离网型风光互补发电系统多模态能量控制与管理

皇甫宜耿[1]，安晓彤[2]，马瑞卿[1]，骆光照[1]

(1. 西北工业大学，陕西 西安 710072; 2. 北京航空航天大学 北京 100191)

摘 要: 离网型风光互补发电系统是一种合理配置新能源的独立电源系统，由于自然界中风能、太阳能出现的不可预测性，以及负载、储能状态的随机性，提出一种基于风光互补发电系统多模态能量流的分析法，研究了各模态及模态间转化特性，给出了四种典型状态下风光互补发电系统的能量控制及管理。采用闭环电压控制使风力发电通道和光伏发电通道输出电压恒定，为用电设备和储能元件提供安全可靠的电能。通过 MATLAB/Simulink 软件对离网型风光互补发电系统多模态能量控制进行了仿真，结果表明离网型风光互补发电系统工作可靠，验证了多模态分析法的有效性。

关 键 词: 离网型; 风光互补; 多模态; 能量管理

中图分类号: TM91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2758(2013)03-0470-06

风能发电可以减少化石燃料产生的大量污染物和碳排放，其技术相对成熟、并具有大规模开发和商业开发条件、成本相对较低的发电方式[1]。光伏发电的过程相对风能发电没有机械转动部件，具有寿命长、免维护、无噪声、占地小等特点[2]。风能和太阳能作为可再生能源，虽具有许多优点，但二者均受季节、地形、气候等因素的影响，为充分提高新能源的利用率，一种风光互补发电系统被广泛采用。

另外，在诸如边防、海岛、牧区、渔船、边远山村等无电网区域，或为便携式、可移动设备供电场合下，由储能元件构成离网型风光互补发电系统起到举足轻重的作用。但往往由于负载大小、储能元件满亏程度也是不可预知的。因此，需要对离网型风光互补发电系统进行多模态下的分析及综合管理。

目前，对风光互补发电系统的研究大多是根据风力机转速与转矩及光伏电池电压与功率的关系，设计控制器实现最大功率跟踪。其核心思想是根据风速的大小调节发电机转速，从而维持最优叶尖速比。在最大功率跟踪阶段，为获得最大的风能利用系数，桨距角通常保持不变; 抑或调节负载大小，使输出功率位于光伏电池伏安曲线的拐点。这样虽然能使风能及太阳能的利用率达到最大，但忽视了储能元件、用电设备等系统特性，对实际应用系统中的能量流控制与管理意义不大。

风光互补发电系统弥补了能量的间歇性强，可靠性差等不足，实现不间断供电，其中蓄电池作为能源储存模块扮演了重要角色。因此，不少研究学者对蓄电池的充电方法及其寿命的影响做了深入的研究。

离网型风光互补发电系统多用于独立电源供电，论文采用 PID 电压闭环控制、电流截至保护技术使系统输出稳定的电压值，从而实现为负载和储能元件供以安全可靠的电能。

1 风光互补发电系统

1.1 风能发电模型

风能是一种通过风轮机转化为机械能，拖动发电机发电。据目前的风能发电技术，大约 3m/s 的微风速度就可以开始发电。风力发电机原理比较简单，空气流动的动能作用在叶轮上，将动能转化为机械能，从而推动叶片旋转，将叶轮的转轴与发电机的转轴相连就会发出电。

收稿日期: 2012-09-10 **基金项目:** 教育部博士点新教师基金(20126102120050)与陕西省国际科技合作重点项目计划(2012120320275 8)资助

作者简介: 皇甫宜耿(1981—)，西北工业大学副教授，主要从事电源变换技术、新能源发电及其应用研究。

根据风能捕获原理,风力机扫掠面的风能为

$$P_w = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3 \tag{1}$$

由贝兹理论[5]可知,风力机捕获的风能为

$$P_M = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_P(\lambda,\beta) V^3 \tag{2}$$

式中,ρ 是空气密度,为常数 $\rho = 1.225\ \mathrm{kg/m^3}$; π 是圆周率常数; R 是风力机叶片半径; C_p 是风能利用系数,通常为叶尖速比 λ 和叶桨矩角 β 的函数; v 是风力机迎风风速。

风力机输出机械转矩可以表示为

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

$$\lambda = \frac{Rw_r}{V} \tag{4}$$

式中, w_r 是风力机转速,单位为 rad/s。

1.2　光伏发电模型

光伏电池的发电原理是光生伏打效应,一个光伏电池具有类似于二极管 PN 结的结构。当光照射在电池上,PN 结两端就会有电压产生,单独的光伏电池功率很小,所以光伏发电系统要将大量的光伏电池串并联,以构成光伏阵列。

因此,在得到光伏电池的模型后,进行串并联等效可得到光伏阵列的模型。

I_{ph} 和 I_d 分别为光生电流和流过二极管的反向饱和漏电流

$$I_{ph} = I_{sco}\left[1 + h_t(T - T_{ref})\right] S/S_{ref} \tag{5}$$

$$I_d = I_{rr}\left[\frac{T}{T_{ref}}\right]^3 \exp\left(\frac{qE_G}{kTA}\left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right]\right) \tag{6}$$

I_{sco} 是标准日照下,标准温度时的短路电流; 温度系数 $h_t = 6.4 \times 10^{-4}\mathrm{K}^{-1}$; I_{rr} 为二极管反向饱和电流; q 为电子电荷,其值为 $q = 1.6 \times 10^{19}\mathrm{C}$; k 为玻耳兹曼常数,$k = 1.38 \times 10^{-23}\ \mathrm{J/K}$; A 为无量纲的任意曲线的拟合常数,通常取 $1 \leqslant A \leqslant 2$,当光伏电池输出高电压时 $A = 1$,当光伏电池输出低电压时 $A = 2$; E_G 为硅的禁带宽度。

根据太阳能电池的数学理论及发电机理,建立光伏电池仿真模型[3]。常用建模方法主要是利用四个标准条件下的电气参数根据太阳辐射强度和温度对太阳电池阵列的非线性影响进行了线性近似,在非标准条件下对这四个电气参数进行修正。本文使用的是一种改进模型,其结构简单易于操作,能更好描述光伏整列的电气特性,该模型还考虑了在任意光强下和温度下串联电阻 R_s 的影响,并进行了太阳能电池输出特性测试,理论估算值与实际测量值相比,两者误差在工程应用允许的精度 6% 内。其数学表达式为

$$I = I_{sc}\left\{1 - C_1\left[1 - \exp\left(\frac{V + \mathrm{d}v}{C_2 V_{oc}}\right)\right]\right\} + D \tag{7}$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)\exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right) \tag{8}$$

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1\right)/\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \tag{9}$$

式中, I_{sc} 为短路电流, I_m 为最大功率点电流, V_{oc} 为开路电压, V_m 为最大功率点电压

$$T_1 = T - T_{ref} \tag{10}$$

$$S_1 = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \tag{11}$$

式中, T 为光伏电池的温度, T_{ref} 是标准电池温度, S 是光照强度, S_{ref} 是标准光照强度

$$D = I_{sc}S_1 + aT_1(1 + S_1) \tag{12}$$

$$\mathrm{d}v = bT_1 + DR_S \tag{13}$$

式中, a, b 均为补偿系数,取 $a = 0.005\ 4$, $b = 0.21$。

光照强度相同时,随着温度上升光伏电池开路电压下降,短路电流有所增加,最大输出功率也减小; 温度相同时,随着光照强度的增加开路电压几乎不变,短路电流有所增加,最大功率也有所增加。基于光伏电池输出特性具有非线性和最大功率点特点,而且最大功率点也随着光照强度和环境温度等因素变化[4,5]。

1.3　系统模型

风光互补发电系统由风力机、永磁同步发电机、整流器、光伏阵列、DC/DC 变换器、蓄电池、控制器、负载电阻等组成,其结构框图如图 1 所示。

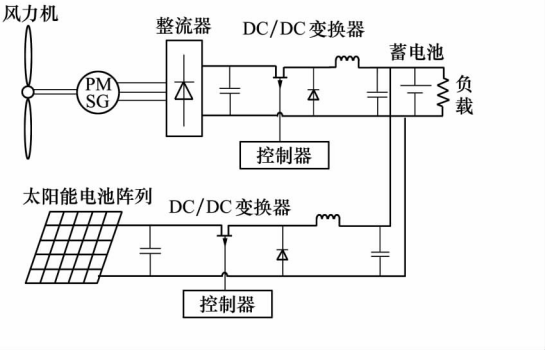

图 1　风光互补发电系统结构图

风力发电部分采用风力机直接同轴驱动交流永

磁同步发电机的形式，风力发电机发出的交流电经过整流器和 DC/DC 变换器转变成蓄电池所需的直流电。通过控制 DC/DC 变换器的触发脉冲占空比来使输出电压保持在 12V。光伏阵列产生的直流电经过 DC/DC 变换器得到蓄电池所需的直流电，通过控制 DC/DC 变换器的触发脉冲占空比来使输出电压保持在 12V。蓄电池在由于天气等原因导致输出不稳定的情况下起存储能量的作用，这样负载就可以得到稳定的功率。

2　系统能量控制与管理

2.1　模态分析

为了便于分析，充分考虑系统在自然界的实际工况，将风光互补发电系统根据太阳能、风能和负载的有无状态划分为 8 种模态，其具体划分如表 1 所示。

表 1　风光互补发电系统的 8 种模态

模态	风能	太阳能	负载
模态 1	0	0	0
模态 2	0	0	1
模态 3	0	1	0
模态 4	0	1	1
模态 5	1	0	0
模态 6	1	0	1
模态 7	1	1	0
模态 8	1	1	1

注：0 代表风能、光能、负载不存在；1 代表风能、光能、负载存在

由于大自然中风速和光照强度是不稳定的，那么输入到系统中的能量也是不稳定的，上表中 8 种状态只是将为了分析方便而人为将其划分为 8 种状态，其实，在实际的系统中，这 8 种状态实际上是相互铰链并且可以随时互相转化的，是一个动态的转化过程。

模态 1　即初始状态在无风无光也无负载的情况下。当有风出现时，该模态转化为模态 5；有光照时，转化为模态 3；有负载出现时，转化为模态 2。

模态 2　即初始状态在无风无光有负载的情况下。当有风出现时，该模态转化为模态 6；有光照时，转化为模态 4；无负载出现时，转化为模态 1。

模态 3　即初始状态在无风有光无负载的情况下。当有风出现时，该模态转化为模态 7；当没有光照时，转化为模态 1；有负载出现时，转化为模态 4；有风无光时，转化为模态 5。

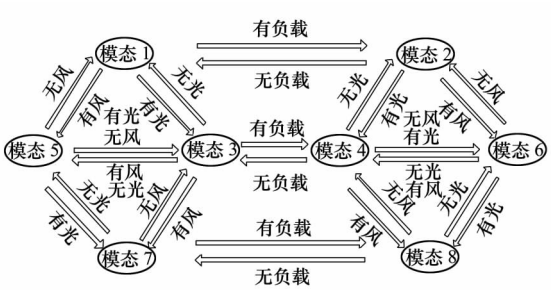

图 2　多模态下的相互转化关系图

模态 4　即初始状态在无风有光有负载的情况下。当有风出现时，该模态转化为模态 8；当无光照时，转化为模态 2；无负载出现时，转化为模态 3；无风有光照时，转化为模态 6。

模态 5　即初始状态在有风无光无负载的情况下。当无风出现时，改模态转化为模态 1；当有光照时，转化为模态 7；有负载出现时，转化为模态 6；有光照无风时，转化为模态 3。

模态 6　即初始状态在无风有光有负载的情况下。当有风出现时，改模态转化为模态 2；当无光照时，转化为模态 8；无负载出现时，转化为模态 5；有风无光照时，转化为模态 4。

模态 7　即初始状态在有风有光无负载的情况下。当无风出现时，改模态转化为模态 3；当无光照时，转化为模态 5；有负载出现时，转化为模态 8。

模态 8　即初始状态在有风有光有负载的情况下。当无风出现时，该模态转化为模态 4；当无光照时，转化为模态 6；当无负载出现时，转化为模态 7。

从实际系统的工作模态可以看出，由于风光互补发电系统的能源输入具有较强的随机性和不可预测性，其工作模态并非一成不变，而是随着混合输入能源的状态，不断发生变化的。为了更好地研究系统的实际工作特性，需要对其多模态工作做进一步分析，论文提出一种基于平滑输出的能量管理策略，即在保证系统为负载和储能元件提供安全可靠的稳定电压为基础，进行带有截止保护和最大利用功能的控制器设计。

2.2　能量管理

在风光互补发电系统中能量管理技术在保证系统稳定输出的基础上提高能量的利用率和系统的经济性，其核心思想是恒压闭环控制，电流内环保护控

制。风光互补发电系统在为负载供电同时,通过控制风力发电系统、光伏发电系统及蓄电池的充放电,协调各个模块间的能量流动,实现对系统的能量管理。

为了便于分析,首先忽略各个能量模块的具体数值,仅研究其能量流的状态,如表 1 所示。对于各个模态间的能量流的转化,如图 2 所示。

对于 DC/DC 变换器控制主要采用闭环电压控制策略,利用 PID 控制器分别实时控制 2 个通道的 DC/DC 变换器中 MOSFET 管的占空比,使输出电压尽量保持一个恒定的参考值。为了避免双通道能源尽可能多的被利用,设置蓄电池的最大充电阈值,通常为额定值上浮 10%,根据该阈值,判断风、光通道发电状态进行充电或为负载供电。如果风、光通道发电同时存在,对通道最先到达阈值的,设置其发电优先级高,最先给负载或电池提供电能。

3　仿真结果

由于风光互补发电系统各个模态之间转化是十分复杂的,为了抓住问题的核心,现对风光同步、风光交替、附加储能元件、负载扰动这几种典型情况下风光互补发电系统能量控制与管理,并给出仿真验证。

仿真中所用到的系统参数分别如表 2 ~ 表 3 所示。

表 2　风机仿真模型的主要参数

参数	单位	数值
额定风速	m/s	8
工作风速	m/s	3 ~ 12
风叶直径	m	3.2
发电机额定功率	W	450
发电机额定转速	r/min	300

表 3　光伏仿真模型的主要参数

参数	单位	数值
峰值功率	W	80
开路电压	V	21.5
短路电流	A	5.17
峰值电压	V	17.5
峰值电流	A	4.57
标准电池温度	°C	25
标准光照强度	W/m^2	1 000

3.1　风光同步实验

首先,为验证风光互补发电系统作为独立电源直接为负载供电,假设储能元件——铅酸蓄电池与风光互补发电系统暂时分离。由于光伏电池的启动光照强度为 300 W/m^2,风力机切入风速为 3 m/s,试验中首先考虑系统的风、光通道处于同时发电状态下,并随机给定能量输入,对系统输出进行控制,其控制效果如图 3 所示。

为了分析系统输出电压特性,分别选取 0.21 ~ 0.22 s、0.61 ~ 0.62 s、1.01 ~ 1.02 s 这三段电压进行纹波分析,其电压纹波分别为: 0.25%、0.2%、0.14% 均能满足设计要求。

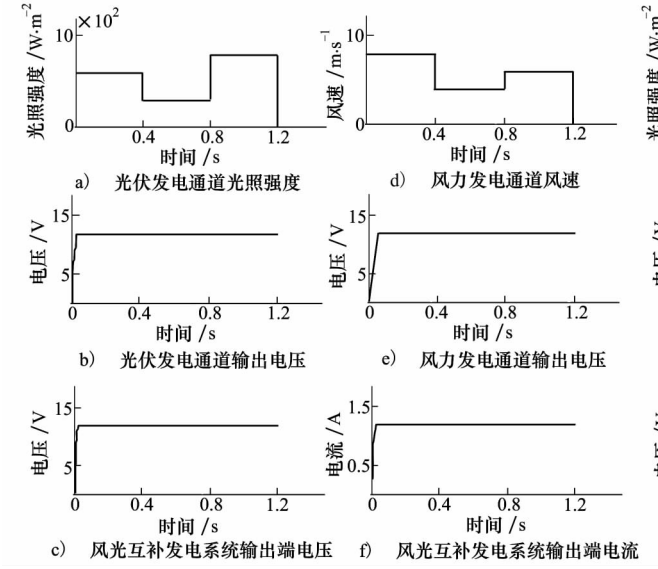

图 3　风光同步时系统输出特性

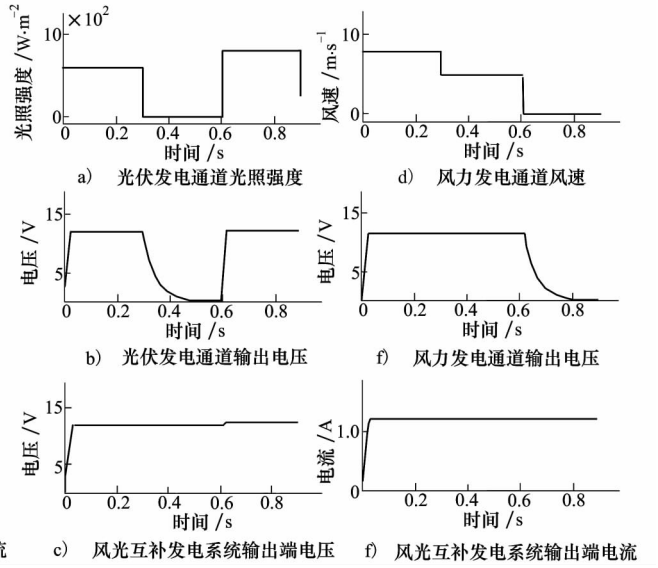

图 4　风光交替出现时系统输出特性

3.2 风光交替实验

对于风光互补发电系统其优势就在于结合风能发电和光伏发电的优势，提高系统的稳定性。由于自然界风能和太阳能的不稳定性，风能和太阳能不在同一时间出现的概率很高，本实验是为了验证风光互补发电系统在风能和太阳能交替出现的情况下的系统输出特性。其控制思想是基于能量流的闭环稳压控制，当系统自检能源亏盈状态，自动切换风、光能发电通道，以实现平滑输出电压，控制效果如图4所示。仿真中电池采用容量为120 Ah，额定电压12 V的铝酸型蓄电池。

由于在0～0.3 s、0.3～0.6 s、0.6～0.9 s时段，风光互补发电系统分别由风能和太阳能共同供电、风能单独供电、太阳能单独供电，因此选取这3个时段中一部分将其放大后观察其电压的纹波是具有代表意义的。根据电压纹波的计算公式可知，这3个时段的电压纹波分别为0.25%、1.04%、0.09%均能满足设计要求。

3.3 附加储能元件实验

其次，为验证带有储能元件的离网型风光互补发电系统为负载供电，并对系统输出特性进行仿真。

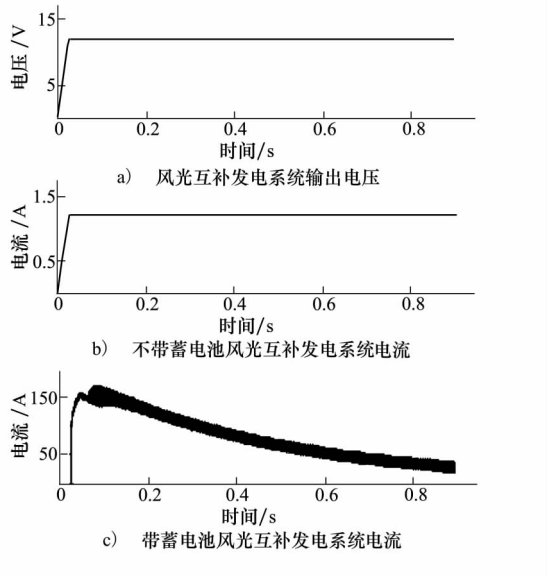

图5 附加储能元件时系统输出特性

在不改变风光通道的发电状态下，以风光交替出现为例，在系统中切入储能元件，根据平滑稳压输出电压的要求，系统的输出特性波形如图5所示。由于储能元件的充放电特性与其初始值有很大的关系，考虑到文章篇幅受限，论文仅以SOC等于70%为例进行说明，不再赘述。

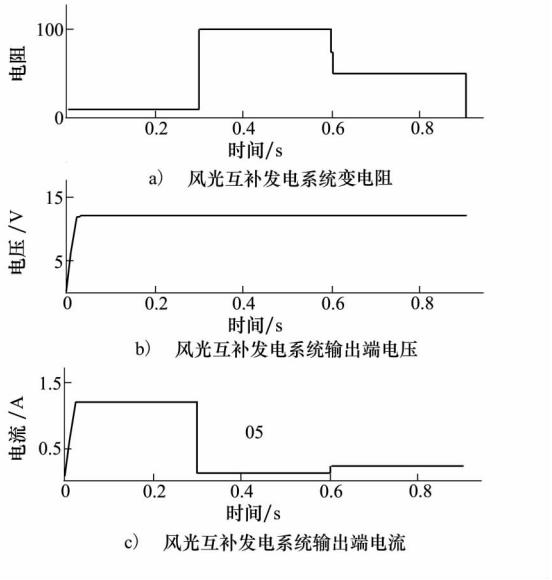

图6 负载电阻突变时，系统输出电压电流波形

另外，从图中可以看出，系统输出端的蓄电池充电电流具有较大的振动，这是由于电池氧化还原反映造成的，与实际工作情况相符，验证了模型的可行性。

3.4 负载扰动实验

最后，在实际的风光互补发电系统中，负载是不可能固定不变的，但是由于实际系统中负载的变化又是无规律的，并且是无法预知的，在系统仿真时，不可能建立没有规律的负载。综合考虑到这两方面的原因，建立一个负载随时间发生突变的恶劣条件进行模拟。

在0～0.3 s、0.3～0.6 s、0.6～0.9 s时段，风光互补发电系统的负载分别为10 Ω、100 Ω、50 Ω，因此选取这3个时段中一部分将其放大后观察其电压的纹波是具有代表意义的，控制效果如图6所示。根据电压纹波的计算公式可知，这3个时段的电压纹波分别为0.125%、0.092%、0.033%均能满足设计要求。

4 结 论

离网型风光互补发电系统应用广泛，论文旨在建立混合能源发电系统数学模型的基础上，进行复杂工况下的多模态系统输出特性验证，并通过变换器实现平滑稳定的电压输出。

仿真结果表明,风光互补发电系统在多模态情况下仍能保持正常供电。另外,风光互补发电系统在风能和太阳能两种能量同时出现、交替出现、附加储能元件、以及负载扰动情况下仍可以实现稳定恒压源输出,其纹波最大值为 1.04%,系统具有较高的精确性和稳定性。

论文所提出的离网型风光互补发电多模态分析法得到了仿真验证,基于能量管理的控制器设计为实际工程应用的进一步推广提供了理论基础和方案设计思路。

参考文献:

[1] 唐　岚,束洪春,于继来. 风能资源估算中的不确定性分析. 太阳能学报,2011,32(10): ,1560-1565
Tang Lan, Shu Hongchun, Yu Jilai. Uncertainty Analysis of Wind Energy Resource Estimation. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(10): 1560-1565 (in Chinese)

[2] 陈松利,田　德,孙云峰等. 离网型户用风光互补发电系统的匹配. 吉林大学学报,2012,42(4): 882-886
Chen Songli, Tian De, Sun Yunfeng, et al. Matching for Wind-Solar Hybrid Power System for Off-Net Tousehold. Journal of Jilin University, 2012, 42(4): 882-886 (in Chinese)

[3] 吴忠军,刘国海,廖志凌. 硅太阳电池工程用数学模型参数的优化设计. 电源技术,2007,31(11): 897-901
Wu Zhongjun, Liu Guohai, Liao Zhiling. Optimization Design of Engineering Analytical Model for Silicon Solar Cell. Chinese Journal of Power Sources, 2007, 31(11): 897-901 (in Chinese)

[4] 杨金孝,朱　琳. 基于 MATLAB/Simulink 光伏电池模型研究. 现代电子技术,2011,34(24): 192-198
Yang Jinxiao, Zhu Lin. Research on Photovoltaic Cell Model Based on Matlab/Simulink. Modern Electronics Technique, 2011, 34(24): 192-198 (in Chinese)

[5] 陈如亮,崔　岩等. 光照不均匀情况下光伏组件仿真模型的研究. 系统仿真学报,2008,20(7): 1681-1685/1690
Chen RuLiang, Cui Yan, et al. Study on Simulation Model of PV Module under Non-Uniform Insolation. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1681-1685/1690 (in Chinese)

Multi-Mode Energy Control and Management for Stand-Alone Wind-Photovoltaic Hybrid Power System

Huangfu Yigeng[1], An Xiaotong[2], Ma Ruiqing[1], Luo Guangzhao[1]

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A Stand-alone wind-photovoltaic hybrid power system allocates new energy resources reasonably and independently. But the appearance of wind energy and solar energy is unpredictable, and their loading and storage states are random. Therefore, we analyze the flow of the multi-mode energy of the stand-alone wind-photovoltaic hybrid power system. We study its mode and modal transformation and then control and manage the energy in its four typical modes. We use the closed-loop voltage control to make sure that the output voltage of a wind turbine and the photovoltaic-generated power are stable and that the power supply for electrical equipment and electricity-storage components is safe and reliable. We use the MATLAB/Simulink to simulate the control of the multi-mode energy of the stand-alone wind-photovoltaic hybrid power system. The simulation results, give in Figs. 4, 5 and 6, and their analysis show preliminarily that the stand-alone wind-photovoltaic hybrid power system can work reliably, verifying that our multi-mode analysis method is effective.

Key words: control, energy conservation, energy management, MATLAB, power generation, solar energy, wind turbines; multi-modal analysis, stand-alone wind-photovoltaic hybrid power system