

# 基于回溯法环网助增系数计算方法的研究

熊学海<sup>1</sup>, 万春竹<sup>1</sup>, 赵凌<sup>1</sup>, 齐雪雯<sup>1</sup>, 李武龙<sup>2</sup>, 崔晓慧<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550000;  
2. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:**随着高压电网结构的日益复杂,大小环网互相交错的情况屡见不鲜,这使得继电保护的整定计算越来越复杂,尤其是计算定值需要满足各种运行方式,而助增系数的计算结果受运行方式的影响极大,因而搜索极端运行方式是定值整定计算的重中之重。针对现有高压环网的特点,提出了一种基于回溯算法计算助增系数的方法,通过对保护支路的回溯搜索可得到不同级数的环网,全面考虑不同级数环网各种恶劣运行方式下的助增系数,并通过算例与传统助增系数计算方法的计算结果进行了对比,得出基于回溯算法能够快速准确地找到更为极端运行方式下的助增系数,最后通过实例电网验证了该算法的有效性,并对该算法的复杂度进行了分析,验证了其快速性。

**关键词:**回溯法;高压环网;助增系数

文章编号:2096-4633(2018)10-0087-06 中图分类号:TM744 文献标志码:B

随着智能电网和特高压电网建设,电网规模越来越大,电网结构也随之日益复杂,大环网、小环网交错连接情况比比皆是<sup>[1-5]</sup>。环网中某些线路的检修和投运操作影响电力系统局部网络间的物理拓扑结构,对一定范围内保护定值及其正确动作产生很大影响,助增系数作为整定计算的基础,研究运行方式对其影响有着重要意义<sup>[6-11]</sup>。

传统的助增系数计算一般采取在系统基础方式(大方式、小方式)基础上,通过轮断保护对侧母线上连接的线路来求取计算电气量和配合系数,轮断背侧母线上连接的线路来校验保护灵敏度,如电流保护。这是由于保护背侧或对侧母线所连线路往往提供了较大的馈入电流,或者承担了较大了分支电流,其开断对保护定值的影响较大。在辐射型的电网结构中,根据这种传统的运行方式组合方法,可以有效找到整定计算的极端运行方式。但是在日益复杂的超高压环网结构中,可能会遗漏某些更为极端的环行方式,给保护装置正确动作以及电力系统安全稳定运行留下隐患。因此,需要研究高压环网中极端方式助增系数的计算方法。

文献[12]运用电力系统的拓扑辨识有针对性地选择对定值计算结果有较大影响的线路断开,得到电力系统中的极端运行方式。文献[13]提出利用遗传算法建立故障电流和分支计算所需的节点阻抗矩阵,以最大、最小电流和助增系数为目标,得到

各种极端情况下的厂站运行方式组合。文献[14]提出了利用电气耦合指标查找电力系统中较为苛刻的运行方式。上述研究虽然提出了一些电网定值计算中极端运行方式获取及助增系数计算的通用方法,但是对于高压环网下助增系数的计算考虑并不全面,且电网节点矩阵模型过大,矩阵求逆算法复杂,对整定计算效率影响较大。

因此,本文提出了一种基于回溯法的高压环网极端助增系数计算方法,该方法通过寻找保护所在电网中所有处于回路中的线路进行组合轮断,充分考虑环网中各侧电源对助增系数计算的影响,有效地保证整定计算的准确性及效率。

## 1 传统助增系数计算

传统助增系数的计算考虑在系统的基础方式下,即大方式、小方式,通过轮断对侧或者背侧母线上连接的线路来求得助增系数<sup>[15-18]</sup>。如图1所示为一个典型的电网结构,R1和R2为两个需要配合的保护,其中R2为配合支路,电网参数如表1所示,G1~G3为系统电源,L1~L5为线路,可以看出,L1,L2(L3),L4和L5构成环网。

保护R1与保护R2配合,考虑对侧和背侧N-1检修,同时考虑相邻支路L2首端和末端故障,得到助增系数计算结果如表2所示,可以看出,传统助增系数计算结果中的最小值为1.440 1。

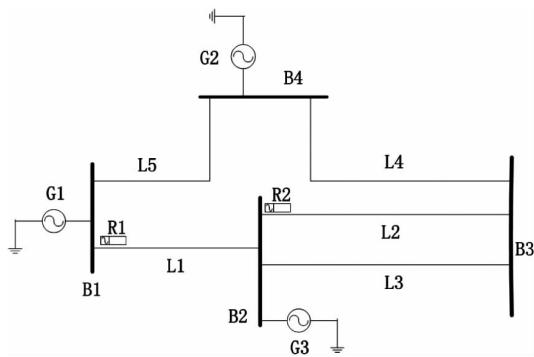


图 1 典型环网示例图

Fig. 1 Typical example of ring network

表 1 电网参数

Tab. 1 Grid parameter

元件名称	正序电抗标幺值
G1	1
G2	2
G3	0.5
L1	0.3
L2	0.6
L3	0.4
L4	0.4
L5	0.2

表 2 传统助增系数计算结果

Tab. 2 Calculation results of traditional branch coefficient

本支路	配合支路	助增系数	运行方式描述
L1 线	L2 线	1.440 1	L5 线检修, 在 L2 线的 B3 侧发生故障
L1 线	L2 线	2.956 8	L5 线检修, 在 L2 线的配合位置首端发生故障
L1 线	L2 线	3.402 5	L3 线检修, 在 L2 线的配合位置首端发生故障
L1 线	L2 线	3.581 7	在 L2 线的 B3 侧发生故障
L1 线	L2 线	3.850 6	在 L2 线的配合位置首端发生故障
L1 线	L2 线	3.873 0	L5 线检修, 在 L2 线的配合位置首端发生故障

由图 1 可以看出, 线路 L4 对于 L1 和 L2 之间的配合起关键的作用, 如果 L4 检修, 则 G2 提供的短路电流只能通过保护 R1 的支路 L1 注入故障点, 从而使 L1 上的短路电流增大, 则对应助增系数变大, 但是 L4 支路不是保护 R1 的对侧或背侧母线所连支路, 因此在传统助增系数中不会考虑 L4 支路检

修。若将 L4 支路检修, 则计算保护 R1 和保护 R2 的助增系数, 则有在 L2 的 B3 侧发生故障时计算出助增系数为 1.1901, 而传统助增系数计算方法并没有考虑到环网的这种情况, 导致计算的结果并不是极端运行方式下的助增系数。由此可知, 某些与本支路及相邻支路电气距离较近的支路连接重要电源或同本支路及相邻支路构成回路时, 其对助增系数的计算影响极大。

因此, 该文针对上述情况, 研究出一种适用于高压环网的助增系数计算方法, 解决传统助增系数计算方法考虑不全面的问题。

## 2 回溯法计算助增系数原理

回溯法计算助增系数是针对高压环网架构, 遍历电网拓扑, 找到本保护背侧母线到本保护对侧母线两个节点间的所有回路, 并将回路中的线路加入到轮断线路中进行轮断。

### 2.1 回路的快速搜索算法

该文根据环网结构特点提出了一种无重复回路的快速搜索算法, 可以快速找出本保护所在支路相关的所有回路, 并可查找特定级数内的回路。

设  $G$  是一个由  $n(n > 2)$  个顶点组成的图, 构成回路的顶点均有至少两条支路, 如果某顶点只连有一条支路, 则认为此条支路为单条支路, 在回溯搜索算法中, 需删除此节点至起始顶点的所有支路。以保护所在支路任意节点  $s$  为起始顶点, 在余下的所有顶点中按照各顶点的度(定义节点与支路的关联次数为度)进行回路搜索, 回溯法搜索回路流程如图 2 所示:

(1) 判断图  $G$  的顶点个数  $n$ , 若  $n < 2$ , 则构不成回路, 查找终止, 否则继续。

(2) 判断图  $G$  中是否含有单条支路, 删除所有单条不构成回路的  $k$  条支路, 则剩余顶点数为  $n - k$ 。

(3) 选取  $s$  为起点, 找到与  $s$  点直接相连的  $m$  条支路进行排列组合, 从  $m$  条支路选取两条支路, 以两条支路中的任意一条为搜索路径, 查找与之相连的所有支路, 直到找回  $s$  点, 则记此路径为一条回路  $C_1$ , 将此回路放入回路集合  $C_p$  中。

(4) 以此类推, 按各节点的度找到图  $G$  中所有的回路  $C_2, C_3, \dots$  加入集合  $C_p$  中, 并可根据需要查找  $N$  级( $N > 1$ )回路。

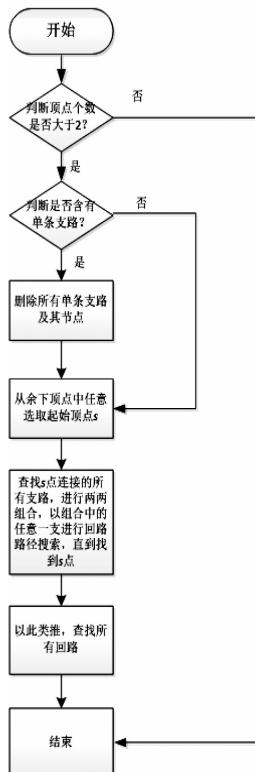


图 2 回路查找流程图

Fig. 2 Flow chart of loop search

## 2.2 算法验证

如图 3 所示, 顶点个数为 5, 顶点序号为  $s$ 、1、2、3、5,  $s$  为任意起始顶点, 各边序号分别为  $L_1 \sim L_7$ 。判断图中存在单条支路, 删除单条支路  $L_7$  及其节点 5, 查找与  $s$  相连的支路共有三条, 即  $L_1 \sim L_3$ , 将这三条线路进行两两组合, 得到  $L_1 \sim L_2$ ,  $L_2 \sim L_3$ ,  $L_1 \sim L_3$  三种组合情况, 每个组合中任选取一支作为回路查找的节点, 依次搜索所连支路, 直到找到回到  $s$  点, 如图 4 所示为回路搜索后顶点序列图。

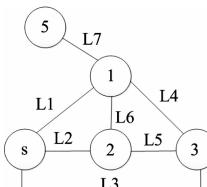


图 3 回溯法原理图例

Fig. 3 The Backtracking principle legend

从图 4 可看出, 以  $s$  为参考起点的级数为 4(定义起始顶点为第一级)的回路共有 3 个: ( $L_1, L_2, L_4, L_5$ )、( $L_2, L_3, L_6, L_4$ )、( $L_1, L_3, L_5, L_6$ ); 以  $s$  为参考起点的级数为 3 的回路共有 3 个: ( $L_1, L_2, L_6$ )、( $L_2, L_3, L_5$ ) 及 ( $L_1, L_3, L_4$ )。综上, 此算法可查找不同级数的回路。

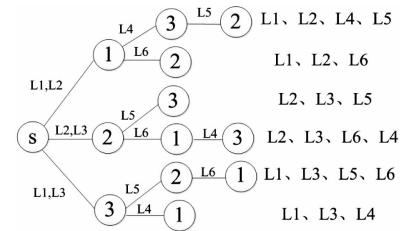


图 4 回路搜索后顶点序列图

Fig. 4 Vertex sequence figure of loop search

## 3 算例分析

本文以某电网复杂环网结构为例验证回溯法的有效性及正确性, 环网结构如图 5 所示, 其中 220 kV A 厂站、220 kV B 厂站和 220 kV F 厂站均为有源厂站, 各设备参数如表 3 所示。

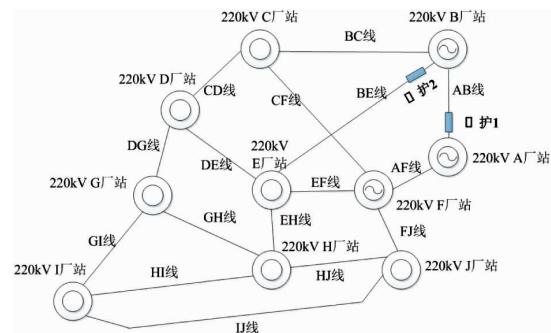


图 5 实际电网环网结构图

Fig. 5 Actual ring network of power grid

表 3 算例设备参数表

Tab. 3 Example equipment parameter table

元件名称	正序电抗标幺值
220 kV A 厂站等值电源 G1	0.32
220 kV B 厂站等值电源 G2	0.754
220 kV F 厂站等值电源 G3	0.48
AB 线	0.475
BC 线	0.264
CD 线	0.478
DE 线	0.376
EF 线	0.726
AF 线	0.753
BE 线	0.462
CF 线	0.265
DG 线	0.567
GH 线	0.533
EH 线	0.643
GI 线	0.157
HI 线	0.529
HJ 线	0.825
IJ 线	0.478
FJ 线	0.248

### 3.1 助增系数计算结果分析

该文以计算 AB 线对 BE 线的助增系数为例进行验证,保护所在位置如图 5 所示。选取 AB 线路 220 kV A 厂站侧的保护为起始顶点,根据回溯搜索法得到如图 6 所示的回路顶点序列图,由图 6 可知,本环网结构共有 20 个回路,其中 4 级回路(起始顶点 A 为第一级厂站)2 个,6 级回路 3 个,7 级回路 1 个,8 级回路 6 个,9 级回路 7 个,10 级回路 1 个。可根据特定级数查找对应级数回路内所有线路进行 N-1 检修、N-2 检修(回路中线路条数大于 2 条)。

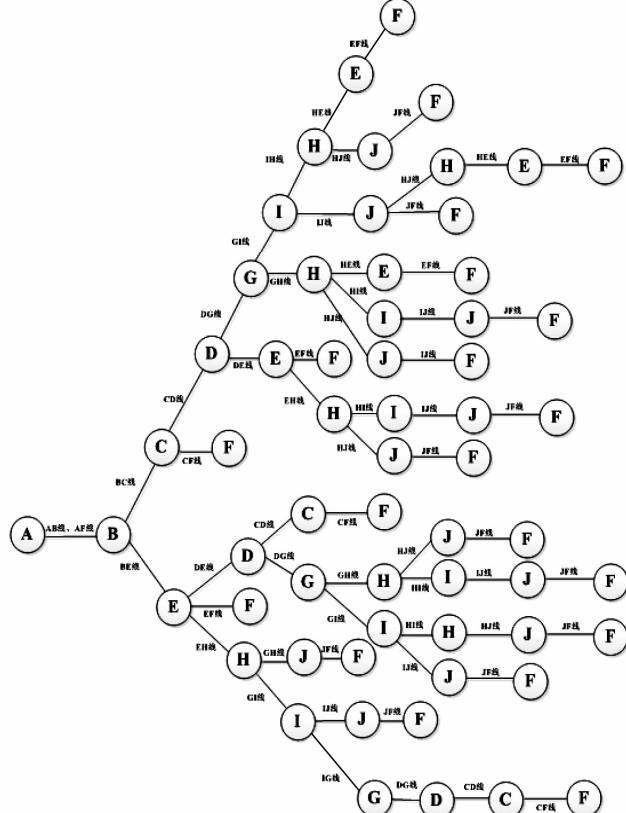


图 6 回溯搜索法得到的顶点序列图

Fig. 6 Vertex sequence figure of backtracking method

该文运用传统助增系数的计算方法对保护 1 对侧母线上所连支路进行轮断,得到极大助增系数为

$$T = t_2 \times t_3 \times \cdots \times t_n = m_1 \times (m_1 - 1)/2 \times (m_2 - 1) \times \cdots \times (m_{n-1} - 1)$$

如图 5 所示的电网中,厂站数为 10,各厂站的度分别为 2、3、3、3、3、4、3、4、3、3,对应的最大搜索次数为 384 次,每次搜索时间为 0.000 1 s,则回路搜索共需 0.038 4 s。由此可见,回溯搜索法的计算效率是比较理想的。

1.933 5,而利用该文提出的回溯法计算助增系数的方法结果为 1.363 1,两种方法求得助增系数的对比结果如表 4 所示,可以看出,利用回溯法计算得出的助增系数比运用传统方法计算出的助增系数更为恶劣。这是由于本支路保护对侧或背侧线路与本保护或配合保护构成回路或者连接重要电源时,传统计算助增系数的方式会遗漏一些恶劣运行方式。采用本文提出的回溯法计算助增系数,可全面考虑环网断环后各种恶劣运行方式,包括本保护和配合保护对侧、背侧以外的开环线路,对电网的安全稳定运行有着重要意义。

表 4 两种方法对比结果

Tab. 4 Comparison of two method

	本支路	配合支路	助增系数	方式描述
回溯法	AB 线	BE 线	1.363 1	CF 线检修,EF 线检修,在 BE 线的 E 厂站侧发生故障。
传统算法	AB 线	BE 线	1.933 5	在 BE 线的 E 厂站侧发生故障。

### 3.2 回溯法计算效率分析

从回溯法的执行流程可看出,本算法的主要执行时间集中在生成回路所需的时间,随着电网节点的增加,线路条数也不断增加。设电网中共有  $n$  个成环厂站( $S_1, S_2, \dots, S_n$ ),共有  $l$  条线路。 $S_1 \sim S_n$  厂站的度分别为  $m_1 \sim m_n$ ,以  $S_1$  为参考起始顶点,则二级厂站组合数为:

$$t_2 = C_{m_1}^2 = m_1 \times (m_1 - 1)/2 \quad (1)$$

每个二级组合厂站可生成最大三级组合厂站、四级厂站数、…、 $k$  级厂站数分别如式(2)~式(4)中  $t_3, t_4, t_k$  所示:

$$t_3 = C_{m_2}^1 - 1 = m_2 - 1 \quad (2)$$

$$t_4 = C_{m_3}^1 - 1 = m_3 - 1 \quad (3)$$

$$t_k = C_{m_{k-1}}^1 - 1 = m_{m_{k-1}} - 1 \quad (4)$$

则所有回路最大搜索次数为:

$$t = t_2 \times t_3 \times \cdots \times t_n \leq \prod_{k=1}^n (m_k - 1) \quad (5)$$

## 4 结论

针对高压环网结构复杂、整定计算助增系数难的问题,提出了一种基于回溯法的助增系数计算方法,并将其应用于实际电网助增系数计算中,取得了很好

的应用效果。通过对保护支路的回路搜索得到顶点序列图,找到所有回路信息,根据各回路中线路进行N-1、N-2轮检计算出恶劣方式下的助增系数,并将回溯法计算得到的助增系数与传统助增系数计算方法的结果进行了对比,得出该方法的有效性,最后通过电网实例验证了该文提出方法的合理性及高效性。

## 参考文献:

- [1] 高旭,杜丽艳,李雪冬,等. 基于改进遗传算法的继电保护一体化图形拼接厂站最优布局[J]. 电力系统保护与控制. 2015, 43 (10): 74–78.
- [2] 罗彬,刘本希,王健,等. 网省地一体化电网运行方式可视化交互策略及实践[J]. 电网技术. 2016,40(10):3228–3235.
- [3] 余江,陈朝晖,高宏慧. 南方电网继电保护一体化监控系统建设[J]. 南方电网技术. 2014,8 (01):1 –7.
- [4] 孟晓丽,唐巍,刘永梅,等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制. 2015,43 (13):45 –51.
- [5] MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network [ J ]. Power System Protection and Control, 2015,43(13):45 –51.
- [6] CAO GC. A versatile method to calculate faults for protective relaying setting[J]. Power System Technology,2002,26 (12):24 –29.
- [7] 乐全明,郁惟镛,吕飞鹏,等. 多环电网方向保护整定计算中形成有向简单回路的新方法[J]. 中国电机工程学报[J]. 2005,25 (08):36 –40.
- [8] YUE Quanming, YU Weiyong, LV Feipeng, et al. A new algorithm to determine directional simple loops during setting and calculating of directional relays protection in a multi-loop electric power network [ J ]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering[J]. 2005,25 (08):36 –40.
- [9] 冷贵峰,方胜文,王荣,等. 继电保护定值在线整定软件开发与实践[J]. 电力大数据. 2018,21(05):78 –81.
- [10] LENG Guifeng, FANG Shengwen, WANG Rong, et al. Development and application of on-Line setting software for relay protection [ J ]. Power Systems and Big Data,2018,21(05):78 –81.
- [11] 盛海华,赵纪元,奚洪磊. 适应智能电网继电保护定值的在线管控方案[J]. 电力系统自动化. 2016,40(15):154 –158.
- [12] SHENG Haihua, ZHAO Jiyuan, XI Honglei. On-line management and control scheme for relay protection settings of smart grid [ J ]. Automation of Electric Power Systems. 2016,40(15):154 –158.
- [13] 王友怀,杨增力,周虎兵,等. 继电保护定值在线校核及预警系统开发与应用[J]. 电力系统及其自动化学报. 2015,27 (06):91 –97.
- [14] WANG Youhuai, YANG Zengli, ZHOU Hubing, et al. Development and application of online verification and early-warning system for protective relay [ J ]. Proceedings of the CSU-EPSA. 2015 , 27 (06):91 –97.
- [15] 邓丰强,吕飞鹏,廖小君,等. 考虑系统运行方式的继电保护在线智能校核[J]. 电力系统及其自动化学报. 2013,25 (05):71 –76.
- [16] DENG Fengqiang, LV Feipeng, LIAO Xiaojun, et al. Online intelligent verification of relay protection considering system operation mode [ J ]. Proceedings of the CSU-EPSA. 2013 , 25 (05):71 –76.
- [17] 夏成军,谢奕,邱桂华. 可视化地铁供配电系统继电保护整定软件的开发[J]. 电力系统保护与控制. 2011,39(10):116 –120.
- [18] XIA Chengjun, XIE Yi, QIU Guihua. Development of visual relay protection setting calculation software for metro power supply system[ J ]. Power System Protection and Control. 2011,39(10): 116 –120.
- [19] 蒋科,吕飞鹏,郭亮,等. 基于拓扑辨识的电力系统运行方式组合方法[J]. 电网技术. 2010,34 (02):76 –79.
- [20] JIANG Ke, LV Feipeng, GUO Liang, et al. Combination method for power system operation modes based on Topology identification[ J ]. Power System Technology. 2010,34 (02): 76 –79.
- [21] 周文越,吕飞鹏,李鹤. 基于遗传算法的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制. 2013,41 (10):51 –55.
- [22] ZHOU Wenyue, LV Feipeng, LI He. Method for the combination of power system operation mode based on genetic algorithm[ J ]. Power System Protection and Control,2013,41 (10):51 –55.
- [23] 杨雄平,段献忠,石东源. 基于环网电气耦合指标运行方式组合方法[J]. 电力系统自动化. 2005,29 (23):64 –68.
- [24] YANG Xiongping, DUAN Xianzhong, SHI Dongyuan. Method for operation mode combination based on electric coupling of mesh network [ J ]. Automation of Electric Power Systems. 2005, 29 (23):64 –68.
- [25] 程小平. 配合系数与网络结构关系的研究[J]. 电力系统自动化,2000,24 (09):52 –55.
- [26] CHENG Xiaoping. Study on Relation between Network

- Topology and Cooperation Coefficient [ J ]. Automation of Electric Power Systems. 2000,24 (09):52–55.
- [16] 陈永琳. 电力系统继电保护的计算机整定计算 [M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [17] 康鹏,刘蔚,林成,等.一种基于柔性直流技术的送端电网电磁环网解环方法 [J]. 广东电力,2016,29(11):86–92.  
KANG Peng, LIU Wei, LIN Cheng, et al. A method for opening electromagnetic loop network of sending – end power grid based on VSC HVDC technology [ J ] . Guangdong Electric Power,2016,29(11):86 – 92.
- [18] 胡金,辛也平. 500 kV/220 kV 电磁环网运行分析 [J]. 内

蒙古电力技术,2017,35(03):97 – 100.

HU Jin, XIN Yeping. Running analysis of 500 kV/220 kV electromagnetic loop network [ J ]. Inner Mongolia Electric Power,2017,35(03):97 – 100.

收稿日期:2018-09-10

作者简介:



熊学海(1981),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统继电保护相关研究。

(本文责任编辑:王 燕)

## Research on calculation method of auxiliary increasing coefficient in high-voltage ring network based on backtracking method

XIONG Xuehai<sup>1</sup>, WAN Chunzhu<sup>1</sup>, ZHAO Ling<sup>1</sup>, QI Xuewen<sup>1</sup>, LI Wulong<sup>2</sup>, CUI Xiaohui<sup>2</sup>

(1. Power Dispatching Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000 Guizhou, China;  
2. Beijing Join Bright Digital Power Technology Company, Beijing 100085, China)

**Abstract:** With the increasingly complex structure of high-voltage power grids, the size of the ring network staggered situation is common, making the overall protection of the more complex calculation, especially the calculation of the value of the need to meet a variety of operating methods, and the calculation of the auxiliary increasing coefficient is very important in the calculation. In this paper, the characteristics of the existing high-voltage ring network, proposed a backtracking method of calculating the auxiliary increasing coefficient in ring network, through the protection of the ring circuit search can be different series of ring network, a comprehensive consideration of different series ring network of various harsh running and compared with the traditional calculation auxiliary increasing coefficient method. It is concluded that the backtracking algorithm can quickly and accurately find the auxiliary increasing coefficient of the more extreme operation. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by an example of the grid, and the complexity of the proposed method is analyzed, and the speediness of the proposed method is verified.

**Key words:** backtracking method; high-voltage power grid; auxiliary increasing coefficient