

基于线路修正传输极限和交流分布因子的 ATC 快速计算

孙荣富¹, 宋永华², 张昌华³, 孙元章¹, 李国杰¹

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. Brunel 大学 电子与计算机工程系, 伦敦; 3. 中国科学院 自动化所, 北京 100080)

摘要: 根据现有在线应用线性分布因子法计算可用传输容量(ATC)的缺点, 利用复数潮流考虑无功的影响, 根据 π 型等值线路复数潮流轨迹和视在功率极限轨迹的交点得出计及无功的传输极限; 根据基态雅可比矩阵, 计算传输合同对节点电压的影响, 再利用 π 型等值线路中线路潮流对两端节点电压的偏导, 计算节点电压变化对线路潮流的影响; 采用线路故障的节点功率注入模拟方法, 得到考虑基态潮流的交流功率传输分布因子。并根据 flowgate 的剩余容量和分布因子计算 ATC。定义 flowgate 为线路热极限和线路故障 2 种情况, 分别计算基态潮流和考虑线路紧急故障情况下的区域间 ATC 值, 并与线性分布因子法和重复潮流法(RPF)计算结果相比较。IEEE 30 节点系统计算结果表明, 该算法快速准确, 满足在线计算和分析要求。

关键词: 可用传输容量; 线性分布因子; 重复潮流; 复数潮流; 交流功率传输分布因子

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0001-05

0 引言

在电力市场环境下, 可用传输容量 ATC (Available Transfer Capability) 是反映输电设备可用于能量交易的剩余容量的重要指标。为保证电网的安全运行、减少阻塞的发生, 电网公司必须向交易者提供电网使用状况的详细信息, 这一功能可以通过在电力市场实时信息系统中发布电网的 ATC 指标实现。北美电力系统在 20 世纪 90 年代提出了 ATC 的详细定义^[1]: ATC 是在已有的协议基础上, 在实际输电网络中可以用于进一步商业活动的富余输电能力。

计算 ATC 的方法有多种, 在不考虑动态安全约束时, 常用的计及静态运行约束的 ATC 计算方法包括线性分布因子法^[2-3]、重复潮流法(RPF)^[4-5]、连续潮流法(CPF)^[6-7]和最优潮流法(OPF)^[8-11]。

线性分布因子法可计及支路过负荷约束, PowerWorld 软件^①算法简单, 计算速度快, 目前得到较为广泛的应用, 但精度较差; 文献[2]提出的支路停运分布因子(LODF)和发电机停运分布因子(GODF), 建立在直流潮流模型的基础上, 忽略了线路电阻和系统无功问题, 在无功支持不足的情况下误差较大。

CPF 法能够计及无功-电压问题以及支路过负荷、节点电压限值和电压崩溃等约束, 但功率增长只沿着给定的方向变化, 不做优化, 因而所得结果可能偏保守。OPF 法通常以指定的网络断面流过潮流或某一组发电节点和负荷节点交易量最大为目标函

数, 可以方便地计及各种物理约束, 计算结果可以实现交易功率在送端、受端节点集上的分布优化, 使 ATC 最大, 该方法有良好的计算精度; 但耗时较长, 因而相对 CPF 法而言, 在大规模电力系统中应用较少, 主要作为离线分析的工具。此外, 当要考虑机组非计划停机、天气变化以及用户行为方式等不可精确预测的变化对 ATC 的影响时, 可以借助于各种随机算法。上述方法需要在每种故障情况下多次计算交流潮流, 无法满足实时计算要求。因此, 如何在保证计算精度的前提下快速求解 ATC 是目前亟待解决的问题。

在此, 首先介绍了 flowgate 的定义, 并以目前广泛应用的线性分布因子法计算 ATC 为基础, 提出一种基于线路复数潮流和交流分布因子(ACPTDF)的 ATC 在线计算方法: 在计算线路传输功率极限时, 利用复数潮流考虑无功的影响, 根据 π 型等值线路复数潮流轨迹和视在功率极限轨迹的交点得出计及无功的传输极限, 进而修正线路传输极限; 同时根据基态和紧急状态下潮流方程提出了一种基于交流功率传输分布因子 ATC 计算方法。ACPTDF 描述了在指定的送、受端之间多传输单位有功功率时各支路潮流的变化, 与直流潮流模型不同的是可根据当前运行状况下的雅可比矩阵, 计算传输合同对节点电压的影响, 再根据 π 型等值线路中线路潮流对两端节点电压的偏导, 计算节点电压变化对线路潮流的影响, 并采用了线路故障的节点功率注入模拟方

① PowerWorld Corporation. The manual of powerworld simulator software. PowerWorld Corporation, 2004.

法,从而得到考虑基态潮流的交流功率传输分布因子。因此,根据修正后的热极限裕度和交流分布因子,可计算出区域间断面的 ATC,既克服了传统的线性分布因子法无法计及无功影响的缺点,又能够快速求出较为准确的 ATC 值,对于当前 ATC 在线计算分析具有积极的意义。对 IEEE 30 节点系统算例分析可知,该算法在基态潮流和考虑线路紧急故障情况下双边和多边交易的 ATC 计算值较线性分布因子法更为准确,与 RPF 计算值相近,且计算时间满足在线要求。

1 基本概念

根据 FERC 的 ATC 计算报告,flowgate^[3]的定义是指约束 ATC 值的传输元件(如输电线路、变压器等)和相关线路故障紧急情况(contingency)。在此只考虑线路热极限和线路故障。AFC 是指在现有的协议基础上,实际输电系统中每个 flowgate 可以用于进一步商业活动的富余物理输电能力。它与 ATC 的关系如下:

$$\text{AFC}(f) = \text{DF}(t, f) * \text{ATC}(t, f) \quad (1)$$

式中 t 为预设的送、受端间的传输通道; $\text{ATC}(t, f)$ 为传输通道 t 上受限于 flowgate f 的最大传输容量; $\text{DF}(t, f)$ 为影响 ATC 的 flowgate f 的分布因子,此处对应于正常情况下的功率传输分布因子(ACPTDF)和线路故障时的故障影响分布因子(LOPTDF)。

为了计算在正常和故障情况下线路潮流极限约束的静态 ATC 值,除了交流功率传输分布因子外,还扩展了线路故障下分布因子的概念。

1.1 ACPTDF

假设一个区域 (m, n) 间输电合同 T_{mn} , 线路 L (i, j 间)承担一部分的传输合同功率 P_{ij} 。当传输合同改变 ΔT_{mn} 时,在线路 L 上传输功率改变 ΔP_{ij} , 则功率传输分布因子可以描述为

$$\text{ACPTDF}_{ij-mn} = \Delta P_{ij} / \Delta T_{mn} \quad (2)$$

1.2 LOPTDF

同样,假设线路 L' (r, s 间)故障断开,故障前线路 L' 传输功率 P_{rs}^0 , 故障后线路 L 的潮流为 P_{ij-rs} , 在线路故障情况下,若传输合同改变 ΔT_{mn} 时,线路故障功率传输分布因子可以描述为

$$\text{LOPTDF}_{ij-mn,rs} = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta T_{mn}} + \frac{\Delta P_{rs}}{\Delta T_{mn}} \frac{P_{ij-rs} - P_{ij}^0}{P_{rs}^0} \quad (3)$$

2 考虑无功的修正传输极限

输电线路 π 型等值模型^[13]如图 1 所示。

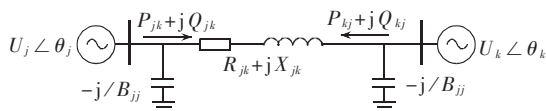


图 1 π 型等值线路 jk

Fig.1 π -model transmission line jk

从 j 到 k 的视在功率可表示为

$$\begin{aligned} S_{jk} &= P_{jk} + jQ_{jk} = U_j^2 G_{jk} - \\ &U_j U_k Y_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk}) + \\ &j[-U_j^2 B_{jj} - U_j^2 B_{jk} - \\ &U_j U_k Y_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k + \alpha_{jk})] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 Y_{jk} 为导纳矩阵元素, α_{jk} 为其对应相角; U_j 、 U_k 、 θ_j 、 θ_k 为节点电压幅值和相角。

从而得到:

$$(P_{jk} - U_j^2 G_{jk})^2 + (Q_{jk} + U_j^2 B_{jj} + U_j^2 B_{jk})^2 = (U_j U_k Y_{jk})^2 \quad (5)$$

当传输功率增加时,输电线路的潮流发生改变,但是在 $P_{jk} - Q_{jk}$ 坐标系中,所有可行的运行状况均位于式(5)表达的圆形轨迹上。另一方面,线路的额定视在功率可以用半径为线路热极限 $S_{jk}^{\max}$ 的圆形轨迹表示如下:

$$P_{jk}^2 + Q_{jk}^2 = (S_{jk}^{\max})^2 \quad (6)$$

因此,运行轨迹和热极限所表示的轨迹在 $P_{jk} - Q_{jk}$ 坐标系中如图 2 所示。

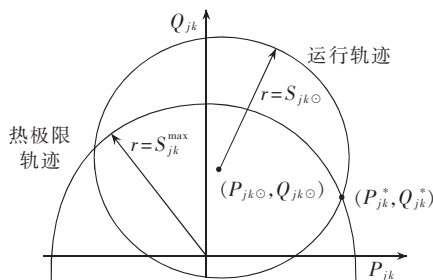


图 2 线路运行轨迹和热极限 $P - Q$ 分布

Fig.2 Transmission line operating trajectory and $P - Q$ distribution of thermal limit

两者交点为 (P_{jk}^*, Q_{jk}^*) , P_{jk}^* 为考虑无功分量的实际线路有功潮流极限值,因此,用其修正分布因子计算中的 $P_{jk}^{\max}$ 。

3 分布因子的计算流程

极坐标系下根据 NRLF 可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = S_T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 J 为雅可比矩阵,其逆阵 S_T 定义为灵敏度矩阵。

3.1 ACPTDF 的计算

在基态负荷潮流下,当双边交易输电合同改变 ΔT_{mn} 时,根据交易功率分布向量 V ,求解式(7)右边向量:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = V \Delta T_{mn} \quad (8)$$

根据式(7)求得相应母线电压幅值和相角的变化量,然后根据 π 型等值线路潮流公式(4)的偏微分得出支路的传输功率变化 ΔP_{ij} 如式(9)中所示。其中假设 r 为系统中发电机节点的个数, S' 为灵敏度矩阵 S_T 的部分行列, H' 为 π 型等值线路中线路潮流对两端节点电压的偏导。从而由式(9)可求出 ACPTDF。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial U_j} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial U_j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_{n \times 1}} & \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_{(n-r) \times 1}} \\ \frac{\partial \theta_j}{\partial P_{n \times 1}} & \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_{(n-r) \times 1}} \\ \frac{\partial U_i}{\partial P_{n \times 1}} & \frac{\partial U_i}{\partial Q_{(n-r) \times 1}} \\ \frac{\partial U_j}{\partial P_{n \times 1}} & \frac{\partial U_j}{\partial Q_{(n-r) \times 1}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}_{(2n-r) \times 1} = H' S' V \Delta T_{mn} \quad (9)$$

从表达式可知,所提出的计算分布因子的算法有如下优点:

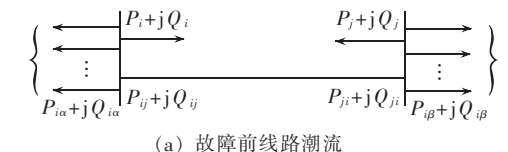
a. 根据节点注入功率对节点电压影响的灵敏度矩阵和 π 型等值线路中线路潮流对两端节点电压的偏导,可以快速计算输电合同对于每个支路潮流的影响;

b. 相比较常规的线性灵敏度因子法,该算法可以考虑节点注入无功对线路潮流的影响,从而可以把受端负荷功率增长表示为等功率因数的方式,计算结果更趋于准确。

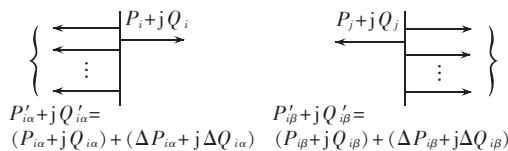
3.2 LOPTDF 的计算

通常,网络拓扑的变化会引起节点导纳矩阵的变化,因而在计算线路故障分布因子时需要重新计算雅可比矩阵。

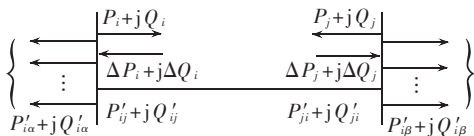
在此利用假想注入模型法^[12-13],如图 3 所示,在母线 i, j 上分别接入假想发电机以注入功率 $\Delta P_i + j \Delta Q_i$ 和 $\Delta P_j + j \Delta Q_j$,同时,假设线路 ij 保持连接状态,并假设线路潮流与故障前等值,因此节点导纳矩阵可通过假想注入模型保持不变。



(a) 故障前线路潮流



(b) 故障后线路潮流



(c) 故障后等效线路潮流

图 3 输电线路断开模拟

Fig.3 Line outage simulation

图 3(a)表示故障前正常运行状态节点 i, j 的注入功率分别为 $P_i + jQ_i, P_j + jQ_j$, 线路潮流如图所示。图 3(b)表示故障后线路断开,线路潮流变为 $P'_{i\alpha} + jQ'_{i\alpha}$ 和 $P'_{j\beta} + jQ'_{j\beta}$ 。图 3(c)用等效注入功率 $\Delta P_i + j\Delta Q_i$

和 $\Delta P_j + j\Delta Q_j$ 模拟故障后潮流的改变 $\Delta P_{i\alpha} + j\Delta Q_{i\alpha}$ 和 $\Delta P_{j\beta} + j\Delta Q_{j\beta}$, 此时支路 ij 保持连接状态,且流过的功率变为 $P'_{ij} + jQ'_{ij}$ 和 $P'_{ji} + jQ'_{ji}$ 。显然,线路潮流与节点注入之间的关系有

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{i\alpha} \\ \Delta Q_{i\alpha} \\ \Delta P_{j\beta} \\ \Delta Q_{j\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i\alpha}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{i\alpha}}{\partial U} \\ \frac{\partial Q_{i\alpha}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{i\alpha}}{\partial U} \\ \frac{\partial P_{j\beta}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{j\beta}}{\partial U} \\ \frac{\partial Q_{j\beta}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{j\beta}}{\partial U} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta^T}{\partial P_i} & \frac{\partial \theta^T}{\partial Q_i} & \frac{\partial \theta^T}{\partial P_j} & \frac{\partial \theta^T}{\partial Q_j} \\ \frac{\partial U^T}{\partial P_i} & \frac{\partial U^T}{\partial Q_i} & \frac{\partial U^T}{\partial P_j} & \frac{\partial U^T}{\partial Q_j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} = H'' S'' \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, S'' 表征状态变量关于节点注入功率的灵敏度函数。 H'' 和 S'' 的计算方法与式(9)类似。在已知线路故障支路潮流后,由线路故障后的潮流变化,根据式(11)求解等效注入功率 $\Delta P_i + j\Delta Q_i$ 和 $\Delta P_j + j\Delta Q_j$,以模拟支路故障对其他线路潮流的影响。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} = [H'' S'']^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{i\alpha} \\ \Delta Q_{i\alpha} \\ \Delta P_{j\beta} \\ \Delta Q_{j\beta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

同时在故障情况下的传输合同可以根据式(8)表述为节点注入功率的变化。这 2 项叠加可以得到支路故障情况下传输合同所等效的综合节点注入功率:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + [0 \cdots \Delta P_i \cdots 0 \cdots \Delta P_j \cdots 0 \cdots \Delta Q_i \cdots 0 \cdots \Delta Q_j]^T \quad (12)$$

这样等效的优点是由于线路 rs 仍然存在,不会引起雅可比矩阵的变化。所以可根据式(7)求得相应母线电压幅值和相角的变化量,然后根据潮流方程得出支路的传输功率变化 ΔP_{ij} , 根据每条支路的传输功率变化量和所有节点电压幅值变化量,可求出 LOPTDF。

4 ATC 算法

根据修正传输极限和交流功率传输分布因子,可以快速计算线路热极限约束的 ATC 值。

4.1 基态情况下 ATC 计算

在基态情况下,类似于线性分布因子 PTDF, flowgate 定义为限制 ATC 值的传输元件,在此只考虑线路热极限。对于每个 flowgate 线路 ij ,受限于其热极限的 ATC 可表示为

$$ATC(mn, ij) = \frac{P_{ij}^* - P_{ij}^0}{ACPTDF_{ij-mn}} \quad (13)$$

式中 P_{ij}^* 为考虑无功的线路潮流极限; P_{ij}^0 为在

双边输电合同 T_{mn} 下,线路 ij 上的基态潮流;
 $ATC(t, f)$ 为传输功率方向 t 上受制于 flowgate f
 的 ATC 值。

4.2 线路故障情况下 ATC 计算

在线路故障时,flowgate 定义为限制 ATC 值的
 线路故障紧急情况。此时 ATC 的值可由 ACPTDF
 和线路故障分布因子综合求解。假设故障线路 rs ,
 考虑线路热极限,线路 ij 决定的 ATC 可表示为

$$ATC_{ij}(mn,rs)=\frac{P_{ij}^*-P_{ij}^0}{LOPTDF_{ij-mn,rs}} \quad (14)$$

因此,根据 ATC 定义:

$$ATC_{mn}=\min\{ATC(mn,ij),ATC_{ij}(mn,rs), \\ ij\in N_L,rs\in N_0\} \quad (15)$$

式中 N_L 为所有 flowgate 线路总数; N_0 为 flowgate
 线路故障紧急情况总数。

5 算例

根据所提出的模型和计算方法,对 IEEE 30 节点
 系统分别进行基态潮流和考虑线路紧急故障情况下的
 双边交易的 ATC 值,并与常规线性分布因子法和
 重复潮流法计算结果进行比较。

本算例的 IEEE 30 节点系统共有 6 台发电机,41
 条线路,3 个区域。每个区域有 2 台发电机,3 个区
 域之间存在 7 条互联线路。网络结构如图 4 所示。

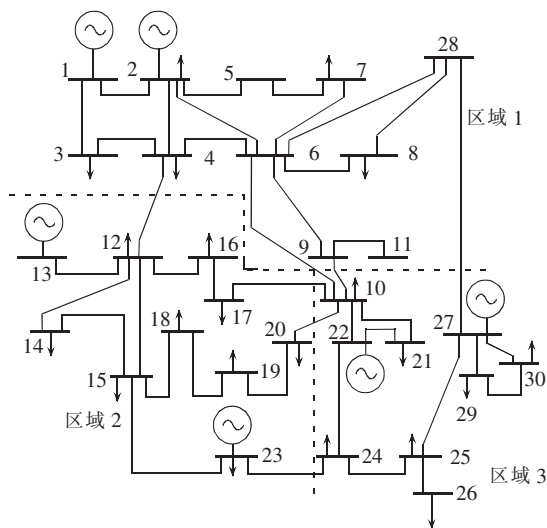


图 4 IEEE 30 节点系统
 Fig.4 IEEE 30-node system

当进行双边交易时,只考虑送端发电机节点有功
 出力增加,受端负荷节点有功无功注入以等功率因数
 的方式增加。当考虑区域交易模式时,发电机节点
 的交易功率分布向量 V_p 与其有功出力裕度等比
 例;负荷节点交易功率分布向量 V_L 与当前运行状况
 负荷等比例。

首先得到计及无功影响的线路修正热极限,修
 正后热极限 $S^{\max}$,如图 5 中“ $\circ$ ”所示(N 为支路编
 号)。考虑 2 个双边交易 T_1 和 T_2 ,以及一个多边交

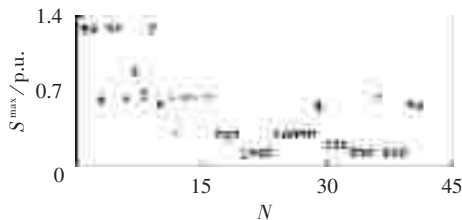


图 5 计及无功影响的线路修正热极限
 Fig.5 Corrected line thermal transfer limit
 considering impact of reactive power

T_3 ,送端节点 23 至受端节点 4 定义为双边交易 T_1 ,送
 端节点 22 至受端节点 8 定义为双边交易 T_2 ,多边交
 易则定义为送端节点 22、23 至受端节点 4、8 的传输
 合同。其计算结果如表 1 所示。

表 1 IEEE 30 节点基态双边交易 ATC 计算
 Tab.1 Calculative results of ATC for base-case
 bilateral transaction of IEEE 30-node system

交 易	线性分布因子法		RPF		本文算法	
	ATC/ MW	越限 支路	ATC/ MW	越限 支路	ATC/ MW	越限 支路
T_1	4.1923	6-8	39.515	6-8	34.583	6-8
T_2	26.3030	15-23	22.557	15-23	24.083	15-23
T_3	48.6360	15-23	41.811	15-23	42.084	15-23

考虑线路故障停运的情况下,利用 LOPTDF 计
 算区域间交易的 ATC 值,其结果如表 2 所示。

表 2 考虑故障支路情况下的区域交易 ATC
 Tab.2 Calculative results of ATC for line
 outage transaction between areas

区域对	flowgate	ATC/MW	
		RPF	本文算法
1-2	4-12	48.254	42.016
2-1	4-12	25.104	21.862
1-3	10-21	104.530	95.078
3-1	28-27	57.689	55.877
2-3	23-24	25.912	23.891
3-2	10-20	32.767	22.962

分析结果可得到 4 点结论。

a. 由图 5 可知,修正后的线路传输极限考虑了
 无功因素的影响,比视在功率极限有所减小;而常规
 的线性分布因子法计算 ATC 时结果偏乐观,所以修
 正值减小了线路热极限裕度,从而使结果更趋近真
 实值。

b. 本文算法中考虑无功潮流体现在 2 个方面:
 除了线路热极限的修正,相比较常规的线性灵敏度
 因子法,本文算法还可以考虑节点注入无功对线路潮
 流的影响,从而可以把受端负荷功率增长表示为等
 功率因数的方式,计算结果更趋于准确。

c. 由表 1 可知,在基态运行状况下,不考虑线路
 停运时,以 RPF 法结果为基准,本文算法的 ATC 计
 算结果远比线性分布因子法更接近真实值,且区域
 间输电增长过程中受限支路与 RPF 法基本一致。

d. 由表 2 可知,在考虑线路停运故障时,仅需
 要计算灵敏度矩阵 S_T ,而且在各种支路故障情况下,

S_T 保持不变,无需重复计算,满足在线计算的要求,且结果较为准确。在进行故障计算之前,不遍历所有支路故障,根据 PTDF 筛选出对 ATC 影响较大的关键线路,这样可以加快计算速度。

6 结论

根据 AFC 和 ATC 的关系,考虑线路热极限和线路故障 2 种 flowgate 的情况下,提出了一种利用修正传输极限和交流功率传输分布因子快速求解 ATC 的计算方案,并得到了以下主要结论:

a. 基于直流潮流模型的线性分布因子法计算 ATC 的值偏乐观,考虑线路无功的修正传输极限减少了传输裕度,更趋于真实值;

b. 交流功率传输分布因子可以考虑节点注入无功对线路潮流的影响,因此可以考虑等功率因数的负荷增长方式,计算结果表明,结果更准确;

c. 对于线路故障情况,采用等效功率注入模拟,计算结果表明线路故障情况下快速计算的可行性。

目前,我国正在建设东北、华北、华东、华中、西北和南方六大区域电力市场,计算各大区域间的 ATC 具有实际意义。所提出的基于线路修正传输极限和交流功率传输分布因子的 ATC 快速计算方法,满足准确在线评估的要求,但在考虑电压稳定、暂态稳定情况下的 ATC 快速计算方法还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Transmission Transfer Capability Task Force. Available transmission capability definitions and determination [C] // North American Electric Reliability Council. Princeton, New Jersey: [s.n.], 1996: 15-21.
- [2] EJEBE G C, WAIGHT J G, SANOTS - NIETO M, et al. Fast calculation of linear available transfer capability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 1112-1116.
- [3] North American Electric Reliability Council. Long - term AFC / ATC task force final report [EB / OL]. [2004 - 05 - 14]. ftp://www.nerc.com/pub/sys/all_updl/mc/ltatf/LTATF_Final_Report_Revised.pdf.
- [4] OU Yan, SINGH C. Assessment of available transfer capability and margins [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [5] GRAVENER M H, NWANKPA C. Available transfer capability and first order sensitivity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 512-518.
- [6] CHIANG H D, FUECK A, SHAH K S. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady - state stationary behavior due to load and generation variations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634.
- [7] 李国庆. 基于连续型方法的大型互联电力系统区域间输电能力的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1998.
LI Guo-qing. Study of transmission transfer capability of large scale interconnected power systems based on continuation method [D]. Tianjin: Tianjin University, 1998.
- [8] 潘雄, 徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 87-91.
PAN Xiong, XU Guo-yu. OPF based ATC calculation with static

voltage stability constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 87-91.

- [9] 王良缘, 吴政球, 傅海燕, 等. 电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 28-33.
WANG Liang-yuan, WU Zheng-qiu, FU Hai-yan, et al. Calculation of available transfer capability (ATC) taking into account transient stability constraints based on interior - point solution in electricity market [J]. Proceedings of the EPSA, 2004, 16(1): 28-33.
- [10] 孙景强, 房大中. 暂态稳定约束下极限传输能力的计算 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 21-25.
SUN Jing-qiang, FANG Da-zhong. Total transfer capability with transient stability constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 21-25.
- [11] 丁晓莺, 王锡凡. 最优潮流在电力市场环境下的最新发展 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 1-7.
DING Xiao-ying, WANG Xi-fan. Recent development of optimal power flow in power market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 1-7.
- [12] MAMANDUR K R C, BERG G J. Efficient simulation of line and transformer outages in power systems [J]. IEEE Trans Power App Syst, 1982, 101(10): 3733-3741.
- [13] HU Z, WANG Xi-fan. A probabilistic load flow method considering branch outages [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 507-514.
- [14] GRIJALVA S, SAUER P W, WEBER J D. Enhancement of linear ATC calculations by the incorporation of reactive power flows [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 619-624.
- [15] STAHLHUT J W, HEYDT G T. Stochastic-algebraic calculation of available transfer capability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 616-623.
- [16] OTHMAN M M, MOHAMED A, HUSSAIN A. Available transfer capability assessment using evolutionary programming based capacity benefit margin [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(33): 166-176.
- [17] RODRIGUES A B, da SILVA M G. Probabilistic assessment of available transfer capability based on monte carlo method with sequential simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 484-492.
- [18] OTHMAN M M, MOHAMED A, HUSSAIN A. Fast evaluation of available transfer capability using cubic - spline interpolation technique [J]. Electric Power Systems Research, 2005, 73(3): 335-342.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

孙荣富(1982-), 男, 江苏姜堰人, 博士研究生, 研究方向为电力市场及 ATC 的计算分析 (E-mail: srf05@mails.tsinghua.edu.cn);

宋永华(1964-), 男, 四川巴中人, IEEE Fellow, IEEE 高级会员, 主要研究方向为灵活交流输电系统的稳态和暂态分析与控制、电力系统商业化运营的理论与现代优化算法、电力系统非线性与自适应控制和智能故障诊断系统等;

张昌华(1975-), 男, 湖北恩施人, 博士研究生, 研究方向为电力市场;

孙元章(1954-), 男, 湖南岳阳人, 长江学者特聘教授, 博士研究生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统自动化、电力系统非线性控制理论与技术、FACTS 应用等;

李国杰(1965-), 男, 浙江温州人, 副教授, 从事电力系统分析与控制及新能源的研究工作。

(下转第 10 页 continued on page 10)

ATC calculation based on modified transfer limits and AC distribution factors

SUN Rong-fu¹, SONG Yong-hua², ZHANG Chang-hua³, SUN Yuan-zhang¹, LI Guo-jie¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Dept. of Electronic and Computer Engineering, Brunel University, London, U.K.;

3. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: To improve the linear distribution factor method of ATC (Available Transfer Capability) calculation, the complex flow is used to consider the influence of reactive power and the corrected transfer limit including reactive power is calculated according to the intersection point of the complex flow trajectory of π -model transmission line and the apparent power limit trajectory. The impact of transfer contracts on node voltages is evaluated according to base-case Jacobian matrix and the partial derivatives of line flows by node voltages are computed, the influences of node voltages on line flows are thus calculated. The AC power transfer distribution factors considering base-case power flows are achieved using the node power injection method for line outage simulation, according to which, as well as the remaining capacity of flowgate, ATC is calculated. The flowgate is defined for two conditions: line thermal limit and line outage, and the ATCs between areas are calculated respectively, which are compared with those calculated using linear distribution factor method and repeated power flow method. The calculative results for IEEE 30-node system show that, the proposed method is fast and accurate, meeting the requirements of online calculation and analysis.

Key words: available transfer capability; linear distribution factor; repeated power flow; complex flows; AC power transfer distribution factor