

DOI: 10.7667/PSPC151287

荷源联合调峰运行方案的电力节能评估研究

李淑鑫¹, 刘文颖¹, 李亚龙¹, 王维洲², 刘福潮²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对当前大规模风电远距离外送造成输电网网损激增和调峰能力不足的矛盾, 提出将高载能负荷参与常规电源调峰, 在风电就地消纳的同时实现电力节能。在深入分析高载能负荷的调节特性和对电网调峰影响的基础上, 从电网、电源和高载能负荷三个方面提出了表征电力节能的指标并进行量化。最后基于综合模糊评价法对荷源联合调峰运行方案进行电力节能综合评估。仿真结果表明, 该指标体系及方法在荷源联合调峰运行方案电力节能评估方面是有效可行的。

关键词: 高载能负荷; 荷源联合调峰; 电力节能指标; 电力节能效益; 综合模糊评估

Evaluation of energy-saving on peak load regulation scheme based on source-load coordination

LI Shuxin¹, LIU Wenyong¹, LI Yalong¹, WANG Weizhou², LIU Fuchao²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Gansu Provincial Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: With regard to the contradiction between sharp transmission power loss and insufficient peak load regulation capacity caused by long-distance wind power transmission, it is proposed that high-energy load participate in conventional peak load regulation to realize energy-saving with wind energy consumption. Based on in-depth analyses of regulation features of high-energy load and influences that it may make on peaking, energy-saving indexes, considering power grid, power supply and high-energy load, are comprehensively proposed. In addition, comprehensive assessment of energy saving is made on peak load regulation scheme based on source-load coordination with the method of synthetical fuzzy evaluation. The simulation results show that the index system and method is effective and feasible in terms of evaluation of energy-saving on peak load regulation scheme based on source-load coordination.

This work is supported by the Twelfth-five National Research Program of China (No. 2015BAA01B04) and the Major S&T Projects of State Grid Corporation of China (No. 52272214002C).

Key words: high-energy load; source-load coordination; energy-saving index; energy-saving benefit; synthetical fuzzy evaluation

0 引言

随着大规模风电基地集中接入容量的快速发展, 大规模远距离输送以及其随机性和波动性特点, 造成途径电网的网损显著增加。将具有可调节和可中断特点的高载能负荷纳入调峰控制体系, 实现荷源协调控制, 可达到电力节能和新能源就地消纳的双重目标^[1]。

然而目前针对大规模风电接入电网的荷源联合

调峰电力节能评估研究较少。文献[2]建立了高载能负荷参与大规模新能源并网的电网调峰能力评估模型, 从调峰效果角度进行了评估, 并未涉及对电力节能的影响评估; 文献[3]从“荷”的角度, 对高载能企业自身的能耗进行了量化评估, 未涉及高载能企业参与电网调峰; 文献[4]从“源”的角度, 具体评估了常规机组的调峰能力; 文献[5]建立了用户侧管理效益的综合评价指标体系, 评估了可中断负荷参与电网调峰的经济效益。

上述文献所涉及的研究, 很少有同时计及“荷”“源”两方面协调控制的调峰分析, 并且从电力节能角度的评估研究较少。为此, 本文深入分析了高载

能负荷的调节特性和对电网调峰的影响，从电网、电源和高载能负荷三个方面提出了表征电力节能的指标，然后基于综合模糊评价法对荷源联合调峰的大规模风电集中接入电网进行电力节能综合评估。

1 高载能负荷调节特性和对电网调峰的影响

1.1 高载能负荷的调节特性

高载能负荷是指能源消耗比重较大的用户负荷，具备可转移、可中断或者可调节的特性。

可转移特性负荷可通过调整生产时间，改变负荷曲线；可调节特性负荷具备连续调节能力；可中断特性负荷可根据实际生产要求进行投退操作。

上述三类高载能负荷能够参与电网调峰，具备一定的调峰能力，表 1 所示即为高载能负荷的调节特性分析。

表 1 高载能负荷调节特性

Table 1 Regulation characteristics of high-energy load

负荷类型	可转移负荷	可调节负荷	可中断负荷
代表负荷	磨煤、煤粉储备 (钢厂)	电解铝	碳化硅
调节特性	1) 生产过程适应风电特性，具有快速调节能力； 2) 生产过程中的电压或电流波动，不影响产品的质量和工艺流程； 3) 具有一定的负荷备用，可超额定容量运行，可在夜间持续运行； 4) 负荷稳定，昼夜峰谷差较小。		

表 1 所示，高载能负荷具备良好快速的调节能力，能够在短时间内增减出力，而且风电波动变化只影响产量，不影响质量和工艺，具备参与电网调峰的能力。

1.2 荷源联合调峰对电力节能的影响

目前，荷源联合调峰的方式主要有利用可转移负荷移峰填谷、应用连续可调节负荷来消纳新能源和通过可中断负荷来应对系统缺电等方式。荷源联合调峰对电力节能的影响主要有以下几点：

(1) 对电网损耗的影响

高载能负荷参与调峰对电网损耗的影响，主要体现在线路损耗和变压器损耗两方面。

高载能负荷就近消纳风电，避免了大规模风电功率远距离输送，减少了输电线路及变压器上的功率流动，相应降低了线损和变压器损耗；然而高载能负荷在交直流变换过程中将会向电力系统注入谐波，造成相应的谐波损耗，进而影响电网损耗。

图 1 为某风电基地的网损仿真对比图，分析风电多发情况下有无高载能负荷参与调峰对线损和变

损的变化。

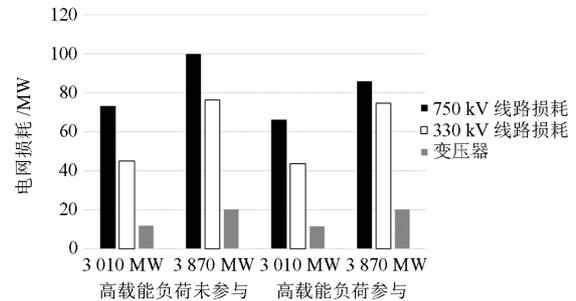


图 1 网损对比图

Fig. 1 Power loss comparison

图中对比所示，在风电多发的情况下，高载能负荷参与调峰，能够降低电网的线损和变损，起到节能效果。

(2) 对电源发电成本的影响

a) 对常规电源煤耗率的影响

高载能负荷参与调峰对常规电源发电成本的影响，主要体现在减少常规电源的调峰容量，减少煤耗等。

由于新能源发电的不确定性，使电网调峰需求增大^[6]。图 2 即为风电接入前后调峰需求对比图。

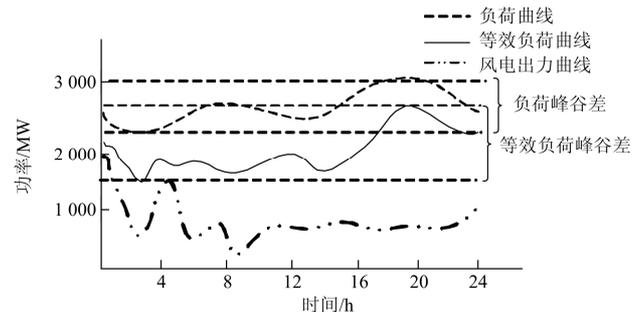


图 2 调峰需求曲线图

Fig. 2 Curve of peak demand

由图分析，风电接入后，调峰需求增大，相应增加了常规电源调峰容量，进而增加煤耗率。

高载能负荷参与调峰能有效缓解常规电源的调峰压力。在负荷低谷时段增加用电，等效于增加了系统负荷；在负荷高峰时段降低用电，等效于减小了系统负荷；能够抵消部分风电“反调峰”容量，从而降低常规电源调峰容量，降低煤耗率。

图 3 所示为 300 MW 机组负荷与供电煤耗率关系曲线^[7]。

图中所示，随着机组发电负荷的降低，煤耗率增加幅度加大。如果高载能负荷参与调峰，可以提高机组发电负荷，降低煤耗率。

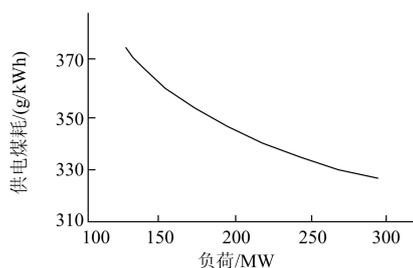


图3 300 MW 机组负荷与供电煤耗率关系曲线

Fig. 3 Relationship between 300 MW unit load and power supply coal consumption rate

对于水电厂, 与火电机组类似, 高载能负荷参与调峰, 同样可以提高机组效率, 节约水资源。

b) 对风电送出功率的影响

高载能负荷参与调峰将增加风电送出功率, 从而提高风电企业的经济效益。

图 4 所示为某地区风电输出功率的仿真对比图, 分析高载能负荷参与调峰前后风电最大送出功率的变化。

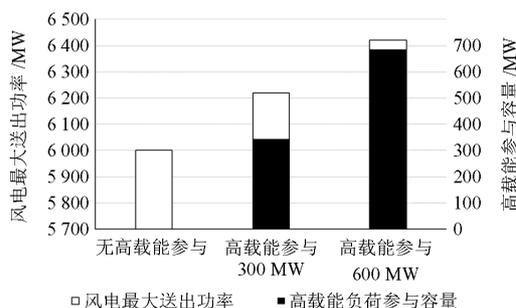


图4 高载能负荷参与调峰前后风电最大输出功率变化

Fig. 4 Maximum output wind power change between before and after high-energy load participating

由图分析, 高载能负荷不参与调峰的情况下, 该地区的风电最大送出极限为 6 000 MW; 考虑高载能负荷参与调峰后, 风电最大送出功率相应增加。

高载能负荷参与调峰能够增加风电送出功率, 减少弃风电量。

(3) 对高载能负荷电能损耗的影响

高载能负荷参与调峰对高载能节能的影响, 主要体现在高载能负荷自身的电能损耗方面。

a) 对负荷启停损耗的影响

高载能负荷参与调峰, 为适应调峰需求, 需进行启停或者增压负荷操作, 表 2 所示为某铁合金高载能企业在负荷高峰时段, 进行停炉调峰操作的启停损耗情况。可以看出, 该铁合金高载能企业参与调峰, 产量降低; 在停炉过程中造成了电能损耗。

表 2 铁合金高载能企业参与调峰的损耗

Table 2 Loss of ferroalloy high-energy enterprises with peaking participating

铁合金企业	产量	启停电耗
采取调峰策略	-11%	+3.2%

b) 对高载能企业用电设备损耗的影响

高载能企业正常运行状态下, 用电设备以最佳运行效率工作; 高载能负荷参与调峰, 进行增切负荷操作, 负载率降低或者负荷率升高, 都会使用电设备的运行效率降低, 设备的损耗也相应增加。

以高载能企业中的电动机负荷为例, 电动机负载率发生变化, 对电动机效率产生影响。表 3 为电动机的效率和功率因数与负载率的关系。

表 3 电动机效率和功率因数与负载率关系

Table 3 Relationship between motor efficiency and power factor and load factor

负载率	空载	25%	50%	75%	100%
功率因数	0.2	0.5	0.77	0.85	0.89
效率	0	78%	85%	88%	87%

c) 对负荷长时间断电损耗的影响

高载能企业长时间中断, 对企业损耗也有影响。以电弧炉设备为例, 高载能负荷中断调峰, 造成电弧炉系统降温-升温的过程, 造成电能损耗。

图 5 给出了四个发达国家停电持续时间对工业用户的影响的数据^[8-10]。高载能负荷缺电持续的时间越长, 高载能负荷的损耗就越大。

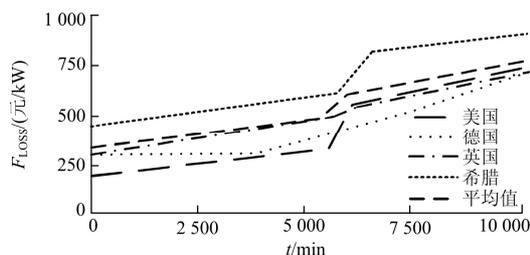


图5 停电持续时间对工业用户的影响

Fig. 5 Effect of interruption duration on the industrial users

虽然高载能企业参与调峰使电能损耗及能源损耗增加, 但可以通过电价优惠降低单位生产成本, 使企业经济效益得到提高。

2 荷源联合调峰的电力节能指标

基于上述对荷源联合调峰对电力节能的影响分析, 建立节能评估指标。

2.1 电网侧节能指标

(1) 线路损耗节能指标

定义 F_L 表示高载能参与调峰后线路减少损耗成本(元)。

$$F_L = \left[\frac{R}{U^2 \cos^2 \theta} P^2 - \frac{R}{U^2 \cos^2 \theta} (P - \Delta P_B)^2 \right] \times T J_d = \frac{\Delta P_B R}{U^2 \cos^2 \theta} (2P - \Delta P_B) \times T J_d \quad (1)$$

式中: R 为导体电阻; $\cos \theta$ 为功率因数; U 为线路运行电压; P 为负荷功率; ΔP_B 为高载能负荷调峰填谷的负荷; T 为调峰时间; J_d 为综合电价(元/kWh)

(2) 变压器损耗节能指标

定义 F_T 表示高载能参与调峰后变压器减少的损耗成本(元)。

$$F_T = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[P_{0,i} + \left(\frac{S_i}{S_{N,i}} \right)^2 P_{KZ,i} \right] - \left[P_{0,i} + \left(\frac{S_i - \Delta S_{B,i}}{S_{N,i}} \right)^2 P_{KZ,i} \right] \right\} \times T J_d = \sum_{i=1}^n \frac{P_{KZ,i} \Delta S_{B,i}}{S_{N,i}^2} (2S_i - \Delta S_{B,i}) \times T J_d \quad (2)$$

式中: $P_{0,i}$ 为第 i 台变压器空载损耗; $P_{KZ,i}$ 为额定功率损耗(kW); $S_{N,i}$ 为额定负荷; S_i 为负荷容量; $\Delta S_{B,i}$ 为高载能负荷调峰填谷的负荷。

2.2 电源侧节能指标

(1) 常规电源煤耗率节能指标

定义 F_C 表示高载能参与调峰后发电机组供电煤耗减少的成本(元)^[11]。

$$F_C = (F_0 - F_B) \times P \times J_c T = \left\{ m(P_n - P_s) - m \left[P_n - (P_s + \Delta P_B) \right] \right\} \times P \times J_c T$$

$$\Delta P_B = \Delta P_H \times \frac{1}{(1-l)(1-\beta)} \quad (3)$$

式中: F_0 为高载能负荷调峰前的机组煤耗率; F_B 为参与后的煤耗率; $m(P_i)$ 为供电煤耗随负荷的变化函数(g/kWh), 见图 3; P_n 是调峰机组的额定容量(kW); P_s 为高载能负荷调峰前的备用容量; ΔP_H 为高载能负荷参与调峰的容量(kW); ΔP_B 为等效的备用容量(kW); P 为机组出力(kW); β 为厂用电率; J_c 为煤的价格(g/元)。

(2) 风电送出功率节能指标

定义 F_Q 表示高载能参与调峰后风电场增发电量的经济效益^[12]。

$$F_Q = \Delta P_H \times J_w T - C_n T \quad (4)$$

式中: ΔP_H 为高载能参与调峰的容量, 可以等效为

电网增加的风电消纳出力; C_n 为单位时间内增发的风电运行成本(元/h); J_w 为风电场的上网电价(元/kWh)。

2.3 高载能负荷侧节能指标

(1) 负荷启停损耗成本

定义 F_s 表示高载能参与调峰引起的启停损耗成本(元)。

$$F_s = J_q \times i \quad (5)$$

机组启停损耗成本是指机组适应调峰变化, 退出或投入时额外消耗的成本。 J_q 为单次启停的成本费用(元), i 为机组参与调峰的启停次数, 此处根据机组启停组数确定。

(2) 负荷长时间缺电损耗成本

根据图 5, 停电持续时间对工业用户的影响曲线, 分析模拟长时间缺电引起的停电损失成本。

定义 F_D 表示高载能企业参与调峰造成的停电损失成本(元)。

$$F_D = F_{Loss} \times \Delta P_H$$

$$\lg F_{Loss} = 1.26 + 0.47 \lg(t/60) \quad (6)$$

式中: F_{Loss} 为长时间停电损失(元/kW); ΔP_H 为高载能负荷参与调峰的容量(kW); t 为高载能负荷参与调峰引起的缺电时间, 单位为 h。

(3) 高载能企业用电设备损耗成本

定义 F_M 表示高载能参与调峰增加的用电设备损耗成本(元)。

$$F_M = \left[\sum W_i - \sum \frac{W_i}{\eta_i} \eta_{opt,i} \right] \times J_d \quad (7)$$

式中: W_i 为设备 i 在高载能参与调峰下的用电量; η_i 为此时相应的设备效率; $\eta_{opt,i}$ 为设备 i 的最佳运行效率。

3 大规模风电集中接入电网荷源联合调峰的电力节能综合评估

针对荷源联合调峰运行方案的电力节能效益需要进行综合评估的问题, 本文选取基于层次分析法的多级模糊综合评估模型, 利用上述电力节能指标, 对荷源联合调峰运行方案的电力节能效益进行综合评估, 为确定最优方案提供理论依据。

3.1 综合模糊评估方法概述

模糊综合评估方法基于模糊数学, 结合层次分析法, 建立递阶层次模型, 对评估对象进行评分和排序, 同时根据模糊评估集上的数值按最大隶属度原则去评定目标所属等级^[13]。模糊综合评估方法的具体流程如图 6 所示。

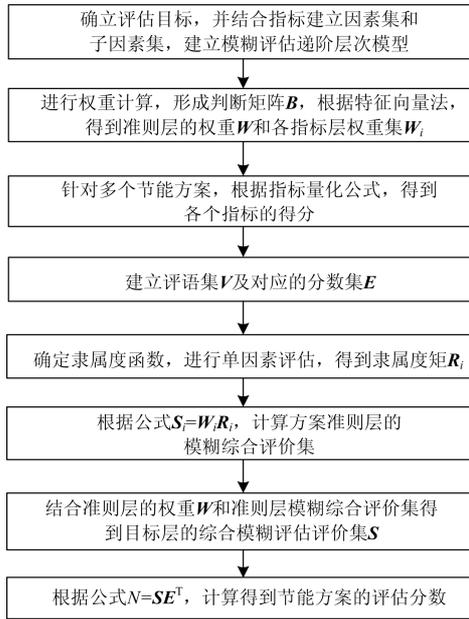


图 6 模糊综合评估方法流程图

Fig. 6 Flowchart of fuzzy comprehensive evaluation methods

3.2 电力节能综合评估

(1) 确立评估目标, 建立模糊评估递阶层次模型

针对大规模风电集中接入电网荷源联合调峰多个运行方案, 首先进行安全分析, 在满足电网安全运行条件下, 选取高载能负荷参与调峰的电力节能效益为目标, 建立递阶层次模型, 如图 7 所示。其中电网侧节能和电源侧节能的效益指标为极大值指标, 即越大对目标越有利; 高载能负荷侧节能的效益指标为极小型指标, 即越小对目标越有利。

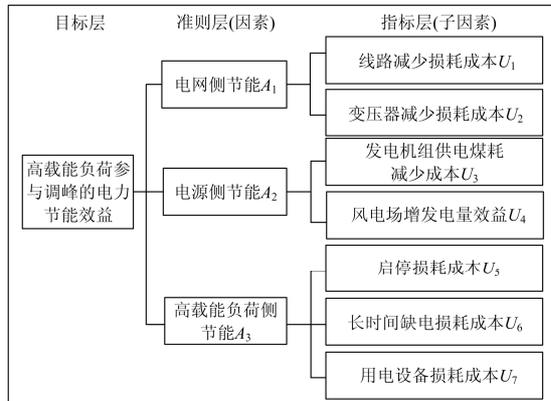


图 7 模糊递阶层次结构图

Fig. 7 Fuzzy hierarchical structure

(2) 进行权重计算, 建立权重集

首先计算准则层权重。采用 9 尺度法, 将准则层电网侧节能准则 A_1 、电源侧节能准则 A_2 和高载

能负荷侧节能准则 A_3 的相对重要程度进行两两对比, 形成判断矩阵 B :

$$B = (a_{ij})_{3 \times 3} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

其中 a_{ij} 为节能准则 A_i 对 A_j 的重要程度之比, 矩阵满足 $a_{ii} = 1, a_{ij} = 1 / a_{ji}$ 。

计算判断矩阵 B 的特征向量 $W = (w_1, w_2, w_3)$ 和最大特征值 λ_{\max} 。若 λ_{\max} 满足一致性校验, 则判断矩阵 B 特征向量 W 即为准则层的权重矩阵, w_i 即为节能准则 A_i 对于电力节能效益目标的权重。

同理计算指标层的权重, 分别得到电网侧节能的指标层权重 W_{A1} , 电源侧节能的指标层权重 W_{A2} , 高载能负荷侧节能的指标层权重 W_{A3} 。

(3) 结合运行方案, 进行指标评分

针对多个荷源联合调峰运行方案, 结合上述的各指标量化公式, 将指标层各效益指标进行评分。得到方案 j 在效益指标 U_i 下的评分 $M_{ij}, i = 1, 2, \dots, 7$ 。

(4) 建立评语集及对应的分数集

将目标“高载能负荷参与调峰的电力节能效益”划分为“很好”、“较好”、“一般”、“差”4种情况, 即电力节能效益评语集为 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4) = (\text{很好}, \text{较好}, \text{一般}, \text{差})$, 对应的分数集为 $E = [10, 7, 4, 1]$ [14]。

(5) 进行单因素评估, 得到隶属度矩阵

利用半梯形和三角形隶属度函数, 将指标层各效益指标的评分结果 M_{ij} 映射到电力节能效益评语集中, 如图 8 所示 [15]。

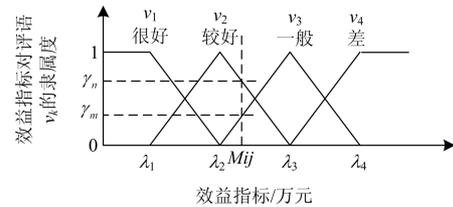


图 8 效益指标的隶属度函数

Fig. 8 Membership function of efficiency index

图中 M_{ij} 为方案 j 在效益指标 U_i 下的打分, γ_n 和 γ_m 为该效益指标对评语集的隶属值, $0 \leq \gamma_n, \gamma_m \leq 1$; $\lambda_1 - \lambda_4$ 为常数, 表示效益指标的经验判断值, 对于电网侧节能和电源侧节能的效益指标, λ_1 到 λ_4 依次递减, 对于高载能负荷侧节能的效益指标, λ_1 到 λ_4 依次递增。

以图 8 所示情况为例, 在方案 j 中效益指标 U_i 的隶属度矩阵 $R_{ij} = [0, \gamma_n, \gamma_m, 0]$ 。

据此得到, 对于方案 j , 在电网侧节能准则 A_1 的

隶属度矩阵 $R_{j-A_1} = [R_{1j}, R_{2j}]^T$ ；电源侧节能准则 A_2 的隶属度矩阵 $R_{j-A_2} = [R_{3j}, R_{4j}]^T$ ；高载能负荷侧节能准则 A_3 的隶属度矩阵 $R_{j-A_3} = [R_{5j}, R_{6j}, R_{7j}]^T$ 。

(6) 综合评估计算

根据上述计算得到的权重矩阵和隶属度矩阵进行多级模糊运算。

首先计算节能准则的模糊综合评价集。对于方案 j ，节能准则 A_i 的模糊综合评价集 S_{Ai} 。

$$S_{Ai} = W_{Ai} \cdot R_{j-A_i} \quad i=1, 2, 3 \quad (9)$$

同理计算方案 j 关于电力节能效益目标综合模糊评价集 S_j 。

$$S_j = W \times [S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}]^T \quad (10)$$

最后计算方案 j 的模糊评价得分 N 。

$$N = S_j \cdot E^T \quad (11)$$

4 实例应用

以甘肃河西酒泉地区电网为例进行分析。在 2014 年冬大典型运行方式下，河西地区常规能源总发电功率为 3 067 MW，风电实时并网容量为 3 542 MW，负荷总量 3 099 MW，接线示意图如图 9 所示。

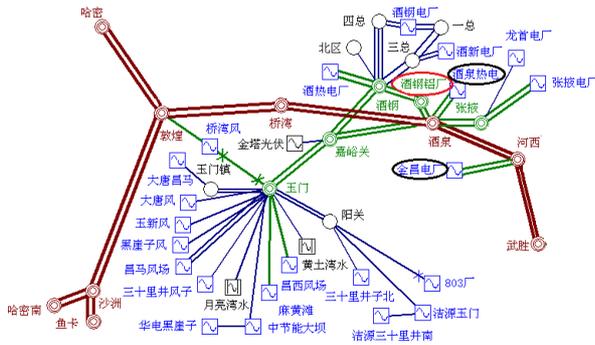


图 9 高载能负荷接线图

Fig. 9 Wiring diagram of high-energy load

在酒泉风电场集群片区中，风电场以玉门 330 kV 变电站作为中间汇集站，地区调峰压力较大；酒钢铝厂高载能负荷，已投产 700 MW，具备连续调节能力；常规电源主要有酒泉热电厂、金昌电厂等多个火电机组，具备调峰能力。

选取 03:00~05:00(负荷较小，风电大发)和 19:00~21:00(负荷较重，风电少发)两个时间段，制定调峰方案。结合上述评估方法，对荷源联合调峰方案进行节能评估。

(1) 高载能负荷参与荷源联合调峰方案及增加

的损耗成本

在投入资金一定的情况，高载能企业提出 2 套参与荷源联合调峰的方案，如表 4 所示。

表 4 高载能企业参与联合调峰方案

Table 4 Peaking scheme with high-energy load participating

方案	具体措施
1	在 03:00-05:00，确定电解铝高载能负荷容量 330 MW，参与激励填谷，调峰时长共计 2 h；
	在 20:00-21:00，确定电解铝高载能负荷容量 330 MW，参与中断调峰，调峰时长共计 1 h。
2	在 03:00-04:00，确定电解铝高载能负荷容量 396 MW，参与激励填谷，调峰时长共计 1 h；
	在 19:00-21:00，确定电解铝高载能负荷容量 264 MW，参与中断调峰，调峰时长共计 2 h。

根据节能指标量化公式，计算求得高载能负荷侧效益指标的得分，如表 5 所示。

表 5 高载能负荷侧节能效益指标得分

Table 5 Index score of load-side energy efficiency

高载能负荷侧效益指标	方案 1/万元	方案 2/万元
启停损耗损失	2.43	1.75
长时间缺电损耗成本	1.20	1.80
用电设备损耗成本	0.60	0.90

(2) 常规电源参与荷源联合调峰方案及减少的损耗成本

根据高载能负荷参与荷源联合调峰的方案，常规电源调整调峰运行方案，如表 6 所示。

表 6 常规电源参与联合调峰方案

Table 6 Peaking scheme with conventional power participating

方案	具体措施
1	在 03:00-05:00，该地区常规电源较传统调峰运行方式，减少下降出力 360 MW；
	在 20:00-21:00，该地区常规电源较传统调峰运行方式，减少上升出力 360 MW。
2	在 03:00-04:00，该地区常规电源较传统调峰运行方式，减少下降出力 430 MW；
	在 19:00-21:00，该地区常规电源较传统调峰运行方式，减少上升出力 290 MW。

根据节能指标量化公式，计算求得电源侧效益指标的得分，如表 7 所示。

表 7 电源侧节能效益指标得分

Table 7 Index score of source-side energy efficiency

电源侧效益指标	方案 1/万元	方案 2/万元
发电机组煤耗减少成本	7.80	7.20
风电场增发电量效益	7.50	6.50

(3) 电网侧减小的损耗成本

根据上述高载能负荷和常规电源共同参与的荷源联合调峰方案, 计算求得电网侧节能效益的得分, 如表 8 所示。

表 8 电网侧节能效益指标得分

Table 8 Index score of grid-side energy efficiency

电网侧效益指标	方案 1/万元	方案 2/万元
线路减少损耗成本	4.68	5.05
变压器减少损耗成本	2.92	3.50

根据上述的电力节能综合评估方法, 根据不同的目标需求, 对 2 个节能方案进行评估。

A 以基于降低电网损耗的综合效益最大为目标
a) 权重计算

根据上述权重计算方法, 分别计算准则层权重和指标层权重。

对于以降低电网损耗综合效益最大的目标, 电网侧的节能效益的重要程度最大; 进行权重计算准则层的权重系数为 $W=(0.423, 0.308, 0.269)$ 。

电网侧节能指标权重 $W_{A1}=(0.624, 0.376)$; 电源侧节能权重 $W_{A2}=(0.586, 0.414)$; 高载能负荷侧节能权重 $W_{A3}=(0.245, 0.551, 0.204)$ 。

b) 隶属度矩阵计算

利用半梯形和三角形隶属度函数, 分别对两个方案计算隶属度矩阵。

对于方案 1:

$$R_{1-A1} = [R_{11}, R_{21}]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \end{bmatrix};$$

$$R_{1-A2} = [R_{31}, R_{41}]^T = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$R_{1-A3} = [R_{5j}, R_{6j}, R_{7j}]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.23 & 0.77 \\ 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对于方案 2:

$$R_{2-A1} = [R_{12}, R_{22}]^T = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{2-A2} = [R_{32}, R_{42}]^T = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{2-A3} = [R_{52}, R_{62}, R_{72}]^T = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(9)-式(11), 计算方案的模糊评价得分, 并与网源荷总经济效益进行对比, 如表 9 所示。

表 9 以降低电网损耗效益为目标方案评估结果对比

Table 9 Comparison between the evaluation results under the target for decreasing the power loss

方案号	综合模糊评价得分(满分 10 分)	电网降损经济效益/万元	网源荷经济叠加效益/万元
方案 1	6.2302	7.60	18.67
方案 2	6.8532	8.55	17.80

由表 9 可以看出, 以降低电网损耗的综合效益最大为目标时, 采用综合模糊评价法, 方案 2 得分较高, 能够反映电网降损经济效益; 而网源荷总经济叠加效益计算不能满足预期的结果。

B 以基于节约能源的综合效益最大为目标

对于以节约能源的综合效益最大的目标, 电源侧的节能效益重要程度最大; 进行权重计算准则层的权重系数为 $W=(0.308, 0.423, 0.269)$ 。

其他的模糊计算过程与目标需求 A 中相同, 得到对比计算结果如表 10 所示。

表 10 以节约能源效益为目标方案评估结果对比

Table 10 Comparison between the evaluation results under the target for saving energy

方案号	综合模糊评价得分(满分 10 分)	电源节能经济效益/万元	网源荷经济叠加效益/万元
方案 1	6.8506	15.30	18.67
方案 2	6.6620	13.70	17.80

由表 10 可以看出, 以基于节约能源的综合效益最大为目标时, 采用综合模糊评价法, 方案 1 得分较高, 能够反映电源节能经济效益。

结论表明: 1) 对比网源荷总经济效益叠加计算方法, 本文提出的基于综合模糊理论的评估方法能够细化指标权重, 反映目标需求, 具有灵活性; 2) 综合模糊评估法能够追踪不同的目标需求, 筛选不同的运行方案, 可以为调度运行人员制定调峰计划给予参考。

5 结论

本文提出高载能负荷参与的荷源联合调峰的电力节能评估体系及方法。在深入分析高载能负荷调节特性和对电网调峰影响的基础上, 从荷-网-源三个方面提出了表征电力节能的指标, 并结合评估指标, 提出基于综合模糊评价法的荷源联合调峰电力节能综合评估方法。最后进行实例计算, 证明建立的电力节能综合评估体系的合理性和评估方法的有效性, 可以作为后续设计选择的参考。

参考文献

[1] 马林东, 葛智平, 张世才, 等. 基于高耗能企业参与电

- 网内风电消纳的主动调峰技术[J]. 电力建设, 2013(10): 102-106.
- MA Lindong, GE Zhiping, ZHANG Shicai, et al. Active peaking technology based on high energy-consumption enterprise participating in wind power accommodation in power grid[J]. Electric Power Construction, 2013(10): 102-106.
- [2] 何桂雄, 曹年林, 蒋利民, 等. 风电富裕区域高载能负荷参与电网调峰研究[J]. 可再生能源, 2015(4): 491-496.
- HE Guixiong, CAO Nianlin, JIANG Limin, et al. Research on peak-load regulating with participation of high-use industrial consumers in wind power rich area[J]. Renewable Energy Resources, 2015(4): 491-496.
- [3] 王志勇, 邱泽晶, 王振宇, 等. 高耗能企业能效水平的多级模糊综合评估方法[J]. 冶金能源, 2013(6): 12-16, 58.
- WANG Zhiyong, QIU Zejing, WANG Zhenyu, et al. Multi-level fuzzy comprehensive energy efficiency evaluation for high energy-consuming enterprises[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2013(6): 12-16, 58.
- [4] 张艳霞, 董永平, 王洪. 关于用电负荷参与新能源调峰的可行性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014(1): 61-63.
- ZHANG Yanxia, DONG Yongping, WANG Hong. The new energy peaking feasibility analysis with the load participation in the electricity[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(1): 61-63.
- [5] 刘军. 需求侧管理评价指标体系及评价模型[J]. 华北电力技术, 2003(7): 10-11.
- LIU Jun. Evaluation index and model of demand side management[J]. North China Electric Power, 2003(7): 10-11.
- [6] 张涛, 李家珏, 张延峰, 等. 计及电网调峰约束的风电接纳调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 74-80.
- ZHANG Tao, LI Jiayu, ZHANG Yanfeng, et al. Research of scheduling method for the wind power acceptance considering peak regulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 74-80.
- [7] 缙新科, 崔乐乐, 巨圆圆, 等. 火电厂机组煤耗特性曲线拟合算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 84-89.
- GOU Xinke, CUI Lele, JU Yuanyuan, et al. Study on curve fitting algorithm for thermal power plant units coal consumption[J]. Power system Protection and Control, 2014, 42(10): 84-89.
- [8] KOSKOLOS N C, MEGALOCONOMOS S M, DIALYNAS E N. Assessment of power interruption costs for the industrial customers in Greece[C] // Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Athens, Greece: IEEE, 1998: 761-766.
- [9] TOLLEFSON G, BILLIINTON R, WACKER G, et al. A Canadian customer survey to assess power system reliability worth[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 443-450.
- [10] KARIUKI K K, ALLAN R N. Evaluation of reliability worth and value of lost load[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and distribution, 1996, 143(2): 171-180.
- [11] 刘福国, 蒋学霞, 李志. 燃煤发电机组负荷率影响供电煤耗的研究[J]. 电站系统工程, 2008(4): 47-49.
- LIU Fuguo, LIANG Xuexia, LI Zhi. Investigation on affects of generator load on coal consumption rate in fossil power plant[J]. Power System Engineering, 2008(4): 47-49.
- [12] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
- LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [13] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 37-41.
- LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 37-41.
- [14] 李正明, 张纪华, 陈敏洁. 基于层次分析法的企业有序用电模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 136-141.
- LI Zhengming, ZHANG Jihua, CHEN Minjie. Fuzzy comprehensive evaluation of enterprise's orderly power utility based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 136-141.
- [15] 郭新志, 乞建勋, 李星梅. 基于改进模糊层次分析法的火电厂选址综合评价方法研究[J]. 现代电力, 2007, 24(3): 67-71.
- GUO Xinzhi, QI Jianxun, LI Xingmei. Synthetic evaluation method of site selection for thermal power plants based on improved fuzzy-AHP[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(3): 67-71.

收稿日期: 2015-07-25; 修回日期: 2015-11-05

作者简介:

李淑鑫(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: lishuxin23@gmail.com.cn

刘文颖(1955-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制及电力系统智能调度;

李亚龙(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 张爱琴)