

广东电网节能发电调度潜力分析

钟海旺¹, 康重庆¹, 陈慧坤², 骆晓明², 李嘉龙²

(1. 电力系统国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 广东省电力调度中心, 广东省 广州市 510600)

Analysis on Potential of Energy-Conservation Based Dispatch for Guangdong Power Grid

ZHONG Hai-wang¹, KANG Chong-qing¹, CHEN Hui-kun², LUO Xiao-ming², LI Jia-long²

(1. State Key Lab of Power Systems (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Guangdong Provincial Electric Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Energy-conservation based dispatch (ECD) has been carried out in the electric power industry in China. It is an outstanding topic with significance to analyze the potential of coal conservation after ECD is carried out in power system ahead of time. This paper starts with the relationship between equilibrium scheduling (ES) and ECD. As an evaluation index of ES, equilibrium scheduling index (ESI) is introduced. Based on the relation curve between average coal consumption of generation and ESI at different load levels, a model to analyze the potential of energy conservation is established and an evaluation method is proposed. Analysis of examples is carried out based on the data from Guangdong Power Grid, which is one of the five provincial pilots of ECD in China. The results of calculation example show that the proposed method can demonstrate the optimization space generated during the transition from the pattern of ES to ECD, and this method can be applied to analyze the potential and benefit of coal conservation between different dispatching patterns.

KEY WORDS: energy-conservation based dispatch ; equilibrium scheduling index (ESI); indifference curve; benefit of coal conservation

摘要: 我国电力行业已经逐步推行节能发电调度, 提前分析电力系统实施节能发电调度的节煤潜力具有重要意义。作者从研究均衡发电调度与节能发电调度之间的关系入手, 引入均衡调度指数作为均衡发电调度的评价指标。基于不同负荷水平下均衡调度指数与发电平均煤耗之间的关系曲线, 建立了节能潜力分析模型和评价方法, 并基于作为我国 5 个

节能发电调度试点省份之一的广东电网实际数据进行了案例分析。研究表明, 该方法能够直观地反映均衡发电调度转向节能发电调度时所形成的优化空间, 适用于分析不同调度模式下的节煤潜力和效益。

关键词: 节能发电调度; 均衡调度指数(ESI); 无差异曲线; 节煤效益

0 引言

长期以来, 我国电力系统推行考虑机组容量的均衡发电调度模式, 这在一定时期内促进了电力工业的快速发展^[1], 并取得了丰富的运行经验。我国一次能源结构不均衡, 在相当长一段时间内, 煤电在发电量中所占比例将保持在 70%左右^[2]。面对我国日益严峻的能源形势与日渐突出的环境问题, 电力工业采用节能减排技术已迫在眉睫。节能发电调度理念的提出^[3], 使我国电力工业面临从传统的均衡发电调度模式向节能发电调度模式的转变。当前对于节能发电调度潜力的研究和探讨多停留在政策解读和定性分析的层面^[1,4], 研究节能发电调度潜力的量化分析方法, 科学地衡量均衡发电调度与节能发电调度之间的优化空间, 是转向节能发电调度时迫切需要面对和回答的问题。

本文以我国节能发电调度 5 个试点省份之一的广东为分析对象, 简要分析广东电网实施节能发电调度的潜力。广东作为我国的用电大省, 其水能、煤炭资源均非常贫乏^[5], 长期以来形成了以火电为主、多种能源并存的多元化电源结构^[6]。21 世纪初实现了厂网分离^[7], 在这种情况下, 机组的实际煤耗作为发电企业的私有信息较难获取, 而实时煤耗监测的实现尚需时日, 因此, 本文在分析中采用的

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-07-0484); 国家自然科学基金资助项目(No. 50877041)。

Project supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-07-0484) and National Natural Science Foundation of China (No 50877041).

是广东电网燃煤机组的设计煤耗值。

1 总体分析思路

1.1 概述

从调度目标的维度看，均衡发电调度追求各机组的合同完成率尽量趋同，节能发电调度追求系统发电煤耗最低。短期而言，均衡发电调度表现为各机组的负荷率相近，而节能发电调度表现为不同煤耗的机组之间负荷率差异较大。

从评价指标的维度看，均衡发电调度关注机组合同完成率，节能发电调度关注系统发电煤耗。对于给定的电力系统，在同一负荷水平下，选择不同的发电调度模式，这两个指标之间既相互冲突又潜在关联。如，当机组的合同完成率趋同时，系统发电煤耗较高；而系统发电煤耗最低时，不同机组之间的合同完成率差别较大；这种关系类似于微观经济学中的商品无差异曲线的性质。在节能发电调度环境下，不同机组之间合同完成率的偏差可以视为一种调度控制策略，对煤耗不同的机组实施差异化调度，是降低系统发电煤耗的有效途径。

基于以上两点，本文的总体分析思路是引入均衡发电调度模式的定量评价指标——均衡调度指数，研究其在不同负荷水平下与发电平均煤耗之间的关系曲线，基于此曲线对节能发电调度的节煤潜力和效益进行分析，如图 1 所示。

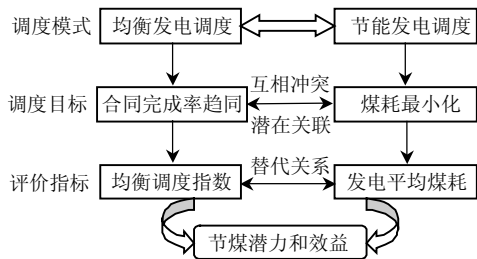


图 1 总体分析思路

Fig. 1 General idea of analysis

1.2 均衡调度指数

为了定量地描述均衡发电调度的程度，本文引入均衡调度指数的概念。均衡调度指数 A 定义如下

$$A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \quad (1)$$

式中： r_i 表示机组 i 的合同完成率； \bar{r} 表示系统平均合同完成率； N 表示系统中的机组数。该指标衡量的是各机组的合同完成率与系统平均合同完成率之间的平均偏差率。显然，均衡调度指数是一个无量纲的指标。

从某种意义上讲，均衡调度指数可以评价发电调度模式与理想均衡发电调度模式的偏差程度。在理想均衡发电调度模式下，各机组的合同完成率相等，则 $A=0$ ；发电调度模式与理想均衡发电调度模式偏差越大，则均衡调度指数 A 越大。

1.3 发电平均煤耗—均衡调度指数边际替代率

发电平均煤耗与均衡调度指数之间存在相互替代的关系，本文引入发电平均煤耗与均衡调度指数的边际替代率 M_{AC} ，该指标的计算方法如下：

$$M_{AC} = \frac{\Delta C}{\Delta A} \quad (2)$$

式中： ΔC 表示系统发电平均煤耗的变化量； ΔA 表示均衡调度指数的变化量。为了分析方便，通常取边际替代率的绝对值进行评价。

该指标的物理意义是当均衡调度指数增加一个单位时，所能减少的系统发电平均煤耗，其单位为 g/kWh 。从式(2)可以看出，在节能发电调度模式下，均衡调度指数 A 可以视为一种调度控制策略，对煤耗不同的机组实施差异化调度，将会带来节煤效益。

2 节能潜力分析模型

2.1 概述

不同地区的电网，其电源结构和网架结构会对节煤效益的分析产生较大影响。为了从宏观角度分析节能发电调度的节煤效益，本文所建立的分析模型中，仅考虑火电系统的不同运行方式，且未计及系统网络约束和机组出力的时段耦合约束，机组组合采用优先顺序法。这种简化处理的目的是揭示不同调度模式之间的主体差异，而不是陷入细节分析之中。

2.2 均衡发电调度的评价模型

在均衡发电调度模式下，以 1.2 节提出的均衡调度指数 A 最小为优化目标，对于给定典型日的负荷水平来分析机组的负荷率，其效果等同于分析机组的合同完成率。因此，可以将前述的 r_i 和 \bar{r} 分别用来表示机组 i 的负荷率以及系统平均负荷率，并建立如下的数学模型：

目标函数

$$\min A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \quad (3)$$

约束条件

$$P_{i\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i\max}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=1,2,\dots,T \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = D_t, \quad t=1,2,\dots,T \quad (5)$$

此模型中, $P_{i,t}$ 为第 i 台燃煤机组第 t 个时段的有功出力值; $P_{i\min}$ 为机组 i 的最小技术出力; $P_{i\max}$ 为机组 i 的出力上限; N 为系统中在线运行的燃煤机组的台数; T 为调度周期内时段的个数, 以 15 min 作为时段间隔时, $T=96$; D_t 为第 t 个时段燃煤机组需要平衡的负荷。

机组负荷率按下式计算:

$$r_i = \frac{\sum_{t=1}^T P_{i,t}}{T \cdot P_{i\max}}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (6)$$

系统平均负荷率按下式计算:

$$\bar{r} = \frac{\sum_{t=1}^T D_t}{T \cdot \sum_{i=1}^N P_{i\max}} \quad (7)$$

该模型的优化目标是各机组之间负荷率的偏差最小化, 均衡调度指数的非线性使得这一模型需要求解非线性规划的问题。

2.3 节能发电调度的评价模型

在当前实施节能发电调度的现有条件下, 机组的煤耗暂取其设计煤耗值。以全系统发电总煤耗最低为优化目标, 可以建立如下的数学模型:

目标函数

$$\min C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_i P_{i,t} \quad (8)$$

其约束条件同式(4)(5), 式中 c_i 为第 i 台燃煤机组的单位发电煤耗值, g/kWh, 其他符号意义同前。

该模型的优化目标是系统发电总煤耗最低, 由于机组的单位发电煤耗为其设计煤耗值, 且约束条件均是线性的, 故该模型只需求解线性规划问题。

3 评价方法

为求解方便, 在求解均衡发电调度的评价模型时, 先将目标函数平方, 然后利用二次规划方法求解, 最后将所得结果开平方得到目标函数值。

从电网历史负荷数据中选取若干个负荷水平, 基于典型日的负荷曲线进行分析计算。

对负荷曲线进行如下处理: 将水电、核电、燃气、抽水蓄能等非燃煤机组以及外省联络线送入的功率视为给定值, 得到燃煤机组需要平衡的负荷。

在求解均衡发电调度的数学模型时, 本文采用

二次规划方法进行求解并进行相关指标的统计; 在求解节能发电调度的数学模型时, 采用线性规划方法进行求解并进行相关指标的统计。

在节能发电调度模式下的总煤耗和均衡发电调度模式下的总煤耗之间分成若干段, 将发电总煤耗作为等式约束加入到均衡发电调度的评价模型中, 然后利用二次规划求解系统发电平均煤耗-均衡调度指数关系曲线上的其他点。整体计算过程如图 2 所示。

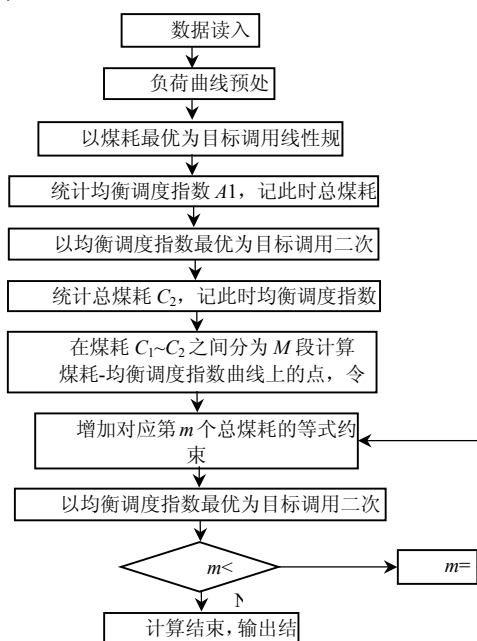


图 2 评价方法流程图

Fig. 2 Flow chart of assessment method

4 节煤潜力分析

节能发电调度的总体节煤效益来源于两个方面: 一是改善和调整电源结构使低煤耗机组所占的比例增大而产生的节煤, 称之为结构节煤效益; 二是发电调度方式的改变使得各机组之间的负荷率产生差异, 发电量从高煤耗机组向低煤耗机组转移而产生的节煤, 称之为运行节煤效益。

对于给定的电力系统, 提高结构节煤效益的手段是改善和调整电源结构; 提高运行节煤效益的手段是实施差异化调度。节能发电调度在发电基础组合方案制定中体现的是结构节煤效益, 而以发电煤耗最低为目标的经济调度则将实现运行节煤效益最大化。

为了衡量不同负荷水平下的结构节煤效益, 本文以运行机组的加权平均煤耗值为切入点进行分析, 机组的权重值为其额定容量。当系统中所有的

N_0 台机组都参与发电时, 加权平均煤耗 C_{ave0} 为

$$C_{ave0} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} c_i P_{i\max}}{\sum_{i=1}^{N_0} P_{i\max}} \quad (9)$$

其单位与煤耗单位相同, 以此为系统基准加权平均煤耗。

实际运行中, 部分机组(例如高煤耗机组)将无法参与发电, 设此时参与发电的燃煤机组数为 N_1 , 则加权平均煤耗 C_{ave1} 为

$$C_{ave1} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} c_i P_{i\max}}{\sum_{i=1}^{N_1} P_{i\max}} \quad (10)$$

则该负荷水平下的结构节煤效益定义为

$$e = (C_{ave0} - C_{ave1}) / C_{ave0} \quad (11)$$

显然, 结构节煤效益 e 是一个无量纲的指标。

可以认为, 在调度安排过程中, 结构节煤效益是由于机组组合不同而产生的节煤效益; 运行节煤效益是在确定的机组组合方式下, 通过经济负荷分配产生的节煤效益。

5 算例分析

5.1 概述

广东电网是近年来国内发展最迅速的电网^[8], 广东地区的负荷约占南方电网负荷总量的 60%^[9]。本文基于广东电网 2008 年 6 月的实际负荷数据, 采用上述分析模型和评价方法进行分析。为了分析节能发电调度的潜力, 机组组合采用的是优先顺序法, 即燃煤机组按照煤耗从低到高的顺序依次开机, 直到开机容量满足系统最大负荷为止。

5.2 负荷曲线预处理

广东电网 2008 年 6 月份典型日的统调负荷曲线如图 3 所示。将非燃煤机组的出力以及外省联络线送入功率视为给定值, 得到燃煤机组需要平衡的负荷, 如图 3 中的虚线所示。

广东电网 2008 年火电机组的总装机容量为 26.27 GW。基于广东 2008 年 6 月份的总体负荷水平, 以该典型日负荷曲线形状为基准, 分别取最高

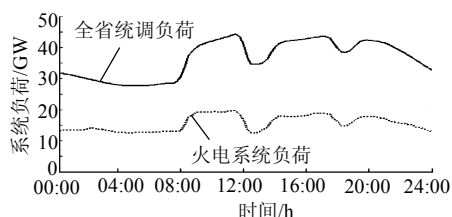


图 3 广东电网 2008 年 6 月份典型日负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curve of Guangdong Power Grid in June, 2008

统调负荷为表 1 中的数值, 得到 5 个不同的负荷水平, 相应的火电机组需要平衡的负荷如表 1 中所示。以下分析基于这 5 个负荷水平进行。

表 1 系统负荷水平

Tab. 1 System Load Level

负荷水平	1	2	3	4	5
最高统调负荷/GW	35	40	45	50	55
最高火电负荷/GW	14	17	20	23	26

5.3 发电平均煤耗-均衡调度指数关系曲线

上述 5 个负荷水平下系统发电平均煤耗-均衡调度指数关系曲线如图 4 所示。

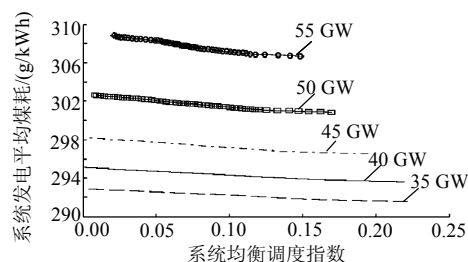


图 4 发电平均煤耗-均衡调度指数关系曲线

Fig. 4 Relation curve between average coal consumption of generation and ESI

图 4 反映了不同负荷水平下发电平均煤耗与均衡调度指数之间的替代关系。不难得出以下结论:

- 1) 给定负荷水平下, 当均衡调度指数接近 0, 即理想均衡发电调度模式下, 发电平均煤耗较高。
- 2) 给定均衡调度指数, 沿 Y 轴方向竖直向上表明, 随着系统负荷水平的增大, 系统发电平均煤耗增加。
- 3) 随着均衡调度指数的增加, 系统发电平均煤耗降低, 均衡调度指数增大能产生节煤效益。

在“系统负荷-系统发电平均煤耗-系统均衡调度指数”构成的三维空间中, 发电平均煤耗-均衡调度指数关系曲线将变成空间曲线, 如图 5 所示。

以图 5 中的空间曲线为边界构成一个空间曲

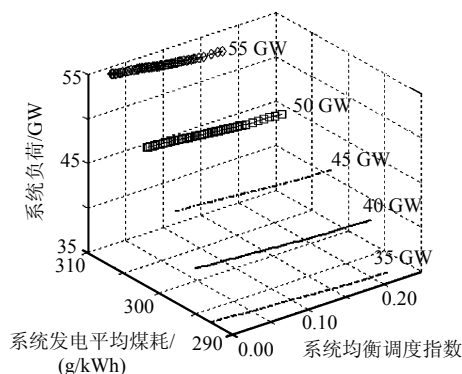


图 5 空间中的关系曲线

Fig. 5 Relation curve in space

面，这个曲面就是均衡发电调度与节能发电调度之间的决策优化空间，如图 6 所示。

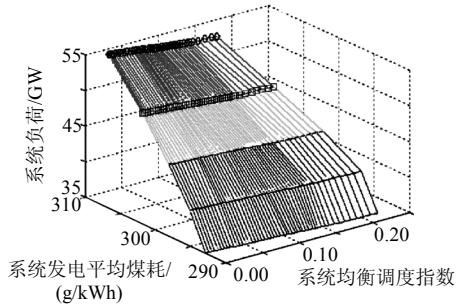


图 6 发电平均煤耗和均衡调度指数的优化空间
Fig. 6 Optimization space between average coal consumption of generation and ESI

随着负荷水平的增长，均衡调度指数的调整空间变小，其原因是为满足系统负荷，大部分机组的可调空间变小，各机组之间的负荷率比较接近。

图 6 的空间曲面就是各个负荷水平下，系统发电平均煤耗和均衡调度指数之间的决策优化空间。该图直观反映了系统当前运行点的系统发电平均煤耗和均衡调度指数，并且可以反映系统当前还存在多少节煤空间，有助于系统运行人员评估当前系统运行的经济性。

5.4 节煤潜力分析

为了测算广东电网实施节能发电调度的结构节煤效益，首先计算广东电网火电系统的基准加权平均煤耗，通过式(9)计算得到 309.92 g/kWh。按照式(10)可以计算得到不同负荷水平下的加权平均煤耗值，然后通过式(11)即可计算在不同的负荷水平下的结构节煤效益。广东电网节能发电调度的节煤效益如表 2 所示。

表 2 不同负荷水平的节煤效益对比

Tab. 2 Benefit comparison of coal conservation at different system load levels

负荷水平	1	2	3	4	5
运行节煤效益/%	0.43	0.48	0.54	0.58	0.70
结构节煤效益/%	5.50	4.78	3.79	2.36	0.38

表 2 中的节煤效益百分比如图 7 所示。

当负荷水平较低时，仅由低煤耗大容量机组发电即可满足负荷需求，运行机组的煤耗率都较低，

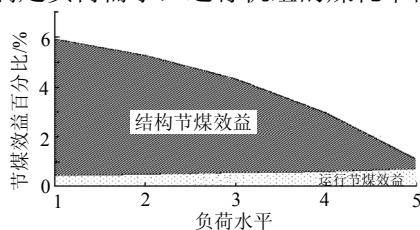


图 7 不同负荷水平下的节煤效益

Fig. 7 Benefit of coal conservation at different load levels

虽然系统结构节煤效益显著，但增大均衡调度指数带来的运行节煤效益较低。

随着负荷水平的增大，高煤耗机组获得参与发电的机会，此时增大均衡调度指数所带来的节煤效益增大，同时由于高煤耗机组参与发电使得结构节煤效益减小。

当负荷水平接近火电装机容量时，系统的结构节煤效益将下降到 0，此时的运行节煤效益最大。

于是可以通过计算不同负荷水平下系统节煤效益百分比来测算广东电网节能发电调度的日节煤潜力。例如，在负荷水平为 50 GW 时，节煤效益百分比为 2.94%，日节煤潜力为 4 009.40 吨标煤。

该结果是在不考虑系统网络约束，机组组合方式按照优先顺序法的前提下得到的，而且采用设计煤耗作为计算依据，因此计算结果偏于乐观，所得到的结果是理想情况下广东电网实施节能发电调度的最大节煤潜力。

5.5 边际替代率

为了求得不同负荷水平下，发电平均煤耗与均衡调度指数之间的边际替代率，对图 4 的发电平均煤耗-均衡调度指数关系曲线进行拟合，本文采用非线性最小二乘拟合方法，拟合模型如下式所示

$$y = ax^2 + bx + c \quad (12)$$

根据拟合得到的曲线方程，对其求导得到不同负荷水平下系统的边际替代率曲线，如图 8 所示。

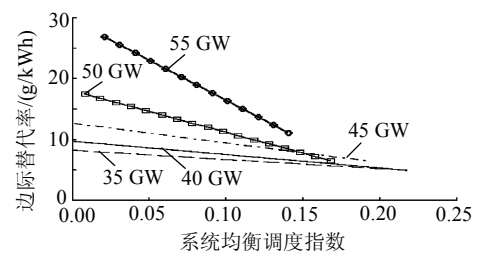


图 8 不同负荷水平下的边际替代率

Fig. 8 M_{AC} at different load levels

对于不同的负荷水平边际替代率呈现递减的规律。其物理含义是当均衡调度模式开始向节能发电调度过渡时，首先提高的是煤耗最低的机组(群)的负荷率，降低煤耗最高的机组(群)的负荷率，所产生的节煤效益最为显著；随着均衡调度指数的增大，低煤耗机组的可调空间缩小，此时全系统的节煤空间缩小，因此边际替代率呈现递减的规律。

根据不同负荷水平下的边际替代率曲线，系统运行人员可以直观地把握实施差异化调度能够带来的节煤效益。

6 结论

1) 本文在引入均衡调度指数的基础上, 建立了节能潜力分析模型, 借鉴微观经济学中商品无差异曲线的分析思路, 研究了在不同负荷水平下系统发电平均煤耗与均衡调度指数之间的相互替代关系, 结果表明, 两者的边际替代率呈递减规律。

2) 本文采用的系统发电平均煤耗-系统均衡调度指数关系曲线的分析方法, 可以用于评估改变均衡调度模式所带来的节煤效益, 也适用于不同发电调度模式下的指标对比, 能够直观地反映系统的运行状态和决策优化空间。

3) 本文将节能发电调度的节煤效益分解为结构节煤效益和运行节煤效益, 其物理概念明晰, 计算结果表明, 利用效益分解的思想来考虑节煤效益能够客观地反映节能发电调度的真实节能情况。

4) 本文建立了一套节能发电调度潜力分析方法, 并基于广东电网的实际情况进行了较为深入的分析, 测算了广东电网实施节能发电调度后的节煤潜力, 得出的一些结论从全新的视角反映了节能发电调度的实质内涵。

7 参考文献

- [1] 尚金成. 兼顾市场机制的主要节能发电调度模式比较研究[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 78-85.
Shang Jincheng. Comparative research on main energy-saving generation dispatching model considering market mechanism [J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 78-85(in Chinese).
- [2] 郭剑波. 我国电力科技现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 1-7.
Guo Jianbo. Present situation and development trend of powerscience and technology in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 1-7(in Chinese).
- [3] 国务院. 国务院办公厅关于转发发展改革委等部门《节能发电调度办法(试行)》的通知(国办发[2007]53号文)[Z]. 2007.
- [4] 李春山, 李志国, 李淑慧. 节能发电调度模式下东北电网运行存

在的问题及建议[J]. 电网技术, 2008, 32(S1): 14-16.

Li Chunshan, Li Zhiguo, Li Shuhui. Problems of northeast china power grid under energy-saving generation dispatching mode and the relative suggestions[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 14-16(in Chinese).

- [5] 常浩. 试论南方电网发展规划[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 15-21.
Chang Hao. A preliminary research on planning for development of southern power grid in China[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 15-21(in Chinese).
- [6] 陈旭, 左郑敏. 抽水蓄能电站在广东的发展分析[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 56-61.
Chen Xu, Zuo Zhengmin. Analysis on development of pumped-storage station in guangdong province[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 56-61(in Chinese).
- [7] 陈志刚. 广东电网需重点研究的问题[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 64-66,84.
Chen Zhigang. Some problem to be emphatically researched in Guangdong Power Grid[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 64-66,84(in Chinese).
- [8] 范明天, 张祖平, 杨少勇, 等. 具有抽水蓄能电厂的多区域电网日经济调度研究[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 57-61.
Fan Mingtian, Zhang Zuping, Yang Shaoyong, et al. Economic dispatch of multi-regional power network involving pump storage plants[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 57-61(in Chinese).
- [9] 毛晓明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 6-9,13.
Mao Xiaoming, Wu Xiaochen. Analysis on operational problems in South China AC-DC hybrid grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 6-9,13(in Chinese).



钟海旺

收稿日期: 2008-11-07。

作者简介:

钟海旺(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为经济调度、电力市场, E-mail: zhonghw04@mails.tsinghua.edu.cn;

康重庆(1969—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究方向为经济调度、电力市场、负荷预测、电力规划、电力经济与信息技术等, E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn。

(编辑 杨天和)

中国 3 企业入围全球企业社会责任 100 强

近日美国《财富》杂志公布了 2008 年全球 100 强企业社会责任排名, 上榜企业分布于 3 大洲 18 个国家。其中, 欧洲 51 家、美国 31 家、亚洲 16 家、拉丁美洲 2 家。国家电网、中石化、中石油 3 家中国企业入围, 其中, 国家电网排名较 2007 年度提升了 14 位, 获得中国企业历史最好排名。

《财富》全球 100 强企业社会责任排名的范围主要是当年《财富》全球 500 强中的前 100 名企业。排名标准包括公司战略、公司治理与管理、企业对社会公益事业的参与和投入、运营绩效共 4 个方面。在入围的 3 家中国企业中, 国家电网、中石化、中石油分别排名第 55 位、第 84 位、第 87 位。国家电网公司得分 45.9 分, 是中国企业迄今获得的最高得分。