

# 单相接地故障下双馈感应发电机短路电流计算

潘文霞<sup>1</sup>, 刘明洋<sup>1</sup>, 张艺博<sup>1</sup>, 杨 刚<sup>1</sup>, 郭家圣<sup>1</sup>, 杨 川<sup>2</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 210098; 2. 国家电网公司扬州市供电公司, 扬州 225000)

**摘 要:** 当发生单相接地短路故障时,双馈感应发电机(DFIG)的暂态特性与普通的异步发电机有着较大区别。因此基于DFIG的暂态模型,采用对称分量法得到含撬棒电阻的正、负序等值电路,进而分析单相接地故障下,DFIG短路电流的瞬时值、最大值以及周期分量有效值的计算公式。最后对比PSCAD/EMTDC软件中的仿真结果,验证该文所推导出的单相接地故障下DFIG短路电流计算公式的准确性。

**关键词:** 双馈风电机组; 短路电流; 撬棒保护; 对称分量法

**中图分类号:** TM744

**文献标识码:** A

## 0 引 言

传统的化石能源已不能满足人类现代社会的发展需求,具有可持续发展特性的可再生能源越来越受到重视。近年来,风力发电技术作为可再生能源利用的重要形式而得到大力发展<sup>[1,2]</sup>。随着变频恒速技术的发展,双馈感应发电机(DFIG)在风力发电中得到广泛应用<sup>[3,4]</sup>。然而,日益增加的风电并网容量给电网的安全稳定运行构成威胁,由低电压故障引起的风电机组脱网事故可能造成电网电压和频率崩溃<sup>[5,6]</sup>。为此,世界各国的电网运营商均要求接入电网的风电机组必须具备低电压穿越能力(LVRT)<sup>[7]</sup>。

现有的 LVRT 技术中,在转子侧增加撬棒电阻保护装置作为一种硬件保护方案得到较为广泛的应用<sup>[8,9]</sup>。电网短路故障发生后,在转子回路中接入撬棒电阻可使得转子侧的过电流迅速衰减<sup>[10]</sup>。

目前针对不对称故障下双馈感应发电机的短路电流的研究较少。文献[11]提出暂态下的 DFIG 正、负序空间矢量坐标系下的数学模型,通过求解磁链微分方程,分析 DFIG 不对称故障下的短路电流特性。文献[12]通过叠加原理及拉氏变换与反变换,在两项静止坐标系下分析 DFIG 单相短路接地故障下的定、转子电流表达式。文献[13]通过对定子绕组磁链进行定量分析,在两项静止坐标系下提出其简化计算模型,并基于此导出故障后的稳态

基频电流分量和衰减转速频率分量的计算公式。但上述研究的解析过程和结果均较为复杂。

本文利用对称分量法得到正、负序情况下含撬棒电阻的 DFIG 暂态等值电路。然后以 DFIG 正、负序暂态等值电路为基础,从正、负序角度上分别推导出 DFIG 单相接地短路情况下的短路相正、负序短路电流公式,确定故障发生之前的初值情况,并推导短路相短路电流的最大值表达式和周期分量有效值表达式。最后通过仿真验证本文所提计算公式的正确性。

## 1 双馈感应发电机模型建立

### 1.1 双馈感应发电机含撬棒电阻元件暂态模型

单台双馈感应发电机接入电力系统的基本结构如图 1 所示。

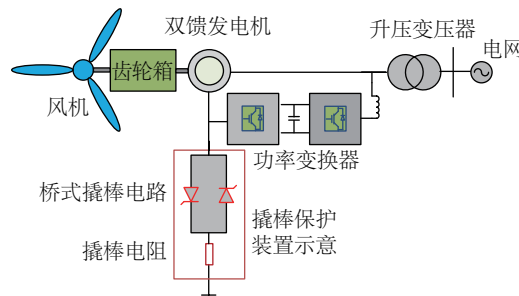


图1 双馈风电机组简单系统示意图

Fig. 1 Diagram of simple doubly-fed wind turbines system

收稿日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(51377047); 江苏高校优势学科建设工程

通信作者: 刘明洋(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事可再生能源发电技术方面的研究。hhulmy@126.com

设DFIG为理想电机,且定、转子4绕组的电压、电流及磁链正方向均采用电动机惯例,并将所有电气量折算至定子侧<sup>[14]</sup>。则在空间同步旋转坐标系中,DFIG的电磁暂态方程可以描述为<sup>[15]</sup>:

$$u_s = R_s i_s + j\omega_s \psi_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$u_r = R_r i_r + j\omega_p \psi_r + \frac{d\psi_r}{dt} \quad (2)$$

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (3)$$

$$\psi_r = L_m i_s + L_r i_r \quad (4)$$

忽略撬棒保护的动作时间<sup>[16]</sup>,则故障发生后,转子侧的电阻立即变为 $R_r + R_{CB}$ ,式(2)即变为<sup>[11]</sup>:

$$u_r = (R_r + R_{CB}) i_r + j\omega_p \psi_r + \frac{d\psi_r}{dt} \quad (5)$$

式(1)~式(5)中变量的具体含义见文献[17]。根据故障后的定转子电压和磁链式(1)和式(3)~式(5),得到如图2所示的暂态等值电路。

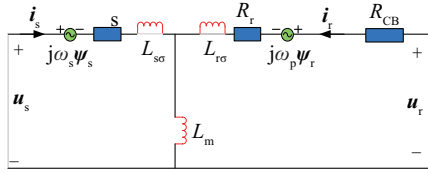


图2 含撬棒电阻元件的DFIG暂态等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DFIG with the element of crowbar resistance for transient analysis

## 1.2 双馈感应发电机正、负序等值电路模型

当电网单相接地短路故障发生在DFIG机端时,故障点的不对称性会造成系统中电流和电压的不对称。对于这种情况,通常采用对称分量法来处理。

由对称分量法可知:正序网的网络结构与正常运行时相同,电阻和电抗都保持不变。且电压和电流变成正序分量,如图3所示。其中, $u_{sp}$ 为定子侧正序电压分量; $i_{sp}$ 为定子侧正序电流分量; $u_{rp}$ 为转子侧正序电压分量; $i_{rp}$ 为转子侧正序电流分量。

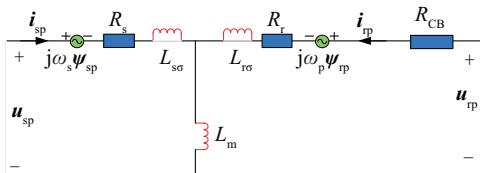


图3 暂态正序等值电路模型

Fig. 3 The model of transient positive equivalent circuit

同理,对于负序网,电阻保持不变,电抗反向。且电压和电流均为负序分量,如图4所示。其中, $u_{sn}$ 为定子侧负序电压分量; $i_{sn}$ 为定子侧负序电流分量; $u_{rn}$ 为转子侧负序电压分量; $i_{rn}$ 为转子侧负序电流分量。

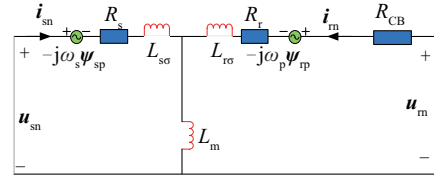


图4 暂态负序等值电路模型

Fig. 4 The model of transient negative equivalent circuit

根据图3和图4,可得到正负序下的DFIG电磁暂态方程:

$$\begin{cases} u_{sp} = R_s i_{sp} + j\omega_s \psi_{sp} + \frac{d\psi_{sp}}{dt} \\ u_{rp} = (R_r + R_{CB}) i_{rp} + j\omega_p \psi_{rp} + \frac{d\psi_{rp}}{dt} \\ \psi_{sp} = L_s i_{sp} + L_m i_{rp} \\ \psi_{rp} = L_m i_{sp} + L_r i_{rp} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{sn} = R_s i_{sn} - j\omega_s \psi_{sn} + \frac{d\psi_{sn}}{dt} \\ u_{rn} = (R_r + R_{CB}) i_{rn} - j(\omega_s + \omega_r) \psi_{rn} + \frac{d\psi_{rn}}{dt} \\ \psi_{sn} = L_s i_{sn} + L_m i_{rn} \\ \psi_{rn} = L_m i_{sn} + L_r i_{rn} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)和式(7)以及图3和图4构成了单相接地短路下,DFIG的计及撬棒的正序暂态等值电路和负序暂态等值电路模型。借助于该模型,可对单相接地短路电流进行分析。

## 2 双馈感应发电机单相接地短路分析

### 2.1 短路初值分析

假设故障发生在 $t=0$ 时刻,则短路前同步旋转坐标系下的定子电压矢量 $u_{s0}$ 可表示为:

$$u_{s0} = U_{s0} e^{j\alpha} \quad (8)$$

式中, $U_{s0}$ 、 $\alpha$ ——稳态运行时定子电压幅值和定子a相电压的初相角。

故障后定、转子侧磁链初值分别可表示为<sup>[17]</sup>:

$$\psi_{s0} = \frac{u_{s0}}{j\omega_s} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
\psi_r &= L_m \dot{i}_s + L_r \dot{i}_r \\
&= L_r (\dot{i}_s + \dot{i}_r) - L_{\sigma r} \dot{i}_s \\
&= \frac{L_r}{j\omega_s L_m} \left[ j\omega_s L_m (\dot{i}_s + \dot{i}_r) - \frac{j\omega_s L_m L_{\sigma r}}{L_r} \dot{i}_s \right] \\
&= \frac{L_r}{j\omega_s L_m} \left[ u_s - R_s \dot{i}_s - \frac{d\psi_s}{dt} - j\omega_s L_{\sigma r} \dot{i}_s - \frac{j\omega_s L_m L_{\sigma r}}{L_r} \dot{i}_s \right] \\
\Rightarrow \psi_{r0} &= \frac{L_r}{j\omega_s L_m} (u_{s0} - Z_s' \dot{i}_{s0}) \quad (10)
\end{aligned}$$

式中,  $i_{s0}$ ——定子电流矢量初值,  $Z_s' = R_s + j\omega_s L_s'$ 。

## 2.2 正、负序等效电路下的短路分析

单相接地故障的瞬间,忽略定子电压相位跳变,发电机定子侧三相的电压产生了不同程度的降落,为了方便描述短路后 a、b、c 三相的电压,下面定义各项的压降系数:

$$K_a = \frac{u_{sa}}{u_{s0}} \quad (11)$$

$$K_b = \frac{u_{sb}}{a^2 u_{s0}} \quad (12)$$

$$K_c = \frac{u_{sc}}{a u_{s0}} \quad (13)$$

式中,  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$  和  $u_{sc}$ ——短路后 a、b、c 三相定子侧电压相量;  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 。根据对称分量法,由将  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$  和  $u_{sc}$  转换为正负零序电压:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

DFIG 机组的绕组一般采用星形接法且中性点不接地,故不存在零序分量的流通回路,只需求解正序和负序分量即可。根据式(14),正、负序电压可表示为:

$$\begin{aligned}
u_1 &= \frac{1}{3} (u_{sa} + a u_{sb} + a^2 u_{sc}) \\
&= \frac{(K_a + K_b + K_c)}{3} u_{s0} = \frac{A}{3} u_{s0} \quad (15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_2 &= \frac{1}{3} (u_{sa} + a^2 u_{sb} + a u_{sc}) \\
&= \frac{u_{s0}}{3} [K_a + K_b (j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}) + K_c (-j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2})] \quad (16) \\
&= \frac{B u_{s0}}{3}
\end{aligned}$$

式中,  $A$ 、 $B$ ——正、负序压降系数。

类似于电压,磁链也可以分解为正、负序分量。将  $\psi_{s0}$  和  $\psi_{r0}$  分解,得到正、负序磁链初值:

$$\psi_{sp0} = \frac{u_{s0}}{j\omega_s} \quad (17)$$

$$\psi_{sn0} = 0 \quad (18)$$

$$\psi_{rp0} = \frac{L_r}{j\omega_s L_m} (u_{s0} - Z_s' \dot{i}_{s0}) \quad (19)$$

$$\psi_{rn0} = 0 \quad (20)$$

故障后,正、负序定子磁链的工频分量可表示为:

$$\psi_{spf} = \frac{u_1}{j\omega_s} = \frac{\frac{A}{3} u_{s0}}{j\omega_s} \quad (21)$$

$$\psi_{snf} = -\frac{u_2}{j\omega_s} = -\frac{\frac{B}{3} u_{s0}}{j\omega_s} \quad (22)$$

由于磁链不会突变,因此在故障后的定子磁链正、负序分量中必然存在以暂态时间常数  $\tau_s = L_s' / R_s$  衰减的直流分量,分别可以表示为:

$$\psi_{spdc} = \frac{(1 - \frac{A}{3}) u_{s0}}{j\omega_s} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (23)$$

$$\psi_{sndc} = \frac{\frac{B}{3} u_{s0}}{j\omega_s} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (24)$$

综合式(21)~式(24),故障后,定子侧正、负序磁链表达式为:

$$\psi_{sp} = \frac{\frac{A}{3} u_{s0}}{j\omega_s} + \frac{(1 - \frac{A}{3}) u_{s0}}{j\omega_s} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (25)$$

$$\psi_{sn} = -\frac{\frac{B}{3} u_{s0}}{j\omega_s} + \frac{\frac{B}{3} u_{s0}}{j\omega_s} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (26)$$

假设在短路故障发生后的瞬间,在投入撬棒的同时给转子侧变流器闭锁信号,则转子侧电压突降为零。因此,故障后正、负序转子磁链的工频分量可以表示为:

$$\psi_{rpf} = \psi_{rnf} = 0 \quad (27)$$

由于磁链守恒,转子侧正序磁链中会产生一个以暂态时间常数  $\tau_r' = L_r' / (R_r + R_{cb})$  衰减并以近似于同步旋转转速  $\omega_s$  的频率变化的衰减的周期分量<sup>[17]</sup>。因此,故障后的转子侧正、负序磁链可以表示为(折算到定子侧):

$$\psi_{rp} = \frac{L_r}{j\omega_s L_m} (u_{s0} - Z_s' \dot{i}_{s0}) e^{-\frac{t}{\tau_r'}} \quad (28)$$

$$\psi_{rn} = 0 \quad (29)$$

根据式(6)、式(7)、式(25)~式(29)可得到

DFIG 单相接地正、负序短路电流的表达式:

$$\mathbf{i}_{sp} = \frac{\frac{A}{3}\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} + \frac{(1-\frac{A}{3})\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \frac{(\mathbf{u}_{s0} - Z_s' \mathbf{i}_{s0})}{j\omega_s L_s'} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (30)$$

$$\mathbf{i}_{sn} = -\frac{\frac{B}{3}\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} + \frac{\frac{B}{3}\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (31)$$

式中,  $L_s'$ ——定子绕组暂态电感, 且  $L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$ 。

根据空间矢量的定义, 可得单相接地故障后, a 相电流的瞬时值表达式:

$$\mathbf{i}_{sa} = \text{Re} \left[ \frac{\frac{A}{3}\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} e^{j\omega_s t} + \frac{(1-\frac{A}{3})\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \frac{(\mathbf{u}_{s0} - Z_s' \mathbf{i}_{s0})}{j\omega_s L_s'} e^{-\frac{t}{\tau_s}} e^{j\omega_s t} + \frac{\frac{B}{3}}{j\omega_s L_s'} (-\mathbf{u}_{s0} e^{j\omega_s t} + \mathbf{u}_{s0} e^{-\frac{t}{\tau_s}}) \right] \quad (32)$$

当时间取  $t = T/2 = 0.01 \text{ s}$  [18], 初相角  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  时, a 相短路电流取得最大值, 可表示为(忽略定子电阻):

$$\mathbf{i}_{samax} = \text{Re} \left[ \frac{\frac{A}{3}\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} e^{j\omega_s \frac{T}{2}} + \frac{(1-\frac{A}{3})\mathbf{u}_{s0}}{j\omega_s L_s'} e^{-\frac{T}{2\tau_s}} - \frac{(\mathbf{u}_{s0} - Z_s' \mathbf{i}_{s0})}{j\omega_s L_s'} e^{-\frac{T}{2\tau_s}} e^{j\omega_s \frac{T}{2}} + \frac{\frac{B}{3}}{j\omega_s L_s'} (-\mathbf{u}_{s0} e^{j\omega_s \frac{T}{2}} + \mathbf{u}_{s0} e^{-\frac{T}{2\tau_s}}) \right] \quad (33)$$

根据式(33), 可推导故障时 DFIG 短路电流的周期分量有效值的表达式为:

$$I_{savmr} = \left| \frac{\frac{A}{3}U_{s0}}{\sqrt{2}\omega_s L_s'} - \frac{U_{s0} - |Z_s'|I_{s0}}{\sqrt{2}\omega_s L_s'} + \left| \frac{B}{3}U_{s0} \right| \right| \quad (34)$$

### 3 仿真分析

按照图 1 所示的简单系统, 用 PSCAD/EMTDC 搭建 1 MW 双馈感应电机暂态仿真模型, 仿真平台结构图如图 5。仿真中所用的主要参数见表 1。由于短路故障发生后迅速将其切除, 因此可认为风电机组的控制系统并未对故障前、后的风速产生影响。假设故障前风速为 8 m/s 且定子侧的单相接地

故障发生在  $t = 1.01 \text{ s}$ 。

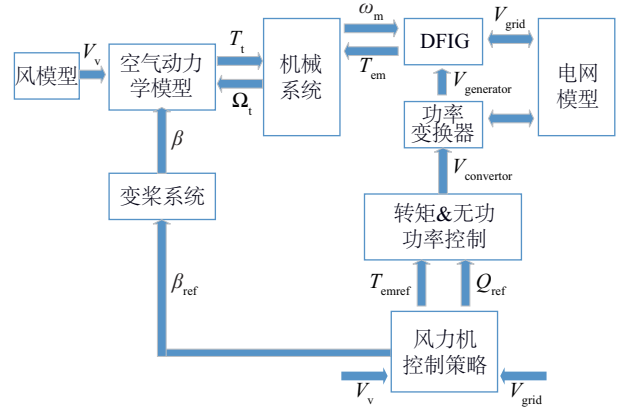


图5 仿真平台结构图

Fig. 5 The structure of simulation platform

表1 1台1 MW DFIG参数

Table 1 Parameters of the 1 MW DFIG

参数	数值	参数	数值
$L_{sr}/\text{pu}$	0.10	$R_s/\text{pu}$	0.0054
$L_{tr}/\text{pu}$	0.11	$R_r/\text{pu}$	0.00607
$L_m/\text{pu}$	4.5	$R_{CB}/\text{pu}$	0.03
$U_N/\text{V}$	690	$P_N/\text{MW}$	1

利用搭建的 1 MW DFIG 暂态模型进行仿真, 结果如图 6 和表 2 所示。从图 6 可很明显看出: 单相接地故障下的短路电流在短路故障发生后约半个周期(约为 0.01 s)达到最大值, 随后即迅速衰减。表 2 对比了仿真值和本文公式计算值, 可看出本文所提出的短路电流计算公式有良好的准确性。另外从图 6 和表 2 也可发现, 计算值和仿真值之间有一定误差, 造成这种误差的原因可能是: 1) 与 PSCAD/EMTDC 所采用的五阶模型系统相比, 三阶的物理方程就精度上来讲, 有一些差距是可以接受

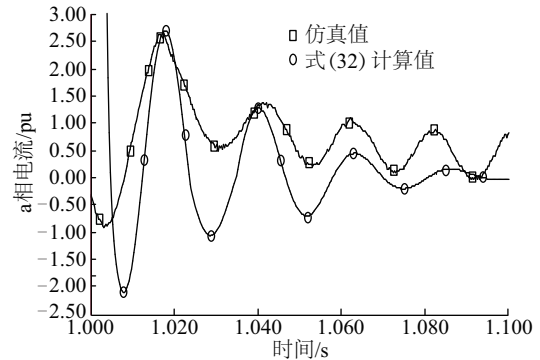


图6 定子侧短路电流仿真

Fig. 6 DFIG's stator short circuit current simulation

的;2)本文的重点在于考虑 DFIG 定子侧短路电流最严重时的情况,此时的短路电流的最大值可用来校核各种设备。因此,公式计算值应略大于仿真的近似真值,来保证设备校核的绝对安全。

表2 在定子侧短路电流达到最大时,比较仿真值和式(33)、式(34)计算值

Table 2 The comparison of the simulation values and formula 33 and 34 when the DFIG's stator short circuit current achieve maximum

短路电流	仿真值/pu	式(33)和式(34) 计算值/pu	相对误差 百分比/%
最大值	2.6370	2.7176	3.06
周期分量 有效值	0.7916	0.7517	-5.04

## 4 结 论

本文基于 DFIG 暂态等值电路,分析电网不对称故障下 DFIG 计及撬棒正、负序暂态等值电路的模型。然后,从正、负序角度上推导 DFIG 单相接地短路下相关的短路电流公式。PSCAD 仿真表明:本文所提出的单相接地短路电流的最大值表达式和周期分量有效值表达式正确可行,可为风电场的工程设计提供参考依据。

### [参考文献]

- [1] Gao Z, Tang C, Zhou X, et al. An overview on development of wind power generation[A]. Control and Decision Conference (CCDC), 2016[C], Yinchuan, China, 2016, 435—439.
- [2] Sun S, Liu F, Xue S, et al. Review on wind power development in China: Current situation and improvement strategies to realize future development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45(5): 589—599.
- [3] Rahimi M, Parniani M. Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(2): 184—195.
- [4] 李文津, 汤广福, 康 勇, 等. 基于 VSC-HVDC 的双馈式变速恒频风电机组启动及并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1864—1873.
- [4] Li Wenjin, Tang Guangfu, Kang Yong, et al. Starting up and integration control of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator based on VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1864—1873.
- [5] 年 珩, 程 鹏, 贺益康. 故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4184—4197.
- [5] Nian Heng, Cheng Peng, He Yikang. Review on operation techniques for DFIG-based wind energy conversion systems under network faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4184—4197.
- [6] 叶 希, 鲁宗相, 乔 颖, 等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 11—17.
- [6] Ye Xi, Lu Zongxiang, Qiao Ying, et al. A primary analysis on mechanism of large scale cascading trip-off of wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 11—17.
- [7] GB/T 19963—2005, 风电场接入电力系统技术规定[S].
- [7] GB/T 19963—2005, Technical rule for connecting wind farm to power network[S].
- [8] 贺益康, 胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1—15.
- [8] He Yikang, Hu Jiabing. Several hot-spot issues associated with the grid-connected operations of wind-turbine driven doubly fed induction generators[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(27): 1—15.
- [9] 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.
- [9] Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(25): 1—9.
- [10] Akhmatov V. Induction generators for wind power[M]. Multi-Science Publishing Company Ltd., 2005, 156—183.
- [11] 郑 涛, 魏占朋, 李 娟, 等. 计及撬棒保护的双馈风电机组不对称短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 7—12.
- [11] Zheng Tao, Wei Zhanpeng, Li Juan, et al. Unsymmetrical short circuit current analysis of doubly fed induction generators with crowbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 7—12.



- 7—12.
- [12] 沈浩然, 张建华, 丁磊, 等. 双馈异步发电机单相接地故障瞬态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 6—11.
- [12] Shen Haoran, Zhang Jianhua, Ding Lei, et al. Transient characteristic research of doubly-fed induction generator during single-phase grounding fault [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 6—11.
- [13] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1—10.
- [13] Kong Xiangping, Zhang Zhe, Yin Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1—10.
- [14] 邢鲁华, 陈青, 吴长静, 等. 含双馈风电机组的电力系统短路电流实用计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1121—1127.
- [14] Xing Luhua, Chen Qing, Wu Changjing, et al. A practical method to calculate short-circuit current in power system connected with doubly fed induction generators [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1121—1127.
- [15] Abad G, López J, Rodríguez M, et al. Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation [M]. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2011, 166—190.
- [16] 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.
- [17] 潘文霞, 杨刚, 刘明洋, 等. 考虑Crowbar电阻的双馈电机短路电流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3629—3634.
- [17] Pan Wenxia, Yang Gang, Liu Mingyang, et al. Calculation of short-circuit current of DFIG with the considering of Crowbar resistance [J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(13): 3629—3634.
- [18] Muljadi E, Gevorgian V. Short-circuit modeling of a wind power plant [A]. Proceedings of the 2011 IEEE PES General Meeting: The Electrification of Transportation and the Grid of the Future [C], Detroit, MI, United States, 2011.

## CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENT OF DFIG UNDER SINGLE-PHASE TO GROUND FAULT

Pan Wenxia<sup>1</sup>, Liu Mingyang<sup>1</sup>, Zhang Yibo<sup>1</sup>, Yang Gang<sup>1</sup>, Guo Jiasheng<sup>1</sup>, Yang Chuan<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** When the single-phase to ground fault occurs, the transient characteristics of the doubly fed induction generator (DFIG) are different from the common asynchronous generator. Therefore, in this paper, the positive and negative sequence equivalent circuit of DFIG with crowbar resistance was estimated by using the symmetrical component method on the basis of the DFIG transient model. Then the instantaneous maximum value and the effective value of the periodic component of DFIG short-circuit current were analyzed. Finally, the accuracy of the calculation formula of the DFIG single phase grounding fault proposed was verified in comparison with the simulation results of PSCAD/EMTDC.

**Keywords:** double fed wind turbine; short circuit currents; crowbar protection; symmetrical component method