

基于变速抽蓄的新能源送端电网能量平衡优化控制方法研究

王靖¹, 孙帆¹, 李晖¹, 兰宇², 陈艳波³

(1.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710061; 2.华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650220; 3.华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对高比例新能源与抽水蓄能联合发电的送端电网协调关系复杂可能导致新能源消纳能力不足的问题, 文章提出基于变速抽蓄的新能源送端电网能量平衡优化控制方法。首先, 研究变速抽水蓄能机组的运行特性, 分析基于变频器控制的变速抽水蓄能机组有功无功输出特性; 其次, 对变速抽蓄提升新能源发电能力进行分析, 建立新能源送端电网能量平衡优化模型; 再次, 对量子粒子群算法进行改进, 提出新能源送端电网能量平衡优化控制算法; 最后, 参考西北某地区的新能源基地外送模式, 构建变速抽水蓄能电站以及常规抽水蓄能电站与新能源配合的典型场景, 对比分析变速抽水蓄能电站与常规抽水蓄能电站提升新能源消纳的能力。仿真结果表明, 基于变速抽水蓄能的送端电网能量平衡优化控制方法能够提高新能源利用率, 可显著提升新能源的消纳水平。

关键词: 变速抽水蓄能电站; 新能源消纳; 光伏电站; 粒子群算法

中图分类号: TK51; TM612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)07-0964-08

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 新能源规模将会不断扩大, 且新形态电力负荷种类复杂, 调节能力差, 源荷的双重不确定性会导致峰谷差不断增大, 对电网的安全稳定运行产生较大冲击^[1,2]。在运营优化方面, 风光分布不均决定了清洁能源必须在更大范围内消纳, 须要以多能互补、跨区域交易与储能的形式配置新能源资源^[3]。变速抽水蓄能电站作为储能领域的一种关键手段, 已经逐步应用于光伏、风电等多种间歇性能源^[4]。通过多种电源互补策略, 能够显著提升新能源的消纳能力, 实现电能的可可靠供应与利用。

针对抽水蓄能电站与新能源的协调运行, 文献[5]提出了一种风光蓄并网联合运行系统容量优化配置的方法, 联合运行可以最大限度地利用风能和太阳能, 降低系统成本, 提高经济效益, 实现连续稳定运行, 减少碳排放。文献[6]建立了抽水蓄能电站参与电能市场和多时间尺度备用市场的最优决策模型, 重点分析了备用补偿价格对其运营策略的影响, 研究表明, 抽水蓄能电

站通过提供备用服务, 可以显著提高其运行收益。文献[7]探讨了风光互补发电系统中抽水蓄能电站的调节可靠性, 建立了光-风-水混合发电系统的电网辅助调峰与可靠性提升优化模型, 研究表明, 抽水蓄能电站对抑制风光发电功率的波动具有重要意义。文献[8]建立了多个电力用户日前电量共享的协调优化模型, 并根据共享参与者对应的贡献函数进行利益的最优分配, 制定了水电光伏联合发电系统的优化调度策略。文献[9]分析了抽水蓄能电站的主要运行方式和运行效益, 提出了适合中小型抽水蓄能电站的运行方式。文献[10]基于变速抽水蓄能机组, 建立了风光储-抽蓄的鲁棒优化调度模型。目前的研究大多针对抽蓄电站相关约束条件以及联合发电系统的调度算法, 对变速抽蓄机组能够提升新能源消纳能力的理论分析不足, 也缺少与常规抽蓄机组的新能源消纳能力的对比分析。

国内外学者对抽水蓄能机组参与电网运行, 提高电网系统的效率和效益进行了初步研究。文献[11]建立了抽水蓄能电站参与电力竞价及其在

收稿日期: 2023-09-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于知识引导的电力系统数据驱动状态估计研究”(52077076);

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司项目“新型电力系统环境下水电机组网源配合关键技术研究”。

作者简介: 王靖(1979-), 男, 正高级工程师, 主要从事抽水蓄能机组并网运行工作。E-mail: chenyanbo19@yeah.net

辅助服务市场中灵活调整容量的风险收益模型,重点研究了抽水蓄能电站在辅助服务市场中的定价机制和成本回收,认为合理的辅助服务市场定价机制有助于实现抽水蓄能电站的成本回收。文献[12]采用强化学习算法获得抽水蓄能电站的实时竞价策略,改进后的竞价策略能为抽水蓄能电站带来更好的效益,并且具有高于市场平均水平的抗风险能力。目前相关文献对抽水蓄能如何提高电网的能效进行了一些研究,但仅考虑了变速抽蓄的自身控制特性,较少考虑变速抽蓄参与新能源送端电网的能量控制。

本文针对基于变速抽蓄的新能源送端电网能量优化控制问题,首先,研究了变速抽水蓄能机组的运行控制特性,分析变速抽水蓄能机组网侧和机侧变频器的控制方式;然后,对提升新能源发电能力进行分析,研究新能源-抽水蓄能能量平衡模型,并建立新能源送端电网能量平衡优化模型,在此基础上,对量子粒子群算法进行改进,提出新能源送端电网能量平衡优化控制算法;最后,参考西北某地区的新能源基地外送模式,构建变速抽水蓄能电站以及常规抽水蓄能电站与新能源配合的典型场景,进行全年 8 760 h 运行模拟,对比分析变速抽水蓄能电站与常规抽水蓄能电站提升新能源消纳的能力。分析结果表明,变速抽水蓄能电站能够提高新能源利用率,可显著提升新能源的消纳水平。

1 变速抽蓄运行控制特性

1.1 变速抽水蓄能机组拓扑结构

双馈变速抽水蓄能系统(Double-fed Variable Speed Pumped Storage System, DVSPS)主要包括双馈感应电机、可逆式水泵水轮机及其调速设备和变频器, DVSPS 的架构如图 1 所示。双馈感应电机与可逆式水泵水轮机协调运行能够促进电能与机械能之间的转换^[13]。可逆式水泵水轮机通过调

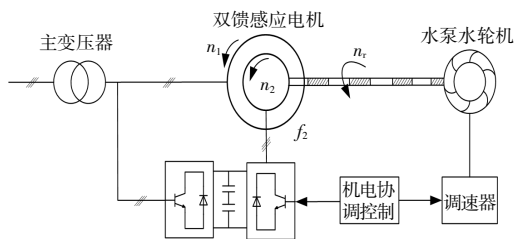


图 1 变速抽蓄机组结构示意图

Fig.1 Structure diagram of variable speed pumped storage unit

速系统调整导叶的开度,系统进而能够调节输出功率。DVSPS 中双馈感应电机的转子与电网通过变频器进行能量的相互传递。

DVSPS 中双馈感应电机的定子与同步电机一致,而 DVSPS 中双馈感应电机的转子是对称分布的三相绕组^[14]。DVSPS 中双馈感应电机的机械转速与同步转速的关系式如下:

$$n_1 = n_2 \pm n_r \quad (1)$$

式中: n_1, n_2, n_r 分别为 DVSPS 中双馈感应电机的转速、机械转速、同步旋转速度。

$$\begin{cases} f_1 = \frac{n_1}{60} & f_2 = \frac{n_2}{60} \\ f_2 \pm \frac{n_r}{60} = f_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_1, f_2 分别为 DVSPS 中双馈感应电机的定子侧电流频率和转子侧电流频率。

1.2 变速抽水蓄能机组控制特性分析

传统的抽水蓄能机组在电网中主要根据调度计划曲线进行有功调节,以满足电网在不同时段的峰谷需求。为了避开振动区,传统抽水蓄能机组通常以恒定值进行有功输出调节,且在抽水工况下仅能恒功率运行,大大限制了其对于电网的辅助调节能力。

DVSPS 的有功功率调节主要是基于电气过程,具有快速的响应速度,其出色的运行特性和可靠性能够在新形态电力系统中发挥着关键作用。

DVSPS 变频器控制主要包括网侧控制和机侧控制。在网侧,对电压、电流采用 PI 控制可以实现无差控制,电流控制可用如下公式表达:

$$\begin{cases} u_d = -\left(K_{ip} + \frac{K_{id}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ u_q = -\left(K_{ip} + \frac{K_{iq}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (3)$$

电压环的控制方程为

$$i_d^* = \left(K_{up} + \frac{K_{ud}}{s}\right)(u_{dc}^* - u_{dc}) \quad (4)$$

式中: K_{ip}, K_{iq} 为 DVSPS 的比例系数; K_{id}, K_{iq} 为 DVSPS 的积分系数; i_d^* 为 DVSPS 的 d 轴参考电流; u_{dc}^* 为 DVSPS 的直流参考电压。

DVSPS 通过控制定子电流控制电压:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = \psi_s \\ \psi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

电机的定转子电流关系为

$$\begin{cases} i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ i_{sd} = \frac{1}{L_s} (\psi_s - L_m i_{rd}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_s$ 分别为 DVSPS 中双馈感应电机的定子磁链的 $d, q, 0$ 轴分量; i_{sq}, i_{sd} 为 DVSPS 中双馈感应电机的定子电流。

DVSPS 并网后双馈感应电机的转子电流与功率输出的关系为

$$\begin{cases} i_{rq} = \frac{2L_s}{3L_m} \frac{P}{u_s} \\ i_{rd} = -\frac{2L_s}{3L_m} \frac{Q}{u_s} + \frac{\psi_s}{L_m} \end{cases} \quad (7)$$

基于 PI 控制下的转子电流控制模式为

$$\begin{cases} i_{rq}^* = \left(K_{pp} + \frac{K_{pl}}{s} \right) (P^* - P) \\ i_{rd}^* = \left(K_{pp} + \frac{K_{pl}}{s} \right) (Q^* - Q) \end{cases} \quad (8)$$

内环的转子电流环控制方程为

$$\begin{cases} u_{rd} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{rd}^* - i_{rd}) + \Delta u_{rd} \\ u_{rq} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{rq}^* - i_{rq}) + \Delta u_{rq} \end{cases} \quad (9)$$

与传统的抽水蓄能机组做对比, DVSPS 可在一定的转速范围内调整出力, 进而对送端电网能量平衡进行优化。

2 新能源送端电网能量平衡优化模型

2.1 变速抽蓄提升新能源发电能力分析

DVSPS 技术是目前全球最先进的抽水蓄能技术之一, DVSPS 具有稳定性好、变速恒频发电能力强、调节范围广泛、能够实现快速响应和深度调节系统无功等优点。DVSPS 能够使机组的年平均运行效率提升 2.8%~4.7%。表 1 为常规定速抽水蓄能机组与 DVSPS 性能对比^[15]。与传统抽水蓄能机组相比, DVSPS 爬坡能力可由 0.50~1.0 扩大至 0.38~1.0, DVSPS 抽水输出调整范围可由按水头控制提升至额定功率的 0.55~1.0。

如图 2 所示, DVSPS 的抽水容量为 G_0 , 并且须要消耗一定的充电/抽水能量 W_0 。在这种情况下, 当新能源大发时增加系统负荷, 抽蓄设施应在低谷负荷(即最小负荷)时段将部分负荷曲线向右平移一定的距离。此外, 必须确保曲多边形 12345

表 1 定速与变速抽水蓄能机组性能对比

Table 1 Performance comparison of constant speed and variable speed pumped storage unit

项目	定速机组	变速机组
机组爬坡能力	0.50~1.0	0.38~1.0
输出调整	固定容量	有功控制
抽水输出调整范围	按水头控制	额定功率的 0.55~1.0
对于电网稳定支撑	有功无功耦合控制	有功无功独立控制
响应水平	1~3 min	3~10 ms
扩大机组适应的水头变幅范围	约 1.22	1.22~1.46
效率/%	76~84	79~89

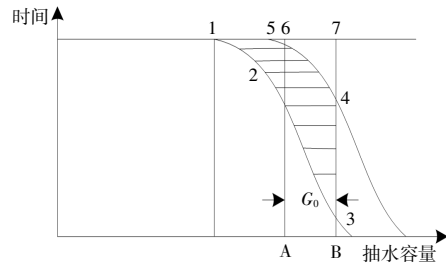


图 2 抽蓄机组抽水与负荷调节的关系

Fig.2 Relationship between pumping and load regulation of pumped storage unit

的面积与给定值相等。将图 2 中右上方 12345 视为等效的持续负荷曲线。通过找出适当的曲线段 AB, 令 $AB=G_0$, 使相应曲多边形的面积等于特定值 $6237=W_0$, 就能确定出 2, 3 两点位置 A 和 B。一旦明确了 2, 3 两点的位置, 就可以调整等效持续负荷曲线(电量函数)的形状。

2.2 抽蓄-新能源协同能量平衡优化模型

针对我国西北地区所具有的大规模、大容量新能源发电资源构成的电网清洁能源外送运行方式, 以光伏发电、抽水蓄能电站进行联合协同运行, 通过抽水蓄能电站的储水、放水调节, 提高光伏发电系统的可控性, 并促使大规模光伏高比例外送[16-18]。因此, 基于抽水蓄能电站-光伏电站协同配合的运行场景, 系统能量须在各时段(此处将优化周期设定为 24 h, 每一时间段设定为 1 h)满足以下等式方程。其中, 式(10)描述了抽蓄-光伏协同配合时系统总的输出功率方程; 式(11)描述了抽蓄-光伏协同配合时系统总的消耗电功率方程; 式(12)描述了抽蓄-光伏协同配合时系统总的能量平衡方程; 式(13)描述了光伏电站总的输出功率; 式(14)描述了抽蓄-光伏总的并网电功率。

$$P_{total,i} = P_{PV, total,i} + P_{G,i} + P_{storage,i} \quad (10)$$

$$D_{total,i} = P_{load,total,i} + P_{storage,i} + (1-\eta_s)P_{storage,i} + (1-\eta_c)P_{storage,i} + P_{PVL,i} \quad (11)$$

$$P_{total,i} = D_{total,i} \quad (12)$$

$$P_{PV,total,i} = P_{PV,i} + P_{PVL,i} \quad (13)$$

$$P_{B,total,i} = P_{PV,i} + P_{storage,i} \quad (14)$$

式中: $P_{total,i}$ 为系统在 i 时段的总输出功率; $P_{PV,total,i}$ 为光伏电站在 i 时段的输出电功率; $P_{G,i}$ 为火电厂在 i 时段的输出电功率; $P_{storage,i}$ 为 DVSPS 在 i 时段的输出电功率; $D_{total,i}$, $P_{load,total,i}$ 为系统在 i 时段的总耗电功率和负荷功率; $P_{storage,i}$ 为 DVSPS 在 i 时段的抽水蓄能功率; η_s 为 DVSPS 的蓄能效率; η_c 为 DVSPS 的放能效率; $P_{PVL,i}$ 为光伏电站在 i 时段的弃光功率; $P_{PV,i}$ 为光伏电站在 i 时段的并网电功率; $P_{B,total,i}$ 为抽蓄-光伏在 i 时段的并网总功率。

针对抽水蓄能电站运行过程中存在的能量损失,仅通过抽水蓄能电站调节,并不能够使得抽水蓄能电站和光伏电站获得最优的经济效益。因此,本文以抽蓄-光伏协同运行后的运行成本和污染物排放量最优为优化目标,建立抽蓄-新能源协同能量平衡优化模型,对抽蓄-光伏联合系统进行优化。

①优化目标 1——运行成本最优

$$\max F_1 = \sum_{i=1}^N (C_i P_{PV,i} + C_i P_{storage,i} - CC_i P_{storage,i} + b P_{storage,i}) \quad (15)$$

式中: $\max F_1$ 为抽蓄-光伏联合系统的运行成本; C_i 为抽蓄-光伏联合系统在 i 时段的并网电价; CC_i 为抽蓄-光伏联合系统中抽水蓄能电站在 i 时段的抽水蓄能成本; b 为折旧成本系数。

②优化目标 2——污染物排放量最优

当抽水蓄能电站、光伏电站出现并网功率短缺或者系统频率、电压发生波动时,须要原有电网中的火电厂进行功率调节,维持系统的稳定。因此,抽蓄-光伏联合系统的污染物排放量计算可以参考火电厂的污染物排放计算方法:

$$\max F_2 = \sum_{i=0}^n [\alpha (P_{PVL,i} - P_{PVL,i})^2 + \beta (P_{PVL,i} - P_{PVL,i}) - \gamma \Delta P_{G,i}] \quad (16)$$

式中: $\max F_2$ 为抽蓄-光伏联合系统的污染物排放量; $P_{PVL,i}$ 为光伏电站独立运行时在 i 时段的弃光功率; $\Delta P_{G,i}$ 为抽蓄-光伏联合协调运行下电网内火电厂在 i 时段应当减少的输出功率; α, β, γ 为

火电厂污染物排放系数。

$$P_{PVL,i} = \begin{cases} P_{PV,total,i}, & P_{PV,total,i} \leq P_{PV,\min} \\ P_{PV,total,i} - P_{PV,\max}, & P_{PV,total,i} \geq P_{PV,\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{PV,\min}$, $P_{PV,\max}$ 分别为光伏电站有功输出的最小、最大值。

抽蓄-新能源协同能量平衡优化模型须要满足的约束条件如下。

①抽水蓄能电站出力约束

$$\begin{cases} u_{storage} P_{g,\min} \leq P_{storage,i} \leq u_{storage} P_{g,\max} \\ (1-u_{storage}) P_{p,\min} \leq P_{storage,i} \leq (1-u_{storage}) P_{p,\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{g,\min}$, $P_{g,\max}$ 分别为 DVSPS 在 i 时段输出功率的最小值、最大值; $P_{p,\min}$, $P_{p,\max}$ 分别为 DVSPS 在 i 时段抽水蓄能功率的最小值、最大值; $u_{storage}$ 为 DVSPS 运行工况的描述系数,当 $u_{storage}=1$ 时,表示抽水蓄能电站正在放水输出功率,当 $u_{storage}=0$ 时,表示抽水蓄能电站正在抽水蓄能。

②抽蓄水库容量约束

$$\begin{cases} E_{storage,u,\min} \leq E_{storage,u} \leq E_{storage,u,\max} \\ E_{storage,d,\min} \leq E_{storage,d} \leq E_{storage,d,\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $E_{storage,u}$ 为 DVSPS 上水库容量; $E_{storage,u,\min}$, $E_{storage,u,\max}$ 分别为 DVSPS 上水库容量的最小值、最大值; $E_{storage,d}$ 为 DVSPS 下水库容量; $E_{storage,d,\min}$, $E_{storage,d,\max}$ 分别为 DVSPS 下水库容量的最小值、最大值。

③抽蓄水库内水位动态变化约束

$$\begin{cases} E_{storage,u}^t = E_{storage,u}^{t-1} - \frac{P_{storage,i}^t}{\eta_c} + \frac{P_{storage,i}^t}{\eta_s} \\ E_{storage,d}^t = E_{storage,d}^{t-1} + \frac{P_{storage,i}^t}{\eta_c} - \frac{P_{storage,i}^t}{\eta_s} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $E_{storage,u}^t$, $E_{storage,d}^t$ 分别为 t 时刻 DVSPS 上、下水库的容量。

2.3 新能源送端电网能量平衡优化控制算法

经典的粒子群算法在进行全局搜索时会使收敛速度变慢,若当粒子处于较为集中的分布与搜索空间时,则全局性较差。因此,传统的粒子群算法依然解决不了抽蓄-光伏联合运行系统的功率优化问题。

针对传统的粒子群算法中初始粒子分布影响算法求解速度的问题,本文结合 Bloch 坐标转换的思路,对抽蓄-光伏联合系统出力的初始“粒子”进行坐标转换和空间转换。本文基于量子粒子群

算法, 建立如图 3 所示的新能源送端电网能量平衡优化控制算法。

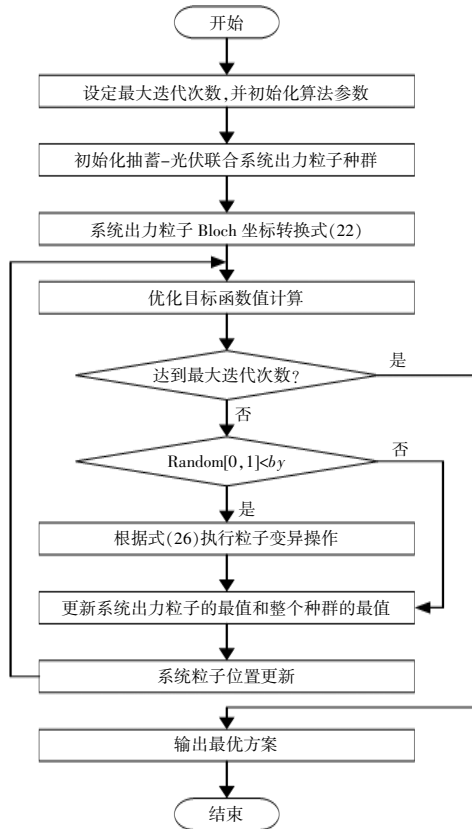


图 3 求解算法

Fig.3 Solution algorithm

①抽蓄-光伏联合系统出力“粒子”的坐标转换

$$\varphi = [\cos\varphi \sin\theta \quad \sin\varphi \sin\theta \quad \cos\theta]^T \quad (21)$$

在进行 Bloch 坐标转换时, 每一个初始“粒子”都可以与 Bloch 球面上的一点对应, 因此, 每一个初始“粒子”都可由式(21)表示, 这样可以使得抽蓄-光伏联合系统出力的初始“粒子”的位置分布均匀。

根据式(21), 假设 P_i 为抽蓄-光伏联合系统出力的第 i 个初始“粒子”, 则有:

$$\begin{cases} P_i = [\cos\varphi_i \sin\theta_i & \sin\varphi_i \sin\theta_i & \cos\theta_i] \\ \varphi_i = 2\pi \cdot \text{Random}[0, 1] \\ \theta_i = 2\pi \cdot \text{Random}[0, 1] \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\text{Random}[0, 1]$ 为 $[0, 1]$ 的随机数; $i=1, 2, 3, \dots, N$, N 为抽蓄-光伏联合系统出力的初始“粒子”总数。

②抽蓄-光伏联合系统出力“粒子”的求解空间变换

此处, 先设定 P_i 的 3 个优化的解为

$$\begin{cases} P_{i,x} = [\cos\varphi_i^* \sin\theta_i^*] \\ P_{i,y} = [\sin\varphi_i^* \sin\theta_i^*] \\ P_{i,z} = [\cos\theta_i^*] \end{cases} \quad (23)$$

再设定抽蓄-光伏联合系统出力“粒子”的求解空间为 $[A, B]$, 则抽蓄-光伏联合系统出力的第 i 个初始“粒子” P_i 映射在求解空间的位置为

$$\begin{cases} P_{ix} = [B(1+P_{i,x}) + A(1-P_{i,x})]/2 \\ P_{iy} = [B(1+P_{i,y}) + A(1-P_{i,y})]/2 \\ P_{iz} = [B(1+P_{i,z}) + A(1-P_{i,z})]/2 \end{cases} \quad (24)$$

依据式(24), 可以得到抽蓄-光伏联合系统出力的第 i 个初始“粒子” P_i 的求解空间位置搜索结果。

③抽蓄-光伏联合系统出力“粒子”位置更新

在求解过程中, 可以通过式(25)实现对抽蓄-光伏联合系统出力“粒子”的更新。

$$\begin{cases} \Delta\varphi_i(j+1) = \alpha x_1 \cdot \text{Random}[0, 1] \cdot [\varphi_{\text{optimal},i}(j) - \varphi_i(j)] + \\ \quad \alpha x_2 \cdot \text{Random}[0, 1] \cdot [\varphi_{\text{optimal},g}(j) - \varphi_i(j)] + k_w \Delta\varphi_i(j) \\ \Delta\theta_i(j+1) = \alpha x_1 \cdot \text{Random}[0, 1] \cdot [\theta_{\text{optimal},i}(j) - \theta_i(j)] + \\ \quad \alpha x_2 \cdot \text{Random}[0, 1] \cdot [\theta_{\text{optimal},g}(j) - \theta_i(j)] + k_w \Delta\theta_i(j) \\ \varphi_i(j+1) = \varphi_i(j) + \Delta\varphi_i(j+1), 1 \leq i \leq N \\ \theta_i(j+1) = \theta_i(j) + \Delta\theta_i(j+1), 1 \leq i \leq N \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\varphi_{\text{optimal},i}(j), \theta_{\text{optimal},i}(j)$ 为抽蓄-光伏联合系统出力的第 i 个“粒子”所对应的最优相位参数; $\varphi_{\text{optimal},g}(j), \theta_{\text{optimal},g}(j)$ 为抽蓄-光伏联合系统出力的整个“粒子”所对应的最优相位参数; k_w 为位置更新惯性系数; $\varphi_i(j+1), \theta_i(j+1)$ 为更新后的抽蓄-光伏联合系统出力的第 i 个“粒子”所对应的相位参数; $\alpha x_1, \alpha x_2$ 为更新系数; j 为迭代次数。

④抽蓄-光伏联合系统出力“粒子”变异

基于量子粒子群算法中的变异思想, 本文设定粒子变异算子为 κ , 使得抽蓄-光伏联合系统出力的第 i 个“粒子”在 Bloch 球面上围绕球心进行旋转。

$$\begin{cases} \kappa = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \varphi_i(j+1) = \frac{\pi}{2} - \varphi_i(j) \\ \theta_i(j+1) = \frac{\pi}{2} - \theta_i(j) \end{cases} \quad (26)$$

设定出力粒子变异率为 by , 当 $\text{Random}[0, 1] <$

by 时,执行式(26);反之,跳过变异操作,进行下一步。式(26)主要起到避免抽蓄-光伏联合系统协同能量平衡优化模型在迭代求解过程中陷入局部最优解的作用。

3 仿真分析

为了分析验证本文建立的新能源送端电网能量平衡优化模型的可行性,以我国西北某地区光伏电站、抽水蓄能电站的历史运行数据为基础,搭建仿真模型,同时对抽蓄-光伏联合系统协同运行促进新能源消纳能力提升的情况进行分析。表2为算例仿真的基础参数。

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

参数	抽蓄成本 元/MW	排放系数 元/t	电价/元·(kW·h) ⁻¹		
			峰时段	平时段	谷时段
数值	37.1	2 123.4	1.1	0.7	0.5

图4给出了本文所采用的西北某地区新能源外送基地及其配套抽水蓄能电站的网架拓扑示意图。其中,外送主通道线路为一条容量为8 000 MW的直流外送线路,线路电压等级为500 kV,光伏电站的最大出力为18 000 MW,3个抽水蓄能电站直接联接主外送通道,抽水蓄能电站的总装机容量为4 200 MW,抽水蓄能电站充、放能效率为76%。

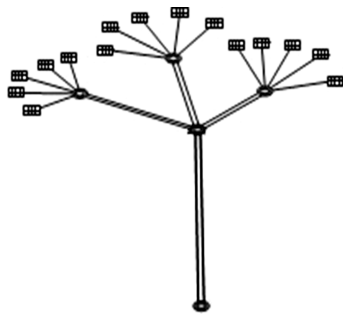


图 4 新能源配套抽水蓄能基地外送网架示意图

Fig.4 Schematic diagram of the external transmission grid of the new energy base and its supporting pumped storage power station

另外,在仿真过程中设定,当系统负荷处于低谷时,抽水蓄能电站进行抽水蓄能,消纳富裕的外送光伏;在系统负荷处于峰值时,抽水蓄能电站进行放水放能,补充峰值时的负荷缺额,进而起到促进电网新能源消纳能力提升的作用。

图5给出了该地区新能源外送基地全年光伏出力情况统计结果。该基地太阳能年利用小时数

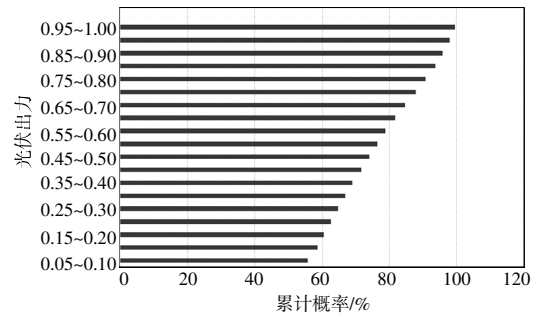


图 5 光伏出力统计结果

Fig.5 Statistical results of photovoltaic output

为1 964 h,由图5可以看出,该基地光伏出力在0.8以下的累计概率为96.01%,即1 964 h中光伏出力小于0.8倍装机容量的小时数占比为96.01%。

表3给出了本文仿真算例中所设定的3种配置场景,分别为无抽水蓄能机组、常规抽水蓄能机组和变速抽水蓄能机组。另外,仿真时优先按照光伏就近就地消纳、系统分级调峰的原则,进行外送基地、地区负荷及主网络的能量平衡、调峰和新能源消纳。

表 3 外送基地配置方案

Table 3 Configuration scheme of the outgoing base

场景	万 kW		
	基地	抽蓄	光伏
1	光伏+变速抽蓄	420	1 800
2	光伏+常规抽蓄	420	1 800
3	光伏		1 800

对设定的3种仿真配置场景下系统光伏输出功率消纳的情况进行统计、分析,结果如表4所示。

表 4 光伏+抽蓄外送基地的外送测算结果

Table 4 Calculation results of PV and pumping and storage delivery base

场景	场景 1	场景 2	场景 3
光伏发电量/亿 kW·h	372.7	325.9	283.8
弃光电量/亿 kW·h	24.6	27.7	29.4
光伏利用率/%	93.4	91.5	89.5
光伏装机/万 kW	1 800	1 800	1 800
运行成本/万元	373.4	643.1	977.4
污染物排放量/t	142.1	321.1	794.1

由表4可以看出,在配套抽水蓄能机组外送场景下,系统能够有效减小弃光功率,整个外送基地的新能源利用率在90%以上。同时,如果采用变速抽水蓄能机组与光伏电站进行协同优化调节时,能够进一步提高系统内的新能源利用率,提升新能源的消纳能力。

4 结论

本文通过研究抽水蓄能电站的运行原理,建立了抽蓄-光伏联合系统协同能量平衡优化模型,并结合改进的量子粒子群算法,对模型进行求解。最后,结合西北某地区电网运行数据,搭建仿真模型进行模拟分析,主要成果如下。

①本文通过分析对比变速抽水蓄能电站与常规抽水蓄能电站所具有的优势,建立抽蓄-光伏联合系统协同能量平衡优化模型,对抽蓄-光伏联合系统进行优化。

②在抽蓄-光伏联合系统的外送方案下,通过光伏电站与抽水蓄能电站间的协调配合,能够促进系统降低弃光率,使系统的新能源利用率达90%以上。

③变速抽水蓄能电站与光伏电站协同运行,具有更加明显的优势,系统新能源利用率更高,对新能源消纳的提升更加明显。

参考文献:

[1] 谢勇刚,陈豪,刘颖明,等.兼顾碳排放和经济效益的抽水蓄能功率优化策略[J].可再生能源,2023,41(7):978-985.

[2] 吴利乐,郑源,王爱华,等.可再生能源综合利用的研究现状与展望[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(3):82-85.

[3] 衣传宝,杨黎明,罗艳,等.基于抽水蓄能的新型电力系统惯量优化控制方法[J].可再生能源,2023,41(4):530-537.

[4] Luo Shihua, Hu Weihao, Huang Qi, et al. Optimization of photovoltaic/small hydropower/pumped storage power station system sizing under the market mechanism [J]. Transactions of China Elec-trotechnical Society, 2020, 35(13):2792-2804.

[5] 马丽叶,王志强,陆肖宇,等.基于机会约束规划的风-火-蓄联合系统优化调度 [J]. 电网技术,2019,43(9):3311-3320.

[6] 刘文军,赵琰,张东,等.抽蓄联合全可再生能源孤岛微网配置优化模型 [J]. 可再生能源,2020,38(9):

1266-1271.

[7] 李晓鹏,李岩,刘舒然,等.基于可变速抽水蓄能技术提升区域电网新能源消纳水平的研究 [J]. 智慧电力,2021,49(10):52-58,112.

[8] Su C, Cheng C, Wang P, et al. Optimization model for long-distance integrated transmission of wind farms and pumped-storage hydropower plants [J]. Applied Energy, 2019,242(5):285-293.

[9] 顾慧杰,周华锋,彭超逸,等.含抽水蓄能电站的高比例新能源发电系统多时间尺度调度模型[J/OL].上海交通大学学报:1-22 [2023-11-02].<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.123>.

[10] Yuan Wenlin, Wang Xinqi, Su Chengguo, et al. Stochastic optimization model for the short-term joint operation of photovoltaic power and hydropower plants based on chance-constrained program-ming [J]. Energy, 2021(10):1-15.

[11] 陈伟伟,张增强,毕立松,等.多能源送端电网暂态能量平衡快速鲁棒控制模型 [J]. 可再生能源,2021,39(12):1669-1674.

[12] 梁绍泉. 抽水蓄能电站运行控制与效益分析 [D]. 济南:山东大学,2019.

[13] Yizi Shang, Shibao Lu, Jiaguo Gong, et al. Improved genetic algorithm for economic load dispatch in hydropower plants and com-prehensive performance comparison with dynamic programming method [J]. Journal of Hydrology, 2017, 554:306-316.

[14] 朱灵子,翟勇,唐建兴,等.基于信息物理模型的可再生能源电网能量平衡控制 [J]. 可再生能源,2022,40(2):254-259.

[15] 滕云,刘硕,回茜,等.考虑区域多能源系统集群协同优化的联合需求侧响应模型[J].中国电机工程学报,2020,40(22):7282-7296.

[16] 罗远翔,关明,刘铖,等.大规模风电并网下抽水蓄能参与电网调频的模型预测控制策略[J].东北电力大学学报,2023,43(4):20-29.

[17] 滕云,孙鹏,张明理,等.基于农村新型产业结构的“能源-环境-经济”鲁棒优化模型[J].中国电机工程学报,2022,42(2):614-631.

[18] 马君亮,王智冬,张述铭.考虑县域光伏潜力评估的源网荷储协同规划[J].东北电力大学学报,2023,43(3):82-90.

Research on energy balance optimization control method of new energy sending end power grid based on variable speed pumping and storage

Wang Jing¹, Sun Fan¹, Li Hui¹, Lan Yu², Chen Yanbo³

(1.Northwest Survey and Design Institute of China Electric Power Construction Group Co.,Ltd., Xi'an 710061, China; 2.Huaneng Lancang River Hydropower Co.,Ltd., Kunming 650220, China; 3.School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the problem that the complex coordination relationship of the sending-end power grid with high proportion of new energy and pumped storage combined power generation may lead to insufficient new energy consumption capacity, an energy balance optimization control method of the new energy sending-end power grid based on variable speed pumped storage is proposed. Firstly, the operating characteristics of variable speed pumped storage units are studied, and the active and reactive power output characteristics of variable speed pumped storage units based on frequency converter control are analyzed. Secondly, the variable speed pumping is used to analyze the improvement of new energy generation capacity, and the energy balance optimization model of the new energy sending end power grid is established. Then, the quantum particle swarm optimization algorithm is improved, and the energy balance optimization control algorithm of the new energy sending end power grid is proposed. Finally, with reference to the delivery mode of new energy base in a certain area of Northwest China, a typical scenario of variable speed pumped storage power station and conventional pumped storage power station cooperating with new energy is constructed. The improved new energy consumption capacity of variable speed pumped storage power station and conventional pumped storage power station is compared. The simulation results show that the energy balance optimization control method of the sending end power grid based on variable speed pumped storage can improve the utilization rate of new energy and play a significant role in improving the level of renewable energy consumption.

Keywords: variable speed pumped storage power station; new energy consumption; photovoltaic power station; particle swarm optimization algorithm