

不同转差率对双馈风机撬棒投入后的短路电流影响分析

王燕萍¹, 郑涛¹, 王增平¹, 曹雅榕¹, 朱时雨¹, 杨国生²

(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. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 故障前风机的运行状态会影响低电压穿越运行时双馈风机的短路电流, 其中风机的转速是非常重要的一个影响因素。根据磁链守恒推导出了电网发生三相对称短路故障时考虑撬棒电路作用下的双馈风机短路电流表达式, 从短路电流的周期分量、暂态直流分量和衰减的转速频率分量详细分析了转差率是如何影响撬棒电路作用下的风机短路电流特性的。并在 PSCAD 平台上搭建了 30 kW 的双馈风机模型, 仿真验证了理论分析的正确性。所得结论为更加深入分析双馈风机的故障特性, 探究短路电流的影响因素提供理论基础, 有利于保护整定计算的研究。

关键词: 撬棒电路; 双馈风机; 转差率; 短路电流; 故障特性

Impact analysis of different slips on the short circuit current of DFIG after crowbar operation

WANG Yanping¹, ZHENG Tao¹, WANG Zengping¹, CAO Yarong¹, ZHU Shiyu¹, YANG Guosheng²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Running state before the failure will affect the short-circuit current of doubly fed induction generator (DFIG) which operates in low voltage ride through, and the speed of the wind turbine is a very important factor. Considering the crowbar circuit, based on the conservation of flux, this paper derives the expression of short-circuit current when three-phase short-circuit fault occurs. A detailed analysis of how the slip affects the short-circuit current's characteristics from the periodic component, the DC component and speed transient attenuation frequency components is made. And PSCAD is used to build a 30 kW double-fed wind turbine model, the simulation results verify the theoretical analysis is correct. The conclusions provide a theoretical basis for more in-depth analysis of failure characteristics of DFIG and factors of the short-circuit current. It is conducive to the research of protection setting computing.

Key words: crowbar circuit; DFIG; slip; short-circuit current; fault characteristics

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0008-07

0 引言

近年来, 风电机组脱网事故频发, 给电网的安全稳定运行造成了严重影响。作为应用最广泛的双馈风电机组(DFIG), 其并网技术成为了当前电力系统研究的热点^[1-2]。由于双馈风机特殊的结构, 其故障暂态特性不同于传统同步电机, 对电网保护的整定计算与配置产生不利影响, 急需对双馈风机的暂态特性进行深入研究^[3-5]。目前, 双馈风机接入配电网后故障程度不深时, 主要靠风机本身的控制策略实现并网运行^[6]; 当故障严重造成机端电压跌落较深时, 转子绕组中会产生很大的短路冲击电流导致转子变频器过流, 严重时会造成变频器甚至造成风电机组脱网运行^[7]。此时一般采用在转子回路里串

接撬棒电路, 将转子侧经撬棒电阻短路以实现风机低电压穿越运行^[8-10]。

文献[11]提出当双馈机组作故障穿越运行时, 其馈入电网的故障电流具有“多态”变化特征, 将改变电网的故障特性。论述了故障点距离、Crowbar保护动作门槛值以及励磁逆变器控制系数等因素对双馈风机短路电流特性的影响。但实际影响因素并不止这些, 变流器控制策略、运行工况、风速、有功无功输出水平、负载大小、故障发生时间等因素均对双馈风机电磁暂态特性有影响。文献[12]根据双馈风力发电机内部的电磁关系, 分析了发电机故障前不同转速、输出有功功率及无功功率等运行状态对双馈发电机短路电流的影响。但其简单地认为故障后转子侧直接短路, 并没有考虑 Crowbar 电

阻的影响。因此其分析结果并不能真正反映撬棒电路作用时各因素对短路电流的影响。

考虑到现有研究缺少具体分析严重故障情况下考虑撬棒电路作用时不同转差率对风机短路电流的影响, 本文根据磁链守恒推导出两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中电网发生三相对称短路故障时考虑撬棒电路作用下的短路电流表达式, 从短路电流的周期分量、暂态直流分量和衰减的转速频率分量详细分析转差是如何影响撬棒电路作用下的短路电流特性的。并在 PSCAD 平台上搭建模型, 仿真验证了理论分析的正确性, 所得结论为更加深入分析双馈风机的故障特性、探究短路电流的影响因素提供理论基础, 有利于保护整定计算的研究。

1 双馈感应发电机矢量模型

理想对称电网电压条件下 DFIG 风电系统稳态运行, 定、转子侧均采用电动机惯例, 同步速旋转 dq 坐标系中矢量形式的 DFIG 电压和磁链方程为

$$\begin{cases} U_{sdq} = R_s I_{sdq} + j\omega_1 \Psi_{sdq} + \frac{d\Psi_{sdq}}{dt} \\ U_{rdq} = R_r I_{rdq} + js\omega_1 \Psi_{rdq} + \frac{d\Psi_{rdq}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_{sdq} = L_s I_{sdq} + L_m I_{rdq} \\ \Psi_{rdq} = L_r I_{rdq} + L_m I_{sdq} \end{cases} \quad (2)$$

式中, 转子侧的量均折算到定子侧, U_{sdq} 、 U_{rdq} 分别为 dq 轴同步旋转坐标系下定、转子的电压矢量, I_{sdq} 、 I_{rdq} 分别为 dq 轴同步旋转坐标系下定、转子的电流矢量, Ψ_{sdq} 、 Ψ_{rdq} 分别为 dq 轴同步旋转坐标系下定、转子的磁链矢量。 $s = (\omega_1 - \omega_r)/\omega_1$ 为转差率, ω_1 表示同步转速, ω_r 表示转子转速。 R_s 、 R_r 分别为定、转子绕组等效电阻, L_s 、 L_r 分别为定、转子绕组等效电感, L_m 为定转子绕组互感。

设 $\omega_1 = 0$ 可得两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中矢量形式的 DFIG 电压和磁链方程为

$$\begin{cases} U_{s\alpha\beta} = R_s I_{s\alpha\beta} + \frac{d\Psi_{s\alpha\beta}}{dt} \\ U_{r\alpha\beta} = R_r I_{r\alpha\beta} + \frac{d\Psi_{r\alpha\beta}}{dt} - j\omega_r \Psi_{r\alpha\beta} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha\beta} = L_s I_{s\alpha\beta} + L_m I_{r\alpha\beta} \\ \Psi_{r\alpha\beta} = L_r I_{r\alpha\beta} + L_m I_{s\alpha\beta} \end{cases} \quad (4)$$

根据以上数学模型可得 DFIG 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的等效电路如图 1 所示。其中, $L_{\sigma s}$ 、 $L_{\sigma r}$ 分别为定、转子漏感, $L_s = L_{\sigma s} + L_m$, $L_r = L_{\sigma r} + L_m$ 。

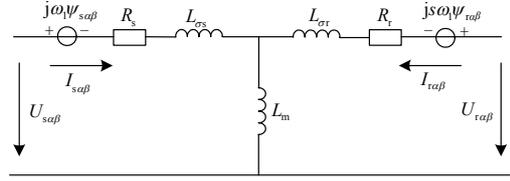


图 1 双馈发电机 $\alpha\beta$ 坐标系下等效电路
Fig. 1 $\alpha\beta$ axis equivalent circuit of DFIG

2 撬棒投入后短路电流求解

2.1 短路电流解析表达式

假设 t_0 时刻电网发生三相对称故障, 机端电压深度跌落, 转子过电流触发 Crowbar 保护动作, 同时双馈风电机组转子侧变流器闭锁, 停止工作^[13-15]。此时, 转子回路馈入电压为零, 可得带 Crowbar 运行的双馈感应发电机空间矢量模型为

$$\begin{cases} U_{s\alpha\beta}^c = R_s I_{s\alpha\beta}^c + \frac{d\Psi_{s\alpha\beta}^c}{dt} \\ 0 = R_r I_{r\alpha\beta}^c + \frac{d\Psi_{r\alpha\beta}^c}{dt} - j\omega_r \Psi_{r\alpha\beta}^c \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha\beta}^c = L_s I_{s\alpha\beta}^c + L_m I_{r\alpha\beta}^c \\ \Psi_{r\alpha\beta}^c = L_r I_{r\alpha\beta}^c + L_m I_{s\alpha\beta}^c \end{cases} \quad (6)$$

其等效电路如图 2。

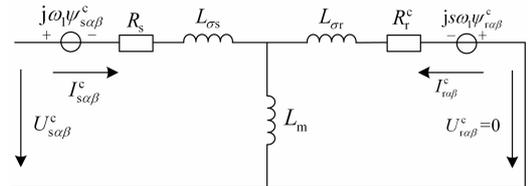


图 2 投入撬棒后双馈发电机 $\alpha\beta$ 坐标系下等效电路
Fig. 2 $\alpha\beta$ axis equivalent circuit of DFIG when crowbar operates

上标 c 表示 Crowbar 保护动作后的双馈感应发电机电气量, $R_r^c = R_r + R_c$ 为 Crowbar 电路接入后的转子等效电阻, R_c 为 Crowbar 电阻。

考虑到电磁暂态过程相对较短, 转子转速不会变化很大, 所以, 在故障期间可将转子转速视作恒定^[16], 由式(6)可得定、转子电流表达式为

$$\begin{cases} I_{s\alpha\beta}^c = \frac{L_r \Psi_{s\alpha\beta}^c}{L_s L_r - L_m^2} - \frac{L_m \Psi_{r\alpha\beta}^c}{L_s L_r - L_m^2} \\ I_{r\alpha\beta}^c = \frac{L_m \Psi_{s\alpha\beta}^c}{L_m^2 - L_s L_r} - \frac{L_s \Psi_{r\alpha\beta}^c}{L_m^2 - L_s L_r} \end{cases} \quad (7)$$

令 $P = L_s L_r - L_m^2$, $M = L_m / (L_m^2 - L_s L_r)$, $N = L_s / (L_m^2 - L_s L_r)$ 。设故障前机端稳态电压幅值为 U_s ,

故障后机端残压幅值为 kU_s 。考虑到定子电阻较小, 为简化分析, 忽略定子电阻的影响, 稳态运行时定子磁链为

$$\Psi_{s\alpha\beta} = \frac{U_s e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1} \quad (8)$$

根据磁链守恒原则, t_0 时刻故障发生, 机端电压骤降, 但定子磁链不会突变。因此, 故障后的定子磁链中不仅包含由残压引起的稳态分量, 还包括跌落的部分电压在定子磁链中感应出的暂态衰减分量^[17-18], 其表达式为

$$\Psi_{s\alpha\beta}^c = \frac{kU_s e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1} + \frac{(1-k)U_s e^{j\omega_1 t_0} e^{-\tau_s t}}{j\omega_1} \quad (9)$$

式中, $\tau_s = R_s L_r / (L_s L_r - L_m^2)$ 为定子衰减时间常数。

由式(5)中转子电压方程和式(7)中转子电流方程及式(9)定子磁链方程可得转子磁链为

$$\begin{aligned} \Psi_{r\alpha\beta}^c = & \\ & \frac{R_c M k U_s e^{j\omega_1 t}}{s\omega_1^2 + jR_c N \omega_1} + \frac{R_c M (1-k) U_s e^{j\omega_1 t_0} e^{-\tau_s t}}{jR_c N \omega_1 - \omega_1 \omega_r} + C_0 e^{j\omega_1 t} e^{-\tau_r t} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\tau_r = R_c L_s / (L_s L_r - L_m^2)$ 为转子衰减时间常数。

设稳态运行时双馈风机空载运行, 即 $I_{s\alpha\beta}^0 = 0$, 由式(7)中定子电流方程和式(10)转子磁链方程可得积分常数为

$$C_0 = \frac{L_r U_s e^{j\omega_1 t_0}}{j\omega_1 L_m} - \frac{R_c M k U_s e^{j\omega_1 t_0}}{s\omega_1^2 + jR_c N \omega_1} - \frac{R_c M (1-k) U_s}{jR_c N \omega_1 - \omega_1 \omega_r}$$

将式(9)、式(10)带入式(7)并进行相应变换可得带 Crowbar 电阻运行的定、转子短路电流为

$$\begin{aligned} I_{s\alpha\beta}^c = & \left[1 - \frac{jR_c M L_m}{(s\omega_1 + jR_c N)L_r} \right] \frac{kL_r U_s e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1 P} + \\ & \left[1 - \frac{jR_c M L_m}{(jR_c N - \omega_r)L_r} \right] \frac{(1-k)L_r U_s e^{j\omega_1 t_0} e^{-\tau_s t}}{j\omega_1 P} + M \cdot \\ & \left[\frac{L_r U_s e^{j\omega_1 t_0}}{j\omega_1 L_m} - \frac{R_c M k U_s e^{j\omega_1 t_0}}{s\omega_1^2 + jR_c N \omega_1} - \frac{R_c M (1-k) U_s}{jR_c N \omega_1 - \omega_1 \omega_r} \right] e^{j\omega_1 t} e^{-\tau_r t} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_{r\alpha\beta}^c = & \frac{sMkU_s e^{j\omega_1 t}}{js\omega_1 - R_c N} + \frac{(1-s)M(1-k)U_s e^{j\omega_1 t_0} e^{-\tau_s t}}{R_c N + j\omega_r} - N \cdot \\ & \left[\frac{L_r U_s e^{j\omega_1 t_0}}{j\omega_1 L_m} - \frac{R_c M k U_s e^{j\omega_1 t_0}}{s\omega_1^2 + jR_c N \omega_1} - \frac{R_c M (1-k) U_s}{jR_c N \omega_1 - \omega_1 \omega_r} \right] e^{j\omega_1 t} e^{-\tau_r t} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 定子短路电流周期分量为

$$I_{s\alpha\beta,\tau}^c = \left[1 - \frac{jR_c M L_m}{(s\omega_1 + jR_c N)L_r} \right] \frac{kL_r U_s e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1 P}$$

暂态直流分量为

$$I_{s\alpha\beta,z}^c = \left[1 - \frac{jR_c M L_m}{(jR_c N - \omega_r)L_r} \right] \frac{(1-k)L_r U_s e^{j\omega_1 t_0} e^{-\tau_s t}}{j\omega_1 P}$$

衰减的转速频率分量为

$$I_{s\alpha\beta,r}^c = M \cdot$$

$$\left[\frac{L_r U_s e^{j\omega_1 t_0}}{j\omega_1 L_m} - \frac{R_c M k U_s e^{j\omega_1 t_0}}{s\omega_1^2 + jR_c N \omega_1} - \frac{R_c M (1-k) U_s}{jR_c N \omega_1 - \omega_1 \omega_r} \right] e^{j\omega_1 t} e^{-\tau_r t}$$

转子短路电流强制差频分量为

$$I_{r\alpha\beta,f}^c = \frac{sMkU_s e^{j\omega_1 t}}{js\omega_1 - R_c N}$$

暂态直流分量为

$$I_{r\alpha\beta,z}^c = \frac{(1-s)M(1-k)U_s e^{j\omega_1 t_0} e^{-\tau_s t}}{R_c N + j\omega_r}$$

衰减的转速频率分量为

$$I_{r\alpha\beta,r}^c = -N \cdot$$

$$\left[\frac{L_r U_s e^{j\omega_1 t_0}}{j\omega_1 L_m} - \frac{R_c M k U_s e^{j\omega_1 t_0}}{s\omega_1^2 + jR_c N \omega_1} - \frac{R_c M (1-k) U_s}{jR_c N \omega_1 - \omega_1 \omega_r} \right] e^{j\omega_1 t} e^{-\tau_r t}$$

2.2 解析式仿真分析

以上表达式是在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中求得的, 为了仿真分析直观, 将两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的短路电流表达式转换到定子三相静止坐标系中

$$\begin{cases} I_{sa}^c = \text{Re}(I_{s\alpha\beta}^c) \\ I_{sb}^c = \text{Re}(I_{s\alpha\beta}^c \cdot e^{-j\pi 2/3}) \\ I_{sc}^c = \text{Re}(I_{s\alpha\beta}^c \cdot e^{j\pi 2/3}) \\ I_{ra}^c = \text{Re}(I_{r\alpha\beta}^c) \\ I_{rb}^c = \text{Re}(I_{r\alpha\beta}^c \cdot e^{-j\pi 2/3}) \\ I_{rc}^c = \text{Re}(I_{r\alpha\beta}^c \cdot e^{j\pi 2/3}) \end{cases}$$

根据以上的解析计算过程编写 Matlab 程序, 以风机并网处发生三相短路故障, 机端电压跌落至 30% 为例, 仿真分析 DFIG 定、转子 A 相电流, 仿真参数参照 PSCAD 的中所搭建的单机参数, 将所得结果与理论分析进行对比验证。

从故障后的定子电流表达式分析得, 在故障跌落程度一定的时候, $M < 0$, $N < 0$, 当 DFIG 超同步运行时, $s < 0$, $|s|$ 越大, 周期分量幅值越大, 而对于暂态直流分量和衰减的转速频率分量, $\omega_r = (1-s)\omega_1$, $s < 0$, $|s|$ 越大, ω_r 越大, 两者的幅值也越大。因此, 在 $s < 0$ 时, 周期分量的幅值、暂态直流分量与衰减的转速频率分量均随着 $|s|$ 的增大而增大。当 DFIG 亚同步运行时, $s > 0$, $|s|$ 越大, 周期分量幅值越大, 而对于暂态直流分量和衰减的转速频率分量, $\omega_r = (1-s)\omega_1$, $s > 0$, $|s|$ 越大, ω_r 越

小, 两者的幅值也越小。因此, 在 $s > 0$ 时, 周期分量的幅值随着 $|s|$ 的增大而增大, 暂态直流分量与衰减的转速频率分量的幅值随着 $|s|$ 的增大而减小。图 3 给出定子 A 相电流及各频率分量的仿真结果。

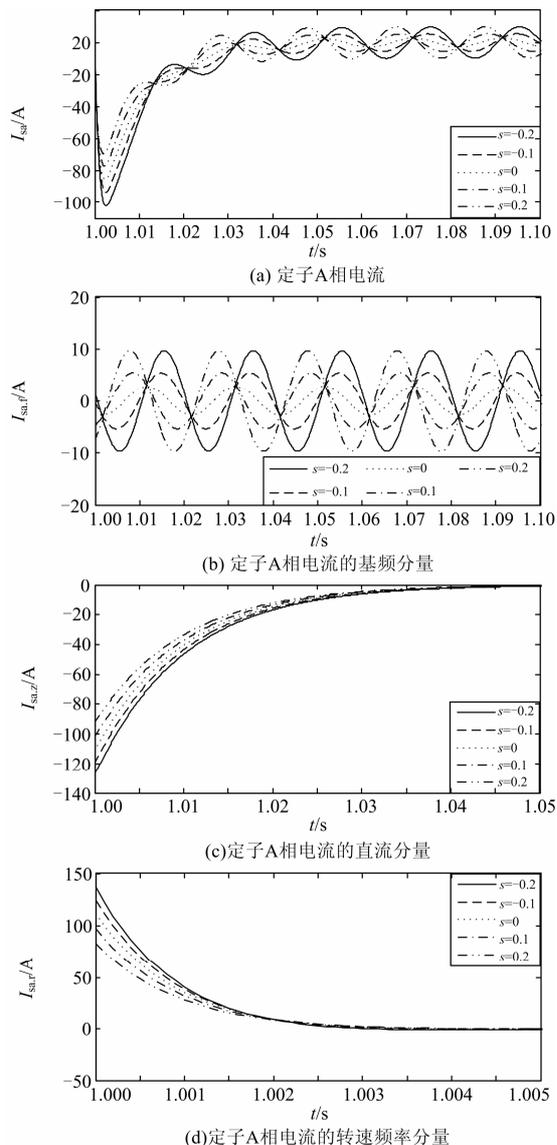


图 3 定子 A 相电流及各频率分量的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of A-phase stator current and the various components of the current

同理, 从故障后的转子电流表达式分析可得相似的结论, 图 4 给出转子 A 相电流及各频率分量的仿真结果。

由图 3、图 4 可以看出, 定子短路电流基频分量和转子短路电流差频分量的幅值随着转差率绝对值的增大而增大, 关于 $s=0$ 对称。定、转子短路电流直流分量和转速频率分量的幅值随转差率的增大而减小。由于直流分量的幅值较基频分量或差频分

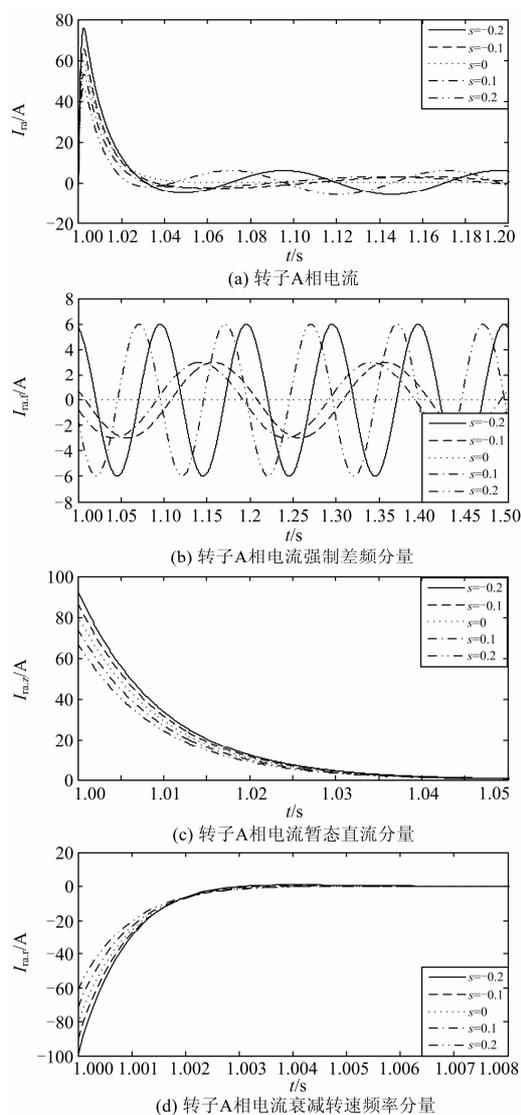


图 4 转子 A 相电流及各频率分量的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of A-phase rotor current and the various components of the current

量大很多, 且直流分量衰减比转速频率分量慢, 因此故障初始阶段, 定、转子短路电流的峰值基本由直流分量决定。

3 建模仿真验证与分析

为验证以上所得数学解析式及理论分析的正确性, 以一台配备撬棒保护的 30 kW 双馈风机机端三相短路故障, 电压跌落至 30% 为测试算例, 对不同转差情况下的定、转子短路电流进行了仿真研究, DFIG 基本参数如表 1。

在 $t=1.0$ s 时, 风机并网处发生三相短路故障, 不考虑撬棒投入的延时, 仿真时撬棒电路在故障一发生就投入, 撬棒电阻取 20 倍的转子自身电阻值。图 5 所示为转差率等于 -0.2 时定子 A 相短路电流仿

真波形和解析计算波形对比图，图 6 为转差率等于 0.2 时定子 A 相短路电流仿真波形和解析计算波形对比图。

表 1 30 kW 双馈感应发电机参数
Table 1 30 kW DFIG parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率	30 kW	定子电阻	0.313 2 Ω
额定定子线电压	380 V	定子转子匝数比	0.602 798
额定频率	50 Hz	转子电阻	0.379 7 Ω
额定转速	1 000 rpm	转子电抗	0.980 3 Ω
极对数	3	励磁电抗	32.05 Ω
定子电抗	0.615 6 Ω	直流母线电容	10 000 μF

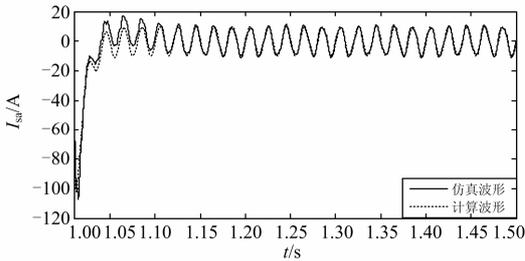


图 5 转差率为-0.2 时定子 A 相短路电流的仿真波形和解析计算波形对比图

Fig. 5 Simulated and calculated A-phase stator short-circuit current ($s=-0.2$)

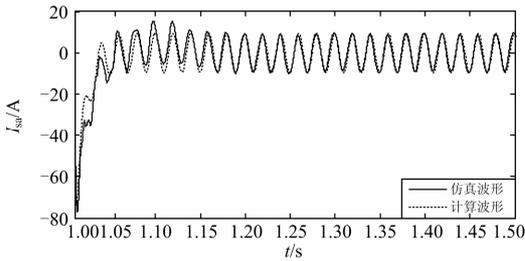


图 6 转差率为 0.2 时定子 A 相短路电流的仿真波形和解析计算波形对比图

Fig. 6 Simulated and calculated A-phase stator short-circuit current ($s=0.2$)

同理，转子短路电流的仿真波形与解析计算波形对比如图 7、图 8 所示。图 7 所示为转差率等于 -0.2 时转子 A 相短路电流仿真波形和解析计算波形对比图，图 8 为转差率等于 0.2 时转子 A 相短路电流仿真波形和解析计算波形对比图。

从图 5、图 6 的对比结果和图 7、图 8 的对比结果可以看出，定子短路电流的仿真波形和解析计算波形基本吻合，只在起始阶段有差异，主要是因为解析计算中不考虑定子电阻、控制策略等的影响。出于篇幅考虑，定、转子短路电流的其他情况对比结果不再赘述，定、转子 A 相短路电流基频分量、直流分量和转速频率分量幅值随转差率变化的仿真结果如图 9 所示。

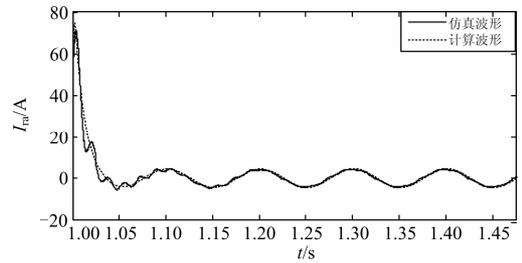


图 7 转差率为-0.2 时转子 A 相短路电流的仿真波形和解析计算波形对比图

Fig. 7 Simulated and calculated A-phase rotor short-circuit current ($s=-0.2$)

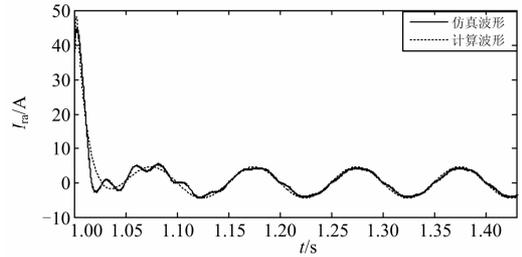
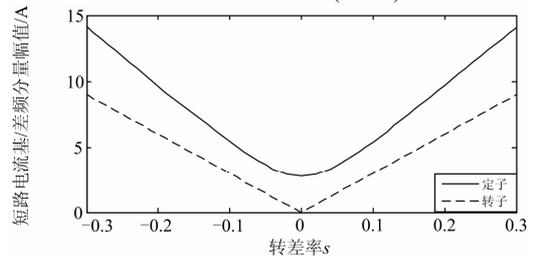
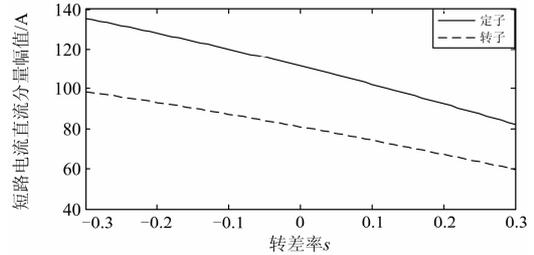


图 8 转差率为 0.2 时转子 A 相短路电流的仿真波形和解析计算波形对比图

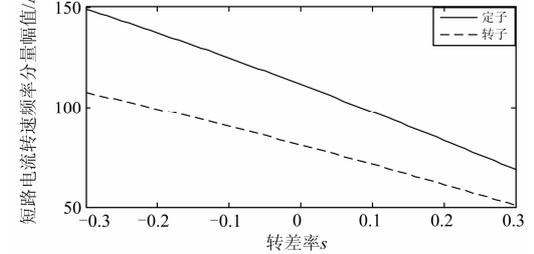
Fig. 8 Simulated and calculated A-phase rotor short-circuit current ($s=0.2$)



(a) 定、转子短路电流基/差频分量幅值与转差率的关系



(b) 定、转子短路电流直流分量幅值与转差率的关系



(c) 定、转子短路电流转速频率分量幅值与转差率的关系

图 9 定、转子短路电流各频率分量幅值与转差率的关系
Fig. 9 Relationship between the max value of each component of the stator and rotor fault current and slip ratio

从图 9 可见, 其仿真结果与数值计算一致, 定子短路电流的基频分量和转子短路电流的差频分量幅值随着转差率绝对值的增大而增大, 关于 $s=0$ 对称; 定、转子短路电流的直流分量和转速频率分量幅值随着转差率从负到正逐渐减小, 即风机在超同步运行时定、转子短路电流的直流分量和转速频率分量幅值比在亚同步运行时要大。由于直流分量的幅值较基频分量或差频分量大多, 且直流分量衰减比转速频率分量慢, 所以故障初始阶段, 定、转子短路电流的峰值基本由直流分量决定。因此, 可以得到结论, 当风机在超同步运行时发生对称短路故障投入撬棒情况最恶劣, 短路电流峰值最大, 对电流保护的影响最严重。

4 结论

本文从磁链的角度推导了考虑撬棒投入的对称短路故障时定、转子短路电流数学解析模型。先从解析计算的角度分析了定、转子短路电流各分量随转差率变化的规律。然后结合搭建的 PSCAD 模型, 仿真验证了解析计算的正确性, 得出与理论分析一致的规律, 给出当风机在超同步运行时发生对称短路故障投入撬棒情况最恶劣, 短路电流峰值最大, 对电流保护的影响最严重。所得结论为更加深入分析双馈风机的故障特性, 探究短路电流的影响因素提供了理论基础, 有利于保护整定计算的研究。

参考文献

- [1] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 并网双馈风电机组在电网短路时的特性研究[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.
- [2] PETERSSON A, THIRINGER T, HARNEFORS L, et al. Modeling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(4): 878-885.
- [3] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45-50.
BI Tianshu, LI Yanbin, MA Lihong, et al. Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 45-50.
- [4] 苏常胜, 李凤婷, 武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 86-91.
SU Changsheng, LI Fengting, WU Yuping. An analysis on short-circuit characteristic of wind turbine driven doubly fed induction generator and its impact on relay setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 86-91.
- [5] 张建华, 王健, 陈星莺, 等. 双馈风机低电压穿越控制策略的分析与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 28-33.
ZHANG Jianhua, WANG Jian, CHEN Xingying, et al. Analysis of DFIG-based wind generation LVRT control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 28-33.
- [6] 林小进, 吴蓓蓓, 包斯嘉, 等. 新型移动式低电压穿越测试装置设计与开发[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 105-109.
LIN Xiaojin, WU Beibei, BAO Sijia, et al. Design and development of a mobile LVRT testing device[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 105-109.
- [7] 齐桓若, 刘其辉. 双馈风机低电压穿越的改进技术[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 102-107.
QI Huanruo, LIU Qihui. Improved technology for DFIG's low voltage ride through[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 102-107.
- [8] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 114-121.
XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 114-121.
- [9] 黄涛, 陆云平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2759-2765.
HUANG Tao, LU Yunping. Analysis on transient EMF variation characteristic of doubly fed induction generator after crowbar protection activated[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2759-2765.
- [10] 翟俊俊, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 18-23.
ZHAI Jiajun, ZHANG Buhuan, XIE Guanglong, et al. Three-phase symmetrical short-circuit current characteristics analysis of wind turbine driven DFIG with crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 18-23.

- [11] 李岩松, 郭世繁, 任国威, 等. 双馈式风力发电系统的机电暂态建模与运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 104-109.
LI Yansong, GUO Shifan, REN Guowei, et al. Modeling and operation simulation of doubly-fed type wind power generation system electromechanical transient model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 104-109.
- [12] 张学广, 徐殿国, 李伟伟. 双馈风力发电机三相短路电流分析[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 493-497.
ZHANG Xueguang, XU Dianguo, LI Weiwei. Analysis of three-phase short circuit current of doubly fed induction generator[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5): 493-497.
- [13] MORREN J, SJOERD W H, DE HAAN. Short circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [14] 杨国生. 风力发电机保护及其对配电系统保护的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
YANG Guosheng. Protection of wind turbines and their impact on the protection of distribution system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [15] 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(8): 184-195.
- [16] 马越, 陈星莺, 余昆, 等. 不同类型短路故障下双馈风机短路电流分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 60-65.
MA Yue, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Analysis for short circuit current of DFIG-based wind generation system under different types of short circuit[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2): 60-65.
- [17] 欧阳金鑫. 变速恒频风电机组并网故障机理与分析模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
OUYANG Jinxin. Studies on fault characteristics and analytical models of integrated variable-speed constant-frequency wind power generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [18] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
-
- 收稿日期: 2014-11-20; 修回日期: 2015-01-15
- 作者简介:
王燕萍(1991-), 女, 硕士, 研究方向为新能源电力系统的保护与控制; E-mail:942652275@qq.com
郑涛(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。
(编辑 葛艳娜)