

考虑需求弹性的发电检修协调方法

方陈¹, 夏清¹, 孙欣²

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 随着智能电网的发展, 用户的需求响应能力进一步增强, 对发电检修的协调安排带来了新的影响。提出了机组检修协调意愿费用曲线, 建立了考虑需求价格弹性的发电检修决策协调模型。在此基础上, 深入分析市场环境下中长期发电检修决策对短期市场供求关系及出清价格的影响。建立了用户电力需求随电价而弹性变化、最终受中长期发电检修决策影响的函数关系; 通过函数分段参数的讨论与约束的合并变换, 将非线性混合整数规划模型转化为线性整数规划模型; 根据智能电网下不同需求响应场景模拟, 评估分析了需求弹性对发电检修决策产生的影响与效益。

关键词: 发电检修计划; 需求响应; 价格弹性; 效益评估; 智能电网

Unit maintenance coordination method considering demand elasticity

FANG Chen¹, XIA Qing¹, SUN Xin²

(1. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: With the development of smart grid, demand response capacity is further enhanced, which influences the coordination of unit maintenance scheduling. Maintenance coordination cost curve is proposed, and unit maintenance coordination model is established considering the elasticity of demand price. On this basis, influence of long-term maintenance scheduling on short-term market demand-supply relationship and further on market clearing prices is analyzed. The function of load demand elastically changing with price and ultimately influenced by medium and long term maintenance scheduling is established. Accordingly, the nonlinear mixed integer programming model is simplified into linear integer programming model by function segment parameters discussion and constraints merging transformation. Finally, according to the simulation of different demand response scenarios of smart grid, the impact and benefit of demand elasticity on unit maintenance scheduling is assessed and analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50877041).

Key words: unit maintenance scheduling; demand response; price elasticity; benefit assessment; smart grid

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0038-07

0 引言

当前, 国际国内经济形势、能源形势正发生深刻变化, 新一轮世界能源变革已经拉开序幕。欧美发达国家从发展清洁能源、应对气候变化、保障能源安全、促进经济增长的需要出发, 相继提出发展智能电网的战略和措施, 智能化成为世界电力发展的新趋势^[1]。

互动性是智能电网的重要特征, 需求响应则是互动性的重要体现。随着智能电网的深入发展, 电网的需求响应能力不断增强。根据美国联邦能源监管委员会(FERC)在2008年底的统计, 大约有8%

的美国用户参与了需求响应(DR)项目, 所有DR资源总共达到了41GW(约5.8%系统高峰负荷), 而智能电表的普及率达到了4.7%。预计到2019年, 如果所有美国电力用户都采用动态电价与智能电网技术, DR资源可以达到188GW(约20%系统高峰负荷)^[2]。我国国家电网公司在其制订的智能电网建设计划中, 提出了至2020年基本建成坚强智能电网, 电网与电源、用户的互动水平显著提高的目标^[1]。届时, 我国电网的需求响应能力必将得到明显提升。

从宏观层面看, 智能电网需求响应能力的显著提升集中体现为负荷需求弹性的增强, 表现为在电力市场中将有更多的负荷以更灵敏的方式响应价格的变化。中长期的发电检修计划决策将在一定程度

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877041)

上改变短期电力市场的供求关系, 进而影响市场的出清电价。负荷需求随电价的弹性变化又将反馈改变检修决策的系统安全备用容量需求, 进而影响检修决策的安全性、经济性以及发电企业检修意愿的满足程度。随着智能电网时代的到来以及需求响应能力的提升, 在发电机组的检修决策中, 必须考虑检修决策与负荷需求弹性互动这一影响因素。

在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初, David A K 在负荷需求弹性方面做了大量的研究工作, 提出了负荷需求的时间交叉弹性系数^[3]。在此基础上, Kirschen D S 系统分析了负荷需求弹性矩阵的特征^[4], 并定量描述了需求弹性在电力市场中的效益^[5]。大量的文献进一步研究了需求弹性对长期的电源^[6]电网^[7]规划、短期的电力市场运行(包括交易模式^[8]、输电定价^[9]、备用配置^[10]、阻塞管理^[11]等)的影响。目前, 在中期(年度)层面上, 关于需求弹性对电力系统调度运行影响的相关研究还较少。文献[12]通过在年度发电检修计划安排中考虑可中断负荷的优化, 使全网在全年各周的备用更均匀化, 提高了电力系统的安全可靠性。

本文建立了市场环境下考虑需求弹性的发电检修协调模型, 并在智能电网不同需求响应能力的场景下, 模拟评估需求弹性对检修决策的影响与效益, 为智能电网中发电设备的检修计划协调安排提供了方法与思路。同时, 本文的研究工作, 也能为科学论证智能电网需求响应在降低系统检修备用容量方面的价值提供技术手段。

1 边界条件

首先说明本文研究问题的边界条件, 包括检修计划的安排模式、电力市场的交易模式以及负荷需求弹性的应用方法。

1.1 检修计划安排模式

本文研究电力市场环境下载电机组的年度检修计划协调安排。其流程如下:

- 1) 各发电企业申报机组年度检修计划。
- 2) 电力调度机构协调电网安全稳定运行受影响时段的检修计划。
- 3) 若在协调过程中有费用产生, 电力调度机构分摊相应费用。

本文的研究内容为 2), 重点研究需求弹性对检修计划协调决策的影响及其效益。同时, 为保证内容的完整性, 也将简要说明 1)、3) 部分的内容。

1.2 电力市场模式

中长期发电机组的检修计划安排将改变短期的电力市场有效竞争机组容量, 进而影响市场的供求

关系和出清价格。市场的出清价格变化将通过电力需求弹性反映为负荷需求的变化, 又将对发电机组的检修决策产生影响。

为了简化模型, 本文选用一部制电价、全电量竞争的日前发电侧电力市场作为分析对象。

1.3 电力需求弹性

电力需求弹性包括自弹性系数和交叉弹性系数, 分别描述单时段和多时段用户对电价的响应。在智能电网中, 通过智能电表和实时双向通信, 极大地加强了用户的短期负荷弹性。用户的高峰时段用电量将被削减或转移到其他时段。比如尼亚加拉莫霍电力公司(NMPC)分析了大用户实施 RTP 的需求响应。在转移用电的用户中, 有 35% 的用户将用电转移到了当天其他时段, 47% 的用户将用电转移到了第 2 天, 18% 的用户将用电转移到了第 3 天^[13]。本文的研究对象为智能电网下用户的短期负荷弹性, 且仅关注影响检修计划安排的周负荷峰值的需求弹性。通过上述的实例可知, 该需求电量将在本周内被直接削减或转移, 未影响到下周负荷峰值的需求弹性。为此, 本文仅考虑负荷需求的自弹性系数, 不考虑交叉弹性系数。

2 检修计划申报

2.1 检修计划申报要求

本文对发电厂商的检修申报要求如下:

- 1) 申报所有时段的检修意愿协调费用。
- 2) 至少有一段机组最适检修时段, 该时段的检修意愿协调费用应小于等于零。

所谓检修协调费用是为了使发电厂商将检修计划调整安排到该时段, 电力调度机构需要给发电厂商支付的经济补偿。这部分费用最终将通过电费分摊的方式向用户收取, 分摊方式可见文献[14]。

图 1 是某机组的检修协调费用曲线, 如图所示, 检修协调费用从时间维度可粗略分为三部分: 1) 最适检修时段 $[t_1, t_2]$, 机组在该时段检修, 可保证其综合考虑检修成本、市场竞争机会成本等后的总费用最低, 要求机组在该时段的检修协调费用申报需小于等于零。在特殊情况下, 当该时段的协调费用小于零时, 即为机组的检修意愿支付^[15]。2) 需要一定协调费用的检修时段 $[1, t_1]$ 和 $[t_2, t_3]$, 在该时段, 机组由于未能在最理想的时间检修, 其检修成本有所增加。在理想竞争市场中, 机组的检修协调费用申报值即为其检修成本增加量。在寡头竞争市场中, 其检修协调费用将略高于其实际检修成本增加量, 具体数额视市场竞争状况而定。3) 需要较高协调费

用时段 $[t_3, 52]$ ，机组不希望电力调度机构将其检修计划安排到该时段，因此申报了较高的协调费用。

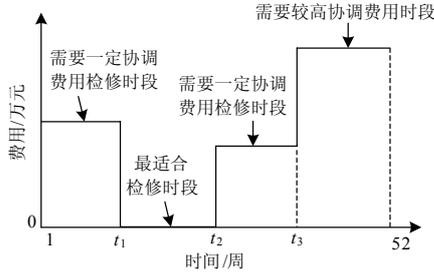


图1 发电机组的检修协调费用曲线
Fig.1 Unit maintenance coordination cost curve

2.2 检修申报要求的合理性分析

市场环境下发电厂商的检修计划申报存在多种模式。文献[15]采用了检修意愿支付的方式，发电厂商为了能够竞争得到系统检修容量稀缺时段的检修权而需支付一定的费用；而本文与此相反，发电厂商的申报为检修意愿协调费用，其检修计划被调整时将获得这部分费用。

本文申报方式的合理性说明如下：文献[15]检修意愿支付的方式虽然是发电厂商为其检修计划安排付出了一定的成本，但是这部分费用最终还将通过机组在电力市场竞争中抬高电价而转移到用户侧。而且，如果发电机组由于检修计划安排不当，导致了系统年期望失负荷电量(EENS)增高，最终也将是用户的利益受到损失。即用户将最终承担检修计划的协调成本。为此，本文选择要求发电企业直接申报检修协调费用的方式，直接将机组检修协调产生的成本支付给发电企业，避免了复杂的成本转移。同时，采用申报检修协调费用的方式，还可避免发电企业与电力调度机构间的反复协商，电力调度机构可直接根据机组的检修协调费用，一次性的协调安排检修。为了避免发电厂商利用系统安全约束获取高额检修协调费用，则要求发电厂商申报的最适检修时段的协调费用应小于等于零。

3 数学模型

3.1 优化目标

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^G c_{i,t} \cdot x_{i,t} \quad (1)$$

其中： i 为机组编号； t 为时段编号（周）； $c_{i,t}$ 为机组的检修意愿协调费用（万元）； $x_{i,t}$ 为机组的检修状态，若机组 i 在时段 t 处于检修状态，则为1，否则为0； T 为总时段数； G 为总机组数。优化目标为全时段全系统检修计划总协调费用最低。

3.2 约束条件

3.2.1 检修计划安排约束

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} = D_i \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_{i,t} - x_{i,t-1} \leq x_{i,t+D_i-1} \quad \forall i \in I, 1 \leq t \leq T \quad (3)$$

式(2)、(3)分别为检修申报时间长度约束、检修连续性约束。式中： D_i 为机组的检修持续时间； I 为机组集合。式(3)为了表达检修计划的连续性，共需 $G \times T$ 个约束条件。为了保证表达式的一致性与简洁性，式(3)中部分约束条件的决策变量超出了决策周期，对于这些变量直接用以下常数替代。当 $t=1$ 时，令 $x_{i,0} = 0$ ；当 $t+D_i-1 > T$ 时，令 $x_{i,t+D_i-1} = 0$ 。

3.2.2 电网安全备用约束

$$s_t \geq (1+R_t)d_t \quad 1 \leq t \leq T \quad (4)$$

$$s_t = \sum_{i=1}^G g_i - \sum_{i=1}^G g_i x_{i,t} \quad 1 \leq t \leq T \quad (5)$$

式(4)、(5)分别为系统备用容量约束和市场供给约束。式中： s_t 为市场供给容量； R_t 为系统备用率； d_t 为系统周负荷峰值； g_i 为机组的装机容量。由于本文从宏观上研究检修计划对市场竞争的影响，不涉及微观的机组启停和出力安排，因此无机组相关约束和潮流相关约束。

3.2.3 出清电价约束

文献[16]通过实际数据分析得到：当需供比小于0.8时，市场出清电价与需供比成正比。文献[17]进一步根据浙江电力市场的数据，建立了电价与剩余容量百分比的分段线性关系曲线。参考上述研究成果，系统出清价格与需供比存在如下约束：

$$p_t = \begin{cases} a_{1,t} \cdot r_t + b_{1,t} & 0 \leq r_t \leq r_{MP,t} \\ a_{2,t} \cdot r_t + b_{2,t} & r_{MP,t} < r_t \leq 1 \end{cases} \quad 1 \leq t \leq T \quad (6)$$

$$r_t = \frac{d_t}{s_t} \quad 1 \leq t \leq T \quad (7)$$

$$a_{1,t} \cdot r_{MP,t} + b_{1,t} = a_{2,t} \cdot r_{MP,t} + b_{2,t} \quad 1 \leq t \leq T \quad (8)$$

$$a_{2,t} \cdot 1 + b_{2,t} = p_{\text{ceiling}} \quad 1 \leq t \leq T \quad (9)$$

式(6)为系统出清价格与需供比的分段线性函数关系，式(7)、(8)、(9)为相应的参数限定。式中： p_t 为市场出清价格； r_t 为市场需供比； $a_{1,t}$ 、 $b_{1,t}$ 、 $a_{2,t}$ 、 $b_{2,t}$ 为相关参数，且 $a_{2,t} \geq a_{1,t} > 0$ ； $r_{MP,t}$ 是在电力市场中出现市场力的临界需供比； p_{ceiling} 为市场最高限价。

如图2所示，市场出清电价与系统的需供比的函数关系分为两段：第一段为正常电价区段，此时，由于供远大于求，电力市场接近于完全竞

争市场, 电价与需供比成正比关系; 第二段为市场成员动用市场力抬高电价区段, 随着需供比的增大, 电力市场接近于寡头竞争甚至于寡头垄断市场, 发电厂商拥有更大的确定市场出清价格的话语权, 市场出清价格以比正常电价区段更快的速度增高, 但其与需供比依然是线性关系。式 (8) 表示在任意时段 t 电价与需供比的函数关系是连续的, 式 (9) 表示当需供比达到 1 时, 市场成员可充分行使其市场力, 选择报高价, 此时市场的出清电价为最高限价。

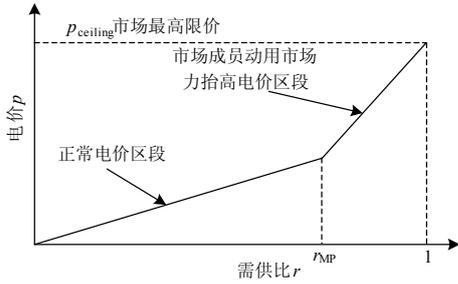


图 2 市场出清电价与需供比的函数关系

Fig.2 Function relationship of market clearing price and demand-supply ratio

3.2.4 价格弹性约束

本文采用如下线性价格弹性约束^[5]:

$$d_t = d_{R,t} + d_{F,t} \quad 1 \leq t \leq T \quad (10)$$

$$d_{F,t} = a_{F,t} p_t + b_{F,t} \quad 1 \leq t \leq T \quad (11)$$

电力市场中的负荷由两部分组成: $d_{R,t}$ 为刚性负荷部分, 该部分负荷未参与需求响应或无需求响应能力, 与电价关系不密切; $d_{F,t}$ 为弹性负荷部分, 该部分负荷具有需求价格响应能力, 受电价的影响较大。 $a_{F,t}$ 、 $b_{F,t}$ 为需求弹性曲线相对应的参数, 且 $a_{F,t} \leq 0$, $b_{F,t} > 0$ 。负荷需求弹性曲线如图 3 所示, 正常出清电价位于图中虚线框区域。

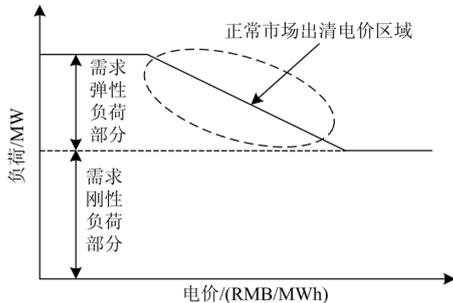


图 3 负荷需求弹性曲线

Fig.3 Load demand elasticity curve

至此, 本文模型的决策变量为 $x_{i,t}$, p_t , 目标函数为式 (1), 约束条件为式 (2) ~ (11), 整个模

型为约束条件含分式项的非线性混合整数规划问题, 直接求解难度较大。

从表面上来看, 上述数学模型中式 (7) 存在非线性, 为非线性混合整数规划问题, 但通过深入分析模型结构可知, 非线性只存在于部分约束条件, 通过函数分段参数的讨论与约束条件的数学变换, 能够有效地简化模型, 降低复杂度, 下文将进一步分析模型简化方法。

3.3 模型变换

发电机组的检修计划安排将改变电力市场的有效竞争机组容量, 进而影响市场的供求关系和出清价格, 如式 (6)、(7) 所示。而市场的出清价格变化将通过电力需求弹性反映为负荷需求的变化, 如式 (10)、(11) 所示。负荷的变化又将对发电机组的检修决策产生影响, 如式 (4) 所示。其中, 式 (6)、(7)、(10)、(11) 都为等式约束, 通过等式变换, 能直接建立系统需求和供给的函数关系。但由于式 (6) 为分段线性函数, 需根据分段参数讨论。

3.3.1 系统需供比小于行使市场力的临界需供比

$$\frac{d_t}{s_t} \leq r_{MP,t} \quad (12)$$

将式 (6)、(7)、(11) 代入式 (10), 并移项化简, 得需求与供给的函数关系为:

$$d_t = \frac{s_t(d_{R,t} + a_{F,t}b_{1,t} + b_{F,t})}{s_t - a_{F,t}a_{1,t}} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12), 并移项化简, 得到系统需供比小于行使市场力的临界需供比时的供给约束:

$$s_t \geq \frac{d_{R,t} + a_{F,t}b_{1,t} + b_{F,t}}{r_{MP,t} + a_{F,t}a_{1,t}} \quad (14)$$

进一步化简备用容量约束, 将式 (13) 代入式 (4) 得:

$$s_t \geq (1 + R_t) \frac{s_t(d_{R,t} + a_{F,t}b_{1,t} + b_{F,t})}{s_t - a_{F,t}a_{1,t}} \quad (15)$$

由于不等式两端同时存在 s_t , 可直接消去, 且 $a_{F,t} \leq 0$, $a_{1,t} > 0$, $s_t > 0$, 所以 $s_t - a_{F,t}a_{1,t} > 0$, 将式 (15) 移项化简得:

$$s_t \geq (1 + R_t)(d_{R,t} + a_{F,t}b_{1,t} + b_{F,t}) + a_{F,t}a_{1,t} \quad (16)$$

即在系统需供比小于行使市场力的临界需供比的情况下, s_t 需要满足式 (14)、(16)。

3.3.2 系统需供比大于行使市场力的临界需供比

$$r_{MP,t} \leq \frac{d_t}{s_t} \leq 1 \quad (17)$$

将式 (6)、(7)、(11) 代入式 (10), 并移项化

简得到需求与供给的函数关系为:

$$d_t = \frac{s_t(d_{R,t} + a_{F,t}b_{2,t} + b_{F,t})}{s_t - a_{F,t}a_{2,t}} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)并移项化简,得到系统需供比大于行使市场力的临界需供比时的供给约束:

$$s_t \geq (d_{R,t} + a_{F,t}b_{2,t} + b_{F,t}) + a_{F,t}a_{2,t} \quad (19)$$

$$s_t \leq \frac{d_{R,t} + a_{F,t}b_{2,t} + b_{F,t}}{r_{MP,t}} + a_{F,t}a_{2,t} \quad (20)$$

化简系统备用容量约束,将式(18)代入式(4)得:

$$s_t \geq (1+R_t)(d_{R,t} + a_{F,t}b_{2,t} + b_{F,t}) + a_{F,t}a_{2,t} \quad (21)$$

当式(21)满足时,式(19)始终满足,其实际意义是:当供给满足系统备用需求时,其值必将大于负荷需求,需供比将满足小于1的条件。

即当系统需供比大于行使市场力的临界需供比时,需求 s_t 需要满足式(20)、(21)。

3.3.3 系统备用容量约束的合并

根据上述讨论可知:实际系统供给需要满足式(14)、(16)或式(20)、(21),即取两个可行域的并集,分别对应图2中两个分段的需供比情景。

根据式(8)可知:

$$\frac{d_{R,t} + a_{F,t}b_{2,t} + b_{F,t}}{r_{MP,t}} + a_{F,t}a_{2,t} = \frac{d_{R,t} + a_{F,t}b_{1,t} + b_{F,t}}{r_{MP,t}} + a_{F,t}a_{1,t} \quad (22)$$

即式(14)和式(20)的不等式右项相等。讨论:

当 $(1+R_t) \geq \frac{1}{r_{MP,t}}$ 时,式(14)、(16)的交集为

式(16),式(20)、(21)的交集为 \emptyset ,两者的总并集为式(16)。其物理含义是:当系统备用需求较大而临界需供比较高时,系统出清电价对应的需供比始终位于图2的正常电价区段,所以仅需满足该段的备用约束式(16)即可。将式(5)代入式(16)得:

$$\sum_{i=1}^G g_i x_{i,t} \leq \sum_{i=1}^G g_i - (1+R_t)(d_{R,t} + a_{F,t}b_{1,t} + b_{F,t}) - a_{F,t}a_{1,t} \quad (23)$$

当 $(1+R_t) < \frac{1}{r_{MP,t}}$ 时,式(14)、(16)的交集为

式(14),式(20)、(21)的交集为自身,考虑式(22),得两者的总并集为式(21)。其物理含义是:当系统

的备用需求较小而临界需供比较低时,系统出清电价对应的需供比可位于图2中的任一电价区段。由于在市场成员动用市场力抬高电价区间对供给要求较低,而图2中分段函数的连续性保证了式(14)和式(20)、(21)并集的连续性,所以仅需满足该区间的备用约束式(21)即可。将式(5)代入式(21)得:

$$\sum_{i=1}^G g_i x_{i,t} \leq \sum_{i=1}^G g_i - (1+R_t)(d_{R,t} + a_{F,t}b_{2,t} + b_{F,t}) - a_{F,t}a_{2,t} \quad (24)$$

至此,总模型的优化目标为式(1),约束条件为式(2)、(3)、(23)(当 $(1+R_t) \geq \frac{1}{r_{MP,t}}$ 时)或式(24)

(当 $(1+R_t) < \frac{1}{r_{MP,t}}$ 时),整个模型转化为一纯0-1整数规划问题。

4 算例分析

4.1 基本参数

本文选取IEEE30节点测试系统,该系统由6台发电机组组成,机组装机容量参数^[18]如表1所示。所有机组的检修持续时间为4周,机组检修意愿协调费用申报如图4所示。

表1 发电机组装机容量
Tab. 1 Generation capacities of units

机组编号	1	2	3	4	5	6
装机容量/MW	80	80	50	55	30	40

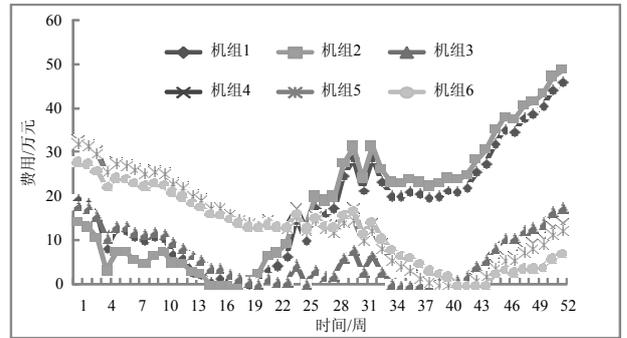


图4 发电机组的检修协调费用申报

Fig.4 Unit maintenance coordination cost declaration

选取4种峰值负荷需求弹性情景,分别对应系统0%,10%,20%,40%的负荷具备价格响应能力,如图5所示。一般情况下,系统的价格均衡点在350RMB/MWh左右,此时上述四种情景对应的需求价格弹性系数分别为0,0.05,0.09,0.2。根据文献[19]对实时电价下短期需求弹性系数的研究,可知上述情景选取是合理的。

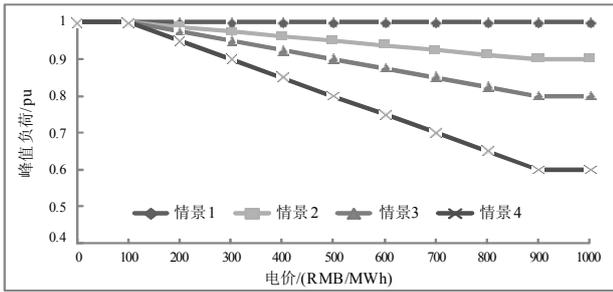


图 5 需求价格弹性情景

Fig.5 Scenarios of demand price elasticity

系统出清电价约束参数取值如下: $a_{1,t} = 500$, $b_{1,t} = 0$, $a_{2,t} = 2000$, $b_{2,t} = -1200$, $r_{MP,t} = 0.8$, $p_{ceiling} = 800$ 。

4.2 检修决策结果与分析

检修计划决策结果如表 2、图 6、图 7 所示。

表 2 不同情景下的检修意愿协调总费用

Tab.2 Unit maintenance coordination cost under different scenarios

检修意愿协调费用	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
万元	76	51	51	0

由表 2 可知,随着负荷需求响应能力的增强,系统将能以更经济的方式安排检修计划,用户的检修意愿能得到更大程度的满足。在本例中,当有 40% 的负荷具备需求响应能力时,所有的发电机组都能在其申报的最适时段得到检修,检修意愿协调费用降为 0。

图 6 是不同情景下的发电机组检修计划协调决策结果。由图可见,随着需求响应能力的逐步增强,检修计划协调安排的优化空间不断增大,更多的机组能够在其检修意愿协调费用较低的时段得到检修,也即机组对检修协调的满意度将更高。

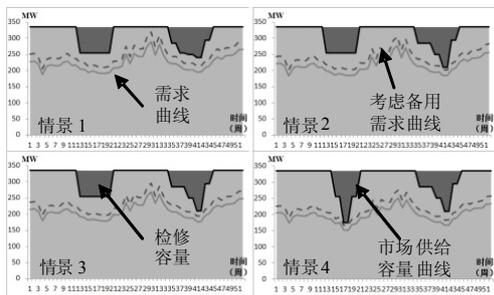


图 6 不同情景下的检修计划协调决策

Fig.6 Unit maintenance coordination scheduling under different scenarios

图 7 是不同情景下的全年负荷峰值出清电价模拟。由图可见,在机组的检修意愿得到更大程度满足的同时,也将影响市场的有效供给能力,进而影

响市场的出清电价。某些时段的电价由于检修计划的安排将被抬高。但正是这种价格的变化,引导需求动态响应,使电网的安全裕度更大,检修计划的协调安排更灵活,协调成本更低,协调满意度更高。只要电价波动在合理的范围内,价格的有效变动能够充分激发电力供给与需求间的互动,是电力市场良性运行的表现,是智能电网的重要特征。

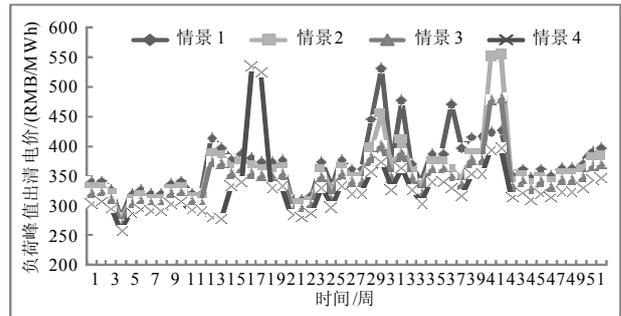


图 7 不同情景下的全年负荷峰值出清电价

Fig.7 MCPs in peak load periods under different scenarios

5 结论

需求响应是智能电网的重要特征,需求弹性则是需求响应的宏观表现。负荷需求随电价的弹性变化,将影响发电检修决策的可用检修容量空间。在智能电网中协调安排发电机组的检修计划时,需要考虑该因素的影响。

本文建立了考虑需求弹性的发电检修协调模型,定量分析了发电检修决策及负荷需求与市场出清电价间的关联关系,考虑了市场出清电价对负荷需求的影响,推导了负荷需求与发电检修决策间的函数关系,通过函数分段参数的讨论与约束条件的数学变换简化了发电检修决策协调模型。

IEEE30 节点的实际算例表明:随着电网需求响应能力的增强,发电机组的检修协调优化空间将增大,检修协调的灵活性将增强,更多的发电机组能够在其检修意愿协调费用较低的时段得到检修,机组对检修协调的满意度将提高,系统的总检修协调费用将降低。即从检修计划安排的角度而言,在电力系统中引入需求弹性,有利于检修计划的协调安排。

参考文献

[1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1, 13-14.
 [2] 张钦, 王锡凡, 付敏, 等. 需求响应视角下的智能电网[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 49-55.
 ZHANG Qin, WANG Xi-fan, FU Min, et al. Smart grid

- from the perspective of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 49-55.
- [3] David A K, Li Y Z. Effect of inter-temporal factors on the real time pricing of electricity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 44-52.
- [4] Kirschen D S, Strbac G, Cumperayot P, et al. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 612-617.
- [5] Su C L, Kirschen D S. Quantifying the effect of demand response on electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1199-1207.
- [6] 刘国跃, 曾鸣, 肖霖. 计及需求侧价格弹性的电源投资动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 22-26.
LIU Guo-yue, ZENG Ming, XIAO Lin. Generation capacity investment dynamics based on price elasticity of demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 22-26.
- [7] 吉兴全, 王成山. 计入需求弹性的输电网动态规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 23-27.
JI Xing-quan, WANG Cheng-shan. Transmission dynamic expansion considering demand elasticity[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 23-27.
- [8] 彭涛, 夏清, 江健健, 等. 区域电力市场交易模式的经济机理剖析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 20-23, 29.
PENG Tao, XIA Qing, JIANG Jian-jian, et al. Analysis of economic mechanism of two regional electricity market models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 20-23, 29.
- [9] 吴军, 涂光瑜, 罗毅, 等. 基于差别定价的电力市场输电服务定价研究[J]. 继电器, 2005, 33(11): 9-13.
WU Jun, TU Guang-yu, LUO Yi, et al. Research of transmission pricing based on price discrimination in electricity market[J]. Relay, 2005, 33(11): 9-13.
- [10] 罗运虎, 邢丽冬, 王勤, 等. 需求价格弹性对发电侧备用容量配置的影响[J]. 继电器, 2008, 36(2): 31-34.
LUO Yun-hu, XING Li-dong, WANG Qin, et al. Influence of price elasticity of demand to configuration for the reserve capacity of generation side[J]. Relay, 2008, 36(2): 31-34.
- [11] 董军, 张婧, 陈小良, 等. 考虑需求侧响应的短期阻塞管理模型与激励机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 24-28.
DONG Jun, ZHANG Jing, CHEN Xiao-liang, et al. Study on short-run congestion management model and incentive mechanism considering demand response [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 24-28.
- [12] Park J B, Lee K S, Shin J R, et al. A resource maintenance scheduling scheme with consideration of interruptible loads[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, 1: 286-291.
- [13] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
ZHANG Qin, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [14] Conejo A J, Garcia-Bertrand R, Diaz-Salazar M. Generation maintenance scheduling in restructured power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 984-992.
- [15] LU G, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Unit maintenance scheduling coordination mechanism in electricity market environment[J]. IEE generation transmission & distribution, 2008, 2(5): 646-654.
- [16] Visudhiphan P, Ilic M D. Dependence of generation market power on the demand/supply ratio: analysis and modeling[C]. //IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, 2: 1115-1122.
- [17] 周浩, 陈建华, 孙维真. 电力市场中的电价分析与调控[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 37-40.
ZHOU Hao, CHEN Jian-hua, SUN Wei-zhen. Analysis and adjustment of electricity price in electricity market[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 37-40.
- [18] Ferrero R W, Shahidehpour S M, Ramesh V C. Transaction analysis in deregulated power systems using game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1340-1347.
- [19] Shu F, Hyndman R J. The price elasticity of electricity demand in South Australia and Victoria [EB/OL]. [2010-08-18].
www.esipc.sa.gov.au/webdata/resources/files/Price_Elasticity.pdf.

收稿日期: 2010-08-23

作者简介:

方 陈(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为智能电网、电力经济调度、电力市场等; E-mail: fang-c02@mails.tsinghua.edu.cn

夏 清(1957-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究方向为智能电网、电力市场、电力系统规划、电力经济与信息等;

孙 欣(1980-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为可再生能源发电、智能电网、电力经济调度等。