

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190820

# 考虑售电侧放开后的配电网供电能力计算方法

白浩<sup>1</sup>, 于力<sup>1</sup>, 姜臻<sup>1</sup>, 张斌<sup>1</sup>, 叶琳浩<sup>2</sup>, 郁可可<sup>3</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510663;  
3. 山东欧姆电力科技有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 售电侧放开增加了配电网潮流的不确定性, 对配电网的供电能力也产生了一定的影响。首先从物理因素和市场因素两方面, 分析了售电侧放开后影响配电网供电能力的因素。其次, 根据售电侧放开后电力交易负荷的变化情况, 利用最小二乘法模拟负荷增长趋势, 建立了考虑售电侧放开后的配电网供电能力模型, 并采用改进的重复潮流算法对模型进行求解。最后通过算例, 分析了联络线的增加及电力交易量的大小等因素对配电网供电能力造成的影响, 验证了所提方法的准确性和有效性。

**关键词:** 售电侧; 配电网供电能力; 重复潮流; 最小二乘法

## Calculation method of power supply capacity of a distribution network considering the opening of power sale side

BAI Hao<sup>1</sup>, YU Li<sup>1</sup>, JIANG Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, YE Linhao<sup>2</sup>, YU Keke<sup>3</sup>

(1. Southern Power Grid Research Institute Limited Liability Company, Guangzhou 510663, China; 2. China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China; 3. Shandong Ohm Power Technology Limited Liability Company, Tai'an 271000, China)

**Abstract:** The release of the power supply side increases the uncertainty of the power flow of a distribution network, and also has a certain impact on the power supply capacity of the network. In this paper, the factors that affect the power supply capacity are analyzed from two aspects: physical factors and market factors. Secondly, according to the change of power transaction load and the load growth trend simulated by least squares method, the power supply capacity model of a distribution network considering the release of the power side is established, and an improved repetitive power flow algorithm is used to solve the model. Finally, the influence of factors such as the increase of tie line and the size of electricity transactions on distribution network power supply capability is analyzed and the accuracy and effectiveness of the proposed method are verified by an example.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905105) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid in 2019 "Assessment Method Study of Distribution Network Power Supply Capability after the release of the Power Supply Side" (No. ZBKJXM20180068).

**Key words:** power selling side; distribution network power supply capability; repeated power flow; least squares method

## 0 引言

自售电侧放开以来, 售电主体和购电主体如雨后春笋般涌入电力交易市场。电力市场化形成一方面有助于推动我国电力市场的发展, 提高电

力资源的有效利用率。但另一方面考虑到市场交易具有时变性、复杂性等特征, 对配电网的供电能力也会造成一定的影响。

现有文献关于配电网供电能力计算方法的研究大致分成三个阶段。第一阶段利用“容载比法”基于变电站容量对配电网供电能力进行评估, 该阶段以经济型为主, 采用的方法能够简单便捷地计算出负荷快速增长情况下的配电网供电能力, 但是该阶段没有考虑线路的转供能力。第二阶段考虑到网络

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905105); 2019 南方电网科技项目资助“售电侧开放后配电网供电能力评估方法研究”(ZBKJXM20180068)

转供情况,利用“最大负荷倍数法”、“网络最大流法”等方法计算网络供电能力,该阶段提出的方法较第一阶段考虑更为全面,但由于在描述负荷增长过程中采用等比例增长易于陷入潮流及早越限,使得计算结果偏低;第三阶段主要是计及  $N-1$  的配电网供电能力评估,该阶段计算方法以安全性为主,能够计算出发生  $N-1$  故障情况下的配电网供电能力,但该方法计算较为复杂。文献[1]采用一种改进的最大负荷倍数法对配电网供电能力进行计算,该方法简单快捷但是精度较低。文献[2]从电力负荷变化的角度出发,通过对电力负荷的变化趋势来评估网架的供电能力,该方法简单便捷,但在负荷预测时没有考虑到市场交易的影响。文献[3-4]考虑配电网供电能力和联络建设费用两种约束条件,提出了一种配电网主变联络优化的方法。文献[5]考虑分布式光伏的出力变化情况,提出了一种考虑光伏出力不确定性的配电网供电能力计算方法。文献[6]结合 DG 的出力变化,建立了基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化模型,描述了经济调度与配电网供电能力之间的关系。文献[7]结合储能的特点,提出了一种利用储能优化提升配电网供电能力的方法,该方法能够弥补因分布式电源出力不均导致的配电网供电能力计算偏差较大的情况。文献[8]提出了计及变电站低压母线上分布式电源转供能力的配电网供电能力计算方法。文献[9-11]提出了考虑  $N-1$  状态下的配电网供电能力计算方法,并且列出了相应的计算思路和流程,思路清晰。文献[12]考虑电压和网损的影响,提出一种运用广义梯度法与前推回代法相结合的供电能力求解方法,该方法计及电压及网损情况,计算的结果更加贴合实际但计算过程复杂。文献[13]结合  $N-1$  时线路进行多次转供的情况,提出了一种考虑线路转供下的配电网供电能力计算方法。除此之外,也有学者在计算供电能力的同时,考虑了安全裕度,提出基于安全域的配电网供电能力模型。其中文献[14-15]定义了配电网的安全距离、安全域体积、安全域维度等概念,文献[16]提出了柔性配电网的安全域模型,文献[17]在安全域基础上提出了有源配电网下的全象限安全域、安全距离以及分析方法。

目前,配电网供电能力计算方法的研究主要针对物理方面,关于售电侧放开后交易负荷变化对配电网供电能力的影响未有提及。上述模型及计算方法不能准确描述出电力负荷交易下配电网供电能力的实时变化情况。因此,文中分析了售电侧放开后

配电网供电能力的影响因素,建立了考虑售电侧放开后的配电网供电能力模型,并运用改进的重复潮流算法对供电能力进行了求解。

## 1 配电网供电能力的影响因素

配电网供电能力主要由网架结构、负荷及负荷增长水平决定<sup>[18]</sup>。在网架结构方面,影响配电网供电能力的主要为变电站数量容量、主变数量容量以及主变间的联络线数量容量等物理因素。随着售电侧放开后多类型市场主体加入到售电市场中,给负荷及负荷增长水平也带来了诸多不确定性。多时间尺度的交易周期、多类型的交易方式、交易电量等市场因素都会改变电力交易负荷的变化趋势,从而对配电网供电能力产生一定影响。为了分析以上因素对配电网供电能力的影响,可以分别建立相应的物理因素和市场因素灵敏度矩阵。

### 1.1 物理因素灵敏度矩阵

定义物理因素灵敏度矩阵  $\frac{dS}{dX}$ , 其中  $S$  代表配电网供电能力,  $X$  代表控制变量,主要包括主变数量、主变容量、变电站数量、变电站容量、联络线数量以及联络线容量。

$$\frac{dS}{dX} = \begin{bmatrix} \frac{dS}{dA1} & \frac{dS}{dA2} & \frac{dS}{dA3} & \cdots & \frac{dS}{dA(n-1)} & \frac{dSC}{dAn} \\ \frac{dS}{dB1} & \frac{dS}{dB2} & \frac{dS}{dB3} & \cdots & \frac{dS}{dB(n-1)} & \frac{dS}{dBn} \\ \frac{dS}{dC1} & \frac{dS}{dC2} & \cdots & \frac{dS}{dCm} & \cdots & 0 \\ \frac{dS}{dD1} & \frac{dS}{dD1} & \cdots & \frac{dS}{dDm} & \cdots & 0 \\ \frac{dS}{dE1} & \frac{dS}{dE2} & \cdots & \frac{dS}{dEl} & \cdots & 0 \\ \frac{dS}{dF1} & \frac{dS}{dF2} & \cdots & \frac{dS}{dFl} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\frac{dS}{dAn}$  代表  $n$  个主变对配电网供电能力的影响;

$\frac{dS}{dBn}$  代表第  $n$  个主变的容量对配电网供电能力的

影响;  $\frac{dS}{dCm}$  代表  $m$  个变电站对配电网供电能力的

影响;  $\frac{dS}{dDm}$  代表第  $m$  个变电站对配电网供电能力的

的影响;  $\frac{dS}{dEl}$  代表  $l$  条联络线对配电网供电能力的影响。

## 1.2 市场因素灵敏度矩阵

定义市场因素灵敏度矩阵  $\frac{dS}{dY}$ , 其中  $S$  代表配电网供电能力,  $Y$  代表控制变量, 主要包括多时间尺度的交易周期、不同的交易电量以及不同交易区域。

$$\frac{dS}{dY} = \begin{bmatrix} \frac{dS}{da1} & \frac{dS}{da2} & \frac{dS}{da3} \\ \frac{dS}{db1} & \frac{dS}{db2} & \frac{dS}{db3} \\ \frac{dS}{dc1} & \frac{dS}{dc2} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\frac{dS}{da1}$  代表中长期交易对配电网供电能力的影响;  $\frac{dS}{da2}$  代表日前交易对配网供电能力的影响;  $\frac{dS}{da3}$  代表实时交易对配网供电能力的影响;  $\frac{dS}{db1}$  代表交易电量小于 0.2 倍的可用供电能力;  $\frac{dS}{db2}$  代表交易电量介于 0.2~0.5 倍的可用供电能力;  $\frac{dS}{db3}$  代表交易电量大于 0.5 倍的可用供电能力;  $\frac{dS}{dc1}$  代表区域内交易对配网供电能力的影响;  $\frac{dS}{dc2}$  代表区域间交易对配网供电能力的影响。

## 2 考虑售电侧放开后的配电网供电能力模型

### 2.1 电力交易负荷出清

由于售电侧放开后市场因素的影响, 电力交易负荷会随着交易方式、交易周期等因素时刻变化。为了计算某时刻配电网的供电能力, 首先需要计算出该时刻电力交易负荷的变化情况。因此, 文中以社会效益最大为目标, 考虑电力平衡、市场出清等约束建立电力交易电量出清模型<sup>[19]</sup>, 如式(3)所示。

目标函数

$$\max \left\{ \sum_{b=1}^B [\varepsilon_{b,t} p_{b,t} q_{b,t}] - \sum_{m=1}^M [\varepsilon_{m,t} p_{m,t} q_{m,t}] \right\} \quad (3)$$

式中:  $p_{b,t}$ 、 $p_{m,t}$  分别为购电主体和售电主体在  $t$  时刻的申报价格;  $q_{b,t}$ 、 $q_{m,t}$  分别为购电主体和售电主体在  $t$  时刻的申报电量;  $B$ 、 $M$  分别为购电主体和售电主体的数目;  $\varepsilon_{b,t}$ 、 $\varepsilon_{m,t}$  分别为  $t$  时刻购电主体和售电主体是否中标的 0-1 变量。

约束条件

### (1) 电量平衡

$$\sum_{b=1}^B [\varepsilon_{b,t} q_{b,t}] = \sum_{m=1}^M [\varepsilon_{m,t} q_{m,t}] \quad (4)$$

### (2) 市场出清约束

$$\varepsilon_{b,t} \sum (p_{b,t} - p_{cl,t}) q_{b,t} \geq 0 \quad (5)$$

式中,  $p_{cl,t}$  为  $t$  时刻电力交易出清电价。

## 2.2 配电网供电能力模型

配电网供电能力的大小和负荷及其增长水平密切相关。传统配电网供电能力模型在对负荷进行处理时没有考虑交易对负荷产生的影响, 导致负荷等比例增长时无法准确描述其增长过程。为了准确描述售电侧放开后配电网负荷变化情况, 文中将负荷分为常规负荷和电力交易负荷, 结合两种负荷的变化曲线利用最小二乘法建立常规负荷和电力交易负荷的增长函数<sup>[20]</sup>。以配电网供电能力最大为目标函数, 考虑潮流、电压等约束建立模型如式(6)所示。

目标函数

$$\max S = \sum_{i=1}^N F_1(x) Q_{i,t} + \sum_{i=1}^N F_2(x) P_{i,t} \quad (6)$$

式中:  $S$  为配电网供电能力;  $Q_{i,t}$ 、 $P_{i,t}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  处的常规负荷和电力交易负荷;  $N$  为节点数;  $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$  分别为常规负荷和电力交易负荷增长函数。

约束条件

$$\begin{cases} P_{Gi}^t - P_{Li}^t = U_i^t \sum_{j=1}^N U_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \\ Q_{Gi}^t - Q_{Li}^t = U_i^t \sum_{j=1}^N U_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \end{cases} \quad (7)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (8)$$

$$I_i^{\min} \leq I_i \leq I_i^{\max} \quad (9)$$

$$S_{ij}^{\min} \leq S_{ij}^t \leq S_{ij}^{\max} \quad (10)$$

式中:  $P_{Gi}^t$ 、 $Q_{Gi}^t$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  处机组有功及无功出力;  $P_{Li}^t$ 、 $Q_{Li}^t$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  处有功及无功负荷;  $U_i^t$  为节点  $i$  处的电压;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为支路  $ij$  的电导和电纳;  $\theta_{ij}^t$  为节点  $i$ 、 $j$  的相角差;  $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$  分别为节点  $i$  处电压上下限;  $S_{ij}^{\max}$ 、 $S_{ij}^{\min}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的线路功率上下限。

## 3 算法求解

考虑到本文在求解时既需要求解电量出清模型, 又需要对配电网供电能力进行计算。因此, 采用了两种算法进行求解。

其中, 电量出清模型的求解属于非线性整数规

划问题<sup>[21-22]</sup>。为了求解方便,需要先对式(2)一式(3)进行线性化处理,然后运用 GAMES 求解器进行求解。为此引入  $\delta_i$  为  $\varepsilon_i$  的相关变量;  $\gamma$  为购售电主体申报价格; 购电侧  $\delta_i = 1 - \varepsilon_i$ , 售电侧  $\delta_i = \varepsilon_i$ ; 处理结果如下:

$$\varepsilon_i \leq \delta_i \quad (11)$$

$$\varepsilon_i \leq \frac{P_{cl,t}}{\gamma} \quad (12)$$

$$\frac{P_{cl,t}}{\gamma} \leq 1 + 100\varepsilon_i \quad (13)$$

配电网供电能力的计算实际是指在给定运行模式和负荷增长模型下,系统所能供给负荷的最大值。当处在最大值时,如果负载有一点点增长,则不能满足约束并且配电网无法达到安全水平<sup>[23]</sup>。为了考虑售电侧放开后电力交易负荷的变化情况,文中采用了改进的重复潮流算法。改进的部分主要在于两点:第一,将负荷分为常规负荷和电力交易负荷两种,能够直观地反映出售电侧放开后的负荷变化情况;第二,利用最小二乘法分别描述两种负荷增长模式,降低等比例增加时潮流提前越限的概率。

具体的求解步骤及流程图如图 1 所示。

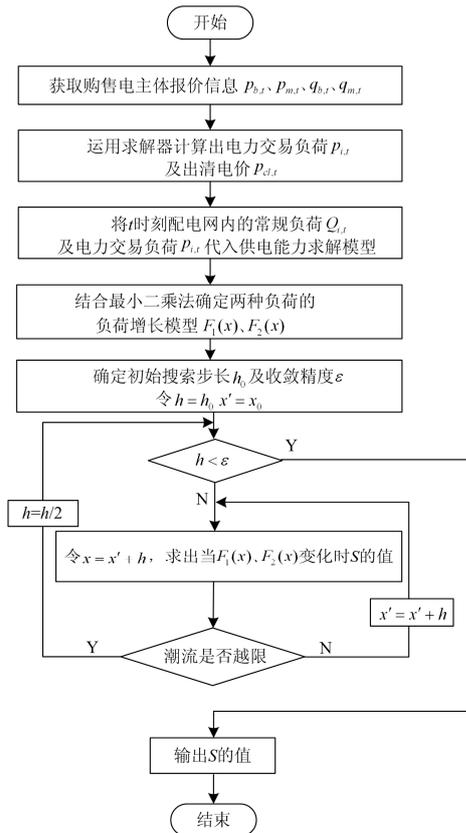


图 1 算法求解流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm solution

第一步: 获取购售电主体的报价信息  $p_{b,t}$ 、 $p_{m,t}$ 、 $q_{b,t}$ 、 $q_{m,t}$ 。

第二步: 运用求解器计算出电力交易负荷  $p_{i,t}$  及出清电价  $p_{cl,t}$ 。

第三步: 将  $t$  时刻配电网内的常规负荷  $Q_{i,t}$  及电力交易负荷  $p_{i,t}$  代入配电网供电能力求解模型。

第四步: 结合最小二乘法确定两种负荷的负荷增长函数  $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 。

第五步: 确定初始搜索步长  $h_0$  及收敛精度  $\varepsilon$ , 令  $h = h_0$ 、 $x' = x_0$ 。

第六步: 若  $h < \varepsilon$ , 结束运算, 输出  $S$ , 若  $h > \varepsilon$ , 进行下一步。

第七步: 令  $x = x' + h$ , 求出当  $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$  变化时的  $S$  值。

第八步: 检验潮流有无越限, 如果没有越限, 则令  $x' = x' + h$ 。若发生潮流越限, 令  $h = \frac{1}{2}h$ , 转步骤 5。

## 4 算例

本文在现有 IEEE33 节点的基础上进行改进, 连接线路 7-20, 11-21, 8-14, 17-32, 24-28。该系统电压等级为 12.66 kV, 现有常规负荷为 3715 kW+j2300 kvar, 假设图 2 中节点中均有部分负荷作为购电主体参与电力交易<sup>[24]</sup>。

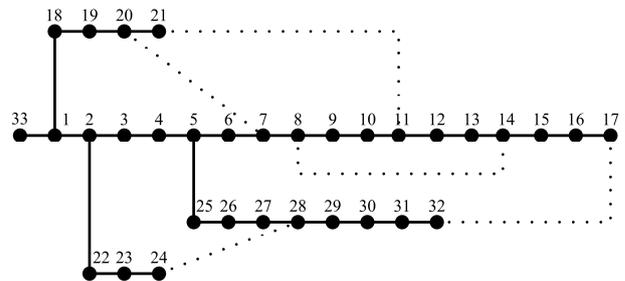


图 2 改进的 IEEE33 节点

Fig. 2 Improved IEEE33 node

为了分析物理因素和市场因素对配电网供电能力的影响, 验证文中所提计算方法的有效性, 本文以改变网架的联络线数量和电力交易的容量为例设置了两种场景。

场景一: 不考虑电力交易, 运用改进的算法和传统重复潮流算法对标准的 IEEE33 节点和改进后的 IEEE33 节点配电网供电能力进行计算。

场景二：在改进的 IEEE33 节点上运用改进的算法对考虑不同交易电量下的配电网供电能力进行计算。

首先不考虑电力交易情况，结合常规负荷的变化趋势，利用最小二乘法计算得出常规负荷增长模型  $F_1(x) = 0.0036x^2 - 0.0026x + 0.2417$ 。分别采用两种方法求解的结果如表 1 所示，电压及线路负载率变化情况如图 3、图 4 所示。

表 1 场景一对比

Table 1 Contrast of scene one

网架结构	指标	改进算法	传统重复潮流算法
标准 IEEE33 节点	最大供电能力	5 388 kW+j2 793 kvar	5 352 kW+j2 723 kvar
	可用供电能力	1 673 kW+j493 kvar	1 637 kW+j423 kvar
	迭代次数	5	4
	越限原因	节点 21 电压越限	线路 29 潮流越限
改进 IEEE33 节点	最大供电能力	5 468 kW+j2 877 kvar	5 403 kW+j2 793 kvar
	可用供电能力	1 753 kW+j577 kvar	1 688 kW+j493 kvar
	迭代次数	6	4
	越限原因	线路 18 潮流越限	节点 16 电压越限

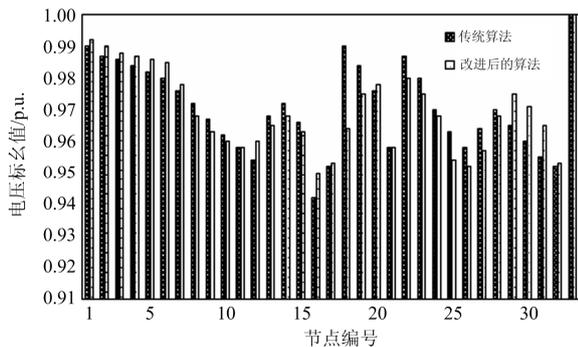


图 3 改进 IEEE33 节点电压标幺值对比

Fig. 3 Comparison of improved IEEE33 node voltage standard unit

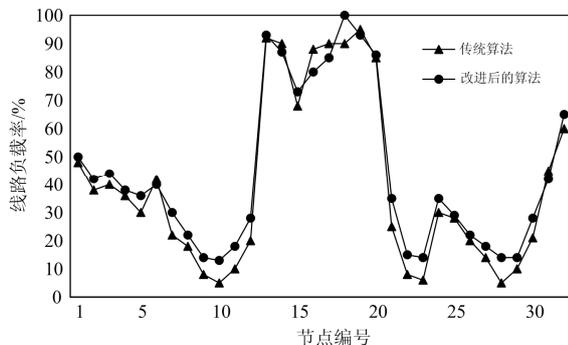
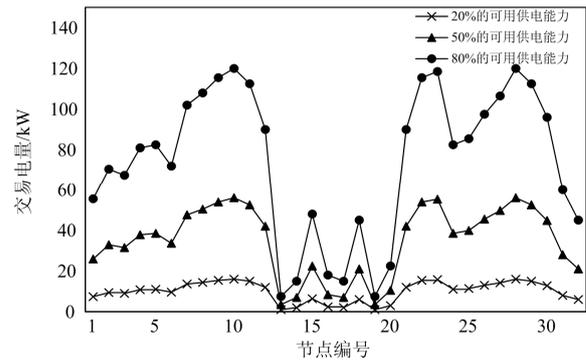


图 4 改进 IEEE33 节点线路负载率对比

Fig. 4 Comparison of the improved IEEE33 node line load rate

从表 1 中可以看出，当 IEEE33 节点中增加联络线时，运用两种方法求解出来的配电网最大供电能力较标准的 IEEE33 节点都得到了相应的提升，由此表明网架中联络线条数越多，配电网供电能力就越大。从图 3 及图 4 中可以看出，改进后算法的电压标幺值有了一定的提升、线路负载率也更为均衡，由此可以降低因电压过低造成迭代及早越限情况的发生。除此之外，采用改进的算法较传统算法相比，迭代次数虽有增加但是在计算精度上有一定提升。

其次在改进的 IEEE33 节点上考虑电力交易情况，分别假设交易电量为可用供电能力的 0.2、0.5 以及 0.8 倍。结合表 1 中求得的可用供电能力为 1 753 kW+j577 kvar，得出某时刻三种情况下电力交易负荷变化曲线如图 5 所示。

图 5 某时刻  $t$  下各节点的电力交易电量Fig. 5 Electricity transaction volume of nodes at a time  $t$ 

最后计算考虑电力交易情况下配电网供电能力的变化情况，利用最小二乘法得出电力交易负荷增长模型  $F_2(x) = 0.0015x^2 + 0.0037x + 0.1342$ 。采用算法对场景二情况下的配电网供电能力进行求解的结果如表 2 所示。

表 2 场景二对比

Table 2 Contrast of scene two

交易电量	指标	结果
电力交易量为 20% 可用供电能力	最大供电能力	5 584 kW +j2 838 kvar
	可用供电能力	1 869 kW+j538 kvar
	迭代次数	5
电力交易量为 50% 可用供电能力	最大供电能力	5 684 kW +j2 903 kvar
	可用供电能力	1 969 kW +j603 kvar
	迭代次数	6
电力交易量为 80% 可用供电能力	最大供电能力	5 424 kW +j2 806 kvar
	可用供电能力	1 709 kW +j506 kvar
	迭代次数	4

从表 2 中可以看出, 当电力交易量为 50% 的可用供电能力时, 系统求得的配电网最大供电能力最大, 运算迭代次数最多。当电力交易量为 20% 的可用供电能力时, 配电网最大供电能力次之。但是以上两种情景求出的配电网最大供电能力均大于不考虑电力交易情况下的最大供电能力。当交易电量为 80% 的可用供电能力时, 配电网最大供电能力与迭代次数最小, 并且最大供电能力小于不考虑电力交易下的配电网供电能力。由此可以看出, 在一定比例下, 配电网供电能力随着电力交易电量的增大而增大, 但当超过一定比例时, 反而会使得配电网的供电能力下降。

## 5 结论

通过对售电侧放开后配电网供电能力进行分析, 主要取得了以下结果: (1) 结合最小二乘法, 提出考虑电力交易的改进重复潮流算法求解配电网的供电能力。(2) 分析售电侧放开后配电网供电能力的影响因素, 并通过算例验证联络线的增加及电力交易量的大小都会对配电网供电能力造成影响。后续会就电力交易量占配电网可用供电能力的比例对配电网供电能力的影响问题进行研究。

## 参考文献

- [1] 陈浩, 张焰, 俞国勤, 等. 配电网最大供电能力计算方法[J]. 中国电力, 2009, 42(8): 20-23.  
CHEN Hao, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. A new algorithm to evaluate maximum load supplying capability of distribution network[J]. Electric Power, 2009, 42(8): 20-23.
- [2] 刘建鹏, 高亚静, 梁海峰, 等. 基于负荷预测的城市配电网供电能力计算[J]. 华东电力, 2014, 42(5): 873-877.  
LIU Jianpeng, GAO Yajing, LIANG Haifeng, et al. Calculation of power supply capacity of urban distribution network based on load forecasting[J]. East China Electric Power, 2014, 42(5): 873-877.
- [3] 何伟, 吴万禄, 沈宏伟, 等. 城市配电网供电能力计算方法研究[J]. 供用电, 2013, 30(3): 33-38.  
HE Wei, WU Wanlu, SHEN Hongwei, et al. Research on calculation method of power supply capability of urban distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2013, 30(3): 33-38.
- [4] 肖白, 王思莹, 谷禹. 计及最大供电能力和最小联络建设费用的主变联络结构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 9-16.  
XIAO Bai, WANG Siying, GU Yu. Optimization for contact structure among main transformers between substations considering total supply capacity and minimum contact construction cost[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 9-16.
- [5] 杨汾艳, 张跃, 曾杰, 等. 计及分布式光伏配电网供电能力计算方法[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 150-155.  
YANG Fenyan, ZHANG Yue, ZENG Jie, et al. Taking into account the calculation method of power supply capability of distributed photovoltaic distribution network[J]. Electric Power, 2016, 49(12): 150-155.
- [6] 周玮, 孙恺, 孙辉, 等. 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 70-77.  
ZHOU Wei, SUN Kai, SUN Hui, et al. Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 70-77.
- [7] 国宗, 韦钢, 郭运城, 等. 面向供电能力提升的配电网储能功率动态优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 1-8.  
GUO Zong, WEI Gang, GUO Yuncheng, et al. Dynamic optimization of energy storage power in distribution network based on power supply capacity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 1-8.
- [8] 张李明, 齐先军. 计及分布式电源转供能力的配电网供电能力计算[J]. 现代电力, 2016, 33(5): 87-94.  
ZHANG Liming, QI Xianjun. Calculation of power supply capacity of distribution network considering distributed power supply capacity[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(5): 87-94.
- [9] 罗凤章, 王成山, 肖峻, 等. 一种简捷实用的配电系统供电能力计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 56-60.  
LUO Fengzhang, WANG Chengshan, XIAO Jun, et al. A simple and practical method to evaluate power supply capability of distribution system[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 56-60.
- [10] 肖峻, 谷文卓, 郭晓丹, 等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.  
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [11] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬, 等. 城市中压配电网最大供电能力评估方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 403-407.  
OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Evaluation method for maximum load capability of urban medium-voltage distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 403-407.
- [12] 肖峻, 刘世嵩, 李振生, 等. 基于潮流计算的配电网最

- 大供电能力模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5516-5524.
- XIAO Jun, LIU Shisong, LI Zhensheng, et al. Model of total supply capability for distribution network base on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5516-5524.
- [13] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275-2281.
- ZHU Jiaqi, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Method for estimating maximum power supply capacity of distribution network considering multiple transfer[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275-2281.
- [14] 肖峻, 甄国栋, 王博, 等. 配电网的安全距离:定义与方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2840-2851.
- XIAO Jun, ZHEN Guodong, WANG Bo, et al. Security distance of distribution network: definition and method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2840-2851.
- [15] 肖峻, 张宝强, 邵经鹏, 等. 配电网安全域的全维观测[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 73-79, 218-225.
- XIAO Jun, ZHANG Baoqiang, SHAO Jingpeng, et al. Dimension of distribution system security region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 73-79, 218-225.
- [16] 肖峻, 刚发运, 邓伟民, 等. 柔性配电网的安全域模型[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3764-3774.
- XIAO Jun, GANG Fayun, DENG Weimin, et al. Security region model for flexible distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3764-3774.
- [17] 肖峻, 林启思, 左磊, 等. 有源配电网的安全距离与安全分析方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 76-95.
- XIAO Jun, LIN Qisi, ZUO Lei, et al. Security distance and security analysis method for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 76-95.
- [18] 李振坤, 陈星莺, 刘皓明, 等. 配电网供电能力的实时评估分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 36-39, 62.
- LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-39, 62.
- [19] 张馨瑜, 陈启鑫, 葛睿, 等. 考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 35-41.
- ZHANG Xinyu, CHEN Qixin, GE Rui, et al. Power spot market clearing model considering flexible block trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 35-41.
- [20] FAN Tianrong, CHEN Xingying, LIAO Yingchen, et al. The maximum power supply capability calculation based on the actual load characteristics[C] // 2013 IEEE International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), 2013, Xi'an, China: 1-4.
- [21] SZYPOWSKI M, SIEWIERSKI F, WEDZIK A. Optimization of energy-supply structure in residential premises using mixed-integer linear programming[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1368-1378.
- [22] 索瑞鸿, 宋依群. 计及负荷规模效应的售电公司决策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 95-102.
- SUO Ruihong, SONG Yiqun. Decision-making study of electricity retailers considering the economies of scale[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 95-102.
- [23] 章禹, 何迪, 曹煜, 等. 基于灵敏度分析的配电网供电能力评估方法[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 89-95.
- ZHANG Yu, HE Di, CAO Yu, et al. Evaluation method of power supply capacity of distribution network based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 89-95.
- [24] 王佳佳, 吕林, 刘俊勇, 等. 基于改进分层前推回代法的含分布发电单元的配电网重构[J]. 电网技术, 2017, 34(9): 60-64.
- WANG Jiajia, LÜ Lin, LIU Junyong, et al. Distribution network reconfiguration based on distributed power generation unit with improved layered forward pushback method[J]. Power System Technology, 2017, 34(9): 60-64.

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-08-29

作者简介:

白浩(1987—),男,工程师,博士,研究方向为智能配电网和人工智能应用等。E-mail: baihao@csg.cn

(编辑 张爱琴)