计及风机禁止转速区间的风-火协同两阶段随机备用优化

陈肖璐[1]，郑博文[1]，窦宇宇[1]，江博游[2]，郭创新[2]
(1.国网内蒙古东部电力有限公司 电力科学研究院，内蒙古 呼和浩特 010000；2.浙江大学 电气工程学院，浙江 杭州 310027)

摘 要：风电机组可通过超速控制提供备用容量，以提升电力系统运行经济性，但未充分考虑风电超速控制过程中风机危险运行区域。文章从感应发电机效应原理出发，推导出禁止转速区间，分析其对风电超速备用容量的影响，并建立了计及禁止转速区间的风电备用模型。在此基础上，建立了计及禁止转速区间的风电-火电协同备用优化模型，并利用 multi-cut Benders 分解法进行求解。算例结果验证了风电提供备用能够提升系统频率稳定性和运行经济性，以及考虑禁止转速区间的必要性。

关键词：风电机组；备用容量；超速控制；禁止转速区间；随机优化
中图分类号：TK81 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2026)01-0086-09

0 引言

能源转型推动了风能的快速发展[1-3]。然而，风电的随机性和波动性要求电网必须配套相应的灵活性备用容量，否则，当风电因风力资源约束出力受限时，电力供需平衡难以维系[4]。

为确保系统留取充足的备用容量，学者们基于随机优化、鲁棒优化，将风电和负荷等不确定性因素以场景或区间的方式嵌入备用决策模型。在随机优化方面，文献[5]基于场景优化法构建了多时间尺度的电力系统备用优化模型。在鲁棒优化方面，文献[6]基于两阶段自适应鲁棒优化，建立了考虑风电出力不确定性的鲁棒能量与备用协同的优化模型。文献[7]在鲁棒备用优化模型中考虑了需求响应的影响。与随机优化相比，鲁棒优化要求决策结果能够保证最恶劣场景下的可行性，往往过于保守。而随机优化则需要对多个概率场景进行协同优化，为提高其求解效率，通常采用 benders 分解[8]等算法加速求解。系统的备用来源主要是同步发电机组，而风机一般以最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking，MPPT)方式运行，不参与系统备用。随着风电主动控制技术的发展，风机可通过主动降载运行以提供备用容量[9]。文献[10]考虑风电场运行的尾流效应和风电场提供备用的方式，建立了风电场与系统协同运行鲁棒备用优化模型。文献[11]考虑风机通过动态降载提供备用容量，并考虑不同响应速度备用之间的相互转换。文献[12]基于两阶段鲁棒优化对火电机组、风电场、需求侧响应的备用进行协同优化。文献[13]考虑风电场提供惯量响应和一次调频备用，并基于分布式鲁棒机会约束规划建立了风-火备用协同优化模型。文献[14]建立了风电出力多状态模型以发挥风电灵活调节的优势，并将其纳入两阶段随机优化模型，但并未考虑风电场的再调度过程。上述研究表明，风电参与系统备用可以缓解传统机组备用压力，提升系统运行经济性。然而，现有研究均为简化模型，多以风功率为控制变量，采用降载系数表征风机降载程度以及备用能力，而忽略了风机备用控制环节的具体实现。风机备用控制主要包括变桨距角控制和超速控制，而变桨距角控制的响应速度较慢，且频繁调节桨距角会影响风机寿命。通过降载系数表征风机备用的处理方式，本质上认为风机在最低转速和额定转速之间全范围可调节。但受到感应发电机效应的影响，对于双馈风机经串补线路送出系统，当风机运行在某一转速区间，系统等值电阻为负[15]，可能会造成双馈风机发生次同步功率振

收稿日期：2023-10-12。
基金项目：国网蒙东电力科技项目《蒙东电网次同步振荡风险预警及防控技术研究与应用》(526604210001)。
通信作者：郭创新(1969-)，男，博士，教授，研究方向为电力系统风险评估及风险调度。E-mail：guochuangxin@zju.edu.cn

荡。若在安排风电场出力和备用计划时,忽视这一转速区间的影响可能会导致实际运行中发生次同步振荡,威胁系统的安全稳定运行[16]。

本文以双馈风机为研究对象，针对风电提供备用容量开展了研究。首先,分析禁止转速区间对风电备用的影响，建立了改进的风电机组备用模型;其次,基于两阶段随机优化,建立了计及禁止转速区间的风电-火电协同备用优化模型，并利用 multi-cut benders 分解法进行求解;最后,通过算例验证了所提模型和方法的有效性。

1　禁止转速区间定义及其对风电备用的影响

1.1　禁止转速区间定义

禁止转速区间是为保证系统安全稳定运行而应避开的转速运行点集合。本文从次同步谐振的感应发电机效应原理出发，简述在次同步谐振这一特定场景下,禁止转速区间的推导过程,并结合风机超速控制，建立计及决策依赖不确定性和禁止转速区间的备用优化模型。

1.2　感应发电机效应等效电阻变化规律

当双馈风电场经串补线路送出功率时，由于输电线路包含串补电容，双馈风机的定子回路存在一个自然谐振频率 $f_{sr}=f_0\sqrt{X_C/X_{L\Sigma}}$（亦称次同步谐振频率），其中:$f_0$ 为系统同步频率;$X_{L\Sigma}$为从等值双馈风机后向系统看进去的同步频率等值电抗;X_C 为线路串补电容容抗;$X_C/X_{L\Sigma}$为线路串补度,即系统容抗和感抗之比。

当系统受到扰动后，转子回路在定子侧的等效电阻为 $R'_{req}(f_r,f_{sr})$,双馈风机转子回路与激磁回路并联等值电阻为(以下称为转子并联等效电阻) $R_{req}(f_r,f_{sr})$,双馈风机在系统侧的等值电阻 $R_{total}(f_r,f_{sr})$分别为

$$\begin{cases} R'_{req}(f_r,f_{sr})=\dfrac{R_r+R_{RSC}}{1-f_r/f_{sr}} \\ R_{req}(f_r,f_{sr})=\dfrac{X_m^2 R'_{req}(f_r,f_{sr})}{R'^2_{req}(f_r,f_{sr})/f_{sr}^2+(X_r+X_m)^2} \\ R_{total}(f_r,f_{sr})=R_L(f_r,f_{sr})+R_S(f_r,f_{sr})+R_{req}(f_r,f_{sr}) \end{cases} \tag{1}$$

式中:f_r 为转子转速;R_r 为双馈风机转子电阻;R_{RSC}为转子侧变流器在自然谐振频率下的等值电阻;X_r,X_m 分别为双馈风机转子漏抗、励磁电抗;输电线路电阻 $R_L(f_r,f_{sr})$和双馈风机定子回路电阻 $R_S(f_r,f_{sr})$均为正值。

根据文献[15]可知,双馈风电场产生感应发电机效应的条件为双馈风机在系统侧的等值电阻 $R_{total}(f_r,f_{sr})$为负值。在串补度给定的情况下,系统等值电阻 $R_{total}(f_r,f_{sr})$是风机转速 f_r 的函数,本文将分析转速对于系统等值电阻 $R_{total}(f_r,f_{sr})$的影响。

1.3　感应发电机效应危险区域分析

线路串补度给定后,可基于式(1)绘制转子并联等效电阻 $R_{req}(f_r,f_{sr})$和系统等值电阻 $R_{total}(f_r,f_{sr})$关于风机转速的函数曲线。线路串补度在 36%,f_{sr}=0.6 p.u.的情况下,转子并联等效电阻和系统总等值电阻随转子转速的变化曲线如图 1 所示。

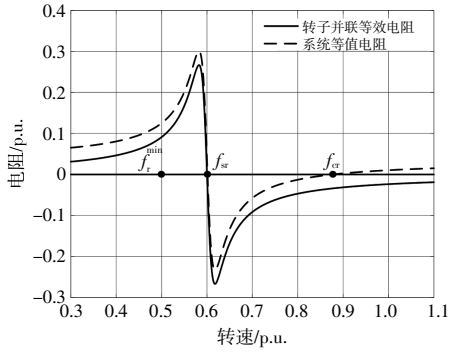


图 1　系统等值电阻随转速的变化曲线

Fig.1 Variation curves of the equivalent resistance with rotor speed

求解方程 $R_{total}(f_{cr},f_{sr})=0$，在系统谐振频率 f_{sr} 的右侧存在 2 个根(转速点),假设靠近 f_{sr} 的转速点为 f'_{sr},远离 f_{sr} 的转速点为临界转速 f_{cr}。由于 $f'_{sr}\approx f_{sr}$,本文直接采用 f_{sr} 代替 f'_{sr}。在 $f_{sr}\leqslant f_r\leqslant f_{cr}$ 内,系统总等值电阻为负值,系统面临次同步谐振的危险,转速[f_{sr},f_{cr}]即为风电场的禁止转速区间。

在设置风机运行点时，应尽量避开上述禁止转速区间,以保证系统安全。风机的转速一方面受到风速影响；另一方面直接影响风电场的出力功率,进而影响风电场的备用容量。本文将分析在不同的风速下,风机呈现的 3 种不同运行工况,及其在禁止转速区间对风电出力和备用的影响。

1.4　禁止转速区间对风电备用的影响

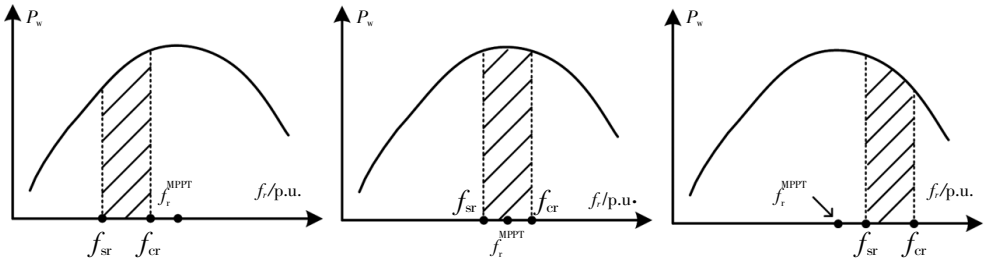
风机的输出功率由桨距角、转速、风速大小以及风机物理结构共同决定。

$$\begin{cases} P_w=\dfrac{1}{2}\pi\rho r^2 V_w^3 C_p(\lambda,\beta) \\ C_p(\lambda,\beta)=0.22\left(\dfrac{116}{\bar{\lambda}}-0.4\beta-5\right)e^{\frac{-12.5}{\bar{\lambda}}} \\ \dfrac{1}{\bar{\lambda}}=\dfrac{1}{\lambda+0.08\beta}-\dfrac{0.035}{\beta^3+1} \end{cases} \tag{2}$$

式中:ρ 为空气密度;r 为风机叶片半径;V 为风速;$C_p(\lambda,\beta)$为风能捕获系数;λ 为风机叶尖速比;β 为桨距角;$\bar{\lambda}$为公式化简中间变量。

当风机采用 MPPT 控制以最大化利用风能时,其桨距角设置为 0,转速则根据风速变化而调整,以获得最优的叶尖速比和最大风能捕获系数。桨距角给定后,可通过求取 $C_p(\lambda,\beta)$的最大值(可利用 MATLAB 的 fminbnd 函数)获得最优叶尖速比 λ_w^{MPPT},再根据 $\lambda_w^{MPPT}=f_r^{MPPT}r/V_w$ 即可求得 MPPT 转速 f_r^{MPPT}。

根据风速的不同,风机 MPPT 转速和禁止转速区间的相对位置可能出现 3 种不同的工况,如图 2 所示。



(a)工况 1 (b)工况 2 (c)工况 3

图 2 风机 MPPT 转速和禁止转速区间的相对位置

Fig.2 The relative position of fan MPPT speed and prohibited operation range

工况 1:禁止转速区间位于 MPPT 转速的左侧,此时禁止转速区间对风电场运行并不会产生影响,风机转速调整为$\left[f_r^{MPPT},f_r^{max}\right]$,风机的出力调节为$\left[P_w^{min},P_w^{MPPT}\right]$,表达式为

$$\begin{cases} P_w^{min}=\dfrac{1}{2}\pi\rho r^2 V_w^3 C_p(\lambda_w^{max}) \\ \lambda_w^{max}=\dfrac{f_r^{max} r}{V_w} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} P_w^{MPPT}=\dfrac{1}{2}\pi\rho r^2 V_w^3 C_p(\lambda_w^{MPPT}) \\ \lambda_w^{MPPT}=\dfrac{f_r^{MPPT} r}{V_w} \end{cases} \tag{4}$$

工况 2:MPPT 转速位于禁止转速区间内,此时风机转速调整为$\left[f_{cr},f_r^{max}\right]$,根据式(2)可计算得到风机的出力调节为$\left[P_w^{min},P_w^{cr}\right]$,表达式为

$$\begin{cases} P_w^{cr}=\dfrac{1}{2}\pi\rho r^2 V_w^3 C_p(\lambda_w^{cr}) \\ \lambda_w^{cr}=\dfrac{f_{cr} r}{V_w} \end{cases} \tag{5}$$

工况 3:禁止转速区间位于 MPPT 转速右侧,此时风机转速调整为$\left[f_r^{MPPT},f_{sr}\right]$和$\left[f_{cr},f_r^{max}\right]$,根据式(2)可进一步计算得到风机的出力调节$\left[P_w^{min},P_w^{cr}\right]$和$\left[P_w^{sr},P_w^{MPPT}\right]$,其中$\left[P_w^{min},P_w^{cr}\right]$的表达式如式(3)~(5)所示,$\left[P_w^{sr},P_w^{MPPT}\right]$的表达式为

$$\begin{cases} P_w^{sr}=\dfrac{1}{2}\pi\rho r^2 V_w^3 C_p(\lambda_w^{sr}) \\ \lambda_w^{sr}=\dfrac{f_{sr} r}{V_w} \end{cases} \tag{6}$$

基于式(2),将风机的禁止转速区间映射至功率区间。本文基于功率区间,进一步建立考虑禁止转速区间的风电备用模型。

图 3 为日前-日内两阶段优化调度框架下,计及禁止转速区间的风电备用模型。图中:$A_{w,t}^{rated}$为风机额定功率;$R_{w,t}^{0,+}$和 $R_{w,t}^{0,-}$分别为风电场日前上、下备用功率;$A_{w,t}^{0}$为日前风电 MPPT 功率;$P_{w,t}^{0}$为降载后的日前风电功率;$P_{w,t}^{u}$为降载后的日前风电功率;$A_{w,t}^{u}$为日内风电 MPPT 功率;$R_{w,t}^{u,+}$和 $R_{w,t}^{u,-}$分别为风电场日前上、下备用功率。

日前阶段,风机通过降载留取一定的备用功

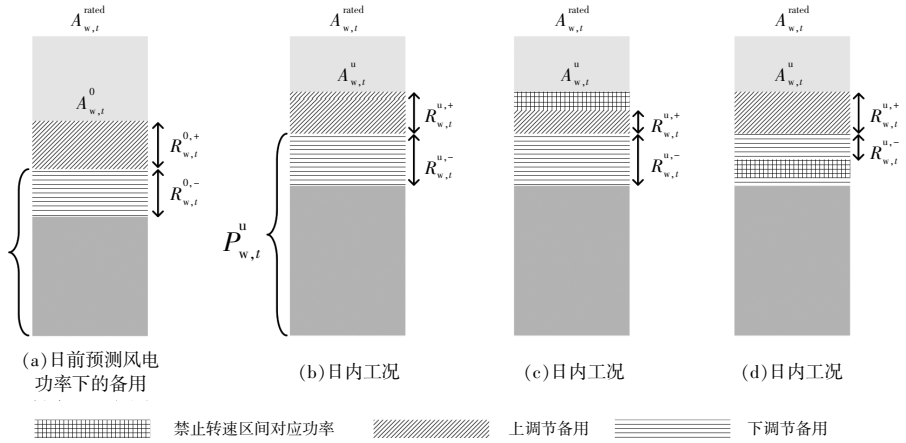


图 3　计及禁止转速区间的风电备用模型

Fig.3 The relative position of fan MPPT speed and prohibited operation range

率,降载后的日前风电功率、日前上下备用功率、降载率、辅助变量之间的关系满足:

$$\begin{cases} P_{w,t}^{0}=(1-\kappa_{w,t})A_{w,t}^{0} \\ R_{w,t}^{0,+}=\gamma_{w,t}^{+}A_{w,t}^{0} \\ R_{w,t}^{0,-}=\gamma_{w,t}^{-}A_{w,t}^{0} \\ \gamma_{w,t}^{+}\leqslant\kappa_{w,t} \\ \gamma_{w,t}^{-}\leqslant\kappa^{\max}-\kappa_{w,t} \\ \gamma_{w,t}^{+}\geqslant 0,\gamma_{w,t}^{-}\geqslant 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中:$\kappa_{w,t}$ 为风机降载系数;$\kappa^{\max}$ 为风机最大降载率;$\gamma_{w,t}^{+}$,$\gamma_{w,t}^{-}$ 分别为上、下备用功率对应的比例系数。

由于风电功率存在不确定性,日前留取的备用功率在日内未必可行,本文通过 $\gamma_{w,t}^{+}$ 和 $\gamma_{w,t}^{-}$ 耦合日前和日内备用功率。

日内阶段,实际可用风电功率 $A_{w,t}^{u}$、降载后功率、上下备用功率、日内风功率在备用范围满足:

$$\begin{cases} P_{w,t}^{u}=(1-\kappa_{w,t})A_{w,t}^{u} \\ R_{w,t}^{u,+}=\gamma_{w,t}^{+}A_{w,t}^{u} \\ R_{w,t}^{u,-}=\gamma_{w,t}^{-}A_{w,t}^{u} \\ P_{w,t}^{u}-R_{w,t}^{u,-}\leqslant P_{w,t}^{r}\leqslant P_{w,t}^{u}+R_{w,t}^{u,-} \\ P_{w,t}^{r}\leqslant \underline{P}_{w,t}^{u,pro} \\ P_{w,t}^{r}\geqslant \overline{P}_{w,t}^{u,pro} \\ P_{w,t,s}^{u,curt}=A_{w,t,s}^{u}-\left(P_{w,t,s}^{u}+R_{w,t}^{u,+}\right) \end{cases} \tag{8}$$

式中:$P_{w,t}^{r}$ 为再调度后的日内风电功率;$\overline{P}_{w,t}^{u,pro}$ 和 $\underline{P}_{w,t}^{u,pro}$ 分别为日内风速下禁止转速区间上、下界对应的风电功率。

为避开禁止转速区间,针对工况 2,3,还需要分别满足式(8)中第五、六条约束。日内弃风功率如式(8)中第七条约束。可直接以风机转速为决策变量,将禁止转速区间以及风电功率和转速之间的函数关系,即式(2),包含在备用优化模型中,非线性的式(2)可通过分段线性化处理。但这种处理方式增加了模型复杂度,并且分段线性化引入的 0–1 变量,导致模型难以应用 benders 分解法等求解框架。由于本文所提模型中,转速只通过式(2)与风电功率耦合,因此可通过式(2)~(6)实现转速到功率的映射,将转速和非线性的式(2)从模型中剥离出去,只保留风电功率作为决策变量,使得模型更易于求解。

2　计及禁止转速区间的两阶段随机备用优化模型

2.1　目标函数

目标函数包括日前火电机组启停成本、火电燃料成本、火电和风电备用成本、日内弃风弃负荷惩罚。

$$C=\sum_{g\in G}\sum_{t\in T}\begin{pmatrix} C_{g}^{su}u_{g,t}+C_{g}^{sd}v_{g,t}+C_{g}P_{g,t}^{0}+C_{g}^{R+}R_{g,t}^{+}+ \\ C_{g}^{R-}R_{g,t}^{-}+C_{w}^{R+}R_{w,t}^{+}+C_{w}^{R-}R_{w,t}^{-} \end{pmatrix}+$$

$$\sum_{s\in S}p_{s}\sum_{t\in T}\left(\sum_{w\in W}C_{w}^{curt}P_{w,t,s}^{u,curt}+\sum_{d\in D}C_{d}^{shed}P_{d,t,s}^{u,shed}\right) \tag{9}$$

式中:$u_{g,t}$ 和 $v_{g,t}$ 为火电机组启停动作指示符,取值为 1 表示机组执行开机或停机动作;$P_{g,t}^{0}$ 为日前火

电机组出力;$R_{g,t}^{+}$和$R_{g,t}^{-}$分别为火电机组上备用和下备用功率;$R_{w,t}^{+}$和$R_{w,t}^{-}$分别为火电机组上备用和下备用功率;$P_{w,t,s}^{\mathrm{u,curt}}$和$P_{d,t,s}^{\mathrm{u,shed}}$分别为日内弃风和弃负荷功率;$g,w,d,t,s$分别为火电机组、风电场、负荷节点、调度时段以及风速场景的索引;G,W,D,T和S分别为火电机组、风电场、负荷节点、调度时段以及风速场景的集合;变量上标0表示日前阶段变量;上标"u"表示日内阶段变量。

2.2 日前阶段

日前阶段约束条件:火电机组出力、备用、功率平衡和线路潮流约束分别为

$$\begin{cases} P_{g,t}^{0}+R_{g,t}^{+}\leqslant P_{g}^{\max}i_{g,t} \\ P_{g,t}^{0}-R_{g,t}^{-}\geqslant P_{g}^{\min}i_{g,t} \\ R_{g,t}^{+},R_{g,t}^{-}\geqslant 0 \\ \sum\limits_{g\in G}P_{g,t}^{0}+\sum\limits_{w\in W}P_{w,t}^{0}=\sum\limits_{d\in D}P_{d,t}^{0} \\ -\bar{F}_{l}\leqslant\sum\limits_{g\in G}S_{lg}P_{g,t}^{0}+\sum\limits_{w\in W}S_{lw}P_{w,t}^{0}+\sum\limits_{d\in D}S_{ld}P_{d,t}^{0}\leqslant\bar{F}_{l} \end{cases} \tag{10}$$

式中:$i_{g,t}$为机组启停状态的指示符(取1表示机组处于开机状态,取0表示处于停机状态);$R_{g,t}^{+}$和$R_{g,t}^{-}$分别为火电机组的上、下爬坡速率限制;$P_{g}^{\max}$和$P_{g}^{\min}$分别为火电机组最大和最小技术出力;$P_{d,t}^{0}$为日前负荷功率;S_{lg},S_{lw}和S_{ld}分别为火电机组g,风电场w和负荷d对线路l的功率转移分布因子;$\bar{F}_{l}$为线路l的载流上限。

风电场出力及备用相关约束为式(7)。火电机组启停、最小开停机时间以及爬坡约束可参考文献[7],不再赘述。

2.3 日内阶段

日内阶段约束条件包括火电机组出力调整约束为

$$P_{g,t}^{0}-R_{g,t}^{-}\leqslant P_{g,t,s}^{\mathrm{u}}\leqslant P_{g,t}^{0}+R_{g,t}^{+} \tag{11}$$

风电场出力及备用约束为式(8),火电机组爬坡约束、日内功率平衡约束、线路潮流上限约束同日前阶段,此处不再赘述。同时,日内阶段允许弃负荷并满足其上限约束[7]。式(11)中各变量含义同日前阶段,上标"u"表示日内阶段变量。

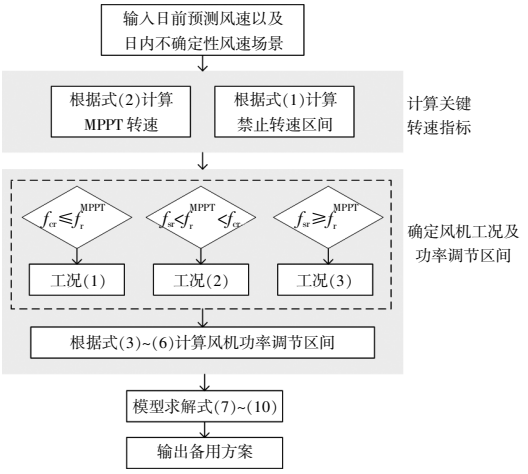


图4 备用优化流程

Fig.4 The diagram of reserve optimization

3 求解方法

原问题虽然可直接利用gurobi等商业求解器求解,但当风电不确定性场景数量较多时,求解效率会受到影响,因此本文采用multi-cut benders分解法进行求解。不同于single-cut benders分解法每次迭代只返回一条benders割,multi-cut benders分解法针对每个不确定性场景均返回一条benders割,主问题解空间收缩更快,收敛速度得到极大改善。

为应用multi-cut benders分解法,首先将原问题分解为主问题和多个子问题,主问题的形式如式(12)所示。主问题目标函数包括日前成本$c^{T}x^{i}$以及日内各场景成本的近似α^{i},i表示迭代次数。第一条约束表示主问题约束;第二条约束表示子问题返回到主问题的benders割;μ为拉格朗日乘子,等于各场景拉格朗日乘子的概率加权和。

$$\min c^{T}x^{i}+\alpha^{i}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} Ax^{i}\geqslant b-B\bar{y} \\ \alpha^{i}\geqslant\sum\limits_{s}^{Ns}p_{s}\eta_{s}^{i-1}+\sum\limits_{t}^{T}\mu_{1,g,t}^{i-1}\left(P_{g,t}^{0}-P_{g,t}^{0,i-1}\right)+ \\ \quad\sum\limits_{t}^{T}\mu_{2,g,t}^{i-1}\left(R_{g,t}^{+}-R_{g,t}^{+,i-1}\right)+\sum\limits_{t}^{T}\mu_{3,g,t}^{i-1}\left(R_{g,t}^{-}-R_{g,t}^{-,i-1}\right)+ \\ \quad\sum\limits_{t}^{T}\mu_{4,g,t}^{i-1}\left(\kappa_{w,t}-\kappa_{w,t}^{i-1}\right)+\sum\limits_{t}^{T}\mu_{5,g,t}^{i-1}\left(\gamma_{w,t}^{+}-\gamma_{w,t}^{+,i-1}\right)+ \\ \quad\sum\limits_{t}^{T}\mu_{6,g,t}^{i-1}\left(\gamma_{w,t}^{-}-\gamma_{w,t}^{-,i-1}\right) \end{cases} \tag{12}$$

子问题的形式为

$$\min \eta_s^i = d^T y_s^i$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} B y_s^i \geqslant b - A x \\ x = x^i : \mu \\ y_s^i \geqslant 0 \end{cases} \tag{13}$$

式中:y_s^i为子问题的解;μ用以生成 benders 割。

x 为主问题求解过程传递到子问题对应的变量,即:

$$\begin{cases} P_{g,t}^0 = P_{g,t}^{0,i} : \mu_{1,g,t,s}^{i-1} \\ R_{g,t}^+ = R_{g,t}^{+,i} : \mu_{2,g,t,s}^{i-1} \\ R_{g,t}^- = R_{g,t}^{-,i} : \mu_{3,g,t,s}^{i-1} \\ \kappa_{w,t} = \kappa_{w,t}^i : \mu_{4,w,t,s}^{i-1} \\ \gamma_{w,t}^+ = \gamma_{w,t}^{+,i} : \mu_{5,w,t,s}^{i-1} \\ \gamma_{w,t}^- = \gamma_{w,t}^{-,i} : \mu_{6,w,t,s}^{i-1} \end{cases} \tag{14}$$

multi-cut benders 算法执行流程如图 5 所示。

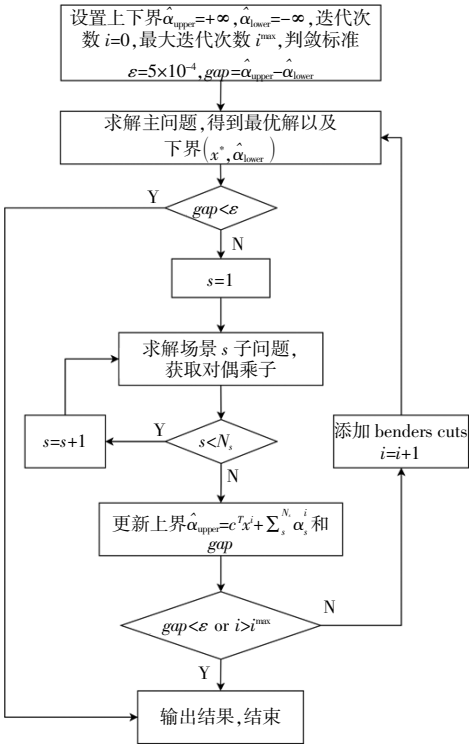


图 5　multi-cut benders 分解法流程图

Fig.5 The diagram of multi-cut benders decomposition

4　算例分析

本文基于 IEEE 39 节点系统，拓扑如图 6 所示。

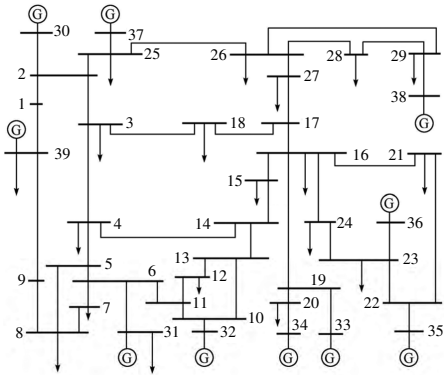


图 6　IEEE 39 节点系统接线图

Fig.6 Connection diagram of IEEE 39-bus system

根据文献[15]的算例参数以及 36%的串补度进行计算,得到禁止转速区间为[0.600,0.876] p.u.,风速和负荷的预测数据以及各随机场景(场景数取 10)数据参考文献[17]。风电机组相关参数:空气密度为 1.225 kg/m^3,叶片半径为 58.5 m,额定风速为 10.5 m/s,风电场总装机台数为 1 000 台,通过节点 6 并网。风电总装机容量为 3 243.7 MW,火电总装机容量为 6 683.3 MW,风电渗透率为 32.68%,系统最大负荷功率为 6 801.3 MW[18]。为说明计及禁止转速区间对调度结果的影响，采用以下 3 种优化方案进行对比分析:

方案 1：不考虑禁止转速区间，风机运行在 MPPT 转速,不提供备用;

方案 2:不考虑禁止转速区间,风机通过主动超速降载提供备用;

方案 3:考虑禁止转速区间,风机通过主动超速降载提供备用。

表 1 为 3 种备用优化方案的总成本和各项运行成本。

表 1　成本对比

Table 1 Comparison of costs　　元

方案	总成本	燃料成本	火电备用成本	风电备用成本	弃负荷惩罚	弃风惩罚
方案 1	12 26 251	1 072 838	132 734	0	679	0
方案 2	1 025 542	863 179	101 470	40 893	0	0
方案 3	1 191 614	1 067 764	80 231	24 618	0	0

由表 1 可知，方案 2 总成本最低，方案 3 次之,方案 1 总成本最高。方案 1 风电不参与备用,备用均由火电机组承担，因此火电备用成本为 3 种方案中最高。方案 3 考虑禁止区间后,其总运行成本比方案 2 亦提高，主要原因是方案 3 风电机

组为避开禁止转速区间，其并网发电能力和备用能力均受到限制。相较于方案 2,方案 3 的火电燃料成本从 863 179 元增至 1 067 764 元,风电备用成本从 40 893 元降低至 24 618 元。同时,方案 3 的火电备用成本同样有所降低，这是因为考虑禁止转速区间后，风电功率的波动幅度一定程度上被削减,因此对火电机组备用需求降低。3 种方案下的弃风惩罚均为 0,风电消纳率为 100%。

图 7 为 3 种方案的火电备用功率。

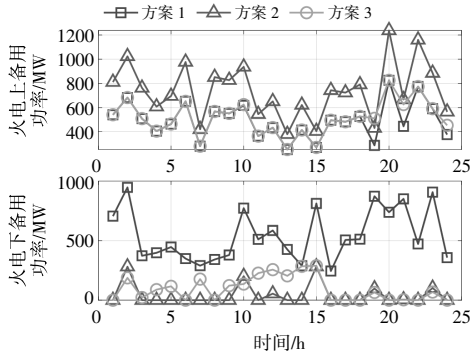


图 7　火电备用功率

Fig.7 Reserve of thermal units

由图 7 可知,方案 2 火电上备用最高,这是由于方案 2 日前阶段风电并网功率最高，火电出力最低,为保证日内功率平衡,方案 2 火电机组预留的备用功率为 3 种方案最高。而方案 2 的下备用功率为 3 种方案中最低，其原因是风电承担了大部分下备用功率。而方案 1 由于不考虑风电提供备用，因此必须预留足够的下备用以确保日内风电消纳。

图 8 中的最大风电功率为不考虑禁止转速区间的 MPPT 功率,可用风电功率上、下界为考虑禁止转速区间影响后,风电实际可调节上、下范围。

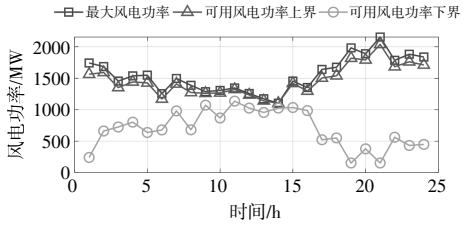


图 8　日内最大风电功率以及可用风电功率上下界

Fig.8 Comparison of intraday wind curtailment

由图 8 可知,若不考虑禁止转速区间,风电功率可调节 0~MPPT 的功率，即图中横坐标轴至正方形标注实线之间区域;考虑禁止转速区间后,风电功率可调节范围为图中圆圈标注实线至三角形标注实线之间区域。

图 9 为方案 2 和方案 3 的日前及日内风电备用功率。

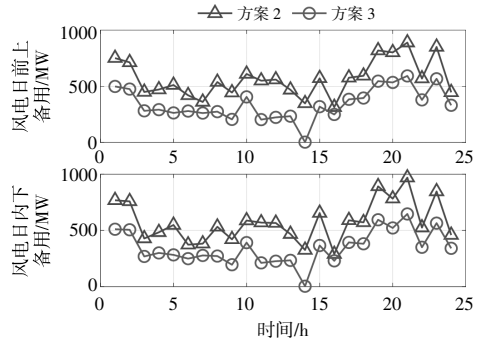


图 9　日前及日内风电备用功率

Fig.9 Day-ahead and intra-day wind power reserve

由图 9 可知,风电只留取了下备用功率,而没有留取上备用功率，这是因为风电留取上备用功率则降载运行,火电需要相应增出力,导致燃料成本上升。而风电留取一定量的下备用功率,火电无须留取日前下备用功率来应对风电功率增发,风电可以自行下调风功率以保持功率平衡。风电下备用功率随时间的变化趋势和风电功率保持一致，这也体现出风电预留备用在平抑风功率自身波动方面的作用。由于日内实际风速可能偏离日前预测风速，因此日前预留风电备用功率和日内实际可用风电备用功率存在一定差异。

图 10 为 multi-cut benders 分解法的收敛过程。

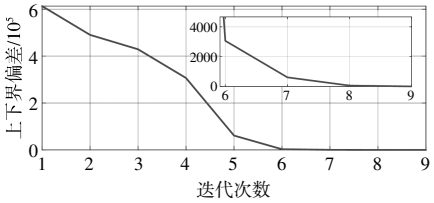


图 10　multi-cut benders 分解法收敛过程

Fig.10 The divergence process of multi-cut benders decomposition

表 2 对比了方案 3 采用 multi-cut benders 分解法和集中式求解的结果。

表 2　multi-cut benders 分解法和集中式求解结果对比

Table 2 Comparison of multi-cut benders decomposition and centralized solving

求解方法	总成本/元	求解时间/s
集中式求解	1 192 401	371
multi-cut benders 分解法	1 191 614	93

由表 2 可以看出,multi-cut benders 分解法的求解结果和集中式求解十分接近,只有约 0.066% 的计算误差。

5　结论

本文分析了禁止转速区间对风电备用的影响,建立了改进的风电机组备用模型;并基于两阶段随机优,建立了计及禁止转速区间的风-火协同备用优化模型,通过算例分析可得出以下结论。

①风电参与提供备用,可有效降低传统火电机组的备用压力,降低系统整体运行成本。

②考虑风机禁止转速区间后,风电功率可调节范围受限,风电备用提供能力受限,系统整体运行成本相较于不考虑风电禁止转速区间有所提高。

③在风机备用优化模型中,禁止转速区间虽然一定程度上降低了系统运行经济效益,但能够避开次同步危险运行点,提升了系统稳定性。

参考文献:

[1] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.

[2] 蒋成成,陆建宇,魏云冰,等.基于量化风电场限功率的电力系统旋转备用优化研究[J].电测与仪表 2022,59(1):18-24.

[3] 张海锋,李德鑫,李秀杰,等.大规模风电接入对电网动态频率响应时空分布的影响[J].东北电力大学学报,2022,42(5):74-82.

[4] 赵雪珺,刘天琪,何川,等.基于汇聚效应的风电集群接入与区域电网协调规划研究[J].电测与仪表,2023,60(12):51-58.

[5] H Wu,I Krad,A Florita,et al. Stochastic multi-timescale power system operations with variable wind generation [J].IEEE Transations on Power Systems,2017,32(5):3325-3337.

[6] W Wei,F Liu,S Mei,et al. Robust energy and reserve dispatch under variable renewable generation [J].IEEE Transations on Smart Grid,2015,6(1):369-380.

[7] 陈哲,张伊宁,马光,等.计及需求侧响应日前—日内两阶段鲁棒备用优化 [J]. 电力系统自动化,2019,43(24):67-76.

[8] Y Wen,C Guo,H Pandžić,et al. Enhanced security-constrained unit commitment with emerging utility-scale energy storage [J].IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(1):652-662.

[9] Zhongda Chu,Uros Markovic,Gabriela Hug,et al. Towards optimal system scheduling with synthetic inertia provision from wind turbines [J].IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(5):4056-4066.

[10] 张智,周明,朱凌志,等.风电场协同参与的电力系统发电-备用鲁棒优化运行方法[J].电网技术,2022,46(4):1316-1325.

[11] X Ge,X Zhu,Y Fu,et al. Optimization of reserve with different time scales for Wind-thermal power optimal scheduling considering dynamic deloading of wind turbines [J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2022,13(4):2041-2050.

[12] 陈哲,王橹裕,郭创新,等.计及风电备用容量与需求响应的多备用资源鲁棒优化 [J]. 电力系统自动化,2020,44(10):50-58.

[13] L Yang,Z Li,Y Xu,et al.Frequency constrained scheduling under multiple uncertainties via data-driven distributionally robust chance-constrained approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2023,14(2):763-776.

[14] Lin You,Ding Yi,Song Yonghua,et al. A multi-state model for exploiting the reserve capability of wind power [J].IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):3358-3372.

[15] 陈武晖,宿端鹏,汪旎,等.双馈风电场感应发电机效应的风险区域变化机理[J].中国电机工程学报,2016,36(20):5469-5478,5723.

[16] 晏鸣宇,艾小猛,张艺镨,等.考虑机组禁止运行区间的含风电鲁棒机组组合[J].中国电机工程学报,2018,38(11):3195-3203.

[17] Congcong Pan,Changzheng Shao,Bo Hu,et al.Modeling the reserve capacity of wind power and the inherent decision-dependent uncertainty in the power system economic dispatch [J].IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society,2023,38(5):4404-4417.

[18] 孙书鑫,宋朋飞,乔颖,等.风光储联合发电站与电力用户的电能直接交易模型 [J]. 可再生能源,2024,42(9):1237-1245.

Two-stage stochastic reserve optimization for wind-thermal coordination considering the prohibited rotor speed zone of wind turbines

Chen Xiaolu[1], Zheng Bowen[1], Dou Yuyu[1], Jiang Boyou[2], Guo Chuangxin[2]
(1.State Grid East Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Huhhot 010000, China; 2.College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Wind turbines can provide reserves through overspeed control to enhance the operational economy of the power system. However, existing research has not adequately considered the dangerous operating region of wind turbines during overspeed control. To address this issue, this study starts from the principle of induction generator effect, derives and defines the prohibited rotor speed zone, analyzes its impact on wind power overspeed reserves, and establishes a wind power reserve model that incorporates the prohibited rotor speed zone. Building upon this, a coordinated reserve optimization model for wind and thermal power generation, considering the prohibited rotor speed zone, is developed, and the multi-cut Benders decomposition method is employed for solution. The case study validates that wind power reserves can improve system frequency stability and operational economy, emphasizing the necessity of considering the prohibited rotor speed zone.

Keywords: wind turbine; reserve; overspeed control; prohibited rotor speed zone; stochastic optimization