

考虑小水电季节特性的微网经济运行

黄 伟¹, 崔屹平¹, 黄 婷¹, 张小珍¹, 马 丽²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

Economic Operation of Microgrid by Considering of Seasonal Effect of Small Hydropower

HUANG Wei¹, CUI Yiping¹, HUANG Ting¹, ZHANG Xiaozhen¹, MA Li²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

摘 要: 针对小水电集中地区微源运行和小水电、风电的互补特性, 考虑小水电发电的季节差异, 基于分时电价, 以计及微网运行、网际交易、折旧等要素的总成本最低为优化目标, 并运用 AHP 层次分析法建立微网的调度和经济运行模型。通过所建模型优化微源出力, 灵活调度蓄水水库运行, 合理配置主网与微网之间的电能交易。选取典型微网为案例, 并根据不同季节的典型负荷曲线进行仿真, 结果表明季节特性对于小水电集中地区微网有较大的影响, 针对丰水期和枯水期分别制定不同的调度策略是相当必要的; 同时也证明了风-水互补运行对于提高微网经济性和可靠性都具有重要意义。

关键词: 微网; 小水电; 季节性; 经济运行; 风-水互补

Abstract: As to the features of micro source operation and the complementary relationship between small hydropower and wind power in center area of small hydropower, by taking of seasonal effect of hydropower into account, the minimum operational cost is used as the optimized objective by considering of such factors as micro-grid operation, trade, and the depreciation. At the same time, analytic hierarchy process method is used to build dispatching and economic operation model of microgrid, based on which the output of microgrid can be optimized, the operation of storage reservoir is dispatched flexibly, and power trade between main power grid and microgrid can be allocated reasonably by the proposed model. By taking typical microgrid as example, the simulation is carried out according to typical load curves in different season. The results show that the influence of seasonal characteristics on microgrid in center area of small hydropower is large, and it is necessary to formulate differ-

ent scheduling strategies in wet season and dry season. In other hand, it also can be seen that the complementary between small hydropower and wind power is helpful to improve the economic and reliability of micro-grid.

Keywords: microgrid; small hydropower; seasonal effects; economic operation; complementary between small hydropower and wind power

0 引 言

我国水电资源蕴藏量全球居首, 小水电也已经得到了广泛的发展。在陕西、青海等西部地区已经建成大量的小水电, 但由于其季节性以及不合理的运行调度, 使得小水电发电受到很大的制约。微电网的提出极大促进了分布式电源的利用。建立完善的微网可以很好地解决分布式电源并网所带来的一系列问题^[1]。微网的经济调度作为微网能量管理的重要组成部分, 是研究微网的重要课题之一。目前对于微网经济运行的研究尚处在初步阶段, 多是对风、光、储等微源的调度优化管理和经济效益分析, 对于小水电集中地区的微网能量优化管理研究较少。

文献 [2] 构建了风-蓄-水电互补系统, 分别考虑丰水期和枯水期的调度策略, 但调度策略并没有充分利用小水电的储能效应; 文献 [3] 建立了有蓄电池的小水电与风光混合发电系统的结构模型, 提出用小水电站代替微网常用的蓄电池来进行功率的调节, 但并没有考虑丰水期与枯水期调度策略的不同。文献 [4] 建立了较为完整的微网能量管理体系, 在并网模式下考虑了分时电价, 但并不

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助 (2007AA05Z249, 2008AA05Z216)

适合于含小水电微电网的情况；文献 [5] 较为详细讨论了抽水蓄能电站的特性，建立了风电与抽水蓄能电站之间的能量转换模型，并对其效益进行评价，但同样没有考虑水力发电季节性的影响。

本文将建立小水电集中地区微电网的最优化调度和经济运行模型，分析风-水互补微网的优越性，并利用差分进化算法对典型算例进行分析。

1 小水电地区新能源特性

1.1 小水电的调度运行特性

1.1.1 小水电的功率特性

水电站的功率主要由水头和发电流量决定，其出力 P_H 公式为

$$P_H = \eta \rho g Q H = 9.81 \eta Q H = A Q H \quad (1)$$

式中： η 表示小水电效率； ρ 表示水的密度； g 表示重力加速度； A 表示出力系数； Q 表示应用流量； H 表示净水头^[6]。

对于可逆的小水电机组来说，其发电状态的功率 P_h 和抽水状态下的功率 P_p 分别为

$$P_h = A_h Q_h H \quad (2)$$

$$P_p = A_p Q_p H \quad (3)$$

式中： A_h 、 A_p 分别表示两种状态下的出力系数， Q_h 、 Q_p 分别表示发电流量和抽水流量。

水电站水头 H 的表达式为

$$H = Z_{sy} - Z_{xy} \quad (4)$$

式中： Z_{sy} 、 Z_{xy} 分别表示上、下游水位。

不计水头损失，忽略蓄水库的综合利用， Z_{sy} 依据负荷、来水的情况随时间变化。对于无调节水电站基本不变，对于有调节水电站，则在水库正常蓄水位与死水位之间周期性变化。

一般来说，在水电丰富地区，不可调节小水电将承担主要的地区负荷。如果带有蓄水库，并且小水电机组可逆，将对微网的短期出力调节起到很关键的作用。

1.1.2 小水电的季节性调度原则

水电具有明显的季节性，因此在能量管理中应根据丰水期、枯水期采用不同的调度策略。在丰水期，为充分利用小水电资源，小水电应在保证可靠性的前提下尽可能的发电。对于可调节水电站，在满足电力系统负荷要求的前提下，水库应尽可能保持在被允许高水位上运行；在枯水期，只能以满足微电网可靠性要求的运行方式工作。

1.2 风力发电的运行特性

对风力发电机输出功率产生影响的因素主要为风速与风机特性。风力发电机的典型输出功率特性曲线(风速与输出功率的关系曲线)如图 1 所示。

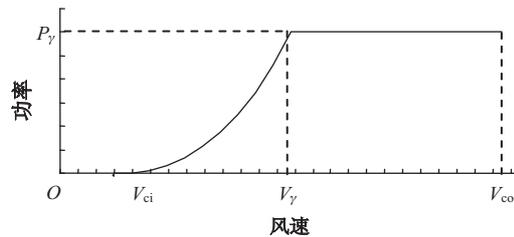


图1 典型风力发电机输出功率特性曲线

风力发电机典型输出功率特性的具体数学模型^[7]为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & (V \leq V_{ci}) \cup (V \geq V_{co}) \\ P_y \frac{V - V_{ci}}{V_y - V_{ci}}, & V_{ci} < V < V_y \\ P_y, & V \geq V_y \end{cases} \quad (5)$$

式中： V_y 表示风力发电机额定功率风速(m/s)； V 表示实际风速(m/s)； V_{ci} 表示切入风速(m/s)； V_{co} 表示切出风速(m/s)； P_y 表示风机的额定功率(kW)，本文取 $V_y = 12\text{m/s}$ ， $V_{ci} = 3\text{m/s}$ ， $V_{co} = 25\text{m/s}$ ， $P_y = 400\text{kW}$ 。

对于风速的模拟，目前大多采用威布尔分布模拟，其简化的分布函数如(6)所示：

$$V = c [-\ln X_i]^{1/k} \quad (6)$$

式中： c 为尺度参数，反映了平均风速，在精度要求不高时，可取平均风速； X_i 为均匀分布随机数； k 为威布尔分布的形状参数，反映了威布尔分布的偏斜度，取值为 1.8~2.3，一般可取 2。最终取得的典型风速曲线如图 2 所示。

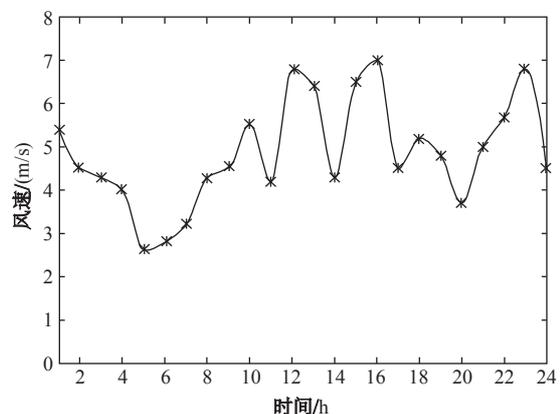


图2 典型日风速曲线

1.3 风-水互补特性

小水电集中地区一般地处偏僻的郊区，以水电发电为主。而在西部的一些地区，往往除了水电资源外还有丰富的风力资源，并且它们之间具有互补性。具体互补性和地理位置、季节气候^[8]都有很大的关系。如果可以充分利用，则能在很大程度上减小仅有小水电发电的季节性瓶颈和对电网的冲击。风-水互补微电网的构成如图 3 所示。

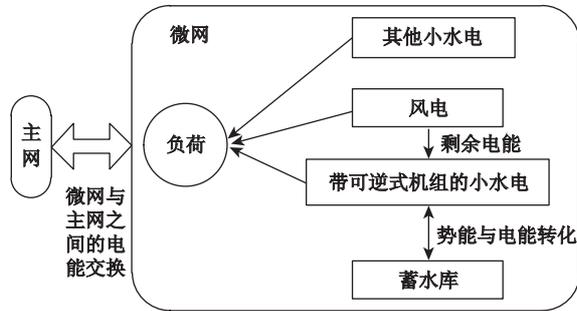


图 3 风-水能源互补微网构成

小水电发电短期波动性小，短期内可以视为恒定，但是从长期来看，由于其发电随季节变化明显，使得丰水期发电过剩，枯水期电力紧缺。风电在长期来说对小水电有很好的互补作用，冬春季枯水期水力发电不足，而风力较为充足；夏秋季丰水期小水电基本满发，而风力相对较弱。对于风电出力短期波动较大的问题，由于可调节小水电启停灵活，短期调节效果较好，可以很好地平衡风电产生的功率波动。克服风电场单独运行时对系统造成的冲击。

2 微网优化调度与经济分析

2.1 并网模式下的微网优化调度

微源在并网模式下不承担调频任务。对于带蓄水库并且水轮机组可逆的小水电，可以在考虑丰水期、枯水期不同特性的前提下，利用电力市场峰谷电价对其进行灵活控制，实现更大的经济利益。其调度方案如图 4 所示。

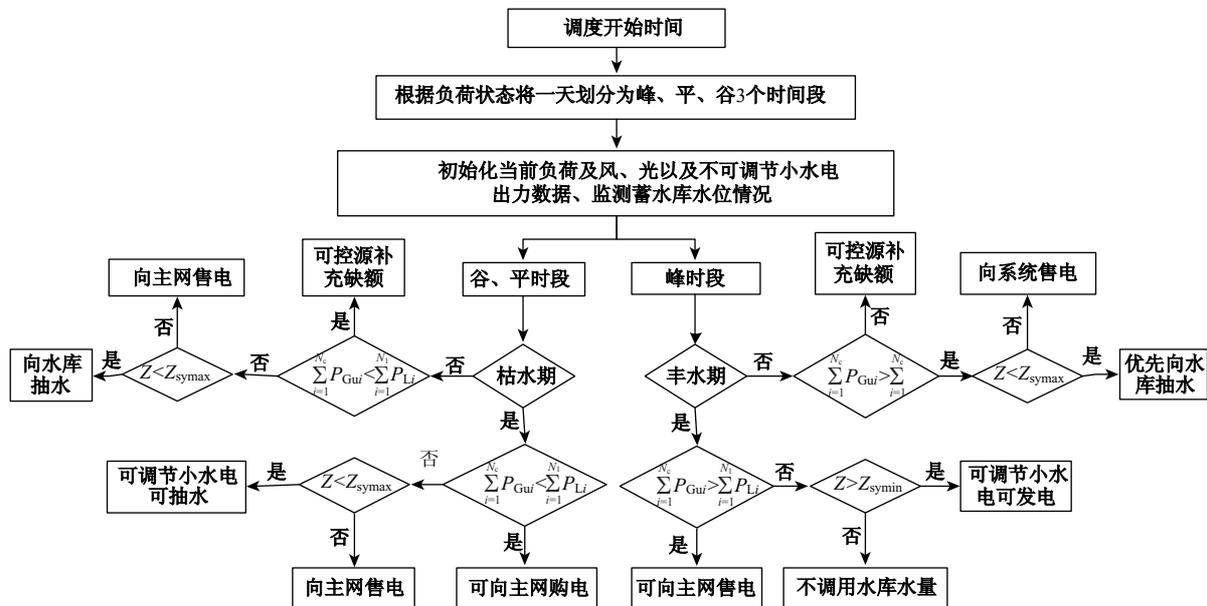


图 4 并网模式下微网调度方案

图中 Z 表示所监测的水库水位，值 Z_{symin} 、 Z_{symin} 分别为蓄水库上游允许最高、最低水位(m)； N_c 表示可控微源数； P_{Gui} 表示第 i 个不可控微源的出力预测值； P_{Li} 表示第 i 个负荷的预测值。

总体来讲，在分时电价的前提下微网可以在平、谷时段尽量将多余电能以势能的形式存储在蓄水库中，在用电高峰期以较高的电价向外电网传输电能，以获取综合利益。具体还需考虑季节性的影

响，在枯水期，为了保证蓄水库的调节性能，除非满足功率平衡并且水库水位已达到最大值，则不向外网售电。在丰水期，为了更加充分的利用水电资源，应尽量保证小水电的发电，只有当水库水位低于最低允许水位时才可向外网购电。

2.2 微网优化经济分析

2.2.1 多目标分析

本文中，微网运行的经济性以总成本最低为目

标,考虑微网运行、网际交易、折旧成本等要素。并应用AHP层次分析法赋予不同的权重,其目标函数为

$$\min C(P) = \omega_1 C_{OP}(P) + \omega_2 C_{DEP}(P) \quad (7)$$

式中: $C(P)$ 表示综合成本; $C_{OP}(P)$ 表示微网运行成本; $C_{DEP}(P)$ 表示折旧成本。每一部分成本的计算公式如下:

① 运行成本最低

$$\min C_{OP} = \sum_{t=0}^{T-1} \left(\sum_{i=1}^N (C_{OMi}(P_i)) + C_G(P_G(t)) \right) \quad (8)$$

式中: P_i 表示微源 i 在时段 t 的输出功率(kW); T 表示优化周期总时段,一天分为24个时间段,每段1小时; N 表示微网中微源的数量; $C_{OMi}(P_i)$ 表示微源的运行维护费用函数(元); $P_G(t)$ 表示在时段 t 内与主网交易功率(kW), $P_G(t) > 0$ 购电, $P_G(t) < 0$ 售电; $C_G(P_G(t))$ 表示在时段 t 内与主网交易(元),与该时段的交易电量和实时电价有关,其中, $C_G(P_G(t)) > 0$ 时为购电成本,并且 $|C_G(P_G(t))| = C_b(P_G(t))$, $C_G(P_G(t)) < 0$ 时为售电收益,并且 $|C_G(P_G(t))| = C_s(P_G(t))$, C_b 表示微网购电电价; C_s 表示微网售电电价。

② 微源折旧成本最低

本文采用基本的直线法进行固定资产折旧,即将微源的购买成本按小时计入到目标函数中:

$$\min C_{DEP} = \sum_{i=0}^{T-1} \left(\sum_{i=1}^N C_{DEPi} \right) \quad (9)$$

$$\text{而} \quad C_{DEPi} = \frac{C_{i,INS}}{L \times 365 \times 24} \quad (10)$$

式中: C_{DEPi} 表示第 i 个微源单位时间内计入的折旧成本(元); $C_{i,INS}$ 表示微源 i 的安装成本(元); L 表示微源 i 的寿命(a)。

2.2.2 约束条件

微网经济性的约束条件应包括等式约束(功率平衡,水库水量平衡)和不等式约束(微源出力限制、微网与主网的交互功率限制、水库限制)

① 功率平衡

$$\sum_{i=1}^{N_c} (P_{Gci}) + \sum_{i=1}^{N_{uc}} (P_{Gwi}) + P_G = P_L \quad (11)$$

式中: N_{uc} 表示不可控微源数; P_{Gci} 表示第 i 个可控微源出力。

② 水库水量平衡

忽略弃水流量,水库的水量取决于上个调度时段内的入库流量和出库流量,则

$$V(t+1) = V(t) + [Q_{rk}(t) - Q_h(t)] \times \Delta T(t) \quad (12)$$

式中: $V(t+1)$ 、 $V(t)$ 分别表示 t 时段初、末水库蓄水量(m^3); $Q_{rk}(t)$ 、 $Q_h(t)$ 分别表示 t 时段内的平均入库流量和出库流量。

③ 微源出力约束

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max} \quad (13)$$

式中: P_i 表示第 i 个微源实际出力(kW); P_{max} 和 P_{min} 分别表示第 i 个微源最大和最小出力(kW)。

④ 网际交互约束

$$P_{Gmin} \leq P_G \leq P_{Gmax} \quad (14)$$

式中: P_{Gmax} 表示主网向微网输送最大功率(kW); P_{Gmin} 表示微网向主网输送最大功率(kW)。

⑤ 蓄水库水位约束

$$Z_{symin} \leq Z_{sy} \leq Z_{sy max} \quad (15)$$

2.2.3 小水电的季节性分析

在枯水期,为保证水库水量,在目标函数中加入惩罚因子,修正后的目标函数如式(16)所示。

$$\min C(P)' = \min C(P) + \lambda \quad (16)$$

$$\lambda = k(Z_{sy max} - Z) \quad (17)$$

式中: $\min C(P)'$ 表示枯水期改进的最小综合成本; λ 为惩罚因子,蓄水库水位越低,则 λ 越大。

在丰水期,为了最大限度的利用小水电,可不对调度期内总用水量加以限制,但在枯水期,应对一天内的总用水量加以约束。其数学表达式如式(18)所示。

$$W_h(T) = \sum_{t=0}^{T-1} Q_h \times \Delta T \quad (18)$$

式中: $W_h(T)$ 表示一天内蓄水库总出库水量(m^3)。

枯水期时,应将这一约束加入微网经济优化分析中。同时由于限制了水量,应去掉对于带蓄水库小水电的功率约束。

3 算例分析

3.1 基本数据

本文采用微网模型包括风力发电机(WT)、不可调小水电(HDU)、可调小水电(HDC)以及丰水期和枯水期典型负荷。带蓄水库小水电发电流量最大 $3.3m^3/s$,水头假设恒定为16m,可逆小水电综合出力系数 $A=0.72$,风速按威布尔分布进行模拟,不可调小水电枯水期发电能力取为丰水期的30%。微网与主网之间最大功率传输限制为500kW。成本参数如表1所示。

表 1 微源基础数据

| 类型 | 功率/kW | | 寿命/a | 安装成本 / (万元/kWh) | 运行维护 系数/ (元/kWh) |
|-----|-------|-----|------|-----------------|------------------|
| | 下限 | 上限 | | | |
| WT | 0 | 400 | 10 | 1.19 | 0.03 |
| HDU | 0 | 950 | 30 | 0.75 | 0.02 |
| HDC | 0 | 400 | 30 | 0.8 | 0.025 |

表 2 分时购电和售电电价 元/kWh

| 时段 | 具体时间 | 购电价格 | 售电价格 |
|-----|-------------|------|------|
| 峰时段 | 11:00—15:00 | 0.83 | 0.65 |
| | 19:00—21:00 | | |
| 平时段 | 08:00—10:00 | 0.49 | 0.38 |
| | 16:00—18:00 | | |
| 谷时段 | 22:00—23:00 | 0.17 | 0.13 |
| | 00:00—07:00 | | |

3.2 微源出力分析

3.2.1 丰水期

丰水期水量充足，小水电常常满发，本文中假设不可调节小水电以最大出力稳定发电。

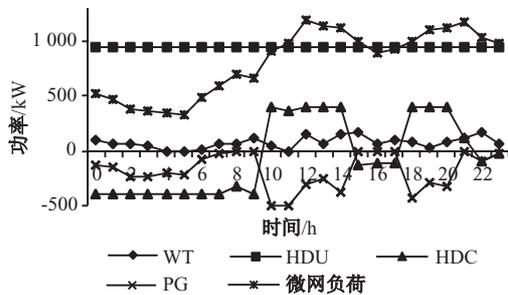


图 5 丰水期微源处理安排

从图 5 中可以看出，不可调节的小水电提供了丰水期的主要电能，清洁能源足以满足负荷的要求。微网经济运行的实现主要通过水库调节来实现。在平、谷时段，小水电抽水将电能储存起来，此时微电网向外售电为其不可控电源发出的强迫功率；在高峰时段，小水电集中发电，微网以较高的电价最大程度的向主网售电。最终达到最大的经济效益。

3.2.2 枯水期

枯水期来水量大大减小，其微源出力分配如图 6 所示。

从图 6 中可以看出，在枯水期不可调节小水电

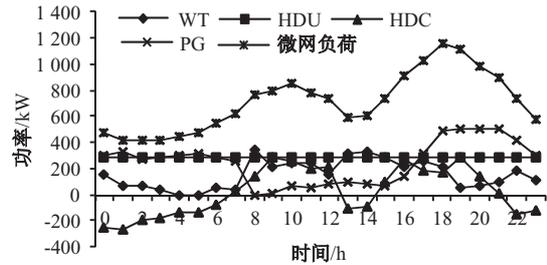


图 6 枯水期微网出力安排

的发电量大大减小，在 7:00~17:00，风力发电功率相较于丰水期有所增大，有效减轻了微网系统的供电负担，在枯水期补充水电发电缺额是风-水互补的重要体现。

调节作用主要由水库调度和主网来实现，可逆小水电机组在用电高峰期起主要调节作用，由于水库水位限制，18:00~22:00 虽然是用电高峰期，但微网依然从主网购入电能用以支撑负荷缺额。整个调度过程微网没有向主网售电。

从成本上来说，丰水期整个微网一天 24h 的总成本为 515.65 元，而枯水期为 5 613.62 元。枯水期成本明显高于丰水期的原因在于水电发电能力相对不足，向系统购电比例增加。而丰水期较低的成本有很大一部分来自于高峰期大量向系统售电所获得经济效益的补偿。

3.3 风-水互补性分析

比较小水电单独出力和风-水互补供电时微网与主网的功率交换，所得结果如图 7 所示。

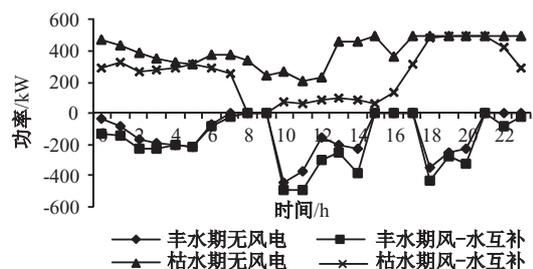


图 7 风-水互补与水电单独供电微网与外网功率交换

从图 7 中可以看出，在丰水期，风-水互补相比于水电单独发电在用电高峰期向主网出售更多的电力；而在枯水期，如果只有水电出力，由于水库调节能力有限，微网在负荷高峰期大量向主网以高价购电，而风-水互补运行时，在高峰期向系统的购电量一直处于较低的水平。

从成本上来看，小水电单独出力时，丰水期总

成本为 737.25 元, 枯水期总成本为 6 521.81 元, 都较风-水互补运行时高。风-水互补的微网运行方式减轻了与主网之间电能的输送负担, 同时也提高了微网的经济效益。

利用公式(1)~(3)可以计算出每小时调用水库水量, 以枯水期为例, 计算结果如图 8 所示。其中, 正值表示可逆小水电处于发电状态, 负值表示可逆小水电处于抽水状态。

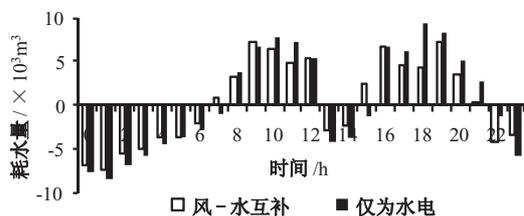


图 8 枯水期蓄水库调度单位时间耗水量

从图中可以看出, 在单位时间内, 在大部分时间段风-水互补运行时调用的水库水量少于仅含小水电的微网。由于小水电蓄水库库容一般较少, 而与其与主网之间的传输能力有限, 在枯水期时可能会因为蓄水库调节能力有限而不得不切负荷, 导致部分用户停电。因此, 减小单位时间调用水量可以很好的减轻蓄水库的调节负担, 提高微电网供电的可靠性。

4 结束语

本文提出了小水电集中地区微网在并网模式下微源的优化调度方案, 建立了风-水互补的微网经济运行模型, 考虑了丰水期和枯水期的不同特点。结果表明, 由于小水电发电的季节性影响, 使得丰水期和枯水期微源的出力特性有较大的差别。丰水期水电承担主要负荷, 利用峰谷电价与主网交易达到最佳的经济效益; 枯水期风电起到很好的补充作

用。本文还验证了风-水互补的优越性, 算例分析证明, 风-水互补运行对于提高微网经济性和可靠性都具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
- [2] 尚志娟, 周晖, 王天华. 带有储能装置的风电与水电互补系统的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 99-105.
- [3] 白雪, 袁越, 傅质馨. 小水电与风光并网的经济效益与环境效益研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(6): 75-80.
- [4] 石庆均. 微网容量优化配置与能量优化管理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [5] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究 [J]. 电网技术, 2009, 33(6): 13-18.
- [6] 陈森林. 水电站水库运行与调度 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 17.
- [7] Chedid R, Akiki H, Rahman S. A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1998, 13(1): 76-83.
- [8] 刘波, 郭家宝, 袁智强, 等. 风光互补发电系统特性研究 [J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1903-1906.

收稿日期: 2013-04-24

作者简介:

黄伟(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统规划与可靠性, 电力系统分析、运行与控制等, E-mail: huangwei@ncepu.edu.cn;

崔屹平(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划及其可靠性, E-mail: cuyping@126.com.

(责任编辑: 林海文)