

· 智能配网与微网 ·

基于测量导纳变化的微电网群联络线保护方案

张凡¹, 牟龙华¹, 邱进²

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092;

2. 电网环境保护国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 湖北 武汉 430074)

摘要:当多个相邻微电网之间通过低压配电线路互联互通时,则形成微电网群。微电网群内部联络线故障时,方向不定的网络潮流,易变的拓扑结构以及多样的逆变式分布式电源控制策略等因素,给微电网群的保护带来了挑战。文中根据微电网群系统故障前后线路电压和电流的分布特点,提出一种以母线测量导纳量变化量为判据的微电网群内部联络线保护新方案。该方案采用故障前后联络线两端测量导纳的幅值变化为初步判据,选出疑似故障线路,并结合疑似线路两侧导纳相角差的变化实现故障线路识别。该方法原理简单,易于整定,具有较高的灵敏度和可靠性。利用 PSCAD/EMTDC 进行算例验证,结果证实了该方案的正确性和可靠性。

关键词:微电网群;逆变型分布式电源;联络线;保护方案

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0067-08

0 引言

微电网是由分布式电源和电力负荷构成的电力系统^[1],可以工作在并网和孤岛模式下^[2],具有高度的灵活性和自治性。微电网群作为分布式发电网络的一个全新概念,立足于微电网,将地理位置毗邻的子微电网互连,构成一个微电网群集系统^[3]。微电网群能满足特定的功能和控制目标^[4],是微电网、多微电网系统发展到一定阶段的产物。

保护方案是微电网群关键支撑技术之一。传统的配电网作用是从输电网向用户进行电能分配,其保护基于较高的故障电流水平和从电源到负荷的单向潮流这2个基本前提来设计,保护配置一般为电流速断保护以及过电流保护,通过时间配合来选择性地切除故障。

与传统配电网不同,微电网群中子微电网间能够双向供电,不同子微电网间也可以进行潮流传输,导致辐射状网络的保护装置中可能通过双向潮流^[5];微电网群内发生故障时,逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generations, IIDGs)提供的故障电流较小,且不同控制策略下 IIDGs 的故障特性不同,传统保护失效^[6-7],给微电网群的保护带来了新问题。

目前,国内外学者对微电网群保护的研究还处于起步阶段。但是,对于微电网继电保护方面的研究已经取得了一定的成果,提出了一些解决方案,

收稿日期:2018-09-06;修回日期:2018-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407128);国家电网有限公司科技项目(GY71-17-032)

大体上可分为2大类:基于传统配电网保护原理的优化调整和基于配网自动化、广域量测系统的广域保护。文献[8]提出一种基于电压变化量幅值比较的故障方向检测元件,通过比较保护安装处母线电压变化量与给定的工作电压变化量幅值的大小来判断故障方向。文献[9]提出了电流差动保护方案,该方案对通信和数据的同步测量要求较高,在系统或负荷不平衡情况下可能误动。文献[10]将微电网实时拓扑结构转化为树形节点路径图,采用节点搜索方法和节点路径算法对微电网内保护装置的動作值与时限进行自适应整定。该方案需要事先知道微电网的所有可能结构形式,且不同运行方式下微电网的短路故障计算比较复杂。文献[11]根据广域保护的概念首先将故障范围缩小到一个搜索区域内,然后利用区域内电流的相位关系定位故障线路,该方案对通信的要求较高。此外,大部分微网保护原理都没有考虑 IIDGs 的控制策略^[12-13]。

IIDGs 控制策略将对故障特征的分析产生较大的影响^[14],现有的基于电流故障分量幅值和相位比较的保护原理存在失效的可能性^[15]。

文中从微电网群自身的运行状态中寻找故障特征,考虑低电压穿越时分布式电源在恒功率控制策略下的故障特性,提出了针对微电网群内部联络线故障的保护方案。首先对微电网群中不同位置联络线在故障前后电压和电流量图进行分析,得出测量导纳幅值和相角差的变化关系,进而提出保护判据。最后,利用 PSCAD/EMTDC 建立了微电网群仿真模型,仿真结果验证了所提方案的可靠性。

1 微电网群的典型结构

目前已有文献中,微电网群或多微电网系统大多采用图1所示的中、低压辐射状结构^[16-18],在配电网低压侧有若干不同能源结构和负荷特性的交流子微电网接入同一配电线路。

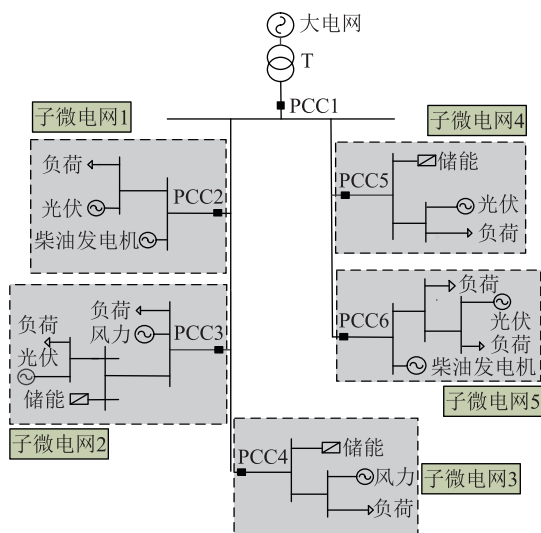


图1 微电网群示意

Fig.1 Schematic diagram of multi-microgrid system

微电网群的整合标准满足^[19]: m 个子微电网以低于35 kV电压等级的线路互联,并且该 m 个子微电网自动实现以效率极大化、停电概率极小化为指标的优化潮流。微电网群具有 n 个接口与外部配电网互联,且 $n < m$ 。其中,每一个子微电网通过公共连接点(point of common coupling, PCC)接入到微电网群中。PCC是子微电网和配电网连接的枢纽,通过控制PCC的通断即可实现整个微电网群的协调控制和保护。与单个微电网相比,微电网群具有更多技术优势,使大电网的控制更灵活。

微电网群系统中的子微电网是由微电源、储能装置及负荷构成的小型电力系统,通过PCC接入配电网,在一定条件下可以独立运行。此外,在一定的运行条件下,某个区域的多个微电网也可作为组合微电网独立运行。微电网群具有群并网、部分并网、离网3大类运行方式。配电网正常运行时,微电网群并网运行,运行状态与配电网一致。在并网运行的过程中,如果有故障发生,其故障点可能位于子微电网内、子微电网间联络线或者配电网内3种不同位置。对于不同位置的故障,结合已有微电网故障隔离策略^[20]以及微电网群运营模式特征^[21],提出一种典型的微电网群隔离策略:

(1) 故障发生在配电网侧时,微电网群马上解列转孤岛运行;

(2) 故障发生在子微电网内时,切除故障子微电网并转孤岛运行,其余子微电网继续连接配电网;

(3) 故障发生在子微电网间的联络线时,切除故障线路,故障下游的子微电网互联供电,上游子微电网继续联网运行,使得故障影响和停电损失降至最低。

2 微电网群联络线故障时电气量特征分析

微电网群内部故障时的保护方案研究,主要有2个层面问题:

(1) 子微电网间联络线发生故障时的保护方案;

(2) 子微电网内发生故障时的保护方案。

文中主要讨论并网状态下微电网群内部联络线发生故障时的保护策略。以图2所示简化线路为例分析微电网群内部故障时联络线中电压、电流和测量导纳的变化规律,研究保护判据。

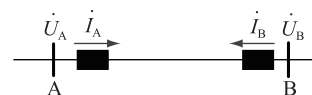


图2 简化线路图

Fig.2 Simplified line

规定电流正方向为母线指向线路,假设故障前后A端保护测量到的电压、电流、导纳分别为 \dot{U}_A , \dot{I}_A , G_A 和 \dot{U}_{1A} , \dot{I}_{1A} , G_{1A} ,则图2中A端保护在故障前后测量到的电流方向可分为4种情况。

情况1:故障前后A端的电流方向未发生改变,都为正方向,其电压、电流向量关系如图3所示。

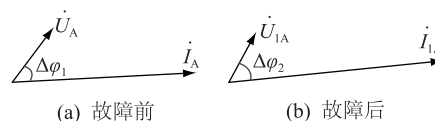


图3 故障前后A端电流和电压向量图

Fig.3 Current and voltage vector graph of A end for pre-and post-fault

则故障前后A端测量导纳的相角分别为:

$$\Delta\varphi_1 = \arg(G_A) = \arg(\dot{I}_A) - \arg(\dot{U}_A) \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_2 = \arg(G_{1A}) = \arg(\dot{I}_{1A}) - \arg(\dot{U}_{1A}) \quad (2)$$

由图3可知:

$$\begin{cases} -90^\circ \leq \Delta\varphi_1 \leq 90^\circ \\ -90^\circ \leq \Delta\varphi_2 \leq 90^\circ \end{cases} \quad (3)$$

故障前后A端测量导纳的相角差为:

$$\Delta\varphi_A = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 \quad (4)$$

可得:

$$-90^\circ \leq \Delta\varphi_A \leq 90^\circ \quad (5)$$

情况 2:故障前后 A 端的电流方向未发生改变,都为反方向,其电压、电流向量关系如图 4 所示。

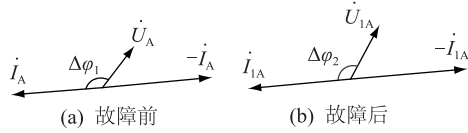


图 4 故障前后 A 端电流和电压向量图

Fig.4 Current and voltage vector graph of A end for pre-and post-fault

由图 4 可知:

$$\begin{cases} 90^\circ \leq \Delta\varphi_1 \leq 180^\circ \\ 90^\circ \leq \Delta\varphi_2 \leq 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

故障前后 A 端测量导纳的相角差为:

$$\Delta\varphi_A = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 \quad (7)$$

可得:

$$-90^\circ \leq \Delta\varphi_A \leq 90^\circ \quad (8)$$

情况 3:故障前 A 端的电流为正方向,故障后为反方向,其电压、电流的向量关系如图 5 所示。

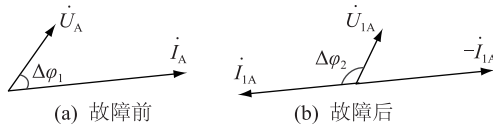


图 5 故障前后 A 端电流和电压向量图

Fig.5 Current and voltage vector graph of A end for pre-and post-fault

由图 5 可知:

$$\begin{cases} -90^\circ \leq \Delta\varphi_1 \leq 0^\circ \\ 90^\circ \leq \Delta\varphi_2 \leq 180^\circ \end{cases} \quad (9)$$

故障前后 A 端测量导纳的相角差为:

$$\Delta\varphi_A = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 \quad (10)$$

可得:

$$90^\circ \leq \Delta\varphi_A \leq 270^\circ \quad (11)$$

情况 4:故障前 A 端的电流为反方向,故障后为正方向,其电压电流的向量关系如图 6 所示。

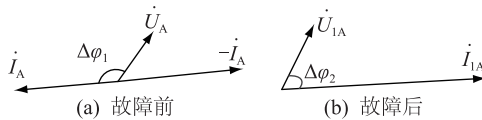


图 6 故障前后 A 端电流、电压向量图

Fig. 6 Current and voltage vector graph of A end for pre-and post-fault

由图 6 可知:

$$\begin{cases} 90^\circ \leq \Delta\varphi_1 \leq 180^\circ \\ -90^\circ \leq \Delta\varphi_2 \leq 0^\circ \end{cases} \quad (12)$$

故障前后 A 端测量导纳的相角差为:

$$\Delta\varphi_A = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 \quad (13)$$

可得:

$$90^\circ \leq \Delta\varphi_A \leq 270^\circ \quad (14)$$

上述 4 种下,故障前后 A 端测量导纳的相角差变化情况如表 1 所示。

表 1 故障前后 A 端测量导纳相角差变化情况

Table 1 Phase difference change information of measured admittance of A end for pre-and post-fault

电流方向	相角差/(°)
正向不变(情况 1)	-90~90
反向不变(情况 2)	-90~90
正向-反向(情况 3)	90~270
反向-正向(情况 4)	90~270

3 联络线故障时测量导纳特征分析

图 1 中微电网群简化,如图 7 所示。系统的接线方式为单母线结构,由 5 个子微电网及网间联络线 AB, BC, CD, EF 和 FG 等组成。其中子微电网 1—3 接入馈线 1,子微电网 4,5 接入馈线 2。正常运行时,PCC1—PCC6 开关都为闭合状态。

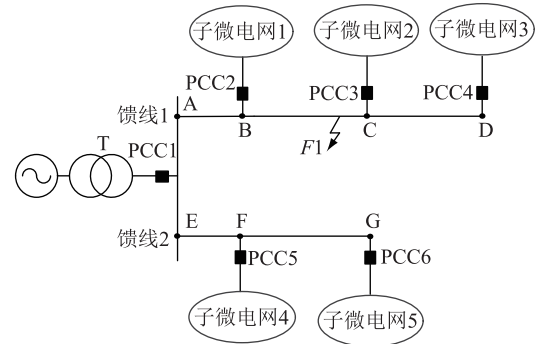


图 7 微电网群简化系统

Fig.7 Simplified structure of multi-microgrid system

当微电网群联络线 BC 内 F1 处发生故障时,对故障联络线 BC 两端和其他非故障联络线两端故障前后测量导纳幅值和相角差变化情况进行分析。

3.1 故障联络线两端的测量导纳特征分析

由图 7 可知,正常运行方式下,联络线 BC 中的潮流分为以下 2 种情况:

工况 1:子微电网 2 和 3 内总的负荷需求大于微电源总的发电出力时,潮流方向为 B 端流向 C 端。

工况 2:子微电网 2 和 3 内总的负荷需求小于微电源总的发电出力时,潮流方向为 C 端流向 B 端。

3.1.1 工况 1

记故障前后联络线 BC 中 B 端故障前、后的电压、电流分别为 \dot{U}_B , \dot{I}_B 和 \dot{U}_{1B} , \dot{I}_{1B} 。由于 B 侧与配电网相连,故障后配电网将支撑 B 侧的电压基本保

持不变,故障电流将会显著变大^[22]。故障前后电压、电流关系分别为:

$$|\dot{U}_{1B}| \leq |\dot{U}_B| \quad (15)$$

$$|\dot{I}_B| \ll |\dot{I}_{1B}| \quad (16)$$

故障前后母线 B 侧的测量导纳为:

$$G_B = \dot{I}_B / \dot{U}_B \quad (17)$$

$$G_{1B} = \dot{I}_{1B} / \dot{U}_{1B} \quad (18)$$

由式(15)一式(18)可知:

$$|G_{1B}| \gg |G_B| \quad (19)$$

正常运行和故障时 B 端的电流皆为正方向,由表 1 可知故障前后 B 端测量导纳的相角差为:

$$-90^\circ \leq \Delta\varphi_B \leq 90^\circ \quad (20)$$

故障后,C 端子微电网内的分布式电源(distributed generation, DG)无法像大电网一样提供足够的短路容量,导致 C 侧电压的大幅跌落。故障前,下游子微电网 2 和 3 内的负荷较大,流过 C 端的电流很大。而故障后由于子微电网 2 和 3 内的 DG 逆变器过流能力的限制,IIDGs 输出的最大故障电流不能超过额定电流的 2 倍,使得流过 C 端的短路电流可能会小于故障前流过 C 端的电流值,导致其检测到的电流幅值减小。参照式(17)一式(18)可知,故障前后 C 端的导纳幅值 $|G_C|$ 和 $|G_{1C}|$ 的大小关系无法直接判断。

故障前 C 端电流为反方向,故障时为正方向,则故障前后 C 端测量导纳的相角差为:

$$90^\circ \leq \Delta\varphi_C \leq 270^\circ \quad (21)$$

3.1.2 工况 2

此种情况下 B 端故障前后的测量导纳幅值变化情况与 3.1.1 节中 B 端情况相同。

故障前 B 端电流为反方向,故障后为正方向,故障前后联络线 B 端测量导纳的相角差为:

$$90^\circ \leq \Delta\varphi_B \leq 270^\circ \quad (22)$$

故障前后 C 端电流均为正反向,则故障前后 C 端测量导纳的相角差为:

$$-90^\circ \leq \Delta\varphi_C \leq 90^\circ \quad (23)$$

C 端故障前后测量导纳幅值变化与 3.1.1 节中 C 端情况相同,导纳幅值 $|G_C|$ 和 $|G_{1C}|$ 的大小关系无法直接判断。

3.2 非故障联络线两端的测量导纳特征分析

非故障联络线测量导纳特征的分析过程与上述第 3.1 节中类似。

正常运行时,各条联络线中的潮流同样分为 2 种情况:

工况 1:当联络线下游的子微电网内总的负荷

需求大于微电源总的发电容量时,该联络线上的潮流方向为上游端口流向下游端口。

工况 2:当联络线下游的子微电网内总的负荷需求小于微电源总的发电容量时,该联络线上的潮流方向为下游端口流向上游端口。

线路发生故障时,由于故障点电压最低,潮流方向都为各个端口流向故障点。

参照 3.1 节的分析过程,可以得到以下结论。

工况 1:故障前后,联络线 AB, EF 两端的测量导纳相角差都在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间,联络线 CD 两端的测量导纳相角差都在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间。

工况 2:故障前后,联络线 CD, EF 两端的测量导纳相角差都在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间,联络线 AB 两端的测量导纳相角差都在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间。

故障点上游处的联络线由于与大电网相连接,其端口电压变化不大,但是流过的电流明显增大,导致其测量导纳幅值显著增大。故障点下游处的联络线,其端口处的电压会下降,同时由于 DG 的控制特性,导致其电流幅值可能会减小,其测量导纳幅值变化趋势无法判断。相邻馈线内的联络线,在故障前后电流、电压基本上未发生变化,因此其测量导纳幅值无显著改变。

4 基于测量导纳变化的微电网群保护方案

4.1 故障定位判据

当子微电网内部联络线 BC 内 F1 处发生故障时,分析故障联络线和非故障联络线两端的测量导纳幅值和相角差变化,总结如表 2 所示。

表 2 故障前后联络线两端测量导纳变化信息

Table 2 Change information of measured admittance for both ends of the tie lines for pre-and post-fault

联络线	端点	工况 1		工况 2	
		相角差 /($^\circ$)	幅值	相角差 /($^\circ$)	幅值
AB	A	$-90 \sim 90$	显著增大	$90 \sim 270$	显著增大
	B	$-90 \sim 90$	显著增大	$90 \sim 270$	显著增大
BC	B	$-90 \sim 90$	显著增大	$90 \sim 270$	显著增大
	C	$90 \sim 270$	不确定	$-90 \sim 90$	不确定
CD	C	$90 \sim 270$	不确定	$-90 \sim 90$	不确定
	D	$90 \sim 270$	不确定	$-90 \sim 90$	不确定
EF	E	$-90 \sim 90$	基本不变	$-90 \sim 90$	基本不变
	F	$-90 \sim 90$	基本不变	$-90 \sim 90$	基本不变

由表 2 结合图 7 可知,只有故障点上游处测量导纳的幅值在故障后显著上升,故障点下游母线测量导纳幅值变化无法确定,相邻馈线处的测量导纳幅值略有增大。故障馈线两端测量导纳相角差分

别在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 和 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间,其他联络线两端测量导纳相角差则在同一变化区间内。

综上所述,微电网群的内部联络线短路故障数据可以简化描述:

(1) 判据 1:故障点所在馈线上游区域故障前后测量导纳差的幅值显著上升,并超过阈值 G_{set} (设为6~7倍故障前测量导纳,可依实际运行情况调整)。

(2) 判据 2:故障所在馈线两端母线故障前后测量导纳的相角差 φ_1, φ_2 ,一端在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 区间,另一端在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 区间。即测量导纳相角差判据为:

$$\begin{cases} -90^\circ \leq \Delta\varphi_1 \leq 90^\circ \\ 90^\circ \leq \Delta\varphi_2 \leq 270^\circ \end{cases} \quad (24)$$

或

$$\begin{cases} 90^\circ \leq \Delta\varphi_1 \leq 270^\circ \\ -90^\circ \leq \Delta\varphi_2 \leq 90^\circ \end{cases} \quad (25)$$

4.2 微电网群保护方案

微电网群保护方案结构如图8所示。以馈线汇入母线上所连接设备及子微电网和相邻的联络线端为保护对象,安装集成保护单元。相邻的集成保护单元通过通信线路交换信息,实现保护的选择性。每一个集成保护单元通过“信号采集控制单元”实时获取电流、电压和开关位置等信息,进行数据的集中分析与处理,定位故障联络线后,向联络线两端的“信号采集控制单元”下达故障处理指令。

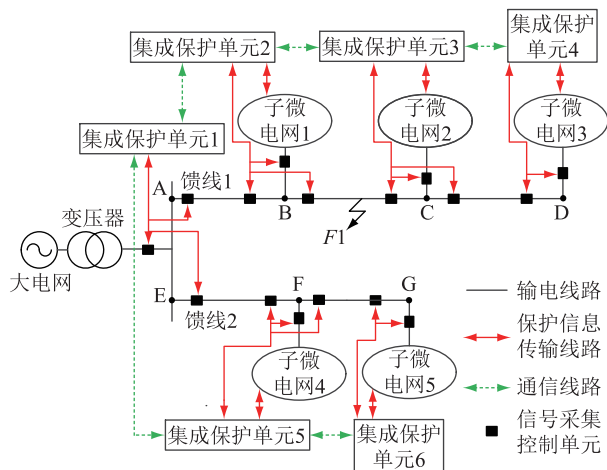


图8 微电网群保护方案结构

Fig.8 Multi-microgrid structure with protection system

其通信采用基于IEC 61850的数字化变电站内集成保护通信系统。通过各个信号采集单元采集电气量信息,预处理后经由光纤通信网络传输到集成保护单元;为了满足可靠性要求,由光纤以太网和交换机构成集成保护单元的通信网络,通常采用

环网,使整个保护系统实现无缝通信。基于母线上测量导纳变化的微电网群联络线保护流程如图9所示。

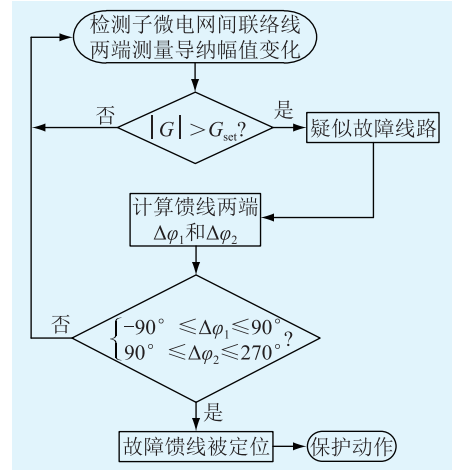


图9 微电网群保护方案流程

Fig.9 Multi-microgrid protection scheme

基本过程叙述如下:

(1) 检测微电网群中子微电网间联络线两端的导纳幅值变化,当满足判据1时,判定该联络线为疑似故障线路;

(2) 检测疑似故障线路两端的测量导纳相角变化,当满足判据2时,判定该联络线为故障线路;

(3) 保护动作,切除故障联络线。

由图9可知,该保护方案的测量信息只有故障前后馈线的电流和电压,需要处理和传输的数据较少,对通信的要求不高。同时,由于微电网群中的线路通常比较短,可以快速、实时的进行数据传输,该保护方案具有较高的速动性。

5 微电网群仿真分析

5.1 仿真系统及参数

图10为一典型微电网群结构,含有3个独立子微电网,各子微电网的电压等级为10 kV,经升压变压器接入35 kV配电网,系统频率为50 Hz,各子微电网内部微电源均采用具有低电压穿越能力的PQ控制策略。各子微电网内部微电源及负荷情况如表3所示。各子微电网内部采用1台DG。微电网群线路正序阻抗率分别为0.38 Ω/km、0.45 Ω/km;线路的零序阻抗率分别为0.76 Ω/km、1.32 Ω/km。联络线AB,CD及DE的长度分别为1 km,2 km,2 km。根据以上参数,在PSCAD中搭建仿真模型。仿真时以AB相短路故障为例,故障点过渡电阻取为2 Ω,分析不同联络线故障时,联络线AB,CD和DE两端测量导纳幅值以及相角差的变化。

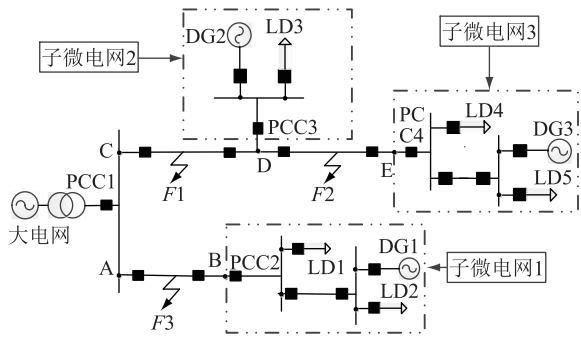


图 10 微电网群仿真模型

Fig.10 Simulation model of multi-microgrid

表 3 微电网群中分布式电源和负荷容量

Table 3 Capacity of DGs and loads in multi-microgrid

子微电网	分布式电源容量/kW	负荷容量/(kW·A)
1	DG1:500	LD1:1 500+j15 LD2:1 200+j30
2	DG2:600	LD3:1 200+j30
3	DG3:400	LD4:1 200+j30 LD5:900+j27

5.2 F1 处故障

微电网群正常运行,联络线 CD 间 $F1$ 处发生故障时,联络线 AB,CD 和 DE 两端测量导纳幅值以及相角差信息如表 4、表 5 所示。其中 φ_i 和 φ_{ii} 为故障前后联络线两端测量导纳相角, $\Delta\varphi$ 为测量导纳相角差, $|G_i|$ 和 $|G_{ii}|$ 为故障前后的测量导纳幅值。

表 4 故障前各联络线测量导纳

Table 4 Measured admittance results of tie lines before fault occurs

联络线	节点	$ G_i $	$\varphi_i/(^\circ)$
AB	A	0.019	-9.73
	B	0.019	170.6
CD	C	0.022	-11.93
	D	0.023	168.92
DE	D	0.017	-12.03
	E	0.018	168.83

表 5 F1 处故障时各联络线测量导纳

Table 5 Measured admittance results of tie lines when F1 fault occurs

联络线	节点	$\varphi_{ii}/(^\circ)$	$ G_{ii} $	$ G_{ii}/G_i $	$\Delta\varphi_i/(^\circ)$
AB	A	109.63	0.047	2.47	119.36
	B	-66.89	0.038	2.00	122.51
CD	C	-46.5	1.25	56.82	-34.57
	D	-45.35	0.313	13.61	145.74
DE	D	112.38	0.099	5.82	124.41
	E	-64.62	0.043	2.39	126.55

对表 4、表 5 分析可知,CD 两端的测量导纳幅值明显上升,满足保护的判据 1;故障点下游线路

DE 以及相邻馈线侧联络线 AB 两端的导纳幅值变化不明显,不满足判据 1。故障线路两端 C,D 在故障前后的导纳相角差分别为 -34.57° 和 145.74° ,满足相角差判据 2,其他线路的两端相角差都在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间,不满足相角差判据。故障被定位在联络线 CD 上。

5.3 F2 处故障

当微电网群内联络线 DE 间 $F2$ 处发生故障时,联络线 AB,CD 和 DE 两端测量导纳相角差以及幅值变化信息如表 6 所示。

表 6 F2 处故障时各联络线测量导纳

Table 6 Measured admittance results of tie lines when F2 fault occurs

联络线	节点	$\varphi_{ii}/(^\circ)$	$ G_{ii} $	$ G_{ii}/G_i $	$\Delta\varphi_i/(^\circ)$
AB	A	-42.54	0.020	1.05	-32.80
	B	124.51	0.019	1.00	-46.80
CD	C	-50.51	0.419	19.05	-38.56
	D	130.89	0.420	18.26	-38.03
DE	D	-49.71	0.804	47.29	-37.68
	E	-42.51	0.155	8.61	148.66

分析表 6 可知,联络线 CD 和 DE 两端的测量导纳幅值明显上升,满足判据 1;故障点相邻馈线 AB 两端的导纳幅值变化不明显,不满足判据 1。故障线路两端 D,E 在故障前后的导纳相角差分别为 -37.68° 和 148.66° ,满足判据 2,其他线路两端的相角差都在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间,不满足判据 2。故障被定位在联络线 DE 上。

5.4 F3 处故障

当微电网群内联络线 AB 间 $F3$ 处发生故障时,联络线 AB,CD 和 DE 上测量导纳相角差以及幅值变化信息如表 7 所示。

表 7 F3 处故障时各联络线测量导纳差

Table 7 Measured admittance results of tie lines when F3 fault occurs

联络线	节点	$\varphi_{ii}/(^\circ)$	$ G_{ii} $	$ G_{ii}/G_i $	$\Delta\varphi_i/(^\circ)$
AB	A	-9.74	2.21	116.32	-32.51
	B	170.57	0.193	10.16	173.72
CD	C	-11.92	0.104	4.73	118.79
	D	168.95	0.062	2.69	111.8
DE	D	-12.02	0.026	1.53	170.56
	E	168.84	0.019	1.06	168.63

分析表 7 可知,故障点所在馈线 AB 两端的测量导纳幅值明显上升,满足判据 1;故障线路相邻馈线两端的测量导纳幅值变化不明显,不满足判据 1。故障线路两端 A,B 在故障前后测量导纳的相角差分别为 -32.51° 和 173.72° ,满足判据 2,其他线路两

端的相角差都在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间, 不满足判据 2。故障被定位在联络线 AB 上。

由以上的仿真结果可知, 故障前后微电网群联络线两端测量导纳幅值和相角差变化与理论分析一致。只有故障联络线两端母线测量导纳变化同时满足 2 个保护判据, 实现保护功能。

6 结语

文中对微电网群内部联络线故障时的保护方案进行了理论探讨和仿真分析。结合微电网群故障前后线路测量导纳的幅值和相角变化特征, 提出了一种基于母线测量导纳的微电网群内部联络线保护方案。该方案首先通过比较联络线两端故障前后测量导纳幅值变化量选出疑似故障线路, 然后通过比较疑似故障线路两端测量导纳相角变化量准确识别故障联络线, 此过程缩小了故障定位的范围, 缩短了故障排除的时间。其中, 测量导纳幅值比较是故障后的幅值与故障前的幅值之比, 相角比较是故障后的相角与故障前的相角之差, 通过线路不同位置测量导纳的变化量定位故障, 克服了传统纵联距离保护的不足。与差动保护相比, 文中使用的相角差判据是一个变化的范围, 降低了对测量数据精度的要求。基于含有 3 个子微电网的微电网群模型, 对微电网群内不同点故障进行了仿真, 计算结果验证了方案的有效性。需要说明, 发生高阻故障时, 其过渡电阻较大, 可能导致保护方案的部分失灵。后续工作将对高阻故障、各子微电网内部发生故障以及微电网群外部故障时的保护策略进行研究, 并结合微电网群内部联络线故障的保护策略, 提出完整的微电网群保护方案。

参考文献:

- [1] 崔林, 唐沂媛. 冷热电联供型微电网优化运行及敏感性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6):138-143.
CUI Lin, TANG Yiyuan. Optimal operation and sensitivity analysis of the combined cooling, heating and power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):138-143.
- [2] 文凌峰, 党广宇, 田伟, 等. 基于多时间尺度风储协同的微电网能量管理策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 123-128.
WEN Lingfeng, DANG Guangyu, TIAN Wei, et al. Research on micro-grid energy management system based on multi-time scale[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3):123-128.
- [3] 周小平, 陈燕东, 周乐明, 等. 一种微网群架构及其自主协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 123-134.
ZHOU Xiaoping, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. A microgrid cluster structure and its autonomous coordination control

- strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 123-134.
- [4] 刘剑飞, 熊雄. 主动配电网下多微电网间功率协调优化研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1639-1646.
LIU Jianfei, XIONG Xiong. Multi-microgrids power optimal dispatch under active distribution system[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1639-1646.
- [5] 周宁, 雷响, 荆晓睿, 等. 一种含高渗透率分布式电源配电网自适应过电流保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22):24-31.
ZHOU Ning, LEI Xiang, JING Xiaorui, et al. Adaptive over-current protection scheme for distribution network with high penetration rate of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 24-31.
- [6] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22):1-9.
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.
- [7] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [8] 丛伟, 田崇稳, 赵义术, 等. 基于电压变化量幅值比的智能配电网故障方向元件[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 93-99.
CONG Wei, TIAN Chongwen, ZHAO Yishu, et al. Massive data processing of intermittent energy based on map reduce model[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(15): 93-99.
- [9] DEWADASA M, GHOSH A, LEDWICH G. Protection of microgrids using differential relays[C]//21st Universities Power Engineering Conference(AUPEC), Australasian, 2011: 1-6.
- [10] 贾清泉, 孙玲玲, 王美娟, 等. 基于节点搜索的微电网自适应保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1650-1657.
JIA Qingquan, SUN Lingling, WANG Meijuan, et al. An adaptive protection method for micro-grid based on node searching[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1650-1657.
- [11] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20):50-56.
LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(20): 50-56.
- [12] MU L, HAN H, JIANG B, et al. Microgrid protection based on principle of fault location[J]. IEEE Transactions on Elec-

- trical and Electronic Engineering, 2016, 11(1): 30-35.
- [13] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [14] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变器分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [15] 韩海娟, 牟龙华, 郭文明. 基于故障分量的微电网保护适用性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 90-96.
HAN Haijuan, MU Longhua, GUO Wenming. Adaptability of microgrid protection based on fault components [J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(3): 90-96.
- [16] 于雷, 陈奇芳, 段力铭, 等. 配电网故障情况下多微网互联能力分析[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 682-689.
YU Lei, CHEN Qifang, DUAN Liming, et al. Analysis on interconnectivity of multi-microgrids under fault condition of distribution network [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 682-689.
- [17] KROPOSKI B, LASSETER R, ISE T, et al. Making microgrid work[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 3(6): 40-53.
- [18] SOSHINSKAYA M, CRIJNS-GRAUS W H J, GUERRERO J M, et al. Microgrids: experiences, barriers and success factors [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40(1): 659-672.
- [19] 卢强. 智能微能源网[C]//2015 年中国智能电网学术研讨会, 2015.
LU Qiang. Smart micro-energy grid[C]//2015 China's Smart Grid Conference, 2015.
- [20] 王盼宝, 王卫, 孟尼娜, 等. 直流微电网离网与并网运行统一控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4388-4396.
WANG Panbao, WANG Wei, MENG Nina, et al. Unified control strategy of islanding and grid-connected operations for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4388-4396.
- [21] 赵敏, 陈颖, 沈沉. 微电网群特征分析及示范工程设计[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1469-1476.
ZHAO Min, CHEN Ying, SHEN Chen. Characteristic analysis of multi-microgrids and a pilot project [J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1469-1476.
- [22] 姜斌, 牟龙华, 郭文明, 等. 基于母线测量导纳变化的微电网保护[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1751-1758.
JIANG Bin, MU Longhua, GUO Wenming, et al. Microgrid protection based on change of measured bus admittance [J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1751-1758.

作者简介:



张凡

张凡(1990),男,博士在读,研究方向为微电网以及智能电网保护与控制(E-mail: 1310491@tongji.edu.cn);

牟龙华(1963),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网以及电能质量;

邱进(1981),男,硕士,高级工程师,从事高压电器技术方面研究工作。

Protection scheme for tie lines of multi-microgrid based on measured bus admittance

ZHANG Fan¹, MU Longhua¹, QIU Jin²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key

Laboratory of Power Grid Environmental Protection(China Electric Power Research Institute), Wuhan 430074, China)

Abstract: With increasing interconnection and interaction among the adjacent microgrids, multi-microgrid is formed. Multi-microgrid has many new characteristics, such as bi-directional power flows, flexible operation modes and different control strategy of inverter interfaced distributed generations (IIDGs), which challenge multi-microgrid protection. Based on the voltage and current distribution characteristics of the line parameters, this paper proposes a new protection scheme for internal tie lines fault of multi-microgrid, which takes the change of measured bus admittance as the criterion. First, measured admittance amplitude of both ends of tie lines, before and after the fault are calculated. Then, comparing the admittance amplitude to select the likely faulty lines. Finally, fault line is located on comparison the phase of measured admittance among the likely faulty lines. This scheme with high sensitivity and reliability, has a simple principle and is easy to be adjusted. PSCAD/EMTDC is used in simulation analysis, and simulation results have verified the correctness and effectiveness of the protection scheme.

Keywords: multi-microgrid; inverter interfaced distributed generations; tie lines; protection scheme

(编辑 胡昊明)