

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210388

# 基于 Larsen 推理的电压暂降下工业过程负荷损失率评估方法

李天楚<sup>1,2</sup>, 伍智鹏<sup>1,2</sup>, 方铭<sup>1,2</sup>, 李科得<sup>1,2</sup>

(1. 海南电网有限责任公司电力科学研究院, 海南 海口 570311; 2. 海南省电网理化分析重点实验室, 海南 海口 570311)

**摘要:** 明确电压暂降对工业过程的影响程度, 是进行暂降损失估计、提供治理方案的前提。考虑了工业过程设备级/过程级的电压暂降耐受能力, 提出了一种负荷损失率的评估方法, 以量化电压暂降对工业过程造成的危害。首先, 为解决过程参数难以获取、精度低的问题, 建立了基于物理结构的过程参数等值响应模型。将过程级的非电量过程参数值等效为电压值, 以输入电压暂降特征量刻画设备和工业过程的耐受特性。然后, 提出了基于 Larsen 推理的负荷损失率评估方法, 以暂降特征量为推理前件、以负荷损失率为推理后件, 构建了前件、后件的隶属度函数。实现了基于监测数据的过程负荷损失率的推理评估, 减小评估结果对精确信息的依赖性。最后, 应用该方法评估海南省某石化企业的电压暂降下负荷损失率, 结果表明所提出方法正确且有效。

**关键词:** 电能质量; 电压暂降; 电压耐受曲线; 负荷损失率; 模糊推理

## Load loss rate evaluation method of an industrial process under voltage sag based on Larsen reasoning

LI Tianchu<sup>1,2</sup>, WU Zhipeng<sup>1,2</sup>, FANG Ming<sup>1,2</sup>, LI Kede<sup>1,2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Corporation Ltd., Haikou 570311, China;

2. Key Laboratory of Physical and Chemical Analysis for Electric Power of Hainan Province, Haikou 570311, China)

**Abstract:** It is a requirement of estimating voltage sag loss and providing a treatment scheme to know the impact of voltage sag on the industrial process. This paper considers the tolerance of voltage sags at the equipment/process level, and presents an evaluation method of load loss rate to quantify the harm of voltage sags. First, to solve the problems of obtaining process parameters and low accuracy, an equivalent response model of process parameters based on physical structure is established. The non-electrical process parameters at the process level are equivalent to the voltage values, and the characteristics of sag are used to describe the tolerance characteristics of equipment and industrial processes. Then, the load loss rate evaluation method based on Larsen reasoning is proposed. Taking the sag characteristic quantity as the antecedent and the load loss rate as the aftereffect, the membership functions are constructed. The evaluation of the load loss rate based on the monitoring data is realized, and the dependence of the evaluation result on accurate information is reduced. Finally, the method is applied to evaluate the load loss rate of a petrochemical enterprise in Hainan Province. The results show that the method proposed in this paper is correct and effective.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. 073000KK52190007).

**Key words:** power quality; voltage sag; voltage tolerance curve; load loss rate; fuzzy reasoning

## 0 引言

电压暂降是工业用户投诉最频繁的电能质量扰动事件<sup>[1-4]</sup>。随着生产技术的发展, 高精尖的敏感用户越来越多, 电压暂降导致其生产过程跳停, 造成巨大经济损失<sup>[5-8]</sup>。电压暂降下的负荷损失率是运行

风险分析中表征风险后果的重要内容, 能客观量化电网负荷损失和用户实际后果<sup>[9]</sup>。研究敏感用户的设备与生产过程的工作特性, 分析电压暂降下的用户负荷损失率, 是进行用户电压经济损失评估、电网负荷损失预警和电压暂降治理的前提。

随着工厂生产流程自动化程度的提升, 保持设备持续、正常运行愈加重要<sup>[10]</sup>。针对电压暂降导致的设备异常工作或跳停事件, 相关学者展开了大量

基金项目: 南方电网科技项目资助(073000KK52190007)

研究。通过搭建实验平台，对工业过程中涉及到的敏感设备，如可编程逻辑控制器<sup>[11]</sup> (Programmable Logic Controller, PLC)、变频器<sup>[12]</sup>(Variable Frequency Drive, VFD)和交流接触器<sup>[13-14]</sup> (AC Contactor, ACC)进行了大量测试研究。基于测试数据，获得了受试设备的电压耐受曲线<sup>[15]</sup>(Voltage Tolerance Curve, VTC)，刻画出单台设备的耐受能力。但单个设备的耐受能力与整个工业过程的耐受能力不是简单的线性关系，难以直接反映电压暂降给工业过程造成危害的严重程度<sup>[16]</sup>。

在工业过程方面，最早的研究主要是针对工业生产过程中易受电压暂降影响的核心设备进行分析的，文献[17-18]分析了纺织机与轧钢机在暂降下的严重后果，并建议了治理措施。在此基础上，学者们把研究对象扩展到由多个设备组成的子过程，通过分析子过程的受影响程度，再进一步得出整个工业过程的电压暂降后果。文献[19]提出了一种串并联关系结构，用于刻画各子过程与工业过程间的联系。文献[20]提出了一种基于与或逻辑门的故障树结构，刻画二者关系。在研究工业子过程受影响程度时，子过程包含部分不敏感设备，导致上述方法难以直接应用。CIGRE 提出过程免疫时间(Process Immunity Time, PIT)概念<sup>[21]</sup>，力图解决工业过程受暂降影响的后果刻画问题。文献[22]将 PIT 用于过程的电压暂降后果评估研究，考虑了工业过程中的惯性系统对暂降的响应时间、设备重启动等情况。文献[23]考虑了诸如重合闸等保护机构动作特性对中断概率评估的影响，为供电方与用户提供更多信息。

目前，工业过程电压暂降耐受能力的评估领域，存在两大挑战。第一，现有方法依赖较精确的基础信息，在实际中难以满足。现有评估方法进行中断概率的准确评估，是建立在精确信息的基础之上，即需要准确得到工业过程中各设备间的连接关系、敏感设备的耐受能力、过程免疫时间、电压暂降的特征参数等数据。显然，生产实际中，无法保证所收集的基础数据的精度，某些涉及生产机密的详细生产情况，工业用户往往并不愿提供。第二，评估目标的适用性不强。评估方法认为工业过程的后果状态仅存在两种可能，即正常或中断。实际上，电压暂降并不会导致工业过程完全中断，更多的时候，表现为用户损失部分负荷。基于上述原因，现有评估结果的精确性得不到保证，甚至因缺乏相关数据而无法进行评估。

应对上述挑战，本文以负荷损失率量化电压暂降给工业过程造成的危害，引入 Larsen 模糊推理方

法，减小评估方法对精确信息的依赖性。首先，分析设备级/过程级电压暂降响应特性及其刻画方法；其次，针对生产过程某些参数难以获取的现状，提出了基于物理结构的过程参数等值响应模型，将非电量过程参数转化为电压参数，直接以输入电压值刻画工业过程耐受特性。然后，根据设备级/过程级电压暂降响应特性和过程参数等值响应模型，提出电压暂降下负荷损失率评估方法，构建了幅值隶属度函数、持续时间隶属度函数以及负荷损失率隶属度函数，基于 Larsen 模糊推理方法进行暂降特征量到负荷损失率的推理评估，再集质心去模糊，实现过程负荷损失率的评估。最后，应用所提算法评估海南省某石化企业的电压暂降下负荷损失率，证明了本文所提出方法的合理性与适用性。

### 1 设备级/过程级电压暂降响应特性

电压暂降耐受能力可以分为设备级和过程级，设备级耐受能力反映了设备的电气特性，它决定电气设备对电压暂降的抵抗能力；过程级耐受能力反映了工业过程的物理属性，它决定了电压暂降下过程参数越过限制阈值所用的时间长短。需要说明的是，设备级耐受能力并不能等同于过程级的耐受能力，但两者之间又存在紧密联系。

#### 1.1 电压暂降响应特性——设备级

设备的电压暂降耐受能力是描述设备级电压暂降响应特性的有效工具，一般以电压耐受曲线 (Voltage Tolerance Curve, VTC)的形式进行刻画。通常，确定电压耐受曲线的最佳方法是实验测试。然而，由于较高的测试成本和耗时<sup>[24]</sup>，不可能通过测试获得所有设备的耐受曲线。因此，基于有限测试样本，构建设备耐受能力评估模型<sup>[25]</sup>，是获取设备耐受能力、刻画设备级电压暂降响应特性的普遍方法。

典型的电压耐受曲线如图 1 所示，横、纵坐标分别为电压暂降持续时间和残余电压，两条红色的

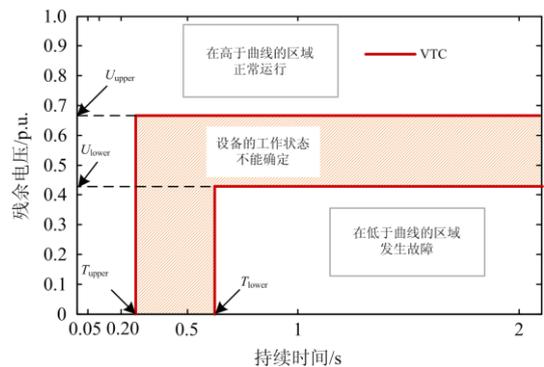


图 1 典型电压耐受曲线

Fig. 1 Typical voltage tolerance curve

VTC 将耐受能力区间分为正常运行、不确定区域和故障区域。其中上限 VTC 对应的耐受电压和时间分别为  $U_{upper}$  和  $T_{upper}$ , 下限 VTC 对应的耐受电压和时间分别为  $U_{lower}$  和  $T_{lower}$ 。对于高于 VTC 上限的暂降, 设备表现为正常运行, 对于低于 VTC 下限的暂降, 设备表现为故障停机。在不确定性区域, 设备可能表现为正常运行, 也可能表现为故障停机。

## 1.2 电压暂降响应特性——过程级

工业过程由多个设备集成, 多个设备经不同的串并联关系协调配合进行生产。过程级电压暂降响应特性受过程包含的敏感设备类型、各敏感设备组成比例、设备的连接方式以及工艺参数的可接受阈值等影响。

目前, 常采用过程参数变化曲线来刻画过程级电压暂降响应特性。暂降前后过程参数的偏差, 可作为定量刻画工业过程受电压暂降影响的依据。过程级响应特性不同于设备级响应特性, 过程中可能包含对暂降不敏感的元件, 体现为某些关键工艺参数不会即刻响应电压暂降, 比如油仓液位、化学反应釜的压力、烤漆房的温度等。文献[21]提出 PIT 概念量化过程级响应特性。如图 2 所示, PIT 是从暂降发生时刻起至其关键过程参数越限的时间。通常认为在典型敏感设备故障/跳停前, 关键过程参数不会发生偏离。

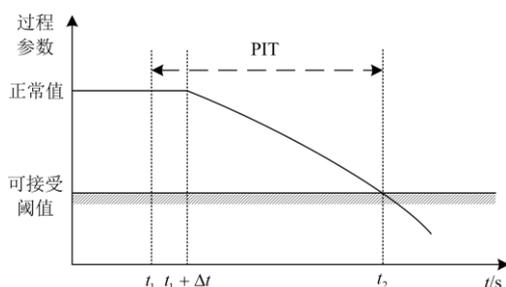


图2 过程参数变化曲线

Fig. 2 Change curve of process parameters

## 2 过程参数等值响应模型

过程参数在电压暂降下的变化规律体现了过程级电压暂降响应特性。工业用户的生产管理系统虽然可以监测部分过程参数, 但是, 过程参数的监测和电压暂降的监测属于不同监测系统, 多源数据存在时误差、采样率不一、甚至某些过程参数未被采集的情况。在生产实际中, 难以直接应用生产管理系统的数据库刻画过程级电压暂降响应特性。为此, 本文提出基于物理结构的过程参数等值响应模型, 将非电量过程参数转化为电压参数, 直接以输入电压值刻画工业过程耐受特性。

电动机是工业用户的主要负荷, 其可进一步分为变频交流电机和普通异步电机。变频交流电机通常由 VFD 驱动, 发生电压暂降时, 若 VFD 未故障, 则电机转速不会发生偏移, 因此本文仅考虑普通异步电机系统中过程参数的偏移。在典型的工业过程中, 交流接触器、电动机及电动机拖动的负荷等设备协同运行, 构成了工业过程中敏感模块, 其典型结构如图 3 所示。刻画该模块受电压暂降影响的后果状态, 需要确定过程侧的关键参数, 建立过程侧关键参数与电气侧参数的等值响应模型。从而, 将工业参数的变化等值映射为电机的机端电压的变化。实际中, 该模块中的稳定运行一般由转速控制, 因此明确转速(转差率)与机端电压间的映射关系, 即可建立过程参数等值响应模型。

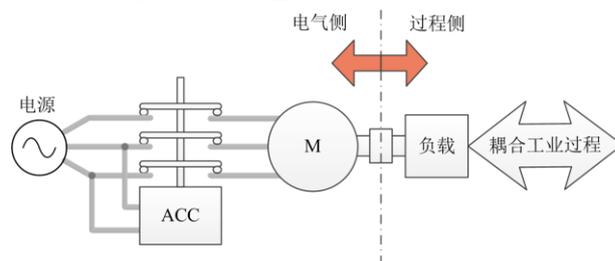


图3 交流接触器-电机-负荷模块

Fig. 3 Module of ACC-motor-load

额定工况下异步电机的输出转矩和负载转矩相等, 如式(1)所示。

$$k_T (n_N)^i = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (1)$$

式中:  $k_T$  为转矩常数;  $n_N$  为额定转速;  $P_N$  为额定机械功率;  $i$  的取值与负载类型有关, 对于恒转矩负载、恒功率负载和平方转矩负载,  $i$  的值分别为 0、-1 和 2。

当机端电压下降时, 异步电机的输出转矩突然下降, 电机转速随之下降, 根据电磁转矩的参数表达式, 输出转矩为

$$T = \frac{pm_1}{2\pi f_1} U^2 \frac{sr'_2}{(r'_2)^2 + (sx_k)^2} \quad (2)$$

式中:  $s$  为下降后的实际转差率;  $U$  为电机的机端电压;  $r'_2$  为折算后的转子电阻;  $x_k$  为异步电动机的短路电抗;  $m_1$  为定子绕组的相数;  $f_1$  为旋转磁场的频率。随着转速的变化, 负载转矩也随之变化, 且变化规律与负载类型有关, 存在如下关系:

$$T_L = k_T [n_1(1-s)]^i \quad (3)$$

式中:  $T_L$  为负载转矩;  $n_1$  为旋转磁场的转速。根据式(2)、式(3)可求得转差率对应的等值电压  $U_p$  为

$$U_p^2 = \frac{2\pi k_T f_1}{pm_1 s r_2'} [n_1(1-s)]^i \left[ (r_2')^2 + (s x_k)^2 \right] \quad (4)$$

由上式可知当转差率由额定值  $s_N$  下降为  $s$  时, 对应的电压为  $U_p$ 。

如图 4 所示, 红色曲线为额定电压下电机的机械特性曲线, 蓝色曲线为电压下降后的机械特性曲线, 黄色曲线为负载特性曲线。额定电压下, 电机稳定运行在 A 点,  $T_L$  与  $T$  相等, 此时转差率为  $s_1$ 。当发生电压暂降时, 机械特性曲线由红色曲线变为蓝色曲线, 电磁转矩突然下降, 电机转差率由  $s_1$  逐渐增大,  $T_L$  与  $T$  达到新的平衡点 B, 若 B 点的转差率为电机可接受的最大转差率  $s_{th}$ , 此时的机端电压即为保证转差率在用户可接受范围内的最低电压  $U_{P-th}$ 。联立式(1)和式(4)可求得  $U_{P-th}$  为

$$U_{P-th}^2 = \frac{n_1 P_N \left[ (r_2')^2 + (s_{th} x_k)^2 \right]}{n_N m_1 s_{th} r_2'} \left( \frac{n_1(1-s_{th})}{n_N} \right)^i \quad (5)$$

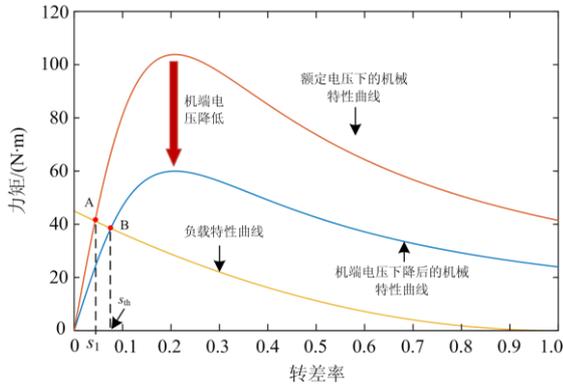


图 4 负载特性曲线及机械特性曲线

Fig. 4 Load characteristic curve and mechanical characteristic curve

类似于 VTC 对应的耐受电压,  $U_{P-th}$  从过程参数角度刻画了工业过程的后果状态。后文在采用模糊推理法评估电压暂降下的负荷损失率时, 构建的幅值隶属度函数同时考虑了  $U_{P-th}$  和上下限 VTC 对应的耐受电压。

### 3 电压暂降下负荷损失率评估方法

#### 3.1 模糊推理体系

设备级/过程级电压暂降响应特性及建立的过程参数等值响应模型可描述在具体过程结构、运行工况下的敏感负荷响应特性。但是, 工业过程中的工况、结构和设备类型等存在多样性, 发生电压暂降而导致损失负荷的条件具有不充分性, 难以简单地描述电压暂降事件与负荷损失量之间的因果关系。电压暂降事件的幅值和持续时间等特征量具

有随机性, 负荷响应特性具有模糊性, 可采用模糊推理构建电压暂降下负荷损失率评估方法。

模糊推理的步骤主要包括模糊化、模糊推理、解模糊。进行模糊推理前, 首先要对属性进行模糊化, 即将前件和后件(表示条件的命题称为前件, 表示依赖条件而成立的命题称为后件)分为多个模糊子集, 并采用隶属度函数来确定论域中的元素对模糊集合的隶属度。

模糊推理即通过模糊规则和后件的隶属度函数来确定输出模糊值。本文采用 Larsen 模糊推理规则, 实现电压暂降特征量到负荷损失率之间的推理。该方法又称为乘积推理法, 是一种应用较为广泛的模糊推理方法。其蕴含算子在简化计算的同时又保留了因果关系, 适用于本文的负荷损失率评估推理。对于具有多个前件的单一规则, 假设  $\tilde{A}$ 、 $\tilde{B}$  和  $\tilde{C}$  分别为论域  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  上的模糊集合, 且它们之间的模糊关系确定, 即根据  $\tilde{A}$  和  $\tilde{B}$  (前件) 可推理得出  $\tilde{C}$  (后件)。则基于此模糊关系, 可以根据  $X$ 、 $Y$  上的新的模糊集合  $\tilde{A}^*$  和  $\tilde{B}^*$  得出论域  $Z$  上新的模糊集合  $\tilde{C}^*$ , 其推理过程如图 5 所示。

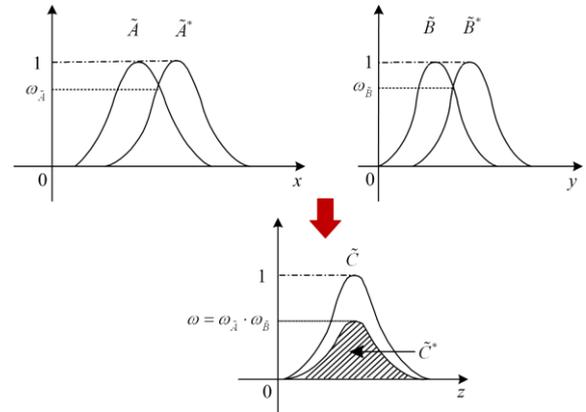


图 5 多前提、单规则的 Larsen 模糊推理过程

Fig. 5 Larsen fuzzy reasoning process based on multiple antecedents and single rule

首先求适配度  $\omega_A$  和  $\omega_B$  :

$$\begin{aligned} \omega_A &= \bigvee_{x \in X} [\mu_{\tilde{A}^*}(x) \wedge \mu_{\tilde{A}}(x)] \\ \omega_B &= \bigvee_{x \in X} [\mu_{\tilde{B}^*}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x)] \end{aligned} \quad (6)$$

激励强度  $\omega$  为  $\omega_A$  和  $\omega_B$  之积:

$$\omega = \omega_A \cdot \omega_B \quad (7)$$

最后用激励度与模糊规则的后件作乘积合成运算, 即

$$\mu_{\tilde{C}^*}(y) = \omega \mu_{\tilde{C}}(y) \quad (8)$$

解模糊是将推论所得到的模糊值转换为明确的值, 解模糊的方法有很多种, 最常用的有最大隶

属度法、质心法和加权平均法。

### 3.2 推理前件模糊化

本模糊体系的推理前件为暂降的幅值和持续时间, 以敏感设备的上/下限 VTC、工业过程的 PIT 和  $U_{P-th}$  为依据, 对暂降幅值与持续时间进行划分。如图 6 所示, 两段红线分别为工业过程中敏感设备的电压耐受曲线的上限和下限, 两段蓝线的竖直部分由 PIT 决定, 水平部分由  $U_{P-th}$  决定, 其中 PIT 可能的最大值为  $T_2$ , 可能的最小值为  $T_1$ 。它们把幅值-时间平面划分为 5 个区域。

当暂降事件处于 I 区间时, 工业过程不会受到电压暂降的任何影响。当暂降事件处于 II 区间时, 设备往往不会跳闸, 但过程参数会有一定程度的下降, 工业过程存在中断的可能性。当暂降事件处于 III 区间时, 设备存在跳闸的可能性, 若设备跳闸后, 不能在规定时间内完成重启, 则工业过程会发生中断。当暂降事件处于 IV 区间时, 敏感设备必定跳闸, 同样, 若跳闸设备不能在规定时间内完成重启, 则故障将升级为工业过程中断。当暂降事件处于 V 区间时, 暂降的后果最严重, 无论跳闸设备是否能在在规定时间内完成重启, 工业过程均会发生中断。

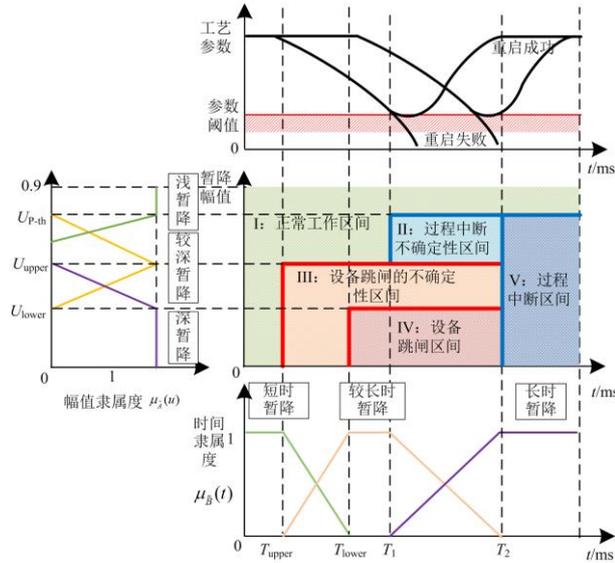


图 6 推理前件的隶属度函数

Fig. 6 Membership function of fuzzy antecedents

根据区域的划分, 暂降幅值和持续时间的论域分别包含 3 个模糊子集, 采用三角隶属度函数和梯形隶属度函数刻画各模糊子集的隶属度。

#### 3.2.1 幅值隶属度函数

电压暂降幅值的论域  $U$  取  $[0, 0.9]$  p.u., 设  $\tilde{A}_1$ 、 $\tilde{A}_2$  和  $\tilde{A}_3$  为论域  $U$  上的模糊集合, 它们分别表示“浅暂降”、“较深暂降”、“深暂降”这三种模

糊概念。根据图 6 可以得出模糊集合  $\tilde{A}_1$ 、 $\tilde{A}_2$  和  $\tilde{A}_3$  的隶属度函数分别为

$$\mu_{\tilde{A}_1}(u) = \begin{cases} 1 & 0.9 > u > U_{P-th} \\ \frac{u - U_{upper}}{U_{P-th} - U_{upper}} & U_{P-th} \geq u > U_{upper} \\ 0 & u \leq U_{upper} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{\tilde{A}_2}(u) = \begin{cases} \frac{U_{P-th} - u}{U_{P-th} - U_{upper}} & U_{P-th} \geq u > U_{upper} \\ \frac{u - U_{lower}}{U_{upper} - U_{lower}} & U_{upper} \geq u > U_{lower} \\ 0 & 0.9 > u > U_{P-th} \text{ or } u \leq U_{lower} \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{\tilde{A}_3}(u) = \begin{cases} 0 & 0.9 > u > U_{upper} \\ \frac{U_{upper} - u}{U_{upper} - U_{lower}} & U_{upper} \geq u > U_{lower} \\ 1 & u \leq U_{lower} \end{cases} \quad (11)$$

由上式可知: 当暂降幅值  $u$  高于  $U_{P-th}$  时, 此幅值完全隶属于浅暂降  $\tilde{A}_1$ ; 当暂降幅值低于  $U_{P-th}$  但高于  $U_{upper}$  时, 此幅值可认为介于浅暂降  $\tilde{A}_1$  与较深暂降  $\tilde{A}_2$  间; 当暂降幅值低于  $U_{upper}$  并高于  $U_{lower}$  时, 此幅值介于较深暂降  $\tilde{A}_2$  和深暂降  $\tilde{A}_3$  之间; 而当暂降幅值低于  $U_{lower}$  时, 此幅值完全隶属于深暂降  $\tilde{A}_3$ 。

#### 3.2.2 持续时间隶属度函数

电压暂降持续时间的论域  $T$  取  $[0, 1000]$  ms, 设  $\tilde{B}_1$ 、 $\tilde{B}_2$  和  $\tilde{B}_3$  为论域  $T$  上的模糊集合, 它们分别表示“短时暂降”、“较长时暂降”、“长时暂降”这三种模糊概念。根据图 6 可以进一步得出模糊集合  $\tilde{B}_1$ 、 $\tilde{B}_2$  和  $\tilde{B}_3$  的隶属度函数分别为

$$\mu_{\tilde{B}_1}(t) = \begin{cases} 1 & t \leq T_{upper} \\ \frac{T_{lower} - t}{T_{lower} - T_{upper}} & T_{lower} \geq t > T_{upper} \\ 0 & t > T_{lower} \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{\tilde{B}_2}(t) = \begin{cases} 1 & T_1 \geq t > T_{lower} \\ \frac{t - T_{upper}}{T_{lower} - T_{upper}} & T_{upper} \geq t > T_{lower} \\ \frac{T_2 - t}{T_2 - T_1} & T_{lower} \geq t > T_{lower} T_{upper} \\ 0 & t > T_2 \text{ or } t \leq T_{upper} \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{\tilde{B}_3}(t) = \begin{cases} 0 & t \leq T_1 \\ \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} & T_1 < t \leq T_2 \\ 1 & T_2 < t \end{cases} \quad (14)$$

由上式可知：当暂降持续时间  $t$  小于  $T_{upper}$  时，此持续时间完全隶属于短时暂降  $\tilde{B}1$ ；当  $t$  大于  $T_{upper}$  但小于  $T_{lower}$  时，此持续时间介于短时暂降  $\tilde{B}1$  与较长时暂降  $\tilde{B}2$  之间；当  $t$  大于  $T_{lower}$  且小于  $T_1$  时，此持续时间隶属于较长时暂降  $\tilde{B}2$ ；当  $t$  大于  $T_1$  且小于  $T_2$  时，此持续时间介于较长时暂降  $\tilde{B}2$  与长时暂降  $\tilde{B}3$  之间；当  $t$  大于  $T_2$  时，此持续时间隶属于长时暂降。

### 3.3 推理后件模糊化

本文模糊体系的推理后件为负荷损失率，为准确刻画不同电压暂降特征下工业过程的负荷损失情况，定义模糊子集  $\tilde{C}_{11} \sim \tilde{C}_{33}$  以表示损失的大小。根据模糊推理的思想，存在如下的模糊规则。

若  $u$  是  $\tilde{A}_m$  且  $t$  是  $\tilde{B}_n$ ，则有  $o$  是  $\tilde{C}_{mn}$

其中：“ $u$  是  $\tilde{A}_m$  且  $t$  是  $\tilde{B}_n$ ” 为推理的前件；“ $o$  是  $\tilde{C}_{mn}$ ” 为推理的后件。

考虑到各个工业过程特点不同， $\tilde{C}_{mn}$  的隶属函数需要具有灵活可调的特性。然而，经典的三角形、梯形、正态分布等隶属度函数可调节性较差，难以刻画不同敏感行业的负荷损失与电压暂降间的关系。因此，本文根据负荷损失历史数据的特点，构建如图 7 所示的隶属度函数，保证隶属度函数的客观性。图中横坐标为负荷损失率，纵坐标为不同负荷损失率对  $\tilde{C}_{11} \sim \tilde{C}_{33}$  的隶属程度。

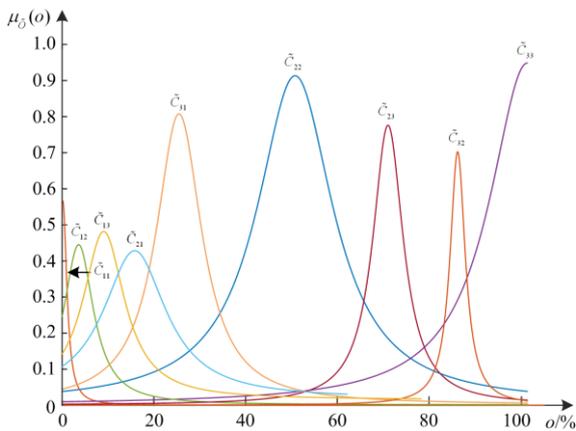


图 7 负荷损失率隶属度函数

Fig. 7 Membership function of load loss rate

隶属函数的表达式为

$$u_o(o) = \frac{\alpha}{1 + (o - O_{mean})^{2\beta}} \quad (15)$$

式中： $\alpha$  和  $\beta$  用于调节曲线的形状，其取值均大于 0； $O_{mean}$  为区间各元素的中值。根据电压暂降下实际的负荷损失率拟合  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $O_{mean}$ 。在调节  $\alpha$  和  $\beta$

时，需保证相邻语言间重叠率宜保持在 0.2~0.6。

### 3.4 模糊推理和解模糊

由上文可知  $\tilde{A}_m$ 、 $\tilde{B}_n$ 、 $\tilde{C}_{mn}$  分别是论域  $U$ 、 $T$  和  $O$  的模糊集合，其模糊关系可根据历史数据确定。已知论域  $U$ 、 $T$  上新的模糊集合  $\tilde{A}^*$ 、 $\tilde{B}^*$ ，根据模糊关系，可推理论域  $O$  上的模糊集合  $\tilde{C}^*$ 。

对于某次的电压暂降事件，根据 Larsen 模糊关系的定义有：

$$\mu_{\tilde{C}^*}(o) = \{ \bigvee_{u \in U} [\mu_{\tilde{A}^*}(u) \wedge \mu_{\tilde{A}}(u)] \cdot \bigvee_{t \in T} [\mu_{\tilde{B}^*}(t) \wedge \mu_{\tilde{B}}(t)] \} \cdot$$

$$\mu_{\tilde{C}}(o) = \omega_A \cdot \omega_B \cdot \mu_{\tilde{C}^*}(o)$$

(16)

式中， $\omega_A$  和  $\omega_B$  分别表示  $\tilde{A}^*$  对  $\tilde{A}$  的适配度和  $\tilde{B}^*$  对  $\tilde{B}$  的适配度。其表达式为

$$\omega_A = \bigvee_{u \in U} [\mu_{\tilde{A}^*}(u) \wedge \mu_{\tilde{A}}(u)] \quad (17)$$

$$\omega_B = \bigvee_{t \in T} [\mu_{\tilde{B}^*}(t) \wedge \mu_{\tilde{B}}(t)] \quad (18)$$

$\omega_A \cdot \omega_B$  为模糊规则的激励强度或满足度，它表示规则的前件部分被满足的程度。

根据上述方法，分别求取电压暂降在不同规则下的模糊集合，集成多个模糊集合，再集质心去模糊，即可评估负荷损失率  $v_o$  为

$$v_o = \frac{\int o \cdot \mu_{\tilde{C}^*}(o) do}{\int \mu_{\tilde{C}^*}(o) do} \quad (19)$$

### 3.5 评估流程

电压暂降下负荷损失率评估流程，如图 8 所示。主要步骤如下所述。

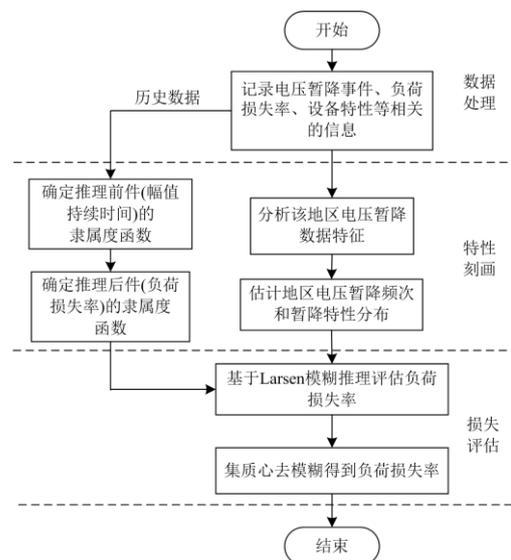


图 8 负荷损失率的评估流程

Fig. 8 Evaluation process of load loss rate

1) 数据处理: 根据历史记录的电压暂降事件、用户各敏感设备的 VTC、负荷跳停历史事件等计算过程参数等值可接受阈值和各过程的 PIT 等电压暂降耐受信息。

2) 特性刻画: 基于电压暂降事件与负荷损失率的数据集进行推理模型训练, 确定隶属函数中各参数; 根据记录到的电压暂降事件, 分析地区电压暂降特征, 估计出该地区的电压暂降水平。

3) 损失评估: 基于所刻画的模糊推理体系, 依据 Larsen 推理算法, 获得待评估各次电压暂降事件的负荷损失率的模糊集, 进一步去模糊化得到负荷损失率。

## 4 应用实例

以海南某石化企业为研究对象, 验证本文所提方法。该厂的主要产物为精对苯二甲酸(PTA)和聚酯切片(PET), 其生产流程如图 9 所示。首先需要从原油中提炼出对二甲苯(PX), 再将 PX 氧化并去杂质后得到 PTA, PTA 再和乙二醇反应生成 PET。根据工艺指标的不同, 该厂生产得到的 PET 又可分为瓶级切片、纤维级切片和薄膜级切片, 其中瓶级切片可用于饮料包装, 纤维级切片可用于制作涤纶短纤等, 薄膜级切片可用于包装、胶片及磁带等。

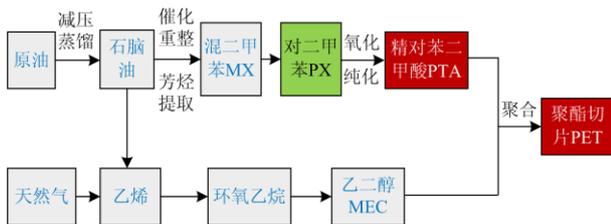


图 9 海南某石化企业生产流程

Fig. 9 Production process of a petrochemical enterprise in Hainan

生产过程中涉及的主要设备有蒸汽喷射器、催化重整与联合芳烃装置、反应器、过滤器、螺杆泵、转阀、干燥机、风机、搅拌器、真空泵、输送系统等。其中典型的敏感电气设备有搅拌机、螺杆泵、真空泵等, 它们均采用变频器驱动。同时含电机的设备一般前端还配有交流接触器以控制电路的通断。本节以上述石化行业氧化过程为例进行分析。

在氧化反应中, 螺杆泵的功能为控制反应器中注入原料的流量  $S$ , 流量  $S$  是一个具有数字耦合特性的参量, 其有明确的限值, 它是判断螺杆泵是否正常运转的关键参数。为了进一步建立液体流量  $S$  与电气侧参数的关系, 需要分析各个参数间的联系。液体的流量  $S$  与螺旋叶片的转速  $N$  线性正相关, 而电机转速  $N$  与电机机端电压  $U$  的关系可根据机械特

性曲线求出。螺杆泵为平方转矩负载<sup>[26]</sup>, 其负载特性曲线与电机的机械特性曲线的交点即是电机的稳定工作点。随着电机机端电压的下降, 电机稳定工作点的转差率逐渐增大。根据第 2 节方法可知, 当电机机端电压降为额定值的 79% 时, 转差率达到可接受的最大转差率(6%), 此时若电压再下降, 则会导致氧化环节产物受到影响, 即确定  $U_{P-th}$  为 0.79 p.u.。

基于厂家提供的工艺参数可接受阈值, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真平台, 确定流量  $S$  的过程抗扰时间 PIT 为 280~340 ms。表 1 为该环节中各设备的耐受特性。由于目前厂内交流接触器配置有不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS), 电压暂降并不会造成 ACC 脱扣, 因此仅需考虑变频器的电压耐受能力。则有  $T_{lower}$  和  $T_{upper}$  分别为 36 ms 和 68 ms,  $U_{lower}$  和  $U_{upper}$  分别为 0.55 p.u. 和 0.78 p.u.。

表 1 设备耐受信息

Table 1 Information of equipment tolerance

设备名称	耐受电压/p.u.	耐受时间/ms
变频器	0.55~0.78	36~68
交流接触	0.34~0.72	8~82

经统计 2016 年 1 月到 2019 年 12 月, 该企业的监测装置共记录到 64 次电压暂降及其负荷损失大小。基于这 64 次的历史数据, 拟合出负荷损失率隶属度函数中  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $O_{mean}$ , 进而得到不同负荷损失率对  $\tilde{C}_{11} \sim \tilde{C}_{33}$  的隶属程度。

表 2 为 2020 年该地区统计得到的 10 次电压暂降事件。根据 Larsen 模糊推理方法, 计算表 2 中各次电压暂降事件作用下该环节的负荷损失率, 结果如表 3 所示。

本文所提方法进行的模糊化处理, 减小了客观存在的数据偏差等带来的影响, 且根据实际的负荷损失量来确定隶属度函数, 进一步保证了评估结果的准确性。以用户给出的实际负荷损失量为标准, 评估结果相对误差均小于 6%, 处于可接受范围。证明了本文所提出的方法减小了对精确数据信息的依赖性, 且能保证较好的准确性。

表 2 2020 年记录的电压暂降事件

Table 2 Recorded voltage sags in 2020

事件序号	幅值/%	持续时间/ms	事件序号	幅值/%	持续时间/ms
1	0.81	75	6	0.58	92
2	0.68	436	7	0.66	103
3	0.54	252	8	0.72	430
4	0.87	120	9	0.36	305
5	0.48	30	10	0.74	46

表 3 负荷损失率

Table 3 Load loss rate

事件序号	评估得到的 负荷损失率/%	实际负荷 损失率/%	绝对误差/%
1	2.3	0	2.3
2	73.5	77	3.5
3	68.6	71	2.4
4	1.2	0	1.2
5	2.6	0	2.6
6	15.6	19	3.4
7	19.5	21	1.5
8	42.3	46	3.7
9	94.1	100	5.9
10	7.8	6	1.8

## 5 结论

1) 将电压暂降耐受能力分为设备级和过程级，并分析了设备级/过程级电压暂降响应特性，明确相应的刻画方法；

2) 针对某些过程参数难以获取的现状，本文提出了一种基于物理结构的过程参数等值响应模型，将非电量过程参数转化为电压参数，直接以输入电压值刻画工业过程耐受特性；

3) 本文提出了一种电压暂降下工业过程负荷损失率的评估方法，基于 Larsen 模糊推理，减小了客观存在的数据偏差等对评估结果的影响程度，降低了评估过程对精确信息的依赖性；

4) 对海南省某石化企业进行案例分析，基于评估结果与实际负荷损失率的对比分析，证明了本文方法的适用性和合理性。

研究用户在电压暂降下的损失大小，根据用户的损失风险程度，优化电压暂降治理措施。最大化治理效益，为用户定制优质用电精准服务，是电压暂降防治工作的主要方向。

## 参考文献

- [1] Electromagnetic compatibility (EMC): part 4-30 testing and measurement techniques-power quality measurement method: IEC 61000-4-30[S]. 2015.
- [2] 汪颖, 王欢, 李琼林, 等. 基于距离判别分析的电压暂降源识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 9-16.  
WANG Ying, WANG Huan, LI Qionglin, et al. Identification method of voltage sag source based on distance discriminant analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 9-16.
- [3] 欧阳森, 陈义森. 一种可提取受波动干扰的电压暂降特征的信号处理方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 17-22.

- OUYANG Sen, CHEN Yisen. Signal processing method for extracting the voltage sag feature with voltage fluctuation interference[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 17-22.
- [4] 刘海涛, 叶筱怡, 吕干云, 等. 基于最优组合赋权改进 S 变换的电压暂降检测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 47-52.  
LIU Haitao, YE Xiaoyi, LÜ Ganyun, et al. Modified S-transform of voltage sag detection method based on optimal combination weights[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 47-52.
  - [5] 栾乐, 马智远, 莫文雄, 等. 考虑不同敏感设备耐受特性的用户侧电压暂降严重程度区间评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 140-148.  
LUAN Le, MA Zhiyuan, MO Wenxiong, et al. Voltage sag severity interval assessment method for user side considering tolerance characteristics of equipment of differing sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 140-148.
  - [6] LI Z, LI W W, PAN T H. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 78-85.
  - [7] 汪颖, 邵彬, 肖先勇. 一种考虑冗余度的电压暂降工业过程中断概率评估方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 8-15.  
WANG Ying, SHAO Bin, XIAO Xianyong. A method for estimating industrial process interruption probability caused by voltage sag considering redundancy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 8-15.
  - [8] 谭秀美, 肖先勇, 张逸, 等. 基于敏感过程运行状态的事件型电能质量扰动损失评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 84-89.  
TAN Xiumei, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. Assessment of economic loss caused by event power quality disturbances based on sensitive process running states[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 84-89.
  - [9] 裴超, 王大磊, 王曼, 等. 基于有功功率流的运行风险负荷损失快速评估[J]. 电工技术, 2019(13): 9-12.  
PEI Chao, WANG Dalei, WANG Man, et al. Fast load loss assessment of operational risk using active power flow[J]. Electric Engineering, 2019(13): 9-12.
  - [10] 冯澎湃, 肖楚鹏, 郭松, 等. 考虑含多敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 36-44.  
FENG Pengpai, XIAO Chupeng, GUO Song, et al. Voltage sag vulnerable area identification of a distribution grid

- with multiple sensitive loads[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 36-44.
- [11] 吴亚盆, 刘颖英, 徐永海. 可编程控制器对电压暂降敏感度的试验研究[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(6): 1422-1430.  
WU Yapen, LIU Yingying, XU Yonghai. Experimental research on PLCs sensitivity during voltage sags[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(6): 1422-1430.
- [12] DJOKIC S Z, STOCKMAN K, MILANOVIC J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(1): 494-505.
- [13] DJOKIC S Z, MILANOVIC J V, KIRSCHEN D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruptions, and undervoltage transients[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [14] 徐永海, 兰巧倩, 洪旺松. 交流接触器对电压暂降敏感度的试验研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(21): 136-146.  
XU Yonghai, LAN Qiaoqian, HONG Wangsong. Experimental research on AC contactor sensitivity during voltage sags[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(21): 136-146.
- [15] IEEE Standard Association. IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment: IEEE std 1346—1998[S]. IEEE Press, 1998.
- [16] CEBRIAN J C, KAGAN N, MILANOVIC J V. Probabilistic estimation of distribution network performance with respect to voltage sags and interruptions considering network protection setting: part II-economic assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(1): 42-51.
- [17] CARLSSON F, WIDELL B, SADARANGANI C. Ride-through investigations for a hot rolling mill process[C] // *International Conference on Power System Technology*, December 4-7, 2000, Perth, WA, Australia.
- [18] STOCKMAN K, DHULSTER F, DIDDEN M, et al. Embedded solutions to protect textile processes against voltage sags[C] // *2002 IEEE Industry Applications Conference*, October 13-18, 2002, Pittsburgh, PA, USA.
- [19] POHJANHEIMO P, LEHTONEN M. Introducing prob-a-sag—a probabilistic method for voltage sag management[C] // *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, September 12-15, 2004, Lake Placid, NY, USA, 2004.
- [20] WANG J, CHEN S, LIE T T. Estimating economic impact of voltage sags[C] // *2004 International Conference on Power System Technology*, 2004. PowerCon 2004. IEEE, 2005.
- [21] CIGRE/CIREU/UIE Joint Working Group C4.110, Voltage dip immunity of equipment and installations, CIGRE Technical Brochure 412[J]. 2010.
- [22] CEBRIAN J C, MILANOVIC 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.
- [23] CEBRIAN J C, KAGAN N, MILANOVIC J V. Probabilistic estimation of distribution network performance with respect to voltage sags and interruptions considering network protection setting—part I: the methodology[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(1): 42-51.
- [24] 汪颖, 陈春林, 肖先勇, 等. 电压暂降敏感设备耐受能力自动测试方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 127-135.  
WANG Ying, CHEN Chunlin, XIAO Xianyong, et al. automatic test method for tolerance capability of voltage sag sensitive equipment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(20): 127-135.
- [25] 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.
- [26] 赵利. 风机和泵类负载调速变频器的选择[J]. *电机与控制应用*, 2007(8): 39-41.  
ZHAO Li. Selection of inverter in speed regulation of air-blower and pump[J]. *Motor and Control Application*, 2007(8): 39-41.

收稿日期: 2021-04-11; 修回日期: 2021-07-16

作者简介:

李天楚(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量、电磁环境与仪器仪表检测技术; E-mail: litianchu2000@163.com

伍智鹏(1993—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电能质量分析; E-mail: hnwuzhipeng2020@163.com

方铭(1988—), 女, 本科, 工程师, 研究方向为电能质量、电压管理与仪器仪表检定技术。E-mail: hnfangming@163.com

(编辑 葛艳娜)