

DOI: 10.7667/PSPC180238

适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护

马帅¹, 武志刚¹, 高厚磊², 徐彬²

(1. 国网山东省电力公司莱芜供电公司, 山东 莱芜 271100; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 对于高渗透率分布式电源(DG)接入的配电网, 提出了新型综合电流幅值比较的保护原理, 通过线路两端分相全电流幅值以及正序故障电流幅值的比较进行故障定位, 实现了低成本与高可靠性的兼容。并通过 PSCAD 搭建 10 kV 含分布式电源配电网模型, 全面仿真了不同 DG 渗透率、故障位置、故障类型、过渡电阻、非同步数据等多种因素对保护原理的影响。经过理论分析和仿真, 证明方案能够准确实现故障定位, 利用的数据简单, 耐过渡电阻能力优秀, 保护配置要求低, 抗同步误差强。

关键词: 有源配电网; 电流幅值比较; 正序故障分量; 同步; 保护

Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation

MA Shuai¹, WU Zhigang¹, GAO Houlei², XU Bin²

(1. Laiwu Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Laiwu 271100, China;
2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: For distribution networks with high-permeability Distributed Generation (DG), this paper proposes a novel integrated current amplitude protection principle by comparing the two ends of the line full phase current amplitude and positive sequence fault current amplitude which achieves low-cost and high-reliability compatibility. The model of 10 kV active distribution network is built by PSCAD to comprehensively simulate the influence of different DG permeability, fault location, fault type, transition resistance, asynchronous data and other factors on the protection principle. After theoretical analysis and simulation, it is proved that the scheme can accurately solve the fault location problems, the data used is simple, the resistance to transition resistance is excellent, the protection configuration is low, and the ability of resisting synchronization error is strong.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377100) and Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 52061216000M).

Key words: active distribution network; current amplitude comparison; positive sequence fault components; synchronize; protection

0 引言

随着越来越多不同类型分布式电源(DG)接入配电网, 使配电网由原来的辐射型网络向复杂的多源、多端网络转变, 从而导致传统的配电网三段式电流保护不再适用^[1-2], 因此寻找新的适合高渗透率 DG 接入的配电网保护新方案成为当务之急。

现有的解决方案是在故障发生后做 DG 离网处

理^[3], 非故障区段正常运行的 DG 也会被切除, 而且考虑到配电网故障 80% 为非永久性故障, 频繁切除 DG 限制了其发展。有人提出将输电网常用的电流纵联差动保护应用到配电网, 但其对数据的同步性要很高, 依赖于可靠的数据同步设备和方案, 这在配电网大规模应用成本较高。随后, 大量学者提出了很多新型保护原理^[4-16], 主要可分为对输电网传统保护方法移植改进、结合广域电流保护思想、结合 DG 故障特征的自适应电流保护等方法。但这些方法要么技术实现难度大, 不适合现有配电网, 要么过分追求从线路单端获取的信息, 使保护受限

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51377100); 国网山东电力公司科技项目资助(52061216000M)

条件很多。而从线路两侧同时提取简单易得的信息组成对同步要求较低的新型纵联式保护，可以兼顾两侧信息比较的优势和成本的权衡。

鉴于此，文献[15]提出基于电流幅值的差动保护标积制动的判据方案，但 K 值整定需要实时应用线路两端电压电流故障分量信息，获取难度较高。文献[16]进一步提出基于等效相角来整定 K 值的方案，但在高渗透率 DG 接入时依然存在保护死区，且耐过渡电阻的能力较差。本文借鉴纵联保护应用双端信息量的特点，提出只利用两端电流幅值信息的主保护，其对数据的同步要求很低，耐过渡电阻能力优秀，并且无需大规模装配电压互感器，非常适合在现有配电网装备应用。

1 有源配电网相间短路时电流幅值分析

分布式电源按照运行的方式主要可以分为旋转电机类和逆变类，其中旋转电机类 DG 故障瞬间的短路电流最大可以达到 6~10 倍的额定电流，而逆变型 DG 受控制策略影响，最大只能达到 1.2~2 倍的额定电流^[17]。逆变类 DG 故障等值模型可以等效成一个受控电流源^[18]，其电流由控制策略及 DG 接入点电压综合决定，但其最大值被加以限制。目前，接入 10 kV 配电网的 DG 以光伏逆变型为主，以图 1 所示 10 kV 配电网模型为例，若 DG 皆为逆变类，*f* 点发生金属性相间短路故障时，线路 MN 左端故障电流将达到 kA 级，而 DG 侧输出的故障电流最大只能达到百安级，相对于主变侧，DG 侧所能提供的故障电流小了一个数量级。由此可见，对于以逆变类 DG 为主的有源配电网，发生相间故障时，线路主变侧故障电流远大于 DG 侧故障电流是普遍存在的现象。

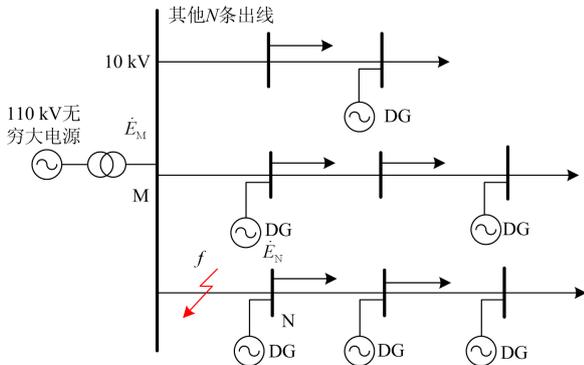


图 1 含分布式电源 10 kV 配电网模型
Fig. 1 10 kV distribution network model with distributed generation

配电网分布式电源种类具有多样性，对于双馈风机以及生物质燃料发电机等分布式电源，其故障

等值模型属于旋转电机类^[19]。当配电网中的分布式电源以此类 DG 为主时，由于旋转电机类可按照理想电源串联阻抗的模型来等效，当 DG 上游 *f* 点发生金属性相间短路故障时，在不考虑其他出线上 DG 对主变侧的助增电流时，根据电路理论，可以等效为如图 2 所示故障等值电路。

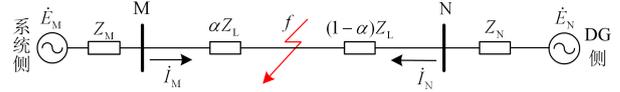


图 2 简单含 DG 配网故障等值电路
Fig. 2 Equivalent circuit of simple active distribution network fault

其中， α 为故障点 *f* 与 M 侧的母线距离与线路 MN 全长之比， \dot{E}_M 、 \dot{E}_N 为电源电势， Z_M 、 Z_N 为等效电源阻抗， Z_L 为线路总阻抗。由于 10 kV 侧相对于 110 kV 侧容量很小，系统侧可视为无穷大电源，选取 SFQ7-31500/110 型变压器为例，其容量为 31.5 MVA，根据相关变压器标准，可以求出其归算到低压侧的变压器阻抗

$$Z_M = iX_T = \frac{U_k \% \cdot U_N^2}{100S_N} = \frac{10.5 \times 11^2}{100 \times 31.5} \Omega \approx i0.40 \Omega \quad (1)$$

式中： X_T 为变压器阻抗； U_N 为低压侧电压等级； $U_k \%$ 为变压器短路电压百分数； S_N 为变压器容量。

配电网各处电压近似相等，电源对配电网的渗透率之比与等效阻抗近似成反比。考虑到正常情况下分布式电源为分散配置。假设分布式电源容量为平均分散布置，即每条出线上的分布式电源出力差不多，设 DG 总的渗透率为 *h*，主变侧出线共有 *N* 条，那么单条馈线上的 DG 对整体配电网的渗透率为 *h*/*N*，而中压配电网出线一般在十几条以上^[20]，可见单条馈线上的 DG 容量较主变侧来说较小。以上文选取的变压器为例，并将 M 侧下方的所有分布式电源按照渗透率条件等效为一个，设 *N*=10，*h*=50%，由于忽略了其他出线上 DG，那么，单条馈线上分布式电源的等效阻抗为

$$Z_N \approx \frac{N(1-h)}{h} Z_M = i4 \Omega \quad (2)$$

在忽略负荷电流的前提下，两端保护安装处的电流大小为

$$|\dot{i}_M| = \left| \frac{\dot{E}_M}{Z_M + \alpha Z_L} \right| \quad (3)$$

$$|\dot{i}_N| = \left| \frac{\dot{E}_N}{Z_N + (1-\alpha) Z_L} \right| \quad (4)$$

不难发现，随着 α 的增大， $|\dot{i}_M|$ 逐渐减小而 $|\dot{i}_N|$

逐渐增大, 逆变侧故障电流越来越接近主变侧。以 10 kV 配电网常用 LGJ-120 架空线为例, 其单位阻抗 $Z_l = 0.4 \Omega/\text{km}$ 。可见, 即使故障发生在最严重的线路末端, 也需要近 10 km 的故障线路长度来使两端电流幅值相等。再考虑到其他馈线 DG 对 M 侧的助增电流, $|I_M|$ 会更加明显地大于 $|I_N|$, 使两端电流相等所需要的故障线路长度增加更多, 而单条 10 kV 配电网馈线供电范围多在 8 km 以下^[21]。

以上分析是对高渗透率电机类 DG 接入配电网常规情况的分析。对于电机类 DG 集中分布于少数几条馈线且渗透率较高的极端情况, 则存在故障时两端电流幅值相等的可能。但这种情况一般比较少见, 而且只可能发生在 DG 集中分布馈线的少数几段线路上。

综上, 在大部分实际情况下, 对于大部分馈线区段, 故障线路内部发生金属性相间短路故障时其两端电流幅值不相等, 即主变压器侧故障电流幅值大小明显大于对侧, 而正常运行或发生区外故障时, 两侧电流幅值相等。而只有在 DG 以旋转电机类为主且 DG 集中分布于少数几条馈线时, 才有可能在 DG 上游线路出现两端电流幅值相等的情况, 而其他大部分区段线路两端电流幅值依然明显不相等。基于这一结论, 可以提出一种基于线路两侧电流幅值比较的新型电流保护判据。

2 综合幅值比较式保护判据

2.1 电流幅值比较判据形式

基于前文的分析和配电网当前信息获取的特点, 借鉴电流纵联差动保护的优点, 仅利用线路两端的电流幅值信息来构造动作电流和制动电流, 选用

$$\left\| |I_M| - |I_N| \right\| - K \left\| |I_M| + |I_N| \right\| \geq I_{op} \quad (5)$$

式中: $|I_M|$ 为 M 侧电流幅值; $|I_N|$ 为 N 侧电流幅值; $\left\| |I_M| - |I_N| \right\|$ 为动作量; $K \cdot \left\| |I_M| + |I_N| \right\|$ 为制动量, 其中制动系数 K 取值小于 1; I_{op} 为很小的门槛, 用来保证正常情况下保护不误动。

这种动作电流 $\left\| |I_M| - |I_N| \right\|$ 不是定值, 而是随制动量的变化而变化的, 不仅提高了内部短路时的灵敏性, 而且提高了外部短路拒动的可靠性。

为了方便对保护原理进行分析, 对判据进行变形, 假设 M 侧的电流幅值比 N 侧大, 定义两侧电流幅值比为

$$\beta = \frac{|I_M|}{|I_N|} \quad (6)$$

则有

$$\frac{|I_M|}{|I_N|} - 1 - K \left(1 + \frac{|I_M|}{|I_N|} \right) > \frac{I_{op}}{|I_N|} \quad (7)$$

因为 I_{op} 很小, 式(7)右侧近似为零忽略不计, 将式(6)代入式(7), 得

$$\beta = \frac{|I_M|}{|I_N|} \geq \frac{1+K}{1-K} \quad (8)$$

定义保护的整定阈值

$$R_{set} = \frac{1+K}{1-K} \quad (9)$$

由式(8)可以看出, 该带制动特性的幅值比较保护动作原理可以近似变形为内部故障时大电流一端与小电流一端幅值之比大于整定阈值的情况, 为了分析的方便性, 下文多以此为基础进行分析。在运行当中, 考虑到 CT 因不同型不同容量及固有工程误差等引起的传变误差(用 ε 表示), 当传变误差最大时, 区外短路有 $|I_N| = (1 - \varepsilon_{max}) |I_M|$, 为了防止区外短路时误动, 则应有 $R_{set} > 1/(1 - \varepsilon_{max})$, 这需要对整定阈值 R_{set} 进行合理的整定。 R_{set} 取值越大, 即 K 取值越大, 判据抗区外误动的能力越强, 但会导致对区内故障的识别能力下降, 为了提升故障的判别能力, R_{set} 按照 CT 传变误差的极限来取。其具体关系可参见表 1。

表 1 整定阈值、制动系数和 CT 最大传变误差的关系

Table 1 Relationship between the threshold setting, the braking coefficient and the CT maximum transfer error

CT 传变误差	K	R_{set}
5%	0.025 6	1.052 6
10%	0.052 6	1.111 1
15%	0.081 1	1.176 5
20%	0.111 1	1.250 0

2.2 基于正序故障分量电流幅值比较的保护原理

对于 DG 类型以逆变类为主的有源配电网, 由于线路两端电流幅值差异很大, 基于两端全电流的幅值比较判据保护裕度很大, 这时可不必考虑过渡电阻的影响。但对于旋转电机类 DG, 线路两侧提供故障电流的能力差别不大, 此时全电流幅值量构成的比较判据受过渡电阻和负荷电流影响较大。按照 2.1 节的判据形式, 对于图 2 所示模型, 忽略负荷电流, 经过渡电阻阻值为 R 的三相短路时, 有

$$\frac{|I_M|}{|I_N|} = \frac{|Z_N + (1-\alpha)Z_L + R|}{|Z_M + \alpha Z_L + R|} \quad (10)$$

从式(10)易得, 过渡电阻 R 越大, 会明显地使判据的幅值比减小, 从而使保护的灵敏性下降。全电流是非故障状态下的负荷电流和故障分量的叠加, 在重负荷条件下, 且经大过渡电阻接地时, 不能再忽略负荷电流 I_L , 假设故障前后负荷电流不变且流向为从 DG 侧流向主变侧, 则两端电流幅值之比应为

$$\frac{|I_M|}{|I_N|} = \frac{\left| \frac{\dot{E}_M}{Z_M + \alpha Z_L + R} - I_L \right|}{\left| \frac{\dot{E}_N}{Z_N + (1-\alpha)Z_L + R} + I_L \right|} \quad (11)$$

从式(11)可以看出, 两侧穿越性的负荷电流可能会造成两端幅值之比变小, 从而使保护灵敏度降低。

为了提高保护耐过渡电阻和负荷电流的能力, 在此, 引入线路两端正序故障分量电流幅值 $|\Delta I_{M1}|$ 和 $|\Delta I_{N1}|$, 并以此代替电流幅值来构成 2.1 节中的判据。

根据叠加原理, 图 2 故障情况可以分解出如图 3 所示的正序故障附加网络。

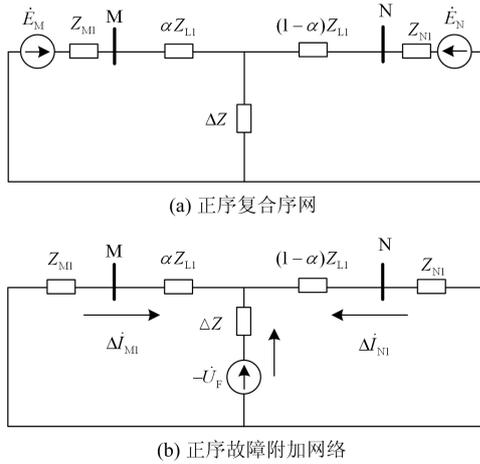


图 3 正序故障附加网络分解

Fig. 3 Positive sequence fault additional network decomposition

图 3 中, \dot{E}_M 、 \dot{E}_N 为电源电势, Z_{M1} 、 Z_{N1} 为等效电源正序阻抗, Z_{L1} 为总的线路正序阻抗, ΔI_{M1} 和 ΔI_{N1} 分别为 M、N 侧正序故障分量电流, \dot{U}_F 为故障点故障前电压。根据三相和两相短路故障的复合序网边界条件, 可得到如图 3(a)所示 DG 上游区段故障的正序复合序网。其中, 设过渡电阻为 R , 当发生三相短路故障时, $\Delta Z = R$, 当发生两相短路故

障时, $\Delta Z = R + Z_{2\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$ 为负序序网的等值阻抗。

将得到的正序复合序网应用叠加原理进行分解, 得到如图 3(b)所示正序故障附加网络, 由此可得两侧正序故障分量电流幅值之比为

$$\frac{|\Delta I_{M1}|}{|\Delta I_{N1}|} = \frac{|Z_{N1} + (1-\alpha)Z_{L1}|}{|Z_{M1} + \alpha Z_{L1}|} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 采用工频正序故障分量电流幅值构成的幅值比较判据判断结果几乎不受负荷电流和过渡电阻的影响, 而只由故障位置和两端等效电源电抗决定。

2.3 综合幅值比较方案及其性能分析

由工频全电流幅值构成的幅值比较判据能够准确实现以逆变类 DG 为主的有源配电网的故障定位, 且全电流形式的故障电流获取简单, 故障持续时间内较为稳定, 用于幅值比较判据具有一定优势。工频正序故障分量电流幅值构成的幅值比较判据不受负荷电流和过渡电阻的影响, 可以提高保护的灵敏度, 但故障分量通常情况下要在故障发生后的一到两个周波内尽快进行提取计算, 而由于配网线路末端的弱馈性, 末端保护可能无法启动, 当对端发送来启动信号再启动时, 可能已经无法测取到故障电流, 其相对全电流对实时获取的要求也更高。因此, 同时引入分相全电流幅值判据和正序故障分量电流幅值判据, 两种判据为或的关系, 只要一个满足幅值比较动作条件, 则保护启动。综合幅值比较判据如下为

$$\begin{cases} S_1 : \|I_{MA} - I_{NA}\| - K \|I_{MA} + I_{NA}\| \geq I_{op} \\ S_2 : \|I_{MB} - I_{NB}\| - K \|I_{MB} + I_{NB}\| \geq I_{op} \\ S_3 : \|I_{MC} - I_{NC}\| - K \|I_{MC} + I_{NC}\| \geq I_{op} \\ S_4 : \|\Delta I_{M1} - \Delta I_{N1}\| - K \|\Delta I_{M1} + \Delta I_{N1}\| \geq I_{op} \\ S_1 \vee S_2 \vee S_3 \vee S_4 = 1 \end{cases} \quad (13)$$

图 4 为本文综合幅值比较保护动作原理图。

采用过流检测启动的方式可以防止在同步误差较大时, 一侧为故障前电流幅值一侧为故障后电流幅值而引起误动的情况。同时, 比起时刻比较两端幅值, 增强了保护的抗同步误差能力, 减小了两端信号传递的压力。

根据前面的分析, 本幅值比较保护方案能实现有源配电网绝大部分线路区段的故障定位, 虽存在极端情况下无法判别的故障死区, 但能保证不会误动, 所以完全适合作为有源配电网故障定位的方法之一。

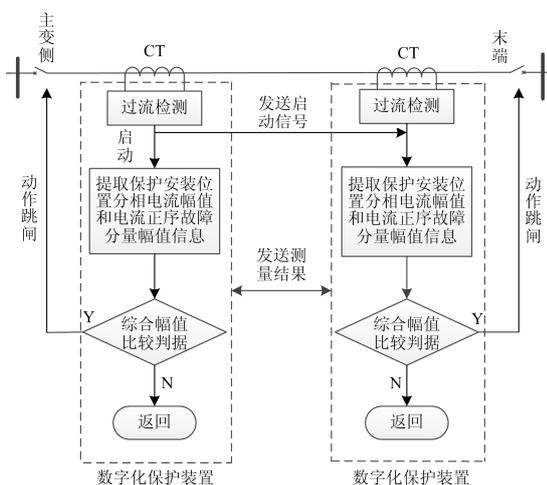


图 4 综合幅值比较保护动作原理图

Fig. 4 Integrated amplitude comparison protection principle diagram

3 仿真验证

3.1 仿真模型建立

为了进一步验证上文所提保护的 correctness, 通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建了如图 5 所示的 10 kV 含 DG 简单配电网模型。系统电源中性点不接地, 变压器选择 SFQ7-31500/110 型变压器, 容量为 31.5 MVA。线路 AB、AD 采用地下电缆, 长度均为 4 km, 线路单位参数为 $(0.093 + i0.259)\Omega$ 。线路 BC、DE、EF、FG 采用 LGJ-120 型导线, 线路单位参数为 $(0.263 + i0.348)\Omega$, 长度分别为 3 km、3 km、2 km、1 km。负荷均为 2 MW、功率因数为 0.85。分别搭建了逆变类和旋转电机类两种 DG 模型, 逆变类 DG 采用 PQ 控制方式, 有功功率可调, 其无功仅在故障情况下输出以给电网电压提供支撑, 按照 1.2 倍额定电流限流。电机类 DG 按照渗透率采用电机串联电抗来等效。

故障仿真时, 故障仿真位置分别设置在线路 AB、AD、DE、EF、FG 的线路中点, 故障类型包括两相短路和三相短路。此后, 借助 Matlab 对 PSCAD 输出的数据采样值进行全周傅里叶计算, 提取工频电流幅值和工频电流故障分量的幅值, 以此构成保护判据, 进而判断故障能否得到切除。

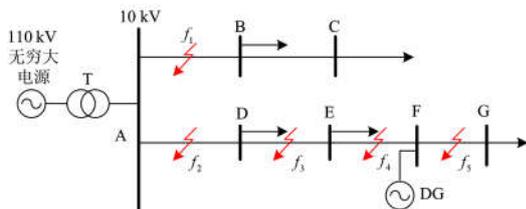


图 5 仿真模型示意图

Fig. 5 Simulation model diagram

3.2 故障仿真结果及分析

对于逆变类 DG, 首先设置有功功率为 2 MW, 即 DG 渗透率为 20%, 并在 f_4 点设置金属性三相短路, 然后将 DG 由相同渗透率接入的电机类代替进行同样的实验, 在图 6 中显示了两次实验线路 EF 两端电流以及逆变类 DG 出口处电流变化信息。

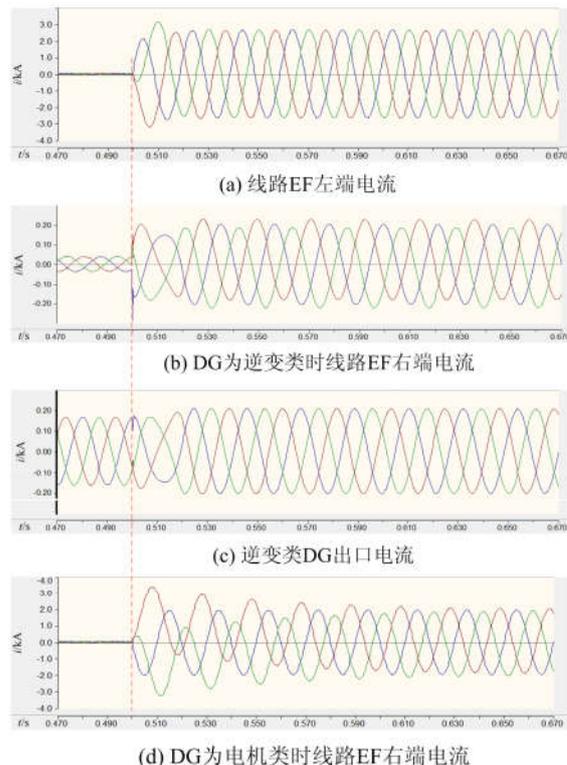


图 6 故障电流波形

Fig. 6 Fault current waveform

从图 6 中可以看出, 在 20% 渗透率的情况下, 逆变类 DG 输出的故障电流比主电源输出的少一个数量级。但当 DG 为电机类且分布集中时, 在高渗透率情况下会造成两端幅值相近。

接着, 在图 5 中 5 个不同位置, 以逆变类 DG 渗透率为 20%、40% 分别进行三相金属性短路实验和 AB 两相金属性短路实验, 将各区段分相(A 相)全电流判据结果显示到动作特性图中, 又以 EF 区段为参考, 将其他 4 次区外实验的判断结果也经入动作特性图(图 7)中。

图 7 中: I_r 为动作电流; I_{res} 为制动电流; I_{op} 取 0.2 倍的额定负荷电流; CT 传变误差取 0.85; 此时 $K = 0.0811$ 。

从图 7 可以看出, 对于逆变类 DG, 渗透率的增高对以分相全电流构成的判断结果不会造成很大的影响, 以分相全电流幅值为判据的幅值比较保护

即能适应高渗透率逆变类 DG 接入的配电网的故障定位。

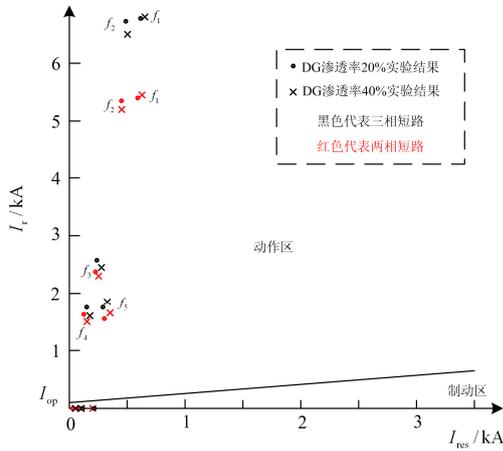


图 7 幅值比较式判据动作特性图

Fig. 7 Amplitude comparison criteria motion characteristics

3.3 耐过渡电阻性能

为了进一步研究以正序故障分量电流幅值构成的幅值比较保护耐过渡电阻的能力，对于图 5，将 DG 设置为 20% 渗透率接入的旋转电机类分布式电源，由于带有制动特性的幅值比较式保护可以近似等效为式(8)的情况，为了分析的方便性，采用此种比值的判据形式进行结果的分析。

首先，在线路 DE 的中点 f_3 点进行三相短路仿真，设置过渡电阻为 60Ω ，故障起始时间为 0.5 s，故障持续时间为 0.5 s。分别绘制由分相全电流幅值构成的判据结果和由正序故障分量电流幅值构成的幅值比较式判据结果，如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，经过高电阻三相短路时，由正序故障分量电流幅值构成的幅值比较式判据的灵敏性明显高于全电流。

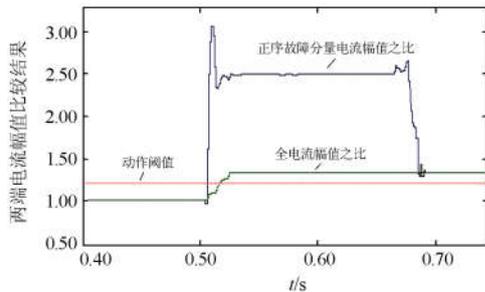


图 8 幅值比较结果对比图

Fig. 8 Amplitude comparison results comparison chart

接着，在线路 EF 的中点设置三相相间短路故障，过渡电阻大小依次设置为 $0 \Omega, 20 \Omega, 40 \Omega, 60 \Omega$ ，取故障发生后连续三次测量的平均值，结果如表 2 所示。

表 2 不同过渡电阻下的判断结果

Table 2 Judgment under different transition resistance

测量值	0Ω	20Ω	40Ω	60Ω
$ \dot{I}_M / \text{kA}$	1.875 7	0.453 1	0.238 6	0.160 5
$ \Delta \dot{I}_{M1} / \text{kA}$	1.909 2	0.467 2	0.250 5	0.171 1
$ \dot{I}_N / \text{kA}$	1.384 7	0.353 2	0.196 2	0.138 9
$ \Delta \dot{I}_{N1} / \text{kA}$	1.360 2	0.324 9	0.176 2	0.119 2
$ \dot{I}_M / \dot{I}_N $	1.354 6	1.282 8	1.216 1	1.155 5
$ \Delta \dot{I}_{M1} / \Delta \dot{I}_{N1} $	1.403 6	1.437 7	1.421 6	1.435 4

因为线路 EF 上的故障位置距离主变侧较远，电机类 DG 提供故障电流的能力已经和主变侧差不多，从表 2 中可以看出，当过渡电阻达到 60Ω 时，由分相全电流幅值构成的主保护已经无法识别区内故障，而由正序故障分量电流幅值构成的保护判断结果在不同过渡电阻下几乎不变，且均大于由全电流构成的幅值比较判据结果，抗过渡电阻的能力较强，有助于提高保护的灵敏度。

3.4 数据不同步的影响

传统的电流纵联差动保护对数据同步要求比较高，一旦两边数据有同步误差，会对保护造成严重的影响，哪怕两端数据同步只有 5 ms 的误差，两端测量值的角度与真实值也会产生 90° 的偏差。本文构成幅值比较判据所用的工频电流幅值和正序故障分量电流幅值在故障持续时间内则几乎不变，抗同步误差能力较强。

接下来从本新型综合幅值比较保护方案与传统电流纵联差动保护对比的角度，对其抗同步误差的性能进行分析。相对于线路 DE，在区外 f_4 点设置三相相间短路故障，并在仿真时依次设置线路 DE 两端的保护采样装置的通信同步误差从 0° 到 135° 。图 9 为综合幅值比较方案的仿真结果，其中实线为全电流幅值比较判据(A 相)的结果，虚线为正序故障分量电流幅值比较结果。图 10 为传统电流纵联保护的仿真结果(A 相)。

对比图 9 和图 10 不难看出，当数据同步误差由 0° 增大至 135° 时，电流差动保护中的动作电流逐渐增大而制动电流逐渐减小，考虑制动系数取 0.5 时的情况(图 10 中的虚线)，当两侧同步误差达到 45° 时，动作电流便开始大于制动电流，而本方案的幅值比较式幅值判据制动电流一直稳定大于动作电流，不会因为数据同步问题而误动。由此可见，本文所提出的幅值比较方案对数据同步要求更低，具有很强的抗同步误差能力。

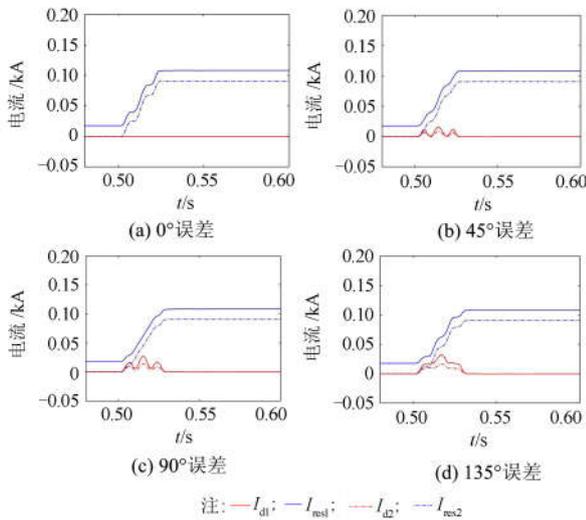


图 9 数据不同步对本文方案的影响

Fig. 9 Effect of non-synchronized data on the scheme of this paper

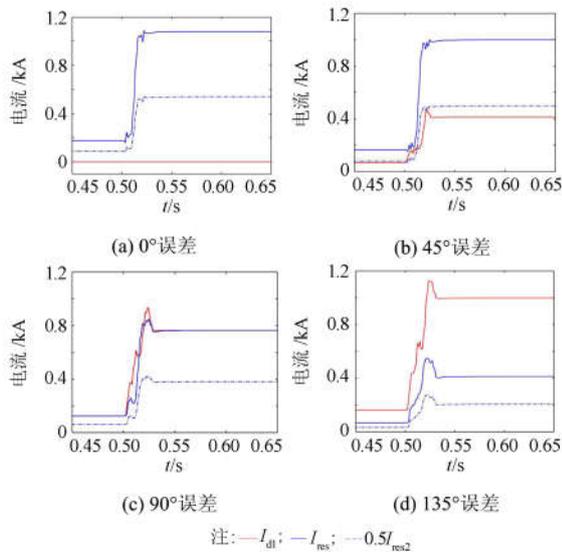


图 10 数据不同步对电流差动保护的影响

Fig. 10 Effect of non-synchronized data on the current differential protection

4 结论

需要指出的是, 为了满足保护的可靠性, 可以通过配合其他故障定位方法或者依靠现存有源配电网故障定位方法。例如, 当极端故障情况无法实现故障定位时, 可以在短暂延时之后切除所有 DG, 这时, 幅值比较保护将不存在死区, 从而确保了故障能得到有效切除。虽然切除所有 DG 会对非故障区段的 DG 造成一定的负面影响, 但由于这种情况发生的概率比较小, 因此这种负面影响是可以接受的。

综上, 理论分析和仿真结果表明, 本文所提的以两端电流幅值比较为原理的保护方案可以准确识别以不同渗透率逆变类 DG 接入的配电网环境。而当辅助采用两端电流故障分量幅值信息时, 能够对旋转电机类 DG 接入的配电网大部分的故障区段实现定位, 并且耐过渡电阻和负荷电流能力优秀。本文所提出的综合幅值比较方案对设备要求低, 信息获取容易, 抗同步误差能力强, 能准确判别绝大部分故障, 虽然存在部分极端情况下的保护判别死区, 但不影响其作为有源配电网故障区段定位方法之一。对于极端情况, 在简单有效的辅助方案被提出之前, 可以依靠有源配电网现有的 DG 离网技术来辅助实现故障区段定位, 但相对于现有保护方案, 故障时大大减少了 DG 离网的情况的发生, 实现了配电网与 DG 利益的兼顾。

参考文献

- [1] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [2] 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.
- [3] 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 1480—2015[S]. 北京: 国家电网公司, 2015.
Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 1480—2015[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2015.
- [4] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [5] GAO H L, LI J, XU B Y. Principle and implementation of current differential protection in distribution networks with high penetration of DGs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 565-574.
- [6] 齐郑, 张首魁, 李志, 等. 考虑时间尺度的含 DG 配电网故障动态恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 31-38.
QI Zheng, ZHANG Shoukui, LI Zhi, et al. Dynamic

- service restoration strategy considering time scale for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 31-38.
- [7] 范忻蓉, 张沛超, 方陈. 辐射型主动配电网的自适应方向保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 150-155.
FAN Xinrong, ZHANG Peichao, FANG Chen. Adaptive directional protection scheme for radial active distributional network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 150-155.
- [8] NAIEM A F, HEGAZY Y, ABDELAZIZ A Y, et al. A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation power delivery[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 176-185.
- [9] 段建东, 崔帅帅, 刘吴骥, 等. 基于电流频率差的有源配电网线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2927-2928.
DUAN Jiandong, CUI Shuishuai, LIU Wuji, et al. Line protection based on current frequency difference for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2927-2928.
- [10] 李娟, 高厚磊, 朱国防. 考虑逆变类分布式电源特性的有源配电网反时限电流差动保护[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 74-83.
LI Juan, GAO Houlei, ZHU Guofang. Inverse-time current differential protection in active distribution network considering characteristics of inverter-interfaced distributed generations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 74-83.
- [11] 刘凯, 李幼仪. 主动配电网保护方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2584-2590.
LIU Kai, LI Youyi. Study on solutions for active distribution grid protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2584-2590.
- [12] 黄伟, 雷金勇, 夏翔, 等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97.
HUANG Wei, LEI Jinyong, XIA Xiang, et al. Influence of distributed generation on phase-to-phase short circuit protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 93-97.
- [13] 徐萌, 邹贵彬, 陈宁, 等. 基于故障超前相的有源配电网能量方向纵联保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 58-64.
XU Meng, ZOU Guibin, CHEN Ning, et al. Energy-directional pilot protection based on leading-phase for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 58-64.
- [14] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 基于克拉克电流相角差值的低压有源配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 15-24.
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. Fault location method for low voltage active distribution network based on phase-angle differences of the Clark currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 15-24.
- [15] 许偲轩, 陆于平. 适用于含分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 113-118.
XU Sixuan, LU Yuping. A pilot protection method for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 113-118.
- [16] 许偲轩, 陆于平. 含 DG 配网电流幅值差异化保护方案[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 164-169.
XU Sixuan, LU Yuping. Current amplitude differential protection for distribution system with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 164-169.
- [17] 李娟. 有源配电网电流差动保护原理与实现技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
LI Juan. Studies on current differential protection and implementation technologies in active distribution networks[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [18] WANG L C, GAO H L, ZOU G B. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [19] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [20] 周莉梅, 屈高强, 刘伟, 等. 配电网供电区域划分方法与 applications[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 242-248.
ZHOU Limei, QU Gaoqiang, LIU Wei, et al. Methods and practical application of power supply area division for distribution[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 242-248.
- [21] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-05-10

作者简介:

马 帅(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统及其自动化的运行与管理工作;

武志刚(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统及自动化专业的运行与管理工作;

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统保护与控制的教学和研究工作。Email: houlei@sdu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)