

基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位方法

高孟友¹,徐丙垠^{2,3},张新慧²

(1. 山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061;2. 山东理工大学 智能电网研究中心,山东 淄博 255049;
3. 山东科汇电力自动化股份有限公司,山东 淄博 255087)

摘要:分析了分布式电源(DER)的短路电流特征和DER准入容量限制。通过分析有源配电网非故障区段与故障区段两侧开关短路电流的幅值关系,提出利用流过线路区段两侧的短路电流幅值比较进行有源配电网故障定位。MATLAB/Simulink仿真结果表明,该方法在DER准入容量满足公共连接点处的电压变化量要求的情况下,可以实现有源配电网故障定位。

关键词:有源配电网;分布式电源;公共连接点;电压变化量;故障定位;幅值比较;短路电流

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.004

0 引言

馈线自动化实现配电线路故障定位、隔离与供电恢复,是提高供电可靠性的重要技术手段。在常规辐射式供电的配电网中,利用故障点上游开关处能够检测到故障电流而故障点下游开关处检测不到故障电流的现象实现故障区段的定位^[1-4]。而在分布式电源DER(Distributed Energy Resource)高度渗透的有源配电网中^[5],DER提供的短路电流可能使流过故障点下游开关的故障电流大于故障电流整定值,导致常规的故障定位方法失效,因此,需要研究适用于有源配电网的故障定位方法。

国内外针对DER对有源配电网故障区段定位的影响及相应解决方案的研究成果较少。通过比较故障区段两侧开关处的故障电流方向可以识别出故障区段^[6-7],但该方法要求在馈线开关处加装电压互感器或传感器。文献^[8]提出根据馈线上DER可以

提供的最大短路电流来设定故障电流整定值,以克服DER的影响;文献^[9]基于短路电流计算,对DER的最大接入容量进行限制,调整开关过电流整定值,将系统电源提供的最小短路电流及DER提供的最大短路电流区分开,然后采用传统故障区段定位方案进行故障定位。这些方法增加了计算工作量,而且会降低故障检测灵敏度。

本文根据DER引起的公共连接点PCC(Point of Common Coupling)电压变化量的限制,推导出配电线路上任一点及其下游DER准入容量之和的极限值,得出了流过故障点下游开关由DER提供的最大短路电流与流过故障点上游开关由系统提供的短路电流的关系,并据此提出通过比较流过线路区段两侧的短路电流幅值进行有源配电网故障定位的方法。

1 考虑电压变化量约束的DER准入容量限值分析

DER输出的电流会使线路电压发生变化,如果引起的电压变化量过大,会造成电压不合格,因此,需要对DER并网引起的电压变化量予以限制,如德国中

收稿日期:2014-12-06;修回日期:2015-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177096)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177096)

Establishment and application of EMI indicator system orienting to massive industrial data mining

XU Qingshan¹,WANG Wendi¹,LIN Zhangsui²,LI Xilan²,DING Maosheng³

(1. School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China;

2. Fujian Electric Power Company Economic Research Institute,Fuzhou 350012,China;

3. State Grid Ningxia Electric Power Company,Yinchuan 750001,China)

Abstract: The required indicator data are selected from massive electrical power data and industrial data to form an EMI(Electricity Managers Index) indicator system. The statistical test-rough set theory is applied to select the key indicators and optimize the EMI indicator system. It is proposed to predict the industrial power usage trend based on the optimized EMI indicator system. The power usage trends of the typical industries in Fujian province are predicted by the proposed method and the results show its feasibility and effectiveness.

Key words: electricity forecasting; indicator system; leading indicators; Granger causality test; rough set; EMI

压配电网 DER 并网技术标准要求 DER 引起的电压变化量应小于 3%^[10-12]。

针对线路某一具体的参考点,忽略上游 DER 的影响,则该点电压变化量等于在该点处及其下游侧接入的 DER 的总输出电流与从该点看入系统的系统阻抗值乘积,其电压变化量正比于 DER 总输出电流。因此,根据电压变化量的限值可以推导出线路任一点下游侧 DER 允许注入的电流,即得出 DER 在该点下游允许接入的最大容量,称为准入容量。

图 1 为有源配电网简化示意图,其中 U_s 为系统等效电源电压; Z_1, Z_2, \dots, Z_n 为各段线路的阻抗,一般情况下,对于给定的馈线,其阻抗角相等,假设为 θ ; $DER_1, DER_2, \dots, DER_i, \dots, DER_n$ 沿线均匀分布,其中 DER_i 按照其额定电流 I_{Gi} 等效为电流源,功率因数角为 φ_i ,与电网的公共连接点为 PCC_{i0} 。

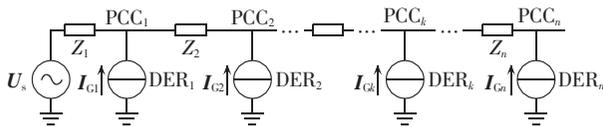


图 1 有源配电网简化示意图

Fig.1 Simplified schematic diagram of active distribution network

为便于分析,以图 1 所示并网点 PCC_k 为例,假定 DER 并网前电压为线路额定电压 U_N ,并网后电压为 U_k ,则 PCC_k 处及其下游侧 DER 引起的电压相量变化 ΔU_k 为:

$$\Delta U_k = U_k - U_N = \sum_{i=k}^n \left(I_{Gi} \sum_{j=1}^n Z_j \right) = \left(\sum_{i=k}^n |I_{Gi}| \right) \left| \sum_{j=1}^k Z_j \right| \angle (\theta - \varphi) \quad (1)$$

其中, ΔU_k 为 PCC_k 处电压相量变化; θ, φ 分别为线路阻抗角和 DER 功率因数角; $\sum_{i=k}^n |I_{Gi}|$ 为 PCC_k 处及其下游所有 DER 提供的电流幅值之和; $\sum_{j=1}^k Z_j$ 为从 PCC_k 看入系统母线的线路阻抗。

DER 并网后 PCC_k 处电压相量图如图 2 所示。

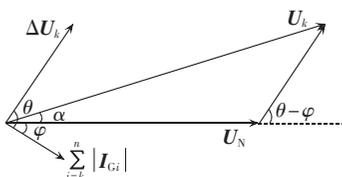


图 2 PCC_k 处电压相量图

Fig.2 Voltage phasor of PCC_k

根据 DER 并网后 PCC_k 处电压相量关系及正弦定理可得:

$$\frac{|U_k|}{\sin(\theta - \varphi)} = \frac{|U_N|}{\sin(\theta - \varphi - \alpha)} = \frac{|\Delta U_k|}{\sin \alpha} \quad (2)$$

其中, α 为 PCC_k 处 DER 并网后电压 U_k 与 DER 并网

前电压 U_N 之间的夹角。

考虑 DER 并网引起的电压变化量的限制,即:

$$|U_k| - |U_N| \leq 3\% |U_k| \quad (3)$$

在 10 kV 中压有源配电网中,对于架空线路,其阻抗角 θ 位于 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间;对于电缆线路,其阻抗角 θ 位于 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之间;根据国家电网《分布式电源接入电网技术规定》对 DER 电压调节能力的限制,其功率因数角 φ 位于 $-18^\circ \sim 18^\circ$ 之间,联立式(2)、(3),可得极限情况下的 $|\Delta U_k|$ 为:

$$|\Delta U_k| = 0.1148 |U_N| \quad (4)$$

由式(1)、(4)可得 PCC_k 处及其下游允许 DER 注入电流,即 DER 准入容量为:

$$\sum_{i=k}^n |I_{Gi}| = \frac{0.1148 |U_N|}{\left| \sum_{i=1}^k Z_i \right|} \quad (5)$$

2 DER 提供短路电流极限值分析

DER 有同步发电机、异步发电机与逆变器 3 种类型。

同步发电机输出的短路电流取决于其内部电动势、内部电抗以及外部回路阻抗(发电机与短路点之间的阻抗)。在中小型同步发电机出口发生三相短路时,在故障初始(次暂态)阶段(约 50 ms 前),短路电流幅值可达额定电流的 6 倍,之后的暂态阶段(50 ms ~ 1 s)在 3 倍左右。如果发电机有强行励磁功能,稳态短路电流会维持接近暂态电流的值,否则可能降至低于额定电流^[13-14]。异步发电机型 DER 故障暂态特征与同步发电机类似。在发电机出口短路时,异步发电机提供的起始电流可达到额定电流的 6 倍,此后经过约 3 ~ 10 个周期逐渐衰减到 0^[15]。逆变器型 DER 短路电流输出特性与其控制原理有关。对与电网同步的逆变器,在检测到过电流时立即关断并在 10 ms 以内停止输出电流。而对于自同步的逆变器而言,短路电流一般控制在 1.2 ~ 1.5 倍的额定电流值^[5]。

以图 1 所示 PCC_k 为例,根据第 1 节的分析,正常运行时 PCC_k 下游 DER 准入容量满足式(5),考虑极端情况,假设所有 DER 均为同步发电机,则当 PCC_k 处短路时,由 PCC_k 下游 DER 提供的最大短路电流为:

$$|I_{Gsk}| = \frac{0.6888 |U_N|}{\left| \sum_{i=1}^k Z_i \right|} \quad (6)$$

而 PCC_k 处短路时,由系统提供的短路电流近似为:

$$|I_{Ssk}| = \frac{|U_N|}{\left| \sum_{i=1}^k Z_i \right|} \quad (7)$$

所以, PCC_k 处短路时由下游 DER 提供的最大

短路电流与系统提供的短路电流满足:

$$|I_{Gfk}| = 0.6888 |I_{Sfk}| \quad (8)$$

3 有源配电网馈线线路区段两端短路电流幅值之比分析

下面以图 3 所示的有源配电网馈线为例,分析线路上发生故障时各线路区段两端短路电流幅值之比。线路由出口断路器 QF 与分段开关 S_1 — S_3 分为 4 个区段,流过各个开关的电流分别记为 I_{QF} 、 I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_{S3} ; DER₁、DER₂ 分别从馈线中间及馈线末端并网,其提供的电流记为 I_{DER1} 与 I_{DER2} ;当 F 点发生故障时,对于各线路区段,记流过其上游开关的电流为 I_{up} ,流过其下游开关的电流为 I_{down} ,定义 ρ 为流过线路区段下游开关的电流与流过上游开关的电流幅值之比,即 $\rho = |I_{down}| / |I_{up}|$ 。

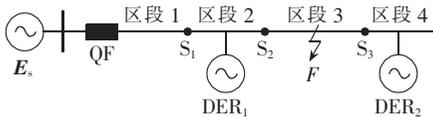


图 3 有源配电网馈线

Fig.3 Feeders of active distribution network

3.1 故障点上游非故障区段两端短路电流幅值之比分析

有源配电网馈线发生短路故障时,对于故障点上游线路区段内无 DER,如图 3 所示线路区段 1,流过该区段上、下游开关的短路电流幅值近似相等,即 $|I_{CB}| \approx |I_{S1}|$,所以该区段两端短路电流幅值之比近似为 1,即:

$$\rho \approx 1 \quad (9)$$

如果非故障区段内含 DER,由于 DER 提供的短路电流 I_{DER} 的影响,使得流过该区段两端开关的短路电流不再相等。如图 3 所示线路区段 2,流过区段下游开关的短路电流 I_{S2} 等于流过该区段上游开关的短路电流 I_{S1} 与 DER₁ 提供的短路电流 I_{DER1} 之和,即 $I_{S2} = I_{S1} + I_{DER1}$,其相量关系如图 4 所示。

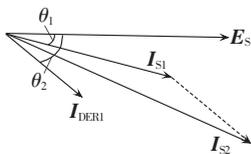


图 4 I_{S1} 与 I_{S2} 的关系

Fig.4 Relationship between I_{S1} and I_{S2}

在有源配电网中,一般 DER 与系统的功角差很小,即 DER 端口电压与系统电压相位夹角很小,可以忽略不计。 I_{S1} 的相角 θ_1 主要与线路阻抗角有关,一般在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间,而 I_{DER1} 的相角 θ_2 与 DER 的容量有关,一般在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 之间,所以 DER 提供短路

电流 I_{DER1} 与系统提供短路电流 I_{S1} 的相位差不大。所以该区段的两端短路电流幅值之比 ρ 大于 1,即:

$$\rho > 1 \quad (10)$$

3.2 故障区段两端短路电流幅值之比分析

当故障区段下游含 DER 时,如图 2 所示线路区段 3,此时该区段下游开关流过由 DER₂ 提供的短路电流,即 $I_{S3} = I_{DER2}$,根据上面的分析,DER₂ 提供的短路电流幅值 I_{DER2} 不会超过系统提供短路电流幅值 I_{S2} 的 68.88%,所以对于该区段两端短路电流幅值之比 ρ 有:

$$\rho = |I_{down}| / |I_{up}| = |I_{S3}| / |I_{S2}| \leq 0.6888 \quad (11)$$

4 故障定位方法

通过上述分析可得,在有源配电网馈线发生短路故障时,可以通过判断线路区段两端短路电流幅值之比 ρ 是否不大于 0.6888 识别其是否为故障区段。考虑到负荷电流及电流互感器测量误差等因素的影响,对故障定位判据通常留有一定的裕度,所以设置识别故障区段判据如下:

$$\rho \leq \gamma \quad (12)$$

其中, γ 为一定值,位于 0.8~0.9 之间。

在实际配电自动化系统中,当馈线终端装置 (FTU) 检测到流过监控开关的电流超过整定值 (2 倍的线路额定电流) 时的故障电流幅值信息后,首先比较第 1 个线路区段,如果该区段 ρ 值满足式 (12),则该区段为故障区段,否则继续比较第 2 个线路区段的 ρ 值,依此类推,直至定位出故障区段。

5 故障定位方法适用性分析

上述幅值比较故障定位方法的适用条件是故障点下游 DER 提供的短路电流小于系统短路电流的 70%。目前的 DER 并网规程一般要求 DER 引起的 PCC 处电压变化率小于 3% 并且 DER 功率因数角不大于 18° , 这种情况下,即便考虑极限的情况,上述幅值比较故障定位方法也是有效的。

随着有源配电网 DER 电压控制技术的发展和,对 DER 引起 PCC 处电压变化率的进一步放宽,DER 准入容量会进一步提高,故障点下游 DER 提供的短路电流可能会接近甚至超过系统短路电流,使上述幅值比较故障定位法不再适用。这样,就需要针对馈线上所有 DER 的 PCC 处,计算短路时故障点下游 DER 提供的短路电流与系统短路电流之比,如果比值小于 70%,上述幅值比较故障定位方法就仍然适用,否则就需要采用新的故障定位方法,如故障电流相位比较法。

需要指出,如果馈线上只有光伏发电接入,因为光伏发电逆变器提供的短路电流不会大于超过其额

定电流的 1.5 倍,即便整条馈线上接入的 DER 容量达到极限的馈线额定容量,馈线上 DER 提供的短路电流总和也不会超过馈线额定电流的 1.5 倍,故障点下游提供的短路电流不会超过系统短路电流的 70%,幅值比较故障定位方法总是有效的。

6 仿真

为验证基于电流幅值比较的有源配电网故障定位方法,在 MATLAB/Simulink 对图 5 所示的 10 kV 有源配电网架空线路进行仿真,系统电源短路容量为 $500 \text{ MV}\cdot\text{A}$,线路(LGJ-150 钢芯铝绞线)单位长度参数为 $0.221 + j0.384 \ \Omega/\text{km}$,各段线路长度均为 2 km; DER 在第 2 个线路区段首端并入电网。为验证 DER 提供短路电流最严重情况,DER 用同步发电机来模拟,次暂态电抗标幺值取为 0.1667。

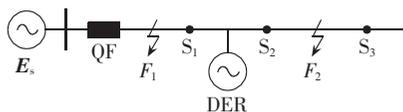


图 5 有源配电网馈线仿真图

Fig.5 Feeder diagram of active network for simulation

a. DER 准入容量极限值。

假定并网处允许的电压变化为 3%,则由式(1)~(3)可推导出 DER 最大额定电流,即 DER 准入容量极限值为 748 A。

b. 短路电流计算结果。

假定 DER 准入容量为极限值 748 A,分别在 DER 所在区段的两侧设置故障点 F_1 、 F_2 ,如图 5 所示。记录各个开关处流过的故障电流有效值见表 1。

表 1 三相短路故障时短路电流计算结果

Table 1 Calculated short circuit currents for three-phase short circuit fault

故障点	I_{QF}/kA	I_{S1}/kA	I_{S2}/kA	I_{S3}/kA
F_1	5.593	4.025	0	0
F_2	2.407	2.407	3.984	0

c. F_1 点故障时故障定位结果。

F_1 点故障时,根据仿真数据,如表 1 所示,采用传统的故障定位方法时,由于开关 QF、 S_1 处检测到故障电流,而开关 S_2 没有检测到故障电流,因此判断故障位于开关 S_1 和 S_2 之间的线路区段上,无法正确定位出故障区段;采用本文提出的方法,当 F_1 点故障时,首先比较线路区段 1 两端开关电流的幅值之比得 $\rho = 0.7196$,满足判据式(12),所以判断故障位于该区段。

d. F_2 点故障时故障定位结果。

当 F_2 点故障时,首先比较线路区段 1 两端开关电流的幅值之比得 $\rho = 1$,不满足判据式(12),接着比较线路区段 2 两端开关电流的幅值之比得 $\rho =$

1.6552,也不满足判据式(12),然后比较线路区段 3 两端开关电流的幅值之比得 $\rho = 0$,满足判据式(12),因此判断故障位于该区段。可见通过比较线路区段两端电流幅值可以实现有源配电网的故障定位。

7 结论

本文根据 DER 的短路电流特性以及目前的 DER 并网规程要求 DER 引起的 PCC 处电压变化率小于 3% 并且 DER 功率因数角不大于 18° 的情况下,得出有源配电网中 DER 提供的短路电流不会超过系统短路电流的 68.88% 的结论。提出通过比较线路区段流过下游开关的故障电流与流过上游开关的故障电流的幅值之比 ρ 是否小于整定值,识别被监视的线路区段是否是故障区段。该方法无需改变原有的过电流检测定值,简单易行。如果 DER 并网条件放宽,故障点下游的短路电流可能会超过系统短路电流的 70%,则需要采用其他的故障定位方法。

参考文献:

- [1] 刘健,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(1):31-33.
LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [2] 王飞,孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化,2003,27(24):45-47.
WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 45-47.
- [3] 王英英,罗毅,涂光瑜. 基于粗糙集与决策树的配电网故障诊断方法[J]. 高电压技术,2008,34(4):794-798.
WANG Yingying, LUO Yi, TU Guangyu. Fault diagnosis method for distribution networks based on the rough sets and decision tree theory [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 794-798.
- [4] 刘健,张志华,张小庆,等. 配电网模式化故障处理方法研究[J]. 电网技术,2011,35(11):253-257.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Modeled fault isolation and restoration for distribution systems [J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 253-257.
- [5] 徐丙垠,李天友,薛永端. 智能配电网建设中的继电保护问题——讲座六 有源配电网保护技术[J]. 供用电,2012,29(6):15-25,69.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Relay protection issues in construction of smart distribution network—lecture 6 protections for active distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2012, 29(6): 15-25, 69.
- [6] 康文文. 面向智能配电网的快速故障检测与隔离技术研究[D]. 济南:山东大学,2011.
KANG Wenwen. Study of fast fault detection and isolation technology for smart distribution grid [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011.
- [7] 张艳霞,代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):71-74.

- ZHANG Yanxia, DAI Fengxian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 71-74.
- [8] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-42, 48.
- LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-42, 48.
- [9] 郑涛, 贾仕龙, 潘玉美, 等. 基于配电网原故障定位方案的分布式电源准入容量研究[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2257-2262.
- ZHENG Tao, JIA Shilong, PAN Yumei, et al. Research on allowed penetration level of DGs based on the traditional fault location method[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2257-2262.
- [10] 王志群, 朱守珍, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.
- WANG Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [11] Eduardo Navarro: present status of DG in Belgium: national codes, standards, requirements and rules for grid-interconnection and operation[EB/OL]. (2001-05-22). <http://www.dispower.org>.
- [12] 裴玮, 圣鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配电网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
- PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [13] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网故障定位与供电恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 175-176.
- [14] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 3版. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 218-255.
- [15] JOHAN M, de HAAN SJOERD W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.

作者简介:



高孟友

高孟友(1983—),男,山东东营人,博士研究生,研究方向为智能配电网快速自愈技术(E-mail: gaomengyou2007@163.com);

徐丙垠(1961—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力线路故障监测、配电自动化(E-mail: xuby@163.com)。

Fault location based on fault current amplitude comparison for active distribution network

GAO Mengyou¹, XU Bingyin^{2,3}, ZHANG Xinhui²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Research Center for Smart Grid, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

3. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

Abstract: The short circuit current properties of DER(Distributed Energy Resource) and its allowed capacity are analyzed. The relationship of short circuit current amplitude between faulty and healthy zones is analyzed and it is proposed to locate the fault of active distribution network by the comparison of short circuit current amplitude between both sides of a feeder section. The simulative results by MATLAB/Simulink show that, the proposed method can locate the fault when the allowed capacity of DER satisfies the voltage offset of point of common coupling.

Key words: active distribution network; distributed energy resource; point of common coupling; voltage offset; fault location; amplitude comparison; short circuit current