

基于分布鲁棒优化的含风电系统静态安全校正控制方法

张尚, 顾雪平, 王涛

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:提出一种计及风电出力不确定性的电力系统静态安全校正控制方法。考虑与风电预测方法的合理对接,采用风电预测出力的区间及期望值信息描述风电的不确定性。以调整措施耗费的经济成本最小为目标,考虑发电机出力调整和切负荷2种控制措施,建立考虑风电波动的有功安全校正控制模型。基于分布鲁棒线性优化理论,将含有不确定性参数的校正控制模型转化为仅含确定性参数的鲁棒对等模型,并采用线性规划方法进行求解。某区域电网算例结果表明,所提模型得到的校正控制方案能够应对各种可能的风电波动;同时,该模型可实现控制策略经济性与鲁棒性的相互转化,并能给出控制策略鲁棒性程度的概率评价。

关键词:风电;校正控制;不确定性;分布鲁棒线性优化

中图分类号:TM 761;TM 614

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.009

0 引言

电网静态安全校正控制是安全控制的一项重要内容,是保证系统安全、优质运行的重要手段之一。近年来风电并网规模不断扩大,在缓解能源、环境压力的同时,其出力的随机性和波动性给电网的安全控制等问题带来了较大挑战^[1]。

安全校正控制通过对相关节点注入功率的再安排(调整发电机出力或切负荷)等手段来消除系统中的过负荷或电压越限问题。以往的确定性方法^[2-5]分析得出的校正控制策略由于未能考虑调整过程中风电出力变化的不确定性,在含风电系统的实际调度中无法保证系统运行状态的安全性。因此,需要采用不确定性分析方法来处理含风电系统的安全校正控制问题。考虑风电的不确定性优化方法主要包括随机优化方法^[6-11]以及鲁棒优化方法^[12-17]。随机优化采用随机变量来描述风电出力或风电出力的预测误差,在已知随机变量概率分布的条件下,采用机会约束规划方法^[6-7]、条件风险法^[8-9]或场景分析法^[10-11]等对目标期望值进行优化。文献^[6-7]分别假设风功率预测误差服从正态分布和均匀分布,并采用机会约束规划模型求解校正控制策略。文献^[10]采用极限场景代替风电功率预测误差的多种情况,建立了考虑校正控制的含风电场安全约束优化潮流模型。这类基于概率统计的优化方法需要获得随机变量完整的概率统计信息,如期望、方差、协方差等,然而在实时安全控制中很难准确且

全面地刻画风电的概率分布信息。同时,这类方法计算量较大,限制了其在工程中的实际应用。鲁棒优化方法采用不确定性集合^[12]来刻画风电不确定性,寻求最恶劣情况下的最优决策,使得约束条件在风电所有可能的实现下都得到满足。文献^[16-17]分别采用盒式不确定集合和多面体不确定集合描述风电出力,并建立校正控制模型。这类方法所需的不确定参数信息较少,仅需要获取参数所属的区间范围,但也由于基于的信息少,未能充分利用部分易获取的概率统计信息,优化模型获得的控制策略有时趋向保守。

基于上述考虑,本文采用一种随机优化与鲁棒优化相结合的方法,即分布鲁棒优化方法^[18],来处理同时考虑随机变量分布信息和鲁棒优化特性的静态安全校正控制问题。在给定风电预测出力的区间和期望的前提下,以校正控制耗费的经济成本最小为目标,建立安全校正的分布鲁棒优化模型,并转化为相应的鲁棒对等模型,寻求满足安全约束条件的经济最优解,使得校正控制方案能够应对各种可能的风电波动,在最恶劣的情况下保证系统的安全水平。同时,该模型通过调节风电波动范围,也可实现经济性与鲁棒性的相互转化,使得调度策略更为灵活。某区域电网算例分析验证了本文方法的有效性和灵活性。

1 含风电电力系统安全校正控制模型

系统有功安全校正控制问题通常可用如下优化模型^[3]来描述:

$$\min C(\Delta P) \quad (1)$$

$$\sum \Delta P = 0 \quad (2)$$

$$P_L = S(P_0 + \Delta P) \quad (3)$$

收稿日期:2018-05-28;修回日期:2018-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677071);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XS109)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677071) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015XS109)

$$-P_{Lmax} \leq P_L \leq P_{Lmax} \quad (4)$$

$$\Delta P_{min} \leq \Delta P \leq \Delta P_{max} \quad (5)$$

其中, C 为目标函数; P_0 为当前运行状态下系统的有功功率注入; ΔP 为控制变量的调整策略, 在有功安全校正控制中, 控制变量主要包括发电机有功出力的调整量和切负荷量; ΔP_{max} 和 ΔP_{min} 分别为有功调整量的上、下限; P_L 为线路有功潮流; P_{Lmax} 为线路有功潮流限值; S 为节点注入有功功率对线路潮流的灵敏度矩阵^[19], 可以由系统线路参数和网架结构得到。

式(2)~(5)分别为校正控制后系统需要满足的有功功率平衡约束(忽略网络中有功损耗的变化)、潮流方程、线路传输功率安全约束、节点注入有功功率的限制约束。本文同时考虑发电机出力调整、切负荷这2种控制类型, 将目标函数式(1)进一步写成:

$$\min \sum_{k=1}^K w_k \sum_{j=1}^{N_k} (C_j^+ \Delta P_j^+ + C_j^- \Delta P_j^-) \quad (6)$$

其中, K 为控制类型的总数, 有 $K=2$; w_k 为第 k 种控制类型的权重因子; N_k 为第 k 种控制类型的控制变量总数; ΔP_j^+ 和 ΔP_j^- 分别为控制变量 P_j 的正、负向调整量, 且有 $\Delta P_j = \Delta P_j^+ - \Delta P_j^-$, $\Delta P_j^+ \geq 0$, $\Delta P_j^- \geq 0$, 对于切负荷控制, 其 ΔP_j^+ 总是等于 0; C_j^+ 和 C_j^- 分别为与 ΔP_j^+ 、 ΔP_j^- 对应的成本系数。

设系统中有 r 座风电场, 风电场有功出力为 $P_w = [0, \dots, 0, P_{w1}, P_{w2}, \dots, P_{wr}]^T$ (n 阶列向量, n 为系统中节点总数)。实际中, 对风电出力的不确定性往往难以进行准确而全面的描述。用概率分布或隶属度等方式表征风电不确定性, 在短时间内与实测结果的误差较大, 不适用于实时的在线安全校正问题。考虑到与风电预测方法的合理对接, 本文采用风电预测出力的区间及期望值信息, 以提高安全校正控制模型的实用性。以式(6)为优化目标, 计及风电出力不确定性的有功安全校正控制模型所需满足的约束条件如下。

a. 等式约束。

潮流方程:

$$P_L = S(P_G + P_w - P_D + \Delta P) \quad (7)$$

其中, $P_G = (P_{Gj})$ 为常规机组有功出力列向量; $P_w = (P_{wj})$ 为风电机组有功出力列向量; $P_D = (P_{Dj})$ 为负荷节点有功功率列向量。

功率平衡约束:

$$\sum_{j=1}^n P_{Gj} + \sum_{j=1}^n P_{wj} + \sum_{j=1}^n \Delta P_j = \sum_{j=1}^n P_{Dj} \quad (8)$$

b. 不等式约束。

节点有功功率限值约束:

$$0 \leq \Delta P_{Gj}^+ \leq P_{Gj, max} - P_{Gj} \quad (9)$$

$$0 \leq \Delta P_{Gj}^- \leq P_{Gj} - P_{Gj, min} \quad (10)$$

$$\Delta P_{Dj}^+ = 0 \quad (11)$$

$$0 \leq \Delta P_{Dj}^- \leq P_{Dj} \quad (12)$$

其中, ΔP_{Gj}^+ 和 ΔP_{Gj}^- 分别为常规机组 j 有功出力的正、负向调节量; $P_{Gj, max}$ 和 $P_{Gj, min}$ 分别为常规机组 j 有功出力的上、下限; ΔP_{Dj}^+ 和 ΔP_{Dj}^- 分别为节点 j 有功负荷的正、负向调节量。

常规机组爬坡速率约束:

$$|\Delta P_{Gj}| \leq K_p \Delta t \quad (13)$$

其中, K_p 为常规机组出力的上下允许调节速率; Δt 为安全校正控制的允许时间限制。

线路有功潮流安全约束:

$$-P_{Lmax} \leq P_L \leq P_{Lmax} \quad (14)$$

风电机组有功出力约束:

$$P_{wj, min} \leq P_{wj} \leq P_{wj, max} \quad (15)$$

$$E(P_{wj}) = \bar{P}_{wj} \quad (16)$$

其中, $P_{wj, max}$ 和 $P_{wj, min}$ 分别为风电机组 j 有功出力的上、下限; $\bar{P}_{wj}$ 为风电机组 j 的平均出力。

2 考虑风电不确定性的校正控制问题求解方法

采用 Seng-Cheol Kang 提出的分布鲁棒线性优化模型^[18]来求解上述考虑风电不确定性的安全校正控制问题。

2.1 分布鲁棒线性优化方法

设已知待求解的线性规划模型为:

$$\begin{cases} \max & \mathbf{c}\mathbf{x} \\ \text{s.t.} & \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为决策变量, $\mathbf{x} = (x_i) \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{l}$ 分别为 $\mathbf{x}$ 的上、下限; $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{b} = (b_i) \in \mathbf{R}^m$; 系数矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}$ 。假设只有矩阵 $\mathbf{A}$ 中含有不确定参数, 每 2 个不等式约束之间的不确定参数彼此相互独立。 $\mathbf{A}$ 中各元素的取值范围及均值分别为 $a_{ij} \in [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 、 $E(a_{ij}) = \bar{a}_{ij}$ 。

分布鲁棒线性优化模型的求解过程可分为如下 3 步。

a. 建立原问题的分布鲁棒优化模型, 如式(18)所示。

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{c}\mathbf{x} \\ & \max_{\mathbf{a}_i \in \mathfrak{R}_i(\Gamma_i)} (\mathbf{a}_i \mathbf{x}) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{a}_i$ 为 $\mathbf{A}$ 中第 i 行不确定参数向量; Γ_i 为每个不等式约束中引入变化约束变量; 集合 $\mathfrak{R}_i(\Gamma_i)$ 的定义见文献[18]。

b. 将式(18)转化为相应的鲁棒对等模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} x_j + \Gamma_i z_i + \sum_{k \in J_i} p_{ik} \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & z_i + p_{ik} \geq \max \{ t_{ik}^F x_k, -t_{ik}^B x_k \} \\ & i = 1, 2, \dots, m; \forall k \in J_i \\ & z_i \geq 0, p_{ik} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; \forall k \in J_i \\ & l \leq x \leq u \end{aligned} \quad (19)$$

其中, J_i 为矩阵 A 第 i 行不确定参数的集合, 该集合的元素个数为 $|J_i|$, 并且有 $\Gamma_i \leq |J_i|$; $t_{ik}^B = \bar{a}_{ik} - a_{ik}^L$; $t_{ik}^F = a_{ik}^U - \bar{a}_{ik}$; z_i 和 p_{ik} 为模型式(18)转化为鲁棒对等模型式(19)时引入的2个新决策变量。

c. 通过上述过程, 含不确定参数的线性规划模型式(17)就可以转化为确定性的线性规划模型式(19), 采用常规的线性规划问题求解方法即可得到鲁棒最优解。

文献[18,20]指出, 变化约束变量 Γ_i 可用来调节优化结果的最优性和鲁棒性。当 $\Gamma_i = |J_i|$ 时, 可考虑到不确定参数所有可能的变化, 即能满足在各种情况下的全部约束, 此时解的鲁棒性最强; 当 $\Gamma_i < |J_i|$ 时, 通过控制每个不等式约束中 Γ_i 的大小使优化结果在最优性和鲁棒性之间灵活转换, 此时鲁棒最优解的不可行程度可以通过违反不等式约束的概率上限的估计进行评估。

2.2 采用分布鲁棒线性优化方法的模型转化

求解考虑风电不确定性的校正控制模型式(6)~(16), 需将该模型转化为分布鲁棒优化模型及其鲁棒对等模型。

模型式(6)~(16)中含有不确定参数的约束条件包括式(7)、(8)、(14)。将式(7)代入式(14)中可得:

$$S\Delta P + S P_W \leq P_{Lmax} - S(P_G - P_D) \quad (20)$$

$$-S\Delta P - S P_W \leq P_{Lmax} + S(P_G - P_D) \quad (21)$$

对于式(8), 其等价于:

$$e^T \Delta P + e^T P_W \leq -e^T (P_G - P_D) \quad (22)$$

$$-e^T \Delta P - e^T P_W \leq e^T (P_G - P_D) \quad (23)$$

其中, $e = [1, 1, \dots, 1]^T$ 为单位向量。

在对原始模型进行初步变换后, 含有不确定参数 $P_W = [0, \dots, 0, P_{W1}, P_{W2}, \dots, P_{Wr}]^T$ 的不等式约束为式(20)~(23)。由于不确定参数仅有 P_W (假设各风电场出力互相独立), 则每一个不等式约束引入的变化约束变量 Γ_i 相等。设 J_W 为系统中接入风电场的节点集合, 该集合的元素个数为 $|J_W|$, 有 $\Gamma_i \leq |J_W|$ 。

将式(20)~(23)转化为鲁棒对等模型。对于式(20)不等号左边, 有 $S\Delta P + S P_W = [S P_W][\Delta P S]^T$,

可将 $[S P_W]$ 视作式(17)中的矩阵 A , 则 $[\Delta P S]^T$ 即为决策变量 x , 根据式(17)~(19)可得出不等式(20)的鲁棒对等模型为:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n S_{ij} \Delta P_j + \Gamma_i z_{1,i} + \sum_{k \in J_W} p_{1,ik} \leq P_{Li, max} - \\ & \sum_{j=1}^n S_{ij} (P_{Gj} - P_{Dj}) - \sum_{j=1}^n S_{ij} \bar{P}_{Wj} \quad i = 1, 2, \dots, M \\ & z_{1,i} + p_{1,ik} \geq \max \{ S_{ik} (P_{Wk, min} - \bar{P}_{Wk}), \\ & S_{ik} (P_{Wk, max} - \bar{P}_{Wk}) \} \quad i = 1, 2, \dots, M; \forall k \in J_W \\ & z_{1,i} \geq 0, p_{1,ik} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, M; \forall k \in J_W \end{aligned} \quad (24)$$

其中, M 为系统中线路总数; S_{ij} 为 S 的元素, 有 $S = (S_{ij})_{M \times n}$; $P_{Li, max}$ 为 P_{Lmax} 的元素, 有 $P_{Lmax} = (P_{Li, max})_{M \times 1}$; $z_{1,i}$ 和 $p_{1,ik}$ 为将式(20)转化为式(24)时引入的新的决策变量。

式(22)的鲁棒对等模型为:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n e_j \Delta P_j + \Gamma_i z_2 + \sum_{k \in J_W} p_{2,k} \leq - \sum_{j=1}^n e_j (P_{Gj} - P_{Dj}) - \sum_{j=1}^n e_j \bar{P}_{Wj} \\ & z_2 + p_{2,k} \geq \max \{ e_k (P_{Wk, min} - \bar{P}_{Wk}), \\ & e_k (P_{Wk, max} - \bar{P}_{Wk}) \} \quad \forall k \in J_W \\ & z_2 \geq 0, p_{2,k} \geq 0 \quad \forall k \in J_W \end{aligned} \quad (25)$$

其中, z_2 和 $p_{2,k}$ 为将式(22)转化为式(25)时引入的新的决策变量。

式(21)及式(23)的转化过程同理。经过这一转化, 考虑风电出力不确定性的安全校正模型变成了一个确定性的线性规划模型, 求解较为简单。同时, 通过控制变化约束变量 Γ_i 可以实现优化结果在最优性和鲁棒性之间进行转换。

当 $\Gamma_i < |J_W|$ 时, 若线性规划模型的最优解为 $\Delta P^* = [\Delta P_1^*, \Delta P_2^*, \dots, \Delta P_n^*]^T$, 则违反不等式约束式(24)的概率的上限估计为:

$$\begin{aligned} & P \left[\sum_{j=1}^n S_{ij} \Delta P_j^* + \sum_{j=1}^n S_{ij} P_{Wj} > P_{Li, max} - \sum_{j=1}^n S_{ij} (P_{Gj} - P_{Dj}) \right] \leq \\ & \min_{\theta \geq 0} \exp \left\{ \sum_{j \in J_W} \ln \left(\frac{\tilde{f}_{ij}^U - S_{ij} \bar{P}_{Wj}}{\tilde{f}_{ij}^U - \tilde{f}_{ij}^L} e^{\theta \tilde{f}_{ij}^L} + \frac{S_{ij} \bar{P}_{Wj} - \tilde{f}_{ij}^L}{\tilde{f}_{ij}^U - \tilde{f}_{ij}^L} e^{\theta \tilde{f}_{ij}^U} \right) - \right. \\ & \left. \theta \left[P_{Li, max} - \sum_{j=1}^n S_{ij} (P_{Gj} - P_{Dj}) - \sum_{j=1}^n S_{ij} \Delta P_j^* \right] \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

其中, θ 为非负实数; $\tilde{f}_{ij}^U = \max \{ S_{ij} P_{Wj, max}, S_{ij} P_{Wj, min} \}$; $\tilde{f}_{ij}^L = \min \{ S_{ij} P_{Wj, max}, S_{ij} P_{Wj, min} \}$ 。将不等式(26)右边的函数记为 $P_{min}(\theta)$, 该问题是以 θ 为单变量的凸优化问题, 可通过常规的凸优化方法求解。

违反式(25)的概率的上限估计为:

$$P \left[\sum_{j=1}^n \Delta P_j^* + \sum_{j=1}^n P_{Wj} > - \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P_{Dj}) \right] \leq \min_{\theta \geq 0} \exp \left\{ \sum_{j \in J_W} \ln \left(\frac{P_{Wj, \max} - \bar{P}_{Wj}}{P_{Wj, \max} - P_{Wj, \min}} e^{\theta P_{Wj}^L} + \frac{\bar{P}_{Wj} - P_{Wj, \min}}{P_{Wj, \max} - P_{Wj, \min}} e^{\theta P_{Wj, \max}} \right) - \theta \left[- \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P_{Dj}) - \sum_{j=1}^n \Delta P_j^* \right] \right\} \quad (27)$$

同理可得违反其他不等式约束的概率的上限估计。

2.3 模型的精简与高效求解

校正控制模型式(6)~(16)转化后的鲁棒对等模型中除了含有原先的 $2n$ 个决策变量 ΔP_j^+ 和 ΔP_j^- 之外,还包括新引进的决策变量 z_i 和 p_{ik} ,后者共计 $(1+|J_W|)(2M+2)$ 个;模型的不等式约束条件共计 $(1+|J_W|)(2M+2)+4n+2n_g$ 个,其中 n_g 为系统中常规机组数量。由于实际系统可能规模较大,机组及线路数目庞大,为满足实时在线分析、快速校正的要求,可从以下2个方面对模型进行简化。

a. 对控制变量的选择。

火电机组的出力主要受供热和水电机组出力的影响。在供热期或水电大发期间,火电机组的调峰能力减小。对于一些出力已经接近上限的机组,由于其可调度量已经很小,可以令这部分机组不参与调整,从调度实际而言避免了一些不必要的调节。另外,参与执行固定发电计划的机组及某些特定的调峰调频厂不参与出力调整。

b. 主导约束的辨识。

在校正控制的优化模型中,如果考虑所有的线路潮流安全约束,则模型的复杂度较高。若能先识别出已经越限及重载的关键线路集合,找到那些少量的、起主导作用的线路约束,则该策略将使线性规划问题的规模大幅降低,从而提高计算效率,减少计算时间。采用主导约束预测策略^[3],将不起主导作用的约束滤除后求解校正控制的线性规划模型。若此次调整后出现了新的线路过载,则重新识别主导约束集并代入优化模型求解,如此循环往复,直至没有新的线路越限为止。

校正控制方法的流程图见附录中图 A1。

3 算例分析

采用某区域电网算例进行仿真分析。该区域电网正常接线方式下的网架结构见附录中图 A2。区域内共有 23 台发电机组,总装机容量为 23 130 MW,总负荷为 13 200 MW。区域电网与外部交流电网通过 4 条 750 kV 联络线连接,受入功率为 7 000 MW。

风电场分别在节点 33 和 82 接入系统,其接入节点的有功出力参数见附录中表 A1,出力波动范围取当前出力的 $\pm 10\%$ 。本算例中取 2 种控制措施的权重因子相等。

3.1 风电不确定性对校正控制的影响

初始状态下系统中没有线路潮流越限。现选取较为常见的线路 N-1 故障及相对严重的线路 N-2 故障作为 2 种典型故障情况进行分析,并以是否涉及切负荷措施为代表性进行选择。假设该系统存在以下 2 种典型故障:故障 1,330 kV 线路 77-90 因故断开,330 kV 线路 30-85 过载,负载率为 1.124;故障 2,750 kV 线路 25-44 双回线因故断开,750 kV 线路 17-65 以及线路 17-69 过载,负载率分别为 1.058 和 1.108。

仿真软件采用中国电力科学研究院开发的 PSD 电力系统分析软件工具中的 PSD-BPA 潮流及暂态稳定程序。设置该区域电网在 1 s 时分别发生线路 77-90 断开和线路 25-44 断开,仿真时间持续 10 s。故障 1 发生后线路 30-85 有功功率波动情况如图 1 所示,故障 2 发生后线路 17-65、17-69 有功功率波动情况如图 2 所示。

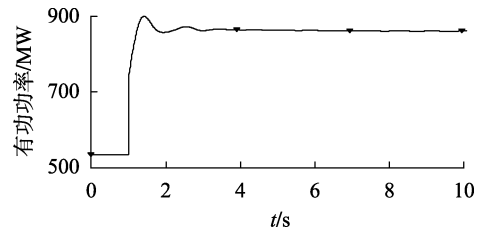


图1 线路 77-90 断开后线路 30-85 有功功率变化图

Fig.1 Active power flow of line 30-85 after line 77-90 breaking

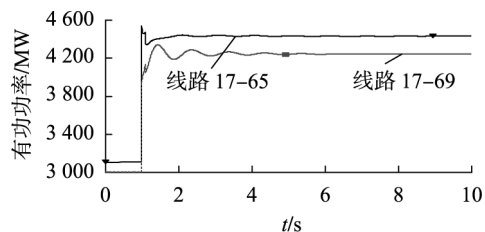


图2 线路 25-44 双回线断开后线路 17-65 及线路 17-69 的有功功率变化图

Fig.2 Active power flow of line 17-65 and line 17-69 after parallel line 25-44 breaking

对于故障发生后的系统,当不考虑风电出力不确定性,即认为风电场出力在校正控制过程中始终保持不变时,所得的控制策略如表 1 所示。

系统中共有 2 座风电场,即 $|J_W| = 2$ 。考虑风电不确定性,当取变化约束变量 $\Gamma_i = |J_W|$ 时,安全校正优化模型的解的鲁棒性最强,所得校正策略见表 2。

表 1 不考虑风电不确定性的校正控制策略

Table 1 Correction control strategies without considering wind power uncertainties

故障	发电机出力调整		切负荷		总成本/¥
	节点	调整量/ MW	节点	调整量/ MW	
1	92	-3.405 7	54	-6.322 6	295.685 1
	94	-2.916 9			
2	9	-5.202 6	7	-2.846 2	525.930 4
	10	-5.379 5	35	-4.019 6	
			79	-3.716 3	

表 2 考虑风电不确定性时的校正控制策略

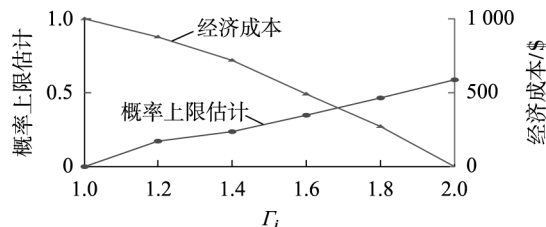
Table 2 Correction control strategies considering wind power uncertainties

故障	发电机出力调整		切负荷		总成本/¥
	节点	调整量/ MW	节点	调整量/ MW	
1	11	-6.189 7	7	-4.502 8	585.050 4
	15	-6.189 7	84	-7.876 6	
	9	-10.899 8	13	-1.510 9	
	10	-10.821 6	17	-1.593 6	
2	102	-8.697 9	31	-0.660 2	1 511.839 2
			35	-1.309 3	
			46	-8.289 6	
			86	-9.794 8	
			91	-7.260 9	

根据表 1 和表 2,在同一种故障发生后,与不考虑风电波动时相比,考虑风电不确定性的校正控制策略总的调整量和所消耗的经济成本都有所增加,这是由于为保证校正控制后的系统在任何一种可能的风电出力情况下都能维持安全状态,不产生新的越限问题,势必会增大各节点注入功率的调节量,从而带来成本的增高。尤其在故障 2 发生时,鲁棒性最强的解对应的切负荷量迅速增加,本例中切负荷成本较高,导致控制措施总成本比不考虑风电波动性时显著增大。相反,假设系统发生故障 1,此时如果仅采用表 1 给出的控制策略,则调整后的系统在风电出力为 $P_{w1}=582$ MW、 $P_{w2}=198.1$ MW 时,线路 30-85 又出现过载,负载率为 1.097;而采用表 2 所示的控制策略后,在同样风电出力的情况下,系统中不存在线路过载问题。可见,含风电系统在进行安全校正的控制过程中考虑风电的不确定性是十分必要的,鲁棒优化方法能够有效处理该问题,使系统在应对各种可能的风电波动时仍然能够保持一定的安全水平。

3.2 鲁棒性与经济性的转化

在校正控制模型中, Γ_i 的变化能够实现校正策略在鲁棒性和经济性之间的转化与平衡。设系统在初始状态下发生故障 1,当 Γ_i 从 1 到 2 变化时(以 0.2 为间隔),违反总经济成本及模型中不等式约束的概率上限估计变化情况如图 3 所示,调整策略见表 3。

图 3 不同 Γ_i 下的调整结果对比Fig.3 Comparison of control results among different values of Γ_i 表 3 不同 Γ_i 下的控制策略调整量对比Table 3 Comparison of adjustment quantities among control strategies with different values of Γ_i

Γ_i	总调整量/MW	Γ_i	总调整量/MW
0~1	0	1.6	17.423 5
1.2	10.988 3	1.8	21.515 5
1.4	13.582 8	2.0	24.758 8

由图 3 及表 3 可见,系统的经济性与安全性往往是矛盾的。当 Γ_i 从 1 变为 1.2 时,概率上限估计值由 1 减小至 0.875 7,也即违反系统运行约束的概率减小了约 0.12,校正控制策略产生的经济成本增加;随后,当 Γ_i 每增加 0.2,违反运行约束的概率减小,对应的经济成本呈线性增加;当 Γ_i 从 1.8 增加到 2.0 时,概率上限估计值由 0.271 4 降为 0,此时对应的控制策略鲁棒性最强,经济性最差。校正控制的最优解在鲁棒性越强时能兼顾到的风电波动范围越大,伴随的是调整量越多,经济性越差;而最优解在经济性越好时考虑到的风电波动范围越小,鲁棒性越差,系统在应对风电波动时出现线路过载的概率越高,调整策略的安全性难以保证。

分布鲁棒优化模型中引入的变化约束变量可对经济性与安全性进行取舍。调度运行人员可以结合风电预测数据及调度经验选择合适的风电波动范围进行考虑,调整模型中变化约束变量的大小,得到相应的概率评估信息,灵活选择合理的校正控制方案,兼顾安全性和经济性。

3.3 风电波动范围对校正控制的影响

分析系统中风电出力波动范围对故障后校正控制措施的影响,令风电场 W1 和 W2 的有功出力波动范围从当前出力的 $\pm 10\%$ 开始以 1% 的间隔增加至 $\pm 20\%$,系统在初始状态下发生 2 种故障时所得控制策略的经济成本变化如图 4 所示。

同一种故障模式下,不同的风电出力波动幅度对控制成本的影响程度有所不同。由图 4 可以看出,当系统当中的风电波动幅度不断增大时,最优解对应的经济成本持续增加,这是由于风电出力波动范围的增大给系统带来的不确定性增强,为应对这种不确定性,保证校正后的系统状态的安全水平,需要采用更为保守的控制措施。这种控制措施虽然牺牲了更多的经济成本,但也为系统运行安全提供了更为可靠的保障。调度运行人员可根据实际运行中

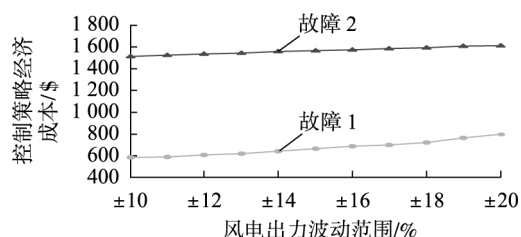


图4 不同风电波动范围下的调整结果对比

Fig.4 Comparison of control results among different wind power fluctuation ranges

风电预测结果,对不同的故障有针对性地选择控制策略的鲁棒性,兼顾控制成本经济性,为风电并网下系统的安全校正提供有效的决策支持。

4 结论

本文提出一种考虑风电不确定性的静态安全校正控制模型。采用风功率预测区间和均值描述其不确定性,与现有风电预测方法合理对接,参数易获取且通用性强。在此基础上建立安全校正的分布鲁棒线性优化模型,并转化为鲁棒对等模型进行求解。算例结果表明,随着风电波动范围的增大,风电输出的不确定性对系统安全影响越大,在保证校正控制措施的鲁棒性最强的情况下,消耗的经济成本越高,而模型可通过调节计及的风电波动范围使校正控制措施在鲁棒性和经济性之间进行折中,为调度运行人员提供更为灵活的调整方案。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 傅旭. 电力系统静态安全混合控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 124-130.
FU Xu. Hybrid control of power system static security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 124-130.
- [2] PIPELZADEH Y, MORENO R, CHAUDHURI B, et al. Corrective control with transient assistive measures: value assessment for great Britain transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1638-1650.
- [3] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 25-30.
ZHAO Jinquan, CHIANG Hsiaocong, ZHANG Boming. A successive linear programming based on-line static security corrective control approach[J]. Power System Technology, 2015, 29(5): 25-30.
- [4] 程临燕, 郝治国, 张保会, 等. 基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 51-55.
CHENG Linyan, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Fast elimination of overload in transmission line section based on simplified primal-dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 51-55.
- [5] 王韶, 刘沛铮, 董光德, 等. 基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 162-168.
WANG Shao, LIU Peizheng, DONG Guangde, et al. Power system cascading failure model based on complex network theory with consideration of corrective control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 162-168.
- [6] ROALD L, MISRA S, KRAUSE T, et al. Corrective control to handle forecast uncertainty: a chance constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1626-1637.
- [7] VRAKOPOULOU M, MARGELLOS K, LYGEROS J, et al. A probabilistic framework for reserve scheduling and $N-1$ security assessment of systems with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3885-3896.
- [8] 周任军, 姚龙华, 童小娇, 等. 采用条件风险方法的含风电系统安全经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 56-63.
ZHOU Renjun, YAO Longhua, TONG Xiaojiao, et al. Security economic dispatch in wind power integrated systems using a conditional risk method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 56-63.
- [9] 薛志英, 周明, 李庚银. 基于条件风险价值的电力系统短期充裕性决策[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 96-104.
XUE Zhiying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Short-term adequacy decision of power systems based on CVaR[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 96-104.
- [10] 江东林, 徐向东, 刘天琪, 等. 考虑校正控制的含风电场安全约束优化潮流[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 172-177.
JIANG Donglin, XU Xiangdong, LIU Tianqi, et al. Security-constrained optimal power flow of power grid connected with wind farms considering corrective control[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 172-177.
- [11] 田建芳, 毛亚珊, 翟桥柱, 等. 基于风电消纳能力评估的安全约束经济调度方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2398-2403.
TIAN Jianfang, MAO Yashan, ZHAI Qiaozhu, et al. Security constrained unit commitment with wind power based on evaluation of wind power penetration capacity[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2398-2403.
- [12] 刘斌, 刘锋, 王程, 等. 适用于鲁棒调度的风电场出力不确定性集合建模与评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 8-14.
LIU Bin, LIU Feng, WANG Cheng, et al. Uncertainty set modeling and evaluation of wind farm power output for robust dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 8-14.
- [13] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 134-143.
YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 134-143.
- [14] DING T, LIU S, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.
- [15] 臧海祥, 余爽, 卫志农, 等. 计及安全约束的虚拟电厂两层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 96-102.
ZANG Haixiang, YU Shuang, WEI Zhinong, et al. Safety-constrained two-layer optimal dispatch of virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 96-102.
- [16] QIN Z, HOU Y, LEI S, et al. Quantification of intra-hour security-constrained flexibility region[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 671-684.
- [17] KORAD S, HEDMAN K. Enhancement of do-not-exceed limits with robust corrective topology control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1889-1899.
- [18] KANG S C. Robust linear optimization using distributional information[D]. Boston, USA: Boston University, 2008.
- [19] OVERBYE T. Power system simulation: understanding small and large system operations[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2004, 2(1): 20-30.

[20] 陈雁,文劲宇,程时杰. 电网规划中考虑风电场影响的最小切负荷量研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):20-27.

CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Minimum load-curtailment in transmission network planning considering integrated wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34):20-27.

作者简介:

张 尚(1991—),女,河南郑州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用(E-mail:zhangshang@ncepu.edu.cn);



张 尚

顾雪平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用(E-mail:xpgu@ncepu.edu.cn);
王 涛(1976—),男,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制和智能技术在电力系统中的应用(E-mail:wtwx@126.com)。

Static security corrective control method of wind power-integrated system based on distributional robust optimization

ZHANG Shang, GU Xueping, WANG Tao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A static security corrective control method for power system is proposed with the consideration of wind power uncertainties. In order to rationally connect with wind power forecasting method, the range and mean value of wind power output are used to describe the uncertainties. An active power security corrective control model is established with the consideration of wind power fluctuations, which takes the minimum economic cost of adjustment measure as its objective, and considers two control measures of generator output adjustment and load shedding. On the basis of distributional robust linear optimization theory, the corrective control model with uncertainty parameters is converted to robust peer-to-peer model only with certainty parameters, which is solved by linear programming method. The case results of a regional power grid show that the corrective control scheme obtained by the proposed model can deal with various wind power fluctuations, meanwhile, the model can realize the transition between economy and robustness of control strategy, and give corresponding possibility evaluation of robustness degree for control strategies.

Key words: wind power; corrective control; uncertainty; distributional robust linear optimization

(上接第57页 continued from page 57)

Harmonic resonance analysis for wind-thermal-bundled half-wavelength AC transmission system

CHEN Chang, YANG Honggeng

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Large distributed capacitors between ground and long distance overhead transmission lines and cables can easily cause the harmonic resonance problems for the grid-connected wind power system. In order to analyze the harmonic resonance amplification characteristics of the large-scale wind-thermal-bundled half-wavelength AC transmission system, the decoupling matrix of harmonic resonance transmission and amplification is derived based on the selective modal analysis. The interactive participation factor is used to evaluate the excitation effect of harmonic disturbance sources on any nodes in the system, and to determine the nodes which are easily affected by the harmonic resonance transmission and amplification. The harmonic response voltage of each node caused by the characteristic harmonics, which have larger contents in the actual grid-connected wind power system, is analyzed according to the different proportions of wind power when the resonance happens. The standardized sensitivity and its dominant coefficient are introduced to analyze the element sensitivity with a comprehensive consideration of various resonance conditions, which can provide a theoretical basis for suppressing multiple harmonic resonance amplification or subharmonic resonance simultaneously. Simulation shows that, there may have harmonic resonance amplification in the wind-thermal-bundled half-wavelength AC transmission system. As the proportion of wind power increases, the resonance frequency decreases gradually. The 7th and 11th harmonic resonance amplifications have serious influences on the 35 kV and 110 kV buses, which may endanger the safe operation of the system. The head and end of the half-wavelength transmission line are not affected by the harmonic resonance transmission and amplification and can operate safely. The simulation is carried out with PSCAD to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: wind-thermal-bundled; half-wavelength transmission line; AC transmission system; modal analysis; harmonic resonance; participation factor; standardized sensitivity

附录：

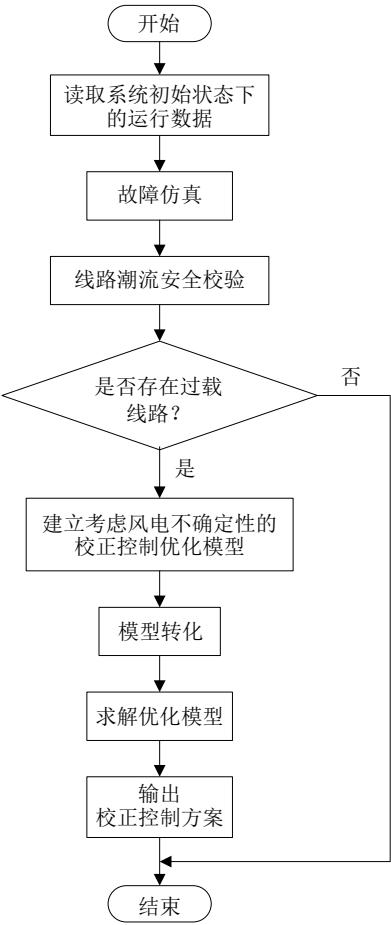


图 A1 校正控制流程图

Fig. A1 Flowchart of correction control

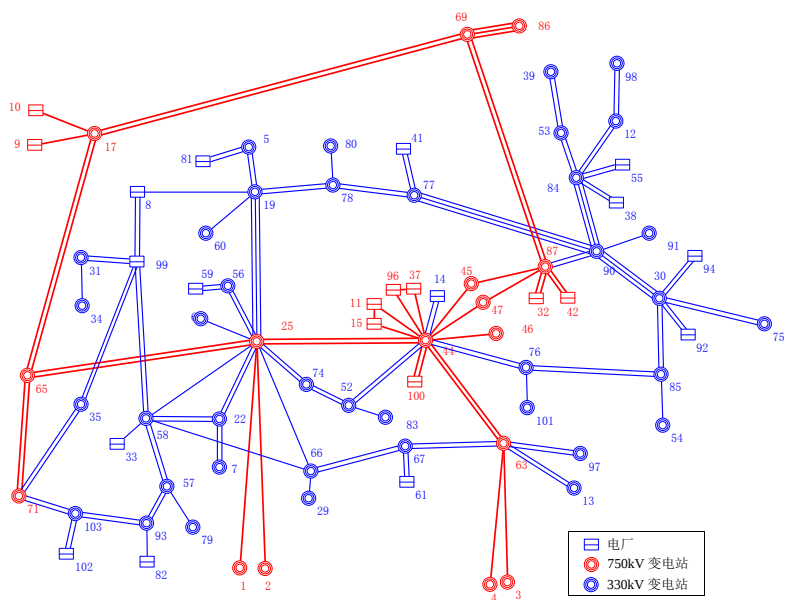


表 A1 风电场参数

Table A1 Parameters of wind farms

节点 编号	风电场 编号	当前出力/ MW	最大出力 /MW	平均出力 /MW	波动区间/ MW
33	W1	540	807	510	[486,594]
82	W2	209	832.5	190.6	[188.1,229.9]