

考虑电压暂降耐受能力的配电网保护 时延特性研究

郭成¹,王林玲¹,何觅²,杨发宇²,杨宣铭¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;
2. 云南电网有限责任公司 昆明供电局, 云南 昆明 650500)

摘要:电压暂降对设备的影响程度与保护动作切除故障时间、故障引起的暂降幅值大小和设备暂降耐受能力有关,在保护定值整定过程中考虑电压暂降因素的挑战在于确定基于暂降情况的时间整定方法,并确保整定结果的合理性。提出了考虑敏感设备对电压暂降的耐受能力的配电网继电保护配置方案。首先,引入敏感设备对电压暂降耐受能力等级概念,结合敏感设备CBEMA特性曲线对电压暂降严重性进行判断,对敏感设备电压暂降耐受能力进行等级划分。其次,在原保护动作时间基础上结合特性曲线进行保护动作时间整定,将电压暂降影响聚集到继电保护时间定值中。最后,通过对某地区实际配电系统进行仿真分析,验证了继电保护技术能够改善由电流保护切除的故障引起的电压暂降对敏感设备的影响,在维持保护选择性的情况下实现低成本缓减电压暂降。

关键词:电压暂降;设备耐受能力;CBEMA 特性曲线;优化

中图分类号:TM714.2 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25678

Research on Protection Delay Characteristics Considering Voltage Sag Tolerance Ability

GUO Cheng¹, WANG Linling¹, HE Mi², YANG Fayu², YANG Xuanming¹

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, Yunnan, China; 2. Kunming Power Supply Bureau,
Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: The influence degree of voltage sag on equipment is related to the fault removal time of protection action, the magnitude of sag caused by fault and the tolerance ability of equipment sag. The challenge of considering voltage sag factors in the protection setting process is to determine a time setting method based on sag conditions and ensure the rationality of the setting results. A relay protection configuration scheme for distribution network considering the tolerance of sensitive equipment to voltage sags was proposed. Firstly, the concept of voltage sag tolerance level of sensitive equipment was introduced, and the severity of voltage sag was judged by combining the CBEMA characteristic curve of sensitive equipment, and the tolerance ability was graded. Secondly, on the basis of the original protection action time, the protection action time was set by combining the characteristic curve, and the voltage sag effect was aggregated into the relay protection time setting value. Finally, through the simulation analysis of the actual distribution system in a certain area, it is verified that the relay protection technology can improve the influence of the voltage sag caused by the fault removed by the current protection on the sensitive equipment, and realize the low cost reduction of the voltage sag under the condition of maintaining the protection selectivity.

Key words: voltage sag; equipment tolerance; CBEMA characteristic curve; optimization

随着新型配电网的发展,配电网结构变得更 加多样化和复杂化,电压敏感设备(sensitive equip-

基金项目:国家自然科学基金(52367002);云南省联合基金重点项目(202201BE070001-15)

作者简介:郭成(1978—),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制,Email:ge325@126.com

通讯作者:王林玲(1999—),女,硕士在读,主要研究方向为电力系统中电压暂降分析与控制,Email:cilipponi@163.com

ment, SE)和用户规模越来越大,电压暂降对配电网敏感设备的影响加剧^[1-3]。电压暂降指供电电压方均根值在短时间内快速下降到额定电压的10%~90%,并持续10 ms~1 min,然后又恢复的现象^[4]。短路故障是导致电压暂降发生最主要的原因^[5],从电网系统侧进行电压暂降治理有助于提高配电网整体电能质量水平^[6]。电网侧治理措施一般包括减少故障次数、优化电网结构、减少故障持续时间三个方面,前两种方式虽然有效但是投资成本巨大。相比较之下,对配电网继电保护动作时间进行优化从而缩短短路故障切除时间能够快速有效且低成本地缓解电压暂降对配电网的影响。

现有技术对配电网进行保护时间定值整定时大多为了减少误动而片面地延长保护动作时间,引发的电压暂降会对用户造成加倍的后果,且目前进行保护动作时间定值整定时通常只依赖于实际测试数据和工程师的经验进行人工设定^[7],准确性较差。不少学者就继电保护对电压暂降的影响关系进行了深入研究。文献[8]详细说明了电压暂降严重程度随电压暂降幅值和持续时间的变化是单调且连续的,故考虑电压暂降影响对继电保护时间进行整定具有可行性。进行继电保护定值整定时考虑配电网电压暂降影响的研究中,有从电压暂降对敏感设备故障率的影响^[9-11]、继电保动作时限特性^[12]、电网线路故障随机性^[13-14]、平均暂降严重程度^[15]、继电保护配合动作随机性^[16]等角度进行分析,都证明了继电保护动作对配电网电压暂降情况存在实质性影响。文献[17]提出了电流保护的电压暂降安全域评估模型及保护性能评估模型,有效衡量了电流保护可以提供给敏感设备安全运行的最大保护能力。在此基础上,文献[18]提出了基于单端失选择性全线速切保护的电压暂降治理方案,通过增大I段保护范围的方法实现了在不增加成本的前提下提高电能质量。

上述研究从理论角度进行了多方面的验证,但研究缺乏如何通过调节配网继电保护动作时间对电压暂降的影响来改善配网电压暂降情况的具体优化方案。本文将保护动作特性与敏感设备耐受能力CBEMA特性曲线相结合,实现低成本降低电压暂降对敏感设备的危害。首先,利用敏感设备的性能与保护响应时间之间的关系,将敏感设备电压暂降耐受能力进行等级划分,然

后,通过优化保护时间定值参数来缓解电压暂降,提出基于敏感设备耐受能力的保护优化方法。最后,通过仿真验证了该方法的有效性。

1 敏感设备耐受程度等级

1.1 敏感设备CBEMA特性曲线

敏感设备CBEMA特性曲线是基于敏感设备对不同电压暂降幅值和持续时间的耐受程度水平形成的^[19],由计算机商业设备制造协会(CBEMA)提出,该曲线被作为判断很多敏感设备穿越性能的基准。敏感设备承受电压暂降而不发生压降的能力称为穿越能力,对于已有设备,其穿越能力已经固定,通过其他方法降低暂降幅值或减少持续时间可帮助避免敏感设备运行异常。

敏感设备CBEMA特性曲线如图1所示,其中纵坐标为电压暂降的幅值,定义为电压有效值与额定电压有效值的比值;横坐标为电压暂降的持续时间。曲线右下方为敏感设备异常运行区,左上方为安全运行区。CBEMA曲线拟合方程^[20]为

$$\begin{cases} U^2 t = 4400 \\ U = 87 - 100U_M/U_N \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 为电压暂降幅值百分比; t 为电压暂降持续时间; U_M 为敏感负载接入母线的故障后电压; U_N 为接入母线额定电压。

额定电压的87%是CBEMA曲线规定的敏感设备稳态最低电压;不同敏感设备存在不同稳态最低电压值;4 400是一个恒定值。

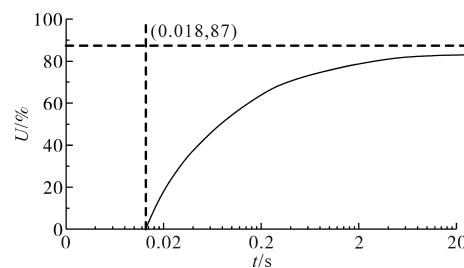


图1 敏感设备耐受能力的标准CBEMA的曲线

Fig.1 The standard CBEMA curve of the tolerance of sensitive equipment

1.2 敏感设备耐受程度等级划分

结合CBEMA特性曲线对敏感设备的电压暂降耐受能力等级进行划分。当电压暂降持续时间与幅值在安全运行区时(曲线的上部),该区域为设备能够容忍的电压和持续时间范围,在这区域内设备一般能够保持正常运行,将区域内敏感设备耐受能力划为AA级。当电压暂降持续时间与幅值在异常运行区时(曲线的下部),设备的正

常功能不能发挥,维护成本增高,使用寿命减少,性能下降,将区域内敏感设备耐受能力划为 A 级。

将敏感设备耐受能力因素考虑进保护时间定值整定能够高效地缩短故障清除时间,但是只简单地划为 A 级与 AA 级进行时间定值无法满足敏感设备的可靠性、灵敏性和速动性。结合三段保护具体整定时间范围和逐级配合要求可以使整定方案结果满足上述必要前提条件。

1.3 结合电流保护特性的耐受程度等级划分

首先,明确目前配电网三段保护时间整定值的范围可以确保继电器的灵敏性和速动性。I 段保护整定值一般为 0 s,但是动作时间取决于继电器固有动作时间与固有分闸时间,一般为 0.075 s 左右,且在配电网中一般通过增大时间定值来避免误动,所以配网中 I 段保护动作时间定值范围约为 0.07~0.15 s。II 段保护时间定值通常比下级线路 I 段保护高出一个时间阶梯 Δt ,无特殊情况时 Δt 取值在 0.3~0.5 s 之间,当灵敏度不满足要求时与下级 II 段保护配合,比下级线路 I 段保护再高出一个时间阶梯 Δt ,所以配网中 II 段保护动作时间定值范围约为 0.3~0.8 s。III 段保护作为后备保护动作时间较长,一般可达 1~2.5 s。

将安全运行区内设备耐受能力 AA 级按照三段保护定值范围再分为 AA_I, AA_{II}, AA_{III} 三个等级,将异常运行区内设备耐受能力 A 级同样分为 A_I, A_{II}, A_{III} 三个等级,如图 2 所示,以此确保时间定值不会超过各段保护约束,满足保护灵敏性和速动性。

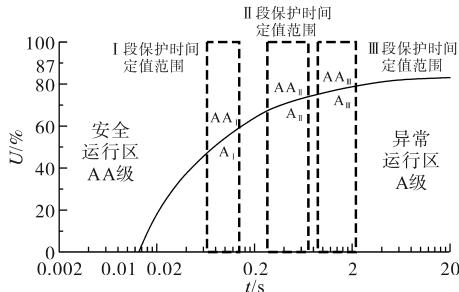


图 2 敏感设备耐受程度等级划分示意图

Fig.2 Sensitive equipment tolerance level classification diagram

其次,在此基础上各段动作时限需逐级配合以确保继电器的选择性,这要求主保护和后备保护继电器动作时间必须满足以下约束条件:

$$t_{op}^b - t_{op}^p \geq CTI \quad (2)$$

式中: t_{op}^b 为主保护动作时间; t_{op}^p 为后备保护动作时间; CTI 为保护协调时间间隔,是衡量保护配合的重要参数,现有研究确定了其取值在 0.2~0.5 s

之间^[21],本文选择 0.3 s。

2 电压暂降幅值计算模型

在进行电压暂降幅值计算时,该方法基于节点阻抗矩阵计算系统发生对称故障和非对称故障时节点电压暂降幅值。发生非对称故障时,在如图 3 所示的电压暂降幅值评估模型系统中,设母线 p 为敏感负荷接入节点,系统内某线路 $i-j$ 上 f 点发生短路故障, l 为故障点 f 距离节点 i 的长度占总线路 $i-j$ 的比例。母线 p 的电压暂降幅值 V_p^n 为

$$V_p^n = V_{p0}^n - Z_{pf}^n I_f^n \quad (3)$$

其中

$$Z_{pf}^n = (1-l)Z_{pi}^n + lZ_{pj}^n \quad (4)$$

$$I_f^n = V_{f0}^n / Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2 + Z_{ff}^0 \quad (5)$$

$$Z_{ff}^n = (1-l)^2 Z_{ii}^n + l^2 Z_{ii}^n + 2l(1-l)Z_{ij}^n + l(1-l)Z_{ij}^n \quad (6)$$

式中: $n=0,1,2$,表示零序、正序和负序; V_{p0}^n, V_{f0}^n 为 f 点故障前母线 p 和点 f 的电压幅值; Z_{pf}^n 为母线 p 与故障点 f 之间的互阻抗; $Z_{pi}^n, Z_{pj}^n, Z_{ij}^n$ 为母线与节点、节点与节点之间的互阻抗; I_f^n 为故障点 f 处短路电流; $Z_{ii}^n, Z_{ii}^n, Z_{ij}^n$ 为自阻抗; Z_{ij}^n 为线路 $i-j$ 间互阻抗。

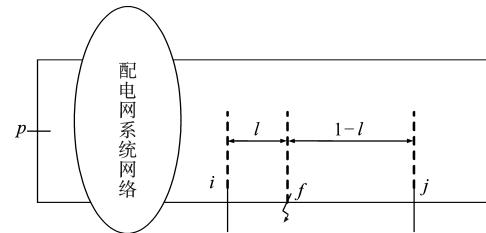


图 3 电压暂降幅值评估模型系统

Fig.3 Voltage sag amplitude evaluation model system

末端线路保护出口处发生三相对称短路时电压暂降幅值计算公式如下:

$$V_p = V_{p0} - \frac{Z_{pf}^1}{Z_{ff}^1} V_{f0} \quad (7)$$

式中: V_{p0}, V_{f0} 分别为三相接地故障前母线 p 和故障点 f 的电压; Z_{pf}^1 为母线 p 与故障点 f 之间的正序互阻抗; Z_{ff}^1 为正序自阻抗。

当故障位于环网中时,线路两端继电保护装置动作时间存在时间差,不论线路两侧的断路器哪个先断开,网络拓扑结构改变,为了计算单端保护跳开后的二次暂降幅值,需要对网络的阻抗矩阵进行修正。保护动作后,相当于故障所在线路在原拓扑中消失,同时产生了一个与原继电器相连的附加节点 i^* ;而故障点从原 $i-j$ 线路转移

到新拓扑中的 i^*-j 线路。基于上述等效动态变换过程,节点阻抗矩阵需要作相应的修改。

首先将原来的 N 维阻抗矩阵 Z 中元素修改得到矩阵 Z_1 中的元素为

$$Z_{1ii}^n = Z_{ii}^n - z_{ij}^n \quad (8)$$

$$Z_{1jj}^n = Z_{jj}^n - z_{ij}^n \quad (9)$$

$$Z_{1ij}^n = Z_{1ji}^n = 0 \quad (10)$$

随后在 Z_1 中增加关于附加节点 i^* 的一行一列元素,变为 $(N+1)$ 维矩阵 Z_2 ,增加的元素为

$$Z_{2i^*i^*}^n = z_{ij}^n \quad (11)$$

$$Z_{2i^*j}^n = -z_{ij}^n \quad (12)$$

$$Z_{2j^*i^*}^n = -z_{ij}^n \quad (13)$$

最后在 Z_2 中增加关于虚拟故障节点 f 的一行一列元素,变为 $(N+2)$ 维矩阵 Z_3 ,增加的元素为

$$Z_{3df}^n = (1-p)Z_{2df}^n \quad (14)$$

$$Z_{3ff}^n = (Z_{2a^*a^*}^n + Z_{2bb}^n - 2Z_{2a^*b}^n - Z_{2a^*b}^n)p^2 + (2Z_{2a^*b}^n - 2Z_{2a^*a^*}^n + Z_{ab}^n) + Z_{2a^*a^*}^n \quad (15)$$

式中: Z_{3df}^n 为与 f 节点相连的所有节点的互阻抗; Z_{3ff}^n 为 f 节点自阻抗。

修正节点阻抗矩阵后,还需要基于新的拓扑进行潮流计算,更新各节点的故障前电压。

3 考虑敏感设备耐受能力等级的保护优化

本方案以CBEMA特性曲线为参考值,结合继电保护动作时间,以敏感负荷电压暂降耐受能力为目标实现继电保护定值的整定计算,有利于工作人员及时做出定值优化策略,有效降低电网的运行风险。本方案的继电保护整定方法步骤如图4所示。

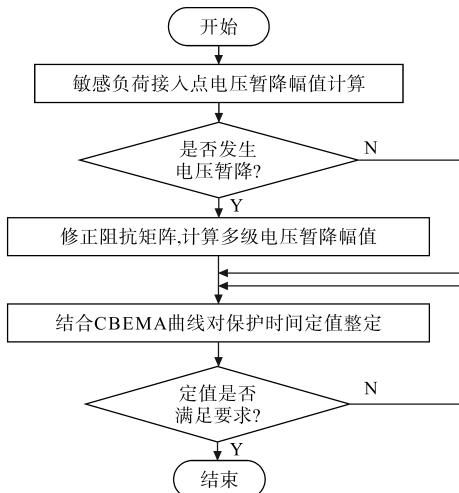


图4 继电保护定值整定方法步骤

Fig.4 Relay protection setting method steps

步骤1:配电网敏感负荷接入点电压暂降幅值计算。当发生短路故障时,配电网系统网络结构发生改变,需确定敏感负荷接入点电压暂降幅值大小。

步骤2:判断是否发生多级暂降。若发生多级电压暂降则配电网拓扑结构发生改变,需要对原配网结构形成的阻抗矩阵进行修正来重新计算电压暂降幅值,否则按照步骤1确定敏感负荷接入点的电压暂降幅值。

步骤3:配电网继电保护时间定值整定。将保护动作特性与敏感设备耐受能力CBEMA特性曲线相结合对电压暂降严重性进行准确判断,对不同等级情况进行保护动作时间整定,在设备允许范围内缩短继电保护动作时间,以实现电压暂降对敏感设备的影响最小化。比较电压暂降幅值、保护动作时间数据与CBEMA特性曲线参数值,以CBEMA特性曲线参数值为优先保护级进行保护定值优化整定,具体步骤如下:

1)如果发生故障时敏感负荷点的电压 U_{sag} 与电压暂降持续时间 t_{sag} 位于异常运行区时,敏感负荷设备耐受能力划分为A级,选择在该暂降幅值水平情况下安全运行区内最大时间点作为新保护时间定值,且需确保该定值是否满足灵敏性、速动性及选择性要求。其中,为确保时间整定值尽可能接近CBEMA曲线,定义电压暂降幅值为 U_{sag} 时CBEMA曲线上对应电压暂降持续时间为 $t_{\text{Usag}}^{\text{CBEMA}}$,故最大时间点选取按 $t_{\text{Usag}}^{\text{CBEMA}} - 0.1t_{\text{Usag}}^{\text{CBEMA}} < \text{最大时间点} < t_{\text{Usag}}^{\text{CBEMA}}$ 进行选取。

如图5所示, A_1 点电压暂降幅值为 V_1 ,电压暂降持续时间为 t_1^A ,位于设备异常运行区内,设备性能下降,判定此时敏感设备耐受能力等级为 A_1 级,根据CBEMA特性曲线,将保护时间整定为同电压暂降幅值水平 V_1 下设备安全运行区内最大时间点,即 t_1^{AA} 时刻,耐受能力等级提升为 AA_1 级。

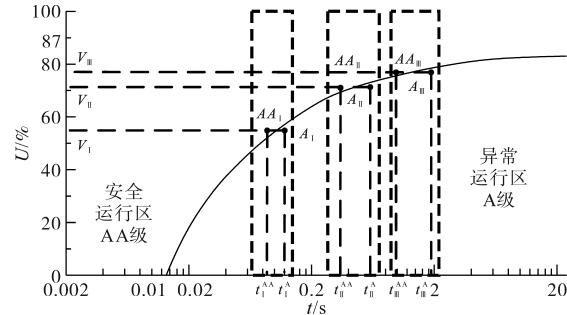


图5 时间整定示意图

Fig.5 Time setting diagram

同理, A_{II} 点保护时间整定为 t_{II}^{AA} 时刻, A_{III} 点保护时间整定为 t_{III}^{AA} 时刻。

2) 如果发生故障时敏感负荷点的电压 U_{sag} 与电压暂降持续时间 t_{sag} 位于设备安全运行区时, 设备耐受能力则为 AA_I, AA_{II}, AA_{III} 三个等级, 保护时间定值采用初始定值。

4 仿真分析

选取图 6 所示某地区实际配电系统为敏感设备电压暂降耐受能力评估的分析对象, 假设母线 1 接入文献[22]中给出的某化学反应过程中气体测量装置和温度控制器, 元件稳态最低电压值分别为 87% 和 90%, 分析线路 1—2 和 1—7 上保护在不同整定方法情况下敏感设备的状态。

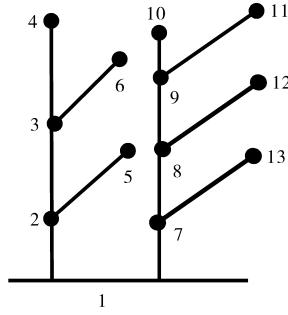


图 6 某地区实际配电系统

Fig.6 Actual distribution system in a region

在同一故障条件下, 该配电网三段保护原始动作时间和本文方法所得保护方案整定时间如表 1 所示。

表 1 保护整定方案对比

Tab.1 Comparison of protection setting scheme

| 线路 | 整定时间/s | |
|-----|--------------|--------------|
| | 传统方案 | 本文方案 |
| 1—2 | I 段: 0.113 | I 段: 0.096 |
| | II 段: 0.639 | II 段: 0.423 |
| | III 段: 2.224 | III 段: 1.382 |
| 1—7 | I 段: 0.130 | I 段: 0.110 |
| | II 段: 0.656 | II 段: 0.489 |
| | III 段: 2.412 | III 段: 1.522 |

针对上述系统及时间设置进行了 30 次敏感设备电压暂降耐受能力等级不同的仿真。气体测量装置在不同方案下耐受能力等级次数分布结果如表 2 所示。由表 2 可见, 在实际配电网系统中, 采用本文所提方案得到的 AA 级次数相对于原方案都是增加的, 相对的, A 级次数减少, 故采用所提整定方案相比于原方案敏感设备电压暂降耐受等级得到改善。可见, 考虑敏感设备

电压暂降耐受能力等级进行保护动作时间整定的方法可以实现设备状态与保护动作的优化配合, 用户可根据敏感设备耐受能力等级确定厂内配电系统的具体保护方案, 实现低成本缓减电压暂降。

表 2 气体测量装置在不同方案下耐受能力等级次数分布

Tab.2 The number distribution of tolerance level of gas measuring device under different schemes

| 线路 | 整定方案 | 次数 | | | | | |
|-----|------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------|
| | | AA _I | AA _{II} | AA _{III} | A _I | A _{II} | A _{III} |
| 1—2 | 原方案 | 2 | 4 | 3 | 7 | 6 | 8 |
| | 本文方案 | 4 | 6 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 1—7 | 原方案 | 3 | 4 | 5 | 6 | 5 | 8 |
| | 本文方案 | 5 | 5 | 7 | 4 | 3 | 6 |

温度控制器在不同方案下耐受能力等级次数分布如表 3 所示。对比表 2 与表 3 本文方法对不同敏感设备改善情况, 温度控制器对电能质量要求更高, 在对其进行时间整定后, 缓解效果略大于对电能质量要求不高的气体测量装置。由此可知, 对电能质量要求更高的敏感设备使用该方案进行保护动作时间整定可以更有效地缓解电压暂降对敏感设备的影响。

表 3 温度控制器在不同方案下耐受能力等级次数分布

Tab.3 The number distribution of tolerance level of temperature controller under different schemes

| 线路 | 整定方案 | 次数 | | | | | |
|-----|------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------|
| | | AA _I | AA _{II} | AA _{III} | A _I | A _{II} | A _{III} |
| 1—2 | 原方案 | 2 | 3 | 2 | 7 | 8 | 8 |
| | 本文方案 | 5 | 5 | 3 | 4 | 6 | 7 |
| 1—7 | 原方案 | 2 | 4 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| | 本文方案 | 5 | 6 | 4 | 3 | 5 | 7 |

另外, 由整定过程可知, III 段保护整定时间相比于原保护动作时间变化较大, I 段保护时间定值变化相对小得多, 会主观地以为对 I 段保护时间进行整定对提高敏感设备耐受能力帮助不大。但是对比三段式保护每一段的改善效果, 接入气体测量装置时, I 段保护 AA 级次数都增加 2 次, II 段保护 AA 级次数都增加 2 次和 1 次, III 段保护 AA 级次数都增加 1 次和 2 次。可见, 该方案对于 I 段保护的改善并没有因为时间变化小而毫无改善作用。文献[10]的相关研究得到了相同结论, 表明电压暂降安全域百分比系数随保护时间整定值递增而反比例递减, 即对 I 段保护时间进行整定其电压暂降安全域百分比系数更为敏感, 暂降安全域提升空间很大, 故 I 段保护很小的时

间变化值会对敏感设备遭受电压暂降状况造成很大影响。而Ⅱ段、Ⅲ段保护由于整定时间变化跨度较大,所以在灵敏度不高的情况下也能提供一定的改善能力。

5 结论

本文利用CBEMA曲线进行配电网继电保护整定,目的在于将电压暂降对敏感设备的影响考虑进继电保护时间定值的整定中去,能够有效且低成本地缓解敏感设备受电压暂降的影响,弥补了传统配电网继电保护时间定值的准确性和速动性较差的缺陷。此外,保护整定与配合主要取决于系统要求,本文方法对供配电系统的保护无任何不利影响,尤其适用于工厂供电系统的保护配置。

利用CBEMA曲线进行配电网继电保护整定也存在一定不足,由于现有敏感设备CBEMA曲线的完整数据较少,更深入地对CBEMA曲线进行研究可能会更好地证明这个方法的普适性。但是,敏感设备电压暂降耐受能力等级划分概念这个概念可用于设备选型、供电方案制定和优化运行方式等,为解决电压暂降问题提供了一种有效途径。

参考文献

- [1] 马莉,陈应雨,田钉荣,等.基于改进层次分析法的多级电压暂降严重程度评估[J].电力系统保护与控制,2023,51(17):49–57.
MA Li, CHEN Yingyu, TIAN Dingrong, et al. Severity evaluation of multistage voltage sag based on an improved analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 49–57.
- [2] 李旭斌,田付强,郭亦可.新型电力系统中电力设备健康管理与智能运维关键技术探究[J].电网技术,2023,47(9):3710–3727.
LI Xubin, TIAN Fuqiang, GUO Yike. Key technologies for health management and intelligent operation and maintenance of power equipment in new power systems[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3710–3727.
- [3] JIN J, LI H, YANG R, et al. An improved compensation method for voltage sags and swells of the electric vehicles charging station based on a UPQC-SMES system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 143: 108501.
- [4] 何觅,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.
- [5] 杨志超,詹萍萍,严浩军,等.电压暂降原因分析及其源定位综述[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(12):15–20.
YANG Zhichao, ZHAN Pingping, YAN Haojun, et al. Review on cause analysis and source location for voltage sag[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 15–20.
- [6] YADAV J R, VASUDEVAN K, KUMAR D, et al. Power quality assessment for industrial plants: a comparative study[C]/2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), IEEE, 2019: 1–6.
- [7] 刘盼,崔庆傲.配电网继电保护与FTU终端定值整定原则探讨[J].电工技术,2022(15):124–126.
LIU Pan, CUI Qingshao. Discussion on distribution network relay protection and FTU terminal setting principle[J]. Electric Engineering, 2022(15): 124–126.
- [8] 卢文清,常乾坤,贾东强,等.设备侧电压暂降严重程度评估方法研究[J].电力自动化设备,2019,39(1):175–182.
LU Wenqing, CHANG Qiankun, JIA Dongqiang, et al. Research on evaluation methods of voltage sag severity for equipment side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (1): 175–182.
- [9] 范文杰,肖湘宁,陶顺.计及继电保护动作的电压暂降评估[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(3):129–136.
FAN Wenjie, XIAO Xiangning, TAO Shun. Assessment on voltage transient drop considering relay protection action[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40 (3) : 129–136.
- [10] 林志超,罗步升,宋志坚.基于非参数估计的电压暂降下敏感设备故障率评估[J].电测与仪表,2023,60(6):86–95.
LIN Zhichao, LUO Busheng, SONG Zhijian. Fault rate assessment of voltage sag sensitive equipment based on nonparametric assessment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 86–95.
- [11] 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.
- [12] 陈礼频,肖先勇,张志,等.考虑保护时限特性的电压暂降频次评估[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):113–119.
CHEN Lipin, XIAO Xianyong, ZHANG Zhi, et al. Voltage sags frequency assessment considering the time characteristic of protection system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 113–119.
- [13] 许鹏程,林焱,林缔,等.序贯蒙特卡洛模拟下计及保护动作特性的电压暂降评估[J].电器与能效管理技术,2021(3):81–87.
XU Pengcheng, LIN Yan, LIN Di, et al. Voltage sag evaluation considering action characteristics of protection based on sequential Monte Carlo simulation[J]. Electrical & Energy Man-

- agement Technology, 2021 (3):81-87.
- [14] 叶曦,刘开培,李志伟.不确定条件下计及线路保护动作特性的电压暂降频次评估[J].电力自动化设备,2018,38(3):169-176.
YE Xi, LIU Kaipei, LI Zhiwei. Voltage sag frequency assessment considering action characteristics of line protection in uncertain conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(3):169-176.
- [15] 谭亚欧,肖先勇,胡文曦.电网节点电压暂降综合评估及其检验方法[J].电测与仪表,2021,58(4):99-106.
TAN Yaou, XIAO Xianyong, HU Wenxi. Comprehensive evaluation of grid node voltage sag and its testing method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(4):99-106.
- [16] 陈礼频,肖先勇,汪颖,等.考虑保护配合动作随机性的电压暂降频次评估[J].电网技术,2012,36(5):132-138.
CHEN Lipin, XIAO Xiangyong, WANG Ying, et al. Assessment on voltage sag frequency considering randomness of protection cooperation[J]. Power System Technology, 2012,36(5):132-138.
- [17] 王宾,潘贞存,徐文远,等.配电线路电流保护的跌落保护性能评估[J].电力系统自动化,2006,30(6):25-29,41.
WANG Bin, PAN Zhencun, XUN Wenyuan, et al. Evaluations of sag mitigation capability to distribution line current protection[J]. Automation of Electric power Systems, 2006, 30 (6) : 25-29,41.
- [18] 王宾,潘贞存,董新洲.电压跌落的配电线路全线速切治理方案[J].电网技术,2006,30(21):84-88.
WANG Bin, PAN Zhencun, DONG Xinzhou. A scheme of the fast tripping current protection for distribution lines based on the voltage sag mitigation[J]. Power System Technology, 2006, 30(21):84-88.
- [19] 刘妍朋,于明涛,管春伟,等.基于电压暂降的标准SARFI参数与ITIC曲线分析保护装置对电压暂降的影响[J].电网与清洁能源,2015,31(8):15-20,25.
LIU Yapeng, YU Mingtao, GUAN Chunwei, et al. Influence of SARFI parameter based on voltage sag and ITIC curve analysis protection device on voltage sag[J]. Power System Clean Energy, 2015,31(8):15-20,25.
- [20] BALASUNDAR C, SUNDARABALAN C K, SHARMA J, et al. Design of power quality enhanced sustainable bidirectional electric vehicle charging station in distribution grid[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74:103242.
- [21] GÓMEZ J C, MORCOS M M. Voltage sag and recovery time in repetitive events[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4):1037-1043.
- [22] BOLLEN M H J, STEPHENS M, DJOKIC S Z, et al. CIGRE/CIRED/UIE joint working group C4. 110, voltage dip immunity of equipment in installations-main contributions and conclusions [C]/CIRED 2009-20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1, IET, 2009: 1-4.

收稿日期:2024-03-06

修改稿日期:2024-04-25