

考虑供电系统运行方式的工业过程电压暂降 耐受特性评估方法

张逸^{1,2}, 李为明^{1,2}, 张嫣^{1,2}, 邵振国^{1,2}, 吴颖³, 蒋衍³

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;

2. 福建省电器智能化工程技术研究中心, 福建 福州 350108;

3. 国网厦门供电公司, 福建 厦门 361044)

摘要:针对复杂工业过程,以过程参数免疫时间(PIT)为电压暂降耐受力指标,提出一种考虑运行方式影响以及多设备备用情形的工业过程电压暂降耐受特性评估方法。首先,分析当前运行方式下节点的连通性,结合电压暂降发生点分析影响范围;其次,建立原始过程故障树并根据受扰设备的判断结果进行修正,得到受扰过程故障树;最后,利用单一设备的PIT计算全过程PIT以评估全过程的电压暂降耐受特性。对某实际薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)生产过程进行实例分析,证明该方法的正确性和可行性。

关键词:电压暂降;耐受特性;工业过程;过程参数免疫时间;供电系统运行方式

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911006

0 引言

以高端制造业为代表的现代工业,由于包含大量的过程控制器、变频调速装置、自动数据处理设备等,其生产过程对电压暂降十分敏感^[1-2]。电压暂降可造成生产过程中断、产品报废、设备损坏等严重后果,已成为工业用户面临的最严重的电能质量问题,造成了极大的经济损失^[3]。准确评估工业过程电压暂降耐受能力,是进行电压暂降经济损失评估和治理方案设计的重要依据^[4-6]。

过程由多设备按一定的方式连接而成^[7],设备受电压暂降影响后失效,导致过程中断。遵循此逻辑顺序,过程的电压暂降耐受特性评估通用流程是先判断设备失效再判断过程中断。对于设备失效的判断,传统的评估依据设备电压耐受曲线VTC(Voltage-Tolerance Curve),通过比较电压暂降特征量与设备的电压耐受范围,得出设备的受影响状态。文献[8-10]计及了设备敏感度的不确定性,对敏感设备电压暂降失效事件进行了随机模糊评估。文献[11-12]通过分析工艺流程和设备连接方式,实现了由单一设备到复杂过程的评估。实际中,单一设备中断并不会立刻导致某些过程中断,过程中断的实质是反映设备功效的物理参数(如温度、速度、力矩、压力等)超出工艺要求的范围。CIGRE/CIREN联合工作组C4.110于2010年提出了过程参数免疫时间PIT

(Parameter Immunity Time)的概念^[13]并给出了测试方法建议。PIT考虑了用户易于感知的过程参数及其变化规律,避免了讨论复杂的电气响应关系,直接反映过程对电压暂降的抵御能力,适用于对过程的评估。文献[14-16]将PIT应用于电压暂降经济损失评估,在计及过程免疫力后,评估出的过程中断次数相对减少,经济损失更接近实际情况。文献[17-18]利用故障树刻画设备与过程多事件间的关系,通过已知的单一设备的PIT即可评估全过程的PIT,但传统故障树分析忽略了供电系统不同运行方式下电压暂降实际影响范围的不同,等同于只考虑了所有设备同时遭遇电压暂降的最严重情况,评估结果过于严重,导致错误评估经济损失以及治理方案的过度投资。

本文提出一种考虑供电系统运行方式的工业过程电压暂降耐受特性评估方法。根据当前运行方式下电压暂降的实际影响范围来确定受扰设备,修正原始过程故障树,利用单一设备的PIT来计算全过程PIT,得出由PIT曲线表示的耐受特性评估结果。实例分析结果表明,本文所提方法能有效评估不同工况下工业过程的电压暂降耐受特性,相较于传统方法更接近工程实际。

1 过程中断的判定

1.1 过程PIT

C4.110工作组将过程PIT定义为:敏感过程在经受给定幅值的电压暂降后,其过程参数超过允许限制值的时间^[13]。过程参数是指设备在过程中负责管控的各项物理指标,包括温度、压力、速度等,因设备和过程而异。过程PIT示意图如图1所示。图中,电压为标么值; P_{nom} 为过程参数额定值; P_{lim} 为可接

收稿日期:2019-01-20;修回日期:2019-09-12

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2014AA-051901);福建省自然科学基金资助项目(2016J01219)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2014AA051901) and the Natural Science Foundation of Fujian Province (2016J01219)

受的限制值; t_1 为电压暂降发生时刻; Δt 为过程响应延时(设备耐受时间); t_2 为过程参数超过限值(过程中断)的时刻; $T_{PI} = t_2 - t_1$, 为过程 PIT。

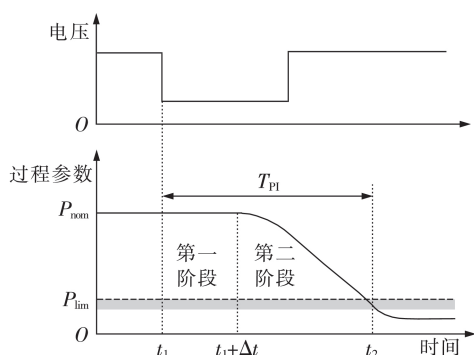


图1 过程 PIT 示意图

Fig.1 Schematic diagram of process PIT

当电压暂降持续时间 $D_s < \Delta t$ 时,过程不受影响;当 $\Delta t \leq D_s \leq T_{PI}$ 时,过程参数仍处于可接受状态,过程不中断;当 $D_s > T_{PI}$ 时,过程参数超过限值,过程中断。可见,过程 PIT 越大,电压暂降耐受能力越强。

1.2 设备失效与过程中断

过程中断分为 2 个阶段:第一阶段是设备经受电压暂降而宕机,即暂降发生时刻到设备失效为止,其时长由设备的电压耐受度决定;第二阶段是该设备作用的过程参数恶化至限值以下,造成工艺不达标从而导致过程中断,其时长由生产环境、过程参数特征和设备特性决定。

由单一设备或多设备构成的过程都具有过程参数免疫力。对于单一设备构成的过程,过程 PIT 就是该设备的 PIT;对于多设备构成的过程,设备的职能效果不同,可能有多个物理参数和限值,PIT 取决于最快超过限值的那个物理参数。

单一设备的 PIT 容易通过实测获取,而复杂过程的 PIT 不易通过实测获取。过程的划分可大可小,过程的构成方式多样,不太可能对所有过程进行 PIT 测试。工程上可行的办法是将单一设备的 PIT 按照其构成过程的组合方式进行综合分析,得到过程的全局 PIT。

1.3 过程故障树

电压暂降致使工业过程中断是一个多层级响应事件^[17],一次过程中断事件包括“设备失效”、“子过程中断”和“过程中断”3 级事件。根据工艺流程和设备分工可将各级事件通过逻辑门连接形成故障树。典型的过程构成方式有串联型和并联型^[2,14]:串联型的过程中没有互为备用的设备或子过程,在故障树中通过或门连接,表示任何一个事件发生都会导致上一级事件发生;并联型的过程中存在冗余,互为备用的设备或子过程通过与门连接,只有当与门下所有事件都发生时才会导致上一级事件发生。复杂的过程故障树可由 2 种基本类型组合表示,如

图 2 所示。

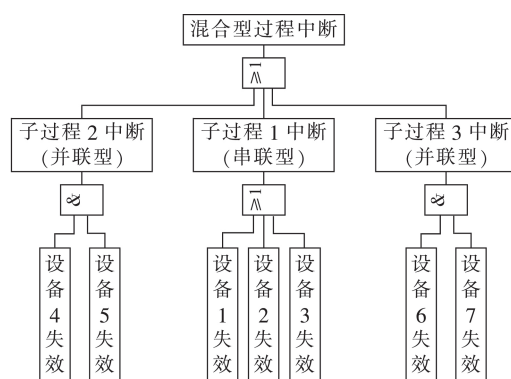


图2 过程故障树示例

Fig.2 Examples of process fault tree

以故障树为基础,可以通过已知的单一设备的 PIT 和逻辑门定义的运算规则来计算全过程的 PIT。传统故障树分析只将某一过程涉及的子过程和设备按逻辑关系全部罗列出来,而不考虑电压暂降的实际影响范围,相当于只考虑了全过程所有设备同时遭遇电压暂降的情形,导致 PIT 评估结果往往比实际严重。对于治理成本高昂的高端制造企业,单纯的评估生产过程在最恶劣情况下的电压暂降耐受能力,容易造成过度投资,增加企业的用电成本,不能满足工程要求。

1.4 供电系统运行方式的影响

当电压暂降发生时,不同的供电系统接线形式和运行状态将使得设备和过程经受不同的影响。高端制造企业的供电系统多数配有双路电源,有些还配置备用电源,并且尽量采用可靠性更高的运行方式来减小故障的影响范围,这将使得部分关键设备免受电压暂降的威胁。以下举例说明供电系统运行方式对 PIT 评估的影响。

某工艺过程的电气主接线示意图见图 3,该过程共涉及 8 台敏感设备,正常运行状态下,由独立双电源供电,各母线分列运行。若 1 号电源进线发生电压

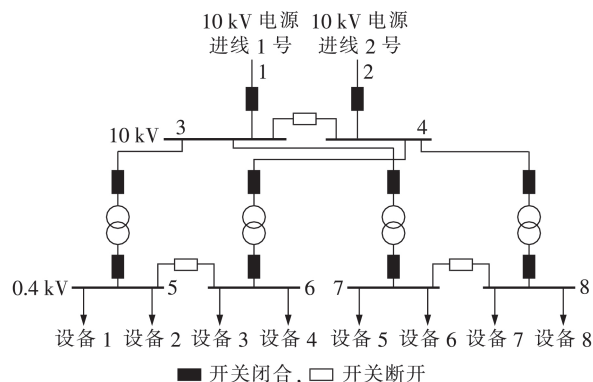


图3 某工艺过程电气主接线示意图

Fig.3 Schematic diagram of main electrical connection for a technological process

暂降,只有设备 1、2、5、6 会遭受影响,而设备 3、4、7、8 不受影响,评估此种运行方式下的 PIT 只需考察可能受影响设备的 PIT。只有当双电源同时发生电压暂降时才会出现传统故障树分析所对应的情形。

2 考虑运行方式的过程 PIT 评估方法

2.1 评估流程

本文所提评估方法主要分为以下 3 个步骤:

(1) 根据供电系统主接线图构建拓扑网络,分析当前运行方式下节点的连通性,结合电压暂降发生位置判断受扰设备;

(2) 建立过程故障树并利用电压暂降影响范围的分析结果进行修正,得到受扰过程故障树;

(3) 利用受扰设备的 PIT 来计算全过程 PIT。

具体流程如附录 A 中的图 A1 所示。

下面以图 3 所示的某工艺过程供电系统运行方式为例介绍本文所提方法的具体步骤。

2.2 判断受扰设备

将评估对象(可以是整个企业或者某一工艺制程)的供电系统主接线图抽象成一个拓扑图^[19]。将电源、母线视为节点,变压器、开关元件等均视为支路,则图 3 所示的主接线图可转化为图 4(a)所示的原始拓扑网络。对节点支路进行编号后,可用节点-支路关联矩阵 $A=[a_{ij}](i=1,2,\dots,8;j=1,2,\dots,9)$ 来描述其拓扑结构,其中,元素 a_{ij} 表示节点 i 与支路 j 的连通性,当节点 i 与支路 j 连通时 $a_{ij}=1$,否则 $a_{ij}=0$ 。

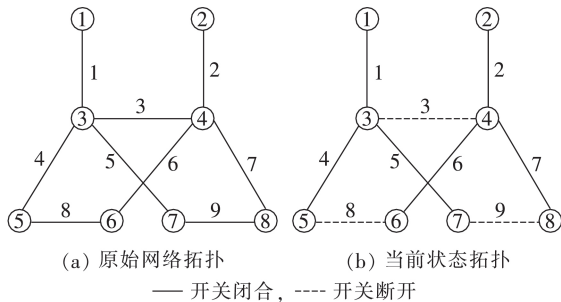


图 4 供电网络拓扑图

Fig.4 Topology diagram of power supply network

若系统中所有开关闭合,则此时的关联矩阵称为原始关联矩阵,记为 A_0 。

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

系统的运行方式可由开关的状态矢量 $S=(s_j)$ 表示。开关闭合时 $s_j=1$,开关断开时 $s_j=0$ 。图 4(b)所

示的当前运行状态拓扑图可由式(2)表示:

$$S=[1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (2)$$

将 A_0 的每一行与 S 中的对应元素进行按位与运算可得当前运行方式的关联矩阵,记为 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于由 m 个节点、 n 条支路构成的拓扑网络,可由节点-节点连通矩阵 $C=[c_{ij}]$ 表示节点之间的连通性,若节点 i 与节点 j 通过任一支路连通,则 $c_{ij}=1$,否则 $c_{ij}=0$ 。由节点-支路关联矩阵 A 与支路-节点关联矩阵 $B=A^T$ 进行布尔矩阵乘法运算^[19]可得 C :

$$C=A \cdot B=A \cdot A^T \quad (4)$$

其中,“ $\cdot$ ”表示布尔乘法运算。 C 的具体运算过程为:

$$c_{ij} = \bigcup_{k=1}^n (a_{ik} \cap a_{jk}) \quad (5)$$

其中,“ $\cup$ ”表示或运算;“ $\cap$ ”表示与运算。

经一次布尔乘法运算得到的 C 仅表示节点之间的直接连通性质,称为 1 级节点-节点连通矩阵,并记为 $C^{(1)}$ 。

$$C^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由节点连通性的传递性质^[20]及 C 的对称性,对 $C^{(1)}$ 作布尔自乘运算,可得 2 级节点-节点连通矩阵为:

$$C^{(2)} = C^{(1)} \cdot C^{(1)} \quad (7)$$

其具体运算过程和计算结果分别如式(8)和式(9)所示。

$$c_{ij} = \bigcup_{k=1}^m (c_{ik} \cap c_{kj}) = \bigcup_{k=1}^m (c_{ik} \cap c_{jk}) \quad (8)$$

$$C^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

依照上述步骤不断进行迭代自乘,挖掘节点之

间的间接连通关系,直到结果不再发生变化,即 $C^{(n)} = C^{(n-1)} \cdot C^{(n-1)}$ 时,最终连通矩阵 C 表示了该运行方式下全部的节点连通关系。

$$C = C^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

本方法将与发生电压暂降的电源节点相连通且与其他正常工作电源节点相连通的节点判定为受扰节点,用受扰节点矢量 $D=[d_i]$ 表示,元素 $d_i=1$ 表示该节点遭受暂降, $d_i=0$ 表示该节点不受影响,并认为接在该节点上的设备均为受扰设备。若有 p 个电源节点发生电压暂降, q 个电源节点正常工作,则 d_i 的具体求取过程如下:

$$d_i = \left(\bigcup_{s=1}^p c_{is} \right) \cap \left(\bigcup_{g=1}^q \overline{c_{ig}} \right) \quad (11)$$

其中, s 为发生电压暂降的电源节点编号; g 为正常工作的电源节点编号; “ $\neg$ ” 表示非运算。

本例中,若1号电源进线处(节点1)发生电压暂降,2号电源正常工作,则 C_1 与 $\overline{C_2}$ 进行按位与运算:

$$d_i = c_{i1} \cap \overline{c_{i2}} = c_{i1} \cap \overline{c_{i2}} \quad (12)$$

可得受扰节点矢量为:

$$D = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0] \quad (13)$$

判断得出受扰节点为3号、5号、7号节点,接在这3段母线上的设备受到电压暂降影响,又由于没有设备直接接在3号母线上,故受扰设备为设备1、2、5、6。下文均以此种运行方式为例。

2.3 建立受扰过程故障树

建立如图5所示的原始故障树,其包含2个子过程,通过或门连接,任一子过程中断都将导致过程中断。子过程1由设备1—4组成,通过或门连接,任一设备失效均导致子过程1中断;子过程2包括2个2级子过程,接于与门下,表示互为备用,只有2个2级子过程都中断时,上一级子过程才中断。

为了准确评估不同暂降下的PIT,需要根据受扰设备判断结果在原始故障树上保留受影响且会导致过程中断的部分,删除不受影响的部分。对于串联型(通过或门连接)过程,在故障树上保留受扰设备或过程,删除非受扰部分;对于并联型(通过与门连接)过程,受扰设备或过程存在备用,若其备用不受影响,则该过程不会中断,接于该与门下的所有设备都予以删除。通过设备、子过程和过程逐级的判断分析,可得到图3对应的受扰过程故障树见图6。

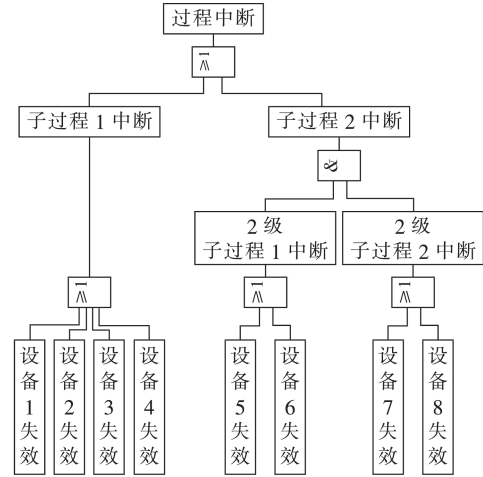
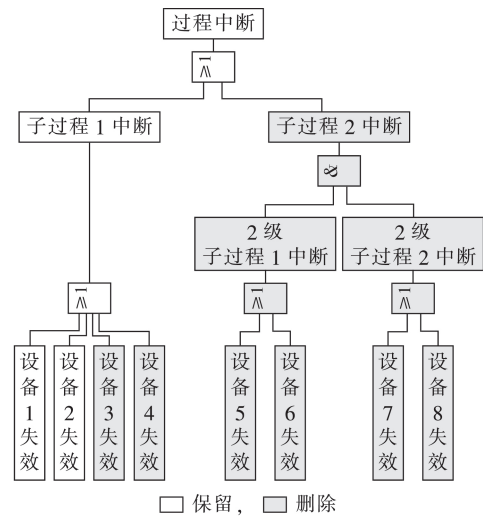


图5 原始过程故障树

Fig.5 Original fault tree of process



□ 保留, □ 删除

图6 受扰过程故障树

Fig.6 Fault tree of disturbed process

2.4 计算过程PIT

从底层开始,由逻辑门下各设备的PIT值逐层计算上一级过程的PIT,直至顶事件。

对于包含 J 台设备或子过程的串联型过程,其PIT等于各设备和子过程的PIT的最小值,如式(14)所示。

$$T_{PI}^o = \min(T_{PI1}, T_{PI2}, \dots, T_{PIJ}) \quad (14)$$

对于包含 K 台设备或子过程的并联型过程,其PIT等于各设备和子过程的PIT的最大值,如式(15)所示。

$$T_{PI}^a = \max(T_{PI1}, T_{PI2}, \dots, T_{PIK}) \quad (15)$$

对于一个包含 M 个串联型子过程和 N 个并联型子过程的生产过程,其全局PIT等于或门下各子过程PIT和与门下最大的子过程PIT中的最小值,如式(16)所示。

$$T_{PI}^p = \min(T_{PI1}^{os}, T_{PI2}^{os}, \dots, T_{PIM}^{os}, \max(T_{PI1}^{as}, T_{PI2}^{as}, \dots, T_{PIN}^{as})) \quad (16)$$

对于本文示例,可得: $T_{pi}^p=\min(T_{pi1},T_{pi2})$ 。

由不同电压暂降幅值下的过程免疫时间绘制出类似于敏感设备 VTC 的敏感过程 PIT 曲线,可认为 PIT 曲线下方区域的电压暂降不会引起过程中断,而曲线上方区域的电压暂降会引起过程中断。

对于不同的运行方式及电压暂降发生位置,重复以上步骤即可得到一组由 PIT 曲线刻画的工业过程电压暂降耐受特性。

3 应用案例

将本文所提方法应用于福建厦门市火炬高技术园区某半导体行业重要用户(自建专用变电站,最高电压等级为 110 kV,主变压器容量为 $2\times 63\text{ MV}\cdot\text{A}$,日用电量为 $2.5\times 10^6\text{ kW}\cdot\text{h}$),以薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)生产过程为例,评估其在各种典型运行方式下的 PIT。

3.1 敏感过程分析

TFT-LCD 的生产过程主要包括阵列(array)、彩膜(CF(Color Filter)、成盒(cell)和模组(module)4 个子工艺过程^[18],其连接顺序如图 7 所示。

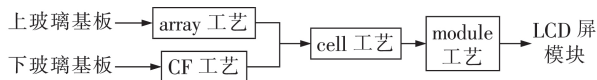


图 7 TFT-LCD 生产工艺流程

Fig.7 Production process of TFT-LCD

为了保证产品的良品率和设备正常运转,多数工艺过程对压力、温度、湿度、洁净度等过程参数有严格的要求,这些苛刻的生产条件大部分由水系统、气体系统、化学系统、真空系统等厂务系统来保障,比如,制程机台的冷却需要工艺冷却水(PCW),清洗和稀释需要超纯水(UPW),一般冲吹和仪器气缸需要干燥压缩空气(CDA),空间填充和洁净冲吹需要一般氮气(GN2)或纯化氮气(PN2)。通常一个厂务系统需要同时保障多个工艺制程,因此厂务设备宕机往往比工艺设备宕机造成的影响更大。该用户的各厂务系统均有 2 组设备互为备用,其故障树见附录 B 中的图 B1。工艺过程有多条生产线并列,关键的工艺设备配有备用,同一工艺过程的多条产线之间也是互为备用的关系。以单条产线为例,由工艺过程和厂务系统中较为敏感的部分构成整个生产过程故障树,见附录 B 中的图 B2。

3.2 供电系统运行方式

厂内 TFT-LCD 生产过程供电系统主接线示意图如附录 B 中的图 B3 所示,2 路 110 kV 电源进线经 2 台主变向厂内 4 个主要用电区域供电,10 kV 备用电源来自其他上一级变电站出线(在其他企业中也可能来自柴油发电机组)。各用电区域在接线上均可由 3 路电源供电,但由于单电源带载能力有限,除

2 台主变都正常供电外的其他任何一种运行状态均无法实现满负荷运转。

该供电系统具有 3 种典型工作状态:①正常状态下,2 台主变同时投入,满负荷运行;②检修状态下,单台主变退出,由另一台主变供电,单台主变容量有限,损失部分生产力;③紧急状态下,仅由 10 kV 备用电源供电,保证最低限度的生产运作。

3.3 评估结果

不同电压暂降幅值下,敏感设备耐受能力不同,过程参数的变化规律也不同,由调研实测及现有文献^[17-18]可得,正常运行状态经受暂降幅值为 0.7 p.u. 的电压暂降时,各关键设备的 PIT 值如表 1 所示。

表 1 TFT-LCD 生产过程关键设备的 PIT 值

Table 1 Key equipment PITs of TFT-LCD production process

项目	工艺/厂务	敏感设备	PIT/ms
工艺过程	array	气象沉积(CVD&PVD)设备	153
		激光退火(ELA)设备	163
		蚀刻机(DET&WET)	350
		离子注入掺杂(IPM)设备	189
		快速热退火(RTA)设备	256
	CF	涂布机	413
		曝光机	160
		显影机	155
	cell	液晶滴注设备(ODF)	119
		真空对盒机	155
		紫外固化炉	205
	module	清洗机	698
		光学自检设备	150
		PC 机	155
厂务系统	PCW 系统	PLC 控制器	401
		换热器	825
		温度、压力传感器	440
	UPW 系统	阴阳离子交换器(IE)	191
		混床(MBX)	575
		紫外灯(UV)	316
	CDA 系统	变频调速系统(ASD)	152
		空气压缩机	505
		微粒子过滤器	358
	GN2&PN2 系统	PLC 控制器	401
		纯化器	716
		压力传感器	440
	化学系统	化学供应机台(CDU)	273
		混酸机台(CMU)	397
	真空系统	真空泵	440
		变频调速系统(ASD)	152

采用本方法对正常、检修、紧急 3 个典型状态的评估结果以及与传统评估方法的结果对比见表 2。

由表 2 可知,正常运行状态下的 PIT 最大,检修状态下的 PIT 次之,紧急状态下的 PIT 最小。同时,考虑运行方式的评估结果均大于未考虑运行方式的评估结果^[18]。这是由于:正常状态下所有母联开关断开,2 路主电源分别向常规负责区域供电,大部分过程存在充足冗余,电压暂降耐受能力最强,过程

表2 各运行方式下过程PIT评估结果
Table 2 Results of process PIT evaluation under different operation modes

运行方式	暂降发生点	综合 PIT/ms
正常	单电源	401
	双电源	152
检修	单电源	118
紧急	备用电源	91
未考虑	—	83

PIT最大;检修状态下闭合部分母联开关,单电源供电,部分设备和过程失去备用,电压暂降耐受能力下降,过程PIT较小;紧急状态下,备用电源只能保证各关键工艺区域和基本厂务系统部分设备运行,电压暂降耐受能力最弱,过程PIT最小。文献[18]未考虑运行方式和设备备用,PIT评估结果最低。

根据不同暂降幅值下的过程PIT评估结果,可绘制考虑不同运行方式的PIT曲线簇,以刻画该TFT-LCD生产过程的电压暂降耐受特性,并与文献[18]未考虑运行方式的曲线进行对比,结果见图8。图中,电压暂降幅值为标么值;任意的电压暂降事件可由暂降幅值和暂降持续时间这一对特征量构成的点表示,位于PIT曲线上方的电压暂降会导致过程中断,而过程对PIT曲线下方的电压暂降免疫。

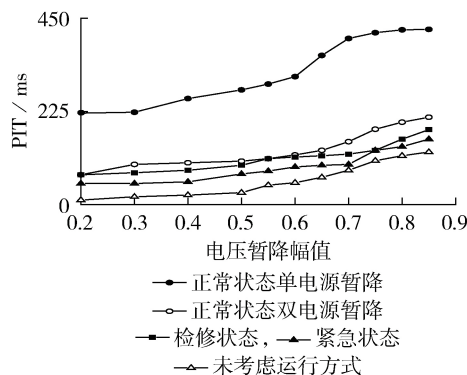


图8 TFT-LCD生产过程PIT曲线簇

Fig.8 PIT curve cluster of TFT-LCD production process

由图8可看出,正常状态单电源暂降、正常状态双电源暂降、检修状态、紧急状态的PIT曲线依次降低。经调研和实测发现,过程参数的变化规律与运行方式有关,在正常运行状态下,所有设备处于满功率状态,过程参数维持在较高的水平,相关设备失效后过程参数下降慢,PIT较长;非正常状态下,个别设备无备用且非满功率运行,过程参数维持在不至于越限的较低水平,相关设备失效将导致过程更快地中断,PIT较短。

4 结论

本文面向工业过程,提出一种计及系统运行方式影响、过程与设备备用情形的综合PIT计算方法,通过算例分析,得到以下结论。

(1)工业过程包含的设备群在逻辑关系上按工序连接,而在接线方式上由多电源点供电,造成了供电系统不同运行方式下电压暂降实际影响范围不同,因此工业过程受暂降影响,不能用传统故障树模型来分析。

(2)并列的产线和设备使得故障树中包含大量与门,在只有部分设备受扰的情况下,全过程的耐受力往往并非取决于所有设备中最敏感的那个,而是缺少备用的关键设备。单一设备的PIT与其工作状态有关,这使得不同运行方式下评估结果存在差异。

(3)本文方法能得出不同运行方式、不同电压暂降发生位置下的多组PIT评估结果,相较于传统方法,本文的评估结果更接近实际情况,可有效指导电压暂降的应对措施和治理方案的设计,并帮助用户制定生产计划和调整运行方式,具备工程应用价值。

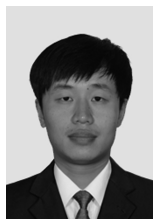
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] CHAN J Y, MILANOVIC J V. Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions [C]//International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain: IEEE, 2007: 1-6.
- [2] 甄晓晨,陶顺,肖湘宁,等.电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(12):104-111. ZHEN Xiaochen, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. An evaluation model of plant-level economic loss due to voltage dips [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 104-111.
- [3] 刘旭娜,肖先勇,刘阳,等.工业过程电压暂降风险等级层次化多级模糊综合评估[J].电网技术,2014,38(7):1984-1988. LIU Xuna, XIAO Xianyong, LIU Yang, et al. Hierarchical multi-level fuzzy comprehensive evaluation on risk level of voltage sag during industrial process [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1984-1988.
- [4] MOHAMMED B S, RAO K S R, IBRAHIM R, et al. Application of custom power park to improve power quality of sensitive loads [C]//India International Conference on Power Electronics. New Delhi, India: IEEE, 2013: 1-6.
- [5] 刘阳,肖先勇,刘旭娜,等.考虑用户定量需求的优质电力园区DVR优化配置[J].电网技术,2015,39(3):823-828. LIU Yang, XIAO Xianyong, LIU Xuna, et al. Optimal configuration of DVR in premium power park considering customers' quantitative demand [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 823-828.
- [6] 李丹丹,肖先勇,刘阳,等.利用过程免疫时间优化保护的电压暂降减缓方案[J].电力自动化设备,2014,34(9):95-100. LI Dandan, XIAO Xianyong, LIU Yang, et al. Voltage sag mitigation scheme using protection optimization with process immunity time [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 95-100.
- [7] MILANOVIC J V, GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags—part I: the methodology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 918-924.
- [8] 赵泓,肖先勇,李政光,等.敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J].电力自动化设备,2011,31(10):70-75. ZHAO Hong, XIAO Xianyong, LI Zhengguang, et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment

- failure rate due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 70-75.
- [9] 肖先勇, 杨洪耕, 陈武, 等. 敏感设备电压暂降敏感度的模糊随机评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 90-95.
XIAO Xianyong, YANG Honggeng, CHEN Wu, et al. Fuzzy-random assessment method of equipment sensitivity to voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 90-95.
- [10] 杨达, 肖先勇, 汪颖. 计及失效事件和严重程度不确定性的设备电压暂降失效率评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 107-111, 117.
YANG Da, XIAO Xianyong, WANG Ying. Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 107-111, 117.
- [11] CHAN J Y, MILANOVIC J V, DELAHUNTY A. Risk-based assessment of financial losses due to voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 492-500.
- [12] CHAN J Y, MILANOVIC J V, DELAHUNTY A. Generic failure-risk assessment of industrial processes due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2405-2414.
- [13] CIGRE/CIRE/UE Joint Working Group C4.110. Voltage dip immunity of equipment and installations[R]. Paris, France: CIGRE, 2010.
- [14] WANG X, LI C, LI H. Economic losses risk assessment of industrial users due to voltage sags based on uncertainty of process immunity[C]//Power and Energy Engineering Conference. Xi'an, China: IEEE, 2016: 1139-1142.
- [15] REUSEL K V, STOCKMAN K, DRIESSENS W. "Process Immunity Time" assessment of its practicability in industry[C]//International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, Italy: IEEE, 2010: 1-4.
- [16] CEBRIAN J C, MILANOVIĆ J V, KAGAN N. Probabilistic assessment of financial losses in distribution network due to fault-induced process interruptions considering process immunity time[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1478-1486.
- [17] 李春海, 李华强, 刘勃江. 基于过程免疫不确定性的工业用户电压暂降经济损失风险评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 136-142.
LI Chunhai, LI Huaqiang, LIU Bojiang. Risk assessment based on process immunity uncertainty for industrial customers' financial losses due to voltage sags[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 136-142.
- [18] 张旭彬, 张逸, 张孔林, 等. 基于过程免疫时间的半导体企业电压暂降经济损失预评估方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(6): 43-49.
ZHANG Xubin, ZHANG Yi, ZHANG Konglin, et al. Economic losses pre-evaluation of semiconductor enterprise due to voltage sags based on process immunity time[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(6): 43-49.
- [19] 储俊杰. 变电所一次主接线电气连通性分析的数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 31-33.
CHU Junjie. Mathematical model for analyzing electrical connectedness of main electrical scheme in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 31-33.
- [20] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-12.
WANG Xiangzhong, LI Xiaolan. Topology identification of power network based on incidence matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-12.

作者简介:



张逸

张逸(1984—),男,湖北武汉人,副教授,博士,研究方向为电能质量、主动配电网和电力数据分析(E-mail: zhangyiscu@163.com);

李为明(1994—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: 981307858@qq.com);

张嫣(1979—),女,福建福州人,讲师,硕士,通信作者,研究方向为电能质量及电力系统稳定与控制(E-mail: zyww@fzu.edu.cn);

邵振国(1970—),男,江苏南通人,教授,博士,研究方向为电能质量、新能源发电运行及电力系统稳定与控制(E-mail: shao.zg@fzu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Evaluation method for voltage sag tolerance characteristics of industrial process considering operation mode of power supply system

ZHANG Yi^{1,2}, LI Weiming^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}, SHAO Zhenguo^{1,2}, WU Ying³, JIANG Yan³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Smart Electrical Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350108, China;

3. State Grid Xiamen Electric Power Supply Company, Xiamen 361044, China)

Abstract: Aiming at complex industrial processes, a method considering the influence of operation mode and equipment standby for evaluating the voltage sag tolerance characteristics of industrial processes is proposed, which takes the PIT(Parameter Immunity Time) as the voltage sag tolerance index. The connectivity of nodes under current operation mode is analyzed, and the impact range is analyzed with the occurrence point of voltage sag. Then the original process fault tree is established and corrected according to the judgment result of the disturbed equipment. The whole process PIT is calculated by using PIT of a single device to evaluate the whole process voltage sag tolerance characteristics. The production process of an actual TFT-LCD(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display) is analyzed and the analytical results prove the correctness and feasibility of the proposed method.

Key words: voltage sag; tolerance characteristics; industrial process; process parameter immunity time; power supply system operation mode

附录 A

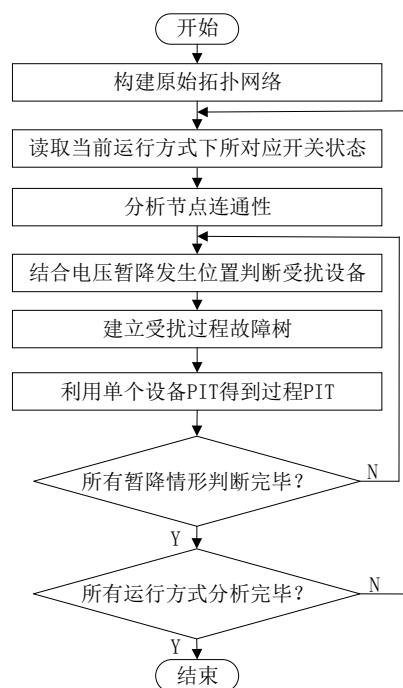


图 A1 考虑运行方式的 PIT 评估流程图

Fig.A1 PIT evaluation flowchart considering operation mode

附录 B

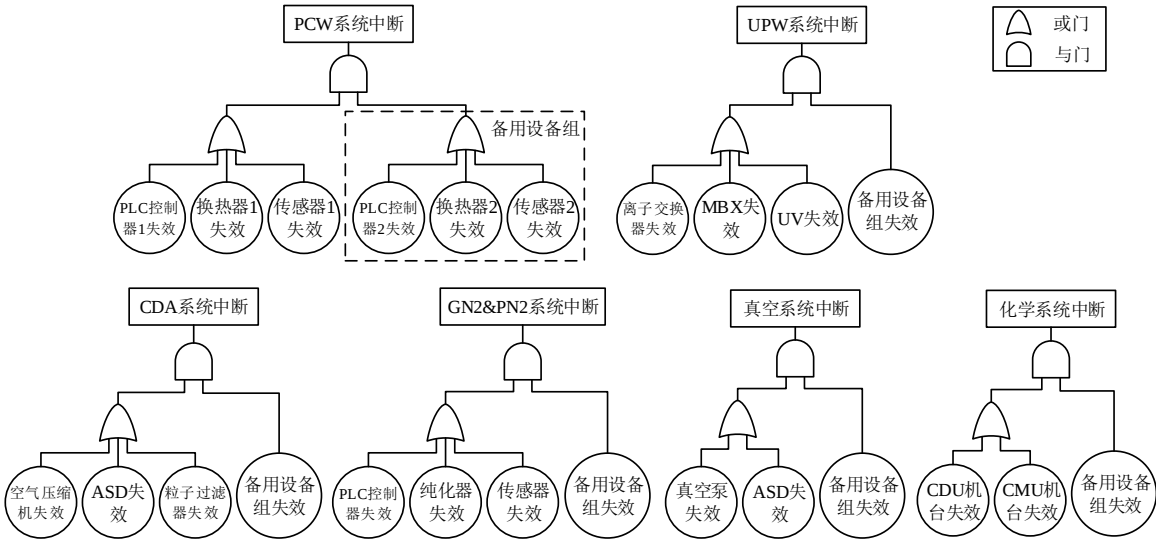


图 B1 各厂务系统故障树

Fig.B1 Fault tree of factory systems

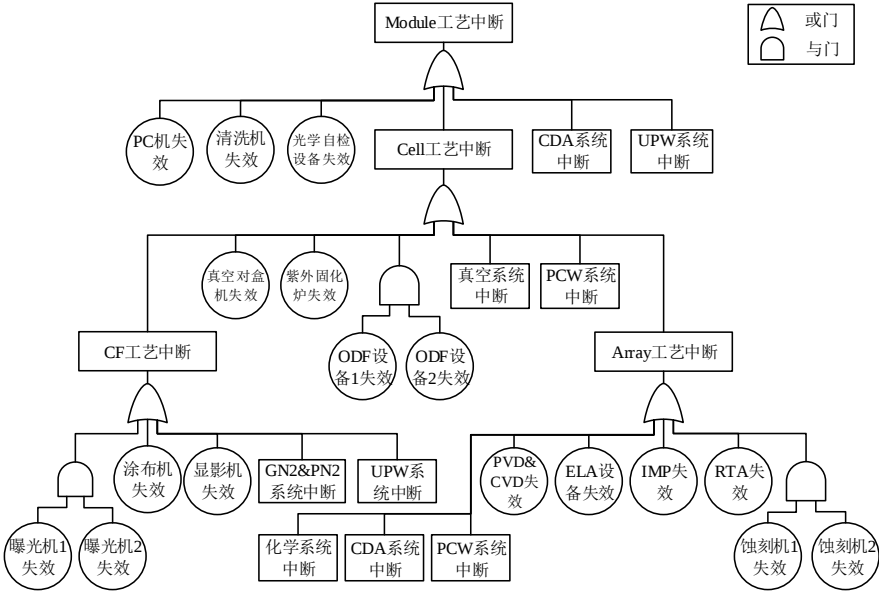


图 B2 TFT-LCD 生产过程故障树

Fig.B2 Process fault tree of TFT-LCD production

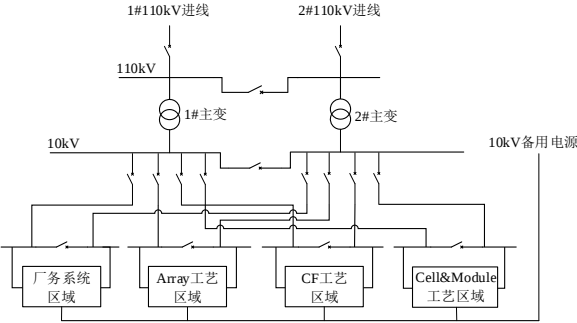


图 B3 TFT-LCD 生产过程供电系统示意图

Fig.B3 Schematic diagram of power supply system of TFT-LCD production process