

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.017

# 考虑最差条件风险价值的主动配电网 优化调度研究\*

施卫杰<sup>1</sup>, 金 茜<sup>2</sup>, 李禹鹏<sup>1</sup>, 刘扬洋<sup>3</sup>, 龚锦霞<sup>4\*</sup>

(1. 国网上海市南供电公司, 上海 200233; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209;  
3. 国网上海松江供电公司, 上海 201600; 4. 上海电力学院 电气工程系, 上海 200082)

**摘要:**针对分布式电源大量入网的管理问题和大量零散分布的需求侧可控资源的利用问题,研究了主动配电网日前调度计划和风险管理问题。针对主动配电网内部随机因素多、不确定性强,而且随机变量的分布信息难以准确预测的特点,采用了最差条件风险价值指标度量主动配电网风险,并建立了考虑最差条件风险价值的主动配电网日前调度模型。利用了最差条件风险价值指标在仅已知随机变量概率分布所属集合的情况下评估主动配电网风险,保证调度计划对随机变量随机性和概率分布不确定性具有鲁棒性。研究表明:所提出调度计划能够有效评估并控制主动配电网运营风险,规避主动配电网因避免概率分布预测误差带来的损失。

**关键词:**主动配电网;调度计划;风险管理;最差风险价值

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1316-06

## Optimal dispatch of active distribution network considering worst-case conditional value-at-risk

SHI Wei-jie<sup>1</sup>, JIN Xi<sup>2</sup>, LI Yu-peng<sup>1</sup>, LIU Yang-yang<sup>3</sup>, GONG Jin-xia<sup>4</sup>

(1. State Grid Shanghai Shinan Electric Power Supply Company, Shanghai 200233, China; 2. State Power Economic Research Institute, Changping District, Beijing 102209, China; 3. State Grid Shanghai Songjiang Electric Power Supply Company, Shanghai 201600, China; 4. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** Aiming at managing the large number of integrated distributed generators and utilizing the dispersed located demand side sources, this paper studied the day-ahead dispatch and risk management problem of active distribution network (ADN). Aiming at that ADN contains various random factors and random variables' precious distribution functions are hard to predict, this paper adopted worst-case conditional value-at-risk (WCVaR) to measure the risk suffered by ADN, and proposed a day-ahead schedule model considering WCVaR. WCVaR was adopted to estimate ADN's risk by only having the possible sets of random variables' distribution, and ensure the robustness of optimal schedule against distribution uncertainties. The results indicate that the proposed model can estimate and control ADN'S risk effectively, and the schedule model can avoid the losses resulted from distribution forecasted errors.

**Key words:** active distribution network (ADN); optimal dispatch; risk management; worst-case value-at-risk

收稿日期:2017-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助基金项目(51607112)

作者简介:施卫杰(1965-),男,江苏启东人,工程师,高级技师,主要从事电力系统规划和建设方面的工作。E-mail: 615727217@qq.com

通信联系人:龚锦霞,女,博士研究生,讲师。E-mail: gjxia06@126.com

## 0 引言

近年来分布式电源大量接入电网,可中断负荷、可转移负荷等需求侧响应资源也逐渐在电网中得到应用。但是,分布式电源和需求侧资源难以被电网调度部门统一监控和管理。由于预测技术精度不够,负荷、风电和光伏等新能源对电网的安全稳定运行也带来了挑战<sup>[1-2]</sup>。针对这些问题,主动配电网得到各界广泛关注<sup>[3]</sup>。

对于电网来说,主动配电网降低了调度部门的管理难度,有助于本地分布式能源发电的就地消纳,降低用电成本<sup>[4]</sup>。

文献[5]研究了主动配电网的日前调度计划,优化与电网的购售电交互和联络开关调整。文献[6]和[7]分别从架构提出了主动配电网的分层能量管理与多源协同优化调度策略。文献[8]利用了随机模拟技术和惩罚函数,并基于机会约束规划求解主动配电网的调度计划。文献[9]利用随机优化理论最大化主动配电网的期望收益保证主动配电网在各个可能场景中的表现。而文献[10]在优化主动配电网期望收益的同时利用协同演化博弈算法考虑了主动配电网与微网等利益主体的博弈。

近年来一系列评价企业尾部风险的指标,诸如风险价值(VaR)和条件风险价值(CVaR)被广泛用来评价企业在一定置信度水平下的极端损失。该文献引入 CVaR 建立了主动配电网在间歇性电源不确定性下的风险评估体系。文献[11]针对期望收益优化和风险管理折中问题,利用风险调整资本收益率约束实现风险和收益的平衡。

随机优化模型难免会因为随机变量的概率分布预测不准确而难以准确评估主动配电网的期望收益和风险。文献[12-14]分别利用条件 Copula 函数、集对分析理论和核极限学习机模型预测风电区间。预测结果降低了预测误差。利用仅有部分信息的随机变量,文献[15]采用模糊鲁棒方法制定电网调度策略。文献[16]则通过模糊机会约束处理含有部分信息随机变量的调度问题。Zhu 和 Fukushima 针对只掌握部分随机变量分布信息的情况提出了一种新型风险指标:最坏条件风险价值(WCVaR)<sup>[17]</sup>,评估主动配电网可能遭受的最坏风险值。文献[18-20]从发电侧讨论了发电资产配置问题。

但是上述文献均只从中长期角度考虑发电量分配问题,本研究从需求侧出发,建立一种考虑 WCVaR 风险指标的主动配电网日前优化调度模型。

## 1 最差条件风险价值理论

大多文献利用风险指标衡量企业在极端情况下的最大亏损,也有文献利用风险指标衡量企业在极端情况下的最小收益<sup>[21]</sup>。本研究中的风险取后者概念。

主动配电网收益  $\xi$  不高于阈值  $\alpha$  的概率为  $\psi(x, \alpha)$  为:

$$\Psi(x, \alpha) = \int_{\xi \leq \alpha} p(y) dy \quad (1)$$

式中: $x$ —主动配电网可控变量向量; $y$ —主动配电网随机变量向量; $p(y)$ —随机变量的具体概率密度函数。

根据定义可知,主动配电网在置信概率下的收益将会高于 VaR 值。如果将收益低于 VaR 的情况定义为极端情况,CVaR 风险值等于主动配电网在极端情况下的期望收益:

$$VaR_c(\xi) = \max\{\alpha: \Psi(x, \alpha) \leq 1 - c\} \quad (2)$$

$$CVaR_c(\xi) = (1 - c)^{-1} \int_{\xi \leq VaR_c(\xi)} \xi p(y) dy \quad (3)$$

实际运营过程中,决策者可能仅仅只知道随机变量概率分布的部分信息。针对这种情况,Zhu 和 Fukushima 基于条件风险的定义,提出了最差条件风险概念,评估当仅知道随机变量概率分布所属的可能集合时的企业风险。WCVaR 指标的定义如(4)所示。其中  $P$  为随机变量概率分布的可能集合:

$$WCVaR_c(\xi) = \inf_{p(y) \in P} CVaR_c(\xi) \quad (4)$$

随机变量的概率密度函数不确定性可以用一个混合分布表示,即实际概率密度函数为若干个已知分布函数的线性组合。混合分布如下所示:

$$p(y) \in \left\{ \sum_{j=1}^N \gamma^j p^j(y) \mid \sum_{j=1}^N \gamma^j = 1 \right\} \quad (5)$$

式中: $p^j(y)$ —第  $j$  个已知分布,混合分布中共有  $NJ$  个可能分布。WCVaR 的求解可以转换为(6),对于混合分布而言,WCVaR 的取值等于各已知分布下主动配电网 CVaR 的最差情况,即下界。当随机变量的确切概率分布为  $p^j(y)$  时,主动配电网的 CVaR 取值为  $CVaR_c^j(\xi)$ :

$$WCVaR_c(\xi) = \inf_j CVaR_c^j(\xi) \quad (6)$$

由于概率分布函数的解析式较为复杂,常利用场景树方法生成一定数目场景进行近似。每个场景表示了随机变量的一种可能实现。而任一个随机变量在众多场景中的取值遵从其概率分布函数。此时,WCVaR 可以根据下式计算:

$$WCVaR_c(\xi^s) = \inf_j \max_{\alpha \in R} F_c(x^s, \alpha) \quad (7)$$

$$F_c(x^s, \alpha) = \varepsilon - \frac{1}{1 - c} \sum_{s=1}^{NS} \pi^s \eta^s \quad (8)$$

$$\varepsilon - \xi^s - \eta^s \leq 0 \quad (9)$$

$$\eta^s \geq 0 \quad (10)$$

式中:  $\xi^s$ —主动配电网的收益,场景树中包括了 NS 个场景;  $F_c(x^s, \alpha)$ —构造的辅助函数;  $x^s$ —离散化的在各个场景中,主动配电网的决策变量;  $y^s$ —场景树中随机变量的可能实现;  $\pi^s$ —场景  $s$  的概率;  $\varepsilon, \eta^s$ —辅助变量。

## 2 考虑 WCVaR 的主动配网优化调度策略

本研究采用双层随机优化理论搭建主动配电网优化调度模型。优化算法的第一层求解日前决策变量,第二层求解在具体场景中,面对随机变量的具体实现,可控变量的最优控制。

由于本研究 WCVaR 指标代表主动配电网在极端场景下的收益, WCVaR 越大代表风险越小。目标函数如(11)所示,为期望收益和 WCVaR 的线性加权和。由于随机变量的概率分布仅知道部分信息,因此主动配电网的期望收益也是未知的。当随机变量属于混合分布时,主动配电网的最差期望收益为  $\inf_{p(y) \in P} E(\xi_p^s)$ 。混合分布中最差期望收益等于在若干个已知分布中主动配电网期望收益的最小值  $\inf_j E(\xi_j^s)$ 。WCVaR 可以通过公式(7)求得。

$$\text{Max} \inf_j E(\xi_j^s) \times (1 - \beta) + \text{WCVaR}_c(\xi_j^s) \times \beta \quad (11)$$

$$\xi_j^s = \sum_{t=1}^{NT} (P_{j,s,t}^{\text{sell}} \times Q_{j,t}^{\text{sell}} - P_{j,s,t}^{\text{buy}} \times Q_{j,t}^{\text{buy}} - F(P_{j,s,t}^{\text{DR}}) - F(P_{j,s,t}^{\text{fuel}}) - \Delta P_{j,s,t} \times Q^{\text{pen}}) \quad (12)$$

式中:  $\xi_j^s$ —第  $j$  种已知分布第  $s$  个场景中主动配电网的收益;  $E(\cdot)$ —期望值;  $\beta$ —风险厌恶系数。

$$E(\xi_j^s) = \sum_{s=1}^{NS\_J} (\pi^s \times \xi_j^s) \quad (13)$$

公式(12)表明了主动配电网的收益包括了向电网的售电收入  $P_{j,s,t}^{\text{sell}} \times Q_{j,t}^{\text{sell}}$ , 购电成本  $P_{j,s,t}^{\text{buy}} \times Q_{j,t}^{\text{buy}}$ , 化石燃料分布式电源发电成本  $F(P_{j,s,t}^{\text{fuel}})$ , 需求响应成本  $F(P_{j,s,t}^{\text{DR}})$  以及购售电量波动遭受的惩罚  $\Delta P_{j,s,t} \times Q_{j,t}^{\text{pen}}$ 。

其中:  $P_{j,s,t}^{\text{sell}}, P_{j,s,t}^{\text{buy}}$ —主动配电网售电量和购电量;  $Q_{j,t}^{\text{sell}}, Q_{j,t}^{\text{buy}}$ —购售电价;  $P_{j,s,t}^{\text{DG}}, P_{j,s,t}^{\text{DR}}$ —主动配电网中分布式电源发电量和需求响应的削减负荷用电量。因为主动配电网内部随机因素波动,实际购售电量与日计划不同,需要电网调用备用等资源保证全网有功平衡。因此本研究假设电网将根据主动配电网购售电量波动的绝对值  $\Delta P_{j,s,t}$  进行惩罚,惩罚价格为  $Q^{\text{pen}}$ 。

本研究中日前调度模型的时间尺度为 1 h, 调度周期中的时段数 NT 为 24。约束(13)表明了主动配电网在第  $j$  种已知分布下的期望收益,对于该分布,场景树生成了 NS\_J 个场景。

$$P_{j,s,t}^{\text{fuel}} + P_{j,s,t}^{\text{res}} - P_{j,s,t}^{\text{sell}} + P_{j,s,t}^{\text{buy}} = L_{j,s,t} - P_{j,s,t}^{\text{DR}} \quad (14)$$

式中:  $L_{j,s,t}$ —主动配电网内的负荷需求;  $P_{j,s,t}^{\text{res}}$ —主动配电网内可再生能源的发电量。

公式(14)表明了主动配电网的有功平衡关系。等式左边为主动配电网的净注入量,右边为主动配电网的实际负荷供应。需求响应  $P_{j,s,t}^{\text{DR}}$  被要求不能超过实际负荷需求的  $\alpha \times 100\%$ , 如(15)所示。

$$0 \leq P_{j,s,t}^{\text{DR}} \leq \alpha \times L_{j,s,t} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{j,s,t}^{\text{res}} \leq P_{j,s,t}^{\text{res,max}} \quad (16)$$

公式(16)表示了可再生能源的实际发电量  $P_{j,s,t}^{\text{res}}$  受到了气象等因素的约束,  $P_{j,s,t}^{\text{res,max}}$  表示在当前气象等条件下,可再生能源的最大可能发电量。

公式(17)和(18)为主动配电网和主网之间联络线的潮流约束,  $P^{\text{line,max}}$  是主动配电网与电网联络线的额定容量,而  $g_{j,s,t}$  为布尔变量,取值为 1 时表示主动配电网向电网售电,否则取值为 0。

$$0 \leq P_{j,s,t}^{\text{sell}} \leq g_{j,s,t} P^{\text{line,max}} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{j,s,t}^{\text{buy}} \leq (1 - g_{j,s,t}) P^{\text{line,max}} \quad (18)$$

主动配电网与主网之间的能量交互为售电量与购电量的差值,如下:

$$P_{j,s,t}^{\text{ADN}} = P_{j,s,t}^{\text{sell}} - P_{j,s,t}^{\text{buy}} \quad (19)$$

因为内部负荷和可再生能源的随机波动,主动配电网购售电量波动  $\Delta P_{j,s,t}$  等于日前购售电量计划  $P^{\text{ADN}}$  与实际数值差值的绝对值,线性化求解方法如下:

$$\Delta P_{j,s,t} \geq P_{j,s,t}^{\text{ADN}} - P^{\text{ADN}} \quad (20)$$

$$\Delta P_{j,s,t} \geq P^{\text{ADN}} - P_{j,s,t}^{\text{ADN}} \quad (21)$$

式(22 ~ 23)为主动配电网中诸如燃气轮机等化石燃料分布式电源的运行特性。燃气机组的燃料成本可由式(22)求取,  $a_f$  和  $b_f$  是机组的成本系数,燃气价格为  $Q^{\text{gas}}$  单位是  $\text{¥/KWh}$ 。  $I_t^{\text{fuel}}$  表示燃气机组在时刻  $t$  的启停机状态,1 为启动,0 为停止状态。因为机组无法频繁启停,机组启停机状态在同一时间段内无法改变,为第一层随机规划中的日前变量。燃气机组的出力上下限受到机组特性和状态约束,如下:

$$F(P_{j,s,t}^{\text{fuel}}) = (a_f P_{j,s,t}^{\text{fuel}} + b_f I_t^{\text{fuel, chp}}) \times Q^{\text{gas}} \quad (22)$$

$$I_t^{\text{fuel}} \times P^{\text{fuel,min}} \leq P_{j,s,t}^{\text{fuel}} \leq I_t^{\text{fuel}} \times P^{\text{fuel,max}} \quad (23)$$

式中:  $P^{\text{fuel,min}}, P^{\text{fuel,max}}$ —燃气机组最小出力和最大出力。

引入辅助变量  $\mu$ , 通过式(25)可求得在可能收益情况中的最差期望收益。WCVaR 的求解可以通过式

(26) - (29) 求得。调度模型的目标函数可以转换为:

$$\text{Max} \mu \times (1 - \beta) + \text{WCVaR}_c(\xi_j^s) \times \beta \quad (24)$$

$$0 \leq \mu \leq \sum_{s=1}^{NS-J} \pi_j^s \xi_j^s \quad (25)$$

$$\text{WCVaR}_c(\xi_j^s) \leq \varepsilon_j - \frac{1}{1-c} \sum_{s=1}^{NS-J} \pi_j^s \eta_j^s \quad (26)$$

$$\sum_{s=1}^{NS-J} \pi_j^s = 1 \quad (27)$$

$$\varepsilon_j - \xi_j^s - \eta_j^s \leq 0 \quad (28)$$

$$\eta_j^s \geq 0 \quad (29)$$

综上所述,主动配电网的目标函数为(24),约束条件为(12) - (23)和(25) - (29)。调度模型为混合整数规划,可以应用商业软件 CPLEX 12.4 求解。

### 3 算例

#### 3.1 算例基本信息

主动配电网内有一台装机容量为 600 kW 的燃气机组和总共 500 kW 的风电太阳能发电模块。主动配电网负荷在 300 kW 至 600 kW 间波动。具体风力发电预测和负荷预测曲线如图 1 所示。

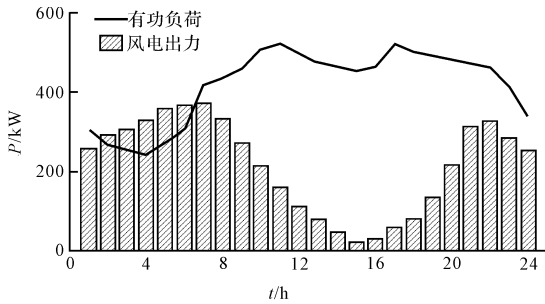


图 1 主动配电网预测负荷曲线和风电预测出力

燃气机组的发电特性数据如表 1 所示。

表 1 主动配电网内燃气机组参数

| 参数变量                                   | 取值   |
|--|------|
| $p^{\text{fuel},\text{min}}/\text{kW}$ | 300  |
| $p^{\text{fuel},\text{max}}/\text{kW}$ | 50   |
| $a_f$                                  | 2.64 |
| $b_f$                                  | 66.2 |

天然气价格为 0.3 元/kWh。需求响应负荷不超过总负荷需求的 20%，对于主动配电网实际购售电与日前计划的偏差征收 0.15 元/kWh 的惩罚费用,主动配电网开展需求响应叫需要补偿给用户 1 元/kWh。

主动配电网与主网的购售电价来自参考文献 [22],如表 2 所示。

表 2 主动配电网向电网购电与售电电价

| 购售电价 | 价格/(元·kWh <sup>-1</sup> ) |      |      |
|------|---------------------------|------|------|
|      | 峰时段                       | 平时段  | 谷时段  |
| 购电   | 1.56                      | 0.70 | 0.43 |
| 售电   | 1.28                      | 0.54 | 0.32 |

电价为峰平谷分时电价,谷时段为 00:00 ~ 08:00,平时段为 08:00 ~ 11:00、16:00 ~ 19:00 和 22:00 ~ 24:00,峰时段为 11:00 ~ 16:00 和 19:00 ~ 22:00。假设主动配电网中负荷和光伏出力预测误差均服从均值为 0 的正态分布,但是标准差未知。建立概率分布的混合集合,其中负荷误差的可能分布有两种,标准差分别为负荷预测值的 10% 和 15%。风电出力误差的可能分布也有两种,标准差分别为风电出力预测值的 20% 和 30%。忽略风电出力和负荷波动的相关性,因此主动配电网中随机变量的混合分布共有 4 种可能分布:高负荷波动高风电波动,高负荷波动低风电波动,低负荷波动高风电波动和低负荷波动低风电波动。本研究采用拉丁超立方方法对每种可能分布生成 200 个场景,模型共求解 800 个场景。WCVaR 的置信概率为 95%,风险厌恶系数为 0.5。

#### 3.2 日前调度结果

主动配电网的购售电计划,以及内部燃气机组和需求响应的调度计划如图 2 所示。

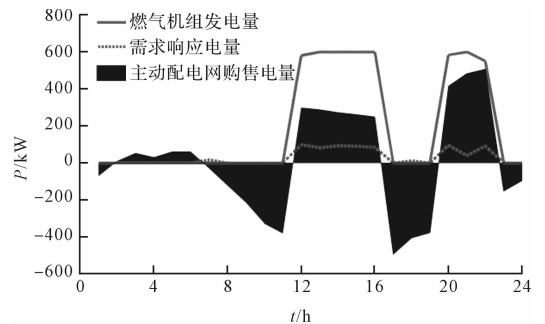


图 2 可控资源调度计划和主动配电网购售电计划

主动配电网与主网的购售电功率需要综合考虑电价、负荷和风电三者的相互影响。在电价低谷时段,风电可用资源丰富,主动配电网以就地消纳风电为主,多余风电以较低价格出售给电网。在电价高峰时期,由于主动配电网售电的电价较高,因此主动配电网充分利用内部燃气机组和需求响应等资源向电网售电获得利润。在电价平时刻,售电电价和购电电价低于燃气机组和需求响应的成本,风电出力也较低。

#### 3.3 敏感性分析和对比分析

主动配电网在不同风险厌恶系数下的购售电情况和燃气机组出力如图 3 所示。

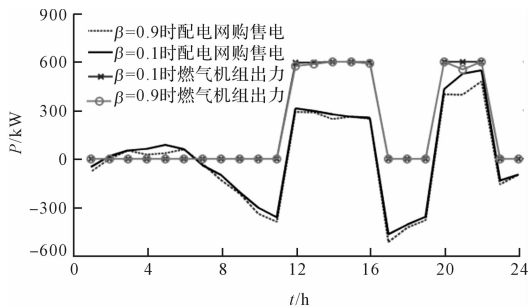


图 3 不同风险厌恶系数下主动配电网调度计划

对比购售电曲线可以发现,风险厌恶系数较高时,主动配电网倾向于购买更多的电量和卖出更少的电量。因为风险厌恶较高情况下主动配电网在电价高峰时段计划卖出了更少的电量,燃气机组的计划出力也略低于风险厌恶较低情况下的出力。主动配电网调度计划的 Pareto 前沿如图 4 所示。

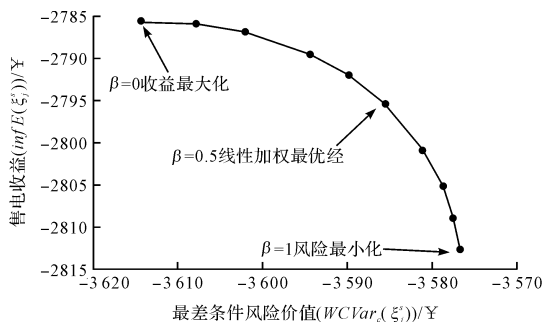


图 4 主动配电网调度计划的 Pareto 前沿

售电收益和 WCVaR 是调度计划的两个优化目标。调整调度模型中的风险厌恶系数可以大致描绘出调度模型中由 Pareto 最优解组成的 Pareto 前沿。在算例中设置  $\beta$  取值 0.5,大致可以保证调度模型获得风险和收益较为均衡的调度计划。主动配电网的最低期望收益  $\inf E(\xi_j)$  为  $-2\ 795$  ¥, WCVaR 取值为  $-3\ 585$  ¥, 取值为负代表成本。对比可知,由于负荷、风电的波动,在 95% 的置信概率下,主动配电网可能会多付出 30% 的总成本。

调整调度模型中的偏差惩罚价格对调度计划的影响如图 5 所示。

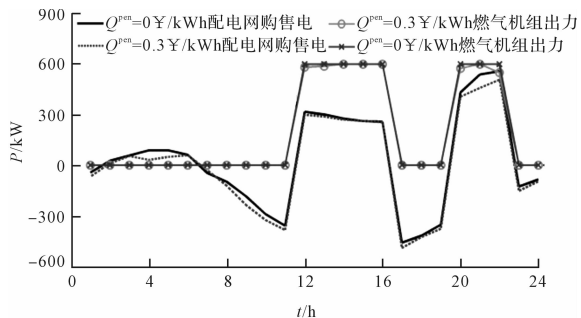


图 5 不同偏差惩罚价格下的主动配电网调度策略

对比分析图 3 和图 5 可知,不收取惩罚费用和惩罚价格为  $0.3$  ¥/kWh 时,收取较高惩罚费用也会让主动配电网制定较为风险规避的调度计划。此时,主动配电网购入更多电量。

当决策者不考虑预测误差概率分布不确定性时,仅仅根据假设的概率分布求解出的主动配电网经济性情况如表 3 所示。

表 3 不同分布假设的主动配电网经济性

| 概率分布   | 期望收益/( ¥ ) | CVaR/( ¥ ) |
|--|------------|------------|
| $\delta_{load} = 10\%$ $\delta_{wind} = 20\%$ (情况 1) | -2 737     | -3 160     |
| $\delta_{load} = 10\%$ $\delta_{wind} = 30\%$ (情况 2) | -2 794     | -3 415     |
| $\delta_{load} = 15\%$ $\delta_{wind} = 20\%$ (情况 3) | -2 731     | -3 404     |
| $\delta_{load} = 15\%$ $\delta_{wind} = 30\%$ (情况 4) | -2 776     | -3 490     |

此时调度模型与本研究中模型相同,但是 NJ 取值为 1,模型退化为传统文献中基于 CVaR 指标的调度模型。 $\delta_{load}$  和  $\delta_{wind}$  分别为假设的负荷和风速预测误差的标准差。对比可知,由于概率分布的不同,4 种情况下的期望收益最大有 2.3% 波动,波动较小。传统基于 CVaR 指标的调度模型中,因为随机变量概率分布模型的不确定性将会对调度计划的风险评估带来较大误差。本研究提出的调度模型中,风险指标 WCVaR 可以很好地规避这个问题,拥有对概率分布不确定的鲁棒性。

利用本研究 WCVaR 模型和传统 CVaR 模型的调度计划,在面对实际各种概率分布情况下的期望收益和 CVaR 值如表 4 所示。

表 4 不同分布假设的主动配电网经济性

| 实际<br>情况 | 传统 CVaR 模型(情况 1) |                | WCVaR 模型       |                |
|----------|------------------|----------------|----------------|----------------|
|          | 期望收益/<br>( ¥ )   | CVaR/<br>( ¥ ) | 期望收益/<br>( ¥ ) | CVaR/<br>( ¥ ) |
| 情况 1     | -2 737           | -3 160         | -2 730         | -3 172         |
| 情况 2     | -2 791           | -3 437         | -2 795         | -3 418         |
| 情况 3     | -2 730           | -3 416         | -2 736         | -3 409         |
| 情况 4     | -2 770           | -3 511         | -2 775         | -3 500         |

对比可知,当实际情况也为情况 1 时,传统 CVaR 模型求取的调度计划期望收益和风险指标均最好。但是当实际情况和假设情况不相同,本文提出的 WCVaR 模型的风险值均较传统 CVaR 模型有所改善。在实际随机变量概率分布具有不确定性时,本文提出的 WCVaR 模型相较传统 CVaR 模型有良好的鲁棒性。

## 4 结束语

本研究讨论了风险管理下的主动配电网运行调度问题,在算例中,本研究提出的调度模型将根据可再生能源出力、负荷和电价情况充分调用自身可控资源。主动配电网在电价低谷时段将充分消纳新能源,在电价峰时段则向主网售电赚取利润,从而实现对主网的主动响应。

通过敏感度分析可知,增加风险厌恶系数会令主动配电网制定更加保守的调度计划,在购售电计划中,购电更多、售电更少。

### 参考文献 (References):

- [1] 李剑楠,乔颖,鲁宗相,等. 大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19):7-13.
- [2] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29):5029-5040.
- [3] 赵波,王财胜,周金辉,等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18):125-135.
- [4] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18):10-16.
- [5] 尤毅,刘东,钟清,等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9):177-183.
- [6] 刘东,陈云辉,黄玉辉,等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31):5500-5506.
- [7] 蒲天骄,陈乃仕,王晓辉,等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1):17-23, 32.
- [8] 王健,谢桦,孙健. 基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13):45-52.
- [9] 王健. 主动配电网日前计划调度方法研究[D]. 北京:北京交通大学电子工程学院, 2015.

- [10] 王璟,金尧,黄泽华,等. 考虑间歇性电源不确定性的配电网经济效益风险评估[J]. 电器与能效管理技术, 2015(13):14-18.
- [11] 刘扬洋,蒋传文,谭胜敏,等. 考虑风险调整资本收益率阈值约束的虚拟电厂优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17):4617-4627.
- [12] 兰飞,桑川川,梁浚杰,等. 基于条件 Copula 函数的风电功率区间预测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(S1):79-86.
- [13] 郭钰锋,孙颀,于继来,等. 集对分析理论在风电场风速区间预测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2):6-11.
- [14] 杨锡运,关文渊,刘玉奇,等. 基于粒子群优化的核极限学习机模型的风电功率区间预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(S1):146-153.
- [15] 季峰,蔡兴国,岳彩国. 含风电场电力系统的模糊鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28):4791-4798.
- [16] 吴杰康,唐力. 基于模糊机会约束规划的水火电力系统多目标随机调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25):26-34.
- [17] ZHU S, FUKUSHIMA M. Worst-case conditional value-at-risk with application to robust portfolio management[J]. **Operations Research**, 2009, 57(5):1155-1168.
- [18] 周任军,胡军,罗潇,等. 发电资产最优组合分配的 WCVaR 风险度量方法[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2009(1):36-42.
- [19] 周娟,江辉,李鹏. 基于 WCVaR 风险度量的发电商电量分配模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1):156-160.
- [20] 童小娇,王旭东,罗可. 多置信水平下的最坏情况条件风险模型[J]. 控制与决策, 2010, 25(9):1431-1440.
- [21] TAJEDDINI M A, RAHIMI-Kian A, SOROUDI A. Risk averse optimal operation of a virtual power plant using two stage stochastic programming[J]. **Energy**, 2014, 73(9):958-967.
- [22] 石庆均,江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5):76-82.

[编辑:张豪]

### 本文引用格式:

施卫杰,金茜,李禹鹏,等. 考虑最差条件风险价值的主动配电网优化调度研究[J]. 机电工程, 2017, 34(11):1316-1321.

SHI Wei-jie, JIN Xi, LI Yu-peng, et al. Optimal dispatch of active distribution network considering worst-case conditional value-at-risk[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(11):1316-1321.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>