

基于转子串电阻的双馈风电机组的故障穿越方法研究

孟娜娜, 孙丽玲

(华北电力大学电气工程学院, 河北保定 071003)

Analysis of Fault Ride-through of Doubly-fed Wind Power Generator Based on Rotor Series Resistor

MENG Nana, SUN Liling

(School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 电网发生故障时, Crowbar 保护电路的投入会将双馈风电机的转子侧变换器短路从而使其失去控制, 而且变换器的传统控制方法会导致双馈风电机组的控制性能恶化。针对以上问题, 本文在考虑定子励磁电流动态变化的基础上改进了变换器的控制策略, 并与转子串电阻相互配合, 实现了双馈风电机组的故障穿越方法。利用 MATLAB/Simulink 仿真平台进行了仿真实验, 结果表明, 改进的控制策略与转子串电阻相互配合能够协助双馈风电机组成功穿越电网的严重故障, 有利于风电系统的稳定运行。

关键词: 双馈发电机; 定子励磁电流; 变换器; 故障穿越; 转子串电阻

Abstract: In the case of power grid failure, the rotor side converter of double fed wind generator will be shorted when Crowbar protection circuit is put into, which results in the out of control of doubly fed wind power generator. Then the traditional control method of converter will lead to the deterioration of control performance of doubly fed wind generator. As to above problems, this paper improves converter control strategy by considering the dynamic changes of the stator excitation current, and proposes fault ride-through scheme by combining with rotor series resistor. The proposed scheme is analyzed and its superiority is verified through Matlab/Simulink software. Simulation results show that the improved control strategy coordinating with rotor series resistor method can help doubly fed generator ride through the serious fault of the power grid, which is conducive to the operation stability of the wind power system.

Keywords: double-fed wind power generator; stator excitation current; converter; fault ride-through; rotor series resistor

0 引 言

能源危机和环境污染是当代人类生存和发展急

需解决的两大问题, 相比于核能、太阳能等新能源发电技术, 风力发电是目前研究较为成熟、应用较为广泛的一种发电方式。双馈异步发电机(Double-fed induction generation, DFIG)因其具有能够变速恒频运行、变流器容量小、有功无功可解耦控制等诸多优点, 成为风力发电系统中最受欢迎的机型之一^[1]。但是 DFIG 对电网故障尤其是电压故障十分敏感, 所以如何协助 DFIG 在电网电压跌落期间不脱网运行一直是研究的重点。目前, DFIG 的故障穿越技术主要有两种^[2], 一种是基于控制算法的故障穿越技术, 另一种是基于附加电路的故障穿越技术。

文献 [3] 针对传统矢量控制方案的不足提出了改进的控制策略, 能够有效地控制转子电流进而保护转子励磁变频器。文献 [4] 提出通过无功功率控制通道上并联励磁电流控制器来加快定子磁链瞬态分量的衰减, 从而减小故障期间转矩和功率的振荡, 协调机组穿越对称的电网电压跌落故障。文献 [5] 对 DFIG 在电网电压跌落时定子电流的电磁暂态过渡过程进行分析后, 提出了考虑定子磁链电流动态过渡过程的励磁电流新型控制策略。文献 [6] 针对转子侧变换器的电流控制, 提出了通过增加前馈定子电压瞬态补偿项来改善双馈风机的故障穿越能力和动态稳定性。文献 [7] 以退磁电流和无功功率控制器的输出共同作为电流控制器的参考值, 提出了一种定子磁链主动衰减的策略。但是, 以上文献中所涉及的方法常常受到 DFIG 参数的限制, 而且只能保证穿越较轻的电压跌落故障, 对于严重的电压跌落没有明显的作用。另外, 控制部分大多数也较为复杂。

针对转子电流本身, 许多文献提出了附加额外

电阻的方法,其中撬棒保护电路因原理简单、对穿越严重的电压跌落故障效果显著而被广泛应用。文献[8]中采用的Crowbar保护电路能有效抑制电压跌落时转子回路产生的电流。文献[9]提出Crowbar保护电路中阻值的选取存在一个最优值使DFIG低电压穿越的能力最好。文献[10]针对传统passive crowbar的不足,提出采用active crowbar电路的控制方法来提高DFIG的低电压穿越能力。文献[11]在电网发生三相对称短路故障时,提出IGBT型Crowbar的投切策略。文献[12]通过研究发现,Crowbar电路在故障结束一个周波后退出运行会使DFIG得到更好的故障穿越效果。然而Crowbar保护电路的投入会将DFIG转子侧变换器短路,运行在异步发电机状态下,需要从电网中吸收无功功率,减缓了电网恢复稳定运行,这也就失去了作为双馈风电机的优势。

针对以上两种故障穿越技术的不足,本文在考虑定子励磁电流动态变化的基础上改进了变换器的控制策略,并与转子串电阻相互配合来实现低电压穿越,保证DFIG的可控运行。通过Matlab仿真平台分别对改进的控制策略、转子串电阻电路和Crowbar保护电路的穿越方法进行了仿真分析,证明了本文所提故障穿越方法的有效性和优越性。

1 电网故障下变换器的控制策略

1.1 转子侧变换器的控制策略

传统的矢量控制方法通常假设电网是无穷大的理想电网,认为电网电压恒定不变,并没有将定子励磁电流的动态变化过程考虑在内,虽然提出的转子侧变换器控制策略在电网正常的状况下能够使双馈风电系统获得良好的动静态特性,但是在电网发生故障时会恶化双馈风电系统的控制性能。为了在电网电压骤降时,提高双馈风电机组的控制性能并保证其不脱网运行,本文在考虑定子励磁电流动态变化的基础上改进DFIG转子侧变换器的控制策略。

DFIG在同步旋转dq坐标系下的电压矢量方程和磁链矢量方程分别如下:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_1 \psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_s \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (2)$$

令定子励磁电流矢量 I_{m0} 为

$$I_{m0} = \frac{\psi_s}{L_m} = \frac{L_s}{L_m} I_s + I_r \quad (3)$$

由式(1)、(2)和(3)得

$$\frac{dI_{m0}}{dt} = \frac{1}{L_m} (U_s - R_s I_s - j\omega_1 \psi_s) \quad (4)$$

转子侧变换器采用定子电压定向的控制方式,即 $u_{ds} = u_s$, $u_{qs} = 0$,将转子电压矢量方程写成dq分量的形式如下:

$$\begin{cases} u_{rd} = u'_d + \Delta u_d \\ u_{rq} = u'_q + \Delta u_q \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} u'_d = (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} \\ u'_q = (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta u_d = R_r i_{rd} - \omega_s (L_m i_{sq} + L_r i_{rq}) + \frac{L_m}{L_s} (u_s - R_s i_{sd} + \omega_1 (L_s i_{sq} + L_m i_{rq})) \\ \Delta u_q = R_r i_{rq} + \omega_s (L_m i_{sd} + L_r i_{rd}) + \frac{L_m}{L_s} (-R_s i_{sq} + \omega_1 (L_s i_{sd} + L_m i_{rd})) \end{cases} \quad (7)$$

电网发生三相对称短路故障时,DFIG的转子电流由两个分量组成:转子电流励磁分量和由定子磁链直流分量引起的转子电流旋转分量^[13]。为了抵消定子磁链直流分量对转子电流的影响,转子电流励磁给定为

$$\begin{cases} i'_{rd} = i_{rd}^* - (i_{rd} - i_{rdDC}) \\ i'_{rq} = i_{rq}^* - (i_{rq} - i_{rqDC}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{rdDC} 、 i_{rqDC} 为转子电流励磁分量的直流量。改进的转子侧变换器故障穿越控制框图如图1。

1.2 网侧变换器的控制策略

在电网发生严重故障时,如果网侧变换器采用传统的控制方法,这将无法保证变换器直流侧母线电压的波动在安全阈值内。在本文中,网侧变换器采用电压定向的方法,即 $u_{gd} = u_s$, $u_{gq} = 0$,改进的控制方案以保证网侧变换器输入功率与输出功率相平衡为目标,在原来直流母线电压外环的输出上增加一个前馈分量:

$$i_{gd}^* = \frac{u_{dc} i_{dcr}}{u_s} \quad (9)$$

式中: i_{dcr} 是转子侧的直流电流; u_{dc} 是直流母线电压。

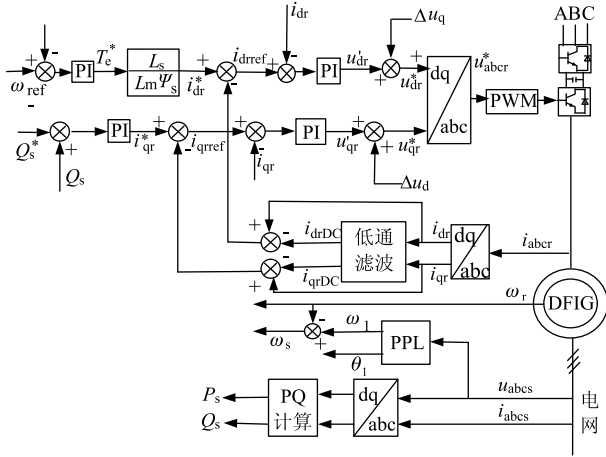


图 1 改进的转子侧变换器控制框图

改进的 DFIG 网侧变换器控制框图如图 2，将直流母线电压经 PI 调节器的输出和前馈分量共同作为网侧输入电流 d 轴分量的参考值。

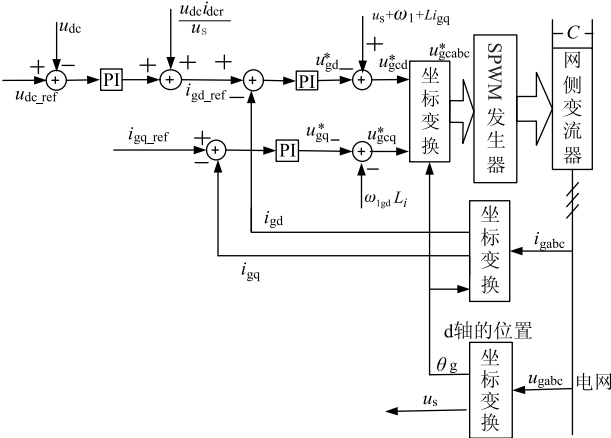


图 2 改进的网侧变换器控制框图

2 转子串电阻电路分析

基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越方法的系统结构如图 3。

2.1 转子串电阻电路可行性分析

由 DFIG 同步旋转坐标系下的电压矢量方程(1)和磁链矢量方程(2)得到转子电压方程的另一种形式：

$$(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{d\mathbf{I}_r}{dt} = \mathbf{U}_r - R'_r \mathbf{I}_r + \frac{L_m}{L_s} (\mathbf{U}_s - j(\omega_1 - \omega_s) \boldsymbol{\psi}_s) - \frac{R_s}{L_s} \boldsymbol{\psi}_s - j(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_s \mathbf{I}_r \quad (10)$$

式中：

$$R'_r = R_r + (\frac{L_m}{L_s})^2 R_s \quad (11)$$

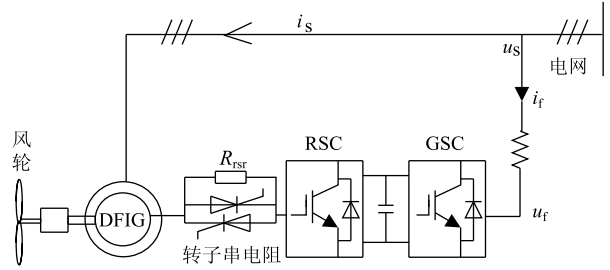


图 3 转子串电阻电路在双馈风电机组中的应用系统图

由式(11)可看出增大转子回路或者定子回路上的电阻都可以抑制转子回路上的故障电流，考虑到 DFIG 在正常运行时旁路开关处于闭合状态，这会带来额外的电路损耗。因为转子绕组侧变换器容量仅为 DFIG 容量的 30%~40%，所以转子串电阻电路仅需处理部分容量，因而电路损耗小。此外，转子绕组中串入限流电阻会增加定子瞬态时间常数使得系统的过渡过程延长，有利于减小系统的应力，降低对电力电子设备和机械系统的损害^[14]。

2.2 转子串电阻阻值的选择

转子串电阻电路中限流电阻阻值的确定要以最严重电压跌落故障条件下可能出现的转子故障电流最大值为依据，因转子串电阻保护电路的电阻是串联在转子绕组回路中的，此时，转子侧变换器仍然处于工作状态，所以确定电阻阻值时还要考虑转子侧变换器能够承受的最大电压。转子故障电流最大值可近似表示为^[15]

$$i_{ra,max} = i_{ra}(t_{0-}) - \frac{V_{rp} \tau_r}{\sigma L_r (1 + \tau_r^2 (s \omega_1)^2)} - \frac{k_s (1-s) V_s \tau_r}{\sigma L_r (1 + \tau_r^2 \omega_r^2)} + \frac{V_{rp}}{\sigma L_r \sqrt{1 + \tau_r^2 (s \omega_1)^2}} + \frac{k_s (1-s) V_s}{\sigma L_r \sqrt{1 + \tau_r^2 \omega_r^2}} \quad (12)$$

式中： τ_r 为转子瞬态时间常数； V_{rp} 为假设转子侧变换器施加到转子绕组上的电压在故障后的幅值； V_s 为定子电压幅值。边界条件为

$$i_{ra,max} \leq i_{r,lim} \quad (13)$$

$$V_{rp} \leq V_{RSC,lim} \quad (14)$$

式中： $i_{r,lim}$ 为转子电流安全限值； $V_{RSC,lim}$ 为转子变换器电压安全限值。

$$R_{rsr} = \frac{\sigma L_r}{\tau_r} - R_r \quad (15)$$

利用式(12)、(13)、(14)和(15)可以求出转子串电阻阻值 R_{rsr} 。

3 仿真验证及结果分析

3.1 仿真条件

风电场由6台同一型号的双馈型异步发电机组成,按照图3所示的系统图搭建仿真模型。

双馈感应发电机参数:额定功率为1.5MW,额定频率为50Hz,极对数为3,定子额定线电压为690V,直流母线额定电压为1200V,定子电阻为0.00706pu,转子电阻为0.005pu,定子漏感为0.171pu,转子漏感为0.156pu,定转子间的互感为2.9pu。

电力系统参数:系统故障在1.5s时发生,110kV母线电压跌落到额定值的20%,故障共持续300ms,1.8s时电压恢复正常。

其他参数:电网发生故障的300ms内风速的变化很小,风速变化对仿真结果的影响可以忽略,设风速恒为11.5m/s。

3.2 转子串电阻及改进控制策略的性能分析

根据3.1的仿真条件,利用Simulink仿真平

台进行了仿真,将3种故障穿越方法对双馈风电系统的影响作比较。3种故障穿越方法如下:方法一:仅采用改进的控制策略;方法二:传统的控制策略与转子串电阻相互配合;方法三:改进的控制策略与转子串电阻相互配合。其中方法三为本文所提出的基于转子串电阻电路的故障穿越方法。另外,在有转子串电阻的仿真中,根据故障发生的时间控制转子串电阻电路的开关,1.5s时开关断开限流电阻接入转子回路,在1.8s故障结束延后20ms即1.82s时开关闭合限流电阻被短路,电网恢复正常运行。

图4为转子三相电流对比波形,由图4(a)和(b)知,方法一、二均不能将转子三相电流限制在2pu内,并且方法一在电压跌落到额定值的20%时转子过电流最为严重,其值超过6pu,故障穿越能力最差。图4(c)说明方法三能够很好地抑制转子三相电流,故障穿越能力明显优于方法一和方法二。由图5定子三相电流的仿真结果同样说明了方法三的有效性,定子三相电流的值均小于2pu。

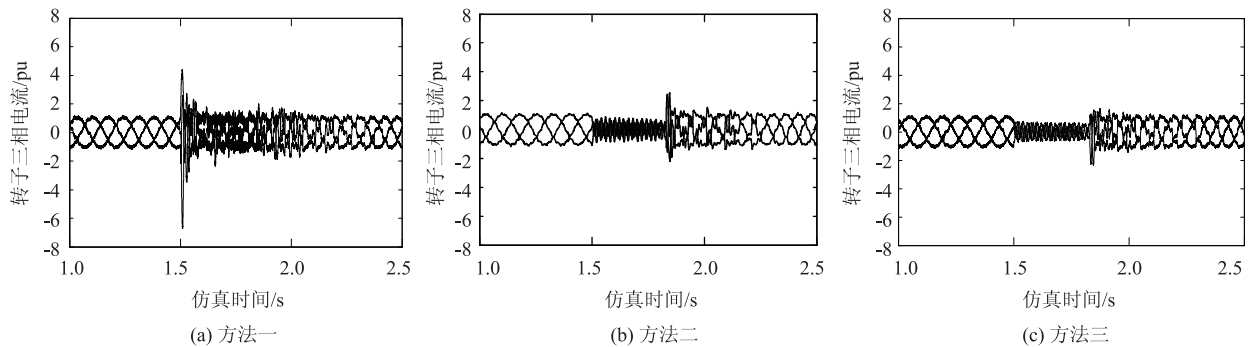


图4 双馈风电机组在3种故障穿越方法下的转子三相电流

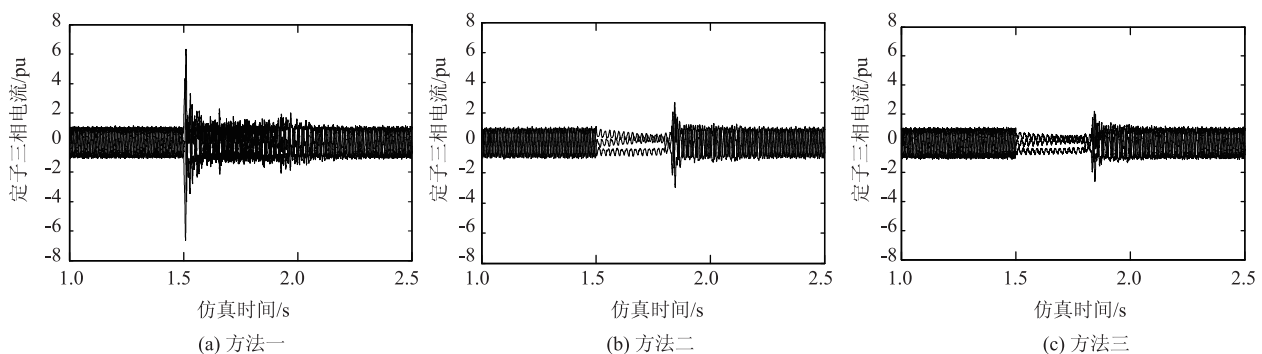


图5 双馈风电机组在3种故障穿越方法下的定子三相电流

图6展示了3种故障穿越方法下风电系统的直流母线电压、电磁转矩的情况。由图6(a)得,采

用转子串电阻的故障穿越方法即方法二、三可以抑制直流侧母线电压的波动,控制其在1.2倍额定

值以下^[16]，能够保证变换器不被损坏。方法三中直流母线电压的波动幅度最小，抑制效果最好。从图 6(b)看出方法三的电磁转矩的振荡幅度最小，

远远低于安全限制 2.5pu，从而更有利于延长双馈风电系统齿轮箱的使用寿命。

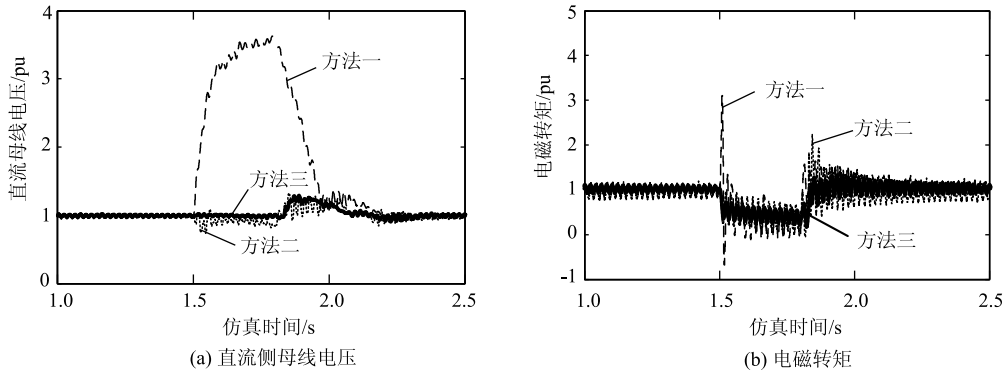


图 6 双馈风电机组在 3 种故障穿越方法下的瞬态性能

3.3 转子串电阻和 Crowbar 保护电路对比分析

仿真中 DFIG 变换器均采用改进的控制策略，仿真条件如 3.1 节所述，为了具有可比性，令转子串电阻电路的限流电阻与 Crowbar 保护电路的旁路电阻阻值相同并且保证两电阻投入和退出的时刻相同。

图 7 展示了双馈风电机组分别采用转子串电阻和 Crowbar 保护电路在故障期间的瞬态性能。Crowbar 保护电路的运行导致 DFIG 因转子侧变换器短路而运行于异步发电机的状态，在 Crowbar 保护电路退出时风电机组需要从电网中吸收无功功率，图 7(a)证实了这一点，这将不利于风电系

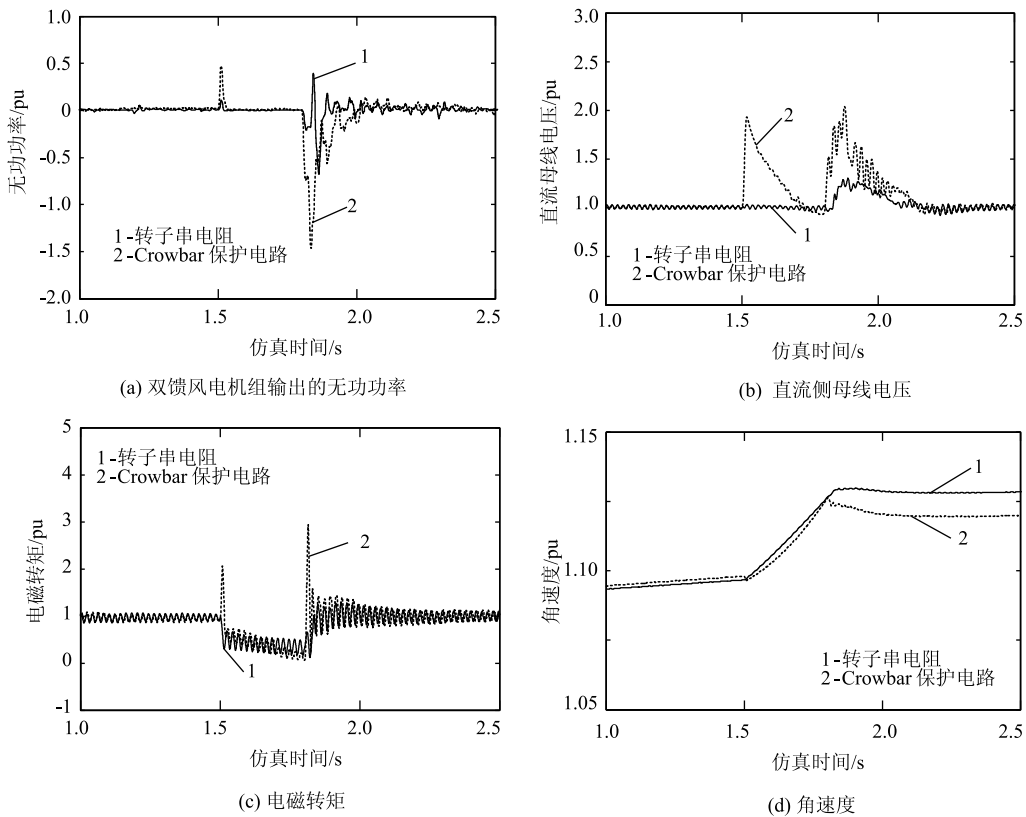


图 7 双馈风电机组在转子串电阻和 Crowbar 保护电路下的瞬态性能

统恢复稳定运行。从图 7(a)看出含 Crowbar 电路的方法比含转子串电阻电路的方法需要吸收更多的无功功率,这是因为转子串电阻电路投入运行时 DFIG 仍然处于可控状态,可以输出无功功率,加快风电系统恢复到稳定运行状态。由图 7(b)和(c),相比于 Crowbar 保护电路,转子串电阻能够将直流侧母线电压和电磁转矩限制在安全限值之内,并且远远小于安全限值,波动幅度比 Crowbar 保护电路小得多,保证变换器免受损坏。从图 7(d)所示的转速响应可以看出,在采用转子串电阻的故障穿越方法中,转速在故障期间的加速缓慢,提高了系统的稳定性。

4 结 论

通过以上仿真分析,本文采用的转子串电阻与改进的控制策略相互配合的故障穿越方法能够使双馈风电机组成功穿越电网的严重故障,保证双馈风电机组满足电网规范的穿越要求,并且弥补 Crowbar 保护电路作用时使 DFIG 失控的不足,具有比传统的控制策略以及 Crowbar 保护电路更好的暂态性能,是一种值得研究和推广的故障穿越方法。

参 考 文 献

- [1] Niirnen J. Voltge Dip Ride Through of Doubly-fed Generator Equipped with Active Crowbar [C]. Proceed of Nordic Wind Power Conference, Gothenburg, Sweden, 2004: 1-2.
- [2] 凌禹. 大型双馈风电机组故障穿越关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [3] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制 [J]. 电力自动化设备, 2006, 30(8): 21-26.
- [4] Mendes V F, De Sousa C V, Silva S R, et al. Modeling and ride-through control of doubly fed induction generators during symmetrical voltage sags [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1161-1171.
- [5] 张纯江, 王勇, 柴秀慧, 等. 基于精细建模的双馈风力发电机 LVRT 控制研究 [J]. 电力电子技术, 2011, 45(8): 39-41.
- [6] Liang J, Qian W, Harly R G. Fed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2010, 25(3): 836-843.
- [7] Mohsenia M, Islamb S M. Review of international grid codes for wind power integration diversity, technology and a case for global standard [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3876-3890.
- [8] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 127-130.
- [9] 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.
- [10] 张学广, 徐殿国. 电网对称故障下基于 active crowbar 双馈发电机控制 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 99-103.
- [11] 苏平, 张靠山. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 164-171.
- [12] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36.
- [13] 蔚蓝, 陈国呈, 宋小亮, 等. 一种双馈感应风力发电机低电压穿越的控制策略 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 170-175.
- [14] Rahimi M, Parniani M. Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2010, 25(3): 873-883.
- [15] Yang J, Fletcher J E, Reilly J O. A series-dynamic-resistor based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault condition [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2010, 25(2): 422-432.
- [16] Rahimi M, Parniani M. Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 514-525.

收稿日期: 2016-02-26

作者简介:

孟娜娜(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网故障下双馈风电机组的无功补偿技术, E-mail: nmengna@126.com;

孙丽玲(1972—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机设计及大型电机的状态监测与故障诊断。

(责任编辑: 林海文)