

考虑 Crowbar 阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越

朱晓东¹, 石磊¹, 陈宁¹, 朱凌志¹, 刘皓明², 刘隽³

(1. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003;
2. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098; 3. 上海市电力公司, 上海市 200000)

摘要: 在电网发生严重故障情况下, 双馈风电机组多采用 Crowbar 保护电路以实现低电压穿越 (LVRT), 而 Crowbar 阻值和退出时间对 LVRT 效果有很大影响。文中从磁链角度推导给出了双馈感应发电机 (DFIG) 在并网运行情况下发生机端三相短路故障后的转子短路电流表达式及最大短路电流估算式, 并给出了 Crowbar 阻值的整定方法。为了验证推导所得转子电流表达式的正确性, 并分析 Crowbar 阻值与最大短路电流及其出现时间之间的关系和 Crowbar 阻值及退出时间对 DFIG 的 LVRT 效果的影响, 针对 1.5 MW DFIG 进行了一系列仿真分析, 结果表明: 推导所得转子短路电流表达式及最大短路电流估算式比较准确; 随着 Crowbar 阻值的增大, 最大转子电流逐渐减小, 其出现时间在半同步周期内逐渐提前, 但转子侧最大电压逐渐升高; 在保证网侧变流器不过压的情况下, 若 Crowbar 阻值在合理范围内偏大且 Crowbar 在故障切除前退出运行, 则 DFIG 的 LVRT 效果更好。

关键词: 风力发电; 双馈感应发电机; 低电压穿越; Crowbar 保护电路; 转子电流

0 引言

双馈感应发电机 (DFIG) 具备有功和无功功率独立控制、可变速运行及励磁变流器容量小等特点, 已成为兆瓦级并网风电机组的首选机型。对于并网的 DFIG, 由于其定子侧与电网直接相连, 当电网故障引起电压突降时, 会导致 DFIG 定子侧电压骤降, 并在转子侧感应出较大的电流, 导致转子侧出现过电流和过电压^[1-2], 严重时可能损坏变流器和电机^[3-5]。随着风电并网规模的不断增加, 越来越多的国家在其风电并网导则中明确要求风电机组必须具备低电压穿越 (LVRT) 能力^[6-7]。

目前, DFIG 的 LVRT 主要通过 2 种方法来实现, 一种是改进变流器的控制策略, 另一种是增加硬件控制电路^[8]。前者适用于电压小幅跌落的情况, 当电网发生严重故障时, 改进变流器控制策略的 LVRT 效果较差, 此时多采用 Crowbar 保护电路^[9], 而 Crowbar 阻值和退出时间对 LVRT 效果有很大影响^[10-13]。文献^[10, 14-15]推导了 DFIG 在空载运行条件下发生机端三相短路后的定子、转子电流, 并分析了转差率、有功和无功输出对短路后转子电流的影响。文献^[16-17]推导了 DFIG 在并网运行条件下发生机端三相短路后的定子、转子电流在

abc 坐标系下的表达式, 并根据转子电流表达式整定了 Crowbar 阻值, 但其转子电流表达式复杂, 各分量物理意义不明确, 且整定 Crowbar 阻值过程中没有考虑 Crowbar 阻值对转子电流的影响。

本文推导了 DFIG 在并网运行情况下发生机端三相短路后的转子电流表达式和最大转子电流估算式。以 1.5 MW DFIG 为例, 分析了 Crowbar 阻值与最大短路电流及其出现时间之间的关系, 比较了不同 Crowbar 阻值和退出时间下 DFIG 的 LVRT 效果。

1 DFIG 的数学模型

图 1 给出了一种典型的含 Crowbar 保护电路的 DFIG 风电机组拓扑结构。

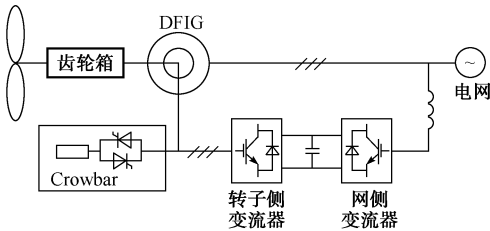


图 1 含 Crowbar 保护电路的 DFIG 风电机组拓扑结构
Fig. 1 Topology of DFIG wind generation system with Crowbar protection circuit

DFIG 的定子、转子绕组可看成三相对称, 因此, 在同步旋转 $dq0$ 坐标系下, DFIG 的数学方程如下:

收稿日期: 2010-06-07; 修回日期: 2010-07-26。
国家自然科学基金资助项目 (50877014); “十一五” 国家科技支撑计划重大项目 (2008BAA14B04); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2007AA05Z422)。

1) 电压方程:

$$\begin{cases} u_{ds} = r_1 i_{ds} + D\Psi_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} \\ u_{qs} = r_1 i_{qs} + D\Psi_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} \\ u_{dr} = r_2 i_{dr} + D\Psi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{qr} \\ u_{qr} = r_2 i_{qr} + D\Psi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Psi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{ds}, u_{qs} 和 i_{ds}, i_{qs} 分别为定子电压和电流的 d 轴、 q 轴分量; u_{dr}, u_{qr} 和 i_{dr}, i_{qr} 分别为转子电压和电流的 d 轴、 q 轴分量; Ψ_{ds}, Ψ_{qs} 和 Ψ_{dr}, Ψ_{qr} 分别为定子和转子磁链的 d 轴、 q 轴分量; r_1 和 r_2 分别为定子绕组和转子绕组电阻; ω_s 和 ω_r 分别为定子角速度(即同步角速度)和转子角速度; D 为微分算子。

2) 磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $L_s = L_1 + L_m$; $L_r = L_2 + L_m$; L_1 和 L_2 分别为定子、转子漏电感; L_m 为励磁电感。

将式(1)和式(2)改写为如下矢量形式:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = r_1 \mathbf{i}_s + D\Psi_s + j\omega_s \Psi_s \\ \mathbf{u}_r = r_2 \mathbf{i}_r + D\Psi_r + j(\omega_s - \omega_r) \Psi_r \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \\ \Psi_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \end{cases} \quad (4)$$

2 DFIG 机端三相短路后的转子电流表达式

DFIG 转子最大短路电流出现在机端发生三相短路故障时。机端发生三相短路后,稳态电流分量将会衰减,同时,由于励磁不能突变,将会在转子侧产生很大的暂态感应电流。稳态电流衰减分量和暂态感应电流分量叠加即为故障发生后转子侧的短路电流。

为简化分析,作如下假设:

1) 兆瓦级发电机的定子、转子电阻相对很小,故在稳态运行时忽略定子、转子电阻值;

2) 暂态过程持续时间较短,因此假设暂态过程中转速恒定;

3) 由于投入 Crowbar 保护电路所需的时间较短,从检测故障到投入只需 $1 \text{ ms} \sim 2 \text{ ms}$,故可以认为短路故障后 Crowbar 立刻投入;

4) 假设转子侧参数已折算到定子侧,且各参数都为标么值。

稳态运行时,DFIG 电压方程中的微分项为 0。设在标么值下有 $\omega_s = 1$,则 $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s = 1 - \omega_r$ 。因而将式(2)代入式(1),解矩阵方程并写成矢量形式,可得到稳态时的转子电流表达式为:

$$\mathbf{i}_r^{(0)} = i_{dr} + j i_{qr} = \frac{1}{j(L_s L_r - L_m^2)} \cdot \left[\frac{L_s}{s} (u_{dr} + j u_{qr}) + L_m (u_{ds} + j u_{qs}) \right] \quad (5)$$

DFIG 稳态运行时,定子电压可以表示为:

$$\mathbf{u}_s = V_s e^{j\omega_s t} \quad (6)$$

式中: V_s 为稳态运行时定子电压的幅值,其值为 1。

忽略定子电阻,则由式(3)和式(6)可得出定子磁链如下:

$$\Psi_s = \frac{\mathbf{u}_s}{j\omega_s} = \frac{V_s e^{j\omega_s t}}{j\omega_s} \quad (7)$$

假设 DFIG 在 0 s 时发生机端三相短路故障,此时,定子磁链瞬值为:

$$\Psi_s^{(0)} = \frac{V_s}{j\omega_s} \quad (8)$$

对式(4)取模,有

$$\begin{cases} |\Psi_s| = |L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r| \\ |\Psi_r| = |L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r| \end{cases} \quad (9)$$

因兆瓦级风电机组中, $L_m \gg L_1, L_m \gg L_2$, 且 $L_s = L_1 + L_m, L_r = L_2 + L_m$, 故 $L_s \approx L_r \approx L_m$, 所以定子、转子磁链的模近似相等,再结合式(8),有:

$$|\Psi_s| = |\Psi_r| = V_s \quad (10)$$

稳态时转子以转速 $(1-s)\omega_s$ 旋转,则稳态时的转子磁链可表示为:

$$\Psi_r = \frac{V_s e^{j(1-s)\omega_s t}}{j\omega_s} \quad (11)$$

所以,0 s 时的转子磁链瞬值可表示为:

$$\Psi_r^{(0)} = \frac{V_s}{j\omega_s} \quad (12)$$

当短路故障发生时,DFIG 一般会通过 Crowbar 将转子短路,以达到保护 DFIG 和变流器的目的。因而,DFIG 短路后的暂态感应电流符合如图 2 所示电路关系。图中, Ψ_s' 和 Ψ_r' 分别为短路后的定子、转子磁链。

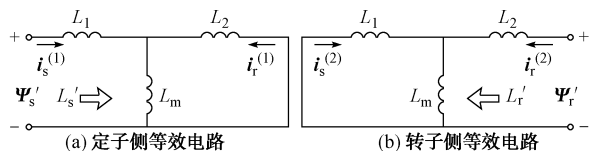


图 2 短路时定子、转子侧等效电路
Fig. 2 Stator and rotor equivalent circuits in short circuit fault

由图 2 可得:

$$\begin{cases} L_s' = L_1 + \frac{L_2 L_m}{L_2 + L_m} \\ L_r' = L_2 + \frac{L_1 L_m}{L_1 + L_m} \end{cases} \quad (13)$$

$$i_r^{(1)} = -\frac{\Psi_s'}{L_s'} \frac{L_m}{L_2 + L_m} \tag{14}$$

$$i_r^{(2)} = \frac{\Psi_r'}{L_r'} \tag{15}$$

式中： $i_r^{(1)}$ 和 $i_r^{(2)}$ 分别为由定子磁链 Ψ_s' 和转子磁链 Ψ_r' 感应产生的转子电流分量。

由此可得，定子、转子磁链和稳态电流在短路后的衰减时间常数为：

$$\begin{cases} T_s' = \frac{L_s'}{r_1} \\ T_r' = \frac{L_r'}{r_2} \end{cases} \tag{16}$$

所以，在转子定向坐标系下，短路故障后转子磁链可表示为：

$$\Psi_r' = \Psi_r^{(0)} e^{-\frac{t}{T_r'}} = \frac{V_s}{j\omega_s} e^{-\frac{t}{T_r'}} \tag{17}$$

由于短路后，定子磁链以 $-(1-s)\omega_s$ 的转速相对于转子运动，因而在转子定向坐标系下，短路故障后定子磁链可表示为：

$$\Psi_s' = \Psi_s^{(0)} e^{-j(1-s)\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_s'}} = \frac{V_s}{j\omega_s} e^{-j(1-s)\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_s'}} \tag{18}$$

将式(14)和式(15)相加，并结合式(17)和式(18)，可以得到短路后的暂态感应电流表达式为：

$$i_r^{(1)} + i_r^{(2)} = \frac{V_s}{j\omega_s} \left(-\frac{L_m e^{-j(1-s)\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_s'}}}{L_r L_s'} + \frac{e^{-\frac{t}{T_r'}}}{L_r'} \right) \tag{19}$$

采用定子电压定向矢量控制，即有：

$$\begin{cases} u_{ds} = V_s \\ u_{qs} = 0 \end{cases} \tag{20}$$

将式(20)代入式(5)并改写为极坐标形式，可得 0 s 时转子侧稳态电流的瞬时值为：

$$i_{r0}^{(0)} = \frac{1}{j(L_s L_r - L_m^2)} \left(\frac{L_s}{s} \sqrt{u_{dr}^2 + u_{qr}^2} e^{j\delta t} + L_m V_s \right) \tag{21}$$

式中：
$$\delta = \arctan \frac{u_{qr}}{u_{dr}} \tag{22}$$

由于转子侧稳态电流在机端发生三相短路后将衰减，其衰减时间常数为 T_r' ，因而可得到短路后转子侧稳态电流衰减分量为：

$$(i_r')^{(0)} = i_{r0}^{(0)} e^{-\frac{t}{T_r'}} \tag{23}$$

式(19)与式(23)相加即为短路后的转子侧电流。所以，在转子定向坐标系下，短路后的转子电流可以表示为：

$$i_r' = (i_r')^{(0)} + i_r^{(1)} + i_r^{(2)} = \frac{1}{j(L_s L_r - L_m^2)} \left(\frac{L_s}{s} \sqrt{u_{dr}^2 + u_{qr}^2} e^{j\delta t} + L_m V_s \right) e^{-\frac{t}{T_r'}} + \frac{V_s}{j\omega_s} \left[-\frac{L_m e^{-j(1-s)\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_s'}}}{(L_2 + L_m) L_s'} + \frac{e^{-\frac{t}{T_r'}}}{L_r'} \right] \tag{24}$$

文献[10,14-15]中的转子电流表达式是在空载运行条件下推导得到的，即推导过程中假设稳态时的转子电压为 0。与本文的推导结果相比，缺少式(24)中的第 1 项。

通过计算验证，定子、转子侧的短路电流峰值一般出现在短路后的半同步周期点前后 0.25 ms 之内，因此，短路后的最大转子电流估算式为：

$$I_{r, \max} = \left| i_r \left(\frac{T}{2} \right) \right| \tag{25}$$

3 Crowbar 阻值整定

DFIG 的 Crowbar 阻值整定受转子侧变流器电流和网侧变流器电压的约束。当电网发生短路故障时，Crowbar 阻值过小将不能有效抑制转子侧的短路电流，从而可能损坏转子侧变流器；Crowbar 阻值过大，可能会导致网侧变流器的直流侧出现过电压，也会损坏网侧变流器。通常，在合理取值范围内，Crowbar 阻值越大对转子侧过电流的抑制效果就越明显^[6]。

电网故障期间，转子最大电压为：

$$U_{r, \max} = I_{r, \max} r_c \tag{26}$$

式中： r_c 为 Crowbar 阻值。

为防止网侧变流器直流侧过电压，Crowbar 阻值需满足如下约束条件：

$$U_{r, \max} < U_{r, \lim} \tag{27}$$

式中： $U_{r, \lim}$ 为网侧变流器能承受的最大电压。

由此可得最大 Crowbar 阻值估算式为：

$$r_{c, \max} = \frac{U_{r, \lim}}{I_{r, \max}} \tag{28}$$

4 仿真分析

4.1 最大转子电流估算式有效性验证

为验证最大转子电流估算式的正确性，分别针对 1.5 MW、2.0 MW、3.0 MW DFIG 在 DIgSILENT 中进行仿真，机组参数如附录 A 表 A1 所示。仿真值与式(25)计算所得估算值的比较如表 1 所示。其中，估算值可通过如下方法得到：在式(24)中代入机组相关参数，以及稳态运行时 DFIG 的滑差 s 和励磁电压的 d 轴、 q 轴分量，并取时间 $t = T/2$ 。

表 1 最大转子电流仿真和计算结果
Table 1 Maximum rotor currents of simulation and calculation

机组容量/MW	最大转子电流(标么值)		误差/(%)
	仿真值	估算值	
1.5	8.54	8.442	1.15
2.0	8.97	8.801	1.88
3.0	8.02	7.902	1.47

由表 1 可以看出,估算值与仿真值的误差都在 1.9% 以内,估算式(25)能够比较准确地描述 DFIG 风电机组机端最大三相短路电流。

4.2 1.5 MW DFIG 的 Crowbar 阻值整定

对于 1.5 MW DFIG 的网侧变流器,其直流侧电压一般为 690 V 或者 480 V,实际参数视机组型号而定。由于变流器的耐压能力有限,其直流侧电压一般不允许超过额定电压水平的 10%~15%。假设网侧变流器的直流侧电压为 480 V,因 DFIG 额定电压为 690 V,取最不利情况并转化为标么值,

有 $U_{r, \lim} = \frac{480}{690\sqrt{2}}(1+10\%) = 0.54$ 。

Crowbar 的投入将使得转子侧电阻发生变化,其时间常数也相应发生变化,则式(16)变为:

$$\begin{cases} T_s' = \frac{L_s'}{r_1} \\ T_r' = \frac{L_r'}{r_2 + r_c} \end{cases} \quad (30)$$

由于 Crowbar 的投入,最大转子电流出现时间 t_{appear} 将提前,提前量与 Crowbar 阻值有关。

对于 1.5 MW DFIG,为了确定 Crowbar 阻值的最大值,结合式(24)和式(30),通过代入不同的 Crowbar 阻值 r_c ,可计算得到不同的最大短路电流 $I_{r, \max}$ 及其出现时间 t_{appear} ,再结合式(26),可得最大转子电压 $U_{r, \max}$ 。具体计算结果如表 2 所示。

表 2 不同 Crowbar 阻值下 $I_{r, \max}$, t_{appear} 和 $U_{r, \max}$ 的计算结果
Table 2 Calculation results of $I_{r, \max}$, t_{appear} and $U_{r, \max}$ under different Crowbar resistances

r_c	$I_{r, \max}$	$t_{\text{appear}}/\text{ms}$	$U_{r, \max}$
0.02	7.93	7.50	0.159
0.05	6.88	7.25	0.344
0.08	6.11	7.00	0.489
0.09	5.93	6.75	0.534
0.10	5.76	6.50	0.576

注:电阻、电流、电压为标么值。

从表 2 可以看出:随着 Crowbar 阻值的增大,最大转子电流逐渐减小,其出现时间在电网半同步周期内逐渐提前,但转子侧最大电压逐渐升高;在保证网侧变流器不过压的前提下,Crowbar 阻值越大,对短路电流的抑制效果越明显;当 $r_c = 0.10$ 时, $U_{r, \max} < U_{r, \lim}$ 不再成立,因此,Crowbar 阻值的最大值约为 0.09。

为验证上述 Crowbar 阻值整定结果的合理性,分别选取 r_c 为 0.02,0.088,0.09,对 Crowbar 投入后的转子侧电流、电压进行仿真,仿真结果见表 3。

对比表 2 和表 3 可以看出,不同 Crowbar 阻值

下各个参数的变化趋势一致,计算结果与仿真结果能够相互印证。表 3 中,当 $r_c = 0.09$ 时, $U_{r, \max}$ 超过了 0.54, Crowbar 阻值最大值约为 0.088,这与通过计算所得结果 0.09 十分接近。

表 3 不同 Crowbar 阻值下 $I_{r, \max}$, t_{appear} 和 $U_{r, \max}$ 的仿真结果
Table 3 Simulation results of $I_{r, \max}$, t_{appear} and $U_{r, \max}$ under different Crowbar resistances

r_c	$I_{r, \max}$	$t_{\text{appear}}/\text{ms}$	$U_{r, \max}$
0.020	7.77	8.0	0.155
0.088	6.10	6.4	0.537
0.090	6.05	6.2	0.545

注:电阻、电流、电压为标么值。

4.3 不同 Crowbar 阻值和退出时间对 LVRT 效果影响分析

在 DiGSILENT 软件中建立 1.5 MW DFIG 仿真模型,并经 6.9 kV/33 kV 和 33 kV/110 kV 共 2 台升压变压器接入 110 kV 无穷大电网。假设 0 s 时机端发生三相短路,0.15 s 时短路故障切除。DFIG 励磁电压为 $u_{dr} = 0.168$, $u_{qr} = 0.0197$,稳态运行时的滑差为 $s = -0.2$ 。

4.3.1 不同 Crowbar 阻值对 LVRT 效果影响分析

设定 Crowbar 退出时刻为 0.068 s,分别选取 $r_c = 0.06$ 和 $r_c = 0.088$,相应的 DFIG 转子电流、定子无功功率和机端电压的仿真结果如图 3 所示。

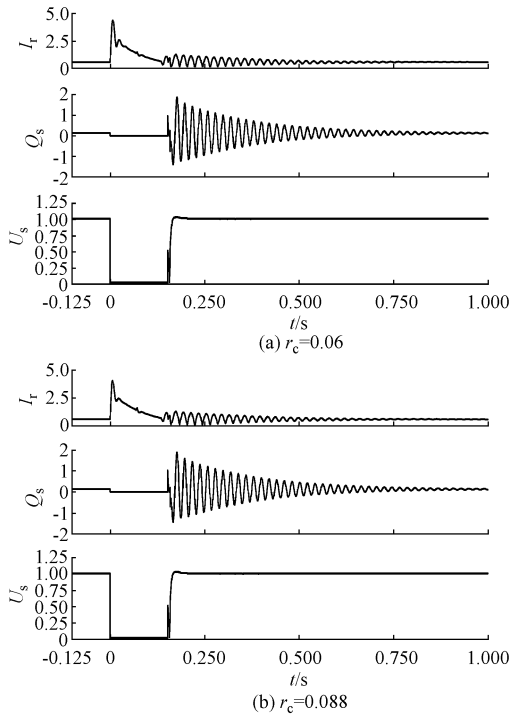


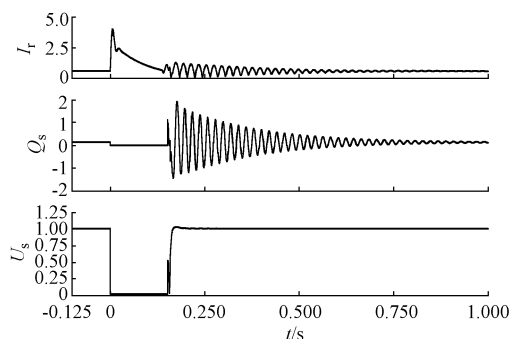
图 3 不同 Crowbar 阻值的 DFIG 转子电流、定子无功功率和机端电压
Fig. 3 Rotor current, stator reactive power and terminal voltage of DFIG with different Crowbar resistances

由图3可以看出:故障发生后, $r_c=0.088$ 时的最大转子电流为3.75,小于 $r_c=0.06$ 时的最大转子电流4.37; $r_c=0.088$ 时,故障切除后的转子电流更快趋于稳定。由此表明,Crowbar阻值在合理范围内偏大,可以更有效抑制转子侧短路电流,同时能使转子侧电流在故障切除后更快趋于稳定。从图3还可以看出, $r_c=0.06$ 和 $r_c=0.088$ 时,故障切除后风电机组从电网吸收的最大瞬时无功分别为1.4和1.44,随后向电网提供的最大瞬时无功分别为1.92和1.97,且机端电压分别在0.167 s和0.168 s时恢复到1。由此表明,若Crowbar在短路故障切除前退出运行,Crowbar阻值在合理范围内偏大或偏小对故障切除后DFIG的无功和机端电压影响不大。

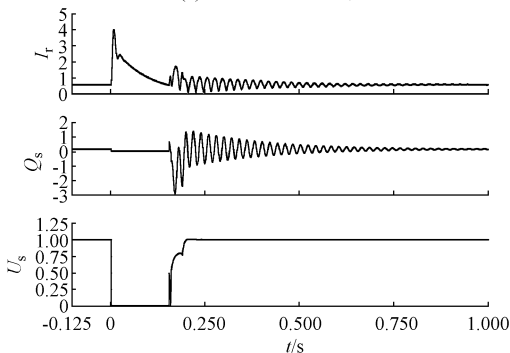
综上所述,建议Crowbar阻值在合理范围内取较大值。

4.3.2 不同Crowbar退出时间对LVRT效果影响分析

为确定Crowbar的合理退出时间,设定Crowbar退出时刻分别为0.13 s(短路故障切除前)和0.18 s(短路故障切除后),DFIG转子电流、定子无功功率和机端电压的仿真结果如图4所示。



(a) Crowbar退出时刻为0.13 s



(b) Crowbar退出时刻为0.18 s

图4 不同Crowbar退出时刻的DFIG转子电流、定子无功功率、机端电压

Fig.4 Rotor current, stator reactive power and terminal voltage of DFIG with different quitting time of Crowbar

从图4可以看出,Crowbar在0.13 s故障切除前退出运行与0.18 s故障切除后退出运行相比,前者的转子电流暂态扰动明显小于后者,两者在故障

切除后产生的冲击电流分别为1.25和1.9。由此可见,Crowbar在短路故障切除前退出运行,故障切除后所产生的冲击电流更小,且转子电流的暂态扰动更小。从图4还可看出,Crowbar在故障切除前退出运行与故障切除后退出运行相比,前者的无功暂态扰动明显小于后者,前者的机端电压恢复速度明显比后者快,两者在故障切除后从电网吸收的最大瞬时无功分别为1.44和2.95,发出的最大瞬时无功分别为1.91和1.35。可见,Crowbar在故障切除前退出运行使得DFIG在故障切除后不仅从电网吸收的无功更少,而且随后能向电网提供更多的无功支持,有利于电网电压的恢复。这是因为若Crowbar过晚退出,则可能导致短路故障切除后Crowbar仍在运行,此时,由于DFIG处于异步运行状态,DFIG将从电网吸收大量无功,不利于电网电压的恢复。

Crowbar在短路故障切除前退出运行,DFIG的LVRT效果更好,但也不能过早退出,因为过早退出将不能有效抑制转子侧的短路电流,同时也将导致转子电流暂态扰动过大。通过更多的仿真分析发现,在保证Crowbar在短路故障切除前退出运行的情况下,适当提前或推后Crowbar的退出时间,对故障切除以后DFIG无功和机端电压的影响不大。综上所述,建议Crowbar在短路故障切除之前退出运行,且Crowbar退出运行的时刻尽可能接近短路故障切除时刻。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of the factors affected the rotor over-current of DFIG during the three-phase voltage dip// Proceedings of the 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 6-9, 2008, Nanjing, China.
- [2] MOREN J, HAAN S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [3] 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.中国电机工程学报,2006,26(10):30-35. XIANG Dawei, YANG Shunchang, RAN Li. System simulation of a doubly fed induction generator ride-through control for symmetrical grid fault. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 30-35.
- [4] XIANG D W, RAN L, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [5] 胡家兵,贺益康.双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制.电力系统自动化,2008,32(2):49-52. HU Jiabing, HE Yikang. Low voltage ride through operation and control of doubly fed induction generator wind turbines. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 49-52.

- [6] LOPEZ D, SANCHIS J, ROBOAM P, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2007, 22 (3): 709-717.
- [7] BASSO T S, DEBLASIO R D. IEEE P1547-series of standards for interconnection// *Proceedings of 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*; Vol 2, September 7-12, 2003, Dallas, TX, USA; 556-561.
- [8] 王伟,孙明冬,朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析. *电力系统自动化*, 2007, 31(23): 84-89.
WANG Wei, SUN Mingdong, ZHU Xiaodong. Analysis on the low voltage ride through technology of DFIG. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(23): 84-89.
- [9] ZHAO Jing, ZHANG Wei, HE Yikang, et al. Modeling and control of a wind-turbine-driven DFIG incorporating core saturation during grid voltage dips// *Proceedings of 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, October 17-20, 2008, Wuhan, China; 2438-2442.
- [10] MORREN J, de HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 174-180.
- [11] 张建华,陈星莺,刘皓明,等. 双馈风力发电机三相短路分析及短路器最大电阻整定. *电力系统自动化设备*, 2009, 29(4): 6-10.
ZHANG Jianhua, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Three-phase short-circuit analysis for double-fed wind-driven generator and short-circuiter maximal resistance calculation. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(4): 6-10.
- [12] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [13] 李欣. 风电机组的短路电流特性及低电压穿越的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [14] LI D D. Analysis of short circuit current of wind turbine doubly-fed induction generator// *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, May 24-26, 2006, Singapore; 1-5.
- [15] 张学广,徐殿国,李伟伟. 双馈风力发电机三相短路电流分析. *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. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5): 493-497.
- [16] 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的要求. *电网技术*, 2007, 31(7): 79-82.
GUAN Hongliang, ZHAO Haixiang, CHI Yongning, et al. Requirement for LVRT capability of wind turbine generator in power system. *Power System Technology*, 2007, 31(7): 79-82.
- [17] 姚骏,廖勇. 基于 Crowbar 保护控制的交流励磁风电系统运行分析. *电力系统自动化*, 2007, 31(23): 79-83.
YAO Jun, LIAO Yong. Analysis on the operations of an AC excited wind energy conversion system with Crowbar protection. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(23): 79-83.

朱晓东(1970—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:发电机励磁控制技术. E-mail: zhuxiaodong@sgepri. sgcc. com. cn

石磊(1978—),男,硕士,工程师,主要研究方向:励磁控制系统、变频器研制和电力电子. E-mail: shilei@sgepri. sgcc. com. cn

陈宁(1983—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:风力发电系统接入与控制方法. E-mail: chenning8375@163. com

An Analysis on Low Voltage Ride Through of Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator with Different Resistances and Quitting Time of Crowbar

ZHU Xiaodong¹, SHI Lei¹, CHEN Ning¹, ZHU Lingzhi¹, LIU Haoming², LIU Jun³

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200000, China)

Abstract: In the case of serious faults with the grid, the Crowbar protection circuit is frequently adopted to implement low voltage ride through (LVRT) of the grid-connected wind turbine driven doubly fed induction generator (DFIG). The LVRT effect is greatly influenced by the resistance and quitting time of Crowbar. From the viewpoint of magnetic linkage in the case of a three-phase short-circuit fault occurring at the terminal of DFIG, the analytical expression of the short-circuit rotor current is deduced together with the estimated expression. The method for Crowbar resistance setting is proposed. To validate the rotor current expressions deduced, analyze the impact of Crowbar resistance on maximum short-circuit rotor current and its appearing time, and find the influence of resistance and quitting time of Crowbar on the LVRT effect, a series of simulations are conducted on a 1.5 MW DFIG. Simulation results show that: the analytical expression and the estimated expression presented in this paper can depict the rotor current correctly; with an increase of Crowbar resistance, the maximum short-circuit rotor current is gradually decreased and the appearing time is gradually advanced from the half grid-synchronized cycle to zero, but the maximum rotor voltage is gradually increased. On condition that the grid-side converter be not over-voltage, if the Crowbar resistance is fairly great at the rational level and the Crowbar quits before the fault is eliminated, the LVRT effect would be better.

This work is jointly supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877014), Mega-projects of Science Research for the 11th Five-year Plan (No. 2008BAA14B04) and the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2007AA05Z422).

Key words: wind power generation; DFIG; LVRT; Crowbar protection circuit; rotor current

附录 A

表 A1 双馈风电机组参数
Table A1 Parameters of DFIG

机组容量/MW	r_1	L_1	L_m	r_2	L_2
1.5	0.007 9	0.114	3.29	0.011	0.097
2.0	0.010 0	0.100	3.50	0.010	0.100
3.0	0.007 0	0.070	3.30	0.005	0.170