

基于故障超前相的有源配电网能量方向纵联保护方法

徐 萌¹, 邹贵彬¹, 陈 宁², 张 健², 马玉伟¹

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. 国网山东省电力公司枣庄供电公司, 山东 枣庄 277100)

摘要: 基于不同故障类型下各故障相能量函数的特征分析, 提出了一种适用于有源配电网的能量方向纵联保护方法。针对配电网中性点非有效接地的网络特点, 建立了基于故障超前相的故障识别判据, 并构造了能量函数幅值辅助判据以克服区内分支负荷投切对故障判别的影响; 研究了基于正序分量控制的逆变型分布式电源接入配电网情形下所提保护原理的适应性。仿真结果表明, 所提保护方法能够正确识别故障方向, 并能躲过负荷投切的影响, 且具有一定的抗过渡电阻的能力。

关键词: 有源配电网; 分布式电源; 超前相; 能量函数; 故障分量; 方向纵联保护; 电力系统保护

中图分类号: TM 771

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.010

0 引言

分布式电源 DG (Distributed Generator) 接入配电网改变了原有系统中故障电流的分布情况^[1-2]。基于单端信息的保护原理已很难满足选择性的要求, 在 DG 接入点的上游侧加装断路器和保护装置, 与首端保护形成纵联保护, 使保护能够从两侧切除故障线路段^[3], 已成为国内外许多学者的普遍共识。文献[4-5]考虑 DG 的较低渗透率及逆变型 DG 的输出电流限制, 利用故障线路两侧电流幅值差异, 构造了新型纵联保护方案。文献[6-8]利用区内外故障前后电流相位突变方向的不同, 构造方向纵联保护方案, 但保护的灵敏度受负荷支路的影响。文献[9-10]利用正序故障分量的方法构造出适用于有源配电网的方向元件。文献[11]将基于正序故障分量的电流差动保护原理引入有源配电网, 但对故障信息的同步性有较高的要求。

能量方向纵联保护原理利用故障后一定时间内线路两侧故障分量能量函数的方向性, 正确区分区内外故障, 现已成功应用于高压输电网中^[12]。而有源配电网具有中性点非有效接地、分支负荷投切频繁、接入电源种类多样等网络特点, 原有能量方向保护原理并不能直接适用于有源配电网。本文从能量函数的构造原理入手, 研究不同故障类型下各故障相能量函数正负极性的特征, 提出了适用于有源配电网的基于故障超前相的改进能量方向纵联保护方案。

收稿日期: 2016-05-28; 修回日期: 2016-11-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012-AA050213); 山东省重点研发计划资助项目(2015GGX101011) Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA-050213) and Shandong Province Key Research Project(2015-GGX101011)

1 有源配电网故障分量能量函数特征分析

图 1 为一个典型的有源配电网结构, 图中 A—E 为负荷分支或 DG 分支, f_1 — f_3 为故障点, 为了从故障两侧切除故障, 在变电站出口母线与 DG₁ 之间、2 个 DG 之间线路段两端均安装断路器, 如图中 CB₁—CB₄ 所示, 并分别配置能量方向保护 1—4。变电站出口母线与各 DG 并网点均安装有电压互感器(TV)和电流互感器(TA)。

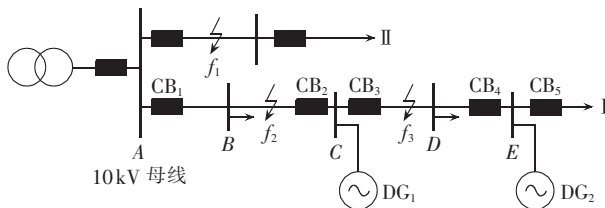


图 1 有源配电网结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of active distribution network

定义保护安装处能量函数 E' 为故障分量电压与电流乘积的积分^[12], 如式(1)所示。

$$E' = \int_0^{T/2} \Delta u \Delta i dt \quad (1)$$

其中, Δu 和 Δi 分别为故障分量电压和电流的瞬时值; 积分时间为故障后半半个工频周期 T 。

故障分量包含了系统短路引起的工频故障分量 Δu_1 、 Δi_1 以及衰减的暂态分量 Δu_{tr} 、 Δi_{tr} 。由于中低压配电网 R/X 值较大, 忽略衰减的暂态分量。设 γ 为工频故障分量电压与电流的相角差, 将式(1)化简得:

$$E' = \int_0^{T/2} \Delta u_1 \Delta i_1 dt = \frac{1}{2} \Delta U_1 \Delta I_1 \int_0^{T/2} \cos \gamma dt \quad (2)$$

其中, ΔU_1 、 ΔI_1 分别为工频故障分量电压与电流的幅值, 两者均为正值, 则故障分量能量函数的正负极性仅由两者相角差 γ 决定。若 γ 在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 区间

内,则能量函数为正;若在区间 $(-\pi,-\pi/2)$ 或 $(\pi/2,\pi)$ 内,则能量函数为负。因此,研究工频故障分量电压与电流的相位关系,即可得到不同故障类型下各故障相能量函数的正负极性。

配电网中性点非有效接地,发生单相接地故障时,故障电流较小,保护难以检测出故障状态,一般配置小电流接地选线装置进行故障线路的选择。以下能量函数特征的分析不考虑单相接地故障类型,仅讨论相间故障及两相接地故障的情况,以构造适用于有源配电网的能量方向纵联保护方案。

1.1 两相相间短路故障

两相相间短路时故障点处两故障相的电压大小相等、相位相同,幅值为非故障相电压的一半,相位与非故障相电压相反。假设发生 bc 相间短路故障,图 2 所示为故障点处电压相量图。

图 2 中, U_a 、 U_b 、 U_c 为短路前故障点各相电压相量; U_{ka} 、 U_{kb} 、 U_{kc} 为短路后故障点各相电压相量; ΔU_b 、 ΔU_c 为两故障相的工频故障分量电压。中性点的电位不受相间故障的影响,仍为零电位,则两故障相彼此独立,可得:

$$\begin{cases} \Delta U_b = -\Delta U_c \\ \Delta U_a = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将中性点 N 与故障附加电源零电位相连,图 3(a) 和(b)分别显示了图 1 中线路段 AC 区内点 f_2 发生故障与区外点 f_3 发生故障时 b 相工频分量下的

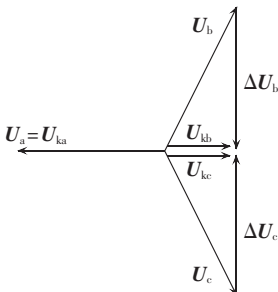


图 2 两相相间短路故障点电压相量图
Fig.2 Voltage phasor diagram of inter-phase short circuit fault

故障附加电路。c 相附加电路与之相似,仅故障点处附加电源不同。为了方便分析,暂不考虑负荷分支的影响。图 3 中, Z_{S1} 为系统侧等值阻抗; Z_{S2} 为保护 2 背侧至系统中性点 N' 的等值阻抗; Z_{DG1} 为 DG_1 的等值阻抗; ΔU_{m1} 、 ΔI_{m1} 与 ΔU_{m2} 、 ΔI_{m2} 分别为保护 1 与保护 2 处工频故障分量电压与电流; Z_{AC} 、 Z_{AC1} 与 Z_{AC2} 分别为线路段 AC 、线路段 AC 首端至故障点 f_2 、故障点 f_2 至线路段 AC 末端的线路阻抗; Z_{CE1} 为线路段 CE 首端至故障点 f_3 的线路阻抗。

规定电流的正方向为各保护安装处指向被保护馈线的方向,若保护安装处故障分量电流方向与规定的正方向相同,则故障分量电压与电流相角差 γ 等值于保护安装处相对于故障点的背侧阻抗角 φ ;若相反,则为 $\varphi - \pi$ 。表 1 为区内点 f_2 发生故障与区外点 f_3 发生故障时保护 1 与 2 处故障分量电压与电流的相角差。

表 1 区内外故障时故障分量电压与电流的相角差 γ

Table 1 Phase-angle difference between voltage and current of fault component for in-zone and out-zone faults

故障情况	相角差	
	保护 1(CB ₁ 处)	保护 2(CB ₂ 处)
区内 f_2 点发生故障	$\varphi_{Z_{S1}} - \pi$	$\varphi_{Z_{S2}} - \pi$
区外 f_3 点发生故障	$\varphi_{Z_{S1}} - \pi$	$\varphi_{Z_{S2}}$

注: $Z_2 = Z_{S1} + Z_{AC}$ 为区外点 f_3 发生故障时保护 2 相对于故障点的背侧阻抗。

由于各背侧阻抗角均满足 $\varphi < \pi/2$,所以在区内点 f_2 发生故障时保护 1 与保护 2 处能量函数均为负;区外点 f_3 发生故障时,距离故障点远端的保护 1 的能量函数为负,近端的保护 2 的能量函数为正。

1.2 两相接地短路故障

图 4 所示为发生 bc 两相接地故障时的电压相量图。当系统中性点不接地时,发生两相接地故障后故障点处故障相电压变为零,非故障相电压抬高为电源电压的 1.5 倍,中性点的电压幅值变为正常运行时非故障相电压幅值的一半,可看作故障发生后在中性点处附加了一个电源。对于我国大量应用的中性点经消弧线圈接地配电系统,由于线圈阻抗远大于线路阻抗,线圈分压作用明显,中性点电压略小于不接地系统的中性点电压值。由图 4 可以看出,两故障相故障分量的电压幅值相等,b 相故障分量电压仍超前于 c 相 120° ,则有:

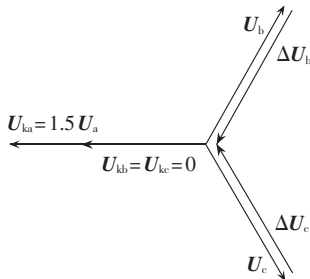
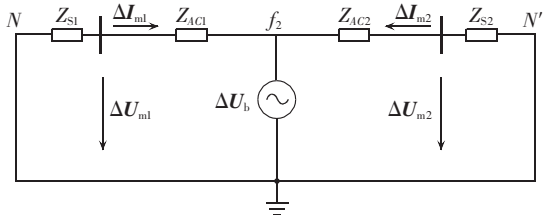
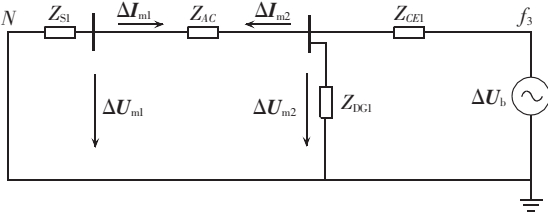


图 4 两相接地短路故障点的电压相量图
Fig.4 Voltage phasor diagram of dual-phase grounding fault



(a) 区内故障附加电路(故障点 f_2)



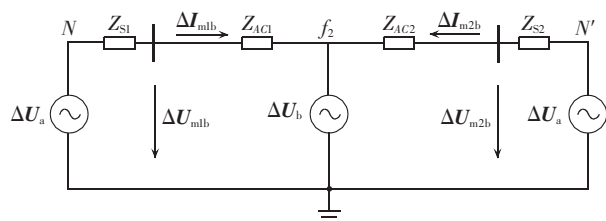
(b) 区外故障附加电路(故障点 f_3)

图 3 两相相间短路故障的附加电路图

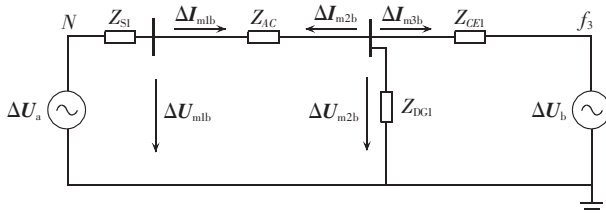
Fig.3 Additional circuits of inter-phase short circuit fault

$$\begin{cases} \Delta U_b = -U_b \\ \Delta U_c = -U_c \\ \Delta U_a = 0.5 U_a \end{cases} \quad (4)$$

图 5 为图 1 中线路段 AC 分别发生区内点 f_2 故障与区外点 f_3 故障时 b 相工频分量下的故障附加电路。c 相附加电路与之相似,仅故障点处附加电源不同。下面以保护 1 为例分析区内点 f_2 发生两相接地短路故障时的能量函数极性规律。



(a) 区内故障附加电路 (故障点 f_2)



(b) 区外故障附加电路 (故障点 f_3)

图 5 两相接地短路故障附加电路图

Fig.5 Additional circuits of dual phase grounding fault

按图中所示电流正方向, bc 两相接地故障附加电路中故障点 f_2 至系统中性点 N 间的阻抗 $Z_1 = Z_{S1} + Z_{AC1}$, 压降为 $\Delta U_{Z1i} = \Delta U_a - \Delta U_i$ ($i = b, c$), 相量关系如图 6(a) 所示。由图 6(a) 及相量关系 $\Delta U_{Z1i} = Z_1 \Delta I_{mi}$ ($i = b, c$) 可得:

$$\begin{cases} \Delta U_{Z1b} = -\Delta U_{Z1c} \\ \Delta I_{mlb} = -\Delta I_{mlc} \end{cases} \quad (5)$$

即流过保护 1 处的两故障相工频故障分量电流幅值相等、方向相反。设 Z_{AC1} 的线路阻抗角为 θ , 系统阻抗 Z_{S1} 的阻抗角为 δ , 分析保护 1 处工频故障分量电压与电流的相位关系如图 6 所示。

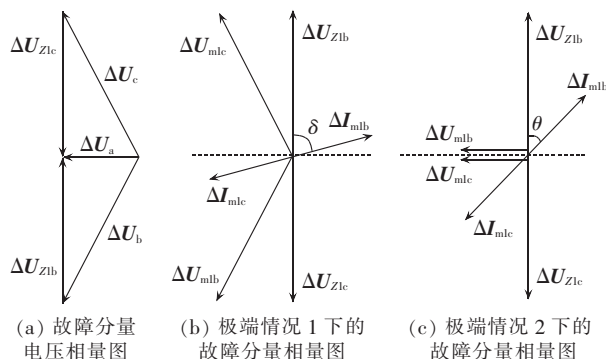


图 6 两相接地短路故障分量相量图

Fig.6 Fault component phasor diagrams of dual phase grounding fault

图 6(b)、(c) 表示发生区内故障时 2 种极端情况下保护 1 处工频故障分量电压与电流的相位关系, 其他情况的相位关系介于此两者之间。

图 6(b) 为假定保护 1 出口处发生 bc 两相接地短路故障, 则保护 1 处的故障分量电压与附加电源相同, 即保护 1 处 b 相故障分量电压超前 c 相 120° 。故障分量电流滞后于 ΔU_{Z1} 的相位仅由系统阻抗角 δ 决定。因此 b 相、c 相故障分量电压与电流的相角差 γ_b, γ_c 为:

$$\begin{cases} \gamma_b = \delta - 7\pi/6 \\ \gamma_c = \delta - 5\pi/6 \end{cases} \quad (6)$$

由于 δ 在 $(0, \pi/2)$ 区间内, 则 γ_b 的取值范围为 $(-7\pi/6, -2\pi/3)$, γ_c 的取值范围为 $(-5\pi/6, -\pi/3)$, 因而 $\cos \gamma_b$ 恒为负, 但 $\cos \gamma_c$ 可能为负, 也可能为正。

图 6(c) 为假定故障发生在保护 1 的远端, 此时忽略系统阻抗 Z_{S1} , 那么在保护 1 处两故障相的故障分量电压近似等于中性点处故障附加电源。故障分量电流滞后于 ΔU_{Z1} 的相位由线路阻抗 Z_{AC1} 决定。b 相、c 相故障分量电压与电流相角差 γ_b, γ_c 为:

$$\begin{cases} \gamma_b = \theta + \pi/2 \\ \gamma_c = \theta - \pi/2 \end{cases} \quad (7)$$

容易得到, $\cos \gamma_b$ 为负, 而 $\cos \gamma_c$ 为正。也即发生区内故障时, 保护安装处两故障相中仅超前相 b 相的能量函数可靠为负, 而 c 相能量函数的正负不定。

以保护 2 为例对图 5(b) 所示区外故障情形进行分析。由于 DG_1 支路作为并联支路, 并不会影响保护 2 处故障分量电压与电流的相位关系, 其仍由保护 2 相对于故障点的背侧阻抗决定。由于附加电源产生的电流与保护 2 处电流正方向一致, 将图 6(b)、(c) 中的 bc 两相故障分量电流互换即可得到此故障下的相量关系图。类似地, b 相 $\cos \gamma_b$ 恒为正, 而 c 相 $\cos \gamma_c$ 仍正负不定。

因此, 在发生 bc 两相接地故障时, 仅 b 相能量函数的极性特征能够正确区分区内外故障。由此引入故障超前相的概念; 在确定了故障相后, 若故障为两相故障, 按照三相正相序排列顺序, 相位超前 120° 的一相为故障超前相, 即 ab、bc、ca 两相故障时的超前相分别为 a 相、b 相、c 相; 若故障为三相故障, 则 a 相为故障超前相。

1.3 三相短路故障

三相短路故障与两相相间短路故障类型相似, 在故障发生后, 故障点电位变为零, 故障前后中性点保持在零电位, 三相的故障分量变化相互独立。各相工频分量电压和电流变化规律相同, 仅在相位存在 120° 的差别。在各保护处的三相能量函数仅因暂态分量的不同其幅值略有差异, 但最终判别结果一致。

综合以上相间故障及两相接地故障的情况, 可

以看出故障相中仅超前相能够保证任何故障类型下能量方向判别的正确性。发生区内故障时,线路两侧保护超前相的能量函数值均为负;发生区外故障时,距离故障点近端保护超前相的能量函数为正,远端保护超前相的能量函数为负。

2 基于故障超前相的能量方向纵联保护方法

设被保护馈线两端分别为 O 端与 P 端,根据上述不同故障类型下故障超前相能量方向的特征分析,可以得到基于故障超前相的能量纵联保护方法。

故障发生后,两端保护首先经选相元件确定故障超前相,计算本地故障超前相能量函数的正负极性。在微机保护中,离散化的能量函数计算方法为:

$$E'(J) = \frac{T}{S} \sum_{k=0}^J \Delta u(k) \Delta i(k) \quad (8)$$

其中, $\Delta u(k)$ 、 $\Delta i(k)$ 分别为故障超前相第 k 个故障分量电压和电流的采样值; S 为每周周期采样点数; J 为积分窗口时间内的点数,则一个能量周期采样点个数为 $S/2$ 。

综合两端能量函数极性特征,设两侧离散化的能量函数分别为 E'_O 与 E'_P ,若满足如式(9)所示保护判据,则判别为区内故障,保护动作;否则,保护不动作。

$$\begin{cases} E'_O(S/2) < 0 \\ E'_P(S/2) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

基于故障超前相的能量方向纵联保护方案相比于电流差动、相位比较等纵联保护方案具有明显的优势。(1)采用故障分量能量函数的方法,有效解决了小电源引起的弱馈问题。虽然具有弱馈特点的 DG 产生的故障分量电流较小,在幅值上难以与正常运行状态下的负荷电流进行区分,但是能量函数作为故障分量电压与电流乘积的积分,故障后电压跌落可产生较大的故障分量电压,且经积分运算的累积作用,进一步改善了逆变型 DG 的弱馈特性对保护性能的影响。(2)能量函数取故障相相分量的瞬时值,无需提取工频量、序分量,省去了计算延时,仅通过半个工频周期的积分计算即可判断出故障方向。(3)保护装置只需将本地能量正负极性判定结果传送至对端,降低了对数据传输的要求。

然而,配电网在许多方面都具有不同于高压输电系统的典型特征,比如负荷分支分散接入且投切频繁,接入 DG 的种类多样。这些特征将直接影响保护的动作性能,因此有必要进一步研究所提保护原理在有源配电网中的适应性及改进方法。

2.1 负荷分支瞬时投切对保护的影响及解决措施

虽然能量函数极性与保护安装处背侧系统有关,受保护间负荷分支的影响较小,但是大负荷瞬时

投切相当于在负荷支路接入点瞬间加了一个与原负荷支路等大反向的附加电流源,线路两侧能量函数特征可能与故障时相似,从而造成保护误判。对此,可以通过增加能量函数的幅值门槛以消除纵联保护区内负荷变化的影响。定义幅值辅助判据如下:

$$\begin{cases} E_M > k_1 E_L \\ E_M = \max \{ |E'(0)|, |E'(1)|, \dots, |E'(J-1)| \} \end{cases} \quad (10)$$

其中, E_L 为被保护馈线区段内负荷变化最大时的幅值门槛; k_1 为可靠系数,取 1.2~1.3; E_M 为故障开始到第 $J-1$ 个采样点之间的能量函数绝对值的最大值。幅值门槛的确定方法如下:

$$\Delta I_{\max} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3} U} \quad (11)$$

$$E_L = \Delta I_{\max}^2 Z \quad (12)$$

其中, $\Delta I_{\max}$ 为最大分支负荷电流; $S_{\max}$ 为馈线安装方向纵联保护的某区段内最大负荷容量; U 为线路额定线电压; Z 为保护安装处相对于负荷接入点背侧的等值阻抗。

2.2 逆变型 DG 故障特性对保护的影响及解决措施

在第 1 节分析中仅考虑了传统旋转型 DG 接入情况,而光伏、燃气轮机等逆变型 DG 的故障输出特性受内部控制策略的影响,在故障分析时不能简单地将其按传统旋转型 DG 等值^[13]。在众多控制策略中,由于正序分量控制能够有效改善逆变型 DG 的输出特性,已成为国内常用的控制策略^[14]。正序分量控制策略采用并网点正序电压作为参考,在不对称电压跌落情况下,仍只输出正序电流。因此在故障附加网络中,可将逆变型 DG 等值为三相对称的附加电流源,相值为故障前后输出电流的变化量。同时,逆变型 DG 滤除了并网点电压负序分量在功率中产生的倍频分量,可以认为逆变型 DG 输出功率为正序分量电压与短路电流的乘积。

若图 1 所示有源配电网中 DG_1 与 DG_2 均为正序分量控制的逆变型 DG,图 7 为点 f_3 发生 bc 相间短路故障的故障附加电路图。图中, Z_2 与 Z_{S5} 分别为保护 2 与保护 5 相对于故障点 f_3 的背侧等值阻抗; ΔI_{DG1} 与 ΔI_{DG2} 为逆变型 DG 的附加电流源; Z_{CE1} 与 Z_{CE2} 分别为线路段 CE 首端至故障点 f_3 、故障点 f_3 至线路段 CE 末端的线路阻抗。

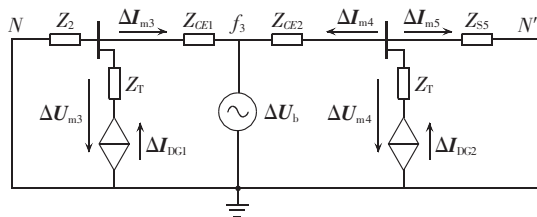


图 7 点 f_3 发生 bc 相间短路故障时 b 相的附加电路图
Fig.7 Additional circuit of b-c inter-phase short circuit fault at f_3 for Phase-b

以保护 4 为例对能量函数正负极性进行分析。根据电路正方向的设置,保护 4 处故障分量电压与电流相量关系为 $\Delta U_{m4}/\Delta I_{m4}=(\Delta I_{DG2}/\Delta I_{m4}-1)Z_{S5}$ 。可以看出,保护 4 安装处故障分量电压和电流的相角差不仅由保护背侧 Z_{S5} 决定,也与逆变型 DG 提供的故障分量电流有关。

若下游负荷需求较大,即 Z_{S5} 较小,可认为故障附加电源产生的流向下流的故障分量电流仍远大于 ΔI_{DG2} ,此时可忽略 ΔI_{DG2} ,则 $\Delta U_{m2}/\Delta I_{m2}\approx -Z_{S2}$,能量函数为负。

若下游负荷需求较小,即 Z_{S5} 较大,则认为流过保护 4 的故障电流完全由 DG_2 提供, DG_2 并网点处各相故障分量电压与电流的相位关系即决定了保护 4 能量函数的正负极性。

由于馈线路段较短,可认为故障发生在 DG_2 并网点处以简化分析。根据 DG_2 外部配电系统各序网络电路方程,同时考虑故障点相间过渡电阻的影响,得到并网点正序电压分量随过渡电阻从零至无穷大的变化半圆轨迹,如图 8 所示。半圆与非故障相 a 相的左右交点分别为过渡电阻为零与无穷大时对应的并网点正序电压分量。

根据各序电压的幅值与相位关系,可以进一步得到故障状态下各相电压相量,从而得到各相故障分量电压。而 DG_2 向故障点提供的故障电流与故障分量电流,需通过 DG_2 内部的具体功率控制目标计算获得。

(1)若逆变型 DG 不具备在系统发生故障时提供无功支持的能力,即在故障前后有功、无功输出保持不变,由于正常运行情况下 DG 往往以单位功率因数并网,可认为无功功率在故障情况下仍为零。同时由于短路电流为三相对称电流,因而各相短路电流与正序电压分量同向,由此得到各相故障电流与故障分量电流。根据各相故障分量电压与电流的相位关系,即可计算出逆变型 DG 出口处能量函数的正负极性。同样地,可对两相接地短路故障情形进行分析。

由于相间短路过渡电阻以弧光电阻为主,与电压等级成正比,对于 10 kV 电压等级的配电网而言,相间过渡电阻较小,通过理论分析与仿真验证,能量

方向保护原理仍能正确判别故障方向。但对于两相接地短路故障而言,接地阻抗远大于弧光电阻,在接地阻抗较小时保护尚能可靠动作,但在阻抗较大时,保护原理将失效。受篇幅限制,详细推导不再赘述。

(2)若逆变型 DG 具备低电压穿越能力,能够在故障发生后根据并网点正序电压跌落程度提供不同大小的无功支持,则故障分量电压与电流的相角差 γ 将受过渡电阻、有功功率参考值、故障位置等因素的影响,其变化规律将更为复杂,难以保证保护的有效性^[15]。

因此,针对含逆变型 DG 的配电网需进一步研究能量方向纵联保护原理的改进方法。考虑到配电网对保护的速动性要求较低,允许少数故障在保护拒动的情况下,由后备保护切除,此项工作将在后续研究中逐步完善。

3 仿真分析

为验证所提保护原理的正确性,利用 PSCAD/EMTDC 搭建如图 1 所示的有源配电网仿真模型,系统阻抗为 0.14Ω ,基准电压为 10.5 kV;线路的正、负序阻抗均为 $0.17 + j 0.34 \Omega/\text{km}$,馈线 I 各段 AB、BC、CD、DE 以及馈线 II 的长度分别为 1.8 km、2.0 km、2.1 km、2.0 km、5.6 km。馈线 I 上的负荷总容量为 $8 \text{ MV}\cdot\text{A}$,功率因数为 0.9,分配于各母线,其中 B 处接入最大负荷,负荷容量为 $4.0 \text{ MV}\cdot\text{A}$;C 和 E 处分别接入双馈异步风力发电机组 DG_1 和具有低电压穿越能力、三相对称控制输出的光伏电站 DG_2 ,额定容量分别为 $2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 和 $4 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。保护 1—4 的幅值门槛值分别为 $0.08 \text{ kV}\cdot\text{A}\cdot\text{s}$ 、 $0.04 \text{ kV}\cdot\text{A}\cdot\text{s}$ 、 $0.05 \text{ kV}\cdot\text{A}\cdot\text{s}$ 、 $0.01 \text{ kV}\cdot\text{A}\cdot\text{s}$ 。

表 2 显示了不同故障情形下能量方向保护的判别结果,以及保护 1 与保护 2 处的故障超前相能量函数 E_1 与 E_2 值,其中括号中的相为微机保护装置识别出的超前相。

由表 2 可知,点 f_2 发生故障时,保护 1 与 2 的能量函数值均为负,保护正确识别为区内故障;而发生区外故障时,距离故障点近端保护的能量函数的幅值较大且极性为正,远端保护能量函数的幅值较小且极性为负,因而识别为区外故障。进一步地,接地故障情形下能量函数幅值明显大于相间故障情形,而在配电网中经大过渡电阻的短路故障多为接地故障,因而能量函数这一特征有利于提高接地故障时保护的灵敏度。

假定点 f_2 发生短路故障,逐渐增加过渡电阻并观察能量函数的取值变化,将其与区内最大负荷投切扰动下能量函数进行比较,如表 3 所示。

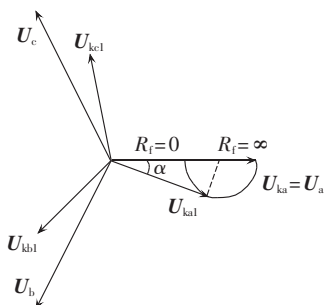


图 8 bc 两相经过渡电阻短路时并网点正序电压随过渡电阻的变化轨迹

Fig.8 Variation trajectory of PCC positive-sequence voltage along with transition resistance for b-c inter-phase short circuit with transition resistance

表 2 不同故障情形下的能量函数值
Table 2 Energy function values
in different fault conditions

运行 状态	故障 情形	$E_1/$ (kV·A·s)	$E_2/$ (kV·A·s)	判别 结果
DG ₁ 容量为 2 MV·A, DG ₂ 容量为 4 MV·A, 负荷容量为 8 MV·A	$f_1bc(b)$	0.165	-0.057	区外
	$f_1caG(c)$	0.654	-0.581	区外
	$f_1abc(a)$	0.242	-0.110	区外
	$f_2ab(a)$	-25.388	-24.728	区内
	$f_2bcG(b)$	-159.560	-41.432	区内
	$f_2abc(a)$	-28.664	-40.079	区内
	$f_3ca(c)$	-1.002	44.642	区外
	$f_3abG(a)$	-29.174	50.278	区外
	$f_3abc(a)$	-2.369	41.875	区外
DG ₁ 容量为 1 MV·A, DG ₂ 容量为 1 MV·A, 负荷容量为 8 MV·A	$f_1bc(b)$	0.169	-0.063	区外
	$f_1caG(c)$	0.673	-0.547	区外
	$f_1abc(a)$	0.228	-0.103	区外
	$f_2ab(a)$	-24.624	-23.086	区内
	$f_2bcG(b)$	-153.727	-39.765	区内
	$f_2abc(a)$	-28.804	-37.448	区内
	$f_3ca(c)$	-1.021	43.723	区外
	$f_3abG(a)$	-28.964	48.999	区外
	$f_3abc(a)$	-2.159	39.624	区外

注: f_1bc 表示点 f_1 发生 bc 相间短路故障; f_1caG 表示点 f_1 发生 ca 两相接地短路故障; f_1abc 表示点 f_1 发生 abc 三相短路故障;其他类似;后同。

表 3 负荷投切与区内经过渡电阻短路故障
的能量函数对比

Table 3 Comparison of energy function value
between in-zone short circuit fault with
transition resistance and load switching

扰动情形	$E_1/(kV \cdot A \cdot s)$	$E_2/(kV \cdot A \cdot s)$
最大负荷投切	-0.074	-0.039
$f_2ab, R_t=5 \Omega$	-0.695	-0.453
$f_2bcG, R_t=10 \Omega$	-2.294	-0.537
$f_2bcG, R_t=50 \Omega$	-0.237	-0.102

由表 3 可知,最大负荷投切时保护安装处的能量函数与故障情况相比小几个数量级,保护具有较高的灵敏性。这是因为区内发生经过渡电阻的短路故障时逆变型 DG 提供的故障分量电流虽在幅值上与负荷电流相差不大,但 2 种情况下电压跌落程度却存在较大差异。负荷投切时故障分量电压近似为零,因而能量函数幅值较小;而发生故障时故障分量电压幅值较大,明显起到了增大能量函数的作用。

此外,当过渡电阻达到 50 Ω 时,能量函数仍大于设定的幅值门槛,因此所提判据有足够的灵敏度和一定的抗过渡电阻能力。但是,对比分析表 2 与表 3 数据,明显看出能量函数的幅值受过渡电阻的影响较大,阻值越高,能量函数就越小,当发生大过渡电阻短路故障时,存在能量函数幅值小于幅值门槛的可能。对此在设定幅值门槛值时,必须综合考虑区内最大负荷投切和过渡电阻的影响。

4 结论

提出了一种适用于有源配电网的故障超前相能量方向纵联保护方案。能量函数的正负极性取决于保护安装处故障分量电压与电流的相位关系,它不仅与保护背侧等值阻抗角有关,还受中性点电位的影响,利用故障超前相的能量函数极性关系能够正确反映不同类型的区内外故障。

针对保护馈线内部负荷分支瞬时投切对故障方向判别的影响,利用负荷投切与故障状态下的能量函数的幅值差异引入幅值判据加以区分。此外,理论分析了基于正序分量控制的逆变型 DG 在恒有功、恒无功控制模式以及低电压穿越无功支持模式下的故障输出特性对保护性能的影响,由于其输出特性复杂,存在使得保护误判的情况,有必要进一步深入研究保护原理的改进方法。

参考文献:

[1] 孙鸣,赵月灵,王磊. DG 容量及接入方式对变电站继电保护定值的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):46-49.
SUN Ming,ZHAO Yueling,WANG Lei. Impact of DG capacity and location on relay protection of substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):46-49.

[2] 郭煜华,姜军,范春菊,等. 改进的配电网反时限过电流保护[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):45-50.
GUO Yuhua,JIANG Jun,FAN Chunju,et al. Improved inverse-time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):45-50.

[3] 孙景钊,李永丽,李盛伟,等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):81-84.
SUN Jingliao,LI Yongli,LI Shengwei,et al. A protection scheme for distribution system with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(1):81-84.

[4] 许德轩,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.

[5] 高孟友,徐丙垠,张新慧,等. 基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):21-25.
GAO Mengyou,XU Bingyin,ZHANG Xinhui,et al. Fault location based on fault current amplitude comparison[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):21-25.

[6] 司新跃,陈青,高湛军,等. 基于电流相角突变量方向的有源配电网保护[J]. 电力系统自动化,2014,38(11):97-103.
SI Xinyue,CHEN Qing,GAO Zhanjun,et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(11):97-103.

[7] HALABI N E,GARCÍA-GRACIA M,BORROY J,et al. Current phase comparison pilot scheme for distributed generation networks protection[J]. Applied Energy,2011,88(12):4563-4569.

[8] 彭春华,张艳伟. 基于电流正序分量相位比较的主动配电网保护

- 方案[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 163-169.
- PENG Chunhua, ZHANG Yanwei. Protection scheme based on phase comparison of positive-sequence fault current for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 163-169.
- [9] MIRSAEIDI S, MAT SAID D, MUSTAFA M W, et al. A protection strategy for micro-grids based on positive-sequence component[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(6): 600-609.
- [10] 曹贵明. 基于正序故障分量的含分布式电源配电网保护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- CAO Guiming. Protection researches of distribution network based on the positive sequence fault components[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [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] 刘浩芳, 王增平, 刘汉青, 等. 改进能量方向保护及其在特高压输电线路上的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 185-191.
- LIU Haofang, WANG Zengping, LIU Hanqing, et al. Improved energy directional protection and its application in UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 185-191.
- [13] 谭会征, 李永丽, 陈晓龙, 等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31-37.
- TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37.
- [14] 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.
- [15] 韩海娟, 牟龙华, 郭文明. 基于故障分量的微电网保护适用性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 90-96.
- HAN Haijuan, MU Longhua, GUO Wenming. Adaptability of microgrid protection based on fault components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 90-96.

作者简介:



徐 萌

徐 萌(1992—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事有源配电网及微电网保护控制技术方面的研究(E-mail: dzwbxm@163.com);

邹贵彬(1971—), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力系统继电保护方面的研究工作(E-mail: guibinzou@sdu.edu.cn)。

Energy-directional pilot protection based on leading-phase for active distribution network

XU Meng¹, ZOU Guibin¹, CHEN Ning², ZHANG Jian², MA Yuwei¹

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

2. State Grid Shandong Electric Power Company Zaozhuang Electric Power Company, Zaozhuang 277100, China)

Abstract: Based on the characteristic analysis of fault-phase energy function for different fault types, a method of energy-directional pilot protection is proposed. According to the characteristics of distribution network with ineffectively-grounded neutral point, a fault recognition criterion based on the leading-phase is established and an auxiliary criterion based on the amplitude of energy function is added to get over the impact of in-zone branch load switching on the fault recognition. Its adaptability to the distributed generators which are connecting with the distribution network via inverter based on the positive-sequence component control is studied. Simulative results show the proposed method is immune to the transition resistance to a certain extent and able to recognize the fault directions correctly and get over the impact of load switching.

Key words: active distribution network; distributed generator; leading phase; energy function; fault component; directional pilot protection; electric power system protection