

基于不确定随机系统的新一代智能变电站可靠性分析

张 籍¹, 杜 治¹, 谢瀚阳², 蔡 勇³, 陈艳波², 颜 炯¹, 谢 东¹

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 3. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 建设新一代智能变电站(NGSS)是破解当前智能变电站技术推进瓶颈、实现未来智能电网发展的迫切需求,而 NGSS 的可靠性分析是其中重要的环节。为了解决 NGSS 可靠性分析中新型设备的可靠性指标表征问题,提出了基于不确定随机系统的 NGSS 可靠性分析方法,其特点在于:新型设备可靠性指标统计缺乏时,所提方法仍能进行可靠性分析;可靠性分析结果以不确定期望和一定置信度下的区间表示。算例仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 新一代智能变电站; 可靠性分析; 不确定测度; 不确定随机系统; 不确定期望; 置信度

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.030

0 引言

建设新一代智能变电站 NGSS(New Generation Smart Substation)是破解当前智能变电站技术推进“瓶颈”、实现电网发展的迫切需求^[1]。而可靠性分析可定量评价关键新型设备对 NGSS 主接线优化的贡献,从而综合评价 NGSS 的性能,因此可靠性分析是 NGSS 设计的重要环节。

在 NGSS 电气主接线优化环节中,针对优化设计对设备的要求,多种新型智能一次设备如智能变压器、智能气体绝缘开关设备 GIS(Gas Insulated Switchgear)、集成式隔离断路器 DCB(Disconnecting Circuit Breaker)、电子式互感器、集成式无功设备等已应用于变电站中。文献[2-4]利用全寿命周期管理理念和实践,在智能变电站设计和研制阶段,全面考虑设备的集成度、可靠性、维修性等因素来进行设备选型、可靠性分析和经济性分析;文献[5]对含隔离式断路器的 NGSS 主接线进行了可靠性评估及灵敏度分析。以上文献做了很有意义的工作,但在对含新型设备的 NGSS 主接线进行可靠性分析时,由于缺乏新型设备的可靠性数据,常采用由新型设备所替代的传统设备中可靠性水平较高的指标数据来近似表示。显然,这种处理方法具有经验性,不能客观描述新型设备对 NGSS 主接线可靠性的影响。综上,对 NGSS 主接线进行可靠性分析的关键是解决新型设备的可靠性指标表征问题,这些可靠性指标常因缺乏统计数据而具有一定的不确定性。

收稿日期:2016-06-28;修回日期:2017-05-16
基金项目:国网湖北省电力公司科技项目(新一代智能变电站设计方案和技术经济性研究)(15KJ020602D20042)
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Company(Research on Design Scheme and Technical Economy of the New Generation Smart Substation)(15KJ020602D20042)

近年来,为了描述客观现实中的不确定性,Liu 提出了与概率论平行的一套不确定理论^[6],在此基础上构筑了不确定可靠性分析等分支。在不确定可靠性分析中,对于不存在或只有少量统计样本的可靠性元件,可用基于不确定测度的可靠性参数表征其可靠性,显然这种方法适用于解决可靠性统计指标缺乏时的 NGSS 主接线可靠性分析。为此,本文提出可将 NGSS 视作不确定随机系统,采用不确定测度表征新型设备的可靠性,并对其进行可靠性分析,采用这种方法可很好地解决 NGSS 主接线可靠性分析问题。此外,为了体现 NGSS 顶层设计远期对设备制造技术的需求,在设备制造并未成型时,若以不确定性来描述顶层对设备的期望,亦可对 NGSS 进行可靠性预评估。

1 不确定理论概述

概率论作为处理随机现象的数学工具已在实践中得到了广泛应用^[7],当被表征对象存在大量样本时,可用概率论描述其数学特点;但当被表征对象不存在样本,而只有少量信息描述时,概率论难以对其进行刻画。此时不确定理论应运而生,可用于描述不确定现象^[6,8-9]。以下简要介绍不确定理论的一些基本概念。

1.1 不确定测度

设 Γ 是一个非空集合, \mathcal{L} 是 Γ 上的 σ -代数。 \mathcal{L} 中每一个元素 A 称为一个事件。如果集函数 \mathcal{M} 满足^[6]:对于全集 Γ ,有 $\mathcal{M}\{\Gamma\}=1$ (规范性);对于事件 $A_1 \subset A_2$,有 $\mathcal{M}(A_1) \leq \mathcal{M}(A_2)$ (单调性);对于任意事件 $A \in \mathcal{L}$,有 $\mathcal{M}\{A\} + \mathcal{M}\{A^c\} = 1$ (自对偶性);对于任意可列的事件序列 A_1, A_2, \dots, A_i ,都有 $\mathcal{M}\left\{\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right\} \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mathcal{M}\{A_i\}$ (可列次可加性),则称 \mathcal{M} 为不确定测度。此时,称三元组 $(\Gamma, \mathcal{L}, \mathcal{M})$ 为一个不确定空间。在概率论中,

使用概率来描述一个事件发生的可能性大小;而在不确定理论中,使用不确定测度来描述事件发生的不确定性大小。

1.2 不确定变量

在概率论中,为了便于描述和研究,引用一个法则将样本空间中的每个元素与实数对应起来,从而产生了随机变量的概念;而在不确定理论中,为了描述现实世界中的不确定事件,引进了不确定变量的概念^[6]。

从不确定空间 $(\Gamma, \mathcal{L}, \mathcal{M})$ 到实数集的一个可测函数 ξ 称为一个不确定变量。即对任意的布尔集 B_w ,有式(1)成立。

$$\mathcal{M}\{\gamma \in \Gamma \mid \xi(\gamma) \in B_w\} \in \mathcal{L} \quad (1)$$

不加证明地给出:若 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是不确定变量, f 是可测函数,则 $f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 也是一个不确定变量。

不确定变量 ξ 的分布函数 $\Phi: \mathcal{R} \rightarrow [0, 1]$ 定义为:

$$\Phi(x) = \mathcal{M}\{\gamma \in \Gamma \mid \xi(\gamma) \leq x\} \quad x \in \mathcal{R} \quad (2)$$

1.3 分布函数的确定与极大熵

设连续不确定变量 ξ 的分布函数为 Φ ,则其熵为:

$$H[\xi] = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\Phi(x)) dx \quad (3)$$

$$S(t) = -t \ln t - (1-t) \ln(1-t)$$

极大熵原理是一种广为应用的确定不确定分布的方法,此优化问题可用拉格朗日函数法求解^[10-11]。

1.4 不确定变量的期望

若 ξ 为不确定变量,其不确定分布为 Φ ,则其期望为:

$$E[\xi] = \int_{-\infty}^{+\infty} x d\Phi(x) \quad (4)$$

并且不加证明地给出,若 ξ 的逆分布函数为 Φ^{-1} ,那么 ξ 的期望值 $E[\xi]$ 还能表示为:

$$E[\xi] = \int_0^1 \Phi^{-1}(\alpha) d\alpha \quad (5)$$

1.5 不确定变量函数的分布及期望

假设不确定变量 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 相互独立,且其不确定分布分别为 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$,函数 $f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 是关于 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 的严格递增函数及关于 $\xi_{k+1}, \xi_{k+2}, \dots, \xi_n$ 的严格递减函数,那么不确定变量 $\zeta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 的不确定逆分布 Ψ^{-1} 和期望值分别为:

$$\Psi^{-1}(\alpha) = f(\Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_k^{-1}(\alpha), \Phi_{k+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)) \quad (6)$$

$$E[\zeta] = \int_0^1 f(\Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_k^{-1}(\alpha), \Phi_{k+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)) d\alpha \quad (7)$$

由逆分布 Ψ^{-1} 进而可以求解得不确定变量 $\zeta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 的不确定分布 Ψ 。

2 NGSS 主接线可靠性分析

2.1 新型设备可靠性参数的不确定描述

NGSS 主接线系统中的各元件均属于可修复元件,故可将此系统视为可修复系统来进行可靠性分析^[12]。

在可修复系统中,连续工作时间 T_U 和连续停运时间 T_D 是重要的可靠性指标。在实际运行中由于新型设备不存在大量样本的统计描述,故难以用概率论进行可靠性分析;相反地,其不确定性可用不确定理论来描述。

a. 已知元件的故障率 λ 和修复率 μ 为常数。

基于不确定理论,元件的 T_U 和 T_D 可看作是非负的连续不确定变量,根据极大熵原理,可以确定它们服从的不确定分布分别为:

$$F_U(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$F_D(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (9)$$

以上结果表明, T_U 和 T_D 的不确定分布为指数分布,与采用概率论推导的结果相同,因此基于连续工作时间和连续停运时间表示的可用率 A 、不可用率 Q 和平均无故障工作时间MTTF等关键可靠性指标的推导与概率论体系一样。

b. 元件的故障率 λ 和修复率 μ 由专家先验信息给定。

由于专家先验信息存在不确定性, λ 和 μ 本身的不确定分布根据先验信息由极大熵原理确定,分别如式(10)和(11)所示。

$$\Phi_\lambda(x) = \mathcal{M}\{\lambda \leq x\} \quad (10)$$

$$\Phi_\mu(x) = \mathcal{M}\{\mu \leq x\} \quad (11)$$

稳态情况下, A 、 Q 及MTTF等关键可靠性指标均可由故障率 λ 和修复率 μ 表示:

$$A(\lambda, \mu) = \mu / (\lambda + \mu) \quad (12)$$

$$Q(\lambda, \mu) = \lambda / (\lambda + \mu) \quad (13)$$

$$\text{MTTF}(\lambda, \mu) = 1 / \lambda \quad (14)$$

因此, A 、 Q 、MTTF可看作不确定变量 λ 和 μ 的函数,可利用式(6)和式(7)求得其不确定分布和期望。

2.2 不确定随机系统的可靠性

在一个混合系统中,若系统中有部分元件由于有大量样本信息而可用随机分布来描述其统计特征,则这部分元件可视为随机变量;而另有部分元件没有样本,只有少量信息描述,则将其视为不确定变量^[13]。若系统中同时存在随机变量和不确定变量,则不能简单地应用概率论或不确定理论对系统进行分析。Meilin对此进行了深入研究,提出可用不确定随机系统模型来统一概率系统和不确定系统^[14],并给出了可靠性指标公式用以分析不确定随机系统的可靠性。具体介绍如下。

假设一个系统由结构函数 f_i , 相互独立随机元素 y_1, y_2, \dots, y_m 及不确定元素 z_1, z_2, \dots, z_n 组成, 其中 y_1, y_2, \dots, y_m 和 z_1, z_2, \dots, z_n 的可靠度分别为 a_1, a_2, \dots, a_m 和 b_1, b_2, \dots, b_n , 则此不确定随机系统的可靠度为:

$$R_{\text{reliability}} = \sum_{(y_1, y_2, \dots, y_m) \in \{0, 1\}^m} \sum_{i=1}^m \mu_i(y_i) \cdot Z(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (15)$$

$$Z(y_1, y_2, \dots, y_m) = \begin{cases} \sup_{f_i(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=1} \min_{1 \leq j \leq n} v_j(z_j) \\ \sup_{f_i(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=1} \min_{1 \leq j \leq n} v_j(z_j) < 0.5 \\ 1 - \sup_{f_i(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=0} \min_{1 \leq j \leq n} v_j(z_j) \\ \sup_{f_i(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=1} \min_{1 \leq j \leq n} v_j(z_j) \geq 0.5 \end{cases}$$

$$\mu_i(y_i) = \begin{cases} a_i & y_i = 1 \\ 1 - a_i & y_i = 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$v_j(z_j) = \begin{cases} b_j & z_j = 1 \\ 1 - b_j & z_j = 0 \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

由式(15)可知, 不确定随机系统可靠度的计算是将不确定系统和随机系统进行解耦计算。首先对随机元素 y_1, y_2, \dots, y_m 的所有状态进行枚举, 得到每一状态下系统随机部分可靠工作的概率 $\sum_{i=1}^m \mu_i(y_i)$; 然后在随机系统这一状态下, 计算不确定系统的可靠度, 即将随机元素 y_1, y_2, \dots, y_m 用 0 或 1 代替, 再按照不确定测度的运算规则及结构函数 f_i 对不确定元素 z_1, z_2, \dots, z_n 进行计算, 求得当前状态下系统可以可靠工作的不确定测度 $Z(y_1, y_2, \dots, y_m)$; 最后对所有状态下随机系统发生的概率与其可以可靠工作的不确定测度的乘积进行求和, 即可得出不确定随机系统的可靠度。

利用式(15)可计算同时含随机变量和不确定变量的不确定随机系统的可靠度, 进而可利用式(16)~(18)计算不确定随机系统的故障次数、故障率及修复率。

$$f_s = \sum_{(y_1, \dots, y_m) \in \{0, 1\}^m} \prod_{i=1}^m \mu_i(y_i) \cdot Z(y_1, y_2, \dots, y_m) \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\mu}) \quad (16)$$

$$\lambda_s = f_s / R_{\text{reliability}} \quad (17)$$

$$\mu_s = f_s / (1 - R_{\text{reliability}}) \quad (18)$$

其中, $\bar{\lambda}$ 和 $\bar{\mu}$ 分别为当前状态下满足 $f_i(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=1$ 的所有值为 1 的元素的故障率之和和修复率之和。

同理, 系统可用率 A_s 、系统不可用率 Q_s 和系统平均无故障工作时间 $MTTF_s$ 等关键可靠性指标均可由故障率 λ_s 和修复率 μ_s 表示:

$$A_s(\lambda_s, \mu_s) = \mu_s / (\lambda_s + \mu_s) \quad (19)$$

$$Q_s(\lambda_s, \mu_s) = \lambda_s / (\lambda_s + \mu_s) \quad (20)$$

$$MTTF_s(\lambda_s, \mu_s) = 1 / \lambda_s \quad (21)$$

2.3 NGSS 主接线可靠性分析方法

2.3.1 建模方法

与传统变电站主接线可靠性计算类似, NGSS

主接线的可靠性计算同样依赖于整个主接线的网络结构和各个设备的可靠性, 最小路集法是解决这一问题的常用方法。该方法首先将所需计算的系统状态限制在最小路集中, 该最小路集代表了系统保持正常工作的所有基本模式; 然后对最小路集进行可靠性指标计算, 即可得到整个主接线系统的可靠性^[12]。

与传统变电站主接线可靠性计算不同的是, 由于新型设备的可靠性指标未知, 故 NGSS 主接线系统应被视作不确定随机系统, 其中新型设备的可靠性指标由一定置信度下的不确定测度描述, 而其他传统元件的可靠性指标则由概率描述。在用最短路集法计算 NGSS 主接线系统的可靠性时, 路集内元素之间及路与路之间的系统拓扑关系由系统结构函数 f_i 描述, 然后即可用式(15)计算 NGSS 主接线系统的可靠性。

2.3.2 基本假设

将 NGSS 主接线系统看作可修复系统, 并做如下假设: 传统元件的连续工作时间和修复时间服从指数分布, 而新型设备的连续工作时间和修复时间服从不确定指数分布; 计算主接线系统可靠性只考虑单一故障, 不考虑双重及以上故障情况; 所有元件只考虑 2 种工作状态, 即正常工作状态和故障工作状态, 元件视为可修复元件, 系统视为可修复系统, 一旦发生故障, 元件退出运行并进行检修, 检修完毕后直接投入运行; 各元件相互独立, 互不影响。

2.3.3 基于不确定随机系统的可靠性计算方法

与传统主接线可靠性计算相同, 基于不确定随机系统计算 NGSS 可靠性时, 需先将电气主接线图转化为用于可靠性计算的逻辑框图, 一般以断路器为边界对主接线进行模块划分, 将模块内所有元件看作串并联关系, 即可得到此逻辑框图。以图 1 所示的主接线

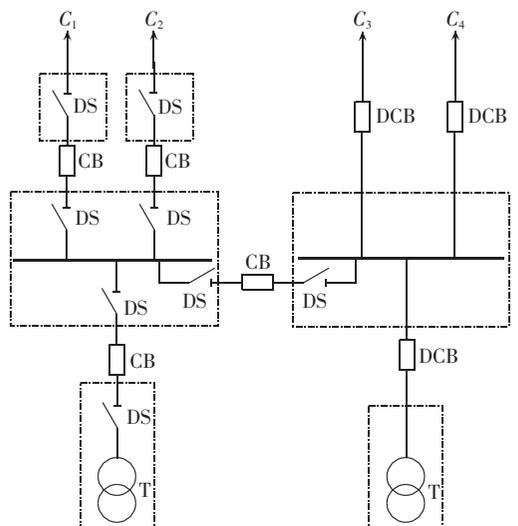


图 1 NGSS 电气主接线图

Fig.1 Main electrical wiring diagram of NGSS

图为例,将其以断路器 CB 和 DCB 为边界对主接线进行模块划分,得到用于可靠性计算的逻辑框图,如图 2 所示,框图中各元素的元件组合如表 1 所示。

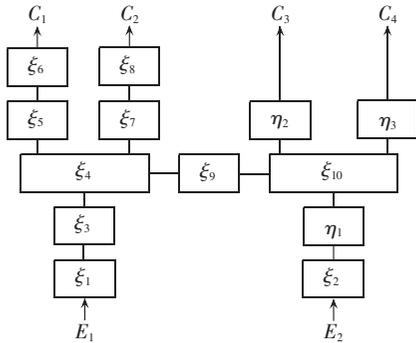


图 2 不确定随机系统的逻辑框图

Fig.2 Logic diagram of uncertain stochastic system

表 1 元素的元件组成

Table 1 Component composition of element

系统元素	元件组合	系统元素	元件组合
η_1, η_2, η_3	DCB	ξ_4	B \wedge 3 DS
ξ_1	T \wedge DS	ξ_{10}	B \wedge DS
ξ_2	T	ξ_6, ξ_8	DS
$\xi_3, \xi_5, \xi_7, \xi_9$	CB		

需要注意的是,由于不能简单计算传统元件和新型设备之间的串联关系,即两者不能划分在同一个模块里,因此系统中既包含随机变量元素,又包含不确定元素,是一个典型的不确定随机系统。

形成不确定随机系统逻辑框图之后,即可计算其可靠性,计算流程如图 3 所示。

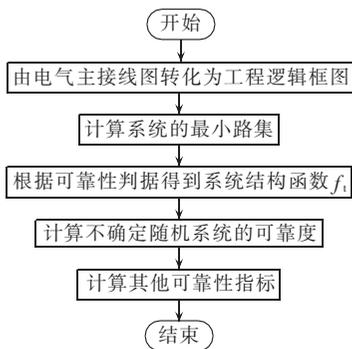


图 3 基于不确定随机系统的可靠性计算流程

Fig.3 Flowchart of reliability calculation based on uncertain stochastic system

3 算例分析

3.1 简单不确定随机系统的可靠性分析

以图 4 所示简单不确定随机系统为例进行分析。图 4 中已形成了包含可靠度为 a_1, a_2 的随机元素 ξ_1, ξ_2 及可靠度为 b_1, b_2 的不确定元素 η_1, η_2 。若该系统可以可靠工作的前提是入口到出口间存在通路,则可得到相应的最小路集,如表 2 所示。由最小路集可得描述系统拓扑串并联关系的结构函数 f_i :

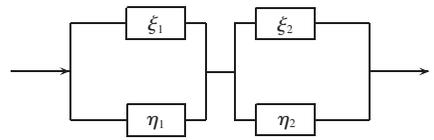


图 4 不确定随机系统逻辑框图

Fig.4 Logic diagram of uncertain stochastic system

表 2 最小路集

Table 2 Minimal path sets

序号	最小路集	序号	最小路集
1	ξ_1, ξ_2	3	η_1, ξ_2
2	ξ_1, η_2	4	η_1, η_2

$$f_i(\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2) = (\xi_1 \wedge \xi_2) \vee (\xi_1 \wedge \eta_2) \vee (\eta_1, \xi_2) \vee (\eta_1 \wedge \eta_2) \quad (22)$$

其中, \wedge 表示元素的逻辑与; \vee 表示元素的逻辑或; f_i 的物理意义是若最小路集中至少存在一条通路,则系统可以可靠工作。

根据式 (15), 图 4 所示系统的可靠度为:

$$R_{\text{reliability}} = P_r \{ \xi_1 = 1, \xi_2 = 1 \} \times Z(1, 1) + P_r \{ \xi_1 = 1, \xi_2 = 0 \} \times Z(1, 0) + P_r \{ \xi_1 = 0, \xi_2 = 1 \} \times Z(0, 1) + P_r \{ \xi_1 = 0, \xi_2 = 0 \} \times Z(0, 0) = a_1 a_2 \times Z(1, 1) + a_1 (1 - a_2) \times Z(1, 0) + (1 - a_1) a_2 \times Z(0, 1) + (1 - a_1) (1 - a_2) \times Z(0, 0) \quad (23)$$

$$Z(1, 1) = \mathcal{M} \{ (1 \wedge 1) \vee (1 \wedge \eta_2) \vee (\eta_1 \wedge 1) \vee (\eta_1 \wedge \eta_2) = 1 \} = \mathcal{M} \{ 1 \wedge 1 = 1 \} = 1$$

$$Z(1, 0) = \mathcal{M} \{ (1 \wedge 0) \vee (1 \wedge \eta_2) \vee (\eta_1 \wedge 0) \vee (\eta_1 \wedge \eta_2) = 1 \} = \mathcal{M} \{ \eta_2 = 1 \} = b_2$$

$$Z(0, 1) = \mathcal{M} \{ (0 \wedge 1) \vee (0 \wedge \eta_2) \vee (\eta_1 \wedge 1) \vee (\eta_1 \wedge \eta_2) = 1 \} = \mathcal{M} \{ \eta_1 = 1 \} = b_1$$

$$Z(0, 0) = \mathcal{M} \{ (0 \wedge 0) \vee (0 \wedge \eta_2) \vee (\eta_1 \wedge 0) \vee (\eta_1 \wedge \eta_2) = 1 \} = \mathcal{M} \{ \eta_1 \wedge \eta_2 = 1 \} = b_1 \wedge b_2$$

因此, 图 4 所示系统的可靠度为:

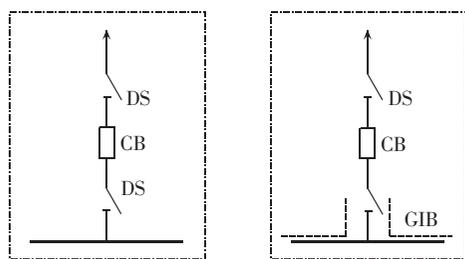
$$R_{\text{reliability}} = a_1 a_2 + a_1 (1 - a_2) b_2 + (1 - a_1) a_2 b_1 + (1 - a_1) (1 - a_2) (b_1 \wedge b_2) \quad (24)$$

得到系统可靠度之后, 进而可利用式 (16) — (21) 计算系统的故障次数、系统故障率和系统修复率等可靠性指标。

3.2 出线单元可靠性算例分析

以含气体绝缘母线 (GIB) 配电装置的 NGSS 优化设计的出线单元为例, 基于不确定随机系统进行可靠性分析。图 5 为传统出线单元和含 GIB 配电装置的出线单元主接线图。其中含 GIB 配电装置的出线单元可以取消出线隔离开关 (DS)。出线单元的可靠性判据是保证单元内所有元件正常工作。

计算主接线各元件的故障率 λ 、修复率 μ 和可用率 A , 如表 3 所示。其中 GIB 是新型元件, 没有可靠性历史数据。考虑到 GIB 与 GIS 的区别只是在气体保护中减少了断路器和互感器, 因此可以认为



(a) 传统出线单元 (b) 含 GIB 配电装置的出线单元

图 5 传统出线单元与含 GIB 配电装置的出线单元

Fig.5 Traditional outgoing feeder and new outgoing feeder containing GIB distribution equipment

表 3 元件可靠性参数

Table 3 Reliability parameters of components

元件	λ/a^{-1}	μ/a^{-1}	A
母线 B	0.1	2 920	0.999965
断路器 CB	0.12	219	0.999452
断路器 CB (视作新型设备)	$\mathcal{L}(0.12, 0.12)$	$\mathcal{L}(219, 219)$	$E(A) = 0.999452$
隔离开关 DS	0.015	584	0.999974
GIB	$\mathcal{L}(0.02, 0.03)$	$\mathcal{L}(265, 2576)$	$E(A) = 0.999973$

GIB 的可靠性水平与 GIS 相当;另外也可以认为 GIB 主要是将母线和隔离开关置于气体保护中构成,因此其可靠性应与母线和所有隔离开关正常工作的单元可靠性相当。采用上述 2 种专家信息即可以基于不确定随机系统计算其可用率,同时分别取其可靠性较高者为乐观值、较低者为悲观值进行传统的可靠性分析。GIB 故障率 λ 的乐观值为 $0.02/a$, 悲观值为 $0.03/a$ (故障率越小,系统的可靠性指标越乐观);修复率 μ 的乐观值为 $2576/a$,悲观值为 $265/a$;可用率 A 的乐观值为 0.999992 ,悲观值为 0.999886 。

另外,为了验证本文所提方法结果的正确性以及合理性,将随机元素断路器 CB 视为故障率 λ 服从 $\mathcal{L}(0.12, 0.12)$ 、修复率 μ 服从 $\mathcal{L}(219, 219)$ 的不确定元素,采用本文所提方法进行传统出线单元可靠性计算,并与传统的可靠性分析进行对比验证,计算结果如下:传统可靠性计算方法下,传统出线单元的可用率 A_s 为 0.999365 ,含 GIB 配电装置的出线单元可用率 A_s 的乐观值为 0.999418 ,悲观值为 0.999313 ;基于不确定随机系统可靠性计算方法下(不确定测度 $\alpha_1=1$),传统出线单元可用率 A_s 的期望为 0.999365 ;含 GIB 配电装置的出线单元可用率 A_s 的期望为 0.999399 ,最大区间为 $[0.999313, 0.999418]$ 。

由上述分析可知:对于不含新型设备的传统出线单元,分别采用传统可靠性方法和本文所提方法进行可靠性计算,计算结果是一致的,因此本文所提方法的正确性得到验证;采用传统可靠性计算方法会因为关于 GIB 可靠性的专家先验信息不同,而

导致可用率的计算结果不具有 consistency。在本算例的极端情况下,采用乐观值计算得到含 GIB 配电装置的出线单元可靠率优于传统出线单元的可用率,但采用悲观值计算得到的结果则截然相反。而基于不确定随机系统可以合理处理专家先验信息,含 GIB 配电装置的出线单元可用率的最大区间的边界与传统方法计算所得可用率的乐观值和悲观值一样,本文所提方法的正确性得到验证;同时,所提方法的计算结果给出了合理的期望值,计算结果表明含 GIB 配电装置的出线单元的可用率的期望高于传统出线单元。

3.3 某实际电网 NGSS 可靠性算例分析

3.3.1 方案描述

以《国家电网公司 220 kV 变电站典型设计技术导则》^[15] 典型设计方案 220-A-1 的 220 kV 侧为例,220-A-1 典型方案 220 kV 侧以双母线接线为主,变压器容量为 $2 \times 120 \text{ MV} \cdot \text{A}$,双母线接线,出线 4 回,主接线形式如图 6 所示。研究以下两问题:NGSS 220 kV 侧主接线采用新型设备 DCB 替代传统断路器和出线侧隔离开关后,可靠性是否得以提高;NGSS 220 kV 侧主接线采用 DCB 后,在保证可靠性的前提下,能否由原来的双母线接线优化为单母线分段接线方式。

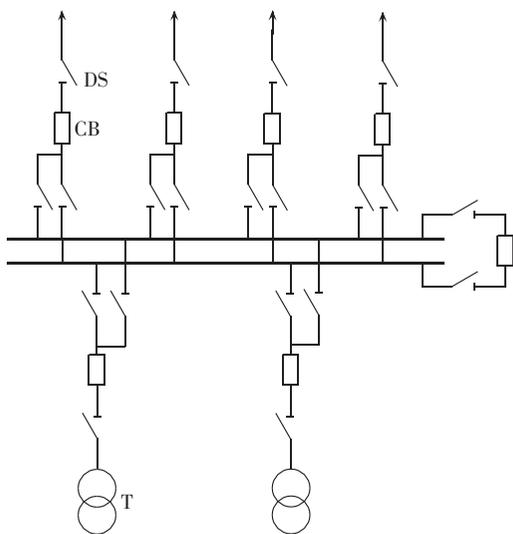


图 6 典型设计方案主接线形式

Fig.6 Main wiring form in typical design scheme

主接线优化后的接线形式如图 7 和图 8 所示。图 7 采用含 DCB 的双母线接线,取消了线路侧及变压器侧隔离开关,保留母线侧隔离开关;图 8 采用含 DCB 的单母线分段接线,取消了所有隔离开关配置。

计算主接线各元件可靠性数据:故障率 λ 、修复率 μ 、平均修复时间 MTTF 和可用率 A ,如表 4 所示。其中,变压器、母线、隔离开关及断路器参考设备运行的历史统计数据;虽然已有一些关于新型设备 DCB

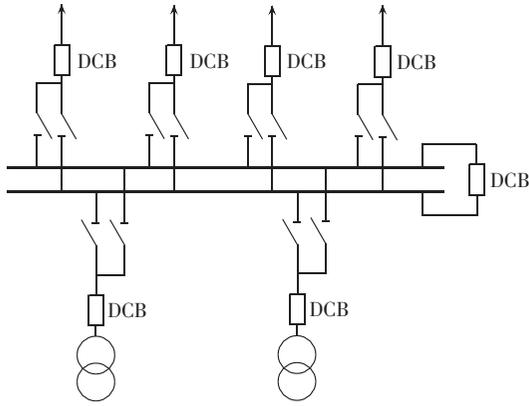


图 7 含 DCB 的双母线接线形式

Fig.7 Double-bus wiring form with DCB

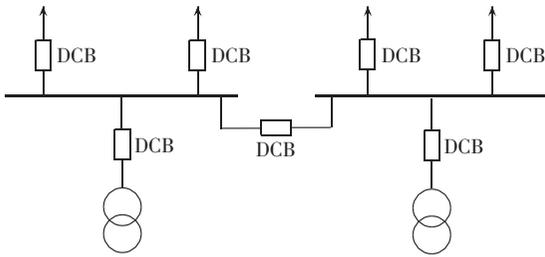


图 8 含 DCB 的单母线分段接线形式

Fig.8 Sectionalized single-bus wiring form with DCB

的研究,但由于缺乏实际运行经验,国内尚无 DCB 可

表 4 元件可靠性参数

Table 4 Reliability parameters of components

元件	λ/a^{-1}	MTTF/h	μ/a^{-1}	A
母线 B	0.1	3	2920	0.999965
断路器 CB	0.12	40	219	0.999452
隔离开关 DS	0.015	15	584	0.999974
变压器 T	0.03	90	97.3	0.999691
DCB	$\mathcal{L}(0.1, 0.15)$	—	$\mathcal{L}(201, 264)$	$E(A) = 0.999454$

靠性水平的历史统计数据。鉴于 DCB 的设备技术,可认为 DCB 的可靠性较高,接近于 GIS 的可靠性水平^[5],其维护周期与现有断路器相当^[16]。在统计数据缺乏的情况下,可根据上述专家信息将 DCB 看作主接线系统中的不确定元素,服从介于 GIS 设备和断路器可靠性指标之间的线性分布。

3.3.2 可靠性分析

对采用常规设备的双母线接线(传统双母线接线)及采用含 DCB 的双母线和单母线分段 3 种接线形式,均采用保证所有出线持续供电的可靠性判据,即保证任一出线至少有一个主变压器与之连通,以此进行可靠性计算,可靠性指标的计算结果见表 5(基于不确定随机系统可靠性计算结果中,一定不确定测度 α_1 下的电气主接线的可靠性指标由区间给出,部分指标则由不确定期望值给出),关键指标可用度的不确

表 5 可靠性计算结果

Table 5 Results of reliability calculation

接线形式	α_1	A_s	Q_s	f_s	λ_s	μ_s	MTTF _s /h
传统双母线接线	—	0.997709	0.002291	0.5391	0.5404	235.314	16211.2
	1.0	(0.998508, 0.999239)	(0.000761, 0.001492)	(0.3339, 0.6172)	(0.3342, 0.6181)	$E(\mu_s) = 434.591$	$E(MTTF_s) = 18421.6$
含 DCB 双母线接线	0.9	(0.998601, 0.999213)	(0.000787, 0.001399)	(0.3599, 0.5912)	(0.3602, 0.5920)	$E(\mu_s) = 434.591$	$E(MTTF_s) = 18421.6$
	0.8	(0.998687, 0.999121)	(0.000879, 0.001313)	(0.3887, 0.5623)	(0.3890, 0.5630)	$E(\mu_s) = 434.591$	$E(MTTF_s) = 18421.6$
	0.64	>0.998820	<0.001180	$E(f_s) = 0.4750$	$E(\lambda_s) = 0.4755$	$E(\mu_s) = 434.591$	$E(MTTF_s) = 18421.6$
	0.88	>0.998620	<0.001380	$E(f_s) = 0.4750$	$E(\lambda_s) = 0.4755$	$E(\mu_s) = 434.591$	$E(MTTF_s) = 18421.6$
	—	$E(A_s) = 0.998907$	$E(Q_s) = 0.001093$	$E(f_s) = 0.475009$	$E(\lambda_s) = 0.475529$	$E(\mu_s) = 434.591$	$E(MTTF_s) = 18421.6$
含 DCB 单母线分段接线	1.0	(0.998432, 0.999169)	(0.000831, 0.001568)	(0.4381, 0.6724)	(0.4385, 0.6735)	$E(\mu_s) = 477.449$	$E(MTTF_s) = 15757.7$
	0.9	(0.998531, 0.999143)	(0.000857, 0.001469)	(0.4596, 0.6509)	(0.4599, 0.6519)	$E(\mu_s) = 477.449$	$E(MTTF_s) = 15757.7$
	0.8	(0.998617, 0.999057)	(0.000943, 0.001383)	(0.4834, 0.6270)	(0.4839, 0.6279)	$E(\mu_s) = 477.449$	$E(MTTF_s) = 15757.7$
	0.44	$E(A_s) = 0.998837$	$E(Q_s) = 0.001163$	<0.5389	<0.5395	$E(\mu_s) = 477.449$	$E(MTTF_s) = 15757.7$
	0.55	>0.998820	<0.001180	$E(f_s) = 0.5553$	$E(\lambda_s) = 0.5559$	$E(\mu_s) = 477.449$	$E(MTTF_s) = 15757.7$
	0.8	>0.998620	<0.001380	$E(f_s) = 0.5553$	$E(\lambda_s) = 0.5559$	$E(\mu_s) = 477.449$	$E(MTTF_s) = 15757.7$
—	$E(A_s) = 0.998837$	$E(Q_s) = 0.001163$	$E(f_s) = 0.555273$	$E(\lambda_s) = 0.5559$	$E(\mu_s) = 477.449$	$E(MTTF_s) = 15757.7$	

定分布如图 9 所示。

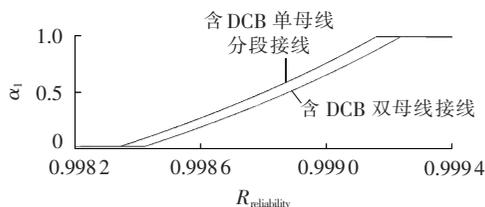


图 9 可靠度不确定分布曲线

Fig.9 Uncertainty distribution curve of reliability

将含 DCB 双母线接线和含 DCB 单母线分段接线可靠率的分布区间和不确定期望与传统双母线接线的可靠率作对比,结果如图 10 所示;将含 DCB 双母线接线、含 DCB 单母线分段接线及传统双母线接线的故障率和修复率进行对比,结果如图 11 所示。

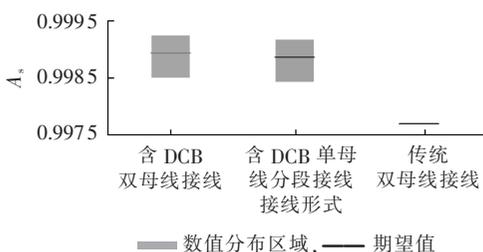


图 10 3 种接线方式的可用率对比

Fig.10 Comparison of availability among three wiring forms

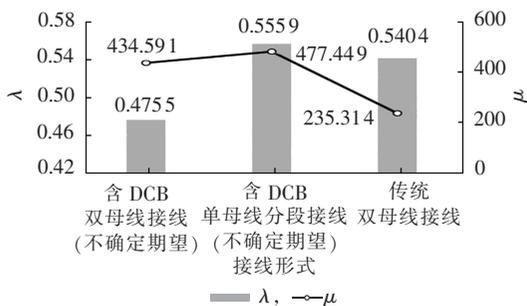


图 11 故障率与修复率对比

Fig.11 Comparison of failure rate and repair rate

由图 9 可知,含 DCB 的双母线接线的可靠度落于区间(0.998 508,0.999 239),而含 DCB 的单母线分段接线的可靠度落于区间(0.998 432,0.999 169);由图 10 可知,含 DCB 的双母线接线和含 DCB 的单母线分段接线的可用率期望值在整个分布区间都高于典型接线的可用率(0.997 709),故含 DCB 的双母线接线和含 DCB 的单母线分段接线的可靠度高于传统接线的可靠度,因此采用 DCB 可显著提高系统的可靠性。

由表 5 和图 11 可知,含 DCB 双母线接线的故障次数、故障率采用不确定期望的形式表示,与典型接线的故障次数、故障率相比,含 DCB 双母线接线的故障次数、故障率下降了接近 14%;修复率和 MTTF

则分别提高了 45% 和 16%,供电可靠性得以显著提高;采用含 DCB 的单母线分段接线的故障次数、故障率和平均无故障工作时间期望与传统双母线接线相比相差不到 3%,修复率提高近 1 倍。

特别地,由表 5 可知,当不确定测度 α_1 为 0.44 时,含 DCB 单母线分段接线的所有可靠性指标优于传统双母线接线,故可认为采用含 DCB 的单母线分段接线形式可基本满足变电站 220kV 侧可靠性,因而可考虑采用含 DCB 的单母线分段的接线形式来简化 NGSS 主接线设计,以达到减少设备数目和占地面积的经济性目的。

4 结论

由于 NGSS 一次新型设备可靠性统计数据缺乏,其可靠性指标具有一定的不确定性,这使得 NGSS 主接线可靠性分析难以进行。本文提出在 NGSS 主接线可靠性分析中,可采用不确定测度表征新型设备的可靠性,将 NGSS 主接线视作不确定随机系统,并对其进行可靠性分析,从而解决了新型设备可靠性指标统计缺乏时 NGSS 主接线可靠性分析的难题。

本文所提方法具有以下特点:

- 在新型设备可靠性统计数据缺乏时,仍能合理分析 NGSS 主接线的可靠性;
- 能合理处理设备已有的先验可靠性信息,给出贴近实际的不确定分布描述;
- NGSS 可靠性分析结果可以用不确定期望和一定置信度下的区间分布表示,更适用于 NGSS 的综合技术经济分析。

同时,为了体现 NGSS 顶层设计对设备制造技术的需求,在设备制造并未成型时,以不确定元素来描述顶层设计对设备的期望,应用本文提出的方法亦可进行可靠性预评估。

参考文献:

- 王益民. 坚强智能电网技术标准体系研究框架[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):1-6.
WANG Yimin. Research framework of technical standard system of strong & smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(22):1-6.
- 宋璇坤,刘开俊,沈江. 新一代智能变电站设计与研究[M]. 北京:中国电力出版社,2014:12.
- 易永辉,王坤,王震学,等. 基于全寿命周期管理的智能变电站应用方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(13):99-103.
YI Yonghui,WANG Kun,WANG Zhenxue,et al. Research of application schemes of smart substation based on whole-life cycle management [J]. Power System Protection and Control,2010,38(13):99-103.
- 倪益民,杨宇,樊陈,等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化,2014,38(3):194-199.
NI Yimin,YANG Yu,FAN Chen,et al. Discussion on integration

- of secondary devices in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(3):194-199.
- [5] 李宝伟,倪传坤,李宝潭,等. 新一代智能变电站继电保护故障可视化分析方案[J]. 电力系统自动化,2014,38(5):73-77.
LI Baowei,NI Chuankun,LI Baotan,et al. Analysis scheme for relay protection fault visualization in new generation smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(5):73-77.
- [6] 黄扬琪,路欣怡,刘念,等. 含隔离式断路器的新一代智能变电站主接线可靠性评估及灵敏度分析[J]. 电气技术,2014(6):10-14,79.
HUANG Yangqi,LU Xinyi,LIU Nian,et al. Analysis on reliability and sensitivity of main electrical connection for new generation smart substation with disconnecting circuit breaker [J]. Electrical Engineering,2014(6):10-14,79.
- [7] LIU B. Uncertainty theory[M]. Berlin,Germany:Springer,2007:1-2.
- [8] LAHA R,ROHATGI V. Probability theory[M]. New York,USA:Wiley,1979:446-451.
- [9] LIU B. Some research problems in uncertainty theory[J]. Journal of Uncertain Systems,2009,3(1):3-10.
- [10] LIU B. Uncertainty theory[EB/OL]. [2017-01-21]. <http://orsc.edu.cn/liu/ut.pdf>.
- [11] CHEN X,DAI W. Maximum entropy principle for uncertain variables[J]. International Journal of Fuzzy Systems,2011,13(3):232-236.
- [12] CHEN X,KAR S,RALESCU D A. Cross-entropy measure of uncertain variables[J]. Information Sciences,2012,201:53-60.
- [13] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003:3-4.
- [14] LIU B. Uncertain risk analysis and uncertain reliability analysis[J]. Journal of Uncertain Systems,2010,4(3):163-170.
- [15] WEN M L,KANG R. Reliability analysis in uncertain random system[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making,2016,15:1-16.
- [16] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程典型设计:220 kV 变电站分册(2005年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2007:21.

作者简介:



张籍

张籍(1985—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要从事电网规划分析工作;

杜治(1970—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要从事电网规划分析工作;

谢瀚阳(1992—),男,广东肇庆人,硕士,主要研究方向为电力系统状态估计、电力系统稳定与控制;

蔡勇(1984—),男,湖北仙桃人,高级工程师,硕士,主要从事电网规划分析工作;

陈艳波(1982—),男,河南西峡人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统优化与分析(**E-mail**:yanbochen2008@sina.com);

颜炯(1971—),男,湖南衡阳人,高级工程师,博士,主要从事电网通信及智能化规划研究工作;

谢东(1979—),男,湖北孝感人,高级工程师,博士,主要从事电网通信及智能化规划研究工作。

NGSS reliability analysis based on uncertain stochastic system

ZHANG Ji¹,DU Zhi¹,XIE Hanyang²,CAI Yong³,CHEN Yanbo²,YAN Jiong¹,XIE Dong¹

(1. Economic and Technology Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company,Wuhan 430077,China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;3. State Grid Hubei Electric Power Company,Wuhan 430077,China)

Abstract: Construction of NGSS(New Generation Smart Substation) is an active demand to break the bottleneck of propelling the smart substation technology and to realize the development of future smart grid,while NGSS reliability analysis is an important part. A method of NGSS reliability analysis based on the uncertain stochastic system is proposed to represent the reliability indices of new NGSS equipments,which can still perform the reliability analysis when the reliability index statistics of new equipment are lacking, and the results of reliability analysis are given as the uncertain expectations and confidence level intervals. Simulation examples verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: new generation smart substation; reliability analysis; uncertainty measures; uncertain stochastic system; uncertain expectation; confidence level