

DOI: 10.7667/PSPC171464

含逆变型分布式电源的配电网正序综合阻抗纵联保护

雷霖^{1,2}, 唐成达^{1,2}, 青禹成¹, 张鹏^{1,2}, 赖真良^{1,2}, 赵永鑫²

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 成都大学信息科学与工程学院, 四川 成都 610106)

摘要: 为解决逆变器控制策略对含逆变型分布式电源的配电网的故障特性的影响问题, 提出了一种基于正序分量综合阻抗的纵联保护新原理。该原理利用线路两端正序电压相量之差与线路两端正序电流相量之和的比值构成正序分量综合阻抗。区内与区外发生故障时, 正序分量综合阻抗的幅值变化明显, 据此可以区分线路上的内部和外部故障。新原理特征量明显, 容易整定, 不受分布式电源控制策略的影响, 抗过渡电阻能力强。PSCAD 仿真验证了该原理的有效性。

关键词: 正序分量综合阻抗; 纵联保护; 正序分量; 逆变型分布式电源; 配电网

Pilot protection of positive sequence component integrated impedance for distribution network with inverter interfaced distributed generator

LEI Lin^{1,2}, TANG Chengda^{1,2}, QING Yucheng¹, ZHANG Peng^{1,2}, LAI Zhenliang^{1,2}, ZHAO Yongxin²

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. School of Information Science and Electrical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: In order to solve the influence of the inverter control strategy on the fault characteristics of the distribution network with Inverter Interfaced Distributed Generator (IIDG), a new principle of pilot protection based on positive sequence component integrated impedance is proposed. The principle uses the ratio between the difference of two terminals positive sequence voltage phasor of the transmission line and the sum of the two terminals positive sequence currents phasor of the same transmission line to form a positive sequence component integrated impedance. When the faults occur in external or internal area, the amplitude of the positive sequence component integrated impedance varies obviously, so that the internal and external faults on the line can be distinguished. The new principle has obvious characteristics, such as easy tuning, free from the influence of distributed generation control strategy, and strong resistance to transition resistance. The validity of the principle is verified by PSCAD simulation.

This work is supported by Key Research and Development Program of Sichuan Science and Technology Department (No. 2017GZ0385).

Key words: positive sequence component integrated impedance; pilot protection; positive sequence component; inverter type distributed power supply; distribution network

0 引言

将分布式电源接入配电网, 已成为有效利用清洁能源的方式之一。但是随着 DG 的大规模接入使网络中的潮流具有不确定性, 传统配电网三段式电流保护将失去选择性^[1-2]。

目前, 关于配电网保护的研究较多^[3-13]。文献[3-4]提出了一种多代理保护方案及多电源故障定位

方案, 通过将基础保护和基于通信系统的多点信息保护相结合, 保证在局部信息的完整性。文献[5-7]构造了相应的故障区段函数, 分别采用和声算法、改进和声算法及纵横叉算法从数学角度解决故障定位问题。这类保护方案在很大程度上能够克服配电网复杂运行状态的影响, 但主站需要实时处理大量数据, 对通信系统要求较高。文献[8-10]分别通过等效阻抗、整定系数、故障残压的自适应计算, 来实现对配电网保护装置的动作值及动作时限进行自适应整定。文献[11-12]根据配电网的树状结构特征,

分别提出了一种基于方向闭锁原理及于广域局部瞬时量测信息的自适应保护方案。自适应保护需要事先确定系统的所有可能结构形式,不能适用于 DG 渗透率较高的配电网。文献[13]分析了保护可靠性对并入 DG 容量进行了限制,保留了传统的三段式电流保护。这类保护方案以传统配电网保护为基础,根据配电网故障特征量对判据进行改进,可靠性和选择性均存在不足。

新的并网标准对分布式电源的低电压穿越能力提出了要求,使含分布式逆变型电源(Inverter Interfaced DG, IIDG)的配电网保护更加复杂^[14]。为此文献[15-17]提出了基于故障分量的保护原理。文献[15]利用线路两端在区内外发生故障时测得的正序阻抗值不同,提出了带制动特性的正序阻抗纵联保护方案。文献[16]提出利用母线正序电压故障分量与各馈线的正序电流故障分量的相位差来判断故障方向,其中差值最大所在线路即为故障线路。文献[17]提出仅利用电流信息的方向元件,利用母线上各馈线的故障分量相位来区分故障发生位置。然而,当计及 IIDG 的控制策略时,这些保护原理的可靠性仍有待研究^[18]。

本文分析了线路区内与区外故障时,线路两端正序电压相量之差与正序相量电流之和的比值特点,提出了一种基于故障正序分量综合阻抗的纵联保护新原理,并使用 PSCAD/EMTDC 建立仿真模型对新原理进行了验证。

1 正序分量综合阻抗的纵联保护原理

1.1 正序综合阻抗的概念

图 1 为含 IIDG 的配电网示意图。正常运行时,线路电压损失一般小于 5%;当区内发生故障时,故障点电压为不可测量,故障点电流可由两端电流之和求得。线路发生大过渡电阻接地故障时,线路出现故障电流,而线路压差远小于故障点电压;线路发生金属性故障时,故障电流达到最大,线路两端电压差大于故障点电压。含 IIDG 的配电网发生故障时,采用正序分量控制的 IIDG,系统发生故障时 IIDG 只包含在正序网络中^[19-20]。由此定义线路两端正序电压之差与线路两端正序电流之和的比值为正序综合阻抗。

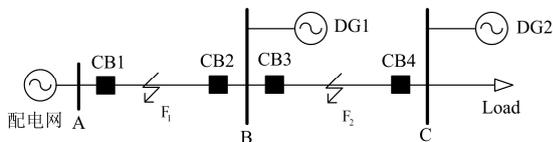


图 1 含 IIDG 的配电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a distribution network with IIDG

$$Z_{cd} = \frac{\dot{U}_{cd}}{\dot{I}_f} \quad (1)$$

式中: $\dot{U}_{cd} = \dot{U}_1^+ - \dot{U}_2^+$; $\dot{I}_f = \dot{I}_1^+ + \dot{I}_2^+$; \dot{U}_1^+ 、 \dot{I}_1^+ 和 \dot{U}_2^+ 、 \dot{I}_2^+ 分别为保护安装处正序电压和正序电流。

(1) 区内无故障。若图 1 中馈线 AB 区外 F_2 发生故障,不考虑区内负荷分支的影响,故障正序分量网络如图 2 所示。

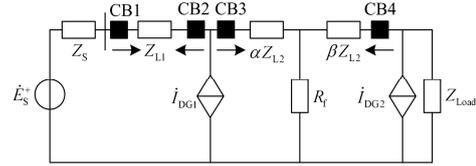


图 2 区外 F_3 故障正序分量网络

Fig. 2 Positive sequence component network of external fault F_3

根据图 2 可得馈线 AB 两端正序电压分别为

$$\dot{U}_1^+ = \dot{I}_1^+ Z_{L1} + \dot{I}_3^+ \alpha Z_{L2} + (\dot{I}_3^+ + \dot{I}_4^+) R_f \quad (2)$$

$$\dot{U}_2^+ = \dot{I}_3^+ \alpha Z_{L2} + (\dot{I}_3^+ + \dot{I}_4^+) R_f \quad (3)$$

式中: \dot{U}_1^+ 和 \dot{U}_2^+ 为保护 1 与 2 处的正序电压; \dot{I}_1^+ 至 \dot{I}_4^+ 为流过保护 1 至保护 4 的正序电流; α 为保护安装处到故障点距离占被保护线路全长比例且满足 $0 \leq \alpha \leq 1$; Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别为线路 AB 和 BC 的正序阻抗; β 与 α 满足 $\beta = 1 - \alpha$, R_f 为过渡电阻。

将式(2)与式(3)相减除以 \dot{I}_f , 可得

$$Z_{cd} = \frac{\dot{I}_1^+ Z_{L1}}{\dot{I}_1^+ + \dot{I}_2^+} = \lambda_0 Z_{L1} \quad (4)$$

式中, $\lambda_0 = \frac{\dot{I}_1^+}{\dot{I}_1^+ + \dot{I}_2^+}$, 即线路无故障时, \dot{I}_f 为线路对地电容电流, 此时 $|Z_{cd}|$ 相对于线路阻抗是一个较大的数值, 且线路上馈送电流越大 $|Z_{cd}|$ 越大。

(2) 区内故障。图 1 馈线 AB 发生区内 F_1 故障时, 故障正序分量网络如图 3 所示。

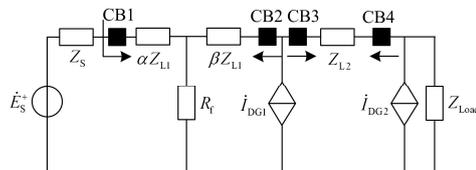


图 3 区内故障正序分量网络

Fig. 3 Positive sequence component network of internal fault

根据图 3 可得馈线 AB 两端正序电压分别为

$$\dot{U}_1^+ = \dot{I}_1^+ \alpha Z_{L1} + (\dot{I}_1^+ + \dot{I}_2^+) R_f \quad (5)$$

$$\dot{U}_2^+ = \dot{I}_2^+ \beta Z_{L1} + (\dot{I}_1^+ + \dot{I}_2^+) R_f \quad (6)$$

将式(5)与式(6)相减除以 \dot{I}_{cd} 可得区内正序综合阻抗。

$$Z_{cd} = \frac{I_1^+ \alpha - I_2^+ \beta}{I_1^+ + I_2^+} Z_{L1} = \lambda Z_{L1} \quad (7)$$

式中, $\lambda = \frac{I_1^+ \alpha - I_2^+ \beta}{I_1^+ + I_2^+}$ 。

令 $\lambda_1 = \left| \frac{I_1^+ - I_2^+}{I_1^+ + I_2^+} \right|$, $k = \left| \frac{I_1^+}{I_2^+} \right|$ 。由图4可知, 不论

α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 取何值都有 $|\lambda| \leq \lambda_1$ 成立, 为便于 $|Z_{cd}|$ 的整定, 只需计算 λ_1 的最大值。

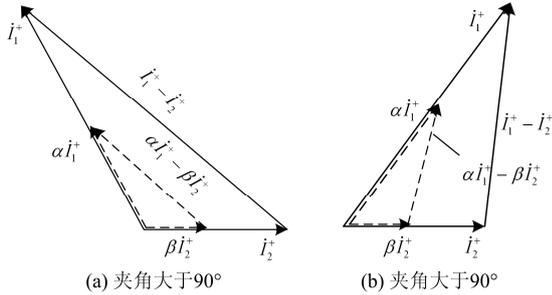


图4 I_1^+ 与 I_2^+ 相量关系图

Fig. 4 Phasor relation between I_1^+ and I_2^+

在实际含有 IIDG 的配电网中, 线路发生故障时, 保护1处提供的短路电流较大, 而保护2处提供的短路电流受 IIDG 输出短路电流限制和线路下游负载影响提供的短路电流较小。以正常运行状态下电流由保护1流向保护2的条件为例, 故障发生后, 此时 $k \geq 1$, 且 k 随过渡电阻的减小而增大。正常运行状态下电流由保护2流向保护1的情况类似, 下面只分析系统前一种情况。则有

$$\lambda_1 \leq \frac{k+1}{k-1} (k \geq 1) \quad (8)$$

式中, λ_1 为 k 的单调减函数, 只有当 k 趋近于1即过渡电阻为无穷大时等号才能成立。

为求 λ_1 最大值只需求 k 的最小值, 以线路发生三相大过渡电阻且故障后系统电压 $> 0.9U_N$ 为例, 设故障点正序电流和正序电压分别为 I_f 、 \dot{U}_f , U_N 为线路额定电压, 此时故障电流全由系统侧提供, $-I_2^+$ 与 I_f 的夹角小于 90° , 则有

$$I_f = \frac{\dot{U}_f}{R_f} \quad (9)$$

$$I_1^+ = I_f - I_2^+ \quad (10)$$

$$k = \left| \frac{I_1^+}{I_2^+} \right| = \left| \frac{I_f}{-I_2^+} \right| \quad (11)$$

$$|\dot{U}_f| > \left| \frac{0.9U_N}{\sqrt{3}} \right| \quad (12)$$

由式(9)一式(12)连理得:

$$k \geq \left| \frac{0.9U_N}{\sqrt{3}R_f I_2^+} \right| + 1 \quad (13)$$

定义故障前线路馈送净容量 $S = |\tilde{S}_{load} - \tilde{S}_{DG}|$, 其中 \tilde{S}_{load} 支路负载的复功率, \tilde{S}_{DG} 为各 DG 输出总功率, S 可由保护安装处信息直接求得, 有

$$S > \left| \sqrt{3} \times 0.9U_N I_2^+ \right| \quad (14)$$

由式(8)、式(13)、式(14)可得

$$\lambda_1 < 1 + \frac{2}{0.9^2} \frac{R_f}{Z'_{load}} \quad (15)$$

式中, $Z'_{load} = \frac{U_N^2}{S}$, 测量得到的 $|Z_{cd}|_{max}$ 为

$$|Z_{cd}|_{max} = |\lambda|_{max} Z_{L1} = \left(1 + 2.47 \frac{R_f}{Z'_{load}} \right) Z_{L1} \quad (16)$$

通过以上分析可知, 当线路发生三相大过渡电阻接地故障时, 系统正常运行时 Z_{cd} 由式(4)决定, 此时 I_f 为线路对地电容电流。以 10 kV 电压等级架空线路长度为 L 为例, 正常运行时, 线路对地电容电流为 $I_f = 0.028(\text{A/km})$ [21], 代入式(4)得:

$|\lambda_0| = \frac{20.6S}{LU_N}$, 线路发生区内故障时, 由式(15)得

$|\lambda|_{max} = 1 + 2.47 \frac{SR_f}{U_N^2}$ 。中低压配电网相间故障 R_f 取值

一般为 1~2 Ω , 发生接地故障时 R_f 的取值可以从 0 到几百欧姆 [22], 10 kV 线路供电半径一般为 6~20 km。对比分析可知 $|\lambda|_{max}$ 将远小于 $|\lambda_0|$ 。线路发生区外故障时, 线路电压降低, 此时线路对地电容电流 I_f 将减小, 线路馈送电流 I_1^+ 将增大, $|\lambda_0|$ 值将显著增大。

1.2 基于正序综合阻抗纵联保护判据

从上面的分析可知, 当线路保护区外发生故障时, $|Z_{cd}|$ 为一个远大于线路阻抗的数值。发生区内故障时, $|Z_{cd}|_{max}$ 为 $|Z_{L1}|$ 的有限倍数, 具体数值可由式(17)在线整定得到。因此, 可以根据 $|Z_{cd}|$ 的大小来区分线路内部、外部故障, 据此提出基于正序综合阻抗的纵联保护原理, 动作判据为

$$|Z_{cd}| < Z_{set} \quad (17)$$

式中, Z_{set} 为阻抗定值, 整定原则为

$$Z_{set} = |\lambda|_{max} Z_L \quad (18)$$

式中: $|\lambda|_{max}$ 为可靠系数; Z'_{load} 可在线测得。在实际计算中 R_f 可取值为 500 Ω , 即

$$|\lambda|_{\max} = 1 + \frac{1235}{Z'_{\text{load}}} \quad (19)$$

以 10 kV 电压等级, 线路长度为 5 km, 支路负荷为 1.5 MVA, 功率因数为 0.9, 支路 DG 容量为 1 MVA 为例, 可得 $Z_{\text{set}} = |\lambda|_{\max} Z_L = 10.15 Z_L$, $|Z_{\text{cd}}| = 306 Z_L$, 能够保证不误动。在线路长度更短的情况下, $|\lambda|_{\max}$ 值不变, $|\lambda_0|$ 值将增大, 进一步增强了可靠性。

2 性能分析

2.1 抗过渡电阻能力

中低压配电网中短距离输电线路的导引线电流差动保护, 具有线路短、分布式电容电流小的特点。当区外发生故障时系统电压降低, 分布式电容电流进一步减小, 线路电流增加, $|Z_{\text{cd}}|$ 值增大, 故区外发生故障时能够保证不误动。区内发生故障时, 由第 1 节分析可知, 因 Z_{set} 为在线测得, 从式(16)可知动作量 $|Z_{\text{cd}}|$ 将严格小于 Z_{set} , 为了进一步提高判据可靠性 R_f 可以取得更大。因此相对于传统电流差动保护, 新原理在理论上具有很强的抗过渡电阻能力。

2.2 新判据对单端供电线路的灵敏度

单端供电线路相当于线路上接入的 IIDG 容量为 0, 正常运行状态下正序综合阻抗 $|Z_{\text{cd}}|$ 将达到最大值, 此时 S 变为负荷容量, Z_{set} 在线取得最大整定值。区外发生故障时, 由于失去 DG 对系统电压支撑, 系统电压降低更严重, 式(4)中的对地电容电流将减小, 线路馈送电流增加, 此时 $|Z_{\text{cd}}|$ 将比正常状态更大。当线路发生区内故障时仍满足式(16), 此时 $|Z_{\text{cd}}|$ 将满足 $|Z_{\text{cd}}| < Z_{\text{set}}$ 。可见新原理用于单端输电线路, 仍会有良好的性能。

2.3 新判据受 DG 投切的影响

本文所提判据, $|Z_{\text{cd}}|$ 值将随 DG 出力波动及投

切而发生变化, 区内无故障时, $|Z_{\text{cd}}|$ 随线路电流的变化而改变。DG 离网时, 与 2.2 节分析类似, 线路馈送电流增加, $|Z_{\text{cd}}|$ 将增大, 在一定程度上增强了可靠性; DG 并网时, 理论上当支路负荷有功电流全由 DG 提供时, 线路馈送净负荷容量达到最小值, $|Z_{\text{cd}}|$ 将减小, 为避免误动需要调整 Z_{set} 值。因此在应对 DG 出力波动及投切时, 都可利用在线整定的方法调整 Z_{set} 值防止保护误动。

2.4 新判据受暂态分量的影响

传统故障分析中, 当线路发生故障时, 差动电流含有少量的直流分量和高频分量, 为避免误动一般需要增大 Z_{set} 值, 在暂态分量减少后, 才使用较低的定值, 以保证可靠性。

此方法也可应用在新判据中, 即在暂态过程中适当增大 Z_{set} 值。由于区内和区外发生故障时, $|Z_{\text{cd}}|$ 值差别较大, 即使增大了 Z_{set} 值, 对于区内故障仍有较大动作裕度。在原理上新判据受过渡电阻的影响小, 低压配电网暂态衰减较快, 故当线路发生带过渡电阻故障时, 保护也能快速响应。

2.5 线路空载合闸

特定长度的线路对地电容电流只与线路电压有关, 对输电线路充电完成之后, 有 $|I_1^+| > |I_1^+ + I_2^+|$, 式(4)中分子变为 $|\dot{U}_{\text{cd}}| = |\dot{U}_1^+ - \dot{U}_2^+| < |\dot{I}_1^+ Z_L|$, 将无法严格保证 $|Z_{\text{cd}}| > |Z_L|$ 。而线路馈送净容量近似为 0, 等效 Z'_{load} 为无穷大, 按照式(16)整定 $Z_{\text{set}} = Z_L$ 。故空载合闸时为避免保护误动作必须退出本判据。

3 仿真验证

3.1 仿真结构及参数

为验证基于正序综合阻抗的新型纵联保护原理在配电网中的适应性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 5 所示的配电网仿真模型。

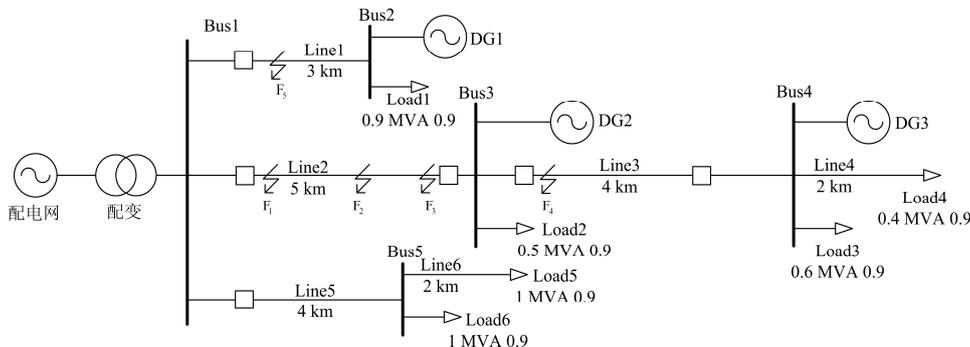


图 5 配电网系统结构图

Fig. 5 System structure of distribution network

系统电压等级为 10 kV, 含有光伏电源及柴油发电机两种逆变型分布式电源和三条馈线。变压器容量为 10 MVA, 中性点经 1 mH 消弧线圈接地。配电网中分布式电源均为逆变型电源, 最大输出电流限制为额定电流的 1.5 倍, 光伏电源和柴油发电机额定容量都为 0.5 MVA, 在系统正常运行条件下各分布式电源均采用 PQ 控制, 并按最大功率因数输出有功, 当系统发生故障时各分布式电源采用低电压穿越运行控制。线路参数 $R_1 = R_2 = 0.64 \Omega/\text{km}$, $X_1 = X_2 = 0.12 \Omega/\text{km}$, $R_0 = 2.00 \Omega/\text{km}$, $X_0 = 0.40 \Omega/\text{km}$ 。线路长度及负载额定功率如图 5 所示。仿真中, 分别在 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 6 个点模拟各种故障, F_1 、 F_4 、 F_5 、 F_6 位于各保护正向出口, F_2 位于 Line2 的中点, F_3 位于 Bus3 端母线反向侧出口, 计算时采用傅里叶滤波算法。

3.2 仿真结果

如图 6 所示为线路 Line2 发生相间金属性故障, 正序综合阻抗轨迹及保护动作情况。如图 6(a) 所示, 保护动作区域是以 Z_{set} 为半径的阻抗圆, 故障前测量阻抗位于动作范围之外, 当 Line2 在 0.6 s 发生故障时, 测量阻抗快速进入动作区域, 如图 6(b) 所示保护快速响应。

在线路末端发生故障时取得最大值, 此时

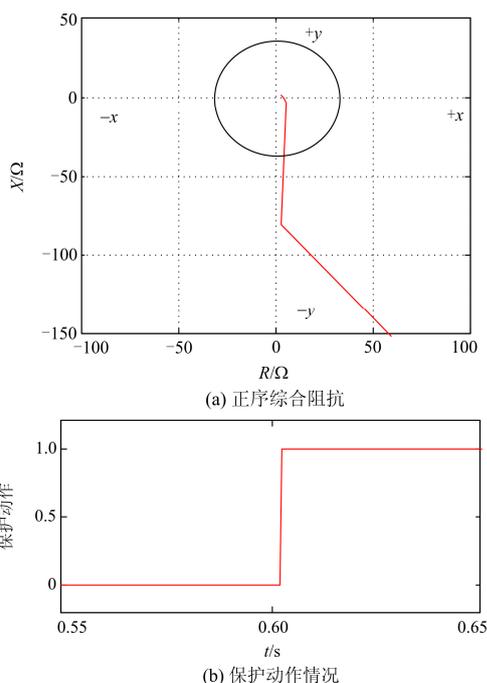


图 6 Line2 相间故障正序分量综合阻抗及保护动作情况

Fig. 6 Positive sequence component integrated impedance and protective action of phase to phase faults of Line2

$|i_1^+ / i_2^+|$ 值较小, 对于判据最为不利。如图 7 所示为 F_3 处发生大过渡电阻接地故障 Line2 的综合正序阻抗轨迹及保护动作情况。故障前, 测量阻抗位于动作范围外。0.6 s 线路发生三相大过渡电阻接地故障, 过渡电阻为 100Ω , 此时测量阻抗进入保护区域, 保护快速动作, 如图 7(b) 所示, 表明判据在系统发生大过渡电阻情况下同样能够满足快速性的要求。

表 1 列出了 F_1 至 F_6 不同位置发生不同故障情形

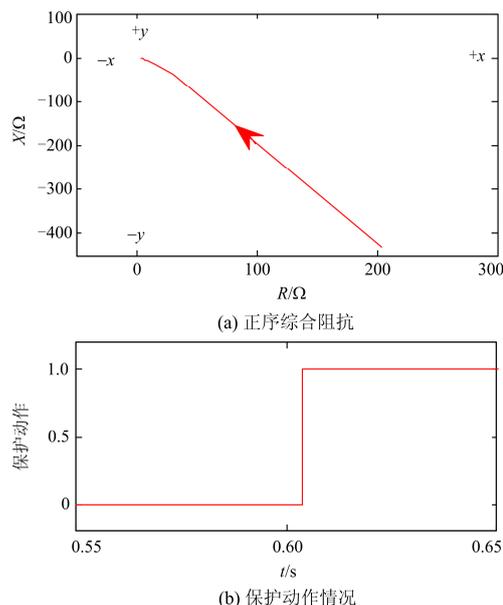


图 7 Line2 接地故障正序分量综合阻抗及保护动作情况

Fig. 7 Positive component integrated impedance and action of protection of Line2

表 1 不同故障情形下 Line2 正序分量综合阻抗测量结果
Table 1 Measurement results of Line2 positive sequence integrated impedance under different fault conditions

故障点	故障类型	R_f / Ω	$ Z_{\text{cd}} / \Omega$	k
区外故障	F_4 BCG	10	6 197	1.00
	ABG	100	1 495	1.00
F_5	AB	1	502	1.00
	ABC	0.01	120 627	1.00
F_1	AB	0.01	0.04	>50
	BC	2	0.13	26.7
	ABCG	100	2.49	1.99
F_2	AB	0.01	1.61	>47
	BCG	2	1.75	25.2
	ABCG	100	3.63	1.94
F_3	ABG	100	7.37	1.40
	ABCG	100	5.06	1.89
	BCG	200	12.18	1.18
	ACG	500	27.12	1.06
	ABCG	500	14.60	1.14

下, Line2 正序综合阻抗计算结果, 其中 R_f 表示接地过渡电阻, 正常运行时 $|Z_{cd}|=1032\ \Omega$, $Z_{set}=34.5\ \Omega$ 。从表 1 可以看出, 当 Line2 发生内部故障时, 故障时的综合正序分量阻抗的模值较小, $|Z_{cd}|$ 最大为 $27.24\ \Omega$, 当区外发生故障时, $|Z_{cd}|$ 数值远大于 Z_{set} 。可见, 使用故障正序综合阻抗可以容易的区分线路区内、区外故障, 基于正序综合阻抗的纵联保护原理可以应用于含逆变型分布式电源的低压配电网线路。

4 结论

本文提出了一种基于正序分量综合阻抗的纵联保护新原理, 并进行了理论分析和 PSCAD/EMTDC 仿真验证。理论分析和仿真结果表明: 区外发生故障时, 正序综合阻抗远大于线路阻抗, 从而保证基于正序综合阻抗的纵联保护的可靠性; 区内发生故障时, 正序综合阻抗能保证保护动作要求, 故障特征量明显, 保证了基于正序综合阻抗的纵联保护的灵敏性。该原理适用于含 IIDG 的配电网保护, 具有容易整定、动作灵敏, 抗过渡电阻能力强的优点。仿真结果验证了新原理的有效性。

参考文献

- [1] 黄大为, 潘波. 考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 64-70.
HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.
- [2] 罗迪, 田新首, 刘超, 等. 分布式清洁能源接入配电网研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 101-108.
LUO Di, TIAN Xinshou, LIU Chao, et al. A survey of research on distributed renewable energy in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 101-108.
- [3] 尚璿, 郇能灵, 刘琦, 等. 考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 40-45.
SHANG Jin, TAI Nengling, LIU Qi, et al. New protection method for distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 40-45.
- [4] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 139-145.
LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe. New fault region location scheme in distribution system with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 139-145.
- [5] 刘蓓, 汪泓, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 280-284.
LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-284.
- [6] 李亚男, 张靠社, 张刚, 等. 基于改进和声搜索算法的配电网多目标综合优化[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 82-86.
LI Yanan, ZHANG Kaoshe, ZHANG Gang, et al. Multi-objective integrated optimization of distribution network based on improved harmony search algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(6): 82-86.
- [7] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 基于纵横交叉算法在含分布式电源的配电网故障定位[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(9): 128-134.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location of distribution network with distributed generation based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(9): 128-134.
- [8] 周宁, 雷响, 荆晓睿, 等. 一种含高渗透率分布式电源配电网自适应过电流保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 24-31.
ZHOU Ning, LEI Xiang, JING Xiaorui, et al. Adaptive over-current protection scheme for distribution network with high penetration rate of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 24-31.
- [9] MA J, MA W, QIU Y, et al. An adaptive distance protection scheme based on the voltage drop equation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1931-1940.
- [10] 张红洁, 董祖晨, 何晓明, 等. 含光伏电源配电网中新型反时限欠电压保护方案的研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 6-10, 34.
ZHANG Hongjie, DONG Zuchen, HE Xiaoming, et al. Novel inverse-time under-voltage protection for distribution network with photovoltaic power system[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 6-10, 34.
- [11] 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.
- [12] 杨德友, 蔡国伟. 基于广域局部量测信息的复杂电力系统自适应低频保护策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 266-275.
YANG Deyou, CAI Guowei. Adaptive under frequency load shedding schemes for complex power systems using local measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 266-275.
- [13] WU L J, CHEN X Y, LIU J, et al. Calculating the maximum penetration capacity of distributed generation considering current protection[C] // Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, 2014, 672: 1257-1261.
- [14] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规范: Q/GDW 617—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
State Grid Corporation of China. Technical rule for photovoltaic power station connected to power systems: Q/GDW 617—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [15] 徐萌, 邹贵彬, 高磊, 等. 含逆变型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 93-99.
XU Meng, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence impedance for distribution network with inverter-based distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 93-99.
- [16] 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): 110-120.
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): 110-120.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 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.
- [21] 郑南雁, 楚方求, 程友发. 10 kV 系统对地电容电流的测试[J]. 继电器, 2000, 28(9): 56-58.
ZHENG Nanyan, CHU Fangqiu, CHENG Youfa. Measuring of ground capacitive current of 10 kV system[J]. Relay, 2000, 28(9): 56-58.
- [22] BLACKBURN J L, DOMINT J. Protective relaying principles and applications[M]. 2nd ed. London, UK: Taylor & Francis Group, 2006: 441-504.

收稿日期: 2017-09-30; 修回日期: 2017-12-25

作者简介:

雷霖(1963—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电子技术、现场总线、继电保护; E-mail: 552429528@qq.com

唐成达(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 877826653@qq.com

(编辑 张爱琴)