

# Influence Mechanisms of High-Energy Load Regulation by Tracking Wind Power Fluctuations on Network Loss Reduction

Chunxiao Yao<sup>1</sup>, Wenying Liu<sup>1</sup>, Yuwei Zhang<sup>1</sup>, Fuchao Liu<sup>2</sup>, Jingjing Zheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electrical Power University, Beijing

<sup>2</sup>Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Qinghai

Email: yaochunxiao@yeah.net

Received: Apr. 13<sup>th</sup>, 2017; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2017; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In light of the problem of network loss increase brought by large-scale wind power integration, this paper is based on the large-scale wind power base with high-energy loads, and conducts further research on influence mechanisms of high-energy loads involved in adjustment section by tracking wind power fluctuations on network power loss. Based on these, we analyze the regulation characteristics of high-energy load, and propose network loss reduction control strategies with high-energy load involved in the adjustment section by tracking wind power fluctuations. Finally, with Hexi grid containing large-scale wind power as the background, we verify the effectiveness of the strategies by simulation.

## Keywords

Large-Scale Wind Power, High Energy Load, Influence Mechanisms of Loss Reduction, Control Strategies

---

# 高载能负荷跟踪风电波动进行调节对电网降损的作用机理

姚春晓<sup>1</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>, 张雨薇<sup>1</sup>, 刘福潮<sup>2</sup>, 郑晶晶<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

<sup>2</sup>国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 青海 兰州

Email: yaochunxiao@yeah.net

收稿日期: 2017年4月13日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

## 摘要

针对大规模风电并网对电网带来的网损增加问题,本文以大规模风电基地建有高载能负荷为研究背景,对高载能负荷跟踪风电波动进行调节对电网降损的影响机理进行了深入研究。在此基础上,对高载能负荷调节特性进行了分析,提出了高载能负荷跟踪风电波动进行调节的降损控制策略。最后,以大规模风电接入的甘肃河西电网为例,仿真验证了策略的有效性。

## 关键词

大规模风电,高载能负荷,降损影响机理,控制策略

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国大规模风电的并网,风电远距离输送和常规能源逆向调峰带来的网损激增问题日益凸显。而在大规模风电基地附近接入电网的高载能负荷具有良好的调节特性,若跟踪风电进行调节,可就地消纳风电,将对电网的降损起到非常可观的效果[1][2]。

目前国内外在风电并网带来的网损影响及降损措施方面进行了一定的研究。其中,文献[3]研究了风电并网后,各因素对网损的影响机理,并根据甘肃河西电网的特点提出了降损控制措施;文献[4]在现有线损分析方法的基础上,提出了解决风电功率双向流动问题的新方法。此外,国内外对于高载能负荷调节能力及其参与荷-网-源协调控制方面也有研究。文献[1][2]分析了高载能负荷的特性,并对高载能负荷参与荷-网-源协调控制方面进行了深入研究。综上所述,目前对于电网降损策略及高载能负荷特性已有一定的研究,但对于高载能负荷参与调节对大规模风电接入电网降损的影响机理及降损控制方面研究甚少。

本文对高载能负荷调节对电网降损的综合作用机理进行了分析,研究了高载能负荷的调节特性,提出了高载能负荷参与调节的降损控制策略。在理论分析的基础上,结合大规模风电接入的甘肃河西地区电网运行实例进行仿真,验证了降损控制策略的有效性。

## 2. 高载能负荷参与调节对电网降损的作用机理

### 2.1. 风电出力对网损的影响

风电出力具有明显的波动性[5][6]。图1为我国某地区的典型日风电出力波动曲线。图2为我国某地区风电出力与网损的关系曲线。由图1可以看出,风电日内出力具有明显的波动性,且波动范围较大。分析图2曲线可知,风电小发(即风电相对出力小于10%)时,随着风电出力的增加,网损减少。此种情况是由于风电出力增加,减小了常规能源向风电基地附近负荷远距离输送的功率,减小了输送过程中产生的有功损耗,表现为网损率略有降低。风电大发(即风电相对出力大于10%)时,随着风电出力增加,风电经远距离输电线路向负荷中心输送的功率增大,电网网损率增加。

### 2.2. 高载能负荷跟踪风电波动进行调节对电网降损的作用机理

在我国,大规模风电基地大多距负荷中心较远,风电需要进行远距离输送,从而增大了途径电网的

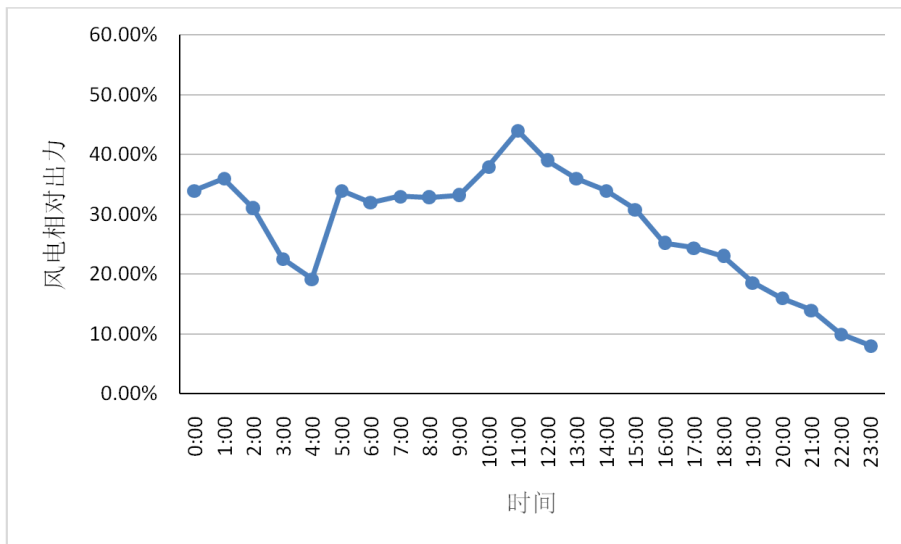


Figure 1. Curve: wind power output fluctuation on a typical day  
图 1. 典型日风电出力波动曲线

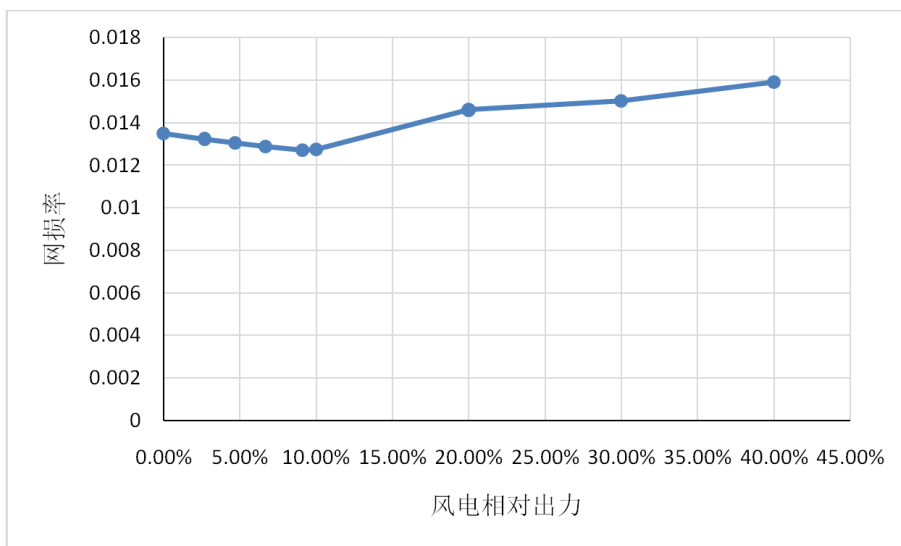


Figure 2. Curve: relationship between wind power output and network loss  
图 2. 风电出力与网损的关系图

网损[7]。由于常规能源与风电具有逆向分布的特点，在常规能源调峰过程中也会带来较大的电网损耗。而在大规模风电基地建有的高载能负荷具有较好的调节特性，如果基于风电的波动变化进行调节可在风电多发时就地消纳部分风电，可显著降低大规模风电接入电网的网损。图 3 为高载能负荷与大规模风电接入电网的简化接线示意图。本文以该图为例，研究高载能负荷参与调节对电网降损的作用机理。

如图 3 所示，线路 1-2-3 为 750 KV 远距离输电线路，线路两端分别连接区域电网和负荷中心，流经线路 1-2、2-3 段的功率分别为  $P_1 + jQ_1$ 、 $P_2 + jQ_2$ ，功率方向为  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 。大规模风电出力为  $P_w + jQ_w$ ，升压后接入超高压输电网络；节点 2 处高载能负荷功率大小为  $P_h + jQ_h$ ；节点 6 处当地负荷功率大小为  $P_{L0} + jQ_{L0}$ ；常规能源出力为  $P_c + jQ_c$ ；负荷中心处功率大小为  $P_L + jQ_L$ 。

根据网损计算公式

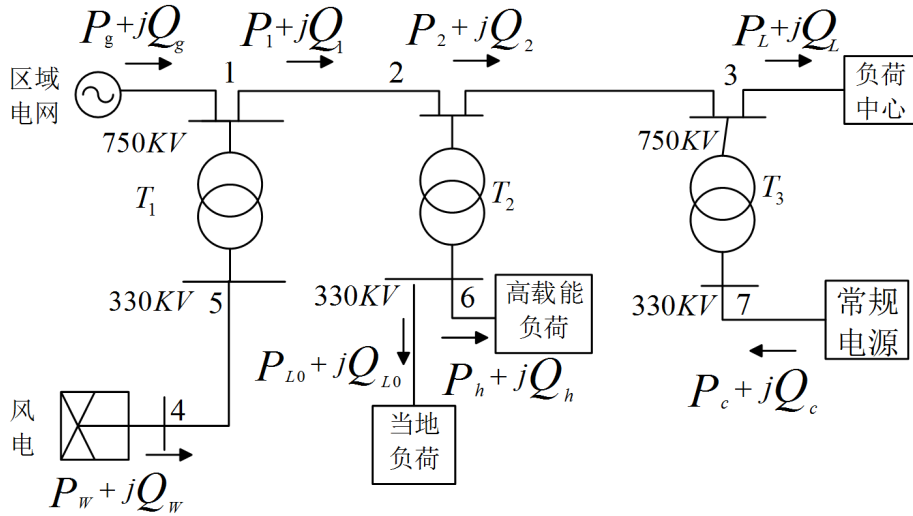


Figure 3. Simplified wiring graph with integration of wind power and high energy load  
图3. 高载能负荷与大规模风电接入的电网简化接线示意图

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad (1)$$

考虑到线路损耗远小于线路输送功率，故忽略线损对流经线路功率的影响，得到图中系统总的网损为：

$$\Delta P = \frac{P_w^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/45} + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_{750}^2} R_{750/23} + \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} + \Delta P_{T3} \quad (2)$$

其中， $\Delta P_{T1}, \Delta P_{T2}, \Delta P_{T3}$  为变压器  $T_1, T_2, T_3$  上的损耗，考虑到超高压线路上线路电阻损耗远大于变压器损耗，故忽略 330KV 电压等级上的变压器损耗，总网损为

$$\Delta P = \frac{P_w^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/45} + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_{750}^2} R_{750/23} \quad (3)$$

其中，

$$P_1 = P_g + P_w, Q_1 = Q_g + Q_w \quad (4)$$

$$P_2 = P_1 - P_{L0} - P_h = P_g + P_w - P_{L0} - P_h, Q_2 = Q_1 - Q_h - Q_{L0} \quad (5)$$

风电大发时  $P_w + P_g > P_h + P_{L0}$ ，流经线路的有功功率  $P_1, P_2$  均为正。系统满足功率平衡，故  $P_g + P_w + P_c = P_h + P_{L0} + P_L$ ，其中  $P_g$  为区域电网送入功率。假设在风电、高载能负荷及常规能源的功率变化前后，区域电网送入功率  $P_g$ 、负荷  $P_{L0}$ 、 $P_L$  的变化不大，可忽略不计。

此时风电有功功率增大  $\Delta P_w$ ，若高载能负荷不参与调节，为保证功率平衡，需满足  $P_g + (P_w + \Delta P_w) + (P_c - \Delta P_{c1}) = P_h + P_{L0} + P_L$ ，即常规能源下调节量  $\Delta P_{c1} = \Delta P_w$ 。假设系统经无功优化控制，风电变化前后输电线上的电压变化可以忽略；无功功率变化并非本文研究重点，在此处不予考虑。此时，流经线路 5-1-2-3 的功率均增大  $\Delta P_w$ ，系统总网损为

$$\Delta P_1 = \frac{(P_w + \Delta P_w)^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/45} + \frac{(P_1 + \Delta P_w)^2 + Q_1^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{(P_2 + \Delta P_w)^2 + Q_2^2}{U_{750}^2} R_{750/23} \quad (6)$$

若高载能负荷参与降损调节，为保证功率平衡，需满足  $P_g + (P_w + \Delta P_w) + (P_c - \Delta P_{c2}) = (P_h + \Delta P_h) + P_{L0} + P_L$ ，

即  $\Delta P_h = \Delta P_w - \Delta P_{c2}$ ，其中  $\Delta P_h$  为高载能负荷上调量。此时，与高载能未参与调节时相比，流经线路 4-5、线路 1-2 功率不变，流经线路 2-3 的功率降低了  $\Delta P_h$ ，系统总网损为

$$\Delta P_2 = \frac{(P_w + \Delta P_w)^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/45} + \frac{(P_1 + \Delta P_w)^2 + Q_1^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{(P_2 + \Delta P_w - \Delta P_h)^2 + Q_2^2}{U_{750}^2} R_{750/23} \quad (7)$$

系统总网损变化量为

$$\Delta \Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{(P_2 + \Delta P_w)^2 - (P_2 + \Delta P_w - \Delta P_h)^2}{U_{750}^2} R_{750/23} = \frac{(2P_2 + 2\Delta P_w - \Delta P_h)\Delta P_h}{U_{750}^2} R_{750/23} \quad (8)$$

由于风电大发时， $P_2 > 0$  且  $\Delta P_h = \Delta P_w - \Delta P_{c2} < \Delta P_w$ ，故式(8)中  $\Delta \Delta P > 0$ ，即风电大发时，上调高载能负荷可使电网的总有功损耗降低。

风电小发时， $P_w < P_h + P_{L0} - P_g + P_L$ ，此时  $P_1 = P_w + P_g > 0$ ， $P_2 = P_g + P_w - P_h - P_{L0} < 0$ ，即线路 2-3 上功率方向与图中方向相反，由常规能源倒送功率为当地负荷及高载能负荷供电。当风电出力减少  $\Delta P_w$ ，若高载能负荷未参与调节，与风电大发时同理，为保证功率平衡，常规能源上调调节量  $\Delta P_{c1} = \Delta P_w$ ，总网损变化为

$$\Delta P_1 = \frac{(P_w - \Delta P_w)^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/45} + \frac{(P_1 - \Delta P_w)^2 + Q_1^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{(P_2 - \Delta P_w)^2 + Q_2^2}{U_{750}^2} R_{750/23} \quad (9)$$

若高载能负荷参与调节，为保证功率平衡，需满足  $P_g + (P_w - \Delta P_w) + (P_c + \Delta P_{c2}) = (P_h - \Delta P_h) + P_{L0} + P_L$ ，即  $\Delta P_h = \Delta P_w - \Delta P_{c2}$ ，其中  $\Delta P_h$  为高载能负荷下调量。显然，高载能负荷调节后，流经线路 1-2-3 的功率降低  $\Delta P_h$ ，系统总网损为

$$\Delta P_2 = \frac{(P_w - \Delta P_w)^2 + Q_w^2}{U_{330}^2} R_{330/45} + \frac{(P_1 - \Delta P_w)^2 + Q_1^2}{U_{750}^2} R_{750/12} + \frac{(P_2 - \Delta P_w + \Delta P_h)^2 + Q_2^2}{U_{750}^2} R_{750/23} \quad (10)$$

将式(9)与式(10)作差，得系统总网损变化量为

$$\Delta \Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{(P_2 - \Delta P_w)^2 - (P_2 - \Delta P_w + \Delta P_h)^2}{U_{750}^2} R_{750/23} = \frac{(-2P_2 + 2\Delta P_w - \Delta P_h)\Delta P_h}{U_{750}^2} R_{750/23} \quad (11)$$

由于  $\Delta P_h = \Delta P_w - \Delta P_{c2} < \Delta P_w$  且  $\Delta P_2 < 0$ ，故式(11)中  $\Delta \Delta P > 0$ ，即风电小发情况下，下调高载能负荷可有效降低系统总有功损耗。

综上所述，高载能负荷响应风电变化进行调节，对电网降损将产生显著效果；风电大发情况下，上调高载能负荷用电功率，减少风电远距离输送功率，可以有效降低网损；风电小发情况下，下调高载能负荷用电功率，减少常规能源远距离逆向调峰输送功率，也可有效降低电网的总有功损耗。

### 3. 高载能负荷调节特性

高载能负荷是指生产过程中包含高耗能环节的一类特殊用电负荷，根据高载能行业初步调研结果，高载能负荷具有不同程度的可离散调节和可连续调节的特性[8]。高载能负荷类型众多，本文主要对两类典型高载能负荷进行分析：

#### (1) 具有可离散调节特性的电解铝负荷

电解铝负荷可以通过改变槽电压的方法调节负荷功率，且此方式除了影响产量外，对产品质量和生产安全均无影响，具有可行性[9] [10]。根据前人对电解铝负荷的研究及调研结果，从功率角度，电解铝负荷在 90%~105%的范围内具有调节能力；从调节周期来看，为保证电解铝企业的经济效益，至少应当

确保电解铝负荷在上调 5% 的用电功率上连续运行 4 小时, 且电解铝负荷不能长时间处于超额定功率运行的状态。因此电解铝负荷具有可离散调节特性。

根据电解铝负荷的性质, 电解铝负荷进行第  $k$  次调节前后的特性曲线如图 4 所示, 则电解铝负荷在  $t$  时段的用电负荷  $P_k$  可以表示为:

$$P_k^t = \begin{cases} P_{l(k-1)}, & t < t_{lk} \\ P_{lk}, & t_{lk} < t < t_{l(k+1)} \\ P_{l(k+1)}, & t < t_{l(k+1)} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $P_{l(k-1)}$  为第  $k$  次调节前的用电负荷,  $P_{lk}$  是第  $k$  次调节后的用电负荷,  $P_{l(k+1)}$  是第  $k+1$  次调节后的用电负荷,  $T_{lk}$  为第  $k$  次调节的持续时间且  $T_{lk} = t_{l(k+1)} - t_{lk}$ 。根据电解铝负荷的特性, 上述公式需满足以下约束条件:

$$\begin{cases} P_{l\min} \leq P_{lk} \leq P_{l\max} \\ T_{l\min} \leq T_{lk} \leq T_{l\max} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $P_{l\max}, P_{l\min}$  分别为电解铝负荷可调节范围的上下限,  $T_{l\max}, T_{l\min}$  为电解铝负荷调节持续时间的上下限, 仅当  $P_{lk} \geq P_0$  时,  $T_{lk}$  的上限约束  $T_{l\max}$  才存在。当  $T_{lk} = t_{l(k+1)} - t_{lk}$  满足上述约束时, 电解铝负荷可调节, 当  $T_{lk} < T_{l\min}$  时, 电解铝负荷不可调节, 而当  $T_{lk} > T_{l\max}$  时, 说明负荷超额定功率运行时间过长, 需及时下调电解铝负荷至额定功率以下。

#### (2) 具有可连续调节特性的铁合金负荷

铁合金负荷中主要包括冶炼炉及相关辅助设备。铁合金采用按炉生产的方式, 因此可通过调节每炉的产量及生产时间来调整其用电负荷。根据现有的调研报告, 铁合金负荷在一定范围内具有可连续调节特性, 可连续调节容量的上限可达到负荷额定容量的 105%, 其出力主要受可调节容量上下限约束和爬坡率约束。

### 4. 高载能负荷参与调节的降损控制策略

由于电解铝负荷有调节持续时间约束, 不能连续调节, 而铁合金负荷具有连续调节特性, 所以降损控制策略采取优先调节电解铝负荷, 之后调节铁合金负荷, 最后再调节常规能源的模式。当风电大发时, 高载能负荷进行响应调节增加用电功率, 风电小发时, 高载能负荷减少用电功率, 以达到降损目的。高载能负荷参与调节的降损控制策略的流程图如图 5 所示。

具体步骤为:

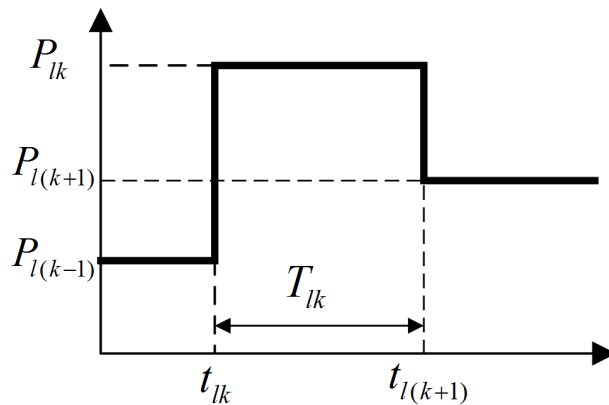


Figure 4. Curve: the characteristic of load of aluminum plant  
图 4. 电解铝负荷特性曲线

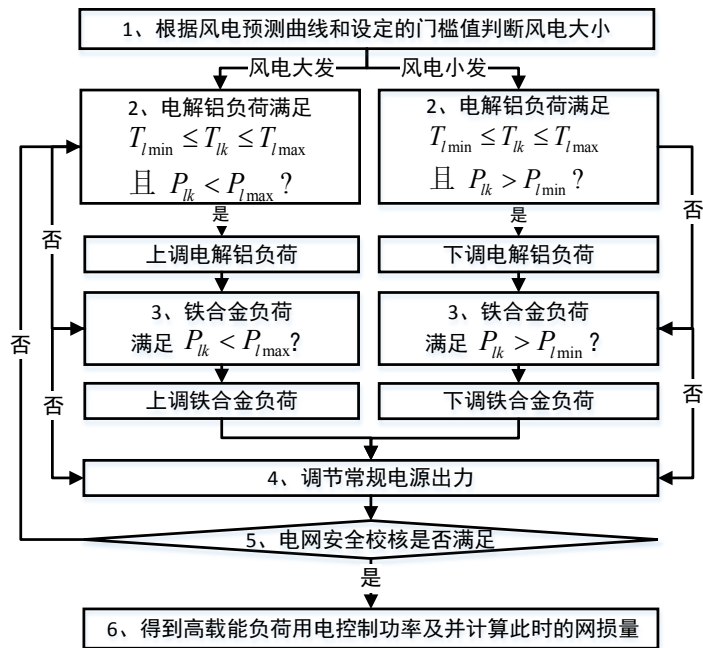


Figure 5. Flow diagram of network loss reduction control strategies  
图 5. 降损控制策略流程图

步骤 1：根据风电预测曲线和设定的阈值判断风电大小。

步骤 2：风电大(小)发时，根据电解铝负荷调节容量约束及调节持续时间约束，判断电解铝负荷是否可调节，若可调节则上(下)调电解铝负荷，反之，则不调节。

步骤 3：根据铁合金负荷调节容量上下限约束，判断其是否可调节，若是，风电大(小)发时上(下)调铁合金负荷，反之则不调节。

步骤 4：调节常规电源出力。

步骤 5：电网安全校核，若校核满足要求，进行步骤 5，反之，返回步骤 2。

步骤 6：计算得到高载能负荷参与调节后的网损量。

## 5. 仿真分析

### 5.1. 仿真条件

河西电网位于甘肃西部的河西走廊，是典型的链式远距离输电网络，其电网结构如图 6。图中可见，河西电网中大规模风电集中在敦煌和酒泉地区，高载能负荷集中在酒泉地区接入电网，电气距离较近。

仿真的风电出力依据河西地区典型日的风电出力曲线，如图 7 所示，风电最大出力达到 3300 MW，最低出力为 500 MW。高载能负荷的基本调节信息如表 1 所示。

### 5.2. 仿真分析

为验证降损控制策略的有效性，比较“无策略”与“有策略”两种情况下河西地区网损率的变化。“无策略”时，高载能负荷不参与调节，电解铝负荷日内功率保持 650 MW 不变，铁合金负荷日内保持功率 92 MW 不变。“有策略”时，根据上述降损控制策略，风电大发(功率大于 600 MW)，上调高载能负荷，风电小发(小于 600 MW)时，下调高载能负荷，得到电解铝负荷日投入容量变化曲线如图 8 所示，铁合金负荷调节情况如图 9 所示。



以小时为单位进行潮流计算，得到日 24 个时间点的网损量，计算得到“无策略”与“有策略”时甘肃网损情况，如表 2 所示。

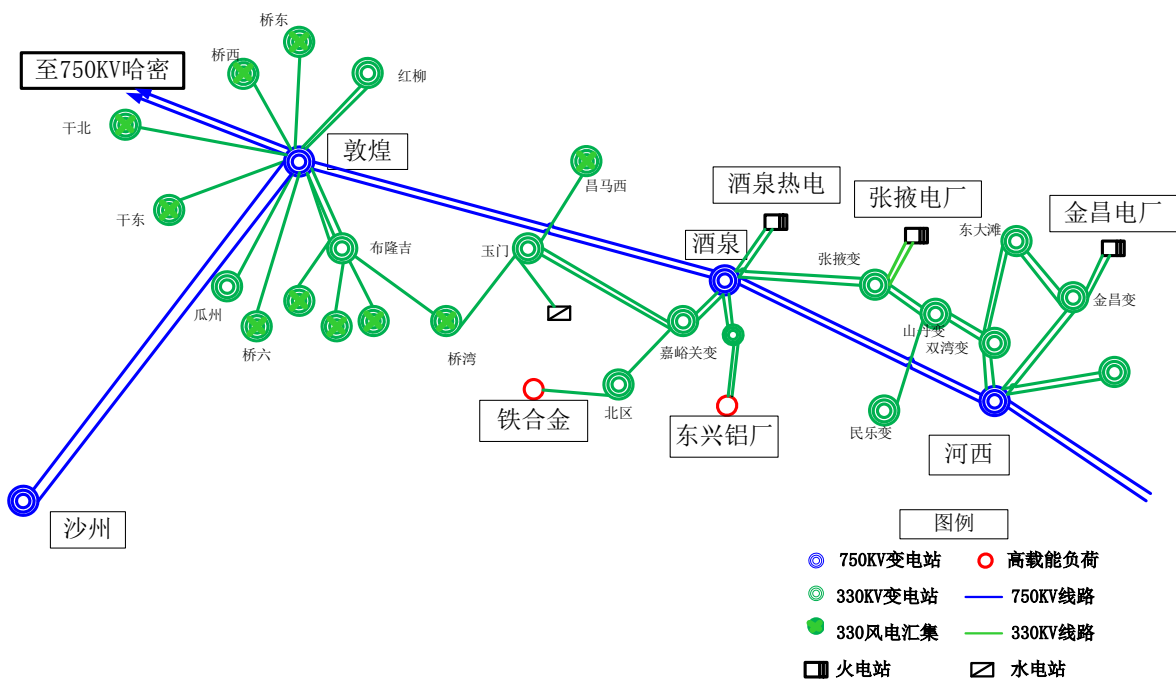


Figure 6. Wiring diagram of Hexi grid  
图 6. 河西电网接线图

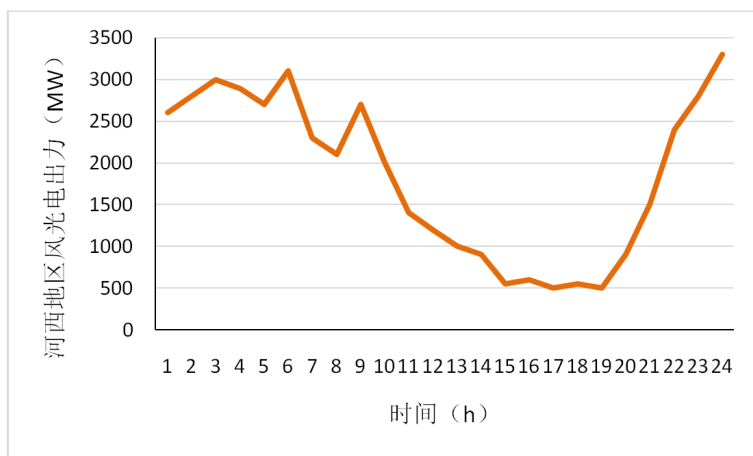


Figure 7. Curve: forecasted wind power output on a typical day  
图 7. 典型日风电预测出力曲线

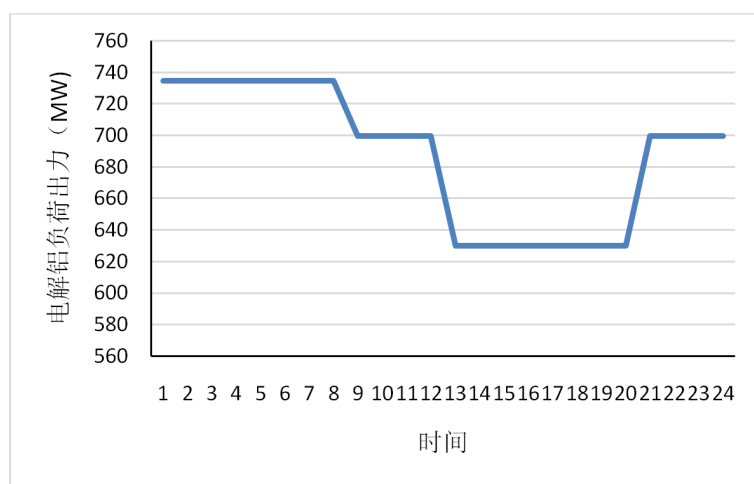
Table 1. System resulting data of standard experiment  
表 1. 标准试验系统结果数据

负荷类型	接入系统电压等级	额定功率	可调节范围	最短持续运行时间	超额定功率运行可持续时间
电解铝	330 kv	700 MW	630~735 MW	4 小时	8 小时
铁合金	330 kv	92 MW	74~105 MW	无	8 小时



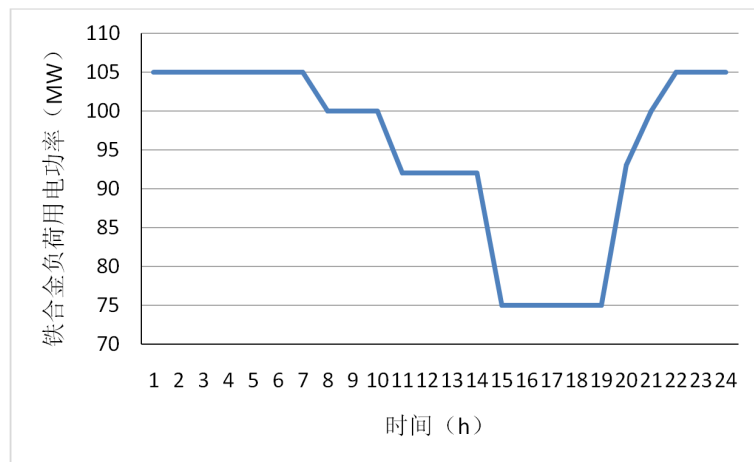
**Table 2.** Comparisons of the line losses of Gansu grid between before and after taking loss reduction strategies  
**表 2.** 采取降损策略前后甘肃网损情况对比

风电出力情况	无策略网损值(MW·h)	采取降损策略网损值(MW·h)	降损值(MW·h)	网损降低幅度(%)
风电大发(19 小时)	6501.23	6386.28	114.95	1.76
风电小发(5 小时)	1607.25	1591.6	15.65	0.74
总计	8108.48	7977.88	130.6	1.6



**Figure 8.** Curve: capacity of load of aluminum plant put into operation

**图 8.** 电铝负荷投入容量曲线



**Figure 9.** Curve: the adjustment of ferroalloy load

**图 9.** 铁合金负荷调节曲线

根据仿真结果，与“无策略”相比，实施高载能负荷参与调节的降损控制策略后，在风电大发场景下电网有功损耗降低 1.76%，风电小发场景下电网有功损耗降低 0.74%，平均降低幅度达到了 1.6%，验证了降损策略的有效性。

## 6. 结论

本文以大规模风电基地建有高载能负荷为研究背景，对高载能负荷跟踪风电波动进行调节对电网降

损的影响机理进行了研究。在此基础上, 对高载能负荷离散和连续两种调节特性进行了分析, 提出了高载能负荷基于风电波动进行调节的降损控制策略。最后, 仿真证明在风电大发和小发的场景下, 控制策略的实施能分别使电网有功网损降低 1.76%和 0.74%, 验证了策略的有效性。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(51377053); 国家科技支撑计划(2015BAA01B04); 国家电网公司项目(52272214002C)。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘聪, 刘文颖, 王维洲, 等. 高载能负荷参与的电网消纳风/光电能力定量预评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 223-229.
- [2] 李明, 杨烈奎, 王维洲, 等. 针对甘肃电网的高载能企业参与可再生能源消纳“荷-网-源”协调控制[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 115-121.
- [3] 周海洋. 大规模风电送出功率对网损影响及控制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013: 3.
- [4] 周伟绩. 含风电地区电网线损分析[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012: 5.
- [5] 肖创英, 汪宁渤, 陟晶, 丁坤. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 64-67.
- [6] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 陟晶. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7.
- [7] 王维洲, 刘福潮, 周海洋, 等. 大规模风电送出对网损影响机理研究[J]. 中国电业(技术版), 2013(12): 78-81.
- [8] Xu, J., Liao, S., Sun, Y., Ma, X., *et al.* (2015) An Isolated Power System Driven by Wind-Coal Power for Aluminum Productions: A Case Study of Frequency Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, **30**, 471-483. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2322080>
- [9] 姚明涛, 胡兆光, 张宁, 等. 工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4219-4226.
- [10] 晋宏杨, 孙宏斌, 郭庆来, 王彬, 陈润泽, 王维洲. 基于能源互联网用户核心理念的高载能-风电协调调度策略[J]. 电网技术, 2016(1): 139-145.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)