

基于改进 GO 法的 1 000 kV 电气 主接线可靠性研究

龚剑波, 黄民翔*, 徐国丰
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 特高压电网的快速发展对 1 000 kV 电气主接线的可靠性提出了更高的要求, 将一种以成功为导向的可靠性分析方法-GO 法引入电力系统领域, 并针对操作符的相关性, 提出了改进 GO 算法。该方法适应了主接线操作的灵活性, 建立了 3/2 断路器和双断路器 2 种主接线方式的 GO 模型图, 从不考虑元件检修的 2 状态模型和考虑元件检修的 3 状态模型两方面, 对两种典型的主接线方式展开了定量的可靠性评价并给出了最终推荐方案, 研究结果表明, 改进 GO 法在主接线可靠性评价中具有优势。

关键词: 改进 GO 法; 1 000 kV 主接线; GO 图; 操作符相关性; 可靠性

中图分类号: TM631

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0215-05

Reliability research of 1 000 kV main electrical connections based on improved GO methodology

GONG Jian-bo, HUANG Min-xiang, XU Guo-feng
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Considering the rapid development of ultra-high voltage grid putting forward higher requests to reliability research of 1 000 kV main electrical connections, a new success-driven reliability assessment method called GO methodology, was introduced to the power system field. The improved GO methodology was presented through the comprehensive consideration of the operator relevance, and adapted well to the flexibility of main electrical connections operation. The GO model charts of 3/2 circuit breaker and double circuit breaker were built clearly, and the quantitative reliability evaluations of two typical main electrical connection patterns by considering the three and two state component models were carried out, and the recommended scheme was advanced. The results show that it has the advantages of reliability research on main electrical connections using improved GO methodology.

Key words: improved GO methodology; 1 000 kV main electrical connections; GO chart; operator relevance; reliability

0 引 言

变电站内各电压等级的电气主接线可靠性相互独立^[1], 当前国内对 500 kV 及以下电压等级主接线可靠性评价主要采用 Markov 状态空间法^[2]、区间方法^[3]、频率-持续时间法(FD)等方法^[4], 而对于 1 000 kV 电压等级主接线可靠性所开展的定量研究并不多见。

GO 法(GO methodology)^[5]于 1967 年由美国 Kaman

科学公司提出, 后被用来研究核物理领域及武器系统的安全性和可用性^[6]。20 世纪 80 年代, 国外有关学者进一步开发了 GO—FLOW 方法^[7], 该方法更具模型化, 用于处理有时序有阶段性任务的可靠性分析。近年来, 国内学者对 GO 法进行了更深入的研究探讨, GO 法展现出优于其他方法的特点而开始被人关注, 并在核工业和天然气输送工程中得到有效应用^[8-9]。文献[5]没有涉及不同 GO 支路共有元件的修正处理, 文献[10-11]

收稿日期: 2011-09-14

作者简介: 龚剑波(1987-), 男, 浙江安吉人, 主要从事电网规划、电力系统可靠性分析等方面的研究。E-mail: gongjb1987@163.com

通信联系人: 黄民翔, 男, 教授。E-mail: huangmx@zju.edu.cn

分别介绍了共有元件和共有信号的处理,但均未深入研究串联结构的操作符相关性。

本研究提出改进GO算法,将着重讨论操作符相关性处理,初步探讨将该方法应用在1 000 kV电气主接线可靠性评价中,并进行相关的定量计算。

1 1 000 kV电气主接线方案

国外只有前苏联和日本开展过1 000 kV输变电工程的实际建设,但均处在降压运行状态,可供借鉴的运行经验很少。但从国外特高压1 000 kV主接线的探索与应用来看,前苏联的枢纽变电站采用4/3接线,中间变电站采用混合接线方式;日本推荐双母双分段接线;南美洲765 kV变电站采用双断路器接线;意大利则在特高压试验中采用了双母线接线。

国内各接线方式运行的主要技术特点比较如表1(假设主接线进出线总数为 n)^[12]所示。

表1 主接线技术特点比较				
技术要点	3/2 断路器接线	双断路器接线	4/3 台断路器接线	双母双分段接线
断路器数	1.5 n	2 n	1.33 n	$n+3, n+4$
运行经验	有	有	欠缺	有
N-1 校验	满足	满足	满足	不满足
接线布置	较复杂	易实现	复杂	易实现
扩建	较不易	易	不易	易

我国特高压建设须结合电网发展的基础和需求,从技术上、经济上综合考虑,3/2台断路器和双断路器接线方案总体性能上占优。

本研究拟基于改进GO法对两种主接线方式进行可靠性的定量研究。主接线方案设定为“二进二出”典型模式,以“出线L1、L2均能正常连续送电”代表系统成功运行。

2 GO法建模

GO法是以成功为导向的可靠性评价方法,其可靠性指标主要为系统的可用率^[5]。主接线方案的改进GO法可靠性评价基本流程如图1所示。

改进GO法建模基本思想为:

(1) 把系统原理图、流程图根据相关规则翻译成GO模型图(GO图)。GO图的操作符表征实际系统的单元(或逻辑关系),用信号流表征各操作符间的关联。文献[5]对17种典型的GO操作符的类型、符号、用途和特点做了详细的介绍。系统成功准则为“L1、L2均能正常送电”;

(2) 操作符相关性处理^[5]。系统的单元之间,单元和系统之间往往不是完全独立的,在停工、维修和备

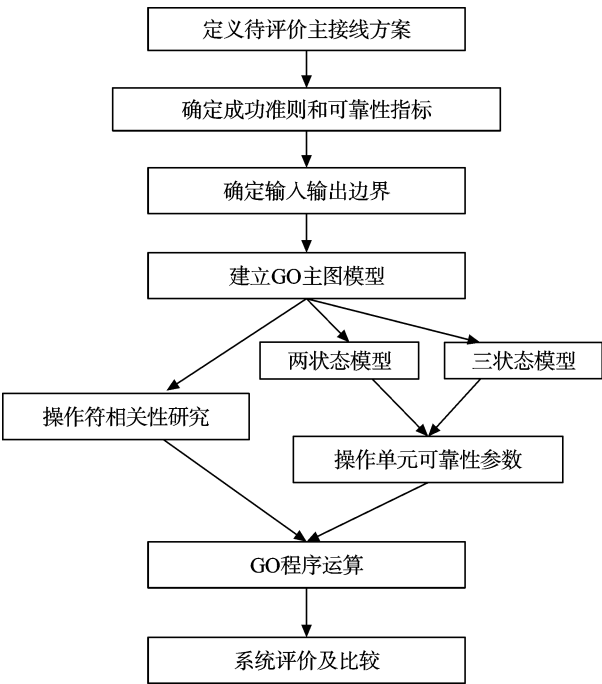


图1 GO法分析流程

用等方面存在一定的相关性,对应到GO图表现为操作符相关性。考虑到主接线的操作灵活性,本研究涉及操作符相关性主要指串联结构的等效、停工相关的处理、共有信号和共有元件的处理等;

(3) 进行GO运算。目前较成熟的分析方法主要有状态组合算法和概率公式算法,本研究采用概率公式算法对各信号流逐个推导定量求解。

3 1 000 kV电气主接线的可靠性定量分析

3.1 可靠性基础数据

现阶段1 000 kV相关设备的可靠性统计数据相对缺乏,本研究综合文献[10]、[13]中的可靠性数据,并结合文献[14]介绍的国际大电网会议(CIGRE)统计的750 kV以上设备可靠性数据,采用可靠性技术数据如表2所示。

表2 1 000 kV设备可靠性数据				
设备	故障率 (次·年 ⁻¹)	平均修复 时间/h	计检率 (次·年 ⁻¹)	平均计检 时间/h
母线	0.015	20	0.25	48
断路器	0.040	160	0.5	240
进出线	0.180	15.5	0.4	60

若元件为不考虑计划检修状态的2状态模型,其处于正常工作的概率 P_0 为^{[5][10]}:

$$P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

(1)

当元件为考虑计划检修状态的3状态模型:正常运行状态(记为状态0)、故障状态(记为状态1)和检修状态(记为状态2),本研究假设正常工作状态为设备成功运行状态(记为状态0'),故障状态和检修状态均属于设备不成功运行状态(记为状态1')。3状态元件模型至2状态元件模型的等效如图2所示:

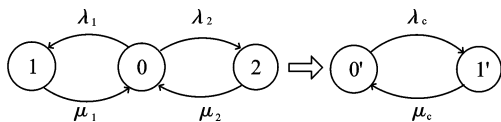


图2 3状态元件模型至2状态元件模型的等效

等效后的元件可靠性参数为^{[5][10]}:

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (2)$$

$$\mu_c = \frac{\lambda_c \mu_1 \mu_2}{\lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1} \quad (4)$$

式中:设 λ_1 和 μ_1 为设备故障率和修复率; λ_2 和 μ_2 为设备计划检修率和计划检修修复率。 λ_c, μ_c 为设备等效2状态模型下的等效停运率和等效修复率, P_c 表示等效后设备处于成功运行状态的概率。

根据表2基础数据,进一步计算2状态元件模型和3状态元件模型下的设备成功运行概率如表3所示。

表3 元件成功运行概率

设备	2 状态	3 状态
母线	0.999 966	0.998 598
断路器	0.999 270	0.985 776
进出线	0.999 682	0.996 951

3.2 3/2断路器接线建模

3.2.1 主接线方案

考虑“二进二出”模式,主接线如图3所示。

3.2.2 主接线GO图

设G1,G2为理想电源完全可靠,但进线存在故障

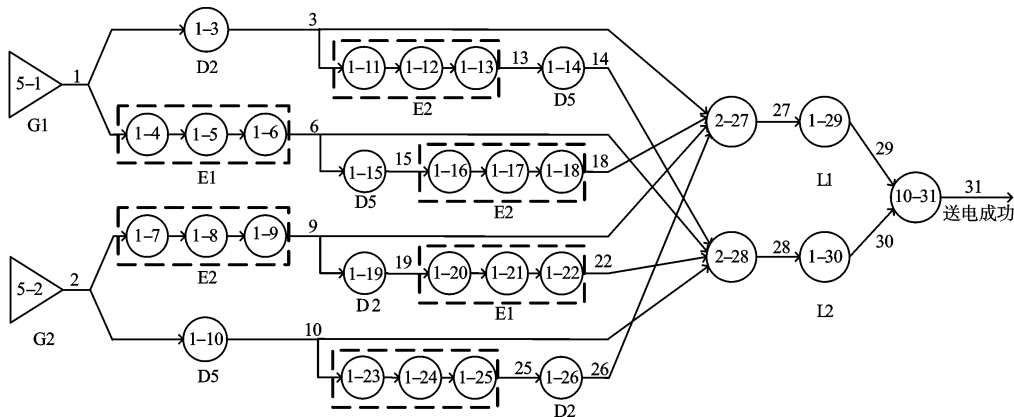


图4 3/2断路器电气主接线GO模型图

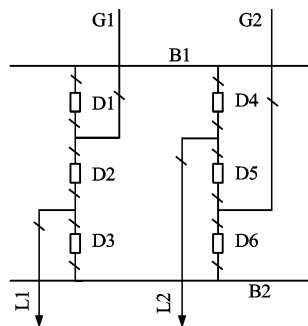


图3 “二进二出”3/2断路器电气主接线图

G—进线;B—母线;L—出线;D—断路器

的可能性,本研究在GO模型中以“类型5—单信号发生器”操作符来模拟;以“类型1—两状态单元”操作符模拟断路器、母线、等效元件等;以“类型2—或门”操作符模拟各电能输送可能路径间逻辑关系;以“类型10—与门”操作符模拟最终成功准则“L1,L2均能正常供电”。文献[10]对GO图作了简化分析并引入条件信号来表征设备间成功运行的依存关系;本文则在考虑所有电能传输路径后分析串联结构的等效处理,建立3/2断路器接线方式的系统GO模型如图4所示。

3.2.3 停工相关的处理

“停工相关”用停工故障数 I 表示,意义为系统中 I 个单元维修停工时,没有发生故障的其他单元随系统的停工而停止运行,并且不再发生故障,直到系统恢复这些单元再恢复正常运行^[5]。针对内部元件不独立的串联结构,应对其进行“停工相关”分析,得到其等效元件模型及相应的可靠性参数。

当考虑“二进二出”3/2断路器接线时,串联结构“D1、B1、D4”、“D3、B2、D6”等效为元件E1、E2,其各自内部停工相关,且 $I=1$ 。

以等效元件E1为例,其等效故障率 λ_{E1} 为串联结构内所有元件故障率之和,其故障率和维修率的比值 λ_{E1}/μ_{E1} 为所有元件的故障率和维修率比值之和:

$$\lambda_{E1} = \lambda_{D1} + \lambda_{B1} + \lambda_{D4} \quad (5)$$

$$\frac{\lambda_{E1}}{\mu_{E1}} = \frac{\lambda_{D1}}{\mu_{D1}} + \frac{\lambda_{B1}}{\mu_{B1}} + \frac{\lambda_{D4}}{\mu_{D4}} \quad (6)$$

推得E1处于正常工作的概率计算公式为:

$$P_{CE1} = \frac{\mu_{D1}\mu_{B1}\mu_{D4}}{\mu_{D1}\mu_{B1}\mu_{D4} + \lambda_{D1}\mu_{B1}\mu_{D4} + \mu_{D1}\lambda_{B1}\mu_{D4} + \mu_{D1}\mu_{B1}\lambda_{D4}} \quad (7)$$

3.2.4 共有信号的处理^[5]

根据GO图操作规则“操作符和信号流的编号的唯一性”,本研究采用概率公式算法,沿信号流方向,由操作符概率计算公式直接定量计算系统可用率。设 P_{Si} 表示编号为 i 的信号流的成功概率, P_{Ci} 表示编号为 i 的操作符成功概率。 P_{S1} 和 P_{S2} 为公共输入信号,如操作符27、28、31等为多输入操作符,其输入信号都完全包含或部分包含共有信号 P_{S1} 和 P_{S2} ,得到的输出信号包含共有信号状态概率的高次项,其实际意义表示该共有信号同时发生的概率,应修正为一次项。

该系统中,共有信号为 P_{S1} 和 P_{S2} ,设某操作符有 M 个输入信号,其输出信号流可初步表示为:

$$P_R = c_0 + \sum_{j=1}^M c_{1j} P_{S1}^j + \sum_{j=1}^M c_{2j} P_{S2}^j + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M c_{3jk} P_{S1}^j P_{S2}^k \quad (8)$$

其中, c_0 、 c_{1j} 、 c_{2j} 、 c_{3jk} 和共有信号无关。

考虑共有信号的修正后,表达式简化为:

$$P_R = c_0 + c_1 P_{S1} + c_2 P_{S2} + c_3 P_{S1} P_{S2} \quad (9)$$

其中, c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 和共有信号无关。

3.2.5 共有元件的处理

由于主接线的运行灵活性,不同的调度倒换可以构成不同的运行方式,从而导致同一元件出现在多条电能可能输送支路中,而GO图原则上不允许循环结构,因此GO图中多次引入新操作符来代表同一元件,即同一元件将出现在不同GO图支路中,本研究将这些元件定义为“共有元件”,对传统GO法的应用进行了丰富和改进。相应的,GO法概率计算公式中会存在“共有

元件”对应概率的高次项,本研究参考共有信号处理方法,设各元件的成功概率为:

$$\begin{aligned} P_{CD2} &= a_1, P_{CD5} = a_2 \\ P_{CE1} &= a_3, P_{CE2} = a_4 \end{aligned} \quad (10)$$

则“共有元件”的修正处理规则为^[10]:

$$a_i a_j = a_i, i=j \quad (11)$$

3.3 双断路器接线建模

3.3.1 主接线方案

接线方式为“二进二出”模式,接线如图5所示。

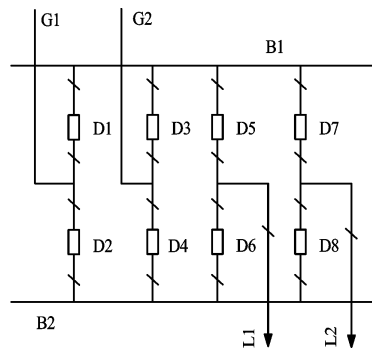


图5 双断路器电气主接线图

G—进线;B—母线;L—出线;D—断路器

3.3.2 主接线GO图

采用本文3.2节相关建模思想,考虑母线元件集中建模,建立双断路器接线GO模型如图6所示。

3.4 GO运算结果及分析

在完成对共有信号和共有元件的修正处理后,本研究得到的系统可用率表达式是精确的。本研究根据现实运行考虑元件的检修状态,得到两种接线方案的系统可用率结果如表4所示。

表4 两种接线方式的可用率计算结果

接线方式	2 状态	3 状态
3/2 断路器接线	0.999 361	0.993 064
双断路器接线	0.999 363	0.993 495

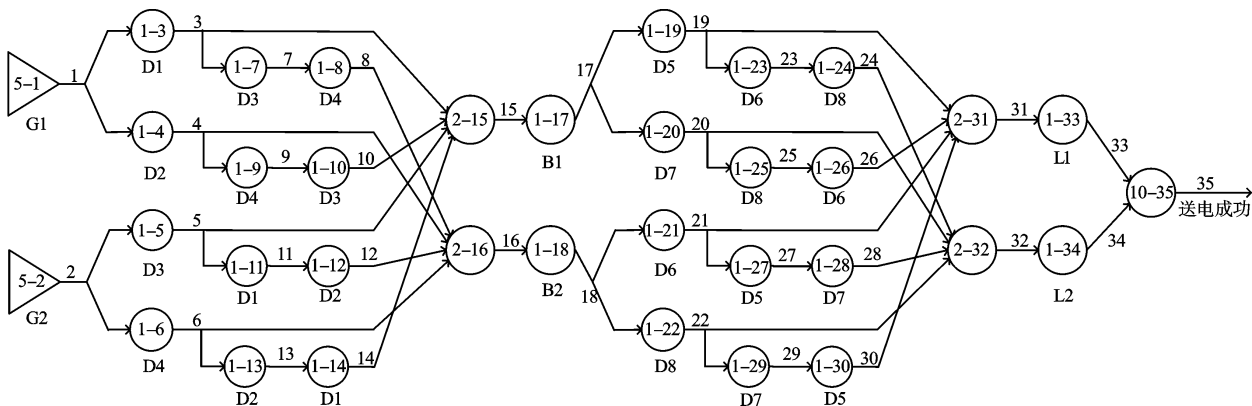


图6 双断路器电气主接线GO模型图

GO运算结果表明,“二进二出”模式时,无论元件是不计检修的2状态模型还是考虑检修的3状态模型,双断路器接线的可靠性均略高于3/2台断路器接线。

但从经济性的角度看,由于特高压断路器的价格十分昂贵,在保证较高可靠性的前提下,1 000 kV电气主接线形式终期一般建议采用3/2台断路器接线。国家电网公司企业标准Q/GDW294-2009《1 000 kV变电站设计技术规定(电气部分)》规定“1 000 kV配电装置的最终接线方式,当进出线总数大于等于5回时,宜用3/2断路器接线”^[15]。

相比传统的FTA(故障树法),GO法有更强的实用价值。本研究若采用故障树最小割集来计算系统失败概率,一方面高阶割集概率小、组合较多、计算量大,另一方面最小割集近似独立计算的方法忽略了最小割集同时出现时对系统故障的影响^[10];而GO法通过概率计算,得到的定量计算结果的对立面包括所有故障组合,使得结果更全面真实。

4 结束语

本研究提出了改进GO法,对电气主接线系统进行可靠性分析,扩展了GO法的应用,建立了其在1 000 kV主接线可靠性量化评价的模型,通过建立考虑元件检修状态的3状态模型,对3/2断路器和双断路器两个主接线方案展开定量评价,提出了综合考虑操作符相关性的处理,阐明了GO法在主接线可靠性评价中的高效和精确,具有很高的应用价值。

参考文献(References):

[1] 赵丽华,郭相国,高进强. 1000 kV 电气主接线设计[J]. 电力建设,2010,31(4):13-16.

- [2] 冯 怡,周家启,赵 霞,等. 三峡电站电气主接线可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(3):21-26.
- [3] 张 鹏,郭永基. 电气主接线可靠性评估的区间方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(19):48-52.
- [4] 王 博. 基于FD法发电厂主接线可靠性分析[D]. 北京:华北电力大学电气与工程学院,2009.
- [5] 沈祖培,黄祥瑞. GO法原理及应用——一种系统可靠性分析方法[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [6] WOOD D E, BECAR N J. Risk Analysis of a Spent Fuel Received and Storage Facility Using the GO methodology [M]. USA: Kaman Sciences Corporation, 1979.
- [7] MATSUOKA T, KOBAYASHI M. The GO-FLOW reliability analysis methodology—analysis of common cause failure with uncertainty [J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 175(3):205-214.
- [8] 任 鑫,赵新文,蔡 琦,等. 基于GO法的反应堆补水系统共因失效分析[J]. 核动力工程,2010,31(3):64-68.
- [9] 宋东昱,沈祖培. 天然气管道系统可靠性分析中GO法的应用[J]. 石油工业技术监督,2000,16(11):1-7.
- [10] 李 哲,鲁宗相,刘井泉. 基于GO法的核电厂电气主接线系统可靠性分析[J]. 核动力工程,2010,31(3):69-73.
- [11] 王 超,张雪松,徐 政,等. 基于GO法的特高压直流输电可靠性研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(1):159-165.
- [12] 苏 晓,陈 旋. 500 kV 变电站 220 kV 侧主接线运行分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(4):86-92.
- [13] 李 勇,黄宝莹,鲁宗相,等. 基于电网协调发展的特高压变电站电气主接线设计原则[J]. 电力建设,2011,32(1):27-33.
- [14] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW294-2009 1 000 kV 变电站设计技术规定(电气部分)[S]. 北京:国家电网公司,2009.

[编辑:李 辉]