

## 混合储能系统在风光互补微电网中的应用

殷桂梁, 李相男, 郭磊, 李晓亮

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛066004)

**摘要:**光伏发电和风力发电输出功率具有间歇性和随机性的特点, 为了提升微电源的性能, 将储能装置应用于风光互补的微电网中。采用超级电容与蓄电池的混合储能系统, 通过对DC/DC变换器控制策略的合理设计, 实现了蓄电池恒流充放电, 延长了使用寿命; 针对传统PID控制的不足, 采用响应速度更快、控制效果更好的滑模变结构控制方法; 为了平抑风光互补微电网功率, 并在孤岛运行时提供稳定的电压频率支持, 采用低压微电网的下垂控制策略。在孤岛运行时, 分别在风速、光照强度改变以及负载变化的情况进行了仿真评估混合储能系统的性能, 结果表明, 混合储能系统能够提高风光互补微电网的电能质量。

为了更高效地利用可再生能源, 在太阳能、风能资源比较丰富的地区, 构建风光互补微电网进行发电, 可以提高微电网供电的连续性、稳定性和可靠性<sup>[1-2]</sup>

。典型的风光互补微电网由风力发电单元、光伏发电单元、储能系统及负荷组成[3]。其中, 储能对于微电网的间断供电、电力调峰、电能质量的改善和微电源性能的提升具有非常重要的作用, 是微电网安全可靠运行的关键<sup>[4-5]</sup>。

蓄电池储能具有能量密度大、运行维护简便的优点<sup>[6]</sup>

, 超级电容器具有功率密度大、循环寿命长、充放电效率高的优点[7], 二者在技术性能上有互补性[8], 通过合理连接混合使用, 可使系统兼具蓄电池的高能量密度和超级电容器的高功率密度的优点, 并可以优化蓄电池的工作环境。文献[9-10]对混合储能应用于独立的光伏发电系统进行了研究, 研究表明混合储能应用于独立光伏系统, 可以降低蓄电池的放电深度, 提高光伏系统的能量转换效率; 文献[11-12]将混合储能系统应用在风力发电中, 结果表明, 混合储能可以迅速平衡系统瞬时功率, 改善风电功率波动, 优化蓄电池的工作状态, 延长其使用寿命; 文献[13]在分析微电网稳定运行对储能要求的基础上, 提出适用于微电网的混合储能控制策略, 在满足微电网运行需求的前提下, 混合储能结构能够延长蓄电池的使用寿命, 有较强的技术经济性。

本文深入分析了含有混合储能系统的风光互补微电网的拓扑结构和控制策略, 进而在孤岛模式下进行仿真, 考虑了当外界自然条件和负载变化时, 混合储能系统的加入对于负载电压和系统频率的影响, 验证了混合储能系统的加入对于提高电能质量的作用。

### 1 储能系统结构

混合储能系统由蓄电池组、超级电容器组、双向DC/DC变换器和双向DC/AC变换器组成, 结构如图1所示。其中,  $U_B$ 和 $R_B$ 为蓄电池组电压和等效内阻;  $L$ 为双向DC/DC变换器电感;  $i_L$ 为流过电感上的电流;  $C$ 为直流母线电容;  $u_{dc}$ 为直流母线电压;  $U_{sc}$ 和 $R_{sc}$ 为超级电容器组等效电压源和等效内阻;  $L_f$ 为变换器滤波电感;  $C_f$ 为变换器滤波电容;  $R_f$ 为变换器滤波电阻;  $Z_{ln}$ 为线路阻抗;  $Z$ 为恒阻抗负载;  $U_i$ 、 $I_i$ 分别为变换器输出的电压和滤波电感上的电流;  $U_{ldi}$ 为滤波电容上的电压;  $I_{ci}$ 为流向滤波电容上的电流;  $I_{ln}$ 为流向负载和电网的电流之和。

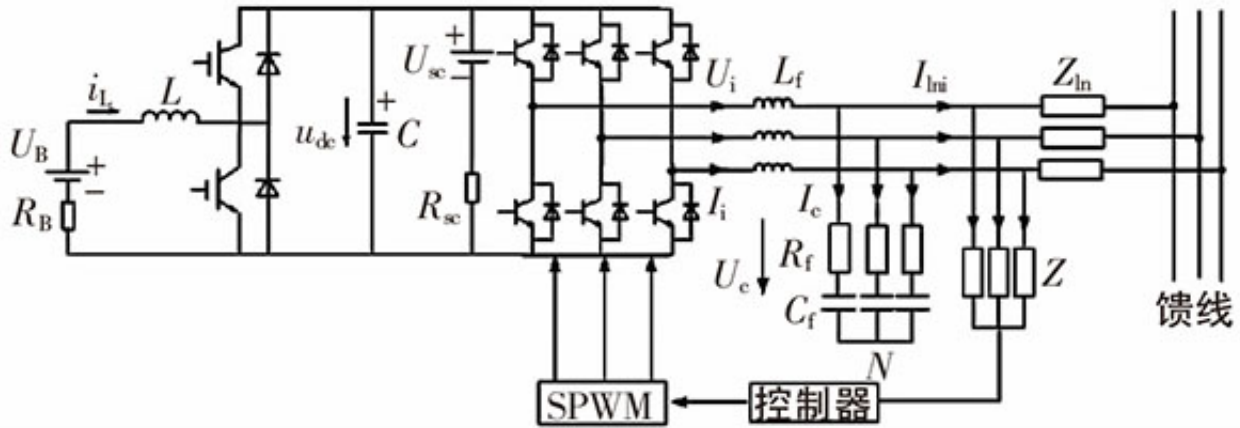


图 1 混合储能系统结构

Fig.1 Structure of hybrid energy storage system

蓄电池组通过双向buck/boost变换器与超级电容器组一起并联在三相变换器的直流母线上，三相变换器经过LC滤波器接入风光互补微电网的交流母线上，通过与微电网之间有功和无功功率的交流实现系统的瞬时功率平衡和稳定控制。

#### 2双向DC/DC变换器的控制策略

为了改善蓄电池的充放电过程，并满足风光互补微电网运行的功率需求，采用如图 2 所示的电流计算模块，计算得到双向 DC/DC 变换器上的电感电流参考值。根据直流母线电容电压  $u_{dc}$  的大小，由滞环判断得到电感电流的参考值  $i_{L\_ref}$ 。

根据参考电流  $i_{L\_ref}$  的正负判断双向 DC/DC 变

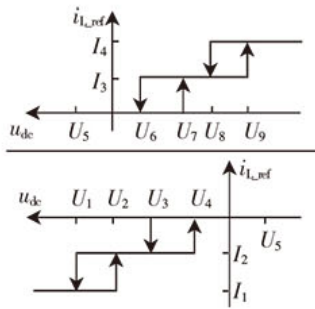


图 2 参考电流计算模块

Fig.2 Reference current calculation module

换器的工作状态。当  $i_{L\_ref} > 0$  时，电路工作在 boost 状态；当  $i_{L\_ref} < 0$  时，电路工作在 buck 状态；当  $i_{L\_ref} = 0$  时，电路不工作。

与相对传统的 PID 控制相比，滑模变结构具有较强的鲁棒性和动态响应特性，本文选取  $S = i_L - i_{L\_ref}$  为切换函数，取  $u = \text{sgn}(S)$  为控制规律，则

$$u = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

DC/DC 变换器滑模变结构控制框图见图 3。

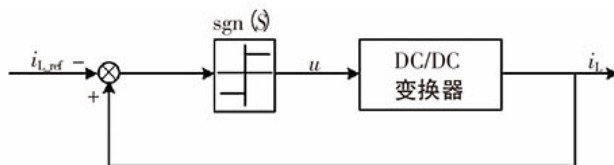


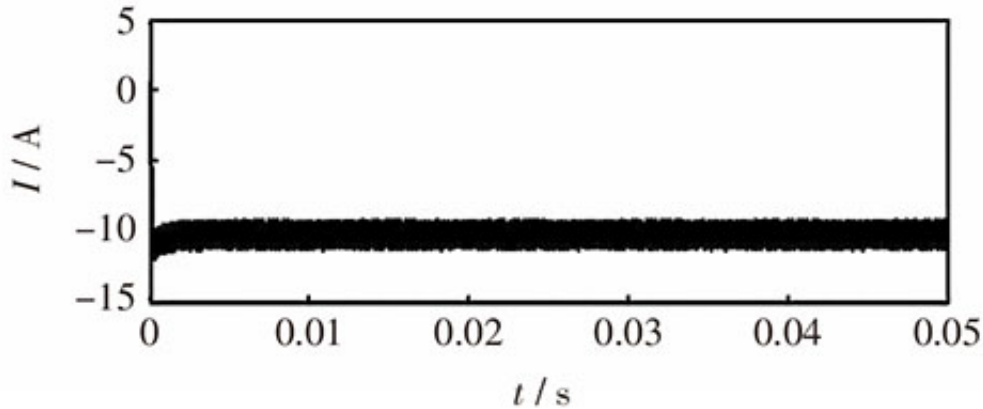
图 3 DC/DC 变换器滑模变结构控制框图

Fig.3 Block for sliding-mode and variable-structure control of DC/DC converter

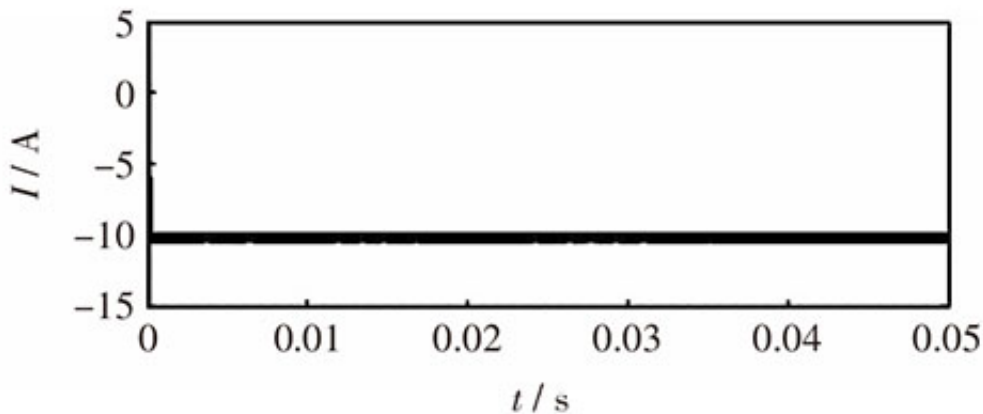
给定电感电流  $i_{L\_ref}$  与实际电感电流  $i_L$  的差值，经过符号位 Sign 判断得到控制量  $u$ ，由控制量  $u$  的正负判断 PWM 波控制开关管的导通和关断，使实际电流  $i_L$  跟踪参考电流  $i_{L\_ref}$ 。

为了验证DC/DC变换器滑模变结构控制方法的响应速度和控制效果，搭建如图1所示的混合储能系统，系统中将三相逆变器部分等效为恒功率负载。系统参数为：超级电容器电容15F，额定电压900V，初始电压850V，内阻0.1；蓄电池容量100A·h，额定电压240V，内阻0.5；双向DC/DC变换器电感9mH；负载电阻100。仿真得到传统PID控制与滑模变结构控制时电感电流仿真波形，如图4所示。

两种控制方法都能使电感电流有效地跟踪给定电流，采用PID控制方法输出的电感电流纹波约为20%，而采用滑模变结构控制方法输出的电感电流纹波约为5.7%。由此可以看出，采用滑模变结构的控制方法输出的电感电流纹波更小，响应的速度也更快。



(a) PID 控制时电感电流



(b) 滑模变结构控制时电感电流

图 4 DC/DC 变换器电感电流仿真曲线

Fig.4 Simulation curve of DC/DC converter of inductance current

### 3双向DC/AC变换器的控制策略

当光照、温度、风力发生变化时，风光互补的微电网输出功率波动很大，这就要求混合储能系统能够平抑分布式电源的并网功率，减少功率波动对微电网系统的冲击，而在孤岛运行时能够提供微电网系统的电压和频率参考，且能合理分担负荷的功率，维持整个系统的功率平衡。因而，双向DC/AC变换器采用控制灵活、简单的下垂控制策略。

在低压微电网中，微电源输出的有功功率主要与输出电压的幅值有关，而无功功率主要与输出电压相角有关。因而，传统的下垂控制方程变为



$$\begin{cases} U = U_n + \frac{P_n - P}{a} \\ f = f_n + \frac{Q}{b} \end{cases} \quad (2)$$

其中：

$$\begin{cases} a = \frac{P_{\max} - P_n}{U_n - U_{\min}} \\ b = \frac{Q_{\max}}{f_{\max} - f_n} \end{cases}$$

式中： $P_{\max}$  为微电源在电压下降时允许输出的最大功率； $P_n$  为微电源的额定输出功率； $U_n$  为微电源输出额定功率下的电压； $U_{\min}$  为允许的最小电压幅值； $f_n$  为电网的额定频率； $f_{\max}$  为微电源允许输出的最大频率； $Q_{\max}$  为微电源达到频率最大允许值时输出的无功功率。

根据上述低压下垂特性，设计得到功率控制器，如图5所示。同时为了改善三相输出电能，需对电压和电流进行精确、动态的控制，其中最典型的控制策略是电压电流双环控制，如图6所示。

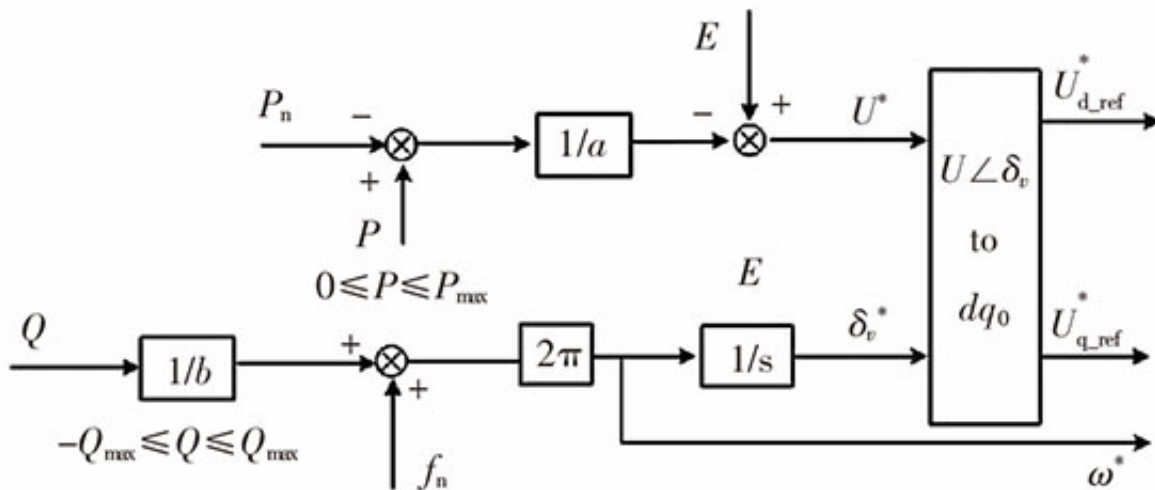


图 5 功率控制器结构

Fig.5 Structure of power controller

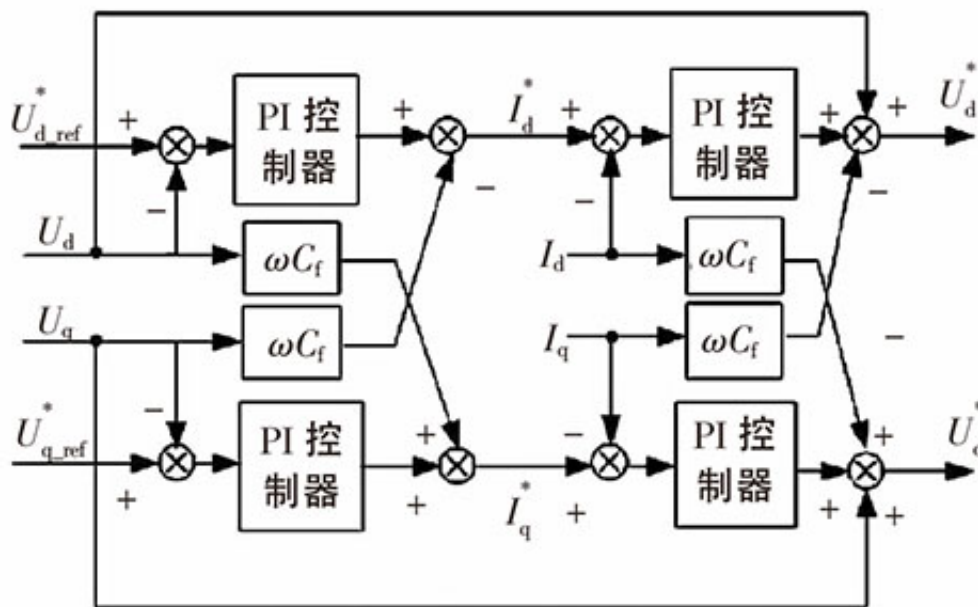


图 6 电压电流双环控制结构框图

Fig.6 Structure block of voltage-current loop controller

输出电压与功率控制器得到的参考电压信号相比较，其差值经过电压环PI控制器和前馈解耦控制得到电流内环的参考电流。滤波电感电流与参考电流的差值经过电流环PI控制器、前馈解耦和电压前馈补偿得到SPWM调制电压信号。

#### 4仿真分析

为了验证混合储能系统在风光互补微电网中的重要性，构建一个风光互补的微电网，结构如图7所示，系统由光伏发电（31kW）、双馈风力发电（35kW）以及超级电容蓄电池混合储能系统（蓄电池容量100Ah，额定电压240V，超级电容器电容15F，额定电压900V）和负载组成，通过线路、断路器连接到大电网中。超级电容蓄电池混合储能接在公共母线上，用于稳定母线电压，并在孤岛运行时采用下垂控制，吸收或补给功率缺额，维持整个系统的功率平衡。负载1、2为本地负载，负载3为重要负载，运行时应保证其供电可靠性，负载4、5为普通负载，必要时可以切除，负载6为冲击性负载。

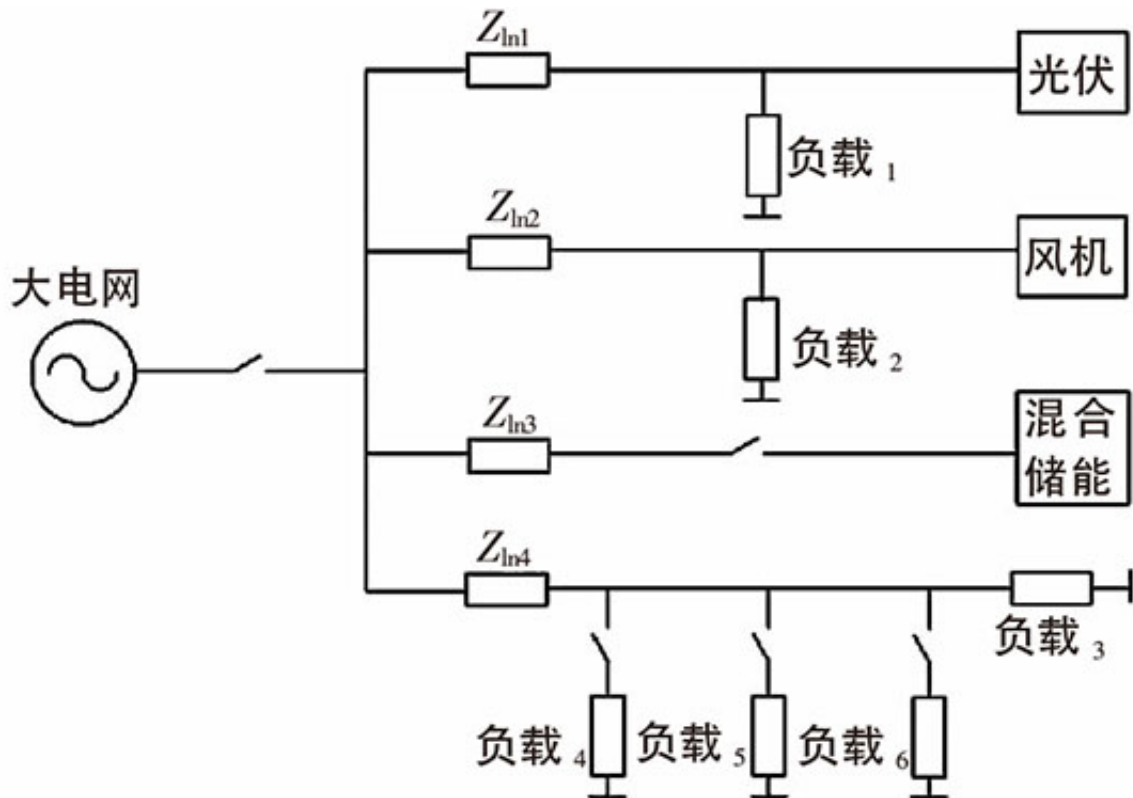


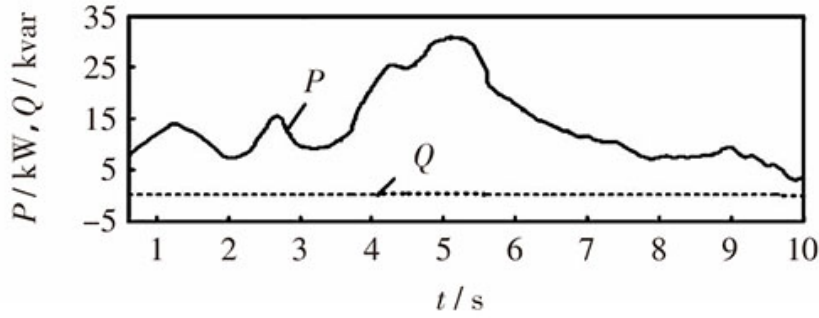
图 7 风光互补微电网结构

Fig.7 Structure of wind/solar hybrid microgrid

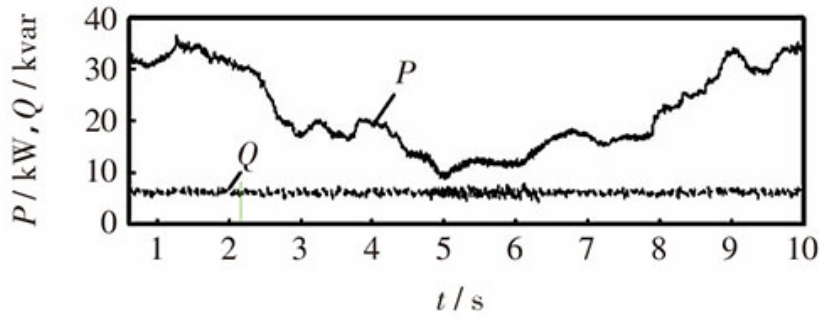
#### 4.1 孤岛运行时光照强度、风速变化仿真分析

太阳的光照强度和风机的风速随机地发生变化。本地负载1、2和重要负载3接入系统，负载1：P=5kW，Q=3kvar；负载2：P=8kW，Q=3kvar；负载3：P=20kW，Q=0kvar。仿真结果如图8所示。

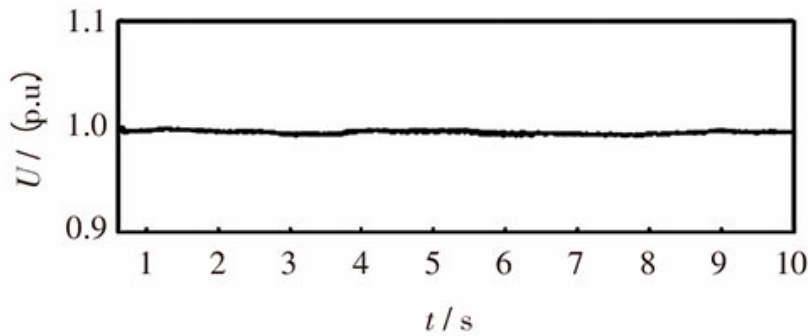
由图8 (a)、(b) 可以看出，光伏和风机的输出功率随着太阳的光照强度和风机的风速随机地发生变化，具有很大的随机性、波动性。由图8 (c)、(d) 可以看出，在风速和光照强度变化时，负载3电压基本保持不变，维持在标么值1p.u.附近，系统频率始终稳定在50Hz附近，满足了重要负荷的供电可靠性。



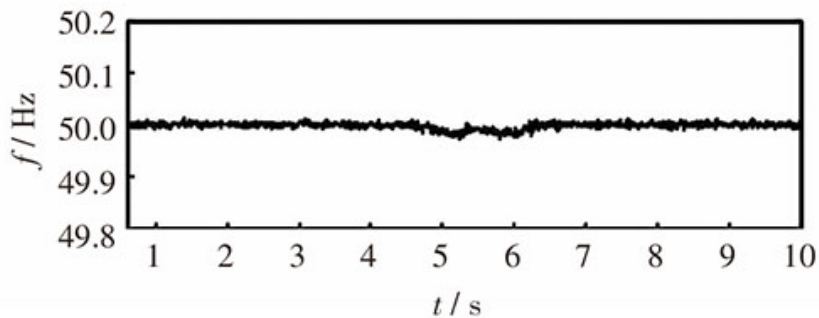
(a) 光伏输出的有功和无功功率



(b) 风机输出的有功和无功功率



(c) 负载 3 电压



(d) 系统频率

图 8 孤岛运行时光照强度、风速变化仿真曲线

Fig.8 Simulation curve of solar irradiance and wind velocity changes in islanding operation mode

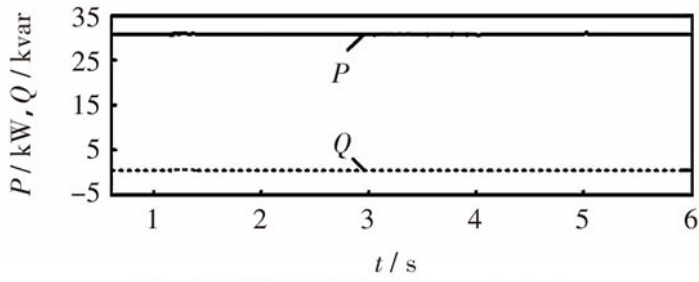


整个仿真过程表明，当外界条件发生变化，风光互补微电网输出功率波动很大时，储能系统能够平抑功率的波动，提供微电网的电压和频率支持，且能够合理地分担负载功率，维持整个系统的功率平衡。

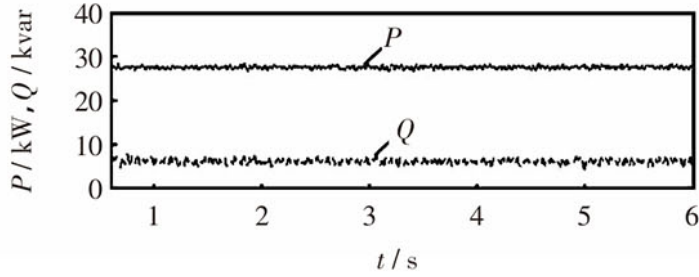
#### 4.2 孤岛运行时负载变化仿真分析

太阳的光照强度恒为 $1000\text{W}/\text{m}^2$

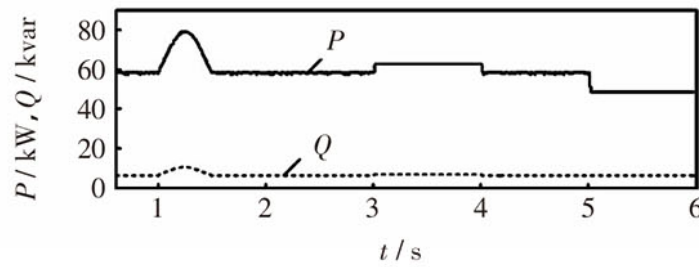
，风机的风速恒为 $8\text{m}/\text{s}$ 。本地负载1、2和重要负载3以及普通负载4接入系统，负载1： $P=10\text{kW}$ ， $Q=3\text{kvar}$ ；负载2： $P=13\text{kW}$ ， $Q=3\text{kvar}$ ；负载3： $P=25\text{kW}$ ， $Q=0\text{kvar}$ ；负载4： $P=10\text{kW}$ ， $Q=0\text{kvar}$ 。 $t=1\text{s}$ 时突加冲击负载： $t=1.0\sim 1.25\text{s}$ 总的负载消耗有功功率由 $58\text{kW}$ 逐渐增加到 $80\text{kW}$ ，无功功率由 $6\text{kvar}$ 逐渐增加到 $10\text{kvar}$ ； $t=1.25\sim 1.5\text{s}$ 总的负载消耗有功功率由 $80\text{kW}$ 逐渐降到 $58\text{kW}$ ，无功功率由 $10\text{kvar}$ 逐渐降到 $6\text{kvar}$ 。 $t=3\text{s}$ 时突加负载5， $P=5\text{kW}$ ， $Q=500\text{var}$ ， $t=4\text{s}$ 时切除负载5， $t=5\text{s}$ 时突甩负载4。得到的系统仿真结果如图9所示。



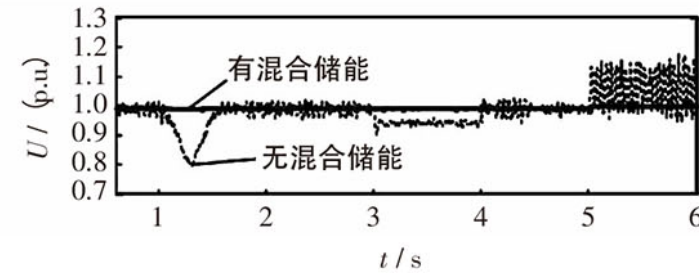
(a) 光伏输出的有功和无功功率



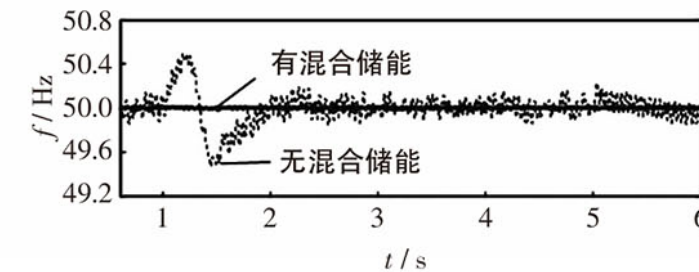
(b) 风机输出的有功和无功功率



(c) 负载消耗的有功和无功功率



(d) 负载3电压



(e) 系统频率

图9 孤岛运行时负载变化仿真曲线

Fig.9 Simulation curves of the load change in islanding operation mode

由图9 (a)、(b)可以看出, 光伏输出功率恒为 $P=31\text{kW}$ ,  $Q=0\text{kvar}$ ; 风机输出功率恒为 $P=28\text{kW}$ ,  $Q=6\text{kvar}$ 。由图9 (d)可以看出, 由于混合储能系统提供稳定的频率支持, 使得系统频率一直稳定在 $50\text{Hz}$ 附近, 满足了重要负荷的供电可靠性。

在 $t=1\text{s}$ 时突加冲击负载, 由图9 (d)、(e)可以看出, 无混合储能系统时, 突加冲击负载则重要负载3电压下降到 $0.8\text{p.u.}$ 左右, 系统频率在 $49.5\sim 50.5\text{Hz}$ 上下波动较大, 不能满足负载稳定性要求;

加混合储能系统时, 在突加冲击负载前后, 负载两端电压基本保持不变, 维持在 $1\text{p.u.}$ 附近, 系统频率维持在 $50\text{Hz}$ 附近, 满足负载的供电可靠性。

在无混合储能系统时,  $t=3\text{s}$ 时, 突加负载5。由图9 (e)可以看出, 由于系统存在功率缺额, 重要负载3电压下降到 $0.9\text{p.u.}$ ,  $t=5\text{s}$ 时, 突甩负载4, 重要负载3电压在 $0.95\sim 1.2\text{p.u.}$ 上下波动; 在加入混合储能系统以后, 在突加、突甩负载时, 混合储能系统使整个微网功率平衡并向系统提供电压支持, 负载3电压稳定在标么值1。

整个仿真过程表明, 系统孤岛运行时, 突加冲击负载和突加、突甩负载时, 储能系统能够维持系统功率平衡, 稳定系统电压和频率, 使整个过程中电压幅值和频率的变化始终在允许的范围内, 满足电能质量的要求。

## 5 结语

混合储能对于风光互补微电网内部能量的瞬时平衡, 维持微电网的稳定运行以及改善微电源的性能具有非常重要的作用。本文采用适合风光互补微电网的混合储能系统结构, 合理设计了双向DC/DC、双向DC/AC变换器的控制策略, 并构建了风光互补微电网, 针对系统孤岛运行时光照强度、风速变化; 突加、突甩负载; 突加冲击负载3种情况进行了仿真分析。仿真结果表明储能系统能够提供风光互补微电网的电压和频率参考, 维持整个系统的功率平衡, 提高微电网的电能质量。

## 参考文献:

[1]Liu Chunhua, Chau K T, Zhang Xiaodong. An efficient wind-photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57 ( 3 ) : 831-839.

[2]Park S J, Kang B B, Yoon J P, et al. A study on the stand--alone operating or photovoltaic/wind power hybrid generation system[C]//35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany : 2004.

[3]周念成, 王强钢, 杜跃明 ( Zhou Niancheng, Wang Qiang-gang, Du Yueming ). 风能与光伏混合微电网的建模和仿真 ( Modeling and simulation of wind/PV/ hybrid micro-grid ) [J]. 中国电力 ( Electric Power ) , 2010, 43 ( 4 ) : 81-85.

[4]沈晓彦, 黄钟琪, 周建新, 等 ( Shen Xiaoyan, Huang Zhongqi, Zhou Jianxin, et al ). 锂电池在风光发电储能系统中的应用分析 ( Application of Li-ion battery in wind power and photovoltaic power generation system ) [J]. 电源技术 ( Chinese Journal of Power Sources ) , 2011, 35 ( 5 ) : 602-604.

[5]周林, 黄勇, 郭珂, 等 ( Zhou Lin, Huang Yong, Guo Ke, et al ). 微电网储能技术研究综述 ( A survey of energy storage technology for micro grid ) [J]. 电力系统保护与控制 ( Power System Protection and Control ) , 2011, 39 ( 7 ) : 147-152.

[6]罗隆福, 黎涛, 邓建国, 等 ( Luo Longfu, Li Tao, Deng Jianguo, et al ). 储能型光伏系统功率控制仿真分析 ( Simulation analysis for constant power control of photo-voltaic system with battery energy storage ) [J]. 电力系统及其自动化学报 ( Proceedings of the CSU-EPSC ) , 2011, 23 ( 6 ) : 87-91.

[7]Cultura A B, Salameh Z M. Performance evaluation of a supercapacitor module for energy storage applications[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pitts-burgh, USA : 2008.

[8]李韶杰 ( Li Shaojie ). 超级电容器蓄电池混合电源的建模与性能分析 ( Modeling and performance analysis of supercapacitor & battery combined power source ) [J]. 蓄电池 ( Chinese Labat Man ) , 2010, 47 ( 2 ) : 67-70, 93.

[9]唐西胜, 武鑫, 齐智平 ( Tang Xisheng , Wu Xin , Qi Zhiping ) .超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究 ( Study on a stand-alone PV system with battery/ultracapa-citor hybrid energy storage ) [J]. 太阳能学报 ( Acta En-ergiae Solaris Sinica ) , 2007 , 28 ( 2 ) : 178-183.

[10]侯世英, 房勇, 孙韬, 等 ( Hou Shiying , Fang Yong , Sun Tao , et al ) .混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用 ( Application of hybrid energy storage system in power stand-alone photovoltaic power system ) [J]. 电网技术 ( Power System Technology ) , 2011 , 35 ( 5 ) : 183-187.

[11]张坤, 毛承雄, 陆继明, 等 ( Zhang Kun , Mao Chengxiong , Lu Jiming , et al ) .用于直驱式风力发电的复合储能系统 ( Hybrid energy storage system used in directly-driven with power system ) [J]. 电力系统及其自动化学报 ( Pro-ceedings of the CSU-EPSSA ) , 2011 , 23 ( 4 ) : 1-5 , 26.

[12]于芑, 赵瑜, 周玮, 等 ( Yu Peng , Zhao Yu , Zhou Wei , et al ) .基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究 ( Research on the method based on hybrid energy stor-age system for balancing fluctuant wind power ) [J]. 电力系统保护与控制 ( Power System Protection and Control ) , 2011 , 39 ( 24 ) : 35-40.

[13]Zhang Guoju , Tang Xisheng , Qi Zhiping. Research on bat-tery supercapacitor hybrid storage and its application in microgrid[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu , China : 2010.

[14]Etxeberria A , Vechiu I , Camblong H , et al. Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids[J]. Energy Conversion and Manage-ment , 2012 , 54 ( 1 ) : 113-121.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/91055.html>