# 基于断开安全裕度状态空间截断的电力系统可靠性算法

万官泉[1,2]，任 震[2]，汪穗峰[1,2]，代保明[1]，吴国沛[1,2]
（1. 广州供电局，广东省广州市 510620；2. 华南理工大学电力学院，广东省广州市 510640）

**摘要**：在大型电力系统中，由支路断开触发的电力系统相继跳闸故障常会引起大停电的灾难性后果，因此必须进行紧急状态下的事件可靠性分析。通过分析支路断开对系统节点电压及线路负荷的影响，给出一种快速计算紧急状态下系统节点电压和线路负荷的方法，引入系统节点电压和线路负荷安全裕度指标，并提出基于断开安全裕度状态空间截断的电力系统可靠性算法。该算法利用安全裕度指标找出系统故障状态中的关键状态集合，通过对该集合进行系统行为分析来计算可靠性指标。算例表明该算法能有效截断系统状态空间，在一定精度下降低了可靠评估的计算复杂性。

**关键词**：电力系统可靠性；算法；安全裕度；状态截断

**中图分类号**：TM732；TM711

## 0 引言

大停电事故表明，如何评估电网在运行过程中特别是在故障状态和特殊运行方式下的可靠性水平成为电力系统面临的紧迫任务。大型电力系统可靠性研究虽已取得很大进展[1-9]，但由于其固有的计算复杂性，常难以应用于工程实际，在实际大系统中如何兼顾计算精度和速度以更好地适应实时评估（特别是要满足线路相继断开期间系统可靠性水平分析）等方面还需深入研究。不少文献提出了减少状态数的方法，如多重故障的状态合并法[2]、神经网络法[10]、状态空间截断法[11]等，但都是孤立地将多个故障简单组合，未考虑故障间的影响和严重程度，对预防由连续故障引发的安全性问题缺乏指导，具有一定的局限性，如文献[2]就没有考虑 2 个元件故障的先后关系，认为故障后果一样，而实际情况并非如此。系统范围的大停电往往与一系列线路相继断开联系在一起，线路过载支路的跳闸将引起系统潮流的重新分布，结果是线路断开导致其他线路过负荷或系统节点电压越限，但实际上支路跳闸对各输电回路造成的影响大不相同，只有少量回路有功潮流急剧增加，大部分变化很小，甚至基本不变[12]。

本文从改进预想事故评估和故障筛选技术的思想出发，通过计算线路断开后对其他节点电压及线路过负荷的影响程度，提出基于断开安全裕度的状态空间截断的可靠性算法。该算法把线路断开后安全裕度较小的元件故障状态事件筛选出来进行状态分析，减少了需评估的状态数量，进一步探索了大型电力系统可靠性工程应用方法。该算法有助于系统可靠性的实时评估，特别是线路发生相继断开期间的事件可靠性分析。

收稿日期：2006-11-20；修回日期：2007-05-01。
国家自然科学基金重点资助项目（50337010）；广东电网公司科技合作项目。

## 1 线路断开对系统节点电压和其他线路过负荷的影响分析

### 1.1 线路断开对系统节点电压的影响分析

支路 $l_{ij}$ 断开的模拟和计算过程可参见文献[13]。线路断开后电网各节点的电压增量为：

$$\Delta\dot{V}_k = (Z_{ki} - Z_{kj})\frac{Z_{lij}}{Z_{lij} - Z_{ii} - Z_{jj} + 2Z_{ij}}\dot{I}_{ij} \tag{1}$$

式中：$k=1,2,\cdots,n$。

支路 $l_{ij}$ 断开后各节点的电压为：

$$\dot{V}_k' = \Delta\dot{V}_k + \dot{V}_k \tag{2}$$

### 1.2 线路断开对其他线路负荷的影响分析

功率转移分配系数（PTDF）是指节点注入复功率的变化引起线路 $l_{ij}$ 复潮流的变化：

$$\rho_{ij\text{-}k} = \frac{\partial S_{ij}}{\partial S_k} \tag{3}$$

式中：$S_{ij}$ 为支路 $l_{ij}$ 的复潮流；$S_k$ 为节点 $k$ 的注入复功率；$\rho_{ij\text{-}k}$ 为支路 $l_{ij}$ 对节点 $k$ 的 PTDF。

在电网电压幅值约为 1 的条件下，式(3)可以表示为：

$$\rho_{ij\text{-}k} = \left(\frac{Z_{ik} - Z_{jk}}{Z_{ij}}\right)^* \tag{4}$$

式中：$Z_{ik}$，$Z_{jk}$ 为阻抗矩阵的元素（复数）；$Z_{ij}$ 为支路 $l_{ij}$ 的阻抗（复数）；* 表示求共轭。

取式(4)实部，得到改进的 PTDF：

$$\rho_{ij\text{-}k}{}' = \frac{r_{ij}(R_{ik} - R_{jk}) + x_{ij}(X_{ik} - X_{jk})}{|Z_{ij}|^2} \tag{5}$$

通过式(5)得到节点注入有功变化时对支路上有功潮流的影响为:

$$\Delta P_{ij} = \sum_{k=1}^{N_B} \rho_{ij\text{-}k}{}' \Delta P_k \tag{6}$$

式中:$\Delta P_k$ 为节点 $k$ 的注入有功变化;$\Delta P_{ij}$ 为支路 $l_{ij}$ 上有功潮流的变化;$N_B$ 为节点数。

由此求得线路断开后支路 $l_{ij}$ 的有功潮流为:

$$P_{ij}{}' = P_{ij} + \Delta P_{ij} \tag{7}$$

式(7)是线路断开后支路有功潮流的精确计算,在实际工程应用中,特别是为了能有效预防连锁过载,快速通观全局,执行在线实时紧急状态安全分析,判断过载线路切除后是否会引起其他线路进一步过载,可以采取非精确计算。出于在线分析和计算速度的需要,本文参考文献[12]的思想给出一种单一线路过载的分析模型,这种模型基于直流潮流的分布系数法,不需要求解网络方程,可以直接计算系统中各支路功率的增量,计算速度快,尤其适用于紧急状态下的安全性快速分析,分析多条线路时可以按分析单条线路断开的方法进行。

设电网共有 $n$ 个节点,$m$ 条线路,断开其中一条过载线路 $L_i$,断开前该线路的有功潮流为 $P_i^{(0)}$,系统中其他任一条支路 $L_j$ 不过载的约束为:

$$P_j^{(i)} = P_j^{(0)} + \beta_j^{(i)} P_i^{(0)} \leqslant P_{j,\max} \tag{8}$$

式中:$P_j^{(i)}$ 为支路 $L_i$ 断开后线路的有功潮流;$P_j^{(0)}$ 为支路 $L_i$ 断开前线路的有功潮流;$\beta_j^{(i)}$ 为支路 $L_i$ 断开引起线路 $L_j$ 潮流增加的有功潮流分布系数;$P_{j,\max}$为线路 $L_j$ 的最大允许有功热极限。

设支路 $L_i$ 与线路$L_j$ 端节点分别为 $a$,$b$ 和 $c$,$d$,则 $\beta_j^{(i)}$ 可以表示为:

$$\beta_j^{(i)} = \frac{x_{ab}(X_{ca} - X_{cb} - X_{da} + X_{db})}{x_{cd}(x_{ab} - X_{aa} - X_{bb} + 2X_{ab})} \tag{9}$$

式中:$x_{ab}$,$x_{cd}$ 分别为线路 $L_i$,$L_j$ 的电抗;$X_{ca}$,$X_{cb}$,$X_{da}$,$X_{db}$,$X_{aa}$,$X_{bb}$,$X_{ab}$是支路 $L_i$ 断开前节点电抗矩阵 $\boldsymbol{X}$ 中的对应元素。

在系统发生元件过载的紧急状态下,利用过载前的电抗矩阵 $\boldsymbol{X}$ 快速计算分布系数,根据式(8)判别出过载线路 $L_i$ 断开是否会引起其他线路进一步过载。已知网络电抗矩阵时,式(9)可以避免繁琐的潮流计算,计算速度相当快。

## 2 基于断开安全裕度状态空间截断的电力系统可靠性算法

### 2.1 线路元件断开的安全裕度计算

线路等元件断开会引起系统部分节点电压越限或线路过负荷,理论上进行断开后系统潮流计算时,节点电压和支路负荷必须满足的潮流约束为 $V_{\min} \leqslant V_k{}' \leqslant V_{\max}$,$P_j{}' \leqslant P_{j,\max}$。而实际上为了保证发生元件断开后系统的正常运行,有效预防线路相继断开的连锁过载,通常许多电力部门为节点电压和线路负荷都留有一定的裕度,并通过设置相应的继电保护整定值来防止事故发生。为此,本文引入节点电压和线路负荷安全裕度的概念。

1)节点电压安全裕度:指各种情况下为了保证系统安全运行,节点电压允许变化的范围,用 $\lambda_k^v$ 来表示:

$$\lambda_k^v = \min\left(\frac{V_{k,\max}}{V_k{}'}, \frac{V_k{}'}{V_{k,\min}}\right) = \min\left(\frac{V_{k,\max}}{V_k + \Delta V_k}, \frac{V_k + \Delta V_k}{V_{k,\min}}\right) \tag{10}$$

$\lambda_k^v$ 的大小取决于节点情况,正常运行时系统各节点电压严格限制在约束范围内,甚至在比约束范围更窄的区间内($\lambda_k^v \geqslant 1$),当然也有些节点允许短时间不满足电压约束运行。

2)支路负荷安全裕度:指各种情况下为了保证系统安全运行,支路允许承载的负荷大小,用 $\lambda_j^p$ 来表示,也称为支路负荷系数:

$$\lambda_j^p = \frac{P_{j,\max}}{P_j{}'} = \frac{P_{j,\max}}{P_j + \Delta P_j} \approx \frac{P_{j,\max}}{P_j^{(0)} + \beta_j^{(i)} P_i^{(0)}} \tag{11}$$

正常运行时支路的 $\lambda_j^p \geqslant 1$,其值受线路热极限等因素的影响,$\lambda_j^p < 1$ 为线路过负荷运行,其大小表示过负荷程度,为了保证线路的安全运行,必须有一定的负荷安全裕度。

设支路 $L_i$ 断开与另外 $n$ 条线路的相继故障相关,则支路 $L_i$ 断开后线路 $L_j$ 的支路负荷安全裕度可用矩阵 $\boldsymbol{\lambda}$ 来描述这一相关关系:

$$\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_{ij}]_{n\times n} \quad \lambda_{ij} \geqslant 0; i = 1,2,\cdots,n; j = 1,2,\cdots,n$$

实际系统中,$\lambda_{ij} < 1$ 的矩阵元素不多,需注意有可能 $\lambda_{ij} \neq \lambda_{ji}$;因此可通过 $\lambda_{ij}$ 来筛选可能发生的相继故障的数量。元件断开后的节点电压和线路负荷安全裕度(简称为安全裕度)是可靠性评估的状态选取的重要依据,并对系统的运行具有指导意义:

1)不同元件断开系统的安全裕度不同,这反映出元件断开对系统及其他元件安全运行的影响程度。运行时可通过安全裕度找出影响最大的元件,加强维护以提高系统的可靠性。

2)安全裕度反映了多个元件断开的相互影响程度,既可判断出元件断开造成具体是哪些节点及线路不安全,又可分析多个元件不同顺序相继断开的安全裕度(不是简单的多重组合)。通过安全裕度可找出系统已有元件断开时,最可能发生故障的元件,对此元件采取措施,防止系统故障重数增大造成大面积停电。

3)通过安全裕度可筛选出一些影响程度较大或容易引起相继断开的系统多重故障状态并进行分析，能大大减少系统评估状态数，节省评估时间。

### 2.2 基于断开安全裕度状态空间截断的电力系统可靠性算法

其基本思想为：计算元件断开后的节点电压和线路负荷安全裕度并找出所有系统故障状态中安全裕度较小的状态集合，通过对该集合进行系统行为分析，得到可靠性指标。本文通过排序并截取一定大小的安全裕度来筛选出元件断开期间影响程度较大或容易引起相继断开的系统故障状态，达到系统状态空间截断的目的，然后用交流潮流计算出可靠性指标。基于断开安全裕度的系统状态截断的可靠性算法，其优点在于选出安全裕度较小、元件断开期间影响程度较大或确实会引起相继断开的系统故障状态来计算可靠性指标，不考虑那些影响较小或不容易相继断开的状态，大大减少了需要分析的系统故障状态数，提高了评估计算速度。

## 3 实际应用及分析

应用VC++6.0和VB6.0开发系统在 Windows 平台上实现了基于断开安全裕度的系统状态截断的可靠性算法，并对广东省 2005 年500 kV主网系统进行分析。系统接线图、运行方式、元件参数、元件编号和可靠性等效框图等见华南理工大学任震、万官泉、黄金凤编写的《广东省 2005 年主网可靠性评估研究报告》。

下面以系统 $N-2$ 和 $N-3$ 故障这 2 种多重故障类型为例来说明该算法的应用(对系统 $N-3$ 故障的具体分析参见附录 A)。对系统 $N-2$ 故障安全裕度进行排序后，后 15 个指标如表 1 所示。

由表 1 可看出：支路 9，30，47 断开对系统的节点电压和线路负荷影响最大；节点 9 和 10 易受支路断开影响而发生节点电压越限；支路 9 断开会造成系统很多支路过载，说明它是最容易使系统发生连锁故障的元件，也是主网系统连锁故障中最薄弱的环节，应加强维护。直流系统的支路 47 对主网的影响也较大，须密切关注其运行情况。支路 9 断开时支路 10 过负荷最严重，说明它们是最容易使系统发生$N-2$故障的支路，是防止系统发生多重故障的重点关注对象，因此要特别提高这些支路的运行可靠性，防止系统故障加重，发生大面积停电事故。支路 9，30，47 先发生故障造成系统进一步发生 $N-2$ 故障的可能性最大，实际运行中必须加强在这些支路故障情况下所影响的支路的维护工作。

**表 1 系统 $N-2$ 故障的计算结果**

**Table 1 Calculation result of system $N-2$ fault**

| 节点电压安全裕度 | | 线路负荷安全裕度 | |
|---|---|---|---|
| 断开支路 $i$ | 节点电压 $\lambda_k^v$ | 支路 $i$-$j$ | 线路负荷 $\lambda_j^p$ |
| 9 | 0.832($k=10$) | 9-10 | 0.548 |
| 47 | 0.846($k=44$) | 30-18 | 0.576 |
| 30 | 0.846($k=28$) | 47-30 | 0.591 |
| 9 | 0.849($k=8$) | 9-47 | 0.623 |
| 18 | 0.851($k=19$) | 9-29 | 0.627 |
| 29 | 0.855($k=30$) | 29-30 | 0.632 |
| 9 | 0.858($k=9$) | 9-18 | 0.634 |
| 47 | 0.859($k=45$) | 47-12 | 0.641 |
| 30 | 0.862($k=29$) | 47-29 | 0.649 |
| 42 | 0.877($k=41$) | 30-34 | 0.656 |
| 12 | 0.893($k=10$) | 30-47 | 0.658 |
| 11 | 0.909($k=10$) | 9-42 | 0.673 |
| 30 | 0.913($k=31$) | 11-18 | 0.687 |
| 34 | 0.962($k=32$) | 30-29 | 0.690 |
| 10 | 0.982($k=9$) | 30-26 | 0.695 |

表 2 为系统 $N-2$ 故障中部分支路断开对其他支路影响的 $\boldsymbol{\lambda}$ 矩阵。从表中可知安全裕度与支路故障顺序有关，因此可根据安全裕度来安排支路计划检修顺序。

**表 2 系统 $N-2$ 故障中支路断开的影响情况**

**Table 2 Influence of branch open of system $N-2$ fault**

| 影响支路号 | $\lambda_j^p$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $L_9$ 断开 | $L_{30}$ 断开 | $L_{47}$ 断开 | $L_{29}$ 断开 |
| $L_9$ | | 0.723 | 0.708 | 0.697 |
| $L_{30}$ | 0.701 | | 0.591 | 0.632 |
| $L_{47}$ | 0.623 | 0.658 | | 0.711 |
| $L_{29}$ | 0.627 | 0.690 | 0.649 | |
| $L_{18}$ | 0.634 | 0.576 | 0.734 | 0.715 |
| $L_{11}$ | 0.709 | 0.742 | 0.807 | 0.729 |
| $L_{26}$ | 0.796 | 0.695 | 0.810 | 0.696 |
| $L_{12}$ | 0.703 | 0.801 | 0.641 | 0.804 |

支路故障先后顺序造成安全裕度不同的原因在于，当某条线路故障时，它将引发系统一些非线性环节的变化，如可能导致某些发电机达到无功输出极限或导致某些有载分接开关的变比发生调整等。因此，即使前后故障的元件集合完全相同，故障顺序不同时影响也会不同，传统基于 $N-m$ 准则组合考虑元件故障的方法无法考虑这一点。表 3 给出了基于安全裕度来筛选可能发生的相继故障的关键影响支路，只列出了 $L_9$ 和 $L_{30}$ 断开的情况。从表 3 可以看出，不同安全裕度对系统故障状态空间有很大的影响。当 $\boldsymbol{\lambda}$ 已知后，在影响支路的搜索过程中，只有当 $\boldsymbol{\lambda}$ 小于某一阈值时，它才会被选为关键影响支路，所以不论系统规模大小，影响支路的搜索工作都被限制在一个很小的范围内，这样需要分析的故障状态数就很少，计算量也相应减少。

表 3 基于 $\lambda$ 的系统 $N-2$ 故障状态空间截断
Table 3 State space pruning of system $N-2$ fault based on $\lambda$

| 断开支路 | $\lambda_j^p$ | 影响支路 |
|---|---|---|
| $L_9$ | <0.700 | $L_{47}, L_{29}, L_{18}$ |
| | <0.710 | $L_{47}, L_{29}, L_{18}, L_{30}, L_{11}, L_{26}, L_{12}$ |
| $L_{30}$ | <0.700 | $L_{47}, L_{29}, L_{18}, L_{26}$ |
| | <0.750 | $L_{18}, L_{47}, L_{29}, L_{26}, L_9, L_{11}$ |

注:若取 $\lambda_j^p<0.780$,则此时系统的部分二重故障为:$L_9$-$L_{30}$,$L_9$-$L_{47}$,$L_9$-$L_{29}$,$L_9$-$L_{18}$,$L_9$-$L_{11}$,$L_9$-$L_{12}$,$L_{30}$-$L_{18}$,$L_{30}$-$L_{47}$,$L_{30}$-$L_{29}$,$L_{30}$-$L_{26}$,$L_{30}$-$L_9$,$L_{30}$-$L_{11}$。

表 4 给出了通过断开安全裕度来判断薄弱环节并与后果分析后的结论进行比较的情况,结果表明安全裕度和后果分析方法判断系统前 10 个薄弱环节的效果一样,且后面的误判率变化不大。产生误判的原因可能是计算分布系数时采取了非精确计算,特别是当 $\lambda_j^p<1.427$ 时,把部分没有过负荷但不允许重载的线路也当成了薄弱环节。安全裕度方法虽然存在误判薄弱环节,但误判率不大且分析系统薄弱环节的时间较少(后果分析需要进行潮流和稳定分析,安全裕度方法不需要),尤其适合分析支路断开后系统的薄弱支路。表 5 所示为应用本文算法的计算结果。

表 4 薄弱环节计算结果对比
Table 4 Calculation result of weakness part

| 薄弱环节数 | $\lambda_j^p$ | 误判率/(%) |
|---|---|---|
| 10 | 0.650 | 0 |
| 60 | 0.850 | 1.21 |
| 100 | 0.950 | 1.98 |
| 150 | 1.427 | 2.1 |

表 5 广东主网系统可靠性计算结果
Table 5 Reliability result of the main power network of Guangdong Province

| 计算方法 | 缺电概率 | 电量不足期望值 | 计算时间/s |
|---|---|---|---|
| 选择 $\lambda$ 值较小的 50 个故障状态 | 0.019 623 | 324 461 | 121 |
| 选择 $\lambda$ 值较小的 80 个故障状态 | 0.019 637 | 324 487 | 137 |
| 选择 $\lambda$ 值较小的 100 个故障状态 | 0.019 639 | 324 563 | 154 |
| 选择 $\lambda$ 值较小的 150 个故障状态 | 0.019 641 | 324 584 | 213 |
| 常规方法 | 0.019 646 | 324 587 | 18 064 |

由表 5 可知,各种方法的评估结果与常规方法相差不大,但计算时间却大大减少,因此可通过选择合适的截断值来截断故障状态,既能减少系统分析的状态数以节省时间,又能使可靠性计算达到所要求的精度。从表 5 结果的变化趋势来看,选取的故障状态数越多,则计算时间越长,而系统指标在一定条件下变化不大,因此应用表明本文方法尤其适用于分析多重故障。

## 4 结语

元件断开后节点电压和线路负荷安全裕度可反映出电力系统薄弱环节,为提高电网运行可靠性提供关键信息,并为运行人员提供指导性建议。通过截断安全裕度指标,可找出所有故障状态中对系统可靠性影响较大的状态集合,并只对该集合进行分析,能达到系统状态截断的目的,协调可靠性计算的速度和精度。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

## 参考文献


[1] 任震,谌军,黄雯莹,等.大型电力系统可靠性评估的模型和算法.电力系统自动化,1999,23(5):25-34.
REN Zhen, CHEN Jun, HUANG Wenying, et al. Model and algorithm of reliability evaluation for large power systems. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 25-34.

[2] 程林,郭永基.可靠性评估中多重故障算法的研究.清华大学学报,2001,41(3):69-72.
CHENG Lin, GUO Yongji. Study of the multi-fault assessment algorithm in reliability evaluation. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(3): 69-72.

[3] 别朝红,王锡凡.复杂电力系统一类连锁反应事故可靠性评估初探.电力系统自动化,2001,25(15).
BIE Zhaohong, WANG Xifan. Studies on cascading faults of complicated power systems. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15).

[4] 别朝红,王锡凡.复杂电力系统一类连锁反应事故可靠性评估模型和算法.电力系统自动化,2001,25(10):30-34.
BIE Zhaohong, WANG Xifan. Studies on models and algorithms of reliability evaluation for cascading faults of complicated power systems. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 30-34.

[5] 张沛.基于概率的可靠性评估方法.电力系统自动化,2005,29(4):92-96.
ZHANG Pei. Reliability evaluation methods based on probability. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 92-96.

[6] 任震,梁振升,黄雯莹.交直流混合输电系统可靠性指标的灵敏度分析.电力系统自动化,2004,28(14):33-40.
REN Zhen, LIANG Zhensheng, HUANG Wenying. Sensitivity analysis of AC/DC hybrid transmission system reliability indices. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 33-40.

[7] 任震,陈碧云.一类复杂输电网络的改进可靠性评估模型.电力系统自动化,2005,29(5):26-30.
REN Zhen, CHEN Biyun. Improved reliability evaluation model for complex transmission networks. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 26-30.

[8] 万官泉,任震,汪穗峰,等.基于系统伪故障指标截断的电力系统可靠性算法.电力系统自动化,2004,28(10).
WAN Guanquan, REN Zhen, WANG Suifeng, et al. Reliability

evaluation algorithm of power system using system false fault indices pruning. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10).

[9] 程林,郭永基.发输电系统充裕度和安全性算法研究.电力系统自动化,2001,25(10):23-26.
CHENG Lin, GUO Yongji. New algorithm of adequacy and security evaluation for bulk power system. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 23-26.

[10] REFACEJ A, MOHANDES M, MAGHRBI H, et al. Radial basis function networks for contingency analysis of bulk power. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 772-778.

[11] SINGH C, MITRA J. Composite system reliability evaluation using state space pruning. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 471-479.

[12] 周德才,张保会,姚峰,等.基于图论的输电断面快速搜索.中国电机工程学报,2006,26(12):32-38.
ZHOU Decai, ZHANG Baohui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.

[13] 吴际舜.电力系统静态安全分析.上海:上海交通大学出版社,1985.
WU Jishun. Static security analysis of power system. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1985.

[14] ROY B, RONALD A, NORMAN R. Reliability evaluation of power systems. New York, NY, USA: Plenum Press, 1996.

万官泉(1979—),男,硕士,主要从事电力系统运行与控制等研究工作。E-mail: wanguanquan@163.com

汪穗峰(1973—),男,硕士,主要从事电力系统运行与管理等工作。

## Reliability Evaluation Algorithm of Power Systems Based on Outage Margin of Safety State Space Pruning

*WAN Guanquan*[1,2], $\boxed{\textit{REN Zhen}}$[2], *WANG Suifeng*[1,2], *DAI Baoming*[1], *WU Guopei*[1,2]

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China)

(2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In bulk power system, cascading failures initiated by branch outage events often lead to blackouts, it is necessary to carry out the event reliability analysis under emergency state. The influence of branch outages on system node voltage and line load is analyzed and a method can quickly calculate system node voltage and line load method under emergency state is introduced. The safety margin indices of node voltage and line load are also introduced. The reliability evaluation algorithm using state pruning by margin of safety is proposed. The margin of safety indices is applied to get the key states in all system fault states. Reliability indices are calculated by analyzing these key states. Some samples demonstrate its effectiveness and the computational complications of reliability analysis can be reduced.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010) and Technological Project Cooperated by China Southern Power Grid.

**Key words:** power system reliability; algorithm; margin of safety; state pruning

# 附录 A　对系统 $N$-3 故障的分析和算法的精度与误差分析

以线路负荷安全裕度截断故障状态空间为例来说明对系统 $N$-3 故障的分析，通过计算系统 $N$-3 故障的 $\lambda$ 矩阵，设置不同的 $\lambda$ 值，截断后的状态数和分析时间随截断值的变化趋势曲线如下图 A1 和图 A2 所示：

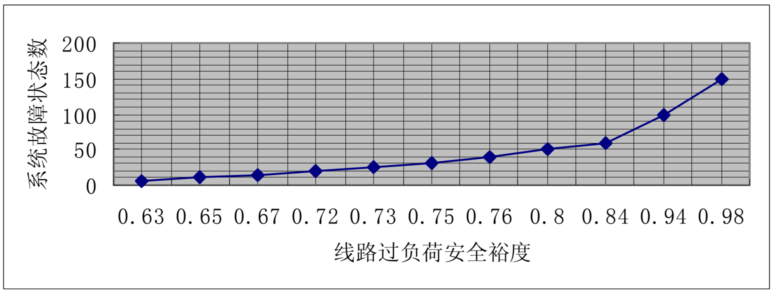


**图 A1　状态数随截断值的变化曲线**

**Fig.A1　The variety curve of state number along with pruning value**

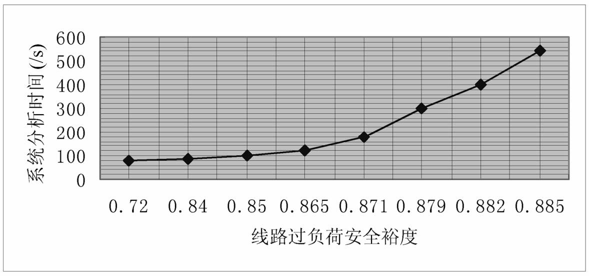


**图 A2　分析时间随截断值的变化曲线**

**Fig.A2　The variety curve of analyzing time along with pruning value**

图 A1,A2 表明基于线路过负荷安全裕度的截断方式可对系统的故障状态进行截断，在一定范围内，系统故障状态数和分析时间随截断值变化很大，截断值越小，截断后的系统故障状态数越少，计算时间也越少。实际分析时，一般只需要考虑线路的过负荷状态，然而本文方法也可兼顾线路的重负荷状态（选择较大一点的截断值即可）。从图 A1，A2 可知，如果直接采用 $N$-3 安全准则来确定系统的三级故障，则故障数很大，计算量也很大，但实际上只有很少的组合情况对系统行为分析有帮助，故采用本文方法后可大大减少计算量。计算表明，基于安全裕度的关键影响支路覆盖了绝大多数实际受影响较严重的支路。

由本文内容可知，该算法可能会带来两方面的误差，分别是：开断模拟引起的误差主要是应用开断模拟进行节点电压变化和支路负荷分析时，电压、支路功率、功率转移系数等均为近似值，特别是采用了基于直流潮流的分布系数法，减少了开断模拟支路数量；状态截取的误差主要是由于从系统全部状态空间中截取一定量的系统状态进行分析而带来的。本算法的误差处理分两方面：

1）基于直流潮流分布系数法带来的误差处理。以线路过负荷安全裕度指标计算为例，假设式（11）中 $P_j'$ 的误差为±δ，则可调整为

$$\lambda_j^p = \frac{P_{j,\max}}{P_j'} = \frac{P_{j,\max}}{P_j' \pm (P_j' \times \delta / 100)} \tag{A1}$$

经验表明，相对于精确潮流计算，基于直流潮流的分布系数法会有 10%的计算误差即 $\delta$=10，也即 $\lambda_{j(1)}^p = \dfrac{P_{j,\max}}{[0.9P_j', 1.1P_j']} = [0.91\lambda_j^p，1.11\lambda_j^p]$，而不计误差的 $\lambda_j^p < 1$ 就表示线路过负荷运行且其值越小线路过负荷越严重，当需要计及误差时，只需要将原来的 $\lambda_j^p$ 修正为 0.91 $\lambda_j^p$ 即可（因为 0.91 $\lambda_j^p$ 是 $\lambda_{j(1)}^p$ 的最小值），这样不但把所有过负荷支路包括进去甚至还把本来不过负荷的支路也模拟进去。

2）关于状态截取的误差，由于本文方法属于在损失一定精度下降低计算复杂性的研究，对于大型电力系统可靠性分析而言，计算速度和精度本身就是矛盾的，而在电力系统发生过载时，为了满足实时分析的要求，避免大停电事故，计算的快速性是第一位的，因此牺牲一定的计算精度以保证计算的快速性是合理的，当然也可以通过有效选择一定数量的关键状态集来保证某一精度的分析结果。对于在一定精度下如何选择关键状态集数量（如表 5 中的 50，80 或 100），本算法采用二分法来实现：由图 A1 可知系统故障状态数量随线路过负荷安全裕度的变化趋势较大，把 $\lambda_j^p$ 排序后，取中间大小的 $\lambda_j^p$ 并基于此值进行系统状态空间截断，计算结果精度，若此时精度小于要求的精度则继续取右半部分的 $\lambda_j^p$ 中值进行结果精度分析，否则取左半部分，依次进行下去，则可得到给定精度要求下的 $\lambda_j^p$ 和系统状态数量。为了消除误差的交互影响，本文在算法的实现过程中综合应用了上述两种处理措施，即在应用二分法选择关键状态集数量的同时，将原来的 $\lambda_j^p$ 修正为 0.91 $\lambda_j^p$。为验证方法的正确性，本文对 RTS79 和 RTS96 测试系统进行了分析，由于篇幅有限，本文只给出 RTS79 的结果。

**表 A1 RTS79 测试系统可靠性计算结果**

**Table A1 The reliability result of RTS79**

| 计算方法 | LOLP | EENS | 计算时间/S |
|---|---|---|---|
| 80个关键状态集 | 0.08133 | 109870.2 | 105 |
| 120个关键状态集 | 0.08135 | 11432.9 | 146 |
| 200个关键状态集 | 0.08131 | 113596.7 | 173 |
| 500个关键状态集 | 0.08139 | 115255.5 | 372 |
| 文献[15] | 0.08142 | 120208.3 | 198 |

表 A1 是取 $\delta = 0.1$ 并采用二分法来选择关键状态集数的计算结果，由表可知 $\lambda$ 值较小的前面一部分的关键状态集对系统可靠性指标具有决定作用，当 $\lambda$ 大于一定数值时，计算的关键状态集数和计算时间会大大增加，但指标精度变化却非常小，这表明本文算法能有效改善计算复杂性；由表还可看出，应用本文算法计算得到的结果与文献[14]基本一致，但时间却大大减少，这也验证了本文算法计算结果的正确性。