

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181256

双馈风机三相短路电流特性分析

范小红, 孙士云, 孙德娟, 海世芳, 王杨

(昆明理工大学, 云南 昆明 650500)

摘要: 双馈风机(DFIG)短路电流特性与传统电机相比存在显著差异。根据机端电压的跌落程度, 分析了计及Crowbar保护动作和计及RSC控制两种情况下DFIG的短路电流特性。针对撬棒(Crowbar)保护动作后转子磁链的频率含量以及定、转子电流的解析表达式并未完全统一的问题, 建立了DFIG数学模型, 分析Crowbar保护动作后DFIG定、转子磁链的暂态过程。在此基础上采用拉氏和反拉氏变换法推导了转子磁链的表达式, 通过数学解析的方法得到了计及Crowbar保护动作的DFIG定、转子电流计算表达式。同时根据DFIG数学模型和转子侧变流器(RSC)控制模型, 采用解微分方程法详细地推导了计及RSC控制的双馈风机定、转子短路电流的表达式。最后在Matlab/Simulink平台上建立DFIG电磁暂态仿真模型。仿真验证计及Crowbar保护和计及RSC控制两种情况下DFIG短路电流表达式的正确性, 进而分析了电压跌落程度、Crowbar阻值以及PI控制参数对短路电流的影响。
关键词: 双馈风机; Crowbar保护; 转子磁链; RSC控制; 短路电流

Analysis of three-phase short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator

FAN Xiaohong, SUN Shiyun, SUN Dejuan, HAI Shifang, WANG Yang
(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The short-circuit current characteristics of Doubly Fed Induction Generator (DFIG) are significantly different from those of conventional motors. According to the voltage drop of the motor, the short-circuit current characteristics of DFIG, taking into account Crowbar protection action and RSC control, are analyzed in this paper. Aiming at the problem that the frequency content of rotor flux linkage and the analytical expressions of stator and rotor current are not completely unified after Crowbar protection action in the existing literature, this paper establishes a DFIG mathematical model and analyzes the transient process of stator and rotor flux linkage of DFIG after Crowbar protection action. On this basis, Lagrangian and anti-Lagrangian methods are adopted. The expression of rotor flux linkage is deduced by transformation method, and the calculation expressions of DFIG stator current and rotor current considering Crowbar protection action are obtained by mathematical analysis method. At the same time, according to the mathematical model of DFIG and the control model of Rotor-Side Converter (RSC), the expressions of stator current and rotor current of DFIG with RSC control are deduced in detail by solving differential equation methods. Finally, the electromagnetic transient simulation model of DFIG is established on Matlab/Simulink platform. The simulation results verify the correctness of the short-circuit current expression of DFIG considering Crowbar protection and RSC control, and then analyze the influence of voltage sag, Crowbar resistance and PI control parameters on short-circuit current.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China "Multi-perspective Reclosure Sequence Strategy Setting, Risk Assessment and Its Coordinated Optimization Study" (No. 51367009).

Key words: doubly fed induction generator; Crowbar protection; rotor flux linkage; RSC control; short-circuit current

0 引言

风力发电机组种类较多, 双馈风机(DFIG)凭借

其调速范围宽, 对励磁变频器容量需求小等优点, 成为兆瓦级风力发电机组的主流机型之一^[1-3]。随着电网对风电机组并网性能要求的不断提高, 双馈风机在机端短路故障时也暴露出承受冲击能力弱等弊端^[4-5]。目前双馈风机普遍采用转子侧安装撬棒(Crowbar)电路的措施来解决电网短路故障引起的

基金项目: 国家自然科学基金资助(51367009)“多视角下重合时序的策略整定、风险评估及其协调优化研究”

风电机组转子侧大电流和高电压造成的风电机组脱网、电网稳定性降低等问题^[6-7]。

双馈风电机组提供的短路电流特性有别于传统电机, 除含有暂态直流分量和基频分量外, 还含有衰减的交流分量, 该分量容易造成保护的误动和拒动, 给电网稳定性带来不利影响。在深度电压跌落故障时, 撬棒保护瞬时动作, 闭锁转子侧变流器; 在非深度电压跌落故障时, 撬棒保护不动作, 此时转子侧变流器(RSC)对电压跌落做出快速响应, 进而改变转子励磁电流和定子感应电势^[8]。

对于深度电压跌落故障, 计及 Crowbar 保护动作的 DFIG 短路电流, 现有文献中一般认为定子磁链是由暂态直流分量和稳态基频分量组成, 但对于转子磁链的频率含量却并未完全统一。文献[9]和文献[10]推导得到的定子短路电流含暂态直流分量和基频分量, 忽略了故障后转子感应电流对定子电流的影响。大部分文献虽然考虑了转子磁链对短路电流的影响, 但由于所考虑的转子磁链不同, 得到的短路电流解析式也存在着差异^[11-16]。文献[11-12]推导得到的定子短路电流由稳态基频分量、暂态直流分量和衰减基频分量组成。文献[11]直接给出故障前后转子磁链的稳态值, 但并未给出暂态期间的转子磁链表达式; 文献[12]直接给出仅含衰减基频分量的转子磁链表达式, 并未给出该磁链的求解过程。文献[13-14]认为定子短路电流含有稳态基频分量、暂态直流分量以及衰减的转速频率分量, 文献[13]采用线性模型的方法求解得到定子短路电流, 并未给出转子磁链表达式, 文献[14]求解得到的转子磁链仅含衰减的转速频率分量。文献[15-16]的转子磁链由稳态基频分量、暂态直流分量和衰减的转速频率分量组成, 文献[15]在两相静止坐标系下通过求解二阶微分方程得到转子磁链, 文献[16]通过类比的方法直接写出转子磁链表达式。此外对于撬棒保护动作后的转子电流目前也少有文献推导分析, 文献[10]认为撬棒保护动作后转子电流为零, 文献[15]在两相静止坐标系下求解得到的转子电流由稳态基频分量、暂态直流分量以及衰减的转速频率分量组成。

对于非深度故障, Crowbar 保护不动作的 DFIG 短路电流的解析, 现有文献一般分成两种情况: (1) 假设转子电压保持不变; (2) 转子电压受 RSC 调节作用。文献[17-18]在研究撬棒保护未投入时 DFIG 短路电流相关特性时, 忽略了变流器控制的影响, 假设转子侧电压保持不变。文献[8,19-20]考虑了转子侧变流器对 DFIG 短路电流的影响。文献[8]提出了一种计及励磁调节特性影响的 DFIG 故障电流特

性分析方法, 分析了典型 I 型系统和典型 II 型系统转子电流内环的动态响应; 文献[19]根据故障分量法, 求解了计及 RSC 控制的双馈风机短路电流解析式; 文献[20]推导了计及励磁调节作用的 DFIG 定、转子短路电流简化表达式, 分析了控制方式对短路电流的影响; 以上文献虽然考虑了转子侧变流器的影响, 但并没有考虑转子侧变流器 PI 控制参数对短路电流的影响。文献[21]推导了双馈风机定子短路电流, 并分析了 PI 控制参数对定子短路电流的影响, 但没有给出转子电流解析式及 PI 控制参数对转子电流的影响。

针对深度电压跌落故障, Crowbar 保护动作的转子磁链的频率含量以及定、转子电流的解析表达式并未完全统一的问题, 本文在 dq 同步旋转坐标系下建立 DFIG 的数学模型, 采用拉氏与反拉氏变换的方法求取转子磁链解析式。在此基础上, 推导计及 Crowbar 保护动作的双馈风机定、转子三相短路电流解析式, 同时分析了 DFIG 定、转子短路电流的频率含量。对于非深度电压跌落, Crowbar 保护不动作的相关文献并未对计及 RSC 控制的转子短路电流及 PI 控制参数对短路电流的影响进行完整的分析, 本文根据 dq 同步旋转坐标系下 DFIG 数学模型以及 RSC 的控制模型, 采用全量法, 通过解微分方程法推导了计及 RSC 控制的 DFIG 定、转子短路电流解析式。最后在 Matlab/Simulink 平台上建立 DFIG 电磁暂态仿真模型, 仿真验证计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 控制的 DFIG 两种情况下短路电流的正确性, 并分析了电压跌落程度、Crowbar 阻值以及 PI 控制参数对短路电流的影响。

1 双馈风机的电磁暂态模型

含撬棒保护电路的并网型双馈风机系统如图 1 所示。正常运行时, DFIG 定子绕组经升压变压器直接与电网相连, 转子绕组通过双 PWM 变流器与电网相连。当系统发生严重故障时, 转子侧撬棒保护动作, 同时闭锁转子变流器。

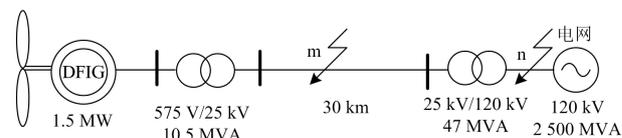


图 1 并网双馈风机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a doubly fed induction generator system with Crowbar circuits

本文中双馈风力发电机定子侧和转子侧均采用电动机惯例, DFIG 定子和转子的磁链、电压方程

在 dq 同步旋转坐标系下为^[22-23]

$$u_s = R_s i_s + j\omega_1 \psi_s + d\psi_s / dt \quad (1)$$

$$u_r = R_r i_r + js\omega_1 \psi_r + d\psi_r / dt \quad (2)$$

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

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

式中：下标 s 是定子绕组电气量； r 是转子绕组电气量； u_s 、 u_r 、 i_s 、 i_r 、 ψ_s 、 ψ_r 分别为 DFIG 定、转子电压、电流和磁链矢量； R_s 为定子电阻； R_r 为转子电阻； L_s 、 L_r 分别为 DFIG 定、转子电感， $L_s = L_m + L_{os}$ ， $L_r = L_m + L_{or}$ ，其中 L_{os} 、 L_{or} 分别为定、转子漏感， L_m 为定转子绕组互感； ω_1 为同步转速， ω_r 为转子转速， $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$ 为转差率。

将式(3)、式(4)联立，可得到定、转子电流方程为

$$i_s = \frac{L_r}{L_D} \psi_s - \frac{L_m}{L_D} \psi_r \quad (5)$$

$$i_r = \frac{L_s}{L_D} \psi_r - \frac{L_m}{L_D} \psi_s \quad (6)$$

式中， $L_D = L_s L_r - L_m^2$ 。

根据 DFIG 定子和转子的电压、磁链方程式(1)一式(4)，可得 DFIG 在 dq 同步旋转坐标系下的等效电路如图 2 所示。

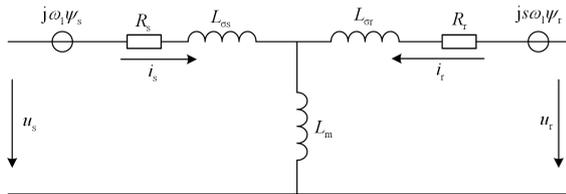


图 2 dq 同步旋转坐标系下 DFIG 等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of doubly fed induction generator in dq synchronous rotating coordinate system

其中，Crowbar 保护动作后，DFIG 在 dq 同步旋转坐标系下的等效电路如图 3 所示。

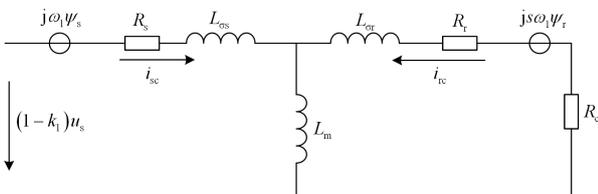


图 3 计及 Crowbar 保护的 DFIG 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of DFIG considering Crowbar protection

计及 RSC 控制的双馈风机在 dq 同步旋转坐标系下等效电路图如图 4 所示。

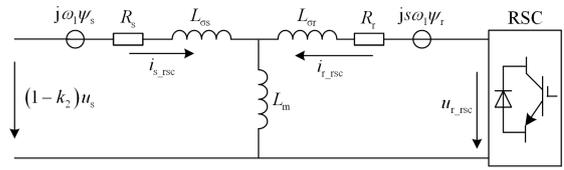


图 4 计及 RSC 控制的 DFIG 等效电路图

Fig. 4 DFIG equivalent circuit diagram considering RSC control

2 计及 Crowbar 保护动作的 DFIG 三相短路电流特性分析

2.1 短路电流物理过程分析

系统稳定运行时，双馈风力发电机通过转子侧变流器给转子绕组提供频率为 $s\omega_1$ 的励磁电流，称为转差电流。因为转子绕组相对定子绕组以 ω_r 的转速旋转，所以定子绕组电流为同步转速 ω_1 的基频电流。

假设系统发生三相短路故障，DFIG 机端电压严重跌落，转子侧 Crowbar 保护瞬时动作。根据磁链守恒定律，故障瞬间定子绕组磁链不能突变，为维持定子绕组磁链初值不变，定子绕组中将感应出定子短路电流直流分量，与该电流直流分量对应的磁链称为定子磁链直流分量，短路电流、磁链直流分量的大小与故障瞬间电压跌落程度以及短路时刻有关，由于定子电阻的存在，定子短路电流、磁链直流分量将随时间以定子时间常数衰减。同理，转子绕组为了维持撬棒保护动作瞬间转子磁链不变也将感应出转子短路电流直流分量，与该电流直流分量对应的磁链称为转子磁链直流分量，由于转子电阻和撬棒电阻的存在，转子短路电流、磁链直流分量以转子时间常数衰减。

目前双馈风电机组的容量较大，且暂态过程较短，因此一般认为暂态过程中转子转速保持不变。由于故障后，转子仍以 ω_r 的转速旋转，定、转子绕组之间磁链存在相互耦合的关系，因此定子磁链直流分量会作用于转子绕组，从而在转子绕组中感应出频率为 ω_r 的以定子时间常数衰减的转子短路电流转速频率分量。同理，由于转子磁链直流分量的存在，定子绕组中也会感应出一个频率为 ω_r 以衰减时间常数 T_c 衰减的定子短路电流转速频率分量。

定子电流中除暂态直流分量和衰减的转速频率分量外，还含有稳态基频分量，该基频分量的大小与故障后 DFIG 的机端残压有关。由于磁链的耦合关系，因此转子电流中存在频率为 $(\omega_1 - \omega_r)$ 的差频分量。

根据以上分析，考虑到撬棒保护动作的 DFIG

定子和转子的三相短路电流各频率含量及对应关系如表 1 所示。

表 1 DFIG 三相短路电流各频率分量及对应关系

Table 1 DFIG three phase short-circuit current frequency components and corresponding relations

	定子绕组	转子绕组	原因
强制分量	稳态基频	强制差频	机端残压
自由分量	暂态直流	衰减转速	定子磁链不能突变
	转速频率	暂态直流	转子磁链不能突变

2.2 短路电流解析式推导

如图 1 所示, 电压跌落程度系数用 k 表示, 假设 t_0 时刻电网 m 处发生三相短路对称故障, DFIG 机端电压深度跌落, 由 u_s 跌落至 $(1-k_1)u_s$, Crowbar 保护在故障瞬间动作, 闭锁转子侧变流器, 转子电压降为零, 此时转子等效电阻 R_{rc} 是转子自身电阻 R_r 与 Crowbar 电阻 R_c 的叠加。

根据磁链守恒原理, 故障瞬间, DFIG 机端电压骤降, 定子磁链不会突变, 因此故障后定子磁链包含与机端残压对应的稳态分量和跌落部分电压在定子磁链中感应出的暂态分量, 故障后的定子磁链表达式为

$$\psi_{sc} = \frac{(1-k_1)u_s}{j\omega_1} + \frac{k_1u_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1(t-t_0)} e^{-\tau_{sc}(t-t_0)} \quad (7)$$

式中, $\tau_{sc} = R_s L_r / L_D$ 。

对式(2)、式(6)、式(7)进行拉氏变换, 将转子电压、电流方程和定子磁链解析式从时域变换到复频域为

$$\begin{cases} 0 = R_{rc} i_{rc}(p) + js\omega_1 \psi_{rc}(p) + p\psi_{rc}(p) - \psi_{r0} \\ i_{rc}(p) = \frac{L_s}{L_D} \psi_{rc}(p) - \frac{L_m}{L_D} \psi_{sc}(p) \\ \psi_{sc}(p) = (1-k_1)u_s / j\omega_1 p + k_1 u_s / (j\omega_1 (p + \tau_s + j\omega_1)) \end{cases} \quad (8)$$

式中: p 表示拉氏运算因子; $\psi_{r0} = u_s / j\omega_1$ 表示故障瞬间转子磁链的初始量; 下标中的 c 表示计及 Crowbar 保护动作。

由式(8)可得复频域下转子磁链方程解析式为

$$\psi_{rc}(p) = \frac{M_\phi}{p(p + \tau_{sc} + j\omega_1)(\tau_{rc} + js\omega_1 + p)} \quad (9)$$

式中, $\tau_{rc} = R_{rc} L_s / L_D$ 。

$$M_\phi = \frac{R_{rc} L_m [(p + \tau_{sc} + j\omega_1)(1-k_1)u_s + pk_1 u_s]}{j\omega_1 L_D} + \frac{(p + \tau_{sc} + j\omega_1) p u_s}{j\omega_1}$$

对式(9)进行反拉氏变换, 即可求得时域下转子

磁链的解析式为

$$\psi_{rc} = A_\phi + B_\phi e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_{sc} t} + C_\phi e^{-js\omega_1 t} e^{-\tau_{rc} t} \quad (10)$$

式中, A_ϕ 、 B_ϕ 、 C_ϕ 为转子磁链系数, 详细表达式见附录 A。

由式(10)可知, 转子磁链在 dq 同步旋转坐标系下含有稳态直流分量、以定子时间常数衰减的基频分量以及以转子时间常数衰减的差频分量, 变换到转子三相静止坐标下, 转子磁链即含有强制的差频分量、以定子时间常数衰减的转速频率分量以及以转子时间常数衰减的直流分量。

将式(7)、式(10)代入式(5)、式(6)可求得撬棒保护动作后的 DFIG 定、转子三相短路电流在 dq 同步旋转坐标系下的解析式为

$$\begin{cases} i_{sc} = A_{sc} + B_{sc} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_{sc}(t-t_0)} + C_{sc} e^{-j\omega_1 s t} e^{-\tau_{rc}(t-t_0)} \\ i_{rc} = A_{rc} + B_{rc} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_{sc}(t-t_0)} + C_{rc} e^{-js\omega_1 t} e^{-\tau_{rc}(t-t_0)} \end{cases} \quad (11)$$

式中, A_{sc} 、 B_{sc} 、 C_{sc} 、 A_{rc} 、 B_{rc} 、 C_{rc} 分别为计及 Crowbar 保护动作的定、转子电流系数, 详细表达式见附录 B。

以上表达式是在 dq 同步旋转坐标系下求得的, 为更直观地分析定、转子短路电流, 以 a 相为例, 将 dq 同步旋转坐标系下的 a 相短路电流转换到 abc 三相静止坐标中, a 相短路电流表达式为

$$\begin{cases} i_{sa-c} = \text{Re} [i_{sc} e^{j\omega_1 t}] \\ i_{ra-c} = \text{Re} [i_{rc} e^{js\omega_1 t}] \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知: 在三相静止坐标系下, 定子三相短路电流由稳态基频分量、以定子时间常数衰减的暂态直流分量和以转子时间常数衰减的转速频率分量组成; 转子三相短路电流由强制差频分量、以定子时间常数衰减的转速频率分量和以转子时间常数衰减的暂态直流分量组成。所得的定、转子短路电流理论推导结果与物理过程相对应。

3 计及 RSC 控制特性影响的 DFIG 三相短路电流特性分析

3.1 转子侧变流器控制策略分析

由于网侧变流器容量较小, 交流侧电流对双馈风机馈出的短路电流影响不大^[17], 因此本文忽略 GSC 对双馈风机短路电流的影响, 详细分析转子侧变流器对 DFIG 短路电流的影响。转子侧变流器是基于定子电压定向矢量控制策略, 其控制原理图如图 5 所示。

正常运行时, RSC 采用双闭环控制系统, 外环为功率环, 内环为转子电流环。为了实现双馈风机单位功率因数运行, 一般有有功功率的参考值 $P_{s.ref}$ 取

为 1, 无功功率的参考值 $Q_{s.ref}$ 取为 0, 将功率的参考值与反馈值 P_s 、 Q_s 相比较, 经功率外环的 PI 控制器得到 d 、 q 轴电流的参考值 $i_{dr.ref}$ 、 $i_{qr.ref}$; 电流的参考值与 d 、 q 轴电流反馈值 i_{dr} 、 i_{qr} 相比较, 经电流环 PI 控制器, 并对其进行前馈补偿, 最后得到转子电压的参考值。转子侧输出的电压方程为^[15]

$$u_{r_rsc} = k_p (i_{r.ref} - i_{r_rsc}) + k_i \int (i_{r.ref} - i_{r_rsc}) dt + j\omega_s \frac{L_D}{L_s} i_{r_rsc} \quad (13)$$

式中: k_p 、 k_i 分别为 RSC 变流器的比例、积分参数; $i_{r.ref}$ 为转子电流的参考值, i_{r_rsc} 为转子电流的反馈值, 且 $i_{r.ref} = i_{dr.ref} + j i_{qr.ref}$, $i_{r_rsc} = i_{dr} + j i_{qr}$; 下标中的 rsc 表示计及了转子侧变流器的控制。

电网发生故障后, 闭锁信号 Gshut 由 1 变为 0, 功率外环闭锁^[17]。转子电流的参考值可直接给定, 在计及转子侧变流器控制时, 主要考虑转子电流内环控制对短路电流的影响, 转子内环控制特性取决于转子电流内环 PI 控制参数。

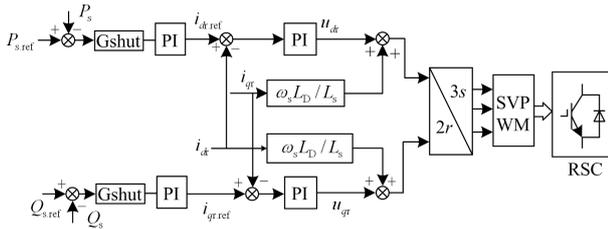


图 5 DFIG 转子侧变流器(RSC)控制框图

Fig. 5 Control block diagram of DFIG rotor side converter (RSC)

3.2 短路电流解析式推导

假设 t_1 时刻电网发生三相短路对称故障, DFIG 机端电压非深度跌落, 由 u_s 骤降至 $(1-k_2)u_s$ 。根据磁链守恒原则, 发生故障瞬间定子磁链不会发生突变, 因此故障后的定子磁链有两个分量: 一是与机端残压 $(1-k_2)u_s$ 相对应的定子磁链稳态分量 ψ_{sf} ; 二是与电压跌落部分相对应的定子磁链暂态分量 ψ_{sn} , 该分量以定子时间常数衰减。则 dq 同步旋转坐标下定子磁链 ψ_{s_rsc} 为

$$\psi_{s_rsc} = \psi_{sf} + \psi_{sn} = \frac{(1-k_2)u_s}{j\omega_1} + \frac{k_2 u_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_{s_rsc}(t-t_1)} \quad (14)$$

式中, $\tau_{s_rsc} = R_s L_r / L_D$ 。

联立式(3)、式(4)所示的定子和转子磁链方程, 消去定子电流 i_s 可得转子磁链为

$$\psi_{r_rsc} = \frac{L_D}{L_s} i_{r_rsc} + \frac{L_m}{L_s} \psi_{s_rsc} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14), 进一步得到转子磁链方程, 再将所得到的转子磁链方程代入式(2), 即可得到转子电压方程的表达式为

$$u_{r_rsc} = \left(R_r + j s \omega_1 \frac{L_D}{L_s} \right) i_{r_rsc} + \frac{L_D}{L_s} \frac{d i_{r_rsc}}{dt} + \frac{L_m}{L_s} s (1-k_2) u_s + (j s \omega_1 - j \omega_1 - \tau_{s_rsc}) \frac{L_m}{L_s} \frac{k_2 u_s}{j \omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_{s_rsc}(t-t_1)} \quad (16)$$

将式(16)代入式(13), 整理可得转子电流二阶微分方程为

$$\frac{d^2 i_{r_rsc}}{dt^2} + \beta_1 \frac{d i_{r_rsc}}{dt} + \beta_2 i_{r_rsc} = \beta_2 i_{r.ref} + \beta_r \frac{k_2 u_s}{j \omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_{s_rsc}(t-t_1)} \quad (17)$$

式中, β_1 、 β_2 、 β_r 具体表达式见附录 C。

通过求解转子电流方程式(17), 可得 dq 同步旋转坐标下转子电流的解析式为(具体过程见附录 E):

$$i_{r_rsc} = A_{r_rsc} + B_{r_rsc} e^{-j\omega_1 t} e^{\tau_{s_rsc}(t-t_1)} + C_{r_rsc} (\alpha_2 e^{\alpha_1(t-t_1)} - \alpha_1 e^{\alpha_2(t-t_1)}) \quad (18)$$

式中, A_{r_rsc} 、 B_{r_rsc} 、 C_{r_rsc} 为计及 RSC 控制的转子电流系数, 详细表达式见附录 D。

将式(18)、式(14)代入式(3)可得定子电流解析式为

$$i_{s_rsc} = A_{s_rsc} + B_{s_rsc} e^{-j\omega_1 t} e^{\tau_{s_rsc}(t-t_1)} + C_{s_rsc} (\alpha_2 e^{\alpha_1(t-t_1)} - \alpha_1 e^{\alpha_2(t-t_1)}) \quad (19)$$

式中, A_{s_rsc} 、 B_{s_rsc} 、 C_{s_rsc} 为计及 RSC 控制的定子电流系数, 详细表达式见附录 D。

将 dq 同步旋转坐标系下 DFIG 短路电流转换到 abc 三相静止坐标系下, 由于对称故障下, 定、转子 A、B、C 三相电流除相位相差 120° 外, 幅值相等, 故以下只给出三相静止坐标系下定、转子 A 相短路电流。

$$\begin{cases} i_{sa_rsc} = \text{Re} [i_{s_rsc} e^{j\omega_1 t}] \\ i_{ra_rsc} = \text{Re} [i_{r_rsc} e^{j s \omega_1 t}] \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知: 在三相静止坐标系下, 计及 RSC 控制的 DFIG 定子短路电流含强制分量、暂态直流分量和暂态自然分量; 转子电流含强制差频分量、衰减转速频率分量和自然分量。其中强制分量与发电机参数、机端电压跌落深度和稳定运行时 RSC 参数有关; 暂态直流分量是由于故障瞬间定转子侧磁链不能发生突变产生的, 其大小与机端电压跌落率及转子侧变流器的控制参数有关, 定子和转子电流暂态直流分量衰减时间常数分别由定子电阻和转子

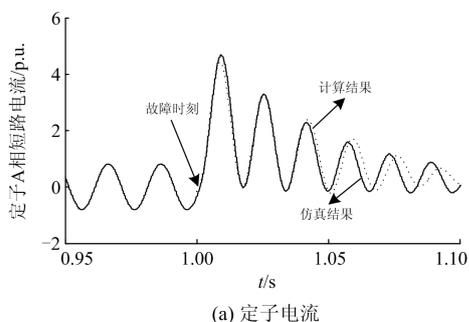
电阻决定; 暂态自然分量由定子磁链和转子变流器耦合作用产生, 其大小也与机端电压跌落深度和 RSC 控制参数有关, 其衰减时间常数 α_1 、 α_2 受转子侧变流器 PI 参数的影响。

4 仿真验证及分析

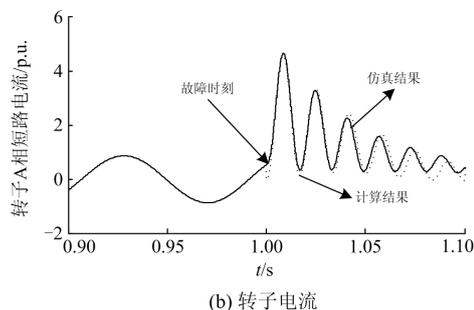
为验证 DFIG 定、转子短路电流计算表达式的正确性, 以一台并网双馈风机为例进行验证, 双馈风机额定功率为 1.5 MW, 功率因数角为 0.9, 额定电压为 575 V, 额定转速为 1.2 p.u., 基准功率为额定视在功率, 基准电压为额定电压, 具体参数见附录 F。在已知 DFIG 数学模型的基础上, 可以通过两种方法得到 DFIG 定、转子短路电流, 方法一: 在 DFIG 数学模型的基础上, 通过直接推导代数微分方程组, 从而得到 DFIG 定、转子短路电流的解析式, 即文中推导式(12)和式(20)的方法, 将双馈风机基本参数直接代入式(12)和式(20), 可得到 DFIG 定、转子电流的值, 该结果在本文中定义为“计算结果”; 方法二: 根据 DFIG 数学模型, 在 Matlab/Simulink 上建立图 1 所示的并网双馈风力发电机的电磁暂态仿真模型, 设置双馈风机基本参数, 即输入 DFIG 定、转子电阻、自感、互感、转差率等参数, 仿真是采用定步长离散算法对代数微分方程组进行迭代求解从而得到的定、转子电流的值, 对该结果本文将定义为“仿真结果”。通过对比计算结果和仿真结果的值, 从而验证计算结果的正确性。

4.1 短路电流验证

图 1 所示系统中 m 点发生三相短路故障, 导致机端电压发生深度跌落, 机端电压跌落至额定电压的 5%, 即电压跌落程度 k 为 0.95, 此时 Crowbar 保护动作, 定、转子短路电流的解析结果与仿真结果如图 6 所示; 电网侧 n 点发生三相短路故障, 机端电压发生非深度跌落, 机端电压跌落至额定电压的 70%, 即电压跌落程度 k 为 0.3 时, Crowbar 保护不动作, 此时计及 RSC 控制的定、转子短路电流的计算结果与仿真结果如图 7 所示。电网发生三相短路时, 各相电流除相位相差 120° 外, 其变化规律



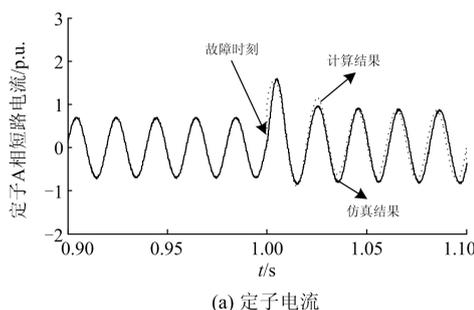
(a) 定子电流



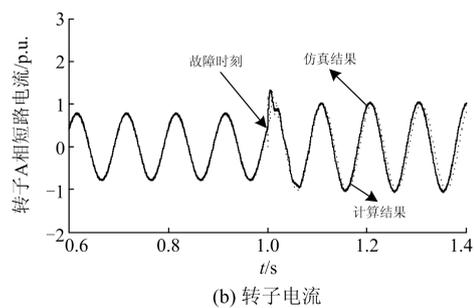
(b) 转子电流

图 6 计及 Crowbar 保护动作的 DFIG 定、转子三相短路电流计算结果与仿真结果对比图

Fig. 6 Comparison of theoretical value and simulation value of DFIG stator and rotor three phase short-circuit current after Crowbar protection action



(a) 定子电流



(b) 转子电流

图 7 计及 RSC 控制的 DFIG 定、转子三相短路电流计算结果与仿真结果对比图

Fig. 7 Comparison of theoretical and simulation values of DFIG stator and rotor currents

是一致的, 故以下只给出定、转子短路电流 a 相仿真值与理论值的对比图。

由图 6、图 7 可知计及 Crowbar 保护动作和计及 RSC 控制的 DFIG 定、转子短路电流的计算结果与仿真结果得到的波形图基本吻合。其中, 由图 3 可知: 当电压跌落程度 $k=0.95$, 计及 Crowbar 保护动作的 DFIG 定子侧电流计算值与仿真值均在 1.007 0 s 时出现最大峰值, 理论电流峰值的大小为 4.71 p.u., 仿真电流峰值的大小为 4.80 p.u.; 转子短

路电流的计算值和仿真值均在 1.006 2 s 出现最大峰值，理论电流的峰值大小为 4.77 p.u.，仿真电流的峰值大小为 4.80 p.u.。由图 4 可知，当电压跌落程度 $k=0.3$ ，计及 RSC 控制的 DFIG 故障的定子电流约增大至 1.58 p.u.，转子电流约增大至 1.32 p.u.。其中定、转子短路电流的计算结果与仿真结果在前三个周波内基本一致，第四个周波开始，通过短路电流表达式计算得到的短路电流出现了偏移，这主要是因为推导短路电流表达式时假设故障期间转子转速不变，而在实际仿真模型中，转子转速在故障后不会保持恒定，随时间有一定的变化。

4.2 影响短路电流因素分析

1) 电压跌落深度

保持仿真系统中其他参数不变，改变故障点位置，令机端电压跌落系数 k 分别为 0.95、0.85、0.70，即机端电压跌落至额定电压的 5%、15%、30%时，分析机端电压跌落深度对 DFIG 定、转子电流的影响，仿真结果如图 8 所示。

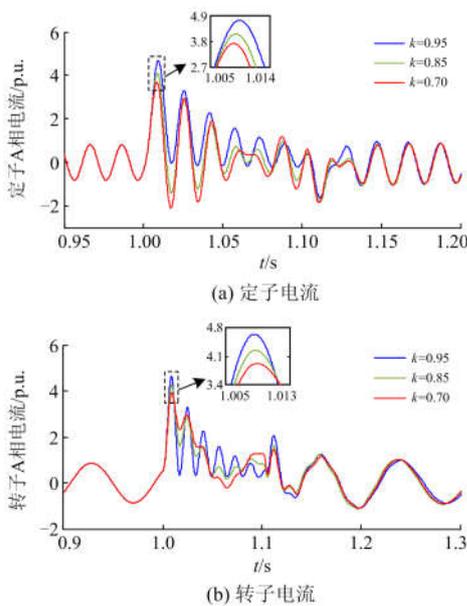


图 8 不同电压跌落程度下 DFIG 定、转子短路电流
Fig. 8 Short circuit current of DFIG stator and rotor under different voltage sags

由图 8 可知，电网发生故障后，机端电压跌落程度越深，定、转子冲击电流越大。以定子 A 相电流为例，如图 8(a)所示，当机端电压跌落系数 k 分别为 0.7、0.85、0.95 时，定子电流最大幅值分别为 3.7 p.u.、4.2 p.u.、4.8 p.u.，机端电压跌落程度越深，定子端电流幅值越大。图 8(b)为不同机端电压跌落程度下的转子电流波形图，其变化规律与定子电流一致，机端电压跌落程度越深，转子电流幅值越大。

2) Crowbar 阻值

改变 Crowbar 电阻阻值，令 Crowbar 保护阻值分别为 0.01 p.u.、0.05 p.u.、0.1 p.u.时，保持仿真系统中其他参数不变，分析 Crowbar 阻值对 DFIG 定、转子电流的影响，仿真结果如图 9 所示。

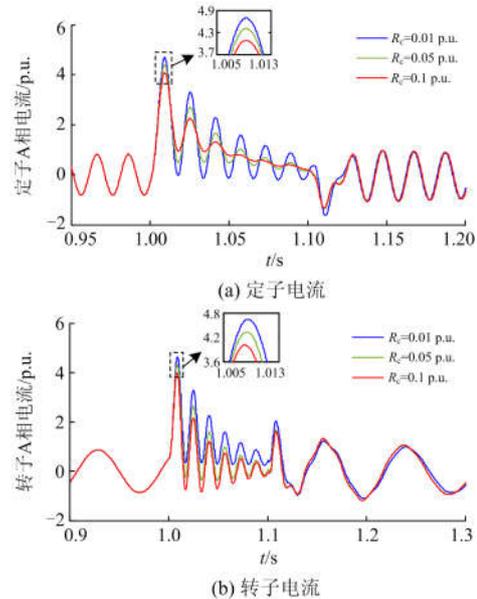


图 9 不同 Crowbar 阻值下 DFIG 定、转子短路电流
Fig. 9 Short circuit current of DFIG stator and rotor under different Crowbar resistances

由图 9 可知，电网发生故障后，投入的 Crowbar 保护的阻值越大，定、转子短路电流的幅值越小。以定子 A 相为例，当 Crowbar 阻值分别为 0.01 p.u.、0.05 p.u.、0.1 p.u.时，定子短路电流最大幅值为 4.8 p.u.、4.3 p.u.、4.0 p.u.。由 Crowbar 阻值 R_c 为 0.01 p.u. 和 0.05 p.u.的波形可知，随着 Crowbar 阻值的增大，定子电流衰减速度非常明显，但 R_c 由 0.05 p.u.变为 0.1 p.u.，定子电流的衰减速度变化不大。

3) PI 控制参数

为研究 RSC 变流器 PI 参数对短路电流的影响，保持系统其他参数不变，分别改变 k_i 和 k_p ，当 RSC 控制参数中的积分参数 $k_i(k_i=8)$ 不变，比例参数 k_p 分别为 0.2、0.4、0.6 时，DFIG 定、转子 A 相的短路电流波形如图 6 所示。保持变流器比例参数 $k_p(k_p=0.6)$ 不变，积分参数 k_i 分别为 4、6、8 时，DFIG 定、转子 A 相短路电流如图 10 所示。

由图 10 可知，比例参数对定、转子电流都有影响，随着比例参数由 0.2 增大到 0.6，定子短路冲击电流幅值由 1.59 p.u.减小至 1.48 p.u.，但转子短路冲击电流幅值由 0.99 p.u.增大至 1.50 p.u.。由图 11 可知，随着积分参数的增大，定子短路电流几乎没有变化，转子短路冲击电流的幅值有一定的减小。

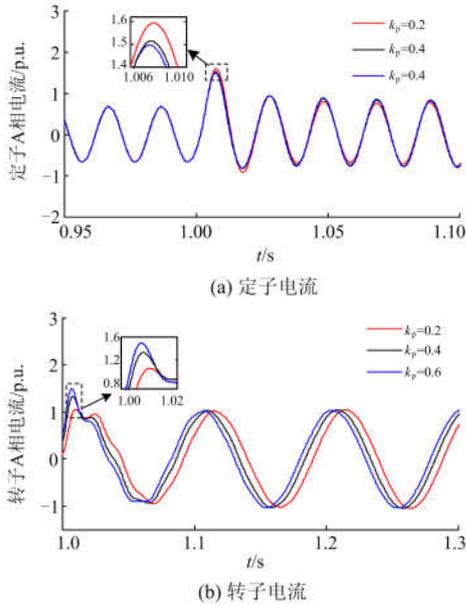


图 10 $k_t=8$ 时, 不同 k_p 下定转子短路电流对比图
Fig. 10 Comparison of stator and rotor short-circuit current under different k_p at $k_t=8$

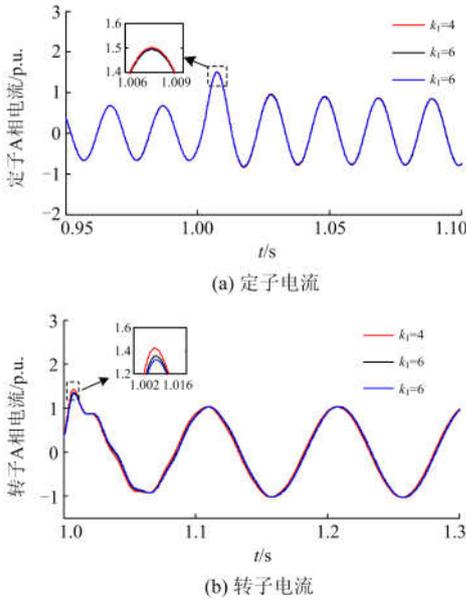


图 11 $k_p=0.6$ 时, 不同 k_t 下定转子短路电流对比图
Fig. 11 Comparison of stator and rotor short-circuit current under different k_t at $k_p=0.6$

根据以上分析可知, 在机端电压跌落程度较低, 转子侧仍受变流器控制的情况下, 可以通过调节变流器 PI 控制参数控制转子侧励磁电压, 从而达到抑制定、转子短路冲击电流的目的。

5 结论

本文通过 dq 同步旋转坐标系下 DFIG 的数学模

型以及转子侧变流器的控制模型, 分别推导了计及 Crowbar 保护和计及 RSC 控制的定、转子短路电流的解析式, 得到了以下结论:

1) 对于计及 Crowbar 保护动作的 DFIG, 通过拉氏和反拉氏变换的方法, 确定了同步旋转坐标系下转子磁链的解析式, 确定了转子磁链含暂态直流分量、衰减的转速频率分量以及强制差频分量。在三相静止坐标系下, 定子电流含基频分量、暂态直流分量以及衰减的转速频率分量, 转子电流含强制差频分量、暂态直流分量以及衰减的转速频率分量。

2) 对于计及 RSC 控制的 DFIG, 通过解微分方程法, 得到了 DFIG 定、转子三相短路电流的解析式。在三相静止坐标系下, 定子电流含稳态基频分量、暂态直流分量和自然分量, 转子电流含强制差频分量、暂态直流分量和自然分量。

3) 对不同的电压跌落程度和不同 Crowbar 阻值的短路情况进行了仿真分析, 结果表明机端电压跌落程度越大, 定、转子短路电流的冲击电流越大; 增大 Crowbar 电阻的阻值, 一定程度上可以加快定、转子短路电流的衰减速度, 但 Crowbar 电阻增大到一定程度后, 继续增大阻值, 对短路电流的影响就减小了。

4) 通过合理地调节转子侧变流器 PI 参数, 可以在一定程度上抑制 DFIG 定、转子短路冲击电流的大小。

附录A

$$A_\varphi = \frac{R_{rc} L_m}{j\omega_1 L_D (\tau_c + js\omega_1)} (1 - k_1) u_s$$

$$B_\varphi = \frac{R_{rc} L_m}{j\omega_1 L_D (\tau_s + j\omega_1 - \tau_c - js\omega_1)} k_1 u_s$$

$$C_\varphi = \frac{R_{rc} L_m}{j\omega_1 L_D} \left[\frac{L_D}{R_{rc} L_m} u_s - \frac{1}{\tau_c + js\omega_1 - \tau_s - j\omega_1} k_1 u_s - \frac{(1 - k_1) u_s}{\tau_c + js\omega_1} \right]$$

附录B

计及Crowbar保护动作的定、转子电流系数

$$A_{sc} = \left(\frac{L_r}{L_D} - \frac{R_{rc} L_m^2}{L_D^2 (\tau_c + js\omega_1)} \right) \frac{(1 - k_1) u_s}{j\omega_1}$$

$$B_{sc} = \left(\frac{L_r}{L_D} - \frac{R_{rc} L_m^2}{L_D^2 (\tau_s + j\omega_1 - \tau_c - js\omega_1)} \right) \frac{k_1 u_s e^{j\omega_1 t_0}}{j\omega_1}$$

$$C_{sc} = \frac{R_{rc} L_m^2}{j\omega_1 L_D^2} \left[\frac{L_D}{R_{rc} L_m} - \frac{1}{\tau_c + js\omega_1 - \tau_s - j\omega_1} - \frac{(1 - k_1)}{\tau_c + js\omega_1} \right] u_s e^{js\omega_1 t_0}$$

$$A_{rc} = \left(\frac{L_s R_{rc} L_m}{L_D^2 (\tau_c + js\omega_1)} - \frac{L_m}{L_D} \right) \frac{(1 - k_1) u_s}{j\omega_1}$$

$$B_{rc} = \left(\frac{L_s R_{rc} L_m}{L_D^2 (\tau_s + j\omega_1 - \tau_c - js\omega_1)} - \frac{L_m}{L_D} \right) \frac{k_1 u_s e^{j\omega_1 t_0}}{j\omega_1}$$

$$C_{rc} = \frac{R_{rc} L_m L_s}{j\omega_1 L_D^2} \left[\frac{L_D}{R_{rc} L_m} - \frac{1}{\tau_c + js\omega_1 - \tau_s - j\omega_1} k_1 - \frac{(1-k_1)}{\tau_c + js\omega_1} \right] u_s e^{js\omega_1 t_0}$$

附录C

$$\beta_1 = (R_r + k_p) L_s / L_D$$

$$\beta_2 = k_1 L_s / L_D$$

$$\beta_r = (js\omega_1 - j\omega_1 - \tau_s)(j\omega_1 + \tau_s) L_m / L_s$$

附录D

计及Crowbar保护动作的定、转子电流系数

$$A_{r_rsc} = i_{r.ref}$$

$$B_{r_rsc} = \frac{\beta_r k_2 u_s}{j\omega_1 [(j\omega_1 + \tau_s)^2 - \beta_1 (j\omega_1 + \tau_s) + \beta_2]}$$

$$C_{r.ref} = i_{r.ref} / (\alpha_2 - \alpha_1)$$

$$A_{s_rsc} = \frac{1}{L_s} \left(\frac{(1-k_2) u_s}{j\omega_1} - L_m i_{r.ref} \right)$$

$$B_{s_rsc} = \frac{-\beta_r L_m k_2 u_s / L_s}{j\omega_1 [(j\omega_1 + \tau_s)^2 - \beta_1 (j\omega_1 + \tau_s) + \beta_2]} + \frac{k_2 u_s}{j\omega_1 L_s}$$

$$C_{s_rsc} = \frac{L_m}{L_s} \frac{i_{r.ref}}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

附录E

求解转子电流的二阶微分方程:

$$\frac{d^2 i_{r_rsc}}{dt^2} + \beta_1 \frac{di_{r_rsc}}{dt} + \beta_2 i_{r_rsc} = \beta_2 i_{r.ref} + \beta_r \frac{k_2 u_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_s(t-t_1)}$$

1) 求转子电流二阶微分方程对应的齐次方程的通解 $i_{r(\text{通解})}$ 的表达式

转子电流二阶微分方程式对应的齐次方程为

$$\frac{d^2 i_{r_rsc}}{dt^2} + \beta_1 \frac{di_{r_rsc}}{dt} + \beta_2 i_{r_rsc} = 0$$

转子电流二阶微分方程式对应的齐次方程的特征方程为

$$\alpha_r^2 + (R_r + k_p) \frac{L_s}{L_D} \alpha_r + k_1 L_s / L_D = 0$$

对特征方程进行求解, 可求得特征方程的特征根为, 两个不相等的实数根:

$$\alpha_1 = \frac{-(R_r + k_p) L_s + \sqrt{[(R_r + k_p) L_s]^2 - 4k_1 L_s L_D}}{2L_D}$$

$$\alpha_2 = \frac{-(R_r + k_p) L_s - \sqrt{[(R_r + k_p) L_s]^2 - 4k_1 L_s L_D}}{2L_D}$$

根据二阶常系数齐次微分方程的通解的定义可知, 当所求的特征方程有两个不相等的实数根时, 则 $i_{r1} = e^{\alpha_1 t}$ 、 $i_{r2} = e^{\alpha_2 t}$ 是特征方程的两个线性无关的特解, 故所求特征方程的通解 $i_{r(\text{通解})}$ 的形式可以表示为

$$i_{r(\text{通解})} = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}$$

式中, C_1 、 C_2 为常数。

转子电流二阶微分方程对应的齐次方程的通解 $i_{r(\text{通解})}$ 的形式中常数 C_1 、 C_2 的值是根据故障瞬间转子电流的初值确定的。故障瞬间0 s时刻转子电流初值 i_{r0} 为稳态运行时转子电流的指令值, 即 $i_{r0}|_{t=0} = i_{r.ref}$; 故障瞬间转子电流初值的一阶导数为 $i'_{r0}|_{t=0} = 0$ 。根据以上分析可知:

$$\begin{cases} i_{r.ref} = C_1 + C_2 \\ 0 = \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 \end{cases}$$

求解上式可得常数 C_1 、 C_2 的值分别为

$$\begin{cases} C_1 = \alpha_2 i_{r.ref} / (\alpha_2 - \alpha_1) \\ C_2 = \alpha_1 i_{r.ref} / (\alpha_1 - \alpha_2) \end{cases}$$

将 C_1 、 C_2 代入特征方程的通解 $i_{r(\text{通解})}$ 的形式中, 可求得转子电流二阶微分方程对应的齐次方程通解的表达式为

$$i_{r(\text{通解})} = \frac{\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}}{\alpha_2 - \alpha_1} i_{r.ref}$$

2) 求转子电流二阶微分方程的特解 i_r^*

转子电流的二阶微分方程可分解为

$$\frac{d^2 i_{r_rsc}}{dt^2} + \beta_1 \frac{di_{r_rsc}}{dt} + \beta_2 i_{r_rsc} = \beta_2 i_{r.ref} \quad (a)$$

$$\frac{d^2 i_{r_rsc}}{dt^2} + \beta_1 \frac{di_{r_rsc}}{dt} + \beta_2 i_{r_rsc} = \beta_r \frac{k_2 u_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_s(t-t_1)} \quad (b)$$

设 i_{r1}^* 、 i_{r2}^* 分别为二阶微分方程式(a)、式(b)的特解, 则转子电流二阶微分方程的特解为

$$i_r^* = i_{r1}^* + i_{r2}^*$$

(1) 求特解 i_{r1}^*

转子电流二阶微分方程对应的齐次方程的特征根为两个不相等的实数根, 故可设特解 i_{r1}^* 为

$$i_{r1}^* = b_1$$

式中, b_1 为常数。

对 i_{r1}^* 求一阶导和二阶导后, 代入式(a)求解可得特解 i_{r1}^* 的值为

$$i_{r1}^* = i_{r.ref}$$

(2) 求特解 i_{r2}^*

转子电流二阶微分方程对应的齐次方程的特征根为两个不相等的实数根, 故可设特解 i_{r2}^* 为

$$i_{r2}^* = b_2 e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_s(t-t_1)}$$

式中, b_2 为常数。

对 i_{r2}^* 求一阶导和二阶导后, 代入式(b)求解可得特解 i_{r2}^* 的值为

$$i_{r2}^* = \frac{\beta_r}{(j\omega_1 + \tau_s)^2 - \beta_1(j\omega_1 + \tau_s) + \beta_2} \frac{k_2 u_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_s(t-t_1)}$$

将所求的特解 i_{r1}^* 和 i_{r2}^* 代入转子电流二阶微分方程的特解方程中, 即可求得转子电流二阶微分方程的特解 i_r^* 为

$$i_r^* = i_{r.ref} + \frac{\beta_r k_2 u_s e^{-j\omega_1 t} e^{-\tau_s(t-t_1)}}{j\omega_1 [(j\omega_1 + \tau_s)^2 - \beta_1(j\omega_1 + \tau_s) + \beta_2]}$$

附录F

表2 单台 1.5 MW DFIG 的仿真参数

Table 2 Simulation parameters of single 1.5 MW DFIG

参数	数值/p.u.	参数	数值/p.u.
功率因数	0.9	转子转速	1.2
定子电阻	0.023	定子漏感	0.18
转子电阻	0.016	转子漏感	0.16
撬棒阻值	0.05	定转子互感	2.9

参考文献

- [1] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 109-117.
WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbine considering different crowbar protection insertion time[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 109-117.
- [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] BOUBZIZI S, ABID H, EL HAJJAJI A, et al. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 214-225. DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
- [4] 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.
- [5] LOPEZ J, GUBIA E, SANCHIS P, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-330.
- [6] MORREN J, DE HAAN S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2005, 20(1): 435-441.
- [7] 吕勇, 雷涛, 黄国华, 等. 并网双馈风力机感应发电机效应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 154-158.
LÜ Yong, LEI Tao, HUANG Guohua, et al. Induction generator effect analysis of doubly-fed wind generator connected to the power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 154-158.
- [8] 孔祥平. 含分布式电源的电网故障分析方法与保护原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
KONG Xiangping. Study on the fault analysis method and relay protection of the power grid with distributed generators[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [9] 柳鑫, 刘晓华, 吕文芳, 等. 考虑撬棒保护动作的双馈风机故障暂态特性分析[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(1): 49-52.
LIU Xin, LIU Xiaohua, LÜ Wenfang, et al. Fault transient characteristic analysis of doubly fed induction generator wind turbines considering operation of crowbar protection[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(1): 49-52.
- [10] 蒋永梅, 李凤婷, 张谦. 计及低穿控制的双馈风电机组故障电流特性研究[J]. 水力发电, 2016, 42(7): 111-114.
JIANG Yongmei, LI Fengting, ZHANG Qian. Study on fault current characteristics of DFIG when considering low voltage ride-through control strategy[J]. Water Power, 2016, 42(7): 111-114.
- [11] 王耀函, 刘辉, 刘吉臻, 等. 考虑撬棒保护和残压的DFIG 短路电流实用计算方法及应用[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 134-138.
WANG Yaohan, LIU Hui, LIU Jizhen, et al. Transient current analysis method of DFIG voltage dip based on crowbar protection[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 134-138.
- [12] 杨刚, 潘文霞, 刘明洋, 等. 考虑 Crowbar 电阻的双馈电机短路电流实用计算[J]. 电网技术, 2016, 40(7):

2075-2080.
 YANG Gang, PAN Wenxia, LIU Mingyang, et al. Practical calculation of short-circuit current of DFIG considering Crowbar resistance[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2075-2080.

[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.
 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.
 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] 王燕萍. 双馈风电机组暂态特性及对配网保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
 WANG Yanping. Research on transient characteristics of wind power generation with doubly fed induction generator and the influence on protection of distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[16] 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(7): 1610-1618.

[17] 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 Zongxiang, 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.

[18] 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): 85-91.
 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): 85-91.

[19] 丁秀香. 双馈风力发电系统故障特性及保护策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
 DING Xiuxiang. Research on fault characteristic and protection strategy of wind power generation with doubly fed induction generator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[20] 欧阳金鑫, 熊小伏. 计及转子励磁控制的双馈感应发电机短路电流研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6083-6092.
 OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu. Research on short-circuit current of doubly-fed induction generators under rotor excitation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6083-6092.

[21] 郑涛, 魏旭辉, 李娟, 等. PI 控制参数对双馈风电机组短路电流特性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 15-21.
 ZHENG Tao, WEI Xuhui, LI Juan, et al. Influence of PI control parameters on short circuit current characteristics of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 15-21.

[22] 周士琼, 王倩, 吕潇, 等. 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 33-39.
 ZHOU Shiqiong, WANG Qian, LÜ Xiao, et al. Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator with the stator Crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.

[23] 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.

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2019-01-17

作者简介:

范小红(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风力发电及其对电力系统保护的影响; E-mail: 1240201076@qq.com

孙士云(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 422416503@qq.com

(编辑 葛艳娜)