

考虑非计划停运及检修的发电权多目标优化交易

李啸虎¹, 李磊², 赵岩², 蒋传文¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海市电力公司电力交易中心, 上海 200122)

摘要: 分析了目前主要的发电权交易模型, 结合非计划停运及检修的实际情况提出了基于 Pareto 最优的发电权多目标交易模型, 可以将效用、煤耗或其他因素作为评判一组交易方案的标准, 并综合考虑这些指标, 给出在 Pareto 最优意义下的最优解。实际算例研究表明, 该模型能较好地解决非计划检修、非计划停运容量交易问题, 可以有效地保障系统的安全, 降低发电商的风险, 对于发电权交易的开展具有一定现实意义。

关键词: 非计划停运; 非计划检修; 发电权交易; Pareto 最优; 多目标

Multi-objective optimized trade of generation rights considering non-plan outage and repair

LI Xiao-hu¹, LI Lei², ZHAO Yan², JIANG Chuan-wen¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Electricity Trade Center, Shanghai Municipality Electric Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: This paper analyzes some common modules of generation rights trading, and presents a multi-objective generation rights trading module based on Pareto optimality, which selects profit, coal consumption and other factors as a group of criterions to evaluate trade schemes, and attains the optimum solution under the definition of Pareto optimal after a comprehensive consideration of all the factors. Examples shows that this module can solve non-plan outage and repair trading problems perfectly, protect the system's security and reduce the risk for generating firm and is of great practical significance to propel the development of generating rights trading.

Key words: non-plan outage; non-plan repair; trade of generation rights; Pareto optimal; multi-objective

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0035-05

0 引言

发电机的不可用时间按照时间上的突然性可分为计划停运和非计划停运, 由于非计划停运具有时间上的突然性, 其对整个电网稳定性的危害是显而易见的^[1]。近年来, 随着发电机组制造工艺的改进和电网的科学调度, 非计划停运的次数呈现逐年下降的趋势, 但仍然不可能完全杜绝非计划停运的可能性。电网越复杂, 单机容量越大, 非计划停运造成的后果也就越难预料。

在完全电力市场模式下, 非计划停运及非计划检修是辅助服务市场的一部分, 相应的机组在辅助市场中竞价及成交, 将停运或检修期间的发电计划转移出去。然而在我国电力市场环境下的辅助服务并没有涉及到非计划停运及检修时的交易问题, 由于发电权调节市场可通过“代发电”让发电厂平衡自身发电能力, 是一种更灵活的市场调节手段, 对发

电公司来说, 发电权调节市场提供了一种对冲风险的机制和平台。开展发电权交易及相关研究, 是当前市场交易研究的热点^[2-3], 研究表明发电权交易能够有效地提高社会效益, 并且有助于机组的节能降耗。本文考虑用发电权交易的办法来解决非计划停运及非计划检修发电量的转移问题, 提出了用于解决非计划停运及检修时发电权交易的多目标模型, 并以 IEEE30 节点系统和上海电网进行了算例测试。

1 考虑非计划停运及检修的发电权交易模型

发电权是每个电厂获得的发电份额, 表征了电厂与电力公司之间的某种合同关系。发电权意味着电厂可以通过发电来获取经济利益, 也在某种程度上是一种义务, 即必须在规定的时间内完成规定的发电量, 否则将受到电力公司的处罚。一般来说发电权交易有自主协商和集中撮合两种, 交易的目标也有最大效益、最优煤耗、最大交易量等几种。文

献[4]中剖析了发电权交易的原理并提出了一些发电权交易的模型,如最优效用模型。该模型将发电权交易所产生的效用和网损的变化作为考察量,此处的效用其实是电厂通过交易获得的经济利益。

就现有的研究而言,秉承“以大代小”以及节能降耗的思想,发电权交易主要集中在大机组与小机组或者能耗高的机组与能耗低的机组之间。对此文献[5]提出了基于能耗最优的交易模型,目的在于通过发电权交易最大限度地实现节能减排,用能耗低的机组替代能耗高的机组。

同时,本文认为发电权交易也可以作为一种辅助服务的形式来开展,当出现机组非计划停运或非计划检修时,通过发电权交易可以保持整个系统的稳定,也可以使出售发电权的一方免于经济处罚。

由于效用与能耗的单位不同,考察一个发电权交易方案时很难将这两者统一起来作为一项指标,本文提出的发电权多目标最优交易模型借用了 Pareto 最优的概念,可以将效用、能耗以及其它指标(如网损及文献[6]中提到的排放量)作为几个独立的指标分别考虑,找出在 Pareto 最优意义下的多目标最优解。以仅考虑效用与能耗两个因素为例,模型如下:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n U_{ij}, \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F_{ij} \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^m Q_{ij} \leq Q_{B_j} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n Q_{ij} = Q_{S_i} \quad (3)$$

$$U_{ij} = (P_{S_i} - P_{B_j} - C_{ij})Q_{ij} \quad (4)$$

$$F_{ij} = \int_{Q=Q_{ij}} (f_i(Q) - f_j'(Q))dQ \quad (5)$$

其中: U_{ij} 、 F_{ij} 和 Q_{ij} 分别表示第 i 号非计划停运或检修的电厂与第 j 号买入发电权的电厂之间交易所产生的效用、能耗和交易量; Q_{S_i} 表示第 i 号非计划停运或检修电厂的计划卖出量; Q_{B_j} 表示第 j 号买入发电权的电厂计划最大买入量; P_{S_i} 和 P_{B_j} 分别表示第 i 号卖家与第 j 号买家的报价; $f_i(Q)$ 和 $f_j'(Q)$ 分别表示第 i 号卖家与第 j 号买家的耗量曲线函数。

机组非计划检修或停运之前,需要向电力交易中心提交机组检修或停运的时间段,每一个时间段需要由其他机组替代发电的电量,以及替代发电的

时间,交易中心根据该机组的状况,在发电权交易撮合平台上发布该机组出售发电权的信息,其他电厂也相应发布每个电厂在各个时段的申报电量和申报价格,发电权的出售方和购买方在电力交易中心的撮合下,按照交易模型来撮合发电权买卖双方,确定发电权买卖双方每个时段分配到的电量和电价,交易双方按照此交易价格和交易的电量进行结算。

非计划检修或停运期间,需要通过发电权的形式撮合好买卖双方的交易情况。非计划检修或停运时间一般比较长,交易撮合的电量和价格需要具体到每一个时段,一般非计划检修时以一天为一个时段,非计划停运时以一小时为一个时段。

2 Pareto 最优的含义及粒子群优化算法

2.1 Pareto 最优的概念及求解

一般地,多目标优化问题有如下形式:

$$\min f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad x \in \Omega$$

其中: Ω 表示所有可行解的集合; $f_i(x)$ ($i=1 \sim k$) 表示 k 个目标函数。满足下列条件的称为 Pareto 解^[7]:

$$\wedge_{i \in I} (f_i(X) = f_i(X^*)) \quad (7)$$

或者至少存在一个 $j \in I$, $I = \{1, 2, \dots, r\}$, 使

$$f_j(X) > f_j(X^*) \quad (8)$$

Pareto 最优是博弈论中的重要概念,并且在经济学、工程学和社会科学中有着广泛的应用^[8]。它表征了那些在多目标场景下效率比较高的调度方案:即在可行解集合下,不存在每个性能指标表现均优于这些方案的调度策略。在本文中采取一种进化算法——粒子群优化算法来求解 Pareto 最优问题。

2.2 粒子群优化算法简介

粒子群优化算法由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年最先提出,是最近兴起的一种进化计算方法^[9]。这种算法受到自然界中动物捕食行为的启发。粒子群优化算法中的“粒子”便是需要求解的变量的集合,它可以是一个数或者是 N 维的向量。开始迭代时,先将每个粒子代入到目标函数中,分别求出其适应值,其中最优的那个解作为全局最优解,然后根据一定的迭代公式,改变粒子的数值,再分别代入目标函数求出适应值。如此反复就基本上能找到最优解。

PSO 算法的标准形式如下所示:

$$v_m^{k+1} = wv_m^k + c_1r_1(p_{bestm} - x_m^k) + c_2r_2(g_{best} - x_m^k) \quad (9)$$

$$x_m^{k+1} = x_m^k + v_m^{k+1} \quad (10)$$

其中: x_m^k 和 v_m^k 分别表示第 m 个粒子在第 k 次迭代中的位置和速度; p_{bestm} 表示第 m 个粒子的个体最优解; g_{best} 表示全局最优解; r_1 、 r_2 是 $[0,1]$ 之间的随机数; c_1 、 c_2 是学习因子, 用于控制收敛的速度; w 是惯性系数。

2.3 基于多目标的 DPW-PSO 算法描述

Xiaohui Hu 和 Eberhart 在 2002 年提出动态邻居 (dynamic neighborhood) 的概念^[10], 首次把 PSO 算法用于多目标优化问题, 但他们的算法具有与其他进化算法相同的缺点。文献[11]在 PSO 算法的基础上, 提出一种基于动态 Pareto 解集的 PSO 算法 (Dynamic Pareto Warehouse-based PSO, DPW-PSO), 利用这种算法可以在较小的初始种群规模下, 产生大量的 Pareto 最优解而并不显著增加计算量。

DPW-PSO 算法的基本原理是构建一个动态的 Pareto 解集, 并随着 PSO 算法迭代的进行不断地更新这个解集。在 PSO 算法初始化后, 将初始粒子依据式 (7)、(8) 进行检验, 将其中的强 Pareto 解加入解集中, 之后把每迭代一步产生的新粒子都依次进行检验, 如果是非支配的 Pareto 解则加入解集中, 并且去掉原解集中的弱 Pareto 解。当 PSO 算法迭代结束后, 解集中的粒子将非常接近理论上的 Pareto 前沿。

3 算法模型和计算过程

3.1 交易模型的建立

整个交易方案可以用一个矩阵表示, 该矩阵就是 PSO 算法中的基本“粒子”。该矩阵中的每一行表示某个买入发电权的电厂从各卖出发电厂买入的电量; 每一列表示某个卖出电权的电厂向各买入发电厂卖出的电量, 如式 (11) 所示:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,i,SELLER} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,i} & \cdots & x_{2,i,SELLER} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{t,1} & x_{t,2} & \cdots & x_{t,i} & \cdots & x_{t,i,SELLER} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{iBUYER,1} & x_{iBUYER,2} & \cdots & x_{iBUYER,i} & \cdots & x_{iBUYER,i,SELLER} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: $iBUYER$ 表示买入发电权电厂的数量;

$iSELLER$ 表示卖出发电权电厂的数量; $x_{t,i}$ 则表示第 t 号买入电厂与第 i 号卖出电厂之间的交易情况。

3.2 模型的初始化与限制条件的处理

粒子群优化算法的特点之一是粒子的最初状态都是随机的, 任意分布在解空间中。虽然具有随机性, 但并不意味着任何一种初始化方式对于算法速度、收敛性等的影响都是一样的。在结合机组组合的实际问题中, 就应尽可能地将初始粒子比较“均匀”地分布, 这样将有助于加快迭代的速度。

在实际的发电权交易中必然会存在一些限制, 比如非计划检修或停运电厂的交易量必须全部交易, 买入方的买入量也不能超过其最大买入量, 交易量不能为负等等。但在按照式 (9)、(10) 进行迭代时有可能使粒子不满足限制条件, 这时便需要进行修正。限制条件处理的主要思想是强制地改变某些元素的值使其满足要求, 具体的处理办法见表 1。

表1 粒子越限处理办法

Tab.1 Treatment when particles surpass its limit

限制条件	越限处理方法
某笔交易量为负	令其为0
某笔交易量超过 买家最大买进量	令其等于最大买进量
某笔交易量超过 卖家最大卖出量	令其等于最大卖出量
某电厂买入之和大于 其最大买入量	随机减少某个(些)买入值直到 等于最大买入量为止
某电厂卖出之和大于 其最大卖出量	随机减少某个(些)卖出值直到 等于最大买入量为止
非计划停运或检修电厂 未能全部卖出	随机增加某个(些)未越限的卖出值直 到全部卖出为止

3.3 算法过程

在具体的编程实现 DPW-PSO 算法的过程中, 采用如下步骤:

(1) 确定一些常量, 如: 粒子数、初始化范围、最大速度限制、迭代次数及 PSO 算法公式中的一些常量。

(2) 定义粒子及速度, 定义储存 p_{best} 和 g_{best} 的数组及 Pareto 解集, 并初始化。

(3) 按照限制条件对粒子进行处理。

(4) 将粒子代入适应函数计算适应值, 并记录下每个粒子的 p_{best} 值, 选出其中最佳的作为 g_{best} ; 并将所有满足式 (7)、(8) 定义的粒子加入 Pareto 解集中。同时记录下取得 p_{best} 和 g_{best} 值时的粒子值。

(5) 进入循环, 用式 (9) 计算出每个粒子的速

度。

(6) 用式 (10) 计算出每个粒子的位置。

(7) 按照限制条件对粒子进行处理。

(8) 将粒子所代表的交易结果代入网络进行潮流计算, 如果满足潮流约束则进行下一步, 如果不满足则将该粒子退回原值, 并用新的随机数重新计算式 (11), 得到新的粒子再代入进行潮流计算, 直至满足要求为止。

(9) 将新产生的粒子与 Pareto 解集中的粒子相比较, 新粒子是非支配的 Pareto 最优解, 那么将这个新生成的粒子加入 Pareto 解集; 如果某个新生成的粒子在效用和煤耗两个方面都比某个 Pareto 解集中的粒子要好, 那么用这个新生成的粒子替换之前 Pareto 解集中的这个粒子。

(10) 将粒子代入适应函数计算适应值, 并与之前记录下的 p_{best} 值相比较, 如果出现更佳的结果则替代, 并选出其中最佳的作为 g_{best} 。同时记录下取得 p_{best} 和 g_{best} 值时的粒子值。

(11) 返回第 (5) 步, 直至预定的迭代次数为止。

(12) 输出 Pareto 解集中的结果。

4 算例分析

4.1 IEEE-30 标准节点算例

以 IEEE-30 节点系统为例, 设其中 2 号和 5 号机组为买入发电权机组, 8、11、13 为卖出发电权的机组, 其中机组 13 处于即将非计划停运的状态。1 号机组不参与交易。各机组的具体数据如表 2。

其中: a_i 、 b_i 、 c_i 是第 i 号机组的煤耗曲线 $F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$ 中的系数。机组 13 由于即将停运, 其出力必须全部交易。表 2 中的报价是人为指定的, 目的是为了体现各发电厂成本的差异, 以及有利于交易的进行。

建立式 (1) 所示的交易模型后, 以煤耗与效用作为多目标优化中的两个指标, 用 DPW-PSO 算法计算后, 可得到如图 1 所示的 Pareto 前沿。

图 1 中曲线上的每一点都表示对应状态下的一组交易方案, 都是强 Pareto 解, 决策者可以在这条曲线代表的交易方案中作出选择。从图 1 中也可以看到, 13 号机组非计划停运后, 由于必须强制交易 13 号机组的出力, 故其 Pareto 前沿比没有限制条件时要差, 这也是符合实际情况的。

表 2 各发电机参数

Tab.2 Parameters of generators

机组	状态	最大交易量 / pu	报价 / (万元 / pu)	最大出力	最小出力	a_i	b_i	c_i
2	买入	0.150 0	4.260	0.80	0.20	350.0	175.0	0
5	买入	0.100 0	4.188	0.50	0.15	1 250	100.0	0
8	卖出	0.100 0	4.508	0.35	0.10	166.8	325.0	0
11	卖出	0.100 0	4.553	0.30	0.10	500.0	300.0	0
13	卖出	0.169 1	4.435	0.40	0.12	500.0	300.0	0

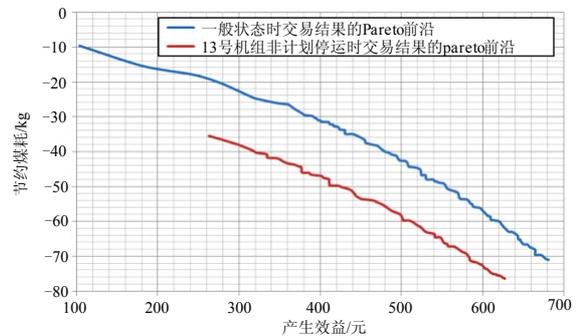


图 1 正常及非计划停运时的交易结果

Fig.1 Trade result in normal condition and non-plan outage

4.2 上海电网某日运行状态算例

以仅出现非计划检修的情况为例, 在上海电网某日运行状态下, 外高桥二厂非计划检修时, 检修期间的发电量可以通过发电权的形式, 由以下机组来代替: 发电权的购买方包括外高桥三厂、外高桥电厂、石洞口电厂、石洞口二厂、吴泾六期、吴泾二厂, 各机组的申报数据见表 3 所示。

在已知各电厂出力及煤耗变化的情况下, 根据多目标最优模型可以算出最优交易方案, 在这里只列出比较有代表性的三组, 如表 4。

根据表 4 可以分别计算出交易 900 MWh 的电量, 购买方电厂代替外高桥二厂所产生的总的交易效用和需要多消耗的煤的总量, 所计算出的是 1 个小时所产生的交易效用和多消耗的煤的总量。可以将这三组交易方案的结果与之前提出的单纯效用最优或能耗最优模型的计算结果相比较。并且可以对整个上海电网进行潮流计算得出交易前已知的网损与交易后的网损变化。结果如表 5 所示。

表 3 各电厂的申报电量和价格

Tab.3 Applied quantity of electricity and price for all generation

company			
电厂名称	买卖方向	电量/MW	报价/(元/MW天)
外高桥三厂	买	600	421.8
外高桥电厂	买	90	428.2
石洞口电厂	买	150	432
石洞口二厂	买	150	425.3
吴泾六期	买	40	429.6
吴泾二厂	买	100	450
外高桥二厂	卖	900	434.8

表 4 发电权买卖双方交易量

Tab.4 Trading volume of generation rights

卖方	买方	发电权交易量 / MW
外高桥二厂	外高桥三厂	600/600/600
外高桥二厂	石洞口二厂	150/150/150
外高桥二厂	吴泾二厂	100/35/32
外高桥二厂	石洞口电厂	10/15/18
外高桥二厂	外高桥电厂	0/70/80
外高桥二厂	吴泾六期	40/30/20

表 5 各种交易前后的网损、交易后所产生的交易效用和消耗的煤的总量

Tab.5 Network loss, profit and coal consumption after trade

	交易前 网损 / MW	交易后 网损 / MW	网损的 变化量 / MW	总交易 效用/ (元·h ⁻¹)	煤耗增 加量/ (吨·h ⁻¹)
效用最优交易结果	79.726	81.921	2.195	10 083	4.51
多目标最优 (一)		76.544	-3.182	9 586	4.23
多目标最优 (二)		75.86	-3.866	9 353	3.96
多目标最优 (三)		76.513	-3.213	9 241	3.73
能耗最优交易结果		76.744	-2.982	8 035	3.45

该算例结果进一步表明: (1) 在我国当前电力市场模式下用发电权交易代替非辅助交易解决非计划停运或检修问题是可行的; (2) 多目标综合最优模型可以在进行发电权交易时在多个因素间进行权衡, 得到多组交易结果; (3) 实际操作中交易中心可以根据电网的实际情况或某种倾向性在多组交易结果中进行选择配对。

5 结论

发电权交易是解决非计划检修、非计划停运问题的新思路, 一方面发电权的出让方能够规避风险, 减少损失; 另一方面还能产生社会效益, 对节能减排做贡献。本文创新性地综合了前人对于发电权交易机制和评价体系的研究成果, 提出了基于 Pareto 最优的发电权交易模型。该模型能够在发电权交易的多个指标中有效地作出权衡, 使交易结果尽可能满足多种需求。总而言之, 多目标最优发电权交易算法不仅可以很好地解决非计划检修、非计划停运问题, 同时对于发电权交易的开展和充分发挥发电权交易的作用具有重要意义。

参考文献

- [1] 祝宪. 发电机组非计划停运的探讨[J]. 华北电力技术, 1993(8): 6-12.
ZHU Xian. Discussion about non-plan outage of generators[J]. North China Electric Power, 1993(8): 6-12.
- [2] 张少华, 等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (21): 28-32.
ZHANG Shao-hua, et al. Combining option theory with modeling for bilateral optional electricity forward contracts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (21): 28-32.
- [3] 姚建刚, 等. 基于期权理论的发电权交易模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (21): 76-81.
YAO Jian-gang, et al. Generation rights trade based on option theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (21): 76-81.
- [4] 黎灿兵, 康重庆, 夏清, 等. 发电权交易及其机理分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (6): 16-21.
LI Can-bing, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Generation rights trade and its mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6): 16-21.
- [5] 郑欣, 蒋传文, 李磊, 等. 基于能耗和效益最优的发电权节能降耗效益分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (24): 43-46.
ZHENG Xin, JIANG Chuan-wen, LI Lei, et al. Analysis of generation rights trade based on optimization of energy-saving and efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (24): 43-46.
- [6] 周详. 发电权交易的模式及运作的有关问题分析[J]. 市场周刊, 2008(1): 129-130, 151.
ZHOU Xiang. Analysis of problems about generation rights trade mode and operation[J]. Market Weekly, 2008(1): 129-130, 151.

(下转第 45 页 continued on page 45)

波的暂态信息, 提出了一种基于小波变换的直流线路行波保护。该保护方案主要利用了暂态电压行波的高、低频能量在区内、区外故障以及雷电干扰等故障情况下呈现出大小不同的特性构成保护判据。

通过大量仿真计算表明: 对于直流线路区内的不同位置、不同的接地电阻的故障情况下, 本文的保护判据均能准确判断, 保护能够快速动作; 对于区外故障、雷电干扰能够可靠识别, 且具有很强的抗干扰性。

参考文献

- [1] 艾琳. 高压直流输电线路行波保护的研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.
AI Lin. Research on HVDC line wave traveling protection, thesis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002.
- [2] 何智江. 发展中的中国高压直流输电事业[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 460-463.
HE Zhi-jiang. Chinese developing HVDC transmit electricity project[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 460-463.
- [3] 刘东, 吴泽辉. 天广直流线路高阻抗接地故障保护分析[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1(5): 57-60.
LIU Dong, WU Ze-hui. Protection analysis of Tian-Guang direct current line grounding through large resistance[J]. China Southern Power Technology Research, 2005, 1(5): 57-60.
- [4] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wan-jun. HVDC transmit electricity engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

- [5] 王钢, 李海锋, 赵建仓, 等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.
WANG Gang, LI Hai-feng, ZHAO Jian-cang, et al. Identification of transient on transmission lines caused direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.
- [6] 罗仕乾. 雷电波的频谱及能量分布[J]. 高电压技术, 1995, 21(1): 85-86.
LUO Shi-qian. The spectrum and energy distribution of lightning wave[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(1): 85-86.
- [7] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
DONG Chang-hong. Matlab theory and application of wavelet analysis toolbox[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [8] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Electricity power relay protection theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2009-04-25; 修回日期: 2009-06-04

作者简介:

李振强(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统过电压研究工作; E-mail: zhen_268@163.com

鲁改凤(1963-), 女, 本科, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全运行与保护等;

吕艳萍(1955-), 女, 教授, 主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化研究工作。

(上接第 39 页 continued from page 39)

- [7] 夏凌. 基于Pareto边界的多目标调度研究(硕士学位论文)[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
XIA Ling. Pareto boundary based multicriteria scheduling, thesis [D]. Shanghai: SJTU, 2008.
- [8] Wan Y H. On local Pareto optima[J]. Journal of Mathematical Economics, 1975, 2: 35-42.
- [9] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. //Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. 1995: 39-43.
- [10] HU Xiao-hui, Eberhart R. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization[C]. //Proceedings of the Evolutionary Computation on 2002. CEC '02. Proceedings of the

Congress. 2002: 1677-1681.

- [11] 毕荣山, 杨霞, 谭心舜, 等. 基于动态Pareto解集的微粒群优化算法及其在多目标规划中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(32): 85-88.

BI Rong-shan, YANG Xia, TAN Xin-shun, et al. Dynamic Pareto warehouse-based particle swarm optimization algorithm for multi-objective programming[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(32): 85-88.

收稿日期: 2009-08-24; 修回日期: 2009-10-09

作者简介:

李啸虎(1986-), 男, 研究生, 主要研究方向为电力市场。E-mail: goldtime1997@sina.com