

基于风光互补的微网系统建模与仿真

郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 程如岐, 赵二刚, 祁超

(南开大学, 天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 天津 300071)

摘要: 在传统风光互补发电系统的基础上, 建立了基于直流母线的单相微网系统模型, 利用 Matlab 分别搭建了风力发电机、光伏阵列和蓄电池的模型, 系统主电路采用 Z 拓扑结构延长了孤岛运行时间。微网控制策略根据运行模式分为两种: 孤岛运行时, 系统采用主从控制模式, 其中蓄电池作为主控单元, 提供电压参考; 并网时尽可能地将新能源并入电网, 分别进行最大功率点跟踪控制。利用该模型及控制策略对微网两种模式切换时的过渡状态以及功率流向进行了仿真研究, 结果验证了该模型的可行性和有效性, 为建立微网实验平台和示范工程奠定了基础。

关键词: 风光互补; 直流母线; 主从控制; 最大功率点跟踪

Modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid

GUO Tian-yong, ZHAO Geng-shen, ZHAO Yao, CHENG Ru-qi, ZHAO Er-gang, QI Chao

(Tianjin Key Laboratory of Photo-electronic Thin Film Devices and Technology, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: On the basis of traditional wind-solar hybrid generation system, a model of single-phase microgrid system based on DC bus is established, and the models of wind turbine, solar arrays and battery are built respectively with Matlab. Z topology is adopted to prolong the island running time. The controlling strategy is divided into two types according to operation mode: one is that it takes master slave control mode when the system is island running, where the battery is the main control unit to provide reference voltage; the other one is when it's grid connected, the system adopts maximum power point tracking control mode respectively, which aims to make the new energy into grid as much as possible. With this model and controlling method, the simulation of transition state and power flow during the microgrid mode-switch is carried out, the results prove the feasibility and validity of this model, which will lay a foundation for building microgrid experimental platform and demonstration project.

Key words: wind-solar hybrid; DC bus; master slave control; maximum power point tracking

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0104-05

0 引言

随着能源危机和环境恶化日益严重, 绿色新能源已得到世界各国的广泛重视, 尤其是风力发电和光伏发电得到了快速发展, 而两者都受到季节和气候等因素制约, 但是两者的变化趋势基本相反, 采用风光互补的方式可以发挥更大的作用^[1-2], 但由于分布式发电会对电网造成负面影响, 且不具备能量管理能力。因此, 一种新的分布式能源组织形式——微网被提出来, 它是由各种微源、储能装置、敏感负荷/非敏感负荷以及监控、保护装置组成的集合, 是一个能够实现智能控制和管理的系统, 既能并网运行又能孤立运行^[3]。微网在实际运行中需要解决的关键技术之一是系统的控制问题, 因此, 建立微网的仿真模型可以对系统的各种控制策略进行验

证, 从而为搭建微网实验平台奠定基础。

目前, 对微网的建模不是很完善, 文献[4]建立了含光伏阵列及燃料电池的微网模型, 只是验证了并网逆变器的输出, 而没有验证系统孤立运行时的情况; 文献[5]忽略了蓄电池的充放电特性, 且只研究了微网从并网模式向孤岛模式转换的动态过程; 本文在分析了风力发电机、光伏阵列和蓄电池特性的基础上, 利用 Matlab/Simulink 搭建了完整的基于风力发电机和光伏阵列的微网系统模型, 对微网两种模式的过渡状态以及两种模式下的功率流向进行了研究。

1 微网结构

本文采用直流母线的微网方式, 其结构如图 1 所示, 该结构的特点是系统的微源、储能装置、负

荷都通过电力电子变换装置连接到直流母线。系统中只存在一级电压变换装置, 降低了系统成本, 且控制简单, 无需考虑多个微源之间的同步问题。

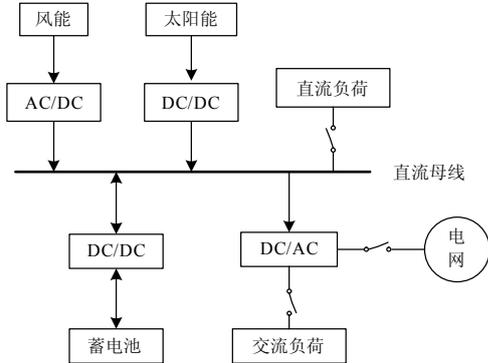


图1 直流母线的微网结构

Fig.1 Microgrid structure of DC bus

2 微网模型

2.1 风力发电机模型

2.1.1 风力机模型

由空气动力学, 风力机从风中捕获的机械功率为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风轮半径; V 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, 它是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数^[6], 且 $\lambda = \omega_r R / V$, ω_r 为风轮角速度。当桨距角变化时其曲线如图2所示, 从中可以看出, 在桨距角不变的情况下, 只要保证最优叶尖速比 λ 保持不变, 即风轮转速与风速同步变化, 就可维持风机在最大风能利用系数下运行, 当风速超过额定风速时, 需要结合变桨距控制保护风机并实现最大风能捕获。

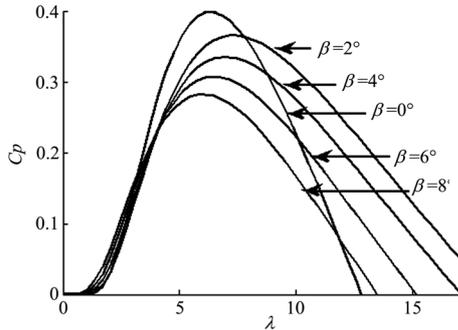


图2 风能利用系数曲线

Fig.2 The curve of wind power coefficient

风力机模型采用文献[7]中建立的模型, 图3为该模型的封装。

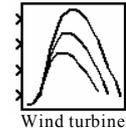


图3 风力机模型封装

Fig.3 Mask of the wind turbine model

2.1.2 发电机模型

永磁同步发电机 (PMSG) 在 d - q 旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{Q_f p \omega_r}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电流; L_d 和 L_q 分别为 d 轴和 q 轴电感; R_s 为定子电阻; ω_r 为转子角速度; p 为转子极对数; Q_f 为永磁体的磁链; u_d 和 u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压。

图4是根据式(2)建立的发电机模型, 风力机和发电机模型是通过发电机的运动方程联系在一起的, 其运动方程为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - F \omega_r \quad (3)$$

式中: T_m 为机械输入转矩, 即风力机输出转矩; T_e 为发电机电磁转矩; J 为机械转动惯量; F 为阻尼系数。

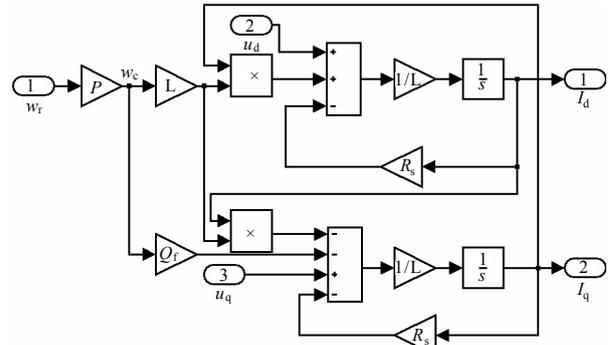


图4 永磁发电机模型

Fig.4 Permanent magnetic generator model

2.2 光伏阵列模型

本文采用工程用的光伏阵列模型^[8-9], 其中, 重要的参数有: 短路电流 I_{sc} ; 开路电压 V_{oc} ; 最大功率点电流 I_m 和电压 V_m 。当光伏阵列电压为 V 时, 在考虑太阳辐射和太阳温度影响时, 其对应的电流为:

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{(V-DV)/C_2 V_{oc}} - 1)) + DI \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-V_m / C_2 V_{oc}} \\ C_2 = (V_m / V_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \\ DI = \alpha R / R_{ref} DT + (R / R_{ref} - 1) I_{sc} \\ DV = -\beta DT - R_s DI \\ DT = T - T_{ref} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 、 R_{ref} 为太阳辐射和辐射参考值; T 、 T_{ref} 为电池温度和参考温度; α 为电流变化温度系数; β 为电压变化温度系数; R_s 为光伏阵列串联电阻。

光伏系统的最大功率跟踪采用变步长的扰动观察法, 根据功率变化量的斜率决定步长的大小, 斜率的绝对值与步长成正比关系, 其中, 控制量是占空比 d 。

2.3 蓄电池模型

作为储能设备, 蓄电池在风光互补的微网系统中起着非常重要的作用, 可以消除微源的功率扰动和负荷扰动对电网的影响。本文选用受控电压源串联一个固定阻值的电阻作为蓄电池的等效电路^[10-11]。其模型为:

放电状态:

$$E = E_0 - KI^* \frac{Q}{Q - Q_t} - KQ_t \frac{Q}{Q - Q_t} + Ble^{-BQ} \quad (6)$$

$$V = E - IR$$

充电状态:

$$E = E_0 - KI^* \frac{Q}{0.1Q + Q_t} - KQ_t \frac{Q}{Q - Q_t} + Ble^{(A-B)Q}$$

$$V = E + IR$$

(7)

式中: E 为开路电压; E_0 为恒定电压; V 为端电压; Q 为电池容量; Q_t 为充电量 (或放电量); K 为极化常数; I^* 为低通滤波后的电流; I 为蓄电池电流; A 为指数电压系数; B 为指数容量系数; R 为电池内阻。

2.4 Z 拓扑及逆变器模型

本文主电路采用 Z 拓扑结构对直流母线电压进行升降压控制^[12-13], 利用其特有的直通特性可以延长蓄电池的放电时间, 从而延长系统孤岛运行的时间, 提高了系统的可靠性, 其模型如图 5 所示, 其中: L_1 、 L_2 和 C_1 、 C_2 构成 Z 拓扑结构, 为简化分析, 假定 $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$; I_o 为系统输出电流; I_l 为负荷电流; I_g 为并网电流; S5 为电路的改进部分, 利用可控 MOSFET 代替传统 Z 拓扑中的二极管, 从而为系统提供能量回馈电路。

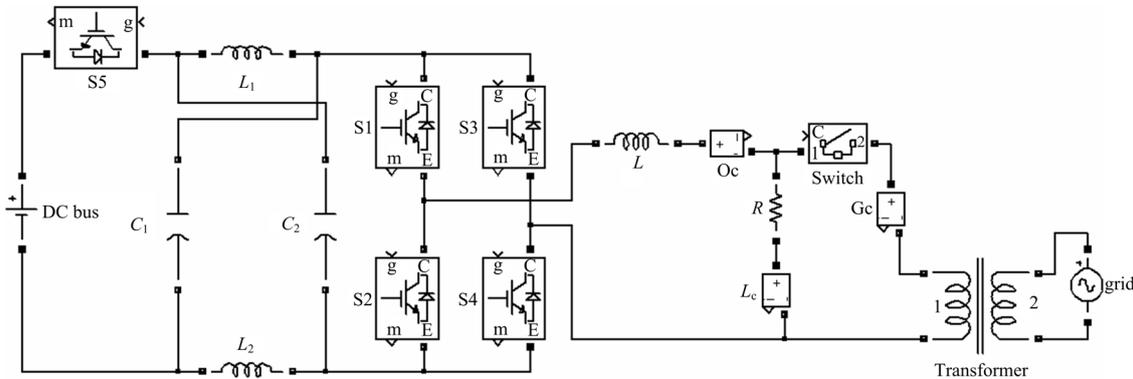


图 5 Z 拓扑及逆变器模型

Fig.5 Z-topology and inverter model

3 控制策略及仿真

微网具有两种运行模式: 孤岛和并网, 而在这两种模式下系统的任务和功能有所不同。孤岛运行时, 系统要实现电压幅值和频率的控制, 为重新并网做准备; 同时为负荷进行分配供电, 保证敏感负荷的电能质量等; 本文采用主从控制方法, 将蓄电池作为主控单元, 从而维持微网的频率和电压幅值, 蓄电池要通过充放电来跟踪微源的功率和负荷的波动; 并网时, 大电网提供电压和频率参考值, 系统只需控制并网电流与电网电压同频同相且并网电压

幅值与电网电压相同; 此时目标是实现微源的最大功率跟踪, 若微源提供的功率远远大于负荷需求, 则将剩余电量并入电网; 反之, 需要电网和微源共同向敏感负荷供电, 此时, 只需要控制系统输出电压与电网同频同相, 而系统输出电流与并网电流反向。

模拟系统分别搭建了 8 kVA 的风力发电机、4 kVA 的光伏电池和 6 kVA 的蓄电池模型, 本文针对微网的功率流向以及两种模式之间切换的过渡状态进行了仿真验证。

系统从孤岛运行切换到并网时, 功率流向存在

两种状态, 一种是微网提供的功率大于负荷所需, 此时系统为电网送电, 并网电流流入电网, 如图 6 (a) 所示; 另一种是微网提供的功率不足以支撑负荷所需, 且电网有电, 此时, 电网和微源共同为敏感负荷供电, 并网电流从电流出, 如图 6 (b)。

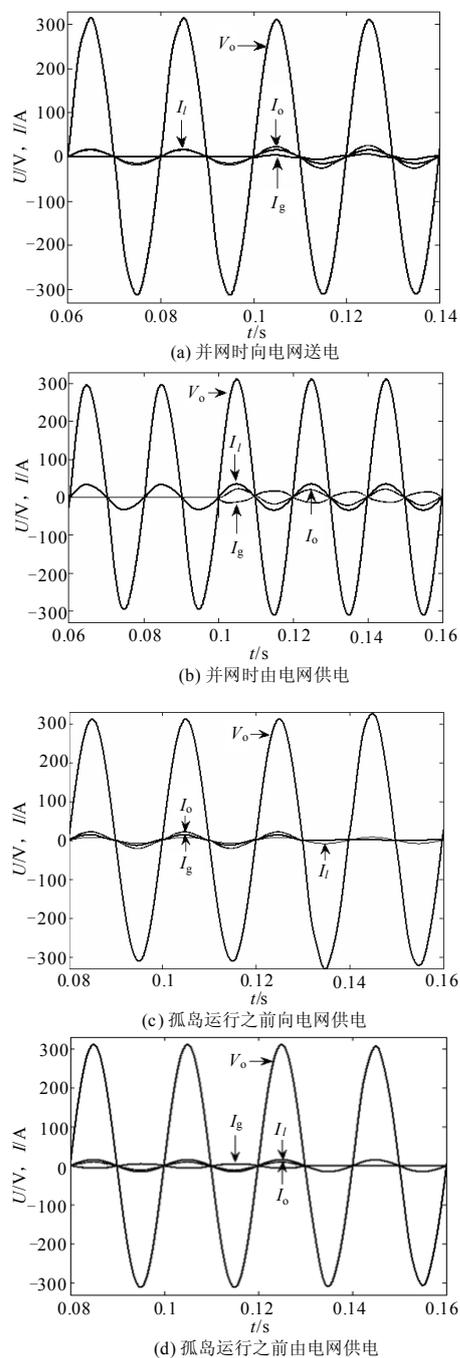


图 6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

图中切换时刻在 0.1 s, 由于大电网提供电压和频率, 所以输出电压 V_o 幅值没有明显突变, 只修正

了输出波形, 改善了电压波形的畸变率; 未并网时系统输出电流 I_o 与负载电流 I_l 重合, 并网后系统输出电流幅度变大, 而负载电流没有变化, 并网电流 I_g 流入电网, 电流波形有点畸变, 功率因数近似为 1。

并网切换时刻也是在 0.1 s, 从图 6 (b) 中可以看出, 并网之前, 系统输出电流 I_o 与负载电流 I_l 重合, 并网后负载电流依然保持不变, 系统输出电流减小, 其减小部分由并网电流 I_g 提供, 并网电流与系统输出电流反向, 且在系统并网瞬间电流相位有突变, 过一个周期后系统自动调整好。

当电网出现故障时, 微网从并网模式切换到孤岛运行, 系统根据微源输出功率的大小, 重新分配负荷, 主要是保障敏感负荷的供电; 若电网未断开时, 系统为电网送电, 在负荷不变的情况下, 系统输出电流应该减小, 如图 6 (c) 所示; 若之前电网向敏感负荷供电, 则应利用蓄电池放电, 从而维持负荷电压电流不变, 如图 6 (d) 所示。

系统由并网模式切换到孤岛模式的时刻为 0.13 s, 孤岛运行时电压幅值突然变大, 波形有点畸变, 一个周期后幅值稳定, 并网运行时, 系统输出电流 I_o 最大, 它是负载电流 I_l 与并网电流 I_g 之和, 系统切换后, 并网电流消失, 系统输出电流与负载电流重合。

图 6 (d) 突变时刻在 0.13 s, 电压幅值未发生明显变化。未切换时, 并网电流 I_g 与系统输出电流 I_o 反向, 且负载电流 I_l 最大; 孤岛运行后, 并网电流消失, 此时负载电流与系统输出电流重合, 之前系统控制输出电压与电网电压幅值相同, 所以只需控制蓄电池放电以维持负载电流值不变。

4 结论

本文根据风力发电机、光伏阵列和蓄电池的特性, 分别建立了它们的数学模型, 并构建了风光互补的微网仿真模型, 该模型可以模拟任意功率的风能和太阳能的输出特性。在微网两种模式下采取不同的控制策略, 针对功率不同流向时的仿真结果验证了该策略的可行性和有效性。为后续搭建基于直流母线的微网平台提供了参考。

参考文献

- [1] Chedid R, Rahman S. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 12 (1): 79-85.
- [2] Hashem Nehrir M, LaMeres B J, Giri Venkataramanan, et al. An approach to evaluate the general performance of stand-alone wind/photovoltaic generating systems[J]. IEEE

- Trans on Energy Conversion, 2000, 15 (4): 433-439.
- [3] 王成山, 王守相. 分布式发电功能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 1-4.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 1-4.
- [4] 陶琼, 吴在京, 程军照, 等. 含光伏阵列及燃料电池的微网建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 89-93.
TAO Qiong, WU Zai-jing, CHENG Jun-zhao, et al. Modeling and simulation of microgrid containing photovoltaic array and fuel cell[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (1): 89-93.
- [5] 郭力, 王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (2): 82-86.
GUO Li, WANG Cheng-shan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (2): 82-86.
- [6] Slootweg J G, Polinder H, Kling W L. Initialization of wind turbine models in power systems dynamics simulation[C]. //IEEE Proto Power Tech Conference. Porto (Portugal): 2001.
- [7] GUO Tian-yong, ZHAO Geng-shen, CHENG Ru-qi, et al. Simulation of wind turbine based on Fuzzy-PI control[C]. //The 2nd conference on PEITS. Shenzhen (China): 2009: 130-133.
- [8] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22 (4): 409-412.
SU Jian-hui, YU Shi-jie, ZHAO Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2001, 22 (4): 409-412.
- [9] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (5): 1248-1251.
MAO Mei-qin, YU Shi-jie, SU Jian-hui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [10] Shepherd C M. Design of Primary and secondary cells-part 2: an equation describing battery discharge[J]. Journal of Electrochemical Society, 1965: 657-664.
- [11] Tremblay O, Dessaint L -A, Dekkiche A -I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[C]. //Vehicle Power and Propulsion Conference. 2007: 284-289.
- [12] PENG Fang-zheng. Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (2): 504-510.
- [13] ZHOU Zhi-jian, ZHANG Xing, XU Po, et al. Single-phase uninterruptible power supply based on Z-Source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (8): 2997-3004.

收稿日期: 2010-04-15; 修回日期: 2010-08-25

作者简介:

郭天勇 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与光电子技术; E-mail: gty_0101@163.com

赵庚申 (1950-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与光电子技术;

赵耀 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与光电子技术。

(上接第 103 页 continued from page 103)

- LI Jing-hua, WEI Hua. A general pattern search algorithm for electric power system unit commitment problems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (6): 123-128.
- [20] 黎静华, 韦化. 基于内点法的机组组合模型[J]. 电网技术, 2007, 31 (24): 28-34.
LI Jing-hua, WEI Hua. A unit commitment model based on interior point method[J]. Power System Technology, 2007, 31 (24): 28-34.
- [21] 黎静华, 兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2): 1-7.
LI Jing-hua, LAN Fei. Extended priority list method for unit commitment problem[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (2): 1-7.
- [22] 周渝慧. 智能电网—21世纪国际能源新战略[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

黎静华 (1982-), 女, 讲师, 博士生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用, 电力系统优化运行与控制; E-mail: happyjinghua@163.com

韦化 (1954-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为现代内点最优理论及其在电力系统中的应用;

夏小琴 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化。