

基于图论的智能配电网馈线保护研究

田果, 黄小莉, 邓强, 刘洁

(西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039)

摘要: 智能配电网的出现使配电网保护技术面临新的挑战, 为此提出一种适用于智能配电网的馈线保护算法。该算法结合图论知识, 对配电网的有向图进行分析, 把所有智能电子设备(IED)分成互联组和后备互联组, 利用 IED 采集的故障信息实现故障的定位和隔离, 原理简单, 所需信息量少。研究了网络结构变化、IED 拒动、断路器失灵等异常情况给馈线保护算法带来的影响, 提出相应的容错算法应对这些异常情况。算例分析结果表明: 算法对故障区段的判断结果准确, 且能够应对网络结构变化和异常情况的发生。

关键词: 智能配电网; 馈线保护; 图论; 分布式决策; 容错算法

Feeder protection based on graph theory in smart distribution system

TIAN Guo, HUANG Xiaoli, DENG Qiang, LIU Jie

(School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Appearance of smart distribution system makes protection technology face new challenges, a feeder protection algorithm based on graph theory for smart distribution system is proposed. Using graph theory, analyzing directed graph of distribution network, dividing all IEDs into interconnected group and reserve interconnected group, the fault section can be diagnosed and isolated through fault overcurrents information from IED, the principle is simple and less information is required. Impacts of such abnormal conditions as malfunction of IED or circuit breaker and the change of network topology are discussed. To cope with abnormal conditions the fault-tolerance algorithms are given. The result of case show that the fault estimation results are exact and immune against abnormal conditions.

Key words: smart distribution system; feeder protection; graph theory; distributed decision; fault-tolerance algorithms

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0095-05

0 引言

近年来, 智能电网技术已经逐步成为世界各国电力行业研究的热点, 智能配电网作为智能电网的重要组成部分之一, 具有支持大量分布式电源(Distributed Generation, DG)合理接入的特征^[1-4]。DG 的合理接入不仅具有发电灵活、启停方便、投资少的优点, 而且能够提高配电网的供电可靠性和防灾害能力, 符合智能电网框架的发展要求。

解决配电网中大量分散 DG 的运行问题是智能配电网发展的目标之一^[5-8]。智能电网故障时, 为使

传统继电保护正确动作, 切除 DG 的做法削弱了其提高配电网供电可靠性的优势, 但是若 DG 继续为负荷供电, 传统的继电保护就会出现保护误动、保护盲区、保护灵敏度降低等问题。为了充分发挥 DG 提高配电网供电可靠性的优势, 对智能配电网馈线保护的研究具有重要意义。

本文针对含有 DG 的智能配电网, 提出一种基于图论的智能配电网馈线保护算法, 分析配电网的有向图, 把所有 IED 分成互联组和后备互联组, 利用 IED 采集的故障信息实现故障的定位和隔离。在此基础上, 提出了应对 IED 拒动、断路器失灵和通信系统拥堵等异常情况相应的容错算法。

1 智能电网的馈线保护

1.1 图论在智能电网中的应用

图论的核心思想是图，图是由顶点集合及顶点之间的关系集合组成的一种结构^[9]。在电力系统中，我们所要研究的是电网络中的电气元件，比如变电站母线、输电线路等。本文规定：在建立与电网络等效的图时，以电力系统中电气元件为顶点，所有 IED 为边，通过监测边达到保护各顶点的目的。

图论中有有向图、无向图和完全图^[10]。有向图可以很好地描述电力系统中的电气矢量，所以把配电网结构图等效为有向图，电气量的正方向和有向图的正方向一致。本文规定：由母线到相邻馈线的方向为正方向。

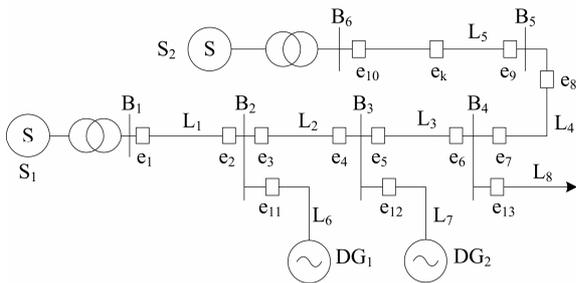


图 1 简化的智能配电网结构

Fig. 1 Simplified structure for smart distribution network

图 1 是简化的智能配电网结构图， $B_1 \sim B_6$ 是母线， $L_1 \sim L_8$ 是馈线， $e_1 \sim e_{13}$ 是 IED，每个 IED 对应一个断路器。 e_k 是联络开关 K 对应的 IED，配电网正常运行时开关 K 处于断开状态^[11]。图 2 是图 1 对应的有向图，箭头指向为正方向，矩形框内电路有开关 K，在配电网正常运行时开关 K 处于断开状态。

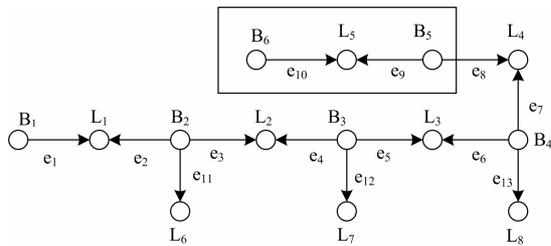


图 2 有向图

Fig. 2 Directed graph

1.2 智能电网故障的检测与隔离算法

智能电网馈线保护系统采用分布式决策结构，每段馈线的首末两端各安装一个 IED，每个 IED 对应一个断路器。IED 的工作有三个部分：

(1) 采集安装点故障信息，与规定范围内的 IED 联络并获取这些 IED 安装点的故障信息；

(2) 处理采集到的故障信息，判断 IED 所保护的馈线是否故障；

(3) 若 IED 保护的馈线有故障发生，向对应的断路器发出跳闸指令。

配电网的故障信息有很多种，比如故障距离信息，故障电气量方向、相位、幅值信息等^[12]。故障过电流方向是方向与幅值信息的综合，对故障的判断更加准确，且故障方向指示明确，所以故障过电流方向是本文 IED 需要采集的故障信息，并且定义 A_F 为过流方向系数。

$$A_F = \begin{cases} 1 & \text{过流方向和正方向一致} \\ -1 & \text{过流方向和正方向相反} \\ 0 & \text{没有检测到过流方向} \end{cases} \quad (1)$$

1.2.1 IED 互联组的划分

本文对配电网中主线上所有的 IED 分组，馈线两侧的 IED 为一个互联组，只有同互联组的 IED 才相互联络，获取对方的故障信息。联络开关 K 对应的 IED 可以和所有 IED 联络，线路故障后 IED 向联络开关 K 发出闭合指令，使主电源 2 继续为系统供电。

1.2.2 互联组有向图的分析

对互联组有向图中的两个故障过电流方向进行分析，将两者的 A_F 相加，分析结果如表 1 所示。主电源 1 在母线 B_1 侧(并非直接和 B_1 相连)，有向图下方箭头指向是过电流的方向，有向图下方无箭头表示没有过电流。

表 1 互联组两个故障过电流的关系

Table 1 Relations of overcurrent fault in interconnection group

	所有情况	有向图	A_F 之和
线路 L 故障	L 上游有 DG		1+1=2
	L 上游无 DG		1+0=1
线路 L 无故障	L 上游故障		1-1=0
	L 下游故障，且上游有 DG		-1+1=0
	L 下游故障，且上游无 DG		0+0=0
	配电网正常运行		0+0=0

由表 1 可以得出以下结论：IED 互联组的 A_F 之和非 0，该段馈线发生故障；互联组的 A_F 之和为 0，该段馈线无故障。此结论就是本文故障检测与隔离的判据。

2 保护算法的容错性能

在隔离智能配电网故障的过程中,可能会出现 IED 拒动、断路器失灵等异常情况^[13],智能配电网的保护算法要有应对这些异常情况的方案,及时隔离故障确保系统安全运行。

出现上述异常情况时,互联组就失去了检测或隔离故障的能力,因此需要后备互联组来完成故障的检测和隔离。互联组内正常运行的 IED 与故障 IED 相邻的所有 IED 联络,包括主线路 IED、DG 分支 IED 和负荷分支 IED,构成后备互联组。

本文只考虑同互联组内一个 IED 故障的情况,不考虑两个 IED 同时故障的极端情况。

2.1 IED 拒动的情况

2.1.1 IED 拒动的判据

IED 拒动是指 IED 有能力检测所在线路是否故障,但却失去了隔离故障的能力。IED 拒动与断路器失灵的情况类似,断路器失灵的情况按照 IED 拒动的情况处理。

配电网某段馈线发生故障时,其互联组 IED 检测到 A_F 之和非 0,正常运行的 IED 发出跳闸指令使断路器跳闸后,超出一定时间范围后,依然能够检测到同组 IED 的故障过电流,此时可判断同组的 IED 拒动,这是 IED 拒动的判据。

2.1.2 IED 拒动的容错算法

确定互联组中有 IED 拒动后,后备互联组开始工作,正常运行的 IED 与故障 IED 相邻的所有 IED 联络,并要求这些 IED 向各自对应的断路器发出跳闸指令,有效隔离故障。

整个配电网最首端和最末端的 IED 情况特殊,一旦发生拒动,同互联组 IED 无法扩大联络范围:

(1) 对于首端的 IED 拒动,例如图 1 中的 e_1 拒动,在 e_2 确定故障发生在 L_1 的情况下, e_2 直接与变电站通信,要求主电源 1 退出运行,并与联络开关 K 联系,使主电源 2 投入运行;

(2) 对于末端的 IED 拒动,例如图 1 中的 e_3 拒动,在 e_7 确定故障发生在 L_4 的情况下,断开 e_7 对应的断路器就可以有效隔离故障。

2.2 通信系统拥堵的情况

本文的馈线保护算法是建立在通信系统的基础上,通信系统拥堵会导致 IED 信息丢失。与 IED 拒动不同的是,含有 IED 信息丢失的互联组失去了判断馈线是否故障的能力,显然这种情况比较复杂。

2.2.1 IED 信息丢失的判据

当某段馈线互联组内某个 IED 信息丢失,正常运行的 IED 检测不到另一个 IED 的信息,返回空白

信息,这是互联组内 IED 信息丢失的判据。

2.2.2 IED 信息丢失的容错算法

对含有后备互联组的有向图进行分析,有向图中 e_2 和 e_3 为互联组, e_2 的信息丢失, e_3 正常运行, e_1 是 e_2 故障时的后备互联组,分析结果如表 2 所示。

表 2 后备互联组故障过电流的关系

Table 2 Relations of overcurrent fault in backup

interconnection group				
L_2	e_3	e_1	有向图(e_2 信息丢失)	结果
可能发生故障的情况	1	1		L_2 无故障发生
		-1		L_2 发生故障
	0	1		L_2 无故障发生
		-1		L_2 发生故障
		0		L_2 无故障发生
	无故障	-1	\	

备注: \ 表示不需要 IED 检测故障信息

由表 2 的分析结果可得:

(1) 正常运行 IED 的 A_F 为 0 或 1,说明所在馈线可能有故障发生。若后备互联组的 A_F 为 1,则馈线无故障发生;若后备互联组的 A_F 为 -1,则馈线有故障发生,正常运行的 IED 和后备互联组所有 IED 发出跳闸指令隔离故障。

(2) 正常运行 IED 的 A_F 为 -1,则所在馈线无故障发生,因为故障电流最终不流向此馈线。

特殊地,当线路首末端 IED 信息缺失,可按同组正常运行 IED 自身的 A_F 值判断首末端线路是否故障:

$$A_F = \begin{cases} 1 & \text{过电流向馈线顶点,} \\ & \text{首末端馈线故障} \\ -1 & \text{过电流不流向馈线顶点,} \\ & \text{首末端馈线正常} \\ 0 & \text{没有检测到过电流信息,} \\ & \text{首末端馈线正常} \end{cases} \quad (2)$$

综上所述,智能配电网的馈线保护策略流程图如图 3 所示。故障发生后,互联组内的 IED 最先开始工作,执行保护算法检测故障区段,在这个过程中如果出现异常情况,启动后备互联组,执行对应的容错算法。最后故障馈线的 IED 向对应的断路器

发出跳闸指令，隔离故障。

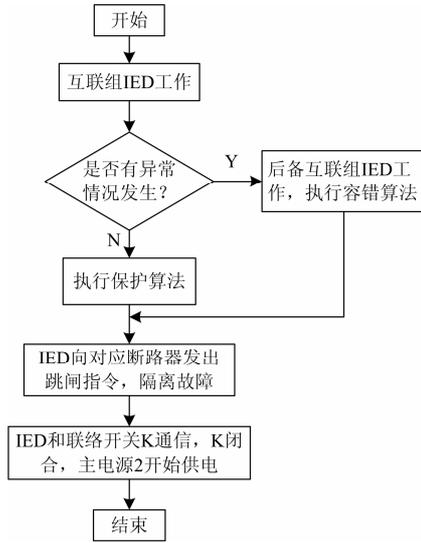


图3 馈线保护策略流程图

Fig. 3 Strategy for feeder protection system

3 保护算法对网络结构变化的适应性

为了提高智能配电网供电的可靠性，两个主电源之间用联络开关 K 连接，在电网正常运行的情况下开关 K 是断开状态。当主线路发生故障，开关 K 就要闭合，使主电源 2 为部分电路继续供电。虽然网络结构发生了变化，但整体的保护算法不会受到影响。例如图 1 中开关 K 闭合，主电源 2 开始供电时，只需要增加线路 L₅ 的互联组 e₉ 和 e₁₀ 以及与其相关的后备互联组：主线路 L₅、e₉ 故障时 e₁₀ 和 e₈ 互联，主线路 L₄、e₈ 故障时 e₇ 和 e₉ 互联。

智能电网含有多个 DG，DG 分支投退导致网络结构发生的变化不影响联络开关 K 的状态，但是对容错算法有影响，需要对 DG 分支相关的后备互联组进行删除，例如图 1 中 e₁₂ 属于后备互联(e₄)、e₃、e₁₂，也属于后备互联组(e₅)、e₆、e₁₂，e₁₂ 对应 DG 退出运行只需要对主线路 e₃、e₆ 发出退出运行信号，不再互互联即可。()内 IED 有异常情况发生。

4 算例分析

为了验证容错算法的可靠性和可行性，对图 1 中不同的故障情况进行检测和隔离。对图 1 中所有 IED 的分组情况如表 3 所示。

4.1 线路 L₃ 故障

IED 采集到安装点处的故障过流信息后，同互联组内的 IED 互互联并获取对方的故障过流信息，判断结果如表 4 所示。

表 3 图 1 中 IED 的分组情况

Table 3 Groups of all IED in Figure 1

保护对象	互联组	后备互联组
L ₁	e ₁	(e ₁)e ₂
	e ₂	(e ₂)e ₁ 、e ₃ 、e ₁₁
L ₂	e ₃	(e ₃)e ₄ 、e ₂ 、e ₁₁
	e ₄	(e ₄)e ₃ 、e ₅ 、e ₁₂
L ₃	e ₅	(e ₅)e ₆ 、e ₄ 、e ₁₂
	e ₆	(e ₆)e ₅ 、e ₇ 、e ₁₃
L ₄	e ₇	(e ₇)e ₈ 、e ₆ 、e ₁₃
	e ₈	(e ₈)e ₇
L ₅	e ₉	(e ₉)e ₁₀ 、e ₈
	e ₁₀	(e ₁₀)e ₉

表 4 线路 L₃ 发生故障时的判断结果

Table 4 Fault calculation results when fault occurs in L₃

保护对象	互联组	A _F	输出结果	判断结果
L ₁	e ₁	1	0	没有故障
	e ₂	-1		
L ₂	e ₃	1	0	没有故障
	e ₄	-1		
L ₃	e ₅	1	1	有故障
	e ₆	0		
L ₄	e ₇	0	0	没有故障
	e ₈	0		

4.2 线路 L₃ 故障，e₅ 拒动

互联组已经确定线路 L₃ 故障，e₆ 对应的断路器跳闸后，超出一定时间范围后，e₆ 依然能检测到 e₅ 的过电流信息，满足拒动判据，可判断 e₅ 拒动。启动线路 L₃、e₅ 拒动时的后备互联组：e₆ 和 e₄、e₁₂，向与之对应的断路器发出跳闸指令，有效隔离故障。

4.3 线路 L₃ 故障，e₅、e₇ 信息同时丢失

互联组在联络过程中，e₆ 检测 e₅ 的故障信息后返回空白信息，e₈ 检测 e₇ 的故障信息后返回空白信息，由此可判断 e₅ 和 e₇ 的信息丢失，启动线路 L₃、e₅ 故障时和 L₄、e₇ 故障时对应的后备互联组，判断结果如表 5 所示。

表 5 线路 L₃ 故障且 e₅、e₇ 信息丢失时的判断结果

Table 5 Fault calculation results when fault occurs in

L₃ and information of e₅, e₇ is lost

保护对象	后备互联组	A _F	判断结果
L ₃	(e ₅)e ₆	0	有故障
	e ₄	-1	
L ₄	(e ₇)e ₈	0	没有故障
	e ₆	0	

5 结语

本文提出了一种基于图论的智能配电网馈线保护算法，将所有 IED 分为互联组和后备互联组，结合故障过电流方向信息实现故障的检测与隔离。该算法原理简单，所需信息量少，能应对 IED 拒动、

断路器失灵和通信系统拥堵等异常情况的发生,能适应网络结构的改变。本文通过算例验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.
WANG Zengping, JIANG Xianguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [2] 高志远, 姚建国, 曹阳, 等. 智能配电网发展机理初探[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 116-121.
YAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.
- [3] 李明, 李景强. 一种基于智能电网的广域备自投方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 129-133.
LI Ming, LI Jingqiang. A wide area standby power supply automatic switching scheme based on smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 129-133.
- [4] 庞清乐, 高厚磊, 杜强, 等. 面向智能配电网的保护与控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 28-38.
PANG Qingle, GAO Houlei, DU Qiang, et al. Protection and control method for smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 28-38.
- [5] 冯希科, 邵能灵, 宋凯, 等. DG 容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 156-165.
FENG Xike, SHAO Nengling, SONG Kai, et al. Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 156-165.
- [6] DENG Menghua, QIAN Jun, WAN Zhenping, et al. A reasearch of feeder protection 10 kV distribution networks including distributed generation[C] // 2012 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2012), Shanghai, 2012: 1-5.
- [7] TIAN Youwen, GUO Lijie, JI Xiaohan, et al. The analysis of distributed Generation influence onfeeder protection[C] // International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce, Zhengzhou, 2011: 4404-4407.
- [8] 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.
- [9] 鄢阳, 文明浩, 吕祥晰. 基于图论的集中式保护主后备保护区划分[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 21-26.
YAN Yang, WEN Minghao, LÜ Xiangxi. Zone selection of primary and backup protection in centralized protection based on graph theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 21-26.
- [10] YI Lü, YOU Dahai, KE Wang, et al. Study on wide-area backup protection system for the smart grid[C] // International Conference on Electric Utility Dereg, Weihai, 2011: 218-224.
- [11] 丛伟, 孔瑾. 用于智能配电网自动重合闸的断路器分类方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1146-1151.
CONG Wei, KONG Jin. Classification of circuit breakers suitable for auto-reclosing in smart distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1146-1151.
- [12] 康文文, 赵建国, 丛伟, 等. 含分布式电源的配电网故障检测与隔离算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 25-29.
KANG Wenwen, ZHAO Jianguo, CONG Wei, et al. Fault detection and isolation algorithm for distribution network containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 25-29.
- [13] 李江, 李国庆. 容错控制在电力系统中的应用研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 140-146.
LI Jiang, LI Guoqing. A survey on application of fault tolerant control in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 140-146.

收稿日期: 2014-10-29

作者简介:

田 果(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为含分布式电源的配电网保护; E-mail: tianguoxihua@163.com

黄小莉(1974-), 女, 副教授, 主要研究方向为信号处理与通信;

邓 强(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式电源的并网。

(编辑 魏小丽)