

高载能负荷企业参与受阻风电消纳决策方法

朱丹丹, 赵静波, 李强, 周前, 刘建坤

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:高载能负荷企业具备就地消纳受阻风电的良好条件,在其参与电网调节过程中,需向电网上报调节能力或意愿调节曲线,但目前尚缺乏供企业使用的决策方法。文中考虑企业参与电网调节后成本、销售额的变化,首先对高载能负荷企业参与调节的经济收益进行分析;其次,基于企业经济收益及社会责任,建立以高载能负荷企业收益及消纳受阻风电电量最大为目标的决策模型;然后,应用 NSGA-II 算法对模型求取 Pareto 最优解,利用附加约束及满意度评价选取最优折衷解,并提出高载能负荷企业参与受阻风电消纳的决策方法;最后,通过算例分析验证了所提决策方法可为高载能负荷企业主动参与受阻风电消纳提供技术支持。

关键词:风电消纳;高载能负荷企业;收益分析;荷源协调;企业决策

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0121-07

0 引言

目前,我国大规模风电消纳形势严峻。解决我国大规模风电消纳难的问题,不仅需要充分利用发电侧资源,还需要负荷侧资源的积极参与^[1-2]。在大规模风电基地附近通常建设有高载能负荷企业,负荷高度集中、容量大、控制灵活^[3-4]。利用高载能负荷的调节能力进行受阻风电就地消纳是缓解我国风电消纳问题的可行之路。

目前,已有文献对高载能负荷控制方法进行的研究。文献[5—6]将高载能负荷调节能力应用于平滑风电功率波动、孤网频率控制及降损控制中;文献[7]研究了市场机制下高载能负荷企业参与需求侧响应的优化用电方法。但文献[5—7]均不针对风电消纳问题。文献[8]以风电消纳电量最大及系统运行成本最小进行了荷源协调;文献[9]兼顾风电消纳与系统运行以及调节成本建立了荷源优化模型;文献[10]在建立高载能负荷精细调度模型的基础上讨论了新能源与高载能负荷协调调度模式;文献[11]以最大化消纳风电、最小化风电实时出力与计划出力偏差为目标,提出荷源互动二级协调控制策略;文献[12]建立了以最大化消纳受阻风电为目标的长时间尺度荷源优化控制模型。文献[8—12]从电网或社会整体的角度,提供了将高载能负荷作为电网统一调控对象参与电网调节进行风电消纳的技术方法,但未考虑高载能负荷参与调节的经济收益。文献[13—14]提出了博弈优化模型,在

以高载能负荷消纳受阻风电的同时使得参与主体收益最大,虽然考虑了高载能负荷企业的收益,但依然从系统整体角度作决策。总体而言,已有研究多从社会整体或电网角度出发建立高载能负荷被动式参与风电消纳的控制模型,缺乏从企业角度出发参与风电消纳的决策方法。而负荷主动参与电网调节过程中,需要负荷向电网上报调节能力或意愿调节曲线,因此有必要研究企业参与受阻风电消纳的决策方法。

文中首先研究了高载能负荷参与受阻风电消纳的过程;其次,在高载能负荷参与受阻风电消纳的成本收益分析基础上,建立以高载能负荷企业收益及消纳受阻风电电量最大为目标的多目标决策模型;然后,应用 NSGA-II 算法对模型进行求解,提出高载能负荷企业参与受阻风电消纳的决策方法。最后通过算例分析验证所提决策方法的有效性,并分析不同受阻风电的优惠电价对高载能负荷企业决策的影响。

1 高载能负荷调节特性

高载能负荷包括电解铝工业负荷、碳化硅工业负荷等,高载能负荷的调节特性如图1所示。

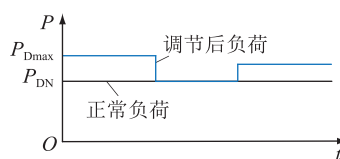


图1 高载能负荷调节特性示意

Fig.1 Schematic diagram of energy-intensive load regulation characteristic

图1中, P_{Dmax} , P_{DN} 分别为负荷最大技术功率

收稿日期:2020-10-05;修回日期:2020-11-13

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“电力弹性负荷快速响应及柔性调节关键技术研究及应用”

及额定功率,此类负荷一次调节后需稳定运行一段时间,方可进行下一次调节,调节曲线表现为矩形波。

将受阻风电功率曲线与高载能负荷调节能力进行匹配^[12],存在受阻风电的时段内,高载能负荷上调用电功率,实现受阻风电消纳。

2 高载能负荷企业参与受阻风电消纳的收益分析

高载能负荷 t 时段调节功率为 $P_{t,D,up}$,若忽略损耗,控制期内消纳的受阻风电电量 $E_{Wind,C}$ 为:

$$E_{Wind,C} = \sum_{t=1}^T P_{t,D,up} \Delta t \quad (1)$$

式中: Δt 为每一时段的时长,文中取 1 h; T 为控制期时段数,文中取 24。

高载能负荷企业参与消纳受阻风电过程中,虽然消纳的受阻风电可享受优惠电价,但存在各种类型的成本变化,参与电网调节消纳受阻风电的收益是高载能负荷企业关心的问题^[15]。以下对高载能负荷参与受阻风电消纳过程中的收益进行分析。

2.1 成本分析

高载能负荷企业主要通过消耗电能、原料进行产品生产,其中还涉及人工及生产设备。高载能负荷消纳受阻风电过程中的成本主要有:电价成本、原料成本、生产设备损耗成本及人工成本。假设生产设备损耗成本由两部分组成,一部分与高载能负荷上调电量即消纳的受阻风电电量成正比,另一部分与功率变动的次数成正比,则控制期内高载能负荷参与消纳受阻风电的成本 C 为:

$$C = (\beta_{Wind,C} + \beta_{Ml} + \beta_{Wr})E_{Wind,C} + \pi N_f + \varepsilon(E_{Wind,C})c_{Lr} \quad (2)$$

式中: N_f 为高载能负荷功率变动的次数; π 为单次功率变动相应设备损耗成本; $\beta_{Wind,C}$ 为受阻风电电价; β_{Ml} 为单位能耗的原料成本系数; β_{Wr} 为单位调节电量的设备损耗成本系数; c_{Lr} 为控制期内参与受阻风电消纳增加的人工成本; $\varepsilon(E_{Wind,C})$ 如式(3)所示。

$$\varepsilon(E_{Wind,C}) = \begin{cases} 0 & E_{Wind,C} = 0 \\ 1 & E_{Wind,C} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 销售额分析

高载能负荷参与受阻风电消纳过程中,功率增加时产量增加。

$$\Delta A = \left(\sum_{t=1}^T P_{t,D,up} \Delta t \right) / \theta \quad (4)$$

式中: ΔA 为高载能负荷参与受阻风电消纳过程中

产量的增加量; θ 为高载能负荷的能耗系数。

售价方面,企业的产量将影响其产品的市场价,建立基于线性回归法的弹性售价模型^[16]。

$$\eta = \frac{A_0 \Delta R}{R_0 \Delta A} \quad (5)$$

$$R = R_0 + \Delta R \quad (6)$$

式中: η 为高载能企业产品的价格弹性系数; A_0 为产量初始值; R_0 , ΔR 分别为价格初始值和变化值; R 为变化后价格。

假设生产的产品均可售出,则参与受阻风电消纳带来的销售额增量为:

$$S = \frac{(1 + \eta)R_0}{\theta} \sum_{t=1}^T P_{t,D,up} \Delta t + \frac{\eta R_0}{\theta^2 A_0} \left(\sum_{t=1}^T P_{t,D,up} \Delta t \right)^2 \quad (7)$$

2.3 收益分析

高载能负荷企业参与受阻风电消纳时的收益 B 为:

$$B = S - C \quad (8)$$

结合式(1)、式(2)、式(8),有:

$$B = \frac{(1 + \eta)R_0 E_{Wind,C}}{\theta} + \frac{\eta R_0 E_{Wind,C}^2}{\theta^2 A_0} - \pi N_f - (\beta_{Wind,C} + \beta_{Ml} + \beta_{Wr})E_{Wind,C} - \varepsilon(E_{Wind,C})c_{Lr} \quad (9)$$

3 高载能负荷企业参与受阻风电消纳决策方法

3.1 决策模型

考虑高载能负荷企业的经济收益及企业社会责任,根据受阻风电功率、高载能负荷调节技术参数及经济参数,以 B 及 $E_{Wind,C}$ 最大为目标,建立高载能负荷企业参与受阻风电消纳的多目标决策模型。

目标函数 1 为:

$$\max f_1 = B \quad (10)$$

目标函数 2 为:

$$\max f_2 = E_{Wind,C} \quad (11)$$

约束条件为:

$$P_{t,D,0} + P_{t,D,up} = P_{t,D} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{t,D,up} \leq P_{t,Ws} \quad (13)$$

$$P_{D,min} \leq P_{t,D} \leq P_{D,max} \quad (14)$$

$$\sum_{t=\tau}^{\tau+T_{min}-1} x_t \leq 1 \quad \forall \tau \in [1, T_N - T_{min} + 1] \quad (15)$$

$$x_t (P_{D,min} - P_{D,max}) \leq P_{t,D} - P_{t-1,D} \leq x_t M \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^T x_t \leq N_{max} \quad (17)$$

式中: $P_{t,D,0}$ 为高载能负荷初始用电功率; $P_{t,D}$ 为高载能负荷用电功率; $P_{t,Ws}$ 为受阻风电功率; $P_{D,min}$,

$P_{D,\max}$ 分别为高载能负荷技术允许最小负荷和最大负荷; x_t 为 0-1 变量, 值为 0 表示该负荷在 t 时刻功率不允许变化, 即维持前一时刻功率, 值为 1 表示该负荷在 t 时刻功率允许变化; T_{\min} 为高载能负荷功率稳定最小时长; T_N 为控制周期的总时间窗口长度; N_{\max} 为控制周期内高载能负荷允许的最大调节次数; M 为约束线性化处理引入的参数, 通常取一个足够大的数, 此处可以取 $P_{D,\max} - P_{D,\min}$ 或者更大数值。

约束条件中, 式(13)表示高载能负荷上调功率控制在受阻风电功率范围内; 式(14)为高载能负荷的功率上、下限约束; 式(15)为高载能负荷的功率稳定时长约束; 式(16)表示当功率变化允许变量为 0 时, 当前时刻功率与前一时刻功率相等; 式(17)限制了控制周期内高载能负荷功率变化的总次数。

3.2 模型求解

文献[17]所提多目标模型求解算法 NSGA-II, 具有参数设置简单、搜索速度快的特点。文中引入该方法对所建模型进行求解, 得到一组 Pareto 最优解集^[18], 即任何一个目标函数值在不使其他目标函数劣化的条件下已不可能进一步优化的一组解, 求解步骤参见文献[19—21]。其中, 将式(10)和式(11)2个目标函数作为适应度函数。

在实际工作中, 对于应用 NSGA-II 算法求解模型得到 Pareto 最优解集不唯一的情况, 决策者必须从一组 Pareto 最优解集中选择出最优折衷解。文中通过附加约束及满意度评价进行最优折衷解选取。

(1) 附加约束筛选。以附加约束 $B \geq 0$, 对 Pareto 最优解集中的解进行筛选, 保证 B 不为负。记满足附加约束的 Pareto 最优解的个数为 L 。

(2) 满意度评价。文中采用模糊隶属度函数表示每个 Pareto 解的各目标函数对应的满意度, 通过比较满意度找出最优折衷解。定义模糊隶属度函数为^[8]:

$$\mu_{i,k} = \begin{cases} 1 & f_{i,k} \geq f_{i,\max} \\ \frac{f_{i,k} - f_{i,\min}}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} & f_{i,\min} < f_{i,k} < f_{i,\max} \\ 0 & f_{i,k} \leq f_{i,\min} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $f_{i,k}$ 为第 k 个 Pareto 最优解的第 i 个目标函数值; $f_{i,\max}$, $f_{i,\min}$ 分别为第 i 个目标函数的上、下限值; 文中 $f_1 = B$, $f_2 = E_{\text{Wind,C}}$ 。

当 $\mu_{i,k} = 0$ 时, 表示对第 i 个目标函数值完全不满意; 当 $\mu_{i,k} = 1$ 时, 表示对第 i 个目标函数值完全满意。对于以附加约束筛选出的 L 个 Pareto 最优解, 根据式(19)求解其标准化满意度值, 其中满意度值

最大的解即为最优折衷解。

$$\mu_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_{i,k} \quad (19)$$

式中: μ_k 为第 k 个 Pareto 最优解的标准化满意度值; m 为待优化目标函数的个数。

3.3 决策方法

基于上述研究, 提出高载能负荷企业参与受阻风电消纳决策方法, 如图 2 所示。在考虑受阻风电功率、高载能负荷调节技术及经济参数的基础上, 以 B 及 $E_{\text{Wind,C}}$ 最大为目标, 建立高载能负荷企业参与受阻风电消纳多目标决策模型, 应用 NSGA-II 算法求解得到 Pareto 最优解集后, 分析企业收益与消纳受阻风电电量之间的关系, 并采用附加约束和满意度评价选取最优折衷解, 最终生成高载能负荷企业决策。

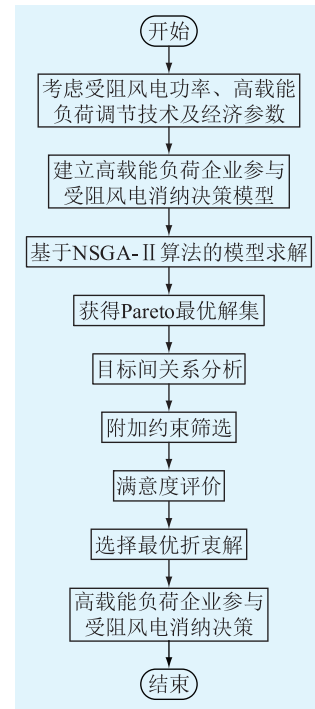


图 2 高载能负荷企业参与受阻风电消纳决策方法

Fig.2 Decision method of energy-intensive enterprise in curtailed wind power consumption

4 算例分析

4.1 算例设置

以某高载能负荷企业参与受阻风电消纳为例, 对文中所提决策方法进行仿真验证。受阻风电功率 $P_{t,Ws}$ 如图 3 所示, 高载能负荷调节参数如表 1 所示。

4.2 仿真计算

应用 NSGA-II 算法对文中所建模型进行求解, 得到一组范围宽广的 Pareto 最优解集。Pareto 最优

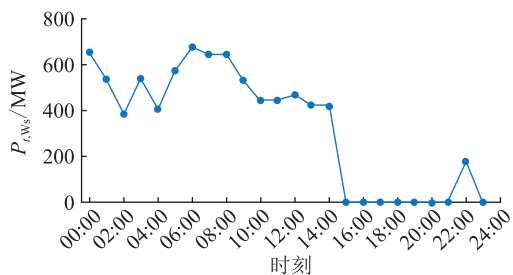


图3 受阻风电功率

Fig.3 Curtailed wind power

表1 参数设置

Table 1 Parameter setting

类型	参数	数值
技术	$P_{t,D,0}$ /MW	3 000
	$P_{D,max}$ /MW	3 450
	T_{min} /h	4
	N_{max}	4
经济	$\beta_{Wind,C}$ / [元·(MW·h) ⁻¹]	348
	β_{Ml} / [元·(MW·h) ⁻¹]	650
	β_{Wr} / [元·(MW·h) ⁻¹]	180
	c_{Lr} /元	1 200
	η	-0.029
	R_0 / (元·t ⁻¹)	16 200
	θ / [(MW·h)·t ⁻¹]	13.3
	N_f / (元·次 ⁻¹)	300

解集在目标函数空间上的分布如图4所示。

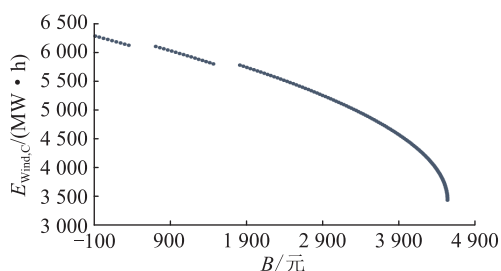


图4 Pareto 最优解集分布

Fig.4 Distribution of Pareto optimal solution set

分别以 B 、 $E_{Wind,C}$ 最大为目标搜索极端解,通过附加约束 $B \geq 0$ 筛选 B 不为负的 Pareto 最优解,根据式(18)、式(19)构建模糊隶属度函数,从 Pareto 最优解集中选出最优折衷解,见表2。

表2 Pareto 最优解集中的极端解和折衷解

Table 2 Extreme solutions and best compromise solutions in Pareto optimal set

优化目标	B /元	$E_{Wind,C}$ / (MW·h)
$E_{Wind,C}$ 最大	-100	6 258
B 最大	4 532	3 440
最优折衷解	3 202	5 060

由表2可知,仅以受阻风电消纳为目标,不利于

高载能负荷企业的利益;仅以 B 为目标, $E_{Wind,C}$ 将降低。文中通过隶属度函数挖掘 Pareto 最优解集信息,求解得到一组兼顾 $E_{Wind,C}$ 和 B 的折衷解,供企业决策使用。此外,多目标优化模型还可通过加权求和方法将多个目标转化为单目标进行求解。将受阻风电消纳情况用企业参与调节产生的加权效益 φ 表示。

$$\varphi = \omega_1 B + \omega_2 E_{Wind,C} \quad (20)$$

$$B_{Wind,C} = \gamma_{Wind,C} E_{Wind,C} \quad (21)$$

式中: $B_{Wind,C}$ 为受阻风电消纳效益; $\gamma_{Wind,C}$ 为受阻风电消纳系数,文中取 348 元/(MW·h); ω_1 、 ω_2 分别为 B 、 $E_{Wind,C}$ 2 个目标对应的权重系数,且两者之和为 1,当权重系数取不同值时,采用加权求和得到最优解,如表3所示。

表3 不同权重系数下单目标优化模型的最优解

Table 3 Optimal solutions of single-objective optimization model with different weights

ω_1	ω_2	B /元	$E_{Wind,C}$ / (MW·h)
0.9	0.1	4 526	3 552
0.5	0.5	4 040	4 426
0.1	0.9	-85	6 250

由表3可知,采用加权求和法将多目标模型转化为单目标进行求解时,不同权重系数的设置对求解结果影响非常大,而权重系数通常人为给定,具有较大的随意性。通过多目标优化方法求得的最优折衷解则可避免决策过程中的主观臆断性。

此外,相较于单目标优化方法只给出某种权重系数设置下相应的决策方案,多目标优化方法首先给出 Pareto 最优解集在目标函数空间上的分布,直观、清晰地反映决策者关心的高载能负荷企业收益和受阻风电消纳情况之间的关系,为企业决策人员提供更丰富的信息。

4.3 不同决策方法下的调节方案对比分析

方案一:文中所提高载能负荷企业参与受阻风电消纳决策方案。

方案二:以 $E_{Wind,C}$ 最大为目标制定调节方案。

不同方案下, $E_{Wind,C}$ 、 B 的对比如表4所示。由于方案二从系统消纳风电角度出发,未考虑高载能负荷企业的收益,相应高载能负荷企业的收益为负,显然该调节方案在实际中不具备可操作性。而方案一更好地兼顾了高载能负荷企业收益与社会责任,可为高载能负荷企业参与电网调节进行受阻风电消纳提供决策支持。需要指出的是,受阻风电电价为 348 元/(MW·h)时,虽然当天该企业消纳受阻风电的收益仅为 3 202 元,但以该天数据作为平

均水平估计该企业参与消纳受阻风电的年收益约为116.87万元,收益较为可观。

表4 不同方案对比

Table 4 Comparison of different control schemes

方案	$E_{\text{Wind,C}}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	$B/\text{元}$
一	5 060	3 202
二	6 258	-100

4.4 受阻风电电价对高载能负荷企业决策的影响分析

高载能负荷企业在参与受阻风电消纳过程中,主要通过获得受阻风电优惠电价降低生产成本,从而获得收益,因此受阻风电的优惠电价设置对于调节高载能负荷企业行为具有重要引导作用。以下分析不同受阻风电电价 β_{WA} 对高载能负荷企业决策的影响。

(1) β_{WA} 为358元/(MW·h)。相应 Pareto 最优解集在目标函数空间上的分布如图5所示。由图5可知,由于此时 β_{WA} 优惠力度不足,电价成本的降低无法覆盖其他方面成本的增加, B 为负。高载能负荷企业倾向于不参与调节,相应控制结果见表5。

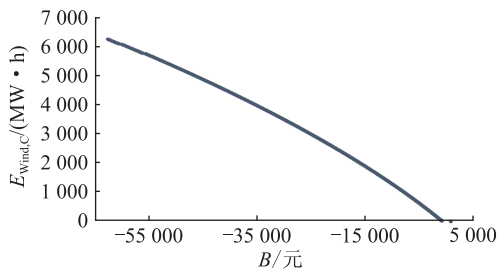


图5 Pareto 最优解集分布 (β_{WA} 为358元/(MW·h))

Fig.5 Distribution of Pareto optimal solution set (β_{WA} is 358 Yuan/(MW·h))

表5 不同 β_{WA} 下的折衷解

Table 5 Compromise outcome under different β_{WA}

$\beta_{\text{WA}} /$ [元·(MW·h) ⁻¹]	Pareto 最优 解集是否唯一	$B/\text{元}$	$E_{\text{Wind,C}} /$ (MW·h)
358	不唯一	0	0
300	唯一	300 280	6 258

(2) β_{WA} 为300元/(MW·h)。相应 Pareto 最优解集唯一,如表5所示。由表5可知,此时高载能负荷企业电价成本极大降低,企业收益目标与消纳风电目标完全一致,企业参与风电消纳的积极性被有效调动。当天该企业消纳受阻风电的收益为30 0280元,以当天数据作为平均水平估计该企业参与消纳受阻风电的年收益约为10 960.22万元,收益相当可观。

综合不同 β_{WA} 下的结果可知,文中所提决策方

法在不同情况下,均可以作出兼顾企业收益与受阻风电消纳的决策。且在合适的 β_{WA} 下,高载能负荷企业参与受阻风电消纳的收益可观。

5 结语

文中提出了高载能负荷企业参与受阻风电消纳的决策方法,兼顾高载能负荷企业的经济收益及企业社会责任,为高载能负荷企业参与消纳受阻风电过程中的调节能力或意愿调节曲线上报提供自主决策支撑。得出的结论为:

(1) 高载能负荷企业参与受阻风电消纳的决策方法,通过最优折衷解的选取,兼顾了高载能负荷企业经济收益及受阻风电消纳目标,可在不同受阻风电优惠电价下作出合理决策;同时可通过 Pareto 最优解集分布向企业决策者展示企业经济收益与受阻风电消纳量之间的量化关系,供决策者参考。

(2) 受阻风电电价较高时,高载能负荷参与系统调节的收益为负,不利于调动负荷侧参与调节的积极性;受阻风电电价较低时,高载能负荷企业参与受阻风电消纳可获得可观收益,负荷调节积极性被有效调动。合理设置受阻风电电价有利于实现负荷侧调节能力最大化利用。

参考文献:

- [1] 孟冰冰,郭丰慧,胡林献,等. 考虑天然气-电力耦合的多能源系统风电消纳分析[J]. 电力工程技术,2019,38(6):2-8. MENG Bingbing, GUO Fenghui, HU Linxian, et al. Wind abandonment analysis of multi-energy systems considering gas-electricity coupling [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6):2-8.
- [2] 曾惠娟. 负荷侧应参与到系统平衡中来——访中国工程院院士薛禹胜[J]. 国家电网,2017(168):56-57. ZENG Huijuan. The load side should be involved in the balance of the system—an interview with academician of the Chinese academy of engineering XUE Yusheng [J]. State Grid, 2017 (168):56-57.
- [3] TODD D, CAUFIELD M, HELMS B, et al. Providing reliability services through demand response: a preliminary evaluation of the demand response capabilities of Alcoa Inc [R]. Washington, DC: Federal Energy Regulatory Commission, 2009.
- [4] 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,2015,33(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, 33(4):491-496.
- [5] LIAO Siyang, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Control of energy-intensive load for power smoothing in wind power plants [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6142-6154.
- [6] GE Simin, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Research on power

- loss reduction method based on continuous regulating features of energy-intensive industrial loads[C]//IEEE International Conference on Power System Technology. POWERCON,2016.
- [7] VOROPAIN, STYCYNSKI Z, KOMARNICKI P, et al. Energy-intensive manufacturing enterprises as active players in demand side management system[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. ISGT-Europe,2016.
- [8] 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 Wenying, 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.
- [9] 文晶,刘文颖,谢昶,等. 计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J]. 电工技术学报,2015(8):247-256.
- WEN Jing, LIU Wenying, XIE Chang, et al. Source-Load coordination optimal model considering wind power consumptive benefits based on bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015(8):247-256.
- [10] 晋宏杨,孙宏斌,郭庆来,等. 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,2016,40(1):139-145.
- JIN Hongyang, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Dispatch strategy based on energy internet customer-centered concept for energy intensive enterprise and renewable generation to improve renewable integration[J]. Power System Technology,2016,40(1):139-145.
- [11] 郭鹏,文晶,朱丹丹,等. 基于源-荷互动的大规模风电消纳协调控制策略[J]. 电工技术学报,2017(3):1-9.
- GUO Peng, WEN Jing, ZHU Dandan, et al. Research on coordination control strategy for large-scale wind power consumption based on source-load interactive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017(3):1-9.
- [12] 朱丹丹,刘文颖,蔡万通,等. 风电消纳目标下基于电量与功率滚动优化的荷源控制方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(5):80-85,119.
- ZHU Dandan, LIU Wenying, CAI Wantong, et al. Load-source coordinated dispatch method for promoting wind power accommodation based on rolling optimization of energy and power[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(5):80-85,119.
- [13] 李亚龙,刘文颖,谢昶,等. 高载能负荷消纳受阻风电的供应链博弈决策方法探究[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):135-143.
- LI Yalong, LIU Wenying, XIE Chang, et al. Supply chains game based decision-making method of congested wind power consumption for high-energy load[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7):135-143.
- [14] 刘文颖,李亚龙,郭鹏,等. 基于纳什均衡的高载能负荷就地消纳受阻风电双边博弈决策[J]. 可再生能源,2016,34(11):1617-1625.
- LIU Wenying, LI Yalong, GUO Peng, et al. A bilateral game decision-making model of using high-energy load to consume congested wind power based on the nash equilibrium[J]. Renewable Energy Resources,2016,34(11):1617-1625.
- [15] 陈润泽,孙宏斌,晋宏杨. 高载能企业参与电力系统调度的模式与效益分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):168-175.
- CHEN Runze, Sun Hongbin, JIN Hongyang. Pattern and benefit analysis of energy-intensive enterprises participating in power system dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):168-175.
- [16] 丁伟,袁家海,胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. 电力系统自动化,2005(20):14-18.
- DING Wei, YUAN Jiahai, HU Zhaoguang. Price decision model considering users reaction and satisfaction index[J]. Automation of Electric Power Systems,2005(20):14-18.
- [17] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
- [18] 唐云岚,赵青松,高妍方,等. Pareto 最优概念的多目标进化算法综述[J]. 计算机科学,2008(10):25-27,57.
- TANG Yunlan, ZHAO Qingsong, GAO Yanfang, et al. Overview on the Pareto optimal-based multiobjective evolutionary algorithm[J]. Computer Science,2008(10):25-27,57.
- [19] SHAYGAN M, ALIMOHAMMADI A, MANSOURIAN A, et al. Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using NSGA-II[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2014.
- [20] KANNAN S, BASKAR S, MCCALLEY J D, et al. Application of NSGA-II algorithm to generation expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(1):454-461.
- [21] 苏玉刚,陈苓芷,唐春森,等. 基于 NSGA-II 算法的 ECPT 系统 PID 参数寻优及输出稳压控制[J]. 电工技术学报,2016,31(19):106-114.
- SU Yugang, CHEN Lingzhi, TANG Chunsen, et al. Evolutionary multi-objective optimization PID parameters for output voltage regulation in ECPT system based on NSGA-II[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(19):106-114.

作者简介:



朱丹丹

朱丹丹(1991),女,博士,工程师,从事电力系统分析与控制相关工作(E-mail: zdd_life@126.com);

赵静波(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析与控制相关工作;

李强(1981),男,博士,高级工程师,从事电力系统分析与控制相关工作。

Decision making method for energy-intensive enterprise in consuming curtailed wind power

ZHU Dandan, ZHAO Jingbo, LI Qiang, ZHOU Qian, LIU Jiankun

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Energy-intensive enterprises have great potential in consuming curtailed wind power. While there are few decision making methods to support the regulation capacity or intended regulation curve report of enterprises. Thus, on the basis of benefit analysis of energy-intensive enterprise taking part of the regulation, a decision making model which is intended to maximize both the benefit of involved energy-intensive enterprise and the consumption of curtailed wind power is proposed. Besides, the decision making method for the energy-intensive enterprise is put forward and NSGA-II is employed for calculation in the model. A proper compromised solution is picked with application of additional constraints and satisfaction index. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through case analysis.

Keywords: wind power consumption; energy-intensive enterprise; benefit analysis; load-source coordination; decision making of enterprises

(编辑 吴楠)

(上接第 106 页)

An online pre-decision method for frequency and voltage emergency regulation considering running condition of equipment

ZHANG Jianxin¹, WU Feng², HUANG Lei¹, BAO Yanhong², XU Wei², XU Guanghu¹, YANG Junjun²

(1. Power Dispatch Control Center of China Southern Power Grid Co.Ltd., Guangzhou 510530, China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co.Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: There are risks of frequency and voltage security and stability due to the on-going replacement of conventional synchronous power plants by intermittent generation and DC transmission. Prompt and effective emergency regulation after faults can prevent blackouts. An online pre-decision method for emergency regulation of frequency and voltage security and stability considering running condition of equipment is proposed. Considering the influence of system protection, unit primary frequency regulation, automatic generation control and automatic voltage control on node injection after failure, the quasi-steady state mode after failure is automatically identified, and the frequency and voltage pre-decision-making model with the goal of minimizing comprehensive control cost is constructed. A check plan is formed through the enumeration and combination of measures, and the check plan screening is realized based on the rapid estimation of the measure adjustment amount. The iterative search of the pre-decision strategy taking into account the frequency and voltage safety issues is realized, and the specific equipment and control quantities are given. After the actual fault occurs, emergency control is carried out by matching the fault and the post-fault problem to reduce the risk of grid accidents. The effectiveness of the method is verified by an actual grid calculation example.

Keywords: safety and stability of frequency and voltage; system protection; grid failure plans; emergency regulation; online pre-decision

(编辑 方晶)