

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190358

考虑多类型水电协调的风光电站容量优化配置方法

苏康博¹, 杨洪明¹, 余千², 廖圣桃¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南省电动交通与智能配网工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学经济与管理学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为减少风光出力波动性造成的弃风、弃光, 利用梯级水电和抽水蓄能等不同类型水电之间的调蓄特性, 提出一种多类型水电协调参与风光消纳的联合运行策略。考虑多类型水电站出力、水库库容和联络线传输功率等约束, 以风光电站投资建设成本、系统运行维护成本及购电成本最小和风光发电占负荷需求比例最大为目标, 建立一种多类型水电协调的风光电站容量优化配置模型, 采用基于极限学习机的粒子群算法(ELM-PSO)对模型进行求解。以青海某地区为例, 通过仿真分析, 得出综合考虑系统经济性和风光发电占负荷需求比例最优的容量配置方案, 验证了所提策略和所建模型的可行性及有效性。

关键词: 多类型水电; 协调策略; 风光消纳; 联合运行系统; 容量优化配置

Optimal capacity configuration method of wind-solar power station considering the coordination of multi-type hydropower

SU Kangbo¹, YANG Hongming¹, YU Qian², LIAO Shengtao¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Hunan Provincial

Engineering Research Center of Electric Transportation and Smart Distribution Network, Changsha 410114, China;

2. School of Economics and Management, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to reduce wind and solar power abandon caused by fluctuation of their output, this paper proposes a combined operation strategy that multi-type hydropower stations participate in wind-solar energy consumption by utilizing the regulation and storage characteristics between cascade hydropower, pumped storage and other types of hydropower. Considering the constraints of multi-type hydropower stations, reservoir capacity and transmission capacity of tie-lines, an optimal capacity configuration model of wind-solar power station coordinated by multi-type hydropower is established aiming at the minimum investment and construction cost, system operation and maintenance cost and power purchase cost and the maximum ratio of wind-solar power generation to load demand. The Extreme Learning Machine based Particle Swarm Optimization algorithm (ELM-PSO) is used to solve the model. Taking an area of Qinghai province as an example, the optimal capacity configuration scheme considering the system economy and the proportion of wind-solar power generation to load demand is obtained through simulation analysis, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71420107027), Science and Technology Projects of Hunan Province (No. 2017CT5015 and No. 2017WK2053), Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (No. CX2017B465 and No. CX2018B525), and Strategic Emerging Industries Project in Hunan Province (No. 2018GK4002).

Key words: multi-type hydropower; coordination strategy; wind-solar energy consumption; combined operation system; optimal capacity configuration

0 引言

随着人类对化石能源的过度开采和对能源需求

的不断提高, 资源短缺、环境污染等问题日趋严重, 风能和太阳能等可再生能源的开发利用成为人们关注的焦点^[1]。近年来, 我国风光发电装机规模得到快速发展, 截止 2018 年, 我国风电累计装机容量 18.97 亿 kW, 光伏发电装机容量 1.7 亿 kW。但是风光出力易受风速大小、光照强弱、昼夜变化、云层遮挡等自然因素的影响, 其出力存在一定的间歇性和波动性^[2-4], 风光大规模并网将给电力系统的安

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(71420107027); 湖南省科技计划项目资助(2017CT5015, 2017WK2053); 湖南省研究生科研创新项目资助(CX2017B465, CX2018B525); 湖南省战略性新兴产业资助(2018GK4002)

全平稳运行造成极大挑战^[5-8]。为减少风光并网对电力系统的影响,通常采取减小风光接入比例的方式,由此造成的弃风、弃光问题十分突出^[9-11]。

现阶段我国不同类型的水电发展较为成熟,水电作为可以快速调节水轮机组出力的电源,对可再生能源发电并网有着良好的支撑作用^[12-13]。在梯级水电调节风光发电并网方面,文献[14]提出一种梯级水电站和光伏电站联合运行方案,并建立以总发电量最大和剩余负荷曲线波动最小的双目标优化模型,有效提高光伏发电的利用率;文献[15]考虑水流滞时效应的梯级水电水量平衡关系,建立以运行成本最小为目标的水-风-光联合发电系统优化模型,有效提高系统可再生能源的发电比例;文献[16]考虑梯级水电站出力、流量、水头之间的约束关系,以经济效益和风光消纳程度为指标,建立一种风-光-水联合发电系统优化模型。在抽水蓄能调节风光发电并网方面,文献[17]提出一种抽水蓄能电站和储能装置协调调度策略,旨在减小风电出力波动性以优化系统运行;文献[18]考虑一种包含径流式水电的混合式抽水蓄能电站,通过其调节能力对混合抽蓄-风光联合系统进行调节,有效提高风光发电的并网消纳量。在可再生能源容量配置方面,文献[19]针对风-光-抽蓄联合发电系统设计多种调度策略,分析每种策略下系统最佳容量配置的运行结果,得出最佳的系统调度策略;文献[20]以抽水蓄能电站作为储能装置,风-光-抽蓄系统的经济收益最大化为目标,建立抽水蓄能电站的容量优化配置模型;文献[21]以系统弃风光电量最小和接入的风光总规模最大为目标,建立一种水-风-光联合发电系统容量优化模型,有效促进风光的并网消纳。上述研究较少涉及到利用区域内现有的多类型水电站的协调能力,对风光电站的装机容量进行优化配置。

本文充分利用区域内现有的径流式水电站、梯级水电站和抽水蓄能电站共同调节风光出力的波动性,提出多类型水电-风光联合系统运行策略。在此基础上,综合考虑风光电站投资建设成本、系统运行维护成本、购电成本以及风光发电占负荷需求比例等指标,建立一种多类型水电协调的风光电站容量优化配置模型。采用联合系统运行策略,得出综合最优的风光电站容量配置方案,达到电网对风光消纳量增加的目的。

1 多类型水电站出力模型

1.1 径流式水电站出力模型

径流式水电站为没有水库或水库库容很小,对天然河水流量无调节能力或调节能力很小的水电

站,其出力模型如式(1)所示。

$$P_{R',l,t} = \rho g \eta_{R',l} Q_{R',l,t} H_{R',l,t} \quad (1)$$

式中: $P_{R',l,t}$ 为第 l 个径流式水电站在 t 时刻的出力; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; $\eta_{R',l}$ 为发电效率; $Q_{R',l,t}$ 为发电流量; $H_{R',l,t}$ 为发电水头。

1.2 梯级水电站出力模型

一般来说,梯级水库是由一组沿河流串联或并联的水库组成,各个水库之间相互影响,为了量化水库调蓄能力,建立一种考虑串并联型梯级水库的水量时空耦合模型,如图 1 所示,耦合模型公式如式(2)所示。

$$L_{k,t} = I_{k,t} + a_{k,k+1} Q_{k+1,t-1} + b_k Q_{k+2,t-1} \quad (2)$$

式中: $L_{k,t}$ 为第 k 个水库在 t 时刻的入库流量; $I_{k,t}$ 为水库自然来水量; $Q_{k+1,t-1}$ 、 $Q_{k+2,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻水库 $k+1$ 和 $k+2$ 的出库流量; $a_{k,k+1}$ 为 k 和 $k+1$ 个水库的关联系数,用 0-1 变量表示, $a_{k,k+1}=1$ 说明两个水库相关联,反之说明两个水库无关联; b_k 也为 0-1 变量,当水库 k 为两个并联水库的汇流点时 $b_k=1$,反之 $b_k=0$ 。当梯级水库为串联型时, $a_{k,k+1}=1$, $b_k=0$; 当梯级水库为串并联型时, $a_{k,k+1}=1$, $b_k=1$ 。

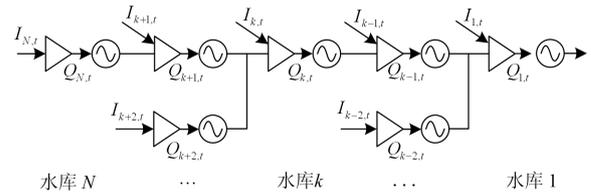


图 1 串并联型梯级水库水量时空耦合模型

Fig. 1 Series-parallel combination cascade reservoirs system

采用描述水位与库容关系的二次函数表示梯级水电站出力,公式为

$$P_{R'',k,t} = \xi_{1k} (V_{R'',k,t})^2 + \xi_{2k} (Q_{R'',k,t})^2 + \xi_{3k} V_{R'',k,t} Q_{R'',k,t} + \xi_{4k} V_{R'',k,t} + \xi_{5k} Q_{R'',k,t} + \xi_{6k} \quad (3)$$

式中: $P_{R'',k,t}$ 为第 k 个梯级水电站在 t 时刻的出力; $Q_{R'',k,t}$ 为发电流量; $V_{R'',k,t}$ 为水库储水容量; $\xi_{1k}, \dots, \xi_{6k}$ 为第 k 个梯级水电站的发电系数。

1.3 抽水蓄能电站出力模型

抽水蓄能电站可看作为一个能量存储装置,在负荷低谷时段通过抽水作业以水势能的形式存储,在用电高峰时段通过排水发电将水的势能转换为电能送出,实现电能的时间和空间上的转移与再分配。

抽水蓄能电站是一个包含水、机、电的复杂控制系统,由 4 个子系统构成,分别为压力引水系统、

可逆式机组、调速器以及发电电动机,其中可逆式机组包括水泵和水轮机。抽水蓄能机组调节系统的结构示意图如图 2^[22]所示。

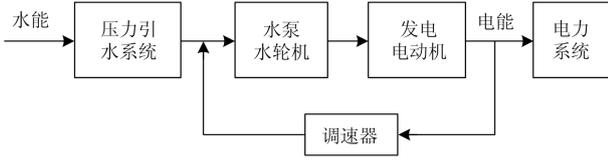


图 2 抽水蓄能机组调节系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the regulatory system of pumped storage

当运行在水泵抽水工况时,水泵抽水功率 $P_{R^*,o,t,Pump}$ 为

$$P_{R^*,o,t,Pump} = \left(\frac{\pi}{30} \right) \eta_{o,Pump} M_{o,1} n_{o,1} D_o^2 H_{R^*,o,t,Pump}^{1.5} \quad (4)$$

式中: $H_{R^*,o,t,Pump}$ 为第 o 个抽水蓄能电站在 t 时刻的抽水水头; D_o 为转轮直径; $M_{o,1}$ 为单位力矩; $n_{o,1}$ 为单位转速; $\eta_{o,Pump}$ 为抽水效率。

当运行在水轮机发电工况时,水轮机的发电功率 $P_{R^*,o,t,Dis}$ 为

$$P_{R^*,o,t,Dis} = g \eta_{o,Dis} Q_{R^*,o,t,Dis} D_o^2 H_{R^*,o,t,Dis}^{1.5} \quad (5)$$

式中: $Q_{R^*,o,t,Dis}$ 为第 o 个抽水蓄能电站在 t 时刻的发电流量; $H_{R^*,o,t,Dis}$ 为发电水头; $\eta_{o,Dis}$ 为发电效率。

2 多类型水电-风光联合系统运行策略

水电的调节能力为有效平抑风光出力的波动性和协调风光出力与负荷需求之间的供需平衡。考虑到三种水电的调节能力和运行成本,本文以径流式水电作为基底负荷,需要水电参与调节时,采用先投入梯级水电站后投入抽水蓄能电站的顺序。调节过程详述如下。

1) 区域内的径流式水电-风光出力无法满足负荷需求时

首先投入梯级水电站,其调节能力可从水量调节出发进行刻画。当风光出力增加时,梯级水电站通过减少发电流量的方式来减少机组出力。发电流量调节量 $\Delta Q_{J,k,t}$ 的计算公式为

$$\Delta Q_{J,k,t} = \min(Q_{k,t} - Q_{k,min}, Q_{J,k,t}) \quad (6)$$

$$Q_{J,k,t} = f^{-1} \left(\lambda_1 P_{e,k} / \sum_{k=1}^{N_R} P_{e,k} \right) \quad (7)$$

式中: $Q_{J,k,t}$ 为第 k 个梯级水电站 t 时刻减发功率所

需发电流量; $Q_{k,min}$ 为第 k 个梯级水电站的最小发电流量; $P_{e,k}$ 为第 k 个梯级水电站的额定功率; N_R 为梯级水电站数量; λ_1 为相关系数; $f^{-1}(\cdot)$ 为式(3)的反函数。

此时,梯级水电站的减发功率 $P_{R^*,J,t}$ 可由式(8)表示。

$$P_{R^*,J,t} = \sum_{k=1}^{N_R} f(\Delta Q_{J,k,t}) \quad (8)$$

式中, $f(\cdot)$ 为式(3)表示的函数。

当风光出力减小时,梯级水电站通过增加发电流量的方式来增加机组出力。发电流量调节量 $\Delta Q_{Z,k,t}$ 的计算公式为

$$\Delta Q_{Z,k,t} = \min(Q_{k,max} - Q_{k,t}, Q_{Z,k,t}) \quad (9)$$

$$Q_{Z,k,t} = f^{-1} \left(\lambda_2 P_{e,k} / \sum_{k=1}^{N_R} P_{e,k} \right) \quad (10)$$

式中: $Q_{Z,k,t}$ 为第 k 个梯级水电站 t 时刻增发功率所需发电流量; $Q_{k,max}$ 为第 k 个梯级水电站的最大发电流量; λ_2 为相关系数。

此时,梯级水电站的增发功率 $P_{R^*,Z,t}$ 可由式(11)表示。

$$P_{R^*,Z,t} = \sum_{k=1}^{N_R} f(\Delta Q_{Z,k,t}) \quad (11)$$

如果梯级水电站参与调节后仍然无法满足负荷需求,需要利用抽水蓄能电站排水发电进行调节。为了详细刻画多类型水电-风光联合系统运行策略,首先需要明确上水库中目前储存的水量。假设第 o 个抽水蓄能电站在 t 时刻上水库的蓄水量为 $V_{o,t}$,则 $t+1$ 时刻上水库的蓄水量 $V_{o,t+1}$ 可由式(12)计算。

$$V_{o,t+1} = V_{o,t} - Q_{o,t,Dis} + Q_{o,t,Pump} \quad (12)$$

式中: $Q_{o,t,Dis}$ 为第 o 个抽水蓄能电站在 t 时刻的发电流量; $Q_{o,t,Pump}$ 为 t 时刻的抽水流量。

其次,为了计算径流-梯级-风光联合系统出力相对于负荷需求的差值,引入功率平衡 $P_{U,t}$,如式(13)所示。

$$P_{U,t} = P_{R^*,t} + P_{R^*,t} + P_{W,t} + P_{PV,t} - P_{Load,t} \quad (13)$$

式中: $P_{R^*,t}$ 为径流式水电站在 t 时刻的出力; $P_{R^*,t}$ 为梯级水电站在 t 时刻的出力; $P_{W,t}$ 为风电场在 t 时刻的出力; $P_{PV,t}$ 为光伏电站在 t 时刻的出力; $P_{Load,t}$ 为 t 时刻的负荷需求量。

$P_{U,t}$ 为负值时,表示抽水蓄能电站需要从上水

库排水发电, 此时, 抽水蓄能电站的发电出力如式(14)所示。

$$P_{R^*,t,Dis} = \sum_{o=1}^{N_{R^*}} P_{R^*,o,t,Dis} \quad (14)$$

式中: $P_{R^*,o,t,Dis}$ 为式(5)表示的函数; N_{R^*} 为抽水蓄能电站数量。

2) 区域内的径流式水电-风光出力大于负荷需求时

同样先调节梯级水电站使其控制在机组最小出力 $P_{R^*,t,min}$ 。

若此时还有多余的风光出力, 为减少弃风、弃光现象的发生, 需利用抽水蓄能电站进行调节。此时 $P_{U,t}$ 为正值, 通过水泵利用多余电量将下水库的水抽至上水库存储, 抽水功率如式(15)所示。

$$P_{R^*,t,Pump} = \sum_{o=1}^{N_{R^*}} P_{R^*,o,t,Pump} \quad (15)$$

式中, $P_{R^*,o,t,Pump}$ 为式(4)表示的函数。

3 考虑多类型水电协调的风光电站容量优化配置模型

考虑到带有水库的梯级水电站和抽水蓄能电站的调蓄特性, 即利用水库进行蓄水、排水调节以实现水电站的出力调整。同时, 采用上述所提出的多类型水电-风光联合系统运行策略, 建立一种多类型水电协调的风光电站容量优化配置模型。

3.1 目标函数

以风光电站投资建设成本、联合系统运行维护成本及购电成本最小和风光发电占负荷需求比例最大为目标, 分别表示如下。

1) 风光电站投资建设成本、联合系统运行维护成本以及购电成本之和 F_1

$$\min F_1 = f_1 + f_2 + f_3 \quad (16)$$

(1) 风光电站投资建设成本 f_1

$$f_1 = \frac{d(1+d)^T}{(1+d)^T - 1} \left(\sum_{m=1}^{N_W} C_{W,m} S_{W,m} + \sum_{n=1}^{N_{PV}} C_{PV,n} S_{PV,n} \right) \quad (17)$$

式中: d 为折旧率; T 为工程年限; $S_{W,m}$ 、 $S_{PV,n}$ 分别为第 m 个风电场和第 n 个光伏电站的装机容量; $C_{W,m}$ 、 $C_{PV,n}$ 分别为第 m 个风电场和第 n 个光伏电站单位装机容量的投资成本; N_W 、 N_{PV} 分别为风电场和光伏电站数量。

(2) 联合系统运行维护成本 f_2

$$f_2 = \sum_{t=1}^{8760T} \left[\sum_{l=1}^{N_{R^*}} \psi_{R^*,l} E_{R^*,l,t} + \sum_{k=1}^{N_{R^*}} \psi_{R^*,k} E_{R^*,k,t} + \sum_{o=1}^{N_{R^*}} \left(\nu \psi_{R^*,o,Dis} E_{R^*,o,t,Dis} + (1-\nu) \psi_{R^*,o,Pump} E_{R^*,o,t,Pump} \right) + \sum_{m=1}^{N_W} \psi_{W,m} E_{W,m,t} + \sum_{n=1}^{N_{PV}} \psi_{PV,n} E_{PV,n,t} \right] \quad (18)$$

式中: $E_{R^*,l,t}$ 、 $E_{R^*,k,t}$ 、 $E_{W,m,t}$ 、 $E_{PV,n,t}$ 分别为第 l 个径流式水电站、第 k 个梯级水电站、第 m 个风电场、第 n 个光伏电站运行时间 t 内的发电量; $E_{R^*,o,t,Dis}$ 、 $E_{R^*,o,t,Pump}$ 分别为第 o 个抽水蓄能电站的排水发电量和抽水电量; $\psi_{R^*,l}$ 、 $\psi_{R^*,k}$ 、 $\psi_{W,m}$ 、 $\psi_{PV,n}$ 分别为第 l 个径流式水电站、第 k 个梯级水电站、第 m 个风电场、第 n 个光伏电站单位发电量的运行维护成本; $\psi_{R^*,o,Dis}$ 、 $\psi_{R^*,o,Pump}$ 分别为第 o 个抽水蓄能电站单位排水发电量和单位抽水电量的运行维护成本; ν 为 0-1 变量, $\nu=1$ 表示抽水蓄能电站运行在发电工况, $\nu=0$ 表示抽水蓄能电站运行在抽水工况。

(3) 联合系统购电成本 f_3

$$f_3 = c_B \sum_{t=1}^{8760T} P_{B,t} \quad (19)$$

式中: $P_{B,t}$ 为 t 时刻的系统购电功率; c_B 为单位购电成本。

2) 风光发电占负荷需求比例 F_2

$$\max F_2 = \frac{\sum_{t=1}^{8760T} \sum_{m=1}^{N_W} P_{W,m,t} + \sum_{t=1}^{8760T} \sum_{n=1}^{N_{PV}} P_{PV,n,t}}{\sum_{t=1}^{8760T} P_{Load,t}} \quad (20)$$

式中: $P_{W,m,t}$ 、 $P_{PV,n,t}$ 分别为第 m 个风电场和第 n 个光伏电站在 t 时刻的出力; $P_{Load,t}$ 为 t 时刻的负荷需求量。

3.2 多目标处理

考虑到目标函数 F_1 、 F_2 在量纲和数量级上的不同, 采用 min-max 标准化方法进行归一化处理^[23], 如式(21)所示。

$$y_i^* = (y_i - y_{i\min}) / (y_{i\max} - y_{i\min}) \quad (21)$$

式中: y_i^* 为目标函数归一化之后的值; y_i 为目标函数的真实值; $y_{i\max}$ 、 $y_{i\min}$ 分别为对应目标函数的最大、最小值。归一化处理后通过加权法将多目标问题转化为单目标问题, 并选取对应的权重系数分别为 0.4、0.6。

3.3 约束条件

对于一些常规的约束条件, 如系统功率平衡、

多类型水电站出力等约束,在此不再赘述、多类型水电协调的风电站容量优化配置模型重点考虑的约束条件如下所述。

1) 多类型水电站运行约束

(1) 径流式水电站

$$Q_{R',l,\min} \leq Q_{R',l,t} \leq Q_{R',l,\max} \quad l=1,2,\dots,N_{R'} \quad (22)$$

式中: $Q_{R',l,\max}$ 、 $Q_{R',l,\min}$ 分别为第 l 个径流式水电站的最大、最小发电流量。

(2) 梯级水电站

$$\begin{cases} Q_{R'',k,\min} \leq Q_{R'',k,t} \leq Q_{R'',k,\max} \\ V_{R'',k,\min} \leq V_{R'',k,t} \leq V_{R'',k,\max} \end{cases} \quad k=1,2,\dots,N_{R''} \quad (23)$$

式中: $Q_{R'',k,\max}$ 、 $Q_{R'',k,\min}$ 分别为第 k 个梯级水电站的最大、最小发电流量; $V_{R'',k,\max}$ 、 $V_{R'',k,\min}$ 分别为第 k 个梯级水电站的最大、最小库容。

(3) 抽水蓄能电站

$$\begin{cases} Q_{R''',o,\text{Dis},\min} \leq Q_{R''',o,t,\text{Dis}} \leq Q_{R''',o,\text{Dis},\max} \\ Q_{R''',o,\text{Pump},\min} \leq Q_{R''',o,t,\text{Pump}} \leq Q_{R''',o,\text{Pump},\max} \\ V_{R''',o,\min} \leq V_{R''',o,t} \leq V_{R''',o,\max} \\ |P_{R''',o,t,\text{Dis}} - P_{R''',o,t-1,\text{Dis}}| \leq \Delta P_{R''',o,\text{Dis}} \end{cases} \quad o=1,2,\dots,N_{R'''} \quad (24)$$

式中: $Q_{R''',o,\text{Dis},\max}$ 、 $Q_{R''',o,\text{Dis},\min}$ 分别为第 o 个抽水蓄能电站的最大、最小发电流量; $Q_{R''',o,\text{Pump},\max}$ 、 $Q_{R''',o,\text{Pump},\min}$ 分别为最大、最小抽水流量; $V_{R''',o,\max}$ 、 $V_{R''',o,\min}$ 分别为第 o 个抽水蓄能电站上水库的最大、最小库容; $P_{R''',o,t,\text{Dis}}$ 为第 o 个抽水蓄能电站在 t 时刻的发电出力; $\Delta P_{R''',o,\text{Dis}}$ 为第 o 个抽水蓄能电站在发电工况下单个时段的最大爬坡速率,抽水工况下与此类似。

2) 风电场运行约束

$$\begin{cases} S_{W,m,\min} \leq S_{W,m} \leq S_{W,m,\max} \\ 0 \leq P_{W,m,t} \leq \zeta S_{W,m} \end{cases} \quad m=1,2,\dots,N_W \quad (25)$$

式中: $S_{W,m,\max}$ 、 $S_{W,m,\min}$ 分别为第 m 个风电场的最大、最小装机容量; ζ 为风电场的出力系数。

3) 光伏电站运行约束

$$\begin{cases} S_{PV,n,\min} \leq S_{PV,n} \leq S_{PV,n,\max} \\ 0 \leq P_{PV,n,t} \leq \zeta S_{PV,n} \end{cases} \quad n=1,2,\dots,N_{PV} \quad (26)$$

式中: $S_{PV,n,\max}$ 、 $S_{PV,n,\min}$ 分别为第 n 个光伏电站的最大、最小装机容量; ζ 为光伏电站的出力系数。

4) 联络线传输功率约束

$$0 \leq P_t \leq P_{G,\max} \quad (27)$$

式中, $P_{G,\max}$ 为电网向联合系统输送的最大功率。

3.4 求解算法

本文所构建的容量优化配置模型具有复杂的非线性、多约束的特点,考虑采用基于极限学习机的改进粒子群算法(ELM-PSO)对模型进行求解^[24],图3为算法流程图。

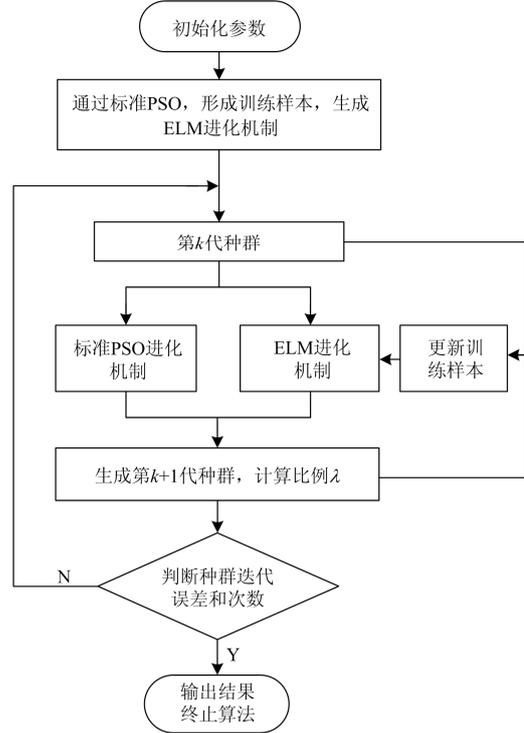


图3 基于极限学习机的改进粒子群算法流程

Fig. 3 ELM-PSO algorithm process

1) 初始化参数,如 M_p (种群规模)、 w_i (最大迭代次数)、 ε_p (迭代终止误差)、 $x_{0,i}$ (初始粒子随机生成)及速度 $v_{0,i}$ ($i=1,2,\dots,M_p$)等,迭代误差为^[25]

$$\varepsilon = \frac{1}{M_p} \sqrt{\sum_{i=1}^{M_p} (x_{j,i} - x_{j-1,i})^2} \quad (28)$$

2) 基于标准 PSO 对初始种群实现进化,选择合适的隔代数 L_M , 并获得极限学习机种群进化机制的训练样本,进而设定最初的分配比例 λ_p 。

3) 根据 λ_p , 随机从 j 代种群中选取 $\lambda_p M_p$ 个粒子,采用极限学习机种群进化机制生成 $t+1$ 代粒子;剩余粒子采用标准 PSO 生成,继续更新训练样本,得到更好的种群进化机制。

4) 计算平均适应度 $f_{j,1}$ 、 $f_{j,2}$, 并调整两者的分配比例。

5) 计算迭代误差 ε , 其值如小于迭代终止误差 ε_p 或者迭代次数 $j = J_{\max}$, 输出结果并终止算法;否则继续步骤 3)。

4 算例分析

4.1 参数设置

选取青海省可再生发电资源丰富的某个区域为例, 该区域包含 1 个装机容量为 240 MW 的径流式水电站、4 个装机总容量为 500 MW 的梯级水电站、1 个装机容量为 300 MW 的抽水蓄能电站、1 个风电场和 1 个光伏电站。各水、风、光电站的样本数据来源于中国气象局气象数据中心的监测数据、NASA 气象数据库和部分水文站/水库站的数据。风光电站投资建设成本、联合系统运行维护成本及购电成本如表 1 所示。抽水蓄能电站的抽水效率与发电效率分别取值为 0.9 和 0.8。

表 1 风光电站投资建设成本、联合系统运行维护成本及购电成本

经济成本	风电场	光伏电站	径流式水电站	梯级水电站	抽水蓄能电站	
					发电	抽水
投资成本/(元/MW)	9.1×10^6	8.5×10^6	—	—	—	—
运行成本/(元/MW·h)	72	134	23	32	46	60
购电成本/(元/MW·h)			300			

4.2 仿真结果分析

本文针对径流-梯级-风光、径流-抽蓄-风光和径流-梯级-抽蓄-风光 3 种不同水电和风光组成的联合系统, 采用提出的多类型水电-风光联合系统运行策略以及建立的容量优化配置模型进行仿真模拟。得出三种联合系统中风光电站装机容量的最优配置分别为 650 MW 和 760 MW、810 MW 和 790 MW、920 MW 和 810 MW。在对三种联合系统一年的仿真结果中选出一个典型日的运行情况进行分析比较, 结果如下。

1) 多类型水电-风光联合系统运行策略分析

(1) 径流-梯级-风光联合系统

图 4 中径流式水电站出力 $P_{R'}$ 作为基底负荷, 利用梯级水电站出力 $P_{R''}$ 对径流式水电站出力、光伏发电出力 P_{PV} 、风电出力 P_W 和负荷需求量 P_{Load} 的功率平衡进行调节。从图 4 中可以看出, 在径流-风光出力大于负荷需求时, 梯级水电站通过控制机组在最小出力状态以减小发电功率来促进风光的消纳(图

中区域 I 表示梯级水电站的调节量), 避免弃风、弃光现象的发生; 在径流-风光出力无法满足负荷需求时, 梯级水电站通过水库调节增加发电流量以弥补负荷需求差额, 但受到梯级水电站最大出力限制在 18~23 h 出现向电网大量购电 P_B 的情况, 增加了系统的运行成本。

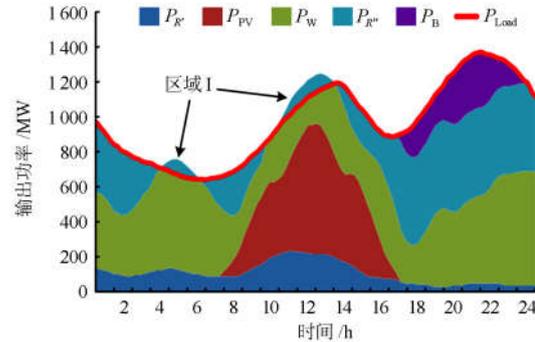


图 4 径流-梯级-风光联合系统典型日的累积输出功率
Fig. 4 Accumulated power output on typical day of run-of-river hydropower, cascade hydropower and wind-solar combined system

(2) 径流-抽蓄-风光联合系统

从图 5 中可以看出, 在径流-风光出力大于负荷需求时, 抽水蓄能电站 $P_{R''}$ 通过抽水作业消纳多余出力, 避免弃风、弃光现象的发生; 在径流-风光出力无法满足负荷需求时, 抽水蓄能电站通过排水发电参与调节以弥补负荷需求差额, 但是受到抽水蓄能电站最大发电功率的限制在 17~24 h 出现向电网大量购电 P_B 的情况。

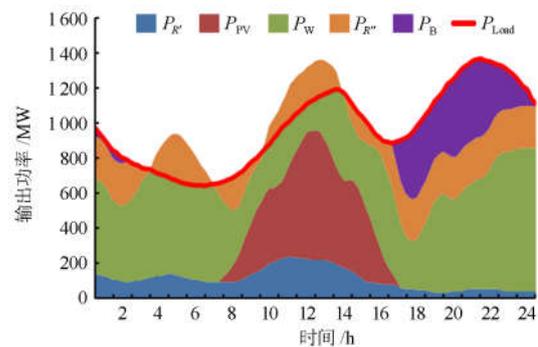


图 5 径流-抽蓄-风光联合系统典型日的累积输出功率
Fig. 5 Accumulated power output on typical day of run-of-river hydropower, pumped storage and wind-solar combined system

(3) 径流-梯级-抽蓄-风光联合系统

从图 6 中可以看出, 在径流-风光出力大于负荷需求时, 梯级水电站首先通过控制机组在最小出力状态以减小发电功率来促进部分风光的消纳(图中区域 II 表示梯级水电站的调节量), 由于梯级水电站

调节能力的限制仍有多余风光出力, 此时抽水蓄能电站进行抽水作业消纳剩余风光出力, 避免弃风、弃光现象的发生; 在径流-风光出力无法满足负荷需求时, 首先增加梯级水电站的发电流量以弥补负荷需求差额, 在梯级水电站处于最大出力状态仍然无法满足负荷需求时, 抽水蓄能电站再通过放水发电来满足负荷需求。

从3张图中对比得出, 径流-梯级-风光联合系统和径流-抽蓄-风光联合系统的运行策略能较好体现梯级水电站和抽水蓄能电站的调节能力, 平抑风光出力的波动性, 保持系统功率平衡并消纳更多的风光出力。但是由于水电站装机容量和最大出力的限制, 造成向电网大量购电的情况, 降低了系统运行的经济性。径流-梯级-抽蓄-风光联合系统的运行策略综合梯级水电站和抽水蓄能电站的调节能力, 二者协调运行能更好平抑风光出力的波动性。既促进了风光的消纳, 又提高了系统经济性。

2) 3种联合系统典型日的运行结果分析

表2 三种联合系统典型日的运行结果

Table 2 Operation result on typical day of three types of combined systems

序号	组合类型	风电装机容量/MW	光伏装机容量/MW	风光电站投资成本/元	系统日运行成本/元	日购电成本/元	风光占比/%
1	径流-梯级-风光	650	760	1.23×10^{10}	6.42×10^6	1.82×10^6	58.72
2	径流-抽蓄-风光	810	790	1.40×10^{10}	7.04×10^6	3.26×10^6	70.21
3	径流-梯级-抽蓄-风光	920	810	1.52×10^{10}	7.55×10^6	0	77.64

从表2中风光电站装机容量的配置结果可以得出, 系统1配置的风光电站装机容量最少, 而系统3配置的风光电站装机容量最多。其中, 系统2比系统1配置的风电、光伏装机容量分别多出160 MW和30 MW; 系统3比系统1配置的风电、光伏装机容量分别多出270 MW和50 MW。

3种联合系统典型日的运行结果中, 系统1与系统3相比, 前者的日运行成本低, 但是1号系统的日购电成本比二者日运行成本的差值更高。从系统日运行经济性方面考虑, 系统3的日运行经济性更好, 且系统3比系统1的风光占比高出18.92%。

系统2与系统3相比, 二者的日运行成本相差不大, 但是系统2的日购电成本远大于二者日运行成本的差值, 系统3的日运行经济性更好, 且系统3比系统1的风光占比高出7.43%。

综上所述, 径流-梯级-抽蓄-风光联合系统配置的风光电站装机容量最多, 且系统的日运行经济性最好、风光占比最高, 其运行结果最优。

5 结论

本文提出一种多类型水电-风光联合系统运行

下面给出以上3种联合系统的投资成本和典型日的运行成本、购电成本以及风光发电占负荷需求比例的对比分析, 如表2所示。

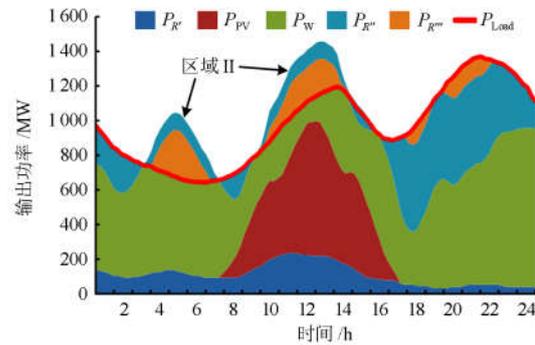


图6 径流-梯级-抽蓄-风光联合系统典型日的累积输出功率
Fig. 6 Accumulated power output on typical day of run-of-river hydropower, cascade hydropower, pumped storage and wind-solar combined system

策略, 并建立了考虑多类型水电协调的风光电站容量优化配置模型。综合考虑风光电站投资建设成本、联合系统运行维护成本、购电成本以及风光发电占负荷需求比例等指标进行仿真模拟, 得出一种最优的风光电站装机容量配置方案。并在3种联合系统一年的仿真结果中选出一个典型日的运行情况进行分析比较, 结果表明:

1) 采用多类型水电-风光联合系统运行策略, 利用不同水电站的调节能力可有效平抑风光出力的波动性, 保持系统功率平衡并促进风光的并网消纳。

2) 通过对3种联合系统典型日的运行结果分析得出, 径流-梯级-抽蓄-风光联合系统对梯级水电站和抽水蓄能电站的协调运行, 增强了水电的调节能力, 可更好地平抑风光出力波动性, 既促进了风光的消纳, 又提高了系统运行的经济性。为采用多类型水电协调进行风光装机容量优化配置提供可行性思路。

参考文献

[1] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 51-57.

- FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 51-57.
- [2] 黄予春, 曹成涛, 顾海. 基于 IKFCM 与多模态 SSO 优化 SVR 的光伏发电短期预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(24): 96-103.
- HUANG Yuchun, CAO Chengtao, GU Hai. Short-term photovoltaic power generation forecasting scheme based on IKFCM and multi-mode social spider optimization SVR[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 96-103.
- [3] 田茹, 张东英. 风电出力波动性概述[J]. *科技风*, 2012(7): 12-12.
- TIAN Ru, ZHANG Dongying. Overview of wind power output volatility[J]. *Technology Wind*, 2012(7): 12-12.
- [4] 关中杰, 鲁效平, 李钢强, 等. 基于风速模型的风电机组动态转矩前馈控制技术[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(22): 5338-5345.
- GUAN Zhongjie, LU Xiaoping, LI Gangqiang, et al. Dynamic torque feed forward control technology of wind turbine based on wind speed model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(22): 5338-5345.
- [5] MAGDY G, SHABIB G, ELBASET A A, et al. Optimized coordinated control of LFC and SMES to enhance frequency stability of a real multi-source power system considering high renewable energy penetration[J]. *Protection Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 407-421. DOI: 10.1186/s41601-018-0112-2.
- [6] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(12): 108-114.
- DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU RuiPeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(12): 108-114.
- [7] 晁颖, 金焯, 朱晶亮, 等. 考虑光伏发电出力不确定性的年度最大负荷概率预测[J]. *广东电力*, 2018, 31(9): 83-89.
- CHAO Ying, JIN Ye, ZHU Jingliang, et al. Probabilistic forecast of annual peak load with consideration of photovoltaic generation output uncertainties[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(9): 83-89.
- [8] 黄伟, 陈雪, 林怀德, 等. 考虑光伏不确定性的配电网负荷特性概率评估[J]. *广东电力*, 2018, 31(6): 84-90.
- HUANG Wei, CHEN Xue, LIN Huaide, et al. Evaluation on load characteristic probability of power distribution network considering photovoltaic uncertainty[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(6): 84-90.
- [9] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(10): 146-154.
- ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shi'en, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(10): 146-154.
- [10] 王敏骁, 苏娟, 梁琛. 西北大规模新能源消纳问题成因分析及综合应对策略研究[J]. *电网与清洁能源*, 2017, 33(10): 124-128.
- WANG Minxiao, SU Juan, LIANG Chen. Research on cause analysis and coping strategies on consumption of large scale renewable in Northwest China[J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(10): 124-128.
- [11] 沈小军, 付雪姣, 周冲成, 等. 风电机组风速-功率异常运行数据特征及清洗方法[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(14): 3353-3361.
- SHEN Xiaojun, FU Xuejiao, ZHOU Chongcheng, et al. Characteristics of outliers in wind speed-power operation data of wind turbines and its cleaning method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(14): 3353-3361.
- [12] 张博庭. 中国水电从追赶到引领的嬗变[J]. *中国电力企业管理*, 2018(25): 72-79.
- ZHANG Boting. Sinohydro's evolution from catch-up to leader[J]. *China Power Enterprise Management*, 2018(25): 72-79.
- [13] 樊启祥. 高质量开发水电资源全面助力西藏发展[J]. *水力发电*, 2019, 45(2): 1-3, 34.
- FAN Qixiang. High-quality development of hydropower resources to fully contribute to Tibet's development[J]. *Water Power*, 2019, 45(2): 1-3, 34.
- [14] 陈文伯, 李灿, 姚李孝. 梯级水电站与光伏电站的联合优化运行[J]. *电网与清洁能源*, 2017, 33(8): 113-117.
- CHEN Wenbo, LI Can, YAO Lixiao. Joint optimal operation of cascaded hydropower station and photovoltaic power station[J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(8): 113-117.
- [15] 肖欣, 周渝慧, 何时有, 等. 含流域梯级水电的水火风互补发电系统联合运行优化[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(2): 100-108.
- XIAO Xin, ZHOU Yuhui, HE Shiyou, et al. Optimal joint operation of hydro-thermal-wind hybrid power system

with cascaded hydro power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 100-108.

[16] 温正楠, 刘继春. 风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J/OL]. 电网技术, 2019: 1-13[2019-02-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1142>.
WEN Zhengnan, LIU Jichun. An optimal scheduling method to hybrid wind-solar-hydro power generation system with data center in demand side[J]. Power System Technology, 2019: 1-13[2019-02-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1142>.

[17] LI J, WANG S, YE L, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.

[18] JURASZ J, MIKULIK J, KRZYWDA M, et al. Integrating a wind- and solar-powered hybrid to the power system by coupling it with a hydroelectric power station with pumping installation[J]. Energy, 2018, 144: 549-563.

[19] 曹宇, 汪可友, 石文辉, 等. 风-光-海水抽蓄联合发电系统的调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 16-23.
CAO Yu, WANG Keyou, SHI Wenhui, et al. Study on dispatching strategies of a wind-solar-seawater pumped storage hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 16-23.

[20] 杨和稳, 任增. 风光互补发电系统中抽水蓄能电站的优化配置[J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 111-115.
YANG Hewen, REN Zeng. Research on optimal allocation of pumped storage station in wind and photovoltaic complementary generation system[J]. Computer Simulation, 2015, 32(4): 111-115.

[21] 朱燕梅, 陈仕军, 黄炜斌, 等. 一定弃风光率下的水风光互补发电系统容量优化配置研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 215-218.
ZHU Yanmei, CHEN Shijun, HUANG Weibin, et al. Optimal capacity configuration of hydro-photovoltaic-wind complementary power generation system under wind and photovoltaic curtailment[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 215-218.

[22] 吕崇帅. 含风光水储电源的电力系统优化调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
LÜ Chongshuai. Research on power system optimal dispatch with wind-PV-hydro-storage power source[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[23] 朱兰, 周雪莹, 唐陇军, 等. 计及可中断负荷的微电网多目标优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 151-158.
ZHU Lan, ZHOU Xueying, TANG Longjun, et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 151-158.

[24] 熊铜林. 流域水风光互补特性分析及联合发电随机优化协调调度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
XIONG Tonglin. Research on complementary analysis and combined generation stochastic optimal coordinated scheduling of hydro-wind-solar within river basin[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.

[25] 易德鑫. 计及风电出力不确定性的虚拟电厂随机优化调度[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
YI Dexin. Virtual power plant stochastic optimal dispatch considering uncertain outputs from wind generators[D]. Changsha: Changsha University of Science & technology, 2013.

收稿日期: 2019-03-30; 修回日期: 2019-05-13

作者简介:

苏康博(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制、新能源发电技术。E-mail: 1239486307@qq.com

杨洪明(1972—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电力系统运行与控制; E-mail: yhm5218@163.com

(编辑 周金梅)