

# 基于线性化最优潮流的电网可用输电能力计算

孙鑫<sup>1</sup>, 饶宇飞<sup>1</sup>, 肖浩<sup>2</sup>, 李朝晖<sup>1</sup>, 阮冲<sup>1</sup>, 滕卫军<sup>1</sup>, 谷青发<sup>1</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 可用输电能力(ATC)是评价互联电网运行安全稳定裕度的重要测度指标。针对交流最优潮流(OPF)模型计算ATC时在收敛性方面的不足,提出一种计及电压和网损的线性潮流方程,在此基础上构造用于ATC计算的OPF计算模型,并通过先估计网损、再求解优化问题的2步求解策略得到ATC的计算结果。IEEE 39节点系统的算例分析验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 可用输电能力; 最优潮流; 潮流方程线性化; 网损估计; 输电网

**中图分类号:** TM 711

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202009013

## 0 引言

可用输电能力(ATC, Available Transfer Capability)指在不引发安全稳定问题的条件下电网中剩余的功率传输容量<sup>[1]</sup>。ATC近似衡量了电网运行点距离其安全稳定边界的距离,是电力系统调度运行人员监测系统运行状态和电力市场参与各方制定交易合同的重要参考信息;在含新能源并网电力系统中,包括ATC在内的电网输电能力指标也是量化电网新能源承载能力的必要边界条件<sup>[2-3]</sup>。ATC的快速和准确计算意义重大且需求迫切。

现有研究提出包括线性分布因子法、连续潮流法、重复潮流法和最优潮流(OPF, Optimal Power Flow)法等在内的多种ATC计算方法<sup>[4]</sup>。其中,OPF法<sup>[5-6]</sup>将ATC计算表示成一个以最大化区域间或输电通道上的传输功率为目标函数、以电网潮流平衡和安全稳定判据为约束条件的数学优化问题。通过求解OPF优化问题,可以得到确定电网运行状态下的ATC。为了确保电网运行具有适度的灵活性,在ATC计算中需要考虑负荷预测误差、新能源出力预测误差等不确定性因素。在确定性OPF模型的基础上,通过结合蒙特卡洛模拟(MCS, Monte Carlo Simulation)等概率统计方法,可以得到概率ATC计算模型<sup>[7]</sup>;而通过在约束条件中引入随机变量,又可以得到随机规划ATC计算模型<sup>[8]</sup>。概率ATC计算和随机

规划ATC计算能够有效计及不确定性因素对电网输电能力的影响,给出兼顾电网运行安全性和经济性的ATC计算结果。

由于表征电网物理规律的潮流等式和不等式约束非凸、非线性,经典的OPF模型需要迭代求解。在应用于实际规模电力系统时计算量大,收敛性难以保证,且易于陷入局部最优解<sup>[9]</sup>。根据合理的假设条件将潮流模型近似线性化是克服该不足的有效手段<sup>[10]</sup>。直流OPF模型是一种最常见的线性OPF模型,其仅保留了有功功率和电压相角间的线性关系,能够在牺牲一定计算精度的条件下有效保证计算收敛性和稳健性,在机组组合、经济调度等电力系统优化问题中应用广泛<sup>[11]</sup>。但直流OPF法由于忽略了电压幅值、无功功率和支路电阻等因素,无法计及与电压、无功相关的约束条件,且对重载支路的有功功率近似误差较大,存在应用局限性<sup>[12]</sup>。

综上所述,针对现有方法的不足,本文在计及电压和网损的线性潮流方程的基础上,建立用于ATC计算的OPF模型,并且通过先预估网损、再求解优化问题的2步求解策略实现ATC的快速准确计算。IEEE 39节点系统中的算例分析验证了所提ATC计算方法的实施效果。

## 1 潮流方程线性化

在交流潮流中,电网中支路 $ij$ 的有功功率 $P_{ij}$ 可按下式计算:

$$P_{ij} = g_{ij}(V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) - b_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij} \quad (1)$$

其中, $V_i$ 和 $V_j$ 分别为节点 $i$ 和 $j$ 的电压幅值; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ , $\theta_i$ 和 $\theta_j$ 分别为节点 $i$ 和 $j$ 的电压相角; $g_{ij}$ 和 $b_{ij}$ 分别为支路 $ij$ 的电导和电纳。

为了线性化该支路功率表达式,即将 $P_{ij}$ 表示为 $V_i$ 、 $V_j$ 、 $\theta_i$ 和 $\theta_j$ 的线性函数,采用如下近似条件。

(1)支路两端电压相角差 $\theta_{ij}$ 通常不大,则三角函数项可通过 $\theta_{ij}=0$ 处的泰勒展开级数近似表示为:

收稿日期:2020-01-17;修回日期:2020-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907067);国家电网有限公司科技项目(电化学储能电站群在特高压交直流混联受端电网应用关键技术研究及示范)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907067) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research and Demonstration of Key Technologies for Application of Electrochemical Energy Storage Station in Receiving End of UHV AC/DC Hybrid Grid)

$$\sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij}, \cos \theta_{ij} \approx 1 - \theta_{ij}^2/2 \quad (2)$$

(2)将节点电压幅值的标幺值写成  $V_i=1+\delta V_i$  的形式,忽略电压偏差量  $\delta V_i$  的高阶无穷小量后,电压二次项可近似表示为:

$$\begin{cases} V_i^2 - V_i V_j = (1 + \delta V_i)(\delta V_i - \delta V_j) \approx V_i - V_j \\ V_i V_j = (1 + \delta V_i)(1 + \delta V_j) \approx 1 \end{cases} \quad (3)$$

联立式(1)–(3)即可得到支路  $ij$  有功功率的近似表达式为:

$$P_{ij} \approx g_{ij}(V_i - V_j) - b_{ij}\theta_{ij} + P_{ij,loss} \quad (4)$$

同理,可得到支路  $ij$  无功功率  $Q_{ij}$  的近似表达式为:

$$Q_{ij} \approx -b_{ij}(V_i - V_j) - g_{ij}\theta_{ij} + Q_{ij,loss} \quad (5)$$

其中,  $P_{ij,loss}$  和  $Q_{ij,loss}$  分别为分摊至支路上节点  $i$  侧的有功网损和无功网损,如式(6)所示。

$$P_{ij,loss} = g_{ij}\theta_{ij}^2/2, Q_{ij,loss} = -b_{ij}\theta_{ij}^2/2 \quad (6)$$

不难看出,在不计或已知支路损耗的条件下,式(4)和式(5)中的支路有功、无功功率与节点电压幅值、相角为线性函数关系。若进一步假设  $V_i=V_j=1$  p.u.、 $g_{ij}=0$ ,则上述潮流方程即转变为常规的直流潮流方程,仅描述支路有功功率和节点电压相角间的线性关系。

## 2 基于线性 OPF 的 ATC 计算

### 2.1 交流 OPF 计算模型

电网 ATC 计算是在给定的网架结构、开机方式、负荷功率、功率增长模式等运行参数以及安全约束条件下,确定电网在已有传输功率的基础上可以额外传输的最大功率。其中,电网的网架结构(包括元件参数、开断状态)和初始开机方式、负荷功率构成一个平衡的潮流解点,称为初始运行点。功率增长模式描述了不同区域内发电机群和负荷群的功率调整方式。从初始运行点开始,通过调整发电和负荷功率不断增加电网区域间的交换功率,直至有安全约束条件越限,得到电网的极限运行点。初始运行点和极限运行点下电网区域间交换功率的差值即为 ATC。当仅考虑静态安全约束对电网输电能力的限制时,该 ATC 计算过程可以表示成一个非线性优化问题,简述如下。

(1)目标函数。

$$\min f(P_G, Q_G, V, \theta) = \sum_{i \in S_E} (P_{Gi} - P_{Gi,0}) \quad (7)$$

其中,  $P_{Gi}$  和  $P_{Gi,0}$  分别为节点  $i$  上发电机  $G_i$  的有功出力及其初始值;  $S_E$  为送端待调整发电节点集合。各发电机的有功出力  $P_G$ 、无功出力  $Q_G$  以及各节点的电压幅值  $V$  和相角  $\theta$  共同构成优化问题的决策变量,记为  $\mathbf{x}=[P_G, Q_G, V, \theta]^T$ ,其初值  $\mathbf{x}_0$  与电网的初始运行点对应。

(2)约束条件。

a. 节点潮流平衡约束。

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $Q_{Gi}$  为发电机  $G_i$  的无功出力;  $P_{Di}$  和  $Q_{Di}$  分别为节点  $i$  上的有功和无功负荷;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵第  $i$  行第  $j$  列元素的实部和虚部;  $j \in i$  表示节点  $j$  与节点  $i$  相连。

b. 功率增长模式约束。

文献[13]中给出了4种常用的功率增长模式及各自的应用场景。本文采用在电网离线规划及准实时调度中“送端增加发电,受端减少发电”的模式,在数学上可表示为:

$$\begin{cases} P_{Gi,0} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} & i \in S_E \\ P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,0} & i \in S_I \\ P_{Gi} = P_{Gi,0} & i \notin S_E \cup S_I \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \quad \forall i \quad (10)$$

其中,  $P_{Gi,max}$ 、 $P_{Gi,min}$  和  $Q_{Gi,max}$ 、 $Q_{Gi,min}$  分别为发电机  $G_i$  的有功出力和无功出力的上、下限值;  $S_I$  为受端待调整发电节点集合。

在调整发电机出力时,还可要求各发电机按照预先设定的变化率增减出力,即:

$$P_{Gi} - P_{Gi,0} = \lambda T_{Gi} \quad i \in S_E \cup S_I \quad (11)$$

其中,  $\lambda$  为功率调整控制变量;  $T_{Gi}$  为发电机  $G_i$  的出力变化率,对于送端发电机其值为正,对于受端发电机其值为负。各发电机的出力变化率  $T_{Gi}$  可根据电网运行和调度的实际需求,综合安全性、经济性等多方面考虑合理设定<sup>[14]</sup>。联立约束条件式(9)和式(11),对各发电机有功出力的约束可以等价转换为对变量  $\lambda$  的约束。

c. 运行安全约束。

电网安全运行要求线路和变压器支路上的功率传输不过载,节点电压在规定范围内。因此,支路的有功功率应满足:

$$P_{ij} \leq P_{ij,max} \quad ij \in L \quad (12)$$

节点的电压幅值应满足:

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad \forall i \quad (13)$$

其中,  $P_{ij,max}$  为支路  $ij$  的有功功率传输限额;  $L$  为电网中所有支路的集合;  $V_{i,max}$  和  $V_{i,min}$  分别为节点电压  $V_i$  的上、下限值。

除式(12)、(13)的静态安全约束条件外,在 OPF 模型中还可计及暂态稳定约束对电网输电能力的影响,常用的做法包括:将描述暂态过程的微分方程差分为代数方程,以离散时间序列上的约束条件表达暂态稳定判据<sup>[15]</sup>;利用约束转换技术将暂态稳定约束条件转换为与时间变量无关的等价条件<sup>[16]</sup>;根

据系统运行状态修正支路传输功率极限,将暂态稳定约束转换为支路的有功功率约束<sup>[17]</sup>等。其中,采用暂态微分方程方法从数学上准确描述了系统的暂态过程,但也显著增大了优化模型的复杂程度和求解难度;近似方法虽然牺牲了一定的准确性,但是没有大幅增加优化模型的规模,适用于对暂态稳定要求宽松的应用场合。

### (3) 电网 ATC 的确定。

式(7)—(13)构成了用于 ATC 计算的交流 OPF 模型,其最优解  $\mathbf{x}^*$  即为电网的极限运行点。因此,电网的 ATC 可以表示为:

$$P_{\text{ATC}} = \sum_{ij \in T} P_{ij}(\mathbf{x}^*) - \sum_{ij \in T} P_{ij}(\mathbf{x}_0) \quad (14)$$

其中,  $P_{\text{ATC}}$  为电网的 ATC;  $T$  为构成区域间输电断面的支路集合;  $P_{ij}(\mathbf{x}_0)$  和  $P_{ij}(\mathbf{x}^*)$  分别为初始运行点和极限运行点下支路  $ij$  上的有功功率。

## 2.2 线性化 ATC 计算模型

在交流 OPF 模型中,以线性潮流方程,即式(4)—(6)替代交流潮流方程后,可以得到用于 ATC 计算的 OPF 模型,概括表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(\mathbf{P}_G, \mathbf{Q}_G, \mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{e}_G^T (\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_{G,0}) \\ \text{s.t. } \mathbf{P}_G - \mathbf{P}_D - \mathbf{P}_{\text{loss}} - \mathbf{G}\mathbf{V} + \mathbf{B}'\boldsymbol{\theta} = 0 \\ \mathbf{Q}_G - \mathbf{Q}_D - \mathbf{Q}_{\text{loss}} + \mathbf{B}\mathbf{V} + \mathbf{G}'\boldsymbol{\theta} = 0 \\ \mathbf{P}_G^{\min} \leq \mathbf{P}_G \leq \mathbf{P}_G^{\max} \\ \mathbf{Q}_G^{\min} \leq \mathbf{Q}_G \leq \mathbf{Q}_G^{\max} \\ \mathbf{P}_L^{\min} \leq \mathbf{P}_L = \mathbf{g}_L \mathbf{V} - \mathbf{b}_L \boldsymbol{\theta} + \mathbf{P}_{L,\text{loss}} \leq \mathbf{P}_L^{\max} \\ \mathbf{V}^{\min} \leq \mathbf{V} \leq \mathbf{V}^{\max} \end{array} \right. \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{P}_G$ 、 $\mathbf{P}_{G,0}$ 、 $\mathbf{Q}_G$ 、 $\mathbf{P}_D$ 、 $\mathbf{Q}_D$ 、 $\mathbf{V}$  和  $\boldsymbol{\theta}$  分别为由所有  $P_{Gi}$ 、 $P_{Gi,0}$ 、 $Q_{Gi}$ 、 $P_{Di}$ 、 $Q_{Di}$ 、 $V_i$  和  $\theta_i$  构成的  $n_b$  维列向量,  $n_b$  为电网节点数;  $\mathbf{P}_L$  和  $\mathbf{P}_{L,\text{loss}}$  分别为由所有  $P_{ij}$  和  $P_{ij,\text{loss}}$  构成的  $n_l$  维列向量,  $n_l$  为电网支路数;  $\mathbf{e}_G$  为  $n_b$  维单位系数列向量,与送端待调整发电机节点对应的元素取值为 1,其他元素取值为 0;  $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{B}$  分别为节点导纳矩阵的实部和虚部;  $\mathbf{G}'$  和  $\mathbf{B}'$  分别为忽略节点对地导纳后节点导纳矩阵的实部和虚部;  $\mathbf{g}_L$  和  $\mathbf{b}_L$  分别为由支路电导和电纳构成的系数矩阵;上标 max 和 min 分别表示相应约束条件的上、下限值;  $\mathbf{P}_{\text{loss}}$  和  $\mathbf{Q}_{\text{loss}}$  分别为由所有  $P_{\text{loss}i}$  和  $Q_{\text{loss}i}$  构成的  $n_b$  维列向量,  $P_{\text{loss}i}$  和  $Q_{\text{loss}i}$  为由支路损耗构成的节点等效注入功率,如式(16)所示。

$$P_{\text{loss}i} = \sum_{j \in i} P_{ij,\text{loss}}, \quad Q_{\text{loss}i} = \sum_{j \in i} Q_{ij,\text{loss}} \quad (16)$$

由式(6)可知,与电压相角差平方呈函数关系的网损  $P_{ij,\text{loss}}$  和  $Q_{ij,\text{loss}}$  是式(15) OPF 模型中仅存的非线性因素。但由于电压相角是优化问题的决策变量,在获得最优解前未知,因此支路损耗在求解优化问题前也无法准确获得。虽然忽略网损可以得到完全线性化的 OPF 模型,但会增加重载支路或电阻与电

抗比值较大支路的功率计算误差,从而降低 ATC 计算结果的可信性。

因此,本文提出先预估网损、再求解优化问题的 2 步计算策略:

步骤 1 首先根据直流 OPF 模型下的 ATC 计算结果得到极限运行点处的电压相角估计  $\theta_{dc}$ ;

步骤 2 由  $\theta_{dc}$  根据式(6)修正各支路的有功和无功损耗,然后再通过式(15)求解得到最终的 ATC 计算结果。

在上述策略中,通过估计电网极限运行点处的网损得到线性化的 ATC 计算模型。除此之外,现有研究还提出通过构建支路功率损耗的线性表达式来实现 OPF 线性化的处理方法。例如,文献[18]通过引入整数变量实现对支路功率损耗的分段线性化,但是其会显著增加优化问题的变量和约束数量;文献[19]借助已有潮流解点下的损耗分布因子得到支路功率损耗的线性表达式,但是当该潮流解点与最优潮流解点间距离较远时,误差较大。将支路功率损耗的线性化表达式代入式(15)同样可以得到线性化的 ATC 计算模型,本文不再赘述。

## 3 算例分析

采用标准的 IEEE 39 节点系统进行算例分析,系统接线如图 1 所示,系统线路阻抗、发电和负荷等基本参数见文献[20]。将该测试系统划分为送端区域 1 和受端区域 2,区域间的输电断面由支路 15-16 和 16-17 构成。在 MATLAB 内编制计算程序。

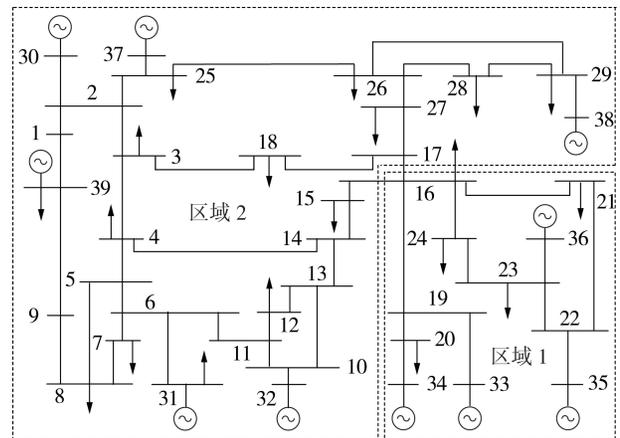


图 1 IEEE 39 节点系统接线和分区图

Fig.1 Wiring and partition diagram of IEEE 39-bus system

### 3.1 线性化潮流方程的准确性评估

按照式(11)同时增加送端发电功率以及减少受端发电功率,从而增加 2 个区域间的交换功率。其中,对送端节点 33—36 上的发电机,设定出力变化率  $T_{Gi}=1$ ;对受端节点 30、32、37 和 38 上的发电机,设定出力变化率  $T_{Gi}=-1$ 。

在不同的区域间交换功率水平下,分别执行交流潮流方程(AC)、直流潮流方程(DC)、不计网损的线性潮流方程(LN<sub>1</sub>)和计及网损的线性潮流方程(LN<sub>2</sub>)下的潮流计算。其中,在LN<sub>2</sub>中,通过相同发电机有功功率设定值下的直流潮流计算结果估计各支路的功率损耗。以AC计算结果为参照,计算由其他3种潮流计算方法得到的各支路有功功率、两端相角差和各节点电压幅值3种潮流量的绝对误差。3种潮流量绝对误差随功率调整控制变量 $\lambda$ 的变化曲线如图2所示(图中功率调整控制变量以及支路有功功率和节点电压幅值的绝对误差为标么值)。

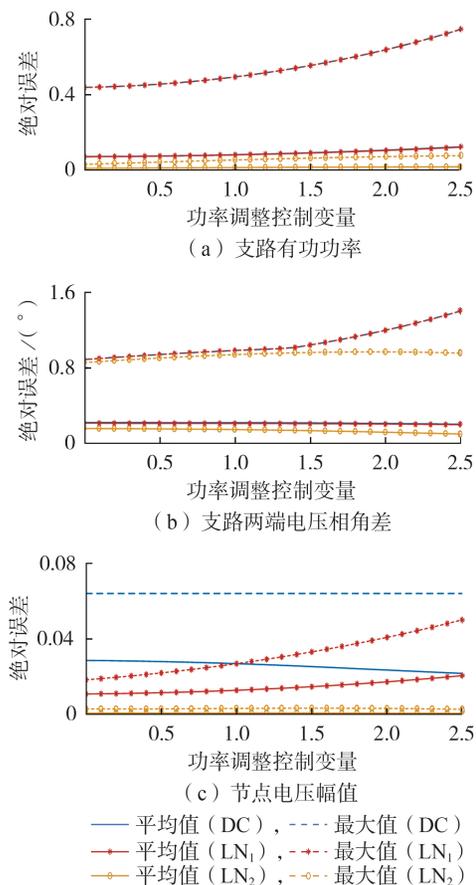


图2 不同潮流模型下计算结果的绝对误差

Fig.2 Absolute error of calculative results for different power flow models

图2(a)、(b)表明:当不计支路功率损耗时, LN<sub>1</sub>和DC下的支路有功功率和两端相角差计算准确度几乎相同,且随着区域间交换功率水平的增加,计算误差呈现增大的趋势。这是因为当区域间交换功率较大时,电网中部分支路上的传输功率增大,功率损耗也相应增大,在LN<sub>1</sub>和DC中忽略了支路的有功功率损耗,因而导致支路有功功率的计算误差增大。另一方面,当区域间交换功率不大时,测试系统中各支路传输功率的平均负载率较低。图2(c)表明:相较于DC中将所有节点的电压幅值均视为1 p.u., LN<sub>1</sub>

能够更加准确地估计得到各节点的电压幅值;但该优势随着区域间交换功率水平的增加而逐渐消失。

当计及支路功率损耗后,图2表明:相较于LN<sub>1</sub>和DC, LN<sub>2</sub>能够给出更加准确的支路有功功率和节点电压幅值计算结果,且其在计算准确度上的优势并不随着区域间交换功率水平的增加而降低。事实上, LN<sub>2</sub>相较于LN<sub>1</sub>在潮流计算结果准确度上的提高,得益于由直流潮流计算结果 $\theta_{dc}$ 能够较为准确地估计得到支路功率损耗。当 $\lambda=0$ 和 $\lambda=2.5$ 时,以AC下的支路功率损耗计算结果为参照,由 $\theta_{dc}$ 根据式(6)估计得到的各支路功率损耗误差如图3所示(图中绝对误差均为标么值)。图中结果表明:支路有功功率损耗绝对误差最大值不超过 $1.5 \times 10^{-4}$  p.u., 无功功率损耗绝对误差最大值不超过 $3 \times 10^{-3}$  p.u.。

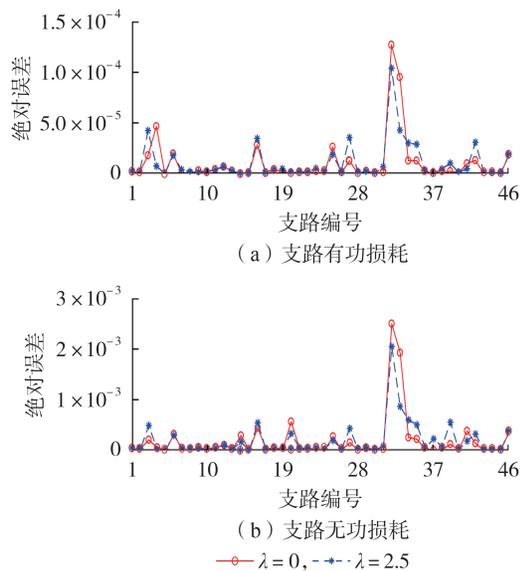


图3 支路功率损耗绝对误差

Fig.3 Absolute error of branch power loss

上述算例分析结果验证了本文所提线性潮流方程的有效性。在不计支路功率损耗的条件下,由线性潮流方程能求解得到和DC相同精度的支路有功功率计算结果,且能更准确地估计节点电压幅值;在计及支路功率损耗后,由线性潮流方程能求解得到更准确的潮流计算结果,且相较于AC计算,其只需2次求解线性方程组,避免了非线性方程的迭代求解。

### 3.2 基于线性OPF的ATC计算结果评估

以测试系统原始基础数据下的潮流计算解点作为ATC计算的初始运行点,节点16侧的断面功率为494.58 MW。增加送端节点33—36上的发电机有功出力,同时减少受端节点30、32、37和38上的发电机有功出力,计算2个区域间的ATC。为了验证本文ATC计算方法的有效性,对比本文方法与交流OPF法、直流OPF法的计算结果,如表1所示。

表1 3种方法的ATC计算结果

Table 1 ATC calculative results of three methods

方法	$P_{ATC} / \text{MW}$	越限约束	计算耗时 / s
本文方法	321.99	支路16-21功率	0.23
交流OPF法	323.71	支路16-21功率	0.87
直流OPF法	337.14	支路16-21功率	0.15

在3种对比方法中,所采用的优化模型均将支路16-21的有功功率传输上限500 MW识别为制约电网输电能力的关键约束条件。在计算准确度上,本文方法与交流OPF法的ATC误差小于直流OPF法与交流OPF法的误差。此外,由于本文方法需多求解1次线性方程以获得各支路相角差的估计值,因此相较于直流OPF法增加了额外的计算耗时;交流OPF需进行12次迭代计算收敛于最优解,计算耗时最长。上述分析表明,本文方法在计算效率上优于交流OPF法,在计算准确度上优于直流OPF法。

由于本文方法和直流OPF法在建立OPF优化模型时均对潮流方程进行了一定程度的近似化处理,因而在描述电网的潮流特性时必然存在近似误差。为了验证本文方法和直流OPF法ATC计算结果的可行性,在OPF最优解,即电网的极限运行点处,执行交流潮流计算校验各约束条件的越限情况。其中,在本文方法中,分别采用 $LN_1$ 和 $LN_2$ 构造OPF模型进行ATC计算。采用DC、 $LN_1$ 和 $LN_2$ 这3种方法,支路16-21有功功率的交流潮流校验结果分别为493.33、493.22、499.81 MW,且不存在其他约束条件越限的情况。图4(a)、(b)分别给出了各方法中46条支路的有功功率和29个非发电机节点的电压幅值的OPF最优解与交流潮流校验结果之间绝对误差(图中绝对误差均为标么值)。

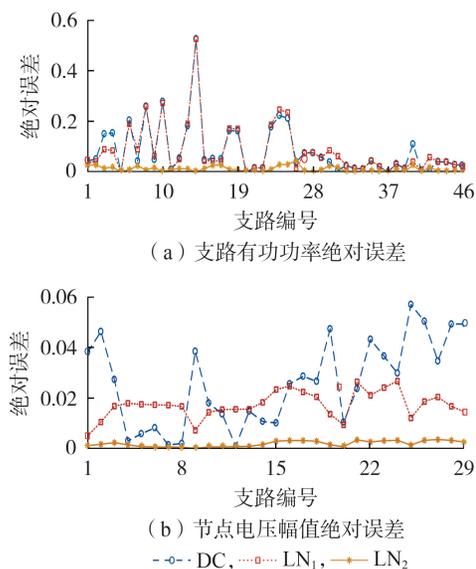


图4 支路有功功率和节点电压幅值的绝对误差  
Fig.4 Absolute error of branch active power and node voltage magnitude

图4表明: $LN_1$ 构造的OPF模型可以得到和直流OPF模型相似准确度的支路有功功率计算结果,但是却可以给出更高准确度的节点电压计算结果;通过支路功率损耗估计, $LN_2$ 构造的OPF模型进一步提高了线性OPF模型对电网潮流特征的近似能力,在3种对比OPF模型中具有最高的准确度,以交流潮流校验结果为参照,其支路有功功率和节点电压幅值标么值的绝对误差最大值分别为0.045 p.u.和0.0036 p.u.。

上述算例分析结果验证了本文ATC计算方法的有效性,计及电压和网损的线性潮流方程能够更准确地近似交流潮流方程下的电网潮流特征,通过在其基础上构造的OPF计算模型能够实现电网ATC的快速、准确求解。

#### 4 结论

本文提出一种基于线性OPF的ATC计算模型和求解方法,能够计及静态安全约束条件对电网输电能力的影响。相较于采用交流OPF模型的ATC计算方法,本文方法既在原理上保证了计算收敛性,又在牺牲较小准确度的条件下提高了计算速度。相较于采用直流OPF模型的ATC计算方法,本文方法能够计及电压对电网潮流的影响,同时也提高了计算准确度。算例分析中多种方法的对比,验证了本文所提模型与方法的正确性和有效性。在概率ATC计算等需要大量次重复求解不同运行状态下电网ATC的电力系统分析计算问题中,应用本文方法有望极大提高计算效率,下一步将对此展开研究。

#### 参考文献:

- [1] North American Electricity Reliability Council. Available transfer capability definition and determination[R]. Princeton, New Jersey, USA: North American Electricity Reliability Council, 1996.
- [2] 丁心海,王先甲,黄涌,等.华中电网省间联络线输电能力的电力市场适应性研究[J].电网技术,2008,32(1):56-60.  
DING Xinhai, WANG Xianjia, HUANG Yong, et al. Research on adaptability of transmission capacity of trans-provincial tie-lines inside Central China Power Grid to electricity market [J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 56-60.
- [3] 李国庆,刘玢,陈厚合.大规模风电并网系统容量效益裕度计算模型研究[J].电力自动化设备,2016,36(7):1-6,14.  
LI Guoqing, LIU Bin, CHEN Houhe. CBM calculation model for power system with large-scale wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 1-6, 14.
- [4] 罗钢.电网可用输电能力的计算方法研究[D].武汉:华中科技大学,2014.  
LUO Gang. Research on calculation methods of available transfer capability in power grids [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [5] 汪峰,白晓民.基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J].中国电机工程学报,2002,22(11):35-40.  
WANG Feng, BAI Xiaomin. OPF based transfer capability calculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 35-40.

- [6] ZHANG X M, SONG Y H, LU Q, et al. Dynamic Available Transfer Capability (ATC) evaluation by dynamic constrained optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2):1240-1242.
- [7] 谢敏,尹一江,杜余昕,等. 考虑复杂天气风险源的电力系统可用输电能力评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4):16-22.  
XIE Min, YIN Yijiang, DU Yuxin, et al. Assessment on available transfer capability considering complex weather risk sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):16-22.
- [8] 杨燕,文福拴,李力,等. 可用输电容量协调决策的多目标机会约束规模模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13):37-43.  
YANG Yan, WEN Fushuan, LI Li, et al. A coordinated model for available transfer capability decision-making employing multi-objective chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13):37-43.
- [9] 林哲,胡泽春,宋永华. 最优潮流问题的凸松弛技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13):3717-3727.  
LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Convex relaxation for optimal power flow problem: a recent review[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13):3717-3727.
- [10] YANG Z F, ZHONG H W, BOSE A, et al. A linearized OPF model with reactive power and voltage magnitude: a pathway to improve the MW-only DC OPF[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):1734-1745.
- [11] WANG H Y, MURILLOSANCHEZ C, ZIMMERMAN R D, et al. On computational issues of market-based optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3):1185-1193.
- [12] STOTT B, JARDIM J, ALSAC O. DC power flow revisited[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3):1290-1300.
- [13] 丁平,周孝信,严剑峰,等. 考虑合理安全原则的大型互联电网在线传输极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22):1-6.  
DING Ping, ZHOU Xiaoxin, YAN Jianfeng, et al. Calculation of online total transfer capability in bulk interconnected grid integrating rationality and security principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22):1-6.
- [14] 石东源,罗钢,陈金富,等. 考虑方向性和风险性的大型互联电网可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34):58-66.  
SHI Dongyuan, LUO Gang, CHEN Jinfu, et al. Fast calculation of available transfer capability in bulk interconnected grid considering directions and risks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34):58-66.
- [15] GAN D Q, THOMAS R J, ZIMMERMAN R D. Stability-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2):535-540.
- [16] CHEN L, TAKA Y, OKAMOTO H, et al. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(3):327-339.
- [17] 杨帮宇,彭建春,何禹清. 功率圆确定稳定约束的可用输电能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34):66-71.  
YANG Bangyu, PENG Jianchun, HE Yuqing. A novel algorithm for calculating available transfer capability using power-circle determine stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34):66-71.
- [18] ZHANG H, HEYDT G T, VITTAL V, et al. An improved network model for transmission expansion planning considering reactive power and network losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3471-3479.
- [19] YANG Z F, ZHONG H W, BOSE A, et al. A linearized OPF model with reactive power and voltage magnitude: a pathway to improve the MW-only DC OPF[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):1734-1745.
- [20] Illinois Center for a Smarter Electric Grid. Literature-based power flow test cases: IEEE 39-bus system[EB/OL]. [2019-11-05]. <http://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/>.

#### 作者简介:



孙 鑫

孙 鑫(1990—),男,河南内黄人,工程师,博士,研究方向为电力系统分析计算、新能源和储能运行等(E-mail:xsu-nee@foxmail.com);

饶宇飞(1984—),男,河南郑州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析(E-mail:ryf326@163.com)。

(编辑 王锦秀)

## Available transfer capability calculation based on linearized optimal power flow

SUN Xin<sup>1</sup>, RAO Yufei<sup>1</sup>, XIAO Hao<sup>2</sup>, LI Zhaohui<sup>1</sup>, RUAN Chong<sup>1</sup>, TENG Weijun<sup>1</sup>, GU Qingfa<sup>1</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** ATC (Available Transfer Capability) is an important measurement index for assessing the operation security and stability margins of interconnected power systems. Aiming at the shortage of AC OPF (Optimal Power Flow) model in the aspect of convergence when calculating ATC, a linear power flow equation is proposed considering the voltage and power loss, on this basis, an OPF calculation model for ATC calculation is built, and the calculation results of ATC is obtained by two-step solving strategy of firstly estimating power loss and then solving the optimization problem. The case analysis of IEEE 39-bus system verifies the correctness and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** available transfer capability; optimal power flow; linearization of power flow equations; power loss estimation; transmission network