

暂态稳定概率评估的蒙特卡罗方法

李文沅¹, 卢继平²

(1. BCTC 公司, 温哥华; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆市 沙坪坝区 400044)

MONTE CARLO METHOD FOR PROBABILISTIC TRANSIENT STABILITY ASSESSMENT

LI Wen-yuan¹, LU Ji-ping²

(1. BCTC, Four Bentall Center, Vancouver, BC, Canada, V7X 1V5;

2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Shapinba Distract, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: This paper presents the basic framework of probabilistic transient stability assessment using Monte Carlo methods. The assessment requires two simulation processes: probability simulation and transient stability simulation of system states associated with fault events. The focus is placed on probability models and Monte Carlo simulation methods. The procedures for two types of studies are provided. The first one is evaluation of average system risk index due to system instability and the second one is determination of a relationship between probability of system instability and a system operation condition for a given fault. The presented method can provide useful information in secure system operation for control centers of utilities. The example given in the paper demonstrates an application of the presented method in an actual power system in Canada.

KEY WORDS: Power systems; Transient stability; Probability assessment; Monte Carlo simulation; System risk

摘要: 提出了用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法进行电力系统暂态稳定概率评估的基本框架。这种评估要进行 2 种模拟: 涉及故障事件的系统状态的概率模拟和系统状态的暂态稳定模拟。文章着重讨论了故障的概率模型及其 Monte Carlo 模拟方法, 给出了 2 种研究情况的步骤: 第 (1) 种情况是评估由于系统不稳定所造成的系统平均风险指标; 第 (2) 种情况是对于一个给定的故障, 建立系统不稳定概率和一个系统运行条件的定量关系。所给的例子表明, 文中提出的方法可为电力公司控制中心需要的系统安全运行条件提供十分有用的信息。该方法已在加拿大一实际电力系统中应用。

关键词: 电力系统; 暂态稳定; 概率评估; 蒙特卡罗模拟; 系统风险

1 引言

业内在电力系统概率可靠性评估方面已进行了大量的研究并取得了显著成果^[1-11]。然而长期以来, 电力系统暂态稳定基本上是采用确定性的方法进行分析^[12-14]。在这个框架下, 所有的系统因素和研究条件是确定的, 而相应的在规划和运行中的稳定准则是: 系统必须能够承受对应于极端运行条件和最严重故障的所谓“最坏情况”。确定性准则的不足在于: ① 在真实系统中实际存在的不确定因素被忽略了; ② 人为选定的运行条件和故障状态, 可能并不一定是“最坏情况”, 换句话说, “最坏情况”可能会被漏掉。因而确定性准则并不能保证系统有 100% 的安全性。电力公司不仅应该知道它们使用的稳定准则, 而且应该知道并量化在它们的准则下系统可能失去稳定的风险。

本文将讨论用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法进行电力系统暂态稳定概率评估的基本框架。对电力系统暂态稳定进行概率分析并不是一个新的想法。在过去的文献中已作过一些探讨^[15-20], 然而这些探讨是有局限的, 它们基本上是从一个单一的角度或方面提出问题, 并没有从框架的层面上来讨论, 而且这些文章基本上使用解析方法 (如条件概率方法), 很难处理涉及故障状态的大量随机因素的组合, 特别是部分文章在描述概率模型时, 把故障事件的概率和涉及故障事件的系统状态的概率混为一谈。在工业界的工程报告中, 这种错误更是普遍存在。

与电力系统稳态的充裕度评估类似, 电力系统暂态稳定概率评估要模拟故障事件的概率和后果。

然而，这两方面的模拟都比稳态的充裕度评估要复杂得多，涉及故障事件的系统状态的概率不仅取决于故障的位置和类型，而且取决于系统中所经历的扰动序列和继电保护设置，还依赖于故障前的系统状态，这些因素本质上都是随机的，其组合而形成的状态数目具有“维数灾”特点，用解析方法来枚举，不作大量的简化是不可能的，因此，用 Monte Carlo 方法来选择暂态故障的系统状态比解析法要优越得多。其后果分析要对大量的状态进行暂态稳定的模拟和影响评估。根据各种系统状态概率和后果分析的结果，可以形成系统失去稳定的概率分布，或产生一个表示系统风险的指标。

本文从框架的观点提出电力系统暂态稳定概率评估应包括 2 种研究情况：

(1) 评估由于系统不稳定造成的系统平均风险。在这种情况下，对于给定的或随机采样的故障前系统状态，必须模拟所有可能发生的故障和后果，产生一个全局系统的平均风险指标；

(2) 对于一个给定的故障，建立系统不稳定概率和一个系统参量之间的定量关系，这个系统参量可以是影响系统稳定性的任何运行条件，例如，联络线上传输容量的限制，或主要发电机的输出或出口电压的限制，等等。

通过第(1)种研究，可以得到系统风险总水平的评估信息。而第(2)种研究可用来帮助确定电力公司控制中心需要的系统安全运行条件。虽然文献[21]对第(2)种情况做了一个实例研究，但没有从一般方法上进行总结，也没有给出故障模型和概率模拟的细节，更没有从以上 2 种研究情况来进行探讨。

2 故障的概率模型和模拟

2.1 故障前系统状态的选择

故障前系统状态由系统的网络拓扑、发电方式和负荷水平定义。依赖于研究的目的，这 3 个因素可被确定性地指定，或被随机地抽取：如果研究的时间范围较长并能包括不同的系统状态，且研究的目的是评估在给定时间范围内系统的平均风险，故障前的系统状态就应该按照其出现的概率随机地抽取；如果研究的时间范围较短（例如，1 小时的或在线的传送容量研究），对应的那个短时段系统网络拓扑、发电方式和负荷水平则可从能量管理系统(EMS)获得，即被确定性地指定。

系统网络拓扑和发电机状态的随机抽取可以用

状态抽样方法得到^[1-2]。每一个输电或发电元件可用 $[0, 1]$ 之间的均匀分布随机数模拟。假定每个元件有失效和成功 2 个状态，并且元件的失效是相互独立的，令 s_i 表示第 i 个元件的状态而 Q_i 表示它的不可用概率，对每一个元件 i 产生一个在 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数 R_i ，有

$$s_i = \begin{cases} 0, & R_i > Q_i \\ 1, & 0 \leq R_i \leq Q_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 0 为成功状态；1 为失效状态。

含 N 个元件的系统状态由下面的矢量表示：

$$s = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_N) \quad (2)$$

上面的概念很容易扩展到考虑元件多状态的情况。

在确定性的暂态稳定分析中，故障前的负荷水平一般都只考虑一年或一季的峰荷。其实，由于各变电站负荷的非同时性，某一条线路上的最大负载水平并不一定出现在系统峰荷时段，在暂态稳定的概率评估中，必须考虑负荷曲线。可以使用一个多水平负荷曲线模型。这个模型实际上给出每一个负荷水平有多大的概率，然后可用状态抽样方法选取其对应于故障前系统状态的负荷水平。如果系统中的母线被分成多组，而每一组有不同的负荷曲线，则可使用下面的聚类判别技术(Clustering technique)来捕获几组负荷曲线间的相关性^[1-2]。考虑有 N_C 条曲线，假定负荷曲线上的负荷点按其对峰荷的百分比被分成 N_L 组。每条曲线中每组的负荷水平是组中负荷点的平均值，该技术包括以下几步：

(1) 选定初始的各组负荷水平 M_{ij} ，其中 i 和 j 表示第 i 组 ($i=1, \dots, N_L$) 和第 j 条曲线 ($j=1, \dots, N_C$)，按等百分比间隔大致选取。

(2) 计算从每一个负荷点到每个负荷水平的欧几里德距离：

$$D_{ki} = \left[\sum_{j=1}^{N_C} (M_{ij} - L_{kj})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中 D_{ki} 为第 k 负荷点到第 i 个负荷水平的欧几里德距离； L_{kj} 为第 j 条曲线中第 k 个负荷点的值。

(3) 按照将负荷点分配给最近的负荷水平的原则重新分组，并按下式计算新的负荷水平：

$$M_{ij} = \sum_{k=1}^{N_i} L_{kj} / N_i \quad (4)$$

式中 N_i 为第 i 组的负荷点数。

(4) 重复第(2)和第(3)步，直到 2 次迭代间计算的负荷水平之差小于一个给定的误差。

2.2 故障的概率模型

(1) 故障发生的概率

在实施第 1 种研究时,需要用故障发生的概率。而在实施第 2 种研究时,因故障线路或母线是被指定的,则不需要这个概率。可用泊松分布来模拟故障发生的概率。在给定的时间段 t 内不发生故障的概率为

$$P_{no} = \frac{e^{-\lambda_0 t} (\lambda_0 t)^0}{0!} = e^{-\lambda_0 t} \quad (5)$$

式中 λ_0 为平均故障率。

因而,在给定的时间段 t 内发生故障的概率为

$$P_o = 1 - e^{-\lambda_0 t} \quad (6)$$

(2) 故障位置的概率

一条线路上的故障位置可以用基于历史统计的离散概率分布来模拟。一条线路被分成 M 段,故障发生在第 i 段的概率为

$$P_i = f_i / \sum_{i=1}^M f_i \quad (7)$$

式中 f_i 为在历史数据中发生在第 i 段的故障数。

在母线上的故障,其位置是确定的。

(3) 故障类型的概率

故障可以分成不同的类型,例如,可以分成:

①单相接地;②两相接地;③三相短路;④相间短路。类似地,离散概率分布亦可用来模拟故障类型的概率,相应的公式与式(7)是一样的,只是 P_i 代表故障类型的概率, f_i 代表历史数据中发生第 i 种类型故障的数目,而 $M=4$ 。

(4) 重合闸失败的概率

高压线路一般装有重合闸装置,只在重合闸失败时才需要第二次清除故障。从概念上说,重合闸失败的概率也可从历史统计数据中计算。虽然大量的故障数据管理系统不记录重合闸成功的信息,但却提供故障原因的记录,在故障原因和重合闸失败的概率之间有强相关性。例如典型的统计分析表明,由雷击引起的故障仅 10% 的重合闸是失败的,而其它原因造成的故障 50% 的重合闸是失败的。重合闸失败的概率可用下面的条件概率公式估计:

$$P_{ru} = \sum_{i=1}^n P(U/i)P(i) \quad (8)$$

式中 $P(U/i)$ 为在故障由第 i 种原因引起的条件下,重合闸失败的条件概率,这些概率可以通过典型的统计分析得到; $P(i)$ 为引起故障的第 i 种原因的概率,这些概率很容易从历史数据中获得,例如,

故障由雷击引起的概率、由其它坏天气引起的概率及由保护误动引起的概率等等。

(5) 故障清除时间的概率

故障清除包括故障检测、继电保护和开关动作 3 部分。一般假定故障检测是瞬时完成的,而继电保护和开关动作需要的时间被假定是随机变量,可用下面的办法之一来模拟:

① 继电保护和开关动作 2 个概率分布分别模拟,因而总的故障清除时间是这 2 个概率分布的卷积;

② 总的故障清除时间直接用一个概率分布模拟。

一般来说,可以假定继电保护和开关动作需要的时间或总的故障清除时间服从正态分布。正态分布的 2 个参数(均值和方差)可通过对历史数据的统计分析来确定。

2.3 故障的 Monte Carlo 模拟

故障对系统暂态稳定的影响取决于以下 3 个方面:

- (1) 由系统的网络拓扑、发电方式和负荷水平确定的故障前系统状态;
- (2) 故障本身的特点,包括故障元件(线路,母线)、故障位置和故障类型;
- (3) 保护运行,包括重合闸是否成功和故障清除时间是否大于临界清除时间。

这 3 方面因素是随机组合的,如前所述,故障前系统状态可被确定性地指定或被随机抽取,这将取决于所研究的时间长短。故障线路或母线的确定则取决于研究的目的:如果评估由于系统不稳定造成的系统平均风险(第 1 种研究),则所有可能故障的线路和母线需要随机抽取。如果针对一个给定的故障,建立系统不稳定概率和运行条件之间的定量关系(第 2 种研究),一个故障线路或母线被确定性地指定。所有其它的因素应该被处理为随机变量。按照第 2.2 节中的故障概率模型,涉及故障事件其它因素的 Monte Carlo 模拟可以归纳为下面 3 种类型:

(1) 有 2 个可能性的抽样。该类型包括确定故障是否发生和重合闸是否成功。以故障是否发生为例,如图 1 所示,产生一个在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数 R ,如果 $R < P_o$,故障发生,否则故障不发生。

(2) 有多个可能性的抽样。该类型包括确定故

障位置和故障类型。以故障类型为例，如图 2 所示，将 4 种故障类型的概率值连续置于 [0, 1] 区间，并产生一个在 [0, 1] 区间均匀分布的随机数 R ， R 的位置表明在抽样中哪个类型被随机地选定。

(3) 对正态分布随机数抽样。故障清除时间的模拟属于此类，其步骤为：

- (1) 产生一个标准正态分布随机数 X ^[2]；
- (2) 计算随机的故障清除时间，其公式为

$$\tau_c = X\sigma + \mu \quad (9)$$

式中 μ 和 σ 分别为故障清除时间的均值和方差。



图 1 抽取故障是否发生

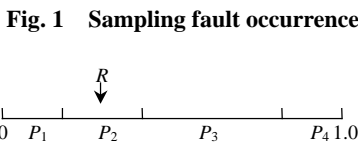


图 2 抽取故障类型

Fig. 2 Sampling fault type

3 系统暂态稳定模拟

按照第 2.3 节的 Monte Carlo 方法选定一个故障状态后，要执行暂态稳定数字模拟来确定系统状态是否稳定，为此需要计算的数目是很大的，这是因为系统状态和故障事件被随机选取时，需要大量的样本才能得到概率的风险指标或不稳定的概率分布。现已有许多加速暂态稳定模拟计算的方法，如微分方程的变步长算法、提前终止稳定模拟的判据、扩展的等面积准则、快速故障扫描及第 2 次人为扰动 (second-kick) 算法等^[22-24]。

在暂态稳定模拟计算中必须给定扰动序列 (disturbance sequence)。不同故障的扰动序列是不同的，电力公司控制中心按照大量的离线计算，在其运行规程中规定了暂态稳定模拟中的扰动序列。除了开关动作、继电保护动作和重合闸以外，扰动序列还包括各种安全校正措施，如切发电、切负荷、无功设备切换、人为跳线和其它控制系统的反应等。

4 两种研究的一般步骤

第 1 种研究是评估由于系统不稳定造成的系统平均风险，图 3 给出了它的评估步骤。在图 3 的选择框中，网络拓扑和发电状态的选定可是确定性的或是随机性的（取决于研究时间的长短）。其它项的

选择均为随机性的，可用前面描述的 Monte Carlo 方法模拟。风险指标是故障后果和故障状态发生概率的乘积和，后果分析框是故障的后果，它可是简单的系统稳定或不稳定 (0 或 1 变量)，也可以包括更为复杂的损失分析。损失分析常常涉及以下方面：

- (1) 切发电或切负荷造成的损失；
- (2) 设备损坏；
- (3) 系统传输能力降低，导致企业收入减少；
- (4) 连锁失效，甚至造成灾难性后果；
- (5) 违反互联电网规程或协议的惩罚。

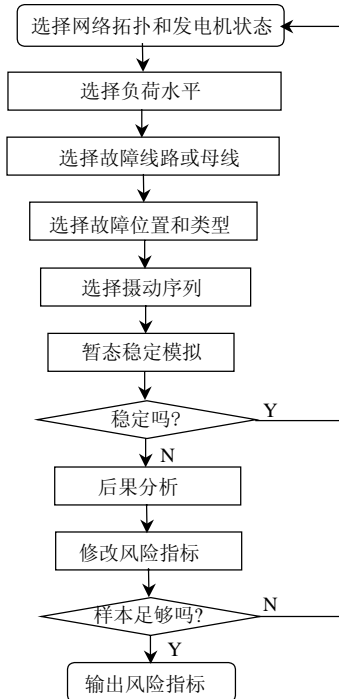


图 3 评估由于系统不稳定造成的系统平均风险的步骤

Fig. 3 Procedure for evaluating overall system risk due to transient instability

第 2 种研究是针对某一故障建立系统不稳定概率和其系统运行条件之间的定量关系，图 4 给出了它的评估步骤，该评估有以下特点：

- (1) 故障是指定的；
- (2) 在暂态稳定模拟中，要调整反映运行条件的系统参数以使系统保持稳定，从而得到保持暂态稳定的运行条件极限值。

图中的“刚好稳定”一词 (barely stable) 是指它是一个稳定状态，但改变系统参数，给其一个很小的增量即可导致系统不稳定。例如，联络线传输功率作为系统参数，它的门坎精度是 1 MW，若一个状态是稳定的，但假如将联络线传输功率增加 1 MW，故障时系统就变得不稳定了，那么这个状态称为“刚好稳定”的。

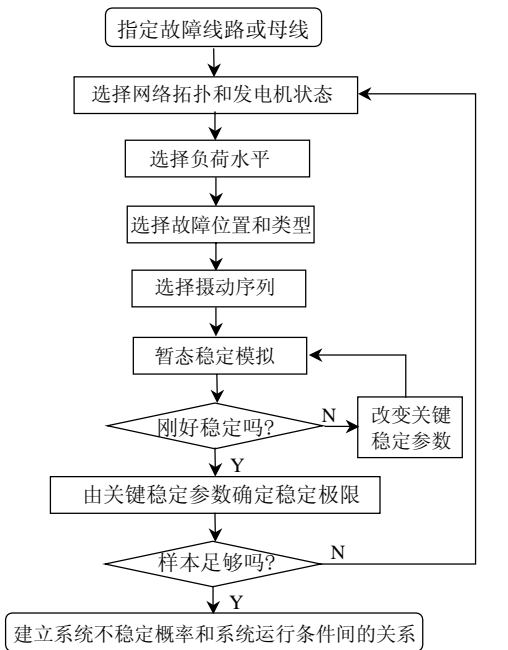


图 4 建立系统不稳定概率和系统运行条件之间的定量关系的步骤

Fig. 4 Procedure for establishing relation between instability probability and system condition

5 实例

以加拿大西部一电力公司的系统为例，该系统的 2 个发电中心分别位于北部和东部，而负荷中心位于西南部。全系统有 35 条主要的 500kV 输电线，在西部有 2 条 500kV 联络线联接到美国西部大系统。在正常运行状况下，2 条联络线的传送容量限制为 2850 MW。

(1) 第 1 种研究情况的结果

以 2000 年冬季的系统结构，在其发电方式和负荷条件下，计算了该系统失去暂态稳定的平均概率。在紧急情况时，切除部分发电 (generation rejection) 或切除部分负荷 (load shedding) 是该系统运行中的主要安全措施，结果表明，在考虑这 2 个基本校正措施 (Remedial Action Scheme) 的假设下，系统在这个冬季期间失去暂态稳定的平均概率为 0.00082，该概率被认为是可接受的。对这种情况研究的目的在于：如果系统在给定的运行期间失去暂态稳定的平均概率太大，则必须对在 Monte Carlo 模拟中已抽到并导致失去暂态稳定的故障事件进行更多的具体分析，以确定现有运行规程以外的提高系统暂态稳定的解决方案（由于数据的原因，本文没有进行损失分析）。

(2) 第 2 种研究情况的结果

在给定的系统、发电方式和负荷条件下，计算了某条关键的 500kV 线路故障时的 2 条联络线总传输容量限制和系统失去稳定的概率之间的关系，该概率分布见表 1。依据基于确定性暂态稳定分析的现有运行规程，针对这条 500kV 线路，在其故障时容许的联络线传输容量限制是 2210 MW，虽然现有运行规程是基于人为选定的“最坏情况”，但从表 1 中给出的结果可知，它仍然有 0.001 的失去暂态稳定的概率。实际上，真正的“最坏情况”并不发生在最高系统峰荷时段，而是在人为选择运行条件和故障状态时被漏掉了。

表 1 在某条关键的 500kV 线路故障的条件下联络线传输容量限制和系统失去稳定的概率之间的关系
Tab. 1 Relationship between transfer capability limit of the tie-lines and probability of system instability given a fault on a crucial 500 kV line

联络线传输容量限制/MW	系统失去稳定的概率
2850	0.153
2750	0.152
2650	0.120
2550	0.105
2450	0.048
2350	0.041
2250	0.001
2150	0.001
2050	0.000

6 结论

长期以来，电力系统暂态稳定都采用确定性的方法进行分析，其主要不足在于忽略了真实系统中实际存在的不确定因素。而且，人为选定的运行条件和故障状态，可能并不一定是“最坏情况”，因而即使满足确定性准则的系统状态仍然存在失去稳定的风险。本文提出了用 Monte Carlo 方法进行电力系统暂态稳定概率评估的基本框架，这种评估要进行 2 种模拟：涉及故障事件的系统状态的概率模拟和系统状态的暂态稳定模拟。本文着重讨论了故障的概率模型及其 Monte Carlo 模拟方法。作为框架探讨，文中提出了 2 种研究情况的步骤。第(1)种情况是评估由于系统不稳定造成的系统平均风险指标，在这种情况下，对于给定的或者随机采样的故障前系统状态，必须随机模拟可能发生的大量故障和后果。第(2)种情况是对于一个给定的故障，建立系统不稳定概率和系统运行条件之间的定量关系。这对确定电力公司控制中心需要的系统安全运行条件是十分有用的信息，该方法已在加拿大一实际电力系统中应用。

参考文献

- [1] Li Wenyuan, Risk assessment of power systems – models, methods, and applications [M]. IEEE Press and Wiley & Sons, USA and Canada, 2005.
- [2] Billinton R, Li Wenyuan. Reliability assessment of electric power systems using monte carlo methods[M]. Plenum Press, New York, 1994.
- [3] Billinton R, Allan R N, Reliability evaluation of power systems (second edition) [M]. Plenum Press, New York, 1996.
- [4] Allan R N, Billinton R, Briepohl A M *et al.* Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation, 1987-1991[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 41-49
- [5] The USA EPRI. Reliability evaluation for large scale bulk transmission systems [R]. Report EL5291, 1988.
- [6] IEEE Tutorial Course Text, Reliability assessment of composite generation and transmission systems[M]. 90EH0311-PWR, IEEE Publishing Services, 1990.
- [7] CIGRE Task Force 38-03-10 Report. Composite Power System Reliability Analysis[C]. CIGRE Symposium on Electric Power System Reliability, Sept.16-18, 1991, Montreal.
- [8] Li Wenyuan, Lu Jiping. Risk evaluation of combinative transmission network and substation configurations and its application in substation planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1144-1150.
- [9] Li Wenyuan, Korczynski J K. Risk evaluation of transmission system operation modes and its application at british columbia transmission corporation[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(5): 658-664.
- [10] Li Wenyuan. Incorporating aging failures in power system reliability evaluation[J]. IEEE Transaction on Power Systems, August 2002, 17(3): 918-923.
- [11] Li Wenyuan, Mansour Y, Vaahedi E *et al.* Incorporation of voltage stability operating limits in composite system adequacy assessment: bc hydro's experience[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(4): 1279-1284.
- [12] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability (revised printing) [M]. IEEE Press, New York, 1994.
- [13] Kundur P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill, New York, 1994.
- [14] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] Kuruganty P, Billinton R. Protection system modeling in a probabilistic assessment of fault clearing time[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(5): 2164-2170.
- [16] Anderson P, Rose A. A Probabilistic approach to power system stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983,102(8): 2430-2439.
- [17] Hsu Y Y, Chang C L. Probabilistic transient stability studies using the conditional probability approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1565-1572.
- [18] Porretta B, Kiguei D, Hamoud G *et al.* A comprehensive approach for adequacy and security evaluation of bulk power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991,6(2): 433-441.
- [19] Billinton R, Aboreshaid S. Stochastic modeling of high-speed reclosing in probabilistic transient stability studies[J]. IEE Proceedings, Part C, 1995, 142(4): 350-354.
- [20] McCalley J D, Fouad A A, Vittal V *et al.* A risk-based security index for determining operating limits in stability-limited electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1210-1219.
- [21] Vaahedi E, Li Wenyuan, Chia T *et al.* Large scale probabilistic transient stability assessment using bc hydro's on-line tools[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(20) : 661-667.
- [22] Xue Y, Ribbens-Pavella M. Extended equal-area criterion: an analytical ultra-fast method for transient stability assessment and preventive control of power systems[J]. International Journal of Electric Power and Energy Systems, 1989, 11(2): 131-149.
- [23] The USA EPRI Report. Analytical methods for contingency selection and ranking for dynamic security analysis[R]. Report TR-104352, Project RP-3103-3, September 1994.
- [24] Mansour Y, Vaahedi E, Chang A Y *et al.* BC hydro's on-line transient stability assessment (TSA) model development, analysis and post-processing[J]. IEEE Transactions on Power System, 1995,10(1): 241-250.

收稿日期: 2005-01-08。

作者简介:

李文沅, 博士, 首席工程师 (加拿大), 教授, IEEE Fellow, 主要兴趣包括电力系统规划、运行、可靠性和概率应用;

卢继平, 博士, 副教授, 主要兴趣包括电力系统自动化、继电保护和概率在电力系统中的应用。