

# 敏感用户工业过程的过程免疫时间曲线刻画方法

马骏<sup>1</sup>, 景源<sup>1</sup>, 易见<sup>1</sup>, 周之松<sup>1</sup>, 徐方维<sup>2</sup>, 龙晨瑞<sup>2</sup>

(1. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司输气管理处, 四川 成都 610213;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**过程免疫时间曲线是分析敏感用户工业过程对电压暂降免疫力的重要工具。针对实际生产中过程参数监测困难、用户监测意愿低导致过程免疫时间曲线难以刻画的问题,文中提出监测数据缺失或不足时典型工业过程的过程免疫时间曲线模型构建方法。首先,基于典型工业过程结构,利用敏感设备电压暂降免疫时间常数计算过程免疫时间;然后,由经验公式和二次Lagrange插值分别得到无监测数据和少量监测数据情况下过程免疫时间曲线;最后,通过对某天然气压气站大功率电驱离心式压缩机系统的分析,验证了所提方法的可行性与有效性。

**关键词:**电压暂降; 过程参数; 过程免疫时间; Lagrange插值

**中图分类号:** TM 714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0063-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230412

## PIT Curve Characterization Method for Industrial Processes of Sensitive User

MA Jun<sup>1</sup>, JING Yuan<sup>1</sup>, YI Jian<sup>1</sup>, ZHOU Zhisong<sup>1</sup>, XU Fangwei<sup>2</sup>, LONG Chenrui<sup>2</sup>

(1. Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610213, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** The process immunity time curve is an important tool to analyze the immunity of sensitive industrial process to voltage sag. In order to solve the problem that it is difficult to describe the process immunity time curve due to the monitoring difficulty of process parameters and low monitoring willingness of users in actual production, a method to build the process immunity time curve model is proposed for typical industrial processes with missing or insufficient monitoring data. Firstly, based on typical industrial process structure, the immunity time constant of voltage sag in sensitive equipment is used to calculate the process immunity time. Then, the empirical formula and quadratic Lagrange interpolation are used to obtain the process immunity time curves without monitoring data and with a small amount of monitoring data respectively. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by the analysis of a high-power electric drive centrifugal compressor system in a natural gas compressor station.

**Key words:** voltage sag; process parameter; process immunity time; Lagrange interpolation

## 0 引言

电压暂降是最常见的电能质量扰动事件,产生原因包括短路故障、变压器投切和大型感应电动机启动<sup>[1-3]</sup>。现代工业过程广泛使用诸如变频器(adjustable speed driver, ASD)、交流接触器(AC contactor, ACC)

**基金项目:** 西南油气田分公司输气管理处 2021 年科研计划项目 (20210401-08)

和可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)等电压暂降敏感设备,易因电压暂降引起工业过程中断,造成巨大经济损失<sup>[4-6]</sup>。尽管电压暂降的发生无法避免,但提升工业过程对电压暂降的耐受能力可有效缓减敏感用户经济损失。在用户侧加装电压暂降治理装置是最主流的提升措施。针对不同过程对电压暂降耐受能力的差异,对治理装置进行优化配置可达到经济收益最大化。因此,有必要研究工业过程对电压暂降的耐受能力。

电压暂降国际联合工作组 (CIGRE C4.110) 在 2009 年发布报告推荐使用过程免疫时间 (process immunity time, PIT) 作为衡量过程对电压暂降或短时中断免疫力的统一测度<sup>[7]</sup>, PIT 定义为过程受到电压暂降或短时中断影响后, 其能维持过程参数不越限的最大持续时间。PIT 在电压暂降经济损失评估<sup>[8-10]</sup>、电压暂降后果缓减<sup>[11-12]</sup>、电压暂降严重度评估<sup>[13-14]</sup>、工业用户供电方案优化和过程免疫力量化<sup>[15-19]</sup>等方面得到应用。上述研究得以开展的先决条件是 PIT 已知, 但实际生产中 PIT 存在模糊性。

通常, 敏感用户无法为 PIT 曲线的刻画提供数据支撑, 因为电压暂降具有随机性, 其出现频次、暂降幅值和持续时间不确定, 难以有预见性地对电压暂降事件进行监测; 而建立完善的监测系统采集电压暂降期间工业过程中电量与物理量数据, 将使用户的生产成本上升。

当用户监测数据不足时, 以 PIT 为切入点针对工业过程电压暂降免疫力的研究主要从两方面开展: 过程免疫时间计算<sup>[20-21]</sup>和过程免疫时间曲线刻画<sup>[22-23]</sup>, 即 PIT 值计算和 PIT 曲线刻画。PIT 值的计算一般基于过程中元件响应特性或元件连接方式; 文献[20]考虑工业过程元件连接方式, 利用信息响应流拓扑评估工业过程 PIT 值; 文献[21]基于元件逻辑连接关系和单个元件的响应特性, 利用甘特图计算 PIT 值。实际生产中不同工业过程之间联系复杂、过程容量大, 文献[20-21]的计算结果置信度难以保证。对 PIT 曲线的刻画, 以数据拟合和构建物理模型为主: 文献[22]使用线性插值对用户监测数据进行拟合以刻画 PIT 曲线, 其结果难以反映温度、流量等非线性变化的过程参数对电压暂降的响应特性; 文献[23]基于工业过程物理结构提出过程参数响应模型以刻画 PIT 曲线, 其等值模型结构简单, 无法推广至其他工业用户。可见, 如何保证小样本及复杂工业结构下 PIT 曲线的刻画精度, 仍是未来工业过程电压暂降耐受能力研究领域的发展方向。

综上, 当用户监测数据缺失或不足时建立具有一定精度的工业过程 PIT 曲线模型, 具有较高的经济价值和实用性。为此, 下面提出敏感用户工业过程 PIT 曲线刻画方法。首先, 基于过程中敏感设备类型及其组成结构, 计算得到不同过程结构的 PIT 值; 无过程参数监测数据时, 根据 PIT 值和过程参数变化特性得到 PIT 曲线; 仅有少量过程参数监测数据时, 利用二次 Lagrange 插值得到 PIT 曲线。最后,

通过对某天然气压气站用户工业过程的分析, 证明了所提方法的可行性。

## 1 过程免疫时间与过程免疫力

工业过程以电力作为动力源, 时刻与外界环境产生能量和物质交换, 以维持过程中特定工艺参数 (过程参数) 稳定在可接受范围内。研究电压暂降影响下过程参数的变化特性, 可准确衡量并掌握工业过程对电压暂降的抗扰能力。

过程参数超过控制系统设定阈值时, 相应工艺过程中断; 若多个过程之间设置有连锁保护, 单一过程的中断可能引起工业用户整个生产过程中断。因此, 可用 PIT 作为衡量工业过程对电压暂降免疫力的测度。假设过程受到电压暂降影响前稳定运行, 且电压暂降持续时间大于过程中敏感设备的耐受时间<sup>[11]</sup>, 则 PIT 曲线如图 1 所示。

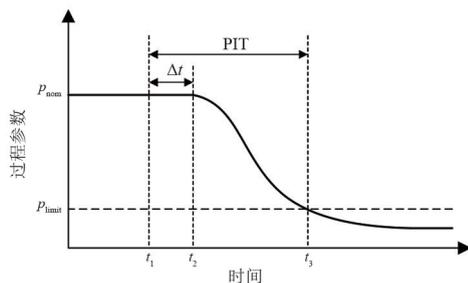


图 1 过程免疫时间曲线

图 1 中:  $p_{nom}$ 、 $p_{limit}$  分别为过程参数额定值和限值;  $t_1$  为电压暂降起始时刻;  $t_2$  为过程参数因电压暂降而偏离额定值的时刻;  $t_3$  为过程参数超过限值时刻, 即过程中断时刻;  $\Delta t$  为过程参数对电压暂降的响应时延。为防止过程因电压暂降中断, 应在  $t_3$  前将过程参数提升至  $p_{limit}$  以上, 避免触发控制系统的连锁保护, 这一过程如图 2 所示。

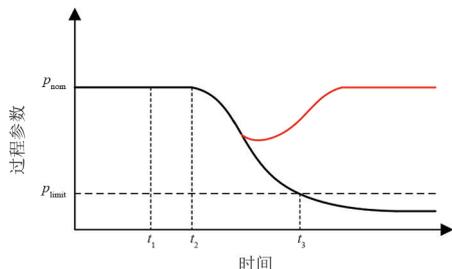


图 2 过程免疫力的提升

图 2 中, 红色曲线为进行电压补偿或提升过程储能后过程参数的变化趋势。由图 2 可知,  $t_3$  前过程参数维持在  $p_{limit}$  以上, 成功穿越此次电压暂降。

提高工业过程对电压暂降的抗扰能力,合理缓减电压暂降影响,可基于 PIT 曲线确定电压暂降补偿方式、补偿深度以补偿维持时间。

## 2 工业过程结构与 PIT

常见的敏感设备包括个人电脑(personal computer, PC)、PLC、ASD 和 ACC。工业用户通常会采用 UPS 保护 PC 和 PLC 等控制设备,因此 ACC 与 ASD 成为对工业过程影响最大的敏感设备。工业过程的正常运行,是控制系统、驱动系统和负载(压缩机、泵、粉碎机和风机等)共同出力的结果。不同工业过程使用的负载类型不同,但驱动系统一般由 ACC、ASD 和异步电动机组成,驱动系统将电能转化为其他能量形式,直接或间接维持过程参数恒定。

典型的工业过程结构为“ACC-异步电动机-负载”和“ACC-ASD-异步电动机-负载”,后续简称为 ACC-M 和 ASD-ACC-M。将这两种结构中各元件的输出量看作相应元件的过程参数,则两种结构的 PIT 等于结构中各元件的 PIT 之和。此外,单一元件的 PIT 受其响应时间与免疫时间常数<sup>[20]</sup>(immunity time constant, ITC)影响。受试设备电压耐受曲线(voltage tolerance curve, VTC)及 ITC 的定义如图 3 所示。

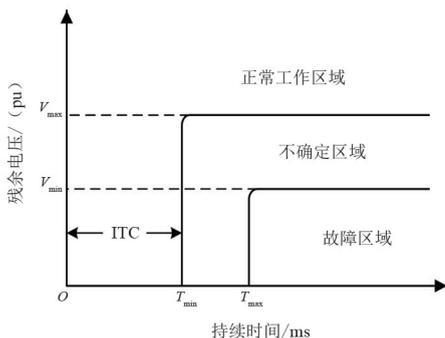


图3 ITC 的定义

图3中,  $(T_{\min}, V_{\max})$ 、 $(T_{\max}, V_{\min})$  为 VTC 中 3 个区域边界线的膝点坐标。

ACC 由电磁线圈、静铁芯、动铁芯和弹簧构成。电压暂降会导致 ACC 输入端电压  $u_{\text{ACC}}$  迅速下降,从而使流过电磁线圈的电流  $i_{\text{ACC}}$  减小,ACC 铁芯中磁通量下降,电磁力减小,最终电磁力不足以克服弹簧力的影响,导致触点断开,受控设备的电源中断。大量研究和测试表明,ACC 对电磁线圈中电压变化的响应时间近似于 0。因此,若将 ACC 动铁芯与静铁芯距离作为过程参数,可认为其 PIT 等于 ACC 的 ITC。

ASD 由整流电路、直流耦合电容和逆变电路组成。二极管和晶闸管是响应速度极快的电力电子器件,因此整流电路与直流耦合电路的响应时间近似为 0,ASD 的响应时间由直流耦合电容决定。对于给定的 ASD,有

$$V = V_{\text{sag}} + (V_{\text{nom}} - V_{\text{sag}}) e^{\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

式中: $V$  为暂降期间 ASD 输出的稳态电压; $V_{\text{sag}}$  为暂降期间 ASD 的输入电压; $V_{\text{nom}}$  为整流电路输出电压; $R$  为 ASD 所接负载的等值电阻; $C$  为直流耦合电容值。

式(1)表明:发生电压暂降时,ASD 整流侧的输出电压  $V_{\text{nom}}$  会随输入电压降低而减小;当  $V_{\text{nom}}$  小于 ASD 直流耦合电容电压时,电容将通过逆变侧负载电阻放电。此时,ASD 遭受电压暂降时将经历式(1)所示的暂态过程,时间常数为  $RC$ ,最终  $V$  会衰减至  $V_{\text{sag}}$ 。对于一切采用“交-直-交”结构的工业变频调速器,上述分析均适用。

ASD 通常设有直流电压保护,当  $V_{\text{nom}}$  低于保护阈值时 ASD 将闭锁。因此,从暂降发生至整流电路输出电压低于保护阈值的时间为 ASD 的 PIT。当 ASD 整流电路输出电压难以获取时,可近似认为其 PIT 等于 ITC。

异步电动机通常与 ASD 和 ACC 配合使用。由于异步电动机对电压暂降的耐受能力强于 ASD 和 ACC,通常认为当异步电动机控制回路中的 ASD 与 ACC 因电压暂降失效后,异步电动机开始耐受短时中断。假设电压暂降结束时异步电动机转速未降至 0,则有

$$\begin{cases} \Delta n = \frac{T_m}{2\pi J} \int_{t_{\text{st}}}^{t_{\text{ed}}} [V_{\text{sag-M}}^2(t) - 1] dt \\ n_{\text{ed}} = n_n + \Delta n \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta n$  为异步电动机因电压暂降产生的转速变化量; $T_m$  为异步电动机的机械转矩; $J$  为惯性转矩; $t_{\text{st}}$ 、 $t_{\text{ed}}$  分别为电压暂降起始时刻和结束时刻; $V_{\text{sag-M}}$  为电压暂降影响下异步电动机端电压; $n_{\text{ed}}$ 、 $n_n$  分别为  $t_{\text{ed}}$  时刻转速和  $t_{\text{st}}$  时刻前转速。

异步电动机的机端电压会引电压暂降降低,此时异步电动机电磁转矩减小,当电磁转矩小于其机械转矩  $T_m$  时,电动机转差率上升,转速下降。由式(2)可知,异步电动机转速下降取决于初始机械转矩、惯性转矩及电压暂降特征(暂降幅值与持续时间)。直驱异步电动机和变频异步电动机转速在电压暂降影响下的变化均满足式(2)。

将式(2)移项得

$$\frac{2\pi J\Delta n}{T_m} = \int_{t_{st}}^{t_{ed}} [V_{\text{sag-M}}^2(t) - 1] dt \quad (3)$$

求解式(3),以转速作为异步电动机过程参数,其 PIT 可由式(4)<sup>[18]</sup>确定。

$$t_{\text{PIT-M}} = \frac{2\pi J(n_n - n_f)}{T_m(V_{\text{sag}}^2 - 1)} \quad (4)$$

式中: $t_{\text{PIT-M}}$ 为异步电动机的 PIT; $V_{\text{sag}}$ 为电压暂降幅值。

在异步电动机的测试和分析中,通常将其转速或转差率作为判断其运行状态的参考量,当式(4)中  $J$  与  $T_m$  难以获取时,可近似认为其 PIT 等于 ITC。综上,由 ACC-ASD-M 和 ACC-M 两种结构组成的工业过程 PIT 为

$$\begin{cases} t_1 = t_{\text{PIT-ACC}} + t_{\text{PIT-ASD}} + t_{\text{PIT-M}} \\ t_2 = t_{\text{PIT-ACC}} + t_{\text{PIT-M}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $t_1$ 、 $t_2$  分别为 ACC-ASD-M 结构和 ACC-M 结构的 PIT; $t_{\text{PIT-ACC}}$ 、 $t_{\text{PIT-ASD}}$  分别为 ACC 和 ASD 的 PIT。

## 3 工业过程 PIT 模型

### 3.1 无监测数据

电压暂降影响下过程参数的监测数据缺失时,可根据过程参数额定值、限值以及生产过程所处环境的环境参数建立 PIT 曲线模型。研究与测试表明,在无外界能量输入时,诸如压力、温度等过程参数的变化速率取决于其初始状态与环境参数。当 ACC-ASD-M 和 ACC-M 结构中元件因电压暂降失效后过程参数随即耗散,耗散速率与过程参数梯度呈正比<sup>[11]</sup>。

设电压暂降发生后,过程参数  $p$  随时间  $T$  变化关系为

$$p'(T) = \frac{dp(T)}{dT} = -\lambda [p(T) - p_E] \quad (6)$$

式中: $\lambda$  为表征过程参数耗散速率的系数, $\lambda$  仅与过程结构和设备性能有关; $p_E$  为无设备出力时相应过程参数的环境值。

由式(6)可得 PIT 曲线模型。

$$p(T) = p_E + (p_{\text{nom}} - p_E)e^{-\lambda T} \quad (7)$$

式(7)表明:对于给定工业过程,电压暂降影响下过程参数  $p$  的变化速率与初值、稳态值和环境值有关;工业过程的结构、初始储能不同,其过程参数变化形式存在差异;可用  $\lambda$  表征过程抗扰能力, $\lambda$  越

大,过程对电压暂降的抗扰能力越弱。以温度、压力和流量等为过程参数的工业过程均可用式(7)描述过程参数变化特性。

由 PIT 定义可知

$$p(t_{\text{PIT}}) = p_E + (p_{\text{nom}} - p_E)e^{-\lambda t_{\text{PIT}}} = p_{\text{limit}} \quad (8)$$

式中, $t_{\text{PIT}}$ 为给定过程的过程免疫时间。

根据式(7),有

$$t_{\text{PIT}} = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{p_{\text{limit}} - p_E}{p_{\text{nom}} - p_E}\right) \quad (9)$$

于是

$$\lambda = -\frac{1}{t_{\text{PIT}}} \ln\left(\frac{p_{\text{limit}} - p_E}{p_{\text{nom}} - p_E}\right) \quad (10)$$

将式(5)中不同过程结构的 PIT 代入式(10)即可求出  $\lambda$ ,并得到式(7)所示 PIT 曲线模型。

### 3.2 少量监测数据

根据用户提供的少量监测数据,可通过拟合或插值方法得到 PIT 曲线模型。由于温度、压力和流量等过程参数在短时间段内的变化是非线性的,随着用户监测样本数量的减少,拟合或线性插值结果将无法反映过程参数的实际变化特性。基于此,利用二次 Lagrange 插值<sup>[24]</sup>,保证小样本情况下所得 PIT 曲线模型的精度。

设插值节点为  $T_i$ ,  $i=0,1,2,\dots,k,\dots,n$ ;各插值节点对应的过程参数为  $p_i$ 。则有

$$\begin{cases} T_n = t_{\text{PIT-n}} \\ p_0 = p_{\text{nom}} \\ p_n = p_{\text{limit}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $t_{\text{PIT-n}}$ 为过程免疫时间; $p_{\text{nom}}$ 为电压暂降发生前过程参数额定值; $p_{\text{limit}}$ 为过程参数限值。

在区间  $[T_{k-1}, T_{k+1}]$ , 设二次 Lagrange 插值基函数分别为

$$\begin{cases} l_{k-1}(T) = \frac{(T - T_k)(T - T_{k+1})}{(T_{k-1} - T_k)(T_{k-1} - T_{k+1})} \\ l_k(T) = \frac{(T - T_{k-1})(T - T_{k+1})}{(T_k - T_{k-1})(T_k - T_{k+1})} \\ l_{k+1}(T) = \frac{(T_k - T_{k-1})(T - T_k)}{(T_{k+1} - T_{k-1})(T_{k+1} - T_k)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k$  为常数且  $k \in (1, n-1)$ ;  $l(T)$  为对应插值区间内二次 Lagrange 插值的基函数。

二次 Lagrange 插值结果为

$$p_k(T) = p_{k-1}l_{k-1}(T) + p_k l_k(T) + p_{k+1}l_{k+1}(T) \quad (13)$$

根据  $i$  个插值区间的二次 Lagrange 插值函数解出该区间下过程参数值,得到给定过程的 PIT 曲线模型。工况中,如温度、压力等过程参数随时间的变化趋势并非呈线性,式(13)通过插值区间端点和中点值,利用二次基函数进行插值能更好反映过程参数曲线的特点。当插值节点足够时,式(13)可作为分析工业过程抗扰能力及其对电压暂降响应特性的可靠参考。

### 4 算例分析

以中国西南地区某天然气气站用户为例,验证所提方法的可行性与有效性。该用户主要工艺流程为压缩天然气,由大功率电驱离心式压缩机(下面简称为压缩机)的主系统与辅助系统共同维持工艺流程运转,其供电结构如图4所示。

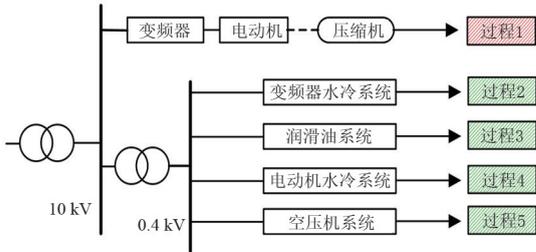


图4 压缩机系统供电结构

图4中,过程1由压缩机主系统维持,过程2至过程5分别由压缩机4个辅助系统维持:变频水冷系统的润滑油系统、电动机水冷系统、空压机系统和后空冷系统。过程1至过程5的结构和过程参数如表1所示。

表1 过程结构及过程参数

过程	结构	过程参数	额定值	限值
过程1	ACC-ASD-M	压力	16 MPa	10 MPa
过程2	ACC-M	温度	34 °C	47 °C
过程3	ACC-ASD-M	压力	0.25 MPa	0.05 MPa
过程4	ACC-M	温度	22 °C	33 °C
过程5	ASD-M	压力	0.75 MPa	0.06 MPa

该用户的工艺监测系统中,存储了少量电压暂降影响下主系统过程参数数据,根据式(12)一式(13)可得过程1的PIT曲线;4个辅助系统过程参数无可用监测数据,根据式(6)一式(10)可得过程2至过程5的PIT曲线。需要注意的是,该用户压缩机驱动系统中变频器可低电压穿越,因此暂降幅值不同时过程1的PIT曲线变化趋势不同;辅助系统中某一元件因电压暂降失效后将导致过程中

断,故不再考虑暂降幅值对过程1至过程5PIT曲线变化趋势的影响。

过程2至过程5中敏感设备包括ACC与ASD。结构中各设备典型VTC曲线<sup>[18,25]</sup>的膝点坐标与ITC值如表2所示。

表2 敏感设备典型VTC参数

种类	$(T_{min}, V_{max})$	$(T_{max}, V_{min})$	ITC
ACC	(60,0.8)	(100,0.5)	60
ASD	(10,0.8)	(50,0.7)	10
M	(500,0.47)	—	500

根据式(5),由表1和表2可知过程2至过程5的PIT值  $t_{PIT2}$ 、 $t_{PIT3}$ 、 $t_{PIT4}$ 、 $t_{PIT5}$  分别为0.56 s、0.57 s、0.56 s和0.51 s。过程2和过程4的过程参数均为冷却介质的供水温度,无设备出力时过程参数将分别升高至57 °C和43 °C,故过程2和过程4的环境值  $p_{E2}$ 和  $p_{E4}$ 分别为57和43;过程3与过程5的过程参数分别为润滑油总管压力和空压机出口压力,无设备出力时过程参数均降低至0,故过程3与过程5的环境值  $p_{E3}$ 和  $p_{E5}$ 均为0。

将过程2至过程5的过程参数额定值、限值、 $t_{PIT2} \sim t_{PIT5}$  以及  $p_{E2} \sim p_{E5}$  代入式(10),解得相应过程参数耗散速率系数  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ 、 $\lambda_5$  分别为0.672 3、0.354 2、0.754 8和0.201 9。将  $\lambda_2 \sim \lambda_5$  代入式(7),可得相应过程的PIT曲线,结果如图5所示。

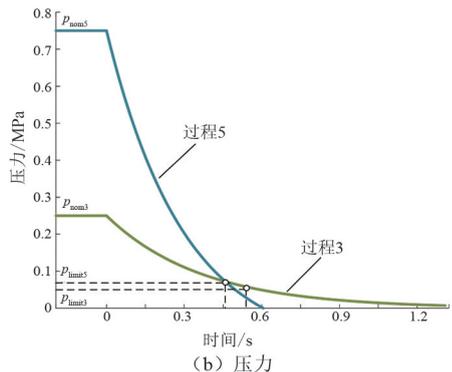
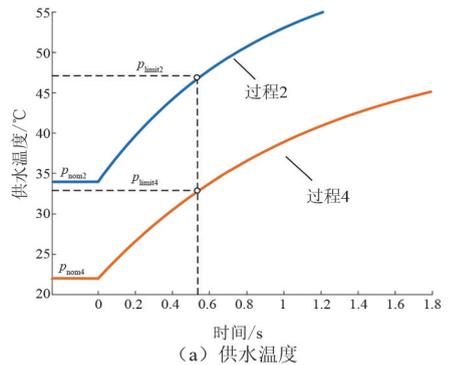


图5 过程2至过程5的PIT曲线

图5中,电压暂降起始时刻为0 s;  $p_{nom2}$ 、 $p_{nom3}$ 、

$p_{nom4}$ 、 $p_{nom5}$  分别为过程 2 至过程 5 的过程参数额定值;  $p_{limit2}$ 、 $p_{limit3}$ 、 $p_{limit4}$ 、 $p_{limit5}$  分别为过程 2 至过程 5 的过程参数限值。

该用户压缩机主系统包含隔离变压器、大功率变频器、高压异步电动机和离心式压缩机。根据用户提供的暂降幅值为 0.35 pu、0.56 pu 和 0.89 pu 时压缩机出口压力采样数据,利用二次 Lagrange 插值得到过程 1 的 PIT 曲线,结果如图 6 所示。

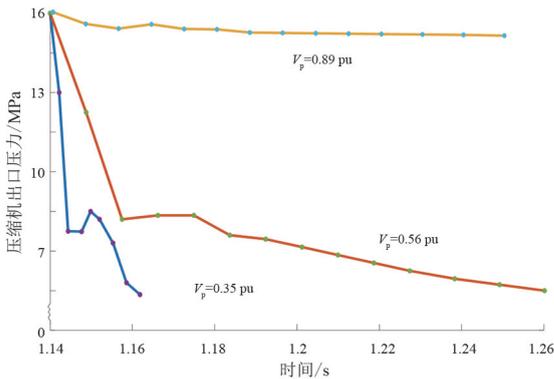


图 6 过程 1 的 PIT 曲线

图 6 中  $V_p$  为暂降幅值,根据该用户接入点电压暂降的幅值概率分布特征,可得到不同暂降幅值下主过程 1 的 PIT 曲线。依据该压气站用户过程工程师经验,可知图 5 至图 6 中过程 1 至过程 5 的过程参数变化特性与历史事件相符合,可反映实际生产中压缩机主系统与辅助系统过程参数对电压暂降的响应特性。

## 5 结 论

所提出的过程免疫时间曲线构建方法,可用于描述工业用户受暂态电压扰动时,关键工艺参数的变化特性。通过分析用户工业过程结构,采集用户关键工艺参数,可完成过程参数模型构建;或根据少量过程参数监测数据利用插值得到过程免疫时间曲线。基于所得过程免疫时间曲线中关键坐标参数,可为用户后续治理装置选型、补偿深度和补偿时间的确定奠定基础,并为同类型敏感用户建设初期供电方案的设计与规划提供客观参考。

考虑用户需求以提供个性化的电能质量定制服务,将成为未来电力市场和优质供电服务的发展方向。随着用户数据开放程度的提升,精准制定符合用户特点的供用电策略,将同时利好电网和用户。过程免疫时间曲线作为反映敏感用户工业过程对电压暂降免疫能力的便利工具,可同时反映敏感用户

的电气特性和物理属性,具有较好的研究价值。针对工业用户过程参数监测数据缺失或不足的问题,上面分别提出相应过程免疫时间曲线模型的构建方法,为采用特定工业过程结构的用户提供参考。但如何在小样本情况下,完善过程免疫时间曲线的刻画精度,以便推广至同类型用户,还需进一步研究。

## 参考文献

- [1] 汪颖,王曼,陈韵竹,等.基于多维关联信息的电压暂降治理需求识别[J].电网技术,2022,46(11):4391-4402.
- [2] 王璐,肖先勇,汪颖,等.基于深度神经网络的电压暂降经济损失评估模型[J].电力自动化设备,2020,40(6):156-165.
- [3] 华桦,李华强,李文峰.电压暂降治理的运营模式及其投资回报[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):151-160.
- [4] 何英杰,支文浩,张义坤,等.典型敏感设备电压暂降耐受能力自动测试系统研究[J].电网技术,2022,46(5):1956-1964.
- [5] HE Hanyang, ZHANG Wenhai, WANG Ying, et al. A sensitive industrial process model for financial losses assessment due to voltage sag and short interruptions[J]. IEEE Transaction on Power Delivery,2021,36(3):1293-1301.
- [6] 何函洋,肖先勇,李成鑫,等.敏感用户电压暂降损失风险评估的模糊推理模型[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6527-6535.
- [7] CIGRE/CIREU/UIE joint working group C4.110. Voltage dip immunity of equipment in installations[R].CIGRE, Paris, France;2010.
- [8] 丁凯,胡畔,李伟,等.考虑信息缺失的电压暂降经济损失模糊评估方法[J].中国测试,2020,46(7):46-53.
- [9] 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.
- [10] CEBRIAN J C, MILANOVIC J V, KAGAN N. Case studies of application of process immunity time in assessment of financial losses due to system faults induced industrial process interruptions[C]//Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286007.
- [11] 张逸,李为明,林芳,等.基于电气特性-物理属性的工业用户电压暂降减缓策略[J].中国电机工程学报,2021,41(2):632-642.
- [12] 张逸,张妍,张嫣,等.缓减电压暂降影响的电-气综合能源系统储气装置选址定容方法[J].电力自动化设备,2022,42(6):37-44.

的稳定性和可靠性。

2) 新建串联补偿装置,补偿度为 30%,乌撒电源可满出力。

3) 新建调相机 100 Mvar,毕节新能源可满出力。

## 4 结 论

上面对毕节新能源 500 kV 送出系统进行了电网稳定研究,分析了毕节新能源和水电送出 500 kV 联络线存在的稳定问题,提出了提高送电能力的措施。

### 参考文献

- [1] 李明节.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J].电网技术,2016,40(4):985-991.
- [2] 杨欢欢,付超,李诗旸,等.南方电网稳定控制系统高保真传动试验方案设计与结果分析[J].南方电网技术,2022,16(5):1-8.
- [3] 许涛,励刚,于钊,等.多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J].电力系统自动化,2017,41(8):98-104.
- [4] 朱锐,黎劲松,杨宝起,等.高比例新能源接入区域电网稳定控制技术探讨[J].电工技术,2021(12):46-49.

- [5] 肖友强,李玲芳,陈义宣.云南电网稳控系统的优化配置研究[J].云南电力技术,2017,45(1):118-119.
- [6] 郝雨辰,江叶峰,仇晨光,等.基于多代理系统的直流微电网分区域式稳定控制方法研究[J].电力工程技术,2017,36(5):15-20.
- [7] 郭剑,朱炳铨,徐泰山,等.基于历史数据聚类分析的暂态功角稳定故障筛选[J].电力工程技术,2020,39(2):75-80.
- [8] SHU Y B, TANG Y. Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 334-339.
- [9] YU W J, XUE Y S, LUO J B, et al. An UHV grid security and stability defense system: considering the risk of power system communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 491-500.
- [10] 郭琦,朱益华,常东旭,等.电网安全稳定控制系统远程试验方法及工程应用[J].电力系统自动化,2020,44(1):152-159.

### 作者简介:

明 杰(1992),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2023-01-19)

(上接第 68 页)

- [13] 秦川,姜燕.基于经济等效时间考虑电压暂降的供电可靠性评估方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(1):144-150.
- [14] 林志超,罗步升,宋志坚.一种基于过程免疫时间的电压暂降后果分级指标[J].云南电力技术,2020,48(6):20-24.
- [15] 肖先勇,秦铄,汪颖,等.考虑敏感设备中断概率的电网线路改造优质供电运营模式研究[J].电网技术,2023,47(2):584-594.
- [16] 汪颖,李成鑫,李国栋,等.基于响应事件工艺参数免疫时间的设备电压暂降敏感特征识别[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):181-187.
- [17] 刘旭娜,张文涛,魏俊,等.基于配电网过电流保护的电压暂降缓解方法[J].电气应用,2017,36(22):69-74.
- [18] HUANG Anjunguo, XIAO Xianyong, WANG Ying. Evaluation scheme of voltage sag immunity in sensitive industrial process[J]. IEEE Access, 2021, 9: 66398-66407.
- [19] 罗珊珊,陈兵,汪颖,等.基于过程免疫力和优化 K 近邻估计的配网电压暂降频次估计[J].电工电能新技术,2022,41(7):25-37.
- [20] 徐琳,刘畅,杨华.敏感工业过程电压暂降免疫时间评估[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(2):110-116.
- [21] 钟庆,何淇彰,陈伟坤,等.基于甘特图的过程免疫时间计算方法[J].电力系统自动化,2019,43(7):174-181.

- [22] 肖先勇,谭秀美,汪颖,等.基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):105-110.
- [23] 李天楚,伍智鹏,方铭,等.基于 Larsen 推理的电压暂降下工业过程负荷损失率评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(4):145-153.
- [24] 胡兵,徐友才,朱瑞.现代科学与工程计算基础[M].成都:四川大学出版社,2018.
- [25] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE Std 1159:2009[S/OL]. [2022-10-05]. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8796484>.

### 作者简介:

马 骏(1984),男,工程师,从事电气管理工作;  
景 源(1981),男,助理工程师,从事电气技术管理工作;  
易 见(1983),男,高级工程师,从事天然气离心式压缩机组管理工作;

周之松(1988),男,高级工程师,从事水电、压缩机管理工作;

徐方维(1978),女,博士,教授,研究方向为电能质量与电磁兼容;

龙晨瑞(1998),男,硕士研究生,研究方向为电压暂降治理技术。

(收稿日期:2022-12-05)