

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.01.004

风力发电蓄电池储能系统的建模与仿真

孙晓¹, 梁维², 曾浩宇², 杨丹青²

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了风电运行人员能更好地掌握蓄电池储能系统的理论知识, 模拟分析其运行情况, 分析了蓄电池储能系统的工作原理及其数学模型, 利用 Matlab/Simulink 软件搭建了蓄电池储能系统的仿真模型, 并在阵风、渐进风和随机风3种风模型下, 对其进行仿真分析。仿真结果表明: 该仿真模型是正确、有效的。

关键词: 风力发电; 蓄电池储能系统; 仿真建模

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)01-0017-06

Modeling and Simulation of Battery Power Storage System of Wind Power Generation

SUN Xiao¹, LIANG Wei², ZENG Haoyu², YANG Danqing²

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract : For wind power operation personnel better grasping the theoretical theory of battery energy storage system, simulates and analyzes the system operating conditions, analyzes the working principles and mathematical model, and applies Matlab/Simulink software to build simulation model of battery energy storage system. Under the three wind models of gust, gradual wind and random wind, makes simulation analysis. The result show that the simulation model is correct and effective.

Keywords : wind power generation; battery energy storage system; simulation and modeling

0 引言

能源紧缺是人类社会面临的重大问题。因此, 开发可再生能源以发展低碳经济成为世界各国解决能源不足的重要途径之一。风力发电作为目前较成熟、可大规模开发的可再生能源发电技术之一, 近年来得到迅速发展^[1]。风力发电主要有不消耗资源、不污染环境、造价低、占地面积小等优点。其利用风力带动风车叶片旋转, 再通过增速机将旋转的速度提升, 促使发电机发电。由于风力发电具有很强的波动性, 为了保持风力发电系统的稳定, 引入储能系统^[2]

(energy storage system, ESS)。储能系统主要是将电能转化为化学能、势能、电磁能等形态存储起来, 并在需要时可转化为电能的技术。常用的储能技术有物理储能、电磁储能、电化学储能和相变储能4类。目前, 蓄电池储能系统在风力发电中的应用最为广泛。

蓄电池储能系统是风力发电的重要组成部分。对于风电运行人员而言, 在平常的岗位培训中, 只能学习到蓄电池储能系统的理论知识, 而不能对其实际运行情况进行模拟。因此, 本文基于蓄电池储

收稿日期: 2015-11-08

作者简介: 孙晓(1972-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事机电控制方面的教学与研究,

E-mail: sxbug@163.com

能系统的动态数学模型,建立了风电发电蓄电池储能系统的仿真模型。该模型能让风电运行人员更好地了解蓄电池储能系统的运行机构和原理,从而提高风电运行维护的安全性^[3-4]。

1 蓄电池储能系统的数学模型

常见的储能系统结构可归纳为3部分:储能元件、变流器(DC/DC, DC/AC)及控制系统。蓄电池储能系统主要由蓄电池元件、逆变器、控制电路和变压器组成,如图1所示^[5]。

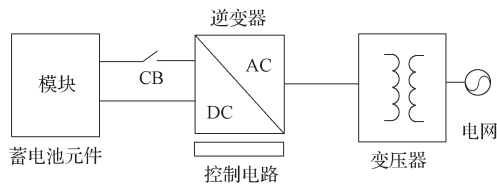


图1 蓄电池储能结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of battery energy storage structure

1) 蓄电池元件模型

通常用由谢菲尔提出的 Shepherd 模型来描述风力发电系统中的蓄电池元件模型。该模型能合理地反映蓄电池储能系统的电流和电压变化。图2为蓄电池元件的 Shepherd 模型^[6]。

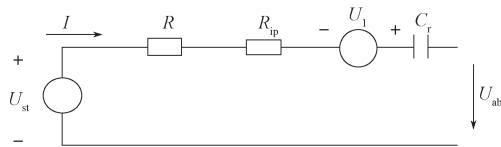


图2 Shepherd 模型

Fig. 2 Shepherd model of battery components

蓄电池端电压估算方程为

$$U_{ab} = U_{st} + Ae^{-B(1-soc)} - C(1-soc) - K_{ip}I \times soc - R_{ip}I \quad (1)$$

式中: U_{st} 为蓄电池开始放电时的电压;

A, B, C, K_{ip}, R_{ip} 为待定参数,可以根据试验数据得到;

soc 为荷电状态;

$U_1 = Ae^{-B(1-soc)}$ 为对开始放电时电压的快速变化的校正;

$C_f = C(1-soc)$ 为考虑空载电压随放电程度变化所引进的修正项;

$K_{ip}I \times soc$ 为由于电极板通道引起的压降;

$R_{ip}I$ 为欧姆电压损失。

由式(1)可知,当已知荷电状态 soc 与电流 I , 即可得到蓄电池电压 U_{ab} 值。

①确定电流 I 的数值

根据 Peukert 经验公式(即蓄电池容量衰减方

程),可求出电流 I , 即

$$K = tI^n, \quad (2)$$

式中: t 为相应的放电时间;

K 为蓄电池中与活性物质的量有关的常数;

n 为 Peukert 常数;

n 和 K 可以根据试验数据获得。

当 n 和 K 已知时,取2个时间 t_1 和 t_2 ($t_2 > t_1$)。式(2)可转化为

$$\begin{cases} \Delta t = t_2 - t_1, \\ I = \left(\frac{K}{\Delta t} \right)^{\frac{1}{n}}. \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3),可求出 I 。

②确定荷电状态 soc 的数值

根据安培小时法,求出荷电状态 soc 。安培小时法的基本思想是,将不同电流下的放电电量等效成特定(标准)电流下的放电电量。通过一个容量修正系数得到修正后的等效放电电量公式为:

$$\begin{cases} C_1(t) = \int_0^t w_1 I d\tau = \int_0^t I_B d\tau, \\ w_1 = \frac{C_1}{C_{II}} = \left(\frac{I_1}{I} \right)^{n-1}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: w_1 为考虑温度对蓄电池容量的影响,而引入的修正系数, $w_1 = 1 + 0.008(T - 25)$, 其中 T 为蓄电池元件放置地的温度;

I_B 为标准化电流;

C_1 为在相同的初始条件下,以标准放电电流 I 放出的电量;

C_{II} 为在相同的初始条件下,以不同放电电流 I_1 放出的电量。

因此蓄电池的荷电状态 soc 为

$$soc = \frac{C_B - \int_0^t I_B d\tau}{C_B} \times 100\%, \quad (5)$$

式中 C_B 为标准容量,即 25 °C 时标准放电电流下的最大放电容量。根据式(4)~(5)可求出荷电状态 soc 的数值。

求得电流 I 和荷电状态 soc 的数值后,再计算出 U_{ab} 的大小^[7]。

2) 控制电路模型

蓄电池储能系统常见的控制电路由升降压斩波电路(Buck-Boost chopper)和变流器组成,如图3所示。蓄电池放电时, V_1 保持关断, V_2 以一定的占空比保持开通,此时电路的工作原理等效于升压斩波电路(Boost chopper);同理,蓄电池充电时,相当

于 Boost 电路反向运行, 此时可以理解为降压斩波电路 (Buck chopper)^[8]。

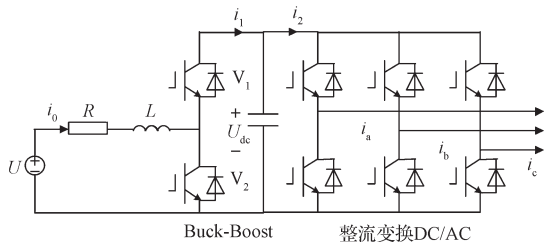


图3 主控制电路图

Fig. 3 Main control circuit

结合 Shepherd 模型, 主电路的等效电路如图 4 所示。考虑风力发电机机侧变换器是由三相不可控整流桥、滤波电容组成, 基于蓄电池储能的永磁直驱式风力发电系统的拓扑结构如图 5^[9]所示。

建立正弦波永磁同步发电机的数学模型, 需作

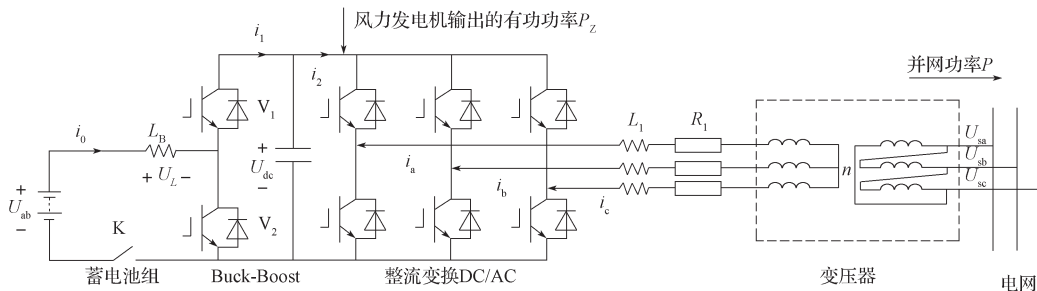


图4 主控制电路等效图

Fig. 4 The equivalent diagram of main control circuit

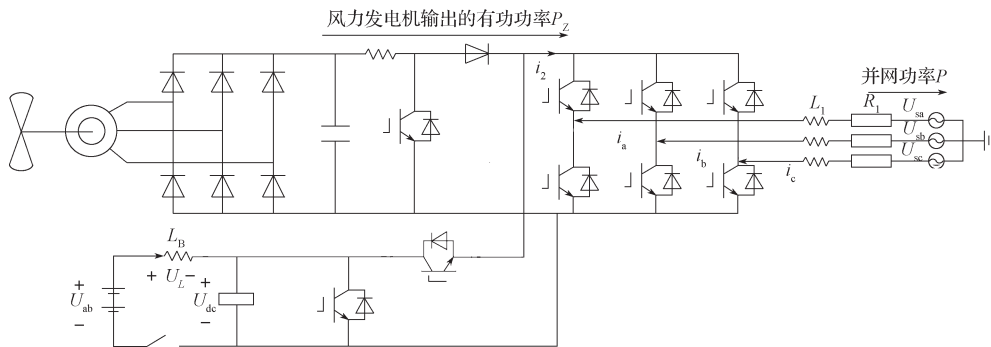


图5 系统拓扑结构图

Fig. 5 Topological structure of system

永磁直驱式风电系统使用背靠背双 PWM 变流方式, 机侧与网侧三相 PWM 电压源型变流器 (voltage source converter, VSC) 采用可控器件 (如 IGBT) 与续流二极管反并联的方式。可控全桥的 3 个桥臂共有 6 个开关单元, 其中, 机侧整流器与网侧逆变器工作原理类似。三相 PWM 电压型变流器经过三相静止坐标转换到两相静止坐标, 再由两相静止坐标转换到两相旋转坐标后, 其在 $d-q$ 两相旋转坐标系下的数学模型^[10]为:

以下假设:

- 1) 忽略发电机铁心的饱和;
- 2) 不计发电机的涡流和磁滞损耗;
- 3) 电机电流为对称的三相正弦波电流。

由此可得永磁同步电机在 $d-q$ 旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d}i_d + \omega \frac{L_q}{L_d}i_q + \frac{1}{L_d}u_d, \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_q}i_q - \omega \left(\frac{L_d}{L_q}i_d + \frac{1}{L_q} \right) + \frac{1}{L_q}u_q \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为发电机的 d, q 轴电流;

L_d 和 L_q 分别为发电机的 d, q 轴电感;

R_a 为永磁同步发电机的定子电阻;

ω 为角频率;

u_d 和 u_q 分别为发电机的 d, q 轴电压。

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - Ri_d - u_{r,d} + \omega Li_q, \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q - Ri_q - u_{r,q} + \omega Li_d. \end{cases} \quad (7)$$

式中: L 为滤波电感;

R 为变流器等效电阻;

$u_{r,d}$ 和 $u_{r,q}$ 分别为 $d-q$ 两相旋转坐标下的电源电压瞬时值。

根据式 (6) ~ (7), 风电机组拓扑结构在 $d-q$ 坐标

系下的整体数学模型为式(8)。在 $d-q$ 旋转坐标系下的频率为交流系统频率 ω (即角频率), d 轴与系统电压矢量重合, q 轴超前 d 轴 90° [11-12]。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1-m}{L_b} \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & \omega & \frac{1}{L_1} \\ 0 & -\omega & -\frac{R_1}{L_1} & \frac{m_q}{L_1} \\ 1-m & -\frac{m_d}{C_1} & -\frac{m_q}{C_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ i_d \\ i_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_{ab}}{L_b} \\ \frac{U_{sd}}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$m = \begin{cases} 0, & V_1 \text{断}, V_2 \text{断}; \\ 1, & V_1 \text{通}, V_2 \text{通}。 \end{cases}$$

式中: i_b 为蓄电池放电电流;
 i_d, i_q 分别为交流侧 $d-q$ 轴电流分量;
 U_{dc} 为直流侧电压;
 m 表示 V_1 和 V_2 的开关情况;
 m_d, m_q 分别为变流器开关函数的 $d-q$ 轴分量;
 L_b 为斩波电路低压侧电感;
 R_1 为交流系统等效电阻;
 L_1 为输出等效电感;

C_1 为变流器直流侧电容;
 $U_{s,d}$ 为交流系统电压矢量的 d 轴分量。

该模型为四阶线性系统, i_b, i_d, i_q, U_{dc} 为状态量, m, m_d, m_q 为控制量, $L_b, \omega, R_1, L_1, C_1, U_{s,d}, U_{ab}$ 为已知量。当控制量给定后, 可求出状态量 [13]。

3 模型仿真和分析

对式(4)~(6)和式(9)进行分段化集中处理, 得到非线性模型:

$$\begin{cases} \dot{i}_b = -\frac{1-m}{L_b} i_b + \frac{U_{ab}}{L_b}, \\ U_{ab} = U_{st} + Ae^{-B(1-soc)} - C(1-soc) - K_p I \times soc - R_p I, \\ \dot{U}_{dc} = (1-m) i_b - \frac{m_d}{C_1} i_d - \frac{m_q}{C_1} i_q, \\ P = P_z + U_{dc} i_2 + P_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: P 为并网功率;
 P_z 为风力发电机输出的有功功率;
 P_0 为蓄电池储能系统的输出功率。

利用 Matlab/Simulink 构建了基于蓄电池储能系统的永磁直驱式风电系统的仿真模型, 如图6所示。

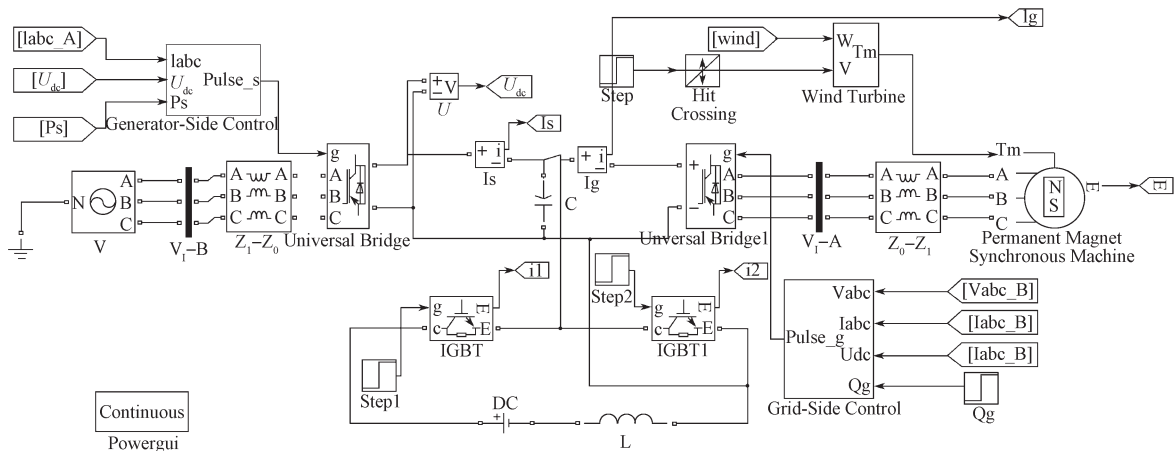


图6 基于蓄电池储能系统的风力发电机仿真模型

Fig. 6 Simulation model of wind turbine based on battery energy storage system

在基于蓄电池储能系统的风力发电机仿真中, 采用龙格库塔算法和可变步长的方式对模型进行求解。仿真参数设置如下: 风力发电机的额定功率为 1.5 MW, 输出线电压额定值为 690 V (有效值), 频率均为 50 Hz; 永磁同步发电机的定子电阻为 0.017 Ω , 定子电感为 0.003 L, 极对数为 32, 滤波电感为 0.003 5 L; 蓄电池组额定电压为 610 V, 容量为 500 kVA/5 MJ; 电网侧变换器的直流侧电压额定值为 1 100 V, 功率器件为 IGBT, 开关频率均为 2.5 kHz, 电容为 $C_1=6 \times 10^{-5} \mu\text{F}$, 输出等效电感为 $L_1=$

0.001 2 L。所有仿真结果均采用标么值表示, 且以其相应的额定值作为基准值。通过 step 信号给定相应的风速。对于电网而言, 所需的并网功率 P 需求恒定, 为 0.4 MW。由于风速的变化, 将导致永磁同步电机的输出功率 P_z 和并网功率 P 存在差别, 此时, 蓄电池储能系统可起到较好的缓冲作用, 能对差值功率进行再利用或补偿。

对于风力发电机组而言, 风速直接决定了机组的动态特性。常见的风速模型有阵风、渐进风和随机风, 如图7所示。

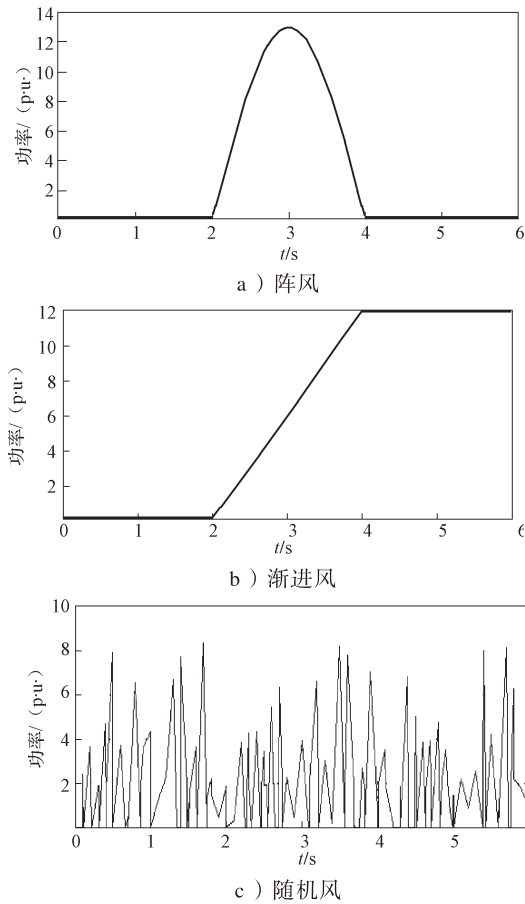


图7 风速模型简图

Fig. 7 Diagram of wind speed model

在不同的风速模型下, 并网功率 P 、风电机输出功率 P_z 和储能系统输出功率 P_0 的仿真波形如图8~10所示。

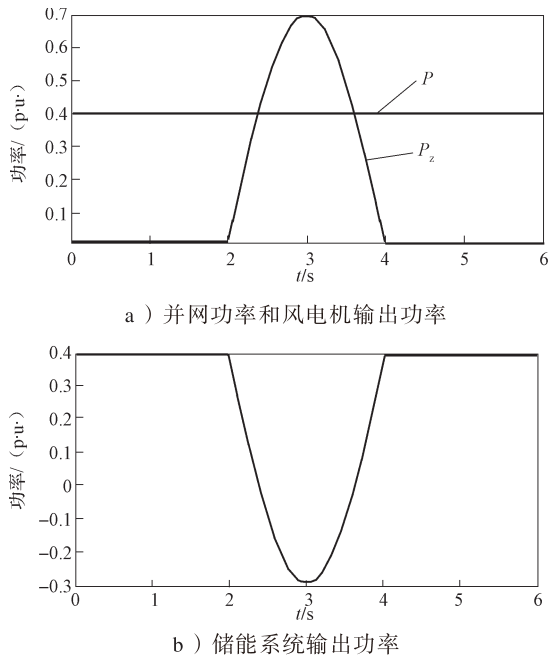


图8 阵风模型下的仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveform for gust model

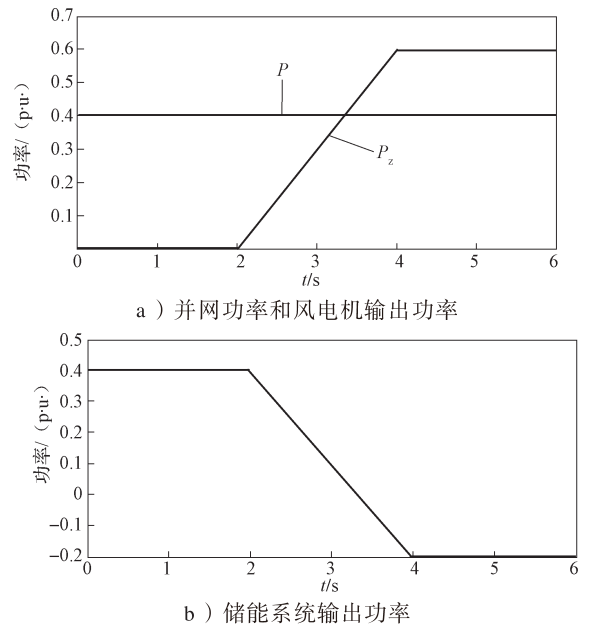


图9 渐进风模型下的仿真波形图

Fig. 9 Simulation waveform for gradual wind model

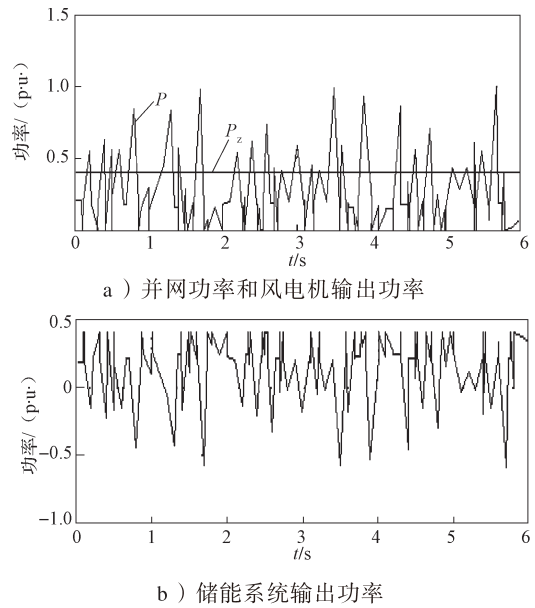


图10 随机风模型下的仿真波形图

Fig. 10 Simulation waveform for random wind model

由图8~10可以看出: 在不同的风速模型下, 为了维持风力发电并网功率的稳定, 风电机的输出功率 P_z 和蓄电池储能系统的输出功率 P_0 发生了较大的变化。当风速达不到并网的最优风速时, 风电机的输出功率偏小, 此时, 蓄电池储能系统开始放电, 其输出功率补偿风电机的输出功率; 当风速超过了并网的最优风速时, 风电机输出功率过大, 超过了并网功率 P , 此时, 蓄电池储能系统就开始充电, 吸收功率 (图中吸收功率表示为负)。总体而言, 并网功率 P 约等于风电机输出功率 P_z 和蓄电池储能系统输出功率 P_0 之和。

但是,与实际情况相比,仿真结果存在一定误差。其主要原因是:实际的并网存在各种损耗;变压器漏感对控制电路会造成影响;电容滤波存在不可控制性等。

4 结语

本文先分析了蓄电池储能系统的工作原理,再搭建蓄电池元件和控制元件的数学模型,最后利用 Matlab/Simulink 建立相应的仿真模型。仿真结果表明:该模型能反映在阵风、渐进风和随机风下的风电并网功率特性,证明本文所搭建的蓄电池储能系统模型是合理的。本课题组下一步将研究基于蓄电池储能的风力发电系统的功率控制策略。

参考文献:

- [1] 李军军,吴政球,谭勋琼,等.风力发电及其技术发展综述[J].电力建设,2011,32(8):64-72.
LI Junjun, WU Zhengqiu, TAN Xunqiong, et al. Review of Wind Power Generation and Relative Technology Development[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(8): 64-72.
- [2] 刘世林,文劲宇,孙海顺,等.风电并网中的储能技术研究进展[J].电力系统保护和控制,2013,41(23):145-151.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on Applications of Energy Storage Technology in Wind Power Integrated to the Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-151.
- [3] 张宇,俞国勤,施明融,等.电力储能技术应用前景分析[J].华东电力,2008,36(4):91-93.
ZHANG Yu, YU Guoqin, SHI Mingrong, et al. Review of Energy Storage Systems[J]. East China Electric Power, 2008, 36(4): 91-93.
- [4] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术,2008,32(7):1-9.
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of Energy Storage Technologies in Power Grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [5] 陈星莺,刘孟觉,单渊达.超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J].中国电机工程学报,2001,21(12):63-66.
CHEN Xingying, LIU Mengjue, SHAN Yuanda. Application of Super Conducting Magnetic Energy Storage System- SMES in Wind Power System of Network Forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66.
- [6] 金晓东,丁明,茆美琴.分布式发电系统中的蓄电池模型[J].仪器仪表用户,2008,15(2):88-90.
JIN Xiaodong, DING Ming, MAO Meiqin. Battery Model of Distributed Power Generation System[J]. Electronic Instrumentation Customer, 2008, 15(2): 88-90.
- [7] 黄汉奇,毛承雄,王丹,等.可再生能源分布式发电系统建模综述[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(5):1-15.
HUANG Hanqi, MAO Chengxiong, WANG Dan, et al. Modeling Summarizing of Distributed Renewable Energy Power Generation System[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(5): 1-15.
- [8] 魏瑾.Boost斩波器及并联组态的控制方法研究[D].东营:中国石油大学,2009.
WEI Jin. The Research on Control Strategy Used in Boost Converter and its Parallel Configuration[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2009.
- [9] 李勇,朱晓青,黄鹰.基于直驱永磁风力发电系统中最大风能跟踪的实现[J].湖南工业大学学报,2014,28(5):59-63.
LI Yong, ZHU Xiaoqing, HUANG Ying. Implementation of Maximum Wind Energy Tracking in Direct-Drive Permanent Magnet Wind Power Generation System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(5): 59-63.
- [10] 王文亮,葛宝明,毕大强.储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J].电力系统保护和控制,2010,38(14):43-48.
WANG Wenliang, GE Baoming, BI Daqiang. Energy Storage Based Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Wind Power Control System[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 43-48.
- [11] 张兴,张崇巍.PWM整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003:20-135.
ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM Rectifier and Its Control[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 20-135.
- [12] 王刚毅,肖强辉,朱广辉,等.永磁直驱风力发电机功率控制的研究[J].湖南工业大学学报,2013,27(4):61-65.
WANG Gangyi, XIAO Qianghui, ZHU Guanghui, et al. Power Control of Direct-Driven Permanent Magnet Wind-Generators[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(4): 61-65.
- [13] 李军徽,朱昱,严干贵,等.储能系统控制策略及主电路参数设计的研究[J].电力系统保护和控制,2012,40(7):7-12.
LI Junhui, ZHU Yu, YAN Gangui, et al. Research on the Control Strategy and the Design of Main Circuit Parameters of Energy Storage System[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 7-12.

(责任编辑:邓彬)