

# 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行

王守相<sup>1</sup>,张善涛<sup>1</sup>,王凯<sup>1</sup>,黄碧斌<sup>2</sup>

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网能源研究院,北京 102209)

**摘要:**以配电网网损和电压偏差最小为优化目标,计及分时电价下的用户需求响应,建立了与用户互动的分布式储能多目标优化运行模型,将电价变动引起的用户需求响应与分布式储能动态结合,探究了分布式储能在优化运行方面提升配电网运行水平的作用。采用改进的遗传算法对所建立的模型进行求解,证明了计及分时电价下负荷需求响应的分布式储能多目标优化运行模型能够有效降低配电网网损,减小线路电压偏差,同时也验证了所提出的改进遗传算法具有进化速度快、求解结果优的特点。

**关键词:**分布式储能;配电网;分时电价;需求响应;遗传算法;优化

**中图分类号:**TM 731;F 407.61

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201911029

## 0 引言

在全社会都在力行节能减排,进行生态文明建设的时代背景下,可再生能源的开发利用是电力领域发展的大趋势。风电、光伏等大量分布式电源接入配电网以及用户负荷的大幅度变动,造成配电网的供需不平衡、网络损耗增加、线路电压偏差量变大、用户侧电能质量下降等问题。通过需求响应调节用户负荷特性,同时考虑分布式储能兼具负荷和电源的2种特性,利用其出力的灵活性,与用户负荷特性的调节相配合,以降低网损及减小电压偏差,保证电网的安全运行具有重要的现实意义。

在竞争性电力市场中,通常通过价格信号及其他激励机制引导用户响应,其中价格信号包括分时电价、实时电价和尖峰电价<sup>[1]</sup>。目前关于用户需求响应与分时电价之间的响应机制方面的研究较为成熟,从电力需求价格弹性矩阵、消费者心理学以及统计学原理等方面阐明了分时电价作用于用户需求响应的机理。文献[2]运用内点法和模糊半梯度隶属度函数法,建立了用户负荷与电价的互动模型。文献[3]采用模糊聚类的方法划分峰谷电价时段,对分时电价进行了建模。文献[4]依据可再生能源短期出力与负荷的供需关系,提出了一种动态分时电价机制。文献[5-6]提出衡量用户对峰谷分时电价响应的电力需求价格弹性矩阵,从经济性角度建立了峰谷分时电价数学模型。文献[7]从消费者心理学角度,在峰谷分时电价下用户响应模型基础上,依据用户需求响应更好地制定峰谷分时电价,应用最小

二乘法,提出了用户响应度曲线的参数辨识模型,处理了分段线性的响应度曲线的拐点处理问题。为更多科学研究提供基础数据支撑,准确预测用户负荷响应,是开展需求响应研究与实践的重要基础<sup>[8]</sup>,文献[9]建立电力用户在分时电价下的响应行为模型,实现了对用户响应行为规律的模拟,揭示了用户需求响应的变化与分时电价政策激励力度的规律。

虽然目前用户需求响应与分时电价之间的研究较为充分,但是将分布式储能与用户需求响应结合考虑的文献较少。目前针对储能的研究多集中于分布式电源接入电网后,利用储能的“低储高发”特性获取电费利润,以及利用储能提高分布式电源渗透率降低弃风、弃光率,提高能源利用率削峰填谷,提高供电的可靠性和稳定性。文献[10]从获利角度提出了一种储能系统的充放电方法,以解决分布式电源和负荷波动引起的配电网供需平衡问题。考虑到分布式电源和不同负荷的时序特性,文献[11]以配电网的投资、运行等多项成本为目标,建立了一种分布式电源与储能装置的协同规划模型。文献[12]以储能系统投资成本和风电场运行成本最小化为目标,建立了考虑风电场弃风能量和储能系统损失能量的风电场储能容量优化计算模型。配电网的优化运行一直是研究者们关注的焦点,文献[13]提出一种利用锥优化方法,实现储能系统参与配电网运行调节的快速计算。文献[14]为解决农用电网低电压和网损严重的问题,利用分布式储能改善电压质量,对分布式储能系统的选址定容进行规划。然而目前在分布式储能系统的规划和运行研究中,结合用户需求响应,考虑用户负荷特性的调节以配合配电网优化运行的工作尚不充足。

目前有关分布式储能的研究大多为如何利用分布式储能提升配电网中分布式电源的渗透率,关注

收稿日期:2019-04-22;修回日期:2019-09-28

基金项目:国家电网公司科技项目(SGERIXnyKJ[2017]95)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(SGERIXnyKJ[2017]95)

分布式储能在配电网中的优化配置。而结合用户需求响应,研究分布式储能配合用户需求响应,进而提升电网的优化运行水平这方面的研究很少涉及。本文从该角度出发探究了分布式储能在优化运行方面提升配电网运行水平的作用。首先基于消费者心理学原理,建立了反映分时电价与用户需求响应之间关系的模型。然后结合分布式储能接入电网的相关约束条件,利用分时电价对用户响应的影响,调控分布式储能的出力,以线路运行网损及电压偏差最小为目标,建立了计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行模型,采用改进的遗传算法对其进行了求解。最后利用IEEE 33节点标准算例对所提算法进行测试,验证了所提模型和方法的有效性。

## 1 峰谷分时电价对用户响应的影响建模-负荷转移率模型

负荷转移率是用来衡量各时段之间负荷转移程度的物理量,定义其为实行分时电价后,用户负荷从电价高的时段向电价低的时段转移的用电量与电价高的时段所对应负荷的比值<sup>[7]</sup>。基于负荷转移率的用户响应模型可以近似拟合成分段线性函数,峰谷、峰平、平谷时段的负荷转移率分别如式(1)~(3)所示<sup>[8,16]</sup>。

$$\lambda_{fg} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \Delta p_{fg} \leq a_{fg} \\ K_{fg}(\Delta p_{fg} - a_{fg}) & a_{fg} \leq \Delta p_{fg} \leq b_{fg} \\ \lambda_{fg}^{\max} & \Delta p_{fg} \geq b_{fg} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\Delta p_{fg} = p_f - p_g$ ,  $p_f$ 、 $p_g$  分别为峰时段、谷时段的电价;  $a_{fg}$ 、 $b_{fg}$  分别为用户对于峰谷时段电价差在死区与线性区的上限值,  $b_{fg} = \lambda_{fg}^{\max} / K_{fg} + a_{fg}$ ,  $K_{fg}$  为线性区的斜率;  $\lambda_{fg}^{\max}$  为峰谷时段的负荷转移率最大值。

$$\lambda_{fp} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \Delta p_{fp} \leq a_{fp} \\ K_{fp}(\Delta p_{fp} - a_{fp}) & a_{fp} \leq \Delta p_{fp} \leq b_{fp} \\ \lambda_{fp}^{\max} & \Delta p_{fp} \geq b_{fp} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\Delta p_{fp} = p_f - p_p$ ,  $p_p$  为平时段的电价;  $a_{fp}$ 、 $b_{fp}$  分别为用户对于峰平时段电价差在死区与线性区的上限值,  $b_{fp} = \lambda_{fp}^{\max} / K_{fp} + a_{fp}$ ,  $K_{fp}$  为线性区的斜率;  $\lambda_{fp}^{\max}$  为峰平时段的负荷转移率最大值。

$$\lambda_{pg} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \Delta p_{pg} \leq a_{pg} \\ K_{pg}(\Delta p_{pg} - a_{pg}) & a_{pg} \leq \Delta p_{pg} \leq b_{pg} \\ \lambda_{pg}^{\max} & \Delta p_{pg} \geq b_{pg} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\Delta p_{pg} = p_p - p_g$ ;  $a_{pg}$ 、 $b_{pg}$  分别为用户对于平谷时段电价差在死区与线性区的上限值,  $b_{pg} = \lambda_{pg}^{\max} / K_{pg} + a_{pg}$ ,  $K_{pg}$  为线性区的斜率;  $\lambda_{pg}^{\max}$  为平谷时段的负荷转移率最大值。

由上述3类响应度曲线,各时段的拟合负荷为:

$$L_k = \begin{cases} L_{k0} + \lambda_{fg} \bar{L}_f + \lambda_{pg} \bar{L}_p & k \in T_g \\ L_{k0} + \lambda_{fp} \bar{L}_f - \lambda_{pg} \bar{L}_p & k \in T_p \\ L_{k0} - \lambda_{fp} \bar{L}_f - \lambda_{fg} \bar{L}_f & k \in T_f \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $T_f$ 、 $T_p$ 、 $T_g$  分别为峰时段、平时段、谷时段;  $k$  为其中的任一时段;  $L_{k0}$ 、 $L_k$  分别为分时电价实施前、后  $k$  时段的负荷;  $\bar{L}_f$ 、 $\bar{L}_p$  分别为峰、平时段总负荷在相应时段内的平均值。

## 2 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能优化运行建模

由峰谷电价对用户响应的影响可知,只要改变分时电价,用户需求响应就会发生变化,从而造成配电网的负荷波动,峰谷、峰平、平谷之间的负荷转移率均会相应地发生变化。因此,由用户需求响应模型拟合得到的用户负荷随之变动,用户一天中峰时段对应的最大负荷和最大峰谷差随之变化,可以通过不断地调整分时电价,激励用户主动调整用电方式,优化峰时段对应的最大负荷和最大峰谷差,使二者在一定条件下同时达到最佳,从而实现削峰填谷,实现峰时段负荷的有效转移<sup>[16]</sup>。显然,由于用户用电行为的随机性以及政策实行的滞后性,这种调节手段过于粗糙,仅仅依靠分时电价引导用户主动调整用电方式,对配电网进行运行优化实现削峰填谷从而改善电能质量,无法满足目前社会生产对高质量电能的需求。

在配电网系统中加入分布式储能环节,在提高系统运行可靠性及供电质量的同时,促进可再生能源的应用。另外还可以通过平滑负荷实现电力设备更加有效的利用,降低网损,减小电压偏差,提高电网运行的经济性<sup>[17]</sup>。

将分时电价下的需求响应和分布式储能结合考虑,研究其对配电网运行的影响,通过优化在分时电价情形下当用户负荷发生变动时,合理地安排分布式储能出力值,从而更好地实现削峰填谷,降低线路损耗,减小线路电压偏差,比传统的单一考虑分时电价调整用户需求响应优化电网运行,以及在不考虑负荷变动情况下利用储能优化电网运行更加切合实际,有更多的优越之处,更加有效地实现电网的安全、经济、高效运行。利用分时电价调控用户负荷响应,在满足用户需求响应的基础上,对预先配置好的储能出力进行调控,实现对配电网的优化运行是本文的整体构思。

### 2.1 目标函数

以配电网的线路网损和线路电压偏差最小为优化目标的多目标函数,对于多目标函数的建立采用理想点法。对各个目标函数求出最优点  $X_i^*$  和相应的最优值  $f_i(X_i^*)$ ,对于综合目标而言,其理想的最优点一般无法得到,但若能使各个目标尽可能接近各

自的理想值,就可以求出较优解<sup>[18]</sup>。理想点的评价函数为:

$$U(X) = \left( \frac{f_r(X) - f_r(X_r^*)}{f_r(X_r^*)} \right)^2 \quad (5)$$

其中,  $l$  为单目标函数的个数;  $f_r(X)$ 、 $f_r(X_r^*)$  分别为第  $r$  个单目标和该单目标的最优值;  $U(X)$  为  $l$  个单目标无量纲化后组成的多目标评价函数。

因此,以配电网的线路网损和线路电压偏差最小为优化目标的多目标函数为:

$$\min f(x) = \sqrt{\left( \frac{\sum_{b=0}^M P_{b, \text{loss}} - P_{\text{loss}}^*}{P_{\text{loss}}^*} \right)^2} + \sqrt{\sum_{k=0}^D \left( \frac{U_k - U_N}{U_N} \right)^2} \quad (6)$$

其中,  $M$  为配电网的支路个数;  $D$  为配电网的节点个数;  $p_{b, \text{loss}}$  为支路  $b$  的线路网损;  $p_{\text{loss}}^*$  为网损单目标下求得的最佳理想网损;  $U_k$  为节点  $k$  处的节点电压;  $U_N$  为线路额定电压。等式右侧第一项为最小线路网损的无量纲化目标函数,等式右侧第二项为最小电压偏差的无量纲化目标函数。

当电网运行时,功率由配电网线路的起始端流向末端。将分布式储能接入用户侧后,整个配电网的潮流分布将发生变化,配电网的线路网损也将随之波动。

未接入分布式储能时的线路损耗为:

$$\Delta s = \frac{(P_j - P_{j\text{DG}})^2 + (Q_j - Q_{j\text{DG}})^2}{U_j^2} (R_{ij} + jX_{ij}) \quad (7)$$

其中,节点  $i$ 、 $j$  为相邻的 2 个线路节点,节点  $i$  为线路的首端,节点  $j$  为线路的末端,以节点  $j$  处相电压为参考相量;  $R_{ij} + jX_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间的线路阻抗;  $P_j$ 、 $Q_j$  分别为节点  $j$  处的有功和无功负荷;  $P_{j\text{DG}}$ 、 $Q_{j\text{DG}}$  分别为节点  $j$  处分布式电源发出的有功和无功功率;  $U_j$  为线路的末端线电压;  $\Delta s$  为未接入分布式储能时,对应的相邻节点  $i$ 、 $j$  之间的线路网损。

在节点  $j$  处接入分布式储能后,对应的线损为:

$$\Delta s' = \frac{(P_j - P_{j\text{DG}} + mP_{j\text{Bess}})^2 + (Q_j - Q_{j\text{DG}} + nQ_{j\text{Bess}})^2}{U_j^2} (R_{ij} + jX_{ij}) \quad (8)$$

其中,  $m$ 、 $n$  分别为储能吸收或发出有功功率和无功功率的标志;  $P_{j\text{Bess}}$ 、 $Q_{j\text{Bess}}$  分别为节点  $j$  接入的分布式储能的有功功率和无功功率出力;  $\Delta s'$  为接入分布式储能后相邻节点  $i$ 、 $j$  之间的线路网损,  $\Delta s'$  取实部即为有功网络损耗  $p_{\text{loss}}$ 。

节点  $i$  对应的电压偏差为:

$$U_{\text{dev}} = U_i - U_N \quad (9)$$

其中,  $U_{\text{dev}}$  为节点  $i$  处的电压与额定电压的差值;  $U_i$  为相邻两节点间线路的首端线电压。

$$U_i = \sqrt{(U_j + \Delta U)^2 + \sigma U^2} \quad (10)$$

$$\Delta U = \frac{(P_j - P_{j\text{DG}} + mP_{j\text{Bess}})R_{ij} + (Q_j - Q_{j\text{DG}} + nQ_{j\text{Bess}})X_{ij}}{U_j} \quad (11)$$

$$\sigma U = \frac{(P_j - P_{j\text{DG}} + mP_{j\text{Bess}})X_{ij} - (Q_j - Q_{j\text{DG}} + nQ_{j\text{Bess}})R_{ij}}{U_j} \quad (12)$$

其中,  $\Delta U$ 、 $\sigma U$  分别为线路电压降落纵分量与横分量。

由式(8)~(12)可知,分布式储能接入配电网后,根据分布式储能的不同出力情况,配电网的网络损耗及电压偏差将发生不同程度的变化<sup>[19]</sup>。分布式储能在不同运行方式下对电网影响如表 1 所示。

表 1 分布式储能在不同运行方式下对配电网的影响

Table 1 Influence of distributed energy storage on distribution network under different operation modes

$m$	$n$	储能出力状态	对配电网的影响
1	1	吸收有功, 吸收无功	网络损耗和电压偏差都会增大, 且二者与储能的出力程度成正相关
1	-1	吸收有功, 发出无功	网络损耗和电压偏差变化情况要根据储能具体的出力程度决定
-1	1	发出有功, 吸收无功	
-1	-1	发出有功, 发出无功	若线路负载较重, 网络损耗和电压偏差会随着储能出力程度的增大而变小, 达到一定程度时, 逆向潮流使得网络损耗和电压偏差增大

实行分时电价政策,使用户根据自身用电情况主动调整用电结构,负荷响应产生很大变动,导致配电网中用电负荷产生较大波动。同时,光伏、风电等大量分布式电源的接入,以及配电网运行和负荷供需平衡的限制,导致弃风、弃光率严重,造成资源浪费,投资、运行成本的回收周期变长。另外由于受季节、天气等条件的影响,分布式电源出力波动大,具有随机性和间歇性以及出力不可控的特点,对电网的安全、稳定产生消极影响。以上情形会出现配电网负荷供需不平衡、节点电压过高或过低的现象,使网络损耗变大、电压偏差增大、用户侧电能质量下降。针对这一现状,本文基于分时电价下用户侧的负荷响应,从分布式储能的 4 种出力方式出发,利用分布式储能灵活的充放电特性,结合分时电价下的负荷响应,配合电网安全、高效运行,以网损和电压偏差最小为优化目标,运用改进的遗传算法优化分布式储能出力,达到分时电价下分布式储能系统的优化运行。

## 2.2 约束条件

约束条件共有 2 种,分为等式约束和不等式约束。等式约束包括潮流平衡、网络的功率平衡和分布式储能系统能量平衡约束;不等式约束包括电压约束等<sup>[14]</sup>。

(1)潮流平衡约束。

$$\begin{aligned} \Delta P_j &= P_{j,h}^{\text{ESS}} - P_j + P_j^{\text{cal}} = 0 \\ \Delta Q_j &= Q_{j,h}^{\text{ESS}} - Q_j + Q_j^{\text{cal}} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $P_{j,h}^{\text{ESS}}$ 、 $Q_{j,h}^{\text{ESS}}$  分别为接入系统的第  $h$  个分布式储能装置有功与无功容量;  $P_j^{\text{cal}}$ 、 $Q_j^{\text{cal}}$  分别为主网和分布式电源在节点  $j$  处注入的有功与无功功率;  $\Delta P_j$ 、 $\Delta Q_j$  分别为节点  $j$  的有功与无功不平衡量。

(2) 网络功率平衡约束。

$$\sum P_{\text{all}} = \sum P_{\text{load}} + \sum P_{\text{loss}} + \sum P_{\text{DG}} + \sum mP_{\text{ess}} \quad (14)$$

其中, 等式左边表示上级电网注入的总有功功率, 等式右边四项分别表示有功负荷总值、系统损耗值、分布式电源总有功功率和分布式储能总有功功率。

(3) 节点电压约束。

$$\begin{aligned} U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ \delta_{\min} \leq \delta_i \leq \delta_{\max} \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$  分别为节点电压幅值  $U_i$  的下限、上限值;  $\delta_{\min}$ 、 $\delta_{\max}$  分别为节点电压相角  $\delta_i$  的下限、上限值。

(4) 分布式储能系统能量平衡约束。

分布式储能系统的荷电状态 SOC (State Of Charge) 在时序上具有绝对的连续性, 按照时间顺序根据充放电功率的大小进行累积计算, 且每个时间点要满足 SOC 的上下限要求, 在一个运行周期内, 分布式储能系统的初始 SOC 和最后的 SOC 应保持一致, 见式(16)~(18)。

$$S_{\text{SOCh}}^{\text{ESS}}(t) - S_{\text{SOCh}}^{\text{ESS}}(t + \Delta t) = \frac{P_h^{\text{ESS}}(t)\Delta t}{E_{h,\text{rate}}^{\text{ESS}}} \quad (16)$$

$$S_{\text{SOCh},\min}^{\text{ESS}} \leq S_{\text{SOCh}}^{\text{ESS}}(t) \leq S_{\text{SOCh},\max}^{\text{ESS}} \quad (17)$$

$$S_{\text{SOCh}}^{\text{ESS}}(0) = S_{\text{SOCh}}^{\text{ESS}}(T) \quad (18)$$

其中,  $h$  为分布式储能装置编号,  $h = 1, 2, \dots, N_{\text{ESS}}$ ,  $N_{\text{ESS}}$  为装置总数;  $T$  为仿真周期;  $\Delta t$  为仿真步长;  $S_{\text{SOCh}}^{\text{ESS}}(t)$  为  $t$  时刻第  $h$  个装置的 SOC 值;  $E_{h,\text{rate}}^{\text{ESS}}$ 、 $S_{\text{SOCh},\max}^{\text{ESS}}$ 、 $S_{\text{SOCh},\min}^{\text{ESS}}$  分别为第  $h$  个装置的储能容量和 SOC 的上、下限值<sup>[12-13]</sup>;  $P_h^{\text{ESS}}(t)$  为  $t$  时刻第  $h$  个装置的有功功率。

### 3 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能优化运行模型求解方法

根据式(5)~(18)所建立的考虑分时电价政策下用户负荷变动, 以最小线路网损和电压偏差为目标的配电网中分布式储能多目标优化运行模型, 利用改进的遗传算法进行求解。针对传统遗传算法收敛速度慢、运行时间长的问题进行改进, 使收敛速度大幅提高, 保证运行的稳定性。

#### 3.1 算法流程

改进的遗传算法流程如下。

(1) 初始种群选取方法的改进。初始种群的选取方法一般为随机选择生成, 寻优结果较慢、寻优过程波动较大。本文采用均匀随机的方法生成初始种群, 使优良个体提前出现, 加速进化过程, 寻优迅速, 整个寻优过程平滑收敛。

(2) 交叉变异点的改进。交叉、变异点的选取通

常为单交叉单变异, 种群进化过程较慢。本文采用多交叉多变异, 使进化加速, 提升了寻优速度。

(3) 添加疫苗库的改进。目前免疫遗传算法已被大量运用, 使得进化加速, 效果较好。本文在种群进化的同时, 对疫苗库的个体进行交叉变异, 并且为多交叉多变异, 使进化速度进一步加快, 寻优效果更佳。

#### 3.2 算法步骤

改进的遗传算法步骤如下。

(1) 输入参数。考虑分时电价对用户响应的影响, 负荷发生变化, 在改进的算法中输入分时电价影响下各节点对应的负荷, 设置种群个数、进化代数、疫苗库个体数量以及计算精度。

(2) 生成初始种群。按步骤(1)中设置的种群参数, 采取均匀随机的方法生成相应数目的初始种群。

(3) 计算适应度。按式(6)计算系统网络的无量纲线损及电压偏差, 算出多目标函数的适应度值。

(4) 生成疫苗库。根据每个个体的适应度值在初代个体中选择靠前的优质个体作为疫苗库。

(5) 复制交叉变异。利用概率统计方法选择进行交叉的个体, 对交叉后产生的个体进行变异。若生成的新个体优于原始个体, 则替换; 反之, 复制保留生成新种群。传统遗传算法通常是单交叉单变异, 而改进算法在交叉变异时, 采取多交叉多变异方法, 加速进化寻优进程, 应用在实际的运行优化中意义重大。

(6) 疫苗库的进化。目前的免疫遗传算法中疫苗库的个体是复制上代种群中的优秀个体, 随种群进化过程中采取的是单交叉单变异的方法。而本文对疫苗库进行多交叉多变异, 结合新生成的种群中靠前的优质个体, 共同选择优秀个体作为新的疫苗库, 比一般的免疫遗传算法进化效果更好, 进化速度更快。

(7) 记录最优值。记录每代种群和相应疫苗库的最优适应度值及其对应个体。

(8) 重复步骤(5)~(7), 直到最大进化代数, 最后一代对应的最优适应度值及其对应个体即为本文所求多目标最优值及最优储能出力。

#### 4 算例分析

采用 IEEE 33 节点算例对本文所提模型和算法进行仿真验证。图 1 为 IEEE 33 节点配电系统结构图, 系统基准电压为 12.66 kV。图中, 实线表示正常运行线路; 虚线表示联络线, 正常情况下处于断开备用状态。

假定夏季某用户典型日负荷曲线<sup>[20]</sup>如图 2 所示。由于负荷类型不同, 当实行分时电价时, 有些类

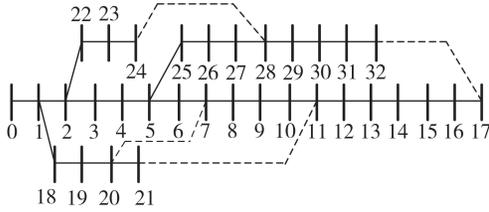


图1 IEEE 33 节点配电系统结构图  
Fig.1 Structure diagram of IEEE 33-bus distribution system

型的负荷基本不参与或者参与度低,如照明类负荷等,而有些类型的负荷需求响应潜力大、削峰能力强,如工业类负荷等。参考文献[21], $\lambda_{fg}=0.04$ , $\lambda_{fp}=0.02$ , $\lambda_{fv}=0.01$ ,具体的峰、平、谷时段划分及电价信息见表2。

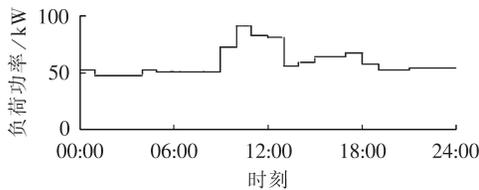


图2 某用户典型日负荷曲线  
Fig.2 Typical daily load curve of a user

表2 峰谷分时电价

Table 2 Peak and valley time-of-use price

电价类别	时段	分时电价 / [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
峰时电价	(08:00, 11:00]U(18:00, 23:00]	0.68
平时电价	(07:00, 08:00]U(11:00, 18:00]	0.40
谷时电价	(23:00, 24:00]U(00:00, 07:00]	0.23

在本文33节点配电系统中,假定节点2、3、10—12、14、16、23、24、28、30处接入的负荷需求响应潜力大,参与分时电价,其余不参与。图3为某节点实行用户分时电价前的负荷与实行分时电价后的优化负荷对比曲线。

以09:00—11:00的峰时段为例进行分析,假设系统接入的分布式电源为光伏,光伏接入点的位置

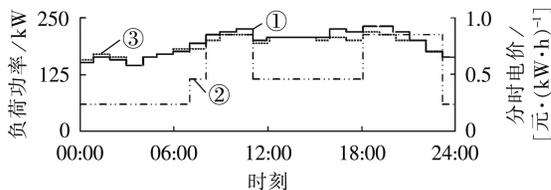


图3 某节点实行分时电价前后的负荷变化曲线  
Fig.3 Comparison of load curves between original price and time-of-use price

为节点9、18、21、23,此时段光照充足,光伏功率输出稳定,装机容量为600 kW。

根据国家标准 GB/T 12325—2008《电能质量供电电压偏差》规定,20 kV 及以下电压等级的供电电压允许偏差为 $\pm 7\%$ <sup>[22]</sup>,本算例中的基准电压为12.66 kV,对33个节点的电压偏差取绝对值求和,总偏差应在2.31 p.u.以内。当系统未接入分布式储能且未实行分时电价时,网损为128.74 kW,总电压偏差为1.24 p.u.,满足电压偏差标准;当系统未接入分布式储能但实行分时电价时,网损为124.75 kW,总电压偏差为1.21 p.u.,满足电压偏差标准。在未接入分布式储能的配电网中,与不采取分时电价政策相比,实行分时电价,在该峰时段,通过电价机制激励用户主动调节用电方式,网损减少了3.99 kW,总电压偏差下降了0.03 p.u.,下降比例为2.42%,提升了线路运行状况,达到削峰填谷、改善线路电压质量的目的,但效果一般。

利用分布式储能随充随放的灵活性,配合分时电价政策的实施,参与配电网的优化运行。依据33节点配电系统中参与分时电价的节点处负荷响应情况和分布式电源接入情况,对分布式储能位置进行较为合理的选取,假定在节点21、10、13、17、29、32处配置分布式储能,分别记为 $x_1$ — $x_6$ 。再根据分布式储能所在位置附近支路的负荷大小和接入配电网中的分布式电源出力大小,假定配置的分布式储能充电功率的上限值和放电功率的下限值均为200 kW,容量均为600 kW·h。对分布式储能的位置和容量进行了初步的合理设定后,本文重点计及分时电价下的用户需求响应,研究运行时段内分布式储能的出力优化。

实行分时电价后,当分布式储能未参与配电网运行调节时,峰时段分时电价下对应负荷需求响应所产生的网损为124.75 kW,总电压偏差为1.21 p.u.。将该情形作为对比,实行分时电价后,接入分布式储能参与调节配电网运行,采用传统遗传算法对上述6个节点处接入分布式储能进行运行优化,如图4和表3所示(表中电压偏差为标么值,后同)。

由图4和表3的优化结果可知,采用传统遗传算法对本文所建立的分时电价下与用户互动的分布式储能多目标优化运行模型进行求解,优化后网损为81.87 kW,总电压偏差为0.83 p.u.,远小于标准规定

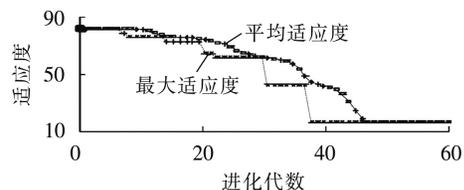


图4 分时电价下峰时段传统遗传算法的迭代结果  
Fig.4 Iterative results of peak period under time-of-use price with traditional genetic algorithm

表3 分时电价下峰时段传统遗传算法优化结果  
Table 3 Optimization results of peak period under time-of-use price with traditional genetic algorithm

参数	数值	参数	数值
$x_1$ 出力/kW	188.28	种群大小	50
$x_2$ 出力/kW	62.89	收敛代数	47
$x_3$ 出力/kW	-193.75	最小适应度值	16.51
$x_4$ 出力/kW	-149.22	最小电压偏差	0.83
$x_5$ 出力/kW	-200	最小网损/kW	81.87
$x_6$ 出力/kW	-200		

的总电压偏差最大值 2.31 p.u., 进一步提升了供电质量。相较于分布式储能不参与调节配电网线路运行时, 此峰时段分时电价下对应的负荷响应所产生的网损为 124.75 kW, 总电压偏差为 1.21 p.u., 分别降低了 42.88 kW、0.38 p.u., 总电压偏差下降比例达 31.4%, 充分说明本文建立的分时电价下与用户互动的分布式储能多目标优化运行模型能有效降低配电网网损, 减小线路电压偏差, 使得算例系统运行状况得到很大改善。但传统遗传算法进化过程缓慢, 存在较多波动和短暂停滞现象, 进化到第 47 代才开始收敛, 收敛速度较慢。

采用改进遗传算法, 对建立的分时电价下与用户互动的分布式储能优化运行模型进行求解, 求解结果如图 5 和表 4 所示。

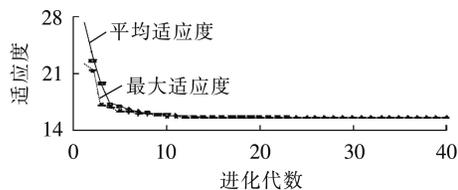


图5 分时电价下峰时段改进遗传算法的迭代结果  
Fig.5 Iterative results of peak period under time-of-use price with improved genetic algorithm

表4 分时电价下峰时段改进遗传算法优化结果  
Table 4 Optimization results of peak period under time-of-use price with improved genetic algorithm

参数	数值	参数	数值
$x_1$ 出力/kW	199.79	种群大小	50
$x_2$ 出力/kW	43.50	收敛代数	15
$x_3$ 出力/kW	-127.13	最小适应度值	15.53
$x_4$ 出力/kW	-197.88	最小电压偏差	0.83
$x_5$ 出力/kW	-199.65	最小网损/kW	81.86
$x_6$ 出力/kW	-199.99		

相比传统遗传算法, 本文采用改进遗传算法对所建分时电价下与用户互动的分布式储能优化运行模型进行求解, 优化后网损为 81.86 kW, 总电压偏差为 0.83 p.u., 比该时段分时电价下分布式储能不参与配电网运行调节时的网损降低 42.89 kW, 总电压偏差降低 0.38 p.u.。与采用传统遗传算法相比, 采用改进遗传算法得到的网损最优值以及最小电压偏

差两者基本一致, 但其进化速度约是传统遗传算法的 3 倍, 利用改进遗传算法进化到第 15 代时就开始收敛, 进化过程平缓, 进化速度快, 而传统遗传算法则进化到第 47 代才开始收敛, 这是由于本文所提的改进遗传算法采用的是均匀随机产生初始种群的方法, 在初代时便能得到靠近最优值的优良个体, 同时引入疫苗库, 采用多交叉多变异的方法, 使得进化速度快, 进化结果优。

从传统遗传算法和改进遗传算法的优化结果来看, 储能  $x_1, x_2$  处于充电状态, 而  $x_3-x_6$  处于放电状态。这是因为  $x_1$  所在位置为线路 18-21, 由于该分支线路上有分布式电源, 09:00—11:00 时段光伏出力足,  $x_1$  配合分布式电源, 吸收多余电量, 降低该分支的线路电压偏差; 储能  $x_2-x_4$  所在位置为主干线路 0-1-2-...-17, 同这条线路上的分布式电源一起协调优化出力, 改善该分支线路上的电压偏差和网损; 储能  $x_5, x_6$  以满功率放电, 这是因为所接入的分支线路处 28-29-...-32 的负荷较大, 为典型的自给自足型。

本文重点针对 09:00—11:00 峰时段的用户需求响应, 计算了实行分时电价前后的配电网网损和电压偏差, 分别利用传统遗传算法和改进遗传算法, 优化出了在实行分时电价后分布式储能配合用户需求响应提升配电网运行水平时产生的配电网网损、电压偏差及对应的分布式储能出力情况, 并对结果进行了对比分析。同理, 在平时电价与谷时电价时段, 基于文中建立的分时电价下与用户互动的分布式储能多目标优化运行模型, 利用分布式储能配合用户需求响应对配电网进行优化运行, 也可得到对应的配电网网损、电压偏差和相应的分布式储能出力情况, 由于篇幅限制, 不再详细展开。

## 5 结论

本文针对大量分布式电源接入配电网的背景下, 实行分时电价政策, 使得用户负荷响应变动, 造成配电网负荷供需不平衡、网络损耗增大、电压偏差变大、用户侧电能质量下降的问题, 将电价变动引起的负荷需求响应与分布式储能动态结合, 建立了分时电价下与用户互动的分布式储能多目标优化运行模型, 并根据实行分时电价政策的某地夏季一天的负荷数据, 采用改进遗传算法, 对建立的计及分时电价下负荷需求响应的分布式储能多目标优化运行模型进行了求解, 验证了改进遗传算法对所建模型求解的快速性和有效性, 表明了改进遗传算法较传统遗传算法, 在进化速度上具有绝对优势, 两者的优化结果均表明, 分时电价下负荷需求响应与分布式储能动态结合共同优化配电网运行, 比实行分时电价时分布式储能不参与配电网优化的网损、电压偏

差降低很多,提升了电网的能源利用率,改善了电能质量,最终证明了分时电价下,配合用户的负荷响应,分布式储能优化运行在降低网损、减小电压偏差、提高电能质量方面的有效性。

### 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):97-107.  
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):97-107.
- [ 2 ] 潘敬东,谢开,华科. 计及用户响应的实时电价模型及其内点法实现[J]. 电力系统自动化,2005,29(23):8-14.  
PAN Jingdong,XIE Kai,HUA Ke. Supplier customer interaction modeling in an integrated optimal spot pricing framework by nonlinear interior point methods[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(23):8-14.
- [ 3 ] 赵洪山,赵航宇,侯杰群,等. 需求响应对配电网供电可靠性影响分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):8-14.  
ZHAO Hongshan,ZHAO Hangyu,HOU Jiequn,et al. Effect of demand response on supply reliability of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):8-14.
- [ 4 ] 张有兵,任帅杰,杨晓东,等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):55-62.  
ZHANG Youbing,REN Shuaijie,YANG Xiaodong,et al. Optimal configuration considering price-based demand response for stand-alone microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):55-62.
- [ 5 ] 唐捷,任震,胡秀珍. 一种可操作的需求侧管理峰谷分时电价定价方法[J]. 电网技术,2005,29(22):71-75.  
TANG Jie,REN Zhen,HU Xiuzhen. An operable peak-valley time-of-use tariff setting method for demand side management [J]. Power System Technology,2005,29(22):71-75.
- [ 6 ] 李春燕,许中,马智远. 计及用户需求响应的分时电价优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(3):11-16.  
LI Chunyan,XU Zhong,MA Zhiyuan. Optimal time-of-use electricity price model considering customer demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2015,27(3):11-16.
- [ 7 ] 阮文骏,王蓓蓓,李扬,等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J]. 电网技术,2012,36(7):86-93.  
RUAN Wenjun,WANG Beibei,LI Yang,et al. Customer response behavior in time-of-use price[J]. Power System Technology,2012,36(7):86-93.
- [ 8 ] 赵鸿图,朱治中,于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]. 电网技术,2010,34(5):146-153.  
ZHAO Hongtu,ZHU Zhizhong,YU Erkeng. Study on demand response markets and programs in electricity markets[J]. Power System Technology,2010,34(5):146-153.
- [ 9 ] 刘继东,韩学山,韩伟吉,等. 分时电价下用户响应行为的模型与算法[J]. 电网技术,2013,37(10):2973-2978.  
LIU Jidong,HAN Xueshan,HAN Weiji,et al. Model and algorithm of customers' responsive behavior under time-of-use price[J]. Power System Technology,2013,37(10):2973-2978.
- [ 10 ] 李秀磊,耿光飞,季玉琦,等. 含分布式电源的配电网中电池储能系统运行策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):59-65.  
LI Xiulei,GENG Guangfei,JI Yuqi,et al. Operation strategy of battery energy storage system in distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):59-65.
- [ 11 ] 苏海锋,胡梦锦,梁志瑞. 基于时序特性含储能装置的分布式电源规划[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):56-63.  
SU Haifeng,HU Mengjin,LIANG Zhirui. Distributed generation & energy storage planning based on timing characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):56-63.
- [ 12 ] 冯江霞,梁军,张峰,等. 考虑调度计划和运行经济性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):90-95.  
FENG Jiangxia,LIANG Jun,ZHANG Feng,et al. An optimization calculation method of wind farm energy storage capacity [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):90-95.
- [ 13 ] 赵金利,于莹莹,李鹏,等. 基于锥优化的储能系统参与配电网运行调节快速计算方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(2):30-35.  
ZHAO Jinli,YU Yingying,LI Peng,et al. A fast calculation method of energy storage system for distribution network regulation based on conic programming [J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(2):30-35.
- [ 14 ] 王钤,刘丽娜,徐备,等. 改善农网低电压与网损的分布式储能系统规划方案研究[J]. 东北电力大学学报,2017,37(5):19-24.  
WANG Qian,LIU Lina,XU Bei,et al. Planning of distributed energy storage system for improving low voltage and network loss in rural network [J]. Journal of Northeast Electric Power University,2017,37(5):19-24.
- [ 15 ] 罗运虎,邢丽冬,王勤,等. 峰谷分时电价用户响应模型参数的最小二乘估计[J]. 华东电力,2009,37(1):67-69.  
LUO Yunhu,XING Lidong,WANG Qin,et al. Least-squares estimation of parameters of customer response models for peak and valley time-of-use electricity price [J]. East China Electric Power,2009,37(1):67-69.
- [ 16 ] 林清明. 智能电网分时电价的定价与优化[D]. 上海:上海交通大学,2015.  
LIN Qingming. TOU pricing and optimization of smart grid [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2015.
- [ 17 ] 姚遥,刘东,廖怀庆,等. 含储能电池的配电网降损分析[J]. 华东电力,2010,38(5):677-680.  
YAO Yao,LIU Dong,LIAO Huaiqing,et al. Analysis on loss reduction of distribution network with energy storage battery [J]. East China Electric Power,2010,38(5):677-680.
- [ 18 ] 杨挺. 优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2014:148.
- [ 19 ] 杜鹏,彭咏龙,黄江浩,等. 含用户侧分布式储能的配电网降损分析[J]. 电力科学与工程,2018,34(8):30-35.  
DU Peng,PENG Yonglong,HUANG Jianghao,et al. Analysis of distribution network loss reduction with distributed energy storage on the user side [J]. Electric Power Science and Engineering,2018,34(8):30-35.
- [ 20 ] 任炳刚,张振高,王学军,等. 基于用电采集数据的需求响应削峰潜力评估方法[J]. 电力建设,2016,37(11):64-70.  
REN Bingli,ZHANG Zhengao,WANG Xuejun,et al. Assessment method of demand response peak shaving potential based on metered load data [J]. Electric Power Construction,2016,37(11):64-70.
- [ 21 ] 杨卫红,赖清平,兰宇,等. 基于调节潜力指标的用户用电行为聚类分析算法研究[J]. 电力建设,2018,39(6):96-104.  
YANG Weihong,LAI Qingping,LAN Yu,et al. Research on clustering analysis algorithm based on adjustable potential index for user power consumption behavior [J]. Electric Power Construction,2018,39(6):96-104.
- [ 22 ] 林海雪. 电能质量国家标准系列讲座第 1 讲 供电电压偏差标

准[J]. 建筑电气, 2011(4):3-9.

LIN Haixue. Lectures on national standard of power quality lecture one standard of supply voltage deviation[J]. Building Electricity, 2011(4):3-9.

#### 作者简介:

王守相(1973—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为分布式发电、微电网与智能配电系统



王守相

(E-mail: sxwang@tju.edu.cn);

张善涛(1992—),男,河南商城人,硕士研究生,研究方向为分布式发电和储能  
(E-mail: zhangshantao@tju.edu.cn);

王凯(1992—),男,山东广饶人,博士研究生,研究方向为智能配电和储能  
(E-mail: sduwangkai@126.com)。

(编辑 王欣竹)

## Multi-objective optimal operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price

WANG Shouxiang<sup>1</sup>, ZHANG Shantao<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, HUANG Bibin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** The minimum of distribution network loss and voltage deviation is taken as the optimization objective, and a multi-objective optimal model of distributed energy storage is established considering user demand response under time-of-use price. Distributed energy storage is explored to improve the operation level of distribution network by the dynamic combination of user demand response under time-of-use price. An improved genetic algorithm is presented to solve the optimal model. The test results prove that the multi-objective optimization operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price can effectively reduce the distribution network loss and the voltage deviation. It also shows that the improved genetic algorithm has the characteristics of faster evolution speed and better solution results.

**Key words:** distributed energy storage; distribution network; time-of-use price; demand response; genetic algorithms; optimization

(上接第124页 continued from page 124)

## Capacity configuration method of flywheel energy storage system considering power characteristics of generation-energy storage-load

WANG Yufei, WANG Chenglong, XUE Hua, XU Wenfa

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In the application scenario of DC fast charging station of electric vehicles, a capacity configuration method of flywheel energy storage system considering power characteristics of generation-energy storage-load is proposed to limit the ramp rate of grid power and compensate the bus voltage drop. Firstly, according to the power relationship of generation-energy storage-load, the ratio of the increment of flywheel's mechanical angular velocity to the bus voltage sag amplitude is approximately a function of time. According to the power characteristics of grid-side converter in the fast charging station, it is deduced that the relationship between the maximum grid power ramp rate and the maximum sag amplitude of bus voltage is approximately proportional. Then, for the fast charging load with different rated power, the setting of the rotational inertia of flywheel rotor and the initial mechanical angular velocity is emphatically discussed, and the capacity constraints of the energy storage converter of the flywheel side are analyzed, on the basis of satisfying the DC bus voltage level and the electromagnetic constraint of permanent magnet synchronous motor. Finally, the system simulation model is built in MATLAB/Simulink to verify the correctness of the capacity configuration method of flywheel energy storage system.

**Key words:** electric vehicles; DC fast charging station; flywheel energy storage system; ramp rate of grid power; bus voltage; rotational inertia; mechanical angular velocity; capacity configuration; power characteristics