

DOI: 10.7667/PSPC170389

# 分布式光储微电网系统并网控制策略研究

李江, 张永利, 刘强, 周铁军

(国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 分布式光储微电网系统有效整合了分布式光伏电源和储能单元, 有效改善了分布式光伏电源接入配电网产生的电能质量问题。分析了微电网的研究现状, 给出了分布式微电网系统拓扑结构, 并对分布式光伏电源和储能单元的特性进行了分析。针对分布式光伏微电网系统, 研究了底层装置在并网模式下的控制策略, 并在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型, 验证了底层控制策略的可行性。研究了以削峰填谷为目标的基于模糊算法的能量管理策略, 根据当前所处的用电时段以及储能的 SOC 水平, 确定能量控制策略, 使光储微电网系统的运行成本最低。通过 Matlab 算例验证了该控制策略的有效性。

**关键词:** 微电网; 分布式电源; 储能单元; 削峰填谷

## Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system

LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, ZHOU Tiejun

(Tangshan Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** The Distributed PV-Storage Microgrid System (DPMS) validly integrates the distributed photovoltaic power and energy storage unit and effectively improves the power quality problems when the distributed photovoltaic generation is accessed to the distribution network. This paper analyzes the research status of microgrid system, gives the typology structure of distributed micro-grid, and studies the characteristics of distributed photovoltaic generation and energy storage unit. For DPMS, this paper researches the control strategy of underlying device in grid-connected mode and builds a simulation model in Matlab/Simulink environment, which validates the feasibility of the underlying control strategy. It researches the energy management strategy taking peak load shifting as the goal and basing on fuzzy algorithms. According to the different periods of power consumption and the SOC level of energy storage, it determines the energy control strategy and minimizes the operating cost of the DPMS. The validity of the control strategy is verified by the Matlab numerical example.

**Key words:** microgrid; distributed generation (DG); energy storage unit; peak load shifting

## 0 引言

目前, 随着经济的迅猛发展, 能源消耗与日俱增, 传统能源面临着新的挑战, 世界各国开始重视新能源的开发和相关技术的研究。因此, 光伏电站并网及其接入系统运行特性的研究成为电力行业共同关注的课题<sup>[1-2]</sup>。经过多年的发展, 光伏发电呈现“规模化分散开发、低压接入、就地消纳”的局面, 已经成为较为成熟的一项新能源技术, 但对于光伏电站接入系统产生的安全、稳定和可靠性等问题仍然需要开展深入的研究<sup>[3]</sup>。

分布式光伏电源单机接入成本高, 控制复杂, 其发电随机性会对电网系统的电压和频率造成较大

的冲击。将储能单元引入分布式光伏发电从而组成光储微电网系统, 可以有效地解决上述光伏单独接入电网带来的问题<sup>[4]</sup>。

文献[5]提出了一种新型DC/DC变换器的功率调节控制器算法, 使用电压和电流反馈实现最大功率追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)计算; 文献[6]提出了一种区域智能调控系统, 采用分层控制的调节方式, 将光伏监控主站的功率调节任务按照一定的分配算法分配给多个区域智能调控单元; 文献[7]借鉴模糊评价理论, 根据电网中电能质量各指标的特点, 提出了一种最优隶属度方法, 得到量化的微电网电能质量综合评价结果。本文研究了光伏DC/DC变换器、储能DC/DC变换器以及

DC/AC变换器在并网模式下的底层控制策略, 提出针对性的能量管理策略, 在最大限度地利用光伏发电及合理利用储能单元充放电情况下, 利用模糊控制算法实现削峰填谷, 保证电网的安全、稳定。

## 1 分布式光储微电网结构

本文采用共直流母线方式的分布式光储微电网系统, 系统主要包括分布式光伏发电单元、储能单元、电压定向矢量控制单元、主控制系统和负荷单元<sup>[8-10]</sup>。其拓扑结构如图 1 所示。

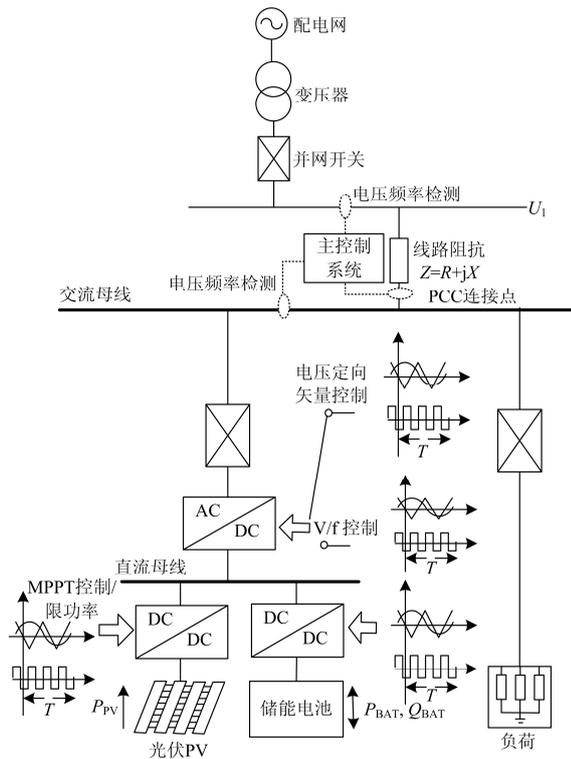


图 1 分布式光储微电网拓扑结构图

Fig. 1 Typology structure of distributed PV-storage microgrid system

其中, 储能单元 DC/DC 变换器工作于单电流环控制模式, 可控制储能单元电流的输入、输出, 从而控制储能的充放电; 光伏发电单元 DC/DC 变换器为了最大限度地利用太阳能清洁能源, 增加微电网的经济化效益, 始终保持工作在 MPPT 模式下; 交流母线通过双向 DC/AC 变换器与直流母线相连, 控制系统交流侧和直流侧的能量流动, 交流侧电压有电网作为支撑无需调整, 则其需要稳定直流母线电压, 因此 DC/AC 变换器采用电压定向矢量控制, 同时控制变换器功率的输入、输出。

主控制系统负责检测采集各节点电压、电流、频率、储能 SOC 和温度等参数, 经过计算处理, 对

各个底层控制单元下达控制指令。同时通过能量管理策略实现能量的最优化管理。

### 1.1 光伏发电的特性分析

影响光伏电池输出特性的因素主要有工作温度和光照强度, 而且其输出特性曲线呈非线性变化。当温度和光照强度发生变化时, 最大功率跟踪控制 (MPPT) 根据对阵列当前电压和电流的检测, 计算当前阵列输出功率, 再通过与前一段时间的阵列输出功率进行比较, 保留最大值, 通过不断检测, 筛选出最优值, 最终使阵列工作在最大功率点<sup>[11]</sup>。

根据在 Matlab/Simulink 搭建的光伏组件模型, 得到光伏电池板在不同条件下的输出特性, 如图 2 所示。

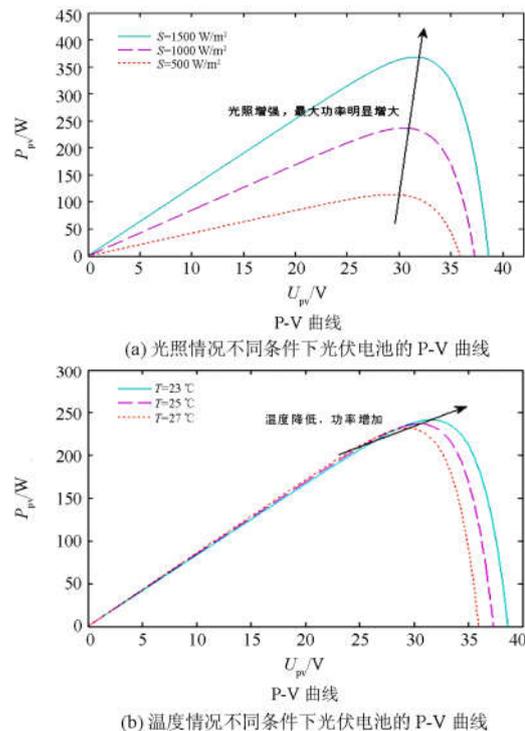


图 2 光伏电池板在不同条件下的输出特性

Fig. 2 Output characteristics of the photovoltaic cell under different conditions

对光伏电池板在不同条件下的输出特性进行分析, 可知光伏电池的输出特性如下:

1) 光伏电池的开路电压与温度成反比, 而短路电流受其影响不明显;

2) 对 P-V 曲线分析可知, 在光照强度和温度一定的情况下, 其输出功率会在某个电压值附近达到最大即最大功率点 (Max Power Point, MPP), 该点随光照强度上升而增大, 随温度上升而减小。

### 1.2 储能单元的特性分析

储能单元通过电力电子设备实现储能与微电网之间的能量交换，在大电网出现故障的情况下可作为备用电源对重要负荷供电。储能单元能稳定分布式光伏电源输出，平抑光伏发电波动性，柔化光伏发电的出力曲线，实现削峰填谷，保证电能质量。

对于分布式光伏电源而言，可根据不同应用需求灵活配置响应速度快、不受地理等外部条件限制的新兴储能装置来构成储能单元<sup>[12]</sup>。锂离子电池储能装置以价格便宜、构造成本低、可靠性好和技术成熟的优势，已广泛应用于电力系统微电网中。

## 2 分布式光储微电网系统并网控制策略

对分布式光储微电网系统并网模式下运行控制策略进行研究，包括底层装置控制策略和顶层能量管理策略<sup>[13-15]</sup>。如图3所示，底层控制策略主要研究储能DC/DC变换器、光伏DC/DC变换器以及DC/AC变换器在并网模式下的控制策略。顶层能量管理策略则针对并网模式下，控制储能单元输入输出功率达到平抑光伏发电波动的效果，保证分布式光储微电网系统正常运行的情况下提升微电网的经济效益<sup>[16]</sup>。

### 2.1 分布式光储微电网底层控制策略

光伏DC/DC采用MPPT双环控制，储能DC/DC

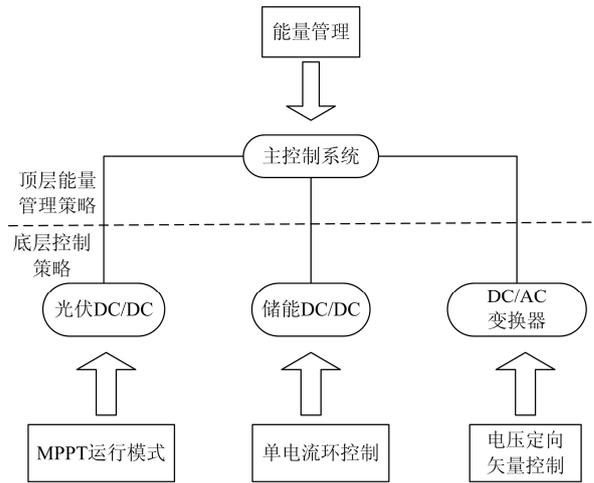


图3 分布式光储微电网系统并网模式运行控制策略

Fig. 3 Control strategy of distributed PV-storage microgrid system on grid connected mode

变换器采用单电流环控制，二者输入输出的变化会引起直流母线电压的波动。直流母线电压根据双向DC/AC变换器的额定功率确定，并采用双闭环控制保证其电压恒定，因此本文设直流母线额定电压为650V。配电网为交流侧母线提供稳定的电压和频率支撑，其中交流母线电压为380V，交流频率为50Hz。光储微电网系统的底层控制策略如图4所示。

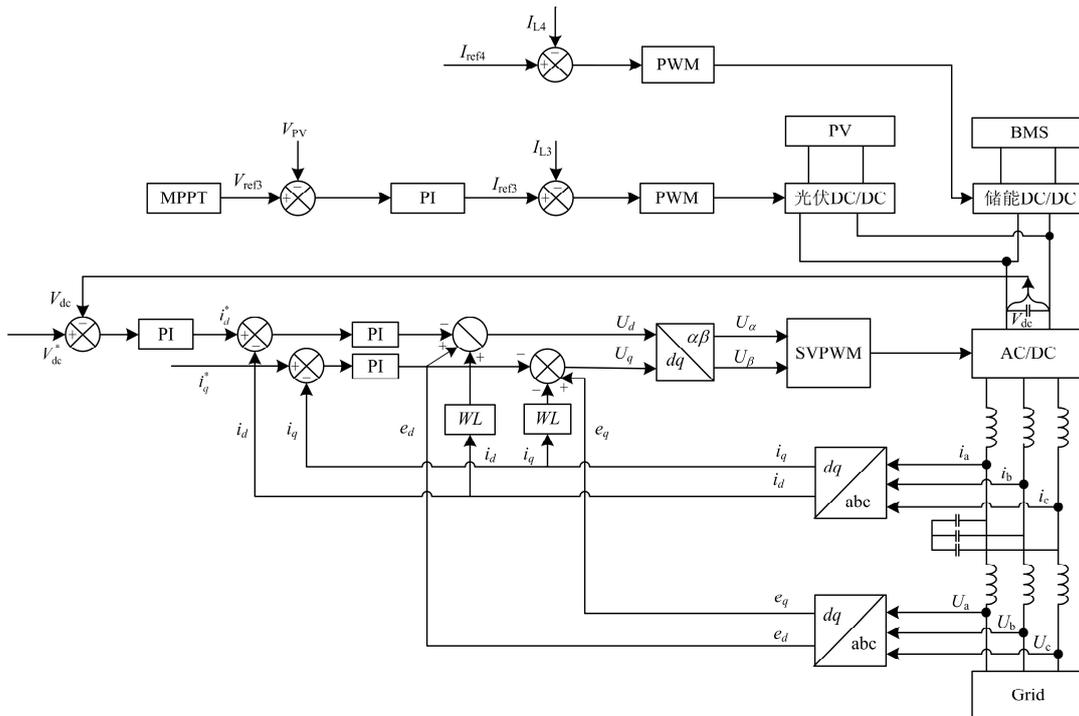


图4 并网底层控制策略

Fig. 4 Underlying control strategy of grid connected mode

## 2.2 光伏 DC/DC 控制策略

并网运行模式下, 分布式光伏单元经光伏 DC/DC 升压后与 650 V 直流母线相连接。电路拓扑结构如图 5 所示。

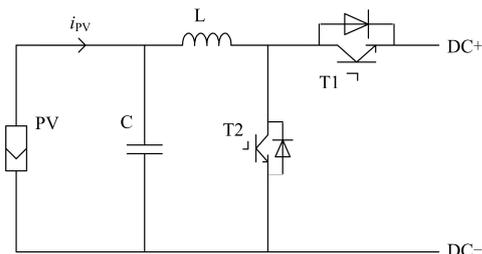


图 5 光伏 DC/DC 电路拓扑结构

Fig. 5 Photovoltaic DC/DC circuit topology

为了实现微电网经济效益最大化, 应该尽可能地利用光伏发电单元, 保证其始终工作在 MPPT 模式下, 光伏 DC/DC 采用电压外环电流内环的双环控制, 通过不断调节光伏阵列的输出电压, 使其始终运行在 P-V 特性曲线最大功率点处, 实现 MPPT。光伏 DC/DC 控制模块原理如图 6 所示。

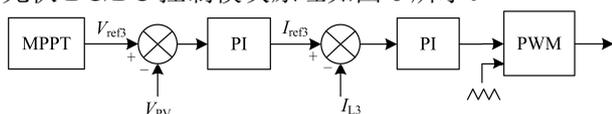


图 6 光伏 DC/DC 控制模块

Fig. 6 Photovoltaic DC/DC control module

图中:  $V_{pv}$  为光伏反馈电压, 由主控制系统采集得到;  $V_{ref3}$  为光伏电压给定值, 其值大小决定光伏输出大小;  $I_{ref3}$  为光伏电流给定值;  $I_{L3}$  为光伏电流反馈值。利用光伏阵列的输出电压和输出电流, 经过 MPPT 算法得到光伏阵列最大功率点输出电压的参考值, 将其与光伏阵列输出电压的实际值之间的误差经 PI 调节后与三角波比较, 从而产生 PWM 信号。

## 2.3 并网模式下储能 DC/DC 控制策略

储能单元经储能 DC/DC 变换器后与直流母线相连接。电路拓扑结构如图 7 所示。

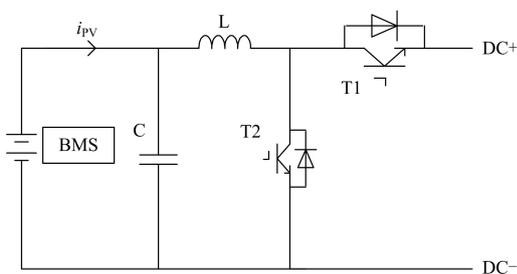


图 7 储能 DC/DC 电路拓扑结构

Fig. 7 Energy storage DC/DC circuit topology

储能 DC/DC 工作在恒流模式下, 单电流环控制储能系统输入和输出功率, 根据响应系统的信号, 实现能量的双向流动, 其储能控制原理如图 8 所示。

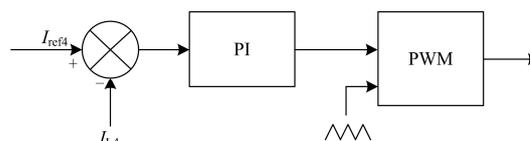


图 8 储能 DC/DC 控制模块

Fig. 8 Energy storage DC/DC control module

图中:  $I_{ref4}$  为储能电流给定值, 其大小决定了储能单元输出功率的大小,  $I_{ref4}$  为正时, 储能单元将处于发电状态,  $I_{ref4}$  为负时, 储能单元将处于充电状态;  $I_{L4}$  为反馈值。DC/DC 变换器采用单电流环的控制, 通过不断调节储能的输入输出电流, 使其输出电流期望值。利用采样得到的储能输出电流, 将其与给定值之间的误差经 PI 调节后与三角波比较, 从而产生 PWM 信号。

## 2.4 并网模式下 DC/AC 变换器控制策略

在微电网中, DC/AC 变换器采用三相电压型变换器, 其直流侧与直流母线相连接, 交流侧经滤波电路与 PCC 点连接。其电路拓扑如图 9 所示。

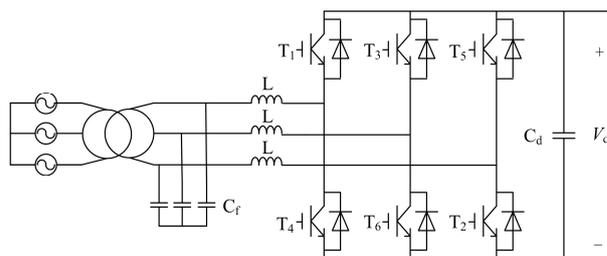


图 9 三相电压型变换器拓扑

Fig. 9 Circuit topology of three-phase voltage source converter

并网状态下, 交流侧电压由电网提供支撑, 则 DC/AC 需要稳定直流母线电压, 同时控制整个系统的输出电流。其控制模块如图 10 所示。

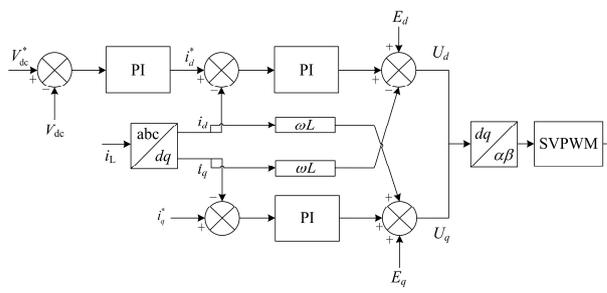


图 10 DC/AC 控制模块

Fig. 10 DC/AC control module

图中： $V_{dc}^*$  为直流电压给定值； $V_{dc}$  为直流母线电压反馈值； $i_d^*$  为交流电流给定值； $i_d$  为交流电流在  $d$  轴的投影， $i_q$  为交流电流在  $q$  轴的投影。误差信号为直流电压的给定值  $V_{dc}^*$  与采样值  $V_{dc}$  作差，经过 PI 的比例积分环节后的输出作为有功电流  $i_d^*$  的指令；电流内环的有功电流和无功电流单独控制。根据 SVPWM 调制策略，得到  $U_d$ 、 $U_q$  指令后，通过脉宽调制，计算每个开关管动作时间，产生相应的开关信号，实现 DC/AC 变换器并网控制。

在 Matlab/Simulink 环境下搭建 DC/AC 变换器仿真模型，通过仿真得到直流母线电压波形如图 11 所示。

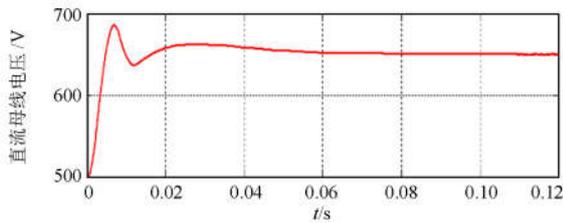


图 11 直流母线电压仿真结果

Fig. 11 Simulation results of DC bus voltage

根据仿真结果可知，DC/AC 变换器将直流母线电压稳定在 650 V，说明其控制策略有效。

### 3 经济性能调度下的削峰填谷模糊控制策略

分布式光储微电网系统在保证安全稳定并网运行时，充分发挥储能单元的作用，使大电网的负荷曲线变得相对平滑，通过能量管理达到经济最优化。根据当前所处的用电时段以及储能的 SOC 水平，确定能量调度策略，还加入了储能单元的放电罚函数，保证储能单元能够保存一定的电量来应对大电网故障等突发状况造成的离网运行模式<sup>[17-19]</sup>。最后利用仿真证明了所使用策略的有效性和可行性。

#### 3.1 模糊控制算法

模糊控制就是利用模糊数学的基本思想和理论的控制方法。在传统的控制领域里，控制系统动态模式的精确与否是影响控制优劣的最主要因素，系统动态的信息越详细，则越能达到精确控制的目的。传统的控制理论无法实现过于复杂或难以精确描述的系统，因此尝试以模糊数学来处理这些控制问题。

#### 3.2 基于光储微电网系统的削峰填谷模糊控制策略

在光储微电网系统中，分布式光伏的发电量、储能单元的容量和微电网内负荷均是变量，因此采用模糊控制的理论对光储微电网系统进行能量管理，得到一个最优的经济化能量调度方案。

当光储微电网中分布式光伏输出的总功率大于总负荷与储能单元可用充电容量时，光储微电网向配电网输送电能；当光储微电网中分布式光伏与储能单元可用放电容量的总功率小于总负荷时，混合微电网从电网汲取电能。光储微电网对外输送或汲取电能由交流母线电压的抬升或下降自动实现。此时，配电网为交流母线提供电压支撑，光伏发电以最大功率输出，储能设备起“削峰填谷”作用。

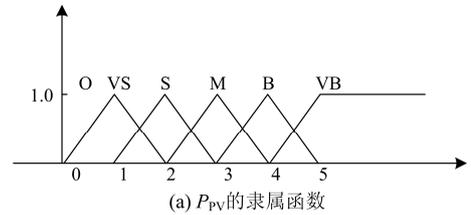
模糊控制有 3 个模糊变量：1)  $E_{PV}$  为分布式光伏预测发电量；2)  $SOC$  为储能单元荷电状态(剩余容量)；3)  $E_{BAT}$  为储能单元实际输出电量。其中， $E_{PV}$ 、 $SOC$  设置为输入变量， $E_{BAT}$  设置为输出变量。

将  $E_{PV}$  论域划分为 6 档 {0,1,2,3,4,5}，词集选用 {O, VS, S, M, B, VB}。

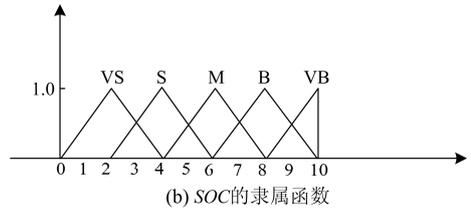
将  $SOC$  论域划分为 11 档 {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}，词集选用 {VS, S, M, B, VB}。

将  $E_{BAT}$  论域划分为 7 档 {3,2,1,0,1,2,3}，词集选用 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}。

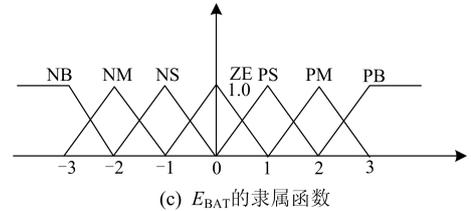
隶属函数如图 12 所示。



(a)  $P_{PV}$  的隶属函数



(b)  $SOC$  的隶属函数



(c)  $E_{BAT}$  的隶属函数

图 12 隶属函数

Fig. 12 Subordinate function

光储微电网系统能量管理优化的目标是经济效益最大化的同时起到一个削峰填谷的作用，因此在制定控制策略时需要考虑电价和用电的峰谷时段<sup>[20]</sup>。研究对象在峰、平、谷三个时段所对应的时刻和电价如表 1 所示。

表 1 峰平谷电价

Table 1 Peak level valley electricity price

时段	时刻	电价/(元/kWh)
谷	23:00—7:00	0.41
平	7:00—8:00、11:00—18:00	0.66
峰	8:00—11:00、18:00—23:00	0.91

因此, 基于模糊算法的能量调度策略是: 电价低谷时段, 储能单元从大电网购买电量, 待用电高峰时段再将电量卖给电网, 取得经济利益的同时, 也起到了一定的削峰填谷作用。平电价时段, 若光伏发电功率超过微电网内负荷, 光储微电网系统在给微电网内负荷供电的同时, 将多余电量卖给大电网, 实现能量调度。

模糊控制策略如图 13 所示。

		SOC				
		VS	S	M	B	VB
$E_{pv}$	O	NS	ZE	PS	PM	PB
	VS	NS	ZE	ZE	PS	PM
	S	NS	ZE	ZE	ZE	PS
	M	NS	ZE	ZE	ZE	PS
	B	NS	ZE	ZE	PS	PM
	VB	NS	ZE	PS	PM	PB

(a) 高峰时段控制策略

		SOC				
		VS	S	M	B	VB
$E_{pv}$	O	NM	NS	ZE	PS	PM
	VS	NM	NS	ZE	ZE	PS
	S	NM	NS	ZE	ZE	ZE
	M	NM	NS	ZE	ZE	ZE
	B	NM	NS	ZE	ZE	PS
	VB	NM	NS	ZE	PS	PM

(b) 平时段控制策略

		SOC				
		VS	S	M	B	VB
$E_{pv}$	O	NM	NM	NS	NS	NS
	VS	NM	NM	NS	NS	NS
	S	NM	NM	NS	NS	NS
	M	NB	NM	NS	NS	NS
	B	NB	NM	NS	NS	NS
	VB	NB	NM	NS	NS	NS

(c) 低谷时段控制策略

图 13 微电网模糊控制策略

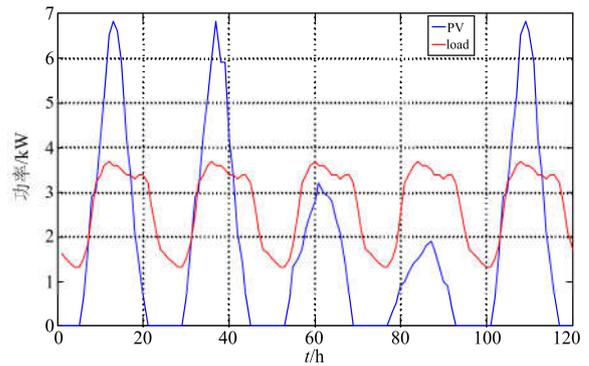
Fig. 13 Fuzzy control strategy of micro-grid

#### 4 算例分析

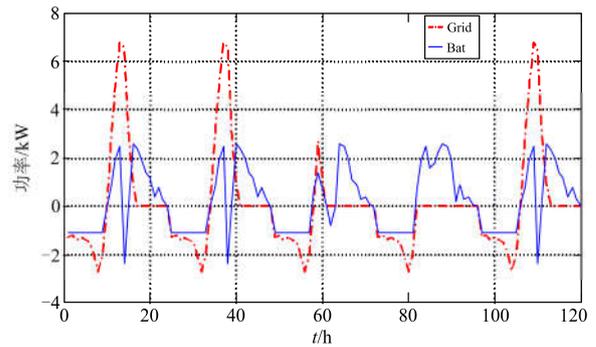
本文以河北省某市分布式光储微电网系统的所采集数据作为实验对象, 进而验证削峰填谷能量调度策略的可行性。分布式光伏阵列的额定发电功率为 10 kW、储能单元为 20 kVA、直流母线额定电压为 650 V, 分布式光储微电网系统由并联共直流母线的储能 DC/DC 和光伏 DC/DC 以及并网 DC/AC

变换器组成。

根据模糊控制策略, 在用电高峰时段, 在保证系统稳定运行的基础上, 充分利用分布式光伏和储能单元发电, 最大化地将所发电能卖给电网, 降低微电网的运行成本, 起到“削峰”作用; 在用电低谷时段, 充分考虑经济性效益, 发挥储能单元的作用, 从电网购电, 为储能单元充电, 起到“填谷”作用。其能量管理模型关于功率的优化结果如图 14 所示。



(a) 光伏和负载功率曲线



(b) 电网功率和储能功率

图 14 能量管理模型优化结果

Fig. 14 Optimization results of energy management model

表 2 为分布式光储微电网系统在能量管理控制策略下与电网之间交换的电能以及经济化运行所得到的利润。从上述能量管理调度策略可以看出, 基于

表 2 运行收益

Table 2 Operating income

	买入电量		卖出电量		收益
	低谷	平段	平段	高峰	
晴天	16.82	0	10.48	52.24	54.46
晴天	15.83	0	11.72	53.67	56.57
阴天	16.64	0	0	20.48	18.64
雨天	16.52	0	0	16.52	15.03
晴天	16.45	0	12.96	54.86	58.47
合计	82.26	0	35.16	197.77	203.18

模糊算法的策略,从微电网系统运行的角度来说,这种能量管理的方法能取得一定的经济效益,也起到了削峰填谷的作用,有效缓解高峰时段用电压力。

## 5 小结

本文研究了分布式光储微电网并网模式下,光伏 DC/DC 变换器、储能 DC/DC 变换器以及 DC/AC 变换器的底层控制策略以保证微电网的不间断供电和安全稳定运行,同时研究了分布式光储微电网系统在经济性调度下的削峰填谷模糊控制策略的能量管理策略,通过 Matlab 仿真验证了策略的有效性。能量管理策略完成了经济效益最优化,同时起到调峰作用,提高了电能质量,为促进分布式光伏电站更好更快地发展提供了理论基础。

## 参考文献

- [1] 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]. Power System Protection and Control, 2007, 31(19): 100-107.
- [2] 周林,黄勇,郭珂,等.微电网储能技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2011,39(7):147-152.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [3] 王守相,王慧,蔡声霞.分布式发电优化配置研究综述[J].电力系统自动化,2009,33(18):110-115.  
WANG Shouxiang, WANG Hui, CAI Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 110-115.
- [4] 吕双辉,蔡声霞,王守相.分布式光伏-储能系统的经济性评估及发展建议[J].中国电力,2015,48(2):139-144.  
LÜ Shuanghui, CAI Shengxia, WANG Shouxiang. Economy evaluation and development suggestions for distributed PV-energy storage system in China[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 139-144.
- [5] 陈树勇,鲍海,吴春洋,等.分布式光伏发电并网功率直接控制方法[J].中国电机工程学报,2011,31(10):6-11.  
CHEN Shuyong, BAO Hai, WU Chunyang, et al. Direct grid-tie power control method for distributed photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 6-11.
- [6] 王以笑,崔丽艳,雷振锋,等.分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(4):118-122.  
WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-122.
- [7] 曾君,徐冬冬,郭华芳,等.面向可再生能源的微电网电能质量特点分析与综合评价方法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(19):10-16.  
ZENG Jun, XU Dongdong, GUO Huafang, et al. Renewable energy-oriented micro-grid power quality characteristic analysis and comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 10-16.
- [8] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0021-1
- [9] 李承熹,杨强,颜文俊.含分布式光伏电源的微电网孤岛动态运行策略[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):99-105.  
LI Chengxi, YANG Qiang, YAN Wenjun. Dynamic islanding operation of microgrid with distributed photovoltaic generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 99-105.
- [10] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等.微电网技术在主动配电网中的应用[J].电力自动化设备,2015,35(4):8-16.  
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [11] 徐鹏威,刘飞,刘邦银,等.几种光伏系统 MPPT 方法的分析比较及改进[J].电力电子技术,2007,41(5):3-5.  
XU Pengwei, LIU Fei, LIU Bangyin, et al. Analysis comparison and improvement of several MPPT methods for PV system[J]. Power Electronics, 2007, 41(5): 3-5.
- [12] 肖浩,裴玮,杨艳红,等.计及电池寿命和经济运行的微电网储能容量优化[J].高电压技术,2015,41(10):3256-3265.  
XIAO Hao, PEI Wei, YANG Yanhong, et al. Energy storage capacity optimization for microgrid considering battery life and economic operation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3256-3265.
- [13] 王旭强,刘广一,曾沅,等.分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J].电力系统保护与控制,

- 2014, 42(1): 47-53.  
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [14] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60.  
CHEN Ruchang, CHEN Fei, ZHANG Fan, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60.
- [15] 徐意婷, 艾芊. 含微电网的主动配电网协调优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 18-26.  
XU Yiting, AI Qian. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 18-26.
- [16] 任远, 王佳伟, 王越. 基于混合储能实时控制的峰谷平时段微电网 PCC 点功率调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 103-106.  
REN Yuan, WANG Jiawei, WANG Yue. Microgrid PCC power dispatch strategy based on multi-ESS control during peak, flat and valley period[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 103-106.
- [17] 汪隆君, 许海林, 王钢. 计及分布式电源功率特性的微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 31-38.  
WANG Longjun, XU Hailin, WANG Gang. Economic dispatch model for microgrid considering power characteristics of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 31-38.
- [18] 胡晓通, 刘天琪, 刘舒, 等. 基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化运行[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 33-40.  
HU Xiaotong, LIU Tianqi, LIU Shu, et al. Coordinated optimal operation between microgrid and distribution network based on dynamic award and penalty price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 33-40.
- [19] 李瑞生, 翟登辉. 光伏 DG 接入配电网及微电网的过电压自动调节方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 62-68.  
LI Ruisheng, ZHAI Denghui. Research on over-voltage automatic adjustment method of distributed photovoltaic source accessing to distribution network of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 62-68.
- [20] 吴云亮, 肖峥, 沈阳武, 等. 微电网并网模式下的协调经济调度策略控制[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 6-11.  
WU Yunliang, XIAO Zheng, SHEN Yangwu, et al. Coordinated economic dispatch strategy under microgrid connected mode[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 6-11.

收稿日期: 2017-03-19; 修回日期: 2017-05-07

作者简介:

李江(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为分布式发电和微电网技术; E-mail: lijiajlj88@126.com

张永利(1971—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网运行和分布式发电技术研究。

(编辑 魏小丽)