

基于拓扑结构变化的配电网自适应保护方法

刘 刚^{1,2}, 朱 林³, 祁升龙¹, 刘海涛¹, 李旭涛^{1,2}

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750001; 2. 宁夏电力能源科技有限公司, 宁夏 银川 750001;
3. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘 要: 输配电网经常需要通过短时改变拓扑结构来实现故障处理, 但保护装置的动作范围受拓扑变化的影响。在此背景下, 首先, 提出一种基于拓扑结构变化的输配电网自适应保护方法, 在拓扑变化的情况下实现保护装置的最佳配置; 然后, 在传统自适应保护方法的基础上提出一种节点开关拓扑变化追踪技术, 该技术主要根据系统结构变化, 自适应改变拓扑结构, 进而改变拓扑矩阵, 自适应修改系统保护参数; 最后对所提出的方法进行实例分析, 并与传统的自适应保护方法进行比较。结果表明所提方法提高了自适应保护的整定范围和电力系统的保护能力。

关 键 词: 输配电网; 拓扑结构; 自适应保护; 矩阵

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.013 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2022)01-0106-06

Adaptive protection method for distribution networks based on the dynamic topology

LIU Gang^{1,2}, ZHU Lin³, QI Shenglong¹, LIU Haitao¹, LI xutao^{1,2}

(1. State Grid Ningxia Electric Power Technical Research Institute, Yinchuan 750001, China; 2. Ningxia Electric Power Energy Technology Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 3. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: The topology of distribution networks can be instantly modified to handle faults, but the operation ranges of the protection devices will be affected. In this paper, an adaptive protection method for distribution networks based on the dynamic topology is proposed to realize the optimal configuration of protection devices under different topologies. A dynamic topology tracking technology of node switch is built based on the traditional adaptive protection method. According to the system structure changes, this technology also amends the topology adaptively. During this step, the topology matrix is modified, and the system protection parameters are updated adaptively. Finally, the proposed method is compared with the traditional method in a test case. The results show that the proposed method improves the setting range of adaptive protection and the protection performance.

Key words: distributed transmission network; topology; adaptive protection; matrix

随着输配电网结构复杂化发展趋势, 对电力系统供电要求不断提高。当电力系统发生故障时, 需

要对输配电网电压、电流以及其相关分量(正序分量、负序分量以及零序分量等)进行分析和判断。但

在分析的过程中,由于缺少对电力系统进行统一判定,越来越多的研究者逐步对自适应保护方法研究。自适应保护研究主要是解决判据不统一的问题,进而提高电力系统的故障处理能力^[1-2]。自适应保护方法能够根据被保护系统的结构变化自动调整保护参数,具有更高的适应性和更广范围的系统保护。自适应保护方法能够对电力系统结构变化进行保护,这对提高电力系统运行可靠性起着至关重要的作用。

对于自适应保护的研究主要在 2 个方面,分别是自适应保护方法的优化研究和自适应保护方法的应用研究。自适应保护方法优化研究主要是弥补传统自适应方法不能满足日益发展的电力系统的缺陷。在电力系统的不断发展的同时,对于电力系统的保护要求也不断提高,传统自适应保护方法不能满足复杂化的电力系统。目前,对于自适应优化研究比较广泛,主要以智能算法和机器学习为主。文献[3]提出一种基于 APFPFA 算法优化自适应方法,并应用于微电网孤岛检测研究;文献[4-5]提出采用 Hansdorff 算法对自适应方法进行优化,并应用于输电线路的母线保护和差动保护;文献[6-7]为了提高自适应方法的适应度和准确性,采用智能算法和机器学习的方法对自适应方法进行优化,进而得到更好的自适应结果。此外,还有部分学者采用其它方法对自适应方法进行优化研究,文献[8]采用自动修复技术对自适应进行优化,用于降低输电网恢复时对分布式电源的影响;文献[9]基于顺序决策技术提出一种环境自适应保护方法;文献[10]基于自组织映射聚类方法,提出一种电力系统自适应协调方法。另外一方面,主要是对自适应方法的应用研究,例如自适应方法应用于电力系统各种设备的保护,文献[11]将自适应方法运用于混合多端直流快速重合闸,提高电力系统的供电能力;文献[12-13]提出将自适应方法运用于高压直流系统的接地故障;文献[14]为了提高差动保护灵敏度,采用自适应方法进行计算和整定。另有部分研究者将自适应方法用于变换器的断路器测试电流检测^[15]、电源设

计中断路器限流^[16]、光伏出现继电保护^[17]、零序电流保护^[18]、继电器过流保护^[19]、能量管理器保护^[20]和微输配电网保护^[21]等研究。然而以上对于自适应保护方法的研究,只是单纯的考虑方法自身缺陷和传统保护存在的问题,没有对电力系统发生故障发生原因进行研究和分析,例如输配电网结构改变情况下电力系统参数的变化。不能及时的根据电力系统结构的变化及时调整保护参数优化和应用不能精确的表征电力系统,将导致电力系统保护装置拒动或误动,影响供电可靠性。

本文基于节点开关追踪技术,提出一种基于拓扑结构变化的输配电网自适应保护方法。该自适应方法采用追踪电力系统拓扑结构,根据拓扑结构的变化自适应调整保护整定参数,重新对电力系统进行保护动作。根据拓扑结构的变化,实时优化系统的保护参数,能够保证此时系统最优的保护动作参数。实时追踪电力系统结构的变化,解决了目前保护方法存在的保护局限性。提高电力系统继电保护的准确度,进而提高电力系统运行稳定性。

1 保护模型研究

1.1 保护整定模型研究

为了简化研究,此处对电力系统瞬时电流速断保护、带限时电流速断保护和过电流保护三种保护进行讨论。按照继电保护原理,保护设计需要躲过三相短路电流。

1) 瞬时电流速断保护。三相短路最大运行方式下短路阻抗、短路电流计算为

$$\begin{aligned} X_{3S} &= X_{\min} + X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \\ \{I_{d\max} &= I_d / X_{3S} \\ [I_{OP} &= K_3 I_{k\max} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 X_{3S} 为三相短路阻抗; $X_1 \sim X_4$ 为线路的阻抗; $I_{d\max}$ 为短路点最大短路电流; $I_{k\max}$ 为系统最大短路电流; I_{OP} 为线路末端整定的电流; K_3 为保护整定的可靠系数。保护整定线路长度为

$$L = \frac{\sqrt{3}}{2K_3} \left(1 + \frac{Z_{s\min}}{Z}\right) - \frac{Z_{s\max}}{Z} \quad (2)$$

式中 Z_{smax} 和 Z_{smin} 分别为最小运行方式下和最大运行方式下的等值阻抗; Z 为被保护线路的长度。

2)待限时电流速断保护。按照躲过变压器低压侧母线短路计算:

$$\begin{cases} X_d = X_{min} + X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \\ I_{dmax} = I_d / X_d \\ I_{OP} = K_3 I_{dmax} \end{cases} \quad (3)$$

式中 X_d 为三相短路阻抗。

3)过电流保护。按照躲过最大负荷电流计算:

$$\begin{cases} I_{wmax} = P / (\sqrt{3} U \cos \phi) \\ I_{OP} = K_3 I_{wmax} / K_f \end{cases} \quad (4)$$

式中 P 为最大负载功率; U 为线路系统电压值; I_{wmax} 为系统最大短路电流; K_f 为保护整定的可靠系数。

1.2 节点—开关拓扑追踪技术

电力系统正常稳定运行时,其表现出稳定的拓扑结构。当电力系统需要正常的切入切出和发生故障时,电力系统结构将发生变化,导致系统拓扑矩阵发生改变。基于自适应保护方法,要提高电力系统保护的准确性,需要实时的追踪电力系统拓扑结构变化,及时修改拓扑结构,进而自适应修改保护参数,最大范围的对电力系统进行保护。

本文基于节点—开关,提出一种自适应拓扑结构追踪技术。拓扑结构主要基于拓扑图进行构建,由节点和边组成。其中系统中的节点定义为 N ,在电力系统结构发生变化的过程中,主要以开关的开关为主要表征。因此以系统开关状态矩阵来表示系统拓扑结构,为方便研究,设定开关元件在 t 时刻的向量为 $\mathbf{B}(s(t))$,同时设定系统的节点为 i ,开关为 j ,则系统节点与开关状态矩阵为 \mathbf{M} 。定义节点 i 和开关 j 之间有联系,则系统矩阵对应为 1,如果没有联系,则对应为 0。对于节点在开关矩阵 \mathbf{M} 中有以下关系:

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (5)$$

为了更进一步解释拓扑矩阵,设定某系统接线方式如图 1 所示,则得到的系统拓扑结构矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

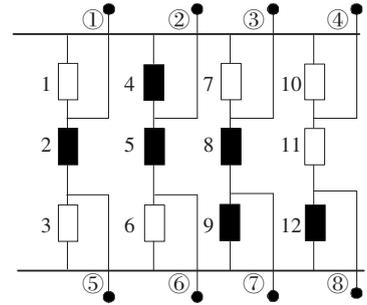


图 1 节点开关接线

Figure 1 Node switch wiring diagram

设定在 t 时刻对于向量满足: $\mathbf{B}(s(t)) = [0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1]$, 经过运算,得到 t 时刻的节点开关矩阵为

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

如果此时的电力系统发生动作,导致其拓扑结构发生变化。相应的节点和开关状态随之改变,使电力系统拓扑矩阵发生变化。因此需要对电力系统

拓扑结构进行实时追踪,追踪的原则是针对于开关断路器包含闭合和断开 2 种方式,当断路器闭合时,系统拓扑结构变化需要遵行以下原则。

1)断路器闭合时,如果所处系统中该断路器两端在系统中属于同一个等值节点,当闭合此断路器时,不会对系统结构发生变化。因此在拓扑追踪的过程中,不需要改变拓扑结构矩阵。

2)断路器闭合时,如果断路器两端的节点不是系统的同一节点,意味着这 2 个节点之间是通过其它设备进行连接。当系统需要闭合此断路器时,需要改变此时的拓扑结构矩阵,2 个节点将结合为 1 个节点,导致矩阵大小变化。

3)如果断路器两端的节点不是系统的同一节点,同时这 2 个节点之间也不是通过出开端设备以外的设备进行连接。当系统需要闭合此断路器时,需要改变此时的拓扑结构矩阵,引起多个节点合并,矩阵变化增大。

断路器断开也会影响系统的拓扑结构矩阵,影响主要有 3 种情况:节点无分裂;部分节点分裂,但没有导致系统解列;系统已经解列。

1.3 优化自适应保护

本文提出一种基于拓扑结构变化追踪技术优化自适应保护方法,该方法首先对原始系统进行遍历,形成初始节点开关拓扑结构矩阵。在电力系统运行的过程中,实时对拓扑结构进行追踪,并判断拓扑结构中节点或系统是否发生变化。当遍历结构没有发生时,则继续追踪,反之则更新拓扑结构矩阵,进而改变阻抗参数值。阻抗值发生改变后,需要对系统参数重新进行更新,同时对系统的保护进行整定计算,整定计算的结果与系统保护参数值进行对比,判断此时保护装置是否需要动作,不需要则重新追踪,需要动作则保护动作,具体的流程如图 2 所示。

假定此时输配电网系统由于倒闸操作,需要断开 X_4 部分线路,因此需要断开 X_4 部分断路器开关。再次模拟发生接地短路故障,此时系统结构等效阻抗矩阵发生变化。按照图 3 优化自适应保护方法和文 2.1 节部分的瞬时速断保护整定计算。假定

系统倒闸操作造成阻抗 X_4 部分阻抗被切出,即 $X_4=0$ 。此时,需要重新对输配电网系统的短路电流进行整定。系统结构改变之后,系统的短路电流整定计算为

$$I'_d = K_1 \frac{K_2 E}{Z' + Z'_B} \quad (8)$$

式中 I'_d 为系统改变后短路故障发生时电力系统保护装置点做电流; K_1 为电力系统运行的可靠系数; Z' 为系统改变后的等值阻抗; Z'_B 为该电力系统保护装置电流保护线路阻抗值; K_2 为故障类型的系数,根据电力系统不同的短路故障,系数值选择不同。

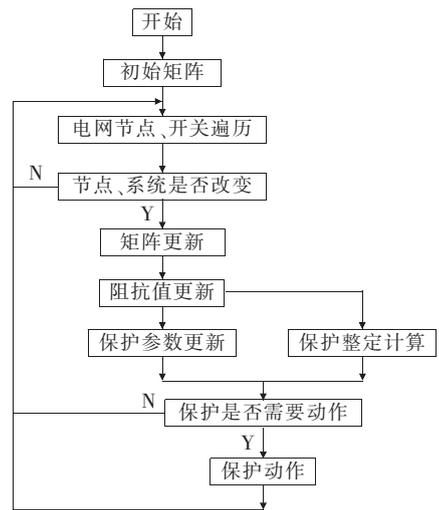


图 2 优化自适应流程

Figure 2 Optimization flows of the adaption

在不改变输配电网其它参数的前提下,对三相短路最大运行方式下短路阻抗、短路电流重新计算:

$$\begin{cases} X'_{3S} = X_{\min} + X'_1 + X'_2 + X'_3 \\ \{ I'_{d\max} = I_d / X'_{3S} \\ [I'_{OP} = K_3 I'_{k\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中 X'_{3S} 为系统结构改变之后三相短路阻抗; $X'_1 \sim X'_3$ 为系统结构改变之后线路的阻抗; $I'_{d\max}$ 为系统结构改变之后短路点最大短路电流; $I'_{k\max}$ 为系统结构改变之后系统最大短路电流; I'_{OP} 为线路末端整定的电流; K_3 取值为 1.2。

保护整定线路长度为

$$L' = \frac{\sqrt{3}}{2K_3} \left(1 + \frac{Z'_{\min}}{Z'} \right) - \frac{Z'_{\max}}{Z'} \quad (10)$$

式中 Z'_{\max} 、 Z'_{\min} 分别为系统结构改变之后最小运

行方式下和最大运行方式下的等值阻抗; Z' 为系统结构改变之后被保护线路的阻抗。由于篇幅原因,此处不再对系统发生变化后的另外 2 种保护整定计算进行列举。

2 仿真分析

本文主要对一般的拓扑结构发生改变进行研究,大角度模拟电网拓扑结构变化,研究电网拓扑结构发生变化后采用所提方法进行优化。在后续的研究中,将根据不同类型的拓扑结构变化进行分别研究,研究所提方法在不同类型的拓扑结构变化的适应性。

2.1 拓扑追踪仿真分析

为了验证节点开关拓扑结构追踪效果,在图 2 的基础上增大系统结构,图 1 的结构为 10 节点 12 开关拓扑结构。为了更好的模拟实际电网的复杂性,对节点开关拓扑结构图进行扩增,扩大为 30 节点,如图 3 所示。图 3 中,(1,3,5,8,10,11,16,17,19,22,23,25,26,30,32,34)所示的开关为闭合开关,剩余开关均为断开开关。

对于开关 1,其对应的拓扑矩阵中,节点 1、30 为关系节点。首先改变其中 8 号开关状态,由断开变为闭合。为了排除检测的偶然性,提高准确率,试验分析进行 5 次检测,并对检测结果求取平均值,检测结果如表 1 所示。

从 1 到 35 依次增加改变开关状态个数,并且每一次仿真计算 5 次后求取平均值,检测结果如图 4 所示。由图 4 可知,当改变的开关数少于 5 个时,检测准确率为 100%,当增加改变数时,准确率缓慢下降。但是在同时改变 15 个状态之前准确率较高,而且电网同时出现大量开关变化的概率较低,因此该方法能较好追踪电网结构变化。

表 1 开关检测结果

Table 1 Switch test results

次数	准确率/%	次数	准确率/%
1	100	4	100
2	100	5	100
3	100		

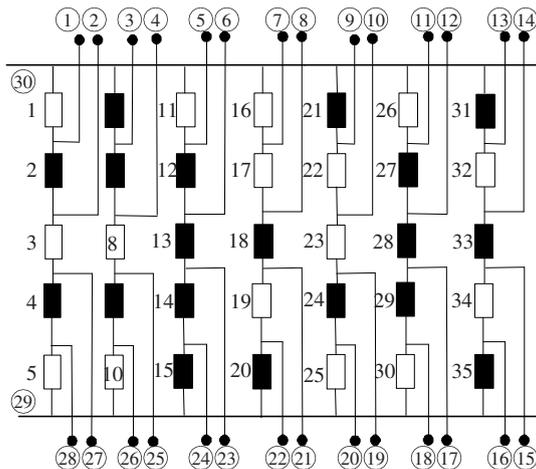


图 3 仿真模拟拓扑

Figure 3 Topology of simulation system

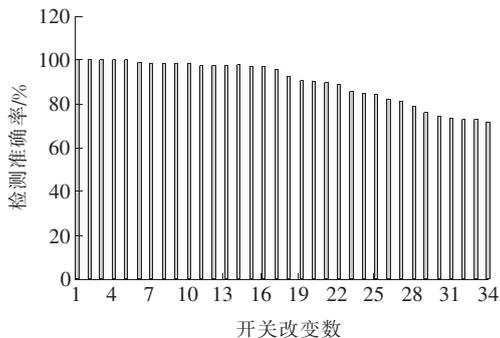


图 4 开关状态检测结果

Figure 4 Switch state detection results

2.2 优化自适应保护仿真分析

本文采用 IEEE 39 节点系统模拟电力系统,通过改变 IEEE 节点信息模拟电力系统正常切换,IEEE 39 节点系统如图 5 所示。

由图 5 可知,IEEE 39 节点共包含 10 个发电机节点,29 个负荷节点。在发电机节点中,其中 31 号

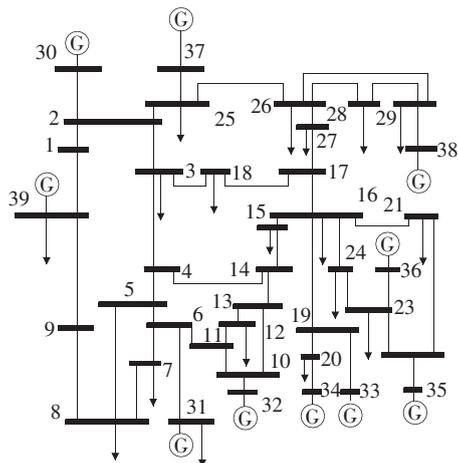


图 5 IEEE 39 节点

Figure 5 IEEE-39 node diagram

节点为平衡节点。在负荷节点中,其中包含了 12 个联络节点。在 IEEE 39 节点系统中,分别在线路 15、16 设置三相短路和两相短路故障,对于继电保护整定计算模型如图 6 所示。

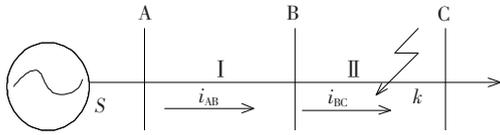


图 6 保护整定结构

Figure 6 Protection setting structure

模拟电压等级为 35 kV,最大负荷过电流为 600 A。电流速断保护系数取值为 1.2,带限时电流保护系数 I 段和 II 段,分别取值 1.1 和 1.2。对于过电流保护,整定系数和返回系数分别取值 1.1 和 0.9。本文所提方法与传统自适应方法进行对比,对文 3.1 节中电流速断、带限时电流和过电流保护 3 种保护方式进行范围求取,对比结果如表 2~4。

表 2 电流速断保护

Table 2 Instantaneous overcurrent protection

方法	最大运行方式		最小运行方式	
	三相短路	两相短路	三相短路	两相短路
传统	$0.8I_k$	$0.5I_k$	$0.3I_k$	$0.2I_k$
本文	$0.8I_k$	$0.8I_k$	$0.8I_k$	$0.8I_k$

表 3 带限时电流保护

Table 3 Time limited current protection

方法	最大运行方式		最小运行方式	
	三相短路	两相短路	三相短路	两相短路
传统	$1.49I_k$	$1.21I_k$	$1.08I_k$	$0.81I_k$
本文	$1.49I_k$	$1.49I_k$	$1.25I_k$	$1.25I_k$

表 4 过电流保护

Table 4 Overcurrent protection

方法	最大运行方式		最小运行方式	
	三相短路	两相短路	三相短路	两相短路
传统	$0.68I_k$	$0.44I_k$	$0.38I_k$	$0.27I_k$
本文	$0.68I_k$	$0.68I_k$	$0.55I_k$	$0.55I_k$

由表 2~4 可知,相对于传统的自适应保护方法,本文所提的基于拓扑结构变化的自适应保护方法在电流速断、带限时电流和过电流保护 3 种保护方式上具有更大的保护范围,保护效果更佳。

3 结语

本文提出一种基于拓扑结构变化的自适应保护

方法,研究和分析了传统自适应保护方法的原理及其存在缺陷。并基于传统自适应保护方法提出一种系统拓扑结构结构追踪技术,在拓扑结构的基础上进一步分析拓扑阻抗矩阵。并通过拓扑追踪技术仿真和保护保护范围整定仿真,分别整定计算了在电流速断、带限时电流和过电流保护三种保护方式上的保护范围,研究表明所提方法相对于传统自适应保护防护具有更大的保护范围,所提方法对电力系统保护效果更好。

参考文献:

- [1] KHALID H, SHOBOLE A, Existing developments in adaptive smart grid protection: a review[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191(3): 106901.
- [2] BARRA P H A, COURRY D V, FERNANDES R A S. A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 118: 109524.
- [3] 王金芹, 贺柱, 张建华, 等. 多配电网线路并发合环电压差计算方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 8-13. WANG Jinqin, HE Zhu, ZHANG Jianhua, Study on the calculation method of concurrent closed loop voltage difference for multiple distribution network lines[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 8-13.
- [4] 戎子睿, 金能, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离的自适应母线保护新原理[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 312-321. RONG Zirui, JIN Neng, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of adaptive busbar protection based on Hausdorff distance algorithm[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 312-321.
- [5] 沈培锋, 王徐延, 张昊亮, 等. 考虑规模化快充负荷的低电压互联配台区风险评估[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 56-64. SHEN Peifeng, WANG Xuyan, ZHANG Haoliang, et al. Risk assessment of low-voltage interconnected distribution districts considering large-scale fast charging load [J]. Electric Power, 2021, 54(5): 56-64.
- [6] AKDAG O, YEROGLU C. Optimal directional overcurrent relay coordination using MRFO algorithm: a case study of adaptive protection of the distribution network of the Hatay province of Turkey [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 192: 106998.
- [7] MARÍN-QUINTERO J, OROZCO-HENAO C, PERCYBROOKS W S, et al. Toward an adaptive protection scheme in active distribution networks: Intelligent ap-

- proach fault detector [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 98:106839.
- [8] SAMPAIO F C, LEÃO R P S, SAMPAIO R F, et al. A multi-agent-based integrated self-healing and adaptive protection system for power distribution systems with distributed generation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 188:106525.
- [9] CUI Q S, WENG Y. An environment-adaptive protection scheme with long-term reward for distribution networks[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 124:106350.
- [10] GHADIRI S M E, MAZLUMI K. Adaptive protection scheme for microgrids based on SOM clustering technique[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 88:106062.
- [11] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(11):3873-3885.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Application research on fast line protection and adaptive restarting methods for multi-terminal hybrid LCC/MMC HVDC transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(11):3873-3885.
- [12] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(11):3548-3557.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(11):3548-3557.
- [13] 王开科, 熊小伏, 肖扬, 欧阳金鑫. 基于负序电流的主动配电网单相断线故障保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(6):10-18.
WANG Kaike, XIONG Xiaofu, XIAO Yang, OUYANG Jinxin. Single-phase break fault protection method for an active distribution network based on negative sequence current [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6):10-18.
- [14] 高岩, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于电流幅值比的有源输电网自适应差动保护原理[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(2):1-7.
GAO Yan, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Adaptive Differential protection principle for active distribution network based on current amplitude ratio[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(2):1-7.
- [15] 游颖敏, 王景芹, 舒亮, 等. 断路器保护特性测试电流的自适应控制策略[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(15):3203-3213.
- YU Yingmin, WANG Jingqin, SHU Liang, et al. Research on adaptive current control method in circuit breaker protection characteristic test[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(15):3203-3213.
- [16] 李斌, 王晨阳, 何佳伟, 等. 自适应限流型固态断路器的直流电源设计[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(5):30-37.
LI Bin, WANG Chenyang, HE Jiawei, et al. Design of DC power supply for self-adaptive current-limiting solid-state circuit breaker [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(05):30-37.
- [17] 明潇宇, 吕飞鹏, 余晓, 等. 含 T 接逆变型分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(11):74-79.
MING Xiaoyu, LV Feipeng, YU Xiao, et al. Pilot protection scheme for distribution network with T-connected inverter interfaced distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(11):74-79.
- [18] 曾德辉, 王钢, 李海峰, 等. 小电阻接地配电网多回线故障分析与自适应零序电流保护[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5):45-52.
ZENG Dehui, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault analysis of multi-feeder grounding fault and self-adaptive zero-sequence current protection scheme for low-resistance grounding distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5):45-52.
- [19] 董凯达, 蔡燕春, 金震. 小电阻接地配电网零序保护的改进研究[J]. *供用电*, 2020, 37(6):48-52+65.
DONG Kaida, CAI Yanchun, JIN Zhen. The research on the improvement of the zero-sequence relay for the low resistance grounded distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(6):48-52+65.
- [20] NÚÑEZ-MATA O, PALMA-BEHNKE R, VALENCIA F, et al. Coupling an adaptive protection system with an energy management system for microgrids [J]. *The Electricity Journal*, 2019, 32(10):106675.
- [21] Swathika O V G, Angalaeswari S, Krishnan V A, et al. Fuzzy decision and graph algorithms aided adaptive protection of microgrid[J]. *Energy Procedia*, 2017, 117:1078-1084.
- [22] 湛江波, 陈碧云, 王楚通. 含超导元件的配电网继电保护方案研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(8):84-90.
CHEN Jiangbo, CHEN Biyun, WANG Chutong. Distribution grid relay protection scheme with superconducting device[J]. *Smart Power*, 2020, 48(8):84-90.