

文章编号:1005-0523(2019)01-0133-10

基于极限场景的风火蓄联合运行经济调度研究

孙惠娟, 余 愿, 蒋少川

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:风电-火电-抽水蓄能多源联合运行在提高风电渗透率的同时,还能实现各能源优势互补。但风电的随机性和波动性不可避免地使联合系统的经济调度无法达到最优。针对这一问题,基于风速概率分布函数得到风电出力的不确定分布概率,采用置信区间法生成极限场景风电功率,并构建了基于极限场景的风火蓄联合运行经济调度模型,以实现系统综合运行成本最小化目标。此外,还进一步分析了极限场景的可靠性约束,并结合算例应用分析了联合优化运行机组运行成本及可靠性在不同置信度下的结果。算例表明,采用的置信区间法使系统运行在较好经济性与可靠性的状态下,有效解决风电的低渗透率问题。

关键词:经济调度;极限场景;置信区间;风电;抽水蓄能

中图分类号:TM732

文献标志码:A

风电作为间歇式能源的代表,具有取之不尽、用之不竭的特点,正好满足了人们对改变现有能源模式的要求,大规模风电的并网发电是未来发展的趋势。风速的大小决定着风电场的实时出力,但风速的不可控性导致目前风电场的实际出力存在着强烈的随机性和波动性,无法保证整个电网的运行安全性和稳定性^[1]。为此,在风电场本身的设计规划与运行优化外,其与抽水蓄能机组的配合也越来越受到相关研究学者的关注。

目前国内外学者对于多源联合机组优化调度问题进行过大量研究。文献[2-3]基于预测风电进行风蓄联合优化,将预测风电中的部分功率作为系统功率失衡时的备用,进而降低系统失稳的概率。文献[4-6]将风蓄联合运行的成本和风电的消纳率作为目标函数并建立相关机组组合模型。但他们仅考虑了抽蓄机组与风电场的配合,未将常规火电机组纳入统一调度,无法明确抽蓄机组是否对常规火电机组日常调度的经济性有改善。文献[7-8]通过概率场景法模拟风电不同概率下生成的随机场景来表示风电的不确定性,求解时若要保证计算精度,需要场景数量多且计算复杂。文献[9]将小规模并网风电在不同时段内的出力表示为一个不确定集,并优化一个三目标 min-max-min 模型,当风电场达到一定的规模后,系统实时功率平衡无法通过该方法进行快速调整,且系统所需相应的备用容量也难以估算。文献[10]采用置信区间法,通过计算风电的置信度来体现风电出力的不确定性,仅需要将处于误差场景边界上的极限场景进行优化,实现提高多源联合系统的运行经济性和稳定性的目的。

综上,为了将风电在时间与空间上重新按需求优化分配,引入储能系统能大大提高联合系统运行的经济性与稳定性。为了促使风电能够获得更高的消纳率与渗透率,基于风速概率分布函数得到风电出力的不确定分布概率,采用置信区间法生成极限场景风电功率,并构建了基于极限场景的风火蓄联合运行经济调度模型,达到风火蓄多源联合系统的最优调度经济性的目的。采用一种新的系统调节能力约束,并进一步分

收稿日期:2018-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51567007);江西省自然科学基金项目(20171BAB206042);江西省教育厅科技项目(GJJ160525);江西省“百人远航工程”项目(2017080)

作者简介:孙惠娟(1982—),女,副教授,硕士,研究方向为智能电网优化调度。

析极限场景的可靠性约束,结合算例应用分析了联合优化运行机组运行成本及可靠性在不同置信度下的结果。算例表明,本文方法能够有效解决因风电出力不确定性而导致的低消纳率问题,具有较好的经济性和可靠性。

1 基于置信区间的风电极限场景

1.1 风电功率概率模型

风电输出功率与风速的典型转换关系可由如下的分段函数来计算

$$w = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ w_r \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ w_r, & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_{in}, v_{out} 和 v_r 分别为切入风机叶片前后的风速与额定风速; w_r 为风机的额定功率。

研究表明双参数威布尔分布能很好地拟合风速的分布特征^[1],风速概率密度函数 $f_{v_t}(v_t)$ 由风速累积分布函数求导得出

$$f_{v_t}(v_t) = \frac{k_t}{c_t} \left(\frac{v_t}{c_t} \right)^{k_t-1} \exp \left(- \left(\frac{v_t}{c_t} \right)^{k_t} \right) \quad (2)$$

式中: k_t 和 c_t 为第 t 时段威布尔分布模型的形状参数和尺度参数。

由概率论并结合(1)(2)式,可以得出第 t 时段的风电随机变量 w_t 在风速介于 $[v_{in}, v_r]$ 时的概率密度函数为

$$f_{w_t}(w_t) = \frac{k_t h v_{in}}{w_r c_t} \left[\left(1 + h v_{in} \frac{v_{in}}{c_t} \right)^{k_t-1} \exp \left\{ - \left[\left(1 + \frac{h w_t}{w_r} \right) \frac{v_{in}}{c_t} \right]^{k_t} \right\} \right] \quad (3)$$

式中: $h = (v_r/v_{in}) - 1$ 。

进一步可得到风电 w_t 的累积概率分布函数

$$F_{w_t}(w_t) = P(W_t \leq w_t) = \begin{cases} 0, & (w_t < 0) \\ 1 - \exp \left\{ - \left[\left(1 + \frac{h w_t}{w_r} \right) \frac{v_{in}}{c_t} \right]^{k_t} \right\} + \exp \left[- \left(\frac{v_{out}}{c_t} \right)^{k_t} \right], & (0 \leq w_t < w_r) \\ 1, & (w_t \leq w_r) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 基于置信区间的极限场景风电功率

风电的预测误差在一定的程度上满足概率分布,需要以风电预测的高精确度为基础,风电在一定置信度下的置信区间可以用来表示风电出力处于某一范围内。在1.1节中风电功率概率模型求解的情况下,利用风电出力的实际波动区间,建立不同置信度下的置信区间调度模型,由置信度与运行稳定性的关系得到风电实际出力波动范围内的最优置信区间,在该置信区间内,风电出力具有最佳的经济性与系统稳定性。

风电场在一定区间范围内波动时,任意出力可被认为是一个标准的调度场景即预测场景。当风电的所有实际出力值都不在预测场景范围内时,此时的场景被定义为误差场景。当风电的实际出力恰好落在上述两个场景的边界上时,此时的风电即处于极限场景下。风电机组的出力调节约束在任意时刻下的可调出力均应处于两个极限场景之间即波动范围内。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \min(p_{i,\max} - p_{i,t}, \gamma_{i,u}^{15}) &\geq p_w - p_{w,\min} \\ \sum_{i=1}^n \min(p_{i,t} - p_{i,\min}, \gamma_{i,d}^{15}) &\geq p_{w,\max} - p_w \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $p_{w,\max}, p_{w,\min}$ 分别表示风电的极限场景; $p_{i,\max}, p_{i,\min}$ 表示机组 i 的最大,最小出力; $\gamma_{i,u}, \gamma_{i,d}$ 表示机组 i 在15 min间隔内的爬坡率与滑坡率。

由置信度和极限场景的关系可得到

$$\Pr(p_{w,\min} \leq p_{i,t} \leq p_{w,\max}) = \beta_{i,t} \quad (6)$$

式中: $\Pr(\cdot)$ 表示风电出力满足机组稳定运行的概率; $\beta_{i,t}$ 表示风电置信概率。

随着风电置信区间的不断增大,联合系统的功率上下调节会出现能力无法满足风电出力始终处于两个极限场景内。此时,需要通过一定的弃风来稳定系统的功率平衡,弃风量为

$$p_{dw,t} = \max \left\{ 0, p_{w,\max} - p_{w,t} - \sum_{i=1}^J \min(p_{i,t} - p_{i,\min}, \gamma_{i,t}^{15}) \right\} \quad (7)$$

2 基于极限场景的联合优化调度模型

根据风电功率概率分布,可以获得各个置信度下的不同极限场景。不同的置信度对应不同的运行成本,当置信度越大时,风电预测出力区间越大,维持系统稳定运行的成本就越高;反之,需要维持系统稳定运行的成本越低。

2.1 基于成本效益的目标函数

基于极限场景的风火蓄多源机组联合优化运行需要同时满足以下两个要求:

- 1) 该多源机组联合优化运行需保证当风电出力在极限场景间跨越时,系统有能力保持安全稳定运行;
- 2) 该多源机组联合优化运行能在风电出力处于预测场景的情况下取得最优的发电成本。

由于本文中的风电将保持高消纳率与渗透率,且均处于不同置信度下的极限场景内,故对于风电成本不纳入目标函数。成本效益目标函数如下

$$\min F = F_C + F_P + \lambda \sum_{t=1}^T \beta \cdot p_{dw,t} \quad (8)$$

式中: F_C 为火电机组的发电成本; F_P 为抽蓄机组的启停成本; λ 为惩罚系数; β 为弃风损失系数。

其中,常规机组的发电成本可表示为^[12]

$$F_C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (f_{i,t} + f_{U_{i,t}} + f_{D_{i,t}}) \quad (9)$$

式中: N 为火电机组总数; T 表示时段数; $f_{i,t}$, $f_{U_{i,t}}$, $f_{D_{i,t}}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段的运行成本、开机成本和停机成本,其中运行成本为^[13]

$$f_{i,t} = [a_i + b_i p_{i,t} + c_i (p_{i,t})^2] C_f \quad (10)$$

式中: a_i , b_i , c_i 为常规机组相关耗量系数; $p_{i,t}$ 为常规机组相应时段计划出力; C_f 为单位燃料成本。

由于抽水蓄能机组运行是从电网吸收电能后将电能返回电网的过程,其运行成本主要体现在不同工作状态间转换时产生的成本,即发电时发电机的启动成本和抽水时电动机的启动成本两部分^[14]

$$F_{ps} = \sum_{j=1}^H \sum_{i=1}^T [C_{j,t}^g I_{j,t}^g (1 - I_{j,t-1}^g) + C_{j,t}^p I_{j,t}^p (1 - I_{j,t-1}^p)] \quad (11)$$

式中: H 代表抽水蓄能机组总数; T 表示时段数; $C_{j,t}^g$ 为抽蓄机组 j 在 t 时段发电工况下成本系数; $C_{j,t}^p$ 为抽蓄机组 j 在 t 时段抽水工况下的成本系数; $I_{j,t}^g$, $I_{j,t}^p$ 表示第 t 时段抽蓄机组分别处于不同工况下的状态变量。

2.2 约束条件

与不考虑风火蓄多源联合运行的机组相比,本文在功率平衡约束中增加了抽蓄机组两种工作状态,分别为发电状态和抽水蓄能状态。

- 1) 功率平衡约束。对每个调度时段,系统总有功率应与风火蓄输出之和保持供需平衡,即

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t} + \sum_{i=1}^W p_{w,t} + \sum_{i=1}^H (p_{j,t}^g - p_{j,t}^p) = L_t \quad (12)$$

式中: $p_{j,t}^g$ 为抽水蓄能机组发电功率; $p_{j,t}^p$ 为抽蓄机组抽水功率。

2) 抽蓄机组相关约束。抽蓄机组状态约束

$$\sum_{j=1}^H (I_{j,t}^{\text{gen},0} - I_{j,t}^{\text{pump},0}) = 0 \quad (13)$$

上下水库库容约束

$$V_t^{\text{up}} = V_{t-1}^{\text{up}} + \sum_{j=1}^H (Q_{j,t}^{\text{p}} - Q_{j,t}^{\text{g}}) \quad (14)$$

$$V_t^{\text{d},0} = V_{t-1}^{\text{d},0} - \sum_{j=1}^H (Q_{j,t}^{\text{p}} - Q_{j,t}^{\text{g}}) \quad (15)$$

式中: V_t^{up} 为上水库容量; V_t^{d} 为下水库容量; $Q_{j,t}^{\text{g}}$ 为发电流量; $Q_{j,t}^{\text{p}}$ 为抽水流量。

抽蓄机组发电和抽水功率约束

$$\left. \begin{aligned} P_{j,t}^{\text{g}} &= 9.81 \eta_j^{\text{g}} Q_{j,t}^{\text{g}} (Z_{j,t-1}^{\text{up}} - Z_{j,t-1}^{\text{d}}), P_{j,t}^{\text{p}} = P_{j,t}^{\text{p}} I_{j,t}^{\text{p}} \\ P_{j,\min}^{\text{g}} I_{j,t}^{\text{g}} &\leq P_{j,t}^{\text{g}} \leq P_{j,\max}^{\text{g}} I_{j,t}^{\text{g}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: $Z_{j,t-1}^{\text{u}}$ 为上水库水头; $Z_{j,t-1}^{\text{d}}$ 为下水库水头。

3) 常规机组相关约束。发电机组出力约束

$$p_{i,t}^{\min} \leq p_{i,t}^0 \leq p_{i,t}^{\max} \quad (17)$$

式中: $p_{i,t}^{\max}$, $p_{i,t}^{\min}$ 分别为常规火电机组 i 在 t 时段的出力上限与下限。

旋转备用容量约束

$$\sum_{i \in N} p_{i,t}^{\max} + \sum_{k \in W} p_{wk,t} + \sum_{j \in H} p_{j,\max}^{\text{g}} \geq p_{D,t} (1+L) \quad (18)$$

式中: $p_{D,t}$ 为系统 t 时刻的负荷预测值; L 为针对系统负荷的机组旋转备用率。

最小开停机时间限制

$$\left. \begin{aligned} [T_{i,t-1}^{\text{R}} - T_{i,\min}^{\text{R}}] [\tau_{i,t-1} - \tau_{i,t}] &\geq 0 \\ [T_{i,t-1}^{\text{S}} - T_{i,\min}^{\text{S}}] [\tau_{i,t} - \tau_{i,t-1}] &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: $\tau_{i,t}$ 表示火电机组 i 在 t 时刻的运行状态, 停机状态为 0 开机状态为 1; $T_{i,t-1}^{\text{R}}$ 表示火电机组 i 在 $t-1$ 时间段内的连续开机运行时间; $T_{i,t-1}^{\text{S}}$ 表示火电机组 i 在 $t-1$ 时间段内的连续停机时间; $T_{i,\min}^{\text{R}}$, $T_{i,\min}^{\text{S}}$ 分别表示火电机组 i 最小开机运行时间和最小停机时间。

爬坡率限制

$$\left. \begin{aligned} -R_i^{\text{D}} \leq (p_{i,t} - p_{i,t-1}) \leq R_i^{\text{U}}, p_{i,t-1} &\geq p_{i,\min} \\ R_i^{\text{lim},0} \leq |p_{i,t} - p_{i,t-1}| \leq R_i^{\text{lim},1}, 0 &\leq p_{i,t-1} \leq p_{i,\min} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: R_i^{D} , R_i^{U} 分别表示火电机组 i 最大爬坡率和最小滑坡率; $R_i^{\text{lim},0}$, $R_i^{\text{lim},1}$ 分别表示火电机组 i 在开机和停机过程中的上、下爬坡限制。

2.3 极限场景可靠性约束分析

在风电火电联合运行时, 机组能在连续的时段内具有足够的爬坡率和滑坡率以保持系统运行的安全稳定, 文献[15]采用式(21)来保持常规机组调节时系统能处于稳定状态

$$\left. \begin{aligned} P_{i,t}^2 - P_{i,t-1}^1 &\leq R_i (1 + u_{i,t-1} - u_{i,t}) + p_{i,\min} (2 - u_{i,t-1} - u_{i,t}) \\ P_{i,t-1}^2 - P_{i,t}^1 &\leq D_i (1 + u_{i,t-1} - u_{i,t}) + p_{i,\min} (2 - u_{i,t-1} - u_{i,t}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $P_{i,t}^1$, $P_{i,t}^2$ 分别为风电出力场景 1 和场景 2 时常规机组出力; $p_{i,\min}$ 为常规机组出力下限。该式保证了常规机组在风电出力的置信区间内能实时平衡风电波动所带来的影响。

当多源联合系统中加入抽水蓄能电站时,抽蓄电站能根据系统需求自动转换运行方式,从系统吸收能量或向系统释放能量。由预测负荷可以获得相应等效负荷:

$$dL_t = L_t - \sum_{i=1}^T P_{w,t} \quad (22)$$

式中: L_t 表示预测负荷; $P_{w,t}$ 为极限场景下风电场出力; dL_t 为极限场景下相应的等效负荷。

火电与抽水蓄能联合运行时,在连续时段内,当最大可调节出力无法满足下一时段内由风电出力和预测负荷所组成的等效负荷需求时,说明此时可靠性低,需要另外增加可行约束来避免这一情况。图 1 所示为系统调节能力示意图,当系统的最大调节能力在任意相邻时段内可在极限场景 1 与极限场景 2 之间穿越,则说明此时的系统具有较高可靠性。

由于抽水蓄能机组的发电或抽蓄工况与其上下水库的水头关系密切,在实际的机组组合运行中,抽水蓄能电站可能因为库容的原因导致其在下一时段进行发电或抽蓄作业无法进行,此时抽蓄电站唯一运行状态是停机,相当于退出联合系统。对图 1 的系统上、下调节能力进行分析,得到极限场景下系统综合调节能力约束式(23)与式(24)

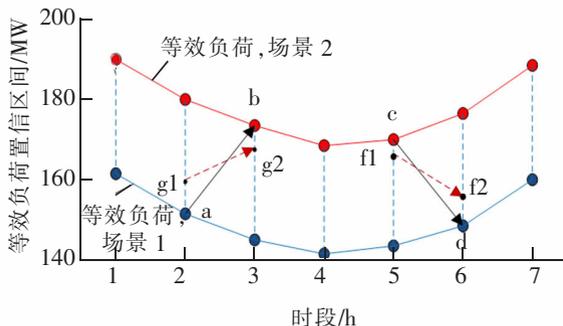


图 1 系统上、下调节能力示意图
Fig.1 Schematic diagram of upward and downward adjustment ability of power system

$$r_{t-1,t}^1 = \left. \sum_{i=1}^T (\min \{P_{i,\max} - P_{i,t-1}^1, R_i\} I_{i,t-1} I_{i,t} + p_{i,\min} u_{i,t-1} - p_{i,\min} u_{i,t}) - \sum_{j=1}^H (P_{j,t-1}^{\text{gen},1} - P_{j,t-1}^{\text{pum},1}) \right\} \quad (23)$$

$$d_{t-1,t}^1 = \left. \sum_{i=1}^N (\min \{P_{i,t-1}^2 - P_{i,\min}, D_i\} I_{i,t-1} I_{i,t} + p_{i,\min} v_{i,t} - p_{i,\min} u_{i,t}) - \sum_{j=1}^H (P_{j,t-1}^{\text{gen},2} - P_{j,t-1}^{\text{pum},2}) \right\} \quad (24)$$

式中: $r_{t-1,t}^1$ 表示极限场景 1 下的火蓄联合系统在 $t-1$ 时段的最大上调能力; $d_{t-1,t}^1$ 表示极限场景 2 下的火蓄联合系统在 $t-1$ 时段的最大下调能力。

3 算例分析

3.1 测试系统

本文算例系统中包含了 3 台常规火电机组、1 座风电场、1 座抽水蓄能电站,如图 2 所示。各机组参数见表 1、表 2。由于抽蓄电站的运行特殊性,其发电功率共分为 3 种情况。case1:无抽蓄; case2:发电功率 30 MW; case3:发电功率 60 MW。

在不同情况下,风电装机与抽水蓄能装机占比各不相同,可由此比较不同源机组在系统各自占比不同时,对系统经济型运行的影响。各机组参数参考文献[14]和[16],分别如表 1 和表 2 所示。

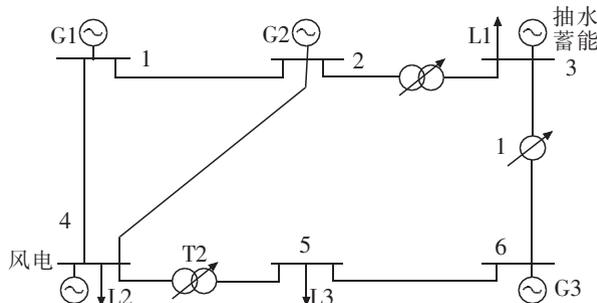


图 2 6 节点测试系统
Fig.2 Six-node test system

表 1 火电机组参数
Tab.1 Parameters of thermal units

机组参数	常规火力发电单元		
	U_1	U_2	U_3
a	100	200	200
b	18	10	17
c	0.04	0.05	0.04
p^{\min}/MW	100	100	250
p^{\max}/MW	600	650	800

表 2 抽水蓄能机组模型参数
Tab.2 Model parameters of pumped storage units

V_h^{\max}/m^3	V_h^{\min}/m^3	$\eta_p/(\text{MW}/\text{Hm}^3)$	$\eta_d/(\text{MW}/\text{Hm}^3)$	c_p/USD
10 000	4 000	300	240	100
$p_{ph-1}^{\max}/\text{MW}$	$p_{ph-2}^{\max}/\text{MW}$	p_{ph}^{\min}/MW	p_{ph}/MW	c_g/USD
30	60	10	45	100

在 $t=0$ 时段, 负荷取 284 MW, 以各机组发电成本最低和污染气体排放量最少这两个优化目标安排各机组初始阶段出力, 24 个时段内的日前负荷和该风电场的出力明显无法匹配, 就有强烈的反调峰特性, 增大了系统负荷的峰谷差。表 3 为风电预测数据与日前负荷数据进行对比。

表 3 负荷与风电场出力预测数据
Tab.3 Load and the predicted data of wind farm output

时段	负荷/MW	风机出力/pu	时段	负荷/MW	风机出力/pu
1	225	0.845	13	339	0.597
2	235	0.928	14	305	0.696
3	269	0.923	15	282	0.810
4	270	0.853	16	275	0.956
5	275	0.820	17	270	0.895
6	285	0.715	18	273	0.693
7	300	0.498	19	286	0.583
8	343	0.424	20	315	0.468
9	354	0.338	21	340	0.391
10	360	0.370	22	348	0.276
11	367	0.193	23	320	0.562
12	359	0.386	24	384	0.752

图 3 表示的是置信度为 0.95 的风电出力极限场景与置信区间。

3.2 结果与分析

为分析不同抽蓄机组发电功率对系统运行经济性的影响,分别构造了 3 种算例:case1 为风电火电联合运行模式;case2、case3 均为基于风火蓄的多源联合优化运行模式,仅抽蓄机组发电功率不同。

3 种算例下的各类成本如表 4 所示。从表中可以看出,虽然抽水蓄能机组与风电火电配合运行会有一些电能损失,产生了抽水蓄能机组的运行成本,但可以显著减小其他各类成本,从而降低风电出力不确定性和反调峰特性对系统运行的影响,提高电网的系统运行经济性。

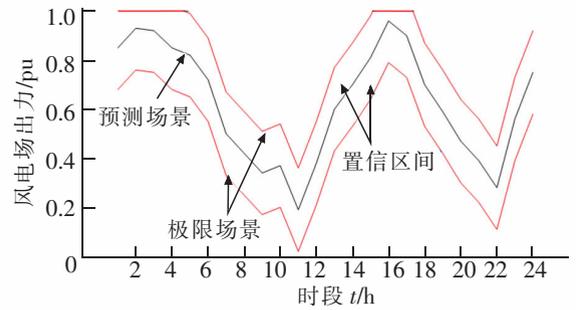


图 3 风电预测场景与极限场景分布图
Fig.3 The chart of wind prediction scenario and extreme scenario

表 4 不同发电功率下的综合成本比较
Tab.4 Comparisons of different costs in 3 cases

USD

成本	case1 的各种成本	case2 的各种成本	case3 的各种成本
出力成本	228 121.73	224 293.93	221 572.46
开机成本	5 584.60	4 363.00	3 742.80
备用成本	59 823.74	55 482.76	51 391.58
抽蓄成本	0	500	500
期望总成本	307 445.68	298 201.01	283 606.84

从图 4 可以看出,抽水蓄能机组通过在净负荷的低谷时段(第 1~6 和 15~18 时段)抽水及在净负荷的高峰时段(第 8~13 和 20~23 时段)发电,可减小系统净负荷的峰谷差,使得低谷时段发电成本较低的机组出力减小,从而在整体上减小风火蓄多源联合优化机组的出力成本。图 5 表示极限场景下各火电机组的出力情况。

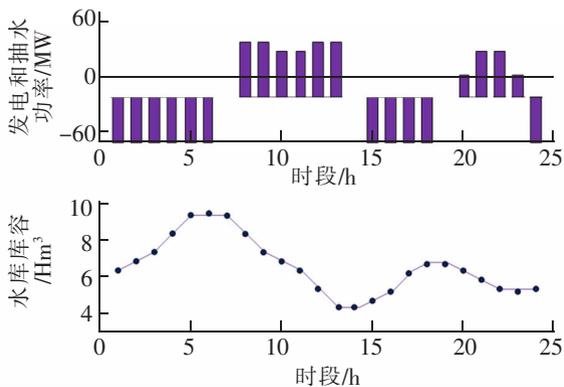


图 4 case2 中抽蓄机组的各变量随库容变化情况
Fig.4 Variation of discharge and pumping power and reservoir volume of pumped storage units in case2

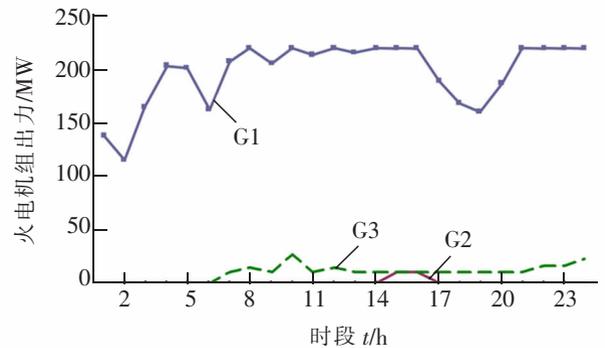


图 5 极限场景下火电机组的出力
Fig.5 The output of thermal power unit in the extreme scenario

对比图 4 与图 5 可得,当系统等效负荷处于高峰期,尽量投入抽蓄电站进行发电,减小常规高耗能机组的开机时段,能够取得最为有效的经济性能。

在 case3 的条件下,加入抽水蓄能机组进行联合运行后,机组组合及其出力会有一定程度的变化,根据前文所述的模型求解出含抽水蓄能的机组组合及其出力,如表 5 所示。

表 5 含抽水蓄能的联合系统机组组合结果
 Tab.5 Integration results of integrated system units with pumped storage

机组序号	MW					
	G1	G2	G3	等效负荷	抽水	发电
1	137	0	0	198	40	0
2	118	0	0	170	40	0
3	167	0	0	159	40	0
4	205	0	0	155	40	0
5	198	0	0	154	40	0
6	163	0	0	121	0	0
7	210	0	9	177	0	0
8	220	0	12	189	0	60
9	208	0	10	211	0	60
10	220	0	22	241	0	51
11	215	0	10	221	0	39
12	220	0	13	230	0	60
13	218	0	10	223	0	60
14	220	0	9	225	0	0
15	219	9	9	272	40	0
16	219	9	10	268	40	0
17	186	0	10	255	40	0
18	170	0	9	235	40	0
19	165	0	10	225	0	0
20	180	0	10	233	0	22
21	220	0	10	222	0	48
22	220	0	13	231	0	52
23	219	0	13	190	0	18
24	220	0	18	192	40	0

通过对抽蓄机组的装机比例和风电功率置信区间进行调整,所得到的机组组合可以保证系统具备强的调节能力,利用 Matlab 随机生成 200 个风电场景,用于机组组合可靠性检验,其可靠性验证结果如表 6 所示。

表 6 不同风电置信度下机组组合可靠性概率
Tab.6 The results of the reliability of unit commitment

抽蓄功率	不同风电置信度下机组组合可靠性概率/%					
	0.40	0.60	0.80	0.90	0.95	0.98
无抽蓄	41.7	55.8	59.6	88.2	95.3	99.5
抽蓄 30 MW	96.5	98.1	99.7	100	100	100
抽蓄 60 MW	100	100	100	100	100	100

机组组合的可靠性在一定的风电置信度区间内,与风电置信度成正比增长,在无抽蓄的情况下,机组组合可靠性随置信度的变化呈现大幅增长趋势,当抽蓄功率增加后,机组组合的可靠性趋于稳定,不再随风电置信度的变化而变化。为了使系统运行可靠性与经济性最佳,我们在不同抽蓄功率下分别依次选择 0.98,0.80,0.40 的风电置信度。

4 结论

基于风速概率分布函数得到风电出力的不确定分布概率,采用置信区间法生成极限场景风电功率,并构建了基于极限场景的风火蓄联合运行经济调度模型,以实现系统综合运行成本最小化目标。还进一步分析了极限场景的可靠性约束,保证风电出力在一定置信度下时,火蓄联合系统能实时满足功率平衡,维持系统安全稳定运行。

在同样的置信区间下,增加抽蓄机组的装机占比可大大提高多源机组联合优化的可靠性,充分发挥抽水蓄能调峰填谷的作用,以实现最安全最经济的运行方式。基于 6 节点系统的仿真算例结果验证了本文方法能够有效解决风电不确定性而导致的低消纳率问题,具有较好的经济性和可靠性。

参考文献:

- [1] 蒋程,刘文霞,张建华,等. 含风电接入的发输电系统风险评估[J]. 电工技术学报,2014,29(2):260-270.
- [2] 黎静华,左俊军,汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术,2016,40(11):3503-3510.
- [3] KADDAH S. Impact of renewable resources forecasting on unit commitment solution of egyptian electric grid[J]. International Journal of Scientific & Engineering Research,2015,6(8):510-517.
- [4] 吴小珊,张步涵,袁小明,等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):45-52.
- [5] 吕翔,刘国静,周莹. 含抽水蓄能的风水火联合机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制,2017(12):35-43.
- [6] ANSARI M R,AMJADY N,VATANI B. Stochastic security-constrained hydrothermal unit commitment considering uncertainty of load forecast,inflows to reservoirs and unavailability of units by a new hybrid decomposition strategy[J]. Generation Transmission & Distribution IET,2014,8(12):1900-1915.
- [7] JIANGMING L I,WEN J,HAN X. Low-carbon unit commitment with intensive wind power generation and carbon capture power plant[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy,2015,3(1):63-71.
- [8] PAPPALA V S,ERLICH I,ROHRIG K,et al. A Stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system[J]. IEEE Transactions. on Power Systems,2009,24(2):940-950.
- [9] JIANG RUIWEI,WANG JIANHUI,GUAN YONGPEI. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. IEEE Transactions. on Power Systems,2012,27(2):800-810.

- [10] YANG WANG, QING XIA, KANG CHONGQING. Unit commitment with volatile node injections by using interval optimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1705–1713.
- [11] PENG CH, SUN HJ, GUO JF, LIU G. Dynamic economic dispatch for wind–thermal power system using a novel bi–population chaotic differential evolution algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2012, 42(1): 119–26
- [12] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源–荷–储”协调互动优化调度策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18–25.
- [13] 左丽霞, 余愿, 孙惠娟. 电力系统动态环境经济调度模型研究 [J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3): 134–142.
- [14] 彭春华, 谢鹏, 陈臣. 大规模光伏电站接入电网可调节鲁棒优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4324–4332.
- [15] ORTEGA VAZQUEZ M A. Optimizing the spinning reserve requirements [D]. UK: University of Manchester, 2006.
- [16] 徐帆, 刘军, 张涛, 等. 考虑抽水蓄能机组的机组组合模型及求解 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 36–40.

Economic Dispatch for Wind/Thermal/Pumped–Storage Integration System Based on Extreme Scenario

Sun Huijuan, Yu Yuan, Jiang Shaochuan

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The integrated operation of wind/thermal/pumped–storage can realize energy complementation and improve wind power utilization. However, the uncertainty of wind power would have a negative impact on the economy and reliability of the optimal dispatch for the integration system. In order to solve this problem and minimize the overall operating cost of the system, based on the probability distribution function of wind speed, the uncertainty distribution probability of wind power output was obtained. The confidence interval method was used to generate wind power of the extreme scenario, and an economic dispatch model of the wind/thermal/pumped–storage integration system based on the extreme scenario was established. In addition, this study analyzed the reliability constraints of the extreme scenario, the effects of confidence interval and the pumped–storage capacity on the combined operating cost and reliability of the multi–energy units with an example application. The results showed that the proposed method could effectively solve the problem of low permeability, and it worked better in economy and reliability.

Key words: economic dispatch; extreme scenario; confidence interval; wind power; pumped–storage