

基于风险评估和机会约束的不确定性 可中断负荷优化调度

牛文娟, 李 扬, 王 磊

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 用户响应的不确定性使得电力公司调用可中断负荷的总成本存在不确定性, 还会面临负荷削减不足或过多的风险。对可中断负荷项目中的不确定性进行分析, 提出基于风险评估和机会约束的不确定性可中断负荷优化决策方法, 在目标函数中同时考虑固定补偿成本和不确定性成本, 更为合理地反映调用可中断负荷资源的总成本, 在约束条件中采用置信水平来衡量削减需求约束的满足情况。算例分析表明所提方法不仅可以考虑对可中断用户的补偿价格, 还能考虑惩罚价格和用户响应可靠程度的影响, 并促使用户提高响应可靠程度, 降低调用可中断负荷的总成本。

关键词: 可中断负荷; 需求响应; 不确定性分析; 风险评估; 机会约束规划; 优化; 负荷调度

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.010

0 引言

需求响应^[1] DR(Demand Response)项目中的可中断负荷 IL(Interruptible Load)项目在国外电力市场中已得到了广泛的应用, 一些国家和地区先后引入了 IL 措施。它通过与用户签订合同来确定 IL, 灵活性较强, 能有效控制峰谷差, 提高社会资源利用率。随着需求侧的逐步放开, IL 作为一种虚拟的备用发电容量资源和输电容量资源, 在调峰、降低阻塞和新能源消纳等方面越来越受到关注^[2-4]。我国经济发展迅速而出现的电力供应紧张局面、人们环保节能意识的增强以及 IL 自身所具有的优势, 使得 IL 项目的开展具有迫切性和可行性。

复杂系统的处理往往难以回避定性的、不精确的、不完全的和不确定性的信息^[5]。在实施 IL 项目时, 从获取数据、下发命令、用户执行等各个环节均存在不确定性。文献[6]考虑各不确定性影响因素建立了 IL 风险收益评估模型。文献[7-9]在 IL 优化决策过程中分别考虑了现货价格的不确定性、发生意外事故的不确定性对备用水平的影响, 以及多种能源需求的不确定性。但 IL 优化决策中的成本模型基本都是采用确定性成本模型, 文献[10-12]以合同中约定的补偿价格来确定 IL 成本, 文献[3, 7, 13-14]根据激励相容原理使用户上报用户类型参数, 从而建立二次模型来确定 IL 成本。但由于没有考虑 IL 不确定性的影响, 无法反映 IL 的实际成本, 在调用 IL 资

源时难免有一定的盲目性, 因此必须要考虑 IL 的不确定性^[15]。

文献[16]中已建立了初步的 IL 成本模型, 考虑了 IL 削减量不确定造成的补偿费用成本不确定性, 但该模型中不确定性越大, 成本越低, 导致削减不可靠的用户会被优先调用以降低成本, 在优化模型中将方差作为优化目标的一部分, 物理意义不清晰, 且未考虑发电机与 IL 共同参与的调度流程。本文在已有研究成果的基础上对 IL 项目中的不确定性进行分析梳理, 阐述了各种不确定性因素的分类和影响, 提出了有 IL 参与的日前优化调度流程, 对 IL 响应不确定性和削减需求不确定性进行描述, 建立 IL 成本和风险的期望值模型。该不确定性模型能更为合理地反映电力公司在负荷高峰期调用 IL 的真实成本。

1 考虑响应不确定性的 IL 成本

1.1 IL 不确定性分析

在电力市场过渡期的 IL 管理主要通过合同进行。多时间尺度的 IL 调度可作为电力系统调度的补充^[17]。IL 的不确定性主要来源于用户基线负荷、用户的响应行为、IL 削减需求等多个因素。用户基线负荷预测类似于短期负荷预测, 针对单个用户负荷进行预测, 不确定性问题更为突出。当系统调度员向用户发出中断命令时, 用户应自觉地做出响应进行负荷削减。合同中补偿价格的设置是以经济手段激励用户履行合同积极响应, 惩罚价格的设置是以经济手段提高合同约束力, 降低用户违约概率。但用户的实际响应情况受用户对响应效益的理性判断、次日突发状况和用户响应信誉的影响, 使得用户的响应行为具有不确定性。IL 削减需求取决于负荷预测、传统机组出力、新能源发电预测、线路阻塞情况、元件故

收稿日期: 2015-03-10; 修回日期: 2015-12-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A115); 国家自然科学基金资助项目(51277028)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A115) and the National Natural Science Foundation of China(51277028)

障情况、备用水平等因素,由于这些因素的不确定性,IL 削减需求存在不确定性。

1.2 IL 支付成本

对签订了 IL 合同的用户下发负荷削减命令后,应定期进行费用结算,合理的补偿和惩罚可以刺激消费者积极可靠地参与 IL 项目。但用户响应情况存在不确定性,用户有可能欠响应或过响应,即用户实际负荷削减量有可能比要求的少或者多,因此用户得到的费用结算也存在不确定性。本文在文献[18]的基础上提出一种考虑用户响应不确定性,同时计及补偿成本和惩罚成本的 IL 用户费用结算方法。本文所提及的时段长度均为 1 h。由于用户响应不确定性,实际削减负荷与要求削减负荷之差 ξ 是随机量,采用充足的历史数据可对用户实际负荷的预测误差进行估计,一般认为其服从正态分布^[19-20]。可以得到用户 i 在时段 t 的总收入为:

$$C_{i,t} = C_{\text{fix},i,t} + C_{\xi,i,t} = \begin{cases} 0 & \xi \geq 0 \\ P_{r,i,t} r_{1,i} + \xi(r_{1,i} + r_{2,i}) & -P_{r,i,t} < \xi < 0 \\ \xi r_{2,i} - P_{r,i,t} r_{1,i} & \xi \leq -P_{r,i,t} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_{r,i,t}$ 为用户 i 在时段 t 被要求削减的容量; $r_{1,i}$ 和 $r_{2,i}$ 分别为 IL 合同中约定的补偿单价和惩罚单价。

1.3 IL 风险成本

根据风险理论,风险费用评估是一种将风险和经济因素放在同一价值尺度上来衡量的方法^[21]。风险损失费用可用单位停电费用损失 r 乘以期望缺供电量计算。当用户欠响应时,电力公司需要承担重新购买高价备用容量和维护网络安全稳定性等风险,假设单位停电损失 r_0 已知。当用户过响应时,电力公司需要承担售电量减小的风险,此时的损失价格为售电价格 r_p 。对于电力公司而言,用户 i 每小时风险成本为:

$$C_{\text{risk},i} = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\xi_i) |\xi_i| g(\xi_i) d\xi_i \quad (2)$$

$$r(\xi_i) = \begin{cases} r_p & \xi_i < 0 \\ 0 & \xi_i = 0 \\ r_0 & \xi_i > 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, ξ_i 为第 i 个用户实际削减负荷与要求削减负荷之差;假设电力公司可根据历史统计数据得到用户响应情况的概率分布, $g(\xi_i)$ 为 ξ_i 的概率密度函数。

2 削减总需求不确定性

在负荷高峰期由于负荷水平很高,供电能力和机组爬坡能力有限,往往会形成容量缺额。新能源发电的参与,使得备用水平提高,加剧了容量缺额紧张。本文假设 IL 的优化决策在同时间尺度调度系统之后,由 IL 来满足系统容量缺额。

2.1 容量缺额的不确定性描述

容量缺额主要源于两方面:一是系统供电不足,二是机组爬坡能力不足。

(1) 系统供电不足导致的容量缺额。

$$P_{R1,t} = P_{L,t} + P_{b,t} - P_{\text{gmax},t} - P_{n,t} \quad (4)$$

其中, $P_{L,t}$ 为时段 t 的预测负荷; $P_{b,t}$ 为时段 t 的备用容量; $P_{\text{gmax},t}$ 为时段 t 可开机机组最大总出力; $P_{n,t}$ 为新能源发电时段 t 预测出力。

由于负荷预测和新能源的不确定性等,容量缺额呈现一定的不确定性,可用均值和随机偏差来表示:

$$P_{R1,t} = \bar{P}_{R1,t} + \xi_{R1,t} = (\bar{P}_{L,t} + \xi_{L,t}) + P_{b,t} - P_{\text{gmax},t} - (\bar{P}_{n,t} + \xi_{n,t}) \quad (5)$$

其中, $\bar{P}_{R1,t}$ 、 $\bar{P}_{L,t}$ 和 $\bar{P}_{n,t}$ 分别为时段 t 的削减需求、负荷预测期望值和新能源出力的均值; $\xi_{R1,t}$ 、 $\xi_{L,t}$ 和 $\xi_{n,t}$ 为随机偏差, $\xi_{R1,t}$ 的概率密度函数为 $\xi_{L,t}$ 和 $\xi_{n,t}$ 的概率密度函数的卷积,假设 $\xi_{L,t}$ 和 $\xi_{n,t}$ 都服从正态分布,均值都为 0,方差分别是 $\sigma_{L,t}$ 和 $\sigma_{n,t}$,根据独立正态分布随机变量的特性, $\xi_{R1,t}$ 也服从正态分布,均值为 0,方差 $\sigma_{R,t} = \sigma_{L,t} + \sigma_{n,t}$ 。

(2) 机组爬坡能力不足导致的容量缺额。

$$P_{R2,t} = (P_{L,t} - P_{L,t-1}) + (P_{b,t} - P_{b,t-1}) - P_{\text{ramp},t} \quad (6)$$

其中, $P_{\text{ramp},t}$ 为所有机组从时段 $t-1$ 到时段 t 的爬坡能力之和。

考虑负荷预测的不确定性,机组爬坡能力不足导致的容量缺额也可表示为 $P_{R2,t} = \bar{P}_{R2,t} + \xi_{R2,t}$ 的形式。

2.2 削减总需求的机会约束建模

在 IL 优化决策中,若要调用 IL 资源来完全满足削减需求,代价会非常高,比较合理的选择是满足削减需求的概率达到一个可接受的值。本文采取机会约束规划来描述削减需求的不确定性,机会约束规划中,允许决策在一定程度上不满足约束,但该决策使约束成立的概率不小于某一置信水平 α ^[5]。因此削减需求与 IL 用户削减总量的关系如下:

$$P_r \left\{ \sum_{i=1}^N x_{i,t} P_{r,i,t} \geq P_{R,t} \right\} \geq \alpha \quad (7)$$

其中, N 为 IL 用户总数; $P_r \{ \cdot \}$ 为事件发生的概率; $P_{R,t}$ 为容量缺额, $P_{R,t} = \max(P_{R1,t}, P_{R2,t})$; $x_{i,t}$ 表示 IL 是否中断,是本文模型中的控制变量, $x_{i,t} = 1$ 表示用户 i 在时段 t 中断负荷, $x_{i,t} = 0$ 则表示用户正常用电。

可见,置信水平 α 越高, $\xi_{R,t}$ 的方差越大,需要调用的 IL 就越多。因此选择合适的置信水平,并提高负荷预测和新能源出力预测的精度是提高 IL 项目经济性的重要手段。

3 IL 调度优化决策模型

根据提前通知时间和用户特性的不同,IL 可参与日前计划、滚动计划和实时调度等多种时间尺度的

系统调度。上文提出的考虑响应不确定性的 IL 成本建模方法,可适用于多时间尺度的优化决策。本文侧重于研究 IL 参与日前调度的优化决策,日前调度有充足的时间进行动态优化计算,一般是以安全为约束,以经济为目标。应充分利用 IL,与高峰期调度结合,缓解容量缺额降低备用压力,提高系统可靠性。

3.1 IL 参与日前调度的方式

根据 2.1 节所描述的容量缺额特点,给出 IL 参与日前调度的方式如图 1 所示。

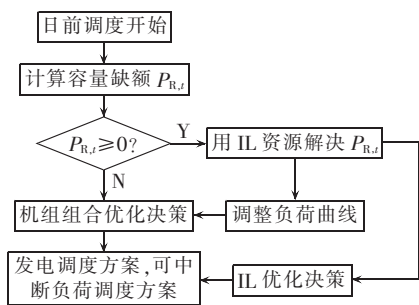


图 1 IL 参与日前调度流程图

Fig.1 Flowchart of day-ahead dispatch including ILs

3.2 优化决策模型的目标函数和约束条件

本文在 IL 优化决策模型中考虑用户响应的不确定性和负荷削减需求的不确定性,建立单目标期望值模型,以调用 IL 总成本的期望值最小为优化目标。目标函数如下:

$$f = E \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N x_{i,t} (C_{i,t}(\xi_i) + C_{risk,i,t}) \right] \quad (8)$$

其中, T 为 IL 事件总时长。

由该模型结构特点和期望值算子基本性质可得:

$$f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N x_{i,t} C_{total,i,t} \quad (9)$$

$$C_{total,i,t} = C_{fix,i,t} + E[C_{\xi,i,t}(\xi_i)] + C_{risk,i,t}$$

由此可见,在进行优化计算之前,可先计算出电力公司在时段 t 调用用户 i 的 IL 成本期望值 $C_{total,i,t}$, 以此避免采用蒙特卡洛法带来的庞大计算量。

为了与传统方法对比,在算例中也对固定补偿成本目标函数 f_1 进行了优化计算。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N x_{i,t} C_{fix,i,t} \quad (10)$$

由于不同的电力企业对风险的考虑侧重程度不同,可为优化目标设定风险系数。通过调节风险系数大小来选择对风险不确定性的侧重程度,如下:

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \{ x_{i,t} \{ \lambda C_{fix,i,t} + (1-\lambda) \{ E[C_{\xi,i,t}(\xi_i)] + C_{risk,i,t}(\xi_i) \} \} \} \quad (11)$$

其中, λ 为风险系数, $\lambda < 0.5$ 为风险回避者,偏好于低风险的用户, $\lambda > 0.5$ 为风险偏好者,偏好于风险大的用户, $\lambda = 0.5$ 为风险中立者,希望预期成本最小化。

该目标函数须满足如下约束条件。

a. 削减量约束条件见式(7),可将该问题转化为其等价类进行求解^[5]。

b. 削减间隔时间约束条件:

$$|j-k| \geq T_{min,i} \quad i=1,2,\dots,N \quad (12)$$

其中,时段 j 开始中断负荷;时段 k 恢复用电; $T_{min,i}$ 为用户 i 2 次负荷削减事件间隔时间的最小值。

c. 削减持续时间约束条件:

$$\sum_{t=j}^{T_{dur,i}+j-1} x_{i,t} = T_{dur,i} \quad i=1,2,\dots,N \quad (13)$$

其中,时段 j 开始中断负荷; $T_{dur,i}$ 为用户 i 的负荷削减持续时间。

d. 削减总次数约束条件:

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} \leq N_{T,i} \quad i=1,2,\dots,N \quad (14)$$

其中, $N_{T,i}$ 为用户 i 在 T 时段内中断最大次数。

由此可见,本文所提出的基于风险评估和机会约束的不确定性 IL 优化决策模型,通过优化目标期望化和约束条件等价化处理后,是一个整数规划模型。

4 算例及分析

4.1 算例数据介绍

为了验证本文提出的 IL 参与日前调度的流程以及不确定性 IL 优化决策模型的有效性,算例采用广西某市的负荷数据和 IEEE 30 节点系统的发电机数据,并以该市若干工业负荷数据为基础进行计算。IL 可视为多个用户的集合,根据中心极限定理,负荷削减量可近似视为服从正态分布^[22]。假设实际削减负荷与要求削减负荷之差 ξ 呈均值为 0 的正态分布。用 ξ 的标准差 σ 占要求削减负荷量 $P_{r,i}$ 的比例来表示用户的响应可靠程度,即 $\sigma/P_{r,i}$ 越小表示用户响应越可靠。

(1) 第 1 组。不同行业的企业由于电价在成本效益中所占比例不同,当用户的补偿价格和惩罚价格越高时,一般情况下用户响应可靠性越高。60 个用户来自 3 个行业,数据在表 1 的基础数据上变化得到。

表 1 3 个行业的用户基础数据

Table 1 Basic customer data of three industries

行业	补偿价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	惩罚价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	$\sigma/P_{r,i}$
第 1 类	1.0	2	0.3
第 2 类	1.5	3	0.3
第 3 类	2.0	4	0.3

(2) 第 2 组。60 个用户分为 3 个小组,每一小组都固定 2 个参数不变,第 3 个参数变化,如表 2 所示。

假设电力公司缺电成本为 10 元/(kW·h),电价为 1 元/(kW·h)。在 MATLAB 中采用 YALMIP 建模工具箱进行建模,调用 CPLEX 求解。

表 2 3 个用户组的 IL 参数
Table 2 IL parameters of three customer groups

用户	补偿价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	惩罚价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	$\sigma/P_{r,i}$
第 1 组	2	3	0.001~0.3
第 2 组	1~5	3	0.3
第 3 组	2	1~10	0.3

4.2 IL 参与日前调度

根据 3.1 节的流程图进行日前调度计算,得到各个时段的负荷削减量如表 3 所示。假设每个时段的负荷削减需求均呈正态分布,方差为均值的 1%,置信水平为 0.9。采用第 1 组用户参与 IL 优化决策,机组组合和 IL 调度结果如图 2 所示。

表 3 各个时段的负荷削减量
Table 3 Load curtailment for different periods

时刻	$\bar{P}_{R,t}$ /MW	时刻	$\bar{P}_{R,t}$ /MW	时刻	$\bar{P}_{R,t}$ /MW
10:00	58.56	14:00	56.36	18:00	94.80
11:00	100.80	15:00	20.28	19:00	88.64
12:00	111.44	16:00	36.78	20:00	61.50
13:00	111.44	17:00	56.72	21:00	41.56

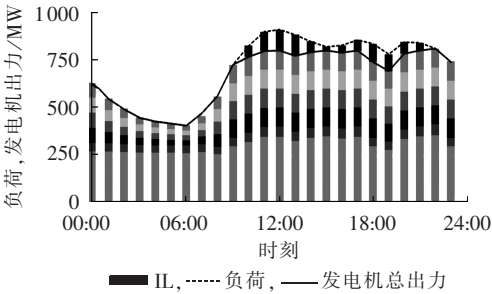


图 2 IL 参与的机组组合结果
Fig.2 Results of UC considering ILs

4.3 确定性和不确定性IL 优化决策对比

采用第 1 组用户参与优化决策,并设置 3 种优化场景如表 4 所示。

表 4 优化场景定义
Table 4 Definition of optimized scenarios

场景	目标函数	削减总量约束
1	考虑不确定性的总成本 f	机会约束
2	固定补偿成本 f_i	机会约束
3	固定补偿成本 f_i	确定性约束

计算电力公司在整个优化时段 f, f_i 和对 IL 的实际支付成本期望值 $\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \{x_{i,j} \{C_{fix,i,j} + E[C_{\xi,i,j}(\xi_i)]\}\}$, 以对比分析不同优化场景对各成本的影响,见表 5。

表 5 3 种场景下的成本
Table 5 Costs of three scenarios 万元

场景	总成本期望值	固定补偿成本	支付成本期望值
1	142.61	126.89	80.62
2	115.96	115.96	64.99
3	114.03	114.03	63.59

场景 3 优化结果只能保证 50% 的概率满足削减总需求。由于总需求要求低,因此所调用的用户较少,导致场景 3 成本最低,但也会导致电力公司不能达到削减负荷要求,额外削减负荷的风险增大。

为了与补偿价格对比,将用户的总成本期望值除以 IL 容量得到用户的综合价格。图 3 和图 4 分别为 IL 用户调用情况与补偿价格和综合价格的关系,阴影表示该用户被调用。场景 2、3 优先调用补偿价格较低的用户,但总成本期望值较高。场景 1 能够调用一些虽然补偿价格较高但综合价格较低的用户,合理反映 IL 成本。

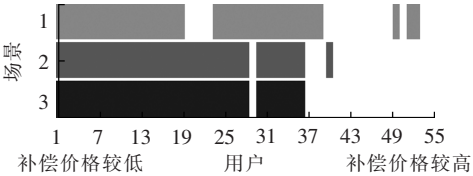


图 3 IL 用户调用情况(用户按照补偿价格排序)
Fig.3 IL dispatch(sorted by compensation price)

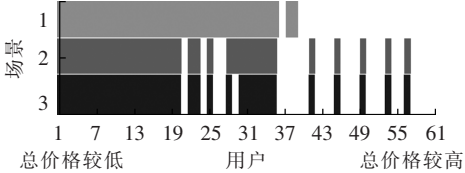


图 4 IL 用户调用情况(用户按照综合价格排序)
Fig.4 IL dispatch(sorted by total price)

确定性模型无法考虑用户响应不确定性对成本的影响,削减需求估计较为保守,使得负荷削减较少,但增加了额外削减负荷的风险。而本文提出的不确定性模型则在考虑用户响应不确定性的基础上更为合理地反映 IL 成本,能考虑削减需求的满足概率。

4.4 用户 IL 成本的影响因素

为了分析用户响应可靠程度、补偿价格和惩罚价格对 IL 成本的影响,采用第 2 组负荷进行计算。将用户的支付成本期望值除以 IL 中断容量得到用户的支付价格。各用户的综合价格和支付价格分别如图 5 和图 6 所示。

可见,随着补偿价格的降低、惩罚价格的升高,IL 综合价格和支付价格均降低;但随着用户响应可靠程度的增大,IL 综合价格降低,IL 支付价格升高。

基于本文所提出的模型,会在满足约束条件的情况下优先选择 IL 综合价格较低的用户,即那些补偿价格较低、惩罚价格较高且响应更为可靠的用户。而用户在合同约定补偿价格和惩罚价格不变的情况下,提高响应可靠程度,有助于提高所得到的支付费用。因此按照该模型进行优化调度,对于用户而言,能够促进用户努力提高响应可靠程度,以提高参与

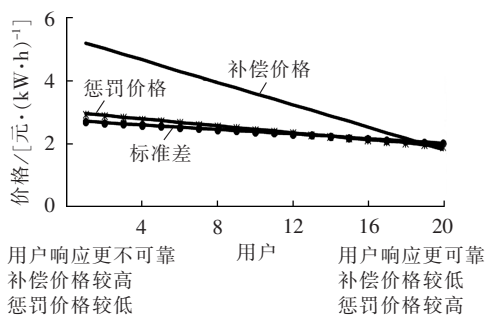


图 5 IL 综合价格曲线

Fig.5 Total IL price curves

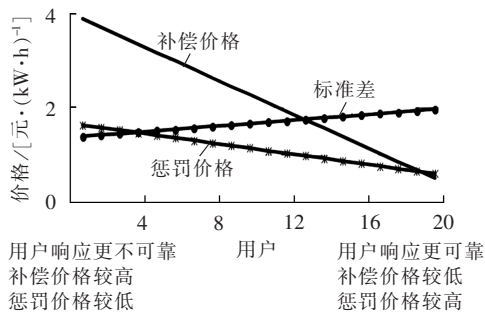


图 6 IL 支付价格曲线

Fig.6 IL payment curves

IL 项目的收益;对于电力公司而言,则有助于降低电力用户调用 IL 的总成本。

4.5 风险系数的影响

采用第 1 组用户参与优化计算,当风险系数 λ 从 0 至 1 变化时,固定补偿成本、不确定性总成本和风险成本变化趋势见图 7。随着风险系数增大,固定补偿总成本变小,风险成本变大。而当风险系数为 0.5 时,不确定性总成本达到最小值。

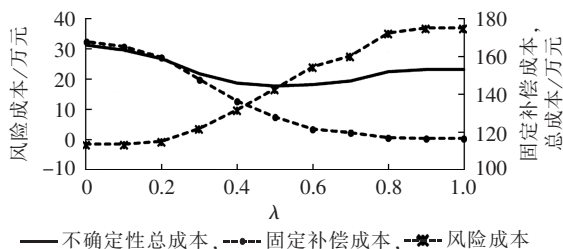


图 7 权重变化时的成本变化情况

Fig.7 Curves of cost vs. weight

4.6 削减需求不确定性对优化结果的影响

在削减需求均值和置信水平不变的情况下,改变削减需求的概率分布方差进行求解。削减需求的变化以时段 1 为例,其他时段的变化趋势相同。

削减需求方差占均值的百分比变化时成本及削减需求曲线如图 8 所示。可见,削减需求方差减小即削减需求的预测更为精确时,实际削减需求减少,此时相应的 IL 成本降低。根据本模型中的机会约束条件,提高削减需求预测准确度有助于减小削减需求,相应地减小 IL 成本。换言之,相同的 IL 总成本下提

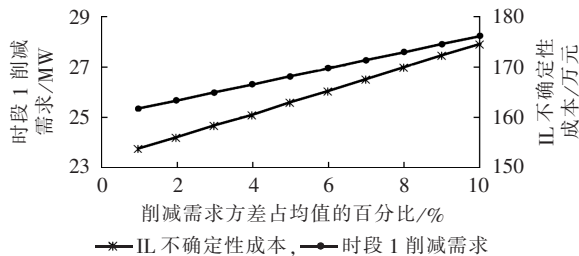


图 8 削减需求方差占均值的百分比变化时成本及削减需求曲线

Fig.8 Curves of cost and load-shedding requirement vs. variance-mean ratio of load-shedding requirement

高预测准确性可以减少运行风险。

5 结论

本文基于风险评估和机会约束对不确定性 IL 优化决策方法及其参与日前调度的流程进行研究。首先对 IL 的不确定性进行分析,再考虑用户响应不确定对可中断支付成本和风险成本进行建模,考虑削减需求不确定性建立机会约束模型,提出不确定性 IL 优化决策模型,最后给出算例分析。可得以下结论。

首先,IL 参与日前调度有助于解决由于系统供电不足和机组爬坡能力不足导致的容量缺额。

其次,所提出的模型采用考虑不确定性的 IL 支付成本和考虑不确定性的 IL 风险成本之和作为目标函数,优化结果能更为合理地反映受用户响应不确定性影响的 IL 总成本,使电力公司调用 IL 总成本的期望值最低。根据所提出模型的特点,在进行优化计算前,可首先计算出每个用户 IL 支付成本期望值和风险成本,避免了在优化过程中采用蒙特卡洛法带来的巨大计算量。

第三,用户响应可靠程度较高时,用户获得的 IL 支付金额较高,并能降低电力公司调用 IL 的总成本,从而促使用户积极提高 IL 响应可靠性。相同的 IL 总成本下提高削减需求预测准确性可以减少运行风险,这有助于促使电力公司努力提高负荷和出力的预测准确度。

随着需求侧管理和需求响应的作用逐渐受到重视并获得了更多的政策支持,IL 的应用将越来越广泛。在本文研究的基础上,更为深入地探讨 IL 项目的各种不确定性因素的影响,将有助于 IL 在调峰、降低阻塞和新能源消纳等方面发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 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 Xifan,WANG Jianxue,et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):97-106.
- [2] 杨彦,陈皓勇,张尧,等. 计及分布式发电和不完全信息可中断负荷选择的电力市场模型[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):

- 15-24.
- YANG Yan, CHEN Haoyong, ZHANG Yao, et al. An electricity market model with distributed generation and interruptible load under incomplete information[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 15-24.
- [3] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 30-38.
- LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Day-ahead generation scheduling model considering demand side interaction under smart grid paradigm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 30-38.
- [4] 张国新, 王蓓蓓. 引入需求响应的电力市场运行研究及对我国电力市场改革的思考[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 28-33.
- ZHANG Guoxin, WANG Beibei. Study of power market operation with demand response and consideration of China's power market reform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 28-33.
- [5] 刘宝碁, 彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 序言.
- [6] 张颖, 张有兵, 曹一家, 等. 基于证据理论的可中断负荷不确定性风险收益评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 1-6.
- ZHANG Ying, ZHANG Youbing, CAO Yijia, et al. An evaluating model of interruptible load uncertain risks and returns based on evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 1-6.
- [7] 王金凤, 李渝曾, 张少华. 基于机会约束规划的可中断负荷管理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 42-45.
- WANG Jinfeng, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. Interruptible load management based on chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2008, 20(2): 42-45.
- [8] KHORSAND M A, HEYDARI H, ZAKARIAZADEH A. Interruptible load participation as operating reserve in joint energy and spinning reserve markets using stochastic security analysis[C]// The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). Singapore: [s.n.], 2010: 8-12.
- [9] OH S C, D'ARCY J B, ARINEZ J F, et al. Assessment of energy demand response options in smart grid utilizing the stochastic programming approach[C]// Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. San Diego, CA, USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [10] 于娜, 芙蓉薇. 电力市场高峰时段可中断负荷优化购买模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 89-93.
- YU Na, FU Rongwei. Optimization model of interruptible load dispatch during the peak load time periods in the earlier power market[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2010, 22(4): 89-93.
- [11] 刘新东, 陈焕远, 姚程. 计及大容量燃煤机组深度调峰和可中断负荷的风电场优化调度模型[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 95-100.
- LIU Xindong, CHEN Huanyuan, YAO Cheng. Economic dispatch considering deep peak-regulation and interruptible loads for power system incorporated with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 95-100.
- [12] 李丹, 刘俊勇, 刘友波, 等. 风电接入后考虑抽蓄-需求响应的多场景联合安全经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 28-34.
- LI Dan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Joint secure & economic dispatch considering wind power, pumped storage and demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 28-34.
- [13] 李海英, 李渝曾, 张少华. 一种激励相容的输电阻塞管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 36-40.
- LI Haiying, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. An incentive compatible model for transmission congestion management[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 36-40.
- [14] FAHRIOLU M, ALVARADO F L. Designing incentive compatible contracts for effective demand management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1255-1260.
- [15] 王蓓蓓, 李义荣, 李扬, 等. 考虑响应不确定性的可中断负荷参与系统备用配置的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 1-8.
- WANG Beibei, LI Yirong, LI Yang, et al. Optimal coordination between system reserve and interruptible loads with response uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 1-8.
- [16] NIU W, LI Y. Uncertain optimization decision of interruptible load in demand response program[C]// 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia 2014). Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2014: 675-679.
- [17] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664-3673.
- YANG Shengchun, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3664-3673.
- [18] 牛文娟, 王磊, 李扬. 需求响应项目中用户基线负荷计算方法及其应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(3): 556-560.
- NIU Wenjuan, WANG Lei, LI Yang. Calculation method and application of customer baseline load in demand response project[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(3): 556-560.
- [19] BO R, LI F X. Probabilistic LMP forecasting considering load uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1279-1289.
- [20] BILLINTON R, HUANG D. Effects of load forecast uncertainty on bulk electric system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 418-425.
- [21] 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: 7.
- [22] ARGIENTO R, FARANDA R, PIEVATOLO A, et al. Distributed interruptible load shedding and micro-generator dispatching to benefit system operations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 840-848.

作者简介:



牛文娟

牛文娟(1983—), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 主要研究方向为需求响应、电力市场、双向互动智能用电技术、电力系统调度运行(E-mail: leafnwj@qq.com);

李扬(1961—), 男, 江苏泰兴人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统运行、电力市场和需求侧管理(E-mail: li_yang@seu.edu.cn);

王磊(1963—), 女, 江苏南京人, 副教授, 主要研究方向为信息技术在电力系统中的应用、电力市场(E-mail: wangl@seu.edu.cn)。

(下转第84页 continued on page 84)

影响分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):165-169.

ZHAO Hongfei, MA Hongzhong, LI Kai, et al. Test and analysis of inherent frequency of power transformer tank[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 165-169.

[19] 王春宁, 朱跃光, 马宏忠, 等. 基于振动信号和小波神经网络的变压器故障诊断[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 75-79.

WANG Chunling, ZHU Yueguang, MA Hongzhong, et al. Fault diagnosis of power transformer based on vibration and wavelet neural network[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 75-79.

作者简介:



弓杰伟

弓杰伟(1991—),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事电力设备状态监测与故障诊断方面的研究(E-mail:jsjjgw@163.com);

马宏忠(1962—),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,博士,从事电气设备状态监测与故障诊断、磁悬浮承重技术、电力系统谐波分析方面的研究。

Finite element modeling and winding looseness analysis for power transformer

GONG Jiewei¹, MA Hongzhong¹, JIANG Ning², WANG Chunling², LI Yong², ZHOU Yu¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: For studying the relationship between pre-compression and looseness of transformer winding, the finite element model is applied to analyze the influence of pre-compression on the transformer vibration signal. The three-dimensional drawing software Pro/Engineer is adopted to draw a transformer model, the ANSYS Workbench is introduced to the modal analysis and harmonic response analysis, and the analytical results are compared respectively with the results of excitation test and short circuit test, by which, the conclusion is obtained that the inherent frequency of transformer decreases along with the reduction of pre-compression. Further researches reveal that, after the exciting force is exerted, the pre-compression change has great effect on the vibration signals and the change tendency is dependent on the structure of different positions. The variation law of 100 Hz vibration signal along with the pre-compression change is studied and the corresponding winding looseness is analyzed. Comparison between simulative and experimental results verifies the correctness of the proposed model and the feasibility of transformer winding looseness simulation based on the finite element model.

Key words: power transformers; winding looseness; finite element; modal analysis; inherent frequency; harmonic response analysis; short circuit test

(上接第 67 页 continued from page 67)

Optimal dispatch of uncertain interruptible loads based on risk assessment and chance constraint

NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Lei

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The uncertainty of customer response results in the uncertainty of total IL (Interruptible Load) dispatch cost of electric power company and increases the risk of improper load shedding. The uncertainty of IL program is analyzed and a scheme of optimal uncertain IL dispatch based on the risk assessment and chance constraint is proposed, which considers both the fixed compensation cost and the uncertainty cost in the objective function to more rationally reflect the total cost of IL resource dispatch, and adopts the confidence level in the constraint to measure the satisfaction level of load-shedding requirement. Case analysis shows that, the proposed scheme considers not only the compensation price of IL but also the impacts of penalty price and customer response reliability, which promotes the improvement of customer response reliability and reduces the total cost of IL dispatch.

Key words: interruptible load; demand response; uncertainty analysis; risk assessment; chance constraint programming; optimization; electric load dispatching