# 计及拓扑结构变化的分布式自适应电流保护方法

武 岳<sup>1</sup>,范开俊<sup>1</sup>,徐丙垠<sup>1,2</sup>,陈 羽<sup>1</sup>,王 玮<sup>1</sup>,曹金铭<sup>1</sup> (1. 山东理工大学 电气与电子工程学院 智能电网研究院,山东 淄博 255000; 2. 山东科汇电力自动化股份有限公司,山东 淄博 255000)

摘要:针对配电网络重构、线路拓扑关系发生变化导致保护误动或拒动的问题,提出一种自适应电流保护方法,该方法由智能终端实时获取配电线路的拓扑关系,自适应调整保护定值,实现自适应保护和故障自愈功能。该方法可减少配置维护工作量,提高配电网的可靠性。为了实现互操作性,建立了基于IEC 61850标准的分布式自适应电流保护相关的逻辑节点,构建了分布式自适应电流保护应用的信息模型,以期能为现场应用提供一定的参考。

**关键词:**配电网;分布式电流保护;自适应保护;故障自愈;信息模型 中图分类号:TM77 **文献标志码**:A

DOI:10.16081/j.epae.202304024

#### 0 引言

配电网直接面向用户,其运行状态的好坏直接 影响着供电质量的好坏<sup>[1]</sup>。配电网是智能电网的重 要组成部分,智能配电网最重要的特征是具有完备 的故障自愈功能,最大限度地减小配电网故障对用 户的影响<sup>[2]</sup>。然而,配电网进行负荷投切、故障隔 离、供电恢复等操作会导致配电网的动态拓扑变化 频繁<sup>[34]</sup>。传统的配电网保护方案在配电线路重构、 拓扑关系发生变化时,原有的整定参数可能无法保 证保护正确动作<sup>[5]</sup>,如果不及时进行故障处理,则会 导致故障区域扩大、停电时间延长等问题。分布式 电源(distributed energy resource, DER)的接入进一 步增加了拓扑结构和运行方式的复杂性,使得配电 网由传统的单电源辐射网络变为具有多端电源结构 的配电网络,短路电流的方向和大小都会受到影响, 可能会造成保护拒动或误动<sup>[67]</sup>。

配电网继电保护与自动化是实现配电网故障自 愈的重要手段。合理的保护配置方案可以最小化故 障影响范围,与之相配合的配电自动化措施可以加 快配电网的故障处理速度,进一步提高供电可靠 性<sup>[89]</sup>。就减少用户的停电时间而言,配电自动化是 配电网继电保护的补充与延伸,因此,从提高用户供 电质量出发,首先应该完善配电网的保护<sup>[10]</sup>。

目前,国内外学者对配电网的保护开展了大量的研究。文献[11]利用故障前、后被保护线路两侧 电流正序分量的幅值之差,构成制动量和动作量,提 出了一种新型电流幅值差动保护判据。文献[12]针

收稿日期:2022-08-11;修回日期:2023-04-10 在线出版日期:2023-05-04 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077221) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077221) 对不同类型的DER 对传统保护的影响,提出了一种 基于有偿系数的新型差动保护,实现对有源配电网 的自适应保护。文献[13]针对系统不同运行条件, 提出了一种多级协同的自适应过电流主保护方案, 其整定值由计算得到的短路电流自适应确定。文献 [14]将自适应电流瞬时保护和自适应电压瞬时保护 相结合,有效地解决了配电网线路保护灵敏度低的 问题。文献[15]提出了一种基于改进动态时间弯曲 距离算法的线路纵联保护方案,有效降低同步误差 对纵联保护的影响。文献[16]提出一种基于光学电 流互感器的有源配电网相差保护方案,与传统的纵 联差动保护相比,有效地解决了其通信通道和数据 同步问题。文献[17]提出了在保护元件中设置2套 保护方案,对左右两侧线路进行保护整定的保护配 置方法,但未考虑供电恢复后其他保护元件负荷电 流的变化,不是完全自适应保护。文献[18-19]基于 IEC 61850构建了分布式故障定位、故障隔离和供 电恢复的配电自动化信息模型,未与配电网保护相 结合。当配电线路拓扑连接关系发生变化时,原有 保护的整定参数可能无法正确动作,现有文献尚未 对这一问题开展针对性的研究。

本文针对配电网重构、线路拓扑关系发生变化 使传统保护可能拒动或误动的问题,提出了一种分 布式自适应电流保护方案,该方案可以根据智能终 端(smart terminal unit,STU)自动获取的实时拓扑 信息和最大负荷电流,调整保护定值,实现配电网的 自适应电流保护功能;然后考虑配电系统点多面广 的特点,为实现大量不同生产厂家配电终端的互操 作性,建立了基于IEC 61850的分布式自适应电流 保护信息模型,给出了分布式自适应电流保护的拓 扑识别模型;接着基于IEC 61850标准建立了分布 式电流保护相关的逻辑节点;最后通过算例分析验 证所提方法的有效性。

#### 1 分布式自适应电流保护

#### 1.1 定时限三段式电流保护分析

传统的配电网定时限三段式电流保护通常利用 动作时间的配合来保证保护动作的选择性,保护的 配合需要知道其上下级关系,而实际的配电线路由 于负荷转移等操作可能会使得上下级关系发生变 化。以"手拉手"环网配电线路为例,系统正常运行 时以联络开关为界,位于同一侧的各个分段断路器 之间有固定的上下级关系。然而当某一侧电源退出 或故障隔离、对非故障区段进行恢复供电后,其线路 拓扑结构以及负荷电流会发生变化,可能导致传统 的配电网电流保护误动或拒动。

典型"手拉手"环网配电线路如图1所示。图 中:CB<sub>1</sub>和CB<sub>0</sub>为电源出口断路器;CB<sub>3</sub>、CB<sub>4</sub>、CB<sub>6</sub>、CB<sub>8</sub> 为分段断路器;CB,为DER并网断路器;CB,为分支 线断路器;CB,为联络开关。此时,若点F,发生故 障,则由CB<sub>3</sub>与CB<sub>4</sub>进行故障隔离,若电源B的备用 容量裕度大于待转供的负荷容量,则联络开关CB, 闭合,非故障区段CB<sub>4</sub>-CB<sub>7</sub>改为由电源B进行供电, CB。成为CB<sub>5</sub>、CB<sub>4</sub>的上游开关,其断路器开关的上下 级拓扑关系发生了变化,配电网络发生了重构。以 CB。为例,在系统正常运行时,CB1、CB3和CB4是CB6的 上游开关,按照传统的保护配合方法进行整定,以保 证保护的选择性。在线路发生重构后,CB<sub>6</sub>的上级变 为CB<sub>7</sub>-CB<sub>9</sub>,其原来的保护整定配合将不再适用, 需要手动或者由主站参与调整相应的保护定值,导 致实时性差。此外,在对非故障区段进行供电恢复 后,CB<sub>1</sub>和区段CB<sub>6</sub>-CB<sub>6</sub>的负荷电流都会发生变化。

利用 PSCAD 搭建如图 1 所示的环网配电线路 仿真模型。选取配电网电压等级为 10 kV,主干线 各节点间线路的长度为 2 km,分支线线路长度为 1 km,分别在馈线 1 和馈线 2 干线上接入负荷 LD<sub>1</sub> — LD<sub>3</sub>和 LD<sub>4</sub>、LD<sub>5</sub>,在 CB<sub>5</sub>所在的分支线上接入负荷 LD<sub>6</sub>,所有负荷的容量均为 1 MV·A,配电网线路参 数如下:正序电阻  $R_1$ =0.125  $\Omega$  / km、正序电感  $L_1$ = 0.3 mH / km、正序电容  $C_1$ =0.0096  $\mu$ F / km、零序电阻  $R_0$ =0.275 Ω / km、零序电感  $L_0$ =4.6 mH / km、零序电 容  $C_0$ =0.0054 µF / km。以流过断路器 CB<sub>1</sub>和 CB<sub>8</sub>的 电流为例,当系统正常开环运行时,流过 CB<sub>1</sub>的电流 为0.45 kA,流过 CB<sub>8</sub>的电流为0.1 kA,在点  $F_1$ 发生故 障,故障隔离以及非故障区段恢复供电后,流过 CB<sub>1</sub> 的电流变为 0.24 kA,流过 CB<sub>8</sub>的电流变为 0.25 kA。 若不进行保护整定值的改变,则将影响线路保护的 正确动作。

可见,配电线路拓扑关系和负荷电流的变化给 传统的配电网保护带来整定困难的问题,必须提出 新的解决方案。

#### 1.2 分布式自适应电流保护原理

分布式自适应电流保护基于对等通信网络,在 系统发生故障保护起动后,由监控开关的相应STU 自行采集、处理当地站点以及其他相关站点的测量 和控制信息,相邻保护装置之间交换故障检测信息, 从而判断故障是否发生在本保护区内,实现有选择 性的快速跳闸,解决了传统配电网保护因多级配合 而导致整定困难和动作时间长的问题。

图1所示的配电线路非闭环运行时,只有一侧 电源供电,中间保护(位于主干线电源出口保护下 级,线路末端保护上级,如分段断路器CB<sub>3</sub>,CB<sub>4</sub>,其 闭锁条件为接收下游保护的起动信号)起动后,延时  $- \uparrow \Delta t$ ,如果中间保护没有收到下游保护的起动信 号,则可以判定故障位于该侧电气区段<sup>[20]</sup>,起动信号 和超过分布式自适应电流保护整定值的动作信号组 成"与"门,结果为真时保护动作于跳闸。首端保护 装置(如电源出口断路器CB<sub>1</sub>)的闭锁条件为接收到 下级保护装置的起动信号;线路末端保护装置(如 CB<sub>5</sub>,CB<sub>4</sub>)检测到发生故障后,直接动作于跳闸。若 故障发生在DER并网接入点所在的线路,则需要跳 开DER并网断路器,使DER脱网;若在DER接入点 相邻的线路发生故障,根据GB/T 33593-2017《分 布式电源并网技术要求》,光伏电站并网点电压降至 0时,光伏发电站应能不脱网连续运行 $0.15 s^{[21]}$ 。

在系统发生故障进行故障隔离和非故障区段供 电恢复后,分布式自适应电流保护利用STU之间的



Fig.1 Schematic diagram of typical hand in hand ring network distribution lines

信息交互以及实时动态拓扑的识别,重新确定各开 关上下级拓扑关系,STU自主调整所订阅的数据流 信息,并由STU根据各保护安装处的最大负荷电流 值,进行保护整定值的自适应调整。

为了提高保护装置的可靠性,避免因系统干扰 导致保护误动,在分布式自适应电流保护中配置故 障起动元件。配电系统中,故障分量作为配电网保 护的输入量具有灵敏度高、响应速度快的优点,受过 渡电阻的影响小。因此,分布式自适应电流保护的 起动元件可采用故障分量算法<sup>[22]</sup>,起动判据如式(1) 所示。

$$\Delta I_{\varphi} \ge K_{\rm e} I_{\rm e} \tag{1}$$

$$\Delta I_{\varphi} = \left| \left| i(k) - i(k-N) \right| - \left| i(k-N) - i(k-2N) \right| \right| \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为相别, $\varphi$ =A,B,C; $\Delta I_{\varphi}$ 为 $\varphi$ 相电流的起动量; i(k)为电流在时刻k的采样值;N为1个工频周期的 采样点数; $K_{e}$ 为起动系数,取0.2~0.3; $I_{e}$ 为额定电流。

STU通过实时拓扑识别确定线路保护的上下级 连接关系,为了提高保护的灵敏度,分布式电流保护 的整定值可按照最大负荷电流进行整定,如式(3) 所示。

$$I_{\text{set}} \ge \frac{K_{\text{rel}} K_{\text{MS}}}{K_{\text{re}}} I_{\text{Lmax}}$$
(3)

式中: $I_{set}$ 为分布式自适应电流保护整定值; $I_{Lmax}$ 为最 大负荷电流; $K_{rel}$ 为可靠系数,取1.25~1.5; $K_{MS}$ 为自起 动系数, $K_{MS}$ >1,具体数值由网络具体接线和负荷 性质确定; $K_{re}$ 为电流继电器的返回系数,一般取 0.85~0.95<sup>[23]</sup>。

以中间保护装置为例,分布式自适应电流保护 的动作流程图如图2所示。



图 2 中间保护动作流程图 Fig.2 Flowchart of intermediate protection action

STU<sub>4</sub>收到 STU<sub>3</sub>故障切除的信息后,控制 CB<sub>4</sub>跳 闸进行故障隔离。故障隔离后,经过预设的重合闸 等待时间后,首先由系统侧的 CB<sub>3</sub>合闸,若故障为瞬 时性故障,则重合闸成功,STU<sub>3</sub>向 STU<sub>4</sub>发送"重合闸 成功"信号,STU<sub>4</sub>控制 CB<sub>4</sub>进行重合闸,线路恢复供 电;若故障为永久性故障,则 CB<sub>3</sub>再次跳开,STU<sub>3</sub>向 STU<sub>4</sub>发送"重合闸失败"信号,CB<sub>4</sub>不再重合。故障 隔离后 STU<sub>7</sub>与 STU<sub>4</sub>、STU<sub>9</sub>进行通信,STU<sub>7</sub>收到故障 隔离完成的信息后,若电源 B 的备用容量大于待恢 复供电的下游负荷总容量,则控制联络开关 CB<sub>7</sub>闭 合,对故障点下游非故障区段进行供电恢复(此处不 考虑备用容量不足的情况)。在供电恢复之后,因 CB<sub>5</sub>-CB<sub>7</sub>由电源 A 供电变为电源 B 供电,其拓扑结 构发生变化,需进行自主拓扑识别。供电恢复后的 线路结构示意图如附录A 图 A1 所示。

以监控CB,的STU,为例,STU,首先查询相邻终 端STU<sub>4</sub>和STU<sub>6</sub>,获取其本地拓扑信息以及下一级相 邻终端的通信地址,由于STU<sub>4</sub>的本地开关为断开状 态,该侧拓扑查询结束。STU。继续向STU,进行拓扑 查询,以此类推,直至查询到出线开关CB。的监控终 端STU。,确定其线路重构后的开关上下级拓扑关系 为STU<sub>5</sub>-STU<sub>6</sub>-STU<sub>7</sub>-STU<sub>8</sub>-STU<sub>9</sub>,相关STU重新订阅新 的数据流信息。以监控CB<sub>6</sub>的STU<sub>6</sub>为例,在系统正 常运行时,CB,、CB,和CB,是CB,的上游开关,STU,订 阅STU<sub>3</sub>、STU<sub>4</sub>和STU<sub>6</sub>的数据流信息;CB<sub>9</sub>是CB<sub>8</sub>的上 游开关,STU。订阅STU。的数据流信息。系统故障隔 离、供电恢复之后,STU。将根据拓扑识别的结果,重 新确定拓扑关系,STU。将订阅STU。一STU。的数据流 信息,STU。将订阅STU。和STU,的数据流信息。STU 重新订阅数据流信息后,根据最大负荷电流进行保 护整定。

#### 1.3 仿真分析

利用PSCAD搭建如图1所示的环网配电线路仿 真模型,选取配电网电压等级为10kV,设置在0.8s 时发生故障,主干线各节点间线路的长度为2km, 分支线线路长度为1km,各馈线上负荷容量均为 1 MV·A,线路参数如附录A表A1所示。线路正常 运行时,联络开关CB,断开,线路各保护整定值如附 录A表A2所示。

1)当点 *F*<sub>1</sub>处发生 BC 相间短路故障时, CB<sub>1</sub>处的 电流波形如附录 A 图 A2 所示。表1为在点*F*<sub>1</sub>处发 生 BC 相间短路故障(BC)、BC 相接地故障(BCG)、三 相短路故障(ABC)时各保护元件检测到的故障电 流值。

由表1可知,当点F<sub>1</sub>处发生不同类型的故障时, 保护装置CB<sub>1</sub>和CB<sub>3</sub>对应的保护装置均能检测到故

#### 表1 不同故障类型下各保护装置处的故障电流

 

 Table 1
 Fault current at each protection device under different fault types

1	故障	故障电流 / kA						
	类型	$CB_1$	CB <sub>3</sub>	$CB_4$	$CB_6$	CB <sub>7</sub>	$CB_8$	CB <sub>9</sub>
	BC	1.65	1.57	0.09	0.01	_	0.08	0.15
	BCG	1.76	1.69	0.12	0	—	0.08	0.15
	ABC	1.89	1.82	0	0	—	0.08	0.15

障电流,电流大于其保护定值,CB<sub>4</sub>对应的保护装置 未检测到故障电流,电流小于其保护定值。因为 STU<sub>3</sub>接收不到下级保护的起动信号,故障定位在区 段CB<sub>3</sub>-CB<sub>4</sub>,判别结果正确,STU<sub>1</sub>控制本地保护闭锁, STU<sub>3</sub>控制CB<sub>3</sub>跳闸有选择性地切除故障。其余保护 装置处的电流均未越过各自的保护整定门槛值,非 故障区段可正常运行。当故障发生时,DER并网点 电压降至0.33 p.u.,若保护动作时间低于DER低电 压穿越的规定时间,则DER依旧可以并网运行。

2)在点 F<sub>1</sub>发生故障后,CB<sub>3</sub>、CB<sub>4</sub>跳闸,对故障区 段进行故障隔离;通过闭合联络开关CB<sub>7</sub>对非故障 区段进行恢复供电,因配电网线路拓扑结构发生变 化,STU需进行实时拓扑识别,重新确定各保护的上 下级拓扑关系,确定CB<sub>6</sub>和CB<sub>7</sub>为CB<sub>8</sub>的下游保护,并 根据最大负荷电流进行自适应电流保护整定。保护 装置CB<sub>6</sub>和CB<sub>9</sub>处的电流变化分别如附录A图A3和 A4所示。

通过仿真可知,在故障隔离、对非故障区段供电恢复后保护装置CB<sub>1</sub>的电流由正常运行时的0.45 kA 变为0.24 kA,CB<sub>6</sub>的电流由正常运行时的0.07 kA变 为0.13 kA,CB<sub>9</sub>的电流由正常运行时的0.16 kA变为 0.33 kA。根据分布式自适应电流保护整定原则,线 路结构改变前、后各保护装置的整定值如表2所示。

表2	各保护	装置整	定值
----	-----	-----	----

Table 2 Setting values of each protection device

线路结			東	を定值 / 1	kA		
构变化	CB <sub>1</sub>	CB <sub>3</sub>	$CB_4$	CB <sub>6</sub>	CB <sub>7</sub>	CB <sub>8</sub>	CB <sub>9</sub>
前	0.81	0.47	0.34	0.13	—	0.16	0.29
后	0.44	0	0	0.24	0.38	0.47	0.60

由上述分析可知,分布式自适应电流保护利用 本地电流信息及其STU存储的实时拓扑信息,即可 实现保护有选择性的快速动作,不需要主站的参与, 具有自具性。与传统的电流保护相比,分布式自适 应电流保护可以有选择性地快速切除故障,不需要 通过延时时间阶梯进行配合,减少了停电时间,缩小 了故障影响的停电范围;并能根据网络拓扑结构的 变化,进行实时拓扑识别,重新确定保护的上下级关 系,更新订阅的数据流信息,自主调整保护定值,有 效减少了传统电流保护因网络结构的变化使其保护 整定配合不当而造成拒动或误动问题。

#### 2 分布式自适应电流保护信息模型

#### 2.1 分布式自适应电流保护的建模需求

配电系统点多面广,为实现不同终端之间的互操作性,采用IEC 61850建立分布式自适应电流保护的信息模型。配电系统与变电站从层次结构到内容上差异都很大,因此,分布式自适应电流保护应用 IEC 61850建模时不能照搬现有的信息模型。

IEC 61850提供了距离保护逻辑节点 PDIS,其 适用于长距离、重负荷的线路,如果用于配电网线路 区段保护,则其动作可靠性较低。差动保护逻辑节 点 PDIF适用于 110 kV 及以上电压等级的系统,如果 用于中压配电网,则经济性较差,且不能满足后备保 护的需求。瞬时接地故障保护逻辑节点 PTEF 适用 于检测接地补偿网络中的接地故障。方向比较保护 逻辑节点 PDIR 在故障点周围故障传感器(如方向继 电器)提供的故障方向信号一致时,做出跳闸决策, 不适用于过电流保护。瞬时过电流保护逻辑节点 PIOC 和定时过电流保护逻辑节点 PTOC 作为传统的 三段式电流保护不能满足配电网拓扑结构、电流发 生变化的自适应保护。

因此,IEC 61850中没有可直接用于分布式自 适应电流保护的逻辑节点,需要根据分布式自适应 电流保护的信息交互过程,按照IEC 61850的信息 建模方法,构建相应的逻辑节点。

#### 2.2 分布式自适应电流保护信息建模

根据第1章对分布式自适应电流保护的分析, 分布式自适应电流保护主要可分为切除故障、拓扑 识别和保护定值调整3个环节。其中切除故障环节 可与配电自动化相融合,IEC 61850-90-6技术报告 中提供的故障指示器逻辑节点SFPI、故障定位逻辑 节点AFSL、故障隔离逻辑节点AFSI和供电恢复控 制逻辑节点ASRC可满足此部分要求。分布式自适 应电流保护建模需要的信息与已有逻辑节点的映射 关系见附录B表B1。

针对分布式自适应电流保护的其他相关应用需 求,可选择IEC 61850已有的逻辑节点,如孤岛管理 逻辑节点 DISL、架空线逻辑节点 ZLIN、电缆线逻辑 节点 ZCAB、跳闸输出逻辑节点 PTRC、信号输入 / 输 出逻辑节点 GGIO、电气测量逻辑节点 MMXU、断路器 逻辑节点 XCBR、投切开关控制逻辑节点 CSWI等。

对于拓扑识别和保护定值调整环节的应用需求,IEC 61850中还未提供相应的逻辑节点,需要扩展已有的逻辑节点或定义新的逻辑节点,这部分内容将在第3章中进行详细阐述。

STU在执行分布式自适应电流保护时需要建立 该STU与其他相关STU之间所需要的通信数据流连 接,因此,需要在STU中预先配置局部网络拓扑信息、其他相关STU的通信接口信息、功能和数据模型信息等。配电终端配置拓扑查询信息后,STU能够通过终端自主查询获取配电网络拓扑结构及其与逻辑节点关联的关系,订阅新的数据流,实现即插即用功能。以图1为例,当点F1处发生故障时,分布式自适应电流保护功能数据流时序图如附录B图B1 所示。

#### 3 分布式自适应电流保护的逻辑节点建模

当系统正常运行时,以联络开关为界,定义电流 的正方向为由电源指向负荷。可将断路器分为电源 出口断路器、主干线路分段断路器、联络开关、分支 线断路器和DER断路器。

目前IEC 61850-90-6已经提供了故障定位隔离 逻辑节点,还缺少针对线路拓扑关系发生变化时电 流整定值自适应变化的逻辑节点,因此需要新建拓 扑分析和自适应电流逻辑节点。文献[24]中新建了 拓扑功能的逻辑节点FTPA,但此逻辑节点未提供拓 扑识别之后的具体路径,因此,本文新建拓扑功能逻 辑节点FTAN,在供电恢复后,STU通过逻辑节点 FTAN进行实时拓扑路径分析,确定其上下级开关的 拓扑关系,各STU根据实时的拓扑关系重新订阅所 需要的数据流信息。以图1中STU<sub>6</sub>为例,在系统正 常运行时,STU<sub>4</sub>订阅STU<sub>6</sub>的故障指示、保护起动信 号、故障隔离、拓扑结构等信息;在系统故障隔离、供 电恢复后,STU<sub>7</sub>将根据拓扑识别的结果重新订阅 STU<sub>6</sub>的故障指示、保护起动信号、故障隔离、拓扑结 构等信息。

对于电源出口断路器、中间分段断路器和分支 线断路器,新建自适应电流保护逻辑节点PACP,在 对非故障区段恢复供电后,根据各保护安装处的最 大负荷电流值,进行自适应的保护整定值设定。

新建逻辑节点 FTAN、PACP的主要数据对象分别如表3和表4所示。表中:SeqRslRef 为数据对象 索引值,表示本逻辑节点需要订阅的来自其他逻辑 节点的数据对象索引,用于建立STU之间的数据流; M/O/C表示必选/可选/条件必选。

表3	逻辑节点FTAN的主要数据对象

Table 3 Main data objects of logical node FTAN

数据	对象名称	公共 数据类	解释说明	M / O / C
112- <del>1-</del>	Str	SPS	拓扑分析开始	0
状念 信 自	End	SPS	拓扑分析结束	М
旧心	PathName	ENS	拓扑路径	М
控制	OpCnRs	ING	可复位动作计数	0
	OpDlTmms	ING	动作延时时间	0
识宁	RsDlTmms	ING	复位延时时间	0
W/E	SeqRslRef	ORG	接收供电恢复完成信 号的数据对象索引	М

	表4	逻辑节点PACE	り的主要数据对象
--	----	----------	----------

Table 4 Main data objects of logical node PACP

数据对象名称		公共 数据类	解释说明	M / O / C
华太信百	SetProValStr	SPS	保护整定值设定起动	0
扒芯情息	SetProValEnd	SPS	保护整定值设定完成	Μ
测量和计量	ProSetVal	MV	保护整定值	Μ
控制	OpCntRs	ING	可复位动作计数	0
	RsSetVal	SPC	保护整定值的复位	0
	MinOpTmms	ING	最小动作时间	0
	MaxOpTmms	ING	最大动作时间	0
과사	OpDlTmms	ING	动作延时时间	0
汉正	RsDlTmms	ING	复位延时时间	0
	SeqRslRef	ORG	接收供电恢复完成 信号的数据对象索引	М

对于 DER 断路器,应用孤岛管理逻辑节点,接 收来自故障隔离的数据对象索引,在线路发生故障 后,断开 DER,防止形成非计划孤岛。以中间断路器 为例,其信息交互需求对逻辑节点的映射关系如附 录C图 C1 所示。

#### 4 算例分析

环式线路分布式自适应电流保护系统如图3所示。图中:CB<sub>1</sub>和CB<sub>13</sub>为电源出口断路器;CB<sub>3</sub>、CB<sub>5</sub>、 CB<sub>7</sub>、CB<sub>9</sub>、CB<sub>11</sub>为主干线路分段断路器;CB<sub>2</sub>、CB<sub>6</sub>和 CB<sub>12</sub>为分支线断路器;CB<sub>4</sub>、CB<sub>10</sub>为DER并网断路器; CB<sub>8</sub>为联络开关;各STU通过对等通信网络进行 通信。



图 3 环式线路分布式自适应电流保护系统 Fig.3 Ring line distributed self-adaptive current protection system

#### 4.1 点 F<sub>1</sub>发生故障

1)当故障发生在点 $F_1$ 时,STU<sub>1</sub>和STU<sub>3</sub>均检测到 故障信息,STU<sub>1</sub>和STU<sub>3</sub>保护起动,在预设的时间内 STU<sub>1</sub>接收到STU<sub>3</sub>的信号STU<sub>3</sub>SFPI.FltInd="TRUE", 闭锁本地的保护。STU<sub>3</sub>未接收到下游保护STU<sub>5</sub>的 起动信号,因此STU<sub>3</sub>确定故障区段为CB<sub>3</sub>-CB<sub>4</sub>-CB<sub>5</sub>。

2)STU<sub>3</sub>控制本地断路器开关 CB<sub>3</sub>动作于跳闸, 即STU<sub>3</sub>CSWI.Pos="FALSE",并起动本地的故障隔离 功能,即STU<sub>3</sub>AFSI.FltIsoInd 被设置为"TRUE"。STU<sub>4</sub> 订阅的数据流信息发生变化,则有 STU<sub>4</sub>DISL.InRef= "STU<sub>3</sub>AFSL.FltLocInd",起动反孤岛保护; STU<sub>5</sub>订阅 的数据流信息发生变化,则有 STU<sub>5</sub>AFSI.InRef= "STU<sub>3</sub>AFSL.FltLocInd",起动故障隔离功能。

3) 设置 STU<sub>4</sub>的数据对象 DISL.TxTr 为"TRUE" 后,将起动相应的 DER 并网断路器 CB<sub>4</sub>断开,即 STU<sub>4</sub>CSWI.Pos="FALSE",DER<sub>1</sub>脱网。

4) 设置 STU<sub>5</sub> 的数据对象 AFSI. FltIsoInd 为 "TRUE",控制其监控的CB,断开,STU,CSWI.Pos= "FALSE"。控制结果返校成功后,故障隔离动作完 成。故障隔离后,经过预设的重合闸等待时间后,首 先由系统侧的CB,合闸,若故障为瞬时性故障,则重 合闸成功, STU,向 STU,发送"重合闸成功"信号, STU,控制CB,进行重合闸,线路恢复供电;若故障为 永久性故障,则CB,再次跳开,STU,向STU,发送"重 合闸失败"信号,CB,不再重合。STU,根据故障前流 过CB、的负荷电流来获取需要供电恢复的负荷容 量,STU,通过面向通用对象的变电站事件(generic objective-orient substation event, GOOSE) 报文发布 故障隔离成功及故障前负荷电流信息,STU。接收到 此信息之后,向STU<sub>1</sub>请求备用容量信息,若电源B 可转供的容量大于待转供的负荷容量,则STU。控制 CB。合闸,进行供电恢复操作。

5) STU<sub>s</sub>起动供电恢复功能,其起动信号为 STU<sub>s</sub>ASRC.SeqStr="TRUE",控制断路器 CB<sub>s</sub>闭合, STU<sub>s</sub>CSWI.Pos="TRUE",恢复对故障点下游非故障 区段的供电。分布式自适应电流保护线路开关采用 断路器,因此在故障隔离后,对故障点上游的非故障 区段没有影响,不需要对故障点上游进行供电恢复, 控制结果返校成功后,供电恢复完成。

6) STU<sub>6</sub>和 STU<sub>7</sub>收到下游供电恢复的消息后, 开始进行实时拓扑识别, STU<sub>6</sub>FTAN.Str="TRUE"、 STU<sub>7</sub>FTAN.Str="TRUE",获得的拓扑路径 PathName= "CB<sub>6</sub>-CB<sub>7</sub>-CB<sub>8</sub>-CB<sub>9</sub>-CB<sub>11</sub>-CB<sub>13</sub>"。STU<sub>13</sub>将重新订阅 STU<sub>7</sub>—STU<sub>9</sub>和 STU<sub>11</sub>的数据流信息, STU<sub>11</sub>将重新订 阅 STU<sub>7</sub>—STU<sub>9</sub>的数据流信息, STU<sub>9</sub>将重新订阅 STU<sub>7</sub>和 STU<sub>8</sub>的数据流信息, STU<sub>8</sub>将订阅 STU<sub>7</sub>的数据 流信息。

7)STU<sub>8</sub>将故障点下游非故障区段供电已恢复的消息通过GOOSE报文发布。STU<sub>1</sub>、STU<sub>2</sub>、STU<sub>6</sub>— STU<sub>9</sub>、STU<sub>11</sub>—STU<sub>13</sub>的数据对象PACP.SetProValStr= "TURE",并根据配电线路重构后的最大负荷电流, 通过预先配置的整定原则进行自适应电流保护定值 的整定,整定值修订之后,STU<sub>1</sub>、STU<sub>2</sub>、STU<sub>6</sub>—STU<sub>9</sub>、 STU<sub>11</sub>和 STU<sub>13</sub>的数据对象 PACP.SetProValEnd 被置 为"TRUE"。

分布式自适应电流保护的数据流连接示意图如 附录C图C2所示。

#### 4.2 点 F<sub>2</sub>发生故障

1)当故障发生在点 $F_2$ 时,STU<sub>1</sub>和STU<sub>2</sub>均检测到 故障信号,STU<sub>1</sub>和STU<sub>2</sub>保护起动,STU<sub>1</sub>接收到STU<sub>2</sub> 的信号STU<sub>2</sub>SFPI.FltInd="TRUE",故闭锁本地的 保护。

2)由于STU<sub>2</sub>是分支线末端保护,所以控制本地 开关 CB<sub>2</sub> 直接跳开切除故障,即 STU<sub>2</sub>CSWI.Pos= "FALSE"。

3)STU<sub>2</sub>经GOOSE 报文发布故障切除消息;STU<sub>1</sub>、 STU<sub>3</sub>、STU<sub>5</sub>和STU<sub>7</sub>的数据对象PACP.SetProValStr= "TURE",进行负荷电流的检测,并根据预先配置的 整定原则进行自适应电流保护的整定。整定值完成 改变后,STU<sub>1</sub>、STU<sub>3</sub>、STU<sub>5</sub>和STU<sub>7</sub>的数据对象PACP. SetProValEnd 被置为"TRUE"。

### 5 结论

配电网保护是保证供电质量的第一道防线,配 电网继电保护与配电自动化是实现故障自愈的重要 手段,配电网保护与自动化设备融合是提高配电系 统供电可靠性和电能质量的必然趋势。

本文提出了一种可适应配电线路拓扑变化的分 布式自适应电流保护方法,利用本地电流信息以及 线路的拓扑关系,对线路进行快速故障定位、隔离以 及非故障区的供电恢复,该方法利用STU自主识别 拓扑,自适应调整保护定值,不依赖于主站配置,具 有自具性,可减少配置维护工作量,实现配电线路的 故障自愈。针对配电网重构、配电线路拓扑关系发 生变化的情况,新建拓扑分析逻辑节点FTAN和自 适应电流保护逻辑节点PACP,通过算例分析验证了 该方法的可行性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1]常诚.智能配电网自愈技术研究与应用[D].北京:华北电力 大学,2017.

CHANG Cheng. Research and application of self-healing technology in intelligent distribution network[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.

- [2] 李振坤,赵向阳,朱兰,等.智能配电网故障后自愈能力评估
  [J]. 电网技术,2018,42(3):789-796.
  LI Zhenkun,ZHAO Xiangyang,ZHU Lan, et al. Evaluation of self-healing ability for smart distribution network after failure
  [J]. Power System Technology,2018,42(3):789-796.
- [3] 陈晓龙,李永丽,孙景钌. 基于状态量信息的含分布式电源配 电网保护新方案[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):135-

139,154.

CHEN Xiaolong, LI Yongli, SUN Jingliao. Novel protection scheme based on status information for distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38 (12):135-139, 154.

- [4] 丛伟,盛亚如,咸国富,等.基于智能配电终端的分布式供电恢 复方法[J].电力系统自动化,2018,42(15):77-85.
   CONG Wei,SHENG Yaru,XIAN Guofu, et al. Distributed power service restoration method based on smart terminal unit [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(15):77-85.
- [5]别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展 与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2744.
  BIE Zhaohong, LIN Zhaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(9):2735-2744.
- [6] 谭会征,李永丽,陈晓龙,等.带低电压穿越特性的逆变型分布 式电源对配电网短路电流的影响[J].电力自动化设备,2015, 35(8):31-37,52.

TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ridethrough capability on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37, 52.

- [7] 吴悦华,高厚磊,徐彬,等. 有源配电网分布式故障自愈方案与 实现[J]. 电力系统自动化,2019,43(9):140-146.
  WU Yuehua, GAO Houlei, XU Bin, et al. Distributed fault self-healing scheme and its implementation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9):140-146.
- [8] 徐丙垠,薛永端,李天友,等.智能配电网广域测控系统及其保 护控制应用技术[J].电力系统自动化,2012,36(18):2-9.
   XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control applications[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):2-9.
- [9]范开俊.智能配电网分布式控制技术及其应用[D].济南:山东大学,2016.
   FAN Kaijun. Distributed control technologies and its applica-

tion in smart distribution network[D]. Jinan:Shandong University, 2016.

- [10] 徐丙垠,李天友,薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北 京:中国电力出版社,2017:99-104.
- [11] 张雪松,马啸,章雷其,等. 有源配电网含不可测分支线路新型
   电流幅值差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):
   76-81.
   ZHANG Xuesong, MA Xiao, ZHANG Leiqi, et al. Novel cur-

ZHANG Auesong, MA Aiao, ZHANG Leiqi, et al. Novel current amplitude differential protection criterion for line with unmeasurable branch in active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2):76-81.

- [12] 梁营玉,卢正杰. 基于补偿系数的有源配电网自适应电流差动 保护[J]. 电网技术,2022,46(6):2268-2275.
  LIANG Yingyu, LU Zhengjie. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network[J]. Power System Technology,2022,46(6):2268-2275.
- [13] SHEN Shaofei, LIN Da, WANG Huifang, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized thevenin equivalent parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2017,32(1):411-419.

[14] LI Juan, HE Jinghan, ZHANG Hao, et al. Research on adap-

tive protection based on integrated protection[C]//2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Beijing, China; IEEE, 2011;848-852.

[15] 冉启胜,张哲,韩杰祥,等. 基于改进动态时间弯曲距离算法的 直流配电网线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备,2022,42 (12):157-164.

RAN Qisheng, ZHANG Zhe, HAN Jiexiang, et al. Pilot protection scheme for DC distribution network based on improved dynamic time warping distance algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12):157-164.

- [16] 刘世明,赵永森,王波,等.基于光学电流互感器的有源配电网相差保护方案[J].电力系统自动化,2022,46(22):173-181.
  LIU Shiming, ZHAO Yongsen, WANG Bo, et al. Phase differential protection scheme of active distribution network based on optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22):173-181.
- [17] 邹贵彬,高厚磊,许春华,等. 馈线自动化自适应快速保护控制 方案[J]. 电网技术,2013,37(10):2920-2925.
  ZOU Guibin, GAO Houlei, XU Chunhua, et al. A fast adaptive protection and control scheme for feeder automation [J].
  Power System Technology,2013,37(10):2920-2925.
- [18] 朱正谊,徐丙垠,YIP Tony,等. IEC 61850应用于分布式馈线 自动化系统的模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(23):148-154.
   ZHU Zhengyi,XU Bingyin,YIP Tony, et al. IEC 61850 based models for distributed feeder automation system. Automation of Electric Power Systems,2018,42(23):148-154.
- [19] YIP T, XU Bingyin, ZHU Zhengyi, et al. Application of IEC 61850 for distribution network automation with distributed control[J]. The Journal of Engineering, 2018(15):993-996
- [20] 范开俊,徐丙垠,董俊,等.基于智能终端逐级查询的馈线拓扑 识别方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):180-186.
  FAN Kaijun, XU Bingyin, DONG Jun, et al. Identification method for feeder topology based on successive polling of smart terminal unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):180-186.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.分 布式电源并网技术要求:GB/T 33593-2017[S].北京:中国 标准出版社,2017.
- [22] 唐志军,邹贵彬,高厚磊,等.含分布式电源的智能配电网保护 控制方案[J].电力系统保护与控制,2014,42(8):9-14.
  TANG Zhijun,ZOU Guibin,GAO Houlei, et al. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource[J]. Power System Protection and Control,2014,42(8): 9-14.
- [23] 贺家李,李永丽,董新洲,等. 电力系统继电保护原理[M]. 北 京:中国电力出版社,2018:40-42.
- [24] GE Haotian, XU Bingyin, ZHANG Xinhui, et al. Feeder topology configuration and application based on IEC 61850 [J]. Energies, 2021, 14(14):4230.

#### 作者简介:

武 岳(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电 网保护与自动化(E-mail; wuyue\_1118@163.com);

范开俊(1985—), 女, 讲师, 博士, 通信作者, 主要研究方 向为配电网保护与自动化(E-mail: cathrine\_fan@126.com);

徐丙垠(1961—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要 研究方向为智能配电网、配电网自动化、电力系统故障检测 (E-mail:xuby@vip.163.com)。

(编辑 任思思)

(下转第80页 continued on page 80)

56

## Charging path guidance of electric vehicles at photovoltaic-storage charging stations based on dynamic energy and geographic information fusion

YANG Youwei, XU Chunmei, PENG Daogang, XING Lei

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The traveling behavior and charging behavior of electric vehicles (EVs) not only affect the operation law of transportation system, but also change the spatial and temporal distribution of energy network load. Therefore, considering the characteristics of the photovoltaic-storage-charging integrated system and combined with the dynamic information of large-scale EVs, regional road network, distribution network and photovoltaic-storage charging stations, a refined EV-station-road-network dynamic fusion model is constructed. On this basis, a multi-objective optimization function is constructed from three perspectives of users, traffic network and power grid, which includes the travel time, the traffic congestion and the power grid stability. Aiming at the high complexity of the current model, the LPA\* path planning algorithm is improved by using the hierarchical programming and bidirectional search, so as to realize the charging path guidance under dynamic environment. Taking a regional road network in a city as an example, the simulative results show that compared with the existing strategies, the proposed charging path guidance strategy can well solve the problems caused by EV charging, such as local road congestion, uneven consumption of regional photovoltaicstorage energy, and so on.

**Key words**: electric vehicles; photovoltaic-storage charging station; geographic information system; energy network; charging path guidance; hierarchical programming

(上接第56页 continued from page 56)

#### Distributed self-adaptive current protection method considering topological changes

WU Yue<sup>1</sup>, FAN Kaijun<sup>1</sup>, XU Bingyin<sup>1,2</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, CAO Jinming<sup>1</sup>

(1. Smart Grid Research Institute, College of Electrical and Electronic Engineering,

Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Kehui Electric Automation Co., Ltd., Zibo 255000, China)

**Abstract**: Aiming at the misoperation or rejection of protection caused by the reconstruction of distribution network and change of line topological, a self-adaptive current protection method is proposed, which is based on the smart terminal units acquiring the topological relationship of distribution lines in real time and adaptively adjusting the protection settings to achieve adaptive protection and fault self-healing functions. It can reduce the configuration and maintenance workload and improve the reliability of the distribution network. In order to achieve interoperability, the logical nodes related to distributed adaptive current protection based on IEC 61850 standard are established, and the information model of distributed adaptive current protection application is constructed, which is expected to provide some reference for field applications.

Key words: distribution network; distributed current protection; self-adaptive protection; fault self-healing; information model

## 附录 A



Fig.A1 Schematic diagram of line structure after power supply restoration

表A	1 仿	真模	型线	路参	数
				_	

TableA1	Line parameters	of simulation	model

$R_0 / (\Omega \cdot \mathrm{km}^{-1})$	$C_0 / (\mu F \cdot km^{-1})$	$L_0 / (\mathrm{mH} \cdot \mathrm{km}^{-1})$	$R_1 / (\Omega \cdot \mathrm{km}^{-1})$	$C_1 / (\mu \mathbf{F} \cdot \mathbf{km}^{-1})$	$L_1 / (\mathrm{mH} \cdot \mathrm{km}^{-1})$
0.2750	0.0054	4.6000	0.1250	0.0096	1.3000

表 A2 各保护装置整定值

TableA2	Setting value of each protection device				
保护	整定值/kA	保护	整定值/kA		
$CB_1$	0.81	CB <sub>7</sub>	_		
CB <sub>3</sub>	0.47	CB <sub>8</sub>	0.16		
$CB_4$	0.34	CB <sub>9</sub>	0.29		
$CB_6$	0.13				



Fig.A2 Current waveform of CB1



附录 B

#### 表 B1 分布式自适应电流保护的通信数据需求和逻辑节点映射

TableB1 Communication data requirements and logical nodes mapping for distributed adaptive current protection

通信数据	逻辑节点映射	通信服务	传输时间[A1]
故障指示信号	IEC 61850-90-6 现有逻辑节点 SFPI	GOOSE over UDP	≤10ms
故障区段定位	IEC 61860-90-6 现有逻辑节点 AFSL	GOOSE over UDP	≤10ms
线路保护跳闸信号	IEC 61850-7-4 现有逻辑节点 PTRC	GOOSE over UDP	≤10ms
DER 的孤岛状态指示	IEC 61860-90-6 现有逻辑节点 DISL	GOOSE over UDP	≤20ms
DER 并网断路器跳闸信 号	IEC 61860-90-6 现有逻辑节点 DISM	GOOSE over UDP	≤10ms
故障隔离信号	IEC 61860-90-6 现有逻辑节点 AFSI	GOOSE over UDP	≤10ms
供电恢复控制	IEC 61860-90-6 现有逻辑节点 ASRC	GOOSE over UDP	$\leqslant$ 5s
拓扑结构分析	需新建逻辑节点	GOOSE over UDP	≤100ms
电流测量	IEC 61850-7-4 现有逻辑节点 TCTR, MMXU	-	-
自适应调整保护整定值	需新建逻辑节点	GOOSE over UDP	≤100ms



Fig.B1 Timing-sequence diagram of distributed self-adaptive current protection data flow

[A1]国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.配电自动化智能终端技术规范:GB/T 35732-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

## 附录 C



Fig.C1 Mapping relationships of intermediate circuit breaker information interaction requirements to LN



Fig.C2 Logical nodes and data flow connections of distributed self-adaptive current protection