

风光储联合发电系统复合控制策略研究

张明理¹, 王璐², 徐建源², 冯汝明², 史喆¹, 张晓天¹

(1. 国网辽宁电力有限公司经济技术研究院 规划评审中心, 沈阳 110015;

2. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 100870)

摘要: 由于新能源发电自身的不确定性和波动性, 电网调峰过程无法同时兼顾新能源并网、本地变化负荷与主电网的功率需求, 造成大规模弃风弃光问题。为此, 文中根据风电与光伏系统运行特点, 借助储能单元充放电控制功能, 提出一种联合发电系统复合控制策略, 并在RTLAB环境下, 依据东北某地区气象数据, 搭建含改进控制策略的风光储联合出力追踪本地负荷仿真模型。仿真结果表明, 文中提出的控制策略能够快速响应本地负荷变化需求, 有效实现了最大化利用风光资源以及平抑出力波动。

关键词: 新能源发电; 风光互补; 储能; 协调控制; 负荷追踪

Research on Compound Control Strategy of Wind/PV/Storage Hybrid Power Generation System

ZHANG Mingli¹, WANG Lu², XU Jianyuan², FENG Ruming², SHI Zhe¹, ZHANG Xiaotian¹

(1. Planning Review Center of State Grid Liaoning Economic Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. School of Electrical Engineering of Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Due to the volatility and uncertainty of new energy power generation, it cannot combine the load variation and grid power need of the location around in the power grid peak shaving. And there are a plenty of abandoned wind and photovoltaic power. So, in this paper, a control strategy of wind/PV/storage hybrid power generation system is proposed, based on the operating characteristics of wind and photovoltaic systems and charge-discharge power control function of energy storage unit. Based on RTLAB, according to the meteorological data of a region in Northeast China, the simulation model of wind/PV/storage hybrid system for tracking local load power is established. The simulation result shows that the compound control strategy could quick response the demand of local load power change while it realizes the most effective use and stabilizes the powers fluctuations of wind and photovoltaic power.

Key words: new energy power generation; wind-photovoltaic hybrid; storage system; coordination control; load tracking

0 引言

以风力发电和光伏发电为代表的新能源正逐步成为中国重要的电力能源资源^[1], 然而, 风电、光伏发电都具有随机性、波动性和间歇性的特点, 这些特点决定了其发电特性不具备常规电源的稳定性, 大大增加了源网、源与本地负荷调度控制的难度。单一设备的运行控制技术已经比较成熟, 尤其针对风光能源利用的最大功率追踪控制研究较

多, 已提出扰动观测法、增量导纳法等多种控制策略^[2], 而如何充分利用储能设备, 配合风光互补发电系统, 切实减少采用单一资源出力波动和不确定的问题, 提高系统的性价比与供电可靠性成为研究热点。

文[3]分析了风力发电系统和光伏发电系统的资源互补性; 文[4-6]详细介绍了国外在光伏电站和风电场侧配置寿命长、可靠性高的电池储能装置的工程实例; 文[7-9]详细介绍了采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统最大功率点跟踪算法和光伏阵列最大功率点跟踪控制方法; 文[10-13]介

绍了风光发电系统功率追踪和能量管理等控制策略,但是以上文献都没有针对迎合本地负荷需求,利用蓄电池储能设备调和风光互补系统出力控制做出相关研究,为此文中在RTLAB环境下,依据东北某地区气象数据,搭建风光储联合出力追踪本地负荷仿真模型,针对如何快速响应本地负荷变化需求,有效地实现风光资源的最大利用和平抑出力波动进行了研究工作。

1 响应本地负荷的联合发电系统搭建

文中所述响应本地负荷的风光储联合发电系统结构见图1。其中由直驱型风力发电系统、光伏

发电系统、蓄电池储能设备、直流负荷和交流负荷及系统驱动电路和控制器组成。直流升压变换器和逆变变流器实现了系统中交直流负荷的独立接入和系统内能量分配管理,其控制器根据风光系统实际运行状态及负载和能量系统电压变化情况,实现对风光子系统模式的调节,确定系统各部分的最大功率追踪控制、负载跟踪控制等,而蓄电池作为储能设备利用其快速的充放电能力,对风光系统处理进行平抑,尽量消除由于天气等原因引起能量供应和需求的不平衡^[2],在整个系统中起到能量调节和平衡负载。

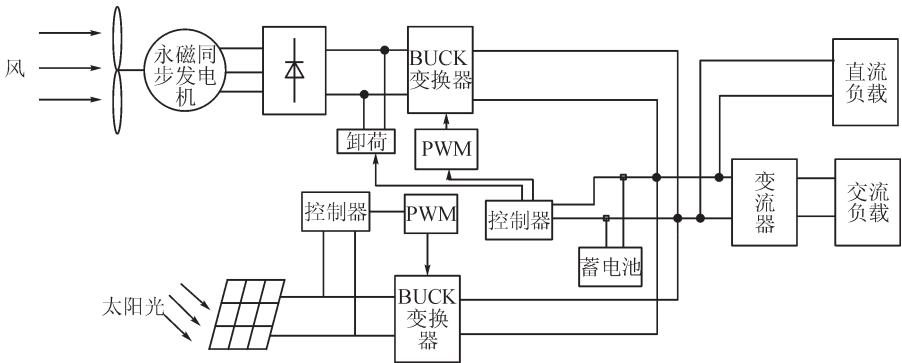


图1 响应本地负荷的风光储联合发电系统结构框图

Fig. 1 The structure diagram of wind/PV/storage hybrid power generation system in responded local load demand

1.1 光伏发电单元

光伏电池的电流随光照变化而变化。对PV进行分析时,可以分析它的等效电路,光伏电池可以等效成电流源与一个二极管的反并联,串联电阻等效损耗,并联电阻等效电池边沿的漏电^[14-15],见图2。PV的等效电路计算见式(1)。

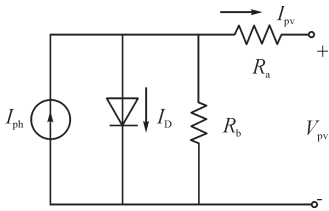


图2 光伏电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of photovoltaic

$$I_{pv} = I_L - I_0(e^{\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_a)}{nkT}} - 1) - \frac{U_{pv} + I_{pv}R_a}{R_b} \quad (1)$$

式(1)中: I_{ph} 和 q 分别为光生电流和电子电荷; I_0 是反向饱和电流; A 是常数因子; T 是绝对温度; k 是波尔茨曼常数; R_a 是串联电阻。光伏单元电流 I_{pv} 与光伏电池电压 U_{pv} 之间的关系为

$$I_{pv} = I_{sc} \left[1 - C_1(e^{\frac{U_{pv} - DI}{C_2 U_{oc}}} - 1) \right] + DI \quad (2)$$

式(2)中,
$$\begin{cases} C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}})e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}} \\ C_2 = (\frac{U_m}{U_{oc}} - 1) / \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \\ DV = -\beta \cdot DT - \alpha \cdot DI \\ DT = T - T_{ref} \\ DI = \alpha \cdot \frac{Q}{Q_{ref}} \cdot DT + (\frac{Q}{Q_{ref}} - 1) \cdot I_{sc} \end{cases}$$

其中: α 、 β 分别为电流和电压温度系数; T_{ref} 、 T 分别为参考温度以及工作温度; Q_{ref} 、 I_{sc} 分别为参考日照强度和短路电流; U_{oc} 为开路点的电压; U_m 指的是MPP电压; I_m 指的是MPP电流。

文中以无锡某公司的STP135D-1 2/TEA光伏组件为例,3块光伏组件串联构成光伏阵列,光伏阵列在标准测试条件下(光照强度=1 000 W/m²,温度=25 ℃)的出厂参数见表1。总功率为405 W。通过式(2),在RTLAB搭建光伏电池仿真模型,见图3。

表1 光伏阵列参数

Table 1 The parameters of photovoltaic array

名称	U_m/V	I_m/A	U_{oc}/V	I_{sc}/A	$\alpha/(^\circ C)$	$\beta/(^\circ C)$
数值	52.500	7.710	66.900	8.200	-0.340	0.045

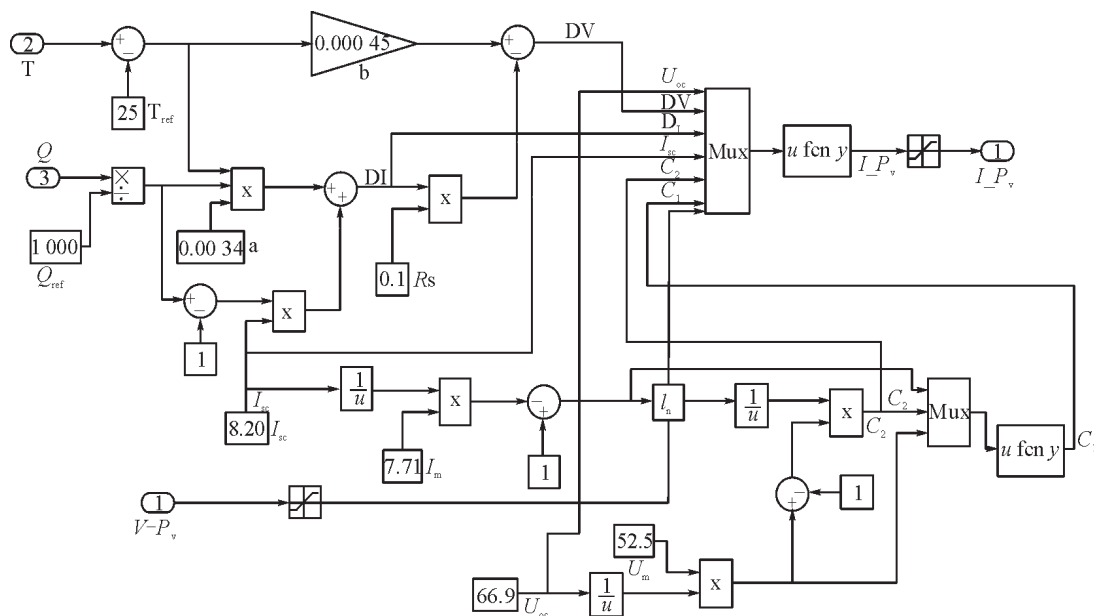


图3 RTLAB平台上光伏电池模型

Fig. 3 The model of photovoltaic cells in RTLAB

1.2 风力发电单元

文中以风力机型号FD4-1/8型1 kW风力发电机参数为基础,采用RTLAB直驱型风力发电机及其控制系统模型,根据风力机的空气动力学可知,风力机的输入功率为

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (3)$$

式(3)中: ρ 为空气密度; v 为风速; R 为风力机叶片的半径; A 为风力机叶片迎风扫掠的面积。而风力机实际输出的机械功率为

$$P_o = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (4)$$

式(4)中: P_o 为机械功率; C_p 为风能利用系数。风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数。其中,叶尖速比 λ 是风轮叶尖速度和风速的比值,可表示为

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{2\pi R n}{v} \quad (5)$$

调试系统风力发电单元,模型通过合理设置参数可以真实的模拟永磁同步发电机的特性。其中,以实测风速作为输入,可以得到转矩和机械功率的输出,风力机仿真模型见图4。

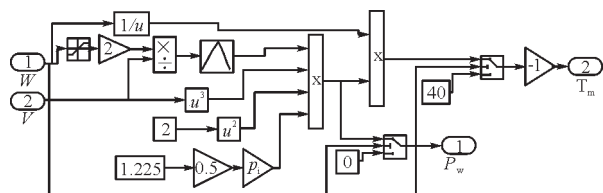


图4 RTLAB平台上风力机仿真模型

Fig. 4 The model of wind power generator in RTLAB

1.3 蓄电池储能单元

常用的蓄电池模型有Thevenin模型、Shepherd模型、三阶动态模型等。文中采用考虑了内阻,忽略了某些电化学反应的Bess数学模型,见式(6)。具体参数是:4个额定容量为200 Ah,额定电压为12 V的铅酸蓄电池串并联组成24 V,400 Ah的铅酸电池。对应的仿真模型见图5。

$$\begin{cases} U_c = E_{OC} + I_c R_B \\ E_{OC} = U_F + b \log(SOC) \\ SOC = SOC_0 + \frac{Q}{BC} \\ Q = \int_0^t I_c dt \\ R_B = R_{\text{electrode}} + R_{\text{electrolyte}} \\ R_{\text{electrode}} = r_1 + r_2(SOC) \\ R_{\text{electrolyte}} = [r_3 - r_4(SOC)]^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: I_c 为充电电流; r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 为经验常数; U_F 为充满电时端电压; b 为经验常数; U_c 为端电压; E_{oc} 为开路电压; SOC 为荷电状态,表征储能电池的充放电的程度; Q 是电量; R_B 为内阻,包含浓差极化电阻 $R_{\text{electrode}}$ 和电化学电阻 $R_{\text{electrolyte}}$ 2个部分。满充电状态下的蓄电池放电时间为 5.5×10^4 s。

2 联合发电系统复合控制策略研究

2.1 联合发电系统复合控制策略

文中所述风光储联合发电系统受自然条件和负荷需求影响而改变工作状态,以保障最大功率发电和追随负荷变化响应为前提,以此提高能源利用

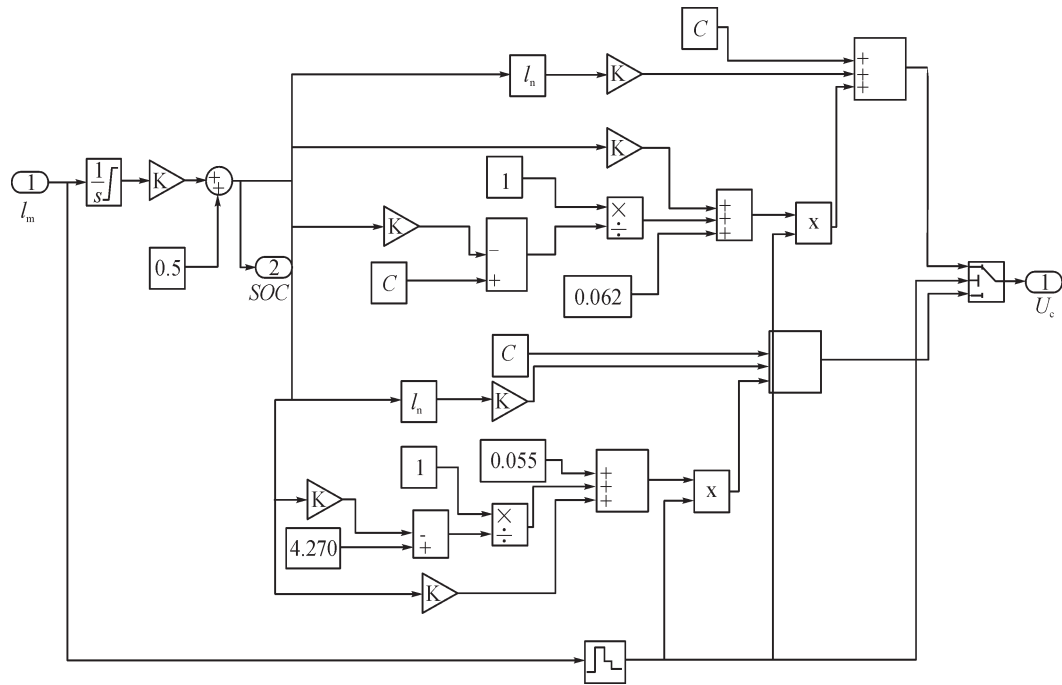


图5 RTLAB平台上蓄电池仿真模型
Fig. 5 The model of storage battery in RTLAB

效率,实现联合发电系统复合控制,具体见图6。

在风速和光照强度发生变化时,系统的负载功率 P_l ,光伏阵列功率 P_{pv} ,风力机功率 P_w ,蓄电池可以接受最大功率 $P_{c\max}$ 之间的关系也发生变化,根据系统中 P_l 、 P_{pv} 、 P_w 、 $P_{c\max}$ 的不同工况下的关

系,系统的工作模式见表2。

为了实现快速响应本地负荷变化需求,实现风光资源的最大利用和出力的波动平抑,文中所提联合发电系统复合控制策略具体包括:最大功率跟踪控制单元、本地负荷需求跟踪控制单元和蓄电池充放电控制单元。

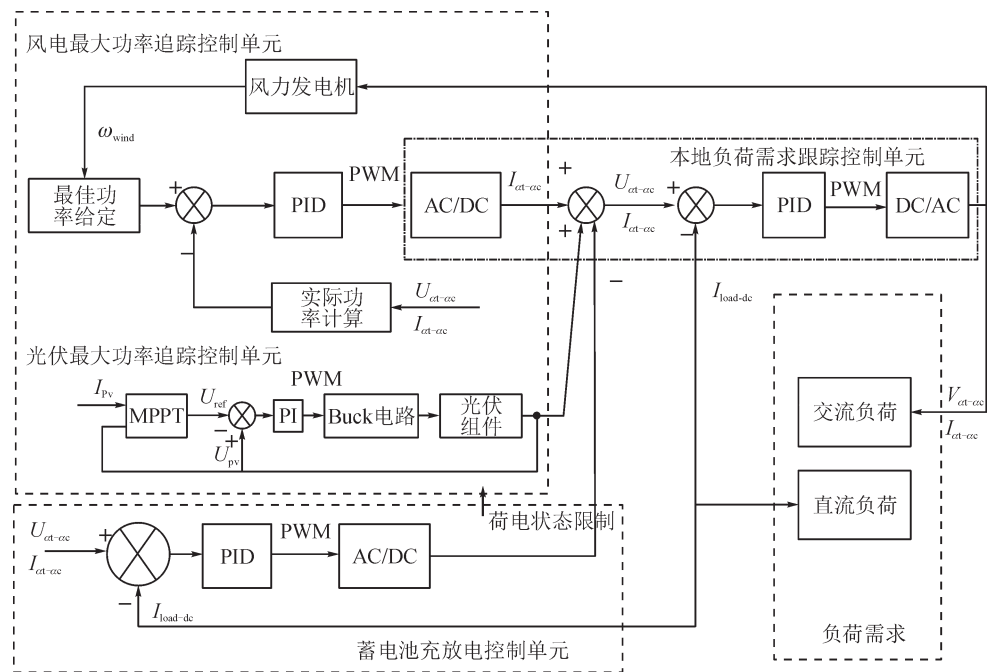


图6 风光储联合发电系统复合控制结构框图

Fig. 6 The structure diagram of compound control strategy for wind/PV/storage hybrid power generation system

表2 联合发电系统运行状态

Table 2 Operating state of Hybrid power generation system

工作状态	气象条件	系统功率关系	辅助约束条件	风力子系统	光伏子系统	蓄电池
1	有风有光	—	—	LPPT	MPPT	充电
2	有风无光	$P_w + P_{pv} - P_l > P_{c\max}$	—	MPPT	停	充电
3	有光无风		—	停	LPPT	充电
4	有风有光	$0 < P_w + P_{pv} - P_l < P_{c\max}$	—	MPPT	MPPT	充电
5	有风无光		—	MPPT	停	充电
6	有光无风	—	—	停	MPPT	充电
7	有风有光	—	—	MPPT	MPPT	放电
8	有风无光	—	$U_c > U_{diset}$	MPPT	停	放电
9	有光无风	$P_w + P_{pv} - P_l < 0$		停	MPPT	放电
10	无风无光		$U_c < U_{diset}$	停	停	切除负载
11	有风	—	$\omega > \omega_{\max}$	卸荷	—	—

2.2 风力发电单元最大功率跟踪

通过 β 和 λ 计算风力机的功率系数 C_p ,最优叶尖速比和功率系数分别为5.9和0.44。风力发电单元通过最大功率跟踪方式来提高捕获风能,通过控制风机转速向最佳风速进行转化。通过实测风机转速可以计算得到最佳尖速比^[8]。对于风力机在最佳叶尖速比 λ_{opt} 时对应最佳风能利用系数 C_{pmax} ,最大的功率输出为 $P_{max} = k\omega^3$,其中:

以此作为风机最大输出功率控制环节的实时功率给定值,与风力发电系统实时输出功率比较,功率偏差经PID控制器计算获得变流器开关脉冲信号,通过调节开关闭合导通时间,使得系统输出跟随输入设定,实现系统的随动控制,其控制结构见图7。

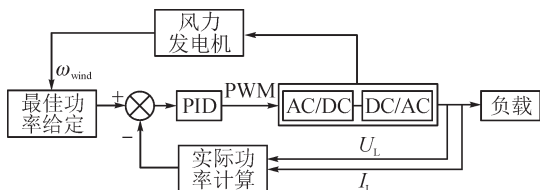


图7 风力发电最大功率跟踪控制结构图

Fig. 7 The structure diagram of maximum power tracking control of wind power

在最大功率跟踪控制过程中,以电流内环和电压外环的双闭环结构实现PID调节其的控制,其中电压外环的给定输入由有功功率偏差计算得到,电流内环的输入由电压偏差计算得到,电流内环的目标是实现功率的快速跟踪,而电压外环的控制目标是确保系统输出的功率因素和系统电压稳定。

2.3 光伏发电单元最大功率跟踪控制

在光伏发电系统中,由于太阳能电池的光电转换效率比较低,输出功率随着外界环境(温度、光强)的变化而变化,若要保证整个系统的效率必须进行

最大功率跟踪控制,使输出功率为最大功率。光伏最大功率跟踪控制框图见图8。

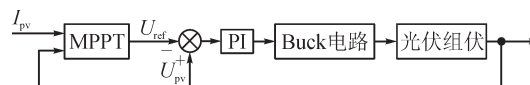


图8 光伏阵列最大功率跟踪控制框图

Fig. 8 The structure diagram of maximum power tracking control of photovoltaic cells

光伏发电系统的本质是电流源,其最大功率跟踪实现依托于对升压电路输出电流的实时控制,通过实时监测系统电压和光伏阵列实时输出电流值计算得到系统实际输出功率,通过计算功率对电压的偏导数获得控制方向,以电压偏差经PI调解器,生产PWM信号控制升压电路,最终实现光伏阵列的最大功率点跟踪控制。其中,控制方向的判断采用增量电导法^[16-17],以光伏阵列输出特性曲线为依据,原理图见图9。

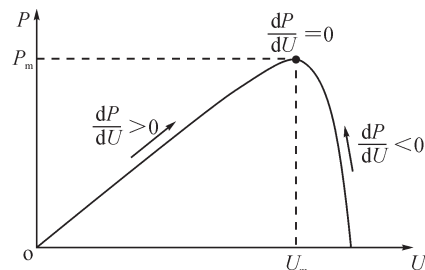


图9 增量电导法原理图

Fig. 9 Schematic diagram of incremental conductance

通过比较 dI/dU 和 $-I/U$ 的大小,确定光伏阵列当前工作点与最大功率点的位置关系,从而判断跟踪方向。当 $dI/dU \leq -I/U$ 时,工作点在最大功率点右侧,反之左侧,始终保持工作点向极致点运动即可实现系统的最大功率跟踪控制。

2.4 本地负荷功率跟踪控制

由于风电、光伏、本地负荷的变化具有随机性、波动性,风光系统在一定程度上能够互补,但本地负荷的变化很难满足电网对风光复合系统的稳定性要求,因此为确保系统的输出能量与负荷所需求的能量相匹配,采用蓄电池储能系统实时调控系统功率分配,采用本地负荷功率的跟踪控制的实现基于负荷母线电流实时监控,即控制负荷电流。本地负荷功率跟踪控制图见图 10。

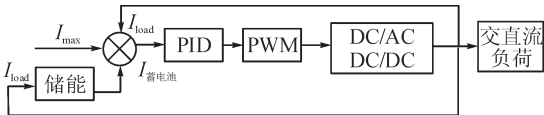


图 10 本地负荷功率跟踪控制图
Fig. 10 Diagram of load power tracking control

负荷母线电流实时数据同时作为电源变流器(风机变流器和光伏升压变换器)和储能变流器输入

信号,经PID控制器产生PWM信号,控制开关器件,其中电源变流器根据蓄电池荷电状态及负荷需求判断输出分配,储能变流器配合电源变流器,切换蓄电池充放电状态,使负荷母线电流始终迎合负荷需求。

2.5 储能系统单元充放电控制

由于风能和太阳能具有不稳定性,结合小型风光互补发电系统的特点,文中提出采用改进三段式充电方法,见表 3。流程图见图 11。

表 3 三段式充电方法状态

Table 3 The states of three-stage charging method		
SOC 状态	电池状态	充放电过程
>98%	蓄电池充满电	涓流充电
	若 $U_c > U_{set}$	恒压充电
$10\% < SOC \leq 98\%$	若 $U_c < U_{set}$	风力、光伏对蓄电池实行 MPPT 充电
<10%	蓄电池过放	切断蓄电池

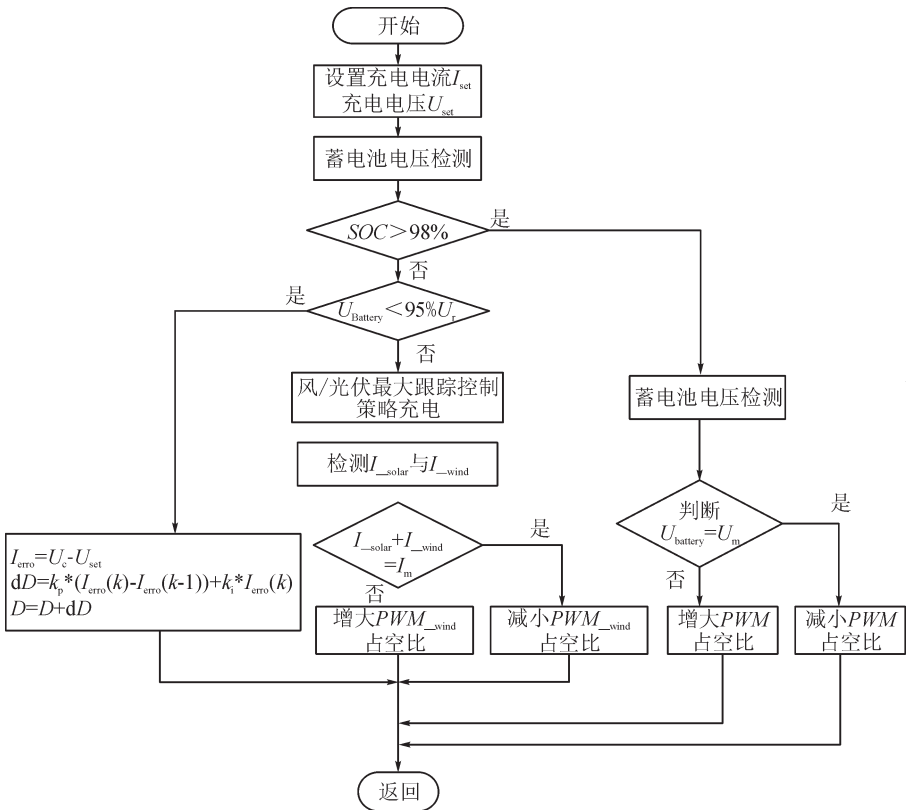


图 11 改进三段式充电主程序流程图
Fig. 11 Flow chart of the main program of improved three-stage charging

3 复合控制策略下本地负荷响应仿真分析

3.1 联合发电系统复合控制仿真平台搭建

根据前述,在 RTLAB 环境下建立对应的仿真模型,见图 12。风速、光照数据来自东北某地区实际气象数据。风力机型号为 FD4-1/8 型。光伏组件总

功率为 405 W,蓄电池容量为 400 Ah,交流负载工作电压是 220 V,直流侧电压工作为 24 V。

3.2 复合控制策略下本地负荷响应仿真分析

取东北某地的光强数据和风速数据做成光强模型和风速模型,见图 13。全天输出功率变化曲线见图 14。

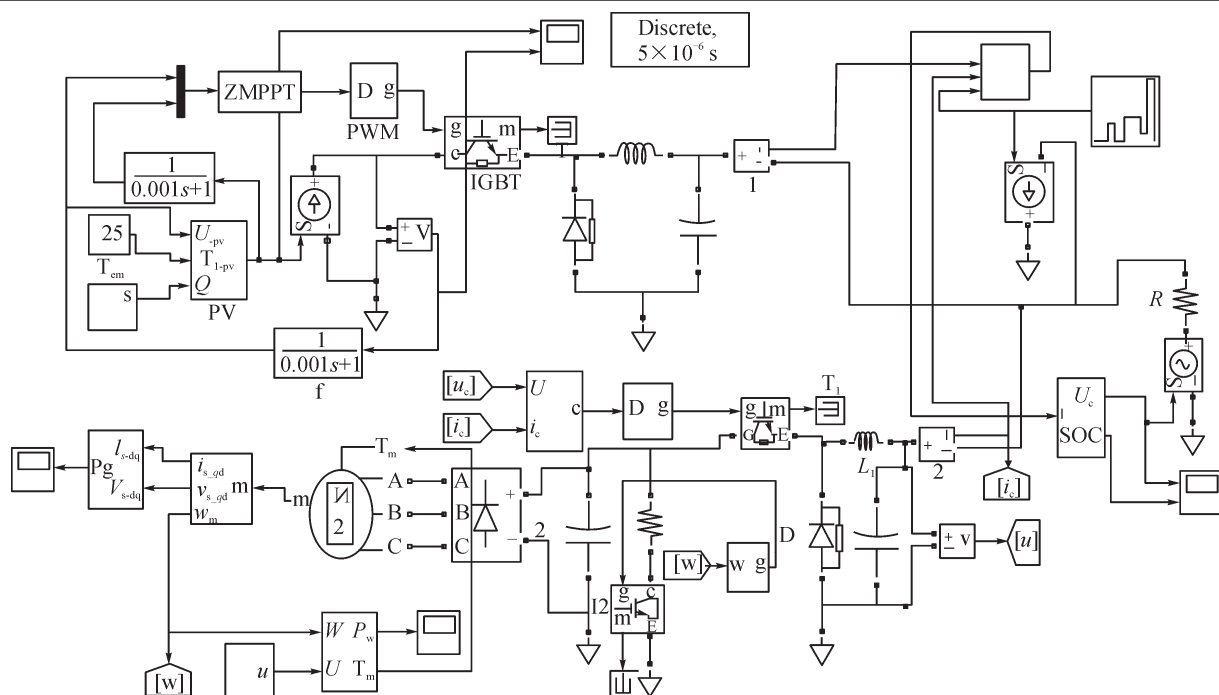


图 12 RTLAB 环境下系统仿真模型

Fig. 12 The model of wind/PV/storage hybrid power generation system in RTLAB

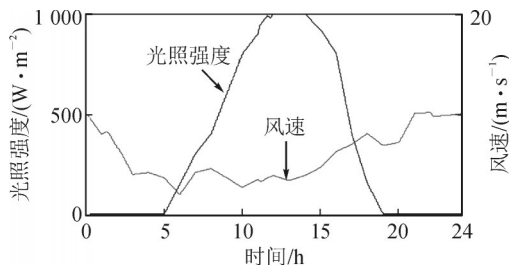


图 13 全日光强和风速

Fig. 13 The curve of light intensity and wind speed

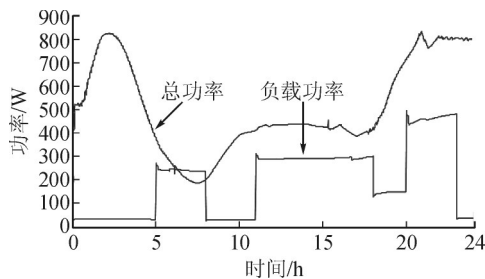


图 15 总功率和负载功率曲线

Fig. 15 Curves of total power and load power

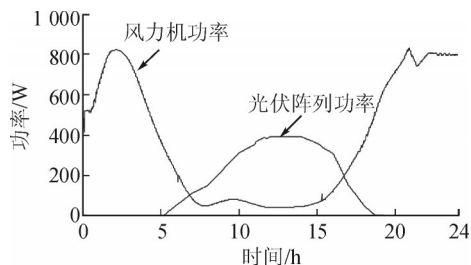


图 14 全天风力机和光伏阵列发出的功率

Fig. 14 The output power of PV and wind generators

观察图 14 可知,光伏系统输出功率追随日照强度变化,风电出力追随风速变化,即光伏子系统和风电子系统同时处于最大功率追踪控制状态,且具有良好的互补性。复合控制策略下,联合发电系统功率输出见图 15。

取东北某地一天之中风速变化值和光照强度变化值作为输入,设定本地负荷全天变化和系统追随负荷变化响应输出总功率如图 15 所示。

由图 15 可以看出,全天中 05:00、08:00 和 20:00 本地负荷成阶跃式突变,尤其 20:00 出现大幅增长,采用储能单元后系统快速响应了负载功率的突变,使得风光储总输出功率平滑。且对比图 14 可知,在负荷大幅度突变情况下,联合发电系统避免了风机低功率输出不能满足负荷需求的问题,有效的实现了风光储互补的功率输出控制,联合发电系统具体工作状态见表 4。由表 4 可知,系统同时实现了快速负荷响应以及新能源功率利用最大化。

表 4 复合控制策略下系统运行状态

Table 4 State of system with compound control strategy

时间	风力机状态	光伏阵列状态	运行保护
0:00-3:00	MPPT(负荷	不工作	超速时进入
20:00-24:00	功率跟踪)		卸荷保护
06:00-18:00	MPPT	MPPT	跟随风速化

蓄电池全天跟随风光系统运行过程端电压和荷电状态变化曲线见图 16、17。由图 16、17 可知,蓄

电池储能单元通过充放电,使联合发电系统对本地负荷的阶跃变化实现快速响应,全天蓄电池充放电性能见表5。由表5可知,蓄电池快速切换工作状态满足风光系统输出变化速度。

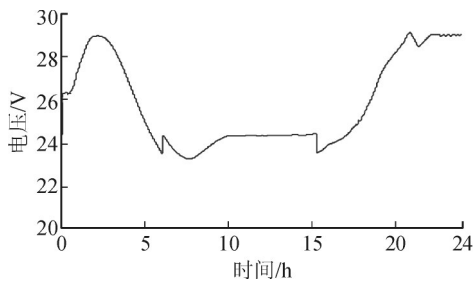


图16 蓄电池端电压

Fig. 16 Voltage curve of storage battery port

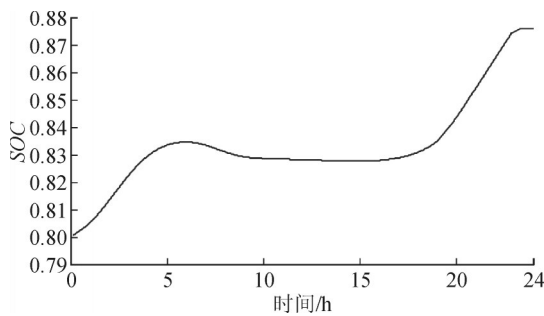


图17 蓄电池荷电状态曲线

Fig. 17 SOC of storage battery

表5 蓄电池充放电状态

Table 5 Operating state of charge and discharge control

时间	负荷/W	SOC 状态	蓄电池充放电状态
0:00-3:00	25	增加	MPPT 充电
03:00-04:00	25	缓慢增加	恒压充电
05:00-07:00	220	SOC 逐渐减小	放电状态
07:00-17:00	330	增加	MPPT 充电 (电量很少)
17:00-20:00	180	显著增加	MPPT 充电
20:00-23:00	800	降低	放电
23:00-24:00	30	增加	充电

4 结语

考虑受自然条件和负荷需求影响而改变工作状态,文中提出了一种风光储联合发电系统的复合控制方法,该方法能够保障最大功率发电和追随负荷变化响应,实现风光储电源功率利用最大化,避免风光发电系统输出不确定性引发的源荷功率不平衡问题,实现根据本地负荷需求和自然气候条件情况,合理调度系统能量以实现快速响应本地负荷需求的功能。通过 RTLAB 环境下搭建联合发电系

统仿真模型,验证了该方法的正确性和可行性,为提高能源利用效率提供参考。

参考文献:

[1] 王皓怀,汤涌,侯俊贤,等. 风光储联合发电系统的组合建模与等值[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34):1-9.
WANG Haohuai, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Composition modeling and equivalence of an integrated power generation system of wind, photovoltaic and energy storage unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34):1-9.

[2] 齐志远,王生铁,田桂珍. 风光互补发电系统的协调控制[J]. 太阳能学报, 2010, 31(5):654-660.
QI Zhiyuan, WANG Shengtie, TIAN Guizhen. Coordination control of wind/PV hybrid system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(5):654-660.

[3] 麻常辉,潘志远,刘超男,等. 基于自适应下垂控制的风光储微网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015(23): 21-27.
MA Changhui, PAN Zhiyuan, LIU Chaonan, et al. Frequency regulation research of wind-PV-ES hybrid micro-grid system based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015(23):21-27.

[4] 王皓怀,汤涌,侯俊贤,等. 潮流计算和机电暂态仿真中风光储联合发电系统的实用等值方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1):1-8.
WANG Haohui, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Equivalent method of integrated power generation system of wind, photovoltaic and energy storage in power flow calculation and transient simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1):1-8.

[5] 施鹏飞. 全球风力发电现状及发展趋势[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(7):3-5.
SHI Pengfei. Present situations and development trends of global wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(7):3-5.

[6] 克劳特. 太阳能发电-光伏能源系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
KRAUTER S. Solar electric power generation-photovoltaic energy system[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

[7] 周林,武剑,栗秋华,等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6):1145-1152.
ZHOU Lin, WU Jian, LI Qiuhua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6):1145-1152.

[8] 李咸善,徐浩,杜于龙. 采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统最大功率点跟踪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015(13):66-71.
LI Xianshan, XU Hao, DU Yulong. Maximum power tracking of wind power generation system using the

- combination of tip speed ratio method and climbing search method[J]. Power System Protection & Control, 2015, 43(13):66-71.
- [9] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2005, 20(4): 963-973.
- [10] 郭成达. 风光互补发电能量转换系统研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- GUO Chengda. Research on system of energy conversion wind/photovoltaic hybrid generation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [11] KARLIS A D, KOTTAS T L, BOUTALIS A. Novel maximum powerpoint tracking method for PV systems using fuzzy cognitive networks(FCN)[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(3-4):315-327.
- [12] 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(4):91-93.
- ZHANG Yu, YU Guoqin, SHI Mingrong, et al. Review of energy storage system[J]. East China Electric Power, 2008(4):91-93.
- [13] 吴斌. 风力发电系统的功率变换与控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.
- WU Bin. Power conversion and control of wind energy system[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [14] 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 system[J]. Power System Technology, 2008 32(7):1-9.
- [15] VALENCIAGA F, PULESTON P F. Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2):398-405.
- [16] CHEN A L, HU T Y. Research of photovoltaic charging system with maximum power point tracking based on DSP[C]// IEEE International Conference on Information and Industrial Electronics.[S.l.]:IEEE, 2011:346-349.
- [17] SALAM A A, MOHAMED A, HARMAN M A. Improved control strategy for fuel cell and photovoltaic inverters in a microgrid[J]. WSEAS Transactions on Power Systems, 2009, 10(4):331-340.
- 张明理(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电网规划及电力系统分析等工作。
- 王璐(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网技术、交直流系统稳定分析。