

DOI: 10.61369/NPS.2025020003

# 首波开断技术在新能源电压暂降治理中的应用与工程实践

刘海<sup>1</sup>, 邵久柠<sup>1</sup>, 宋延良<sup>1</sup>, 童雪燕<sup>2</sup>, 杨新州<sup>3</sup>

(1. 华电新疆公司有限公司 新能源分公司, 新疆 乌鲁木齐 832000;

2. 安徽合凯电气科技股份有限公司, 安徽 合肥 231131;

3. 上海昆拓电气科技有限公司, 上海 201612)

## Engineering Practice Research on Mitigating Voltage Sag with First-Wave Breaking Technology

LIU Hai<sup>1</sup>, SHAO Jiuning<sup>1</sup>, SONG Yanliang<sup>1</sup>, TONG Xueyan<sup>2</sup>, YANG Xinzhou<sup>3</sup>

(1. Huadian Xinjiang Company Limited, New Energy Branch, Urumqi Xinjiang 832000;

2. Anhui Hekai Electric Technology Co., Ltd., Hefei Anhui 231131;

3. Shanghai Kuntuo Electric Technology Co., Ltd., Shanghai 201612)

**摘要:**【目的】为解决新能源风电等连续型企业因电压暂降引发的敏感设备停运问题,避免大规模停产事故。【方法】根据研判,电压暂降问题核心在于传统故障切除时间远超设备耐受极限,提出了首波开断技术。通过涡流驱动快速开关、高速 DSP 识别技术及限流阻抗构成系统,短路时快速开关将电流导向限流阻抗,15 ms 内完成故障隔离。以某 110 kV 供配电系统为实例,设计了应用方案,实现了母线电压维持与故障快速切除。【结果】在新能源风电项目首次应用验证:①故障切除时间缩短至 15 ms 内,母线电压维持在 90% 额定值;②短路持续时间从 0.15 s 降至 15 ms,热效降低,电缆截面需求减小;③限制短路电流幅值,保护主变等设备免受冲击;④确保无故障支路敏感负载连续运行,彻底消除电压暂降导致的连锁停产。【结论】首波开断技术通过极速故障隔离和电压维持,从根本上解决了电压暂降问题。其高效性、可靠性和经济性为新能源风电、石化等连续型生产企业避免重大经济损失,具备工程推广价值。

**关键词:** 变电站; 电压暂降; 敏感负载; 首波开断技术; 快速识别

**ABSTRACT:** [Purpose] To address the suspension of sensitive equipment in continuous-operation enterprises, such as those in the new energy wind power industry, caused by voltage sags, thereby preventing large-scale production outages. The core challenge lies in the fact that traditional fault-clearing times significantly exceed the tolerance limits of such equipment. [Method] The first-wave breaking technology is

proposed, comprising an eddy-current-driven fast switch, high-speed DSP identification technology, and a current-limiting impedance. During short circuits, the fast switch diverts fault current to the impedance, isolating the fault within 15 ms. A practical application scheme is designed and validated using a 110 kV power distribution system, achieving rapid fault clearing while maintaining bus voltage stability. [Results] Initial application in a wind power project demonstrated: (1) Fault-clearing time shortened to <15 ms, with bus voltage maintained at 90% of the rated value; (2) Short-circuit duration reduced from 0.15 s to 15 ms, thermal effect lowered, and cable cross-section requirements minimized; (3) Shortcircuit current amplitude limited, protecting critical equipment (e.g., main transformers); (4) Continuous operation of sensitive loads on non-faulted branches ensured, eliminating cascading outages due to voltage sags. [Conclusion] The first-wave breaking technology fundamentally resolves voltage sag issues through ultra fast fault isolation and voltage stabilization. Its high efficiency, reliability, and cost-effectiveness mitigate significant economic losses for continuous-operation enterprises (e.g., wind power, petrochemicals), underscoring its substantial engineering value for widespread adoption.

**KEY WORDS:** substation; voltage sag; sensitive load; first-wave breaking technology; rapid identification

## 引言

连续生产的企业对供电可靠性要求高，且系统接线复杂。中压系统的供电的层级比较多，任一下级站某出线回路发生短路事故，会造成所在总站变电所的电压暂降，电压暂降就是在故障支路被切除前电压凹陷到 $10\%U_c \sim 90\%U_c$ 的现象，电压暂降的持续时间一般约为100 ms左右<sup>[1-2]</sup>，电压凹陷期间将会导致对电压质量要求高的敏感负载停产、停运。

某企业设置循环水处理变电站，站内所属10 kV I段的馈出线发生短路故障，故障应对措施是做切除动作，动作用时70 ms~300 ms，在做出切除动作期间，10 kV I段的母线将发生电压暂降，会导致其所带部分负荷失电；同时，该电压暂降会波及存在电气连接的10 kV尿素变电所 I段和10 kV锅炉变电所 I段母线，造成这两段母线上所带的部分高感性负荷（电压要求高者）失电，进而停运。

因此，一旦发生电压暂降若不能在最短的时间内将故障支路切除，严重时将会导致全厂停电事故<sup>[3-4]</sup>。其主要原因是普通弹簧操作机构的真空开关分闸速度不够快，其总体切除时间大于70 ms，因此无法避免对电压质量要求高的感性负载全厂停运事故。

本文首先分析了造成电压暂降事故的原因及市场现有解决方案，并阐述治理电压暂降的基本措施，进而引出首波开断技术，最后以某系统实际应用为例，介绍了首波开断技术在新能源风电行业首次应用及其效果。

## 1 电压暂降的本质及现有解决方案

### 1.1 电压暂降的本质

项目科研阶段的调研与实地考察表明：对线路出现的电压暂降，该企业内部部分敏感设备的耐受时间不同，无压释放时间分别为：交流接触器20 ms~30 ms、交流电磁阀30 ms~40 ms、低电压保护装置的为20 ms~30 ms。因此，若电压暂降持续时间超过20 ms，部分控制类设备即存在失压释放的风险；若无压释放时间超过40 ms，则会导致此类设备全部失压释放。

对变频器而言，当电压凹陷超过20 ms，直流侧滤波和储能电容两端的电压，就会降低到额定70%以下，并闭锁逆变器的输出，即变频器电压暂降超过20 ms以上，就会停止对外供电，导致其所

带的负载出现大面积停运事故。

系统短路导致电压暂降后，异步电动机会转入发电机模式。其原有旋转磁场在切割定子绕组时，约100 ms内即可耗尽储存的磁场能量。若此时重启电机，电网将产生高达7倍额定电流的冲击；多台并联启动可能导致母线电压崩溃，甚至引发整个企业供电系统瘫痪。

通过上述分析得知：对电压要求高的感性负载对电压暂降的容忍时间一般为20 ms~30 ms，远远小于企业电压暂降持续时间，显然，在电压凹陷期间，控制类设备早已释放，变频类设备已经停止对外供电，还有一些由交流接触器控制的辅机，会停运连跳主机，最终导致重要生产设备的停产事故。

因此，电压凹陷时间远大于敏感类设备所能承受的时间，是导致电压暂降事故的本质原因。

### 1.2 现有处理方案

#### 1.2.1 快速隔离/切换方案

快速隔离/切换方案采用光纤纵差保护分析了影响传统分相式全电流差动原理保护装置可靠性和灵敏度的各种因素：负荷电流、线路的分布电容电流、制动系数K和TA特性提出了一种利用相电流突变量构成分相式突变量差动保护，利用两端电流构成差动后备保护的快速隔离/切换方案<sup>[4-6]</sup>，此方案二次保护出口速度比传统的差动保护速度快了很多，保护出口时间可以控制在7 ms左右，但是保护出口的执行部件是开关柜中的普通弹簧操作机构的真空断路器，而目前市面上弹簧操作机构的真空断路器的分闸时间在40 ms~60 ms左右，显然这个时间远远大于敏感类负载的容忍时间。

#### 1.2.2 抗晃电接触器的优化方案

抗晃电接触器的优化方案能解决短时（零点几秒内的电压陡降）接触器不释放，但是根本不能阻止电机、变频器停止工作<sup>[6]</sup>。

#### 1.2.3 分批启动优化方案

当企业电力系统发生晃电现象时，分批启动优化方案是通过PLC控制技术、在线控制技术、电力电子等技术对企业内负载进行分类，采取分批启动方式，研究设计出企业内重要负载如异步电动机分批再启动及自动切换控制系统<sup>[7]</sup>，但是此种优化方案只是在停产后恢复，这个恢复过程至少要几个小时，停产损失已成事实且更严重。

#### 1.2.4 出线回路串联电抗器方案

为缓解电压凹陷对系统的影响，常规方案是在

各分支线路中串联支路电抗器。其核心作用是在某馈线发生短路时，通过串联电抗器维持母线电压。然而，电抗器参数的设计存在显著困难：维持母线残压于80%及以上需较高的电抗率，该参数虽提升稳压效果，但同时导致串联线路产生显著功耗、电磁干扰及额外压降。特别是高电抗率工况下，电抗器两端的大幅压降将危及系统中大部分电气设备的正常运行，严重削弱了该方案的经济性。

为阐明电抗器运行对企业安全生产的影响及安全隐患<sup>[8-10]</sup>，举例分析如下：

隐患1：能耗。以如图2所示的系统为例，循环水变电所10 kV I段馈线短路电流有效值： $I_d=38.64$  kA，换算成系统阻抗标幺值是0.1423，为了短路时维持母线电压在80%左右，需要串入4倍系统阻抗的电抗器。计算得出 $X_k=0.5694$ ，由于该段母线所带负荷的计算容量为8 810 kW，对应额定电流1 000A，额定电压10 kV的电抗器的电抗率为12%。

现以额定电压10 kV，额定电流1 000 A，额定电抗率12%的电抗器为例计算电抗器的年经济损耗：

计算时假设条件：电抗器所带负荷的负荷率 $\beta=0.6$ ，电抗器在系统中的年运行时间 $T=8\ 000$  h，电费：0.5元/kW·h。有功损耗功率查电抗器参数表可得 $P_k=16.98$  kW，三相无功损耗：

$$Q_k = 3S_k = 3 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times I_N \times X_L \% = 2.78.4 \text{ kVar} \quad (1)$$

一组电抗器年耗电量：

$$S = \beta^2 \Delta P_\Sigma T = \beta^2 (P_k + 0.06Q_k) T = 408\ 049.92 \text{ kW}\cdot\text{h} \quad (2)$$

式中，其中0.06为无功当量。

电抗器年经济损耗如表1，其数据可以得出：一组额定电压10 kV，额定电流1 000 A，额定电抗率12%的空心电抗器，按照负荷率 $\beta=0.6$ ，年运行时间 $T=8\ 000$  h，电费为0.5元/kW·h考虑，其年经济损失约为20.4万元。

表1 电抗器年经济损耗表

Tab.1 Reactor annual economic loss table

序号	型号	有功功率损耗/kW	无功损耗/kW	年耗电量/kW·h	年经济损失/万元
1	XK GK-10-1000%-12%	16.98	124.7	408 049.92	20.4

隐患2：电磁干扰。空心电抗器在空气介质中运行时，其交变电磁场会辐射出强电磁能。该电磁

辐射可严重干扰邻近的通信系统及计算机监控系统，甚至导致其功能失效。此外，强交变主磁场会在电抗器周边的金属构件及基础混凝土的钢筋内诱发涡流损耗（即附加损耗）。持续性的电磁振动还可能使混凝土结构松软，进而损害基础与厂房的长期结构稳定性。

隐患3：压降、噪声及发热等隐患。综上所述可知，当前市面主流电压暂降治理方案均未从根本上解决该问题。其中前三种方案因故障切除时间过长，如：继电器的保护出口时间约为20 ms~30 ms，断路器的固有分闸时间约40 ms~60 ms，再加上燃弧时间的10 ms~20 ms，三者累计达到70 ms~110 ms，会构成事故发生的核心瓶颈。若要有效抑制电压暂降事故，须将故障切除时间压缩至20 ms以内。

## 2 首波开断优化方案

### 2.1 工作原理

首波开断优化方案的核心在于快速限制短路电流并维持系统稳定。如图1虚线框所示，装置包含涡流驱动快速开关、微机综合控制器、电流采集器、限流阻抗及后备开关。

装置原理图见图1虚线框内：

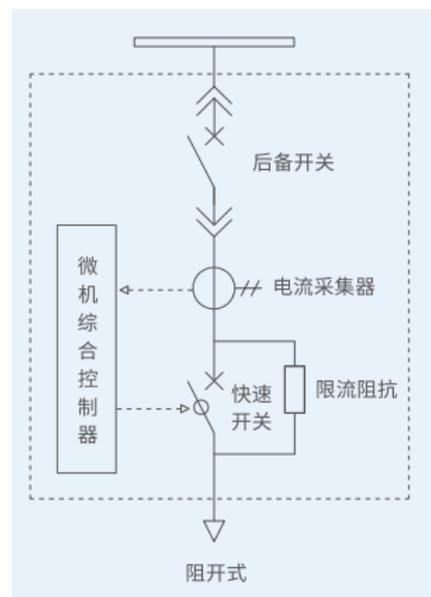


图1 首波开断方案的一次原理接线图

Fig.1 Primary principle wiring diagram of first-wave breaking scheme

一旦短路故障被切除，微机综合控制器监测到支路电流回归额定水平，会立即指令快速开关合闸，退出限流阻抗，系统恢复正常运行。

若支路短路状态持续超过300 ms（即回路故障未解除），微机综合控制器判定为分支断路器拒动或母线故障，随即命令后备开关分闸切除该故障支路，此举符合继电保护整定原则。

得益于该方案的快速响应特性，在装设首波开断装置的馈线短路时，上级主母线电压暂降持续时间可缩短至一个周期以内，有效避免系统中变频器、接触器、电动机、电磁阀等敏感负载出现停产或停运现象。

## 2.2 首波开断优化方案的特点

1) 动作速度快。该短路电流限制装置的核心优势在于其超快的动作速度和强大的开断能力。装置能够在系统短路故障发生的7ms~15ms内可靠开断故障电流，这得益于其关键组件的高速协同运作。高速涡流驱动机构赋予快速开关极快的分合闸能力，实现5 ms以内分闸及10ms内合闸。核心控制系统采用配备高精度、高速数模转换器的微机综合控制器，对系统电流进行持续实时采样检测。一旦检测到电流超过设定阈值，系统即刻通过高速DSP技术结合专用优化算法，在2 ms内精确计算短路电流参数及其电流过零点时刻。控制器据此精确地在电流过零点前发出动作指令，驱动快速开关动作，确保燃弧时间达到最小值，从而在7 ms~15 ms的时间窗内，将短路电流成功转移至限流电抗器中。这一过程不仅有效限制了短路电流的幅值，还维持了母线电压的稳定性（维持母线残压）。

2) 开断能力强。该装置通过精确控制触头的刚分时间，进一步优化操作时序，将燃弧时间压缩至最低，显著提升了灭弧室的性能裕度，使其短路开断能力轻松达到80 kA的高水平。

3) 母线残压保持高。装置正常运行时，限流阻抗被快速开关并联，无电流通过，无压降。只有在短路发生时投入工作，限流抗值设计等同于负载阻抗。短路时快速开关开断将限流阻抗投入，使母线电压保持90%左右，使上级系统和关联的敏感负荷连续运行。

4) 使用寿命长。该装置在使用寿命和运行可靠性方面展现出显著优势。其核心组件——快速开关采用高速涡流驱动机构，相较于传统断路器普遍使用的弹簧操作机构，运动部件数量减少80%。该机构仅执行简单的直线运动，省却了复杂的传动结构，大幅降低了机械磨损，从而显著提升了机械

寿命和整体可靠性。同时，装置基于过零点精确开断技术，在开断过程中产生的燃弧量不足常规断路器的10%。这一特性不仅极大提升了开断容量，更显著减小了触头烧蚀，使得触点电寿命呈现数量级的增长。

5) 性能高可靠。装置的高可靠性能得益于核心部件的自主原创研发与生产，即使在强电磁干扰的严苛工况下也能保持稳定运行。系统配备的微机综合控制器具备实时自检功能，持续监控自身状态以确保核心功能的绝对可靠。装置运行的所有关键功能信息和告警均可通过标准通信协议或4G/5G无线网络实时传送至后台监控中心。此外，用户还可通过专属手机APP便捷地查阅历史故障记录及分析故障录波波形图，为维护和诊断提供强大支持。

## 3 首波开断优化方案在某新能源风电行业首次应用

### 3.1 某系统电气系统及设计图

以110 kV供配电系统为例，用以说明首波开断优化方案在某新能源风电行业首次应用。

该供电案例的具体电气系统图具体如图2—图4所示。

以图2循环水变电所为例进行短路电流计算分析。已知：该变电所10 kV的电气设备采用单母线分段的供电方式，母联开关正常运行时处于常开状态，该变电所10 kV I段母线系统提供的短路电流 $I_x=36.52$  kA，电动机的反馈电流 $I_{fd}=2.12$  kA。

10kV侧循环水变电所I段馈线发生三相短路故障时，

$$\text{总电流有效值: } I_d = I_x + I_{fd} = 38.64 \text{ kA};$$

$$\text{短路电流峰值: } I_{\max} = \sqrt{2} \times 38.64 = 54.64 \text{ kA};$$

$$\text{短路电流冲击值: } I_c = 2.5 \times 38.64 = 96.6 \text{ kA}。$$

由短路电流计算机系统分析可知：循环水变电所I段配电网中心开闭所馈出线发生两相或三相短路故障时，故障切除时间70 ms~300 ms。

在此动作期间，10 kV I段母线发生了电压跌落。该线路的电压跌落首先造成其下联的部分负荷失电；其次，与此母线电气相连的10 kV尿素变电所和锅炉变电所的I段母线也将发生电压暂降，这样导致这些变电所I段母线上所带的电压敏感性负荷停运。此外，系统中存在大量高压电动机负载，电压回升时会引发电机群二次冲击，将母线电压拖低至70% $U_n$ 及以下，造成更多负载跳闸。

### 3.2 热效应抑制效能分析

首波开断优化方案的实施显著降低了短路电流在电缆导体中的热积累效应 ( $Q_d$ )。

该效应可表征为:

$$Q_d = \int_0^t i^2 dt = I_B''^2(t + T_B) + 4I_B''I_D'' \left[ \frac{T_D}{2} (1 - e^{-\frac{t}{T_D}}) + \frac{T_B T_D}{T_B + T_D} \right] + 1.5I_D''^2 T_D \quad (3)$$

式中,  $I_B''$  为系统电源周期分量起始有效值, kA;  $U_c$  电动机反馈电流周期分量起始有效值, kA;  $I_D''$  为电动机反馈电流电源周期分量的起始有效值, kA;  $t$  为短路计算时长 (综合主保护动作与断路器分闸时间), 本项目取 0.15 s; 考虑暂态分量衰减特性 (系统时间常数  $T_B=0.06$  s, 电机  $T_D=0.03$  s), 热效应可简化为:

$$Q_d = 0.21I_B''^2 + 0.08I_B''I_D'' + 0.045I_D''^2 \quad (4)$$

代入数值计算得:  $Q_d = 286.48 \text{ kA}^2 \cdot \text{s}$ , 依据热效应校验导体截面积:

$$S \geq \frac{\sqrt{Q_d}}{C} \quad (5)$$

式中,  $S$  为导体最小截流量,  $\text{mm}^2$ ;  $Q_d$  是短路电流的热效应,  $\text{A}^2 \cdot \text{s}$ ;  $C$  为铜导体热容系数, 取 137。对循环水变电所 I 段出线回路, 计算得  $S_d \geq 124$ 。

实际负荷电流分析表明 (典型值 50A/60A/120A), 常规载流量选型仅需  $35 \text{ mm}^2 \sim 75 \text{ mm}^2$  截面电缆 (详见表 2)。

表 2 电缆选型对比表

选型依据	要求截面积 / $\text{mm}^2$
载流量选型	35~75
短路热效应校验	$\geq 124$
实际配置	150

由此可知, 热效应约束导致电缆截面需提升至  $150 \text{ mm}^2$ , 较载流量选型增大 214% 以上, 凸显本方案对导体热应力的控制价值。由此, 采用了首波开断优化方案后, 短路持续时间  $t$  由 0.15s 缩短到 15 ms 以内, 即  $Q_d$  降低, 热稳定校验最小截面  $S$  减少到原来的  $\frac{1}{\sqrt{10}}$ , 即现有的电缆热稳定裕量大大增加。

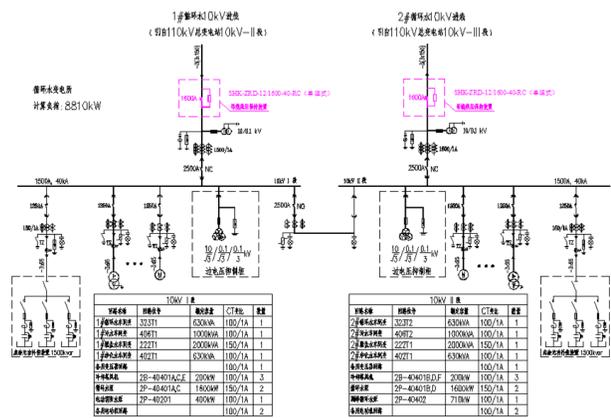


图 2 某企业循环水变电所电气系统图

Fig.2 Electrical system diagram of circulating water substation in a certain enterprise

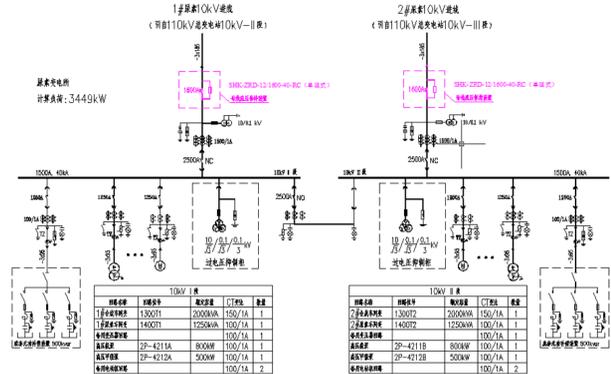


图 3 某企业尿素变电所电气系统图

Fig.3 Electrical system diagram of urea substation in a certain enterprise

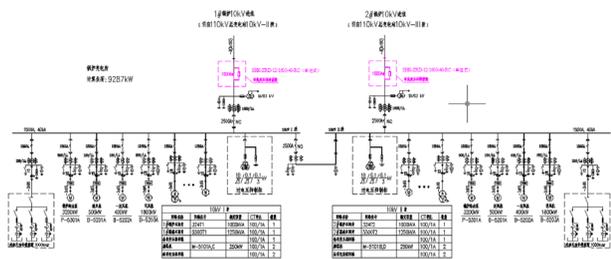


图 4 某企业锅炉变电所电气系统图

Fig.4 Electrical system diagram of boiler substation in an enterprise

### 3.3 馈出线回路短路电流的抑制

为应对循环水变电所 I 段出线回路因短路而造成的电压暂降所可能引发的两相或三相短路故障, 本文所提方案采用了具备毫秒级的快速分断能力的母线电压支撑装置 (SHK-ZRD)。该装置的核心机制在于, 故障发生时, 其内部的快速开关能在极

短时间内动作（典型动作时间约为数毫秒），迅速将故障电流转移至预设的限流阻抗路径。此举显著降低了故障电流的峰值幅值，从而有效保障了馈出线断路器能够在其安全开断容量范围内可靠地消除故障。

### 3.4 母线电压的稳定维持

在循环水变电所 I 段出线回路发生上述短路故障期间，母线电压支撑装置（SHK-ZRD）发挥关键作用。其设计目标是在故障发生后的关键初期阶段（通常在十余毫秒量级内），通过特定的能量补偿或限流机制，主动将 110 kV 总降变电所 10 kV II 段母线电压维持在接近额定运行值的高水平区间（例如，保持其不低于额定电压的较大部分比例）。这一功能至关重要，它最大限度地减小了系统电压暂降的深度和持续时间，确保了连接于该母线及关联系统的、对电压波动敏感的非故障负载能够持续正常运行。

## 4 结束语

本文深入剖析了解决电压暂降问题的核心技术关键，创新性地提出了首波开断优化方案。该方案通过毫秒级（典型值约 15 ms）的快速分断能力与限流阻抗的协同投入，有效维持了故障期间上级母线的电压稳定性（维持在接近额定值的高水平），从根源上阻断了电压暂降事故链。应用表明，该技术方案显著保障了非故障支路及关联变电所内敏感设备的连续可靠运行，为新能源风电、石油化工、冶金等对供电连续性要求极高的大中型流程工业，规避了由生产中引发的巨额经济损失，具有很好的工程应用推广价值。

## 参考文献

- [1] 张军梁,鲁宗相,李立.石化企业抗晃电问题研究[J].电气应用,2010,29(22):60-63. ZHANG Junliang,LU Zongxiang,LI Li.Research on Anti-Flashing in Petrochemical Enterprises[J].Electrotechnical Application,2010,29(22):60-63.
- [2] 何冕,王林玲,郭成,等.电力系统电压暂降治理措施综述[J].电工技术,2023(18):210-215. HE Mi,WANG Linling,GUO Cheng,et al.Review on Control Measures of Voltage Sag in Power System[J].Electric Engineering,2023(18):210-215.
- [3] 张帅.电压暂降对敏感电气设备影响及其改进措施分析[J].电器工业,2023(2):48-51. ZHANG Shuai.Influence of Voltage Sag on Sensitive Electrical Equipment and Its Improvement Measures[J].China Electrical Equipment Industry,2023(2):48-51.
- [4] 李清波,刘沛.光纤纵差保护的应用及灵敏度的提高[J].电力自动化设备,2002,22(4):21-24. LI Qingbo,LIU Pei.Applications of Fiber Differential Protection and Sensitivity Improvement[J].Electric Power Automation Equipment,2002,22(4):21-24.
- [5] 刘文亮.厂用电快速切换装置的研究[D].重庆:重庆大学,2011. LIU Wenliang. Research on fast Switching Device of Auxiliary Power [D].Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [6] 冯庆全.永磁式交流接触器《低电压释放功能》对稳定生产系统的作用[J].机电信息,2003(20):26-27. FENG Qingquan.Effect of Permanent Magnet AC Contactor "Low Voltage Release Function" on Stable Production System[J].1,2003(20):26-27.
- [7] 王茂君.用PLC实现电动机分批再启动和自动切换[J].石油化工自动化,2007,43(4):40-42,60. WANG Maojun.Realizing Motors Batch Restarting and Auto-Changing by PLC[J].Automation in Petro-Chemical Industry,2007,43(4):40-42,60.
- [8] 欧阳森,程伟添,刘天马.考虑故障不确定性的电压暂降监测点优化配置方法[J].电气自动化,2023,45(6):1-3. OUYANG Sen,CHENG Weitian,LIU Tianma.Optimal Configuration Method for Voltage Sag Monitoring Points Considering Fault Uncertainties[J].Electrical Automation,2023,45(6):1-3.
- [9] 郑峻峰,黄际元,陈远扬,等.多功能电压暂降治理装备控制策略研究[J].电气传动,2023,53(10):71-78. ZHENG Junfeng,HUANG Jiyuan,CHEN Yuanyang,et al.Research on Control Strategy of Multifunctional Voltage Sag Treatment Equipment[J].Electric Drive, 2023,53(10):71-78.
- [10] 林邵杰.基于深度迁移学习的配电网电压暂降状态自适应估计方法[D].西安理工大学,2023. LIN Shaojie. Adaptive Estimation Method of Voltage Sag State in Distribution Network Based on Deep Transfer Learning [D].Xi'an University of Technology, 2023.

收稿日期: 2025年5月22日

作者简介:



刘海

刘海(1973),男,研究方向为电力工程建设及与之相关的新技术、新工艺、新材料研发及其运用,108865297@qq.com



宋延良

宋延良(1991),男,工程师,研究方向为工程建设管理,289641728@1qq.com



邵久柠

邵久柠(1987),男,工程师,研究方向为电力工程施工,电气设备自动化技术,shaojiuning@126.com



童雪燕

童雪燕(1976),女,高级机电工程师、高级电气工程师、BIM高级工程师、装配式高级工程师、二级机电建造师。企业研究生导师。主要研究方向:中压配电网故障防控及电能质量治理领域,在短路电流超标治理、电压暂降治理等。13866778709@126.com



杨新州

杨新州,硕士,工程师,研究方向:过电压过电流保护,快速识别与判断测控技术,快速开关,连续稳定供电,项目管理。