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

李春海,李华强,刘勃江
(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:针对现有评估方法难以有效刻画工业过程电压暂降响应特性及暂降事件严重度的缺点,提出了一种基于过程免疫时间及其不确定性的电压暂降经济损失分级评估模型。首先,基于过程免疫时间和设备敏感度不确定性,引入了过程免疫时间不确定性的概念,提出参数越限严重性指标,并结合最大熵理论确定电压暂降引起的过程物理参数越限概率;然后,建立了工业过程故障树分析模型,根据各级事件过程免疫时间特征,将暂降事件后果划分为正常、子过程中断和过程中断3个等级,根据暂降事件后果等级进行损失分级评估,有效地提高了经济损失评估精度。实例分析结果验证了所提模型的正确性和可行性。

关键词:电压暂降;工业过程;电压暂降免疫力;经济损失;故障树;风险评估
中图分类号:TM 71 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.021

0 引言

随着工业过程中大量敏感设备投入使用,电能质量问题给用户带来了极大的经济损失,尤其是电压暂降,已成为影响工业过程正常运行的最主要的电能质量问题[1-3]。在无法避免电压暂降的情况下,电压暂降缓解设备的配置已成为敏感用户规避经济损失的重要途径[4]。由于配置暂降缓解设备的投资成本昂贵,确定最优投资方案需要合理评估设备配置前后的电压暂降经济损失[5]。因此,准确评估电压暂降对工业过程造成的经济损失,是用户选择电压暂降缓解方案的重要依据,具有重要的现实意义和理论价值,已成为目前亟待解决的重要课题。

现阶段,国内外评估电压暂降对工业用户造成的经济损失的研究主要是分析敏感设备对于电压暂降的响应情况,结合设备故障导致的生产中断严重度进行经济损失评估。文献[6-7]计及了设备敏感度的不确定性,评估暂降作用下的设备运行状态,并将故障设备数占整个生产过程设备数的比例作为事件严重度指标。但实际上,故障设备比例难以准确度量损失大小。文献[8-9]综合考虑了设备敏感度、设备间的连接关系、负荷类型以及负荷在电网中位置等不确定性,提出了一种经济损失随机评估模型。文献[10]将工业生产流程分为3个阶段,基于各阶段生产流程工艺要求和设备组成,分阶段进行经济损失评估。文献[11]分析了暂降对工厂级、过程级、子过程级以及设备级的影响,但采用故障设备在过程中的重要度来评估暂降事件严重度,容易受主观判断影响。文献[12-13]采用故障树分析法对设备故障与生产中断的逻辑关系进行分析,不足之处在于以设备故障后的失负荷率刻画暂降事件的影响因子。然而多数情况下,暂降损失和失负荷率之间并非线性关系。事实上,对工业用户而言,其更关注的是过程运行状态是否符合工艺要求(包括温度、速度、力矩、压力等)[5]。而过程中断实质是过程物理参数超出限制值所致[14],不同的工业过程,即使设备具有相同的电压耐受能力,由于工艺要求不同,物理参数限制值也不同,其过程发生中断的时间也不相同,单凭暂降作用下的设备运行状态并不能完全表征暂降对过程的影响情况。因此,合理刻画电压暂降对工业过程的影响以及准确评估暂降事件后果严重度是确定工业用户电压暂降经济损失的关键。

本文首次将国际供电会议(CIRED)、国际大电网会议(CIGRE)和国际电热联盟(UIE)暂降抗扰力联合工作小组C4.110于2010年提出过程免疫时间(PIT)应用于暂降的经济损失评估中。该概念基于电压暂降作用下的过程物理参数变化规律,结合实际过程工艺要求,分析过程的运行状态,可有效度量不同工业过程的电压暂降响应特性[14]。本文首先基于过程免疫时间的定义和设备敏感度的不确定性,引入了过程免疫时间不确定性的概念,提出参数越限严重性指标,并结合最大熵理论对过程中物理参数越限概率进行评估;在此基础上,采用故障树分析法对工业过程进行功能逻辑分析,结合各级过程免疫时间,将暂降造成的后果划分为正常、子过程中断和过程中断3个等级,提出了工业过程经济损失分级评估模型。最后对我国某城市工业敏感过程进行实例分析,证明该方法的正确性和可行性。

1 过程免疫时间及其不确定性

1.1 过程免疫时间的定义

过程免疫时间的定义为:在经受给定幅值的电压

收稿日期:2015-08-04;修回日期:2016-10-10

暂降后，工业过程的物理参数超过允许限制值的时间[14]，如图 1 所示。图中，P_{limit} 为物理参数临界值；P_{nom} 为物理参数额定值；t_1、$t_1+\Delta t$ 和 t_2 分别为敏感过程经受电压暂降的起始时刻、物理参数偏离额定值的时刻以及超出临界值的时刻；T_{PI} 为过程免疫时间。

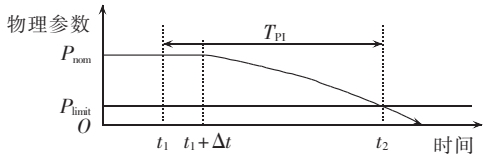

图 1 过程免疫时间曲线
Fig.1 Curve of PIT

对于给定的工业敏感过程，可以确定其物理参数的额定值和限制值。当暂降持续时间 $T<\Delta t$ 时，过程完全正常；当暂降持续时间 $\Delta t<T<T_{PI}$ 时，过程可自动恢复到正常状态；$T>T_{PI}$ 时，过程中断。因此，T_{PI} 越长，留给过程抵御电压暂降的时间越久，过程免疫力越强。本文将暂降持续时间小于过程免疫时间前的状态均考虑为可接受状态，即为正常状态；暂降持续时间大于等于过程免疫时间后的状态考虑为不可接受状态，即为中断状态。

1.2　过程免疫时间的不确定性分析

工业过程物理参数的变化规律由过程中的设备类型、设备的连接关系以及设备的运行状态共同决定[15-16]。大量研究表明：可调速电机 ASD(Adjustable Speed Drives)、PC、可编程逻辑控制器 PLC(Programmable Logic Controllers)以及交流接触器 ACC(AC-Contactor)等敏感设备的电压暂降敏感度具有不确定性，电压耐受曲线在电压幅值–持续时间平面上存在一个不确定区域[17]。

将敏感设备电压耐受曲线的不确定区域与过程免疫时间相结合，如图 2、图 3 所示。由于在不确定区域内，敏感设备是否发生故障以及故障程度，既与暂降的特征有关，又与设备的运行状态、运行环境、负载情况等多种因素相关[2]。而过程物理参数变化规律与设备的运行状态密切相关。因此，在设备状态具有不确定性的前提下，单条过程免疫曲线无法完全表征在电压暂降作用下设备所控制的物理参数变化规律。

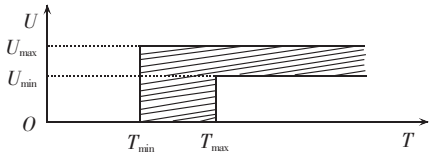

图 2 负荷电压耐受曲线的不确定性区域
Fig.2 Uncertainty region of load voltage tolerance curve

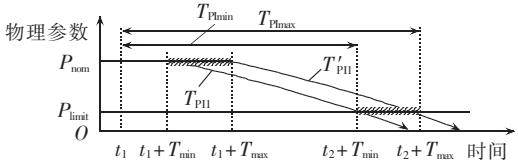

图 3 考虑不确定性的过程免疫时间曲线
Fig.3 PIT curve considering uncertainty

为说明过程免疫时间不确定性，假设设备发生故障后，过程物理参数开始偏离额定值，并且同一暂降幅值下，过程参数从偏离额定值到超出限制值的时间相同。如图 3 所示，在时间 $t\in[t_1+T_{min},t_1+T_{max}]$ 时，控制过程物理参数变化的敏感设备可能发生故障，相应地，过程物理参数可在 $[t_1+T_{min},t_1+T_{max}]$ 内任意时刻开始偏离额定值，而物理参数超出限制值的时间也可发生在 $[t_2+T_{min},t_2+T_{max}]$ 内的任意时刻，根据过程免疫时间的定义，过程免疫时间存在不确定区间为 $[T_{PImin},T_{PImax}]$，当暂降持续时间在不确定区间内时，过程物理参数均可能超出限制值。因此，过程免疫时间曲线可为 T_{PI1} 和 T'_{PI1} 区域中的任意一条 T_{PI} 曲线。通过分析过程免疫时间在不确定区间内的分布规律，可准确地判别暂降下的过程物理参数是否会发生越限，从而更加合理地刻画工业过程的电压暂降响应特性。

2　工业过程参数越限概率评估

过程免疫时间是度量过程抗扰能力的重要指标，不同的暂降幅值下的过程免疫时间不同，暂降幅值越小，对应的过程免疫时间就越小[15]。理论上，在样本数量足够多时，可以确定任意暂降幅值的过程免疫时间不确定区间，但在实际工程中样本数据是有限的，难以实现逐一评估连续幅值下的过程免疫时间不确定区间。因此，本文结合工程实际情况，将电压暂降幅值范围 $[0.1U_N,0.9U_N]$（U_N 为工频电压额定值）以步长 $0.05U_N$ 进行等步长划分，并考虑在每个小的幅值范围内暂降幅值的影响基本相同，分别对各个幅值范围内的过程免疫时间不确定区间进行评估。

2.1　参数越限严重性指标

工业过程在经受给定幅值范围的暂降时，若暂降持续时间小于 T_{PImin} 或大于 T_{PImax}，则过程参数越限概率分别为 0 和 1，则暂降持续时间在 $[T_{PImin},T_{PImax}]$ 之间时，过程参数越限概率必然以一定的规律逐渐增加。若假设过程参数越限概率是按照线性规律增加，则可定义参数越限严重性指标 S_{Ipl} 为：

$$S_{Ipl}=\begin{cases}0 & T<T_{PImin}\\ \dfrac{T-T_{PImin}}{T_{PImax}-T_{PImin}} & T_{PImin}\leqslant T\leqslant T_{PImax}\\ 1 & T>T_{PImax}\end{cases}\tag{1}$$

其中，T 为电压暂降持续时间。

在暂降经济损失评估中，需结合实际过程免疫时间的样本分布确定 S_{Ipl} 的概率密度函数，从而更加精

确地确定过程物理参数越限概率。

2.2 过程参数越限概率

本文采用文献[1]提出最大熵算法求取参数越限严重性指标的概率密度函数,该算法可直接根据样本数据求取随机变量的概率密度函数,且无需人为假设或专家经验[2],其数学模型为:

$$\max H=-\int_R f(x)\ln f(x)\mathrm{d}x \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\ \int_R f(x)\mathrm{d}x=1 \tag{3}$$

$$\int_R xf(x)\mathrm{d}x=E_1 \tag{4}$$

$$\int_R (x-E_1)^n f(x)\mathrm{d}x=E_n \quad n=2,3,\cdots,N \tag{5}$$

其中,H 为随机变量 x 的熵;$f(x)$ 为 x 的概率密度函数;R 为 x 的取值边界;E_1、E_n 分别为参数越限严重性指标样本数据的1阶原点矩和 n 阶中心距。

根据以上模型,引入拉格朗日算子,采用经典偏微分法可得到参数越限严重性指标概率密度函数解析式为:

$$f(x)=\exp\left[\lambda_0+\lambda_1 x+\sum_{n=2}^{N}\lambda_n(x-E_1)^n\right] \tag{6}$$

其中,λ_n 为第 n 阶矩约束条件对应的拉格朗日算子;实际工程中,取 $N=5$ 即可,详见文献[2]。

给定电压暂降幅值,当对应的参数越限严重性指标为 s 时,过程参数越限的概率为:

$$P=\int_0^s f(x)\mathrm{d}x \tag{7}$$

其中,x 为随机变量 S_{lpl} 的取值。

3 工业过程中断概率评估

工业过程中,物理参数的越限会导致部分或全部子过程中断,确定暂降事件造成的后果需要对过程的结构、子过程的功能及其与过程之间的关系进行合理的刻画。

3.1 过程结构功能分析

本文采用故障树分析法建立工业过程故障树分析模型,如图4所示。故障树的顶事件、中间事件、底事件分别为过程中断、子过程中断、设备控制的物理参数越限。其中子过程按照功能类别进行划分。

各级事件之间采用与逻辑(AND)和或逻辑(OR)进行连接,与门和或门所连接的上下级事件的关系定义为:

$$P_{\mathrm{a}}(\mathrm{AND})P_{\mathrm{b}}=P_{\mathrm{a}}P_{\mathrm{b}} \tag{8}$$

$$P_{\mathrm{a}}(\mathrm{OR})P_{\mathrm{b}}=1-(1-P_{\mathrm{a}})(1-P_{\mathrm{b}}) \tag{9}$$

其中,P_{a} 和 P_{b} 分别为事件a、b的发生概率。

在该故障树分析模型下,1级或门下的子过程功能相互独立,任何一个子过程的中断都会导致全过程中断;而1级与门下的子过程功能互为备用,只有当1级与门下所有子过程中断才会导致全过程中断;设备与子过程之间通过2级或门相连,任意设备控制的物理参数越限都将导致子过程中断。在实际工业过程中,同一子过程下可能存在互为备用的设备,只需将其当作一个设备进行过程免疫分析即可。

3.2 过程中断概率评估

在上述基本事件相互独立的情况下[18],按照工业过程故障树分析模型进行逻辑运算,即可得到过程中断概率以及子过程中断概率。

子过程和设备之间通过2级或门相连,则子过程的中断概率为:

$$P_i^{\mathrm{s}}=1-\prod_{j=1}^{N_i}(1-P_{ij}^{\mathrm{e}}) \tag{10}$$

其中,P_i^{s} 为第 i 个子过程中断概率;N_i 为第 i 个子过程下的设备个数;P_{ij}^{e} 为第 i 个子过程下第 j 个设备所控制的物理参数越限概率,可由式(7)得到。

过程和子过程之间通过1级与门和1级或门相连,则过程中断概率为:

$$P_{\mathrm{p}}=1-\prod_{i=1}^{m_1}(1-P_i^{\mathrm{os}})\prod_{j=1}^{m_2}\left(1-\prod_{k=1}^{n_j}P_{jk}^{\mathrm{as}}\right) \tag{11}$$

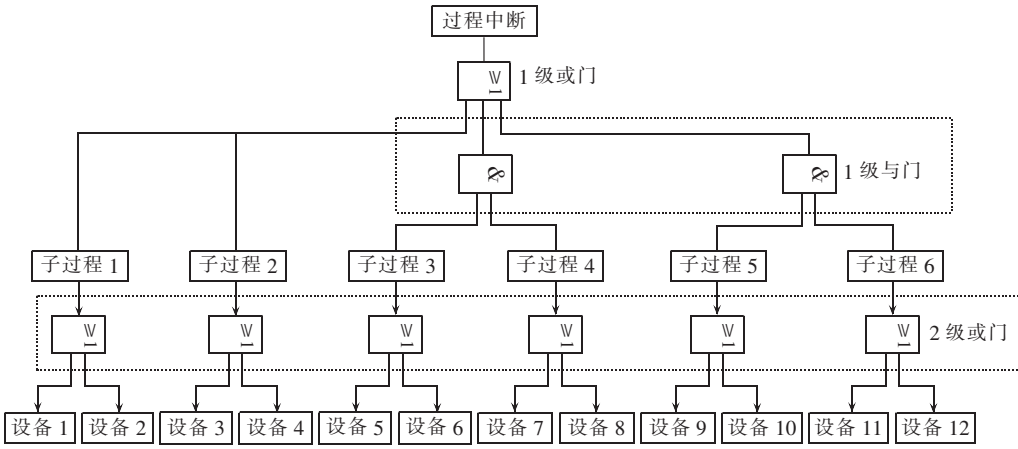

图4 工业过程的故障树分析模型

Fig.4 Fault tree analysis model of industrial process

其中，P_p 为过程中断概率；P_i^{os} 为直接与 1 级或门相连的第 i 个子过程中断概率；P_{jk}^{as} 为直接与第 j 个 1 级与门相连的第 k 个子过程中断概率；m_1 为直接与 1 级或门相连的子过程个数；m_2 为 1 级与门个数；n_j 为第 j 个 1 级与门下子过程个数。

3.3　过程中断分级

暂降事件的严重度分析是电压暂降经济损失评估中的重要环节。传统分析方法中，以暂降造成的故障设备数目、故障设备重要程度或失负荷率来刻画暂降事件的严重度[6-7,11,13]，评估精度有待提高。本文基于故障树分析可知，任意设备控制的物理参数越限都将导致子过程中断，而互为备用的子过程中断不会导致过程中断。因此，可将暂降事件的后果分为正常、子过程中断以及过程中断 3 个等级，基于后果级别进行分级评估。

3.3.1　各级过程免疫时间

为进行暂降事件后果分级，在给定的暂降幅值范围内，引入如下概念。

定义 1　设备过程免疫时间 T_{PI}^{e}：能够引起设备控制的物理参数越限的最短暂降持续时间。各个设备的 T_{PI}^{e} 等于对应设备的过程免疫时间不确定区间下限，即：

$$T_{PIi}^{e}=T_{PIi\min} \tag{12}$$

其中，$T_{PIi\min}$ 为第 i 个设备的过程免疫时间下限；T_{PIi}^{e} 为第 i 个设备的设备过程免疫时间。

定义 2　子过程免疫时间 T_{PI}^{s}：能引起子过程中断的最短暂降持续时间。各个子过程的 T_{PI}^{s} 等于子过程下各个设备的 T_{PI}^{e} 最小值，即：

$$T_{PIi}^{s}=\min\{T_{PIi1}^{e},T_{PIi2}^{e},\cdots,T_{PIiN_i}^{e}\} \tag{13}$$

其中，T_{PIi}^{s} 为第 i 个子过程的子过程免疫时间；$T_{PIij}^{e}(j=1,2,\cdots,N_i)$ 为第 i 个子过程下第 j 个设备的设备过程免疫时间。

定义 3　全局过程免疫时间 T_{PI}^{p}：能引起整个过程中断的最短暂降持续时间。全局过程免疫时间等于一级或门下各子过程免疫时间和各个 1 级与门下最大子过程免疫时间中的最小值，即：

$$T_{PI}^{p}=\min\{T_{PI1}^{os},T_{PI2}^{os},\cdots,T_{PIm_1}^{os},T_{PI1}^{as},T_{PI2}^{as},\cdots,T_{PIm_2}^{as}\} \tag{14}$$

其中，$T_{PIj}^{os}(j=1,2,\cdots,m_1)$ 为 1 级或门下第 j 个子过程的子过程免疫时间；$T_{PIi}^{as}(i=1,2,\cdots,m_2)$ 为第 i 个 1 级与门下的最大子过程免疫时间，即：

$$T_{PIi}^{as}=\max\{T_{PIi1}^{s},T_{PIi2}^{s},\cdots,T_{PIin_i}^{s}\} \tag{15}$$

其中，$T_{PIij}^{s}(j=1,2,\cdots,n_i)$ 为第 i 个 1 级与门下第 j 个子过程的子过程免疫时间，n_i 为第 i 个 1 级与门下的子过程个数。

3.3.2　电压暂降事件后果分级

基于各级暂降事件的过程免疫时间特征，将暂降事件后果作如下区分。

(1)正常。给定幅值范围内的电压暂降，暂降持续时间小于最小子过程免疫时间，即：

$$T<T_{PI\min}^{s} \tag{16}$$

$$T_{PI\min}^{s}=\min\{T_{PI1}^{s},T_{PI2}^{s},\cdots,T_{PIn}^{s}\} \tag{17}$$

其中，$T_{PI\min}^{s}$ 为各子过程的最小子过程免疫时间；n 为子过程个数。

(2)子过程中断。给定幅值范围内的电压暂降，暂降持续时间大于等于最小子过程免疫时间且小于全局过程免疫时间，即：

$$T_{PI\min}^{s}\leqslant T<T_{PI}^{p} \tag{18}$$

(3)过程中断。给定幅值范围内的电压暂降，暂降持续时间大于等于全局过程免疫时间，即：

$$T\geqslant T_{PI}^{p} \tag{19}$$

4　工业过程经济损失评估

4.1　经济损失成本构成

工业过程在经受电压暂降时会导致严重的经济损失，但不同的工业过程所承受的损失成本组成和特征不同，暂降的经济损失存在着较大的差异。因此，实际评估中应结合具体的生产流程和负荷类别来评估经济损失的成本构成情况。在普遍情况下，可以将经济损失成本分为以下几类[3,7,19-20]。

4.1.1　直接损失

直接损失 C_1 是指由于电压暂降引发过程或子过程中断而导致的直观损失，其包含以下几种损失。

(1)报废损失 C_{11}：由于生产过程物理参数越限导致产品质量不符合工艺要求，无法满足原定功能用途，而产生的废品损失。

(2)停产损失 C_{12}：过程中断后，停产期间的人工、管理以及耗材等费用。

(3)利润损失 C_{13}：由于生产过程中断，生产产量减少，无法按时完成原定的生产进度，从而导致的企业利润损失。

$$C_1=C_{11}+C_{12}+C_{13} \tag{20}$$

4.1.2　重启损失

工业生产过程中，一旦过程物理参数越限，就会导致子过程中断或过程中断。此时需要投入额外的人力及物力来重启过程、恢复生产，这个过程所产生的费用，记为重启损失 C_2。

4.1.3　额外损失

额外损失 C_3 是指与生产难以形成量化关系的资源投入以及未说明的直接或间接成本，如设备故障产生的维修、更换和运输成本或未能按时完成生产项目导致的信誉受损、客户流失、违约补偿等费用。

综上所述，单次暂降事件导致的过程中断或子过程中断损失可表示为：

$$C=C_1+C_2+C_3 \tag{21}$$

4.2 经济损失评估模型

综上所述，评估单次电压暂降造成的经济损失 C_{sag}，可建立电压暂降经济损失分级评估模型为：

$$C_{sag}=\begin{cases}0 & T<T^{s}_{PImin}\\ \sum_{j=1}^{n}P_j^{s}C_j^{s} & T^{s}_{PImin}\leqslant T<T^{p}_{PI}\\ P^{p}C^{p} & T\geqslant T^{p}_{PI}\end{cases}\tag{22}$$

其中，P_j^s 为第 j 个子过程的中断概率；C_j^s 为第 j 个子过程的中断损失；P^p 为过程中断概率；C^p 为过程中断损失。

则工业用户每年的暂降损失 C^{y}_{sag} 为：

$$C^{y}_{sag}=\sum_{i=1}^{N_{vd}}C_{sag}(U_i,T_i)\tag{23}$$

其中，$C_{sag}(U_i,T_i)$ 为第 i 次暂降的经济损失，U_i、T_i 分别为第 i 次暂降的电压幅值和持续时间；N_{vd} 为用户的年暂降次数。

5 实例分析

将本文方法应用于我国某城市光学中心的精密温控过程，其故障树分析模型如图5所示。其中顶事件为温控过程中断，中间事件为各子过程中断，底事件为各设备所控制的物理参数越限。其中温控过程按照功能划分为供风、过滤、表冷、加热、加湿、送风1和送风2这7个子过程。

以温控过程在暂降幅值为[0.65U_N，0.7U_N]时的分析为例：设备的过程免疫时间不确定区间与各子过程的子过程免疫时间如表1所示。其中，最小子过程免疫时间和全局过程免疫时间分别为30 ms和44 ms。因此，对于持续时间小于30 ms的暂降，整个过程可以保持正常状态；在持续时间大于等于30 ms且小于44 ms之间时，子过程送风1可能发生中断，温控过程可以继续运行；在持续时间大于等于44 ms时，整个温控过程可能发生中断。

在该暂降幅值范围内的暂降经济损失分级评估模型为：

$$C_{sag}=\begin{cases}0 & T<30\ \text{ms}\\ \sum_{j=1}^{7}P_j^{s}C_j^{s} & 30\ \text{ms}\leqslant T<44\ \text{ms}\\ P^{p}C^{p} & T\geqslant 44\ \text{ms}\end{cases}\tag{24}$$

温控过程中，除了送风1和送风2这2个子过程互为备用外，其他子过程功能相互独立。因此，在暂降经济损失评估中，除温控过程中断损失外，只需要单独对送风1和送风2的子过程中断损失进行评估。基于经济损失分类原则，结合实际统计数据，温控过程、送风1及送风2的中断经济损失如表2所示。

当暂降幅值为0.68U_N、持续时间为50 ms时，由式(24)可得，该次暂降造成后果为温控过程中断，相应经济损失评估结果如式(25)所示。

$$C_{sag}=P^{p}C^{p}=0.885\times5.65=5\ (\text{万元})\tag{25}$$

表1 温控过程的过程免疫时间不确定区间

Table 1 PIT uncertainty region of temperature control

子过程	设备	T_{PI}/ms	T^{s}_{PI}/ms
供风	通风机1(新风)	[88,93]	88
	通风机2(回风)	[108,113]	
	温度控制系统1	[129,135]	
过滤	通风机3	[144,149]	144
	洁净度控制系统	[165,181]	
表冷	压缩机	[47,53]	47
	温度传感器1	[73,75]	
加热	热处理器	[44,52]	44
	温度传感器2	[65,70]	
	电磁阀	[83,87]	
加湿	蒸发机	[102,105]	62
	湿度传感器	[62,66]	
送风1	通风机4(送风)	[30,35]	30
	温度控制系统2	[114,119]	
	湿度控制系统1	[76,81]	
送风2	通风机5(送风)	[53,59]	53
	温度控制系统3	[114,119]	
	湿度控制系统2	[76,81]	

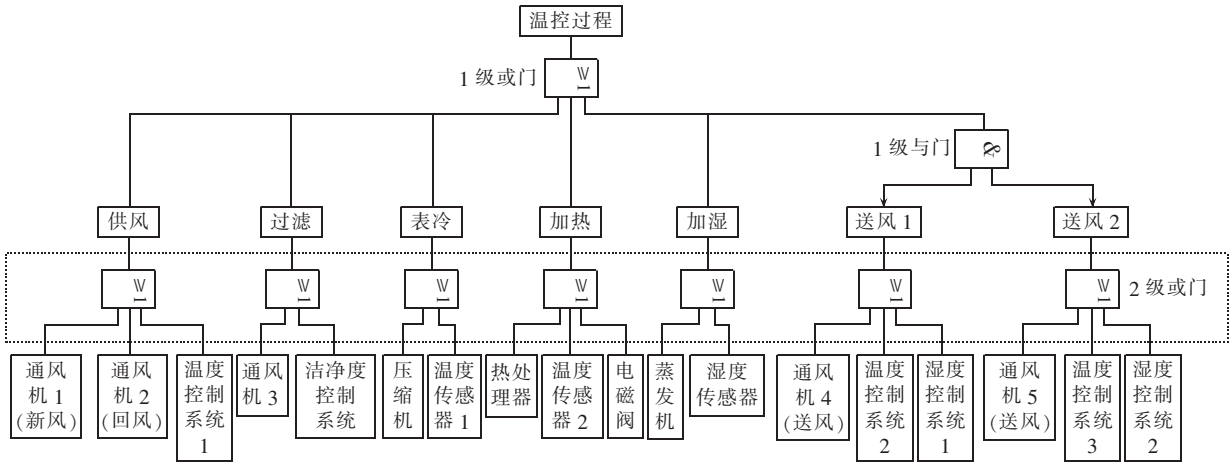

图5 温控系统故障树分析模型

Fig.5 Fault tree analysis model of temperature control system

表 2 过程中断经济损失
Table 2 Financial loss of process interruption

中断等级	经济损失/万元
温控过程中断	5.65
送风 1 中断	0.57
送风 2 中断	0.57

综上可得，基于该光学中心的 2014 年的电压暂降情况，该用户的暂降经济损失分布情况如图 6 所示。

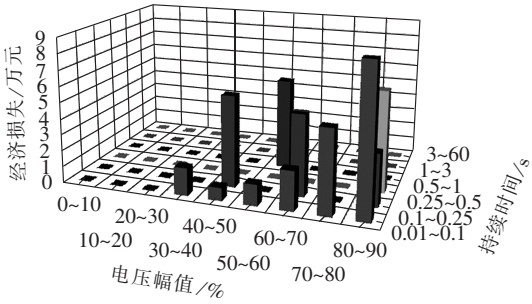

图 6 2014 年电压暂降经济损失分布情况
Fig.6 Distribution of 2014's financial loss due to voltage sag

最后利用上述方法，评估该用户 2012—2014 年暂降经济损失，将评估结果与实际损失进行对比，结果如图 7 所示，图中柱形高度代表年经济损失评估结果，柱形上方的误差棒长度代表本文评估结果和实际损失之间的误差，图中所得 2012、2013、2014 年的估计值的相对误差绝对值分别为 5.65%、7.9%、3.68%。

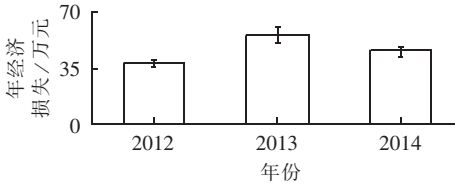

图 7 2012—2014 年电压暂降经济损失
Fig.7 Annual financial loss due to voltage sag from 2012 to 2014

以上评估结果表明，本文方法可以准确评估暂降对用户所造成的经济损失。此外，基于以上结果可知，影响温控过程最小子过程免疫时间和过程免疫时间的设备分别为通风机 4 和热处理器，则该过程最薄弱的子过程为送风 1，而最关键的子过程为加热，因此，基于本文方法还可为工业过程生产设计、关键设备选型等方案提供重要依据。

6 结论

a. 基于过程免疫时间及其不确定性，提出参数越限严重性指标，结合最大熵理论对工业过程物理参数越限概率进行评估，符合工程实际，可准确刻画遭受电压暂降时的过程响应特性。

b. 通过故障树分析法，以图形化的方式表示过程中各基本事件的交互关系，结合过程免疫时间可迅速识别工业过程的关键脆弱环节，为用户改善过程免疫力提供依据。

c. 基于各级事件过程免疫时间特征，将电压暂降事件后果划分为正常、子过程中断以及过程中断 3 个等级，提出了暂降经济损失分级评估模型，有效地解决了现有评估方法中暂降事件严重度刻画不精确的问题，并提高了经济损失评估精度。

d. 通过对实际工业过程进行实例分析，建立了具体的评估模型，结果表明本文方法可以准确评估暂降对工业用户造成的经济损失，具有较高的工程实用价值。

参考文献：

[1] 肖先勇，马超，杨洪耕，等. 用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J]. 中国电机工程学报，2009，29(31)：115-121.
XIAO Xianyong，MA Chao，YANG Honggeng，et al. Stochastic estimation of equipment sensitivity to voltage sag based on voltage sag severity index and maximum entropy principle[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(31)：115-121.

[2] 肖先勇，陈武，杨洪耕. 敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估[J]. 中国电机工程学报，2010，30(10)：36-42.
XIAO Xianyong，CHEN Wu，YANG Honggeng. Multi-uncertainty assessment for failure level of sensitive equipment caused by voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE，2010，30(10)：36-42.

[3] YIN S A，SU C L，CHANG R F. Assessment of power quality cost for high-tech industry[C]//2006 IEEE Power India Conference. [S.l.]：IEEE，2006：6.

[4] 盛晓光，韦统振，马明，等. 配电网中多台动态电压恢复器的优化配置研究[J]. 电网技术，2013，37(10)：2991-2996.
SHENG Xiaoguang，WEI Tongzhen，MA Ming，et al. Optimal configuration of multiple DVRs in distribution network [J]. Power System Technology，2013，37(10)：2991-2996.

[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] 章雪萌，李国栋，徐永海，等. 基于预估的电压暂降技术经济评估[J]. 电网技术，2010，34(10)：121-125.
ZHANG Xuemeng，LI Guodong，XU Yonghai，et al. Technical and economic assessment of voltage sag based on stochastic prediction [J]. Power System Technology，2010，34(10)：121-125.

[7] 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，2013，42(12)：104-111.

[8] MILANOVIĆ 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.

[9] GOSWAMI A K，GUP TA C P，SINGH G K. Assessment of

financial losses due to voltage sags in an Indian distribution system[C]//2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems. [S.l.]:IEEE, 2008:1-6.

[10] 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.

[11] CHAN J Y,MILANOVIĆ J V. Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions[C]// 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation,2007. [S.l.]:IEEE,2007:1-6.

[12] CHAN J Y,MILANOVIĆ 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] YASIR M,KAZEMI S,LEHTONEN M,et al. A novel approach for assessing the impacts of voltage sag events on customer operations[C]//Electric Power Quality and Supply Reliability Conference(PQ),2012. [S.l.]:IEEE,2012:1-5.

[14] VAN REUSE K,STOCKMAN K,DRIESSENS W. "Process immunity time" assessment of its practicability in industry[C]// 2010 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. [S.l.]:IEEE,2010:1-4.

[15] 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.

[16] 郑颖,刘旭娜,刘阳,等. 基于过程免疫时间和可接受后果状态的优质园区供电质量等级划分[J]. 电网技术,2014,38(1):3813-3818.
ZHENG Ying,LIU Xuna,LIU Yang,et al. Classification of power supply quality levels for premium power park based on process immunity time and acceptable resulting status[J]. Power System Technology,2014,38(1):3813-3818.

[17] GUPTA C P,MILANOVIĆ J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(2):711-718.

[18] 韩小涛,尹项根,张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术,2004,28(1):56-59.
HAN Xiaotao,YIN Xianggen,ZHANG Zhe. Application of fault tree analysis method in reliability analysis of substation communication system[J]. Power System Technology,2004,28(1):56-59.

[19] VEGUNTA S C,MILANOVIĆ J V. Estimation of cost of downtime of industrial process due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):576-587.

[20] MILANOVIĆ J V,GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part Ⅱ: practical implementation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(2):925-932.

作者简介:

李春海

李春海(1991—),男,福建福州人,硕士研究生,研究方向为电压暂降分析与评估(**E-mail**:lichunhai91@163.com);

李华强(1965—),男,四川成都人,教授,博士,从事电压稳定与控制和电能质量等方面的教学和研究工作。

Risk assessment based on process immunity uncertainty for industrial customers' financial losses due to voltage sags

LI Chunhai,LI Huaqiang,LIU Bojiang

(College of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: As the existing assessment methods could not effectively depict the characteristics of industrial process response to voltage sag and the severity of voltage sag event,an evaluation model based on the PIT(Process Immunity Time) and its uncertainty is proposed to assess the classification of financial loss due to the voltage sag. A concept of PIT uncertainty is introduced based on the process immunity time and the uncertainty of equipment sensitivity,a severity index of parameter limit violation is proposed,and the limit violation probability of physical process parameter is determined based on the maximum entropy theory. A fault tree analysis model is established for the industrial process,all consequences of sag event are divided based on the PIT characteristics into three classes:normal,sub-process interruption and process interruption,and the classification of financial loss is assessed based the consequence class,which effectively improves the assessment precision. The results of case analysis verify the correctness and feasibility of the proposed model.

Key words: voltage sag; industrial process; voltage sag immunity; financial losses; fault tree; risk assessment