

适用于双馈风电场送出线的线电压故障选相方法

高淑萍^{1,2}, 蔚坤^{1,2}, 宋国兵³

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安; 2. 西安市电气设备状态监测与供电安全重点实验室, 710054, 西安; 3. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了有效识别风电系统在发生短路故障时的故障相, 避免因传统选相元件的适用性问题造成损失, 提出了一种适用于风电场线电压之间的相关性判别选相方法。首先, 分析了风电系统在故障期间的拓扑网络, 利用相模变换以及边界条件确定故障后风电场的线电压表达式; 然后, 分析线电压之间的故障特征, 发现在短路故障发生后, 各线电压之间主要关系与系统的等值阻抗有关, 不同短路故障的线电压突变量具备独特的关联性; 紧接着, 利用 Pearson 相关性算法, 根据短路故障特征确定相应的选相判据进行故障选相; 最后, 通过 PSCAD 搭建双馈风电场并网模型并进行各种故障仿真, 输出故障数据, 利用 MATLAB 对不同故障条件下的数据进行处理以及对所提线电压故障选相方法进行验证。仿真结果表明, 在不同故障类型中该方法均可以有效识别故障相, 并且不受故障位置以及过渡电阻阻值大小的影响, 可有效应对风电系统弱馈性、频率偏移以及正负序阻抗不稳定等问题。

关键词: 风电场; 故障选相; 相模变换; Pearson 相关性

中图分类号: TM771 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202310016 **文章编号:** 0253-987X(2023)10-0163-10

A Line Voltage Fault Phase Selection Method Suitable for Doubly-Fed Wind Farm Transmission Line

GAO Shuping^{1,2}, YU Kun^{1,2}, SONG Guobing³

(1. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security, Xi'an 710054, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to effectively identify the fault phase of a wind power system during the short-circuit fault and avoid the loss caused by the applicability of traditional phase selection components, a phase selection method suitable for the correlation between the line voltages of wind farms was proposed in this paper. First, the topological network of the wind power system during the failure period was analyzed, and the linear voltage expression of the wind farm after the failure was determined by using phase-mode transformation and boundary conditions. Then, through the analysis of the fault characteristics between the line voltages, it was found that after a short-circuit fault occurs, the main relationship between line voltages was related to the equivalent impedance of the system, and the voltage transient quantities of different short circuit faults

收稿日期: 2023-03-04。 作者简介: 高淑萍(1970—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52061635105); 国家电网有限公司总部科技资助项目(52094020006U)。

网络出版时间: 2023-06-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230619.1143.002.html>

have unique correlations. Subsequently, the Pearson correlation algorithm was used to determine the corresponding phase selection criteria based on the short-circuit fault characteristics, according to which fault phase selection can be carried out. Finally, the grid-connected model of the doubly-fed wind farm was built through PSCAD and various fault simulations were carried out to output fault data. MATLAB was used to process the data under different fault conditions to verify the phase selection method of the line voltage fault. The simulation results show that the proposed method can effectively identify the fault phase in different fault types, and is not affected by the fault location and the value of the transition resistance. It can effectively deal with the problems such as weak feedback, frequency offset and instability of positive and negative sequence impedance of the wind power system.

Keywords: wind power; fault phase selection; phase-mode transformation; Pearson correlation

故障选相元件作为继电保护的基本元件之一,对电力系统的保护具有重要意义,但是随着新能源发电技术的大力提倡与推广,考虑到传统电网在保护设计时并未考虑新能源电场的接入影响,因此大规模风电并网可能会导致传统的继电保护元件在一定情况下不能正常工作^[1-4],使故障选相困难,在故障发生时难以正确判断故障相,从而导致故障清除不及时对电网运行造成更大的危害。

为了应对大规模风电接入传统电网造成的问题,文献[5-8]研究了风电场发生故障时对暂态稳定性的影响,故障的发生使电网稳定性下降,并且故障参数较常规系统有较大区别。文献[9]发现在发生短路故障后,风电场的短路电流会出现频率偏移。文献[10]通过对风电场的故障特征分析,发现弱馈性导致保护元件的性能大大降低。因此,为了适应风电系统的保护,文献[11]提出一种新的算法可以改善新能源送出线在短路电流下的差异对故障相位选择和距离保护方向的检测。文献[12]通过对不同故障的相电压时域特征进行分析,从而实现故障选相工作。文献[13]定义并根据电压和电流推导产生的暂态能量进行故障检测,从而识别故障类型和故障相。同样,也有通过研究深度学习的人工智能算法实现故障选相工作^[14],该方法通过利用数据权值共享的方式完成故障选相。而文献[15]通过电压幅值突变量和线电压之间的比例完成选相。文献[16]提出一种基于电压幅值和相位配合的比较选相方法,但该方法的相位变化需要的精确度较高。文献[17]主要是采集电流突变量信息完成故障选相,通过对补偿系数的修正尽可能降低风电场等效阻抗的干扰。文献[18]通过修正双馈风电场序分量之间产生的相角差,再通过相位关系判断故障相。这两种方法共同之处都是通过利用分支系数完成对测量电压电流的修

正补偿,从而适应风电系统故障的暂态变化,但其中分支系数因为风电场中的等效正负序阻抗不稳定,易受干扰且变化影响较大,可能存在一定的适应性问题。文献[19]提出了根据暂态期间故障电流序分量幅值和相位综合比较的选相方式完成选相。文献[20]中构成一相故障分量与另外两相相差之比的电压和电流因子,将其结合并通过不同的故障特征完成选相。文献[21]根据双馈风电场的叠加电流相角差关系,通过对相角的补偿实现故障选相工作。

因此,为了以单一故障量解决含有双馈风电场的故障选相问题,本文将根据双馈风电场并网模型,构建故障附加网络拓扑图,利用 Karrenbauer 变换^[22]得到故障发生后的线电压表达式,通过已知的线电压表达式,对各种故障类型的不同特性进行分析,寻找线电压之间的联系;然后根据线电压之间关联性的不同完成对故障类型以及故障相的区分和判断;最后,设置多种不同类型故障场景,通过 PSCAD 搭建双馈风电场并网故障模型并输出故障数据,利用 MATLAB 对各种不同故障情况下的故障数据进行处理,验证线电压之间的关联性,进而检验不同情况下的故障相判别结果,确定该方法的有效性和适用性。

1 暂态分析

图 1 为双馈风电场并网后线路发生短路故障的简化示意图,下文中的暂态分析均是基于该简化故障模型完成。

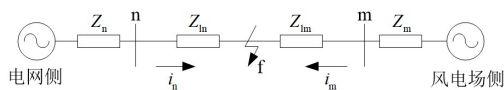


图 1 双馈风电场并网故障简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of grid-connected fault of doubly-fed wind farm

将式(9)所得关系代入 $k_1 Z_{m1}$ 、 $k_2 Z_{m2}$, 可得 $m \approx 1$, 即 $k_1 Z_{m1} \approx k_2 Z_{m2}$, 因此在下文中均假设 $k_1 Z_{m1}$ 、 $k_2 Z_{m2}$ 近似相等。

将 $k_1 Z_{m1}$ 、 $k_2 Z_{m2}$ 代入式(8), 根据线电压之间的关系, 可以发现 ΔU_{AB} 与 ΔU_{CA} 之间呈负相关特性。但是由于式中 $k_1 Z_{m1}$ 、 $k_2 Z_{m2}$ 仅是近似相等, 所以其负相关特性极强但不完全相反, 而 ΔU_{BC} 和其他两项无关联性。

2.2 两相短路故障

以 BC 故障为例, 发生 BC 故障时的各线电压表达式为

$$\begin{cases} \Delta U_{AB} = -\frac{3k_1 Z_{m1} U_{FNA}}{Z_{1\Sigma} - Z_{2\Sigma}} \\ \Delta U_{BC} = \frac{U_{FNA} (3k_1 Z_{m1} + 3k_2 Z_{m2})}{Z_{1\Sigma} - Z_{2\Sigma}} \\ \Delta U_{CA} = -\frac{3k_2 Z_{m2} U_{FNA}}{Z_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma}} \end{cases} \quad (10)$$

将 $k_1 Z_{m1} \approx k_2 Z_{m2}$ 代入式(10), 可知 ΔU_{AB} 、 ΔU_{CA} 近似相等, 呈正相关特性。而 ΔU_{BC} 与其他两组线电压符号相反, 所以呈负相关特性。

2.3 两相短路接地故障

以 BCG 故障为例, BCG 故障的线电压表达式为

$$\begin{cases} \Delta U_{AB} = -k_1 Z_{m1} U_{FNA} [3(Z_{2\Sigma} + R_F) - \sqrt{3}e^{-j90^\circ} (Z_{2\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} + 3R_F)] Z' \\ \Delta U_{BC} = k_1 Z_{m1} U_{FNA} [3(Z_{2\Sigma} + R_F) - \sqrt{3}e^{-j90^\circ} (Z_{2\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} + 3R_F)] Z' - k_2 Z_{m2} U_{FNA} [3(Z_{1\Sigma} + R_F) + \sqrt{3}e^{-j90^\circ} (Z_{1\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} + 3R_F)] Z' \\ \Delta U_{CA} = k_2 Z_{m2} U_{FNA} [3(Z_{1\Sigma} + R_F) + \sqrt{3}e^{-j90^\circ} (Z_{1\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} + 3R_F)] Z' \end{cases} \quad (11)$$

在式(11)中 $Z' = [(Z_{2\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} + 3R_F)(Z_{1\Sigma} + R_F) + (Z_{1\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} + 3R_F)(Z_{2\Sigma} + R_F)]^{-1}$ 。

已知 $k_j = Z_{j\Sigma} / (Z_{mj} + Z_{lmj})$, 代入式(11)可得阻抗关系

$$\begin{cases} Z_{1\Sigma} = k_1 (Z_{m1} + Z_{lm1}) \\ Z_{2\Sigma} = k_2 (Z_{m2} + Z_{lm2}) \end{cases} \quad (12)$$

由于风电系统等值阻抗很大, 而线路阻抗相对来说很小, 因此 $k_1 Z_{lm1}$ 、 $k_2 Z_{lm2}$ 可忽略不计, 由于 $k_1 Z_{m1} \approx k_2 Z_{m2}$, 式(12)中可近似认为 $Z_{1\Sigma} \approx Z_{2\Sigma}$, 进行等效替换后将其代入式(11)可得

$$\begin{cases} a = k_1 Z_{m1} U_{FNA} (Z_{1\Sigma} + R_F) Z' \\ b = k_1 Z_{m1} U_{FNA} (Z_{1\Sigma} + 2Z_{0\Sigma} + 3R_F) Z' \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知 b 比 a 多出 $2Z_{0\Sigma} + 2R_F$ 这一项, 根据其大小关系绘制 BCG 故障时线电压之间的相量关系图如图 3 所示。

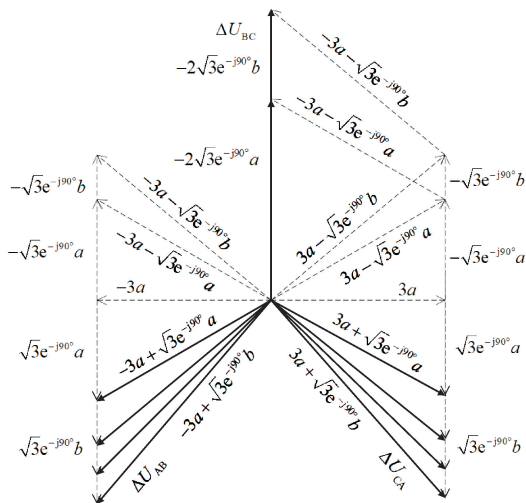


图 3 BCG 故障线电压相量关系图

Fig. 3 BCG fault line voltage vector diagram

由图 3 可以看出, 当发生 BCG 短路故障时, 如果 $a=b$, 此时的 ΔU_{AB} 和 ΔU_{CA} 的夹角近似为 120° , 余弦值近似为 -0.5 , 但根据实际分析知 $a < b$, 即使无法获得具体数值, 但通过上述分析即可明确判断出 ΔU_{AB} 和 ΔU_{CA} 之间的夹角一定小于 120° , 而 ΔU_{BC} 和 ΔU_{AB} 、 ΔU_{CA} 之间夹角明显大于 120° 且近似相等, 在进行余弦计算后, ΔU_{BC} 和其他线电压之间的相量夹角均大于 120° , 所以其余弦值必然小于 ΔU_{AB} 、 ΔU_{CA} 之间的夹角余弦值。

2.4 三相短路故障

三相短路故障的线电压表达式为

$$\begin{cases} \Delta U_{AB} = -\frac{(3 - \sqrt{3}e^{-j90^\circ})k_1 Z_{m1} U_{FNA}}{2(Z_{1\Sigma} + R_F)} \\ \Delta U_{BC} = \frac{(3 - \sqrt{3}e^{-j90^\circ})k_1 Z_{m1} U_{FNA}}{2(Z_{1\Sigma} + R_F)} - \frac{(3 + \sqrt{3}e^{-j90^\circ})k_2 Z_{m2} U_{FNA}}{2(Z_{2\Sigma} + R_F)} \\ \Delta U_{CA} = \frac{(3 + \sqrt{3}e^{-j90^\circ})k_2 Z_{m2} U_{FNA}}{2(Z_{2\Sigma} + R_F)} \end{cases} \quad (14)$$

在 2.3 节的分析中近似认为 $Z_{1\Sigma} \approx Z_{2\Sigma}$, 因此三相短路时各线电压分母可以近似看做相等, 同时又因为 $k_1 Z_{m1} \approx k_2 Z_{m2}$, 设 $k_1 Z_{m1} U_{FNA} / 2(Z_{1\Sigma} + R_F) = a$, 将其代入公式(14), 绘制线电压相量关系图如图 4

所示。

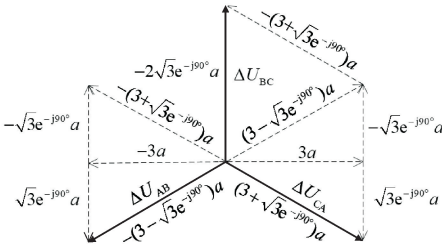


图 4 ABC 故障线电压相量关系图

Fig. 4 ABC fault line voltage vector diagram

由图 4 可知, $\Delta U_{BC} = \Delta U_{AB} e^{-j120^\circ} = \Delta U_{CA} e^{j120^\circ}$, 各线电压之间的夹角余弦计算得到结果为 -0.5 , 但因为公式中存在部分近似等效, 所以实际余弦结果只是接近 -0.5 而不完全相等。

3 故障选相判据

根据上述分析, 本文将利用 Pearson 相关性^[24]判断两组线电压之间的关联性。Pearson 相似度应用于线电压关联性判断可表示为

$$\rho_{\varphi\&\varphi\varphi} = \frac{\sum_{n=1}^N (U_1(n) - \bar{U}_1)(U_2(n) - \bar{U}_2)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (U_1(n) - \bar{U}_1)^2 \sum_{n=1}^N (U_2(n) - \bar{U}_2)^2}} \quad (15)$$

式中: $\rho_{\varphi\&\varphi\varphi}$ 为两组线电压相量之间的相关性系数; U_1, U_2 分别用于指代两组不同的线电压数据, 根据 Pearson 相关性表达式原理得到计算结果取值范围在 $[-1, 1]$ 之间, 负值代表负相关, 正值代表正相关。而且, 该方法对每一个分量减去均值, 将相量值做中心化处理, 然后对中心化处理的结果做余弦计算。该方法是余弦相似度^[25]的优化处理方法, 使用余弦相似度算法需要在使用该方法前计算故障分量的变化量, 而 Pearson 相似度则是通过消去均值分量实现这一过程, 所以 Pearson 相关性分析可以直接应用于故障发生后线电压暂态分量之间的比较, 相当于对两组线电压的变化趋势进行关联性分析。

可设 $\rho_{A\&BC}$ 为线电压 U_{AB}, U_{CA} 的相关系数, $\rho_{B\&AC}$ 为 U_{AB}, U_{BC} 的相关系数, $\rho_{C\&AB}$ 为 U_{CA}, U_{BC} 的相关系数。

依据第 2 节中的分析可知, 几种典型的故障类型相关性特点如下: 发生 AG 故障时, $\rho_{A\&BC} \approx -1$, 其余

两组数据之间无关联性; 发生 BC 故障时, $\rho_{A\&BC} \approx 1$, 且 $\rho_{B\&AC}, \rho_{C\&AB}$ 呈负相关特性; 发生 BCG 故障时, $\rho_{A\&BC} > -0.5 > \rho_{B\&AC} \approx \rho_{C\&AB}$, 且 $|\rho_{B\&AC} - \rho_{C\&AB}| < 0.1$ 即认为近似相等。发生 ABC 故障时, 由于 3 组线电压的相量夹角互差 120° , 所以存在关系 $\rho_{A\&BC} \approx \rho_{B\&AC} \approx \rho_{C\&AB}$, 且约为 -0.5 。

通过分析发现, 两相短路接地和三相短路故障的相关系数值都主要以 -0.5 作区分, 所以通过添加零序与正序分量的突变量比值关系判断故障是否接地, 但电力系统时刻处于波动过程中, 为保证一定的灵敏度, 令 $|U_0/\Delta U_1| < 0.05$ 即认为该故障类型为不接地故障。

由于双馈风电场的弱馈性干扰、系统波动、以及公式中的等效关系导致相关性算法的结果在强关联性时不完全为 1 或 -1 , 所以本文设相关系数为 $\rho_{\varphi\&\varphi\varphi} > 0.9$ 或 $\rho_{\varphi\&\varphi\varphi} < -0.9$ 时就认为两组线电压之间呈强关联性。而根据统计学的理论认为 Pearson 相关系数的绝对值在 0.8 以上认为两组数据间具有极强的关联性, 所以在一定程度上可以适当提高灵敏度。其他故障类型相关性判据方法类似, 故障类型判断和选相方法如故障选相流程图 5 所示, ρ_1, ρ_2, ρ_3 用于指代 3 组不同相关系数值。

4 仿真分析

为验证本文所提方法的正确性, 利用 PSCAD 搭建 20×5 MW 的双馈风电场并网模型, 在双馈风电场的送出线上设置不同的短路故障进行仿真并输出数据, 然后利用 MATLAB 对输出的故障数据进行相关性计算, 检验本文所提选相方法的有效性。双馈风电场并网模型如图 6 所示。

该双馈风电场模型参数配置如下: 双馈风电机组定子输出电压为 0.69 kV, 每台风电机组附近放置一台升压变压器, 升压至 35 kV 后通过集电线路连接所有风电机组, 再通过集电线路升压至 220 kV 后并网; 双馈风电场送出线的线路长 100 km, 风电场送出线的正序和零序参数分别为 $R_1 = 3.576 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}, X_{L1} = 5.078 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}, X_{C1} = 3.058 \times 10^8 \Omega/\text{m}, R_0 = 3.63 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}, X_{L0} = 1.323 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}, X_{C0} = 4.306 \times 10^8 \Omega/\text{m}$, 双馈风电场接入的系统阻抗为 $Z_n = 1.0515 + j1.6054 \Omega$, 该双馈风电场模型的变流器中包含有 Chopper 保护以及 crowbar 保护。

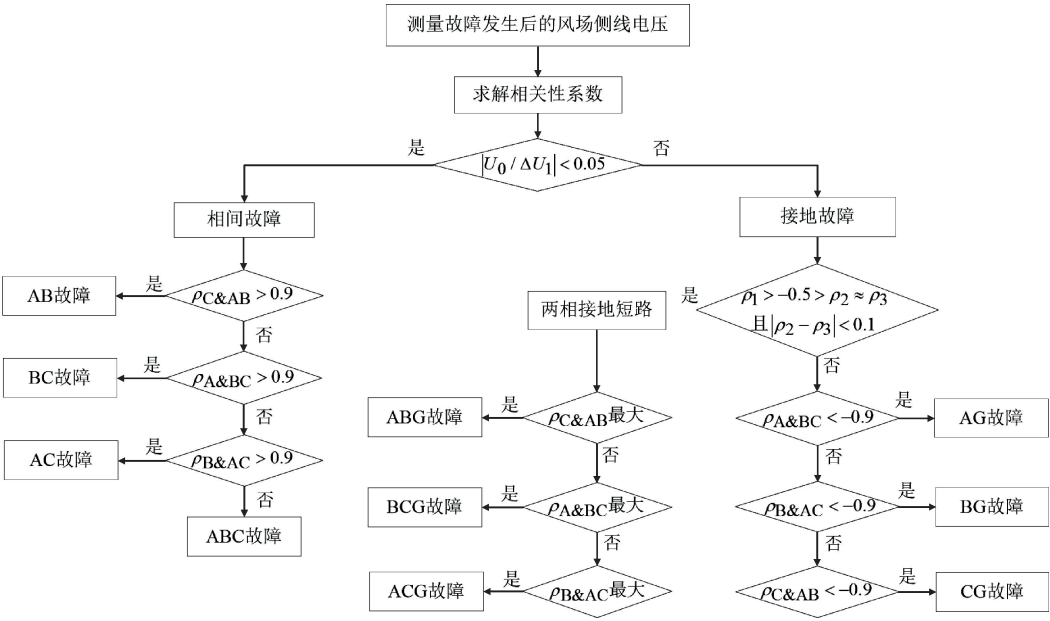


图 5 故障选相流程图
Fig. 5 Flow chart of fault phase selection

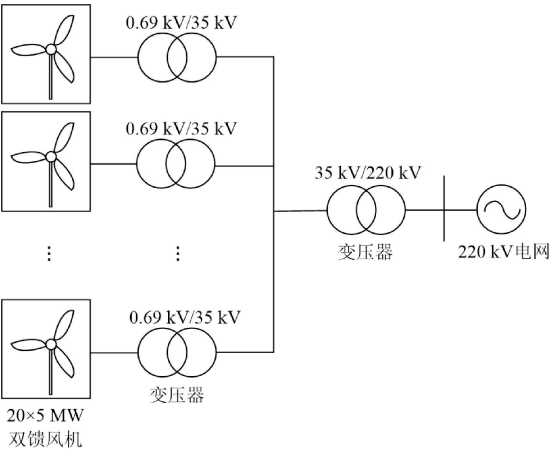


图 6 双馈风电场并网模型
Fig. 6 Double-fed wind farm grid-connected model

输电线路故障模型如图 7 所示。图 7 中故障位于双馈风电场的送出线上, 分别在风电场侧正向线路故障点 f_5 (10%)、 f_4 (30%)、 f_3 (50%)、 f_2 (70%)、 f_1 (90%) 的不同位置, 设置不同的短路故障情况, 从而检验该方法的有效性。

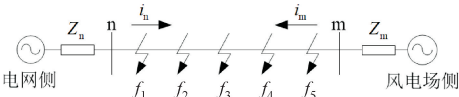


图 7 双馈风电场接入系统的故障模型图
Fig. 7 Fault model diagram of doubly-fed wind farm access system

4.1 传统故障选相方法的缺陷

传统的故障选相方法主要根据电流的突变量关系完成选相工作, 但是含有双馈风电系统的故障参数变化情况与常规系统有较大差别, 不同故障时相电流差突变量的变化情况如图 8 所示。

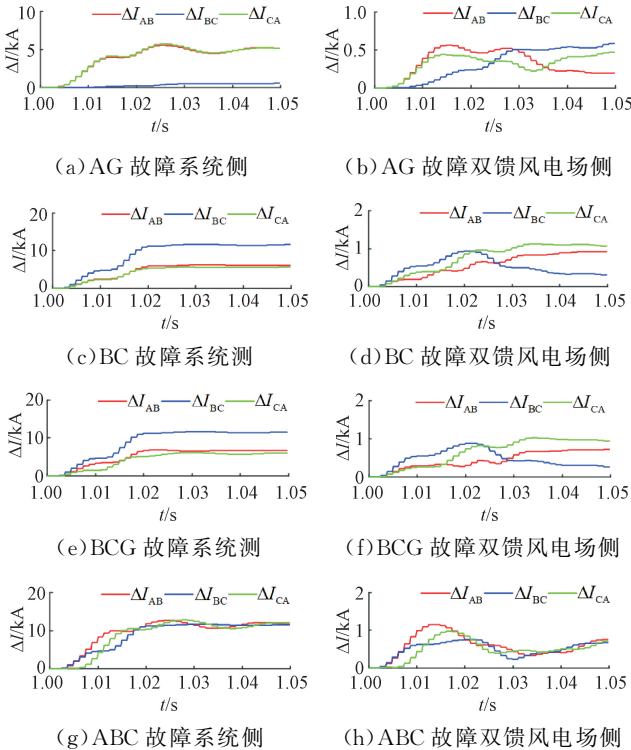


图 8 不同故障的相电流差突变量检验
Fig. 8 Phase current difference mutation test of different faults

在图 8 中,根据不同故障的相电流差突变量关系可以发现,线路发生短路故障后双馈风电场侧保护安装处测量得到的电流关系由于内部电子器件的干扰以及控制方式的不同,除了三相短路故障外,其他短路故障的相电流差突变量关系与传统电网的故障特征明显不同,这将会导致传统的故障选相元件不能及时识别含有双馈风电系统故障相,使相互配合的保护装置产生拒动或者误动的可能。

4.2 线电压故障选相方法验证

由于暂态参数提取时间较短,假设故障发生期间双馈风机所受风速不发生改变。设置金属性短路故障点位于风电场侧保护安装处正向 50 km 的位置,故障发生时间为 1 s,故障持续时间为 0.5 s,对故障发生后 20 ms 内的数据进行检验。故障后双馈风电场的线电压相量值图如图 9 所示。

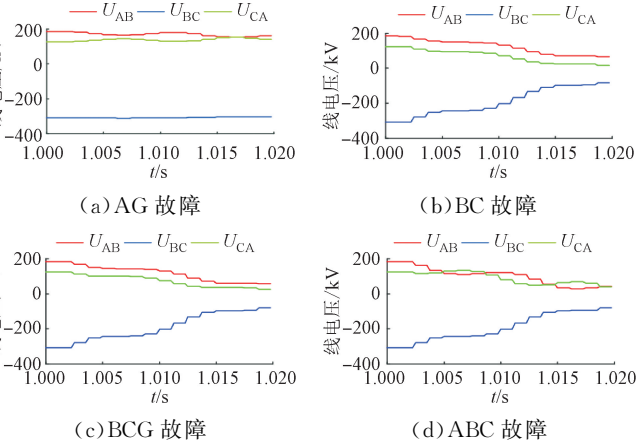


图 9 故障后双馈风电场的线电压相量值图
Fig. 9 Line voltage phasor diagram of doubly fed wind farm after fault

由图 9(a)可以看出,发生 AG 故障时在采样时间内 U_{AB} 、 U_{CA} 的曲线变化情况完全相反,呈负相关特性,而 U_{BC} 的变化不明显,和另外的两条线电压曲线之间无明显关联性。由图 9(b)可以看出,发生 BC 相间短路时 U_{AB} 、 U_{CA} 的变化趋势几乎一致,因此两线电压曲线之间的相关系数约为 1,而 U_{BC} 和其它两条曲线之间呈现明显的负关联性。由图 9(c)可以看出,发生 BCG 故障时线电压 U_{AB} 、 U_{CA} 的变换呈一定的正相关特性,但并非完全一致,而这两项和 U_{BC} 的变换趋势明显相反,因此 U_{AB} 、 U_{CA} 的相关系数值在 3 组相关系数中最大。图 9(d)中 3 条线电压相量值曲线基本两两之间呈现不完全相反变化趋势,因此发生三相短路时的线电压之间互相呈负相关特性,但无明显的强关联性。

根据图 9 中几种短路故障的仿真结果可知,故障期间的线电压相量值关系基本和前文分析结果一致,因此可通过线电压之间的相关系数进行判别,从而实现故障的分类和选相。

为了进一步验证线路中点风电场侧正方向 50 km 处的金属性短路,各线电压之间的相关系数和选相结果如表 1 所示。由表 1 的相关系数检验结果可以看出,本文所提方法和结论符合故障时线电压之间的特点,并且可以准确识别故障类型和故障相。表 1 双馈风电场侧正向 50 km 处金属性接地故障的选相结果

Table 1 Phase selection results of metal grounding fault at 50 km forward on doubly-fed wind farm side

故障类型	$\rho_{A\&BC}$	$\rho_{B\&AC}$	$\rho_{C\&AB}$	$ U_0/\Delta U_1 $	选相结果
AG	-0.996 5	0.112 0	-0.195 2	1.394 1	AG
BG	-0.353 8	-0.992 7	0.238 4	1.418 6	BG
CG	0.085 7	-0.198 9	-0.993 5	1.418 0	CG
AB	-0.995 0	-0.995 0	0.980 0	7.9×10^{-5}	AB
BC	0.917 2	-0.9812	-0.976 9	7.9×10^{-5}	BC
AC	-0.995 9	0.983 4	-0.995 8	8.32×10^{-5}	AC
ABG	-0.949 3	-0.940 9	0.786 7	0.304 6	ABG
BCG	0.556 2	-0.907 6	-0.853 7	0.374 8	BCG
ACG	-0.924 4	0.698 9	-0.918 9	0.750 4	ACG
ABC	-0.588 6	-0.547 2	-0.354 6	8×10^{-5}	ABC

为检验该方法在不同故障条件下的选相结果,在线路中点分别设置 10、100、200 Ω 的过渡电阻,以比较在不同阻值影响下的故障选相结果,其相关系数值和选相结果如表 2 所示。将表 1、表 2 的数据进行对比可以发现,本文所提方法不受过渡电阻大小的影响,有、无过渡电阻均可有效识别故障相和故障类型。同样,为检验在不同距离下发生短路时的故障选相结果,在双馈风电场正向 10、30、70、90 km 处设置短路故障进行验证。表 3 给出了在金属性短路故障时,不同故障距离下的线电压相关系数值以及选相结果。

将表 1、表 3 数据进行对比可以发现,该方法也不受故障距离的影响,可有效识别不同故障的故障相以及故障类型。综上所述,通过大量的仿真实验可以发现,本文提出的故障选相方法既不受风电场弱馈性的干扰也不受大过渡电阻的干扰,并且在不同的故障距离下均可正确判断故障类型以及选出故障相。

表 2 双馈风电场侧正向 50 km 处不同大小过渡电阻阻值下的选相结果

Table 2 Phase selection results under different transition resistance values at 50 km forward of doubly-fed wind farm side

R_F/Ω	故障类型	$\rho_{A\&BC}$	$\rho_{B\&AC}$	$\rho_{C\&AB}$	$ U_0/\Delta U_1 $	选相结果
10	AG	-0.997 2	0.337 9	-0.407 7	1.388 0	AG
	BC	0.926 0	-0.982 7	-0.979 9	7.91×10^{-5}	BC
	BCG	0.541 0	-0.889 7	-0.865 3	0.395 2	BCG
	ABC	-0.592 0	-0.554 6	-0.342 2	8.08×10^{-5}	ABC
100	AG	-0.993 2	0.422 4	-0.525 3	1.326 4	AG
	BC	0.950 6	-0.987 7	-0.987 5	7.78×10^{-5}	BC
	BCG	0.437 6	-0.832 7	-0.862 3	0.514 7	BCG
	ABC	-0.529 3	-0.498 7	-0.471 4	7.81×10^{-5}	ABC
200	AG	-0.990 8	0.196 0	-0.326 8	1.318 3	AG
	BC	0.950 0	-0.987 4	-0.987 4	7.88×10^{-5}	BC
	BCG	0.422 5	-0.835 2	-0.851 3	0.554 6	BCG
	ABC	-0.483 5	-0.498 9	-0.517 4	7.87×10^{-5}	ABC

表 3 金属性接地故障双馈风电场侧正向不同距离下的选相结果

Table 3 Phase selection results at different distances on the side of doubly fed wind farm with metal ground fault

距离/km	故障类型	$\rho_{A\&BC}$	$\rho_{B\&AC}$	$\rho_{C\&AB}$	$ U_0/\Delta U_1 $	选相结果
10	AG	-0.998 3	-0.337 5	0.281 2	1.509 1	AG
	BC	0.917 7	-0.981 0	-0.977 3	7.34×10^{-5}	BC
	BCG	0.478 1	-0.885 6	-0.831 4	0.454 8	BCG
	ABC	-0.594 3	-0.537 5	-0.358 7	9.4×10^{-5}	ABC
30	AG	-0.998 3	-0.125 6	0.067 8	1.455 4	AG
	BC	0.917 2	-0.981 0	-0.977 0	9.03×10^{-5}	BC
	BCG	0.523 3	-0.898 7	-0.843 9	0.410 4	BCG
	ABC	-0.591 5	-0.542 3	-0.356 6	8.78×10^{-5}	ABC
70	AG	-0.996 5	0.170 4	-0.252 3	1.3407	AG
	BC	0.915 6	-0.980 9	-0.976 3	9.85×10^{-5}	BC
	BCG	0.575 0	-0.912 1	-0.859 8	0.344 2	BCG
	ABC	-0.585 5	-0.552 0	-0.352 7	1×10^{-4}	ABC
90	AG	-0.996 3	0.142 7	-0.227 5	1.179 2	AG
	BC	0.915 2	-0.980 9	-0.976 1	9.38×10^{-5}	BC
	BCG	0.557 2	-0.907 0	-0.855 1	0.309 9	BCG
	ABC	-0.582 4	-0.556 1	-0.351 8	9.46×10^{-5}	ABC

5 结 论

本文通过对故障网络的拓扑结构进行研究,确定故障后双馈风电场和系统之间的联系,得到各线电压之间的表达式,然后根据不同故障类型的线电压之间关联性不同的特征,可以识别出故障相以及故障类型。

通过设置不同故障场景输出故障数据,并利用 MATLAB 对输出故障数据进行相关性计算,可以发现,本文所提故障选相方法不受系统故障导致的频率偏移,风电系统阻抗不稳定以及弱馈性的影响,有效避免了因为故障参数的非常规性改变而不能正确选相的问题。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韩璐, 李凤婷, 王春艳, 等. 风电接入对继电保护的影响综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 163-169.
HAN Lu, LI Fengting, WANG Chunyan, et al. A survey on impact of wind farm integration on relay protection [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 163-169.
- [3] RAZZHIVIN I A, RUBAN N U, KIEVEC A V, et al. Simulating wind power plants for relay protection problems [C]//Journal of Physics: Conference Series. Bristol, UK: IOP Publishing, 2018: 012054.
- [4] 成和祥. 基于双馈风机短路特性的风电场集电线路继电保护整定方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 93-99.
CHENG Hexiang. Discussion on setting scheme of collecting line relay protection in wind farm based on a DFIG short-circuit characteristic [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 93-99.
- [5] LIU Yicen, LIU Qunying, HU Fengkai, et al. Transient stability assessment for power system with wind farm considering the stochasticity [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(8): 12854.
- [6] 姜惠兰, 李政, 张驰, 等. SMES-DFIG 提高多机系统暂态功角稳定性的控制策略 [J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 993-1001.
JIANG Huilan, LI Zheng, ZHANG Chi, et al. Control strategy of SMES-DFIG for improving transient power angle stability of multi-machine system [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 993-1001.
- [7] 牟澎涛, 赵冬梅, 王嘉成. 大规模风电接入对系统功角稳定影响的机理分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1324-1332.
MU Pengtao, ZHAO Dongmei, WANG Jiacheng. Influence mechanism analysis of large-scale wind power integration on power system angle stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1324-1332.
- [8] 桑懿谦, 夏俊荣, 戴义平, 等. 双馈风力机转子动能在系统频率跌落时的响应能力分析 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 130-136.
SANG Yiqian, XIA Junrong, DAI Yiping, et al. Response ability analysis for doubly-fed wind generator rotor kinetic energy as system frequency falling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 130-136.
- [9] 蔡文超, 杨炳元, 高敏, 等. 一种抑制双馈风机故障电流频率偏移的有效方法 [J]. 可再生能源, 2018, 36(11): 1663-1669.
CAI Wenchao, YANG Bingyuan, GAO Min, et al. An effective method for suppressing frequency offset of double-fed induction generator fault current [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(11): 1663-1669.
- [10] 王晨清, 宋国兵, 刘凯, 等. 突变量保护对风电接入系统的适应性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5485-5492.
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5485-5492.
- [11] MARTÍNEZ C E, COMECH M P, VILLÉN M T, et al. Improved faulted phase selection algorithm for distance protection under high penetration of renewable energies [J]. Energies, 2020, 13(3): 558.
- [12] 王晨清, 宋国兵, 徐海洋, 等. 适用于风电接入系统的相电压暂态量时域选相新原理 [J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2320-2326.
WANG Chenqing, SONG Guobing, XU Haiyang, et al. Novel principle of phase selection for wind power integration based on fault transient voltage in time-domain [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2320-2326.
- [13] ANUDEEP B, NAYAK P K. Transient energy-based combined fault detector and faulted phase selector for distribution networks with distributed generators [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(4): 12288.
- [14] ALRIFAEY M, LIM W H, ANG C K, et al. Hybrid deep learning model for fault detection and classification of grid-connected photovoltaic system [J]. IEEE Access, 2022, 10: 13852-13869.
- [15] 王紫薇, 肖繁, 王友怀, 等. 适用于双馈风电场联络线故障选相方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 170-176.
WANG Ziwei, XIAO Fan, WANG Youhuai, et al. Fault phase selection method for interconnection line of DFIG-based wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 170-176.
- [16] XU Kehan, ZHANG Zhe, LAI Qinghua, et al. Fault phase selection method applied to tie line of renewable

- energy power stations [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(13): 2549-2557.
- [17] 黄涛, 陆于平. 适用于双馈风电场的改进电流突变量选相元件 [J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2959-2964.
HUANG Tao, LU Yuping. Improved superimposed current phase selector applied to DFIG-Based wind farm [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2959-2964.
- [18] 张俊峰, 高亮, 沈奕菲, 等. 适用于双馈机组风电场的故障电压序分量选相元件 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 136-143.
ZHANG Junfeng, GAO Liang, SHEN Yifei, et al. Fault-sequence element of voltage phase selection applied to DFIG-based wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 136-143.
- [19] ZHANG Jinhua, ZHANG Baohui, WANG Chenqing. Improved schemes for traditional current-based phase selectors in wind power systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(21): 5781-5788.
- [20] XU Zhihao, LU Yuping. A novel superimposed phase selection method for transmission line of DFIG-based wind farm [C]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1-5.
- [21] LI Xu, LU Yuping, JIANG Wentao, et al. Compensated phase selection method based on virtual magnitude zoning for transmission lines emanating from wind farms [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 206: 107804.
- [22] HASHEMINEJAD S, SEIFOSSADAT S G, RAZAZ M, et al. Traveling-wave-based protection of parallel transmission lines using Teager energy operator and fuzzy systems [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 1067-1074.
- [23] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 42-46.
- [24] 李斌, 彭伍龙, 姚斌, 等. 基于复合环流与零序电流特征的换流变压器励磁涌流波形相关性识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 8027-8038.
LI Bin, PENG Wulong, YAO Bin, et al. An algorithm of identifying inrush current of converter transformer based on waveform cross-correlation of composite circulation and zero sequence current characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8027-8038.
- [25] 高淑萍, 沈渠旺, 宋国兵, 等. 采用余弦相似度的混合三端直流输电线路保护原理 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(9): 92-103.
GAO Shuping, SHEN Quwang, SONG Guobing, et al. Cosine similarity-based protection of hybrid three-terminal DC transmission line [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9): 92-103.

(编辑 赵炜)