与手段。

由于可信性理论在电力系统的应用还处于起步阶段, 因此本文的相关研究还有很多不当之处, 希望继续得到同行的批评指正。

参考文献:

- [1] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 11-15. FENG Yongqing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Power System Operation Risk Assessment Using Credibility Theory [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 30(2): 11-15.
- [2] FENG Yongqing, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Transmission Line Maintenance Scheduling Considering both Randomness and Fuzziness [J]. Journal of Uncertain Systems, 2011, 5(4): 243-256.
- [3] LIU Baoding. Uncertainty Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundations [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [4] 王元, 杨德庄. 华罗庚的数学生涯 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 杨德庄. 灵活的应用数学技术 [J]. 数学进展, 2005, 34(1): 1-16. YANG Dezhuang. Flexible Technologies in Applied Mathematics [J]. Advances in Mathematics, 2005, 34(1): 1-16.
- [6] CHOWDHURY A A, KOVAL D O. Power Distribution System Reliability: Practical Method and Application [M]. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.

(责任编辑 黄肇和)