

DOI: 10.7667/PSPC160332

## 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析

李菁<sup>1</sup>, 郑涛<sup>1</sup>, 赵裕童<sup>1</sup>, 魏旭辉<sup>1</sup>, 王增平<sup>1</sup>, 刘辉<sup>2</sup>, 陈璨<sup>2</sup>, 吴林林<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;  
2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

**摘要:** 双馈风电机组短路电流特性不同于传统同步电机, 给继电保护算法和原理带来新的问题。解析推导了转速频率分量使全周傅里叶算法产生计算偏差的表达式, 进一步分析了双馈型风电机组短路电流对全周傅里叶算法的影响, 并通过仿真论证了理论解析的正确性。同时考虑到风电场一般具有较强的弱馈性, 以距离保护为例, 考虑不同类型接地故障并计及过渡电阻, 对风电场侧送出线距离保护测量阻抗进行了机理分析, 并辅以 DIGSILENT 仿真验证, 分析了双馈风电短路电流中的转速频率分量以及风电场弱馈特性对送出线距离保护的影响, 揭示了转速频率分量对于距离保护测量阻抗的影响规律。所得结论可为风电接入系统的保护与配置提供参考。

**关键词:** 双馈风电机组; 短路电流特性; 傅氏算法; 距离保护

### Impact of doubly-fed wind system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection

LI Jing<sup>1</sup>, ZHENG Tao<sup>1</sup>, ZHAO Yutong<sup>1</sup>, WEI Xuhui<sup>1</sup>, WANG Zengping<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>, CHEN Can<sup>2</sup>, WU Linlin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China)

**Abstract:** The short-circuit current characteristic of doubly-fed wind turbine is different from traditional synchronous motor, which brings new problems to algorithms and principles of protection. The deviation expression of the full-wave Fourier algorithm caused by speed frequency components is deduced, and the impact of double-fed wind turbines short circuit current on the full-wave Fourier algorithm is analyzed. Then simulation demonstrates the correctness of theoretical analysis. Meanwhile considering that wind farms are generally weak fed, for distance protection, taking into account different types of ground faults and different value of transition resistance, measured impedance of distance protection of wind farm feeders is calculated and verified by simulation using the DIGSILENT software. The impact of speed frequency short-circuit and weak fed character of doubly-fed wind farm on distance relay are analyzed and the pattern of measured impedance of distance relay varying with the speed frequency current is revealed. The conclusion can provide reference for the protection and configuration of wind power connect-in system.

**Key words:** doubly-fed induction generator unit; short circuit characteristic; Fourier algorithm; distance protection

## 0 引言

由双馈感应风电机组构成的风电场其故障特性受变频器保护(如撬棒保护)、故障前双馈机组运行转差  $s$  及故障时机端残压水平影响, 故障电流由基频分量、衰减转速频率分量和衰减直流分量构成<sup>[1-4]</sup>。正常运行时, 双馈机组  $s$  在  $-0.3 \sim 0.3$  范围内, 故障后短路电流衰减转速频率分量受故障前转差影响在  $35 \sim 65$  Hz 范围内变动, 其衰减速率由转子回路参数

及故障后转子回路所接撬棒电阻阻值决定, 实验测得一般 2~3 周波内衰减趋近于零。

基于稳态量的微机保护动作速度较快, 一般根据故障后 1 个周波内二次电压、电流采样数据, 经低通滤波以及提取工频量的全周或半周离散傅氏算法处理获得的相应相量值, 代入判据便可判断故障。

相对于高次谐波分量, 风电场短路电流中衰减转速频率分量的频率接近基频, 难以被低通滤波器完全滤除, 其以间谐波的形式混杂于工频中会引发

故障时风电场侧电气量的频率偏移。而微机保护通过离散傅氏算法(DFT)处理故障后 2~3 周波内含有间谐波的采样数据, DFT 对靠近基频的间谐波抑制效果很差, 这会严重影响继电保护基频成分提取的效果<sup>[5-7]</sup>。另外, 相对于常规电源, 风电场短路容量较小且由于风电机组自身的特性, 导致风电场提供短路电流的能力有限, 故障时风电场侧等效正负序阻抗相对于系统侧很大。同时风电场的变压器一般采用 D<sub>yn</sub> 接线, 高压侧即系统侧采用三角型接线, 低压侧即风电场侧采用直接接地或经消弧线圈接地, 当系统侧发生不对称故障时, 零序网络只包含风电场变压器高压侧等值零序阻抗, 系统序网结构具有风电场侧正负序阻抗远大于零序阻抗的特征, 这导致送出线风电场侧的故障电流中正负序电流分配系数很小, 零序电流分配系数很大, 风电场具有明显的弱馈特性<sup>[8-10]</sup>。

文献[11]从电路角度分析了风电场送出线电压、电流主频不同对工频傅氏算法的相量距离保护和解微分方程算法距离元件的影响; 文献[12]指出风电机组撬棒电路的投入和风电场的弱馈特性可能导致故障选相装置误选相及阻抗继电器的计算精度降低; 文献[13]对不同故障类型下考虑过渡电阻影响时, 讨论了运行参数变化对相间、接地距离保护和工频变化量距离保护的影响。

风电场短路电流的弱馈性和故障特性, 会对风电场侧计及过渡电阻情况下的计算阻抗带来较大影响, 而现有学术研究鲜有涉及。本文通过故障机理研究和建模仿真分析, 计及过渡电阻的影响, 研究了风电场送出线发生不同类型接地故障时, 上述两种因素对距离保护计算阻抗的影响规律。

## 1 风电场短路电流特性对 DFT 的影响分析

若双馈机组机端外  $t=0$  时刻短路, 撬棒保护瞬时动作, 静止坐标系下表示的对称及不对称故障短路电流表达式如式(1)所示<sup>[14-15]</sup>(故障电流初相角为零)。

$$i_{s,\alpha\beta}(t > 0) = Ae^{j\omega_1 t} + Be^{-j\omega_1 t} + Ce^{-t/T_s} + De^{j\omega_1 t} e^{-t/T_r} \quad (1)$$

式中:  $Ae^{j\omega_1 t}$ 、 $Be^{-j\omega_1 t}$  为正负序基频电流;  $Ce^{-t/T_s}$  为衰减直流分量;  $De^{j\omega_1 t} e^{-t/T_r}$  为转速频率分量, 各频率分量系数具体表达式见附录 A。其中衰减转速频率分量的初始幅值  $D$  受故障后机端残压水平影响, 衰减系数  $T_r$  取决于转子回路参数与撬棒电阻阻值。

### 1.1 风电场短路电流特性对 DFT 的影响机理

如图 1, 双馈风电场送出线 MN 上发生短路, 风电场提供的短路电流经母线 M 风电场侧保护流向故障点。风电场短路电流可近似用单台双馈机特

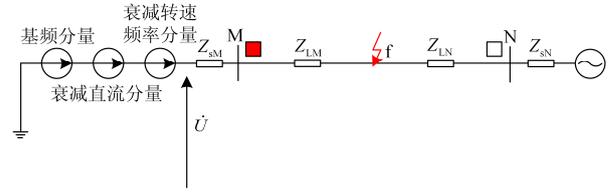


图 1 风电场送出线 MN 发生短路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of short circuit on wind farm transmission line MN

性代数扩容等效, 等效风电场短路电流特性  $i_{\text{farm},\alpha\beta}$  如式(2)所示。

$$i_{\text{farm},\alpha\beta}(t > 0) = N \times i_{s,\alpha\beta} = A'e^{j\omega_1 t} + B'e^{-j\omega_1 t} + C'e^{-t/T_s} + D'e^{j\omega_1 t} e^{-t/T_r} \quad (2)$$

若 a 相为故障相, 电流初相角为  $\varphi$ , 则 a 相短路电流为

$$i_{\text{farm},a}(t > 0) = \text{Re}(i_{s,\alpha\beta}) = (A' + B') \cos(\omega_1 t + \varphi) + C'e^{-t/T_s} \cos \varphi + D'e^{-t/T_r} \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (3)$$

DFT 提取信号中基频相量正、余弦系数表达式为

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-jk\omega_1 \Delta t} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos(k\omega_1 \Delta t) - \\ & j \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin(k\omega_1 \Delta t) = X_{\cos} - jX_{\sin} \end{aligned} \quad (4)$$

母线 M 风电场侧保护的测量电流采样后经低通和差分滤波处理, 近似认为高次谐波及衰减直流分量已被滤除, 再经 DFT 滤波计算各时刻对应相量。前置差分滤波后, 待进行 DFT 滤波的风电场侧故障电流采样值  $i'_{\text{farm},a}(k)$  为

$$i'_{\text{farm},a}(k) = (A' + B') \cos(\omega_1 k \Delta t + \varphi) + D'e^{-k\Delta t/T_r} \cos(\omega_1 k \Delta t + \varphi) \quad (5)$$

其中,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

电流采样值经 DFT 实部计算有:

$$\begin{aligned} i_{\cos} &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i'_{\text{farm},a}(k) \cos(\omega_1 k \Delta t) = \\ & \frac{(A' + B')}{\sqrt{2}N} \sum_{k=0}^{N-1} \cos(2\omega_1 k \Delta t + \varphi) + \frac{(A' + B')}{\sqrt{2}} \cos \varphi + \\ & \frac{D'}{\sqrt{2}N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-k\Delta t/T_r} \cos((\omega_r + \omega_1)k \Delta t + \varphi) + \\ & \frac{D'}{\sqrt{2}N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-k\Delta t/T_r} \cos((\omega_r - \omega_1)k \Delta t + \varphi) = \\ & \frac{(A' + B')}{\sqrt{2}} \cos \varphi + \Delta_{\cos} \end{aligned} \quad (6)$$

同理, 经 DFT 虚部计算有

$$i_{\sin} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i'_{\text{farm,a}}(k) \sin(\omega_1 k \Delta t) = -\frac{(A' + B')}{\sqrt{2}} \sin \varphi + \Delta_{\sin} \quad (7)$$

其中 DFT 频谱泄漏导致的计算偏差  $\Delta_{\cos}$ 、 $\Delta_{\sin}$  为

$$\Delta_{\cos} = \frac{D'}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-k\Delta_t/T_r} \cos((\omega_r + \omega_1)k\Delta_t + \varphi) + \frac{D'}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-k\Delta_t/T_r} \cos((\omega_r - \omega_1)k\Delta_t + \varphi) \quad (8)$$

$$\Delta_{\sin} = \frac{D'}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-k\Delta_t/T_r} \sin((\omega_r + \omega_1)k\Delta_t + \varphi) - \frac{D'}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-k\Delta_t/T_r} \sin((\omega_r - \omega_1)k\Delta_t + \varphi) \quad (9)$$

分析可知偏差  $\Delta_{\cos}$ 、 $\Delta_{\sin}$  主要由角频率为  $\omega_r + \omega_1$  及  $\omega_r - \omega_1$  的衰减频率分量构成。同步发电机短路电流不含间谐波分量, 各数据窗经 DFT 处理所得相量实部、虚部均为常数; 而由于风电场提供的短路电流中衰减转速频率分量的存在和 DFT 对间谐波的频谱泄漏效应, 给 DFT 相量计算带来偏差  $\Delta_{\cos}$ 、 $\Delta_{\sin}$ , 致使短路后 DFT 相量计算值存在波动, 代入继电保护判据, 会对各保护原理产生不同程度的影响。

对式(9)分析可知, DFT 计算偏差  $\Delta_{\cos}$ 、 $\Delta_{\sin}$  受故障电流中转速频率成分的初始幅值  $D'$  和衰减系数  $T_r$  影响。 $D'$  受双馈机组机端电压跌落程度影响, 其相对基频成分幅值越大, 对基频相量影响越严重; 而 DFT 计算偏差的持续时间则受转子回路的等效衰减时间常数  $T_r$  影响, 即受转子回路参数及投入撬棒阻值的影响。若风电场内机组投入撬棒阻值  $R_{\text{crowbar}}$  都较大, 则  $T_r$  较大, 频谱泄漏影响 DFT 的持续时间就相应较短。

### 1.2 风电场弱馈特性对接地故障短路电流的影响

如上文所述, 风电系统由于短路容量较小、系统序网结构及双馈机组撬棒投入等原因, 具有较强的弱馈特性, 具体表现为风电场侧正负序阻抗数倍于系统侧正负序阻抗, 且远大于风电场侧零序阻抗, 导致风电场侧正负序电流分配系数很小, 零序分配系数较大。

如图 1, 以送出线发生 a 相接地短路为例说明风电系统弱馈特性对短路电流的影响<sup>[16]</sup>。各相测量电流如式(10)所示, 其中  $\varphi = a, b, c$ 。

$$i_{m\varphi} = i_{L\varphi} + i_{k\varphi M} = (i_{L\varphi} + \dot{C}_{1M} i_{\varphi 1}) + \dot{C}_{2M} i_{\varphi 2} + \dot{C}_{0M} i_0 = i_{L\varphi} + \dot{C}_{1M} i_{k\varphi} + (\dot{C}_{0M} - \dot{C}_{1M}) i_0 \quad (10)$$

撬棒保护动作下双馈机组提供短路电流的能力有限, 不能按一般情况忽略负荷电流  $i_{L\varphi}$  而仅考虑故障分量。a 相接地短路,  $i_{ka}$  为短路点处 a 相电流故障分量, 非故障相故障分量  $i_{kb}$ 、 $i_{kc}$  近似为零。

相对于系统侧故障支路, 风电场侧故障支路的正负序分配系数  $\dot{C}_{1M}$ 、 $\dot{C}_{2M}$  很小, 而零序分配系数  $\dot{C}_{0M}$  较大。为分析起见, 近似认为分配系数均为常数, 且  $C_{1M} = C_{2M} \ll C_{0M}$ 。分析式(10)可知, 各相测量电流  $i_{m\varphi}$  ( $\varphi = a, b, c$ ) 均以  $(\dot{C}_{0M} - \dot{C}_{1M}) i_0$  分量为主。对于故障相, 测量电流  $i_{ma}$  中故障电流分量  $\dot{C}_{1M} i_{ka}$  较小, 对该相测量电流贡献不大, 因而故障相和非故障相短路电流从幅值和相位上差别不大, 下文仿真结果亦验证了此解析分析的正确性。同理可分析送出线发生 ab 两相接地短路时, 各相的测量电流同样以  $(\dot{C}_{0M} - \dot{C}_{1M}) i_0$  为主, 其零序成分比例更大。

## 2 风电场故障特性对距离保护的影响

发生经过渡电阻短路时, 由于附加阻抗表达式中正负零序分配系数的存在, 以及风电场故障电流中转速频率分量对 DFT 频谱泄漏的影响, 这两种影响因素结合会改变弱馈输电线路不同接地故障情况下附加阻抗特性, 放大过渡电阻对测量阻抗的影响。

### 2.1 风电场侧距离保护测量阻抗的计算

如图 2 所示, 风电场送出线 MN 上 f 点发生短路, 母线 M 处风电场侧采用带有记忆功能的距离保护, 保护正方向短路时具有偏移圆特性。

偏移圆特性方程为

$$90^\circ \leq \arg\left(\frac{U_{\text{op}}}{U_{J1}}\right) = \arg\left(\frac{U_J/I_J - Z_{\text{set}}}{U_J/I_J + Z_S}\right) \leq 270^\circ \quad (11)$$

$U_{\text{op}}$  为阻抗继电器工作电压,  $U_{J1}$  为保护安装处正序记忆电压, 同时设定  $\dot{U}_J$  ( $\dot{U}_{J\varphi}$  或  $\dot{U}_{J\varphi\varphi}$ )、 $\dot{I}_J$  ( $\dot{I}_{J\varphi} = \dot{I}_\varphi + 3K\dot{I}_0$  或  $\dot{I}_{J\varphi\varphi} = \dot{I}_{\varphi\varphi}$ ) 为阻抗继电器(接地短路或相间短路)接线方式电压、电流。

若 f 点发生接地故障, M 侧故障相测量阻抗  $Z_m$  为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_J}{\dot{I}_J} = \frac{\dot{I}_J Z_k + \dot{I}_k R_g}{\dot{I}_J} = Z_k + \frac{\dot{I}_k}{\dot{I}_J} R_g = Z_k + Z_{\text{add}} \quad (12)$$

式中:  $Z_k$  为保护安装处至短路点的线路阻抗;

$\dot{I}_j = \dot{I}_L + \dot{I}_{kM} + 3K\dot{I}_{0M}$  为接地阻抗继电器  $0^\circ$  接线电流,  $\dot{I}_L$  为负荷电流,  $\dot{I}_{kM}$  为 M 侧故障电流分量,  $\dot{I}_{0M}$  为 M 侧零序电流;  $\dot{I}_k$  为短路点电流, 受过渡电阻  $R_g$  影响产生的附加阻抗  $Z_{add}$  如式(13)所示。

$$Z_{add} = \frac{\dot{I}_{kM} + \dot{I}_{kN}}{\dot{I}_L + \dot{I}_{kM} + 3K\dot{I}_{0M}} R_g = \frac{\dot{I}_k R_g}{\dot{I}_L + \dot{C}_{1M}\dot{I}_1 + \dot{C}_{2M}\dot{I}_2 + \dot{C}_{0M}\dot{I}_0 + \dot{C}_{0M} \cdot 3K\dot{I}_0} \quad (13)$$

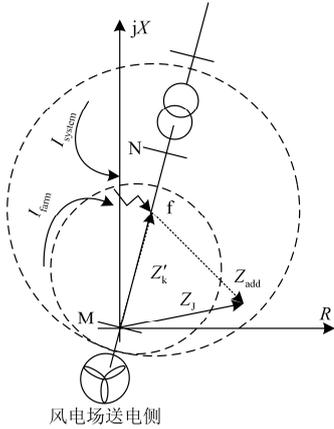


图 2 送出线风电场侧距离保护阻抗继电器动作特性  
Fig. 2 Operation characteristic of impedance relay located at the wind farm side of transmission line

## 2.2 过渡电阻对风场侧距离保护测量阻抗影响机理

因相间距离继电器测量阻抗不受过渡电阻影响, 故以送出线 f 点发生三相接地、单相接地、两相接地短路为例, 解析计及过渡电阻影响下风电系统短路电流转速频率分量导致的频谱泄漏及风电弱馈特性对接地阻抗继电器测量阻抗的影响。

### 1) 三相接地短路下附加阻抗 $Z_{add}$ 分析

发生对称故障, 风电场侧接地距离继电器中零序电流补偿相  $3K\dot{I}_{0M}$  为零, 附加阻抗如式(14)。

$$Z_{add} = \frac{\dot{I}_{kM} + \dot{I}_{kN}}{\dot{I}_L + \dot{I}_{kM}} R_g = R_g + \frac{\dot{I}_{kN} - \dot{I}_L}{\dot{I}_L + \dot{I}_{kM}} R_g = R_g + \frac{(1 - \dot{C}_{1M})\dot{I}_k - \dot{I}_L}{\dot{C}_{1M}\dot{I}_k + \dot{I}_L} R_g = \frac{\dot{I}_k}{\dot{C}_{1M}\dot{I}_k + \dot{I}_L} R_g = \frac{R_g}{\dot{C}_{1M} + \dot{I}_L/\dot{I}_k} \quad (14)$$

式中,  $\dot{I}_L = (\dot{E}_M - \dot{E}_N)/Z_{1\Sigma} = \dot{E}_N(e^{j\delta} - 1)/Z_{1\Sigma}$ 。

如图 3 所示, 发生三相短路, 风电场侧短路电流  $\dot{I}_{kM}$  中较大的转速频率分量导致 DFT 频谱泄漏会使得其工频相量计算存在一定的幅值和相角计算偏

差, 体现在式(14)中的  $\dot{I}_k$ , 并且考虑到风电场的弱馈性, 体现在  $\dot{C}_{1M}$  很小, 此两种因素会对附加阻抗  $Z_{add}$  产生较大影响。其大小与故障前系统运行功角  $\delta$  和故障情况下风电系统的弱馈程度有关。三相短路时机组三相均失去电压支撑, 具有强弱馈性, 可近似认为  $\dot{C}_{1M} \approx 0$ , 则有  $Z_{add} \approx R_g/\dot{I}_L/\dot{I}_k$ , 同时考虑到, 如图 3 所示,  $\dot{I}_L$  近似超前于  $\dot{I}_k$  相量  $90^\circ$ , 附加阻抗近似指向电抗轴负半轴方向, 呈电感性。

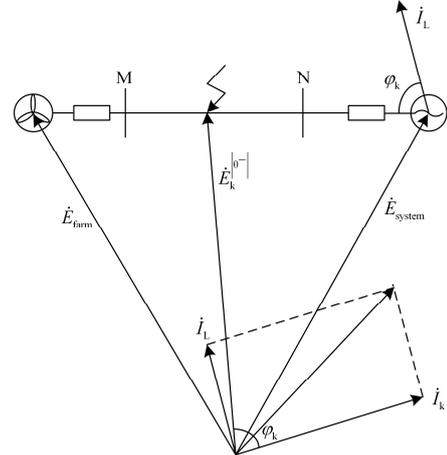


图 3 送出线三相短路电气量相位关系简图  
Fig. 3 Phasor diagram under the three phase fault occurred on the transmission line

### 2) a 相单相接地短路下附加阻抗 $Z_{add,a}$ 分析

$$Z_{add,a} = \frac{3\dot{I}_0 R_g}{\dot{I}_{La} + \dot{C}_{1M}\dot{I}_{a1} + \dot{C}_{2M}\dot{I}_{a2} + \dot{C}_{0M}\dot{I}_0 + \dot{C}_{0M} \cdot 3K\dot{I}_0} = \frac{3R_g}{\dot{I}_{La}/\dot{I}_0 + (\dot{C}_{1M} + \dot{C}_{2M} + (1+3K)\dot{C}_{0M})} \quad (15)$$

考虑到风电系统具有与弱馈性相似的特征, 认为  $\dot{C}_{1M}$ 、 $\dot{C}_{2M} \approx 0$ , 且  $\dot{C}_{0M}$  相位角度一般小于  $5^\circ$ , 近似视为实数。因而有  $Z_{add,a} \approx 3R_g/\left[\dot{I}_{La}/\dot{I}_0 + (1+3K)\dot{C}_{0M}\right]$ , 其中负荷电流相对于零序电流幅值较小, 故  $Z_{add,a}$  近似为纯实数。

### 3) ab 两相接地短路下两故障相附加阻抗 $Z_{add}$ 分析

$$\begin{cases} Z_{add,a} = \frac{\dot{I}_{ka} + \dot{I}_{kb}}{\dot{I}_{La} + \dot{I}_{kaM} + 3K\dot{I}_{0M}} R_g \\ Z_{add,b} = \frac{\dot{I}_{ka} + \dot{I}_{kb}}{\dot{I}_{Lb} + \dot{I}_{kbM} + 3K\dot{I}_{0M}} R_g \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\dot{I}_{kaM} = \dot{C}_{1M}\dot{I}_{a1} + \dot{C}_{2M}\dot{I}_{a2} + \dot{C}_{0M}\dot{I}_0$ ;  $\dot{I}_{kbM} = \dot{C}_{1M}\dot{I}_{b1} + \dot{C}_{2M}\dot{I}_{b2} + \dot{C}_{0M}\dot{I}_0$ , 表达式中相量的关系如图 4 所示。



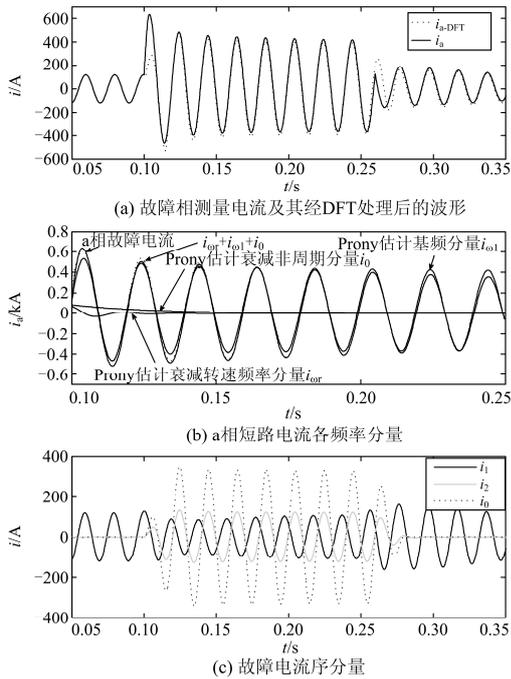


图 6 f 位置 a 单相接地( $R_g=0.01 \Omega$ )故障风电场侧保护 M 处各相序电流及故障 a 相电流频率分量

Fig. 6 Three phase sequence current and frequency component of protection M under phase a to ground fault on place f

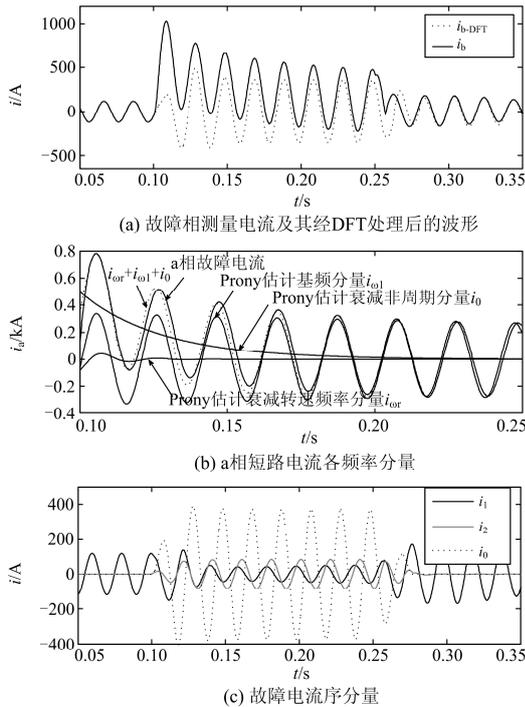


图 7 f 位置 ab 两相接地故障风电场侧保护 M 处各相序电流及故障 a 相电流频率分量

Fig. 7 Three phase and sequence current and frequency component of phase a of protection M under phase a and phase b to ground fault on place f

通过对上述三种情况下短路电流频率分量分析可知,送出线三相短路时风电场短路电流转速频率分量含量最高,2~3 个周波内对 DFT 的频谱泄漏效应较明显,某种程度上延长了原有 DFT 算法的动态特性,其动态过程与转速频率分量的衰减速率有关(或者说与  $T_r$  有关),这使得测量阻抗非单调变化;并且机组三相均失去额定电压支撑,撬棒投入后运行于异步机状态,相对系统侧,其提供短路电流能力更加不足,弱馈性更加明显,  $R_g$  影响下的附加阻抗  $Z_{add}$  模值被放大,会造成阻抗继电器动作结果存在较大的不确定性。

#### 4 风电场侧距离保护测量阻抗轨迹仿真

##### 4.1 三相、单相及两相短路接地故障仿真

图 8 以联络线 MN 相邻元件(变压器或线路)出口处  $f_1$  短路为例,仿真验证联络线发生不同类型接地短路,考虑过渡电阻的影响时距离保护测量阻抗特征。风电场容量 50 MW,相对系统短路容量比 2.5%。

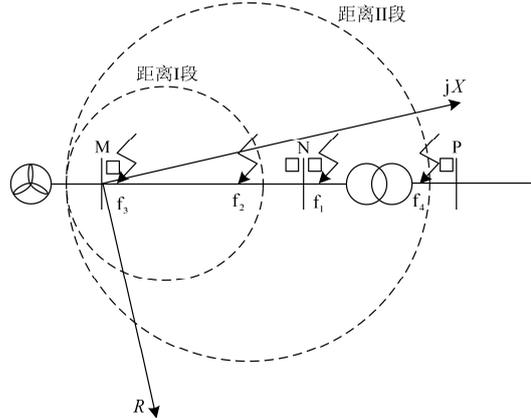


图 8 风电场联络线 MN 距离保护 I 段、II 段保护区域内各故障位置示意图

Fig. 8 Fault location diagram on operation area of distance relay I and II located at wind farm side of transmission line MN

在 Matlab 环境下编写低通滤波、DFT 滤波和距离保护算法程序计算测量阻抗, DFT 算法每周波处理 20 个采样点数据。考虑到傅氏算法的动态特性,实际上故障后 0~20 ms 时段对应测量阻抗并不能反映真实的短路位置,故取 20~60 ms 测量阻抗轨迹作为研究对象。

##### 1) 三相故障

$f_1$  处发生三相故障,过渡电阻  $R_g=0.01、0.5、5 \Omega$  时 330 kV 联络线风电场侧距离保护 a 相测量阻抗轨迹如图 9 所示。

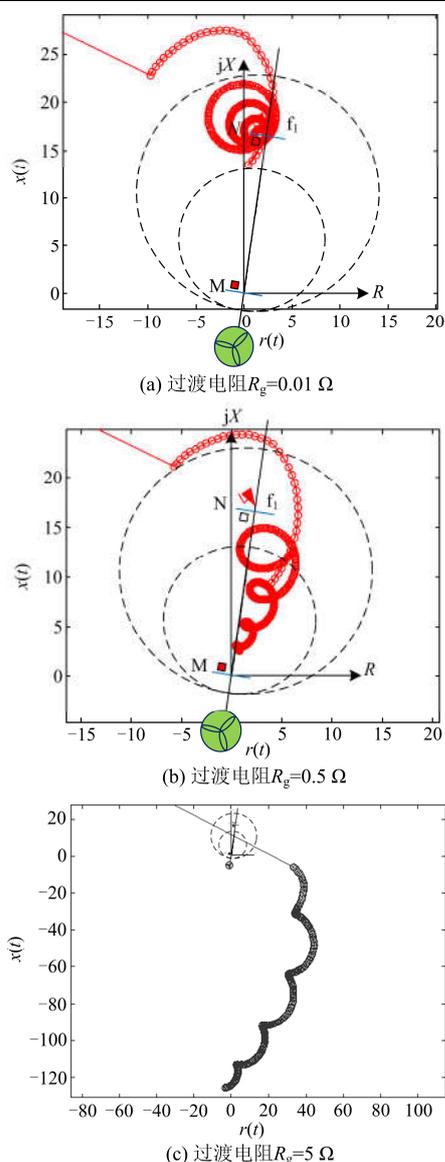


图9 经不同过渡电阻三相短路下风电场侧距离保护 a 相测量阻抗轨迹

Fig. 9 Trajectory of measuring impedance on wind farm side under three phase fault considering different transient resistance

发生三相接地故障时, 由图 5(b)展示的风电场侧故障电流波形可以看出, 相对于基频分量, 衰减转速频率分量初期相幅值较大, 2~3 周波内逐渐衰减为零。分析式(2)可知, 故障后基频分量随风电机组机端残压降低而变小; 同样的机端电压跌落水平下, 相对于不对称故障, 三相故障电流中基频成分很小, 故障后系统侧短路电流相对于风电场侧短路电流较大, 根据式(14)可知附加阻抗受影响程度更加严重, 具体表现在使得  $|Z_{\text{add}}|$  更大。通过图 9 可以看出, 由于附加阻抗的电容性非常明显, 转速频率分量衰减为零后计及附加阻抗的测量阻抗位置会随

着  $R_g$  增大沿线路阻抗角方向移向保护的反方向, 甚至有可能出现负值。

$f_1$  处发生故障, 经过渡电阻短路下的附加电阻向第四象限偏移呈阻容特性, 同时衰减转速频率分量使风电场侧测量阻抗呈螺旋圆轨迹, 两者共同影响, 相当于稳态超越和暂态超越共同作用。如图 9(b), 若 NP 区段保护动作不及时且过渡电阻较小, 测量阻抗有可能落入线路 MN 的 M 侧距离 I 段保护范围内, M 侧 I 段立即动作, 保护失去选择性; 而过渡电阻较大时, 多数情况如图 9(c)所示, 测量阻抗为负, 保护拒动。

## 2) 单相接地

$f_1$  处发生 A 相接地故障, 过渡电阻  $R_g = 0.01$ 、0.5、2、5  $\Omega$  时 330 kV 联络线风电场侧距离保护 A 相测量阻抗轨迹如图 10 所示。

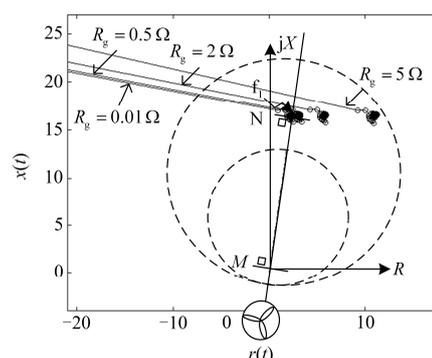


图10 不同过渡电阻下 a 相接地短路风电场侧距离保护测量阻抗轨迹

Fig. 10 Trajectory of measuring impedance on wind farm side under single phase fault considering different transient resistance

联络线 MN 相邻线路出口处发生单相接地故障时, 由于故障相对非故障相的强电磁耦合作用, 故障相电流中衰减转速频率分量很少, 故障相电流的基频幅值比相同点发生三相短路时电流的基频幅值大很多。转速频率分量对 DFT 计算影响微弱, 20 ms 后测量阻抗轨迹波动很小, 发生金属性短路时, 能够很好地反映故障位置。通过图 10 可以看出, 单相接地故障下附加阻抗  $Z_{\text{add}}$  接近为纯阻性, 由于风电场弱馈性, 过渡电阻对  $Z_{\text{add}}$  的放大效应明显, 造成阻抗继电器抗过渡电阻能力减弱, 仿真结果与上节机理分析一致。

## 3) 两相短路接地

$f_1$  处发生 ab 两相接地故障, 过渡电阻  $R_g = 0.01$ 、0.5、2、5  $\Omega$  时 330 kV 联络线风电场侧距离保护 a 相与 b 相测量阻抗轨迹如图 11、图 12 所示。

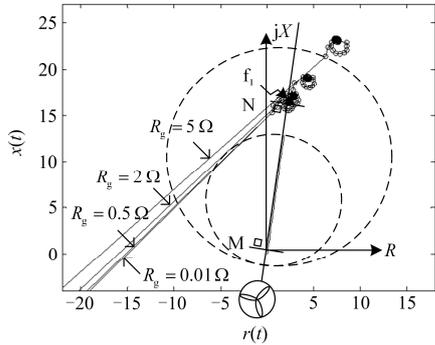


图 11 不同过渡电阻下 ab 两相接地短路风电场侧距离保护 a 相测量阻抗轨迹

Fig. 11 Trajectory of measuring impedance of phase a on wind farm side under double phase fault considering different transient resistance

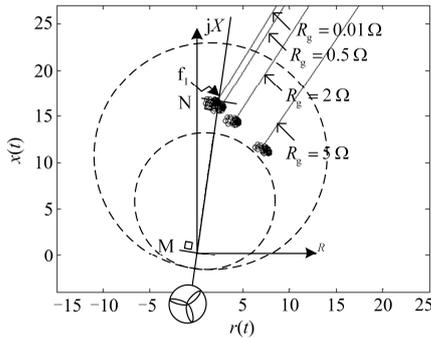


图 12 不同过渡电阻下 ab 两相接地短路风电场侧距离保护 b 相测量阻抗轨迹

Fig. 12 Trajectory of measuring impedance of phase b on wind farm side under double phase fault considering different transient resistance

f 处发生两相接地短路, 由图 7(a)所示, 其波形特征与单相接地故障类似, 故障相电流以基频分量为, 转速频率分量比例很小, 电气量的相量计算几乎不受 DFT 频谱泄漏影响, 当两相经过渡电阻接地时, 两故障相的附加阻抗  $Z_{add}$  分别呈阻感性和阻容性。

现场实际中, 单相或两相接地短路时过渡电阻可达数十欧, 故本文对过渡电阻  $R_g$  从  $0.01 \Omega$  增大到  $30 \Omega$  的情况进行了仿真。图 13 给出了  $f_1$  处发生单相及两相经不同过渡电阻接地短路时, 风电场侧距离保护测量阻抗的变化规律。

图 13 中, 箭头表示过渡电阻从  $0.01 \Omega$  增大到  $30 \Omega$  时, 距离保护测量阻抗的变化趋势。从变化轨迹可以看出, 若过渡电阻很大, 测量阻抗将远远超出距离保护的动作用范围, 导致保护拒动。

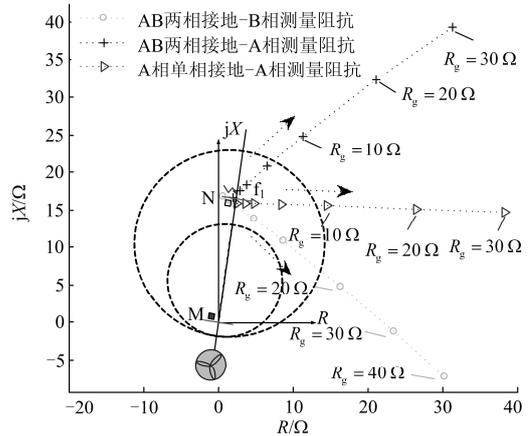


图 13 经不同过渡电阻接地短路风电场侧距离保护测量阻抗变化轨迹

Fig. 13 Trajectory of measuring impedance on wind farm side considering different transient resistance

表 1 给出了经不同过渡电阻接地短路时, 风电场侧距离保护测量阻抗值。仿真中, 送出线 MN 风电场侧距离保护 II 段整定值为  $Z_{set}^{II} = 1.3Z_{MN} = 21.67 \angle 82^\circ \Omega$ 。分析可见, 受弱馈特性影响, 过渡电阻对  $Z_{add}$  的放大效应明显, 继电器抗过渡电阻能力被严重削弱。

表 1 经不同过渡电阻接地短路风电场侧距离保护测量阻抗  
Table 1 Measuring impedance on wind farm side considering different transition resistance

| 过渡电<br>阻阻值/ $\Omega$ | a 单相接地故障<br>a 相测量阻抗/ $\Omega$ | ab 两相接地故障<br>a 相测量阻抗/ $\Omega$ | ab 两相接地故障<br>b 相测量阻抗/ $\Omega$ |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.01                 | $16.09 \angle 81^\circ$       | $16.81 \angle 83.1^\circ$      | $16.79 \angle 87.7^\circ$      |
| 1                    | $16.28 \angle 77.1^\circ$     | $17.76 \angle 80.6^\circ$      | $16.26 \angle 84.7^\circ$      |
| 10                   | $21.26 \angle 46.9^\circ$ *   | $27.26 \angle 65.7^\circ$ *    | $13.86 \angle 51^\circ$        |
| 40                   | $51.89 \angle 16^\circ$ *     | $62.07 \angle 47.9^\circ$ *    | $31.12 \angle -13.7^\circ$ *   |
| 70                   | $85.01 \angle 8.71^\circ$ *   | $98.31 \angle 41.2^\circ$ *    | $55.5 \angle -27.7^\circ$ *    |
| 100                  | $117.81 \angle 5.42^\circ$ *  | $135.7 \angle 37.7^\circ$ *    | $80.78 \angle -33.7^\circ$ *   |

注: “\*” 代表保护拒动。

#### 4.2 两种因素对距离保护的综合作用

由于风电场的弱馈性, 附加阻抗  $Z_{add}$  被放大, 严重削弱风电场侧距离保护耐受过渡电阻能力; 而由于衰减转速频率分量对 DFT 算法的影响, 联络线风电场侧测量阻抗在某种程度上具有一定的暂态特性。这使得阻抗继电器的动作不确定性增大, 某些情况下测量阻抗可能在距离继电器动作圆边界附近反复游荡, 一定程度模糊化了阻抗继电器的动作判断或延迟了其动作时间。

综上, 经过三种不同故障类型下的故障机理和仿真分析, 考虑风电场短路电流中衰减转速频率分

量和过渡电阻  $R_g$  的影响, 风电场侧距离保护测量阻抗轨迹呈现如下的规律。

1) 发生三相金属性短路, 由于风电场初始短路电流中转速频率分量较大的影响, 测量阻抗轨迹呈半径逐渐变小的螺旋圆状, 随着转速频率分量衰减至零, 测量阻抗轨迹落在故障位置。而发生三相非金属性短路时, 转速频率分量导致频谱泄漏, 其测量阻抗具有螺旋圆特性, 同时由于附加阻抗受到风场弱馈性的影响会使测量阻抗产生较大偏差。这是由于与上述另外两种故障类型相比, 发生三相短路时, 场内机组三相均失去额定电压支撑, 异步机提供故障电流能力小, 而撬棒保护投入进一步限制了电流水平, 使得弱馈性更为明显, 附加阻抗幅值更大, 测量阻抗轨迹严重偏离于真实故障位置, 在第四象限范围内向虚轴偏移。

2) 与同一位置发生三相短路相比, 单相接地中故障相短路电流中衰减转速频率分量比例明显较小, 其对 DFT 和测量阻抗的影响较小。发生单相金属性短路时, 故障相测量阻抗在真实故障位置附近很小范围内偏移。而发生单相非金属性短路时, 如前述机理和仿真分析, 由于弱馈性和零序网架的影响, 故障相电流中零序电流占主要成分, 过渡电阻附加阻抗接近为纯阻性, 且相对于同一位置三相短路, 单相故障短路电流较大, 其弱馈性不及三相短路情况, 相同  $R_g$  下附加阻抗  $Z_{add}$  幅值较小, 但同样被严重放大。

3) 同单相接地类似, 两相接地故障短路电流中转速频率分量含量较小, 发生金属性短路时, 对两故障相测量阻抗影响不大。发生两相非金属性故障时, 如前述机理分析, 两故障相过渡电阻附加阻抗分别呈阻容性和阻感性, 相同  $R_g$  下附加阻抗幅值大小同单相故障情况近似。

## 5 总结

风电场送出线故障中绝大多数为单相接地故障, 通过上述分析可知, 该情况下风电故障特性对测量阻抗影响不大, 弱馈作用影响下附加阻抗呈阻性, 避免了送出线相邻线路始端发生稳态超越的可能性, 但风电场弱馈特性一定程度上放大了过渡电阻附加阻抗值, 配置保护时应充分考虑阻抗特性电阻方向的耐受过渡电阻能力。

同理, 在两相接地故障情况下, 测量阻抗受短路电流故障特性的影响较小, 而受弱馈性的影响较大, 两故障相附加阻抗分别呈阻容性和阻感性, 配置保护时需要考虑保护范围外非金属性故障时, 保

护超越动作的可能性。

在三相故障情况下, 当发生金属性故障时, 由于衰减转速频率分量和弱馈性的影响, 测量阻抗的短时波动时间可能延长; 当发生非金属性故障时, 由于弱馈性的影响, 即使接地阻抗很小, 复平面内的测量阻抗轨迹也将严重偏向风电场侧, 甚至可能落到保护背后, 因此无法根据测量阻抗值进行故障定位, 同时接地距离继电器将受到暂态超越和稳态超越的影响, 可能使保护失去选择性和可靠性。

## 附录

故障短路电流表达式如下所述。

DFIG 外  $t=0$  时刻故障, 撬棒保护瞬时动作下用静止坐标系表示的 DFIG 故障短路电流表达式如下式:

$$i_{s,\alpha\beta}(t > 0) = Ae^{j\omega_1 t} + Be^{-j\omega_1 t} + Ce^{-t/T_s} + De^{j\omega_1 t} e^{-t/T_r}$$

(考虑电流初相角为  $0^\circ$ )

$$A = \frac{L_r \bar{U}_{s+}^p}{j\omega_1 M} + \frac{L_m AR_r \bar{U}_{s+}^p}{j\omega_1 (j\omega_s + \frac{1}{T_r}) M}$$

$$B = -\frac{L_r \bar{U}_{s-}^n}{j\omega_1 M} - \frac{L_m AR_r \bar{U}_{s-}^n}{j\omega_1 (\frac{1}{T_r} + j(2-s)\omega_1) M}$$

$$C = \frac{L_r (\bar{U}_s - \bar{U}_{s+}^p + \bar{U}_{s-}^n)}{j\omega_1 M} + \frac{L_m AR_r (\bar{U}_s - \bar{U}_{s+}^p + \bar{U}_{s-}^n)}{j\omega_1 (-j\omega_r + \frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s}) M}$$

$$D_{\text{不对称故障}} = -\frac{L_m}{M}$$

$$\left[ \frac{AR_r \bar{U}_{s+}^p}{j\omega_1 (j\omega_s + 1/T_r)} + \frac{AR_r (\bar{U}_s - \bar{U}_{s+}^p)}{j\omega_1 (-j\omega_r + 1/T_r - 1/T_s)} + \bar{\psi}_{r+}(0) \right] - \left[ \frac{AR_r \bar{U}_{s-}^n}{j\omega_1 (-j(2-s)\omega_1 + 1/T_r)} + \frac{AR_r \bar{U}_{s-}^n}{j\omega_1 (-j(1-s)\omega_1 + 1/T_r - 1/T_s)} \right]$$

$$D_{\text{对称故障}} = -\frac{L_m}{M}$$

$$\left[ \frac{AR_r \bar{U}_{s+}^p}{j\omega_r (j\omega_s + 1/T_r)} + \frac{AR_r (\bar{U}_s - \bar{U}_{s+}^p)}{j\omega_1 (-j\omega_r + 1/T_r - 1/T_s)} + \bar{\psi}_{r+}(0) \right]$$

其中,  $R_r = R_r + R_{\text{crowbar}}$ 。

DiGSILENT 仿真模型系统结构见附录图 1, 其主要参数如下所述。

1) 750 kV 系统: 正序阻抗  $Z_{s1}=24.2 \Omega$ , 零序阻抗  $Z_{s0}=35.0 \Omega$ , 系统短路容量为 2000 MVA, 50 MW

双馈风电场短路容量比为 2.5%;

2) 风电集群再升压变压器: 额定容量为 240 MVA, 额定电压为 345 kV/750 kV, 阻抗电压为  $U_k(\%)=10.5$ ;

3) 330 kV 送出线路: 正序阻抗  $Z_{11}=0.0464+j0.3302 \Omega/\text{km}$ , 零序阻抗  $Z_{10}=0.262+j0.9911 \Omega/\text{km}$ , 线路长度  $L=50 \text{ km}$ ;

4) 750 kV 送出线路: 正序阻抗  $Z_{11}=0.0122+j0.2679 \Omega/\text{km}$ , 零序阻抗  $Z_{10}=0.2729+j0.8399 \Omega/\text{km}$ , 线路长度  $L=279 \text{ km}$ ;

5) 风场主变压器: 额定容量为 63 MVA, 额定电压为 110 kV/38.5 kV, 阻抗电压  $U_k(\%)=10.5$ ;

6) 箱式变压器: 额定容量为 1.6 MVA, 额定电压为 38.5 kV/690 V, 阻抗电压  $U_k(\%)=6.5$ 。

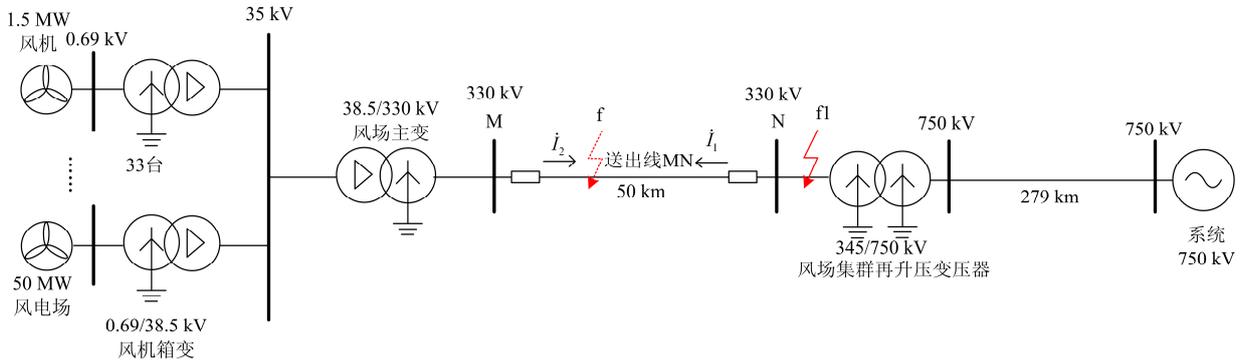
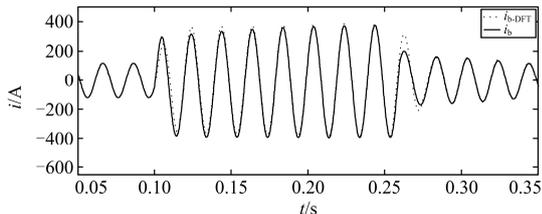


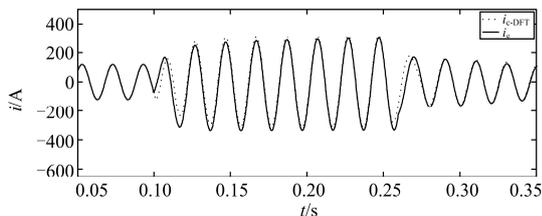
图 1 DlgSILENT 仿真模型系统结构

Fig. 1 System structure of DlgSILENT simulation model

单相及两相接地短路故障下, 流经送出线路风电场侧保护的各相测量电流及其经 DFT 基频滤波处理后的结果如附录图 2、图 3 所示。



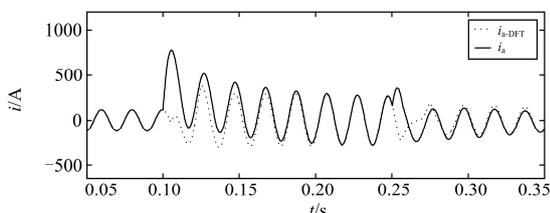
(a) b相电流



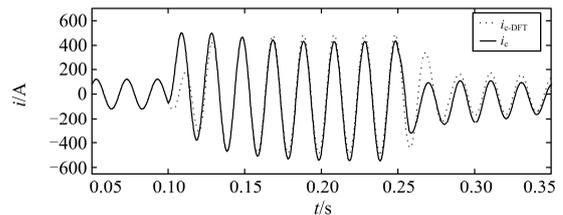
(b) c相电流

图 2 单相接地短路故障测量电流及其经 DFT 处理后的波形

Fig. 2 Measure current and their Fourier filter current under phase A to ground fault



(a) a相电流



(b) c相电流

图 3 两相接地短路故障测量电流及其经 DFT 处理后的波形

Fig. 3 Measure current and their Fourier filter current under two-phase grounding fault

### 参考文献

- [1] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power System Research, 2011, 81(7): 1610-1618.
- [2] MORREN J, DE HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [3] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Short-circuit analysis of a doubly fed induction generator wind turbine with direct current chopper protection[J]. Wind Energy, 2013, 16(1): 37-49.
- [4] 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.
- [5] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 59-64.
- [6] 卜强生, 高磊, 宋亮亮, 等. 风电场短路电压电流频率不一致对距离保护及测试的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 21-27.
- BU Qiangsheng, GAO Lei, SONG Liangliang, et al. Short circuit current and voltage frequency inconsistency in wind farm and its effect on distance protection and relay protection test[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 21-27.
- [7] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-8.
- ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-8.
- [8] 陈伟伟, 李凤婷, 张玉, 等. 风电 T 接双电源系统对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 108-114.
- CHEN Weiwei, LI Fengting, ZHANG Yu, et al. Impact of wind farm on distance protection for T-connected to the dual power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 108-114.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.
- ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [12] 黄涛, 陆于平, 凌启程. 撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 30-36.
- HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 30-36.
- [13] 余嘉彦, 袁越, 周建华, 等. 风电场运行参数变化对其出口输电线路距离保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 64-69.
- YU Jiayan, YUAN Yue, ZHOU Jianhua, et al. Impact of the changes of operation parameters of wind farm on distance protection of output transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 64-69.
- [14] 李辉, 杨顺昌, 廖勇. 并网双馈发电机电网电压定向励磁控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 159-162.
- LI Hui, YANG Shunchang, LIAO Yong. Studies on excitation control of power system voltage oriented for doubly fed generators connected to an infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 159-162.
- [15] 郑涛, 魏占朋, 迟永宁, 等. 考虑撬棒保护动作时间的双馈式风电机组短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 25-30.
- ZHENG Tao, WEI Zhanpeng, CHI Yongning, et al. Short-circuit current characteristic of doubly fed induction generator considering crowbar protection insertion time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 25-30.
- [16] 刘万顺, 黄少锋. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 120-125.

收稿日期: 2016-03-12; 修回日期: 2016-05-31

作者简介:

李菁(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向为风力发电及其对继电保护的影响; E-mail: lijing\_ncepu@163.com

郑涛(1975-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: zhengtao\_sf@126.com

赵裕童(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统保护与控制。E-mail: yutongzhaohd@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)