

# 不同撬棒保护投入时刻下双馈风电机组短路电流计算分析

王增平<sup>1</sup>, 李菁<sup>1</sup>, 郑涛<sup>1</sup>, 赵裕童<sup>1</sup>, 魏旭辉<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:** 双馈感应风电机组故障特性不同于传统同步电机, 对电网继电保护的整定与配合产生不利影响, 需从解析的角度揭示双馈感应风电机组的故障暂态机理。以双馈感应发电机空间矢量模型为基础, 结合电路动态响应理论, 建立了双馈风电机组三相短路电流解析计算模型。所建模型考虑了定、转子电阻的影响, 从理论上证明了衰减时间常数的由来及与频率分量的对应关系。考虑到控制作用的影响, 撬棒的投入会有延时, 解析模型计及了不同的撬棒保护投入时刻。与仿真和现场试验结果对比验证了所建模型的准确性, 并从仿真角度分析了转子电压、双馈风电机组运行状态及转子侧控制策略对故障电流的影响。最后运用解析模型定量评估了定转子电阻、短路发生时刻及DFIG的运行工况等因素对短路电流的影响。

**关键词:** 双馈型感应风力发电机; 撬棒保护; 暂态特性; 解析计算模型

## Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbine considering different crowbar protection insertion time

WANG Zengping<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, ZHENG Tao<sup>1</sup>, ZHAO Yutong<sup>1</sup>, WEI Xuhui<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:** Doubly fed induction generator (DFIG) has a different fault characteristic when compared to traditional synchronous generator, and it has negative impacts on relay protection setting and cooperation, thus revealing the fault mechanism of DFIG from the point of analysis is an important issue. Based on vector model of DFIG, superposing the steady state and fault state, combined with the dynamic response circuit theory, and considering the different crowbar protection insertion time, a model for calculating the three-phase short-circuit current of DFIG is established. The analytical model takes into account the influence of the stator and rotor resistance, theoretically proving the origin of the decay time constant and corresponding relationship with the frequency component. The simulation results validate the model. Finally the paper quantitatively assesses the impacts of the degree of voltage dips, short-circuit occurred time and operation condition of DFIG on the short-circuit current.

**Key words:** doubly fed induction generator (DFIG); crowbar protection; transient characteristics; analytic calculation model

## 0 引言

风能已成为电力系统增长最快的绿色能源和全球发展最快的可再生能源。其中, 并网型双馈式风力发电机组成为工业应用最广泛的风力发电机型。

双馈风电机组输出短路电流对电网的影响正受到越来越多的关注。目前相关研究多从探究双馈风电机组输出短路电流的特征、定性分析双馈风电机组对电网短路电流的影响等角度出发, 采用时域仿真的方法进行分析<sup>[1-3]</sup>。

对于DFIG短路电流的求解, 现有文献多从电机磁链的角度推导短路电流解析式, 求解中忽略了定转子电阻的影响<sup>[4-5]</sup>, 从而不能从解析的角度解释衰减时间常数的由来。且考虑撬棒电路投入时, 一般假设短路后风电机组立即投入撬棒同时闭锁变流器, 使转子电压突变为零<sup>[6-9]</sup>, 此种假设使得DFIG短路电流的求解可参照异步电机, 然而实际上由于控制的作用, 撬棒电路未必会在短路时刻立即投入, 而是有短暂的延时, 此种假设大大简化了短路电流的求解, 但与现实情况有较大差别, 所得结果不够精确。

为得到更贴近实际的短路电流精确解析模型, 本文采用物理过程分析与等效电路状态响应相结合的方法, 对双馈电机频域方程解析, 分时、分阶段得到风电机组机端短路后的短路电流解析计算模型。根据本文所提解析方法, 分别对应给出了由于电网电压跌落、转子变频器闭锁以及撬棒电路投入等原因而在定、转子绕组中引发的各电流频率分量分解式, 并定量评估了定转子电阻阻值、短路发生时刻及 DFIG 的运行工况等因素对短路电流的影响。最后将模型计算结果与仿真计算和现场试验数据进行了对比, 验证了模型的准确性。

## 1 计及撬棒投入时间的 DFIG 故障过程分析

### 1.1 双馈风电机组数学模型

定、转子侧均采用电动机惯例, 忽略磁饱和效应, DFIG 在  $dq$  轴正向同步旋转坐标系下的空间矢量模型为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + j\omega_0 \Psi_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \\ U_r = R_r I_r + js\omega_0 \Psi_r + \frac{d\Psi_r}{dt} \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_s, I_s, \Psi_s, U_r, I_r, \Psi_r$  分别为  $dq$  轴同步旋转坐标系下定、转子的电压、电流和磁链矢量;  $s$  为转差率;  $\omega_0$  为同步转速;  $R_s, R_r, L_s, L_r$  分别为定、转子绕组等效电阻、电感;  $L_m$  为定转子绕组互感。

根据以上数学模型可得 DFIG 在  $dq$  轴下的等效电路<sup>[11-12]</sup>如图 1 所示。其中,  $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$  分别为定、转子漏感,  $L_s = L_{\sigma s} + L_m, L_r = L_{\sigma r} + L_m$ 。

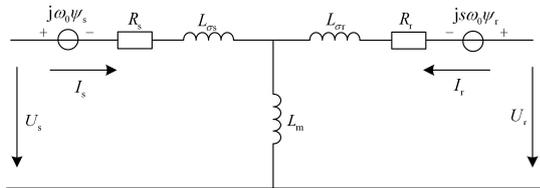


图 1 双馈发电机  $d-q$  轴等效电路-电动机惯例

Fig. 1  $d-q$  axis equivalent circuit of DFIG

### 1.2 DFIG 故障第一阶段物理过程分析

第一阶段的物理过程等效为在稳态运行的基础上, 定子侧突加反向电压源激励。结合图 1, 此过程可分解为图 2(a)稳态电路与图 2(b)故障态电路。

其中, 稳态电路中忽略了定转子电感, 这是由于稳态下认为定、转子磁链恒定。  $U_{sn}, I_{sn}, \Psi_{sn}$  和  $U_m, I_m, \Psi_m$  分别表示定、转子电压、电流和磁链的

稳态量;  $\Delta U_s, \Delta I_s, \Delta \Psi_s, \Delta U_r, \Delta I_r, \Delta \Psi_r$  分别表示定、转子绕组电压、电流和磁链的故障分量。  $\Delta U_s = -kU_{sn}$  为反向电压故障分量,  $k$  为定子侧电压跌落程度系数。

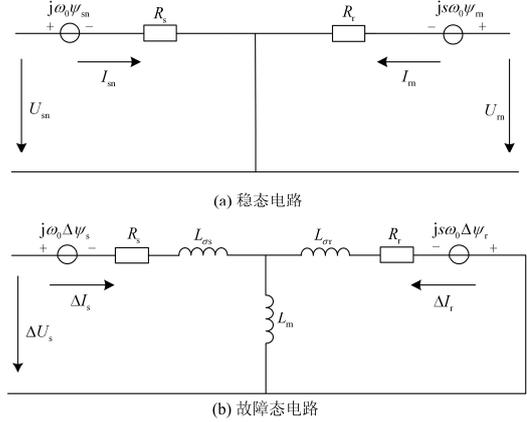


图 2 DFIG 三相短路第一阶段等效电路

Fig. 2 First stage equivalent circuit of DFIG for three-phase short-circuit

### 1.3 DFIG 故障第二阶段物理过程分析

假设  $t_c$  时刻投入撬棒保护进入第二阶段。撬棒投入时 DFIG 内部已经存在由定子电压跌落激起的电磁暂态过程, 此时转子侧保护电路的动作相当于在原有暂态过程的基础上又加入了一个动态激励。将原电路等效为二端口网络, 撬棒电阻分支的加入可以看作转子侧端口并入一个等效电源支路, 与转子侧反向电压一同作用于转子侧。

此过程的等效电路原理图如图 3 所示。上标  $c$  表示第二阶段的稳态量和故障分量。将撬棒电阻  $R_c$  支路等效为一个外加电压源  $R_c I_r^c$ ,  $I_r^c$  为第二阶段转子全电流,  $I_r^c = I_m^c + \Delta I_r^c$ , 在转子电压端口的故障电压分量为  $R_c I_r^c - U_{rn}^c$ 。

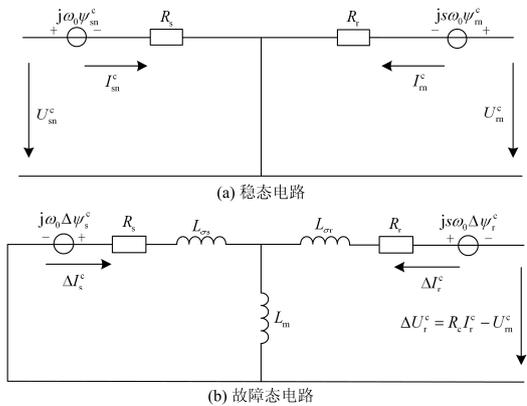


图 3 DFIG 三相短路后投入撬棒等效电路

Fig. 3 Crowbar insertion equivalent circuit of DFIG after three-phase short-circuit

## 2 计及撬棒投入时间的DFIG短路电流计算

### 2.1 第一阶段撬棒未投入时短路电流解析模型

DFIG 处于稳态运行时电压-电流方程为

$$\begin{cases} U_{sn} = (R_s + j\omega_0 L_s)I_{sn} + j\omega_0 L_m I_{rn} \\ U_{rn} = (R_r + js\omega_0 L_r)I_{rn} + js\omega_0 L_m I_{sn} \end{cases} \quad (2)$$

求解上式, 并将各量转换到三相静止坐标下, 得定、转子稳态电流:

$$\begin{cases} I_{sn} = (M_{sn}U_{sn} + N_{sn}\frac{U_m}{s})e^{j\omega_0 t} \\ I_{rn} = (M_{rn}U_{rn} + N_{rn}\frac{U_m}{s})e^{js\omega_0 t} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $M_{sn}$ ,  $N_{sn}$ ,  $M_{rn}$ ,  $N_{rn}$  分别为定、转子电压稳态系数, 详细表达式见附录 A。

故障状态下, 故障分量电压-电流零初始状态的频域运算方程为

$$\begin{cases} \frac{\Delta U_s}{s} = R_s \Delta I_s + (j\omega_0 + S)(L_s \Delta I_s + L_m \Delta I_r) \\ 0 = R_r \Delta I_r + (js\omega_0 + S)(L_r \Delta I_r + L_m \Delta I_s) \end{cases} \quad (4)$$

求解上式得到定转子故障电流分量的频域解析表达式, 对其进行反拉式变换, 并转换到三相静止坐标系下。得到定转子电流故障分量时域表达式为

$$\begin{cases} \Delta I_s = E(A_s e^{j\omega_0 t} + B_s e^{-\frac{t}{T_s}} + C_s e^{j(1-s)\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_r}}) \\ \Delta I_r = -E(A_r e^{js\omega_0 t} + B_r e^{j(1-s)\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} + C_r e^{-\frac{t}{T_r}}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $E = \Delta U_s / L_D$  为与定子电压跌落程度有关的系数;  $L_D = L_s L_r - L_m^2$ ;  $T_s = L_D / (R_s L_r)$  为定子衰减时间常数;  $T_r = L_D / (R_r L_s)$  为转子衰减时间常数;  $A_s$ ,  $B_s$ ,  $C_s$  分别为定子故障电流基频分量、直流分量和转速频率分量的系数,  $A_r$ ,  $B_r$ ,  $C_r$  分别为转子故障电流差频分量、转速频率分量和直流分量的系数, 其详细表达式参见附录 B。

定子和转子侧故障电流为稳态分量和故障分量的叠加:

$$\begin{cases} I_s = I_{sn} + \Delta I_s = (M_{sn}U_{sn} + N_{sn}\frac{U_m}{s} + A_s E) \cdot \\ \quad e^{j\omega_0 t} + B_s E e^{-\frac{t}{T_s}} + C_s E e^{j(1-s)\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_r}} \\ I_r = I_{rn} + \Delta I_r = (M_{rn}U_{rn} + N_{rn}\frac{U_m}{s} - A_r E) \cdot \\ \quad e^{js\omega_0 t} - B_r E e^{j(1-s)\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} - C_r E e^{-\frac{t}{T_r}} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2 第二阶段撬棒不同时刻投入短路电流解析模型

撬棒电路投入后, 三相静止坐标系下定子和转

子的稳态电流为

$$\begin{cases} I_{sn}^c(t \geq t_c) = (M_{sn}^c U_{sn}^c + N_{sn}^c \frac{U_m^c}{s})e^{j\omega_0(t-t_c)} \\ I_{rn}^c(t \geq t_c) = (M_{rn}^c U_{rn}^c + N_{rn}^c \frac{U_m^c}{s})e^{js\omega_0(t-t_c)} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $M_{sn}^c$ ,  $N_{sn}^c$ ,  $M_{rn}^c$ ,  $N_{rn}^c$  分别为投入撬棒保护后定、转子电流的定子电压系数和转子电压系数。

故障状态下, 转子侧叠加反向电压与叠加电阻支路等效电源一起引起的非零状态响应频域方程为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ R_c \Delta I_r^c + \frac{R_c I_m^c - U_m^c}{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{s,t_c} \\ \Delta I_{r,t_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s + (j\omega_0 + S)L_s & (j\omega_0 + S)L_m \\ (js\omega_0 + S)L_m & R_r + (js\omega_0 + S)L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_s^c \\ \Delta I_r^c \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $I_{s,t_c}$ ,  $I_{r,t_c}$  为第二阶段中定子、转子电流  $t_c$  时刻初值, 第二阶段电流初值为第一阶段电流末值;  $\Delta I_s^c$ ,  $\Delta I_r^c$  分别表示由撬棒保护投入而引起的定、转子绕组电流故障分量。

求解式(8)并经坐标系转换得三相静止坐标系下撬棒电路投入后的定子电流故障分量表达式:

$$\begin{aligned} \Delta I_s^c(t \geq t_c) = & -\frac{R_c I_m^c - U_m^c}{L_D} \cdot \\ & \left( A_{s,r} e^{j\omega_0(t-t_c)} + B_{s,r} e^{-\frac{t-t_c}{T_s^c}} + C_{s,r} e^{j(1-s)\omega_0 t} e^{-\frac{t-t_c}{T_r^c}} \right) + \\ & \frac{I_{s, \text{equ}}}{L_D} (B_{s,s0} e^{-\frac{t-t_c}{T_s^c}} + C_{s,s0} e^{j(1-s)\omega_0 t} e^{-\frac{t-t_c}{T_r^c}}) - \\ & \frac{I_{r, \text{equ}} L_m}{L_D} (B_{s,r0} e^{-\frac{t-t_c}{T_s^c}} + C_{s,r0} e^{j(1-s)\omega_0 t} e^{-\frac{t-t_c}{T_r^c}}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $I_{s, \text{equ}} = L_s I_{s,t_c} + L_m I_{r,t_c}$ ,  $I_{r, \text{equ}} = L_m I_{s,t_c} + L_r I_{r,t_c}$  分别表示定子、转子等效暂态电流初值; 频率分量系数下标 s 表示定子侧电流, 下标 r 表示由转子反向电压引起的电流分量, 下标 s0、r0 分别表示由定转子等效暂态电流初值引起的暂态电流分量。这里定子衰减时间常数  $T_s^c = L_D / (R_s L_r \omega_0)$ , 转子衰减时间常数  $T_r^c = L_D / (R_r^c L_s)$ 。

双馈电机转子侧不同时刻投入撬棒保护后定子和转子绕组中的电流为以上两部分的叠加:

$$\begin{aligned} I_s^c(t \geq t_c) = & I_{sn}^c + \Delta I_s^c = \\ & (M_{sn}^c U_{sn}^c + N_{sn}^c \frac{U_m^c}{s} - A_{s,r} \frac{R_c I_m^c - U_m^c}{L_D}) e^{j\omega_0(t-t_c)} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (B_{s,s0} \frac{I_{s, \text{equ}}}{L_D} - B_{s,r} \frac{R_c I_m^c - U_m^c}{L_D} - B_{s,r0} \frac{I_{r, \text{equ}} L_m}{L_D}) e^{-\frac{t-t_c}{T_r^c}} + \\ & (C_{s,s0} \frac{I_{s, \text{equ}}}{L_D} - C_{s,r} \frac{R_c I_m^c - U_m^c}{L_D} - C_{s,r0} \frac{I_{r, \text{equ}} L_m}{L_D}) \cdot \\ & e^{j(1-s)\omega_0(t-t_c)} e^{-\frac{t-t_c}{T_r^c}} \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10)可提取出由定子电压强制分量及定、转子电流暂态分量初值引起的各个故障电流成分,并分析其在总电流中的占比。分析其中所含频率分量可知,DFIG机端三相电压跌落,撬棒保护投入将在定、转子绕组中激发复杂的电磁暂态过程,各自由分量按其对应系数与衰减时间常数衰减,最终定子故障电流中将只剩由定子侧残压引起的稳态分量。

DFIG机端三相电压跌落至撬棒电路投入的全过程的短路电流解析计算模型如式(11)。式中,  $I_{s, \text{ent}}$  表示包含一、二阶段的全电流。

$$I_{s, \text{ent}} = \begin{cases} I_s & 0 \leq t \leq t_c \\ I_s^c & t \geq t_c \end{cases} \quad (11)$$

同理可得转子故障电流解析模型,此处限于篇幅不再赘述。

### 3 仿真验证与分析

在 Matlab/Simulink 环境下搭建双馈风电机组接入系统模型,以一台配备撬棒保护的 1.5 MW 双馈风电机组机端及送出线末端发生三相短路故障为测试算例,系统等值线路图如图 4 所示,DFIG 基本参数见附录 C。

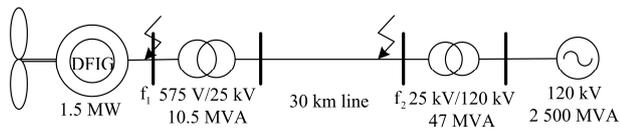


图 4 仿真系统等值线路图

Fig. 4 Equivalent circuit of simulation system

#### 3.1 DFIG 机端电压轻微跌落故障仿真

当机端电压跌落至额定电压的 80% 时,故障电流较小不足以启动撬棒电路,此时的故障过程只有第一阶段。由仿真得到的定子短路电流与计算电流波形对比图如图 5 所示。

#### 3.2 DFIG 机端三相短路故障仿真

当机端电压完全跌落时,图 6(a)、6(b)、6(c)分别表示在故障发生后 0 s、5 ms、10 ms 投入撬棒电路的仿真波形与计算波形对比图。由对比可知,计算波形与仿真波形基本一致,验证了模型的正确性。

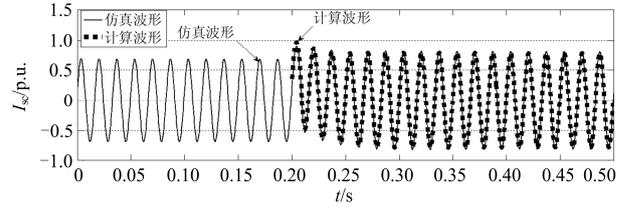
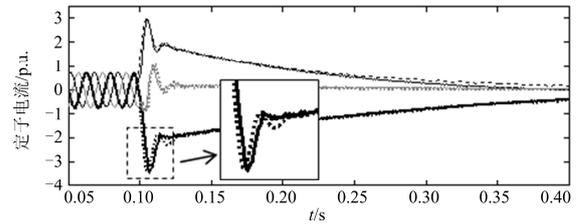
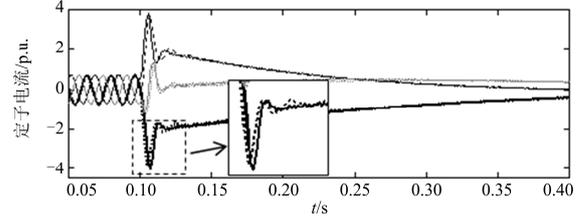


图 5 DFIG 机端电压跌落至 80% 时的定子电流仿真波形与计算波形对比图

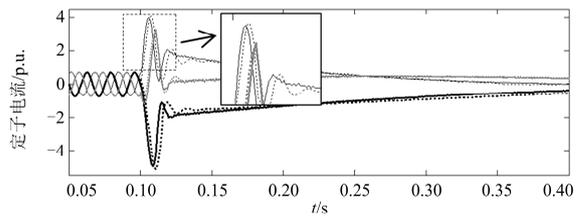
Fig. 5 Comparison of simulation and calculation of stator current waveform when DFIG terminal voltage drops to 80%



(a) 0 s 投入



(b) 5 ms 投入



(c) 10 ms 投入

—A相仿真...A相计算—B相仿真...B相计算—C相仿真...C相计算

图 6 不同时刻投入撬棒仿真波形与计算波形对比

Fig. 6 Simulated and calculated DFIG short-circuit current (different crowbar insertion time)

实际中,撬棒的投入时刻取决于变流器的过载能力,通过检测转子电流或直流母线电压是否超过设定的上限值设计其投切控制策略<sup>[13-14]</sup>。故障后一般在  $T_r/2$  时间内转子电流达到最大值,即故障后  $T_r/2$  时间内触发撬棒投入信号,同时考虑到装置本身的动作延时,共同导致撬棒不会瞬时投入,这给解析模型的建立带来误差<sup>[15]</sup>。通过本文中所提的解析方法,可以计及延时的影响,并通过仿真与计算分析发现,撬棒电路越晚投入则会导致定子短路冲击电流越大,因此控制撬棒投入的上限值的整定应考虑到对定子电流的影响,避免造成定子过电流。

取计算波形与仿真波形的短路电流最大值进行对比, 误差分析如表 1 所示。

表 1 不同时刻投入撬棒仿真波形与计算波形幅值误差  
Table 1 Amplitude errors of simulated waveform and calculated waveform after putting into crowbar in different times

电流幅值/p.u.	0 s	5 ms	10 ms
仿真波形	3.3746	4.0308	5.1148
计算波形	3.3248	3.8998	4.9001
误差	1.48%	3.24%	4.18%

### 3.3 DFIG 联网短路试验结果对比

为更好地分析、评价风电场并网后带来的各种问题, 吉林省电力公司联合众科研生产单位, 在大唐洮南风电场进行了风电机组联网短路试验<sup>[16]</sup>。短路试验设置为 49 号双馈机组定子三相电压完全跌落, 短路发生时, 风速约为 6 m/s, 发电机转速为 1200 r/min。定子线电流有效值约为 144~148 A, 定子线电压超前定子线电流相角度为 27°, 定子相电压与相电流基本同相位, 风电机组运行于恒功率因数方式下, 功率因数为 1。转子电流幅值约为 200 A, 频率约为 12.5 Hz。试验中故障后 4 ms 投入撬棒, 其风电场主要设备参数及定转子电流的试验录波图如附录 D 所示。本文将双馈电机实际参数与短路时的运行工况数据代入所得解析模型中, 得到定、转子三相故障电流波形如图 7 所示。

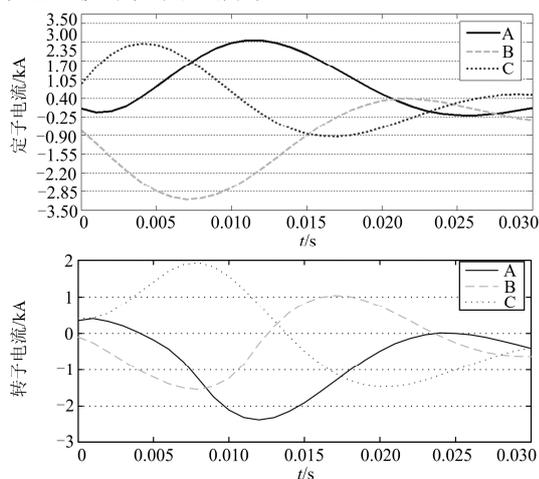


图 7 三相接地短路解析计算波形

Fig. 7 Calculated waveforms during a three-phase to ground fault

试验中, 故障后 B 相定子电流最大值为 3300 A, 约为额定电流有效值(669 A)的 4.193 倍, 转子 A 相电流达到最大值 2200 A, 约为转子额定电流有效值(277 A)的 7.194 倍。定转子电流皆出现了为维持故障前磁链不变的直流分量和为抵消转子旋转磁场对定子磁场影响而产生的与转子旋转频率相同的交流

分量, 频率约为 40 Hz。对比试验录波图与计算所得的波形图可知, 将试验电机参数与初始运行工况数据代入解析计算模型所得结果基本吻合, 进一步验证了解析模型的正确性。

### 3.4 转子电压对故障电流的影响分析

本节通过仿真分析不同故障跌落程度下, 转子电压的实际变化情况。图 8 给出了机端电压跌落至 80% 时转子电压的波动情况。根据波形对比可见, 在机端电压轻微跌落时, 转子电压的波动较小, 可认为基本维持不变。

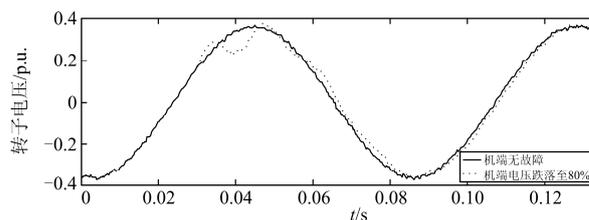


图 8 转子电压波形对比

Fig. 8 Rotor voltage comparison between stator side voltage falling to 80% and no fault

图 9 表示机端电压完全跌落且不投入撬棒, 故障后 10 ms 内转子电压相对正常运行时的波动情况。由仿真可见, 在故障后的 10 ms 内, 转子电压可近似认为不变。

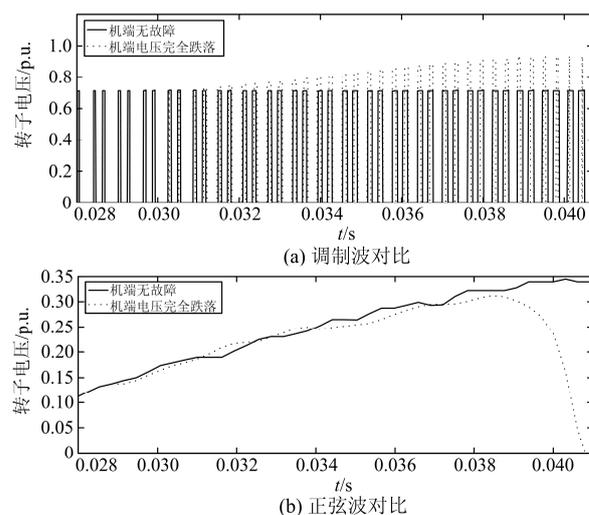


图 9 机端无故障与机端电压完全跌落转子电压波形对比

Fig. 9 Rotor voltage waveform comparison chart

由于控制主要通过转子电压来影响短路电流, 当电压跌落程度较轻时, 转子电压变化程度不大, 解析模型中可用故障前稳态的转子电压代入求解; 当电压跌落程度较深时, 10 ms 内投入撬棒, 同时闭锁变流器, 撬棒投入后变流器对转子电压失去控制作用。

### 4 暂态故障电流影响因素分析

根据所得到的机端三相短路故障下短路电流的解析模型，可以定量分析 DFIG 暂态故障特性。为实际工程中保护的配置与整定提供参考。

#### 4.1 DFIG 运行工况对故障电流幅值的影响分析

转差率  $s$  的大小反映了 DFIG 的出力水平，影响 DFIG 稳态运行时的转子电压及定子电流，即故障的初始状态，而故障后，转差率对故障电流也有直接影响。图 10(a)、图 10 (b)分别为电网电压跌落至 80%不投撬棒与跌落 100%、10 ms 投入撬棒时，定子故障电流最大值与转差率的关系。DFIG 转子转速随转差率增大逐渐减小，DFIG 的出力水平随转速的降低而降低，因此其故障电流幅值也对应减小。

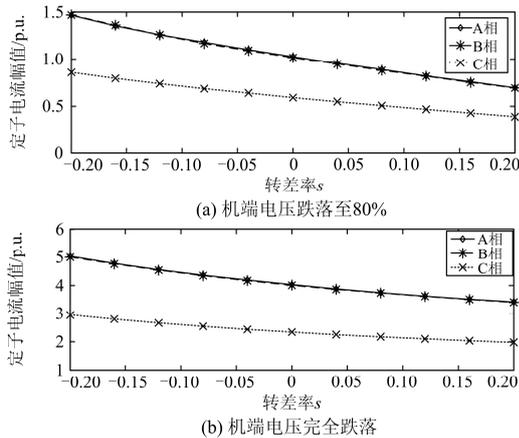


图 10 定子三相电流幅值与转差率的关系

Fig. 10 Relationship between stator three-phase current and the slip

#### 4.2 短路发生时刻对故障电流幅值的影响分析

图 11 表示机端电压完全跌落，转差率  $s=-0.2$  时，故障发生在不同时刻，定子三相短路电流最大值与定子电压 A 相相角初值的关系。由图 11 可知，当初相角在  $0^\circ\sim 360^\circ$  变化时，各相短路电流幅值在  $3\sim 5.6$  p.u. 周期性变化。当故障发生在 A 相相角为  $90^\circ$  的整数倍附近时短路电流较小。

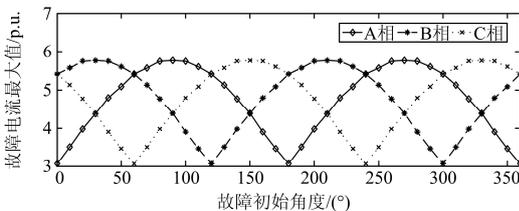


图 11 定子三相短路电流最大值与定子电压 A 相相角初值的关系

Fig. 11 Relationship between the max value of the stator three-phase short-circuit current and the initial phase angle of the stator A phase voltage

#### 4.3 定、转子绕组阻值对故障电流幅值的影响分析

图 12 表示故障电流最大值与转子电阻和定子电阻阻值的关系。典型 1.5 MW 双馈电机的定子和转子绕组阻值约为 0.016 p.u.。由图 12 可见，当定、转子电阻阻值增大至自身阻值的 20~30 倍时，可显著抑制短路电流幅值，但当阻值继续增加时，衰减作用随阻值的增大而增大的不明显。

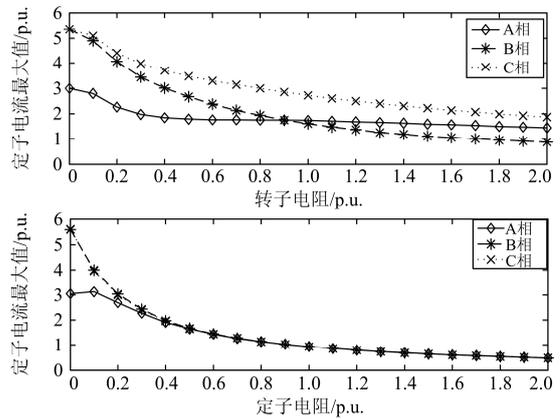


图 12 故障电流最大值与转子电阻和定子电阻阻值的关系  
Fig. 12 Relationship between max value of fault current and the resistance value of the stator and rotor

### 5 结语

本文根据 DFIG 等值电路，结合动态响应理论，利用频域解析的方法，建立了电网故障后不同时刻投入撬棒时的短路电流解析模型，并得到相关结论：

由于控制的作用，机端发生电压跌落时，撬棒电路的投入有一定延时。故障后撬棒保护动作延时越长会导致故障电流越大。

提出从物理过程分段解析的角度建立故障电流解析模型的方法，模型考虑了定、转子绕组电阻对于故障电流的影响，从解析的角度证明了衰减时间常数公式，物理意义较为明晰。

通过解析模型分析可知，撬棒电阻阻值为转子电阻的 20~30 倍时，可显著抑制短路电流，但阻值继续增大不会提高其对短路电流的抑制效果。

运行方式与控制策略均会影响故障电流。控制策略的影响与该策略的控制目标有关。应用文中的建模方法，可进一步从转子电压的角度嵌入解析控制策略对短路电流的影响，有关工作有待深入研究。

#### 附录 A

$$M_{sn} = \frac{1}{R_s + j\omega_0 L_s + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_r / s + j\omega_0 L_r}}$$

$$N_{sn} = \frac{-\frac{j\omega_0 L_m}{R_r / s + j\omega_0 L_r}}{R_s + j\omega_0 L_s + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_r / s + j\omega_0 L_r}}$$

$$M_m = \frac{-\frac{j\omega_0 L_m}{R_s + j\omega_0 L_s}}{\frac{R_r}{s} + j\omega_0 L_r + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_s + j\omega_0 L_s}}$$

$$N_m = \frac{1}{\frac{R_r}{s} + j\omega_0 L_r + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_s + j\omega_0 L_s}}$$

## 附录 B

机端发生对称性跌落故障时定子、转子故障电流各频率分量系数如下所示。

定子电流基频强迫分量系数:

$$A_s = \frac{R_r + js\omega_0 L_r}{(j\omega_0 + \frac{1}{T_s})(js\omega_0 + \frac{1}{T_r})}$$

定子电流直流衰减分量系数:

$$B_s = \frac{-L_r + A_s(js\omega_0 + \frac{1}{T_r})}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r}}$$

定子电流转速频率衰减分量系数:

$$C_s = \frac{L_r - A_s(j\omega_0 + \frac{1}{T_s})}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r}}$$

转子电流差频强迫分量系数:

$$A_r = \frac{js\omega_0 L_m}{(j\omega_0 + \frac{1}{T_s})(js\omega_0 + \frac{1}{T_r})}$$

转子电流转速频率衰减分量系数:

$$B_r = \frac{L_m - A_r(js\omega_0 + \frac{1}{T_r})}{js\omega_0 + \frac{1}{T_r} - j\omega_0 - \frac{1}{T_s}}$$

转子电流直流衰减分量系数:

$$C_r = \frac{-L_m + A_r(j\omega_0 + \frac{1}{T_s})}{js\omega_0 + \frac{1}{T_r} - j\omega_0 - \frac{1}{T_s}}$$

定子电流基频强迫分量系数:

$$A_{s,r} = \frac{j\omega_0 L_m}{(j\omega_0 + \frac{1}{T_s})(js\omega_0 + \frac{1}{T_r})}$$

定子电流直流衰减分量系数:

$$B_{s,r} = \frac{-L_m + A_s(js\omega_0 + \frac{1}{T_r})}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r}}$$

定子电流转速频率衰减分量系数:

$$C_{s,r} = \frac{L_m - A_s(j\omega_0 + \frac{1}{T_s})}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r}}$$

定子电流直流衰减分量系数:

$$B_{s,s0} = \frac{[j(1-s)\omega_0 + \frac{1}{T_s}]L_r - R_r^c}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r^c}}$$

定子电流转速频率衰减分量系数:

$$C_{s,s0} = \frac{R_r^c - \frac{1}{T_r^c} L_r}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r^c}}$$

定子电流直流衰减分量系数:

$$B_{s,r0} = \frac{\frac{1}{T_s}}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r^c}}$$

定子电流转速频率衰减分量系数:

$$C_{s,r0} = \frac{j(1-s)\omega_0 - \frac{1}{T_r^c}}{j\omega_0 + \frac{1}{T_s} - js\omega_0 - \frac{1}{T_r^c}}$$

## 附录 C

附表 1 1.5 MW 双馈感应发电机参数

Table 1 Parameters of 1.5 MW doubly fed induction generator

项目	数值	项目	数值
额定功率	1.5 MW	定子电阻	0.016 Ω
额定定子线电压	575 V	定子转子匝数比	0.373
额定转速	1500 rpm	转子电阻	0.0125 Ω
极对数	2	转子电抗	0.115 Ω
定子电抗	0.017 Ω	励磁电抗	5.47 Ω
定子额定电流	669 A	转子额定电流	277 A

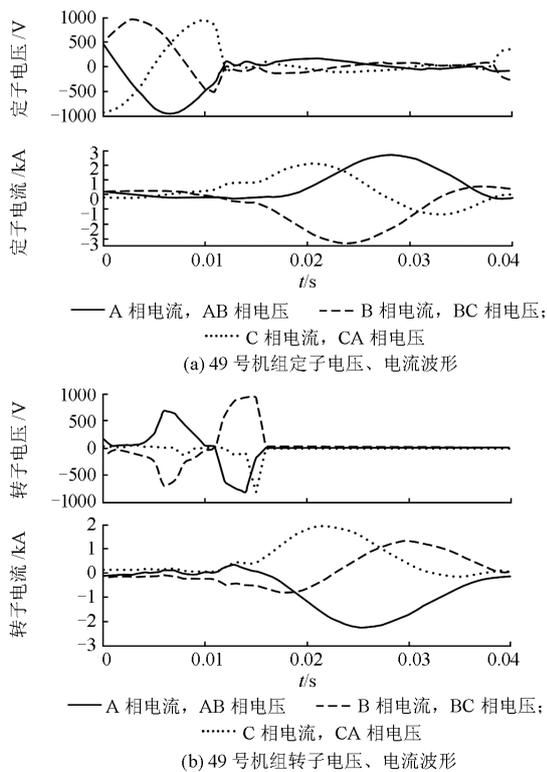
附录 D

附表 2 洮南风电场主要设备参数

Table 2 Main parameters of Taonan wind farm

设备名	参数
风力机	$\Phi=58\text{ m}$ , $V_{\text{min}}=3\text{ m/s}$ , $V_{\text{max}}=21\text{ m/s}$
双馈感应发电机	$P_N=800\text{ kW}$ , $U_{\text{LL}}=690\text{ V}$ , $\Omega_1=1500\text{ rpm}$ , $P=2$ , $N_s:N_r=0.373$ , $R_1=0.016\ \Omega$ , $X_1=0.017\ \Omega$ , $R_2'=0.0125\ \Omega$ , $X_2'=0.115\ \Omega$ , $R_m=215\ \Omega$ , $X_m=5.47\ \Omega$
双馈感应风电机组变流器	$E_{\text{dc}}=800\text{ V}$ , $C=30\ 000\ \mu\text{F}$ , 二电平 VSI, $S_{C1}=S_{C2}=64\text{ kVA}$
风电机组出口变	T_1 -58 $U_1/U_2=690\text{V}/10.5\text{ kV}$ , $S_n=0.9\text{ MVA}$ , $U_k\%=6.04$ , Y/d-11
风电场出口变	T1 (2) $U_1/U_2=10.5\text{ kV}/66\text{ kV}$ , $S_n=31.5\text{ MVA}$ , $U_k\%=9.19$ , d/Y-11

洮南风电场三相接地短路试验录波图:



附图 1 洮南风电场三相接地短路试验录波图

Fig. 1 Recorded waveforms during a three-phase to ground fault of Taonan wind farm

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] 王晓兰, 孙万义. 双馈风力发电机在不同电网故障下的动态响应仿真研究[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 170-175.

WANG Xiaolan, SUN Wanyi. Simulation study on dynamic response of doubly fed induction generators during system voltage sag caused by power grid faults[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 170-175.

[3] 郑涛, 李娟, 杨国生. 计及不同电网电压跌落程度的双馈风电机组定子电流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 81-87.

ZHENG Tao, LI Juan, YANG Guosheng. Stator current analysis of doubly-fed induction generators considering different grid voltage dip levels[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 81-87.

[4] 石一辉, 鲁宗相, 闵勇, 等. 双馈感应发电机三相短路电流解析计算模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 38-43.

SHI Yihui, LU Zhongxiang, MIN Yong, et al. Practical calculation model of three-phase short-circuit current for doubly-fed induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 38-43.

[5] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85-89.

YANG Shuying, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Electro-magnetic transition of doubly fed wind turbines initiated by voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 85-89.

[6] VICATOS M S, TEGOPOULOS J A. Transient state analysis of a doubly fed induction generator under three phase short circuit[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(1): 62-68.

[7] 张建华, 陈星莺, 刘皓明, 等. 双馈风力发电机三相短路分析及短路器最大电阻整定[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 6-10.

ZHANG Jianhua, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Three-phase short-circuit analysis for double-fed wind-driven generator and short-circuiter maximal resistance calculation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 6-10.

[8] 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): 1610-1618.

[9] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压

- 穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.
- ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [10] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36.
- XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36.
- [11] FEIJOO A, CIDRAS J, CARRILLO C. A third order model for the doubly fed induction machine[J]. Electric Power Systems Research, 2000(56): 121-127.
- [12] 王燕萍, 郑涛, 王增平, 等. 不同转差率对双馈风机撬棒投入后的短路电流影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 8-14.
- WANG Yanping, ZHENG Tao, WANG Zengping, et al. Impact analysis of different slips on the short circuit current of DFIG after crowbar operation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 8-14.
- [13] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-131.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-131.
- [14] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [15] 樊江川. 考虑低电压穿越的双馈风力发电机组电磁暂态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- FAN Jiangchuan. Study on electromagnetic transient characteristics of doubly-fed wind turbine considering low voltage ride through[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [16] 王晓波, 严干贵, 郑太一, 等. 双馈感应风电机组联网运行仿真及实证分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 87-91.
- WANG Xiaobo, YAN Gangui, ZHENG Taiyi, et al. Simulation and experimental analysis on the grid connected doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 87-91.

收稿日期: 2016-03-08; 修回日期: 2016-04-28

作者简介:

王增平(1964-), 男, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: Wangzp1103@sina.com

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

(编辑 魏小丽)