

Crowbar 阻值对双馈感应发电机低电压穿越特性的影响

栗 然,王 倩,卢 云,刘会兰,祝晋尧

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003)

摘要:研究了 Crowbar 阻值选取对双馈感应发电机低电压穿越的影响。从功率耗损的角度对 Crowbar 阻值与定、转子暂态直流磁链的衰减关系进行推导分析;讨论了 Crowbar 阻值对低电压穿越下双馈感应发电机电磁转矩的影响;提出了通过在 Crowbar 回路中串联附加电感的方法抑制电压跌落瞬间电磁转矩的振荡。研究表明,过大或过小的 Crowbar 阻值都将削弱双馈感应发电机低电压穿越能力,Crowbar 阻值的选取存在最优值,附加串联电感在一定程度上可以抑制电磁转矩暂态振荡。

关键词:风电;双馈感应发电机;低电压穿越;Crowbar 保护;阻值整定;串联电感

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.018

0 引言

风电场对电网安全稳定的影响已成为风电发展的重要课题之一。如果大规模风电机组从电网解列,就不能支撑电网电压,进而导致连锁反应,对电网的稳定运行造成严重影响。因此各国电网的风电并网规范相继提出了低电压穿越 LVRT (Low Voltage Ride Through) 的要求,即要求风机在一定程度的电网电压跌落下维持可靠并网运行一定时间,从而为电网提供有功和无功支持,以利于电网电压的快速恢复和电网的安全稳定运行^[1-3]。

双馈感应发电机 DFIG (Doubly Fed Induction Generator) 是目前主流风电机型之一,由于其变换器容量较小,对电网电压跌落造成的暂态过电流冲击尤为敏感,需要采取可靠的保护措施,防止变换器中功率器件损坏^[4-6]。从研究方向上看,对于双馈感应风力发电系统动态特性及其低电压穿越能力的研究主要集中于 3 个方面:① DFIG 控制策略的分析和改进^[7-8];② DFIG 硬件电路的改进^[9-10];③ 在风电场出口加装动态无功补偿装置、DVR、TCSC 或串联电阻等^[11]。通过改进 DFIG 控制策略提高低电压穿越能力只适用于并网点电压跌落不是很严重的情况;改进 DFIG 硬件电路最常见的措施是添加撬棒电路,即 Crowbar。文献[12-14]指出,Crowbar 阻值的选取对低电压穿越影响较大,选取合适的 Crowbar 阻值有利于 DFIG 实现低电压穿越。目前,对 Crowbar 保护下的 DFIG 动态特性的研究主要集中在 Crowbar 阻值的选取及其与 DFIG 暂态电压、电流的关系上,而对 Crowbar 阻值与定转子暂态磁链和暂态电流衰减时间常数的数学关系方面的研究则并不深入。对电压跌落时 DFIG 电磁转矩波动的抑制措施也少有

文献研究。

本文研究双馈感应风力发电系统低电压穿越时的 Crowbar 保护技术,针对 DFIG 机端发生三相对称短路机端电压跌落至零的情况,首先数学分析 Crowbar 阻值对 DFIG 运行特性、电磁转矩和转子转速的影响;然后在 MATLAB/Simulink 平台上搭建模型,通过设定不同电压跌落程度、不同 Crowbar 阻值验证理论分析的正确性;最后通过在 Crowbar 回路中串联附加电感缓和电压跌落发生瞬间 DFIG 电磁转矩的波动。三相短路故障发生在远离机端的电网导致机端电压部分跌落时,其对暂态直流磁链、电磁转矩和转子转速的影响规律相似,只是此时机端电压不再为零,本文不再单独分析。

1 Crowbar 阻值对低电压穿越特性的影响

1.1 Crowbar 阻值对 DFIG 运行特性的影响

1.1.1 理论分析

列写空间静止坐标系下 DFIG 的发电机矢量方程如式(1)所示^[14]。

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r \psi_r \\ \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_r i_r + L_m i_s \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可推得:

$$u_r = \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) \psi_s + \left[R_r + \sigma L_r \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) \right] i_r \quad (2)$$

其中, u 、 i 、 R 、 L 、 ψ 、 ω 分别为电压、电流、电阻、电感、磁链和角频率;下标 s 和 r 分别表示定子和转子侧各变量。

以发电机出口发生三相短路故障为例,故障后 Crowbar 立即投入短接转子,突然发生的短路故障使定子绕组和转子绕组中分别感应产生相对定子和转

子静止的暂态直流磁链,将其分别定义为:

$$\begin{cases} \psi_{sn}^s = \psi_{s0} e^{j\alpha} \\ \psi_{rn}^r = \psi_{r0} e^{j\alpha'} \end{cases} \quad (3)$$

其中, ψ_{sn}^s 和 ψ_{rn}^r 分别为定子和转子暂态直流磁链的空间矢量; ψ_{s0} 和 ψ_{r0} 分别为定、转子直流磁链的幅值; α 和 α' 为初始相位; 上标 s 和 r 分别表示相对定子和转子静止的空间坐标系下各变量的表达式; 下标 n 和 m 分别表示定子和转子直流磁链作用下产生的各电气量。将定子和转子暂态直流磁链的特性分开考察, 首先假定故障后定子和转子直流磁链恒定不变。

设 R_{crowbar} 为 Crowbar 电阻阻值, 则在出口三相短路且 Crowbar 投入的情况下应满足:

$$\begin{cases} u_s = 0 \\ u_r = -R_{\text{crowbar}} i_r \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)中第 1 式和式(4)中第 2 式代入式(2)并整理得:

$$0 = \frac{L_m}{L_s} \omega_r \psi_{s0} e^{j\beta} + (R_r + R_{\text{crowbar}}) i_{rn}^s + \sigma L_r \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) i_{rn}^s \quad (5)$$

其中, $\beta = \alpha - 90^\circ$ 。

将式(5)变换到转子坐标系下可得:

$$\frac{L_m}{L_s} \omega_r \psi_{s0} e^{j\omega_r t} e^{j\beta'} + (R_r + R_{\text{crowbar}}) i_{rn}^r + \sigma L_r \frac{d i_{rn}^r}{dt} = 0 \quad (6)$$

将式(6)整理成相量的形式如式(7)所示:

$$N \angle \beta' + (R_r + R_{\text{crowbar}}) I_{rn}^r + j X_r' I_{rn}^r = 0 \quad (7)$$

$$N = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{L_m}{L_s} \omega_r \psi_{s0}, \quad X_r' = \omega_r \sigma L_r$$

则:

$$I_{rn}^r = -\frac{N \angle \beta'}{(R_r + R_{\text{crowbar}}) + j X_r'} = -\frac{N}{\sqrt{(R_r + R_{\text{crowbar}})^2 + X_r'^2}} \angle \beta'' \quad (8)$$

$$\beta'' = \beta' - \arctan \frac{X_r'}{R_r + R_{\text{crowbar}}}$$

不计励磁支路电流, 近似认为:

$$I_{sn}^r = -I_{rn}^r \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)并变换到定子坐标系下可得:

$$i_{sn}^s = \frac{\sqrt{2} N}{\sqrt{(R_r + R_{\text{crowbar}})^2 + X_r'^2}} e^{j\beta''} \quad (10)$$

β' 经坐标变换后变为 β'' 。由式(8)和式(10)可以得到恒定子直流磁链作用下系统的有功损耗为:

$$P_n = \frac{N^2}{\sqrt{(R_r + R_{\text{crowbar}})^2 + X_r'^2}} (R_r + R_{\text{crowbar}} + 2R_s) \quad (11)$$

对式(11)进行数学处理可知, P_n 取最大值时应满足:

$$R_{\text{crowbar}}^{\max} = \sqrt{4R_s^2 + X_r'^2} - 2R_s - R_r \quad (12)$$

此时有功损耗最大, 与之对应的定子直流磁链的衰减速度也最高。

以上是对定子直流磁链影响的讨论, 接下来对转子直流磁链的影响进行分析。将式(3)中第 2 式变换到定子坐标系下:

$$\psi_{rn}^s = \psi_{r0} e^{j\omega_r t} e^{j\alpha''} \quad (13)$$

其中, α'' 为转子直流磁链变换到定子坐标系下的初始相位。

仿照式(2), 由式(1)可得:

$$u_s = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + R_s i_s + \sigma L_s \frac{d i_s}{dt} \quad (14)$$

将式(4)中第 1 式和式(13)代入式(14)可得:

$$0 = \frac{L_m}{L_r} \omega_r \psi_{r0} e^{j\omega_r t} e^{j\theta} + R_s i_{sm}^s + \sigma L_s \frac{d i_{sm}^s}{dt} \quad (15)$$

其中, $\theta = \alpha'' + 90^\circ$ 。

将式(15)变换成相量表达式后整理如下:

$$M \angle \theta + R_s I_{sm}^s + j X_s' I_{sm}^s = 0 \quad (16)$$

$$M = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{L_m}{L_r} \omega_r \psi_{r0}, \quad X_s' = \omega_r \sigma L_s$$

则:

$$I_{sm}^s = -\frac{M \angle \theta}{R_s + j X_s'} = \frac{M}{\sqrt{R_s^2 + X_s'^2}} \angle \theta' \quad (17)$$

$$\theta' = \arctan \frac{X_s'}{R_s} - \theta$$

同理, 不计励磁支路电流, 得到转子坐标系下的转子电流为:

$$i_{rm}^r = \frac{\sqrt{2} M}{\sqrt{R_s^2 + X_s'^2}} e^{j\theta''} \quad (18)$$

θ' 经坐标变换后变为 θ'' 。由式(17)、(18)可知, 恒转子直流磁链作用下系统的有功功耗为:

$$P_m = \frac{M^2}{R_s^2 + X_s'^2} (2R_r + 2R_{\text{crowbar}} + R_s) \quad (19)$$

式(8)表明转子暂态电流交流分量的幅值受 Crowbar 阻值影响, 阻值越大, 转子电流交流分量的幅值越小; 式(18)表明转子暂态电流的直流分量幅值的大小与 Crowbar 电路的具体阻值无关。

由于定转子直流磁链的衰减速度主要取决于磁场储能的耗散速度, 故本文采用式(11)和式(19)的有功损耗速率来表征定转子直流磁链的衰减速度。式(11)表明, 当 Crowbar 阻值大于 $R_{\text{crowbar}}^{\max}$ 以后, 定子直流磁链的衰减速度随着 Crowbar 阻值的增大而减小; 式(19)表明, 转子直流磁链的衰减速度随着 Crowbar 阻值的增大而增大。

1.1.2 仿真验证

研究 Crowbar 保护下 DFIG 动态特性时, 以等值单机接无穷大系统机端三相短路为仿真研究对象, 分析发电机自身参数及 Crowbar 阻值对转子电流及定转子直流磁链动态特性的影响, 仿真模型如图 1 所示。

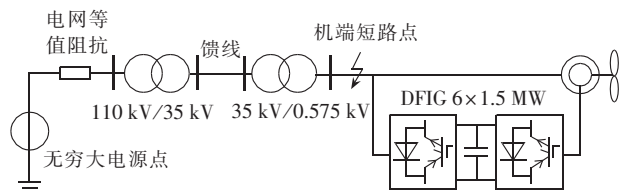


图 1 等值单机接无穷大系统

Fig.1 Equivalent single-generator connected to infinite system

Crowbar 保护电路采用主动式结构,由晶闸管三相整流桥、IGBT 开关元件及卸荷电阻构成。

仿真中, $t=0.1\text{ s}$ 时机端发生三相短路故障, Crowbar 保护迅速动作, $t=0.2\text{ s}$ 时退出, $t=0.3\text{ s}$ 时故障切除, 短路持续时间为 200 ms 。

图 2 和图 3 分别为定子和转子磁链幅值波形(文中图形纵轴均为标么值), 由图 2 知, $t=0.1\text{ s}$ 故障发生时, 定子磁链幅值逐渐减小, 且随着 Crowbar 阻值的增大, 定子磁链幅值的衰减速度也越慢, 表明定子磁链直流分量的衰减时间常数越小。由图 3 知, Crowbar 阻值越大, 转子磁链幅值的衰减速度越快, 对应的转子中暂态直流磁链的衰减时间常数越大。由于 $t=0.2\text{ s}$ 时 Crowbar 退出, 转子变换器重新投入运行, 故转子磁链幅值在 $t=0.2\text{ s}$ 时出现阶梯式增长。

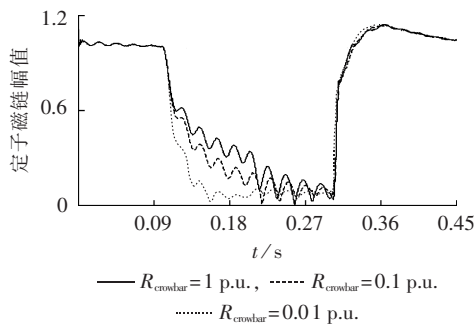


图 2 定子磁链幅值

Fig.2 Amplitude of stator flux

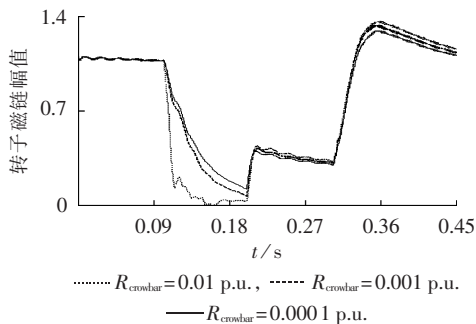


图 3 转子磁链幅值

Fig.3 Amplitude of rotor flux

由图 2 同时可以看出, 不论 Crowbar 阻值的大小, $t=0.3\text{ s}$ 故障切除时, 定子磁链的幅值迅速突变到稳态值附近, 故障切除时定子磁链中不出现直流分量。

图 4 为 Crowbar 阻值取不同值时转子三相电流

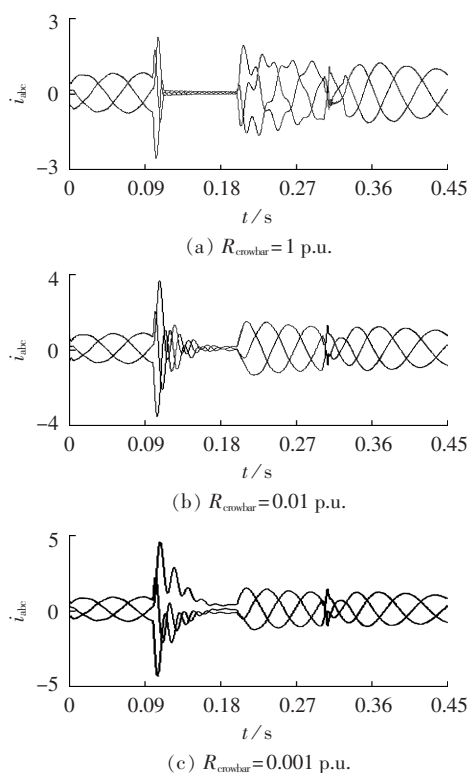


图 4 不同 Crowbar 阻值下转子三相电流波形

Fig.4 Waveforms of three phase rotor currents for different Crowbar resistances

波形。0.1~0.2 s 为故障期间 Crowbar 动作时段, 0.2 s 时 Crowbar 退出, 变换器投入但故障仍未切除, 0.3 s 时故障切除, DFIG 恢复正常运行。

图 4(a)表明 Crowbar 投入后转子电流直流分量迅速衰减, 只维持了 Crowbar 投入后初始时刻的几个波峰, 而由于直流分量的快速衰减, 转子电流中仅存在三相对称的交流分量, 如图所示, Crowbar 投运阶段转子电流为三相对称且缓慢衰减的工频交流电流。转子交流分量的缓慢衰减意味着定子直流磁链的缓慢衰减, 当 Crowbar 退出时定子直流磁链未充分衰减, 导致变换器重新投运后转子电流出现工频振荡成分, 如图 4(a)中 0.2~0.3 s 时段的转子电流波形所示。未充分衰减的定子直流磁链及其相应的转子工频振荡电流会诱发 Crowbar 保护的二次动作, 从而不利于 Crowbar 保护快速稳定地退出。

图 4(c)中, 转子电流交流分量的衰减速度较图 4(a)中加快, 而随着 Crowbar 阻值的减小, 直流分量的衰减速度变慢, 如图 4(b)、(c)中所示, 随着 Crowbar 阻值的减小, 转子电流直流分量越来越明显地“析出”, 且 0.2 s 时 Crowbar 退出并未引起转子电流的振荡。

图 4(b)中转子电流的交流分量和直流分量都取得了较为理想的衰减效果。

综上所述, 在本文的仿真算例中, 随着 Crowbar 阻

值的增大,定子直流磁链的衰减速度减小而转子直流磁链的衰减速度增大,反之亦然。Crowbar 阻值的选取存在一最优值,在此最优值附近定转子暂态直流磁链及其对应的转子电流的交直流分量均能得到迅速而有效的衰减,从而有利于 Crowbar 保护的快速退出。本例中,Crowbar 阻值整定在 0.01 p.u. 附近时定、转子直流磁链均获得合适的衰减速度。

由理论分析与仿真波形可知 Crowbar 阻值的增大能有效抑制转子电流交流量的幅值,转子交流电流幅值的减小并不表示定子直流磁链衰减速度的增加。转子直流分量的幅值在图 4 中各 Crowbar 阻值下大致相同,表现为除去交流成分影响后转子电流初始时刻不对称偏移量的大致相同。这与式(18)的结论一致。

1.2 Crowbar 阻值对电磁转矩和转子转速的影响

1.2.1 理论分析

经 Crowbar 短接转子的 DFIG 运行于普通异步感应发电机状态,其电磁转矩的表达式为^[15]:

$$T_e = \frac{m_1}{\Omega_1} \frac{U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (20)$$

其中, m_1 、 Ω_1 为恒定常数; U_1 为定子电压; s 为转差率; R_1 、 R_2' 分别为定子绕组电阻和归算至定子侧的转子绕组电阻; X_1 、 X_2' 分别为定子绕组电抗和归算至定子侧的转子绕组电抗。

由式(20)经推导可知,若 U_1 和 s 为常数,当转子绕组电阻满足式(21)时,电磁转矩 T_e 取得最大值。

$$R_2' = R_{2\max}' = s \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (21)$$

当 $R_2' < R_{2\max}'$ 时,电磁转矩将随着转子电阻的增大而增大;当 $R_2' > R_{2\max}'$ 时,电磁转矩将随着转子电阻的增大而减小。因此,Crowbar 阻值对 DFIG 电磁转矩的影响亦应满足上述规律。

又知,Crowbar 短接转子下 DFIG 的转子运动方程为^[15]:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (22)$$

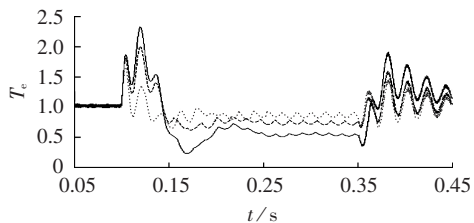
式(22)表明,当机械转矩 T_m 不变时,电磁转矩 T_e 越小,则转子的转速升高得越快;由式(20)可知,异步机运行状态下 DFIG 的电磁转矩与机端电压 U_1 的平方成正比,当电网电压跌落导致 DFIG 机端电压跌落时,电磁转矩将以平方于电压跌落程度的速率严重削弱从而使转子转速迅速上升,转子转速上升一方面会对 DFIG 的安全运行造成危害,另一方面会导致风机失稳。因此,采用 Crowbar 电路实现低电压穿越的 DFIG 在 Crowbar 电阻阻值选取的时候应使 DFIG 在低电压穿越的过程中获得尽量大的电磁转

矩,以免由于电磁转矩不足而使转子过速。

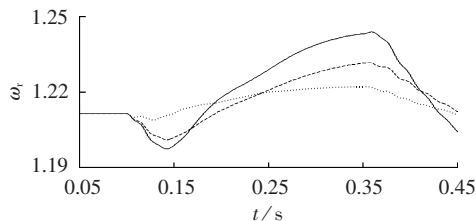
1.2.2 仿真分析

仿真测试系统结构同图 1。 $t=0.1$ s 时无穷大电网电压发生跌落,Crowbar 保护立即投入短接 DFIG 转子, $t=0.35$ s 时电网电压恢复正常。不同电网电压跌落程度、不同 Crowbar 阻值的情况下仿真得到 DFIG 电磁转矩 T_e 和转子转速 ω_r 的波形分别如图 5—7 所示。

由图 5(a)可以看出,短路发生瞬间电磁转矩出



(a) 电磁转矩

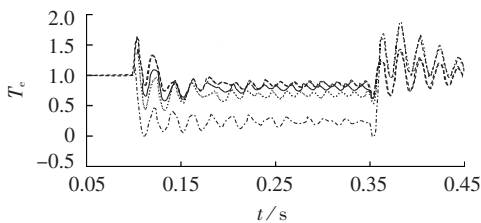


(b) 转子转速

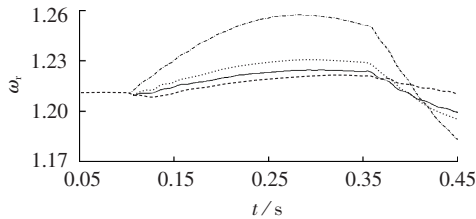
— $R_{\text{crowbar}}=0.01$ p.u., - - - $R_{\text{crowbar}}=0.02$ p.u.
..... $R_{\text{crowbar}}=0.05$ p.u.

图 5 电压跌落程度为 -0.2 p.u. 时不同 Crowbar 阻值下的电磁转矩和转子转速 (1)

Fig.5 Electromagnetic torque and rotor speed for different Crowbar resistances when voltage drops -0.2 p.u.(1)



(a) 电磁转矩



(b) 转子转速

..... $R_{\text{crowbar}}=0.05$ p.u., — $R_{\text{crowbar}}=0.07$ p.u.
- - - $R_{\text{crowbar}}=0.1$ p.u., $R_{\text{crowbar}}=0.5$ p.u.

图 6 电压跌落程度为 -0.2 p.u. 时不同 Crowbar 阻值下的电磁转矩和转子转速 (2)

Fig.6 Electromagnetic torque and rotor speed for different Crowbar resistances when voltage drops -0.2 p.u.(2)

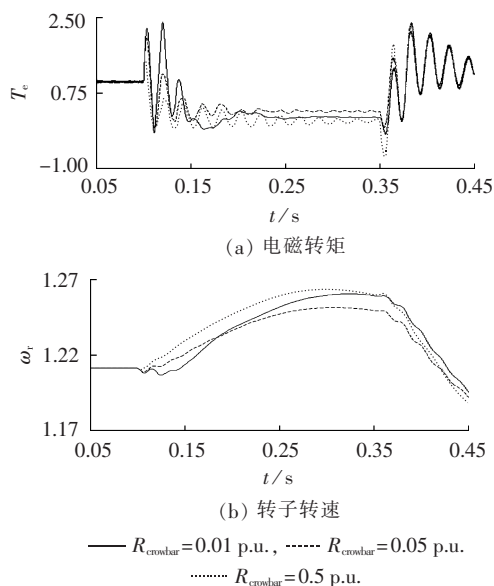


图 7 电压跌落程度为 -0.5 p.u. 时不同 Crowbar 阻值下的电磁转矩和转子转速

Fig.7 Electromagnetic torque and rotor speed for different Crowbar resistances when voltage drops -0.5 p.u.

现剧烈波动,短路稳定后电磁转矩随着 Crowbar 阻值 R_{crowbar} 的增大而增大。由图 5(b)可知,转子转速的峰值随着 R_{crowbar} 的增大而减小。

由图 6(a)可以看出,短路稳态下的电磁转矩随着 Crowbar 阻值的增大而减小。由图 6(b)可知,转子转速的峰值随着 R_{crowbar} 的增大而增大。

图 5 和图 6 的各曲线表明,当 $R_{\text{crowbar}} < 0.05 \text{ p.u.}$ 时,电磁转矩 T_e 随着 R_{crowbar} 的增大有增大的趋势,转子转速则相应地呈现减小的趋势;当 $R_{\text{crowbar}} \geq 0.05 \text{ p.u.}$ 时,电磁转矩 T_e 随着 R_{crowbar} 的增大有减小的趋势,而转子转速则呈现增大的趋势。

图 5 和图 6 中电磁转矩和转子转速的特性与理论分析相吻合,即 Crowbar 阻值存在一极限值 R'_{crowbar} ,在此极限值下 DFIG 获得最大的电磁转矩,从而转子转速的增量最小;当 Crowbar 阻值大于或小于此极限值时,随着 Crowbar 阻值的增大或减小电磁转矩均将减小,从而转子转速的增量将增大。

由图 7 可以看出,当电压跌落程度为 -0.5 p.u. 时,电磁转矩和转子转速与 Crowbar 阻值的关系表现出与图 5 和图 6 相似的变化特点。在 3 条曲线中,当 $R_{\text{crowbar}} = 0.05 \text{ p.u.}$ 时,DFIG 获得最大的电磁转矩,其转速的增量也最小;当 $R_{\text{crowbar}} = 0.01 < 0.05 \text{ p.u.}$ 和 $R_{\text{crowbar}} = 0.5 > 0.05 \text{ p.u.}$ 时,DFIG 的电磁转矩均减小,其转速的增量也均增大。

仿真结果证明了本文理论分析的合理性。基于上述分析可知,Crowbar 阻值不宜选取得过大或过小,过大或过小的 Crowbar 阻值都将降低 DFIG 低电压穿越时电磁转矩的大小,从而削弱其低电压穿越

能力。

2 附加串联电感的 Crowbar 电路

由 1.2.2 节中电磁转矩的波形可知,随着 Crowbar 阻值的减小,短路发生瞬间电磁转矩的波动也越剧烈。当 $R_{\text{crowbar}} = 0.05 \text{ p.u.}$ 时,DFIG 获得最大的稳态低电压穿越电磁转矩,但短路发生瞬间的暂态过程中电磁转矩却出现了非常强烈的波动,电压跌落程度为 -0.5 p.u. 时波动峰值甚至达到了 2.0 p.u. 左右。电磁转矩的大幅波动会威胁到 DFIG 轴系的安全,而由理论分析可知,若是通过增大 Crowbar 阻值的方法抑制电磁转矩的暂态波动则会大幅削弱 DFIG 低电压穿越下的稳态电磁转矩,从而造成转子过速而不利于 DFIG 并网运行的安全稳定。

为解决这个问题,本文采用在 Crowbar 回路中附加串联电感来抑制电磁转矩的暂态波动,其原理如图 8 所示。附加电感 L 与一可控开关 S 并联后串入 Crowbar 电路的直流回路, S 处于闭合状态时 L 被短路而不起作用,当 S 在控制信号的作用下打开时 L 与耗能电阻 R_{crowbar} 串接在一起从而发挥作用。

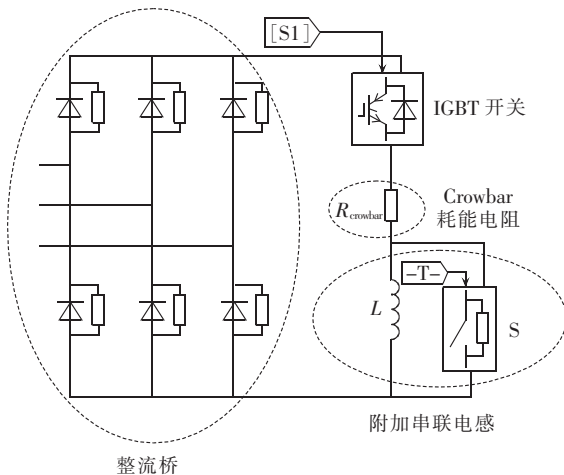


图 8 附加串联电感 Crowbar 电路结构图

Fig.8 Crowbar circuit with additional series inductor

加装串联电感前、后 DFIG 电磁转矩和转子转速的仿真波形分别如图 9、图 10 所示。仿真系统结构同图 1, $t = 0.1 \text{ s}$ 时无穷大电网电压发生跌落,Crowbar 保护立即投入短接 DFIG 转子, $t = 0.35 \text{ s}$ 时电网电压恢复正常,Crowbar 阻值取为 $R_{\text{crowbar}} = 0.05 \text{ p.u.}$ 仿真中,串联电感在电压跌落发生瞬间与 Crowbar 电路一起投入,为避免转子串联电感对 DFIG 运行特性的不利影响, $t = 0.2 \text{ s}$ 时串联电感退出运行,即串联电感只在短路发生后的瞬时暂态过程中投入运行以抑制电磁转矩的波动。

由图 9(a)和 10(a)可知,加装串联电感比未加装串联电感的 DFIG 电磁转矩的最大波动峰值小;由

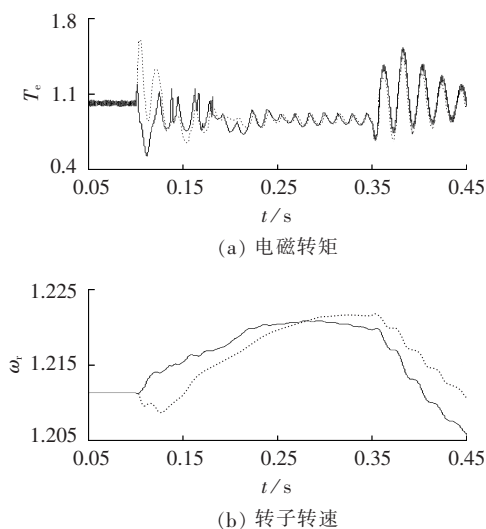


图 9 电压跌落程度为 -0.2 p.u.时加装串联电感前后电磁转矩和转子转速

Fig.9 Electromagnetic torque and rotor speed when voltage drops -0.2 p.u. before and after adding series inductor

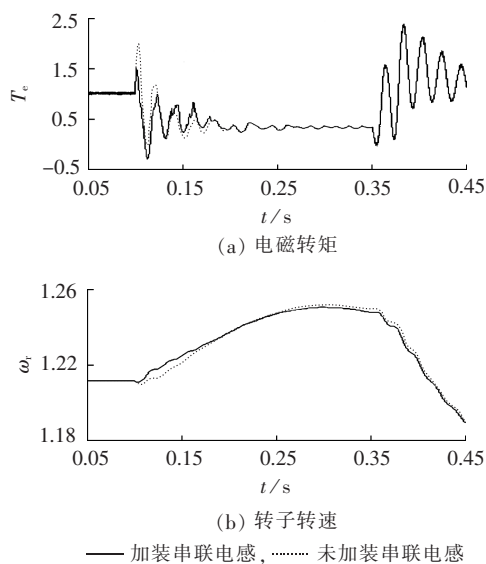


图 10 电压跌落程度为 -0.5 p.u.时加装串联电感前后电磁转矩和转子转速

Fig.10 Electromagnetic torque and rotor speed when voltage drops -0.5 p.u. before and after adding series inductor

图 9(b)和 10(b)可知,加装串联电感比未加装串联电感的 DFIG 转子转速的峰值小。

由此可知,通过在 Crowbar 回路中串联附加电感可以在一定程度上缓和电压跌落发生瞬间 DFIG 电磁转矩的波动,并可以轻微降低 DFIG 转子转速。但同时,转子回路中电感的串入会导致 DFIG 的电磁转矩波形中出现一定量的高次谐波,也会增加制造及控制的难度。由于风机带有的电力电子装置也会产生大量谐波,附加串联电感产生的高次谐波可与风机产生的其他谐波一起通过风机原有的滤波装置滤除。

3 结论

a. Crowbar 阻值与 DFIG 定子直流磁链的衰减速度并非成正比关系,在一定情况下定子直流磁链的衰减速度随着 Crowbar 阻值的增大而减小,Crowbar 阻值过大时会导致转子电流在 Crowbar 退出时出现“二次振荡”,不利于 Crowbar 电路的稳定投退。

b. Crowbar 阻值存在“极限值”,在此极限值下 DFIG 电磁转矩最大,相应转速的增量也最小,低于此极限值时电磁转矩随着 Crowbar 阻值的减小而减小,高于此极限值时电磁转矩随着 Crowbar 阻值的增大而减小。

c. 当其他条件满足要求时,Crowbar 阻值的选取应尽可能地使 DFIG 获得最大的电磁转矩和最高的定子直流磁链衰减速度。Crowbar 阻值过低会导致电压跌落瞬间电磁转矩产生剧烈的暂态振荡,通过在 Crowbar 电路中短时串联附加电感可以在一定程度上抑制电磁转矩的暂态振荡。

参考文献:

- [1] ABBEY C J. Effect to Low Voltage Ride Through (LVRT) characteristic on voltage stability[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3): 1-7.
- [2] 徐海亮,章玮,贺益康,等. 双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 8-15.
XU Hailiang, ZHANG Wei, HE Yikang, et al. A review on low voltage ride through technologies and prospect for DFIG wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 8-15.
- [3] 朱颖,李建林,赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 20-24.
ZHU Ying, LI Jianlin, ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 20-24.
- [4] 毕天姝,刘素梅,薛安成,等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 26-31.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride-through capability [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.
- [5] 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.
- [6] 郑重,杨耕,耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 7-15.
ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with Crowbar protection under grid faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 7-15.
- [7] 蔚兰,陈国呈,曹大鹏,等. 电网对称故障时双馈感应发电机低电压穿越控制[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(7): 1-6.
YU Lan, CHEN Guocheng, CAO Dapeng, et al. Low voltage ride-

- through control of doubly fed induction generator during symmetric voltage sag[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(7):1-6.
- [8] 凌禹, 高强, 蔡旭. 紧急变桨与撬棒协调控制改善双馈风电机组低电压穿越能力[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4):18-33.
LING Yu, GAO Qiang, CAI Xu. Improvement of low-voltage ride-through by coordinated pitch control and Crowbar control for DFIG wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4):18-33.
- [9] 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.
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on Crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22):29-36.
- [10] 王虹富, 邱家驹, 曹军. 基于串联制动电阻的恒速风电机组故障穿越改善措施[J]. 华东电力, 2008, 36(9):28-32.
WANG Hongfu, QIU Jiaju, CAO Jun. Fault ride-through improvement for fixed speed wind turbines by using series dynamic braking resistors[J]. East China Electric Power, 2008, 36(9):28-32.
- [11] 熊小伏, 张涵轶, 欧阳金鑫. 含 SVC 双馈风电机组暂态输出特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19):89-93, 99.
XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi, OUYANG Jinxin. Simulation analysis on transient output characteristics of DFIG with SVC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19):89-93, 99.
- [12] 朱晓东, 石磊, 陈宁, 等. 考虑 Crowbar 阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18):84-89.
ZHU Xiaodong, SHI Lei, CHEN Ning, et al. An analysis on low voltage ride through of wind turbine driven doubly fed induction generator with different resistances and quitting time of Crowbar[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18):84-89.
- [13] DITTRICH A, STOEV A. Comparison of fault ride-through strategies for wind turbines with DFIM generators[C]//The 11th Conference on European Power Electronics and Applications. Dresden, Germany: [s.n.], 2005:1-8.
- [14] 李建林. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [15] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 北京: 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2012.

作者简介:



栗然

栗然(1965-),女,河北保定人,教授,主要从事人工智能在电力系统中的应用、电网调度自动化、新能源发电与并网技术方面的研究;

王倩(1989-),女,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事新能源发电与并网技术方面的研究(E-mail:electric_work@163.com)。

Impact of Crowbar resistance on low voltage ride through of DFIG

LI Ran, WANG Qian, LU Yun, LIU Huilan, ZHU Jinyao

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The impact of Crowbar resistance on LVRT (Low Voltage Ride Through) of DFIG (Doubly Fed Induction Generator) is researched. The relationship between the Crowbar resistance and the transient DC flux of stator and rotor is derived; the impact of Crowbar resistance on the electromagnetic torque of DFIG during LVRT is discussed; and it is proposed to add a series inductor in Crowbar circuit to suppress the electromagnetic torque oscillation caused by voltage drop. Results show that, either too large or too small Crowbar resistance may weaken the ability of DFIG LVRT, the optimal Crowbar resistance should be selected and the additional series inductor suppresses the transient oscillation of electromagnetic torque.

Key words: wind power; doubly fed induction generator; low voltage ride through; Crowbar protection; resistance setting; series inductance