

一种基于半马尔柯夫过程的配电系统可靠性经济评估方法

熊俊, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对配电系统故障时间分布不确定的特点, 提出了基于半马尔柯夫过程的可靠性经济评估通用方法。建立元件寿命、预防维修时间和修理时间服从任意分布的可靠性评估模型, 引入用户停电损失函数研究系统在不完善预防维修情况下的停电损失; 通过实例证明了该方法的正确性, 显示出该方法对 Homogenous Markov 和 Weibull Markov 算法的兼容性、有效性, 同时更清晰地反映了元件故障持续时间分布对系统可靠性经济指标的影响。

关键词: 配电系统; 可靠性; 停电; SemiMarkov; 经济评估

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)12-0057-06

0 引言

在电力市场环境, 供电可靠性与经济性紧密联系起来构成市场交易的一个重要方面, 配电网可靠性经济评估已成为配电系统规划、管理中的一项常规性工作, 其基础是用户停电损失估计^[1]。停电损失是指电力用户因电力供应中断或不足而蒙受的经济损失, 普遍的评估方法是可靠性评估模型与停电成本模型综合起来考虑, 采用解析法或蒙特卡罗模拟法对系统进行可靠性评估^[2], 并在此基础上应用停电损失函数 CDF/SCDF (Customer Damage Function/Sector Customer Damage Function) 以及能量供应不足成本模型来计算可靠性经济指标^[3-5]。在这些方法中, 为简化计算一般将元件可靠性参数的分布均看成指数分布, 应用可靠性指标的平均值来进行经济评估, 但对实际来说, 连续停运时间 (即修复时间) 往往不服从指数分布, 它的概率密度函数形状很接近于铃形曲线^[6], 因此计算结果存在偏大的可能^[7], 同时平均值法使得可靠性经济指标与故障修复时间的分布无关^[8], 没有反映出故障持续时间分布对可靠性经济评估的影响。文献 [9] 对可靠性指标的分布进行了讨论, 认为各可靠性指标的概率分布可能符合 WEIBULL 分布, 因此描述系统的随机过程就成了非马尔柯夫过程。一般的做法是通过追加变量法和分级法可将其转换为马尔柯夫过程来求解^[6, 8, 10], 但修复时间分布的影响与构造的状态图结构密切相关, 并不能深刻反映修复时间分布对可靠性分析的影响。文献 [7, 11] 提出了一种 WEIBULL MARKOV 的方法, 使用含形状系数和比例因数的 WEIBULL 分布来代替常用的指数分布, 选择不同的形状系数可得到与实际相符合的成本

指标, 显示出对指数分布的良好兼容性。但该算法在推导状态转移概率过程中并没有完全考虑两状态的特殊性, 同时未考虑不完善预防维修的情况, 不具有普遍性。

本文针对配电系统故障时间分布不确定的特点, 提出了一种基于半马尔柯夫过程 (SemiMarkov) 的可靠性经济评估通用方法, 假设系统寿命、预防维修时间和修复时间均服从任意分布, 研究系统在不完善预防维修情况下的成本计算方法; 当修复时间分别服从指数和 WEIBULL 分布时, 对测试系统 (IEEE RBTS Bus 2) 进行停电损失计算, 并与 Homogenous Markov (HM) 和 Weibull Markov (WM) 算法进行了比较。

1 半马尔柯夫过程原理^[12]

设随机变量 X_n 取值在 $E = \{0, 1, \dots, K\}$ 中, 而随机变量 T_n 取值在 $[0, \infty)$ 中, $n = 0, 1, \dots$, 其中 $0 = T_0, T_1, T_2, \dots$ 。如果对所有 $n = 0, 1, \dots, j \in E, t > 0$ 都有:

$$P\{X_{n+1} = j, T_{n+1} - T_n \leq t \mid X_0, X_1, \dots, X_n; T_0, T_1, \dots, T_n\} = P\{X_{n+1} = j, T_{n+1} - T_n \leq t \mid X_n\} \quad (1)$$

则称随机过程 $(X, T) = \{X_n, T_n, n = 0, 1, \dots\}$ 为状态空间 E 上的马尔柯夫更新过程, 如果对所有 $i, j \in E, t > 0$,

$$P\{X_{n+1} = j, T_{n+1} - T_n \leq t \mid X_n = i\} = Q_{ij}(t) \quad (2)$$

不依赖于 n , 则称 (X, T) 是齐次的, 称 $\{Q_{ij}(t), i, j \in E\}$ 为半马尔柯夫核, 其意义为: $Q_{ij}(t) = p$ (下一步转到 j 在 i 的停留时间 $\leq t$ 时进入状态 j)

(3)

则有以下表达式成立：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t) = p \{ Z_{n+1} = j \mid Z_n = i \} = p_{ij} \quad (4)$$

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} G_{ij}(t) \quad (5)$$

$$G_{ij} = p \{ T_{n+1} - T_n \mid X_n = i, X_{n+1} = j \} \quad (6)$$

其中： p_{ij} 为马尔柯夫链的状态转移概率。

令 $Y(t) = X_n$, 当 $T_n < t < T_{n+1}$ 时, 称 $\{Y(t), t \geq 0\}$ 是由马尔柯夫更新过程 (X, T) 产生的半马尔柯夫过程。半马尔柯夫过程的状态停留时间为 $[T_n, T_{n+1})$, 其长度 $T_{n+1} - T_n$ 的分布只依赖于目前所处的状态 X_n 以及下一步要进入的状态 X_{n+1} , 而相继访问的状态组成一个 MARKOV 链。

2 可靠性评估的半马尔柯夫模型

目前, 配电系统可靠性评估大多是在指数分布情况下得到的, 当元件寿命、预防维修时间和故障修理时间为一般分布时, 对于任意时刻 t , 元件状态不再具备马尔柯夫特性, 所以只能借助半马尔柯夫过程来建模^[12~14]。

2.1 不完善预防维修情况

预防维修的目的在于提高系统的可用性, 一般考虑预防维修时都是针对完善预防维修的。系统如果在无故障工作期间进行了大量的预防维修, 必定会降低系统的可用性; 通过预防维修, 有可能不仅不能使系统修复, 反而使系统产生故障^[13], 此时系统以概率 p 的可能性发生故障, 仅以 $1 - p$ 的概率投入工作。不完善预防维修情况是对数学模型的进一步考虑, 更好地模拟了实际工作情况。

2.2 元件状态评估

假设系统中元件的工作寿命服从任意分布 $F(t)$, 其均值为 $\int_0^{\infty} t dF(t)$ 。预防维修周期为 T , 故障状态的时间分布设为 $G(t)$ 。如果系统在 T 之前发生故障, 立即进行维修, 修理时间 Y_f 服从任意分布 $G_f(t)$, 其均值为 $\int_0^{\infty} t dG_f(t)$, 修复后元件如新的一样并立即转为工作状态。如果元件工作到指定的时间 T 仍然没有发生故障, 则对其进行预防性维修, 预防维修时间 Y_p 服从任意分布 $G_p(t)$, 其均值为 $\int_0^{\infty} t dG_p(t)$, 在预防维修结束后, 以概率 p 的可能性发生故障, 仅以 $1 - p$ 的概率投入工作, 这时就要对系统进行修理。假设修理时间、预防维修时间和元件寿命是相互独立的, 则系统元件状态转移如图 1 所示。

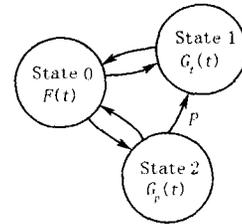


图 1 元件状态转移图

Fig 1 Component states model with transition

状态 0 表示工作状态; 状态 1 表示修理状态; 状态 2 表示预防维修状态。

若将指定的时间 T 看成定长随机变量 X_T , 则其分布为:

$$U(t) = p \{ X_T < t \} = \begin{cases} 0 & \text{当 } t < T \\ 1 & \text{当 } t \geq T \end{cases} \quad (7)$$

半马尔柯夫核为:

$$Q_{01}(t) = p \{ X < T, X < t \} = \int_0^t \bar{U}(t) dF(t) \quad (8)$$

$$Q_{02}(t) = p \{ X > T, T < t \} = \int_0^t \bar{F}(t) dU(t) \quad (9)$$

$$Q_{10}(t) = p \{ Y_f < t \} = G_f(t) \quad (10)$$

$$Q_{20}(t) = p \{ Y_p < t \} \cdot (1 - p) = G_p(t) \cdot (1 - p) \quad (11)$$

$$Q_{21}(t) = p \{ Y_p < t \} \cdot p = G_p(t) \cdot p \quad (12)$$

假设 $A_i(t) = p \{ \text{时刻 } t \text{ 系统处于工作状态} \}$ 时刻 0 系统进入状态 i ($i=0, 1, 2$), 则 $A_i(t)$ 满足马尔柯夫更新方程组:

$$A_0(t) = Q_{02}(t) \cdot A_1(t) + Q_{02}(t) \cdot A_2(t) + (1 - Q_{01}(t) - Q_{02}(t)) \quad (13)$$

$$A_1(t) = Q_{10}(t) \cdot A_0(t) \quad (14)$$

$$A_2(t) = Q_{20}(t) \cdot A_0(t) + Q_{21}(t) \cdot A_1(t) \quad (15)$$

$A_i(t)$ 表示瞬时可用度。

对更新方程组做 LAPLACE 变换, 解方程组得到各状态可用度的 L 变换。由 L 变换的托贝尔定理, 平均稳态可用度为:

$$\bar{A}_i = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \int_0^{\infty} A_i(u) du = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot A_i^*(s) = \frac{\int_0^T \bar{F}(t) dt}{\int_0^T F(t) dt + \bar{F}(T) \cdot p + P \cdot \bar{F}(T) \cdot f + F(T) \cdot f} \quad (16)$$

因极限值与状态无关, 由马尔柯夫更新过程的

极限定理,系统的稳态可用度为:

$$A = \frac{\int_0^T \bar{F}(t) dt}{\int_0^T F(t) dt + \bar{F}(T) \cdot p + P \cdot \bar{F}(T) \cdot f + F(T) \cdot f} \quad (17)$$

由于元件的预防维修可看成故障状态,因此可将元件三状态转换为两状态情况,元件稳态可用度等于元件无故障状态的概率 $p(0)$,即: $p(0) = A$,故障状态的概率为 $P = 1 - A$,频率为 $F = P/E(d)$,其中 $E(d)$ 表示故障状态的期望时间。

2.3 系统状态评估

2.3.1 系统状态的概率及频率

因元件采用任意分布,系统将不符合马尔柯夫特性。假设元件是随机独立的且系统符合 $N-1$ 规则,则某一元件故障对应一种系统故障状态,即当元件 i 故障停运时,系统就处于状态 i 其稳定概率指标为:

$$p(s_i) = p(x_{i,i}) \prod_{j=1}^N (1 - p(x_{j,i})) \quad (18)$$

$p(s_i)$ 为系统处于状态 i 的概率, $p(x_{i,i})$ 为元件 i 的故障概率, $p(x_{j,i})$ 为系统状态 i 时除元件 i 外,其余各元件发生故障的概率。

系统处于状态 i 的频率为:

$$F(s_i) = p(s_i) \cdot \sum_{c=1}^N \frac{F(x_{c,i})}{p(x_{c,i})} \quad (19)$$

其中: $F(s_i)$ 为系统状态频率, $F(x_{c,i})$ 为元件频率。

2.3.2 系统状态的持续时间分布

因为系统状态随元件状态的改变而改变,由 N 个元件组成的系统,在时刻 t 处于状态 S_s ,假设元件 c 是导致系统处于状态 S_s 的元件,则系统状态因元件在 T_s 改变状态而开始,系统状态的概率是:

$$P(S(T_s + D) = S_s | X_{c,s}, X_{c,s-1}) = [1 - G_{c,s}(D)] \prod_{k=1}^N \left(\frac{1}{M_{k,s}} \int_0^D [1 - F_{k,s}(t)] dt \right) \quad (20)$$

其中: D 为状态的持续时间, $M_{k,s}$ 是元件状态 $X_{k,s}$ 的平均持续时间, $G_{c,s}(D)$ 是元件故障状态的时间分布。由元件 c 导致系统状态 s 的概率为:

$$P(X_{c,s-1}, X_{c,s}) = \frac{F(x_{c,s}) \prod_{k=1}^N P(x_{k,s})}{\sum_{c=1}^N (F(x_{c,s}) \prod_{k=1}^N P(x_{k,s}))} =$$

$$\frac{(1/M_{c,s}) \cdot p(s_c)}{\sum_{k=1}^N (1/M_{k,s}) \cdot p(s_k)} \quad (21)$$

由此可得系统状态持续时间分布表达式:

$$P(T_{s+1} - T_s > D) = \sum_{c=1}^N p(X_{c,s-1}, X_{c,s}) \cdot \bar{G}_{c,s}(D) \prod_{k=1}^N \frac{1}{M_{k,s}} \int_0^D [1 - F_{k,s}(t)] dt \quad (22)$$

此时,若假设元件寿命时间为指数分布,而强迫故障修复时间、预防维修断电时间为符合不同形状参数的 WE BULL分布,则系统的故障状态持续时间分布为:

$$P(T_{s+1} - T_s > D) = \sum_{c=1}^N p(X_{c,s-1}, X_{c,s}) \cdot e^{-\left(\frac{D}{c}\right)^{c,s}} \cdot \prod_{k=1}^N \left(\frac{1}{M_{k,s}} \int_0^D e^{-k,s \cdot t} dt \right) \quad (23)$$

3 可靠性经济评估

可靠性经济评估通过估算系统不可靠时对用户造成的经济损失来研究电力系统可靠度效益问题^[3],其基础是用户停电损失计算,它通过构造用户停电损失函数并利用系统可靠性评估而得到。

3.1 用户停电损失函数(CDF/SCDF)

用户停电损失函数(CDF)一般通过用户调查,获取不同用户在不同停电持续时间下的经济损失,并按照不同用户的停电特性来建立;通过对用户进行分类建立用户部分停电损失函数(SCDF),表征各类用户停电损失与停电时间的关系,它与用户类别、停电时间、停电频率密切相关。

3.2 可靠性经济评估指标

常用的平均值经济指标为^[3-5]:缺供电量指标 ENS (MW h),停电损失($COST$)(\\$)。

$$ENS = \sum_{i=1}^n l_i \cdot r_i \quad (24)$$

$$COST = \sum_{i=1}^n l_i \cdot iSCDF(r_i) \quad (25)$$

其中: l_i 为负荷点平均年停运率, r_i 为负荷点平均停运持续时间。

本文以概率评估为基础,为反映故障持续时间分布对可靠性经济评估的影响,应用负荷点的经济期望值指标:电量不足期望值 $EENS$ (MW h),停电损失期望值 $ECOST$ (\$/kWh), $IEAR$ 停电损失评价率,为供电中断造成用户得不到单位电量引起的经济损失,是评价系统可靠度水平的指标。

$$EENS = \sum_{j=1}^{N_c} l_j f_j d_j = \sum_{j=1}^{N_c} l_j p_j \quad (26)$$

$$ECOST = \sum_{j=1}^{N_c} l_j f_j SCDE(d_j) \quad (27)$$

$$IEAR = \frac{ECOST}{EENS} \quad (28)$$

其中： n 表示负荷点数， l_j 表示负荷点平均故障概率， r_j 表示负荷点平均故障时间， l_j 表示故障平均失负荷， p_j 表示负荷点处于故障状态 j 的概率， f_j 表示负荷点处于故障状态 j 的频率， N_c 为负荷点故障状态数， d_j 为第 j 种故障的持续时间。

4 算例分析

本文以参考文献 [15] 所给的 IEEE RBTS Bus 2 配电系统为例，其接线如图 2 所示。

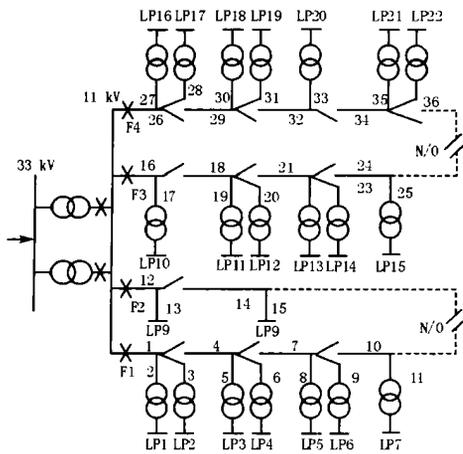


图 2 配电测试系统图

Fig 2 Distribution system for RBTS Bus 2

4.1 对系统所做的一些假设

1) 该系统中元件均为可修复的，主要包括断路器、母线、架空线、隔离开关、熔断器和用户端配电变压器。

2) 假设断路器、熔断器、隔离开关均是可靠的，也不计入母线的故障的情况，变压器无备用。

3) 馈线 F1、F2 之间存在可转移负荷，馈线 F3、

F4 之间存在可转移负荷。

4) 假设系统元件寿命时间为指数分布，而强迫故障修复时间和预防维修断电时间为符合不同形状参数的 WE BULL 分布。

4.2 可靠性评估的原始参数

主要采用测试系统的基本数据，同时结合了部分文献的参数。11 kV 主馈线段及分支线均为架空线，故障修复时间为 2.5 h，预防维修断电时间为 4.621 h，其形状因子 $\alpha = 2$ ；变压器等级为 11/0.415 kV，故障修复时间为 1.28 h，预防维修断电时间为 3.887 h，取 $\alpha = 2.5$ ；系统中开关的切断时间为 1 h。用户部门停电损失函数^[5]见表 1。

表 1 用户停电损失函数 (SCDF)

Tab 1 Sector customer interruption damage function (SCDF) (\$ /kW)

用户部门	停电持续时间				
	1 min	20 min	1 h	4 h	8 h
商业	0.381	2.969	8.552	31.317	83.008
政府	0.044	0.369	1.492	6.558	26.040
工业	0.001	0.093	0.482	4.914	15.690
小用户	0.060	0.343	0.649	2.064	4.120

4.3 可靠性指标及经济指标计算

利用配电系统可靠性分析的故障模式与后果分析法^[6] FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)，可得到负荷点及系统可靠性指标^[6]，利用式 (17)、(18)、(19)、(23)，式 (24~28) 可得到负荷点的成本指标，结果见表 2、表 3、表 4。

在半马尔柯夫过程中，当修复时间取为指数分布时，它就成为马尔柯夫过程，由表 2 的计算结果可以看出，当修复时间假定为指数分布时，采用本文的方法与基于马尔柯夫算法得到的结果误差很小，证明了该方法的正确性。当修复时间假定为 WE BULL 分布时，与 WE BULL MARKOV 方法得到的结果相比，误差为 0.3%，显示出该方法良好的兼容性、有效性，同时修正了前述 WE BULL MARKOV 方法的不足。

表 2 几种算法的比较

Tab 2 Arithmetic comparison using three different approaches

馈线	EENS				ECOST			
	HM	SemiMarkov		WM	HM	SemiMarkov		WM
		指数	Weibull			指数	Weibull	
F1	2.156 0	2.155 9	1.662 4	1.661 9	6.085 6	6.085 6	4.766 1	4.763 9
F2	1.267 9	1.267 8	0.926 7	0.926 8	0.799 5	0.799 4	0.568 1	0.568 2
F3	1.836 3	1.836 4	1.416 5	1.416 2	3.766 6	3.766 7	2.981 8	2.979 3
F4	2.004 3	2.004 3	1.546	1.545 8	6.005 8	6.005 9	4.695 6	4.693 7

表 3 负荷点可靠性指标及经济指标

Tab 3 Load point reliability and cost indices

负荷点	r	u	平均值			期望值			
			ENS	COST(k \$)	IEAR	EENS	ECOST(k \$)	IEAR	
LP1	2.859 2	2.435 1	6.962 5	3.724 9	3.975 5	1.067 3	0.244 0	0.148 1	0.607 0
LP6	2.869 0	2.435 3	6.986 9	3.172 0	25.331	7.985 8	0.207 1	1.760 8	8.504 0
LP7	2.872 2	2.430 3	6.980 4	3.169 1	25.310	7.986 5	0.207 1	1.760 8	8.504 0
LP8	1.639 8	3.300 4	5.411 9	5.411 9	2.856 0	0.527 7	0.431 0	0.264 2	0.613 0
LP10	2.862 5	2.433 5	6.965 8	3.726 7	3.976 4	1.067 0	0.244 0	0.148 1	0.607 0
LP15	2.862 5	2.433 5	6.965 8	3.162 5	25.256	7.986 1	0.207 1	1.760 8	8.504 0
LP17	2.862 5	2.435 2	6.970 6	3.136 8	3.347 9	1.067 3	0.205 2	0.124 6	0.607 0
LP22	2.875 5	2.428 7	6.983 6	3.170 6	25.323	7.986 8	0.207 1	1.760 8	8.504 0

表 4 主馈线可靠性指标及经济指标

Tab 4 Feeder reliability and cost indices

馈线	SAFI	SADI	CA DI	ASAI	平均值		期望值		
					ENS	IEAR	EENS	ECOST	IEAR
F1	2.868 0	6.984 1	2.435 2	0.999 2	25.450 7	2.982 5	1.662 4	4.766 1	2.894 6
F2	1.639 8	5.404 6	3.296 0	0.999 4	11.618 7	0.527 8	0.926 7	0.568 1	0.613 1
F3	2.869 9	6.987 4	2.434 7	0.999 2	21.683 8	2.291 0	1.416 5	2.981 8	2.123 3
F4	2.867 1	6.978 6	2.434 0	0.999 2	23.676 1	3.125 8	1.546	4.695 6	3.065 7

表 3、表 4 显示,利用负荷点可靠性平均值指标得到的停电损失率(IEAR)与用成本期望值得到的指标总体相近,但在某些负荷点 LP1、LP10、LP17 等变化较大,其原因是因为平均值法忽略了高概率及低概率故障事件对负荷点经济指标的影响。可以看出,应用经济指标期望值能更好地体现各元件故障时间持续分布对负荷点可靠度效益的影响,更容易找出电网的薄弱环节,为配电网规划、管理提供详细的参考信息。

5 结论

本文根据配电系统本身的随机性,基于半马尔柯夫过程建立可靠性评估的通用模型,研究系统停电损失的计算方法;该方法能充分反映元件故障修复时间分布对系统可靠度经济效益的影响,同时克服了以往算法中需要针对不同持续时间分布建立不同模型的缺点;在与 Homogenous Markov(HM)算法和 Weibull Markov(WM)算法进行比较的过程中显示了该方法对任意时间分布情况的有效性、实用性。

参考文献:

- [1] 王锡凡,王秀丽,别朝红. 电力市场条件下电力系统可靠性问题[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 19-22
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, BE Chao-hong. Power System Reliability Issues in Power Market Environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 19-22
- [2] 邓立华,陈星莺. 配电系统可靠性分析综述[J]. 电力

系统自动化设备, 2004, 24(4): 74-77.

DENGLi-hua, CHEN Xing-ying. Review of Distribution System Reliability Evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 74-77.

- [3] 陈晓,王建兴,臧宝锋. 城市电网用户停电损失及其估算[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2003, 28(1): 53-56
CHEN Xiao, WANG Jian-xing, ZANG Bao-feng. Research on the Power Outage Cost and Its Estimation in the Electric Power Network [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2003, 28(1): 53-56
- [4] Ali SA, Wacker G, Billinton R. Determination and Use of Sector and Composite Customer Damage Functions [A]. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 1999. 1483-1488
- [5] Billinton R, Zhang W. Cost Related Reliability Evaluation of Bulk Power Systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(2): 99-112
- [6] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 1986
GUO Yong-ji. The Theory and Application of Power System Reliability [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986
- [7] van Casteren J FL, Bolleand M H J, Schmiegl M E. Reliability Assessment in Electrical Power Systems: the Weibull-markov Stochastic Model [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36: 911-915.
- [8] 周家启,任震. 电力系统可靠性评估 [M]. 重庆:科学技术出版社重庆分社, 1986

- ZHOU Jia-qi, REN Zhen Power System Reliability Assessment[M]. Chongqing: Technology Press of Chongqing Branch, 1986
- [9] Schwab M, Wellssow W H, Koglin H J. Identification of Probability Distributions of Probabilistic Reliability Indices for Monetary Evaluation and Risk Assessment[A]. 14th PSCC. Sevilla: 2002 1-7.
- [10] Brown R E, Gupta S, Christie R D. Distribution System Reliability Assessment Using Hierarchical Markov Modeling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (4): 1929-1934.
- [11] van Casteren J. Assessment of Interruption Cost in Electric Power Systems Using the Weibull Markov Model[D]. Chalmers University of Technology, 2003.
- [12] 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论 [M]. 北京:科学出版社, 1986
CAO Jin-hua, CHENG Kan Reliability Mathematics Theory[M]. Beijing: Science Press, 1986
- [13] 刘付显,刑清华. 预防维修决策分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23 (6): 44-46
- L U Fu-xian, XING Qing-hua The Decision Analysis of Preventive Maintenance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23 (6): 44-46
- [14] Peman M, Senegacnik A, Tuma M. SemiMarkov Models with an Application to Power-Plant Reliability Analysis [J]. IEEE Trans on Reliability, 1997, 46 (4): 526-532.
- [15] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al Reliability Test System for Educational Purposes Basic Distribution System Data and Results [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (2): 813-820

收稿日期: 2005-12-02; 修回日期: 2006-02-20

作者简介:

熊俊 (1978 -),男,硕士研究生,主要从事电能质量及电力市场的研究; E-mail: jun_xi@sohu.com

肖先勇 (1968 -),男,副教授,从事电力系统及自动化方面的科研和教学工作,研究方向为电能质量及电力市场。

A method of reliability cost assessment in distribution system based on SemiMarkov process

X DNG Jun, XAO Xian-yong
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper presents a general method of reliability cost assessment in distribution system which based on SemiMarkov process and aimed at the uncertainty of failure duration distribution. It gives a reliability assessment model for element longevity, preventive maintenance and repair time submitting to a random distribution, introduces customer interruption damage function and gives a calculation method of interruption cost in imperfect maintenance. Finally, it offers a simple system to testify its correctness and validity, reveals that it is compatible with the Homogenous Markov and Weibull Markov model, and could subtly reflect the effect of repair time on reliability cost indices.

Key words: distribution system; reliability; interruption; SemiMarkov; economic assessment

(上接第 45 页 continued from page 45)

Operation characteristic of thyristor controlled interphase power controller

L I Juan¹, ZHAO Lu¹, L U Zhuo²
(1. Northeast China Institute of Power Electric Engineering, Jilin 132012, China;
2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The basic construction and mathematical models of interphase power controller are studied. Thyristor Controlled Interphase Power Controller (TCIPC) can be formed by the control of thyristor to the equivalent inductor. Based on the weak AC interconnected power system connected by the TCIPC, the mathematical expression between trigger-delayed angle of thyristor and parameters of TCIPC as well as the Thevenin-equivalent parameters of interconnected networks is deduced. Furtherly, its operation characteristics are analyzed considering the influence of equivalent parameters of power networks. The results for the weak AC interconnected power system with TCIPC between Northeast and North China show that TCIPC can control the power flow of tie-line continuously and dynamically.

Key words: thyristor controlled interphase power controller; thyristor; trigger-delayed angle; equivalent parameters; operation characteristics