

自适应保护在含分布式电源配电网中的应用

徐岩,卫波,冯巩

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,河北保定 071003)

摘要:结合含 DG 配电网的网络结构图与对称分量法,研究出一种相电流差故障分量作为保护动作判据的算法,相电流差故障分量的获取可由采集故障后数据与故障前数据并通过计算得到,该方法实用,能够准确识别保护区内外的故障。并在 MATLAB 平台上搭建了含风机的配电网模型,进行了仿真实验。仿真结果证明该算法准确识别保护区内外的故障,能减小分布式电源接入配电网后对其电流保护产生的影响。

关键词:分布式电源;配电网;自适应保护;故障分量

中图分类号: TM77

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)05-0045-04

电力发展之初是分散的、小型的,随着经济与科学技术的发展和工业化时代规模效益的追求才出现大容量高参数机组的中心电站、超高压远距离输电、大电网互联集中供电,这是工业化过程中电力工业发展的必经之路,也是目前电能生产、输送和分配的主要方式。但是其在适应负荷变化的灵活性与供电安全性方面存在一些弊端。在近年来屡屡发生的能源危机、电力危机与大面积停电事故中,已暴露出现有的庞大电力系统存在的缺点。因此需要建设一批分散布置的分布式发电机组作为大电网的辅助和补充,既可以提高系统的经济性、安全性、可靠性和灵活性,同时也满足了可持续发展的要求,大大减轻环保的压力^[1,2]。

1 配电网的继电保护

我国 10 kV 配电网的保护主要是电流三段式保护。对于中性点非有效接地的配电网,传统的电流速断保护是按最大运行方式下线路末端三相短路整定来保证保护动作的选择性,按电力系统最小运行方式来校验保护的灵敏度。这种按最严重的运行条件确定保护整定值的方法,虽然可保证在电力系统各种运行方式下发生故障时,继电保护都能正确动作,但存在以下缺点:一是按该方法确定的继电保护整定值,对电力系统其他运行方式(包括电力系统的主要运行方式)来讲不是最佳的整定值;二是在电力系统最小运行方式下发生最不利的故障时,继电保护系统的性能会严重变坏甚至发生拒动现象。这不但限制了电网运行的灵活性,而且降低了电网运行的稳定性^[3,4]。

对图 1 所示的网络结构进行 MATLAB 仿真分析,BC 末端发生三相短路故障时,当分布式电源注入容量为 7.5 MV·A 时,保护 2 测得电流值为 2.23

kA,超过保护 2 的电流速断保护整定值,因此当 CD 线路出口附近段发生短路故障时,保护 2 和 3 都可能动作,无法保证选择性。

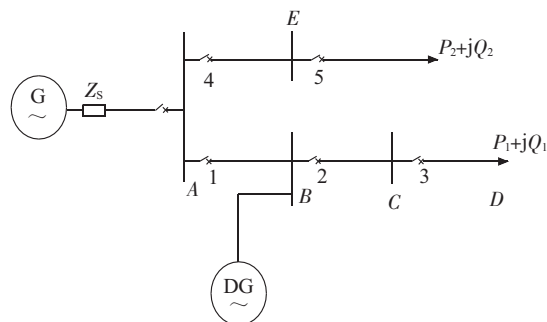


图 1 含分布式电源的配电网网络结构

自适应电流保护就是在微机电流保护的基础上应用了自适应方法而产生的一种新型保护。它能根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变电流保护定值,从而改进了电流保护的动作性能。

2 自适应保护的研究

基于两相电流差和线电压的自适应保护具有故障类型和运行方式自适应的特点。根据两相电流差的特性,可以将相差电流作为相间短路保护的判据,能保证各种类型的相间短路都有相同的保护区,且不用计算故障类型系数,自动具有故障类型自适应的功能。如果再利用线电压及两相电流差的故障分量估计出背后的系统阻抗,就可以得到具有故障类型和运行方式自适应特点的基于两相电流差和线电压的自适应保护方案。

在电力网络中,被保护线路发生相间金属性短路故障时,流过保护电流的两相电流差存在如下关系:无论发生何种相间短路故障,两故障相间的两相电流差大小等于三相短路时单相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,与非故障相有关的两相电流差的大小则小于故障相间

的两相电流差值,而且两故障相间电流差的大小与短路类型无关。

用对称分量法对电网进行故障分析,可以作出 A 相的正序、负序和零序网如图 2 所示^[5,6]。

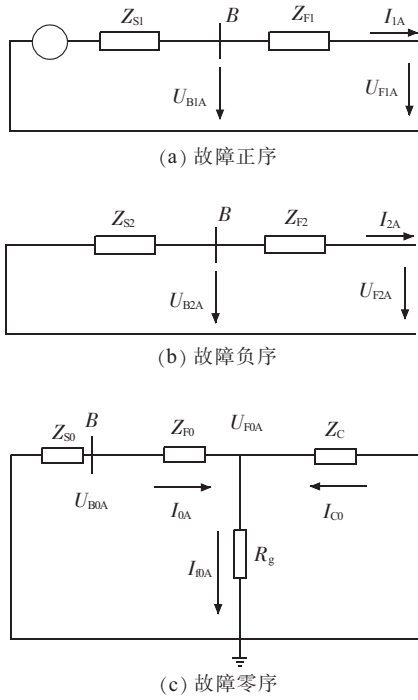


图 2 故障序网图

其中: Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S0} 分别为母线 B 处左端系统等效正序、负序和零序阻抗,由大系统与分布式电源并联而成; Z_{F1}, Z_{F2}, Z_{F0} 分别为保护安装处至短路点 F 之间的正序、负序和零序阻抗; I_{C0} 为对地电容电流。

由图可知:

$$\begin{cases} \dot{U}_{F1A} = \dot{E}_A - I_{1A}(Z_{S1} + Z_{F1}) \\ \dot{U}_{F2A} = -I_{2A}(Z_{S2} + Z_{F2}) \\ \dot{U}_{F0A} = -I_{0A}(Z_{S0} + Z_{F0}) \end{cases} \quad (1)$$

假设电力系统的正序阻抗等于负序阻抗,即 $Z_{S1} = Z_{S2}, Z_{F1} = Z_{F2}$ 。可求出短路点 F 处 A 相电压为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{FA} &= \dot{U}_{F1A} + \dot{U}_{F2A} + \dot{U}_{F0A} \\ &= \dot{E}_A - (I_A + 3K_1 I_0)Z_{S1} - (I_A + 3K_2 I_0)Z_{F1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{其中: } K_1 = \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{3Z_{S1}}, K_2 = \frac{Z_{F0} - Z_{F1}}{3Z_{F1}}。$$

同理,可求得短路点 F 处的 B 相电压与 C 相电压,可得短路点 F 处的相间电压:

$$\begin{cases} \dot{U}_{FAB} = \dot{E}_{AB} - (I_A - I_B)(Z_{S1} + Z_{F1}) \\ \dot{U}_{FBC} = \dot{E}_{BC} - (I_B - I_C)(Z_{S1} + Z_{F1}) \\ \dot{U}_{FCA} = \dot{E}_{CA} - (I_C - I_A)(Z_{S1} + Z_{F1}) \end{cases} \quad (3)$$

定义 $I_{AB} = I_A - I_B, I_{BC} = I_B - I_C, I_{CA} = I_C - I_A$ 为各两相电流差电流,简称相电流差。代入式(3),整理可得相电流差的表达式为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{AB} = \frac{\dot{E}_{AB} - \dot{U}_{FAB}}{Z_{S1} + Z_{F1}} \\ \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{E}_{BC} - \dot{U}_{FBC}}{Z_{S1} + Z_{F1}} \\ \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{E}_{CA} - \dot{U}_{FCA}}{Z_{S1} + Z_{F1}} \end{cases} \quad (4)$$

以 F 处故障的 BC 相为例,BC 相的相电流差故障分量可以表示为:

$$\dot{I}_{BCg} = \dot{I}_{BC}^{(t)} - \dot{I}_{BC}^{(0)} \quad (5)$$

式中: $\dot{I}_{BC}^{(t)}$ 为故障时 BC 相的电流; \dot{I}_{BCg} 为故障分量电流; $\dot{I}_{BC}^{(0)}$ 为正常运行时的负荷电流。

下面利用序分量对 A, B, C 三相的相电流差故障分量进行分析。

利用对称分量法可表达为^[7]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{ABg} = (\dot{I}_A - \dot{I}_B)_g = (1-a^2)c_1 \dot{I}_{1g} + (1-a)c_2 \dot{I}_{2g} \\ \dot{I}_{BCg} = (\dot{I}_B - \dot{I}_C)_g = (a^2-a)c_1 \dot{I}_{1g} + (a-a^2)c_2 \dot{I}_{2g} \\ \dot{I}_{CAg} = (\dot{I}_C - \dot{I}_A)_g = (a-1)c_1 \dot{I}_{1g} + (a^2-1)c_2 \dot{I}_{2g} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\dot{I}_{1g}, \dot{I}_{2g}$ 为故障点的正、负序故障分量电流; c_1, c_2 为保护端的正、负序电流分布系数; $\dot{I}_{ABg}, \dot{I}_{BCg}, \dot{I}_{CAg}$ 为相电流差故障分量; a 为 e^{j120° 。若 $c_1 = c_2$, 上式的幅值又可表示为:

$$\begin{cases} |\dot{I}_{ABg}| = c_1 \left| (1-a^2)\dot{I}_{1g} + (1-a)\dot{I}_{2g} \right| \\ |\dot{I}_{BCg}| = c_1 \left| (a^2-a)\dot{I}_{1g} + (a-a^2)\dot{I}_{2g} \right| \\ |\dot{I}_{CAg}| = c_1 \left| (a-1)\dot{I}_{1g} + (a^2-1)\dot{I}_{2g} \right| \end{cases} \quad (7)$$

接地故障涉及到电容电流,对于非直接接地系统来说就是零序电流,所以电容电流对式(7)没有影响。

(1) 单相接地短路。以 A 相接地短路为例,则有 $\dot{I}_{1g} = \dot{I}_{2g}$, 代入式(7)可得:

$$\begin{cases} |\dot{I}_{ABg}| = 3c_1 \left| \dot{I}_{1g} \right| \\ |\dot{I}_{BCg}| = 0 \\ |\dot{I}_{CAg}| = 3c_1 \left| \dot{I}_{1g} \right| \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,单相接地短路的幅值特性是两非

故障相的电流差等于 0。

(2) 两相短路。以 B,C 两相短路为例分析,则

有 $i_{1g}=i_{2g}$, 代入式(7)可得:

$$\begin{cases} |i_{ABg}| = \sqrt{3} c_1 |i_{1g}| \\ |i_{BCg}| = 2\sqrt{3} c_1 |i_{1g}| \\ |i_{CAg}| = \sqrt{3} c_1 |i_{1g}| \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,两相短路的幅值特性是故障相电流差值最大。

(3) 两相短路接地。以 B,C 两相接地短路为例

分析,则有 $i_{1g}=-Ki_{2g}$, 假设为金属性短路,则 $0 < K < 1$, 代入式(7)可得:

$$\begin{cases} |i_{ABg}| = \sqrt{3} c_1 |(1-a)(1+a-K)i_{1g}| \\ |i_{BCg}| = 2\sqrt{3} c_1 |(1+K)i_{1g}| \\ |i_{CAg}| = \sqrt{3} c_1 |(1-a\cdot K-K)i_{1g}| \end{cases} \quad (10)$$

两相接地短路的幅值特性与两相短路的相同,即两故障相电流差最大。

(4) 三相短路。此时 $i_{2g}=0$, 代入式(7)可得:

$$|i_{ABg}| = |i_{BCg}| = |i_{CAg}| = \sqrt{3} c_1 |i_{1g}| \quad (11)$$

通过对以上各种情况分析可知:

$$\max(|i_{ABg}|, |i_{BCg}|, |i_{CAg}|) \geq \sqrt{3} c_1 |i_{1g}| \quad (12)$$

综合以上分析保护动作判据可得出:

$$\begin{cases} \max(|i_{ABg}|, |i_{BCg}|, |i_{CAg}|) \geq \sqrt{3} c_1 |i_{1g}| \\ \sqrt{3} c_1 |i_{1g}| = K_{rel} \cdot c_1 \cdot \frac{\sqrt{3} E_\phi}{Z_s + Z_l} \end{cases} \quad (13)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数; E_ϕ 为系统保护侧等效电源正常相电势; Z_s 为保护侧系统等效正序阻抗; Z_l 为被保护线路全长的正序阻抗; c_1, c_2 为正、负序电流分配系数,系统中正、负序电流分配系数相等。

实现该自适应电流速断保护还需要解决 2 个问题:(1) 相电流差故障分量的计算;(2) 系统等效阻抗和等效电源电势的计算。

对于第一个问题,相电流差故障分量的获取可由采集故障后数据与故障前数据并通过计算得到,计算式如下:

$$i_{BCg} = i_{BC}^{(t)} - i_{BC}^{(0)} \quad (14)$$

对于第二个问题,根据对相电流差及其故障分量的特性分析,得出故障相间的两相电流差及其故障分量值最大,发生短路故障时取 3 个相电流差故障分量中的最大值及其对应的线电压故障分量进行

实时整定计算。例如假设 B,C 两相短路故障,系统等效阻抗可由如下方法计算:

$$Z_s = -\frac{\dot{U}_{BC}^{(t)} - \dot{U}_{BC}^{(0)}}{i_{BC}^{(t)} - i_{BC}^{(0)}} \quad (15)$$

这种保护动作判据中的整定值由保护实时测量值计算而来,而且测量值中故障前后的相间电流和相间电压值可由保护直接采集、或仅经过简单的计算得到。

然后计算系统等效电源,计算公式如下:

$$E_1 = \sqrt{3} E_\phi = E_{BC} = U_{BC} + I_{BC} Z_s \quad (16)$$

式中: U_{BC} 为故障时被保护线路保护装置安装处的线电压; I_{BC} 为故障时候被保护线路保护装置安装处的线电流。

3 仿真研究

依据 MATLAB 搭建的仿真平台^[8],对上述的理论分析进行仿真验证。分布式电源由风机组成,接入容量为 7.5 MW。其中 $c_1=1, K_{rel}=1.1$ 。

分布式电源接入对配电网的影响主要是保护的速断保护范围延伸到下一段线路,所以仿真设定 BC 线路末端发生三相短路,此时故障发生在保护 2 速断电流保护范围外。保护 2 处 B,C 两相各电压电流幅值如下:

$$\begin{cases} \dot{i}_{BC}^{(0)} = -237.4 - j647.2 (\text{A}) \\ \dot{i}_{BC}^{(t)} = -3864.6 - j37.9 (\text{A}) \\ \dot{i}_{BCg} = -3627.2 - j685.1 (\text{A}) \\ \dot{U}_{BC}^{(0)} = -598.4 - j13980.7 (\text{V}) \\ \dot{U}_{BC}^{(t)} = -251.4 - j4528.3 (\text{V}) \\ \dot{U}_{BCg} = 347 + j9452.4 (\text{V}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{则, } Z_s = -\frac{\dot{U}_{BC}^{(t)} - \dot{U}_{BC}^{(0)}}{i_{BC}^{(t)} - i_{BC}^{(0)}} = -0.384 + j2.53 (\Omega)$$

$$E_1 = E_{BC} = U_{BC} + I_{BC} Z_s = 1136.7 - j14320.1 (\text{V})$$

$$\left| K_{rel} \cdot c_1 \cdot \frac{\sqrt{3} E_\phi}{Z_s + Z_l} \right| = 4270.7 (\text{A})$$

当风机接入容量为 7.5 MW 时, $|i_{BCg}| = 3691.3$

(A) $< \left| K_{rel} \cdot c_1 \cdot \frac{\sqrt{3} E_\phi}{Z_s + Z_l} \right|$, 不符合保护判据,保护 2

不动作,所以不会产生像传统电流保护那样保护 2 的自适应速断保护范围延伸到下一段线路,可见自适应电流保护优于传统电流保护。

如果故障发生在保护范围之内,即三相短路故

障发生在 BC 线路上离 B 端 2 km 处,则仿真结果如下:

$$\begin{cases} \dot{I}_{BC}^{(0)} = -237.4 - j647.2 (\text{A}) \\ \dot{I}_{BC}^{(1)} = -4\ 469.4 + j59.3 (\text{A}) \\ \dot{I}_{BCg} = -4\ 232 + j706.5 (\text{A}) \\ \dot{U}_{BC}^{(0)} = -541.8 - j14\ 021.1 (\text{V}) \\ \dot{U}_{BC}^{(1)} = -152.9 - j2\ 616.2 (\text{V}) \\ \dot{U}_{BCg} = 388.9 + j11\ 404.9 (\text{V}) \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{则, } Z_S = -\frac{\dot{U}_{BC}^{(1)} - \dot{U}_{BC}^{(0)}}{\dot{I}_{BC}^{(1)} - \dot{I}_{BC}^{(0)}} = -0.35 + j2.64 (\Omega)$$

$$E_1 = E_{BC} = U_{BC} + I_{BC} Z_S = 1\ 254.8 - j14\ 436.2 (\text{V})$$

$$\left| K_{rel} \cdot c_1 \cdot \frac{\sqrt{3} E_\phi}{Z_S + Z_1} \right| = 4\ 183.6 (\text{A})$$

当风机接入容量为 7.5 MW 时, $\left| \dot{I}_{BCg} \right| = 4\ 290.6$

(A) $> \left| K_{rel} \cdot c_1 \cdot \frac{\sqrt{3} E_\phi}{Z_S + Z_1} \right|$, 符合保护判据, 保护 2 动

作, 即保护区内故障正确动作。

从以上仿真结果来看, 自适应电流保护性能优于传统电流保护, 而且可以减小分布式电流接入配电网后对其保护产生的影响。

4 结束语

文中考虑将自适应电流保护应用到含分布式电源的配电网中, 结合含 DG 配电网的网络结构图与对称分量法, 研究出一种相电流差故障分量作为保护动作判据的算法。其中相电流差故障分量的获取可由采集故障后数据与故障前数据并通过计算得

到。然后在 MATLAB 平台上搭建了含风机的配电网模型, 进行了仿真验证, 仿真结果显示该方法可行。由此可见基于相电流差故障分量作为保护动作判据的算法的准确性, 能够准确识别保护区内外的故障, 对减小分布式电流接入配电网后对其保护产生的影响有重要意义。

参考文献:

- [1] 何建剑, 吴为麟. 分布式电源并网系统的研究[J]. 能源工程, 2007(3): 1-6.
- [2] LU Y P, HUA L D, WU J A, et al. A Study on Effect of Dispersed Generator Capacity on Power System Protection[C]. Power Engineering Society General Meeting 2007 IEEE, 2007.
- [3] SADEH J, BASHIR M, KAMYAB E. Effect of Distributed Generation Capacity on the Coordination of Protection System of Distribution Network[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010.
- [4] 胡成志, 卢继平. 分布式电源对配电网继电保护影响的分析[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(8): 36-39.
- [5] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [6] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [7] 揭林玲. 配电线路自适应保护研究[D]. 重庆大学硕士学位论文, 2009.
- [8] 于群, 曹娜. 电力系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

作者简介:

徐岩(1976), 男, 吉林吉林人, 副教授, 从事电力系统继电保护的研究;

卫波(1988), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护的研究;

冯巩(1988), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护的研究。

Application of Self-adaptive Protection in Distribution Network with Distributed Power

XU Yan, WEI Bo, FENG Gong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Combined with network structure diagrams and the symmetrical component method of distribution network with DG, an algorithm is developed. In the algorithm, the fault component of phase to phase current difference is used as a judgement whether a protection acts and can be computed with connected post-fault datas and pre-fault datas. The algorithm is applicable and can identify the fault in or out of the protection area accurately. A distribution network model with wind turbine is built in MATLAB to conduct a simulation and verify the algorithm. The simulation results show the algorithm's accurate identification and ability of reducing the impact to current protection with the access of distributed current to distribution network.

Key words: distributed power; distribution network; self-adaptive protection; fault component