

# 用于含分布式电源配网保护的无电压方向元件研究

贾伟<sup>1</sup>, 张永生<sup>2</sup>, 吴寿山<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049; 2. 西北电网有限公司, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 针对含有分布式电源的配网电流保护需要安装方向元件以确保动作的正确性, 提出了一种只利用电流信息判断故障方向的方法。分析含有分布式电源的配网发生短路故障时的电流特征, 得出无故障支路的电流故障分量模值较小, 故障支路的电流故障分量模值最大, 由此可以判断出故障的方向。运用 PSS/E 软件, 对 IEEE34 节点系统对各种故障进行仿真, 仿真分析表明, 此方法能有效判断出故障的方向, 且不受故障类型和故障位置的影响。

**关键词:** 分布式发电; 配电网; 保护误动; 故障分量; 方向元件

## Research on directional element without voltage in distribution network protection with DG

JIA Wei<sup>1</sup>, ZHANG Yong-sheng<sup>2</sup>, WU Shou-shan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwest China Grid Company, Xining 810000, China)

**Abstract:** As to distribution system with DG, its current protection needs directional element to ensure the correctness of action. Based on that, a method of distinguishing the fault direction using only current information is proposed. By analyzing the characteristics of short-circuit current when fault occurs in distribution system with DG, it shows that the modular of current fault component of non-fault branch is smaller, and the modular of the current fault component of fault branch is the largest. According to that, the direction of fault can be distinguished. Various faults are simulated on IEEE34 bus system by PSS/E software, and the simulation results show that the proposed method can distinguish the direction effectively and does not affected by fault types and fault location.

**Key words:** distributed generation; distribution network; protection mal-operation; fault component; directional element

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0094-04

## 0 引言

近年来, 随着发电技术的进步以及社会用电需求的增加, 分布式发电以其方便、高效、清洁的特点, 已越来越受到人们的青睐。但是分布式电源的引入使配电网中各支路的潮流不再是单方向地流动, 因此, DG 的引入将会给整个电网带来深刻的影响<sup>[1-4]</sup>。除了各种形式的 DG 技术本身还有进一步研究和完善外, 从 DG 与传统电网连接的角度, 必须针对含有 DG 的电网规划与运行方式<sup>[5]</sup>、继电保护<sup>[6-13]</sup>、安全及稳定性<sup>[14]</sup>、对控制中心的影响等一系列问题进行深入的研究。

配电网是单电源辐射状的网络结构, 决定了配电网的馈线保护无需方向判别, 传统保护装置均是针对单向潮流设计的, 没有方向判别能力, 短路电流都是通过系统流向故障点的, 故通过流过故障电流的开关序列就可以轻易地判断出故障点所在的线

路段。然而, 当 DG 接入系统后, 整个系统变成了多电源的区域, 此时多数开关都流过短路电流, 仅仅通过过电流的开关的序列就判别故障段是行不通的。

目前, 国内外现行的 DG 并网运行规程大多数是基于 DG 并网不影响原有配电网保护控制系统正常工作的原则提出的, 这些原则包括: 要求 DG 不能主动参与调压; 配电网发生故障时, DG 必须迅速退出配电网以保证配电网继电保护正确动作等。这些规程虽然极大限度地保证了电力系统的安全性, 但在一定程度上局限甚至破坏了 DG 的正常运行, 损害了 DG 发电商和 DG 用户的经济利益, 对提高供电范围及供电可靠性也是不利的。为了保证现有电流保护的配合性, 降低 DG 接入对保护系统的影响的方法就是降低 DG 贡献的短路电流, 增大 DG 支路的阻抗, 目前采取的措施主要有两个: 1) 采用限制在特定位置接入 DG 的容量的方法; 2) 采

用在 DG 支路上增加一定阻抗值的限流器限制 DG 贡献的短路电流。这两个措施都对 DG 发电商提出了苛刻要求,违背了电力系统中“二次服从并服务于一次”的原则。为了达到判别故障方向而在馈线上各开关处增设电压互感器构成功率方向是运行单位所不能接受的,一来投资很大,二来保护接线及实现方法变得很复杂。因此研究无电压方向性保护的的任务是十分紧要的。

### 1 分布式电源的接入对配网过电流保护的影响

由于传统供电模式通常采用辐射状的配电网,其潮流从电源到用户单向流动,系统保护设计通常在变电站处安装反向过流断路器,主馈线上装设自动重合闸装置,支路上装设熔断器,所以这种保护不具有方向性。DG 并入时配电网发生了根本性变化,辐射式配电网将变为分布式电源和用户互联的网络,潮流不再单向地从变电站母线流向用户负荷,配电网各种保护定值与机理发生了深刻变化。

图 1 是接有分布式电源的配电网。当系统侧 F1 处或 35 kV 母线其他馈线 F2 处发生故障时,在 DG 引入之前,本馈线的保护 L2 感受不到故障电流, DG 引入之后,相同点故障时,本馈线的保护将感受到 DG 提供的故障电流,由于保护不经过方向元件闭锁,如果该电流足够大,将导致本线路的保护误动,因此,需要设计一个方向元件,来判断故障是发生在保护安装处的上游还是下游。

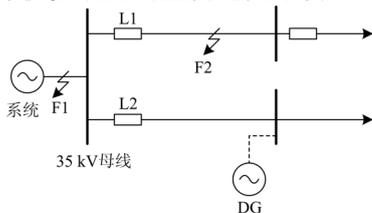


图 1 包含 DG 的配电网

Fig.1 Distribution network with DG

### 2 接有 DG 的配电网故障特征分析

接有分布式电源的配电网简化模型如图 2。

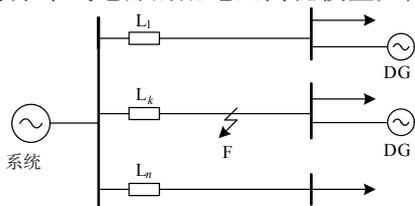


图 2 带有分布式电源的配电网模型

Fig.2 Distribution network model with distributed generation

左方进线是系统电源,右方是出线,设有  $n$  条,其中部分支路带有分布式电源。设第  $k$  条出线发生三相短路故障,得出电路的故障分量电路如图 3 所示。

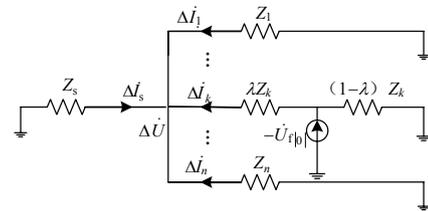


图 3 故障分量电路图

Fig.3 Fault component circuit

图 3 中:  $Z_s$  是系统阻抗;  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  是各支路线路阻抗; 电流  $\Delta \dot{I}_s$  为系统侧电流故障分量;  $\Delta \dot{I}_i$  为各支路电流故障分量;  $\Delta \dot{U}$  为母线电压正序故障分量。则有

$$\Delta \dot{I}_k = -(\Delta \dot{I}_s + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta \dot{I}_i) \quad (1)$$

$$\Delta \dot{I}_s = \frac{-\Delta \dot{U}}{\Delta Z_s} \quad (2)$$

$$\Delta \dot{I}_i = \frac{-\Delta \dot{U}}{\Delta Z_i}, \quad i=1,2,\dots,n(i \neq k) \quad (3)$$

由式 (1) ~ (3) 可得式 (4)。

$$\begin{cases} \left| \frac{\Delta \dot{I}_k}{\Delta \dot{I}_s} \right| = \frac{\left| \frac{1}{Z_s} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \frac{1}{Z_i} \right|}{\left| \frac{1}{Z_s} \right|} \\ \left| \frac{\Delta \dot{I}_k}{\Delta \dot{I}_i} \right| = \frac{\left| \frac{1}{Z_s} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \frac{1}{Z_i} \right|}{\left| \frac{1}{Z_i} \right|} \end{cases} \quad (4)$$

考虑电力系统实际情况,线路阻抗角和系统阻抗角约为  $70^\circ \sim 85^\circ$ 。

设两个向量  $\vec{a}$  和  $\vec{b}$ , 它们的向量角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ , 设定令  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ , 向量  $\vec{c}$  的角度为  $\gamma$ 。设  $\theta = \alpha - \beta$ , 则

$$|\vec{c}| = \sqrt{|\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 + 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta}$$

可知,当  $\theta < 90^\circ$ ,  $|\vec{c}| > |\vec{a}|, |\vec{c}| > |\vec{b}|$ , 且  $\gamma$  在  $\alpha$  和  $\beta$  之间, 如图 4 所示。

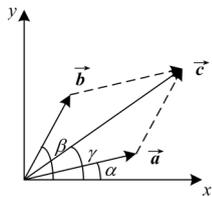


图 4 向量关系示意图

Fig.4 Vector graphics

由于  $Z_i$ 、 $Z_s$  的阻抗角约为  $70^\circ \sim 85^\circ$ ，所以  $\frac{1}{Z_i}$ 、 $\frac{1}{Z_s}$  的阻抗角约为  $95^\circ \sim 110^\circ$ ，可见  $\frac{1}{Z_i}$ 、 $\frac{1}{Z_s}$  的阻抗角之间的差值约在  $15^\circ$  之内，所以向量和  $\frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}$  的模值必定大于每一个向量的模值，且它们向量和的相角必在在  $95^\circ \sim 110^\circ$  之间。即：

$$\left\{ \begin{aligned} \left| \frac{\Delta I_k}{\Delta I_s} \right| &= \frac{\left| \frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{1}{Z_i} \right|}{\left| \frac{1}{Z_s} \right|} > 1 \\ \left| \frac{\Delta I_k}{\Delta I_i} \right| &= \frac{\left| \frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{1}{Z_i} \right|}{\left| \frac{1}{Z_i} \right|} > 1 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

如发生不对称故障（两相短路故障）时，取各支路正序电流故障分量也满足式（5）关系。

### 3 无电压方向元件的判据

设一个母线有  $n$  条支路，设系统侧短路阻抗为  $Z_0$ ，系统侧故障电流分量为  $\Delta I_0$ 。各支路的短路阻抗为  $Z_i$ ，故障电流分量为  $\Delta I_i$ ，当第  $i$  ( $i=0,1,\dots,n$ ) 条支路发生三相短路故障时，则各支路电流故障分量有式（6）关系。

$$\left| \frac{\Delta I_i}{\Delta I_j} \right| = \frac{\sum_{k=0, k \neq j}^n \frac{1}{Z_k}}{\frac{1}{Z_j}}, \quad (\forall j=1,2,\dots,n, j \neq i) \quad (6)$$

由式（6）可见，当母线上某一支路发生三相短路故障时，故障线路电流故障分量的模值最大，由此可以区分故障线路和非故障线路，从而实现故障方向的判定。如果发生两相短路故障时，只要取各支路的电流正序故障分量即可。

当母线发生短路时，也可能存在这种关系，所以会产生误判。当母线发生短路时，有式（7）关系。

$$\dot{I}_s + \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \neq 0 \quad (7)$$

利用式（7）可以判断是否发生母线短路。

设变电站共有  $n$  条支路，设故障时第  $i$  ( $i=0,1,2,\dots,n$ ) 支路的正序电流故障分量  $\Delta I_i$ ，则判定第  $i$  支路发生短路故障的判断原则为：

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=0}^n \dot{I}_i &< I_{set} \\ \left| \Delta I_i \right| &> k \left| \Delta I_j \right|, (j=0,1,2,\dots,n, j \neq i) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

当发生不对称故障时，用负序分量也可以判断故障方向。而且因为在正常运行时负序分量不存在，当发生不对称故障时负序分量是从无到有的过程，所以当发生不对称故障时用负序分量判断效果会更好，但负序分量不能判断三相对称短路故障的方向，限于篇幅，这里不再详细介绍。

### 4 仿真实验

用 PSS/E 建立 IEEE34 节点系统进行仿真计算，图 5 为有 DG 接入的系统结构图。

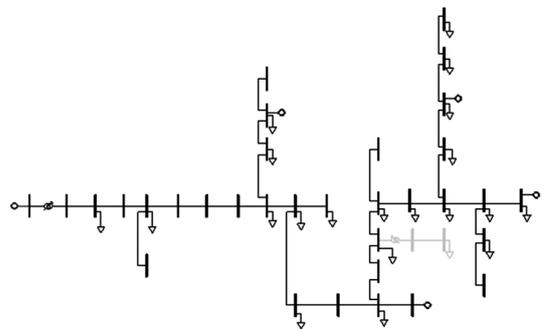


图 5 包含 DG 的 IEEE34 节点系统图

Fig.5 IEEE 34 bus system with DG

基准电压为 24.9 kV，基准功率为 100 MVA，平衡节点 3001 母线电压标幺值为 1.05 pu=345 kV。系统负荷、发电机参数及各支路正序阻抗标幺值见文献[4]，仿真时取正、负序相同，零序为正序的三倍。

选取节点 108 所在变电所进行仿真实验，108 节点所在位置如图 6 所示。对线路 108~109 和 108~110 线路每隔 10%距离做一次三相短路和两相短路计算，观察从 108 节点流向各支路的正序电流故障分量，比较它们的大小，以此来验证所提判据，仿真数据见表 1 和表 2。

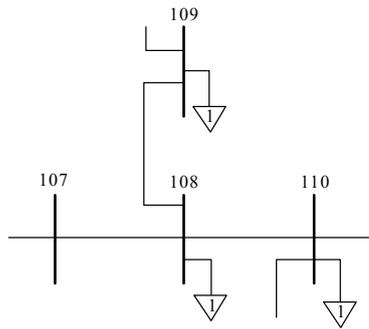


图 6 节点 108 的位置

Fig.6 The location of the node 108

表 1 线路 108~109 短路故障时各支路的电流故障分量

Tab.1 Current fault components of each branch when Short-circuit fault occur in line of 108~109

故障距离 L	流向各支路的正序电流故障分量模值/A					
	三相短路			两相短路		
	To 107	To 110	To 故障点	To 107	To 110	To 故障点
0.1	247.9	558.4	789.5	138.2	323.3	468.6
0.2	246.6	555.6	785.3	137.4	321.7	466.2
0.3	245.3	552.8	781.3	136.7	320.1	463.9
0.4	244.0	550.0	777.2	135.9	318.5	461.5
0.5	242.7	547.3	773.2	135.2	316.9	459.2
0.6	241.5	544.6	769.3	134.5	315.4	457.0
0.7	240.2	541.9	765.4	133.8	313.8	454.7
0.8	239.0	539.3	761.5	133.1	312.3	452.5

表 2 线路 108~110 短路故障时各支路的正序电流故障分量

Tab.2 Positive current fault components of each branch when Short-circuit fault occur in line of 108~110

故障距离 L	流向各支路的正序电流故障分量模值/A					
	三相短路			两相短路		
	To 107	To 109	To 故障点	To 107	To 109	To 故障点
0.1	229.1	508.9	739.5	123.0	294.8	438.9
0.2	222.2	495.0	718.6	119.1	286.9	427.0
0.3	215.7	481.8	698.8	115.4	279.4	415.8
0.4	209.6	469.3	680.2	111.9	272.4	405.1
0.5	203.7	457.4	662.5	108.5	265.6	395.0
0.6	198.2	446.1	645.6	105.3	259.3	385.4
0.7	192.9	435.5	629.6	102.3	253.2	376.3
0.8	187.9	425.3	614.4	99.4	247.4	367.6
0.9	183.1	415.5	599.8	96.7	241.9	359.3

由表 1 和表 2 可以看出, 短路前后节点 108 流

向各支路的电流故障分量有明显的差别, 发生短路故障的支路的电流故障分量明显大于另两条支路的电流故障分量, 从而可以判断出故障支路, 验证了理论的正确性。

当故障位置和故障类型发生变化时, 各支路电流也都发生变化, 但各支路电流故障分量的比值变化不大。因此, 此方法基本不受故障位置和故障类型的影响。

## 5 结论

针对接入 DG 后的配电网电流保护需要安装方向原件的问题, 本文提出了利用各支路故障电流模值的不同来判断故障方向的方法, 通过理论分析和 PSS/E 仿真验证表明, 带分布式电源的配电网故障电流信息包含故障方向, 故障支路的电流故障分量模值最大, 可以利用故障电流分量模值的大小来判断故障的方向, 且此方向元件基本不受故障类型和故障位置的影响, 简单可靠。

## 参考文献

- [1] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27 (12): 71-75.  
LIANG You-wei, HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27 (12): 71-75.
- [2] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32 (20): 23-27.  
LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, TU You-qing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32 (20): 23-27.
- [3] Thomas Ackermann, Vatery Knyazkin. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects[J]. IEEE, 2002, 2: 1357-1362.
- [4] CIRIC R M, PADILHA-FELTRIN A, IARA FERNANDA EDD. Observing the performance of distribution systems with embeded generators[J]. European Trans on Electrical Power, 2004, 14 (6): 347-359.
- [5] 李锋, 陆一川. 大规模风力发电对电力系统的影响[J]. 中国电力, 2006, 39 (11): 80-84.  
LI Feng, LU Yi-chuan. Influences of large-scale wind energy converters on transmission systems[J]. Electric Power, 2006, 39 (11): 80-84.
- [6] 温阳东, 王欣. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器, 2008, 36 (1): 12-14, 26.

(下转第 118 页 continued on page 118)

- 33(1): 51-55, 65.  
ZHU Chuan-bai, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. Hierarchical fault diagnosis model of a large-scale power system based on dispatch integrated information platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 51-55, 65.
- [14] XU Luo. Power system fault analysis based on intelligent techniques and intelligent electronic device data[D]. Texas: A&M University, 2007.
- [15] 苗世洪, 刘沛. 超高压输电线路的自适应保护判据[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 43-49.  
MIAO Shi-hong, LIU Pei. Adaptive protection criterion for EHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 43-49.
- [16] Liu J F, Wilson P L, Jayasinghe R P. A PSCAD/EMTDC based simulation study of protective relay[C]. //Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. 2004: 264-267.
- [17] Perez S G A, Sachdev M S, Sidhu T S. Modeling relays for use in power system protection studies[C]. // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2005: 566-569.
- [18] Haiguo Piao, Zhixin Wang. Simulative study of a new control algorithm for yawing control system with PSCAD[C]. //DRPT 2008. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. 2008: 2734-2738.
- [19] 杨洋, 唐睿, 吕飞鹏. 基于COMTRADE格式的故障录波分析软件设计[J]. 继电器, 2008, 36(7): 67-70, 74.  
YANG Yang, TANG Rui, Lü Fei-peng. Fault recording analysis software design based on COMTRADE format[J]. Relay, 2008, 36(7): 67-70, 74.
- 
- 收稿日期: 2010-01-13; 修回日期: 2010-05-21
- 作者简介:  
何文(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护, 故障诊断; E-mail: hw\_xuan@163.com  
何正友(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理和息理理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等方向的研究;  
陈珂宁(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化。
- 
- (上接第 97 页 continued from page 97)
- WEN Yang-dong, WANG Xin. Effect of distributed generation on protection in distribution system[J]. Relay, 2008, 36 (1): 12-14, 26.
- [7] 张超, 计建仁, 夏翔, 等. 分布式发电对配电网继电保护及自动化的影响[J]. 华东电力, 2006, 34 (9): 23-26.  
ZHANG Chao, JI Jian-ren, XIA Xiang, et al. Effect of distributed generation on relay protection and automation of distribution network[J]. East China Electric Power, 2006, 34 (9): 23-26.
- [8] Elmarkabi, Ismail Mohamed. Control and protection of distribution networks with distributed generators[J]. UMI Microform, 2004.
- [9] Jose C M, Vieira, Waldir Freitas, et al. Performance of frequency relays for distributed generation protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (3): 1120-1127.
- [10] Keith Malmedal, Sen, JohnP, et al. Application of out-of-step relaying for small generators in distributed generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41 (6): 1506-1514.
- [11] Freitas Waldir, Xu Wilsun, Huang Zhenyu, et al. Comparative analysis between ROCOF and vector surge relays for distributed generation applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1315-1124.
- [12] 张超, 计建仁, 夏翔. 分布式发电对配电网馈线保护的影响[J]. 继电器, 2006, 34 (13): 9-12.  
ZHANG Chao, JI Jian-ren, XIA Xiang. Effect of distributed generation on the feeder protection in distribution network[J]. Relay, 2006, 34 (13): 9-12.
- [13] 王希舟, 陈鑫, 罗龙, 等. 分布式发电与配电网保护协调性研究[J]. 继电器, 2006, 34 (3): 15-19.  
WANG Xi-zhou, CHEN Xin, LUO Long, et al. Research on the coordination of distributed generation and distribution system protection[J]. Relay, 2006, 34 (3): 15-19.
- [14] 王志群, 朱手真, 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 Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (16): 56-60.
- 
- 收稿日期: 2010-01-24; 修回日期: 2010-05-18
- 作者简介:  
贾伟(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: jiawei.66@stu.xjtu.edu.cn  
张永生(1986-), 男, 工程师, 主要从事电网运行分析工作;  
吴寿山(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究。