

基于 MATLAB 的双馈风力发电机仿真设计

姜 俐, 李自成, 陈柯帆, 柴 铭, 况玑作

(成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614000)

摘 要 随着全球环境污染以及不可再生能源匮乏的问题不断加重, 各个国家对于这些问题都开始重视, 风能发电刚能够降低环境污染和不可再生能源的使用量。在如今利用风能发电的许多装置里面, 大多数都采用的双馈风力发电和变速调节装置。双馈风力发电机对电网的能量输送通过定子和转子, 有着高效、容易控制的优点, 因此双馈风力发电机在风力发电领域有较高的研究热度。本文在已建立双馈风力发电机的数学模型基础上, 利用 SIMULINK 进行数字仿真, 有效地直观化了双馈发电机的系统结构。

关键词 双馈发电机; 风力发电; 定子; 转子; MATLAB

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)02-0008-04

风能作为一种可再生、能量巨大、前景广的能源, 逐渐受到世界各国的重视。当前我国风力资源占有率最高, 如果风力资源仅开采一半, 就可以支撑我国目前的全部电力需求。我国的风力发电处于发展阶段, 风力发电也正在进入产业化和商业化的轨道, 在将来风能会作为一种常规能源进行开采开发。本文以双馈发电机作为研究对象, 着手于双馈发电机的基本原理, 并在已有的双馈发电机数学模型的基础上建立数字仿真, 通过仿真检验模型的正确性和实用性。

1 双馈发电机结构分析

双馈异步发电机与绕线型感应电机比较类似, 其中定子与普通三相交流发电机定子一样, 具有分布式绕组, 但其转子绕组上加有滑环和电刷; 转子采用三相分布式对称交流绕组。变速恒频双馈风力发电机系统由风力机、齿轮箱、双馈异步发电机、双 PWM 变换器组成, 其主要结构如图 1 所示。^[1]

双馈风力发电机的定子和转子都与电网连接, 在超同步的状态下工作时, 定子与转子分别向电网输送能量。在亚同步状态下工作时定子向电网输送能量, 转子这需从电网获取能量。^[2]

2 双馈风力电机的数学模型

三相静止 abc 坐标系下的数学模型: 取定子电流以流出为正, 从定子侧看, 电流流过定子绕组电阻为电压降的过程; 转子绕组采用电动机惯例, 转子电流流入为正,^[3]并作如下假设: (1) 忽略磁饱和和空间谐波, 设三相绕组对称, 均为星形连接, 磁动势沿气隙正弦分布; (2) 不考虑温度对电机参数的影响;^[4] (3) 转子绕组均折算到定子侧, 折算后每相绕组匝数相等。

1. 三相定子绕组电压方程:

$$\begin{cases} u_{as} = -R_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \\ u_{bs} = -R_s i_{bs} + \frac{d\psi_{bs}}{dt} \\ u_{cs} = -R_s i_{cs} + \frac{d\psi_{cs}}{dt} \end{cases}$$

2. 三相转子电压方程:

$$\begin{cases} u_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\psi_{ar}}{dt} \\ u_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\psi_{br}}{dt} \\ u_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\psi_{cr}}{dt} \end{cases}$$

3. 磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss} & -L_{sr} \\ -L_{rs} & -L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}$$

$$\psi_s = [\psi_{as}, \psi_{bs}, \psi_{cs}]^T$$

$$\psi_r = [\psi_{ar}, \psi_{br}, \psi_{cr}]^T$$

$$L_{sr} = L_{re}^T = L_{ms} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

$$L_{ss(rr)} = \begin{bmatrix} L_{ms(mr)} + L_{ts(tr)} & -\frac{1}{2}L_{ms(mr)} & -\frac{1}{2}L_{ms(mr)} \\ -\frac{1}{2}L_{ms(mr)} & L_{ms(mr)} + L_{ts(tr)} & -\frac{1}{2}L_{ms(mr)} \\ -\frac{1}{2}L_{ms(mr)} & -\frac{1}{2}L_{ms(mr)} & L_{ms(mr)} + L_{ts(tr)} \end{bmatrix}$$

其中, L_{ls} : 定子漏感; L_{lr} : 转子漏感; θ_r : 转子位置角; L_{ms} : 定子相绕组交链的最大互感磁通所对应的定子互感值; L_{mr} : 转子相绕组交链的最大互感磁通所对应的转子互感值。

3 两相同步旋转坐标系下的数学模型

三相静止 abc 坐标系变换到两相同步旋转 dq 坐标系时按变换前后功率不变的原则^[5], 同时坐标变换时,

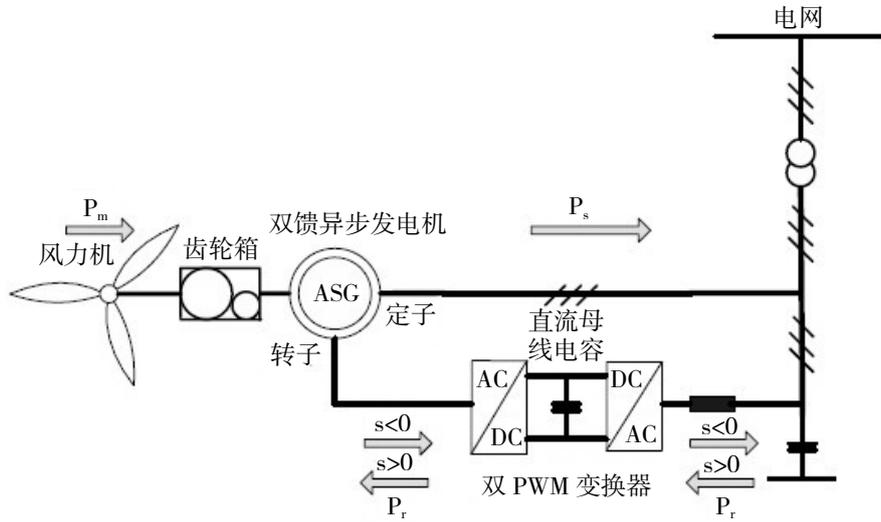


图 1

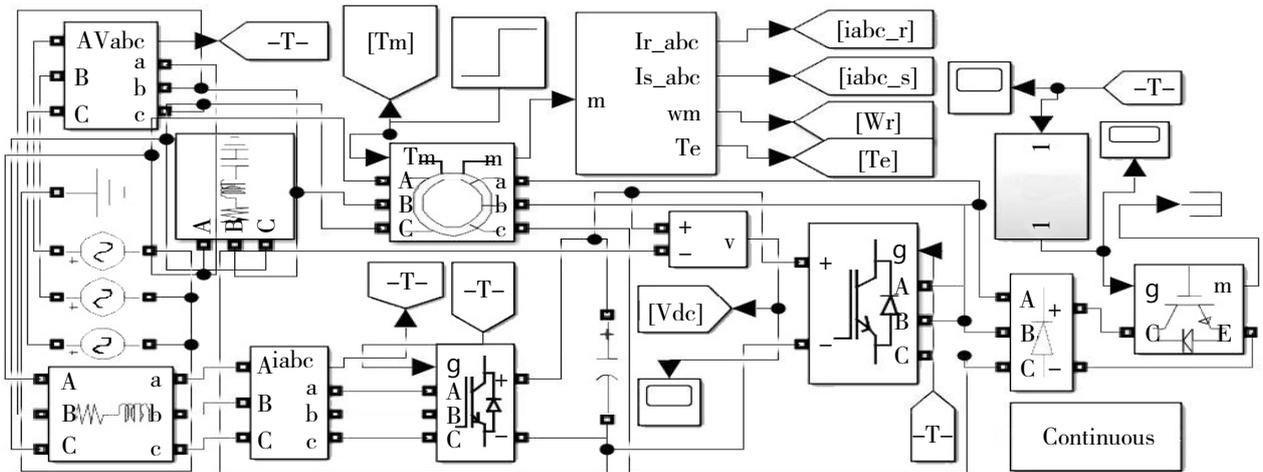


图 2

d 轴和 a 轴之间的角度由 θ 变为 $\theta - \theta_r$ ，矩阵 T 表达式：

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta - \theta_r + 120^\circ) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - 120^\circ) & -\sin(\theta - \theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

由变换矩阵对三相静止 abc 坐标系中各量做坐标变换即得到双馈发电机在两相同步旋转坐标系下的数学模型。

1. dq 坐标系下的电压方程：

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_1 \varphi_{qs} \\ -\omega_1 \varphi_{ds} \\ -\omega_2 \varphi_{qr} \\ -\omega_2 \varphi_{dr} \end{bmatrix}$$

2. dq 坐标系下的磁链方程：

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & L_0 & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & L_0 \\ -L_0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -L_0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

式中，dq 坐标系下： L_s 为两相定子绕组的自感， $L_s = L_{ls} + 1.5L_{ms}$ ； L_0 为同轴定子绕组与转子绕组间的等效互感， $L_0 = 1.5L_{ms}$ ； L_r 为两相转子绕组的自感， $L_r = L_{lr} + 1.5L_{mr}$ 。

3. dq 坐标下的功率方程：

$$P_s = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}); \quad Q_s = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{qs} - u_{qs} i_{ds})$$

$$P_r = \frac{3}{2} (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr}); \quad Q_r = \frac{3}{2} (u_{qr} i_{ds} - u_{ds} i_{qr})$$

式中， P_s 、 Q_s 为定子侧向电网输出的有功无功； P_r 、 Q_r 为转子侧从电网输入有功无功。

4 仿真模型

通过利用 MATLAB 作为仿真工具，构建出双馈风力发电机在电网搭建的数字电路模型如图 2 所示。通过对一些参数的突变来研究双馈风力发电机在外界干

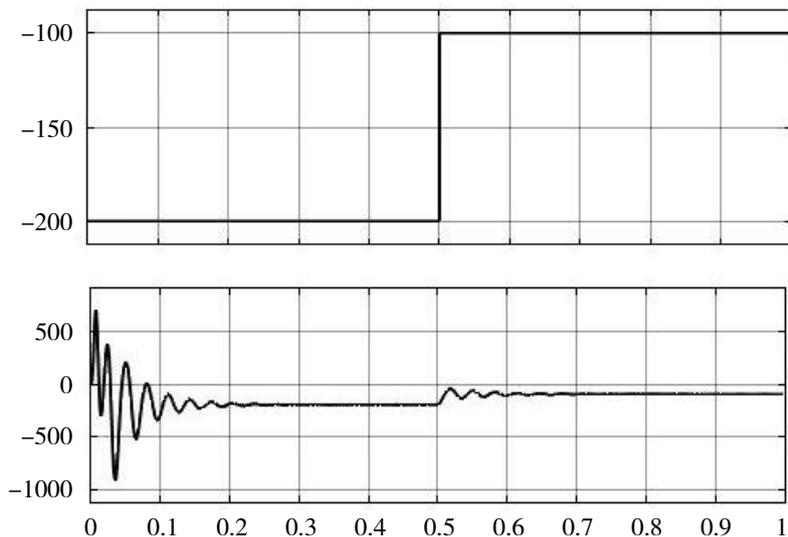


图3

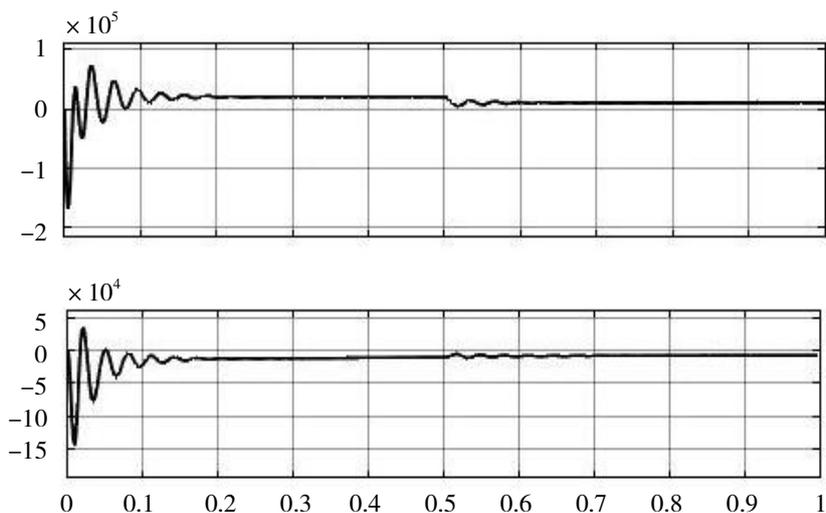


图4

扰下各转矩、功率、电压等波形变化。

电路模块参数：(1) 双馈发电机 L_0 取 0.06419 欧姆， L_{lr} 、 L_{ls} 取 0.000991Ω ；(2) 线电压为 $400V$ ，各相相差 120° ；(3) 双 PWM 变换器电阻为 0.1Ω ，电感为 $0.1mH$ ；电容为 $4700\mu F$ ；(4) 定子侧 PWM 控制器控制电容电压为 $900V$ ；(5) 设置双馈风力发电机输入转矩初始值为 200 ， $0.5s$ 时突变为 100 ，运行仿真。

5 仿真结果

5.1 机械转矩与电磁转矩

如 3 图所示，电磁转矩在大小上逐渐逼近输入的机械转矩，在 $0.5s$ 时，输入转矩由 200 突变为 100 ，后

电磁转矩在较小的波动后也逐渐趋于新的输入机械转矩大小。

5.2 定子侧消耗的有功无功

如 4 图所示，有功功率和无功功率先趋于稳定，在 $0.5s$ 时输入转矩减小，导致波动，稳定后有功功率较之前降低，无功功率较之前变化不大，都较低。

5.3 电容两端的电压与转子转速

如 5 图所示，定子侧 PWM 控制器在 $0.2s$ 后有效控制了电容两端电压在 $895V\sim 900V$ 之间， $0.5s$ 时让输入机械转矩突变，导致定子侧 PWM 变换器输出电压出现波动，在定子侧 PWM 控制器调节后，使电容两端电压稳定在 $900V$ 左右。在双 PWM 控制器的调节后，也达

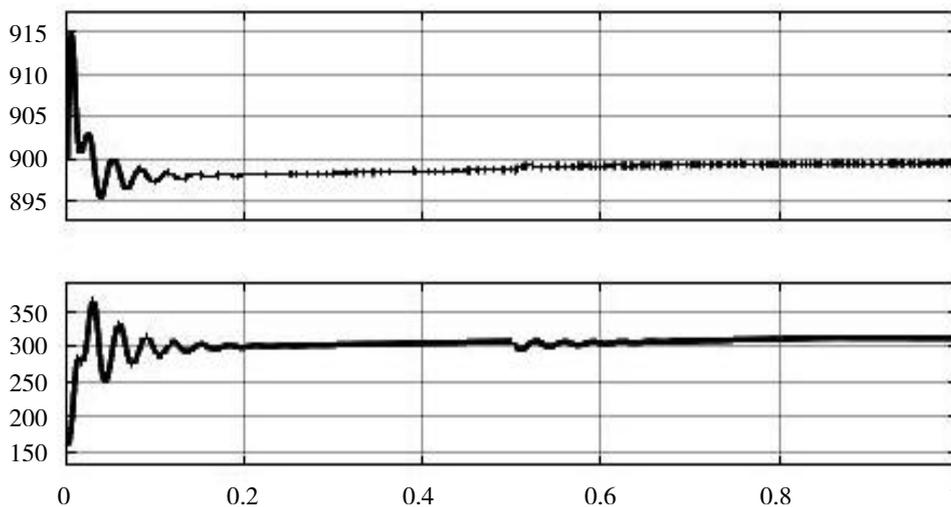


图 5

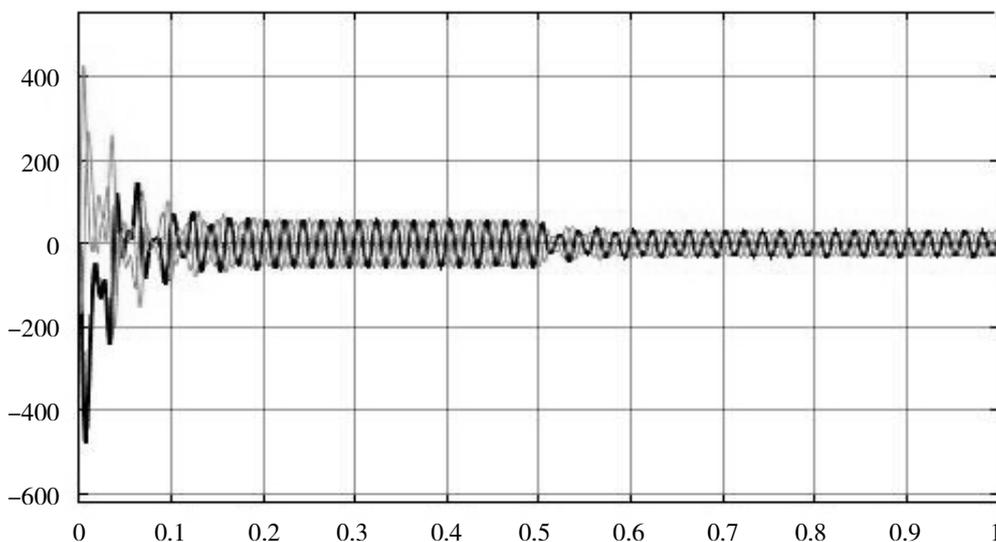


图 6

到了一个稳定值。

5.4 转子侧电流

如 6 图所示, 转子侧电流在双 PWM 控制器的控制下趋于稳定, 在 0.5s 时输入机械转矩由 200 突变到 100, 则励磁电流减小, 导致转子侧输入电流减小。仿真数据未达到故障阈值条件, 转子过电流保护没有动作。

本文以双馈风力发电机作为研究对象, 对双馈风力电机的数学模型进行分析, 在 MATLAB/SIMULINK 环境中, 建立数字仿真模型, 得到了机械转矩与电磁转矩、定子侧消耗的有功无功、电容两端的电压与转子转速、转子侧电流波形, 实现定子有功功率和无功功率的控制。

参考文献:

- [1] 王大伟. 双馈风力发电机运行控制技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [2] 刘腾. 双馈风力发电变流器控制技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [3] 郑恩让, 高飞. 双馈风力发电励磁控制系统的研究与设计 [J]. 电机与控制应用, 2011(02):37-39.
- [4] 任清晨. 风力发电机组工作原理和技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 李文杰. 基于交流励磁双馈电机变速恒频风力发电系统的研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.