

# 基于 LCC 管理的变电站主接线的风险评估

徐岩, 迟成

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071000)

**摘要:** 全寿命周期成本(life-cycle Cost, LCC)管理是资产全寿命周期管理(life-cycle management, LCM)的基础和技术手段。Petri 网具有图形化表达方式, 可以对故障树分析、马尔可夫方程等进行改进并补充更多特征和信息, 提高了整个风险评估系统的速度和准确性。采用基于 LCC 管理的方法, 在变电站主接线运行分析过程中建立四状态模型。讨论了元件发生计划检修事件和断路器拒动现象, 提出利用 Petri 网的基本方程确定系统状态并计算相应概率, 定量分析变电站主接线运行的断供成本, 寻求最佳效益下的运行方式。在算例中讨论计算了不同主接线方案的风险指标断供成本, 计算结果验证了所提算法的可行性。

**关键词:** 全寿命周期成本管理; Petri 网; 变电站主接线; 风险评估; 断供成本

## Risk assessment of substation main connection based on LCC management

XU Yan, CHI Cheng

(Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** Life-cycle cost management is the foundation and techniques for life-cycle cost management. Petri nets has a graphical expression; it can improve and add more features and information to fault tree analysis, Markov equations and so on, which raises the speed and accuracy of the entire system of risk assessment. The paper proposes a risk assessment based on the life-cycle management approach, establishes four state models to analyze transformer substation main wiring operation, discusses elements occurring planned maintenance events and breaker tripping phenomenon, and proposes using the basic equations of Petri nets to determine system status and calculate the corresponding probabilities, quantitatively analyzes the outage costs of the substation main connection off for running, and seeks the best value under the run. In the example, it discusses and calculates the risk indicators of outage costs for different wiring schemes; the results demonstrate the feasibility of the proposed algorithm.

**Key words:** life-cycle cost management; Petri nets; substation main wiring; risk assessment; outage costs

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)04-0074-07

## 0 引言

变电站是发电机组与输电系统之间或输电系统与配电系统之间的连接部分, 是电力系统重要的组成部分, 担负着通过输电网向各个负荷区供电的任务。变电站的电气主接线代表了变电站高电压、大电流的电气部分主体结构, 是电力系统网络结构的重要组成部分, 它直接影响电力运行的可靠性、灵活性, 同时对电气设备选择、配电装置布置、继电保护、自动装置和控制方式等诸多方面都有绝对性的关系<sup>[1]</sup>。

降低变电站全寿命周期成本(LCC)是建设“一强三优”电网的重要内容, 早在 2007 年, 国家电

网公司基建部就“两型一化”变电站和“两型三新”线路为契机, 开展了提高变电站工程全寿命周期内效率和效益的研究<sup>[2]</sup>。

基于全寿命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)管理规划方案评价强调对工程全寿命周期发展过程实施持续不断、协调统一的管理, 综合考虑各个阶段的问题, 保证各个阶段活动的前后衔接和决策的一致性, 达到工程在全寿命周期内技术最优、质量最可靠、成本最低、服务最好、环保最佳、更符合可持续发展的要求<sup>[3]</sup>。

基于全寿命周期成本管理的变电站主接线的风险评估是一种定量分析方法, 主要分析的是因电气主接线上的元件发生故障进行修理而不能正常使用

和因为计划检修所造成的损失,是全寿命周期成本管理中的重要组成部分。

本文讨论了如何运用基于全寿命周期成本管理的风险评估的理念,创建一套完整的综合考虑各因素的评估模型,实现变电站的电气主接线的设计、运行与资产收益的最佳组合。

## 1 基于LCC管理的变电站主接线的风险评估

### 1.1 资产全寿命周期成本管理的基本概念

随着电网资产规模日益扩大和快速发展,资产密集型电力企业需要在资产管理中不断开拓视野,引入新的管理手段。资产全寿命周期管理作为一种新的资产管理理念正逐步被电力企业所关注、接受并逐步推广。资产全寿命周期管理目前国家电网给出的定义是:从企业的长期经济效益出发,通过一系列的技术经济组织措施,对设备的规划、设计、制造、购置、安装、调试、运行、维护、改造、更新直至报废的全过程进行全面管理、在保证电网安全效能的同时,对全过程发生的费用进行控制,使寿命周期费用最小的一种管理理念<sup>[4]</sup>。

全寿命周期成本的表达式为

$$LCC = \text{购置成本} + \text{维持成本} \quad (1)$$

电力企业中用得较多的是将维持成本再细化成运行成本、检修维护成本、故障成本和退役处置成本之和,故LCC又表达为

$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD \quad (2)$$

式中: LCC 是全寿命周期成本; CI 是投资成本; CO 是运行成本; CM 是检修维护成本; CF 是故障成本; CD 是退役处置成本。故障成本 CF 是由直接故障成本和间接故障成本组成,直接故障成本为系统多重故障导致的直接经济损失,通常是指停电损失,可以用断供成本(UEC)来表示。间接故障成本包括赔偿费用、对社会造成的不良影响以及公司名誉受损等间接费用<sup>[4]</sup>,但是由于间接成本的计算目前还没有定论,与不同的国家的不同经济情况、社会情况和电网情况等都有关系,只能参照相关规定进行近似值计算,或者按直接故障成本的比例进行取值,所以本文只讨论故障成本中的直接故障成本,即断供成本的计算。

### 1.2 风险评估中的断供成本

文献[5]采用基于风险理论的电力系统元件风险评估办法,提出通过多项指标综合分析单个元件退出运行的概率以及其退出运行后对系统可能造成的影响,参考文献[5]中的方法,本文中基于LCC的变电站主接线的风险评估是采用断供成本作为风险指标来分析电力系统元件。

断供成本与许多因素有关,包括停电量、停电持续时间、停电频率等,并且断供成本的计算问题与国家经济发展、电力发展水平,以及需求现状有关,目前有些国家对断供成本采用几种简单估算方法,包括按GDP计算,按电价倍数计算,按缺电功率、缺电量、缺电持续时间即缺电频率计算。其中相比前两种算法,第三种方法能够一般性的反映缺电影响,同时考虑可靠性的影响,所以本文采用第三种计算方法。

第三种方法的计算公式为

$$UEC = \sum_{i=1}^n (K_w \times P_i + K_e \times E_i) \quad (3)$$

式中:  $k_w, k_e$  分别为单位缺电功率与单位缺电量损失系数,与工业用户大小有关;  $P_i, E_i$  为第  $i$  次缺电功率及缺电量。

但是由于计算所需有关基础资料的匮乏和损失系数等参数的难以确定,因而上述计算比较困难,所以提出在LCC成本的直接故障成本计算过程中采用单位停电费用损失乘以期望缺供电量(EENS)来进行计算,即考虑了系统可靠性又考虑了经济性<sup>[4]</sup>。

$$UEC = EENS \times C_{\text{price}} \quad (4)$$

式中,  $C_{\text{price}}$  是系统售电价格。

### 1.3 Petri网在变电站主接线的风险评估中的应用

文献[6]中介绍了国内外许多电力系统故障诊断的技术与方法,文献[7]中采用了神经网络与模糊积分融合的技术,文献[8]中采用了马尔可夫链蒙特卡罗的方法,本文采用的将Petri网的分析方法应用于变电站主接线的风险评估中。

Petri网是一种离散事件系统建模和分析的图形化数学工具。Petri网可以解决风险分析中很多问题,能取代故障树、事件树和马尔可夫图,并为分析增加了更多的内容,在传统的风险分析模型和方法中增加新的功能。

Petri网的基本方程可以表示从初始标识  $m_0$  到标识  $m$  的转换过程<sup>[9]</sup>。

$$m = m_0 + W \cdot u \quad (5)$$

式中:  $W$  是Petri网的关联矩阵;  $u$  是特征向量。

## 2 变电站主接线的风险评估分析计算过程

### 2.1 变电站主接线在风险评估中的特点

变电站主接线风险评估中基本系统分析,主要是分析元件失效模式和电源点与负荷点之间的连通性识别。

变电站元件有三种失效模式:非主动失效、主

动失效和断路器的拒动。非主动失效指元件失效后不引起任何保护装置动作，不影响任何其他健康元件的一种失效，在元件修复以后恢复供电。主动失效指元件失效后引起失效元件保护动作而造成其他健康元件停运的一种失效。断路器的拒动可能造成故障的扩大化，使得更大范围内保护装置动作，引起更多健康元件停运<sup>[10]</sup>。

变电站的元件包括变压器、隔离开关、母线以及断路器等。变压器、隔离开关、输电线路都属于静态元件，其作用是从一点向另一点传输功率，这些元件基本模型采用如图 1 所示的四状态模型，包括正常运行状态、切换状态、在修状态和计划检修停运状态，其中切换状态是由主动失效引起，比如元件发生短路故障引起相应保护装置动作，通过切换状态的倒闸操作隔离失效元件，进入在修状态，其他健康元件恢复供电，使部分或全部负荷点恢复工作。

断路器的动态性除考虑以上四种状态外还考虑拒动情况，添加到切换状态的讨论中，这在后文中会讨论。

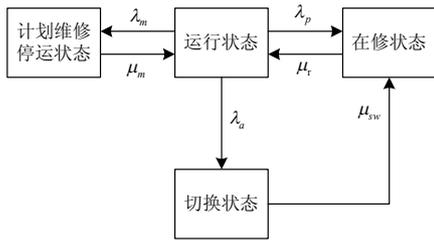


图 1 变电站主接线上的元件的四状态模型图

Fig. 1 Four-state model diagram of substation components

图 1 中： $\lambda_a$  表示主动失效比如短路故障引起的失效率； $\lambda_p$  表示非主动失效比如开路故障引起的失效率； $\lambda_m$  表示计划检修状态的转移率； $\mu_{sw}$  表示成功倒闸切换率； $\mu_r$  表示从在修到运行的修复率； $\mu_m$  表示从计划检修到运行的修复率<sup>[10]</sup>。

本文中变电站电气主接线风险评估采用 Petri 网模型选择系统状态，同时为了减少计算量，只考虑发生包括两阶及两阶以下的重叠失效事件，在元件发生失效时只考虑出现一次断路器拒动现象，因为三个以上元件的同时失效和发生两个以上断路器拒动的现象概率极低，简化是合理的。

### 2.2 基于 LCC 的变电站主接线的风险评估的主要步骤

变电站主接线的风险评估的主要步骤如下。

1) 对变电站所有节点进行编号。一条母线是一个节点，其余设备有两个节点，位于设备两端，按

照从电源点到母线再到负荷点的方向从 1 开始编号。

2) 建立 Petri 网模型。将变电站元件建立多个子集合，每一个子集合中只包含一个元件以及与它有保护关系的断路器，根据每个集合建立相应的 Petri 网模型，绘制如图 2、图 3 所示的 Petri 网图形。

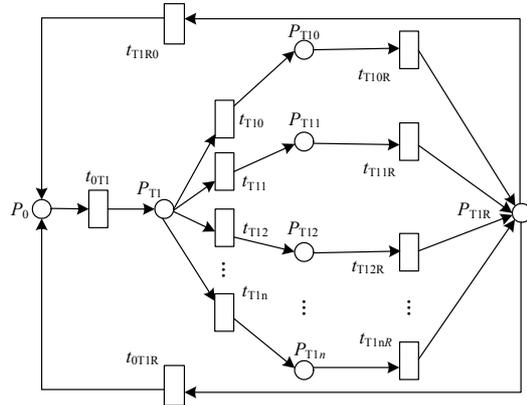


图 2 变压器失效的 Petri 网图

Fig. 2 Petri nets figure of transformer failure

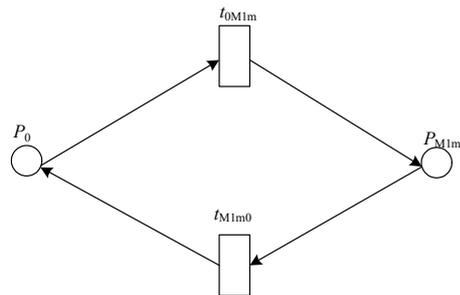


图 3 母线计划检修的 Petri 网图

Fig. 3 Petri nets figure of planned bus overhaul

图 2 中绘制的 Petri 网图涉及的子集合包含一台变压器  $T_1$  和与它有保护关系的断路器  $QF_1, QF_2, QF_3, \dots$ ，所将发生的状态包括  $P_0, P_{T_1}, P_{T_10}, \dots, P_{T_1n}, P_R$ 。

其中  $P_0$  表示所有元件处于正常的运行状态， $P_{T_1}$  表示变压器  $T_1$  发生失效事件处于切换状态， $P_{T_10}$  表示和变压器  $T_1$  有保护关系的断路器都正常断开。 $P_{T_1n}$  表示  $QF_n$  发生拒动现象，其他断路器正常断开， $P_R$  表示通过倒闸操作变压器  $T_1$  处于在修状态。 $T = (t_{0T_1}, t_{T_10}, t_{T_11}, \dots, t_{T_1n}, t_{T_10R}, \dots, t_{T_1nR}, t_{T_1R0}, t_{0T_1R})$  表示转移向量，其中  $t_{0T_1}$  表示变压器主动失效过程； $t_{T_10}$  到  $t_{T_1n}$  表示与变压器有保护关系的断路器的动作过程， $t_{T_10}$  表示相关断路器都正常断开， $t_{T_1n}$  表示相关的第

$n$  台断路器发生拒动;  $t_{T_1,0R}$  到  $t_{T_1,nR}$  表示倒闸操作过程,  $t_{0T_1,R}$  表示元件发生非主动失效过程,  $t_{T_1,R0}$  表示从在修状态转移到正常运行的过程。  $n$  表示与变压器  $T_1$  有保护关系的断路器有  $n$  台。其他元件的失效事件的 Petri 网图与图 2 有相同结构。

图 3 中绘制的 Petri 网图涉及的子集合包含一条母线  $M_1$ ,  $P_m$  表示母线处于计划检修状态。  $t_{0M_1,m}$  表示元件从正常运行到计划检修状态的过程,  $t_{M_1,m0}$  表示元件从计划检修状态到正常运行的过程, 其它元件的计划检修事件的 Petri 网图与图 3 有相同结构。

3) 求解各个子集合的 Petri 网来获取每个元件处于各个状态的概率。计算结果为

元件处于运行状态下概率与频率

$$P_0 = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \quad (6)$$

$$f_0 = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \cdot (\lambda_a + \lambda_p + \lambda_m) \quad (7)$$

元件处于切换状态的概率与频率

$$P_a = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \cdot \frac{\lambda_a}{\mu_{sw}} \quad (8)$$

$$f_a = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \cdot \lambda_a \quad (9)$$

元件处于在修状态的概率与频率

$$P_r = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \cdot \frac{(\lambda_a + \lambda_p)}{\mu_r} \quad (10)$$

$$f_r = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \cdot (\lambda_a + \lambda_p) \quad (11)$$

元件处于计划检修状态概率与频率

$$P_m = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \cdot \frac{\lambda_m}{\mu_m} \quad (12)$$

$$f_m = \frac{\mu_{sw}\mu_m\mu_r}{\lambda_a\mu_m\mu_r + \lambda_m\mu_{sw}\mu_r + (\lambda_a + \lambda_p)\mu_{sw}\mu_m + \mu_{sw}\mu_m\mu_r} \cdot \lambda_m \quad (13)$$

式中  $\mu_{sw}$ 、 $\mu_m$ 、 $\mu_r$  的表达式为

$$\mu_{sw} = \frac{1}{r_1} = \frac{8760}{MTTR_1} \quad (14)$$

$$\mu_m = \frac{1}{r_2} = \frac{8760}{MTTR_2} \quad (15)$$

$$\mu_r = \frac{1}{r_3} = \frac{8760}{MTTR_3} \quad (16)$$

MTTR 表示平均修复时间,  $r$  是以年为单位的 MTTR。实际工程中, 统计的失效数据结果一般都是失效频率、平均修复时间和倒闸操作时间, 所以将实际的主动和非主动失效频率, 平均修复时间代入公式中求取主动失效引起的失效率  $\lambda_a$ , 非主动失效引起的失效率  $\lambda_p$  和计划检修状态的转移率  $\lambda_m$ 。

4) 用 Petri 网选择系统状态, 只考虑一阶、二阶失效事件和计划检修事件。变电站元件的每一个子集合都可以构造一个关联矩阵, 用 Petri 网的基本方程可以表示从初始标识  $m_0$  到标识  $m$  的转换过程  $m = m_0 + W \cdot u$ , 如图 2 中变压器  $T_1$  的子集合, 它的 Petri 网关联矩阵为  $(n+3)(2 \times n+4)$  阶。关联矩阵为

$$\begin{matrix} t_{0T_1} & t_{T_1,0} & t_{T_1,R} & \cdots & t_{T_1,n} & t_{T_1,nR} & t_{0T_1,R} \\ P_{T_1} & P_{T_1,0} & P_{T_1,R} & \cdots & P_{T_1,n} & P_{T_1,nR} & P_{0T_1,R} \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

关联矩阵中每一列表示转移过程, 每一行表示元件状态, 初始位置  $m_0$  为  $(n+3) \times 1$  阶列向量  $(0,0,0,\dots,0)^T$ , 特征向量  $u$  是  $(2 \times n+4) \times 1$  阶列向量。通过  $u$  的不同取值可以枚举确定系统状态, 讨论变压器失效事件中由于本文只考虑只有一台断路器拒动现象。  $u$  分为三部分, 第一部分是  $u$  的第一行, 取值为 0 或 1, 1 代表元件发生失效将处于切换状态, 0 代表该元件正常运行。第二部分是  $u$  的第二行起到倒数第二行结束, 其中将第  $2 \times m$  与  $2 \times m+1$  项 ( $m=1,2,3,\dots,n,n+1$ ) 分为一组, 一共有  $n+1$  组, 每

一组取值为 0, 0 或 1, 0 或 1, 1, 其中 1, 0 表示元件失效后断路器动作的过程, 1, 1 表示元件倒闸操作后由切换状态转移为在修状态的过程。第三部分是  $u$  的最后一项, 取值为 0 或 1, 取 1 时表示元件由正常运行直接转移到在修状态的过程, 比如非主动失效。

此外, 第一部分的取值与第三部分的取值是相异的, 即最后一部分取 1 时前两部分都只能取 0; 第一部分取 1 时, 第二部分分情况讨论, 第三部分取 0。由于本文只考虑断路器可能发生一次拒动现象, 所以第二部分只有一组值取 1, 0 或 1, 1, 其他组取 0, 0, 共有  $n+1$  种情况。

如果考虑多台断路器拒动现象, 可以在  $u$  的第二部分每组按排列组合方式确定各项值, 如果考虑两台断路器失效就有  $C_{n+1}^2$  种情况。这样只需按照公式  $m = m_0 + W \cdot u$  就可以确定系统状态。

#### 5) 考虑系统状态的概率

(1) 考虑系统发生一阶失效事件或计划检修事件的概率。Petri 网基本方程中每一组  $u$  对应一个系统状态就对应一个概率, 此外计算失效或计划检修的系统概率要同时考虑所有元件的运行状态, 比如图 2 中计算变压器  $T_1$  失效后的概率除考虑自身失效概率外还要考虑其它元件的正常运行的概率, 同理, 图 3 中母线  $M_1$  计划检修的概率也要考虑其他元件的正常运行的概率。

变压器失效处于切换状态且断路器工作正常的概率

$$P_{T_1,0} = P_{T_1} \times \prod_{k=2}^m p_k \times \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n \left[ p_{bi} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (1 - p_{bj}) \right] \right\}, \quad (17)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

变压器失效处于切换状态且第  $i$  台断路器发生拒动的概率

$$P_{T_i} = P_{T_1} \times \prod_{k=2}^m p_k \times \left[ p_{bi} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (1 - p_{bj}) \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

变压器失效处于在修状态的概率

$$P_{T_{1R}} = P_{T_{1r}} \times \prod_{k=2}^m p_k \quad (19)$$

式中:  $P_{T_1}$  表示变压器  $T_1$  发生处于切换状态的概率;  $P_{T_{1R}}$  表示变压器处于在修状态概率;  $p_k$  表示其他元件正常运行的概率;  $p_{bi}$ ,  $p_{bj}$  分别表示与变压器有保护关系的第  $i$  台断路器和第  $j$  台发生拒动事件的概率;  $m$  表示有  $m$  个元件;  $n$  表示与该元件有保护关系的断路器个数。

其他元件的失效系统状态概率公式与上述公式相同。

图 3 中母线  $M_1$  发生计划检修事件的概率为

$$P_{M_1,J} = P_{M_{1m}} \times \prod_{k=2}^m p_k \quad (20)$$

式中:  $P_{M_{1m}}$  表示母线  $M_1$  处于计划检修状态的概率;  $P_k$  表示其他元件正常运行的概率;  $m$  表示有  $m$  个元件。

其他元件的计划检修系统状态概率公式与上述公式相同。

(2) 考虑系统发生两阶失效事件的概率, 将两个失效子集合的计算结果进行并运算, 注意要除去两个失效事件中可能有相同的断路器发生拒动事件的概率。

$$p = \frac{(p_1 \times p_2)}{p_b} \quad (21)$$

式中:  $p_b$  表示两个失效事件中有相同的断路器发生拒动事件的该断路器拒动概率;  $p_1$ 、 $p_2$  分别表示两个失效事件的概率。

(3) 考虑发生一阶失效事件和计划检修事件同时发生。要注意因某台元件的计划检修也被隔离的其它邻近元件不用再讨论, 以及因计划检修造成某些线路失去电气连接, 这些线路上的元件也不用讨论。

6) 检验电源点和负荷点之间的连通性。根据前面所做的标号, 用直接标号法进行分析, 如果一个负荷点从所有电源点断开, 则这个系统状态被认为该负荷点的失效状态, 并记录消减的负荷。

负荷的消减可能发生在多种情况, 一种情况元件发生主动失效时断路器响应断开线路或某个断路器拒动使故障扩大, 此时可能造成某个负荷点断电, 对应图 2 的  $P_0, P_{T_1}, P_{T_{10}}, \dots, P_{T_{1n}}$  位置; 随后发生的倒闸操作隔离失效元件, 其他健康元件恢复供电, 也可能造成某个负荷点断电, 对应图 2 的  $P_R$  位置, 这两种情况由于起因是相同即元件发生失效, 所以可以合统计消减的负荷; 另一种情况元件发生非主动失效, 可能造成某个负荷点断电, 对应图 1 的  $\lambda_p$  和图 2 的  $P_R$  位置; 最后一种情况发生在元件处于计划检修状态, 可能造成某个负荷点断电, 对应图 3 的过程。

按照负荷点分别统计各自的消减负荷以及对应的发生概率。

7) 计算每个负荷点的风险指标。

负荷消减概率 PLC

$$PLC_k = \sum_{i=1}^{N_k} p_{ik} \quad (22)$$

式中:  $p_{ik}$  是与负荷点  $k$  相关的失效状态  $i$  的概率;

$N_k$  是引起负荷点  $k$  削减负荷的状态的总数。

期望缺供电力  $EENS$

$$EENS_k = \sum_{i=1}^{N_k} p_{ik} L_k \quad (23)$$

式中,  $L_k$  是负荷点  $k$  在所考察期间(多数情况为 1 年)的平均负荷。

期望断供成本  $UEC$

$$UEC = EENS \times C_{\text{price}}$$

式中,  $C_{\text{price}}$  是系统售电价格。

### 3 算例

本文算例采用风险费用评估方法讨论选择某变电站主接线的两种接线设计方案的优劣, 第一种方案是内桥接线方式, 第二种方案是外桥接线方式, 验证本文提出的基于 LCC 管理的变电站主接线的风险评估的可行性。

首先, 如图 4 所示分别将内外桥所有节点按前文所述方法进行编号。

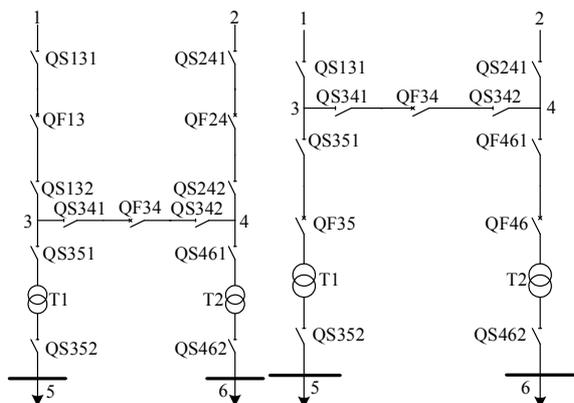


图 4 内桥和外桥接线方式图

Fig. 4 Wiring of inter-bridge and outer-bridge

表 1 中给出了变电站主接线上主要元件的相关数据。除此之外, 本案例中设定由故障或检修到正常运行的倒闸切换时间为 1 h, 断路器拒动率为 0.0015 次/年, 单位停电费用损失  $C_{\text{price}}$  按照 2006 年电网平均售电价格 0.461 元/kwh, 负荷点 5、6 的平均负荷分别是 40 MWh。此外在本例讨论过程中默认各元件在发生某种非正常运行状态下, 其余元件剩余容量能保证系统的正常运行。

然后根据表 1 中失效频率与修复时间和以上设定数据, 通过前文叙述方法计算得到各元件处于各状态的概率, 如表 2 所示。

表 1 变电站元件数据

元件	失效频率		修复时间 (/时/次)	计划检修时间 (/时/次)
	主动性/ (次/年)	非主动性 (/次/年)		
变压器	0.035 2	0.003 3	500.0	288
断路器	0.016 3	0.001 2	100.0	96
母线	0.175 2		40.0	48

表 2 元件处于各状态的概率

Table 2 Probability of element in each states

元件	正常运行 概率	切换状态 概率	在修状态 概率	计划检修 概率
变压器	0.967 5	4.018E-6	2.197E-3	3.03E-2
断路器	0.989 2	1.86E-6	1.37E-5	1.075E-2
母线	0.995 5	2.0E-5	2.0E-5	4.52E-3

最后再根据前文讨论的方法计算两种方案各自的风险指标负荷消减概率 PLC, 期望缺供电力 EENS 和断供成本 UEC, 得表 3 两种接线方式的风险评估结果。

表 3 两种接线方式的风险评估结果

Table 3 Risk assessment results of the two methods of wiring

连接方式	母线号	PLC	EENS/(MWh/a)	UEC/元
内桥连接	5	0.0355	379.541	349 936.802
	6	0.0355	379.541	
外桥连接	5	0.0439	420.617	387 808.874
	6	0.0439	420.617	

通过两种接线方式的风险评估结果对比可以发现, 在本例讨论的情况下, 内桥连接方式的断供成本比外桥连接方式的要少, 更有优势, 所以该变电站应该采用内桥连接方式的设计方案。同时验证了本文所提出的基于 LCC 管理的变电站主接线的风险评估作为一种定量分析主接线风险评估的方法的可行性。

### 4 总结

本文提出基于 LCC 管理的变电站主接线的风险评估, 是一种定量的分析方法来实现对变电站主接线的规划和设计, 符合了企业的长期经济效益。变电站主接线的风险指标期望缺供电力 EENS 和断供成本 UEC 融合了失效频率、持续时间和损失程度, 相比其他指标可以更贴近实际的比较不同主接线连接方式的方案, 确定最优接线方式。此外本文在风险评估过程中考虑了元件可能发生的四种状态, 同时考虑断路器的拒动现象, 提出用 Petri 网的方法确定系统状态及计算相应概率, 提高了整个风险评估系统的速度和准确性。最后在算例中通过比

较计算内外桥连接方式的断供成本来确定最优方案的过程,验证了本文提出的方法的可行性。

参考文献

[1] 熊信银. 发电厂电气部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 易永辉, 王坤, 王震学, 等. 基于全寿命周期管理的智能变电站应用方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 99-103.  
YI Yonghui, WANG Kun, WANG Zhenxue, et al. Research of application schemes of smart substation based on whole-life cycle management[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 99-103.

[3] 苏海锋, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于改进均值聚类随机粒子群算法的变电站 LCC 规划[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 209-215.  
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation LCC planning based on refined mean clustering random particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 209-215.

[4] 帅军庆. 电力企业资产全寿命周期管理理论、方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[5] 张毅明, 张忠会, 姚峰, 等. 基于风险理论的电力系统元件风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 73-78.  
ZHANG Yiming, ZHANG Zhonghui, YAO Feng, et al. Risk assessment of power system components based on the risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 73-78.

[6] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 电力系统故障诊断研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 210-216.

WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 210-216.

[7] 郭创新, 游家训, 彭明伟, 等. 基于面向元件神经网络与模糊积分融合技术的电网故障智能诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 183-189.  
GUO Chuangxin, YOU Jiaxun, PENG Mingwei, et al. A fault intelligent diagnosis approach based on element-oriented artificial neural networks and fuzzy integral fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 183-189.

[8] 叶圣永, 王晓茹, 周曙, 等. 基于马尔可夫链蒙特卡罗方法的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 168-174.  
YE Shengyong, WANG Xiaoru, ZHOU Shu, et al. Power system probabilistic transient stability assessment based on Markov Chain Monte Carlo method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 168-174.

[9] RAUSAND M. Risk assessment theory, methods, and applications[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

[10] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

收稿日期: 2014-05-11; 修回日期: 2014-06-25

作者简介:

徐岩(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统保护与安全控制、新能源发电和智能电网方面的研究工作;

迟成(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为资产全寿命周期管理。E-mail: 2302682728@qq.com

(编辑 张爱琴)