

# 发电扩容与输电扩容的协调优化模型

张午阳<sup>1</sup>,姚建刚<sup>1</sup>,周媛<sup>1</sup>,刘昌<sup>2</sup>,姚文峰<sup>2</sup>,王路<sup>3</sup>,欧阳永熙<sup>3</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南湖大华龙电气与信息技术有限公司, 湖南长沙 410080; 3. 湖南省电力公司, 湖南长沙 410001)

**摘要:** 以电厂和电网分离为主要特征的电力市场化改革给电力扩容规划带来了巨大的冲击。如何协调好发电与输电的扩容直接关系到电力系统的稳定运行和健康发展。通过分析市场化改革后电力扩容规划存在的主要问题, 构筑了发电扩容与输电扩容的协调优化模型。该模型中提出了利用协调因子的思想来解决电力扩容的规划风险和保障竞争性电力市场的电价机制。协调因子计及了缺电成本和输电利用成本, 这不仅能充分反映电力扩容的规划风险, 而且能使双方共同承担其风险, 从而促进两者扩容的协调。文章为厂网协调发展探索了新的途径。

**关键词:** 发电扩容; 输电扩容; 协调优化; 规划风险

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)04-0026-05

## 0 引言

发电扩容(电源建设)与输电扩容(电网规划建设)的协调优化问题一直是电力系统规划范畴中的难点<sup>[1]</sup>。传统的输电系统扩容的主要任务是配合发电扩容, 在所研究的扩容规划期间, 负荷增长预测及发电扩容规划方案已知的基础上, 为满足电力供应和需求的变化, 确定最佳的输电系统扩容计划, 使得输电系统的投资、建造和运行费用最小。随着电力市场化改革的深入, “厂网分开”的具体实施使发电部分和输电部分成为两个相对独立、自主经营的实体, 这样发电扩容和输电扩容分别成为各自内部的事务。建设发电侧竞争的电力市场使发电扩容规划投资者以追求其利益最大化为目标, 同时影响发电电价的因素有很多<sup>[2,3]</sup>, 使得发电扩容规划与决策存在着许多不确定性因素, 从而导致输电扩容面临着更多风险, 给整个电力扩容规划工作带来了相当大的困难<sup>[4-6]</sup>, 进而会对电力系统运行和电力市场运营带来严重的影响。

如上所述, 发电扩容与输电扩容之间的协调发展对电力工业市场化改革有着非常重要的影响, 涉及到整个国家能源发展战略和国民经济的长远利益。因此发输电扩容应该在国家能源政策的指导下和相关部门的监管下有序进行。针对电力扩容一般有以下几种方式<sup>[7-9]</sup>: 在有些国家如玻利维亚、智利和秘鲁等, 政府推荐一些候选的新的发电厂位

置供投资者选择, 投资者可以根据此选择新建发电厂址和装机容量。在另外一些政府处于强势的国家, 政府部门或监管机构可以指定候选的发电厂址, 要求投资者在这些指定的地点选择建厂。根据输电网的自然垄断属性和社会公用性的特点, 可以确定输电网扩容规划指导发电厂选址布局的思想, 输电网系统根据全局规划, 利用具有调节性的经济手段作为指导方式从一定程度上影响发电扩容的建设布局。本节的协调优化模型就是基于第三种方式, 充分考虑了电力扩容规划中的核心影响因素, 很好的促进了电力市场环境下的发电扩容与输电扩容的协调, 防止了规划主体缺位导致近来电源建设的“跑马圈地”<sup>[10]</sup>, 并从一定程度上规避了电力扩容的风险。

## 1 协调因子的提出

结合文献[9]电力扩容规划的新思想和文献[11]推荐的两种发输电扩容模式, 以国家能源政策指导电力扩容建设、输电网规划指导电源建设为扩容规划基础, 本文提出了利用协调因子促进发电扩容与输电扩容的协调优化。利用协调因子的目的是为了规避电力扩容规划中大量不确定性因素导致的巨大规划风险, 因此协调因子应该反映系统规划的缺电成本和输电利用成本, 从而使新型的优化模型能够充分顾及系统的可靠性和经济性。

由于协调因子的运用是为了促进电力扩容规划协调, 而不是为电网企业谋取新的赢利点, 所以协调因子类似于发电扩容与输电扩容之间的“平衡基金”, 它的计取应充分考虑电力扩容需要, 并应保证

基金项目: 湖南省电力公司科研专项基金资助项目  
(04430103000112)

两者整体之间的基本平衡。市场化改革后的电网企业收取输配电价,从而拥有了投资偿还能力,输电费用(也称过网费)是通过国家相关的价格管理部门具体核定,同时开放的电力市场对每个上网竞争者要保证“三公”原则,因此带有激励性质的协调因子的收取可以放在入网体系的接入费用部分里,其核算接入费用(主要针对协调因子)的主体可以是电网企业也可以是电力监管机构。

## 2 协调优化的数学模型

电力市场条件下,具有厂商性质的发电领域投资者追求的是利润最大化,因此发电扩容部分我们以发电利润最大化为目标函数;而输电网规划具有一定公用事业意义,所以对输电扩容规划的问题是以满足电力供需关系下线路的投资和建造成本最小化为目标。在双方的目标函数中引入协调因子这一影响参数,从而使得发电、输电扩容之间不仅在投资规划领域里还在市场运营部分中都具有联动因素。

$$\begin{cases} \max F = \sum_{i=1}^N C_{it}^1 [ \sum_{D_i} E_{D_i} \times (P_{D_i} - C_{D_i}) - \\ f(x, t) - k^* E_{D_i}^* ] \\ \min Z = \sum_{i=1}^K C_{it}^2 [ \sum C_{1i} (R_i) + \sum C_{2i} (V^*) + \\ \sum (E_D^*) + \sum (E_D^*) - k^* \sum E_D^* ] \end{cases} \quad (1)$$

$$s \quad t \quad D_i \quad D \quad (2)$$

$$R_i \quad R \quad (3)$$

$$B = P \quad (4)$$

$$P \{ P_L \quad P_{Lmax} \} \quad (5)$$

$$P_{D_i} \quad P_{Dmax} \quad (6)$$

$$k^* \quad f_1 [ (E_D^*) ] + f_2^1 [ (E_D^*) ] \quad (7)$$

目标函数为双输出模型,式(1)中  $F$  为评估年限  $N$  年内发电扩容建设投资者所追求的总利润,  $Z$  为  $K$  年内输电扩容规划的总费用;  $C_{it}^1$  和  $C_{it}^2$  分别为发电和输电建设所对应当年的折现系数;  $D_i$  和  $R_i$  为发电扩容规划集  $D$  中和输电扩容规划集  $R$  中的第  $i$  种方案;  $E_{D_i}$ 、 $P_{D_i}$ 、 $C_{D_i}$  为第  $i$  种方案采样第  $t$  年的单位实时发电量和电价(可由模拟运行得到)以及当年的单位发电成本(包含运行维护费用);  $f(x, t)$  为第  $t$  年的还贷款项、税收、分红等方面的支付成本;在输电扩容规划投资公式中第一项为第  $i$  年输电建设投资费用;第二项是电网最优运营费用,即以各发电厂报价竞争上网(不考虑阻塞情况下)的购电费用最

低为目标;第三项是按照实际购电  $E_D^*$  的情况下,各种因素引起的系统缺电成本,其中  $k^*$  为可靠系数;第四项是按照实际购电  $E_D^*$  的情况下,所造成的输电利用成本,其中  $f_1$  为经济系数;  $k^*$  和  $E_D^*$  为发电扩容规划和输电扩容规划的协调因子以及协调影响的参考量。

约束条件中,  $B$  为节点电纳矩阵;  $\theta$  为节点电压相角向量;  $P$  为节点净注入功率向量;  $P_L$  为线路功率向量;  $P_{Lmax}$  为线路输电容量向量;  $\alpha$  为线路功率约束的置信水平;  $P_{D_i}$  为发电机组出力向量;  $P_{Dmax}$  为发电机组的出力上限向量;  $k^*$  正比于缺电成本,反比于输电利用成本,  $f_1$ 、 $f_2$  分别为协调因子的对应函数。

由于电力工业的特点和重要性,对于电力扩容规划,不管是在计划经济体制下还是市场经济体制下,其主要目的是为了实现在全社会效益最大。因此将式(1)的发电部分由利润最大化转化为成本最小化,同时为体现模型的特点,简化为式(8):

$$\begin{cases} \min F = \{ F^* \} + K D^* \\ \min Z = \{ Z^* \} + (1 - K) D^* \end{cases} \quad (8)$$

$\{ F^* \}$  和  $\{ Z^* \}$  分别表示不考虑协调因子的一般发电和输电的扩容投资运行费用,  $D^*$  表示全网协调因子的参考值(即本轮电力扩容规划的风险等效参考值),  $K$  为全网的等价权重因子,取值范围为  $[0, 1]$ ,从而使厂网共同承担电力规划的风险,促使两者的规划协调。

## 3 模型的特点

与原垂直一体化管理模式下的发输电统一规划模型相比,该模型明确地考虑了电力市场化前提;和当前的输电网规划研究相比,该模型充分地顾及了发输电扩容之间的必然联系。本文所建立的发电与输电扩容的数学模型有以下特点:

1) 充分地分析了输电网规划所需要两个重要指标:系统可靠性和系统经济性。把可靠性指标和经济性指标纳入输电网规划的考虑范围中,能够避免单方面考虑的缺陷性;

2) 原来的约束条件转化为目标函数中的一部分,能够提高规划模型的精度;

3) 在电力市场的环境下,提出了协调解决发电与输电扩容的新方法,通过协调因子,可以看到优化模型能够使得两者扩容的建设规划有了经济性的关联,体现了整体社会效益,协调了经济性与可靠性之间的关系。

## 4 模型的求解

对于该协调优化模型,可以采用蒙特卡罗模拟法来进行求解。通过设备维护、设备退出、线路故障概率、输电线路裕度水平等,对各种系统运行状态及不同系统故障进行模拟,计算各个节点电量不足的期望值和各条线路输电裕度及利用率。最主要是求得输电规划最优中的代表可靠性的第三项和代表经济性的第四项,以确定各个接入点的协调因子。模型求解的步骤如下:

1) 形成初始可行输电网扩容规划方案集、发电扩容规划方案集。

2) 计算开发成本,包括线路投资成本、系统运营成本。

3) 计算缺电成本。

收集数据,确定规划缺电评价率;主要方法是通过对供电区域的用户进行调查,根据不同运行情况下对各类缺电损失,确定运行缺电评价率;

统计设备维修或者退出运行造成系统供电不足的概率,以及线路、设备故障造成事故的概率,通过蒙特卡罗模拟法分别计算规划缺电和运行缺电情况下造成节点电量不足的期望值;

分别计算规划、运行缺电成本。

4) 计算输电利用成本。

收集数据,确定系统运行时线路输电裕度及利用率;

根据全网购电费用最低以及按照模拟运营安全调度后的购电费用确定阻塞成本评价及出现阻塞概率;

根据无风险投资理论,比较长期处于低容量传输的线路确定其机会成本评价及相应概率;

分别计算线路阻塞、机会成本。

5) 根据所计算的输电网建设综合成本,通过模拟两者扩容之间的整体效益最佳来确定与发电扩容的协调因子。

6) 给出协调优化方案,公开节点接入费用(包括协调因子)相关信息,结束求解。

## 5 协调优化模型的基本计算流程

根据以上协调优化模型的解算步骤,可形成图1所示的计算流程。

从流程示意图中,可以发现输电利用成本中的线路阻塞成本影响着规划缺电成本,这样会导致发电企业按照竞价上网的市场规则时遇到线路阻塞而

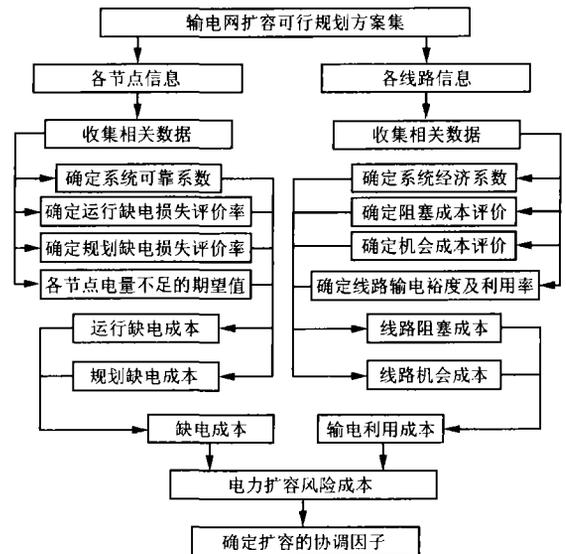


图1 发电扩容与输电扩容的协调优化模型计算流程图

Fig 1 Flow chart of calculation for the model of generation and transmission expansion

被迫压电的现象,将直接影响到发电企业上网的实际电量,从而使发电投资商的利益受损。本模型计及了电力扩容规划的两大风险因素:缺电成本和输电利用成本,以此为依据的协调因子可以保证发电企业竞价上网的电量,实际兼顾了发电利润。因此通过蒙特卡罗模拟仿真,根据输电网扩容规划综合成本最小和发电扩容投资利润最大化原则,引入协调因子使得发电与输电扩容能够进一步协调优化、规避风险、共同发展。

## 6 模型的优点

1) 通过协调优化模型能够减少缺电成本,规避输电阻塞,充分利用输电能力,降低发电厂选址的不确定性给输电网扩容规划带来的困难,从而减小对电网安全稳定运行的冲击,避免资源(不仅包括一次能源,还包括土地资源及线路资源等)得不到优化配置。

2) 发电与输电扩容的协调,能够使发电经营企业健康发展,预防发电企业利用网络阻塞进行隐性市场力(经济缩减)的操纵,使电力市场能够经济性运营。

3) 通过具有指导性的协调因子能够对整个地区的电力系统进行有序规划,不仅保证了发电企业利润,同时又能激励电网企业自身加强网架结构,结合国家经济形势、中长期规划积极地主动发展,有利

于培养健康、稳定、积极的电力市场。

4) 具有指导性的协调因子可以用于回收电网投资费用,积累电网发展资金,当然也可以担负起网络损耗分摊的任务,规避一些不合理的交叉补贴,同时也能防止一些企业逃避相关的国家政策。

## 7 模型的计算与应用

模型的计算和应用包括了文献 [12~14] 中对电力规划风险的缺电成本中规划缺电和运行缺电成本(也称静态缺电和动态缺电成本)以及相关文献 [7, 15~17] 对输电利用成本中的线路阻塞成本和线路机会成本的计算和方法,因此文中没有过多赘述。

在模型的计算过程中涉及到了海量的迭代优化求解,特别是在确定协调因子的计算中需要对输电扩容规划集内方案和发电扩容规划集内方案进行反复迭代,其中对发电投资风险决策中生产模拟模块的蒙特卡罗模拟法处理不确定变量时就需要上百次的迭代运算,且所涉及很多工程、经济方面的问题,需要的数据参数庞大,因此要运用计算机辅助完成。作者基于以上思想,利用某省已往的扩容规划数据进行了相关的尝试,取得了一定的收获,为厂网协调发展探索了新的途径。

## 8 结论

电力市场条件下的扩容规划问题不能片面地按职能部门独自解决,同时也需要尊重市场体制的原则。本文针对如何促进发电扩容与输电扩容的协调优化问题,提出了协调因子的经济调整思想,构筑了协调优化模型,利用此平衡手段能够从一定程度上规避其扩容风险,促进厂网协调发展,有利于电力系统的发展和电力市场的建设。

值得提出的是,本协调优化模型适宜于中小型电源的地区电力系统规划建设,而含有丰富的一次能源的大型、特大型煤炭基地和水电基地等需要相关的国家能源部门宏观调控能源战略部署,此时输电系统应积极配合这一类发电扩容的建设,输电网扩容规划指导发电扩容建设的思想不再适宜,但是通过相关职能的转变,该优化模型仍有充分利用的空间。

## 参考文献:

[1] 周安石,康重庆,洪元瑞,等. 电力工业可持续发展的统一规划模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 28-32.

- ZHOU An-shi, KANG Chong-qing, HONG Yuan-nui, et al. Power System Expansion Planning Model Considering the Strategy of Sustainable Development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 28-32.
- [2] 白超利,康重庆,夏清,等. 不确定性电价分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 36-41.
- BAI Chao-li, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Analysis on the Uncertainty of Electricity Price[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 36-41.
- [3] 康重庆,白超利,夏清,等. 电力市场中发电商的风险决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 1-6.
- KANG Chong-qing, BAI Chao-li, XIA Qing, et al. Risk Decision-making of Generations in Electricity Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 1-6.
- [4] David A K, Wen F S. Transmission Planning and Investment Under Competitive Electricity Market Environment[A]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Vancouver (Canada): 2001. 1725-1730.
- [5] 韩祯祥,黄民翔. 2002年国际大电网会议系列报道[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 8-10.
- HAN Zhen-xiang, HUANG Min-xiang. A Review of CIGRE 2002 on Power System Planning and Development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 8-10.
- [6] 文福栓, David A K. 加州电力市场失败的教训[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 1-5.
- WEN Fu-shuan, David A K. Lessons from Electricity Market Failure in California[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 1-5.
- [7] 杨宁,文福栓. 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.
- YANG Ning, WEN Fu-shuan. Transmission System Expansion Planning Based on Chance Constrained Programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27.
- [8] Rudnick H. Generation and Transmission in Developing Countries: Planning in a Deregulated Environment in Developing Countries: Bolivia, Chile and Peru[J]. IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(7): 18-22.
- [9] 王路. 公用电网——电力传输和电力市场的共同载体[J]. 中国电力企业管理, 2004, (11): 40-42.
- WANG Lu. Common Grid—the Common Carrier of Power Transmission and Power Market[J]. China Power Enterprise Management, 2004, (11): 40-42.
- [10] 王健. 电源“圈地”: 回归有序? [J]. 中国电力企业管理, 2004, (4): 4-6.
- WANG Jian. Power Resource Competition: Resume Orderline [J]. China Power Enterprise Management, 2004, (4): 4-6.
- [11] 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): 1-5.
- ZENG Qing-yu. Generation/Transmission Expansion Planning Model and Operation Model in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 1-5.
- [12] 朱旭凯,刘文颖,杨以涵. 综合考虑可靠性因素的电网规划新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 51-54.

- ZHU Xu-kai, LU Wen-ying, YANG Yi-han A New Power Network Planning Method by Comprehensively Considering System Reliability Factors [J]. Power System Technology, 2004, 28 (21): 51-54.
- [13] 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. The Optimal Planning of Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.
- [14] 张焰, 陈章潮, 谈伟. 不确定性的电网规划方法研究 [J]. 电网技术, 1999, 23 (3): 15-22.
- ZHANG Yan, CHEN Zhang-chao, TAN Wei An Approach for Transmission System Planning Incorporating Uncertainties [J]. Power System Technology, 1999, 23 (3): 15-22.
- [15] 杨宁, 文福栓. 计及风险约束的多阶段输电系统规划方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (4): 28-33.
- YANG Ning, WEN Fu-shuan Risk-constrained Multistage Transmission Expansion Planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (4): 28-33.
- [16] 李平, 宋燕敏, 曹荣章. 电力市场的阻塞调度 [J]. 电力系统自动化, 2001, 10 (13): 11-12, 41.
- LI Ping, SONG Yan-min, CAO Rong-zhang Congestion Dispatch in Power Market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 10 (13): 11-12, 41.
- [17] 汤振飞, 于尔铿, 唐国庆. 电力市场输电阻塞管理 [J]. 电力系统自动化, 2001, 23 (10): 13-16.
- TANG Zhen-fei, YU Er-keng, TANG Guo-qing Transmission Congestion Management in Power Market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 23 (10): 13-16.

收稿日期: 2005-07-07; 修回日期: 2005-08-05

作者简介:

张午阳 (1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力规划及稳定性研究、电力市场及其技术支持系统; E-mail: mastery@126.com

姚建刚 (1952-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、配电网系统自动化和新型输电方式;

周媛 (1980-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统 CAD 设计。

### Concordant optimal model of generation and transmission expansion

ZHANG Wu-yang<sup>1</sup>, YAO Jian-gang<sup>1</sup>, ZHOU Yuan<sup>1</sup>, LU Chang<sup>2</sup>, YAO Wen-feng<sup>2</sup>, WANG Lu<sup>3</sup>, OUYANG Yong-xi<sup>3</sup>

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan HDHL Electric & Information Tech Co., Ltd, Changsha 410007, China; 3. Hunan Electric Power Company, Changsha 410001, China)

**Abstract:** The electric power market reformation whose main character is the separation of power plant and power grid has brought great impact to power expansion planning. How to deal with the concordant expansion between power plant and power grid will directly affect the power system steady operation and healthy development. By analyzing some main problems in power expansion after market reformation, the new concordant optimal model of generation and transmission expansion is built. The scheme about concordant gene is presented in the model, which can resolve planning risk in power expansion and ensure the price mechanism in competing power market. The concordant gene considers power outage cost and transmission using cost, which can not only well reflect electricity power expansion risk, but also make both of them assume the risk, to advance both concordant expansion. The paper explores a new approach for concordant development between power plant and power grid.

This project is supported by the Scientific Research Fund of Hunan Power Company (No. 04430103000112).

**Key words:** generation expansion; transmission expansion; concordant planning; planning risk

(上接第 16 页 continued from page 16)

焦彦军 (1963 - ), 男, 副教授, 研究领域主要为微机保护及自动远动技术;

柯赫震 (1978 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统微机继电保护。

### A universal protective relaying setting calculation and management system for power plant

KONG Xiang-min, JIAO Yan-jun, KE He-zhen

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** A universal protective relaying setting calculation and management system for power plant is developed. For the problem of universal property caused by different names and setting methods of the same protection principle from different manufacturers, the system combines Visual Basic 6.0 with SQL Server to increase its universality. The function and feature of each module of the system are introduced.

**Key words:** relay protection; setting calculation; universality