

市场环境下基于系统阻塞指标约束的多阶段输电网规划

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: 电力市场环境下的多阶段输电网扩展规划在满足发电公司和用户的需求的同时,对减缓输电系统阻塞,促进市场的公平竞争具有重要作用。在此背景下,利用系统阻塞指标和系统阻塞成本分别作为评估规划网络可靠性指标和运行指标,以改进的小生境遗传算法为研究方法,提出了基于阻塞指标约束下的输电网多阶段规划模型。IEEE-24节点系统上算例分析表明该模型综合考虑了各规划阶段输电系统的经济运行,能更科学地指导输电网规划决策,有效减缓系统阻塞发生,提高规划系统的网络充裕性。

关键词: 系统阻塞指标; 阻塞成本; 小生境改进遗传算法; 多阶段输电网规划

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0055-05

0 引言

传统的垄断电力工业体制下,输电网扩展规划方法一般是在预想的负荷水平上进行电网的优化扩展,对未来环境变化的适应性较差,难以满足市场条件下输电网规划要求^[1]。随着以厂网分离为主要特征的电力工业市场化在世界范围内的逐步推广,市场成员间的竞争合作关系、经济发展的走势以及环境的影响,使得输电网规划面临许多新的挑战。

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。对此,文献[2]研究了电力联营体和双边市场模式下的输电网规划方法,文献[3]建立了拍卖市场下基于拍卖结果的输电网规划模型。其次,传统的输电网规划问题以负荷预测的结果为依据,将用户作为被动的接受者。而在市场条件下,市场成员为获取交易盈余会尽量充分利用现有网络的传输极限,而用户对电价独立的理性反应必将影响系统的实际运行和电网的收益。市场激烈竞争下,受市场交易计划的制定、输电定价等不确定因素的影响,输电网规划也需要依据市场运营评估指标,确定最佳的输电系统扩展计划,促进电力市场发展和提高系统的运行效率。文献[4]将提出的输电容量充裕性评估指标——系统阻塞指标作为系统阻塞程度的约束条件来建立输电网水平年扩展规划模型。文献[5]提出利用节点边际价格、阻塞成本和阻塞收益等系统运行指标来评估输电网规划方案。

输电网规划问题可分为静态规划和动态规划。静态规划又称为水平年规划,在进行方案比较时不

必考虑资金的贴现情况。而当输电网规划期较长时,需要将规划期分为几个规划阶段并考虑各阶段规划方案的系统运行过程。在这种情况下,必须同时考虑在何时、何地投建新的输电线路,这种规划属于动态规划问题。相对于水平年规划,市场环境下基于系统运营指标的多阶段动态规划方面的研究工作还比较初步^[6],文献[7]主要研究了基于输电阻塞等系统指标激励的输电网动态规划方法框架,由于输电阻塞费用的分摊问题仍在研究阶段,因此,市场环境下如何利用交易价格、输电阻塞等经济信号来指导输电网动态规划问题仍值得深入研究。

在上述背景下,本文利用系统阻塞指标^[4]构造了双边市场模式下多阶段输电网优化规划的方法框架,以整个规划期内的投资费用和运行指标的贴现值之和最小为目标,利用市场交易优化运行来处理优化方案的系统运营评估指标。同时,以改进小生境遗传算法为研究基础,根据所提出规划模型的实际特点,发展了基于小生境进化环境的优化规划模型,以提高算法的全局寻优能力和收敛速度。最后在IEEE-24算例系统上进行输电网扩展规划验证,结果表明所提出方法能有效指导输电网动态规划决策,减缓规划期间系统阻塞发生,提高系统运行的经济性能。

1 多阶段输电网优化规划模型

在输电开放环境中,市场参与者为了降低运行成本,获取交易盈余会充分利用输电线路的传输极限。当市场中输电网络传输容量不足时,就会产生系统传输阻塞,导致系统阻塞成本增加。输电系统

规划必须通过输电线路扩建来降低系统阻塞指标,从而有效地缓解线路阻塞。

因此,在阻塞激励的作用下,多阶段电网规划目标为规划期内在系统阻塞指标约束下投资成本与运行指标费用之和最小。设电力市场采用基于双边竞价的电力联营体模式,基于边际成本的输电定价模型,规划模型可表示为:

$$\min F = \sum_{l=1}^L \frac{C_l S_l}{(1+\delta)^{t_l}} + \sum_{t=1}^{T_y} \frac{C_C(t)}{(1+\delta)^t} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } R_{\text{cong}}(t) < \bar{R}_{\text{cong}}, \quad t = 1, 2, \dots, T_y \quad (2)$$

目标函数式(1)第一项为系统投资成本贴现值,第二项为系统在规划期间的运行指标贴现值,约束条件式(2)指规划期间内系统阻塞指标的约束。式中, T_y 为规划目标年; t 为每个规划水平年;变量 S_l 为候选线路 l 的0-1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 为线路 l 的投资成本; t_l 为候选线路 l 的投运时间; δ 为贴现率; t_h 为市场交易时段; $C_C(t)$ 为第 t 年度的系统阻塞成本,可作为系统在该规划年的运行指标; $R_{\text{cong}}(t)$ 为第 t 年的系统阻塞指标, \bar{R}_{cong} 为系统阻塞指标的阈值。

以上构造了以市场交易优化为模拟单元的多阶段输电网优化规划模型,其中,年度系统运营指标以及年度系统阻塞指标将由以下年度电网运行优化模型来确定系统在各规划阶段的运行评估指标。

2 年度电网运行优化模型

在完全竞争的双边竞价市场模式下,可假设发电商与用户按其边际成本曲线进行独立理性的报价。市场机制的设计追求社会运行成本最小化,采用直流潮流模型模拟输电网络,并忽略网损,可以得到每个交易时段 t_h 的市场优化模型为^[8]:

$$\min J(t_h) = \sum_{i=1}^{N_G} C_i(g_i(t_h)) - \sum_{j=1}^{N_D} B_j(d_j(t_h)) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^{N_D} d_j(t_h) - \sum_{i=1}^{N_G} g_i(t_h) = 0 \quad (4)$$

$$g_{i,\min} \leq g_i(t_h) \leq g_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (5)$$

$$d_{j,\min} \leq d_j(t_h) \leq d_{j,\max} \quad j = 1, 2, \dots, N_D \quad (6)$$

$$|z_m(t_h)| \leq z_{m,\max} \quad m = 1, 2, \dots, N_L \quad (7)$$

目标函数式(3)为社会成本最小。约束条件分别对应网络平衡方程、发电厂机组容量约束、负荷容量约束和输电线路容量约束。式中, 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 i 出力; $C_i(g_i)$ 为发电机 i 的报价函数; d_j 为负荷 j 的功率; $B_j(d_j)$ 为负荷 j 的报价函数; $g_{i,\max}$ 和 $g_{i,\min}$ 为发电机 i 容量上下限; $d_{j,\max}$ 和 $d_{j,\min}$ 为负荷 j 容量上下限值; z_m 为线路 m 的潮流; $z_{m,\max}$ 为线路 m 的容量限值。

上述优化模型构成了一个带约束的最优潮流问题,系统优化变量 $u = (g_i(t_h), d_j(t_h))$ 。市场优化模型中,与网络平衡约束式(4)相关的KKT乘子 μ_c 对应各节点处的边际发电成本,而与约束式(7)对应的乘子 $\mu_{z,m}$ 则表示输电安全成本。这样,分摊到各节点的电价将包含两个部分,第一部分为边际发电成本: $r_{ei}(t_h) = \mu_c(t_h)$,第二部分为节点阻塞价格部分: $r_{si}(t_h) = \sum_{m=1}^{N_L} H_{im} \cdot \mu_{z,m}$ 。为把输电线路影子价格归算到各节点,式中采用直流潮流灵敏度矩阵 H 来表示支路潮流对节点注入的灵敏度。节点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。

当输电线路没有发生阻塞时,系统按节点电价进行结算将达到收支平衡。而当输电线路发生传输阻塞时,线路容量约束将被激活,则受电端节点处阻塞价格急剧上升,导致这些节点的电价变化较大。输电网按照节点电价进行结算时出现收支不平衡,系统运行的阻塞成本 $C_C(t_h)$ 表示为:

$$C_C(t_h) = J(t_h) - J_0(t_h) \quad (8)$$

其中: $J(t_h)$ 为市场每个交易时段由市场优化模型求得的社会成本最小值; $J_0(t_h)$ 为市场优化模型不计输电容量约束式(7)后求得的社会成本最小值。 $C_C(t_h)$ 等于输电线路阻塞造成的社会成本增加值,即交易时段内系统运行的阻塞成本。

第 t 年度的系统阻塞成本 $C_C(t)$ 将根据该年度市场交易信息,对每个交易时段 $C_C(t_h)$ 的值求和,表示为 $C_C(t) = \sum_{t_h=1}^{T_h} C_C(t_h)$, T_h 为规划年 t 包含的交易时段 t_h 数目。它反映了由于输电线路阻塞造成的社会成本增加值,即规划年 t 内系统运行的阻塞成本。

为了综合分析未来市场输电阻塞对输电规划的影响,本文提出利用系统阻塞指标 $R_{\text{cong}}(t_y)$ 来度量规划年 t_y 的系统阻塞严重程度:

$$R_{\text{cong}}(t_y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e(r_{si}(t_h)) - e(r_{ei}(t_h)))^2 \quad (9)$$

式中, $e(r_{si})$ 等于每个节点在规划年 t 时阻塞价格的均值, 表示为 $(e(r_{si}(t_h))) = \frac{1}{T_h} \sum_{t_h=1}^{T_h} r_{si}(t_h)$; $e(r_s(t_h))$ 是系统阻塞价格的均值, 表示为 $(e(r_s(t_h))) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e(r_{si}(t_h))$, N 为系统节点数。

系统阻塞指标反映了各节点电价的偏离程度。当输电线路容量充裕度较高时, 阻塞价格在节点电价中所占比重很小, 则系统阻塞指标 $R_{cong}(t)$ 也很小, 表示系统中节点电价分配越平均, 市场成员有充足的输电线路容量进行交易。而当输电线路发生阻塞时, 线路容量约束将被激活, 则受电端节点处阻塞成本急剧上升, 导致这些节点的电价变化较大。 $R_{cong}(t)$ 越大, 表示系统阻塞程度越高。因此, 输电网规划时将采用系统阻塞指标作为评估规划网络可靠性的评估指标。

3 小生境改进遗传算法

电网规划问题是一个复杂的非线性混合整数规划问题。遗传算法, 作为一种智能的随机优化算法, 由于具有常规算法缺少的全局、并行优化等特点, 已被成功应用于电网规划中。遗传算法是采用概率变迁规则的随机化搜索方法, 在进化过程中受到遗传算子的进化机制、个体解的群体空间分布以及优化搜索策略设计等因素的影响, 群体中的所有个体会趋于同一状态而停止进化, 这时算法给出的解往往会陷入局部最优解附近, 并未给出全局意义上的最优解。

针对遗传算法未成熟收敛问题, 本文提出了一种基于小生境技术的改进遗传算法结构^[9] (Niche Genetic Algorithms, NGA), 并将其应用于输电网优化规划问题。基于小生境技术的遗传算法就是将每一代个体划分为若干类, 每个类中选出若干适应度较大的个体作为一个类的优秀代表组成一个种群, 再在种群中以及不同种群之间通过杂交、变异产生新一代个体, 同时采用共享机制完成选择操作。

因此, 本文对多阶段输电规划提出基于适应度函数值共享机制来实现小生境遗传算法的进化环境。各小生境环境分别包含一定数量的染色体 (即规划方案) 构成各自独立的种群。小生境环境的实现主要是根据个体之间的相似性进行选择与分类。个体间的相似性主要表现在两个方面: 一个是基因型相似, 即染色体基因编码结构的相似; 另一个就是表现型相似, 即个体适应度大小的接近程度。

在电网规划中, 由于电网规划的多目标性, 适应度相近时对应的网络扩展方案可能相差不大, 也可能相差很大, 这是由规划问题的非凸特性和网络自身的非线性约束条件决定的。因此, 如何衡量电网扩展规划问题中的个体之间的相似性是构造小生境进化环境进行算法设计的关键所在。

为了定义一个小生境进化环境, 输电网规划中各规划方案个体 x_i 、 x_j 的距离 $d(x_i, x_j)$ 可以采用海明距离测度 (基因型差异) 与适应度距离 (表现型差异) 相结合的方法。个体之间的相似性可以采用海明距离测度 (基因型差异) 与适应度距离 (表现型差异) 相结合的方法。若 $d_1(x_i, x_j)$ 为任意两个个体 x_i 、 x_j 的基因差异海明距离, 数值上可以采用染色体相应位置基因值非相同的基因位数来度量, d_1 值大的表明染色体反映的网络结构差异较大; $d_2(x_i, x_j)$ 为任意两个个体 x_i 、 x_j 的适应度距离, 数值上等于两个个体适应度差的绝对值。

此时, 可定义两个个体 x_i 、 x_j 的共享函数^[10]为:

$$\text{sh}[d(x_i, x_j)] = \begin{cases} 1 - \frac{d_1(x_i, x_j)}{1} & d_1(x_i, x_j) \leq 1, d_2(x_i, x_j) \leq 2 \\ 1 - \frac{d_2(x_i, x_j)}{2} & d_1(x_i, x_j) \leq 1, d_2(x_i, x_j) \leq 2 \\ 1 - \frac{d_1(x_i, x_j) d_2(x_i, x_j)}{1 \cdot 2} & d_1(x_i, x_j) \leq 1, \\ & d_2(x_i, x_j) \leq 2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

式中: 1 、 2 为小生境半径区间, 其中 1 为一个小生境内个体的基因型的最大距离, 在一个小生境内, 取 $L_{\min} \leq 1 \leq L_{\min} + k$, 其中 L_{\min} 为该小生境内个体中最小网络规模, k 为区间半径调整量, 取整数, 一般计算时取 $1 \sim 5$ 。 2 为一个小生境内个体的适应度表现型的最大距离, $0 \leq 2 \leq f$, 在电网规划中 f 一般取得相对较大些, 主要是尽可能防止网络结构差异不大而适应度数值差别极大的个体进入以小概率进入下一代繁殖。

基于适应度函数值共享机制的小生境遗传算法将搜索空间的个体分布重新进行调整, 防止个别相似个体大量集中在某个很小的区域。因此, 基于适应度函数值共享的遗传算法将个体 i 的目标适应值 f_i 除以其小生境计数 m_i , 其中个体 i 的小生境计数 m_i 是对个体邻集密集程度的估计:

$$m_i = \sum_{j \in \text{nich}} \text{sh}[d(x_i, x_j)] \quad (11)$$

式中: $d(i, j)$ 是个体 i 、 j 的距离, $\text{Sh}[d(\cdot)]$ 是共享

函数,它是一个递减函数,即与自身的共享为 1,与其它个体之间的共享都小于 1,距离最远的共享最小。

为防止在进化过程中个别个体大量集中,一些相似的个体占据群体的支配地位,在一个小生境内适当的降低其适应度,进而降低其在下一代中被选择的概率,而增大那些空间分布比较分散,在距离上相对较远的个体的选择概率,使其有更多的机会参与进化,改善种群基因的多样性,从而防止早熟问题的发生。个体适应度调整按下式进行:

$$f(x_i) = \frac{f(x_i)}{m_i} \quad (12)$$

式中: $f(x_i)$, $f(x_i)$ 分别为共享前后的个体 i 的适应度。

运用上述方法能够动态构造一种小生境的进化环境。根据确定的共享函数动态调整适应度函数值,在以后的进化过程中,相应调整个体进入下一代生存的可能性,从而改善大量相似个体相对集中的状况,降低遗传进化早熟的可能。同时,基于适应度函数值共享的输电网规划方法在一定程度上还可以提高群体进化的多样性,增大搜索空间,为提高全局寻优能力创造条件。

4 输电网优化规划步骤

本文将市场环境下的多阶段输电网规划模型分解为两个问题,即长期网架优化子问题和年度电网运行子问题。

因此,采用基于小生境的改进遗传算法求解输电网多阶段扩展规划的步骤为:

1) 在优化决策主问题中,读取规划网络原始参数,利用改进小生境遗传算法生成初始群体作为候选方案集。

2) 根据候选方案集构造小生境进化环境。首先统计候选群体中各个体的网络扩展规模,并按网络扩展规模排序;然后从最小网络扩展规模开始,根据小生境区间半径调整量 k 和 r ,依次确定相应的小生境区间 1_1 、 2_2 ,并将种群分配给相应的小生境。在每个小生境环境中,按式(10)、(11)计算每个个体的共享函数 $Sh(d)$ 和小生境计数 m_i 。共享值小的表明个体之间包括基因和适应度两个方面综合差异较大,两者的距离较远。

3) 将候选方案集解码后代入市场模拟子问题中,根据负荷、电源及其报价的预测值,设备参数的运行状态进行市场模拟,得到每一阶段的市场优化

运行点。由每一阶段的市场优化运行点根据式(8)、(9)依次计算各阶段的系统阻塞成本和阻塞指标。

4) 将各阶段系统运行指标回代入优化决策主问题,根据输电规划目标模型式(1)计算个体适应度,再按式(12)计算小生境共享后的个体适应度,对个体进行遗传优化操作生成下一代群体。

5) 重复步骤 2)~步骤 4),直到达到给定的最大允许迭代次数为止,输出最终的优化规划方案。

5 算例分析

对 IEEE-24RTS 系统进行计算分析,系统由发电公司、输电公司和配电公司组成。系统中发电公司发电增长及其报价参数,配电公司负荷需求增长及其购电参数以及负荷限值年增长率等参数见文献[4]。

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,节点间允许最多扩建线路个数为 1,候选支路数为 34 条。规划期为 8 年,分为 8 个扩建阶段,设资金年贴现率为 10%。遗传算法中取初始种群为 100,选择、交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1。

表 1 系统待选线路的参数及规划方案列表

Tab 1 System parameters and planning schedules

规划线路		规划年/年		
端点	端点	=0 美元 (MW h) ⁻¹	=5 美元 (MW h) ⁻¹	=10 美元 (MW h) ⁻¹
3	24	5	5	7
11	14	6	7	7
14	16	1	1	4
16	17	3	4	6
17	18	6	6	0

对阈值 θ 分别等于 0, 5 美元/(MW h) 和 10 美元/(MW h) 这三种限值进行了计算,得到的相应输电网优化规划方案如表 1 所示。当约束阈值 θ 等于零,表示规划目标为所有线路无阻塞发生,规划方案为支路 14-16、16-17 和 3-24 分别在第 1 年、第 3 年和第 5 年扩建,支路 11-14 和 17-18 均都在第 6 年扩建。当 θ 等于 5 美元/(MW h),表示规划决策人员设定规划系统阻塞价格允许偏离程度为 5 美元/(MW h),此时支路 11-14 和支路 16-17 均需推迟 1 年扩建;当 θ 等于 10 美元/(MW h) 时,可见支路 3-24,支路 14-16 和支路 16-17 的扩建被推迟,支路 17-18 的扩建被取消。

表 2 不同约束条件下规划目标值比较

Tab 2 Comparison of planning schemes under various constraints

	投资费用 /10 ⁴ 美元	运行指标 /10 ⁴ 美元
=0	128 516 3	0
=5	128 072 9	688 45
=10	116 588 0	4354 21

表 3 比较了不同规划方案的目标值。当 等于 5 美元 / (MWh) 时, 投资成本为 $128\ 072\ 9 \times 10^4$ 美元, 运行指标为 $688\ 45 \times 10^4$ 美元; 当 等于 10 美元 / (MWh) 时, 投资成本降低为 $116\ 588 \times 10^4$ 美元, 运行指标增大为 $4\ 354\ 21 \times 10^4$ 美元。这些扩建方案下系统阻塞指标大大降低, 说明优化得出的规划方案能将系统阻塞有效地控制在指定的范围内。当

等于 0 时, 整个规划期的投资成本为 $128\ 516\ 3 \times 10^4$ 美元, 运行指标为 0, 虽然扩建个数有所增加, 投资成本也增加, 但系统阻塞降为零。可见, 当选择阻塞指标的阈值不同, 相应的扩建线路个数和投资成本也不同。

随着系统阻塞指标约束阈值的增加, 表示系统在规划期间允许阻塞发生的程度增加, 导致所需新建线路数目减少或线路投资推迟, 总的投资成本减少。这反映了高阻塞风险对输电网扩建的抑制作用。同时, 在不同的规划阶段, 系统阻塞指标会随着系统已投资扩建网络结构和参数的变化而波动, 从而能使整体优化方案很好地协调规划期间各年度的输电网经济运行。

由分析结果可知, 通过给定不同的阻塞指标约束条件, 规划人员可以事先对多阶段规划过程中的安全经济运行要求进行管理, 可以根据所能承受的系统阻塞的不同和实际需要, 做出相应的规划决策。

6 结论

电力市场环境下的输电网规划问题涉及到比传统电力系统规划更多的经济因素, 已经成为国内外电力系统领域广为关注的一个重要问题。本文通过分析阻塞对市场环境下输电网规划的影响, 利用综合性的系统阻塞指标来量化系统输电线路阻塞程度, 建立了多阶段输电网规划模型, 给出了基于改进小生境遗传算法的求解方法。与传统的电网规划相比, 所提出的方法能计及市场环境下电源、负荷和报价信息等经济因素, 综合处理复杂的输电网运行状况。IEEE-24 节点算例系统的仿真表明, 市场环境下基于最优潮流的电网规划能够较好地模拟市场环境下系统最优经济运行状况, 从而更科学地进行输

电网规划决策, 有效减缓系统阻塞发生, 提高规划系统的安全经济运行。

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] FANG Ri-sheng, Hill D J. A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Market [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 374-380
- [3] Dekrajangpetch S, Sheble G B. Application of Auction Results to Power System Expansion [A]. Proc IEEE Int Conf Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies London (England): 2000. 142-146
- [4] 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.
- [5] Buygi M O, Balzer G, Shanechi H M, et al Market-based Transmission Expansion Planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2060-2067.
- [6] 杨宁, 文福拴. 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): 28-27.
YANG Ning, WEN Fu-shuan Risk-constrained Multi-stage Transmission System Expansion Planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 28-27.
- [7] Shrestha G B, Fonseka P A J. Congestion-driven Transmission Expansion in Competitive Power Markets [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1658-1665
- [8] WEI Ping, Ni Y, Wu F F. Decentralized Approach for Congestion Management and Congestion Price Discovering [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(6): 645-652
- [9] 付蓉. 市场环境下基于阻塞激励机制的输电网扩展规划 (博士学位论文) [D]. 南京: 东南大学, 2005.
FU Rong Congestion Driven Mechanism Based Transmission Expansion Planning under Market Environment, Doctoral Dissertation [D]. Nanjing: Southeast University, 2005
- [10] 商允伟, 裘聿皇. 适应值共享对遗传算法选择概率的影响分析 [J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 708-711.
SHANG Yun-wei, QIU Yu-huang Influence of Fitness Sharing on the Selection Probability of Genetic Algorithm [J]. Control and Decision, 2003, 18(6): 708-711.

(下转第 80 页 continued on page 80)

Protection Operation Management Expert System Based on CBR [J]. Relay, 2001, 29 (12): 18-20.

- [5] 张琦,韩祯祥,文福柱. 一种基于粗糙集理论的电力系统故障诊断和警报处理新方法 [J]. 中国电力, 1998, 31 (4): 32-38

ZHANG Qi, HAN Zhen-xiang, WEN Fu-shuan A New Approach for Fault Diagnosis and Alarm Processing in Power System Based on Rough Set Theory [J]. Electric Power, 1998, 31 (4): 32-38

- [6] 雷英杰,张雷,等. Visual Prolog语言教程 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002

LEI Ying-jie, ZHANG Lei, et al Visual Prolog Language Tutorial [M]. Xi an: Shaanxi Science and Technology

Publishing House, 2002

收稿日期: 2005-12-05; 修回日期: 2006-01-17

作者简介:

刘凤 (1982 -),女,硕士,研究方向为牵引变电所故障故障分析和智能故障信息处理; E-mail: phoenix820217@126.com

李群湛 (1957 -),男,工学博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统与牵引供电系统的综合补偿及优化设计,负荷及行为过程仿真,三相不对称非线性负荷的谐波分布及对策等方面的教学与科研工作。

Fault analysis expert system of transformer substation based on case-based reasoning

LU Feng, LI Qun-zhan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The rule-based traditional fault analysis expert systems are mostly adopted in transformer substation. But their knowledge acquiring and self-learning ability is weak, the speed of reasoning is slow. It is difficult for them to meet the need of railway traction net development. A new method based on case-based reasoning is proposed. The case database is composed of three parts: knowledge database, common case database and special case database. The system can analyze the fault accurately and quickly, overcome the bottleneck of the traditional expert systems which obtain and describe the knowledge difficultly, at the same time, the self-learning ability is greatly improved.

Key words: expert system of fault analysis; case-based reasoning (CBR); rule-based reasoning (RBR); transformer substation of the railway

(上接第 59 页 continued from page 59)

收稿日期: 2005-10-25; 修回日期: 2005-12-30

作者简介:

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

魏萍 (1973 -),女,博士,研究方向为电力市场运行,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。

Congestion index based multi-stage transmission expansion under market environment

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

(1. Institute 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 delivering power from generators to loads, relieving the congestion of transmission system and providing a fair environment to all market participants. In this paper, a new congestion index is used to evaluate the reliability of transmission planning system. Then the congestion index constrained model for the multi-stage transmission system expansion planning is constructed, and the method solves for the optimal strategy using an improved niche genetic algorithm. Finally, test results on the IEEE 24-bus example system show that the proposed method is very suitable and effective for solving the multi-stage transmission expansion planning problem under power market environment.

Key words: congestion index; congestion cost; improved niche genetic algorithm; multi-stage transmission expansion planning