

# 概率风险评估在电力系统运行规划中的有效应用

张沛

(美国电力科学研究院电网运行规划部, 美国 94304)

## Utility Experience Performing Probabilistic Risk Assessment for Operational Planning of Electric Power Systems

ZHANG Pei

(Electric Power Research Institute (EPRI), USA 94304)

**Abstract :** EPRI has developed a Probabilistic Risk/Reliability Assessment (PRA) method under Power Delivery Reliability Initiative, which has been successfully implemented by various energy companies in planning studies of growing complexity. Unlike the traditional deterministic contingency analysis, PRA combines a probabilistic measure of the likelihood of undesirable events with a measure of the consequence of the events (that is, the impact) into a single reliability index – Probabilistic Reliability Index (PRI). EPRI internally developed the PRI program that uses contingency analysis results as well as the transmission facility outage information as the input to compute and graphically display the reliability indices. This paper presents an application of PRI program to study the transmission network of New York Power Authority (NYPA), demonstrating that the PRA method significantly improves the ability of conducting effective transmission operational planning.

**Key words:** operational planning; probabilistic risk assessment; PRI program

**摘要:** 美国电力科学研究院开发的基于概率的风险/可靠性评估(PRA)方法已经由多家电力公司验证,并在复杂的规划研究中得以成功应用。与传统确定性静态安全分析方法不同,PRA将事故的发生概率和事故的严重程度合并为一个可靠性指标——概率

可靠性指标(PRI)。EPRI开发了PRI程序。该程序以静态安全分析结果数据及传输设备停运信息作为输入数据,计算并以图表的形式显示可靠性指标。本文介绍的是EPRI与纽约电力局(NYPA)合作,应用PRI程序对NYPA传输网络进行研究,验证了PRA方法能有效帮助运行规划人员分析系统静态安全状况。

**关键词:** 运行规划; 概率风险评估; PRA程序

电力系统可靠性始终是电力系统规划运行中的最重要的问题之一。EPRI与许多电力公司合作开发了概率风险评估(PRA)<sup>[1-3]</sup>的方法来执行基于风险的可靠性评估。与传统确定性分析方法不同,PRA同时考虑各种突发事件的概率和这些事件对系统带来的影响。EPRI还开发了概率可靠性指标(PRI)程序,PRI程序为电力工业在市场环境下进行可靠性评估提供了一种更为精确的工具。

从2001年起PRA就被许多电力公司所使用,现在已经有足够的推动该方法更广泛地应用于电力系统中。迄今为止,EPRI已经应用PRA对南方公司(Southern Co.),美国电力公司(American Electric Power),Tri-State发电及传输公司,堪萨斯州城市电力及照明公司(Kansas City Power & Light),东部互联网(Eastern Interconnection)及ERCOT的输电网络进行了研究。世界上已有超过10个电力公司采纳了PRA方法并开始使用PRA对其系统进行研究。

本文介绍的是 PRI 在纽约电力局 (NYPA) 传输网络研究中的应用。

## 1 概率风险评估方法论

### 1.1 几种指标

EPRI 开发了以静态安全分析结果数据及传输设备停运信息作为输入数据的 PRI 程序, 该程序计算并以图表的形式显示可靠性指标。图 2 显示了 PRI 程序的计算体系。EPRI 还开发的 PRI 程序的应用程序界面, 该界面与很多商用静态安全分析程序的界面相同, 如: Siemens/PTI MUST, PSS/E IPLAN, GE PSLF EPCL, and V&R POM。

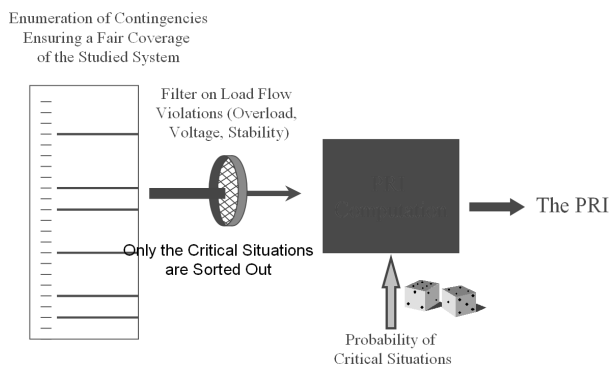


图 2 PRI 程序的计算体系

(1) PRI 的定义。

PRI 定义为事故概率与其影响程度的乘积:

$$PRI = \text{事故概率} \times \text{受损程度} \quad (1)$$

在这里事故概率 (probability) 为故障状态出现的概率, 即紧急停运组合出现的可能性, 而受损程度 (impact) 为故障状态对系统造成的物理冲击。

系统的受损程度及可靠性指标有以下 4 种类型: APRI (过负荷), VPRI (电压越界), VSPRI (电压稳定性) 及 LLPRI (甩负荷):

(2) 过载概率可靠性指标:

$$APRI = \sum_{i \in \{\text{Simulated\_Situations}\}} \text{probability}_i \times \text{Aimpact}_i \quad (2)$$

Aimpact<sub>i</sub> 指第 i 个突发事件所引发的所有过载线路过负荷值的总和。Aimpact<sub>i</sub> 的单位是 MVA 或者 kA。

(3) 电压越界概率可靠性指标:

$$VPRI = \sum_{i \in \{\text{Simulated\_Situations}\}} \text{probability}_i \times \text{Vimpact}_i \quad (3)$$

Vimpact<sub>i</sub> 指第 i 个突发事件所引发的所有节点电压偏离上下限值总和。Aimpact<sub>i</sub> 的单位是 kV 或者 p.u.。

(4) 电压稳定概率可靠性指标:

$$VSPRI = \sum_{i \in \{\text{Simulated\_Situations}\}} \text{probability}_i \times \text{VSimact}_i \quad (4)$$

VSimact<sub>i</sub> 为第 i 个突发事件导致的系统电压失稳, 它是一个二进制值, 如果一个突发事件导致系统电压失稳, 则 VSimact<sub>i</sub> 等于 1, 否则等于 0。

(5) 甩负荷概率可靠性指标:

$$LLPRI = \sum_{i \in \{\text{Simulated\_Situations}\}} \text{probability}_i \times \text{LLimpact}_i \quad (5)$$

LLimpact<sub>i</sub> 指第 i 个突发事件所引发的所有节点甩负荷值的总和, 单位是 MW。

(6) 事故概率。

从规划的角度考虑, 事故概率是指电力系统在未来某一时刻出现此状态的可能性。它是一个涉及电力系统所有设备状态的函数:

$$\text{Probability} = \prod_{i \in U} u(c_i) \prod_{j \in A} a(c_j) \quad (6)$$

这里 U 是事故设备集, A 是正常设备集。

$\Omega = A \cup U$ ,  $\Omega$  是所有设备的全集。

不是所有的设备都是独立存在的, 这样的例子到处都存在, 如共用杆塔的传输线路, 共享公共设备的发电机组, 没有断路器分隔连接在一起的一组设备等。在这些例子中, 多个设备的停运是由于一个共同的原因造成的 (公共模式)。在 PRA 方法论中, 我们定义由于一个共同的原因造成的同时遭受系统停运的这样一组设备为公共模式故障。一旦确定为公共模式故障, 从停运的观点公共模式故障具有同一有效率。

### 1.2 分析方法

EPRI 开发了 6 种分析并将它们集成到 PRI 程序中。这 6 种的分析可以分为两类: 系统层次分析 (见图 3) 和元件层次分析 (见图 4)。

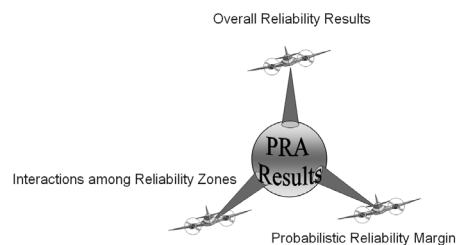


图 3 系统层次 PRI 分析

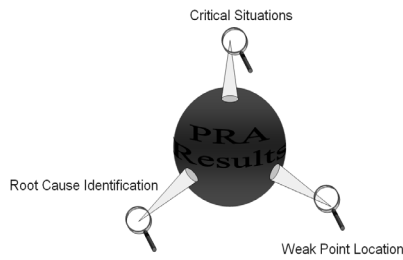


图4 元件层次 PRA 分析

(1) 综合分析揭示整个系统的可靠性等级。

(2) 区域间相互作用分析用于揭示用户指定的各个区域之间的相互影响关系。事故发生的区域被称为“引发区”，而因此事故受到影响的区域被称为“受损区”。每个事故都按由引发区到受损区来命名。“by Zone1 on Zone2”的意思是由于 Zone1 发生故障导致 Zone2 受到影响。

$$PRI(\text{Zone1 on Zone2}) = \sum_{\text{Situation} \in \text{Zone1}} \left( \sum_{\text{Component} \in \text{Zone2}} PRI(\text{Situation, Component}) \right) \quad (3)$$

概率域度分析建立了概率可靠性参数与系统承载能力之间的关系。它为系统的鲁棒性提供了一个量度。域度是指系统距危险区域的距离。概率可靠性分析回答了“从基本状态出发朝着预定的方向走多远即到达危险区域”的问题。这个“方向”可以是负荷量、潮流传输方向的或是发电机输出量等等。

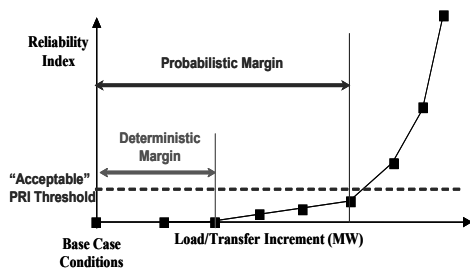


图5 可靠性范围是负荷/传输增量的函数

(4) 故障状态分析将各种状态根据其其对参数的贡献程度进行了排序。这将有助于系统规划人员确定哪些状态具有高概率性，哪些具有高影响性，还是两者皆有。故障状态分析的结果显示在如图 6 所示的概率(probability)/影响(impact)坐标系的平面中。

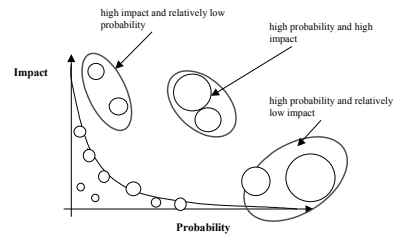


图6 在概率/影响坐标系中的故障状态分析

(5) 根源故障分析对导致系统进入严重事故状态的故障设备(线路、变压器、发电机等等)进行分析。根源故障设备是指，不管其他设备故障与否，其停运都对系统产生严重危害的设备。根源概率可靠性参数定义如下：

$$PRI(\text{RootCause}) = \sum \frac{PRI(\text{Situation})}{k \text{ order}(\text{RootCause})}$$

$PRI(\text{Situation})$  是指包含该根源故障设备的所有系统临界状态的概率可靠性指标的总和， $k$  表示包含该根源设备的系统状态的个数。

每一个故障状态都对根源概率可靠性参数产生贡献。根源故障概率是指不管其他设备停运发生与否都对系统产生严重影响的设备的停运概率。

(6) 薄弱环节分析可以识别出受损最大的母线和支路。一个薄弱元件是指至少经受过一次严重损伤的元件。薄弱环节概率可靠性参数可以定义如下：

$$PRI(\text{WeakPoint}) = \sum_{\text{Situation} \in \text{Situations Affecting the WeakPoint}} PRI(\text{Situation, WeakPoint})$$

这个参数与一组在此薄弱元件上产生严重影响的故障状态相关。

## 2 研究数据及假设

NYPA 给 EPRI 提供了纽约 ISO 2010 夏季潮流数据文件。该研究系统包含了 46 785 条母线，28 035 个负荷，7 756 个发电机，55 175 条传输线路，17 752 个变压器及 3 621 个并联开关。

### 2.1 静态安全分析描述

NYPA 为静态安全分析提供的技术要求包括：

(1) 指定电压界限的电压约束文件。该电压约束要求应用于区域 1—11 (纽约州区域) 的 100 kV 及其以上电压等级的所有母线；

(2) 指定电流界限的电流约束文件。该电流约束文件指定用夏季额定限值的 100% 作为区域 1—

11 (纽约州区域) 115 kV 及其以上电压等级的所有线路的电流限值;

(3) 一个有 759 个单一故障或组合故障组成的故障列表文件。从该文件 EPRI 可以执行静态安全分析并识别出 144 个临界故障。

## 2.2 概率数据描述

通用停运概率数据被应用于本次研究。通用概率数据文件包含可以计算不同电力系统元件的停运率的参数。

例如, 线路的停运率可以使用以下等式进行计算:

$$Unavailability = Outage\ Freq \times Repair\ Time / 8760 \quad (7)$$

在上面的等式中的停运频率 (*Outage Freq*) 由以下等式计算得来:

$$Outage\ Freq = a + b \times (Z / ZpuPerMile) \quad (8)$$

其中:  $a(1/year)$  为被迫停运频率的常量参数;  $b(1/year/mile)$  为被迫停运频率的比例参数;  $ZpuPerMile(p.u./mile)$  为用于估算线路长度的每英里平均阻抗;  $RepairTime(hour)$  为发生一个被迫停运后的平均维修时间。

## 3 PRA 方法在系统研究当中的应用

PRI 程序可以同时进行确定性及概率性两种风险评估, 以便系统的运行规划人员对这两种方法的结果进行比较。

### 3.1 综合分析

PRI 可以将综合分析的结果以柱图及表格的形式显示给用户, 如图 7 所示。

根据概率性分析, 在电压越界方面区域 7 是最严重的地区, 它占了概率性电压综合可靠性指标的 74%。区域 7 还是电流越界方面最严重的地区, 它占了概率性电流综合可靠性指标的 37%。

根据确定性分析, 在电压越界方面区域 10 是最严重的地区, 它占了确定性电压综合可靠性指标的 55%。区域 7 还是电流越界方面最严重的地区, 它占了确定性电流综合可靠性指标的 28%。

### 3.2 区域间相互作用分析

PRI 可以将区域间相互作用分析的结果显示在表格及区域地图上, 如图 8 所示。当在区域地图上显示电压越界区域间相互作用分析结果时, 图示里

的每一个泡泡代表一个控制区域。泡泡中的 *PRI* 值表示当故障及受损都发生在该区域时的可靠性指标。带 *PRI* 值的每一个箭头标明了故障发生的根源区域对受损的受影响区域的影响。

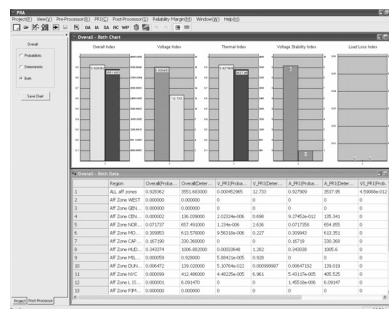


图 7 显示综合分析结果

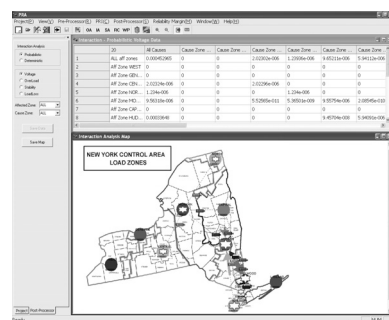


图 8 显示区域间相互作用分析结果

根据电压越界概率性区域相互作用分析的结果, 区域 7 是故障发生最严重也是受损最严重的区域。而根据电压越界确定性区域相互作用分析的结果, 区域 10 是故障发生最严重也是受损最严重的区域。

### 3.3 故障状态分析

PRI 可以将故障状态分析的结果以泡图及表格的形式显示给用户, 如图 9 所示。根据电压越界概率性故障状态分析的结果, 综合考虑故障发生的概率及其影响, 区域 7 中的一个 345 kV/138 kV 的变压器发生停运是系统中最严重的故障。而根据电压越界确定性故障状态分析的结果, ‘SBK: MOSE\_115’ 是导致最严重的电压越限影响的故障。

根据电流过载概率性故障状态分析结果, 综合考虑故障发生的概率及其影响, 区域 5 中一条 230 kV 的线路发生停运是系统中最严重的故障。而根据电流过载确定性故障状态分析的结果, ‘TWR: MWP& PV20’ 是导致最严重电流过载影响的故障。

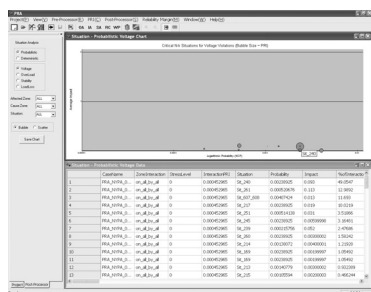


图9 显示故障状态分析结果

### 3.4 根源故障分析

PRI 可以将根源故障分析的结果显示在泡图, 表格及元件地图上, 如图 10 所示。

根据电压越界概率性根源故障分析的结果, 综合考虑故障发生的概率及其影响, 区域 7 中的一个 345 kV/138 kV 的变压器是系统中最严重的根源故障设备。而根据电压越界确定性根源故障分析的结果, 区域 4 中一个 240 kV/120 kV 的自动变压器是最严重的根源故障设备, 它产生的电压越限影响最为严重的。

根据电流过载概率性根源故障分析的结果, 综合考虑故障发生的概率及其影响, 区域 5 中的一条 230 kV 的线路是系统中最严重的根源故障设备。而根据电流过载确定性根源故障分析的结果, 区域 6 与 7 之间的一条 345 kV 的线路是最严重的根源故障设备, 它产生的电流过载影响最为严重的。

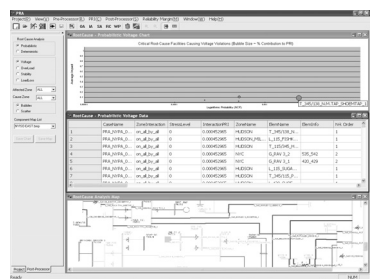


图10 显示根源故障分析结果

### 3.5 薄弱环节分析

PRI 可以将薄弱环节分析的结果显示在柱图, 表格及元件地图上, 如图 11 所示。

根据电压越界概率性薄弱环节分析的结果, 综合考虑故障发生的概率及其影响, 区域 7 中的一条 115 kV 的母线是系统中最薄弱的母线。而根据电压越界确定性薄弱环节分析的结果, 从电压越界影响方面来说区域 4 中的一条 115 kV 的母线是系统中最薄弱的母线。

根据电流过载概率性薄弱环节分析的结果, 综合考虑故障发生的概率及其影响, 区域 7 中的一条 115 kV 的母线是系统中最薄弱的母线。而根据电流过载确定性薄弱环节分析的结果, 从电流过载影响方面来说区域 7 中的一条 115 kV 的母线是系统中最薄弱的母线。

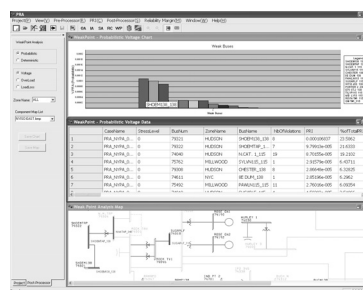


图11 显示薄弱环节分析结果

## 4 结论

本文介绍了采用 EPRI 的 PRI 程序对纽约州输电网络就其系统全局可靠性进行的概率风险评估; 揭示用户指定的各个区域之间的相互影响关系; 将故障根据其可靠性指标的贡献程度进行了排序; 识别最有可能导致系统进入临界状态的传输系统元件; 识别最容易受到影响而停运的特殊的线路和母线。NYPA 的规划人员通过对系统进行概率风险评估, 除了获得传统的确定性静态安全分析结果之外, 还可以获得更多的附加信息。

### 参考文献:

- [1] ZHANG P, LEE S T, SOBAJIC D. Moving Towards Probabilistic Reliability Assessment Method[C]// Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2004.
- [2] LEE S T. A New Vision for Transmission Operation and Planning Under An Open Power Market[C]// Joint CIGRE and IEEE Conference, Montreal, October 7-10, 2003.
- [3] EPRI. Probabilistic Reliability Index (PRI) Version 4.0[CP/CD] Software-1012485, 2006.
- [4] EPRI. KCPL and Midwest ISO Use Probabilistic Reliability Assessment to Enhance Transmission Planning[R/OL]. <http://www.epriweb.com/public/00000000001012653.pdf>.

收稿日期: 2007-07-05

### 作者简介:

张沛(1972-), 男, 美国电气、电子工程协会高级会员 (IEEE Senior Member), 现任美国电力科学研究院电网运行规划部高级项目经理, 电气工程博士。目前研究涉及概率方法在电力系统运行和规划领域的应用, 电力系统稳定性和控制, 电力系统可靠性和安全性。

(本文责任编辑 张亚拉)