

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190321

# 经柔直电网互联的含抽蓄的联合发电系统最大供电量计算

张晓华<sup>1</sup>, 魏子睿<sup>2</sup>, 马煜<sup>3</sup>, 耿光飞<sup>2</sup>, 杨晓楠<sup>4</sup>

(1. 国网东北电力调控分中心, 辽宁 沈阳 110180; 2. 中国农业大学, 北京 100083; 3. 辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110000; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 为充分利用风光发电能量, 合理调度抽水蓄能电站, 针对经柔直电网互联的风光蓄联合发电系统向远方负荷中心供电这一工程实际需求, 提出基于日供电量最大的抽水蓄能发电优化调度模型及方法。采用最优潮流法计算受电区(负荷中心)全天的消纳极限。并以此极限为约束, 同时考虑抽蓄电站库容与运行工况等限制, 建立了抽蓄电站功率优化调度模型。提出的分段法与等效面积法显著提升了优化模型的计算速度。在某地风光蓄发电系统与柔直输电网架结构的基础上, 用 IEEE30 节点系统模拟受端电网, 建立仿真算例。比较了几种最大供电量计算方法的结果, 验证了所提方法与模型的有效性。

**关键词:** 风光蓄联合发电; 最大供电能力; 动态优化; 削峰填谷; 柔直电网

## Maximum power supply calculation of combined power generation with pumped storage system interconnected by VSC-HVDC grid

ZHANG Xiaohua<sup>1</sup>, WEI Zirui<sup>2</sup>, MA Yu<sup>3</sup>, GENG Guangfei<sup>2</sup>, YANG Xiaonan<sup>4</sup>

(1. State Grid Northeast Power Control Subcenter, Shenyang 110180, China; 2. China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Shenyang Power Supply Company, Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 4. China Electric Power Research Institute Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to make full use of the energy of wind-photovoltaic power generation and rationally dispatch pumped storage power stations, this paper proposes an optimal dispatching model and method for pumped storage power generation based on the maximum daily power supply, aiming at the actual demand of the project that the wind-photovoltaic storage combined power generation system interconnected through VSC-HVDC grid supplies power to remote load centers. The optimal power flow method is used to calculate the all-day renewable energy consumption limit of the power receiving area (load center). Taking this limit as constraint and considering the reservoir capacity and operation condition of pumped storage station, an optimal power dispatching model for pumped storage station is established. The proposed segmentation method and equivalent area method significantly improve the calculation speed of the optimization model. The simulation case is based on the structure of wind-photovoltaic storage power system and flexible VSC-HVDC power grid in a certain area, the load center power grid is simulated with the IEEE30-bus system. The results of several calculation methods of maximum power supply are compared, which verifies the effectiveness of the proposed methods and models.

This work is supported by Project of Beijing Science and Technology Commission “Technical Research on VSC-based DC Grid Collecting Renewable Energy Integrating AC Power Grid Dispatch” (No. Z161100004816025) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Technical Research of  $\pm 500$  kV VSC-based DC Grid Dispatch”.

**Key words:** wind-photovoltaic-pumped storage systems; maximum power supply capability; dynamic optimization; peak load shifting; VSC-based DC grid

## 0 引言

风电与光电出力的波动性和间歇性给电力系统

的安全稳定运行带来了挑战, 利用储能系统与风电场、光伏电站配合运行是改善风光出力特性、提升能源利用率的有效途径<sup>[1]</sup>。其中, 抽水蓄能以其成本低、容量大、寿命长等优势备受关注, 是最为成熟的储能技术之一<sup>[2-5]</sup>。计算风电、光伏、抽水蓄能联合运行系统的最大供电量, 不仅可以指导风光蓄的协同调度, 为最大限度利用风光能量并获得联合

**基金项目:** 北京市科委项目“柔直电网汇集新能源接入交流电网调度技术研究”(Z161100004816025); 国家电网科技项目资助“ $\pm 500$  kV 柔性直流电网调度技术研究”

系统的平稳出力提供依据, 还可验证风光蓄的容量配置是否合理, 为新能源发电系统规划建设提供参考。

现有文献对新能源电站与抽水蓄能联合系统的研究主要集中在两个方向, 电站容量规划<sup>[6-8]</sup>与运行优化调度<sup>[9-17]</sup>。其中, 对于联合系统运行调度的研究主要集中在提升系统运行的经济性, 或是优化联合系统功率输出特性以提升系统稳定性。例如文献[9-12]从减少污染气体排放量、降低火电机组运行费用与抽水蓄能的启停成本、降低购电成本、提升能量转换收益等角度优化风电、火电与抽蓄出力, 提升联合运行系统的效益。上述文献在对联合系统优化调度时侧重考虑系统经济性, 未明确给出技术上风蓄系统的最大供电量。文献[13]意在提升风蓄系统中风能利用率, 但以各时刻并网功率最大为目标无法考虑库容变化量约束, 不尽合理; 文献[14]考虑了风蓄系统电量效益, 但仅以抽蓄抽水消耗电量与其发电量相等来约束其库容变化, 所提模型与方法灵活性有待完善。文献[15-16]所建模型中风蓄联合出力最大的目标及抽蓄相关约束对本文有借鉴意义。此外, 现有研究联合系统的文献中大多未进行潮流计算, 仅用发电与负荷相等进行功率平衡约束, 因此也就忽略了网损对联合系统供电能力的影响。

此外, 高压柔性直流输电 (Voltage Source Converter High Voltage DC, VSC-HVDC) 以其占地面积小、谐波水平低、适合构成多端直流系统等优势, 被广泛应用于电网互联、可再生能源并网等领域<sup>[18-21]</sup>。张北±500 kV 四端柔性直流电网示范工程是世界上首个具有环网结构的柔性直流输电工程, 其网络结构如图 1 所示。工程利用柔直线路连接风力电站、光伏电站与抽水蓄能电站, 实现多种新能源的汇集并网与有效消纳。

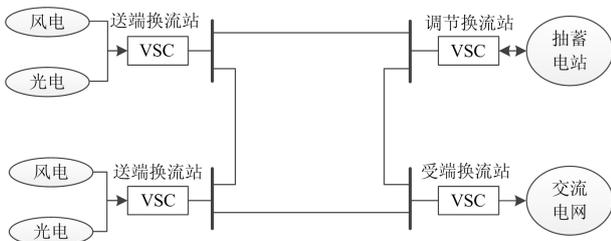


图 1 某地柔直电网结构示意图

Fig. 1 Structure of a VSC-HVDC grid

本文的研究背景类似于张北柔直示范工程, 经多端柔直电网与负荷中心连接的风光蓄联合供电系统, 考虑如何通过风光蓄联合优化调度提升风光能

量利用率, 并减少负荷中心化石能源发电量。受端电网的消纳能力也是研究联合系统供电能力必须要考虑的因素, 最优潮流法可用于受端电网消纳极限的计算。在此基础上建立基于最大输电量的风光蓄联合系统最优调度模型, 并采用不同计算方法, 提升模型求解速度。通过算例验证模型与方法的有效性, 并比对系统网损对联合系统供电能力的影响。

## 1 风光蓄发电系统最大供电量计算思路

对于两区域互联系统, 供、受电区域间某时刻的最大输电功率, 应等于供电区可提供的最大功率与受电区可消纳的最大功率两者中的较小值。即有

$$P_{TTC} = \min(P_{s,max}, P_{r,max}) \quad (1)$$

式中:  $P_{s,max}$  为供电区外送功率极限;  $P_{r,max}$  为受电区域消纳功率极限。

基于以上思路, 本文针对风光蓄经柔直系统并网的交直流混合系统, 提出最大供电量计算方法的具体步骤如下。

步骤 1: 计算受电区最大消纳功率。将风光蓄联合发电系统作为供电区, 负荷中心的交流电网作为受电区。仅考虑消纳能力时可将供电区简化为平衡节点, 根据受电区的负荷分布及其变化曲线, 建立受电区消纳功率极限的数学模型, 经最优潮流计算得到受电区消纳功率极限的变化曲线。

步骤 2: 计算供电区最大外送电量。以外送电量最大为目标, 综合考虑风光出力曲线、抽水蓄能库容、受电区消纳极限、VSC 约束等因素, 建立抽蓄电站功率优化调度模型, 进而求解得到一段时间(1 天)内风光蓄经柔性直流输电系统向交流电网负荷中心的最大输电量。

## 2 受电区最大消纳功率计算

将混合系统中的供电区等效为一个平衡节点, 建立受电区域消纳极限的数学模型如式(2)—式(4)。

(1) 目标函数

$$F = \max \sum_{j \in B} P_{A_j} \quad (2)$$

式中: A 表示供电区; B 表示受电区;  $P_{A_j}$  为由供电区 A 流向受电区 B 中节点 j 的有功功率。

(2) 等式约束

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i + Q_{Ci} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_i$  和  $Q_i$  分别为交流系统中节点 i 的注入有功

和无功功率;  $G_{ij} + jB_{ij}$  为节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}$  中元素;  $Q_{Ci}$  为节点  $i$  上的无功补偿容量;  $j \in i$  表示所有与节点  $i$  相连的节点  $j$ ;  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的电压相角差。

### (3) 不等式约束

不等式约束包括节点电压、线路功率及发电机功率等约束, 如式(4)。

$$\begin{cases} U_{si}^{\min} \leq U_{si} \leq U_{si}^{\max}, \\ S_{ij} \leq S_{ij}^{\max}, & j \in i \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, & i \notin A \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, & i \notin A \end{cases} \quad (4)$$

式中, 上标“max”、“min”分别表示相应变量的上限值和下限值。

本文的应用场景是已知受电区各负荷节点的日负荷变化曲线, 负荷中心消纳风光蓄发电功率后用于减少本地的火力发电量与功率。计算受电区某一时刻的最大消纳能力时, 令受电区负荷保持不变, 将受电区火力发电功率作为自变量, 采用最优潮流法求解以上模型。计算出每个采样时刻的受电区域消纳极限, 便可求得受电区全天的消纳功率上限曲线, 以及相应的受电区发电机调度方案。

## 3 风光蓄发电系统最大送电量计算方法

### 3.1 最大送电量优化模型

#### 3.1.1 目标函数

本文以一段时间(1天)内联合供电系统的外送电量最大为目标函数, 如式(5)。

$$f_1 = \max \left( \sum_{t=1}^N \sum_{i \in j} P_{ij}^{(t)} \cdot \Delta t \right) \quad i \in A, j \in B \quad (5)$$

式中:  $P_{ij}^{(t)}$  为  $t$  时刻节点  $i$ 、 $j$  之间传输的有功功率;  $N$  为一天中采样点的个数; 第  $\Delta t$  为采样时间间隔。

#### 3.1.2 等式约束

##### (1) 直流网络方程

$$P_{dv} = U_{dv} \sum_{k=1}^{N_d} Y_{dvk} U_{dv} \quad v \in N_d \quad (6)$$

式中:  $P_{dv}$ 、 $U_{dv}$  分别为直流节点  $v$  的注入功率与节点电压;  $N_d$  为直流节点集合;  $Y_{dvk}$  为直流子网络节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}_d$  的第  $v$  行、第  $k$  列元素。

##### (2) 换流器方程

VSC-HVDC 系统模型如图 2 所示。设换流器交流输出基波电压相量  $\dot{U}_c = U_c \angle 0$ , 交、直流系统分界点  $s$  处的基波电压相量  $\dot{U}_s = U_s \angle \delta$ , 流入换流站的有功、无功功率分别为  $P_s$ 、 $Q_s$ 。VSC 换流站内

部所有有功损耗的等效电阻为  $R$ , 换流变压器或电抗器等效电抗为  $X$ , 换流站流入直流网络的有功功率为  $P_d$ , 换流器直流侧电压为  $U_d$ , 电流为  $I_{dc}$ 。

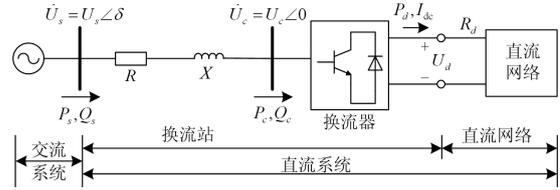


图 2 VSC-HVDC 系统模型

Fig. 2 Model of VSC-HVDC system

VSC 换流器方程可总结为式(7)~式(10)。

$$P_c = P_d \quad (7)$$

$$U_c = \frac{\mu}{\sqrt{2}} M U_d \quad (8)$$

$$P_c R + Q_c X = U_c^2 - U_c U_s \cos \delta \quad (9)$$

$$P_c X - Q_c R = U_c U_s \sin \delta$$

$$P_s = \frac{R U_s (U_s - U_c \cos \delta_{sc}) + X U_s U_c \sin \delta_{sc}}{R^2 + X^2} \quad (10)$$

$$Q_s = \frac{X U_s (U_s - U_c \cos \delta_{sc}) - R U_s U_c \sin \delta_{sc}}{R^2 + X^2}$$

式(8)中:  $\mu (0 < \mu < 1)$  为直流电压利用率, 本文中取固定值为  $\sqrt{3}/2$ ;  $M (0 < M < 1)$  为换流器调制比。

##### (3) 抽水蓄能电站库容变化量方程

抽水蓄能电站发电时, 上、下水库库容变化如式(11), 抽水时, 上、下水库库容变化如式(12)。

$$\begin{cases} V_{t+1}^u = V_t^u - P_h^{(t)} / \eta_1 \\ V_{t+1}^d = V_t^d + P_h^{(t)} / \eta_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} V_{t+1}^u = V_t^u - P_h^{(t)} / \eta_2 \\ V_{t+1}^d = V_t^d + P_h^{(t)} / \eta_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $t$  表示采样时刻;  $V^u$ 、 $V^d$  分别为上、下水库库容;  $P_h$  为抽水蓄能电站发出的有功功率;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别为抽水蓄能电站的发电效率、抽水效率与库容之间的折算系数, 且  $\eta_1 / \eta_2 = 0.75$ 。

#### 3.1.3 不等式约束

柔直系统不等式约束如式(13), 依次是直流节点电压约束、换流器交流侧电压约束、调制比约束、VSC 热容量约束和直流线路最大允许电流约束。

$$\begin{cases} U_{dk}^{\min} \leq U_{dk} \leq U_{dk}^{\max} & k \in N_d \\ U_{cn}^{\min} \leq U_{cn} \leq U_{cn}^{\max} \\ M_n^{\min} \leq M_n \leq M_n^{\max} & n \in N_c \\ I_{cn} \leq I_{cn}^{\max} \\ I_{kv} \leq I_{kv}^{\max} & v \in k \end{cases} \quad (13)$$

式中: 下标“ $n$ ”为 VSC 编号;  $N_C$  为系统中所有 VSC 的集合。

抽蓄电站的不等式约束主要包括库容与功率约束, 如式(14)—式(16)。

$$\begin{cases} V_{\min}^u \leq V_t^u \leq V_{\max}^u \\ V_{\min}^d \leq V_t^d \leq V_{\max}^d \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $V_{\max}^u$  和  $V_{\min}^u$  分别为上水库的最大、最小库容;  $V_{\max}^d$  和  $V_{\min}^d$  分别为下水库的最大、最小库容。

为了保证抽蓄电站具备持续的调节能力, 应限制水库日初与日末的库容变化量。

$$\begin{cases} |V_0^u - V_E^u| \leq \alpha V_{\max}^u \\ |V_0^d - V_E^d| \leq \alpha V_{\max}^d \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $V_0^u$  和  $V_E^u$  分别为日初、日末上水库库容;  $V_0^d$  和  $V_E^d$  分别为日初、日末下水库库容;  $\alpha$  为 1 天内允许的最大库容变动系数,  $\alpha$  的数值越大, 抽蓄削峰填谷的能力越强, 风光发电量的利用率越高, 但若  $\alpha$  取值过大将难以约束次日起始库容, 影响次日联合系统的平稳供电。故  $\alpha$  是决定更长时间内联合系统最大供电量的关键, 本文仅探讨一天内联合系统的最大供电量, 取  $\alpha=0.05$ 。

$$\begin{cases} P_{o\min} \leq P_h \leq P_{o\max} & P_h > 0 \\ P_{i\min} \leq -P_h \leq P_{i\max} & P_h < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $P_{o\max}$  和  $P_{o\min}$  分别为抽蓄电站最大、最小发电功率;  $P_{i\max}$  和  $P_{i\min}$  分别为抽蓄电站最大、最小抽水功率。

风电、光电实际功率不等式约束如式(17)。

$$\begin{cases} 0 \leq P_f \leq P'_f \\ 0 \leq P_g \leq P'_g \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $P'_f$  和  $P'_g$  分别表示不弃风、不弃光情况下的风电场与光伏电站满发功率值。

联合系统外送功率约束如式(18)。

$$P_s^{(t)} \leq P_r^{(t)} \quad (18)$$

式中:  $P_s^{(t)}$  为  $t$  时刻风光蓄联合发电系统的外送功率;  $P_r^{(t)}$  为  $t$  时刻受电区消纳极限。

此外, 在常用的控制策略下, 风电与光电的惯性响应时间通常在 10 s 以内, 抽蓄电站中水轮机的惯性响应时间为 20~30 s, 风光发电与抽蓄发电间存在 20 s 左右的惯性响应时差。但本文在计算风光蓄最大供电量时以小时为单位进行采样, 因此在建立风光蓄模型时不再考虑秒级的惯性响应时差。

### 3.2 分段法计算风光蓄联合发电系统最大供电量

#### 3.2.1 分段法计算最大供电量的基本思路

优化模型(式(5)—式(18))以风光蓄发电系统日

供电量最大为目标函数, 一天中各个时段的风电、光电与抽水蓄能发电功率为 3 组自变量, 该问题是一个动态优化问题。若考虑网损并在每个采样间隔都进行准确的潮流计算, 必然增加优化的难度。例如, 若一天中控制变量的优化调整间隔为 1 h, 则整个动态优化要确定  $3 \times 24 = 72$  组数值, 每组优化变量对应的待定数值序列过长会导致寻优求解速度缓慢。

本文采用分段的方法减少控制变量所需优化数值序列的长度, 进而缩短模型求解时间。分段法的基本思路是将动态优化中一些随时间变化的变量曲线近似或等效为台阶式折线, 从而在每个台阶(即时段)上计算其最优控制变量, 台阶数越少, 则计算量越小。由于抽蓄电站的调节作用, 风光蓄 3 种电源构成的发电侧曲线可以形成台阶式折线, 因此仅需对受端消纳极限曲线进行分段即可。

图 3 为分段法的示意图, 可分为三个步骤。

步骤一: 将连续变化的受端消纳极限曲线分为若干段, 每段内的消纳极限近似为定值, 由于消纳极限是联合系统外送功率的上限, 因此该定值取段内消纳极限的最小值, 如图 3(a)中虚线所示。

步骤二: 采用图 3(a)确定的分段点, 将风光满发功率曲线(图 3(b)中蓝色实线)按照电量相等原则等效为台阶状折线(图 3(b)中蓝色虚线)。每一段对应一组风、光、抽出力变量, 待求优化变量数目将缩减为“ $3 \times$ 时段数”。依据分段与等效后的风光满发功率与消纳极限功率, 并考虑库容等约束, 可得联合系统最大供电量以及相应外送功率曲线, 如图 3(c)中绿色实线所示。

步骤三: 根据联合系统外送功率曲线与风光满发功率曲线, 计算最大外送电量对应的各时刻风光蓄实际出力。

#### 3.2.2 分段法计算过程与模型

##### (1) 受端消纳极限曲线优化分段与近似处理

对消纳极限曲线进行分段, 每段近似为水平直线, 其值取该段内消纳极限的最小值(如图 3(a)红色虚线所示)。为了减少因分段近似造成如图 3(a)中黄色区域的误差, 本文以近似后受电区日可消纳电量(即图 3(a)中虚线与横轴所围面积)最大为目标函数, 对曲线的分段时刻进行优化, 最大限度地减少由分段近似产生的误差。

设消纳极限曲线的时间序列如式(19)。

$$\mathbf{X} = [x_{11} \ x_{12} \ \cdots \ x_{1L_1} \ \cdots \ x_{S1} \ x_{S2} \ \cdots \ x_{SL_S}] \quad (19)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为消纳极限的时间序列;  $x_{mn}$  为第  $m$  段内第  $n$  个时刻的消纳极限;  $L_m$  为第  $m$  段内采样时刻的个数;  $S$  为消纳极限曲线的分段数。

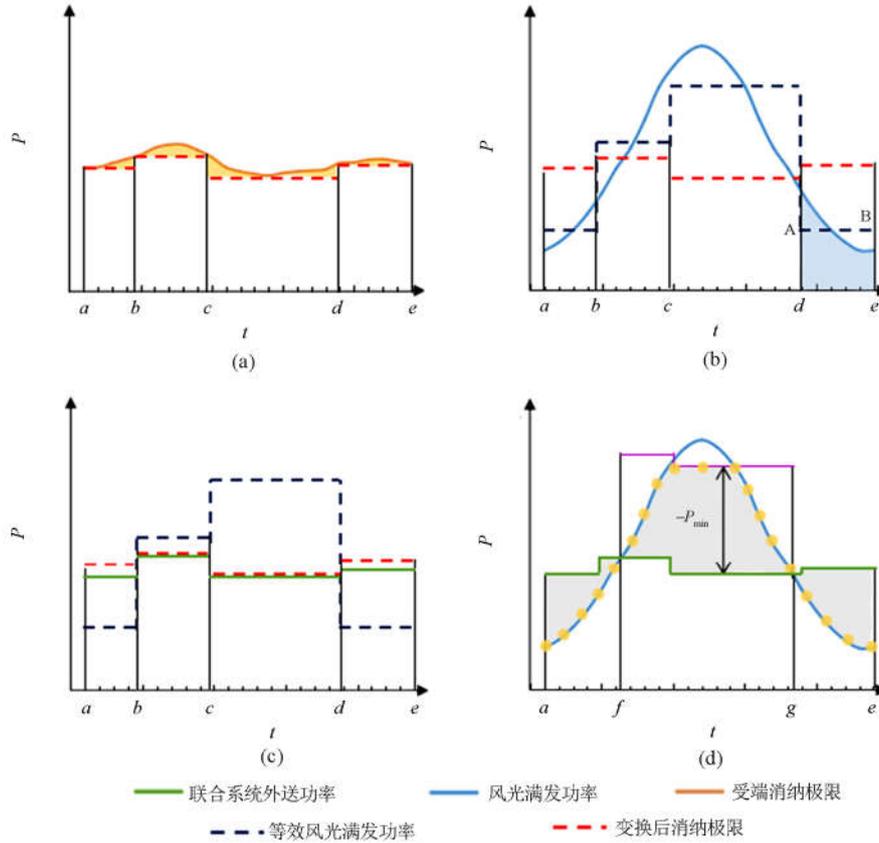


图3 分段法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of segmentation method

建立曲线分段的数学模型如式(20)。

$$\begin{cases} F_{\text{seg}} = \max \sum_{m=1}^S y_m \cdot T_m \\ \text{s.t.} & y_m = \min(x_{m1}, x_{m1}, \dots, x_{mL_m}) \\ & T_m = L_m \cdot \Delta t \\ & L_1 + L_2 + \dots + L_S = L \end{cases} \quad (20)$$

式中： $y_m$  为近似后第  $m$  段消纳极限功率； $T_m$  为第  $m$  段的时长。

经近似变换，将原最大供电量计算模型中联合系统外送功率约束(18)变更为式(21)。

$$P_s \leq Y \quad (21)$$

其中，

$$Y = \underbrace{[y_1 \cdots y_1]}_{L_1} \underbrace{[y_2 \cdots y_2]}_{L_2} \cdots \underbrace{[y_S \cdots y_S]}_{L_S} \quad (22)$$

式中， $Y$  为分段近似变换后受端消纳极限曲线的时间序列。

在分段法中，分段数目对最大供电量的计算结果有一定影响。从图 3(a)可以看出，分段数目越多则分段造成的误差越小，但分段法加速效果越差。

因此分段数目应根据用户预期的求解时间与计算精度确定。分段法计算时长随段数的增加而迅速增加，对于本文算例分段数在 4 段以上时，寻优用时超过 1 min，8 段及以上超过 10 min。若消纳极限曲线波动剧烈，应适当增加分段数以保证计算精度。确定最优分段数为另一优化问题，因篇幅限制本文不作详细探讨。

### (2) 求各时段的风光蓄联合发电功率

经过上一步分段之后，受端消纳极限曲线近似为台阶状曲线。若每级台阶对应的风光满发功率也为定值，则可将优化变量时间序列缩减为每级台阶对应一组风光蓄功率。

抽蓄电站能在一定条件下对供电区风光发电功率曲线进行削峰填谷，从而实现供电量最大的目标。所以在模型式(20)确定的时段划分基础上，以时段内的风光满发电量相等为原则，将该时段内的风光满发功率曲线(图 3(b)蓝色实线)等效为一个常量，如图 3(b)中的阶梯状蓝色虚线。以  $de$  时段为例，等效后虚线段  $AB$  与横轴  $de$  围成的矩形面积与蓝色阴影区域面积相等。等效后的风光出力范围如式(23)。

$$\begin{cases} 0 \leq P_f \leq \frac{\sum_{t \in N_m} P_f^{(t)}}{L_m} \\ 0 \leq P_g \leq \frac{\sum_{t \in N_m} P_g^{(t)}}{L_m} \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $N_m$  为第  $m$  段中包含的采样点集合。

经过以上分段近似与等效处理后, 每个时段对应一组风光蓄功率变量, 目标函数式(5)变为式(24)。

$$f_2 = \max(\sum_{m=1}^S \sum_{i \in j} P_{ij}^{(m)} \cdot T_m) \quad i \in A, j \in B \quad (24)$$

采用内点法求解以上改进后的优化模型(式(6)—式(16)、式(21)—式(24)), 得到风光蓄联合系统的日最大供电量, 以及相应的外送功率曲线(如图3(c)所示, 其中绿色曲线为联合系统外送功率曲线)。

### (3) 计算风光蓄实际出力

根据优化求解得到的联合系统外送功率与风光满发功率曲线的差值, 并考虑抽蓄电站功率约束, 可进一步确定抽蓄电站出力与风光电站扣除弃风弃光后的实际发电功率(如图3(d)所示)。

当风光满发功率小于外送功率时(如图3(d)中  $af$ 、 $ge$  两段), 则风光电站按满发功率运行; 当满发

功率大于外送功率时(如图3(d)中  $fg$  段), 需判断它们的差值是否超过了抽水蓄能电站允许的最大功率, 未超过则令风电、光电满发, 超过只得弃风、弃光。综上, 图3中风电、光电功率应沿黄色圆点所在曲线运行。已知风电光电功率与外送功率, 可通过联合系统潮流计算求得抽蓄电站的实发功率。

### 3.3 等效面积法计算风光蓄联合系统最大供电量

等效面积法的原理如图4, 图4(a)中红色曲线为受端消纳极限, 蓝色曲线为风光满发功率。若无抽蓄电站, 在  $bc$  时段将不得不弃风弃光, 弃掉的电量相当于图4(a)中绿色区域的面积。有抽蓄电站时, 可在  $bc$  时段“削峰”——抽水储存绿色区域对应的光风发电量, 并在  $ab$ 、 $cd$  时段“填谷”——发电以补充粉色区域对应的差额电量。若日初日末库容相等, 考虑抽蓄电站能量转化效率后, 填谷面积与削峰面积对应电量之比为 0.75, 因抽蓄电站的作用而多供的电量相当于填谷的面积。因此, 联合发电系统日供电量最大化的目标可等效为填谷面积最大或削峰面积最大。若允许日初日末库容有 5% 的变动范围, 联合发电系统供电量最大的目标函数可等效为削峰面积与填谷面积之和最大。

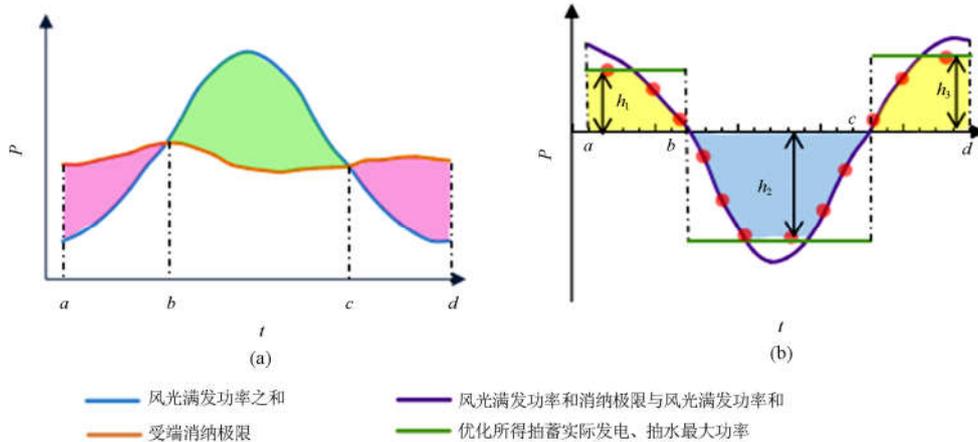


图4 等效面积法原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of equivalent area method

确定抽蓄电站的发电功率  $P_h^{(t)}$  是等效面积法的关键一步, 其大小应低于抽蓄电站额定功率, 且需满足库容的约束。举例说明, 用消纳极限减去风光满发功率得到如图4(b)所示的紫色曲线。在  $ab$ 、 $cd$  时段, 设放水发电功率最大值分别为  $h_1$ 、 $h_3$ , 在  $bc$  时段, 设抽水电动功率最大值为  $h_2$ 。则  $h_1$ 、 $h_2$  和  $h_3$  是待求的变量, 三者不仅受抽蓄电站电机额定功率的约束, 同时应满足库容的约束, 图中黄色与蓝色面积对应的库容差在允许范围之内。

图4(b)中绿色台阶状折线各段高度  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  决定了黄色区域与蓝色区域面积的大小。联合供电系统最大供电量计算问题, 可等效为求解黄色与蓝色区域面积最大的优化问题, 其目标函数如式(25)。

$$\begin{cases} f_3 = \max \sum_{t=1}^N |P_h^{(t)}| \cdot \Delta t \\ \text{s.t.} \quad P_{\text{sub}} = P_r - (P_f' + P_g') \\ P_h = P_{\text{sub}} \quad |Z| > |P_{\text{sub}}| \\ P_h = Z \quad |Z| < |P_{\text{sub}}| \end{cases} \quad (25)$$

式中：目标函数  $f_3$  为抽蓄电站放水发电量与抽水耗电量之和最大； $P_{\text{sub}}$  为消纳极限与风光满发功率之差，即图 4 中紫色曲线； $Z$  随时间的变化如图 4(b) 中绿色阶梯型曲线，其取值如式(26)。

$$Z(t) = \begin{cases} \beta \cdot h_1 & t = [t_1, c_1) \\ \beta \cdot h_2 & t = [c_1, c_2) \\ \vdots & \\ \beta \cdot h_{B+1} & t = [c_B, t_N) \end{cases} \quad (26)$$

式中： $t_1$  与  $t_N$  分别为一天中的首末采样时刻； $c_i$  为  $P_{\text{sub}}$ (图 4(b)紫色曲线)的第  $i$  个过 0 点； $\beta = P_{\text{sub}} / |P_{\text{sub}}|$  表示抽蓄电站的工作状态， $\beta = 1$  表示发电状态， $\beta = -1$  表示电动抽水状态。

等效面积法约束条件包括抽蓄功率约束式(16)和库容约束式(11)一式(12)、式(14)一式(15)。

求解以上等效面积法模型可获得联合供电系统最大供电量对应的抽蓄发电功率(如图 4(b)中红色圆点所在曲线)。据此计算实际风光发电功率和联合系统外送功率(式(27))，进而计算出联合系统的最大供电量(式(28))。

$$\left. \begin{cases} P_s = P_r \\ P_f + P_g = P_r - P_h \end{cases} \right\} P_h < 0 \text{时} \quad (27)$$

$$\left. \begin{cases} P_s = P_f + P_g + P_h \\ P_f + P_g = P'_f + P'_g \end{cases} \right\} P_h \geq 0 \text{时}$$

$$D_{\text{max}} = \sum_{i=1}^N P_s \cdot \Delta t \quad (28)$$

式中， $D_{\text{max}}$  为风光蓄联合发电系统最大供电量。

#### 4 算例分析

算例系统如图 5 所示，红色虚线左侧为供电区，右侧为受电区。供电区的四端柔直电网采用某地土 500 kV 柔性直流电网示范工程网架结构，实现风电、光电、抽水蓄能发电的汇集与外送。受电区采用 IEEE30 节点系统来模拟负荷中心的交流电网。

受电区发电机初始功率为： $P_{G3}=P_{G4}=P_{G5}=P_{G6}=60 \text{ MW}$ 、 $P_{G2}=80 \text{ MW}$ ，节点负荷  $P_{18}=13.2 \text{ MW}$ 、 $P_{23}=23.2 \text{ MW}$ ，其他系统参数和限值与 IEEE30 节点标准算例保持一致。图 6 中红色曲线为采用重复潮流法计算所得受电区域一天中的最大消纳功率曲线。

供电区域直流电压基准值  $U_d^*=264 \text{ kV}$ ，容量基准值为 100 MVA，换流器调制比  $M$  约束范围为  $[0,1]$ ，等效电阻  $R=0.6$ ，换流器控制方式：VSC1、VSC2、VSC3 定直流功率，VSC4 定节点电压  $U_{d4}=1.05 \text{ p.u.}$ 。以受电区域消纳极限为约束条件，分别采用 3 种算法计算供电区域风光蓄联合供电系统

一天的最大供电量。

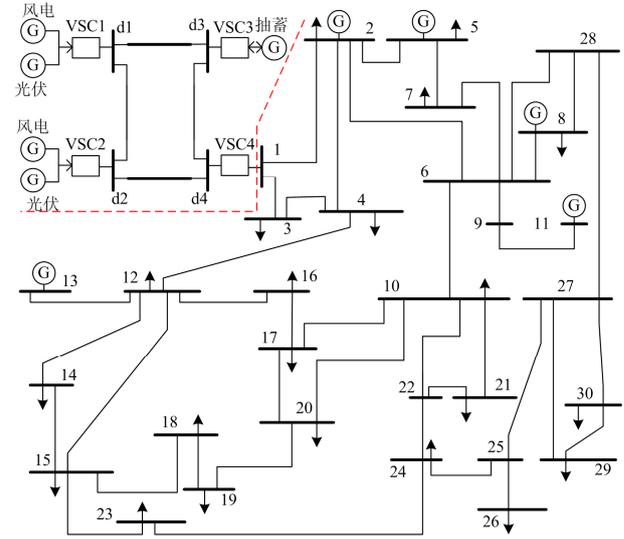


图 5 含风光蓄联合供电的交直流混合电网

Fig. 5 AC/DC system with wind-photovoltaic-pumped storage system

算法 1 为每小时设置一组风光蓄出力变量，直接求解最大供电量计算模型(式(5)一式(18))；算法 2 为分段法(式(6)一式(16)、式(21)一式(25))；算法 3 为等效面积法(式(11)、式(12)、式(14)一式(16)、式(26)、式(27))。

图 6 给出了风光满发功率曲线、受端消纳极限曲线和以上 3 种算法计算的联合系统外送功率曲线。表 1 给出了 3 种算法的计算时间、风光利用率以及最大供电量计算结果。

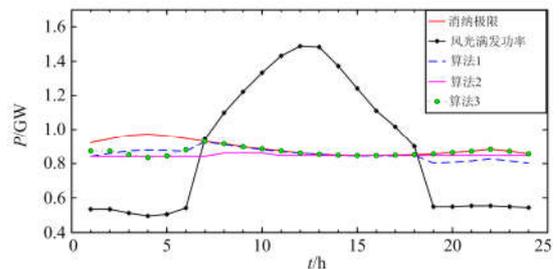


图 6 联合发电系统外送功率曲线

Fig. 6 Power curves of wind-photovoltaic-pumped storage system

表 1 风光蓄联合供电系统最大供电量

Table 1 Maximum power supply of wind-photovoltaic-pumped storage system

编号	算法名称	最大供电量/ GW·h	计算时长	风光利用率
算法 1	直接求解	20.340 7	65 min 33 s	96.61%
算法 2	分段法	20.232 9	43 s	96.10%
算法 3	等效面积法	20.912 3	1 s	99.33%

从表 1 可以看出: (1) 3 种算法所得最大供电量与风光利用率均较为接近, 而算法 2 与算法 3 计算用时明显少于直接求解法, 说明分段法与等效面积法都是快速求解联合供电系统最大供电量的有效方法; (2) 由于算法 2 在对消纳极限的分段近似中存在误差, 因此分段法所得最大供电量较直接求解最大供电量模型减少约 0.5%, 但从图 6 粉色曲线可以看出, 分段法所求联合系统外送功率在 1:00—7:00、8:00—10:00、11:00—24:00 这 3 个时段内保持不变, 较算法 1 与算法 3 所求联合系统外送功率曲线更为平稳; (3) 由于算法 3 没有考虑潮流约束、无需潮流计算, 其运算速度较分段法更快。但因算法 3 忽略了系统网损, 所得最大供电量较算法 1 增加了约 3.3%。

## 5 结论

本文从提高风光能量利用率的角度出发, 将重复潮流法应用于消纳极限的求解, 并以此极限为约束, 同时考虑抽蓄电站的能量转化效率、库容约束以及 VSC 方程等约束, 以一天内风光蓄联合运行输电量最大为目标优化调度风、光、蓄电站出力。提出 3 种风光蓄联合系统最大供电量计算方法, 并通过算例验证了其正确性和有效性, 对比分析了每种方法各自的特点。

1) 直接求解法: 其最大供电量优化模型比较细致精确, 优化控制变量动态序列数值多, 计算时间长。

2) 分段法: 计算速度较快, 所求最大供电量略偏小, 所求联合供电系统外送功率较为平稳。

3) 等效面积法: 不计网损, 无需潮流计算, 计算速度很快, 所求最大供电量略微偏大。

## 参考文献

- [1] KABOURIS J, KANELLOS F D. Impacts of large-scale wind penetration on designing and operation of electric power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1(2): 107-114.
- [2] 张刘冬, 殷明慧, 卜京, 等. 基于成本效益分析的风电-抽水蓄能联合运行优化调度模型[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3386-3392.  
ZHANG Liudong, YIN Minghui, BU Jing, et al. A joint optimal operation model of wind farms and pumped storage units based on cost-benefit analysis[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3386-3392.
- [3] 鹿嵩. 抽水蓄能电机抽水调相及其转换过渡过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
LU Song. The research of phase modulation and the converting process for pumped storage motor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [4] 张小辰. 考虑大规模风电场与抽水蓄能联合运行的可用输电能力分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
ZHANG Xiaochen. Available transfer capability evaluation considering large scale wind farms and pump storage[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [5] 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.
- [6] 曹昉. 风电及抽水蓄能电站容量规划方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
CAO Fang. Research on planning method to wind farm and pumped-storage generation capacity[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [7] 王睿, 张粒子, 张丽娟, 等. 含风电场系统风电与抽水蓄能匹配容量研究[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(6): 1037-1043.  
WANG Rui, ZHANG Lizi, ZHANG Lijuan, et al. Research on optimal capacity between wind power and pumped-storage power station[J]. *Acta Energetica Solaris-Sinica*, 2012, 33(6): 1037-1043.
- [8] 潘文霞, 范永威, 朱莉, 等. 风电场中抽水蓄能系统容量的优化选择[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(3): 120-124.  
PAN Wenxia, FAN Yongwei, ZHU Li, et al. The optimal sizing for pumped storage system in wind farm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(3): 120-124.
- [9] 徐飞, 陈磊, 金和平, 等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 149-154.  
XU Fei, CHEN Lei, JIN Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operation of pumped storage power station and wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 149-154.
- [10] 刘芳, 潘毅, 杨军峰, 等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(4): 766-775.  
LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Unit commitment model for combined optimization of wind power-thermal power-pumped storage hydro[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(4): 766-775.
- [11] 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.

- LI Qiang, YUAN Yue, LI Zhenjie, et al. Research on energy shifting benefits of hybrid wind power and pumped hydro storage system considering peak-valley electricity price[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 13-18.
- [12] 黄庶, 林舜江, 刘明波. 含风电场和抽水蓄能电站的多目标安全约束动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 112-121.  
HUANG Shu, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Multi-objective security constrained dynamic optimal dispatch with wind farms and pumped storage stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 112-121.
- [13] 李洁, 南彩霞, 韩兴军. 利用抽水蓄能电站提高电网接纳风电能力[J]. 蒙古科技大学学报, 2013, 32(3): 278-282.  
LI Jie, NAN Caixia, HAN Xingjun. Using the pumped storage power station to increase the acceptance of wind power capacity of the grid[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2013, 32(3): 278-282.
- [14] 祝瑞金, 郝焕帅, 王建军. 风考虑调峰效益和电量效益的风蓄联合运行优化模型及算法[J]. 华东电力, 2012, 40(4): 564-567.  
ZHU Ruijin, BING Huanshuai, WANG Jianjun. Optimization model and algorithm for wind-storage combined operation considering peak shaving and electricity benefits[J]. East China Electric Power, 2012, 40(4): 564-567.
- [15] 盛四清, 孙晓霞. 风电-抽水蓄能联合运行优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 100-103.  
SHENG Siqing, SUN Xiaoxia. Operational optimization model for combined operation of wind power and pumped-storage plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(11): 100-103.
- [16] 盛四清, 孙晓霞. 利用风蓄联合削峰的电力系统经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2484-2488.  
SHENG Siqing, SUN Xiaoxia. An economic dispatching strategy of peak load shifting by wind farm and pumped storage plant[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2484-2488.
- [17] YE Lin, ZHANG Cihang, TANG Yong, et al. Hierarchical model predictive control strategy based on dynamic active power dispatch for wind power cluster integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4617-4629.
- [18] 刘昇. 含 VSC-HVDC 的交直流电力系统建模、分析与控制相关问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
LIU Sheng. Modeling, analysis and control of AC/DC power systems containing VSC-HVDCs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [19] 韦廷方, 卫志农, 孙国强, 等. 适用于电压源换流器型高压直流输电的模块化多电平换流器最新研究进展[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1243-1252.  
WEI Yanfang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. New prospects of modular multilevel converter applied to voltage source converter high voltage direct current transmission[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1243-1252.
- [20] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.  
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and to-morrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [21] 李大虎, 张志杰, 张伟晨, 等. 背靠背柔性直流接入电网后的影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 71-80.  
LI Dahu, ZHANG Zhijie, ZHANG Weichen, et al. Influence evaluation of provincial power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 71-80.

收稿日期: 2019-03-23; 修回日期: 2019-06-13

作者简介:

张晓华(1963—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: zxx001@sina.com

魏子睿(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合系统分析; E-mail: 826626123@qq.com

马煜(1973—), 女, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: 2468807490@qq.com

(编辑 许威)