

# 考虑时变因素的配电系统可靠性分析

董雷, 李佳

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 在传统配电系统可靠性分析的基础上, 考虑了实际运行过程中气候条件、元件老化这两类不确定因素, 使元件故障率成为时间的函数, 并将其与时变负荷模型和停电损失费用模型相结合, 基于 Monte-Carlo 法编制了可靠性评估算法, 以计算负荷点及整个系统的可靠性与经济性指标, 并通过算例分析说明了考虑不确定时变因素后对可靠性指标的影响程度, 以此说明本算法的有效性。

**关键词:** 配电系统; 可靠性; 不确定时变因素; Monte-Carlo 法

## Reliability analysis of distribution system considering time-varying factors

DONG Lei, LI Jia

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Uncertainty factors about weather condition and aging of components are considered in the paper under conventional reliability analysis of distribution system, which make failure rate of components be function of time. Combined time-varying load model with interruption cost model, program of reliability evaluation is practiced in the paper using Monte-Carlo method, which can calculate reliability and economic indices of load points and system. Example of distribution system is used to illustrate effects on reliability indices considering uncertainty time-varying factors, which can explain effectiveness of the program.

**Key words:** distribution system; reliability; uncertainty time-varying factors; Monte-Carlo method

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)12-0006-05

## 0 引言

自上世纪 90 年代以来, 我国的配电系统可靠性研究开始受到了极大的关注, 从研究方法来说大体分为解析法和模拟法, 虽然方法种类很多且对其进行改进方面的研究也有了很大的进展, 但其模型大多数仍是采用故障率、故障修复时间为平均值来进行可靠性分析。而在实际运行过程中, 元件的参数受到各种因素的影响, 如元件的老化过程, 气候变化的影响, 人为因素的干扰; 负荷和单位停电损失也均具有时变性和不确定性。由于没有考虑这些因素对可靠性评估过程的影响, 故传统的分析结果与实际情况的误差很大, 不能真实反映实际运行过程中的可靠性水平。

在解析法的可靠性研究中, 认为研究对象一般是服从指数分布的随机过程, 其不易解决非指数分布的情况。而 Monte-Carlo 法的优势就在于, 可以使研究对象服从任何类型的分布, 来对其进行模拟分析。

文献[1,2]利用 Monte-Carlo 法, 使用元件平均故障率和故障修复时间, 负荷和单位停电损失费用

均采用平均模型来进行可靠性分析; 文献[3]在文献[1]的基础上, 建立了时变负荷模型, 时变 SCDF 模型, 进行了更符合实际运行的可靠性成本/效益分析; 文献[4]在配电系统可靠性分析中, 采用元件时变故障率模型, 但只考虑了元件寿命的老化过程; 文献[5]考虑了气候和可修复资源的影响, 使其元件故障率和故障修复时间均成为时变函数, 使得可靠性分析更切合实际, 但却未考虑元件老化这一因素的影响。

本文在传统配电系统可靠性分析的基础上, 综合考虑了实际运行过程中气候条件、元件老化过程这两类不确定因素, 采用时变故障率模型、时变负荷模型和停电损失费用模型, 基于 Monte-Carlo 法编制了可靠性评估算法, 以计算负荷点及整个系统的可靠性与经济性指标, 得到的可靠性指标分别为负荷点指标: 故障率、停电持续时间、年停运时间; 系统指标: 系统平均停电频率指标 SAIFI、系统平均停电持续时间指标 SAIDI、用户平均停电持续时间指标 CAIDI、平均供电可用率指标 ASAI (%)、系统期望故障受阻电能 EENS、系统期望停电损失费用 ECOST、系统停运电量评估率 IEAR。

## 1 传统 Monte-Carlo 法可靠性分析

配电系统由变压器、输电线路、熔断器、隔离开关、断路器等设备组成。在传统 Monte-Carlo 法的配电系统可靠性评估中,元件通常使用两状态模型表示,即正常工作状态和故障停运状态。在整个 Monte-Carlo 模拟过程中,每个元件均随机地重复着运行—故障—运行的工作过程。元件的无故障工作时间 TTF 和故障修复时间 TTR 均是随机变量,因而有着各自的概率分布,在传统可靠性分析中,一般均假定元件 TTF 和 TTR 均服从指数分布,即元件故障率、故障修复时间均为常数。

传统可靠性分析中,负荷模型采用平均负荷或持续负荷时间曲线;停电损失费用模型也采用平均模型,即分类停电损失费用函数(SCDF),来进行可靠性效益分析。平均停电损失费用 SCDF<sup>[6]</sup>见表 1 所示。

表 1 用户停电损失费用  
Tab.1 Sector interruption cost

用户	停电时间&停电损失费用 C (\$/kW)				
	1 min	20 min	60 min	240 min	480 min
大用户	1.005	1.508	2.225	3.968	8.24
工业用户	1.625	3.868	9.085	25.16	55.81
商业用户	0.381	2.969	8.552	31.32	83.01
农业用户	0.060	0.343	0.649	2.064	4.12
居民用户	0.001	0.093	0.482	4.914	15.69
政府&机关	0.044	0.369	1.492	6.558	26.04
办公写字楼	4.778	9.878	21.06	68.83	119.20

## 2 考虑不确定性因素的可靠性模型

### 2.1 时变故障率模型

在考虑气候变化、元件老化因素后,时变故障率  $\lambda(t)$  可以表示为:

$$\lambda(t) = \theta_w(t) \times \lambda_a(t) \quad (1)$$

式中:  $\theta_w(t)$  为时变气候权重系数,表示气候因素对元件故障率的影响程度,  $\lambda_a(t)$  为正常气候条件下考虑元件老化的故障率。

#### 2.1.1 元件老化的影响

元件的老化过程受元件类型、地理位置、运行环境、运行时间、制造水平等条件的影响<sup>[4]</sup>,元件老化对元件故障率有较大影响。电力系统元件寿命过程共分为三个阶段,分别为磨合期、有用寿命期和耗尽期,其元件寿命周期的故障率曲线为浴盆曲

线,如图 1 所示。

在传统可靠性分析中,认为 TTF 和 TTR 均服从指数分布,故元件的故障率均是常数,即只考虑有用寿命期间发生故障的情况,而在本文中采用元件寿命的浴盆曲线,即加入了磨合期和耗尽期,在这两个时期中引入时变权重系数的概念,使时变权重系数与时间的函数关系按指数形式发展;而在有用寿命期时故障率仍为常数,这样通过时变权重系数与平均故障率的乘积即可使故障率随时间按浴盆曲线的形状而发生变化。

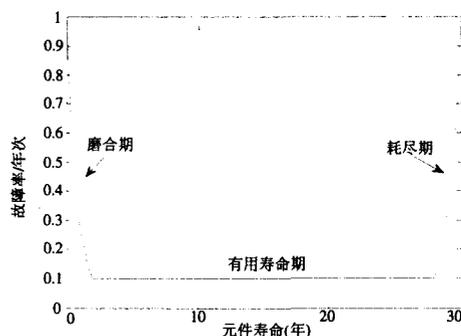


图 1 元件寿命的浴盆曲线

Fig.1 Bath tub curve of component life

考虑老化过程的元件时变故障率表达如下式:

$$\lambda_a(t) = \theta_a(t) \times \lambda_c \quad (2)$$

式中:  $\theta_a(t)$  为时变老化权重系数,  $\lambda_c$  为元件正常运行时平均故障率。时变老化权重系数取决于元件的寿命,并遵循与浴盆曲线近似相同的形状。

以下分别从不同时期来分析时变老化权重系数的取值:

#### (1) 磨合期

$$\theta_a(t) = K_0 e^{-\beta t} \quad (3)$$

$$\beta = \ln K_0 / t_{BI} \quad (4)$$

式中:  $K_0$  为权重系数的最大值,  $t_{BI}$  为元件的磨合期年限。

#### (2) 有用寿命期

$$\theta_a(t) = 1 \quad (5)$$

#### (3) 耗尽期

$$\theta_a(t) = K e^{\gamma t} \quad (6)$$

$$K = e^{-\gamma(t_L - t_{wo})} \quad (7)$$

$$\gamma = \ln \theta_{a_{max}} / t_{wo} \quad (8)$$

式中:  $t_L$  为元件的使用寿命年限,  $\theta_{a_{max}}$  为权重系数最大值即  $K_0$ ,  $t_{wo}$  为元件的耗尽期年限。

#### 2.1.2 气候因素的影响

电力系统运行的气候条件按其对环境的影响程

度分为正常气候 (normal weather)、恶劣气候 (adverse weather) 和灾害气候 (major storm disaster) 三类<sup>[7]</sup>。本文在三种气候状态条件下, 采用时变气候权重系数  $\theta_w(t)$  的概念, 对其使用如图 2 所示的阶梯曲线模型<sup>[5]</sup>。

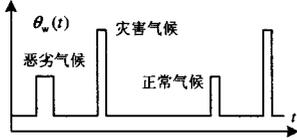


图 2 时变气候权重系数的模拟曲线

Fig.2 Simulation curve of time-varying weather factor

在电力系统中, 电气元件  $n$  在气候状态  $i$  下发生故障的比率  $F_i^n$  可以表示如下<sup>[8]</sup>:

$$F_i^n = \frac{T_i \lambda_i^n}{T \lambda_c^n} \quad (9)$$

其中:  $\lambda_i^n$  为元件  $n$  在气候状态  $i$  下的故障率;  $\lambda_c^n$  为元件  $n$  的平均故障率;  $T_i$  为气候状态  $i$  的持续时间;  $T$  为所有气候状态持续时间的总和。

通常  $F_i^n$  是无法获得的, 而其一类元件在气候状态  $i$  下发生故障比率的平均值  $F_i$  可通过数据收集来获得。因此,  $\lambda_i^n$  可表示如下:

$$\lambda_i^n = F_i \frac{T}{T_i} \lambda_c^n = \theta_w \lambda_c^n \quad (10)$$

这里的  $\theta_w$  即为上面所述的时变气候权重系数。从而可以调整不同气候状态下的元件故障率。

### 2.2 时变负荷模型

IEEE-RTS 系统<sup>[9]</sup>的负荷模型已经被广泛用于综合发输电系统的可靠性评估中, 它是以日、周、季节的形式来按时序计算整个系统一年的小时负荷。本文基于文献<sup>[9]</sup>的时序负荷曲线, 针对配电系统母线上所带的用户类型不同而使用不同的时序负荷曲线, 其方法及原理同文献<sup>[9]</sup>一样, 即使用各类用户的周负荷百分比系数、日负荷百分比系数、小时负荷百分比系数以及其年峰值负荷来得到一年 8760 小时的各个负荷值, 以产生年负荷模型。

### 2.3 时变停电损失费用模型

在配电系统实际运行过程中, 即使是同一类型的负荷, 如果停电时刻不同, 单位停电损失费用也往往是不同的, 因此单位停电损失费用是随时间变化的函数<sup>[3]</sup>。这里定义时变停电费用权重系数

$\theta_{\text{cost}}(t)$  为:

$$\theta_{\text{cost},k}(t) = C_{\text{cost},k}(t) / C_{\text{a cost},k} \quad (9)$$

式中:  $C_{\text{cost},k}(t)$  为  $t$  时刻的负荷类型  $k$  的单位停电损失费用,  $C_{\text{a cost},k}$  为负荷类型  $k$  的平均单位停电损失费用。由于统计资料不足, 一般很难获取时变停电损失费用权重系数, 这里使用文献<sup>[5]</sup>的调查信息统计资料, 考虑了一日 24 小时的停电损失费用权重系数, 对应七类不同用户的权重系数取值如图 3 所示。

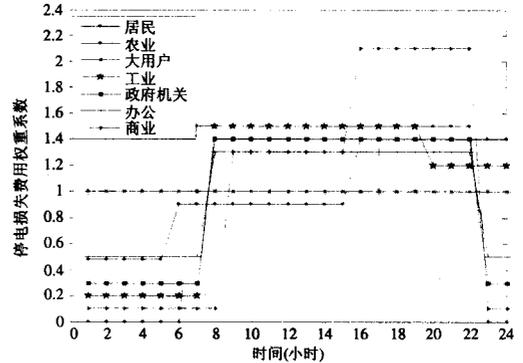


图 3 时变停电损失费用权重系数

Fig.3 Time-varying interruption cost factor

这样, 就可以通过  $\theta_{\text{cost}}(t)$  使单位停电损失费用针对不同的用户类型在不同的时间段, 其值发生变化。

### 3 基于 Monte-Carlo 法的可靠性评估算法

目前, Monte-Carlo 模拟法可分为两大类, 序贯仿真法和非序贯仿真法, 序贯仿真法是一种时序 Monte-Carlo 法, 又称为状态持续时间抽样法, 其特点是对元件发生故障的时间和元件故障后的修复时间进行抽样, 通过比较各元件故障时间和修复时间的早晚, 确定系统所处的状态, 整个过程中始终存在一个虚拟的时间轴, 按时间进度来推演。而非序贯仿真法又称为状态抽样法, 它不能考虑时序性, 是在元件各状态之间进行抽样模拟。

鉴于序贯仿真法对考虑时序性方面问题的解决较非序贯仿真法有着绝对的优势, 本文使用 Monte-Carlo 序贯仿真法, 利用 Matlab 语言编写程序以实现配电系统可靠性分析。流程框图见图 4 所示, 其主要思想是根据元件的随机两状态模型确定仿真年中元件的运行顺序, TTF 服从指数分布, TTR 服从对数正态分布, 开关切换操作时间 TTS 服从指数分布, 利用时变气候权重系数实现三种气候状态的模拟, 元件故障率随着运行年限逐渐经历磨合期、有用期及耗尽期, 然后根据某一时刻 TTF 最小的元

件故障为停电故障判据, 以此计算每次故障引起负荷停电的持续时间及向正常运行状态的转移频率, 根据停电持续时间所在时刻不同产生各负荷点不同的加权停电负荷值及加权停电损失费用值, 以  $TTF=TTF+MAX(TTS, TTR)$  作为新的仿真运行时间点, 即取 TTS、TTR 中较大者作为变仿真步长, 如此循环下去, 直到满足收敛条件为止, 通常由于 EENS 指标有着最低的收敛率<sup>[10]</sup>, 故选择 EENS 指标的协方差作为收敛标准, 以此保证满足多个可靠性指标的准确度, 从而计算出负荷及系统的可靠性与经济性指标。

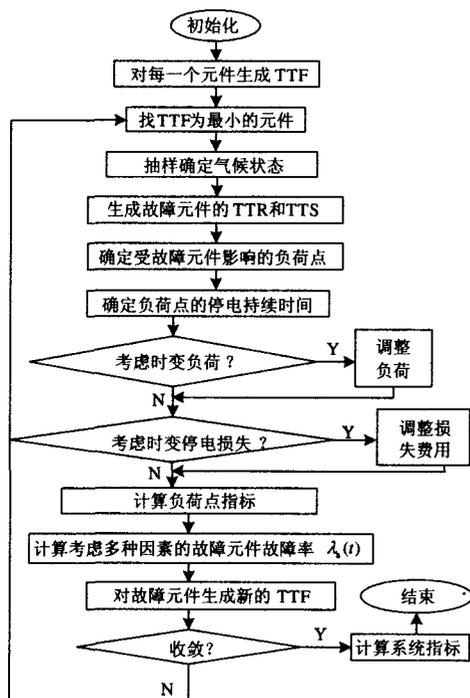


图 4 程序流程框图

Fig.4 Flow diagram of program

### 4 算例分析

本文以 IEEE-RBTS 测试系统的 BUS2 典型城市配电系统<sup>[11]</sup>为例, 如图 5 所示, 利用以上所编算法进行考虑不确定性因素的可靠性分析。

针对有隔离开关、熔断器、备用电源, 无备用配电变压器的网络配置模式, 可靠性原始数据见文献[11], 本文计算的传统可靠性评估结果与文献[11]的结果非常接近, 其各系统指标 SAIFI、SAIDI、CAIDI、EENS、ECOST 相差百分比分别为 4.64%、2.14%、-2.68%、2.58%、-1.88%, 故本文编制的可靠性算法是合理且有效的。

从以下五种情况来说明本文考虑多种不确定因

素后的可靠性影响程度, 分别为 CASE1: 平均故障率, 平均修复时间, 平均负荷, 平均 SCDF; CASE2: 平均故障率, 平均修复时间, 时变负荷, 时变 SCDF; CASE3: 考虑元件老化的时变故障率, 平均修复时间, 时变负荷, 时变 SCDF; CASE4: 考虑气候因素的时变故障率, 平均修复时间, 时变负荷, 时变 SCDF; CASE5: 考虑元件老化和气候因素的时变故障率, 平均修复时间, 时变负荷, 时变 SCDF。

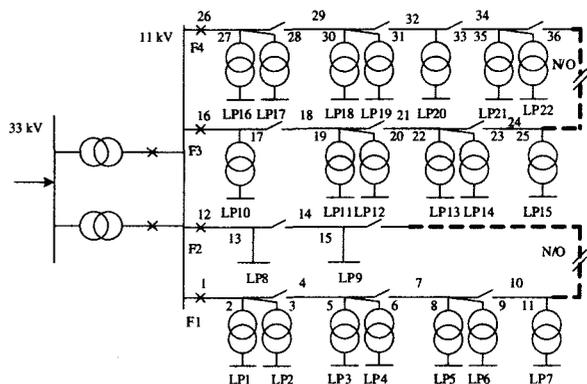


图 5 IEEE-RBTS-BUS2 测试系统

Fig.5 IEEE-RBTS-BUS2 test system

图 6 示出了考虑时变负荷和时变停电损失费用模型后 ECOST 的比较结果, 由于未涉及到元件本身的运行状况及网络拓扑的改变, 所以只是 EENS、ECOST 这两个经济性指标发生变化, 而其他可靠性指标保持不变, 由于篇幅有限, 只列出了 ECOST 的曲线分析图。

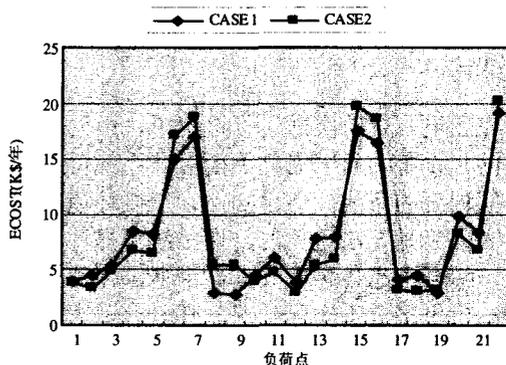


图 6 负荷点 ECOST 指标变化趋势图

Fig.6 Tendency diagram of ECOST of load points

从图中可看到, 居民用户负荷点 1-3、10-12、17-19, 在 CASE1 和 CASE2 下的变化差异很小, 即停电损失费用与时间变化的密切程度不大; 而负荷点 8、9 这类工业用户的停电损失费用受停电时刻不同的影响变化较大; 政府机构类负荷 4、5、13、14、20、21 的 ECOST 在 CASE2 的值较小, 这是由于周

末时停电损失费用较小；商业用户类型 6、7、15、16、22 则要大很多，这与其停电时刻在高峰还是低谷时期有着密切的关系。可见，停电损失费用 ECOST 的变化在很大程度上取决于用户类型，即各类用户费用模型曲线的形状。

图 7 示出了 CASE2-CASE5 的故障率指标变化情况，从图中可以明显看到，考虑老化因素对故障率指标的影响程度相对考虑气候因素而言要大很多。

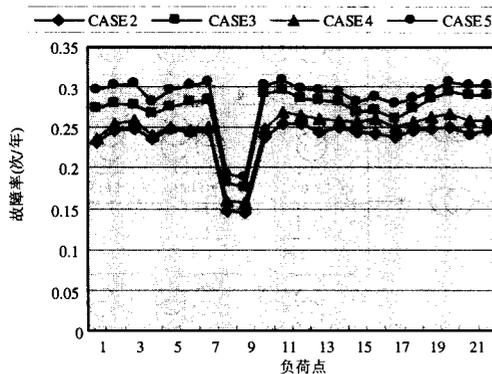


图 7 负荷点故障率变化趋势图

Fig.7 Tendency diagram of failure rate of load points

CASE5 是综合考虑元件老化和气候因素的影响，其负荷点及系统的可靠性指标较 CASE2 而言，故障率、平均停电持续时间、年停电时间、SAIFI、SAIDI、EENS、ECOST 值均有所增加，年可用率 ASAI 下降，使得负荷点及系统的可靠性水平较传统时降低，但它能真实客观地反映实际运行过程中配电系统的可靠性水平。

### 5 结论

在配电系统的实际运行过程中，所处的气候环境不同、设备的新旧老化不同对其系统可靠性就会有不同程度的影响。但事实上，气候环境、元件老化这类因素是无法避免的，在传统可靠性模型的基础上，综合考虑各种不确定性因素，使得可靠性评估的结果更接近于实际状况，其具有重大的现实意义，因此在进行配电系统可靠性评估时，要考虑实际运行过程中的各种不确定因素，并针对不同地区不同系统采用符合各自实际情况的时变可靠性模型参数，以此为前提，从改善网络结构、提高自动化程度的角度来开展电网规划与运行工作，以切实有效地提高系统可靠性与经济性。

### 参考文献

- [1] Billinton R, Wang P. Distribution System Reliability Cost/Worth Analysis Using Analytical and Sequential Simulation Techniques[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1245-1250.
- [2] Ou Y, Goel L. Using Monte Carlo Simulation for overall Distribution System Reliability Worth Assessment[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 1999, 146(5): 535-540.
- [3] WANG Peng, Billinton Roy. Time Sequential Distribution System Reliability Worth Analysis Considering Time Varying Load and Cost Models[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1046-1051.
- [4] Retterath B, Venkata S S, Chowdhury A A. Impact of Time-Varying Failure Rates on Distribution Reliability[A]. In: Proc of the 8th International Conference on PMAPS[C]. 2004. 953-958.
- [5] Wang Peng, Billinton R. Reliability Cost/Worth Assessment of Distribution Systems Incorporating Time-varying Weather Conditions and Restoration Resources[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1): 260-265.
- [6] Billinton R, Kumar S, Chowdhury N, et al. A Reliability Test System for Educational Purpose-Basic Data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.
- [7] Billinton R, WU Chen-jian. Predictive Reliability Assessment of Distribution Systems Including Extreme Adverse Weather[A]. In: Proc of CCECE[C]. 2001. 719-724.
- [8] Rios M A, Kirschen D S, Janyaweera D, et al. Value of Security: Modeling Time-Dependent Phenomena and Weather Conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 543-548.
- [9] IEEE Reliability Test System[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [10] Billinton R, LI Wen-yuan. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods[J]. New York: Plenum Press, 1994.
- [11] Allan R N, Billinton R, Sjarief I. A Reliability Test System for Educational Purpose-basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-830.

收稿日期：2008-07-25； 修回日期：2008-09-17

作者简介：

董雷 (1967-), 女, 副教授, 从事电力系统分析、运行与控制的教学与研究工作;

李佳 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制。E-mail:lijia810828@163.com