

基于最优配合效果的电压敏感设备低压脱扣配置策略

王 雪¹, 唐正聪¹, 刘兴杰²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;
2. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750000)

摘要: 根据耐受曲线的相对位置定义了低压脱扣器和电压敏感设备的三种配合关系, 对比三种配合关系中低压脱扣器的作用特点。综合考虑设备的有效运行和脱扣器的及时动作能力, 提出了低压脱扣器综合配合指数的概念。用随机变量和模糊变量对设备与脱扣器的耐受能力进行描述, 引入 λ -截集进行计算; 针对电网侧电压暂降事件的随机性, 用蒙特卡罗法进行仿真。选取了典型敏感设备和五种不同动作特性的低压脱扣器, 通过指标的对比有效地对脱扣器与设备的配合效果进行评估, 并根据综合配合指数指标得到最佳的延时设置。所提概念可为供电双方对脱扣器合理配置选型提供理论依据。

关键词: 电压暂降; 敏感设备; 低压脱扣器; 模糊随机; 耐受能力; 配合关系

DOI: 10.12067/ATEEE2008002

文章编号: 1003-3076(2021)05-0064-09

中图分类号: TM714

1 引言

电网负荷中电压敏感设备的比例逐渐增大, 电压暂降发生时供电电压有效值迅速下降至有效值的90%~10%, 影响设备安全稳定运行, 已经成为最突出的电能质量问题之一^[1,2]。低压脱扣器作为低压配电系统中的一种重要电气附件, 在电网欠压时通过控制机构实现保护用电设备的作用, 在配电网中被广泛应用^[3]。

电网故障引起供电电压波动, 电压暂降沿线路渗透导致成片区域用户脱扣, 造成严重的负荷损失^[4]。造成不必要跳闸的原因包括对于设备耐受能力了解的欠缺以及脱扣器选型和参数整定的不合理。因此研究敏感设备和低压脱扣器在电压暂降影响下的特性尤为重要。

对敏感设备的电压暂降耐受能力研究已经取得了较多的成果, 国内外学者对交流接触器^[5,6]、调速驱动器^[7,8]、电脑^[9]等敏感设备进行了大量试验研究, 得到其电压耐受能力曲线。近些年, 对低压脱扣器电压暂降敏感度试验的研究也逐渐展开, 在基于国标 GB/T 17626.11—2008 的标准下, 文献[10-12]

选取了多种不同型号的低压脱扣器进行试验。文献[13]讨论了暂降起始点相位对低压脱扣器耐受能力的影响, 利用曲面拟合从暂降幅值、持续时间和起始点相位三个维度建立低压脱扣器的敏感度模型。

合理地挑选低压脱扣器并进行延时设置对用户和供电公司双方都具有重要的意义。文献[14]根据敏感设备受电压暂降影响给出相应配置策略; 文献[15]分析欠压脱扣装置对用电设备是否应该配置低压脱扣器进行了分析。关于低压脱扣器的选型配置研究依旧相对欠缺, 现有研究存在以下不足: ①低压脱扣器耐受能力的模糊性, 只给出确定的动作阈值增加了供用电双方挑选低压脱扣器的困难; ②敏感设备耐受曲线的不确定性, 低压脱扣器动作阈值设置不合理会造成不必要动作或者需要动作时不动作; ③低压脱扣器要求时未考虑现有型号脱扣器的能力, 给出的配置建议并不能给予用户合理的指导和帮助。

基于此, 本文综合考虑供电系统电压暂降、低压脱扣器耐受能力和敏感设备耐受能力的随机性和模糊性。根据耐受曲线相对位置关系定义了脱扣器与敏感设备的三种配合关系, 并在此基础上提出低压

收稿日期: 2020-08-03

作者简介: 王 雪(1978-), 男, 河北籍, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制;
唐正聪(1996-), 男, 江苏籍, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与评估。

脱扣器综合配合指数 (Comprehensive Coordination Index of Release, CCIR) 的概念, 引入 λ -截集对指数进行计算。利用蒙特卡罗法模拟供电系统电压暂降, 选取了几类典型敏感设备和低压脱扣器, 通过结果的比较有效地对不同类型的低压脱扣器进行评估, 并给出最佳的延时时间设置, 验证了本文方法的有效性, 能为用户和供电公司合理地配置低压脱扣器提供指导。

2 影响因素的随机性与模糊性

2.1 供电系统电压暂降的随机性

电压暂降是系统运行中的短时扰动现象, 本质上是线路流过的大电流引起较大的电压降造成的电网电压降低。

系统内线路和母线短路故障是造成暂降的最主要原因。电压暂降幅值受网络结构、短路故障位置、故障类型及运行方式等影响。电压暂降持续时间取决于故障电流的清除时间, 即线路中继电保护装置的动作时间。

以图 1 系统为例, 当线路 m-n 上任意位置 a 发生三相短路时, b 点的电压幅值变为:

$$U_b = U_b^{\text{pref}} - [(1-\varepsilon)Z_{bm} + \varepsilon Z_{bn}] U_a^{\text{pref}} / [(1-\varepsilon)^2 Z_{mm} + \varepsilon^2 Z_{nn} + 2\varepsilon(1-\varepsilon)Z_{mn} + \varepsilon(1-\varepsilon)z_{mn} + Z_g] \quad (1)$$

式中, U_a^{pref} 、 U_b^{pref} 分别为故障前节点 a、b 的电压; ε 为 a 点在线路中相对位置的归一化长度; Z_{mm} 、 Z_{nn} 分别为节点 m、n 的自阻抗; Z_{bm} 、 Z_{bn} 、 Z_{mn} 分别为节点 b、m、n 对应互阻抗; z_{mn} 为线路 m-n 的阻抗; Z_g 为故障阻抗。

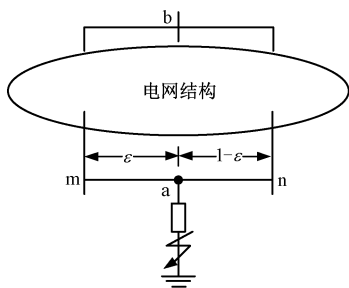


图 1 电网结构示意图

Fig.1 Structure of power system network

暂降幅值和持续时间是刻画电压暂降事件严重程度的基本特征, 用 $v(U, T)$ 表示。由上述可知, 短路故障是随机发生的, 故障切除时间也受保护装置的影响, 因此供电系统发生的电压暂降事件的幅值和持续时间都是相互独立的随机变量。故障点法、

临界距离法等故障定位识别方法^[16,17] 被广泛应用于电力系统分析与评估中。

2.2 电压敏感设备耐受能力的模糊性

电压敏感设备由于不同运行环境、电能质量扰动的影响, 其耐受能力具有模糊性。设备运行区域存在三部分: 正常运行区域、故障区域及不确定区域。在不确定区域内敏感设备的状态具有模糊性。为便于研究, 文献[18]给出典型敏感设备的通用区间阈值, 敏感设备电压耐受能力 $r(U, T)$ 位于该区间内, 并符合一定的概率分布。电压暂降引起敏感设备故障可表示为 $v > r$, 将事件分别记为 ζ 。

当系统电压暂降为 $v_i(U_i, T_i)$ 时, 可得设备故障率 $P(\zeta_i)$ 的计算方法:

$$P(\zeta_i) = \begin{cases} 0 & v_i \in S_1 \\ \int_{r_L}^{v_i} g(r) dr & v_i \in S_2 \\ 1 & v_i \in S_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, r_L 和 r_R 分别为敏感设备电压耐受能力 r 的区间左右阈值; $g(r)$ 为敏感负荷耐受能力的概率密度函数; S_1, S_2, S_3 分别为敏感设备的安全区、模糊区和故障区。

2.3 低压脱扣器动作特性的模糊性

低压脱扣器动作区域与不动作区域之间存在明显的过渡地带, 即低压脱扣器的动作特性可划分为动作区域、不动作区域及不确定区域, 在该区间内动作特性具有模糊性; 同时, 对于同类型低压脱扣器在不同暂降起始点相位影响下的模糊区域也存在明显差异, 因此综合各因素可知, $w(U, T)$ 可视为一个模糊变量。电压暂降引起低压脱扣器动作表示为 $v > w$, 将事件记为 ξ 。

系统暂降为 v_i 时脱扣器的动作概率 $P(\xi_i)$ 如式 (3) 所示:

$$P(\xi_i) = \begin{cases} 0 & v_i \in S_4 \\ \int_{w_L}^{v_i} l(w) dw & v_i \in S_5 \\ 1 & v_i \in S_6 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $S_4 \sim S_6$ 分别为脱扣器的不动作区、模糊区和动作区; w_L 和 w_R 为脱扣器耐受能力的区间左右阈值; $l(w)$ 为脱扣器耐受能力在区间上的概率密度函数。

假设脱扣器耐受能力符合正态分布, 则脱扣器在电压暂降 $v_i(U_i, T_i)$ 影响下动作的概率可进一步表示为:

$$P(\xi_i) = \int_{w_L}^{w_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp\left(-\frac{(w - \mu_w)^2}{2\sigma_w^2}\right) dw \quad (4)$$

式中, σ_w, μ_w 为分布参数。

式(4)中 σ_w, μ_w 可根据“3 σ ”法则进行计算:

$$\sigma_w = (w_L + w_R)/2 \quad (5)$$

$$\mu_w = (w_R - w_L)/6 \quad (6)$$

由于暂降起始点的影响,脱扣器的耐受能力参数 $[w_L, w_R]$ 可视为 L-R 型模糊数,式(4)中的分布参数也随之改变,概率难以直接求解。

为求解模糊事件 $v_i > w$ 的概率 $P(\xi_i)$, 引入 λ -截集的概念,将模糊事件转化为随机概率问题进行求解。

给定论域 C , 对 $\forall D \in F(C), \forall \lambda \in [0, 1]$, 称普通集合 $D_\lambda = \{c | c \in C, \mu_D(c) \geq \lambda\}$ 为模糊子集 D 的 λ 的水平截集。在本问题中,论域 C 为电压暂降所有可能起始点相位的集合; $\mu(c)$ 可以根据电压暂降起始点在周期内的分布规律进行求解^[19]; D_λ 中的元素表示隶属度大于 λ 的暂降起始点相位。脱扣器耐受能力参数与暂降起始点相位存在以下的映射关系:

$$c \mapsto [w_c^L, w_c^R] \quad (7)$$

式中, w_c^L, w_c^R 分别为当暂降起始点为 c 时脱扣器耐受能力的左右阈值。

对 D_λ 中所有元素对应的耐受能力区间取并集, 得到 λ -截集下的耐受能力常数区间为 $w_\lambda = [w_\lambda^L, w_\lambda^R]$ 。此时再求解随机事件 $\xi_{i\lambda}$ 的概率 $P(\xi_{i\lambda})$:

$$P(\xi_{i\lambda}) = \int_{w_\lambda^L}^{w_\lambda^R} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{w\lambda}} \exp\left(-\frac{(w - \mu_{w\lambda})^2}{2\sigma_{w\lambda}^2}\right) dw \quad (8)$$

式中, 分布参数 $\sigma_{w\lambda}, \mu_{w\lambda}$ 的求解公式参照式(5)和式(6)。

若隶属度阈值 λ_k 在 $[0, 1]$ 上均匀分布, λ_i 的取值为 $[0, 1]$ 内符合均匀分布的随机数, 则脱扣器动作概率 $P(\xi_i)$ 为:

$$P(\xi_i) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M P(\xi_{i\lambda_k}) \quad (9)$$

式中, M 为在 $[0, 1]$ 内选取的隶属度阈值数量。

3 基于配合关系的低压脱扣器综合配合指数

3.1 配合关系的定义

低压脱扣器的配置策略需要考虑敏感设备的类型及耐受特性, 脱扣器与敏感设备的配合程度可基

于两者的电压耐受曲线进行分析, 如图2所示。

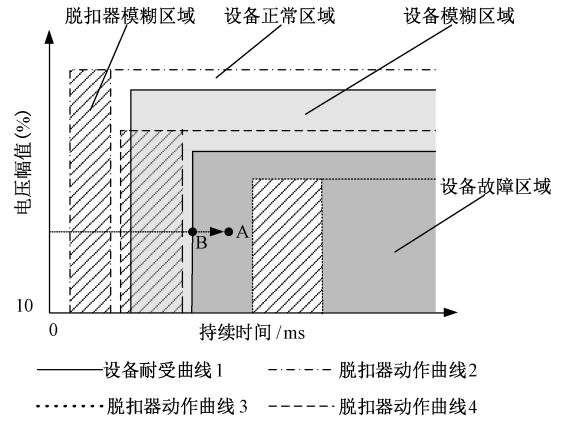


图2 低压脱扣器与敏感设备耐受曲线

Fig.2 Tolerance curves of low voltage releases and sensitive equipment

根据其耐受曲线的相对位置将其配合关系定义为完全配合、完全不配合和不完全配合, 分别对应图2中的曲线2~4。

完全配合指脱扣器动作曲线完全位于敏感设备耐受曲线的左上方, 模糊区域无交集。完全配合关系的特点是敏感设备故障运行前脱扣器均能及时动作跳闸, 起到保护作用; 缺点是脱扣器动作区域覆盖了敏感设备模糊区域及部分正常运行区域, 可能造成脱扣器不必要跳闸。

完全不配合指脱扣器动作曲线完全位于敏感设备耐受曲线的右下方, 模糊区域无交集。完全不配合关系的特点是脱扣器动作滞后于敏感设备, 在敏感设备的正常运行区域和模糊区域, 敏感设备正常运行时脱扣器均不会误动作; 模糊区域和故障区域内, 电压暂降造成设备故障时脱扣器不能及时跳闸。

不完全配合表示脱扣器动作曲线的位置介于完全配合和完全不配合之间, 设备与脱扣器模糊区域存在交集。不完全配合对完全配合和不完全配合的特性进行了平衡。相较于完全配合, 不完全配合的及时动作能力有所减弱, 但误动作的可能性降低。

3.2 低压脱扣器综合配合指数

通过对三种配合关系特点的分析, 若要对脱扣器与敏感设备配合效果进行合理评估, 需要考虑两个因素: 保障设备正常运行; 提高脱扣器及时切断故障的能力。针对此问题, 本文定义了设备有效运行率 (Effective Operation Rate of Equipment, EORE) 和脱扣器有效动作率 (Effective Action Rate of Release, EARR) 的概念对以上两个影响因素进行评估。综

合两个指标提出脱扣器综合配合指数的概念(CCIR), 用此概念对不同特性的低压脱扣器与敏感负荷的配置合理程度进行评估。

式(3)和式(9)的计算结果表示当系统电压暂降为 $v_i(U_i, T_i)$ 时脱扣器的动作概率, 考虑到脱扣器的保护机制需要其在设备故障之前及时动作, $P(\xi_i)$ 不能直接用于评估。如图2所示, 当电压暂降落在A点, 若此时配合关系为完全不配合, 计算结果 $P(\xi_i)$ 为1, 脱扣器动作, 但实际在B点时设备一定已经故障, 脱扣器失效。为准确地对脱扣器配置进行评估, 本文在 $P(\xi_i)$ 的基础上再引入脱扣器超前于设备动作概率的概念, 用 $P_s(\xi_i)$ 表示, 表示脱扣器在设备故障之前动作的概率, 可得:

$$P_s(\xi_{i\lambda_k}) = P(w_{\lambda_k} < r) = \int_{r_L}^{v_i} g(r) \int_{w_{\lambda_k}}^r l_{\lambda_k}(w) dw dr \quad (10)$$

$$P_s(\xi_i) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M P_s(\xi_{i\lambda_k}) \quad (11)$$

在 $v_i(U_i, T_i)$ 影响下设备故障率为 $P(\zeta_i)$, 脱扣器动作率为 $P(\xi_i)$, 脱扣器在设备之前动作概率为 $P_s(\xi_i)$ 。敏感设备能保证正常运行同时脱扣器保持合闸状态直至电压恢复正常, 设备有效运行率可表示为:

$$EORE_i = (1 - P(\zeta_i))(1 - P(\xi_i)) \quad (12)$$

脱扣器能在敏感设备故障之前跳闸, 脱扣器有效动作率EARR可表示为:

$$EARR_i = P(\zeta_i)P_s(\xi_i) \quad (13)$$

$P(\xi_i)(1 - P(\zeta_i))$ 为敏感设备能维持正常运行但脱扣器在此之前已经跳闸的概率, 此时脱扣器误动作导致不必要损失; $(1 - P_s(\xi_i))P(\zeta_i)$ 为敏感设备故障脱扣器在此之前不能及时动作的概率, 脱扣器未起到保护作用; 综合以上分析, 可得CCIR_i的计算方法:

$$CCIR_i = P_s(\xi_i)P(\zeta_i) + (1 - P(\xi_i))(1 - P(\zeta_i)) - P(\xi_i)(1 - P(\zeta_i)) - (1 - P_s(\xi_i))P(\zeta_i) \quad (14)$$

式(12)~式(14)的计算结果仅表示供电系统电压暂降为 v_i 时对应的评估结果, 需要进一步考虑供电系统电压暂降随机性。EORE和EARR指标基于设备正常运行场景及故障场景, 进行标准化处理, 可得:

$$EORE = \frac{\sum_{i=1}^N EORE_i}{\sum_{i=1}^N (1 - P(\zeta_i))} \quad (15)$$

$$EARR = \frac{\sum_{i=1}^N EARR_i}{\sum_{i=1}^N P(\zeta_i)} \quad (16)$$

$$CCIR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CCIR_i \quad (17)$$

式中, N 为供电系统电压暂降样本空间的样本点数。

4 敏感设备与脱扣器评估计算步骤

(1) 建立电网故障信息的概率模型, 使用蒙特卡罗法对供电系统电压暂降进行仿真。

(2) 基于蒙特卡罗仿真的数据建立供电系统电压暂降的样本集。

(3) 根据现有文献的研究数据或实际测试结果确定各类型敏感设备的通用电压暂降耐受能力参数及低压脱扣器的动作参数等。

(4) 根据电网侧电压暂降样本集和式(2)~式(11)计算敏感设备的故障率 $P(\zeta_i)$, 脱扣器动作概率 $P(\xi_i)$ 及脱扣器在设备之前动作概率 $P_s(\xi_i)$ 。

(5) 将上述求得的概率代入式(12)~式(14)计算 v_i 对应下的设备有效运行率、脱扣器有效动作率及两者的综合配合指数。

(6) 根据式(15)~式(17)计算考虑系统随机性后的相关评估指标。

5 算例分析

5.1 供电系统电压暂降特征分布

5.1.1 蒙特卡罗仿真

以IEEE33节点配电网作为研究对象, 系统结构图如图3所示, 建立电网故障信息的概率模型, 关于蒙特卡罗法在供电系统电压暂降仿真的应用在其他文献中介绍较多, 在此不重复论述, 选取节点24作为研究对象, 进行 $N = 10\,000$ 次仿真, 得到供电系统电压暂降的样本集 $V_{\text{sag}}\{v_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 其关于电压幅值和持续时间的分布特征如图4所示。

由图4可知, 节点24的电网侧电压暂降幅值呈现中间低两边高的分布, 电压幅值在10%~40%上递减, 在40%以后近似为线性增长。电压暂降主要集中在幅值较高处, 幅值 $\geq 50\%$ 的电压暂降占80.5%。随着持续时间的增加, 分布先增后减, 在50 ms附近分布最高。持续时间主要集中于10~100 ms, 在此区间内的电压暂降占总体的54.1%。

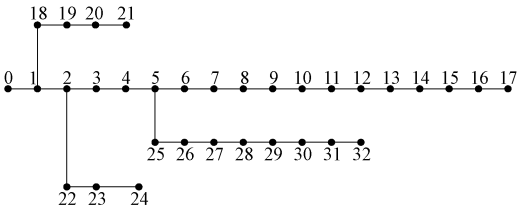


图 3 IEEE33 节点系统
Fig.3 IEEE33 node system

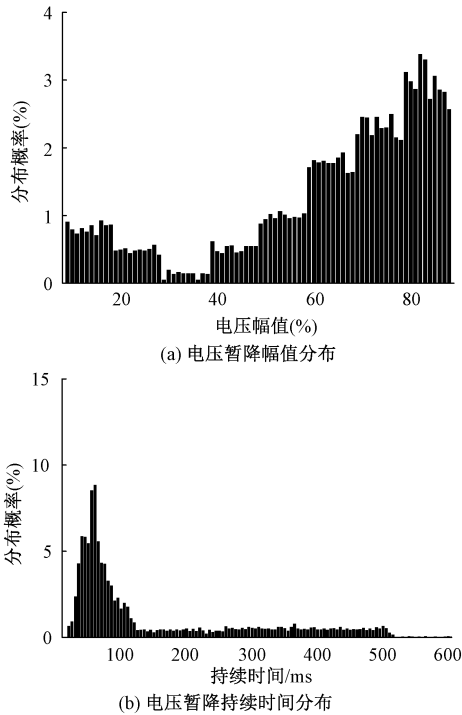


图 4 蒙特卡罗仿真供电系统电压暂降特征分布
Fig.4 Characteristic distribution of voltage sag in power supply system by Monte Carlo

5.1.2 电压暂降实测数据

电压暂降的实测评估法即根据电能质量装置记录的数据进行评估。对某地区 2018 年~2019 年电网历史暂降数据进行统计分析,得到关于幅值和持续时间的分布如图 5 所示。

对比图 4 和图 5 可以看出,蒙特卡罗和实测数据在持续时间上的分布近似,在幅值上的分布存在差异。实测数据中电压幅值的分布更为集中,幅值在 80% 以上的电压暂降事件占全体的 63.2%。这是因为蒙特卡罗法只对短路故障引起的电压暂降进行仿真,这类暂降往往程度较深。实测数据中的电压暂降起因还包括变压器投切、电机起动等冲击负荷,这种暂降程度较轻。

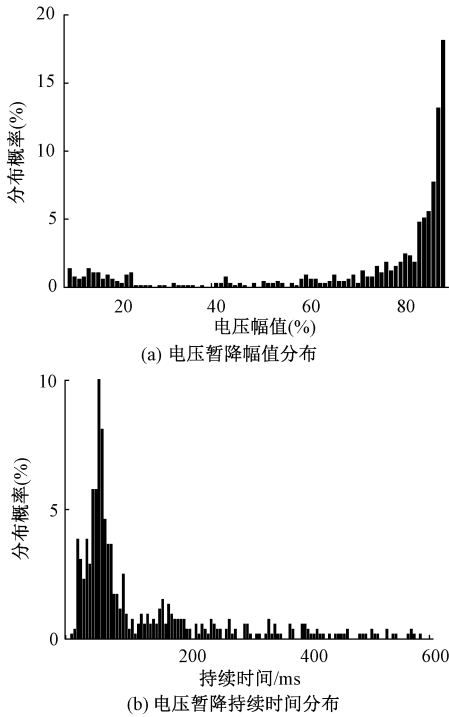


图 5 实测供电系统电压暂降特征分布
Fig.5 Characteristic distribution of voltage sag in power supply system based on measured data

5.2 脱扣器与设备配合效果评估

考虑实际场景,选取三种在现代工业中被应用于实际生产的典型电压敏感设备。可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)是一种在工业环境中被广泛应用的数字运算操作的电子装置,对工业流程进行控制;变频调速器(Adjustable Speed Drive, ASD)具有变压变频作用,其是否能正常工作影响到电机设备;个人计算机(Personal Computer, PC)涵盖了信息管理、过程控制等技术,遍及各行各业。

三种设备的电压耐受能力见文献[18],设敏感设备的耐受能力在其区间上符合正态分布,电压和持续时间的阈值和分布参数记作 $U(r_L, r_R, \sigma_r, \mu_r)$ 和 $T(r_L, r_R, \sigma_r, \mu_r)$,如表 1 所示。绘制 PLC 在模糊区域内设备故障率关于电压幅值和持续时间的三维曲面,如图 6 所示。

表 1 典型敏感设备耐受能力参数

Tab.1 Tolerance parameters of typical sensitive equipment								
设备	$U(r_L, r_R, \sigma_r, \mu_r)$				$T(r_L, r_R, \sigma_r, \mu_r)$			
PLC	30	90	10	60	20	400	63	210
PC	46	63	3	55	40	205	28	122
ASD	59	71	2	65	15	175	27	95

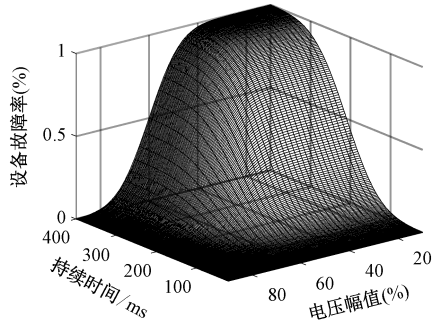


图6 PLC设备故障率曲面

Fig.6 PLC fuzzy area equipment failure rate surface

幅值大或持续时间小时设备故障率低,对应区域内设备故障率均较小;随着幅值的降低及持续时间的增大,曲面变化趋势先增大后减小,设备故障率逐渐增大。

从市场上主流的低压脱扣器中选取5种动作特性具有显著差异的低压脱扣器^[10-13,20]。不同起始点相位下的耐受曲线构成曲线簇,为便于展示,取其最左和最右边界作为包络线,Typ1~Typ5型脱扣器的耐受能力曲线如图7所示,认为脱扣器耐受能力在不同起始点相位下的区间上符合正态分布。

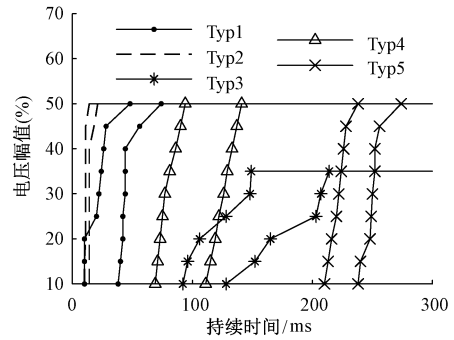


图7 不同类型低压脱扣器耐受曲线

Fig.7 Tolerance curves of different types of low voltage releases

表2为敏感设备的有效运行率EORE及脱扣器有效动作率EARR的评估结果。EORE指标越大说明脱扣器对设备正常运行的影响越小;等于1时表示脱扣器在设备稳定运行时均能保持合闸状态,不会发生误动作。EARR指标越大说明敏感设备故障时脱扣器能够跳闸切断设备的能力越强。EARR对CCIR的贡献度随着设备故障率 $P(\zeta)$ 的增大而增大。

$$P(\zeta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(\zeta_i) \quad (18)$$

表2 基于蒙特卡罗仿真数据的设备有效运行率及脱扣器有效动作率计算

Tab.2 Calculation of EORE and EARR based on Monte Carlo simulation data

设备		Typ1		Typ2		Typ3		Typ4		Typ5	
类型	故障率	EORE	EARR	EORE	EARR	EORE	EARR	EORE	EARR	EORE	EARR
PLC	0.119	0.870	0.564	0.854	0.564	0.991	0.391	0.967	0.557	0.997	0.512
PC	0.105	0.892	0.810	0.877	0.811	0.999	0.504	0.987	0.793	1.000	0.063
ASD	0.195	0.898	0.511	0.881	0.512	1.000	0.239	0.993	0.460	1.000	0.195

表3给出基于蒙特卡罗仿真数据的三类典型敏感设备与5种动作脱扣器的综合配合指数的仿真计算结果。可以看出由于对设备正常稳定运行影响的大小及对故障有效切断能力的差异,脱扣器的CCIR指标不同;PLC与Typ5脱扣器配合效果最佳;PC和ASD与Typ4配合效果最佳。Typ4与三类设备配合均较好,适用性最强。

结合表2对表3结果进行分析:

(1) PLC故障场景要少于正常运行场景,EARR对CCIR指标的贡献度小于EORE。Typ1和Typ2型脱扣器耐受能力敏感,保障脱扣器在设备前动作的同时却使得PLC有效运行率较大程度地降低,由于指标贡献度的差异,CCIR相较于其他三类脱扣器

表3 基于蒙特卡罗仿真数据的低压脱扣器综合配合指数计算

Tab.3 Calculation of CCIR of low voltage releases based on Monte Carlo simulation data

设备	CCIR				
	Typ1	Typ2	Typ3	Typ4	Typ5
PLC	0.667	0.639	0.840	0.837	0.878
PC	0.767	0.739	0.894	0.933	0.803
ASD	0.644	0.618	0.703	0.779	0.610

较差;Typ5的两个指标均高于Typ3,尽管脱扣器有效动作率低于Typ4,综合两个指标后CCIR仍高于Typ3和Typ4;Typ3的EORE指标高于Typ4,而EARR则低于Typ4,综合来看两者的CCIR接近。

(2) PC 的电压敏感度比 PLC 高, Typ5 的动作特性与 PC 配合效果差, 脱扣器有效动作率大幅减小, 设备故障不能及时动作, CCIR 指标降低; Typ4 的 EORE 略低于 Typ3, EARR 指标相比 Typ3 有明显的提高, 因此 CCIR 更大; Typ1 和 Typ2 由于其较低的设备有效运行率, CCIR 指标依旧较差。

(3) 当设备为 ASD 时, 不同类型脱扣器 CCIR 的差异同 PC 类似。但由于设备故障率的增大, 脱扣器有效动作率指标的贡献度随之提高。从结果看, Typ1 和 Typ2 的 CCIR 与其他三类脱扣器的差距缩小, 与分析相符。

表 4 为基于电网实测数据的敏感设备与低压脱扣器综合配合指数的仿真计算结果。

表 4 基于实测数据的低压脱扣器综合配合指数计算

Tab.4 Calculation of CCIR of low voltage releases based on measured data

设备	CCIR				
	Typ1	Typ2	Typ3	Typ4	Typ5
PLC	0.871	0.865	0.917	0.911	0.939
PC	0.930	0.924	0.940	0.966	0.720
ASD	0.898	0.893	0.863	0.921	0.650

由于实测数据中幅值较高的电压暂降事件占比高于蒙特卡罗仿真数据, 此类暂降几乎对设备无影响, 脱扣器保持合闸使设备成功躲过暂降。因此对比表 3 和表 4 可以看出, 实测数据下的脱扣器与设备配合效果普遍优于蒙特卡罗仿真数据。

5.3 脱扣器延时参数设置

根据实际应用需求, 新型低压脱扣器一般都具备延时设置功能。不同厂商不同型号的脱扣器延时设置的范围和步长也不尽相同。本文查阅相关厂商欠压脱扣器说明书, 以江苏凯帆大全 KFW2 型脱扣器为例, 该脱扣器延时整定范围为 0.2~60 s, 步长为 0.1 s。脱扣器延时设置为 Δt 。脱扣器动作曲线与 PLC 耐受曲线的位置关系以及供电系统电压暂降的分布如图 8 所示, 实线为 PLC 耐受曲线, 虚线为脱扣器动作电压阈值。

电网侧电压暂降幅值较高、持续时间较短的占主体, 严重程度较低的电压暂降密集, 严重程度较高的电压暂降分布稀疏。

计算在不同延时整定时脱扣器与 PLC 的 CCIR, 如图 9 所示。

延时允许存在 10% 误差, 因此实际动作时间为 $w' = w + \Delta t \pm 10\% \Delta t$ 。两条曲线分别表示实际

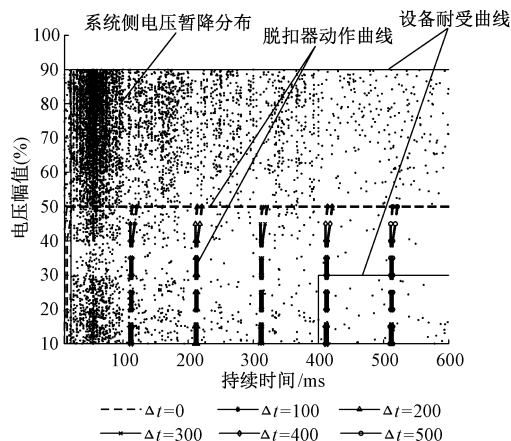


图 8 耐受曲线位置与电压暂降分布

Fig.8 Location of withstand curves and distribution of voltage sags

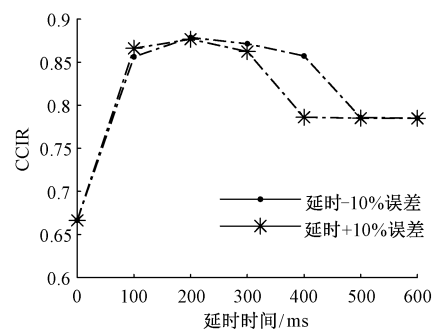


图 9 脱扣器延时设置对 CCIR 的影响

Fig.9 Influence of release time delay setting on CCIR

动作延时为 $0.9\Delta t$ 和 $1.1\Delta t$ 时脱扣器与设备的配合效果。KFW2 型脱扣器在不设置延时状态下的时间参数为 [10 ms, 20 ms], 结合图 4 可知脱扣器动作区域将设备模糊区域内故障率较低的电压暂降覆盖, 脱扣器跳闸将设备切除, 误动作概率较高, CCIR 较低; 当设置延时为 100 ms 时, 脱扣器在系统电压暂降持续时间小于 100 ms 时保持闭合, 使设备能够躲过这部分故障率低的电压暂降事件, CCIR 较瞬时动作时大幅增长; 延时设置为 200 ms 时, 脱扣器保持合闸时持续时间在 100~200 ms 的电压暂降设备能保持较好的运行状态, CCIR 增加; 继续增大延时, 设备的故障概率逐渐增高, 此时脱扣器应跳闸, 延时设置使脱扣器不能及时动作, CCIR 开始减小。因此对于敏感设备 PLC, KFW2 型脱扣器的延时设置为 200 ms 配合效果最佳。同理, 若设备为 PC 和 ASD, 经过计算延时设置应为 200 ms 和瞬时动作。

6 结论

建立电压敏感设备、脱扣器及系统侧电压暂降的概率模型,引入设备有效运行率和脱扣器有效动作率指标,并综合两个指标提出脱扣器综合配合指数的概念对脱扣器与设备的配合效果进行评估,结论如下:

(1) 低压脱扣器及时动作起到保护设备的同时,也会不同程度造成误动作的情况,影响设备的正常运行,对脱扣器的评估需综合考虑其切断故障能力和设备的稳定运行。

(2) 所提出的设备有效运行率指标、脱扣器有效动作率指标和综合配合指数的概念能够准确全面地对设备以及脱扣器进行综合评估。

(3) 对于同类敏感设备,不同动作特性的低压脱扣器配合效果可能存在较大差异。本文所提指标能够为用户和供电方配置脱扣器提供理论指导。

(4) 脱扣器的延时设置需要综合考虑系统侧电压暂降的特点及设备耐受能力,通过不同延时下综合配合指数的比较可得出最优的延时设置。

(5) 所提指标和概念从模糊数学和概率学角度出发,依据风险理论引入损失指标对脱扣器与设备配合效果进行评估是需进一步深入研究的问题。

参考文献 (References):

- [1] Ying W, Yang Z, Xianrong X, et al. Research status and challenges of voltage sag issue [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35 (2): 2-9.
- [2] 张旭彬, 孔林, 李为明, 等 (Zhang Xubin, Kong Lin, Li Weiming, et al.). 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 (Economic losses pre-evaluation of semiconductor enterprise due to voltage sags based on process immunity time) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 43-49.
- [3] 吴国诚, 叶樊, 梁帅伟, 等 (Wu Guocheng, Ye Fan, Liang Shuaiwei, et al.). 基于电压持续曲线的多次电压暂降严重程度评估方法 (Evaluation method of multiple voltage sag severity based on voltage duration curves) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2018, 38 (2): 182-191, 200.
- [4] 付华, 于田 (Fu Hua, Yu Tian). 电压暂降源自适应 S 变换辨识模型 (Identification model of voltage sag based on adaptive S-transform) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and En-

- ergy), 2019, 38 (11): 17-23.
- [5] Honrubia-Escriban A, Gomez-Lazar E, Molina-Garcia A, et al. Influence of voltage dips on industrial equipment: analysis and assessment [J]. Electrical Power and Energy System, 2012, 41 (1): 87-95.
- [6] 徐永海, 兰巧倩, 洪旺松 (Xu Yonghai, Lan Qiaoqian, Hong Wangsong). 交流接触器对电压暂降敏感度的试验研究 (Experimental research on AC contactor sensitivity during voltage sags) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (21): 136-146.
- [7] Djokic S Z, Stockman K, J. Milanovic J V. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 494-505.
- [8] 李晨懿, 汪坤, 卢文清, 等 (Li Chenyi, Wang Kun, Lu Wenqing, et al.). 变频器对不同类型电压暂降的耐受特性研究 (Study on tolerance characteristics of variable-frequency drives under different types of voltage sags) [J]. 电测与仪表 (Measurement and Instrumentation), 2018, 55 (15): 1-7.
- [9] 刘书铭, 吴亚盆, 张博, 等 (Liu Shuming, Wu Yapen, Zhang Bo, et al.). PC 机电压暂降敏感度试验研究 (Experimental research on sensitivity of PC to voltage sags) [J]. 电测与仪表 (Measurement and Instrumentation), 2019, 56 (11): 32-36, 48.
- [10] 欧阳森, 刘平, 吴彤彤, 等 (Ouyan Sen, Liu Ping, Wu Tongtong, et al.). 低压脱扣器电压暂降敏感性试验研究 (Experimental research on sensitivity of low voltage releaser to voltage sag) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (2): 575-581.
- [11] 邓福亮 (Deng Fuliang). 电压暂降对负荷低压脱扣影响的研究 (Research about voltage sag on the influence of the load of low voltage tripping) [J]. 广州: 华南理工大学 (Guangzhou: South China University of Technology), 2015.
- [12] 秦志坚 (Qin Zhijian). 低压脱扣器抗电压暂降性能的研究 (Research on the voltage sag resistance of low voltage release) [J]. 电器与能效管理技术 (Electrical & Energy Management Technology), 2016, (17): 45-50.
- [13] 欧阳森, 刘平, 梁伟斌, 等 (Ouyang Sen, Liu Ping, Liang Weibin, et al.). 低压脱扣器电压暂降敏感度三维模型 (A three-dimensional model for sensitivity of low-voltage releases to voltage sags) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (22): 157-163.
- [14] 刘平, 欧阳森 (Liu Ping, Ouyang Sen). 低压脱扣器电压暂降试验分析及配置策略研究 (Experiment analysis

- on low-voltage release under voltage sags and its configuration strategy research) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 74-80.
- [15] 孙志能 (Sun Zhineng). 低压电网欠压脱扣装置配置与安全管理 (The configuration and safety management of under-voltage tripper in low-voltage power grid) [J]. 供用电 (Distribution & Utilization), 2016, 33 (5): 65-69.
- [16] 李璐, 肖湘宁, 陈鹏伟 (Li Lu, Xiao Xiangning, Chen Pengwei). 改进光伏模型及其在微网可靠性评估中的应用 (Improved photovoltaic model and its application in reliability evaluation of microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (11): 65-71.
- [17] 余修勇, 肖立业 (Yu Xiuyong, Xiao Liye). 直流配电网故障识别和定位技术研究综述 (An overview of fault identification and location technology or DC distribution networks) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (7): 56-66.
- [18] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 711-718.
- [19] 司学振, 李琼林, 杨家莉, 等 (Si Xuezheng, Li Qionglin, Yang Jiali, et al.). 基于实测数据的电压暂降特性分析 (Analysis of voltage sag characteristics based on measured data) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2017, 37 (12): 144-149.
- [20] 欧阳森, 刘平, 李翔 (Ouyang Sen, Liu Ping, Li Xiang). 基于大规模实验的低压脱扣器电压暂降脱扣特性研究 (Investigation into tripping characteristics of low-voltage release under voltage sag based on large-scale experimental) [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版) (Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)), 2015, 43 (4): 85-94.

Low-voltage release configuration strategy of voltage sensitive equipment based on optimal coordination effect

WANG Xue¹, TANG Zheng-cong¹, LIU Xing-jie²

(1. College of Information and Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. College of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 751000, China)

Abstract: According to the relative position of the tolerance curve, three coordination relationships between the low-voltage release and the sensitive equipment are defined. The function characteristics of the low-voltage release in the three coordination relationships are analyzed. Considering the effective operation of the equipment and the timely action ability of the release, the concept of comprehensive coordination index of low-voltage release is put forward. Random variables and fuzzy variables are used to describe the withstand ability of the equipment and release. λ -cut set is introduced to calculate. Monte Carlo method is used to simulate the randomness of voltage sag events on the grid side. The typical sensitive equipment and five kinds of low-voltage release with different action characteristics are selected. Through the comparison of indicators, the coordination effect of release and equipment is effectively evaluated. Best delay setting is obtained. The proposed concept can provide theoretical basis for reasonable configuration and selection of release for both sides of power supply.

Key words: voltage sag; sensitive equipment; low-voltage release; fuzziness & randomness; tolerance ability; coordination relationship