

基于多维小波变换的新型有源配电网自适应重合闸方案

戴志辉¹, 柳梅元¹, 于海平², 朱卫平³, 韦舒清¹

(1. 河北省微网与分布式储能重点实验室 (华北电力大学), 河北 保定 071003; 2. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211000; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 无新能源接入的传统配电网只在线路单侧配置无检重合闸, 若在新型有源配电网中仍继续沿用这种重合闸方式, 在故障发生后盲目重合会导致配网中新能源在低电压穿越期间大规模脱网, 影响系统的安全稳定运行。为此, 首先分析了断路器跳闸后其下游新能源形成的孤岛内的故障特征, 推导了孤岛内新能源出口处电压、电流相位差变化规律, 并基于多维小波变换对相位差波形进行分解, 构造了故障性质识别双重判据。其次, 进一步分析故障性质检测时间、低电压穿越时间、防孤岛保护动作时间和重合闸时间四者的时序配合问题, 提出适用于新能源接入的配电网自适应重合闸方案。仿真结果表明, 所提方案能可靠识别出永久性故障, 无需增加额外电源, 且不受故障位置和过渡电阻影响。相比于传统重合闸方案, 大大缩减了重合延时, 有效避免了新能源的大规模退出运行、提高了系统供电的可靠性。

关键词: 重合闸; 故障性质识别; 配电网; 新能源; 小波变换

中图分类号: TM762.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2026) 02-0119-13

Adaptive Reclosing Scheme of New Active Distribution Network Based on Multi-dimensional Wavelet Transform

DAI Zhihui¹, LIU Meiyuan¹, YU Haiping², ZHU Weiping³, WEI Shuqing¹

(1. Hebei Key Laboratory of Microgrid and Distributed Energy Storage (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211000, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Traditional distribution networks without new energy integration typically employ non-check reclosers only on the power-supply side of the line. If this reclosing method is still used in the new active distribution network with inverter based resources, blind reclosing after a fault will lead to large-scale disconnection of new-energy resources during low-voltage ride through (LVRT), affecting the system security and stability. To address this issue, this paper first analyzes the fault characteristics in the downstream island after the tripping of the circuit breaker, and the change of the phase-angle difference between voltage and current at the grid connection point of the new-energy source in the island is deduced. The variation pattern of the voltage current phase angle difference at the point of interconnection of new energy in the island is derived, and a dual criterion for fault nature identification is constructed based on multi-dimensional wavelet decomposition of the phase-angle difference waveform. Subsequently, the timing coordination of fault detection time, LVRT time, anti-islanding protection action time and reclosing time are further analyzed. An adaptive reclosing scheme for active distribution networks is proposed. Simulation shows that the proposed scheme can reliably identify permanent faults without additional power supply, and is not affected by fault location and transition resistance. Compared with the conventional reclosing scheme, the proposed scheme significantly reduces the reclosing delay, effectively prevents large-scale new energy generation disconnection and enhances power supply reliability.

Key words: reclose; fault characteristic identification; distribution network; new energy; wavelet transform

0 引言

近年来,逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed generator, IIDG)大量接入配电网,增加了配网结构的复杂性和多样性,对配网故障处理和供电恢复提出了更大挑战^[1]。由于配电网发生的故障多为瞬时性故障,大部分地区(尤其是农村和偏远地区)一般仍采用前加速无检重合闸缩短停电时间、提高供电可靠性。但随着配电网中混合线路的增多,永久性故障发生的频率逐渐增大,重合闸成功率有所降低。断路器盲目重合于永久性故障时,不仅会给电网带来冲击,而且会导致新能源在低电压穿越期间因二次电压跌落而脱网,严重影响配电网的安全稳定运行^[2]。

现有针对新能源接入主要采取的措施是增设检无压环节,但考虑到现有配电网线路中大部分只在系统侧配置了断路器,实现检无压也需故障点下游的新能源退出运行;并且,重合于永久性故障依旧会给系统侧带来二次冲击,仍会影响系统的稳定运行。

为了避免无检重合闸所带来的不利影响,有专家提出并不断探索应用“自适应重合闸”,即在重合之前进行故障性质识别,根据判别结果决定是否重合,但配电网的自适应重合闸目前仍鲜有研究。

自适应重合闸的核心环节是进行故障性质识别,现有故障性质识别方法主要分为有源识别法和无源识别法两类。其中,有源识别法主要利用外加电源向跳闸后的线路注入高频信号,通过检测高频信号的特征来进行故障的识别。文献[3]利用注入电流的波形相似度作为识别判据,但该方法易受噪声的影响;文献[4]利用在电压互感器二次侧施加电压信号,通过其在线路上的响应特征进行性质判别,但该方法受互感器接线方式的影响较大,判据的使用场景受限;文献[5]通过电力电子开关将逆变型电源短时接入线路,基于暂态电压和电流的频域特性对线路的内部特性进行辨识,但该方法中额外设备的成本投入较多。基于上述分析,有源识别这类方法均未考虑新能源的接入,均需要增加额外的电源输入,成本较高,并且在二次侧增加较高的输入电压会威胁到人身安全,注入的高频信号对电力电子器件的损害程

度也还有待研究^[6-8]。

无源识别法则主要基于线路跳闸后自身的电气量特征进行故障性质的识别。文献[9]基于线路并联电容放电电流衰减特性的差异性对故障性质进行识别,但该方法在发生永久三相故障时易将其误判为瞬时性故障;文献[10]基于线路模分量模型对相间电容的参数进行识别,根据识别出的电容参数误差构造故障性质识别判据,但由于电容放电电流衰减迅速,该方法易产生误判;文献[11]提出利用分相开关在故障状态下仅重合一相,根据相间不同特征来进行故障判别,但配网普遍采用三相重合闸方案,该方法的适用性受限。相比于有源识别法,无源识别法投资较小,但现有基于无源识别的自适应重合闸方法中均认为故障性质识别时新能源已脱网,而未考虑新能源不脱网时的情况^[12,13]。

因此,将自适应重合闸的思想延伸到高渗透率新能源接入的配电线路上,并实现与新能源低电压穿越的配合,对于仍采用单侧无检重合闸的配电网具有重要意义。本文首先充分分析了新能源接入后对传统前加速无检重合闸的影响,针对传统重合闸导致新能源在低电压穿越期间遭受电压二次跌落而脱网等问题,利用多维小波变换构造基于电压电流相位差的故障性质识别判据,并进一步分析了故障性质检测时间和低电压穿越时间的配合问题,提出有源配网单侧无检重合闸改进方案。

1 新能源接入对重合闸的影响分析

在新能源接入配电网早期,为消除新能源给线路保护所带来的影响,在故障发生后新能源主动退出,从而使保护和重合闸均能正常动作。然而,随着新能源的渗透率越来越高,新能源的大规模脱网会严重影响系统的稳定运行。因此,各国电网对新能源故障时的穿越能力做出了详细要求。

如图1所示为我国的低电压穿越要求,图中: T_1 为电压跌落到0.2 pu需保持并网的时间,设定为0.625 s, T_2 为电压跌落到0.9 pu需保持并网的时间,设定为2 s^[14]。当并网点电压位于实线以上时,新能源需保持并网稳定运行;当并网点电压跌落到实线以下时,新能源脱网。

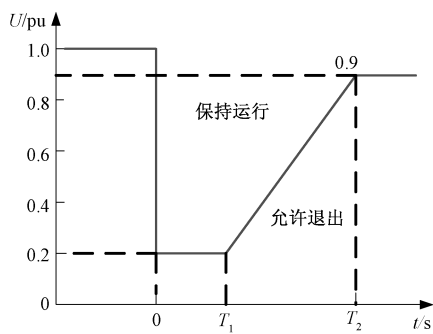


图 1 新能源低电压穿越要求

Fig. 1 Low voltage ride through requirements of new energy

基于上述分析,由于新能源都具备故障穿越能力,故障后若并网点电压位于实线以上时并不立刻脱网,传统前加速无检重合闸的问题逐渐凸显。图 2 为典型有源配网结构,两条馈线均接有新能源,保护配置的重合闸均为前加速无检重合,延时时间设定为 1.2 s^[15]。

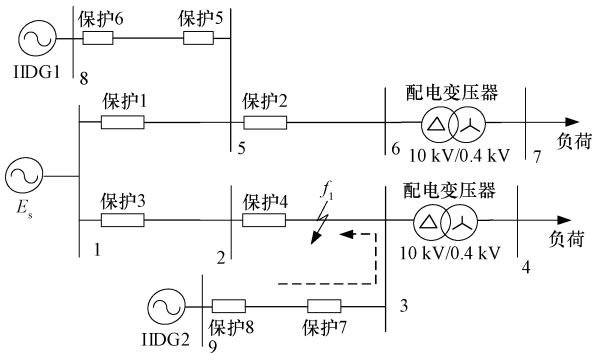


图 2 典型有源配网结构图

Fig. 2 Typical network structure diagram of active distribution

结合上述典型配网拓扑对传统前加速无检重合闸所存在的问题进行分析:

当在 f_1 点发生短路故障时,母线 1 处的电压降低,IIDG1 和 IIDG2 均进入低电压穿越状态。在经过保护动作延时后,保护 4 正确动作,断路器跳闸,其下游新能源 IIDG2 与负荷形成孤岛,在防孤岛保护动作前一段时间内带故障运行。经 1.2 s 延时重合闸动作。

1) 若发生的故障为永久性故障,在前加速重合闸之前故障一直存在,重合后导致 IIDG1 并网点处的母线电压二次跌落,有一定概率超出低电压穿越所规定的并网运行轮廓线后退出运行,造成 IIDG1 不能成功穿越故障^[16]。

2) 若发生的故障为瞬时性故障,经过较短时间故障消失。然而,当 IIDG2 输出功率较小,与本

地负荷功率不匹配程度较大时,孤岛电压较低,在重合闸延时的 1.2 s 内 IIDG2 已达到并网运行的极限(超出并网运行轮廓线)而退出运行,导致在重合之前故障点下游负荷仍有一段时间处于失电状态;并且由于故障为瞬时性故障,在新能源退出运行前故障早已消失,此时仍退出运行意义不大。因此,对于瞬时性故障应采用较短延时进行重合。

综上,当故障为瞬时性故障时,应在较短时间内识别出其故障性质后直接进行重合,避免瞬时性故障时下游 IIDG 的大面积脱网;当故障为永久性故障时,应直接闭锁重合闸,避免除下游新能源以外的 IIDG 在低电压穿越期间遭受二次电压跌落而直接脱网。

因此,新能源接入后应提高重合闸成功率,即在重合前正确识别故障类型,当判别为永久性故障时,应闭锁重合闸;当判别为瞬时性故障时,应在考虑低电压穿越的基础上对重合闸时间进行重新配置,减少重合延时。并且在此基础上,基于故障性质识别提出适用于新能源接入的配电网自适应重合闸整体方案,解决传统单侧无检重合闸导致故障后新能源大面积脱网的问题,提高系统运行的安全性。

2 新能源孤岛故障特征分析

当故障线路保护跳闸后,由下游新能源形成的孤岛内故障特征主要由新能源决定。由于新能源逆变器的限流作用,故障电流较小,最大短路电流仅为额定电流的 1.5 倍,远小于大系统提供的短路电流(约为额定电流的 20~30 倍)。因此,在故障消除前后孤岛内的电流特征变化并不明显^[17],无法仅用电流信息来识别故障是否消除。

以两相短路故障为例进行分析,图 3 为 f_1 处发生 BC 相间短路故障时的等值网络图。

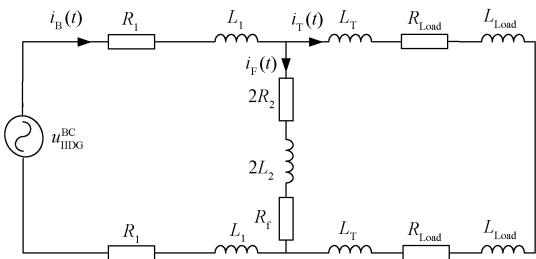


图 3 BC 相间短路故障等值网络图

Fig. 3 Equivalent network diagram of BC phase-to-phase short circuit fault

图中, $u_{\text{IIDG}}^{\text{BC}}$ 为故障后新能源提供的 BC 相间线电压; R_1 、 L_1 分别为新能源送出线路电阻、电感; R_2 、 L_2 分别为母线 3 至故障点处的线路电阻、电感; R_f 为故障点处过渡电阻; L_T 为配电变压器等值电感; R_{Load} 、 L_{Load} 分别为负荷的等值电阻、电感; $i_B(t)$ 为新能源提供的 B 相故障电流; $i_f(t)$ 为流过短路点的相间故障电流; $i_r(t)$ 为负荷对故障电流的分流。

2.1 故障持续阶段

在故障持续阶段, 电压跌落程度较大, IIDG 采用低电压穿越控制, 输出有功的同时发出无功。IIDG 的功率输出一般采用矢量解耦控制, 通常将系统电压设为 d 轴方向, 此时 IIDG 的输出功率如式(1)所示。

$$\begin{cases} P = u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq} \\ Q = u_{gq} i_{gd} - u_{gd} i_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 和 Q 为 IIDG 给孤岛提供的有功和无功功率; u_{gd} 和 u_{gq} 分别为新能源并网点电压的 d 、 q 轴分量; i_{gd} 和 i_{gq} 分别为 IIDG 输出电流的 d 、 q 轴分量, 在低电压穿越阶段, i_{gq} 如式(2)所示。

$$i_{gq} = \begin{cases} 0, & U_{\text{PCC.f}} > 0.9 \\ 1.5 \times (0.9 - U_{\text{PCC.f}}) I_N, & 0.2 \leq U_{\text{PCC.f}} \leq 0.9 \\ 1.1 I_N, & U_{\text{PCC.f}} < 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_{\text{PCC.f}}$ 为并网点故障电压的标幺值, I_N 为 IIDG 故障前输出的额定电流, 其中 $I_N = P_{\text{ref}} / \sqrt{3} U_N$ 。考虑到 IIDG 逆变器的限流作用, i_{gd} 由式(3)给定。

$$i_{gd} = \sqrt{(1.1 I_N)^2 - i_{gq}^2} \quad (3)$$

由于配电变压器和负荷的等值阻抗远大于故障点处过渡电阻和线路电阻之和^[18], 因此在故障持续阶段可忽略配电变压器和负荷的影响, 其等值网络如图 4 所示。

由图可得, 故障持续阶段中新能源端口的等效阻抗如式(4)所示:

$$Z_{\text{eq1}} = 2(R_1 + R_2) + R_f + j2\omega(L_1 + L_2) \quad (4)$$

对图 4 进行简化, 等效电路如图 5 所示。

根据等效电路图得故障电流如式(5)所示:

$$I_B = \frac{U_{\text{BC}}}{Z_{\text{eq1}}} \quad (5)$$

式中: U_{BC} 、 I_B 分别为故障后 BC 相间线电压和 B 相电流的向量值。应用时采集三相电压、电流信息, 进行故障性质识别时, 需根据故障类型合理采

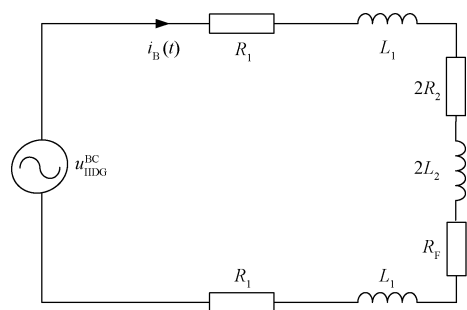


图 4 BC 相间短路故障简化网络图

Fig. 4 Simplified network diagram of BC phase-to-phase short circuit fault

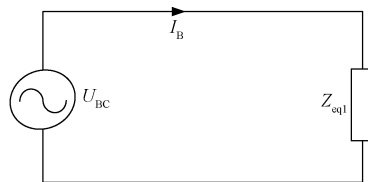


图 5 BC 相间短路故障等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of BC phase-to-phase short circuit fault

用“接线方式”确定所需的电压和电流特征量。

由于电流本身的幅值较小, 当故障消失后, 其变化特征也较小, 因此无法通过电流本身的变化特征来进行准确的故障识别。

然而, 在瞬时性故障消失前后, 线路等效电阻和电抗均发生了不同程度的变化, 而电抗和电阻的比值决定了电压和电流的相位差。在该阶段内, 电压、电流相位差如式(6)所示。

$$\theta = \arctan \frac{U_{\text{BC}}}{I_B} = \arctan \frac{2\omega(L_1 + L_2)}{2(R_1 + R_2) + R_f} \quad (6)$$

由于线路电抗和电阻大小相差不大, 且配电网中过渡电阻较小, 因此, 参考工程实际中的案例, 在故障持续阶段中电压电流相位差均位于 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之内。

2.2 故障消失阶段

当瞬时性故障消失后, IIDG 处于无故障孤岛运行状态, 此时孤岛电压如图 6 所示, 其取决于 IIDG 的输出功率和本地负荷功率的匹配程度:

1) 若 IIDG 输出功率能够满足本地负荷的功率需求, 则孤岛电压上升至额定电压附近, IIDG 从低电压穿越控制策略转变为正常运行状态时的单位功率因素的 PQ 控制策略。

2) 若 IIDG 输出功率较小, 与本地负荷功率不匹配时, 此时孤岛电压虽然有一定程度的抬升, 但仍低于额定电压, IIDG 继续采用低电压穿越控制

策略。

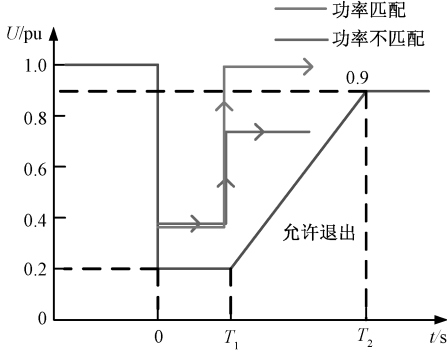


图 6 故障消失后低电压穿越时序图

Fig. 6 Sequence diagram of low voltage ride through after fault disappears

当 BC 相间瞬时性故障消失后,等值网络如图 7 所示。

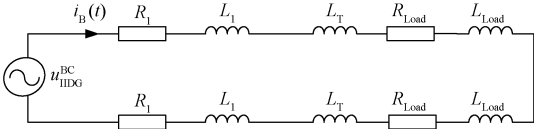


图 7 故障消失后等值网络图

Fig. 7 Equivalent network diagram after fault disappears

由图可得,瞬时性故障消失后新能源端口的等效阻抗如式(7)所示:

$$Z_{eq2} = 2R_1 + 2R_{Load} + j2\omega(L_1 + L_T + L_{Load}) \quad (7)$$

和故障持续阶段同理,对其进一步简化,得到图 8 所示的等效电路。

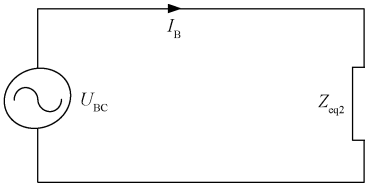


图 8 故障消失后等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit diagram after fault disappears

此时,电压、电流相位差为

$$\theta = \arctan \frac{U_{BC}}{I_B} = \arctan \frac{2\omega(L_1 + L_T + L_{Load})}{2R_1 + 2R_{Load}} \quad (8)$$

由于配电变压器的感抗远大于线路的阻抗,在故障消失后电压电流相位差发生接近 90° 的变化,因此,可利用电压电流相位差的差异实现故障性质的准确识别。

同理,当发生三相短路时,以 A 相为例,瞬时性故障消失前后的相位差如式(9)所示,其中 U_A 、

I_A 为故障后 A 相的电压和电流向量值。

$$\theta = \arctan \frac{U_A}{I_A} = \begin{cases} \arctan \frac{\omega(L_1 + L_2)}{R_1 + R_2 + R_f}, & \text{故障消失前} \\ \arctan \frac{\omega(L_1 + L_T + L_{Load})}{R_1 + R_{Load}}, & \text{故障消失后} \end{cases} \quad (9)$$

因此,当发生三相短路故障时所得出的结论依然适用,故障消失前后相位差仍发生突变。

根据上述分析可知,若在检测期间故障消失,则相位差波形发生突变,且在消失后的一小段时间内相位差波动程度最大,如图 9 所示;若为永久性故障,则电压电流相位差波形不存在突变过程。

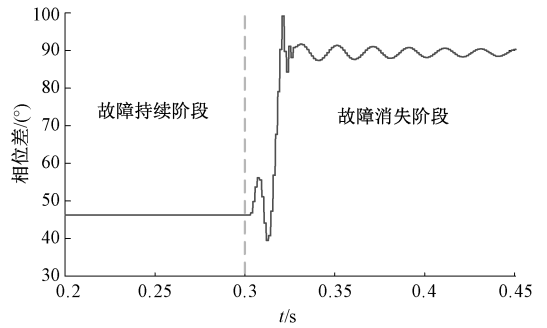


图 9 相位差变化波形图

Fig. 9 Waveform diagram of phase difference change

综上,当发生故障后,采集新能源出口处的电压、电流信息,提取二者的相位差波形可以实现可靠的故障性质识别。

3 基于多维小波变换的自适应重合闸方案

基于上述故障特征分析,本节提出基于多维小波变换的自适应重合闸方案。首先,利用孤岛内新能源出口处所测得的电压电流相位差构造故障性质识别判据。然后,针对新能源低电压穿越时间、防孤岛保护动作时间和重合闸时间存在冲突这一问题,提出自适应重合闸时间整定方案,有效避免新能源故障期间大规模的退出运行。

3.1 小波变换系数分解

小波变换(Wavelet Transform, WT)是一种提取频率-时间局部关系的信号分析方法,可以提取局部信号的不同频率成分,在处理非平稳随机信号方面具有明显优势,可以用式(10)进行表示:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (10)$$

式中: $\psi(k)$ 为母小波函数; a 、 b 分别为尺度因子和平移因子。为了突显所提取的频域特征,在实际工程中通常基于 Mallat 算法进行离散小波变换,其变换过程如图 10 所示。

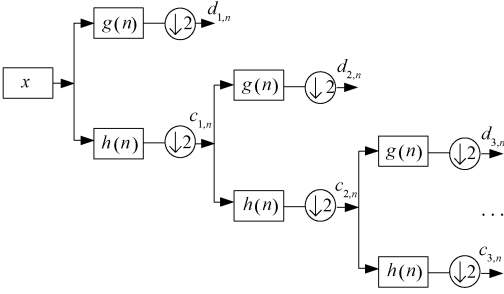


图 10 小波变换过程

Fig. 10 Wavelet transform process

图中, $d_{j,n}$ 和 $c_{j,n}$ 分别为高频细节系数和低频近似系数,分别可表示为^[19]

$$\begin{cases} d_{j,n} = \sum_i g(i - 2n) c_{j-1,i} \\ c_{j,n} = \sum_i h(i - 2n) c_{j-1,i} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, I$ 为当前数据窗中的采样点序号, I 为数据窗内的采样点总数; $g(n)$ 和 $h(n)$ 分别为高通和低通滤波函数,由选取的母小波函数决定,db4 母小波已广泛在电力系统中应用,因此本文选取 db4 作为母小波函数; $j = 1, 2, \dots, J$ 表示小波分解层数, J 为最大分解层数,为提高故障判别的准确度,本文取 J 为 3; $n = 1, 2, \dots, N$ 为小波变换的离散化程度。每层系数所对应的频率范围如图 11 所示,其中 f_s 为采样频率^[19]。

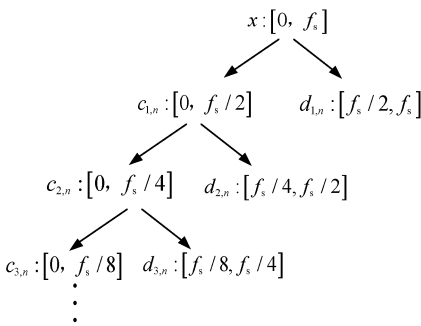


图 11 小波变换频率范围

Fig. 11 Frequency range of wavelet transform

相比于傅里叶变换,离散小波变换在时域上有较高分辨率,能够反映不同频率的波形随时间变化的特征,因此选择小波变换对相位差进行分析可以准确体现出波形突变的特征。

3.2 故障性质识别判据

自适应重合闸的核心是利用故障性质识别,在保证新能源在其低电压穿越时间内不脱网的基础上,加速实现供电恢复^[20]。

由第 2 节分析可知,瞬时性故障消失前后电压电流相位差有较大变化,因此选用该相位差作为故障性质识别的依据。

监测电压电流相位差的数值变化简单明了,但由于负荷阻抗的不确定性,导致相位差的数值不为固定值,直接根据相位差的整定值来进行判别容易产生误判。

为此,本文提出基于多维小波变换的故障性质识别判据,对下游新能源出口处测得的电压电流相位差进行离散小波变换,基于高频细节系数和低频近似系数对瞬时性和永久性故障进行判别。

对电压电流相位差信号进行多维小波分解后,根据所获得的第 j 层高频细节系数求解出其在自己频段内的平均能量 $Q_{d,j}$ 为

$$Q_{d,j} = \frac{\sum_{n=1}^N d_{j,n}^2}{N} \quad (12)$$

式中: $d_{j,n}$ 为第 j 层的高频细节系数; $n = 1, 2, \dots, N$ 为小波变换的离散化程度。

同理,根据所获得的第 j 层低频近似系数求解出其均方根值 $G_{c,j}$ 为

$$G_{c,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^N c_{j,n}^2} \quad (13)$$

式中: $c_{j,n}$ 为第 j 层的低频近似系数; $n = 1, 2, \dots, N$ 为小波变换的离散化程度。

由上节分析可知,当断路器跳闸后,新能源出口处的电压电流相位差在故障持续阶段保持稳定。当故障消失后,相位差发生突变,且突变后发生一定的波动。为了避免负荷波动和噪声的影响引起误判,利用上述所提出的细节系数平均能量值和近似系数均方根值构造双重判据。

1) 判据 1: 定义当前数据窗中各层高频细节系数平均能量之和为 $Q_d(m)$,如式(16)所示,其中 m 为当前数据窗的序号。

$$Q_d(m) = \sum_{j=1}^J Q_{d,j} = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \frac{d_{j,n}^2}{N} \quad (14)$$

当数据窗中信号的各层细节系数平均能量值之和满足下式时,则判定线路发生的故障为瞬时

性故障。

$$\lambda_{Q_d} = Q_d(m) - \overline{Q_d(1 \sim m-1)} > \lambda_{\text{set}} \quad (15)$$

式中: $\overline{Q_d(1 \sim m-1)}$ 为第1~m-1个数据窗中细节系数能量之和的平均值; λ_{set} 为整定值,可根据互感器误差、重合成功率要求等对 λ_{set} 的值进行整定。本文采集多组线路受干扰情况下的数据值,为避免线路遭受其他干扰时导致误判,取 λ_{set} 为20。当互感器误差较大、重合成功率较高时, λ_{set} 可适当增大。

2)判据2:若当前数据窗中的低频近似系数的均方根值满足下式时,则判定线路发生的故障为瞬时性故障,反之则为永久性故障。

$$\gamma_{G_c} = \left| \frac{G_c(m) - G_c(m-1)}{G_c(m-1)} \right| > \gamma_{\text{set}} \quad (16)$$

式中: $G_c(m) - G_c(m-1)$ 表征了相邻两个数据窗的近似系数均方根之差; γ_{set} 为判据2的整定值,实际工程中可根据互感器误差、重合成功率要求等对 γ_{set} 的值进行整定。为了避免线路遭受其他干扰时导致误判,取 γ_{set} 为2。当互感器误差较大、重合成功率较高时, γ_{set} 应适当增大。

使用双重判据可以大大提高故障性质识别的可靠性,主要表现为:

①高频细节系数主要表征高次谐波的变化趋势,当少数采样数据异常时判据2有一定概率达到阈值,而判据1不会受少数异常数据的影响;

②低频近似系数主要表征波形变化的大体趋势,当噪声谐波较大时判据1有一定概率达到阈值,而判据2不会受噪声谐波的影响。

因此,同时使用两个判据可以避免产生误判。

当断路器跳闸后,持续检测新能源出口处的电压电流相位差,利用多维小波变换算法提取得到高频细节系数和低频近似系数,并通过上述计算得到每个数据窗中的细节系数平均能量值和近似系数均方根值。当计算结果同时满足判据1和判据2时,则判定瞬时性故障已经清除。

3.3 故障识别检测时间整定

在新能源接入的配电网中,对故障性质进行识别的主要目的是防止重合于永久故障,导致新能源在低电压穿越期间遭受二次电压跌落的冲击而脱网。

当线路发生永久性故障时,经过一定延时后新能源超出低电压穿越轮廓线或防孤岛保护动作后退出运行,此时若一直进行故障性质的检测已

经没有意义,并且新能源退出后孤岛内已无电压和电流,无法进行判别。因此,需对故障性质识别的时间进行限制。

重合闸的时序图如图12所示。故障发生后,新能源检测到电压跌落,开始进入低电压穿越状态。经过一定延时后保护动作,断路器跳闸,重合闸和防孤岛保护延时开始计时,同时故障性质识别的检测时间也以此为计时起点。防孤岛保护的延时由故障性质识别的结果所决定,当判定故障为永久性故障且新能源未达到低电压穿越极限时,防孤岛保护应立即动作将下游新能源切除。

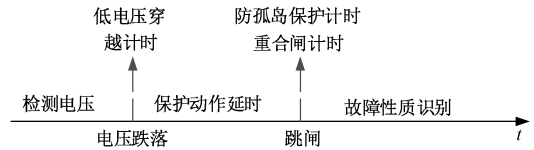


图12 重合闸时序图

Fig. 12 Time sequence diagram of reclosing

重合闸检测时间的整定原则为:

1)当保护动作跳闸延时小于新能源低电压穿越持续时间时,检测时间应不大于低电压穿越持续时间和保护动作跳闸延时的差值。同时,若新能源较长时间持续给短路点提供电流,会导致瞬时性故障发展为永久性故障;且当检测时间大于最大电弧去游离时间 t_{arc} (约0.3s),瞬时性故障均已消失,持续检测已无意义,此时新能源应通过防孤岛保护直接退出运行,因此检测时间也不应大于最大电弧去游离时间。

2)当保护动作跳闸延时大于低电压穿越持续时间时,在断路器跳闸之前新能源已经退出运行,此时再检测新能源出口处的电压、电流已无意义,因此故障检测时间为0。

综上,最大故障识别检测时间 T_{dect} 按式(17)整定:

$$T_{\text{dect}} = \begin{cases} \min\{t_{\text{LVRT}} - t_{\text{trip}}, t_{\text{arc}}\}, & t_{\text{LVRT}} > t_{\text{trip}} \\ 0, & t_{\text{LVRT}} \leq t_{\text{trip}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: t_{trip} 为保护动作跳闸延时时间,其值等于保护动作延时时间和断路器跳闸固有时间和; t_{LVRT} 为新能源低电压穿越持续时间,s,其值与新能源出口处的电压跌落程度有关,如式(18)所示^[17]。

$$t_{\text{LVRT}} = \begin{cases} 1.96U_{\text{pcc.f}} + 0.23, & 0.2 \leq U_{\text{pcc.f}} < 0.9 \\ 0.15, & U_{\text{pcc.f}} < 0.2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $U_{\text{pec.f}}$ 为并网点故障电压的标幺值。检测期间,若判定故障为瞬时性故障,则立即经过约 0.3 s 延时后(躲过电弧去游离时间)进行重合闸;反之,超出检测时间后直接闭锁重合闸,下游新能源退出运行。

3.4 自适应重合闸方案

由于故障消失后孤岛内的电压取决于孤岛内负荷功率和 IIDG 输出功率的匹配程度,定义衡量孤岛无故障正常运行的电压标幺值为

$$U_{\text{normal}} = \eta \frac{P_{\text{IIDG}}}{P_{\text{Load}}} \quad (19)$$

式中: P_{IIDG} 为孤岛内 IIDG 的输出功率; P_{Load} 为孤岛内负荷功率,该值由主站通过通信网络提供; η 为调节系数,本文取 0.9 可以保证当孤岛电压高于该衡量电压标幺值时,孤岛一定处于无故障正常运行状态^[21]。由于在正常运行时孤岛电压也有一定概率低于 U_{normal} ,该衡量电压标幺值只能作为故障性质的初步识别依据,并不能准确可靠对故障性质进行识别。

当保护跳闸延时较大时,瞬时性故障有一定概率在跳闸之前消失,此时若在跳闸后继续进行故障性质识别,则会产生误判。利用该电压标幺值可以大幅度减少这种误判的概率,若跳闸后孤岛内电压标幺值大于 U_{normal} ,则表明故障在跳闸之前已消失。

基于上述分析,提出有源配网自适应重合闸方案,如图 13 所示。

1) 配电线路发生故障,线路保护动作将断路器 CB 跳开,同时利用通信网络将保护动作信息发送至线路下游新能源出口处的保护装置。为避免重合闸方案遭受通信延迟的影响,要求使用的通信网络在 100 km 内的传输时延小于 5 ms(如 5 G 通信网络^[22]),此时可将其忽略不计;当新能源出口保护接受到信号后开始计时,并持续监测新能源并网点的电压电流信息;

2) 若并网点故障电压的标幺值 $U_{\text{pec.f}} > U_{\text{normal}}$,则直接表明故障一定为瞬时性故障,并且在断路器跳闸之前故障已消失,此时不需进行故障性质识别,计及故障熄弧去游离时间(约 0.3 s)后直接发送信号将线路断路器进行重合^[17];

3) 若并网点故障电压的标幺值 $U_{\text{pec.f}} > U_{\text{normal}}$,则新能源出口处的保护装置根据电压跌落情况和保护动作跳闸延时时间计算故障识别检测时间,

在该时间内进行故障性质识别:

① 若检测期间满足瞬时性故障判据,则新能源出口处保护利用通信网络将判别结果传递至线路跳闸保护装置,断路器经 0.3 s 延时后重合闸;

② 若在检测期间未满足瞬时性故障判据,则超出检测时间后新能源出口处保护发送信号至线路跳闸保护装置,直接闭锁重合闸。若 $t_{\text{LVRT}} - t_{\text{trip}} < t_{\text{arc}}$,则下游新能源首先达到低电压穿越极限而退出运行;若 $t_{\text{LVRT}} - t_{\text{trip}} > t_{\text{arc}}$,则首先达到最大电弧去游离时间,下游新能源由防孤岛保护切除,退出运行。

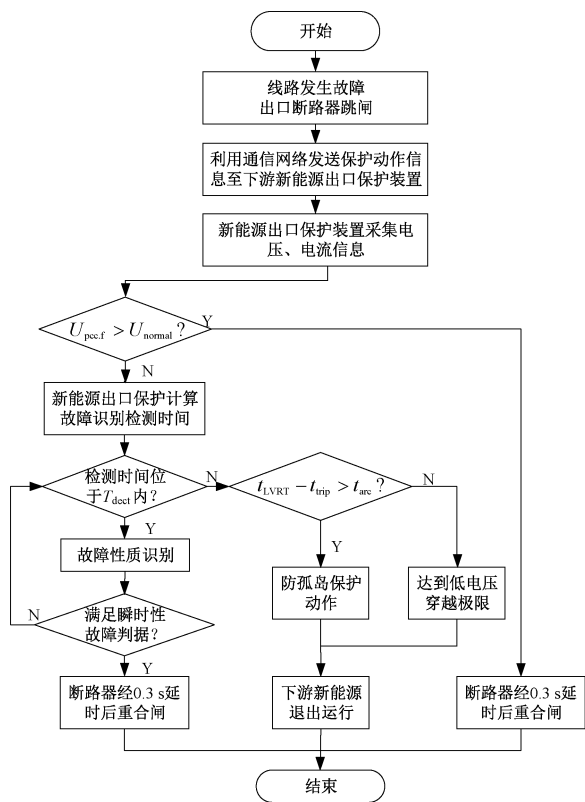


图 13 自适应重合闸方案

Fig. 13 Adaptive reclosing scheme

4 仿真实验

4.1 仿真模型及参数

为验证所提方法,基于 PSCAD/EMTDC 平台,搭建了图 2 所示系统的仿真模型,具体参数如表 1 所示。

在线路断路器跳闸后,发送相应开关量信号给 IIDG2 并网点处保护 8。保护装置 8 的电压、电流采样频率为 1.2 kHz,在接受到该开关量信号后利用窗长为 20 ms 的 FFT 计算电压、电流相位差。

表 1 配电网模型参数

Tab. 1 Parameters of distribution network model

系统参数	数值	系统参数	数值
正序电阻/(Ω/km)	0.14	正序电抗/(Ω/km)	0.38
零序电阻/(Ω/km)	0.39	零序电抗/(Ω/km)	1.18
线路 12 长度/km	10	线路 23 长度/km	10
线路 15 长度/km	7	线路 56 长度/km	4
变压器容量/MVA	2	IIDG1 容量/MW	5
IIDG2 容量/MW	8		

4.2 不同故障类型下自适应重合闸方案验证

当 0.2 s 时 f_1 处发生瞬时性三相故障(故障持续 0.1 s),线路保护 4 中的电流保护 I 段无延时动作,断路器经过 0.03 s 跳闸并发送信号至 IIDG2 并网线路 IIDG 侧保护 8,其接受信号后开始计时,并持续计算 IIDG2 并网点处的电压电流相位差,如图 14 所示。

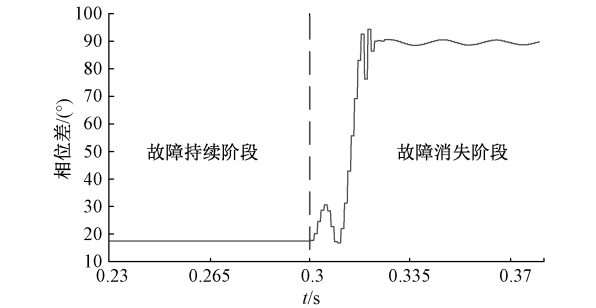


图 14 相位差变化仿真图

Fig. 14 Simulation diagram of phase difference change

保护 8 利用多维小波变换对其波形进行分解,得到的细节系数和近似系数结果如图 15 所示。

仿真结果表明:在故障持续阶段,电压电流相位差较小,且较为稳定;当故障消失后,相位差发生突变,高频细节系数和低频近似系数均发生较大变化。仿真结果与前文理论分析一致。

在故障持续阶段,孤岛电压为 0.32 pu,对应的低电压穿越时间为 0.86 s,最大故障识别检测时间为 0.83 s。故障性质识别从线路断路器跳闸开始计时,在持续检测 88 ms 后(远小于最大故障识别检测时间)计算所得 λ_{Qd} 为 32.56, λ_{Gc} 为 2.07,均达到阈值,判定为瞬时性故障。此时 IIDG2 出口保护 8 发送信号至线路保护 4,线路断路器经过 0.3 s 后重合。整体重合延时为 0.388 s,相比于目前需要经过 1.2 s 以上延时的传统重合闸,该方法已大大缩减延时时间,且不会导致 IIDG2 在低电压穿越期间内脱网。

为验证在不同故障类型下所提自适应重合闸

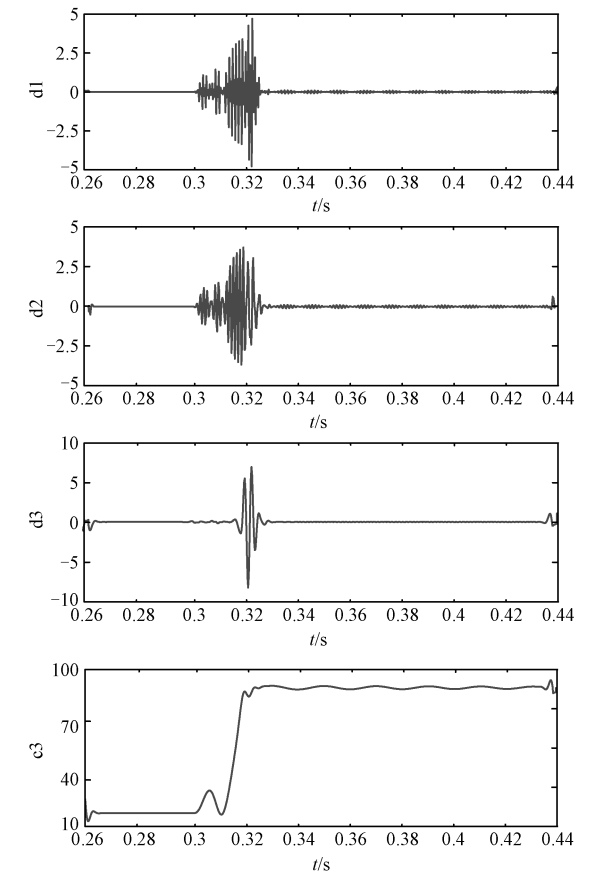


图 15 f_1 故障时小波变换结果

Fig. 15 Results of WT when fault occurs at f_1

方案的适应性,在 f_1 处分别再设置两相短路和两相接地短路,并且在瞬时性故障(0.1 s 故障消失)和永久性故障两种场景下都进行仿真,仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同故障类型下仿真结果

Tab. 2 Simulation results under different fault types				
故障类型	跳闸瞬间孤岛电压幅值/pu	故障性质	检测时间/ms	判别结果
两相故障	0.42	瞬时性故障	97	直接重合
		永久性故障	300	闭锁重合
两相接地故障	0.39	瞬时性故障	91	直接重合
		永久性故障	300	闭锁重合

具体仿真分析如下:

1) 当发生两相瞬时性故障时,在持续检测 97 ms(小于最大检测时间)时计算所得的 λ_{Qd} 为 29.44, λ_{Gc} 为 2.11,均达到阈值,判别为瞬时性故障。线路断路器经过 0.3 s 后重合,整体重合延时为 0.397 s。重合延时未超过 IIDG 的低电压穿越运行极限,IIDG1 和 IIDG2 均成功穿越故障,故障期间未退出运行。

2) 当发生两相永久性故障时,根据电压跌落

程度计算所得的 $t_{LVRT}-t_{trip}=1\,023.2\text{ ms}>t_{arc}$, 因此最大检测时间为 300 ms 。在持续检测 300 ms 时计算所得的 λ_{Qd} 和 λ_{Gc} 均未达到阈值, 此时已达到最大检测时间, 不再进行故障性质检测, 判别为永久性故障。由于未达到低电压穿越的运行极限, 防孤岛保护动作将 IIDG2 切除。IIDG1 在断路器跳闸后恢复正常运行, 且不遭受二次电压跌落, 成功完成故障穿越。

3) 当发生两相接地瞬时性故障时, 在持续检测 91 ms (小于最大检测时间) 时计算所得的 λ_{Qd} 为 27.98 , λ_{Gc} 为 2.17 , 均达到阈值, 判别为瞬时性故障。线路断路器经过 0.3 s 后重合, 整体重合延时为 0.391 s 。同理, IIDG1 和 IIDG2 均成功穿越故障。

4) 当发生两相接地永久性故障时, 根据电压跌落程度计算所得的 $t_{LVRT}-t_{trip}=964.4\text{ ms}>t_{arc}$, 因此最大检测时间为 300 ms 。同理, 在最大检测时间内 λ_{Qd} 和 λ_{Gc} 均未达到阈值, 判别为永久性故障。防孤岛保护动作将 IIDG2 切除, IIDG1 成功完成故障穿越。

综上, 本文所提的故障性质识别判据在不同故障类型下均能可靠识别故障性质, 均能大大缩减重合闸延时时间。

4.3 不同故障位置下自适应重合闸方案验证

为了验证不同故障位置下所提方案的适应性, 即验证所提方案是否存在识别死区问题, 当 0.2 s 时在线路 23 上每间隔 10% 线路长度设置瞬时性三相故障 (故障持续 0.1 s), 保护 8 利用多维小波变换对 IIDG2 并网点处的电压电流相位差进行分解, 如图 16 所示。

由仿真结果可知, 在不同位置发生瞬时性故障时, 0.3 s 故障消失后电压电流相位差的高频细节系数和低频近似系数发生较大程度的变化, 均达到判据的阈值, 判定为瞬时性故障。

由波形对比可知, 当故障点越来越远离母线 2 时, 故障消除前后阻抗变化更明显, 细节系数和近似系数变化程度更大, 该仿真结果与前文理论分析一致。因此, 不管故障点至 IIDG 并网点距离远近, 所提方法在不同故障位置下均能可靠判别故障性质, 即不存在故障性质识别死区。

同时, 选择线路 23 上 30% 、 60% 和 90% (距离母线 2) 这三个典型位置对重合闸时序进行仿真验证, 当在这三个典型位置发生三相短路时, 其时序

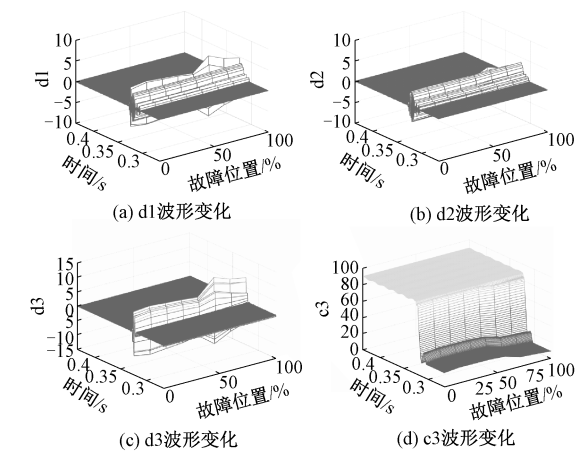


图 16 不同故障位置下小波变换结果
Fig. 16 Wavelet transform results under different fault locations

如表 3 所示。

表 3 不同故障位置下时序仿真结果				
Tab. 3 Timing simulation under different fault locations				
故障位置	跳闸瞬间电压 幅值/pu	故障性质	检测时间/ ms	重合时间/ ms
30%	0.37	瞬时性故障	93	393
		永久性故障	300	闭锁
60%	0.354	瞬时性故障	90.2	390.2
		永久性故障	300	闭锁
90%	0.812	瞬时性故障	0	300
		永久性故障	300	闭锁

具体仿真分析如下:

1) 当瞬时性故障发生在线路 30% 处时, 线路电流保护 I 段无延时动作, 断路器经过 0.03 s 跳闸后发送信号至 IIDG2 出口保护装置 8。在持续检测 93 ms (小于最大检测时间) 时计算所得的 λ_{Qd} 为 36.74 , λ_{Gc} 为 2.86 , 均达到阈值, 判别为瞬时故障。

2) 当瞬时性故障发生在线路 60% 处时, 同理, 在持续检测 90.2 ms (小于最大检测时间) 时计算所得的 λ_{Qd} 为 39.3 , λ_{Gc} 为 2.47 , 均达到阈值, 判别为瞬时故障。

3) 当瞬时性故障发生在线路 90% 处时, 线路电流保护 II 段经 0.5 s 延时后动作, 此时在跳闸之前故障已经消失。跳闸之后孤岛内 $U_{pec.f}$ 为 0.812 , 计算所得的 U_{nomal} 为 0.78 , 判定故障已在跳闸之前消失, 经 300 ms 后直接重合。

4.4 不同过渡电阻下自适应重合闸方案验证

随着故障点处过渡电阻的变化, 故障特征也会随之变化。配电网中往往发生经过渡电阻接地的短路故障, 自适应重合闸也需在经高阻接地短路时正确识别故障性质。

当 0.2 s 在 f_1 点设置经不同过渡电阻接地的短路故障, IIDG2 并网点处电压电流相位差的细节系数和近似系数如图 17 所示。

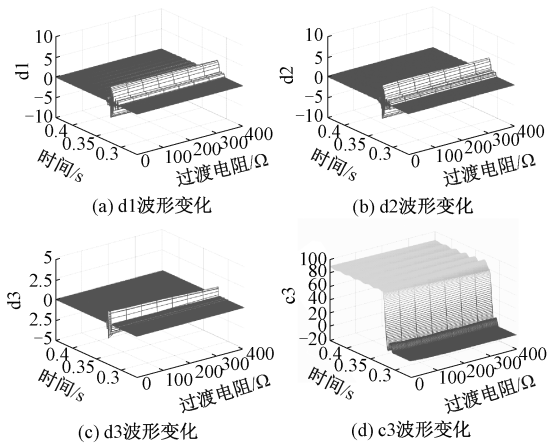


图 17 不同过渡电阻下小波变换结果

Fig. 17 Wavelet transform results under different transition resistances

由仿真结果可知,随着过渡电阻的增大,各系数的突变程度有略微减小。根据第 2 节理论分析可知,由于过渡电阻支路并联在网络中,过渡电阻越大,故障消除前后阻抗变换程度越小,因此各系数变化程度也应越小。该仿真结果与前文理论分析一致。

可见,本文所提故障性质识别方法在不同过渡电阻下均能可靠判别故障性质。

4.5 与传统前加速无检重合闸性能对比

4.5.1 IIDG1 的低电压穿越效果

当 1 s 时故障发生在线路 f_1 处,故障类型为永久性三相故障,传统重合闸延时 1.2 s 后重合,本文方案在超出检测时间后直接闭锁重合闸。对比分析在两种方案下 IIDG1 的低电压穿越效果结果如图 18 所示。

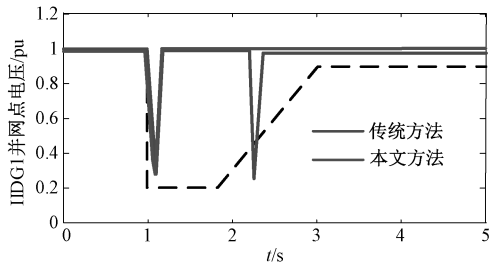


图 18 IIDG1 的低电压穿越效果对比

Fig. 18 Comparison of low voltage ride through effect of IIDG1

从图中可以看出,当采用传统重合闸进行重合时, IIDG1 在 1.2 s 处并未完成第一次低电压穿

越,重合于永久性故障后电压二次跌落,并且超出低电压穿越的轮廓线,导致其退出运行。采用本文所提方案时,在其低电压穿越期间识别出永久性故障后,直接闭锁重合闸, IIDG1 并网点电压不会二次跌落,其完成低电压穿越后继续正常运行。因此,当发生永久性故障时,采用本文方法可以保证除故障点下游的 IIDG 均不会在低电压穿越期间退出运行,提高了系统的安全性。

4.5.2 IIDG2 的低电压穿越效果

当 1 s 时故障发生在线路 f_1 处,故障类型为瞬时性三相故障(故障持续 0.1 s),传统重合闸延时 1.2 s 后重合,本文所提方案在识别出瞬时性故障后直接进行重合。由于孤岛内本地负荷功率需求较大,与 IIDG2 输出功率不匹配,故障消失后孤岛内电压仍较低。对比分析在两种方案下 IIDG2 的低电压穿越效果结果如图 19 所示。

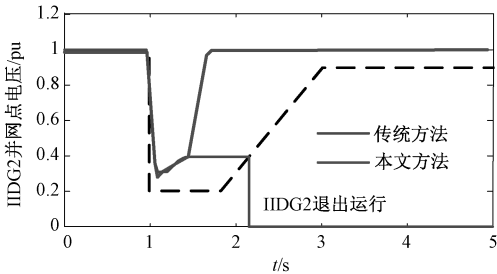


图 19 IIDG2 的低电压穿越效果对比

Fig. 19 Comparison of low voltage ride through effect of IIDG2

从图中可以看出,当采用传统重合闸方法时,在重合闸延时的 1.2 s 内 IIDG2 已超出低电压穿越轮廓线而退出运行,导致发生瞬时性故障时重合之前故障点下游仍有一段时间处于失电状态。当采用本文方法时,在瞬时性故障下不仅不会造成故障点下游新能源的退出,而且在较短时间内实现了孤岛的并网运行。

5 结 论

由于传统配电网只在线路单侧配置无检重合闸,在故障发生后盲目的重合会导致配网中新能源在低电压穿越期间大规模脱网。本文分析了在断路器跳闸后,其下游孤岛内的故障特征,并进一步分析了故障性质检测时间、低电压穿越时间、防孤岛保护动作时间和重合闸时间四者的时序配合问题,提出了基于多维小波变换的有源配网自适应重合闸方案。经理论推导和仿真验证,得出结论如下:

1) 利用多维小波变换对电压、电流相位差进行分解, 并利用细节系数和近似系数构造故障识别双重判据, 其不同故障情况下均能实现可靠识别, 具有较强的耐受过渡电阻能力。

2) 在瞬时性故障下, 所提方案不仅不会造成故障点下游新能源的退出, 而且在较短时间内实现了重合闸动作, 大大缩减了供电恢复时间。

3) 在永久性故障下, 所提方案可保证除故障点下游的新能源均不会在其低电压穿越期间退出运行, 提高了系统的安全稳定性。

该方法不需增加额外装置, 仅利用新能源并网点处的故障信息即可。方法有效避免了故障期间新能源大规模脱网, 相比于通信投资, 系统整体经济效益更高。

参考文献:

- [1] 肖澍昱, 林湘宁, 魏繁荣, 等. 面向含不可测分支配电线路不对称故障可靠辨识的负序电流比相保护判据 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (9): 2435–2447.
XIAO Shuyu, LIN Xiangning, WEI Fanrong, et al. Phase comparison protection of negative sequence current for distribution lines with unmeasurable branches [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (9): 2435–2447 (in Chinese).
- [2] 马伟明. 关于电工学科前沿技术发展的若干思考 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (22): 4627–4636.
MA Weiming. Thoughts on the development of frontier technology in electrical engineering [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (22): 4627–4636 (in Chinese).
- [3] 邵文权, 贺雨昕, 关欣, 等. 利用多次扰动电流波形特征的配电网相间永久故障识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (7): 146–157.
SHAO Wenquan, HE Yuxin, GUAN Xin, et al. Identification method for an interphase permanent fault in a distribution network using waveform characteristics of multiple disturbance currents [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51 (7): 146–157 (in Chinese).
- [4] 廖宏宇, 康小宁, 袁燕磊, 等. 利用注入信号的配电网自适应三相重合闸研究 [J]. 电网技术, 2021, 45 (7): 2623–2630.
MIAO Hongyu, KANG Xiaoning, YUAN Yanlei, et al. Adaptive three-phase reclosing device of distribution network based on injected signals [J]. Power System Technology, 2021, 45 (7): 2623–2630 (in Chinese).
- [5] 朱珂, 宋玉涛, 徐玉刚, 等. 一种配电线路有源自适应重合闸技术研究 [J]. 电网技术, 2017, 41 (3): 993–999.
ZHU Ke, SONG Yutao, XU Yugang. An active adaptive reclosing scheme for distribution lines [J]. Power System Technology, 2017, 41 (3): 993–999 (in Chinese).
- [6] 陈海东, 蒙飞, 赵磊, 等. 利用分布式电源注入信号的配电线路故障性质识别技术 [J]. 高压电器, 2022, 58 (12): 123–129.
CHEN Haidong, MENG Fei, ZHAO Lei, et al. Fault identification technology for distribution line based on distributed generation injection signal [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58 (12): 123–129 (in Chinese).
- [7] 解超, 李凤婷, 樊艳芳, 等. 应用附加电容器的不带并联电抗器输电线路自适应三相重合闸策略 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (6): 1811–1818.
XIE Chao, LI Fengting, FAN Yanfang, et al. Adaptive three-phase reclosing scheme of transmission lines without shunt reactors using additional capacitors [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (6): 1811–1818 (in Chinese).
- [8] LUO X, HUANG C, JIANG Y, et al. Adaptive single-phase reclosure scheme for transmission lines with shunt reactors based on current inner product [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11 (7): 1770–1776.
- [9] 邵文权, 刘一璇, 关欣, 等. 一种主动探测式的配电网相间重合前永久性故障判别方案 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (14): 96–103.
SHAO Wenquan, LIU Yixuan, GUAN Xin, et al. An active detection scheme for permanent fault identification before phase-to-phase reclosing in a distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (14): 96–103 (in Chinese).
- [10] 李育强, 宋国兵, 王维庆, 等. 基于参数识别光伏接入配网永久性故障判别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (16): 1–7.
LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (16): 1–7 (in Chinese).
- [11] 李浩, 宋国兵, 樊艳芳, 等. 利用分相开关探测的配电网永久性故障识别方法 [J]. 电力系统保护与控

- 制, 2023, 51 (5): 11–21.
- LI Hao, SONG Guobing, FAN Yanfang, et al. Permanent fault identification method of a distribution network based on detection using a phase segregated switch [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51 (5): 11–21 (in Chinese).
- [12] 梁振锋, 索南加乐, 康小宁, 等. 利用自由振荡频率识别的三相重合闸永久性故障判别 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (7): 124–130.
- LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, et al. Permanent faults identification using free oscillation frequency for three-phase reclosure on transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (7): 124–130 (in Chinese).
- [13] XIE C, LI F. Adaptive comprehensive auto-reclosing scheme for shunt reactor-compensated transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35 (5): 2149–2158.
- [14] 李育强, 王志文, 王维庆, 等. 具备 LVRT 能力的光伏接入配网对重合闸的影响及对策 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (15): 61–67.
- LI Yuqiang, WANG Zhiwen, WANG Weiqing, et al. Influence of PV with LVRT capability access to distribution network on automatic reclosing and its countermeasures [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (15): 61–67 (in Chinese).
- [15] 郭金学, 南东亮, 郝红岩, 等. 光伏电站接入对距离保护和重合闸的影响 [J]. 电气技术, 2017, (11): 25–31+38.
- GUO Jinxue, NAN Dongliang, HAO Hongyan, et al. Effects of PV power station on distance protection and automatic reclosing [J]. Electrical Engineering, 2017, (11): 25–31+38 (in Chinese).
- [16] FLORES S, BUI N, SALMANI A, et al. Impact analysis of high PV penetration on protection of distribution systems using real-time simulation and testing: a utility case study [C]. 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 2–6, 2020, Montreal, Canada: 1–5.
- [17] 杨彬, 贾科, 李俊涛, 等. 基于电压上升限时检测的含新能源配电网自适应重合闸 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (22): 66–74.
- YANG Bin, JIA Ke, LI Juntao, et al. Adaptive reclosing based on time-limited detection of voltage rise for the renewable energy sources connected distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (22): 66–74 (in Chinese).
- [18] 邵文权, 刘朋跃, 王斌, 等. 基于等值阻抗相位特征的带并补电抗线路单相自适应重合闸故障识别方法 [J]. 电网技术, 2020, 44 (5): 1796–1805.
- SHAO Wenquan, LIU Pengyue, WANG Bin, et al. Single-phase adaptive reclosure fault identification for transmission lines with shunt reactors based on equivalent impedance phase property [J]. Power System Technology, 2020, 44 (5): 1796–1805 (in Chinese).
- [19] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (9): 115–123.
- YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43 (9): 115–123 (in Chinese).
- [20] 罗勋华, 黄纯, 江亚群, 等. 基于电压内积的带并联电抗器输电线路单相自适应重合闸 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (11): 17–25.
- LUO Xunhua, HUANG Chun, JIANG Yaquin, et al. A voltage inner product based approach for single-phase adaptive reclosure on transmission line with shunt reactors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (11): 17–25 (in Chinese).
- [21] 徐可寒. 适应逆变型电源集中接入的线路保护与重合闸技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- XU Kehan. Research on line protection and reclosing technology adapted to centralized access of inverter power supply [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021 (in Chinese).
- [22] 王晓卫, 康乾坤, 梁振锋, 等. 考虑 5G 基站储能参与配网供电恢复研究 [J]. 电工技术学报, 2024, 39 (11): 3538–3555.
- WANG Xiaowei, KANG Qiankun, LIANG Zhenfeng, et al. Distribution network restoration supply method considers 5G base station energy storage participation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (11): 3538–3555 (in Chinese).

作者简介:

戴志辉 (1980), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: daihuadian@163.com;

柳梅元 (1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: 1003517132@qq.com.