

有源配电网含不可测分支线路新型电流幅值差动保护判据

张雪松¹, 马 啸², 章雷其¹, 王子璇², 林湘宁², 李正天²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 电流幅值差动保护的動作性能受不可测分支等实际工程因素的影响。为此, 着重分析了有源配电网中含不可测分支线路两侧电流的幅值之差在正常运行以及区内、区外不同故障场景下的特征。在此基础上, 利用故障前后被保护线路两侧电流正序分量的幅值之差, 分别构成制动量和动作量, 提出一种新型电流幅值差动保护判据。仿真结果表明, 所提判据能适应不同的不可测分支接入容量。

关键词: 有源配电网; 分布式电源; 弱同步系统; 电流幅值差动保护; 不可测分支

中图分类号: TM 77

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202001006

0 引言

作为节能减排、实现可持续发展的重要举措, 分布式发电技术在世界范围内得到了广泛的应用。然而, 分布式电源(DG)的不断接入, 使得配电网结构由传统的单电源辐射状网络转变为潮流方向不确定、弱馈问题突出的有源网络。按单侧电源网络整定的三段式电流保护, 已越来越难以满足保护动作“四性”的要求^[1-4]。

电流相量差动保护具有良好的选择性^[5-6], 是解决有源配电网保护难题的理想选择。但是, 若要保障配电网中任一干线两侧电流相量的同步性, 就需要构建耗费巨大的通信通道甚至是通信网络, 故电流相量差动保护短期内难以在配电网中普遍应用。

对此, 文献[7-9]指出, 在有源配电网中, 系统侧和DG侧短路电流馈出能力存在较大差异, 据此提出了多种基于两侧电流幅值信息的新型配电网保护方案。与传统的电流相量差动保护相比, 此类电流幅值差动保护虽然动作性能稍逊, 但不要求线路两侧电流相量严格同步, 故在配电网中具备较好的应用前景。然而, 上述研究对于实际工程因素考虑较少, 鲜有计及不可测分支负荷等的影响。文献[10]研究指出, 在含不可测分支的线路区外下游发生故障时, 常规电流幅值差动保护判据存在一定的误动风险, 并提出了相应的辅助判据加以规避, 但其仅适用于末端为多分支节点的线路。

综上所述, 针对现有研究的不足, 本文基于故障前后被保护线路两侧电流幅值之差的差异化特征,

提出了一种适用于有源配电网含不可测分支线路的新型电流幅值差动保护判据。通过PSCAD仿真, 对本文所提判据的動作性能进行了全面验证。

1 有源配电网含不可测分支线路的故障特征

在图1所示的有源配电网内, 线路MN下游接有DG, 并存在分支负荷。由于配电网设备相对落后, 电压、电流信息不完整, 此类分支负荷通常不可测^[11]。本节以线路MN为例, 探究当其发生区内/区外故障时, DG与不可测分支的接入将对线路MN两侧电流的幅值产生何种影响, 从而为提出适应性的电流幅值差动保护判据奠定基础。

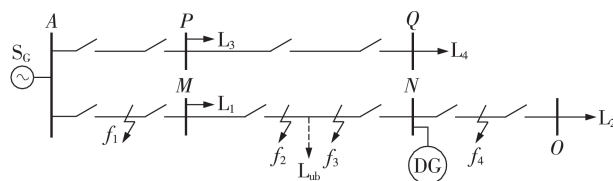


图1 有源配电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of active distribution network

1.1 区外故障期间线路两侧电流幅值特征

为分析简便起见, 对图1中的线路MN以双侧电源模型进行等效, 示意图如图2所示。图中, E_s 、 Z_s 和 E_d 、 Z_d 分别为线路MN上游和下游等值系统的电势与内阻; Z_L 、 Z_B 分别为线路MN和不可测分支 L_{ub} 的等值阻抗; 系数 β 为不可测分支 L_{ub} 与母线M的距离

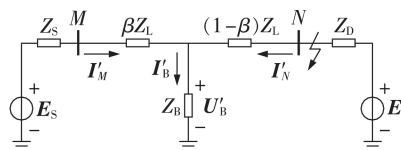


图2 发生区外故障时线路MN等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of Line MN under external fault

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-11-15

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS160-01V)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.(5211DS160-01V)

与线路 MN 全长的比值; I'_M 、 I'_N 分别为发生故障时 M 、 N 侧电流; I'_B 为发生故障时不可测分支 L_{ub} 的电流; U'_B 为发生故障时不可测分支 L_{ub} 的端口电压。

当线路 MN 区外下游出口发生短路故障时,如图2所示,由基尔霍夫电流定律以及三角不等式可知,线路 MN 两侧电流的幅值 I'_M 、 I'_N 之差将不超过其上所接不可测分支 L_{ub} 的电流幅值 I'_B ,如式(1)所示。

$$|I'_M - I'_N| \leq |I'_M + I'_N| = |I'_B| = I'_B \quad (1)$$

由于故障期间节点电压的跌落, I'_B 将小于故障前的幅值 I_B 。而正常运行期间,线路 MN 及其不可测分支 L_{ub} 上流经的负荷电流的相位较为接近,可认为故障前线路 MN 两侧电流的幅值 I_M 、 I_N 之差近似等于 I_B 。因此,发生区外故障后,线路 MN 两侧电流 I'_M 、 I'_N 的幅值之差将小于故障前的幅值之差,即:

$$|I'_M - I'_N| \leq |I_M - I_N| \quad (2)$$

上述分析表明,由于不可测分支 L_{ub} 的分流效应,线路 MN 两侧电流的幅值差异始终存在,但在发生区外故障后,随着不可测分支 L_{ub} 汲流的减小,线路 MN 两侧电流的幅值之差将小于故障前的差值。此外,在区外故障下,流经线路 MN 两侧的故障电流基本由同一侧电源提供,故式(2)所示的规律不会受两侧电源特性差异的影响。换言之,无论接入何种 DG,式(2)所示的规律均适用。

1.2 区内故障期间线路两侧电流幅值特征

当线路 MN 区内发生短路故障时,线路 MN 两侧不仅需向不可测分支 L_{ub} 提供负荷电流,还要向故障点提供短路电流。定性而言,此时线路 MN 两侧电流的幅值之差将因此被放大。例如,在不可测分支 L_{ub} 接入点附近发生三相金属性短路,如图3所示,此时线路 MN 两侧电流的幅值 I'_M 、 I'_N 满足:

$$|I'_M - I'_N| = \left| \frac{E_S}{Z_S + \beta Z_L} - \frac{E_D}{Z_D + (1-\beta)Z_L} \right| = \left| \frac{E_S}{Z_S + \beta Z_L} \right| \left| 1 - \frac{E_D}{E_S} \frac{|Z_S + \beta Z_L|}{|Z_D + (1-\beta)Z_L|} \right| \quad (3)$$

而在故障发生前,线路 MN 两侧电流的幅值 I_M 、 I_N 满足:

$$|I_M - I_N| = \left| \frac{E_S - U_B}{Z_S + \beta Z_L} - \frac{E_D - U_B}{Z_D + (1-\beta)Z_L} \right| = \left| \frac{E_S - U_B}{Z_S + \beta Z_L} \right| \left| 1 - \frac{E_D - U_B}{E_S - U_B} \frac{|Z_S + \beta Z_L|}{|Z_D + (1-\beta)Z_L|} \right| \quad (4)$$

其中, U_B 为故障前不可测分支 L_{ub} 的端口电压。

两侧系统电势 E_S 、 E_D 一般相差不大,对比式(3)、(4)可知,式(3)、(4)的第2项因式近似相等,而在第1项因式的分子中,有 $|E_S| \geq |E_S - U_B|$ 。因此,发

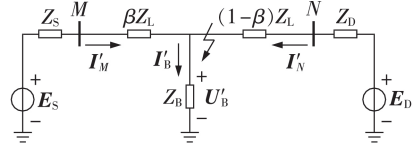


图3 发生区内故障时线路 MN 等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of Line MN under internal fault

生区内故障后,线路 MN 两侧电流的幅值之差较故障前增大,即:

$$|I'_M - I'_N| \geq |I_M - I_N| \quad (5)$$

应当指出,对于区内故障,由于故障点位于线路 MN 内部,故障电流分别由系统电源与 DG 提供,两侧电源的特性差异将对故障期间线路 MN 两侧电流的幅值之差产生较大影响。特别是逆变型 DG (IIDG),其限流特性与常规电源有着显著差异^[12-13],式(5)所示规律的适用性有待进一步分析。

1.3 逆变型 DG 故障限流特性及其影响分析

为简化分析,不妨假定不可测分支 L_{ub} 位于线路 MN 中点,即 $\beta=0.5$ 。在计及逆变型 DG 的控制策略后,进一步分析线路 MN 两侧电流的幅值特征。

1.3.1 故障前线路两侧电流幅值特征

在系统正常运行期间,逆变型 DG 采取恒功率 (PQ) 控制,且一般仅输出有功功率。将 d 轴定向于电网电压矢量,则此时逆变型 DG 的端口电压 U_{DG} 、电流 I_{DG} 可表示为^[14]:

$$\begin{cases} u_d = |U_{DG}| = U_{DG} \\ u_q = 0 \\ i_d = |I_{DG}| = P_{ref}/U_{DG} \\ i_q = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为正常运行时逆变型 DG 端口电压和电流的 d 、 q 轴分量; P_{ref} 为有功参考功率。

此时,逆变型 DG 可等效为受并网点电压控制的电流源,如图4所示。通过对逆变型 DG 以外的系统进行戴维南等值,则外部系统等效电势 E_{ST} 与逆变型 DG 端口电压 U_{DG} 、电流 I_{DG} 之间存在以下关系:

$$E_{ST} = U_{DG} - I_{DG} Z_{ST} \quad (7)$$

其中, E_{ST} 和 Z_{ST} 分别为故障前外部系统的等效电势和内阻,详见附录 A 中的式(A1)、(A2)。

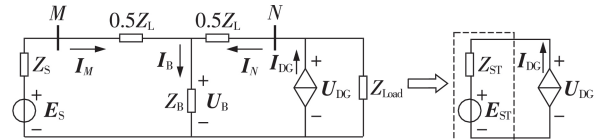


图4 逆变型 DG 接入场景下故障前线路 MN 等值电路

Fig.4 Equivalent circuit of Line MN with

IIDG before fault

在系统参数已知时,联立式(6)、(7)即可求解得出逆变型 DG 在故障前的出力状态,进而可得线路 MN 两侧电流 I_M 、 I_N (亦即正序分量 I_{M1} 、 I_{N1}) 分别如式

(8)和式(9)所示。

$$I_M = (E_S - U_B) / (Z_S + 0.5 Z_L) \quad (8)$$

$$I_N = I_{DG} - (E_{ST} + Z_{ST} I_{DG}) / Z_{Load} \quad (9)$$

其中, $U_B = U_{DG} - 0.5 Z_L I_N$; Z_{Load} 为被保护线路下游负荷的等值阻抗。

1.3.2 故障后线路两侧电流幅值特征

当系统发生故障后,根据并网规程的要求,逆变型DG将优先输出无功功率以支撑电压。此外,对于任何类型的故障,逆变型DG均仅输出正序电流,即其不会出现在负序网络中。因此,逆变型DG可等效为受控正序电流源,即^[14]:

$$\begin{cases} u'_{d1} = |U'_{DG1}| = U'_{DG1} \\ u'_{q1} = 0 \\ i'_{d1} = \min \left\{ P_{ref} / U'_{DG1}, \sqrt{I_{max}^2 - i_{q1}^2} \right\} \\ i'_{q1} = \min \left\{ k(U_{DG} - U'_{DG1}), I_{max} \right\} \end{cases} \quad (10)$$

其中, k 为无功支撑比例系数; I_{max} 为逆变型DG输出的最大故障电流,一般不超过额定电流 I_e 的2倍,本文拟取为 $1.5I_e$; 下标“1”表示正序分量,后同;上标“'”表示故障后分量。

以线路MN区内不可测分支 L_{ub} 上游发生相间短路故障为例,相应的复合序网及其等效电路见图5,简化过程见附录B。

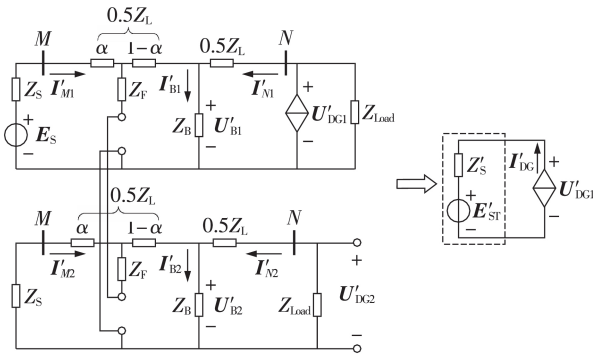


图5 逆变型DG接入场景下故障后线路MN等值电路

Fig.5 Equivalent circuit of Line MN with IIDG after fault

由图5中的等效电路可得:

$$E'_{ST} = U'_{DG1} - I'_{DG1} Z'_{ST} \quad (11)$$

其中, E'_{ST} 、 Z'_{ST} 分别为故障后外部系统的等效电势与内阻,详见附录B中的式(B6)、(B7)。

联立式(10)、(11),即可求解得出逆变型DG故障后的端口电压、电流,进而可得故障后线路MN两侧电流的正序分量 I'_{M1} 、 I'_{N1} 分别见式(12)和式(13)。

$$I'_{M1} = \frac{E_S - \left[U'_{B1} + (1-\alpha) 0.5 Z_L \left(\frac{U'_{B1}}{Z_B} - I'_{N1} \right) \right]}{Z_S + \alpha \cdot 0.5 Z_L} \quad (12)$$

$$I'_{N1} = I'_{DG1} - \frac{E'_{ST} + Z'_{ST} I'_{DG1}}{Z_{Load}} \quad (13)$$

其中, $U'_{B1} = U'_{DG1} - 0.5 Z_L I'_{N1}$, 为故障后不可测分支 L_{ub} 端口电压的正序分量; α 为故障点 f 与母线 M 的距离与不可测分支 L_{ub} 至母线 M 的距离的比值。

类似地,亦可得到故障点位于不可测分支 L_{ub} 下游时,线路MN两侧电流的正序分量 I'_{M1} 、 I'_{N1} 。

基于上述分析,在得到区内故障前后线路MN两侧电流(正序分量)的计算式后,代入与本文仿真算例一致的典型系统参数,以下游负荷空载、不可测分支满载的工况为例,遍历故障点位置 λ (故障点 f 至母线 M 的距离与线路MN全长的比值)和过渡电阻 Z_F ,即可得附录C中图C1所示的曲面。其中,纵坐标以线路MN首端M侧区内出口发生相间金属性短路时两侧电流幅值之差为基准进行标幺值转换。

图C1表明,在区内不同位置,对于 Z_F 高达 1000Ω 的极高阻故障,蓝色曲面(故障后两侧电流正序分量幅值的差值 $|I'_{M1} - I'_{N1}|$)均位于红色曲面(故障前两侧电流正序分量幅值的差值 $|I_{M1} - I_{N1}|$)之上,即始终有 $|I'_{M1} - I'_{N1}| \geq |I_{M1} - I_{N1}|$ 成立,式(5)所示规律依然成立。

综上所述,利用式(2)和式(5)所反映的线路两侧电流幅值之差在区内、区外故障场景下的差异化特征,可构成适用于含不可测分支线路有源配电网的新型电流幅值差动保护判据。

2 有源配电网新型电流幅值差动保护判据

根据第1节的分析,在系统正常运行期间,线路两侧流出电流的幅值之差可近似代表其上所接不可测分支的负荷电流水平,而在发生区内、区外故障时,两侧电流的幅值之差将在故障前的基础上分别呈现增大、减小的趋势。基于这一特征,可将故障后的两侧电流幅值之差作为动作量,将故障前的两侧电流幅值之差作为制动量,构成式(14)所示的新型电流幅值差动保护判据。

$$\begin{cases} I_d = |I'_{M1} - I'_{N1}| \\ I_r = |I_{M1} - I_{N1}| + I_{r0} \\ I_d \geq I_r \end{cases} \quad (14)$$

其中, I_d 、 I_r 分别为动作电流和制动电流; I_{r0} 为余项。

应当指出,式(14)所示的电流幅值差动保护判据,与传统的电流相量差动保护判据类似,其动作电流 I_d 应躲过正常运行及区外故障时的不平衡电流。工程中不平衡电流稳态值按电流互感器的10%误差曲线考虑。故式(14)所示判据中,制动电流 I_r 除故障前的两侧电流幅值差外,还应包含1个余项 I_{r0} :

$$I_{r0} = 0.1 K_{rel} K_{st} K_{np} \cdot \max \{ I'_{M1}, I'_{N1} \} \quad (15)$$

其中, K_{rel} 为可靠系数,一般取为1.2~1.3; K_{st} 为同型系数,在两侧电流互感器同型号时取0.5,不同型号时取1; K_{np} 为非周期分量系数,对微机保护可取为1。

从式(14)所示判据的制动电流 I_r 的构成来看,通过引入故障前线路两侧电流的幅值之差,可适应不同的不可测分支接入容量。因此,与常规的电流量值差动保护判据相比,在发生区外故障时,尽管存在不可测分支的分流效应,式(14)所示判据的动作安全性仍能得到充分保证;同时,由于其制动量具有一定的自适应性,该判据在发生区内故障时也能实现较为灵敏的动作。

3 算例仿真

为验证本文所提新型电流量值差动保护判据的有效性,基于PSCAD/EMTDC,搭建如图1所示的10 kV有源配电网模型。其中,线路AM、MN、NO、AP、PQ的长度分别为2、8、4、4、6 km,线路单位正序阻抗均为 $0.14+j0.38 \Omega/\text{km}$;DG为同步机型与逆变型2类,额定容量为 $1.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$;负荷 L_1 、 L_3 、 L_4 为 $1.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$,功率因数为0.85;不可测分支 L_{ub} 位于线路MN中点; $K_{rel}=1.2$, $K_{st}=1$, $K_{np}=1$ 。

3.1 区外故障场景

以线路MN为例,分别在其区外上、下游出口 f_1 、 f_4 处设置故障程度最为严重的三相金属性短路故障,考察式(14)所示判据在区外故障场景下的动作安全性。

3.1.1 区外上游故障场景

令不可测分支容量 S_{Lub} 与其下游负荷 L_2 容量 S_{Ld2} 的总和保持一定,即 $S_{Lub}+S_{Ld2}=3 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。当线路MN区外上游出口 f_1 处发生三相金属性短路故障时,改变不可测分支 L_{ub} 接入容量 S_{Lub} 的占比 $r=S_{Lub}/(S_{Lub}+S_{Ld2})$,故障后流经线路MN两侧电流正序分量的幅值以及判据(14)的动作情况如表1所示。

表1 区外上游故障时幅值差动保护动作情况

Table 1 Operation of amplitude differential criterion under external upstream faults

DG	$r/\%$	I'_{M1}/kA	I'_{N1}/kA	I_d/kA	I_r/kA	动作情况
同步机型	0	1.498	1.498	0	0.180	×
	20	1.497	1.515	0.018	0.215	×
	40	1.497	1.532	0.035	0.242	×
	60	1.495	1.549	0.054	0.251	×
	80	1.494	1.567	0.073	0.243	×
	100	1.494	1.584	0.090	0.228	×
逆变型	0	0.125	0.125	0	0.015	×
	20	0.126	0.127	0.001	0.045	×
	40	0.128	0.130	0.002	0.072	×
	60	0.128	0.131	0.003	0.082	×
	80	0.130	0.134	0.004	0.070	×
	100	0.132	0.137	0.005	0.045	×

注:“√”表示“动作”,“×”表示“不动作”,后同。

由表1可知,当线路MN区外上游发生三相金属性短路时,流经线路MN两侧的短路电流 I'_{M1} 、 I'_{N1} 基本由接于母线N的DG提供。由于逆变型DG存在

故障限流控制,而同步机型DG没有此类限制,所以在同步机型DG接入场景下,流经线路MN两侧的电流将明显大于逆变型DG接入场景。但是,无论是同步机型DG还是逆变型DG,在不同的不可测分支接入容量下,动作量 I_d 始终小于制动量 I_r ,故判据式(14)均可靠不误动。

3.1.2 区外下游故障场景

当线路MN区外下游出口 f_4 处发生三相金属性短路故障时,与3.1.1节类似,遍历不可测分支 L_{ub} 接入容量,可以得到判据式(14)的动作情况如表2所示。

表2 区外下游故障时幅值差动保护动作情况

Table 2 Operation of amplitude differential criterion under external downstream faults

DG	$r/\%$	I'_{M1}/kA	I'_{N1}/kA	I_d/kA	I_r/kA	动作情况
同步机型	0	1.333	1.333	0	1.160	×
	20	1.339	1.322	0.017	0.193	×
	40	1.345	1.312	0.033	0.220	×
	60	1.351	1.301	0.050	0.228	×
	80	1.357	1.291	0.066	0.218	×
	100	1.363	1.281	0.082	0.202	×
逆变型	0	1.349	1.349	0	0.162	×
	20	1.355	1.339	0.016	0.193	×
	40	1.361	1.329	0.032	0.219	×
	60	1.367	1.319	0.048	0.230	×
	80	1.373	1.309	0.064	0.219	×
	100	1.379	1.300	0.079	0.194	×

表2呈现的规律与表1基本一致,即对于区外下游故障,不论不可测分支 L_{ub} 接入容量如何,判据式(14)的动作量 I_d 始终小于其制动量 I_r ,并未因 L_{ub} 分流而发生误动。此时,流经线路MN两侧的电流基本由系统电源提供,2种DG接入场景的差异不大。

3.2 区内故障场景

在线路MN区内 f_3 处(线路MN区内不可测分支 L_{ub} 与母线N之间的中点)设置短路故障,考察式(14)所示判据在区内故障场景下的动作灵敏性。

3.2.1 区内不同故障类型下的适应性

以不可测分支 L_{ub} 空载($S_{Lub}=0$ 、 $S_{Ld2}=3 \text{ MV}\cdot\text{A}$)、满载($S_{Lub}=3 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 、 $S_{Ld2}=0$)2种工况为例,在区内 f_3 处发生金属性短路故障期间,线路MN两侧电流正序分量的幅值以及判据式(14)的动作情况如表3所示。

由表3可知,发生区内金属性短路故障时,两侧系统均会向故障点馈送短路电流。由于故障点 f_3 至DG接入处(母线N)的电气距离相对较短,同步机型DG的故障馈流相对较强,因此可能出现流经线路MN首端M侧(由系统电源提供)的短路电流 I'_{M1} 小于N侧(由DG提供)的短路电流 I'_{N1} 的情况;相比之下,逆变型DG提供的短路电流由于限流控制远小于系

表3 区内不同类型故障下幅值差动保护动作情况
Table 3 Operation of amplitude differential criterion under various types of internal faults

DG	$S_{Lub}/$ (MV·A)	故障 类型	$I'_{M1}/$ kA	$I'_{N1}/$ kA	$I_d/$ kA	$I_r/$ kA	动作 情况
同步 机型	0	相间	2.000	2.966	0.966	0.356	√
		三相	1.655	3.748	2.093	0.450	√
	3	相间	1.129	2.000	0.871	0.278	√
		三相	1.667	3.837	2.170	0.498	√
逆变型	0	相间	0.874	0.053	0.821	0.105	√
		三相	1.650	0.134	1.516	0.198	√
	3	相间	0.886	0.134	0.752	0.135	√
		三相	1.662	0.137	1.525	0.228	√

统电源。这再次印证了逆变型DG的故障馈流特性与同步机型DG的差异。但是,从最终的动作结果来看,在以上2种DG接入场景下,式(14)所示判据均能满足 $I_d \geq I_r$ 而可靠动作。

3.2.2 不同过渡电阻的区内故障下的适应性

以区内 f_3 处相间短路故障为例,当过渡电阻逐渐增大时,故障期间线路MN两侧电流的幅值以及判据(14)的动作情况,如表4所示。

表4 不同过渡电阻的区内故障下幅值差动保护动作情况

Table 4 Operation of amplitude differential criterion under internal faults with various transition resistances

DG	$S_{Lub}/$ (MV·A)	$Z_F/$ Ω	$I'_{M1}/$ kA	$I'_{N1}/$ kA	$I_d/$ kA	$I_r/$ kA	动作 情况
同步 机型	0	0	2.000	2.966	0.966	0.356	√
		10	0.575	0.196	0.379	0.069	√
		20	0.334	0.080	0.254	0.040	√
		50	0.180	0.068	0.112	0.022	√
		80	0.141	0.073	0.068	0.017	√
	3	100	0.128	0.075	0.053	0.015	√
		0	1.129	2.000	0.871	0.278	√
		10	0.560	0.237	0.323	0.105	√
		20	0.329	0.125	0.204	0.077	√
		50	0.190	0.091	0.099	0.061	√
逆变型	0	80	0.160	0.088	0.072	0.057	√
		100	0.152	0.089	0.063	0.056	√
	3	0	0.874	0.053	0.821	0.105	√
		10	0.499	0.106	0.393	0.060	√
		20	0.340	0.120	0.220	0.041	√
		50	0.212	0.133	0.079	0.025	√
		80	0.178	0.131	0.047	0.021	√
	3	100	0.167	0.131	0.036	0.020	√
		0	0.886	0.134	0.752	0.135	√
		10	0.508	0.098	0.410	0.090	√
		20	0.336	0.095	0.241	0.069	√
		50	0.201	0.089	0.112	0.053	√
		80	0.165	0.088	0.077	0.049	√
		100	0.154	0.088	0.066	0.037	√

从表4中的数据可知,随着过渡电阻的增大,故障后线路MN两侧电流的幅值之差 I_d 呈现减小的趋势,这与图C1中基于公式推导得出的基本规律一

致,对于过渡电阻达到 $100\ \Omega$ 的轻微故障均有 $I_d \geq I_r$ 成立,即式(14)所示判据能够灵敏动作。

进一步地,仍以区内 f_3 处相间短路故障为例,当不可测分支 L_{ub} 的容量 $S_{Lub}=3\text{ MV}\cdot\text{A}$ (满载)时,遍历下游负荷 L_2 的容量($0\sim 1\text{ MV}\cdot\text{A}$),探究本文所提判据的耐受过渡电阻极限,结果如图6所示。

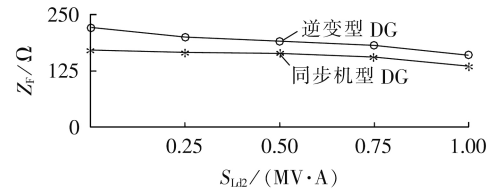


图6 不同负载工况下幅值差动保护耐受过渡电阻极限

Fig.6 Transition resistance tolerance limitation of amplitude differential criterion under various load conditions

由图6可知,随着故障线路下游负荷容量的增大,本文所提判据的耐受过渡电阻性能总体呈现下降趋势。这一变化趋势主要与判据制动量的构成有关,下游负荷容量越大,故障前两侧电流的幅值之差越大,相应的制动量越大,越不利于判据动作。

综上所述,对于不同的DG类型,在不同的负载工况下,本文所提电流幅值差动保护判据可避免因不可测分支分流效应诱发判据误动风险,同时其区内故障耐受过渡电阻的极限仍可达到 $100\ \Omega$ 以上。

4 结论

本文通过引入故障前后被保护线路两侧电流的幅值之差,分别构成新型电流幅值差动保护的制动量和动作量,有效克服了常规电流幅值差动保护因不可测分支的分流效应而潜在的区外故障误动风险,并且在区内故障场景下也具备较为优越的动作灵敏性。但也应当承认,目前研究仍不充分。如何设计性能更为完备的电流幅值差动保护判据,将在今后进一步的研究工作中予以重点关注。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 马静,刘静. 基于故障稳态分量的含DG配电网自适应方向电流保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 1-9.
MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 1-9.
- [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] BARAN M E, EL-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on

- Power Systems, 2005, 20(4):1757-1764.
- [4] 陈晓龙,李永丽,孙景钊. 基于状态量信息的含分布式电源配电网保护新方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 141-145, 160.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, SUN Jingliao. Novel protection scheme based on status information for distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 141-145, 160.
- [5] 吴大立,尹项根,张哲,等. 输电线路复合差动保护方案[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 87-91.
WU Dali, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Research on multi-differential protection scheme for transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 87-91.
- [6] 王利平,王伟,陈军,等. 串联补偿输电线路稳态电流差动保护改进算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 98-103.
WANG Liping, WANG Wei, CHEN Jun, et al. Improvement algorithm for current differential protection using steady currents for series compensated transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 98-103.
- [7] 章桢,陆于平,李然. 基于“充分式”电流综合比幅判据的含DG配网保护[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3495-3501.
ZHANG Zhen, LU Yuping, LI Ran. Protection for distribution network containing distributed generations based on sufficient synthetic criterion of current amplitude comparison[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3495-3501.
- [8] 许偲轩,陆于平,章桢,等. 分布式发电配电网新型充分式保护原理及方案[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2532-2537.
XU Sixuan, LU Yuping, ZHANG Zhen, et al. Principle and implementation of a novel sufficient criterion protection for distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2532-2537.
- [9] 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, 155.
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, 155.
- [10] 和敬涵,李文立,张大海,等. 基于节点分支电流幅值的含DG配网差动保护原理[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 1-9.
HE Jinghan, LI Wenli, ZHANG Dahai, et al. Differential protection scheme based on current amplitude of branch node for distribution network with DG[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 1-9.
- [11] 高厚磊,李娟,朱国防,等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 40-44.
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.
- [12] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [13] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 184-192.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Key issues of fault analysis on distribution system with high-density distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 184-192.
- [14] 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): 110-119.
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): 110-119.

作者简介:



张雪松

张雪松(1979—),男,河北遵化人,教授级高级工程师,博士,研究方向为分布式电源和微电网控制与保护(E-mail: ee_zxs@163.com);

马 啸(1995—),男,湖南邵阳人,博士研究生,通信作者,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 1815708181@qq.com);

章雷其(1989—),男,浙江诸暨人,工程师,博士,研究方向为分布式发电与储能技术(E-mail: y_delta@163.com)。

(编辑 任思思)

Novel current amplitude differential protection criterion for line with unmeasurable branch in active distribution network

ZHANG Xuesong¹, MA Xiao², ZHANG Leiqi¹, WANG Zixuan², LIN Xiangning², LI Zhengtian²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The operation performance of current amplitude differential protection is affected by the unmeasurable branches and other practical engineering factors. For this reason, the characteristics of the amplitude difference of the currents on both sides of the active distribution network with unmeasurable branches under normal operation and different fault scenarios in and out of the area are analyzed. On this basis, a new type of current amplitude differential protection criterion is proposed by using the amplitude difference of the positive sequence component of the current on both sides of the protected line before and after the fault to constitute the braking amount and action amount respectively. Simulative results show that the proposed criterion can adapt to different unmeasurable branch access capacities.

Key words: active distribution network; distributed power generation; weak synchronous system; current amplitude differential protection; unmeasurable branch

附录 A

如图 4 所示，在系统正常运行期间，IIDG 外侧系统等效电势 E_{ST} 、内阻 Z_{ST} 分别为：

$$E_{ST} = E_S \frac{Z_B}{Z_S + 0.5Z_L + Z_B} \frac{Z_{Load}}{(Z_S + 0.5Z_L) // Z_B + 0.5Z_L + Z_{Load}} \quad (A1)$$

$$Z_{ST} = [(Z_S + 0.5Z_L) // Z_B + 0.5Z_L] // Z_{Load} \quad (A2)$$

其中， Z_{load} 为被保护线路下游负荷的等值阻抗。

附录 B

对于图 5 所示的复合序网，基于正序等效原则和戴维南等效定理，可以进行逐步化简，如图 B1 所示。

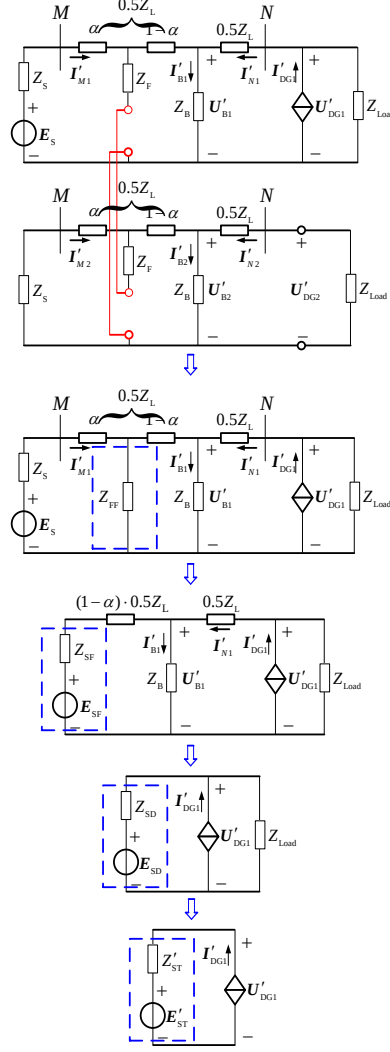


图 B1 IIDG 接入场景下故障后线路 MN 等值电路

Fig.B1 Equivalent circuit of MN with IIDG after fault

由图 B1 的化简过程，可依次得到：

$$Z_{FF} = 2Z_F + (Z_S + \alpha \cdot 0.5Z_L) // [(1 - \alpha) \cdot 0.5Z_L + Z_B // (0.5Z_L + Z_{Load})] \quad (B1)$$

$$E_{SF} = E_S \frac{Z_{FF}}{Z_S + \alpha \cdot 0.5Z_L + Z_{FF}} \quad (B2)$$

$$Z_{SF} = (Z_S + \alpha \cdot 0.5Z_L) // Z_{FF} \quad (B3)$$

$$E_{SD} = E_{SF} \frac{Z_B}{Z_{SF} + (1 - \alpha) \cdot 0.5Z_L + Z_B} \quad (B4)$$

$$Z_{SD} = [Z_{SF} + (1 - \alpha) \cdot 0.5Z_L] // Z_B + 0.5Z_L \quad (B5)$$

$$E'_{ST} = E_{SD} \frac{Z_{Load}}{Z_{Load} + Z_{SD}} \quad (B6)$$

$$Z'_{ST} = Z_{SD} // Z_{Load} \quad (B7)$$

附录 C

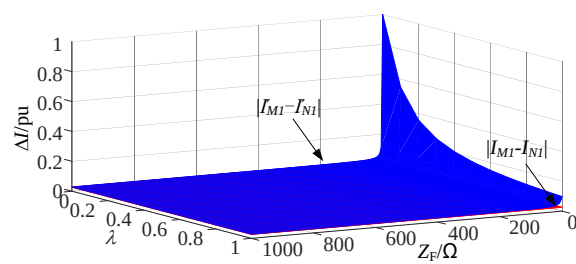


图 C1 不同区内故障前后线路 MN 两侧电流幅值之差的变化趋势

Fig.C1 Current amplitude differences of MN before and after various internal faults