

GO 法在特高压直流输电可靠性研究中的应用

张雪松¹, 王超², 常勇³, 高鹏⁴

(1. 浙江省电力试验研究院, 杭州 310014; 2. 浙江电力调度通信中心, 杭州 310007;
3. 国网运行有限公司, 北京 100005; 4. 南瑞继保电气有限公司, 南京 211100)

摘要: 为探索特高压直流输电可靠性评估的新方法, 首次将 GO 法引入到特高压直流输电的可靠性建模当中。结合特高压直流输电系统的实际工况, 探讨了串联结构存在相关性时的等效模型算法, 基于该算法开发了相应的 GO 程序, 通过计算得到考虑元件相关性的情况下, 系统中所有信号流的精确的可靠性参数。计算分析过程说明, 可修复系统稳态可靠性的定量计算要比不可修复系统复杂得多。通过与不考虑元件相关性的情况下所得结果之间的对比, 说明了发展可修复系统中 GO 法理论与算法的必要性与先进性。

关键词: 可靠性; GO 法; 特高压直流输电; 可修复系统; 共有信号; 停运相关

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6520(2009)02-0236-06

Reliability Analysis of UHVDC System by the GO Methodology

ZHANG Xue-song¹, WANG Chao², CHANG Yong³, GAO Peng⁴

(1. Zhejiang Electrical Power Research and Test Institute, Hangzhou 310014, China;
2. Zhejiang Electric Power Dispatch and Communication Center, Hangzhou 310007, China;
3. State Grid Operation Company, Beijing 100005, China;
4. NARI Relays Electric Co. Ltd, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to develop new methods for reliability analysis of ultra high voltage direct current (UHVDC) system, a new goal oriented reliability assessment method, called the GO methodology, was introduced. Considering the actual operating mode of UHVDC, the equivalent model and algorithm of serial structures with correlations were discussed. With the equivalent algorithm, the reliability parameters of the structure with correlations were calculated first. Then a direct calculation with the GO methodology was taken after the structure was replaced with an equivalent element. When dealing with the operational characters during the calculation, the shared signal should be separated from the input signal first, and then merged in the result after the common logic calculation. Accordingly, the GO program was developed. With the developed program, the used factors of the UHVDC system were calculated considering component correlation. The necessity and advantage of the improved GO methodology in repairable system were proved by comparison between results with and without consideration of components' correlation. It is verified that the reliability assessment method based on GO methodology is more efficient than the traditional method.

Key words: reliability; GO methodology; UHVDC; repairable system; shared signal; outage dependency

0 引言

特高压直流输电系统(Ultra High Voltage Direct Current transmission system, UHVDC)具有远距离、大容量、低损耗等优势, 1 回 ± 800 kV 直流工程的输送能力是 ± 500 kV 直流线路的 2 倍以上, 是 ± 500 kV 交流线路的 5 倍以上, 其可靠性对交直流系统安全运行起着至关重要的作用^[1-5], 因此, 对 UHVDC 的可靠性研究具有重大的实际工程价值^[6-8]。当前直流系统可靠性分析采用的方法主要有 Markov 状态空间法^[9]、故障树法^[10]等。

从核物理领域引入一种新的可靠性分析方法——GO 法(GO methodology)^[11], 并探讨该方法在特高

压直流输电系统可靠性分析中的应用。GO 法是一种以成功为导向的系统概率分析技术, 该方法在上世纪 60 年代中期由美国 Kaman 科学公司提出, 用来分析武器和导弹系统的安全性和可靠性^[12]。80 年代后期, 日本学者在此基础上发展了 GO-FLOW 方法, 用于处理系统共因失效分析、系统故障概率的不确定性分析和系统动态可靠性分析等复杂可靠性问题, 并开发了相应的通用软件, 成为核物理工业概率风险分析的一种强有力的工具^[13, 14]。

交直流系统可靠性评估的关键在于如何对直流系统进行分析建模, 嵌入发输电系统可靠性评估中, 从而完成整个系统的评估^[9]。本文将基于 GO 法对特高压直流系统的可靠性建模问题做初步探讨。

因技术较为复杂和保密等原因,GO法的普及和应用受到一定的限制。近年来GO法的功能和算法不断地得到发展和完善。作为一种特殊的可靠性分析方法,GO法适合于可修复系统的研究。本文首次将该方法引入到典型的可修复系统——特高压直流系统的可靠性评估当中,并通过分析说明GO法自身的一些特点和优势。

1 可修复系统GO法的基本原理

1.1 可修复系统的可靠性特征量

可修复系统总是处于正常工作和停工维修状态的交替之中。工程中可修复系统最常用的是服从指数分布的可修复系统,这样的系统可用马尔可夫过程来描述,称为马尔可夫型可修系统。工程中,可修复系统是长期连续工作的,因此最感兴趣的是经过长期工作、处于稳定运行阶段的系统平均特性。设稳态情况下,系统故障率为 λ ,维修率为 μ ,据此可以计算系统其他的可靠性参数如式(1)~(6)^[11]。

平均无故障工作时间为

$$t_{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

平均修复时间为

$$t_{MTTR} = \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

平均周期为

$$t_{MCT} = t_{MTBF} + t_{MTTR} \quad (3)$$

稳态可用度(平均工作概率)为

$$A = \frac{t_{MTBF}}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (4)$$

稳态不可用度(平均停工概率)为

$$\bar{A} = 1 - A = \frac{t_{MTTR}}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (5)$$

故障频率为

$$f = A\lambda = \bar{A}\mu = \frac{1}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} = \frac{1}{t_{MCT}} \quad (6)$$

1.2 可修复系统中GO法的基本概念

GO法是一种以成功为导向的系统概率分析技术,其基本思想是把系统图或工程图直接翻译成GO图^[11]。GO图中用操作符代表具体的部件(或逻辑关系),用信号流连接操作符,代表具体的物流(或逻辑上的进程)。GO法共定义了17种标准操作符,可参考文献[11],GO法系统可靠性分析的具体流程见图1。

GO法应用于可修复系统时,由于可修复系统的参数是随时间变化的,因此GO法中操作符和信号流的参数也应该随时间而变化。GO法中操作符和信号流的状态值 $i=0,1,\dots,N$ 表示时间点,代表

一系列给定的具体时间值。但考虑到实际工程可修复系统是长期连续工作的,因此最感兴趣的是经过长期工作、处于稳定运行阶段的系统平均特性。此时GO法的操作符和信号流的参数就是可修复系统的稳态可靠性特征量,代表系统的平均特性,是不随时间变化的常数,此时的状态值 i 也不代表时间点,而是用1和2分别代表操作符或信号流的正常工作状态和故障维修状态。输入可修复单元的稳态可靠性数据,直接进行GO运算,即可得到系统可靠性参数的平均值,完成稳态可靠性分析。

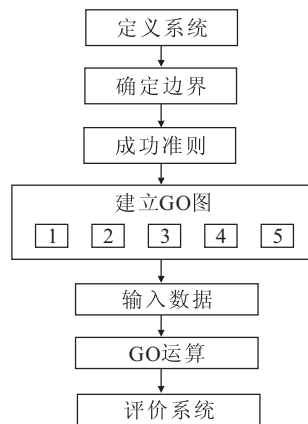


图 1 GO法分析过程

Fig. 1 Analysis procedure of the GO methodology

1.3 可修复系统中操作符的相关性

GO法应用于可修复系统时,操作符代表系统的可修复单元。而系统单元与单元之间,单元和系统之间并不是完全独立的,在停工、维修、冗余、备用等方面有一定的相关性,具体定义如下^[15]:

(1)停工相关:系统因某单元故障而停工时,没有故障的单元随系统的停工而停止运行,且不再发生故障,直到系统修复,这些单元再恢复正常运行。

(2)维修相关:可修复系统有多个单元同时处于故障状态,而维修工不足,有些单元发生故障后不能及时维修,而要等到其他单元恢复后才能维修。

(3)冗余相关:系统中的并联单元数多于系统工作要求的单元数,多出的单元发生故障时,系统仍能正常工作。

(4)备用相关:有冗余的并联单元系统中冗余的单元处于备用状态,当正在运行的单元发生故障时,冗余备用的单元开始运行,保证系统正常工作,并假定冗余单元处于备用状态时不会发生故障。

可修复系统中复杂的相关性使GO法在其中的应用变得较为复杂,本章以典型的可修复系统——特高压直流输电系统为例,探讨GO法在其可靠性分析中的应用。

表 1 特高压直流输电系统操作符可靠性参数

Tab. 1 Reliability data of operational character of the UHVDC system

操作符编号	类型	单元名称	故障率/(次·a ⁻¹)	平均修复时间/h
1	5	送端母线	0.02	10
2	1	双极线路部分	0.07	16.6
3, 23	1	双极设备	0.1	4
4~7, 16~19	1	阀组	1.9	6
8,9,20,21,22	2	或门	×	×
10,11,14,15	1	单极设备	0.6	6
12, 13	1	单极线路	0.75	1
24	1	受端母线	0.2	10

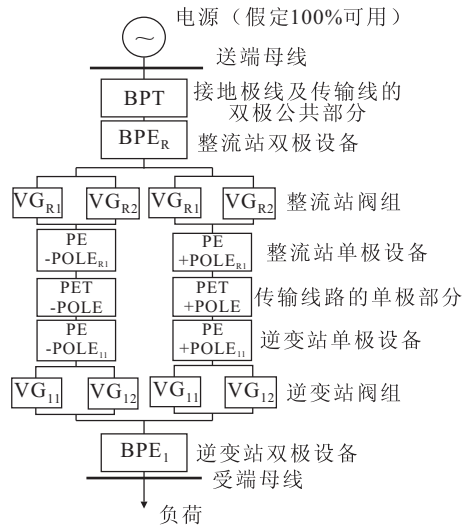


图 2 每极 2 个阀组时的特高压输电系统原理图
Fig. 2 Schematic of UHVDC system with two valve groups in series per polar

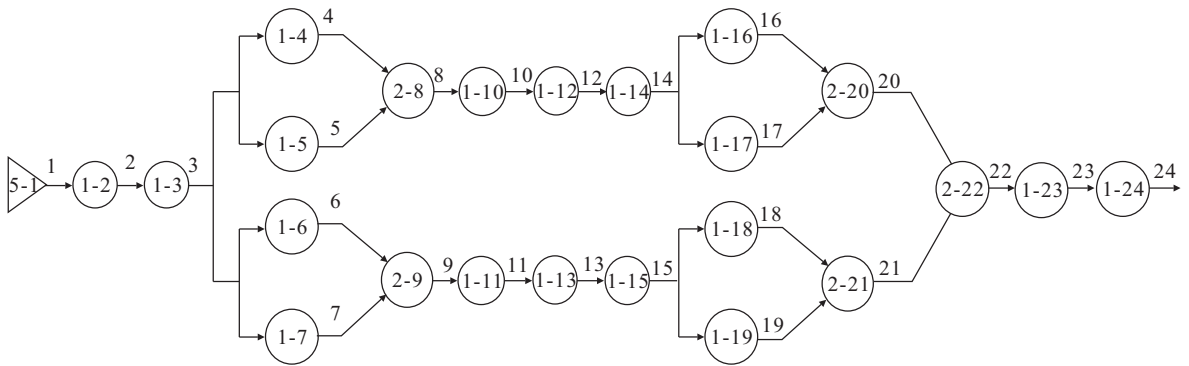


图 3 特高压直流输电系统 GO 图
Fig. 3 GO diagram of the UHVDC system

2 特高压直流输电系统建模与分析

特高压直流输电系统与常规直流输电系统相比,其单极部分含有 2 个串联的 12 脉动换流器,但特高压系统的运行方式灵活,一个换流器停运不会导致同极中的另一个换流器停运,因此这 2 个换流器在可靠性模型中相当于并联的关系。以系统可用率作为特高压直流输电系统可靠性的评价指标。图 2 所示为一个典型的每极 2 个阀组时的 UHVDC 模型框图^[2,16]。

图 2 中每一个框图代表一个子系统,下标 R 表示整流侧,下标 I 表示逆变侧。基于图 2 建立 GO 图过程如下:以两状态单元(类型 1 操作符)代表阀组、单极设备、单极线路、双极设备、双极线路部分、受端母线;不考虑交流系统故障的影响,但送端母线存在故障的可能性,GO 模型中用单信号发生器(类型 5 操作符)来模拟;以类型 2 操作符代表两极之间、以及两极中阀组之间的逻辑关系,建立 UHVDC

系统 GO 图见图 3。

给定各单元的可靠性参数,就可以计算出整个系统的可靠性指标。实际工程中一般给出元件故障率和平均修复时间两个参数,据此可以计算出其他指标,如元件可用率等。各操作符的编号、类型、代表的单元名称及其两个参数见表 1。

文[17]提出了精确的概率公式算法,基于该算法开发了 GO 程序,在假设 UHVDC 系统元件相互独立的前提下,计算得到系统可用率的精确值

$$P_{S24} = 0.99970302. \quad (7)$$

实际上,由于上述方法未考虑元件相关性,因此式(7)所得结果是不够准确的。实际工况中,UHVDC 系统元件之间存在着停工相关等相关性,例如,单极中整流侧设备故障时,对应的逆变侧设备也应当退出运行,这说明它们之间存在着一定的相关性,若希望得到较为准确的分析结果,则必须将这些相关性考虑在内。

3 考虑相关性时的 UHVDC 可靠性分析

可修复系统中通常有两种具有相关性的部件组合:①有停工相关的部件串联结构;②相同部件的并联冗余结构。这样在可修复系统进行定量分析时,首先对有相关性的结构进行单独定量分析,得到它们的等效单元的等效可靠性参数,并在可修复系统中用等效单元代替这些结构,然后可修复系统的单元就是独立的,可以直接进行系统的定量计算,得到精确的结果。

考虑到当前特高压直流输电系统的实际运行工况,认为两支路中,单极整流站设备、逆变站设备以及单极线路之间存在停工相关,即操作符 10、12、14,以及 11、13、15 之间存在停工相关,且停工阶数 $I=1$;不考虑并联的整流站、逆变站阀组之间可能存在的相关性。因此需要推导串联结构的等效单元可靠性参数表达式。

3.1 串联结构的等效模型推导

定义操作符本身的成功状态概率、故障状态概率、故障率、修复率分别为 $P_C(1)$ 、 $P_C(2)$ 、 λ_C 、 μ_C ;操作符输入信号的正常状态概率、停工状态概率、等效故障率、等效修复率分别为 $P_S(1)$ 、 $P_S(2)$ 、 λ_S 、 μ_S ;操作符输出信号的正常状态概率、停工状态概率、等效故障率、等效修复率分别为 $P_R(1)$ 、 $P_R(2)$ 、 λ_R 、 μ_R 。在考虑停工相关的类型 1 操作符的定量计算公式的基础上,可以详细推导串联结构的等效单元可靠性模型。

停工阶数 $I=1$ 时,输入信号和操作符有一个故障停工时,另一个也停止运行,不会发生故障,因此不存在输入信号和操作符同时故障的状态。输出信号的成功状态概率 G_1 时输入信号和操作符都处于成功状态的概率,故

$$G_1 = P_S(1)P_C(1)。 \quad (8)$$

输出信号的故障状态概率 G_2 时输入信号和操作符中有一个处于成功状态,且另一个处于故障状态的组合概率,而不存在 2 个都处于故障的状态,故

$$G_2 = P_S(1)P_C(2) + P_S(2)P_C(1)。 \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得:

$$P_R(1) = \frac{G_1}{G_1 + G_2}; \quad (10)$$

$$P_R(2) = \frac{G_2}{G_1 + G_2}。 \quad (11)$$

系统等效故障率仍为各子系统故障率之和,即

$$\lambda_R = \lambda_S + \lambda_C。 \quad (12)$$

由式(8)~(11)可得

$$\frac{P_R(1)}{P_R(2)} = \frac{\frac{\mu_R}{\lambda_R + \mu_R}}{\frac{\lambda_R}{\lambda_R + \mu_R}} = \frac{\mu_R}{\lambda_R} = \frac{G_1}{G_2} =$$

$$\frac{P_S(1)P_C(1)}{P_S(1)P_C(2) + P_S(2)P_C(1)} = \frac{\mu_S\mu_C}{\lambda_S\mu_C + \mu_S\lambda_C}。 \quad (13)$$

由式(12)、(13)可得

$$\frac{\lambda_R}{\mu_R} = \frac{\lambda_S}{\mu_S} + \frac{\lambda_C}{\mu_C}。 \quad (14)$$

由此可得等效修复率

$$\mu_R = \frac{\lambda_R}{\frac{\lambda_S}{\mu_S} + \frac{\lambda_C}{\mu_C}}。 \quad (15)$$

将其推广到 M 个两状态单元串联的情况下,此时即相当于各单元一一组合,假如 M 个单元完全独立,此时串联结构的成功概率是所有单元成功概率的乘积,串联结构的等效故障率是所有单元故障率之和,故有:

$$P_R(1) = \prod_{i=1}^M P_i(1); \quad (16)$$

$$\lambda_R = \sum_{i=1}^M \lambda_i。 \quad (17)$$

基于式(16)、(17)可得:

$$P_R(2) = 1 - P_R(1); \quad (18)$$

$$\mu_R = \lambda_R \frac{P_R(1)}{P_R(2)}。 \quad (19)$$

当 M 个单元存在一阶停工相关时,给出串联结构等效可靠性参数的详细推导过程,首先可得等效故障率的计算公式如下:

$$\lambda_R = \sum_{i=1}^M \lambda_i; \quad (20)$$

$$\frac{\lambda_R}{\mu_R} = \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i}。 \quad (21)$$

系统等效修复率为

$$\mu_R = \frac{\lambda_R}{\sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i}}。 \quad (22)$$

基于式(20)~(22)可得系统状态概率:

$$P_R(1) = \frac{\mu_R}{\lambda_R + \mu_R} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_R}{\mu_R}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i}}; \quad (23)$$

$$P_R(2) = \frac{\lambda_R}{\lambda_R + \mu_R} = \frac{\frac{\lambda_R}{\mu_R}}{1 + \frac{\lambda_R}{\mu_R}} = \frac{\sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i}}{1 + \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i}}。 \quad (24)$$

串联结构的等效单元仍然是 1 个输入、1 个输出的 2 状态单元,在可修复系统中仍然用类型 1 操作符表示。给定串联结构中各单元的可靠性参数,即可利用式(16)~(24)计算出等效两状态单元的故

障率、修复率、正常工作概率等参数^[11]。

3.2 考虑相关性情况下的 UHVDC 可靠性评估

根据上述理论,在对 UHVDC 进行可靠性评估时,需要单独进行操作符 10、12、14 组成的串联结构的定量计算,得到它们的等效可靠性参数,记为 14**。另一条支路的计算是相同的,记为 15**。得到的可靠性参数见表 2。

有相关性的结构单独计算以后,沿信号流序列逐个对操作符进行定量计算。因操作符 1、2、3 是串联结构且不考虑相关性,因此可考虑将信号 3 作为共有信号。当计算两支路信号流 8、9 时,由于包含共有信号 3,因此首先要将共有信号 3 从信号 8 和 9 中分离出去。设分离后的信号为 8* 和 9*,那么相当于共有信号 3 是输入信号,分离后信号 8* 和 9* 是类型 1 操作符,输出信号是 8 和 9,按类型 1 操作符计算公式就可计算得到分离后信号 8* 和 9* 的可靠性参数。依此类推,在两条支路中分别计算得到分离出共有信号 3 后的输出信号 20* 和 21*,然后

按照类型 2 或门操作符的计算公式可以计算输出信号 22* 的可靠性参数,输出信号 22* 中不包括共有信号 2,下一步再按类型 1 操作符公式,和共有信号 2 合并计算,得到信号 22 的精确的等效可靠性参数。这样最终可以求得各信号流的精确等效可靠性参数,它们代表了该信号之前的等效系统。

表 2 有相关性的结构的等效可靠性参数

Tab. 2 Equivalent reliability data of related structures

等效信号流编号	等效结构类型	故障率/(次·a ⁻¹)	平均修复时间/h	工作概率
14**	停工相关串联	1.95000000	4.07692308	0.99909329
15**	停工相关串联	1.95000000	4.07692308	0.99909329

基于上述思路开发了可修复系统 GO 程序,GO 程序的计算过程不再详细列出,最终结果见表 3,其中,带上标 * 的表示分离共有信号 3 后的信号流值,不带 * 的表示合并共有信号之后的精确的等效可靠性参数。

表 3 信号流定量计算结果

Tab. 3 Quantitative calculating results of signal flow

信号流编号	可用度	不可用度	等效故障率	等效故障持续时间	等效故障频率
3	0.99979801	0.00020199	0.19000000	9.31467275	0.18996162
8*, 9*	0.99999831	0.00000169	0.00493481	3.00000000	0.00493480
8, 9	0.99979632	0.00020368	0.19493481	9.15483106	0.19489511
14*, 15*	0.99909160	0.00090840	1.95493481	4.07421149	1.95315895
14, 15	0.99888979	0.00111021	2.14493481	4.53916584	2.14255348
20*, 21*	0.99908991	0.00091009	1.95986962	4.07151357	1.95808596
20, 21	0.99888811	0.00111189	2.14986962	4.53564050	2.14747920
22*	0.99999917	0.00000083	0.00356407	4.30306806	0.00356407
22	0.99979718	0.00020282	0.19356407	9.18065476	0.19352481
23*	0.99995317	0.00004683	0.10356407	3.96116587	0.10355922
23	0.99975119	0.00024881	0.29356406	7.42633517	0.29349102
24*	0.99972518	0.00027482	0.30356407	7.93263681	0.30348064
24	0.99952325	0.00047675	0.49356407	8.46564428	0.49332876

从表 3 可见,在考虑 UHVDC 元件串联相关性的前提下,基于 GO 程序计算得到系统的可用度为 0.99952325,而式(7)显示在不考虑相关情况下的计算结果为 0.99970302,前者数据偏小,这与实际情况完全符合,因为元件之间存在的停工相关性在一定程度上降低系统的可靠性。

当系统元件可靠性较低,或元件之间存在较复杂的相关性时,忽略元件相关性可能会带来较大的误差,因此,发展 GO 法在可修复系统中的理论与算

法是非常有必要的。此外,采用本文的 GO 算法,不仅可以计算系统可用度与不可用度,而且可以得到系统等效故障率、故障持续时间、故障频率等可靠性参数,从而可以对系统进行更准确和详细的描述。

4 结论

a) 本文将 GO 法引入到特高压直流输电可靠性分析领域,并与传统的可靠性评估方法进行了比较。分析表明,GO 法较传统方法计算速度更快且建模

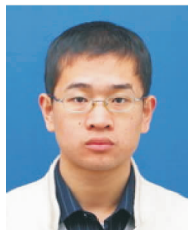
更方便,对特高压直流输电系统进行可靠性研究具有重大的实际工程价值。

b)需要说明的是,本文的研究尚属初步探讨,例如,对 UHVDC 系统建模时仅考虑了 0、1 两个状态,但在直流系统实际运行中,还可能出现降额运行状态,特别是单极强迫停运,是不可忽视的。从本文分析可知,在所建模型的基础上,将模型扩展到多状态的情形是比较方便的,从而能够更好地考虑系统单极停运等较复杂情况,这也将是本文作者今后的工作重点。

c)本文旨在抛砖引玉,期望通过本文的工作,能够推动 GO 法在电力系统中得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 詹奕,尹项根. 高压直流输电与特高压交流输电的比较研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 44-46.
ZHAN Yi, YIN Xiang-gen. Comparative research on HVDC and UHV power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 44-46.
- [2] 周静,马为民,石岩,等. ± 800 kV 直流输电系统的可靠性及其提高措施[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 7-12.
ZHOU Jing, MA Wei-min, SHI Yan, et al. Study on reliability of ± 800 kV UHVDC power transmission and its improvement measures[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 7-12.
- [3] 周静,马为民,石岩,等. 葛南同杆并架直流工程可靠性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 152-156.
ZHOU Jing, MA Wei-min, SHI Yan, et al. Study of reliability for the double circuits on the same tower of Ge-Nan DC project[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 152-156.
- [4] 马为民,李亚男,周静. 特高压直流输电系统可靠性和可用率指标研究[J]. 电力设备, 2007, 8(3): 85-88.
MA Wei-min, LI Ya-nan, ZHOU Jing. Reliability and availability index study of UHVDC system[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(3): 85-88.
- [5] 石岩,韩伟,张民,等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-14, 21.
SHI Yan, HAN Wei, ZHANG Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-14, 21.
- [6] 张文亮,吴维宁,胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 16-18.
ZHANG Wen-liang, WU Wei-ning, HU Yi. Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 16-18.
- [7] 吴光亚,罗兵,王蕙. ± 800 kV 特高压直流绝缘子可靠性分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1802-1806.
WU Guang-ya, LUO Bing, WANG Hui. Reliability analysis of ± 800 kV UHVDC insulators[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1802-1806.
- [8] 谷定燮. 我国发展特高压输电的前景[J]. 高电压技术, 2002, 28(3): 28-30, 40.
GU Ding-xie. The prospect of developing UHV transmission system in China[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 28-30, 40.
- [9] 任震,黄雯莹,冉立. 高压直流输电系统可靠性评估[M]. 北京:中国电力出版社, 1996.
- [10] 刘海涛,程林,孙元章,等. 交直流系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27-31.
LIU Hai-tao, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Reliability evaluation of hybrid AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 27-31.
- [11] 沈祖培,黄祥瑞. GO 法原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [12] Wood D, Becar N. Rish analysis of a spent fuel received and storage facility using the GO methodology[R]. Pueblo, Colorado, USA: Kaman Sciences Corporation, 1979.
- [13] Matsuoka T, Kobayashi M. The incorporation of common cause failures into the GO-FLOW methodology[C]// Proceedings of the Probabilistic Safety Assessment International Topical Meeting. Orlando, Florida, USA: [s. n.], 1993: 811-817.
- [14] Matsuoka T, Kobayashi M. Development of the GO-FLOW reliability analysis methodology for nuclear reactor systems[C]// International Conference on Probabilistic Safety Assessment Methodology and Applications. Seoul, Korea: [s. n.], 1995: 593-598.
- [15] 沈祖培,黄祥瑞,高佳. 可修复系统可靠性分析中 GO 法的应用[J]. 核动力工程, 2000, 21(5): 456-461.
SHEN Zu-pei, HUANG Xiang-rui, GAO Jia. Application of GO methodology for reliability analysis of repairable system[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(5): 456-461.
- [16] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [17] SHEN Zu-pei, GAO Jia, HUANG Xiang-rui. A new quantification algorithm for the GO methodology[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000, 67(3): 241-247.



ZHANG Xue-song
Ph. D.

张雪松

1979—,男,博士,工程师

主要研究方向为电力系统稳定与控制、继电保护

E-mail: ee_zxs@hotmail.com



WANG Chao
Ph. D.

王超

1981—,男,博士,工程师

主要从事电力系统可靠性、电网安全稳定运行、特高压输电等方面的研究

E-mail: wangchao@zju.edu.cn



CHANG Yong
Ph. D.

常勇

1979—,男,博士,工程师

主要从事高压直流输电的运行研究工作

E-mail: yong-chang@sgcc.com.cn