

DOI: 10.7667/PSPC160175

同时计及设备老化与不完全维修的电力系统可靠性评估

邓奥攀¹, 胡志坚¹, 胡美玉¹, 熊敏¹, 汤鹏²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 江西电网南昌供电局, 江西 南昌 330006)

摘要: 在电力系统可靠性评估中, 建立精确的元件停运模型至关重要。传统模型忽视了设备老化与维修更新性的影响, 导致评估误差随着元件运行时间增长而不断增大。针对这一严重不足之处, 提出了计及设备老化与不完全预防性维修的元件时变停运概率模型。该模型采用虚拟年龄与改善因子表征预防性维修对故障率的降低效应, 采用威布尔模型表征时间对故障率的增长效应。应用所提出的模型对改进的 IEEE RTS-79 系统进行了可靠性评估。通过改变部分系统元件的维修成本和预防性维修周期模拟实际维修, 给出了新模型中不同维修策略的系统可靠性评估结果, 并与传统方法进行了对比分析。结果表明提出的模型能更准确地反映实际维修效果, 更精确地预测电力系统中长期可靠性水平。

关键词: 电力系统; 设备老化; 可靠性评估; 时变故障率; 停运模型; 预防性维修

Power system reliability evaluation considering deterioration and imperfect maintenance of equipment

DENG Aopan¹, HU Zhijian¹, HU Meiyu¹, XIONG Min¹, TANG Peng²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. Nanchang Power Supply Bureau of Jiangxi Electric Power Corporation, Nanchang 330006, China)

Abstract: It is important to develop accurate component outage models for reliability evaluation in power system. However, the traditional models neglect the impacts of deterioration and maintenance of equipment, making the estimation error increase with the operating time. Aimed at this problem, a time-varying outage model based on aging characteristics and imperfect preventive maintenance is proposed, in which the virtual age and improvement factor are used to characterize the effects of maintenance and the Weibull model is adopted to reflect the aging trend of failure rate. The proposed model is applied to the reliability evaluation of a modified IEEE RTS-79 system, the reliability evaluation results of different maintenance strategies with different cycles and costs are given in detail and compared with that of traditional model. All the results show that the proposed model is more accurate in power system reliability evaluation and can reflect the actual complex maintenance.

This work is supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20110141110032).

Key words: power system; deterioration of equipment; reliability evaluation; time-varying failure rate; outage model; preventive maintenance

0 引言

电力系统的可靠性指标是系统规划、系统运行和电力市场交易的重要参考数据^[1-3]。在电力系统规划中, 需对不同方案进行可靠性评估, 才能确保所选方案即具有良好的经济性又能使系统稳定运行;

其次, 全面的可靠性评估数据是运营部门决策的重大依据, 以便在合理的风险范围内制定最优的系统运行方式; 此外, 在国际电力市场中, 可靠性是电力商品的重要属性, 因而是定价的重要依据之一。因此, 对电力系统进行可靠性分析十分重要^[4]。

传统模型假设电力系统设备寿命服从指数分布, 因而故障率恒定, 通常取长期运行统计下的平均值。但实际中, 设备故障率会受到设备内部老化和外部环境的影响而变化, 尤其当设备投运时间较

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目
(20110141110032)

长, 其实际故障率与初始故障率相差巨大。如文献[5]对泰国地区不同容量变压器运行状况进行了 10 年的统计分析, 结果表明变压器故障率随着工作年限而显著增大, 并非恒定值。

为模拟时变故障率, 文献[6]采用指数模型, 通过改变函数的参数来模拟元件各个阶段对应的故障率。文献[7]采用威布尔分布函数描述元件的退化过程, 但均未考虑维修因素的影响。维修能够减少元件的故障率, 能够延长元件的寿命, 电力设备大都会进行定期检修, 因此构造故障率函数必须考虑维修因素。文献[8]采用阶梯模型, 虽然考虑了故障率的时变效应, 并将故障率函数等分为若干阶段, 分别用恒定值等效, 但认为维修使设备完全如新, 对维修效果考虑过于理想, 导致评估结果过于乐观。实际中, 设备并不会修复如新, 故障率有改善但不会恢复至起点^[9-10]。

本文计及元件内部老化因素, 并采用虚拟年龄与改善因子表征维修效果, 建立一种更为全面而精确的元件时变停运概率模型。然后采用蒙特卡洛算法, 分别用该模型与传统模型对改进的 IEEE 系统进行可靠性评估。最后通过改变设备维修成本和预防性维修周期, 比较不同维修策略对系统的可靠性指标的影响。

1 时变故障率

在电力系统中, 绝大部分设备的故障率曲线呈现浴盆特性, 具有阶段性^[11-12]。第一阶段为投入初期, 这段时期设备出现故障的主要原因是材料缺陷及制造的缺陷, 随着设备进一步磨合, 故障率随着时间呈递减趋势。第二阶段为稳定运行期, 这段时期设备失效主要是由于随机故障而非老化, 故障率趋于稳定。第三阶段为损耗期, 随着服役时间增加, 设备内部日益老化, 故障率逐渐上升。由于第一阶段时间较短, 且设备普遍受到老化影响较大, 故实际中不考虑浴盆曲线的第一阶段, 主要考虑第二、三阶段。

电力系统元件寿命分布, 通常适合采用两参数的威布尔分析模型, 其优势在于易于统计模型参数^[13]。因此, 本文基于两参数威布尔分布, 并考虑预防性维修因素建立时变故障率模型。

1.1 不考虑预防性维修

基于威布尔模型的元件寿命分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

元件寿命密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2)$$

则依式(1)及式(2)可得故障率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

上式中, α 与 β 分别为威布尔分布的尺度参数与形状参数。当 $\beta > 1$ 时, 故障率随着时间递增, 能够表征元件老化情况。

1.2 考虑预防性维修

1.2.1 维修模型

维修按效果可分为最小维修、完全预防性维修与不完全预防性维修^[14-15]。最小维修指仅当发生故障时进行维修, 设备修复如旧, 故障率仅回到故障之前; 完全预防性维修指在故障发生之前进行定期维修, 设备修复如新, 故障率恢复到投入初期。

然而实际情况中, 维修为不完全维修, 即维修的作用使设备介于如新与如旧之间, 其故障率得到改善, 但并不会降低至初始阶段。通常用虚拟年龄和改善因子来表征不完全预防性维修对设备运行状态的改善效果^[16], 其计算公式如式(4)。

$$\begin{cases} \tau_0 = t & 0 < t < T \\ \tau_1 = t - q_1 T & T \leq t < 2T \\ \vdots & \vdots \\ \tau_k = t - \sum_{i=1}^k q_i T & kT \leq t < (k+1)T \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: T 为预防性维修的间隔; t 为设备的实际年龄。其中 $0 \leq q \leq 1$ 为改善因子, 其大小与预防性维修投入的费用以及维修次数相关, 改善因子越大, 则维修效果越好, 设备变得更年轻。由于设备劣化特性, 改善因子 q 为维修次数的递减函数, 即随着维修次数增加, 维修对元件的改善效果逐渐减小。 τ_k 为第 k 次维修后的虚拟年龄, q_k 为第 k 次维修的改善因子。每次预防性维修后, 设备的年龄回退 $q_k T$, 即设备在此预防性维修周期中相当于只工作了 $(1 - q_k)T$ 时间。当 $q_k = 0$ 时, 意味着此次维修仅使设备由停运状态转为工作状态, 回退年龄为零, 维修不改变设备的故障率, 即最小维修; 当 $q_k = 1$ 时, 设备在此次维修后, 虚拟年龄增加量为零, 设备得到完全更新, 即完全维修。由上述分析可知, 利用虚拟年龄与改善因子能准确地表征维修对设备故障率的降低效果。

因此, 首先通过实际年龄和预防维修的次数, 可由式(4)求得设备虚拟年龄, 然后代入式(3)即可计算出考虑预防性维修后的设备故障率为

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} & t < T \\ \frac{\beta}{\alpha^\beta} (t - \sum_{i=1}^k (q_i \cdot T))^{\beta-1} & t > T \end{cases} \quad (5)$$

依据式(3)和式(5), 考虑与不考虑预防性维修两种情况的设备故障率如图 1 所示。

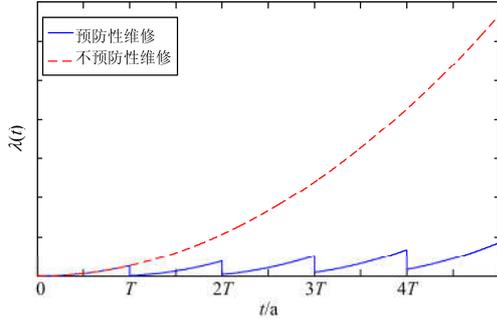


图 1 故障率曲线

Fig. 1 Curve of failure rate

图 1 中, 横轴为设备服役年龄, 纵轴为故障率。由图可知, 在不进行预防性维修时, 由于设备老化, 故障率为时间的递增函数; 在定期进行预防性维修时的故障率曲线中, 每次预防性维修都会在不同程度上降低设备故障率, 相较于未进行预防性维修的情况, 其故障率增长更为缓慢, 特别是设备服役年限较长时, 维修对故障率的降低作用十分显著。

1.2.2 维修效果衰减

进一步考虑到改善因子随着维修次数递减, 借鉴文献[17]的经验取值法, 第 k 次维修后的改善因子为

$$q_k = q_1 \cdot \frac{l_1 k + l_2}{l_3 k + l_4} \quad (6)$$

式(6)中, $l_i (i=1, 2, 3, 4)$ 均为与设备相关的常数, 为了体现改善因子随维修次数的衰减特性, 参数取值需使得 $(l_1 k + l_2) / (l_3 k + l_4) \in (0, 1)$, 且改善因子应缓慢衰减。其具体值应该由专家根据设备特性以及历史统计数据进行整定。

为了分析对比不同的维修效果对故障率的降低作用, 如式(4)和式(5)所述, 用改善因子表征维修效果, 设定每次维修成本恒定。

图 2 为 $q_1 = 0.7$ 与 $q_1 = 0.8$ 的故障率随时间变化曲线。由图 2 可知, 改善因子表征着维修的效果, 改善因子越大, 维修效果越好。 $q_1 = 0.8$ 的曲线与 $q_1 = 0.7$ 的曲线相比, 每次维修后设备年龄回退的更多, 即故障率下降更多, 设备故障率增加越慢。在同一曲线下 ($q_1 = 0.8$), 由于设备的裂化特性, 改善

因子 q_i 随着维修次数递减, 每次回退的年龄在逐步减小 ($q_4 T < q_2 T$)。

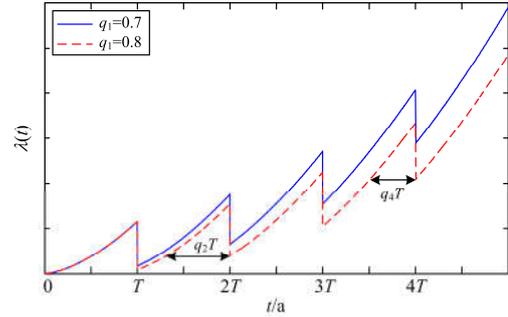


图 2 不同改善因子下的故障率曲线

Fig. 2 Failure rate curves for different improvement factors

2 计及维修的平均不可用度分析

在电力系统可靠性评估中, 设备的不可用度 U 定义为设备在时刻 t 不可用的概率。

假设设备进行一次预防性维修的平均时间为 t_m , 最小维修的修复时间服从指数分布, 修复率为 u , 则依据指数分布特性, 平均最小维修时间(Mean Time To Repair, MTTR)为 $r = 1/u$ 。则在给定时间 T 内平均不可用时间 T_f 为

$$T_f = r \int_{\tau}^{\tau+T} \lambda(t) dt + n t_m \quad (7)$$

式(7)中: 前半部分为给定时间 T 内的最小维修所需平均修复时间与失效次数的乘积; τ 为设备的虚拟年龄; n 为 T 时段内的预防性维修次数。

依据定义, 设备的平均不可用度^[18]为给定时间 T 内不可用时间 T_f 与 T 的比值, 则设备的平均不可用度为

$$U = \frac{T_f}{T} = \frac{r \int_{\tau}^{\tau+T} \lambda(t) dt + n t_m}{T} \quad (8)$$

3 算例分析

基于上述时变停运模型, 本文采用蒙特卡洛算法对改进的标准 RTS-79 系统^[19]进行仿真。该系统含有 24 节点、32 台发电机、33 条传输线和 5 台变压器。其负荷跨度为 861.62 MW 至 2850 MW, 平均值为 1750.63 MW。为更全面地模拟实际情况, 本文将 RTS-79 中所有发电元件的 MTTF 提高为原来的 5 倍, 即元件的初始故障率降为原来的 1/5。

为了分析设备老化与预防性维修对故障率的影响, 同时确保对比的公正性, 将传统模型与本文模型的设备初始的故障率设为相等。由图 1 可知, 在

投运的前期,设备处于稳定时期,故障率变化率很小,可以视为浴盆曲线的第二阶段的末期^[20],可取该阶段(0~10年)故障率平均值为传统方法统计下的故障率,即

$$\frac{\int_0^{10} \lambda(t) dt}{10} = \frac{\int_0^{10} \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} dt}{10} = \lambda_m \quad (9)$$

式中: $\lambda(t)$ 为时变故障率; λ_m 为传统方法统下的平均故障率。由式(3)和(9)可求得时变故障率为

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{10^{\beta-1}} t^{\beta-1} \lambda_m \quad (10)$$

改进后的 RTS-79 系统中部分发电机可靠性数据如表 1 所示。

表 1 发电机可靠性数据

Table 1 Reliability data of generators

元件编号	容量/MW	故障率/h	修复率/h
9-10	100	1/6000	1/50
12-13	197	1/4750	1/50
30-31	155	1/4800	1/40

为深入分析设备老化与不完全维修对系统可靠性的影响,分别对以下 5 种情况进行讨论。

Case1: 系统中所有元件均不考虑老化和预防性维修影响,元件寿命服从指数分布,故障率为恒定值,即威布尔分布中 $\beta=1$ 的特例,即为传统模型。

Case2: 系统中 6 台发电机(节点 7 中 G9-10 [100 MW], 节点 13 中 G12-13 [197 MW], 节点 23 中 G30-31 [155 MW])故障率受到时间老化影响递增,寿命服从威布尔分布($\beta > 1$),且仅当设备发生故障时进行最小维修,其余元件与 Case1 一致,即部分设备故障率只受老化与最小维修的影响。

Case3: 当设备发生故障时进行最小维修,同时考虑定期预防性维修。假设预防性维修成本固定,预防性维修周期 $T=5$ 年,平均维修时间为最小维修时间的 1.5 倍, $q_1=0.8$,考虑到改善因子的衰减特性,假设式(6)中 $l_1=5, l_2=2, l_3=6, l_4=1$,参数满足改善因子缓慢衰减的特性。其他条件与 Case2 相同,即部分设备故障率同时受老化与预防性维修的影响。

Case4: 改善因子为固定值,不随着维修次数而衰减,其他条件与 Case3 相同。

Case5: 采用变周期预防性维修,维修周期随着设备老化而缩短,系统服役 0~10 年间, $T=5$ 年; 10~18 年间, $T=4$ 年; 18~30 年间, $T=3$ 年。其他条件与 Case3 相同。

3.1 模型对比

设定系统已服役 30 年,以系统停电概率(Loss of Load Probability, LOLP)和电量不足期望值(Expected Energy Not Supply, EENS)为可靠性指标进行计算。

文献[21]采用两参数威布尔模型对近 400 台发电机进行故障率统计并求得威布尔参数,结果表明,采用真空压力浸渍绝缘系统的发电机的形状参数 $\beta=1.7$,采用多树脂绝缘系统的发电机形状参数 $\beta=1.8$ 。在威布尔分布模型中,形状参数 β 对概率函数影响很大,因此本文中 β 取为 1~2.2 中的不同值。

为了分析设备老化与预防性维修对系统可靠性的影响,对 Case1、Case2 和 Case3 分别进行可靠性计算,结果如图 3 所示。

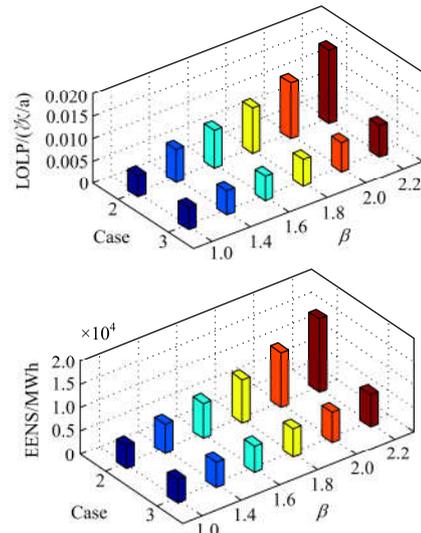


图 3 LOLP 与 EENS 随 β 变化示意图

Fig. 3 LOLP and EENS for different β

图 3 中,当 $\beta=1$ 时,由式(3)知故障率不随时间改变,Case2 与 Case3 指标相等,对应的都是 Case1 的结果,其可靠性指标最低,即用传统故障率模型,系统可靠性评估结果过于乐观。

当 $\beta > 1$ 时,Case2 与 Case3 均表明, β 越大,设备故障率增加的越快,系统的可靠性指标越大。由 Case3 与 Case2 对比可知,在 β 相等的情况下,Case3 的系统的可靠性指标显著减小,意味着预防性维修能提高系统的可靠性;但与 Case1 相比,系统的可靠性指标仍较大,意味着即使进行预防性维修,随着设备老化,系统的可靠性仍然在下降。因此设备老化和维修措施对系统可靠性有较大影响。

3.2 维修对可靠性影响

从上节的模型对比可知,预防性维修能显著提高电力系统可靠性。而预防性维修的成本和周期是影响维修效果的主要因素,所以也是影响系统可靠

性的重要因素, 因此有必要进行深入分析。

3.2.1 预防性维修成本对可靠性影响

为了分析维修投入成本对可靠性的影响, 在 Case3 的基础上, 调整每次预防性维修成本, 让 q_i 从 0 逐渐增大至 1, 假设 $\beta = 2.2$, 对 Case3 与 Case4 分别计算系统的可靠性指标 LOLP 如图 4 所示。

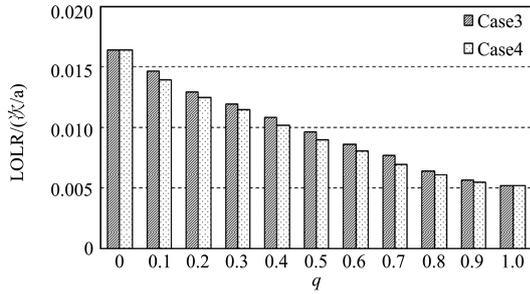


图 4 不同改善因子下的 LOLP

Fig. 4 LOLP for different improvement factors

由图 4 可知, 随着维修成本的增加, 改善因子越大, 系统的可靠性指标减小, 系统的可靠性增大。由于 Case4 忽视了改善因子随着维修次数衰减的特性, 其计算得到的可靠性指标低于 Case3, 即评估结果过于乐观。

3.2.2 预防性维修周期对可靠性影响

在预防性维修中, 不同的预防性周期 T 对设备故障率函数和系统可靠性指标有较大影响。随着设备的老化, 设备故障率增高, 如果采用固定周期预防性维修, 则设备在维修周期内的可靠性将逐渐下降。为确保预防性维修周期内的设备可靠性以保证生产, 宜采用变周期维修策略, 即维修周期随着设备年龄增长而逐渐缩短。假设 $\beta = 2.2$, 对 Case3 与 Case5 分别计算系统在服役 30 年间的累积 LOLP, 结果如表 2 所示。

表 2 不同维修周期的 LOLP

Table 2 LOLP for different maintenance cycle

方案	LOLP/次
Case3	0.1935
Case5	0.1811

由表 2 可知, 在相同的服役年限, Case5 的可靠性指标低于 Case3, 即在设备服役后期, 采用预防性周期逐渐缩短的维修策略, 能更好地提高系统的可靠性。

4 结论

1) 在电力系统可靠性评估中, 传统模型没有同时考虑设备老化和不完全维修因素, 会让评估结果偏离实际情况。本文提出的模型能反映设备老化与

实际维修效果, 对系统可靠性评估更精确。

2) 威布尔模型能较好地描述设备损耗期故障率的变化, 但其形状参数对系统可靠性指标影响较大, 在实际中应对其精确统计。

3) 维修的效果随维修的次数而衰减, 如忽视维修效果的衰减, 则对系统的可靠性评估将过于乐观。

4) 预防性维修能够提高系统的可靠性, 维修成本和预防性维修周期均对可靠性有重要影响。

参考文献

- [1] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15. CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [2] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35. XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [3] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56. CAI Dehua, CHEN Boxi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [4] 黄江宁, 郭瑞鹏, 赵舫, 等. 基于故障集分类的电力系统可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 112-121. HUANG Jiangning, GUO Ruipeng, ZHAO Fang, et al. Fault set classification method for power system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 112-121.
- [5] CHAIDEE E, TIPPACHON W. Failure statistics and condition evaluation for power transformer maintenance[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2011: 1-4.
- [6] RETTERATH B, VENKATA S S, CHOWDHURY A A. Impact of time-varying failure rates on distribution reliability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(9): 682-688.
- [7] 张翔, 宋子彤, 杨致慧, 等. 一种基于负载率和设备检测信息的油浸式变压器故障率模型[J]. 电网技术,

- 2013, 37(4): 1159-1165.
ZHANG Xiang, SONG Zitong, YANG Zhihui, et al. A failure model for oil-immersed transformer based on load factor and equipment inspection information[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1159-1165.
- [8] BERTLING L, ALLAN R, ERIKSSON R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 75-82.
- [9] ZEQUEIRA R I, BÉRENGUER C. Periodic imperfect preventive maintenance with two categories of competing failure modes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(4): 460-468.
- [10] CASTRO I T. Model of imperfect preventive maintenance with dependent failure modes[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 196(1): 217-224.
- [11] 赵渊, 张煦, 王洁, 等. 多级检修模式下电网计划检修周期协调优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 71-81.
ZHAO Yuan, ZHANG Xu, WANG Jie, et al. Coordination and optimization of power-grid preventive maintenance cycle in multi-level maintenance mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 71-81.
- [12] BEBBINGTON M, LAI C D, ZITIKIS R. Useful periods for lifetime distributions with bathtub shaped hazard rate functions[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 55(2): 245-251.
- [13] SUWANASRI C, LIPIRODJANAPONG S, SUWANASRI T, et al. Failure rate analysis of circuit breaker and its preventive maintenance application[C] // Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 1-6.
- [14] 曲玉祥, 吴甦. 基于不完全维护的劣化系统分阶段顺序预防维护策略[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 164-170.
QU Yuxiang, WU Su. Phasic sequential preventive maintenance policy based on imperfect maintenance for deteriorating systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 164-170.
- [15] LIU Y, HUANG H Z. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(2): 356-367.
- [16] HE K, MAILLART L M, PROKOPYEV O A. Scheduling preventive maintenance as a function of an imperfect inspection interval[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(3): 1-15.
- [17] SHEU S H, CHANG C C. An extended periodic imperfect preventive maintenance model with age-dependent failure type[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(2): 397-405.
- [18] DLT 861-2004 电力可靠性基本名词术语[S]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2004.
- [19] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.
- [20] 汲国强, 张伯明, 吴文传, 等. 一种适用于可靠性评估的电网设备时变停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 56-62.
JI Guoqiang, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. A new time-varying component outage model for power system reliability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 56-62.
- [21] SUMEREDER C. Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2008, 15(3): 678-685.

收稿日期: 2016-02-01; 修回日期: 2016-05-10

作者简介:

邓奥攀(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性分析; E-mail: aopandeng@163.com

胡志坚(1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zhijian_hu@163.com

胡美玉(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划运行。E-mail: 850488263@qq.com

(编辑 姜新丽)