

故障树分析法在水电站机组检修转子吊装中的安全分析与应用

王 科

(映秀湾水力发电总厂,四川 都江堰 611830)

摘要:水电站机组检修过程中,转子吊装事故发生的可能性较低,但事故后果非常严重,往往伴随着群伤群亡,属于绝不可接受的重大风险。因转子吊装工序工艺需求,目前尚不能够完全杜绝人员在吊物危险区附近工作,因此,解决转子吊装发生起重机械人身伤害事故的难度较大,需要采取人、机、料、法、环多重预防措施。介绍了采用故障树分析法原理,分析与事故有关的原因,找出事故发生的基本事件并制定相应的安全对策与措施。

关键词:故障树分析法;转子吊装;分析应用;水电站

中图分类号:TV7;TV738;TV734

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2013)01-0079-03

1 概述

在水电站机组检修过程中,转子吊装事故发生的可能性较低,但事故后果非常严重,往往伴随着机毁人亡,是不可接受的重大风险。笔者采用故障树分析法,找出了转子吊装作业起重伤害事故发生的基本原因,提出了防止事故发生的人员控制和其他安全对策措施,从而为水电站转子吊装工序工艺安全设计标准化和科学化提供依据。

鉴于水电站机组检修转子吊装作业通常使用单台桥式起重机或双台桥式起重机,因转子吊装工序工艺需求,目前还不能够完全杜绝作业人员进入吊物危险区,主要有以下两种情况:

(1)转子吊出或吊入机坑过程中,因转子与定子之间的间隙偏小,为防止定子和转子发生意外擦伤或碰撞,作业配合人员一般分布于定子四周,每人双手悬吊5~10 mm厚的木条并将其伸入转子与定子的空气间隙内上下左右移动。若木条不能自由移动时立即告之起重指挥人员及时纠偏,以防止转子与定子直接接触而损坏绝缘层。

(2)转子吊出或吊入安装间存放坑时,待转子悬吊一定高度停稳后,起吊作业配合人员需搬运固定转子的伸缩式支撑墩、悬转转子校对螺栓孔等,均需短暂时间进入吊装危险区。

2 故障树分析

故障树分析法是从结果到原因找出与该事故有关的各种因素之间的因果关系和逻辑关系的

分析方法,这种方法是把系统可能发生事故放在图的最上面,按系统构成要素之间的关系,分析与事故有关的原因,直到找到基本原因为止。将图1中各种因果关系用不同的逻辑门连接起来,然后应用布尔逻辑运算法则进行简化运算和分析。通过定性分析,确定各种因素对事故影响的大小,从而可以掌握和制定事故的控制要点;通过定量分析,则能计算出顶上事件发生的概率。故障树分析得出的结论可为实现系统安全目标提供依据。

通过桥式起重机起重伤害故障树分析,达到了以下目的:

- (1)识别了导致该类事故发生的基本事件(基本的设备故障)与人为失误的组合;
- (2)对导致灾害事故发生的各种因素及逻辑关系做出全面、简洁和形象的描述;
- (3)便于查明该类事故系统内固有的或潜在的各种危险因素,为设计、施工和管理提供科学依据;
- (4)使有关人员、作业人员全面了解和掌握各项防灾要点;
- (5)便于进行逻辑运算,进行定性、定量分析和系统评价。

2.1 桥式起重机起重伤害故障树分析

- (1)构建桥式起重机起重伤害故障树图(图1)。
- (2)求最小割集。

收稿日期:2012-12-11

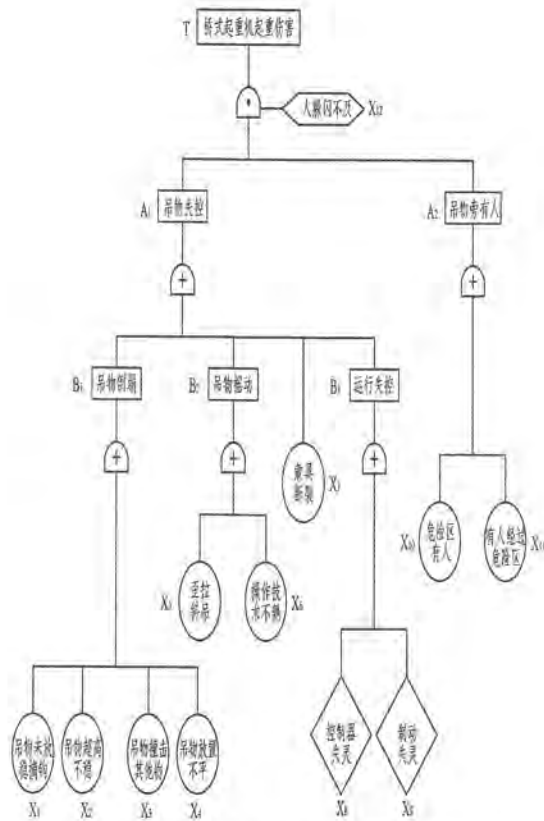


图 1 桥式起重机起重伤害故障树图

最小割集表明系统的危险性。每个最小割集都是顶上事件发生的一种可能渠道,最小割集的数目越多,系统越危险。

$$\begin{aligned}
 T &= (A_1 \cdot A_2) X_{12} \\
 &= (B_1 + B_2 + B_3 + X_7) (X_{10} + X_{11}) X_{12} \\
 &= (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9) (X_{10} + X_{11}) X_{12} \\
 &= X_1 X_{10} X_{12} + X_1 X_{11} X_{12} + X_2 X_{10} X_{12} + X_2 X_{11} X_{12} + X_3 X_{10} X_{12} + X_3 X_{11} X_{12} + X_4 X_{10} X_{12} + X_4 X_{11} X_{12} + X_5 X_{10} X_{12} + X_5 X_{11} X_{12} + X_6 X_{10} X_{12} + X_6 X_{11} X_{12} + X_7 X_{10} X_{12} + X_7 X_{11} X_{12} + X_8 X_{10} X_{12} + X_8 X_{11} X_{12} + X_9 X_{10} X_{12} + X_9 X_{11} X_{12}
 \end{aligned}$$

根据故障树最小割集最多个数判别方法,可以判定该故障树最小割集最多为 18 个,表征系统危险度较高。

(3) 求最小径集。

最小径集表示系统的安全性,也就是顶上事件不发生所需的最低限度的径集。最小径集的求法是利用它与最小割集的对偶性,做出与故障树

对偶的成功树(图 2)。

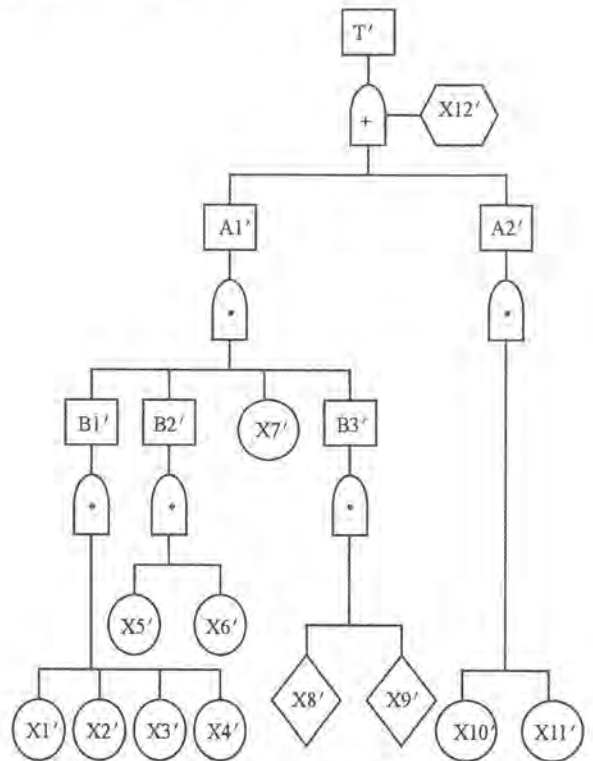


图 2 桥式起重机起重伤害成功树图

利用布尔代数化简法求成功树的最小割集:

$$\begin{aligned}
 T' &= X_{12}' + A_1' + A_2' \\
 &= X_{12}' + X_7' B_1' B_2' B_3' + X_{10}' X_{11}' \\
 &= X_{12}' + X_1' X_2' X_3' X_4' X_5' X_6' X_7' X_8' X_9' + X_{10}' X_{11}'
 \end{aligned}$$

得 3 个最小径集,分别为:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \{X_{12}'\}; P_2 = \{X_{10}', X_{11}'\}; \\
 P_4 &= \{X_1', X_2', X_3', X_4', X_5', X_6', X_7', X_8', X_9'\}
 \end{aligned}$$

最小径集最多为 3 个。对最小径集表示的故障树等效图进行分析得知,只要控制一个最小径集不发生,顶上事件就不发生,故可以选择控制事故的最佳方案,对少事件最小径集加以控制较为有利,即控制 X_{12}' (人躲闪不及)。

(4) 结构重要度分析。

结构重要度分析是从故障树结构上分析各基本事件的重要程度。即在不考虑各种基本事件的发生概率或者说假定各种基本事件的发生概率都相等的情况下,分析各种基本事件的发生对顶上事件的发生所产生的影响程度,这是一种定性的重要度分析。结构重要度分析可以采用以下两种方法。一种是利用最小割集或最小径集判断重要

度;一种是求结构重要系数。在此,笔者推荐采用最小割集或最小径集判断重要度。

根据结构重要度判别原则可知, X_{12} 是单个基本事件最小径集中的事件,其结构重要度最大;其次为 X_{10} 和 X_{11} ,为两个基本事件最小径集中的事件,结构重要度次之;而 $X_1 \sim X_9$ 是9个基本事件组成的最小径集的事件,其结构重要度最小。结构重要度排序如下:

$$I\Phi(12) > I\Phi(10) = I\Phi(11) > I\Phi(1) = I\Phi(2) = I\Phi(3) = I\Phi(4) = I\Phi(5) = I\Phi(6) = I\Phi(7) = I\Phi(8) = I\Phi(9)$$

(5) 结论。

该故障树有18个最小割集,3个最小径集,说明发生事故的可能有18种途径,因此是较为危险的。首先,只要 X_{12} (人躲闪不及)这个基本事件不发生,就可以保障无挤、压、碰撞伤害事故的发生;其次,只要因吊物作业进行时, X_{10} (危险区有人)和 X_{11} (有人经过危险区)两个基本事件不发生,亦可保障不发生挤、压、碰撞伤害事故。

2.2 人员控制措施

故障树分析结论说明,为了防止起重伤害事故的发生,必须控制人的行为。因此,必须注意以下几点。

2.2.1 作业人员分配合理

从事吊运工作的配合人员,在重物起吊前应迅速脱离起吊作业危险区,并密切注意吊物经过的危险区内是否有偶然的不安全因素出现,发现不安全因素时应及时发出警告,尽量减少作业人员暴露于危险环境的频次。

2.2.2 作业人员进入吊装危险区的时机选择

(1) 转子从发电机机坑吊入安装间存放坑。

在转子吊出、转子磁极下阻尼环露出定子线棒上端部时,定子线棒周围的作业配合人员应全部撤离吊装危险区;当转子平移到安装间、大轴法兰基本在存放坑中部位置时,将转子垂直下放到一定高度停稳后,起吊作业配合人员迅速搬运伸缩式支撑墩并将其均布在转子刹车环下,上升锁定并预留间隙1~2 cm后,派两人进入转子存放

坑内,其他配合人员旋转悬吊着的转子校对螺栓孔并做好其它设备保护措施。

(2) 转子从安装间存放坑吊入发电机机坑。

2人进入转子存放坑内,解除固定螺母,待转子垂直起升到一定高度停稳后,起吊作业配合人员上升伸缩式支撑墩锁定并撤离,转子存放坑内的2人在清理法兰面后迅速撤离,并由该2人搬移转子吊运路线上的支撑墩,其他人员禁止进入吊运危险区;将转子平移到定子线棒上方并垂直下移,当转子磁极下阻尼环与定子线棒上端部基本平行时停稳,起吊作业配合人员迅速分布于定子四周每人双手悬吊5~10 mm厚的木条并将其伸入转子与定子的空气间隙内上下左右移动,转子缓慢下移并纠偏,直到转子垂直下移吊装到位。

2.3 其他安全对策

(1) 起重量在30 t及以上的桥式起重机,对其起升机构的每一套独立驱动装置应设两套制动器,且每一套制动器均具有能单独支持额定起重量的制动能力。

(2) 检修单位应按照《桥式起重机电气部分检修技术规程》和《桥式起重机检修技术规程》在每年机组大修前开展行车例行检修,确保设备完好。

(3) 转子起吊前,检修单位应组织检查桥式起重机并在其合格后方能进行转子吊运作业,填写“桥式起重机吊运重要部件检查表”,将责任落实到人。

(4) 起吊转子至一定高度后,起落三次,检查桥式起重机起升机构动作是否可靠。

3 结语

笔者采用故障树分析方法,找出了转子吊装作业起重伤害事故发生的原因,提出了防止事故发生的多重预防措施并在实际中应用,效果良好,值得推广。

作者简介:

王科(1972-),男,四川邛崃人,高级工程师,注册安全工程师,注册安全评价师,从事水电厂安全评价及管理工作。

(责任编辑:胡友权)

四川电力验收首个500千伏机器人巡检项目通过验收

1月11日,四川省电力公司“智能巡检机器人技术在四川±500千伏德阳换流站及500千伏交流变电站的应用研究”在500千伏尖山变电站通过了省公司专家组的验收,标志着首个智能巡检机器人项目正式在±500千伏德阳换流站和500千伏尖山变电站“上岗”。该项目的实施,为提高变电站巡检自动化水平和检测准确性提供了创新性的技术检测手段,有效降低了500千伏变电站“无人值班,少人值守”模式下运行人员的劳动强度,弥补了人工巡视的不足,提高了变电站动维工作效率和质量。