

市场环境下计及阻塞集中度指标的输电网扩展规划

付蓉¹, 魏萍², 万秋兰², 李扬², 唐国庆²

(1. 南京邮电大学自动化学院, 江苏 南京 210003; 2. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 与传统的输电网规划相比, 电力市场环境下的输电网扩展规划不仅要满足市场用户的需求, 还对减缓输电系统阻塞、抑制市场力的滥用和提高社会效益起着重要作用。对于因网络充裕度不足造成的长期输电阻塞, 首先参考市场集中度监管指标 Lerner 指数的定义, 提出了新的阻塞集中度指标作为评估输电网络充裕度的指标; 然后从市场运营的实际情况出发, 以阻塞集中度指标作为约束条件来抑制网络的垂直市场力, 构造了将阻塞收益用于回收投资成本的输电网扩展规划模型。IEEE-24 节点算例系统分析表明该模型综合考虑了输电投资成本回收以及输电阻塞管理等实际问题, 能有效减缓系统阻塞发生, 降低投资风险, 并为输电网监管提供可靠依据。

关键词: 阻塞集中度指标; 阻塞收益; 网络充裕度; 垂直市场力; 扩展规划

Congestion concentration index based transmission expansion planning under market environment

FU Rong¹, WEI Ping², WAN Qiu-lan², LI Yang², TANG Guo-qing²

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In a competitive power market, it is important to expand transmission system in order to provide a fair environment to all market participants. In this paper, a new congestion concentration index taken the form of Lerner Index is defined to quantify the overall network inadequacy. With this congestion concentration indicator, a new transmission expansion planning model in the LMP-based market is constructed. The objective function of the model takes the congestion revenue into account to reimburse the network expansion investments as a reward. The main contribution of this research includes defining new transmission adequacy indicator for restraining the vertical market power during transmission transactions and introducing the congestion revenue for decreasing the investment risk in expansion planning. The bi-level optimal research strategy is then developed for the complete planning process. The test results on the IEEE 24-bus example system show that the optimized expansion planning could successfully improve the network adequacy. It illustrates that the proposed approach is more realistic for the transmission expansion planning under market environment and hence the supervision on the network adequacy is very necessary and effective.

Key words: congestion concentration index; congestion revenue; network adequacy; vertical market power; expansion planning

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)10-0028-05

0 引言

激烈的市场竞争下, 市场成员为降低运行成本会尽量充分利用现有网络的传输极限, 当输电网络传输容量不足时, 就会产生系统输电阻塞。输电公司必须通过扩展或加强输电网络来减缓输电系统阻塞, 提高输电网络充裕度来满足市场成员的需求, 促进市场公平竞争。市场条件下, 受市场成员间的交易、经济的发展以及宏观政策等的影响, 输电网

扩展规划正面临一些新的挑战^[1,2]。

首先, 电力工业结构的调整使不同市场模式下输电公司面临的扩展规划目标不尽相同。如英国的电力市场由非赢利的电网公司负责输电网的运行, 此时电网的规划须从整个系统的角度出发; 而澳大利亚则允许私有电网公司承担电能的输送和分配^[3], 此时电网规划的目标必须与各网络所有者的经济利益相一致。其次, 竞争机制的引入使电网未来的收益由市场供求关系决定, 投资能否全部回收难以确定, 从而增大了投资风险。在这些市场条件下, 投资者在考虑供电可靠性的同时, 更加注重投资成本的回收问题。

基金项目: 江苏省高校自然科学研究指导性计划资助项目 (06KJD470136)

针对市场条件下输电网规划面临的新问题, 文献[4~6]提出了一些新的输电网规划模型。这些规划模型主要对市场激励下多种系统运营方式进行了网络规划分析, 构造了以投资和运行成本最小为目标的输电网规划模型。为了减轻输电线路阻塞, 提高规划系统的充裕度, 以双边竞价的电力运营模式为研究背景, 文献[7~11]在输电网规划模型中提出利用阻塞成本、阻塞收益、系统阻塞指标等运营指标来评估输电网规划方案。这些文章均仅从输电公司运营的角度, 利用交易价格、扩建费用等经济信息来指导输电网规划决策。

实际上, 随着电力管制的解除及市场改革的深入, 市场力问题日益显示其重要性。市场力表现为市场参与者能够影响市场中产品价格的能力, 市场力与市场结构密切相关。对于因网络充裕度不足造成的长期输电阻塞, 输电公司将利用电力传输中的垂直市场力获得阻塞收益, 而一些拥有水平市场力的发电公司也将通过竞价策略来左右市场价格, 达到操纵市场的目的^[12]。因此, 输电网扩展规划中还必须依据能反映市场运行状况的监管指标, 有效识别并抑制输电阻塞和垂直市场力的作用, 才能促进电力市场的公平竞争与健康发展。

与上述文章不同, 本文结合双边竞价的电力运营模式, 以市场集中度指标 Lerner 指数^[13]作为水平市场力的衡量指标为依据, 提出了新的阻塞集中度指标来衡量输电网络阻塞程度, 从而在网络扩展模型中加强对输电阻塞和垂直市场力的约束。并在输电规划时构造了更为实用的利用部分阻塞收益来回收输电网投资成本的优化规划模型。通过对 IEEE-24 节点算例系统计算分析, 验证了所提出的规划模型能有效减缓规划期间系统输电阻塞, 提高输电网络的充裕度, 有利于促进电力市场发展和提高系统运行效率。

1 阻塞集中度指标

1.1 阻塞集中度指标定义

在双边竞价的电力运营模式下, 本文将作如下简化假设:

- 1) 市场运行过程中, 由独立系统运营商或电力运营商执行市场结算;
- 2) 发电公司和配电公司将进行独立理性的报价;
- 3) 采用直流潮流模型来模拟输电网络, 忽略网损和无功一电压子问题。

规划期内市场运营机制追求社会效益的最大化, 可以得到市场出清模型为^[14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min J = \sum_{i=1}^{N_G} C_i(g_i) - \sum_{j=1}^{N_D} B_j(d_j) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{N_D} d_j - \sum_{i=1}^{N_G} g_i = 0 \\ g_{i,\min} \leq g_i \leq g_{i,\max} \quad i=1, 2, \dots, N_G \\ d_{j,\min} \leq d_j \leq d_{j,\max} \quad j=1, 2, \dots, N_D \\ z_{l,\min} \leq z_l \leq z_{l,\max} \quad l=1, 2, \dots, N_L \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: 目标函数为社会成本最小, 等价于社会效益最大化。约束条件分别为网络平衡约束、发电厂机组容量约束、负荷容量约束和输电容量约束。定义参数 N_G 为发电机组节点数; N_D 为负荷节点数; N_L 为线路总数; g_i 为发电机出力; $g_{i,\max}$ 和 $g_{i,\min}$ 为发电机 i 容量上下限; d_j 为负荷功率; $d_{j,\max}$ 和 $d_{j,\min}$ 为负荷 j 容量上下限; z_l 为线路潮流; $z_{l,\max}$ 和 $z_{l,\min}$ 为线路 l 容量上下限。

边际电价模型中, 节点边际电价 (LMP) 定义为每个节点负荷注入的改变量对其效益的微增^[15]。因此, 由优化模型式 (1) 的拉格朗日函数对应的一阶 KKT 优化条件, 可分别得到发电商 i 和用户 j 的节点电价。其中, 发电商 i 的节点电价为:

$$\rho_i = \frac{\partial C_i(g_i)}{\partial g_i} - \mu_{\min,g,i} + \mu_{\max,g,i} \quad i=1, \dots, N_G \quad (2)$$

用户 j 的节点电价为:

$$\rho_j = \frac{\partial B_j(d_j)}{\partial d_j} + \mu_{\min,d,j} - \mu_{\max,d,j} \quad j=1, \dots, N_D \quad (3)$$

式中: $\mu_{\min,d,j}$ 和 $\mu_{\max,d,j}$ 是 KKT 优化条件中负荷 j 容量约束对应的拉格朗日乘子, 由于负荷 j 的容量不能同时违反上下限约束条件, $\mu_{\min,d,j}$ 和 $\mu_{\max,d,j}$ 中必有一个等于零; 同样, $\mu_{\min,g,i}$ 和 $\mu_{\max,g,i}$ 是发电机 i 容量约束对应的拉格朗日乘子。

由式 (2) 和 (3) 可见, 边际电价反映了系统优化交易后社会成本分摊给市场参与者的经济信息。因此, 可将式 (1) 的优化目标转换成由节点电价表示的社会效益最大化形式:

$$\max J = \sum_{i=1}^{N_G} (\rho_i \cdot g_i - C_i(g_i)) + \sum_{j=1}^{N_D} (B_j(d_j) - \rho_j \cdot d_j) + \left(\sum_{j=1}^{N_D} \rho_j \cdot d_j - \sum_{i=1}^{N_G} \rho_i \cdot g_i \right) \quad (4)$$

优化函数的第一项表示发电商的生产效益, 第二项表示用户的消费效益, 第三项表示输电网络的

阻塞收益,意味着电价较低的发电端供应电力给价格较高的受电端时产生的市场交易盈余。若不计输电损耗,交易盈余等于输电方阻塞收益,即由于输电线路容量约束导致的输电盈余。因此,电力传输过程中输电方获得的阻塞收益可表示为:

$$C_R = \sum_{j=1}^{N_D} \rho_j \cdot d_j - \sum_{i=1}^{N_G} \rho_i \cdot g_i \quad (5)$$

进行市场力分析时, Lerner 指数 (LI) 作为反映市场效率的监管指标,通过对市场成交电价与边际成本的比较,能有效地评估市场交易中存在的静态市场力。LI 值越大,价格越接近成本,则市场力越小,市场效率越高。同理,为了评估垂直市场中输电阻塞对市场效益的影响,本文依据监管指标 Lerner 指数的结构形式,提出新的阻塞集中度指标 C_1 用于评估网络充裕度。阻塞集中度指标 C_1 将实际市场平均价格与完全竞争市场电价相比,并以价格相对偏移的百分比来表征整个系统的阻塞程度。

$$C_1 = \frac{\text{mean}(\rho) - \mu_e^{\text{uncong}}}{\text{mean}(\rho)} \quad (6)$$

其中: ρ 是由网络中所有节点电价组成的向量, $\text{mean}(\rho)$ 是节点电价的平均价格; μ_e^{uncong} 是完全竞争市场电价,等于市场优化模型式 (1) 不计网络约束时网络平衡方程对应的拉格朗日乘子 μ_e 。阻塞集中度指标反映了市场中由于输电阻塞造成的价格变化对系统运行的影响。

1.2 指标的比较与分析

在完全自由公平竞争的电力市场,输电线路没有容量限制,阻塞集中度指标 C_1 为零,此时系统各节点的节点电价都相等,意味着输电公司无法利用垂直市场力来获取阻塞收益。当某些线路传输容量不足时,线路容量约束将被激活,阻塞线路上受电端节点电价急剧上升,导致输电网络中垂直市场力的增加。一旦输电方在输电传输过程中拥有的垂直市场力越大,阻塞集中度指标 C_1 必然也越高。

对于大型复杂网络,文献[7]直接采用节点电价作为经济参量指导输电网规划,评估指标显得过于分散和复杂。如果采用文献[8~11]提出的一些带量纲的输电运营指标,对不同系统的规划情况又难以相互比较。本文提出的阻塞集中度指标 C_1 ,通过量化实际市场交易价格对完全竞争市场交易价格的偏离程度,能集中反映输电网络中垂直市场力的作用情况。如果阻塞集中度指标 C_1 过高,表明此时网络阻塞严重,市场存在较大的价格风险。规划人员必

须通过输电线路扩建来降低输电阻塞,提高输电网络充裕性,促进发展公平竞争的电力市场。

2 基于新的阻塞集中度指标的输电网规划

2.1 优化规划模型

传统的输电网水平年规划数学模型^[16]难以处理市场环境下输电定价等经济要素对系统充裕性的影响。实际联营体市场运营中,由于网络充裕性的不足以及输电阻塞的存在,输电公司将赢得一定的阻塞收益。由于输电阻塞收益反映了输电网络的经济价值,无论对于私有或公有电网公司,输电方都更倾向于将部分阻塞收益用于输电网络扩建以降低输电网投资风险。同时,为了防止输电公司滥用市场力,规划系统的阻塞集中度指标必须小于某一监管水平。因此,可构造出更实用化的利用阻塞收益来回收输电网投资成本的优化规划模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max F = \alpha \cdot C_R \cdot T_h - \sum_{l=1}^L \frac{C_l S_l}{T_y} \\ \text{s.t. } C_1 < \varepsilon \\ \min J = \sum_{i=1}^{N_G} C_i(g_i) - \sum_{j=1}^{N_D} B_j(d_j) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^{N_D} d_j - \sum_{i=1}^{N_G} g_i = 0 \\ g_{i,\min} \leq g_i \leq g_{i,\max} \quad i=1,2,\dots,N_G \\ d_{j,\min} \leq d_j \leq d_{j,\max} \quad j=1,2,\dots,N_D \\ z_{l,\min} \leq z_l \leq z_{l,\max} \quad l=1,2,\dots,N_L \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: C_R 是由式 (5) 定义的阻塞收益; α 是用于投资的阻塞收益占总阻塞收益的比例; T_h 是水平年内系统的交易时间; T_y 是投资回收年限; C_1 是由式 (6) 定义的阻塞集中度指标; ε 是监管部门设置的阻塞集中度约束阈值; 变量 S_l 为由于电网元件只能以离散形式增加,所以规划变量 S_l 是候选线路 l 的 0~1 离散决策变量, S_l 取 1 或 0 分别表示该线路包括或不包括在规划方案之中; C_l 为候选输电线路 l 的投资建造费用。

市场环境下游电网投资规划模型是两层优化数学模型,下层优化模型即市场出清是包含在上层输电方投资效益最大化问题中的。规划模型的上层优化目标由两部分组成:第一部分表示规划水平年获得的阻塞收益中用于输电投资的部分;第二部分表示输电规划投资分摊到水平年的费用。约束式分别为阻塞集中度指标约束。其余变量和约束式定义同市场优化模型式 (1)。

2.2 输电网优化规划步骤

市场环境下输电网扩展规划模型涉及市场交易优化运行条件下的投资变量优化问题, 是一个较复杂的非线性混合整数规划问题。本文将输电网投资规划优化模型式(7)分解为两个子问题, 即优化决策主问题和优化运行从问题, 采用两层优化搜索策略来求解网络规划方案。由于优化决策主问题具有的非凸、不可微等特点, 采用改进的遗传算法^[17,18]求解投资决策变量 S_i , 优化运行从问题则利用二次规划法对市场出清模型计算待优化方案的 C_R 和 C_I 等运营指标。两层优化搜索策略法是对待优化的规划方案依次寻找市场出清条件下能使投资收益最大的优化策略。经过循环寻优, 如果连续两次上层循环的规划方案个体的适应度距离小于预设阈值, 则全局优化规划解存在, 迭代终止。

输电网优化规划主要求解步骤如下:

- 1) 输入系统运行参数和合适的优化初值, 置计数器 $k=0$;
- 2) 在优化决策主问题中, 形成初始种群, 解码后作为规划方案初值集合;
- 3) 将候选方案集代入优化运行从问题中, 采用内点法求解定价模型式(1)来确定系统的经济运行方式, 分别采用式(5)和式(6)计算系统运营指标 C_R 和 C_I ;
- 4) 将系统运营指标回代入优化决策主问题, 将规划模型式(7)目标值作为待优化规划方案的个体适应度, 评估每个规划方案的个体适应度, 保留最优个体后, 依次进行交叉、倒位、变异等操作, 生成下一代群体;
- 5) 计数器 $k=k+1$;
- 6) 重复计算步骤(3)~(5), 直到满足预设的阈值条件或达到最大迭代次数为止;
- 7) 将求解过程中适应度最好的个体作为最优的输电网扩展方案。

3 算例分析

本文对 IEEE-24 节点系统进行了算例分析, 系统由 14 个发电公司和 17 个配电公司组成, 发电公司机组报价、机组容量上限值、配电公司负荷报价和峰值负荷对应功率限值参数参见文献[10]。设规划水平年峰值负荷增长为原来的 2 倍, 即总的峰值负荷为 5 700 MW。规划前系统含 38 条线路, 候选线路集选择与已有线路相同型号的线路进行扩建, 线路投资费用与线路长度成正比, 等于 10^4 美元/km。投资回收年限 T_y 设定为 10 年。

设定阻塞集中度指标的约束阈值 ε 等于零和

5%, 分别表示规划目标是所有线路无阻塞发生, 和阻塞集中度指标不能超过 5% 的监管限值。若阻塞收益回收比例 α 为 0.1, 表示输电阻塞收益的 10% 将用于网络扩展; 而 α 为 1 时, 表示将 100% 的输电阻塞收益全部用于网络扩展。设文献[10]中投资成本最小化规划为模型 1, 约束条件是阻塞集中度指标不超出阈值 ε , 得到的输电网优化规划方案为 P_{11} 和 P_{12} ; 采用本文投资成本回收的优化规划模型 2, 对于不同的 ε 和 α 取值, 求得的输电网优化规划方案为 $P_{13} \sim P_{15}$, 如表 1 所示。

当阈值 ε 等于零时, 在不同的规划模型和阻塞收益分配比例上, 得到的方案 P_{11} 与 P_{13} 都相同, 均需扩建六条支路: 3-24、7-8、14-16、15-24、16-17 和 17-18。当 $\varepsilon=5\%$ 时, 模型 1 投资成本最小得出两个优化规划方案, 分别是: 方案支路 3-24、10-12、14-16、15-24、16-17; 和方案支路 3-24、14-16、15-24、16-17、17-18。两个方案投资成本均为 141 万美元, 两个方案投资后运营系统的阻塞集中度指标分别为 2.86% 和 3.98%, 因此选择 P_{12} 作为模型 1 的最优方案。采用投资成本回收的优化规划模型 2, 当阻塞集中度指标不能超过阈值 5% 时, 若将输电阻塞收益的 10% 用于网络扩展时, 规划方案 3 中支路 17-18 的扩建被取消; 若输电阻塞收益的 100% 将用于网络扩展时, 则规划方案 3 中支路 7-8 和 17-18 的扩建都被取消。

表 1 不同输电系统扩建规划方案列表

Tab.1 Solutions of transmission planning schedules

两端节点	支路容量/MW	支路长度/km	模型 1		模型 2		模型 2	
			P_{11} ($\varepsilon=0$)	P_{12} ($\varepsilon=5\%$)	P_{13} ($\varepsilon=0$)	P_{14} ($\varepsilon=5\%$ $\alpha=0.1$)	P_{15} ($\varepsilon=5\%$ $\alpha=1$)	
3-24	400	50	1	1	1	1	1	
6-10	175	16	0	0	0	0	0	
7-8	175	16	1	0	1	1	0	
10-12	400	10	0	1	0	0	0	
14-16	500	27	1	1	1	1	1	
15-24	500	36	1	1	1	1	1	
16-17	500	18	1	1	1	1	1	
17-18	500	10	1	0	1	0	0	

表 2 比较了不同规划方案的目标值。采用基于阻塞集中度指标约束的规划模型, 规划方案 P_{13} 扩建线路有 6 条, 投资成本为 157×10^4 美元。此时网络不存在任何输电阻塞, 规划系统能完全消除输电网络的垂直市场力, 但这只是一种完全理想的投资方案。实际规划中考虑不确定因素对系统运行的影响, 一般将阻塞集中度这一监管指标设定在 5% 以内。比较两种不同规划模型下方案 P_{12} 和 P_{14} 的目标值, P_{14} 的投资费用虽然略高于 P_{12} , 但是其输电阻塞收益更高, 投资方更愿意利用高额输电阻塞收益用于输电投资成本的回收。同时, 投资方将根据实际情况选择不同的阻塞收益投资比例。若将阻

塞收益的 10% 用于输电投资, 规划方案 P_{14} 中扩建线路有 5 条, 输电阻塞收益为 9.84×10^6 美元, 阻塞集中度指标为 3.41%。若将阻塞收益全部用于输电投资, 规划方案 P_{15} 中扩建线路有 4 条, 输电阻塞收益增加到 13.465×10^6 美元, 阻塞集中度指标为 3.89%。结果表明, 随着阻塞收益用于投资的比例增大, 输电方更倾向利用输电网络垂直市场力造成的线路阻塞赢得高额阻塞收益, 从而降低输电线路的投资和扩建, 不利于市场运行和网络扩展。因此, 输电网规划时可以选取合适的投资比例, 依据必要的系统评估指标, 有效抑制输电网络中垂直市场力的滥用, 提高市场效率和社会效益。本算例中选取优化规划扩建方案 P_{14} 既能有效地将输电网络传输中的垂直市场力控制在合理的范围内, 降低系统运行时的输电网络阻塞程度, 同时合理的阻塞收益又能更好地激励投资方扩展输电网络和提高网络的充裕性。

表 2 不同规划方案的目标值比较

Tab.2 Comparison of different planning schemes

优化方案	支路数	年阻塞收益 / 10^6 美元	投资费用 / 10^4 美元	C_i /(%)
P_{11}	6	0	157	0
P_{12}	5	1.246	141	2.86
P_{13}	6	0	157	0
P_{14}	5	9.843	147	3.41
P_{15}	4	13.465	131	3.89

与传统的规划方法相比, 本文提出的输电网扩展规划模型具有以下特点:

1) 通过计算市场优化模型的出清价格, 建立了系统阻塞集中度指标, 能够在网络规划中加强对输电阻塞和垂直市场力的约束。一旦加强对阻塞集中度指标的监管, 投资方必将增加输电线路投资, 增大线路的扩建数目, 降低输电网络的阻塞。

2) 无论对于私有或公有电网公司, 提出利用阻塞收益来回收投资成本的规划目标在保证网络充裕度的同时, 更有利于输电投资方回收投资成本、降低投资风险, 很好地协调了输电收益方与监管部门之间的关系。

4 结论

市场环境下输电网络扩展规划对减缓输电系统阻塞, 促进市场的公平竞争, 提高市场效率和社会效益, 优化配置市场资源具有重要作用。本文基于双边竞争电力市场出清模型, 通过分析输电阻塞引起的垂直市场力对输电网规划的影响, 提出了新的阻塞集中度指标来评估输电网络的充裕度。并从投

资方的实际利益出发, 将阻塞集中度指标作为市场监管的约束条件, 提出了将阻塞收益用于回收投资成本的输电网扩展规划模型。

IEEE-24 节点系统的算例分析表明, 提出的输电网扩展规划模型与传统规划模型相比, 很好地协调了追求利益的投资方和系统监管机构阻塞管理的实际需求。规划人员可以根据系统经济运行和网络充裕度的实际情况对输电网规划进行综合决策。优化规划方案能够在满足市场用户需求的同时, 提高规划系统的网络充裕度, 有效减缓系统阻塞发生, 并为输电网监管提供可靠依据。

参考文献

- [1] Romero R, Monticelli A, Garcia A. Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning[J]. IEE Proc Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(1): 27-36.
- [2] De la Torre T, Feltes J W, Roman T G S. Deregulation, Privatization, and Competition: Transmission Planning under Uncertainty[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 460-465.
- [3] Krapels E N. Stimulating New Transmission Investments [J]. Electricity Journal, 2002, 15(3): 76-80.
- [4] FANG Ri-sheng, Hill D J. A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 374-380.
- [5] YANG Ning, WEN Fu-shuan. A Chance Constrained Programming Approach to Transmission System Expansion Planning[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 75: 171-177.
- [6] 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 System Expansion Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 28-33.
- [7] Lee Y K, Manuspiya S, Choi M. Network Congestion Assessment for Short-term Transmission Planning under Deregulated Environment[A]. In: Proc IEEE PES Winter Meeting[C]. Columbus (America). 2001. 1266-1271.
- [8] Buygi M O, Balzer G, Shanechi H M. Market-Based Transmission Expansion Planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2060-2067.
- [9] Shrestha G B, Fonseka P A J. Congestion-driven Transmission Expansion in Competitive Power Markets [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 19(3): 1658-1665.

(下转第 36 页 continued on page 36)

- 10(23):1-4.
YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong. Issues and Technology Assessment on Power Quality Part1: General Concepts on Power Quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 10(23):1-4.
- [2] 陈磊, 徐永海. 浅谈电能质量评估的方法[J]. 电气应用, 2005, 24(1):58-61.
CHEN Lei, XU Yong-hai. Discussion About the Methods of Evaluating Power Quality[J]. Electrical Application, 2005, 24(1):58-61.
- [3] 金广厚, 李庚银, 周明. 电能质量市场理论的初步探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12):1-6.
JIN Guang-hou, LI Geng-yin, ZHOU Ming. Primary Study of Power Quality Market Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12):1-6.
- [4] 贾清泉, 宋家骅, 兰华, 等. 电能质量及其模糊方法评价[J]. 电网技术, 2000, 24(6):46-49.
JIA Qing-quan, SONG Jia-hua, LAN hua, et al. Quality of Electricity Commodity and Its Fuzzy Evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6):46-49.
- [5] 唐会智, 彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术, 2003, 27(12):85-88.
TANG Hui-zhi, PENG Jian-chun. Research on Synthetic and Quantificated Appraisal Index of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(12):85-88.
- [6] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
LI Deng-feng. Fuzzy Multiobjective Many-person Decision Makings and Games[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
- [7] 辛庆武, 杨灿军. 一种基于模糊多目标决策的炮兵火力优化方法[J]. 运筹与管理, 2005, 14(4): 29-34.
XIN Qing-wu, YANG Can-jun. A Method of Optimizing Artillery Firing Based on Fuzzy Multiobjective Decision Making[J]. Operations Research and Management Science, 2005, 14(4):29-34.

收稿日期: 2006-11-17; 收稿日期: 2006-12-29

作者简介:

韩正伟 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量监测; E-mail:wo6631077@163.com

邵如平 (1964-), 男, 主要从事电力系统和智能建筑方向的研究;

林锦国 (1957-), 男, 教授, 主要从事自动控制与系统工程方向的研究。

(上接第 32 页 continued from page 32)

- [10] 付蓉, 魏萍, 万秋兰, 等. 市场环境下基于最优潮流的输电网规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 42-47.
FU Rong, WEI Ping, WAN Qiu-lan, et al. Optimal Power Flow based Transmission Expansion under Market Environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 42-47.
- [11] 付蓉, 魏萍, 万秋兰, 等. 市场环境下基于系统阻塞指标约束的多阶段的输电网规划[J]. 继电器, 2006, 34(10): 55-59.
FU Rong, WEI Ping, WAN Qiu-lan, et al. Congestion Index based Multi-stage Transmission Expansion under Market Environment[J]. Relay, 2006, 34(10): 55-59.
- [12] Hobbs B F, Metzler C B, PANG Jong-shi. Strategic Gaming Analysis for Electric Power Systems: an MPEC Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 638-645.
- [13] Newbery D M. Power Markets and Market Power[J]. Energy Journal, 1995, 16: 39-66.
- [14] WEI Ping, Ni Y, Wu F F. Decentralised Approach for Congestion Management and Congestion Price Discovering[J]. IEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(6): 645-652.
- [15] Scheweppe F, Caramanis M, Tabors R, et al. Spot Pricing of Electricity[M]. Boston(MA): Kluwer, 1988.
- [16] Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning[J]. IEE Proc Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(1): 27-36.
- [17] LIN Chyi-yeu, WU Wen-hong. Niche Identification Techniques in Multimodal Genetic Search with Sharing Scheme[J]. Advance in Engineering Software, 2002, 33(11): 779-791.
- [18] Silva E L, Gil H A, Areiza J M. Transmission Network Expansion Planning under an Improved Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1168-1175.

收稿日期: 2006-11-02; 修回日期: 2007-01-08

作者简介:

付蓉 (1974-), 女, 博士, 研究方向为市场环境下的电力系统规划; E-mail: furong@njupt.edu.cn

魏萍 (1973-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场运行及配网自动化的研究和教学工作;

万秋兰 (1950-), 女, 博士, 教授, 研究领域为电力系统运行与控制、电力市场等。