

引用格式:叶远波,李端超,汪胜和,等.基于广义S变换和皮尔逊相关系数的新能源接入电网纵联保护[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):194-202.

Citation: YE Yuanbo, LI Duanchao, WANG Shenghe, et al. Pilot protection for new energy access to power grid based on generalized S transform and Pearson correlation coefficient [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 194-202.

基于广义S变换和皮尔逊相关系数的新能源 接入电网纵联保护

叶远波¹, 李端超¹, 汪胜和¹, 郑涛², 苏毅²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 北京四方继保自动化有限公司, 北京 100085)

摘要:随着新型电力系统建设的推进,分布式新能源容量大幅度提升,越来越多的电力电子设备接入电力系统中,导致短路时送出线的电流幅值受限,相角受控,造成传统的工频继电保护方法不再适用。此外,现有的方法在新能源出力较弱时容易出现保护判据失效的问题。为解决以上问题,提出一种基于广义S变换和皮尔逊相关系数的新能源接入电网纵联保护方法。首先,分别对两端电流使用广义S变换得出频域下的故障特征量;然后,使用皮尔逊相关系数计算两端暂态能量相关程度,进一步辨别区内和区外故障;最后,经过实验表明,所提方法能够满足保护的快速性要求,而且具有较强的耐受过渡电阻能力,该方法不受由新能源电力电子设备接入引起的短路电流新特性影响,能够应用于新能源送出线中。

关键词:新型电力系统;分布式新能源;广义S变换;皮尔逊相关系数;纵联保护

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.020 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)06-0194-09

Pilot protection for new energy access to power grid based on generalized S transform and Pearson correlation coefficient

YE Yuanbo¹, LI Duanchao¹, WANG Shenghe¹, ZHENG Tao², SU Yi²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: As the construction of new power systems proceeds, the capacity of distributed new energy has greatly increased, and more and more power electronic devices are connected to the power system, resulting in limited current amplitude and controlled phase angle of the transmission lines during short circuits. Therefore, the traditional power frequency relay protection methods are no longer applicable. In addition, existing methods are prone to the failure of protection criteria when the output of new energy is weak. To address these issues, a pilot protection method for new energy access to the power grid based on generalized S transform and Pearson correlation coefficient is proposed. Firstly, the generalized S transform is used to obtain the fault characteristic quantities in the frequency domain for currents at both ends. Then, the Pearson correlation coefficient is utilized to calculate the correlation degree of transient energy at both ends, so as to further identify intra-zone and extra-zone faults. Finally, experiments show that the proposed method can meet the requirements of protection rapidity and has a strong ability to withstand transition resistance. This method is not affected by the new characteristics of short-circuit current caused by the connection of new energy power electronic devices and can be applied to transmission lines of new energy.

Key words: new power system; distributed new energy; generalized S transform; Pearson correlation coefficient; pilot protection

收稿日期: 2023-05-23; 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2166205); 国家电网有限公司科技项目(521200220009)

通信作者: 叶远波(1973—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统继电保护研究; E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

随着“双碳”目标的推进,建设新型电力系统成为国家的发展战略,高比例分布式新能源并网成为一种趋势^[1-4]。然而大规模分布式新能源并网时,会导致大量电力电子设备接入电网,进而造成故障电流相角受控,新的非工频电流也会产生。传统的以工频为基础的保护方法不再适用,容易出现保护误动、拒动等问题^[5-14],给整个电力系统的安全稳定带来了挑战,因此有必要研究出一种新的保护方法来适应高比例新能源接入的电网,保护新能源送出线路。

传统的送出线路保护主要包含频域保护和时域保护。频域保护是利用不同频段故障特征形成保护判据。文献[15-17]利用双侧工频故障特征构成保护判据,但是该方法以工频信息为基础,面对新能源接入时产生的短路电流频率偏移、幅值受控的情况,保护灵敏度降低,容易出现拒动的现象。文献[18-19]利用线路高频故障特征形成新的保护判据,但是该方法采用的频率信息单一,面对高噪声和高谐波的场景,保护灵敏度会降低。时域保护通过可以测量的时变量故障特征构成保护判据。文献[20-23]利用双侧电流故障波形的差异性,采用不同的相似度算法进行保护判断;文献[24-25]利用区内和区外的电压、电流故障差异性构成保护判据,但是该方法过度依赖双侧线路电压电流的取值,如果电网容量较低,电流值较小,保护会出现拒动的现象。

针对传统保护方法出现的问题,有学者提出基于相似度的保护方法。文献[26-27]研究了各种风力发电短路电流和同步机的差异性,利用余弦算法计算出双侧波形相似度,构造保护判据。文献[28-29]提出基于电流相量夹角余弦值的纵联保护方法,但是该方法在新能源出力较弱时容易出现保护判据失效的问题。

基于上述问题,本文提出一种基于广义 S 变换和皮尔逊相关系数的新能源接入电网纵联保护方法,分别对两端电流使用广义 S 变换得出频域下的故障特征量,使用皮尔逊相关系数计算两端暂态能量相关程度,进一步辨别区内和区外故障。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中搭建分布式新能源并网模型,分别在不同故障位置以及不同故障电阻的场景下进行验证,经过实验表明,所提方法能够满足保护的快速性要求,而且具有较强的耐受过渡电阻能力。该方法不受由新能源电力电子装置接入

引起的短路电流新特性影响,能够应用于新能源送出线中。

1 新能源接入电网故障分析

1.1 系统结构

分布式新能源接入电网拓扑图如图 1 所示,包括分布式新能源场站和送出线路。分布式新能源场站中,由风力发电机、光伏发电机与箱变串联一起组成的多个发电模块,经过汇集线路将电能输送至 35 kV 的汇集母线上,这条新能源汇集线路包含 120 个新能源和 120 个箱式变压器,其中光伏发电机有 100 个,风力发电机有 20 个,一共包含 3 条汇集母线。汇集母线再将汇集的电能经过主变传送至 220 kV 的高压母线上,经过输电线路将电能传输至外部系统。

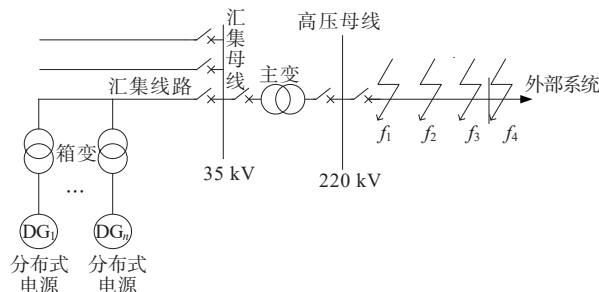


图 1 分布式新能源接入电网拓扑图

Figure 1 Topology of distributed new energy access to power grid

新能源逆变器主要采用锁相环控制的方式,如图 2 所示,逆变器等效成一个电流源,锁相环结构简单,能够在保持稳定性能的情况下进行同步并网。此外,其中还包括电压前馈模块,能够有效抑制谐波和提升动态响应能力。

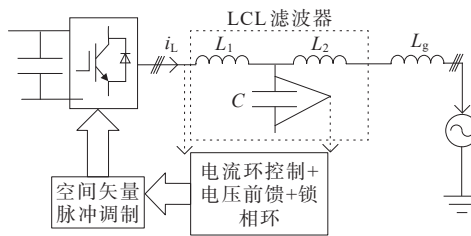


图 2 新能源逆变器控制示意图

Figure 2 New energy inverter control

1.2 故障电流特性分析

如图 1 所示,在分布式电源接入的电网的 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 处分别发生故障,其中 f_1 、 f_2 、 f_3 为区内故障, f_4 为区外故障。以单相接地故障为例进行分析,发生区内故障时,等效电路如图 3 所示。

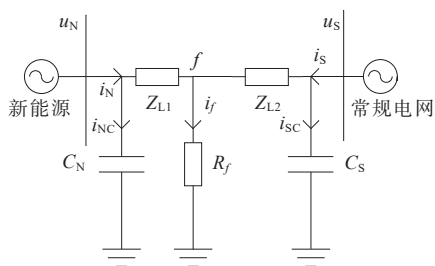


图3 区内故障等效电路

Figure 3 Equivalent circuit for intra-zone faults

电路双端电容电流如下:

$$\begin{cases} i_{NC} = C_N \frac{du_N}{dt} \\ i_{SC} = C_S \frac{du_S}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_{NC} 、 i_{SC} 为流入双侧故障点电容的电流; C_N 、 C_S 为双侧对地电容; u_N 、 u_S 为双侧故障时电压。

双端提供的短路电流为

$$i_N + i_S = i_f + i_{NC} + i_{SC} \quad (2)$$

式中, i_N 、 i_S 为流入双侧的短路电流; i_f 为故障点 f 的电流; $i_N + i_S$ 为差动电流, 通过式(1)、(2)可以得到:

$$i_N + i_S = C_N \frac{du_N}{dt} + C_S \frac{du_S}{dt} + i_f \quad (3)$$

区内故障时差动电流包括2个部分: 双侧电容产生的电流、故障发生后双侧系统提供的短路电流, 后者的幅值大于前者。

区外故障时, 等效电路如图4所示。

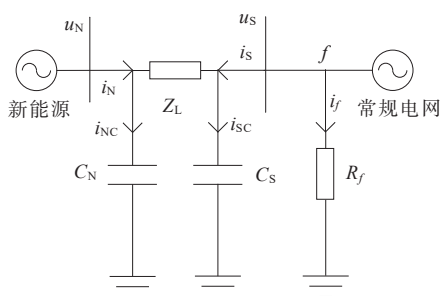


图4 区外故障等效电路

Figure 4 Equivalent circuit for extra-zone faults

线路双侧电容电流如下:

$$\begin{cases} i_{NC} = C \frac{du_N}{dt} \\ i_{SC} = C \frac{du_S}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中, C 为线路双侧等效对地电容。

双侧短路电流为

$$i_N + i_S = i_{NC} + i_{SC} \quad (5)$$

同理, 依据差动原理, 结合式(4)、(5)得到差动电流如下:

$$i_N + i_S = C \frac{du_N}{dt} + C \frac{du_S}{dt} \quad (6)$$

由式(6)可知, 区外故障时差动电流只包含电容电流。通过式(3)、(6)对比可知, 分布式新能源送出线路发生故障时, 区内、区外故障时的差动电流有一定的差异, 区内故障包含较大的短路电流。

1.3 故障电流频率特征分析

电容的电压和电流关系如下:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (7)$$

流过电容的电流和电压的微分成正比关系, 频率和电压变化呈正相关的关系。行波传播的过程中电压暂态会产生较多的高频分量, 进而引起电容电流产生高频分量, 故电容电流的频率同行波频率基本相同, 频率的公式如下:

$$f_s = \frac{(\theta_s + \theta_F + 2k\pi)v}{4\pi d} \quad (8)$$

式中, k 为整数; θ_s 为起始点反射系数角, 取值为0到 π ; θ_F 为故障点反射系数相角, 取值为0 rad; v 为行波速度; d 为故障点到线路起始点的距离。

最小固有频率的值为

$$f_{s, \min} = \frac{v}{4d} \quad (9)$$

由文献[30]可知, 220 kV 的新能源输出线路长度为100~300 km, 传输容量为100~500 MW, 那么得到最小固有频率 $f_{s, \min}$ 为250 Hz, 因此暂态电容电流频率最低值为250 Hz。

分布式新能源送出线路故障电流有一定的差异, 主要体现在区内故障包含频段低、幅值大、含量高的短路电流。因此故障在区内、区外的区别主要体现在差动电流低频段上, 高频段上差距不大。通过分析电流高频、低频的分布状况就可以区别区内和区外故障。

以区内点 f_1 、区外点 f_4 分别发生单相接地故障为例(A相), 在0 ms时刻发生故障, 采样率为5 kHz, 差动电流的频段分布如图5、6所示。每组曲线分别为原始信号、低频分段信号以及高频分段信号。由图5、6可知, 故障发生后的5 ms内, 区内差动故障电流值远高于区外故障差动电流值, 并且区内故障差流频率主要分布于低频, 区外故障差流频率主要分布于高频, 和分析结果一致。

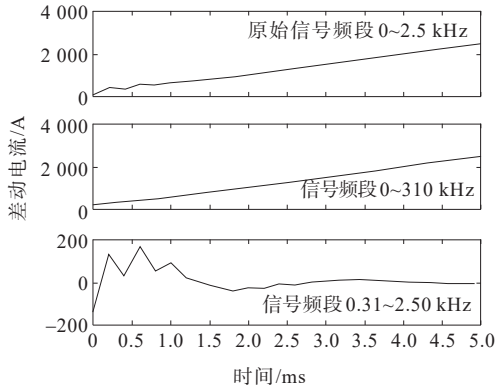


图 5 区内故障各个频段电流

Figure 5 Currents in various frequency bands of intra-zone faults

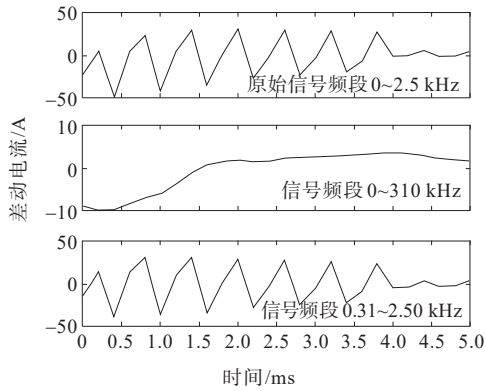


图 6 区外故障各个频段电流

Figure 6 Currents in various frequency bands of extra-zone faults

2 广义 S 变换

2.1 基本原理

S 变换就是通过对原始信号添加高斯窗函数进行傅里叶变换,该高斯窗函数随频率的变化而变化,最终形成 S 矩阵,该矩阵具有时频特性,能够表现出不同频率信号的幅值和相位的变化。

已知原始信号 $x(t)$, 定义 S 变换如下:

$$\begin{cases} S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \\ \omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, t 为时间参数; τ 为高斯窗函数控制参数; f 为频率。

由式(10)可知,时间窗函数宽度和频率呈负相关关系,当频率变低时,时间窗函数宽度变宽,当频率变高时,时间窗函数宽度变窄。使用 S 变换可以使得低频率段时间窗函数较宽,高频率段时间窗函数较窄。

广义 S 变换是在原来的 S 变换的高斯窗函数中

添加大于零的调节因子 g , 进一步优化 S 变换的时频分辨率, 则广义 S 变换的窗函数公式如下:

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{g\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2g^2}} \quad (11)$$

窗函数通过调节 g 的大小进一步优化广义 S 变换的时频分辨率, 则广义 S 变换公式如下:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|}{g\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2g^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (12)$$

如果 $g=0$, 那么广义 S 变换等效于 S 变换; 如果 $g>1$, 那么广义 S 变换有较高的频率分辨率, 能够形成清晰的高频信号; 如果 $0 < g < 1$, 那么广义 S 变换有较高的时间分辨率, 能够检测出突变点。

2.2 离散广义 S 变换

本文采集的电流信号属于离散信号, 因此需要研究离散广义 S 变换。如果输入信号 $x(t)$ 的离散向量为 $x[iT]$, 那么 $x[iT]$ 的离散傅里叶变换如下:

$$X\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[iT] e^{-\frac{j2\pi ni}{N}} \quad (13)$$

式中, N 为采样点个数; n 的范围为 0 到 $N-1$ 的整数; T 为采样时间间隔。

令式(12)中的 $f = \frac{n}{NT}$, $\tau = kT$, 那么离散向量

$x[iT]$ 广义 S 变换如下:

$$\begin{cases} S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2 g^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mk}{N}}, & n \neq 0 \\ S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m}{NT}\right], & n = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, k 为 0 到 $N-1$ 的整数。

信号在特定频段下的广义 S 变换暂态能量和为

$$E = \sum_{p=0}^P \sum_{q=1}^Q \left\{ \text{abs}(S[p, q]) \right\}^2 \quad (15)$$

式中, $S[p, q]$ 为复时频矩阵, 行向量为某一个频率下的时域特征, 列向量为某一个时刻的幅频特征; $\text{abs}(S[p, q])$ 为 $S[p, q]$ 矩阵元素绝对值。

3 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数是一种衡量 2 个变量的线性相关的方法, 可通过数据的协方差矩阵来评估变量的关系程度, 相关系数定义如下:

$$\begin{cases} \rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \\ \text{Cov}(X, Y) = 2E((X - EX)(Y - EY)) \end{cases} \quad (16)$$

式中, $D(X)$ 、 $D(Y)$ 分别为2个变量 X 、 Y 的方差; E 为均值; $\sqrt{D(X)}$ 、 $\sqrt{D(Y)}$ 分别为2个变量 X 、 Y 的标准差; $\text{Cov}(X, Y)$ 为2个变量 X 、 Y 的协方差; ρ_{XY} 为2个变量 X 、 Y 的相关系数, 含义为变量之间的协方差与标准差的商, 范围为-1到1, 绝对值越大, 说明2个变量越相关, 当值为0时, 2个变量不相关, 如果相关系数的值大于0, 那么2个变量呈正相关, 如果相关系数的值小于0, 那么2个变量呈负相关。

皮尔逊相关系数为

$$r_{XY} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right] \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \right]} \quad (17)$$

式中, r_{XY} 为皮尔逊相关系数; X_i 、 Y_i 分别为序列变量 X 、 Y 第 i 个序列的值; \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为序列变量 X 、 Y 的均值。

4 纵联保护方案

综上, 当新能源接入的电网送出线路发生故障时, 各频段信息会有差异, 利用广义S变换提取出双端线路电流各频段暂态能量, 然后将暂态能量皮尔逊相关系数计算出来即可完成区内、区外故障的区分。

4.1 保护启动判据

整个电网正常运行时, 电流会在 $\pm 5\%$ 范围内进行波动。为了防止出现保护的误动作, 当电流变化量超过 10% 额定值时, 再启动判据, 如下:

$$|\Delta i| > 0.1 I_n \quad (18)$$

式中, Δi 为采集的电流变化量; I_n 为额定电流的大小。

4.2 区内外故障保护判据

保护装置通过特定的采样率进行采样, 假设安装在线路两侧的保护装置分别为装置M和装置N, 装置M采集的电流值为 $i_m = \{i_{m1}, i_{m2}, \dots, i_{mN}\}$, 装置N采集的电流值为 $i_n = \{i_{n1}, i_{n2}, \dots, i_{nN}\}$, 则两侧采集的电流经过广义S变换后得到的暂态能量分别 $E_m = \{E_{m1}, E_{m2}, \dots, E_{mN}\}$ 、 $E_n = \{E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nN}\}$, 计算两者的皮尔逊相关系数如下:

$$r(E_m, E_n) = \frac{\sum_{k=1}^N ((E_{mk} - \bar{E}_m)(E_{nk} - \bar{E}_n))}{\left[\sqrt{\sum_{k=1}^N (E_{mk} - \bar{E}_m)^2} \right] \left[\sqrt{\sum_{k=1}^N (E_{nk} - \bar{E}_n)^2} \right]} \quad (19)$$

式中, N 为采样点数。

当发生区内故障时, 双侧暂态能量近似呈正相

关的关系, 皮尔逊相关系数理论值为1, 当发生区外故障时, 双侧暂态能量近似呈负相关的关系, 皮尔逊相关系数理论值为-1。考虑误差的情况下设置一个阈值 τ_{set} , τ_{set} 设置公式如下:

$$\tau_{\text{set}} = K_{\text{mag}} K_{\text{mar}} \quad (20)$$

式中, K_{mag} 、 K_{mar} 分别为幅值的可靠系数、裕度系数。为了考虑误差最大值的可能性, 需要保留一些裕度, 本文设置可靠系数 K_{mag} 的值为0.95, 裕度系数 K_{mar} 的值为0.95, 经过最终计算得到保护阈值 τ_{set} 为 $\tau_{\text{set}} = 0.95 \times 0.95 = 0.9025$ 。那么具体的判据如下:

$$\begin{cases} r(E_m, E_n) > 0.9025, & \text{区内故障} \\ r(E_m, E_n) < -0.9025, & \text{区外故障} \end{cases} \quad (21)$$

4.3 保护逻辑

保护的流程如图7所示, 步骤如下。

1) 读取线路两侧电流数据, 设置采样率。

2) 利用保护判据式(18)判断是否满足保护启动条件, 如果满足, 则进入下一步。

3) 对线路两侧电流进行广义S变换, 提取出两侧电流暂态能量。

4) 计算线路两侧暂态能量皮尔逊相关系数, 根据式(19)判断区内、区外故障。

5) 如果是区内故障, 那么给两侧开关发送跳闸信号, 断开故障线路; 如果是区外故障, 那么给两侧开关发送保护闭锁信号, 防止开关误动作。

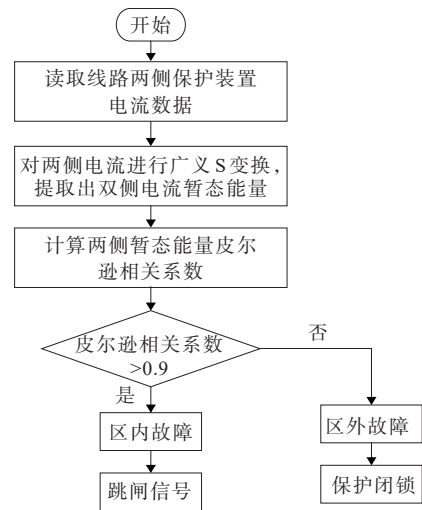


图7 纵联保护流程

Figure 7 Pilot protection process

5 仿真实验

为了验证本方案的有效性, 在PSCAD/EMTDC仿真软件中搭建图1所示的新能源接入的电网模型, 单个光伏发电机容量为1 MW, 共100个, 单个

风力发电机容量为 2 MW,共 20 个。设置的仿真步长为 1 s,采样率为 5 kHz。送出线路长度为 300 km,参数如下:

$$\begin{cases} r_1 = 0.075\ 80\ \Omega/\text{km} \\ l_1 = 0.839\ 22\ \text{mH}/\text{km} \\ c_1 = 0.014\ \mu\text{F}/\text{km} \\ r_0 = 0.154\ 21\ \Omega/\text{km} \\ l_0 = 2.643\ 90\ \text{mH}/\text{km} \\ c_0 = 0.009\ 296\ \mu\text{F}/\text{km} \end{cases}$$

5.1 区内故障和区外故障

1) 正常运行。

正常运行时,两侧电流仿真结果如图 8 所示,图 8 中虚线为线路左侧电流采集结果,实线为线路右侧电流采集结果,2 个电流有一定的相位差,是由输电线路本身阻抗导致的,并且从仿真结果可知,暂态能量皮尔逊相关系数为 0,说明此时没有发生故障,保护不动作。

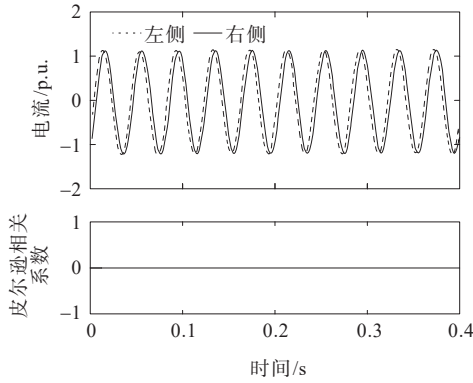


图 8 正常情况下的电流和皮尔逊相关系数

Figure 8 Current and Pearson correlation coefficient under normal conditions

2) 区外故障。

在 f_4 发生区外故障时,故障发生时刻为 0.2 s,两侧电流仿真结果如图 9 所示。

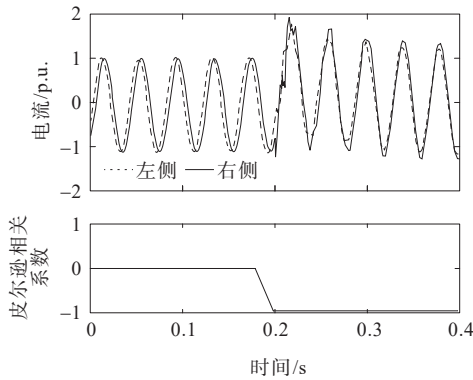


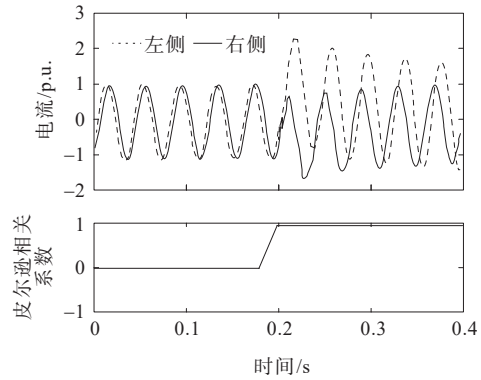
图 9 区外故障时的电流和皮尔逊相关系数

Figure 9 Current and Pearson correlation coefficient during extra-zone faults

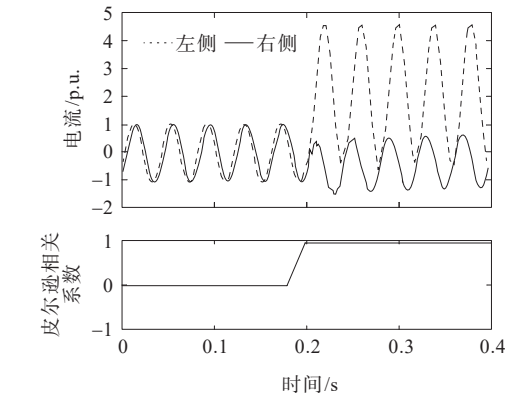
从图 9 中可知,发生区外故障时,两侧电流突然增大,此时皮尔逊相关系数迅速下降,最后降到 -0.993,说明此时发生区外故障,闭锁线路两端保护,防止误动。

3) 区内故障。

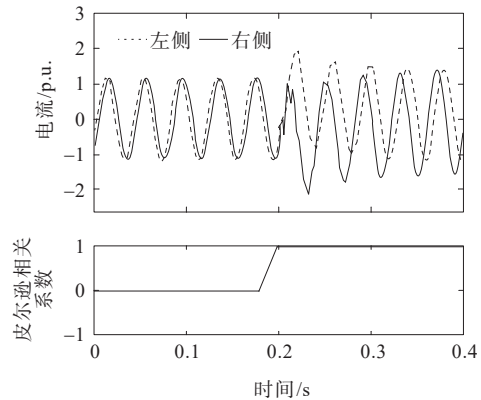
分别在 f_1, f_2, f_3 处发生区内故障,故障发生时刻为 0.2 s,两侧电流仿真结果如图 10 所示。



(a) f_1 点故障



(b) f_2 点故障



(c) f_3 点故障

图 10 区内故障时的电流和皮尔逊相关系数

Figure 10 Current and Pearson correlation coefficient during intra-zone faults

从图10中可知,未发生故障之前,双侧电流波形较相似,发生区内故障时,两侧电流波形变得相反,3个故障点的皮尔逊相关系数迅速上升,分别升到0.998、0.997、0.996,说明此时发生区内故障,达到区内故障条件,线路两端开关接收跳闸信号,保护快速动作。

5.2 不同过渡电阻下的保护

为了验证经过过渡电阻后保护的有效性,设置过渡电阻分别为10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 Ω ,结果如表1所示。从表1中可知,发生经过过渡电阻后的区内故障时,皮尔逊相关系数均大于0.9,满足保护条件,保护装置可靠动作;区外故障时,皮尔逊相关系数均小于-0.9,双侧开关闭锁合闸,防止保护误动。

表1 过渡电阻下的保护验证

Table 1 Verification of protection under transition resistance

过渡电阻/ Ω	皮尔逊相关系数			
	f_1	f_2	f_3	f_4
10	0.994	0.993	0.996	-0.995
20	0.992	0.994	0.998	-0.995
30	0.994	0.998	0.998	-0.991
40	0.996	0.992	0.994	-0.996
50	0.997	0.999	0.996	-0.997
60	0.998	0.994	0.997	-0.993
70	0.995	0.996	0.998	-0.996
80	0.992	0.994	0.994	-0.998
90	0.995	0.998	0.993	-0.995
100	0.994	0.994	0.997	-0.996

5.3 保护动作时间

为了验证保护的動作时间满足条件,分别将本文方法与传统继电保护方法进行对比,记录区内故障 f_1 、 f_2 、 f_3 保护动作的时间如表2所示。从表2中可知,本文方法在3种区内故障处動作时间均较短,最长的时间仅有16 ms,满足保护的速动性要求。

表2 过渡电阻下的保护验证

Table 2 Verification of protection under transition resistance

故障位置	動作时间/ms	
	本文方法	传统方法
f_1	12	36
f_2	16	48
f_3	10	52

6 结语

本文提出了一种基于广义S变换和皮尔逊相关

系数的新能源接入电网纵联保护方法,主要取得了以下成果。

1) 分析了不同频段的电流特征,利用广义S变换提取出线路两端电流的频域故障特征,为后续纵联保护判据的构建奠定了良好的基础。

2) 将皮尔逊相关系数应用于分布式新能源接入的电网保护中,利用双端电流暂态能量相关度构建纵联保护判据。

3) 经过仿真验证,所提方法能够准确辨识区内、区外故障,满足保护的快速性要求,而且具有较强的耐受过渡电阻能力。

参考文献:

- [1] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(增刊1):28-51.
HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (Sup 1):28-51.
- [2] AMAMRA S A, MEGHRICHE K, CHERIFI A, et al. Multilevel inverter topology for renewable energy grid integration[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11):8855-8866.
- [3] 刘故帅,肖异瑶,贺禹强,等.考虑新能源类型的电力系统多目标并网优化方法[J].电力系统保护与控制,2017, 45(10):31-37.
LIU Gushuai, XIAO Yiyao, HE Yuqiang, et al. Multi-objective optimal method considering types of grid connected new energy of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10):31-37.
- [4] 金梦,朱鑫要,周前.新能源对电网调峰特性影响定量评估及应用[J].高压电器,2023,59(4):70-76.
JIN Meng, ZHU Xinyao, ZHOU Qian. Quantitative assessment of influence of renewable energy on peak regulation characteristics of power grid and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4):70-76.
- [5] 黄涛,陆于平,蔡超. DFIG等效序突变量阻抗相角特征对故障分量方向元件的影响分析[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3929-3940.
HUANG Tao, LU Yuping, CAI Chao. Analysis of phase angle characteristics of DFIG equivalent sequence superimposed impedances and its impact on fault components based direction relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14):3929-3940.
- [6] 许冠军,梁营玉,查雯婷,等.方向元件在光伏电站送出线路中的适应性分析[J].电网技术,2019,43(5):1632-1639.

- XU Guanjun, LIANG Yingyu, ZHA Wenting, et al. Adaptability analysis of directional relay for transmission line out-sending from photovoltaic power plant[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1632-1639.
- [7] KIRAKOSYAN A, EL MOURSI M S, KANJIYA P, et al. A nine switch converter-based fault ride through topology for wind turbine applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1757-1766.
- [8] RAUF A M, KHADKIKAR V, EL MOURSI M S. A new fault ride-through (FRT) topology for induction generator based wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1129-1137.
- [9] 李一泉, 屠卿瑞, 陈桥平, 等. 大型光伏电站对送出线路保护选相元件的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2976-2982.
- LI Yiquan, TU Qingrui, CHEN Qiaoping, et al. Influence of large-scale photovoltaic power plant on phase-selection elements of line protections[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2976-2982.
- [10] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.
- LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.
- [11] 张保会, 王进, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(四): 风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-5+11.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(4): performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 1-5+11.
- [12] 郭威, 张凯, 魏新杰, 等. 高渗透率分布式光伏接入的新型电力系统净功率预测[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 48-55.
- GUO Wei, ZHANG Kai, WEI Xinjie, et al. Net power prediction for a novel power system with high permeability distributed photovoltaic access[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 48-55.
- [13] 桂小智, 宋国兵, 常鹏, 等. 适用于新能源并网系统的距离保护方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 250-257.
- GUI Xiaozhi, SONG Guobing, CHANG Peng, et al. Distance protection method applicable to renewable energy grid-connected systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 250-257.
- [14] 张长庚. 考虑含光伏接入的配电网故障特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 138-146.
- ZHANG Changgeng. Research on fault characteristics of the distribution network considering access of photovoltaic[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 138-146.
- [15] 贾科, 杨哲, 朱正轩, 等. 基于电流幅值比的逆变型新能源场站送出线路T接纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 82-88.
- JIA Ke, YANG Zhe, ZHU Zhengxuan, et al. Pilot protection based on current amplitude ratio for teed line in inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 82-88.
- [16] 何世恩, 索南加乐, 杨斌, 等. 适应于酒泉风电送出的750 kV线路纵联保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 87-91.
- HE Shien, SUONAN Jiale, YANG Cheng, et al. A 750 kV transmission line pilot protection suitable to Jiuyan wind power base delivery[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 87-91.
- [17] 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.
- [18] 晁晨翔, 郑晓冬, 高飘, 等. 含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6968-6979.
- CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6968-6979.
- [19] 贾科, 杨哲, 赵其娟, 等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3271-3280.
- JIA Ke, YANG Zhe, ZHAO Qijuan, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3271-3280.
- [20] JIA K, WANG C B, BI T S, et al. Transient current waveform similarity based protection for flexible DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9301-9311.
- [21] CHEN L, LIN X N, LI Z T, et al. Similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 938-948.
- [22] JIA K, YANG Z, ZHENG L M, et al. Spearman correlation-based pilot protection for transmission line connected to

- PMSGs and DFIGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(7):4532-4544.
- [23] ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. Cosine similarity based line protection for large-scale wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7): 5990-5999.
- [24] 侯俊杰, 樊艳芳, 晁勤, 等. 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线路纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 89-96.
HOU Junjie, FAN Yanfang, CHAO Qin, et al. Cluster wind power outgoing line pilot protection scheme based on time-domain full-frequency fault model correlation identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 89-96.
- [25] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.
SONG Guobing, WANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [26] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019+2216.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019+2216.
- [27] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6275.
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [28] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165-171.
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 165-171.
- [29] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3832.
- [30] 陈龙翔, 沈瑜. 风电场集电电压序列经济性优选研究[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1008-1013.
CHEN Longxiang, SHEN Yu. Studies on economic optimization of voltage class series of collector system for wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1008-1013.
-
- (上接第 193 页 Continued from page 193)
- [8] STEVEN A, HERTONO G F, HANDARI B D. Implementation of clustered ant colony optimization in solving fixed destination multiple depot multiple traveling salesman problem[C]//2017 1st International Conference on Informatics and Computational Sciences (ICICoS). Semarang, Indonesia. IEEE, 2017: 137-140.
- [9] WĘDZIK A, SIEWIERSKI T, SZYPOWSKI M. A new method for simultaneous optimizing of wind farm's network layout and cable cross-sections by MILP optimization[J]. Applied Energy, 2016, 182: 525-538.
- [10] CERVEIRA A, DE SOUSA A, SOLTEIRO PIRES E J, et al. Optimal cable design of wind farms: the infrastructure and losses cost minimization case[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4319-4329.
- [11] PÉREZ-RÚA J A, STOLPE M, CUTULULIS N A. Integrated global optimization model for electrical cables in offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1965-1974.
- [12] PÉREZ-RÚA J A, STOLPE M, DAS K, et al. Global optimization of offshore wind farm collection systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2256-2267.
- [13] BANZO M, RAMOS A. Stochastic optimization model for electric power system planning of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1338-1348.
- [14] JIN R S, HOU P, YANG G Y, et al. Cable routing optimization for offshore wind power plants via wind scenarios considering power loss cost model[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113719.
- [15] LI Y, XIAO J X, CHEN C, et al. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4138-4150.
- [16] LOW S H. Convex relaxation of optimal power flow: part I: formulations and equivalence[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(1): 15-27.