双馈风力发电机三相短路电流分析

张学广， 徐殿国， 李伟伟
(哈尔滨工业大学 电气学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了研究双馈风力发电机组的低电压穿越控制问题,分析了双馈风力发电机定子端三相短路时短路电流的产生机理,给出了双馈风力发电机在空载同步转速条件下的定转子短路电流的近似解析表达式。在此基础上,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。在理论分析的基础上,建立了 3 MW 双馈风力发电机的模型,对发电机定子端三相短路故障状态进行了仿真研究。仿真结果表明:通过定转子短路电流的近似解析表达式和发电机故障前的初始状态可以有效对双馈发电机短路电流进行定性分析,为进一步研究双馈风力发电机的低电压穿越能力提供了理论依据。

关键词:异步发电机; 双馈发电机; 风力发电; 三相短路; 短路电流
中图分类号: TM302 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007- 449X(2008)05- 0493- 05

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

ZHANG Xue-guang, XU Dian-guo, LI Wei-wei
(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to research the low voltage ride through (LVRT) control of doubly fed induction generator (DFIG), the principle of short circuit current of DFIG when three-phase short circuit fault occurred in stator is analyzed. The short circuit current approximate equations of DFIG in free load and synchronous speed condition were deduced. The influences caused by pre-fault state such as speed, active power and reactive power were analyzed based on the electromagnetic relationship of DFIG. A 3MW DFIG model was built, and the three-phase fault was simulated in stator side of the DFIG. The simulation results showed that the short circuit current of DFIG can be analyzed through the short circuit current approximate equations and generator pre-fault condition. It can be taken as theoretical base for the research on LVRT control of DFIG.

Key words: asynchronous generators; doubly fed induction generators; wind power; three-phase fault; short circuit currents

1 引 言

随着风力发电规模和风电机组单机容量的不断增大,针对并网型风电机组的运行要求也日益严格。目前很多标准都要求风电机组具有一定的低电压穿越能力,即在一定程度的电网故障情况下能够继续

收稿日期: 2007 - 12 - 20
基金项目: 教育部博士点基金 (20060213027)
作者简介: 张学广 (1981 -),男,博士研究生,研究方向为可再生能源技术;
徐殿国 (1960 -),男,博士生导师,教授,研究方向为电力电子技术与电机控制技术;
李伟伟 (1982 -),男,硕士研究生,研究方向为双馈风力发电技术。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

并网运行[1,2]。双馈风力发电技术是目前应用最广泛的风力发电技术。其具有功率因数可调、效率高、变频装置容量小、节省投资等优点[3]。

在双馈风电机组中,发电机采用绕线式异步电机。其中发电机定子直接与电网相连,转子侧通过交直交变换器与电网相连。当电网电压突然跌落时,会在定子绕组中造成很大的冲击电流。由于发电机定子转子之间的电磁耦合关系,电网电压跌落同样会导致转子侧过流。为防止转子侧过流毁坏变换器,一般采用电机转子侧安装 Crowbar电路,当电压跌落时,通过 Crowbar短路双馈电机的转子绕组,起到保护变换器的作用[4-6]。

由于双馈电机的转子侧接功率变换器,而传统的鼠笼式异步电机的转子是直接短接的,因此双馈电机在短路故障时的特性与鼠笼式异步电机有所不同。当发生短路故障后,由于双馈电机的转子侧变换器的关闭,Crowbar电路突然将双馈电机转子短接,在双馈电机的转子磁链中将会产生暂态的直流分量,转子磁链中的这部分暂态直流分量将会影响双馈电机的短路特性。

为保证双馈发电机电网故障情况下并网运行,有必要分析电网故障情况下双馈电机的定转子电流。本文分析了双馈发电机三相短路时短路电流的产生机理。为简化分析,给出了发电机在空载同步转速条件下的定转子短路电流的近似解析表达式。在此基础上,分析了故障前不同转速、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。最后通过仿真进行了验证。

2 双馈发电机同步转速空载条件下短路电流

2.1 双馈发电机模型

当定转子均采用发电机惯例时,双馈感应电机的数学模型为[7]

$$\vec{u}_s = -R_s\vec{i}_s - \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} - j\omega_s\vec{\psi}_s, \tag{1}$$

$$\vec{u}_r = -R_r\vec{i}_r - \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} - j(\omega_s-\omega_r)\vec{\psi}_r, \tag{2}$$

$$\vec{\psi}_s = L_s\vec{i}_s + L_m\vec{i}_r, \tag{3}$$

$$\vec{\psi}_r = L_m\vec{i}_s + L_r\vec{i}_r。 \tag{4}$$

其中:$\vec{u}_s$、$\vec{u}_r$、$\vec{i}_s$、$\vec{i}_r$、$\vec{\psi}_s$、$\vec{\psi}_r$分别表示定转子电压、电流和磁链;R_s、R_r、L_s、L_r分别表示定转子电阻和电感;L_m表示电机激磁电感;ω_s为电网同步角速度,ω_r为电机转子电角速度。

由式(3)、(4)可以得到由定转子磁链表示定转子电流的表达式为

$$\vec{i}_s = \frac{\vec{\psi}_s}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} - \frac{L_m}{L_r}\frac{\vec{\psi}_r}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}}, \tag{5}$$

$$\vec{i}_r = -\frac{L_m}{L_s}\frac{\vec{\psi}_s}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} + \frac{\vec{\psi}_r}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}}。 \tag{6}$$

由于双馈电机的电感特性,在电网故障前后,定转子的磁链是连续变化的。因此通过研究磁链的暂态变化过程可以得到故障电流的暂态值。

2.2 短路后定转子磁链变化

当故障发生后,定子端电压下降为零,在定子绕组中出现相对于定子绕组不变的磁链直流分量。由于定子电阻的作用,定子磁链的直流分量会缓慢地衰减。其衰减时间可以认为基本由定子电阻及转子短路时的定子等效电感决定[8]。

当故障发生时,双馈风力发电机组一般采用关闭转子侧变换器,通过 Crowbar装置将转子短路的方法来保护转子侧变换器。当转子短路后,转子侧电压突然下降为零,在转子绕组中同样会出现相对于转子绕组静止的直流分量。转子磁链的直流分量会缓慢的衰减,其衰减时间可以认为基本由转子电阻及定子短路时的转子等效电感决定。

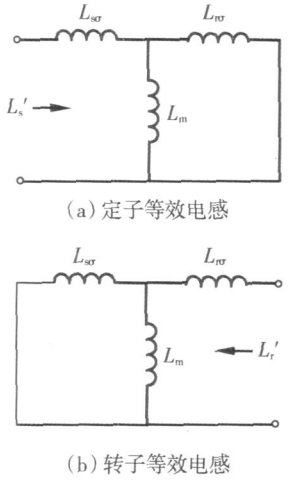

图 1 短路时定转子等效电感

Fig. 1 Stator and rotor equivalent inductance in short circuit fault

图 1为双馈电机定转子短路时的定转子等效电感的等效电路。由图 1可得

$$L_s' = L_{s\sigma} + \frac{L_{s\sigma}L_m}{L_{s\sigma}+L_m}, \tag{7}$$

$$L_r' = L_{r\sigma} + \frac{L_{r\sigma}L_m}{L_{r\sigma}+L_m}。 \tag{8}$$

其中,$L_{s\sigma}$,$L_{r\sigma}$为定转子漏感。由此可以得到定转子磁链在短路后的衰减时间常数为

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$T_s' = \frac{L_s'}{R_s}, \tag{9}$$

$$T_r' = \frac{L_r'}{R_r}。 \tag{10}$$

由式 (5)、(6)可得

$$\vec{i}_s = \frac{\vec{\psi}_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_r}\frac{\vec{\psi}_r}{L_s}, \tag{11}$$

$$\vec{i}_r = -\frac{L_m}{L_s}\frac{\vec{\psi}_s}{L_r} + \frac{\vec{\psi}_r}{L_r}。 \tag{12}$$

2.3 短路电流解析表达式

由于 MW 级发电机定转子电阻很小,为简化分析,在电网故障前双馈发电机稳态运行时忽略其定转子电阻的影响。由于暂态时间持续较短,为简化分析,可以假设暂态过程中转速为一常值。

在双馈发电机稳态运行时,由于定子直接与电网相连,在忽略定子电阻的条件下,定子磁链幅值保持不变,并且恒定超前于电网电压矢量 90 °,可以表示为

$$\vec{\psi}_s = -\frac{\vec{u}_s}{j\omega_s} = -\frac{V_s e^{j\omega_s t}}{j\omega_s}。 \tag{13}$$

当双馈发电机空载时,转子磁链可以表示为

$$\vec{\psi}_r = -\frac{L_r}{L_m}\frac{V_s e^{j\omega_s t}}{j\omega_s}。 \tag{14}$$

假设 $t=0$时刻定子发生短路,此时定转子磁链瞬时值为

$$\Psi_{s0} = -\frac{V_{s0}}{j\omega_s}, \tag{15}$$

$$\Psi_{r0} = -\frac{L_r}{L_m}\frac{V_{s0}}{j\omega_s}。 \tag{16}$$

短路故障后定子磁链可以表示为

$$\vec{\psi}_s = \Psi_{s0} e^{-t/T_s'} = -\frac{V_{s0}}{j\omega_s} e^{-t/T_s'}。 \tag{17}$$

由于短路时,转子仍然以同步转速相对于定子运动,因此,在定子静止坐标系下,故障后转子磁链可以表示为

$$\vec{\psi}_r = \Psi_{r0} e^{-t/T_r'} e^{j\omega_s t} = -\frac{L_r}{L_m}\frac{V_{s0}}{j\omega_s} e^{-t/T_r'} e^{j\omega_s t}。 \tag{18}$$

将式 (17)、(18)代入式 (11)可以得到短路故障后定子短路电流的近似表达式为

$$\vec{i}_s = -\frac{V_{s0}}{j\omega_s L_s}\left(e^{-t/T_s'} - e^{-t/T_r'} e^{j\omega_s t}\right)。 \tag{19}$$

由式 (11)、(12)可以看出,当定转子磁链方向相反时,定转子短路电流会达到最大,因此出现最大电流的时间与电机转速有关。当电机转速为同步转速时,在短路发生后 1/2电网周期后定转子电流达到最大值。

同理在转子坐标系下转子电流可以近似表示为

$$\vec{i}_r = -\frac{V_{s0}}{j\omega_s L_r}\left(1 - \frac{L_m}{L_s} e^{-t/T_s'} e^{-j\omega_s t} + \frac{L_r}{L_m} e^{-t/T_r'}\right)。 \tag{20}$$

3 短路前电机运行状态对短路电流影响分析

在前面主要分析的是双馈发电机在理想的同步转速空载情况下的短路电流。在实际运行中,双馈发电机故障前的运行状态会对短路电流产生一定影响。在这里通过故障前双馈发电机稳态运行时的磁链关系来分析其对短路电流的影响。为简化分析,假定短路故障发生在双馈电机定子端。

3.1 输出有功功率对短路电流影响

图 2为电网同步坐标系下双馈电机稳态运行输出一定有功功率时的电磁关系示意图。定子磁链超前电网电压 90 °并保持不变。在空载情况下,转子磁链与定子磁链基本相等。随着输出有功功率的增加,转子的反应磁链$\vec{\psi}_a = -\frac{L_r}{L_m}(L_s L_r - L_m^2)\vec{i}_s$增加,转子磁链幅值会相应增加,同时超前定子磁链的角度也会增大。由前面的分析可以得到,由于转子磁链的增加,定转子短路电流都会相应增大,并且由于转子磁链超前定子磁链角度的增大,定转子短路电流最大值出现的时间会相应变短。

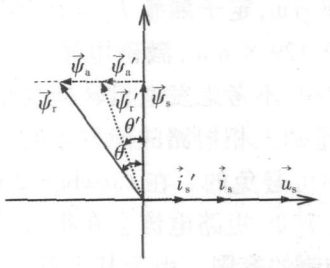

图 2　输出有功功率变化对定转子磁链影响示意图

Fig. 2　Sketch map of stator and rotor flux influence caused by output active power variation

3.2 输出无功功率对短路电流影响

图 3为电网同步坐标系下双馈电机稳态运行输出一定无功功率时的电磁关系示意图。当双馈发电机定子侧输出一定的滞后无功功率时,定子的反应磁动势会表现为对主磁通的去磁,为保持定子磁链的恒定,需要增加转子励磁,因此转子磁链会增加,此时对应图 3中的$\vec{\psi}_r'$。当定子侧吸收一定的滞后无功功率时,定子的反应磁动势会表现为对主磁通的增磁,为保持定子磁链的恒定,需要减小转子励磁,因此转子磁链会减小,对应图 3中的$\vec{\psi}_r''$。输出无功功率的变化同样会引起定转子磁链角度的变化。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

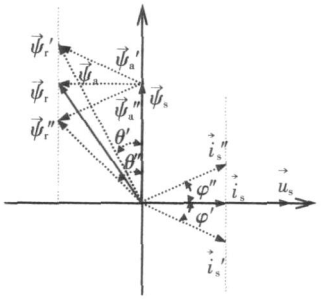

图 3 输出无功功率变化对定转子磁链影响示意图

Fig. 3 Sketch map of stator and rotor flux influence caused by output reactive power variation

3.3 转速对短路电流影响

由前面的分析可以看出,双馈发电机稳态运行时,转速对定转子磁链的关系并没有直接的影响。在短路故障后,转速会影响转子磁链直流分量相对于定子绕组的转速,即影响定转子电流到达最大值的时间,考虑到定转子磁链衰减的影响,会对定转子短路电流略有影响。

4 仿真结果

为验证前面理论分析的结果,以一台 3 MW 的双馈风力发电机为例进行了仿真研究。仿真参数如下:额定功率 $P=3$ MW,额定电压 690 V,额定转速 1 000 r/min。定子电阻 $R_s=0.004\,5$ p.u,转子电阻 $R_r=0.005\,8$ p.u,定子漏感 $L_{s\sigma}=0.161\,3$ p.u,转子漏感 $L_{r\sigma}=0.129\,8$ p.u,激磁电感 $L_m=3.365$ p.u。在仿真过程中,不考虑发电机转速变化。在实际环境中,当严重的三相短路故障发生时,Crowbar电路的动作是不可避免的。在 Crowbar动作前,仅有定子磁链发生突变,短路电流会在很短的时间内增大到变换器控制的容限。由于其上升时间非常短,本文中忽略这段时间内变换器控制的影响。在短路故障后,转子侧短路,为简化分析,不考虑 Crowbar电阻及其动作时间。

图 4为采用电机模型与短路电流近似表达式的定转子短路电流仿真波形比较。其中实线为采用电机模型仿真结果,虚线为采用短路电流近似表达式的计算结果。由仿真结果可以看出两者基本一致,电机的定转子短路电流可以用短路电流的近似表达式表示。

图 5(a)为双馈电机空载情况下不同转速时定转子峰值电流变化图,由图可以看出转速对定转子短路电流只有轻微影响。图 5(b)为双馈电机同步转速下输出有功功率对定转子短路电流的影响。当输出有功功率增加时,定转子短路电流均略有增加。

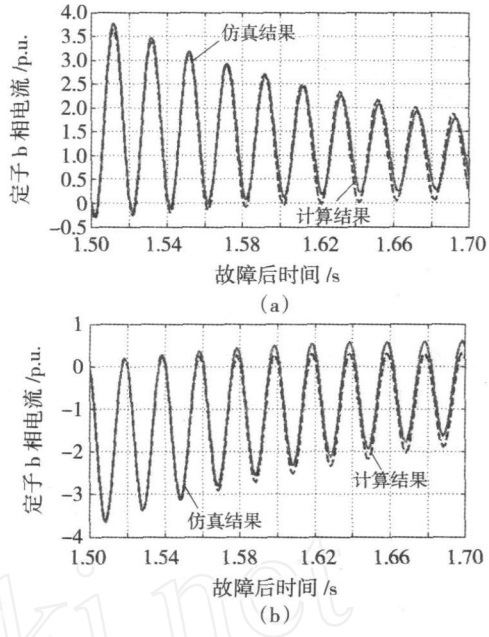

图 4 电机模型仿真与短路电流的近似表达式结果比较

Fig. 4 Comparison between motor model simulation and approximate equation of short circuit current

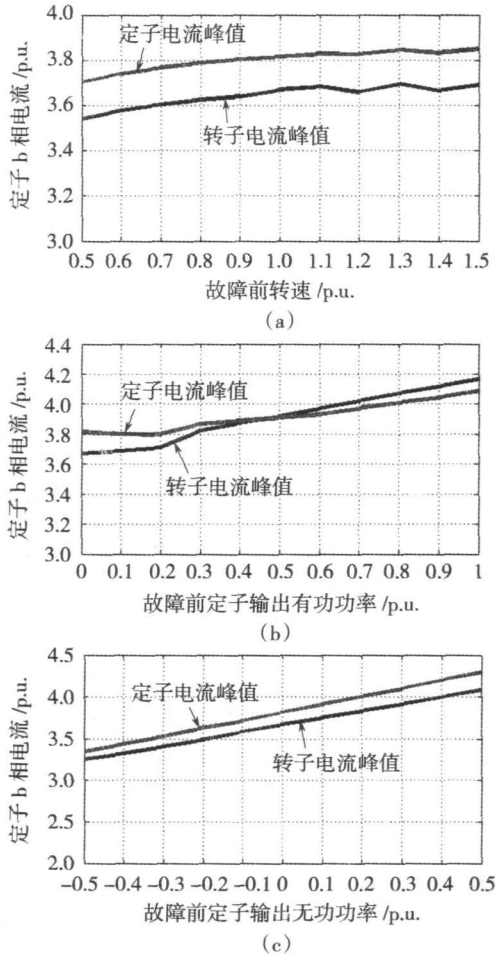

图 5 短路故障前初始状态对短路电流的影响

Fig. 5 The influence of short circuit current caused by pre-fault condition

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 5(c)为双馈电机同步转速下输出无功功率对定转子短路电流的影响。以上仿真结果均与理论分析结果一致。

5 结　论

本文研究了双馈发电机三相短路时短路电流的产生机理,经理论分析得到以下结论:

1)双馈发电机在空载同步转速条件下的定转子短路电流可以用近似解析表达式来表示。

2) 发电机转速会影响定转子电流到达最大值的时间,对定转子短路电流大小影响很小。

3) 当发电机输出有功功率增加时,定转子短路电流均会略有增加,反之则减小。

4) 定转子短路电流受发电机输出无功功率影响较大。当输出无功增加时,定转子短路电流均会增加,反之则减小。

以上结论均经过了仿真验证,可应用于各种电网故障情况下双馈风力发电机故障电流的分析,为进一步研究双馈风力发电机的低电压穿越能力奠定了理论基础。

参 考 文 献:

[1] 关宏亮,赵海翔,迟永宁,等. 电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 78 - 82.
GAN Hongliang, ZHAO Haixiang, CHI Yongning, *et al*. Requirement for LVRT capability of wind turbine generator in power system[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(7): 78 - 82.

[2] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10) 130 - 135.
XIANG Dawei, YANG Shunchang, RAN Li. System simulation of a doubly fed induction generator ride through control for symmetrical grid fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(10): 130 - 135.

[3] DATTA R, RANGANATHAN V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine - a comparison with alternative schemes[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2002, 17(3): 414 - 421.

[4] JOHAN Morren, SJOERD W H de Haan. Short circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 174 - 180.

[5] ISTVAN Erlich, JORG Kretschmann, JENS Fortmann, *et al*. Modeling of wind turbines based on doubly fed induction generators for power system stability studies[J]. *IEEE Trans on Power Systems*. 2007, 22(3): 909 - 919.

[6] JESUS Lopez, PABLO Sanchis, XAVIEr Roboam, *et al*. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three phase voltage dips[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2007, 22(3): 709 - 717.

[7] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京. 清华大学出版社, 2005: 90 - 111.

[8] 汤蕴　,张奕黄,范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 84 - 90.

(编辑:于智龙)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net