

DOI: 10.7667/PSPC170370

基于电流突变量的自适应过电流保护新原理

黄景光^{1,2}, 丁婧¹, 郑淑文¹, 林湘宁³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 华中科技大学电气与电子学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对线路外部故障切除时负荷自启动对配电网过流保护的影响, 提出了一种基于电流突变量的自适应过电流保护新原理。利用线路在配电网内部故障与故障切除过程中电流存在的明显差异特征, 实现对负荷自启动过程的准确识别。当连续两次检测到电流突变量大于设定门限值并满足两个判据时, 即判定负荷产生自启动过程。给出了一套过电流保护整定方法, 可根据负荷变化做出动态调整, 从而构建自适应过电流保护方案。仿真结果表明, 基于电流突变量的自适应过电流保护新原理是有效和实用的。该原理不受负荷自启动与负荷变化的影响, 可有效增大后备保护的保护区, 保证了保护的可靠性和灵敏度。

关键词: 自适应保护; 过电流保护; 电流突变量; 自启动; 配电网

A new adaptive over current protection principle based on current mutation

HUANG Jingguang^{1,2}, DING Jing¹, ZHENG Shuwen¹, LIN Xiangning³

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. School of Electrical and Electronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The influence of load self-start on the over-current protection of distribution network when external fault removal, a new principle of adaptive over-current protection based on current mutation is proposed. By using the significant differences characteristics between the current of lines in the process of distribution network internal fault and fault removal, it realizes the accurate identification of load self-starting process. When the current mutation is detected greater twice successively than the set threshold value, and meets two criterions, the load self-starting process can be determined. An overcurrent protection setting method is proposed, which can be dynamically adjusted according to the load change, so as to build an adaptive over-current protection scheme. The simulation results show that the new principle of adaptive overcurrent protection based on current mutation is effective and practical. The principle is free from the influence of load self starting and load change, which can effectively increase the protection range of the backup protection and ensure the reliability and sensitivity of the protection.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090).

Key words: adaptive over-current protection; over current protection; current mutation; self-starting; distribution network

0 引言

根据“故障后仅断开故障支路”的原则, 传统配电网保护通常采用三段式电流保护, 而过电流保护按躲过可能出现的最大负荷电流整定, 常因自启动电流大, 保护定值高, 在较长线路末端发生短路时, 短路电流小, 灵敏度可能不满足要求, 保护装置

无法动作, 将对电网的安全稳定性产生严重威胁^[1-7]。

国内外学者就配电网的过电流保护问题进行了深入研究。文献[8]提出一种自适应过电流保护方案。根据电力系统运行方式和故障类型实时调整过电流保护定值以应对电力系统的各种变化, 解决了过流整定值在某些状态并不是最佳的问题。文献[9]提出了一种能够动态设定电流整定值的过电流继电器, 提高了定时限过电流继电器的灵敏度, 解决了过流保护定值固定, 不能满足系统负荷变化的问题。

基金项目: 国家自然科学基金资助(51477090)

文献[10]给出了一种三段式自适应保护的过电流整定算法,根据线路的实际负荷电流实时调整过流保护定值,避免了因负荷容量改变而造成保护范围缩小的问题。文献[11]提出了一种微电网自适应保护方法,该方法将微电网实时拓扑结构转化为树形节点路径图并提出树形节点搜索方法,将搜索结果作为微网内保护装置动作电流自适应整定的依据,解决了负荷拓扑结构灵活多变的问题。以上研究主要讨论了负荷动态变化对传统过电流保护的影响,而未涉及因考虑自启动电流而导致整定值较大,致使过电流保护灵敏度不足甚至拒动的问题。

本文在讨论负荷的自启动电流对传统过电流保护整定与配合关系的影响的基础上,以故障被切除为前提,通过分析配电网内部故障发生和切除两个动态过程中流过各线路的电流变化,提出一种基于电流突变量检测的自适应过电流保护新原理。该原理利用外部故障切除后负荷自启动过程中电流突变量明显的差异特征构成负荷自启动判据,实现负荷自启动过程的自动识别,并在此基础上提出了一套过电流保护整定方法,根据负荷的电流水平时调用与更新过电流保护整定值。该方法不受负荷自启动与负荷变化的影响,可有效增大后备保护的保护区,保证了保护的可靠性和灵敏度。

1 负荷自启动对过电流保护的影响

在如图1所示配电网中,当 k 点发生故障时,保护2主保护立即动作,切除故障,保护3作为保护2后备保护,在故障切除后应可靠返回。

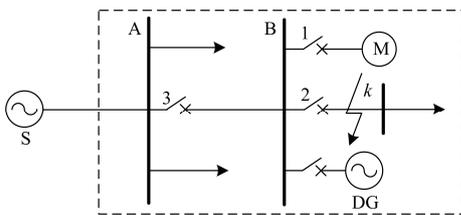


图1 辐射型配电网示意图
Fig. 1 A radial distribution network

在负荷较重的配电网中,上述保护的整定配合关系还需要考虑以下因素^[12-20]:

1) 保护装置误动

当线路外部故障点 k 被切除后,母线B所连接的负荷自启动,线路3的负荷电流增大,可能导致保护3误动。所以,计算过电流保护整定值时,需考虑电感性负荷自启动的影响,确保后备保护的可靠性,但也降低了过电流保护灵敏度。

2) 保护装置拒动

考虑负荷自启动的影响,过电流保护整定时需引入自启动系数,导致保护整定值较大,而在最小运行方式下线路2末端发生经过渡电阻的故障时,可能因短路电流值较小而致使保护2灵敏度不足甚至拒动。

本文提出一种电流突变量检测方法,识别外部故障切除后的负荷自启动过程,以便自适应调整过电流保护整定值,在确保可靠性的前提下,提高过电流保护灵敏度。

2 基于电流突变量的自适应过电流保护原理

2.1 外部故障切除后负荷自启动的识别方法

图1配电网中 k 点故障在保护2动作切除后,保护3处的电流将经历故障前的负荷电流到故障电流的突变,再由故障电流到自启动电流的突变,第二次突变后电流值小于第一次突变后电流值,但仍然大于故障前的负荷电流,那么可以判定故障后符合存在自启动现象,可将此特征作为判别负荷自启动的依据,如图2所示。

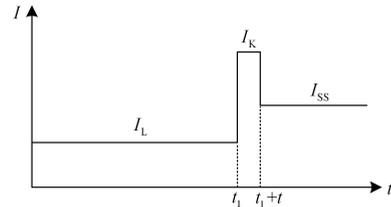


图2 负荷电流变化特征示意图
Fig. 2 Variation characteristics of load current

1) 判据1

在 t_1 时刻发生故障时,电流产生第一次突变,电流突变量如式(1)所示。

$$\Delta I_1 = |I_{t_1} - I_{t_1-T}| \quad (1)$$

式中: ΔI_1 为第一次电流突变量值; I_{t_1} 为 t_1 时刻电流有效值; I_{t_1-T} 为 t_1-T 时刻电流有效值; T 为工频周期。判据1如式(2)所示。

$$\Delta I_1 > I_{d1} \quad (2)$$

式中: I_{d1} 为门限值,可整定 $I_{d1} = (0.2 \sim 0.3)I_N$; I_N 为额定负荷电流值。

2) 判据2

经过时间 t 故障被切除,电流产生第二次突变,电流突变量如式(3)所示。

$$\Delta I_2 = |I_{t_1+t} - I_{t_1-T}| \quad (3)$$

式中: ΔI_2 为第二次电流突变量值; I_{t_1+t} 为 t_1+t 时刻的电流有效值。判据2如式(4)所示。

$$\Delta I_2 > I_{d2} \quad (4)$$

式中: I_{d2} 为门限值, 可整定 $I_{d2} \geq (0.3 \sim 0.5)I_L$; I_L 为故障前负荷电流值, 且第一次电流突变量值和第二次电流突变量值满足判别式(5)。

$$\Delta I_1 \gg \Delta I_2 \quad (5)$$

当保护安装处电流连续发生两次突变, 且电流突变量值同时满足以上两个判据时, 可以判定外部故障切除后发生负荷自启动现象。

2.2 基于电流突变量的自适应过电流保护整定

传统的过电流保护整定值为恒定值, 在考虑重负荷及其自启动系数时, 可能因整定值较大而无法保护灵敏度要求。本文设计一种自适应过电流保护新原理, 正常运行时, 按躲过负荷电流整定, 在外部故障切除后, 通过识别负荷自启动过程, 在发生负荷自启动时, 根据故障前负荷电流及自启动系数实时调整整定值, 保证保护装置的正确动作。

对于三段式自适应保护, I、II 段电流保护因整定值较高, 不受自启动电流的影响, 按照常规方法进行整定^[14-16]。在正常运行时, III 段过电流保护可按躲过负荷电流整定, 而不考虑负荷自启动系数, 因此, 其整定值相对较小, 灵敏度得到提高。在判断外部故障切除后负荷自启动时, III 段过电流保护根据故障前负荷电流计入负荷自启动系数, 实时计算和投入新的过电流保护整定值, 在负荷自启动结束后, 恢复正常过电流保护整定值, 实现自适应过电流保护整定值调整, 在确保可靠性的前提下, 提高过电流保护灵敏度。

正常运行时, 过电流保护整定值表达式为

$$I_{set}^{III} = \frac{K_{rel}^{III}}{K_{re}} I_{L.real} \quad (6)$$

当判定外部故障切除后负荷发生自启动时, 过电流保护整定值表达式为

$$I_{set}^{III} = \frac{K_{rel}^{III} K_{ss}}{K_{re}} I_{L.real} \quad (7)$$

此整定值在负荷自启动时短时间投入, 其投入的时间可根据负荷自启动特征进行整定, 在负荷自启动过程后, 过电流保护恢复正常运行整定值。

自适应定时限过电流保护整定表达式为

$$I_{set}^{III} = \begin{cases} \frac{K_{rel}^{III}}{K_{re}} I_{L.real} & \text{正常整定值(低定值)} \\ \frac{K_{rel}^{III} K_{ss}}{K_{re}} I_{L.real} & \text{自启动整定值(高定值)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: I_{set}^{III} 为过电流保护整定值; $I_{L.real}$ 为实时负荷电流值, 且取值 $I_{L.real} \geq (0.3 \sim 0.5)I_N$, 以防止负荷波动

时保护误动; K_{rel}^{III} 为可靠系数(一般取 1.15~1.25); K_{ss} 为自启动系数(一般取 1.5~3.0); K_{re} 为返回系数(一般取 0.85~0.95)。

2.3 自适应过电流保护动作逻辑

基于电流突变量的自适应过电流保护在线整定流程图如图 3 所示。

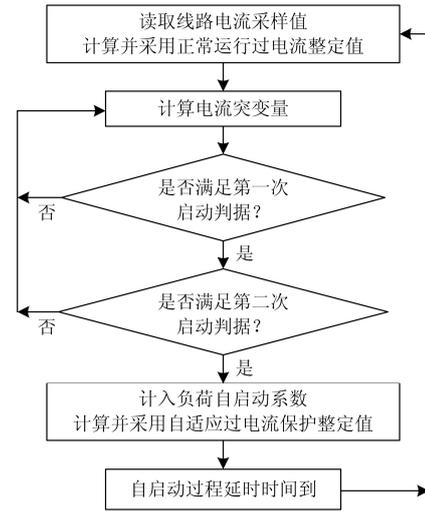


图 3 过电流保护在线整定流程图

Fig. 3 Online setting flow chart of over current protection

通过检测线路外部故障时电流在故障发生时和故障切除后动态过程中的两次突变, 且与故障前负荷电流相比较所呈现的不同特征, 根据前述判据可判定负荷自启动过程, 本文所构成的基于电流突变量的自适应过电流保护方案的逻辑框图如图 4 所示。

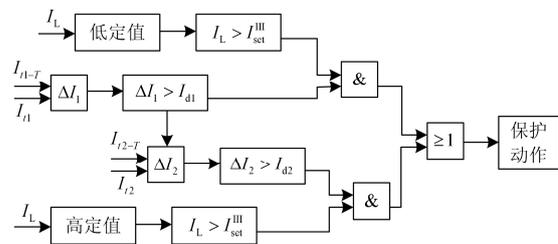


图 4 基于电流突变量的自适应过电流保护逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of adaptive over current protection based on current mutation

其主要过程如下:

(1) 正常运行时, 保护装置对线路电流进行实时数据采样, 自适应过电流保护根据负荷电流计算并采用低值整定值。

(2) 当系统发生短路故障时, 保护装置检测到出现电流突变量, 在系统各保护按选择性判断并切除故障过程中, 自适应过电流保护判断第一次电流突

变量是否满足判据 1；在第一次电流突变量满足判据 1，且线路电流达到过电流保护低值整定值时，自适应过电流保护动作，在其预定动作时限到达时，作为后备保护切除线路。

(3) 若满足判据 1，且检测到发生第二次电流突变量，在排除多发故障、发展性故障后，判断是否满足判据 2，根据判据 2 判定为外部故障切除后的负荷自启动过程，若第二次电流突变量发生时没有发生明显负荷自启动过程，则保护流程返回，保护装置采集负荷电流数据实时采样值，计算并采用低值整定值。

(4) 在根据判据 2 判定为负荷自启动过程时，保护装置根据故障前负荷电流、计入自启动系数，重新计算并短时采用高值整定值，避免保护装置因负荷自启动而误动，确保保护装置迅速返回，应对系统中新的故障发生的可能，在自启动高值整定值时限到达后，退出高值整定值，保护装置流程返回，计算并采用低值整定值，实现自适应过电流保护。在满足判据 2 的负荷自启动过程中，若线路电流达到高值整定值，则自适应过电流保护动作，在其预定动作时限到达时，作为后备保护切除线路。

基于电流突变量的自适应过电流保护，在正常运行时，保护装置采用低值整定值，可提高过电流保护灵敏度。在外部故障切除后负荷自启动过程中，保护装置短时采用高值整定值，既可有效防止保护装置因自启动电流而误动，又可实现保护装置迅速返回，防范系统再次发生故障。

3 仿真验证算例

本文建立 10 kV 配电网仿真模型，如图 5 所示。

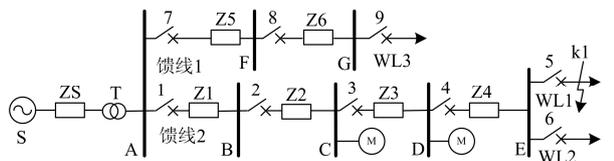


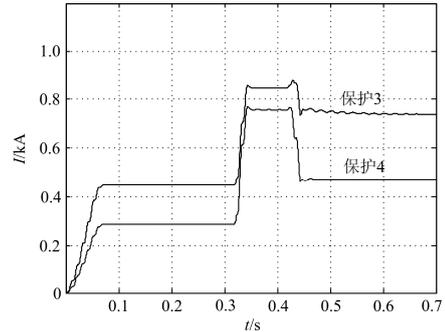
图 5 配电网仿真模型

Fig. 5 A simulation model of distribution network

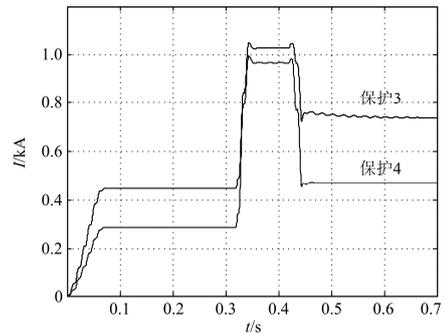
配电网基准容量为 100 MVA，基准电压为 10 kV，系统电压为 110 kV，变压器变比为 110/10.5。线路 AB、BC、CD、AF、FG、DE 的单位阻抗均为 $0.27 + j0.347 \Omega/\text{km}$ ，其长度分别为 3 km、3 km、4 km、3 km、3 km、10 km。电动机负荷接于母线 C 和母线 D，其他均为静态负荷。各线路装设自适应过电流保护装置。本文以馈线 2 为例进行自适应定时限过电流保护仿真分析，采用 PSCAD/EMTDC 软件仿真。

3.1 故障切除后负荷自启动过程的识别

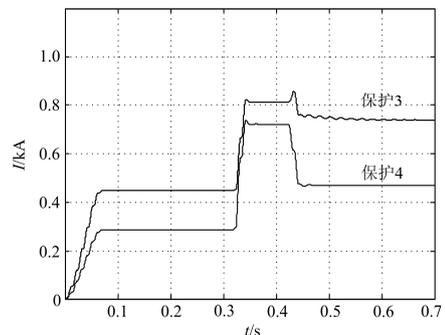
当母线 E 上的出线 WL1 发生金属性短路时，随着其保护 5 动作跳闸，流过保护 3 和保护 4 的电流如图 6 所示。



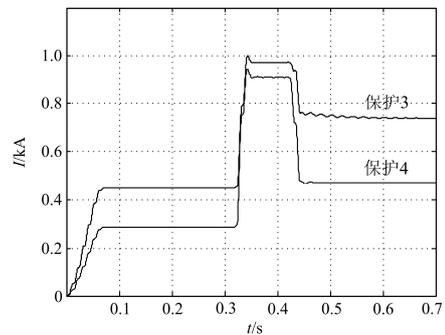
(a) 线路100%发生三相短路



(b) 线路50%发生三相短路



(c) 线路100%发生两相短路



(d) 线路50%发生两相短路

图 6 保护 3 和保护 4 的电流波形

Fig. 6 Current waveforms of protection 3 & 4

由图 6 所示波形可发现, 当线路 WL1 发生故障时, 随着故障被切除, 流过保护 3 和保护 4 的电流会发生两次明显的变化过程, 且其突变量绝对值达到定值, 数据见表 1。故障发生与故障切除两个动态过程中流过保护 3 和保护 4 的电流突变量和负荷自启动识别情况如表 1 所示(电流单位 kA)。

表 1 负荷自启动识别情况
Table 1 Recognition of load self-starting

保护	判据	两相短路		三相短路	
		50%	100%	50%	100%
保护 3	电流突变量 ΔI_1	0.528	0.365	0.582	0.405
	$\Delta I_1 > \text{门限值}$	√	√	√	√
	电流突变量 ΔI_2	0.292	0.294	0.293	0.292
	$\Delta I_2 > \text{门限值}$	√	√	√	√
	$\Delta I_1 > \Delta I_2$	√	√	√	√
	自启动判定	√	√	√	√
保护 4	电流突变量 ΔI_1	0.627	0.437	0.683	0.473
	$\Delta I_1 > \text{门限值}$	√	√	√	√
	电流突变量 ΔI_2	0.187	0.187	0.187	0.187
	$\Delta I_2 > \text{门限值}$	√	√	√	√
	$\Delta I_1 > \Delta I_2$	√	√	√	√
	自启动判定	√	√	√	√

由表 1 可知, 随着外部故障切除, 故障点上级相邻线路保护测量电流均会产生两次明显的突变过程, 两次电流突变量绝对值均大于其启动门限值, 且第一次突变量值大于第二次突变量值, 满足前述判据 1 和判据 2, 根据本文的判别方法, 可判定外部故障切除后负荷发生自启动过程。仿真结果还表明, 在线路不同位置发生不同类型故障时, 本文判别方法能判定外部故障切除后的负荷自启动过程。

3.2 整定计算与校验

本文所提的自适应过电流保护, 正常运行时, 计算并采用一套低值整定值, 提高保护灵敏度。在判定有外部故障发生并切除后, 发生负荷自启动过程时, 计算并短时采用一套高值整定值, 避免保护误动, 保证保护的可靠性。

3.2.1 正常运行整定值

正常运行时, 该自适应过电流保护, 根据负荷电流计算并采用一套低值整定值, 该整定值不计入负荷自启动系数, 同时, 在线路负荷电流较小时, 要求取 30%~50%线路额定负荷值, 该整定值计算公式见式(6)。

本文建立图 5 所示配电网仿真模型, 选取系统总负荷为 10 MVA、12 MVA、15 MVA 三种运行方式(相当于 50%、60%、75%的额定运行方式)下, 对线路过电流保护分别按传统整定方法和本文自适应

过电流保护原理整定方法整定和调用整定值, 并对两种方法整定值的过电流保护分别进行仿真验证。其中线路 CD、DE 的负荷电流数据如表 2 所示。

表 2 线路负荷电流值

	10 MVA	12 MVA	15 MVA
I_{LDE}	0.301	0.337	0.381
I_{LCD}	0.446	0.480	0.513

分别按传统方法和本文自适应过电流保护整定方法计算保护 3 和保护 4 的整定值, 并在 E 母线上校验了保护灵敏度。其结果如表 3 所示。

表 3 传统过电流保护与本文自适应保护整定值

	性能	10 MVA	12 MVA	15 MVA
传统过电流保护	$J_{\text{set},4}^{\text{III}}$	0.602	0.674	0.762
	$J_{\text{set},3}^{\text{III}}$	0.892	0.960	1.026
	$K_{\text{sen},4}$	1.224	1.102	0.982
	$K_{\text{sen},3}$	0.826	0.773	0.730
自适应过电流保护	$J_{\text{set},4}^{\text{III}}$	0.401	0.449	0.508
	$J_{\text{set},3}^{\text{III}}$	0.594	0.640	0.684
	$K_{\text{sen},4}$	1.837	1.654	1.474
	$K_{\text{sen},3}$	1.240	1.201	1.165

对比其整定值及灵敏度, 传统过电流保护整定值较大, 灵敏度较低, 对 E 母线上的最小运行方式下相间故障, 保护 4 作为本线路近后备, 其灵敏度 $K_{\text{sen},4} < 1.5$, 保护 3 作为相邻线路远后备, 其灵敏度不仅无法满足 $K_{\text{sen},3} \geq 1.2$ 的灵敏度要求, 甚至出现 $K_{\text{sen},3} < 1.0$ 的拒动可能, 因此, 均无法满足灵敏度要求。而本文所提出的自适应过电流保护原理, 其保护整定值相对较低, 提高了过电流保护的灵敏度, 同样是 E 母线上的最小运行方式下相间故障, 保护 4 和保护 3, 分别作为本线路近后备和相邻线路远后备, 其灵敏度分别满足或接近满足 $K'_{\text{sen},4} \geq 1.5$ 和 $K'_{\text{sen},3} \geq 1.2$ 的保护要求, 明显提高了过电流保护的灵敏性和可靠性。

3.2.2 负荷自启动过程整定值

当线路外部发生 k1 点故障, 其保护 5 动作切除故障后, 在三种运行方式下, 线路 CD、DE 流过负荷自启动电流, 保护 3 和保护 4 的自启动过程和正常运行方式整定值如表 4 所示。由表 4 可知, 本文所提自适应过电流保护, 正常运行时所调用的低值整定值, 可提高保护灵敏度, 但可能无法躲过线路负荷自启动电流, 本保护方法在判定发生自启动过程时, 短时调用高值整定值, 可有效地躲过负荷自启动电流, 避免保护装置误动, 大大提高了保护装

置的可靠性。

表 4 自启动电流与整定值
Table 4 Load-starting current and setting value

		10 MVA	12 MVA	15 MVA
自启动	I_{DE}	0.472	0.532	0.610
电流	I_{CD}	0.738	0.791	0.841
自启动过程	$I_{set,4}^{III}$	0.602	0.674	0.762
整定值	$I_{set,3}^{III}$	0.892	0.960	1.026
正常运行	$I_{set,4}^{III}$	0.401	0.449	0.508
整定值	$I_{set,3}^{III}$	0.594	0.640	0.684

4 结论

本文提出了一种基于电流突变量的自适应过电流保护新原理。该过电流保护在正常运行时,根据负荷电流计算并采用一套自适应过电流保护整定值,该整定值不计入负荷自启动系数,以提高保护的灵敏度,当线路发生短路故障时,该保护根据故障发生前后、到故障切除、保护返回过程中保护安装处电流的两次突变量的不同特征,构成负荷自启动判据,实现负荷自启动过程的自动识别,保护根据故障前负荷电流和自启动系数,计算一套自适应过电流保护整定值,并在负荷自启动过程中短时调用,避免保护误动、加快保护返回、防止多发性故障发生。该定值在自启动过程结束后退出,保护重新调用正常运行整定值。

仿真结果表明,该原理与其他自适应电流速断保护配合,能够应用于各种条件的配电网环境,尤其是有分布式电源接入的较重负荷配电网。在外部故障发生并正确切除后,该保护原理能准确识别负荷自启动过程,短时调用自适应高值整定值,避免保护误动,保证了保护可靠性。在本线路或下级线路故障、该自适应过电流保护作为后备或远后备保护动作时,该保护因采用低值整定值而具有较高灵敏度,对于运行方式复杂且变化较大的有分布式电源接入配电网,可大大提高后备保护的灵敏性,同时能够有效提高保护的可靠性。

参考文献

- [1] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [2] 张润坤, 王宝华. 含低电压穿越型光伏电源配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 137-142.

- ZHANG Runkun, WANG Baohua. An adaptive positive-sequence current instantaneous trip protection for distribution network with PV. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 137-142.
- [3] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [4] 周劭, 张波, 刘日亮, 等. 基于数据驱动的线路保护定值自适应整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 50-56.
ZHOU Meng, ZHANG Bo, LIU Riliang, et al. An adaptive adjustment method of line protection setting based on data-driven. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 50-56.
- [5] 陈彦翔, 黄景光, 丁婧. 微电网自适应电流保护原理完善及其新算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 22-27.
CHEN Yanxiang, HUANG Jingguang, DING Jing. Improvement of micro grid adaptive current protection principle and research on its new algorithm. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 22-27.
- [6] 郭煜华, 范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 14-20.
GUO Yuhua, FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 14-20.
- [7] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [8] 杨利水, 杨旭, 徐岩. 基于多 Agent 技术的自适应过电流保护的研究[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(6): 34-38.
YANG Lishui, YANG Xu, XU Yan. Research on adaptive overcurrent protection based on multi-agent[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(6): 34-38.
- [9] 王刚, 侯飞. 限时过电流继电器动作逻辑的优化改进[J]. 贵州电力技术, 2016, 19(3): 38-39, 58.
WANG Gang, HOU Fei. Optimized improvement for the action logic for the time limit current overloaded relay[J].

- Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(3): 38-39, 58.
- [10] 邓超平, 唐志军, 张曦. 一种新型的微网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 38-43.
DENG Chaoping, TANG Zhijun, ZHANG Xi, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 38-43.
- [11] 贾清泉, 孙玲玲, 王美娟, 等. 基于节点搜索的微电网自适应保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1650-1657.
JIA Qingquan, SUN Lingling, WANG Meijuan, et al. An adaptive protection method for micro-grid based on node searching[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1650-1657.
- [12] 王鹤, 刘宇超, 李国庆, 等. 接入 MMC-HVDC 的交流系统线路自适应距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 7-13.
WANG He, LIU Yuchao, LI Guoqing, et al. Adaptive distance protection of AC system in the presence of modular multilevel converter based HVDC. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 7-13.
- [13] 孙孜平, 卢克刚, 高春如, 等. 高压电动机综合保护整定计算的探讨[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 48-52.
SUN Ziping, LU Kegang, GAO Chunru, et al. Setting principle of integrated protection for high voltage motor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 48-52.
- [14] 余琼, 余胜, 李晓晖. 含分布式电源的配网自适应保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 110-115.
YU Qiong, YU Sheng, LI Xiaohui. An adaptive protection scheme for meshed distribution system with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 110-115.
- [15] 马静, 王希, 米超, 等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 204-208.
MA Jing, WANG Xi, MI Chao, et al. A new adaptive protection approach for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 204-208.
- [16] 周宁, 雷响, 荆晓睿, 等. 一种含高渗透率分布式电源配电网自适应过电流保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 24-31.
ZHOU Ning, LEI Xiang, JING Xiaorui, et al. Adaptive over-current protection scheme for distribution network with high penetration rate of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 24-31.
- [17] 陈波, 钱文妹. 电网重要线路继电保护定值失配点推移方法研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 17-20.
CHEN Bo, QIAN Wenshu. Research and application of mismatch points transfer method for relay protection setting values of important transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 17-20.
- [18] 赵春雷, 孙利强, 高翔, 等. 基于源端数据维护机制的保护智能运维技术探讨[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 78-83.
ZHAO Chunlei, SUN Liqiang, GAO Xiang, et al. Discussions on smart maintenance technology of smart substations based on source data maintenance[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 78-83.
- [19] 张红洁, 董祖晨, 何晓明, 等. 含光伏电源配电网中新型反时限欠电压保护方案的研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 6-10, 34.
ZHANG Hongjie, DONG Zuchen, HE Xiaoming, et al. Novel inverse-time under-voltage protection for distribution network with photovoltaic power system. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 6-10, 34.
- [20] 魏占朋, 彭妮娜. 双馈风电机组短路电流特性分析[J]. 陕西电力, 2016, 44(6): 18-21.
WEI Zhanpeng, PENG Nina. Short circuit Current Analysis of DFIG[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(6): 18-21.

收稿日期: 2017-03-15; 修回日期: 2018-01-17

作者简介:

黄景光(1968—), 男, 副教授, 研究方向为信号分析和电力系统继电保护研究; E-mail: 258926016@qq.com

丁婧(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 503673557@qq.com

郑淑文(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 张爱琴)