

基于斯皮尔曼等级相关系数的新能源送出线路纵联保护

贾科¹, 杨哲¹, 魏超², 郑黎明¹, 李彦宾³, 毕天姝¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206;

2. 国电东北新能源发展有限公司, 辽宁省沈阳市 110000; 3. 国家电网有限公司华北分部, 北京市 100053)

摘要: 新能源电源均直接或间接通过电力电子装置并网, 其故障电流幅值受限、相角受控、谐波含量高、波形非线性度强, 与传统同步电源有着明显区别。传统比率制动式差动保护的动作性能面临挑战。为解决该问题, 文中提出了基于斯皮尔曼等级相关系数的送出线路纵联保护方法。当正常运行或者区外故障时, 流过送出线路的是穿越性电流, 因此两侧电流波形完全相反。当发生区内故障时, 两侧暂态电流波形存在巨大差异, 因此可以利用斯皮尔曼等级相关系数度量两侧电流波形的相关程度, 从而区分区内、区外故障。该方法适用于各类新能源场站, 且具备较好的抗过渡电阻和抗噪声能力。同时, 与现有基于新能源故障特征的保护相比, 该方法在新能源弱出力以及重合于永久性故障时也表现出了较好的动作性能。仿真结果和现场录波数据均证实了该方法的有效性。

关键词: 纵联保护; 新能源场站; 斯皮尔曼等级相关系数; 暂态电流波形; 送出线路

0 引言

规模化新能源并网发电已成为中国能源电力领域的必然趋势^[1-2]。然而新能源电源故障特性受低电压穿越控制策略的影响, 表现出了序阻抗不稳定、相角受控、频率偏移、高次谐波等特性^[3-5], 这使得传统比率制动式差动保护受到巨大挑战。因此, 研究可靠的纵联保护新原理对于新能源的高效利用具有重要的意义^[6-7]。

对于纵联保护的适应性分析已有一定的研究成果。文献[8]针对逆变型电源短路容量与系统短路容量为1:4, 送出线路发生两相短路的情况, 仿真分析了此时故障相两侧电流相位差大于90°, 比率制动式差动保护存在拒动风险。文献[9]指出光伏电源的弱电流特性会导致内部故障时动作电流与制动电流基本相等, 比率制动式差动保护灵敏度下降。文献[10-11]分析得出双馈风机在撬棒投入后, 故障电流会偏移工频, 因此所有基于工频故障电流的保护原理均受到影响。

为解决上述问题, 众多学者对于纵联保护的新原理展开了研究。文献[12]将故障分量差动电压

与故障分量差动电流的比值定义为故障分量综合阻抗, 利用综合阻抗大小的差异区分区内、区外故障, 然而该方法仍然受双馈风机故障电流频率偏移的影响。文献[13]根据双馈风机撬棒投入以后故障电流偏离工频的特性, 构造了基于电流频率差的纵联保护判据, 然而该方法不适合双馈风机撬棒未投入的情况, 同时也不适合逆变型电源。文献[14]提出了在时域上利用两侧差动电压和差动电流的一阶导数是否符合电容模型来区分区内、区外故障的方法, 但是一阶导数受高次谐波影响, 保护性能稍差。文献[15-16]分别利用皮尔逊相关系数和余弦相似度度量区内故障两侧暂态电流波形的差异, 从而提出了基于暂态电流波形相似度的纵联保护新原理, 但其整定值设置需要进一步研究。此外, 上述大部分保护新原理均过于关注新能源故障电流的刻画和依赖, 一旦新能源不出力(无光或者无风条件下), 保护均将无法正确动作。

本文首先分析了各类电源的暂态电流波形表达式, 在此基础上利用斯皮尔曼等级相关系数度量两侧暂态电流波形的差异, 从而构造了纵联保护新原理。同时, 本文提出了该方法的整定原则, 并分析了其背后隐藏的数学规律。该方法也解决了弱出力情况下故障以及重合于永久性故障下现有基于新能源故障特征的方法无法正确动作的问题。基于国内某新能源场站实际拓扑及参数, 在实时数字仿真器(real time digital simulator, RTDS)中搭建了新能源

收稿日期: 2019-06-30; 修回日期: 2020-04-08。

上网日期: 2020-06-06。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904104); 国家自然科学基金资助项目(51777071); 国家电网公司科技项目(B3441518K002)。

并网系统,验证了所提保护的动作性能,并利用现场录波数据进一步验证了所提保护的实用性。

1 各类电源暂态电流波形特征的对比

分析各类电源暂态电流解析表达式是研究波形特征及提出纵联保护新原理的基础。本文给出了各类电源的暂态电流解析表达式,并对其特点进行简要分析。

1.1 逆变型电源

逆变型电源直接通过逆变器并网,其暂态电流特性主要由逆变器低电压穿越控制策略决定。实际工程中,逆变型电源通常采用定电压矢量控制。从其 dq 坐标系出发可以推导其暂态短路电流的解析表达式,如式(1)^[17]所示。

$$i_{\phi, IV} = i_d^* \cos(\omega t + \theta_\phi) - i_q^* \sin(\omega t + \theta_\phi) + (i_{d0} - i_d^*) \frac{e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cos(\omega t + \theta_\phi) + i_q^* \frac{e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega t + \theta_\phi) \quad t \geq t_0 \quad (1)$$

式中:下标“IV”代表逆变型电源; i_d^* 和 i_q^* 分别为 d 轴和 q 轴电流参考值; i_{d0} 为 d 轴电流的初始值; ω 为锁相环检测到的角频率; θ_ϕ 为三相故障后的初相角; ξ 为二阶系统的阻尼比; ω_n 为二阶系统自然振荡角频率; ω_d 为阻尼振荡角频率; β 为阻尼角; t_0 为故障开始时刻。

考虑到锁相环的响应需要时间,在故障初期电压跌落后其检测到的角频率会偏离工频角频率,因此其电流特性主要表现为衰减的非工频特性。

1.2 双馈风机

当近端发生故障时机端电压跌落严重,转子侧会出现严重的过电压和过电流,触发双馈风机撬棒电阻投入,此时的暂态短路电流可由式(2)^[18]表示。

$$i_{\phi, III} = A_1 e^{-\frac{t}{T_r}} e^{j\omega_r t} + A_2 e^{j\omega t} + A_3 e^{-\frac{t}{T_s}} \quad t \geq t_0 \quad (2)$$

式中:下标“III”表示双馈风机; A_1 、 A_2 和 A_3 为各分量幅值; T_r 和 T_s 分别为转速频分量和直流分量的衰减时间常数; ω_r 为与转速对应的电角速度。

由式(2)可知,撬棒投入后短路电流中包含衰减的转速频分量、稳定的工频分量以及衰减的直流分量,以转速频分量为主。由于双馈风机的转速往往偏离同步转速,因此故障电流主要表现出非工频特性。

当远端故障机端电压跌落不严重时,撬棒电阻不会投入,此时稳态短路电流的解析表达式^[19]为:

$$i_{\phi, III} = \frac{(1-k)U_s}{\omega_s L_s} \cos\left(\omega_s t_0 + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{R_s}{L_s} t} + \frac{kU_s}{\omega_s L_s} \cos\left(\omega_s t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{L_m I_r}{L_s} \cos(\omega_s t + \alpha - \varphi) \quad t \geq t_0 \quad (3)$$

式中: k 为电压跌落程度; U_s 为定子电压矢量的幅值; ω_s 为同步角频率; α 为定子电压矢量相对abc坐标系a相的角度; L_s 为定子漏感; R_s 为定子电阻; L_m 为励磁电感; I_r 为转子电流; φ 为转子电流与定子电压相量的夹角。

由式(3)可知,撬棒不投入情况下的稳态电流主要表现为衰减的正弦波。但是由于故障后转子电流受转子侧换流器的作用而存在短暂波动,所以在暂态阶段也表现出非工频的特性。

1.3 同步发电机

同步发电机机端发生三相短路时的短路电流解析表达式为^[20]:

$$i_{\phi, S} = \sqrt{2} E_{q|0|} \left(\frac{x_d' - x_d''}{x_d' x_d''} e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{x_d - x_d'}{x_d x_d'} e^{-\frac{t}{T_d'}} \right) \cdot \cos(\omega_s t + \varphi_\phi) + \frac{\sqrt{2} E_{q|0|}}{x_d} \cos(\omega_s t + \varphi_\phi) - \frac{\sqrt{2} E_{q|0|} \cos \varphi_\phi}{x_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad t \geq t_0 \quad (4)$$

式中:下标“S”表示同步机; $E_{q|0|}$ 和 x_d 分别为同步机内电势和同步电抗; x_d'' 和 x_d' 分别为次暂态和暂态电抗; T_d'' 和 T_d' 分别为交流分量的次暂态和暂态衰减时间常数; T_a 为直流分量衰减常数; φ_ϕ 为故障初始角。

由式(4)可知,同步发电机短路电流主要包含按指数规律衰减的工频正弦波和直流分量。而逆变型电源和双馈风机暂态短路电流波形均呈现出一定的非工频特性。根据基尔霍夫电流定律可知,正常运行和区外故障时,送出线路两侧波形完全相反,呈完全负相关关系,而对于区内故障,新能源侧提供的暂态电流表现出非工频特性,而系统侧提供的暂态电流体现的是工频特性,两侧波形差异明显。因此,本文提出利用斯皮尔曼等级相关系数数量度两侧波形差异的纵联保护方法。

2 基于斯皮尔曼等级相关系数的纵联保护

2.1 斯皮尔曼等级相关系数的基本原理

斯皮尔曼等级相关系数是用来量度2个波形相关程度的一种方法。2个波形完全相同,斯皮尔曼等级相关系数的值为1;2个波形完全相反,其值为-1;其他情况下在-1~1之间变化,其具体思想

如下。

首先,把波形数列 $x=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 按升序或降序排列得到排序数列 $a=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,将数列 x 内每个元素 x_i 在数列 a 中的位置记为 r_i ,称其为元素 x_i 的秩次,从而可以得到数列 x 对应的秩次数列 r 。将另一波形数列 $y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 按同样方式排列得到排序数列 $b=\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$,继而可以得到数列 y 对应的秩次数列 s 。将数列 r 和数列 s 内每个元素对应相减得到秩次差数列 $d=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$,再将其代入斯皮尔曼等级相关系数公式:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

式中: n 为数列点数,对应于一个窗长的采样点数; ρ 为斯皮尔曼等级相关系数。

系统正常时两侧波形呈完全负相关关系,理论值 $\rho=-1$ 。但对于正弦波同一个幅值下存在2个相等的采样点,其秩次排列可能对相似度的计算有一定影响。为此,首先分析 $\rho=-1$ 情况下的秩次的排列规律。附录A图A1给出了完全负相关的2条曲线,其采样点按降序排列后得到的秩次数列也在图中标注。从图A1中可以总结出在完全负相关状态下($\rho=-1$)其秩次排列必定具有如下规律。

1) 同一时刻对应的2个点的秩次相加等于 $n+1$ 。

2) 秩次差数列 d 为 $n-1$ 至 $-(n-1)$ 的等差数列,公差为 -2 。

将满足上述规律的2个秩次数列称之为标准秩次数列对,其中任意一个数列称之为标准秩数列。将这种秩次排列方式应用于2个完全负相关的正弦波(以半波为例),如图1所示。

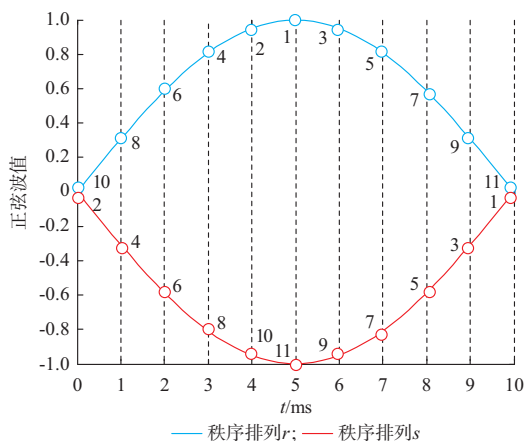


图1 标准秩数列

Fig. 1 Standard rank array

根据图1中的秩次排列 $r=\{10, 8, \dots, 2, 1, \dots, 11\}$,以及 $s=\{2, 4, \dots, 10, 11, \dots, 1\}$,可得秩次差数列 $d=\{8, 4, \dots, -8, -10, 6, \dots, 10\}$,从 d 中可以看出只要峰-峰值对应的秩次差确定($r_i=1, s_i=11$),除其左侧一个点相差2以外,其余均相差4,秩次数列 r 和 s 也具有类似规律。根据上述规律可以写出2个正弦波的标准秩排列以及秩次差数列。

然而秩次数列 r 或 s 中幅值相同的2个点在实际采样中获得的秩次很可能相反,下面将分析其对斯皮尔曼等级相关系数的影响。假设秩次数列 r 中2和3互换位置,其秩次差数列 d 中对应的2个元素将由8和6变为7和7,将其分别抽象为 $k+2$ 和 k 以及 $k+1$ 和 $k+1$ (所有幅值相同的点互换秩次均满足该规律),其对 $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 造成的误差 μ 为:

$$\mu = (k+2)^2 + k^2 - 2(k+1)^2 = 2 \quad (6)$$

本文将窗长设为20 ms,故其内可能发生秩次互换的对数为 $(n-2)/2$,因此可得假设每对秩次均互换位置造成的最大误差为:

$$\Delta\rho = \frac{6 \times 2 \frac{n-2}{2}}{n^3 - n} = \frac{6(n-2)}{n^3 - n} \quad (7)$$

从式(7)中可以看出采样点数 n 增加将极大地削减秩次互换造成的影响。在不同常规采样频率下 $\Delta\rho$ 值如附录B表B1所示。从表B1可以看出在常规采样频率1 000~5 000 Hz下, $\Delta\rho$ 均很小,因此幅值相同的2个点秩次互换对完全负相关特性的影响可以依靠数据冗余消除。

2.2 纵联保护新原理

新能源场站送出线路的拓扑如附录A图A2所示,新能源电源经过汇集系统汇集后经主变压器升压送出。在送出线路上的不同位置设置 K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 这5个故障点,电流正方向均为母线指向线路。

在 K_1 和 K_5 点发生故障时,流过送出线路的均为穿越性电流,两侧波形完全相反,呈完全负相关状态, $\rho=-1$;在 K_2, K_3, K_4 点发生短路故障时,两侧短路电流波形差异较大,负相关程度明显减弱,由此能够可靠区分区内、区外故障。因此,动作判据为:

$$\rho > \rho_{\text{set}} \quad (8)$$

式中: ρ_{set} 为整定阈值,其整定原则将在2.3节中详述,其值在 -0.9 附近。

由于新能源电源在无风、无光情况下出力很低,此时由于电容电流的影响,基于相似度的保护原理可能会发生误动。为了解决这一问题,当一个时间窗内电流的最大值低于10倍的电容电流的最大值

时,按如下方式计算秩次数列。将两侧波形数据记为数列 x 和 y ,可将 x 对应的秩次数列 r 内的所有元素均取平均秩次:

$$r_i = \frac{(n+1)n}{2n} = \frac{n+1}{2} \quad (9)$$

将 y 对应的秩次数列 s 内的所有秩次均取为:

$$s_i = -\frac{(n+1)n}{2n} = -\frac{n+1}{2} \quad (10)$$

此时,斯皮尔曼等级相关系数的值为:

$$\rho = 1 - \frac{6(1+n)}{n-1} \quad (11)$$

由式(11)可知,其相关系数 ρ 在 $-17 \sim -5$ 之间变化,由式(8)可知其能够可靠不动作。

在新能源出力为零的条件下发生内部短路以及重合于永久性故障时(假设系统侧先行重合)会出现系统侧电流较大(大于10倍电容电流),新能源侧电流为零的特殊情况,此时新能源侧电流按式(9)处理,系统侧电流按一般方法计算秩次数列,将其代入斯皮尔曼等级相关系数计算公式,有

$$\rho = 0.5 \quad (12)$$

该数值必然大于 ρ_{set} ,所以保护能够可靠动作。

综上所述,在新能源正常出力情况下发生区内故障,保护的灵敏性主要靠两侧电流波形差异导致相关系数大于保护定值来保证。当新能源出力较低时,保护的灵敏性主要依靠系统侧检测出的故障电流(大于10倍的电容电流),并且按照传统方法获得秩次数列,而新能源侧秩次数列根据式(9)取平均秩次来保证,此时相关系数恒等于0.5,远大于保护定值。

2.3 阈值的整定

区内故障时两侧故障电流暂态波形相似程度较低,因此斯皮尔曼等级相关系数将迅速远离 -1 ,所以阈值整定只需考虑防止正常运行时的保护误动。斯皮尔曼等级相关系数与电流幅值量测精度无关,因此主要考虑两侧不同步的影响。文献[21]指出当采用乒乓对时法时,两侧不同步延时为0.5 ms,在工频下对应的角度为 9° 。同时,正常运行时两侧电流互感器会存在角度误差,一般为 7° [22],在此基础上考虑一定的裕度,将两侧角度误差整定为 18° ,对应于工频下的1 ms。无延时和延时1 ms的两侧电流波形如附录A图A3所示。

以5 kHz采样频率为例,在一个窗长20 ms内采样点数为100。按照2.1节中的方法可得无延时下2个波形的标准秩次数列 r 和 s_1 及其秩次差数列 d_1 ,如附录B表B2所示。

将波形2延时1 ms,认为波形1的秩次排列同

附录B表B2,此时延时波形2的秩次排列 s_2 及秩次差排列 d_2 如表B3所示。

将秩次数列 $d_1(\rho=-1)$ 和 d_2 进行对比,发现只有2个部分无法抵消。

1) d_1 中点数24~28对应的子数列 $\Delta d_1 = \{-93, -97, -99, -95, -91\}$ 与 d_2 中点数21~25对应的子数列 $\Delta d_2 = \{-90, -90, -90, -90, -90\}$,对应于附录A图A3(a)和(b)中2条黑色实线间的点。

2) d_1 中点数74~78对应的子数列 $\Delta d_1 = \{93, 97, 99, 95, 91\}$ 与 d_2 中点数71~75对应的子数列 $\Delta d_2 = \{90, 90, 90, 90, 90\}$ 。

由观察可知,2个部分对 $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 造成的影响相同,所以仅分析第2个部分。 Δd_1 包含5个秩次差,对应1 ms内的采样点数 $n/20$,且其排列后是起始值为 $9n/10+1$ 、公差为2的等差数列,而 Δd_2 内包含的5个秩次差均为:

$$\Delta d_{2i} = n - \frac{n}{20} \times 2 = \frac{9}{10}n \quad (13)$$

分析其他采样频率情况下的秩次差数列也均符合上述规律,因此其对 $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 造成的误差 μ_1 为:

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^{\frac{n}{20}} \left(\frac{9}{10}n + 2i - 1 \right)^2 - \sum_{i=1}^{\frac{n}{20}} \left(\frac{9}{10}n \right)^2 \quad (14)$$

因此,对 ρ 造成的误差 $\Delta\rho_1$ 为:

$$\Delta\rho_1 = \frac{6 \times 2\mu_1}{n^3 - n} = \frac{12\mu_1}{n^3 - n} \quad (15)$$

不同常用采样频率得出的相应误差如附录B表B4所示,由该表可知, $\Delta\rho_1$ 在常规采样频率下差别很小。

上述推导过程没有计及同一幅值2个点秩次互换的影响。按照上述方法易推演出一对点互换秩次会使 d_2 中对应的2个秩次差由 k 和 $k+n/5$ 变为 $k+1$ 和 $k+n/5-1$,则对 $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 造成的误差 μ_2 为:

$$\mu_2 = k^2 + \left(k + \frac{1}{5}n \right)^2 - \left(k + \frac{1}{5}n - 1 \right)^2 - (k+1)^2 = \frac{2}{5}n - 2 \quad (16)$$

假设同一幅值下2个点均互换秩次,则对于 ρ 造成的最大误差 $\Delta\rho_2$ 为:

$$\Delta\rho_2 = \frac{6 \times \left(\frac{2}{5}n - 2 \right) \frac{n-2}{2}}{n^3 - n} = \frac{3 \times \left(\frac{2}{5}n - 2 \right) (n-2)}{n^3 - n} \quad (17)$$

在不同常规采样频率下的误差 $\Delta\rho_2$ 如附录B表

B5所示。

同时,取 $\Delta\rho_3=0.01\sim0.03$ 的安全裕度,主要用于躲避噪声的影响,因此可以将阈值整定为:

$$\rho_{\text{set}} = -1 + \Delta\rho_1 + \Delta\rho_2 + \Delta\rho_3 \quad (18)$$

由式(18)可知,整定阈值 ρ_{set} 可以根据不同采样频率在 $-0.92\sim-0.87$ 之间取值。

3 仿真实验

根据现场某新能源场站的实际拓扑结构及参数,在RTDS中搭建如附录A图A2所示的新能源场站送出系统,电源类型分别为逆变型电源和双馈风机。2种类型场站额定容量均为500 MW,送出线路电压等级为220 kV,长度为40 km,线路参数、场站主变压器参数及新能源场站参数详见附录C。在图A2中送出线路的场站侧外部出口、内部离场站侧10,20,30 km和系统侧外部出口设置短路故障,分别记为 K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 。

3.1 比率制动式差动保护性能

首先,以逆变型新能源为例,分析其对传统比率制动式差动保护的影响。故障点设在 K_3 点,故障类型为BC两相短路,制动系数一般取为 $0.5\sim0.8$ ^[8]。当新能源短路容量与系统短路容量为1:4时,制动系数定值取为0.8;当新能源短路容量与系统短路容量为1:2时,制动系数定值取为0.5。三相的动作电流与制动电流比值如图2所示。

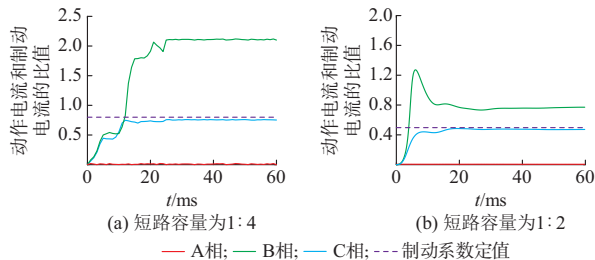


图2 新能源接入后比率制动式差动保护的动作性能
Fig. 2 Operation performance of percentage restrained differential protection after connection of renewable energy source

从图2可以看出,当新能源场站短路容量达到系统短路容量的1/4和1/2时,故障C相的动作电流与制动电流的比值将分别低于制动系数定值0.8和0.5,因此C相会拒动。为解决上述问题,本文提出了基于斯皮尔曼等级相关系数的纵联保护方法。

3.2 不同故障位置和故障类型

为了验证所提保护的性能,需要对不同故障场景进行仿真。本文将故障点分别设在 K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 ,故障类型分别设为A相接地、BC两相短路、

BC两相短路接地和三相短路,分别记为AG,BC,BCG,ABCG。仿真的采样频率为5 kHz,因此保护的整定值设为 -0.92 。

附录A图A4给出了区内 K_3 点和区外 K_5 点发生三相短路故障时两侧电流的波形。从图A4(a)和(b)可以看出,对于区外故障,无论是逆变型电源还是双馈风机,故障后20 ms送出线路两侧电流波形仍然呈现完全负相关关系;从图A4(c)和(d)可以看出,对于区内故障,逆变型电源和双馈风机提供的短路电流中体现非工频和转速频特性,与系统短路电流差异明显,这是利用线路两侧故障波形差异构成纵联保护的基础。

在此基础上,为分析斯皮尔曼等级相关系数的动作性能,图3给出了双馈风机和逆变型电源在 K_1 点、 K_5 点以及区内 K_3 点发生BC两相短路故障时斯皮尔曼等级相关系数的变化情况。

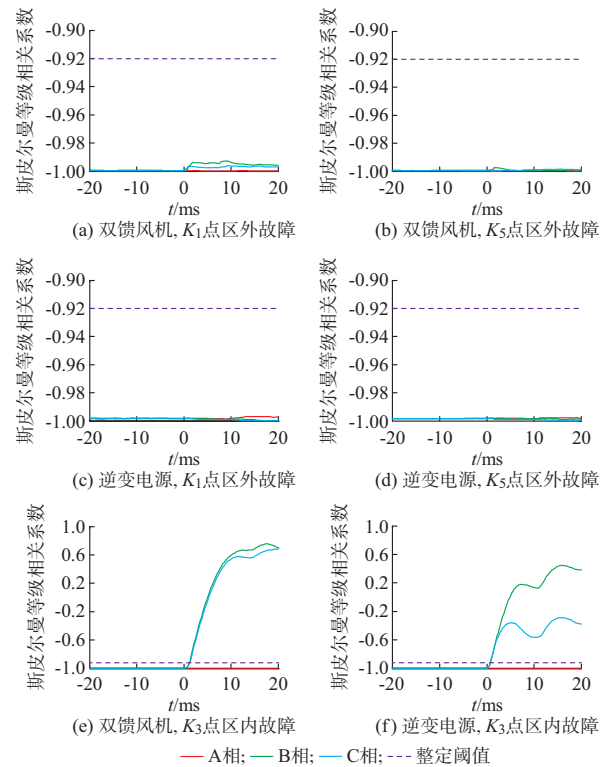


图3 送出线路发生区内、区外两相短路故障时的斯皮尔曼等级相关系数

Fig. 3 Spearman rank correlation coefficients when internal and external two-phase short-circuit faults occur on transmission line

由图3可知,不管何种新能源电源类型,所提保护在区外故障时均能够可靠不动作,在内部故障时,故障相在2 ms内就会超过保护定值 -0.92 ,满足保护速动性的要求。在故障初始阶段,斯皮尔曼等级

相关系数会存在一定的波动,这是因为其数据窗内含有较多的非故障数据,随着非故障数据的减小,其值逐渐稳定。

另外,在所有故障位置和故障类型下的斯皮尔曼等级相关系数在表1中被列出,故障窗长均取为故障后20 ms。

表1 送出线路区内、区外发生各种故障时的斯皮尔曼等级相关系数
Table 1 Spearman rank correlation coefficients when various internal and external faults occur on transmission line

故障位置	故障类型	逆变型电源的斯皮尔曼等级相关系数			双馈风机的斯皮尔曼等级相关系数		
		A相	B相	C相	A相	B相	C相
K_1	AG	-0.998	-0.999	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000
	BC	-0.997	-1.000	-1.000	-1.000	-0.996	-0.997
	BCG	-1.000	-0.999	-0.999	-1.000	-0.999	-0.999
	ABC	-0.999	-0.999	-0.997	-0.999	-0.998	-0.996
K_2	AG	0.691	-0.999	-0.996	0.732	-0.999	-0.998
	BC	-0.998	0.599	-0.142	-0.999	0.699	0.697
	BCG	-0.999	0.918	0.299	-1.000	0.981	0.368
	ABC	0.327	0.349	0.170	0.558	0.599	0.575
K_3	AG	0.648	-0.999	-0.995	0.708	-1.000	-0.998
	BC	-0.998	0.382	-0.376	-1.000	0.701	0.685
	BCG	-0.999	0.971	0.323	-1.000	0.965	0.567
	ABC	0.220	0.308	0.144	0.521	0.545	0.516
K_4	AG	0.655	-0.999	-0.996	0.650	-1.000	-0.997
	BC	-0.998	0.472	-0.265	-1.000	0.654	0.600
	BCG	-0.999	0.799	0.104	-1.000	0.819	0.484
	ABC	0.188	0.058	0.230	0.430	0.458	0.481
K_5	AG	-0.987	-0.998	-0.996	-0.999	-0.991	-0.999
	BC	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-0.999
	BCG	-0.996	-0.992	-0.996	-1.000	-0.996	-0.993
	ABC	-1.000	-0.992	-0.996	-0.998	-0.995	-0.998

从表1中可以看出,无论是双馈风机还是逆变型电源,所提保护在不同故障位置、不同故障类型下均具有良好的动作性能。在区内故障时,故障相均大于-0.92,可靠动作;非故障相均接近于-1,可靠不动作。对于区外故障,三相均接近于-1,可靠不动作,这验证了所提保护原理的可靠性。

3.3 不同故障电阻的影响

通常情况下,220 kV 输电线路最大过渡电阻为 $120\ \Omega$ ^[22],因此为验证所提保护方法的抗过渡电阻能力,本文将过渡电阻分别设为30,60,90,120 Ω 。以 K_3 点发生A相接地故障为例,其斯皮尔曼等级相关系数如附录B表B6所示。从该表可以看出,随着过渡电阻的增大,A相的斯皮尔曼等级相关系数逐渐

接近于整定阈值,但是在 $120\ \Omega$ 的接地电阻下,该保护仍然能够可靠动作。这是因为过渡电阻虽然削弱了故障相两侧波形的差异,但是只要系统感受到故障,新能源电源就必然存在一个暂态过程,导致两侧波形存在差异。

3.4 延时1 ms防误动性能

电力系统中两侧数据会存在一定的延时,通常允许的最大延时为1 ms。为了验证同步延时1 ms对所提方法的影响,本文分别将1 kHz和5 kHz采样频率下的场站侧波形延时1 ms,所得的两侧三相电流如附录A图A5(a)和(c)所示,其斯皮尔曼等级相关系数分别如图A5(b)和(d)所示。

在1 kHz的采样频率下,延时1 ms后根据2.3节的理论分析,其斯皮尔曼等级相关系数应该在-0.944 4~-0.903 8之间,由图A5(b)可知,在20 ms窗长的移动过程中,其计算的相关系数始终在上述范围内。同时,对于5 kHz的采样频率,其理论范围在-0.944 0~-0.932 8之间,图A5(d)所示相关系数也在上述范围内,这证明了理论推导的正确性。

3.5 抗噪声能力

电力系统容易受电磁干扰的影响,其电流信号必然存在一定的噪声。对于220 kV的输电线路,其噪声一般最大为25 dB^[23]。表2给出了在信噪比(signal to noise ratio, SNR)为20,30,40 dB情况下的逆变型电源和双馈风机在各种短路故障下的斯皮尔曼等级相关系数,其所加噪声为高斯白噪声,故障点为 K_3 ,窗长均取为故障后20 ms。

表2 K_3 处发生故障时不同SNR下的斯皮尔曼等级相关系数
Table 2 Spearman rank correlation coefficients with different SNRs when faults occur on K_3

故障类型	SNR/dB	逆变型电源的斯皮尔曼等级相关系数			双馈风机的斯皮尔曼等级相关系数		
		A相	B相	C相	A相	B相	C相
AG	20	0.649	-0.991	-0.962	0.716	-0.990	-0.982
	30	0.649	-0.998	-0.991	0.710	-0.999	-0.993
	40	0.647	-0.999	-0.994	0.709	-1.000	-0.997
BC	20	-0.982	0.389	-0.389	-0.972	0.705	0.717
	30	-0.995	0.386	-0.376	-0.997	0.705	0.683
	40	-0.998	0.383	-0.376	-0.999	0.704	0.685
BCG	20	-0.985	0.961	0.329	-0.989	0.945	0.558
	30	-0.996	0.967	0.329	-0.998	0.964	0.567
	40	-0.999	0.970	0.324	-1.000	0.965	0.570
ABC	20	0.531	0.539	0.508	0.535	0.531	0.537
	30	0.525	0.537	0.518	0.527	0.541	0.529
	40	0.519	0.543	0.520	0.520	0.543	0.518

从表2中可以看出,即使在SNR为20 dB的情况下,故障相的定值仍然远高于-0.92,这是因为噪声的叠加只会使故障波形的秩次排列更加混乱,因此叠加噪声对故障相影响较小;对于非故障相,两侧均叠加高斯白噪声会影响其局部的秩次排列,因此对于两侧电流波形的完全负相关特性会有一定的影响,但是在SNR为20 dB的情况下,所取定值依然能够保证保护可靠不动作。

4 录波数据分析

录波数据分别来自中国内蒙古、吉林和江西。内蒙古录波数据来自某220 kV风电场送出线路,在该线路上发生了B相接地短路,其主拓扑如附录A图A2所示,其两侧三相电流波形以及三相的斯皮尔曼等级相关系数分别如图4(a)和(b)所示。吉林录波数据来自某风火打捆送出线路,在该线路上发生了A相接地短路,其两侧三相电流波形和对应的相关系数如图4(c)和(d)所示。江西录波数据来自某35 kV光伏电站,在靠近光伏侧发生了BC两相短路,故障前光伏出力极低,其场站侧三相电流波形和按常规秩次方法得到的三相斯皮尔曼等级相关系数如图4(e)和(f)所示。

内蒙古和吉林的录波数据被用于证实新能源在正常出力情况下发生故障时所提方法的动作性能。内蒙古录波数据采样频率为1.2 kHz,因此将其阈值设定为-0.87,吉林录波数据采样频率为5 kHz,将其阈值设为-0.92。从图4(b)和(d)中可以看出,其故障相斯皮尔曼等级相关系数迅速大于整定阈值,能够快速动作,并且其稳态值均接近于1,这是因为对于接地故障两侧电流均以零序电流为主,电流相位基本一致。非故障相均低于整定阈值,能够可靠不动作。录波数据证实了所提保护具有良好的动作性能。

江西的录波数据被用于证实新能源弱出力情况下发生故障时所提保护方法的动作性能。它的采样频率为3.2 kHz,所以整定值被设为-0.9。图4(e)为场站侧三相电流的实际波形,从中可以看出故障前的电流极其微弱。在这种情况下,由于电容电流的影响,图4(f)所示的故障前三相电流波形的斯皮尔曼等级相关系数高于整定值,保护在正常运行时将会误动。因此,为了解决这一问题,将两侧波形数据按照式(9)和式(10)进行处理,得到的三相斯皮尔曼等级相关系数如附录A图A6所示。从图A6中可以看出,故障前三相电流波形的斯皮尔曼等级相关系数小于-5,这与式(11)所得的结论一致。由于

故障后瞬间故障相存在较大的暂态冲击电流,在包含此暂态冲击的窗长内,场站侧波形数据也会按照常规方法计算秩次,因此计算出来的故障相相关系数(0~20 ms)与图4(f)中一致。在暂态冲击过后,场站侧秩次数列仍按式(9)处理,而系统侧按照常规方法计算秩次数列,此时故障相的相关系数等于0.5,这与式(12)所计算的理论值一致,重合闸于永久性故障时保护的动作情况和上述过程类似,不再赘述。

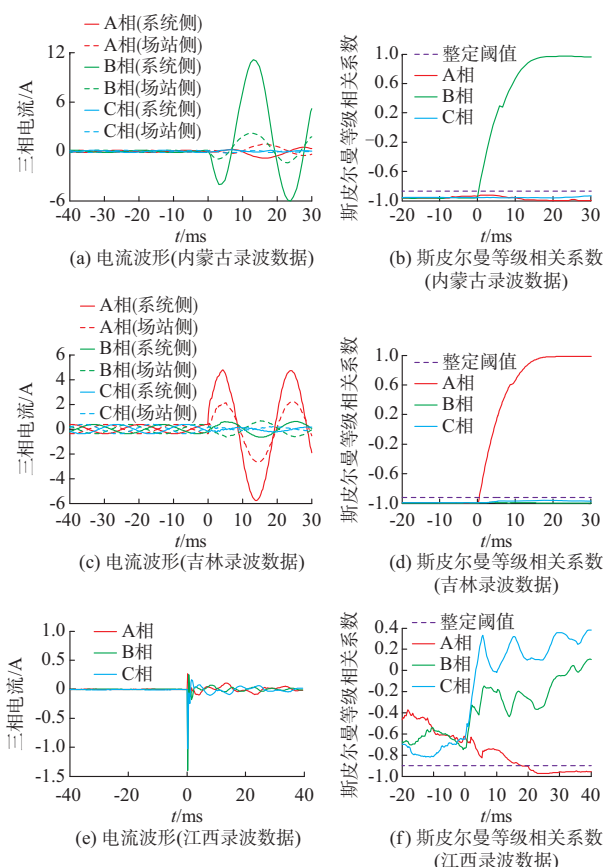


图4 现场录波数据分析
Fig. 4 Analysis of field recording data

5 结语

本文利用区内故障时两侧暂态电流波形特征的差异,提出了一种基于斯皮尔曼等级相关系数的纵联保护方法。该方法能够可靠识别区内、区外故障,适用于各种新能源场站。同时,该方法具备较强的抗过渡电阻和抗噪声能力,不需要较高的采样频率,在新能源弱出力情况下以及断路器重合于永久性故障时也具备良好的动作性能。此外,本文提出了该方法的整定原则,为其他相似度方法的整定提供了理论依据,但该方法的灵敏度校验原则仍然有待研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局新闻发布会介绍 2017 年度相关能源情况等 [EB/OL]. (2018-01-24) [2019-04-18]. http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921015.htm.
National Energy Administration. Energy situations in 2017 introduced on the press conference of National Energy Administration [EB/OL]. (2018-01-24) [2019-04-18]. http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921015.htm.
- [2] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的新能源场站 T 接型送出线路纵联保护 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 111-124.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Cosine similarity based pilot protection of teed transmission line connected to renewable energy power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 111-124.
- [3] 于森, 汤亚芳, 黄亦欣, 等. 双馈风机控制方式对继电保护影响的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 180-187.
YU Miao, TANG Yafang, HUANG Yixin, et al. Research on the influence of control mode of DFIG on relay protection [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 180-187.
- [4] 黄涛, 陆于平, 蔡超. DFIG 等效序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.
- [5] JIA K, GU C, XUAN Z, et al. Fault characteristics analysis and line protection design within a large-scale photovoltaic power plant [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4099-4108.
- [6] 宋杰辉, 杨炳元, 吴俊杰. 双馈风场进线对 220 kV 母线采样值差动保护的影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 100-106.
SONG Jiehui, YANG Bingyuan, WU Junjie. Influence of double fed wind field incoming line on sampled value differential protection of 220 kV bus [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 100-106.
- [7] 陈实, 邵能灵, 范春菊, 等. 逆变型电源接入对选相元件的影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 106-112.
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Influence of inverter-interfaced generator on element of phase selectors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 106-112.
- [8] 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.
- [9] 瞿继平, 吴兴全, 闫凯, 等. 光伏电站弱电源特性对送出线路继电保护的影响 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 146-151.
QU Jiping, WU Xingquan, YAN Kai, et al. Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 146-151.
- [10] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [11] 欧阳金鑫, 唐挺, 郑迪, 等. 低电压穿越控制下双馈风电机组短路电流特性与计算方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 216-224.
OUYANG Jinxin, TANG Ting, ZHENG Di, et al. Characteristics and calculation method of short-circuit current of doubly fed wind generator under lower voltage ride through [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 216-224.
- [12] 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 Jiuquan wind power base delivery [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 87-91.
- [13] 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.
- [14] 段建东, 崔帅帅, 刘吴骥, 等. 基于电流频率差的有源配电网线路保护 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2927-2934.
DUAN Jiandong, CUI Shuaishuai, LIU Wuji, et al. Line protection based on current frequency difference for active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2927-2934.
- [15] 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.
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.
- [16] 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.

- [17] 曹雅榕. 永磁直驱风电机组暂态特性及对配网保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 22-24.
CAO Yarong. Research on transient characteristics of directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator and impact on distribution protection [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 22-24.
- [18] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1610-1618.
- [19] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17-25.
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [20] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007: 49-50.
LI Guangqi. Transient analysis of power system [M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 49-50.
- [21] 彭和平, 孙奇明, 严明皓. 适用于光纤自愈环网的线路差动保护综合同步方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 77-81.
PENG Heping, SUN Qiming, YAN Minghao. Synthesis method of data synchronization for line differential protections using optical fiber self-cure ring networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 77-81.
- [22] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2010: 105-106.
ZHANG Baohui, YIN Xianggen. Power system protection relaying [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 105-106.
- [23] 汤效军. 电力线载波通信技术的发展及特点[J]. 电力系统通信, 2003, 24(1): 47-51.
TANG Xiaojun. The development and characteristics of power line carrier techniques [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2003, 24(1): 47-51.

贾科(1986—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向: 配电网保护和故障定位。E-mail: ke.jia@ncepu.edu.cn
杨哲(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 新能源保护与控制。E-mail: 937794540@qq.com
魏超(1981—), 男, 工程师, 主要研究方向: 风力发电运行及检修。E-mail: weichao1981@163.com

(编辑 蔡静雯)

Pilot Protection Based on Spearman Rank Correlation Coefficient for Transmission Line Connected to Renewable Energy Source

JIA Ke¹, YANG Zhe¹, WEI Chao², ZHENG Liming¹, LI Yanbin³, BI Tianshu¹

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;
2. Guodian Northeast New Energy Development Company, Shenyang 110000, China;
3. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: Renewable energy sources are directly or indirectly connected to the grid through power electronic devices. Their fault currents have limited amplitudes, controlled angles, rich harmonics and strong nonlinearity, which are significantly different from that of conventional synchronous generators. The performance of conventional percentage restrained differential protection is facing challenges. In order to solve this problem, this paper proposes a pilot protection method based on Spearman rank correlation coefficient for transmission lines. When the system operates normally or an external fault occurs, a traversing current is flowing through the transmission line, so the current waveforms on both sides are completely opposite. When an internal fault occurs, there are huge differences between the transient current waveforms on both ends. Therefore, the Spearman rank correlation coefficient can be used to measure the correlation degree between the current waveforms on two ends, to distinguish the faults inside and outside the zone. The method is suitable for all kinds of renewable energy power plants, and has good performance on tolerating transition resistance and noise. Compared with the existing protection based on fault characteristics of renewable energy sources, the proposed method also shows good operation performance when the output power of renewable energy sources is weak and the breaker recloses into a permanent fault. Both simulation results and field recording data verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0904104), National Natural Science Foundation of China (No. 51777071) and State Grid Corporation of China (No. B3441518K002).

Key words: pilot protection; renewable energy power plant; Spearman rank correlation coefficient; transient current waveform; transmission line



附录 A

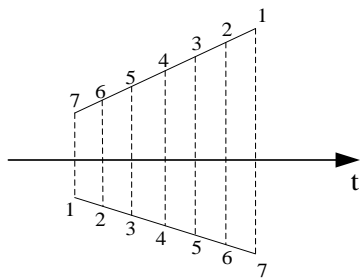


图 A1 典型负相关数列
Fig. A1 A typical negative correlation array

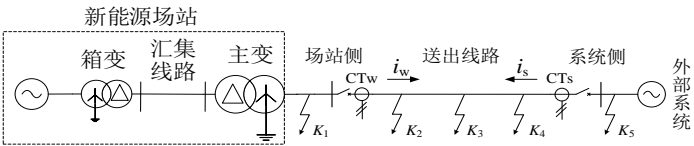


图 A2 新能源场站送出线路示意图
Fig. A2 One-line diagram of a renewable energy power plant

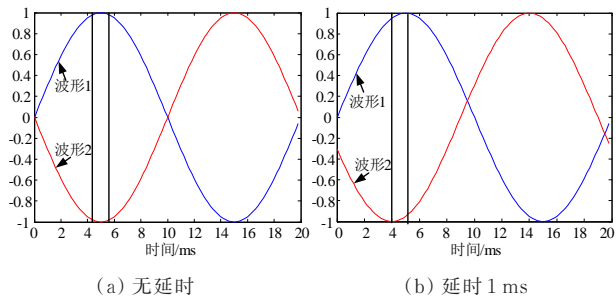


图 A3 正常运行时两侧电流波形
Fig. A3 Both current waveforms under normal operation

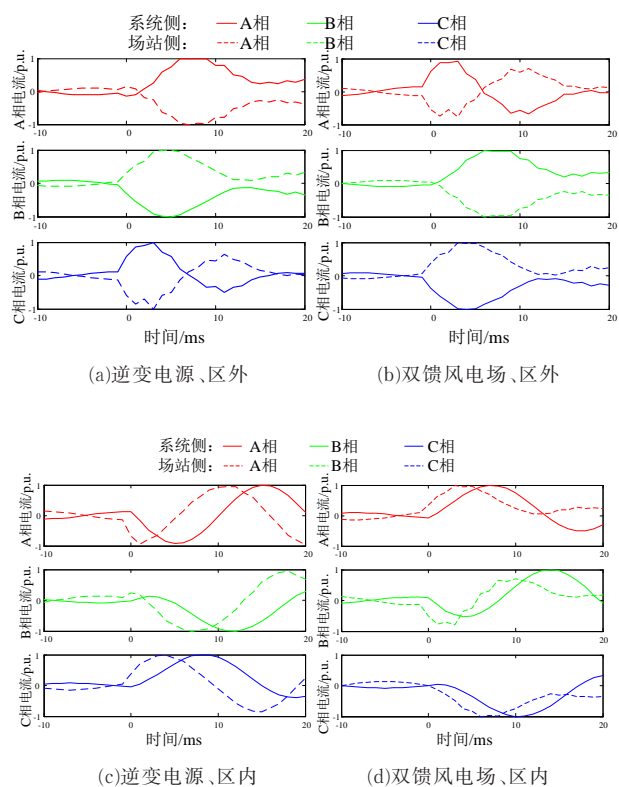


图 A4 送出线路发生区内、外三相短路时的两侧电流波形
Fig. A4 Current waveforms when internal and external fault occur on the transmission line

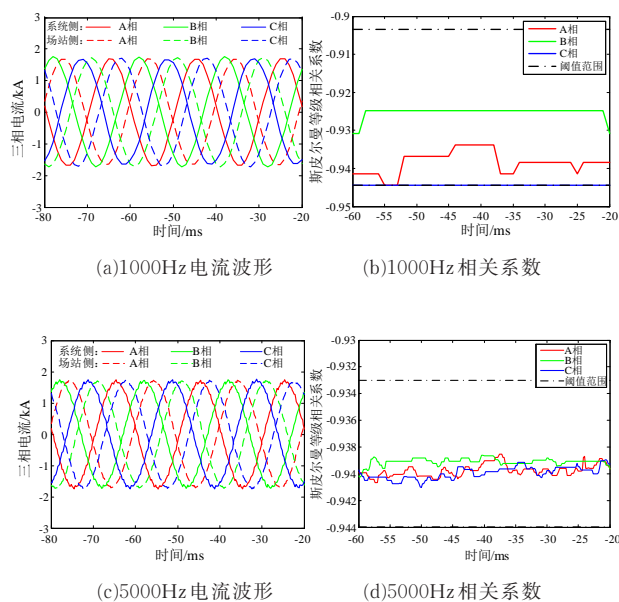


图 A5 延时 1ms 两侧电流波形及斯皮尔曼等级相关系数
Fig. A5 Currents waveforms measured at both terminals and spearman rank correlation coefficients with delay of 1ms

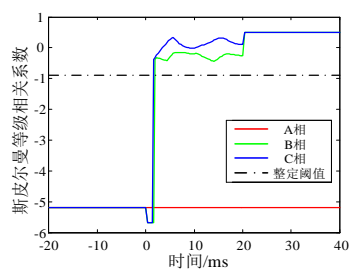


图 A6 处理数据后的三相电流波形相似度
Fig. A6 Three-phase correlation coefficients after processing data

附录 B

表 B1 不同采样频率下的 $\Delta\rho$

Table B1 The value $\Delta\rho$ under different sampling frequencies

采样频率(Hz)	20ms 数据点数	误差 $\Delta\rho$
1000	20	0.0135
2000	40	0.00356
3000	60	0.00161
4000	80	0.000914
5000	100	0.000588

表 B2 无延时秩次数列及秩次差数列

Table B2 Rank array and rank difference array without delay

点数	r	s_1	d_1
1~25	50~2	51~99	-1~-97
26~75	1~99	100~2	-99~97
76~100	100~52	1~49	99~3

注:对于 r 和 s_1 :“~”代表公差为 2;对于 d_1 :“~”代表公差为 4。

表 B3 有延时秩次数列及秩次差数列

Table B3 Rank array and rank difference array with delay

点数	r	s_2	d_2
1~20	50~12	61~99	-11~-87
21~25	10~2	100~92	-90
26~70	1~89	90~2	-89~87
71~75	91~99	1~9	90
76~100	100~52	1~49	99~3

注:对于 r 和 s_2 :“~”代表公差为 2;对于 d_2 :“~”代表公差为 4。

表 B4 不同采样频率下的 $\Delta\rho_1$

Table B4 The value $\Delta\rho_1$ under different sampling frequency

采样频率(Hz)	20ms 数据点数	1ms 数据点数	误差 $\Delta\rho_1$
1000	20	1	0.0556
2000	40	2	0.0559
3000	60	3	0.0560
4000	80	4	0.0560
5000	100	5	0.0560

表 B5 不同采样频率下的 $\Delta\rho_2$
Table B5 The value $\Delta\rho_2$ under different sampling frequency

采样频率(Hz)	20ms 数据点数	1ms 数据点数	误差 $\Delta\rho_2$
1000	20	1	0.0406
2000	40	2	0.0250
3000	60	3	0.0177
4000	80	4	0.0137
5000	100	5	0.0112

表 B6 不同过渡电阻下斯皮尔曼等级相关系数
Table B6 Spearman rank correlation coefficients with different fault resistances

过渡电阻/ Ω	逆变型电源的斯皮尔曼等级相关系数			双馈风机的斯皮尔曼等级相关系数		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
30	0.635	-0.999	-0.994	0.632	-0.998	-0.996
60	0.457	-0.998	-0.999	0.445	-0.999	-1.000
90	-0.167	-0.999	-0.999	-0.237	-0.998	-0.999
120	-0.720	-0.999	-0.998	-0.742	-0.996	-0.999

附录 C

1) 双馈风机仿真模型参数

异步电机额定容量 1.5MW, 额定电压/频率 0.69kV/50Hz, 定子电阻/电感为 0.008pu/0.168pu、转子电阻/电感为 0.006pu/0.152pu, 互感 3.48pu, 定转子匝数比 2.6377; 直流母线额定电压/电容 1.1kV/0.092F, 撬棒电阻 0.5 Ω ; 转子侧变流器功率环/电流环 PI 控制器比例系数为 0.9pu/0.85pu、积分时间常数为 0.05pu/0.03pu; 网侧变流器电压环/电流环 PI 控制器比例系数为 3.0pu/1.21pu、积分时间常数为 0.13pu/0.01pu; 箱变额定容量 1.6MVA, 电压等级 35/0.69kV, Dyn 接线, 短路阻抗 6.76%。

2) 逆变型新能源电源仿真模型参数

逆变器额定容量 3.3MW, 额定电压/频率 2.2kV/50Hz; 直流母线额定电压/电容 1.2kV/4500 μ F; LCL 滤波器参数为 1100 μ H、124 μ H、200 μ F; 逆变器正负序电压环/电流环 PI 控制器比例系数均为 0.75pu/0.35pu、积分时间常数均为 0.875pu/0.005pu; 箱变额定容量 3.3MVA, 电压等级 35/2.2kV, Dyn 接线, 短路阻抗 6.76%。

3) 线路仿真参数

送出线路单位长度正序和零序阻抗分别为 $(0.076 + j0.338)\Omega/\text{km}$ 和 $(0.284 + j0.824)\Omega/\text{km}$, 单位长度正序和零序电容分别为 0.0086 μ F/km 和 0.0061 μ F/km; 汇集系统等值电阻 0.11 Ω , 等值电感 409.5 μ H。

4) 场站主变压器参数

新能源场站主变压器容量 550MVA, 电压等级 220kV/35kV, YNd 接线, 短路阻抗 6%。