

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200665

一种改进型配网自适应过流保护方法

高生凯¹, 曹炜¹, 张旭航^{1,2}, 赵宏成¹, 卫皇莅¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200120)

摘要: 在 DG 构成的配电网系统中, 通常采用电流保护作为配网的主保护。其中电流保护的整定值为定值, 随着 DG 的接入, 配电网结构发生变化, DG 并入位置不同会带来故障点无法准确判定的问题。针对此问题, 提出了一种基于通信的故障定位方案, 具体是引入方向元件并建立信息传递通道检测电流流向来准确判定故障点位置。由于 DG 接入容量的不同和故障前后 DG 所发出电流数值变化, 造成配网原有电流保护失配。针对此问题, 提出一种改进型自适应过流保护算法, 具体是通过检测故障电流正、负序含量, 确定故障类型, 采用不同的整定值, 使得电流保护的整定值时刻变化, 增强保护动作可靠性。将上述策略通过 PCSAD/EMTDC 仿真和动模实验室搭建实验模型来验证所提方案可以有效提高 DG 并网带来的保护动作准确性能。

关键词: DG; 配电网; 故障定位; 过流保护; 自适应

A novel adaptive overcurrent protection method for a distribution network

GAO Shengkai¹, CAO Wei¹, ZHANG Xuhang^{1,2}, ZHAO Hongcheng¹, WEI Huangli¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Corporation Economic and Technological Research Institute, Shanghai 200120, China)

Abstract: In a distribution network system composed of DG, current protection is usually adopted as its main protection. The setting value of current protection is a fixed value. With the access of DG, the structure of the network changes. Different locations of DG merging into it will bring the problem that the fault point cannot be accurately determined. In response to this, we propose a communication-based fault location scheme. It introduces directional components to detect the current flow to accurately determine the location of the fault point. The difference in DG access capacity and the change in the current value sent by DG before and after the fault cause an original current protection mismatch in the distribution network. We propose an improved adaptive overcurrent protection algorithm. By detecting the fault current positive and active sequence components, it determines the type of fault, and then uses different setting values, so that the setting value of current protection changes at any time, enhancing the reliability of protection action. The above strategy is verified by PCSAD/EMTDC simulation and experiment and shows that the proposed scheme can effectively improve the accuracy of the protection action brought by DG grid connection.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51807114).

Key words: DG; distribution network; fault location; overcurrent protection; adaptive

0 引言

随着光伏、风能等新能源大幅接入电网, 清洁能源所具有的无污染性逐渐被人们所重视^[1-7]。与此同时, 所带来的负面影响也逐步增加, 如新能源并网使得配电网由传统的单辐射状态转变为多辐射状,

严重影响配电网继电保护动作的可靠性^[8-13]。因此研究 DG 并网对配网继电保护的影响具有重要的实际意义。

近年来, DG 接入配电网对继电保护的影响成为了国内外的研究热点^[14-18]。对于 DG 接入电网后故障定位困难以及继电保护整定等相关问题。国外学者 Mahamad Nabab Alam 考虑了高渗透率 DG 并网后的网络拓扑结构变化、公共耦合点的连接状态

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助 (51807114)

图 2 为例, 当 f2 故障时, 通过检测母线 C 两侧方向元件的反馈值(++)可知故障点位于 DG 接入点下游, 进一步检测母线 D(++)和母线 E(--)两侧方向元件的返回值完成故障定位。

2) 若两个相邻母线间检测结果反馈值一侧均为“+”, 一侧均为“-”, 则故障点位于 DG 接入点上游。以图 2 为例, 当 f4 故障时, 通过检测母线 C(--)两侧方向元件的反馈值可知故障点位于 DG 接入点上游, 进一步检测母线 A(++)和母线 B(--)两侧方向元件的返回值完成故障定位。

2.2 自适应过流保护算法

1) DG 并网点下游发生不对称故障时, 如两相短路故障, 系统序网图如图 3。

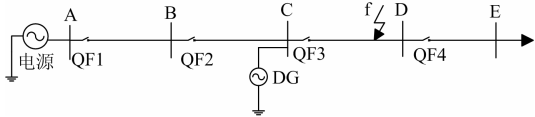


图 3 故障点位于 DG 接入点下游

Fig. 3 Fault point is located downstream of DG access point

通过图 4 可以得出等效网络图。

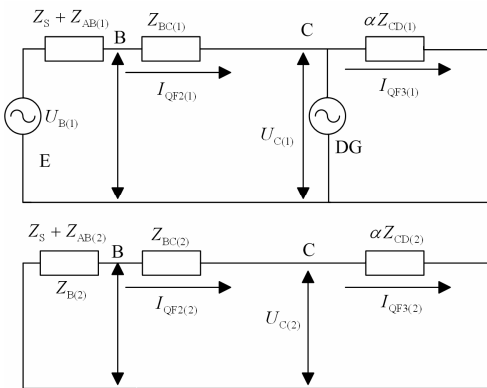


图 4 DG 接入点下游故障正、负序网络图

Fig. 4 Positive and negative sequence network diagram of DG access point downstream faults

由图 5 可以求得母线 C 处的电压:

$$U_C = I_{QF3} (Z_s + Z_{AC} + 2\alpha Z_{CD}) \quad (2)$$

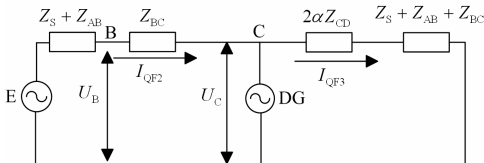


图 5 DG 接入点下游故障等效网络图

Fig. 5 Equivalent network diagram of DG access point downstream

因此保护 QF3 的整定值按式(3)整定。

$$I_{act,QF3}^I = \left| K_{rel}^I \frac{U_C}{Z_s + Z_{AC} + 2Z_{CD}} \right| \quad (3)$$

为使得当线路发生不对称故障时能保护线路全长, 令 α 取 1, 计算故障线路末端母线侧发生不对称故障时的故障电流为保护 QF3 的整定值。

K_b 为 CD 线路末端发生短路故障时, 流过保护 QF2、QF3 的电流之比。将其定义为分支系数:

$$K_b = \frac{I_{QF2}}{I_{QF3}} \leq 1 \quad (4)$$

DG 接入点上游保护 QF2 的 II 段整定值按照式(5)整定。

$$I_{act,QF2}^{II} = K_{rel}^{II} K_b I_{act,QF3}^I \quad (5)$$

2) DG 并网点下游发生对称故障时, 保护装置的整定电流通过计算故障点所在线段末端故障时的最大故障电流整定。

如图 6 所示, 将 α 取值为 1, 可计算流过保护 QF3 的故障电流, 该电流由系统和 DG 电源共同提供。

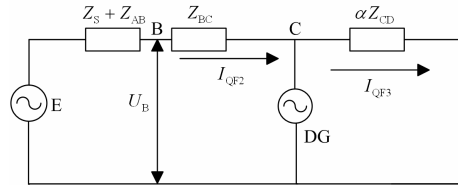


图 6 DG 接入点下游对称故障等效网络图

Fig. 6 Equivalent network diagram of symmetrical faults downstream of DG access points

$$I_{QF3} = \frac{E_s}{Z_s + Z_{AD}} + I_{DG} \frac{Z_s + Z_{AC}}{Z_s + Z_{AD}} \quad (6)$$

$$I_{act,QF3}^I = \left| K_{rel}^I I_{QF3} \right| \quad (7)$$

DG 接入点上游保护 QF2, 由于 DG 电源所提供的外汲作用, 导致流过保护 QF2 的电流减小, 因此需降低上游保护的 II 段整定值。

此时分支系数计算式为

$$K_b = \frac{I_{QF2}}{I_{QF3}} \leq 1 \quad (8)$$

DG 接入点上游保护 QF2 的整定值按照式(9)整定。

$$I_{act,QF2}^{II} = K_{rel}^{II} K_b I_{act,QF3}^I \quad (9)$$

DG 并网点上游发生不对称故障时: 如两相短路故障, 首先需要在 DG 接入母线上游添加保护装置, 如 QF5。如图 7 所示。

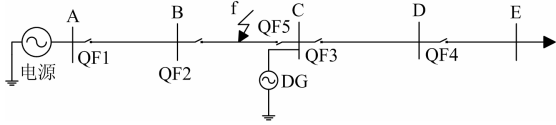


图 7 故障点位于 DG 接入点上游

Fig. 7 Fault point is upstream of pv access point

限于篇幅, 分析原理同下游故障相同, 在此不加赘述, QF2、QF5 整定式如下。

$$I_{act,QF2}^I = \left| K_{rel}^I \frac{U_B - I_{DG}(Z_s + Z_{AC})}{Z_s + Z_{AB} + 2Z_{BC}} \right| \quad (10)$$

$$I_{act,QF5}^I = \left| K_{rel}^I \frac{2U_C - E_s}{Z_s + Z_{AB} + 2Z_{BC}} \right| \quad (11)$$

DG 接入点上游发生对称故障时, QF2 整定值不变, QF5 整定式如式(12)。

$$I_{act,QF5}^I = \left| K_{rel}^I \frac{U_C}{Z_{BC}} \right| \quad (12)$$

2.3 自适应电流保护流程图(图 8)

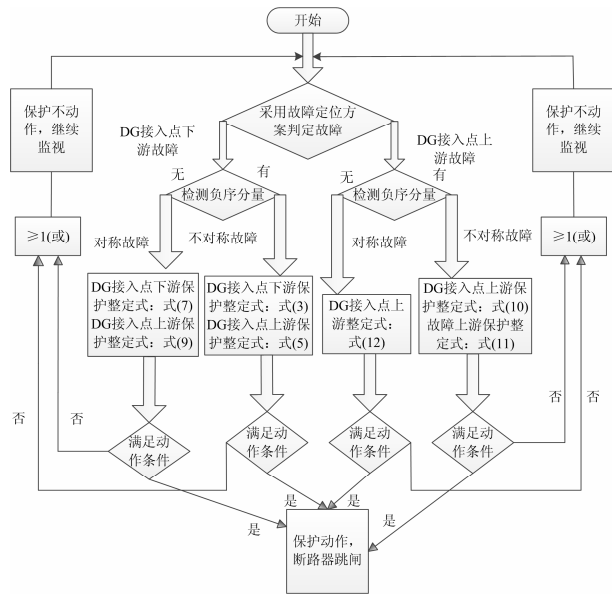


图 8 自适应电流保护流程图

Fig. 8 Flow chart of current adaptive protection

本文所提自适应电流保护由判定故障位置、检测故障类型以及实时计算保护整定值三部分组成。

3 算例验证

利用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型, 选取配电网电压等级为 10 kV, 基准电压为 10.5 kV, 保护配置情况为瞬时电流速断保护和限时电流速断保护构成两段保护, 瞬时电流速断保护可靠系数取值

1.25, 限时电流速断保护可靠系数取值 1.1, 系统最大运行方式下阻抗值取 0.091, 最小运行方式下阻抗值取 0.126。图 9 为配电网结构示意图; 图 10 为含 DG 的配电网系统结构图。表 1 为系统保护整定值。

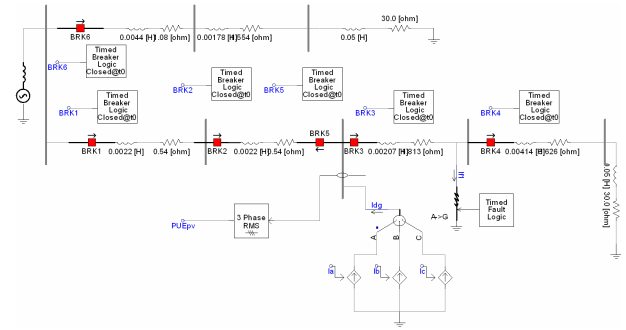


图 9 配电网结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of distribution network structure

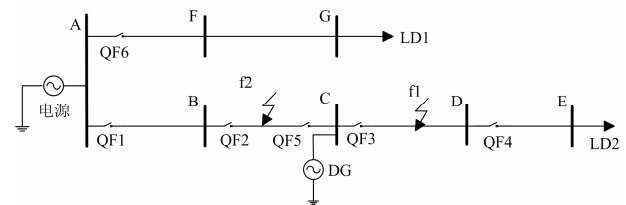


图 10 含 DG 的配电网系统结构图

Fig. 10 Distribution network system structure diagram with DG supply

表 1 系统保护整定值

Table 1 System protection setting

保护名称	线路末端三相	电流速断	限时电流
	短路电流/kA	保护/kA	速断保护/kA
QF1	6.0	7.5	4.7
QF2	3.26	4.1	2.38
QF3	1.65	2.07	1.168
QF4	0.8	1.02	—

采用图 10 的模型进行算例分析, 验证在不同并网 DG 容量下, 配电网不同位置发生故障时采用本文所提改进自适应过流保护算法的可行性。

并网 DG 容量采用 8 MVA、10 MVA、20 MVA 进行分析, 并网点在母线 C 处。选取线路的 30%和 60%来模拟不同位置发生故障, 比较不同情况下输电线路所配置保护的整定值和实测值。

3.1 仿真波形分析

若配电网采用传统的过流保护, 基于图 9 的仿真模型中, 设置 0.7 s 时加入短路故障, 故障设置持续时间为 0.1 s, 断路器延时时间设置为 0.05 s, 0.85 s 重合闸动作, 系统恢复供电。设 DG 容量为 8 MVA, 观察 DG 接入前后并入点上下游短路故障时的电流

变化情况。

1) DG 接入点下游 f1 发生三相短路故障

在 CD 线路 80%处发生三相短路故障时，流过保护 QF2、QF3、QF4 的电流波形如图 11 所示。图 12 为系统接入 DG 时 f1 发生三相短路故障的电流波形。

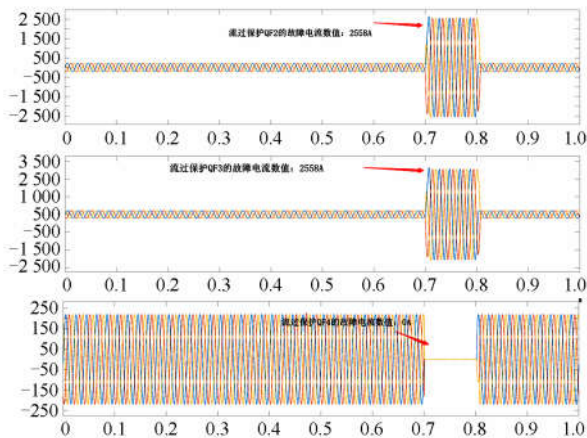


图 11 系统未接入 DG 时 f1 发生三相短路故障的电流波形
Fig. 11 Current waveform of three-phase short-circuit fault in f1 when the system is not connected to DG

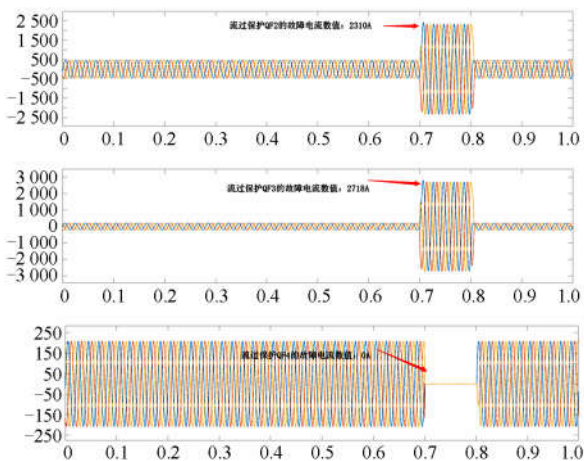


图 12 系统接入 DG 时 f1 发生三相短路故障的电流波形
Fig. 12 Current waveform of three-phase short-circuit fault in f1 when the system is connected to DG

通过比较图 11 和图 12 发生故障时流过保护 QF2、QF3、QF4 的故障电流数值，未接入 DG 时，流过 QF2、QF3 的电流均为 2 558 A，依据表 1 系统保护整定值可知，保护 QF3 的电流保护 I 段可有效切除故障，QF2 的电流 II 段保护可作为 QF3 的后备保护，当 QF3 保护拒动时可利用 QF2 的延时动作。在接入 DG 后，流过保护 QF2 的电流为 2 310 A，流过 QF3 的电流为 2 718 A，此时流过 QF3 的电流

增加是由于 DG 对并网点下游的助增作用，流过 QF2 的电流减少是由于 DG 对并网点上游的外汲作用。

上述现象所造成的的后果是：由于 DG 的助增作用，导致流过 QF3 的故障电流增大，扩大 QF3 的保护范围，若其保护范围延伸至下级线路，会使保护 QF3、QF4 无法正常配合，扩大停电范围。同理，由于 DG 对上游线路的外汲作用，会减少流过保护 QF2 的故障电流，如图 12 可知，接入 DG 后流过保护 QF2 电流为 2 310 A，小于 QF2 的电流 II 段动作的整定电流 2 380 A，此时 QF2 无法作为 QF3 的后备保护，使得 QF2 的保护范围缩短，产生保护拒动的可能性。

2) DG 接入点上游 f2 发生三相短路故障

在 BC 线路 70%处发生三相短路故障时，流过保护 QF2 和 QF5 的电流波形如图 13 所示。图 14 为系统接入 DG 时 f2 发生三相短路故障的电流波形。

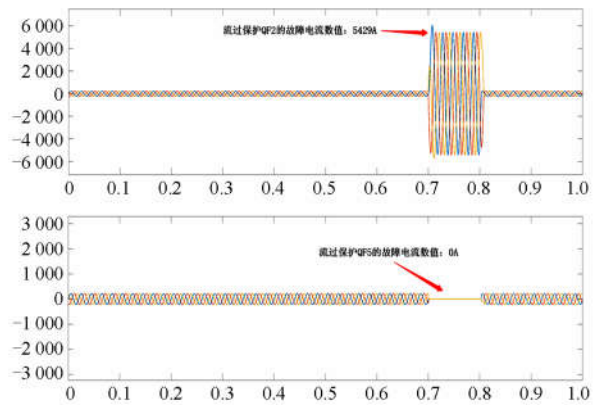


图 13 系统未接入 DG 时 f2 发生三相短路故障的电流波形
Fig. 13 Current waveform of three-phase short-circuit fault in f2 when the system is not connected to DG

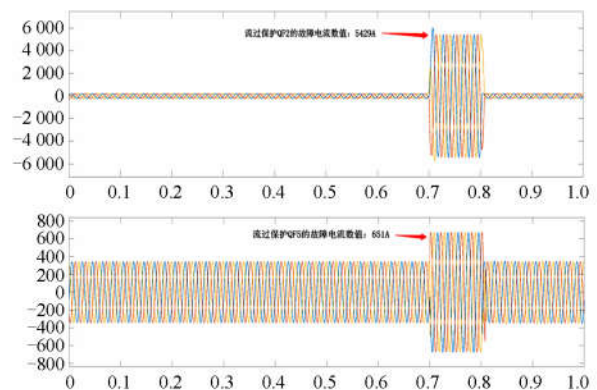


图 14 系统接入 DG 时 f2 发生三相短路故障的电流波形
Fig. 14 Current waveform of three-phase short-circuit fault in f2 when the system is connected to DG

通过比较图 13 和图 14 发生故障时流过保护 QF2 和 QF5 的故障电流数值, 未接入 DG 时, 流过 QF2 的故障电流为 5 429 A, 该数值大于 QF2 的电流 I 段保护, 且大于 QF1 的 II 段保护, 因此 QF2 可以瞬时切除故障, 若 QF2 主保护拒动, QF1 的电流 II 段保护可作为 QF2 的后备保护延时 0.5 s 跳闸切除故障。在接入 DG 后, 流过保护 QF2 的电流依旧为 5 429 A, 但此时 QF5 电流与未接入 DG 相比, 并不是 0, 此时流过 QF5 的故障电流为 651 A。

上述现象所造成的后果是: DG 并网点上游发生故障时, 在 DG 的作用下, DG 依旧向故障点输送电流, 若此时重合闸动作, 可能造成非同期重合闸, 产生较大的短路电流, 对系统的稳定性造成影响。

通过分析上述波形可以得出以下结论:

1) 故障点位于光伏接入点下游时, 存在助增和外汲现象, 造成下游保护灵敏度增大, 存在误动可能; 上游保护灵敏度降低, 存在拒动可能性。造成保护之间不能可靠配合, 扩大停电范围, 对配电网的可靠持续供电造成一定影响。

2) 故障点位于光伏接入点上游时, 若为瞬时性故障, 存在非同期重合闸现象, 产生较大的短路电流, 对系统运行稳定性造成影响。

3.2 仿真数据分析

为验证本文所提改进自适应电流保护的有效性, 对不同故障类型、不同 DG 容量以及不同故障点处均进行故障仿真分析, 仿真结果以数据形式展现, 验证本文所提方案的有效性。

1) 系统发生对称故障时

表 2 为 CD 线路发生三相短路仿真数据。

表 2 CD 线路发生三相短路仿真数据

Table 2 Simulation results of three-phase short circuit in CD line

故障位置	DG 容量/ MVA	QF3/kA(I 段)		QF2/kA(II 段)	
		整定值	测量值	整定值	测量值
30%CD	8	2.58	3.242	2.054	2.582
	10	2.592	3.370	1.957	2.545
	20	3.08	4.010	1.81	2.360
60%CD	8	2.58	2.624	1.931	1.964
	10	2.592	2.727	1.807	1.902
	20	3.08	3.244	1.513	1.594

由表 2 可知:

(1) 在相同 DG 容量下, 故障点越靠近 DG 并网点, 并网点下游电流助增现象越严重, 此时会导致

QF3 的灵敏度增大, 扩大其保护范围, 误动的可能性增加; 故障点越远离 DG 并网点, 并网点上游外汲现象越严重, 通过对比表 1 和表 2 可知, QF2 在容量增加或故障点距离并网点越远时, 故障电流小于 QF2 的 II 段动作电流, QF2 的拒动可能性增大, QF2 与 QF3 失去配合。

(2) 在相同故障距离情况下, DG 容量越大, 对并网点下游保护所产生的助增电流越大, 保护误动作的可能性就越大; 对并网点上游保护所产生的外汲电流越大, 保护拒动的可能性越大。

(3) 采用本文所提的改进自适应电流保护后: 保护 QF3 的整定值随着 DG 容量的增大而增大, 使 QF3 的电流 I 段保护准确动作。QF2 的电流 II 段保护依旧可以作为 QF3 的后备保护, 并且保护动作值随 DG 容量的变化而实时变化, 满足电流保护的可靠性与选择性。

由表 3 可以看出: (1) 当 DG 并网点上游发生故障时, DG 容量大小对故障点上游保护 QF2 无影响, 因此采用原有配网保护整定即可。(2) DG 并网点与故障点之间需配置保护 QF5, BC 线路发生时 QF5 电流保护 I 段可以准确动作, 一方面可以确保发生故障时能够迅速断开 DG 电源与故障点之间的联系, 另一方面也可预防瞬时性故障时非同期重合闸现象。

表 3 BC 线路发生三相短路仿真数据

Table 3 Simulation data of three-phase short-circuit in BC line

故障位置	DG 容量/ MVA	QF2/kA(I 段)		QF5/kA(I 段)	
		整定值	测量值	整定值	测量值
30%BC	8	4.1	6.485	0.525	0.625
	10	4.1	6.485	0.683	0.814
	20	4.1	6.485	1.354	1.613
60%BC	8	4.1	5.435	0.304	0.634
	10	4.1	5.435	0.396	0.827
	20	4.1	5.435	0.782	1.629

2) 系统发生不对称故障时

表 4—表 6 为 CD 线路发生两相短路仿真结果。

表 4 CD 线路发生两相短路仿真结果

Table 4 Simulation results of two-phase short-circuit in CD line

故障位置	DG 容量/ MVA	QF3/kA(I 段)		QF2/kA(II 段)	
		整定值	测量值	整定值	测量值
30%CD	8	1.66	2.647	1.351	2.155
	10	1.721	2.737	1.326	2.109
	20	2.075	3.301	1.205	1.918
60%CD	8	1.87	2.146	1.428	1.639
	10	1.932	2.217	1.371	1.574
	20	2.299	2.638	1.102	1.265

表 5 CD 线路发生单相接地短路仿真结果
Table 5 Simulation results of single-phase grounding short circuit in CD line

故障位置	DG 容量/ MVA	QF3/kA(I 段)		QF2/kA(II 段)	
		整定值	测量值	整定值	测量值
30%CD	8	1.85	2.940	1.560	2.480
	10	1.905	3.030	1.534	2.440
	20	2.213	3.521	1.409	2.243
60%CD	8	1.490	2.370	1.190	1.893
	10	1.535	2.442	1.150	1.830
	20	1.8	2.865	0.952	1.516

表 6 CD 线路发生两相接地短路仿真结果
Table 6 Simulation results of two-phase ground short circuit in CD line

故障位置	DG 容量/ MVA	QF3/kA(I 段)		QF2/kA(II 段)	
		整定值	测量值	整定值	测量值
30%CD	8	1.857	2.954	1.562	2.486
	10	1.922	3.057	1.534	2.440
	20	2.218	3.529	1.409	2.243
60%CD	8	1.495	2.377	1.194	1.899
	10	1.54	2.450	1.156	1.840
	20	1.806	2.872	0.956	1.521

由表 4—表 6 可以看出：(1) 当发生相间短路时：采用文中所提的电流整定方式可以使得 DG 接入点下游保护 QF3 整定值随着 DG 容量的增大而增大，QF2 电流保护 II 段可作为 QF3 的后备保护，可有效解决助增作用所产生的灵敏度增高而导致的误动、外汲作用所产生的灵敏度降低而导致的拒动现象。(2) 当发生接地短路时：采用文中所提的电流整定方式可以使得在不同 DG 并网容量、不同故障位置时可以准确动作。有效地验证了在故障定位后，不对称故障均可采用文中所提的改进型自适应保护整定式进行实时整定。

表 7 为 BC 线路发生两相短路仿真结果。

表 7 BC 线路发生两相短路仿真结果

Table 7 Simulation results of two-phase short-circuit in BC line

故障位置	DG 容量/ MVA	QF2/kA(I 段)		QF5/kA(I 段)	
		整定值	测量值	整定值	测量值
30%BC	8	2.971	5.670	0.573	0.635
	10	2.927	5.655	0.718	0.795
	20	2.74	5.635	1.423	1.575
60%BC	8	3.332	4.600	0.522	0.647
	10	3.312	4.603	0.659	0.817
	20	3.298	4.715	1.282	1.589

由表 7 可以看出：(1) 当 DG 并网点上游发生不对称故障时，采用文中所提的电流整定方式可以使

得故障点上游保护 QF2 电流保护 I 段随着 DG 容量的增大而实时变化，确保保护 QF2 可以准确跳闸。

(2) DG 并网点上游保护 QF5 随着 DG 容量的变化而实时变化，在不同 DG 容量与故障距离情况下，进行故障位置确定后，依据故障情况实时改变动作整定值，实现 BC 线路任何位置出现两相短路时，保护 QF5 均能准确动作。

4 实验分析

为了验证本文所提改进方案的可行性，搭建 DG 并网的简易平台，实验平台硬件如下：逆变器选择 SUNGROW 公司的 SG10KTL-EC，故障模拟柜选择上海文顺电气公司的 WSTF-10JKIA-380 V，示波器选择中元华电的 ZH-102 便携录波仪。实验参数和仿真参数类似，观测本文所提自适应保护算法的 DG 输出电流变化以及故障检测是否能够实现。图 15—图 22 为各项仿真波形。

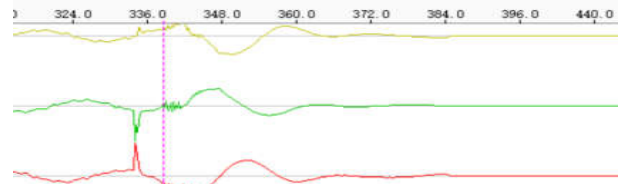


图 15 三相短路前后故障电流变化

Fig. 15 Change of fault current before and after three-phase short circuit

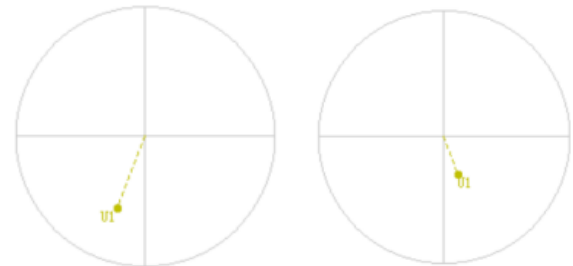


图 16 三相短路故障前后电流成分

Fig. 16 Current components before and after three-phase short-circuit fault

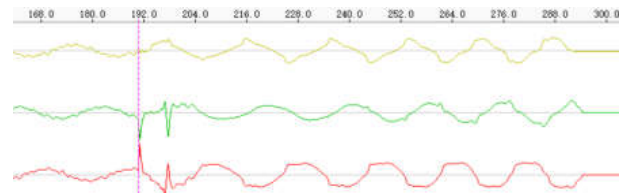


图 17 两相短路前后故障电流变化

Fig. 17 Change of fault current before and after two-phase short circuit



图 18 两相短路故障前后电流成分
Fig. 18 Current components before and after a two-phase short-circuit fault



图 22 两相接地短路故障前后电流成分
Fig. 22 Current components before and after two-phase ground short circuit fault

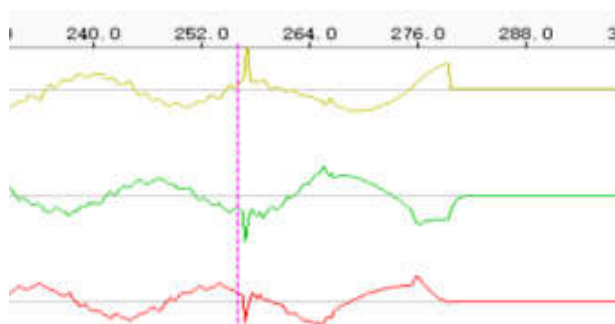


图 19 单相接地短路前后故障电流变化
Fig. 19 Change of fault current before and after single-phase grounding short circuit



图 20 单相接地短路故障前后电流成分
Fig. 20 Current components before and after single-phase ground short circuit fault

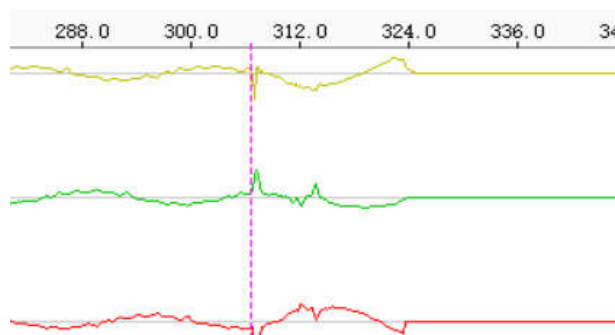


图 21 两相接地短路前后故障电流变化
Fig. 21 Change of fault current before and after two-phase ground short circuit

通过对比不同类型故障前后的电流变化及故障电流成分可以看出:(1)采用实验模型模拟配网发生故障时, DG 输出电流具有一定的限幅功能,故障时 DG 输出故障电流为额定电流 1.3~1.5 倍。(2)实验模型模拟配网发生三相短路时,故障前后电流成分为正序分量,不存在负序和零序分量;模拟不对称故障时,故障前后电流成分为正序分量和少量负序分量;模拟不对称接地故障时,故障前后电流成分为正序分量和少量负序分量,不存在零序分量。

通过采用动模实验室搭建实验模型,所得结论可以佐证本文所提的保护整定方法以及故障类型判定的有效性。

5 结论

本文以 10 kV 的典型 DG 接入配网为研究模型,针对传统 DG 接入配网导致电网结构变化,故障无法准确定位的问题,提出一种基于通信线路的故障定位方案;针对配网电流保护失配问题,提出了一种改进型自适应保护算法。

仿真和实验结果表明:本文所提的自适应保护算法在不同 DG 容量、不同故障位置、不同故障类型下均能够可靠动作,保证了供电可靠性,提高了 DG 并网中各个电源点的利用率。本文所提方案具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 于淼, 汤亚芳, 黄亦欣, 等. 双馈风机控制方式对继电保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 180-187.
YU Miao, TANG Yafang, HUANG Yixin, et al. Research on the influence of doubly-fed fan control mode on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 180-187.
- [2] 张安龙, 李艳, 黄福全, 等. 基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 111-117.
ZHANG Anlong, LI Yan, HUANG Fuquan, et al.

- Adaptive protection and self-healing control method for distribution network based on dynamic topology analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(11): 111-117.
- [3] 刘力, 于佳丽. 不对称电网电压下光伏并网逆变器控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(10): 2848-2856.
LIU Li, YU Jiali. Research on control strategy of photovoltaic grid-connected inverter under asymmetric gridvoltage[J]. *Acta Eergiae Solaris Sinica*, 2017, 38(10): 2848-2856.
- [4] 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, 13.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter type distributed power supply[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 65-74, 13.
- [5] 奚鑫泽, 徐志, 高尚. 直流变压器光伏中压并网故障运行特性研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(5): 89-95.
XI Xinze, XU Zhi, GAO Shang. Fault operation of DC transformer for the PV medium voltage DC grid[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(5): 89-95.
- [6] 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, LÜ Feipeng, YU Xiao, et al. Vertical protection scheme of distributed power distribution network with T-connected inverter[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(11): 74-79.
- [7] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Springer Singapore, 2020, 5(16).
- [8] 吕承, 郜能灵, 郑晓冬, 等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(1): 115-121.
LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(1): 115-121.
- [9] 王增平, 杨国生, 王志洁, 等. 继电保护相关的国内外分布式电源并网标准[J]. *中国电力*, 2019, 52(8): 112-119.
WANG Zengping, YANG Guosheng, WANG Zhijie, et al. Domestic and international distributed power grid connection standards related to relay protection[J]. *Electric Power*, 2019, 52(8): 112-119.
- [10] SULIMAN M Y, GHAZAL M. Design and implementation of overcurrent protection relay[J]. Springer Singapore, 2020, 15(4).
- [11] 焦彦军, 梁宵, 蒋晨阳. 计及 LVRT 光伏电站并网下方向元件动作区域计算[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(7): 20-24.
JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Taking into account the calculation of the action area of the directional element under the connection of the LVRT photovoltaic power plant[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(7): 20-24.
- [12] 孙玉伟, 刘亚东, 方健, 等. 分布式光伏接入对配电网线路故障定位的影响分析[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 102-107.
SUN Yuwei, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Analysis of the influence of distributed photovoltaic access on fault location of distribution network lines[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 102-107.
- [13] 王卫卫, 李可. 分布式 DG 发电及其对配电网的影响综述[J]. *电力学报*, 2017, 32(6): 466-470.
WANG Weiwei, LI Ke. Overview of distributed DG power generation and its impact on distribution network[J]. *Journal of Electric Power*, 2017, 32(6): 466-470.
- [14] 李永. 含 DG 的配电网保护新方案[J]. *南方农机*, 2020, 51(1): 130-131.
LI Yong. A new scheme for distribution network protection with DG[J]. *Southern Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 130-131.
- [15] 黄昱翰, 蔡泽祥, 潘天亮, 等. 面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(2): 47-52.
HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Wide area protection control scheme for closed-loop operation distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(2): 47-52.
- [16] 孔祥平, 袁宇波, 黄浩声, 等. 光伏电源故障电流的暂态特征及其影响因素[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2444-2449.
KONG Xiangping, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, et al. Transient characteristics of photovoltaic power supply fault current and its influencing factors[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2444-2449.
- [17] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(1): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [18] 王珊珊, 吕飞鹏, 张国星. 含分布式电源多点接入的配电网新型纵联保护[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(4): 49-54, 77.
WANG Shanshan, LÜ Feipeng, ZHANG Guoxing. A new type of vertical protection for distribution network with multi-point access of distributed power supply[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(4): 49-54, 77.

- 49-54, 77.
- [19] ALAM M N, GOKARAJU R, CHAKRABARTI S. Protection coordination for networked microgrids using single and dual setting overcurrent relays[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2020, 14(14).
- [20] SINGH M, BASAK P. Adaptive protection methodology in microgrid for fault location and nature detection using q_0 components of fault current[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2019, 13(6).
- [21] AN Wen, MA Junjie, ZHOU Hongyang, et al. An adaptive differential protection and fast auto-closing system for 10 kV distribution networks based on 4G LTE wireless communication[J]. MDPI, 2019, 12(1).
- [22] MAJID N I, PRASETIA H, NOPRIANSYAH A. Mitigation of communication failures on line current differential relays by adding automatic function switching logic to improve protection system reliability, study case in PT PLN (Persero)[C] // 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), October 1-4, 2019, Denpasar, Indonesia: 227-229.
- [23] 张孟琛, 牛益国, 宣文华. 含 DG 配电网分层分区协同故障定位隔离技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 115-121.
- ZHANG Mengchen, NIU Yiguo, XUAN Wenhua. Layered and partitioned cooperative fault location and isolation technology of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 115-121.
- [24] 谢民, 王同文, 徐靖东, 等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 78-84.
- XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Influence of distributed power supply on distribution network relay protection and comprehensive improvement protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.
- [25] 王瑞妙, 欧阳金鑫, 高晋, 等. 电网三相短路下 DG 发电短路电流特性分析[J]. 计算机仿真, 2015, 32(10): 140-143, 397.
- WANG Ruimiao, OUYANG Jinxin, GAO Jin, et al. Analysis of short-circuit current characteristics of DG power generation under three-phase short circuit in power grid[J]. Computer Simulation, 2015, 32(10): 140-143, 397.
- [26] ELMITWALLY A, KANDIL M S, GOUDA E, et al. Mitigation of DGs impact on variable-topology meshed network protection system by optimal fault current limiters considering overcurrent relay coordination[J]. Elsevier BV, 2020, 186.
- [27] 窦小晶, 薛钊, 叶日新, 等. 10 kV 分布式电源并网对配电网继电保护的影响分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 117-122.
- DOU Xiaojing, XUE Zhao, YE Rixin, et al. Analysis of the influence of 10 kV distributed power grid connection on relay protection of distribution network[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 117-122.
- [28] 林湘宁, 翁汉俐, 吴科成, 等. 小电流接地系统自适应单相接地保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 52-57.
- LIN Xiangning, WENG Hanli, WU Kecheng, et al. New principle of adaptive single-phase grounding protection for small current grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 52-57.
- [29] PRASAD C D, BISWAL M, ABDELAZIZ A Y. Adaptive differential protection scheme for wind farm integrated power network[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187.
- [30] KOUROSH E, MORTEZA B, PARINAZ S. Influence of impressed current cathodic protection systems on chemical characteristics of underground water[J]. Water Environment Research, 2020, 92(12).
- [31] 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研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3203-3213.
- YOU Yingmin, WANG Jingqin, SHU Liang, et al. Research on adaptive control strategy of circuit breaker protection characteristic test current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3203-3213.
- [32] 刘刚, 陈莎, 仝进, 等. 含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 50-56.
- LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault recovery method of distribution network with distributed power access[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 50-56.
- [33] 郭晓龙, 秦文萍, 韩肖清, 等. 基于故障后电流相位的含 DGs 配电网故障快速方向识别算法及 RTDS 仿真验证[J]. 太阳能学报, 2020, 41(3): 133-139.
- GUO Xiaolong, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Fast direction identification algorithm and RTDS simulation verification for distribution network with DGs based on current phase after fault[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(3): 133-139.

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-09-13

作者简介:

高生凯(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事光伏并网及控制方向研究; E-mail: 13853948613@163.com

曹炜(1963—), 女, 硕士生导师, 副教授, 研究方向为电力系统分析与仿真计算;

张旭航(1962—), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与仿真计算。

(编辑 葛艳娜)