

考虑发电和负荷不确定因素的输电网灵活规划

麻常辉¹, 杨永军¹, 鄢安河², 张鹏飞³

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 河南电力调度通信中心, 河南 郑州 450052;
3. 江西省电力公司, 江西 南昌 330077)

摘要: 电力市场改革给输电网规划带来了新的挑战, 传统的只考虑一种未来场景的输电网规划方法不能满足实际要求。对市场环境下的不确定性因素进行建模并反映到输电网规划模型中, 按照线路概率性的 $N-1$ 准则建立输电网灵活规划模型, 采用基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的求解方法, 最终得到未来不确定性环境下投资风险最小的输电网规划方案, 仿真验证了该模型的合理性和求解方法的有效性。

关键词: 输电网规划; 电力市场; 不确定性; 遗传算法; 蒙特卡罗仿真

On transmission flexible planning considering the uncertainties of generation and load

MA Chang-hui¹, YANG Yong-jun¹, YAN An-he², ZHANG Peng-fei³

(1. Shandong Electric Research Institute, Jinan 250002, China; 2. Henan Electric Power Dispatching & Communication Center, Zhengzhou 450052, China; 3. Jiangxi Electric Power Corporation, Nanchang 330077, China)

Abstract: Deregulation of the power industry brings many new challenges to the transmission system optimal planning problem. The traditional transmission planning of merely focusing on one future scenario could not meet the practical demands. This paper discusses uncertainties in the electricity market environment, and then establishes a transmission flexible planning model with probabilistic $N-1$ safety criteria of transmission line. A method is proposed for solving the optimization problem using Monte Carlo simulation method and genetic algorithm, and a planning scheme with the least investment risk in the face of future uncertainties can be obtained. A numerical example is presented to illustrate the validity of the method.

Key words: transmission expansion planning; electricity market; uncertainty; genetic algorithm; Monte Carlo simulation

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)21-0029-04

0 引言

在传统的垂直一体化体制下, 输电网规划是建立在负荷预测和发电规划的基础上, 通常只考虑一种最可能出现的未来场景, 把 N 或 $N-1$ 静态安全作为必须满足的条件^[1-4], 一般用罚函数方式来处理静态安全约束要求, 不能处理各种不确定性因素的影响。由于未来不确定性因素的影响, 数学上严格的最优方案却可能导致大量的补偿投资。特别是在电力市场条件下, 电网规划面临着越来越多的不确定因素, 新增发电机组和老机组的退役不再是集中式的统一规划, 而是取决于发电公司或投资者自己的决策。除发电厂位置与装机容量难以准确预测外, 市场竞价结果也会引起机组发电出力变化的不确定性, 以及电力市场发展所导致的合作与竞争的不确定性等, 这些因素都给输电网规划带来了新的挑战^[5-7], 需要新的方法和工具来处理这些不确定性因

素^[8]。

针对不确定性因素的处理, 近年来相继出现了一些新方法。文献[9]采用模糊规划方法, 在进行规划之前对各种数据、专家经验和语言规则等资料进行模糊化处理, 对输入输出之间的关系通过模糊规则来描述, 利用模糊集理论改进传统规划方法的灵活性和强壮性。文献[5,10]采用场景决策方法进行不确定性规划, 根据已知的数据信息来设想多种可能的未来环境。其中的每个场景代表了一个确定的未来环境, 在每个场景下进行确定性的输电网优化规划, 再根据一定的决策方法来选择最优方案。文献[11]考虑了线路被选概率, 根据电网可靠性要求和算出的线路被选概率, 将各条待选线路按顺序加入网架, 形成一种具有较好适应性的电网灵活规划方案。文献[12]将机会约束规划方法应用于输电系统规划, 探索了在不确定环境中考虑静态安全性约束的输电网规划问题。

本文讨论了市场环境下载电网规划所面临的不确定性因素,在系统节点注入不确定的条件下,按照线路概率性的 $N-1$ 约束建立了输电网灵活规划模型。根据指定的静态安全过载概率允许值,采用基于蒙特卡罗仿真和遗传算法来求解输电网规划方案,所得规划方案能够兼顾经济性与安全性,在未来不确定性环境下投资风险最小,通过算例仿真对该方法进行了验证。

1 不确定的注入功率向量

电力市场中的厂网分开,使得输电网的规划模式也发生了重大的变化,电网投资者的目的从原来的发、输、配电总体利益最大化转变成电网建设和运行利益最大化。世界上已经进行了电力工业市场化改革的国家,所采取的电力市场结构体制和运行方式不尽相同,输电网的规划模式也有差别,一般可分为基于管制的方式和基于市场驱动的方式,市场条件下采用怎样的方式进行电网规划仍是一个比较有争议的问题。文献[13~15]讨论了发展中国家电力市场重组的主要因素,并指出在亚洲的发展中国家,输电网络正经历快速发展的阶段,集中式的输电网统一规划和长期的电网投资对于快速发展的电力系统是必要的,进而对发展中国家输电网规划的模式进行了探讨。

随着我国电力市场改革的逐步深入,电厂与电网将彻底分离,分别成为独立的发电公司和具有自然垄断地位的电网公司,电网公司作为一个独立的、特殊的市场参与者,受政府和相应的监管机构的监管。我国和英国、西班牙和南美的一些国家一样,仍坚持输电网的统一规划,由政府或有关部门推荐新电厂的位置和装机容量供投资者参考^[16]。因此,在进行输电系统规划时,对未来的发电厂厂址及其容量可以在相当程度上做出估计。

对未来电厂的厂址、容量和负荷等不确定性因素估计后,可以用概率密度函数描述这些随机变量并反映到模型中。设规划期内节点 i 的新装机容量

$P_{G,i}$ 服从离散概率分布:

$$P_r\{P_{G,i} = P_{G,i}^k\} = p_i^k \quad (k=1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

其中: $0 \leq p_i^k \leq 1$, $\sum_{k=1}^M p_i^k = 1$

设节点 i 的有功负荷 $P_{D,i}$ 服从正态分布 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$, 其中 μ_i 和 σ_i 分别为负荷的期望值和标准差。节点 i 的有功注入功率 $P_i = P_{G,i} - P_{D,i}$, 将

节点注入功率的随机向量记为 ξ_p 。

2 考虑不确定性因素的输电网规划模型

市场环境下的电源建设和负荷增长,以及发电厂竞标行为产生的各发电机节点发电出力等不确定性因素,会引起系统节点有功注入的不确定,按照线路概率性 $N-1$ 准则建立考虑不确定性因素的输电网灵活规划模型:

$$\min Z = C_1(X) \quad (2)$$

s.t.

$$\begin{cases} B\theta = \xi_p \\ P_b = B_b\theta_b \\ |P_b| \leq P_{b,\max} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} B^k\theta^k = \xi_p^k \\ P_b^k = B_b^k\theta_b^k \\ \sum_{k=1}^N q^k P_r\{|P_b^k(\xi_p^k)| > P_{b,\max} / X\} \leq \alpha \end{cases} \quad (4)$$

式(2)中:决策变量 X 是待选线路向量,代表了规划方案; $C_1(X)$ 为线路投资费用和运行费用;式(3)为正常运行的安全约束;式(4)为线路概率性 $N-1$ 静态安全约束。 B 和 B^k 为节点导纳矩阵,分别对应于无开断方式和支路 k 开断方式,向量 θ 和 θ^k 分别为上述两种方式下的节点电压相角, P_b 和 P_b^k 为对应的支路潮流, θ_b 和 θ_b^k 为支路两端相角差, B_b 和 B_b^k 为各支路导纳组成的对角阵, $P_{b,\max}$ 为支路的热容量极限, q^k 为只有支路 k 开断的概率, $P_r\{E/F\}$ 表示在条件 F 成立时,事件 E 成立的概率。 α 是 $N-1$ 开断后,允许其他支路发生过载的概率。 $\alpha=0$ 对应于多种运行方式下的 $N-1$ 静态安全约束。

3 基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的寻优方法

3.1 包含随机向量的约束条件检验

上述输电网规划模型的约束条件中包含节点注入功率的随机向量 ξ_p ,可以采用蒙特卡罗仿真方法进行线路概率性 $N-1$ 约束的检验。首先对各电源和负荷注入功率进行随机抽样获得 M 个注入功率向量 P , 设第 K 条支路开断后,不满足静态安全约束的注入功率向量数为 M' , 则过负荷的概率 $P_r\{|P_b^k(\xi_p^k)| > P_{b,\max} / X\} = M'/M$, 如果所有 $N-1$

由表 3 可以看出, 随着 $N-1$ 静态安全过载概率值 α 的减小, 所得规划方案的投资费用也增大, 当 $\alpha = 0$ 时, 所有运行方式的 $N-1$ 静态安全不过载, 但所需的投资费用较大, 规划时可以根据实际需要选择规划方案。

5 结论

仅考虑一种未来场景的确定性 $N-1$ 输电网规划方法并不能满足未来电力系统的运行要求, 本文提出的输电网灵活规划模型, 计及未来市场环境下的电源和负荷注入不确定性因素, 以线路 $N-1$ 过载概率值为安全约束, 兼顾规划方案的安全性和经济性。

求解时利用蒙特卡罗仿真处理不确定性, 按照给定的 $N-1$ 静态安全过载概率值, 所得规划方案在未来的不确定性环境下更具灵活性和适应性。

参考文献

[1] 文福拴, 韩祯祥. 基于 Tabu 搜索方法的输电系统最优规则[J]. 电网技术, 1997, 21(5): 2-7.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. A Tabu Search Method to the Optimal Planning of Transmission Network[J]. Power System Technology, 1997, 21(5): 2-7.

[2] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 基于蚁群最优的输电网络扩展规划[J]. 电网技术, 2001, 25(6): 21-24.
CHEN Gen-jun, WANG Lei, TANG Guo-qing. An Ant Colony Optimization Method for Transmission Network Expansion Planning[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 21-24.

[3] 伍力, 吴捷, 钟丹虹. 多目标优化改进遗传算法在电网规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 45-48.
WU Li, WU Jie, ZHONG Dan-hong. Application of an Optimization Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(12): 45-48.

[4] 王晖, 韩新阳, 胡兆光, 等. 基于模糊控制遗传算法的输电系统最优规划[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 51-55.
WANG Hui, HAN Xin-yang, HU Zhao-guang, et al. Transmission Network Planning and Optimization Model with Genetic Algorithms Based on Fuzzy Logic Controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 51-55.

[5] De La Torre T, Feltes J W. Deregulation, Privatization, and Competition: Transmission Planning Under Uncertainty[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 460-465.

[6] Wong W, Chao H, Julian D. Transmission Planning in A Deregulated Environment[A]. In: IEEE Transmission and Distribution Conference[C]. 1999. 350-355.

[7] David A K, WEN Fu-shuan. Transmission Planning and Investment under Competitive Electricity Market Environment[A]. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2001. 1725-1730.

[8] 麻常辉, 薛禹胜, 鲁庭瑞, 等. 输电规划方法的评述[J].

电力系统自动化, 2006, 30(12): 97-101.
MA Chang-hui, XUE Yu-sheng, LU Ting-rui, et al. A Review of Transmission Planning Methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 97-101.

[9] Ekel P Y, Terra L D B, Junges M F D. Methods of Multicriteria Decision Making in Fuzzy Environment and Their Applications to Transmission and Distribution Problems[A]. In: IEEE Transmission and Distribution Conference[C]. 1999.

[10] Crousillat E O, Dorfner P, Alvarado P, et al. Conflicting Objectives and Risk in Power System Planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3).

[11] 朱海峰, 程浩忠, 张焰. 考虑线路被选概率的电网灵活规划方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 20-24.
ZHU Hai-feng, CHENG Hao-zhong, ZHANG Yan. A Novel Method of Electric Power Network Flexible Planning Considering the Selected Probability of Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 20-24.

[12] 杨宁, 文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 23-27.
YANG Ning, WEN Fu-shuan. An Investigation on Transmission System Expansion Planning Based on Chance Constrained Programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27.

[13] David A K. Restructuring the Electricity Supply Industry in Asia[J]. International Journal of Global Energy Issues, 1998, 10(2).

[14] Leeprechanon N, Moorthy S S, Brooks S R. A Review of Major Factors in Restructuring Power Market in Developing Countries[A]. In: Proceedings of International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management[C]. 2000. 460-464.

[15] Leeprechanon N, Moorthy S S. Transmission Planning in Deregulated Systems: a Model for Developing Countries[J]. IEEE Porto Power Tech Proceedings, 2001.

[16] 曾庆禹. 电力市场条件下的发输电规划协调与运行模式[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 1-4.
ZENG Qing-yu. Generation/Transmission Expansion Planning Model and Operation Model in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 1-4.

[17] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
WANG Xi-fan. Power System Optimization and Planning[M]. Beijing: Hydrolic and Electric Power Press, 1990.

收稿日期: 2008-04-14; 修回日期: 2008-06-26

作者简介:

麻常辉 (1975-), 男, 博士, 主要研究方向为电网规划、电力系统安全分析与控制; E-mail: machanghui@163.com
杨永军 (1961-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划、电力系统数值仿真;
鄢安河 (1952-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行和技术管理等工作。