

基于系统动力学的宏观层 电网规划的仿真模型

王伟, 张粒子, 舒隽, 麻秀范

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206)

Simulation Model of Transmission Network Macro-planning Based on System Dynamics

WANG Wei, ZHANG Li-zi, SHU Jun, MA Xiu-fan

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Transmission network macro-planning orients to the medium-long term grid planning and solves the problem from the point of view of the entire grid—grid expansion capacity and new lines constructed for each year, etc. It is proposed that apply system dynamics to study the simulation of transmission network macro-planning. Firstly, the feasibility of using system dynamics model to study transmission network macro-planning simulation is analyzed. Secondly, the simulation model of every part of transmission network macro-planning is set up. The relationship of grid planning and transmission price is constructed and analyzed, so the dynamic model of macro-planning is set up and used to research the process and trend from history to future. Finally, a case of transmission network macro-planning using models and methods proposed in this paper demonstrates the validity of the system dynamics model.

KEY WORDS: grid planning; system dynamics; electricity market; transmission price

摘要: 宏观层电网规划面向中长期电网规划, 从全网总量的角度解决逐年电网的投建容量、线路投建总长等问题。该文提出用系统动力学方法研究宏观层电网规划的仿真模型, 首先分析了系统动力学模型对解决宏观层电网规划仿真模型的适用性; 然后, 建立了宏观层电网规划仿真各环节的数学模型, 并且把电网规划和输电价格联系起来进行系统分析, 从而建立了宏观层电网规划的动态模型, 贯穿历史和未来, 研究宏观层电网规划仿真的过程量和发展趋势; 最后, 应用该文提出的模型和方法对某地区的宏观层电网规划进行了算例分析研究, 验证了系统动力学模型的有效性。

关键词: 电网规划; 系统动力学; 电力市场; 输电价格

0 引言

合理的电网规划是保证坚强电网的前提, 并为电力市场提供规范、有效、有序的竞争平台。按照关注的重点不同, 电力市场中的电网规划可以分成两个角度的规划研究: 面向宏观角度的电网规划和面向精细化角度的网架规划。宏观层电网规划基于中长期电网规划, 面向过程量, 从全网总量的角度解决逐年电网的投建容量、线路投建总长等问题, 一般的宏观层面的电网规划依赖于专家经验和定性分析, 文献[1-3]指出了电网规划需要考虑宏观因素: 电力市场中电网规划的引导、待选线路的筛选以及各阶段电网规划方案的协调等。网架规划面向多方案比选和待选线路中寻优^[4-9], 文献[4-5]研究了基于综合评价的电网规划方法; 文献[6-9]考虑了电网阻塞、电价等方面用不同的优化方法分别研究了确定性和不确定性的电网规划。上述文献都推进了电网规划领域的研究发展。

从宏观层面的角度, 更加关心电网每年投建多少容量、多少座变电站、多少千米线路、对输电价格产生多大影响, 而具体的电网规划的地点、线路型号等问题由网架规划来解决。系统动力学分析宏观问题的研究在国外已经较为成熟完善^[10-12], 近几年其在电力系统的应用主要在中长期负荷预测和分区负荷预测上^[13-14]。本文在分析了系统动力学模型对宏观层电网规划适用性的基础上, 应用系统动力学研究宏观层电网规划系统的动态行为, 多角度展示了电网规划体系的内涵和外延, 建立了系统动力学实用模型, 并用算例验证了模型有效性。

1 系统动力学模型对宏观层电网规划研究的适用性

1.1 宏观层电网规划的含义和必要性

宏观层电网规划是相对于网架规划而言的，二者角度和侧重点不同。由于网架规划面向细节，从待选线路中寻优，规划结果为针对具体电网的具体接线形式。相对而言，宏观层电网规划面向总量，从规划的未来发展和长远趋势出发，规划结果为在逐年的输电容量、变电站座数、线路总长。由于研究长期问题时很难确定细节问题，同时也没必要确定具体的网架结构，因为外界制约的环境不断在变化，但在制定政策、战略决策时，又需要从宏观层面评估电网建设总量参数未来的变化趋势和波动规律，因此需要宏观层电网规划。但长期以来，对宏观层面上电网规划的研究缺乏模型和算法支撑，研究文献较少，电网公司和监管机构对此也往往以定性分析为主，迫切需要建立宏观层电网规划的体系和模型进行理论铺垫和实践探索。

1.2 宏观层电网规划和网架规划的比较

电力市场不仅带来了对网架规划的冲击，使其工作更加复杂，也从体制上带来了变化：越来越重视宏观层面的布局和发展战略，更加注重科学合理的政策决策。电力市场中的宏观层电网规划和网架规划既有区别又有联系，表1对二者进行了比较。

表1 宏观层电网规划和网架规划的比较
Tab. 1 Compare transmission network macro-planning with network planning

比较点	网架规划	宏观层电网规划
角度	微观、细节	宏观
对象	网架接线、变压器选型、线路选型	全网输电容量、变电站座数、线路总长
现有方式	待选线路中寻优	定性分析为主，结合简单定量分析
焦点	网架接线	逐年的变化趋势和波动规律
用途	电网公司制定自己的计划规划	长期战略决策、政策制定研究
数学工具	数学规划、优化算法	对不同政策环境下的规划方案仿真

1.3 系统动力学模型对宏观层电网规划研究的适用性

本文提出用系统动力学为宏观层电网规划进行建模，系统动力学是处理复杂非线性动态反馈过程非常有力的数学工具。宏观层电网规划具有的特点，适合用系统动力学来解决。

(1) 宏观层电网规划基于宏观变量：电网逐年投建容量、输电价格等，面向过程量，并不拘泥于细节问题，研究长期的稳定性和发展趋势的变化，

适合用系统动力学来解决。

(2) 宏观层电网规划体系成立因果律。这种相互牵扯的因果关系就是控制论中的反馈关系，并且宏观层电网规划体系内部存在多重因果反馈环，因此其结构是复杂的，其对外表达的行为往往具有反直观性，适合用系统动力学模型来描述。

(3) 构成宏观层电网规划体系的各要素之间具有复杂非线性的依存关系。

(4) 宏观层电网规划体系中原因与结果在时间上往往存在较长的延迟，在空间上往往是分离的。例如，输电电价的调整对电网建设的投资引导是有惯性的，输电价不可能因为电网规划的调整而马上调整，电网投资者也不可能因为输配电价的突然提高而马上投资建电网。

系统动力学可以充分考虑宏观层电网规划体系的上述特点，强调系统结构与系统行为动态特性的关系。把物理系统和人的参与在整体上作为动态系统来把握，认为在所研究的系统中存在信息反馈环，使用系统工程的思想方法把整个系统分为若干子系统，明确作用于子系统间或子系统内部的因果关系，从而建立系统的数学模型。它在验证模型的有效性之后，有针对性地改变系统条件来进行多次仿真计算，以谋求问题的解决，为制定战略、政策、作出决策等提供依据。

2 宏观层电网规划的系统动力学仿真模型

宏观层电网规划的主要环节的数学模型按功能结构划分为7个环节的子系统，并由7个差分方程组成，主要变量的因果关系如图1所示。

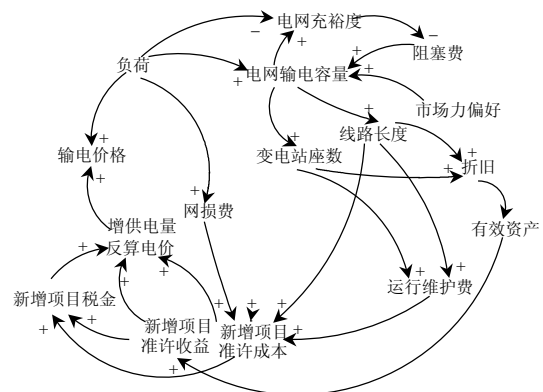


图1 宏观层电网规划主要变量的因果关系
Fig. 1 Relation of variable of transmission network macro-planning

(1) 输电容量环节。

$$D(t) = D(t-1) + \Delta D(t) \tag{1}$$

$$S(t) = S(t-1) + \Delta S(t) \quad (2)$$

$$N_s(t) = N_s(t-1) + [N_{s1}(t) - N_{s2}(t)] \quad (3)$$

$$N_l(t) = N_l(t-1) + [N_{l1}(t) - N_{l2}(t)] \quad (4)$$

$$\Delta S(t) = f_3[D(t), C_{con}(t-1), B_{pow}(t-1)] \quad (5)$$

$$N_{s1}(t) = f_1[\Delta S(t)] \quad (6)$$

$$[N_{l1}(t) - N_{l2}(t)] = f_2\{[N_{s1}(t) - N_{s2}(t)], D(t)\} \quad (7)$$

$$C_{con}(t-1) = f_4[K(t-1)] \quad (8)$$

式(1)~(8)中: $D(t)$ 为第 t 年电网负荷; $\Delta D(t)$ 为第 t 年电网负荷的增长量, 负荷根据预测自然增长; $S(t)$ 为第 t 年输电容量; $\Delta S(t)$ 为第 t 年输电容量的增长量; $N_s(t)$ 为第 t 年电网中变电站个数; $N_{s1}(t)$ 为第 t 年新增变电站; $N_{s2}(t)$ 为第 t 年退役变电站, 按折旧年份进行退役; $N_l(t)$ 为第 t 年电网输电线路的总长度; $N_{l1}(t)$ 为第 t 年新增输电线路的总长度; $N_{l2}(t)$ 为第 t 年退役输电线路的总长度, 按折旧年份进行退役; $C_{con}(t-1)$ 为第 $t-1$ 年电网的阻塞费用; $B_{pow}(t-1)$ 为第 $t-1$ 年电网中市场主体行使市场力的偏好; $K(t-1)$ 为第 $t-1$ 年电网的充裕度的衡量, 并按实际电网容载比和电网需要的容载比的比值计算

$$K(t) = \left[\frac{S(t)}{D(t)} \right] / \left[\frac{\mu(t) \cdot k_{res}(t)}{T(t) \cdot \alpha(t)} \right] \quad (9)$$

式中: $\mu(t)$ 为第 t 年变压器最大负荷的分散系数, 等于一年中同一电压等级中的所有变压器供应的最大负荷值的和除以电网最高负荷时对应的所有变压器供应负荷值的和; $k_{res}(t)$ 为负荷发展储备系数, 一般取 1.1~1.3。根据电网建设工程立项、建设周期情况等因素, 按储备 2 年考虑, 预测的 2 年负荷增长率来取值。对于经济增长快速的地区, 年均负荷增长率达到 15%, 取 k_{res} 为 1.3。而对于经济增长比较平缓的地方, 年均负荷增长率为 5%, 则 k_{res} 取 1.1; $\alpha(t)$ 为变压器的平均功率因数; $T(t)$ 代表变压器的安全运行率, 变压器安全运行率是指在 $N-1$ 时确保其余主变安全运行的最大允许运行率。变电站有 2 台变压器, $T=0.65$, 有 3 台, $T=0.87$ 。

$B_{pow}(t)$ 为第 t 年电网中市场主体行使市场力的偏好的量化指标, 其计算依赖于输入受阻区域内衡量单台机组对行使市场力的偏好

$$B_{pow,i}(t) = \frac{R_i(t)}{R_i(u)} \quad (10)$$

$$B_{pow}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \cdot B_{pow,i}(t) \quad (11)$$

式(10)、(11)中: $B_{pow,i}(t)$ 为第 t 年输入受阻区域内, 第 i 发电厂行使市场力的偏好; $R_i(t)$ 为第 t 年第 i 电

厂竞价收入占市场总购电费的比率, $R_i(t) = (\text{加权平均中标电价} \times \text{中标电量}) / \text{市场总购电费}$; $R_i(u)$ 为第 u 年电厂所在区域没有输入受阻时的收入比率。

$B_{pow,i}(t)$ 越大发电厂行使市场力的偏好越强, 抬高市场价格的风险越大。所有输入受阻区域内的发电厂加权平均得到整个市场的行使市场力偏好, 作为指导电网建设的一项指标。

(2) 输电电价的调整环节。

$$\lambda(t) = \lambda(t-1) + \Delta\lambda(t) \quad (12)$$

$$\Delta\lambda(t) = f_5[\lambda_0(t), \lambda(t-1), \Delta D(t), D(t)] \quad (13)$$

式(12)、(13)中: $\lambda(t)$ 为第 t 年电网输电价格; $\Delta\lambda(t)$ 为第 t 年电网输电价格调整的幅度; $\lambda_0(t)$ 为第 t 年按增供电量和新增电网项目反算的电价。

(3) 电网公司增供环节。

电网公司增供电量的输电价格的计算采用《国家发展改革委关于印发电价改革实施办法的通知》(发改价格[2005]514号)的方法, 包含准许成本、准许收益、税金等的计算。

$$\lambda_0(t) = f_6[F_{cos}(t), F_{inc}(t), F_{tax}(t)] \quad (14)$$

$$F_{cos}(t) = f_7[N_{s1}(t), Z_s(t), N_{l1}(t), Z_l(t)] \quad (15)$$

$$F_{inc}(t) = f_8[F_{ass}(t)] \quad (16)$$

$$F_{tax}(t) = f_9[F_{cos}(t), F_{inc}(t)] \quad (17)$$

式(14)~(17)中: $F_{cos}(t)$ 为第 t 年电网新增项目准许成本; $F_{inc}(t)$ 为第 t 年电网新增项目准许收益; $F_{tax}(t)$ 为第 t 年电网新增项目税金及附加; $F_{ass}(t)$ 为第 t 年电网新建项目的有效资产; $F_{inc}(t)$ 为第 t 年电网新建项目在经营期内的年平均准许收益。

(4) 折旧环节。

$$F_{dep}(t) = F_{dep}(t-1) + \Delta F_{dep}(t) \quad (18)$$

$$\Delta F_{dep}(t) = f_{10}[N_{s1}(t), N_{s2}(t), N_{l1}(t), N_{l2}(t)] \quad (19)$$

式(18)、(19)中: $F_{dep}(t)$ 为第 t 年电网资产折旧; $\Delta F_{dep}(t)$ 为第 t 年电网资产折旧增加值。

(5) 网损费用环节。

$$F_{los}(t) = F_{los}(t-1) + \Delta F_{los}(t) \quad (20)$$

$$\Delta F_{los}(t) = f_{11}[\lambda_g(t), D(t)] \quad (21)$$

式(20)、(21)中: $F_{los}(t)$ 为第 t 年电网的网损费用; $\Delta F_{los}(t)$ 为第 t 年网损费用的增加; $\lambda_g(t)$ 为加权平均上网电价。

(6) 运行管理费环节。

$$F_{ope}(t) = F_{ope}(t-1) + \Delta F_{ope}(t) \quad (22)$$

$$\Delta F_{ope}(t) = f_{12}\{[N_{s1}(t) - N_{s2}(t)], Z_s(t), [N_{l1}(t) - N_{l2}(t)], Z_l(t)\} \quad (23)$$

$$Z_s(t) = f_{13}[S_s] \quad (24)$$

式(22)~(24)中： $F_{\text{ope}}(t)$ 为第 t 年电网的运行管理费用； $\Delta F_{\text{ope}}(t)$ 为第 t 年电网运行管理费的增加； $Z_s(t)$ 为第 t 年电网建设中每座变电站的投资； S_s 为每座变电站的容量； $Z_l(t)$ 为第 t 年电网建设中每km线路的投资。

(7) 变电站容量环节。

$$S_s(t) = f_{14}[S_{\text{se}}(t)] \quad (25)$$

按单位容量的投资最小来决定的变电站经济容量，

$$\min Z_0 = \frac{Z_s(t) + Z_l(t) + F_{\text{los}}(t) + F_{\text{ope}}(t)}{S_{\text{se}}} \quad (26)$$

$dZ_0/dS_{\text{se}} = 0$ ，求出变电站的经济容量为 S_{se} 。

上述模型中(1)~(4)、(12)、(18)、(20)、(22)这8个动态方程决定了宏观电网规划仿真的动态特性，构成了宏观层电网规划仿真的“紧凑”模型，并且在用宏观层电网规划的系统动力学模型分析实际系统时有针对性的改变各环节模型的部分表达形式或者改变对某个时间点上的某个变量的值，来对方案选优和战略、政策的仿真。

3 算例分析

采用某地区电网 2005 年的数据，地区主网由 220/110 kV 和 110 kV 线路构成，采用共用网络输配电价测算的分成分区邮票法，并忽略上级电网分摊费用，只针对 110 kV 电网进行规划和测算电价。采用系统动力学软件 *ithink* 编写仿真程序模拟宏观层电网规划的发展及内部各个变量的相互影响。算例中没有考虑网架规划，在算例中 $f_1 \sim f_{11}$ 的函数关系说明如下：

$$f_1: N_{s1}(t) = INT\left[\frac{\Delta S(t)}{S_s(t)}\right] \quad (27)$$

式中： $INT[]$ 表示四舍五入取整函数； S_s 为变电站容量，kVA。

$$f_2: [N_{l1}(t) - N_{l2}(t)] = [N_{s1}(t) - N_{s2}(t)] \cdot [1/P_l(t)] \cdot S_s(t) \cdot \alpha(t) \cdot r_s(t) \quad (28)$$

式中： $P_l(t)$ 为第 t 年每回线路的平均负荷，各年可取 326 MW； r_s 为负荷几何半径，km；这是在假设变电站的供电区域为圆形，电网覆盖面上的电力负荷密度为均匀的，则 $r_s(t) = \sqrt{S_s(t) \cdot \alpha(t) / (\pi \sigma)}$ ； $\alpha(t)$ 为负荷平均功率因数，取 0.95； $\sigma(t)$ 为面负荷密度，kW/km²，取 $D(t)/(915\text{km}^2)$ 。

$$f_3: \Delta S(t) = \beta \cdot \Delta D(t) \quad (29)$$

式中 β 为修正容载比， $\beta = 1.8 \cdot \gamma \cdot C_{\text{con}}(t) / a_1$ ，其中， γ 为市场力修正系数，一般在 1~1.2 之间，由 $B_{\text{pow}}(t)$

而定，假设市场力偏好为中，取 $\gamma = 1.1$ 。

$$f_4: C_{\text{con}}(t-1) = a_1 / K(t-1) + b_1 \quad (30)$$

阻塞费用和充裕度的反向关系用线性描述， a_1 、 b_1 为参数，并取 $b_1 = 0$ 。

$$f_5: \Delta \lambda(t) = \frac{[\lambda_0(t) - \lambda(t-1)] \cdot \Delta D(t) \cdot h}{D(t) \cdot h} \quad (31)$$

式中 h 为最大负荷利用小时数。

$$f_6: \lambda_0(t) = \frac{F_{\text{cos}}(t) + F_{\text{inc}}(t) + F_{\text{tax}}(t)}{\Delta D(t) \cdot h} \quad (32)$$

式中 h 为最大负荷利用小时数，取 5 500 h。

$$f_7: F_{\text{cos}}(t) = [N_{s1}(t) \cdot Z_s(t) + N_{l1}(t) \cdot Z_l(t)] \cdot (k_{\text{dep}} + k_{\text{ope}}) \quad (33)$$

式中： k_{dep} 为折旧率，按经营期 25 年直线折旧，取 4%； k_{ope} 为运行管理费率，取 5%。

$$f_8: F_{\text{inc}}(t) = F_{\text{ass}}(t) \cdot [1 - k_{\text{dep}} \cdot (A/W, r_2, n)] \cdot (1 + r_1) \quad (34)$$

式中： r_1 为电网的加权平均资金成本，取 6%； r_2 为内部收益率，一般为 8%； n 为经营期，取 25 年； $(A/W, r_2, n)$ 均匀梯度系列年金化系数； $F_{\text{ass}}(t)$ 第 t 年新增电网资产。

$$f_9: F_{\text{tax}}(t) = \frac{[F_{\text{cos}}(t) + F_{\text{inc}}(t)] \cdot K_{\text{tax}}}{1 + K_{\text{tax}}} \quad (35)$$

式中 K_{tax} 为综合税率，按增值税 17%，城市建设维护费率 7%，教育费及附加 3%，折算综合税率为 18.7%。

$$f_{10}: \Delta F_{\text{dep}}(t) = k_{\text{dep}} \cdot [N_{s1}(t) - N_{s2}(t)] \cdot Z_s(t) + k_{\text{dep}} \cdot [N_{l1}(t) - N_{l2}(t)] \cdot Z_l(t) \quad (36)$$

式中： $Z_s(t)$ 为变电站单位造价； $Z_l(t)$ 为线路单位造价，90 万元/km；

$$f_{11}: \Delta F_{\text{los}}(t) = \lambda_g(t) \cdot D(t) \cdot h_2(t) \quad (37)$$

式中： $\lambda_g(t)$ 为平均上网电价，取 30 分/kWh； $h_2(t)$ 最大负荷损耗时间，取 3 750 h。

$$f_{12}: \Delta F_{\text{ope}}(t) = k_{\text{ope}} \cdot \{[N_{s1}(t) - N_{s2}(t)] \cdot Z_s(t) + [N_{l1}(t) - N_{l2}(t)] \cdot Z_l(t)\} \quad (38)$$

$$f_{13}: Z_s(t) = a_2 \cdot S_s(t) + b_2 \quad (39)$$

式中： a_2 、 b_2 为参数，取 $a_2 = 17$ 万元/MVA， $b_2 = 1500$ 万元。

$$f_{14}: S_s(t) = \begin{cases} 2 \times 120, & S_{\text{se}}(t) < 270 \\ 2 \times 150, & 270 \leq S_{\text{se}}(t) < 330 \\ 2 \times 180, & S_{\text{se}}(t) \geq 330 \end{cases} \quad (40)$$

$S_s(t)$ 取 220 kV 有载调压变压器的主要型号。

算例给出了在共用网络输配电价采用分成分区邮票法和准许收入的定价模式时，该地区电网的中

长期电网发展战略: 逐年的变电站和线路投建情况如图2, 输电价走势如图3。

假定价格管制部门提高了第1年的输电价格水平, 这项政策的改变将带来图4的后果, 由于负荷发展不变, 电网建设变电容量不变, 电网建设资金富裕, 所以电网公司前五年新建变电站投入单台主变的占地式规划方式, 这时电网建设已经不是最小投资规划。反之, 对电网公司来说, 如果输电价格是以准许收益的定价方式, 电网公司保持较高输电价格水平的有效方式是加大电网投资, 此时, 新建变电站投入单台主变的占地式规划从电网公司长远效益上优于对原有变电站的扩建和改建。

综上所述, 系统动力学的宏观电网规划仿真模型适用研究宏观层面的政策性、战略性问题, 它可

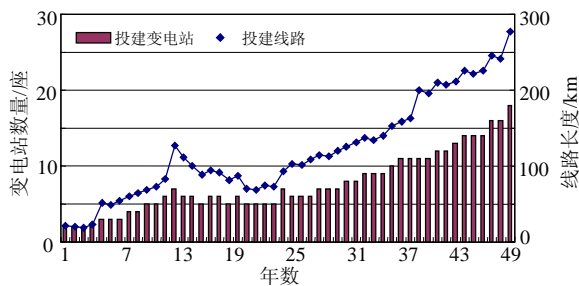


图2 逐年投建的变电站座数和线路长度

Fig. 2 Number of substation and length of line constructing each year

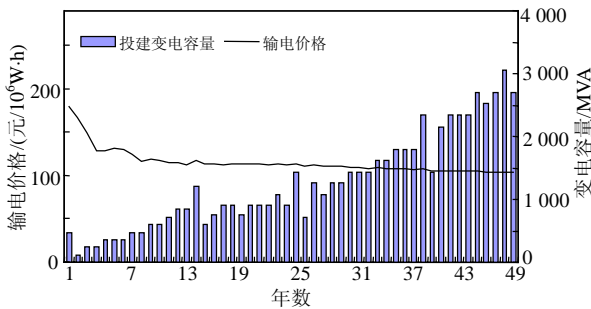


图3 每年投建变电容量和输电价格水平

Fig. 3 Capacity of substation constructing and transmission price each year

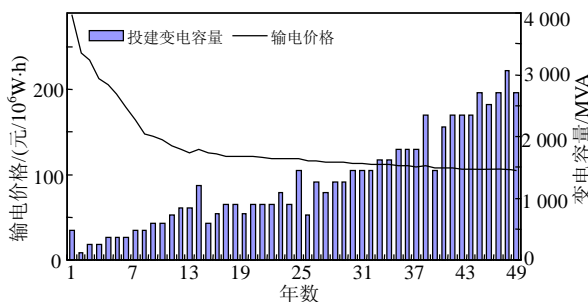


图4 改变投建方式后的每年投建变电容量和输电价格水平

Fig. 4 Capacity of substation constructing and transmission price each year after changing the mode of construction

以对不同规划方案进行比较选优, 可以为宏观层面定性问题量化, 应用本文模型也可以仿真税收政策改变时电网规划的战略、负荷发展储备系数的调整对电网规划的影响等内外参数变化时的宏观层面电网规划战略, 善于表现这种过程量和发展趋势, 适于研究中长期电网规划和电网的远景发展战略。

4 结语

本文提出用系统动力学方法研究宏观层电网规划仿真模型, 建立了各环节的数学模型, 算例验证了本文提出的模型和方法对研究宏观层电网规划仿真提供了强有力的工具。对于电网规划方案的制定、评估, 以及对输电价的影响进行探讨, 综合考虑贯穿历史和未来, 研究过程量、长期的稳定性和发展趋势, 建立各环节的数学模型, 把电网规划和输电价格联系起来进行系统分析, 从而形成宏观层电网规划的动态仿真模型。

参考文献

- [1] Braga A S D, Saraiva J T. A multiyear dynamic approach for transmission expansion planning and long-term marginal costs computation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1631-1639.
- [2] Risheng Fang, Hill D J. A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 374-380.
- [3] Papalexopoulos. Alex. Power system expansion planning and pricing in a deregulated environment[C]. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, San Francisco, USA, 2002.
- [4] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 50-57.
Xiao Jun, Wang Chengshan, Zhou Min. ANIAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57(in Chinese).
- [5] 高赐威, 程浩忠, 王旭. 盲信息的模糊评价模型在电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 24-29.
Gao Ciwei, Cheng Haozhong, Wang Xu. The application of fuzzy evaluation of blind information in electric network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 24-29(in Chinese).
- [6] 谢敏, 陈金富, 段献忠, 等. 基于模糊阻塞管理的启发式电网规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 61-67.
Xie Min, Chen Jinfu, Duan Xianzhong, et al. Fuzzy congestion management based heuristic transmission network planning method [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 61-67(in Chinese).
- [7] Rivas-Davalos F, Irving MR. An efficient genetic algorithm for optimal large scale power distribution network planning[C]. IEEE Bologna Powertech Conference, 2003, 6, 23-26.
- [8] 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[J]. 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[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16(in Chinese).
- [9] 金华征, 程浩忠, 曾德君, 等. 基于集对分析的柔性电网规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 7-12.
Jin Huazheng, Cheng Haozhong, Zeng Dejun, et al. A novel method of flexible transmission network planning based on set pair analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 7-12(in Chinese).
- [10] Richard A Reid, Elsa L Koljonen. Validating a manufacturing paradigm system dynamics modeling approach[C]. The 1999 Winter Simulation Conference, Phoenix, USA, 1999.
- [11] John F Affeldt. The application of system dynamics (SD) simulation to enterprise management[C]. The 1999 Winter Simulation Conference, Phoenix, USA, 1999
- [12] Klaus Vogstad. Combining system dynamics and experimental economics to analyse the design of Tradable Green Certificates [C]. The 38th Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, USA, 2005
- [13] 韦凌云, 吴捷, 刘永强. 基于系统动力学的电力系统中长期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 44-47.
Wei Lingyun, Wu Jie, Liu Yongqiang. Long-term electric load forecasting based on system dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 44-47(in Chinese).
- [14] 钟庆, 吴捷, 伍力, 等. 基于系统动力学的分区负荷预测[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 51-55.
Zhong Qing, Wu Jie, Wu Li, et al. Subarea load forecasting based on system dynamics[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 51-55(in Chinese).
-
- 收稿日期: 2007-05-28。
作者简介:
王伟(1980—), 男, 内蒙通辽市人, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、电网规划, wangwei_tl@sohu.com;
张粒子(1963—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、电力系统规划与运行优化等领域的研究;
舒隽(1974—), 男, 博士, 副教授, 从事电力市场、电网规划、人工智能在电力系统中的应用等领域的研究;
麻秀范(1970—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化、供电市场分析、配网规划与优化。

(编辑 王彦骏)