

±800 kV柔直换流站电气系统可靠性分析

束洪春^{1,2,3},董海飞^{2,3,4},赵红芳¹,许畅⁴,杨永银⁴,赵学专⁴

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院,云南 昆明 650500;

2. 昆明理工大学 省部共建智能电网故障检测与保护控制协同创新中心,云南 昆明 650500;

3. 昆明理工大学 云南省绿色能源与数字电力量测及控保重点实验室,云南 昆明 650500;

4. 昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650500)

摘要:对电气元件等效二状态模型进行优化,提出了计及计划检修状态的元件等效三状态模型,使之符合柔性直流输电系统实际运行情况。以广东龙门换流站为例,通过等效三状态模型计算柔直换流站电气主接线中各元件的可靠性参数,使用分区简化方法计算各分区的可靠性参数。在此基础上,利用目标导向(GO)法和动态贝叶斯网络相结合的方法建立了电气主接线的可靠性模型,求解柔直换流站可用度、不可用度以及计划检修概率的时变曲线,验证了所提模型和方法对柔性换流站电气主接线可靠性评估的可行性与有效性。

关键词:电气主接线可靠性分析;柔性换流站;GO法;动态贝叶斯网络;计划检修

中图分类号:TM 72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208011

0 引言

柔性直流输电技术是绿色能源基地远距离大容量电力外送、优化电网格局的重要技术手段。随着电力电子技术的发展,由加拿大的Boon-Teck等学者提出的基于电压源换流器的高压直流输电^[1](voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)技术近年来被广泛运用在输电系统的换流站中,传统高压直流输电技术采用晶闸管完成换相,换流站由强交流系统支撑;柔性直流输电技术中的换流器采用了可关断器件绝缘栅双极型晶体管和调制技术相结合的电压源换流器(voltage source converter, VSC)^[2],其可有效避免换相失败,实现有功功率和无功功率的单独控制。基于柔性直流输电技术的换流站是柔性直流输电系统中的重要一环,时刻了解换流站电气主接线运行稳定性水平并通过对换流站电气主接线的可靠性分析来合理制定计划检修策略对预防电网事故和保证其安全可靠运行至关重要。

已有大量学者对电力系统可靠性评估与电网在实际运行过程中的脆弱性分析方法进行了研究。文献[3]针对电力系统的安全稳定控制系统提出一种稳定控制系统的可靠性分析方法,将系统的可靠性进行化简分层处理,提出各层故障树分析模型,利用

序贯蒙特卡罗法对故障树模型进行可靠性分析。文献[4]提出一种基于故障树和重要度分析的电气主接线可靠性评估方法,针对电力系统规划、故障诊断等问题,选取了系统可靠性指标并考虑了系统中各个元件的重要度,辨识出系统薄弱环节。文献[2]以乌东德电站送电广东广西输电工程为研究对象,采用故障持续时间和故障发生频率指标估算系统可靠性。由于模块化多电平换流器(modular multilevel convert, MMC)是特高压柔性直流系统的关键设备,许多学者就MMC的损耗和供电可靠性进行了研究。文献[5]为提高MMC可靠性,提出了MMC子模块数量冗余配置的方法。文献[6]在考虑子模块相关性的基础上进行了MMC可靠性分析。文献[7]基于电力系统中的电气元件突发性故障比例,提出了一种计及异常状态和定期检修的统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)可靠性模型及灵敏度分析方法,当电气元件处于异常状态时,其实际上处于故障状态的概率较大,故依靠常规的状态概率评估元件可靠性不够准确。文献[8]提出一种基于可靠性框图法建立的可靠性模型,使用矩阵运算来提高可靠性模型的求解效率,但该方法只适用于某些可靠性框图容易形成的简单电力系统。文献[9]提出了一种将动态故障树和蒙特卡罗法相结合的广域通信系统可靠性分析方法,该方法模型简单,可以辨识出系统中的薄弱环节,针对薄弱环节采取一定策略,从而提高系统的可靠性,但是该算法计算时间长,存在计算效率低的问题。文献[10]将MMC可靠性研究从微观到宏观划分为器件级、电路级和系统级3个尺度,分析了不同尺度之间的相互影响,提出不同尺度可靠性模型互联的思路,为未来MMC可靠性分析多尺度问题提供了一种新的解决路径。

收稿日期:2022-03-11;修回日期:2022-05-31

在线出版日期:2022-08-05

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(52037003);云南省重大科技专项计划项目(202002AF080001)

Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (52037003) and the Major Science and Technology Special Project of Yunnan Province (202002AF080001)

文献[11]从MMC的子模块冗余配置、系统拓扑结构、控制保护等方面对柔性直流输电系统可靠性进行研究,提出一种基于马尔可夫过程的柔性直流输电工程电气主接线的可靠性分析模型。

目前,柔性直流输电系统的可靠性模型与传统高压直流输电系统类似,包括故障树法、状态空间图法、频率-持续时间法、状态解析法、蒙特卡罗法等^[12]。然而,对于超(特)高压、大容量、远距离柔性直流馈入的受端网络,如何与传统直流调控提高受端电网稳定性,如何评估柔性直流系统的性能,支撑新一代电网建设是亟待解决的问题^[13]。基于电气元件状态进行可靠性建模的方法众多,电气元件的运行状态也被分解为正常、异常、故障、计划检修、状态检修等,在可靠性建模上存在一定的复杂性。本文基于已有文献,分析电气元件涉及的各种状态分类以及设备运行状态的划分原因,提出了可将电气运行状态归一于“正常运行状态”“故障运行状态”“检修运行状态”的等效三状态模型,在基于等效三状态模型的可靠性建模下利用目标导向(goal oriented, GO)法与动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network, DBN)相结合的方法解决了柔性直流输电换流站可靠性评估的问题。通过仿真实验验证了本文所提模型对于电气主接线可靠性评估的可行性和有效性;通过与已有的典型方法对比,验证了本文所提等效模型建模得到的可靠性评估指标系统可用度有所提高,并且可有效解决关于电气主接线可靠性建模复杂性问题,同时避免了可靠性分析计算带来的维数灾难问题,依据可靠性评估结果可确定柔直换流站元件检修时间,解决了对柔直换流站元件过度检修和对运行中的系统可靠性认识不确切的问题,为提高柔直换流站运行稳定性提供了可靠依据。

1 受端换流站电气主接线简介

乌东德电站送电广东广西输电工程采用多端直流输电方案,送端云南建设 ± 800 kV、 8×10^6 kW的昆北换流站,受端广东建设 ± 800 kV、 5×10^6 kW的龙门换流站,广西建设 ± 800 kV、 3×10^6 kW的柳北换流站,龙门换流站电气主接线见附录A图A1。

柔直换流站的核心元件是由全控电力电子器件构成的VSC。由图A1可知,龙门换流站的主要设备包括隔离开关、联接变压器、避雷器、交流滤波器、VSC、直流电抗器、电压与电流测量装置、接地刀闸、变流变压器以及断路器^[14]。根据元件在电气主接线的作用,可分为静态元件、动态元件、附属元件。静态元件在主接线中的功能主要是参与调节控制电压,动态元件主要是指具有动作属性的电气设备,附属元件则是在其失去功能时,还能保证主接线的连通性不受其影响的电气设备。因此,静态元件主要

包括送端母线、变压器、交流滤波器、直流滤波器和直流电抗器;动态元件主要包括交流断路器、直流断路器、隔离开关和VSC;附属元件主要包括站控系统、电压与电流测量装置、避雷器、接地刀闸以及互感器。

2 电气主接线元件模型与分区简化方法

2.1 电气主接线各元件的数学模型

2.1.1 静态元件的可靠性模型

静态元件主要是在系统电气主接线中参与控制和调节电压的电气设备,传统可靠性分析中静态元件的状态主要包括正常运行状态 N_j 和故障状态 R_j 。考虑到柔性直流输电系统中很多关键元件发生故障时,由于元件结构复杂性需返厂维修,系统停运时间较长^[15],因此柔直换流站电气主接线可靠性分析中需要着重考虑静态元件的计划检修概率,本文的静态元件采用计及计划检修状态 M_j 的三状态模型,如图1所示。

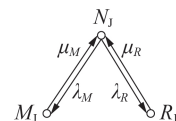


图1 静态元件的三状态模型

Fig.1 Three-state model of static components

静态元件的三状态可靠性模型为:

$$P_{j0} = \frac{\mu_M \mu_R}{\mu_M \mu_R + \lambda_M \mu_R + \lambda_R \mu_M} \quad (1)$$

$$P_{j1} = \frac{\lambda_M \mu_R}{\mu_M \mu_R + \lambda_M \mu_R + \lambda_R \mu_M} \quad (2)$$

$$P_{j2} = \frac{\lambda_R \mu_M}{\mu_M \mu_R + \lambda_M \mu_R + \lambda_R \mu_M} \quad (3)$$

式中: λ_R 和 μ_R 分别为静态元件故障率和修复率; λ_M 和 μ_M 分别为静态元件计划检修故障率和计划检修修复率; P_{j0} 、 P_{j1} 、 P_{j2} 分别为静态元件正常运行、计划检修和故障概率。

2.1.2 动态元件的可靠性模型

动态元件主要是主接线中具有动作属性的电气设备,其状态主要包括正常运行状态 N 、计划检修状态 M 、非扩大型故障状态 R 以及扩大型故障状态 S 。动态元件误动或临时检修停运都属于非扩大型故障状态 R ;动态元件拒动会影响周围元件的运行状态,其属于扩大型故障。动态元件四状态模型见附录A图A2。

动态元件的扩大型故障状态 S 及非扩大型故障状态 R 均为故障状态 R_0 ,则可将动态元件的四状态模型等效为三状态模型,如图2所示。图中: M_0 为动态元件计划检修状态; N_0 为动态元件正常运行状态。

动态元件的可靠性模型为:

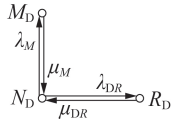


图2 等效的动态元件三状态模型

Fig.2 Equivalent dynamic element three-state model

$$\lambda_{DR} = \lambda_S + \lambda_R \quad (4)$$

$$\mu_{DR} = \frac{(\lambda_S + \lambda_R)\mu_S\mu_R}{\lambda_S\mu_R + \lambda_R\mu_S} \quad (5)$$

$$P_{D0} = \frac{1}{1 + \lambda_M/\mu_M + \lambda_{DR}/\mu_{DR}} \quad (6)$$

$$P_{D1} = \frac{1}{1 + \mu_M/\lambda_M + \lambda_{DR}\mu_M/(\lambda_M\mu_{DR})} \quad (7)$$

$$P_{D2} = \frac{1}{1 + \mu_{DR}/\lambda_{DR} + \lambda_M\mu_{DR}/(\lambda_{DR}\mu_M)} \quad (8)$$

式中: λ_S 和 μ_S 分别为元件扩大型故障状态的故障率和修复率; λ_R 和 μ_R 分别为元件非扩大型故障状态的故障率和修复率; λ_{DR} 和 μ_{DR} 分别为等效后的动态元件故障率和修复率; P_{D0} 、 P_{D1} 、 P_{D2} 分别为等效后的动态元件正常运行、计划检修、故障概率。

2.1.3 附属元件的可靠性模型

附属元件在电气主接线中的功能主要是监测相关电气量,故障后对电气主接线的正常运行不会造成影响;由于附属元件的故障具有独立性,一般不考虑计划检修状态。因此附属元件的运行状态主要包括正常运行与故障状态,其可靠性模型为:

$$P_{F0} = \mu_{FR}/(\lambda_{FR} + \mu_{FR}) \quad (9)$$

$$P_{F1} = \lambda_{FR}/(\lambda_{FR} + \mu_{FR}) \quad (10)$$

式中: λ_{FR} 和 μ_{FR} 分别为附属元件的故障率和修复率; P_{F0} 和 P_{F1} 分别为附属元件的正常运行和故障概率。

2.2 换流站电气主接线合并分区方法

柔性直流输电系统包含的元件数目众多且结构复杂,直接对其进行可靠性分析非常困难。目前还没有确切的柔直换流站电气主接线元件分区设计方法。龙门换流站是典型的 VSC-HVDC 系统,为了便于对龙门换流站进行可靠性分析,降低计算复杂度,提高分析效率,本文在参照国际大电网会议对高压直流输电系统中换流站电气主接线分区设计方法的基础上,对龙门换流站的电气主接线进行简化分区。以单极龙门站电气主接线分区为例,其可分为送端母线、站控子分区、交流系统及辅助元件 AC-E、换流阀 V、控制与保护系统 C&P 和直流线路 DC-E 子分区,见附录 A 图 A3,各子分区包含的元件见附录 A 表 A1。

若各子分区中任意一个元件处于故障或检修状态,则将该区视为故障或检修状态,各子分区的等效可靠性模型如图 3 所示。图中: M_Z 为子分区计划检修状态; N_Z 为等效子分区的正常运行状态; R_Z 为等

效子分区的故障状态。各子分区的计划检修故障率 λ_{ZM} 、修复率 μ_{ZM} 以及等效故障率 λ_{ZR} 、修复率 μ_{ZR} 分别如式(11)~(14)所示。

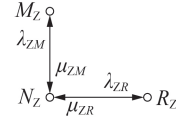


图3 子分区等效三状态模型

Fig.3 Equivalent three-state model of sub-division

$$\lambda_{ZM} = \sum_{i=1}^n \lambda_{JM,i} + \sum_{j=1}^m \lambda_{DM,j} \quad (11)$$

$$\mu_{ZM} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{JM,i} + \sum_{j=1}^m \lambda_{DM,j}}{\sum_{i=1}^n \mu_{JM,i} + \sum_{j=1}^m \mu_{DM,j}} \quad (12)$$

$$\lambda_{ZR} = \sum_{i=1}^n \lambda_{JR,i} + \sum_{j=1}^m \lambda_{DR,j} + \sum_{g=1}^l \lambda_{FR,g} \quad (13)$$

$$\mu_{ZR} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{JR,i} + \sum_{j=1}^m \lambda_{DR,j} + \sum_{g=1}^l \lambda_{FR,g}}{\sum_{i=1}^n \mu_{JR,i} + \sum_{j=1}^m \mu_{DR,j} + \sum_{g=1}^l \mu_{FR,g}} \quad (14)$$

式中: n 、 m 、 l 分别为静态元件、动态元件、附属元件的数量; $\lambda_{JM,i}$ 和 $\mu_{JM,i}$ 分别为所计算的子分区中第 i 个静态元件计划检修故障率和修复率; $\lambda_{JR,i}$ 和 $\mu_{JR,i}$ 分别为所计算的子分区中第 i 个静态元件故障率和修复率; $\lambda_{DM,j}$ 和 $\mu_{DM,j}$ 分别为所计算的子分区中第 j 个动态元件的计划检修故障率和修复率; $\lambda_{DR,j}$ 和 $\mu_{DR,j}$ 分别为所计算的子分区中第 j 个动态元件的故障率和修复率; $\lambda_{FR,g}$ 和 $\mu_{FR,g}$ 分别为所计算的子分区中第 g 个附属元件的故障率和修复率。

通过上述的等效方法,可以求解出每个子分区等效的可靠性模型,以 V 子分区为例,其数学模型推导如附录 B 所示。其他子分区也可依据上述方法完成建模,不再赘述。

3 基于 DBN 和 GO 法的可靠性分析模型

目前已有研究利用模糊 DBN 和 GO 法结合的算法来实现换流站主接线可靠性分析,并且具有一定的优越性,但是由分析可知,通过该算法得到的评估结果使得系统可靠性指标处于一个动态的区间中,无法得到一个确切值,在没有一个确切的可靠性指标值的基础上定义系统的可靠性必然会引起一定的偏差,导致评估结果不够准确。本文采用 DBN 和 GO 法相结合的算法进行换流站电气主接线可靠性分析,可以得出一个确切的可靠性指标数值,根据该值对系统进行可靠性评估具有一定的准确性。

3.1 DBN 理论

DBN 是基于静态网络的一种拓展,主要由初始

网络与转移网络组成,其在静态网络的基础上加入了时间因素,使得贝叶斯网络不但可以反映变量之间的相互作用关系,还能体现变量间随时间变化的动态规律^[16],其数学模型如下。

在某初始时刻,网络中任意一子节点的初始概率为:

$$P(B_T^h) = \prod_{h=1}^H P(B_T^h | A_T^h) \quad (15)$$

在经过 $k\Delta T$ 时间后,转移网络的概率为:

$$P(B_{T+k\Delta T}^h | A_{T+k\Delta T}^h, A_T^h) = \prod_{k=1}^K \prod_{h=1}^H P(B_{T+k\Delta T}^h | A_{T+k\Delta T}^h) \times P(A_{T+k\Delta T}^h | A_T^h) \quad (16)$$

因此,DBN的数学模型可表示为:

$$P(B_{T+k\Delta T}^h) = \prod_{h=1}^H P(B_T^h | A_T^h) + \prod_{k=1}^K \prod_{h=1}^H (B_{T+k\Delta T}^h | A_{T+k\Delta T}^h) P(A_{T+k\Delta T}^h | A_T^h) \quad (17)$$

式中: H 为系统总节点数; T 为初始时间; ΔT 为某一个固定的时间间隔; A_T^h, B_T^h 分别为 T 时刻第 h 个节点的父节点、子节点; $A_{T+k\Delta T}^h, B_{T+k\Delta T}^h$ 分别为 $k\Delta T$ 时间间隔之后的转移网络中第 h 个节点的父节点、子节点。

3.2 GO法原理与GO法模型的构建

GO法基本原理是基于系统的拓扑结构,利用特定的操作符代表系统的拓扑结构,将系统中各子分区看作一个具有输入和输出的单元,使用相对应的GO操作符来表示各子分区,通过信号流将表示各子分区的操作符依据系统逻辑关系连接起来,表示系统运行流程^[17]。依据不同的单元在系统中的功能特点以及相互之间的逻辑关系,将其归类为17个操作符^[18],见附录C图C1。

根据每个操作符的功能,可将操作符分为两大类型:第2、9—11、13—15类操作符为逻辑操作符,主要功能是表示系统中各个单元之间的逻辑关系;第1、3—8、12、16、17类操作符为功能操作符,主要功能是表示系统中各个单元的自身状态值以及逻辑运算。本文基于GO法原理,根据龙门换流站的电气主接线分区结果,采用GO法第1、2、5类操作符对龙门换流站电气主接线进行建模,见附录C图C2。其中,站控子分区、AC-E、V、C&P以及DC-E子分区用第1类操作符表示,送端母线用第5类操作符表示,各子分区并联运行后的输出用第2类操作符表示。

3.3 GO法操作符与DBN的形式化映射方法

本文结合GO法操作符与DBN的模型映射规则构建龙门换流站电气主接线可靠性模型^[19-20],其具体映射规则如下。

1)将GO操作符的输入信号映射为DBN在 T 时刻初始网络中的根节点及其转移网络子节点,建立

与初始网络根节点相对应的网络子节点,完成初始网络根节点和子节点的连接关系。

2)将系统中各个操作符的输出信号映射为转移网络子节点,将步骤1)中的转移子节点作为步骤2)的根节点,建立根节点和子节点的连接关系。

3)根据操作符中各状态概率确定初始网络的先验概率,以及与初始网络根节点相对应的网络子节点的条件概率表(conditional probability table, CPT)。

4)计算输出信号对应的转移网络子节点的CPT。由龙门换流站电气主接线GO法模型可知,模型主要包括GO操作符中的第1、2、5类操作符,第1类操作符是GO法建模最常见的操作符,以第1类操作符为例,其模型映射过程见附录C图C3。由图可知,第1类操作符输出信号的各种运行状态概率为:

$$P_{i00} = 1 - \int_T^{T+\Delta T} f_{ZM}(t)dt - \int_T^{T+\Delta T} f_{ZR}(t)dt \quad (18)$$

$$P_{i01} = \int_T^{T+\Delta T} f_{ZM}(t)dt \quad (19)$$

$$P_{i02} = \int_T^{T+\Delta T} f_{ZR}(t)dt \quad (20)$$

式中: P_{i00}, P_{i01} 和 P_{i02} 分别为初始时刻 T 初始网络根节点成功运行时,转移网络根节点成功运行、计划检修和故障的概率; $f(t)$ 为元件的故障概率密度函数。

元件故障概率密度函数和维修概率密度函数包括高斯分布、威布尔分布和指数分布^[21],假设元件故障概率分布函数和维修概率分布函数服从指数分布^[22],则有:

$$P_{i00} = 1 - P_{i01} - P_{i02} \quad (21)$$

$$P_{i01} = e^{-\lambda_{ZM}T} - e^{-\lambda_{ZM}(T+\Delta T)} \quad (22)$$

$$P_{i02} = e^{-\lambda_{ZR}T} - e^{-\lambda_{ZR}(T+\Delta T)} \quad (23)$$

$$P_{i10} = e^{-\mu_{ZM}T} - e^{-\mu_{ZM}(T+\Delta T)} \quad (24)$$

$$P_{i11} = 1 - e^{-\mu_{ZM}T} + e^{-\mu_{ZM}(T+\Delta T)} \quad (25)$$

$$P_{i12} = 0 \quad (26)$$

$$P_{i20} = e^{-\mu_{ZR}T} - e^{-\mu_{ZR}(T+\Delta T)} \quad (27)$$

$$P_{i21} = 0 \quad (28)$$

$$P_{i22} = 1 - e^{-\mu_{ZR}T} + e^{-\mu_{ZR}(T+\Delta T)} \quad (29)$$

式中: P_{i00}, P_{i11} 和 P_{i12} 分别为初始时刻 T 初始网络根节点计划检修时, $T+\Delta T$ 时刻转移网络中根节点成功运行、计划检修和故障的概率; P_{i20}, P_{i21} 和 P_{i22} 分别为初始时刻 T 初始网络根节点发生故障时, $T+\Delta T$ 时刻转移网络根节点成功运行、计划检修和故障的概率; $\mu(t)$ 为元件的维修概率密度函数。

其他GO操作符与DBN的映射可根据上述映射规则完成,在此不再赘述。

3.4 基于DBN的GO法模型

针对GO法模型中没有考虑可修元件动态时序变化的问题,可借助DBN中的转移网络完成元件的动态特性映射。通过对龙门换流站电气主接线GO法模型进行各操作符的映射,计算各个节点的动态

参数。根据GO图信号流流向确定节点间的有向边走向,建立龙门换流站电气主接线的可靠性模型,见附录C图C4。

4 可靠性评估结果分析

4.1 龙门换流站系统可靠性参数

通过实际现场调研可知,龙门换流站投运时间较短,无法获取原始性参数的具体数据。参考国内外相关文献资料以及已投运的换流站的电气元件参数资料,确定可靠性参数的原始数据^[23-25],如附录D表D1—D3所示。

4.2 仿真结果分析

由本文所提等效三状态模型转化方法,将静态元件、动态元件和附属元件全部等效为三状态模型。由表D1—D3的元件原始可靠性参数计算龙门换流站各元件的三状态模型参数,结果如表1所示。

表1 各元件等效三状态可靠性参数

Table 1 Equivalent three-state reliability parameters of each component

元件	λ_R	λ_M	μ_M	μ_R
送端母线	0.015 00	1.000 0	730.000	4380.000
换流变压器	0.020 00	1.010 0	12.167	22.670
直流电抗器	0.006 58	1.005 0	11.967	350.400
直流滤波器	0.083 30	1.005 0	350.400	834.286
直流断路器	0.181 00	1.010 0	73.000	398.182
隔离开关	0.003 00	0.147 0	109.500	314.400
VSC	0.162 60	0.031 3	486.667	72.099
站控系统	1.309 50	0	0	1095.000
避雷器	1.070 00	0	0	680.098
接地刀闸	0.015 00	0	0	584.000
电流互感器	1.020 00	0	0	798.112
交流滤波器	0.183 30	0	0	182.500
电压测量装置	1.020 00	0	0	798.112

通过本文提出的龙门换流站电气主接线合并分区方法,由式(11)—(14)计算各子分区的故障率 λ_{ZR} 、修复率 μ_{ZR} 、计划检修故障率 λ_{ZM} 、计划检修修复率 μ_{ZM} 以及各子分区正常运行概率 P_0 、计划检修概率 P_1 、故障概率 P_2 ,结果如表2所示。

将表2中的 P_0 、 P_1 和 P_2 作为仿真模型中各分区的初始运行状态概率,根据式(21)—(29)计算 $T=1$ h时各分区的节点转移概率,结果见附录D表D4。

表2 各子分区等效三状态可靠性参数

Table 2 Equivalent three-state reliability parameters of each sub-division

分区	$\lambda_{ZR}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$\mu_{ZR}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$\lambda_{ZM}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	$\mu_{ZM}/(\text{次}\cdot\text{a}^{-1})$	P_0	P_1	P_2
送端母线	0.015 00	4 380.000	1.000 00	730.000	0.998 6	0.001 3	0.000 1
站控子分区	1.492 80	678.461	0	0	0.998 8	0	0.002 2
AC-E	4.166 50	658.757	1.157 00	13.860	0.917 6	0.038 2	0.044 2
U	2.267 60	441.835	0.031 25	486.667	0.995 0	0.000 1	0.005 1
C&P	1.076 58	676.209	1.005 00	11.967	0.921 0	0.077 3	0.001 7
DC-E	3.309 00	640.546	1.157 00	76.228	0.980 0	0.014 8	0.005 2

在工程实践中,常使用设备的可用度来定量分析其可靠性,在规定的工作条件下,给定设备运行时间,设备在该时段内可正常工作的概率即为设备的可用度,同时段内设备故障的概率即为不可用度,本文通过求解系统的可用度与不可用度,得出在规定时间内系统的可用度动态曲线,进一步对龙门换流站可靠性进行分析。

$$A_0 = \frac{T_{MN}}{T_{MN} + T_{MF} + T_{MR}} \quad (30)$$

$$A_1 = \frac{T_{MR}}{T_{MN} + T_{MF} + T_{MR}} \quad (31)$$

$$A_2 = \frac{T_{MF}}{T_{MN} + T_{MF} + T_{MR}} \quad (32)$$

$$T_{MF} = T_N \int_T^{T+\Delta T} (\lambda_{ZR}(t) + \lambda_{ZM}(t)) dt \quad (33)$$

$$T_{MR} = T_N \int_T^{T+\Delta t} (\mu_{ZR}(t) + \mu_{ZM}(t)) dt \quad (34)$$

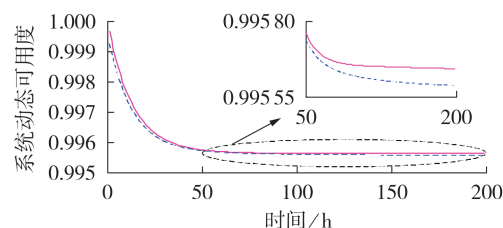
$$T_{MN} = T_N - T_{MF} - T_{MR} \quad (35)$$

式中: A_0 、 A_1 、 A_2 分别为系统的可用度、检修度、不可用度; T_{MN} 、 T_{MR} 、 T_{MF} 分别为系统在规定时段内的正常运行时间、设备检修停运时间与故障停运时间; T_N 为系统投运的额定时间。

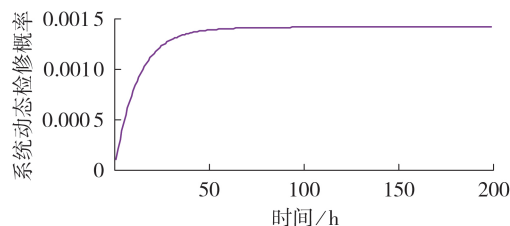
将表D4中的数据导入使用GeNIe2.0软件搭建的仿真模型中,仿真运行时间 T_N 设置为200 h,对比考虑检修的等效三状态模型和不考虑检修状态的等效二状态模型所得的系统可用度、计划检修概率与不可用度的变化曲线,结果如图4所示。

由图4可知:系统可用度随着运行小时数的增加不断下降,最终趋于一个稳定值;计划检修概率以及系统不可用度随着运行小时数的增加而增加,最终也会趋近一个稳定值;同时,比较图4(a)、(c)可知,不考虑设备检修状态的二状态模型的系统可用度曲线明显低于考虑检修状态的三状态模型的系统可用度曲线,而其不可用度曲线高于三状态模型的不可用度曲线;由图4(b)可知,等效二状态模型只是简单地将系统的运行状态视作为“正常运行状态”与“故障停运状态”,缺少对系统检修状态的考虑。上述仿真结果表明,在可靠性建模中考虑电气设备的检修状态,可以在一定程度上提高系统可靠性评估结果的准确性。

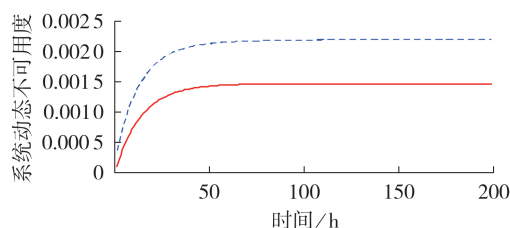
为进一步体现本文所提可靠性模型的有效性,



(a) 系统可用度变化曲线



(b) 系统计划检修概率变化曲线



(c) 系统不可用度变化曲线

--- 不考虑检修的二状态模型, — 考虑检修的三状态模型

图4 龙门换流站电气主接线仿真结果

Fig.4 Simulative results of main electrical connection of Longmen converter station

使用典型的故障树法^[4]对该柔直换流站进行建模仿真,并对比仿真结果与本文方法所得结果。系统中包含很多电气设备,由于附属元件在电气主接线中的功能主要是检测系统在运行时的电气量,附属元件故障不会对整个系统的正常运行有影响,在建立故障树模型时可忽略系统中的附属元件,而电气主接线中的动态元件与静态元件的故障则会直接影响整个系统运行。以系统双极停运为故障树顶层事件,根据对换流站的合并分区结果,将每个分区视为过渡阶段,即中间事件,其中各个分区中的静态元件和动态元件故障是该分区故障的直接原因,将各分区中静态元件和动态元件故障事件看作故障树的底事件,得到基于故障树法的龙门换流站可靠性评估模型,见附录D图D1。图中: G 为顶层事件(换流站双极停运); A_1, A_3, A_5, A_7 为AC-E层隔离开关故障事件; A_2, A_4, A_6, A_8 为AC-E层换流变压器故障事件; B_1, B_2, B_3, B_4 为V层中VSC故障事件; $C_1—C_4$ 为C&P层中直流电抗器故障事件; D_1, D_3, D_5, D_7 为DC-E层中隔离开关故障事件; D_2, D_4, D_6, D_8 为DC-E层中直流断路器故障事件。 $A_1—A_8, B_1—B_4, C_1—C_4, D_1—D_8$ 均为底事件。中间事件与底事件发生的概率为:

$$q_{AC-E}(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) \quad (36)$$

$$q_V(B_1, B_2, B_3, B_4) = (x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}) \quad (37)$$

$$q_{C\&P}(C_1, C_2, C_3, C_4) = (x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}) \quad (38)$$

$$q_{DC-E}(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8) = (x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}) \quad (39)$$

式中: $q_{AC-E}, q_V, q_{C\&P}, q_{DC-E}$ 为中间事件发生概率; $x_1—x_{24}$ 为底事件发生的概率,并且各层内的底事件都属于相互独立事件。设 q_G 为顶层事件发生的概率,则有:

$$p_1 = [1 - (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_9)(1 - x_{13})(1 - x_{17})(1 - x_{18})] \times [1 - (1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_{10})(1 - x_{14})(1 - x_{19})(1 - x_{20})] \quad (40)$$

$$p_2 = [1 - (1 - x_5)(1 - x_6)(1 - x_{11})(1 - x_{15})(1 - x_{21})(1 - x_{22})] \times [1 - (1 - x_7)(1 - x_8)(1 - x_{12})(1 - x_{16})(1 - x_{23})(1 - x_{24})] \quad (41)$$

$$q_G = 1 - (1 - p_1 p_2) \quad (42)$$

基于故障树法的换流站可靠性分析模型,可计算出系统的可用率与不可用率。

目前柔性直流输电工程ABB公司投入时间比较长,本文将以上基于各种可靠性评估模型的计算结果与ABB公司依据工程数据所得到的柔性直流输电可靠性指标进行比较^[26],结果如表3所示。

表3 不同等效模型的仿真结果

Table 3 Simulative results of different equivalent models

等效模型	系统可用率	系统不可用率
ABB公司数据	大于99%	0.3%~5%
不考虑检修状态的二状态模型(双极运行)	0.9955895%	0.0044105%
考虑检修状态的三状态模型(双极运行)	0.99564469%	0.0029338%
不考虑检修状态的二状态模型(单极运行)	0.98565476%	0.01434524%
考虑检修状态的三状态模型(单极运行)	0.99564469%	0.00293379%
基于故障树法的可靠性模型(双极运行)	0.9587500%	0.0412500%
基于故障树法的可靠性模型(单极运行)	0.9884850%	0.0115150%

5 结论

本文对柔直换流站电气主接线中的各个元件进行详细分析,基于系统中元件运行状态并不是成功运行和故障的博弈,提出了更切合实际的计及计划检修的元件等效三状态模型;建立了GO法和DBN

相结合的可靠性模型;最后通过仿真结果验证了所提模型和方法的可行性与有效性。本文所得结论如下:

1)基于元件功能和动作状态,将元件分为静态元件、动态元件和附属元件,通过提出的元件等效三状态模型计算各个元件的可靠性参数;

2)提出了柔直换流站电气主接线可靠性分析分区设计方法,计算各分区的等效可靠性参数;

3)建立了GO法和DBN相结合的可靠性模型,通过模型求解柔直换流站可用度、不可用度以及计划检修概率的时变曲线。

本文依据电气设备的运行状态对系统的电气主接线展开可靠性建模,元件检修状态还可分为计划检修与状态检修,由于柔性直流龙门换流站投入运行时间尚短,本文仅考虑计划检修对可靠性分析的影响,并未考虑状态检修对可靠性分析的影响,这一工作还有待进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 李文君. 柔性直流输电系统可靠性分析及优化[D]. 长沙:湖南大学,2019.
LI Wenjun. Reliability analysis and optimization of flexible HVDC transmission[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [3] 朱介北,邱威,孙宁,等. 基于序贯蒙特卡洛法的安全稳定控制系统架构可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2021,45(15):21-27.
ZHU Jiebei, QIU Wei, SUN Ning, et al. Reliability analysis of security and stability control system architecture based on sequential Monte Carlo method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 21-27.
- [4] 肖彦娟,丁坚勇. 基于故障树的电气主接线可靠性及薄弱环节分析[J]. 电测与仪表,2020,57(16):12-16.
XIAO Yanjuan, DING Jianyong. Reliability evaluation and weak part identification analysis of main electrical connection based on fault tree[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 12-16.
- [5] 王秀丽,郭静丽,庞辉,等. 模块化多电平换流器的结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1908-1914.
WANG Xiuli, GUO Jingli, PANG Hui, et al. Structural reliability analysis of modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1908-1914.
- [6] 井皓,许建中,徐莹,等. 考虑子模块相关性的MMC可靠性分析方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3835-3842.
JING Hao, XU Jianzhong, XU Ying, et al. Reliability analysis of MMC considering the submodule correlations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3835-3842.
- [7] 李生虎,胡涛,常雅玲. 计及异常状态和定期检修的UPFC可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2022,42(5):90-96,103.
LI Shenghu, HU Tao, CHANG Yaling. Reliability evaluation to UPFC with abnormal state and routine test[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 90-96, 103.
- [8] CONTRERAS-JIMÉNEZ J S, RIVAS-DÁVALOS F, SONG J, et al. Multi-state system reliability analysis of HVDC transmission systems using matrix-based system reliability method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 265-278.
- [9] 魏勇,崔俊彬,刘辛彤,等. 基于改进动态故障树的电力系统广域保护通信系统可靠性分析方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(23):171-177.
WEI Yong, CUI Junbin, LIU Xintong, et al. A reliability analysis method power system wide area protection communication system based on an improved dynamic fault tree[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 171-177.
- [10] 谢阳腾,丘东元,谢帆. 基于多尺度思想的模块化多电平变流器可靠性分析综述[J]. 电网技术,2020,44(5):1852-1862.
XIE Yangteng, QIU Dongyuan, XIE Fan. Review of reliability analysis of modular multilevel converter based on multiscale theory[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1852-1862.
- [11] 马海涛,黄守道,饶宏,等. 基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(10):10-16.
MA Hetao, HUANG Shoudao, RAO Hong, et al. Reliability analysis of VSC-HVDC system based on Markov process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 10-16.
- [12] 谢开贵,胡博,南方电网科学研究院有限责任公司. 超(特)高压直流输电系统可靠性评估、优化及应用[M]. 北京:科学出版社,2014:53-72.
- [13] 郭振斌. 交直流混合输电系统可靠性快速评估方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
GUO Zhenbin. AC/DC system reliability rapid evaluation method research[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [14] 丁明,李小燕,毕锐,等. 含VSC-HVDC的交直流混合输电系统可靠性评估[J]. 电网技术,2008,32(16):53-58.
DING Ming, LI Xiaoyan, BI Rui, et al. Reliability assessment of hybrid AC/DC power system containing VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 53-58.
- [15] 李凌飞,胡博,黄莹,等. 混合多端特高压直流输电系统可靠性评估[J]. 南方电网技术,2018,12(11):73-83.
LI Lingfei, HU Bo, HUANG Ying, et al. Reliability evaluation of hybrid multi-terminal UHVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 73-83.
- [16] 廖芷燕,李银红. 基于R藤Copula-DBN时空相关性建模的风光功率概率预测[J]. 电力自动化设备,2022,42(3):113-120.
LIAO Zhiyan, LI Yinhong. Probabilistic forecasting of wind-photovoltaic-load power based on temporal-spatial correlation modelling of Regular Vine Copula-DBN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 113-120.
- [17] 伊泉剑. 基于GO法的复杂系统可靠性关键技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
YI Xiaojian. Study on key technologies of reliability for complex system based on GO methodology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [18] 樊冬明,任羿,刘林林,等. 基于动态贝叶斯网络的可修GO法模型算法[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(11):2166-2176.
FAN Dongming, REN Yi, LIU Linlin, et al. Algorithm based on dynamic Bayesian networks for repairable GO methodology model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(11): 2166-2176.
- [19] 董超跃. 基于动态贝叶斯网络的动车组牵引传动系统可靠性

- 分析[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- DONG Chaoyue. Reliability analysis of EMU traction drive system based on dynamic Bayesian network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [20] 张乐平,周尚礼,谢文旺,等. 基于GO法与贝叶斯网络的智能电能表可靠性预计方法研究[J]. 电测与仪表,2021,58(10): 177-184.
- ZHANG Leping, ZHOU Shangli, XIE Wenwang, et al. Research on reliability prediction method of smart meter based on GO method and Bayesian network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 177-184.
- [21] 束洪春,赵红芳,张旭,等. 昆柳龙混合直流工程送端换流站电气主接线可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2021,45(22): 115-123.
- SHU Hongchun, ZHAO Hongfang, ZHANG Xu, et al. Reliability analysis of main electrical connection for sending-end converter station in Kunlulong hybrid DC project of China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 115-123.
- [22] 马德仲,周真,于晓洋,等. 基于模糊概率的多状态贝叶斯网络可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(12): 2607-2611.
- MA Dezhong, ZHOU Zhen, YU Xiaoyang, et al. Reliability analysis of multi-state Bayesian networks based on fuzzy probability [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(12): 2607-2611.
- [23] 许建中,王乐,武董一,等. 采用子模块相关性坐标变换解耦的混合模块化多电平换流器可靠性建模[J]. 电工技术学报,2019,34(18): 3821-3830.
- XU Jianzhong, WANG Le, WU Dongyi, et al. Reliability modeling of hybrid modular multilevel converter using coordinate transformation based on decoupled sub-module correlations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3821-3830.
- [24] 束洪春,胡泽江,张静芳,等. ± 800 kV换流站主接线可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2008,32(19): 35-39, 91.
- SHU Hongchun, HU Zejiang, ZHANG Jingfang, et al. Reliability evaluation for main electrical scheme of a ± 800 kV converter station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 35-39, 91.
- [25] 丁明,毕锐,王京景. 基于FD法和模型组合的柔性直流输电可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(21): 33-37.
- DING Ming, BI Rui, WANG Jingjing. FD method and combined model for reliability assessment of HVDC flexible [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 33-37.
- [26] 孙宇斌,刘文霞,裘剑明,等. 计及备用元件的柔性直流输电系统可靠性评估方法[J]. 现代电力,2013,30(1): 8-12.
- SUN Yubin, LIU Wenxia, QIU Jianming, et al. The reliability evaluation method for VSC-HVDC system by considering of standby components [J]. Modern Electric Power, 2013, 30(1): 8-12.

作者简介:



束洪春

束洪春(1961—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及DSP应用(E-mail: kmshe@sina.com.cn);

董海飞(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统状态检修(E-mail: 17717631324@163.com);

赵红芳(1993—),女,博士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统韧性评估与供电恢复策略、可靠性分析(E-mail: angel199381@126.com)。

(编辑 任思思)

Reliability analysis of electrical system in ± 800 kV VSC-DC converter station

SHU Hongchun^{1,2,3,4}, DONG Haifei^{2,3,4}, ZHAO Hongfang¹, XU Chang⁴, YANG Yongyin⁴, ZHAO Xuezhan⁴

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. State Key Laboratory of Collaborative Innovation Center for Smart Grid Fault Detection, Protection and Control Jointly, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Green Energy and Digital Power Measurement, Control and Protection, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

4. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The equivalent two-state model of electrical components is optimized, and the equivalent three-state model of components considering scheduled maintenance state is proposed to conform to the actual operation of flexible direct current (DC) transmission system. Taking Longmen converter station in Guangdong as an example, the reliability parameters of each component in the main electrical connection of the converter station are calculated by the equivalent three-state model, and the reliability parameters of each partition are calculated by the simplified partition method. On this basis, the reliability model of electrical main connection is built by combining goal oriented (GO) method and dynamic Bayesian network, and the time-varying curves of availability, inavailability and scheduled maintenance probability of voltage source converter-DC (VSC-DC) converter station are solved. The feasibility and effectiveness of the proposed model and method for reliability evaluation of electrical main connection of VSC-DC converter station are verified.

Key words: reliability analysis of main electrical connection; VSC converter station; GO method; dynamic Bayesian network; scheduled maintenance

附录 A

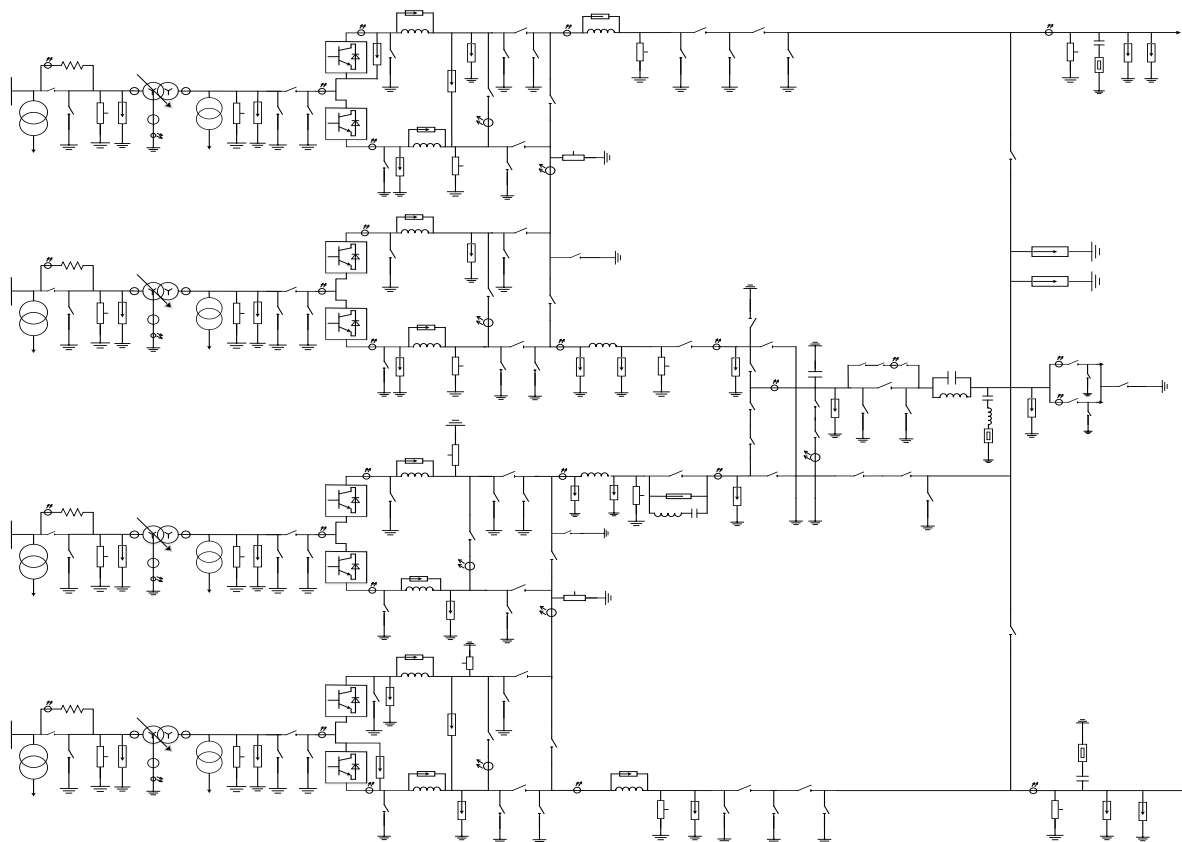


图 A1 龙门换流站电气主接线

Fig.A1 Main electrical wiring of gantry converter station

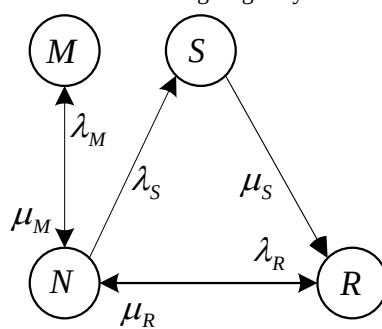


图 A2 动态元件的四状态模型

Fig.A2 Four-state model of dynamic components

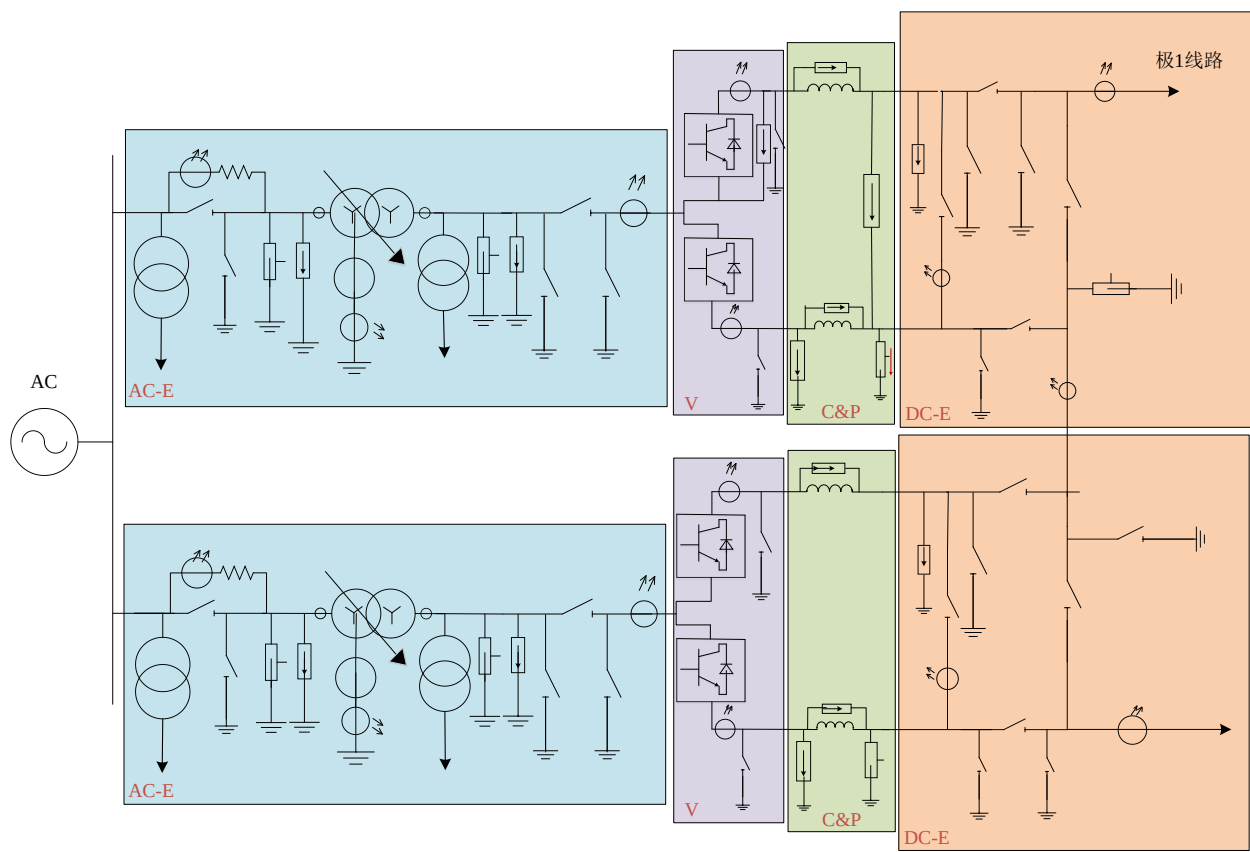


图 A3 龙门换流站单极电气主接线分区示意图

Fig.A3 Schematic diagram of main single-pole electrical wiring division of gantry converter station

表 A1 龙门换流站电气主接线分区结果
Table A1 Zoning results of electrical main wiring of
Longmen converter station

序号	分区名称	元件名称
1	送端母线	——
2	站控子分区	站控系统、交流滤波器
3	AC-E	隔离开关、避雷器、接地刀闸、电流互感器、 电流测量装置、电压测量装置、换流变压器
4	V	VSC、接地刀闸、电流测量装置、避雷器
5	C&P	直流电抗器、避雷器
6	DC-E	隔离开关、接地刀闸、避雷器、电流测量装 置、电压测量装置、直流断路器、直流线路

附录 B

以 V 子分区为例，其数学模型如推导如下所示，其中 $P_{v,0}$ 、 $P_{v,1}$ 和 $P_{v,2}$ 分别为 V 分区的正常运行、计划检修和故障概率。

$$\begin{cases} \lambda_{ZM} = \lambda_{DM,1} \\ \mu_{ZM} = \mu_{DM,1} \\ \lambda_{ZR} = \lambda_{DR,1} + \lambda_{FR,1} + \lambda_{FR,2} + \lambda_{FR,3} \\ \mu_{ZR} = \frac{\lambda_{DR,1} + \lambda_{FR,1} + \lambda_{FR,2} + \lambda_{FR,3}}{\frac{\lambda_{DR,1}}{\mu_{DR,1}} + \frac{\lambda_{FR,1}}{\mu_{FR,1}} + \frac{\lambda_{FR,2}}{\mu_{FR,2}} + \frac{\lambda_{FR,3}}{\mu_{FR,3}}} \end{cases} \quad (B1)$$

$$P_{v,0} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{ZM}}{\mu_{ZM}} + \frac{\lambda_{ZR}}{\mu_{ZR}}} \quad (B2)$$

$$P_{v,1} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_{ZM}}{\lambda_{ZM}} + \frac{\lambda_{ZR}\mu_{ZM}}{\lambda_{ZM}\mu_{ZR}}} \quad (B3)$$

$$P_{v,2} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_{ZR}}{\lambda_{ZR}} + \frac{\lambda_{ZM}\mu_{ZR}}{\lambda_{ZR}\mu_{ZM}}} \quad (B4)$$

式中： $\lambda_{DM,1}$ 和 $\mu_{DM,1}$ 分别为 V 子分区中换流器的元件故障率和修复率； $\lambda_{FR,1}$ 和 $\mu_{FR,1}$ 分别为接地刀闸的故障率和修复率； $\lambda_{FR,2}$ 和 $\mu_{FR,2}$ 分别为避雷器的故障率和修复率； $\lambda_{FR,3}$ 和 $\mu_{FR,3}$ 分别为电流测量装置的故障率和修复率； $P_{v,0}$ 、 $P_{v,1}$ 和 $P_{v,2}$ 分别为 V 分区的正常运行、计划检修和故障概率。

附录 C

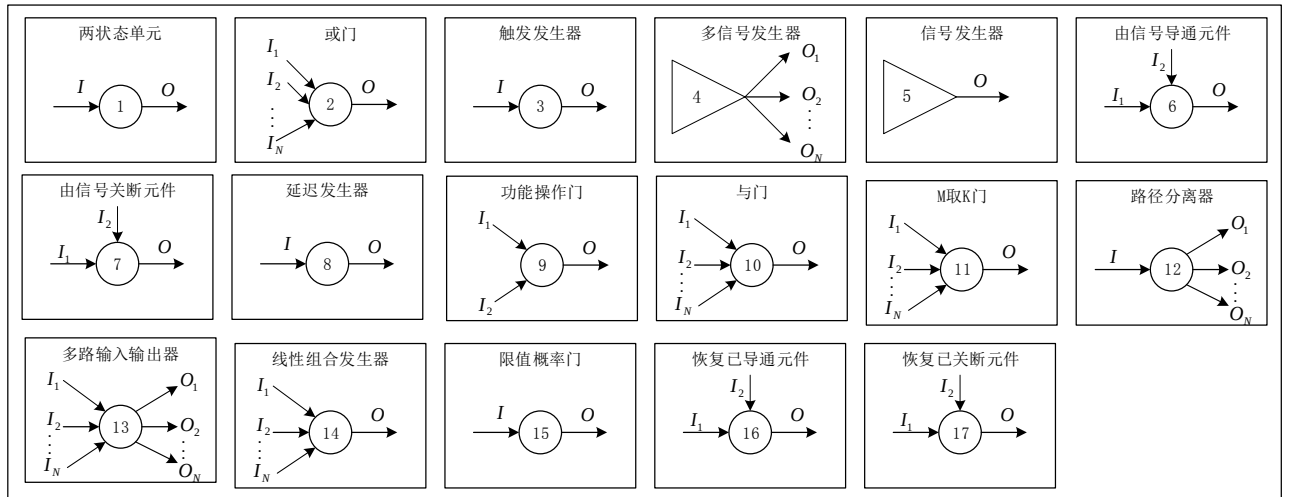


图 C1 GO 法操作符

Fig.C1 Operators of GO method

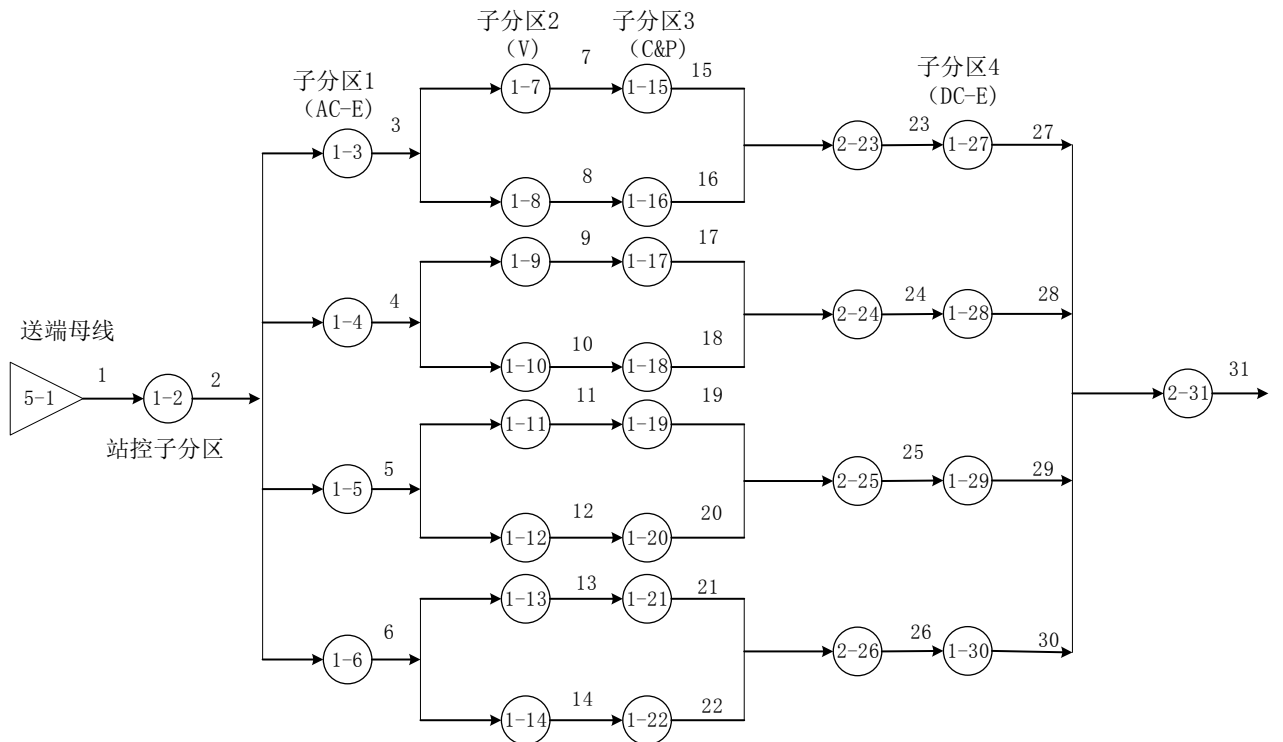


图 C2 龙门换流站电气主接线的 GO 法模型

Fig.C2 GO method model of main electrical wiring of Longmen converter station

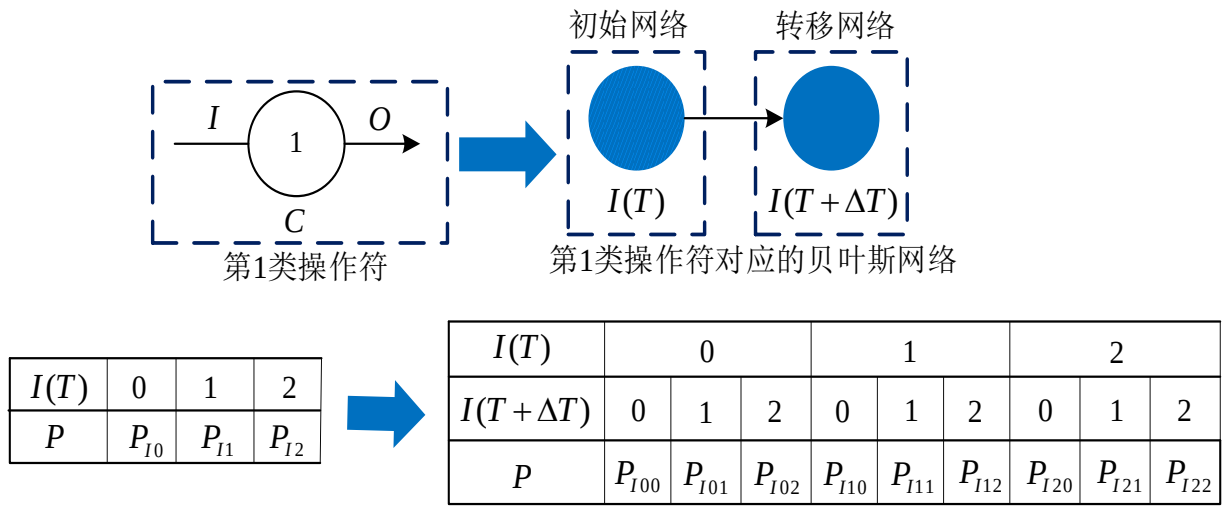


图 C3 第 1 类操作符及对应的 DBN

Fig.C3 Type 1 operators and corresponding DBN

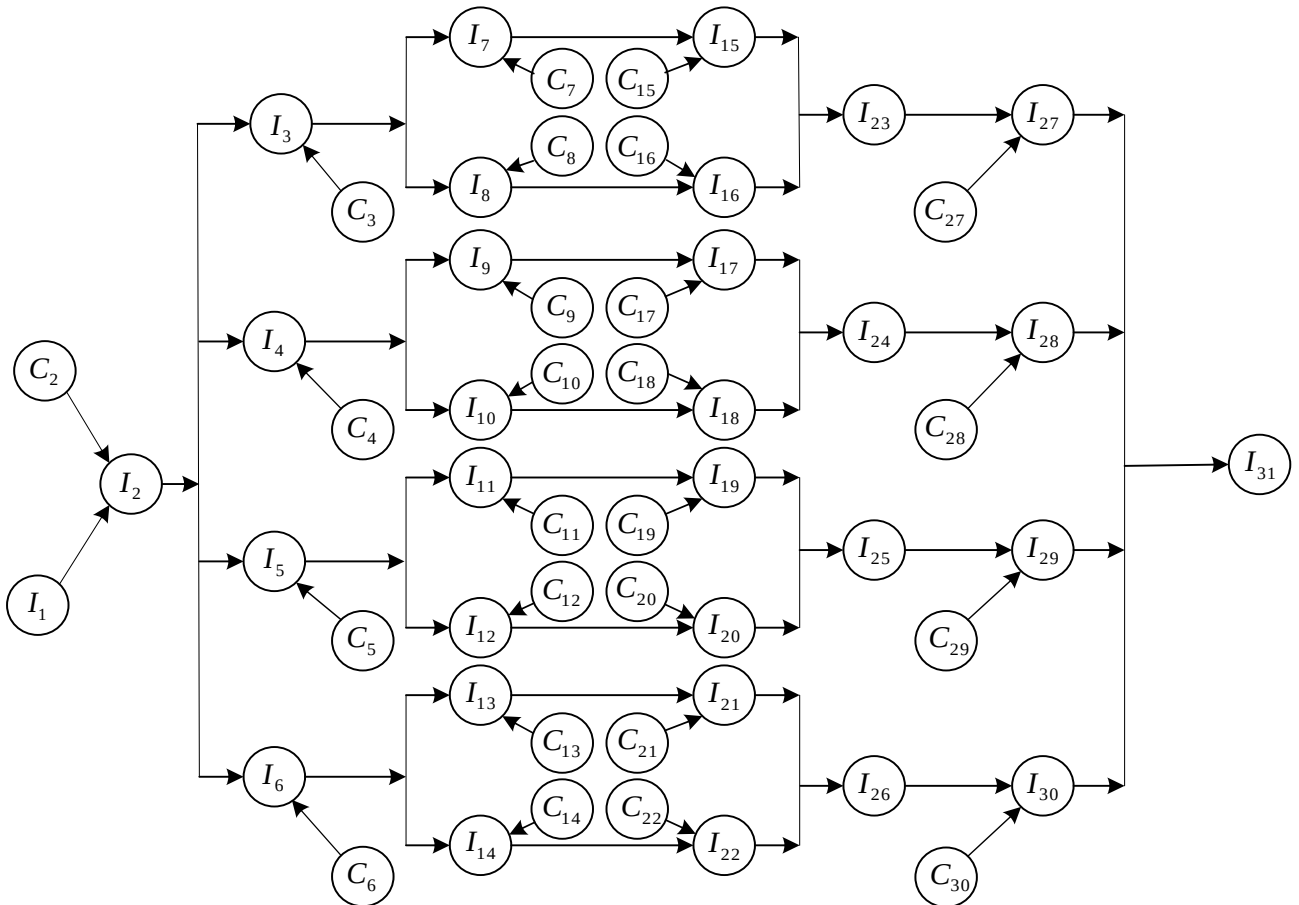


图 C4 龙门换流站电气主接线 DBN 模型

Fig.C4 DBN model of main electrical wiring of Longmen converter station

附录 D

表 D1 静态元件可靠性参数原始数据

Table D1 Raw data of reliability parameters of static components

元件	$\lambda_R / (\text{次 a}^{-1})$	$\lambda_M / (\text{次 a}^{-1})$	$\mu_M / (\text{次 a}^{-1})$	$\mu_R / (\text{次 a}^{-1})$
送端母线	0.015	1.00	730	4380
换流变压器	0.02	1.01	12.167	22.67
直流电抗器	0.00658	1.005	11.967	350.4
直流滤波器	0.0833	1.005	350.4	834.286

表 D2 动态元件可靠性参数原始数据

Table D2 Raw data of reliability parameters of dynamic components

元件	$\lambda_R / (\text{次 a}^{-1})$	$\lambda_M / (\text{次 a}^{-1})$	$\lambda_S / (\text{次 a}^{-1})$	$\mu_M / (\text{次 a}^{-1})$	$\mu_R / (\text{次 a}^{-1})$	$\mu_S / (\text{次 a}^{-1})$
直流断路器	0.121	1.01	0.06	73	121.67	8760
换流断路器	0.045	1.01	0.06	73	175.2	8760
隔离开关	0.00149	0.147	0.00149	109.5	156.43	87600
VSC	0.0813	0.03125	0.0813	486.667	36.5	2920

表 D3 附属元件可靠性参数原始数据

Table D3 Raw data of reliability parameters of auxiliary components

元件	$\lambda_R / (\text{次 a}^{-1})$	$\mu_R / (\text{次 a}^{-1})$
站控系统	1.3095	1095
交流滤波器	0.1833	182.5
避雷器	1.07	680.098
接地刀闸	0.015	584
电流互感器	1.02	798.112
电流测量装置	1.02	798.112
电压测量装置	1.02	798.112

表 D4 各分区 DBN 节点转移概率

Table D4 DBN node transition probability of each partition

序号	分区	$t=0$	$t=1$		
			P_0	P_1	P_2
1	送端母线	P_0	0.9986	0.999884	0.000114
		P_1	0.0013	0.079956	0.920044
		P_2	0.0001	0.393469	0.606531
2	站控子分区	P_0	0.9978	0.9998	0
		P_1	0	0	1
		P_2	0.0022	0.0689	0.9311
3	AC-E	P_0	0.9176	0.999392	0.000132
		P_1	0.0382	0.001581	0.998419
		P_2	0.0442	0.072443	0
4	U	P_0	0.9948	0.9997	0
		P_1	0.0001	0.0511	0.9489
		P_2	0.0051	0.0468	0
5	C&P	P_0	0.9212	0.9998	0.0001
		P_1	0.0773	0.0014	0.9986
		P_2	0.0015	0.0688	0
6	DC-E	P_0	0.9801	0.9995	0.0001
		P_1	0.0148	0.0086	0.9914
		P_2	0.0051	0.0655	0

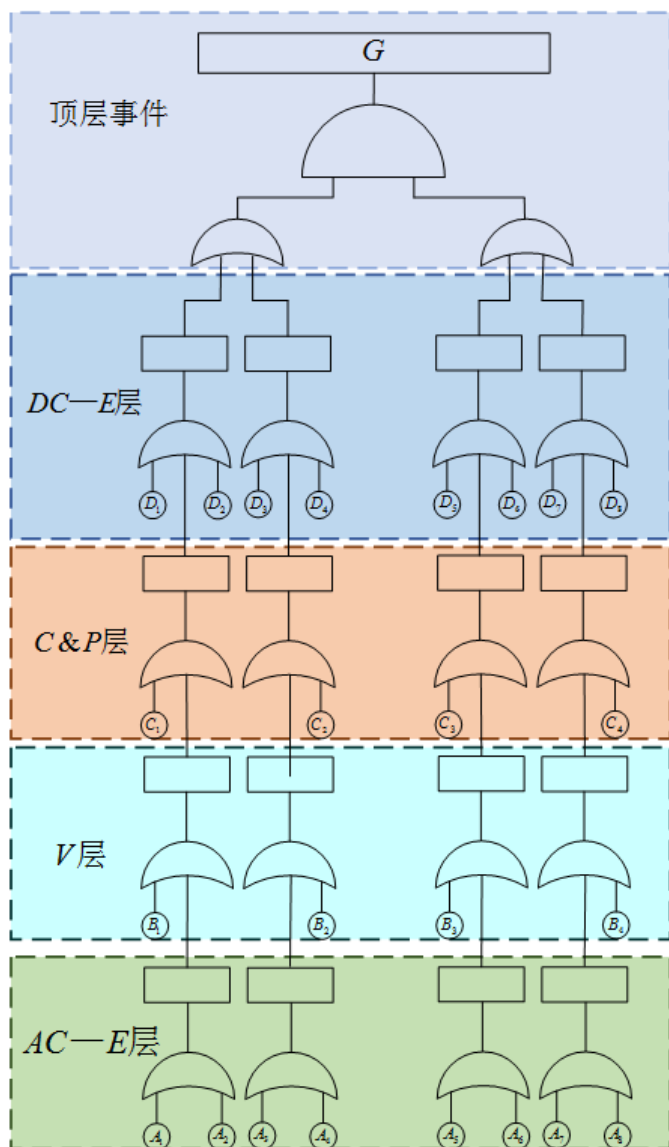


图 D1 龙门换流站故障树模型
Fig.D1 Fault tree model of Longmen converter station