

双馈风电变流器低电压穿越下 Crowbar 电阻的优化设计

刘志星¹, 胡婵娟¹, 年 珩², 程 鹏²

(1. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 随着风电场大规模接入电网, 新的并网规范要求风力发电机组必须具有低电压穿越能力。双馈型异步发电机(DFIG)采用转子侧并联 Crowbar 电阻的方式限制电压跌落时转子产生的过电流, 从而实现 DFIG 的低电压穿越运行。文章在推导了电网电压跌落下 DFIG 定转子电流数学模型的基础上, 分析了 Crowbar 电阻对 DFIG 运行性能的影响, 完成了 Crowbar 电阻的优化设计, 以实现 DFIG 在电网电压跌落下的穿越运行。最后针对 1.65 MW DFIG 风电机组, 建立了基于 Matlab/Simulink 的仿真模型, 分析结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 风力发电; 低电压穿越; 双馈型异步发电机; Crowbar 电阻

中图分类号: TM46; TM315

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2012)01-0044-06

Optimal Design of Crowbar Resistance for DFIG Converter During Low Voltage Ride-through

LIU Zhi-xing¹, HU Chan-juan¹, NIAN Heng², CHENG Peng²

(1. CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: As wind farms being coupled with power grid in large-scale, the new grid code is drafted to require the condition that wind turbines must have low voltage ride-through (LVRT) capability. To realize low voltage ride-through of doubly-fed induction generator (DFIG), Crowbar resistances in parallel are usually equipped to the rotor side to limit the over-current during the voltage dipping. Based on the currents mathematic models of the DFIG stator and rotor, the impact of Crowbar resistance on the DFIG operation performance is analyzed, and the optimized design strategy of the Crowbar resistance is implemented. Finally, the simulation model based on Matlab/Simulink is set up for 1.65 MW DFIG wind turbines, which validates the correctness and effectiveness of the proposed design technology.

Key words: wind power; low voltage ride-through; doubly-fed induction generator; Crowbar resistance

0 引言

随着风力发电规模的扩大与单机容量的提高, 风力发电所产生电能在我国电网中所占的比重也逐渐增加。基于双馈风力发电机(DFIG)的风电系统具有变流器容量小、有功功率与无功功率可以单独调节、调速范围广等特点, 因此在风电场中被广泛应用^[1-2]。现阶段, 很

多国家都要求并网发电的风力机必须能实现低电压穿越(LVRT)^[3], 我国也于2009年提出了《风电场接入电网技术规定(修订版)》^[4]。

由于DFIG定子直接接入电网, 电网故障对其运行影响较大, 一般常采用增加硬件的方法来实现DFIG在严重电网故障下LVRT运行。在这些技术中, 转子侧并联Crowbar旁路电阻技术得到了广泛的应用^[5-7], 同时相关文献也提出了Crowbar电阻值选择原则, 并通过仿真分析验证了Crowbar电阻对于DFIG低电压穿越的有效性^[8-9]。在转子侧Crowbar电阻投入瞬间, DFIG变成一

收稿日期: 2011-11-10

作者简介: 刘志星(1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事兆瓦级风电变流器的研发和生产工作。

台转子电阻较大的鼠笼异步电动机。此时,由于转子变流器失去控制作用,整个电机的工作状态完全取决于Crowbar电阻,因此Crowbar电阻阻值大小直接影响风力发电机LVRT运行能力^[10-11]。

本文从DFIG的数学模型出发,通过分析定子三相电压对称跌落情况下DFIG的动态响应,给出了定子电流与转子电流的表达式,在此基础上推导出转子Crowbar电阻消耗能量与DFIG电磁转矩的表达式;同时分析了Crowbar电阻阻值对于DFIG低电压穿越运行的影响,以此为依据实现Crowbar电阻的优化设计,并对设计策略和所建模型进行了仿真验证。

1 电压跌落工况下DFIG数学模型

图1示出DFIG等效电路。

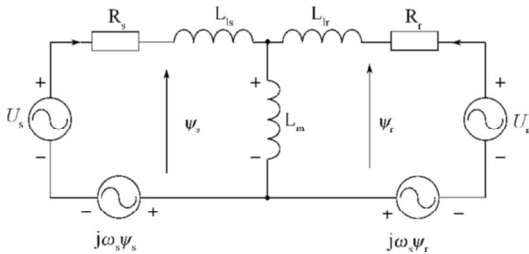


图1 DFIG在同步旋转坐标系下的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of DFIG in the synchronous rotating reference frame

采用电动机惯例,DFIG在 dq 同步旋转坐标系下的电压模型和磁链模型如式(1)和式(2)所示:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_r \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_r \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd} ——定子电压的 d 轴分量; u_{sq} ——定子电压的 q 轴分量; u_{rd} ——转子电压的 d 轴分量; u_{rq} ——转子电压的 q 轴分量; i_{sd} ——定子电流的 d 轴分量; i_{sq} ——定子电流的 q 轴分量; i_{rd} ——转子电流的 d 轴分量; i_{rq} ——转子电流的 q 轴分量; ψ_{sd} ——定子等效磁链的 d 轴分量; ψ_{sq} ——定子等效磁链的 q 轴分量; ψ_{rd} ——转子等效磁链的 d 轴分量; ψ_{rq} ——转子等效磁链的 q 轴分量; R_s ——定子绕组的电阻; R_r ——转子绕组的电阻; ω_1 ——同步角速度; ω_r ——转子的角速度; ω_s ——转差角速度,且 $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$; p ——微分算子。

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_m —— dq 同步旋转坐标系下定转子之间励磁互感; L_s ——定子绕组在 dq 同步旋转坐标系下的等效电感,且 $L_s = L_{ls} + L_m$,其中 L_{ls} 为 dq 同步旋转坐标系下定子绕组的漏感; L_r ——转子绕组在 dq 同步旋转坐标系下的等效电感,且 $L_r = L_{lr} + L_m$,其中 L_{lr} 为 dq 同步旋转坐标系下转子绕组的漏感。

式(1)与式(2)的相量形式为:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + p \times \Psi_s + j\omega_s \times \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + p \times \Psi_r + j\omega_r \times \Psi_r \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_s ——定子电压; U_r ——转子电压; I_s ——定子电流; I_r ——转子电流; Ψ_s ——定子等效磁链; Ψ_r ——转子等效磁链。

根据式(4),定子电流和转子电流可表示为:

$$\begin{cases} I_s = \frac{L_r \times \Psi_s - L_m \times \Psi_r}{L_r \times L_s - L_m^2} \\ I_r = \frac{L_s \times \Psi_r - L_m \times \Psi_s}{L_r \times L_s - L_m^2} \end{cases} \quad (5)$$

因定子绕组与转子绕组的漏感相对于励磁电抗较小,故式(5)可以简化为:

$$I_s = -I_r = \frac{L_m \times (\Psi_s - \Psi_r)}{L_r \times L_s - L_m^2} \quad (6)$$

定子电阻与转子电阻较小,可忽略。当DFIG稳态运行时,如采用定子电压定向的方式进行控制($u_{sq}=0$),由于忽略了定子电阻,定子磁链方向与定子电压方向垂直,即 $\psi_{sd}=0$,则式(1)中定子电压的 dq 轴分量可简化表示为: $u_s = u_{sd} = -\omega_1 \psi_{sq}$ 。

当发电机端三相定子电压出现对称跌落的时候,由于定子与转子磁链不能突变,故磁链中存在一个直流分量,此时转子仍保持原有速度旋转。相对于定子磁链中直流分量,转子的旋转速度较大,会在转子中感应出幅值较大的过电流,它可能造成转子变流器的严重损坏,所以需根据定子磁链的直流分量来分析转子过电流的幅值^[5, 12]。

当发电机端出现三相电压完全跌落时,转子感应出的故障电流最大。假设在 t_0 时刻发生三相电压完全跌落,此时定子的机端三相电压降为0。由于磁链具有连续性、不能突变,故此时定子磁链的初始值与故障发生前的定子磁链相等,并按定子时间常数进行振荡衰减:

$$\psi_s = -\frac{u_s}{\omega_1} \times e^{-t/T_s} \quad (7)$$

式中: T_s ——定子时间常数,且 $T_s = \frac{L_s + L_{lr}}{R_s}$ 。

为使转子故障电流最大,假设在故障发生前瞬间,转子开路,即 $I_r = 0$, 此时转子磁链可表示为:

$$\psi_r = \frac{L_m}{L_s} \times \psi_s = -\frac{L_m}{L_s} \times \frac{u_s}{\omega_1} \times e^{-t/T_r} \quad (8)$$

式中: T_r —— 转子时间常数, 且 $T_r = \frac{L_s + L_r}{R_r}$ 。

将式 (7) 与式 (8) 写成标量形式, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \psi_s &= \frac{u_s}{j\omega_1} \times e^{-t/T_s} \times e^{j\omega_1 t} \\ \psi_r &= \frac{L_m}{L_s} \times \frac{u_s}{j\omega_1} \times e^{-t/T_r} \times e^{j\omega_1 t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式 (9) 可知, 定子磁链为直流分量, 相对于定子绕组保持静止, 相对于同步旋转坐标系则以 $-\omega_1$ 角速度旋转; 转子磁链亦为直流分量, 相对于转子绕组保持静止, 相对于同步旋转坐标系则以 ω_s 角速度旋转。

将式 (9) 代入式 (6), 可获得定子和转子故障电流的近似表达式:

$$\begin{aligned} I_s = -I_r &= \frac{L_m \times (\psi_s - \psi_r)}{L_r \times L_s - L_m^2} \\ &= \frac{L_m \times u_s \times e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1 \times (L_r \times L_s - L_m^2)} \times \left(e^{-t/T_s} - \frac{L_m}{L_s} \times e^{-t/T_r} \times e^{-j\omega_1 t} \right) \quad (10) \end{aligned}$$

由式 (10) 可知, 当定子磁链与转子磁链方向相反时, 定子与转子的故障电流达到最大值, 表明定子和转子故障电流出现的时刻与电机的转速相关。通常, 在半周期 (10 ms) 左右时, 定子与转子的故障电流达到最大值^[12]。

$$I_{smax} = I_{rmax} = \frac{L_m \times u_s}{\omega_1 \times (L_r \times L_s - L_m^2)} \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right) \quad (11)$$

当 DFIG 机端电压跌落未至零时, 假设定子三相电压跌落为额定电压的 p 倍, 则在跌落发生后的暂态过程中, 定子磁链包括暂态直流磁链与 p 倍的额定电压所产生的强制分量, 此时式 (9) 中定子磁链表达式可以修改为:

$$\left. \begin{aligned} \psi_s &= \frac{(1-p) \times u_s}{j\omega_1} \times e^{-t/T_s} \times e^{j\omega_1 t} + \frac{p \times u_s}{j\omega_1} \\ \psi_r &= \frac{L_m}{L_s} \times \frac{(1-p) \times u_s}{j\omega_1} \times e^{-t/T_r} \times e^{j\omega_1 t} + \frac{L_m}{L_s} \times \frac{p \times u_s}{j\omega_1} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (6), 则电压跌落为 p 倍额定电压时定子与转子电流的表达式为:

$$\begin{aligned} I_s = -I_r &= \frac{L_m \times L_s}{L_s \times (L_r \times L_s - L_m^2)} \times \frac{p \times u_s}{j\omega_1} + \\ &\frac{L_m \times (1-p) \times u_s \times e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1 \times (L_r \times L_s - L_m^2)} \times \left(e^{-t/T_s} - \frac{L_m}{L_s} \times e^{-t/T_r} \times e^{-j\omega_1 t} \right) \quad (13) \end{aligned}$$

将式 (10) 与式 (13) 进行比较后发现, 式 (13) 中第

一项为交流强制分量, 即由剩余的交流电压所引起的。

2 Crowbar 电阻优化设计

针对 DFIG 定子电压跌落故障, 目前在风场中广泛采用的保护措施是在转子侧并联 Crowbar 电阻, 通过增加转子电阻措施达到抑制转子故障电流峰值的目的, 其具体拓扑结构如图 2 所示。

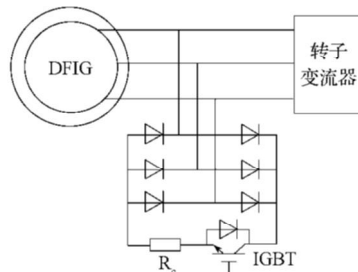


图 2 Crowbar 电路的拓扑结构

Fig. 2 Topology of Crowbar circuit

在定子三相电压对称跌落故障发生瞬间, 转子 Crowbar 电路投入运行, 同时封锁转子脉冲。由于转子 Crowbar 电阻 R_c 的投入, 转子阻抗变大, 则式 (13) 可表示为:

$$\begin{aligned} I_{rmax} &= \frac{p \times u_s}{\sqrt{R_c^2 + \left(\omega_1 \times \frac{L_s (L_r \times L_s - L_m^2)}{L_s \times L_m} \right)^2}} + \\ &\frac{(1-p) u_s}{\sqrt{R_c^2 + \left(\omega_1 \times \frac{(L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m} \right)^2}} \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right) \quad (14) \end{aligned}$$

由式 (14) 可以看出, 当转子侧投入 R_c 后, 转子故障电流的幅值得到相应的限制, 从而保护了变流器。定子三相短路故障发生时, 转子中故障电流幅值最大, 因此对 R_c 的要求很高。为实现在任意工况下 DFIG 可靠地低压穿越运行, R_c 优化设计均在假设 DFIG 定子三相电压发生完全跌落的前提下进行。

相关文献中列出了选择 Crowbar 电阻 R_c 的两条基本原则^[13-15]: 第一, R_c 应足够大, 以达到限制转子故障电流幅值的要求; 第二, R_c 不应过大, 避免电流经转子变流器上反并联二极管向直流母线充电, 造成直流母线电压陡升。

R_c 参数设计时, 由于转子故障电流最大值出现在 10 ms 左右, 而定子时间常数相对于转子时间常数较大, 因此, 我们认为在 10 ms 这段时间内转子磁链已经衰减到零。

首先, 从抑制转子故障电流的角度分析, 根据式 (14) 可得转子故障电流的幅值, 应小于转子变流器安全运

行电流值：

$$\sqrt{R_c^2 + \left(\omega_l \times \frac{(L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m} \right)^2} \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right) < I_{\text{safe}} \quad (15)$$

由式 (15) 可以得出转子Crowbar电阻的最小值：

$$R_c > \sqrt{\left(\frac{u_s \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right)}{I_{\text{safe}}} \right)^2 - \left(\omega_l \times \frac{(L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m} \right)^2} \quad (16)$$

其次,从避免对直流母线电容反充电的角度分析,由于转子变流器采用SVPWM调制技术,故直流母线电压为交流侧电压峰值的 $\sqrt{3}$ 倍,即 R_c 上的压降应小于直流母线电压的 $1/\sqrt{3}$ ：

$$\sqrt{R_c^2 + \left(\omega_l \times \frac{(L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m} \right)^2} \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right) < \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

由式 (17) 可得转子Crowbar电阻的最大值：

$$R_c < \frac{V_{dc} \times \omega_l \times (L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m \times \sqrt{3u_s^2 \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right)^2 - V_{dc}^2}} \quad (18)$$

除上述两条基本原则外,还应考虑 R_c 能否在短时间内消耗更多的能量,以确保转子变流器尽快并网从而向电网输送无功功率,促进电网电压的恢复。 R_c 上消耗的功率可以表示为：

$$P_R = \frac{u_s^2 \times R_c}{R_c^2 + \left(\omega_l \times \frac{(L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m} \right)^2} \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right)^2 \quad (19)$$

由式 (19) 可以看出,当 $R_c = \omega_l \frac{(L_r L_s - L_m^2)}{L_m}$ 时, R_c 消耗的功率最大,但通过式 (19) 计算出的电阻值,通常不在式 (16) 与式 (18) 计算的范围内。一般,在选值范围内, R_c 越小,转子电阻消耗能量就越快。

在选取 R_c 时,应注意DFIG电磁转矩(式(20))的波动,以避免因电磁转矩过大而造成对DFIG机械转轴以及齿轮箱的损坏。

$$\begin{aligned} T_{em} &= \psi_d \times i_q - \psi_q \times i_d \\ &= -\frac{u_s}{\omega_l} \times e^{-t/T_s} \times \sqrt{R_c^2 + \left(\omega_l \times \frac{(L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m} \right)^2} \times \\ &\quad \left(e^{-t/T_s} - \frac{L_m}{L_s} \times e^{-t/T_r} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

类似于式 (13) 的化简过程,则DFIG最大电磁转矩为：

$$|T_{em \max}| = \frac{u_s \times e^{-T/2T_s}}{\omega_l} \times \sqrt{R_c^2 + \left(\omega_l \times \frac{(L_r \times L_s - L_m^2)}{L_m} \right)^2} \times \left(e^{-T/2T_s} + \frac{L_m}{L_s} \times e^{-T/2T_r} \right) \quad (21)$$

可以看出, R_c 越小,电网故障下DFIG转矩冲击则越大,对DFIG机组的影响也越大。

3 仿真分析

为验证上述理论及Crowbar电阻设计方法的正确性,建立了1.65 MW DFIG机组的Matlab/Simulink仿真模型。DFIG机组系统结构如图3所示,其参数如表1所示。仿真系统采用标么值系统,其电压基值为相电压幅值,功率基值为发电机额定功率值。利用式 (16) 与式 (18),计算出转子Crowbar电阻选择范围为 $0.59 \text{ p.u.} < R_c < 1.28 \text{ p.u.}$ 。

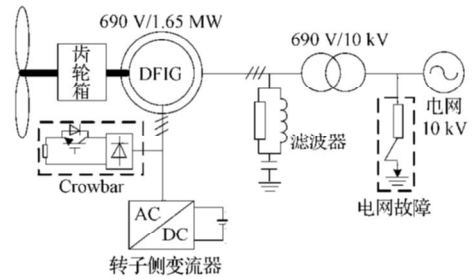


图3 DFIG系统结构

Fig. 3 Structure of the DFIG system

表1 DFIG系统参数

Tab. 1 Parameters of the DFIG system

额定功率 / MW	定子电压 / V	定子匝数	定子电阻 / p.u.	转子电阻 / p.u.	互感抗 / p.u.	定子漏感抗 / p.u.	转子漏感抗 / p.u.	极对数
1.65	690	0.36	0.0083	0.0071	4.82	0.066	0.089	2

为了验证式 (14) 的正确性,图4示出 R_c 为1.0 p.u.与1.25 p.u.、三相电压分别跌落至0%, 10%, 20%, 30%及40%额定电压时转子电流的理论计算值与仿真分析结果比较。可以看出,计算结果与仿真分析结果基本一致,且转子最大故障电流随 R_c 的增大而减小,表明利用式 (14) 能准确估算转子故障电流的最大值,可在此基

础上分析利用不同Crowbar电阻值对DFIG风力发电系统的保护程度。

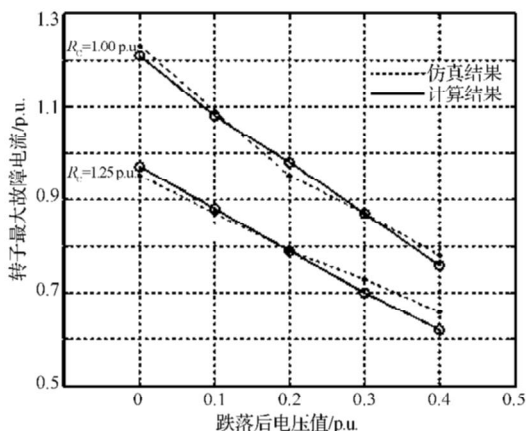


图4 电压跌落转子电流计算值与仿真结果对比

Fig. 4 Comparison between calculation results and simulation results of rotor current under voltage sag

为了验证利用式(21)计算的电磁转矩的正确性,选取3个 R_c 值进行仿真分析(图5)。计算结果与仿真结果均表明,在DFIG定子三相电压出现跌落的时候,DFIG电磁转矩的最大值随 R_c 值增大而减小。计算值小于仿真值,主要是因为式(21)中忽略了由电压突变引起的d轴磁链振荡分量。

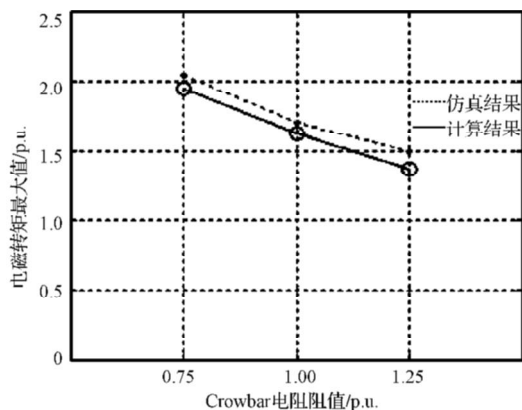


图5 电磁转矩

Fig. 5 Electromagnetic torque of DFIG

考虑 R_c 选择的基本原则并结合式(19),取 $R_c=1.0$ p.u.,对DFIG机组在电网电压跌落下的运行性能进行仿真分析。通过图6(a)可以看出,定子三相电压在0.1s时刻发生跌落,跌落幅度为额定电压的20%,此时 R_c 投入运行,转子变流器封锁脉冲。从图6(c)中可以看出,转子变流器已经被 R_c 旁路,此时DFIG以鼠笼电机方式运行。待 R_c 被切除后,转子变流器开始工作,控制转子励磁电流使DFIG系统输出无功功率促进电网电压恢复。图6(d)示出DFIG电磁转矩,在电网电压跌落瞬间,电磁转矩出现一个冲击,然后逐渐稳定于零。图6(e)示出DFIG定子输出的有功功率和无功功率,可以看出,在故障发生后,DFIG定子输出有功功率变为零;而在转子变流器投入

工作后,定子输出无功功率增加。综上所述,在电网电压发生跌落时,转子Crowbar电阻可以实现对转子变流器的保护,使DFIG系统低电压穿越安全运行。

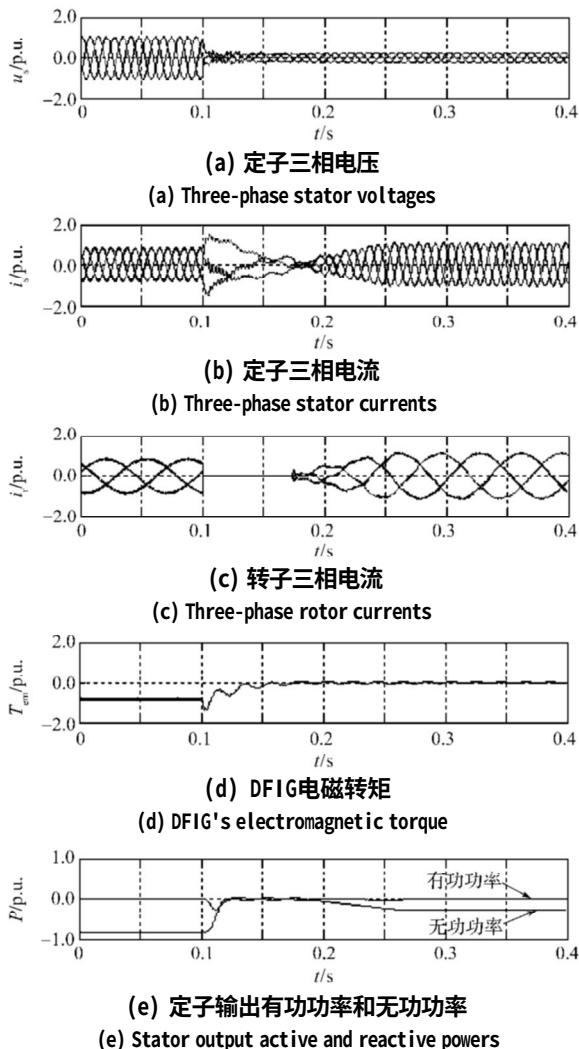


图6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

4 结语

电网电压出现跌落时,DFIG需要通过Crowbar电阻旁路转子变流器以达到保护转子变流器安全运行的目的。本文通过分析电压跌落下DFIG定子和转子的峰值电流,以转子不过流和直流母线不过压为目标得出了Crowbar电阻的优化设计方法,并同时考虑Crowbar电阻消耗能量的大小与Crowbar电阻对DFIG电磁转矩的影响,通过比较分析最终得出了Crowbar电阻的最优阻值。仿真结果验证了所提理论及设计方法的有效性与正确性。

参考文献:

- [1] Muller S, Deicke M, De Doncker R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines [J]. Industry Applications

Magazine, 2002, 8(3) : 26-33.

[2] Holdsworth L, Wu X G, Ekanayake J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances[J]. IEE Proc. Generation Transmission and Distribution, 2003, 150(3) : 343-352.

[3] Tsili M, Papathanassiou S. A review of grid code technical requirements for wind farms[J]. Renewable Power Generation IET, 2009, 3(3) : 308-332.

[4] 国家电网公司. 国家电网公司风电场接入电网技术规定(修订版)[S/OL]. 2011[2009-02].http://www.windpower.org.cn/news/links/jrdw11.pdf.

[5] 贺益康,周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9) : 140-146.

[6] 张兴,张龙云,杨淑英,等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2) : 1-8.

[7] 梁亮,李建林,许洪华. 双馈感应式风力发电系统低电压穿越研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3) : 19-21.

[8] Morren J, de Haan S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2) : 435-441.

[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, 31(22) : 29-36.

[10] 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.

[11] Hansen A D, Michalke G. Fault ride-through capability of DFIG wind turbines [J]. Renewable Energy, 2007, 32(9) : 1594-1610.

[12] Morren J, de Haan S W H. Short-Circuit Current of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1) : 174-180.

[13] Zhang W, Zhou P, He Y. Analysis of the by-pass resistance of an active crowbar for doubly-fed induction generator based wind turbines under grid faults [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008 : 2316-2321.

[14] Lohde R, Jensen S, Knop A, et al. Analysis of three phase grid failure and Doubly Fed Induction Generator ride-through using crowbars[C]//European Conference on Power Electronics and Applications, 2007 : 3659-3666.

[15] 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.



株洲市首批自动挡并联混合动力城市客车投入运营

2011年11月30日,湖南省株洲市公交公司新采购的10台自动挡AMT并联混合动力城市客车——TEG6129PHEV正式投入运营。

经过三年的努力,株洲市城区的627台公交车辆已于2011年9月份全部置换为混合动力城市客车,在全国率先实现了全城公交车辆电动化;目前又按照株洲市政府的部署,在现有手动挡混合动力车辆大批量推广的基础上,有计划、有步骤地在城区投入自动挡并联混合动力、混联混合动力、纯电动、增程式等多种动力类型的新能源车进行市场化运营,同时将新能源车辆的应用领域逐步由公交领域拓展到邮政、环卫、出租、家用车等更为广阔的领域。

据湖南南车时代电动汽车股份有限公司(简称“南车时代电动”)负责此车型研发的项目负责人介绍,此次交付的TEG6129PHEV自动挡AMT并联混合动力城市客车,是该公司面向大中城市开发的新型混合动力整车产品。该型车搭载了由南车时代电动最新研制、具有完全自主知识产权的“基于自动变速器输入轴的并联混合动力系统”。此系统集成大转矩永磁驱动电机、自动变速器、超级电容等关键部件,突破了整车控制、动力总成一体化等核心技术,不仅能够在实际运营过程中实现20%以上的节油率,而且还能实现自动换挡操作,驾驶平稳,动力性较强,可大大减轻驾驶人员的劳动负荷。该产品整体技术性能接近或同于国际领先水平,关键指标接近或优于美国伊顿的同类产品。该产品的研制成功,标志着南车时代电动在混合动力客车核心技术方面实现了重大的突破。

(陈祥熊)