

风能等效转化利用模型及其效益研究

闫占新^{1,2}, 刘俊勇¹, 许立雄¹, 吴杨^{1,3}, 张里², 李勇²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司 技能培训中心, 四川 成都 610000;

3. 西南科技大学 信息化推进办公室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 以能源互联网为依托,研究了风能在转化利用过程中不同“能质”能量之间的等效转化关系及其对应的效益。为综合考虑负荷需求特性及供能价格因素对风能利用方式的影响,以风电利用率最大和系统运行综合效益最大化为目标,构建风能转化利用多目标优化模型;然后,采用量子行为的粒子群优化算法对模型进行优化求解;最后,在不同的供能模式下进行对比分析。算例结果表明,所提模型能够有效地提高能耗系统对风能的综合利用率及消纳能力,并取得更高的能售效益,验证了所提模型及其运行方式的有效性和可行性,为大规模风电的开发和利用提供了新的思路。

关键词: 能源互联网; 风能; 等效转化; 能售效益; 风电消纳

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.007

0 引言

风能作为一种典型的可再生清洁能源,已经成为当前能源结构中重要的组成部分,也是未来能源领域的一个重要的发展方向。然而,随着大规模风电接入系统,弃风问题逐步凸显,对风电的开发和利用造成了极大的损失,使得发电商对其持观望态度,不利于整个风电产业的可持续发展^[1]。

风电的开发、利用以及消纳受多方面因素的影响。从风能自身特性来看,受外界环境影响较大,其风电出力表现出极强的间歇性和不稳定性,其逆负荷分布特性更进一步地增加了负荷区对风电利用和消纳的难度^[2-4];从风能的地域分布来看,风能资源往往远离负荷中心,本地电力负荷不具备对大规模风电进行消纳的能力^[5-6]。风电外送是一个能有效解决大规模风电存在弃风问题的重要途径,虽然其可以扩大对风电的消纳量,但外送受输电容量、输电功率的稳定性以及受端电力负荷需求等多种因素的约束和限制。文献[7]以弹性电力价格为基础,构建了风电消纳机会约束模型,验证了需求侧响应对风电消纳的有效性。文献[8]结合风电与电动汽车的充放电负荷特性,提出了风电与电动汽车协同调度模型以提高风电的利用率和消纳能力。文献[9-11]提出采用多种蓄能技术对风能以不同的形式在时序上形成转移,目的是提高风电的消纳能力;而文献[12-13]对风电与储能系统的功率平衡控制策略展开研究,

目的是保障系统的安全稳定运行。

由上述研究可知,对风电的转化、利用、传递主要是通过电能这种单一的能量形式进行,而对于整个能耗负荷区而言,常包含有冷、热、电等多种类型的负荷需求。因此,首先以能源互联网^[14-16]为基础平台,通过分析风能在利用过程中的多重等效转化关系,构建风能的多层转化利用模型;然后综合考虑能耗价格因素对风能转化利用方式的影响,以风电利用率最大和系统运行综合效益最大化为目标,构建风能转化利用多目标优化模型,通过求解得到风能在不同时间段内的最佳转化利用方式;最后通过不同季节下算例的对比分析,验证所提模型能够有效地提高系统对风能的综合利用率和消纳能力,并提升风能利用的综合效益,为未来大规模风电的规划和运行提供一定的参考。

1 风能等效转化利用机制

风能作为当前能源结构中重要的组成部分,其转化和利用需要经历多重能量之间的转化,以满足不同能量形式的负荷需求。同时,为减缓风电的逆负荷特性,在时序上对风能以不同的能量形式形成转移,在满足负荷需求的同时,提高系统对风能的利用率和消纳能力。本文从风能的转化和转移2个角度分析风能的利用和消纳。

1.1 能量等效转化特性

风能的利用过程是一个复杂的能量转化传递过程,需要根据负荷需求的不同,将其转化为相应的能量形式。在整个转化过程中,由于不同转化阶段能量在“能质”上所表现出的不同^[17-18],彼此之间存在多重梯级转化机制,在能源互联共享的背景下,可将原

收稿日期:2016-05-29;修回日期:2017-02-19

基金项目:国家电网公司适应全球能源互联网的网源协调规划理论与方法研究项目(XTB17201500232)

Project supported by State Grid Research Project on the Network Source Coordinated Planning Theory and Method Adapt to the Global Energy Internet(XTB17201500232)

有单一的供能结构转化为多层立体式的供能结构。风能的多层等效转化关系可描述如下。

1.1.1 风能对电能的等效转化

风电的出力是风能经过风力发电机后将部分动能转化为机械能,再转化为电能而产生的。风电机组电功率的输出量主要取决于风力机轮毂高度处的风速。风电机组输出的有功功率与风速之间有如下函数关系^[19-20]:

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} < v < v_r \\ P_{wt,0} & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k_1 = P_{wt,0} / (v_r^3 - v_{ci}^3)$; $k_2 = -k_1 v_{ci}^3$; $P_{wt,0}$ 为风机的额定功率; v_{ci} 和 v_{co} 分别为风机切入和切出风速; v_r 和 v 分别为额定风速和实际风速。

可见,风电输出的有功功率在0和额定输出功率之间波动,如此大范围的波动势必会与负荷之间表现出较大的日间差异和不确定性。

1.1.2 电能对冷能的等效转化

电能对冷能的等效转化,是一个从“高品质”能量向“低品质”能量形式的转变过程,性能系数相对较高。根据制冷机运行工况的不同,耗电功率与制冷输出功率之间的关联关系及其性能系数通过拟合可表示为:

$$\begin{cases} P_{ce}(t) = P_{ec}(t) C_{oprc}(t) \\ C_{oprc}(t) = A_1 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{[P_{ce}(t) - A_3]/w}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $P_{ce}(t)$ 为电制冷输出功率; $P_{ec}(t)$ 为电制冷耗电功率; $C_{oprc}(t)$ 为电制冷性能系数; $\overline{P_{ce}(t)}$ 为电制冷输出功率的折合功率; $A_i (i=1, 2, 3)$ 和 w 为性能参数对应的拟合参数。

1.1.3 电能对热能的等效转化

电能对热能的等效转化,能量依旧是从“高品质”能量形式向“低品质”能量形式转化,但其性能系数相对稳定,其转化模型可表示为^[21]:

$$P_{he}(t) = P_{eh}(t) C_{opeh} \quad (3)$$

其中, $P_{eh}(t)$ 和 $P_{he}(t)$ 分别为电锅炉耗电功率和电制热输出功率; C_{opeh} 为电锅炉电热转化性能系数。

1.2 能源时序转移

风能的转化和利用易受外界环境的影响,故其能量的输出存在较大的被动性,不能随负荷需求的变动而做出相应的动作,使得能量的输出与负荷需求之间在时间上表现出极大的逆负荷特性。借助多元化储能系统,以负荷能量需求形式为目标,将风能以不同的能量形式在时序上形成转移,以提高系统内部对风能的利用率和消纳能力。在风能的转移过程中,系统将会通过“蓄”和“释”2个阶段对风能实现

二次利用。其中,以电能作为风能转移形式的蓄放过程,用数学表达式可描述为^[22-23]:

$$\begin{cases} E_{bt}(t+1) = E_{bt}(t)(1 - \delta_e) + P_{bt,in}(t)\eta_{in}\Delta t \\ E_{bt}(t+1) = E_{bt}(t)(1 - \delta_e) - P_{bt,out}(t)\Delta t/\eta_{out} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $E_{bt}(t+1)$ 为蓄电系统在 $t+1$ 时刻的蓄电量; $E_{bt}(t)$ 为蓄电系统在 t 时刻的蓄电量; δ_e 为蓄电系统的自放电率; $P_{bt,in}(t)$ 和 $P_{bt,out}(t)$ 分别为蓄电系统的充、放电运行功率; η_{in} 和 η_{out} 分别为蓄电系统的充、放电效率; Δt 为单位时间间隔。

以冷能作为风能转移形式的蓄放过程可以描述为^[24-26]:

$$\begin{cases} C_{cs}(t+1) = C_{cs}(t)(1 - \sigma_{cs})^{\Delta t} + P_{cs,in}(t)\mu_{cs}\Delta t \\ C_{cs}(t+1) = C_{cs}(t)(1 - \sigma_{cs})^{\Delta t} - P_{cs,out}(t)\Delta t/\mu_{cs} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $C_{cs}(t+1)$ 为蓄冷系统在 $t+1$ 时刻的蓄冷量; $C_{cs}(t)$ 为蓄冷系统在 t 时刻的蓄冷量; σ_{cs} 为蓄冷系统能损失系数; $P_{cs,in}(t)$ 和 $P_{cs,out}(t)$ 分别为蓄冷系统蓄冷功率和释冷运行功率; μ_{cs} 为冷能传递系数。

以热能作为风能转移形式的蓄放过程可以描述为^[21,27]:

$$\begin{cases} H_{hs}(t+1) = H_{hs}(t)(1 - \sigma_{hs}) + P_{hs,in}(t)\mu_{hs}\Delta t \\ H_{hs}(t+1) = H_{hs}(t)(1 - \sigma_{hs}) - P_{hs,out}(t)\Delta t/\mu_{hs} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $H_{hs}(t+1)$ 为蓄热系统在 $t+1$ 时刻的蓄热量; $H_{hs}(t)$ 为蓄热系统在 t 时刻的蓄热量; σ_{hs} 为蓄热系统能损失系数; $P_{hs,in}(t)$ 和 $P_{hs,out}(t)$ 分别为蓄热系统蓄热功率和释热运行功率; μ_{hs} 为蓄热系统对热能的蓄放效率。

2 风电消纳效益优化模型

2.1 目标函数

不同“能质”能量之间的等效转化作用,能够将风能以不同的能量形式用于满足多种类型的负荷需求,实现不同负荷之间对风能的共享利用,以提高系统对风能的综合利用率。为了兼顾系统运行的经济性,需要借助优化的手段,根据负荷侧多元化的需求,对风能的转化利用形式进行重新整合优化,以保证系统运行的综合收益。

a. 风电利用率最大。

风电利用率是指在多种转化关系下系统对风电的调度量与其最大可用电能量的比值。风电利用率最大的目标函数如下:

$$\begin{cases} f_1 = \max(\eta) \\ \eta = \frac{\sum_{t=1}^T P_{wt}(t)\Delta t}{\sum_{t=1}^T E_{wt}(t)} \end{cases} \quad (7)$$

其中, T 为调度周期时间间隔数; $P_{wt}(t)$ 为在 t 时刻风电有功调度的输出功率; $E_{wt}(t)$ 为风机在 t 时刻的最大供能量。

b. 运行效益最大化。

风机效益主要来自于供电与制冷收益。其运行效益最大化的目标函数如下:

$$f_2 = \max(C_{\text{power}} + C_{\text{cooling}} + C_{\text{heating}} - C_{\text{operation}}) \quad (8)$$

$$C_{\text{power}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{power}}(t) c_{\text{power}}(t) \Delta t$$

$$C_{\text{cooling}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{ce}}(t) c_{\text{cooling}}(t) \Delta t$$

$$C_{\text{heating}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{he}}(t) c_{\text{heating}}(t) \Delta t$$

$$C_{\text{operation}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{wt}}(t) c_{\text{wt}} \Delta t + \sum_{t=1}^T P_{\text{ce}}(t) c_{\text{rc}} \Delta t + \sum_{t=1}^T P_{\text{he}}(t) c_{\text{eb}} \Delta t + \sum_{i=1}^N |P_i(t)| c_i \Delta t$$

其中, C_{power} 、 C_{cooling} 、 C_{heating} 、 $C_{\text{operation}}$ 分别为一个运行周期内供电、制冷、制热收益及系统的综合运行成本; $P_{\text{power}}(t)$ 为用于供电的输出功率; $c_{\text{power}}(t)$ 、 $c_{\text{cooling}}(t)$ 和 $c_{\text{heating}}(t)$ 分别为供电、制冷以及制热的单位供能价格; $P_i(t)$ 为第 i 类蓄能系统的运行功率; N 为蓄能系统的总类数; c_{wt} 、 c_{rc} 、 c_{eb} 、 c_i 分别为风机、制冷机、电锅炉及相应蓄能系统的运行成本。

2.2 约束条件

a. 风机出力约束条件。

$$0 \leq P_{\text{wt}}(t) \leq P_{\text{wt,forecast}}(t) \quad (9)$$

其中, $P_{\text{wt,forecast}}(t)$ 为风机在 t 时刻输出的最大有功功率。

b. 制冷机约束。

$$0 \leq P_{\text{ce}}(t) \leq P_{\text{ce}}^{\max} \quad (10)$$

其中, P_{ce}^{\max} 为制冷机的最大制冷输出功率。

c. 电锅炉约束。

$$0 \leq P_{\text{he}}(t) \leq P_{\text{he}}^{\max} \quad (11)$$

其中, P_{he}^{\max} 为电锅炉的最大制热输出功率。

d. 蓄能约束。

$$\begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \\ \sum_{t=1}^T P_i(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, P_i^{\min} 和 P_i^{\max} 分别为第 i 类蓄能系统运行功率的下限和上限。

e. 供能约束。

$$\begin{cases} P_{\text{power}}(t) + P_{\text{bt,out}}(t) \leq P_{\text{Pl}}(t) \\ P_{\text{ce}}(t) + P_{\text{cs,out}}(t) \leq P_{\text{CL}}(t) \\ P_{\text{he}}(t) + P_{\text{hs,out}}(t) \leq P_{\text{HL}}(t) \\ E_{\text{power}}(t) + E_{\text{cooling}}(t) + E_{\text{heating}}(t) = E_{\text{wt}}(t) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $P_{\text{Pl}}(t)$ 、 $P_{\text{CL}}(t)$ 和 $P_{\text{HL}}(t)$ 分别为电能、冷能和热能负荷在 t 时刻的需求量; $E_{\text{power}}(t)$ 、 $E_{\text{cooling}}(t)$ 和 $E_{\text{heating}}(t)$ 分别为供电、制冷和制热在 t 时刻的能耗量; $E_{\text{wt}}(t)$ 为风能可在 t 时刻的可利用总能量。

2.3 求解过程

求解风能的最佳转化利用方式采用的是量子行

为的粒子群优化算法对不同优先等级的目标函数进行逐层优化求解。在计算过程中采用惩罚函数的方式来得到系统的最优适应值,即目标函数个体极值 $p_{\text{Best}}(m)$ (其中 m 为不同的目标函数) 的选取是通过评估 $p_{\text{Best}}(m, n)$ (其中 n 为不同的粒子体) 相对于 $g_{\text{Best}}(m, n)$ 的离散度来获取。主要求解过程如下:

a. 输入原始数据;

b. 根据风速确定各时段风机输出的最大有功功率及多种负荷的需求;

c. 初始化粒子群;

d. 根据目标函数 f_1 、 f_2 以及约束条件, 计算各粒子适应度值并计算各粒子的个体极值;

e. 计算各目标函数的最优解 g_{best1} 、 g_{best2} ;

f. 计算 2 个全局矢量均值 g_{Best} 和距离 $d_{g_{\text{Best}}}$, 其中 $g_{\text{Best}} = \text{average}(g_{\text{Best1}}, g_{\text{Best2}})$, $d_{g_{\text{Best}}} = \text{distance}(g_{\text{Best1}}, g_{\text{Best2}})$;

g. 计算各粒子的 p_{Best1} 和 p_{Best2} 之间的距离 $d_{p_{\text{Best}}}$, 并更新所需个体的极值 p_{Best} ;

h. 更新粒子的位置与速度;

i. 重复步骤 c—h, 直至满足终止条件;

j. 输出结果。

3 算例验证

3.1 算例描述

本文以不同季节下风能等效转化利用为例进行说明, 系统的结构如图 1 所示。其中, 风电机组的装机容量为 200 kW; 电制冷的最大制冷功率为 300 kW; 电锅炉的最大制热功率为 200 kW; 蓄电池的最大充放电功率为 100 kW; 蓄冷系统的最大运行功率为 100 kW; 蓄热系统的最大运行功率为 50 kW。

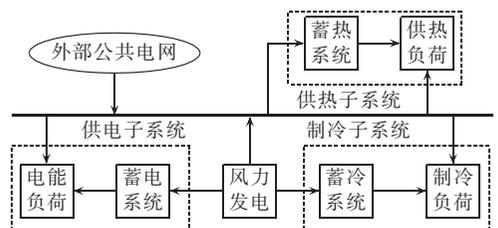


图 1 系统结构

Fig.1 System structure

系统运行以 1 d 为周期, 单位运行时间 $\Delta t = 1$ h, 区域内电能售电价格采用分时电价, 峰时段、平时段、谷时段电价分别为 0.76、0.51、0.26 元/(kW·h)。电价时段划分为: 峰时段为 08:00—13:00、15:00—17:00、19:00—23:00; 平时段为 07:00—08:00、13:00—15:00、17:00—19:00; 谷时段为 00:00—07:00、23:00—24:00。

将不同季节下风能的单一利用供能模式作为参考, 与本文所提出的能量等效转化作用下的混合供能模式做对比。不同季节典型日下风电预测出力及负荷需求如图 2 所示。

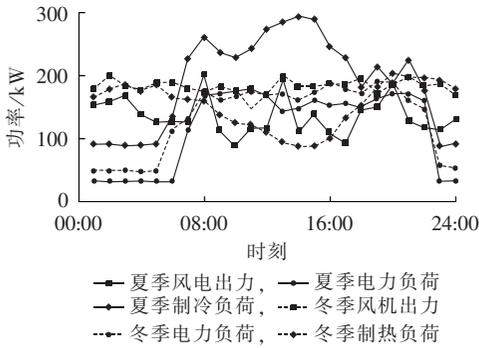


图 2 不同季节典型日风机预测出力及负荷需求
Fig.2 Forecasted wind-turbine output and load demand of typical day for different seasons

3.2 对比分析

3.2.1 夏季

夏季能耗系统的负荷需求及其风能的可利用量如图 2 所示,负荷需求主要包括电力负荷需求和制冷负荷需求,且制冷负荷需求远高于电力负荷需求。当系统对风能的利用采用单一供电模式时,在整个运行周期内,仅有 50% 时间段能够满足负荷侧的电力需求,此时系统对风能的利用率为 70.05%;借助蓄电系统将风能以电能的形式在时序上形成转移利用后,风能可满足全时段内的电力负荷需求,此时系统对风能的利用率可达到 86.47%。其蓄电系统的运行工况如图 3 所示。

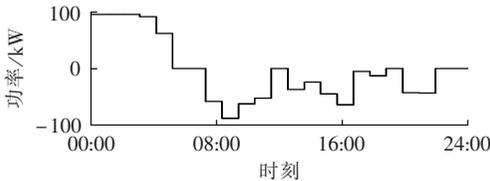


图 3 单一供电模式下蓄电系统运行工况
Fig.3 Operating condition of power storage system in single power-supply mode

而系统在单一的制冷模式下对风能进行利用时,能源的利用是由“高品质”的电能向“低品质”的冷能进行等效转化,此过程中能量间的转化性能系数较高。因此无需蓄冷系统的介入,风能可满足全时段内的制冷负荷的需求,但系统对风能的利用率仅为 44.95%,远低于其在单一供电模式下对风能的利用率。夏季系统在单一供能模式下,对风能利用情况的对比如图 4 所示。

由于风能对电力负荷的能量供给采用的是分时电价按量计费的方式,为了方便计算,对制冷负荷的能量供给同样采用按量计费的方式,其单位供给量计价为 0.2 元/(kW·h)。因此,当系统对风能的利用方式采用基于能量等效转化模型下的混合供能模式时,在供能价格机制的引导下,08:00—23:00 时间段内,系统将优先满足电力负荷需求,以取得更高的能售效益,其他过剩的风能用于对制冷负荷的能量供

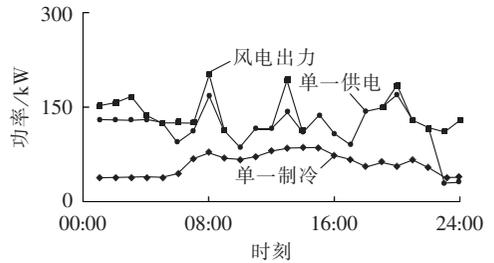


图 4 夏季典型日单一供能模式下风能利用对比
Fig.4 Comparison of wind-energy utilization between single energy-supply modes for typical day of summer

给;而在 23:00 至次日 08:00 时间段内,系统则将优先满足系统内部的制冷负荷需求,其他过剩的风能用于对电力负荷能量的供给。各时段过剩的风能同样是在供能价格引导机制的作用下,分别以电能和冷能的形式在时序上形成转移和再利用。这在提高能源利用率的同时,使系统取得更高的能售效益,其各蓄能系统的运行工况如图 5 所示。

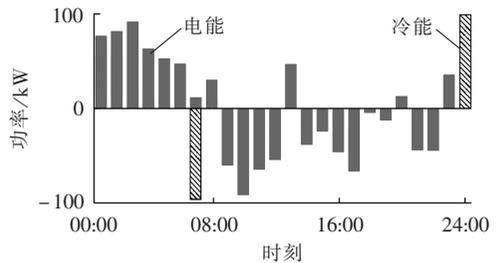


图 5 夏季典型日蓄能系统运行工况
Fig.5 Operating condition of energy storage system for typical day of summer

在整个运行调度周期内,风能以电能形式的转移量占风能总供给量的 17.23%,而以冷能形式的转移量占风能总供给量的 1.92%。夏季系统在混合供能模式下,风能的供能特性如图 6 所示。其中,风能对制冷负荷的供给量占总供给量的 13.58%。由能源转移模型(式(4)、(5))可知,系统在风能的转移过程中存在能量损失,故系统对风能的综合利用率为 98.36% 而不是 100%。

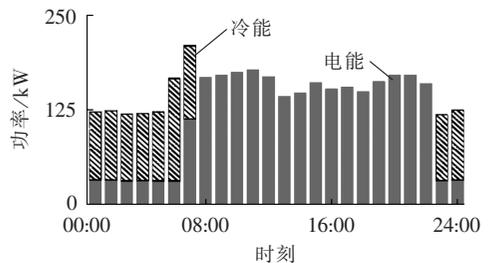


图 6 夏季典型日风能供能特性
Fig.6 Energy-supply characteristic of wind-energy for typical day of summer

夏季系统在混合供能模式下,风能在时序上的转移量、综合利用率及所取得的收益如表 1 所示。结合图 4 可知,系统在采用单一制冷模式时,风能能够

表 1 夏季不同供能模式下风能利用对比

Table 1 Comparison of wind-energy utilization among different energy-supply modes for summer

供能模式	能源转移量/ (kW·h)	利用率/%	收益/元
单一供电	532.61	86.47	1493.16
单一制冷	0	44.95	613.25
混合供能	660.15	98.36	1618.80

满足全时段内的制冷负荷的需求,但系统对风能的利用率极低,从而造成较大比例的弃风,系统供能收益也相对较低。而在单一供电模式下,借助电能时在时序上的转移作用,能明显提高系统对风能的利用率和能售效益,但对风能的利用率依旧不足。相比单一的供能模式,基于能量等效转化利用模型的混合供能模式能够进一步地提高系统对风能的利用和消纳能力,并取得更高的能售效益。

3.2.2 冬季

结合图 2 可知,冬季风能的可利用量高于夏季,同时热能负荷主要集中于夜间,并出现 2 个高峰时段。系统对风能的利用在采用单一制热的运行模式时,能量虽然依旧是从“高品质”形式向“低品质”形式转化,但其转化性能系数远低于其对冷能的转化性能系数。因此,系统采用单一供电模式时,在整个运行周期内,其只能满足 75% 时间段的制热负荷的需求;借助蓄热系统的补偿作用,对风能以热能的形式在时序上形成转移后,系统可满足全时段内的制热负荷需求,对风能的利用率可达到 84.68%。其蓄热系统的运行工况如图 7 所示。

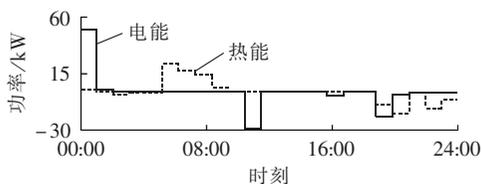


图 7 单一供电模式下蓄能系统运行工况

Fig.7 Operating condition of energy storage system in single power-supply mode

而系统采用单一供电模式时,在整个调度运行周期内,系统能够满足 83% 时间段内的电力负荷需求,对风能的利用率为 71.32%。借助蓄电系统的补偿作用,对风能以电能的形式在时序上形成转移利用后,可满足全时段的电力负荷需求,但系统对风能的利用率也只能提高到 74.62%,蓄电系统的运行工况如图 7 所示。冬季系统在单一供能模式下,对风能的利用情况的对比如图 8 所示。

为使能量统一和计算方便,冬季对热能的供给依旧采用按量计费的方式,单位能耗计价为 0.25 元/(kW·h)。在供能价格机制的引导下,系统对风能的利用消纳在采用混合供能模式时,在 23:00 至次

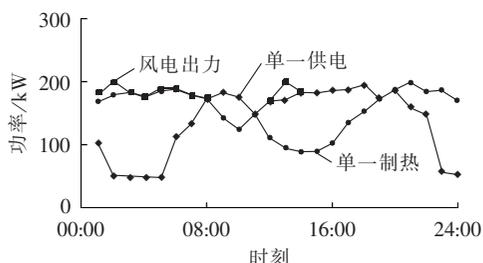


图 8 冬季典型日单一供能模式下风能利用对比

Fig.8 Comparison of wind-energy utilization between single energy-supply modes for typical day of winter

日 07:00 时间段内,其对热能的供给取得更大的收益。因此,该时段内系统将优先满足制热负荷的需求,过剩的风能将用于电力负荷需求的能量供给;而剩余时间段内则与之相反,系统优先满足电力负荷的需求,过剩的风能用于对制热负荷进行能量的供给。过剩的风能在供能价格机制的引导作用下,在不同时间段内将分别以电能和热能的形式在时序上形成转移再利用,以提高系统对风能的综合利用率及能售效益。其蓄能系统的运行工况如图 9 所示。

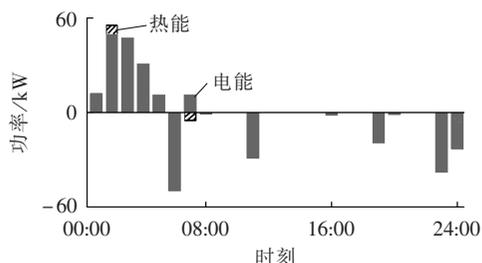


图 9 冬季典型日蓄能系统运行工况

Fig.9 Operating condition of energy storage system for typical day of winter

在整个运行调度周期内,风能以电能形式的转移量占风能总供给量的 3.75%,而以热能形式的转移量仅占风能总供给量的 1.12%。冬季系统在混合供能模式下,风能的供能特性如图 10 所示。其中,风能对制热负荷的供给量占总供给量的 27.89%。结合图 5 可知,冬季系统在整个运行时间段内,风能在时序上的转移利用量相对夏季较低,能损也相对较低,系统对风能的综合利用率可达到 99.61%。

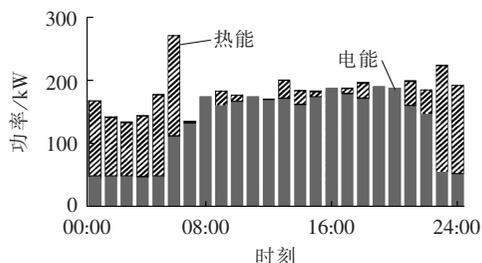


图 10 冬季典型日风能转化利用方式

Fig.10 Conversion and utilization of wind energy for typical day of winter

冬季系统在混合供能模式下,风能在时序上的

转移量、综合利用率及其所取得的收益如表2所示。

表2 冬季不同供能模式下风能利用对比

Table 2 Comparison of wind-energy utilization among different energy-supply modes for winter

供能模式	能源转移量/ (kW·h)	利用率/%	收益/元
单一供电	52.02	74.62	1614.15
单一制热	57.95	84.68	509.99
混合供能	169.90	99.61	1784.45

结合图8可知,当系统采用单一供电或制热模式时,在整个运行调度周期内,并不能满足全时段内的负荷需求,都需要借助蓄能系统对风能在时序上形成转移以满足负荷需求的供给,但其对风能的转移量较低,导致蓄能系统的利用率不高。而相对于单一供电模式,单一制热模式下,虽然其对风能的利用率较高,但由于制热价格机制的原因,其收益远低于单一供电模式下系统所取得的收益。基于能量等效转化利用模型的混合供能模式下,系统能够在保证对风能利用率最大化的同时,取得更高的能售收益。

4 结论

本文通过深入分析不同“能质”能量之间的等效转化关系,构建风能逐级等效转化利用模型,以实现风能的利用率最大化,并提高系统对风能的消纳能力;综合考虑负荷需求特性及供能价格因素对风能转化利用方式的影响,以提高能源利用率和综合效益为目标对风能的转化方式进行优化,提出风能的最佳转化利用方式;与传统风能的单一利用方式进行对比,结果表明,基于能量之间的等效转化模型在不同季节下,系统根据负荷需求的不同,可灵活转变风能的利用方式,可有效提高能耗系统对风能的有效利用率和消纳能力,并提升系统的供能效益。其为大规模风能的开发和利用提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 谭忠富,吴恩琦,鞠立伟,等. 区域间风电投资效益对比分析模型[J]. 电网技术,2013,37(3):713-719.
- [2] TAN Zhongfu,WU Enqi,JU Liwei,et al. A model for contrastive analysis on risk of income from investment in different wind power resource regions[J]. Power System Technology,2013,37(3):713-719.
- [3] 贾文昭,康重庆,李丹,等. 基于日前风功率预测的风电消纳能力评估方法[J]. 电网技术,2012,36(8):69-75.
- [4] JIA Wenzhao,KANG Chongqing,LI Dan,et al. Evaluation on capability of wind power accommodation based on its day-ahead forecasting[J]. Power System Technology,2012,36(8):69-75.
- [5] SHE X,HUANG A Q,WANG F,et al. Wind energy system with integrated functions of active power transfer,reactive power compensation and voltage conversion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(10):4512-4524.
- [6] 侯佑华,房大中,齐军,等. 大规模风电入网的有功功率波动特性分析及发电计划仿真[J]. 电网技术,2010,34(5):60-66.
- [7] HOU Youhua,FANG Dazhong,QI Jun,et al. Analysis on active power fluctuation characteristics of large-scale grid-connected wind farm and generation scheduling simulation under different capacity power injected from wind farms into power grid[J]. Power System Technology,2010,34(5):60-66.
- [8] 白建华,辛颂旭,贾德香,等. 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J]. 电网与清洁能源,2010,26(1):14-17.
- [9] BAI Jianhua,XIN Songxu,JIA Dexiang,et al. Study of major questions of wind power digestion and transmission in China[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(1):14-17.
- [10] 汪宁渤,王建东,何世恩. 酒泉风电跨区域消纳模式及其外送方案[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):82-89.
- [11] WANG Ningbo,WANG Jiandong,HE Shien. Cross-border accommodation method and transmission scheme of Jiuquan wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(22):82-89.
- [12] 艾欣,刘晓. 基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2011,38(3):17-22.
- [13] AI Xin,LIU Xiao. Chance constrained model for wind power usage based on demand response[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition),2011,38(3):17-22.
- [14] 于大洋,黄海丽,雷鸣,等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):24-29.
- [15] YU Dayang,HUANG Haili,LEI Ming,et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in Chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):24-29.
- [16] 严干贵,刘嘉,崔杨,等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):45-52.
- [17] YAN Gangui,LIU Jia,CUI Yang,et al. Economic evaluation on improving wind power scheduling scale by using energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):45-52.
- [18] 郑乐,胡伟,陆秋瑜,等. 储能系统用于提高风能接入规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2533-2543.
- [19] ZHEN Le,HU Wei,LU Qiuyu,et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2533-2543.
- [20] 颜伟,吕冰,赵霞,等. 含高渗透率风电配网中电池储能系统和开关的协调规划[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):6-11.
- [21] YAN Wei,LÜ Bing,ZHAO Xia,et al. Coordinated allocation of BESS and controllable switches in distribution system with high penetration of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):6-11.
- [22] 施琳,罗毅,施念,等. 高渗透率风电-储能鼓励电网控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):78-85.
- [23] SHI Lin,LUO Yi,SHI Nian,et al. A control strategy of isolated grid with high penetration of wind and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16):78-85.
- [24] 赵祖熠,解大,楚皓翔,等. 基于储能系统的双馈风电机组网扭振抑制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):33-39.
- [25] ZHAO Zuyi,XIE Da,CHU Haoxiang,et al. Generator-grid torsional vibration suppression for DFIG system with ESS[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):33-39.
- [26] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统及其自动化,2014,38(15):1-11.

- DONG Zhaoyang,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. From smart grid to energy internet;basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(15):1-11.
- [15] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.
- YU Shenhong,SUN Ying,NIU Xiaona,et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,30(5):104-108.
- [16] 杨方,白翠粉,张义斌. 能源互联网的价值与实现构架研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3495-3502.
- YANG Fang,BAI Cuifen,ZHANG Yibin. Research on the value and implementation framework of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3495-3502.
- [17] 朱明善. 能量系统的火用分析[M]. 北京:清华大学出版社,1988:28-35.
- [18] 杜李超. 火用分析及其应用[J]. 中国电力,1986(8):71-74.
- DU Lichao. Exergy analysis method and application[J]. Electric Power,1986(8):71-74.
- [19] BELFKIRA R,NICHITA C,REGHEM P,et al. Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system[C]//Power Electronics and Motion Control Conference,2008. Poznan,Poland: IEEE,2008:1834-1839.
- [20] DESHMUKH M K,DESHMUKH S S. Modeling of hybrid renewable energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2008,12(1):235-249.
- [21] 吕泉,陈天佑,王海霞,等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):79-85.
- LÜ Quan,CHEN Tianyou,WANG Haixia,et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):79-85.
- [22] 丁明,王波,赵波,等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术,2013,37(3):575-581.
- DING Ming,WANG Bo,ZHAO Bo,et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology,2013,37(3):575-581.
- [23] CHEN S X,GOOI H B,WANG M Q. Sizing of energy storage for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):142-151.
- [24] YOKOYAMA R,ITO K. Effect of inlet air cooling by ice storage on unit sizing of a gas turbine cogeneration plant[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2004,126(2):351-357.
- [25] 陆伟,张士杰,肖云汉. 有蓄冷器的联储系统优化运行[J]. 中国电机工程学报,2007,27(8):49-53.
- LU Wei,ZHANG Shijie,XIAO Yunhan. The optimal operational planning of a cogeneration system with storage[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(8):49-53.
- [26] 肖小清,阚伟民,杨允,等. 有蓄能的联储系统超结构优化配置[J]. 中国电机工程学报,2012,32(32):8-14.
- XIAO Xiaoqing,KAN Weimin,YANG Yun,et al. Superstructure-based optimal planning of cogeneration systems with storage[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(32):8-14.
- [27] 李正茂,张峰,梁军,等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3569-3576.
- LI Zhengmao,ZHANG Feng,LIANG Jun,et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3569-3576.

作者简介:



闫占新

闫占新(1984—),男,山西山阴人,博士研究生,研究方向为可再生清洁能源利用及系统运行优化(E-mail:yanzhanxin@163.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化及智能电网;

许立雄(1982—),男,福建莆田人,讲师,博士,研究方向为电力系统稳定与控制。

Investigation on equivalent conversion-utilization models and corresponding benefits for wind energy

YAN Zhanxin^{1,2}, LIU Junyong¹, XU Lixiong¹, WU Yang^{1,3}, ZHANG Li², LI Yong²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Skill Training Center, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China;

3. Informatization Office, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: The equivalent conversion relationships among different “energy qualities” during the conversion and utilization of wind energy, together with the corresponding benefits, are investigated based on the energy internet. A multi-objective optimization model of wind-energy conversion and utilization is established, which takes the maximum wind-energy utilization rate and the maximum system operational benefit as its objectives and considers comprehensively the influences of load demand and energy-supply price on the wind-energy utilization mode. The quantum-behaved particle swarm optimization algorithm is adopted to solve the model and analytic comparison is carried out among different energy-supply modes. Case study shows that the proposed optimization model improves the comprehensive wind-energy utilization rate, wind-power accommodation capability and energy-sale benefit of energy consumption system. The effectiveness and feasibility of the proposed models and operating modes are verified, providing a new concept for the large-scale development and utilization of wind energy.

Key words: energy internet; wind power; equivalent conversion; energy-sale benefit; wind power accommodation