# 分区电网限流运行方式的综合决策方法

杨 冬[1]，刘玉田[1]，牛新生[2]
(1. 山东大学电气工程学院，山东省济南市 250061；2. 山东电力研究院，山东省济南市 250002)

**摘要：**提出一种分区电网限流运行方式的综合决策方法。首先简化寻优，在尽量保持电网结构完整的前提下，以加权短路电流灵敏度系数为判据，快速寻找较优的限流运行方式可行方案集；然后细化评价，考虑短路电流水平与系统稳定性之间的相互制约关系，基于网络分析法建立分区电网限流运行方式的评价模型，通过模糊综合评价从可行方案集中确定最佳限流运行方式。综合决策优先度考虑了短路电流水平、暂态电压安全和静态潮流分布的影响，对分区电网限流运行方式作出了系统、全面、定量的决策。以济南电网为例验证了该方法的可行性和实用性。

**关键词：**分区电网；短路电流；网络分析法；模糊综合评价

## 0 引言

随着高一级电压电网的建设，下一级电压电网应逐步实现分区运行，相邻分区之间保持互为备用[1]。电网联系的日趋紧密及大容量发电机组的接入使得分区电网短路电流超标问题日益严重。调整分区电网结构以适当增加网络站点间的电气距离，是降低短路电流水平行之有效的方法[2-3]。目前，调整电网结构的主要手段包括开断线路、采用高阻抗变压器、加装限流电抗器或故障限流器[4]等。

文献[5]提出了一种电力系统限流措施的自动优化配置方法，将限流措施配置问题看成一个混合整数规划问题，能够给出综合成本较低且限流效果较好的限流措施配置方案。文献[6]通过推导开断若干回线路对超标站点的自阻抗灵敏度公式，提出了一种限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法，能够选出开断较少线路且较大程度限制短路电流的断线组合。文献[7]给出了一种配置限流措施的结构化流程，首先利用统计法预测系统短路电流水平，然后列举限流措施配置方案，最后对各种限流运行方式进行供电可靠性、系统稳定性及技术可行性校核，凭借工程经验选出较优方案。

限制短路电流与提高系统稳定性是优化电网结构的一对矛盾体，配置限流措施需要综合考虑短路电流水平、系统稳定性和供电可靠性等因素对运行方式的要求。限流运行方式的综合决策是一个多目标、非结构性优化问题，涉及复杂的系统仿真计算，难以描述成完整、统一的优化模型，目前的研究大多基于简化的寻优判据确定较优可行方案集，然后综合多方面影响，凭借工程经验作出定性判断。对电力系统决策者来讲，需要一种既包含工程经验又含有定量计算、可将定性的判断定量化的决策方法。

本文在简化寻优的基础上，引入评价模型，即综合考虑短路电流水平、暂态电压安全和静态潮流分布的影响，基于网络分析法(analytic network process，ANP)建立分区电网限流运行方式的评价模型，通过模糊综合评价确定最佳限流运行方式，从而实现对较优可行方案集的系统、全面、定量的决策。

## 1 模糊网络分析法(FANP)

FANP 是利用 ANP 对被评价事物建立网络结构的评价模型，并运用模糊线性变换原理，综合考虑各种因素的影响，对被评价事物作出系统、全面、定量的评价。

### 1.1 ANP

层次分析法(analytic hierarchy process，AHP)的核心是将系统划分层次且只考虑上层元素对下层元素的支配作用，同一层次中的元素被认为是彼此独立的。然而，在许多实际问题中，各层次内部元素往往是相互依存的，底层元素对高层元素也有支配作用，此时系统的结构更类似于网络。ANP 正是适应这种需要，由 AHP 延伸发展得到的系统决策方法。ANP 一般将系统分为 2 个部分，如图 1 所示。第 1 部分为控制层，包括目标及准则，控制层中可以没有准则，但必须有一个目标。第 2 部分为网络层，它由所有受控制层支配的元素组成，其内部是相互影响的网络结构。通过构造判断矩阵及加权超矩阵可求得网络层所有元素的权重集 $\boldsymbol{T}$，详细计算过程

收稿日期：2009-12-16；修回日期：2010-04-07。
国家电网公司科技项目(SGKJ[2009]12)。

及矩阵表达式参见文献[8-9]。

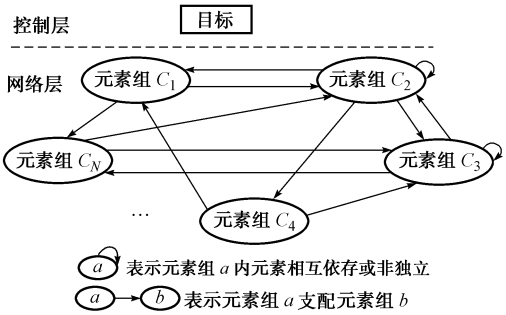



**图 1 ANP 基本结构**
**Fig. 1 Basic structure of ANP**

### 1.2 模糊综合评价

评语集为被评价事物的各级评语组成的集合。设评语共有 $p$ 个,则评语集 $\boldsymbol{V}$ 可以表示为 $\boldsymbol{V}=[v_1, v_2, \cdots, v_p]$。其中,$v_k(k=1,2,\cdots,p)$代表由高到低的各级评语。一般,5 级评语可认为能够对被评价事物作出较为准确的描述。对评语集中的评语 $v_k$ 可以给出相应的分数,从而得到评语集对应的分数集 $\boldsymbol{E}=[e_1, e_2, \cdots, e_p]$。ANP 网络层所有元素的集合 $\boldsymbol{C}$ 到评语集 $\boldsymbol{V}$ 的模糊关系矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为:

$$\boldsymbol{R}=(\mu_{jk})_{n\times p}=\begin{bmatrix}\mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1p}\\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2p}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{np}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$\mu_{jk}$ 为元素集 $\boldsymbol{C}$ 的第 $j$ 个元素隶属于评语集 $\boldsymbol{V}$ 的第 $k$ 个评语的程度;$j=1,2,\cdots,n$;$k=1,2,\cdots,p$;$n$ 为网络层元素个数。

$\boldsymbol{C}$ 中元素隶属于 $\boldsymbol{V}$ 中评语的程度可以用半梯形和三角形隶属度函数予以描述。

通过模糊关系矩阵的合成运算,可得元素集 $\boldsymbol{C}$ 的模糊综合评价集 $\boldsymbol{S}$:

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}=\boldsymbol{T}\circ\boldsymbol{R}=[S_1, S_2, \cdots, S_p]\\ S_k=\sum_{j=1}^{n}T_j\mu_{jk}\end{cases} \tag{2}$$

式中:$S_k$ 为综合考虑所有元素的影响时,被评价事物对评语集第 $k$ 个评语的隶属度;$k=1,2,\cdots,p$。

以模糊综合评价集 $\boldsymbol{S}$ 的元素 $S_k$ 为权重,对分数集 $\boldsymbol{E}$ 中各元素加权平均,可得综合评价优先度 $Q$:

$$Q=\sum_{k=1}^{p}S_k e_k\left(\sum_{k=1}^{p}S_k\right)^{-1} \tag{3}$$

## 2 限流运行方式综合决策模型

### 2.1 寻优判据

调整电网结构以限制短路电流的措施有很多,其中开断线路简单、经济且限流效果显著,因此,本文主要针对开断线路建立寻优判据。开断线路的选取,既要考虑短路电流的限制效果,又要尽量保持电网结构的完整性。本文提出以加权短路电流灵敏度系数为判据,寻找若干断线组合,使得在开断较少线路的前提下较大程度地限制超标站点的短路电流。设原网络形成 $m$ 阶阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}$,当开断节点 $i$、节点 $j$ 间的线路时,相当于在节点 $i$、节点 $j$ 间追加链支 $-z_{ij}$($z_{ij}$ 为开断线路的阻抗)。根据形成阻抗矩阵的支路追加法可得新阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}'$:

$$\boldsymbol{Z}'=\boldsymbol{Z}-\frac{\boldsymbol{Z}_{\mathrm{L}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{L}}^{\mathrm{T}}}{Z_{\mathrm{LL}}} \tag{4}$$

式中:

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{L}}=\begin{bmatrix}Z_{1i}-Z_{1j}\\ Z_{2i}-Z_{2j}\\ \vdots\\ Z_{mi}-Z_{mj}\end{bmatrix}$$

$$Z_{\mathrm{LL}}=Z_{ii}+Z_{jj}-2Z_{ij}-z_{ij}$$

电网开断某一线路后,关注的是各超标站点的短路电流下降程度,因而定义开断 1 回线路时超标站点 $k$ 的短路电流灵敏度系数 $\lambda_k$ 为:

$$\lambda_k=\frac{I_k-I_k'}{I_k}=\frac{Z_{kk}'-Z_{kk}}{Z_{kk}'} \tag{5}$$

式中:$I_k$ 和 $I_k'$ 分别为开断线路前后超标站点 $k$ 的短路电流;$Z_{kk}$ 和 $Z_{kk}'$ 分别为开断线路前后超标站点 $k$ 的自阻抗。

若将同时开断 $n$ 回线路等效为每次开断 1 回线路、开断 $n$ 次的过程,由式(4)迭代 $n$ 次可求得开断第 $n$ 回线路后的阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}^{(n)}$,从而定义同时开断 $n$ 回线路时超标站点 $k$ 的短路电流灵敏度系数 $\lambda_k^{(n)}$ 为:

$$\lambda_k^{(n)}=\frac{I_k-I_k^{(n)}}{I_k}=\frac{Z_{kk}^{(n)}-Z_{kk}}{Z_{kk}^{(n)}} \tag{6}$$

对于某一超标站点 $k$,短路电流灵敏度系数 $\lambda_k$ 越大,表明该断线组合对超标站点 $k$ 的限流效果越好。考虑某一断线组合对所有超标站点的限流效果,定义加权短路电流灵敏度系数 $\lambda$ 为:

$$\lambda=\sum_{k=1}^{l}w_k\lambda_k \tag{7}$$

式中:$l$ 为超标站点个数;$w_k$ 为权重因子,$w_k=(I_k/I_k^{\max})^{2n}$;$I_k$ 为超标站点 $k$ 的实际短路电流;$I_k^{\max}$ 为该站点断路器的最大遮断电流;$n$ 通常取 1。

加权短路电流灵敏度系数如此定义不仅能够反映某一断线组合对所有超标站点的限流效果,而且计及了各站点超标程度差异的影响。在开断较少线路的前提下,通过求取加权短路电流灵敏度系数的较大值,可以快速寻找限制超标站点短路电流的若

干较优断线组合。如考虑采取多种限流措施，由建立开断线路的寻优判据类推，根据不同限流措施的特点，均可通过追加链支形成新阻抗矩阵，从而得到对应限流措施的寻优判据。此时，限流运行方式的决策变量除包括各种限流措施是否投入的0，1变量外，还应纳入限流电抗器、高阻抗变压器和故障限流器的阻抗大小变量等。

## 2.2　评价模型

分区的概念体现为1个或多个500 kV站带220 kV地区型电网。对于某分区内短路电流超标问题，由于调整500 kV主网架及相邻分区电网结构对该分区超标站点短路电流的影响较小，因此，本文仅考虑改善该分区220 kV电网结构以达到限流目的。基于ANP的分区电网限流运行方式评价模型见图2。评价模型综合考虑了适用于局部电网结构的决策因素，包括短路电流水平、暂态电压安全和静态潮流分布。由图2可知，该网络结构考虑了不同元素组之间相互影响、相互制约的关系，如“暂态电压安全”与“短路电流水平”之间相互依存等。

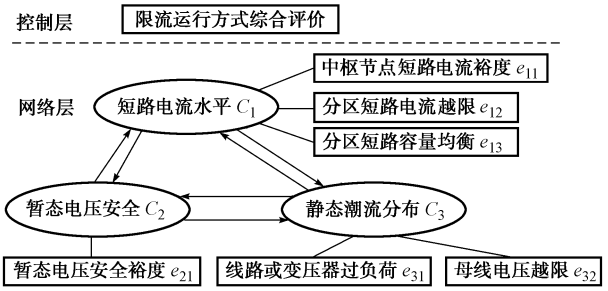



**图2　基于ANP的评价模型**
**Fig. 2　Evaluation model based on ANP**

1)短路电流水平。500 kV变电站的220 kV母线可以看做短路电流中枢节点，其短路电流由500 kV主变和220 kV分区电网的电源共同提供[10]。中枢节点短路电流裕度不仅能够表征变电站500 kV母线和220 kV母线的短路电流配合关系，而且可以衡量分区电网受电能力裕度。对于220 kV分区电网短路电流水平，一方面要考虑限制分区各节点的短路电流，防止其超过断路器的额定遮断容量，可以用分区短路电流越限表征；另一方面要考虑减小分区各节点的短路容量差异，使各节点的抗扰动能力尽量均衡，可以用分区短路容量均衡表征。

2)暂态电压安全。动态安全分析研究系统从事故前的稳态过渡到事故后的另一个稳态的暂态过程中保持稳定的能力。功角稳定性主要关心电气距离较远的发电厂之间的关系，是一个系统全局性概念；电压稳定性主要关心负荷区域与负荷特性，通常涉及电网局部性问题。分区电网限流运行方式评价与局部电网结构的优化决策有关，因而动态安全分析只需考虑暂态电压安全问题，可以用暂态电压安全裕度衡量。

3)静态潮流分布。静态安全分析假设系统从事故前的稳态直接转移到事故后的另一个稳态，不考虑中间暂态过程，用于检验事故后各种约束条件是否得到满足。因此，静态潮流分布可以用系统发生$N-1$预想事故后新的运行工况下，各种约束条件是否得到满足来表征，即线路和变压器是否过负荷，母线电压是否越限。

## 2.3　评价指标

1)中枢节点短路电流裕度指标$I_{\mathrm{PM}}$：

$$I_{\mathrm{PM}}=\sum_{l\in\gamma}w_{\mathrm{M},l}(I_l^{\max}-I_l) \tag{8}$$

式中：$\gamma$为500 kV站点集合；$w_{\mathrm{M},l}$为权重因子；$I_l^{\max}$为允许220 kV系统注入500 kV站220 kV母线的最大短路电流；$I_l$为220 kV系统注入500 kV站220 kV母线的实际短路电流。

2)分区短路电流越限指标$I_{\mathrm{PL}}$：

$$I_{\mathrm{PL}}=\sum_{l\in\beta}w_{\mathrm{L},k}\left(\frac{I_k}{I_k^{\max}}\right)^{2n} \tag{9}$$

式中：$\beta$为母线集合；$w_{\mathrm{L},k}$为权重因子；$I_k$为母线$k$的实际短路电流；$I_k^{\max}$为该母线断路器的最大遮断电流；$n$为正整数。

3)分区短路容量均衡指标$I_{\mathrm{PE}}$：

$$I_{\mathrm{PE}}=\sqrt{\sum_{i\in\beta}(x_i-x_{\mathrm{ave}})^2} \tag{10}$$

式中：$x_i$为母线$i$的短路容量；$x_{\mathrm{ave}}$为所有母线的短路容量平均值。

4)暂态电压安全裕度指标$I_{\mathrm{PTV}}$：

$$I_{\mathrm{PTV}}=\sum_{k\in\eta}w_{\mathrm{TV},k}\varepsilon_k \tag{11}$$

式中：$\eta$为母线电压曲线集合；$w_{\mathrm{TV},k}$为权重因子；$\varepsilon_k$为母线电压曲线$k$的暂态电压跌落可接受裕度[11]。

5)线路或变压器过负荷指标$I_{\mathrm{PP}}$[12]：

$$I_{\mathrm{PP}}=\sum_{l\in\alpha}w_{\mathrm{P},l}\left(\frac{S_l}{S_l^{\max}}\right)^{2n} \tag{12}$$

式中：$\alpha$为线路或变压器支路集合；$w_{\mathrm{P},l}$为权重因子；$S_l$为支路$l$的功率；$S_l^{\max}$为支路$l$的功率上限。

6)母线电压越限指标$I_{\mathrm{PV}}$[13]：

$$I_{\mathrm{PV}}=\sum_{i\in\beta}w_{\mathrm{V},i}\left(\frac{V_i-V_i^{\mathrm{sp}}}{\Delta V_i^{\lim}}\right)^{2n} \tag{13}$$

式中：$w_{\mathrm{V},i}$为权重因子；$V_i$为母线$i$的电压幅值；$V_i^{\mathrm{sp}}=(V_i^{\mathrm{H}}+V_i^{\mathrm{L}})/2$；$\Delta V_i^{\lim}=(V_i^{\mathrm{H}}-V_i^{\mathrm{L}})/2$；$V_i^{\mathrm{H}}$和$V_i^{\mathrm{L}}$分别为母线$i$的电压幅值上下限。

式(8)～式(13)中权重因子的设置取决于相关

指标在未越限及越限时的重要程度,其原则是能够突出地反映越限情况,避免发生遮蔽现象[14]。一般,指数 $n$ 取 1 时,指标的二次方特性既能够满足计算速度的要求,又具有较好的越限程度差异性[15]。

### 2.4 方法流程

本文提出的综合决策方法采用先简化寻优、后细化评价的思路,具体方法流程见附录 A 图 A1。根据各方案综合决策优先度的大小,即可选出最佳限流运行方式。

## 3 算例分析

应用上述综合决策方法,以山东电网 2010 年夏大方式全接线网架为例,对济南分区电网进行限流运行方式综合决策。济南分区电网结构见附录 B 图 B1。济南电网 220 kV 系统发展成熟,负荷水平较高,直接接入 220 kV 电网的电源点较多,500 kV/220 kV 电磁环网的形成使该地区综合阻抗更小,从而使分区电网短路电流超标问题更突出。济南电网短路电流超标情况如表 1 所示。

**表 1 济南电网短路电流超标情况**
**Table 1 Superscalar of short-circuit current in Jinan power grid**

| 超标厂站 | 短路电流值/kA | 超标值/kA |
|---|---|---|
| 济南站 | 52.45 | 2.45 |
| 黄台厂 | 50.26 | 0.26 |

根据简化寻优算法,分别计算开断 1 回、2 回线路时所有断线组合下的 $\lambda$ 值,选取 $\lambda$ 最大的前 4 种断线组合,短路电流情况如表 2 所示。由表 2 可知,开断 2 回线路时 $\lambda$ 最大的前 4 种断线组合可将超标站点短路电流限制到安全水平,从而形成限流运行方式的可行方案集,根据 $\lambda$ 值由大到小依次指定为方式 1～方式 4。

**表 2 开断线路后的短路电流情况**
**Table 2 Short-circuit currents after tripping lines**

| 开断线路 | $\lambda$ | 短路电流/kA | |
|---|---|---|---|
| | | 济南站 | 黄台厂 |
| 济黄 1 回 | 0.113 | 50.02 | 47.19 |
| 韩历 1 回 | 0.087 | 50.76 | 47.71 |
| 兴姚 1 回 | 0.080 | 50.58 | 48.21 |
| 许清 1 回 | 0.060 | 50.86 | 48.91 |
| 济黄 1 回、兴姚 1 回 | 0.215 | 46.93 | 45.34 |
| 邢姚 2 回 | 0.182 | 47.14 | 46.75 |
| 兴姚 1 回、文姚 1 回 | 0.171 | 47.52 | 46.90 |
| 济黄 1 回、许清 1 回 | 0.130 | 49.61 | 46.76 |

基于 ANP 建立限流运行方式评价模型,结合专家经验知识构造判断矩阵,由加权超矩阵计算极限相对排序向量即各评价指标的权重集 $\boldsymbol{T}=$ [0.132 5,0.095 4,0.354 4,0.167 1,0.167 1,0.083 5]。利用电力系统分析软件包(PSASP)对 4 种限流运行方式进行短路电流计算、暂态稳定计算和潮流计算,评价指标结果如表 3 所示。$I_{PM}$ 和 $I_{PTV}$ 为裕度型指标,其值越大,指标性能就越好;$I_{PL}$,$I_{PP}$,$I_{PV}$ 为越限型指标,$I_{PE}$ 为偏差型指标,其值越小,指标性能就越好。各评价指标隶属度函数参数如表 4 所示。

**表 3 评价指标结果**
**Table 3 Results of evaluation indices**

| 方式 | $I_{PM}$ | $I_{PL}$ | $I_{PE}$ | $I_{PTV}$ | $I_{PP}$ | $I_{PV}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 19.54 | 10.23 | 480.67 | 43.23 | 4 285 | 7 680 |
| 2 | 18.77 | 14.36 | 478.93 | 48.92 | 4 212 | 7 425 |
| 3 | 17.10 | 14.98 | 520.96 | 49.15 | 4 257 | 7 552 |
| 4 | 16.76 | 20.30 | 533.77 | 53.54 | 4 199 | 7 340 |

**表 4 评价指标隶属度函数参数**
**Table 4 Parameters of evaluation index membership functions**

| 指标 | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\lambda_4$ | $\lambda_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $I_{PM}$ | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $I_{PL}$ | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| $I_{PE}$ | 460 | 480 | 500 | 520 | 540 |
| $I_{PTV}$ | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| $I_{PP}$ | 4 100 | 4 150 | 4 200 | 4 250 | 4 300 |
| $I_{PV}$ | 7 400 | 7 500 | 7 600 | 7 700 | 7 800 |

经模糊综合评价后,限流运行方式 1～4 的综合决策优先度分别为 0.560 6,0.653 3,0.507 2,0.556 7。由此可知,方式 2 为最佳限流运行方式。根据工程经验,同时开断邢姚 2 回、许清 1 回线路可实现济南地区 500 kV/220 kV 电磁环网开环运行,济南站短路电流降至 45.69 kA,黄台厂短路电流降至 44.11 kA。该断线组合限流效果显著,然而牺牲了电压稳定性和供电可靠性,其综合决策优先度为 0.558 2,与方式 2 相比综合性能较差。

## 4 结语

本文提出先简化寻优、后细化评价的分区电网限流运行方式综合决策方法。济南电网仿真结果表明:①在尽量保持电网结构完整的前提下,以加权短路电流灵敏度系数为判据,可以避免对所有断线组合逐一尝试和校核,从而快速寻找较优的限流运行方式可行方案集;②ANP 考虑到评价模型各因素之间相互影响、相互制约的关系,能够克服 AHP 要求评价指标之间相互独立的不足,得到更符合实际的评价指标权重;③评价体系考虑到地区型电网的特点,采用适用于局部电网结构的决策因素,包括短路电流水平、暂态电压安全和静态潮流分布,具有工程意义。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

## 参 考 文 献


[1] 电力行业电网运行与控制标准化技术委员会.电力系统安全稳定导则.北京:中国电力出版社,2001.

[2] 祁万春,奚巍民,张谦,等.应用500 kV高阻抗变压器提高220 kV片区供电能力.电力系统自动化,2008,32(14):96-98.
QI Wanchun, XI Weimin, ZHANG Qian, et al. Improving power supply capability of 220 kV district grid using 500 kV main transformer with high short circuit impedance. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 96-98.

[3] 杨雄平,李力,李扬絮,等.限制广东500 kV电网短路电流运行方案.电力系统自动化,2009,33(7):104-107.
YANG Xiongping, LI Li, LI Yangxu, et al. Operation schemes for limiting short-circuit current of 500 kV network in Guangdong power grid. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 104-107.

[4] HONGESOMBUT K, MITANI Y, TSUJJ K. Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 1828-1831.

[5] 陈丽莉,黄民翔,张弘,等.电网限流措施的优化配置.电力系统自动化,2009,33(11):38-42.
CHEN Lili, HUANG Minxiang, ZHANG Hong, et al. An optimization strategy for limiting short circuit current. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 38-42.

[6] 张永康,蔡泽祥,李爱民,等.限制500 kV电网短路电流的网架调整优化算法.电力系统自动化,2009,33(22):34-39.
ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39.

[7] SARMIENTO H G, CASTELLANOS R, PAMPIN G, et al. An example in controlling short circuit levels in a large metropolitan area// Proceedings of 2003 Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003, Toronto, Canada: 589-594.

[8] SAATY T L. Decision making with dependence and feedback: the analytic network process. Pittsburgh, PA, USA: RWS Publication, 1996.

[9] YU R, TZENG G H. A soft computing method for multi-criteria decision making with dependence and feedback. Applied Mathematics and Computation, 2006, 180(1): 63-75.

[10] 徐贤.220 kV电网短路电流预测的新方法及应用.电力系统自动化,2007,31(16):103-106.
XU Xian. A novel method for predicting short-circuit current of 220 kV sub-transmission network and its application. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 103-106.

[11] 薛禹胜,徐泰山,刘兵,等.暂态电压稳定性及电压跌落可接受性.电力系统自动化,1999,23(14):4-8.
XUE Yusheng, XU Taishan, LIU Bing, et al. Quantitative assessments for transient voltage security. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 4-8.

[12] STEFOPOULOS G K, YANG F, COKKINIDES G J, et al. Advanced contingency selection methodology// Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, October 23-25, 2005, Ames, IA, USA: 67-73.

[13] CHEN Y, BOSE A. Security analysis for voltage problems using a reduced model. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(3): 933-940.

[14] 吴际舜.电力系统静态安全分析.上海:上海交通大学出版社,1985.

[15] WOOD A J, WALLENBERG B F. Power generation, operation and control. New York, NY, USA: John Wiley & Sons Inc, 1996.



杨　冬(1984—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail:yangdong@mail.sdu.edu.cn

刘玉田(1964—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail:liuyt@sdu.edu.cn

牛新生(1962—),男,高级工程师,主要研究方向:电网规划与运行分析。E-mail:niuxs3701@126.com


## Integrated Decision Method of Operation Schemes for Limiting Short-circuit Currents in District Grids


*YANG Dong*[1], *LIU Yutian*[1], *NIU Xinsheng*[2]

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)



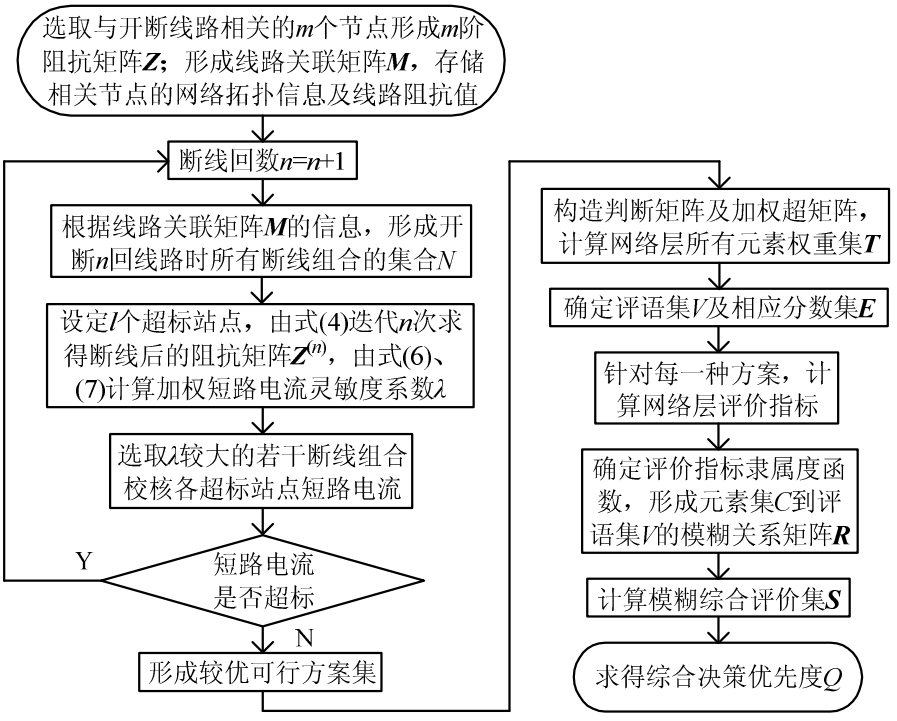
**Abstract:** An integrated decision method of operation schemes for limiting short-circuit currents in district grids is presented. This method starts with the process of simplified optimization. Under the premise of the integrity of power grid, the superior set of feasible alternatives for limiting short-circuit currents is rapidly sought based on the weighted sensitivity. Then, the detailed evaluation is implemented. Considering the relationship of short-circuit current level and system stability, this paper establishes an evaluation model based on analytic network process. Using the fuzzy comprehensive evaluation, the optimal scheme can be determined from the set of feasible alternatives. Considering short-circuit current level, transient voltage security and static power flow distribution, the integrated decision priority represents the systematic, comprehensive and quantitative assessment. The feasibility and practicability of the proposed method is verified by the simulation of Jinan power grid.



This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2009]12).

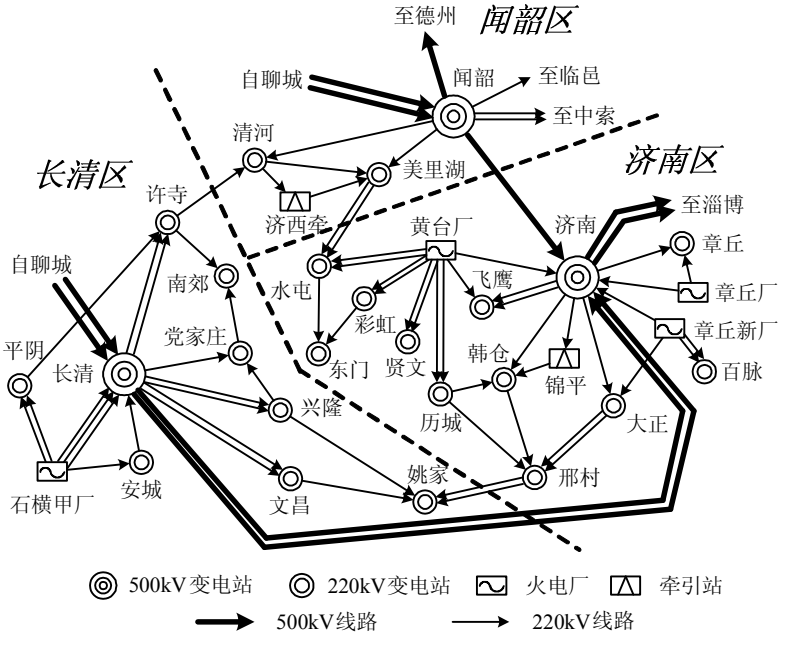
**Key words:** district grid; short-circuit current; analytic network process; fuzzy comprehensive evaluation

# 附录 A　综合决策方法的流程图




**图A1　综合决策方法的流程图**
**Fig.A1　Flow chart for integrated decision method**

# 附录 B　济南电网结构




**图B1　济南电网结构**
**Fig.B1　Structure of Jinan power grid**