

# 基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法

况 华<sup>1</sup>, 沐欣欣<sup>2</sup>, 覃日升<sup>3</sup>

(1. 云南电网有限责任公司, 云南 昆明 650011; 2. 云南电网公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100;  
3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:**合理利用需求侧响应可以提高和优化配电网经济运行水平,降低电网网损。针对中长期需求响应特性及短期需求响应特性进行研究,提出了基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法,选择了粒子群算法作为优化算法,基于编制的潮流计算程序,加入了一定的约束条件,对IEEE 30节点的配电网进行算例分析,仿真结果较好地验证了所提出的基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法的可行性和有效性。所提方法主要是为网损优化提供了新思路,有助于电力企业提高经济效率。

**关键词:**网损优化;多时间尺度建模;需求侧响应;分时电价优化

**中图分类号:**TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0049-06

## Loss Optimization Method Based on Demand – side Response Model with Multiple – time Scales

Kuang Hua<sup>1</sup>, Mu Xinxin<sup>2</sup>, Qin Risheng<sup>3</sup>

(1. Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan, China;

2. Yuxi Electric Power Supply Bureau of Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Yuxi 653100, Yunnan, China;

3. Electric Power Research Institute of Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China)

**Abstract:** The rational use of demand side response can improve and optimize the economic operation level of distribution network and reduce the network loss. The characteristics of medium – and long – term demand response and short – term demand response are studied, and a loss optimization method based on demand – side response model with multi – time scale is proposed. Particle swarm optimization (PSO) is chosen as the optimization algorithm. Based on the compiled power flow calculation program after adding certain constraints, the IEEE 30 node distribution network is analyzed and the simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed method based on the demand – side response model of multi – time scale. The research mainly provides a new idea for the optimization method of network loss, which is helpful to improve the economic efficiency of electric power enterprises.

**Key words:** loss optimization; multi – time scale modeling; demand side response; time – sharing price optimization

## 0 引言

新电改9号文中提出“管住中间,放开两头”的电力运营模式,使得需求侧响应有更大的实施空间。需求侧响应对电能的供需平衡、电网的潮流特性会造成巨大的影响,同时也会影响到配电网的经济运行水平和网损特性<sup>[1]</sup>,因此利用需求侧响应来提高和优化配电网经济运行水平、降低电网网损已成为

人们关注的热点问题。

目前国内外许多专家对网损优化做了相关研究。文献[2-7]分析了线路损耗的造成原因、计算方法以及优化网损的建议。关于优化网损方面,现有文献[8-16]基于设备改造、电网改造、线损率、交直流输电、安全经济调度、中低压电网等方面进行了研究。文献[8-9]考虑了设备改造,其中文献[8]通过确定电容器的位置及其类型和大小,升高线路电压,达到降低损耗的目的;文献[9]分析了变

压器和导线的优化配置方法来实现降损的目的。文献[10]通过合理改变电网的运行方式,优化了电网的网架结构,提高了电网供电可靠性,达到节能降损的目的。文献[11-12]考虑了线损率,其中文献[11]提出一种基于极限线损率和极限降损率指标的配电网降损措施优化方法;文献[12]以线损二项式为分析工具,分析了过网电量、功率因数变化以及供电量增长等因素对线损率的影响,提出降损的方案。文献[13]提出了交直流混合电网的网损优化模型,利用拉格朗日乘子对优化模型进行求解。文献[14]提出了电力系统安全经济调度的网损协调优化方法。文献[15]分析了配电网降损规划工作的主要流程,并提出了配电网降损规划辅助决策模型。现有文献都能有效地降低网损,但很少有文献从需求侧响应的角度进行网损优化研究。仅有文献[16]在电力市场环境下,考虑需求侧响应建立了峰谷分时电价模型,达到网损优化的目标;但是其峰谷分时电价模型仅考虑了短期需求响应特性。

因此提出了新电改背景下<sup>[17]</sup>基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法。首先,对中长期需求响应特性及短期需求响应特性进行研究,建立了多时间尺度需求侧响应模型。该模型是在分时电价的需求弹性量化模型的基础上,通过同时考虑短期电价和中长期电价对需求侧响应的影响,能够反应出中长期电价波动情况下的短期需求响应特性。然后,从经济性角度出发,以网络损耗造成的经济损失最小为目标,将不同时段的网损分别乘上各自时段的电价,可以得到损失的电费,并以此最小为目标函数。最后以IEEE 30节点进行仿真分析,验证了所提方法的有效性。

## 1 多时间尺度需求侧响应建模

### 1.1 需求侧响应特性分析

#### 1.1.1 中长期需求侧响应特性分析

中长期需求特性一般是以年为单位,时间跨度在几年到十几年之间。

中长期需求模型为

$$\ln q = 0.601 \ln y - 8 \ln p + 0.877 \ln S + 2000 \quad (1)$$

式中: $y$ 为人均可支配收入; $p$ 为长期电价; $S$ 为人均居民住宅面积; $q$ 为年均电力需求量。

根据式(1),分别取4组人均可支配收入和人均居民住宅面积的参数,如表1所示。

表1 参数设置

模型	人均可支配收入/ (元/年)	人均居民住宅面积/ (m <sup>2</sup> /人)
曲线1	25 000	45
曲线2	20 000	35
曲线3	15 000	25
曲线4	10 000	15

根据表1设置的参数,得到了中长期电力需求量与中长期电价之间的关系,如图1所示。

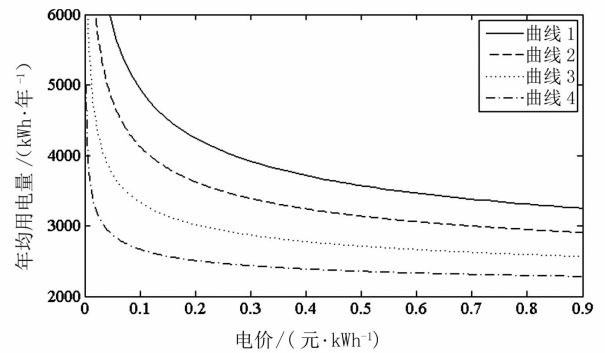


图1 中长期电量电价关系

#### 1.1.2 短期需求响应特性分析

在短期电量电价的模型<sup>[18-19]</sup>中,可以引入负荷转移率的概念。负荷转移率的含义是用电需求高的时段向用电需求低的时段转移的用电量,与用电需求高的时段的用电量之比,得到短期需求模型如式(2)。

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_j - p)/p < A \\ K(p_j - p)/(p - A), & A \leq (p_j - p)/p \leq B \\ K(B - A), & (p_j - p)/p > B \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{ij}$ 为*j*时段的电价变化后,引起了*i*时段需求量的变化; $p_j$ 为*j*时段的电价; $p$ 为常量,指代的是电价; $K$ 为用户反应度模型的斜率; $A$ 为死区阈值; $B$ 为饱和区阈值。

将分时电价分为峰、平、谷3个时段,得到9个相关的短期电量电价模型如式(3)至式(11)所示,式中的*p*暂时都取值0.5,  $(p_j - p)/p$ (下标*j*分别用代表峰、平、谷时段的*f, p, g*表示)的范围设置为0~1。

$$\lambda_{ff} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_f - p)/p < 0.05 \\ 0.4((p_f - p)/p - 0.05), & 0.05 \leq (p_f - p)/p \leq 0.4 \\ 0.4(0.4 - 0.05), & (p_f - p)/p > 0.4 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_{ip} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_p - p)/p < 0.02 \\ 0.27(p_p - p)/p - 0.02, & 0.02 \leq (p_p - p)/p \leq 0.3 \\ 0.27(0.3 - 0.02), & (p_p - p)/p > 0.3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda_{ig} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_g - p)/p < 0.02 \\ 0.1(p_g - p)/p - 0.02, & 0.02 \leq (p_g - p)/p \leq 0.2 \\ 0.1(0.2 - 0.02), & (p_g - p)/p > 0.2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{pf} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_f - p)/p < 0.02 \\ 0.1((p_f - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_f - p)/p \leq 0.5 \\ 0.1(0.5 - 0.02), & (p_f - p)/p > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_{pp} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_p - p)/p < 0.02 \\ 0.5((p_p - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_p - p)/p \leq 0.4 \\ 0.5(0.4 - 0.02), & (p_p - p)/p > 0.4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_{pg} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_g - p)/p < 0.02 \\ 0.25((p_g - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_g - p)/p \leq 0.4 \\ 0.25(0.4 - 0.02), & (p_g - p)/p > 0.4 \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda_{gf} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_f - p)/p < 0.02 \\ 0.06((p_f - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_f - p)/p \leq 0.6 \\ 0.06(0.3 - 0.02), & (p_f - p)/p > 0.6 \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_{gp} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_p - p)/p < 0.02 \\ 0.3((p_p - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_p - p)/p \leq 0.3 \\ 0.3(0.3 - 0.02), & (p_p - p)/p > 0.3 \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda_{gg} = \begin{cases} 0, & 0 \leq (p_g - p)/p < 0.02 \\ 0.7((p_g - p)/p - 0.02), & 0.02 \leq (p_g - p)/p \leq 0.4 \\ 0.7(0.4 - 0.02), & (p_g - p)/p > 0.4 \end{cases} \quad (11)$$

## 1.2 多时间尺度需求响应模型

多时间尺度需求响应模型如图2所示。

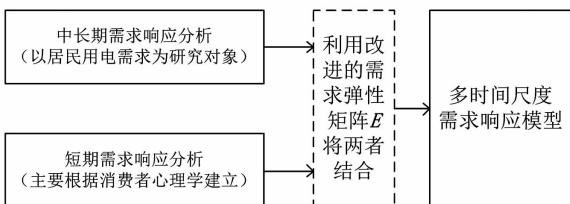


图2 模型结构

需求弹性矩阵中需求弹性系数可以表示为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta q_i / q_i}{\Delta p_j / p_j} \quad (12)$$

式中： $\varepsilon_{ij}$ 为需求弹性系数； $\Delta q_i / q_i$ 为*i*时段需求量变化率； $\Delta p_j / p_j$ 为*j*时段电价变化率。当*i=j*时， $\varepsilon_{ij}$ 为自弹性系数，即同一时段在分时电价前后的需求量变化，这一部分变化的负荷也可以称作可削减负荷，人们可能随着电价的提高而避免这部分负荷，达到减少电费支出的目的。当*i≠j*时， $\varepsilon_{ij}$ 代表互弹性系数，即*j*时段的电价变化与*i*时段需求量变化之比，这一部分负荷也可以称作可转移符合，人们可能随着*j*时段电价的降低，减少*i*时段的用电量，并将这部分电量转移到*j*时段。

需求弹性矩阵为

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \cdots & \varepsilon_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中：对角线元素为自弹性系数；非对角线元素为互弹性系数。

则多时间尺度需求侧响应模型为

$$\mathbf{q}_{DR} = [q_f \ q_p \ q_g]^T + \begin{bmatrix} q_f & 0 & 0 \\ 0 & q_p & 0 \\ 0 & 0 & q_g \end{bmatrix} \cdot E \cdot \begin{bmatrix} \frac{p_f - p}{p} \\ \frac{p_p - p}{p} \\ \frac{p_g - p}{p} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $\mathbf{q}_{DR} = [q_{f-DR} \ q_{p-DR} \ q_{g-DR}]^T$ ； $q_{f-DR}$ 、 $q_{p-DR}$ 、 $q_{g-DR}$ 为需求侧响应执行后各时段用电量； $q_f$ 、 $q_p$ 、 $q_g$ 为实施前各时段用电量。

按照峰、平、谷3个时段，可以得到：

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ff} & \varepsilon_{fp} & \varepsilon_{fg} \\ \varepsilon_{pf} & \varepsilon_{pp} & \varepsilon_{pg} \\ \varepsilon_{gf} & \varepsilon_{gp} & \varepsilon_{gg} \end{bmatrix} \quad (15)$$

结合式(3)至式(11)可以计算 $\varepsilon_{ij}$ ( $i = f, p, g$ ； $j = f, p, g$ )的值。

## 2 网损优化模型

### 2.1 目标函数

电能传输过程中由于线路的阻抗不可避免地会发生损耗，这部分损耗没有带来任何效益，却带来

了巨大的经济损失。需求侧响应会通过改变电力网络中各个负荷输入的有功功率,从而改变网损结果以达到经济损失较少的目的。这里通过需求侧响应改变了用户的用电量,相当于改变网络中的功率分布,最终达到经济损失减少的目的。

优化网损的目标是使得网络损耗造成的经济损失最小,因此将不同时段的网损分别乘上各自时段的电价,可以得到损失的电费,将这个值取最小即是优化目标。函数表达式为

$$\min(p_f \times \sum_{i=1}^n q_{if} + p_p \times \sum_{i=1}^n q_{ip} + p_g \times \sum_{i=1}^n q_{ig}) \quad (16)$$

式中: $p_f$ 、 $p_p$ 、 $p_g$ 分别为执行分时电价后峰、平、谷3个时段的电价; $\sum_{i=1}^n q_{if}$ 、 $\sum_{i=1}^n q_{ip}$ 、 $\sum_{i=1}^n q_{ig}$ 分别为峰、平、谷3个时段通过潮流计算所得各个节点的网损之和, $n$ 为电网中节点个数。

## 2.2 优化变量

基于以网络损耗造成的经济损失最小为目标函数的优化模型有4个优化变量,即 $[p_f, p_p, p_g, p]$ 。

峰价 $p_f$ 大于长期电价,它的增大会导致峰时段的负荷降低,同时使得平时段、谷时段的需求量增加,它与长期电价差值越大,峰时段负荷降低,平、谷时段负荷增加量越明显。

平价 $p_p$ 如果大于 $p$ 会导致峰时段、谷时段需求量的增加;如果小于 $p$ 则会引起峰时段、谷时段的需求量降低。一般不会与长期电价相差太多。

谷价 $p_g$ 小于长期电价,它的减小会导致峰时段负荷、平时段需求量降低,谷时段需求量提高,它与 $p$ 的差值越大,则这些需求量的变化越大。

改变长期电价 $p$ 则会引起一天中电力需求总量的变化,并且 $p$ 与另外3个电价的差值也影响了最终各时段的需求量,因此 $p$ 在该模型中有很大的影响。

## 2.3 约束条件

电价约束:

$$\begin{cases} p_f > p \\ p_f > p_p \\ p_f > p_g \\ p_p > p_g \\ p > p_g \end{cases} \quad (17)$$

初始价格约束:

$$\begin{cases} 0.1 \leq p_f \leq 3 \\ 0.1 \leq p_p \leq 1 \\ 0.1 \leq p_g \leq 1 \\ 0.3 \leq p \leq 0.7 \end{cases} \quad (18)$$

需求量约束:

$$\begin{cases} q_{f-DR} > q_{p-DR} \\ q_{f-DR} > q_{g-DR} \\ q_{p-DR} > q_{g-DR} \end{cases} \quad (19)$$

需求侧响应约束:

$$q_{f-DR} \times p_f + q_{p-DR} \times p_p + q_{g-DR} \times p_g \leq q \times p \quad (20)$$

还需要增加一些潮流计算时保证电力系统正常运行的约束条件:

1)所有节点电压的约束

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

2)所有电源节点的有功功率和无功功率约束

$$\begin{cases} P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \\ Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \end{cases} \quad (22)$$

PQ节点的有功功率和无功功率已经按照条件给定,PV节点的有功功率、平衡节点的有功功率和无功功率都需要满足上述条件。

3)有些节点之间的电压还需要满足相位要求

$$|\delta_i - \delta_j| < |\delta_i - \delta_j|_{max} \quad (23)$$

有些线路两端的电压相位差必须要在一定范围内,这样可以保证系统稳定运行。潮流计算如果不能满足上述要求,则需要修改一些参数或者运行方式,重新计算。

## 2.4 求解算法

求解算法种类众多,但都有各自的优点和缺点,目前还没有完美的算法,考虑到高速计算的同时又能获取高精度的最优解,选择了粒子群算法作为优化算法<sup>[20]</sup>。通过粒子群算法来优化需求侧响应后得到的用电量,所得的用电量作为潮流计算的输入,再用MATpower进行潮流计算<sup>[21]</sup>,求出各节点的总净注入功率来表示网损。

网损优化模型的具体流程如图3所示。

# 3 算例分析

## 3.1 参数设置

峰、平、谷时段初始用电量设置如表2所示。

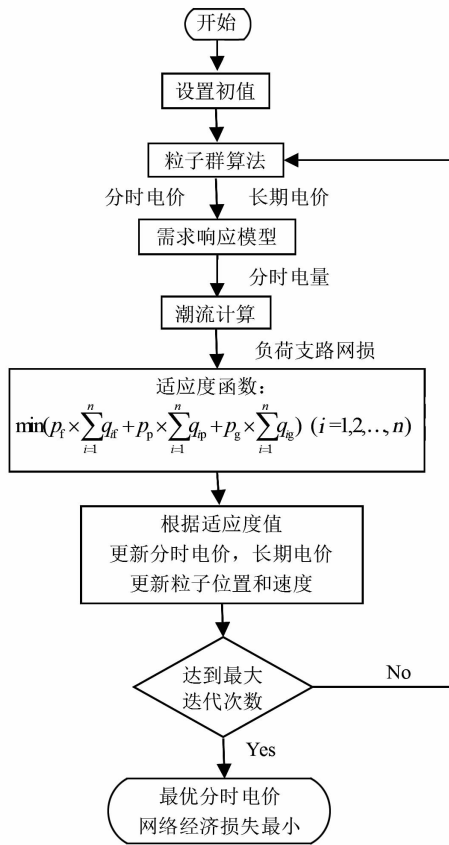


图3 网损优化模型的流程

表2 需求侧响应参数设置

人均收入 y/元	人均住宅 面积 S/m <sup>2</sup>	分时电价 前 q <sub>t</sub>	分时电价 前 q <sub>p</sub>	分时电价 前 q <sub>g</sub>
19 109	34.48	0.45q	0.35q	0.2q

人均用电量  $q$  是通过中长期需求模型的函数表达式计算得出的,这是一年中的平均用电量,要计算一天中的用电量只需要将  $q$  除以 365。进行网损优化时,将 IEEE 30 节点配电网中的一部分节点用需求侧响应求出的用电量来代替,由于电量和功率单位不同,这里需要稍作转换。由于默认每个时段为 8 h,只需要将电量的值除以 8 就可以得到按小时计算的功率,并假设每个节点承担了 80 位居民的负荷,这样在计算某时段网损时,每个节点的负荷就是 10 倍的此时段用电量。

对粒子群算法的参数设置如表 3 所示。

表3 粒子群算法参数设置

粒子数 n	学习因子 c1	学习因子 c2	最大速度 V <sub>max</sub>	维度 D	循环次数 K	惯性权重 W
40	2	2	0.4	4	2000	1

将所提网损优化应用于 IEEE 30 节点系统,系统总的负荷为 2.834 + j1.390 (标么值)。基准功率

为 100 MVA。IEEE 30 节点系统包括 6 台发电机(节点 1,2,5,8,11 和 13,其中节点 1 为平衡节点,节点 2,5,8,11 和 13 为 PV 节点)、21 个负荷节点、37 条线路,4 台可调变压器(支路 6—9、6—10、4—12 和 27—28)和 2 个无功补偿点(节点 10 和 24)。图 4 是 IEEE 30 节点配电网结构图。

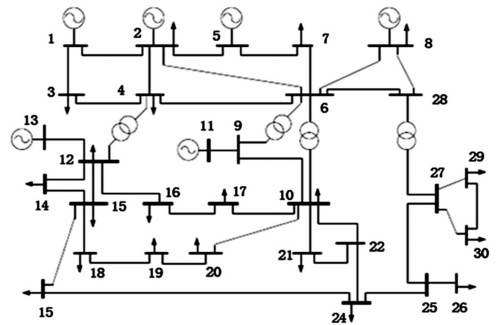


图4 IEEE 30 节点配电网结构

### 3.2 结果分析

网损优化后得到的结果如下:

#### 1) 需求弹性矩阵

$$E = \begin{bmatrix} -0.2566 & 0.2464 & 0.0270 \\ 0.0857 & -0.4563 & 0.1425 \\ 0.0541 & 0.2738 & -0.3990 \end{bmatrix} \quad (24)$$

#### 2) 电价

网损优化后的电价如表 4 所示。

表4 网损优化后的电价 单位:元/kWh

长期电价	峰时段电价	平时段电价	谷时段电价
0.533	0.607	0.411	0.178

表 4 中的数据显示峰价有所上升,但上升不多,原因在于本次优化将电价作为目标函数的一个因子,峰价受到了约束。平价略有下降,谷价下降较多,与预期一致。

#### 3) 优化过程

从图 5 的优化过程可以看到粒子群算法的寻优过程,迭代过程中出现过不同的局部最优值,最终找到了全局最优,经过 800 次左右的优化,数值从 68.34 降低到 58.15,实现了预期的目标。表明该模型对降低网损造成的经济损失有效,符合预期。

#### 4) 优化结果比较

实施网损优化前后电量、电费以及经济损失的比较如表 5、表 6、表 7 所示。

对基于网损优化的多时间尺度需求侧响应模型进行仿真后,可以看出峰谷差负荷由原先的

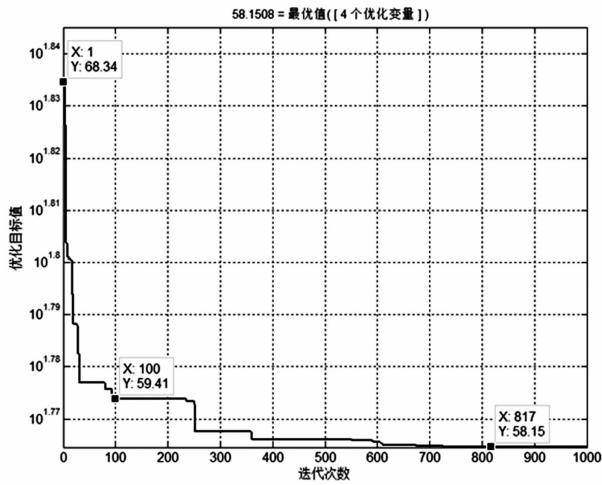


图5 粒子群算法优化过程

表5 网损优化前后电量比较 单位:kWh

指标	峰负荷	平负荷	谷负荷	总负荷	峰谷差
优化前	3.145	2.446	1.398	6.989	1.747
优化后	2.799	2.499	1.692	6.989	1.107

表6 网损优化前后电费比较 单位:元

指标	峰电费	平电费	谷电费	总电费
优化前	1.675	1.303	0.744	3.722
优化后	1.698	1.026	0.300	3.024

表7 网损优化前后经济损失比较

指标	峰网损/平网损/ kWh	谷网损/ kWh	总网损/ kWh	网损经济 损失/(元/h)	
优化前	81.118	42.977	12.009	136.104	72.475
优化后	59.860	45.240	18.317	123.417	58.151

1.747 kWh 优化到 1.107 kWh,总负荷量基本不变。平时段负荷减少了 0.053 kWh,变化不大;峰时段负荷减少了 0.346 kWh,减少较多;谷时段负荷增加了 0.294 kWh,增加较多,表明所提出的模型能有效地将负荷由峰时段转移到谷时段。

电费方面,平时段电价下降了 0.277 元;谷时段电价下降了 0.444 元;峰时段电价上升了 0.023 元,峰时段变化不大,平时段、谷时段都有下降,且总电费下降明显,这能够提升居民的满意度。

网损方面,峰时段网损下降了 21.258 kWh;平时段上升了 2.263 kWh;谷时段上升了 6.308 kWh;总的网损下降了 9.3%,网损造成的经济损失也下降了 19.8%,表明基于网损优化的多时间尺度需求侧响应模型能有效地降低网损,同时减少了网损造成的经济损失。

## 4 结 语

所提网损优化建模考虑了消费者心理学,并将长期需求模型与短期需求模型通过需求弹性矩阵结合在一起,建立了基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法。所提出的基于多时间尺度需求侧响应模型的网损优化方法对网损优化提供了一种新思路,为电价的制定提供了一个参考。

所提方法以网损的降低为目标,不同时间段的网损分别乘上各自时段的电价,可以得到损失的电费。网损是通过 MATpower 进行潮流计算获得。在算例中将 IEEE30 中的一部分节点用需求侧响应求出的用电量来代替,再通过 MATpower 进行潮流计算得到峰、平、谷 3 个时段各负荷支路的有功损耗,最终累加得到各个时段的网损。

### 参考文献

- [1] 袁秋霞. 电网降损规划方法的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [2] 邹宁. 浅议降低线路损耗的方法及措施[J]. 机电信息, 2012(9): 169 - 171.
- [3] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54 - 58.
- [4] 彭娇. 电力市场下电力系统网损计算与分析[J]. 中国新技术新产品, 2017(2): 48 - 49.
- [5] 胡远婷, 郭庆阳, 徐冰亮, 等. 基于电网结构的降损方法研究与经济效益分析[J]. 黑龙江电力, 2017, 39(3): 208 - 215.
- [6] 王佳, 常文焕, 卢东伟, 等. 电力系统网损分析及降损方法的研究[J]. 技术与市场, 2014, 21(11): 57 - 59.
- [7] 江北, 刘敏, 陈建福, 等. 地区电网降低电能损耗的主要措施分析[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 62 - 65.
- [8] M E Baran, F E Wu. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 729 - 734.
- [9] 卢志刚, 秦四娟, 李海涛, 等. 配电网技术线损分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 177 - 180.
- [10] 陈家庚, 林其友. 优化完善电网结构在节能减排领域中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 118 - 121.
- [11] 刘健, 段璟靓. 配电网极限线损分析及降损措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 27 - 35.

(下转第 65 页)

## 4 结 语

基于5G的配电网差动保护能实现保护范围内的全线速动,无需与其他保护配合,具有优良的速动性、灵敏性和选择性,且不受系统方式潮流的影响,是目前为止电网保护领域特性较好的保护机制之一。但作为国家能源的重要基础设施,配电网的安全稳定运行尤为重要,因此,全面分析了基于5G的配电网差动保护安全隐患,提出以下安全防护策略和方案,切实保障配电网安全稳定运行:

1)给出了配电网差动保护的架构和实现原理;

2)对比分析了5G和4G网络安全性能;

3)基于5G的自身安全挑战分析了基于5G的配电网安全防护需求,继而根据差动保护的数据流向和边界条件给出了基于5G配电网差动保护的安全风险点和应对措施;

4)提出了两种组网模式下基于5G配电网差动保护的安全防护实现目标。

### 参考文献

[1] 潘本仁,王和春,张妍,等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(15):102-107.

[2] 白加林,高昌培,王宇恩,等. 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(18):157-162.

[3] 毛文晋,李红伟,李超. 一种考虑DG出力优化分配的

=====

(上接第54页)

[12] 田宏杰. 线损分析预测在供电管理中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(7):77-80.

[13] 孙雁斌,刘恺,陈亦平,等. 异步联网的交直流输电电网损在线优化方法及其在南方电网的实现[J]. 电网技术,2016,40(4):1018-1024.

[14] 王楠,张粒子,黄巍,等. 电力系统安全经济调度网损协调优化方法[J]. 电网技术,2010,34(10):105-108.

[15] 杨文锋,王彬宇,程卓,等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术,2014,38(9):2598-2604.

[16] 陈沧杨,胡博,谢开贵,等. 计入电力系统可靠性与购电风险的峰谷分时电价模型[J]. 电网技术,2014,38(8):2141-2145.

[17] 沈红宇,陈晋,归三荣,等. 新一轮电力改革对电网

配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(13):57-63.

[4] 张平,陶运铮,张治. 5G若干关键技术评述[J]. 通信学报,2016,37(7):15-29.

[5] Gupta A, Jha R K. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies[J]. IEEE Access,2015,3:1206-1232.

[6] Agyapong P, Iwamura M, Staehle D, et al. Design Considerations for A 5G Network Architecture[J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52(11): 65-75.

[7] 冯登国,徐静,兰晓. 5G移动通信网络安全研究[J]. 软件学报,2018,29(6):1813-1825.

[8] 李晖,付玉龙. 5G网络安全问题分析与展望[J]. 无线电通信技术,2015,41(4):1-7.

[9] 杨红梅,赵勇. 5G安全风险分析及标准进展[J]. 中兴通讯技术 2014, 52(11): 65-75.

[10] Zou Y, Zhu J, Wang X, et al. A Survey on Wireless Security: Technical Challenges, Recent Advances, and Future Trends[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(9):1727-1765.

[11] 李宏佳,王利明,徐震,等. 5G安全:通信与计算融合演进中的需求分析与架构设计[J]. 信息安全学报,2018,3(5):1-14.

### 作者简介:

张泰(1982),男,博士,高级工程师,研究方向为电力通信、网络安全;

杨雪(1985),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信;

汪晓帆(1993),女,硕士,助理工程师,研究方向为电力通信。

(收稿日期:2020-11-04)

企业配电网规划的影响与对策[J]. 电力建设,2016,37(3):47-51.

[18] 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.

[19] 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):86-92.

[20] 顾苏雯,马宏忠,王华芳,等. 基于动态多种群粒子群算法的低压配电网电压无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(6):91-96.

[21] 郭桂静,徐道安,师秀凤. 基于Matpower的电力系统潮流计算[J]. 企业导报,2016(12):172-174.

### 作者简介:

况华(1973),男,高级工程师,主要从事配电网电压、电能质量方面的研究。

(收稿日期:2020-10-29)