

面向节能减排的电力系统发购电计划研究述评

文旭¹, 郭琳², 王俊梅²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 国网重庆电网电力交易中心, 重庆 400014)

摘要: 电力系统节能减排工作的开展对人类社会的可持续发展具有重要的现实意义, 为此从节能减排的视角对电力系统发购电计划研究现状展开了述评。首先, 指出了电力系统节能减排的研究背景和意义; 然后, 从发电调度计划和电力市场 2 个环节归纳总结归纳了其对于节能减排的考虑方式; 随后, 重点分析了发电调度计划以及电力市场购电计划优化方法的研究现状, 指出了其面临的关键问题。最后, 归纳提炼了该领域需重点突破的研究方向, 为该领域的深入研究提供了借鉴。

关键词: 电力系统; 电力市场; 节能减排; 发电计划; 购电计划; 述评

Overview of power dispatch and purchasing plan in power system from energy-saving and emission-reducing

WEN Xu¹, GUO Lin², WANG Junmei²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China;

2. Power Exchange Center of Chongqing Power Grid, Chongqing 400014, China)

Abstract: Since power system energy-saving and emission-reducing plays a significant and practical role in sustainable development for human society, the research overview of power system power-purchasing plan is presented from the perspective of energy-saving and emission-reducing. First of all, this paper indicates the research background and significance of power system energy-saving and emission-reducing; then, the processing manners are summarized for energy-saving and emission-reducing according to power dispatch plan and electricity market respectively. The overview of optimization methods for solving power dispatch plan and power-purchasing plan in electricity market are stated and analyzed, and these key problems are pointed out as well. Finally, those important research directions that need to break through are concluded and refined, while providing the reference for this area of research in depth.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177178 and No. 51007098).

Key words: power system; electricity market; energy-saving and emission-reducing energy; power-purchasing plan; power dispatch plan; overview

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)09-0136-09

1 电力系统节能减排的研究背景及其意义

能源是人类社会生存与发展的物质基础, 能源不足是制约世界经济发展的瓶颈之一。我国能源消费已占世界总量的 13.6%, 同时也是煤炭消费第一大国和电力消费第二大国^[1], 但我国人均能源拥有量仅为世界平均水平的 45%左右。截止 2013 年底, 我国电力总装机容量中火电约占 71.5%, 其发电效

率却低于国际先进水平达 10%^[2], 可见我国电力系统节能降耗工作的开展显得刻不容缓。

另一方面, 我国电力行业对环境的污染极为严重。据统计, 我国电力行业每年排放的粉尘、CO₂、SO₂、NO₂ 以及灰渣等造成环境污染带来的损失约为 2 000 亿元, 占全社会污染总量的 40%左右。2009 年 11 月 26 日, 我国政府提出到 2020 年单位 GDP 碳排放量比 2005 年减少 40%~45%^[3]。在我国经济持续高速增长的背景下, 电力行业的减排更充满艰巨性。党的十八大报告更明确提出“全面促进资源节约加强节能减排, 是贯彻落实科学发展观、构建社会主义和谐社会战略思想的重大举措, 也是加快

基金项目: 国家自然科学基金科研项目 (51177178, 51007098); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室项目资助(重庆大学) (2007DA10512710204)

建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需要”^[4]。

作为社会能源消费和环境污染的主要来源,电力系统在上述节能与减排的双重压力之下,从实现节能减排的手段来看,主要包括发电调度计划、电力市场、电力规划、能源政策等四个层面^[5]。本文将重点关注后述二者已确定的前提下,在电力系统发电调度和电力市场两个层面,从节能减排的视角就发/购电计划研究展开述评,以期为该领域的深入研究提供借鉴。

2 发电调度计划与电力市场对节能减排的考虑

2.1 发电调度计划对节能减排的考虑

从节能减排的角度看,电力系统发电计划调度模式主要包括节能发电调度计划模式、环境经济发电调度计划模式以及含节能减排因素的经济发电调度计划模式^[5-6]。其调度目标可分别简述为火电机组的运行能耗最低、火电机组的运行费用和污染气体排放综合最低、火电机组运行费用最低等三个方面。

1) 节能发电调度计划模式^[5]。该模式是我国电力行业结合其自身特殊的电源结构,在原有的“三公”经济发电调度计划基础上提出的。其主要原因在于目前我国电力行业以火电为主,且火电机组的煤耗率较高(或称能耗水平较低),其重点强调是降低一次能源的消耗问题,即节能问题。

2) 环境经济发电调度计划模式^[6]。该模式主要由欧美等发达国家首先提出,由于这些国家火电机组的煤耗率较低以及其电源结构以清洁能源为主,其重点强调的是火电机组调度运行中的污染气体排放(即减排问题)和经济性的协调。

3) 含节能减排因素的经济发电调度计划模式^[7]。该模式在经济发电调度计划模式的框架内将电力系统调度运行中各机组对应的能耗价值、环保价值以及对系统安全运行的影响等诸多因素采用可量化的货币价值,再利用传统的经济发电调度计划模式进行发电调度。需指出的是,这种模式本质上是采用了市场化的方法将各机组的能耗、污染气体以及对系统安全运行等的影响转化到了统一的货币化度量平台,其运行条件必须依赖于电力市场的成熟以及交易规则的完善。

2.2 电力市场对节能减排的考虑

基于市场化的手段考虑电力系统节能减排主要包括以下五种模式:节能电力市场模式、基于外部成本内置法的电力市场模式、基于排放权交易的电力市场模式、基于可再生能源电价政策的电力市

场模式以及基于发电权交易的电力市场模式。

1) 节能电力市场模式^[8]。该模式主要借鉴了节能发电调度计划的思想,通过在电力市场中增加能耗惩罚或者能耗约束的方式,使得购电单位在满足自身经济效益最大化的同时,还要兼顾社会效益最大化,从而达到促进电力系统节能减排的目的。

2) 基于外部成本内置法的电力市场模式^[9]。该模式采用了外部成本内置法的方法对火电机组的化石燃料外部环境成本进行测算和货币化,并将其计入到发电燃料的内部成本中。该方法本质上是对市场交易中各售电单位的原始报价进行了环境因素的修正,从而使得电力市场的交易主体在追求经济效益最大化的过程中蕴含了环境污染最小化的思想。

3) 基于排放权交易的电力市场模式^[10]。排放权交易是为减少温室气体排放而设立的,其本质思想是任何企业要排放温室气体,则其必须拥有相应数量的排放权。排放权不足的企业可以从排放权市场上购买排放权;而排放权剩余的企业可在市场上出售排放权,获得收益。排放权的价格由市场供需决定,排放权交易产生的成本或者收益其实就是外部环境成本的货币化体现。

4) 基于可再生能源电价政策的电力市场模式^[11]。该模式主要是为了促进可再生能源的发展,为避免可再生能源由于技术成本较高无法参与市场竞争的一种保护政策。该模式为可再生能源企业提供了有利的市场环境,可以更好地促进电力系统节能减排效益的最大化。

5) 基于发电权交易的电力市场模式^[10]。发电权是指各类发电机组在政府下发的年度发电量计划或者通过发电权交易竞争获得的发电量,而发电权交易是指发电企业将部分或全部发电权电量有偿转让给有剩余发电能力的高效机组。该交易作为现阶段电力市场节能减排的重要品种,是通过市场化手段实现电力行业节能减排目标的重要手段,而实际中也取得了节能降耗和保护环境的双重实效。

3 考虑节能减排的发购电计划研究述评

3.1 考虑节能减排的发电调度计划研究述评

节能发电调度计划是实现节能降耗的重要手段,现有文献无论从国家层面还是结合节能发电调度计划试点运行均产生了大量研究成果。如2007年8月,文献[5]从国家层面制定的《节能发电调度办法(试行)》成为指导节能发电调度计划工作开展的纲领性文件。在此背景下,文献[12-14]分别结合广东、四川和贵州节能发电的实施情况建立了节能发电调度计划模型。其中文献[12]重点考虑了网络约束、

时段耦合和网损等3个问题,并提出了启发式的2阶段算法求解所建模型,该算法能够较好地处理“寻优”与“时段耦合”之间的关系。文献[13]重点从实时节能调度的角度建立线性化的增量交易模型,并基于等微增率原理最优次序法求解所建模型,该算法具有计算快速、鲁棒性好的优点。文献[14]重点考虑网损对节能调度计划的影响,该模型采用了2阶段算法求解。

然而,上述文献均在日或实时调度的时间范畴内研究节能发电问题,为了实现节能效益时间尺度上的统筹,也有一些文献在月度范畴内建立了节能发电调度计划模型并给出了求解算法。如文献[15]定性提出了建立月度节能发电调度计划模型的基本框架,并给出了其与日发电调度计划的协调方法和求解该类问题的通用算法,即将模型中的约束条件适当转化后利用标准的非线性优化软件包求解。文献[16-17]则利用机组有序启停方式建立了月度节能发电调度计划模型,以实现在“三公调度”基础上系统煤耗最小,所建模型采用启发式算法求解。

上述文献重点从发电侧节能降耗的角度开展研究,没有考虑需求侧对发电调度计划节能降耗的影响,而实际中通过需求侧管理也能在一定程度上实现节能降耗。由此,文献[18-19]提出一种基于需求侧节能降耗的节能发电调度计划模型;文献[20-21]则建立了考虑采暖需求管理的节能发电调度计划模型。上述模型均采用了成熟的非线性规划软件包求解。

鉴于上述文献的优化空间均在一个省网内,其优化空间有限,为了在更大的空间范畴实现发电调度计划节能降耗的统筹,文献[22]提出了建立考虑空间尺度协调的节能发电调度计划基本框架;文献[23-25]则重点引入了经济学中高低匹配的思想在跨省的区域电力市场范畴内建立了节能发电调度计划模型,其中文献[24-25]还给出了基于撮合交易的启发式算法求解所建模型的思路。

考虑到采用集中式的节能发电调度计划时发电企业的自主权受到较大约束,从而影响了节能发电调度的深入开展,文献[26]通过授予发电企业较大自主权的方式,更有效地将发电指标从能耗高机组向能耗低机组的转移,从而实现了发电调度计划的节能降耗。而文献[27]则进一步考虑发电侧、用户和调度中心的三方互动,初步构建了智能电网环境下互动式节能发电调度计划体系的基本框架。目前该类问题还处于定性探索性研究阶段,未见具体的模型和求解算法的研究文献报道。

上述文献均没有考虑污染气体排放对节能发电

调度计划的影响,为了兼顾污染气体排放的控制,文献[28-30]从节能和减排2个角度建立节能发电调度计划多目标模型。其中,文献[28]采用了拉格朗日松弛算法求解模型;文献[29]通过对煤耗微增率特性曲线分段线性化后,采用线性规划法求解所建模型;文献[30]采用了非线性多目标加权模糊优化算法求解所建模型。

在环境经济发电调度计划中,文献[31-32]提出了在经济发电调度计划中考虑污染气体排放管理的基本思想。文献[33-35]建立了纯火电系统的环境经济发电调度计划模型。前者采用了混沌遗传混合优化算法求解;后两者均采用经典的非支配排序遗传算法解。文献[36]重点研究了水火电力混合系统的环境经济发电调度计划模型,采用了多目标差分进化算法求解所建模型。文献[37]建立了考虑含热电联产机组的环境经济发电调度计划模型,模型采用了经典的遗传算法求解。另外,也有文献重点在市场环境下展开了对环境经济发电调度计划模型的研究。如文献[38]在排污权交易的市场背景下建立了环境经济发电调度计划模型;文献[39]则强调了更广域的市场环境下实现节能减排来建立环境经济发电调度计划模型,所建模型采用了基于电网分解与协调原理的分布式并行算法求解。

显然,上述文献均没有考虑风电出力、负荷功率的随机性对发电调度计划节能减排的影响,无法满足未来大规模绿色能源接入以及负荷需求多样化的需要。考虑风电出力,负荷随机性的节能减排发电调度模型,其重点在于强调如何兼顾风电良好的节能减排特性和出力随机性之间的矛盾,以使得所建立的发电调度计划模型能够确保在风电出力和负荷功率随机性造成电网运行条件恶化的环境下,尽可能实现电力系统发电调度计划节能减排和经济效益的综合最优化。

考虑风电出力随机性对节能发电调度计划的影响,文献[40-41]在日调度周期内分别建立了负荷分配和机组组合节能发电调度模型。前者采用了遗传算法求解,后者采用了量子遗传算法求解。文献[30]综合考虑风电、水电的随机性,采用Monte Carlo随机模拟的方法首先模拟出风电、水电电量,再以此作为已知值建立节能发电调度计划模型。由于在建立模型前,模型中的风电和水电等数据是已知的模拟值,故本质上该模型仍属于确定性的模型范畴。同时还需指出的是,由于该模型研究的是月度时间范畴,忽略负荷随机性有待商榷。

电力市场环境下考虑风电等随机性的环境经济发电调度计划,其基本思想是将各类机组的环境价

值、能耗价值以及对电网安全运行的正面或者负面影响,均折算成经济价值,再进行经济发电调度计划的决策。如文献[43]就是这一思路的最好佐证。基于上述思路的延续,文献[44]进一步考虑了风电备用容量补偿成本及风电场“负效率”运行的影响,建立了基于风电场极限穿透功率惩罚成本的经济发电调度计划模型。考虑所建模型是一个复杂的非线性问题,该模型采用了遗传算法求解。文献[45]则通过加入备用罚函数、风电盈余罚函数和污染评估罚函数来建立考虑风电成本的发电调度模型,该模型也采用了遗传算法求解。文献[46]通过分析风电出力可能被高估和低估的概率,对风电接入将导致系统维持稳定运行的成本增加风险加以考虑,构建了含风电机组的电力系统环境经济发电调度计划模型,所建模型采用了非劣排序微进化的多目标优化算法求解。文献[47]则重点通过引入利润备用容量惩罚成本构建含风电机组的经济发电调度计划模型,由于所建模型是在含机会约束的随机规划框架内建模,该模型采用了Monte Carlo和遗传算法相结合的智能算法求解。

鉴于目前全球温室效应突出,考虑节能减排的环境经济发电调度计划中,也有重点从温室气体CO₂排放的角度研究低碳发电调度。本质上而言,该类模型是节能减排发电调度模型的具体化(即将多种排放气体的控制改变为直接针对CO₂)。如文献[48-49]均将CO₂的排放作为一类可调度的资源,在综合考虑低碳电力技术、碳成本和碳约束等要素的基础上,建立了低碳电力调度模型以协调“电平衡”与“碳平衡”。

一般而言,考虑节能减排的发电调度计划模型会在一定程度上增大系统网损,而在随机环境下发电调度的系统网损会变得愈加明显,基于这一思考,文献[50]建立考虑交流潮流安全约束的环境经济发电调度计划模型,从而确保了优化结果的最优性。该模型采用了细菌觅食算法(Bacterial Foraging Algorithm)求解。

鉴于风电出力随机性较大,传统文献中只考虑上旋转备用的发电调度计划模型已不能够满足发电调度的需要,由此,含风电出力随机性的发电调度模型需要考虑上下两种旋转备用。其中,上旋转备用用来应对风电场出力突然较少或者火电机组强迫停运;下旋转备用用于应对负荷突然减少或风电场出力突然增加。基于这一客观事实,文献[51]重点考虑系统上、下旋转备用容量的影响,构建了含风电场的环境经济发电调度计划模型,所建模型采用了差分进化算法求解。文献[52]通过计算下一个调

度日风电场实际出力的条件期望与计划出力的差值,确定了风电对系统上、下旋转备用的需求来建立环境经济发电调度模型,所建模型采用了粒子群算法求解。文献[53]则提出了考虑风电渗透功率的增、减出力旋转备用量化模型,所建模型采用了粒子群算法求解。文献[54]通过定义风电功率间歇波动引起系统备用紧张程度指标以规范化风电备用风险,从而建立了一体化制定经济发电与旋转备用的经济发电调度计划模型。所建模型采用分解交替迭代求解策略,即将原问题分解为经济发电和旋转备用2个混合优化子问题求解。

为应对风电随机性导致的电网运行安全问题,也有文献将风电出力作为“可控”的优化变量。如文献[41,55]认为在风电预测出力范围之内其出力可向下调整,从而避免了风电出力随机性可能带来的网络安全问题。本质上而言,这种思路在风电出力无法满足电网运行安全要求时,采用了“弃风”手段来确保调度方案的可行性。这在风电等随机性绿色能源的渗透率较高,以及其随机性较大时的电网系统中具有一定实用价值。

严格意义上讲火电机组的出力存在“阀点效应”,为了使得建立的发电调度计划节能减排模型更具合理性,应该考虑火电机组阀点对发电调度计划节能减排的影响。基于这一认识,文献[56-57]建立了含火电机组阀点效应的发电调度计划模型。但需指出的是,阀点效应的考虑改变了机组能耗与出力之间函数关系的单调性,大幅增加了模型的求解难度。基于此,上述文献均采用了智能算法中的粒子群算法求解。

文献[57-59]考虑风电出力、负荷功率的随机性,建立了多场景环境经济发电调度计划模型。这类模型的优点在于充分描述了风电出力和负荷随机性对环境经济发电调度计划的影响,但其优化结果的准确性依赖于场景数的多少。当场景数较大时模型求解非常困难;当场景数较少时其优化结果的最优性又得不到保证。上述模型均采用了改进的粒子群算法求解,以提高模型求解效率和优化结果的最优性。

纵观发电调度计划节能减排优化方法的研究现状,节能发电调度计划、环境经济发电调度计划以及到考虑节能减排因素的经济发电调度计划三者本质上均是在追求在满足机组和电网安全等各种约束条件下,如何兼顾节能减排以及经济效益最大化问题。现有文献重点研究了各类随机因素对发电调度计划在运行条件的影响,如旋转备用、电网安全、网损等因素。但是,针对发电调度计划中节能减排问题,现有文献均停留在含确定性的节能减排评估

指标优化模型的研究范畴,特别是还缺乏节能减排的风险防范和管理意识。

3.2 市场环境下考虑节能减排的购电计划研究述评

在西方发达国家,由于建立了严格的环境监管体系、提高了排放税收额度、引入了大气排放物(主要是CO和NO_x)的额度交易等措施,其考虑节能减排的市场机制较为成熟,从而使得电力行业中的发电企业不得不将环保上的成本和效益体现在发电报价中,通过市场机制执行了政府在节能和环保上的导向作用。所以,在西方发达国家,现有的市场环境下的购电计划模型,在考虑节能减排因素后依然适用。在我国,由于电力市场还处于发展的初级阶段,且还面临节能减排的巨大压力,故非常有必要结合我国电力系统节能减排的实际情况,再借鉴成熟电力市场的研究经验来研究基于市场化手段的电力系统节能减排问题。基于以上认识,有学者针对我国电力系统节能减排的实际情况提出了节能电力市场的概念,并对其进行了探索性研究。

文献[60]提出了采用市场机制的节能发电调度计划安排原则及节能发电的调度模式,为节能减排与电力市场的结合打下了基础。文献[8]定性探讨了节能优先、能耗电价和能耗约束三种节能电力市场模式的初步方案。文献[61]则明确提出了兼顾节能减排和电力市场的初步方案,但对于如何进行节能减排与电力市场的深度结合还需作深入研究。文献[62]明确提出了节能发电调度计划与电力市场两个层面的节能降耗模型,在节能发电调度计划的技术层面中考虑煤耗、网损、排污等因素确定调度优先级;而在电力市场层面则根据交易双方的报价水平以及引起网损的变化来确定交易优先级。延续上述研究思路,文献[63]结合我国湖北省在电力市场开展节能减排的实际情况,初步设计了涵盖年度与月度电力市场的节能减排交易模式,其核心思路是首先确保新能源、清洁机组分配到合理的发电空间,然后再以购电费用最小(社会福利最大)为原则安排火电等机组的电能交易。文献[64]明确提出了准市场化的节能发电调度计划模式。文献[65]提出了能耗权交易和能耗折价标准的概念,实现了能量、能耗、排污三者统一的市场评价标准。在此基础上再按照社会综合成本最小化的目标来优化调度发电机组。在上述研究成果基础上,文献[66]进一步提出了细分节能电力市场模式的概念,但市场细分后由于各市场的竞争者较少,该市场模式存在市场力干扰的可能性极大。

上述文献还处于对节能电力市场模式设计的初步阶段,具体表现在:这些节能电力市场模式以定

性研究为主,没有形成完整的节能电力市场模式;没有涉及到市场主体在节能电力市场环境下购电方法的研究;没有考虑绿色能源和负荷需求随机性对市场交易节能减排的影响。另一方面,就区域电力市场环境下的购电计划模型来看,文献[67]只考虑了电量的优化分配问题,也没有考虑绿色能源、负荷需求等随机性因素的影响,其研究成果无法满足我国广域电力市场环境下通过跨省交易实现节能减排的需要。

4 电力系统节能减排还需深入研究的问题

如前所述,电力系统节能减排问题是全球学术界和工程界共同关注的重大问题,然而在智能电网和电力市场的建设中,现有研究无法满足电力系统节能减排的诸多诉求,提炼目前的发购电计划研究现状,主要有如下3个问题还需要作深入研究。

1) 从随机环境下发购电计划节能减排角度来看,现有文献均停留在含确定性的节能减排度量指标的优化模型研究范畴,特别是还缺乏节能减排的风险管理和防范意识。由此,在随机环境下,如何实现发购电计划节能减排的风险管理还需要深入研究。

2) 从广域电力市场环境下发购电计划节能减排角度来看,现有文献在电网结构较为薄弱或者系统峰谷差较大的环境下,可能无法满足特高压环境下跨省发/购电节减排的需要。由此,如何计及系统调峰和网络潮流安全约束,实现广域电力市场发购电计划节能减排的优化及风险管理还需作深入研究。

3) 从智能电网和电力市场的建设进程来看,现有发购电计划研究中没有考虑电动汽车、超级储能装置、源荷互动等对电力系统节能减排的影响,而上述环节的研究和发展方兴未艾。由此,如何计及上述因素对发购电计划节能减排的影响及其风险管理还需作深入研究。

参考文献

- [1] STERN N. The economics of climate change: the stern review[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 国家能源局发展规划司. 能源规划数据手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 198-200.
- [3] ZHAO Xiaoli, WU Longli, ZHANG Sufang. Joint environmental and economic power dispatch considering wind power integration: empirical analysis from Liaoning Province of China[J]. Renewable Energy, 2013, 22(12): 260-265.

- [4] 学习出版社网站. 党的十八大报告[EB/OL]. [2013-06-10]. http://www.wenming.cn/xxph/sy/xy18d/201211/t20121119_940452.shtml.
- [5] 国务院办公厅. 国办发[2007]53号文件: 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[EB/OL]. [2012-12-31]. http://www.gov.cn/zwqk/2007-08/07/content_708486.htm.
- [6] TALAQ J H, EL-HAWARY F, EL-HAWARY M E. A summary of environmental economic dispatch algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1508-1516.
- [7] LEE J C, LIN W M, LIAO G C. Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system[J]. Electrical Power and Energy System, 2011, 33(2): 189-197.
- [8] 耿建, 高宗和, 张显, 等. 节能电力市场设计初探[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 18-21.
GENG Jian, GAO Zonghe, ZHANG Xian, et al. A preliminary investigation on power market design considering social energy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 18-21.
- [9] WEI Xuehao, YAN Zheng, JIA Yanbing, et al. A Generation dispatch model internalizing external costs of power plants[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(3): 1027-1036.
- [10] 王雁凌, 张粒子, 杨以涵. 基于水火置换的发电权调节市场[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 131-136.
WANG Yanling, ZHANG Lizi, YANG Yihan, et al. Adjusting market of generation rights based on hydro-thermal exchange[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 131-136.
- [11] HOU Ping, ZHOU Jiaqi. Power purchase strategies under the condition of power market[C] // International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002.
- [12] 张宁, 陈慧坤, 骆晓明, 等. 广东电网节能发电调度计划模型与算法[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 11-15.
ZHUANG Ning, CHEN Huikun, LUO Xiaoming. Model and algorithm of energy-conservation based generation dispatching for Guangdong Power Grid[J]. Grid Power System Technology, 2008, 32(24): 11-15.
- [13] 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[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 89-92.
- [14] 赵维兴, 林成, 孙斌, 等. 安全约束条件下综合煤耗最优的节能调度算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 18-22.
ZHAO Weixing, LIN Cheng, SUN Bin, et al. Study on economic dispatch method of the optimal composite coal loss under security constraints[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 18-22.
- [15] 尚金成. 基于时间尺度的节能发电优化调度协调模型及算法[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 56-61.
SHANG Jincheng. Coordination model and algorithm of energy-saving power generation dispatching based on time scale[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 56-61.
- [16] 夏清, 陈雨果, 陈亮. 考虑月度机组组合的节能发电调度模式与方法[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 27-34.
XIA Qing, CHEN Yuguo, CHEN Liang. Establishment of mode and method for energy-conservation monthly unit commitment considering dispatching[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 27-34.
- [17] 滕晓毕, 吴臻, 黄静, 等. 面向低碳发展的燃煤机组有序调停模型和算法[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 33-39.
TENG Xiaobi, WU Zhen, HUANG Jing, et al. Model and algorithm of coal-fired unit cyclic operation toward low-carbon development[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 33-39.
- [18] 张鹏, 刘继春, 田伟. 基于需求侧减排的节能调度及其改进 NSGA-II 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 42-48.
ZHANG Peng, LIU Jichun, TIAN Wei, et al. Demand side emission reduction based energy-saving dispatch and the improved NSGA-II method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 42-48.
- [19] RAN Xiaohong, ZHOU Renjun. The multi-objective optimization dispatch of energy-saving coordination of combined cold heat and power[C] // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2012.
- [20] 龙虹毓, 徐瑞林, 马建伟, 等. 基于采暖需求侧管理的风电机组节能调度[J]. 太阳能学报, 2012, 18(4): 609-613.
LONG Hongyu, XU Ruilin, MA Jianwei, et al. Optimization of electric grid energy-saving dispatch based on space heating demand side management[J]. Acta Energetica Sinica, 2012, 18(4): 609-613.
- [21] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, ROOSTA A, et al. A new multi-objective reserve constrained combined heat and power dynamic economic emission dispatch[J]. Energy, 2012, 42(1): 530-545.
- [22] 尚金成, 刘志都. 节能发电调度协调理论及应用[J].

- 电力自动化设备, 2009, 29(6): 109-114.
SHANG Jincheng, LIU Zhidu. Coordination theory of energy-saving generation dispatch and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 109-114.
- [23] 范玉宏, 张维, 叶永松, 等. 基于机组煤耗高低匹配替换的区域电网节能调度模型[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 78-81.
FAN Yuhong, ZHANG Wei, YE Yongsong, et al. Energy conservation generation dispatching mode in regional power network based on high-low matching of coal consumption rates of units[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 78-81.
- [24] 范玉宏, 张维, 韩文长, 等. 区域电网节能发电调度模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 33(16): 107-111.
FAN Yuhong, ZHANG Wei, HAN Wenchang, et al. Research on energy-saving generation dispatching model in regional grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 33(16): 107-111.
- [25] 陈皓勇, 张森林, 张尧. 区域电力市场环境节能发电调度方式[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 16-21.
CHEN Haoyong, ZHANG Senlin, ZHANG Yao. Energy-saving power generation dispatching in regional electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 16-21.
- [26] 黎灿兵, 尚金成, 李响, 等. 集中调度与发电企业自主调度相协调的节能调度体系[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 112-118.
LI Canbing, SHANG Jincheng, LI Xiang, et al. Novel energy-saving generation dispatching system based on the coordination of centralized dispatching and autonomy-dispatching of generation companies[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 112-118.
- [27] 李俊雄, 黎灿兵, 曹一家, 等. 面向智能电网的互动式节能调度初探[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 20-25.
LI Junxiong, LI Canbing, CAO Yijia, et al. Preliminary investigation on interactive energy-saving dispatch oriented to smart grid system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 20-25.
- [28] HECTOR. Short-term generation scheduling under a SO₂ emissions allowances market[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74(2): 257-265.
- [29] 韩彬, 周京阳, 崔晖, 等. 引入 SO₂ 排放惩罚价格因子的节能减排发电调度模型及实用算法[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 50-54.
HAN Bin, ZHOU Jingyang, CUI Hui, et al. An energy conservation and emission reduction based power generation scheduling model leading in factor of penalty price due to SO₂ emission and its practical algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 50-54.
- [30] 温丽丽, 刘俊勇. 混合系统中、长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 24-29.
WEN Lili, LIU Junyong. Monte carlo simulation of medium and long-term generation plan in hybrid power system based on environmental/economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 24-29.
- [31] RAMANATHAN R. Emission controlled economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4): 1994-2000.
- [32] ELAIW A M, XIA X, SHEHATA A M. Minimization of fuel costs and gaseous emissions of electric power generation by model predictive control[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 32(1): 1-16.
- [33] 王欣, 秦斌, 阳春华, 等. 基于混沌遗传混合优化算法的短期负荷环境经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 128-133.
WANG Xin, QIN Bin, YANG Chunhua, et al. Short term environmental/economic generation scheduling based on chaos genetic hybrid optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 128-133.
- [34] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using non dominated sorting genetic algorithm-II[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30(2): 140-149.
- [35] 江兴稳, 周建中, 王浩, 等. 电力系统动态环境经济调度建模与求解[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 385-391.
JIANG Xingwen, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Research on multi-objective environmental economic scheduling model of hydrothermal power system and its solving algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 385-391.
- [36] 卢有麟, 周建中, 王永强, 等. 水火电力系统多目标环境经济调度模型及其求解算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 93-100.
LU Youlin, ZHOU Jianzhong, WANG Yongqiang, et al. Research on multi-objective environmental economic scheduling model of hydrothermal power system and its solving algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 93-100.
- [37] 文旭, 王俊梅, 郭琳, 等. 计及污染气体排放风险的多目标随机动态环境经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 11-16.
WEN Xu, WANG Junmei, GUO Lin, et al. Multi-objective stochastic dynamic economic missionis patch model considering pollution as esmission risk[J]. Electric

- Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 11-16.
- [38] 白忠彬, 温步瀛, 文福栓. 排污权交易制度下电力系统多目标环境经济优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2012, 13(1): 29-34.
BAI Zhongbin, WEN Buying, WEN Fushuan. Multi-objective environmental and economical power optimal dispatch under emissions trading system[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 13(1): 29-34.
- [39] 喻洁, 黄学良, 夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 129-136.
YU Jie, HUANG Xueliang, XIA Anbang. Environmental economic dispatch based on sub-area coordinated optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [40] LIU X, XU W. Economic load dispatch constrained by wind power availability: here-and-now approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 2-9.
- [41] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排下含风电场多目标机组组合建模及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 33-37.
ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinquan, CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment modeling and optimization for energy-saving and emission reduction in wind power integrated system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 33-37.
- [42] LEE J C, LIN W M, LIAO G C. Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system[J]. Electrical Power and Energy System, 2011, 33(2): 189-197.
- [43] 袁铁江, 晁勤, 吐尔逊·伊不拉音, 等. 面向电力市场的含风电电力系统的环境经济调度优化[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 131-135.
YUAN Tiejia, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin, et al. Electricity market-oriented optimization of environmental economic dispatching for power grid containing wind power[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 131-135.
- [44] 袁铁江, 晁勤, 吐尔逊·伊不拉音, 等. 大规模风电并网电力系统动态清洁经济优化调度的建模[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 7-13.
YUAN Tiejia, CHAO Qin, TOERXUN Yibulayin, et al. Optimized economic and environment-friendly dispatching modeling for large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 7-13.
- [45] REN Boqiang, JIANG Chuanwen, PENG Minghong. Short term economic scheduling model including wind power based on improved genetic algorithm and risk management[J]. Modern Electrical Power, 2010, 37(1): 76-80.
- [46] 孙惠娟, 彭春华, 易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 123-128.
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 123-128.
- [47] 田廓, 曾鸣, 鄢帆, 等. 考虑环保成本和风电接入影响的动态经济调度模型[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 55-60.
TIAN Kuo, ZENG Ming, YAN Fan, et al. A dynamic economic scheduling model considering environmental protection cost and impact of connecting wind power to power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 55-60.
- [48] FENG Tao, LI Xueping. Low-carbon emission/economic power dispatch using the multi-objective bacterial colony chemotaxis optimization algorithm considering carbon capture power plant[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 35(1): 106-112.
- [49] 张晓辉, 董兴华. 含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 24-31.
ZHANG Xiaohui, DONG Xinghua. Research on multi-objective scheduling for low-carbon power system with wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 24-31.
- [50] HOTA P K, BARISAL A K, CHAKRABARTI R. Economic emission load dispatch through fuzzy based bacterial foraging algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(7): 794-803.
- [51] 邱威, 张建华, 刘念. 含大型风电场的环境经济调度模型与解法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 8-16.
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian. Model and solution for environmental/economic dispatch considering large-scale wind power penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 8-16.
- [52] 张海峰, 高峰, 吴江, 等. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1298-1303.
ZHANG Haifeng, GAO Feng, WU Jiang, et al. A dynamic economic dispatching model for power grid containing wind power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1298-1303.
- [53] 陈功贵, 陈金富. 含风电场电力系统环境经济动态调度建模与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 27-36.
CHEN Gonggui, CHEN Jinfu. Environmental economic dynamic dispatch modeling and method for power systems integrating wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(17): 27-36.
- [54] 姚瑶, 于继来. 计及风电备用风险的电力系统多目标

- 混合优化调度[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 118-124.
- YAO Yao, YU Jilai. Multi-objective hybrid optimal dispatch of power systems considering reserve risk due to wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 118-124.
- [55] 陈道君, 龚庆武, 张茂林, 等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 10-17.
- CHEN Daojun, GONG Qingwu, ZHANG Maolin, et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 10-17.
- [56] LEE J C, LIN W M, LIAO G C. Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(6): 189-197.
- [57] ABARGHOOEE R A. Stochastic dynamic economic emission dispatch considering wind power[C] // 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, 2011: 158-161.
- [58] AGHAEI J, NIKNAM T, ABARGHOOEE R A, et al. Scenario-based dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 47: 351-367.
- [59] BAHMANI-FIROUZI B, FARJAH B, AZIZIPANAH-ABARGHOOEE R. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. Energy, 2013, 50(1): 232-244.
- [60] 尚金成. 兼顾市场机制与政府宏观调控的节能发电调度及运作机制[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 55-62.
- SHANG Jincheng. Research on energy-saving generation dispatching mode and operational mechanism considering market mechanism and government macro-control[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 55-62.
- [61] 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[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 99-103.
- [62] 傅书暹, 王海宁. 关于节能减排与电力市场的结合[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 31-36.
- FU Shutí, WANG Haining. On coordination of energy saving and reduction of pollution policy with electricity market reform in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 31-36.
- [63] 聂江洪, 曾伟民. 考虑节能降耗的湖北省电力市场模式设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 91-96.
- NIE Jianghong, ZENG Weimin. Design for Hubei Province power market considering energy consumption and corresponding emissions saving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 91-96.
- [64] 张粒子, 谢国辉, 朱泽, 等. 准市场化的节能发电调度模式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 29-32.
- ZHANG Lizi, XIE Guohui, ZHU Ze, et al. Quasi marketization model of energy-saving generation dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 29-32.
- [65] 魏学好, 李瑞庆, 陈宇晨. 具有节能减排内核的电力市场新模式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 26-28.
- WEI Xuehao, LI Ruiqing, CHEN Yuchen. A new electricity power market model embedding core function of energy saving and emission reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 26-28.
- [66] 鲁刚, 文福拴, 马莉, 等. 节能细分电力市场模式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 33-39.
- LU Gang, WEN Fushuan, MA Li, et al. A segment model for energy-saving electricity markets system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 33-39.
- [67] 文旭, 颜伟, 王俊梅, 等. 考虑跨省交易能耗评估的区域节能市场与随机规划购电模型[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 500-506.
- WEN Xu, YAN Wei, WANG Junmei, et al. Regional energy-saving electricity market and stochastic programming power purchasing model considering assessment on energy consumption in trans-provincial transaction[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 500-506.

收稿日期: 2014-07-29

作者简介:

文旭(1980-), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制及风险评估, 电力市场; E-mail: wenxu@cqu.edu.cn

郭琳(1969-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力市场运行与管理, 电力系统节能减排;

王俊梅(1964-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力市场运行与管理, 电力系统节能减排。

(编辑 姜新丽)