

HVDC 输电系统可靠性跟踪方法

胡博¹, 谢开贵¹, 黎小林², 曹侃¹, 刘映尚³

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044; 2. 中国南方电网技术研究中心, 广东省广州市 510623; 3. 中国南方电网有限责任公司, 广东省广州市 510623)

Techniques of Tracing the Unreliability Contributions of HVDC Transmission System Components

HU Bo¹, XIE Kai-gui¹, LI Xiao-lin², CAO Kan¹, LIU Ying-shang³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. China Southern Power Grid Technology Research Center, Guangzhou 510623, Guangdong Province, China; 3. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Generally, HVDC transmission system has a quite complex structure with a large number of components. As is well known, each component has a different impact on the system reliability. The technique of determining the contribution of each component to the system unreliability can be used to identify the system weak parts and provide a useful tool for the decision-making on HVDC system operation and planning processes. This paper proposes an unreliability-tracing principle based on the proportional sharing principle (PSP), and an unreliability-tracing model for HVDC transmission systems. The PSP was used in this model twice based on the sub-system division scheme. In the unreliability-tracing process of the sub-system, the contribution of each component to a sub-system unreliability index can be calculated using the PSP. In the unreliability-tracing process of the whole system, the contribution of each sub-system to the system unreliability can also be calculated using the PSP. The contribution of each component to the system unreliability can be obtained by combining the two contribution results. The case study indicated that the proposed technique can distribute the HVDC transmission system reliability index to components or sub-systems impartially and reasonably, and it can also be used to identify the system weak parts.

KEY WORDS: high voltage direct current (HVDC) transmission; proportional sharing principle; two-time distribution model; reliability tracing

摘要: 由于高压直流输电(HVDC)系统结构复杂、元件众多,各元件对系统不可靠性的影响各不相同,如能找到一种不可靠性分摊方法,给出各元件对系统不可靠性的贡献大小,以确定直流输电系统的薄弱环节,将为运行和规划人员提供一种新的可靠性分析方法。针对该问题,提出基于比例分摊思想的系统不可靠性跟踪准则,结合可靠性计算中的子系统划分,又提出了直流输电系统可靠性跟踪的2次分摊方法。在子系统可靠性跟踪中,应用比例分摊准则得到各子系统内部元件对子系统可靠性指标的分摊;在整个直流系统可靠性跟踪中,基于该准则得到各子系统可靠性指标对直流系统各可靠性指标的分摊;最后合并2次分摊结果即可得到各元件对系统可靠性指标的分摊。采用某工程算例进行测试分析,结果证实该文提出的可靠性跟踪方法能够将HVDC输电系统可靠性指标公平合理地分摊到各元件或子系统,并有效地辨识了系统的薄弱环节。

关键词: 高压直流输电; 比例分摊准则; 2次分摊模型; 可靠性跟踪

0 引言

高压直流输电(HVDC)系统结构复杂,包含元件众多,如:换流变压器、交流滤波器、平波电抗器、直流滤波器、直流输电线路等^[1-7],它们对系统可靠性的影响各不相同,能否量化给出它们各自对不同可靠性指标承担的“责任”大小,以确定引起系统不可靠的主要元件,辨识系统的薄弱环节,这正是HVDC输电系统可靠性跟踪所要研究的问题。

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA-02A21);国家自然科学基金项目(50777067);重庆市自然科学基金重点项目(CSTS2008BC7031)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2006BAA02A21); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50777067); Project Supported by Natural Science Foundation of Chongqing Municipality (CSTS2008BC7031).

当前针对 HVDC 输电系统可靠性跟踪的研究较少,仅有的研究主要集中在可靠性模型的建立和计算方法的研究上^[2-3,7-18],对 HVDC 输电系统可靠性跟踪方法的研究几乎没有。为给出元件可靠性对系统可靠性的影响关系,常用的方法是灵敏度分析法。文献[2]分析了 HVDC 输电系统可靠性随换流阀、无功补偿装置、交流滤波器故障率和修复时间的变化规律,并给出相应的变化曲线。文献[3]针对实际 HVDC 输电系统,分析了不同的可靠性加强措施(如换流变压器冗余、平波电抗器冗余等)对系统可靠性指标的影响。文献[2-3]的方法可定性或定量地反映系统可靠性随某些元件可靠性参数的变化规律,但是没有明确给出各元件对系统可靠性“贡献”的数量关系。

本文提出了基于比例分摊思想的系统不可靠性跟踪准则,结合 HVDC 输电系统元件和子系统众多等特点,提出了 HVDC 输电系统可靠性跟踪的 2 次分摊方法,以确定各元件或子系统对系统不可靠性的分摊关系,并用工程算例进行了验证分析。

1 系统不可靠性跟踪准则

首先介绍系统不可靠性的比例跟踪准则。在第 2 节给出系统任一失效事件概率和频率的分摊方法;第 3 节介绍 HVDC 输电系统可靠性跟踪模型,给出强迫能量不可用率、单极强迫停运率、双极强迫停运率等指标的可靠性跟踪方法。

针对直流输电可靠性跟踪,本文给出以下 2 个基本准则:1)系统的不可靠性由故障元件承担,即正常运行元件不参与系统可靠性指标的分摊;2)元件对系统可靠性指标的分摊按比例进行,即用比例分摊原则^[19-22]。基于上述准则,可得到系统不可靠性的比例分摊方法:

假设一个系统有 n 个元件 $X_i(i=1,2,\dots,n)$,令 $x_i(i=1,2,\dots,n)$ 表示元件 i 的性能参数, $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示系统某一事件的可靠性指标,如强迫能量不可用率、单极强迫停运率和双极强迫停运率等,它是 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数。

为简单起见,设某一失效事件由元件 X_1 和 X_2 故障引起。假设可分为 3 部分:第 1 部分为 $\varphi_1(x_1)$,它仅与元件 X_1 有关;第 2 部分为 $\varphi_2(x_2)$,它仅与元件 X_2 有关;第 3 部分为 $\sigma(x_3, x_4, \dots, x_n)$,它与除 X_1 、 X_2 外的其它元件有关,因此:

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \varphi_1(x_1)\varphi_2(x_2)\sigma(x_3, x_4, \dots, x_n) \quad (1)$$

由准则 1),系统失效事件 k 应该由故障元件 X_1 和 X_2 承担责任;设 $\varphi(k \rightarrow 1)$ 和 $\varphi(k \rightarrow 2)$ 分别表示故障元件 X_1 和 X_2 分摊的可靠性指标,则由准则 2) 有

$$\varphi(k \rightarrow 1) = \frac{\varphi_1(x_1)}{\varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2)} \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$\varphi(k \rightarrow 2) = \frac{\varphi_2(x_2)}{\varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2)} \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

从式(2)和(3)可以看出,比例分摊准则有 2 个明显的特征:1)比例分摊准则具有对称性,即 $x_1(x_2)$ 只是一个符号,可以代表任何元件;2)比例分摊准则具有同一性,即实现系统可靠性指标的完全分摊:

$$\varphi(k \rightarrow 1) + \varphi(k \rightarrow 2) \equiv \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

2 系统某一失效事件概率和频率的可靠性跟踪方法

2.1 系统某一失效事件故障概率的分摊方法

设在状态解析分析过程中,某一失效事件 k 发生的概率^[7-9]为

$$P(k) = \prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \quad (5)$$

式中: q_i 和 q_j 分别为元件 i 和 j 的故障概率; A 、 B 分别为故障元件和正常元件集合。

由可靠性跟踪准则 1) 和 2),以及式(2)和(3)知,对于失效事件 k ,任意元件 i 对失效事件概率的分摊 $P(k \rightarrow i)$ 为

$$\begin{cases} P(k \rightarrow i) = P(k)(q_i / \sum_{j \in A} q_j), & i \in A \\ P(k \rightarrow i) = 0, & i \in B \end{cases} \quad (6)$$

显然:

$$P(k) \equiv \sum_{i \in A} P(k \rightarrow i) + \sum_{i \in B} P(k \rightarrow i) \quad (7)$$

2.2 系统某一失效事件故障频率的分摊方法

结合式(5),失效事件 k 发生的频率^[7-9]为

$$F(k) = \prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) (\sum_{i \in A} \mu_i + \sum_{j \in B} \lambda_j) \quad (8)$$

式中: μ_i 、 λ_j 分别为元件 i 、元件 j 的故障率和修复率。为方便起见,假设 A 中元件的编号为 $1,2,\dots,n$,将式(8)中等式右边按照多项式展开为

$$\begin{aligned} F(k) = & \prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \mu_1 + \prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \cdot \\ & \mu_2 + \dots + \prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \mu_n + \prod_{i \in A} q_i \cdot \\ & \prod_{j \in B} (1 - q_j) \sum_{j \in B} \lambda_j \end{aligned} \quad (9)$$

同样地,由可靠性跟踪准则 1) 和 2),以及式(2)

和(3)可得到各故障元件对失效事件发生频率的分摊, 如式(10)和(11)所示。

$$F(k \rightarrow i) = \prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \mu_1 \frac{q_i}{q_1 \mu_1 + \sum_{j \in A \setminus \{j=1\}} q_j} +$$

$$\prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \mu_2 \frac{q_i}{q_2 \mu_2 + \sum_{j \in A \setminus \{j=2\}} q_j} + \dots +$$

$$\prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \mu_i \frac{q_i \mu_i}{q_i \mu_i + \sum_{j \in A \setminus \{j=i\}} q_j} + \dots +$$

$$\prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \mu_n \frac{q_i}{q_n \mu_n + \sum_{j \in A \setminus \{j=n\}} q_j} +$$

$$\prod_{i \in A} q_i \prod_{j \in B} (1 - q_j) \sum_{j \in B} \lambda_j \frac{q_i}{\sum_{j \in A} q_j}, \quad i \in A \quad (10)$$

$$F(k \rightarrow i) = 0, \quad i \in B \quad (11)$$

式中 $F(k \rightarrow i)$ 为元件 i 对系统失效事件 k 的频率分摊。显然有

$$F(k) \equiv \sum_{i \in A} F(k \rightarrow i) + \sum_{i \in B} F(k \rightarrow i) \quad (12)$$

从式(7)、(12)可以看出, 失效事件 k 概率和频率分摊后保持分摊守恒, 满足比例分摊中的同一性。换句话说, 式(6)、(10)、(11)可实现系统任一失效事件概率和频率的完整分摊。

3 高压直流输电系统可靠性跟踪模型

设系统某一失效事件 k 对应降额容量 $C(k)$, 由式(6)、(10)、(11)可得到系统任意元件 i 对 $P(k)$ 和 $F(k)$ 的分摊: $P(k \rightarrow i)$ 和 $F(k \rightarrow i)$ 。

1) 强迫能量不可用率的分摊。

强迫能量不可用率 $\gamma_{FEU}^{[1]}$ 为

$$\gamma_{FEU} = \sum_{k \in A_{FEU}} (1 - C(k)) P(k) \quad (13)$$

式中 A_{FEU} 为系统发生停运或降额容量状态事件集合。由式(6)知, 强迫能量不可用率对某一元件 i 的分摊 γ_{FEU_i} 为

$$\gamma_{FEU_i} = \sum_{k \in A_{FEU}} (1 - C(k)) P(k \rightarrow i) \quad (14)$$

2) 单极强迫停运率的分摊。

单极强迫停运率 $\gamma_{MFOT}^{[1]}$ 为

$$\gamma_{MFOT} = \sum_{k \in A_{MFOT}} F(k) \quad (15)$$

式中 A_{MFOT} 为发生单极强迫停运的事件集合。结合式(10)和(11), 单极强迫停运率对某一元件 i 的分摊 γ_{MFOT_i} 可表示为

$$\gamma_{MFOT_i} = \sum_{k \in A_{MFOT}} F(k \rightarrow i) \quad (16)$$

3) 双极强迫停运率的分摊。

双极强迫停运率 $\gamma_{BFOT}^{[1]}$ 为

$$\gamma_{BFOT} = \sum_{k \in A_{BFOT}} F(k) \quad (17)$$

式中 A_{BFOT} 为发生双极强迫停运的事件集合。结合式(10)、(11), 双极强迫停运率对某一元件 i 的分摊 γ_{BFOT_i} 可表示为

$$\gamma_{BFOT_i} = \sum_{k \in A_{BFOT}} F(k \rightarrow i) \quad (18)$$

4) 高压直流输电系统处于某一容量状态对应的概率和频率分摊。

① 系统处于某一容量状态对应概率的分摊。

设 HVDC 输电系统共有 m 个容量状态: C_1, C_2, \dots, C_m 。任一容量状态 C_m 对应的概率 $P(C_m)^{[10-18]}$ 为

$$P(C_m) = \sum_{k \in A_m} P(k) \quad (19)$$

集合 A_m 为系统处于容量状态 C_m 对应的所有事件集合。由式(6)知, $P(C_m)$ 对某一元件 i 的分摊 $P(C_m)_i$ 为

$$P(C_m)_i = \sum_{k \in A_m} P(k \rightarrow i) \quad (20)$$

② 系统处于某一容量状态对应频率的分摊。

任一容量状态 C_m 对应的累计频率 $F(C_m)^{[10-18]}$ 为

$$F(C_m) = \sum_{k \in A_m} F(k) \quad (21)$$

由式(10)和(11)知, $F(C_m)$ 对某一元件 i 的分摊 $F(C_m)_i$ 为

$$F(C_m)_i = \sum_{k \in A_m} F(k \rightarrow i) \quad (22)$$

4 直流输电系统可靠性跟踪算法

目前, 针对 HVDC 输电系统可靠性评估的方法主要有 FD 法、故障树法、状态枚举法和蒙特卡罗法等^[2-3,7-18]。鉴于状态枚举法的物理概念清楚、模型解析表达等特点, 本文基于状态枚举法实现 HVDC 输电系统的可靠性跟踪。

状态枚举法虽然精度较高, 但其计算量随系统规模的增大呈指数增长。直流系统元件众多, 如果采用全状态枚举势必会出现“维数灾”问题。为此, 在可靠性计算过程中常将 HVDC 输电系统划分成不同的子系统, 对子系统内部元件采用全枚举法进行可靠性计算, 然后结合各子系统间逻辑连接关系进行状态枚举, 根据累计概率和累计频率的思想建立了直流系统可靠性的多容量状态模型^[7-8,14-18]。

为配合可靠性计算中子系统的划分, 采用 2 次

分摊思想实现可靠性跟踪, 本文以概率和频率为例介绍系统不可靠性对元件的分摊。

1) 子系统可靠性的第1次分摊。

本文采用的测试系统为贵广 I 高压直流输电系统, 系统接线图见附图 A1。考虑各元件故障对系统容量影响的差别以及直流输电线路故障时接地极线开关的配合, 将贵广 I 直流输电系统分为 10 个子系统: S_1, S_1, \dots, S_{10} , 它们之间的逻辑连接关系如图 1 所示。

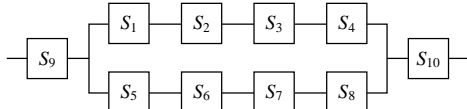


图 1 贵广 I 直流输电系统可靠性框图

Fig. 1 Reliability diagram of the Guiguang I HVDC transmission system

图 1 中, 子系统 S_1 、 S_4 、 S_5 和 S_8 分别包含 2 个元件: 单侧单极 12 脉波换流阀及其相连的换流变压器子系统(包括换流变压器及其对应的断路器和备用换流变压器等, 本文将其等效为 1 个元件); S_2 和 S_6 分别包含 8 个元件: S_2 表示(两侧)正极平波电抗器(包含备用平波电抗器)、直流滤波器、极控、辅助电源, S_6 表示(两侧)负极平波电抗器(包含备用平波电抗器)、直流滤波器、极控、辅助电源; S_3 和 S_7 分别表示正、负极直流输电线路, 各包含 1 个元件; S_9 和 S_{10} 分别表示整流侧和逆变侧交流滤波器子系统(包括单侧交流滤波器及其对应的断路器和母线, 本文将其等效为 1 个元件)、站控, 各包含 2 个元件。加上两侧接地极线开关, 参加可靠性计算的元件共有 32 个, 它们都会参与可靠性跟踪。

假设某一子系统 $S_i(i=1,2,\dots,10)$ 有 l 个停运或降额容量状态: d_1, d_2, \dots, d_l , S_i 共有 N 个元件: X_1, X_2, \dots, X_N , 则子系统 S_i 内部 N 个元件对 l 个容量状态的分摊结果可表示成矩阵形式:

$$\mathbf{R}_{S_i \rightarrow X} = \begin{bmatrix} r_{d_1 \rightarrow X_1} & r_{d_1 \rightarrow X_2} & \cdots & r_{d_1 \rightarrow X_N} \\ r_{d_2 \rightarrow X_1} & r_{d_2 \rightarrow X_2} & \cdots & r_{d_2 \rightarrow X_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{d_l \rightarrow X_1} & r_{d_l \rightarrow X_2} & \cdots & r_{d_l \rightarrow X_N} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: $\mathbf{R}_{S_i \rightarrow X} \in \mathbf{R}^{l \times N}$; 矩阵元素 $r_{d_i \rightarrow X_N}$ 表示子系统 S_i 中元件 X_N 对容量状态 d_i 的分摊结果, r 可以表示为概率或频率。

2) 系统可靠性计算的第 2 次分摊。

根据图 1 组合子系统 $S_1 \sim S_{10}$ 时, 与 1) 中类似, 可得到直流系统处于某一容量状态对应的总概率

和总频率分摊。不同的是, 参与分摊的元件是子系统 $S_1 \sim S_{10}$ 对应的等效多状态元件。类似地, 子系统 S_i 的 l 个容量状态对 HVDC 输电系统 m 个容量状态的分摊结果可表示成矩阵形式, 即

$$\mathbf{R}_{\text{HVDC} \rightarrow S_i} = \begin{bmatrix} r_{C_1 \rightarrow d_1} & r_{C_1 \rightarrow d_2} & \cdots & r_{C_1 \rightarrow d_l} \\ r_{C_2 \rightarrow d_1} & r_{C_2 \rightarrow d_2} & \cdots & r_{C_2 \rightarrow d_l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{C_m \rightarrow d_1} & r_{C_m \rightarrow d_2} & \cdots & r_{C_m \rightarrow d_l} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{R}_{\text{HVDC} \rightarrow S_i} \in \mathbf{R}^{m \times l}$; 矩阵元素 $r_{C_m \rightarrow d_l}$ 表示子系统 S_i 容量状态 d_l 对直流系统容量状态 C_m 的分摊结果, r 可以表示为概率或频率。

3) 2 次分摊合并。

由式(23)和(24)得到分摊矩阵 $\mathbf{R}_{S_i \rightarrow X}$ 和 $\mathbf{R}_{\text{HVDC} \rightarrow S_i}$ 后, 可以合并 2 次分摊结果。首先逐行归一化矩阵 $\mathbf{R}_{S_i \rightarrow X}$ 得到矩阵 $\mathbf{R}'_{S_i \rightarrow X}$, 如果 $\mathbf{R}_{S_i \rightarrow X}$ 某行元素都为 0, 则此行不需归一化:

$$\mathbf{R}'_{S_i \rightarrow X} = \begin{bmatrix} \frac{r_{d_1 \rightarrow X_1}}{\sum_i r_{d_1 \rightarrow X_i}} & \frac{r_{d_1 \rightarrow X_2}}{\sum_i r_{d_1 \rightarrow X_i}} & \cdots & \frac{r_{d_1 \rightarrow X_N}}{\sum_i r_{d_1 \rightarrow X_i}} \\ \frac{r_{d_2 \rightarrow X_1}}{\sum_i r_{d_2 \rightarrow X_i}} & \frac{r_{d_2 \rightarrow X_2}}{\sum_i r_{d_2 \rightarrow X_i}} & \cdots & \frac{r_{d_2 \rightarrow X_N}}{\sum_i r_{d_2 \rightarrow X_i}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{r_{d_l \rightarrow X_1}}{\sum_i r_{d_l \rightarrow X_i}} & \frac{r_{d_l \rightarrow X_2}}{\sum_i r_{d_l \rightarrow X_i}} & \cdots & \frac{r_{d_l \rightarrow X_N}}{\sum_i r_{d_l \rightarrow X_i}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

矩阵 $\mathbf{R}'_{S_i \rightarrow X}$ 表示子系统 S_i 内部 N 个元件对 l 个容量状态概率(频率)的分摊比例, 结合矩阵 $\mathbf{R}_{\text{HVDC} \rightarrow S_i}$ 的物理意义, 子系统 S_i 内部 N 个元件对直流系统 m 个容量状态的分摊结果为

$$\mathbf{R}_{\text{HVDC} \rightarrow X} = \mathbf{R}_{\text{HVDC} \rightarrow S_i} \mathbf{R}'_{S_i \rightarrow X} \quad (26)$$

类似地, 结合第 3 节中主要可靠性指标的分摊准则, 替换式(23)~(26)中各元素即可得到不同可靠性指标的 2 次分摊结果。

5 算例结果及分析

5.1 算例结果

算例采用贵广 I 直流输电系统, 算例拓扑参见附录 A 的图 A1 所示, 单侧换流变压器整体备用, 单侧备用 1 台; 平波电抗器单侧整体备用, 单侧备用 1 台; 单侧单极直流滤波器 1 冗余, 各元件可靠性参数和无功容量表详见文献[23]。基于 VC++ 编

写了相应的计算程序,表 1 为贵广 I 直流输电系统可靠性计算结果。

表 1 贵广 I 直流输电系统可靠性计算结果
Tab. 1 Reliability indices of the Guiguang I HVDC transmission system

名称	指标
强迫能量不可用率	0.012 212
单极强迫停运率/(次/年)	7.153 551
双极强迫停运率/(次/年)	0.135 516

表 2, 3 分别给出了表 1 中强迫能量不可用率和单极强迫停运率的可靠性跟踪结果。为方便,分摊结果均以百分数形式表示。限于篇幅,对于分摊比重小于 0.50% 的元件,累加后统一用“其他”表示。此外,通过可靠性跟踪还可以得到双极强迫停运率的分摊,以及直流输电系统所有容量状态对应的概率和频率分摊。

表 2 贵广 I 直流输电系统强迫能量不可用率可靠性跟踪结果

Tab. 2 Indices of forcing energy unavailability tracing for the Guiguang I HVDC transmission system

编号	子系统	百分比/%
1	正极直流输电线路	36.753
2	负极直流输电线路	36.753
3	整流侧正极换流变压器	5.762
4	整流侧负极换流变压器	5.762
5	逆变侧正极换流变压器	5.762
6	逆变侧负极换流变压器	5.762
7	整流侧正极阀组	0.518
8	整流侧负极阀组	0.518
9	逆变侧正极阀组	0.518
10	逆变侧负极阀组	0.518
11	其他	1.374

表 3 贵广 I 直流输电系统单极强迫停运率可靠性跟踪结果

Tab. 3 Indices of monopole forced outage rates tracing for the Guiguang I HVDC transmission system

编号	子系统	百分比/%
1	正极直流输电线路	27.299
2	负极直流输电线路	27.299
3	整流侧正极换流变压器	8.611
4	整流侧负极换流变压器	8.611
5	逆变侧正极换流变压器	8.611
6	逆变侧负极换流变压器	8.611
7	整流侧阳极极控	1.083
8	逆变侧阳极极控	1.083
9	整流侧阴极极控	1.083
10	逆变侧阴极极控	1.083
11	整流侧阳极平波电抗器	0.775
12	逆变侧阳极平波电抗器	0.775
13	整流侧阴极平波电抗器	0.775
14	逆变侧阴极平波电抗器	0.775
15	整流侧正极阀组	0.774
16	整流侧负极阀组	0.774
17	逆变侧正极阀组	0.774
18	逆变侧负极阀组	0.774
19	其他	0.430

5.2 算例分析

1) 从表 2, 3 可以看出,元件对系统可靠性指标分摊比例相加后都为 100%。这表明本文提出的可靠性分摊准则和 2 次分摊方法可实现可靠性指标的完整分摊。

2) 分析表 3 可知,很多元件都承担了单极强迫停运的“责任”,这是因为它们故障后都会导致系统单极停运,如换流变压器、直流输电线路、阀组、平波电抗器等。

3) 分析表 3 还可以发现,系统单极强迫停运主要由 2 极直流输电线路故障引起(54.598%),两侧换流变压器子系统故障仅占 34.444%。这主要是因为两侧换流变压器都有备用,而直流输电线路本身较长,相比换流变压器子系统可靠性较低。表 4 为两侧换流变压器无备用时单极强迫停运率的可靠性跟踪结果。可以看出,当两侧换流变压器无备用时,单极强迫停运率变为 8.034,两侧换流变压器占 44.664%。显然,相比有备用时换流变压器故障的影响增大。

表 4 贵广 I 直流输电系统两侧换流变压器无备用时单极强迫停运率分摊(单极强迫停运率为 8.034)

Tab. 4 Indices of monopole forced outage rates with no spare transformers for the Guiguang I HVDC transmission system

编号	子系统	百分比/%
1	正极直流输电线路	23.802
2	负极直流输电线路	23.802
3	整流侧正极换流变压器	11.166
4	整流侧负极换流变压器	11.166
5	逆变侧正极换流变压器	11.166
6	逆变侧负极换流变压器	11.166
7	整流侧阳极极控	0.945
8	逆变侧阳极极控	0.945
9	整流侧阴极极控	0.945
10	逆变侧阴极极控	0.945
11	整流侧阳极平波电抗器	0.676
12	逆变侧阳极平波电抗器	0.676
13	整流侧阴极平波电抗器	0.676
14	逆变侧阴极平波电抗器	0.676
15	其他	1.248

4) 从表 2 可以看出,系统强迫能量不可用率主要由 2 条直流输电线路故障引起(73.506%),其他元件:如平波电抗器、直流滤波器、极控、站控和辅助电源对强迫能量不可用率的影响都不超过 0.50%。这表明它们对系统可靠性的影响很小,系统的薄弱环节是直流输电线路。换句话说,相比其他元件,提高直流输电线路可靠性可明显改善系统可靠性。表 5 为 HVDC 输电系统主要设备故障率变为 0 时系统强迫能量不可用率的比较。可以看出,

当不同设备故障率变为0时,系统强迫能量不可用率都有所提高,换流变压器和直流输电线路故障率的改变对系统可靠性提高幅度较大,二者相比,直流输电线路影响最大,这也说明系统的薄弱环节是直流输电线路,与前面的可靠性跟踪结果一致。

表5 贵广I直流输电系统主要设备故障率变为0时强迫能量不可用率的比较

Tab. 5 Comparison of forcing energy unavailability contributed by different equipments with a failure rate of 0 for the Guiguang I HVDC transmission system

编号	故障率变为0的子系统及元件	强迫能量不可用率
1	换流变压器	0.009 566
2	交流滤波器	0.012 099
3	阀组	0.011 968
4	平波电抗器	0.012 144
5	直流滤波器	0.012 203
6	直流输电线路	0.003 328

通过上述算例分析可以发现,采用本文可靠性跟踪方法可将HVDC输电系统可靠性指标公平合理地分摊到各元件或子系统。根据可靠性跟踪结果,还可判断系统的薄弱环节。

基于可靠性跟踪的直流输电系统薄弱环节辨识方法如图2所示。

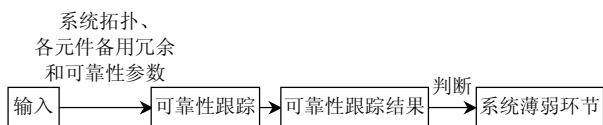


图2 基于可靠性跟踪的直流输电系统薄弱环节辨识方法

Fig. 2 Identification method for the weak parts of HVDC transmission systems using the unreliability tracing technique

由前述知,本文算例为一系统拓扑、可靠性参数和元件备用冗余等都确定的直流输电系统,其目的在于验证可靠性跟踪方法的正确性。但是,在规划、运行等阶段,直流输电系统的拓扑结构、元件的备用冗余等都可能发生变化,因此,需对这些情形的系统薄弱环节进行辨识。由图2可知,可根据实际工程的需要,对系统拓扑变化等情形进行可靠性跟踪分析,即可辨识系统的薄弱环节,从而得到对工程实际有价值的结论或信息。

6 结论

本文基于比例分摊思想,提出一种直流输电系统可靠性跟踪方法,并用贵广I直流输电系统进行了算例分析,结果表明:1)本文所提方法可直接给出各元件对系统不可靠性的“贡献”关系;2)采用本文可靠性跟踪方法可准确辨识直流输电系统的薄弱环节,为直流系统可靠性性能的改善提供

量化的科学依据。综上所述,本文方法可为直流输电系统规划、运行和改造提供一种新的可靠性分析方法。

此外,本文所提可靠性跟踪方法可灵活地扩展到交流(交直流)系统可靠性计算中,2次分摊思想也可扩展到多层、多次可靠性分摊,它为元件对复杂系统可靠性的跟踪提供了新的思路。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 989—2005 直流输电系统可靠性统计评价规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006. National Development and Reform Committee of the PRC. DL/T 989—2005 Statistic evaluation rules for reliability of DC power transmission system[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006(in Chinese).
- [2] Billinton R, Ahluwalia D S. Incorporation of a DC link in a composite system adequacy assessment: DC system modeling[J]. IEE Proceedings-C, 1992, 139(3): 221-220.
- [3] Kuruganty S. Effect of HVDC component enhancement on the overall system reliability performance[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(1): 343-349.
- [4] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7. Zhang Wenliang, Yu Yongqing, Li Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7(in Chinese).
- [5] 文俊, 郭锦艳, 刘洪涛, 等. 高压直流输电直流滤波系统综合优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 14-19. Wen Jun, Guo Jinyan, Liu Hongtao, et al. Integrated optimizing design of filtering equipments at DC side of HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 14-19(in Chinese).
- [6] 赵成勇, 孙营, 李广凯. 双馈入直流输电系统中VSC-HVDC的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 97-103. Zhao Chengyong, Sun Ying, Li Guangkai. Control strategy of VSC-HVDC in dual-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 97-103(in Chinese).
- [7] Billinton R, Allan R N. Reliability of electric power system[M]. New York: Plenum Press, 1996: 382-395.
- [8] Billinton R, Li Wenyuan. Assessment of electric power systems using monte carlo methods[M]. New York: Plenum Press, 1994: 91-103.
- [9] Li Wenyuan. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications[M]. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2005: 58-73.
- [10] 王遂, 任震, 蒋金良. 混合法在高压直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 42-46. Wang Sui, Ren Zhen, Jiang Jinliang. Application of hybrid reliability evaluation method for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 42-46(in Chinese).
- [11] 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 Haitao, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Reliability evaluation of hybrid AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 27-31(in Chinese).
- [12] 陈永进, 任震. 模型组合及其在直流输电系统可靠性评估中的应

- 用[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 18-22.
Chen Yongjin, Ren Zhen. Models combination and its application in reliability evaluation for HVDC systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 18-22(in Chinese).
- [13] 冉立, 黄雯莹, 任震. 高压直流系统可靠性评估中的参数灵敏度分析[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(3): 45-50.
Ran Li, Huang Wenying, Ren Zhen. Sensitivity analysis of parameters for reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 1988, 8(3): 45-50(in Chinese).
- [14] 陈永进, 任震, 梁振升, 等. 高压直流输电系统可靠性评估的容量模型研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 9-13.
Chen Yongjin, Ren Zhen, Liang Zhensheng, et al. Study on capacity model for reliability evaluation of HVDC system[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 9-13(in Chinese).
- [15] 任震, 武娟, 陈丽芳. 高压直流输电可靠性评估的等效模型[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 38-41.
Ren Zhen, Wu Juan, Chen Lifang. Equivalent model for HVDC reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 38-41(in Chinese).
- [16] Billinton R, Sankararishnan A. Adequacy assessment of composite power system with HVDC links using Monte Carlo simulation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(3): 1626-1633.
- [17] Fotuhi-Firuzabad M, Billinton R, Faried S O. Transmission system reliability evaluation incorporating HVDC links and facts devices[C]. Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting, New York, America, 2001.
- [18] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M, Faried S O. Reliability evaluation of hybrid multiterminal HVDC subtransmission systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 571-57.
- [19] Bialek J W, Kattuman P A. Proportional sharing assumption in tracing methodology[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(4): 526-532.
- [20] Bialek J. Topological generation and load distributions factors for supplement charge allocation in transmission open access[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(3): 1185-1193.
- [21] 吴晓蓉, 谢开贵, 周家启. 基于电流分解的输电损耗分摊双向追踪方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 24-29.
Wu Xiaorong, Xie Kaigui, Zhou Jiaqi. Transmission loss allocation method based on current decomposition and bi-directional trace[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 24-29(in Chinese).
- [22] 于继来, 柳焯. 基于交流支路和节点联合电气剖分的功率损耗分摊问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 20-27.
Yu Jilai, Liu Zhuo. Power loss allocation analysis based on united electrical dissection of AC branch and bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 20-27(in Chinese).
- [23] Kindler. Availability and reliability study report (Guizhou-Guangdong ± 500 kV DC transmission project)[R]. Munich: Siemens, 2002.

附录 A

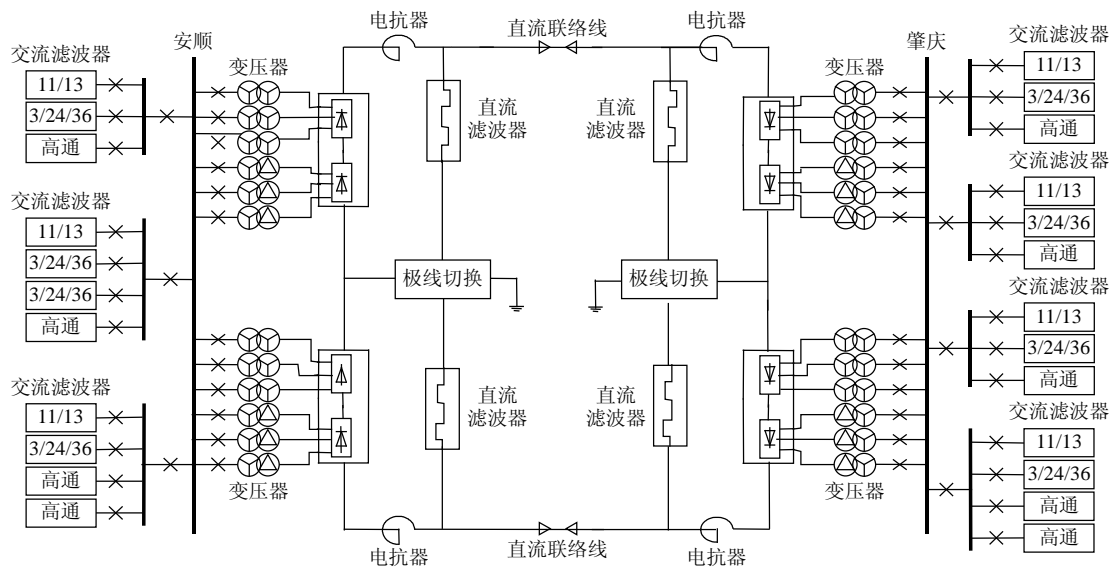


图 A1 贵广 I 直流输电工程接线
Fig. A1 Single line diagram for the Guiguang I HVDC transmission system



胡博

收稿日期: 2009-05-25。

作者简介:

胡博(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统分析计算、并行计算, hboy8361@yahoo.com.cn;

谢开贵(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统规划与可靠性、电力系统优化运行、电力系统并行计算及电力市场等方向的教学和研究工作。

(责任编辑 马晓华)