

考虑天气变化的输电系统可靠性评估

王磊¹, 赵书强¹, 张明文²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003;

2. 河北省电力公司, 河北省 石家庄市 050021)

Reliability Evaluation of Transmission System Considering Weather Change

WANG Lei¹, ZHAO Shuqiang¹, ZHANG Mingwen²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;

2. Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050021, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The evaluation result of power system reliability is greatly influenced by weather changing and conventional method to deal with weather changing is to modify the average failure rates of power components according to the average value of weather conditions to obtain average failure rate under different weather situations, however there is uncertainty in failure rate and weather condition. To take the influence of uncertainty of failure rate and weather condition on reliability evaluation result into account, based on the reliability evaluation by tri-state weather model, the uncertainty of failure rate and weather condition is dealt with by connection number. According to the algorithm of connection number the reliability evaluation of transmission system is performed to obtain the reliability index with the form of connection number. The results of reliability evaluation of transmitting parts of IEEE-RBTS show that the proposed method can reflect the combined influence of failure rate and weather condition on reliability index, thus the reasonableness and effectiveness of the proposed method are verified.

KEY WORDS: transmission system; reliability evaluation; uncertainty; connection number; weather model

摘要: 电力系统可靠性评估的结果受天气变化的影响很大。常规处理天气变化的方法是根据天气情况的平均值对元件的平均故障率进行修正, 得出不同天气状态下的平均故障率。但是故障率和天气情况均具有不确定性。为了考虑故障率和天气情况的不确定性对可靠性评估结果的影响, 在 3 态天气模型可靠性评估的基础上, 运用联系数处理故障率和天气情况的不确定性。根据联系数运算法则进行输电系统可靠性评估, 得到具有联系数形式的可靠性指标。通过评估 IEEE-RBTS 输电部分的可靠性表明, 提出的方法能够反映故障率和天气情况的不确定性对可靠性指标的综合影响, 证明了该方法的合理性和有效性。

关键词: 输电系统; 可靠性评估; 不确定性; 联系数; 天气模型

0 引言

输电系统可靠性评估是电力系统可靠性分析的重要组成部分。电力系统可靠性评估是其规划、设计、运行和维修的重要标尺之一。对输电网进行准确、快速的可靠性分析, 会给规划和运行人员提供重要的参考信息, 以保证电网能安全、经济、优质、可靠地运行^[1-5]。

电力系统可靠性评估方法建立在元件可靠性原始参数基础上。人们在进行输电系统可靠性计算时多采用单一的平均值作为元件可靠性参数, 但这些参数随运行环境不同而差别很大, 直接用平均值进行可靠性计算与实际情况会有较大差别。经验表明, 恶劣天气条件下元件发生故障的可能性将大大增加, 由于电力系统输电线路特别是长距离高压输电线路长期处在复杂的天气环境中, 其故障的发生受天气变化的影响很大, 因此元件的故障率是其所处天气状态的函数^[6]。

常规处理可靠性评估中天气变化的方法是根据天气情况对元件的故障率进行修正, 得出元件在不同天气下的故障率。对故障率的修正采用当地几个日历年天气情况的平均值进行修正, 这在历年天气条件变化很小的情况下是允许的, 但是当几个日历年天气条件变化存在明显波动时, 用天气情况的平均值对故障率进行修正会引起偏差, 不能反映天气情况变化对可靠性指标的影响。因此本文在 3 态天气模型输电系统可靠性评估的基础上, 运用联系数处理故障率和天气情况的波动。

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BAA14B05)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2008BAA14B05).

1 考虑天气因素的元件可靠性参数模型

1.1 多态天气下元件可靠性参数修正模型

输电系统的大部分设备在户外运行,特别是架空线路,受雷雨、冰雹、大雾等天气的影响特别大,因此需要在多态天气下考虑元件的可靠性参数。

将统计期的天气情况分为 n 种情况,设元件的平均故障率为 λ_{avg} ,在第 j 态天气元件的故障率为 λ^j ,则有

$$\lambda_{\text{avg}} = \frac{\text{元件全年的故障次数}}{\text{全年统计时间}} \quad (1)$$

$$\lambda^j = \frac{\text{第 } j \text{ 态天气下元件的故障次数}}{\text{第 } j \text{ 态天气的持续时间}} \quad (2)$$

由式(1)(2)可得

$$\lambda^j = \frac{\sum_{j=1}^n \text{第 } j \text{ 态天气下元件的故障次数}}{\text{全年统计时间}} = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda^j \cdot \text{第 } j \text{ 态天气的持续时间}}{\text{全年统计时间}} \quad (3)$$

设 P_j 为第 j 态天气持续时间占全年统计时间的百分比,则有

$$P_j = \frac{\text{第 } j \text{ 态天气的持续时间}}{\text{全年统计时间}} \quad (4)$$

由式(3)(4)可得

$$\lambda_{\text{avg}} = \sum_{j=1}^n P_j \lambda^j \quad (5)$$

式(5)即为多态天气模型下故障率的修正模型^[7]。

1.2 多态天气模型中元件可靠性参数的获取

求解多态天气模型元件的可靠性参数时,关键是如何求得第 j 态天气下某类元件故障率 λ^j ,通常会得到某类元件的平均故障率 λ_{avg} 。设 F_j 表示某类元件在第 j 态天气下发生的故障占全年总故障次数的百分比,则由式(1)(4)可推出

$$\lambda^j = \lambda_{\text{avg}} F_j / P_j \quad (6)$$

通常处理天气因素的方法是把天气分为 2 种状态或者 3 种状态。2 种状态是把天气分为正常天气和坏天气,3 种状态是把天气分为正常天气、坏天气和恶劣天气。我国地域广阔,个别地区天气差别很大,因此本文采用 3 态天气模型处理天气因素,令上述公式中 n 取 3 即可^[7]。

上述公式中 λ_{avg} 、 F_j 和 P_j 的求取通常是用几个日历年统计结果的平均值,这样处理忽略了故障率和天气情况的不确定性,认为每年的故障率和天气情况是不变的,不符合客观情况。为了考虑故障率

和天气情况的波动对可靠性评估结果的影响,本文用联系数处理几个日历年的 λ_{avg} 、 F_j 和 P_j 。

2 联系数理论

2.1 联系数的概念

集对分析^[8]由赵克勤于 1989 年提出,目前已受到国内学术界的重视。集对分析的核心思想是把不确定性与确定性作为一个系统来进行数学处理和辩证分析,引进既确定又不确定的联系数来系统地处理由随机、模糊、不确定和中介等不确定性所导致的综合不确定性问题^[9-11]。联系数的意义不仅在于把一个具体的数与这个数所在的范围联系起来,更在于把一个具体的数与它所在范围内的确定性与不确定性联系起来,使得一定范围内的确定性与不确定性的相互联系、渗透、制约与转化在数量上得到客观地反映。联系数有不同的表达式,本文仅考虑 $a+bi$ 形式的联系数。

定义 设 $u=A+Bi$,称 u 为联系数,其中 A 为联系数的确定部分, Bi 为联系数的不确定部分, i 为不确定量, $i \in [-1,1]$,但需要根据具体情况取值, i 与 B 一起决定对 A 的修正方向和修正数值^[10]。

例 1 某工序在正常情况下需 48d 完成。若遇意外,最多可能延期 6d。若某种新技术在本工序中顺利使用,最多可提前 6d。因此用联系数表示该工序工期为 $48+6i$, $i \in [-1,1]$ 。如可能提前完工天数最多为 6d,可能延期完工天数最多为 4d,根据集对分析理论中关于 i 在 $[-1,1]$ 之间视不同情况不确定取值的思想仍可用 $48+6i$ 来表示该工序的工期。

2.2 联系数的运算

设 $u_1=A_1+B_1i$, $u_2=A_2+B_2i$,则联系数的加法运算公式为

$$u_1+u_2=(A_1+A_2)+(B_1+B_2)i \quad (7)$$

联系数的乘法运算公式为

$$u_1u_2=A_1A_2+A_1B_2i+A_2B_1i+B_1B_2i^2 \quad (8)$$

由于不确定性相对于确定性而言是不确定的,因此集对分析规定在不计不确定性层次性的条件下,不确定数 i 的各次幂仍记为不确定数 i ,即有

$$i=i^2=i^3=\dots=i^n \quad (9)$$

综合式(8)(9)可得 2 个 $A+Bi$ 联系数相乘的结果仍可化为 $A+Bi$ 形式。即

$$u_1u_2=A_1A_2+(A_1B_2+A_2B_1+B_1B_2)i \quad (10)$$

联系数 $A+Bi$ 的加法和乘法运算满足交换律、结合律和分配律

$$u_1 + u_2 = u_2 + u_1 \quad (11)$$

$$u_1 u_2 = u_2 u_1 \quad (12)$$

$$u_1 + (u_2 + u_3) = (u_1 + u_2) + u_3 \quad (13)$$

$$u_1(u_2 u_3) = (u_1 u_2) u_3 \quad (14)$$

$$u_1(u_2 + u_3) = u_1 u_2 + u_1 u_3 \quad (15)$$

联系数的减法运算公式为

$$u_1 - u_2 = (A_1 - A_2) + [\max(B_1, B_2)]i \quad (16)$$

该定义说明 2 个相同的联系数之差不等于零；

即使 $A_1 - A_2 = 0$ ，但不确定性仍然存在。

联系数的除法运算公式为

$$u_2 / u_1 = A_2 / A_1 + (B_2 - \frac{A_2 B_1}{A_1})i / (A_1 + B_1) \quad (17)$$

设有联系数 $u = A + Bi$ ，则联系数的平方根运算公式为

$$\sqrt{u} = \sqrt{A + Bi} = \sqrt{A} + (-\sqrt{A} \pm \sqrt{A + B})i \quad (18)$$

设有联系数 $u_1 = A_1 + B_1 i$ ， $u_2 = A_2 + B_2 i$ ，...

$u_n = A_n + B_n i$ ，则联系数的均值运算公式为

$$U = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n A_k + i \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n B_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

式中 U 为 n 联系数的平均值^[8]。

3 可靠性评估流程

3.1 原始数据处理

对系统元件原始参数的来源情况加以分析，进行适当处理，用相匹配的联系数表示原始参数。假设共有 n 年的统计数据，每年的统计数据包括所有元件(共有 m 个元件)的 λ_{avg} 、 F_j 和 P_j ，由于每年的天气情况不同，使得每年收集到的 λ_{avg} 、 F_j 和 P_j 存在一定的差异，这时需要用联系数的原理将 λ_{avg} 、 F_j 和 P_j 表示成联系数的形式。

具体做法是：设第 $t(0 \leq t \leq n)$ 年第 $k(0 \leq k \leq m)$ 个元件的上述 3 个参数分别表示成 $\lambda_{k,t}$ 、 $F_{k,j,t}$ 和 $P_{j,t}$ ，通过下列公式将某个元件 n 年的数据转换为联系数形式

$$\tilde{\lambda}_k = \bar{\lambda}_k + \max(|\lambda_{k,\text{max}} - \bar{\lambda}_k|, |\lambda_{k,\text{min}} - \bar{\lambda}_k|)i \quad (20)$$

$$\tilde{F}_{k,j} = \bar{F}_{k,j} + \max(|F_{k,j,\text{max}} - \bar{F}_{k,j}|, |F_{k,j,\text{min}} - \bar{F}_{k,j}|)i \quad (21)$$

$$\tilde{P}_j = \bar{P}_j + \max(|P_{j,\text{max}} - \bar{P}_j|, |P_{j,\text{min}} - \bar{P}_j|)i \quad (22)$$

式中： $i \in [-1, 1]$ ； $\tilde{\lambda}_k$ 为元件 k 故障率的联系数形式； $\bar{\lambda}_k$ 为元件 k 的 n 个故障率的均值； $\lambda_{k,\text{max}}$ 为元件 k 的 n 个故障率中的最大值； $\lambda_{k,\text{min}}$ 为元件 k 的 n 个故障率中的最小值； $\tilde{F}_{k,j}$ 为元件 k 的 F_j 的联系数形式； $\bar{F}_{k,j}$ 为元件 k 的 n 个 F_j 的均值； $F_{k,j,\text{max}}$ 为元件 k 的 n 个 F_j 的最大值； $F_{k,j,\text{min}}$ 为元件 k 的 n 个 F_j 的最小值； \tilde{P}_j 为 P_j 的联系数形式； \bar{P}_j 为 n 个 P_j 的均值；

$P_{j,\text{max}}$ 为 n 个 P_j 的最大值； $P_{j,\text{min}}$ 为 n 个 P_j 的最小值； \max 为求最大值。

在上述公式中， i 的变化区间很好地描述了 n 年中 $\lambda_{k,t}$ 、 $F_{k,j,t}$ 和 $P_{j,t}$ 的可能取值情况，当 $i=1$ 或者 $i=-1$ 时，表示取 n 年中 $\lambda_{k,t}$ 、 $F_{k,j,t}$ 和 $P_{j,t}$ 的最大值或者最小值。通过上述公式得到第 k 个元件的 $\tilde{\lambda}_k$ 、 $\tilde{F}_{k,j}$ 和 \tilde{P}_j ，然后运用式(6)就可以得到第 k 个元件在第 j 态天气下的故障率 $\tilde{\lambda}_k^j$ 。

3.2 系统状态选择

系统状态选取方法包括枚举法和蒙特卡洛法。这些方法已成功地运用于发电、发输电系统可靠性评估中。蒙特卡洛法(包括序贯蒙特卡洛和非序贯蒙特卡洛)基于概率论，能够成功使用在于系统发电部分的故障率比较大，进行系统采样时能够形成多重故障，利于可靠性指标的累计，从而可以得到准确的评估结果。而单纯输电部分的故障率比较小，进行系统采样时很难形成多重故障，不利于可靠性指标的累计，评估结果会严重偏离实际可靠性指标。故本文在选取系统状态时采用枚举法。

系统状态选取包括对线路、变压器和母线等元件状态的选取。为提高可靠性评估的计算速度，忽略对可靠性指标贡献较小的事件^[12]。系统元件中线路、变压器和母线的故障是不可忽略的事件，其他元件的故障属于贡献较小的事件，故进行系统状态选取时只对线路、变压器和母线的状态进行选取。

3.3 系统状态分析

采用枚举法对系统所有元件进行状态选取之后，可能会引起系统网络拓扑结构与初始状态相比发生很大变化，需要重新进行连通性分析以搜索系统网络连通块数(电气孤岛数)以及每个连通块内元件的连通情况。进行网络拓扑分析的方法有深度优先算法和广度优先算法，本文采用深度优先算法^[13]进行网络拓扑分析。

正常状态下，因机组和线路的容量相对于负荷有一定的裕度，故不会出现切负荷的情况。但如果系统中出现了元件的停运故障，会使电网的输电能力下降，此时应最大程度地减小负荷切除功率。求解最小切负荷的数学模型采用文献[14]中的方法。

3.4 系统可靠性指标计算

进行系统状态选取和系统状态分析之后，要计算系统的可靠性指标。根据文献[15]中常规的系统可靠性指标计算公式可得到本文考虑天气变化的

系统可靠性指标计算公式。

$$P_{PLC} = \sum_{j=1}^3 P_{PLC}^j = \sum_{j=1}^3 P_j \sum_{F_i^j \in F^j} P_{rob}(F_i^j) \quad (23)$$

$$F_{LOL} = \sum_{j=1}^3 F_{LOL}^j = \sum_{j=1}^3 P_j \sum_{F_i^j \in F^j} F_{re}(F_i^j) \quad (24)$$

$$W_{EENS} = \sum_{j=1}^3 W_{EENS}^j = \sum_{j=1}^3 P_j \times 8760 \sum_{F_i^j \in F^j} P_{rob}(F_i^j) D_{NS}(F_i^j) \quad (25)$$

式中： P_{PLC}^j 为第 j 态天气下的电力不足概率； F^j 为第 j 态天气下的系统失效事件集； F_i^j 为第 j 态天气下的失效事件； $P_{rob}(F_i^j)$ 为第 j 态天气下的系统故障状态 F_i^j 的出现概率； F_{LOL}^j 为第 j 态天气下的电力不足频率； $F_{re}(F_i^j)$ 为第 j 态天气下从故障系统状态 F_i^j 经过一次状态转移就能够穿过边界墙并到达正常系统状态的所有转移频率的总和； W_{EENS}^j 为第 j 态天气下的电力不足期望值； $D_{NS}(F_i^j)$ 为第 j 态天气下在故障系统状态 F_i^j 时，由于输电设备没有充足的容量满足所有负荷需求而引起的电力不足。上述公式中各变量除 F^j 、 F_i^j 和 $D_{NS}(F_i^j)$ 外均为联系数形式。

通过以上分析可以得到考虑天气变化的输电系统可靠性评估的算法流程图，如图 1 所示。

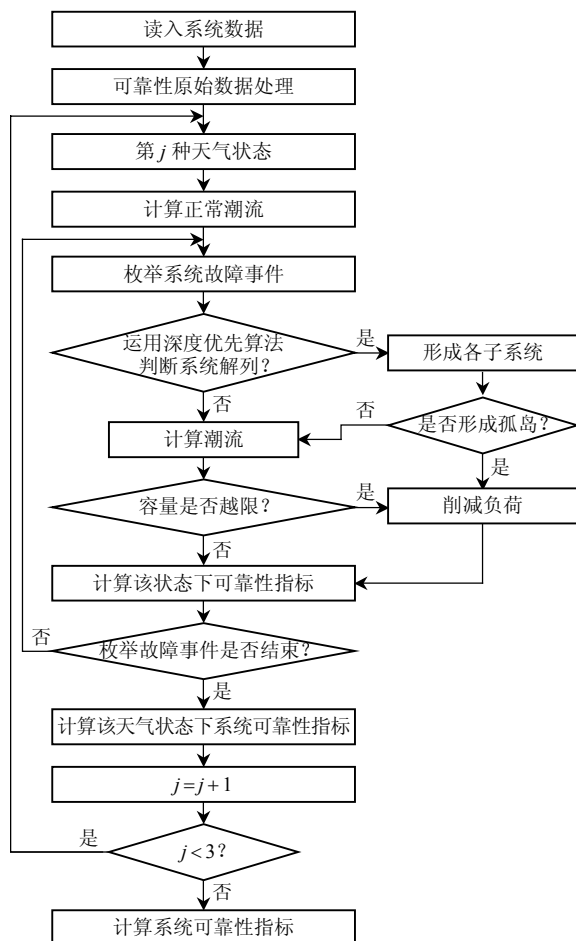


图 1 算法流程

Fig. 1 Flow chart of algorithm

4 算例分析

根据上述提出模型算法，对 IEEE-RBTS^[16]可靠性测试系统的输电部分进行可靠性评估，系统状态的选取采用状态枚举法，元件故障考虑到 2 重故障，忽略 3 重及其以上故障。假设线路、变压器和母线的平均故障率在文献[16]的基础上存在 5% 的偏差，假设通过对几个历年度的数据分析得出正常天气、坏天气、恶劣天气持续时间百分比的平均值分别为 90%、9.9%、0.1%，在此基础上存在 5% 的偏差。假设故障发生在正常天气、坏天气、恶劣天气下的百分比分别为 50%、45%、5%，在此基础上也存在 5% 的偏差。通过编程进行可靠性评估，并与运用常规可靠性评估方法(方法 1)得到的结果和运用常规考虑天气变化的可靠性评估方法(方法 2)得到的结果进行比较，如表 1 所示。

表 1 IEEE-RBTS 评估结果

Tab. 1 Result of IEEE-RBTS evaluation

可靠性指标	方法 1	方法 2	本文方法
P_{PLC}	5.3276×10^{-3}	5.2560×10^{-3}	$(5.2560 + 0.9477i) \times 10^{-3}$
$F_{LOL}/(\text{次/a})$	4.5593	4.2688	$4.2688 + 0.7200i$
$W_{EENS}/(\text{MW}\cdot\text{h/a})$	252.2673	264.6057	$264.6057 + 51.3945i$

通过表 1 中方法 1 和方法 2 的评估结果可以看出，不考虑天气情况影响和考虑天气情况影响进行可靠性评估的结果之间存在一定的偏差，其中 P_{PLC} 的偏差为 1.34%， F_{LOL} 的偏差为 6.37%， W_{EENS} 的偏差为 4.89%，偏差较大，说明天气情况的影响是可靠性评估中需要的因素，不能忽略。从本文方法的评估结果可以发现，当平均故障率、 F_j 和 P_j 存在 5% 的偏差时，可靠性评估结果中不确定部分占确定部分的百分比分别为 18.03%、16.87% 和 19.42%，说明故障率和天气情况的不确定性对可靠性评估结果的影响是非常明显的，因此故障率和天气情况的不确定性是必须要考虑的因素。如果原始参数存在更大的偏差，则可靠性评估结果中的不确定部分所占比例会更大。

比较方法 2 和本文方法的评估结果可以发现，方法 2 的评估结果只是本文方法评估结果的确定部分，即当 $i=0$ 时本文方法的评估结果，所以方法 2 的评估结果可以认为是本文方法评估结果的特殊情况，本文方法的评估结果包含方法 2 的评估结果。

故障率的波动以及天气情况的变化导致可靠性评估结果具有不确定性，本文方法的评估结果通过调整 i 的不同取值能够体现可靠性评估结果不确定性的动态波动，本文方法的评估结果包含了可靠

性指标的所有可能值。令 $i=1$ 和 $i=-1$, 可以得到可靠性指标的最大值和最小值。

5 结论

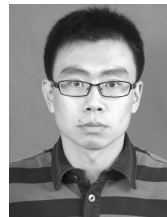
1) 可靠性评估中天气情况的影响是必须要考虑的因素, 故障率、 F_j 和 P_j 的不确定性也是必须要考虑的因素, 即使原始参数存在较小的偏差, 对评估结果的影响也是比较明显的。

2) 原始参数和评估结果的不确定性以联系数的形式表示, 这是很有意义的。一方面是根据工程需要, 对不确定性有确定的度量, 以表示不确定性的大小; 另一方面, 系统中的不确定性通常不是静止的, 而是动态的, 通过调整 i 的不同取值可以体现出不确定性的动态波动。

3) 用联系数处理原始参数的不确定性, 不需要已知原始参数服从的概率分布, 并且可以保持数据的完整性。这是联系数评估相对其他评估的明显优势, 从而可以减少人为主观因素的影响, 使评估结果更客观。

参考文献

- [1] 张鹏, 王守相. 电力系统可靠性经济评估的区间分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 71-77.
Zhang Peng, Wang Shouxiang. Novel interval methods in power system reliability economics[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 71-77(in Chinese).
- [2] 吴素农, 吴文传, 张伯明. 考虑传输容量约束的配电网可靠性快速评估[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 21-25, 41.
Wu Sunong, Wu Wenchuan, Zhang Boming. An efficient reliability evaluation method for distribution system with transmission capacity constraints[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 21-25, 41(in Chinese).
- [3] 王遂, 任震, 蒋金良. 混合法在高压直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 42-46.
Wang Sui, Ren Zhen, Jiang Jinliang. Application of hybrid reliability evaluation method for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 42-46(in Chinese).
- [4] 贾燕冰, 严正. 基于改进快速排序法的发电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 144-148.
Jia Yanbing, Yan Zheng. An improving fast sorting technique for generating system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 144-148(in Chinese).
- [5] 束洪春, 刘宗兵, 朱文涛. 基于图论的复杂配电网可靠性评估方法[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 46-49.
Shu Hongchun, Liu Zongbing, Zhu Wentao. A new method of reliability Evaluation for complex distribution network based on graph theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 46-49(in Chinese).
- [6] Billinton R. Reliability evaluation of power system[M]. London(UK): Pitman Advanced Publishing Program, 1984: 260-266.
- [7] 王新花, 唐巍. 考虑元件可靠性参数修正的配电网可靠性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 62-65.
Wang Xinhua, Tang Wei. Evaluation of distribution network reliability considering modification of component reliability parameters[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 62-65(in Chinese).
- [8] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000: 9-33.
- [9] 赵克勤, 宜爱理. 集对论: 一种新的不确定性理论方法与应用[J]. 系统工程, 1996, 14(1): 18-23.
Zhao Keqin, Yi Aili. Set pair theory: A new theory method of non define and its application[J]. Systems Engineering, 1996, 14(1): 18-23(in Chinese).
- [10] 赵克勤. 联系数及其应用[J]. 吉林师范学院学报, 1996, 17(8): 50-53.
Zhao Keqin. Connection number and its application[J]. Journal of Jilin Teachers College, 1996, 17(8): 50-53(in Chinese).
- [11] 赵克勤. 集对分析(SPA)中的联系数与不确定量[J]. 大自然探索, 1997, 16(2): 91.
Zhao Keqin. Connection number and uncertainties in the set pair analysis (SPA)[J]. Exploration of Nature, 1997, 16(2): 91(in Chinese).
- [12] 吴开贵, 吴中福. 基于灵敏度分析的电网可靠性算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 53-56.
Wu Kaigui, Wu Zhongfu. Reliability evaluation algorithm of electric power systems using sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 53-56(in Chinese).
- [13] 张硕, 李庚银, 周明. 基于序贯蒙特卡罗仿真的发电系统充裕度评估算法[J]. 中国电力, 2009, 42(7): 10-14.
Zhang Shuo, Li Gengyin, Zhou Ming. Research on adequacy evaluation algorithm of generation and transmission systems based on the sequential Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power, 2009, 42(7): 10-14(in Chinese).
- [14] 宋晓通, 谭震宇. 大型发电电组合系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 191-194.
Song Xiaotong, Tan Zhenyu. Methodology for reliability evaluation of bulk composite generation-transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 191-194(in Chinese).
- [15] 赵渊, 周家启, 刘洋. 发电电组合系统可靠性评估中的最优负荷削减模型分析[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 34-37.
Zhao Yuan, Zhou Jiaqi, Liu Yang. Analysis on optimal load shedding model in reliability evaluation of composite generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 34-37(in Chinese).
- [16] Billinton R, Kumar S, Chowdhury N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.



王磊

收稿日期: 2011-01-16.

作者简介:

王磊(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, E-mail: wl_313100@126.com;

赵书强(1964), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制;

张明文(1963), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力经济。

(责任编辑 王晔)