

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190920

考虑需求响应的多目标机组检修调度优化

俞晨奎¹, 孔维禄², 俞柏红¹, 王林炎³

(1. 国网浙江慈溪市供电有限公司, 浙江 宁波 315300; 2. 国网浙江杭州供电有限公司, 浙江 杭州 310000;
3. 华北电力大学, 北京 100026)

摘要: 随着用户多元化用能差异化发展, 针对用户的需求响应可以为机组检修调度提供便利。提出了一种考虑需求响应的多目标发电检修调度模型, 考虑了环境、经济以及系统可靠性的目标, 并利用词典编纂算法进行求解。首先提出了四阶段求解流程和词典编纂算法, 说明了鼓励指标与系统备用水平指标的含义。并针对需求侧管理和需求响应建立相应模型。然后建立了多目标机组检修调度优化模型。在环境目标方面, 考虑了区域排放值和排放水平的影响, 并将两者计入到下一阶段的约束中。对运行、维护和备用成本最小化优化, 考虑了含有需求侧管理的可靠性指标最大化。最后利用 24 节点系统进行仿真, 说明了该模型的有效性和适用性。

关键词: 需求响应; 词典编纂算法; 多目标优化; 机组检修调度优化

Multi-objective optimization of generation maintenance scheduling considering demand response

YU Chenxi¹, KONG Weilu², YU Bohong¹, WANG Linyan³

(1. State Grid Zhejiang Cixi Power Supply Co., Ltd., Ningbo 315300, China; 2. State Grid Zhejiang Hangzhou Power Supply Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 100026, China)

Abstract: With the diversified development of user demand, demand response can facilitate unit maintenance scheduling. This paper proposes a multi-objective power generation maintenance scheduling model that considers demand response, takes the objectives of environment, economy and system reliability into account, and uses a lexicographic algorithm to solve the problem. First, a four-stage solution process and the lexicographic algorithm are proposed, with the explanations of the incentive index and the system reserve level indicator. A corresponding model for demand side management and demand response is built. Then this paper establishes a multi-target unit maintenance scheduling optimization model. It takes into account the impact of regional emission values and emission levels in terms of environmental objectives, and accounts for the next phase of constraints. It optimizes the minimum operating, maintenance and backup costs, and considers the maximization of reliability indicators with demand side management. Finally, the model is simulated in a 24-node system, and the effectiveness and applicability of the model are illustrated.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877190) "Optimization Operation and Risk Scheduling Method of Electrical Integrated Energy System".

Key words: demand response; lexicographic technique; multi-objective optimization; optimal generation maintenance scheduling

0 引言

机组检修对于电力系统保持可靠稳定供电十分重要, 一般机组检修计划需要考虑可靠性、经济性等内容^[1]。对于可靠性主要是指总备用最大、失负

荷最小等, 经济性主要是指检修成本最小。目前环境问题突出的背景下, 机组检修计划应当考虑环境性。另一方面, 机组检修需要考虑到用户负荷的特性, 通过用户的需求响应调整负荷的使用时间、使用电量, 可以提高机组检修效率、优化机组检修组合^[2]。

目前已有的研究主要针对单独检修调度的优化, 文献[3]考虑风电出力的随机性和相关性, 对含

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877190)“电气综合能源系统优化运行与风险调度方法”

风电的电力系统月度机组组合和检修计划联合调度进行优化。文献[4]针对机组检修与运行提出一种内嵌 $N-1$ 安全校核的月度电源运行结构优化的新模式。文献[5]提出了一种基于蚁群算法的机组检修调度优化。文献[6]对去管制电力市场环境下考虑线路阻塞时的发电机组检修规划进行了研究。文献[7]提出了考虑机组组合问题的机组检修计划优化的新模式。这类研究主要集中在与机组组合优化的对比^[8-9]、单目标优化^[10-11]等方面。

针对需求响应环境下的机组检修调度, 文献[12]考虑了需求弹性。另外文献[13]中考虑了需求响应对发电机组检修计划的影响。可见对于发电检修计划中计及需求响应的研究较少。一般来说, 需求响应在一定程度上影响着机组调度的优化, 也就影响着机组检修计划。电价的弹性和用户收益函数都会影响需求响应的结果, 如果在机组检修调度中考虑需求响应, 会比单纯地优化机组检修调度带来更大的经济和环境效益。

为此, 本文提出了一种考虑需求响应的多目标发电检修调度模型。考虑了环境、经济以及系统可靠性的目标, 利用词典编纂算法进行求解。本文同时研究了需求侧管理对系统稳定性的影响。首先, 在环境目标方面, 考虑了区域排放值和排放水平的影响, 并将两者计入到下一阶段的约束中; 然后, 运行、维护和备用成本最小化优化; 最后考虑了含有需求侧管理的可靠性指标最大化。

1 考虑需求响应的多目标机组检修调度概述

1.1 多目标模型求解框架

本文所提模型包括环境、经济 and 可靠性 3 个目标, 为了考察需求侧管理在多目标检修调度中的影响, 本文的研究分 4 个阶段, 其各阶段流程如图 1。

第一阶段, 求解环境目标模型, 将各区域总排放值做最小化处理; 第二阶段, 利用词典编纂算法, 将阶段 1 得到的排放值和排放水平作为配合约束计入阶段 2, 同时计算鼓励指标, 得到阶段 1 的最佳发电模式; 第三阶段, 不考虑需求侧管理的可靠性优化, 将阶段 2 得到的系统成本、排放值和排放水平计入配合约束; 第四阶段, 考虑需求侧管理的影响, 在整个调度周期内净备用均值最大, 同时利用阶段 3 得到的结果作为配合约束。

1.2 鼓励指标和备用指标

鼓励指标是根据环境目标函数优化得到的机组出力而进一步得到的, 具体计算式如式(1), 其可从阶段 1 的发电模式得到, 用于确保发电模式同前一阶

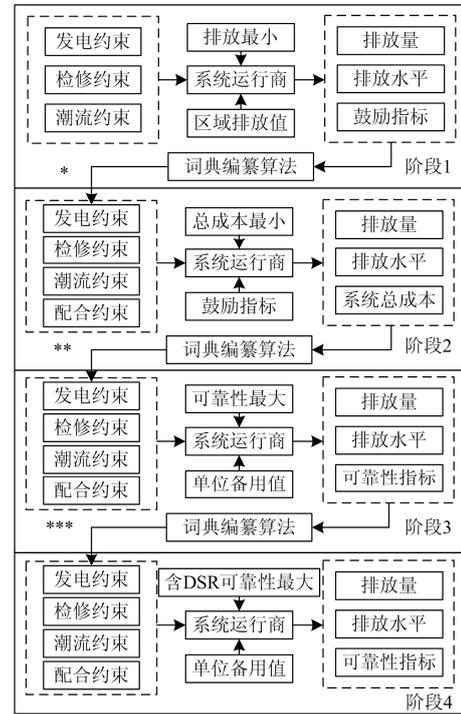


图 1 本文求解框架

Fig. 1 Solution scheme of the proposed method

段。本指标与阶段 1 的机组发电水平直接相关, 并且可以应用到阶段 2 经济目标的运行成本项中。也即, 为了处理阶段 2 的发电模式, 阶段 1 中发电水平越高, 阶段 2 中的指标就越小。

$$I^i(t) = 1 + \left(\frac{P_{\max}^i - P_{\text{ev}}^i(t)}{P_{\max}^i} \right) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{ev}}^i(t)$ 为 t 时段机组在环境目标约束下的出力水平, 可从阶段 1 得到; P_{\max}^i 为机组出力上限。该指标表示相对于机组以最大出力满发, 根据环境约束调整的出力越小, 机组所节省的出力则占比越大, 则越应当鼓励, 该指标最小为 1。

在每个阶段, 备用水平的变化可以影响系统运行商对于系统中突发事件的响应。推荐负荷峰值检修时备用剩余容量有所减少, 这主要是因为系统可靠性较低。备用剩余指标 $\beta(t)$ 可表示为^[14]

$$\beta(t) = \frac{\sum_{b \in N_B} D^b(t)}{\sum_{i \in N_G} P_{\max}^i - \sum_{b \in N_B} D^b(t)} \quad (2)$$

1.3 求解算法

本文中, 采用词典编纂技术^[15]求解多目标发电检修问题。该方法将目标函数按照重要程度排序, 可以人为指定或者系统指定, 并在各个阶段优化每个目标函数。首先, 得到最重要目标函数的解, 即

$$\min F_1(x) = F_1^* \quad (3)$$

然后优化第二重要的目标函数。同时保证第一个目标函数的最优解作为第二个目标函数的约束, 即 $F_1(x) \leq F_1^*$, 保留第一个目标函数的最优解。之后, 优化第三个目标函数, 利用 $F_1(x) \leq F_1^*$ 和 $F_2(x) \leq F_2^*$ 两个约束来保留之前的优化结果。因此, 多目标问题的优化求解模型为

$$\min F_k(x) \quad (4)$$

s.t.

$$F_j(x) \leq F_j^*(x_j^*); \forall j=1, 2, \dots, k-1; \forall k > 1 \quad (5)$$

$$F_j(x) \leq (1 + \delta_j) F_j^*(x_j^*); \forall j=1, 2, \dots, k-1; \forall k > 1 \quad (6)$$

式中: $\delta_j \in [0, 1]$ 用于调整搜索空间; k 表示目标函数推荐排序; $F_j^*(x_j^*)$ 表示 $F_j(x)$ 的最优值。

2 需求侧管理及需求响应模型

需求侧管理即根据对电价的需求响应进行负荷的调整, 包括用户消费习惯等。需求侧管理主要分为两类, 一是基于时间的管理, 二是基于激励的管理。第一种方式不使用惩罚或者激励, 第二种方式可以分为自愿、强制和基于市场的方式^[16]。

在智能电网背景下, 可以通过电价对用户的收益、电能价格波动、激励措施等来智能调整负荷曲线^[17]。为了评估需求响应对负荷曲线的影响, 需要考虑响应负荷的经济模型。响应负荷中的需求水平取决于非响应负荷占比、响应负荷占比、需求的电价弹性以及用户效益。其表达式为

$$D_{DR}^b(t) = (1 - \xi) D^b(t) + \xi D^b(t) \times \left(1 + \sum_{j \in T} E(t, j) \times \frac{Pr_{DR}^b(j) - Pr_0^b(j) + \tau^a(j) \eta_{opt}^b + \tau^e(j) \lambda_{opt}^b}{Pr_0^b(j)} \right) \quad (7)$$

本文主要考虑自愿型激励^[18]。因此 $\lambda^b(t)$ 可以忽略。如果用户削减 1 MW·h 的最大负荷水平, 系统运行商向用户支付 λ_{opt}^b 的激励, 则总的自愿型激励表达式为

$$\rho(\Delta D^b(t)) = \tau^a(j) \eta_{opt}^b (D^b(t) - D_{DR}^b(t)) \quad (8)$$

$$\tau(t) = \frac{D^b(t)}{D_{max}^b} \quad (9)$$

需求比 $\tau(t)$ 应用于 η_{opt}^b 可以得到不同时段的激励水平。其中 a 为激励调整系数, 用于表征需求比参数的效果。

则将上式整理, 得到式(10)和式(11)。

$$\rho(\Delta D^b(t)) = \beta_1^b(t) \eta_{opt}^{b^2} + \beta_2^b(t) \eta_{opt}^b + \beta_3^b(t) \quad (10)$$

$$\rho(\Delta D^b(t)) = \sigma_{inc}^b \phi^b(t) + \sum_{k \in N_{SE}^i} \sigma_k^b(t) \pi_k^b \quad (11)$$

3 考虑需求侧管理的机组检修调度优化模型

本文机组检修调度优化模型的目标为得到满足需求的最优检修计划, 同时将总成本、总排放最小化, 将系统可靠性不断提升。本文将负荷模拟为经济响应模型。

3.1 目标函数 1

环境目标是指排放值最小。电力系统中, 机组的排放函数一般为二次函数^[19]。本文中, 为了反映区域单位排放成本, 将 v^i 计入到排放函数中。这样一来, 城市机组与其他地域的排放系数则有所差别。

$$\min f_1 = \sum_{i \in T} \sum_{i \in N_G} v^i \left(E_{min}^i u^i(t) + \sum_{k \in N_{SE}^i} E_k^i(t) \gamma_k^i \right) \quad (12)$$

式中: v^i 为区域排放成本系数; E_{min} 为机组 i 的排放下限; $E_k^i(t)$ 为机组 i 在 t 时段 k 段的排放量; $u^i(t)$ 为机组组合状态, 1 为开启, 0 为停运; γ_k^i 为排放曲线 k 段斜率; N_G 为机组数量; N_{SE}^i 为排放曲线线性化段数^[20]。

约束条件包括:

1) 供需平衡约束

$$\sum_{i \in N_G} P_G^i(t) = P_{loss}(t) + \sum_{b \in N_B} P_D^b(t) \quad (13)$$

$$P_G^i(t) = \{P_{min}^i(t) \times u^i(t)\} + \sum_{k \in N_{SE}^i} G_k^i(t) \quad (14)$$

$$\sum_{i \in N_G} u^i(t) P_{max}^i(t) \geq \left\{ SR(t) + P_{loss}(t) + \sum_{b \in N_B} P_D^b(t) \right\} \quad (15)$$

$$\sum_{i \in N_G} R^i(t) \geq SR(t) \quad (16)$$

$$0 \leq R^i(t) \leq \{P_{max}^i(t) - P_{min}^i(t)\} \times u^i(t) \quad (17)$$

$$P_{min}^i(t) \leq P_G^i(t) \leq \{P_{max}^i(t) \times u^i(t)\} - R^i(t) \quad (18)$$

式中: $P_G^i(t)$ 为机组 i 在 t 时段的出力; $P_{loss}(t)$ 为 t 时段的损耗; $P_D^b(t)$ 为需求管理前节点 b 在 t 时段的需求; $P_{min}^i(t)$ 和 $P_{max}^i(t)$ 分别为机组最小出力和最大出力; $G_k^i(t)$ 为机组 i 在 t 时段线性化成本 k 段的出力; $SR(t)$ 为 t 时段旋转备用容量; $R^i(t)$ 为机组 i 在 t 时段的备用水平。

其中功率平衡满足式(13), 同时还应留有一部分备用。

2) 检修约束

$$\sum_{t \in T} m^i(t) = \tau^i \quad (19)$$

$$\sum_{t \in T} \varpi^i(t) = 1 \quad (20)$$

$$m^i(t) - m^i(t-1) \leq \varpi^i(t) \quad (21)$$

$$m^i(t) + u^i(t) \leq 1 \quad (22)$$

$$m^i(t) + m^j(t) + m^k(t) \leq 1 \quad (23)$$

$$\varpi^i(t) + \varpi^j(t) \leq 1 \quad (24)$$

其中, 还应满足以下约束。

$$\sum_{t \in T} \varpi^i(t) \geq \varpi^j(t) \quad (25)$$

$$\sum_{i \in N_G} m^i(t) \leq \delta(t) \quad (26)$$

$$\varpi^i(t) = \varpi^j(t + \tau^i + k) \quad (27)$$

$$1 \leq t \leq T - \tau^i - k \quad (28)$$

$$\sum_{t=1}^{T-\tau^i-k} [\varpi^i(t) + \varpi^j(t + \tau^i + k)] = 2 \quad (29)$$

$$\varpi^i(t) = \varpi^j(t + \tau^i - h) \quad (30)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in N_G^i} m^j(t) \leq N_{\max}^M \quad (31)$$

式中: $m^i(t)$ 为机组 i 在 t 时段的检修状态; $\varpi^i(t)$ 为检修初始状态, 如果机组检修在 t 时段初始, 则为 1, 其余为 0; τ^i 为机组 i 检修持续时长; N_{\max}^M 为区域内检修机组最大数量。

式(19)说明了指定时间机组 i 的检修情况; 式(20)指出了每台机组在指定时间段只可进行一次检修, 连续时段的检修可以通过式(21)保证; 式(22)用于满足检修和机组组合状态的关系; 式(23)指出机组不能同时检修; 式(24)、式(25)说明了机组 i 的检修先于机组 j ; 式(26)表示受技术限制机组同时检修数量有限; 式(29)说明了检修间隔时长; 式(30)说明机组 i 和 j 的检修均包括指定的重叠时间 h ; 式(31)表示区域内检修机组的最大数量, 避免电力系统内的出力削减。其中式(19)一式(22)为检修情况下的强制约束, 而约束式(23)一式(31)为取决于系统条件的限值。

3) 线路潮流约束

机组分布在不同的区域, 这会影响到检修计划, 因此应当保持功率平衡, 应当尽量减少切负荷, 应当满足线路潮流限值, 也要保证总的负荷切除少于未用电能的允许值^[21]。

$$s^T f^L(t) + g(t) + r(t) = P_D^b(t) \quad (32)$$

$$0 \leq r^b(t) \leq P_D^b(t) \quad (33)$$

$$-f_{\max}^l \leq f^l(t) \leq f_{\max}^l \quad (34)$$

$$\sum_{b \in N_B} r^b(t) \leq \varepsilon \quad (35)$$

式中: s^T 为节点支路关联矩阵; $f^L(t)$ 为 t 时段有功潮流向量; $g(t)$ 为 t 时段有功潮流出力; $r(t)$ 为 t 时段负荷削减向量; $P_D^b(t)$ 为 t 时段负荷需求; ε 为负荷削减可接受水平; f_{\max}^l 为线路潮流上限。

3.2 目标函数 2

经济目标的目的是系统成本最小。包括运行、维护、备用成本在内的总成本最小。

$$\min f_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_G} \left\{ \Gamma^i(t) \left(G_{\min}^i u^i(t) + \sum_{k \in N_{SE}^i} G_k^i(t) A_k^i \right) + \left. \begin{array}{l} m^i(t) \lambda_c^i + R^i(t) \mu_c^i \end{array} \right\} \quad (36)$$

约束条件包括:

1) 同式(13)一式(35)。

2) 配合约束。

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in N_G} \left(E_{\min}^i u^i(t) + \sum_{k \in N_{SE}^i} E_k^i(t) \gamma_k^i \right) \leq E_1^* \quad (37)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in N_G} v^i \left(E_{\min}^i u^i(t) + \sum_{k \in N_{SE}^i} E_k^i(t) \gamma_k^i \right) \leq E_v^* \quad (38)$$

式中: $\Gamma^i(t)$ 为机组 i 在 t 时段的鼓励指数; G_{\min}^i 为机组 i 最低发电成本; $G_k^i(t)$ 为机组 i 的 k 段线性化成本; A_k^i 为成本斜率; λ_c^i 为机组 i 的检修成本; μ_c^i 为机组 i 的旋转备用成本; E_1^* 为排放水平; E_v^* 为排放值。

配合约束反映了排放对于环境的影响, 以及环境成本。

3.3 目标函数 3

目标函数 3 为可靠性目标。该目标是最大化调度时段的净备用均值^[22]。

$$\max f_3 = \frac{1}{T} \sum_{t \in T} \beta(t) \left\{ \sum_{i \in N_G} P_{\max}^i (1 - m^i(t)) - \sum_{b \in N_B} P_{DR}^b(t) \right\} \quad (39)$$

约束条件包括:

1) 约束式(13)一式(35)。

2) 配合约束。

$$\rho_{\min}^b(t) \leq \rho_{\text{opt}}^b(t) \leq \rho_{\max}^b(t) \quad (40)$$

$$\rho_{\text{opt}}^b = \left[\rho_{\min}^b(t) \times \phi^b(t) \right] + \sum_{k \in N_{SI}^b} \sigma_k^b(t) \quad (41)$$

$$0 \leq \sigma_k^b(t) \leq \sigma_{k \max}^b(t) \quad (42)$$

$$\sum_{b \in N_B} \phi^b(t) \leq N_{\text{DRR max}}(t) \quad (43)$$

$$\sum_{i \in N_G} P_{\max}^i (1 - m^i(t)) - \sum_{b \in N_B} P_{DR}^b \geq R_{Th}(t) \quad (44)$$

$$R_{Th}(t) = \alpha(t) \times \sum_{b \in N_B} P_{DR}^b(t) \times \left(\frac{\sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in N_G} P_{\max}^i - \sum_{b \in N_B} P_D^b(t) \right)}{\sum_{t \in T} \sum_{b \in N_B} P_D^b(t)} \right) \quad (45)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in N_G} \left(E_{\min}^i u^i(t) + \sum_{k \in N_{SE}^i} E_k^i(t) \gamma_k^i \right) \leq E_1^{**} \quad (46)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in N_G} v^i \left(E_{\min}^i u^i(t) + \sum_{k \in N_{SE}^i} E_k^i(t) \gamma_k^i \right) \leq E_v^{**} \quad (47)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in N_G} \left(G_{c \min}^i u^i(t) + \sum_{k \in N_{SF}^i} G_k^i(t) \lambda_k^i + m^i(t) \lambda_c^i + R^i(t) \mu_c^i \right) + \sum_{t \in T} \sum_{b \in N_B} \left(\sigma_{\min}^b \phi^b(t) + \sum_{k \in N_{SI}^b} \sigma_k^b(t) \pi_k^b \right) \leq TC_1^{**} \quad (48)$$

式中： $\beta(t)$ 为时段 t 每MW备用值； ρ_{opt} 为节点 b 需求响应的激励； $\phi^b(t)$ 为 t 时段节点 b 的需求响应状态，1为用户参与，0为不参与； $\sigma_k^b(t)$ 为 t 时段节点 b 的激励收益 k 段线性值； $N_{DRR \max}(t)$ 为 t 时段参与需求响应的最大数量； $R_{Th}(t)$ 为 t 时段最小净备用； E_1^{**} 和 E_v^{**} 为第二个目标函数中得到的排放水平和排放值。

考虑到需求响应， $P_D(t)$ 变为 $P_{DR}(t)$ ；激励的水平由式(40)确定；式(43)说明了需求响应位置的最大数量；式(45)确保了机组检修调度的净备用水平， $R_{Th}(t)$ 作为阈值，与负荷需求以及调度时段内总备用成比例关系；式(46)一式(48)为排放值、排放水平以及排放成本的约束，阈值均由上一目标函数求出。

4 算例分析

4.1 系统说明

如图2所示，本文选取24节点系统进行仿真分析，仿真环境为Matlab2014b。该系统包括26台机组，其中15台燃油机组(O)，9台燃煤机组(C)，2台核电机组(N)^[23]。

调度时段为52周，负荷峰值为2 100 MW。排放函数和成本函数均线性化为20段^[24]。段数的选取是满足相应的斜率低于0.05从而更加逼近二次函数。为了体现机组的区域差异，考虑3个区域差别， v^i 分别为0.8、1和1.2 1/lbs。为了在负荷峰值提高机组

备用水平，考虑备用系数 $\alpha(t)$ ，即：对于超过负荷需求88%的负荷， $\alpha(t)$ 取0.5；对于75%~88%的水平范围， $\alpha(t)$ 取0.45；低于75%的，取0.4。同样考虑机组检修的优先级，三台机组可以同时检修。本文忽略网损，系统不存留未用电量。在本文的求解方法中， δ_j 为0.1。

本文考虑含需求侧管理和不含需求侧管理的两种场景。

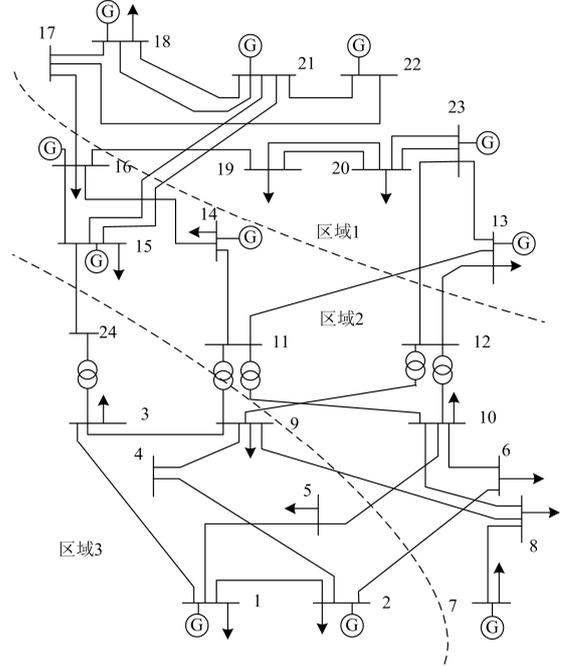


图 2 24 节点系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 24 bus system

4.2 算例分析

1) 不含需求侧管理场景

在该场景中，首先将机组排放值作最小化优化。然后，利用得到的结果，即109.568 M，计算鼓励指数 I^i ，并求解排放水平，将阶段1的值每增大10%作为阶段2的约束。因此，式(37)和式(38)右边为137.675和120.525 Mlbs。在阶段3，将净备用均值作最大化优化，排放水平以及阶段2的成本每增加10%即作为阶段3的约束。因此，式(46)一式(48)的右边分别为139.404 Mlbs, 121.518 M和264.078 M\$。

该场景的排放和成本结果如图3。可以看出，排放值在阶段1已处于最低值，系统成本在阶段2达到最低值，在阶段3，首先将式(46)一式(48)的上限约束设为阶段2优化结果的110%，然后与前一阶段进行比较，得到净备用均值在增大。净备用均值取决于调度阶段内的 $\beta(t)$ 和净备用水平，在1—3阶段中分别为1 421.577、1 420.683和1 460.865 MW。

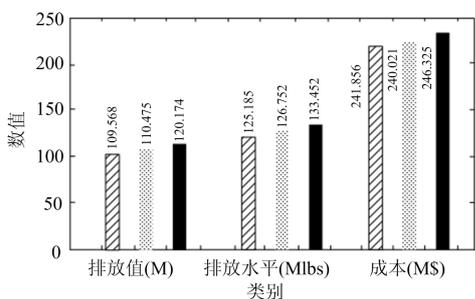


图3 排放及成本对比

Fig. 3 Results of emission and costs

各机组的检修时间结果如表1, 调度时期的净备用水平如图4。

表1 各机组检修安排结果

Table 1 Results of maintenance plan of every generator

机组	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
阶段1	47-48	3-4	24-25	20-21	51-52	1-2	32-33
阶段2	17-18	32-33	40-41	13-14	35-36	20-21	1-2
阶段3	21-22	21-22	7-8	7-8	21-22	8-9	42-43
机组	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14
阶段1	23-24	14-15	29-31	3-5	50-52	24-27	20-23
阶段2	23-24	12-13	29-31	24-26	7-9	24-27	1-4
阶段3	16-17	16-17	40-42	31-33	9-11	35-38	38-41
机组	O15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
阶段1	17-20	6-8	17-19	36-38	26-28	36-39	39-42
阶段2	46-49	21-23	17-19	36-38	26-28	36-39	39-42
阶段3	12-15	31-33	27-29	27-29	27-29	39-42	14-17
机组	C22	C23	C24	N25	N26		
阶段1	9-12	40-43	31-35	6-11	12-17		
阶段2	9-12	40-43	31-35	6-11	12-17		
阶段3	34-37	31-34	9-13	34-39	10-15		

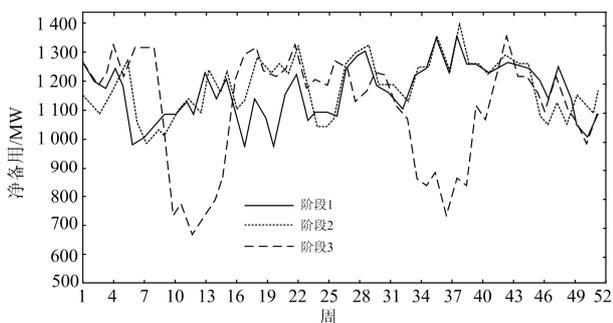


图4 各阶段调度净备用水平

Fig. 4 Results of net reserve of every stage

根据图4, 可以看出10—15周和34—41周第三阶段的净备用水平均低于其在1—2阶段的值。这主要是因为10—15周内和34—41周内, 第三阶段与前两阶段相比分配了更多的机组进行停机检修, 因此机组备用不足, 详见表1内机组检修情况。

2) 含需求侧管理场景

该情景中主要分析了需求侧管理对系统可靠性的影响以及对需求响应激励的影响。本文考虑的负荷分时电价^[25], 分时阶段为周。

考虑到排放水平和排放值, 相比场景1, 本场景的总成本并未增加。式(46)一式(48)右边设为情景1的最优值, 即133.44 Mlbs、120.17 M和246.3 M\$。考虑到式(48), 场景1的运行、检修和备用成本为246.34 \$; 场景2中, 这些总成本再加上总激励低于246.34 M\$。

(1) 需求侧管理对系统可靠性的影响

假设需求侧管理在所有负荷节点投入, 场景2的净备用均值为1 498.45 MW, 比情景1的净备用均值高2.58%。表2给出了本场景和场景1得到的参数结果对比, 结果显示, 虽然场景2含有附加激励成本, 但是总成本大致与场景1相同。

表2 经济环境参数对比

Table 2 Comparison of economic and environmental parameters

情景	运行维护成本/M\$	总备用成本/M\$	总激励/M\$	总成本
1	192.099	54.24	—	247.335
2	191.879	51.765	2.67	247.032
情景	SO ₂ /Mlbs	NO _x /Mlbs	总排放/Mlbs	排放值/M
1	38.134	95.344	133.445	120.23
2	38.087	95.114	133.234	120.322

场景1的调度时段的净备用值和场景2的值对比如表3。可以看出, 消费者需求受弹性变化而发生的变化, 主要是由于需求侧管理的接入导致峰荷时用户不愿意进行消费, 而其自弹性具有更好的效果。但是在负荷低谷, 需求有所增加。相比情景1, 情景2的净备用水平在23—25和44—52周期均有所增加。

(2) 需求侧管理数量对系统的影响

该场景主要考查需求侧管理数量对地区激励和净储备配置的影响。用户在不同地区参与需求侧管理, 并做出不同响应。在不同区域(1,5,9,13和17节点)参与需求响应的用户相比情景1在成本、排放水平方面要更低。

可以看出, 需求侧管理数量的增长会扩大用户需求响应模式的多样性, 因此净备用均值也有所改善。不同地区的用户可以根据激励政策的不同充分利用需求侧管理。从表4中可以看出, 18节点的灵敏度最高。

表5给出了该场景运维成本、备用成本、总激励、排放水平和排放值的对比。可以看出, 需求侧管理数量的增加会带来用户需求响应收益的增加。其他参数的变化是由于需求侧管理存在带来的需求变化。虽然需求响应激励增加了额外成本, 但是总

表3 净备用值对比

Table 3 Comparison of net reserve value

周	净备用/MW		周	净备用/MW	
	无 DSR	含 DSR		无 DSR	含 DSR
1	1 289	1 276	27	1 289	1 267
2	1 221	1 232	28	1 155	1 131
3	1 267	1 245	29	1 189	1 165
4	1 354	1 328	30	1 260	1 229
5	1 266	1 220	31	1 263	1 235
6	1 339	1 298	32	1 146	1 120
7	1 332	1 298	33	1 092	1 056
8	1 387	1 336	34	861	835
9	1 087	1 060	35	823	802
10	701	698	36	887	863
11	765	734	37	719	697
12	621	591	38	846	822
13	677	659	39	824	803
14	783	759	40	1 129	1 102
15	832	820	41	1 098	1 075
16	1 229	1 199	42	1 274	1 263
17	1 327	1 296	43	1 401	1 385
18	1 338	1 319	44	1 245	1 432
19	1 285	1 264	45	1 234	1 422
20	1 263	1 218	46	1 201	1 385
21	1 279	1 232	47	1 128	1 328
22	1 364	1 328	48	1 226	1 420
23	1 209	1 287	49	1 121	1 325
24	1 253	1 300	50	1 081	1 288
25	1 226	1 289	51	1 002	1 209
26	1 301	1 267	52	1 104	1 305

表4 需求侧管理最佳位置及激励值

Table 4 Optimal value of the award and location of DRPs

节点号	位置				
	1	5	9	13	17
1	—	—	—	4.903	4.903
2	—	—	—	—	4.888
3	—	—	4.658	4.658	4.658
4	—	—	—	—	4.866
5	—	—	—	—	4.866
6	—	—	—	4.866	4.866
7	—	—	—	5.025	5.025
8	—	—	5.003	5.003	5.003
9	—	—	4.717	4.717	4.717
10	—	4.776	4.776	4.776	4.776
13	—	4.566	4.566	4.566	4.566
14	—	4.665	4.665	4.665	4.665
15	—	4.293	4.293	4.293	4.293
16	—	—	—	—	4.503
18	4.441	4.441	4.441	4.441	4.441
19	—	—	4.534	4.534	4.534
20	—	—	—	4.467	4.467

成本和排放水平相比情景1都降低或者持平。与此同时，需求侧管理数量的增长使得净备用均值有所增加。

表5 经济环境参数结果

Table 5 Economic and environmental parameters

位置	运行维护 成本/M\$	备用成本/ M\$	总激励/ M\$	排放水平/ Mlbs	排放值/M
1	190.876	54.377	0.365	132.490	120
5	192.439	52.433	1.107	133.787	120
9	192.633	51.489	1.998	133.876	120
13	192.478	51.097	2.236	133.765	120
17	191.980	51.476	2.454	133.287	120

表6给出了该场景中机组检修计划。考虑到最大可靠性约束，所有机组检修计划与之前场景类似。

表6 机组检修计划结果

Table 6 Maintenance plan of generators

机组	计划检修周				
O1	21-22	21-22	7-8	21-22	7-8
O2	21-22	21-22	21-22	7-8	21-22
O3	7-8	7-8	7-8	21-22	21-22
O4	21-22	7-8	21-22	21-22	21-22
O5	7-8	21-22	21-22	7-8	7-8
O6	16-17	16-17	16-17	8-9	16-17
O7	8-9	16-17	16-17	16-17	8-9
O8	16-17	8-9	42-43	42-43	16-17
O9	42-43	42-43	8-9	16-17	42-43
O10	9-11	9-11	40-42	40-42	9-11
O11	40-42	31-33	9-11	9-11	31-33
O12	31-33	40-42	31-33	31-33	40-42
O13	38-41	38-41	38-41	12-15	38-41
O14	35-38	12-15	12-15	35-38	12-15
O15	12-15	35-38	35-38	38-41	35-38
C16	27-29	27-29	31-33	27-29	27-29
C17	27-29	27-29	27-29	31-33	27-29
C18	31-33	31-33	27-29	27-29	31-33
C19	27-29	27-29	27-29	27-29	27-29
C20	31-34	31-34	31-34	31-34	31-34
C21	14-17	39-42	34-37	34-37	14-17
C22	39-42	14-17	39-42	39-42	39-42
C23	34-37	34-37	14-17	14-17	34-37
C24	9-13	9-13	9-13	9-13	9-13
N25	34-39	34-39	34-39	34-39	10-15
N26	10-15	10-15	10-15	10-15	34-39

经以上分析，说明本文所提模型和方法的有效性。

5 结论

本文提出了一种考虑需求响应的多目标发电检修调度模型。考虑了环境、经济以及系统可靠性的目标，利用字典编纂算法进行求解。本文同时研究

了需求侧管理对系统稳定性的影响。首先, 在环境目标方面, 考虑了区域排放值和排放水平的影响, 并将两者计入到下一阶段的约束中; 然后, 运行、维护和备用成本最小化优化; 最后考虑了含有需求侧管理的可靠性指标最大化。利用 24 节点系统对本文进行仿真。确定了各区域最优的激励、用户参与需求响应的潜力、检修计划、机组组合状态、备用水平等。通过仿真得到, 考虑需求响应之后, 排放并未增加, 同时提高了系统可靠性。另外, 合理的激励政策会促进用户参与需求响应, 提高净备用均值, 从而能够提高系统的可靠性。

参考文献

- [1] 李本新, 韩学山. 发输电检修与机组组合联合决策的 Benders 分解方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 224-231.
LI Benxin, HAN Xueshan. Benders decomposition algorithm to coordination of generation and transmission maintenance scheduling with unit commitment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 224-231.
- [2] 夏寅, 张晓青. 配电自动化二次设备风险评估与检修决策研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 155-160.
XIA Yan, ZHANG Xiaoqing. Research on risk assessment and maintenance decision of secondary equipment of distribution automation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 155-160.
- [3] 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): 1586-1595.
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): 1586-1595.
- [4] 汪洋, 钟海旺, 夏清, 等. 机组检修与运行组合的协同优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 26-31.
WANG Yang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Collaborative optimization of unit maintenance and security-constrained unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 26-31.
- [5] 院晓涛, 姚建刚, 陈亮. 基于改进蚁群算法的发电机组检修计划优化[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 42-46.
YUAN Xiaotao, YAO Jianguang, CHEN Liang. Solving unit maintenance scheduling problem by use of improved ant colony algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 42-46.
- [6] GOLMOHAMADI H, RAMEZANI M, BASHIAN A, et al. Risk-based maintenance scheduling of generating units in the deregulated environment considering transmission network congestion[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 150-162.
- [7] 王晓滨, 余秀月, 杨贵钟. 考虑机组组合问题的机组检修计划优化新模型[J]. 能源工程, 2010(6): 15-20.
WANG Xiaobin, YU Xiuyue, YANG Guizhong. A modified discrete particle swarm optimization algorithm to unit maintenance scheduling with unit commitment[J]. Energy Engineering, 2010(6): 15-20.
- [8] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 60-68.
PENG Chunhua, LIU Bing, ZUO Lixia, et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 60-68.
- [9] 卢艺, 卢苑, 梁俊文, 等. 含抽水蓄能电网安全约束机组组合问题的混合整数线性规划算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 39-47.
LU Yi, LU Yuan, LIANG Junwen, et al. Mixed integer linear programming algorithm for solving security constrained unit commitment problem of power grid with pumped storage hydro[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 39-47.
- [10] 张倩文, 王秀丽, 杨廷天, 等. 大用户直购电模式下含大规模风光的电力系统优化调度[J]. 电力建设, 2017, 38(10): 24-32.
ZHANG Qianwen, WANG Xiuli, YANG Tingtian, et al. Optimal dispatch of power system containing large scale wind-photovoltaic power with direct power purchase by large consumers[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(10): 24-32.
- [11] 季峰, 蔡兴国. 含风电电力系统的月度机组组合模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 40-46.
JI Feng, CAI Xingguo. Monthly unit commitment model of power system with integrated wind power[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 40-46.
- [12] 方陈, 夏清, 孙欣. 考虑需求弹性的发电检修协调方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 38-44.
FANG Chen, XIA Qing, SUN Xin. Unit maintenance coordination method considering demand elasticity[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 38-44.
- [13] 王正风, 袁辉. 发输电设备检修计划优化决策系统设计与应用[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 132-137.
WANG Zhengfeng, YUAN Hui. Design and application for maintenance plan optimization decision system of

- generation and transmission equipment[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(2): 132-137.
- [14] EL-AMIN I, DUFFUAA S, ABBAS M. A tabu search algorithm for maintenance scheduling of generating units[J]. *Electric Power Systems Research*, 2000, 54(2): 91-99.
- [15] AHMADI A, AHMADI M R, NEZHAD A E. A lexicographic optimization and augmented ϵ -constraint technique for short-term environmental/economic combined heat and power scheduling[J]. *Electric Machines & Power Systems*, 2014, 42(9): 945-958.
- [16] WIJAYA T K, VASIRANI M, ABERER K. When bias matters: an economic assessment of demand response baselines for residential customers[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(4): 1755-1763.
- [17] 石坤, 李德智, 何胜, 等. 计及需求侧资源的电网分层分区供需平衡调控方法[J]. *现代电力*, 2018, 35(1): 66-70.
SHI Kun, LI Dezhi, HE Sheng, et al. A layered-divisional dispatching method for balancing supply and demand of power grid by considering demand side resources[J]. *Modern Electric Power*, 2018, 35(1): 66-70.
- [18] 王梅霖. 电力需求侧管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WANG Meilin. Research on the electric power demand side management[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [19] 麻秀范, 王超, 洪潇, 等. 基于实时电价的电动汽车充放电优化策略和经济调度模型[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(增刊 1): 190-202.
MA Xiufan, WANG Chao, HONG Xiao, et al. Optimal scheduling of charging and discharging of electric vehicle based on real time price and economic dispatch model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S1): 190-202.
- [20] 依俊楠, 龚英, 刘攀. 基于混合整数线性规划的梯级水电站短期优化调度[J]. *水力发电*, 2013, 39(10): 69-72.
YI Junnan, GONG Ying, LIU Pan. Optimal short-term hydro scheduling for cascade hydropower stations based on MILP[J]. *Water Power*, 2013, 39(10): 69-72.
- [21] 麻秀范, 王超, 洪潇, 等. 基于节点阻塞电价的电动汽车双层充电优化策略[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3706-3714.
MA Xiufan, WANG Chao, HONG Xiao, et al. A two layer model for electric vehicle charging optimization based on location marginal congestion price[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3706-3714.
- [22] 肖逸, 谢俊, 刘若平, 等. 计及风电功率预测误差的备用容量计算新方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 72-79.
XIAO Yi, XIE Jun, LIU Ruoping, et al. A new calculation method of reserve capacity considering wind power forecasting error[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 72-79.
- [23] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1780-1787.
- [24] MOLLAHASSANI-POUR M, RASHIDINEJAD M, ABDOLLAHI A. Appraisal of eco-friendly preventive maintenance scheduling strategy impacts on GHG emissions mitigation in smart grids[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 212-223.
- [25] VALERO S, ORTIZ M, SENABRE C, et al. Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2007, 1(1): 104-110.

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-12-30

作者简介:

俞晨玺(1993—), 女, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 1104045741@qq.com

孔维祿(1992—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: wlytonews@163.com

俞柏红(1993—), 男, 本科, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 13566062218@163.com

(编辑 葛艳娜)