

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.009

抽水蓄能电站与火电厂联合优化运行分析

聂金峰

(南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510530)

摘要: [目的]利用抽水蓄能电站优化火电厂的出力曲线,是提高电力系统经济性的重要手段。[方法]建立了抽水蓄能电站与火电厂联合优化运行的数学模型,然后以某实际电力系统为例对联合运行进行了优化模拟。最后探讨了联合运行节煤的内在机理。[结果]模拟结果表明抽水蓄能电站与火电厂联合优化运行降低了系统煤耗。[结论]建议要充分利用抽水蓄能电站来优化火电厂的出力曲线,提高电力系统运行经济性。

关键词: 抽水蓄能; 火电; 联合优化运行; 调峰

中图分类号: TM611; TV743

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0061-06

Analysis of Combined Optimal Operation of Pumped Storage Power Plants and Thermal Power Plants

NIE Jinfeng

(Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510530, China)

Abstract: [Introduction] Optimizing output curve of thermal power plants by using pumped storage power plants is an important means to improve the economy of power system. [Method] In this paper, a mathematical model of combined optimal operation of pumped storage power plants and thermal power plants was established first. Then, an actual power system containing pumped storage power plants and thermal power plants was taken as an example for simulation. Finally, the mechanism of coal saving of combined optimal operation of pumped storage power plants and thermal power plants was revealed. [Result] The simulation results show that combined optimal operation of pumped storage power plants and thermal power plants reduce the coal consumption of power system. [Conclusion] We suggest that output curve of thermal power plants should be optimized by making full use of pumped storage to improve running efficiency of power system.

Key words: pumped storage power plant; thermal power plants; combined optimal operation; peak load regulation

抽水蓄能电站是目前唯一可用于电力系统储能的储能装置,它即可以削峰填谷,改善系统负荷特性,优化各类型电源的运行位置;又可以承担调频、调相、紧急事故备用、黑启动等动态功能,从而提高供电质量、保障供电安全、减少停电时间等,在世界各国得到了广泛应用,建设合理规模的抽水蓄能电站,是解决电网调峰问题、提高电力系统运行经济性、灵活性的重要手段^[1-4]。

受各种因素的影响,我国抽水蓄能电站的装机

容量占总电源装机容量的比重偏低,在运抽水蓄能电站的利用率偏低,抽水蓄能电站的作用未得到充分发挥,电网调峰任务仍主要由火电机组承担,不少省区电网调峰形势严峻^[4-6]。利用抽水蓄能与风电、核电等调峰性能很差的新能源机组联合运行,提高电网消纳上述清洁能源的能力,在业界已基本达成了共识,相关的优化研究成果也较多^[7-14]。但在系统不存在调峰缺口时,是否有必要利用抽水蓄能优化火电机组运行曲线,在业界仍存在一定的争论,部分研究者甚至根据“抽水蓄能在抽水-发电转换过程中的能量损失率一般为25%左右,火电机组压负荷调峰煤耗一般仅增加10%~15%左右”而得出“抽水蓄能抽水调峰比火电电压负荷调峰的经济

收稿日期: 2017-09-11 修回日期: 2017-11-07

基金项目: 南方电网公司科技项目“含高比例可再生能源的电力系统规划理论研究”(KYKJXM00000021)

性要差”的结论，这些都进一步阻碍了抽水蓄能的发展。

本文首先建立了抽水蓄能机组与火电机组联合运行的优化模型；在此基础上以某实际系统为例进行了联合优化模拟，模拟结果表明合理安排抽水蓄能与火电机组的工作位置可改善系统运行的经济；最后，分析了抽水蓄能与火电联合运行提高系统经济性的内在机理。

1 联合优化运行建模

本文重点探讨的是如何确定抽水蓄能和火电机组的出力组合，以实现二者联合优化运行的目标。为简化分析，建模过程基于以下假设条件：

1) 电力系统中仅包含抽水蓄能和火电两种类型的发电机组。

2) 抽水蓄能和火电的装机容量均为确定值，且已扣除了因各种因素造成的受阻容量。

3) 抽水蓄能机组最大发电出力和最大抽水功率相同，均等于其装机容量，且抽水-发电转换效率为75%（即每发3 kWh电能需抽水消耗4 kWh电能）。

4) 优化时段内（如1典型日等），火电机组不发生启停机操作，即同一台机组要么保持开机状态，要么保持停机状态；抽水蓄能机组抽发平衡，即其发电量等于抽水电量的75%。

5) 不存在电力平衡缺口和调峰缺口。

其中，对假设条件1)说明如下：实际电力系统中一般含有水电等其他类型的机组，但可认为本文优化的是扣除了其他类型机组出力（含承担旋转备用）后的负荷分配，因此该假设对含其他类型机组的电力系统仍是合理的。

1.1 目标函数

将优化时段细分成 L 段，任一段持续时间内假定负荷保持不变，其中第 i 段持续时间计为 T_i ，相应的负荷计为 P_i 。最高负荷计为 P_{\max} ，则有

$$P_{\max} = \max(P_1, P_2, \dots, P_L) \quad (1)$$

设抽水蓄能和火电机组分别有 M 台和 N 台，第 i 台抽水蓄能机组的装机容量计为 $S_i^{(h)}$ ；开停机状态计为 $x_i^{(h)}$ （1表示开机，0表示停机）；第 j 时段出力率为 $y_{ij}^{(h)}$ ；第 i 台火电机组的装机容量计为 $S_i^{(t)}$ ；开停机状态计为 $x_i^{(t)}$ （1表示开机，0表示停机）；第 j 时段出力率为 $y_{ij}^{(t)}$ 。设第 i 台火电机组额

定出力下单位电量煤耗为 e_i ；非额定出力下单位电量煤耗为 $e_i f_i(\alpha)$ ；其中 α 为出力率。

则优化时段内系统煤耗为：

$$E = \sum_{j=1}^L \left[\sum_{i=1}^N x_i^{(t)} S_i^{(t)} y_{ij}^{(t)} e_i f_i(y_{ij}^{(t)}) T_j \right] \quad (2)$$

式(2)即为优化的目标函数。

1.2 约束条件

设系统的旋转备用率为 γ ，则开机容量最小应为最高负荷的 $(1+\gamma)$ 倍，即：

$$\sum_{i=1}^M x_i^{(h)} S_i^{(h)} + \sum_{i=1}^N x_i^{(t)} S_i^{(t)} \geq (1+\gamma) P_{\max} \quad (3)$$

由电力平衡约束，对 $j=1, 2, \dots, L$ ，有：

$$\sum_{i=1}^M x_i^{(h)} S_i^{(h)} y_{ij}^{(h)} + \sum_{i=1}^N x_i^{(t)} S_i^{(t)} y_{ij}^{(t)} = P_j \quad (4)$$

由火电机组开停机状态约束，对 $i=1, 2, \dots, N$ ， $x_i^{(t)}$ 取值只能是1或0，表示成方程的形式即为：

$$x_i^{(t)} (x_i^{(t)} - 1) = 0 \quad (5)$$

类似的，由抽水蓄能机组开停机状态约束，对 $i=1, 2, \dots, M$ ，有：

$$x_i^{(h)} (x_i^{(h)} - 1) = 0 \quad (6)$$

设第 i 台火电机组最小技术出力率为 β_i ，由火电机组出力约束，对 $i=1, 2, \dots, N$ 和 $j=1, 2, \dots, L$ ，有：

$$y_{ij}^{(t)} \geq \beta_i \text{ 且 } y_{ij}^{(t)} \leq 1 \quad (7)$$

类似的，由抽水蓄能机组出力约束，对 $i=1, 2, \dots, N$ 和 $j=1, 2, \dots, L$ ，有：

$$y_{ij}^{(h)} \geq -1 \text{ 且 } y_{ij}^{(h)} \leq 1 \quad (8)$$

由抽水蓄能机组抽发平衡约束，并考虑转换效率为75%，对 $i=1, 2, \dots, M$ ，有：

$$\sum_{j=1}^L y_{ij}^{(h)} \Big|_{y_{ij}^{(h)} \geq 0} + 75\% \sum_{j=1}^L y_{ij}^{(h)} \Big|_{y_{ij}^{(h)} < 0} = 0 \quad (9)$$

化简得到：

$$\sum_{j=1}^L (7y_{ij}^{(h)} + |y_{ij}^{(h)}|) = 0 \quad (10)$$

式(3)~(8)和式(10)组成的不等式组和方程组即构成优化目标的约束条件。

2 模型求解分析

2.1 模型简化

根据前述建立的模型可知，该模型待求解的变量数为 $(M+N)(L+1)$ ，约束方程（或不等式）个数为 $2(M+N)L+2M+N+L+1$ ，且目标函数和约束

条件均为非线性的，优化求解较复杂。为了简化模型求解，并结合实际情况，作如下理想化假设：

1)所有火电机组煤耗特性相同。额定工况下单位电量煤耗计为 e ，出力率为 α 时的单位电量煤耗计为 $ef(\alpha)$ 。

2)所有火电机组的最小技术出力率相同。统一计为 β 。

3)在已开机运行的条件下，所有火电机组任何时候的出力率均相同。第 j 时段的出力率计为 $y_j^{(t)}$ 。

4)在已开机运行的条件下，所有抽水蓄能机组任何时候的出力率均相同。第 j 时段的出力率计为 $y_j^{(h)}$ 。

因此，对 $i=1, 2, \dots, N$ ，有：

$$e_i = e \quad (11)$$

$$f_i(\alpha) = f(\alpha) \quad (12)$$

$$y_{ij}^{(t)} = y_j^{(t)} \quad (13)$$

对 $i=1, 2, \dots, M$ ，有：

$$y_{ij}^{(h)} = y_j^{(h)} \quad (14)$$

2.1.1 目标函数简化

火电机组的总开机容量计为 $S_{\text{开}}^{(t)}$ ，抽水蓄能机组的总开机容量计为 $S_{\text{开}}^{(h)}$ ，则有：

$$S_{\text{开}}^{(t)} = \sum_{i=1}^N x_i^{(t)} S_i^{(t)} \quad (15)$$

$$S_{\text{开}}^{(h)} = \sum_{i=1}^M x_i^{(h)} S_i^{(h)} \quad (16)$$

将式(11)~(15)代入式(3)，得到简化后的目标函数为：

$$E = e S_{\text{开}}^{(t)} \sum_{j=1}^L [y_j f(y_j) T_j] \quad (17)$$

式(17)即为化简后的目标函数。

2.1.2 约束条件简化

式(15)~(16)代入式(3)，得：

$$S_{\text{开}}^{(h)} + S_{\text{开}}^{(t)} \geq (1 + \gamma) P_{\text{max}} \quad (17)$$

式(13)~(16)代入式(4)，得：

$$S_{\text{开}}^{(h)} y_j^{(h)} + S_{\text{开}}^{(t)} y_j^{(t)} = P_j \quad (18)$$

式(13)~(14)分别代入式(7)~(8)，有：

$$y_j^{(t)} \geq \beta \text{ 且 } y_j^{(t)} \leq 1 \quad (19)$$

$$y_j^{(h)} \geq -1 \text{ 且 } y_j^{(h)} \leq 1 \quad (20)$$

式(14)~(16)代入式(10)，有：

$$\sum_{j=1}^L (7y_j^{(h)} + |y_j^{(h)}|) = 0 \quad (21)$$

式(18)~(21)中， $j=1, 2, \dots, L$ 。

火电和抽水蓄能电站的总装机容量分别计为 $S^{(t)}$ 、 $S^{(h)}$ ，则：

$$S_{\text{开}}^{(t)} \geq 0 \text{ 且 } S_{\text{开}}^{(t)} \leq S^{(t)} \quad (22)$$

$$S_{\text{开}}^{(h)} \geq 0 \text{ 且 } S_{\text{开}}^{(h)} \leq S^{(h)} \quad (23)$$

上述式(17)~(23)构成的不等式组(或方程组)即为约束条件。

2.2 模型求解

经过2.1节的化简，优化模型的待求变量降低至 $2(L+1)$ 个，约束方程(或不等式)个数降低至 $4(L+1)$ 个，求解的维度已大为降低。若不考虑 $S_{\text{开}}^{(t)}$ 、 $S_{\text{开}}^{(h)}$ 两个变量是离散整数的约束，则可采用MATLAB自带的优化函数fmincon求解。为此拟定如图1所示的求解流程图进行求解。

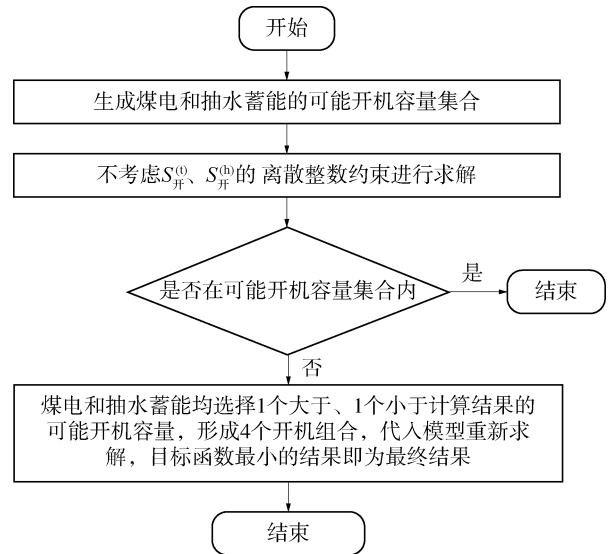


图1 模型求解流程图

Fig. 1 Procedure flow chart of solving

3 算例验证

3.1 系统构成

以某电力系统夏季典型日负荷为例，扣除水电、核电、风电等的出力后，最高负荷为20 GW，分为24段，每段持续时间1 h，每段负荷大小如表1所示。系统要求的旋转备用率为6%。火电装机容量22.87 GW，机组构成情况详如表2所示。抽水蓄能装机容量合计3.6 GW，单机容量均为0.3 GW。火电机组最小技术出力率为50%，额定工况下单位发电量煤耗为300 g/kWh，出力率为 α 时单位发电量煤耗与额定工况单位发电量煤耗的比为 $f(\alpha)$ ，参考某电厂煤电机组的煤耗特性， $f(\alpha)$ 暂按

式(24)考虑:

$$f(\alpha) = 0.4166\alpha^2 - 0.806\alpha + 1.3944 \quad (24)$$

式(24)与 GB 21258—2013 的表 7 比较如图 2 所示,可见该式与规范要求基本相符。

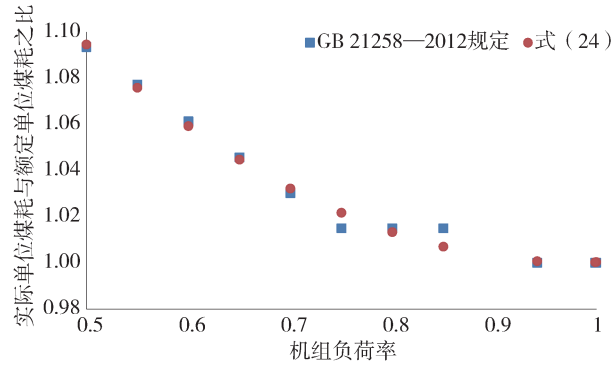


图2 煤耗特性曲线对比图

Fig. 2 Comparison of coal consumption characteristic curve

表1 系统负荷表

Tab. 1 Table of power load

序号	负荷/GW	序号	负荷/GW
1	13.30	13	16.64
2	12.62	14	16.98
3	12.18	15	17.84
4	12.14	16	18.20
5	11.72	17	19.18
6	13.04	18	18.76
7	14.06	19	19.84
8	15.52	20	20.00
9	16.36	21	19.76
10	17.34	22	18.52
11	17.80	23	17.18
12	16.90	24	14.18

表2 火电机组构成表

Tab. 2 Details of coal-fired power generators

容量/MW	机组/台数	容量/MW	机组/台数
100	1	360	2
135	2	600	6
150	2	630	6
220	2	660	4
300	2	670	2
320	4	1 000	4
330	2	1 045	2
350	3	—	—

3.2 结果分析

运用本文建立的模型,求解得到火电的总开机容量为 18.265 GW,如表 3 所示,抽水蓄能的总开机容量为 3 GW(即开 10 台,停 2 台),火电和抽水蓄能出力分配见图 3,系统总发电煤耗 118 352.4 t。

表3 火电开机明细表

Tab. 3 Operation of coal-fired power generators

容量/MW	开机台数/总台数	容量/MW	开机台数/总台数
100	1/1	360	1/2
135	1/2	600	6/6
150	0/2	630	6/6
220	1/2	660	4/4
300	0/2	670	2/2
320	0/4	1 000	4/4
330	0/2	1 045	2/2
350	0/3	—	—

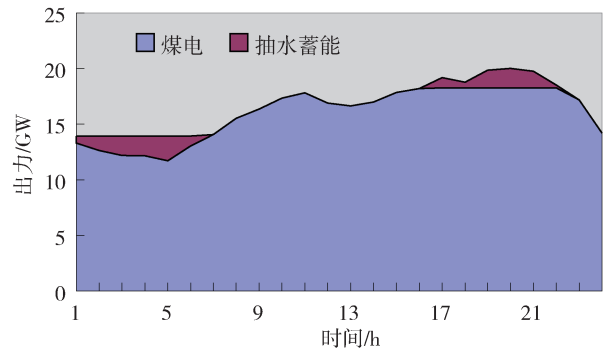


图3 火电和抽水蓄能电站出力曲线

Fig. 3 Output curve of coal-fired power generators and pumped storage power stations

与纯火电运行(即火电开机 21.2 GW,并完全跟踪负荷曲线运行),本算例采用的联合运行比纯火电节省煤耗 1.117 6 kt,逐小时煤耗对比如图 4 所示。

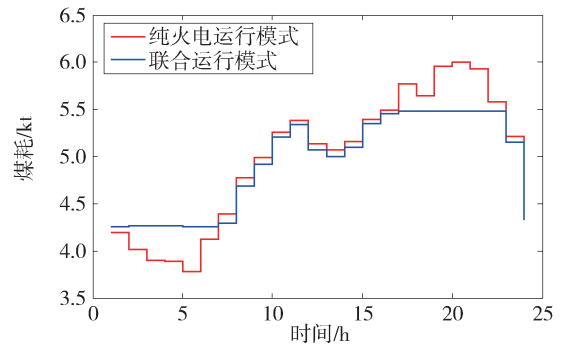


图4 火电机组煤耗曲线

Fig. 4 Coal consumption curve of coal-fired power generators

联合运行和纯火电运行时火电机组出力率曲线如图5所示,逐小时单位煤耗曲线如图6所示。可见,联合运行下火电机组出力率显著提高,单位煤耗明显下降。

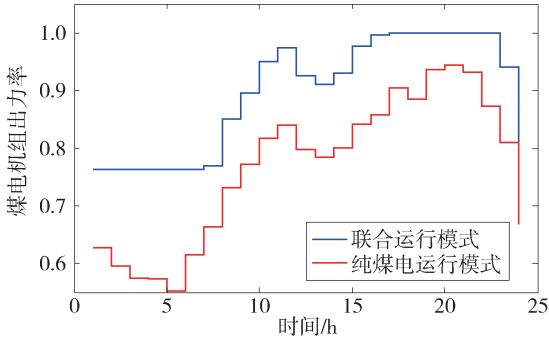


图5 火电机组出力率曲线

Fig. 5 Load rate curve of coal-fired power generators

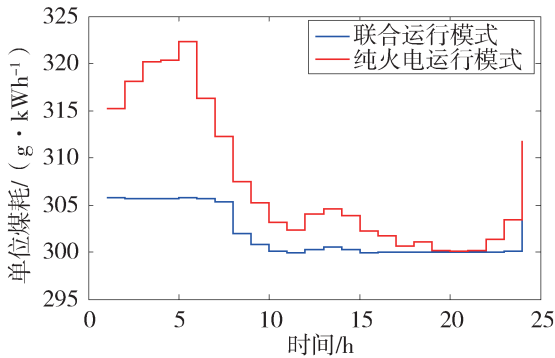


图6 火电机组单位煤耗曲线

Fig. 6 Unit coal consumption curve of coal-fired power generators

4 联合优化运行降低系统煤耗的机理分析

一般的,抽水蓄能电站的能量转换效率为75%,即损耗率达25%,而火电机组在非额定工况下运行的单位电量煤耗一般仅提高10%~15%左右,乍一看抽水蓄能电站与火电机组联合运行似乎不可能提高系统运行的经济性,不少从业者也确实持此观点,但这显然与前述算例计算结果相悖,本节对此进行探讨。

4.1 简化系统分析

为了更清楚的分析抽水蓄能与火电机组联合运行降低系统煤耗的原理,首先构造如下简化系统进行分析。

假想某系统某天的负荷分为高峰、平时、低谷三个时段,负荷分别为10 GW、8 GW、6 GW,持

续时间分别为6 h、10 h、8 h。系统中火电装机容量10.6 GW,抽水蓄能装机容量1 GW,旋转备用率按6%考虑。火电机组单位发电量煤耗与第3节实际算例相同,即额定工况单位发电煤耗300 g/kWh,煤耗特性如式(24)所示,计算得到典型出力率下单位煤耗详如表4所示。

表4 火电机组单位发电量煤耗表

Tab. 4 Coal consumption per unit power generation quantity

出力率/%	单位煤耗/g·kWh ⁻¹
100.0	300.00
94.3	300.10
83.3	302.57
75.5	306.16
66.7	312.00
56.6	321.01

运行本文提出的模型,求解得到火电和抽水蓄能的优化出力为:火电机组开机9.6 GW,抽水蓄能机组开机1 GW;高峰、平时、低谷时段火电分别出力9.6 GW、8.0 GW、6.4 GW(对应的出力率分别为100%、83.3%、66.7%),抽水蓄能分别出力0.4 GW、0、-0.4 GW。

与之对照,纯火电运行模式火电机组开机10.6 GW,抽水蓄能机组全停;高峰、平时、低谷时段火电分别出力10.0 GW、8.0 GW、6.0 GW(对应的出力率分别为94.3%、75.5%、56.6%)。

计算得知,联合运行模式比纯火电运行模式可节省煤耗约448.0 t。其构成如下:

1)高峰、平时、低谷时段火电的出力率上升,使单位煤耗分别下降了0.1 g/kWh、3.59 g/kWh、9.01 g/kWh,分别节省煤耗6.0 t、287.5 t、432.7 t。

2)抽水蓄能抽水-发电转换损失电量0.8 GWh,对应耗煤249.6 t。

3)抽水蓄能削峰填谷将2.4 GWh的高峰电量转移到低谷时段,因两个时段单位煤耗不同而增加耗煤28.6 t。

4.2 实际算例煤耗降低构成分析

对于第3节所示实际算例,前述计算已表明,抽水蓄能和火电联合优化运行比纯火电运行可节省煤耗1.111 7 kt。其构成情况分析如下:

1)抽水蓄能顶峰发电时段(17:00—22:00时),火电单位煤耗下降了0.1~1.3 g/kWh,节煤

63.8 t; 抽水蓄能不抽水也不发电时段(7:00—16:00、23:00—24:00), 火电单位煤耗下降了1.8~6.9 g/kWh, 节煤771.3 t; 抽水蓄能抽水时段(01:00—6:00), 火电单位煤耗下降了9.5~16.7 g/kWh, 节煤970.8 t。

2) 抽水蓄能抽水发电转换损失电量2.157 GWh, 对应耗煤659.3 t。

3) 抽水蓄能削峰填谷将6.47 GWh的高峰电量转移到低谷时段, 因两时段单位煤耗不同而增加耗煤34.8 t。

4.3 原因分析

综上所述, 联合运行比纯火电运行煤耗更少的原因有以下两点:

一是平时时段火电出力率提高, 减少了煤耗。例如: 简化系统和实际算例分别减少了287.5 t、771.3 t, 占节省耗煤的64.2%、69.4%。

二是低谷时段火电的发电量远大于抽水蓄能的抽水电量, 因而火电发电耗煤的下降比例虽低于抽水蓄能抽一发能量损失比例, 但下降总量却高于抽水蓄能抽一发损失能量耗煤量, 仍节省了系统总煤耗。以简化系统和实际算例为例, 联合运行时低谷时段负荷的耗煤量比纯火电运行时分别下降了约3.0%、3.2%~5.6%, 这一比例虽然远低于抽水蓄能抽一发损失能量的比例(约25%), 但低谷时段火电发电量分别是抽水蓄能抽水电量的15倍和8.7倍, 因而低谷时段负荷的耗煤量分别节省432.7 t、970.8 t, 均比抽水蓄能抽一发损失电量的煤耗(分别为249.6 t、659.3 t)。

5 结论

本文建立了抽水蓄能和火电联合优化运行模型, 并以某实际系统为算例验证了模型的有效性, 最后分析了联合优化运行降低系统煤耗的内在机理。得出的主要结论如下:

1) 优化安排抽水蓄能削峰填谷, 平滑火电出力曲线, 可以降低全系统的煤耗总量, 提高经济性。但现有机制下会增加电网企业购电成本, 建议完善相关政策, 促进抽水蓄能积极参与调峰。

2) 抽水蓄能与火电联合优化运行, 降低系统总煤耗的机理在于“以小博大”, 即: 利用占总电量比例很小的抽水蓄能电量的损耗, 提升占总电量绝大部分的火电发电量的效率, 使系统总煤耗降低。

3) 在实际运行中, 建议充分发挥抽水蓄能电站的削峰填谷作用, 平滑火电厂出力曲线, 提高电力系统运行的经济性。

参考文献:

- [1] 罗莎莎, 刘云, 刘国中, 等. 国外抽水蓄能电站发展概况及相关启示[J]. 中外能源, 2013, 18(11): 26-29.
- [2] 陈同法, 张毅. 抽水蓄能电站本质功能分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(2): 76-80.
- [3] 徐帆, 刘军, 张涛, 等. 考虑抽水蓄能机组的机组组合模型及求解[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 36-40.
- [4] 王伟, 徐婧, 赵翔, 等. 中国煤电机组调峰运行现状分析[J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 18-24.
- [5] 曾勇, 曾颖. 燃气热电联产机组选型、调峰能力及电价机制分析[J]. 南方能源建设, 2015, 2(1): 66-70.
- [6] 董超, 卢恩, 谭力强, 等. 基于电源特性优化协调的广东电网调峰策略[J]. 广东电力, 2016, 29(1): 41-44+107.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘德有, 谭志忠, 王丰. 风电—抽水蓄能联合运行系统的模拟研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24(6): 39-42+115.
- [10] 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.
- [11] 胡泽春, 丁华杰, 孔涛. 风电—抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 36-41+57.
- [12] 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.
- [13] 杨苹, 叶超. 风电优先上网的风水火电力系统联合优化调度[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 31-36.
- [14] 赵洁, 刘涤尘, 雷庆生, 等. 核电机组参与电网调峰及与抽水蓄能电站联合运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 1-6.

作者简介:



聂金峰

1987-, 男, 湖南娄底人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划设计工作 (e-mail) niejf206@163.com。

NIE J F

(责任编辑 郑文棠)