

引用格式:邓祥力,葛慧宁,廖玥琳,等.基于多源数据交互的高渗透率主动配电网保护策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):101-111.

Citation: DENG Xiangli, GE Huining, LIAO Yuelin, et al. Active distribution network protection strategy based on multi-source data interaction under high permeability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 101-111.

基于多源数据交互的高渗透率主动配电网保护策略

邓祥力¹, 葛慧宁¹, 廖玥琳¹, 胡绪超², 林光涛³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海正泰自动化软件系统有限公司, 上海 201600;

3. 衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324002)

摘要:主动配电网中分布式电源渗透率逐步提高情况下,由于传统过电流保护的整定值预先设定,使得灵敏度降低,保护配合出现困难。为此,首先分析故障下不同类型分布式电源控制策略特点,并研究分布式电源出力、控制方式、并网点电压与故障电流之间的关系;然后,根据故障电流与电压的关系,在对主动配电网运行信息的多源数据融合方式进行研究后,提出在线自适应整定的电流保护策略;对分布式电源并网点增多且渗透率进一步提高下,改进后保护的灵敏度降低问题,利用采集的电压信息、节点导纳信息进行故障电流匹配计算以实现故障区段搜寻,为识别并切除线路故障提供依据;最后,通过PSCAD/EMTDC仿真结合MATLAB编程验证方案的有效性。

关键词:分布式电源;故障输出特性;多源数据;自适应保护优化;故障电流匹配

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.012 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2024)02-0101-11

Active distribution network protection strategy based on multi-source data interaction under high permeability

DENG Xiangli¹, GE Huining¹, LIAO Yuelin¹, HU Xuchao², LIN Guangtao³

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Zhengtai Automation Software System Co., Ltd., Shanghai 201600, China; 3. School of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 324002, China)

Abstract: With the permeability increase of distributed power supply in active distribution network, the sensitivity is reduced and the coordination of protection is difficult due to the preset setting value of traditional over-current protection. Firstly, the characteristics of different control strategy types of distributed power supply are analyzed, and relationships among the output power, control mode, grid-connected voltage and fault current of distributed power supply are studied. Secondly, multi-source data fusion of active distribution network operation information is achieved according to the relationship between fault current and voltage, and an on-line adaptive setting strategy for current protection is then proposed. Aiming at the sensitivity reduction problem of the improved protection strategy due to the increase of grid-connected points and the further permeability of distributed power supply, the fault current matching calculation is carried out to realize the fault section searching by using the collected voltage and node admittance information. Finally, the effectiveness of the presented scheme is verified by PSCAD/EMTDC simulation combined with MATLAB programming.

Key words: distributed power supply; fault output characteristics; multi-source data; adaptive protection optimization; fault current matching

能源的日益枯竭及环保意识的不断增强给分布式发电(distributed generation, DG)提供了广阔的

发展空间^[1-2]。由于DG输出功率具有较强的随机性和不确定性,给主动配网保护的整定配合带来挑

收稿日期:2022-11-14;修回日期:2023-06-07

基金项目:国家自然科学基金(51777119)

通信作者:邓祥力(1973—),男,博士,副教授,主要从事超高压、特高压电网的继电保护、电力系统元件保护、参数辨识在电力系统中的应用以及电力系统智能调度等研究;E-mail:1964865285@qq.com

战^[3],因此,研究适用于主动配网系统的保护策略对配电网的稳定运行有重要意义。

在 DG 渗透率不断提高的情况下,GB/T 33593—2017 标准对 DG 的低电压穿越能力(low voltage ride through capability,LVRT)提出了要求。文献[4]提出的电流控制与电压恢复器相结合的协调控制策略,以及文献[5]提出的基于虚拟电抗的控制策略,增强了分布式电源的故障穿越能力。由于配网故障边界条件受到这些控制策略的影响^[6-8],对称分量法不再适用于含 DG 的配网故障电流计算,因此,文献[9]对主动配电网的故障分析方法及故障电流特性进行了研究;文献[10]提出基于叠加原理的正序分量故障电流计算方法,为 DG 并网下故障电流计算及保护整定提供了理论依据。但以上研究忽略了不同 LVRT 控制方案可能对 DG 故障输出的影响。

针对 DG 并网引起的保护不正确动作问题,文献[11]研究了基于正序分量的电流速断保护方案;文献[12]验证了利用迭代计算的电流速断保护方法的正确性。但电流速断保护无法保护线路全长,且 DG 渗透率较高情况下保护配合出现困难和灵敏度不满足要求的问题也未解决。影响主动配电网故障电流的因素较多,文献[13-14]根据各因素的时变特性提出分时段自适应过流保护,但未用公式具体表示 DG 故障输出与各影响因素之间的关系;为了充分利用量测信息以提高保护性能,文献[15-18]追踪拓扑变化情况,为保护整定计算提供了实时数据;文献[19]采用改进的基于 Wasserstein 生成式对抗网络(Wasserstein generative adversarial network,WGAN)对缺失数据与异常数据进行修正,弥补了测量数据异常影响保护调整策略这一空缺,但并未详细介绍数据的来源。

在以上研究中,不论是研究分时段过流保护,或是研究追踪拓扑结构变化为保护整定提供故障网络信息,还是研究作为保护计算基础的数据缺失及重构算法,都离不开对配电网运行信息的采集。可见在 DG 渗透率逐渐提高的当下,利用广域信息进行保护整定计算前景愈发广阔^[20]。同时,对于 DG 渗透率过高、并网点较多的配网,利用量测数据进行故障定位研究也有十分重要的意义。文献[21-22]利用同步相量测量(phasor measurement unit,PMU)量测的电气信息,结合配电网节点导纳信息进行迭代计算,从而实现故障定位。而 PMU

量测数据虽在精度及实时性方面占优势,但其价格昂贵,全网装设将导致经济性较低^[23-24]。采用包括数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition,SCADA)等测量装置在内的混合量测数据,可实现保护整定计算,满足配电网切除故障的需求,同时提高经济性。

基于以上因素,本文首先研究 DG 故障输出与控制方式、故障前出力及并网点电压的关系;然后,集成并处理多源数据交互下配电网运行信息,根据故障电流与电压的关系,调整电流保护实时系数以实现电流保护定值自适应调整,提高保护灵敏度。针对 DG 渗透率进一步提高、电流保护灵敏度不满足要求问题,进一步提出基于故障电流匹配的故障定位方法,在保护失去作用时,为识别并切除线路故障提供依据。

1 分布式电源故障输出分析

电网短路故障后,新能源场站根据并网点电压跌落深浅,结合不同 DG 电源特点选择不同 LVRT 方案,确保故障状态下维持 DG 不脱网运行且提供无功支撑,减小电压骤降对逆变器的影响。

1.1 逆变器控制策略

正常运行工况下并网 DG 采用双闭环控制。外环为功率控制环,有功功率 P_{ref} 为功率跟踪模块的最大功率(maximum power point tracking,MPPT),无功功率 Q_{ref} 设置为 0;内环为电流环,实时跟踪电流的瞬态变化,获得高精度稳态输出。锁相环(phase-locked loop,PLL)跟踪电网电压同步信息,追踪电网实时角速度 ω ,保证逆变器及电网保持同步。 E_d 、 E_q 分别为网侧三相电压经 dq 变换后的 d 、 q 轴分量,设置 d 轴与并网点相电压矢量重合,利用实际输出的电流跟踪外环生成的参考电流,最终输出参考电压。通过控制 dq 轴电流,即可实现控制 DG 输出有功和无功功率。

故障下参考电流为由功率外环生成的电流转变为与并网点正序电压及额定参考值相关的函数。LVRT 控制策略如图 1 所示,将电网电压及负载电流引入电流内环,实际输出的电流跟踪参考电流,分别通过控制 d 、 q 轴电流,实现控制输出无功功率,达到对电网无功支撑的目的。故障后过渡到稳态过程中,逆变器输出受系统各元件、控制器 PI 参数影响,故障电流先不断变化,直至到达控制稳态阶段输出恒定故障电流。

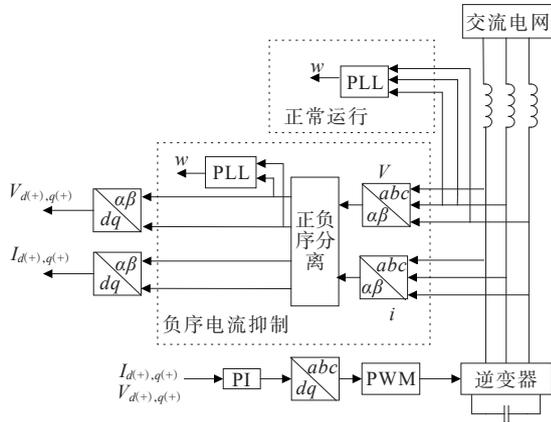


图 1 LVRT 控制策略

Figure 1 Control strategy of LVRT

1.2 逆变器与附加电路协调控制策略

风力发电中采用多种能量形式、容量不同的储能元件,其功率不随扰动快速变化,为保证安全运

行及低电压穿越要求,各控制策略响应速度配合储能元件储能要求序贯动作。根据电压跌落情况的不同,逆变器与附加电路协调控制策略短时工作,严重故障下转子电流快速增加,如图 2 所示。

若转子电流超过换流器最大通流能力,故障量超过启动判据设定值,则 Crowbar 电路动作,同时闭锁转子侧变换器及其控制,避免损坏变流器。Crowbar 电路退出运行后,故障切除或 DG 脱网运行前采用交流电流控制方式,同时,采用去磁控制指令提升动态无功电流注入速度,为电网提供无功支撑,即控制方式与轻度故障时段相同。此期间直流母线电压升高超过安全范围,则直流斩波(Chopper)电路投入使用。转子侧变换器(rotor-side converter, RSC)中 IGBT 闭锁,冲击电流经 IGBT 反向并联的大容量续流二极管导通,直流母线电压快速恢复到正常运行电压。

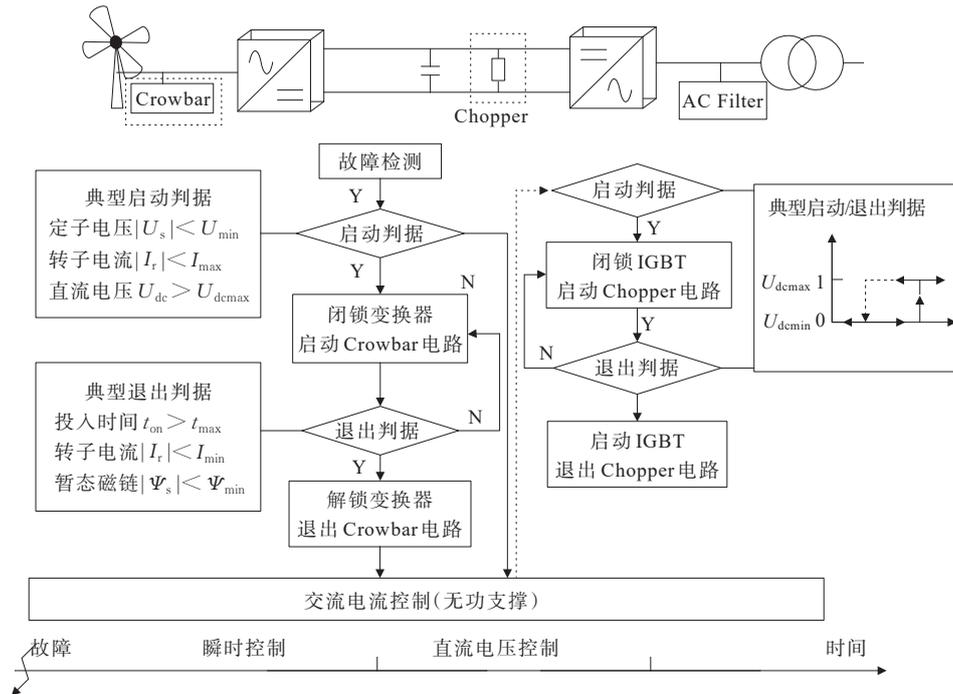


图 2 LVRT 时序动作

Figure 2 Action sequences of LVRT

如表 1 所示,具有可变电阻特性的 Chopper 与 Crowbar 电路最明显的区别在于 Chopper 电路可以在故障过程中反复投退,故障电流衰减更快。不同附加电路投运会改变故障电流特性。受暂态量衰减过程影响,且因控制方式的序贯切换,故障电流有着断续特征。不同控制策略下故障电流变化规律不同,相互独立又彼此相连,与仅采用逆变器 LVRT 控制的 DG 电源相比,电流特性更加复杂。

表 1 附加电路投运对比

Table 1 Comparison of two additional circuits operation

附加电路	Crowbar 电路	Chopper 电路
投入时间	瞬时投入	Crowbar 电路退运后
运行特征	仅单次投退	反复投切
转子侧变流器	变流器闭锁	IGBT 闭锁
等效电阻值	定值,根据故障电流、电压整定	可变电阻,与故障电流成正比

1.3 故障输出计算

随着DG并网规模不断增大,其贡献故障电流不可忽略,在不同控制策略的配合运用下,故障电流不确定性进一步增强,新能源电场及电网保护工作环境更加复杂。不同LVRT控制策略围绕提供无功支撑及抑制短路电流这一中心思想展开的控制策略切换方案都基本相同。基于附加电路的短路电流抑制策略,其目的也是降低逆变器控制方案下的故障输出。并网逆变器控制系统结构如图3所示,其中, u 、 i 为测量点电压及电流。

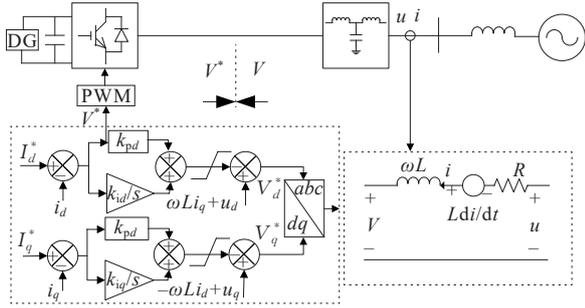


图3 并网逆变器控制系统结构

Figure 3 Control system structure of grid-connected inverter

并网点电压大于0.95 p.u.时逆变器控制策略不变;当小于最小并网运行电压时,DG输出仅逆变的无功电流 i_q 取 $1.2I_N$ 。正常运行工况下逆变器输出电流为

$$\begin{cases} I_{pcc} = \sqrt{(I_{d,f}^*)^2 + (I_{q,f}^*)^2} \\ I_{d,f}^* = \min \left[P_{ref}/U_{pcc}, \sqrt{K^2(1 - (I_{q,f}^*)^2)} \right] \\ I_{q,f}^* = \min [K(1 - U_{pcc}), I_{max}] \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{pcc} 、 $I_{d,f}^*$ 、 $I_{q,f}^*$ 分别为故障情况下DG故障输出电流、故障电流 d 、 q 轴分量; K 为无功支撑系数,通常取2; U_{pcc} 为并网点电压。

逆变器可以通过脉宽调制命令(pulse width modulation, PWM)调节端电压,实现控制系统对电流的控制。调制电压与电流满足如下关系:

$$\begin{cases} V_d^* = -[k_{pd}(I_d^* - i_d) + k_{id} \int (I_d^* - i_d) dt] + \omega L i_q + u_d \\ \left(k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \right) (I_{d,f}^* - i_d) + \omega L i_q + u_d \\ V_q^* = -[k_{pq}(I_q^* - i_q) + k_{iq} \int (I_q^* - i_q) dt] - \omega L i_d + u_q \\ \left(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} \right) (I_{q,f}^* - i_q) - \omega L i_d + u_q \end{cases} \quad (2)$$

式中, V^* 为逆变器输出端电压; k 为PI控制器调节系数; u 、 i 分别为测量点电压及电流。

从交流侧建立的逆变器端子电压与测量点之间的等效电阻 R 和电感 L 的关系为

$$\begin{cases} V_d = -L \frac{di_d}{dt} - R i_d + \omega L i_q + u_d \\ V_q = -L \frac{di_q}{dt} - R i_q - \omega L i_d + u_q \end{cases} \quad (3)$$

在求解故障电流过程中,为简化计算,忽略换流器的开关过程及复杂的矩阵计算^[25]。PWM载波频率高达数千赫兹,一方面降低了交流侧电压的谐波,另一方面提高了输出电压平滑性,可认为逆变器端电压等同于调制电压,由此建立控制侧与交流侧电流关系:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + R i_d = \left(k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \right) (I_{d,f}^* - i_d) \\ L \frac{di_q}{dt} + R i_q = \left(k_{pd} + \frac{k_{iq}}{s} \right) (I_{q,f}^* - i_q) \end{cases} \quad (4)$$

故障发生后已知故障输出与并网点关系,将式(1)带入式(4),即可建立DG故障输出与控制策略、出力、无功支撑系数以及并网点电压之间关系:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + R i_d = \left(k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \right) \cdot \left\{ \min \left[P_{ref}/U_{pcc}, \sqrt{K^2(1 - (I_{q,f}^*)^2)} \right] - i_d \right\} \\ L \frac{di_q}{dt} + R i_q = \left(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} \right) [K(1 - U_{pcc}) - i_q] \end{cases} \quad (5)$$

受各种因素影响,分布式电源故障输出具有时变特性。故障电流与并网点电压相互影响,故障时逆变器采集并网点电压跌落信息,电网电压及负载电流被引入电流内环跟踪参考电流,控制 q 轴电流以实现输出无功功率,提高并网点电压,使线路故障电流减小。在某一时刻故障下,考虑并网点电压、分布式电源出力,对式(5)进一步整理,可得:

$$\begin{cases} \frac{d^2 i_d}{dt^2} + \frac{R + k_p}{L} \frac{di_d}{dt} + \frac{k_i}{L} i_d = \frac{1}{L} \left(k_p \frac{di_{d,f}^*}{dt} + k_i I_{d,f}^* \right) \\ \frac{d^2 i_q}{dt^2} + \frac{R + k_p}{L} \frac{di_q}{dt} + \frac{k_i}{L} i_q = \frac{1}{L} \left(k_p \frac{di_{q,f}^*}{dt} + k_i I_{q,f}^* \right) \end{cases} \quad (6)$$

以 i_d 为例,在 t_0 时刻发生故障,故障电路可抽象为采用二阶常系数非齐次线性微分方程描述的二阶电路全响应,其解由通解和对应齐次方程特解构成。逆变器输出端存在电感,根据一阶零状态响应,输出电流不能突变,即

$$i_d(t_{0+}) = i_d(t_{0-}) = I_{d,f}^*(t_{0-}) \quad (7)$$

故障前、后控制指令发生变化,电流突变,可得故障前、后变化量表达式:

$$i_{d3} = \frac{di_d(t_{0+}) - di_d(t_{0-})}{dt} = \frac{k_p \Delta I_{d,f}^*}{L} = A_3 \quad (8)$$

其中, $\Delta I_{d,f}^* = I_{d,f}^*(t_{0+}) - I_{d,f}^*(t_{0-})$, 对式(6)求解, 可得该方程通解为

$$\begin{cases} i_{d1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [I_{d,f}^*(t_{0+}) - I_{d,f}^*(t_{0-})] e^{\lambda_1 t} = A_1 e^{\lambda_1 t} \\ i_{d2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [I_{d,f}^*(t_{0+}) - I_{d,f}^*(t_{0-})] e^{\lambda_2 t} = A_2 e^{\lambda_2 t} \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\lambda_{1,2} = \left[-(R + k_p) \pm \sqrt{(R + k_p)^2 - 4k_p L} \right] / 2L$$

$$p_1 = R/L, p_2 = k_p/L$$

因此故障电流的解的表现形式为

$$i(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} + A_3 \quad (10)$$

由式(10)发现, DG 故障输出由稳态强制和暂态自由分量构成。暂态分量与控制电路、相关参数有关, 由电路相关理论分析, 暂态分量在 3~5 周期衰减至 0^[26]; 稳态分量受并网点故障电压及分布式电源出力影响, 具有时变特性, 进而影响保护动作。分布式电源故障输出虽然受多种因素影响, 但在对电流保护的研究过程中, 重点在于 DG 提供的稳态电流与电源出力、并网点电压的关系。

2 基于多源数融合的保护计算系统

2.1 分布式电源接入对原有配电网保护影响

DG 对传统配电网保护的影响集中体现在其并网使电网潮流发生变化, 三段式保护整定与配合出现困难。分布式电源并网后 f_1 或 f_2 处发生故障, 保护 1、2、3 处流经线路电流变化情况如图 4 所示。

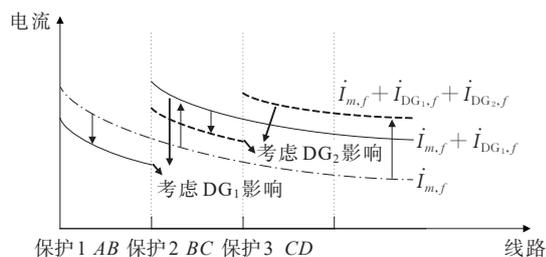


图 4 故障电流变化情况

Figure 4 Variation trends of fault current

故障位置发生于线路 AB 时 DG₁ 并网点电压降低, 根据控制策略给予故障点电压支撑, 故障点电压升高, 保护 1 处监测到的电流降低。线路 BC 发生故障时保护 2 处电流来源于系统和 DG₁, 故障电流显著提高。DG₁ 出力较小时若 DG₂ 提供较强的无功支撑, 故障点电压提高, 保护安装处监测到的电流

降低; DG₂ 出力较弱时提供的无功支撑不足以让故障电流发生明显变化。线路 CD 段发生故障后, 保护 3 处流经电流来源于系统和分布式电源, 故障电流显著提高。

DG 出力具有时变特点, 而各线路流经的故障电流随 DG 出力变化有较大改变, 因此对于主动配电网, 整定值为定值的传统电流保护不满足要求。只有实时掌握系统运行状态, 获取 DG 出力、节点电压信息、网络拓扑信息以及线路相关参数信息, 进而实现自适应电流保护整定及故障定位计算, 才能维护安全稳定运行。

2.2 保护计算系统

实际配网中量测装置特点决定了是否能够获取实时运行数据, 以确定负荷和线路的运行状态、含 DG 配电网的节点类型分类及序分量, 从而实现保护计算。PMU 精度高, 若全网装设可实现对 DG 并网下配电网快速变化的动态过程准确刻画, 但价格昂贵, 且无法获得电网拓扑信息, 而高级量测体系 (advanced metering infrastructure, AMI)、SCADA 采集数据时包含拓扑信息。因此, 利用包括传统 SCADA 量测装置、AMI 以及 PMU 在内的混合量测环境, 可以为进行数据分析、故障诊断与定位以及动态特性优化协调控制等应用提供数据信息支撑, 即多源数据融合是实现自适应保护及故障定位的前提条件。

针对大规模分布式电源接入智能配电网的实际情况, 以及微型同步相量测量信息与已有数据集成的应用需求, 构建基于多源数据融合的保护系统, 如图 5 所示。

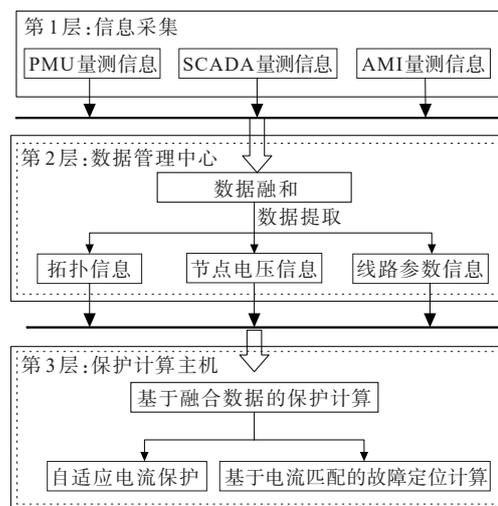


图 5 保护计算系统

Figure 5 Protection system

由图5可以看出,第1层为信息采集装置,采集配电网运行状态信息;第2层为主站系统,对多时间尺度数据进行融合,对异常数据进行辨识修正后在确保数据精度的情况下,将需要的配电网拓扑信息、节点电压信息及线路参数送到计算主机;第3层为保护计算主机,在融合配网调度自动化系统数据情况下,负责保护整定值计算及故障定位判定。

3 保护优化方案

3.1 自适应电流保护

多DG接入配电网结构如图6所示,在系统非对称故障状况下,采用负序抑制控制使分布式电源只输出正序电流。DG上游故障时其提供无功支撑对并网点电压有一定抬升,影响流过保护的故障电流,则对于三段式电流保护的实时调节系数为

$$K_0 = K_{rel} \frac{I_{DG,f}}{I_{Pref=0}} \quad (11)$$

式中, $I_{DG,f}$ 为分布式电源并网后线路故障电流; $I_{Pref=0}$ 为不计出力影响下的故障电流; K_{rel} 为可靠系数,取1.0~1.3。

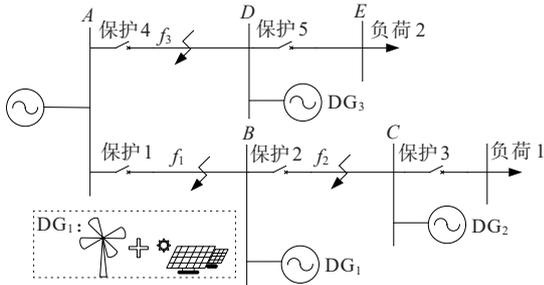


图6 多DG接入配电网结构

Figure 6 Structure of distribution network with multiple DGs connected

多DG接入下电流速断保护及限时电流速断保护优化整定结果分为2种情况,即对DG接入点上游保护进行重新整定得:

$$I'_{set_1} = K_0 I_{set_1} \quad (12)$$

当DG并网点上游发生故障时,分布式电源出力较高情况下无功支撑作用明显,故障电流小于未并网时电流,适当减小可靠系数取值,通过实时调节系数减小保护整定值。对DG接入点下游保护进行重新整定得:

$$I'_{set_2} = K_0 I_{set_2} \quad (13)$$

当分布式电源渗透率达到50%左右时,改进电流保护仍有较高的灵敏度;当分布式电源渗透率进一步提高到60%以上、DG并网点增多情况下,电流

II段保护灵敏度低于1.3,不满足近后备保护需求;DG并网点上、下游故障下流经保护安装处电流差别较大,保护配合也出现困难,电流保护失去作用。在基于多源数据进行电流保护的背景下,亦可利用采集的故障电压信息及故障前、后网络节点导纳信息进行故障电流匹配计算,实现故障定位,为识别并切除线路故障提供依据。

3.2 故障电流匹配计算

3.2.1 故障电流计算

设原电力系统有 N 个独立节点,正常运行时其节点导纳矩阵 Y 为 N 阶方阵。为减小计算量,避免不对称故障下节点电压及支路电流的三相不平衡干扰,对其参数阵做解耦计算。序分量变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}, \alpha = e^{j2\pi/3} \quad (14)$$

根据对称分量法,将 Y 转化为序分量矩阵,用1、2、0分别代表导纳正序、负序、零序分量,用序分量变换矩阵 Y_{120} 计算导纳矩阵序分量,即

$$Y_{120} = TYT^{-1} \quad (15)$$

Y_{120} 中对角元素为各序网络的序导纳,电力系统发生不同类型故障时电网正序拓扑结构都会发生变化。取各节点正序导纳参与故障电流计算,相当于原正序网络增加一个节点。因此,故障情况下,正序节点导纳矩阵 Y' 为 $N+1$ 阶方阵。

$$Y' = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & Y_{1j} & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii}' & Y_{ij}' & Y_{ij}' & \cdots & Y_{in} \\ Y_{j1} & \cdots & Y_{ji}' & Y_{jj}' & Y_{jj}' & \cdots & Y_{jn} \\ Y_{j1} & \cdots & Y_{ji}' & Y_{jj}' & Y_{jj}' & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & Y_{nj} & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Y' 与 Y 相比,仅故障节点间导纳发生变化,即节点 i, j, j 的自导纳和互导纳因不同类型故障发生变化,其余元素仍然不变。

发生接地短路时在节点 i, j 间增加一个新节点,同时增加一条新接地支路,若节点 i, j 间仅有故障支路相连,则

$$\begin{cases} Y'_{ii} = (Y_{ii} - Y_{jj}) \\ Y'_{ij} = Y_{ij} \\ Y'_{ji} = Y'_{ji} = 0 \\ Y'_{jj} = (Y_{jj} - Y_{ij}) \\ \Delta Y_{jj} = Y_{jj} - |Y_{ij} + Y_{ji}| \end{cases} \quad (17)$$

其中, ΔY_{ff} 为非金属性接地故障情况下故障点接地导纳。故障为相间短路时相当于在节点 i, j 间增加一个新节点、一条不接地支路。 $Y'_{ii}, Y'_{ij}, Y'_{ji}, Y'_{jj}$ 变化情况和接地故障相同。故障点 Y_{ff} 变化如下:

$$Y_{ff} = |Y_{if} + Y_{jf}| \quad (18)$$

若节点 i, j 间有其余相连支路, 则不论发生何种类型故障, 其互导纳不为 0, 可表示为

$$Y'_{ij} = Y'_{ji} = Y_{ij} - y_{ij} \quad (19)$$

由于故障节点电气量无法直接获得, 故实际相应节点导纳矩阵需去掉 Y' 中 Y_{ff} 所在的行和列, 则有故障电流计算方程为

$$I_{DG, f} = |U_{ij} Y_{ij}| \quad (20)$$

测量过程中可利用可靠系数弥补因导纳测量带来的故障电流计算与实际值的误差。

3.2.2 故障电流匹配

利用采集到的节点电压结合未发生故障下的各节点导纳信息, 计算参与故障信息匹配的电流:

$$I_f = Y U_f' \quad (21)$$

利用节点电压信息及故障后节点导纳信息计算各节点电流:

$$I_f' = Y' U_f' \quad (22)$$

故障电流匹配公式为

$$\Delta I_f = |f(i, I_f) - f(i, I_f')| < \epsilon \quad (23)$$

故障点 f 与 i, j 节点直接相连, 在利用 Y' 与 Y 进行故障计算时, 仅故障节点电流发生变化, 不平衡电流不为 0, 其余节点在节点电压及导纳相同情况下, 不平衡电流为 0。在实际测量中, 为了避免因各种因素导致非故障点不平衡电流非零而产生故障定位不准确问题, 可以根据不同配电网要求合理选择故障电流整定值, 判断故障是否发生于保护区段。

3.3 基于融合数据的配电网保护策略

根据受分布式电源故障输出影响的配网线路电流特点, 可以看出, 为保证系统安全稳定运行, 在多 DG 并网时需要根据线路电流保护灵敏度情况下, 以 DG 出力为判定依据, 选择不同的保护方式, 能更好地维护系统安全稳定运行。基于多源数据融合的保护策略下, 不同故障切除方式的选择计算流程如图 7 所示, 在多 DG 并网系统中, 实现保护定值及保护策略的自适应调整。在不同的配网系统中, 保护方式选择的判定依据可根据实际情况进行调整, 本文选取 DG 出力为 60 MW。

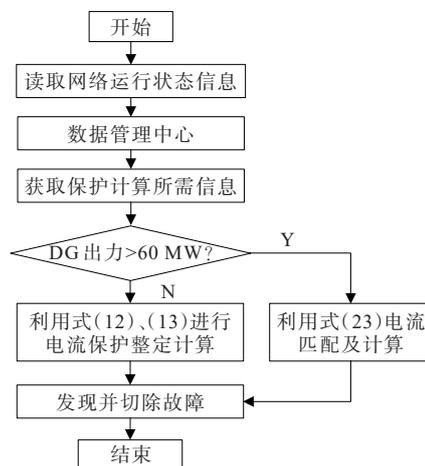


图 7 故障切除方式选择

Figure 7 Selection of fault removal mode

4 仿真实验

系统涉及的重要参数如表 2 所示。利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建含 DG 电源的配电网模型(图 6), 其中光伏及风机采用等效聚合模型, 通过改变缩放组件参数 n 改变输出功率。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

系统基准容量/(MV·A)	交流电网	线路单位长度	负荷功率/MW	
	额定电压/kV	阻抗/(Ω/km)	1	2
100	10	0.27+j0.346	2	3

4.1 不同 LVRT 下故障仿真分析

1) 控制策略下故障输出。

2 s 时 DG₁ 接入点上游 20% 处发生三相短路故障, 以 A 相电流为例, 光伏电源提供暂态电流波形如图 8 所示。故障发生后 LVRT 未立刻作用, 约 10 ms 后进入控制响应阶段, 故障特征由各元件参数决定, 其与控制 PI 参数设计有关, 故障电流缓慢增加; 故障约 50 ms 后进入控制稳态阶段, 故障切除前逆变器输出不再变化。暂态过程十分短暂, 仅可能对电流速断保护产生影响, 进行保护整定时可不考虑此暂态过程。

2) 附加电路对故障特性影响。

风力发电机并网发电时 DG₁ 处电压跌落严重, 转子侧流经电流超过转子最大允许电流, 直流线路电压超过最大允许电压。不同附加电路投入状况下 DG 输出故障电流如图 9 所示, 故障后约半个周波内故障电流最大, 故障特征和控制方式无关。图 9(a) 中 Crowbar 投入使用, 故障电流快速

衰减,投运后若故障未切除,则故障电流幅值增加;若直流电压超过最大允许电压,Chopper电路反复投切,则故障暂态电流中谐波电流含量降低,如图9(b)中所示。在附加电路皆投运的双重作用下,故障电流快速衰减,可接近于正常运行时刻电流;即若故障不及时切除,则故障位置的变化、LVRT下故障电路的组合投运以及故障特征的反复变化可对电流保护产生影响。在三段式电流保护中,电流速断保护未及时切除故障,可由后备保护切除故障。

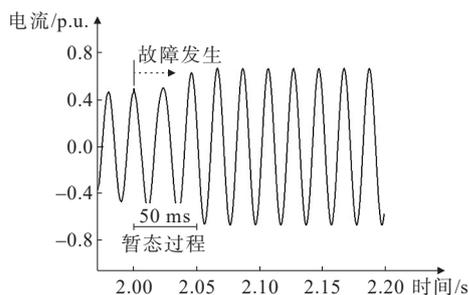
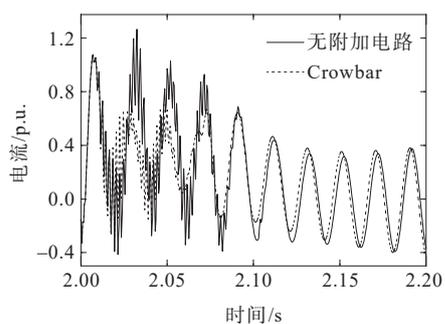
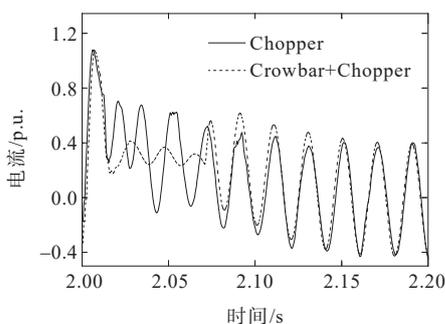


图8 逆变型电源故障输出

Figure 8 Fault output of inverter power supply



(a) 有、无附加电路投入



(b) Chopper电路投运

图9 不同附加电路投运时故障特性比较

Figure 9 Fault characteristics comparison of different additional circuits

4.2 电流保护优化方案仿真

当线路末端发生三相短路时,DG不同出力下的实时调节系数 K_0 变化如图10所示。功率较小时

DG对故障电流影响小,即原配电网对并网的新能源出力有一定消纳能力;随着DG出力的增加及出力的随机性增强,配网故障电流不确定性增加,原配电网电流保护受分布式电源并网影响。配电网不同位置发生三相故障,故障电流及保护整定值如表3所示。

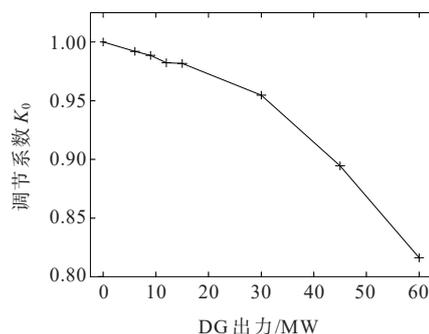


图10 不同出力下 K_0 变化趋势

Figure 10 Variation trend of K_0 under different output power

表3 DG出力变化下保护1、2处情况

Table 3 Results of protection at 1 and 2 place under different DG output

保护	DG出力/ MW	整定值		故障电流	
		80%	100%	80%	100%
1	9	4 580	4 694	4 846	4 517
	15	4 614	4 740	4 823	4 527
	30	4 371	4 400	4 550	4 409
	45	4 264	4 327	4 317	4 158
	60	4 104	4 111	4 006	3 733
2	9	3 877	4 072	4 171	3 981
	15	4 059	4 243	4 397	4 150
	30	4 789	4 980	4 934	4 701
	45	5 033	5 311	5 347	5 076
	60	6 035	6 168	5 734	5 236

本文中电流保护可在DG出力变化情况下调整保护整定值、提升保护性能。上游线路故障时DG出力提高至60 MW,保护范围仍能达到线路全长的70%;下游线路故障时,DG对故障电流影响大,输出功率在45 MW以内,电流保护范围在70%左右;出力达到60 MW,保护范围能达到50%以上。对比文献[11]、[15],即使在较高DG渗透率下,所提方案仍有一定优越性。电流I段保护无法保护线路全长,需要与电流II段保护参与,以达到保护线路全长的目的。在DG出力改变情况下,传统电流II段保护与改进后电流保护整定方案对比数据如表4所示。

表 4 II 段保护对比

Table 4 Sensitivity comparison

线路	DG 出力/ MW	传统保护		改进保护	
		整定值/kA	灵敏度	整定值/kA	灵敏度
AB	0	3 014	>1.3	3 014	>1.3
	15	3 014	>1.3	2 800	>1.3
	30	3 014	<1.3	2 688	>1.3
	45	3 014	<1.3	2 449	>1.3
	60	3 014	<1.3	2 394	>1.3
BC	0	2 355	>1.3	2 355	>1.3
	15	2 355	>1.3	2 495	>1.3
	30	2 355	<1.3	2 897	>1.3
	45	2 355	<1.3	3 287	>1.3
	60	2 355	<1.3	3 461	>1.3

DG 接入点上、下游保护间配合被破坏,因此按照近后备要求,灵敏度变化范围应为 1.3~1.5。在进行灵敏度验证时,随着 DG 出力的增加传统保护方案不满足要求;在 DG 出力一定范围内,改进后的保护方案满足电流保护灵敏度要求。保护方案改进前/后保护 1、2 处 II 段保护灵敏度具体变化情况如图 11 所示,随着 DG 出力的提高接入点上游保护灵敏度降低,下游保护灵敏度过高;改进后电流保护整定值动态变化,相较于传统保护,更能满足 DG 动态变化下对保护灵敏度的要求。但随着 DG 渗透率的进一步提高,其出力导致线路电流保护灵敏度降低,保护间配合也会出现问题,改进后的电流保护可能拒动,因此,可采用基于电流匹配的故障定位方案切除故障。

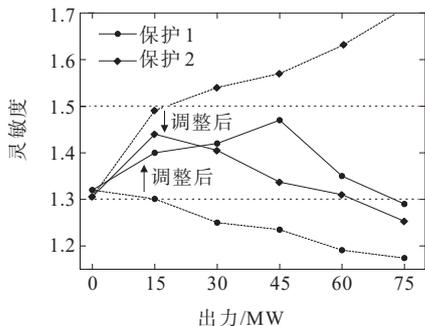


图 11 II 段保护灵敏度

Figure 11 Protection sensitivity of section II

4.3 基于电流匹配的故障定位

在节点 B、C 之间的连线上设置各种类型的短路故障,进行故障电流匹配计算。故障前、后两端差动电流的瞬时变化值如图 12 所示,2.00 s 时 f_2 点

发生短路故障,区内故障下 f_2 两侧电源均向短路点注入短路电流,故障电流方向相同,取向量和,电流一定不为 0;正常运行及区外故障下线路上电流大小相同、方向相反,电流匹配为 0。

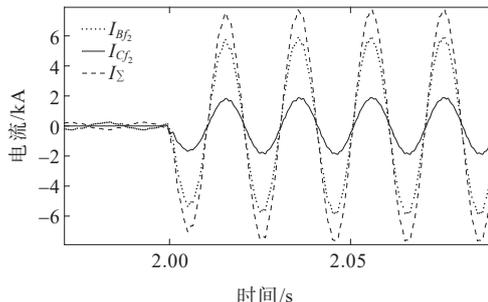


图 12 电流瞬时值比较

Figure 12 Comparison of instantaneous current values

对于 10 kV 配电网系统,单相故障下带负荷运行 1~2 h,判定系统状态为不正常运行状态,因此,进行电流匹配计算时故障设置为两相、三相短路。BC 段可能出现因 DG 出力难以预测、故障电流变化大导致保护失去作用的问题(图 4)。利用文 3.2 中理论分析,分别对这 2 种情况进行故障电流匹配计算,如表 5 所示。故障时刻在线路电流、故障线路阻抗均变化的情况下,同一线路不同位置故障、同一位置发生不同类型故障,匹配电流远大于 0 kA。因此,用采集的故障电压信息和故障前、后的节点导纳信息进行故障电流匹配计算,能够实现故障定位,在保护失去作用时,为识别并切除线路故障提供依据。

表 5 电流匹配

Table 5 Results of current matching

故障类型	故障位置/%	电流 /kA		
		故障	计算	匹配
两相短路	20	3.066	0.983	2.082
	70	2.568	0.513	1.648
	90	2.425	1.629	0.795
三相短路	20	5.243	0.419	4.823
	70	4.590	1.629	2.960
	90	4.428	2.397	2.030

5 结语

为了更好地解决分布式电源并网影响配电网保护的问题,本文首先综合分析影响了 DG 故障输出的多种因素及故障电流特点,发现仅稳态电流会

对电流保护产生影响;然后,利用多源数据交互下采集的信息并根据故障电流与节点电压的关系,提出基于实时调节系数的配电网电流保护整定方案,在DG渗透率较高情况下有效提高保护灵敏度;在DG渗透率过高、保护失去作用时,结合量测信息进一步提出故障电流匹配的故障定位方案,为识别并切除线路故障提供依据。不论DG出力如何变化,都能维护系统安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 章晋龙,史述青,杨海森,等.国内外直流配电网技术发展研究综述[J].南方能源建设,2016,3(S1):93-98.
ZHANG Jinlong, SHI Shuqing, YANG Haisen, et al. Review of research on DC distribution network technology development at home and abroad[J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(S1): 93-98.
- [2] 傅守强,陈翔宇,张立斌,等.面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J].中国电力,2023,56(7):95-106.
FU Shouqiang, CHEN Xiangyu, ZHANG Libin, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 95-106.
- [3] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].发电技术,2022,43(3):476-484.
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.
- [4] 聂永辉,刘天宇,蔡国伟,等.基于MP-RCC的双馈风电机组低电压穿越控制研究[J].电网技术,2022,46(3):905-914.
NIE Yonghui, LIU Tianyu, CAI Guowei, et al. Low-voltage ride-through handling in doubly fed induction generators based on model-predictive rotor current control[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 905-914.
- [5] 王雪梅,王艺博,刘雨桐,等.基于虚拟电抗的主动支撑型新能源机组低电压穿越控制方法[J].电网技术,2022,46(11):4435-4444.
WANG Xuemei, WANG Yibo, LIU Yutong, et al. Low voltage ride-through control of actively-supported new energy unit based on virtual reactance[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4435-4444.
- [6] 王雨欣,王思怡,黎黎晖,等.超级电容储能和卸荷电路协调控制的永磁同步风电机组低电压穿越策略[J].高压电器,2023,59(4):177-185.
WANG Yuxin, WANG Siyi, YANG Lihui, et al. Low-voltage ride-through control strategy of permanent magnetic synchronous wind turbine with coordination of super capacitor energy storage and chopper circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 177-185.
- [7] 仇志华,董浩东,张昊,等.变频软启动永磁同步电机低电压穿越能力评估方法[J].电力工程技术,2022,41(5):202-209.
ZHANG Zhihua, DONG Haodong, ZHANG Hao, et al. Low voltage ride through capability evaluation method for permanent magnet synchronous motor with variable frequency convertor based softly starting[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 202-209.
- [8] 张蝶,李雨龙,袁旭峰,等.基于VSG控制的SOP低电压穿越控制策略[J].电网与清洁能源,2022,38(9):45-54+64.
ZHANG Die, LI Yulong, YUAN Xufeng, et al. SOP low voltage ride through control strategy based on VSG control[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 45-54+64.
- [9] 孔祥平,张哲,尹项根,等.含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J].中国电机工程学报,2013,33(34):65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [10] 杨杉,同向前.含低电压穿越型分布式电源配电网的短路电流计算方法[J].电力系统自动化,2016,40(11):93-99+151.
YANG Shan and TONG Xiangqian. Short-circuit current calculation of distribution network containing distributed generators with capability low voltage ride through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 93-99+151.
- [11] 陈晓龙,李永丽,谭会征,等.含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J].电力系统自动化,2015,39(9):107-112.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive-sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 107-112.
- [12] 曾德辉,王钢,郭敬梅,等.含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J].电力系统自动化,2017,41(12):86-92.
ZENG Dehui, WANG Gang, GUO Jingmei, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 86-92.
- [13] 王守相,宋丽可,舒欣.分布式电源与多元负荷高渗透接入的主动配电网自适应过流保护方案[J].高压技术,2019,45(6):1783-1794.

- WANG Shouxiang, SONG Like, SHU Xin. Adaptive overcurrent protection of active distribution network with high penetration of distributed generations and multiple loads[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(6): 1783-1794.
- [14] 高玉雅,王佳玉,孙宇笛,等.考虑分布式电源与随机负荷的主动配电网继电保护新方法[J].电力与能源,2021,42(01):14-19+145.
- GAO Yuya, WANG Jiayu, SUN Yudi, et al. A new relay protection method for active distribution networks considering distributed power sources and stochastic loads[J]. Power & Energy, 2021, 42(1): 14-19+145.
- [15] 刘刚,朱林,祁升龙,等.基于拓扑结构变化的配电网自适应保护方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(1): 106-112.
- LIU Gang, ZHU Lin, QI Shenglong, et al. Adaptive protection method for distribution networks based on the dynamic topology[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2022, 37(1): 106-112.
- [16] 宁楠,孙睿择,潘凯岩,等.基于运行方式与故障信息融合的配电网保护策略优化[J].电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 54-61.
- NING Nan, SUN Ruize, PAN Kaiyan, et al. Optimization of distribution network protection strategy based on the integration of operation mode and fault information[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2022, 37(2): 54-61.
- [17] 曾翔,文明浩,钱堃,等.逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J].智慧电力,2023,51(1):46-53.
- ZENG Xiang, WEN Minghao, QIAN Kun, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generation integration on grounding distance protection and its strategies[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 46-53.
- [18] 白星振,宋昭杉,葛磊蛟,等.含分布式电源的复杂配电网相间故障定位等效解耦模型[J].电力建设,2022,43(2):45-53.
- BAI Xingzhen, SONG Zhaoshan, GE Leijiao, et al. An equivalent decoupling model for fault location in complex distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 45-53.
- [19] 余磊,贾科,温志文,等.计及量测数据丢失的主动配电网电流保护自适应整定方法[J].电力系统自动化,2022, 46(15):145-152.
- YU Lei, JIA Ke, WEN Zhiwen, et al. Adaptive setting method of over current protection in active distribution network considering measurement data missing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 145-152.
- [20] 李文君,段登伟,朱雨,等.基于5G通信模式下的配电网自愈保护应用[J].电力系统保护与控制,2022,50(24): 152-159.
- LI Wenjun, DUAN Dengwei, ZHU Yu, et al. Application of distribution network protection based on a 5G end-to-end communication mode[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 152-159.
- [21] 黄杨,朱雨,何明,等.基于5G的配电网线路差动保护时间同步算法[J].供用电,2022,39(12): 11-16+44.
- HUANG Yang, ZHU Yu, HE Ming, et al. Time synchronization algorithm of distribution network line differential protection based on 5G[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(12): 11-16+44.
- [22] VON MEIER A, STEWART E, MCEACHERN A, et al. Precision micro-synchro phasors for distribution systems: a summary of applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2926-2936.
- [23] LIEN K, LIU C, YU C, et al. Transmission network fault location observability with minimal PMU placement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1128-1136.
- [24] 朱茂林,刘灏,毕天姝.考虑风电场量测相关性的双馈风力发电机鲁棒动态状态估计[J].电工技术学报,2023,38(3):726-740.
- ZHU Maolin, LIU Hao, BI Tianshu. Robust dynamic state estimation of doubly-fed induction generator considering measurement correlation in wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 726-740.
- [25] 江斌开,王志新.基于VSC-MTDC的平均值建模与控制策略[J].电机与控制学报,2018,22(3):1-8.
- JIANG Binkai, WANG Zhixin. Average-value modeling and control strategy of VSC-MTDC[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(3): 1-8.
- [26] 邱关源,罗先觉.电路[M].北京:高等教育出版社,2006: 134-179.
- QIU Guanyuan, LUO Xianjue. Circuitry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 134-179.