

## 基于 Pareto 最优的电力系统有功-无功综合优化

孙伟卿<sup>1</sup>, 王承民<sup>1</sup>, 张 焰<sup>1</sup>, 俞国勤<sup>2</sup>, 祝达康<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240; 2. 上海市电力公司技术发展中心, 上海市 200122)

**摘要:** 针对纯粹依据能耗或成本指标进行发电调度的不合理性,以系统总发电成本最小和电网有功损耗最小为目标函数,建立了电力系统综合节能降耗的有功-无功协调优化模型。借助 乘子把多目标优化问题转化为单目标优化问题,通过对 Pareto 最优前沿集上综合效益最优解的定义,求解 乘子的最优值,同时还提出了 的近似求解方法以及有网损率约束情况下 值的求解方法,可以为协调系统总发电成本与电网有功损耗之间的矛盾、省级电力调度部门从传统发电调度模式转变为节能发电调度模式提供参考。通过 IEEE 30 和 IEEE 57 节点系统的算例分析表明了所建模型和算法的有效性。

**关键词:** 节能降耗; 多目标; 协调优化; Pareto 最优; 综合效益最优解

**中图分类号:** TM731; TM744

### 0 引言

节能降耗是建设资源节约型社会的一项重要战略任务。“十一五”规划提出到 2010 年将单位国内生产总值(GDP)能耗降低 20%的节能要求,任务非常艰巨。电力系统在各项能源消耗领域中所占比重较大,是节能降耗的重要领域。除大力推行用户节能外,在发电、输电、配电各环节积极开展节能降耗活动对顺利实现“十一五”节能降耗指标具有重要作用。

对于火电机组,通过电力系统有功功率优化,可以达到降低发电成本、节约一次能源的目的。通过电力系统无功功率优化,可以达到降低网络损耗、节约二次能源的目的。如何从传统发电调度模式转变为节能发电调度模式,这使省级电网调度部门面临巨大的压力<sup>[1]</sup>。纯粹以煤耗或发电成本的高低作为发电调度的依据具有明显的不合理性<sup>[2]</sup>。文献[3]指出,只考虑机组煤耗能达到节能降耗目的,但不能体现市场主体意愿;只考虑市场主体意愿,而忽视机组煤耗等因素,节能降耗将难以充分实现。因此,有必要研究一种可以同时考虑降低发电系统发电成本和能源损耗的电力系统综合节能的有功-无功协调优化模型与算法,以协调降低发电成本和降低能源损耗在优化方向上的矛盾,寻求两者之间的最佳平衡,使电能生产和输送的综合效益最大化。

一般情况下,多目标优化模型的各目标函数之

间在最优优化方向上存在冲突,难以得到绝对最优解,但通常存在一个 Pareto 最优解集(有效解集),决策者可从中选择一个解作为该多目标优化问题的满意解<sup>[4]</sup>。文献[4]利用自适应进化规划算法求解多目标优化模型,同时考虑了发电成本最小及系统网络损耗最小等多重目标,并以理想点作为最优解,但评价函数的不同取法会直接影响理想点的取值,并且该方法不适宜处理不同量纲的目标函数。文献[5-8]应用模糊集理论将多目标优化问题转化为标准的单目标优化问题进行求解,但是求得的“最优折衷解”完全取决于隶属函数的构造方法,采用的线性化构造方法虽然简单,但未必最合理,同时,模糊集方法不能求解 Pareto 最优前沿集上其他点,算法不够灵活。文献[9]采用多目标粒子群优化算法,通过定义粒子在目标空间中的距离引导各个粒子寻找局部和全局最优解。文献[10]采用随机搜索法求解电力系统多目标经济负荷分配问题,但其定义的最优判据是病态的,可能出现 A 优于 B 且 B 优于 A 的悖论。文献[11]建立了基于能耗和效益最优的发电权交易模型,讨论了不同加权因子对节能降耗的影响,但未涉及权重因子的最优取值问题。

本文首先建立电力系统综合节能的有功-无功协调优化模型,借助 乘子把双目标优化问题转化为单目标优化,然后通过对 Pareto 最优前沿集上综合效益最优解的定义,求解 的最优值,使 的合理赋值有依据。同时,通过改变 的值,方便地求解 Pareto 最优前沿集上的任意一点,增加算法的灵活性。本文还分别讨论了综合效益最优解的精确值、近似值,以及考虑网损率约束条件下的求解方法。

收稿日期: 2008-09-29; 修回日期: 2009-01-20。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA05Z214)。

## 1 有功-无功协调优化模型

发电系统总发电成本可以用系统中各机组有功出力的二次函数曲线之和表示,即

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{N_G} a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (1)$$

式中:  $a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi}$  为各机组的变动成本,主要为燃料成本;  $c_i$  为各机组的固定成本;  $N_G$  为机组总数。

由于各发电企业燃料采购成本不同,系统总发电成本最小并不等同于总燃料消耗最小。若设各发电企业采购燃料的单价为  $i$ ,并假设燃料成本为唯一的变动成本,则系统的实际燃料消耗量如下:

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^{N_G} \frac{a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi}}{i} \quad (2)$$

《节能发电调度办法》<sup>[12]</sup>指出,对于同类型火力发电机组按照能耗水平由低到高排序,节能优先;机组运行能耗水平近期暂依照设备制造厂商提供的机组能耗参数排序,逐步过渡到按照实测数值排序。这说明,目前的机组能耗参数并不能完全真实地反映机组能耗水平;同时,由于发电企业成本构成的复杂性,以及由发电企业所有制形式的多样化和电力行业放开管制的深入实施造成的各发电企业燃料采购成本的不透明性,难以以总燃料消耗最小作为节能发电调度的目标函数。

即使电力调度部门能够掌握电网中各机组真实准确的成本和能耗参数,完全按照成本或能耗进行发电调度也是不合理的。这是因为由于电网中高价低耗机组(如新近投产的大机组)和低价高耗机组(如老、小机组)的存在,完全按照发电成本进行调度可能出现低耗的大机组竞争不过高耗的老、小机组的情况,而完全按照能耗进行调度又可能出现电网购电成本激增的情况,违背了电力用户的主体意愿。因此,在“上大压小”、从传统发电调度模式向节能发电调度模式转变的过程中,有必要研究一种综合考虑发电成本和能耗的发电调度方法。

由于完全按照能耗水平进行发电调度具有上述不合理性,且当前的能耗参数不能真实地反映发电机组的能耗水平,因此在实际的节能发电调度实践中,可以利用网损率这一电网综合经济运行指标对式(1)所示的系统总发电成本最小的目标函数进行修正,寻求经济效益与节能效益的综合最优。在负荷确定的情况下网损率最小即为网损最小,因此本文以发电系统总发电成本最小和电网有功损耗最小作为目标函数,建立电力系统综合节能的有功-无功协调优化模型,目标函数如下:

$$\min [f_1(x), f_2(x)]^T \quad (3)$$

式中:  $f_2(x)$  为电网有功损耗,可以用系统中各机组有功出力之和与系统总有功负荷之差表示,

$$f_2(x) = P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - \sum_{i=1}^N P_{Di} \quad (4)$$

$N$  为负荷数。

在本模型中,等式约束为节点潮流平衡方程,不等式约束为发电机有功和无功功率出力约束以及节点电压幅值约束。

## 2 综合效益最优解

### 2.1 乘子

借助乘子(0)把上述双目标优化问题的目标函数转化为单目标函数如下:

$$\min f(x) = f_1(x) + \lambda f_2(x) \quad (5)$$

假设分别以  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  为单目标函数进行优化得到的最优解为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 。取不同值时,以式(5)为目标函数的最优解集为  $\lambda$ 。显然,当  $\lambda = 0$  时,可使系统总发电成本最小,即  $\lambda = 0 = \lambda_1$ ;当  $\lambda \rightarrow +\infty$  时,可使电网有功网损最小,即  $\lambda = +\infty = \lambda_2$ 。

由于  $f_1$  和  $f_2$  不是同一量纲,故令  $f_1^{\min} = f_1(\lambda_1)$ ,  $f_1^{\max} = f_1(\lambda_2)$ ,  $f_2^{\min} = f_2(\lambda_1)$ ,  $f_2^{\max} = f_2(\lambda_2)$ , 利用公式  $X = \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}}$ ,  $Y = \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}}$  对其进行归一化。显然,  $X, Y \in [0, 1]$ , 并且可视为决策者对各目标函数优化结果的不满意度,0表示很满意,1表示很不满意。

为了分析不同  $\lambda$  取值对优化结果的影响,在 IEEE 30 节点系统上<sup>[13]</sup>,将  $\lambda$  以 40 为间隔在 0~400 上取值,根据各次优化的结果,构成如图 1 所示的  $-X, -Y$  曲线。

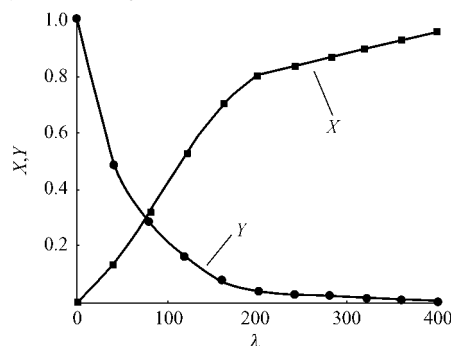


图 1  $-X, -Y$  曲线  
Fig. 1  $-X, -Y$  curves

由图 1 可见,随着  $\lambda$  的不断增大,网损在目标函数中的权重不断增大,使最优解对应的网损值不断减小,与此同时发电成本不断上升。这说明减少发电成本与减小网损始终是相互矛盾的,要减小网损或发电成本,必须以增加发电成本或网损为代价。

将  $\lambda$  取不同值时所得到的最优解集( $\lambda$ 对应的  $X$  与  $Y$  相连,可得到图 2 所示的  $X-Y$  曲线。可以证

明,对于任意  $\lambda > 0$ ,以式(5)为目标函数的优化问题的最优解是以式(3)为目标函数的优化问题的一个 Pareto 最优解。这就说明图 2 中的  $X$ - $Y$  曲线是以式(3)为目标函数的双目标优化问题的 Pareto 最优前沿集。

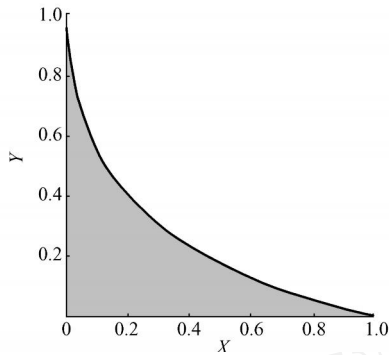


图 2 X-Y 曲线  
Fig. 2 X-Y curve

通常,双目标优化问题的 Pareto 最优前沿集是一组弧线;三目标优化问题的 Pareto 最优前沿集是一组弧面; $n$  目标优化问题的 Pareto 最优前沿集是一组  $n$  维曲面。这一结论与文献[14]中以系统总燃料费用最小、网损最小和污染物排放量最少为目标函数,以及文献[15]中进一步以系统电压安全裕度指标作为第 4 个目标函数的分析结论是一致的。

2.2 综合效益最优解的定义

既然图 2 所示  $X$ - $Y$  曲线是以式(3)为目标函数的双目标优化问题的 Pareto 最优前沿集,该双目标优化问题的满意解显然应该在  $X$ - $Y$  曲线上求得。

在图 2 中,原点是最理想的绝对最优解,但是根据 Pareto 最优前沿集的定义可知,双目标协调优化问题的解在图 2 中原点及其附近的灰色区域都不可能达到的。而在  $(0, 1)$  和  $(1, 0)$  点附近  $X$ - $Y$  曲线的斜率很大(或很小),说明在这些点附近,降低单位容量的网损或发电成本,需要以增加大量的发电成本或网损作为代价。这种“交易”在数学上是最优的,但是在工程上却不合理。

综合效益最优解的判据函数还需满足以下 4 个要求: 可消除各目标函数在量纲上的差异; 应使各目标函数总体不满意度较低; 应使各目标函数的不满意度分布较均匀; 数学形式较简单。

因此,本文定义图 2 中  $X$ - $Y$  曲线上距离原点归一化的欧氏距离最短的点,亦即使

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{\left(\frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}}\right)^2 + \left(\frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}}\right)^2} \quad (6)$$

最小的点  $(X^*, Y^*)$  作为综合效益最优解,该判据函数可以同时满足以上 4 点要求。

由于  $X^2 > 0, Y^2 > 0$ ,因此使  $D$  最小也就是使  $D^2$  最小。至此,寻找综合效益最优解的问题转化为寻找最佳  $\lambda$ ,使对于任意  $\lambda > 0$ ,以式(5)为目标函数的最优模型的解对应的  $D^2$  最小的问题。

2.3 值的求解方法

2.3.1 精确解

根据 K-T 最优性条件,在  $\lambda^*$  处应有:

$$\frac{\partial D^2}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda = \lambda^*} = 0 \quad (7)$$

即

$$2 \left[ \frac{f_1 - f_1^{\min}}{(f_1^{\max} - f_1^{\min})^2} \frac{\partial f_1}{\partial \lambda} + \frac{f_2 - f_2^{\min}}{(f_2^{\max} - f_2^{\min})^2} \frac{\partial f_2}{\partial \lambda} \right] = 0 \quad (8)$$

因为  $\frac{\partial f_1}{\partial \lambda} = - \frac{\partial f_2}{\partial \lambda}$ ,所以,

$$2 \frac{\partial f_2}{\partial \lambda} \left[ \frac{(f_1 - f_1^{\min})(-)}{(f_1^{\max} - f_1^{\min})^2} + \frac{f_2 - f_2^{\min}}{(f_2^{\max} - f_2^{\min})^2} \right] = 0 \quad (9)$$

由  $\frac{\partial f_2}{\partial \lambda} \neq 0$ ,可得:

$$\lambda^* = \left[ \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right]^2 \frac{f_2^* - f_2^{\min}}{f_1^* - f_1^{\min}} \quad (10)$$

式中: $f_1^*$ 和  $f_2^*$ 为对应于  $\lambda = \lambda^*$  时各单目标的值,是隐函数。

因此可以采用迭代的方法求解  $\lambda^*$ 。具体方法是在第  $K$  步优化计算结束后,首先计算  $\lambda^{(K)} = \left[ \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right]^2 \frac{f_2^{(K)} - f_2^{\min}}{f_1^{(K)} - f_1^{\min}}$ ,然后取  $\lambda^{(K+1)} = \frac{1}{2} (\lambda^{(K)} + \lambda^{(K)})$  进行下一步迭代,直至满足迭代精度要求。

2.3.2 近似解

显然,初始值  $\lambda^{(0)}$  的取值会直接影响迭代求解  $\lambda^*$  的收敛速度。由于图 2 所示的  $X$ - $Y$  曲线形似双曲线,因此可以认为该曲线上距离原点最近的点在该曲线与直线  $X = Y$  交点的附近,不妨取该曲线上  $X = Y$  处  $f_1$  与  $f_2$  系数的比值作为  $\lambda$  的初值。

$$X = Y \Rightarrow \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} = \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (11)$$

则

$$f_1 = \frac{f_1^{\max} - f_1^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} (f_2 - f_2^{\min}) + f_1^{\min} \quad (12)$$

$$\lambda^{(0)} = \frac{f_1^{\max} - f_1^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (13)$$

本文第 3 节算例分析将证明,以式(13)求取的初值可以显著提高算法收敛速度,甚至可以直接取  $\lambda^{(0)}$  来近似求解综合效益最优解。

2.3.3 含有网损率约束的解

网损率为电网有功损耗占系统总发电量的百分比。若记电网总有功发电量和总有功负荷量分别为

$$P_G = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} \text{ 和 } P_D = \sum_{i=1}^N P_{Di}, \text{ 网损率 } R_{NL} \text{ 可表示为:}$$

$$R_{NL} = \frac{P_G - P_D}{P_G} \times 100\% = \frac{P_{loss}}{P_G} \times 100\% \quad (14)$$

网损率是电力部门的一项重要综合性技术经济指标。强化网损管理,降低电网损耗,对搞好节能降耗具有重要意义。因此,对于一些网损率比较高的电力网络,在考虑发电成本与降损的综合效益时,电力部门往往希望将网损率控制在一定范围内。采用 2.3.1 节方法求得的综合效益最优解虽然可以起到降低网损率的效果,但是未必可以满足电力部门对网损率的要求。因此,有必要研究网损率有约束情况下的 值求解算法。

设网损率允许的最大值为  $R_{NL}^{max}$ ,则在负荷不变的情况下对应的网损值为  $f_2 = P_{loss} = P_D / (1 - )$ 。此时,应求解相应的  $=$ ,使得优化结果中的网损值等于  $f_2$ ,以保证在不超过网损率允许最大值的前提下,使系统总发电成本最小。

具体的计算方法是在第  $K$  步优化结束后,计算  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial}\right)^{(K)} = \frac{f_2^{(K)} - f_2^{(K-1)}}{ - }^{(K-1)}$ ,以  $^{(K)} = f_2^{(K)} - f_2 \left[\left(\frac{\partial f_2}{\partial}\right)^{(K)}\right]^{-1}$  作为 的变化量,取  $^{(K+1)} = ^{(K)} + ^{(K)}$  进行下一步迭代,直至满足迭代精度要求。

### 3 算例分析

以 IEEE 30 节点和 IEEE 57 节点试验系统对本文提出的模型及算法进行检验。系统参数见文献 [13],收敛精度设定为  $10^{-5}$ 。表 1 是分别以系统总发电成本最小和电网有功损耗最小为目标函数进行单目标优化的结果。可见,当一个目标函数达到最小值时,另一个目标函数的值往往较大。

表 1 单目标优化结果  
Table 1 Single-objective optimization results

试验系统	目标函数	发电成本/ (美元·h <sup>-1</sup> )	网损/ MW	R <sub>NL</sub> / (%)
IEEE 30	优化前	1 228.88	5.370	1.86
	成本最小	980.07	8.062	2.77
	网损最小	1 318.99	3.236	1.13
IEEE 57	优化前	11 069.44	27.864	2.18
	成本最小	7 076.45	42.844	3.31
	网损最小	8 978.68	24.437	1.92

表 2 比较了 2 个试验系统综合效益最优解的精确解和近似解。比较多目标优化结果与单目标优化结果可以发现,多目标问题优化解是各单目标优化问题解的折衷;另外,用 \* <sup>(0)</sup> 求得的近似综合效益最优解与精确解相比误差较小,由于省略了迭代求取 \* 的过程,计算效率也得到提高。可见,这是一种求解近似综合效益最优解的有效简化方法。

表 2 多目标优化结果  
Table 2 Multi-objective optimization results

试验系统	解	发电成本/ (美元·h <sup>-1</sup> )	网损/ MW	R <sub>NL</sub> / (%)	D	
IEEE 30	精确解	1 075.16	4.78	79.93	1.66	0.425
	近似解	1 060.76	4.97	70.23	1.72	0.431
IEEE 57	精确解	7 660.13	29.85	103.50	2.33	0.424
	近似解	7 658.86	29.86	103.34	2.33	0.424

表 3 所示为分别以 2.0%和 2.5%作为网损率允许值上限时,2 个实验系统的综合效益最优解。

表 3 网损率有约束情况下的优化结果  
Table 3 Optimization results with R<sub>NL</sub> constraints

试验系统	R <sub>NL</sub> / (%)	发电成本/(美元·h <sup>-1</sup> )	网损/ MW
IEEE 30	2.0	1 017.4	5.78
	2.5	983.9	7.27
IEEE 57	2.0	8 237.34	25.53
	2.5	7 457.9	32.07

由表 3 可见,对于一个负荷分布确定的电力系统,如果分别以总发电成本最小和网损最小为单目标进行优化所得到的网损率为  $R_{NL}^{max}$  和  $R_{NL}^{min}$ ,则对于任何期望的  $R_{NL} [R_{NL}^{min}, R_{NL}^{max}]$ ,2.3.3 节所述的算法都是一种有效的求解该网损率约束下 Pareto 最优解的优化算法。

### 4 结语

纯粹以煤耗为标准的发电调度方法可以达到节能降耗的目的,但在实际应用中具有诸多不合理的地方。只有同时优化多个目标才更具实际意义。

本文以系统总发电成本最小和电网有功损耗最小为目标函数,对电力系统综合节能降耗问题进行研究,建立了电力系统综合节能的有功-无功协调优化模型并进行求解。针对多目标优化会增大计算负担以及电力部门对网损率有所约束的问题,给出求解近似综合效益最优解和含有网损率约束解的方法。算例表明本文所建立的模型和算法是有效的。

### 参考文献

[1] 王超,张晓明,唐茂林,等.四川电网节能减排发电实时调度优化模型.电力系统自动化,2008,32(4):89-92.  
WANG Chao, ZHANG Xiaoming, TANG Maolin, et al. Real-time dispatching optimization model for energy-saving and emission-reduction generation in Sichuan Grid. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 89-92.

[2] 胡建军.基于节能发电调度和国际贸易理论的电力市场竞争机制.电力系统自动化,2008,32(24):35-38.  
HU Jianjun. A novel power market competition mechanism based on energy-conservation power generation dispatch and international trade concept. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 35-38.

- [3] 胥传普, 杨立兵, 刘福斌. 关于节能降耗与电力市场联合实施方案的探讨. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 99-103.  
XU Chuanpu, YANG Libing, LIU Fubin. Discuss on the union implementation scheme of energy conservation measures and electricity marketability methods. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 99-103.
- [4] 石立宝, 徐国禹. 自适应进化规划及其在多目标最优潮流中的应用: ( ) 基于自适应进化规划的多目标最优潮流. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 33-36.  
SHI Libao, XU Guoyu. Self-adaptive evolutionary programming and its application to multi-objective optimal load flow: Part two self-adaptive evolutionary programming solution of multi-objective optimal load flow. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 33-36.
- [5] MA Rui, YAN Hongwen, TONG Xiaojiao. Multiobjective fuzzy optimal transaction planning based optimal power flow for electricity market// Proceedings of the 7th International Power Engineering Conference, November 29-December 2, 2005, Singapore: 1-5.
- [6] 刘明波, 段晓军, 赵艳. 多目标最优潮流问题的模糊建模及内点解法. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 37-40.  
LIU Mingbo, DUAN Xiaojun, ZHAO Yan. Fuzzy modeling and interior point algorithm of multi-objective OPF problem. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 37-40.
- [7] RAMESH V C, LI Xuan. A fuzzy multiobjective approach to contingency constrained OPF. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1348-1354.
- [8] 叶彬, 张鹏翔, 赵波, 等. 多目标混合进化算法及其在经济调度中的应用. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 66-72.  
YE Bin, ZHANG Pengxiang, ZHAO Bo, et al. Multi-objective hybrid evolutionary algorithm for economic load dispatch. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(2): 66-72.
- [9] ABIDO M A. Multiobjective particle swarm optimization for optimal power flow problem// Proceedings of the 12th International Middle-East Power System Conference, March 12-15, 2008, Aswan, Egypt: 392-396.
- [10] DAS D B, PATVARDHAN C. New multi-objective stochastic search technique for economic load dispatch. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(6): 747-752.
- [11] 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分析. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 39-42.  
ZHENG Xin, JIANG Chuanwen, LI Lei, et al. Analysis of generation rights trade based on optimization of energy-saving and efficiency. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 39-42.
- [12] 中华人民共和国国务院办公厅. 节能发电调度办法(试行) [EB/OL]. [2008-03-17]. <http://www.serc.gov.cn>.
- [13] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [14] ZHANG P X, ZHAO B, CAO Y J, et al. A novel multi-objective genetic algorithm for economic power dispatch// Proceedings of the 39th International Universities Power Engineering Conference: Vol 1, September 6-8, 2004, Bristol, UK: 422-426.
- [15] DAS D B, PATVARDHAN C. Useful multiobjective hybrid evolutionary approach to optimal power flow. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(3): 275-282.

孙伟卿(1985—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统优化. E-mail: sidswq@163.com

王承民(1970—), 男, 副教授, 主要研究方向: 电力系统优化。

张焰(1958—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统规划及电力系统稳定。

### Active/ Reactive Power Coordinated Optimization of Power System Based on Pareto Optimality

SUN Weiqing<sup>1</sup>, WANG Chengmin<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, YU Guoqin<sup>2</sup>, ZHU Dakang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

**Abstract:** Considering limitation of taking energy consumption or cost index as the unique objective of power dispatch, this paper proposes an active/ reactive coordinated optimization model for comprehensive energy saving of power system. In this model, the objective function is to minimize the total power generation cost and active power loss. By multiplier method, the multi-objective optimization problem is transformed into a single-objective one. According to the definition of optimal comprehensive benefits solution on Pareto optimal front set, the optimal solution of multiplier is obtained. For the proposed model, an approximate solution method and a method to deal with a system with network loss rate constraint are presented as well. This method provides reference for coordinating the conflict between total power generation cost and active power loss, and also for provincial power dispatch to transfer from traditional generation dispatching model to energy-saving generation dispatching model. Results of cases study on IEEE 30-bus and IEEE 57-bus systems validate the proposed model and algorithm.

This work is supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA05Z214).

**Key words:** energy saving and consumption reducing; multi-objective; coordinated optimization; Pareto optimality; optimal comprehensive benefits solution