基于多支路开断和关键支路集的快速潮流转移识别

聂宏展，袁晓丹，张会强，王 菲

（东北电力大学电气工程学院，吉林 吉林 132012）

摘要：为快速识别实时潮流转移，基于直流潮流-补偿原理推导了用于快速预估多支路开断后潮流分布的支路开断分布因子(Line Tripping Distribution Factors，LTDF)的计算方法，结合改进的严重度函数，给出了用于评价支路受潮流转移影响程度的过载严重度指标和关键支路集的概念及其求解过程，对单支路或多支路开断同样适用，为后续减载控制策略缩小了分析范围。对 New-England 10 机 39 节点系统的算例分析表明，该方法可准确预估开断后潮流，快速有效识别受潮流转移影响严重支路，克服了以往仅用分布因子去评价支路受潮流转移影响程度的不确切性和漏选重要支路的不足，具备合理性、可行性及快速性。

关键词：潮流转移；直流潮流-补偿原理；支路开断分布因子；严重度指标；关键支路集

Rapid flow transferring identification based on multiple line tripping and key branch set

NIE Hong-zhan, YUAN Xiao-dan, ZHANG Hui-qiang, WANG Fei

（School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China）

Abstract: In order to quickly identify flow transferring in real time, line tripping distribution factors (LTDF) based on DC power flow and compensation principle is deduced to estimate the distribution of multi-line tripping power flow quickly, then combining with the improved severity function, the concepts and solving process of key branch set and overload risk indicator used to estimate impact of flow transferring are introduced in detail, which can apply to single line tripping and multi-line tripping equally and reduce analysis range of subsequent load shedding control strategies. The example analyses of 10-generator 39-bus New England System show that the method can estimate tripping power flow accurately, identify the branches severely affected by flow transferring quickly and efficiently, overcome the deficiency of using distribution factor to evaluate flow transferring degree and miss-selection of important branch, and has the rationality, feasibility and rapidity.

Key words: flow transferring; DC power flow and compensation principle; line tripping distribution factors; severity index; key branch set

中图分类号： TM71 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)17-0038-06

0 引言

相关研究显示，出现大范围停电的重要原因是：初始故障消除后引起潮流转移，导致系统其余支路尤其是与故障点密切相关的支路过载从而引起了后备保护连锁跳闸[1-3]。这时系统暂态过程已基本结束，经常采用静态方法去研究后续故障[4]。所以要防止出现连锁跳闸现象，其前提便是做好潮流转移的快速识别工作，其关键点主要有三个：一是探究快速实时的获取受潮流转移影响后各支路潮流的新算法；二是探索如何缩小受潮流转移影响支路的分析范围。原因在于，故障支路开断之后必然将导致网络潮流的再分配，但实际只有少数支路受影响较严重[5]；另外，考虑到经济性和实际可行性，对全网支路加以分析是不可行的；三是如何评判支路的过载程度，为后续采取减载措施奠定基础。

有关潮流转移识别方面的研究，很多专家学者进行了深入探索，如文献[6-7]将风险理论引入连锁过载事故的研究中，获得了较好的研究成果。文献[8]基于图论理论对电力网络进行简化、分区，通过简单矩阵运算来搜索受潮流转移影响严重的输电断面，但由于该方法只能搜索到链包含的支路，无法搜索到区内支路，存在漏选受影响严重支路的不足；文献[9]给出一种对网络不连通情况也适用的开断潮流方法；文献[10]采用搜索前K条最短路径法较好地解决了上述不足。但以往均只用潮流转移分布因子的大小而不全面考虑支路原始潮流便去评价支路

受潮流转移的影响程度是不确切的，需要进一步研究[4]。

有关单支路开断下潮流转移的识别方法已较为成熟，而多支路开断时的潮流转移识别研究还比较少。如文献[11]介绍了一种利用原节点阻抗矩阵数据估算双重支路开断的电流分布系数法，文献[12]依据线路相关因子的物理含义推导了多支路开断的情况下相关因子的公式，但对多支路开断情况下线路相关集的获取方法没有详细地解释，文献[13]根据潮流转移的虚拟折返过程推导了多支路同时切除时的转移因子快速计算方法。

1　直流潮流–补偿原理与 LTDF 的计算

若网络中有一条或几条支路因故障断开，工作人员需要知道网络中各支路潮流的变化情况，以避免因故障支路的开断引起其他支路后备保护连锁跳闸。因此，LTDF 即被定义为：故障支路切除后，能反映该潮流转移至系统其余支路中的比例系数。虽然与单支路故障相比，多重故障发生的概率比较小，但是一旦发生连锁跳闸，造成大范围停电，后果不堪设想。本文基于直流潮流-补偿原理，分析了多支路同时开断或者在极短的时间内相继开断时的潮流转移识别情况。

1.1 补偿原理

补偿原理的数学形式如下述定理所述。

定理　如果将 n 阶线性方程组 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{B}$ 的系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 表达为 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}_0+\Delta\boldsymbol{A}$，并且满足 $\Delta\boldsymbol{A}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{A}_{\rm b}\boldsymbol{R}$，则由矩阵求逆辅助定理，方程组有如下补偿形式

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_0 & \boldsymbol{L}\\ -\boldsymbol{R} & \boldsymbol{A}_{\rm b}^{-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{B}_{\rm b}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix}$$

式中：$\boldsymbol{B}_{\rm b}=\boldsymbol{A}_{\rm b}\boldsymbol{RX}$；$\boldsymbol{A}_{\rm b}\in\boldsymbol{C}^{s\times s}$；$\boldsymbol{A}_0\in\boldsymbol{C}^{n\times n}$，$\boldsymbol{A}\in\boldsymbol{C}^{n\times n}$ 且非奇异；s 为变动支路数；$\boldsymbol{L}$，$\boldsymbol{R}$ 是由-1，0，1组成的反映矩阵结构的整数矩阵。

补偿法特别适合于网络中不同部位发生局部变化时求网络方程解的应用情景，已在网络静态安全分析中有了较广泛的应用。对支路开断（或添加）的情况应用补偿原理时，关键是要构造导纳矩阵的修正量，节点导纳矩阵的修正量可表示为[14]

$$\Delta\boldsymbol{Y}=-\boldsymbol{N}\delta_y\boldsymbol{N}^{\rm T} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{N}$ 是节点—变动支路关联矢量；δ_y 是变动支路的导纳。

1.2 单支路开断时的潮流转移识别

断开的故障支路潮流与受影响支路的潮流增量关系可表示如下。

$$\Delta P_k^d=d_{k-d}\,p_d \tag{2}$$

式中：p_d 为支路断开前系统处于稳定运行状态下支路 d 的有功潮流；ΔP_k^d 为支路 d 开断而引起的支路 k 的潮流变化量；d_{k-d} 即为 LTDF 的大小，它表示故障支路 d 断开后，因其潮流发生转移，分布到 k 支路的比例。

单支路开断时的支路开断分布因子表达式[14]如下：

$$d_{k-d}=\frac{X_{k-d}/x_k}{1-X_{d-d}/x_d}\quad \forall k\in\text{支路} \tag{3}$$

$$P_{k,\rm now}=P_k^0+\Delta P_k^d \tag{4}$$

式中：x 是支路电抗值；$\boldsymbol{M}_d$、$\boldsymbol{M}_k$ 为支路 d、支路 k 的变动支路关联矢量。$\boldsymbol{\eta}_d=\boldsymbol{XM}_d$，$X_{d-d}=\boldsymbol{M}_d^{\rm T}\boldsymbol{\eta}_d$，$X_{k-d}=\boldsymbol{M}_k^{\rm T}\boldsymbol{\eta}_d$，$P_k^0$、$P_{k,\rm now}$ 分别为支路 d 切除前、切除后的支路 k 潮流。

1.3 多支路开断时的潮流转移识别

断开的故障支路潮流与受影响支路的潮流增量关系可表示为

$$\Delta\boldsymbol{P}_k=\boldsymbol{D}_k\boldsymbol{P}_{ml} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{ml}$ 为支路断开前系统处于稳定运行状态时开断支路的有功潮流列向量；$\Delta\boldsymbol{P}_k$ 为因故障支路开断而引起的支路 k 的潮流变化量；$\boldsymbol{D}_k$ 即为 LTDF 行向量，其元素为多支路开断时各开断支路对支路 k 的分布因子分量。

直流潮流的增量方程表示为

$$\Delta\boldsymbol{P}=\boldsymbol{B}_0\Delta\boldsymbol{\theta}\text{或}\Delta\boldsymbol{\theta}=\boldsymbol{X}\Delta\boldsymbol{P} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{B}_0$ 为以 $1/x$ 为元素的 $n\times n$ 阶电纳阵(n 不含参考节点)；$\boldsymbol{X}$ 为 $\boldsymbol{B}_0$ 取逆所得。在单支路开断的推导中只用到了开断支路的节点-支路关联矢量和电抗。而推导多支路开断时(以两条支路开断为例)，假设开断支路间无互感耦合，要用到开断支路的节点-支路关联矢量组成的节点-支路关联矩阵和两条支路的电纳对角阵。下面以两条支路 m、l 开断的情况为例，推导多支路开断分布因子和开断后潮流的表达式。

设故障支路切除前后，网络中的节点有功潮流保持不变，那么切除后的新电纳矩阵如下：

$$\boldsymbol{B}'=\boldsymbol{B}_0+\boldsymbol{A}^{\Delta}\boldsymbol{B}_{\rm b}^{\Delta}\boldsymbol{A}^{\Delta\rm T} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{A}^{\Delta}$ 是由所有开断支路的开断(变动)支路关联矢量组成的变动支路关联矩阵；$\boldsymbol{B}_b^{\Delta}$ 为开断支路的支路电纳变动矩阵，是一个对角阵。此时将式(6)中的系数矩阵用式(7)中新的电纳替代，再由矩阵求逆引理推导出电压相角变化量。

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{\theta}&=\left(\boldsymbol{B}_0+\boldsymbol{A}^{\Delta}\boldsymbol{B}_{\rm b}^{\Delta}\boldsymbol{A}^{\Delta\rm T}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\Delta}\boldsymbol{P}_{ml}=\\&\left(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{\eta c\eta}^{\rm T}\right)\boldsymbol{A}^{\Delta}\boldsymbol{P}_{ml}\end{aligned} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{\eta}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^{\Delta}$；$\boldsymbol{c}=\left[\left(\boldsymbol{B}_{\mathrm{b}}^{\Delta}\right)^{-1}+\boldsymbol{X}_{z}\right]^{-1}$；$\boldsymbol{X}_{z}=\boldsymbol{A}^{\Delta\mathrm{T}}\boldsymbol{\eta}$。所以，这时支路$k$ ($k\neq d$)的有功潮流增量如下：

$$\Delta P_{k}=\frac{\left(\boldsymbol{A}_{k}^{\Delta}\right)^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{\theta}}{x_{k}}=\boldsymbol{D}_{k}\boldsymbol{P}_{ml}=\frac{\left(\boldsymbol{A}_{k}^{\Delta}\right)^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{c}\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\right)\boldsymbol{A}^{\Delta}\boldsymbol{P}_{ml}}{x_{k}} \tag{9}$$

由矩阵求逆引理可得支路开断分布因子行向量为

$$\boldsymbol{D}_{k}=\frac{\boldsymbol{X}_{k}\left[\boldsymbol{E}+\boldsymbol{B}_{b}^{\Delta}\boldsymbol{X}_{z}\right]^{-1}}{x_{k}} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{k}=\left(\boldsymbol{A}_{k}^{\Delta}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\eta}$；$\boldsymbol{A}_{k}^{\Delta}$为支路$k$的节点-支路关联矢量；$x_k$为支路$k$电抗，至此便可预估双支路开断后引起支路$k$上的有功潮流

$$P_{k,\mathrm{now}}=P_{k}^{0}+\Delta P_{k} \tag{11}$$

式中，P_{k}^{0}、$P_{k,\mathrm{now}}$分别为支路m、l切除前、切除后的k支路潮流。式(5)、式(10)和式(11)同样也适合于多支路同时切除或在极短的时间内相继切除的情况。

可见，支路开断分布因子仅能表示开断支路初始潮流的转移情况，并不能确切表示受潮流转移支路的过载与否程度。因此，本文对严重度函数进行改进，得出过载严重度指标来描述剩余支路实际的受潮流转移影响程度，进而得出关键支路集，大大地缩小后续减载的范围和难度。

2 过载严重度指标和关键支路集的确定

由于 LTDF 越大，只能代表其余支路的有功潮流改变量越大，若不考虑该支路初始潮流就直接确定其受潮流转移影响程度是不确切的，因为工作人员的初衷是要监测识别支路的受潮流转移影响后的过载情况。考虑到网络的不确定性因素，把造成灾害的可能性与此灾害的严重水平结合考虑的理论称为风险理论[15]。由文献[16]可知，元件的越限程度以及不同问题之间的相对严重度可用风险理论中的严重度函数来表示。为此，本文引入严重度函数，并加以改进，作为评价支路受潮流转移影响程度的指标，同时作为形成关键支路集的基本依据。

2.1 过载严重度指标

过载严重度指标反映的是支路受潮流转移的影响出现过载的可能性大小以及严重程度。我国目前《电力系统安全稳定导则》中表明：正常检修与正常运行方式时，静稳定储备系数K_{p}≥(15%~20%)。为保证搜索到的关键支路集的完整性和系统的安全可靠性，这里取 20%。那么，当支路有功潮流小于或等于可允许的最大潮流的 80%时，过载严重度为 0；据此对严重度函数加以改进，将临界点设定为 0.8。该函数指标可以较全面直观地反映随着支路潮流的增加，对应支路的过载严重度随之增大，且增大速率随之变快[16]，严重度函数[16]如下所示。

$$W=\mathrm{e}^{w_{L_i}}-1 \tag{12}$$

$$w_{L_i}=\begin{cases}L_i-0.8 & L_i>0.8\\ 0 & 0\le L_i\le 0.8\end{cases} \tag{13}$$

式中：L_i为支路i的有功过载率，$L_i=P_{i,\mathrm{now}}/0.8P_{i,\max}$；$P_{i,\mathrm{now}}$即为支路$d$切除之后支路$i$的潮流值；$P_{i,\max}$为支路$i$ 允许最大潮流；W即为支路i 的过载严重度指标。

相比之下，该指标的形成将支路开断分布因子和受影响支路的初始潮流这两者结合起来，共同去评价其受潮流转移的影响程度，更加确切、可靠。

2.2 关键支路集的形成

关键支路集是一个集合，由受潮流转移影响引发连锁过载可能性较大的支路组成。从式(12)、式(13)可看出，求取W的过程已经将受潮流转移影响小的支路排除在外(设定为 0)。所以，过载严重度指标大于零即表示该支路受影响较大，将所有符合条件的支路组成一个集合—关键支路集，此方法简单可靠，省去了以往采用各种搜索方法获取关键支路的繁琐。这样，网络安全性分析的幅度就由全部网络缩小至某些关键支路，大大地减轻了潮流识别和后续进行减载措施的难度。

将关键支路集内各支路按W降序排列，W值越大，表明受潮流转移影响越严重，发生连锁过载可能性就越大。

2.3 潮流转移识别判据

故障支路切除后，如果关键支路集中某支路后备保护启动，判断出有支路过载，那么通过将支路的实际测量潮流与由式(11)获得的开断后潮流相比较，若比较结果相一致，则可判定这些支路是因潮流转移而引起过载，具体判据为

$$\left|P_{i,\mathrm{M}}-P_{i,\mathrm{now}}\right|<\varepsilon P_{i,\mathrm{now}} \tag{14}$$

式中：$P_{i,\mathrm{M}}$是d支路断开后实测到的i 支路潮流；ε为计及系统误差和暂态过程的裕度值，当暂态波动较剧烈时，可适当加大ε的取值，通常取 30%比较妥当[17]。

3 算例分析

为验证上述方法的可行性，使用基于 Matlab 的 matpower4.0 仿真软件对新英格兰 39 节点系统做算例分析，其系统接线如图 1 所示。

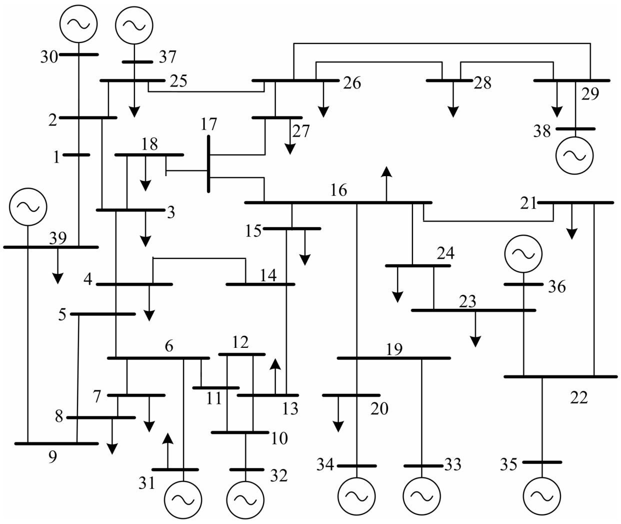

图 1　新英格兰 39 节点系统单线图

Fig. 1 Single line diagram of New England 39-bus system

假设支路 16-15 因故障断开，由式(3)、式(4)得到开断后的分布因子和计算潮流如表 1 所示；由公式(12)得出的过载严重度指标W见表 3。将其与由仿真软件所得的实际交流潮流(作为实时测量潮流)以及支路最大潮流进行比较分析，鉴于篇幅限制，部分支路潮流结果见表 1、表 3，表中潮流单位均为 MW。

表 1　计算与实际交流潮流对比结果

Table 1 Comparison results of calculation and actual AC power flow

支路	支路开断分布因子	计算潮流	实际潮流	误差%
16-17	1	494.58	494.86	0.05
14-15	1	320.87	322.48	0.49
17-18	0.873	435.251	409.23	6.35
18-3	0.873	270.991	250.11	8.35
3-4	0.852 5	267.98	260.6	2.83
13-14	0.275 8	391.805 5	393.82	0.51
10-13	0.251	390.012 4	392.47	0.62
2-1	0.147 5	214.6	217.65	1.40
1-39	0.147 5	116.02	118.52	2.11
11-12	0.024 8	10.803 2	10.65	1.44

由于开断分布因子小的支路的潮流变化量很小，所以潮流基本不变，因此表 1 只列出了分布因子相对较大的支路。由表 1 可见，各支路按本文方法预估的计算潮流与实际交流潮流非常接近，误差很小，在工程允许范围内，由此验证了本文的潮流预估方法的准确性。

作为对比，同样假设支路 16-15 因故障断开，采用文献[8]所提出的基于图论的输电断面搜索方法得到如表 2 所示的结果，其中按照文献[8]的关键输电断面形成方法，表中关键输电断面是由并行输电断面中潮流转移分布因子(即本文的单支路开断分布因子，已在下表相应括号内标出)大于 0.3 的支路组成的。

表 2　输电断面识别结果

Table 2 Identification results of transmission section

开断支路	并行输电断面	关键输电断面
16-15	18-3,14-15,17-18, 17-27,19-20	18-3(0.873), 14-15(1), 17-18(0.873)
漏选支路	16-17(1),　3-4(0.8525)	

由表 2 可明显看出，此方法的确会漏选重要支路；而对于支路 3-4、18-3 和 14-15，结合表 1 可知，其开断后潮流都较其支路最大潮流有近一半的冗余量，所以发生新的过载的可能性很小，实际受潮流转移影响严重的支路是 16-17，17-18，19-16；也说明潮流转移分布因子仅表示转移增量大小，不代表最终的受潮流转移影响程度。而本文所得的关键支路集内的支路是在此基础上结合各支路原始潮流的结果，更可靠、有效，详细结果见表 3。

规定支路初始潮流方向为正，故障支路开断后，有些支路的 LTDF 小于零，即新增潮流与初始潮流反向，所以其实际潮流是减小的，安全分析时这部分支路可不予考虑。于是支路的实际受潮流转移过载率可由式(15)来表示。

$$实际过载率=\frac{P_{i,\mathrm{M}}-P_{i,\max}}{P_{i,\max}}\times100\% \tag{15}$$

其代数值越大，说明该支路实际上受到的潮流在网络中转移的影响就越严重。所以若按本文方法所得关键支路集内支路的W越大，对应的实际过载率百分比越大，即变化趋势基本相同，则可证明该形成关键支路集方法的有效性。

表 3 中关键支路集有一定的冗余支路，实际中可按实际情况选出过载严重度指标大于某一设定值的支路组成最终关键支路集，例如选择该指标大于 0.1 的支路组成最终关键支路集，则由表 3 可得出集合内支路为：16-17，19-16，17-18，32-10，35-22，可见关键支路集包括了受潮流转移影响较严重的支路，不会有漏选的情况，起到了缩小监测分析范围的作用。支路 16-15 开断虽未引起连锁过载，但假如关键支路集内有支路的后备保护启动，则用式(14)可判断出该过载是否是由于潮流转移引起的，若是

则实施相应策略及时消除过载，否则按故障处理。即由表 3 可得到如下结论：

表 3 关键支路集评估指标结果

Table 3 Results of the evaluation index in key branch set

支路	支路开断分布因子	过载严重度指标	实际潮流	最大潮流	实际过载率%
16-17	1	0.259 1	494.86	600	−17.52
19-16	0	0.157 9	454.45	600	−24.25
17-18	0.873	0.112 7	409.23	600	−31.79
32-10	0	0.108 2	650	900	−27.78
35-22	0	0.108 2	650	900	−27.78
33-19	0	0.080 9	632	900	−29.78
38-29	0	0.066 7	830	1200	−30.83
22-21	0	0.044 3	607.24	900	−32.53
13-14	0.275 8	0.016 4	393.82	600	−34.36
10-13	0.251	0.012 6	392.47	600	−34.59
14-15	1	0	322.48	600	−46.25
3-4	0.852 5	0	260.6	500	−47.88
2-1	0.147 5	0	217.65	600	−63.83
1-39	0.147 5	0	118.52	1000	−88.15
关键支路集		16-17, 19-16, 17-18,32-10, 35-22, 33-19, 38-29, 22-21, 13-14, 10-13			

（1）比较关键支路集内支路对应的过载严重度指标W和实际过载率两列，变化趋势基本相同，而分布因子与实际过载率没有此关系，验证了前面文献仅由潮流转移因子(即本文的支路开断分布因子)来描述支路受潮流转移影响程度是不确切的，表明关键支路集内支路的有效性。

（2）所有受潮流转移影响严重(即实际过载率较大)的支路都在关键支路集内，关键支路集内支路对应的均是实际过载率较大的支路，是充分必要条件，验证了该关键支路集的完整性。

下面以两条支路开断为例验证多支路开断时潮流转移识别的有效性。假设支路 16-17、22-23 因故障同时断开，由式(10)、式(11)得到开断后潮流结果、由式(12)得到的过载严重度指标W以及关键支路集的组成如表 4 所示。

由表 4 可见，多支路开断的情况下，各支路按本文方法预估的计算潮流基本与实际交流潮流非常接近，基本误差较小，由此验证了本文的多支路开断潮流预估方法的准确性。同时，由各支路的过载严重度指标可快速得出关键支路集的组成支路，包括了受潮流转移影响较严重的支路，起到了缩小监测分析范围的作用，且不会出现漏选受潮流转移影响严重支路的情况。

表 4 多支路开断潮流转移识别结果

Table 4 Flow transferring identification results of multi-line dripping

支路	过载严重度指标	计算潮流	实际潮流	误差/%
19-16	0.157 9	454.38	454.33	0.01
35-22	0.108 2	650	650	0
32-10	0.108 2	650	650	0
33-19	0.080 9	632	632	0
38-29	0.066 7	830	830	0
11-6	0.064 7	331.290 8	385.07	13.9
22-21	0.055 9	615.150 2	650	5.36
2-3	0.001 3	320.500 6	307.55	4.2
5-8	0	340.949 3	354.27	3.73
6-7	0	456.282 5	474.19	3.77
31-6	0	668.67	670.94	2.64
关键支路集	19-16, 35-22, 32-10, 33-19, 38-29, 11-6, 22-21, 2-3			

广域测量系统传输数据的延迟时间在 20~50 ms 左右，后备保护动作延时通常设在 1 s 及以上，所以利用这段延时可以充分收集广域测量信息，完成快速的算法并采取相应的控制策略。经验证，采用文献[8]中方法计算潮流转移因子约用时 0.019 s，搜索并行输电断面用时 0.033 s，总用时 0.052 s；而采用本文方法分析单支路和多支路开断潮流转移识别时，求取支路开断分布因子分别用时 0.019 s、0.026 s，搜索关键支路集用时均为 0.016 s，因此分析单支路和多支路开断总用时分别为 0.035 s、0.042 s，比文献[8]所用方法提升了 32.7%、19.2%，为后续采取减载控制策略留取了充足的时间(以上时间均精确到小数点后三位)。

4 结论

本文在直流潮流-补偿原理基础上，引入了一种新的可预估开断后各支路潮流的支路开断分布因子的概念，并将其推广到了多支路开断的情况下，算例分析中通过与经典交流潮流结果对比，误差很小，验证了其预估潮流的准确性，且计算简便，有很强的实用性。

利用改进的严重度函数可快速搜索到对单支路和多支路开断同样适用的受潮流转移影响严重的支路集—关键支路集，能较好地克服以往搜索关键支路的不完整性和仅采用潮流转移分布因子确定支路受影响程度的不足，使网络安全性分析的幅度由全部网络缩小至关键支路集内支路，大大降低了后续分析的难度，有利于避免发生连锁过载跳闸事故。

参考文献

[1] 任建文, 李刚, 王增平, 等. 基于背离路径的输电断面搜索新算法[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 121-127.
REN Jian-wen, LI Gang, WANG Zeng-ping, et al. New algorithm for aearching tie lines based on deviation path[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 121-127.

[2] 王英英, 罗毅, 涂光瑜, 等. 电力系统连锁故障的关联模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 204-209.
WANG Ying-ying, LUO Yi, TU Guang-yu, et al. Correlation model of cascading failures in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 204-209.

[3] 杨文辉, 毕天姝, 马强, 等. 基于广域电压相角信息的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 58-63.
YANG Wen-hui, BI Tian-shu, MA Qiang, et al. A method for searching transmission section based on wide-area voltage phasors [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 58-63.

[4] 倪宏坤, 徐玉琴, 王立晶. 电力系统并行输电断面风险评估的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 93-95.
NI Hong-kun, XU Yu-qin, WANG Li-jing. Research on risk assessment of power system parallel transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 93-95.

[5] 黄家栋, 张富春, 周庆捷. 基于输电断面识别的电力系统连锁故障风险评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 30-35.
HUANG Jia-dong, ZHANG Fu-chun, ZHOU Qing-jie. Risk assessment model of cascading failures in power system based on identification of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 30-35.

[6] SALIM N A, OTHMAN M M, MUSIRIN I, et al. Cascading collapse assessment considering hidden failure[C] // International Conference on Informatics and Computational Intelligence, Bandung, Indonesia, 2011.

[7] BALDICK R, CHOWDHURY B, DOBSON I, et al. Vulnerability assessment for cascading failures in electric power systems[C] // IEEE Power and Energy Society Power Systems Conference and Exposition, Seattle, USA, 2009.

[8] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
ZHOU De-cai, ZHANG Bao-hui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.

[9] 潘莉丽, 刘建华, 彭铖, 等. 电网结构发生变化时潮流转移的快速识别[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 118-121.
PAN Li-li, LIU Jian-hua, PENG Cheng, et al. Fast recognition of power flow transferring under change of power network topology[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 118-121.

[10] 王增平, 李刚, 任建文. 基于前 K 最短路径的输电断面搜索新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 193-201.
WANG Zeng-ping, LI Gang, REN Jian-wen. A new search algorithm for transmission section based on K shortest paths[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 193-201.

[11] 王艳, 张艳霞, 徐松晓. 基于广域信息的防连锁过载跳闸保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 37-41.
WANG Yan, ZHANG Yan-xia, XU Song-xiao. A protection scheme against chain overload trip based on widearea information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 37-41.

[12] 张玮, 潘贞存, 李磊. 一种基于线路相关集的大电网继电保护隐藏故障算法[J]. 继电器, 2007, 35(22): 1-5.
ZHANG Wei, PAN Zhen-cun, LI Lei. Analysis of hidden failures of protection in bulk power system based on RCTL[J]. Relay, 2007, 35(22): 1-5.

[13] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 计及暂态过程的多支路切除潮流转移识别算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 24-30.
XU Hui-ming, BI Tian-shu, HUANG Shao-feng, et al. Flow transferring identification algorithm for multi-branches removal event with consideration of transient phenomena[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 24-30.

[14] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[15] 吴耀武, 娄素华, 余永泉, 等. 电力市场环境下输电线路过载风险评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 198-203.
WU Yao-wu, LOU Su-hua, YU Yong-quan, et al. Overload risk assessment of power transmission line under power electrical market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 198-203.

[16] 吴旭, 张建华, 吴林伟, 等. 考虑风电场接入的电网连锁故障运行风险评估[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 395-400.
WU Xu, ZHANG Jian-hua, WU Lin-wei, et al. Operational risk assessment of power grid cascading failures considering wind farm integration[J]. East China Electric Power, 2013, 41(2): 395-400.

[17] 徐慧明. 可识别潮流转移的广域后备保护及其控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.

收稿日期：2014-01-06；　　**修回日期：**2014-04-01

作者简介：

聂宏展(1962-)，男，硕士，教授，研究方向为电力系统规划、电力系统继电保护；

袁晓丹(1990-)，女，通信作者，硕士研究生，研究方向为电力系统分析、仿真与控制；E-mail:yxd0303@sina.com

张会强(1989-)，男，硕士研究生，研究方向为微电网控制。