

DOI: 10.7667/PSPC161352

基于机会约束规划的电力电量平衡分析

夏澍¹, 葛晓琳², 季海华¹, 顾劲岳¹

(1. 国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200072; 2. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 统筹考虑跨区电力电量交换和用电侧调节能力, 以弥补电力电量缺口的调整措施费用最小为目标, 提出了一种电力电量平衡分析优化模型。考虑到水库调度计划和检修计划对机组发电能力的影响, 模型中构建了水库调度和机组检修相关约束, 使得电力电量分析结果更为合理。为了恰当考虑负荷、来水和风电的随机性, 模型利用机会约束规划理论将系统电力、电量约束以及水量平衡约束表示成了概率形式, 并推导出了概率模型的确定化表示形式。通过实际系统的仿真计算, 验证了所提模型的合理性和方法的有效性。

关键词: 不确定性; 机会约束规划; 电力电量平衡; 水库约束; 机组检修

Power supply-demand balancing analysis based on chance-constrained programming

XIA Shu¹, GE Xiaolin², JI Haihua¹, GU Jinyue¹

(1. Shibe Electric Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200072, China;
2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Considering the cross-exchange capacity of electric power and energy and the regulation of side electricity, an optimization model for electric power and energy balance analysis is proposed to minimize the cost of adjustment measures. Taking into account the impact of reservoir operation plan and maintenance plan for the unit generating capacity, reservoir operation and unit maintenance-related constraints are constructed in the model, such that the power consumption analysis results are more reasonable. In order to deal with randomness of the load, runoff, and wind power appropriately, electric power constraint, energy constraint and water balance constraint are expressed in the form of probability based on chance-constrained programming. Then in the solution process, the stochastic model is transferred to the determined model. Simulation results of actual systems verify the rationality and efficiency of the proposed method.

Key words: uncertainty; chance-constrained programming; power supply-demand balancing; reservoirs constraint; unit maintenance

0 引言

电力电量平衡是指在给定的时间周期和供电条件下, 对电力系统中各个电厂的发电出力进行跨区域和跨季节的统筹安排, 最优化利用发电资源, 使得各时段供需的电力和电量达到平衡, 为中长期规划和调度提供了决策依据^[1-2]。传统的电力电量平衡分析方法主要将给定的预测负荷曲线进行分解, 并结合各类型机组的运行条件, 逐步安排各发电厂的出力方案, 包括逐次切负荷法^[3]、剩余容量日利用小时控制法^[4]和随机生产模拟法^[5]等, 这些方法仅能

从宏观的角度分析出电力电量盈缺情况, 没有充分挖掘调度运行的优化潜力。随着电网的发展, 跨区电力电量交换能力不断增强, 水电、风电等新能源发电资源日益丰富和用电侧管理水平不断提高, 进一步给电力电量平衡分析带来了极大的优化空间。为了统筹协调全网供电能力, 实现大范围的能源资源优化配置, 文献[6]参考机组组合和经济调度模型, 以成本最小为目标函数, 构建了电力电量平衡分析的优化模型, 为电力电量平衡问题提供了另一种求解途径。然而该优化模型在构建中对发电出力的约束仅考虑了机组的技术出力限制, 没有精细化考虑水库调度和检修计划等因素对发电出力造成的影响, 因此该模型需要进一步完善。

电力系统中包含众多的不确定性因素^[7], 如负

基金项目: 上海高校青年教师培养资助计划 (ZZsd115096);
国家电网公司科技项目资助 (520914160018)

荷预测偏差和水电站来水的随机性等, 这些都会对电力电量平衡分析结果造成影响。近年来, 随着风电等间歇性电源渗透率不断增加, 不确定性因素的影响越来越大^[8-9], 而目前在电力电量平衡分析中大多将这些不确定因素考虑成确定性变量, 导致分析结果不准确, 因此需要探索新的方法。机会约束规划是一种随机规划方法, 适用于求解约束中包含随机变量的优化模型, 目前已成功应用于机组组合^[10]、网架重构^[11]和无功优化^[12]等电力系统优化问题中, 为不确定型电力电量平衡分析问题提供了一种求解思路。

基于上述背景, 本文为了充分利用跨区交换能力及用电侧调节能力, 以调减外送电、增加外购电和可中断负荷等调整措施费用最小为目标函数, 构建了不确定型电力电量平衡分析优化模型。该模型针对水库调度计划和检修计划对发电能力的影响, 增加了水库和检修相关约束; 同时利用机会约束规划方法对负荷、风电和来水的不确定性影响进行了处理, 将系统电力、电量约束以及水量平衡约束以一定的置信水平来满足, 表示成了概率形式。在模型求解过程中, 基于概率统计理论和二分法, 推导出了概率模型的确量化表示形式。最后将所建模型转化成混合整数规划形式, 利用CPLEX进行求解, 结果验证了模型的有效性。

1 数学模型

1.1 目标函数

本文研究的中长期电力电量平衡分析, 是在电力电量供需形势较为紧张的情况下, 通过优化调度各类发电能源, 使得弥补电力电量缺口的调整措施费用最小。常用的调整措施主要包括调减外送电、增加外购电和可中断负荷等, 其费用模型可以用分段线性模型来表示, 因此目标函数具体表示为

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N F_{W_n}(\Delta w_{n,t}) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_{P_n}(\Delta p_{n,m}) \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_{W_n}(\Delta w_{n,t}) = K_{n,s1}^W \Delta w_{n,t} & \text{当 } W_{n,s1-1} \leq \Delta w_{n,t} \leq W_{n,s1} \\ F_{P_n}(\Delta p_{n,m}) = K_{n,s2}^P \Delta p_{n,m} & \text{当 } P_{n,s2-1} \leq \Delta p_{n,m} \leq P_{n,s2} \end{cases}$$

式中: t 表示与电量相关的时段索引变量, 这里以月为间隔, 以年为周期; m 表示与电力相关的检修时段索引变量, 这里以周为间隔, 以年为周期; n 表示调整措施索引变量; N 为调整措施总数; $\Delta w_{n,t}$ 表示 t 时段第 n 个调整措施对应的电量调整量; $\Delta p_{n,m}$ 表示 m 时段第 n 个调整措施对应的电力调整量; $F_{W_n}(\cdot)$ 表示电量调整费用函数; $F_{P_n}(\cdot)$ 表示电力调整费用函数; $s1$ 和 $s2$ 分别表示分段线性函数 $F_{W_n}(\cdot)$

和 $F_{P_n}(\cdot)$ 的分段索引变量; $K_{n,s1}^W$ 和 $K_{n,s2}^P$ 分别表示第 n 个调整措施在第 $s1$ 段电量和第 $s2$ 段电量对应的费用系数; $W_{n,s1}$ 表示第 $s1$ 段对应的电量; $P_{n,s2}$ 表示第 $s2$ 段对应的电力。

1.2 约束条件

考虑到水库调度和检修对电力电量平衡分析的影响, 因此模型的约束条件包括系统电量约束、系统电力约束、火电机组约束、水电机组约束和检修相关约束。同时考虑到负荷、风电和来水不确定性对部分约束条件的影响, 可采用机会约束规划理论进行建模。

1) 系统电量约束

$$\sum_{i=1}^{N_I} w_{i,t} + \sum_{h=1}^{N_H} w_{h,t} + \Omega_f \left(\sum_{j=1}^{N_J} w_{j,t} \right) = \Omega_D(W_{D,t}) - \sum_{n=1}^N \Delta w_{n,t} \quad (2)$$

$$\Delta w_{n,t} \leq \Delta W_n \quad (3)$$

式中: N_I 、 N_H 和 N_J 分别为火电机组、水电机组和风电场个数; i 、 h 和 j 分别为火电机组、水电机组和风电场编号; $w_{i,t}$ 、 $w_{h,t}$ 和 $w_{j,t}$ 分别为 t 时段第 i 个火电机组、第 h 个水电机组和第 j 个风电场的发电量; $W_{D,t}$ 为 t 时段的需求电量; ΔW_n 为第 n 个措施最大电量调整量; $\Omega_f(\cdot)$ 和 $\Omega_D(\cdot)$ 分别为风电总出力 and 负荷的函数。由于风电和负荷是随机变化的, 因此可以将式(2)转化成概率形式为^[13]

$$P_{\text{rob}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_I} w_{i,t} + \sum_{h=1}^{N_H} w_{h,t} + \sum_{j=1}^{N_J} w_{j,t} \geq W_{D,t} - \sum_{n=1}^N \Delta w_{n,t} \right\} = \beta_1 \quad (4)$$

式中, β_1 表示总发电量满足负荷电量需求的置信水平。

2) 系统电力约束

$$P_{\text{rob}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_I} p_{i,m}^{\max} + \sum_{h=1}^{N_H} p_{h,m}^{\max} + \sum_{j=1}^{N_J} p_{j,m}^{\max} \geq P_{D,m} + R_m - \sum_{n=1}^N \Delta p_{n,m} \right\} \geq \beta_2 \quad (5)$$

$$\Delta p_{n,m} \leq \Delta P_n \quad (6)$$

式中: $p_{i,m}^{\max}$ 、 $p_{h,m}^{\max}$ 和 $p_{j,m}^{\max}$ 分别为 m 检修时段第 i 个火电机组、第 h 个水电机组和第 j 个风电场的最大出力; $P_{D,m}$ 和 R_m 分别为 m 检修时段的负荷和备用; ΔP_n 为第 n 个措施最大电力调整量; β_2 表示总发电功率满足负荷功率需求的置信水平。

3) 火电机组约束

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

$$w_{i,t}^{\max} = \sum_{m \in M_t} \delta_{i,m} p_{i,m}^{\max} \Delta T_m \quad (8)$$

式中: $w_{i,t}^{\min}$ 和 $w_{i,t}^{\max}$ 分别为 t 时段第 i 个火电机组的最小和最大发电量; M_t 为 t 时段对应的检修时段集合; $\delta_{i,m}$ 为第 i 个火电机组负荷率; ΔT_m 为 m 检修时

段对应的小时数。

4) 水电机组约束^[14]

$$w_{h,t}^{\min} \leq w_{h,t} \leq w_{h,t}^{\max} \quad (9)$$

$$w_{h,t}^{\max} = \sum_{m \in M_t} \delta_{h,m} P_{h,m}^{\max} \Delta T_m \quad (10)$$

$$w_{h,t} = K_{h,t} q_{h,t} \Delta t \quad (11)$$

$$q_h^{\min} \leq q_{h,t} \leq q_h^{\max} \quad (12)$$

$$QS_z^{\min} \leq \sum_{h \in z} q_{h,t} + s_{z,t} \leq QS_z^{\max} \quad (13)$$

$$v_{z,t}^{\min} \leq v_{z,t} \leq v_{z,t}^{\max} \quad (14)$$

$$v_{z,T} = V_{L,z} \quad (15)$$

$$P_{\text{rob}} \{v_{z,t-1} + (R_{z,t} + \sum_{g \in U_z} (\sum_{h \in g} q_{h,t} + s_{g,t})) - \sum_{h \in z} q_{h,t} - s_{z,t}\} \cdot \Delta t \geq v_{z,t}\} = \beta_3 \quad (16)$$

其中：式(9)和式(10)为水电机组电量约束； $w_{h,t}^{\min}$ 和 $w_{h,t}^{\max}$ 分别为 t 时段第 h 个水电机组的最小和最大发电电量； $\delta_{h,m}$ 为第 h 个水电机组负荷率；式(11)为水能电能转换关系约束； $K_{h,t}$ 和 $q_{h,t}$ 分别为 t 时段第 h 个水电机组的发电耗水率和发电流量； Δt 为 t 时段对应的秒数；式(12)为发电流量约束； q_h^{\min} 和 q_h^{\max} 分别为第 h 个水电机组的发电流量下限和上限；式(13)为下泄流量约束； QS_z^{\min} 和 QS_z^{\max} 分别为第 z 个水库的下泄流量下限和上限； $s_{z,t}$ 为 t 时段第 z 个水库的弃水流量；式(14)和式(15)为库容约束； $v_{z,t}$ 、 $v_{z,t}^{\min}$ 和 $v_{z,t}^{\max}$ 分别为 t 时段第 z 个水库的库容、库容下限和库容上限； $V_{L,z}$ 为调度末期库容；式(16)为水量平衡约束； $R_{z,t}$ 为 t 时段第 z 个水库的入库流量； U_z 为第 z 个水库对应的上游水库集合； β_3 表示库容平衡的置信水平。由于入库流量 $R_{z,t}$ 是个随机变量，因此式(16)被表示成概率形式。

5) 检修相关约束^[15]

$$P_{i,m}^{\max} \leq P_i^{\max} - \sum_{c=1}^{N_C} A_{c,m} P_{i,c} \quad (17)$$

$$P_{h,m}^{\max} \leq P_h^{\max} - \sum_{c=1}^{N_C} A_{c,m} P_{h,c} \quad (18)$$

$$A_{c,m} = \sum_{m=1-M_c+1}^m \tau_{c,m} \quad (19)$$

$$\sum_{m=M_c^{\min}}^{M_c^{\max}} \tau_{c,m} = 1 \quad (20)$$

$$\sum_{m=1-M_{D_s}+1}^m \tau_{c1,m} + \tau_{c,m} \leq 1 \quad (21)$$

$$\sum_{m=1}^{m-1} \tau_{c1,m} - \tau_{c,m} = 0 \quad (22)$$

$$\sum_{m=1}^M (\tau_{c1,m} - \tau_{c,m}) = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{m=1}^M (A_{c,m} + A_{c1,m}) \leq 1 \quad (24)$$

$$\sum_{c=1}^{N_C} A_{c,m} \leq \delta_m \quad (25)$$

其中：式(17)和式(18)分别为火电机组和水电机组电力约束； P_i^{\max} 和 P_h^{\max} 分别为火电机组 i 和水电机组 h 的最大出力； c 为检修项目编号； N_C 为检修项目总数； $A_{c,m}$ 为检修项目与检修时段的关联系数，取1表示检修项目 c 在 m 时段检修，取0表示不检修； $P_{i,c}$ 和 $P_{h,c}$ 分别表示由于检修项目 c 对火电机组 i 和水电机组 h 造成的电力影响；式(19)和式(20)为检修状态约束； $\tau_{c,m}$ 表示开始检修状态，若项目 c 在 m 时段开始检修则为1，否则为0； M_c 为检修项目 c 的持续时间； M_c^{\max} 和 M_c^{\min} 分别为检修项目 c 的最早和最晚开始时间；式(21)和式(22)为顺序检修约束； $c1$ 为检修项目编号； M_{D_s} 为检修项目 $c1$ 需要比项目 c 提前的时间间隔；式(23)、式(24)和式(25)分别表示同时检修约束、互斥检修约束和检修资源约束； δ_m 为在 m 时段能够检修的项目数上限。

2 概率模型确定化方法

在所建立的电力电量平衡分析优化模型中，式(4)、式(5)和式(18)被表示成概率形式，导致模型难以直接求解。为了解决这一问题，本文将结合概率统计理论对概率模型进行确定化处理。对于式(4)可以转化为

$$P_{\text{rob}} \left\{ W_{D,t} - \sum_{j=1}^{N_f} w_{j,t} \leq \sum_{i=1}^{N_f} w_{i,t} + \sum_{h=1}^{N_H} w_{h,t} + \sum_{n=1}^N \Delta w_{n,t} \right\} = \quad (26)$$

$$F_{W,t} \left(\sum_{i=1}^{N_f} w_{i,t} + \sum_{h=1}^{N_H} w_{h,t} + \sum_{n=1}^N \Delta w_{n,t} \right) = \beta_1$$

式中， $F_{W,t}(\cdot)$ 表示 t 时段负荷和风电电量联合概率分布函数，可以根据随机变量 $W_{D,t}$ 和 $w_{j,t}$ 的概率密度函数，利用离散化卷积和积分的方法得到。进而利用二分法对式(26)进行求解，得出

$$\sum_{i=1}^{N_f} w_{i,t} + \sum_{h=1}^{N_H} w_{h,t} + \sum_{n=1}^N \Delta w_{n,t} = F_{W,t}^{-1}(\beta_1) \quad (27)$$

式中： $F_{W,t}^{-1}(\cdot)$ 为 $F_{W,t}(\cdot)$ 的反函数； $F_{W,t}^{-1}(\beta_1)$ 可以看成是负荷预测电量和风电计划发电电量相减的净负荷电量。式(27)和式(2)一样，也是等式约束，表示各时段发电电量和负荷电量要平衡，物理意义明确。

同理, 式(5)可以转化为

$$P_{\text{rob}} \left\{ P_{D,m} - \sum_{j=1}^{N_j} p_{j,m}^{\max} \leq \sum_{i=1}^{N_j} p_{i,m}^{\max} + \sum_{h=1}^{N_H} p_{h,m}^{\max} - R_m + \sum_{n=1}^N \Delta p_{n,m} \right\} = F_{P,m} \left(\sum_{i=1}^{N_j} p_{i,m}^{\max} + \sum_{h=1}^{N_H} p_{h,m}^{\max} - R_m + \sum_{n=1}^N \Delta p_{n,m} \right) \geq \beta_2 \quad (28)$$

进而得出

$$\sum_{i=1}^{N_j} p_{i,m}^{\max} + \sum_{h=1}^{N_H} p_{h,m}^{\max} - R_m + \sum_{n=1}^N \Delta p_{n,m} \geq F_{P,m}^{-1}(\beta_2) \quad (29)$$

式中: $F_{P,m}(\cdot)$ 表示 m 检修时段负荷和风电功率联合概率分布函数; $F_{P,m}^{-1}(\beta_2)$ 可以看成是负荷预测功率和风电计划发电功率的差值。

式(16)可以转化为

$$P_{\text{rob}} \left\{ R_{z,t} \leq \frac{v_{z,t} - v_{z,t-1}}{\Delta t} - \sum_{g \in U_Z} (\sum_{h \in g} q_{h,t} + s_{g,t}) + \sum_{h \in z} q_{h,t} + s_{z,t} \right\} = F_{R,t} \left(\frac{v_{z,t} - v_{z,t-1}}{\Delta t} - \sum_{g \in U_Z} (\sum_{h \in g} q_{h,t} + s_{g,t}) + \sum_{h \in z} q_{h,t} + s_{z,t} \right) = 1 - \beta_3 \quad (30)$$

进而得出

$$v_{z,t-1} + [F_{R,t}^{-1}(1 - \beta_3) + \sum_{g \in U_Z} (\sum_{h \in g} q_{h,t} + s_{g,t}) - \sum_{h \in z} q_{h,t} - s_{z,t}] \cdot \Delta t = v_{z,t} \quad (31)$$

式中: $F_{R,t}(\cdot)$ 表示 t 时段入库流量概率分布函数; $F_{R,t}^{-1}(1 - \beta_3)$ 可以看成是入库流量的期望值。

通过上述变换, 式(4)、式(5)和式(16)分别转换成了式(27)、式(29)和式(31), 因此电力电量平衡分析问题也从概率优化模型变成了确定性优化模型, 可利用混合整数线性规划法进行求解。

3 算例分析

本文采用 GAMS 软件建立仿真系统, 调用 CPLEX 求解器对所建模型进行求解。算例测试所用计算机: CPU P4 2.50 GHz、内存 4.00 G。

测试系统采用文献[14]所示的实际系统, 包括 58 台火电机组、44 个水电机组和 102 个检修项目。此外, 在上述数据基础上增加两座风电场, 每个风电场额定容量为 200 MW, 负荷数据增加 2%。负荷、风电和入库流量的不确定性模型采用正态分布, 预测误差的标准差分别取预测值的 2%、18%、3.5%。电力电量平衡分析的周期为 1 年, 即电量相关时段 T 为 12 个月, 电力相关时段 M 为 53 个周。采用的电力电量调整措施有两种: 一种是调减外送电, 另一种可中断负荷。两种措施对应费用参数如表 1 所示。所有置信水平取 0.7。

表 1 调整措施对应的费用参数

类型	分段号	电量调整量/MWh	电量费用系数/(元/MWh)	电力调整量/MW	电力费用系数/(元/MW)
调减	1	100 000	100	100	20
外送	2	600 000	200	300	40
电	3	1 400 000	240	900	60
可中	1	100 000	100	1000	20
断负	2	800 000	150	3000	45
荷	3	1 600 000	300	4000	50

为了分析检修和水库调度相关约束对电力电量分析结果的影响, 分别对以下 3 个方案进行了分析。

方案 1: 考虑检修和水库调度相关约束。

方案 2: 考虑检修约束, 不考虑水库相关约束。

方案 3: 不考虑检修, 考虑水库调度相关约束。

通过模型优化可得, 方案 1 需要采取电力电量调整措施, 其中整个周期总电量调整量为 673.36 万 MWh, 最大电力调整量为 2063.86 MW。而方案 2 和方案 3 则不需要采取任何调整措施就可以实现电力电量平衡。

对方案 1 和方案 2 进行对比, 水电系统各时段发电电量和电力如图 1 所示。从图 1(a)中可以看出, 方案 2 在电力电量分析中没有考虑水库调度的相关约束, 水电系统的发电量被过高评估, 最大偏差高达 9 倍左右。从图 1(b)中可以看出, 在水电系统最大发电能力的分析中, 两种方案对于丰水期(24~40 周)的评估偏差较小, 而对于枯水期(1~19 周及 45~53 周)的评估偏差较大, 这是由于枯水期, 来水偏少, 水库的蓄水状态对于水电的发电能力影响较大。由此可见, 不考虑水库调度的约束, 将会对水电的发电能力评估产生较大偏差, 严重影响电力电量平衡分析的合理性。

对方案 1 和方案 3 进行对比, 水电系统和火电系统各时段最大出力如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出, 枯水期(1~20 周及 43~53 周)水电系统的电力供应受检修计划影响较大, 这是由于水电机组的检修项目大多安排在枯水期。从图 2(b)中可以看出, 对于方案 3, 火电机组不考虑检修的影响, 各时段按照最大技术出力计算, 而对于方案 1, 当负荷较小以及丰水期(1~40 周)时, 火电机组通常会安排检修, 在这些时段内火电系统的最大出力将远达不到最大技术出力。由此可见, 检修计划会直接影响系统电力的供应, 在电力电量平衡分析中必须予以考虑。

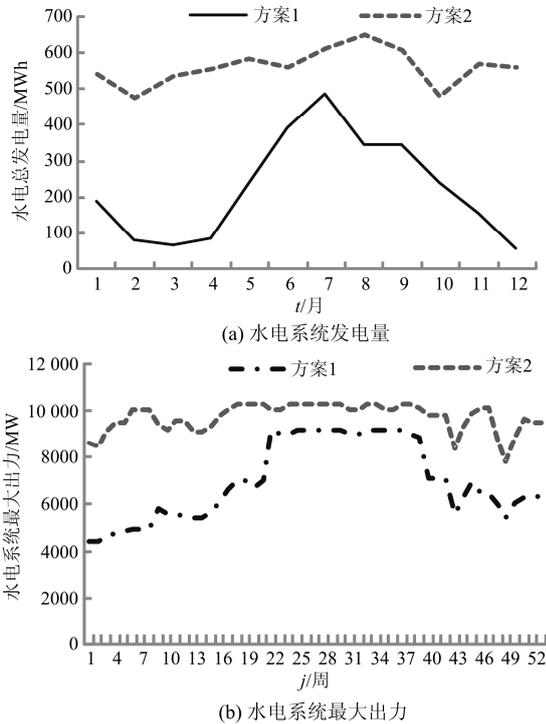


图1 方案1与方案2的对比

Fig. 1 Comparison of scheme 1 and scheme 2

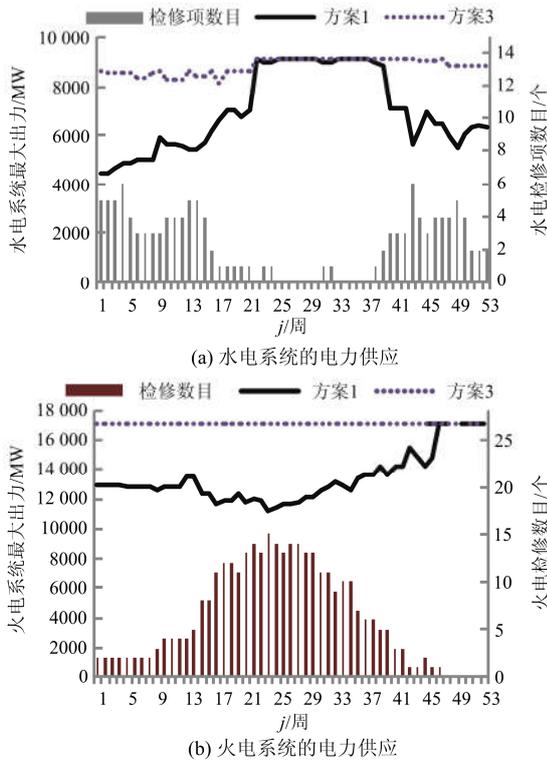


图2 方案1与方案3的对比

Fig. 2 Comparison of scheme 1 and scheme 3

为了分析不同的置信水平对电力电量分析结果的影响, 分别将电量置信水平 β_1 、电力置信水平

β_2 和水库平衡的置信水平 β_3 设置为 0.6、0.7、0.8、0.9 和 0.99 时, 得到的整个周期最大电力调整量和总电量调整量如表 2 所示, 调整措施费用如图 3 所示。

表 2 电力电量调整量

Table 2 Adjustment of electric power and energy		
置信水平	最大电力调整量/MW	总电量调整量/万 MWh
0.6	2063.86	673.36
0.7	2658.55	794.19
0.8	3280.05	933.23
0.9	3963.49	1109.44
0.99	4281.19	1575.05

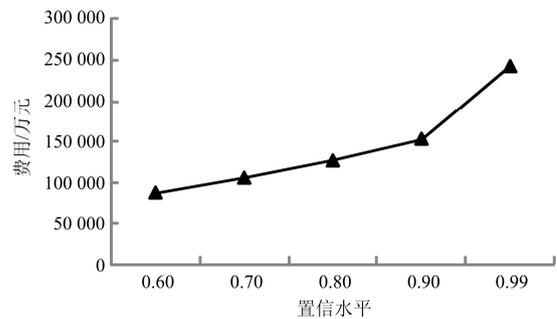


图3 调整措施的费用

Fig. 3 Cost of adjustment measures

从表 1 和图 3 中可以看出, 随着置信水平从 0.6 提高到 0.8, 最大电力调整量也从 2063.8 MW 增加到 4281.19, 总电量调整量从 673.36 万 MWh 增加到 1575.05 万 MWh, 同时调整措施的费用也相应单调增加。由此可见, 置信水平对分析结果影响较大。当置信水平设置较高时, 有利于提高系统的安全性, 但会造成风电和水电的利用率较低, 经济性较差, 增加成本; 当置信水平设置较低时, 会造成电力电量分析结果偏乐观, 带来较大的安全隐患。因此需要根据实际需求, 设置合理的置信水平, 同时兼顾经济性和安全性。

4 结论

本文提出了基于机会约束规划的电力电量平衡分析优化模型。模型以调减外送电、增加外购电和可中断负荷等调整措施费用最小为目标函数, 构建了水库调度和机组检修相关约束, 同时在模型中利用机会约束规划方法来处理出力负荷、风电和来水等随机变量, 并推导出了概率模型的确量化表示形式。最后通过实际仿真系统计算, 得出如下结果: 水库调度和机组检修情况都会对机组发电能力产生较大影响, 从而影响电力电量平衡分析结果的合理性, 因此在模型中应该予以考虑; 机会约束规划能

够较好地描述负荷、风电和来水的不确定性, 有效地权衡了系统运行的经济性和安全性之间的关系。

参考文献

- [1] 蒲天骄, 陈乃仕, 葛贤军, 等. 电力电量平衡评价指标体系及其综合评估方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 250-256.
PU Tianjiao, CHEN Naishi, GE Xianjun, et al. Research on evaluation index system and synthetical evaluation method for balance of electric power and energy[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 250-256.
- [2] 崔晓丹, 李碧君, 李威, 等. 设备月度检修计划给定下的电网运行方式优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 102-107.
CUI Xiaodan, LI Bijun, LI Wei, et al. Operation mode optimization method of power grid with equipment monthly maintenance planning[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 102-107.
- [3] 庞峰. 电力电量平衡新方法[J]. 水力发电学报, 2001, 4(6): 116-121.
PANG Feng. The new method about electric power and energy balance[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001, 4(6): 116-121.
- [4] 陈森林. 电力电量平衡算法及其应用研究[J]. 水力发电, 2004, 30(2): 15-19.
CHEN Senlin. Study and application of the algorithm of the electric power and energy balance method[J]. Water Power, 2004, 30(2): 15-19.
- [5] 丘文千. 抽水蓄能电站及其系统运行优化的概率模拟算法[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 95-100.
QIU Wenqian. Probabilistic simulation algorithm for pumped storage power station and system operational optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 95-100.
- [6] 赖晓文, 钟海旺, 杨军峰, 等. 全网统筹电力电量平衡协调优化方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 97-104.
LAI Xiaowen, ZHONG Haiwang, YANG Junfeng, et al. A coordinated optimization method for system-wide power supply-demand balancing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 97-104.
- [7] PENG C, XIE P, PAN L, et al. Flexible robust optimization dispatch for hybrid wind/photovoltaic/hydro/thermal power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 751-762.
- [8] MICHAEL N, DINH H N, MARIAN P. Risk assessment for power system operation planning with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1359-1358.
- [9] 郭琳, 文旭, 赵志强, 等. 计及节能风险评估的月度随机规划调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 22-29.
GUO Lin, WEN Xu, ZHAO Zhiqiang, et al. A stochastic programming monthly generation dispatching model considering energy-saving risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 22-29.
- [10] DAVID P, JAVIER C. A chance-constrained unit commitment with an n-K security criterion and significant[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2842-2851.
- [11] 李奔, 刘会家, 李珺. 考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 57-62.
LI Ben, LIU Huijia, LI Jun. Multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators considering network survivability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 57-62.
- [12] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 基于可信理论的多目标模糊机会约束无功优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 82-89.
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained optimal reactive power flow based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 82-89.
- [13] LIU X, XU W. Economic load dispatch constrained by wind power availability: a here-and-now approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 2-9.
- [14] 葛晓琳, 舒隽, 张粒子. 考虑检修计划的中长期水火联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 36-43.
GE Xiaolin, SHU Jun, ZHANG Lizi. Mid-long term optimal dispatching method of hydro-thermal power system considering scheduled maintenance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 36-43.
- [15] 周明, 夏澍, 李琰, 等. 含风电的电力系统月度机组组合和检修计划联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1586-1594.
ZHOU Ming, XIA Shu, LI Yan, et al. A joint optimization approach on monthly unit commitment and maintenance scheduling for wind power integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1586-1594.

收稿日期: 2016-08-21; 修回日期: 2016-10-22

作者简介:

夏 澍(1987—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: 870828@ncepu.edu.cn

葛晓琳(1988—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力优化调度; E-mail: gexiaolin2005@126.com

季海华(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行、分析与控制。E-mail: penguim0803@gmail.com

(编辑 葛艳娜)