

# 需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型

鲁鹏<sup>1</sup>, 田浩<sup>1</sup>, 武伟鸣<sup>1</sup>, 王铁强<sup>1</sup>, 何益鸣<sup>1</sup>, 郭光<sup>2</sup>, 马瑞<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050000; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410144)

**摘要:**针对含风电和能量枢纽主动配电网负荷峰谷波动加大及弃风问题,提出一种需求侧能量枢纽和储能协同平抑负荷峰谷及提升风电消纳模型。在分析需求侧源荷储模型基础上,分析其对弃风和峰谷差影响,获取等效负荷曲线;提出跟随各时段负荷变化和风电穿透率制定风电供冷热电权重系数,改进能量枢纽进冷/热电耦合运行模式,横向通过多能互补提升风电消纳水平;同时协同能量枢纽(EH)改进耦合运行模式,确定储能跟随主动配电网状态的充放电控制策略,纵向转移电量平抑峰谷且提升风电消纳水平,从而给出一种能量枢纽和储能协同平抑峰谷和提升风电消纳的模型。最后采用改进的IEEE 33节点配网系统算例仿真,结果表明文中模型能有效提高主动配电网风电消纳,且对削峰填谷作用明显。

**关键词:**需求侧能量枢纽;风电消纳;储能;平抑峰谷

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.005 中图分类号:TM93 文章编号:1673-9140(2021)01-0042-10

## Demand side energy hub and energy storage cooperate to smooth peak and valley and improve wind power consumption model

LU Peng<sup>1</sup>, TIAN Hao<sup>1</sup>, WU Weiming<sup>1</sup>, WANG Tieqiang<sup>1</sup>, HE Yiming<sup>1</sup>, GUO Guang<sup>2</sup>, MA Rui<sup>2</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to solve the problems in active distribution network which incorporates wind power and energy hub, including the escalating power peak-valley fluctuation and wind curtailment, a model for power peak-valley regulation, as well as the wind power accommodation enhancement, is proposed by adjusting both the energy hub and energy storage on the demand side. Through analyzing the model of the source-load storage on the demand side, the influence of both the wind power accommodation and the power peak-valley difference is assessed, then the equivalent load curve is obtained. The wind power-based combined cooling-heating-and-power weight coefficient is proposed according to the load change and wind power penetration rate during each period. The coupling operation mode of cooling and thermoelectricity in energy hubs is improved, and the level of the wind power accommodation is enhanced through

收稿日期:2021-01-01;修回日期:2021-01-25

基金项目:国家自然科学基金(51900172);国网河北省电力有限公司科技项目(kj2020-061)

通信作者:马瑞(1971-),男,博士,教授,主要从事电力系统稳定与控制、综合能源系统规划和运行研究;E-mail: marui818@126.com

the multi-energy complementarity. Meanwhile, the coupling operation mode can also be improved via the proposed model and the EH to determine the charge and discharge controlling strategy of energy storage adapting the operation state of active distribution network. The power peak and valley can be suppressed via the vertically transfer of power, and the accommodation level of wind power can be improved. Finally, an improved IEEE 33-node distribution system is included to simulate the model. The results show that this model can effectively improve the wind power accommodation in the active distribution network, along with the peak reduction and valley filling in power load.

**Key words:** demand side energy hub; wind power consumption; energy storage; peak and valley filling

随着能源危机及环境污染日益严重,风能作为主要可再生清洁能源得到了迅速发展<sup>[1]</sup>。但风电渗透率的不断提高以及其具有随机性、波动性<sup>[2-3]</sup>、反调峰性<sup>[4-5]</sup>等特点,使得电力系统弃风问题越来越频繁<sup>[6-7]</sup>,风电并网消纳问题成为限制风电可持续发展、阻碍碳中和及能源加速转型的主要因素。随着气候变化和人民生活水平提高,电力系统需求侧,特别是夏季和冬季用电峰谷差日益加大,同时能源转型下分布式风电、储能、综合能源系统接入比例也日益提高。在此背景下,如何协同上述资源平抑峰谷差并提升风电消纳成为电力能源转型中亟待研究的关键性问题。

关于峰谷平抑及提升风电消纳问题近年来已得到深入研究,体现在 2 个方面:一方面通过储能提高风电消纳<sup>[8-11]</sup>,如文献[10]通过系统大范围储能布置以满足电力系统负荷“削峰填谷”的目的,进而削弱负荷波动的程度,以增大风电消纳能力;文献[11]构建以通过储能系统来获取调度风电时其相关问题的经济性量化模型,为储能系统参与风电调度提供决策支持。另一方面随着能源互联网的发展,通过多能互补平抑电负荷并提升风电消纳,考虑电锅炉和储热应用愈来愈广泛<sup>[12-14]</sup>,文献[15]构建含电锅炉的风电消纳及含储热的热电联产机组协调调度模型;文献[16]通过协调热电机组和风电的出力以及安装储热设备以达到增大风电消纳能力的目的;文献[17]提出一种综合电热系统调度模型,该模型包含了储热、热电联产和需求侧响应资源。上述文献立足于能量转移角度,通过储能或储热在时间上解耦并最优化能量的生产和消耗以达到提高风电消纳的目的,提高风电实时利用效率,减少弃风。随着主动配电网(active distribution network, ADN)中综合能源系统即能量枢纽(energy hub, EH)和分布式

风电光伏等可再生能源接入比例的日益提高,其多能流耦合及不确定特征日益明显<sup>[18]</sup>。一般地,在分布式风力发电输出功率较高而配网需求侧自身负荷功率较低时段,若限制 ADN 向主网倒送功率情况,则主动配电网被迫弃风。如何考虑需求侧分布式清洁能源、EH、储能及负荷实际,通过其协同平抑峰谷及提升风电消纳亟待研究。

该文提出一种需求侧能量枢纽和储能协同平抑负荷峰谷及提升风电消纳模型。首先介绍主动配电网 EH 模型、风力发电的随机出力模型和储能系统模型。进而通过对含风电的 EH 对 ADN 负荷峰谷差影响进行分析获得等效日负荷曲线,确定 ADN 源荷状态及其相应的在源状态的弃风功率。然后立足于风电实时利用效率,一方面比较各个时间段风电穿透水平、电—气—热负荷跟随负荷变化和风电穿透水平的变化,设定 EH 冷/热电耦合运行模式;另一方面依据 ADN 等效日负荷曲线和弃风量曲线分析,联合储能系统从电量转移角度制定跟随 ADN 源荷运行状态的储能充放电控制策略。最后采用算例对文中模型进行验证。

## 1 需求侧分布式风电、EH 和储能模型

### 1.1 分布式风电出力模型

风电出力具有随机性和间歇性特点,平均随机风速概率密度分布函数可采用 Weibull 分布来描述,即

$$F(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中  $k$  为形状参数;  $c$  为尺度参数, m/s;  $v$  为平均随机风速, m/s。

随机风电出力  $P_w$  可以表示为

$$P_w' = \begin{cases} 0, & v' < v_{\text{cut-in}} \text{ or } v' > v_{\text{cut-out}} \\ 0.5\rho AC_r v', & v_{\text{cut-in}} < v' < v_{\text{rated}} \\ P_{\text{rated}}, & v_{\text{rated}} < v' < v_{\text{cut-out}} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $v'$  为  $t$  时段的平均风速;  $v_{\text{cut-in}}$  和  $v_{\text{cut-out}}$  为切入风速及切出风速;  $v_{\text{rated}}$  为额定风速;  $\rho$  为该地区的空气密度;  $A$  和  $C_r$  为风轮的覆盖面积和风能利用系数;  $P_{\text{rated}}$  为风电机组的额定有功功率。

假设风电机组以恒定功率因数运行并且其机械损耗忽略不计,  $t$  时段风电无功功率为

$$Q_w' = P_w' \tan \varphi_w \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式中  $\varphi_w$  为风电机组的功率因数角;  $T$  为时域分段段数, 如  $T=96$ , 即一天的时间分割成 96 个时段。

### 1.2 含风电电—气—热多能耦合 EH 模型

分布式风电、热电联供设备 (combined heating and power, CHP)、中央空调系统 (air conditioner, AC) 和电力变压器 (Transformer) 等构成图 1 的能量枢纽模型, 电负荷  $L_e'$  和 AC 由风电通过整流器 (Converter) 供给, 定义  $t$  时段风电  $P_w'$  为供冷/热系统, 分配的权重系数为  $v_w'$  (冷/热负荷按常规作为一个物理量  $L_h'$ ),  $P_e'$  为 ADN 与 EH 的交换功率。

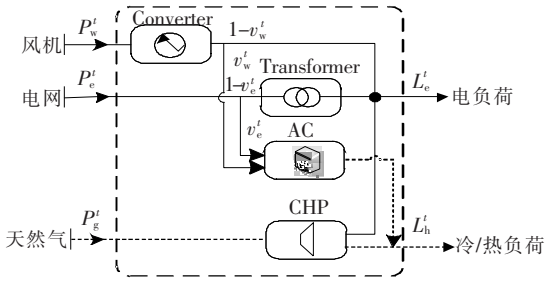


图 1 含风电的 EH 模型

Figure 1 EH model with wind power

$t$  时段 EH 的输入输出耦合关系:

$$\begin{bmatrix} L_e' \\ L_h' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-v_w')\eta_{\text{conv.}} & (1-v_e')\eta_{\text{trans.}} & \eta_{\text{CHP}}^e \\ v_w'\eta_{\text{AC}} & v_e'\eta_{\text{AC}} & \eta_{\text{CHP}}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_w' \\ P_e' \\ P_g' \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $\eta_{\text{conv.}}$ 、 $\eta_{\text{trans.}}$  分别为风电整流器和变压器的效率;  $\eta_{\text{CHP}}^h$ 、 $\eta_{\text{CHP}}^e$  分别为 CHP 机组的制冷/热和制

电效率;  $\eta_{\text{AC}}$  为 AC 制冷/热效率;  $P_g'$  为  $t$  时段天然气能量值。式(4)可求得  $P_e'$ , 当能量枢纽的功率因数为恒定值  $\cos \varphi_{\text{eh}}$  时, EH 与 ADN 之间进行无功交换, 且交换功率  $Q_e' = P_e' \tan \varphi_{\text{eh}}$ 。

### 1.3 储能系统模型

电能双向流动、能量时移、在时间尺度上对电能的生产 and 消耗进行解耦是储能技术的几大特点, 负荷曲线到达低谷时存储电能, 负荷高峰期释电能, 可以准确匹配风功率快速波动及随机性, 使风电出力波动趋于平缓。

采用储能系统的荷电状态 (SOC) 描述其储能状态, 储能装置在  $t$ 、 $t-1$  时刻的 SOC 与从  $t-1$  到  $t$  时段内的充放电状态有关<sup>[19]</sup>, 可表示为

$$SOC^t = (1-\sigma)SOC^{t-1} - \frac{P_{\text{bess}}^t \Delta t}{E_{\text{bess, N}}} \eta \quad (5)$$

式中  $\sigma'$  和  $\eta$  为储能装置的自放电率和充放电效率;  $P_{\text{bess}}^t$  为  $t$  时刻充放电功率;  $P_{\text{bess}}^t \leq 0$  表示充电状态;  $P_{\text{bess}}^t > 0$  表示放电状态;  $E_{\text{bess, N}}$  为储能装置额定容量。

$t$  时刻的储能容量和充放电功率关系为

$$E_{\text{bess}}^t = (1-\sigma')E_{\text{bess}}^{t-1} - P_{\text{bess}}^t \eta \Delta t \quad (6)$$

在系统的实际运行情况下, 储能系统需要满足以下约束条件:

1) 储能的充放电功率只能在其允许数值范围内波动, 即

$$-P_{\text{bess, C}}^{\text{max}} \leq P_{\text{bess}}^t \leq P_{\text{bess, D}}^{\text{max}} \quad (7)$$

式中  $P_{\text{bess, C}}^{\text{max}}$  和  $P_{\text{bess, D}}^{\text{max}}$  分别为储能最大充放电功率。

2) 在储能系统的工作进程中, 电量负荷状态 SOC<sup>t</sup> 需符合以下约束:

$$SOC_{\text{min}} \leq SOC^t \leq SOC_{\text{max}} \quad (8)$$

式中  $SOC_{\text{min}}$  和  $SOC_{\text{max}}$  分别为储能的荷电状态上下限。

3) 为了延长储能使用寿命, 规定一天内储能装置充放电循环不超过一定次数, 即

$$m \leq a \quad (9)$$

式中  $m$  为每日充放电次数;  $a$  为常量, 表示储能装置正常工作每日允许最大充放电次数。

## 2 需求侧等效负荷曲线及其峰谷差和弃风分析

### 2.1 风电和 EH 对 ADN 负荷峰谷差影响分析

风电特点使其呈现明显的反调峰特性<sup>[4]</sup>,在研究风电并网对系统调峰影响时,一般将风电视为“负”的负荷叠加到原始负荷中<sup>[20]</sup>,而对于含风电的 CCHP 系统 EH,在传统 CCHP 系统接入风电及 EH 运行方式,风电作为各种运行模式下系统功率缺额的补充<sup>[21]</sup>。给定运行模式下,由式(4)求得  $t$  时刻配网和 EH 交换功率  $P_{L,i}^t$  为正时表示作为负荷配网向其输送电能,反之作为电源向配网送电。同样将配网和 EH 交换功率  $P_{L,i}^t$  叠加到原始负荷中,得到含分布式风电和含风电 EH 的配电网等效负荷。

分布式风电和含风电 EH 接入配电网其等效负荷为

$$P_{L,eq}^t = \sum_{i=1}^N P_{L,i}^t - \sum_{i=1}^N P_{DG,i}^t + \sum_{i=1}^N P_{e,i}^t \quad (10)$$

式中  $N$  为配电网节点数;  $P_{DG,i}^t$  为  $t$  时段分布式能源接入到配电网节点  $i$  的风电机组有功出力;  $P_{e,i}^t$  为接入到配电网节点  $i$  的含风电 EH 与配电网的交换功率;  $P_{L,i}^t$  为节点  $i$  的有功功率;  $P_{L,eq}^t$  为  $t$  时段 ADN 等效负荷。

原日负荷峰谷差为

$$\Delta P_{L,PV} = P_{L,max} - P_{L,min} \quad (11)$$

式中  $P_{L,max}$  为日内最大负荷值;  $P_{L,min}$  为日内最小负荷值。

分布式风电和含风电 EH 并网后等效某天的负荷峰谷差为

$$\Delta P_{L,eq,PV} = P_{L,eq,max} - P_{L,eq,min} \quad (12)$$

式中  $P_{L,eq,max}$  为等效日内最大负荷值;  $P_{L,eq,min}$  为等效日内最小负荷值。

负荷峰谷差变化量为

$$\Delta PVL = \Delta P_{L,eq,PV} - \Delta P_{L,PV} \quad (13)$$

因此可利用负荷峰谷差变化量  $\Delta PVL$  指标来反映分布式风电和含风电 EH 并网后对电网调峰的影响程度。当  $\Delta PVL > 0$  时,加大系统调峰难度;当  $\Delta PVL < 0$  时,有利于调峰。

### 2.2 ADN 弃风分析

对于配网而言,其接入主网相当于接入无限大系统,ADN 可与主网有功功率双向交互。当配网中分布式电源出力大于总负荷时,配网中多余的电能将会向主网倒送,其倒送功率即相当于 ADN 的“弃风”功率。分布式风电和含风电 EH 接入 ADN 其弃风分析如图 2 所示。

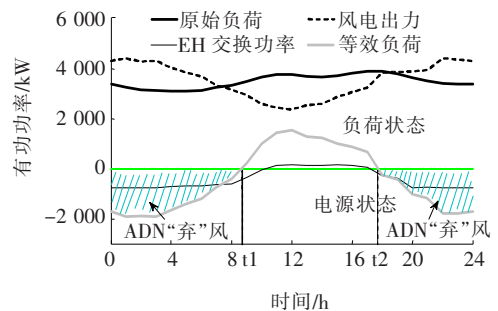


图 2 ADN 弃风分析

Figure 2 Abandoned wind analysis of ADN

由图 2 可知,分布式风电和含风电 EH 接入 ADN,使得 ADN 等效日负荷峰谷差增大。配电网弃风主要出现在高风电低负荷的  $0 \sim t_1$  和  $t_2 \sim 24$  时间段,此时  $P_{L,eq}^t < 0$ ,ADN 处于电源状态,将无法消纳的风电倒送给主网;在  $t_1 \sim t_2$  时段,  $P_{L,eq}^t > 0$ ,主网供应 ADN 电能存在缺额。弃风功率即为 ADN 处于电源状态下的分布式风电和含风电 EH 并网后等效负荷功率值。

基于上述分析,该文提出横向改进 EH 运行模式和纵向加入储能系统协同平抑峰谷并提升风电消纳水平。

## 3 能量枢纽和储能协同平抑峰谷及提升风电消纳模型

### 3.1 改进 EH 耦合模式提升风电消纳水平

EH 多能改进耦合模式是从横向方面提高风电的消纳,所谓横向就是从电力角度,增大配电网各个时刻风电利用功率。针对传统 CCHP 系统接入风电,风电仅作为各种运行模式下系统功率缺额的补充,该文从 EH 对接入风电实时利用的角度,首先提出风电供冷/热权重系数,通过对权重系数实时跟踪风电、冷热电的需求变化,从而达到 EH 主动去利用

风电。以“以热定电”(following the electric load, FEL)为例改进 FEL 模式。

当  $L_e^t \leq P_{e, \text{CHP}}^{\max} + \eta_{\text{conv.}} P_w^t$ ,  $t$  时段  $v_w^t$  的值:

$$\begin{aligned}
 & \text{I) } P_w^t > L_h^t / \eta_{\text{AC}} + L_e^t / \eta_{\text{conv.}} : \\
 & \quad L_h^t / \eta_{\text{AC}} / P_w^t \\
 & \text{II) } P_w^t \leq L_h^t / \eta_{\text{AC}} + L_e^t / \eta_{\text{conv.}} : \\
 & \quad \text{I) } L_h^t > (\eta_{\text{CHP}}^h L_{e, \text{max}}^t / \eta_{\text{CHP}}^e) + \\
 & \quad \eta_{\text{AC}} (P_w^t - (L_e^t - L_{e, \text{max}}^t) / \eta_{\text{conv.}}) : \\
 & \quad 1 - (L_e^t - L_{e, \text{max}}^t) / \eta_{\text{conv.}} / P_w^t \\
 & \quad v_w^t = \{ \text{II) } \eta_{\text{CHP}}^h (L_e^t - \eta_{\text{conv.}} P_w^t) / \eta_{\text{CHP}}^e < L_h^t \leq \\
 & \quad (\eta_{\text{CHP}}^h L_{e, \text{max}}^t / \eta_{\text{CHP}}^e) + \\
 & \quad \eta_{\text{AC}} (P_w^t - (L_e^t - L_{e, \text{max}}^t) / \eta_{\text{conv.}}) : \\
 & \quad (L_h^t + (\eta_{\text{CHP}}^h / \eta_{\text{CHP}}^e) (\eta_{\text{conv.}} P_w^t - L_e^t)) / \\
 & \quad ((\eta_{\text{AC}} + \eta_{\text{conv.}} \eta_{\text{CHP}}^h / \eta_{\text{CHP}}^e) P_w^t) \\
 & \quad \text{III) } L_h^t \leq \eta_{\text{CHP}}^h (L_e^t - \eta_{\text{conv.}} P_w^t) / \eta_{\text{CHP}}^e : \\
 & \quad 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

式中  $L_{e, \text{max}}^t$  为改进 FEL 模式下 CHP 机组最大输出功率。当  $L_e^t \leq P_{e, \text{CHP}}^{\max}$  时,  $L_{e, \text{max}}^t = L_e^t$ ; 当  $L_e^t > P_{e, \text{CHP}}^{\max}$  时,  $L_{e, \text{max}}^t = P_{e, \text{CHP}}^{\max}$ 。当  $L_e^t > P_{e, \text{CHP}}^{\max} + \eta_{\text{conv.}} P_w^t$  时, 风电全部通过 AC 供冷/热负荷, 即  $t$  时段风电供热/冷权重系数  $v_w^t = 0$ 。

将  $v_w^t$  代入式(4), 可得  $t$  时段  $P_e^t$ , 定义  $P_e^t$  为负时, EH 为电源状态, 反之为负荷状态。

$$L_e^t \leq P_{e, \text{CHP}}^{\max} + \eta_{\text{conv.}} P_w^t$$

$$\begin{aligned}
 & \text{I) } P_w^t > L_h^t / \eta_{\text{AC}} + L_e^t / \eta_{\text{conv.}} : \\
 & \quad \Delta L_h^t = 0, \Delta L_e^t = L_e^t - \eta_{\text{conv.}} (P_w^t - L_h^t / \eta_{\text{AC}}) \\
 & \text{II) } P_w^t \leq L_h^t / \eta_{\text{AC}} + L_e^t / \eta_{\text{conv.}} : \\
 & \quad \text{I) } : \Delta L_h^t = L_h^t - ((\eta_{\text{CHP}}^h L_{e, \text{max}}^t / \eta_{\text{CHP}}^e) + \\
 & \quad \eta_{\text{AC}} (P_w^t - (L_e^t - L_{e, \text{max}}^t) / \eta_{\text{conv.}})), \Delta L_e^t = 0 \\
 & \quad \text{II) } : \Delta L_h^t = 0, \Delta L_e^t = 0 \\
 & \quad \text{III) } : \Delta L_h^t = L_h^t - \eta_{\text{CHP}}^h (L_e^t - \eta_{\text{conv.}} P_w^t) / \eta_{\text{CHP}}^e, \Delta L_e^t = 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 & L_e^t > P_{e, \text{CHP}}^{\max} + \eta_{\text{conv.}} P_w^t \\
 & \left\{ \begin{aligned} & \Delta L_e^t = L_e^t - (P_{e, \text{CHP}}^{\max} + \eta_{\text{conv.}} P_w^t) \\ & \Delta L_h^t = L_h^t - \eta_{\text{CHP}}^h P_{e, \text{CHP}}^{\max} / \eta_{\text{CHP}}^e \end{aligned} \right. \\
 & \left\{ \begin{aligned} & \Delta L_h^t \leq 0, P_{e, \text{AC}}^t = 0 \\ & \Delta L_h^t > 0, P_{e, \text{AC}}^t = \Delta L_h^t / \eta_{\text{AC}} \end{aligned} \right. \tag{16}
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \Delta L_e^t \leq 0 : P_e^t = \Delta L_e^t \times \eta_{\text{trans.}} + P_{e, \text{AC}}^t \\ \Delta L_e^t > 0 : P_e^t = \Delta L_e^t / \eta_{\text{trans.}} + P_{e, \text{AC}}^t \end{cases} \tag{17}$$

式中  $P_{e, \text{AC}}^t$  为电网输入到空调 AC 的电功率;  $\Delta L_h^t$  和  $\Delta L_e^t$  分别为电网补充 EH 的冷/热电需求。

$t$  时段 EH 对接入风电的利用功率  $P_{\text{use}}^t$  和  $P_e^t$  的关系为

$$\begin{aligned}
 & P_{\text{use}}^t = \\
 & \begin{cases} P_w^t + P_e^t / \eta_{\text{conv.}} / \eta_{\text{trans.}}, & P_w^t > L_h^t / \eta_{\text{AC}} + L_e^t / \eta_{\text{conv.}} \\ P_w^t, & P_w^t \leq L_h^t / \eta_{\text{AC}} + L_e^t / \eta_{\text{conv.}} \end{cases} \tag{18}
 \end{aligned}$$

### 3.2 储能和能量枢纽协同平抑峰谷并提升风电消纳水平

储能的加入是从纵向方面提高风电的消纳。所谓纵向就是从电量转移角度, 通过储能系统在时间上解耦电能的生产和消耗, 实现配电网在负荷低谷而风电高发时储存配电网多余的风电; 在负荷高峰而风电低发时释放存储的风电供应配电网负荷, 从而提高配电网对其接入分布式风电的消纳。

由 2.2 节分析可知, 对于 ADN 来说, 储能系统应在 ADN 处于电源状态以负荷状态存储配电网弃风; 在 ADN 处于负荷状态时储能系统以电源状态向配电网放电。

计及储能充放电策略和储能最大充放电功率及荷电状态约束的影响, 在 EH 改进多能耦合运行模式的基础上, 结合 2.2 节主动配电网等效日负荷和弃风分析及 1.3 节相应约束下, 接入 ADN 的含风电 EH 和分布式风电的储能系统的充放电功率为

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} & 0, \quad \text{SOC}^t = \text{SOC}_{\max} \ \& \ P_{L, \text{eq}}^t < 0 \\ & P_{\text{bess}}^t = \left\{ \begin{aligned} & 0, \quad \text{SOC}^t = \text{SOC}_{\min} \ \& \ P_{L, \text{eq}}^t > 0 \\ & [P_{L, \text{eq}}^t, \quad \text{其他} \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \tag{19}
 \end{aligned}$$

处于电源状态的  $0 \sim t_1$  和  $t_2 \sim 24$  这 2 个时间段的 ADN 的  $P_{\text{bess}}^t < 0$ , 储能的状态为充电; 处于负荷状态的  $t_1 \sim t_2$  时间段的 ADN 的  $P_{\text{bess}}^t > 0$ , 储能向外放电, 储能的充放电状态和 ADN 源荷状态相对应, 储能系统在 ADN 电源状态充电, 在 ADN 负荷状态放电。

为了保证储能系统在新的调度周期内具有相同的调节性能,储能系统调度周期初始时刻的荷电状态必须与其最后时刻的状态相同,即除了 1.3 节的约束,储能系统还需要满足以下约束条件:

$$SOC(T) = SOC(0) \quad (20)$$

在 EH 改进运行模式基础上,充电时,储能装置作为负荷,放电时当作电源,也即“负”的负荷,因此加入储能系统后其等效负荷为

$$P_{L,eq}^t = \sum_{i=1}^N P_{L,i}^t - \sum_{i=1}^N \tilde{P}_{DG,i}^t + \sum_{i=1}^N \tilde{P}_{e,i}^t - P_{bess}^t = P_{L,eq}^t - P_{bess}^t \quad (21)$$

### 4 算例仿真及结果分析

基于 IEEE 33 节点系统进行算例仿真改进,图 3 为网络接线,其中节点 3、7、10、14、27 分别接入 5 组 2 台风机,节点 20、30 分别接入 2 个含单台风机 EH 1、EH 2,节点 5 接入储能系统。设风电和 EH 以恒定功率因数运行,表 1 为 EH 参数,表 2 为风机参数;储能系统的 SOC 范围为[0.2, 0.9],最大充放电功率为 2 MW,额定容量为 13.6 MW·h;图 4 为配网日电负荷和 EH 日冷/热电负荷。

对系统的某个典型日进行分析,图 5 为采用蒙特卡洛法对 1 000 组 96 时段单台风机进行模拟得出的平均随机出力,视其为实际日风电出力,代入算例进行仿真分析,可得单台风机日平均出力为 352.3 kW。

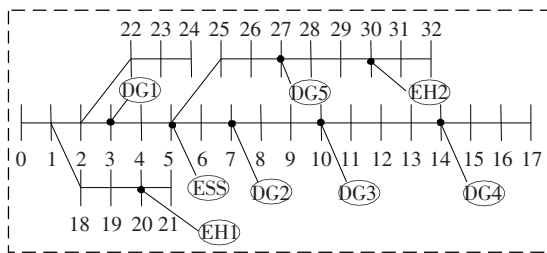


图 3 算例网络接线

Figure 3 Example network wiring diagram

表 1 EH 参数

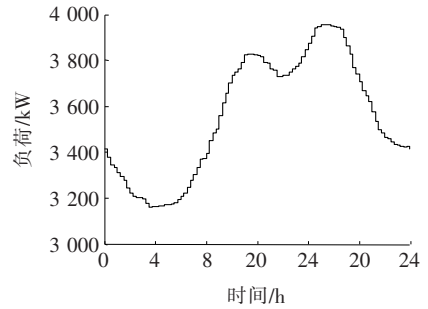
Table 1 Parameters of EH

$\eta_{conv.}$	$\eta_{trans.}$	$\eta_{AC}$	$\eta_{CHP}^c$	$\eta_{CHP}^h$	$P_{e,CHP}^{max} /$ kW	$P_{h,CHP}^{max} /$ kW
0.95	0.95	0.70	0.30	0.40	200	266

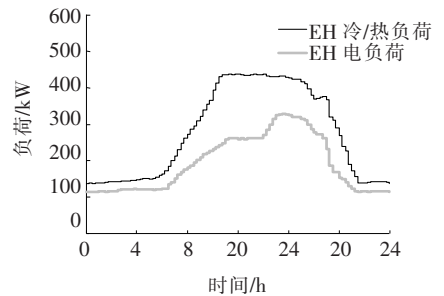
表 2 风力发电参数

Table 2 Parameters of wind generation

$\cos \varphi_w$	$P_{rated} /$ kW	$v_{cut-in} /$ (m/s)	$v_{cut-out} /$ (m/s)	$v_{rated} /$ (m/s)	$k$	$c /$ (m/s)
0.93	500	3	25	13	4.38, [3.75, 6.32]	[8.31, 9.76, 11.88, 13.70]



(a)配电网负荷



(b)EH 负荷

图 4 ADN 电负荷、EH 冷/热电负荷

Figure 4 Load of ADN, EH's cooling/heating and electric load

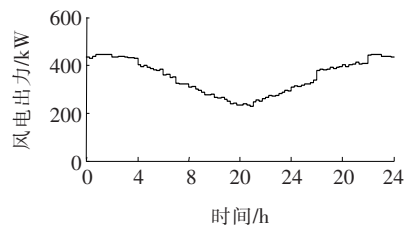


图 5 风机日风电出力

Figure 5 Daily wind power output of fan

#### 4.1 EH 改进多能耦合模式对风电消纳影响

该文 EH 改进运行模式首先提出了风电供冷/热权重系数的数学模型,通过控制权重系数的变动来跟踪风电、冷热电实时的需求变动,进而使 EH 主动去利用接入风电,提高风电实时利用功率。采用 EH 改进运行模式与传统运行模式对其接入风电的日实时利用情况具体如图 6 所示。

由图6可以看出, EH在改进多能耦合运行模式中各时段对接入其风电的被利用的功率都要高于传统运行模式下的利用功率。风电出力越高, 这一特征更加突出。传统模式下的日平均风电利用功率为444.0 kW, 而改进多能耦合控制模型下, 能量枢纽的日平均风电利用功率达到了634.9 kW。

图7给出了2种运行模式下EH与ADN交换功率。EH在改进多能耦合运行模式下, 风电出力较高的时段相对于传统模式对风电的高利用功率使得EH作为电源向配网供电时, 供电功率减小, 将其代入ADN等效负荷计算式, 得到2种运行模式下等效日负荷曲线, 具体如图8所示。

由图8可知, EH改进多能耦合运行模式下, ADN弃风功率减小, 表明EH改进多能耦合运行模

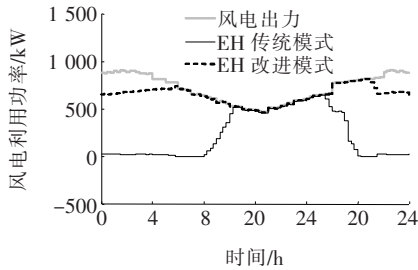


图6 EH 2种运行模式下对其接入风电的利用情况  
Figure 6 EH utilization of wind power in two modes

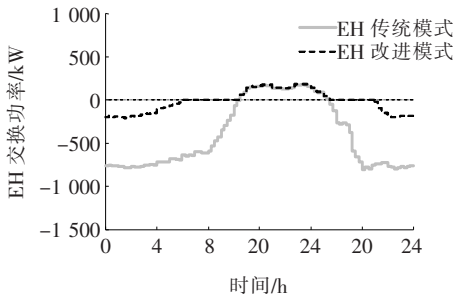


图7 2种运行模式下EH与ADN交换功率  
Figure 7 Switching power between EH and ADN under two modes

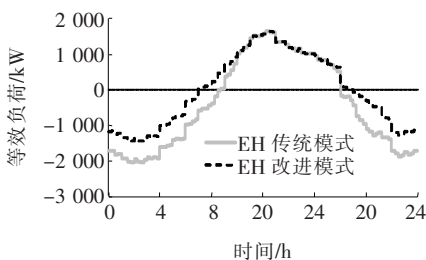


图8 2种运行模式下等效日负荷曲线  
Figure 8 Equivalent daily load curves under two modes

式下, 能从电力方面提升风电实时利用功率, 横向减小风电出力较大时段ADN弃风。

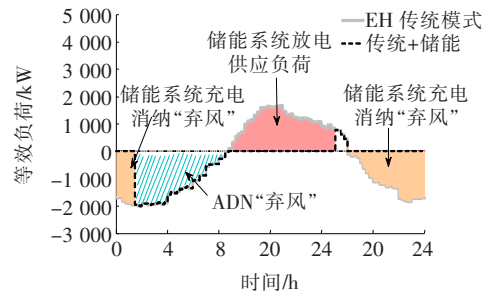
## 4.2 EH改进耦合模式与储能协同

该文考虑表3所示4种不同运行策略, 分析EH改进运行模式联合储能对风电影响计算结果。相同储能配置情况下, 不同运行策略的主动配电网等效日负荷曲线如图9所示。不同运行策略下配电网对其接入分布式风电的消纳情况如表4所示。

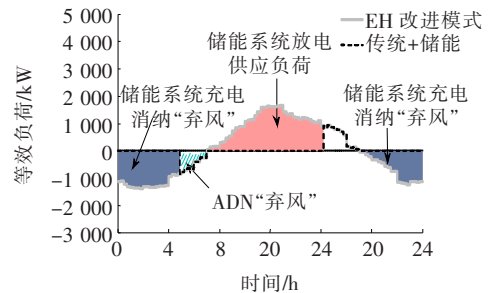
表3 4种运行策略说明

Table 3 Four operation strategies description

运行策略	说明
I	无储能+EH传统运行策略
II	无储能+EH改进运行策略
III	储能+EH传统运行策略
IV	储能+EH改进运行策略



(a)传统模式运行



(b)改进模式运行

图9 不同运行策略的主动配电网等效日负荷曲线  
Figure 9 Equivalent daily load curve of ADN with different operation strategies

表4 配电网对其接入分布式风电的消纳情况

Table 4 Distributed wind power consumption

运行策略	弃风量/(kW·h)	风电消纳率/%
I	18 757.5	81.5
II	10 593	89.6
III	87 955.6	91.3
IV	957.6	99.1

从图 9 和表 4 可以看出,4 种运行策略下弃风量比较  $I > II > III > IV$ ,相应的风电消纳率  $I < II < III < IV$ 。由此可见,该文 EH 改进多能耦合运行模式与储能联合运行策略明显降低了 ADN 弃风,提高了 ADN 对其接入分布式风电的消纳。

根据各个运行策略等效日负荷曲线得到各个运行策略峰谷差见表 5,以运行策略 I 为基准得到峰谷差变化量曲线见图 10。

表 5 等效日负荷峰谷差

Table 5 Equivalent daily load peak-to-valley

运行策略	difference		峰谷差 kW
	峰值	谷值	
I	1 672.5	-1 991.3	3 663.8
II	1 672.5	-1 401.1	3 073.6
III	778.4	-1 991.3	2 769.7
IV	941.2	-854.3	1 795.5

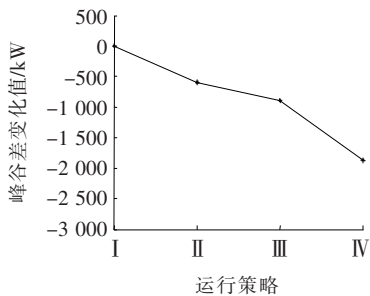


图 10 等效日负荷峰谷差变化量曲线

Figure 10 Equivalent daily difference variation curve of peak-to-valley load

由表 5、图 10 可知,EH 改进多能耦合运行模式与储能联合运行策略下,ADN 等效日负荷峰谷差和峰谷差变化量最小,不仅提高了配电网对其接入分布式风电的消纳,而且对 ADN 负荷的削峰填谷作用更明显。

## 5 结语

该文提出了一种需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑峰谷方法,并通过算例仿真,验证了其正确有效。

1)该文模型可从电力和电量角度达到提升

ADN 风电消纳和平抑负荷峰谷目的。通过跟随负荷及风电穿透水平,实时调节 EH 风电供冷/热权重系数,在电力调度多能互补时优先利用风电等清洁能源,从而提高了需求侧风电实时利用功率;储能运行策略协同 EH 运行模式并跟随 ADN 源荷状态和负荷曲线,可从电量角度平抑峰谷并提升风电消纳水平。

2)该文模型风电不确定性、EH 耦合运行及调控运行具体实现等问题暂未深入探讨,后续将深入研究。

## 参考文献:

- [1] 赵福林,俞啸玲,杜诗嘉,等.计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):42-51.  
ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 42-51.
- [2] 任冲,柯贤波,樊国伟,等.大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J].高压电器,2020,56(5):163-174.  
REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHV DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 163-174.
- [3] 聂聪颖,沈小军,吕洪,等.并网型风电场氢超混合储能容量配置及控制策略研究[J].智慧电力,2020,48(9):1-8.  
NIE Congying, SHEN Xiaojun, LV Hong, et al. Capacity configuration and control strategy of hydrogen super hybrid energy storage in grid connected wind farm[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 1-8.
- [4] 和萍,祁盼,申润杰,等.计及风电和燃料电池的综合能源系统阻尼特性分析[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):14-23.  
HE Ping, QI Pan, SHEN Runjie, et al. Analysis of damping characteristics of an integrated energy system with hybrid wind-fuel cells integrated[J]. Journal of



- Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 14-23.
- [5] 范小红, 孙士云, 王春又, 等. 适应于双馈风电场送出线不对称故障的时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 82-91.  
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, WANG Chunyou, et al. Time domain distance protection for asymmetric faults of an outgoing line in doubly-fed wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 82-91.
- [6] 吴巍, 汪可友, 李国杰, 等. 提升风电消纳区间的鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 523-532.  
WU Wei, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Robust unit commitment to improve the admissible region of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 523-532.
- [7] 李自明, 姚秀萍, 王海云, 等. 不同风电机组并网对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 16-21.  
LI Ziming, YAO Xiuping, WANG Haiyun, et al. The influence of different wind turbine grid connection on transient voltage stability of power system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2): 16-21.
- [8] 杨德友, 聂新宇. 基于供热网络热惯性的风电消纳能力评估[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 66-71.  
YANG Deyou, NIE Xinyu. Evaluation of wind power absorption capacity considering thermal inertia of heating network[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 66-71.
- [9] 宋福龙, 吴洲洋, 张艳, 等. 大规模风电下基于模糊场景聚类的网-储协调规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 74-80.  
SONG Fulong, WU Zhouyang, ZHANG Yan, et al. Fuzzy scene clustering based grid-energy storage coordinated planning method with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 74-80.
- [10] 马瑞, 郭光. 含优先利用风电能量枢纽主动配电网三相不平衡随机模糊动态潮流方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 590-602.  
MA Rui, GUO Guang. Three-phase unbalanced random fuzzy dynamic power flow method for active distribution network containing energy hubs with priority utilization of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 590-602.
- [11] 杨玉龙, 王子善, 杨震, 等. 考虑风电不确定性的蓄热式电采暖消纳弃风经济性分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 47-54.  
YANG Yulong, WANG Zishan, YANG Zhen, et al. Day-ahead economic analysis of electric heating with storage system for heating considering the uncertainty of wind power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 47-54.
- [12] 谢华宝, 许丹, 胡林献, 等. 电锅炉配置方式对弃风消纳效果的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 126-133.  
XIE Huabao, XU Dan, HU Linxian, et al. Study on effect of electric boiler configuration method on wind power curtailment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 126-133.
- [13] 姚方, 王佳伟, 文福拴, 等. 计及碳税的含风电和储能的电力系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 37-46.  
YAO Fang, WANG Jiawei, WEN Fushuan, et al. Economic dispatch for a power system containing wind power and energy storage with carbon tax considered[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 37-46.
- [14] Chen X Y, Kang C Q, O'Malley M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [15] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4080.  
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4080.

- [16] 于婧,孙宏斌,沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组联合优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):139-145.  
YU Jing,SUN Hongbin,SHEN Xinwei. Combined optimal operation strategy of wind power and thermoelectric unit considering heat storage device[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):139-145.
- [17] 崔雪,邹晨露,王恒,等. 考虑风电消纳的电热联合系统源荷协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):74-81.  
CUI Xue,ZOU Chenlu,WANG Heng, et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(7):74-81.
- [18] 王成山,洪博文,郭力,等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报,2015,33(31):26-33.  
WANG Chengshan,HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2015,33(31):26-33.
- [19] Macedo L H, Franco J F, Rider M J, et al. Optimal operation of distribution networks considering energy storage devices[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2015,6(6):2825-2036.
- [20] 左剑,汤吉鸿,钟伟,等. 考虑输配交互的含风电场电力系统多目标动态随机模糊最优潮流[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(1):50-60.  
ZUO Jian, TANG Jihong, ZHONG Wei, et al. Multi objective dynamic random fuzzy optimal power flow of wind integrated[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(1):50-60.
- [21] 和萍,武欣欣,陈婕,等. 含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(1):20-27.  
HE Ping,WU Xinxin,CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of an integrated energy system with wind and solar power generation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(1):20-27.