

计及高压隔离开关设备的 UHVDC 系统 FTA 评估

李生虎, 华玉婷, 董王朝, 于丽萍

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 根据特高压直流输电(UHVDC)系统实际结构建立了横向和纵向故障树分析(FTA)模型, 分析了 2 种模型的差异, 基于此构造计及高压隔离开关设备的 UHVDC 系统 FTA 模型。采用模块分解法、改进的最小路集(MPS)法解决 FTA 的非确定多项式(NP)问题。求取了 UHVDC 可靠性指标。算例分析结果表明: 采用所提方法后, FTA 的计算量明显降低; 与横向建模相比, 纵向建模时双极故障、1/2 单极运行的概率和故障频率较低、持续时间较短, 等效停运小时数较低, 能量可用率较高; 隔离开关对系统双极故障、单极停运影响最明显, 接地开关对其他运行方式影响最明显; 旁路开关对 1/2 双极运行和 3/4 双极运行有影响; 直流转换开关仅对双极故障有明显的影。

关键词: 特高压直流输电; 高压隔离开关设备; 故障树分析; 最小路集; 可靠性

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.012

0 引言

随着大功率电力电子器件和高压隔离开关设备制造技术日趋成熟, 特高压直流输电 UHVDC(Ultra High Voltage Direct Current)工程逐渐增加。截至 2013 年, 全国在运 UHVDC 占有直流输电容量的 1/3^[1-2], UHVDC 的可靠性影响电网安全运行^[3-4]。

现有 UHVDC 可靠性建模有横向和纵向 2 种, 二者区别在于故障元件是否可用异极元件替换。实际工程中, 若送端或受端换流站在同一地点, 可用纵向建模, 考虑元件的可替换性, 将系统分为整流站、逆变站、直流线路建模。如文献[5]认为不同极整流站和逆变站可通过正负极直流线路连接为单极运行; 文献[6]先建立单侧换流站双极模型, 再将整流站和逆变站合并为双侧模型。若送端换流站不在同一地点, 如向家坝—上海工程送端的向家坝和溪洛渡换流站, 单端正负极元件互相替换比较困难, 可采用横向建模, 即先将系统分为正负两极, 再把单极分为整流站、逆变站和直流线路。如文献[7]将同极两站阀组、换流变压器和传输线作为串联结构考虑, 建立故障树分析 FTA(Fault Tree Analysis)模型; 文献[8]将系统划分为双极公共部分和整流站、逆变站、直流线路的两侧单极部分。

高压隔离开关设备作为 UHVDC 系统的重要设备之一, 主要作用为运行方式转换、故障切除、隔离检修。目前主要研究电流转换过程^[9], 可靠性方面的研究集中于数据采集与处理^[10], 未见文献将其纳入可靠性评估。

FTA 是可靠性评估常用的方法, 基本步骤有建

立故障树 FT(Fault Tree)、定性定量分析^[11]。学者通常关心故障原因, 对最小割集 MCS(Minimal Cut Set)研究较多^[12]。实际中, FTA 属于非确定多项式 NP(Nondeterministic Polynomial)问题, 尤其是 FT 中或(OR)门越多, 割集数迅速增加, 枚举 MCS 及其不交化的计算量随之增大, 为 FTA 算法实现造成极大困难。

本文根据 UHVDC 系统的实际结构, 采用不同建模方法构建 FT 模型, 分析两者差异及对可靠性指标的影响; 依据各高压开关配置原则, 建立计及高压开关的 UHVDC 系统 FTA 模型; 针对 NP 困难, 采用模块分解、最小路集 MPS(Minimal Path Set)法进行优化; 根据实际 FT 的特点, 改进 MPS 不交化定理。计算系统状态概率、重要度、故障频率和持续时间、等效停运时间、能量不可用率等可靠性指标, 分析不同开关设备对各运行方式和整个系统的影响。

1 UHVDC 系统的高压开关设备配置

UHVDC 系统一般采用双极双桥 12 脉接线, 有双极运行(100%容量)、3/4 双极运行(75%容量)、单极停运(50%容量)、1/2 双极运行(50%容量)、1/2 单极运行(25%容量)、双极故障(0%容量)6 种运行方式(5 种容量等级)。

计及对称性, 图 1 给出单侧换流站接线^[13-15]。为简明起见, 平波电抗器和直流滤波器等效为每站每极各 1 个, 交流滤波器等效为每站 2 组互为备用, 接地极同站两极共用 1 个。直流转换开关有中性母线接地开关(NBGS)、中性母线开关(NBS)、金属回线转换开关(MRTB)、大地回线转换开关(ERTB)4 种。每站内两极共用 NBGS, NBS 配置于每站每极, MRTB 和 ERTB 一般只在一端换流站内配备^[9]。

为便于故障切除和隔离检修, 为各元件配置隔

收稿日期: 2015-12-03; 修回日期: 2016-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277049)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277049)

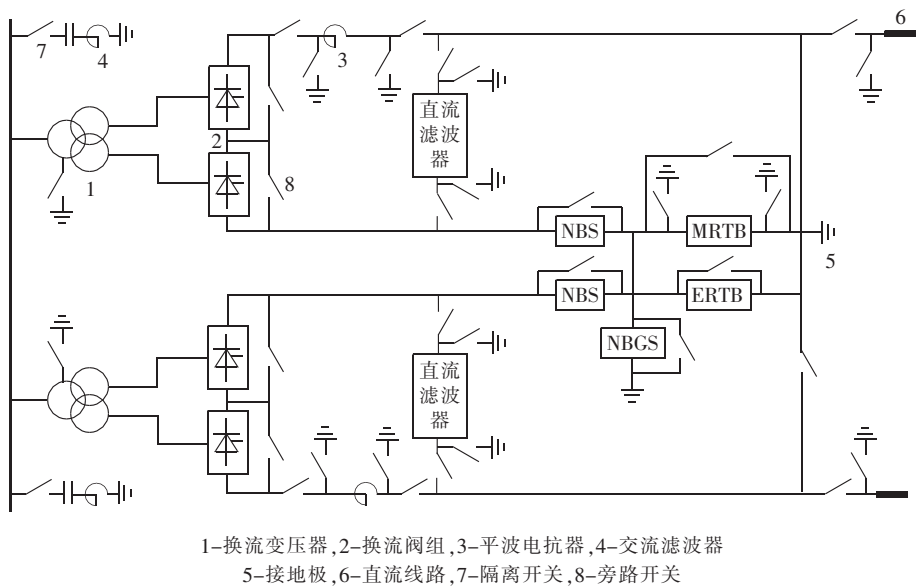


图 1 UHVDC 换流站典型开关布置
Fig.1 Typical switch configuration of UHVDC converter station

离、接地、旁路开关。其中每个变压器配置 1 个接地开关,每个 12 脉换流阀组配置 1 个旁路开关,每组交流滤波器、NBGS、NBS、ERTB 各配置 1 个隔离开关,MRTB 配置 1 个隔离开关和 2 个接地开关,平波电抗器、直流滤波器和直流线路各配置 2 个隔离开关和 2 个接地开关。

2 UHVDC 系统的 FTA 建模

2.1 横向建模与纵向建模的 FT 比较

图 2 给出横向建模和纵向建模的分解方式。横向建模时,先按两极解耦,单极交流滤波器组、直流线路、整流站、逆变站组合,再将两极模型合并,与接地极组成系统双极模型,横向建模不存在两极线路相互转换,因而没有 MRTB 和 ERTB。纵向建模先解耦为整流站、逆变站和直流线路,再区分极 1 和极 2,建立各子系统双极模型,取各子系统最小容量为

UHVDC 系统可输送最大容量。
不同结构分解的 FT 模型不同,图 3 以双极故障为例,给出了 FTA 的横向建模和纵向建模,图中 n/m ($n=1,2;m=2,7$)表示 m 个元件中有 n 个故障则系统故障,后同。图 3(a)中包含极 1 整流站故障且极 2 直流线路故障情况,而在图 3(b)所示的纵向建模中可用极 1 直流线路替换极 2 直流线路,仅作单极故

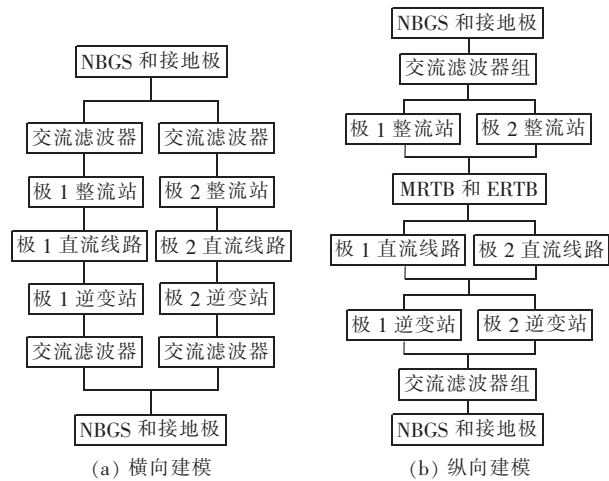


图 2 UHVDC 系统模型
Fig.2 Models of UHVDC system

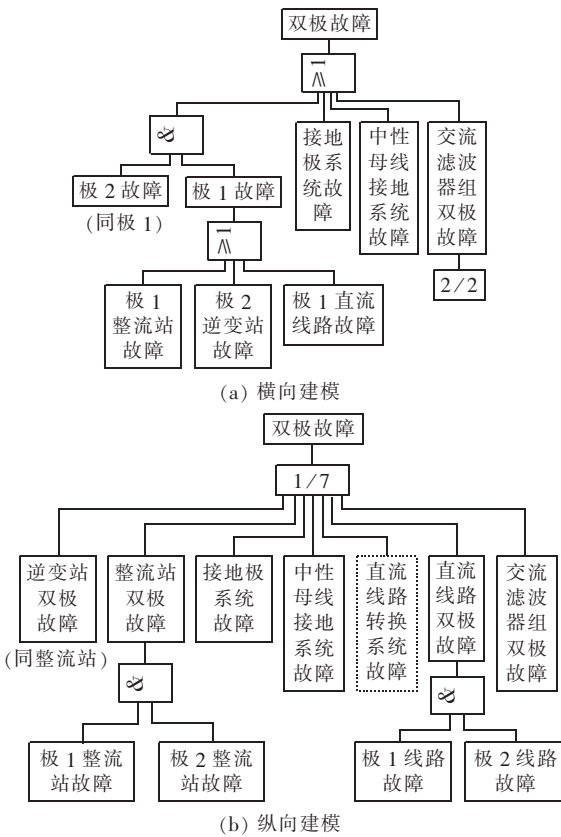


图 3 双极故障的 FTA 模型
Fig.3 FTA models of bipolar outage

障考虑;纵向建模增加了直流线路转换系统故障,如图中虚线框所示。

2.2 高压隔离开关设备的 FTA 建模

对图 3 中的接地极系统、中性母线接地系统、直流线路转换系统分别建模,见图 4。

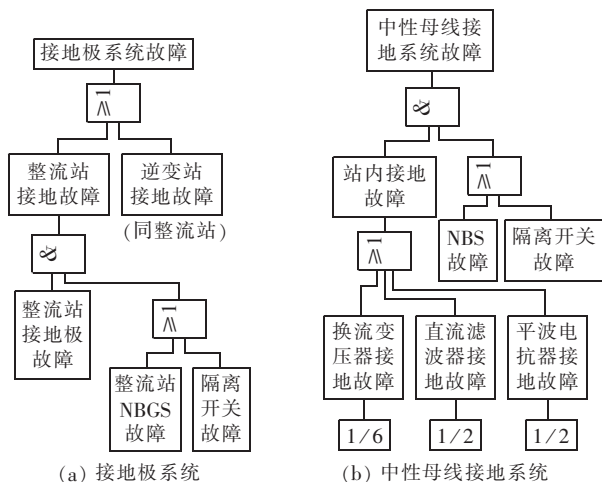


图 4 直流转换开关 FTA 模型

Fig.4 FTA models of DC transfer switches

若任一换流站接地极故障,则中性母线电压升高,为防止双极闭锁,NBGS 合闸建立中性母线和大地连接,保证双极继续运行,若 NBGS 或隔离开关故障,系统会发生双极故障,见图 4(a)。

图 4(b)中,换流站内部元件接地故障,故障极带投旁通对闭锁,但即使故障极停运,故障点仍存在,正常极电流可通过故障点流入站内接地网,对正常极稳定运行造成极大危害,此时若 NBS 故障,故障点不能隔离,系统会发生双极故障。

发生单极故障时,系统由双极运行转为单极运行,为防止大地回线电流过大,在 MRTB、ERTB 和隔离开关配合下,大地回线转为金属回线接线。故障极恢复后,非故障极由金属回线转回大地回线,最终恢复双极大地回线。其中,若高压开关故障,系统因长时间过流报警,只能闭锁两侧换流阀消除警报,导致转换失败且系统双极故障,见图 4(c)。

在换流站内部,高压开关故障会导致相应元件不能正常运行。以换流单元为例,变压器的接地开关和阀组的旁路开关故障会导致变压器和阀组不能正常工作,进而导致换流单元故障,见图 5(a)。纵向建模时,交流滤波器组互为备用,隔离开关故障会导致整流站交流滤波器故障,见图 5(b)。若隔离开关故障概率大于同站 2 组交流滤波器同时故障概率,则其对交流滤波器乃至系统双极故障影响较大。

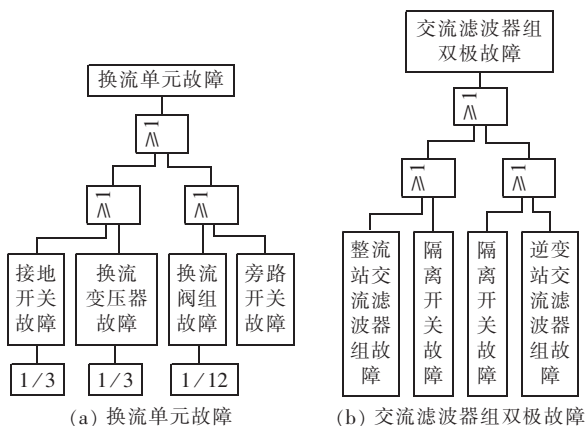


图 5 换流站内部故障 FTA 模型

Fig.5 FTA models of internal faults of converter station

3 FTA 算法的 NP 问题优化

UHVDC 系统的 FT 底层元件众多,逻辑关系复杂,但仍有规律可循,如正负两极,整流、逆变两站均为对称结构。建模时可用模块分解法减小 FT 规模,将重复结构从原 FT 中分割出来独立计算,在原 FT 中用“准底事件”代替,如图 4 即为图 3(b)的子模块。如此形成的 FT 简洁明了,计算量大幅减小。

另外,UHVDC 系统的 FT 中或门较多,可将 MPS 法引入其中,先构造对偶故障树 DFT(Dual FT),其底事件与原 FT 底事件相同,仅将与或门互相转换,再求 DFT 的 MCS,即为原 FT 的 MPS,最后对 MPS 进行不交化可求原 FT 的故障概率。

设由 DFT 求得原 FT 的所有 MPS,记为 $S_1, \dots, S_m$,则原 FT 的不交型结构函数为:

$$\Phi(X) = 1 - \left[S_1 + \bar{S}_1 S_2 + \dots + \left(\prod_{i=1}^{m-1} \bar{S}_i \right) S_m \right] \quad (1)$$

化简式(1)前,对长度为 $n-1$ 的 MPS,可先用式(2)进行不交化处理^[16]。不妨设 $S_1 = X_1 \cdots X_{n-1}$ (X_i 为底事件),则:

$$\Phi(X) = 1 - \left[X_1 \cdots X_{n-1} \bar{X}_n + S_2 + \dots + \left(\prod_{i=2}^{m-1} \bar{S}_i \right) S_m \right] \quad (2)$$

式(2)右端中括号内首项与其余各项均不交化,故可减少式(1)需化简的 MPS 数,而 UHVDC 系统的 MCS 一般小于 $n-1$,不能用式(2)简化。

以图 4(c)所示的 FT 为例,设底事件为 $X_i (i=1, \dots, 7)$,故障和正常概率分别为 p_i 和 q_i ,则 $p_i + q_i = 1$ 。

MCS 和 MPS 这 2 种方法的对比如表 1 所示。

表 1 MCS 与 MPS 对比
Table 1 Comparison between MCS and MPS

方法	MCS		MPS		故障概率
	不交化 处理前	不交化 处理后	不交化 处理前	不交化 处理后	
MCS 法	$X_1X_2,$				$q_1q_2+q_1p_2q_3+$
	$X_1X_3,$		$X_1X_5,$	$X_2X_3\times$	$q_1p_2p_3q_4+$
	X_1X_4	X_1	$X_1X_6,$	$X_4X_5\times$	$q_1p_2p_3p_4q_5+$
			X_1X_7	X_6X_7	$q_1p_2p_3p_4p_5q_6+$
MPS 法					$q_1p_2p_3p_4p_5p_6q_7$
		$X_1X_2,X_1\times$			
		$\bar{X}_2X_3,X_1\times$			
		$\bar{X}_2\bar{X}_3X_4,$	$\bar{X}_1X_2\times$	$\bar{X}_1X_2\times$	$1-p_1-q_1p_2\times$
	X_1	$X_1\bar{X}_2\bar{X}_3\times$	$X_3X_4\times$	$X_3X_4\times$	$p_3p_4p_5p_6p_7$
		$\bar{X}_4X_5,X_1\times$	$X_5X_6X_7$	$X_5X_6X_7$	
		$\bar{X}_2\bar{X}_3\bar{X}_4\times$			
		$\bar{X}_5X_6$			

由图 4(c)可知,直流线路转换系统有 3 个或门、1 个与门,进而有 6 个 MCS、2 个 MPS,MCS 不交化明显比 MPS 复杂,概率计算也更繁琐。

一般而言,MCS 法反映了系统故障模式,而 MPS 法表征了系统正常模式,两者不交化后均可求得系统结构函数。对或门较多的 UHVDC 系统,MPS 法可明显降低计算量,最终的结构函数表达式也更简明。工程中可根据实际情况选取不同方法。

4 FTA 法求取 UHVDC 系统可靠性指标

根据第 3 节,可采用 MPS 法求得系统结构函数 $\Phi(X)$,将 $\Phi(X)$ 中的 X_i 用故障概率 q_i 替换,将 $\bar{X}_i$ 用 $1-q_i$ 替换,可得故障概率 $P(Q)$,即为故障概率 q_i 的函数。将 $P(Q)$ 对 q_i 求偏导可得元件 i 的概率重要度 $I_{i,r}$,见式(3)。元件 i 概率重要度 $I_{i,r}$ 的物理意义为元件 i 故障概率发生变化而导致顶事件故障概率发生变化的程度。

$$I_{i,r}=\frac{\partial P(Q)}{\partial q_i}=P_i(1,Q)-P_i(0,Q) \tag{3}$$

对于 UHVDC 系统, r 取 1、2、 $\cdots$ 、6 分别对应系统双极故障、1/2 单极运行、1/2 双极运行、单极停运、3/4 双极运行、双极运行状态;1 和 0 分别表示元件处于状态 1 和 0。

假设元件 i 的故障率和修复率均服从指数分布,故障率、修复率分别为 λ_i 、 μ_i ,则故障频率为 $f_i=\lambda_i\mu_i/(\lambda_i+\mu_i)$ 。若在 $(t,t+\Delta t]$ 时间段内仅可能出现单个元件故障^[17],则系统故障频率为:

$$f=\sum_{i=1}^nf_iI_{i,r} \tag{4}$$

其中, $f_iI_{i,r}$ 表示由于元件 i 故障引起系统故障的频率。持续时间 D 为:

$$D=\frac{P(Q)}{f} \tag{5}$$

基于强迫停运,定义可靠性指标^[18]:

$$h_{\text{BFOH}}=P_6t_{\text{PH}} \tag{6}$$

$$h_{\text{EFOH}}=t_{\text{PH}}\sum_{r=1}^6P_r(100\%-C_r) \tag{7}$$

$$\lambda_{\text{FEU}}=\sum_{r=1}^6P_r(100\%-C_r) \tag{8}$$

$$\lambda_{\text{EA}}=1-\lambda_{\text{FEU}} \tag{9}$$

其中, $C_r(r=1,2,\cdots,6)$ 为各运行方式对应可输送容量,用百分数表示; h_{BFOH} 、 h_{EFOH} 、 λ_{FEU} 、 λ_{EA} 分别为双极强迫停运小时、等效强迫停运小时、强迫能量不可用率、能量可用率;统计时间 t_{PH} 为 8760 h。

5 算例分析

UHVDC 系统的原始参数见表 2^[5-6],其中直流转换开关参照直流断路器参数设置,接地开关、旁路开关参照隔离开关参数设置^[19]。

表 2 UHVDC 系统原始参数
Table 2 Original parameters of UHVDC system

元件	故障率/ (次·a ⁻¹)	修复率/ (次·a ⁻¹)	安装率/ (次·a ⁻¹)
阀臂	0.1374	1460.0000	1460.000
换流变压器	0.0126	290.5008	182.500
平波电抗器	0.0300	133.5366	—
直流滤波器	0.2500	730.0000	—
交流滤波器	0.2000	876.0000	—
直流线路	4.7080	1101.8900	—
接地极	0.0053	858.8240	—
NBGS	0.0080	650.0000	—
NBS	0.0080	650.0000	—
MRTB	0.0100	584.0000	—
ERTB	0.0065	750.0000	—
接地开关	0.0050	1752.0000	—
隔离开关	0.0050	1752.0000	—
旁路开关	0.0050	1752.0000	—

5.1 FTA 算法优化效果

FT 的计算量可用需计算的总 FT 数量(N_{T})、单个 FT 或模块含有逻辑门数量最大值(N_{L})、底事件数量最大值(N_{E})表征,以双极故障、1/2 单极运行、1/2 双极运行为例,对比系统模块分解前后各指标如表 3 所示。

表 3 模块分解前后 N_{T} 、 N_{L} 、 N_{E} 对比
Table 3 Comparison of N_{T} 、 N_{L} 、 N_{E} between before and after modular decomposition

运行状态	模块分解	参数		
		N_{T}	N_{L}	N_{E}
双极故障	分解前	1	224	486
	分解后	16	8	19
1/2 单极运行	分解前	1	479	506
	分解后	12	9	19
1/2 双极运行	分解前	1	55	152
	分解后	9	8	19

由表 3 可知,模块分解虽增加了 FT 数目,但逻辑门和底事件数量明显减少,而后两者是计算时间的决定性因素,因此模块分解可显著减少运算时间,有效化解 NP 困难。实际上,若 UHVDC 系统的 FT 不进行模块分解,则 FT 输入参数极多,MATLAB 会因内存不够直接崩溃。故本文均用分解后模块进行计算。

表 4 为 MCS 和 MPS 法计算各故障概率的运行时间,可知对于或门较多的 FT 而言,MPS 法计算时间一般为 MCS 法的 1/4~1/2,计算时间明显减少。

表 4 MCS 法和 MPS 法的计算时间
Table 4 Computation times of MCS and MPS

运行状态	运行时间/s	
	MCS 法	MPS 法
双极故障	1.67060	0.52709
1/2 单极运行	1.24750	0.61733
1/2 双极运行	0.40931	0.15327
单极停运	0.75589	0.25021
3/4 双极运行	0.37083	0.09673

5.2 UHVDC 系统不同建模对比

为对比 UHVDC 系统的横向建模和纵向建模方式的差异,设高压开关完全可靠,计算 2 种建模方式下各运行方式的概率如图 6 所示,图中运行状态①、②、…、⑥分别对应系统双极故障、1/2 单极运行、1/2 双极运行、单极停运、3/4 双极运行、双极运行状态。

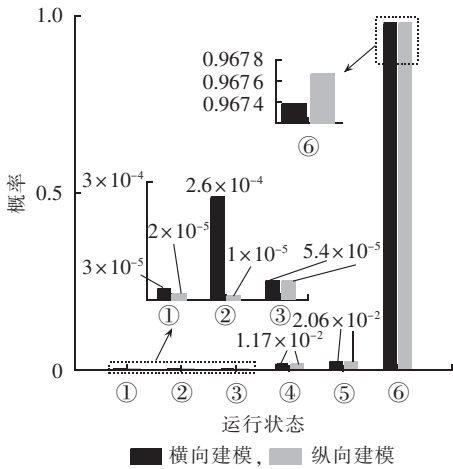


图 6 不同建模方式下 UHVDC 系统各运行方式概率
Fig.6 Probability of UHVDC operating modes for two models

由图 6 可知,纵向建模时可通过开关倒闸操作,用异极正常元件置换某极故障元件,因而双极故障、1/2 单极运行方式的概率较低,双极运行概率较高。单极运行时,虽然横向建模、纵向建模的 FT 不同,但 MPS 和运行方式的概率的计算结果相同,1/2 双极运行和 3/4 双极运行亦是如此。

表 5 为各运行状态的频率和持续时间,表 6 为 2 种建模方式下的各项可靠性指标。由表 5、6 可知:

纵向建模时双极故障、1/2 单极运行状态的频率和持续时间较低,双极运行的频率和持续时间较高;纵向建模强迫停运小时数较低,能量可用率较高。

表 5 不同建模方式下各运行状态的频率和持续时间
Table 5 Frequency and duration of operating modes for two models

运行状态	故障频率/(次·a ⁻¹)		持续时间/a	
	横向建模	纵向建模	横向建模	纵向建模
1	0.05692282	0.04126949	0.00051348	0.00046759
2	0.45771302	0.01476589	0.00057356	0.00083537
3	0.06949829	0.06949829	0.00077152	0.00077152
4	11.2382252	11.2382253	0.00103813	0.00103813
5	13.2155153	13.2155153	0.00155506	0.00155507
6	25.0378747	24.5792743	0.03863894	0.03937045

表 6 不同建模方式下的 UHVDC 系统可靠性指标
Table 6 Reliability indices of UHVDC system for two models

建模方式	h_{BF0H}/h	h_{EF0H}/h	$\lambda_{FEU}/\%$	$\lambda_{EA}/\%$
横向建模	0.256044	98.32258	0.011224	0.988776
纵向建模	0.169045	96.59183	0.011026	0.988974

5.3 高压开关对 UHVDC 系统的影响分析

为研究不同高压开关对 UHVDC 系统的影响,将假定某开关完全可靠(可用率为 1)时与计及所有开关不可用率时的各运行方式概率进行比较,结果见图 7,图中,波形从上至下对应运行方式 1—6,Ⅰ表示计及所有开关不可用率,Ⅱ—Ⅷ分别对应开关可用率为 1 时的 NBGS、NBS、MRTB、ERTB、接地、隔离、旁路开关。可靠性指标见表 7。

由图 7 可知,隔离开关对交流滤波器组双极故障

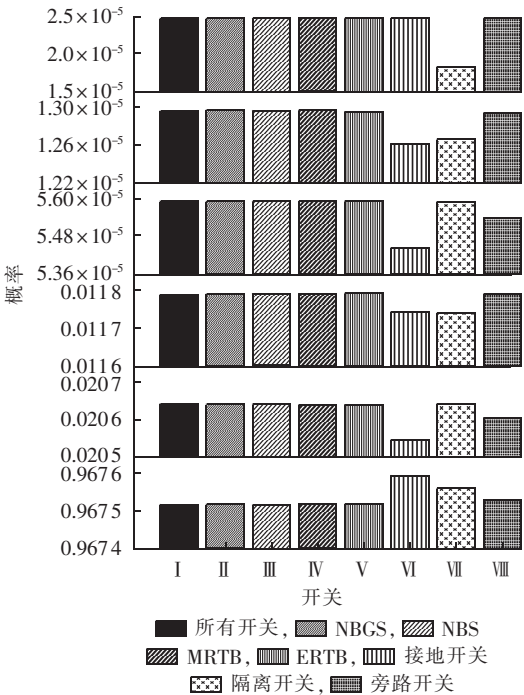


图 7 不同开关对 UHVDC 系统运行方式的影响
Fig.7 Influence of different switches on UHVDC operating modes

表 7 不同开关对可靠性指标的影响
Table 7 Influence of different switches on reliability indices

开关	$h_{\text{REFOH}}/\text{h}$	h_{EFOH}/h	$\lambda_{\text{FEU}}/\%$	$\lambda_{\text{EA}}/\%$
I	0.221 244	97.365 340	1.111 476 48	98.888 523 52
II	0.221 243	97.365 339	1.111 476 47	98.888 523 53
III	0.221 232	97.365 328	1.111 476 34	98.888 523 66
IV	0.220 886	97.364 982	1.111 472 40	98.888 527 60
V	0.221 244	97.365 340	1.111 476 48	98.888 523 52
VI	0.220 361	96.966 319	1.106 921 45	98.893 078 55
VII	0.170 259	97.041 024	1.107 774 25	98.892 225 75
VIII	0.221 243	97.315 500	1.110 907 53	98.889 092 47

影响明显,进而对 UHVDC 系统双极故障影响明显。对 1/2 单极运行状态而言,接地开关影响最大,随后为隔离开关。1/2 双极运行状态和 3/4 双极运行状态仅考虑换流单元故障,其中的接地开关和旁路开关对其有影响,且接地开关的影响更明显。对于单极停运状态,对其影响较大的为隔离开关、接地开关,且隔离开关的影响更明显。接地开关和隔离开关对双极运行状态影响最明显。此外,4 类直流转换开关的故障仅可能造成双极故障,对其他运行状态的影响不明显。

表 7 综合考虑了不同开关对 UHVDC 系统整体可靠性的影响,由表可见隔离开关对双极强迫停运小时数影响最明显,对于等效停运小时数、能量不可用率而言,接地开关影响最明显,随后为隔离开关、旁路开关。

为进一步探究高压开关对 UHVDC 系统的重要性,计算概率重要度指标如表 8 所示。由表 8 可见,增大各开关可用率可降低系统故障概率,提高双极运行率,不同开关对系统概率影响程度与图 7 所示一致。

表 8 各种高压开关的概率重要度
Table 8 Probability importance of different HV switches

开关	$I_{i,1}$	$I_{i,2}$	$I_{i,3}$	$I_{i,4}$	$I_{i,5}$	$I_{i,6}$
II	-0.000 01	—	—	—	—	0.000 01
III	-0.000 11	—	—	—	—	0.000 11
IV	-0.002 39	—	—	—	—	0.002 39
V	—	—	—	—	—	—
VI	-0.035 51	-0.098 99	-0.124 16	-19.825 9	-23.504 7	43.589 3
VII	-2.039 69	-0.083 37	—	-21.740 8	—	23.863 9
VIII	-0.000 02	-0.005 21	-0.041 39	-0.020 53	-7.834 90	7.902 04

6 结论

本文对比 UHVDC 系统建模方式的差异,计及各种高压开关设备,建立 FT 模型。针对 FTA 算法的 NP 困难,采用模块分解、MPS 法进行优化,计算各运行方式可靠性指标,结论如下。

a. UHVDC 系统的纵向建模与横向建模相比,运行方式更加灵活,双极故障、1/2 单极运行概率较低,双极运行概率较高。双极故障、1/2 单极运行频率、

持续时间、等效停运小时数和能量不可用率较低。

b. 对于双极故障、单极停运运行状态,隔离开关的影响最大;对于其他运行状态,接地开关的影响最明显;另外,仅有接地开关和旁路开关对 1/2 双极运行和 3/4 双极运行状态有影响。各开关概率重要度也反映这一结论。

c. 4 类直流转换开关的主要作用为直流电流不同运行回线之间转换,仅对双极故障运行状态有影响,对其他运行状态的影响不明显。

d. 所有开关设备中,隔离开关对双极强迫停运小时数的影响最明显;接地开关对等效停运小时数、能量不可用率的影响最明显,随后依次为隔离开关和旁路开关。

e. UHVDC 系统采用 FTA 算法的 NP 困难可通过模块分解、MPS 法进行有效简化,经算例验证,计算量明显减少,计算时间也随之缩短。

进一步分析表明,上述结论 a、c 也适用于高压直流(HVDC)输电系统;结论 b、d 与元件可靠性参数有关,是否适用于 HVDC 系统有待进一步研究。

参考文献:

[1] ZHEN Y,CUI X,LU T,et al. 3-D finite-element method for calculating the ionized electric field and the ion current of the human body model under the UHVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(2):965-971.

[2] 郑晓东,邵能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):10-14,61.
ZHENG Xiaodong,TAI Nengling,YANG Guangliang,et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):10-14,61.

[3] 莫丽琼. ±800 kV 特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):118-122,146.
MO Liqiong. Study of harmonic instability for ±800 kV UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):118-122,146.

[4] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统可靠性分析[J]. 电网技术,2013,37(10):2681-2688.
ZENG Qingyu. Analysis on reliability of UHVAC and UHVDC transmission systems[J]. Power System Technology,2013,37(10):2681-2688.

[5] WANG Longjun,WANG Gang,LI Bo. Reliability evaluation of UHVDC systems using Monte Carlo simulation[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary,AB,Canada:IEEE,2009:1-6.

[6] 李生虎,马燕如,陈鹏,等. UHVDC 系统可靠性分层等值与灵敏度分解[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(22):9-17.
LI Shenghu,MA Yanru,CHEN Peng,et al. Hierarchical reliability equivalence and sensitivity decomposition to UHVDC system [J]. Power System Protection and Control,2014,42(22):9-17.

[7] 周静,马为民,蒋维勇,等. 特高压直流工程的可靠性[J]. 高电压技术,2010,36(1):173-179.
ZHOU Jing,MA Weimin,JIANG Weiyong,et al. Reliability about UHVDC project[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):173-

- 179.
- [8] 张雪松,王超,常勇,等. GO 法在特高压直流输电可靠性研究中的应用[J]. 高电压技术,2009,35(2):236-241.
ZHANG Xuesong,WANG Chao,CHANG Yong,et al. Reliability analysis of UHVDC system by the GO methodology[J]. High Voltage Engineering,2009,35(2):236-241.
- [9] 彭畅,温家良,马国华,等. 特高压直流输电系统中直流转换开关的电流转换分析与仿真 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(36):1-7.
PENG Chang,WEN Jialiang,MA Guohua,et al. Analysis and simulation on current commutation of the DC transfer switches in UHVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(36):1-7.
- [10] 史亚斌,殷晓刚,武星,等. 高压开关设备可靠性数据库的开发与应用[J]. 高压电器,2014,50(6):133-138.
SHI Yabin,YIN Xiaogang,WU Xing,et al. Development and application of the high-voltage switchgear reliability database [J]. High Voltage Apparatus,2014,50(6):133-138.
- [11] 张静伟,任震,黄雯莹. 直流系统可靠性故障树评估模型及应用 [J]. 电力自动化设备,2005,25(6):62-65.
ZHANG Jingwei,REN Zhen,HUANG Wenying. FTA models and its application in HVDC system evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(6):62-65.
- [12] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.
LUO Hang. Research on some key problems for fault tree analysis[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2011.
- [13] 全国高压开关设备标准化技术委员会. 高压直流转换开关: GB/T 25309—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [14] 全国高压开关设备标准化技术委员会. 高压直流隔离开关和接地开关:GB/T 25091—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [15] 全国高压开关设备标准化技术委员会. 高压直流旁路开关: GB/T 25307—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [16] 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:103-119.
- [17] HUANG Zhixi. Calculating the failure frequency of a repairable system[J]. Microelectronics Reliability,1982,22(5):945-947.
- [18] 国家能源局. 中华人民共和国电力行业标准:DL/T 999—2013 [S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [19] 任震,梁振升,黄雯莹. 交直流混合输电系统可靠性指标的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):33-37.
REN Zhen,LIANG Zhensheng,HUANG Wenying. Sensitivity analysis of AC/DC hybrid transmission system reliability indices[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(14): 33-37.

作者简介:



李生虎

李生虎(1974—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术在电力系统中应用(E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn);

华玉婷(1989—),女,安徽霍山人,博士研究生,研究方向为电力系统规划与可靠性、特高压直流输电技术;

董王朝(1993—),男,安徽合肥人,博士研究生,研究方向为风电系统优化经济调度、电力系统规划与可靠性。

FTA of UHVDC system including high-voltage disconnectors

LI Shenghu, HUA Yuting, DONG Wangchao, YU Liping

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The horizontal and vertical FTA (Fault Tree Analysis) models are established according to the actual structure of UHVDC (Ultra High Voltage Direct Current) and the difference between two models is analyzed, based on which, the FTA models including the high-voltage disconnectors are built. The modular decomposition and the improved MPS (Minimal Path Set) method are applied to solve the NP (Non-deterministic Polynomial) problem of FTA. The reliability indices of UHVDC are calculated. The results of case study show that, the computing load of the proposed method for FTA is obviously reduced; for the bipolar outage and 1/2 monopolar operating modes, the vertical FTA model has lower probability and frequency, shorter duration and equivalent outage hours and higher energy availability than the horizontal FTA model; the disconnector has obvious influence on the bipolar outage and monopolar outage operating modes while the grounding switch on other operating modes; the bypass switch has influence on the 1/2 bipolar and 3/4 bipolar operating modes; the DC transfer switches has influence on the bipolar outage operating mode.

Key words: UHVDC power transmission; high-voltage disconnector; fault tree analysis; minimal path set; reliability