

一种适用于微电网的分散式自适应过电流保护

糟伟红^{1,2}, 祁晓笑^{1,2}, 董雪涛^{1,2}, 李德存^{1,2}, 职凯华³

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:针对传统的定流继电器保护不能及时响应微电网拓扑结构变化的问题,文中提出一种分散式自适应过电流保护方案。根据微电网的故障特性将微电网中的馈线以分布式电源为中心分为上游区域和下游区域。针对不同区域分别配置基于瞬时继电器的分散式保护法。最后,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 平台上建立微电网模型,验证所提方法。结果表明,所提方法能正确地切除微电网在不同运行模式、拓扑结构、DG 运行状态下的故障,提高了保护的可靠性。

关键词:自适应过电流保护;微电网保护;瞬时过流继电器

中图分类号:TM 771 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)02-0052-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230209

A Distributed Adaptive Overcurrent Protection for Microgrid

ZAO Weihong^{1,2}, QI Xiaoxiao^{1,2}, DONG Xuetao^{1,2}, LI Decun^{1,2}, ZHI Kaihua³

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation for Power System, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional constant current relay protection can not respond to the topology changes of microgrid in time, a decentralized adaptive overcurrent protection scheme is proposed. According to the fault characteristics of microgrid, the feeders in microgrid are divided into upstream area and downstream area with the distributed generator (DG) as the center. And distributed protection laws based on instantaneous relays are configured for different regions. Finally, the microgrid model is built on PSCAD/EMTDC platform to test different types of faults. The results show that the proposed method can correctly cut off faults in different operation modes, topology and DG operation states of microgrid, and can improve the reliability of protection.

Key words: adaptive overcurrent protection; microgrid protection; instantaneous overcurrent relay

0 引言

微电网主要由不同类型的分布式电源(distributed generator, DG)、负荷及控制装置组成^[1]。微电网有两种运行模式,且由于 DG 的高渗透率使微电网的潮流呈现双向特征,传统既定式的保护方案无法满足微电网保护的要求。

目前,国内外对于微电网保护研究最多的是自适应保护,文献[2-3]提出了一种新的等效阻抗计算方法,基于正序等效阻抗、三阻抗圆交点的方法计算短路故障时的等效阻抗;该方案需要进行 3 次测量和计算,其数据测量和保护算法分析过程比较复杂。文献[4]提出一种以测量故障前后母线上阻抗变化为依据的保护方法,但该方法只考虑了并网情况,未考虑离网情况。文献[5]考虑了微电网拓扑

和运行模式的变化,通过采样母线内的局部可用测量值动态计算过流继电保护的整定值。文献[6-8]采用中央保护单元对微网进行自适应保护,如果中央保护单元通信连接中断,则保护失败。文献[9]在中心系统和远程通信系统中不使用继电器,继电器通过测量可见阻抗使其设置与微电网条件匹配。因此,微电网保护的关键是计算新的保护整定值,目前迫切需要一种能动态计算保护整定值并使保护方案适应微电网新状态的算法。

下面在分析了微电网的故障特征后,将微电网中的馈线以 DG 为中心分为上游区域和下游区域。针对不同区域分别配置基于瞬时继电器的分散式保护法。该保护方案可以很好地响应微电网的各种动态变化,解决了微电网因潮流双向保护值难以整定的问题,保护方案不会因为某个继电器的连接中断而导致保护失败。仿真结果表明,该保护方案可以实时响应微电网的动态变化,提高保护可靠性。

1 微电网结构及故障特性分析

1.1 微电网拓扑结构

根据 IEEE 1547 标准对微电网的定义^[10],结合所提保护方法,建立如图 1 的微电网模型。

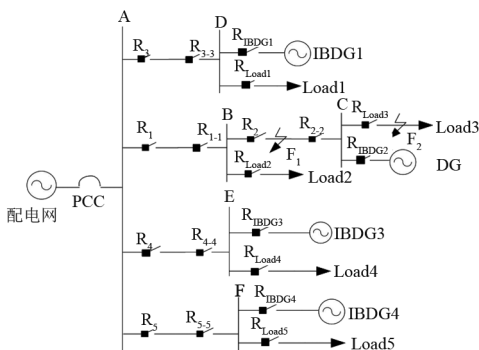


图 1 微电网模型

图 1 中的 PCC(point of common coupling)点为公共耦合点,在 PCC 点断开时,微电网进入孤岛运行。IBDG1(inverter-based DG)为风力发电微电源,DG 为同步发电机,IBDG3 为储能蓄电池,IBDG4 为光伏微电源。Load1—Load5 均为三相对称负载, $R_1—R_{5-5}$ 、 $R_{IBDG1}—R_{IBDG4}$ 、 $R_{Load1}—R_{Load5}$ 分别是馈线两端、IBDG1—IBDG4 并网点处、Load1—Load5 入网点

处的保护装置。

1.2 微电网故障特性

微电网的两种运行模式为并网模式和孤岛模式^[11]。并网模式下微电网内发生故障时,主网对故障电流有贡献,潮流分布不再是单向的,具有双向潮流分布的特点;而孤岛运行时,只有微电网内的分布式电源对故障电流做出贡献,两种运行方式下其故障特征存在较大差异。

在 PSCAD 仿真平台上构建微电网模型,所连接的主网电压等级为 10 kV,系统基准电压为 10.5 kV, $Z_s=0.2 \Omega$ 。线路均为 3 km 架空线路。Load1—Load5 的功率依次为 0.80 MVA、0.80 MVA、0.67 MVA、0.34 MVA、0.82 MVA,系统参数如表 1 所示。

表 1 交流微电网系统参数

参数	数值
母线电压/V	10 000
风电机组容量/MW	0.20
光伏容量/MW	0.27
储能装置容量/MVA	0.90
直流电压源容/MW	2.00

在图 1 中 F_1 处(线路 BC 段 50%处)分别设置对称短路故障和不对称短路故障。 R_2 和 R_{2-2} 的故障电流仿真如表 2 所示。

表 2 F_1 处故障时 R_2 和 R_{2-2} 处的电流

故障类型	R_2 电流/kA			R_{2-2} 电流/kA		
	故障前	并网时 故障电流	离网时 故障电流	故障前	并网时 故障电流	离网时 故障电流
对称短路故障	0.048	1.331	0.084	0.048	0.123	0.092
不对称短路故障	0.048	1.548	0.097	0.048	0.143	0.107

从表 2 可看出,在并网模式下,微电网无论发生何种故障, R_2 流过的故障电流总是比 R_{2-2} 处的大。但在孤岛模式下,微电网无论发生何种故障, R_{2-2} 流过的故障电流总是比 R_2 处的大。在并网时, R_2 处流过的电流包括主网提供的电流和 DG 提供的反向电流;孤岛运行时, R_2 处流过的电流仅包含各微源提供的电流,此时 R_{2-2} 距离 DG 较近,流过 R_{2-2} 的故障电流大于 R_2 处的故障电流。在两种不同运行模式下, R_2 处流过的电流差异较大,传统保护方法会出现误动或拒动的情况。

2 一种分散式自适应保护方案

2.1 整体保护方案

以图 1 中的母线 BC 段和母线 C 到 Load3 段为例,根据 DG 的接入位置,对提出的继电保护方案进行说明。以 DG 为中间点,母线 BC 段为上游区域,母线 C 到 Load3 段为下游区域。下游区域由单端电源供电,配置基于瞬时继电器的分散式保护法;对于上游处母线 BC 段,配置改进的自适应过电流保护法;对于母线 A 到 IBDG1 段,IBDG1 和主网分别在馈线的两端,则在该段的保护装置处配置改进的自适应过电流保护法。

2.2 基于瞬时继电器的分散式保护法的下游线路保护方案

微电网 DG 下游线路可看成传统辐射状网络, DG 接入没有改变潮流方向,只改变了线路的电流故障水平。为使微电网具有有效的保护性能,必须对微电网进行监测,并根据微电网的突然变化更新继电器的整定值。保护方案流程如图 2 所示。

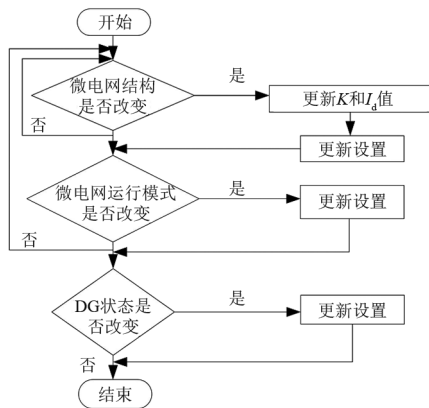


图 2 保护方案流程

在该保护方案中,继电器利用通信获取微电网的数据,对微电网的状态进行监测,并根据这些数据的变化调整继电器的设置。使用瞬时方向过流继电器,该保护装置动作电流值为

$$I_0 = I_f \times M_g + \sum_{i=1}^m (K \times I_d \times S_i) \quad (1)$$

式(1)由两组数据组成:第一组为固定数据,包括外网短路电流 I_f 、DG 的最大短路电流 I_d 和影响因子 K ;第二组为微电网组件发送给相应继电器的电信数据,包括微电网的运行模式 M_g 和 DG 的状态 S_i 。微电网组件也将线路两端断路器的位置发送给

继电器。继电器使用这些信息来监控微电网结构,当微电网结构发生任何变化时,继电器从内存中加载合适的 I_d 和 K 在式(1)中使用。

式(1)中 M_g 为微电网的运行模式,在并网模式时值为“1”,在孤岛模式时值为“0”。只考虑配电网时,故障电流值为

$$I_f = \frac{V_g}{Z_g} \quad (2)$$

式中: V_g 为配电网电压; Z_g 为配电网至故障点处的等效阻抗值。由于重构微电网而产生的等效阻抗值变化,使得每个结构中继电器的整定值不相同。随着每个 DG 的开启或关闭,使用 GOOSE 消息将 DG 运行状态发送到微电网的所有组件。当 DG 开启时, S_i 取 1;当 DG 关闭时 S_i 取 0。继电器通过接受 GOOSE 消息来识别 DG 状态的变化,并根据式(1)更新保护设置,GOOSE 消息的设置文献[12]中提出。

同步发电机的最大短路电流 I_d 可以为额定电流的倍数,见表 3^[13]。IBDG 用的是半导体开关,所以不能像同步发电机那样提供短路电流。

表 3 不同 DG 的最大短路电流

DG 类型	主网电压/kV	短路电流与额定电流之比			注释
		直接连接	变压器连接	电力电子器件	
小型同步发电机	0.4~33	5~8	3~7	—	额定功率 0.5~5 MW
中型同步发电机	11~132	5~6	3~5	—	额定功率 5~25 MW
大型同步发电机	132	—	2.5~4.5	—	额定功率大于 25 MW
燃料电池	0.3~33	—	—	1.0~1.2	—

发生短路时, DG 对故障短路电流水平的贡献值受微电网电压、DG 额定功率和与微电网的连接方式的影响,可以认为这是该 DG (I_d) 的最大短路电流的倍数,表示为 k , k 为 0~1 之间的参数。系数 K 为 DG 观测到的阻抗变化的影响,因此随着微电网的重构, K 值会发生变化。阻抗的变化对 IBDG 电流没有影响,只有 DG 控制器才能改变 IBDG 电流。因此 IBDG 不采用影响因子 K , 其值为 1。保护系统将通过计算多个 DG 对多个继电器的影响系数来创建一个矩阵,矩阵中的每一个 K 值由式(3)计算。

$$K_{mn} = \frac{I_{dmn}}{I_d} \quad (3)$$

$$I_{d_{mn}} = \frac{V_m}{Z \times x_{mn}} \quad (4)$$

式中: K_{mn} 为第 m 个 DG 对第 n 个继电器的影响系数;同理 $I_{d_{mn}}$ 为第 m 个 DG 对第 n 个继电器提供的故障电流值; V_m 为第 m 个 DG 的额定电压; Z 为单位长度线路的阻抗值; x_{mn} 为第 m 个 DG 与第 n 个继电器之间的距离。

在式(1)的基础上,DG 的最大短路电流和影响因子、外网短路电流已经脱机计算并存储在瞬时过流继电器的存储器中。通过继电器实时监测微网的运行状态,根据式(1)~式(4)可实现实时计算,更新各保护装置的启动电流值。

2.3 基于改进自适应过电流保护的 DG 上游线路保护方案

DG 上游区域是双电源供电系统,潮流双向流动,此时传统的保护方法会使保护误动或拒动^[14]。

式(5)为传统过电流保护整定值计算方法。

$$I_s = \frac{K'_i E_\varphi}{Z_s + Z_1} K_d \quad (5)$$

式中: K'_i 为可靠系数; E_φ 为系统的等效相电动势; Z_s 、 Z_1 分别为配电网侧、保护线路的等效阻抗; K_d 为故障类型系数,三相故障时 K_d 取 1,两相故障时 K_d 取 $\sqrt{3}/2$ 。

对上游部分来说,电网是双电源供电,故障发生在 DG 上游时,需要判断保护背侧是否接入 DG^[15]。当保护背面无 DG 接入时,系统侧实际阻抗等于计算阻抗,系统电势为 E_s ,且 R_1 和 R_{1-1} 的整定值不受 IBDG1 的影响。

F_1 处发生两相故障时,分析 R_1 处的正序电压 U_2 和正序电流 I_2 间的关系,可得

$$U_2 - \frac{1}{2}E_s = \frac{1}{2}I_2(Z_s + Z_1) \quad (6)$$

此时可得 R_1 的电流整定为

$$I_2 = \frac{2U_2 - E_s}{Z_1 + Z_s} K'_i K_d \quad (7)$$

F_1 处发生不对称短路故障时, R_1 处的正序电压值 U_3 和正序电流值 I_3 满足式(8)。

$$U_3 = I_3 Z_1 \quad (8)$$

式中, Z_1 为故障点所在线路的全部阻抗。此时 R_1 的电流整定为

$$I_3 = \frac{U_3}{Z_1} K'_i K_d \quad (9)$$

R_2 和 R_{2-2} 的计算与上述不同,因为 DG 接在保护背侧,主网和 DG 提供的电流都会流向故障点。此时应考虑式(5)中主网侧的电动势与等效阻抗的变化。当 F_1 处发生故障时,等效电路如图 3 所示。

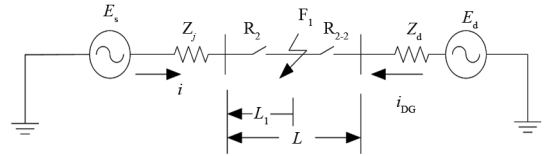


图3 F_1 处发生故障时戴维南等效电路

图中: E_s 为保护装置前侧的等效电压源; E_d 为保护装置后侧的等效电压源; $Z_j(j=1,2,\dots,n)$ 为保护装置前侧电源到故障点处的等效阻抗; Z_d 为保护装置后侧电源到故障点处的等效阻抗。短路点故障相电压为

$$U_k = \frac{U_0}{Z_1 + Z_2} \times Z_2 \quad (10)$$

式中: U_0 为短路点故障前的电压; Z_1 为正序等值阻抗; Z_2 为负序等值阻抗; Z_0 为零序等值阻抗。又因为

$$U_0 = E_d \times \frac{Z_j + Z_0 \times L_1}{Z_j + Z_0 \times L + Z_d} \quad (11)$$

取 $Z_1 = Z_2$ 简化式(10),则根据等效电路,此时 E_d 在 R_2 处产生的电流为:

$$I_k = \frac{U_k}{Z_j + Z_0 \times L_1} = \frac{E_d}{2(Z_j + Z_0 \times L + Z_d)} \quad (12)$$

$$I_s = \left| \frac{K'_i E_s K_d}{Z_j + Z_0 \times L} \right| - K'_i \left| \frac{E_d}{2(Z_j + Z_0 \times L + Z_d)} \right| \quad (13)$$

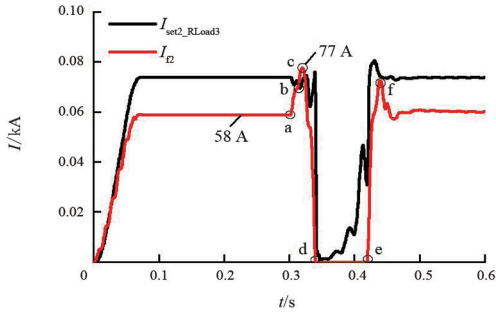
式中,接地故障 K_t 取 0,其余故障 K_t 取 1。

3 算例仿真

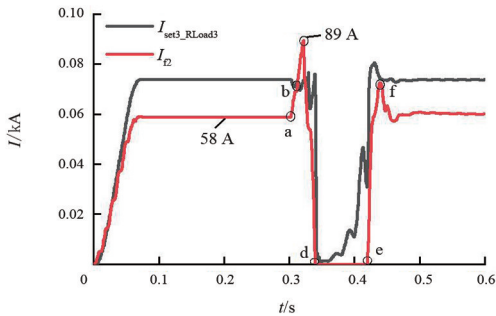
3.1 DG 下游保护动作的仿真实验

系统参数与第 1.2 节所示相同。设 0.3 s 时母线 C 到 Load3 段 F_2 处(50%处)发生 AB 相两相短路故障、ABC 三相短路故障,自动重合闸动作时间为 0.42 s,故障持续 0.05 s,总仿真时间 0.6 s。并网、离网、并网(DG 未接入)运行模式下 R_{Load3} 的操作电流及流过 R_{Load3} 处故障电流波形如图 4—图 6 所示。

观察图 4—图 6,在 0.3 s 时 a 点发生故障, R_{Load3} 检测到过电流,随着故障电流增大, R_{Load3} 的操作电流减小, b 点 R_{Load3} 的操作电流等于故障电流; b 点后,故障电流大于 R_{Load3} 的操作电流, 0.32 s 时继电保护装置动作,将故障线路切除;故障电流在 c 点达到最大值, c 点后, R_{Load3} 动作切除故障线路,故障电流降低至 d 点为 0;在 0.42 s (e 点),成功切除线路故障。

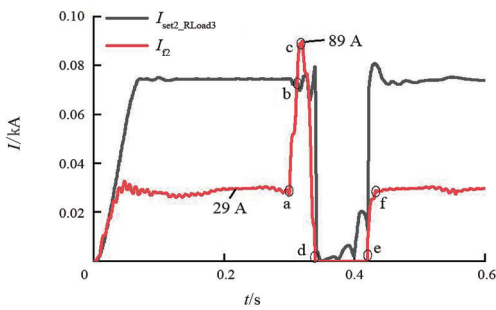


(a) AB相发生两相短路故障

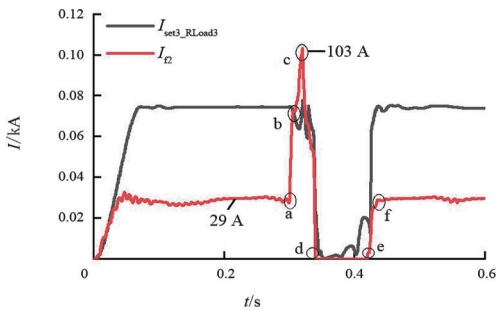


(b) ABC三相短路故障

图 4 并网运行下 F_2 处发生故障 R_{Load3} 动作

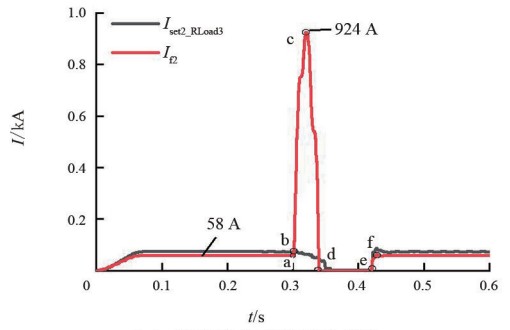


(a) AB相发生两相短路故障

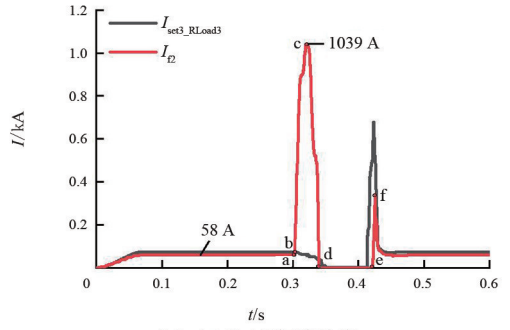


(b) ABC三相短路故障

图 5 离网运行下 F_2 处发生故障 R_{Load3} 动作



(a) AB相发生两相短路故障

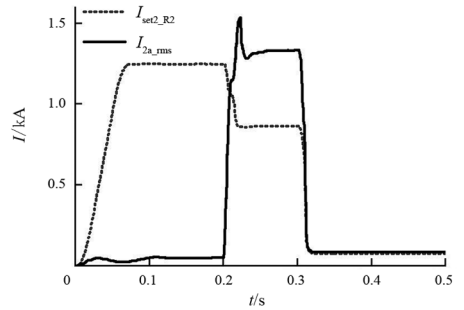


(b) ABC三相短路故障

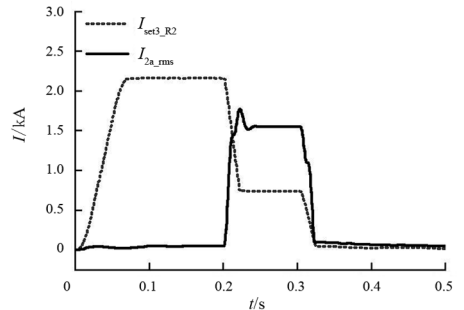
图 6 并网 (DG 未接入) 运行 F_2 发生故障 R_{Load3} 动作

3.2 DG 上游保护动作的仿真验证

设 0.2 s 时母线 BC 段 F_1 处发生 AB 相短路故障、ABC 三相短路故障,总仿真时间为 0.5 s,此时 R_2 和 R_{2-2} 的自适应过电流整定值、故障电流值如图 7、图 8 所示。



(a) AB相发生两相短路故障

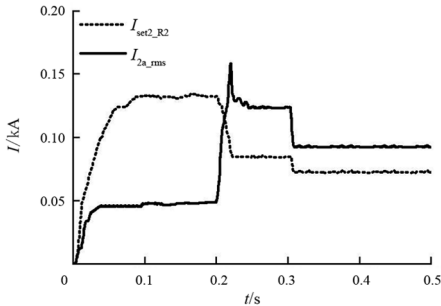


(b) ABC三相短路故障

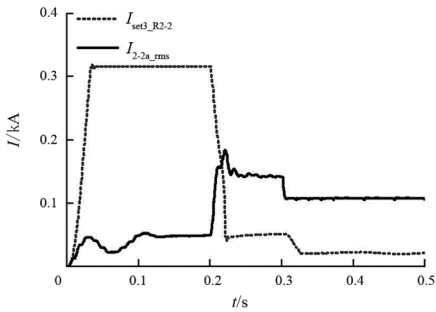
图 7 F_1 处发生故障 R_2 动作

观察图 7、图 8,在 0.2 s 时, F_1 处发生故障,故障电流增大,保护装置整定电流值随着故障电流的增

大而减小,故障电流在达到最大值后开始减小直至电流达到稳定,整定值也随之稳定。0.3 s时,系统进入离网运行模式,故障电流急剧减小,整定值也随之减小。可以看出,改进后的自适应过电流算法整定值更稳定,不会因系统受扰动而产生动作错误。



(a) AB相发生两相短路故障



(b) ABC三相短路故障

图8 F₁处发生故障 R₂₋₂动作

3.3 不同区域、不同位置故障情况下保护装置动作情况

0.2 s故障发生,持续0.3 s。其中F3位于AB段50%处,F4位于BC段70%处,F5位于母线C到Load3段30%处,F6位于母线AD段10%处,F7位于母线E到Load4段60%处,F8位于母线AF段70%处。由表4可看出所提保护方法在微电网不同区域、不同位置故障情况下都能可靠动作。

表4 不同区域、不同位置发生两相短路故障

故障区域	故障位置	保护装置	整定值/ kA	实测值/ kA	保护装置 动作情况
上游区域	F ₃	R ₁	2.3	3	动作
		R ₁₋₁	2.25	2.87	
	F ₄	R ₂	0.85	1.22	动作
		R ₂₋₂	0.095	0.146	
下游区域	F ₅	R _{Load3}	0.087	0.12	动作
		R ₃	2.69	3.15	
相邻 馈线	F ₆	R ₃₋₃	2.65	2.94	动作
		R _{Load4}	0.05	0.082	
	F ₇	R ₅	2.66	3.13	动作
		R ₅₋₅	2.63	3.1	

4 结论

上面将微电网分为上游区域和下游区域,提出一种适用于微电网分区域采取不同措施的综合保护方法。该方法具有如下特点:

- 1)采用分散式保护方案,由各馈线上的瞬时过流继电器负责监控和保护微电网,避免集中式保护中中央控制单元连接中断而造成的保护失败;
- 2)改进的自适应过电流算法考虑了系统不同微电源对故障电流的贡献,提高了保护定值的精度;
- 3)保护整定值具有自适应性,提高了保护的可靠性和灵敏性。

参考文献

- [1] 黄宜平,马晓轩.微电网技术综述(英文)[J].电工技术学报,2015,30(S1):320-328.
- [2] 方如举.基于正序阻抗的微电网线路故障定位策略的研究[J].可再生能源,2016,34(12):1819-1825.
- [3] 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.
- [4] 吐努合·阿米提,崔双喜,王维庆,等.一种新型微电网内部故障保护方案[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(6):166-173.
- [5] SHARAF H M, ZEINELDIN H H, IIRAHIM D K, et al. A proposed coordination strategy for meshed distribution systems with DG considering user-defined characteristics of directional inverse time overcurrent relays[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015,65:49-58.
- [6] 邓超平,唐志军,张曦,等.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.
- [7] 张孟琛,王宁,王美娟,等.基于多Agent的微电网自适应保护方案设计[J].燕山大学学报,2019,43(1):68-74.
- [8] 罗玲童,杨明玉,孟航.微电网线路保护方案优化研究[J].电测与仪表,2019,56(2):47-51.
- [9] TEIXEIRA J C, FERREIRA R R, PAVANI A G, et al. Method for adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed synchronous generators[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, USA,2015.
- [10] 张建华,史佳琪,郑德化,等.微电网运行与控制IEC标准进展与分析[J].电力系统自动化,2018,42(24):1-14.

- [11] ARUNKUMARI T, INDRAGANDHI V. An overview of high voltage conversion ratio DC-DC converter configurations used in DC micro-grid architectures[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 670-687.
- [12] MALEKI M G, JAVADI H, KHEDERZADEH M, et al. Data exchange standardization in a microgrid protection scheme according to the IEC 61850[C]//2015 Smart Grid Conference(SGC), Tehran, Iran, IEEE:2015.
- [13] GHOTBI-MALEKI M, JAVADI H, KHEDERZADEH M, et al. An adaptive and decentralized protection scheme for microgrid protection[C]//2016 Power System Protection and Control Conference (PSPC), 2016.
- [14] SHEN S F, DA L, WANG H F, 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.

- [15] 井淳子.逆变器型 DG 接入配电网对的影响及对等研究[D].西安:西安理工大学,2019.

作者简介:

糟伟红(1995),女,硕士,助理工程师,研究方向为可再生能源并网技术;

祁晓笑(1980),女,硕士,高级工程师,研究方向为大电网安全运行控制;

董雪涛(1988),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统规划、电力系统运行及电网安全分析等;

李德存(1981),男,高级工程师,主要从事电气试验和电气基建调试工作;

职凯华(1997),男,硕士,主要研究方向为继电保护。

(收稿日期:2022-06-09)

(上接第 31 页)

保护装置和变频运行后备保护装置,同步运行状态下投入差动保护装置和同步运行后备保护装置。不同状态下保护装置的切换、保护功能的投切、保护 CT 的切换均依靠控制系统根据机组运行状态自动进行,机组保护相关定值按第 3.3 节提出的方法整定。

在春厂坝变速抽水蓄能示范电站 FSC-VSPSU 调试期间,保护未发生误动事故,且两次正确动作切除了故障:第一次是转子磁场偏移导致横差电流偏大,横差保护动作切除了机组;第二次是机组控组策略问题导致机端电压升高,过电压保护动作切除了机组。

表 4 春厂坝 FSC-VSPSU 保护配置

一次设备	保护配置
35 kV 升压变压器	变压器差动保护装置
	高压侧后备保护装置
	低压侧后备保护装置
同步机组	差动保护装置
	变频运行后备保护装置
	同步运行后备保护装置

5 结 论

上面在分析 FSC-VSPSU 运行特性的基础上,提出了 FSC-VSPSU 保护配置和整定方法,解决了 FSC-VSPSU 继电保护运行难题。所提出的方法运用于国家重点研发计划“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范”项目的春厂坝变速抽水蓄能示范电站,保证了电站在试运行期间的安全稳定。另外,受制于保护改造成本和技术升

级风险,所提出的保护配置和整定方法均是在现有技术上的改进,下一步还需对 FSC-VSPSU 运行及故障特性进行深入研究,提出更具针对性的保护配置和整定方法。

参考文献

- [1] 畅欣.FSC 可变速抽水蓄能机组功率调节特性研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [2] 畅欣,韩民晓,郑超.全功率变流器可变速抽水蓄能机组的功率调节特性分析[J].电力建设,2016,37(4):91-97.
- [3] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机组快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,2022,46(4):162-169.
- [4] 戴理韬,高剑,黄守道,等.变速恒频水力发电技术及其发展[J].电力系统自动化,2020,44(24):169-177.
- [5] 梁廷婷,王凯,陈俊,等.变速抽水蓄能机组继电保护方案研究[J].水电与抽水蓄能,2020,6(5):62-67.
- [6] 中国电力企业联合会.抽水蓄能发电电动机变压器组继电保护装置技术条件:DL/T 2018—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.
- [7] 陈俊,王凯,袁江伟,等.大型抽水蓄能机组控制保护关键技术研究进展[J].水电与抽水蓄能,2016,2(4):3-9.
- [8] 中国电力企业联合会.抽水蓄能电站发电电动机变压器组继电保护整定计算技术规范:DL/T 2380—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.

作者简介:

周文越(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护。(收稿日期:2022-07-24)