

6-4-2020

DFIG Grid Connection Simulation Method Used for Transient Analysis of Black-start

Liqing Liu

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, Baoding 071003, China;;

Zengqiang Mi

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, Baoding 071003, China;;

Du Ping

2. Power Dispatching Control Center, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010020, China;

Yuliang Wan

2. Power Dispatching Control Center, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010020, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

DFIG Grid Connection Simulation Method Used for Transient Analysis of Black-start

Abstract

Abstract: Establishing a grid connection model of doubly-fed induction generator based wind turbine (DFIG) could be useful in the research and verification of black-start strategy in isolated power grid containing wind power. A DFIG grid connection simulation method based on Simulink was proposed. *Through analyzing the operation characteristics of doubly-fed induction generator in no-load and grid-connected conditions, its dual-operation simulation model was established. According to the grid-connection theory of DFIG, the established doubly-fed induction generator model was combined with wind turbine, converter and other built-in modules, and the DFIG grid connection model was built with its control system added.* Simulation results show that the simulation method is feasible.

Keywords

isolated power grid black-start, electromagnetic transient, DFIG, grid connection, dual-operation simulation model

Authors

Liqing Liu, Zengqiang Mi, Du Ping, Yuliang Wan, and Yuan He

Recommended Citation

Liu Liqing, Mi Zengqiang, Du Ping, Wan Yuliang, Yuan He. DFIG Grid Connection Simulation Method Used for Transient Analysis of Black-start[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1575-1584.

用于黑启动暂态分析的 DFIG 空载并网仿真

刘力卿¹, 米增强¹, 杜平², 万玉良², 袁贺¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003

2. 国网内蒙古东部电力有限公司调度控制中心, 呼和浩特 010020)

摘要: 建立用于孤网黑启动电磁暂态分析的双馈风电机组(Doubly-Fed Induction Generator based Wind Turbine, DFIG)空载并网模型, 对于含风电孤网黑启动策略的研究与验证具有重要作用。为此, 提出了一种基于 Simulink 平台的 DFIG 空载并网仿真方法。通过对双馈发电机在空载和并网发电两种工况下的运行特性进行分析, 建立了其双工况仿真模型; 根据 DFIG 的空载并网运行原理, 将所建双馈发电机模型与风力机、变频器等软件内置模块相连接, 并通过建立其空载并网控制模型, 建立了 DFIG 空载并网的整体仿真模型。仿真结果表明所提仿真方法是可行的。

关键词: 孤网黑启动; 电磁暂态; 双馈风电机组; 空载并网; 双工况仿真模型

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 07-1575-10

DFIG Grid Connection Simulation Method Used for Transient Analysis of Black-start

Liu Liqing¹, Mi Zengqiang¹, Du Ping², Wan Yuliang², Yuan He¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, Baoding 071003, China;

2. Power Dispatching Control Center, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010020, China)

Abstract: Establishing a grid connection model of doubly-fed induction generator based wind turbine (DFIG) could be useful in the research and verification of black-start strategy in isolated power grid containing wind power. A DFIG grid connection simulation method based on Simulink was proposed. Through analyzing the operation characteristics of doubly-fed induction generator in no-load and grid-connected conditions, its dual-operation simulation model was established. According to the grid-connection theory of DFIG, the established doubly-fed induction generator model was combined with wind turbine, converter and other built-in modules, and the DFIG grid connection model was built with its control system added. Simulation results show that the simulation method is feasible.

Keywords: isolated power grid black-start; electromagnetic transient; DFIG; grid connection; dual-operation simulation model

引言

近年来, 一些远离主网的海岛或偏远地区, 利用风电机组、储能设备等作为电源构建孤立电网, 已经成为解决其供电问题的有效途径^[1-2]。孤网的

黑启动是指在其故障停电后, 通过其内具备黑启动能力的发电单元的自启动, 带动其它无黑启动能力的发电单元启动, 最终使整个孤网恢复供电^[3-7]。

目前, 国内外学者虽通过对孤网内发电单元功能的划分提出了孤网的黑启动策略, 但是仍缺乏对黑启动过程中孤网电磁暂态的仿真验证。由于黑启动初期孤网的调频调压能力有限, 尤其是对于含高风电渗透率的孤网^[8], 风电机组空载并网将对其产生冲击, 直接关系到孤网能否成功实现黑启动。因此,



收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2016-01-07;
基金项目: 国家电网公司科技项目(SGMD0000DDJS 1500096);
作者简介: 刘力卿(1987-), 男, 河北, 博士, 研究方向为风力发电控制技术; 米增强(1960-), 男, 河北, 博导, 研究方向为新能源电力系统。

<http://www.china-simulation.com>

• 1575 •

通过建立能够用于孤网黑启动电磁暂态过程仿真的风电机组空载并网模型,将对含风电孤网黑启动策略的研究与验证具有重要作用。

双馈风电机组(Doubly-Fed Induction Generator based Wind Turbine, DFIG)是目前应用最为广泛的机组类型,其空载并网过程主要包括空载和并网发电两种工况^[9]。Simulink 内的 SimPowerSystems 是国内外通用的电磁暂态仿真工具,提供了双馈发电机、变频器、电池等大量内置模块,在风力发电、微电网、交直流输电等领域均获得了广泛应用^[10]。国内外学者已利用其风力机、双馈发电机等内置模块建立了并网发电工况下双馈风电机组的仿真模型,并将其用于研究大规模风电接入对电网稳定运行的影响^[11-12]。但由于其内置的双馈发电机模块不能空载运行,国内外学者在对双馈风电机组的空载并网过程进行仿真时,通常忽略外部电网及机组变频器的电磁暂态特性,直接通过编写 S 函数建立双馈发电机空载和并网发电工况下的仿真模型,并在并网瞬间利用使能模块对两种模型进行切换,以实现双馈风电机组空载并网过程的仿真^[13-15]。由于利用上述方法所建模型没有与外部电气模块的接口,该模型只适用于研究理想情况下双馈风电机组的空载并网控制策略,无法将其作为基础模块引入至孤网的黑启动仿真平台中,以用于研究机组空载并网对孤网黑启动电磁暂态的影响。文献[16]则基于 S 函数和受控源模块建立了双绕组发电机的仿真模型,使所建电机模型能够用于电磁暂态过程的仿真。但由于模型中同时含有 S 函数和大量电力电子器件,使所建模型的运行速度大大降低^[17-18],从而也限制了该方法在双馈风电机组仿真中的应用。

针对以上仿真方法的不足,本文基于 Simulink 平台,通过分析双馈风电机组的空载并网运行原理,建立双馈发电机的双工况仿真模型,并将其与风力机、变频器等内置模块相结合,在此基础上建立机组的空载并网控制模型,从而建立起双馈风电机组空载并网的整体仿真模型。最后通过仿真对所提方法的可行性及运行效率进行验证。

1 双馈发电机的数学模型

双馈风电机组主要由风力机、双馈发电机、变频器等构成。空载并网过程中,双馈风电机组通过控制其网侧变频器和转子侧变频器,对双馈发电机定子的空载电压进行调整,待满足并网条件时将开关 K 闭合,机组由空载状态进入并网发电状态,如图 1 所示。

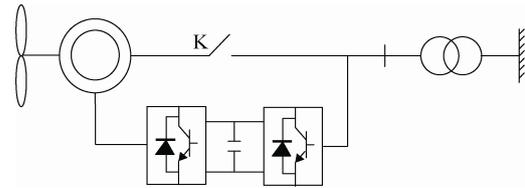


图 1 双馈风电机组的结构图

双馈发电机是双馈风电机组的核心,其数学模型主要由运动方程、电压方程和磁链方程构成。在空载和并网发电两种工况下,双馈发电机的运动方程保持不变,可表示为^[9]

$$\begin{cases} 2Hp\omega_r = T_e - F\omega_r - T_m \\ p\theta_r = \omega_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为发电机的惯性时间常数; ω_r 、 θ_r 分别为发电机的转速和位置角; ω_b 为基准转速; T_e 、 T_m 分别为电磁转矩和机械转矩。

并网发电时,双馈发电机在 dq 轴同步旋转坐标系下的电压与磁链方程可表示为^[9]

$$p\psi_{sr}^b / \omega_b = A\psi_{sr}^b + U_{sr}^b \quad (2)$$

$$\psi_{sr}^b = L I_{sr}^b \quad (3)$$

式中: 上标“b”表示发电机运行于并网发电状态; 下标“s”和“r”分别表示发电机定、转子侧变量; $\psi_{sr}^b = [\psi_{sq}^b, \psi_{sd}^b, \psi_{rq}^b, \psi_{rd}^b]^T$, 为磁链向量; $U_{sr}^b = [u_{sq}^b, u_{sd}^b, u_{rq}^b, u_{rd}^b]^T$, 为电压向量; $I_{sr}^b = [i_{sq}^b, i_{sd}^b, i_{rq}^b, i_{rd}^b]^T$, 为电流向量; $A = -(RL^{-1} + W)$; $R = \text{diag}(r_s, r_s, r_r, r_r)$, 为电阻矩阵; p 为微分算子; s 为发电机的转差率; $L_s = \text{diag}(l_s, l_s)$, $L_r = \text{diag}(l_r, l_r)$, $L_m = \text{diag}(l_m, l_m)$, 分别为发电机定、转子的电感矩阵及互感矩阵;

$$L = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix}, \quad W_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$W_s = \begin{bmatrix} 0 & s \\ -s & 0 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} W_e & 0 \\ 0 & W_s \end{bmatrix}.$$

空载运行时, 双馈发电机的定子电流 $I_s^k = [i_{sq}^k, i_{sd}^k]^T = 0$, 其电压与磁链方程由 4 阶降为 2 阶, 可表示为^[9]

$$p\psi_r^k / \omega_b = A_r \psi_r^k + U_r^k \quad (4)$$

$$U_s^k = L_m L_r^{-1} p\psi_r^k / \omega_b + W_e L_m L_r^{-1} \psi_r^k \quad (5)$$

$$\psi_s^k = L_m I_r^k \quad (6)$$

$$\psi_r^k = L_r I_r^k \quad (7)$$

式中: 上标“k”表示发电机运行于空载状态; $\psi_s^k = [\psi_{sq}^k, \psi_{sd}^k]^T$, $\psi_r^k = [\psi_{rq}^k, \psi_{rd}^k]^T$, 分别为发电机定、转子的磁链向量; $U_s^k = [u_{sq}^k, u_{sd}^k]^T$, $U_r^k = [u_{rq}^k, u_{rd}^k]^T$, 分别为发电机定、转子的电压向量; $I_r^k = [i_{rq}^k, i_{rd}^k]^T$, 为发电机转子的电流向量; $R_r = \text{diag}(r_r, r_r)$, 为发电机转子的电阻矩阵; $A_r = -(R_r L_r^{-1} + W_s)$ 。

2 双馈发电机的双工况仿真模型

隐式梯形法是电磁暂态时域仿真中常用的数值积分方法, 具有较高的精度和稳定性^[19]。本文利用隐式梯形法对双馈发电机的数学模型进行离散化, 分别建立了其空载和并网发电工况下机械和电气部分的模块化仿真模型, 并通过对两者的接口电路及切换机制进行设计, 建立了双馈发电机的双工况仿真模型。所建发电机模型能够与电源、变频器等电气模块进行连接, 以用于双馈风电机组空载并网及其对孤网黑启动电磁暂态影响的仿真。

2.1 机械部分仿真模型

本文利用隐式梯形法对式(1)进行离散化可得

$$M_1 \omega_r(t) = M_2 \omega_r(t - T_s) + T_s [T_e(t) + T_e(t - T_s) - T_m(t) - T_m(t - T_s)] \quad (8)$$

$$\theta_r(t) = T_s [\omega_r(t) + \omega_r(t - T_s)] / 2 + \theta_r(t - T_s) \quad (9)$$

式中: $M_1 = (4H + T_s F)$, $M_2 = (4H - T_s F)$, T_s 为仿真步长。通过对式(8)和式(9)进行分析, 双馈发电机机械部分的仿真模型可分别以 T_e , T_m 作为输

入, 以 ω_r , θ_r 作为状态变量和输出。因此, 根据式(8)和式(9), 基于 Simulink 可建立起双馈发电机机械部分的模块化仿真模型, 如图 2 所示。

2.2 空载工况下电气部分仿真模型

本文利用隐式梯形法对式(4)和式(5)进行离散化可得

$$\psi_r^k(t) = A_d^k \psi_r^k(t - T_s) + B_d^k [U_r^k(t) + U_r^k(t - T_s)] \quad (10)$$

$$U_s^k(t) = C_{d1}^k \psi_r^k(t) + C_{d2}^k \psi_r^k(t - T_s) \quad (11)$$

式中: $A_d^k = [I - aA_r]^{-1}[I + aA_r]$, $B_d^k = a[I - aA_r]^{-1}$, $C_{d1}^k = [I / (\omega_b T_s) + W_e / 2] L_m L_r^{-1}$, $C_{d2}^k = [W_e / 2 - I / (\omega_b T_s)] L_m L_r^{-1}$, $a = \omega_b T_s / 2$ 。通过对式(10)和式(11)进行分析, 空载工况下双馈发电机电气部分的仿真模型可分别以 U_r^k 作为输入, 以 U_s^k 和 I_r^k 作为输出, 以 ψ_r^k 作为状态变量。因此, 根据式(10)和式(11), 基于 Simulink 可建立起空载工况下双馈发电机电气部分的模块化仿真模型, 如图 3 所示。

2.3 并网发电工况下电气部分的仿真模型

本文利用隐式梯形法对式(2)进行离散化可得

$$\psi_{sr}^b(t) = A_d^b \psi_{sr}^b(t - T_s) + B_d^b [U_{sr}^b(t) + U_{sr}^b(t - T_s)] \quad (12)$$

式中: $A_d^b = [I - aA]^{-1}[I + aA]$, $B_d^b = a[I - aA]^{-1}$ 。通过对式(12)进行分析, 并网发电工况下双馈发电机电气部分的仿真模型可分别以 U_{sr}^b 作为输入, 以 I_{sr}^b 作为输出, 以 ψ_{sr}^b 作为状态变量。因此, 根据式(12), 基于 Simulink 可建立起并网发电工况下双馈发电机电气部分的模块化仿真模型, 如图 4 所示。

2.4 双工况接口电路模型

SimPowerSystems 提供了强大的电磁暂态分析工具和丰富的电气模块库, 使电力系统的仿真建模大大简化。为使所建双馈发电机模型能够与 SimPowerSystems 中的电源、变频器等电气模块进行连接以用于电磁暂态的仿真, 需进一步建立双馈发电机电气部分仿真模型与电源、变频器等模块的接口。

在 SimPowerSystems 中, 电源、变频器等模块本质上均为电压源。双馈发电机空载运行时其转子电压由变频器给定, 定子电压则通过调整转子磁链进行控制; 并网发电运行时其转子和定子的电压则分别由变频器和电网给定。通过上述分析, 并根据所建双馈发电机两种工况下电气部分仿真模型的输入和输出类型, 本文基于 SimPowerSystems 建立

了发电机的双工况接口电路模型, 如图 5 所示。通过将接口电路端口的测量电压作为发电机电气部分仿真模型的输入, 并将电气部分仿真模型的输出作为其受控源模块的控制信号, 就能建立起发电机电气部分仿真模型与电源、变频器等电气模块的连接。

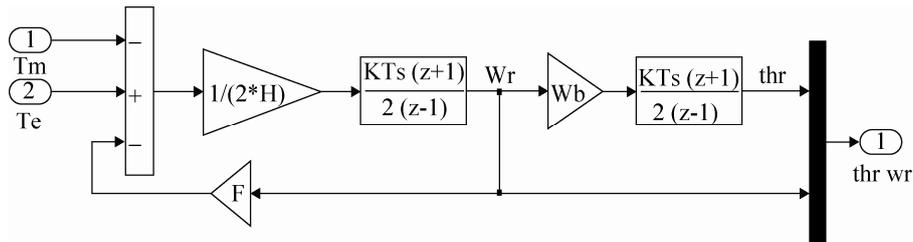


图 2 双馈发电机机械部分的仿真模型

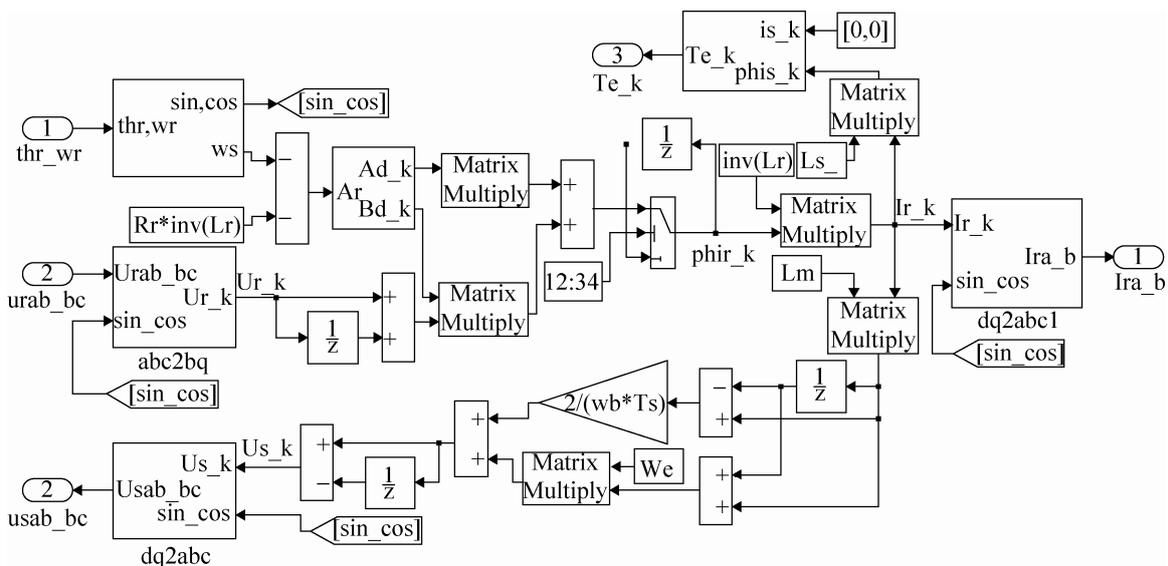


图 3 空载工况下双馈发电机电气部分的仿真模型

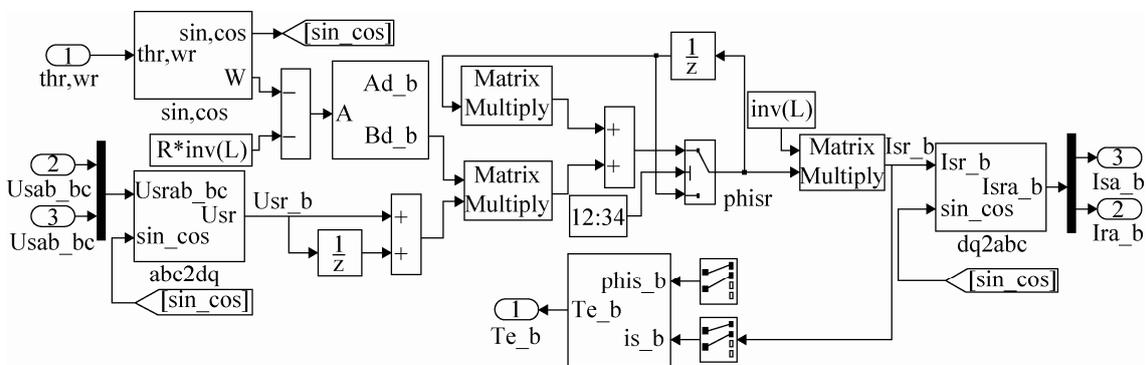


图 4 并网发电工况下双馈发电机电气部分的仿真模型

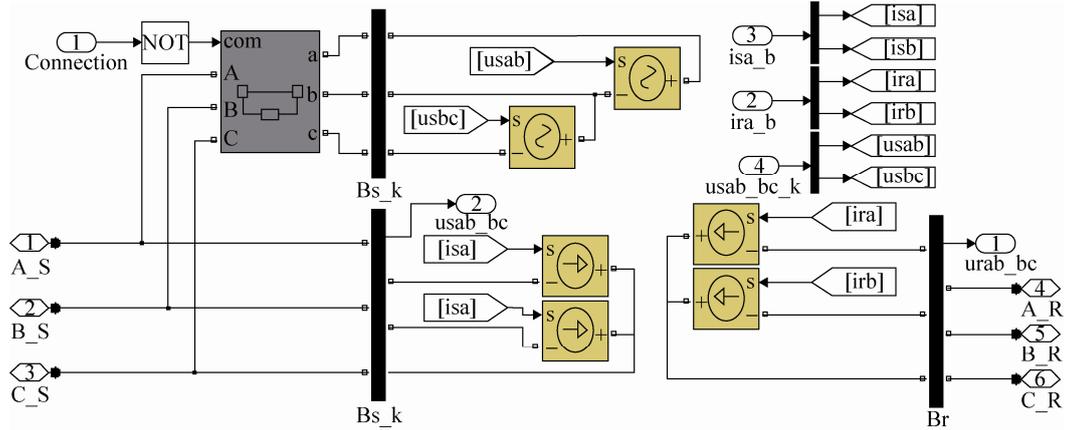


图 5 双馈发电机的双工况接口电路模型

如图 5 所示, 双馈发电机接口电路的转子侧支路由受控电流源模块并联而成, 并在空载和并网发电两种工况下均保持不变; 双馈发电机接口电路的定子侧支路由空载支路经断路器模块与并网发电支路并联而成, 其空载支路和并网发电支路则分别由串联的受控电压源模块和并联的受控电流源模块构成。对于定子侧支路, 其断路器模块的状态可由并网信号 Connection 进行控制: 空载工况下 Connection=0, 使断路器模块闭合, 并将受控电流源模块的电流控制信号设为 0, 其并网发电支路就相当于断路, 定子侧支路则整体表现为电压源; 并网发电工况下 Connection=1, 使断路器模块断开, 其空载支路就相当于断路, 定子侧支路则整体表现为电流源。

2.5 仿真模型的切换机制

由于双馈发电机在空载并网瞬间其定子和转子的电流不会突变^[9], 因此, 为使所建模型能够对双馈发电机空载并网过程的实际运行特性进行仿真, 必须保证双馈发电机的接口电路在并网瞬间无电流突变产生, 即在并网瞬间对发电机两种工况下的电气部分仿真模型进行切换时, 两种模型必须具有相同的定、转子电流输出。为此, 本文通过对双馈发电机两种工况下电压与磁链方程的关系进行分析, 提出了一种新的仿真模型切换机制。

稳定状态下, 式(2), (4)和(5)中磁链的动态过程可以忽略, 于是可得

$$U_s^b = B_{11}I_s^b + B_{12}I_r^b \quad (13)$$

$$U_r^b = B_{21}I_s^b + B_{22}I_r^b \quad (14)$$

$$U_s^k = W_e L_m I_r^k \quad (15)$$

$$U_r^k = -A_r L_r I_r^k \quad (16)$$

式中: $U_s^b = [u_{sq}^b, u_{sd}^b]^T$, $U_r^b = [u_{rq}^b, u_{rd}^b]^T$, $I_s^b = [i_{sq}^b, i_{sd}^b]^T$,

$$I_r^b = [i_{rq}^b, i_{rd}^b]^T, B_{11} = \begin{bmatrix} r_s & l_s \\ -l_s & r_s \end{bmatrix}, B_{12} = \begin{bmatrix} 0 & l_m \\ -l_m & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{21} = \begin{bmatrix} 0 & sl_m \\ -sl_m & 0 \end{bmatrix}, B_{22} = \begin{bmatrix} r_r & sl_r \\ -sl_r & r_r \end{bmatrix}。$$

由式(15)和式(16)可得

$$U_r^k = -A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} U_s^k \quad (17)$$

若令 $[U_s^b, U_r^b]^T = [U_s^k, U_r^k]^T$, 则由式(13)和式(17)可得

$$U_r^b = -A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} B_{11} I_s^b - A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} B_{12} I_r^b \quad (18)$$

$$\text{式中: } A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} B_{11} = -\frac{1}{l_m} \begin{bmatrix} sl_r r_s + l_s r_r & sl_r l_s - r_r r_s \\ r_r r_s - sl_r l_s & sl_r r_s + l_s r_r \end{bmatrix},$$

$$A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} B_{12} = -\begin{bmatrix} r_r & sl_r \\ -sl_r & r_r \end{bmatrix}。$$

于是将式(18)代入式(14)中可得

$$(A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} B_{11} + B_{21}) I_s^b = 0 \quad (19)$$

$$\text{式中: } (A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} B_{11} + B_{21}) = \frac{1}{l_m} \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ -m_2 & m_1 \end{bmatrix},$$

$$m_1 = -sl_r r_s - l_s r_r, m_2 = r_r r_s + s(l_m^2 - l_r l_s)。$$

通过分析可知矩阵 $(A_r L_r L_m^{-1} W_e^{-1} B_{11} + B_{21})$ 的行列式始终大于 0, 则式(19)存在唯一零解, 即

$$I_s^b = I_s^k = 0 \quad (20)$$

进一步将式(20)代入式(13)中可得

$$U_s^b = B_{12} I_r^b \quad (21)$$

又因 $B_{12} = W_e L_m$ ，于是有 $I_r^b = I_r^k$ 。

通过上述分析可知，若在仿真的初始时刻，将双馈发电机 2 种工况下的电气部分仿真模型的初始状态均设为 0，即令 $[\psi_s^b, \psi_r^b]^T = [\psi_s^k, \psi_r^k]^T = 0$ ，并以空载工况下电气部分仿真模型的输入与输出作为并网发电工况下电气部分仿真模型的输入，同时对两种模型进行仿真计算，将使两种模型在每一仿真步长内具有相同的电流输出，即 $[I_s^b, I_r^b]^T = [I_s^k, I_r^k]^T$ 。因此，在并网瞬间直接对双工况接口电路内受控电流源模块的控制信号进行切换，就能实现对双馈发电机空载并网过程的仿真，双馈发电机的双工况仿真模型如图 6 所示。

3 双馈风电机组空载并网仿真模型

与双馈发电机不同，风力机、变频器等部分的数学模型在并网前后保持不变^[9]，因此，风力机、变频器等部分在空载工况下的仿真模型与其在并网发电工况下的仿真模型是一致的，可以直接利用 SimPowerSystems 中提供的风力机、变频器等内置模块进行仿真。根据双馈风电机组的空载并网运行原理，本文对所建双馈发电机的双工况仿真模型进

行封装，并将其与 SimPowerSystems 中的风力机、变频器等内置模块进行组合，在此基础上，采用文献[13-14]中所提空载并网控制策略建立了双馈风电机组的空载并网控制模型，从而能够实现对双馈风电机组空载并网过程的仿真。本文所建双馈风电机组空载并网的整体仿真模型易于与已有模型进行连接，以用于研究机组空载并网对孤网黑启动电磁暂态的影响，如图 7 所示。

双馈风电机组的空载并网控制模型主要包括并网控制模型、变桨控制模型、网侧变频器控制模型以及转子侧变频器控制模型，如图 8 所示。其中，并网控制模型的功能主要为通过计算发电机端口电压与并网点电压的误差以判断并网条件是否满足，并产生并网信号 Connection；变桨控制模型的功能主要为对机组的转速进行控制；网侧变频器控制模型的功能主要为使机组变频器的直流电容电压保持稳定；转子侧变频器的控制模型包括空载和并网发电两部分，空载部分的功能主要为调整双馈发电机定子的空载电压，使其能够对并网点电压进行追踪，并网发电部分的功能则主要为通过控制机组的转速使机组运行于最大风能追踪状态，空载部分和并网发电部分需根据并网信号进行切换。

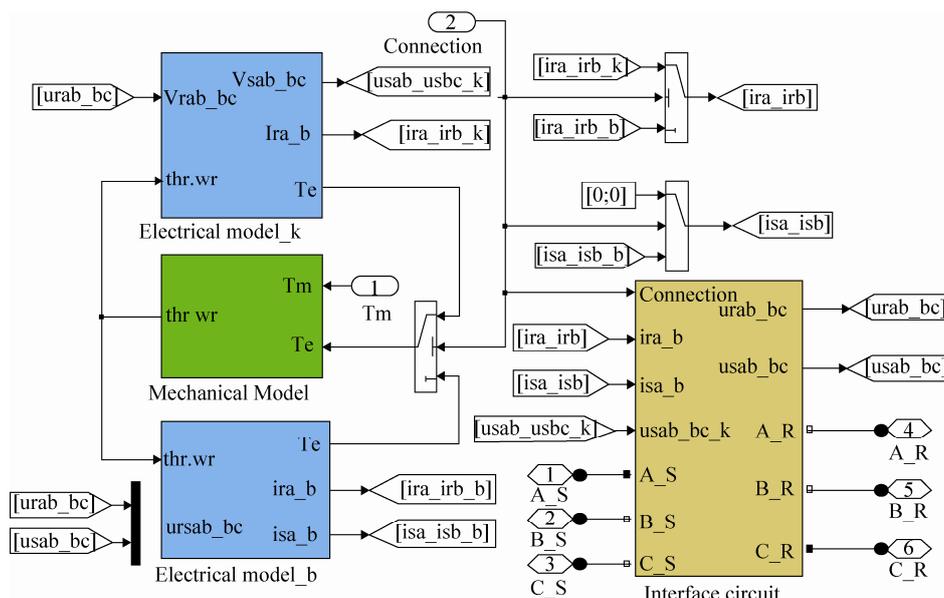


图 6 双馈发电机的双工况仿真模型

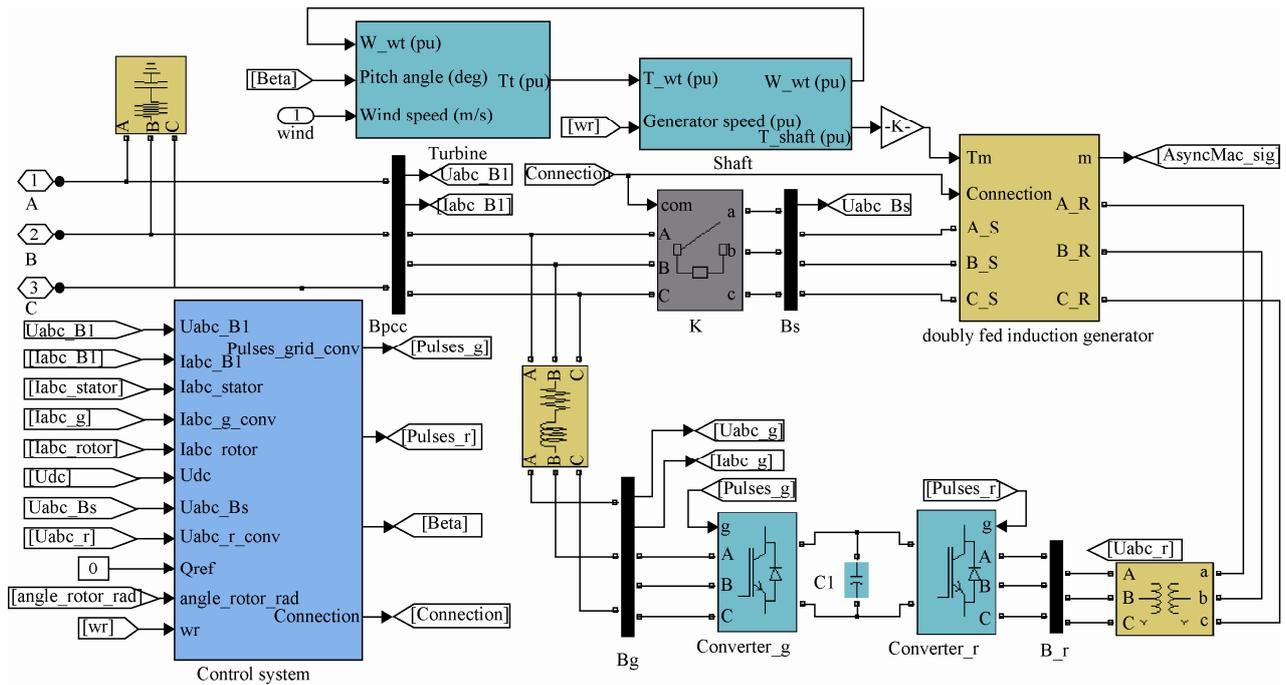


图 7 双馈风电机组空载并网的整体仿真模型

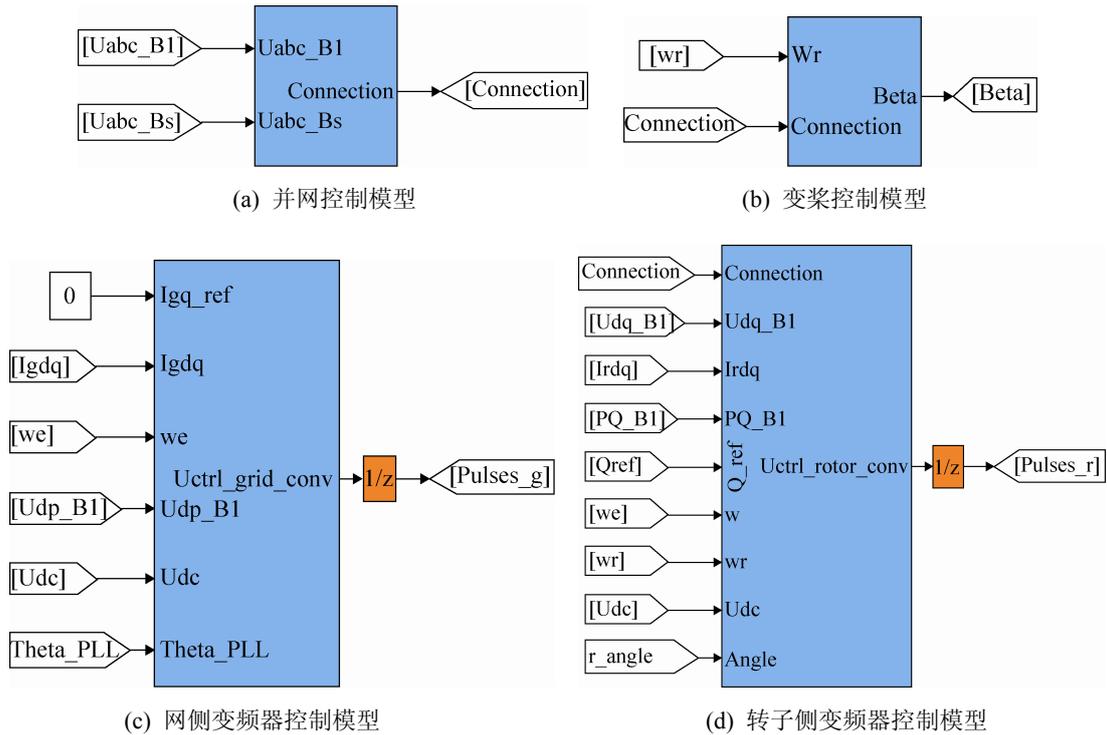


图 8 双馈风电机组的空载并网控制模型

4 仿真结果

4.1 双馈风电机组的空载并网过程仿真

利用图 7 所示模型对接入无穷大电网时的双

馈风电机组的空载并网过程进行了仿真, 通过对双工况接口电路模型、仿真模型切换机制及双馈风电机组整体模型的仿真结果进行分析, 验证了所提仿真方法的可行性, 并进一步与利用文献[13-14,16]

所提方法而建立的模型的仿真结果进行了对比。风速为 7 m/s, 仿真步长为 $5 \mu\text{s}$, 仿真时间为 5 s, 仿真结果如下。

4.1.1 双工况接口电路模型的仿真结果

双馈发电机双工况接口电路模型的仿真结果如图 9 所示。由图 9(a)可知, $t=3.2 \text{ s}$ 时, 并网信号 Connection 变为 1, 双馈风电机组由空载运行状态进入并网发电状态。由图 9(b)和(c)可知, 空载工况下, 定子侧支路的端口电流、电压分别由其空载支路决定, 其并网发电支路的电流则为 0, 处于断路状态; 并网发电工况下, 定子侧支路的端口电流、电压分别由其并网发电支路决定, 其空载支路的电流则为 0, 处于断路状态。由图 9(d)可知, 空载并网过程中, 转子侧支路的端口电流分别由空载和并网发电工况下电气部分仿真模型的转子电流输出信号决定。因此, 通过分析可知, 空载和并网发电工况下, 定子侧支路分别呈现出电压源和电流源特性, 转子侧支路则均呈现出电流源特性, 实现了预期功能, 表明本文所提双工况接口电路的仿真方法是可行的。

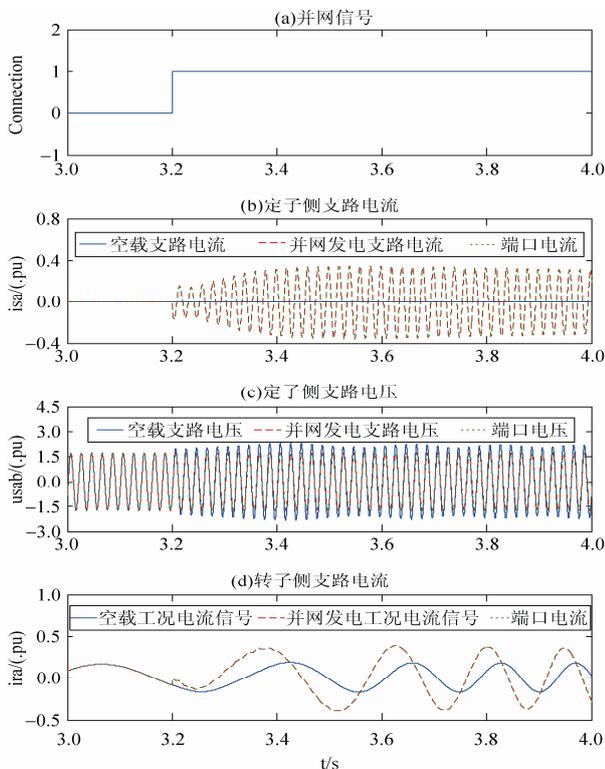


图 9 双工况接口电路模型仿真结果

4.1.2 仿真模型切换机制的仿真结果

本文对双馈发电机空载和并网发电工况下电气部分仿真模型的电流输出信号进行了对比, 以对所提仿真模型切换机制的可行性进行验证, 仿真结果如图 10 所示。

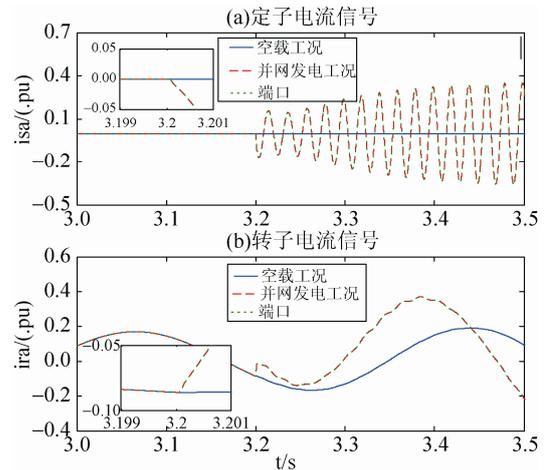


图 10 不同工况下电气部分仿真模型的输出

由图 10 可知, 双馈发电机空载运行时, 其并网发电工况下电气部分仿真模型与空载工况下电气部分仿真模型具有相同的定子、转子电流输出信号, 即两种工况下电气部分仿真模型的定、转子磁链是相同的。并且如图 10 所示, 发电机接口的定、转子侧支路的端口电流在并网瞬间均没有发生突变, 表明本文所提的仿真模型切换机制是可行的, 能够使所建模型实现对双馈发电机的定、转子电流在并网瞬间不会突变这一运行特性的仿真。

4.1.3 双馈风电机组空载并网仿真结果

为进一步对本文所提双馈风电机组空载并网仿真方法的可行性及运行效率进行验证, 在相同仿真条件下, 本文对利用文献[13-14,16]所提方法建立的双馈风电机组空载并网模型也进行了仿真。为便于仿真对比, 本文根据文献[13-14,16]所提方法通过编写 S 函数建立了双馈发电机的数字仿真模型, 并将其与图 5 所示双工况接口电路模型连接, 以替换图 7 中的双馈发电机模块, 机组其它部分的仿真模型保持不变, 仿真对比结果如图 11 所示。

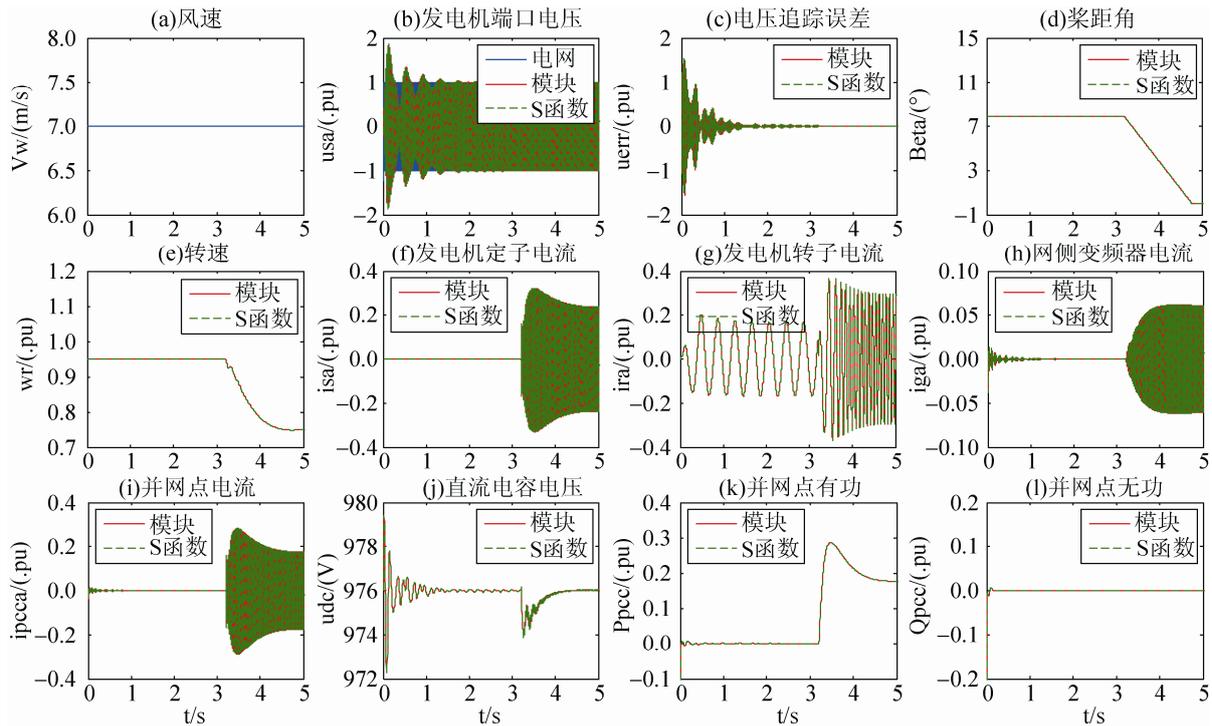


图 11 双馈风电机组空载并网的仿真结果

如图 11(a)所示, 双馈风电机组在风速为 7 m/s 时进行空载并网。并网前空载运行时: 发电机的定子电流为 0, 其电磁转矩也为 0, 机组通过调整桨距角将其转速控制在 0.95 附近, 如图 11(d)~(f)所示; 机组通过对其网侧变流器和转子侧变流器进行控制, 调整其发电机的端口电压, 并使其对并网点电压进行追踪, 如图 11(b)所示; 在对发电机端口电压进行调整的过程中, 为了给转子侧变流器提供能量支撑, 网侧变流器需从电网吸收少量有功以使直流电容的电压保持稳定, 此时网侧变流器和并网点均有少量电流通过, 如图 11(g)~(k)所示。在 $t=3.2$ s 时, 发电机的端口电压与并网点电压之间的误差较小, 能够满足并网条件, 开关 K 闭合, 机组进入并网发电状态, 如图 11(c)所示。进入并网发电状态后: 发电机的端口电压由外部电网给定, 与并网点电压完全相同, 如图 11(b)~(c)所示; 由于风速小于额定风速, 机组的桨距角逐渐减小至 0, 其转速通过调整发电机的电磁转矩进行控制, 如图 11(d)~(e)所示; 为对机组的转速进行调整, 使机组进行最大风能追踪以向电网输出特定的有功功率,

转子的励磁电流增大, 而为保证直流电容电压的稳定, 流经网侧变频器的电流也随之增大, 如图 11(f)~(k)所示。在空载并网过程中, 机组向电网输出的无功功率始终保持为 0, 如图 11(l)所示。综上所述, 上述仿真结果与双馈风电机组空载并网过程的实际运行特性是一致的, 表明利用本文所提仿真方法建立的模型能够实现对双馈风电机组空载并网过程的仿真。

如图 11 所示, 通过对比可知, 利用本文所提方法建立的模块化仿真模型与利用文献[13-14,16]所提方法建立的 S 函数仿真模型的仿真结果, 在机组转速、桨距角等机械运动特性和电压、电流、功率等电磁暂态特性上是一致的, 进一步表明了本文所提双馈发电机及双馈风电机组空载并网的仿真方法是可行的。另外, 本文利用隐式梯形法对双馈发电机的详细数学模型进行离散化, 并基于 Simulink/SimPowerSystems 专业仿真平台, 建立了双馈发电机及双馈风电机组空载并网的整体仿真模型, 使所建模型能够对双馈风电机组空载并网过程的运行特性进行准确仿真, 能够满足精度要求。

为对 2 种模型的运行效率进行对比, 本文通过设置不同的仿真时长对两种模型进行了多次运算, 其中, 仿真平台为 MatLab R2011a, 计算机的处理器为 i7-3770, 主频为 3.4 GHz。如表 1 所示, 在同样的仿真条件下, 利用本文所提方法建立的模块化仿真模型的实际运行时间较短, 模型具有更高的运行效率。

表 1 实际运行时间对比

模型类型	5 s	10 s	15 s
模块	16.678 9 s	32.659 8 s	47.592 7 s
S 函数	170.649 9 s	340.14 s	521.3 s

4.2 风电机组并网对孤网黑启动的影响

为验证本文所建的双馈风电机组空载并网模型能够用于孤网黑启动电磁暂态的仿真分析, 本文对图 12 所示风电-储能孤网系统的黑启动过程进行了仿真。仿真中, 储能系统采用文献[20]所提下垂控制策略带重要负荷 L1 运行, 两台双馈风电机组在不同时刻并网时对孤网电磁暂态的影响如图 13 所示。

图 13(a)中各图为两台双馈风电机组在 $t=7s$ 时同时并网的仿真结果, 图 13(b)中各图则为两台双馈风电机组在 $t=4s$ 和 $t=7s$ 先后并网的仿真结果。如图 13 所示, 在风电机组并网前, 储能系统采用三环控制策略能够带负荷 L1 稳定运行。由于储能系统的调频和调压能力有限, 双馈风电机组空载并网时将其产生冲击, 使其电压和频率发生波动, 并且两台机组同时并网时对其频率、电压的影响更大。综上所述, 本文所建模型能够用于仿真双馈风电机组空载并网对孤网黑启动电磁暂态过程的影响。另外, 当孤网模型中的双馈风电机组模型分别采用模块化仿真模型和 S 函数仿真模型时, 孤网模型的实际运行时间分别为 74.538 5 s 和 716.013 5 s, 表明利用本文所提方法能够提高整个孤网模型的运行效率。

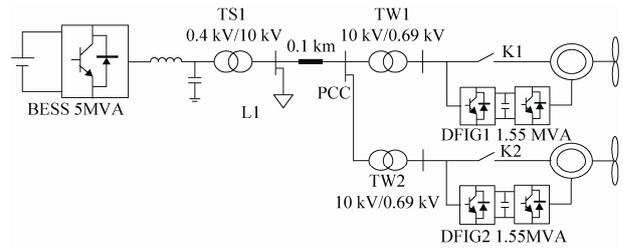


图 12 风电-储能孤立电网的结构图

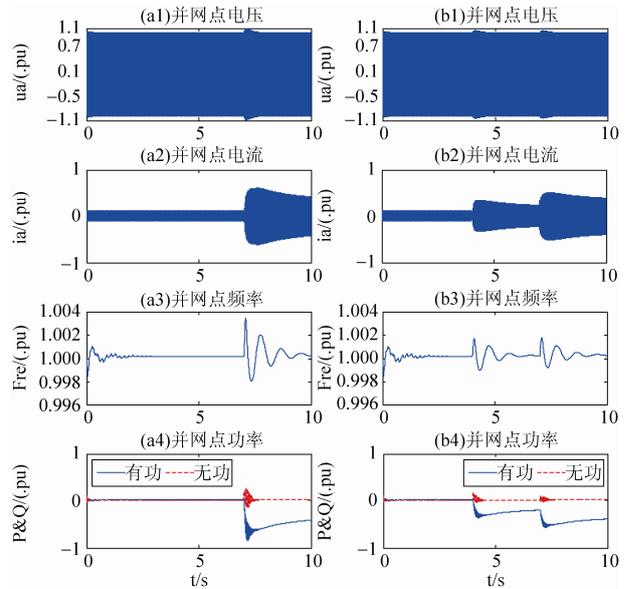


图 13 风电机组并网对孤网黑启动过程的影响

5 结论

本文提出了一种双馈风电机组空载并网的仿真方法, 并基于 Simulink 仿真平台建立了双馈风电机组的空载并网仿真模型, 仿真表明: 利用该方法所建模型能够对双馈风电机组的空载并网过程进行仿真, 并可作为双馈风电机组空载并网控制策略的研究平台; 利用该方法所建模型易于拓展, 能够将其作为基础模块接入已有仿真模型中, 实现“即插即用”; 利用该方法所建模型能够用于孤网黑启动电磁暂态过程的仿真分析, 并具有较高的运行效率。

参考文献:

- [1] 杨欢, 赵荣祥, 辛焕海, 等. 海岛电网发展现状与研究动态 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 95-105.
- [2] Vrettos E I, Papathanassiou S A. Operating Policy and Optimal Sizing of a High Penetration RES-BESS System

- for Small Isolated Grids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion (S0885-8969), 2011, 26(3): 744-756.
- [3] 孟强, 牟龙华, 许旭峰, 等. 孤立微电网的黑启动策略 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 59-64.
- [4] 黄杏, 金新民, 马琳. 微网离网黑启动优化控制方案 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 182-190.
- [5] 牟龙华, 夏明栋, 刘仲. 微电网的黑启动研究 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 59-64.
- [6] Moreira C L, Resende F O, Peas Lopes J A. Using Low Voltage Microgrids for service restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 2007, 22(1): 395-403.
- [7] Mohammad B D, Amirnaser Y. A Unified Control Strategy for Electronically Interfaced Distributed Energy Resources [J]. IEEE Transactions on Power Delivery (S0885-8977), 2012, 27(2): 803-812.
- [8] 施琳, 罗毅, 施念, 等. 高渗透率风电-储能孤立电网的控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 78-85.
- [9] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [10] The MathWorks. SimPowerSystems for Use with Simulink [EB/OL]. (2011) [2015-06]. <http://www.taodocs.com/p-4951283.html>
- [11] 米增强, 刘力卿, 余洋, 等. 限电弃风工况下双馈风电机组有功及调频控制策略 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 81-88.
- [12] 韩肖清, 史燕. 变速恒频风电机组控制及系统暂态稳定仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(10): 3056-3061. (Han Xiaoqing, Shi Yan. Simulation on Control and Transient Stability with Variable-speed Constant-frequency Wind Generation System [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21(10): 3056-3061.)
- [13] 吴国祥. 变速恒频双馈机风力发电的若干关键技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [14] 肖运启. 双馈型风力发电机励磁控制与优化运行研究 [J]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [15] Tapia G, Santamaria G, Telleria M, et al. Methodology for Smooth Connection of Doubly Fed Induction Generators to the Grid [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion (S0885-8969), 2009, 24(4): 959-971.
- [16] 孙俊忠, 姜海龙. 3/12 相交直流发电机的电路模型 [J]. 电机与控制应用, 2006 (2): 12-16.
- [17] 纪锋, 付立军, 王公宝, 等. 基于隐式梯形-时步保持法的 3/12 相电机建模 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 159-165.
- [18] 沈艳霞, 纪志成. 基于 C MEX S-函数永磁同步电机控制系统仿真建模研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(8): 1820-1825. (Shen Yanxia, Ji Zhicheng. Study on Modeling and Simulation of Permanent-magnet Synchronous-motor Control System Based on C Mex S-function [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2005, 17(8): 1820-1825.)
- [19] 商莹. 电磁暂态算法比较及非线性模型研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [20] Pogaku N, Prodanovic M, Green T C. Modelling Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter Based Microgrid [J]. IEEE Transactions on power electronics (S0885-8993), 2007, 22(2): 613-625.