

输电规划方法的评述

麻常辉^{1,2}, 薛禹胜², 鲁庭瑞³, 王小英³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国电自动化研究院, 江苏省南京市 210003)

(3. 江苏省电力公司, 江苏省南京市 210024)

摘要:评述了输电规划的现状,分析了电力市场改革给输电规划带来的新问题。从优化问题的诸要素出发,归纳现有的输电规划求解方法。指出输电规划在考虑经济性的同时,要以量化的指标来反映系统的安全风险水平,兼顾规划方案的经济性和安全性。在此基础上讨论了输电规划的发展趋势。

关键词:输电规划; 最优规划; 经济性; 安全性; 风险; 电力市场

中图分类号: TM715; F123.9

0 引言

输电规划是电力规划的重要组成部分,其任务是根据规划期间的电源和负荷增长情况,在现有电网的基础上合理选择待建线路,在保证安全运行要求的前提下优化经济性^[1-2]。输电规划长期以来都以线路建设的经济性为优化目标^[3]。由于电网在抵御大扰动能力上的不合理,历史上多次发生大停电事故。这使人们认识到输电规划在考虑投资费用的同时,还应考虑系统的安全稳定性,评估输电系统的安全风险。在发电公司和输电公司尚未分离时,传统的输电规划和发电规划由一体化的经济实体统一负责,输电规划中的不确定性相对较少。随着世界范围内电力工业结构体制的改革,上述一体化的关系已被打破,电力系统的众多参与者使输电规划中的不确定性因素大大增加,现有规划方法难以适应^[4-6]。

输电规划涉及的内容十分广泛,包括选择电网电压、确定输电方式和确定电网结构等。电网电压的选择及交直流输电的配合是一个非常复杂的问题,本文仅讨论输电网络拓扑规划的相关问题。

1 输电规划问题的要素

1.1 数学模型

完整的输电规划模型涉及大量难以确定和量化的因素。如果考虑的因素太少,会使规划结果失去实际意义;考虑因素太多,又可能导致难以求解。

电网规划可分为单阶段及多阶段。单阶段规划

是根据规划初期的数据寻求规划最终水平年的最佳网络结构,不考虑建设的具体过程,采用静态规划模型。多阶段规划则以时间划分阶段,既可采用静态规划方法,也可采用动态规划方法。若将其中各个阶段孤立地作为单阶段规划来优化,则仍属于静态规划范畴;若求取一个决策序列,使各阶段的效益总和达到最优,则为动态规划方法。

1.2 目标函数

长期以来,输电规划一直将经济性作为规划的目标函数,一般包括线路投资费用和电网运行费用(包括网损费用和维护费用)。随着电力市场的发展和对供电可靠性要求的提高,输电规划不仅要求节省线路投资,供电的安全可靠性水平也越来越受到重视。为此,需要多目标的输电规划。以文献[7]为代表的大量文献取线路投资费用和网损为目标。文献[8-9]的目标函数还考虑了由于电力供应不足或中断而造成的用户缺电成本,力图将电网规划的经济性和可靠性有机地结合起来。文献[10]提出,市场条件下的电网规划目标是电网建设费用最小化和市场交易费用最低化。为此,必须估计未来电力市场运营中各发电厂的可能报价及相应的系统潮流,再以这些数据为基础构建电网规划的数学模型,将市场行为和电网规划联系起来。由于发电厂报价策略难以预测,故其困难显而易见。文献[11]考虑了线路建设对环境的影响,目标函数中包括新架线路的出线走廊总占地面积最小。文献[12]用直接法估计切负荷量,并将停电损失加入目标函数,在规划中考虑了暂态稳定性。

1.3 决策变量

基本的决策变量为给定的待选线路集合,其取值反映相应的线路是否被选中,这些整数型变量确定了网络的拓扑结构。灵活交流输电系统

收稿日期: 2006-03-28。

国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2004CB217905);国家自然科学基金重大项目(50595413);国家电网公司科技项目(SGKJ[2004]392)。

(FACTS)具有提高线路输送容量、减少线路投资、动态控制潮流、提高静态和动态稳定性等优点。因此,计入 FACTS 的电网扩展规划是电网规划的新方向^[13]。文献[14]同时考虑了用户侧响应,将电价也作为决策变量。

1.4 约束条件

输电系统不仅要满足负荷和各类交易的需求,而且必须符合供电质量和安全标准。在输电规划的大量约束条件中,除了潮流的等式约束以外,还包括发电机出力上下限、支路热容量、电压和频率、静态安全和动态稳定、线路走廊等不等式约束。为保证算法求解和实际工程的可行性,一般要对约束条件做相应的简化。通常的做法是把 N 或 $N-1$ 静态安全作为必须满足的条件,即要求系统在正常运行状态^[15-16]或任意断开一条线路后^[7,17],不会发生系统解列或元件过负荷。一般用罚函数方式来处理 $N-1$ 静态安全约束要求。

输电规划中的潮流计算有最大流法、交流潮流法和直流潮流法。最大流法只保证节点功率平衡,计算速度快但误差较大;交流潮流用于精确的潮流分析,但在形成方案时需要较大计算量;直流潮流法的精度能满足规划要求,由于计算速度快而得到广泛应用。

1.5 输电规划中的不确定性因素

电力市场的发展使输电规划除了负荷水平以外,还要面临许多新的不确定因素,例如新电厂的位置、容量和投运时间,老机组的退役和旧电厂的关闭,参与者的博弈、管制政策和节点电价水平等。

为了处理各种不确定性因素,一些学者将概率论和模糊集合论引入潮流分析中,产生了随机潮流和模糊潮流计算方法^[18]。

1.6 输电规划的可靠性准则

电力系统可靠性是电力系统按照电能质量标准,不间断地向电力用户供应所需电力和电量的能力,包括充裕度和安全性 2 方面。充裕度指在静态条件下满足用户对电力和电量需求的能力;安全性指在动态条件下电力系统抵御突发扰动的能力^[19]。

为了使将来的电网能够安全稳定运行,各国都制定了详细的规划可靠性准则来保证输电系统的可靠性水平。俄罗斯电网跨度很大,其可靠性准则突出了系统稳定问题。由于单独依靠加强电网来提高安全性并不经济,故特别重视系统反事故自动装置和系统,选择和协调反事故措施。欧洲各国电网跨度较小,电网稳定裕度大,规划时更多地考虑了系统其他特性,而稳定问题只在电网互联运行时被强调。北美电力可靠性委员会(NERC)的规划标准分别从系统充裕度和安全度、系统模型数据要求、系统保护和控制、系统恢复 4 个方面提出了对系统可靠性的

要求。其规划目标是电网在概率较大的故障下能保持预期的负荷需求和输电水平,而在严重的小概率故障下避免系统崩溃。

各国现行输电规划基本遵循 $N-1$ 确定性的可靠性准则,以技术条款和事件校验的方法来评价输电电网的可靠性。尽管都在积极开展概率可靠性研究,但尚未将其纳入输电规划。随着电力市场改革而导致不确定性因素增加,输电网灵活规划方法由于能计及各种不确定因素,逐渐成为输电规划中的一个重要研究方向^[20]。

2 输电规划的求解方法

输电规划是一个带有大量等式和不等式约束的非线性离散组合优化问题,求解方法可以分为数学优化和启发式优化 2 类。也有学者结合其优势,开发了新的电网规划方法^[21-22]。

2.1 数学优化方法

数学优化方法用数学优化模型描述,并通过算法求解电网规划问题,从而获得满足系统要求的最优规划方案。常用的数学工具有线性规划^[23]、整数规划^[24]、混合整数规划^[25]、非线性规划^[26]及动态规划等^[27]。利用数学优化方法进行电网规划的求解,理论上可保证解的最优性。但是,一方面由于实际的电网规划问题非常复杂,求解的计算量过大;另一方面,许多不确定性因素不能完全形式化,或者在大量简化条件下得到的不再是(准)最优解。这使得纯粹的数学优化方法难以胜任大电网的规划问题。

2.2 启发式方法

早期的启发式输电规划方法基于直观分析或基于性能指标对可行路径的参数灵敏度,逐步试探直到方案满足要求为止,例如逐步扩展法和逐步倒推法^[1]。启发式方法通常以交互方式进行,便于人工参与决策,具有直观、灵活、快速的特点。其缺点是难以选择容易计算并能反映问题实质的电网性能指标,也无法从全局的角度考虑各线路决策的相互影响,因此不能保证给出数学上的(准)最优解。

现代启发式优化技术随着计算复杂性理论兴起并不断发展^[28],包括遗传算法、模拟退火、禁忌搜索和蚁群算法等。相对于数学优化方法来说,现代启发式优化算法适于解决组合优化问题以及目标函数或某些约束条件不可微的非线性优化问题,已经成功应用在很多领域。一些学者尝试用这类算法来解决输电规划问题,并取得较好的效果^[15-16,29-30]。虽然无法严格保证解的(准)最优,但通过对优化目标进行有导向的局部或全局搜索,在获得最优解的同时也能给出一些次优解,便于与规划人员的经验相结合。文献[29]首次将遗传算法用于输电规划并提出改善收敛性的措施,避免了一般优化算法的局部

最优或维数灾问题。文献[15]则采用了禁忌搜索算法,发展了相应的数学模型和算法。文献[16]利用蚁群算法的正反馈、分布式计算的特点,初步应用于单阶段输电网扩展规划。文献[31]将模拟退火与遗传算法相结合,以克服传统遗传算法难以解决的不稳定和局部收敛的问题,加快了计算速度。

2.3 灵活规划方法

传统的输电规划方法通常只在负荷预测和发电规划的基础上,考虑一种最可能出现的未来场景,因而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的影响,需要新的方法和工具来处理这些不确定因素^[32-33]。

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[18]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[4,32]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[33]考虑了线路被选概率,根据电网可靠性要求和计算出的线路被选概率,顺序将各条待选线路加入网架,形成一种具有较好适应性的电网灵活规划方案。文献[34]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约束的输电规划问题。

3 市场条件下输电规划需要考虑的问题

厂网分开使输电规划的模式发生重大变化,电网投资的目的从发、输、配电总体利益最大化转变成电网建设和运营利益最大化。文献[35]把各国在电力市场环境下的输电扩展方法分为长期金融输电权、统一管制和市场力等3种方法,对应于不同的市场机制。文献[36]认为应该采用商业和管制相结合的办法,小规模的输电系统扩展工程采用商业方法,大规模工程通过统一管制的方法。无论采取何种方式,输电规划的监管都必不可少。

电网公司作为具有自然垄断地位的独立公司和特殊的市场参与者,受到政府监管,输电规划面临更多的不确定因素。文献[37-39]讨论了发展中国家电力市场重组的主要因素,指出亚洲的发展中国家的输电网正经历快速发展阶段,集中式的输电网统一规划和长期的电网投资是必要的,并探讨了发展中国家输电规划的模式。文献[40]根据我国电力市

场和电网结构的特点,推荐采用“统一规划、发电投标决策”和“参考规划、发电自主决策”的规划模式,推荐新电厂位置和装机容量供投资者参考,并协调输电和发电规划。文献[41]指出市场条件下要重新定义输电规划的目标,制定输电规划可靠性的新标准,并针对更多的不确定性因素提出输电规划和投资经济性评估的新方法。

4 关于风险观点的讨论

输电规划方案既要有好的经济性,又要满足一定的静态和动态安全水平,需要用量化的指标加以反映。由于输电规划数学模型求解上的困难,目前一般只用 $N-1$ 静态安全约束来保证输电充裕度,而对输电的动态安全性则采用后校验的方法,即在方案形成后用严重事故来校验系统的动态安全性。

4.1 引入风险观点的必要性

过于强调输电网投资的经济性可能增加产生大规模停电事故的风险,而为保证小概率故障下的系统完整性又需要过高的电网投资,输电规划应在一定风险水平下达到经济性最优。因此,输电规划安全性和经济性之间的协调具有重要理论价值和现实意义。要协调安全性和经济性,必须在输电规划的目标函数中增加相应故障的风险值^[42]。为此,必须考虑不同故障概率的影响,并合理定义货币化的经济指标来衡量不安全现象的后果。故障的风险值就是故障的概率与故障发生的经济代价之间的乘积。

目前的输电规划一般按照固定的门槛值来定性判断功率、功角、电压和频率等的安全稳定。一方面,由于不能正确反映失稳的临界条件,故无法对安全稳定进行量化;另一方面,由于很难量化由越限造成的损失,因此安全稳定只能作为不等式约束出现在数学模型中,而不能以经济量出现在目标函数中。概率安全稳定评估考虑到不同故障概率的影响,但仍不能协调优化安全性和经济性。

如果用控制措施来消除系统的不安全及失稳现象,那就可以用其中最优化控制措施的费用来反映这些现象的经济代价。进而根据故障概率就可以计算故障和系统的风险值,并加入目标函数,从而使规划方案的投资费用与安全风险具有可比性,达到兼顾经济性和安全性的目的。

4.2 静态安全和动态安全的风险评估方法

电力系统在扰动下出现稳定危机时,必须及时施加紧急控制以避免大停电^[43-44]。实施动态安全控制后的系统如果存在故障后的静态过负荷,则还需施加静态安全控制措施。紧急控制措施在特定故障发生后立即执行,一般代价较大且控制的实时性要求高;静态安全控制的代价较小,一般采用发电机出力调整或电压无功控制。

5 结语

输电系统的健康发展是保证电力系统安全经济运行和电力市场自由充分竞争的重要保证。资金约束、可靠性要求和市场竞争使电力系统的安全稳定性和经济性紧密联系在一起,输电规划不仅要考虑静态过负荷问题,还要考虑动态安全问题,输电规划数学模型应计及市场环境下的不确定性因素,兼顾安全性及经济性,而且需对静态与动态安全风险进行合理评估,以获得灵活性和鲁棒性好的方案。

参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划. 北京: 水利电力出版社, 1990.
WANG Xifan. Power system optimization and planning. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.
- [2] 孙洪波. 电力网络规划. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
SUN Hongbo. Electric power network planning. Chongqing: Chongqing University Press, 1996.
- [3] 牛辉, 程浩忠, 张焰. 电网扩展规划的可靠性和经济性研究综述. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 51-56.
NIU Hui, CHENG Haozhong, ZHANG Yan. Review of reliability and economy problems in transmission expansion planning. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 51-56.
- [4] DE LA TORRE T, FELTES J W. Deregulation, privatization, and competition: transmission planning under uncertainty. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 460-465.
- [5] WONG W, CHAO H, JULIAN D, et al. Transmission planning in a deregulated environment// Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference: Vol 1, Apr 11-16, 1999, New Orleans, LA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 350-355.
- [6] 韩祯祥, 黄民翔. 2002 年国际大电网会议系列报道——电力系统规划和发展. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 8-11.
HAN Zhenxiang, HUANG Minxiang. A review of CIGRE' 2002 on power system planning and development. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 8-11.
- [7] 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. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 45-48.
WU Li, WU Jie, ZHONG Danhong. Application of an improved genetic algorithm in multi-objective power network optimization planning. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(12): 45-48.
- [8] 张焰, 陈章潮, 谈伟. 不确定性的电网规划方法研究. 电网技术, 1999, 23(3): 15-18.
ZHANG Yan, CHEN Zhangchao, TAN Wei. An approach for transmission system planning incorporating uncertainties. Power System Technology, 1999, 23(3): 15-18.
- [9] 程浩忠, 高赐威, 马则良, 等. 多目标电网规划的分层最优化方法. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 11-16.
CHENG Haozhong, GAO Ciwei, MA Zeliang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16.
- [10] FANG Risheng, HILL D J. A new strategy for transmission expansion in competitive electricity market. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 374-380.
- [11] SUN Hongbo, DAVID C Y. A multiple-objective optimization model of transmission enhancement planning for independent transmission company (ITC)// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 4, July 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 2033-2038.
- [12] 蔡磊, 张焰, 程浩忠. 考虑系统暂态稳定性的电网规划方法. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 45-48.
CAI Lei, ZHANG Yan, CHENG Haozhong. Transmission network planning incorporating transient stability. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 45-48.
- [13] 陈礼义, 曾颖, 李朴川, 等. 具有 FACTS 设备的输电网络规划. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 6-9.
CHEN Liyi, ZENG Ying, LI Puchuan, et al. Transmission network planning with FACTS devices based on modified adaptive genetic algorithm. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1): 6-9.
- [14] 吉兴全, 王成山. 计入需求弹性的输电网动态规划方法. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 23-27.
JI Xingquan, WANG Chengshan. Transmission dynamic expansion considering demand elasticity. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 23-27.
- [15] 文福拴, 韩祯祥. 基于 Tabu 搜索方法的输电系统最优规则. 电网技术, 1997, 21(5): 2-7.
WEN Fushuan, HAN Zhenxiang. A Tabu search method to the optimal planning of transmission network. Power System Technology, 1997, 21(5): 2-7.
- [16] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 基于蚁群最优的输电网络扩展规划. 电网技术, 2001, 25(6): 21-24.
CHEN Genjun, WANG Lei, TANG Guoqing. An ant colony optimization method for transmission network expansion planning. Power System Technology, 2001, 25(6): 21-24.
- [17] 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化规划. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 51-55.
WANG Hui, HAN Xinyang, HU Zhaoguang, et al. Transmission network planning and optimization model with genetic algorithms based on fuzzy logic controller. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 51-55.
- [18] 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// Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference: Vol 2, Apr 11-16, 1999, New Orleans, LA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 765-770.
- [19] 郭永基. 电力系统可靠性分析. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Yongji. Power system reliability analysis. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [20] 朱海峰, 程浩忠, 张焰, 等. 电网灵活规划的研究进展. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 38-41.
ZHU Haifeng, CHENG Haozhong, ZHANG Yan, et al. A review of electric power network flexible planning. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(17): 38-41.
- [21] OLIVERA G C, COSRA A P C. Large scale transmission using optimization and heretic techniques. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 1828-1835.
- [22] BINATO S, OLIVEIRA G C, ARAUJO J L. A greedy randomized adaptive search procedure for transmission expansion planning. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 247-253.
- [23] VILLASANA R, GARVER L L, SALON S L. Transmission network planning using linear programming. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(2): 349-356.
- [24] LEE S T Y, HICKS K L, HNYILICZA E. Transmission expansion planning by branch and bound integer programming with optimal cost capacity curves. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(5): 1390-1400.
- [25] MELIOPOULOS A P, WEBB R P, BENNON R J, et al.

- Optimal long range transmission with AC load flow. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(1): 4156-4163.
- [26] YOUSSEF H K, HACKAM R. New transmission planning model. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1): 9-18.
- [27] DUSONCHET Y P, EL-ABIAD A H. Transmission planning using discrete dynamic optimization. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1973, 92(6): 1358-1371.
- [28] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法. 北京:清华大学出版社, 1999.
- XING Wenxun, XIE Jinxing. Modern methods of optimization. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [29] 王秀丽,王锡凡. 遗传算法在输电系统规划中的应用. 西安交通大学学报, 1995, 29(8): 1-9.
- WANG Xiuli, WANG Xifan. Transmission system planning with genetic algorithm. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(8): 1-9.
- [30] ROMERO R, GALLEGO R A. Transmission system expansion planning by simulated annealing. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 364-369.
- [31] 陈章潮,顾洁,孙纯军. 改进的混合模拟退火-遗传算法应用于电网规划. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 28-31.
- CHEN Zhangchao, GU Jie, SUN Chunjun. Application of the mixed genetic-simulated annealing algorithm in electric network planning. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 28-31.
- [32] CROUSILLAT E O, DORFNER P, ALVARADO P, et al. Conflicting objectives and risk in power system planning. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 887-893.
- [33] 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. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 20-24.
- ZHU Haifeng, CHENG Haozhong, ZHANG Yan. A novel method of electric power network flexible planning considering the selected probability of transmission line. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 20-24.
- [34] 杨宁,文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法研究. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 23-27.
- YANG Ning, WEN Fushuan. An investigation on transmission system expansion planning based on chance constrained programming. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27.
- [35] JUAN R. Different approaches towards electricity transmission expansion. Review of Network Economics, 2003, 2(3): 238-269.
- [36] HOGAN W. Transmission market design [EB/OL]. 2003-04-04. <http://www.ksg.harvard.edu/cbg/research/rpp/RPP-2003-17.pdf>.
- [37] DAVID A K. Restructuring the electricity supply industry in Asia. International Journal of Global Energy Issues, 1998, 10(2): 203-212.
- [38] LEEPRECHANON N, MOORTHY S S, BROOKS R D. A review of major factors in restructuring power market in developing countries// Proceedings of International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management: Vol 2, Oct 30-Nov 1, 2000, Hong Kong, China. Stevenage, UK: IEE, 2000: 460-464.
- [39] LEEPRECHANON N, MOORTHY S S, BROOKS R D, et al. Transmission planning in deregulated systems; a model for developing countries// Proceedings of IEEE Porto Power Tech Proceedings: Vol 1, Sep 10-13, 2001, Porto, Portugal. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 7.
- [40] 曾庆禹. 电力市场条件下的发电规划协调与运行模式. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 1-5.
- ZENG Qingyu. Generation/Transmission expansion planning model and operation model in power market. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 1-5.
- [41] 王成山,王赛一. 市场条件下电力系统规划工作的探讨. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 82-86.
- WANG Chengshan, WANG Saiyi. Discussion on the power system planning in competitive electricity market. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 82-86.
- [42] 赖业宁,薛禹胜,王海风. 电力市场稳定性及其风险管理. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 18-24.
- LAI Yening, XUE Yusheng, WANG Haifeng. Electricity market stability and its risk management. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 18-24.
- [43] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析. 南京:江苏科学技术出版社, 1999.
- XUE Yusheng. Quantitative study of general motion stability and an example on power system stability. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1999.
- [44] 陈永红,薛禹胜. 区域紧急控制的优化算法. 中国电力, 2000, 33(1): 44-48.
- CHEN Yonghong, XUE Yusheng. Optimal algorithm for regional emergency control. Electric Power, 2000, 33(1): 44-48.

麻常辉(1975—),男,博士研究生,研究方向为输电规划. E-mail: machanghui@163.com

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,博士生导师,总工程师,主要从事电力系统自动化方面的研究工作。

鲁庭瑞(1954—),男,副总工程师兼调度中心主任,高级工程师,主要从事电网调度、运行及生产管理。

A Review of Transmission Planning Methods

MA Changhui^{1,2}, XUE Yusheng², LU Tingrui³, WANG Xiaoying³

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

(3. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The present status of transmission planning is reviewed from various viewpoints and the new requirements of transmission planning resulting from development of electricity markets are discussed. The characteristics of different algorithms on transmission planning are analyzed and compared. The paper also points out that the security risk of transmission system, expressed by quantitative indices, should be considered in the objective function. The future trend of the transmission expansion planning is also discussed based on the analysis.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217905), National Natural Science Foundation of China (No. 50595413) and State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2004]392).

Key words: transmission expansion planning; optimal planning; economy; security; risk; electricity market