

电力市场条件下地区电网日购电 优化模型与算法研究

庄丽蓉¹,蔡金锭¹,李天友²

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350002;

2. 厦门电业局,福建 厦门 361004)

摘要:在目前厂网分开的电力市场环境,许多地方小电厂还不具备参与到省级电力市场上竞争的能力,它们一般由所在地区的供电公司进行统一调度。建立了地区电网日购电优化的数学模型,该模型的目标函数为总购电费用最小,约束条件包括电量平衡约束、地区电网供需平衡约束、各电厂出力特性约束和线路安全约束,另外还考虑了不同地点的电源点向系统传输功率而各自产生的网损对总购电费的影响。同时,还提出了具有快速收敛和高计算精度的改进混沌遗传算法,并将其应用于购电优化计算中。最后,将所提出的购电模型与算法应用于某地区的日购电优化中,计算结果表明,在考虑网损时的购电费用相对于其他方法可节省约 1.9%。

关键词: 日购电; 购电模型; 地区电网; 混沌遗传算法; 电力市场

中图分类号: TM 73;F 123.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0013-04

0 引言

在目前厂网分开的电力市场环境,电厂不再归属于电网,它们追求的是各自利益的最大化。于是,在追求购电成本最小化的市场环境下^[1-2],地区电网公司如何最经济地从本地区的小型电厂购入电量将成为一个值得研究且十分有意义的课题。

随着社会主义市场经济的不断完善,发电厂与电网之间将要以上网电价为纽带,成为卖方和买方的关系,电网需要尽可能低的上网电价,这是市场经济的客观要求,电厂要力求降低发电成本,以优质、低价的电能参与市场竞争。而传统的计划调度方法则忽略了成本,没有以上网电价为杠杆进行发供企业之间的市场运作,显然不利于培育电能市场和资源优化。因此,对地方发电厂购入电量进行优化有利于降低供电公司的购电成本并促进地方发电企业提高效率,达到买卖双方双赢。据了解,迄今为止国内外对于购电优化的研究主要集中在区域电网或省级电网这种大电网^[3-5],而对于处在厂网分开的电力市场初级阶段地区电网的购电优化研究甚少。文献[2]提出的购电优化数学模型只考虑了上网电价和出力约束,文献[6]对地方发电厂的竞价上网进行研究,文献[7]研究了面向地区电网的模拟电力市场运营调度系统,但是文中的地区电网模拟电力市场子系统没有给出具体的购电模型。本文通过分析,建立了电力市场条件下地区电网日购电优化的数学模型。该模型的目标函数是购电费用最小,约束条件包括:电量平衡约束、供需平衡约束、电厂出

力约束和线路安全约束。同时,考虑到各个电厂由于其地理位置的不同而产生不尽相同的网损,购电方应该尽量向网损低的电源点买电,于是在目标函数中采用了考虑网损的修正电价。另外,本文还提出了适合于本购电优化数学模型的算法,采用改进的混沌遗传算法应用于地区电网的日购电优化中,通过算例验证了该模型与算法的正确性和可行性。

1 日购电优化数学模型的建立

假设某供电公司要从多个地方发电厂购入电量,该优化目标是在购买一定电量的情况下,如何在各发电厂之间合理购买电量,使得购电成本最小化。这样就必然要求向电价低的电厂多买电,电价高的电厂少买电,同时还要满足系统供求平衡、发电厂最大出力及输电线路最大传输容量限制等各种约束条件的限制。地区电网购电对象主要包括省网电源点和本地区各种类型的小型电厂。在目前厂网分开的电力市场初级阶段,地方电厂由本地区电网公司调度,而对于省网电源点则由省电力公司调度。省网电源点由省电力公司中心调度所根据各地上报的负荷情况对省网电源点调度后,经过若干条高压线路(假设为 n 条)进入地区电网。因此,可以将省网电源点等效成 n 个“虚拟电源”连接到该地区 220 kV 或 500 kV 变电站上,这 n 个虚拟电源的出力分别等于这 n 条线路末端的功率。将省网电源点等效为“虚拟电源”有利于建立地区电网购电模型和优化计算。另外,对于地方发电厂,它们一般经 10 kV 线路或 35 kV 线路连接到 35 kV 和 110 kV 变电站上。于是,就建立起整个地区电网的购电模型,可用图 1 所示的日购电模型框架图表示。

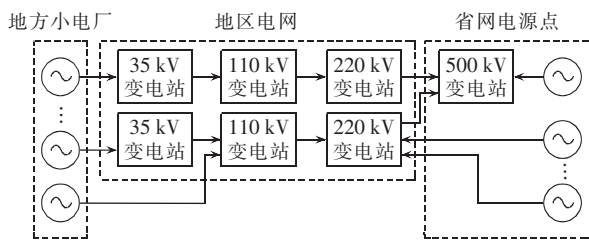


图1 地区电网日购电模型框架图

Fig.1 Daily power purchase model of regional power utility

电能供购双方一般通过关口计量点的读数进行结算,关口计量点的设置一般由电厂和电网双方协定。当关口计量点设置在地区电网侧时,网损由发电厂承担;当其设置在发电厂侧时,网损由地区电网承担。于是,若关口计量点设置在发电厂侧时,由于在电网中所处的位置不同,不同发电厂的网损率是不尽相同的。因此,同样是发电 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$,甲厂可能有 $0.98 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 真正到了供电公司手中,而乙厂可能仅有 $0.90 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 为供电公司所用。设甲、乙两厂的竞标电价分别为 c_1 和 c_2 ($c_1 > c_2$),则如果仅仅按照上述低价优先的原则,供电公司应该向电价低的发电厂乙购买电能更经济,但是由于甲厂的网损率 $\Delta P_1 < \Delta P_2$ 导致供电公司向乙厂的购电成本大于向甲厂的购电成本,可见,向电价高的电厂买电反而更经济。于是,本文在构造购电优化的数学模型时不仅考虑了前述的各种约束,还将各电厂分摊的网损考虑在内。在目标函数中采用了“实际电价”^[8]的概念。

$$c'_i = \frac{c_i}{1 - \Delta P_i} \quad (1)$$

式中 c'_i 为发电厂 i 的实际电价; c_i 为发电厂 i 的上网电价; ΔP_i 为发电厂 i 所发的每单位电能导致的损耗值, $1 - \Delta P_i$ 即为该单位电能中的有效电能。

ΔP_i 的计算公式如式(2)所示, $P_{i,\text{loss}}$ 为发电厂 i 分摊到的网损(kW); P_i 为发电厂 i 的出力(kW)。

$$\Delta P_i = P_{i,\text{loss}} / P_i \quad (2)$$

1.1 目标函数

由于目前各个地方电厂上网实行峰谷电价,峰、谷、平各个时段的上网电价不同,于是,在总日购电量固定的情况下,优化调整各时段各个电厂的出力将可能降低购电费。于是,地区电网日购电优化的目标函数为

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n P_{i,t} c'_{i,t} \Delta t \quad (3)$$

式中 f 为购买地方小电厂的总日购电费; n 为电厂的个数; $T=3$,表示一天总共分为峰、平、谷3个时段; $t=1\sim 3$ 分别为峰、平、谷3个时段; $P_{i,t}$ 为第 t 个时段中第 i 个小电厂的出力(kW); $c'_{i,t}$ 为第 t 个时段中第 i 个小电厂实际电价(元/kW·h); Δt 为峰、平、谷各个时段的小时数(h)。

1.2 约束条件

1.2.1 电量平衡约束

根据购电计划,各小电厂每天的购电量之和均

为定值。如果关口计量点安装在电网侧时,则网损由电厂承担,于是,该电量约束不必考虑网损,具体公式如式(4)所示。如果关口计量点安装在电厂侧时,则网损由电网承担,于是,考虑电量约束时必须扣除掉网损,具体如式(5)所示。

$$\sum_{t=1}^3 \sum_{i=1}^n P_{i,t} \Delta t = W_E \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^3 \left(\sum_{i=1}^n P_{i,t} - P_{\text{loss},t} \right) \Delta t = W_E \quad (5)$$

式中 W_E 为购地方电厂的总日购电量(kW·h);

$P_{\text{loss},t}$ 为第 t 时段地区电网的网损(kW)。

1.2.2 地区电网供求平衡约束

电力调度的基本要求就是必须达到“供求平衡”,即电厂的电力供应应该等于负荷消耗。于是,该地区电网日购电优化也要考虑该约束,使省网电与地方电厂的出力之和与负荷平衡,具体如式(6)所示。

$$P_{i,t} + P'_{j,t} - P_{\text{loss},t} = P_{\text{th},t} \quad (6)$$

式中 $P'_{j,t}$ 为第 j 个省网“虚拟电源”在时段 t 的出力; $P_{\text{th},t}$ 表示地区电网时段 t 的负荷大小。

1.2.3 各发电厂出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (7)$$

式中 $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为第 i 个地方电厂在该时段的最大出力和最小出力。

1.2.4 线路安全约束

$$-L_{\max,l} \leq P_{l,t} \leq L_{\max,l} \quad l \in L \quad (8)$$

式中 $P_{l,t}$ 为正常工况下第 t 时段第 l 条线路上的有功潮流; L 为所有线路的集合; $L_{\max,l}$ 为第 l 条线路的有功限制值。

2 改进的混沌遗传算法在日购电优化中应用

本文的日购电优化数学模型具有多时段、多约束且由于考虑了网损而具有非线性特点,故拟采用改进的混沌遗传算法进行优化计算。

2.1 改进的混沌遗传算法

将全局收敛性很强的遗传算法和局部收敛能力很好的混沌优化方法两者相结合,可以达到很好的收敛效果^[9-11]。改进的混沌遗传算法的设计思路是:首先,利用混沌生成初始种群;其次,利用改进的遗传算法进行全局搜索;然后,利用混沌优化方法进行局部搜索。下面介绍具体流程。

a. 采用实数编码。设定种群规模、适应度函数和违约约束度 viol 函数、交叉概率、变异概率、混沌迭代次数等参数。

b. 初始种群的混沌生成。利用混沌的遍历性进行粗粒度全局搜索,往往会获得比随机搜索更好的效果,以此提高初始种群个体的质量和计算效率。首先设置初值,然后按式(9)将 m 个混沌变量分别映射到优化变量的取值范围内使其变成混沌变量 $x^*_{k,i}$ 。对于固定的 k , $x^*_k = [x^*_{k,1}, x^*_{k,2}, \dots, x^*_{k,m}]$ 代表一个可行解。对每一个可行解计算其适应度,选择适应度较优的 M 个个体组成初始种群。

$$x^*_{k,i} = a_i + (b_i - a_i) t_{k,i} \quad (9)$$

式中 a_i, b_i 分别为优化问题中变量 x_i 的下限和上限; k 为混沌变量的迭代次数。

c. 选择运算。采用固定比例直接比较法(FPDC法)^[12]并结合最优保留策略进行选择操作。

d. 交叉运算。采用自适应单点算术交叉法。

e. 变异运算。采用自适应浮点数非一致变异法。

f. 对新种群中的部分优秀个体进行混沌优化。利用混沌进行细粒度局部搜索,提高解的精度。采用FPDC法选取经遗传操作后种群中较优秀的部分个体(一般取 10 % 左右),对这部分优秀个体进行微小混沌扰动并随着搜索过程的进行自适应地调整扰动幅度,以此进一步优化优秀个体的品质,引导种群快速进化。设 $x=(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 为进化过程中某代群体中的一个优秀个体,对其每一分量按式(10)进行混沌扰动。

$$x_i^*(k)=x_i+\alpha\sigma_i(k)$$

(10)

式中 $\sigma_i(k)$ 为映射至 $[-1, 1]$ 区间的混沌变量, k 为混沌迭代次数; $x_i^*(k)$ 为 x_i 经混沌扰动生成的混沌变量; α 为与迭代次数 k 有关的比例系数, $\alpha=1-|(k-1)/k|^m$, m 为一正整数,依目标函数而定。

对固定的 $k, x^*(k)=[x_1^*(k), x_2^*(k), \cdots, x_n^*(k)]$ 代表一个可行解。对每个可行解计算其适应度,选择适应度较高的 N 个个体组成新种群参加下一代进化。

g. 重复步骤 c~f, 直到满足进化终止条件,该终止条件为进化的代数 $t \leq TT$, TT 为总的进化代数。

2.2 购电优化算法整体流程

a. 暂时不考虑网损和网损分摊量,运用改进的混沌遗传算法进行优化,得出优化后各个小电厂的出力大小。

b. 把省网电源点当成“虚拟电源”连接到 220 kV 或 500 kV 变电站上,按照步骤 a 中得出的各电厂的出力大小对整个地区电网进行潮流计算并计算出总的网损值,同时,采用调整的边际网损系数法确定各小电厂应分摊的网络损耗,并对其电价进行修正。

c. 把步骤 b 中计算得到的网损值代入到相对应的约束条件中,并且把各地方小电厂的修正电价代入到目标函数中,利用改进的混沌遗传算法进行

优化,确定各小电厂的出力大小。

d. 比较前后 2 次优化得到的结果(各小电厂的出力)之间的误差是否小于设定的误差值 $\delta=0.001$, 若满足,则迭代结束;若不满足,则返回到步骤 b 继续进行迭代计算。

3 实际算例与分析

3.1 某地区电源点分布状况与购电情况简介

某地区是福建省电网的负荷中心,该区没有大型电源点,整个地区大部分电量由省电网供给,另外一部分由所在地区的小水电和小火电供给。其境内小水电资源较为丰富,这些小水电大部分是径流式电站,一般经 10 kV 和 35 kV 线路接入电网。目前,地方水、火电的购电情况如下:地方电站的上网基本电价由省物价局根据实际情况制定;上网电量则由省公司在年初经全省平衡后下达指导收购电量后由该区电业局分解并给予下达。关口计量点一般设置在该局管辖的变电站内,根据各个电厂对应的关口计量点的读数确定实际的上网电量。在未实行竞价上网之前,购入地方水、火电站购电费是由平均购电均价与实际上网电量乘积得出,购电均价主要取决于各小水、火电的上网电价及小水电站的峰谷电价等因素。这样就不能在完成相同购入电量基础上通过有效调节来节约和控制购电成本。

3.2 实际计算与分析

现以 2005 年某日购某地区 6 个直调水电站(直调水电站是表示并入地区电网,可由地区电网直接调度的水电站)为例,根据实际假设这几个水电站在该日的总购电量为 $250.68 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。采用改进的混沌遗传算法应用于本文提出的地区电网日购电优化数学模型中,可以得出如表 1 所示的购电优化结果。潮流计算采用牛顿-拉夫逊法(由于本文篇幅的限制,电网参数在文中不一一列出)。

表 1 中给出了考虑网损分摊和不考虑网损分摊的购电优化结果(前者的数据前有 * 号,后者无 * 号),从表 1 中可以看出:

a. 在满足系统供求平衡、水电站出力、线路安全

表 1 不考虑网损分摊与考虑网损分摊的购电优化结果(最好的迭代结果)

Tab.1 Optimized results of power purchase with and without loss allocation

电站	装机容量 /MW	电价/[元(kW·h) ⁻¹]			电站出力/MW			日购电费/10 ⁴ 元			日购电费 合计/10 ⁴ 元
		峰时段	平时段	谷时段	峰时段	平时段	谷时段	峰时段	平时段	谷时段	
YX 水电站	52.0	0.42	0.35	0.28	41.747	38.400	28.294	14.027 0	10.752 0	6.337 9	83.573
					*42.101	*20.468	*24.733	*14.145 9	*5.731 0	*5.540 2	
LMT1 水电站	21.2	0.41	0.34	0.27	20.272	9.187	2.162	6.616 8	2.498 9	0.470 5	
					*17.435	*8.327	*8.929	*5.690 8	*2.264 9	*1.943 0	
LMT2 水电站	29.6	0.41	0.34	0.27	4.462	22.397	8.314	1.456 4	6.092 0	1.809 1	
					*18.933	*21.715	*11.805	*6.179 7	*5.906 5	*2.568 8	
LMT3 水电站	16.0	0.190	0.162	0.130	9.225	7.696	1.331	1.431 1	0.994 9	0.137 7	*82.056
					*11.804	*5.522	*5.646	*1.831 2	*0.713 9	*0.583 9	
SM 水电站	60.0	0.190	0.162	0.130	58.763	47.818	16.782	9.116 3	6.181 9	1.735 7	
					*58.006	*42.398	*30.626	*8.998 8	*5.481 2	*3.167 5	
LT 水电站	25.0	0.38	0.32	0.26	20.918	17.730	14.405	6.426 0	4.538 9	2.950 1	
					*18.985	*12.664	*10.913	*5.832 2	*3.242 0	*2.235 0	

和网损等约束条件下,该购电优化结果中向电价低的电站买电多而向电价高的电站买电相对较少,充分体现了“低价优先”原则,可尽量减少购电成本,例如SM水电站电价较其他水电站低,它在各个时段的出力相对于其他电站多,而装机容量差不多的YX水电站由于其电价最高,它在各个时段的出力相对就少;

b. 比较考虑网损分摊和不考虑网损分摊的计算结果可以看出,考虑网损分摊的购电费比不考虑网损分摊的购电费减少约1.9%,可见,考虑了各电站分摊的网损有利于降低购电费,从而也验证了本文的地区电网日购电优化数学模型中考虑各电站分摊的网损对购电费的影响是合理且正确的。

本算例还应用标准遗传算法于该地区的日购电优化计算中,将改进混沌遗传算法的购电优化结果与标准遗传算法的购电优化结果进行比较,前者最好的优化结果为 82.056×10^4 元,后者为 82.579×10^4 元;前者进化600代收敛,后者进化1000代收敛;前者收敛于最优解的概率为100%,后者仅为78%。可见,利用改进的混沌遗传算法于地区电网日购电优化可以获得更好的优化结果,而且收敛速度较标准遗传算法更快。

4 结语

a. 供电企业从多个发电厂优化购入电量的方法与传统计划调度方法的区别在于“购入相同电量的情况下,最小化总的购电成本”,以总成本为杠杆是在市场经济条件下电网电量调度的原则^[4]。本文提出了地区电网日购电优化的数学模型,该模型以总购电成本最小化为目标,综合考虑了发电厂上网电价、发送能力和网损的影响。同时,还提出了适合于该模型的优化算法——改进的混沌遗传算法。最后,以某地区6家水电站的日购电为例,将该购电模型与算法应用于其购电优化中,将考虑网损分摊的计算结果与不考虑网损分摊的结果进行比较,验证了该购电模型的正确性和可行性,另外,还将改进的混沌遗传算法与标准遗传算法的购电优化结果进行比较,验证了本文优化算法的优越性。

b. 该购电优化方案对于指导供电公司合理利用和收购地方电量具有理论指导意义和科学运用方式。

c. 目前,我国正处于厂网分离的电力市场初级阶段,本文对地区电网优化购入电量进行研究,这将为研究供电公司如何参与到将来的输配分离的电力市场上做好准备、奠定基础,若应用本文提出的购电方案于实际中将可起到过渡的作用。

参考文献:

- [1] 尚金成,黄永皓,夏清,等. 电力市场理论研究与应[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 陈松波,丁振华,张崇见. 利用拉格朗日松弛法解决电网优化购入电量[J]. 电力系统及其自动化学报,2002,14(1):76-78.
CHEN Song-bo, DING Zhen-hua, ZHANG Chong-jian. Solving bidding model by using Lagrangian relaxation method for power

- market[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(1):76-78.
- [3] 郭金,江伟,谭忠富. 风险条件下供电公司最优购电问题研究[J]. 电网技术,2004,28(11):18-22.
GUO Jin, JIANG Wei, TAN Zhong-fu. Research on optimized power purchasing of power suppliers under risk condition[J]. Power System Technology, 2004, 28(11):18-22.
- [4] 谭忠富,张立辉,李晓军,等. 区域电力市场环境下载网公司的多级购电优化模型分析[J]. 电力学报,2004,19(4):273-275.
TAN Zhong-fu, ZHANG Li-hui, LI Xiao-jun, et al. On multilevel purchasing electricity model for electricity grid company in region electricity market[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(4):273-275.
- [5] 蒋东荣,刘学军,李群湛. 电力市场环境下载网日发电计划的电量经济分配策略[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):90-94.
JIANG Dong-rong, LIU Xue-jun, LI Qun-zhan. Economically distributing strategies for daily generation scheduling in a power system under power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7):90-94.
- [6] 孙志能. 地方电厂竞价上网研究[J]. 电力自动化设备,1999,19(6):55-57.
SUN Zhi-neng. On competitive bid for regional power to the grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(6):55-57.
- [7] 陆达,宋人杰,李秋丹. 面向地区电网的模拟电力市场调度运营系统[J]. 电网技术,2002,26(5):69-71.
LU Da, SONG Ren-jie, LI Qiu-dan. A regional power network oriented simulating system for dispatching and marketing in electricity market[J]. Power System Technology, 2002, 26(5):69-71.
- [8] 谭伦农,张保会,周亦山. PX市场中交易电量的优化确定[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):19-22.
TAN Lun-nong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi-shan. Economic determination of market clearing quantity of electricity in power exchange[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6):19-22.
- [9] 姚俊峰,梅焱,彭小奇,等. 混沌遗传算法及其应用[J]. 系统工程,2001,19(1):70-74.
YAO Jun-feng, MEI Chi, PENG Xiao-qi, et al. A new optimization approach—chaos genetic algorithm[J]. Systems Engineering, 2001, 19(1):70-74.
- [10] 周晓,胡以华,陈修桥,等. 混沌遗传算法及其在函数优化中的应用[J]. 计算机与数字工程,2005,33(7):68-70.
ZHOU Xiao, HU Yi-hua, CHEN Xiu-qiao, et al. Chaos genetic algorithm and its application in function optimization[J]. Computer and Digital Engineering, 2005, 33(7):68-70.
- [11] 李兵,蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用,1997,14(4):613-615.
LI Bing, JIANG Wei-sun. Chaos optimization approach and its application[J]. Control Theory and Application, 1997, 14(4):613-615.
- [12] 林丹,李敏强,寇纪松. 基于遗传算法求解约束优化问题的一种算法[J]. 软件学报,2001,12(4):628-632.
LIN Dan, LI Min-qiang, KOU Ji-song. A GA-based method for solving constrained optimization problems[J]. Journal of Software, 2001, 12(4):628-632.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

庄丽蓉(1982-),女,福建晋江人,硕士研究生,研究方向为人工智能在电力系统中的应用和电力系统自动化(E-mail: zlr0100407@163.com);

蔡金锭(1954-),男,福建晋江人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力网络、电力电子线路故障的人工智能诊断研究和教学;

李天友(1962-),男,福建南安人,局长,高级工程师,主要从事电网运行研究及管理工作。

Model and algorithm of daily power purchase optimization for regional grid

ZHUANG Li-rong¹, CAI Jin-ding¹, LI Tian-you²

(1. Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

2. Xiamen Electric Power Bureau, Xiamen 361004, China)

Abstract: Many regional power plants do not possess the ability to compete on provincial electricity market under present conditions, which are normally dispatched by regional power utility. The mathematical model of daily power purchase is set up for regional power utility, which takes the minimal total cost as the objective function and considers constraints of power balance, supply and demand balance, generation ability and transmission ability, as well as the influence of network loss allocation. An improved chaos-genetic algorithm with faster evolution speed and better precision is brought forward for it. The model and algorithm are applied to the power purchase of a region. Results show that, compared with other methods, the cost with consideration of loss allocation is reduced by about 1.9 %.

Key words: daily power purchase; power purchase model; regional power utility; chaos-genetic algorithm; electricity market