

图 3 系统电压与风电场电压

Fig.3 System voltages and wind farm voltages

由仿真结果可以看出,双馈式风电场送出线路风电场侧保护测量处的电压、电流频率有所差别。系统侧故障电流主要频率分量为工频,风电场侧故障电流主要频率分量为  $0.7 \times 50 = 35$  (Hz)。通过频谱分析计算,系统侧电流中 35 Hz 分量大小占 50 Hz 分量的 1.3%,风电场侧电流中 35 Hz 分量大小是 50 Hz 分量的 19.04 倍。而系统侧及风电场侧故障电压主要频率分量均为工频,通过频谱分析计算,系统侧电压中 35 Hz 分量大小占 50 Hz 分量的 6.2%,风电场侧电压中 35 Hz 分量大小占 50 Hz 分量的 59.9%。

## 2 风电场送出线电压、电流不同频率机理

### 2.1 感应发电机暂态模型

感应电机转子运动方程<sup>[11]</sup>:

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{\tau_j} [T_m - T_e - D(1-s)] \quad (1)$$

其中,  $s$  为电机转差率;  $\tau_j$  为惯性时间常数;  $T_m$ 、 $T_e$  分别为机械转矩和电磁转矩;  $D$  为阻尼系数。

感应发电机定、转子在各自三相静止坐标系下电压方程<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = -\mathbf{r}_s \mathbf{i}_s + \mathbf{p} \boldsymbol{\psi}_s \\ \mathbf{u}_r = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_r + \mathbf{p} \boldsymbol{\psi}_r \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{u}_s = [u_A \ u_B \ u_C]^T$ 、 $\mathbf{u}_r = [u_a \ u_b \ u_c]^T$  分别为定、转子电压;  $\mathbf{i}_s = [i_A \ i_B \ i_C]^T$ 、 $\mathbf{i}_r = [i_a \ i_b \ i_c]^T$  分别为定、转子电流;  $\mathbf{r}_s = \text{diag}(R_s, R_s, R_s)$ 、 $\mathbf{r}_r = \text{diag}(R_r, R_r, R_r)$  分别为定、转子电阻对角阵;  $\boldsymbol{\psi}_s = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C]^T$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r = [\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T$  分别为定、转子磁链;  $\mathbf{p}$  为微分算子。

定、转子磁链方程:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s = -\mathbf{L}_s \mathbf{i}_s + \mathbf{L}_{sr} \mathbf{i}_r \\ \boldsymbol{\psi}_r = -\mathbf{L}_{rs} \mathbf{i}_s + \mathbf{L}_r \mathbf{i}_r \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_m + L_{sr} & -L_{ml}/2 & -L_{ml}/2 \\ -L_{ml}/2 & L_m + L_{sr} & -L_{ml}/2 \\ -L_{ml}/2 & -L_{ml}/2 & L_m + L_{sr} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_m + L_{rr} & -L_{ml}/2 & -L_{ml}/2 \\ -L_{ml}/2 & L_m + L_{rr} & -L_{ml}/2 \\ -L_{ml}/2 & -L_{ml}/2 & L_m + L_{rr} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \mathbf{L}_{rs}^T =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

其中,  $\theta_r$  为转子角度;  $L_{ml}$  为定、转子互感;  $L_{sr}$ 、 $L_{rr}$  分别为定、转子漏感。

式(2)、(3)表明,在以上坐标系中,交流电机为时变非线性耦合系统。按磁场等效及恒相幅值原则选择三相静止坐标系至  $\alpha\beta$  两相静止坐标系变换  $\mathbf{C}_{3/2}$ , 及  $\alpha\beta$  坐标系至  $dq$  两相旋转坐标系变换  $\mathbf{C}_{VR}$ :

$$\mathbf{C}_{3/2} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_{VR} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $\theta$  为  $d$  轴与  $\alpha$  轴间夹角,即转子位置角。

对式(2)、(3)依次进行  $\mathbf{C}_{3/2}$  及  $\mathbf{C}_{VR}$  变换(旋转变换转速取为转子转速),得到  $dq$  两相旋转坐标系下交流电机定、转子电压方程:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = -\mathbf{R}_s \mathbf{I}_s + \mathbf{j} \omega_r \boldsymbol{\psi}_s + \mathbf{p} \boldsymbol{\psi}_s \\ \mathbf{U}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{I}_r + \mathbf{p} \boldsymbol{\psi}_r \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{U}_s = u_{sd} + \mathbf{j} u_{sq}$ 、 $\mathbf{U}_r = u_{rd} + \mathbf{j} u_{rq}$  分别为定、转子电压空间相量;  $\mathbf{I}_s = i_{sd} + \mathbf{j} i_{sq}$ 、 $\mathbf{I}_r = i_{rd} + \mathbf{j} i_{rq}$  分别为定、转子电流空间相量;  $\boldsymbol{\psi}_s = \psi_{sd} + \mathbf{j} \psi_{sq}$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r = \psi_{rd} + \mathbf{j} \psi_{rq}$  分别为定、转子磁链空间相量;  $\omega_r$  为转速角频率。

定、转子磁链方程:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s = -\mathbf{L}_s \mathbf{I}_s + \mathbf{L}_m \mathbf{I}_r \\ \boldsymbol{\psi}_r = -\mathbf{L}_m \mathbf{I}_s + \mathbf{L}_r \mathbf{I}_r \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $L_m = 1.5 L_{ml}$  为定、转子等效互感;  $L_s = L_m + L_{sr}$ 、 $L_r = L_m + L_{rr}$  分别为定、转子等效自感。

式(1)、(6)和(7)即为感应发电机精确的暂态模型。为便于分析计算,需对电机的数学模型进行适当简化。感应电机暂态过程中,转子磁链增量对发电机暂态过程的影响远大于定子磁链增量所带来的影响,且电机定子部分暂态过程的时间常数远小于转子部分暂态过程的时间常数,因此本文在研究感应电机暂态过程中不考虑定子磁链暂态过程<sup>[11,14]</sup>,即  $\mathbf{p} \boldsymbol{\psi}_s = 0$ 。

根据式(7)消去转子电流,并且定义暂态电势  $\mathbf{E}' = \mathbf{j} \omega_r \boldsymbol{\psi}_r L_m / L_r$  来表示转子磁链,代入式(6)的定子电压方程中,得:

$$\mathbf{U}_s = \mathbf{E}' - (\mathbf{R}_s + \mathbf{j} \omega_r L') \mathbf{I}_s \quad (8)$$

代入式(6)的转子电压方程中,得:

$$\tau'_d \frac{d\mathbf{E}'}{dt} = (\mathbf{j} \omega_r \tau'_d L_m / L_r) \mathbf{U}_r - \mathbf{E}' - \mathbf{j} \omega_r (L_s - L') \mathbf{I}_s \quad (9)$$

其中,暂态时间常数  $\tau'_d = L_r / R_r$ ; 暂态电感  $L' = L_s - L_m^2 / L_r$ 。

式(8)、(9)与转子运动方程式(1)构成感应发电机三阶动态模型,由式(8)可得感应发电机的暂态等值电路如图 4 所示。

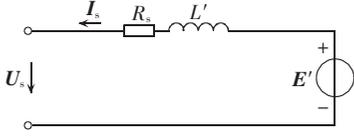


图 4 感应发电机暂态等值电路

Fig.4 Transient equivalent circuit of induction generator

运用图 4 简化等值电路可对含 DFIG 的系统进行近似故障分析。

## 2.2 DFIG 故障特征分析

对于具备低电压穿越能力的 DFIG,一般故障后数毫秒内闭锁转子侧变流器并投入 Crowbar 电阻。投 Crowbar 前,转子回路电压  $U_r \neq 0$ ,转子电流仍受稳态时的矢量解耦控制规律的影响,暂态特性较为复杂。由上述感应式发电机暂态模型可知,暂态电势的变化规律与转子励磁电压有关。该阶段时间短暂,线路保护来不及动作,为简便分析,认为故障瞬时 Crowbar 电路投入,此时转子绕组自成闭合回路,转子电压  $U_r = 0$ ,DFIG 相当于普通的异步发电机运行。

由于故障后无励磁电压,故转子磁链故障后的稳态值将为零,而在故障瞬时转子磁链不能突变,所以转子绕组中会感应出衰减的直流电流,其衰减时间常数  $\tau_r' = L_r' / R_r'$ ,其中  $L_r' = L_r - L_m^2 / L_s$  为从转子侧看进去的等值暂态电感,  $R_r' = R_r + R_{\text{Crowbar}}$  为转子绕组电阻与 Crowbar 短路电阻之和。即在转子旋转坐标系下,转子磁链只有衰减的直流分量:

$$\psi_r = \psi_{r0} e^{-t/\tau_r'} \quad (10)$$

因此故障期间电机的暂态电势为:

$$E' = j\omega_r \psi_r L_m / L_r = (j\omega_r \psi_{r0} L_m / L_r) e^{-t/\tau_r'} \quad (11)$$

通过  $dq$  旋转坐标系至  $\alpha\beta$  坐标系变换  $C_{\text{RV}}$ (旋转变换转速取为转子转速)以及  $\alpha\beta$  坐标系至三相静止坐标系变换  $C_{2/3}$ :

$$C_{\text{RV}} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C_{2/3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

可得三相静止坐标系下的暂态电势:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = C_{2/3} C_{\text{RV}} \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} \quad (14)$$

经整理,幅值最大相的暂态电势为:

$$|E'| = |E_0'| \cos(\omega_r t + \beta) e^{-t/\tau_r'} \quad (15)$$

$$|E_0'| = \omega_r \frac{L_m}{L_r} \times$$

$$\sqrt{(-L_m i_{sd|0|} + L_r i_{rd|0|})^2 + (-L_m i_{sq|0|} + L_r i_{rq|0|})^2} \quad (16)$$

$i_{sd|0|}, i_{sq|0|}, i_{rd|0|}, i_{rq|0|}$  由故障瞬间定、转子三相电流初值  $i_{sa,b,c|0|}, i_{ra,b,c|0|}$  计算:

$$\begin{cases} i_{sd,q|0|} = C_{\text{VR}} C_{3/2} i_{sa,b,c|0|} \\ i_{rd,q|0|} = C_{3/2} i_{ra,b,c|0|} \end{cases} \quad (17)$$

由式(15)知,在故障暂态分析时,DFIG 可以等效为经暂态电抗后的暂态电势,此电势的频率为对应于转子转速的频率,幅值按照指数规律衰减。以前述测试系统中  $\omega_r = 0.7\omega_1$  为例,  $\omega_1$  为工频角频率,DFIG 等效于一个频率为 35 Hz 的暂态电势,其幅值的初值为 1.30 p.u.,以衰减时间常数  $\tau_r' = 0.026$  s 衰减。经  $4\tau_r' \sim 5\tau_r'$  后,转子磁链基本衰减完毕,此时暂态电势约为零,DFIG 可等效为无源负荷,其阻抗与转速有关,等值电路如图 5 所示。

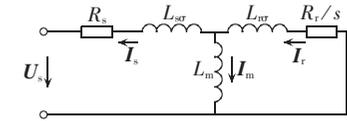


图 5 DFIG 作为负荷时的等值电路

Fig.5 Equivalent circuit of DFIG as a load

## 2.3 风电场送出线路故障分析

对于含 DFIG 的系统分析,故障期间电网中有 2 种频率的电源激励,对线性系统,须运用叠加原理分别对 2 种频率分量作等值电路进行故障分析。

以三相故障为例,从电路角度分析双馈风电场送出线两侧保护处测得的电压、电流。故障期间系统等值电路图如图 6 所示。

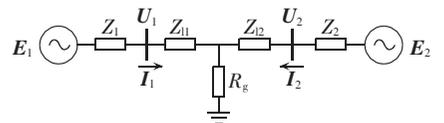


图 6 故障期间系统等值电路

Fig.6 Equivalent circuit of system during fault

图中,  $E_1$  为风机暂态电势,频率取决于故障前机组转速;  $E_2$  为系统电势,频率为工频;  $Z_1$  为 DFIG 暂态电抗  $Z_w$ 、箱变阻抗  $Z_{\text{T}}$ 、送出变阻抗  $Z_{\text{T}2}$  以及汇流线阻抗(其值较小,可忽略)之和;  $Z_{11}, Z_{12}$  为送出线路阻抗;  $Z_2$  为系统侧阻抗;  $R_g$  为过渡电阻。由于风电场的容量相对较小,风机出口电压很低,从高压侧来看,风电场侧的等值阻抗远大于系统侧的等值阻抗,即  $Z_1$  远大于图 6 中的其他阻抗。

分别作出工频分量回路、非工频分量回路,如图 7、8 所示。上标“g”表示工频量,图中各阻抗为工频角频率  $\omega_1$  乘以相应电感;上标“f”表示对应于  $\omega_r$  的非工频交流量,图中各阻抗为角频率  $\omega_r$  乘以相应电感。

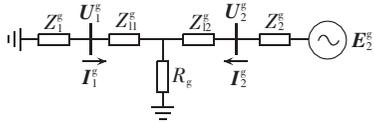


图 7 工频分量回路

Fig.7 Circuit loop of power frequency component

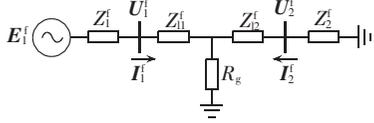


图 8 非工频交流分量回路

Fig.8 Circuit loop of rotor speed frequency component

分别运用电路原理求解 2 个电路,可得 2 种频率激励单独作用下的线路两侧电压、电流。并考虑到图 7 中  $Z_1^g$  远大于其他阻抗,图 8 中  $Z_1^f$  远大于其他阻抗,进行近似简化,得式(18)~(25)。

$$I_2^g \approx \frac{1}{Z_2^g + Z_{12}^g + R_g} E_2^g \quad (18)$$

$$U_2^g \approx \frac{Z_{12}^g + R_g}{Z_2^g + Z_{12}^g + R_g} E_2^g \approx E_2^g \quad (19)$$

$$I_1^g \approx -\frac{R_g}{(Z_1^g + Z_{11}^g + R_g)(Z_2^g + Z_{12}^g + R_g)} E_2^g \quad (20)$$

$$U_1^g \approx \frac{R_g}{Z_2^g + Z_{12}^g + R_g} E_2^g \quad (21)$$

$$I_1^f \approx \frac{1}{Z_1^f + Z_{11}^f + R_g} E_1^f \quad (22)$$

$$U_1^f \approx \frac{Z_{11}^f + R_g}{Z_1^f + Z_{11}^f + R_g} E_1^f \approx 0 \quad (23)$$

$$I_2^f \approx \frac{R_g}{(Z_1^f + Z_{11}^f + R_g)(Z_2^f + Z_{12}^f + R_g)} E_1^f \approx 0 \quad (24)$$

$$U_2^f \approx \frac{R_g Z_{12}^f}{(Z_1^f + Z_{11}^f + R_g)(Z_2^f + Z_{12}^f + R_g)} E_1^f \approx 0 \quad (25)$$

根据式(18)~(25),比较风电场侧保护安装处电压  $U_1$ 、电流  $I_1$ ,系统侧保护安装处电压  $U_2$ 、电流  $I_2$  的工频分量与非工频分量的幅值,有以下结论:  $|I_2^f| \approx 0$ ,远小于  $|I_2^g|$ ,系统侧电流的主频为工频;  $|U_2^f| \approx 0$ ,远小于  $|U_2^g| \approx |E_2^g|$ ,系统侧电压的主频为工频。  $|I_1^g|$  和  $|I_1^f|$  都较小,一般  $|I_1^g| < |I_1^f|$ ,即风电场侧电流的主频为非工频;  $|U_1^f| \approx 0$ ,小于  $|U_1^g|$ ,风电场侧电压的主频为工频。因此,风电场侧保护测得的电流、电压主频不一致。

以第 1 节三相故障为例,用仿真模型中的具体参数进行解析计算,故障电路参数见表 1(折算为标幺值),得到  $U_1$ 、 $I_1$  和  $U_2$ 、 $I_2$  的工频分量与非工频分量(35 Hz)的幅值。将其与用复杂的风机模型通过 PSCAD 平台仿真计算结果对比,如表 2 所示。

由表 2 知,解析结果和仿真结果在一定的误差范围内基本一致,从而验证了本文中用等值电路对含 DFIG 的系统进行近似故障分析方法的可行性。

表 1 故障电路参数表

Tab.1 Parameters of faulty circuit

参数名称	工频网络参数值	非工频网络参数值
$Z_2$	j0.1488	j0.1041
$Z_{11}$	j0.0227	j0.0159
$Z_{12}$	j0.0227	j0.0159
$Z_{21}$	j0.1667	j0.1167
$Z_{12}$	j0.1231	j0.0862
$Z_w$	j0.3731	j0.2612
$R_g$	0.0083	0.0083

表 2 送出线两侧电压、电流幅值

Tab.2 Magnitudes of voltage and current at two sides of outgoing transmission line

变量	工频分量		非工频分量	
	解析结果	仿真结果	解析结果	仿真结果
风电场侧电流/kA	0.037	0.044	0.653	0.838
风电场侧电压/kV	5.117	4.125	2.516	2.470
系统侧电流/kA	3.056	3.862	0.045	0.052
系统侧电压/kV	15.532	14.280	0.978	0.887

解析结果和仿真结果均表明,风电场侧保护处测得的电流、电压主频不一致,而系统侧电压、电流主频均为工频。

### 3 电压、电流频率不一致对距离保护影响

#### 3.1 对相量距离保护影响

文献[10]已经指出,工频傅氏算法只能滤除工频整数倍次谐波,当信号频率在工频附近偏移时,工频傅氏算法无法准确提取基频相量幅值与相位。

当保护安装处感受到的电压、电流主要频率成分不同时,经傅氏滤波提取所获得的电压、电流相量的旋转速度也会变得不同,经过幅值相位比较后获得的阻抗计算结果也会发生旋转,基于傅氏相量计算的阻抗元件将产生极大误差。

图 9 为一个典型的基于相量计算的阻抗元件计算的阻抗在阻抗平面上的运动轨迹。在故障后的短时间内(距离 I 段作用时间内),计算出的阻抗在阻抗平面上不断进出阻抗特性的动作区,从而造成基于相量计算的阻抗元件误动作。

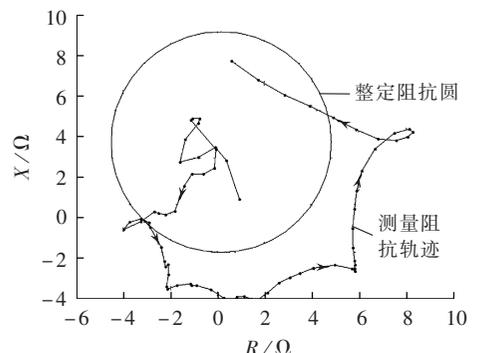


图 9 基于傅氏相量算法的距离元件动作结果

Fig.9 Result of distance element based on Fourier phasor algorithm

理论上,由第 2.3 节分析,若分别准确提取保护安装处工频分量以及转速频率交流分量电压、电流,则可以有效测量出故障线路阻抗。

根据图 7 工频分量回路,由系统侧保护安装处的工频电压、电流信息可以计算得到故障点到系统侧保护安装处的线路阻抗。需要注意的是,由风电场侧保护安装处的工频电压、电流信息计算的阻抗值为负,其含义为风电场背侧阻抗,不再是故障点到风电场侧保护安装处的线路阻抗。

同样地,根据图 8 非工频分量回路,由风电场侧保护安装处的非工频电压、电流信息可以计算得到故障点到风电场侧保护安装处的线路阻抗;而由系统侧保护安装处的非工频电压、电流信息计算的阻抗值为负,其含义为系统背侧阻抗,不再是故障点到系统侧保护安装处的线路阻抗。

以图 1 系统线路中点三相金属性故障为例进行分析,首先利用 Prony 算法或最小二乘算法等准确提取线路系统侧工频电压、电流信息,进而计算出系统侧故障阻抗  $2.92 \Omega$ ;提取线路风电场侧非工频(35 Hz)电压、电流信息,进而计算出风电场侧故障阻抗为  $2.66 \Omega$ ,在误差范围内可以有效反映出故障线路的阻抗(线路一半阻抗为  $2.89 \Omega$ )。

### 3.2 基于解微分方程算法距离保护

解微分方程是基于线路  $RL$  时域模型而设计的算法,与信号的频率没有直接的联系。因此,从原理上,使用解微分方程算法可以避免傅氏滤波相量距离保护算法存在的问题。

对典型的线路等效  $RL$  模型列出出线路端口处电压、电流的时域数学模型如下<sup>[15-16]</sup>:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (26)$$

其中, $u$  在相间故障下为两故障相间的相电压差,在单相故障下为故障相的相电压; $i$  在相间故障下为两故障相间的相电流差,在单相故障下为故障相的相电流。

将参与计算的数据窗内采集获得的电压、电流数据代入式(26),将获得一个超定方程组,对方程组进行最小二乘拟合即可获得对应故障回路的电阻  $R$  和电感  $L$ ,从而可以根据该电感  $L$  计算出故障点到保护安装处的距离。

对图 1 仿真系统进行离线分析,采用最小二乘算法求解线路的微分方程,时间窗长度取半个周期,从故障发生后 10 ms 开始进行计算。经对仿真模型获得的电压、电流采样数据进行计算,得到解微分方程的计算结果如表 3 所示。

由于风机故障电流的频率在 35~65 Hz 之间变化,在解微分方程算法的适用频带内。因此解微分方

表 3 解微分方程算法距离保护计算结果

Tab.3 Results of distance element employing differential equation algorithm

故障位置	故障类型	风电场侧		系统侧	
		故障距离/km	误差/%	故障距离/km	误差/%
中点	三相	7.373	7.64	6.504	5.05
中点	相间	5.904	13.81	6.877	0.39
中点	单相	7.148	4.35	6.551	4.36
系统侧出口	三相	12.855	6.17	0.289	2.11
系统侧出口	相间	13.441	1.89	0.010	0.07
系统侧出口	单相	13.533	1.22	0.013	0.09
风电场侧出口	三相	0.173	1.26	13.357	2.50
风电场侧出口	相间	0.140	1.02	13.467	1.70
风电场侧出口	单相	0.033	0.24	13.446	1.85

程算法在风电暂态电压、电流作用下仍然可以保证计算结果的正确性,相对于傅氏滤波相量算法而言更加适用于风电场送出线路的距离保护元件中。

## 4 结论

风电场电流频率取决于转速,可能非工频,电压由电网支撑为工频,因此风电场送出线路的保护安装处电压与电流主要频率分量不一致。基于傅氏相量算法的距离元件计算结果受到十分严重的影响,无法正常工作。分别准确提取保护安装处工频分量以及转速频率交流分量电压、电流,可以准确测量出故障线路阻抗。解微分方程算法在风电场暂态电压电流下计算结果基本不受影响,宜在风电场送出线路的距离保护中使用。

## 参考文献:

- [1] Globe Wind Energy Council(GWEC). World wind report 2011 [R/OL]. [2012-03-01]. <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-21>.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2011 年中国风电装机统计[R/OL]. [2012-03-23]. [http://www.cwea.org.cn/download/display\\_info.asp?id=44](http://www.cwea.org.cn/download/display_info.asp?id=44).
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] SMITH J C,MILLIGAN M R,DEMEIO E A,et al. Utility wind integration and operating impact state of the art[J]. IEEE Trans on Power Systems,2007,22(3):900-908.
- [6] 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(8):1610-1618.
- [7] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及

- 措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
- ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25):1-9.
- [8] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
- ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2):1-8.
- [9] 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): 1-6.
- 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):1-6.
- [10] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响(三)——风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3):1-8.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(3):performance analysis for wind farm outgoing transformer protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):1-8.
- [11] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 双馈发电机简化动态模型及在风电系统中应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1):58-62.
- LI Jing, WANG Weisheng, SONG Jiahua. Simplified dynamic model of doubly-fed induction generator and its application in wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1):58-62.
- [12] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 电网短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.
- [13] 雷亚洲, GORDON Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25(12):27-32.
- LEI Yazhou, GORDON Lightbody. An introduction on wind power grind code and dynamic simulation [J]. Power System Technology, 2005, 25(12):27-32.
- [14] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1993:105-120.
- [15] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真[M]. 北京:中国电力出版社, 2007:93-96.
- [16] 赵新红, 张慧丽, 袁洪. 微机保护技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2008:22-36.

#### 作者简介:

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究(E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn);

张金华(1993-),女,山西忻州人,硕士研究生,主要从事新能源接入电力系统对继电保护影响的研究(E-mail: zjhapy911@stu.xjtu.edu.cn);

原博(1990-),男,山西运城人,硕士研究生,主要从事新能源接入电力系统对继电保护影响的研究。

## Impact of wind farm integration on relay protection(6):analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line

ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, WANG Jin, HAO Zhiguo  
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on the basic principle of induction generator, a simplified three-order dynamic model of induction generator is established in  $dq$  rotating coordinates. The mechanism of main frequency inconsistency between voltage and current of wind farm outgoing transmission line is analyzed from the perspective of electric circuit, which affects severely the action performance of phasor distance protection element based on power frequency Fourier algorithm. Prony algorithm and some others are used to extract the power frequency component of measured voltage/current by protection and the rotor speed frequency component for accurately detecting the fault line impedance. The distance element, which employs the differential equation algorithm based on the time-domain differential equation model of transmission line, is not affected by the signal frequency. Simulative results with PSCAD/EMTDC show the correctness of analysis.

**Key words:** wind power; relay protection; DFIG; outgoing transmission line; distance protection; frequency inconsistency