

基于电力系统分析综合程序的 限流方案综合评价方法

刘文颖¹, 但扬清¹, 朱艳伟¹, 李芙蓉², 沈卫东², 李群炬²

- (1. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京市 昌平区 102206;
2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京市 西城区 100045)

A Power System Analysis Software Package Based Comprehensive Evaluation Method for Short-Circuit Current Limitation Strategy

LIU Wenyong¹, DAN Yangqing¹, ZHU Yanwei¹, LI Xiaorong², SHEN Weidong², LI Qunju²

- (1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. North China Electric Power Research Institute, Xicheng District, Beijing 100045, China)

ABSTRACT: A comprehensive evaluation system for short-circuit current limitation strategy is proposed based on fuzzy comprehensive evaluation algorithm and related calculation results by Power System Analysis Software Package (PSASP). The core algorithm, structure, functions and data interface of the proposed system are described in detail. By use of judgment matrix analysis, a judging matrix is constructed for the proposed system, and after the normalization of the eigenvectors corresponding to the maximum eigenvalues of the judging matrix the weight vectors are attained to make determination of the weights more objective. In the utilized fuzzy comprehensive evaluation algorithm the mutual restrictions among short-circuit current level, transient voltage stability, steady state power flow distribution and operational economy are taken into account. Using fuzzy comprehensive evaluation algorithm, the optimal short-circuit current limitation strategy is decided from the set of feasible current limitation schemes, thus a systemic, objective, overall and quantitative decision for the operation scheme with short-circuit current limitation strategy can be made. The feasibility and practicality of the proposed system are verified by calculation results of an actual regional power network.

KEY WORDS: short-circuit current; analytic network process; fuzzy comprehensive evaluation; Power System Analysis Software Package (PSASP); judgment matrix

摘要: 基于 PSASP 相关计算结果和模糊综合评价算法, 开发了限流方案综合评价系统。详细介绍了其核心算法、结构、功能和数据接口。本系统采用判断矩阵分析法, 构建判断矩阵, 其最大特征值对应的特征向量经归一化后得出权重向

量, 使得权重的确定更具客观性。所采用的模糊综合评价算法综合考虑了短路电流水平、暂态电压安全、静态潮流分布和运行经济性之间的相互制约关系。通过模糊综合评价算法从可行限流方案集中确定最佳限流运行方案, 能够对电网限流运行方案作出系统、客观、全面、定量的决策。最后以某区域电网为例验证了所开发系统的可行性和实用性。

关键词: 短路电流; 网络分析法; 模糊综合评价; 电力系统分析综合程序; 判断矩阵

0 引言

电网联系的日趋紧密及大容量发电机组的接入导致电网短路电流超标问题日益严重, 限流措施也不断推陈出新。目前, 限流措施主要有电网结构分层分区^[1]、母线分列运行^[2]、电磁解环^[3]、加装限流电抗器或故障限流器 (fault current limiter, FCL)^[4-5]、采用高阻抗变压器、变压器中性点经小电抗接地^[6]以及更换设备等措施。面对多种限流方案, 如何选择最优方案摆在了电网运营商面前。传统的办法通常是对各种限流措施逐一进行计算比较, 因此存在计算方法繁琐、计算效率低等问题。

文献[7]提出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[8]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[9]给出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。可以看出上述研究均是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。

文献[10]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，通过模糊综合评价模型确定最佳限流运行方式，但没有考虑电网运行经济性问题，不利于电网自身的发展。本文借鉴文献[10]模型，增加电网运行经济性因素到该模型中，开发了限流方案综合评价系统，从而实现了对较优可行方案集的系统、全面决策。同时系统除经济投资以外的源数据全部来自于 PSASP 软件的潮流、暂态稳定和短路电流计算结果，数据接口简单，工程实用性强。

1 模糊综合评价算法

1.1 两层 ANP 结构及权重矩阵

模糊综合评价模型^[11]是在模糊集论创始人 L.A.Zadeh 的层次分析法上发展而来的，目前在电厂选址^[12]、大用户购电组合策略^[13]、火电厂状态评估^[14]和风速预测^[15]等多方面都得到很好的应用。它以模糊数学为基础，运用模糊线性变换原理，综合考虑与被评价事物相关的各种因素，对被评价事物作出全面综合的评价。由于 ANP 与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)相比考虑了上层元素对下层元素的支配作用，同时还考虑到底层元素对高层元素的支配作用和各层次内部元素的相互依存关系，所以本文采用 ANP 法。

依据 ANP 法，结合短路电流限制措施优化配置的要求，建立如图 1 所示的层次分析法结构图。其中控制层包括短路电流水平、静态安全性、暂态稳定性和运行经济性 4 个准则；网络层包括 10 个指标，它们受各自控制层的准则支配，形成相互影响和制约的网络结构。其中间接投资包括开关、高抗变压器和串联电抗器等设备投资；直接投资主要指分母运行和新增设备占地投资。间接投资和直接

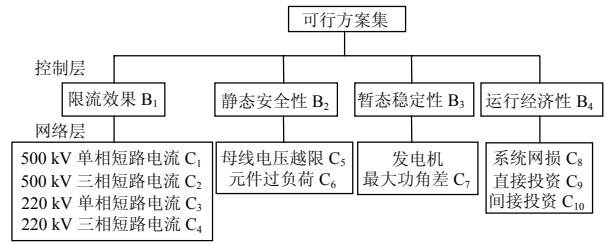


图 1 用于短路电流限制措施评价的层次分析结构

Fig. 1 ANP structure for evaluation of short-current limiting strategy

投资直接反映了限流方案的经济性，促使运行人员不能一味追求电网的安全性和稳定性，同时还得兼顾运行的经济性。

针对不同电网结构，专家可以依据电网运行特性确定图 1 中控制层各准则之间的关系和每个准则下各指标之间的关系，形成电网限流方案的全面描述，即判断矩阵，然后根据判断矩阵计算权重向量 W 。

1.2 评价指标及分数矩阵

1) 短路电流限流效果指标 λ_{SC} 。

$$\lambda_{SC} = \sum_{\gamma} (I_{SC>40-i} / I_{0-i})^2$$

式中： γ 为母线断路器集合； $I_{SC>40-i}$ 为采取措施后短路电流大于 40 kA 的线路电流， I_{0-i} 为断路器额定遮断电流。

2) 元件过负荷指标 λ_{part} 。

$$\lambda_{part} = \sum_{\alpha} (S_{part} / S_{part}^{\max})^2$$

式中： α 为输电线路或变压器支路集合； S_{part} 为支路 l 的功率； S_{part}^{\max} 为其额定容量。

3) 母线电压越限指标 λ_U 。

$$\lambda_U = \sum_{\beta} \left(\frac{U_i - U_i^{SP}}{\Delta U_i^{\lim}} \right)^2$$

$$U_i^{SP} = (U_i^H + U_i^L) / 2, \Delta U_i^{\lim} = (U_i^H - U_i^L) / 2$$

式中： β 为母线集合； U_i 为母线 i 的电压幅值， U_i^H 和 U_i^L 分别为其上限和下限。

4) 最大发电机功角差 δ_{\max} 。

$$\delta_{\max} = \max |\delta_i - \delta_j|$$

式中 δ_i, δ_j 为故障切除后暂态过程中任意 2 台发电机之间的功角。

5) 直接投资指标 λ_c 。

$$\lambda_c = \sum_{\phi} M_i$$

式中 M_i 是指开关、高阻抗变压器和串联电抗器等设备的造价， 10^3 万元。

6) 间接投资指标 λ_{land} 。

$$\lambda_{\text{land}} = \sum_{\phi} F_i$$

式中 F_i 指占地和工程建设费用， 10^3 万元。

7) 系统网损指标 λ_{loss} 。

$$\lambda_{\text{loss}} = \Delta P_{\text{loss}}$$

式中 ΔP_{loss} 是某种方案下系统增加的有功网损衡量。

根据评价指标的取值范围确定评价集，然后将方案下的指标取值按隶属度函数映射到评价集，形成隶属度矩阵 μ ，并最终形成分数矩阵 S 。

1.3 综合评价模型

本文综合评价模型为分为 2 层，控制层的综合评价由各指标的权重系数向量与指标分数矩阵确定，即

$$p(i, j) = \sum_{k=m}^n w_k \cdot s_{kj} \quad (1)$$

式中： w_k 为权重集 W 的元素； s_{kj} 为第 k 个指标在第 j 级评语中的分数； $p(i, j)$ 为第 i 个准则在第 j 级评语中的分数； m 为第 $i+1$ 个准则前的指标个数。

方案集的优先度表达式为

$$P(l) = \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^h w_i \cdot p(i, j) \quad (2)$$

式中： $P(l)$ 为第 l 个方案的优先度； h 为准则个数。

2 系统结构及模块功能

2.1 系统结构

整个短路电流限制措施优化配置系统由主控模块及多个功能模块构成，系统框图见图 2。系统分为数据接口、权重计算、隶属度矩阵计算和优先度计算 4 大模块。

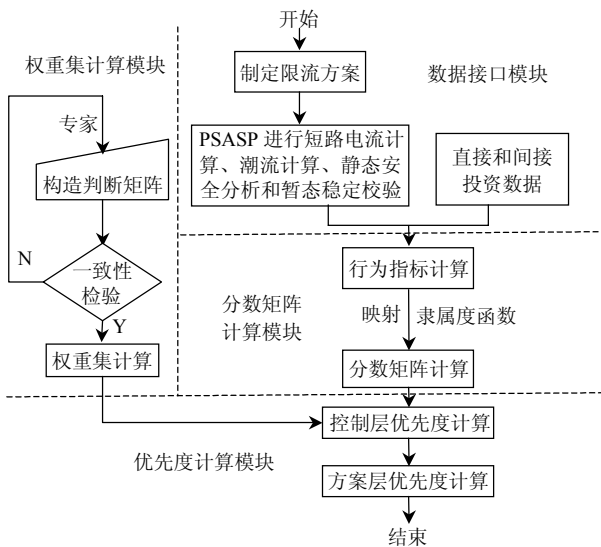


图 2 短路电流限制措施优化配置系统框图

Fig. 2 The block diagram of system of evaluation for short-current limiting strategy

2.2 数据接口

系统数据来源分为人工录入部分和 PSASP 计算后生成部分。人工录入部分包括间接投资和直接投资，由设备厂商和工程施工单位提供。PSASP 计算生成部分是指对应方案下短路电流计算、暂态稳定计算和潮流计算结果。上述 2 部分数据格式均为 excel5.0。

2.3 权重集

权重集是由因素集 U 或因素子集 U_i 中各个因素相对重要性的权重组成的集合。确定因素集和各因素子集相对应的权重集是模糊综合评价最为关键的一环。在实际应用中，常用的确定权重集的方法有专家评议法、专家调查法和判断矩阵分析法。

本系统采用判断矩阵分析法，它是通过经验丰富的专家对因素集各因素之间的相对重要性作两两比较后构造判断矩阵，判断矩阵的最大特征值对应的特征向量经归一化后即为该因素集对应的权重集 W ，然后进行一致性检验，若不满足则需要重新调整判断矩阵的元素。

2.4 分数矩阵

隶属度矩阵的建立是综合模糊评价的重要一环，其步骤分为 2 步：建立评价集和将指标值映射到评价集形成隶属度矩阵。

1) 建立评价集。

评价集为对被评价事物作出的各级评语组成的集合，可以表示为 $V=(v_1, v_2, \dots, v_p)$ 。其中 $v_k(k=1, 2, \dots, p)$ 代表由高到低的各级评语，即评价等级。采用 5 级评语，图 1 中 10 个指标 ($C_1—C_{10}$) 则形成 10×5 的评价集(矩阵)。这里指标的评语分级简单地采用取两端临界值，然后等分 4 个区间得到。

对评价集中的每个评语 v_k 可以给出相应的分数，则可以得到评语集对应的分数集为 $E=(e_1, e_2, \dots, e_p)$ 。一般 5 级评语即认为可对评价对象作出较为准确的描述，即 $p=5$ 。

2) 指标值映射。

隶属度函数是将网络层中计算出的行为指标值映射到评价集中，得到隶属度矩阵 μ 。行为指标隶属于评价语集中各评语的程度可以用半梯形和三角形隶属度函数予以描述，如图 3 所示。

上图中 $\mu(e_k, v_p)(k=1, 2, \dots, 5)$ 即表示该行为指标对评语 e_k 的隶属度，其中 $v_1—v_5$ 为常量参数，表征对应指标的经验判断值，是各行为指标隶属度函数

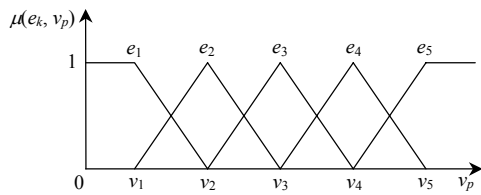


图 3 半梯形和三角形隶属度函数

Fig. 3 Half-ladder and triangle membership functions

的参数。此时指标的分数矩阵可表示为

$$S = E(.,*)\mu \tag{3}$$

公式(3)不是普通意义的矩阵乘法,而是 E 阵与 μ 阵中对应元素相乘,所以用“.”符号以示区分。

2.5 优先度计算

优先度计算模块在所有指标权重系数和隶属度矩阵计算完成的情况下,系统就会根据式(1)(2)快速计算出所有方案的优先度。同时该模块还提供优先度大小的查询和排名功能,方便用户直观地查看各个方案的优劣。

3 实例应用

以某区域输电网 2009 年冬大方式全接线网架为例,应用上述综合决策系统,对该区域电网进行限流运行方式综合决策。该区域电网 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,促使该地区电网短路电流飙升;新建大电源的接入使分区电网短路电流超标问题更加突出。该区域电网短路电流超标情况如表 1 所示。

表 1 某区域电网短路电流超标站点一览

Tab. 1 The list of substation over rated current in a certain regional grid

短路故障点站名	短路电流/kA	开关额定电流/kA	超标百分比/%
I 站 220 kV 侧	72.48	50	145
II 站 220 kV 侧	68.32	50	136
III 站 220 kV 侧	67.43	50	134
IV 站 220 kV 侧	62.11	50	124
V 站 220 kV 侧	60.74	50	121
VI 站 220 kV 侧	58.79	50	117
VII 站 220 kV 侧	57.34	50	114.7
VIII 站 220 kV 侧	57.29	50	114.6

针对上述情况,制定了 3 套限流方案。由于该区域 220 kV 站点短路电流普遍超标,而 500 kV 主网架已坚强,为分区解环运行提供了必要条件。方案 1 采用 500 kV/22 kV 解环分区运行,能有效减小低电压等级 220 kV 站点短路电流;同时配以母线分裂运行措施。方案 2 采用出线串抗、更换高阻抗变

压器和更换大截面导线。方案 3 采用更换断路器和加装限流电抗器措施。

利用电力系统分析软件包(PSASP)对每个方案进行短路电流计算、暂态稳定计算和潮流计算,将其结果导出为 excel5.0 文件。对 PSASP 计算结果和投资数据综合直观分析得,3 个方案均能满足限流和电网安全运行要求。但在运行经济方面,显然方案 1 最优,其次是方案 2。

启动本系统,在权重计算模块输入各指标之间的关系;在分数矩阵计算模块导入 PSASP 计算结果和投资数据,并进行相关计算。然后进入优先度计算系统,进行优先度计算。计算结果如表 2 所示。

表 2 优先度计算结果

Tab. 2 The priority value of multi-schemes

方案号	1	2	3
优先度	7.33	5.82	4.64

表 2 表明,方案 1 为最优方案,这与前面直观分析结果一致。

若忽略直接投资和间接投资 2 个指标,通过计算发现,方案 3 的优先度最大。这显然与实际相悖,因此在控制层加入运行经济性准则能更全面、系统的评价限流方案。

4 结论

本文提出的用于确定最佳限流运行方案的多层次模糊综合评价模型具有以下优势:

1) 应用判断矩阵分析法计算权重向量,使得权重的确定更具客观性。

2) 计算中增加了运行经济性指标,使得运行人员在考虑系统安全运行的同时还要顾及到运行经济性。

3) 本系统与 PSASP 程序之间友好的接口,使得该系统更具工程实用价值。

参考文献

[1] 刘树勇,顾强,张丽娟,等. “十一五”期间天津 500/220 kV 电网分区供电方案[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 51-55.
Liu Shuyong, Gu Qiang, Zhang Lijuan, et al. Research on power supply scheme based on partitioning of 500/220 kV Tianjin power grid during the 11th five-year plan[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 51-55(in Chinese).

[2] 袁娟,刘文颖,董明齐,等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
Yuan Juan, Liu Wenying, Dong Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in northwest China power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45(in Chinese).

[3] 孔涛,王洪涛,刘玉田,等. 500 kV-220 kV 电磁环网开环研究[J]. 电

- 力自动化设备, 2003, 23(12): 13-16.
- Kong Tao, Wang Hongtao, Liu Yutian, et al. On opening 500 kV-220 kV electromagnetic loop circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 13-16(in Chinese).
- [4] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 谐振型限流器最优投切策略研究[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 36-39.
- Wang Huaxin, Xi Hexun, Tang Guangfu, et al. Study on optimized switching on/off strategy for resonant-type fault current limiter[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 36-39(in Chinese).
- [5] 孙树敏, 刘洪顺, 李庆民, 等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 75-79.
- Sun Shumin, Liu Hongshun, Li Qingmin, et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 75-79(in Chinese).
- [6] 于化鹏, 陈水明, 杨鹏程, 等. 220 kV 变压器中性点经小电抗接地方式[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 146-151.
- Yu Huapeng, Chen Shuiming, Yang Pengcheng, et al. Neutral grounding via small reactance for 220 kV power transformers[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 146-151(in Chinese).
- [7] 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 38-42(in Chinese).
- [8] 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[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39(in Chinese).
- [9] Sarmiento H G, Castellanos R, Pampin G, et al. An example in controlling short circuit levels in a large metropolitan area [C]//Proceedings of 2003 Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Canada: IEEE Power & Energy Society, 2003: 589-594.
- [10] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合决策方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 34-38.
- Yang Dong, Liu Yutian, Niu Xinsheng. Integrated decision method of operation schemes for limiting short-circuit currents in district grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 34-38(in Chinese).
- [11] 张吉军. 模糊层次分析法[J]. 模糊系统与数学, 2000, 16(2): 80-88.
- Zhang Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 16(2): 80-88(in Chinese).
- [12] 郭新志, 乞建勋, 李星梅. 基于改进模糊层次分析法的火电厂选址综合评价方法研究[J]. 现代电力, 2007, 24(3): 67-71.
- Guo Xinzhi, Qi Jianxun, Li Xingmei. Synthetic evaluation method of site selection for thermal power plants based on improved fuzzy-AHP[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(3): 67-71(in Chinese).
- [13] 郑雅楠, 李庚银, 周明. 大用户模糊优化购电组合策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 98-104.
- Zheng Yanan, Li Gengyin, Zhou Ming. Studies of electricity procurement strategy for large consumers based on fuzzy optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 98-104(in Chinese).
- [14] 满若岩, 付忠广. 基于模糊综合评判的火电厂状态评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 5-10.
- Man Ruoyan, Fu Zhongguang. Condition assessment of fossil-fired power plant based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 5-10(in Chinese).
- [15] 黄文杰, 傅砾, 肖盛. 采用改进模糊层次分析法的风速预测模型[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 164-168.
- Huang Wenjie, Fu Li, Xiao Sheng. A predictive model of wind speed based on improved fuzzy analytical hierarchy process[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 164-168(in Chinese).



刘文颖

收稿日期: 2011-04-07。

作者简介:

刘文颖(1955), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制及电力系统智能调度;

但扬清(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: danyangqing@yahoo.com.cn;

朱艳伟(1983), 女, 博士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

(责任编辑 李兰欣)