

6-14-2018

Modeling and Simulation of Islanded System with Wind and Storage Power

Ye Peng

1. Institute of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China;;

Yaoning Hu

1. Institute of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China;;

Minghui Sun

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;;

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 Original Article 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.

Modeling and Simulation of Islanded System with Wind and Storage Power

Abstract

Abstract: With the consumption of primary energy and the severe environmental issues, the new energy power generation has been attracted much attention by scholars at home and abroad. As an important application form of new energy power generation, the operation of the islanded system with wind and storage power has a huge potential for future development. *For the islanded system with wind and storage power, each mathematical model and the mathematical model of control system were established. In the electromagnetic transient simulation platform PSCAD, the corresponding electromagnetic transient simulation model was built based on the established mathematical model.* The dynamic characteristics of the islanded system with wind and storage power were studied by simulation. The results indicate that, under the condition of reasonable distribution of wind and energy storage capacity, the islanded system with wind and storage power can realize the self starting and stable operation, and has the ability to resist external interference, which provides a theoretical guide for the further practical application.

Keywords

islanded system with wind and storage power, simulation model, electromagnetic transient simulation, stability

Recommended Citation

Ye Peng, Hu Yaoning, Sun Minghui. Modeling and Simulation of Islanded System with Wind and Storage Power[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2236-2244.

风储孤网系统的建模与仿真研究

叶鹏¹, 胡耀宁¹, 孙铭徽²

(1. 沈阳工程学院电力学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着一次能源消耗与环境问题的突出, 新能源发电备受国内外学者的关注与重视, 风储孤网运行作为新能源发电的一种重要应用形式, 具有十分广阔的发展前景。针对风储孤网系统, 建立了各个模块的数学模型和控制系统数学模型, 在电磁暂态仿真平台 PSCAD 环境中, 基于所建立的数学模型搭建了相应的电磁暂态仿真模型。通过仿真研究了风储孤网系统的动态特性, 在风储容量配置合理的条件下, 能够实现风储孤网系统自启动和稳定运行, 并且具有抵御外部干扰的能力, 为风储孤网系统的推广应用提供了理论指导。

关键词: 风储孤网系统; 仿真模型; 电磁暂态仿真; 稳定性

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2236-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806029

Modeling and Simulation of Islanded System with Wind and Storage Power

Ye Peng¹, Hu Yaoning¹, Sun Minghui²

(1. Institute of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the consumption of primary energy and the severe environmental issues, the new energy power generation has been attracted much attention by scholars at home and abroad. As an important application form of new energy power generation, the operation of the islanded system with wind and storage power has a huge potential for future development. For the islanded system with wind and storage power, each mathematical model and the mathematical model of control system were established. In the electromagnetic transient simulation platform PSCAD, the corresponding electromagnetic transient simulation model was built based on the established mathematical model. The dynamic characteristics of the islanded system with wind and storage power were studied by simulation. The results indicate that, under the condition of reasonable distribution of wind and energy storage capacity, the islanded system with wind and storage power can realize the self starting and stable operation, and has the ability to resist external interference, which provides a theoretical guide for the further practical application.

Keywords: islanded system with wind and storage power; simulation model; electromagnetic transient simulation; stability

引言

在新能源发电中, 风力发电是技术最成熟、最具备开发条件、发展前景良好的项目, 自 20 世纪

90 年代以来, 风电的年增长率一直保持两位数的百分比水平^[1]。但风力发电具有空间分散性、随机波动性、可调度性低等弊端^[2], 而采用储能设备可平抑风速变化引起的风机出力扰动, 削弱风电的间歇性、随机波动性、不可准确预测性等缺陷^[3]。风储孤网运行是新能源应用的一种形式, 在改善风电场输出功率的可控性、提升系统稳定性等方面具有突出优势, 并且能够实现风能最大效率的利用。同



收稿日期: 2016-07-18 修回日期: 2016-10-06;
基金项目: 辽宁省自然科学基金(201602534); 辽宁省教育厅科技项目(L2015376); 沈阳市科技项目(F16-205-1-08);
作者简介: 叶鹏(1974-), 男, 吉林, 博士, 教授, 研究方向为新能源发电与并网。

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

• 2236 •

时,风储孤网系统在运行中具有较大的技术互补优势,通过配置一定的储能容量和二者间功率的协调控制,可以实现对负荷的连续、平稳供电。

近年来,随着新能源在电网的比重越来越大。对新能源的研究,特别是新能源的建模仿真研究引起了国内外学者广泛关注。文献[4]在 MATLAB 仿真平台上,开发了变速恒频风力发电系统并网运行动态仿真程序,并且以电流源代替网侧变流器注入电流,运用程序仿真了系统在电压降低和三相短路情况下双馈感应发电机的运行特性以及风电对系统的影响;文献[5]建立了风机的数学模型以及仿真模型,验证了风机孤岛系统的稳定运行以及并网切换时相角的快速同步;文献[6]建立了蓄电池系统主要元件的数学模型,提出一种基于电流调节的控制策略,仿真表明该策略可使蓄电池避免长期处于欠充状态;文献[7]用 MATLAB 搭建了风储联合并网的仿真模型,详细的研究分析了储能逆变器以及风力发电系统的运行控制策略,并通过仿真实验验证了该控制策略的可行性和有效性;文献[8]在 MATLAB 仿真平台中建立了闭环光储系统中各个模块的数学模型,分析了其能量控制策略,并建立不同策略下的能量模型,为系统优化设计提供了平台。上述仿真平台对新能源及其运行控制进行了建模与仿真研究,但对于风储孤网系统建模仿真还未见相关研究。

本文针对风储孤网系统,建立了各个模块的数学模型和控制系统数学模型。在电磁暂态仿真平台 PSCAD 环境中,基于所建立的数学模型搭建了相应的电磁暂态仿真模型。通过仿真研究了风储孤网系统的自启动特性和系统稳定性,为风储孤网系统的推广应用提供了理论指导。

1 风储孤网系统模型

1.1 风力发电系统数学模型

双馈发电机在风电领域得到了广泛应用^[9-11],定子直接连接在交流母线上,转子绕组通过集电环经变流器与交流母线相连,通过控制转子电流的频

率、幅值、相位和相序实现变速恒频控制。

在本文中,转子绕组依据电动机惯例,定子绕组依据发电机惯例,在同步旋转坐标系下,双馈电机模型的数学模型如下:

转子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{dr} = r_r \cdot i_{dr} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} \\ u_{qr} = r_r \cdot i_{qr} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} \end{cases} \quad (1)$$

定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{ds} = -r_s \cdot i_{ds} - \omega_1 \cdot \psi_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ u_{qs} = -r_s \cdot i_{qs} - \omega_1 \cdot \psi_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

转子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = -L_m \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \\ \psi_{qr} = -L_m \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (4)$$

式中: u 、 i 、 r 分别为风机的电压、电流以及内阻; ψ 、 L 分别为磁链与电感; ω_1 、 ω_r 、 ω_s 为同步角速度、转子角速度以及转差角速度,且满足 $\omega_1 = \omega_r + \omega_s$; 下标为 d 与 q 的变量表示 dq 坐标系下的 d 轴分量与 q 轴分量; 下标为 s 与 r 的变量表示定子侧变量与转子侧变量。

1.2 储能系统模型

全钒液流储能电池是储能系统的重要组成部分,其模型较为完善。它的等效电路模型见图 1。

图中: R_{rea} 为反应动力学引起的等效内阻; R_{res} 为由溶液、电极等引起的等效内阻; R_f 为固定内阻; V_s 为等效的堆栈电压; I_p 为等效的受控电流源。

堆栈电压 V_s 与荷电状态 SOC 的关系如式(5)。

$$V_s = n \left[V_{eq} + 2 \frac{R \cdot T}{F} \ln \left(\frac{SOC}{1 - SOC} \right) \right] \quad (5)$$

式中: V_{eq} 为单体钒液流电池正负极的电势差,绝对温度 $T=298$, 法拉第常数 $F=96\ 500$ c/mol, 摩尔气体常数 $R=8.314$ J/K·mol, 堆栈数量 $n=390$ 。

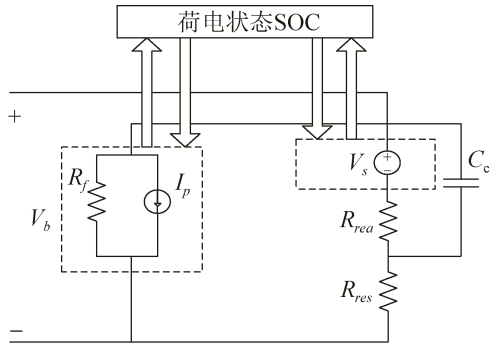


图1 全钒液流电池等效电路模型
Fig. 1 Equivalent circuit model of vanadium redox flow battery

由泵损引起的损耗(可变损耗), 通过采用一个受控电流源 I_p 来等效, 则泵损电流 I_p 、堆栈电流 I_s 和荷电状态 SOC 关系如式(6)。

$$I_p = \frac{K \cdot I_s}{V_b \cdot SOC} I_p \quad (6)$$

式中: 常数 $K=1$; V_b 为电池工作时的端电压。

储能变流器采用三相电压源型变流器, 由两电平 IGBT 换流桥, 直流电容和 LCL 滤波器组成。假设 u_a, u_b, u_c 以及 i_a, i_b, i_c 分别为电网的三相电压、三相电流, u_d, u_q 以及 i_d, i_q 为三相静止坐标系下的 u_a, u_b, u_c 以及 i_a, i_b, i_c 经过 Park 变换得到的两相同步旋转坐标系下 d 轴与 q 轴的电压电流。依据电网电压定则, $u_d=U, u_q=0$ 。其中, U 为电网相电压的峰值, 则储能变流器输出的有功功率、无功功率为:

$$\begin{cases} P_b = \frac{3}{2}(u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) = \frac{3}{2}U \cdot i_d \\ Q_b = \frac{3}{2}(u_q \cdot i_d - u_d \cdot i_q) = -\frac{3}{2}U \cdot i_q \end{cases} \quad (7)$$

储能变流器数学模型可写为:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{u_{rd}}{L} \\ -\frac{u_{rq}}{L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L} \\ \frac{u_q}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: u_{rd}, u_{rq} 为储能变流器的电压在 dq 坐标系下的 d 轴分量与 q 轴分量。在公式(8)中, d 轴变量与 q 轴变量相互耦合, 故而引入前馈解耦控制, 其电流用 PI 调节器调节, 则电压给定量为:

$$\begin{cases} u_{rd}^* = \left(-K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega Li_q + U \\ u_{rq}^* = \left(-K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_q^* - i_q) - \omega Li_d \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: ω 为电网角频率; i_d^*, i_q^* 分别为 d 轴与 q 轴的参考电流; K_p, K_i 分别为电流环的比例以及积分系数; L 为每一相的进线电感。由公式(7)可知, 电流的给定值可以通过有功与无功功率的指令得到, 再得到控制储能系统的变流器开关信号, 从而可以依据给定的信号来实现能量流动控制。

1.3 风储孤网系统控制模型

风储孤网系统主要由风力发电系统与储能系统构成。储能系统采用主从控制, 为风储孤网系统提供所需的电压与频率, 而风力发电系统采用 PQ 控制。风储孤网系统的控制框图如图 2 所示。

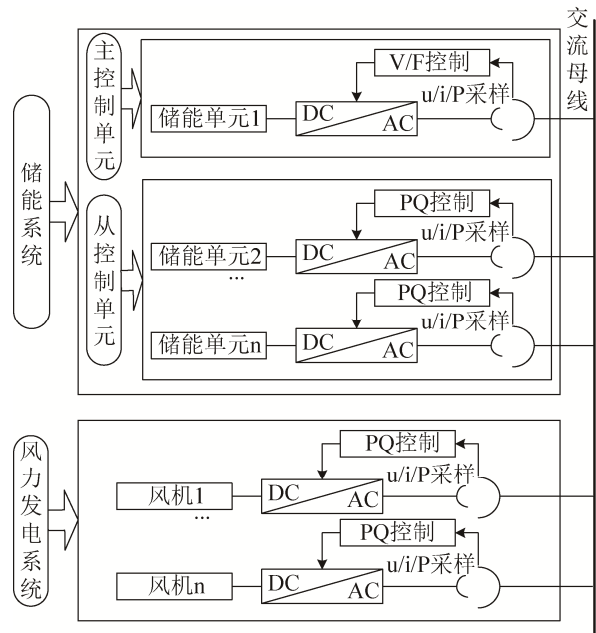


图2 风储孤网系统控制框图
Fig. 2 Control block diagram of wind storage islanded network system

对储能系统而言, 在众多储能单元中选取一个容量较大的储能逆变单元作为主控电源, 该储能逆变器采用 V/f 控制策略, 以保证系统电压和频率的稳定; 其他储能单元作为从控制单元, 逆变器采用 PQ 控制策略, 以此保证风储孤网系统的功率需求,

并能够自适应的进行充放电平衡循环。

在风力发电系统中,每个风机逆变器单元采用 PQ 控制策略。风储孤网系统中储能系统与风力发电系统协调控制,能够为风储孤网系统提供可靠的电压和频率,满足功率动态平衡。

1.3.1 逆变器 V/f 模型

V/f 控制是指恒压频比控制模式,控制变流器按照电压幅值及频率的指令输出对应的电压信号,输出功率由负荷决定。其控制模型如图 3 所示。

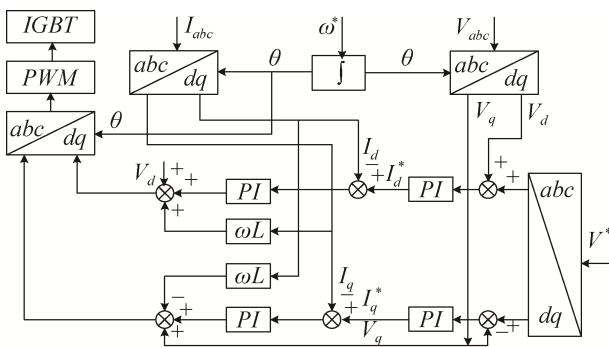


图 3 V/f 控制模型

Fig. 3 V/f control model

逆变器依据频率指令 ω^* 产生角度信号,依据电压幅值指令 V^* 计算 dq 坐标系下电压给定值 V_d^* 、 V_q^* ,采用电压闭环调节产生有功电流 I_d^* 和无功电流 I_q^* ,再采用电流闭环控制,增加前馈项 V_d 、 V_q 和解耦项 $\omega L I_d$ 、 $\omega L I_q$ 之后,用 PWM 控制方式驱动逆变器工作,进而实现电流控制与电压跟踪。

1.3.2 逆变器 PQ 模型

PQ 控制是恒定的有功功率、无功功率的控制,逆变器按照功率指令输出相应的有功功率、无功功率,其控制模型如图 4 所示。

逆变器依据有功功率指令 P^* 、无功功率指令 Q^* 以及系统电压 V_{abc} 计算有功电流 I_d^* 以及无功电流 I_q^* ,之后采用电流闭环控制模式,增加前馈项 V_d 、 V_q 和解耦项 $\omega L I_d$ 、 $\omega L I_q$ 之后,用 PWM 控制方式驱动逆变器工作,进而实现对电流的控制与功率跟踪。

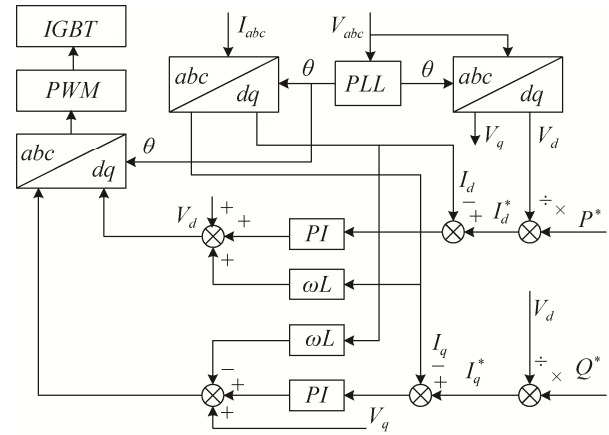


图 4 PQ 控制模型

Fig. 4 PQ control model

2 仿真模型的建立

2.1 风力发电系统

通过在 PSCAD 中搭建整流桥和 dq 变换等模块来完成双馈风机工作要求,双 PWM 变流器的模型如图 5 所示。图中:功率管为全控型器件 IGBT,功率变流器由 2 个反向连接的电压型 PWM 变流器组成,交流母线侧通过变压器、进线电感与变流器相连,转子侧双馈发电机与变流器直接相连;三相桥式变换器通过全控型器件 IGBT 与二极管反并联构成,控制模块为 IGBT 提供触发信号;为达到设置直流电容初始值的目的,引入一个已知的受控电压源, PWM 变流器启动一段时间后利用分合闸信号可切除充电电路。

风力发电系统由风机与双馈电机构成,风机将风能转化为机械能,而双馈电机将机械能转化为电能。风力发电系统及其控制模型如图 6 所示。图中,风力发电系统控制策略的实现要依靠电力变流器来实现。母线侧的电力变流器用于控制交流侧的功率以及稳定母线电压;而转子侧电力变流器通过控制转子电流来实现有功功率、无功功率的解耦,维持输出电压以及频率的稳定。

2.2 储能系统

在电磁暂态仿真平台 PSCAD 中,由图 1 全钒液流电池等效电路模型以及公式(5)、公式(6),搭建全钒液流电池的仿真模型,如图 7 所示。

由图 7 知：该仿真模型包含堆栈电压模块、堆栈电压公式常数项模块、荷电状态 SOC 计算模块和泵损模块，均为计算模块。

储能系统主功率模型如图 8 所示。

由图 8 知：该模型包括由 6 个 IGBT 组成的三相可控桥式电路、隔离变压器、LC 滤波器和线路。直流侧电压经三相可控桥变换后，通过隔离

变压器进行电压变换及隔离，再经过电感电容 LC 滤波器去除谐波分量，最后经过线路连接至交流母线侧。

2.3 风储孤网系统仿真模型

据前述章节所建立各个模块的仿真模型，搭建风储孤网系统仿真模型，如图 9 所示。

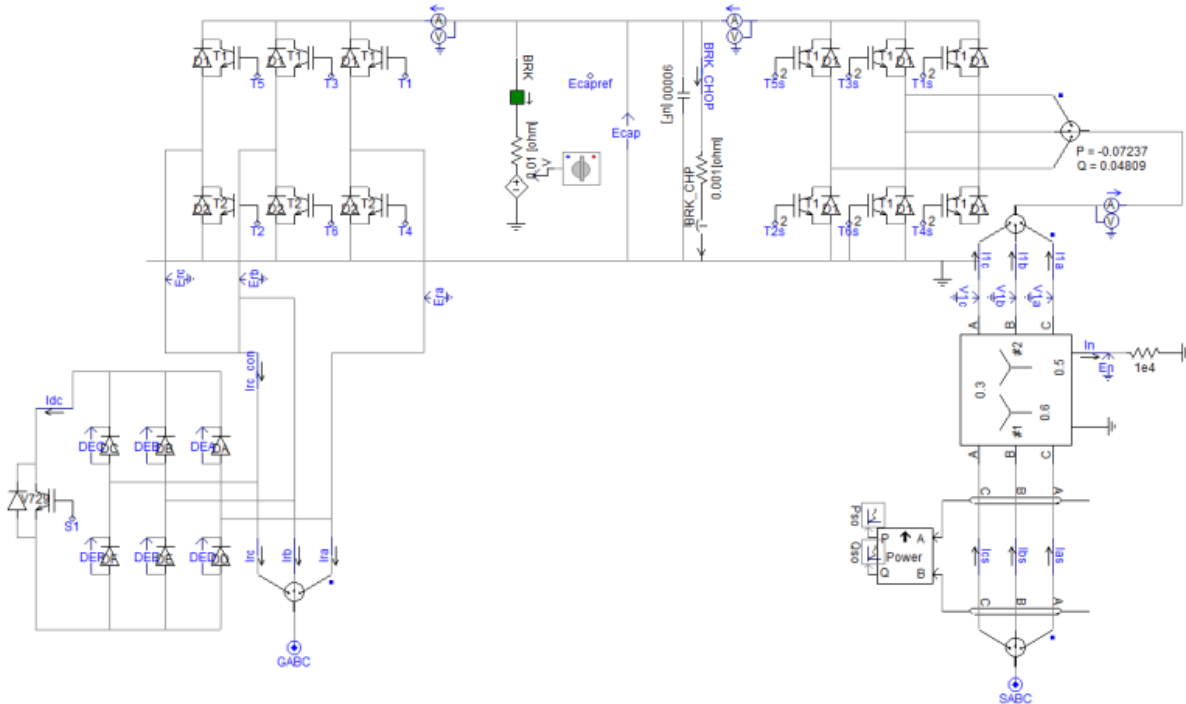


图 5 变流器仿真模型
Fig. 5 Converter Simulation Model

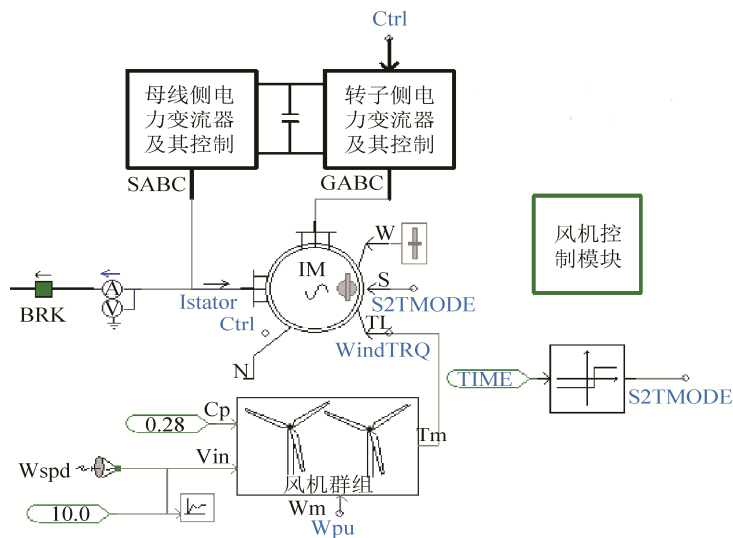


图 6 风力发电系统及其控制策略模型
Fig. 6 Wind power system and its control strategy model

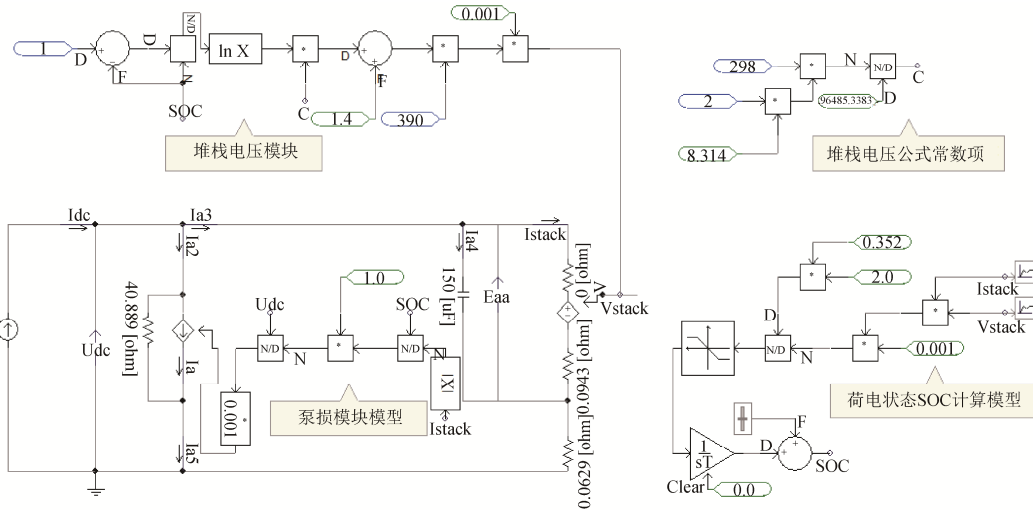


图 7 全钒液流电池的仿真模型

Fig. 7 Simulation model of vanadium redox flow battery

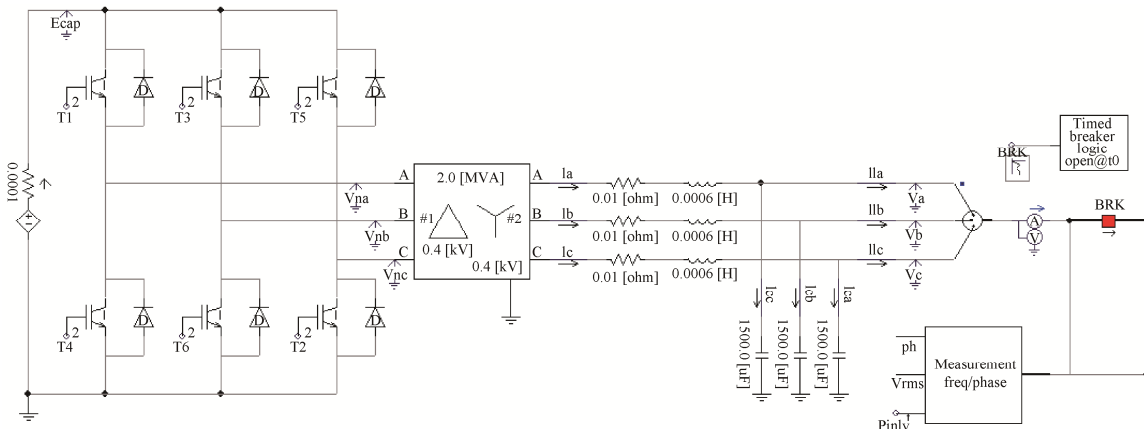


图 8 储能系统主功率模型

Fig. 8 Main power model of energy storage system

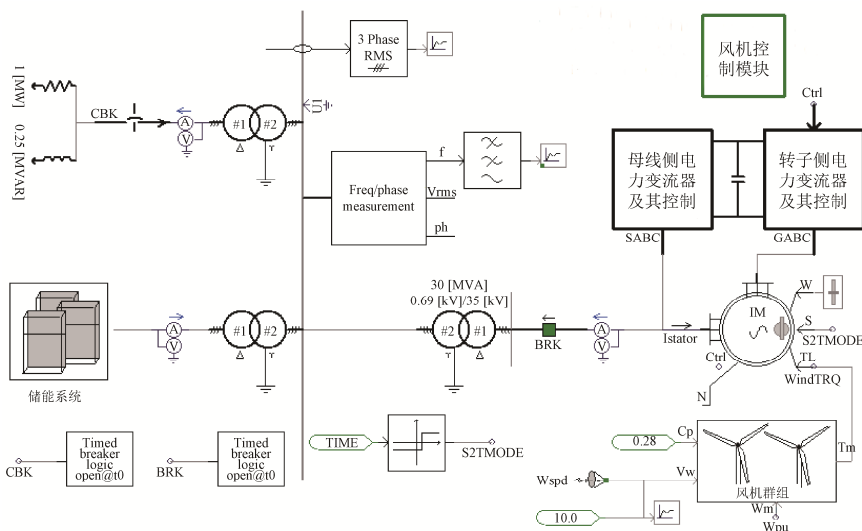


图 9 风储孤网系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of wind storage isolated network system

在仿真系统中，假定起始风速为 8 m/s，在仿真运行到 1.0 s 时，风速变为 10 m/s，风机额定容量为 1.5 MW，风机输出功率 $P_G=1$ MW；假设储能系统额定容量为 3 MW，负载有功为 1 MW、无功为 0.25 Mvar。在仿真运行到 0.5 s 时，风力发电系统投入系统，开始启动；在仿真运行到 2 s 时，负载从风储孤网系统中切除。

3 仿真结果分析

在电磁暂态仿真平台 PSCAD 中，模拟风储孤网系统的自启动过程，所得仿真图形见图 10~14。

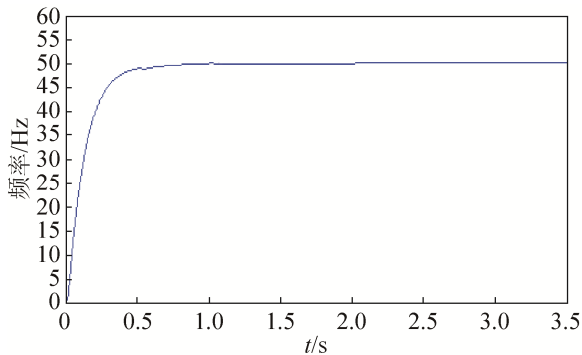


图 10 频率波形图

Fig. 10 Frequency waveform diagram

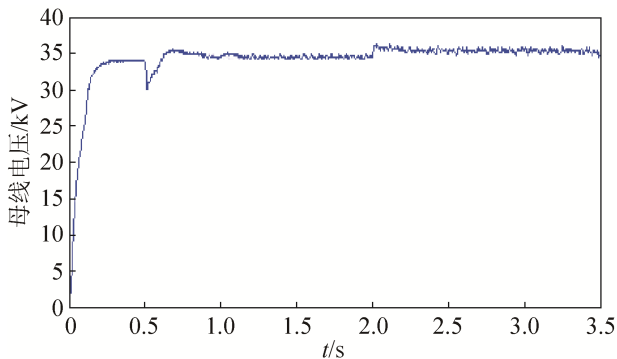


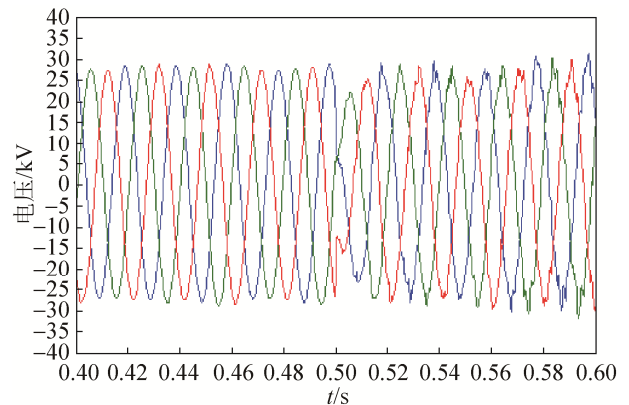
图 11 母线电压波形图

Fig. 11 Bus voltage waveform diagram

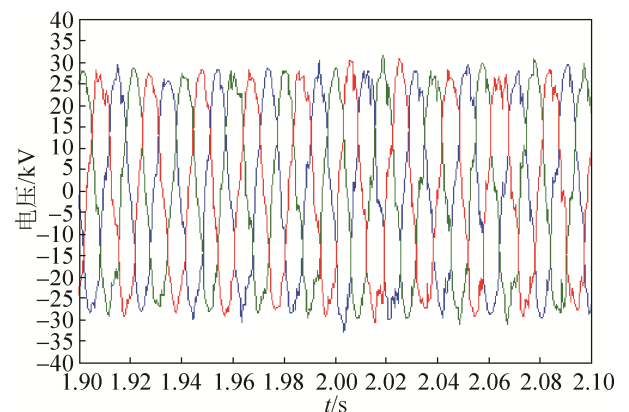
图 12(a)为风机启动前后的三相电压波形图；图 12(b)为负载切除前后的三相电压波形图。

当仿真程序运行到 0.5 s 时，风机启动。由仿真图形可知，风机的启动对系统的频率、电压以及功率都有一定的冲击。但在风机启动成功后，系统频率保持在 50 Hz，母线电压稳定在 35 kV 左右，三

相电压的幅值稳定在 30 kV 左右，电压波动在允许范围内，符合电网运行要求。因系统存在有功、无功功率的消耗，对有功而言，在风机出力 1 MW、负载为 1 MW 时，储能系统还需出力 0.5 MW 用于系统有功功率的消耗；而储能系统提供的无功功率约为 0.5 Mvar，一部分被负载所消耗，另一部分被系统所消耗。



(a) 0.4~0.6s 时的三相电压波形图



(b) 1.9~2.1s 时的三相电压波形图

图 12 三相电压波形图

Fig. 12 Three-phase voltage waveform diagram

在仿真程序运行到 1.0 s 时，风速由 8 m/s 变为 10 m/s，风储孤网系统的频率、电压有一定的波动，但很快会平稳下来。验证了风速在波动情况下，风储孤网系统能够安全、稳定的运行。

综上所述：风储孤网系统能够实现自启动，并且能够安全稳定的运行。能够维持频率、电压的稳定，以及有功、无功功率的平衡。

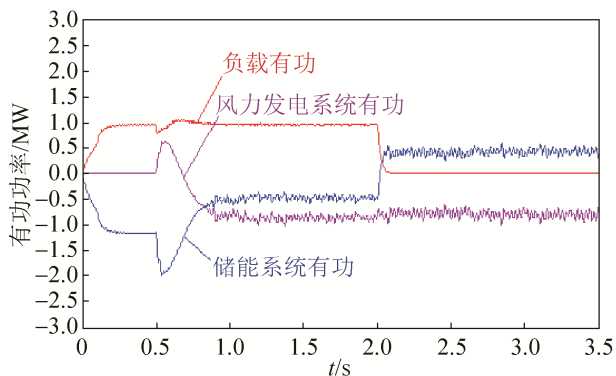


图 13 有功功率波形

Fig. 13 Active power waveform

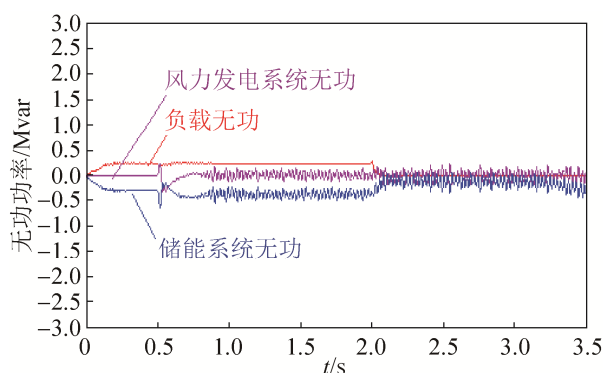


图 14 无功功率波形

Fig. 14 Reactive power waveform

当仿真程序运行到 2.0 s 时, 负荷切除。由仿真图形可知, 负荷的切除对频率几乎没有影响, 保持在 50 Hz, 母线电压出现瞬时上升、瞬时下降的现象, 最终稳定运行在 35 kV 左右, 符合电网运行要求。因系统存在有功、无功功率的消耗, 对有功而言, 风机出力 1 MW, 在满足系统消耗的前提下, 将多余的有功功率(约为 0.5 MW)以电能的形式存储到储能系统中; 对无功而言, 储能系统只需提供系统损耗所需的无功功率即可。

综上所述: 风储孤网系统在完成自启动后, 遇到外界干扰时, 能够迅速的维持系统频率、电压的稳定以及功率的平衡。验证了风储孤网系统能够安全稳定的运行。

4 结论

本文针对风储孤网系统, 建立了各个模块的数学模型和控制系统数学模型。在电磁暂态仿真平台

PSCAD 环境中, 基于所建立的数学模型搭建了相应的电磁暂态仿真模型。通过仿真研究了风储孤网系统的自启动特性和系统稳定性, 具体结论如下:

- (1) 采用数学建模与电磁暂态仿真, 可以有效进行风储孤网系统的仿真研究, 得出其动态特性;
- (2) 通过仿真研究得出, 在风储容量配置合理的条件下, 能够实现风储孤网系统自启动和稳定运行, 并且具有抵御外部干扰的能力。

参考文献:

- [1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-8.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and Measures of Power Grid Accommodating Large Scale Wind Power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-8.
- [2] Souza Ribeiro L A, Saavedra O R, Lima S L, et al. Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: The case of Lencois island[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 1-11.
- [3] Goya T, Omine E, Kinjo Y, et al. Frequency control in isolated island by using parallel operated battery systems applying H control theory based on droop characteristics[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(2): 160-166.
- [4] 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 Xiao-qing, SHI Yan. Simulation on Control and Transient Stability with Variable-speed Constant-frequency Wind Generation System[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(10): 3056-3061.
- [5] 余永元, 郝正航, 龙航, 等. 双馈风机联合储能系统的孤岛供电控制策略[J]. 电测与仪表, 2015, 52(16): 78-83.
Yu Yongyuan, Hao Zhenghang, Long Hang, et al. Control strategy for power supply of DFIG & ESS in isolated system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(16): 78-83.
- [6] 李春华, 朱新坚, 吉小鹏, 等. 光伏系统中蓄电池管理策略研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(11): 2378-2382.
LI Chun-hua, ZHU Xin-jian, JI Xiao-peng, et al. Study on Battery Management Strategy in Photovoltaic System[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(11): 2378-2382.
- [7] 梁洲, 陈意军. 风储联合并网发电系统的控制策略研

- 究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 1-5.
- Liang Zhou, Chen Yijun. Study on control strategy of Wind-ES grid-connected system[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(11): 1-5.
- [8] 赵志刚, 张纯杰, 石广田, 等. 光-储联合供电系统行为特性分析与仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(11): 2779-2783.
- Zhao Zhigang, Zhang Chunjie, Shi Guangtian, et al. Analysis and Simulation on Energy Matching of Closed-loop Photovoltaic-storage System[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(11): 2779-2783.
- [9] 姚兴佳, 谢赐戮, 刘颖明, 等. 大型风力发电机组控制器优化设计[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 145-147.
- Yao Xing-jia, XIE Ci-jian, Liu Ying-ming et al. Optimization design of controller for large-scale wind turbines[J]. Control Theory&Application, 2008, 25(1): 145-147.
- [10] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
- Xue Yusheng, Lei xing, Xue Feng, et al. A Review on Impacts of Wind Power Uncertainties on Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [11] 牛玉广, 李晓明, 王世林, 等. 分散协调控制在风火混合电力系统中仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(3): 609-619.
- Niu Yuguang, Li Xiaoming, Wang Shilin, et al. Simulation Study of Multiple Model Decentralized-coordinated Predictive Control for Hybrid Wind-thermal Power System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 609-619.
-
- (上接第 2235 页)
- [13] 李泽明, 周建洪. 永磁同步电机三环交流伺服系统的仿真研究[J]. 科技创新与应用, 2015, 32(5): 5-7.
- Li Zeming, Zhou Jianhong. Simulation study of three-ring ac servo system of PMSM[J]. Technological innovation and application, 2015, 32(5): 5-7.
- [14] 刘丽伟, 张小杰, 丁圆圆, 等. 永磁同步电机的交流伺服控制系统仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 261-301.
- Liu Liwei, Zhang Xiaojie, Ding Yuanyuan, et al. Simulation of ac servo control system for PMSM[J]. Computer Simulation, 2015, 32(2): 261-301.
- [15] 张莹, 黄科元, 黄守道, 等. 基于瞬时无功功率的感应电机矢量控制仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10): 2141-2145.
- Zhang Ying, Huang Keyuan, Huang Shoudao, et al. MRAS Method for Sensorless Vector Control of Induction Motor Based on Instantaneous Reactive Power[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(10): 2141-2145.
- [16] Chiu-Keng Lai, Chia-Che Tsai. The Modeling And Simulation For Current Regulation Of PMSM Drive System Using Verilog HDL and Variable Structure Control[C]// Automatic Control Conference (CACS), 2016: 218-219.
- [17] Ying-Shieh Kung, Ming-Hung Tsai. FPGA-Based Speed Control IC for PMSM Drive With Adaptive Fuzzy Control[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS (S0885-8993), 2007, 6(22): 2477-2478.
- [18] Bogdan Alecsa, Marcian N Cirstea, Alexandru Onea. Simulink Modeling and Design of an Efficient Hardware-Constrained FPGA-Based PMSM Speed Controller[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS (S1551-3203), 2012, 8(3): 555-557.