

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.019

交流微网整体建模及仿真研究

谢永涛¹, 贾 嵘¹, 董开松², 沈渭程², 李 臻², 杨 楠³

(1. 西安理工大学, 西安 710048; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050;
3. 三峡大学新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 作为消纳新能源发电的一种手段,微电网以其灵活性和经济性,日益受到各国重视。为了研究微电网的运行特性,文中首先研究各分布式电源数学模型,并基于 MATLAB/Simulink 仿真系统,分别搭建光伏、蓄电池储能系统、柴油发电机的仿真模型,结合系统自带模块,构建了交流微电网的整体性仿真模型。对该系统在多种工况下,各分布式电源出力对系统运行特性的影响进行仿真试验,结果表明,文中所建的交流微电网模型能够准确模拟系统的实际运行情况,为微电网的运行与规划提供了技术支持。

关键词: 分布式发电系统(DG); 交流微电网; 储能; 光伏电池模型

Modeling and Simulation of an AC Microgrid

XIE Yongtao¹, JIA Rong¹, DONG Kaisong², SHEN Weicheng², LI Zhen², YANG Nan³

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China;
3. Sanxia University, Hubei Collaborative Innovation Centre for Microgrid of New Energy, Hubei Yichang 443000, China)

Abstract: To investigate the operation characteristics of the microgrid, mathematical models of photovoltaic system, energy storage system, and diesel generator are established based on the simulation software MATLAB/Simulink. Further, a complete model of microgrid system is built with the modules in MATLAB/Simulink. The microgrid system is simulated to reveal the effect of distributed power output on its operation characteristics in different operation conditions. Simulation shows that the proposed model of microgrid system accurately reflects the state of real microgrid system, and may provide a technical support for the microgrid planning and operation.

Key words: distributed generation(DG); AC microgrid; energy storage; PV model

0 引言

分布式发电系统(distributed generation, DG)以其高效率、低污染以及灵活性强的特点,逐渐成为各国未来发电方式的首选研究对象,但是分布式电源出力的随机波动性会给当地配电网带来显著负面影响^[1]。因此,部分学者提出了一种由多个分布式发电设备组成的具有强运行特性,且综合管理方便的电网架构概念,即微电网,其优点^[2-4]为:①将大量零散管理划分为少数小整体的管理,提高了配电网的整体运行可靠性;②微电网充分利用分布式电源的分散性、位置灵活的优点,能够挖掘分布式电源的效率;③具

有即插即用的特点,满足用户多样化需求;④更能适应终端用户能源需求变化,提高能源利用效率。可见微电网具有广阔的应用前景,亟需研究其运行特性。

针对微电网的建模与运行特性研究,国内外学者作了大量的工作,文[5]中给出了智能微型电网的建模的新思路,但并未给出各个分布式单元的模型;文[6-9]中分别构建了典型的微电网系统,研究了微电网的暂态特性,但并未给出一个微电网整体建模过程,仅集中研究了逆变器与变流器控制策略;文[10]中指出微电网孤网运行的频率特性是由不同微电源的调频特性共同决定,微电源的调频特性是影响微电网孤网频率特性的关键因素,只讨论了微电网的运行特性,缺少对微电网模型的研究。

文中从整体角度出发,通过搭建光伏电池、储能

收稿日期:2014-12-14; 修回日期:2015-01-16

基金项目:国家电网科技项目(5227221350BR,52272214002Z)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5227221350BR,52272214002Z)。

单元及柴油发电机等分布式电源的 Simulink 模型,并结合系统自带的风机模型,构建交流微电网仿真模型。利用该模型仿真多种工况下各个分布式电源及整个系统的运行特性,结果表明,文中所建交流微电网模型可以准确模拟系统实际运行情况。

1 交流微电网建模

1.1 交流微电网的整体结构

文中构建的交流微电网模型由风力发电、光伏发电、柴油发电机、蓄电池储能及楼宇综合负荷单元构成,其系统整体架构见图 1。

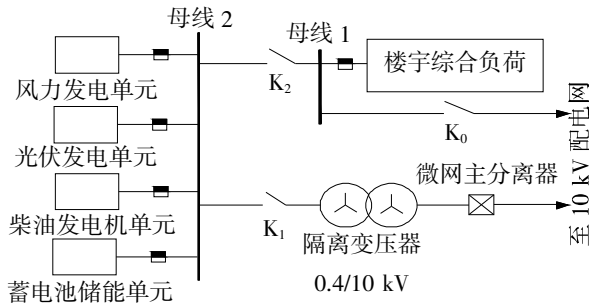


图 1 交流微电网结构

Fig. 1 The configuration of AC microgrid

图 1 中,母线 1 为小区原有的 0.4 kV 交流配电母线,母线 2 为新增的 0.4 kV 交流母线。正常情况下,断路器 K_1 、 K_2 闭合,断路器 K_0 断开,交流微电网并网运行;当上级配电网出现故障时,断路器 K_0 、 K_1 断开,微电网主分离器也断开,断路器 K_2 闭合,交流微电网孤岛运行;当交流微电网系统出现故障(如母线 2 故障)时,断路器 K_1 、 K_2 断开,微电网主分离器也断开,断路器 K_0 闭合,小区楼宇负荷由上级配电网供电。

1.2 分布式光伏电源模型

常见的分布式光伏电源的等值电路模型有 3 种^[1],考虑到仿真模型的精确度,文中采用的是既考虑并联电阻又考虑串联电阻的较精确模型。其等值电路模型见图 2。

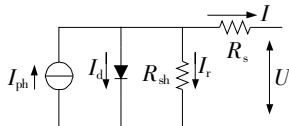


图 2 光伏电池等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of photovoltaic cells

假定光伏电池处于 25 °C 和 1 000 W/m² 的条件下,设输出电压为 U_0 、对应电流为 I 时,则光伏阵列的 I - U 方程为

$$I = I_{sc} [1 - C_1 (\exp \frac{U_0}{C_2 U_{oc}} - 1)] \quad (1)$$

式(1)中: I_{sc} 为短路电流; U_{oc} 为开路电压; C_1 为二

极管反向饱和系数; C_2 为 PN 结理想因数。根据最大功率点处 $U=U_m$ 、 $I=I_m$,以及开路状态下 $U=U_0$ 、 $I=0$,可得其计算结果见式(2)。

$$C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp \frac{-U_m}{C_2 U_{oc}} \quad (2)$$

受光照和温度的影响,光伏电池的运行特性具有了随机波动性,导致在工程实际中不同环境下的 I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 值测量困难,无法获取准确的任意条件下的 I - U 曲线,因此可利用光伏电池的光生电流与阳光辐射强度成正比;开路电压 U_{oc} 与阳光辐射强度呈对数关系等规律,对标准特性曲线进行修正,从而得到任意工况下的光伏电池 I - U 特性曲线。其计算公式为:

$$I_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T); \quad (3)$$

$$U_{oc} = U_{oc} (1 - \gamma \Delta T) \ln(1 + \beta \Delta S); \quad (4)$$

$$I_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T); \quad (5)$$

$$U_m = U_m (1 + \gamma \Delta T) \ln(1 + \beta \Delta S). \quad (6)$$

式(3)-(6)中,一般工况与标准工况的温度差 ΔT 和相对照度差 ΔS 的计算方法为:

$$\Delta T = T - T_{ref}; \quad (7)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1. \quad (8)$$

综上所述,搭建分布式光伏电源的 Simulink 仿真模型见图 3。

模型输入为 T 、 S 、 U_{pv} 分别为实际环境温度、辐射强度、光伏阵列的工作电压,模型的输出电流为 I_{pv} 。

为了得到光伏阵列模型的最大功率输出,文中采用变步长扰动观察法来进行追踪,其光伏阵列的控制系统结构见图 4。

1.3 蓄电池储能单元模型

目前使用最为广泛的蓄电池储能模型为戴维南等效电路模型^[11-12],见图 5。

图 5 中:理想电压源 E_b 为电池开路电压,与 SOC(荷电状态)有关; R_x 为电池中电极板、电解液和间隔板的电阻;电阻 R_c 和电容 C 组成过电势网络,为电池的极化反应过程;电动势 E_b 和电阻 R_x 为开路电压和电池自身内阻,与充放电电流无关,其主导因素为 SOC^[13]。由 Kirchhoff 电流定律可得蓄电池的模型为

$$U_b = E_b(S_{soc}) - I_b R_{e0} \quad (9)$$

式(9)中: $E_b(S_{soc})$ 为蓄电池开路电势; I_b 为蓄电池充/放电电流; R_{e0} 为蓄电池内阻。

蓄电池的静态参数 $E_b(S_{soc})$ 可根据出厂试验数据拟合得到,其计算方法见式(10)。

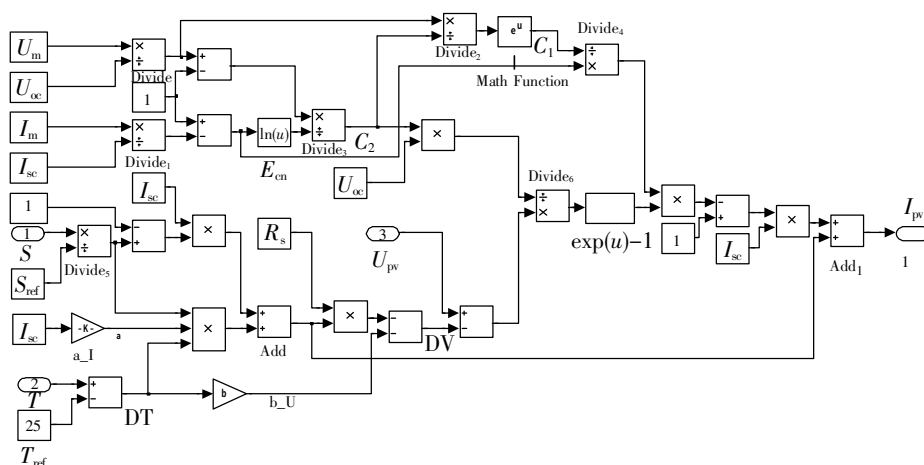


图 3 光伏电池的仿真模型

Fig. 3 The simulation model of photovoltaic cells

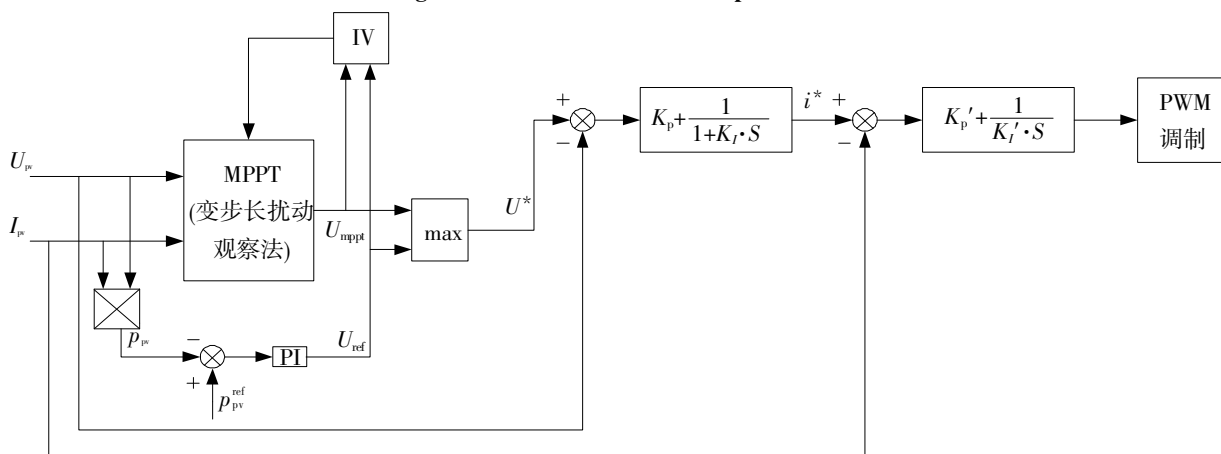


图 4 光伏阵列控制系统

Fig. 4 PV control system

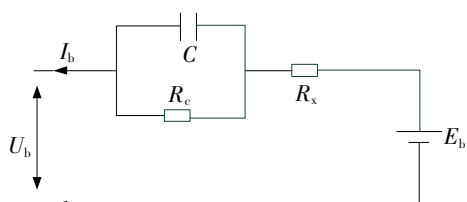


图 5 蓄电池等效电路

Fig. 5 The equivalent circuit of battery

$$E_b(S_{soc}) = a \cdot S_{soc}\% + b. \quad (10)$$

式(10)中: a 、 b 为模型拟合系数; $S_{soc}\%$ 为蓄电池的荷电状态, 其计算方法见式(11)。

$$S_{soc}(t) = S_{soc}(t-1) - \frac{\int_{t-1}^t \eta i(\tau) d\tau}{C}. \quad (11)$$

式(11)中: η 为充/放电效率; $i(\tau)$ 为当前充/放电电流。

蓄电池储能单元的模型搭建见图 6。仿真模型有一个输入端为电流 I , 两个输出端分别为混合输出 m 端和电压输出 U 。

蓄电池储能单元的控制系统的见图 7。将蓄电池当前电压 U_{dc} 与系统给定电压 U_{dc}^{ref} 相比较, 得到的误差信号驱动直流电压调节器产生参考电流, 再通

过电流内环调节, 最终得到 SPWM 脉冲信号, 控制接口换流装置。

1.4 柴油发电机及风力发电单元模型

对于柴油发电机, 文[14]中做了大量研究, 文中为了降低建模难度以同步发电机模拟柴油发电机, 其调速系统和励磁系统见图 8^[15]、9。

风力发电单元文中采用 Simulink 系统中自带的的风力发电模块。

2 基于 Simulink 的交流微电网仿真模型

文中搭建的交流微电网仿真平台中包含了 1 个 20 kW 的光伏发电模块, 1 个 6 kW 的风力发电模块, 1 个 10 kW 的柴油发电机和 10 kW·h 的碳铅电池以及该地小区的楼宇综合负荷构成, 其仿真模型整体结构见图 10。

模型仿真参数部分见表 1。

3 仿真分析

微电网系统属于低压发配电网, 与高压输电线

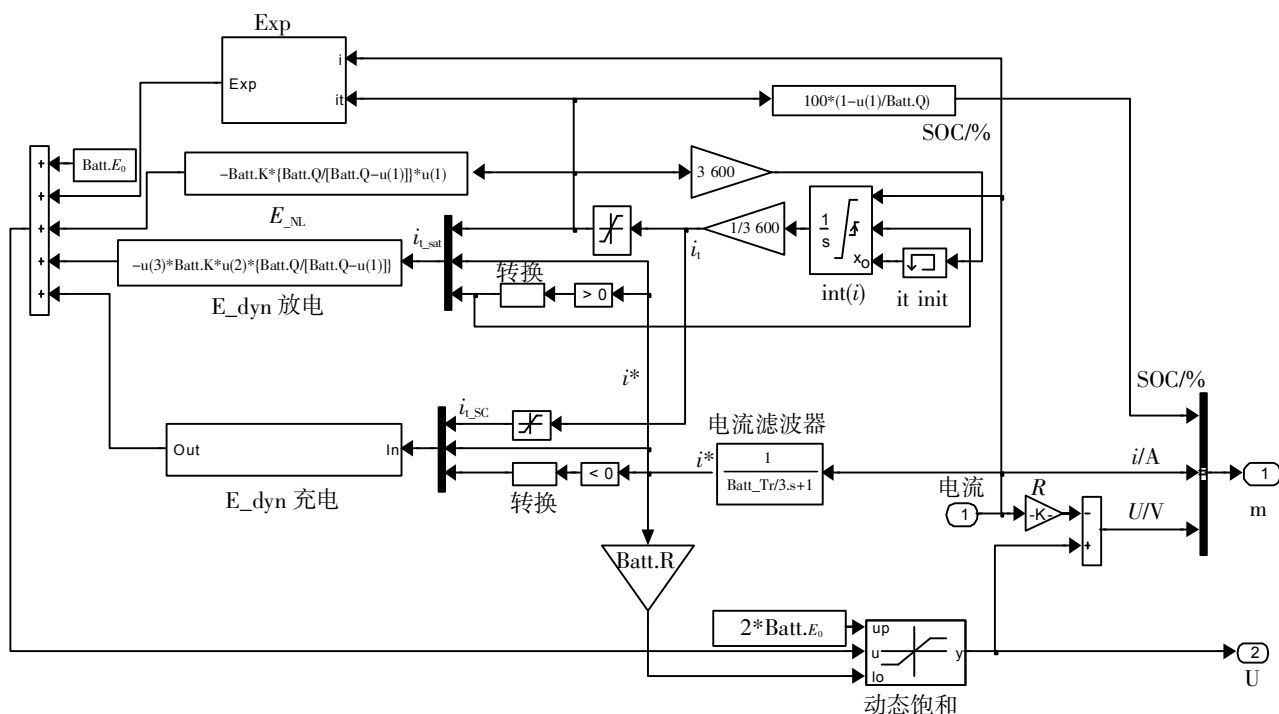


图6 蓄电池仿真模型

Fig. 6 The simulation model of battery

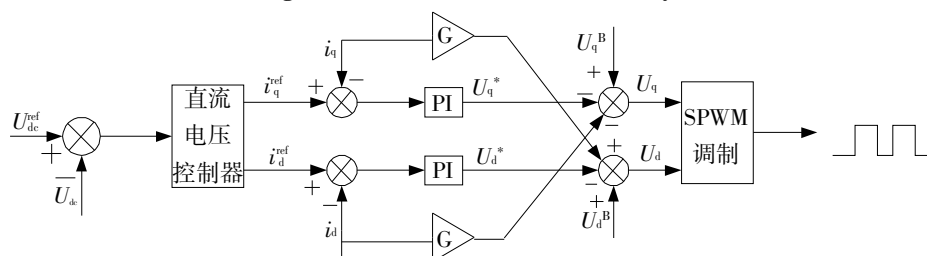


图7 储能控制系统

Fig. 7 The storage control system

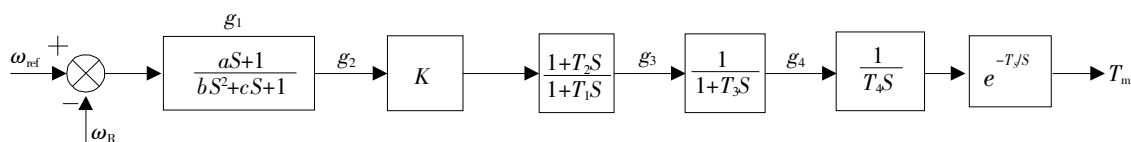


图8 柴油发电机调速系统

Fig. 8 Diesel generator speed control system

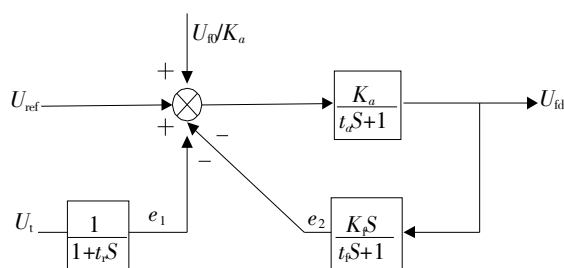


图9 柴油发电机励磁系统

Fig. 9 Diesel generator excitation system

路相比,其网络线路的 R/X 比率很高。这意味着与无功功率相比,系统有功功率要对系统电压、频率的影响更大^[16],因此文中的仿真分析主要集中在有

功率对系统电压、频率的影响上。

1)交流微电网并网运行。在仿真过程中忽略温度对光伏电池和蓄电池的影响,因仿真时间较短,光照强度仍为 $1\,000\text{ W/m}^2$;风速变化:在 $0\sim 20\text{ s}$ 时,风速为 6 m/s ; $20\sim 50\text{ s}$ 时,风速为 11 m/s 。仿真结果见图 11-13。

由图 11-13 可知,系统在刚开始启动阶段,电压、频率发生了波动,其波动范围尚未超过电力规定范围。其原因主要为:模型自身的初始化导致了初始阶段的电压、频率的波动;随后系统的电压、频率基本稳定于额定值附近;在 20 s 时,由于风速的突变导致风力发电单元的出力发生了变化,但微电网系

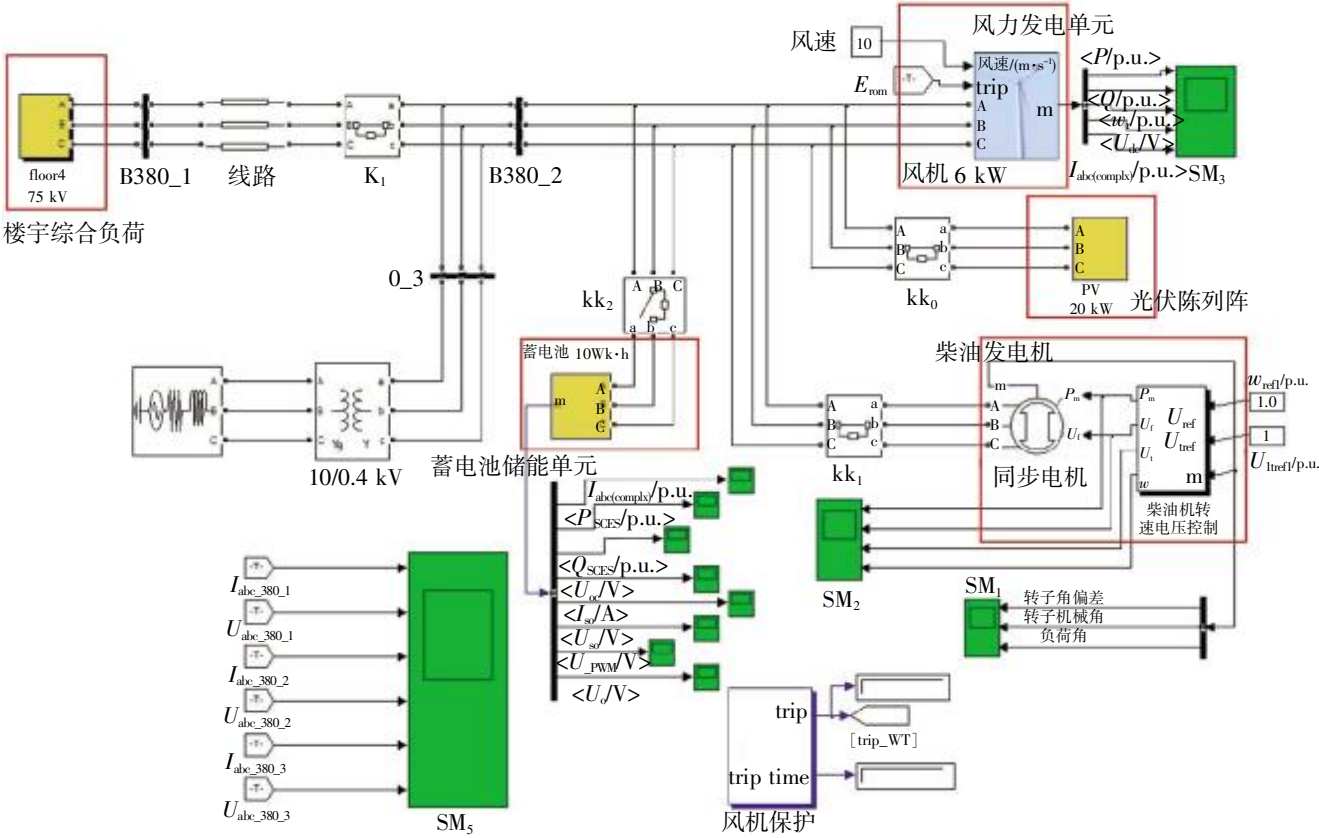


图 10 交流微电网仿真平台

Fig. 10 AC microgrid simulation platform

表 1 模型参数

Table 1 The model parameters

光伏电池模型		蓄电池储能模型	
参数	数值	参数	数值
α	0.002 50	a	0.006 88
β	0.500 00	b	5.750 00
γ	0.002 88	η	0.800 00
I_m/A	4.450 00	C/F	1.370 00
U_m/V	17.200 00	E_0/V	6.000 00
I_{sc}/A	4.300 00	—	—
U_{oc}/V	21.600 00	—	—

统的电压、频率仍保持额定值附近。仿真结果表明：微电网并网运行时，系统的电压、频率主要由上级电网维持，某个分布式电源的出力发生波动时，对微电网系统的电压、频率基本无影响。

2)交流微电网并网运行时，发生单相接地故障。交流微电网并网运行 1.5 s 时，发生了单相短路，0.1 s 后故障切除，其仿真结果见图 14–16。

由图 14–16 可知，交流微电网系统在发生单相接地故障时，电压、频率严重跌落，柴油发电机的有功出力发生了波动，有功功率稳定后，较故障前增加了 0.5 kW。其原因是：由于系统发生接地故障，机端母线电压严重跌落，为了维持电压稳定需要增加其

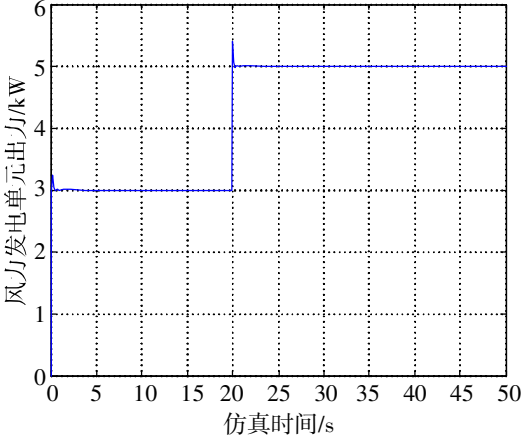


图 11 风力发电机有功出力

Fig. 11 The active power of wind generator

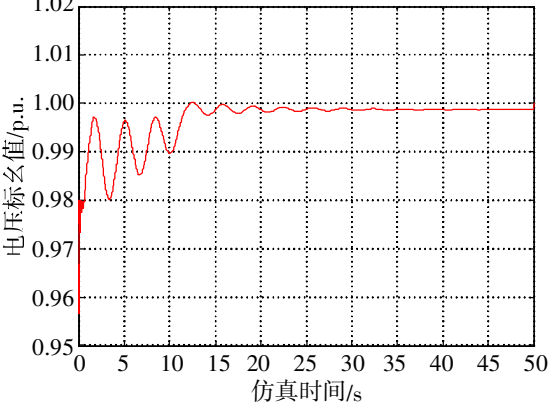


图 12 交流微电网系统电压

Fig. 12 The system voltage of AC microgrid

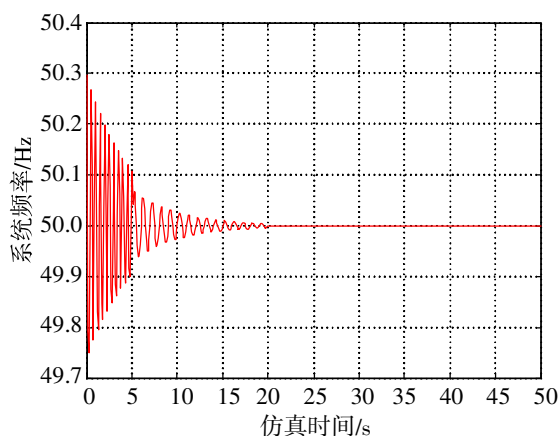


图 13 交流微电网系统频率

Fig. 13 The system frequency of AC microgrid

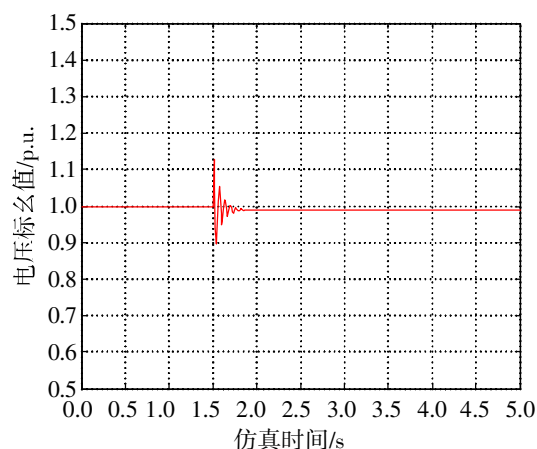


图 16 交流微电网系统电压

Fig. 16 The system voltage of AC microgrid

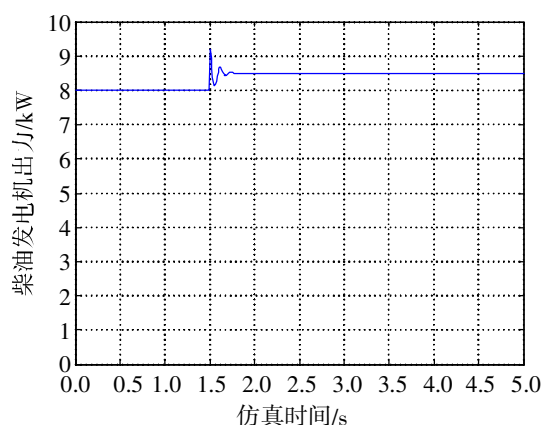


图 14 柴油发电机的有功出力

Fig. 14 The active power of diesel generator

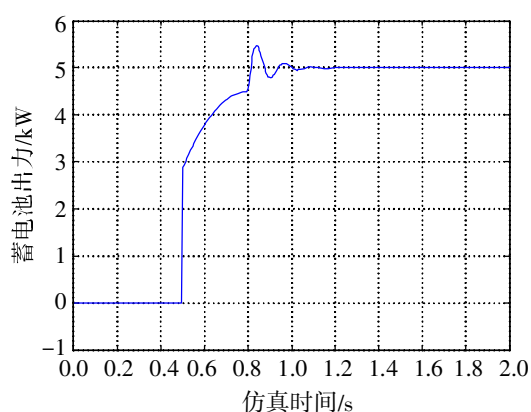


图 17 蓄电池的有功出力

Fig. 17 The active power of battery

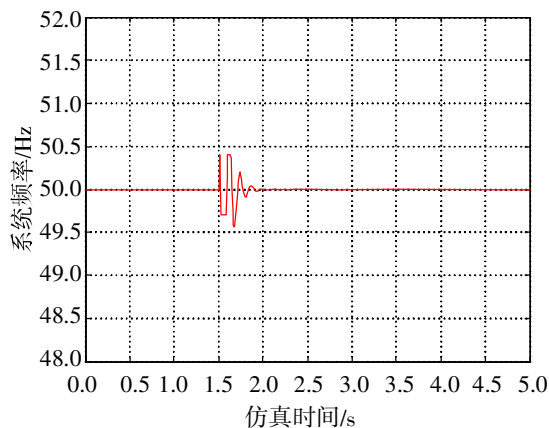


图 15 交流微电网系统频率

Fig. 15 The system frequency of AC microgrid

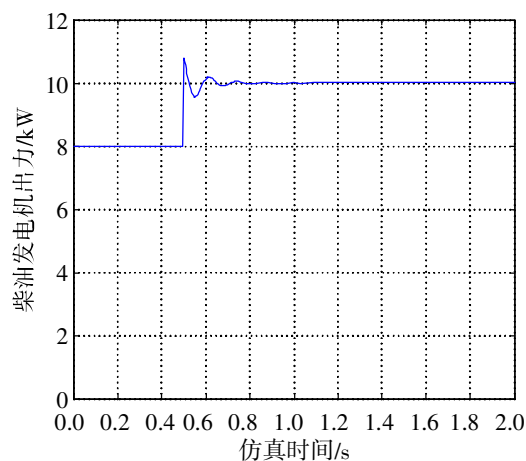


图 18 柴油发电机的有功出力

Fig. 18 The active power of diesel generator

励磁电流, 故而引起有功功率增加; 0.1 s 后故障切除, 微网系统电压、频率在上级系统的维持下, 经过数个周波的振荡后恢复到额定值附近。

3) 交流微电网孤网运行。交流微电网系统并网运行在 0.5 s 时, 由并网运行切换至孤网运行, 其仿真结果见图 17-20。

由图 17-20 可知, 微电网由并网运行切换至孤网运行时, 系统的电压、频率均发生了明显的波动;

蓄电池储能单元和柴油发电机的出力均发生了波动, 其中蓄电池的出力由 0 变成 5 kW, 柴油发电机的出力增加了 2 kW; 经过 0.4 s 后, 系统电压、频率基本稳定, 与并网运行时相比, 系统的电压、频率均有跌落, 但均在电能质量允许的范围内。结果表明: 微电网由并网切换至孤网运行时, 储能单元充当了微电网系统的热备用, 储能单元与柴油发电机的出

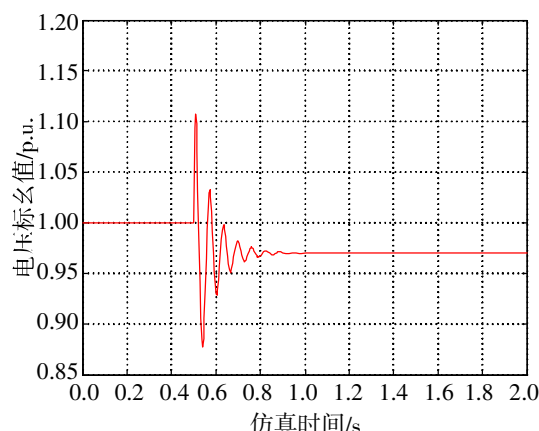


图 19 交流微电网系统电压

Fig. 19 The system voltage of AC microgrid

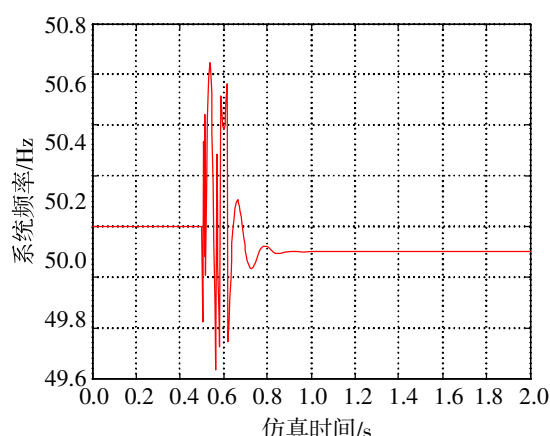


图 20 交流微电网系统频率

Fig. 20 The system frequency of AC microgrid

力对系统频率、电压的稳定起着尤为重要的作用。

4 结论

文中构建了一种交流微电网仿真模型,并基于仿真算例验证了模型的正确性和有效性。结果表明:①并网运行时,微电网系统的电压频率主要靠上级配电网维持,某一分布式电源出力发生波动时对整个微电网系统的影响较小;②参数设计合理的前提下,微电网能够抵御短路电流的冲击,故障切除后,系统能够迅速恢复稳定运行,并能满足用户的用电要求;③在并网向孤网切换过程中,储能单元充当了微电网系统的热备用,其响应速度及接入容量,是影响整个系统稳定性的重要因素。

参考文献:

- [1] 丁 明,王 敏.分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004,24(7):31-36.
DING Ming,WANG Min. Distributed power generation technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(7): 31-36.
- [2] 霍群海,唐西胜.微电网与公共电网即插即用技术研究

[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):105-111.

HUO Qunhai,TANG Xisheng. Plug-and-play technology applied in microgrid and utility grid [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7): 105-111.

- [3] 盛 鹏,孔 力,齐智平,等.新型电网——微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器,2007,35(12):75-81.
SHENG Kun,KONG Li,QI Zhiping, et al. A survey on research of microgrid -a new power system[J]. Relay,2007,35 (12): 75-81.
- [4] 鲁宗相,王彩霞,闵 勇,等.微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong, et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19): 100-107.
- [5] 鞠 平,秦 川,黄 桦,等.面向智能电网的建模研究展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):1-6.
JU Ping,QIN Chuan,HUANG Hua, et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11): 1-6.
- [6] 李培强,刘志勇,李欣然,等.应用综合控制策略的微电网建模与仿真[J]. 高电压技术,2011,37(10):2356-2362.
LI Peiqiang,LIU Zhiyong,LI Xinran, et al. Modeling and simulation of microgrid based on synthesis control[J]. High Voltage Engineering,2011,37(10): 2356-2362.
- [7] 施 捷,郑漳华,艾 芊.直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):86-90.
SHI Jie,ZHENG Zhanghua,AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2): 86-90.
- [8] 马添翼,金新民,黄 杏,等.含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(6): 12-17.
MA Tianyi,JIN Xinmin,HUANG Xing, et al. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converters [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37 (6): 12-17.
- [9] 胡 伟,孙建军,查晓明,等.基于动态相量法的逆变型分布式电源微电网建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2014(3):14-18.
HU Wei,SUN Jianjun,ZHA Xiaoming, et al. Modeling and simulation of microgrid including inverter-interfaced distributed resources based on dynamic phasors[J]. Automation of Electric Power Systems,2014(3): 14-18.
- [10] BERTANI A,BOSSI C,FORNARI F,et al.A microturbine-generation system for grid connected and islanding operation[C]//IEEE PES Power Systems Conference and Exposition.New York,USA:IEEE,2004:360-365.
- [11] 胡义华,陈 昊,徐瑞东,等.光伏电池板在阴影影响下输出特性[J]. 电工技术学报,2011,26(1):123-128.
HU Yihua,CHEN Hao,XU Ruidong, et al. PV module characteristics effected by shadow problem[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(1): 123-128.

(下转第 114 页)

- [5] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
CHEN Jie,YANG Xiu,ZHU Lan,et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19): 57-66.
- [6] 张建华,苏玲,陈勇,等.微网的能量管理及其控制策略[J].电网技术,2011,35(7):24-28.
ZHANG Jianhua,SU Ling,CHEN Yong,et al. Energy management of microgrid and its control strategy[J]. Power System Technology,2011,35(7): 24-28.
- [7] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu,SU Jian,LYU Zhipeng,et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1): 57-70.
- [8] DUFO LOPEZ R,BERNAL AGUSTIN J L. Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms[J]. Solar Energy,2005(79):33-46.
- [9] TSIKALAKIS A G,HATZIARGYRIOU N D. Centralized-control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(1): 241-248.
- [10] CHAKRABORTY S,WEISS M D,SIMOES M G. Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(1): 97-109.
- [11] MARNAY C,VENKATARAMANAN G,STADLER M,et al. Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(3): 975-982.
- [12] 张晓花,赵晋泉,陈星莺.节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J].中国电机工程学报,2010,30(22): 71-76.
ZHANG Xiaohua,ZHAO Jinquan,CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22): 71-76.
- [13] 陈道君,龚庆武,张茂林,等.考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J].中国电机工程学报,2011,31(13):10-17.
CHEN Daojun,GONG Qingwu,ZHANG Maolin,et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(13): 10-17.
- [14] 徐奉友,李朝锋,陶学军,等.一种基于自适应控制算法的光伏发电站自动发电控制系统[J].电力系统保护与控制,2014(14):128-131.
XU Fengyou,LI Chaofeng,TAO Xuejun,et al. A photovoltaic automatic generation control system based on adaptive control algorithm[J]. Power System Protection and Control,2014(14): 128-131.
- [15] 张曦,康重庆,张宁,等.太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J].电力系统自动化,2014(6):6-13.
ZHANG Xi,KANG Chongqing,ZHANG Ning,et al. Analysis of mid/long term random characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014(6): 6-13.
- [16] 于晗,钟志勇,黄杰波,等.考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J].电力系统自动化,2009,33(2):20-24.
YU Han,ZHONG Zhiyong,HUANG Jiebo,et al. A chance Constrained transmission network expansion planning method associated with load and wind farm variations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(2): 20-24.
- 马喜平(1985—),男,硕士研究生,主要研究方向电力新能源并网技术。
谢永涛(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统新能源。
董开松(1966—),男,硕士,高级工程师,国网工程技术专家,主要研究方向为新能源发电及并网技术。
贾嵘(1971—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化。

(编辑 赵彩莉)

(上接第107页)

- [12] SALAMEH Z M,CASACCA M A,LYNCH W A. A mathematical model for lead-acid batteries [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1992,7(1): 93-98.
- [13] 陆秋瑜,胡伟,郑乐,等.多时间尺度的电池储能系统建模及分析应用[J].中国电机工程学报,2013,33(16): 86-93.
LU Qiuyu,HU Wei,ZHENG Le,et al. Modeling and analysis of battery energy storage systems in multi-time scales application[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16): 86-93.
- [14] 何彬,欧阳明高.柴油发电机——整流负载系统多变量变增益控制[J].中国电机工程学报,2006,26(3):146-152.
HE Bin,OUYANG Minggao. Multivariable gain-scheduling control of diesel generator with rectified loads[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(3): 146-152.
- [15] 时珊珊,鲁宗相,闵勇,等.微电网孤网运行时的频率特性分析[J].电力系统自动化,2011,35(9):36-41.
SHI Shanshan,LU Zongxiang,MIN Yong,et al. Analysis on frequency characteristics of islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9): 36-41.
- [16] KATIRAEI F,IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed Generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(4): 1821-1831.
- 谢永涛(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统新能源。
贾嵘(1971—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化。
董开松(1966—),男,硕士,高级工程师,国网工程技术专家,主要研究方向为新能源发电及并网技术。
沈渭程(1984—),男,硕士,研究方向为电力系统自动化。

(编辑 赵彩莉)