

考虑响应量与风电出力相关性的需求响应优化调度研究

原睿萌,范绚然,姬广龙,周梦真,袁越

(河海大学 能源与电气学院,南京 211100)

Study on the optimal dispatching of hybrid type demand response load considering the correlation between response quantity and wind power output

YUAN Rui-meng, FAN Xuan-ran, JI Guang-long, ZHOU Meng-zhen, YUAN Yue

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

摘要:在考虑风电场出力与负荷响应量相关性的基础上,建立以成本最小化为目标的日前优化调度模型。首先根据响应量和风电出力的概率分布建立基于Copula函数的联合概率分布模型;然后提出需求响应(demand response, DR)用户互动满意度指标来限制需求响应负荷的可调节程度;最后建立以电网总成本最小化为目标的日前优化调度模型。以IEEE 39标准算例为例验证了模型的合理性和准确性,结果表明考虑响应量和风电出力相关性可以有效降低系统运行成本,提高系统调度的经济性。

关键词:响应量;需求响应;用户互动满意度;优化调度

Abstract: A day-ahead dispatching model aiming to minimize the dispatching cost of electric power system considering correlation between the response quantity of demand response load and the output of wind power is established. Firstly, a joint probability distribution model of wind power output and response quantity is established. Then, customers' interaction satisfaction index is proposed to limit the adjustable degree of demand response load. Finally, in order to minimize the dispatching cost, an optimal dispatching model is established. The IEEE 39 system standard example verifies the rationality and accuracy of model. The results show that the model proposed can effectively reduce the system operation cost and improve the economic efficiency of the system dispatching.

Key words: response quantity; demand response; correlation; customers' interaction satisfaction; optimal dispatch

中图分类号:F407.61;TK018;TM614;TM73 文献标志码:A

目前风电光伏等清洁能源发电发展迅猛,研究含风电机组的电力系统的优化调度可以更加充分地利用清洁能源发电,降低碳排放量,而DR的提出和应用,为需求侧主动配合发电侧提供了新思路。在优化调度问题中考虑DR的作用有利于促进用户与电网间的互动,降低电网的调节压力。

文献[1]利用风力发电的短期分布预测方法,对经济调度和可中断负荷管理的随机优化问题进行了研究。文献[2]将需求侧管理由应急控制转变为长期协调,充分挖掘需求侧的调节能力。文献[3]在考虑用户响应不确定性和总可中断负荷需求的基础上,根据历史数据推导出用户响应的概率分布,从而对可中断负荷决策进行了优化。文献[4]—文献[5]采用场景分析的方法分析风电和需求响应负荷的不确定性因素。

然而上述研究中尚未考虑负荷响应量和风电

出力之间的相关性,考虑两者之间的相关性可以量化风力发电对需求侧用户用电行为的影响,从而指导电网给出更合理的刺激信号鼓励用户多使用清洁能源,提高电力系统运行调度的经济性。

本文在上述文献的基础上对含价格型和激励型2种类型DR负荷的电力系统建立以电网总成本最小化为目标的日前优化调度模型,提出考虑风电出力和负荷响应量相关性的新思路。首先基于我国某省的风电场总出力实际数据,选择合适的Copula函数,建立风电场出力和DR响应量的联合概率分布模型;其次提出用户互动满意度约束来衡量用户在系统调度中的参与程度和用户获利情况后建立计及DR调度成本的日前优化调度模型,分析不同满意度下是否考虑相关性对调度结果的影响。

1 基于Copula函数的相关性建模

1.1 Copula函数的定义

Sklar定理^[6]:令1个 n 维变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的联合累积分布函数为 F ,各维变量 x_i 的边缘累积分布函数记为 F_i ,那么存在1个 n 维Copula函数 C ,使得

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)] \quad (1)$$

收稿日期:2018-03-05;修回日期:2018-04-18

基金项目:国家重点研发计划项目课题(2016YFB0900103)

作者简介:原睿萌(1993),女,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,主要研究方向为需求侧响应,电力系统优化调度;袁越(1966),男,陕西省西安人,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、可再生能源发电系统、智能电网与微网技术。

1.2 相关系数

设 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 为随机变量 (X, Y) 的 2 组观测值, 如果满足 $(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) > 0$, 则称 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 的相关性是一致的, 否则两者相关性不一致。

定义 τ 为样本 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ 的相关系数。具体公式如下

$$\tau = (c - d) / C_N^2 \quad (2)$$

式中: N 为观测值 (x_i, y_i) 的个数; C_N^2 为观测值两两组合后的组数; c 为相关性是一致的组数; d 为相关性是不一致的组数。

随机变量 (X, Y) 的相关系数 τ 具有以下性质:

- ① $|\tau| \leq 1$, 且 $|\tau|$ 越趋近于 1, 表示 2 组变量相关程度越强;
- ② 当相关系数 $\tau > 0$ 时, (X, Y) 在整体上呈正相关性;
- ③ 当相关系数 $\tau < 0$ 时, (X, Y) 在整体上呈负相关性;
- ④ 当 $\tau = 0$ 时, (X, Y) 的相关性不能确定。

1.3 Copula 函数的拟合优度校验

采用最短平方欧氏距离法^[6]比较几种常见的 Copula 函数的拟合优度, 从而选取最合适的 Copula 函数。

设随机变量 (X, Y) 的 1 个样本为 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), 记 $F_n(x)$ 为 X 的经验分布函数, $G_n(y)$ 为 Y 的经验分布函数, 则经验 Copula 公式如下

$$C_n(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{[F_n(x_i) \leq u]} I_{[G_n(y_i) \leq v]} \quad (3)$$

式中: $C_n(u, v)$ 为拟合的经验 Copula 函数; u, v 分别为随机变量样本的边缘累积分布; n 为样本数; I 为状态函数, 当 $F_n(x_i) \leq u$ 时 $I_{[F_n(x_i) \leq u]} = 1$, 否则 $I_{[F_n(x_i) \leq u]} = 0$ 。

平方欧氏距离公式如下

$$d^2 = \sum_{i=1}^n |C_n(u_i, v_i) - C(u_i, v_i)|^2 \quad (4)$$

式中: $u_i = F_n(x_i)$, $v_i = G_n(y_i)$ 为随机变量样本 (x_i, y_i) 的边缘累积分布 ($i = 1, 2, \dots, n$)。

1.4 响应量和风电出力的相关性分析

本文预估计响应量和风电出力具有负相关性, 因为当电网(含风电)电量不足(充足)时, 会通过提高(降低)电网电价或其他激励手段鼓励用户削减(增加)用电量。以我国某省 1 年的风电场实际出力和响应量数据为样本, 从中随机抽选几日, 如从 1、4、7、10 月各抽选 1 天组成 1 个 96 时段的数据抽样曲线, 见图 1。由图 1 可以看出, 响应量与风电出力具有一定程度的负相关性, 因此可以建立两者的联合概率分布模型。

1.5 负荷响应量和风电出力联合概率分布模型

根据某省风电场出力和实施需求响应计划的响应量实际数据, 对该数据进行了归一化处理, 折算成风电出力率和负荷响应量率, 并以风电出力率 P_1 和

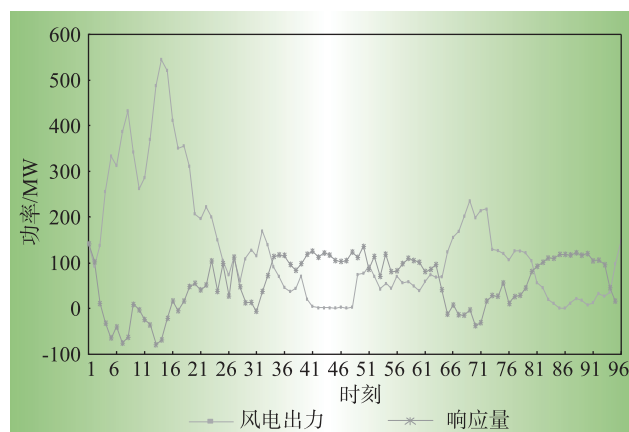


图 1 响应量和风电出力的数据

响应量率 P_2 为随机变量, 对应的概率密度分别为 $f_{PF}(P_1)$ 、 $f_{PDR}(P_2)$ 。令 $(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n})$ 和 $(p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2n})$ 分别为 P_1 和 P_2 的样本空间, n 为样本容量。且 p_{1i} 和 p_{2i} 在时间上一一对应, 那么 (p_{1i}, p_{2i}) 和 (p_{1j}, p_{2j}) 为独立同分布的随机向量, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 且 $i \neq j$ 。

根据 Copula 理论, 风电出力和响应量的联合概率分布可由如下步骤计算:

(1) 对 $f_{PF}(P_1)$ 和 $f_{PDR}(P_2)$ 进行积分运算, 得到累计分布 $F_{PF}(P_1)$ 和 $F_{PDR}(P_2)$;

(2) 将所有 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 且 $i \neq j$ 组成的 (p_{1i}, p_{2i}) 和 (p_{1j}, p_{2j}) 代入式(2), 计算风电出力和负荷响应量的秩相关系数 $\tau = -0.1721$;

(3) 用 (p_{1i}, p_{2i}) ($i = 1, 2, \dots, n$) 拟合几种常见 Copula 函数, 得到连接参数 θ 和 Kendall 相关系数, 并计算出和经验 Copula 函数之间的平方欧式距离 d^2 , 结果见表 1;

(4) 通过比较 Kendall 相关系数和平方欧式距离选择最合适的 Copula 函数, 建立风电出力和负荷响应量的联合概率分布。

表 1 几种常见 Copula 函数的拟合参数

Copula 函数	连接参数 θ	Kendall 相关系数	平方欧式距离 d^2
Normal-Copula	-0.197 3	-0.126 4	0.058 6
t-Copula	-0.285 4	-0.184 3	0.053 9
Clayton-Copula	$1.450 9 \times 10^{-6}$	$7.254 3 \times 10^{-7}$	0.161 2
Frank-Copula	-1.517 0	-0.164 8	0.049 4

由表 1 可以看出在上述常见 Copula 函数中 Frank-Copula 函数的 Kendall 相关系数 -0.164 8 最接近 $\tau = -0.1721$, 且平方欧式距离 d^2 最小。因此选择 $\theta = -1.5170$ 的 Frank-Copula 函数建立风电出力与响应量的联合概率分布模型。

2 需求响应负荷的调度成本建模

2.1 实时电价需求响应负荷调度成本模型

价格型需求响应^[7](price-based demand response, PDR)是指用户根据收到的价格信号调整用电需求,本文采用实时电价(real time price, RTP)的价格弹性系数来描述电网价格信号对PDR负荷产生的影响。响应负荷 r 的功率 $P_{pr,r}$ 与电价 c_r 之间的关系用价格弹性系数^[8]表示为

$$P_{pr,r} = \alpha_r c_r + \beta_r, P_{pr,r} \in [P_{pr,r,\min}, P_{pr,r,\max}] \quad (4)$$

式中: $P_{pr,r,\max}, P_{pr,r,\min}$ 分别为负荷功率最大值和最小值; α_r, β_r 为价格弹性系数,描述负荷功率对电价的敏感程度,绝对值越大,表示该RTP负荷对电价信号的变化越敏感。

整理得到电价公式

$$c_r(t) = \frac{1}{\alpha_r} (P_{pr,r} - \beta_r) \quad (5)$$

用 t 时段电网侧售电收入的变化来表示 t 时段电网对RTP负荷调度成本 $C_{pr,r,\text{cost}}(t)$,如式(6)所示

$$C_{pr,r,\text{cost}}(t) = P_{pr,r,0}(t) \cdot c_{r,0}(t) - P_{pr,r}(t) \cdot c_r(t) \quad (6)$$

式中: $P_{pr,r,0}(t)$ 为 t 时段负荷初始功率; $c_{r,0}(t)$ 为 t 时段初始电价; $P_{pr,r}(t)$ 为 t 时段RTP负荷响应后的功率; $c_r(t)$ 为 t 时段响应后电价。

当 t 时段电价 $c_r(t) \neq c_{r,0}(t)$ 时,RTP负荷根据电价信号削减的用电量为 $\Delta P_{pr,r}(t)$,如式(7)所示

$$\Delta P_{pr,r}(t) = P_{pr,r,0}(t) - P_{pr,r}(t) \quad (7)$$

由式(5)一式(7)整理可得需求响应的调度成本为

$$C_{pr,r,\text{cost}}(t) = -\frac{1}{\alpha_r} \cdot \Delta P_{pr,r}^2(t) - \frac{\beta_r - 2P_{pr,r,0}(t)}{\alpha_r} \cdot \Delta P_{pr,r}(t) \quad (8)$$

2.2 可中断负荷调度成本模型

响应前, t 时段针对可中断负荷(interruptible load, IL) r 电力公司的收入 $C_{il,r,0}(t)$ 为

$$C_{il,r,0}(t) = c_{r,0}(t) \cdot P_{il,r,0}(t) \quad (9)$$

式中: $c_{r,0}(t)$ 为响应前 t 时段IL负荷 r 对应的电价; $P_{il,r,0}(t)$ 为 t 时段IL负荷 r 的初始功率。

t 时段IL负荷 r 削减的用电量 $\Delta P_{il,r}(t)$ 为

$$\Delta P_{il,r}(t) = (P_{il,r,0}(t) - P_{il,r}(t)) \cdot v_{il,r}(t) \quad (10)$$

式中: $P_{il,r}(t)$ 为 t 时段IL负荷 r 根据激励信号做出响应后的功率; $v_{il,r}(t)$ 为IL负荷 r 是否中断的状态量, $v_{il,r}(t)=1$ 表示 t 时段IL负荷 r 中断, $v_{il,r}(t)=0$ 表示 t 时段IL负荷 r 未中断。

t 时段中断负荷 r 的补偿容量 $P_{b,r}(t)$ 为

$$P_{b,r}(t) = \begin{cases} 0 & \Delta P_{il,r} \leq 0 \\ \Delta P_{il,r} & 0 \leq \Delta P_{il,r} \leq \Delta P_{il,r,\text{req}} \\ \Delta P_{il,r,\text{req}} & \Delta P_{il,r} \geq \Delta P_{il,r,\text{req}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta P_{il,r,\text{req}}$ 为 t 时段中断负荷 r 的最大补偿容量。

当 t 时段中断负荷 r 中断并减少用电量为 $\Delta P_{il,r}(t)$ 时,电力公司对用户 r 的经济补偿费用 $C_{il,r,b}(t)$ 为

$$C_{il,r,b}(t) = ILB_r(t) \cdot P_{b,r}(t) \quad (12)$$

式中: $ILB_r(t)$ 为IL合同中 t 时段IL负荷 r 的单位补偿费用。

t 时段中断负荷 r 的赔偿容量为

$$P_{b,r}(t) = \begin{cases} \Delta P_{il,r,\text{req}} - \Delta P_{il,r} & 0 \leq \Delta P_{il,r} \leq \Delta P_{il,r,\text{req}} \\ \Delta P_{il,r} & \Delta P_{il,r} \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{b,r}(t)$ 为 t 时段中断负荷 r 的赔偿容量。

若 t 时段 $\Delta P_{il,r}(t)=0$ 时,即 t 时段中断负荷 r 不中断,用户需赔偿的费用为

$$C_{il,r,p}(t) = ILP_r(t) \cdot P_{b,r}(t) \quad (14)$$

式中: $ILP_r(t)$ 为IL合同中 t 时段IL负荷 r 的赔偿费用。

响应后, t 时段针对IL负荷 r 电力公司的收入 $C_{il,r}(t)$ 为

$$C_{il,r}(t) = c_r(t) \cdot P_{il,r}(t) + U(t) \cdot (C_{il,r,p}(t) - C_{il,r,b}(t)) \quad (15)$$

式中: $c_r(t)$ 为响应后 t 时段IL负荷 r 对应的电价; $U(t)$ 为电网IL负荷调用变量, $U(t)=1$ 表示调用IL负荷, $U(t)=0$ 表示不调用IL负荷。

t 时段电网对IL负荷 r 的调度成本 $C_{il,r,\text{cost}}(t)$ 可以表示为 t 时段IL负荷 r 响应前后电网收入的变化

$$C_{il,r,\text{cost}}(t) = C_{il,r,0}(t) - C_{il,r}(t) = c_{r,0}(t) \cdot P_{il,r,0}(t) - c_r(t) \cdot P_{il,r}(t) - U(t) \cdot (C_{il,r,p}(t) - C_{il,r,b}(t)) \quad (16)$$

2.3 需求响应用户互动满意度

假定需求响应用户 r 的响应量 $\Delta P_r(t) = \Delta P_{pr,r}(t) + \Delta P_{il,r}(t)$,响应前功率为 $P_{r,0}(t)$,响应后功率 $P_r(t) = P_{r,0}(t) - \Delta P_r(t)$,响应后电网调度成本为 $C_{r,\text{cost}}(t) = C_{pr,r,\text{cost}}(t) + C_{il,r,\text{cost}}(t)$ 。为运算方便,本文考虑所有用户均含价格型的实时电价负荷,部分用户含激励型的可中断负荷。

本文采用1天内用户参与调度的响应量来描述用户的用电方式满意度 $\eta_{s,r}$,如式(17)所示

$$\eta_{s,r} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |\Delta P_r(t)|}{\sum_{t=1}^{24} P_{r,0}(t)} \quad (17)$$

式中: $\sum_{t=1}^{24} |\Delta P_r(t)|$ 为用户 r 参与互动时1天的总功率变化量; $\sum_{t=1}^{24} P_{r,0}(t)$ 为用户 r 不参与互动时1天的总功率。

本文采用1天内用户参与调度的调度成本来描述用户的互动效益满意度 $\eta_{c,r}$,如式(18)所示

$$\eta_{c,r} = 1 + \frac{\sum_{t=1}^{24} C_{r,\text{cost}}(t)}{\sum_{t=1}^{24} (P_{r,0}(t) \cdot c_{r,0}(t))} \quad (18)$$

式中: $\sum_{i=1}^{24} C_{r, \text{cost}}(t)$ 为1天内用户 r 参与互动所减少的用电费用; $\sum_{i=1}^{24} (P_{r,0}(t) \cdot c_{r,0}(t))$ 为用户 r 不参与互动时1天的总用电费用。

3 含需求响应电力系统优化调度模型

3.1 目标函数

目标函数由4部分组成,分别为:发电成本、启停成本、需求响应负荷(包括实时电价负荷和可中断负荷)的调度成本。如式(19)所示

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (z_i(t) \cdot C_i(P_i(t)) + \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^I z_i(t) \cdot (1 - z_i(t-1)) \cdot S_i + \sum_{i=1}^T \sum_{r=1}^{DR} C_{r, \text{cost}}(t)) \quad (19)$$

$$C_i(P_i(t)) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (20)$$

式中: F 为系统总的运行成本; T 为调度期间的时段总数; I 为系统机组数; $P_i(t)$ 为火电机组 i 在时段 t 的有功功率; $z_i(t)$ 为火电机组 i 在时段 t 的状态, $z_i(t)=1$ 表示开机, $z_i(t)=0$ 表示停机; $C_i(P_i(t))$ 为机组 i 在时段 t 的运行成本; S_i 为机组 i 的开机费用; a_i, b_i, c_i 为火电机组的运行成本参数; $C_r(t)$ 为需求响应用户 r 在时段 t 的调度成本; DR 为需求响应用户总数。

3.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^I P_i(t) + P_w(t) = \sum_{r=1}^{DR} (P_{r,0}(t) - \Delta P_r(t)) \quad (21)$$

式中: $P_w(t)$ 为风电机组 t 时段的输出功率。

(2) 发电机输出功率约束

$$P_{i, \min} \leq P_i(t) \leq P_{i, \max} \quad (22)$$

式中: $P_{i, \max}, P_{i, \min}$ 分别为发电机组 i 出力的最大值和最小值。

(3) 发电机组爬坡约束

$$-r_{di} \cdot T_t \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq r_{ui} \cdot T_t \quad (23)$$

式中: r_{ui}, r_{di} 分别为发电机组 i 向上和向下的爬坡功率; T_t 为时段 t 所代表的分钟数, 本文取 $T_t = 60 \text{ min}$ 。

(4) 最小运行时间约束

$$(z_i(t-1) - z_i(t)) \sum_{j=t-MU_i}^{t-1} (-z_i(j)) \geq MU_i \quad (24)$$

式中: MU_i 为机组 i 的最小运行时间。

(5) 最小停运时间约束

$$(z_i(t) - z_i(t-1)) \sum_{j=t-MD_i}^{t-1} (1 - z_i(j)) \geq MD_i \quad (25)$$

式中: MD_i 为机组 i 的最小停运时间。

(6) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^I \min(P_{i, \max} - P_i(t), RUI_i) \geq R(t) + R_w(t) \quad (26)$$

式中: RUI_i 为机组 i 的功率上升量上限, 且 $RUI_i = r_{ui} \cdot T_t$; $R(t)$ 为 t 时段系统正常旋转备用容量; $R_w(t)$ 为 t 时段系统风电的备用容量。

(7) 需求响应用户互动满意度约束

$$\eta_{s,r} \geq \eta_{s, \min} \quad (27)$$

$$\eta_{c,r} \geq \eta_{c, \min} \quad (28)$$

式中: $\eta_{s, \min}, \eta_{c, \min}$ 分别为需求响应用户 r 的互动用电方式满意度和互动效益满意度的最小值。

(8) RTP响应量约束

$$P_{pr,r,0}(t) - P_{pr,r, \max} \leq \Delta P_{pr,r}(t) \leq P_{pr,r,0}(t) - P_{pr,r, \min} \quad (29)$$

式中: $P_{pr,r, \max}, P_{pr,r, \min}$ 分别为RTP负荷 r 的最大值和最小值。

(9) IL响应量约束

$$P_{il,r,0}(t) - P_{il,r, \max} \leq \Delta P_{il,r}(t) \leq P_{il,r,0}(t) - P_{il,r, \min} \quad (30)$$

式中: $P_{il,r, \max}, P_{il,r, \min}$ 分别为IL负荷 r 的最大值和最小值。

(10) 总响应量约束

为防止优化调度中需求响应减少用电量过多而影响用户正常用电, 规定PDR用户一天中总负荷量不变

$$\sum_{t=1}^T \Delta P_r(t) = 0 \quad (31)$$

(11) 电价约束

$$c_{r, \min} \leq c_r(t) \leq c_{r, \max} \quad (32)$$

式中: $c_{r, \max}, c_{r, \min}$ 分别为电价的最大值和最小值。

(12) 最小中断时间约束

$$\sum_{t=k}^{k+T_{il,r, \min}-1} v_{il,r}(t) \geq T_{il,r, \min} \cdot (v_{il,r}(k) - v_{il,r}(k-1)) \quad (33)$$

式中: $T_{il,r, \min}$ 为IL负荷 r 的最小中断时间, $k \in (1, 2, \dots, T - T_{il,r, \min} + 1)$ 。

(13) 最大中断时间约束

$$\sum_{t=k}^{k+T_{il,r, \max}} v_{il,r}(t) \leq T_{il,r, \max} \quad (34)$$

式中: $T_{il,r, \max}$ 为IL负荷 r 的最大中断时间, $k \in (1, 2, \dots, T - T_{il,r, \max})$ 。

(14) 中断次数约束

$$\sum_{t=1}^T [v_{il,r}(t)(1 - v_{il,r}(t-1))] \leq N_{il,r} \quad (35)$$

式中: $N_{il,r}$ 为IL负荷 r 最大中断次数。

(15) 系统调用IL负荷约束^[9]

$$U(t) = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^I P_i(t) + P_w(t) \leq KK \cdot \sum_{r=1}^{DR} P_r(t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (36)$$

式中： $U(t)$ 为 IL 负荷调用变量， $U(t)=1$ 表示调用 IL 负荷， $U(t)=0$ 表示不调用 IL 负荷； KK 为负荷中断阈值系数。

4 算例分析

本文以 IEEE39 节点系统为算例,具体参数见文献[10];以夏季典型日负荷数据作为不考虑相关性时的需求响应负荷初始值,8:00~22:00 电价为 0.5 元/kWh, 22:00~次日 8:00 电价为 0.25 元/kWh。RTP 负荷的最大值和最小值分别取其负荷原始数据的 120%和 80%,并且令负荷最大值对应电价^[8]为 0.1 元/kWh,价格弹性系数可由式(8)计算得到。IL 负荷的最大可中断容量为 IL 负荷的 20%,IL 负荷其他数据^[9]见表 2。

表 2 可中断负荷相关数据

可中断 负荷	ILB/ (元·kWh ⁻¹)	ILP/ (元·kWh ⁻¹)	Once T_{IL} /h	N_{IL} /次	$T_{IL,max}$ /h
IL1	0.25~0.50	0.50~1.00	1~2	4	5
IL2	0.40~0.75	0.50~1.00	1~3	4	8
IL3	0.50~1.00	0.75~1.50	2~4	3	9
IL4	0.50~1.00	1.00~2.00	2~5	3	10

表中 IL1~IL4 为可中断负荷编号， ILB 为电网调用 IL 负荷时的补偿金额； ILP 为用户未按规定响应电网的中断调用信号时的赔偿金额； $OnceT_{IL}$ 为 IL 负荷单次中断时间长度； N_{IL} 为 IL 负荷最大中断次数； $T_{IL,max}$ 为 IL 负荷的中断最大时间长度。

在优化调度中计及风电出力和响应量之间的相关性时,选择 $\theta=-1.5170$ 的 Frank-Copula 函数拟出具有相关性的风电出力和响应量数据,如图 2 所示,根据所得数据对负荷初值进行修正即可得到考虑相关性时负荷初值。

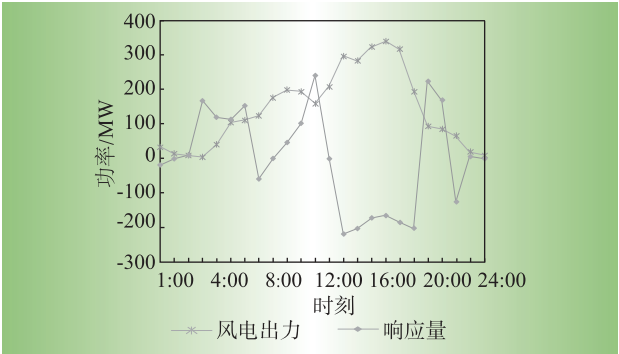


图 2 具有相关性的数据

图 3 给出方式 1 中是否考虑风电出力和响应量相关性时的负荷曲线。可以看出:①考虑相关性后负荷初值曲线的峰值明显降低,这是因为风电出力与响应

量在整体上呈现负相关性。②考虑相关性后负荷结果曲线更平滑,这是因为考虑相关性后的负荷初值改变的同时初始电价也会发生变化,此时再进行优化调度时用户更容易根据电价调节自身用电量。

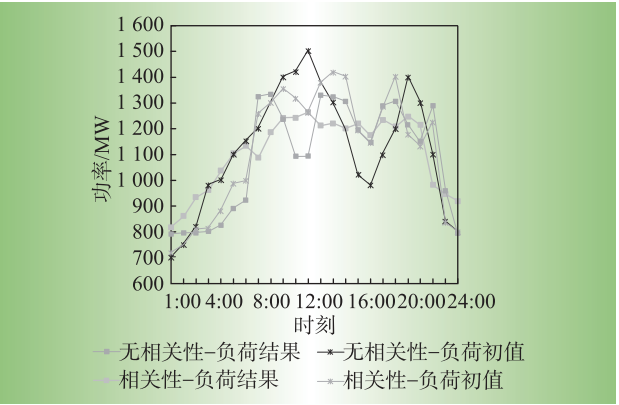


图 3 是否计及相关性的负荷曲线

图 4 给出几种不同用户互动满意度条件下的负荷曲线和电价曲线。可以看出,方式 2 中用户的参与程度最高,负荷曲线峰谷差最小,优化调度程度最好。

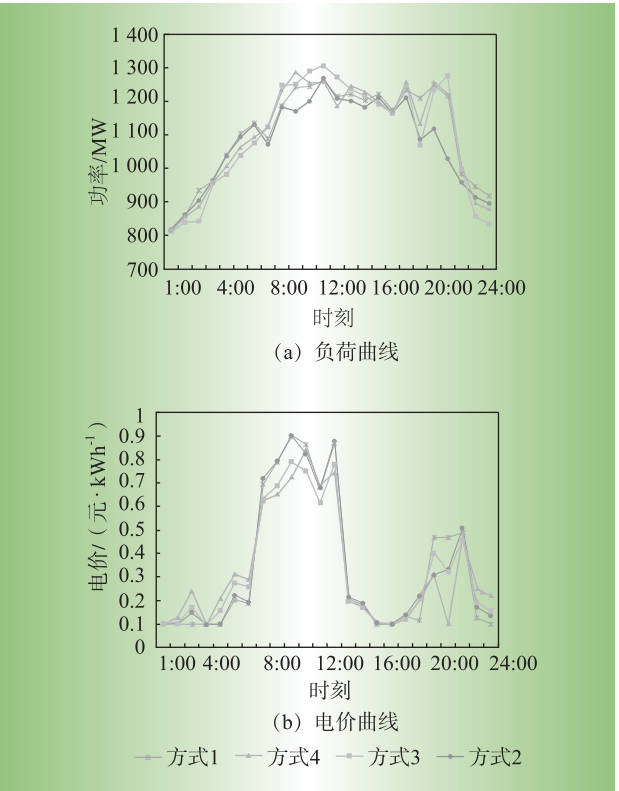


图 4 不同互动满意度的比较

表 3 给出了在不同用户互动满意度条件下,是否计及负荷响应量与风电出力相关性的优化调度结果。可以看出:①在相同用户互动满意度约束下,考虑相关性后,系统总成本、火电机组发电成本、两类需求响应调度成本均会有所减少,这是因为考虑风电出力与负荷响应量相关性时,电网可以更好地通

表3 优化调度结果

方式	用户互动 用电方式 满意度	用户互动 效益满意 度	不考虑相关性				计及相关性			
			发电成本/元	调度成本/元		总成本/元	发电成本/元	调度成本/元		总成本/元
				IL	RTP			IL	RTP	
1	0.85	1.1	410 899.49	400.92	1 792.92	413 093.33	396 629.08	356.08	1 439.17	398 424.33
2	0.85	1.2	399 005.23	367.21	2 502.17	401 874.61	391 306.75	317.85	2 058.30	393 682.90
3	0.9	1.1	412 371.98	486.25	1 446.34	414 304.57	409 434.46	435.88	1 017.15	410 887.49
4	0.9	1.2	409 213.19	451.09	2 061.73	411 726.01	406 677.90	377.00	1 712.29	408 767.18

过电价信号调节用户的用电行为,会在一定程度上鼓励用户在风电充足时增加用电量,由于风电出力本身具有反调峰特性,因此考虑相关性后可以降低负荷峰谷差值。②随着互动用电方式满意度约束值的增大,系统总成本、火电机组的发电成本增加,两类需求响应负荷的调度成本均有所减少,其中RTP的调度成本随用电方式满意度约束的变化更加明显,值越大表示用户参与调度的程度越低。③随着用户互动效益满意度约束值的增大,系统总成本、火电机组发电成本、IL的调度成本会减少,RTP的调度成本会增加,这是因为该约束条件主要反映RTP在各时段的响应程度,值越大表示响应程度越高;2种需求响应负荷对互动满意度约束的变化有差异是因为RTP的响应程度要比IL更加灵活,所以RTP的调度成本变化趋势更明显。

5 结论

本文根据某地区1年的实际风电出力和响应量数据,应用Frank-Copula函数建立了风电出力与负荷响应量的联合概率分布模型对用户需求响应负荷进行了预先处理,并引入了互动满意度约束来反映用户在电力系统优化调度中的参与程度和获利情况,通过算例分析得到以下结论:①用Frank-Copula函数建立的风电出力与响应量的联合概率分布模型可以很好地反映两者的相关性;②各类成本与用户互动满意度约束相关。D

参考文献:

- [1] Xin Fang. Coupon-based demand response considering wind power uncertainty: a strategic bidding model for load serving entities [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1 025-1 037.
- [2] GE Xiaolin, ZHONG Junling, XIA Shu. Long-term scheduling with the consideration of interruptible load [C]// 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy, 2016, 373-377.
- [3] NIU Wenjuan, LI Yang. Uncertain optimization decision of interruptible load in demand response program [C]// 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, 2014, 675-679.
- [4] 金炜. 基于需求响应技术的主动配电网优化调度[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 93-100.
- [5] 艾欣. 基于场景分析的含可中断负荷的优化调度模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 25-31.
- [6] 王敏, 茅鑫同, 王鹤梅, 等. 基于Copula理论考虑光伏出力与负荷相关性的含光伏电站发电系统可靠性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(4): 54-59, 68.
- [7] 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): 97-107.
- [8] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5 571-5 578.
- [9] 牛文娟. 计及不确定性的需求响应机理模型及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [10] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.

