

基于机会约束规划法和非支配排序差分进化算法的含风电多目标输电网规划

在含有风电场的输电网规划问题中,考虑了风电和负荷的不确定性,以规划方案的经济性、对环境的影响最小以及最大化风电并网容量为优化目标,基于机会约束规划的方法构造了计及风电和负荷不确定性因素影响的多目标输电网规划扩展模型,采用蒙特卡洛法和非支配排序差分进化(NSDE)算法对该模型进行求解,为考虑不确定因素的多目标输电网规划问题提供了一种更为灵活的解决方法。

黄 映 周科峰 叶 婷/南京供电公司

0 引言

电网规划是电力系统研究领域中的一个重要环节,随着可再生能源的快速发展和电力系统规模的不断扩大,电网规划问题变得日益复杂。风电作为一种可再生能源,近年来在我国快速发展。但风电本身所固有的随机性和间歇性,给电力系统的规划和运行增加了许多新的不确定因素^[1]。传统的输电系统规划一般假定规划期内的系统发电机出力 and 负荷水平是确定的,规划方法比较保守,不能灵活应对各种不确定性因素对系统规划造成的影响。

近年来,计及不确定性因素影响输电系统灵活规划方法成为了输电系统规划领域研究的热点之一^[2-4]。然而国内外对输电系统灵活规划方法的研究主要集中在对不确定性因素的模拟和求解算法等方面,但是许多影响输电系统规划的不确定性因素难以用严格的数学方法描述。为处理这些不确定性因素,场景决策方法^[5]受到了比较普遍的重视。该方法基于情景分析法的原理,以概率为基

础确定每种场景的重要程度,再根据给定的评价方法进行比较,求得最佳规划方案。虽然场景方法原理简单,但需要事先设定未来可能的场景,而影响输电系统规划的不确定性因素很多且变化多样,对于大规模电力系统来说存在一定的困难。

含大型风电场的多目标输电网扩展规划问题的研究需要适应可再生能源快速发展的要求,在考虑风电场出力和负荷预测带来的不确定性因素情况下,使得电网对可再生能源具有容纳性和适应性,能够支持大型风电场正确合理的接入。在多目标优化问题的众多算法里,非支配排序差分进化(NSDE)算法融合了Pareto快速非支配排序法和差分进化操作,增强了种群多样性和全局搜索能力,该算法能够有效协调各目标之间的冲突^[6]。

对含有大型风电场的规划系统,基于机会约束规划的方法构造计及风电和负荷不确定性因素影响的多目标输电网规划模型,并利用蒙特卡洛法处理含有随机变量的约束条件,采用NSDE算法求解该多目标优化模型。算例结果与分析表明,该方法能使电力网络在满足一定的约束条件下尽可能地利用风能,并权衡规划方案的优化目标。

1 风电场出力和负荷不确定性及模拟

1.1 风电的不确定性及其模拟

风电机组输出功率的随机性主要是



黄 映/工程师

关键词/Keywords

输电网规划·
多目标优化·
风力发电场·
非支配差分进化算法·
机会约束规划·

由风速引起的,对大量实测数据的统计结果表明,绝大多数地区的平均风速分布都可以采用威布尔(Weibull)分布函数来描述,其概率密度函数为^[7]

$$\varphi(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad k > 0, v > 0, c > 1 \quad (1)$$

式中, v 为风速, m/s; c 为尺度参数, 反映了所描述地区的年平均风速; k 为形状参数, 该参数对应威布尔分布密度函数的形状, 反映了风速的分布特点, 取值范围为 1.8~2.3。

风速与风电机组出力之间的数学关系可用以下分段函数近似计算^[7], 即

$$\tilde{P}_{\text{wind}} = \begin{cases} 0 & V < V_{\text{ci}}, V > V_{\text{co}} \\ \frac{(\tilde{V}^3 - V_{\text{ci}}^3) \cdot P_N}{V_N^3 - V_{\text{ci}}^3} & V_{\text{ci}} \leq V \leq V_N \\ P_N & V_N < V \leq V_{\text{co}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\tilde{P}_{\text{wind}}$ 为风电机组出力; V 为风速; V_{ci} 为切入风速, 当风速高于切入风速时, 自动装置把风机并入电网, 准备发电; V_{co} 为切出风速, 当风速高于切出风速时, 风电机组停止发电, 从电力系统中解列出来; V_N 为额定风速, 当风速大于或等于额定风速而小于切出风速时, 风电出力为额定值; P_N 为风电机组额定功率。

蒙特卡洛 (Monte Carlo) 模拟法是基于重复随机抽样的一种随机模拟方法, 在风速分布和风机的特性已知的情况下, 风电场的输出分布用 Monte Carlo 法模拟。假设风速 $\tilde{V}$ 的分布服从 Weibull 分布, 根据式 (2) 所示的分段函数计算出的风电场输出功率抽样值, 得到如图 1 所示的风电

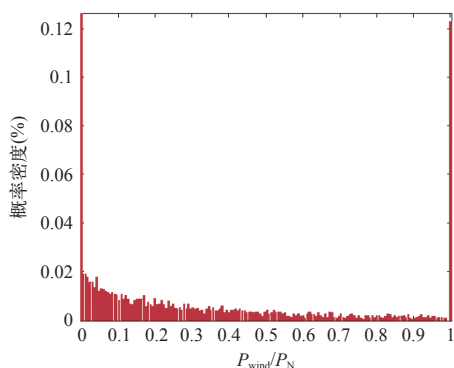


图1 风电场出力概率密度分布示意图

场出力概率密度分布示意图。其中, 参考通用兆瓦级风机参数, 切入风速 V_{ci} 取 3 m/s, 切出风速 V_{co} 取 25 m/s, 额定风速 V_N 取 11 m/s; 文献[8]中江苏东沿海地区 5 月份风速分布函数, Weibull 分布的尺度参数 c 取 7.11 m/s, 形状参数 k 取 2.21, 即平均风速为 6.29 m/s。

1.2 负荷的不确定性及模拟

负荷的不确定性主要表现在随机性和模糊性两方面。假设规划系统中各节点负荷服从正态分布, 即 $P_{\text{load}} \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其概率密度函数为

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (3)$$

式中, μ 为各节点负荷 P_{load} 的预测期望值, 反映了密度曲线沿着水平轴线的分布; σ 为 P_{load} 的预测标准差, 反映了密度曲线的形状。用 Monte Carlo 法模拟, 负荷预测标准差 σ/μ 取为 2%。

2 基于机会约束规划的多目标输电网规划模型

机会约束规划^[9-10]是处理不确定性决策和优化问题的一种有效方法, 主要用于约束条件中含有随机变量, 且必须在观测到随机变量的实现之前作出决策的优化问题。

由于电力系统负荷预测存在一定的偏差, 风电场风况条件也具有很大的间歇性和随机性, 在个别时候可能有某些约束条件无法满足, 不利于风电场向系统送电, 但是这些情况发生的概率又很低, 需要灵活处理这些可能发生的情况, 即允许某些约束条件不满足, 且其发生的概率应该小于某一概率值。考虑到输电系统规划问题中的这些不确定因素, 从数学上采用机会约束规划的方法进行求解, 在含有随机变量风电场输出功率和负荷的约束条件中, 将线路输送能力限制以概率的方式表示。

基于上述思想, 本文构造的基于机会约束规划的多目标输电网扩展规划模型是在计及风电和负荷不确定性因素的情况下, 以规划方案的投资维护费用最小、运行费用最小、线路走廊占地面

积最小和并入系统风电场的装机总容量最大为目标, 允许所形成的规划方案在某些比较极端的正常情况和 $N-1$ 情况下不满足线路潮流约束, 且约束条件成立的概率必须不小于某一置信水平。模型对应的目标函数为

$$\min f_1 = (k_1 + k_2) \sum_{j \in \Omega_1} c_j l_j x_j \quad (4)$$

$$\min f_2 = k_3 \sum_{j \in \Omega_2} r_j P_j^2 \quad (5)$$

$$\min f_3 = \sum_{j \in \Omega_1} a_j w_j(x_j) l_j \quad (6)$$

$$\min f_4 = \sum_{i \in \Omega_{\text{wind}}} C_{\text{wind}i} \quad (7)$$

式中, f_1 为规划方案的建设投资费用, 万元; k_1 为

资金回收系数, $k_1 = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$, 其中 r 为贴现率;

n 为工程经济使用年限; k_2 为工程固定运行费用率; c_j 为单位长度线路造价, 万元/km; x_j 为线路 j 中新建线路回路数; l_j 为线路 j 的长度, km; Ω_1 为待选新建线路集合; f_2 为线路的可变运行费用, 万元, 用年网损费用表示; k_3 为年网损费用系数; r_j 为线路 j 的电阻, Ω_2 为网络中已有的和新建的线路集合; f_3 为线路走廊对环境的影响; a_j 为反映输电走廊所在地区的环境影响系数, 不同社会环境和自然地理环境的 a_j 有不同; w_j 为输电线路的走廊宽度, 与该输电走廊的线路回路数有关, 即 $w_j l_j$ 为线路走廊占据的空间面积, km^2 ; f_4 为并入系统风电场的装机总容量, MW; $C_{\text{wind}i}$ 为节点 i 风电场并网容量; Ω_{wind} 为风电并网节点集合。

而线路的相应输送潮流约束在正常情况下为

$$\Pr\{|P_l^{(0)}(\tilde{P}_{\text{wind}}, \tilde{P}_{\text{load}})| \leq P_{l\max}\} \geq \beta_0 \quad (8)$$

在 $N-1$ 情况下为

$$\Pr\{|P_l^{(i)}(\tilde{P}_{\text{wind}}, \tilde{P}_{\text{load}})| \leq P_{l\max}\} \geq \beta_1 \quad (9)$$

式中, β_0 、 β_1 分别为正常情况和断开第 i 条线路情况下线路潮流约束的置信水平; 线路有功潮流 P_l 为关于随机量 $\tilde{P}_{\text{wind}}$ 和 $\tilde{P}_{\text{load}}$ 的函数; $\tilde{P}_{\text{wind}}$ 为按照式(2)计算出的风电场输出功率; $\tilde{P}_{\text{load}}$ 为节点负荷, 假设其服从期望为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 这

里 $\sigma/\mu = 2\%$, 根据“ 3σ 法则”, 负荷波动范围为预测值的 $\pm 6\%$ 。

3 基于蒙特卡洛法和NSDE算法的多目标电网规划问题求解

基于蒙特卡洛法验证正常情况下线路潮流约束时, 由于风机有功出力是关于风速的分段函数, 因此式(8)可以写为如下的机会约束形式, 即

$$\Pr\{|P_l^{(0)}(\tilde{V}, \tilde{P}_{\text{load}})| \leq P_{l\max}\} \geq \beta_0 \quad (10)$$

对于式(10)的机会约束, 线路有功潮流 P_l 为随机量, 对某一组给定的决策变量即候选的规划方案, 使用蒙特卡洛法检验式(10)是否成立的流程如图2所示。

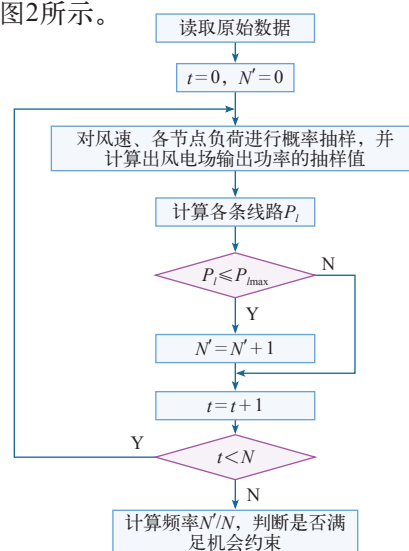


图2 蒙特卡洛法模拟算法流程

首先从风速的概率分布 $\varphi(v)$ 中产生 N 个独立的随机向量 $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_N$; 从节点负荷的概率分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 中产生 N 个独立的随机向量 $\tilde{P}_{\text{load}1}, \tilde{P}_{\text{load}2}, \dots, \tilde{P}_{\text{load}N}$ 。对线路潮流约束条件, 设 N' 为 N 次试验中 $|P_l^{(0)}(\tilde{V}, \tilde{P}_{\text{load}})| \leq P_{l\max}$ 成立的次数, 即所产生的随机变量中满足约束的个数。根据大数定律, 可以用频率 N'/N 估计 $\Pr\{|P_l^{(0)}(\tilde{V}, \tilde{P}_{\text{load}})| \leq P_{l\max}\}$ 的数值, 且仅当 $N'/N \geq \beta_0$ 时, 式(10)成立。

对于计及风电和负荷不确定性因素的机会约束多目标电网规划问题, 基于蒙特卡洛法处理含有随机变量的约束条件, 采用NSDE算法求解多目

标规划问题，主要步骤如下。

- 1) 输入原始数据。
- 2) 随机形成初始种群作为初始规划方案。对于种群中的每一个体，采用蒙特卡洛法检验其是否满足式（8）、式（9）的机会约束，即根据给定的分布概率通过随机抽样得到风速和负荷值，由此计算线路传输功率，经过重复的随机模拟检验是否违反过负荷机会约束，对违反约束的个体进行惩罚。
- 3) 利用NSDE算法对基于机会约束规划的多目标输电网扩展规划模型进行优化求解。通过差分进化操作、基于个体间非支配关系的快速非支配排序与个体拥挤度计算，以及精英保留策略进行多目标寻优，直到满足中止条件。
- 4) 从Pareto解集中选出一个最优折衷的可行方案。

4 算例及分析

以图3所示的Garver-6节点系统为算例^[11]，并对该算例做出如下修改。节点1和节点6的发电机最大输出功率均扩大为原来的2倍，各节点负荷的预测值也相应扩大为原来的2倍。假设在节点3处接入的是大型风电场，最大化该风电场的装机容量作为规划目标之一，风电场装机容量的范围

为100~300 MW。根据风电场穿透功率极限的定义，风电场穿透功率极限是指系统在正常运行的前提下所能接受的风电场最大装机容量与系统最大负荷的比值，因此在该算例系统中，风电场的输出功率约占总负荷需求（期望值）的7.7%~20 %。

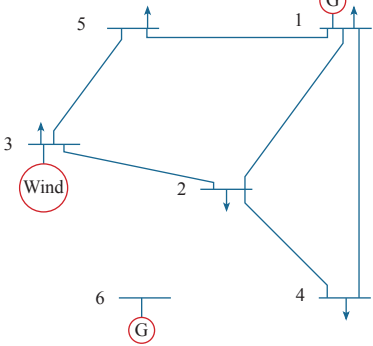


图3 Garver-6节点系统

表1、表2为不同置信水平下以及不同负荷预测标准差（ σ/μ ）下，采用NSDE算法得到的6节点系统算例规划结果。

表1的计算结果表明，随着线路潮流约束置信水平 β_0 和 β_1 取值的减小，即方案过负荷风险的加大，新建线路数目随之减少，费用降低，系统能接受的风电场最大装机容量增大，因违反约束条件而对规划方案经济性和风电场装机容量产生的限制作用有所减少。规划方案加强了风电场节点3

表1 不同置信水平下的6节点系统规划结果（负荷预测标准差 σ/μ 取为2%）

模型	置信水平	新建线路及回数	投建费用 /万元	网损费用 /万元	输电走廊 面积/km ²	风电并网 容量/MW
投建费用、网损费用和 输电走廊占地面积三目标 最小	—	3-5(2), 2-6(4), 4-6(3)	3 692	4 288	164	—
考虑不确定性下的投建 费用、网损费用、输电走 廊占地面积最小和风电并 网最大四目标优化	$\beta_0=0.95, \beta_1=0.9$	2-6(4), 4-6(3), 3-6(1), 2-3(2), 2-5(4)	6 750	8 098	232	280
	$\beta_0=0.9, \beta_1=0.8$	2-6(4), 4-6(2), 3-6(1), 3-5(2), 2-5(2), 3-4(1)	5 647	6 643	230	294
	$\beta_0=0.8, \beta_1=0.7$	2-6(4), 4-6(2), 3-5(1), 2-5(1), 1-4(1)	4 819	4 309	205	300

表2 不同负荷预测标准差下的6节点系统规划结果（ $\beta_0=0.9, \beta_1=0.8$ ）

负荷预测 标准差 σ/μ	新建线路及回数	投建费用 /万元	网损费用 /万元	输电走廊面积 /km ²	风电并网容量 /MW
2%	2-6(4), 4-6(2), 3-6(1), 3-5(2), 2-5(2), 3-4(1)	5 647	6 643	230	294
5%	2-6(4), 4-6(2), 3-6(1), 3-5(2), 2-5(2), 1-4(1), 1-5(1)	5 952	6 808	218	291
7%	2-6(4), 4-6(2), 3-6(1), 3-5(3), 2-5(3), 4-5(1)	6 446	6 792	242	290

与系统的联系,以减小风电出力的不确定性对系统可能造成的影响。随着置信水平的增大,节点6的大容量发电机出力更多地送入系统,减轻风电场不确定性对输电系统规划的影响。

表2中,不同的负荷预测标准差体现了不同的负荷波动水平,系统在满足同一负荷概率时,规划方案和规划费用等优化目标与系统各节点负荷的分布关系很大。随着负荷预测偏差的增大,规划系统需要新建更多的线路以减少负荷波动对系统规划的影响,这也令建设投资维护费用和运行费用有所增加,同时,负荷波动对风电最大并网容量也产生了一定的限制作用。

5 结束语

在基于机会约束规划的多目标输电网扩展规划模型中,由蒙特卡洛方法模拟出风电场出力以及节点负荷的概率分布,将含有随机变量的线路输送能力限制以概率的方式表示,以规划方案的经济性、对环境的影响最小以及最大化风电并网容量作为电网规划的优化目标,采用NSDE多目标优化算法进行求解。算例中通过对不同置信水平(不过负荷概率)和负荷预测偏差的设置,计算出考虑风电场出力和负荷预测的不确定性因素下的规划结果。置信水平反映了规划决策者对系统过负荷情况的重视程度,负荷预测标准差反映了负荷的波动水平和分布情况。与传统的确定性规划方法相比,该方法的应用更加灵活。电网规划方案可以根据规划决策者对系统过负荷情况的不同重视程度和对系统负荷波动、分布的掌握情况,在规划方案的优化目标和过负荷风险、系统负荷波动情况之间进行权衡,从而得到满足实际需要和决策者偏好的规划方案。

参考文献

[1] 孙元章,吴俊,李国杰.风力发电对电力系统的

影响[J].电网技术,2007,31(20):55-62.

[2] Yehia M, Chedid R, Ilic M, et al. A global planning methodology for uncertain environments: application to the lebanese power system [J]. IEEE Transactions on Power System, 1995, 10 (1): 332-338.

[3] Saraiva J T, Miranda V, Pinto L M V G. Impact on some planning decisions from a fuzzy modeling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (2): 819-825.

[4] Madan S, Bollinger K E. Applications of artificial intelligence in power systems [J]. Electric Power Systems Research, 1997, 41 (2): 117-131.

[5] 高赐威,程浩忠,王旭.考虑场景发生概率的柔性约束电网规划模型[J].中国电机工程学报,2004,24(11):34-38.

[6] 黄映,李扬,高赐威.基于非支配排序差分进化算法的多目标电网规划[J].电网技术,2011,35(3):86-89.

[7] Bowden G J, Barker P R, Shestopal V O. The weibull distribution function and wind power statistics [J]. Wind Engineering, 1983, 11 (7): 85-89.

[8] 姚国平,余岳峰,王志征.江苏如东地区风速数据分析及风能发电储量[J].华东电力,2003(11):92-95.

[9] Charnes A, Cooper W W. Chance constrained programming [J]. Management Science, 1959, 6 (1): 73-79.

[10] 杨宁,文福拴.基于机会约束规划的输电系统规划方法[J].电力系统自动化,2004,28(14):23-27.

[11] Rider M J, Gareia A V. A constructive heuristic algorithm to short term transmission network expansion planning [C]. Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2004.

(收稿日期:2015-06-17) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告