

计及节能风险评估的月度随机规划调度模型

郭琳¹, 文旭², 赵志强¹, 黄磊¹, 赵蕾¹, 蒋振涌¹, 肖锋³

(1. 国网重庆电网电力交易中心, 重庆 400014; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;
3. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211006)

摘要: 针对目前确定性的节能评估无法满足随机环境下节能调度节能降耗风险管理的需要, 建立了计及节能风险评估的月度随机规划调度模型。考虑实际调度中机组出力与煤耗率具体的函数关系, 建立了节能调度机组单位调度电量节能效益评估指标。在此基础上, 考虑风电出力、负荷功率等不确定性因素对节能调度节能效益评估的影响, 借鉴经济学中半绝对离差风险的概念, 建立了节能调度节能风险评估指标。在随机规划理论框架内, 建立了计及节能风险评估的月度调度模型。其中, 为了兼顾所建模型求解效率和精度的双重需要, 机组启停和出力变量优化粒度设定为日峰、腰、谷典型负荷状态。采用目标相对占优与内嵌 Monte-Carlo 随机模拟技术的遗传算法求解所建模型。以某省级电网公司为例验证了上述工作的有效性。

关键词: 节能调度; 风险评估; 月度; 随机规划; 半绝对离差

A stochastic programming monthly generation dispatching model considering energy-saving risk assessment

GUO Lin¹, WEN Xu², ZHAO Zhiqiang¹, HUANG Lei¹, ZHAO Lei¹, JIANG Zhenyong¹, XIAO Feng³

(1. Power Exchange Center of Chongqing Power Grid, Chongqing 400014, China; 2. Research Institute of Chongqing Electric Power, Chongqing 401123, China; 3. Nari Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211006, China)

Abstract: A stochastic programming model for monthly power dispatch associated with the risk of energy conservation is proposed for dealing with an issue that the determined method of energy conservation can't be used for the risk management of energy conservation scheduling under uncertain environments. First of all, a benefit index of electricity conservation per unit for the power dispatch units with energy conservation is established on the specific math functional relationship between unit's power-dispatching and its coal consumption rate; the uncertain factors of random variation of load and wind power have significant effects on the benefit evaluation of electricity-conservation, and a risk index of electricity-conservation is established based on the concept of semi-absolute deviation from economy. Furthermore, a monthly power dispatch associated with the risk of energy conservation is developed in the framework of stochastic programming. In order to reach a balance of contradiction between model-solving's efficiency and accuracy, the unit commitment variables and unit power dispatch are respectively defined in a peak, a medium and a valley load. The proposed model is hiring a GA embedding with object relative dominant and Monte-Carlo simulation method. Finally, a provincial power corporation's power system is used for simulation, and it is verified that the proposed method is effective.

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

Key words: energy-saving dispatch; risk evaluation; monthly; stochastic programming; semi-absolute deviation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0022-08

0 引言

在节能降耗已纳入国家战略并成为国民经济发

展长效约束的今天, 作为能源消费主要来源的电力系统必然承担着较大的社会责任^[1-2]。节能调度作为电力系统实现节能降耗的重要手段, 如何考虑不确定因素(风险因素)实现节能风险的有效防范是当前节能调度优化决策中亟待解决的严峻课题^[3]。

目前, 节能调度的优化模型按照是否计及不确定因素可分为确定性和不确定性模型两类^[4-9]。确定性模型提供了一种在确定环境下节能效益最优的节

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177178, 51007098);
国家电网公司项目(2011 渝电科技 12#, 2014 渝电科技 29#)

能调度决策方案,具有一定实用价值。但随着智能电网的建设以及负荷需求的多样化^[10],在绿色能源出力以及负荷功率等随机因素影响较大的环境下,确定性模型的优化结果很难真实地反映节能调度的节能潜力,且决策方案缺乏可信度,而计及不确定性因素的节能调度优化模型能够在一定程度上弥补确定性模型的不足。

计及不确定性因素的节能调度优化模型可进一步分为两类^[4-7]:第一类一般首先采用随机模拟的方法(如Monte-Carlo模拟方法)模拟出随机能源出力或者负荷功率,再采用确定性模型得到节能调度的决策方案^[4-6],本质上而言该类模型仍属于确定性的节能调度范畴;第二类是在随机规划理论框架内,以机会约束的形式考虑随机性绿色能源出力以及负荷功率的不确定性^[7],使得节能调度的决策方案以一定置信水平满足电网支路潮流安全、旋转备用等约束,同时也可避免为了满足不确定环境下极端情形所造成的决策方案过于保守的问题。

上述节能调度优化模型在评估其获得的节能效益时多采用煤耗率^[2-3]、某一时段内的煤耗量^[4-5]以及单位电量平均节煤量^[9]等作为评估指标。这些指标均不含随机性因素,无法给出节能效益实现的风险信息,而目前还未见节能调度节能风险评估的文献报道。当节能调度中的不确定因素由量变引发质变时,有必要将风险管理的理念引入调度决策中,以防止调度机构片面追求节能效益最大化而忽视节能风险,导致节能目标无法实现的现象发生。

另一方面,以日为优化范畴的节能调度优化模型不适合考虑中长期节能考核约束(日调度模型主要考虑在确保电网安全运行前提下追求节能效益最大化)^[4-10],且无法充分挖掘节能调度的节能潜力。基于此,文献[11-14]在月度范畴内建立了确定性的节能调度模型,但月调度计划时间范畴较长,其绿色能源出力、负荷功率的随机性十分明显,不考虑随机因素的影响有待商榷。而实际上,国家电网公司已明确提出从2013年起要将风电从日前电力电量平衡纳入到月度电力电量平衡中^[15]。由此,在月度节能调度模型中更需引入风险管理的理念进行优化决策。

鉴于此,本文考虑风电出力(以风电为例阐述绿色能源对节能调度的影响)、负荷功率的不确定性对节能调度的影响,在如下两个方面进行了创新性研究:1)借鉴经济学中半绝对离差风险的概念,建立了节能调度节能风险评估指标;2)将所建指标应用于月度调度模型中,建立了计及节能风险评估的随机规划模型,该模型采用目标相对占优与内嵌

Monte-Carlo随机模拟技术的遗传算法求解。最后,以某省级电网为例论证了上述工作的有效性。

1 节能调度节能风险评估指标的构建

1.1 节能调度节能风险评估指标的定义方法

节能调度中影响其节能效益实现的不确定性因素主要有两类^[4-8]:风电出力、负荷功率。在不确定性环境下火电机组的出力本质上也具有随机性特征^[16]。以火电机组的节能效益评估为例,当风电出力减少或者负荷功率增加,就可能会使得调度机构所调度机组产生的煤耗超过期望的目标值,从而导致节能风险的发生。由此,需要对不确定性环境下节能调度的节能效益可能面临的节能风险进行量化评估,以利实现节能风险的管理。

著名学者李文沅指出^[17],建立表征风险的指标是风险量化评估的前提,其定义方法有以下两种:第一种为在一定条件下发生行为主体遭受损失状态的可能性,采用风险后果发生的概率来描述;第二种为由于各种不确定性导致行为主体可能遭受的损失,采用风险后果的严重程度来描述。其中第二种定义方法更符合风险指标定义的本质,本文采用风险指标定义中的第2种方法,以调度机构作为行为主体,把风电出力、负荷功率作为影响调度机构实现节能效益的不确定因素,将调度机构节能调度时系统中所有机组实现的总节能效果(总节煤量)可能面临的节能损失严重程度作为节能风险度量指标,简称节能调度节能风险评估指标。同时,为体现不同电源类型对节能效益的贡献,该指标评估对象设定为风电和火电机组。

1.2 机组单位调度电量节能评估指标的建立

在节能调度环境下,文献[18]取火电机组的平均煤耗率建立了单位电量节能评估指标。而实际调度中为了满足电力系统安全运行的需要,同一火电机组在不同时段一般会在不同的功率值运行,相应的在不同时段的煤耗率也会存在较大差异^[6,12]。由此考虑火电机组出力与其煤耗率的函数关系建立了火电机组单位调度电量节能评估指标,过程如下:

首先将整个调度周期等分为多个时段,且设各时段内各火电机组出力均不变,各机组煤耗率也不变。现用 t 代表第 t 个时段数,用 Δt 表示调度周期单位时段长度。设第 t 个时段内调度机构对火电机组 i 的调度功率为 $P_{i,G}^t$,此时段内该机组对应的煤耗率为 $\rho_{i,G}^t(P_{i,G}^t)$,简记 $\rho_{i,G}^t$;该时段机组 i 对应的调度电量 $W_i^t = \Delta t P_{i,G}^t$ 。显然, W_i^t 的煤耗量为 $N_i^t = \rho_{i,G}^t W_i^t$;忽略网损,则调度机构获得的电量

$W_b^t = W_i^t$; 而 W_b^t 在期望实现的节能调度节能考核指标对应煤耗率 ρ_b 条件下其煤耗量为 $N_b^t = \rho_b W_i^t$ 。根据单位电量节能指标的定义^[18], 第 t 个时段节能调度火电机组 i 的单位调度电量节能评估指标 $R_{i,G}^t$ 可表示为

$$R_{i,G}^t = (N_b^t - N_i^t) / W_i^t = (\rho_b W_i^t - \rho_{i,G}^t W_i^t) / W_i^t = \rho_b - \rho_{i,G}^t (P_{i,G}^t) \quad (1)$$

式中, ρ_b 可为政府给定的节能指标或者由调度机构在政府给定的节能指标内自主确定的指标。

由式(1)可知, 显然由于风电机组(一个风电场可等效为一台机组)不消耗煤耗, 故其单位调度电量节能评估指标 R_w 可表示为

$$R_w = \rho_b \quad (2)$$

1.3 节能调度节能风险评估指标的建立

在节能调度环境下可将调度机构期望实现的节能效果类比为总资产, 从调度机组的组合中获得的节能效果看作投资回报。由此, 节能调度的节能问题本质上与经济学中的投资组合理论(Portfolio Theory)^[19]类似, 故可借鉴其中的经济风险评估指标来解决节能调度节能风险评估指标的构建问题。

目前, 投资组合理论中采用的经济风险评估指标大都能够一定程度上反映随机性因素给投资主体带来的经济风险, 但也具有一定的局限性: 均值-方差(Mean-Variance)最大缺点是不能体现风险向下的本质; 半方差(Semi-Variance)虽然体现了风险向下的本质, 但与均值-方差指标一样依赖于收益率服从正态分布, 这在实际中较难满足; 风险价值(Value at Risk)与条件风险价值(Conditional Value at Risk)的缺点是当损失分布不连续时不满足一致性公理, 缺乏次可加性, 不适用于组合优化问题, 同时条件风险价值依赖于给定的置信水平; 绝对离差(Absolute Deviation)的缺点是当风险分布不连续时, 不满足次可加性, 同时也没反映出风险向下的本质^[20]。半绝对离差风险(Semi-Absolute Deviation)其风险向下的思想能够体现市场交易风险的本质, 同时还具有一阶矩存在, 不严格要求损失分布情况的优点, 将其应用于电力市场购电组合的经济风险进行评估时可表示为^[20]

$$E \left[\left| \sum_{k=1}^K w_k (p_k - u_k) \right|_- \right] \quad (3)$$

式中:

$$\left| \sum_{k=1}^K w_k (p_k - u_k) \right|_- = \begin{cases} 0 & p_k \geq u_k \\ \sum_{k=1}^K w_k (u_k - p_k) & p_k < u_k \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: $E[\cdot]$ 表示期望算子; p_k 表示第 k 个售电单位的收益率; u_k 表示第 k 个售电单位的收益率期望; w_k 表示购单位在售电单位 k 的购电量; K 表示售电单位的个数。

借鉴半绝对离差风险评估指标度量购电组合经济风险的思路, 在节能调度环境下某时段内度量节能调度的节能风险评估指标可表示为

$$E \left[\left| \sum_{j=1}^{N_w} R_{j,w} \Delta t (P_{j,w} - E(P_{j,w})) + \sum_{i=1}^{N_G} R_{i,G} \Delta t (P_{i,G} - E(P_{i,G})) \right|_- \right] \quad (5)$$

式中: N_w 、 N_G 分别表示风电、火电机组的台数。

由式(5)可知, 所建的节能调度节能风险评估指标具有以下两个明确的物理内涵:

1) 符合 1.1 节对节能调度节能风险指标的定义。针对给定的调度机组组合, 该指标可量化评估出调度机构期望实现的节能量在随机环境下可能面临的节能损失严重程度。

2) 体现了风险向下的本质。针对给定的调度机组组合, 高于期望节能量的对调度机构不构成节能风险; 低于期望节能量的对调度机构构成节能风险。

由此, 基于所建的节能风险评估指标, 再结合具体的节能调度模型就可以实现节能风险的管理。

2 计及节能风险评估的月度随机规划调度模型

2.1 建模思路及其假设条件

考虑月度范畴可在较长的尺度内实现节能效益的统筹, 且计及了风电出力、负荷功率的不确定性, 导致火电机组的出力也具有随机性特征, 模型中部分表达式采用确定性的形式没有意义, 由此可在随机规划理论框架内建模月度调度模型^[16]。

文献[11]建立了机组启停和出力均为1 h优化粒度的确定性月度调度模型, 若直接采取1 h级的优化粒度来建模考虑风电出力、负荷功率不确定性的月度调度模型, 其优化变量和随机变量的众多会造成模型求解极为困难。文献[12-14]均建立了以日为优化粒度的月度节能调度模型, 其假设为1日内机组启停和出力状态均不变。但若考虑风电出力、负荷功率的不确定性, 特别是风电出力的反调峰特性以及各电网实际峰谷差在逐渐增大的现实^[14], 若直接采取日优化粒度来建模考虑风电出力、负荷功率不确定性的月度节能调度模型, 其优化获得的调度计划将无法满足系统调峰要求。基于此, 同时考虑到火电机组启停受到其固有运行特性的限制一般为数小

时这一事实, 本文将机组启停和出力变量的优化粒度(或称时段)设为日峰、腰、谷典型负荷状态。

为突出研究重点还作如下假设: 1) 忽略网损对调度计划的影响; 2) 各节点各时段负荷功率和风电场出力均服从正态分布^[4,16]; 3) 月负荷功率曲线、月风电场出力曲线已知^[4]; 4) 各典型负荷状态均为 8 h^[13]。

2.2 目标函数

根据本文 1.1 节对节能调度节能风险的定义, 所建模型目标函数可为月系统节能量期望尽可能大以及对应的节能风险小。

1) 月节能量期望尽可能大

$$\max E \left\{ \sum_{d=1}^D \left(\sum_{j=1}^{N_w} R_{d,j,w} \Delta d P_{d,j,w} + \sum_{i=1}^{N_G} u_{d,i} R_{d,i,G} \Delta d P_{d,i,G} \right) \right\} \quad (6)$$

式中: D 表示月峰、腰和谷荷总的状态数; $P'_{d,j,w}$ 表示风电场 j 在第 d 个典型负荷状态第 t 个时段的出力; $P_{d,i,G}$ 表示第 i 台火电机组在第 d 个典型负荷状态出力; $u_{d,i}$ 表示火电机组 i 在第 d 个典型负荷状态的启停状态(“1”为运行, “0”为停机); Δd 表示典型负荷状态持续时间长度。

2) 月节能风险尽可能小

$$\min E \left\{ \left| \sum_{d=1}^D \left(\sum_{j=1}^{N_w} R_{d,j,w} \Delta d (P_{d,j,w} - E(P_{d,j,w})) \right) + \sum_{i=1}^{N_G} u_{d,i} R_{d,i,G} \Delta d (P_{d,i,G} - E(P_{d,i,G})) \right| \right\} \quad (7)$$

2.3 约束条件

2.3.1 系统平衡约束

1) 系统月节能指标机会约束

在风电出力、负荷功率的不确定性环境下, 节能考核约束可采用机会约束形式表示为

$$\Pr \left\{ \sum_{d=1}^D \left(\sum_{j=1}^{N_w} R_{d,j,w} \Delta d P_{d,j,w} + \sum_{i=1}^{N_G} u_{d,i} R_{d,i,G} \Delta d P_{d,i,G} \right) \geq N \right\} \geq \beta_1 \quad (8)$$

式中: $\Pr\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中事件成立的概率; β_1 表示节能考核指标机会约束置信水平; N 表示给定的月节能效益考核指标。

2) 各时段功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{d,i,G} + \sum_{j=1}^{N_w} P_{d,j,w} = \sum_{k=1}^K P_{d,k,D} \quad d \in D \quad (9)$$

式中: $P_{d,k,D}$ 表示第 d 个典型负荷状态节点 k 的负荷功率; K 表示负荷节点数。

3) 各时段系统上下旋转备用机会约束

假设所有旋转备用均由火电机组提供, 各时段系统上下旋转备用机会约束可表示为

$$\Pr \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} u_{d,i} (P_{d,i,G,\max} - P_{d,i,G}) \geq U_{d,SR} \right\} \geq \beta_2 \quad d \in D \quad (10)$$

$$\Pr \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} u_{d,i} (P_{d,i,G} - P_{i,G,\min}) \geq D_{d,SR} \right\} \geq \beta_3 \quad d \in D \quad (11)$$

式中: $P_{i,G,\max}$ 、 $P_{i,G,\min}$ 分别表示火电机组 i 在第 d 个典型负荷状态可发出的最大和最小出力; $U_{d,SR}$ 、 $D_{d,SR}$ 分别表示系统在第 d 个典型负荷状态的向上、向下旋转备用; β_2 、 β_3 分别表示上下旋转备用机会约束置信水平。

2.3.2 机组运行约束

1) 火电机组出力上下限约束

$$u_{d,i} P_{i,G,\min} \leq P_{d,i,G} \leq u_{d,i} P_{i,G,\max} \quad d \in D; i \in N_G \quad (12)$$

式中: $P_{i,G,\max}$ 、 $P_{i,G,\min}$ 分别表示火电机组 i 的出力上下限。若机组停机则机组出力为“0”, 若机组开机式(12)为火电机组出力上下限约束。

2) 火电厂月供电量合同机会约束

$$\Pr \left\{ W_{m,G,\min} \leq \sum_{P_{i,G} \in \varphi_m} \sum_{d=1}^D \Delta d P_{i,G} \leq W_{m,G,\max} \right\} \geq \beta_4 \quad m \in M_G \quad (13)$$

式中: $P_{i,G} \in \varphi_m$ 表示火电机组 i 属于火电厂 m ; $W_{m,G,\max}$ 、 $W_{m,G,\min}$ 分别表示第 m 个火电厂最大、最小月供电合同电量, $W_{m,G,\max}$ 、 $W_{m,G,\min}$ 可在电厂长期合同电量月分解值基础上适当放松得到; β_4 表示各火电厂月供电量合同机会约束置信水平。

3) 火电机组最小持续开机、停机时间约束

$$(T_{i,on} - T_{i,\min,on})(u_{d,i} - u_{d+1,i}) \geq 0 \quad d \in D; i \in N_G \quad (14)$$

$$(T_{i,off} - T_{i,\min,off})(u_{d+1,i} - u_{d,i}) \geq 0 \quad d \in D; i \in N_G \quad (15)$$

式中: $T_{i,on}$ 、 $T_{i,\min,on}$ 分别表示火电机组 i 运行持续时间及其约束值; $T_{i,off}$ 、 $T_{i,\min,off}$ 分别表示火电机组 i 停机持续时间及其约束值。

由于优化粒度为 8 h, 各时段间机组出力不存在耦合关系^[14], 故不考虑机组爬坡能力约束。

2.3.3 断面潮流安全机会约束

$$\Pr \left\{ P_{L,\min} \leq \sum_{l \in L} \left(\sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{d,i} - \sum_{k=1}^K G_{l-k} P_{d,k,D} \right) \leq P_{L,\max} \right\} \geq \beta_5 \quad d \in D; L \in \varphi_L \quad (16)$$

式中: $P_{L,\max}$ 、 $P_{L,\min}$ 表示断面 L 的潮流传输上下限;

l 表示属于关键断面 L 的线路; φ_L 表示关键断面的集合; G_{l-i} 表示在机组 i 所在节点对支路 l 的发电机输出功率的转移分布因子; G_{l-k} 表示节点 k 对支路 l 的发电机输出功率转移分布因子; N 表示发电机总节点数; β_5 表示断面潮流安全机会约束置信水平。

3 内嵌目标相对占优与 Monte-Carlo 随机模拟技术的遗传算法

所建模型属典型的含机会约束的随机规划模型, 由于很难将约束条件中式(8)、式(10)、式(11)、式(13)、式(16)转化为确定性的等价类, 故可采用内嵌 Monte-Carlo 随机模拟技术的遗传算法求解该模型^[16]。另外, 所建模型为多目标模型, 现有算法中对该类模型的处理一般采用权重法、模糊满意度等方法, 这些方法很难找到真正的全局最优解, 而多目标差分进化算法、非劣排序遗传算法在找到有效的 Pareto 最优解集后, 其最优解选取依赖于后续的辅助策略或者人工经验。为了克服上述算法的缺陷, 文献[21]采用了目标相对占优遗传算法求解所建多目标模型, 能够避免上述文献的缺陷。

鉴于此, 本文采用内嵌目标相对占优与 Monte-Carlo 随机模拟技术的遗传算法求解所建的多目标随机规划模型。限于篇幅, 不再赘述。

4 算例分析

4.1 基础数据

采用某省级电网公司的基础数据验证研究工作的有效性。该电网可调度火电厂 12 个(机组 24 台)、风电场 1 座, 某月中典型日负荷曲线以及扣除联络线以及水电机组出力后, 得到的需由火电机组和风电场承担的负荷功率曲线如图 1 所示, 曲线 2 表示系统总负荷, 各时段负荷功率标准差取对应期望值的 3.0%; 风电场典型日出力曲线如图 2 所示, 各时段出力标准差取对应期望值的 50.0%; 月负荷功率和风电出力均由典型日扩展得到。

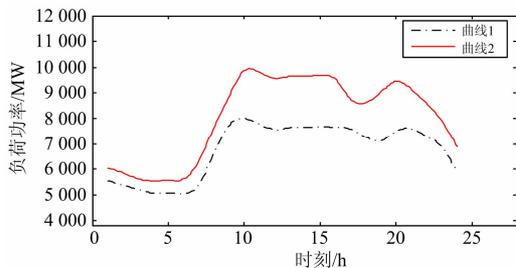


图 1 某省级电网月典型日负荷预测曲线
Fig. 1 Daily load curve of provincial power grid

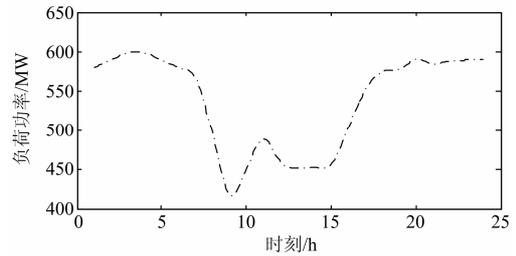


图 2 风电场月典型日出力预测曲线
Fig. 2 Daily output curve of wind power

仿真参数如下: 正负旋转备用 20.0%; 节能考核指标为全网负荷在煤耗率为 350 g/kWh 基准值下风电和火电机组共同实现节煤 6.0 万吨; 各机会约束对应的置信水平值均取 90.0%; 遗传算法中种群规模 20、最大迭代次数 300、交叉概率 0.5、变异概率 0.1, 迭代终止判据为当最优个体连续 30 代保持不变或达到最大迭代次数。仿真软件 Matlab9.2a, 硬件 DELLVostro100, 主频 2.6 GHz、1 G 内存。

4.2 所建节能风险评估指标的有效性验证

为验证所建节能风险评估指标的有效性, 设计如下两种仿真方案给予验证。

方案 1: 基于所提原始数据, 将各节点负荷功率的标准差分别从期望值的 3.0% 逐渐升至 8.0%。

方案 2: 基于所提原始数据, 将风电场出力的标准差从期望值 50.0% 逐渐升至 58.0%。

基于上述两种方案, 由所建调度模型进行决策, 得到的节能风险变化曲线分别如图 3、图 4 所示。

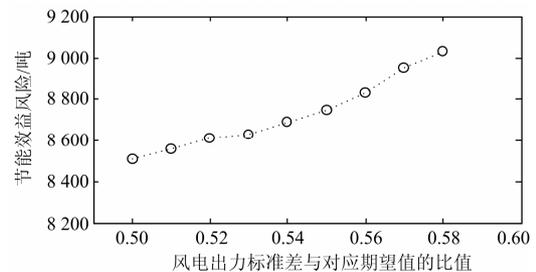


图 3 风电出力随机性对节能风险的影响

Fig. 3 Curve for the relationship between wind power randomness and energy-saving risks

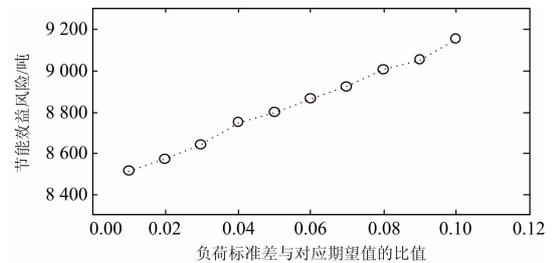


图 4 负荷功率随机性对节能风险的影响

Fig. 4 Curve for the relationship between loads randomness and energy-saving risks

由图 3、图 4 可知, 随着风电出力、负荷功率随机性的增大, 节能调度的节能风险也随之增加。这是由于当风电出力、负荷功率随机性增大时, 为满足系统负荷功率平衡, 调度机构在高能耗机组调度功率的概率也必然逐渐增加, 从而导致节能风险评估指标中半绝对离差风险逐渐增加。可见, 所建节能风险评估指标能够有效的刻画出不同随机环境下节能调度节能风险的本质及其变化趋势。

4.3 所建模型的有效性验证与节能风险管理策略

为验证所建计及节能风险月度调度模型的有效性以及便于对节能调度节能风险的管理策略进行分析, 现设计如下 6 种仿真方案给予验证。

方案 1: 基于本文所提原始数据以及所建原始模型进行仿真。

方案 2: 基于方案 1, 但不考虑风电出力、负荷功率的随机性以及节能风险评估指标, 即采用文献[11-14]等类似的确定性月度节能调度模型进行决策。

方案 3: 基于方案 1, 将机组启停的优化粒度修改为 1 h, 即与文献[11]的优化粒度类似。

方案 4: 基于方案 1, 机组启停和出力的优化粒度修改为天, 即与文献[12-14]的优化粒度类似。

方案 5: 基于方案 1, 将节能考核指标从 6.0 万吨增加到 6.2 万吨。

方案 6: 基于方案 1, 将节能考核指标机会约束置信水平从 92.0% 增加到 98.0%。

基于上述 6 种仿真方案得到的月调度计划节能效益、节能风险以及模型计算时间如表 1 所示。

表 1 6 种仿真方案仿真比较

Table 1 Comparison of six schemes

方案编号	节能效益 /吨	节能风险 /吨	计算时间 /min
1	62 889	8 506	31
2	63 881	9 832*	9
3	61 838	8 401	118
4	65 831	9 083	21
5	63 682	9 203	31
6	60 692	6 899	31

注: 方案 2 中的标*的节能风险采用了文献[14]中事后评估的方法得到。

4.3.1 所建模型的有效性验证

从月度调度模型是否考虑随机因素以及节能风险的角度看, 方案 1(本文所建模型)较方案 2(文献[11-14])节能效益下降了 992 吨, 但使得节能风险下降 1 326 吨。可见, 本文所建模型较现有的确定性

的月度调度模型的节能风险大为降低, 能够实现节能风险的有效管理。更重要的是, 所建模型综合考虑风电出力、负荷功率等不确定性因素对节能调度的影响, 真实地反映了电网的随机运行状态, 其优化方案可信度更高。

从月度调度模型的优化粒度看, 方案 1 较方案 3(文献[11])会带来约 1.05% 的节能误差和 1.11% 的节能风险误差; 而方案 4(文献[12-14])较方案 3 的节能误差为 6.4%、节能风险误差为 8.01%, 误差较大。可见, 本文将机组启停和出力变量优化粒度设为峰平谷典型状态具有合理性, 能够满足实际工程精度的需要。

从月度调度模型的计算效率看, 方案 1 计算时间为 31 min, 方案 4 计算时间为 21 min, 方案 3 的计算时间为 118 min。可见, 本文所建模型求解时间虽然较方案 1 有所延长, 但较方案 3 大幅缩短, 能够满足实际工程的需要。

综上所述, 在不确定性环境下, 所建月度调度模型能够给出节能风险信息, 且可信度较高; 该模型的优化粒度的设置率能够满足实际工程的需要。

4.3.2 节能调度节能风险优化管理策略分析

由表 1 中方案 1、5 可知, 节能考核指标越严厉, 其获得的节能效益越大, 但也使得节能调度面临更大的风险。可见, 节能考核指标的设定对节能风险具有决定性影响, 同时节能风险的提出可作为节能考核机构设定节能考核指标的重要参考。

由表 1 中方案 1、6 可知, 随着节能效益考核指标对应的置信水平值的提高其节能风险水平降低, 对应的节能效益、节能风险均随之下降。可见, 节能风险置信水平的设定可以作为节能调度机构节能风险管理的手段。

综上所述, 通过对所建月度随机规划调度模型中的节能效益评估指标以及该指标对应置信水平的合理设定, 可实现节能调度节能风险的防范和管理。

5 结论

1) 随着风电出力、负荷功率随机性的增加, 节能调度获得的节能效益面临的节能风险也逐渐增加, 在节能调度中引入节能风险管理成为必然。

2) 借鉴经济学中半绝对离差风险概念构建的节能调度节能风险评估指标, 能够实现节能风险的有效评估, 且能够反映节能风险的本质。

3) 计及节能风险评估的月度调度模型能为调度机构的决策提供节能风险信息, 以及为节能风险的管理提供控制策略; 同时其决策方案可信度较高。

参考文献

- [1] 文旭, 郭琳, 王俊梅. 面向节能减排的电力系统发购电计划研究述评[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 136-144.
WEN Xu, GUO Lin, WANG Junmei. Overview of power dispatch and purchasing plan in power system from energy-saving and emission-reducing[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 136-144.
- [2] 陈谦, 谷凡超, 金字清, 等. 含大型风电场的电力系统节能发电调度技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(6): 14-19.
CHEN Qian, GU Fanchao, JIN Yuqing, et al. Energy-saving generation dispatch of power system including large-scale wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(6): 14-19.
- [3] 文旭, 颜伟, 郭琳, 等. 计及风电和负荷不确定性的日调度计划节能效益概率评估方法[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 959-966.
WEN Xu, YAN Wei, GUO Lin, et al. A probability assessment method for energy-saving benefit of daily generation scheduling considering uncertainties of wind power and load[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 959-966.
- [4] 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): 24-31.
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): 24-31.
- [5] 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.
- [6] 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]. 中国电机工程报, 2011, 31(13): 10-18.
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): 10-18.
- [7] 龙军, 莫群芳, 曾建. 基于随机规划的含风电场的电力系统节能优化调度策略[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 133-138.
LONG Jun, MO Qunfang, ZENG Jian. A stochastic programming based short-term optimization scheduling strategy considering energy conservation for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 133-138.
- [8] 胡殿刚, 秦睿, 黄亭, 等. 基于免疫记忆粒子群优化算法的风火联合系统的多目标优化调度[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 20-26.
HU Diangang, QIN Rui, HUANG Ting, et al. Wind power integrated with thermal system multi-objective optimal dispatch based on immune memory particle swarm optimization algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 20-26.
- [9] 张程飞, 黄俊辉, 谢珍建, 等. 电网风电接纳能力评估方法综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 99-105.
ZHANG Chengfei, HUANG Junhui, XIE Zhenjian, et al. A review on evaluation methods of power grid's wind[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 99-105.
- [10] 颜伟, 文旭, 余娟, 等. 智能电网环境下电力市场面临的机遇与挑战[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 224-231.
YAN Wei, WEN Xu, YU Juan, et al. Opportunities and challenges faced by electricity market in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 224-231.
- [11] 高宗和, 耿建, 张显, 等. 大规模系统月度机组组合和安全校核算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 28-32.
GAO Zonghe, GENG Jian, ZHANG Xian, et al. Monthly unit commitment and security assessment algorithm for large-scale power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 28-32.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李利利, 管益斌, 耿建, 等. 月度安全约束机组组合建模及求解[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 27-31.
LI Lili, GUAN Yibin, GENG Jian, et al. Modeling and solving for monthly security constrained unit commitment problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 27-31.
- [15] 国家电监会. 关于加强风电安全工作的意见[EB/OL]. [2013-04-03]. http://www.gov.cn/gzdt/2012-03/08/content_2086392.htm.
- [16] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 42-47.
SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guojie. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 42-47.
- [17] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] 张世帅, 张学松, 王文, 等. 发电权交易下的节能减排指标设计及应用分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 156-160.
ZHANG Shishuai, ZHANG Xuesong, WANG Wen, et al. Design and application analysis of two indices of energy-saving and emission-reducing based on generation right trading[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 156-160.
- [19] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 电力市场环境下长期购电方案及风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 116-122.
ZHOU Ming, NIE Yanli, LI Gengyin, et al. Long-term electricity purchasing scheme and risk assessment in power markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 116-122.
- [20] 颜伟, 文旭, 王俊梅, 等. 考虑网内与网外购电计划差异的月度最优外购电模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 56-60.
YAN Wei, WEN Xu, WANG Junmei, et al. An optimal monthly power purchasing model considering differences between internal and external grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 56-60.
- [21] 林焯. 发输电设备检修计划及其安全校核的优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
LIN Ye. Studies on optimization of global generation and transmission maintenance scheduling and its security correction[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2015-01-13

作者简介:

郭琳(1969-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统发购电计划制定方法、电力市场运行与管理;
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、风险评估、电力市场。

(编辑 张爱琴)