doi: 10.7690/bgzdh.2025.04.014

一种混合电力系统联合优化调度方法研究

何润泉[1]，陈樱露[1]，叶　睆[1]，郭苑灵[1]，殷海森[1]，谢　虎[2]
（1. 广东电网有限责任公司茂名供电局，广东 茂名 525000；
2. 南方电网数字电网研究院数字电网分公司，广州 510560）

摘要：针对混合电力系统安全、经济和可持续供电需求，提出一种混合电力系统联合优化调度模型。综合分析风电、太阳能光伏发电和负荷预测的不确定性、电网安全要求以及不同电源的运行特性；建立考虑风电、太阳能光伏、梯级水电、火电和抽水蓄能等混合电力系统联合优化调度模型；以 IEEE 39 节点系统为基础，结合中国某省电网的功率构成比、发电机组分布和流域分布，构建一个混合电力模拟系统；对不同水力、风力和负荷条件下的自然情景进行调度仿真。结果表明：仿真结果符合实际运行情况，所提模型为混合电力系统最优调度方案、安全管理及稳定运行提供了一定借鉴。

关键词：混合电力系统；风能；太阳能；水利发电；联合优化；调度模型
中图分类号：TM76　　**文献标志码：**A

Research on a Joint Optimal Dispatch Method for Hybrid Power System

He Runquan[1], Chen Manlu[1], Ye Huan[1], Guo Yuanling[1], Yin Haisen[1], Xie Hu[2]
(1. *Maoming Power Supply Bureau*, *Guangdong Power Grid Company Limited*, *Maoming* 525000, *China*;
2. *Digital Grid Branch*, *Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid*, *Guangzhou* 510560, *China*)

Abstract: A joint optimal dispatch model for hybrid power systems is proposed to meet the demand for secure, economical and sustainable power supply. The uncertainty of wind power, solar photovoltaic power generation and load forecasting, the security requirements of power grid and the operation characteristics of different power sources are comprehensively analyzed, and a joint optimal dispatching model considering wind power, solar photovoltaic power, cascade hydropower, thermal power, pumped storage and other hybrid power systems is established; Based on the IEEE 39-bus system, a hybrid power simulation system is constructed by combining the power composition ratio, generator distribution and basin distribution of a provincial power grid in China; The simulation results of natural scenarios under different hydraulic, wind and load conditions show that the simulation results are in line with the actual operation situation, and the proposed model provides a reference for the optimal dispatching scheme, security management and stable operation of the hybrid power system.

Keywords: hybrid power system; wind energy; solar energy; hydropower; joint optimization; dispatching model

0　引言

随着风能、水利、太阳能等可再生能源[1-2]发电比例不断增高，传统以火力发电为主的配电网迎来了新的变革。同时，结合通信、计算机、网络[3-5]等技术，充分调度配电网中不同类型的可变资源，发挥电力资源之间的互补性优势，这为提高可再生能源的利用率以及混合电网的安全运行管理具有重要推动作用。

目前，大部分研究主要集中研究混合电力系统的短期最优调度技术，同时研究涉及包含 2 个或 3 个电力系统的联合优化调度方案，如风-光伏、水电-光伏或水电-风混合系统等。文献[6]从混合电站的结构及运行机理出发，提出了电力市场下混合电站鲁棒优化调度模型。文献[7]提出了一种含电力电子变压器的交直流混合系统分布式能源的日前优化调度方法，从而实现交直流混合系统分布式能源的充分消纳以及经济最优。文献[8]以电力系统中发电成本最低为目标，结合实际发电运行中系统平衡约束和机组操作约束条件，基于混合自适应粒子群算法求解电力经济调度模型。现有的研究大多只针对小规模系统的运行和调度，其目标和约束不能恰当反映实际系统的运行需求。此外，由于风力发电和光伏发电等可再生能源的不确定性和波动性，需要考虑混合电力系统调度的安全性问题，如备用容量、N-1 约束等。

考虑到上述问题，笔者综合考虑风电、太阳能光伏发电和负荷预测的不确定性、电网安全要求以及不同电源的运行特性，建立一种混合电力系统联

收稿日期：2024-08-23；**修回日期：**2024-09-21
基金项目：南方电网公司重点科技项目(0000002021030101XT00045)
第一作者：何润泉(1990—)，男，广东人。

合优化调度模型，从而实现一套安全、经济和可持续的电力供应调度方案。

1　混合电力系统联合优化模型

笔者提出的混合电力系统日前优化调度模型主要关注 3 个问题：1) 根据所有运行约束条件，建立了风电、水电、太阳能、热电和抽水蓄电的协调调度模型；2) 在优化调度模型中，考虑了电网的静态和 N−1 安全约束；3) 采用综合考虑日前风电预测、太阳能光伏预测和负荷预测的有效调度配置。

1.1　模型结构

笔者所提混合电力系统调度协同优化结构如图 1 所示。考虑到混合电力系统中的各种能源具有不同的特性，因此系统运行需要在日前调度中满足不同的约束条件。在模型的优化目标中，笔者考虑了传统火电机组相关的经济目标和风力发电以及光伏发电相关的可再生能源损耗目标。除了系统安全约束外，调度策略还需要满足系统运行约束和机组运行约束。

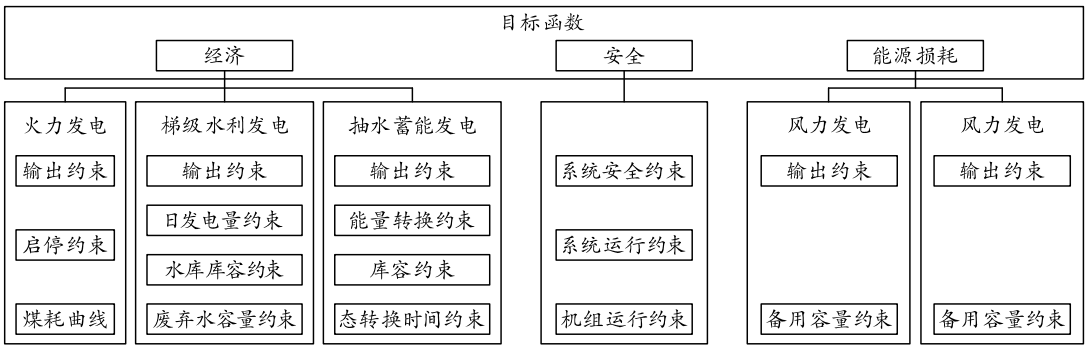

图 1　混合电力系统调度协同优化结构

1.2　优化目标函数

综合考虑安全性、经济性和可再生能源消耗要求，笔者以混合电力系统的安全指标为约束条件，构建的日前优化调度模型定义如下：

$$\text{object:}=\left[\min f_1(x),\max f_2(x),\min f_3(x)\right]$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} f_2(x)\geqslant f_{2,\text{set}} \\ x\in X \end{cases}。\tag{1}$$

式中：f_1、f_2 和 f_3 分别为经济、安全和可再生能源损失指标；$f_{2,\text{set}}$ 为安全指标的设定阈值；x 为决策变量；X 为决策变量的可行域，该值由其他约束确定。

经济指标 f_1 可计算如下：

$$f_1=f_1^r+f_1^{\text{SD}}。\tag{2}$$

式中：f_1^r 为火电机组运行成本；f_1^{SD} 为火电机组启停成本，通常为固定值。由于本文中所有火电机组都是燃煤电厂，因此燃煤电厂的运营成本通常用煤耗曲线 f_i^t 表示：

$$f_i^t=u_i^t\left[a_i(P_i^t)^2+b_iP_i^t+c_i\right]。\tag{3}$$

式中：a_i、b_i 和 c_i 为煤耗系数；u_i^t 为 0−1 变量，表示燃煤机组 i 的启动或停止状态；P_i^t 为燃煤机组 i 在时间 t 的输出。由于 f_i^t 具有非线性特性，使模型求解困难。为此，笔者通过分段线性化方法将其简化：

$$\left.\begin{aligned} F_i^t(P_i^t)&=u_i^tA_i+\sum_{i=1}^{N_G}F_{il}\delta_{i,l}^t \\ A_i&=a_i(P_i^{\min})^2+b_iP_i^{\min}+c_i \\ P_i^t&=u_i^tP_i^{\min}+\sum_{i=1}^{N_G}\delta_{i,l}^t \end{aligned}\right\}。\tag{4}$$

式中：F_{il} 为第 l 个线性消耗函数的斜率；$\delta_{i,l}^t$ 为第 l 个线性消耗函数的输出；$P_i^{\min}$ 为燃煤机组最小输出；N_G 为燃煤机组数量。进一步，线性化的运行成本 f_i^t 可更新为：

$$f_1^t=\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{i=1}^{N_G}F_i^t(P_i^t)。\tag{5}$$

式中 N_T 为调度周期，通常取 24 h。

进一步，系统的安全指标 f_2 定义为在没有风限功率、光伏损耗、剩余水力或负载损耗的情况下，由混合电力系统的有效备用容量确定的系统需求负荷水平，因此：

$$\left.\begin{aligned} f_2&=\sum_{t=1}^{N_T}\rho_t \\ \rho_t&=P(R_{\text{up}}^t)-P(R_{\text{down}}^t) \end{aligned}\right\}。\tag{6}$$

式中：ρ_t 为时间 t 的置信水平；R_{up}^t 为时间 t 时，电力系统的总有效备用容量为正，系统无负载损耗的概率；R_{down}^t 为时间 t 时，电力系统的总有效备用容

量为负，风电损耗、光伏损耗等发生的概率。

同理，可再生能源损失 f_3 定义为运营期内废弃风能、水能和太阳能的总电量，即：

$$f_3=\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{w=1}^{N_W}(P_{W,w}^t\bullet\Delta t)+\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{h=1}^{N_H}(P_{H,h}^t\bullet\Delta t)+\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{s=1}^{N_S}(P_{S,s}^t\bullet\Delta t)\text{。}\tag{7}$$

式中：N_W 为风电机组数量；N_H 为梯级水电机组数量；N_s 为太阳能发电光伏板数量；$P_{W,w}^t$ 为风电机组输出功率；$P_{H,h}^t$ 为梯级水电机组输出功率；$P_{S,s}^t$ 为光伏电站输出功率；Δt 为单位运行时间(取 Δt=1)。

1.3　协同优化运行约束条件

日前优化调度模型的约束主要分为机组运行约束、网络安全约束和系统运行约束。接下来，对各个约束进行详细介绍。

1.3.1　机组运行约束

1) 火力发电机组。

火力发电机组的输出约束 P_i^t 描述为：

$$P_i^t=u_i^tP_i^{\min}+\sum_{l=1}^{N_G}\delta_{i,l}^t,\ \delta_{i,l}^t\geqslant 0\text{。}\tag{8}$$

同时，火力发电机组的最短运行时间约束描述如下：

$$(X_{i,\mathrm{on}}^t-T_{i,\mathrm{on}})(u_i^{t-1}-u_i^t)\geqslant 0\text{。}\tag{9}$$

式中：$T_{i,\mathrm{on}}$ 为机组 i 的最小连续运行时间；$X_{i,\mathrm{on}}^t$ 为机组 i 在时段 t 之前的连续运行时间。同理，机组的最短停机时间约束描述如下：

$$(X_{i,\mathrm{off}}^t-T_{i,\mathrm{off}})(u_i^t-u_i^{t-1})\geqslant 0\text{。}\tag{10}$$

式中：$T_{i,\mathrm{off}}$ 为机组 i 的停机时间；$X_{i,\mathrm{off}}^t$ 为机组 i 在时段 t 之前的停机时间。

2) 风力发电机组。

风力发电机组的输出约束描述为：

$$P_{Wc,k}^t=P_{Wp,k}^t-P_{W,k}^t,\ P_{W,k}^t\geqslant 0,\ P_{Wp,k}^t\geqslant 0\text{。}\tag{11}$$

式中：$P_{Wc,k}^t$ 为损耗风电功率；$P_{Wp,k}^t$ 为预测风电功率；$P_{W,k}^t$ 为风电输出功率。

3) 光伏发电机组。

光伏发电机组的输出约束描述为：

$$P_{Sc,k}^t=P_{Sp,k}^t-P_{S,k}^t,\ P_{S,k}^t\geqslant 0,\ P_{Sp,k}^t\geqslant 0\text{。}\tag{12}$$

式中：$P_{Sc,k}^t$ 为损耗光伏发电功率；$P_{Sp,k}^t$ 为预测光伏发电功率；$P_{S,k}^t$ 为光伏发电输出功率。

4) 梯级水电站运行约束。

梯级水电站运行约束包括输出约束、日发电量约束、水库库容约束以及废弃水容量约束。输出约束描述如下：

$$P_{H,k}^t=\sum_{l=1}^{L_H}I_{k,l}^t\lambda_{k,l}q_{H,k}^t\text{。}\tag{13}$$

式中：$P_{H,k}^t$ 为梯级水电站输出约束；$q_{H,k}^t$ 为水电站 k 在 t 时间内的发电用水量；$\lambda_{k,l}$ 为梯级水电站 k 在其蓄水量为 l 级时的能量转换系数；$I_{k,l}^t$ 为状态变量，当 t 时间时水库容量为 l 级时有 $I_{k,l}^t=1$；L_H 为水库总蓄水级别。为简化计算，笔者应用分离不等式的方法消除式(13)中非线性约束，因此单位输出约束定义如下：

$$\left.\begin{aligned}&p_l^t\leqslant\lambda_{k,l}q_{H,k}^t\\&0\leqslant p_l^t\leqslant I_{k,l}^t\bullet L_H\\&P_{H,k}^t=\sum_{l=1}^{L_H}p_l^t\end{aligned}\right\}\text{。}\tag{14}$$

同时，日发电量约束描述如下：

$$\left.\begin{aligned}&\sum_{t=1}^{T}\left(P_{H,k}^t+R_{\mathrm{up},H,k}^t\right)\bullet\Delta t\leqslant W_{H,k}^{\max}\\&\sum_{t=1}^{T}\left(P_{H,k}^t+P_{Hc,k}^t-R_{\mathrm{down},H,k}^t\right)\bullet\Delta t\geqslant W_{H,k}^{\min}\end{aligned}\right\}\text{。}\tag{15}$$

式中：$P_{H,k}^t$ 为最小产量的差额；$R_{\mathrm{up},H,k}^t$ 为梯级水电站正旋转备用容量；$R_{\mathrm{down},H,k}^t$ 为梯级水电站负旋转备用容量；$W_{H,k}^{\max}$ 和 $W_{H,k}^{\min}$ 为梯级水电站日最大和最小发电量。

水库库容约束描述如下：

$$\left.\begin{aligned}&V_k^{\min}\leqslant V_k^t\leqslant V_k^{\max}\\&V_k^t=V_k^0+\sum_{j\leqslant t}(I_{\mathrm{in},k}^j+Q_{\mathrm{in},k}^j-Q_{\mathrm{out},k}^j)\\&Q_{\mathrm{out},k}^j=q_k^t+q_{Hc}^t\end{aligned}\right\}\text{。}\tag{16}$$

式中：k 为第 k 个水电站；$V_k^{\min}$ 为水库最小蓄水量；$V_k^{\max}$ 为水库最大蓄水量；V_k^t 为 t 时间水库蓄水量；V_k^0 为初始时刻水库蓄水量；$I_{\mathrm{in},k}^j$ 为自由进水量；$Q_{\mathrm{in},k}^j$ 为上游进水量；$Q_{\mathrm{out},k}^j$ 为下游出水量，由发电用水量 q_k^t 和剩余水量 q_{Hc}^t 构成。

废弃水容量约束描述如下：

$$\left.\begin{aligned}&P_{Hc,k}^t=P_{Hc1,k}^t+P_{Hc2,k}^t\\&P_{Hc2,k}^t=\lambda_k\bullet q_{Hc,k}^t\end{aligned}\right\}\text{。}\tag{17}$$

式中 $P_{Hc,k}^t$ 为废弃水容量，主要由电力短缺时的电力

$P_{Hc1,k}^t$ 和通过剩余水转换的等效电力 $P_{Hc2,k}^t$ 组成。

5) 抽水蓄能发电站运行约束。

抽水蓄能发电站的运行约束包括输出约束、能量转换约束、水库上下游库容约束、循环开始和结束状态约束、工作状态转换时间约束。下面对各个约束进行详细介绍。

输出约束 P_{PS}^t：

$$P_{PS}^t = u_{PS}^t P_G^t + (1-u_{PS}^t)P_p \text{。} \tag{18}$$

式中 u_{PS}^t 为抽水蓄能发电站的条件变量（$u_{PS}^t<0$ 为抽水状态，$u_{PS}^t>0$ 为发电状态）。该约束表明：当 $u_{PS}^t=1$ 时，单位输出 P_{PS}^t 等于发电功率 P_G^t；当 $u_{PS}^t=0$ 时，输出 P_{PS}^t 等于恒定泵浦功率 P_p。

同时，采用类似于梯级水电站的离散容量法，将抽水蓄能发电站的水面高度分为 L_{PS} 段，则抽水蓄能发电站的输出 P_{PS}^t 描述如下：

$$P_{PS}^t = q^t\left(\sum_{l=1}^{L_{PS}} I_{g,l}^t \lambda_{g,l} + \sum_{l=1}^{L_{PS}} I_{p,l}^t \lambda_{p,l}\right) \text{。} \tag{19}$$

式中：$\lambda_{g,l}$ 为抽水蓄能电站处于发电状态且水面高度为 l 级时的能量转换系数；$I_{g,l}^t$ 为发电状态变量，表征是否在水面级别 l 发电；$\lambda_{g,l}$ 为抽水蓄能电站处于抽水状态且水面高度为 l 级时的能量转换系数；L_{PS} 为水面高度级别总数；$I_{p,l}^t$ 为抽水状态变量，表征是否在水面级别 l 抽水。进一步，消除非线性后，抽水蓄能电站的能量转换约束如下：

$$\left.\begin{array}{l} p_{g,l}^t \leqslant \lambda_{g,l} q^t,\ 0 \leqslant p_{g,l}^t \leqslant I_{g,l}^t L_{PS} \\ p_{p,l}^t \leqslant \lambda_{p,l} q^t,\ -I_{p,l}^t L_{PS} \leqslant p_{g,l}^t \leqslant 0 \\ P_{PS}^t = \sum_{l=1}^{L_H}\left(p_{g,l}^t + p_{p,l}^t\right) \end{array}\right\} \text{。} \tag{20}$$

水库上下游库容约束描述如下：

$$\left.\begin{array}{l} V_U^{\min} \leqslant V_U^t \leqslant V_U^{\max} \\ V_D^{\min} \leqslant V_D^t \leqslant V_D^{\max} \\ V_U^t = V_U^{t-1} + Q_{U\text{in}}^t - q^t \\ V_D^t = V_D^{t-1} + Q_{D\text{in}}^t + q^t - q_D^t \end{array}\right\} \text{。} \tag{21}$$

式中：V_U^t 为 t 时间抽水蓄能电站上水库蓄水量；$V_U^{\min}$ 为上水库最小蓄水量；$V_U^{\max}$ 为上水库最大蓄水量；V_D^t 为 t 时间抽水蓄能电站下水库蓄水量；$V_D^{\min}$ 为下水库最小蓄水量；$V_D^{\max}$ 为下水库最大蓄水量；$Q_{U\text{in}}^t$ 为上水库进水量；$Q_{D\text{in}}^t$ 为下水库进水量；q^t 为上水库发电用水量；q_D^t 为下水库发电用水量。

循环开始和结束状态约束描述如下：

$$\left.\begin{array}{l} V_U^0 = V_U^T \\ V_D^0 = V_D^T \end{array}\right\} \text{。} \tag{22}$$

式中：V_U^0 为循环开始时刻上水库蓄水量；V_U^T 为循环结束上水库蓄水量；V_D^0 为循环开始时刻下水库蓄水量；V_D^T 为循环结束下水库蓄水量。

工作状态转换时间约束描述如下：

$$\left.\begin{array}{l} 0 \leqslant x_g^t \leqslant 1,\ 0 \leqslant x_p^t \leqslant 1 \\ x_g^t \geqslant u_{PS}^t - u_{PS}^{t-1},\ x_p^t \geqslant u_{PS}^t - u_{PS}^{t-1} \\ \sum_{l=1}^{N_T} x_g^t \leqslant \kappa_g,\ \sum_{l=1}^{N_T} x_p^t \leqslant \kappa_p \end{array}\right\} \text{。} \tag{23}$$

式中：κ_g 度时间内抽水蓄能电站从抽水到发电的转换时间上限；κ_p 为调度时间内抽水蓄能电站从发电到抽水的转换时间上限。

1.3.2 系统运行约束

系统运行约束主要包括功率平衡约束和有效备用容量约束。接下来对各个系统运行约束进行详细介绍。

对于功率平衡约束，有：

$$\sum_{i=1}^{N_L} P_{L,i}^t = \sum_{m=1}^{N_H} P_{H,m}^t + \sum_{j=1}^{N_G} P_j^t + \sum_{l=1}^{N_W} P_{W,m}^t + \sum_{q=1}^{N_S} P_{S,q}^t + P_{ps}^t \text{。} \tag{24}$$

式中：N_L 为负载节点的数量；$P_{L,i}^t$ 为时间 t 时负载 i 的负荷需求。功率平衡约束表明负荷需求与产能之间的供求平衡。

考虑到风电、光伏功率预测和负荷预测的不确定性，系统需要有一定的备用容量；因此，有效备用容量约束描述如下：

$$\left.\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N_G} R_{\text{up},i}^t + \sum_{k=1}^{N_H} R_{\text{up},h,K}^t + R_{\text{up},p}^t \geqslant A_{\text{up}} \\ \sum_{i=1}^{N_G} R_{\text{down},i}^t + \sum_{k=1}^{N_H} R_{\text{down},h,K}^t + R_{\text{down},p}^t \geqslant A_{\text{down}} \end{array}\right\} \text{。} \tag{25}$$

式中 A_{up} 和 A_{down} 为考虑风电预测、光伏功率预测和负荷预测的不确定性时，系统达到一定置信水平所需的正旋转和负旋转备用容量。

1.3.3 网络安全约束

网络安全约束包括静态安全约束和 N-1 安全约束。

1) 静态安全约束。

采用基于直流潮流功率传递分布系数的横截面潮流计算方法，将发电机组旋转备用容量纳入电网静态安全约束，从而确保备用容量的可用性；因此，机组有效备用容量的网络静态安全约束描述如下：

$$\left.\begin{aligned}&-P_{L,\max}\leqslant P_{l,\mathrm{up}}=\boldsymbol{G}_g(P_{\mathrm{Gen}}+R_{\mathrm{up}})-\\&\boldsymbol{G}_l(P_{L,i}^t+R_{\mathrm{up},a}w_l)\leqslant P_{l,\max}\\&-P_{L,\max}\leqslant P_{l,\mathrm{down}}=\boldsymbol{G}_g(P_{\mathrm{Gen}}+R_{\mathrm{down}})-\\&\boldsymbol{G}_l(P_{L,i}^t+R_{\mathrm{down},a}w_l)\leqslant P_{L,\max}\end{aligned}\right\}。\tag{26}$$

式中：$P_{L,\max}$ 为最大负荷需求；$\boldsymbol{G}_g$ 为正常工作下发电机功率输出分配系数矩阵；P_{Gen} 为发电机功率；R_{up} 为发电正旋转备用容量；$R_{\mathrm{up},a}$ 为系统正旋转备用容量；$\boldsymbol{G}_l$ 为正常工作下负荷需求分配系数矩阵；R_{down} 为发电负旋转备用容量；$R_{\mathrm{down},a}$ 为系统正旋转备用容量；w_l 为系统备用容量系数。

2) N-1 安全约束。

N-1 安全约束主要对电网中不确定因素(如风电预测、光伏预测和负荷预测)引起的净负荷不可预测波动保持一定程度的缓冲；因此，有：

$$\left.\begin{aligned}&-\tilde{P}_{L,\max}\leqslant\tilde{P}_{l,\mathrm{up}}=\boldsymbol{G}_g^c(P_{\mathrm{Gen}}+R_{\mathrm{up}}^c)-\\&\boldsymbol{G}_l^c(\tilde{P}_{L,i}^t+R_{\mathrm{up},a}^c w_l)\leqslant\tilde{P}_{l,\max}\\&-\tilde{P}_{L,\max}\leqslant\tilde{P}_{l,\mathrm{down}}^c=\boldsymbol{G}_g^c(P_{\mathrm{Gen}}+R_{\mathrm{down}}^c)-\\&\boldsymbol{G}_l^c(\tilde{P}_{L,i}^t+R_{\mathrm{down},a}^c w_l)\geqslant\tilde{P}_{L,\max}\end{aligned}\right\}。\tag{27}$$

式中：$\tilde{P}_{L,\max}$ 为最大负荷需求 N-1 约束；$\boldsymbol{G}_g^c$ 为线路 c 发生 N-1 故障时发电机功率输出分配系数矩阵；R_{up}^c 为线路 c 发生 N-1 故障时发电正旋转备用容量；$R_{\mathrm{up},a}^c$ 为线路 c 发生 N-1 故障时系统正旋转备用容量；$\boldsymbol{G}_l^c$ 为线路 c 发生 N-1 故障时负荷需求分配系数矩阵；R_{down}^c 为线路 c 发生 N-1 故障时发电负旋转备用容量；$R_{\mathrm{down},a}^c$ 为线路 c 发生 N-1 故障时系统正旋转备用容量。

2　仿真与分析

2.1　仿真环境与实验设置

为验证所提模型有效性，笔者以 IEEE 39 节点系统为基础，结合中国某省电网的功率构成比、发电机组分布和流域分布，构建了一个混合电力模拟系统。混合电力模拟系统结构如图 2 所示。

图 2 中虚线箭头表示梯级水电站所在流域的方向。此外，每个火力发电机组输出范围为[140, 670] MW，煤耗系数 a_i 取值范围为[0.003, 0.012]，煤耗系数 b_i 取值范围为[97, 120]，煤耗系数 c_i 取值范围为[2 700, 6 000]。梯级水电站最大输出范围[250, 300] MW，最大容量[360, 400] Mm^3，最小容量[80, 120] Mm^3。抽水蓄能发电站最大发电功率 150 MW，最大抽水功率 150 MW，发电效率和抽水效率都为 0.9，上(下)水库最大最小容量均为 10^6 和 $2\times10^5\ \mathrm{m}^3$。

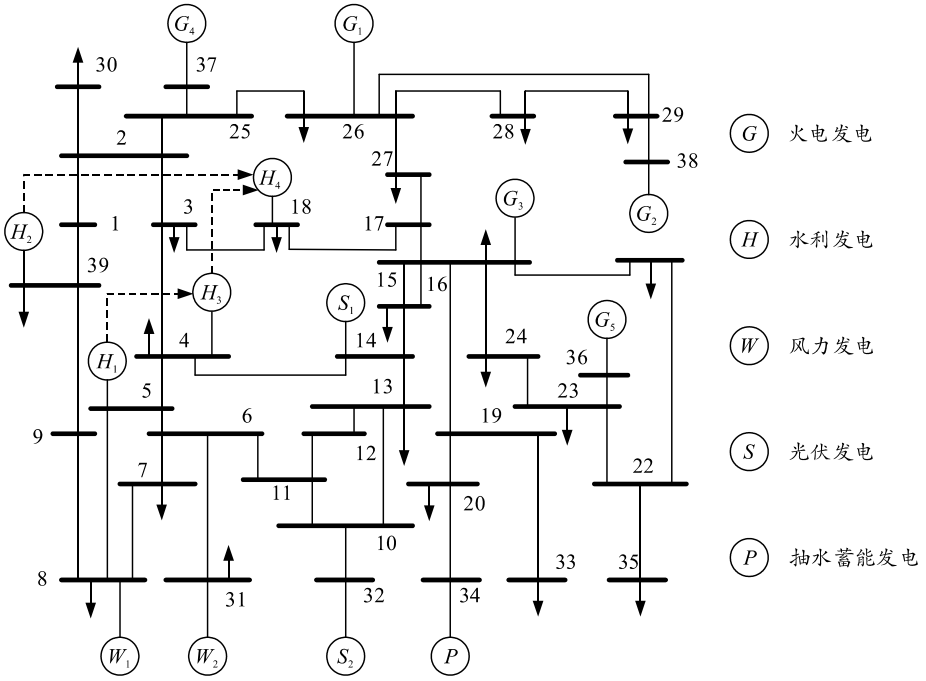

图 2　混合电力模拟系统结构

仿真时实验设置如下：软件环境：在 Matlab/Simulink 中建立仿真控制模型，并基于 platEMO 多目标优化工具包建立优化模型。同时，日负荷数据、省级电网的年平均负荷数据、风况数据以及水文条件(汛期、平季和旱季)等信息以 CVS 文件存储，并在需要时以文件形式调用；硬件环境：

英特尔至强 CPU，处理器的运行频率为 2.36 GHz，内存为 32 G 的联想服务器，操作系统为 Win10 64 位。

2.2　结果与分析

笔者对不同水力、风力和负荷条件下的自然情景进行了日前调度仿真分析。仿真场景划分如表 1 所示。

表 1　不同组合仿真场景划分

发电类型	编号	模式
水利	I	旱季
	II	正常季节
	III	汛期
风力	1	正峰值风况
	2	负峰值风况
负荷条件	a	年平均负荷
	b	最大年负荷峰谷差

由表 1 可知：仿真时将 3 种水利、2 种风力和 2 种负荷条件最终组合为 12 种自然场景。

表 2 为 12 种场景下混合电力系统调度结果。可以看出：当且仅在 III1b(汛期-正峰值风况-最大年负荷峰谷差)和 III2b(汛期-负峰值风况-最大年负荷峰谷差)模式下，混合电力系统出现废弃风能、水能和太阳能，同时废弃能量分别为 458 和 481 MWh。

表 2　不同场景混合电力系统调度结果

场景	成本/元				废弃能量/MWh
	总成本	运行成本	启动成本	停止成本	
I1a	545 133	544 810	323	0	0
II1a	3 854 620	3 854 620	0	0	0
III1a	2 924 776	2 921 865	1 408	1 503	0
I1b	546 720	546 009	711	0	0
II1b	394 622	390 985	1 712	1 925	0
III1b	3 221 686	3 213 544	3 319	4 823	458
I2a	552 551	552 228	323	0	0
II2a	390 174	390 174	0	0	0
III2a	301 010	298 159	1 389	1 462	0
I2b	554 916	554 221	695	0	0
II2b	401 782	398 158	1 699	1 925	0
III2b	333 187	325 907	2 951	4 329	481

分析原因：在 III1b 和 III2b 条件下，混合电力系统电能生产“过饱和”；因此，系统需放弃适度的风力和水力，从而确保在最大负荷峰谷差时系统运行安全稳定。

当混合系统保持 1a(正峰值风况-年平均负荷时)，随着水力资源不断丰富(I1a、II1a 和 III1a)，混合系统启停成本增加，然而运行成本逐渐降低。由于运行成本远大于启停成本，最终汛期总成本较旱季相比，约减少 1/2。

当混合系统保持 2III(负峰值风况-汛期)，火电机组在最大负荷峰谷差(III2b)时的启停成本远高平均负荷条件(III2a)。分析原因：混合电力系统在汛期的调峰能力较弱，需要依靠火电机组的启停来进行调峰。

当混合系统保持 2b(负峰值风况-最大负荷峰谷差)，旱季(I2b)启停成本低于汛期(模式 IIII2b)。分析原因：旱季时梯级水电输出比例较小，此时火电机组将承担更多的负荷，因此启停相对较少；相反，汛期时火电机组频繁启停从而满足调峰要求，因此启停成本增加。

综上所述，仿真结果符合实际运行情况，所提模型为混合电力系统最优调度方案、安全管理及稳定运行提供了一定借鉴作用。

3　结论

笔者建立一种考虑风能、水能、光伏、火力等的混合电力系统调度模型，并基于经济、安全和能耗目标函数和系统安全、系统运行、机组运行等约束条件获取电力最优调度方案。该模型为混合电力系统安全管理及稳定运行提供了一定借鉴作用。未来，可对混合系统参数的优化配置和规模进行研究，进一步降低系统总成本。

参考文献：

[1] 多拉, 丁祥, 张昱翀, 等. 老挝万象与中国昆明太阳能热水系统性能对比分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 11-15.

[2] 柳璐, 程浩忠, 吴耀武, 等. 面向高比例可再生能源的输电网规划方法研究进展与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 176-183.

[3] 毛龙灿, 杨南. 基于大数据背景的皮革人才培养优化研究[J]. 中国皮革, 2021, 50(9): 38-41.

[4] 杨涛. 互联网时代下皮革行业电商物流体系研究分析[J]. 中国皮革, 2021, 50(8): 82-85.

[5] 钟建栩, 余少锋, 廖崇阳, 等. 基于云计算的电力设备智能监测系统[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 37-41.

[6] 臧海祥, 马铭欣, 周亦洲, 等. 电力市场环境下风电-光热-生物质混合电站鲁棒优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 1-11.

[7] 郭世琦, 穆云飞, 陈乃仕, 等. 含电力电子变压器的交直流混合分布式能源系统日前优化调度[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(2): 44-51.

[8] 陈宏伟, 王万成, 王继拓. 混合自适应粒子群算法在电力经济调度中的应用[J]. 计算机与现代化, 2019(3): 45-50.