107

风电场送出线路的距离保护算法分析

苑 双,于 群

(山东科技大学 电气与自动化工程学院,山东 青岛 266590)

摘 要:研究了风电场风速波动和弱馈性对距离保护算法的影响。通过在 PSCAD 中建立双馈式风电场并网仿真 模型,对风速波动时风电场侧电网输出故障电压和电流进行 FFT 分析,然后结合傅里叶算法和解微分方程算法的 测距原理进行仿真分析;给出矩阵束算法的测距原理,针对风电场的弱馈性,仿真分析故障电压和电流采样序列矩 阵的奇异值对矩阵算法提取工频相量的影响。仿真结果表明,风电场侧电网的频偏特性使傅里叶算法的测距结果 误差大,而解微分方程算法不受频率偏移的影响,测距结果能正确反映故障距离;在发生相间短路时,由于风电场 的弱馈性,矩阵束算法无法提取工频相量,而接地短路受影响小,能准确提取工频相量,实现准确测距。 关键词:双馈式风电场;送出线路;傅里叶算法;解微分方程算法;矩阵束算法;测距

中图分类号:TM614 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2017)05-0107-10 DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2017.05.015

Analysis of Distance Protection Algorithm for Wind Farm Outgoing Transmission Line

YUAN Shuang, YU Qun

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In this paper, the influence of wind farm speed fluctuation and weak feed characteristics on distance protection algorithm was studied. A simulation model of double-fed wind farm integration into power grid was firstly established by using the software PSCAD, and the fault voltage and current of wind farm was FFT analyzed while wind speed fluctuated, which was then simulated by combining the distance measurement principle of Fourier algorithm and solving differential equation algorithm. The distance measure principle of matrix pencil algorithm was given. In view of the weak feed of wind farm, the influence of singular value of fault voltage and current sampling sequence matrix on the extracting power frequency phasor of matrix pencil algorithm was simulated. Simulation results show that frequency offset characteristics of fault voltage and current output from the side of wind farm make the ranging result of Fourier algorithm large while that of differential equations algorithm can correctly reflect the fault distance. When phase-phase to ground fault occurs, matrix pencil algorithm cannot extract power frequency phasor due to the weak feed of wind farm, while grounding fault is less influenced and matrix pencil algorithm can extract power frequency phasor accurately so that it can achieve accurate fault location.

Key words: double-fed wind farm; outgoing transmission line; Fourier algorithm; differential equations algorithm; matrix pencil algorithm; distance measure

收稿日期:2016-06-16

基金项目:山东科技大学研究生科技创新基金项目(YC150222)

作者简介:苑 双(1991—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护的研究,本文通信作者.

E-mail:y_sh_run@163.com

于 群(1970—),男,山东淄博人,教授,硕士生导师,主要从事电力系统安全分析,电力系统继电保护的研究.

E-mail: yuqun_70@163. com

距离保护算法用于测量线路保护安装处到短路点间的阻抗值或距离,其准确提取工频量或测量阻抗的 前提是能够正确识别故障特征,但由于风电场侧电网的故障特征不同于常规电网侧,因此距离保护算法应用 的正确与否决定了距离保护装置对故障的反应能力。

由于风机在不同工况下的运行状态不同,使风电场侧电网暂态故障特征明显区别于常规侧电网,风电场 接入电网对送出线路距离保护的影响亟待研究^[1-3]。文献[4]分析了风电接入系统对距离元件的影响,基于 工频相量的保护算法(如傅氏算法)无法准确提取风电基波相量,依据工频电压、电流比值的测量阻抗不再准 确。文献[5-7]仿真研究了风电场送出线路故障时的电压和电流频谱特性对距离保护的影响,提出了利用自 适应距离保护的方法,能够适用风电场运行工况的变化,克服了风电场非工频电压、电流对保护的影响。文 献[8]通过对双馈式风力发电机不同类型短路故障的仿真和对现场实际故障录波数据的计算得出,当 Crowbar 保护电路投入后,其控制系统不再提供电流限幅作用,风机输出电流频率不同于系统频率,影响基于工 频量的保护算法提取工频量的准确性。文献[9]提出等传变距离保护算法,并应用于双馈式风电场 220 kV 送出线路的距离保护中。

目前在风电场送出线路的距离保护研究中,大都限于频率偏移对距离保护算法影响的研究,对基于工频 量保护算法的研究比较少。鉴于此,本研究通过在 PSCAD 建立双馈式风电场并网仿真模型,然后仿真分析 风速波动时风电场侧电网故障特征以及对傅里叶算法和解微分方程算法的影响,仿真分析弱馈性对矩阵束 算法提取工频相量误差的影响,最后得出双馈式风电场侧电网风速波动和弱馈性对距离保护算法影响的 结论。

1 风速波动对傅里叶算法和解微分方程算法影响的仿真分析

1.1 风速波动时的故障特征分析

如图 1 所示,在 PSCAD 中建立容量为 10 MW的双馈式风电场并网仿真模型^[10-12],风电 场内部由 5 个容量为 2 MW 的单机组成,单机出 口电经风电场主变压器由 0.69 升高到 35 kV,多 台单机汇总于 35 kV 母线,然后由风电场送出线 路接至 35 kV 电网系统。

系统主要参数如下:单机额定容量 2 MW,额 定电压 0.69 kV,极对数 p = 1,额定转速为 314.16 rad/s,定子电阻 $R_s = 0.017$ 08 Ω ,转子电 阻 $R_r = 0.002$ 08 Ω ,励磁电感 $L_m = 0.002$ 98 H,



图 1 双馈式风电场系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the double-fed wind farm system

定子漏感 $L_{s\sigma} = 0.000 11 \text{ H},$ 转子漏感 $L_{r\sigma} = 0.000 11 \text{ H};$ 变压器额定容量 2 MVA, 额定电压为 0.69 kV/ 35 kV, 正序漏抗 $X_{1\sigma} = 36.75 \Omega$, 空载损耗 $P_0 = 2 \text{ kW},$ 铜耗 $P_{cu} = 4 \text{ kW}; 35 \text{ kV}$ 送出线路, 单位长度正序电阻 $r_1 = 0.132 \Omega/\text{km},$ 正序感抗 $X_1 = 0.38 \Omega/\text{km},$ 正序容抗 $B_1 = 0.37 \text{ M}\Omega \cdot \text{km},$ 零序电阻 $r_0 = 0.396 \Omega/\text{km},$ 零 序感抗 $X_0 = 1.15 \Omega/\text{km},$ 零序容抗 $B_0 = 1.25 \text{ M}\Omega \cdot \text{km},$ 线路长度 l = 11.2 km.

设置风速分别为 9 m/s 和 12 m/s,即风机转速分别为 0.8 p. u. 和 1.1 p. u.,在 *t*=3 s 时,风电场送出线路中点发生金属性三相短路故障,故障时间持续 0.1 s,转子侧 Crowbar 保护电路在故障发生时投入,得到风电场侧故障前后电压和电流波形,分别如图 2 和图 3 所示。

仿真结果表明,在不同风速下,风电场侧故障电压和电流发生了频率偏移。以转速 0.8 p.u.为例,对故障后的风电场侧电压和电流进行 FFT 分析,如表 1 和表 2 所示,鉴于篇幅,表中仅列出部分谐波含量。其中,采样周期为 1 500 Hz,用于计算总谐波畸变率的最大谐波为 14 次谐波,电压总谐波畸变率为 255.62%, 电流总谐波畸变率为 19.78%。从分析结果可以看出,风电场侧 A 相电压主要频率成分为 40 Hz,大小是 50 Hz分量的 3.75 倍,风电场侧 A 相电流主要频率成分为 40 Hz,大小是 50 Hz 分量的 15.31 倍。 **苑 双等** 风电场送出线路的距离保护算法分析



图 2 风电场侧电压

Fig. 2 Wind farm voltage

图 3 风电场侧电流

Fig. 3 Wind farm current

表 1 风电场侧电压 FFT 分析

Tab. 1 FFT analysis of wind farm vol	ab.l FFI	analysis	ot	wind	tarm	voltage
--------------------------------------	----------	----------	----	------	------	---------

109

会粉						频率/Hz					
多 奴	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
大小/%	93.53	56.91	47.75	27.48	374.93	100	82.99	75.38	73.61	70.08	65.82

表 2 风电场侧电流 FFT 分析

Tab. 2 FFT analysis of wind farm current

会物						频率/Hz					
参奴	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
大小/%	1 482.25	444.48	265.61	305.80	1 531.11	100	35.31	10.70	8.28	7.97	18.99

双馈式风力发电机正常运行时,转子侧输入转差频率的励磁电流使定子端输出 50 Hz 的交流电,为防止 损坏转子侧电力电子器件,通常采用 Crowbar 保护电路^[13-15]。送出线路发生三相短路故障时,Crowbar 保 护电路起动,此后双馈电机工作在异步发电机的状态。由于定转子的相对运动,定子端感应出短路前转子转 速频率的交流电^[4],当转速为 0.8 p. u. 时,频率为 0.8×50 Hz=40 Hz。因此在不同的风速下,风电场侧输 出短路电压和电流频率主要取决于短路前转子转速。

1.2 傅里叶算法

傅里叶算法可用于提取电压、电流信号中的基波分量和各次谐波分量,根据傅里叶变换的原理,对于基 波有:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sin i \, \frac{2\pi}{N}, \\ b_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x_i \cos i \, \frac{2\pi}{N}. \end{cases}$$
(1)

式中:a1、b1 为基波分量的实部和虚部,则其幅值为

$$X_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \,. \tag{2}$$

傅里叶算法通过计算工频电压和电流的有效值,求出测量阻抗,测距方程为

$$Z_{\rm K} = \dot{U}_{\rm K} / \dot{I}_{\rm K} \,. \tag{3}$$

式中: \dot{U}_{κ} 为保护安装处故障电压, \dot{I}_{κ} 为线路故障电流, Z_{κ} 为测量阻抗。相间短路故障时 \dot{U}_{κ} 、 \dot{I}_{κ} 的表达式分 别为 $\dot{U}_{\kappa} = \dot{U}_{\varphi\varphi}$ 、 $\dot{I}_{\kappa} = \dot{I}_{\varphi\varphi}$;接地短路故障时 \dot{U}_{κ} 、 \dot{I}_{κ} 的表达式分别为 $\dot{U}_{\kappa} = \dot{U}_{\varphi}$ 、 $\dot{I}_{\kappa} = \dot{I}_{\varphi} + K \times 3\dot{I}_{0}$ 。其中,下标 φ 分 别为A、B、C各相电压、电流;下标 $\varphi\varphi$ 分别表示为AB、BC、CA各相间电压和相电流之差。

在故障发生 0.02 s 时,利用式(2)求得保护安装处电压和电流基波分量的实部和虚部 a1、b1 作为递推初



Journal of Shandong University of Science and Technology

h.



值,在 0.02 s 后,每隔一个采样间隔,利用递推公式(4)求得新的 a₁、b₁,然后求出基波分量的有效值。通过 计算风电场侧保护安装处短路电压和电流的有效值,然后根据式(3)求得测量阻抗值。

$$\begin{cases} a_1(m) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} x(i+m-N) \sin\left[\frac{2}{N}(i+m-N)\right], \\ b_1(m) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} x(i+m-N) \cos\left[\frac{2}{N}(i+m-N)\right]. \end{cases}$$
(4)

式中: $a_1(m)$ 、 $b_1(m)$ 分别为基波分量在 $t=mT_s$ 采样时刻的实部和虚部,N为每个周期采样点数,x(i+m-N)为 $t=(i+m-N)T_s$ 时刻的采样值。

1.3 解微分方程算法

解微分方程算法基于线路 R-L 模型,可以直接计算出短路阻抗的电阻和电感^[39]:

$$u = Ri + L \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \,. \tag{5}$$

式中:u为保护安装处故障电压,i为线路故障电流,u和i都是关于时间t的函数,R和L分别为保护安装处 到故障点的电阻和电感。相间短路故障时u、i表达式分别为 $u = u_{qq}$ 、 $i = i_{qq}$;接地短路故障时u、i的表达式 分别为 $u = u_{q}$ 、 $i = i_{q} + K \times 3i_{0}$ 。其中,下标 q分别为 A、B、C 各相电压、电流;下标 qq分别表示 AB、BC、CA 各相间电压和相电流之差。

根据式(5)可建立下列微分方程组:

$$\begin{cases} u_1 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt}, \\ u_2 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt}. \end{cases}$$
(6)

式中: u_1 、 u_2 分别为 t_1 、 t_2 两个时刻电压的瞬时值; i_1 、 i_2 分别为 t_1 、 t_2 两个时刻电流的瞬时值; $\frac{di_1}{dt}\Big|_{t=t_1}$ 、 $di_2\Big|_{t=t_1}$ 、

 $\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\Big|_{t=t_2}$ 分别为 t_1 、 t_2 两个时刻电流的微分值。

为了书写方便,令 $D_1 = \frac{di_1}{dt}\Big|_{t=t_1}, D_2 = \frac{di_2}{dt}\Big|_{t=t_2}$ 。式(6)中,由于电流 i(t)在 t_1 、 t_2 两个时刻的导数采样值 D_1 和 D_2 不能直接测量得到。 为此只有利用电流 i(t)的采样值差分近似地代替电流一阶导数的采样值,关于计算采样值时刻 t_1 和 t_2 的选择方式如图 4 所示。

 t_1 和 t_2 分别选为相邻采样时刻k, k+1和 k+1, k+2的中点,则有:

$$\begin{cases}
D_1 = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \\
D_2 = \frac{i(k+2) - i(k+1)}{T_s}
\end{cases}$$
(7)

式中: T_s 为采样周期。电压 u(t)和电流 i(t)的选 取方式是取自相邻时刻 t_1 和 t_2 的采样值的平均值,即:



图 4 差分代替导数图 Fig. 4 Derivative replaced by difference

$$\begin{cases} u_{1} = \frac{1}{2} [u(k) + u(k+1)], u_{2} = \frac{1}{2} [u(k+1) + u(k+2)], \\ i_{1} = \frac{1}{2} [i(k) + i(k+1)], \quad i_{2} = \frac{1}{2} [i(k+1) + i(k+2)]. \end{cases}$$
(8)

根据式(6),利用故障后的三个采样值计算出 R 和 L 作为递推初值,然后每隔一个采样时间间隔,增加

一个微分方程,利用递推形式的最小二乘公式,求出新的L,从而确定故障距离。

1.4 仿真分析

在 PSCAD 中对图 1 所示的风电场送出线路故障进行仿真,风速为 12 m/s,即风机转速为 1.1 p.u.,采 样频率为 1 500 Hz。将故障后的电压和电流数据导入到 MATLAB 中的 M 文件,进行编程验证。傅立叶算 法从故障发生后第 30 个采样点开始计算,解微分方程算法从故障发生后第 1 个采样点开始计算,测距结果 如图 5 和图 6 所示。

图 5 和图 6 分别为在线路中点(5.6 km)发生金属性三相短路和单相接地短路时的傅里叶算法和解微 分方程算法的测距结果。如图 5 所示,由于故障电压和电流频率发生偏移,傅里叶算法测距结果误差大,在 三相短路发生 0.031 33 s时,测距结果为 6.733 km,误差达到 20.2%;相比之下,解微分方程算法因不受电 网频率波动的影响,随着采样点的增加,利用最小二乘法求解的方程组所包含的故障采样点越多,测距结果 误差小,在故障发生 0.01 s时,测距结果为 5.519 km,误差为 1.4%,随着采样点的增加,误差逐渐减小,最 大误差为 1.7%,测距结果为 5.505 km。如图 6 所示,在单相接地短路发生 0.022 s时,傅里叶算法的测距 结果为 6.932 km,误差达到 23.8%,相比之下,解微分方程算法的测距结果误差小,在故障发生 0.01 s时, 测距结果为 5.644 km,误差为 0.8%,随着采样点的增加,误差逐渐减小,最大误差为 0.8%,测距结果为 5.644 km。







图 6 线路中点(5.6 km)处发生单相接地短路时的测距结果

Fig. 6 The ranging result when single phase grounding fault occurs in the middle of line (5.6 km)

为验证两种距离保护算法对保护范围内故障的反应能力,在距风电场侧保护安装处 3.36 km(线路长度 30%)和 7.84 km(线路长度 70%)发生故障时,解微分方程算法和傅里叶算法的测距结果如表 3 所示。

		t = 0.0	1 s 时		t = 0.0	01 s 后	
故障类型	故障距离/km	解微分方程算法		解微分	方程算法	傅里叶算法	
		测距值/km	误差/%	测距值/km	最大误差/%	测距值/km	最大误差/%
三相短路	3.36	3.398	1.1	3.406	1.4	4.033	20.0
	7.84	7.996	2.0	7.996	2.0	11.290	44.0
	3.36	3.348	0.4	3.348	0.4	4.575	36.2
単相接地短路	7.84	7.723	1.5	7.698	1.8	9.177	17.1

Tab. 3 The ranging result of differential equations algorithm and Fourier algorithm

通过以上仿真分析可得,当在风电场送出线路不同位置处发生不同类型短路时,傅里叶算法测距误差大,而解微分方程算法误差小,测距结果能正确反映故障距离。



2 弱馈性对矩阵束算法影响的仿真分析

2.1 矩阵束算法原理

矩阵束算法通过指数项的和对等间隔采样数据进行拟合,可用于提取采样信号中工频量的幅值和相位^[16-17]。利用矩阵束算法将待测信号表示为采样的离散形式:

$$y(kT_{s}) = \sum_{i=1}^{M} R_{i} z_{i}^{k} + n(kT_{s})$$
(9)

式中: $y(kT_s)$ 为采样信号, $n(kT_s)$ 为噪声信号, R_i 为第i个信号的复幅值, $z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)T_s]$, α_i 为第i个信号的衰减因子, f_i 第i个信号的频率, T_s 为采样间隔,M为信号阶数, $M=2q_1+q_2$, q_1 为衰减余弦分量 的个数, q_2 为衰减直流分量的个数。

1) 确定采样信号的阶数

由采样序列 y(kTs)构成如下矩阵:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(L+2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}^{\circ}$$
(10)

式中:N为采样点个数,L为束参数,通常情况下L取N/3和N/2之间。

为确定采样信号阶数,将矩阵Y奇异值分解得:

$$Y = USV^{\mathrm{T}}$$
(11)

式中:U为(N-L)×(N-L)正交矩阵,S为(N-L)×(L+1)矩阵,其主对角元素为 σ_i 为其奇异值,V为(L+1)×(L+1)正交矩阵。

如果信号中不含有噪声,则Y有p个非零奇异值 σ_i ,这些奇异值按照从大到小顺序排列在矩阵S主对角 线上,其中p的值即为该信号的阶数。

当电力系统发生故障后,故障信号中阶次较高的衰减高次谐波分量成为噪声信号,使 S 中原来奇异值为零的点变为非零值,从而形成原理误差,合理选择模型阶次则可以减小误差。所以为了消除噪声对工频信号参数估计的影响,将奇异值 σ_1 记为 σ_{max} ,通过设定一个阀值记为 ε ,将满足 $\sigma_i/\sigma_{max} < \varepsilon$ 的奇异值作为噪声信号 奇异值舍去,将满足 $\sigma_i/\sigma_{max} > \varepsilon$ 的所有奇异值的个数记为 M,则 M 值即为消除噪声后信号的有效阶数。此时,原矩阵 S 变为 S'。

2) 求解信号的各个参数

取式(11)中V的前M个列相量构成矩阵V',取V'前L个行相量得到的矩阵 V_1 ,取V'后L个行相量得 到的矩阵 V_2 ,然后构成 2 个(N-L)×L矩阵,即:

$$\boldsymbol{Y}_1 = \boldsymbol{U}\boldsymbol{S}'\boldsymbol{V}_1^{\mathrm{T}}, \qquad (12)$$

$$\mathbf{Y}_2 = \mathbf{U}\mathbf{S}'\mathbf{V}_2^{\mathrm{T}} \,. \tag{13}$$

经上述处理后,可认为原信号中不含有噪声分量。

利用 Y_1 , Y_2 构成矩阵束 $Y_2 - \lambda Y_1$, z_i 为矩阵 $Y_2 - \lambda Y_1$ 的广义特征值。所以, 求解 z_i 即求解矩阵 $Y_2 - \lambda Y_1$ 的广义特征值, 也即求解矩阵 $Y_1^+ Y_2$ 的特征值。其中, $Y_1^+ \to Y_1$ 的伪逆矩阵。 z_i 和 M 已知后, 将式(9) 展开为 矩阵形式得:

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^1 & z_2^1 & \cdots & z_M^1 \\ z_1^2 & z_2^2 & \cdots & z_M^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^N & z_2^N & \cdots & z_M^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_M \end{bmatrix}.$$
 (14)

利用最小二乘法计算信号复幅值 R_i:

$$\boldsymbol{R}_{i} = \left[(\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{z})^{-1} \right] \boldsymbol{z}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y}_{\circ}$$
(15)

解出 z_i 和 R_i 后,就可以由式(16)求出采样信号中幅值 A_i 、频率 f_i :

$$\begin{cases}
A_{i} = |\mathbf{R}_{i}|, \\
\alpha_{i} + j2\pi f_{i} = \frac{\ln z_{i}}{T_{s}}, \\
f_{i} = \frac{\operatorname{Im}(\ln z_{i})}{2\pi T_{s}},
\end{cases}$$
(16)

利用矩阵束算法可求出故障时所需的工频电压和电流相量的幅值,进而求出短路阻抗,确定故障距离。

2.2 矩阵束算法适用性分析

由于风电场接入电网的容量相对常规电网侧容量小,在送出线路发生故障时,风电场侧电压严重跌落, 提供短路电流能力有限,表现为弱馈特征^[18],影响矩阵束算法中采样序列矩阵 Y 的元素值的大小

为分析起见,参照文献[17],在图 1 的基础上, 将送出线路额定电压继续升高为 110 kV。以送出 线路中点发生 A 相接地短路和 AB 两相短路为例, 仿真得到保护安装处故障电压和电流如图 7 和图 8 所示。

由仿真结果得, U_{AB} 幅值明显小于 U_A , I_{AB} 幅值 明显小于 I_{AB} ,其中 I_A 为带零序补偿的A相电流。 风速为12 m/s,即风机转速为1.1 p. u.,采样频率 为2000 Hz, T_s =0.0005 s,N=40,L=15,取 ϵ = 0.01,采用故障后20 ms数据窗求得矩阵Y的奇异 值如下所示:

 $\sigma_{U_{\rm A}} = [96.7, 60.5, 3.48, 0.27, 0.24, 0.21, 0.11, 0.093, 0.079, 0.059, 0.045, 0.035, 0.026, 0.02, 0.014, 0.007]$

 $\sigma_{I_{A}} = [71.8, 31.9, 3.8, 0.03, 0.019, 0.01, 0.007, 0.005, 0.004, 0.003, 0.002, 0.001, 8.74e^{-4}, 7.16e^{-4}, 5.16e^{-4}, 4.28e^{-4}]$

 $\sigma_{U_{AB}} = [4, 24, 3, 01, 0, 68, 0, 34, 0, 32, 0, 28, 0, 22, 0, 17, 0, 12, 0, 087, 0, 059, 0, 04, 0, 025, 0, 018, 0, 012, 0, 011]$



图 7 保护安装处故障电压







 $\sigma_{I_{AB}} = \begin{bmatrix} 3. \ 26, \ 1. \ 35, \ 0. \ 31, \ 0. \ 062, \ 0. \ 028, \ 0. \ 021, \ 0. \ 014, \ 0. \ 01, \ 0. \ 006, \ 0. \ 004, \ 0. \ 003, \ 0. \ 002, \ 8. \ 96e^{-4}, \\ 4. \ 85e^{-4}, \ 2. \ 27e^{-4}, \ 9. \ 25e^{-5} \end{bmatrix}$

其中:σ_{U_A}和σ_{I_A}分别为A相接地短路时,A相电压采样序列矩阵和带零序补偿的A相电流采样序列矩阵的 奇异值;σ_{U_{AB}}和σ_{I_{AB}}分别为AB两相短路时,AB相间电压采样序列矩阵和AB相间电流采样序列矩阵的奇异 值。由于相间短路时电压严重跌落和提供短路电流能力小,其电压和电流采样序列值矩阵元素值小,而奇异

值越大,其在动态过程中的主导作用就越大。以 $\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_{16}}$ 来表征采样序列矩阵奇异值大小的差别:

$$\begin{cases} \eta_{U_{\rm A}} = \frac{96.7}{0.007} = 13\ 814.29\,,\\ \eta_{I_{\rm A}} = \frac{71.8}{0.000\ 428} = 167\ 757.01\,,\\ \eta_{U_{\rm AB}} = \frac{4.24}{0.011} = 385.45\,,\\ \eta_{I_{\rm AB}} = \frac{3.26}{0.000\ 092\ 5} = 34\ 315.79\,. \end{cases}$$
(17)

山东科技大学	114	第 36 卷 第 5 期	Vol. 36 No. 5
<u> 一</u> 招 自然科学版		2017 年 10 月	Oct. 2017

从式(17)可以看出, $\eta_{U_{AB}}$ 明显小于 $\eta_{U_{A}}$, $\eta_{I_{AB}}$ 明显小于 $\eta_{I_{A}}$,在相同的 ε 值情况下,发生相间短路时的 M 值 比较大,采样信号包含的噪声分量就越大,即包含的衰减的高次谐波分量就越大,从而形成原理误差,使矩阵 束算法无法提取工频相量。而 σ_1 越大, σ_{16} 越小,则 η 值越大,矩阵束算法提取工频相量误差越小。

在 MATLAB 中编写 M 文件进行验证可知,由于风电场的弱馈性,相间电压和相间电流采样值较接地 短路小,导致相间短路时的电压和电流采样序列矩阵 Y 的奇异值非常小,矩阵束算法无法提取出工频相量。 因此,以下仅仿真分析接地短路故障时矩阵束算法测距结果。

2.3 仿真分析

将故障后的电压和电流数据导入到 MATLAB 中的 M 文件,进行编程验证。矩阵束算法从第 20 ms 开始计算测距值,然后每隔 0.000 5 s 计算出新的测距值,如图 9 和图 10 所示。







如图 9 所示,在故障发生后的 20 ms 到 40 ms 间,利用矩阵束算法测距最大误差为 5.3%,测距结果为 5.897 km,最小误差为 0.8%,测距结果为 5.557 km。如图 10 所示,在故障发生后的 20 ms 到 40 ms 间,利用矩阵束算法测距最大误差为 5.4%,测距结果为 5.901 km,最小误差为 0.2%,测距结果为 5.59 km。

在距风电场侧保护安装处 3.36 km(线路长度 30%)和 7.84 km(线路长度 70%)分别发生单相接地短路和两相接地短路时的测距结果如表 4 所示。

	Tab. 4	The ranging result	of matrix pencil alg	orithm				
故障类型	<u> </u>	<i>t</i> (20~40 ms)						
	议厚距离/ Km	最大误差/%	测距值/km	最小误差/%	测距值/km			
单相接地短路	3.36	5.6	3.548	1.0	3.396			
	7.84	5.1	8.240	0.6	7.370			
两相接地短路	3.36	6.1	3.565	0.8	3.333			
	7.84	5.3	8.256	0.4	7.809			

表 4	矩阵束算法的测距结果
-----	------------

仿真结果表明,在送出线路发生接地短路时,矩阵束算法能准确提取工频电压和电流相量,从而准确计 算出短路阻抗,能够实现准确测距。

3 结论

1) 双馈式风电场的风速波动性使保护安装处故障电压和电流频率发生偏移,导致基于工频量的傅里叶 算法的测距结果受到严重影响,解微分方程算法能克服频率波动的影响,测距结果能正确反映故障距离。 2)发生相间短路时,风电场的弱馈性使短路电压严重跌落和短路电流小,导致矩阵束算法中相间电压 和电流采样序列矩阵的奇异值非常小,模型阶次比较大,其包含的噪声分量大,即包含的衰减的高次谐波分 量就越大,从而形成原理误差,无法提取工频相量;接地短路不受弱馈性影响,能够实现准确测距。

参考文献:

[1] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.

JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012,36(7):195-201.

- [2]何世恩,姚旭,徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):21-27.
 HE Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J].
 Power System Protection and Control,2013,41(1):21-27.
- [3]刘岱,庞松岭.风电集中接入对电网影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(3):156-160.

LIU Dai, PANG Songling. System impacts analysis for interconnection of wind farm and power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3):156-160.

[4]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.

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.

[5]张华中,王维庆,朱玲玲,等. 风电场联络线距离保护的自适应整定方法[J]. 电网技术,2009,33(3):89-93.

ZHANG Huazhong, WANG Weiqing, ZHU Lingling, et al. An adaptive setting method for distance protection of transmission lines connecting wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(3):89-93.

- [6]PRADHAN A K, JOOS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.
- [7]王婷,李凤婷,何世恩. 影响风电场联络线距离保护的因素及解决措施[J]. 电网技术,2014,38(5):1420-1424.
 WANG Ting, LI Fengting, HE Shien. Factors impacting distance protection for tie Line of wind farm and corresponding counter measures [J]. Power System Technology,2014,38(5):1420-1424.
- [8]腾予非,行武,张宏图,等. 风力发电系统短路故障特征分析及对保护的影响[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(19):29-36.

TENG Yufei, XING Wu, ZHANG Hongtu. Analysis of characteristics of short circuit fault of wind power system and the impact on the protection [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19); 29-36.

[9]裘愉涛,潘武略,倪传坤,等.风电场送出线等传变距离保护[J].电力系统保护与控制,2015,43(12):61-66.

QIU Yutao, PAN Wulue, NI Chuankun, et al. Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12):61-66.

[10]韩照亚. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈风力发电机的控制策略研究[D]. 太原:山西大学,2013.

[11] 雷虹云,郑超,汪宁渤,等. 基于变频器受控源模拟的双馈风机等效仿真[J]. 中国电力,2012,45(6):82-86. LEI Hongyun,ZHENG Chao,WANG Ningbo,et al. Equivalent simulation of doubly-fed induction generators based on controlled source models of converters [J]. Electric Power,2012,45(6):82-86.

[12]任永峰.双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制[M].北京:机械工业出版社,2011.

2012,27(4):233-239.

- [13] 攝奧洋,张哲,尹项根,等.双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报,2012,27(4):233-239. HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,
- [14] PANNELL G, ATKINSON D J, ZAHAWI B. Minimum-threshold rowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3):750-759.
- [15] 蒋雪冬,赵舫. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机 Crowbar 控制策略[J]. 电网技术,2008,32(12):84-89.

JIANG Xuedong, ZHAO Fang. Crowbar control strategy for doubly fed induction generator of wind farm during power grid voltage dips[J]. Power System Technology, 2008, 32(12):84-89.

- [16]康小宁,屈亚军,焦在滨,等.基于最小二乘矩阵束算法的工频分量提取方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(21):66-70. KANG Xiaoning,QU Yajun,JIAO Zaibin, et al. Power-frequency phasor extraction based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(21):66-70.
- [17]索南加乐,王斌,宋国兵,等. 电力系统快速相量提取算法的性能探究[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(1):25-30.
 SUONAN Jiale, WANG Bin, SONG Guobing, et al. Performance study of fast phasor calculating method for power systems
 [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2013,28(1):25-30.
- [18] 王晨清,宋国兵,汤海雁,等.距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):10-15.
 - WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power systems with wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22):10-15.

(责任编辑:吕海亮)

(上接第90页)

- [9]BALASUBRAMANYAM C, SHETTY A B, SPANDANA K R, et al. Analysis and optimization of an 8 bar mechanism[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2015, 6(4):655-666.
- [10]KIRECCI A, DULGER L C. A study on a hybrid actuator[J]. Mechanism & Machine Theory, 2000, 35(8):1141-1149.
- [11]DU R,GUO W Z. The Design of a new metal forming press with controllable mechanism[J]. Journal of Mechanical Design, 2003,125(3):582-592.
- [12]GUO W Z, HE K, YEUNG K, et al. A new type of controllable mechanical press: Motion control and experiment validation
 [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2005, 127(4):731-742.
- [13]LI H,ZHANG C, MENG C. Hybrid-driven nine-bar press for precision drawing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(S): 197-200.
- [14]ZHOU Y. Type synthesis and optimization of main driving mechanism for servo-punch press[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11):1-7.

(责任编辑:李 磊)

(上接第 96 页)

[13]孙正龙,王雨薇. 浅谈互联电网低频振荡的分析与控制方法[J]. 黑龙江科技信息,2015(36):180-181.

- SUN Zhenglong, WANG Yuwei. Analysis and control of low frequency oscillation in interconnected power system[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015(36): 180-181.
- [14]宋鹏程,甄宏宁,王震泉,等. UPFC 附加阻尼控制器设计研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):10-13. SONG Pengcheng, ZHEN Hongning, WANG Zhenquan, et al. Parameters tuning for UPFC auxiliary damping controller design of additional damping controller[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6):10-13.
- [15]KHODABAKHSHIAN A,ESMAILI M R,BORNAPOUR M. Optimal coordinated design of UPFC and PSS for improving power system performance by using multi-objective water cycle algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 83:124-133.

(责任编辑:李 磊)