

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190269

一种考虑 RSC 和 GSC 的双馈风机短路电流实用计算方法

靳现林¹, 蔡晓宇², 刘其辉², 刘自发²

(1. 国华能源投资有限公司, 北京 100007; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 由于双馈风机(DFIG)的短路电流特性与传统电机不同, 使其保护整定变得困难。针对电网对称故障下双馈风机短路电流, 提出一种同时考虑机侧变流器(RSC)和网侧变流器(GSC)故障期间特性的双馈风机短路电流实用计算方法。在电网电压轻度跌落时, 考虑 RSC 和 GSC 对风机暂态特性的影响。在电网电压深度跌落时综合考虑 RSC、GSC 和撬棒保护(Crowbar)的影响, 把风机短路电流视为定子短路电流和变流器 GSC 输出电流两部分之和。建立双馈风机短路电流计算数学模型, 并在数学模型中体现 Crowbar 动作的延时性。计算过程以 Crowbar 动作时刻为时间分界点, 获得短路电流时域表达式, 计算短路电流的最大值和有效值。在 PSCAD 中进行仿真验证, 验证所用方法的准确性和有效性。

关键词: 双馈风力发电机组; 电压跌落; 短路电流; 撬棒保护; 低电压穿越

A practical calculation method for short-circuit current of DFIG considering RSC and GSC

JIN Xianlin¹, CAI Xiaoyu², LIU Qihui², LIU Zifa²

(1. Guohua Energy Investment Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Since the Short Circuit (SC) characteristics of DFIG are different from traditional generators, the protection setting of DFIG becomes difficult. A practical calculation method for SC current of DFIG under symmetrical fault of power grid is proposed, considering both the characteristics of the Rotor Side Converter (RSC) and Grid Side Converter (GSC) during fault. The influence of RSC and GSC on the transient characteristics is considered under a slight voltage dip, and the influence of RSC, GSC and Crowbar protection is considered under a severe voltage dip. The SC current is regarded as the sum of the stator SC current and the GSC output current. The mathematical model of SC current calculation is established, and the delay of Crowbar action is reflected in the modeling. The calculation process is segmented by Crowbar action time. The time domain expression of SC current is obtained and the maximum and valid value of SC current is computed. The simulation analysis is achieved in PSCAD to verify the accuracy and validity of the method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904000), and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJB0000TKJS1801242), and Science and Technology Project of Shenhua Group “Simulation and Fault Analysis of Double-Fed Generator Abnormal Condition” (No. SHNY (2018) 0049).

Key words: DFIG; voltage dip; short circuit current; Crowbar protection; low voltage ride through

0 引言

随着电力系统中风电装机容量比例增加, 电网

故障时风机与电网的相互影响日渐受到重视^[1]。双馈风机定转子独特的耦合关系使机组的暂态特性和短路电流十分复杂, 与传统的同步电机、异步电机都有明显的区别^[2-3]。目前风机短路电流计算主要有 IEC60909 标准、数学解析两种。文献[4]对比 IEC60909 标准和动态仿真, 结果表明对于双馈风机而言 IEC60909 标准方法计算误差很大。文献[5]建

基金项目: 国家重点研发计划项目资助“大容量风电机组电网友好型控制技术”(2018YFB0904000); 国家电网公司科技项目资助(SGJB0000TKJS1801242); 神华集团科技项目资助“双馈机组异常工况仿真及故障分析”(SHNY (2018) 0049)

立了适用于双馈风机短路计算的数学模型,应用数学解析的方法,在转子开路时求解定子磁链,把转子电压分解为定子磁链相关项和转子电流相关项两部分,研究了三相短路的定子磁链和转子电压变化规律。文献[6]在文献[5]的基础上,分析了不对称故障下DFIG的磁链、电流、电压的关系,并从变流器控制的角度,提出用去磁方式提高风机的低压穿越(LVRT)能力。文献[7]详细分析了低电压穿越中变流器的动态响应,给出了适应不同变流器控制策略的分析模型。文献[8]针对继电保护分析,分别在定转子参考系中建立机侧变流器(RSC)和网侧变流器(GSC)的数学模型,依此简单快速地迭代计算出变流器输出的故障电流。Crowbar保护是最常用的低压穿越方式之一^[9-10],文献[11]在对电机各参数灵敏度分析的基础上,推导了Crowbar投入情况下三相短路电流最大值的计算公式。文献[12]分析了Crowbar投入和不投入两种情况下DFIG定子电流特性,提出了基于电压跌落深度的双馈风机自适应短路电流计算方法。理论上Crowbar在故障瞬时动作把RSC短路,但实际上Crowbar电路的触发是有延迟的,文献[13-14]研究了Crowbar投入时间影响下的短路电流变化规律。此外,文献[15-16]还分析了Crowbar电阻的阻值以及投入时刻转差率的影响。由于暂态过程时间尺度很小,一般仿真过程中认为风速不变,为了弥补这方面的研究空缺,文献[17]模拟了不同风速下的对称故障,分析了机械侧对电磁暂态的影响。文献[18]运用线性叠加的思想,以故障变化量叠加初始状态量求得故障电气量,并进行了仿真和实物实验。文献[19]考虑了Crowbar保护和残压的影响,提出了短路电流的实用计算方法,定量分析了故障对机组短路电流的影响。

目前已有研究对DFIG短路电流特性分析时,能同时考虑一种或多种因素对短路电流的影响作用。但在实用计算中,现有工作未能考虑Crowbar动作延迟性以及控制策略的影响,而且普遍忽略转子电流对定子短路电流的作用,以及GSC对短路电流的贡献。本文分别在电网电压轻度跌落和深度跌落两个场景中对双馈风机短路电流进行分析,分别分析变流器(RSC和GSC)控制和Crowbar保护的作用效果,把短路电流视为定子短路电流和变流器GSC输出电流两部分之和,在电压轻度跌落时只考虑变流器作用下转子电流的变化规律;在电压深度跌落时同时考虑变流器和Crowbar保护的影响,并

根据实际故障工况计及Crowbar动作的延时性,推导出包含Crowbar的短路电流表达式,进而计算出实用短路电流的最大值和有效值。

1 双馈风机空间矢量模型

双馈风机的双PWM变流器具有能量双向交换的功能,是双馈风机发挥其性能优势的技术关键,变流器与DFIG的连接结构如图1所示。考虑到RSC对功率的解耦控制,其控制方程通常在dq同步旋转坐标系中表示,因此分析RSC控制对短路电流的影响时,采用同步旋转坐标系下的空间矢量模型^[20-21]。忽略磁路饱和、漏磁损耗等,DFIG的电压、磁链方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_{s,dq} = R_s i_{s,dq} + j\omega_1 \psi_{s,dq} + p\psi_{s,dq} \\ u_{r,dq} = R_r i_{r,dq} + j\omega \psi_{r,dq} + p\psi_{r,dq} \\ \psi_{s,dq} = L_s i_{s,dq} + L_m i_{r,dq} \\ \psi_{r,dq} = L_r i_{r,dq} + L_m i_{s,dq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为微分算子; u 表示电压; i 表示电流; ψ 表示磁链; R_s 、 L_s 分别表示定子回路的电阻和电感; R_r 、 L_r 分别表示转子回路的电阻和电感;下标 s,dq 表示dq同步旋转坐标系中的定子变量; r,dq 表示dq同步旋转坐标系中的转子变量; L_m 为定转子间互感; ω_1 表示同步转速; ω 表示转差速度。

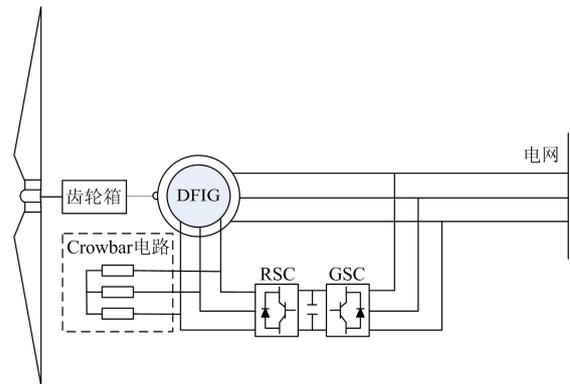


图1 双馈风机连接结构示意图

Fig. 1 Diagram of DFIG with crowbar

在Crowbar保护动作后,Crowbar电阻串联进入转子回路,以降低短路电流的水平,此时转子回路的等效电阻 R_{ra} 变为转子自身电阻与Crowbar电阻值 R_a 之和,即 $R_{ra} = R_r + R_a$ 。同时RSC两端被短接因而与幅值很大的短路电流隔离,不能作为电压源为转子回路提供电压支撑,即令式(1)中的 $u_{r,dq} = 0$,Crowbar动作后DFIG的电磁关系如式(2)所示。

$$\begin{cases} u_{s,dq} = R_s i_{s,dq} + j\omega_1 \psi_{s,dq} + p\psi_{s,dq} \\ 0 = R_r i_{r,dq} + j\omega_1 \psi_{r,dq} + p\psi_{r,dq} \\ \psi_{s,dq} = L_s i_{s,dq} + L_m i_{r,dq} \\ \psi_{r,dq} = L_r i_{r,dq} + L_m i_{s,dq} \end{cases} \quad (2)$$

由图 1 所示结构图可知, 双馈风机短路电流包括两部分: 一是电网故障时风机定子绕组的短路电流; 二是 GSC 对电网故障作出响应的输出电流。在以往的短路电流实用计算中, 第二部分往往被忽略, 为提高实用计算结果的精度, 本文在短路电流计算过程中考虑 GSC 的控制作用, 上述两部分电流之和即为短路电路的实用计算结果。

2 考虑 RSC 影响的定子短路电流分析

2.1 RSC 控制方程

双馈机组的优良运行性能取决于变频器的控制, RSC 通常采用定子磁链定向的矢量控制方式, 双闭环矢量控制中的电流内环引入前馈补偿, 以消除有功功率和无功功率的交叉耦合^[22], 即 RSC 侧交流电压的 dq 轴分量仅与对应的转子电流分量有关。因此电流内环通常采用 PI 控制器, RSC 控制的电压指令表达式为

$$u_{r,ref} = k_{pr}(i_{r,ref} - i_{r,dq}) + k_{ir} \int (i_{r,ref} - i_{r,dq}) dt + j\omega \sigma L_r i_{r,dq} \quad (3)$$

式中: $u_{r,ref}$ 、 $i_{r,ref}$ 分别为转子电压和转子电流的指令值; k_{pr} 和 k_{ir} 为 PI 控制环节的比例积分系数; σ 为风电机的漏磁系数, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ 。

RSC 对双馈风机短路电流的抑制作用有限, 通常需与其他 LVRT 手段配合来进一步抑制短路电流, 在电压轻度跌落时为保持风机可控不宜切入 Crowbar 电路。电网电压深度跌落时, 需要触发 Crowbar 加速磁链衰减, 并保护 RSC 变流器免受过流危害, 因实际工况的 Crowbar 并不能瞬间切入, 而是有一定的动作延迟^[13], 该延时在计算中需予以考虑。

2.2 考虑 RSC 影响的定子电流计算

当电网电压发生轻度跌落时, 转子中的冲击电流并不能使 Crowbar 启动, 转子电流受 RSC 控制。假定 t_1 时刻发生故障, 忽略电压相位的跳变, 设故障后的定子电压与故障前电压 u_{s0} 之比为 k 。由式(1)中磁链的关系可知, 定子电流可视为由两部分组成, 第一部分由定子磁链决定, 第二部分由转子电流决定, 即

$$i_{s,dq} = \frac{\psi_{s,dq}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{r,dq} \quad (4)$$

根据式(1)中的定子电压方程, 故障前忽略定子电阻, 可得定子稳态磁链和故障后定子磁链的表达式为

$$\psi_{s0} = \frac{u_{s0}}{j\omega_1} \quad (5)$$

$$\psi_{st} = \frac{ku_{s0}}{j\omega_1} + \frac{(1-k)u_{s0}}{j\omega_1} e^{-(\tau_1 + j\omega_1)(t-t_1)} \quad (6)$$

式中, τ_1 为衰减时间常数, $\tau_1 = R_s / L_s$ 。因为式(6)给出了故障定子磁链的表达式, 可以得到不计转子电流影响的定子短路电流。下面分析故障时受 RSC 控制的转子电流变化规律。由定转子磁链方程, 可得转子磁链和转子电流的关系式为

$$\psi_{rt} = \frac{L_m \psi_{st}}{L_s} + \sigma L_r i_{r,dq} \quad (7)$$

Crowbar 未动作时, 转子电压主要由 RSC 控制系统决定。当电流控制回路闭环带宽足够大时, RSC 的交流电压能很好地跟踪指令值, 因此将式(7)代入转子电压方程^[23]与式(3)共同构成微分方程, 即

$$p i_{r,dq} + \left(\frac{R_r}{\sigma L_r} + j\omega \right) i_{r,dq} + \frac{f_{ie}(\psi_s) e^{-(t-t_1)}}{\sigma L_r} - \frac{u_{r,ref}}{\sigma L_r} = 0 \quad (8)$$

式中, $f_{ie}(\psi_s)$ 为定子磁链 ψ_s 的一个函数, $f_{ie}(\psi_s) = (p\psi_{st} + j\omega\psi_{st})L_m / L_s$, 反映了定子磁链对转子电流的作用, 相当于一个反电动势, 由于 ψ_s 中存在周期分量和暂态直流分量, 因此 $f_{ie}(\psi_s)$ 也相应地分为周期分量和非周期分量两部分, 由于双馈风电机组的转差率极小, 与转差率 s 成正比的周期分量数值足够小, 因而可以在计算中忽略^[24]。解方程(8)即可得到故障转子电流的表达式, 此时定子磁链和转子电流表达式均已获得, 进而可以获得 dq 旋转坐标系下, 电压非深度跌落时的定子电流表达式为

$$\begin{aligned} i_{st} = & \frac{ku_{s0}}{j\omega_1 L_s} + \frac{(1-k)u_{s0}}{j\omega_1 L_s} e^{-(\tau_1 + j\omega_1)(t-t_1)} - \\ & \frac{\tau_1 L_m f_{ie}(\psi_s) e^{-(\tau_1 + j\omega_1)(t-t_1)}}{\sigma L_s L_r (\tau_1^2 - \tau_1 \xi_1 + \xi_2)} - \frac{L_m i_{ref}}{L_s} - \\ & \frac{\lambda_1 L_m i_{t0} e^{\lambda_2(t-t_1)}}{L_s \sqrt{\xi_1^2 - 4\xi_2}} + \frac{\lambda_2 L_m i_{t0} e^{\lambda_1(t-t_1)}}{L_s \sqrt{\xi_1^2 - 4\xi_2}}, (t > t_1) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: i_{t0} 为转子正常运行的电流; λ_1 、 λ_2 、 ξ_1 、 ξ_2 的

$$\begin{aligned} \text{值分别为 } \lambda_1 = & \frac{-\xi_1 + \sqrt{\xi_1^2 - 4\xi_2}}{2}, \quad \lambda_2 = \\ & \frac{-\xi_1 - \sqrt{\xi_1^2 - 4\xi_2}}{2}, \quad \xi_1 = \frac{R_r + k_p}{\sigma L_r}, \quad \xi_2 = \frac{k_i}{\sigma L_r} \end{aligned}$$

其中, 第一项为转子电流周期分量, 该值主要

取决于电网电压跌落程度和电流指令值，体现了 RSC 的控制作用，该项在定子电流中对应一个幅值与指令值相近的周期分量；第二项是以时间常数 τ_1 衰减的直流分量，第三项是以 λ_1 、 λ_2 为衰减时间常数的直流分量，其幅值大小和衰减速度仅取决于发电机和 RSC 的参数，三个直流分量产生的静止磁场随转子旋转，因此在定子回路中产生幅值衰减的转速频率暂态分量^[24]。

3 电网故障中 GSC 输出电流分析

3.1 GSC 控制方程

GSC 的控制目的主要是保持直流母线电压恒定和控制并网输出的功率因数，一般采用机端电压定向控制来实现有功无功的解耦控制。在风机正常工作或故障状况下 Crowbar 保护未动作时，GSC 通过直流母线与 RSC 联系，从而对风机输出电流产生影响，GSC 的工作原理与 RSC 近似，两相同步旋转坐标系下 GSC 电压的外环控制方程为

$$i_{gd} = k_p(u_{dc} - u_{dc,ref}) + k_i \int (u_{dc} - u_{dc,ref}) dt \quad (10)$$

电流内环基本控制方程为

$$\begin{cases} u_{gd,ref} = k_{pg}(i_{gd,ref} - i_{gd}) + k_{ig} \int (i_{gd,ref} - i_{gd}) dt - \omega_1 L_g i_{gq} + u_s \\ u_{gq,ref} = k_{pg}(i_{gq,ref} - i_{gq}) + k_{ig} \int (i_{gq,ref} - i_{gq}) dt + \omega_1 L_g i_{gd} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $u_{gd,ref}$ 、 $i_{gd,ref}$ 分别为 GSC 电压、电流指令值的 d 轴分量，对应的 q 轴分量以下标 gq,ref 表示； L_g 为滤波等效电感。 $u_{gq,ref}$ 与直流母线电压 u_{dc} 有关， $u_{gq,ref} = S(t)u_{dc}$ ， $S(t)$ 为 GSC 的开关函数。

3.2 电网故障时 GSC 电流计算

在电网电压定向控制方式下，GSC 在交流侧通过 d 轴电流 i_{gd} 控制有功功率的流动，使直流母线电压维持在特定区间。在变流器仍与转子回路相连时，忽略电流内环作用，认为 GSC 电流等于其参考值，其电流主要与其功率平衡有关，当风机输出功率为 P 时，GSC 的功率平衡方程可表示为

$$P - 1.5u_{sd}i_{sd} = u_{dc}C_d p u_{dc} \quad (12)$$

式中， C_d 为直流母线的电容。电压外环方程和功率平衡方程联立^[24]可得对称故障时的电流为

$$i_g = \frac{2\sqrt{2C_d u_{dc} k_{iv}}}{\sqrt{8C_d u_{dc} k_{iv} - 3u_{dc} k_{pv}^2}} \left[i_{sd0} - \frac{2P}{3u_{sd}} \right] e^{-\lambda_3 t} e^{j\omega t} + \frac{2P}{3u_{sd}} \quad (13)$$

GSC 虽然可以通过 i_{gq} 控制无功功率交换以支撑并网电压，但目前风机一般采用通用控制而非附加电压控制。因此在故障期间，并网点的电压不受 GSC 控制的影响，另外，在此期间若保留 GSC 的外环控制会增大电流的参考值，因而在电压跌落较严重时只考虑电流内环控制^[25]。GSC 的基本电压方程式为

$$u_g = R_g i_g + L_g (p i_g + j\omega i_g) + u_s \quad (14)$$

通过 GSC 的电压方程和电流内环控制方程，可列出关于 GSC 的电流微分方程为

$$p^2 i_g + \frac{R_g - k_{pg}}{L_g} p i_g + \frac{k_{ig}}{L_g} i_g - \frac{k_{ig} i_{g,ref}}{L_g} = 0 \quad (15)$$

求解得到 GSC 的输出电流解析表达式为

$$i_g(t) = i_{g,ref} + i_{g1} e^{\lambda_4 t} + i_{g2} e^{\lambda_5 t} \quad (16)$$

其中，

$$i_{g1} = \frac{(p i_{g0} - \lambda_4 i_{g0} + \lambda_4 i_{g,ref}) L_g}{\sqrt{(R_g - k_{pg})(R_g - k_{pg} - 4k_{ig})}},$$

$$i_{g2} = \frac{(-p i_{g0} + \lambda_3 i_{g0} - \lambda_3 i_{g,ref}) L_g}{\sqrt{(R_g - k_{pg})(R_g - k_{pg} - 4k_{ig})}},$$

$$\lambda_{4,5} = \frac{1}{L_g} \left(k_{pg} - R_g \pm \sqrt{(R_g - k_{pg})(R_g - k_{pg} - 4k_{ig})} \right)。$$

GSC 的交换功率随着电网电压跌落程度的加深而增大，GSC 与 RSC 一样都存在功率极限，因此在电压深度跌落时，GSC 存在一个最大输出电流 i_{gmax} ，由于 Crowbar 投入会降低变流器两端的功率差，因而其最大电流出现在故障发生后变流器第一个响应周期内。

4 考虑 Crowbar 的定子短路电流分析

当电网电压出现深度跌落时，机组需要具有一定的 LVRT 能力，需要装设 Crowbar 以保护风机的安全，因此本文以 Crowbar 保护是否投入作为电网电压跌落程度深浅的分界。在电网发生故障时，机端电压的跌落程度、转子侧电流值或者直流母线电压值及其组合都可以作为 Crowbar 的动作判据，本文以电网电压为投入判据，设定当电压跌落至 40% 及以下时启动 Crowbar 保护。考虑到 Crowbar 触发的延迟，假设故障发生时刻为 t_1 ，Crowbar 动作时刻为 t_2 ，在其动作前暂态特性主要由风机参数和 RSC 决定， $t_1 \sim t_2$ 时段内的暂态过程分析与第 2 节中过程同理， t_2 时刻定子磁链如式(17)所示， $t_1 \sim t_2$ 时刻的定子电流表达式同式(9)。

$$\psi_{st2} = \frac{kU_{s0}}{j\omega_1} + \frac{(1-k)u_{s0}}{j\omega_1} e^{-(\tau_1+j\omega_1)(t_2-t_1)} \quad (17)$$

Crowbar 触发后, 由式(4)可得关于转子磁链的微分方程为

$$p\psi_{r,dq} + (j\omega - \frac{R_{ra}}{\sigma L_r})\psi_{r,dq} - \frac{R_{ra}L_m}{\sigma L_s L_r}\psi_{st} = 0 \quad (18)$$

求解得到转子磁链的表达式为

$$\psi_{rat} = \frac{R_{ra}L_mkU_{s0}}{j\omega_1 L_s (R_{ra} + j\omega\sigma L_r)} + \frac{\mu}{\tau_2 - \tau_1} e^{-(\tau_1+j\omega_1)(t-t_2)} + C_1 e^{-(\tau_2+j\omega)(t-t_2)} \quad (19)$$

衰减常数 $\tau_2 = R_{ra} / \sigma L_r$, 由 Crowbar 动作时磁链的初状态式(17), 可求得以 τ_2 为衰减时间常数的直

流分量初始值 C_1 , $C_1 = \frac{L_m\psi_{st2}}{L_s} - \frac{\eta}{\tau_2} - \frac{\mu}{\tau_2 - \tau_1}$, 其中

$$\eta = \frac{R_{ra}L_mkU_{s0}}{j\omega_1\sigma L_r L_s}, \quad \mu = \frac{R_{ra}L_m(1-k)u_{s0}}{j\omega_1\sigma L_r L_s}.$$

再由磁链方程可得, Crowbar 动作后的定子电流为

$$i_{st} = \frac{(1-\sigma)R_{ra}kU_{s0}}{j\omega_1\sigma L_s (R_{ra} + j\omega\sigma L_r)} + C_2 e^{-(\tau_2+j\omega)(t-t_2)} + \frac{(1-\sigma)(1-k)R_{ra}u_{s0}}{(\tau_2 - \tau_1)j\omega_1\sigma^2 L_s L_r} e^{-(\tau_1+j\omega_1)(t-t_2)}, (t > t_2) \quad (20)$$

其中,

$$C_2 = \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_s} \psi_{st2} - \frac{(1-\sigma)R_{ra}kU_{s0}}{j\omega_1\tau_2\sigma L_s L_r} - \frac{R_{ra}(1-\sigma)(1-k)u_{s0}}{(\tau_2 - \tau_1)j\omega_1\sigma^2 L_s L_r}$$

由式(20)可知, DFIG 动作后的短路电流由三部分组成, 周期分量、衰减较快的转速分量以及衰减较慢的直流分量。由于转子回路接入的 Crowbar 成为影响短路电流幅值的重要因素。Crowbar 接入后, 除了衰减的直流分量, 还有一个频率等于转速频率的暂态谐波分量, 该分量初始幅值与机组初始工况、短路周期分量以及暂态直流分量幅值有关, 但由于其衰减常数与 Crowbar 阻值有关, 衰减速度要比直流分量快很多。

5 考虑变流器及 Crowbar 短路电流实用计算

在实际工程中, 最受关注是短路电流的最大值和有效值。本文综合考虑 RSC、GSC 及 Crowbar 保护的作用, 计算风机对电网短路电流的贡献 i_{WT} 。因为双馈风机定子和变流器均与主网相连, 则有 $i_{WT}(t) = i_g(t) + i_s(t)$ 。 t_1 时刻电压深度跌落, t_2 时刻 Crowbar 串入转子回路, 即在 t_2 时刻后电流的幅值逐渐减小, 所以短路电流的最大值出现在 $[t_1, t_2]$ 时间

段内, 且本文认为 RSC 与 GSC 具有足够快的响应速度, 在故障发生时立刻取消功率外环来抑制参考电流的上升, 所以在风机短路电流表达式中仅考虑电流内环控制对变流器产生的故障响应, 对 GSC 采用式(16)表征其电流变化规律, 对 RSC 则采用式(9)和式(20)组成的以 t_2 为分界点的分段函数表示。根据矢量变化法则可以得到定子电流在静止三相坐标系中的矢量表达式^[26]为

$$i_{WT} = \frac{kU_{s0}e^{j\omega t}}{j\omega_1 L_s} + \frac{(1-k)U_{s0}e^{j\omega t}}{j\omega_1 L_s} e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} + \frac{L_m L_s (1-s)(1-k)U_{s0}e^{j\omega t}}{\sigma L_r R_s^2 - R_s(R_r + k_p) + k_1 L_s^2} e^{-\frac{t-t_2}{T_1}} + \frac{\lambda_2 L_m i_{r0} e^{\lambda_1(t-t_1)} - \lambda_1 L_m i_{r0} e^{\lambda_2(t-t_1)}}{L_s(\xi_1^2 - 4\xi_2)} e^{j\omega t} - \frac{L_m i_{ref} e^{j\omega t} + I_{g,ref} e^{j\omega t} + I_{g1} e^{\lambda_1 t} + I_{g2} e^{\lambda_2 t}}{L_s} \quad (21)$$

$$(t_1 \leq t \leq t_2)$$

式中: $T_1 = L_s / R_s$; I_g 为转换为三相静止坐标系下的 GSC 相关电流值。假定在 $t_1 = 0$ 时刻出现对称故障, 考虑最严重的情况, 即故障发生时刻初始相位为 0, 取时间为 $t_m = T/2$ (T 为工频周期), 对式(21)进行化简, 求得短路电流的最大幅值为

$$I_{max} = \frac{kU_{s0}}{\omega_1 L_s} + \frac{(1-k)U_{s0}}{\omega_1 L_s} e^{-t_m/T_1} - \frac{L_m}{L_s} i_{ref} + A_1 e^{-t_m/T_2} + A_2 e^{\lambda_1 t_m} + A_3 e^{\lambda_2 t_m} \quad (22)$$

式中,

$$A_1 = \frac{L_m L_s (1-s)(1-k)U_{s0}}{k_1 L_s^2 - R_s(R_r + k_p)},$$

$$A_2 = \frac{L_m \lambda_2 i_{r0}}{L_s(\xi_1^2 - 4\xi_2)^{1/2}}, \quad A_3 = -\frac{L_m \lambda_1 i_{r0}}{L_s(\xi_1^2 - 4\xi_2)^{1/2}}.$$

t_2 时刻后, 故障电流幅值逐渐减小最后趋于稳定, 把式(22)转换成三相坐标系中矢量表示, 即

$$i_{s,abc} = \frac{kU_{s0}e^{j\omega t}}{j\omega_1\sigma L_s} \left[1 - \frac{(1-\sigma)R_{ra}}{R_{ra} + js\omega_1\sigma L_r} \right] + I_{s2} e^{-\frac{t-t_2}{T_1}} + I_{s3} e^{j(1-s)\omega t} e^{-\frac{t-t_2}{T_2}}, (t > t_2) \quad (23)$$

式中: $T_2 = \sigma L_r / R_{ra}$; I_{s2} 为直流衰减分量初始值; I_{s3} 为转速频率衰减分量初始幅值, 忽略与转差相关的高次项, 则周期分量的有效值即为稳态短路电流有效值。

$$I_v = \frac{kU_{s0}}{\sqrt{2}R_{ra}^2\omega_1\sigma L_s} \sqrt{\sigma^2 R_{ra}^4 + (1-\sigma)^2 R_{ra}^2} \quad (24)$$

6 仿真验证

本节利用 PSCAD/EMTDC 对 DFIG 的短路电流特性进行验证。仿真所用的 DFIG 参数见表 1。仿真过程中风速保持恒定，为 8 m/s。系统等值阻抗为 1.2 p.u.， $t_1 = 1$ s 时电网电压发生三相电压故障，电压跌落程度 $k = 0.2$ 。

电压轻度跌落时，以 a 相电流为例，考虑 GSC 电流影响的短路电流(i_{ag})和未考虑 GSC 电流影响的(i_a)，如图 2 所示。可以看出，正常运行时 GSC 电流与定子电流相比幅值较小，可忽略不计，发生故障时 GSC 的交换功率变化使得其输出电流幅值增大，其电流不影响风机整体短路电流的变化趋势，但使其幅值有较明显的增加。在电网电压深度跌落时，受限于 GSC 的交换容量，在故障初始阶段电流达到最大值 i_{gmax} ，Crowbar 动作切断了变流器与转子回路的联系，转子电流的增大不再影响两个变流器间的功率差，因而在稳态短路电流值中，GSC 的影响可忽略不计。

表 1 DFIG 基本参数

Table 1 Parameters of DFIG

参数类别	参数值
额定功率/MW	1.5
额定电压/V	690
互感/H	0.009 73
定子电阻/ Ω	0.005 79
转子电阻/ Ω	0.006 21
定子漏感/H	0.000 398
转子漏感/H	0.000 265
定转子绕组比	0.344
Crowbar 阻值/ Ω	0.48
k_{pr}	0.02
k_{ir}	5.45
k_{pg}	0.053 7
k_{ig}	1.962 2
k_{pv}	0.022
k_{iv}	5.45

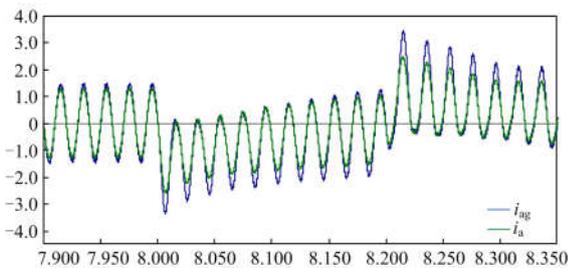


图 2 考虑/未考虑 GSC 电流的故障电流对比

Fig. 2 SC current of slight dip with/without consideration of current of GSC

以 a 相电流为例，对比电压深度跌落时，仅考虑 RSC 作用、仅考虑 Crowbar 作用以及两者同时考虑时的短路电流变化趋势。当未考虑 Crowbar 作用时，仅靠 RSC 无法抑制短路引起的电流，因此该电流值要远高于有 Crowbar 动作的情况，会对变流器和风机造成很大危害，这也是双馈风机配备 Crowbar 保护的原因。当未考虑 RSC 影响时，即假定故障瞬间无延时地投入 Crowbar 保护，由图 3 曲线可发现，瞬时投入 Crowbar 和延时投入的电流变化趋势相似，明显不同于仅有 RSC 作用的情况，而且电流幅值相差不大，尤其是电流衰减后趋向于同一电流值。无延时的 Crowbar 投入加快了短路电流的衰减速度，但对短路电流稳定值无影响。

仍以 a 相电流为例，验证本文所提计算方法的有效性。图 4 为深度电压跌落时的仿真结果和计算结果对比图，图中电流均以标么值表示。由图 4 可以看出，从故障发生到第一个周期结束期间，短路电流达到了最大值，但是计算值要比仿真值略大一些，因为 RSC 与 GSC 控制的滞后校正环节，其故障响应都需要一定的时间。另外，计算电流值的衰减速度要比仿真值稍慢一些，因为仿真模型中，除了 Crowbar 保护之外，机组中还有其他的保护装置(如 Chopper 等)，使得短路电流比计算值的衰减速

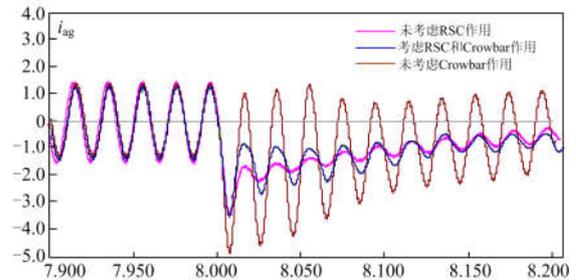


图 3 计及 RSC 和 Crowbar 的不同情况下电流的故障电流变化趋势对比

Fig. 3 Comparison of SC current of deep dip with consideration of RSC or Crowbar

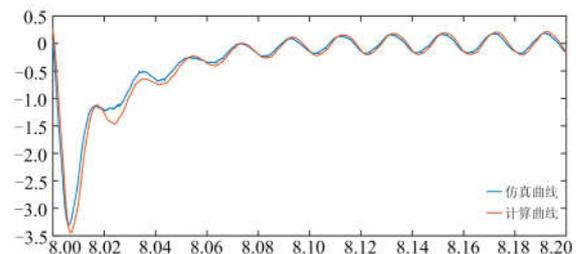


图 4 计算曲线与仿真曲线对比图

Fig. 4 Comparison of calculation results and simulation results

度要稍快。两种情况下短路电流最大值计算误差满足计算要求,有效值的仿真值和计算值误差不明显。

7 结论

本文分析了双馈风电机组的电磁暂态模型和短路电流的影响因素,计及 RSC 和 GSC 控制作用以及 Crowbar 的保护作用,考虑了故障发生时定转子电流之间的相互影响,推导出电压深度跌落时双馈风电机组的定子短路电流特性,在此基础上提出工程实用的短路电流最大值和有效值的计算方法。将本文中计算方法的结果和 PSCAD 仿真作对比,验证了短路电流表达式的准确性、可行性和实用性。该方法计算过程比较简单,计算结果的表达形式简洁又不失准确性,对风电机组相关设备的选择及保护整定具有积极意义。

参考文献

- [1] 李生民, 贾铎, 肖亚敏. 采用新型动态撬棒的 DFIG 低电压连锁故障穿越技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 79-86.
LI Shengmin, JIA Duo, XIAO Yamin. Low-high voltage chain fault ride-through technology of DFIG with active crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 79-86.
- [2] 徐晓宾, 李凤婷, 张国辉, 等. 双馈风电场联络线不对称接地故障测距方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 92-97, 104.
XU Xiaobin, LI Fengting, ZHANG Guohui, et al. Research on location method for asymmetrical grounding fault in the tie line of DFIG wind farm[J]. Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 92-97, 104.
- [3] 李生虎, 唐彩林, 吴东, 等. 基于电压相位比较的双馈风电场输电线路单相接地距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 1-7.
LI Shenghu, TANG Cailin, WU Dong, et al. Distance protection based on voltage phase comparison for line to ground fault of transmission line connecting wind farm with DFIGs[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 1-7.
- [4] KONTIS E O, DIMOS K S, PAPADOPOULOS T A, et al. Comparison of static and dynamic calculations of short circuit currents in distributed generation networks[C] // 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 2-5, 2014, Cluj-Napoca, Romania: 1-6.
- [5] LOPEZ J, SANCHIS P, ROBOAM X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [6] LÓPEZ J, GUBÍA E, SANCHIS P, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-330.
- [7] KONG X, ZHANG Z, YIN X, et al. Study of fault current characteristics of the dfig considering dynamic response of the RSC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 278-287.
- [8] 王增平, 蒋吕兴. 规模化风电场的故障特性对保护影响研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 9-13, 22.
WANG Zengping, JIANG Lǔxing. Study on the protective effect of the fault characteristics of large-scale wind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 9-13, 22.
- [9] 李圣清, 明瑶, 张煜文, 等. 应用于风力发电系统中的撬棒阻值整定新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 102-107.
LI Shengqing, MING Yao, ZHANG Yuwen, et al. A new method of Crowbar resistance setting used in wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 102-107.
- [10] 徐涛, 张梦彬. 风电场低电压穿越与无功补偿协调控制对电网稳定性的影响[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 100-103.
XU Tao, ZHANG Mengbin. Influence of the coordination control between reactive compensation and low voltage ride through on electricity grid stability[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 100-103.
- [11] 张艺博, 潘文霞, 郭家圣. 基于灵敏度分析的双馈电机短路电流简化计算[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(5): 6-12.
ZHANG Yibo, PAN Wenxia, GUO Jiasheng. Simplified calculation of short-circuit current for doubly fed induction generator based on sensitivity analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 6-12.
- [12] 甘俊文, 邵能灵. 基于机端电压跌落深度的双馈风机自适应短路电流计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 3-9.
GAN Junwen, TAI Nengling. Research on adaptive short circuit current calculation of DFIG considering the terminal voltage dip[J]. Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 3-9.
- [13] SWAIN S, RAY P K. Short circuit fault analysis in a grid connected DFIG based wind energy system with active crowbar protection circuit for ridgethrough capability and power quality improvement[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 84: 64-75.

- [14] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 不同 Crowbar 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.
- [15] 栗然, 王倩, 卢云, 等. Crowbar 阻值对双馈感应发电机低电压穿越特性的影响[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 101-107.
LI Ran, WANG Qian, LU Yun, et al. Impact of Crowbar resistance on low voltage ride through of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 101-107.
- [16] SHI L, CHEN N, LU Q. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 1526-1534.
- [17] GOHIL H B, MEHTA C R, VORA S C. Short circuit current comparison of DFIG during symmetrical faults with different wind speeds[C] // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), July 4-6, 2016, Delhi, India: 1-5.
- [18] YANG S, ZHOU T, CHANG L, et al. Analytical method for DFIG transients during voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6863-6881.
- [19] 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.
- [20] 谈竹奎, 徐玉韬, 肖永, 等. 一种双馈风力发电机组定子低次谐波电流抑制的方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(18): 64-69, 81.
TAN Zhukui, XU Yutao, XIAO Yong, et al. A scheme of low harmonic current suppression for doubly-fed induction generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(18): 64-69, 81.
- [21] NOURELDEEN O, HAMDAN I. A novel controllable crowbar based on fault type protection technique for DFIG wind energy conversion system using adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 328-339. DOI: 10.1186/s41601-018-0106-0.
- [22] 盛万兴, 马静, 张瑜, 等. 基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 7-14.
SHENG Wanxing, MA Jing, ZHANG Yu, et al. Research on calculation method of three-phase short circuit current for doubly-fed wind power generator based on the fault equivalent network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 7-14.
- [23] 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, 11.
XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor current of doubly-fed induction generator in grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 114-121, 11.
- [24] 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.
- [25] 李生虎, 黄杰杰, 吴正阳. 基于故障电流解析表达的 FCL 协助 DFIG 低电压穿越研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 8-13, 21.
LI Shenghu, HUANG Jiejie, WU Zhengyang. LVRT of DFIG with FCL based on analytical expression of fault current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 8-13, 21.
- [26] 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.

收稿日期: 2019-03-13; 修回日期: 2019-09-19

作者简介:

靳现林(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为风电并网及运行技术; E-mail: jxl1974@sina.com

刘其辉(1974—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与并网技术. E-mail: 1339133389@qq.com

(编辑 许威)