

UPS 供电系统可靠性与经济性综合研究

王 钢, 丁茂生, 李晓华, 赵建仓

(华南理工大学电力学院, 广东省 广州市, 510640)

COMPREHENSIVE STUDY OF UNINTERRUPTED POWER SUPPLY SYSTEM'S RELIABILITY AND ECONOMY

WANG Gang, DING Mao-Sheng, Li Xiao-Hua, ZHAO Jian-Cang

(College of Electric Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Technique to evaluate the comprehensive index of reliability and economy of UPS was proposed. It is useful to design and estimate UPS system for vital load. The paper analyzed the operations of three typical UPS solutions and proposed an applied technique to quantitatively assess their reliability. Failure rate and average repair time of input-bus unit were calculated by state spaces method. Power reliability indices of whole systems were computed by min-cut method. Finally, the Reliability Life Cycle Cost (RLCC) of UPS system was defined and calculated. It is a criterion to find the most optimum reliability-economy solution. The proposed approach is useful in decision-making among different UPS system solutions.

KEY WORDS: Power electronics; Uninterrupted Power Supply; Reliability Evaluation; Reliability Life Cycle Cost (RLCC)

摘要: 在设计评估重要用户不间断供电系统 UPS (Uninterrupted Power Supply) 时不仅要考虑其可靠性, 而且要兼顾其经济性, 因此有必要探索一种综合可靠性与经济性最优的评估方法。该文在分析三种典型 UPS 供电方案工作过程和特点的基础上, 提出了一种简单实用的评估其供电可靠性指标的方法。该方法用状态空间法求解输入母线单元失效频率和平均修复时间, 用最小割集法计算整个系统的供电可靠性指标。最终提出了 UPS 系统可靠性寿命周期费用 RLCC (Reliability Life Cycle Cost), 作为确定综合可靠性与经济性最优方案的依据。该方法同样适用于其它各种紧急供电系统解决方案的可靠性评估与方案的选型决策。

关键词: 电力电子; 不间断供电系统; 可靠性评估; 可靠性寿命周期费用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50107004, 50337010); 霍英东青年教师基金 (81048)。

Project Support by Natural Science Foundation of China (50107004, 50337010). For Ying Tung Young Teacher Foundation (81048).

1 引言

近年来我国供电系统的质量和可靠性整体水平不断提高, 可以满足一般用户的需求^[1]。然而, 随着电子信息产业的飞速发展, 国际互联网时代的到来, 用户对电力供电质量和可靠性提出了越来越高的要求, 特别是一些重要的部门, 如大型数据处理中心、航空管理系统、医院、电力调度中心、证券中心等对可靠性的要求极高。这些部门一旦电力中断将造成巨大的经济损失和不良的社会影响。通常采用UPS系统为其提供高品质高可靠性的电源, 因此UPS系统的可靠性受到了广泛的重视和研究^[2-5]。同时供电系统的可靠性与经济性是密切相关的^[6-8], 用户在选择UPS解决方案时还必需平衡造价和可靠性两方面的因素, 对UPS供电方案的可靠性与经济性进行定量的综合研究分析, 但这方面的研究一直是一个空白。本文将状态空间法和最小割集法相结合来定量求解UPS方案供电可靠性指标, 同时提出并定义了UPS系统的可靠性寿命周期费用RLCC用以评估其综合可靠性与经济性, 指导各种方案的选型与决策。

2 可靠性研究基础

2.1 可靠性指标

UPS既是一种电子设备, 又是配电网的一部分, 因此在研究评估其可靠性时可参考配电网可靠性和电子设备可靠性的研究方法^[9-11], 重点从系统解决方案和供电能力的角度考虑选用以下指标来定量评估方案的可靠性水平。

(1) 失效率 λ 是可靠性研究中最基本的指标, 它表示系统已经无故障的工作到时间 t , 而在 t 后无

限小的时间 Δt 内失效的概率, 可表示为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} 1/\Delta t \cdot P[t < T \leq t + \Delta t | T > t] \quad (1)$$

UPS 系统的故障一般可分为两种: 视在故障和有效故障。前者指系统次要功能级的失效但主要功能级仍然发挥作用, 有效故障是指 UPS 系统失去向负载供电的能力, 从而引起负载的失电, 本文定义中的故障特指有效故障。

(2) 平均无故障时间 T_{MTTF} 和平均修复时间 T_{MTTR} , 分别定义为系统长期运行中运行时间和修复时间的数学期望。UPS 系统是可修复系统, 其失效率 λ 和失效频率 f 定义为

$$\lambda = 1/T_{\text{MTTF}} \quad (2)$$

$$f = 1/(T_{\text{MTTF}} + T_{\text{MTTR}}) \quad (3)$$

因为 T_{MTTR} 远小于 T_{MTTF} , 所以本文在分析过程中近似认为系统的失效频率 f 和失效率 λ 相等^[3-5]。

(3) 系统可用率 A , 定义为 UPS 系统处于正常供电状态的稳态概率, 可表示为

$$A = T_{\text{MTTF}} / (T_{\text{MTTF}} + T_{\text{MTTR}}) \quad (4)$$

2.2 状态空间法

如果 $\{X(t), t \geq 0\}$ 是一时间连续、状态有限的齐次马尔可夫过程, 则可用状态空间法求解其可靠性指标^[12]。求解步骤为: ①确定系统所有可能的状态空间 $E = \{1, 2, \dots, n\}$, 设 S 和 F 为两个累计状态, S 对应于系统的正常状态, 其稳态概率为 p_S , F 对应于系统的失效状态, 其稳态概率为 p_F 。②确定系统各状态的转移矩阵 $Q = (q_{ij})_{n \times n}$, q_{ij} 表示从状态 i 到状态 j 的转移概率。③求解状态方程 $PQ = 0$, 其中 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 表示系统处于各个状态的稳态概率。则系统由正常状态 S 转向失效状态 F 的频率可表示为 $f = \sum_{i \in F} p_i (\sum_{j \in S} q_{ij})$; 系统处于失效状态的平均修复时间可表示为 $r = p_F / f$ 。

2.3 最小割集法

割集是一些元件的集合, 这些元件的故障将导致系统的失效; 割集中不包含其它割集者为最小割集。如果割集中包含 N 个元件则称该割集为 N 阶割集。一般来说三阶以上的割集对系统可靠性的影响程度很小, 可以忽略。在割集计算时有如下关系:

对于一阶割集有

$$f_{csi} = \lambda_i \quad (5)$$

$$r_{csi} = r_i \quad (6)$$

对于二阶割集有

$$f_{csi} = \lambda_i \lambda_j (r_i + r_j) \quad (7)$$

$$r_{csi} = r_i r_j / (r_i + r_j) \quad (8)$$

在式(5)~(8)中 λ_i 、 λ_j 、 r_i 、 r_j 为割集中所含元件的失效率和平均修复时间; f_{csi} 、 r_{csi} 为割集的失效频率和平均修复时间。

如果已知所有的最小割集, 则系统的失效频率 f_s 和平均修复时间 r_s 可表示为

$$f_s = \sum f_{csi} \quad (9)$$

$$r_s = \sum f_{csi} r_{csi} / f_s \quad (10)$$

3 UPS 供电系统方案

UPS 系统结构如图 1 所示。方案结构大多由输入母线单元和输出母线单元两部分组成, 如图 1(a) 表示。输入母线单元包括市电 U 、紧急发电机 G 、自动转换开关 ATS 和输入母线 BI ; 输出母线单元由 UPS 电源、输出母线 BO 和静态转换开关 STS 组成。这里需要说明的是文中 UPS 电源特指蓄电池组和功率变换器部分, UPS 系统指包括发电机 G 、市电 U 在内的整个解决方案。UPS 电源按其工作方式不同可分为 3 种类型: 单机在线、双机热备用、多机无线并联。

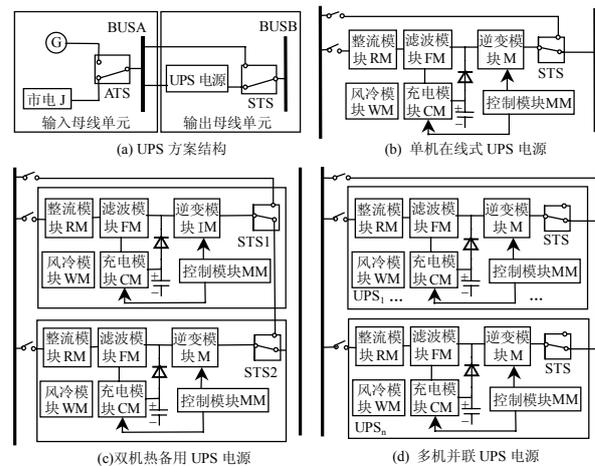


图 1 UPS 系统结构

Fig.1 Framework of UPS System

单机在线式 UPS 电源结构如图 1(b) 所示, 其工作方式: 当输入母线单元正常时, 如果 UPS 电源正常, 则 UPS 电源一方面通过充电电路对蓄电池组进行充电, 另一方面通过整流逆变电路向负载供电; 如果 UPS 电源失效, 则静态转换开关 STS 自动转换到输入母线, 由输入母线直接向负载供电。当输入母线单元失效时, 逆变器由蓄电池组供电, 将蓄电池组中存储的化学能转化为负载所需的交流电能。

双机热备用 UPS 电源如图 1(c) 所示。其工作方式: 当输入母线带电时一般由主机 (UPS_1) 向负载供电; 当主机内部出现故障时由从机 (UPS_2) 向

负载供电。当主机和从机都发生故障时，静态转换开关STS自动转换到输入母线，由输入母线直接向负载供电。当输入母线单元失效时，系统将蓄电池组中的化学能转换为负载所需的交流电能。

UPS的无线并联是近年发展起来的技术^[13-14]，它具有极高的系统可维护性，当单台电源出现故障时，可很方便地热插拔进行更换和维修，整个电源的结构如图 1(d)所示。

4 UPS 系统供电可靠性求解

4.1 概述

本文以一 220KVA 重要负荷紧急供电系统为例，求解单机在线、双机热备用、多机无线并联三种 UPS 系统供电可靠性指标。三种方案的配置如表 1 所示。在求解系统可靠性指标时本文做如下说明：

(1) 在分析时认为市电 U、发电机 G、输入母线 BI、输出母线 BO 和 UPS 电源各功能模块的故障时间和修复时间均服从指数分布。

(2) 本文旨在研究 UPS 方案可靠性求解方法，三种方案针对相同的应用环境，即选用相同的发电机 G、市电 U、输入母线 BI、自动转换开关 ATS 和输出母线 BO；方案 1 和 2 选用相同的 220kVA UPS 电源，方案 3 选用 80kVA 具有无线并联功能的 UPS 电源。

(3) 系统中各功能电路模块故障率参考产品厂商基于美国军用标准 MIL-217-E 模型得到的预测参数；各功能电路模块的平均修复时间 12h。市电 U 的可靠性参数取我国一般大城市配电网可靠性标准：每月停电一次。整个系统可靠性参数如表 2 所示。

表 1 三种解决方案

Tab.1 Three solutions of 220KVA load

方案	供电系统	配置
1	单机在线	1台240kVA柴油发电机，1台220kVA UPS
2	双机热备用	1台240kVA柴油发电机，2台220kVA UPS
3	四机无线并联	1台240kVA柴油发电机，4台80kVA UPS

表 2 模块参数

Tab.2 Modules reliability indices

编号	模块	220kVA UPS	80kVA UPS	r/h
		$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	
1	蓄电池模块 BM	22.831	22.831	12.0
2	柴油发电机 G	61.827	61.827	24.0
3	市电 U	1388.89	1388.89	24.0
4	自动转换开关 ATS	0.328	0.328	12.0
5	输入母线 BI	0.578	0.578	12.0
6	滤波模块 FM	0.370	0.247	12.0
7	整流模块 RM	12.230	8.153	12.0
8	逆变模块 IM	37.100	24.733	12.0
9	风冷模块 WM	5.393	2.697	12.0
10	控制模块 MM	22.228	33.342	12.0
11	静态转换开关 STS	2.837	2.837	12.0
12	输出母线 BO	0.578	0.578	12.0
13	充电模块 CM	6.012	4.008	12.0

(4) 忽略蓄电池组的充电过程，认为在任何时刻输入母线单元失效时蓄电池组可连续放电的时间都为其额定放电时间。

根据以上可靠性参数本文分两步求解系统可靠性指标：①基于状态空间法求解输入母线单元失效频率和平均修复时间；②根据最小割集法获取整个系统的可靠性指标。

4.2 输入母线单元供电可靠性求解

三种方案输入母线单元的外部输入电源相同，都由柴油发电机和市电组成。根据其工作过程可分为 4 个状态 $E = \{1, 2, 3, 4\}$ ，如图 2 所示。其中状态 1 表示市电正常供电，发电机处于正常备用状态；状态 2 表示市电失效，发电机正常供电；状态 3 是市电正常供电，发电机失效；状态 4 是市电失效，发电机也失效。组合状态 $S = \{1, 2, 3\}$ 为输入母线单元有电源供电的状态，组合状态 $F = \{4\}$ 为输入母线单元无电源供电的状态。

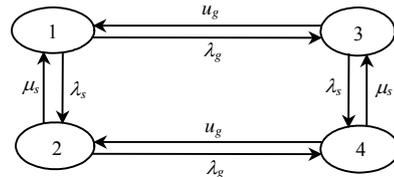


图 2 输入电源四状态空间图

Fig.2 Four states space of input power

根据状态空间图可得状态转移矩阵 Q 为

$$Q = \begin{Bmatrix} -(\lambda_s + \lambda_g) & \lambda_s & \lambda_g & 0 \\ \mu_s & -(\lambda_g + \mu_s) & 0 & \lambda_g \\ \mu_g & 0 & -(\lambda_s + \mu_g) & \lambda_s \\ 0 & \mu_g & \mu_s & -(\mu_s + \mu_g) \end{Bmatrix}$$

由状态空间法得外部输入电源失电频率和平均修复时间

$$f_4 = \frac{\lambda_s \lambda_g (\mu_s + \mu_g)}{(\lambda_g + \mu_g)(\lambda_s + \mu_s)} \quad (11)$$

$$r_4 = \frac{1}{\mu_s + \mu_g} \quad (12)$$

自动转换开关 ATS、输入母线 BI 和输入电源是串联可靠性模型，因此可得输入母线单元失效频率 f_{BIU} 和平均修复时间 r_{BIU}

$$f_{BIU} = f_4 + \lambda_{ATS} + \lambda_{BI} \quad (13)$$

$$r_{BIU} = \frac{\lambda_4 r_4 + \lambda_{ATS} r_{ATS} + \lambda_{BI} r_{BI}}{\lambda_4 + \lambda_{ATS} + \lambda_{BI}} \quad (14)$$

式中 λ_{ATS} 、 λ_{BI} 为自动转换开关 ATS 和输入母线 BI 的失效率； r_{ATS} 、 r_{BI} 为自动转换开关 ATS 和输入母线 BI 的平均修复时间。

根据表2中参数可得 $f_{BIU} = 1.3186 \times 10^{-6} / h^{-1}$, $r_{BIU} = 12.0 / h$ 。

4.3 系统供电可靠性求解

分析3种方案的工作过程, 可得UPS系统的故障树如图3所示。在故障树的基础上本文用最小割集法求解系统可靠性指标。表3是三种方案输入母线单元失效时间大于蓄电池组放电时间割集的频率和平均修复时间。表4是220kVA UPS电源和80kVA UPS电源失效分析计算表; 表5是单机在线UPS方案可靠性分析计算表; 表6是双机热备用UPS方案可靠性分析计算表; 表7是四机无线并联UPS方案可靠性分析计算表; 表8是最终得到的三种方案的可靠性指标。

这里需要说明的是输入母线单元失效时间大于蓄电池组放电时间 t_d 割集的频率 f_B 和平均修复时间 r_B 为

$$f_B = f_{BIU} \exp(-t_d / r_{BIU}) \quad (15)$$

$$r_B = r_{BIU} - t_d \quad (16)$$

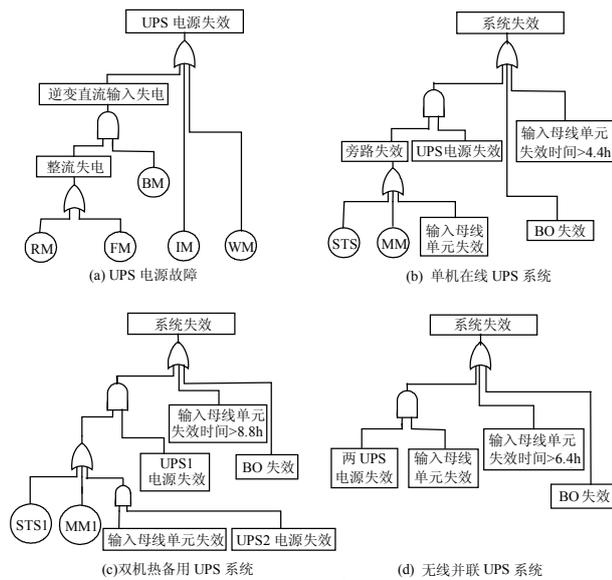


图3 三种方案故障树

Fig.3 Fault trees of three solutions

表3 输入母线单元失效时间大于放电时间割集

Tab.3 Cuts of input bus unit failure time over discharge time

方案	UPS容量 kVA	BM放电时间 (t_d/h)	割集频率 $f_B \times 10^6/h^{-1}$	割集修复时间 (r_B/h)
1	220	4.4	0.9138	7.6
2	440	8.8	0.6333	3.2
3	320	6.4	0.7736	5.6

表4 UPS电源失效

Tab.4 Failure of UPS converters

方案	割集	220KVA UPS		80KVA UPS	
		$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	r/h	$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	r/h
1	IM失效	37.1000	12.0	24.7330	12.0
2	WM失效	5.3930	12.0	2.6970	12.0
3.1	BM失效	0.0069	6.0	0.0046	6.0
3.2	(RM or FM)失效				
	Σ	42.5000	11.99	27.4346	11.99

表5 单机在线UPS系统

Tab.5 Single online UPS system

方案	割集	$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	r/h
1	输出母线失效	0.5780	12.0
2	输入母线单元失效时间>4.4h	0.9138	7.6
3.1	UPS电源失效	0.0263	6.0
3.2	(MM or STS or输入母线单元)失效		
	Σ	1.5181	9.25

表6 双机热备用UPS系统

Tab.6 The hot redundancy UPS system

方案	割集	$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	r/h
1	输出母线失效	0.5780	12.0
2	输入母线单元失效时间>8.8h	0.6333	3.2
3.1	UPS1电源失效		
3.2	[MM1 or STS1 or (UPS2 and 输入母线单元)]失效	0.0261	6.0
	Σ	1.2374	7.51

表7 四机并联UPS系统

Tab.7 Four wireless parallel UPS

方案	割集	$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	r/h
1	输出母线失效	0.5780	12.0
2	输入母线单元失效时间>6.4h	0.7736	5.6
3.1	两UPS电源失效	0.00001	4.0
3.2	输入母线单元失效		
	Σ	1.3516	8.34

表8 三种方案可靠性指标

Tab.8 Reliability indices of three solutions

方案	$\lambda \times 10^6/h^{-1}$	T_{MTTR}/h	A
1	1.5181	9.25	99.998%
2	1.2374	7.51	99.999%
3	1.3516	8.34	99.999%

5 综合可靠性与经济性分析

可靠性与经济性之间存在着对立统一的关系。如果UPS系统供电可靠性不高, 那么在系统寿命周期内因供电失效造成的经济损失就大; 如果提高UPS系统供电可靠性, 那么在系统寿命周期内负载停电造成的经济损失会降低, 但UPS系统解决方案的投资会相应的增加。为了从可靠性与经济性综合最优的角度衡量各种UPS系统解决方案, 本文定义了UPS系统可靠性寿命周期费用 ¥_{RLCC} 来评估方案的综合可靠性与经济性。 ¥_{RLCC} 可表示为

$$\text{¥}_{RLCC} = \sum_{t \leq T} I + \sum_{t \leq T} L \quad (17)$$

式中 T 为系统的设计寿命; I 为 UPS 系统可靠性成本, 定义为设计部门为使系统达到一定的可靠性水平而需要的投资; L 为负载失电可靠性损失, 定义为负载在 UPS 系统寿命周期内因供电失效而造成的损失。

考虑时间成本, UPS 系统可靠性成本和负载失电可靠性损失可表示为

$$I = I_0 \quad (18)$$

$$L = \int_0^T L_0 \lambda (1 + P)^t e^{-\lambda t} dt \quad (19)$$

式中 I_0 为 UPS 系统的投资; λ 为系统的失效率; L_0 为系统投入使用初期如果发生供电失效将造成的经济损失, 它的取值与负载的重要程度有关, 可根据系统负载供电失效后经济损失分析预测得到; T 为系统设计寿命, 本文取 20 年; P 为现行利率, 本文取 5%。

根据预算, 3 种方案的 I_0 分别是 113 万元、206 万元和 160 万元。为比较 3 种方案在各种情况下的可靠性寿命周期费用 ¥_{RLCC} , 本文将其分别应用于 4 种不同的负载情况。这 4 种负载的 L_0 分别为: ① 500 万元; ② 1000 万元; ③ 2000 万元; ④ 3000 万元。根据式(17)分析, 三种方案在四种负载情况下的可靠性寿命周期费用如图(4)所示。由分析结果可知, 当可靠性损失为 500 万元时方案 1 最优, 随着负载重要程度和可靠性损失的增加, 方案 2 由于可靠性较高, 所以逐渐变为可靠性寿命周期费用最优。

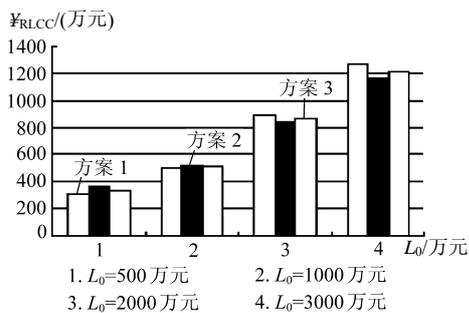


图4 三种方案RLCC比较

Fig.4 The RLCC Comparison of three solutions

6 结论

本文提出了紧急供电系统解决方案简单实用的可靠性评估以及综合可靠性与经济性分析方法。通过应用于分析比较单机在线、双机热备用和多机无线并联三种 UPS 系统, 以确定在各种不同负载时的最优解决方案, 证实了其简单可行性。该方法同样对各种不同的解决方案的选型与决策具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 蒋锦峰. 2002 年中国电力可靠性指标[R]. 北京, 电力可靠性管理中心.
- [2] Suntio T, Suur-Askola S. DC UPS System's reliability performance: facts and fiction[C]. The Second International Telecommunications Energy Special Conference proceedings: 237-243.
- [3] Chanan Singh, Narayana Gubbala, Naralaksni Gubbala. Reliability analysis of electric supply including standby generators and an uninterruptible power supply system[J]. IEEE trans on Industry Applications 1994, 30(5): 1298-1302.
- [4] Chanan Singh, Joydeep Mitra. Reliability analysis of emergency and

- standby power system[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1997, 3(5): 41-47.
- [5] Chanan Singh, PATON A D. Reliability evaluation of emergency and standby power systems[J]. IEEE trans on Industry Applications. 1985, 21(2): 476-480.
- [6] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 肖霖. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 47-52.
Wang Gang, Ding Maosheng, Li Xiaohua, Xiao Ling. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 47-52.
- [7] 张鹏, 王首相. 电力系统可靠性经济评估的区间分析法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 71-77.
Zhang Peng, Wang Chouxiang. Novel interval methods in power system reliability economics[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 71-77.
- [8] 史燕琨, 王东, 孙辉, 等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 136-141.
Shi Yankong, Wang Dong, Sun Hui *et al.* Feeder-switchers optimal location scheme for comprehensive cost minimization in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 136-141.
- [9] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52.
Wan Guocheng, RenZheng, Tian Xiang. Study on model of reliability-network-equivalent of distribution system reliability evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52.
- [10] 万国成, 任震, 吴日昇, 何毅思. 混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 92-98.
Wan Guocheng, Ren Zheng, Wu Risheng, He Yisi. Hybrid method for the reliability on the complex distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 24(9): 92-98.
- [11] MIL-HDBK-217E Reliability prediction of electric equipment [Z]. Department of defense, USA, March 1986.
- [12] 杨蔚百. 电力系统可靠性分析基础及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [13] 姜桂宾, 裴云庆, 杨旭, 等. SPWM 逆变电源的无互联信号线并联控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, V23(12): 94-98.
Jiang Guibin, Pei Yunqin, Yang Xu *et al.* Parallel operation of sinusoid wave inverters without control interconnections [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 94-98.
- [14] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. UPS 无互联线并联中基于解耦控制的下垂特性控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, V23(12): 117-122.
Lin Xinchun, Duan Shanxu, Kang Yun *et al.* The droop characteristic control scheme basing on decoupling control in parallel operation of UPS with no control interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 117-122.

收稿日期: 2004-12-12.

作者简介:

王 钢 (19-66), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化;
丁茂生 (19-77), 男, 博士研究生, 从事电力系统继电保护及自动化, 电力系统可靠性研究;
李晓华 (19-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化, 可靠性分析等;
赵健全 (19-), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为电力系统继电保护。