

考虑光伏低电压穿越特性的交流微电网保护方法

景柳铭, 王一博, 赵 通, 周京华

(北方工业大学 北京市电力电子与电气传动工程研究中心, 北京 100144)

摘要:微电网内部发生故障时,采用恒功率(PQ)控制的光伏电源会进入低电压穿越状态,导致微电网线路电流的相位发生改变,进而可能造成故障方向判别错误。因此,对光伏低电压穿越状态下输出电流相位进行分析,然后对母线上的故障电压分量和故障电流分量的相位特性进行分析,提出了一种基于3组正序电流相位比较的故障方向判别方法。PSCAD/EMTDC仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:微电网;继电保护;低电压穿越;故障区间定位

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202034

0 引言

微电网具有很多优势,但是微电网保护问题制约着其进一步推广应用。交流微电网内部存在双向短路电流,要求保护能够判断故障方向;另外微电网在并网和离网2种模式下的短路电流差异较为明显,需要保护自适应地判别故障状态。此外,微电网的拓扑结构会随着运行方式的改变而发生变化,需要保护能够适用于不同的拓扑结构。除了微电网的短路电流差异以外,在当前低压网络中,很多节点仅配置了电流互感器,并没有配置电压互感器,需要构建仅利用电流信息的保护方法^[1-5]。

当微电网中发生故障时,恒功率(PQ)控制的光伏会进入低电压穿越状态,需要光伏输出无功来支撑电压。无功电流的增加会导致光伏输出电流的大小和相位发生改变,使微电网线路的电流发生变化,容易造成微电网的方向元件误判故障方向,因此有必要分析光伏低电压穿越状态下微电网的故障特性,研究故障方向判别方法^[6-12]。

已有文献对配电网中光伏发电低电压穿越特性进行了一定的研究^[13-16]。文献[13]详细分析了微电网内部发生故障时电流、电压的相位特征,由于故障端的故障电压影响输出电流相位,所以需要结合微电网的具体情况分析分布式电源输出故障电流的相位,因此该文献提出了根据电压故障分量与电流故障分量的相位特征确定故障区间的保护方法,但是该方法需要电压信息,而在低压微电网的部分节点较难获取电压信息。文献[14]提出了基于正序电流故障分量和分布式电源发生故障前电压的相位比较的主动配电网保护方法。该方法考虑了光伏低电压穿越特性对主动配电网的影响,能够准确切除不同

位置发生的不同类型故障,实现保护功能。但是该方法适用于主动配电网,其在微电网中的适用性有待进一步分析。文献[15]分析了光伏并网后配电网的传统方向保护的可靠性,提出了利用故障前电压与故障后正序电流的相位差进行故障区间定位的方法,此方法需要使用电压信息,限制了其中低压微电网中的应用。文献[16]分析了采取不同控制策略的分布式电源发生故障时输出电气量的特征,研究了孤岛运行时微电网母线上正序故障电压和电流的相位特征,提出利用电压故障分量和电流故障分量的相位关系确定故障区间的保护方案,并在最后验证了其可行性,该方案需要较多的电气量,信息的采集和处理过程复杂。

综上所述,现有的考虑光伏低电压穿越的微电网保护方法普遍需要电压互感器,会增加保护系统的成本,因此本文提出了一种仅利用电流信息的微电网线路保护方法。该方法利用母线与分支馈线中故障电流的相位差进行故障方向判别;通过不同保护装置之间的配合定位故障区间。最后利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC对所提方法的有效性进行了仿真验证。

1 光伏低电压穿越特性分析

微电网并网运行时光伏采用PQ控制且带有低电压穿越功能,光伏会在微电网发生故障时降低有功功率,同时增加输出的无功功率对微电网进行电压调节,并且其交流侧输出电流只存在正序分量。在故障附加网络中,采用PQ控制的光伏可直接等效为正序电流源。根据PQ控制的逆变型分布式电源(IIDG)等效数学模型,IIDG输出的故障电流可以表示为^[16]:

$$\begin{cases} I_{q,f} = \min \left\{ k \left(U_{d,0} - U_{d,f}^+ \right), I_{\max} \right\} \\ I_{d,f} = \min \left\{ P_{\text{ref}} / U_{d,f}^+, \sqrt{I_{\max}^2 - I_{q,f}^2} \right\} \\ I_{\text{amp},f} = \sqrt{I_{q,f}^2 + I_{d,f}^2} \\ \alpha = \arctan \left(I_{q,f} / I_{d,f} \right) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2021-03-09;修回日期:2021-12-31

在线出版日期:2022-02-28

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(3214060)

Project supported by Beijing Natural Science Foundation (3214060)

式中: $I_{q,f}$ 和 $I_{d,f}$ 分别为发生故障时光伏发出的无功电流和有功电流; P_{ref} 为有功功率参考值; $U_{d,0}$ 为正常运行时光伏并网点(PCC)电压的 d 轴分量; $U_{d,f}^+$ 为发生故障时光伏并网点电压的正序分量; I_{max} 为发生故障时光伏输出的最大故障电流; $I_{amp,f}$ 为故障电流幅值; α 为故障电流相位; k 为无功补偿系数。

根据式(1)和文献[14],光伏微电网发生故障时,光伏微电网可用图1所示的等效模型进行分析。图中: Z_L 为线路等效阻抗; Z_S 为系统等效正序阻抗; ΔI 为电流故障分量。

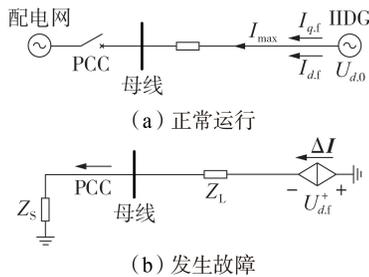


图1 光伏微电网等效模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of equivalent model of photovoltaic microgrid

发生故障时,光伏需要发出无功功率来抑制电压的跌落,所以可以先分析光伏故障前后输出电压、电流的变化情况,然后根据光伏的输出情况分析母线电压与电流的变化,故障前后光伏输出电压相量与电流相量如图2所示。

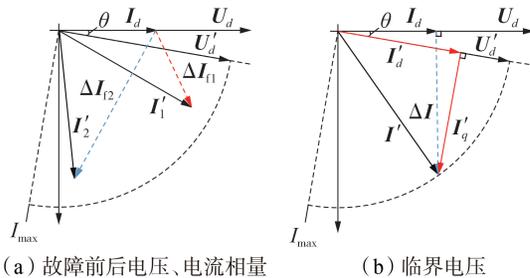


图2 故障前后光伏输出的电压和电流相量

Fig.2 Voltage and current phasors output by photovoltaic before and after fault

图2(a)中: U_d 、 I_d 分别为故障前的电压相量和输出有功电流相量; U'_d 为故障后电压相量,电压相位滞后角度为 θ ; I'_d 为故障后电流相量对应的有功电流相量; I'_1 、 I'_2 为故障电流相量,故障电流范围是以 I_{max} 为半径的弧线所围成的扇形区域; ΔI_{f1} 、 ΔI_{f2} 为电流故障分量。由图2(a)可知,当配电网发生故障时,如果电压跌落较大,即 U'_d 较小,则电流故障分量 ΔI 和 U_d 的相位差大于 90° ;如果电压跌落较小,即 U'_d 较大,则电流故障分量 ΔI 和 U_d 的相位差小于 90° 。由此可知,电压跌落的程度将影响输出电流的故障分量 ΔI 和故障前电压 U_d 的相位差。且故障后电压有

一个临界值如图2(b)所示。图中: I'_q 为故障后电流相量对应的无功电流相量; I' 为故障后电流。此时 U_d 与故障电流分量 ΔI 的夹角为 90° 。

由图2(b)可得:

$$I'_q = |I'| \sin \left(\arccos \frac{I_d}{|I'|} - \theta \right) \quad (2)$$

由于 $|I'| = I_{max}$,所以:

$$I'_q = I_{max} \sin \left(\arccos \frac{I_d}{I_{max}} - \theta \right) \quad (3)$$

根据规定,当电压跌落超过10%时,每超出1%的电压跌落,就需要对应地提高2%的无功电流,数学表达式为:

$$\frac{I'_q}{I_{max}} = k' \frac{0.9U_d - U'_d}{U_d} \quad (4)$$

式中: $k' \geq 2$; U_d 为 U_d 的幅值; U'_d 为 U'_d 的幅值。将式(4)代入(3)可得到正常运行时电压与临界电压的关系为:

$$U'_d = U_d \left[0.9 - \frac{1}{k'} \sin \left(\arccos \frac{I_d}{I_{max}} - \theta \right) \right] \quad (5)$$

根据分析结果可知,若故障后电压小于临界电压,则 ΔI 与 U_d 的相角差大于 90° ;若故障后电压大于临界电压,则 ΔI 与 U_d 的相角差小于 90° 。通过分析光伏的输出电流故障特性,可以为微电网故障分析提供基础。

2 光伏低电压穿越时微电网故障特性分析

本文通过构建的简单微电网模型分析故障特性。图3(a)为1个带有4条母线以及馈线和光伏并网运行的微电网。图中:母线E连接着3条馈线 E_1 — E_3 ;母线F连接着3条馈线 F_1 — F_3 ;母线G连接着3条馈线 G_1 — G_3 ;母线M连接着3条馈线 M_1 — M_3 ;LD₁—LD₃为负载;IIDG₁与IIDG₂为独立分布式电源。当点f发生故障时,该微电网的正序故障附加网络如图3(b)所示。图中: ΔI_{E1} — ΔI_{E3} 、 ΔI_{F1} — ΔI_{F3} 、 ΔI_{M1} — ΔI_{M3} 、 ΔI_{G1} — ΔI_{G3} 分别为发生故障后 E_1 — E_3 、 F_1 — F_3 、 M_1 — M_3 的故障电流; Z_1 — Z_3 分别为LD₁—LD₃的正序阻抗; ΔU_F 为故障点的正序附加电压源; Z_F 为故障点过渡阻抗; Z_{AF} 、 Z_{BF} 、 Z_{EM} 、 Z_{FG} 为不同母线之间线路的等效正序阻抗; ΔI_1 与 ΔI_2 分别为IIDG₁与IIDG₂输出的电流故障分量。

当点f发生故障时,由于微电网与配电网并网运行,大电网能够提供电压支撑,所以母线E、M的电压降较小。但如果故障点离母线E很近,则也可能出现母线E、M的电压降较大的情况,此时母线E处的分析结果与母线G处相似,故本文主要分析母线E、M处电压降较小的情况。

由以上分析可知,当点f发生故障时,母线M处

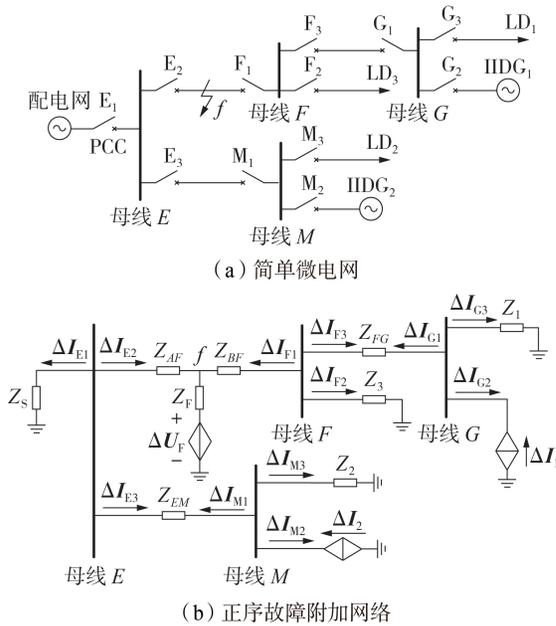


图3 简单微电网及其正序故障附加网络示意图
Fig.3 Schematic diagram of simple microgrid and its positive-sequence fault additional network

IIDG₂输出的电流故障分量 ΔI_2 与故障前母线M的电压 U_M 的相位差小于 90° 。由图3(b)可知, $\Delta I_{M2} = -\Delta I_2$, $\Delta I_{M3} = -\Delta U_M / Z_2$, $\Delta I_{M1} = -(\Delta I_{M2} + \Delta I_{M3})$,其中 Z_2 为感性,所以 ΔI_{M3} 与母线M处正序电压故障分量 ΔU_M 的相位差小于 90° , ΔI_{M3} 位于第三象限。通过分析可以得到母线M处发生故障时电压分量和电流分量的相位关系如图4(a)所示;对于母线E有 $\Delta I_{E3} = -\Delta I_{M1}$, $\Delta I_{E1} = \Delta U_E / Z_s$, $\Delta I_{E2} = -(\Delta I_{E1} + \Delta I_{E3})$,其中 Z_s 为感性,所以 ΔI_{E1} 与母线E处正序电压故障分量 ΔU_E 的相位差小于 90° , ΔI_{E1} 位于第三象限。由上述分析可以得到点f处发生故障时母线E上故障电压分量和电流分量的相位关系,如图4(b)所示。对于母线F有 $\Delta I_{F3} = -\Delta I_{G1}$,所以先分析母线G上的故障电压分量与故障电流分量的相位关系。由图3(b)可知 $\Delta I_{G2} = -\Delta I_1$, $\Delta I_{G3} = \Delta U_G / Z_1$, $\Delta I_{G1} = -(\Delta I_{G2} + \Delta I_{G3})$,其中 Z_1 为感性,所以 ΔI_{G3} 与母线G处正序电压故障分量 ΔU_G 的相位差小于 90° , ΔI_{G3} 位于第三象限。当点f发生故障时,母线G没有大电网的支撑,所以电压降落较大,因此故障后 ΔI_1 与故障前母线G的电压 U_G 的相位差大于 90° ,所以 ΔI_{G3} 位于第三象限。由故障分量图可得,发生故障后母线F各馈线故障分量的关系为: $\Delta I_{F3} = -\Delta I_{G1}$, $\Delta I_{F2} = \Delta U_F / Z_3$, $\Delta I_{F1} = -(\Delta I_{F2} + \Delta I_{F3})$ 。经过上述分析后, ΔI_{G1} 的故障向量方向已知,母线F处各故障分量的相量图如图4(c)所示。

当点f处发生故障时,通过母线E、F处的正序电流故障分量可知,故障点位于 E_2 与 F_1 之间。

在图3(a)中设置4个故障点 f_1 — f_4 ,如图5(a)所

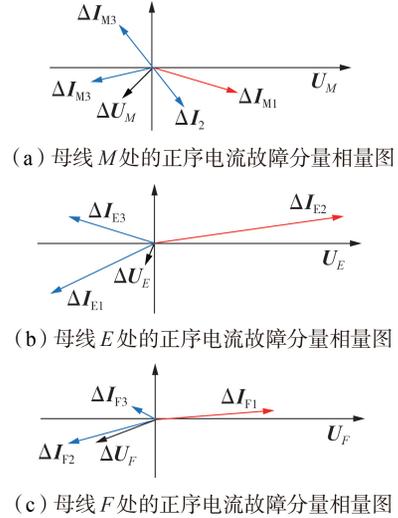


图4 点f处发生故障时各故障电压分量和故障电流分量
Fig.4 Fault voltage components and fault current components under fault at Point f

示。当点 f_4 处发生故障时,图5(a)的正序故障附加网络如图5(b)所示。图中: Z_{11} 、 Z_{12} 为线路的等效正序阻抗; Z_{EF} 为母线E与F之间线路的等效正序阻抗。

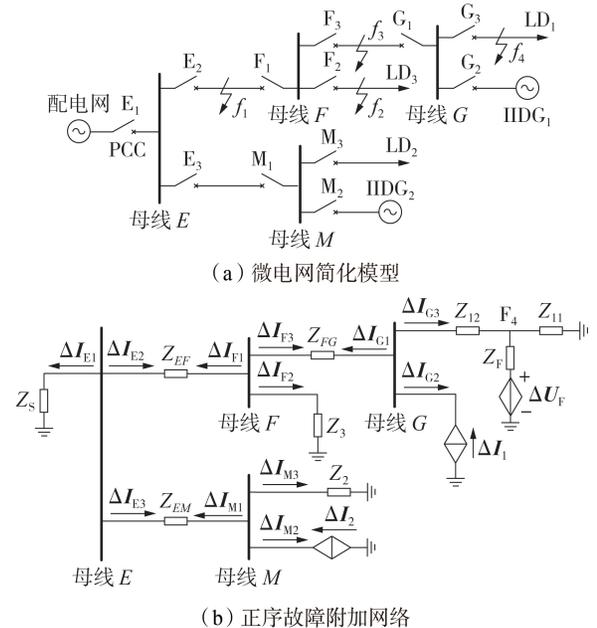


图5 微电网简化模型及正序故障附加网络
Fig.5 Simplified model of microgrid and positive-sequence fault additional network

下面对点 f_1 — f_4 处发生故障时母线E、F、G和M上的故障分量进行分析。

1)当点 f_1 处发生故障时,分析同点f处发生故障的情况,本文不再赘述。

2)当 f_2 处发生故障时,微电网的正序故障附加网络与点 f_1 处发生故障时的分析过程类似,母线E、M处的电流相量图与点f发生故障时类似,本文不再赘述。对故障附加网络中母线G进行分析,当母

线 G 的电压下降较小时, ΔI_1 与 U_G 的相位差小于 90° , 所以 ΔI_1 位于第四象限, 由故障附加网络可得图 6。对母线 F 进行分析, 由故障附加网络可知 $\Delta I_{F1} = -\Delta I_{E2}$ 、 $\Delta I_{F3} = -\Delta I_{G1}$ 、 $\Delta I_{F2} = -(\Delta I_{F1} + \Delta I_{F3})$, 则母线 F 处故障电流分量如图 7 所示。

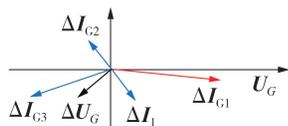


图 6 点 f_2 处发生故障时母线 G 上的故障分量相位关系

Fig.6 Phase relation among fault components on Bus G under fault at Point f_2

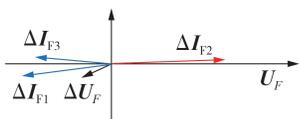


图 7 点 f_2 处发生故障时母线 F 上的故障分量相位关系

Fig.7 Phase relation among fault components on Bus F under fault at Point f_2

3) 当点 f_3 处发生故障时, 母线 M 、 E 处的正序故障相量的关系类似图 4(a)、(b), 本文不再赘述。

由于母线 F 有大电网提供电压所以电压降落较小, 由正序电流故障分量图可得 $\Delta I_{F1} = -\Delta I_{E2}$, $\Delta I_{F2} = \Delta U_F / Z_3$, $\Delta I_{F3} = -(\Delta I_{F1} + \Delta I_{F2})$ 。对 ΔI_{E3} 的分析可参考图 7, 本文不再赘述。由于 Z_3 为感性, 所以 ΔI_{F2} 与 ΔU_F 相位差小于 90° , ΔI_{F2} 位于第三象限。由上述关系可得发生故障时母线 F 处故障分量的相位关系如图 8 所示。

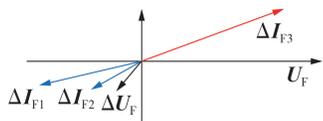


图 8 点 f_3 处发生故障时母线 F 上的故障分量相位关系

Fig.8 Phase relation among fault components on Bus F under fault at Point f_3

4) 当点 f_4 点处发生故障时, 正序故障附加网络如图 5(b) 所示。发生故障时, 母线 M 、 E 和 F 处各故障分量的相量关系分别与图 4(a)、(b) 和图 8 相似, 本文不再赘述。由于母线 G 有大电网的支持, 电压降落较小, 所以 ΔI_1 与 U_G 的相位差小于 90° , ΔI_1 位于第四象限。由图 5(b) 可知, $\Delta I_{G2} = -\Delta I_1$, $\Delta I_{G1} = -\Delta I_{F3}$, $\Delta I_{G3} = -(\Delta I_{G1} + \Delta I_{G2})$ 。根据上述对 ΔI_{G1} — ΔI_{G3} 的分析可得到母线 G 上的故障电压分量、故障电流分量的相位关系如图 9 所示。

基于上述分析得到的各故障分量之间的相位关系, 可在不同位置发生故障时, 得到 1 条母线的所有分支馈线上的正序故障电流分量之间的相位关系。当微电网正常工作时, 任意 2 条馈线上的电流分量

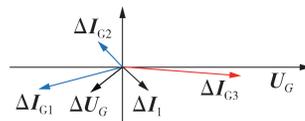


图 9 点 f_4 处发生故障时母线 G 上的故障分量相位关系

Fig.9 Phase relation among fault components on Bus G under fault at Point f_4

相位差在 $(0^\circ, 90^\circ)$ 范围内; 当微电网发生故障时, 故障电流与正常电流的相位差在 $(90^\circ, 180^\circ)$ 范围内。假设母线 A 有 3 条馈线 A_1 — A_3 。当 A_3 发生故障时, 首先提取 3 条馈线上的故障电流分量 ΔI_{A1} — ΔI_{A3} 的相位并转换至 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 范围内, 然后根据式 (6), 判断馈线上的故障电流分量的相位差。

$$\begin{cases} 90^\circ < |\arg(\Delta I_{A3}) - \arg(\Delta I_{A1})| < 180^\circ \\ 90^\circ < |\arg(\Delta I_{A3}) - \arg(\Delta I_{A2})| < 180^\circ \\ 0^\circ < |\arg(\Delta I_{A1}) - \arg(\Delta I_{A2})| < 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

3 微电网保护方案

3.1 微电网保护系统构架

本文提出的微电网保护系统采用集中—分布式保护方案, 单元保护模块 (unit protection) 分布在母线节点处测量各馈线上的电流信息。微电网保护系统配置图如附录 A 图 A1 所示。

与传统的单元保护模块中各条馈线上都需要设置测量装置相比, 本文所提出的保护方法仅需要在并网母线处安装 1 个电压互感器, 不需要在每个节点处安装电压互感器, 可以降低一定的成本。单元保护模块从并网母线处获取电流信息, 提取正序故障电流分量。一旦微电网并网母线处发生电压跌落, 则将信息传递给单元保护模块, 启动故障线路判断, 定位故障馈线。2 个相邻的单元保护模块之间可通过通信联络线传递保护信息。跳闸信号触发模块如附录 A 图 A2 所示。

3.2 故障区段定位方法

故障区段判定依据为母线上电压发生跌落且跌落值超过原电压值的 10%, 当满足故障线路判定依据时, 启动故障判定。故障判断流程如图 10 所示。

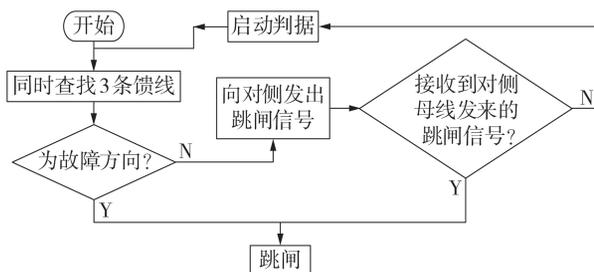


图 10 故障区段判断流程图

Fig.10 Flowchart of fault section diagnosis

首先提取母线对应馈线上的故障电流分量相位, 转换到 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 将被检测馈线的故障电流分量 ΔI_Y 与该馈线所在母线上其他线路的故障电流分量 ΔI_{Yn} , 代入式(7)计算两者的相位差 α 。

$$|\alpha| = |\arg \Delta I_Y - \arg \Delta I_{Yn}| \quad (7)$$

如果式(7)的计算结果都在 $(90^\circ, 180^\circ)$ 范围内, 则被检测馈线发生故障, 故障状态判据输出为-1; 否则, 被检测馈线未发生故障, 故障状态判据输出为1。启动判据后, 开始同时检测母线上所有馈线的出线方向是否发生故障。若存在故障线路, 则发出跳闸信号, 同时向对侧发出跳闸信号, 若发出信号的同时收到对侧发来的跳闸信号, 则直接跳闸, 否则不跳。

4 仿真验证

在电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC中构建微电网模型, 模型图见附录A图A3。微电网二次电压等级为10 kV, 各馈线长度为500 m, 单位长度线路的正序电阻、正序感抗、零序电阻、零序感抗分别为0.64、0.12、2.00、0.4 Ω/km , 负载为0.4 MW。设置1 s时发生三相接地故障。

当故障电阻分别为0.01、0.1、1 Ω 时, 分布式电源输出的电流相位与无功电流如图11所示。图中, 无功电流为标么值。由图可见: 在故障发生时刻, 分布式电源输出的无功电流由0开始迅速增大, 到2 s时故障结束, 无功电流又恢复至0; 在无功电流增加的同时, 分布式电源的输出电流相位也随之变大。

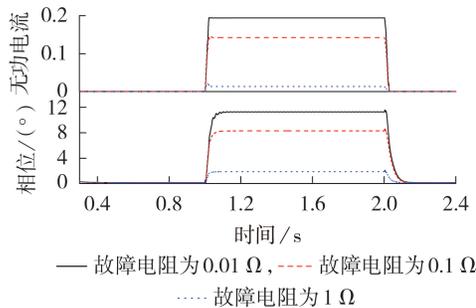


图11 故障电阻变化时分布式电源输出的无功电流和电流相位

Fig.11 Reactive current and current phase of DG when fault resistance changes

在点 f_1 处发生故障时, 仿真结果如图12所示。由图可见: 馈线 E_2 的故障电流分量相位与馈线 E_3 、 E_1 的故障电流分量相位相反; 故障馈线为 E_2 、 F_1 、 M_1 , 健康馈线为 E_1 、 E_3 、 F_2 、 F_3 、 M_2 、 M_3 , 故障线路与健康馈线的故障电流分量相位差在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 健康馈线两两之间的故障电流分量相位差在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

在点 f_2 处发生故障时, 仿真结果如附录A图A4

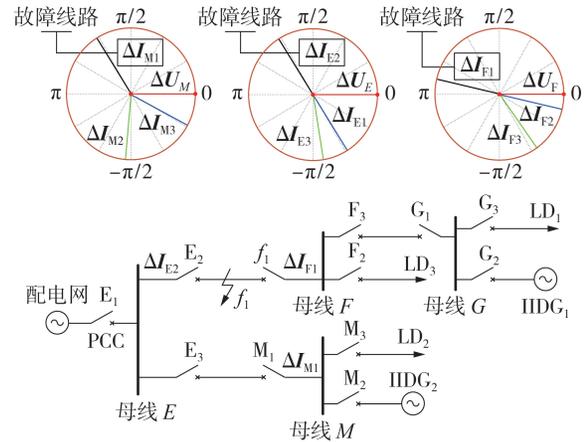


图12 点 f_1 处发生故障时的仿真结果

Fig.12 Simulative results under fault at Point f_1

所示。由图可见: 馈线 F_2 的故障电流分量相位与馈线 F_1 、 F_3 的故障电流分量相位相反; 故障馈线为 E_2 、 F_2 、 G_1 、 M_1 , 健康馈线为 E_1 、 E_3 、 F_1 、 F_3 、 M_2 、 M_3 、 G_2 、 G_3 , 故障线路与健康馈线的故障电流分量相位差在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 健康馈线两两之间的故障电流分量相位差在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

在点 f_3 处发生故障时, 仿真结果如附录A图A5所示。由图可见: 馈线 F_3 的故障电流分量相位与馈线 F_1 、 F_2 的故障电流分量相位相反; 故障馈线为 E_2 、 F_3 、 M_1 , 健康馈线为 E_1 、 E_3 、 F_2 、 F_1 、 M_2 、 M_3 , 故障线路与健康馈线的故障电流分量相位差在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 健康馈线两两之间的故障电流分量相位差在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

在点 f_4 处发生故障时, 仿真结果如附录A图A6所示。由图可见: 馈线 G_3 的故障电流分量相位与馈线 G_1 、 G_2 的故障电流分量相位相反; 故障馈线为 E_2 、 F_3 、 G_3 、 M_1 , 健康馈线为 E_1 、 E_3 、 F_2 、 F_1 、 M_2 、 M_3 、 G_1 、 G_2 , 故障线路与健康馈线的故障电流分量相位差在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 健康馈线两两之间的故障电流分量相位差在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

附录A表A1为仿真结果汇总。经过实验验证, 在低阻故障以及高阻故障时, 本文所提方法都能够有效地在微电网并网时, 确定内部的故障区段, 并定位故障区间。

在故障电阻为0.1 Ω 的条件下, 对点 f_4 处发生单相接地故障和两相短路故障进行分析, 测量母线 F 处各馈线正序电流之间的差值, 进一步证明本文判据的正确性。当 f_4 处发生故障时, 母线 F 处故障线路为 F_3 , 健康线路为 F_1 、 F_2 。正序故障附加网络如图5(b)所示, 微电网简化模型如附录A图A7所示。

当点 f_4 处发生单相接地故障时, 母线 F 上故障分量相位关系如图13所示。由图可见: 当 f_4 处发生单相接地故障时, 故障线路 F_3 与健康线路 F_1 、 F_2 的故

障电流分量相位差在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 之间;2条健康线路 F_1 、 F_2 的故障电流分量相角差在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间。

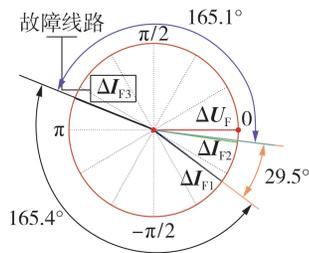


图13 点 f_4 处发生单相接地故障时,母线 F 上的故障分量相位关系

Fig.13 Phase relation among fault components on Bus F under single-phase grounding fault at Point f_4

当点 f_4 处发生两相短路故障时,母线 F 上故障分量相位关系如附录A图A8所示。由图可见:当 f_4 处发生两相短路故障时,故障线路 F_3 与健康线路 F_1 、 F_2 的故障电流分量相位差在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 之间;2条健康线路 F_1 、 F_2 的故障电流分量相角差在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间。

由图13和图A8可得,当发生单相接地故障和双相短路故障时,不同馈线正序电流的故障电流分量相位差仍满足故障判断条件。因此本文方法适用于不同故障类型。

5 结论

本文分析了光伏低电压穿越时的故障电流相位特征,提出了一种基于电流测量信息的就地化保护方法。该方法利用不同馈线正序电流故障分量相位差进行比较,从而判别故障方向。本文中通过不同母线处3条馈线上的正序电流进行相位比较,确定故障方向。最后在PSCAD/EMTDC中构建包含低电压穿越功能的光伏仿真模型,并对微电网内部故障进行仿真验证。仿真结果验证了故障特征分析的正确性以及保护方案的可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 周龙,齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(13):147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [3] 黄涛,王胜利,谢华,等. 光伏逆变器短路电流3次谐波及其对保护的影响分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):99-105.
HUANG Tao, WANG Shengli, XIE Hua, et al. Analysis of third harmonic current of photovoltaic inverter and its influence on protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 99-105.
- [4] 欧阳森,马文杰. 考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):21-26.
OUYANG Sen, MA Wenjie. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 21-26.
- [5] 张明光,陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [6] 张润坤,王宝华. 含低电压穿越型光伏电源配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(18):137-142.
ZHANG Runkun, WANG Baohua. An adaptive positive-sequence current instantaneous trip protection for distribution network with PV[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 137-142.
- [7] 汪冬辉,姚旭,张坤贤,等. 独立运行微电网的故障特征分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):52-58.
WANG Donghui, YAO Xu, ZHANG Kunxian, et al. Analysis on fault characteristics of independent microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 52-58.
- [8] 房志学,苏建徽,王华锋,等. 微网逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(2):143-149,161.
FANG Zhixue, SU Jianhui, WANG Huafeng, et al. Low voltage ride-through control strategy of microgrid inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 143-149, 161.
- [9] 葛路明,曲立楠,陈宁,等. 光伏逆变器的低电压穿越特性分析与参数测试方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(18):149-156.
GE Luming, QU Linan, CHEN Ning, et al. Characteristic analysis of low voltage ride-through and parameter test method for photovoltaic inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 149-156.
- [10] 许志荣,杨苹,郑群儒,等. 基于无功电流注入的光伏逆变器低电压穿越策略[J]. 可再生能源,2015,33(9):1317-1322.
XU Zhirong, YANG Ping, ZHENG Qunru, et al. Low voltage ride-through strategy of PV inverter based on reactive current injection[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(9): 1317-1322.
- [11] 崔艳伟,李双双,孙玉涛,等. 光伏并网低电压穿越控制策略的研究[J]. 电力科学与工程,2017,33(9):23-28.
CUI Yanwei, LI Shuangshuang, SUN Yutao, et al. Research of low voltage ride through control strategy in photovoltaic (PV) grids[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(9): 23-28.
- [12] 贾利虎,朱永强,孙小燕,等. 基于模型电流预测控制的光伏电站低电压穿越控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):68-74.
JIA Lihu, ZHU Yongqiang, SUN Xiaoyan, et al. A control method of low voltage ride through for photovoltaic plant based on model current predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 68-74.
- [13] 韩海娟,牟龙华,张凡,等. 考虑IIDG低电压穿越时的微电网保护[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):110-120.
HAN Haijuan, MU Longhua, ZHANG Fan, et al. Microgrid protection considering low voltage ride-through of IIDG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 110-120.

[14] 孙玲玲,王宁,贾清泉,等. 计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):79-86.

SUN Lingling, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Protection method of active distribution network considering low voltage ride-through of distributed PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):79-86.

[15] 张惠智,李永丽,陈晓龙,等. 具有低电压穿越能力的光伏电源接入配电网方向元件新判据[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):106-112.

ZHANG Huizhi, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. New criteria of directional component in distribution network with photovoltaic generator of low voltage ride through capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):106-112.

[16] 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 Systems, 2016, 40(3):90-96.

作者简介:



景柳铭

景柳铭(1990—),男,讲师,博士,主要研究方向为微电网保护与控制(E-mail: lmjing@ncut.edu.cn);

王一博(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网保护;

赵通(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网保护。

(编辑 任思思)

AC microgrid protection method considering photovoltaic low voltage ride through characteristics

JING Liuming, WANG Yibo, ZHAO Tong, ZHOU Jinghua

(Power Electronics & Motor Drivers Engineering Research Center of Beijing, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: When fault occurs in the microgrid, the PV (PhotoVoltaic) generation adopting constant power control (PQ control) will enter the LVRT (Low Voltage Ride Through) state, which will lead to the phase change of the microgrid line current and cause the fault direction discrimination error. Therefore, the phase of the output current in the PV LVRT state is analyzed, then the phase characteristics of the fault voltage component and the fault current component on the bus are analyzed, and the fault direction discrimination method based on phase comparison of three groups of positive-sequence currents is proposed. The simulative results by PSCAD/EMTDC verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: microgrid; relay protection; low voltage ride through; fault section location

附录 A

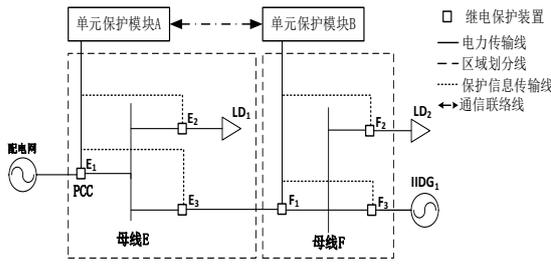


图 A1 微电网保护系统配置图

Fig.A1 Configuration diagram of microgrid protection system

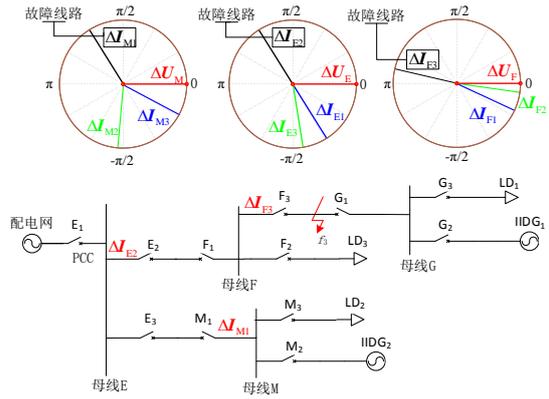


图 A5 点 f_3 处发生故障时的仿真结果

Fig.A5 Simulative results of fault at Point f_3

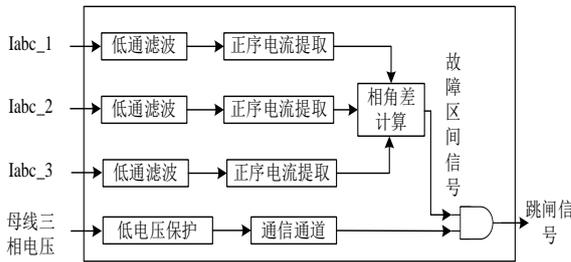


图 A2 跳闸信号触发模块

Fig.A2 Trip signal triggering module

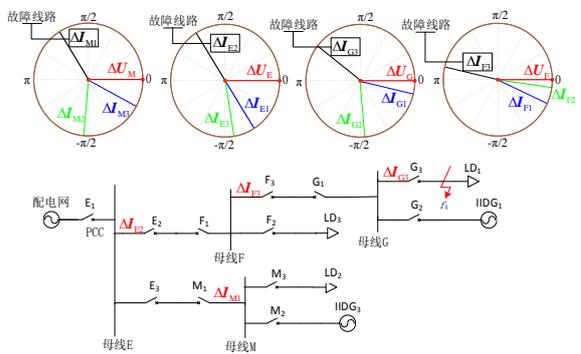


图 A6 点 f_4 处发生故障时的仿真结果

Fig.A6 Simulative results of fault at Point f_4

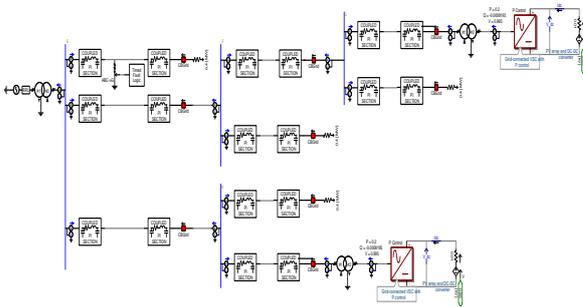


图 A3 交流微电网仿真模型

Fig.A3 AC microgrid simulation model

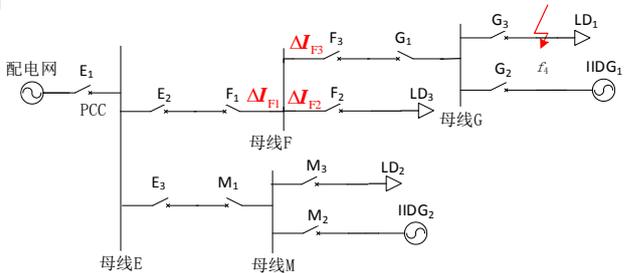


图 A7 f_4 处发生故障时的微电网简化模型

Fig.A7 Simplified model of microgrid under fault at f_4

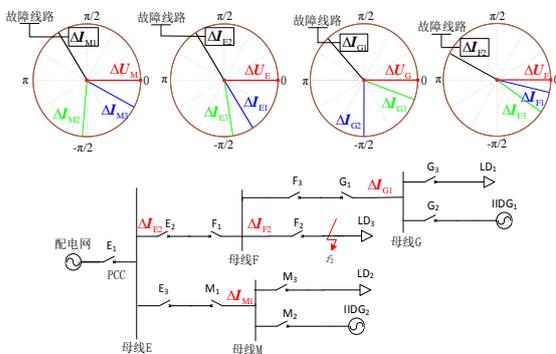


图 A4 点 f_2 处发生故障时的仿真结果

Fig.A4 Simulative results of fault at Point f_2

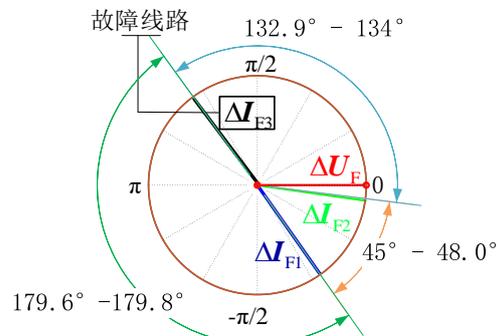


图 A8 两相短路故障时母线 F 上故障分量相位关系

Fig.A8 Phase relation of fault component on Bus F when two-phase short circuit fault occurs

表 A1 故障馈线仿真结果
TableA1 Simulative results of fault feeder

| 故障位置 | 故障电阻 / Ω | 故障馈线 | 馈线 | |
|-------|--------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | 相角差为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ | 相角差为 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ |
| f_1 | 0.01、0.1 | $E_2、F_1、M_1$ | $E_1、E_3$ | $E_2、F_1$ M_1 |
| | 1、12.5 | | $F_2、F_3$ | |
| | 100 | | $M_2、M_3$ | |
| f_2 | 0.01、0.1 | $E_2、M_1、F_2、G_1$ | $E_1、E_3$ | $E_2、F_2$ $M_1、G_1$ |
| | 1、12.5 | | $F_2、F_3$ | |
| | 100 | | $M_2、M_3$ $G_2、G_3$ | |
| f_3 | 0.01、0.1 | $E_2、M_1、F_3、G_1$ | $E_1、E_3$ | $E_2、F_3$ $M_1、G_1$ |
| | 1、12.5 | | $F_1、F_2$ | |
| | 100 | | $M_2、M_3$ $G_2、G_3$ | |
| f_4 | 0.01、0.1 | $E_2、M_1$ $F_3、G_3$ | $E_1、E_3$ | $E_2、F_3$ $M_1、G_3$ |
| | 1、12.5 | | $F_1、F_2$ | |
| | 100 | | $M_2、M_3$ $G_1、G_2$ | |