

高压直流输电系统单双12脉接线可靠性对比研究

刘威¹, 赵渊¹, 周家启¹, 张禄琦¹, 刘洋¹, 金小明²

(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510620)

摘要: 现代高压直流输电系统一般采用双极双桥的单12脉或双12脉接线方式。从接线方式、运行容量状态和等效模型三个方面对这两种接线方式进行了对比研究, 并应用马尔科夫(Markov)过程和频率与持续时间法(FD法)对它们进行了可靠性量化评估分析, 计算结果表明双12脉接线相对单12脉接线在系统运行效率和可靠性水平上有较大提高。同时进行了元件参数对系统可靠性影响的灵敏度分析研究, 透过灵敏度指标可以深刻揭示影响系统可靠性的主要因素, 为有效发现系统薄弱环节和提高系统的运行管理水平提供重要的参考信息和决策依据。

关键词: 直流输电系统; 单双12脉接线; 可靠性评估; 灵敏度分析

Comparison and research on the reliability between the 12-pulse and 2x12-pulse HVDC transmission system

LIU Wei¹, ZHAO Yuan¹, ZHOU Jia-qi¹, ZHANG Lu-qi¹, LIU Yang¹, JIN Xiao-ming²

(1. The Key Lab of High Voltage Engineering & Electric New Technology, Ministry of Education, Electric Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Technology Research Center of CSG, Guangzhou 510620, China)

Abstract: Modern HVDC transmission systems generally use 12-pulse valve groups or 2x12-pulse valve groups per pole as a main circuit designing structure. In this paper, the two configurations are compared with each other by the main circuits, operating capacity states and equivalent models, and then their reliability indices are calculated using the theory of Markov process and FD method based on the same reliability parameter for each equipment. The results of calculation indicate that the HVDC system used 2x12-pulse valve group has dramatic improvement on the operation efficiency of system and level of reliability compared with the one used 12-pulse valve group. Moreover, the sensitivity indices of reliability with respect to equipment parameters are also analyzed in this paper. The sensitivity indices open out the main factors that affect the reliability of system. The analysis and conclusions in the paper can be used as a reference to find the weak reliability links of the HVDC system and improve operation and management of HVDC system.

This project supported by National Natural Science Foundation of China (No.50607021).

Key words: HVDC; main circuit of 12-pulse and 2x12-pulse valve groups; reliability evaluation; sensitivity analysis

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)09-0029-06

0 引言

随着“西电东送”工程的实施以及全国电网互联步伐的加快, 高压直流输电技术得到了不断的发展并有多个高压直流输电工程投入实际运行, 评估高压直流输电系统的可靠性指标已成为评估电力系统可靠性的重要组成部分^[1]。

由于晶闸管技术的发展和出于对滤波器设计的考虑, 目前国内外高压直流输电系统一般采用双极双桥12脉波的接线方式。双极接线采用两根直流

导线, 一正一负, 如一极故障, 另一极可通过大地运行, 承担一半的额定负荷。换流器接线采用双换流桥在直流侧相串而在交流侧相并, 构成12脉动换流阀的接线方式。由于每极采用12脉动换流阀组个数有所不同, 双极双桥12脉动换流阀的接线方式可分为单12脉接线和双12脉接线^[2]。目前国外许多超高压直流输电系统以及国内±500 kV葛南、龙政、江城、天广和贵广直流输电系统都采用单12脉接线方式^[3]。由于特高压换流站系统输送容量大, 电压等级高, 考虑运行及设备制造原因, 较多采用双12脉接线^[4]。例如, 国外的±600 kV依泰普直流输电系统, 前苏联研制的埃基巴图兹—唐波夫±750 kV直流输电工

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607021)

程,以及我国拟建的云广±800 kV 特高压直流输电系统都采用双 12 脉的接线方式。目前,国内外对高压直流输电系统的可靠性评估主要集中在单 12 脉的接线方式,而普遍缺乏对双 12 脉接线方式行之有效的可靠性评估方式,更缺少对两种接线方式下可靠性指标的比较分析。

鉴于此,本文进行了这方面的深入研究。本文先从接线方式、运行容量状态和等效模型三个方面对单双 12 脉接线直流输电系统作出比较分析,然后采用 Markov 过程基本原理和 FD 法^[5],基于相同的元件可靠性原始参数计算两者的可靠性指标,并对其可靠性指标进行元件参数的灵敏度分析,以此进行对比分析,得出若干有价值的结论。

1 单双 12 脉直流输电系统接线方式与运行方式比较

现代高压直流输电系统一般采用双极双桥 12 脉波的接线方式。由于每极采用 12 脉动换流阀组个数的不同,双极双桥 12 脉动换流阀的接线方式可分为单 12 脉接线和双 12 脉接线。

单 12 脉接线每极仅有一个 12 脉动换流阀组,其中 12 脉动换流单元是由两个交流侧电压相位相差 30° 的 6 脉动换流单元在直流侧串联,在交流侧并联所组成,其接线方式如图 1 所示。

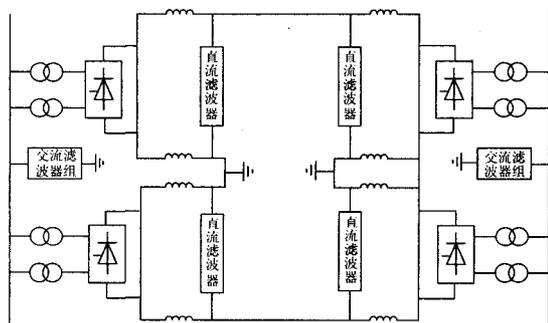


图1 单12脉动换流阀接线方式

Fig.1 Main circuit of 12-pulse valve groups

每极一组 12 脉动换流器接线结构简单,换流站设备数量少、造价低、损耗小,是较理想的接线方式。但其单台设备的容量大,制造难度大,运输也困难。且由于单 12 脉直流换流站系统不允许出现单极 6 脉波的运行方式,所以任一单桥换流器故障均可导致单极停运。当直流输电系统单极(占额定容量的 1/2)停运时,对两端交流系统的冲击和影响也会较大。双极双桥单 12 脉直流输电系统可包括以下 3 种运行方式:双极运行的 100%容量,单极

运行的 50%容量,双极停运的 0 容量^[6]。目前国内外主要的超高压直流输电系统都采用这种接线方式。

双 12 脉接线每极有两个 12 脉动换流阀组,通过阀组两端多个开关的切换,在每极任一换流阀组故障的情况下,健全的阀组仍然可以保持该极的部分运行,提高了系统的输电能力。根据每极两个阀组的连接方式,双十二脉接线可以分为串联方式和并联方式^[7],如图 2 和图 3 所示。

每极两组 12 脉动换流器串联接线方式中,换流器和换流变压器的数量将增加一倍,但其单台容量将降低一半,有利于设备的制造和运输。由于 12 脉动换流器作为基本换流单元可以独立运行,对于这种接线方式,还可按 12 脉动阀组分期进行建设,即按单极低压 1/4 容量—双极低压 2/4 容量—双极不对称高低压 3/4 容量—双极高压 4/4 容量建设。由于双 12 脉接线每极有两组 12 脉动换流阀组,通过换流器两端多个开关的切换,可在任一阀组故障情况下,只停运该故障阀组(占额定容量的 1/4)。这样对两端交流系统的冲击和影响也较小。由于设备数量增多,换流站造价也将增加。巴西的±600 kV 依泰普直流输电系统和我国拟建的云广±800 kV 特高压直流输电系统都采用这种接线方式。这种结构可包括以下 6 种运行方式。

- 1) 双极,两极完全运行,输电功率为 100% 容量。
- 2) 双极,一极完全运行,一极部分运行,输电功率为 75% 容量。
- 3) 双极,两极都部分运行,输电功率为 50% 容量。
- 4) 单极,一极停运,一极完全运行,以大地为回路或以另一极直流输电线作为回路,输电功率为 50% 容量。
- 5) 单极,一极停运,一极部分运行,以大地为回路或以另一级直流输电线作为回路,输电功率为 25% 容量。
- 6) 0 极,两极停运,输电功率为 0% 容量。

每极两组 12 脉动换流器并联接线方式,换流器和换流变压器的数量以及单台设备容量与串联方式相同。其特点是设备的电压高、电流小。但相对串联方式需要更高电压的换流设备,换流站造价较高。同串联方式一样,并联接线方式可在每极任一 12 脉动换流阀组故障的情况下,只停运该故障阀组(占额定容量的 1/4)。并联结构也有与串联结构相同的 6 种运行方式。前苏联研制的埃基巴图兹—唐波夫±750 kV 直流输电工程即采用这种结构。

由于双12脉串并联接线对系统可靠性水平的影响相同。本文在对双12脉直流输电系统进行可靠性分析时,仅以串联接线方式为例计算。

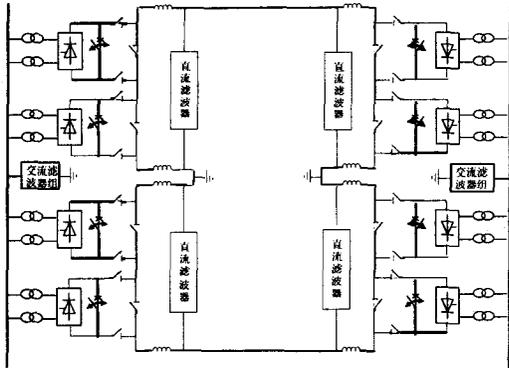


图2 双12脉动换流阀接线串联方式

Fig.2 Series-connected circuit of 2x12-pulse valve groups

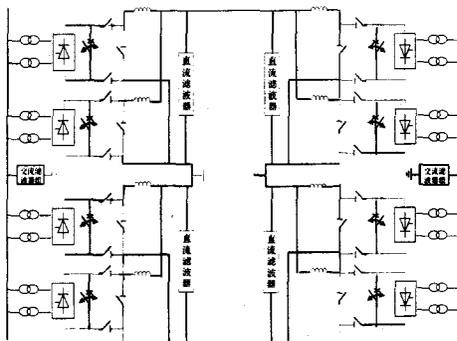


图3 双12脉动换流阀接线并联方式

Fig.3 Shunt-connected circuit of 2x12-pulse valve groups

2 直流输电系统可靠性评估

本文依据马尔可夫过程原理,采用频率和持续时间法(FD法),分析计算CIGRE 14-97(WG04)^[8]提出的直流输电系统可靠性指标:能量不可用率EU、能量可用率EA、总等值停运时间TEOT等。

2.1 直流输电系统子系统的划分

高压直流输电系统包括交、直流侧的各种元件,结构十分复杂。在获得整个系统的可靠性状态空间图之前,为了使问题简化,一般先根据系统的实际需要将其划分为若干个子系统。

本文考虑高压直流输电系统的典型备用模式和运行条件,将单12脉直流输电系统划分为:阀组、换流变压器、控制保护、交流滤波器、直流滤波器和平波电抗器等6个子系统。双12脉系统也类似处理,只是个别子系统的数目有所增加。单双12脉直流输电系统各子系统数目如表1所示。

表1 单双12脉直流输电系统各子系统数目

Tab.1 The number of subsystems of 12-pulse and 2x12-pulse

子系统	阀组 /个	换流变压器 /个	控制保护 /个		交流滤波器	直流滤波器	平波电抗器
			站控	极控			
单12脉	4	24	2	4	4	4	4
双12脉	8	48	2	4	4	4	4

2.2 直流输电系统等效模型

直流输电系统如上节划分的每个子系统,其状态空间图都含有多个状态,且它们有可能分别属于几个不同的容量水平,如果直接将子系统组合成整个系统的状态空间图,系统将变得十分复杂,容易出现“维数灾难”^[9],给问题的求解带来极大的困难。因此,通常将各子系统状态空间图中的状态分别按相同容量进行组合,建立等效模型。最终将各子系统的等效模型层层组合,得到整个高压直流输电系统的状态空间图。由于设备的增加,相对于单12脉输电系统的三状态等效模型(如图4),双12脉输电系统具有五个状态,如图5所示。

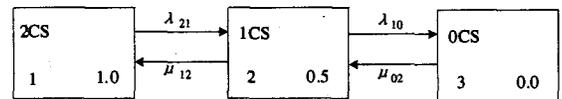


图4 单12脉直流输电系统等效模型

Fig.4 The equivalent model of 12-pulse HVDC system

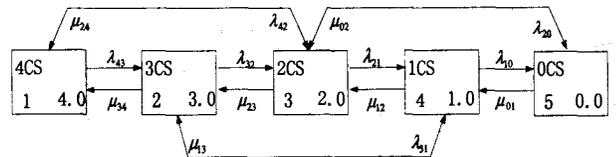


图5 双12脉直流输电系统等效模型

Fig.5 The equivalent model of 2x12-pulse HVDC system

图中:CS代表直流输电系统, λ 、 μ 分别为元件故障率和修复率。

由所得到的等效模型即可计算直流输电系统处于各容量状态下的稳态概率、频率和平均持续时间,然后根据这些系统可靠性基本指标,计算反映系统可靠性水平的其它指标。

2.3 直流输电系统的可靠性指标

电力系统可靠性指标的计算公式为

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x)P(x) \quad (1)$$

式中: x 表示系统运行状态; X 表示系统状态空间; $F(x)$ 表示以系统状态 x 为自变量的可靠性指标测

试函数; $P(x)$ 表示系统运行状态的联合概率分布函数, 即状态 x 出现的概率^[10]。

直流输电系统的主要可靠性指标及其表达式如下:

1) 故障总等值停运时间 $TEOT$ (Total Equivalent Outage Times)

$$TEOT = \frac{8760}{P_s} \sum_{x_i \in X} P(x) L_i \quad (2)$$

其中: P_s 为系统额定容量, L_i 为系统累计失负荷量。

2) 能量不可用率 EU (Energy Unavailability)

$$EU = \frac{\sum_{x \in X} P(x) L_i}{8760 P_s} \times 100\% \quad (3)$$

其中: L_i 为系统某故障状态失负荷量。

3) 能量可用率 EA (Energy Availability)

$$EA = 1 - EU \quad (4)$$

3 直流输电系统可靠性指标灵敏度分析

随着直流输电系统规模的增大, 系统元件数目和系统状态数大幅度增加, 系统中各元件原始参数的变化对系统可靠性指标的影响程度不同, 如何判断对系统可靠性有重要影响的关键元件极为重要。

本文结合南方电网公司直流输电系统可靠性评估项目, 在采用 FD 法对实际高压直流输电系统进行可靠性评估基础上, 研究系统中各元件原始参数的变化对系统可靠性指标影响的大小, 分别就单双 12 脉直流输电系统进行了系统可靠性指标对元件故障率的灵敏度分析。根据灵敏度分析获得的信息以及对它们的比较, 全面评估系统的可靠性。

直流输电系统可靠性的灵敏度分析实质是求取各可靠性指标对系统元件原始参数的偏微分, 因此灵敏度指标反映了元件原始参数的微小变化所引起的系统可靠性改变趋势。本文通过计算不同元件

可靠性原始参数 (故障率) 变动时系统的可靠性指标以作出系统可靠性指标随该元件故障率参数变化的曲线, 即采用图解法分析直流系统可靠性灵敏度。图解法大大减少了可靠性灵敏度分析的计算量, 同时直观描绘了各元件对系统可靠性影响的大小。通过灵敏度分析可以就元件对系统可靠性的影响程度进行排序, 从而可以得出影响系统可靠性的最关键因素^[11]。

4 算例分析

本文以典型的单双 12 脉接线直流输电系统为研究对象, 通过建立高压直流输电系统的可靠性模型, 提出了评估的计算机方法并编制了计算机程序, 基于相同的元件可靠性原始参数, 计算两者的可靠性指标, 并对其可靠性指标进行元件参数的灵敏度分析, 以此进行对比分析, 得出若干有价值的结论。

4.1 直流输电系统可靠性比较

本文所采用的原始参数主要来源于: CIGRE-Reports。各子系统的可靠性原始参数如表 2 所示。考虑换流阀组单 12 脉 3 冗余、双 12 脉 2 冗余, 换流变压器 1 备用, 平波电抗器 1 备用, 基于 Markov 过程原理和 FD 法, 分别对单双 12 脉直流输电系统进行可靠性计算, 结果如表 3 所示。

表2 直流输电系统可靠性原始参数

Tab. 2 Reliability parameters of HVDC system

组合元件		故障率 / (次·年 ⁻¹)	修复率 / (次·年 ⁻¹)	安装时间 /h
阀臂		0.0021	1460.000	
控制 保护	极控系统	0.0774	2.9597e+003	
	站控系统	8.9502e-005	5.8384e+003	
交流滤波器		0.0607	1.2122e+003	
直流滤波器		2.6545e-004	17520	
换流变压器		0.0480	176.1733	40
平波电抗器		0.0027	700.9755	40

表3 单双12脉直流输电系统可靠性评估计算结果

Tab. 3 Reliability indices of 12-pulse and 2x12-pulse HVDC transmission system

基本指标	双极运行		单极停运		双极停运	
	单 12 脉	双 12 脉	单 12 脉	双 12 脉	单 12 脉	双 12 脉
发生概率	0.997844441	0.99979819	0.002154373	0.00020177	0.000001185	0.00000004
发生频率/次·年 ⁻¹	1.246177760	5.25130756	1.245852491	0.33012324	0.027530089	0.00150876
总持续时间/h	8741.1173	8758.2321	18.8723	1.7675	0.0104	0.0003
系统可靠性指标	总等值停运时间/h·年 ⁻¹		能量可用率 EA/ (%)		能量不可用率 EU/ (%)	
	单 12 脉	双 12 脉	单 12 脉	双 12 脉	单 12 脉	双 12 脉
	9.446538	15.217984	99.89216281	99.82627872	0.107837	0.17372128

对比表 3 中的结果可以看出, 就单极停运和双极停运可靠性指标 (概率、频率、总持续时间) 而言, 双 12 脉直流系统相对于单 12 脉系统有较明显的优势。单 12 脉结构的单极停运发生概率、频率及总持续时间, 较双 12 脉结构的同类指标大一个数量级。而双极停运的同类指标, 单 12 脉结构甚至达到双 12 脉结构的 20~30 倍。这是因为系统元件的增加和接线方式的改变, 双 12 脉系统产生了新的容量状态, 当一个 12 脉动换流阀组发生故障时, 健全的阀组仍然可以保持该极的部分运行, 从而大大降低了直流输电系统单极停运、双极停运的概率、频率及总持续时间。

从表 3 中可以看出, 双 12 脉结构的总等值停运时间和能量不可用率较单 12 脉结构略有增加。这是由于双 12 脉结构增加了 25% 和 75% 的容量状态, 而且由于容量状态数量的增加, 状态 (尤其是 100% 和 75% 容量状态) 之间出现更多的状态转移过程, 使得双 12 脉接线发生容量缺失的故障系统状态持续时间之和大于单 12 脉。因之, 虽然 50% 容量及其以下的双 12 脉直流输电系统的等值停运时间远低于单 12 脉结构, 但其总等值停运时间仍较单 12 脉系统略有增加。由公式(2)、(3)可以看出, 能量不可用率与总等值停运时间具有相同的变化趋势。

通过以上可靠性指标比较可以看出, 双 12 脉直流输电系统相比单 12 脉直流系统, 在总等值停运时间和能量不可用率略有增加的情况下, 大大降低了单极停运和双极停运发生的概率、频率、总持续时间, 提高了系统的运行效率, 延长了系统的运行时间。

4.2 直流输电系统可靠性指标灵敏度分析

本文通过计算各元件可靠性原始参数 (故障率) 变动时系统可靠性指标 (基于总等值停运时间) 的变化以进行元件参数的灵敏度分析。单、双 12 脉直流输电系统总等值停运时间随各元件故障率变化趋势如图 6 和图 7 所示。

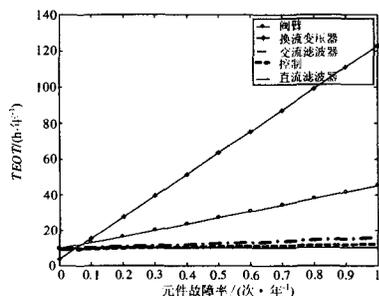


图6 单12脉直流输电系统TEOT变化曲线
Fig.6 TEOT of 12-pulse HVDC system vs failure rate of equipment

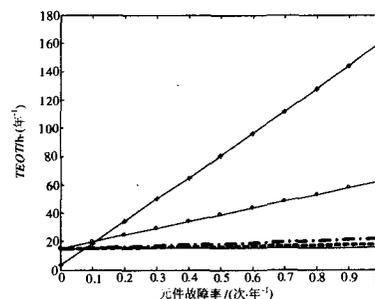


图7 双12脉直流输电系统TEOT变化曲线
Fig.7 TEOT of 2x12-pulse HVDC system vs failure rate of equipment

由图 6 和图 7 可以看出, 当元件故障率在 0~1 范围内变化, 单双 12 脉直流输电系统 TEOT 与元件故障率近似成线性关系。由表 2 可以看出, 实际直流输电工程各元件故障率均远小于 1, 即本文敏感度分析的范围能满足实际工程的需要。

对于单双 12 脉直流输电系统, 元件对系统可靠性指标的影响趋势一致: 换流变压器和阀臂对系统的可靠性指标影响最大, 为最关键因素, 其次是交流滤波器, 而控制保护设备和直流滤波器对系统可靠性指标影响相对较小。现分别考虑单、双 12 脉直流输电系统可靠性指标对系统影响最大的换流变压器和阀臂故障率的灵敏度分析, 如图 8 和图 9 所示。

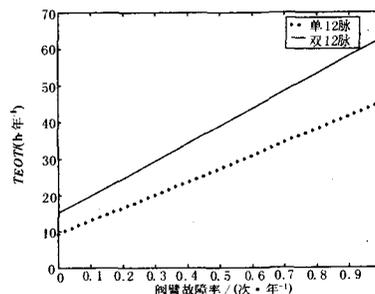


图8 单双12脉直流系统TEOT随阀臂故障率的变化曲线
Fig.8 TEOT of 12-pulse and 2x12-pulse HVDC system vs failure rate of valve arms

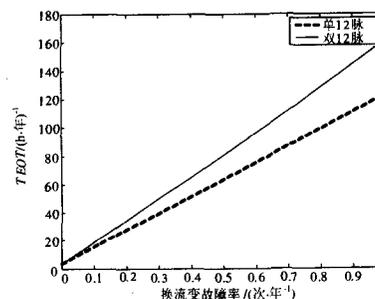


图9 单双12脉直流系统TEOT随换流变故障率的变化曲线
Fig.9 TEOT of 12-pulse and 2x12-pulse HVDC system vs failure rate of converter transformers

由图 8 和图 9 可以看出, 双 12 脉直流输电系统可靠性指标 TEOT 随阀臂和换流变压器故障率的变化率较单 12 脉的情形大。这是因为双 12 脉系统的设备和容量状态都有所增加, 从而受元件的影响较大。虽然, 双 12 脉系统的换流变压器和阀臂数是单 12 脉的 2 倍, 但由于双 12 脉系统每极 2 组换流阀组中任一阀组故障时, 健全的换流阀组仍然保持该极的部分运行, 这就降低了换流变压器和阀臂对系统可靠性指标的影响程度。因之, 单双 12 脉系统中, 阀臂故障对 TEOT 指标的影响应如图 8 和 9 所示, 并非 2 倍关系。

5 结论

(1) 单 12 脉接线方式结构简单, 换流站设备数量少、造价低、损耗小, 因此通常为国内外主要的超高压直流输电系统所采用。而特高压直流输电系统输送容量大, 电压等级高, 考虑运输及设备制造原因, 较多采用双 12 脉接线方式。

(2) 基于 Markov 原理对直流输电系统进行可靠性评估时, 通常将直流输电系统划分为若干子系统, 全面地考虑它们相互之间的关系, 建立各子系统的状态空间图和等效容量模型, 并加以层层组合, 最终建立起能表征整个直流输电系统的状态空间图。由于构成单双 12 脉直流输电系统的基本元件相同, 因此在计算时可以将其划分为相同的子系统, 只是个别子系统的数目有所不同。同时由于设备的增加, 相对于单 12 脉输电系统的三状态等效模型, 双 12 脉系统最终得到五状态等效模型。

(3) 双 12 脉直流输电系统较单 12 脉直流输电系统总等值停运时间和能量不可用率略有增加, 但可显著降低单极停运和双极停运发生概率、频率和停运总持续时间, 提高了系统的运行效率和可靠性水平。

(4) 在进行直流输电系统可靠性指标灵敏度分析时, 采用图解法分析直流系统可靠性灵敏度, 直观描绘了各元件对系统可靠性影响的大小。当元件原始参数变化不大时, 这种方法能提供系统指标随元件原始参数在一定范围内的变化趋势情况。

参考文献

- [1] 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 Yong-jin, REN Zhen. Models Combination and Its Application in Reliability Evaluation for HVDC Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 18-22.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力

出版社, 2004.

- [3] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心. 全国直流输电系统 2004 年度运行可靠性简况[R]. 2005.
- [4] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [5] 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 Li-fang. Equivalent Model for HVDC Reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 38-41.
- [6] 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.
- [7] 刘海锋, 徐政, 金丽成. 世界远距离大容量高压直流输电工程可靠性调查综述[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 1-6.
LIU Hai-feng, XU Zheng, JIN Li-cheng. A Review of the Reliability Survey of Long Distance High Power HVDC Transmision Project Throughout the World[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 1-6.
- [8] Cigre 14-97(WG04), Protocol for Reporting the Operational Performance of HVDC Transmission Systems[S].
- [9] 陈永进, 任震. 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, 2004, 29(10): 9-13.
CHEN Yong-jin, REN Zhen. Study on Capacity Model for Reliability Evaluation of HVDC System[J]. Power System Technology, 2004, 29(10): 9-13.
- [10] 赵渊, 周念成, 谢开贵. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 25-31.
ZHAO Yuan, ZHOU Nian-cheng, XIE Kai-gui. Sensitivity Analysis on Reliability Assessment of Bulk Power System[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 25-31.
- [11] 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): 33-40.
REN Zhen, LIANG Zhen-sheng, HUANG Wen-ying. Research on Nonlinear Decoupling Control of the Active Power Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 33-40.

收稿日期: 2007-08-29

作者简介:

刘威(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划和可靠性, 高压直流输电技术; E-mail: lw818181@yahoo.com.cn

赵渊(1974-) 男, 副教授, 硕士生导师, 长期从事电力系统规划和可靠性研究;

周家启(1938-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统规划和可靠性研究。