

高压直流输电系统可靠性灵敏度分析模型

周家启¹, 陈炜骏¹, 谢开贵¹, 刘洋¹, 金小明²

(1. 高电压与电工新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044;

2. 中国南方电网公司技术研究中心, 广东省广州市 510620)

A Sensitivity Analysis Model of HVDC Transmission System Reliability Evaluation

ZHOU Jia-qi¹, CHEN Wei-jun¹, XIE Kai-gui¹, LIU Yang¹, JIN Xiao-ming²

(1. Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology (Chongqing University), Ministry of Education, Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Technology Research Center of CSG, Guangzhou 510620, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: To depict the impact of components on reliability of HVDC power transmission system, a sensitivity index of component reliability of HVDC system is proposed. Combining with fault tree method and frequency and duration (FD) method, a combination model for sensitivity analysis of component reliability of HVDC system is built, and the definition of probability sensitivity of HVDC system reliability and that of key significance level are given. By means of two calculation examples, the reliability evaluation and sensitivity analysis of single 12-pulse and dual 12-pulse HVDC systems are conducted. According to calculation results, the impacts of each component or sub-system on HVDC system reliability and component backup are deeply studied. The proposed method is available for reference to the analysis on enhancement measures for HVDC system and the decision-making of system operation and maintenance.

KEY WORDS: HVDC power transmission system; reliability evaluation; sensitivity analysis; fault tree method

摘要: 为从元件层面刻画高压直流输电系统可靠性影响程度, 提出了直流系统元件可靠性灵敏度指标, 结合故障树法及频率和持续时间法建立了高压直流输电系统元件可靠性灵敏度分析的组合模型, 提出了直流系统可靠性评估概率灵敏度和关键重要度的定义。最后通过2个算例, 对单/双12脉高压/特高压直流输电系统进行可靠性评估及灵敏度分析, 基于计算结果对各元件或子系统对系统可靠性的影响及元件备用的影响进行了全面探讨。该方法对于识别系统的薄弱环节, 对系统的增强措施分析及系统运行维修决策具有参考意义。

关键词: 高压直流输电系统; 可靠性评估; 灵敏度分析; 故障树

0 引言

与交流输电相比较, 直流输电由于其固有的技

术的经济上的特点, 在远距离大容量输电、交流电力系统之间非同步互联、利用电缆跨海输电或向负荷密集的大城市供电以及作为限制短路电流的措施等方面, 均能发挥其独特的作用^[1]。随着交直流联网的出现, 直流系统的可靠性水平已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素^[2-4]。因此, 评估高压直流输电系统的可靠性及分析各种影响因素具有重要的理论意义和工程实用价值^[5]。各元件对直流系统可靠性的“贡献”取决于其在系统拓扑结构中的位置及自身可靠性参数, 如何快速、准确地判断对系统可靠性影响最大的元件、辨识系统薄弱环节极为重要。

文献[6-8]将 Markov 理论和状态空间法应用于直流系统, 建立了高压直流输电系统可靠性评估的等效模型。文献[9-10]采用确定性和概率性相结合的混合方法进行高压直流输电系统可靠性评估。文献[11]推导了高压直流输电系统容量模型的串并联组合公式, 但模型较为简单, 未计及元件备用模式和交流滤波器切换等实际问题。文献[12]采用故障树法进行高压直流输电系统可靠性的粗略评估。文献[13]以在交流系统可靠性评估中模拟直流系统三状态模型的方式建立交直流系统可靠性评估的数学模型。文献[14]基于 Monte Carlo-FD 混合法对交直流混合输电系统进行了可靠性指标的灵敏度分析。

上述文献较多采用频率和持续时间法(frequency and duration method, FD)对高压直流输电系统进行可靠性分析, 计算部分系统指标。这些指标虽能在一定程度上反映整个系统的可靠性水平, 但缺乏各元件对系统指标的影响分析。本文建立故障树和 FD 法结合的直流输电系统元件可靠性灵敏度组合分析模型, 编

制了相应的计算程序,并以贵广±500 kV单12脉动直流输电系统和拟建的云广±800 kV双12脉动特高压直流输电系统为例进行可靠性评估和灵敏度分析,提出了一些有参考价值的增强性措施。

1 高压直流输电系统可靠性评估方法

1.1 故障树算法

故障树分析法是一种使用图形演绎逻辑推理的方法,用图说明系统的失效原因,将系统的故障与组成系统各部件的故障有机地联系在一起,以找出系统全部可能的失效状态,即故障树的全部最小割集。

用故障树法进行高压直流输电系统可靠性计算的关键之处是在准确掌握各元件可靠性关联关系的基础上,对系统不同运行容量建立正确的故障树模型。完整的故障树由一些底事件通过逻辑门连接到一个或多个顶端事件(选定的系统故障状态称为顶事件)。根据所给底事件的故障率、修复时间等参数,计算各项事件的相关可靠性指标,步骤如下:

- ①定义系统故障,确定系统故障事件,即顶事件;
- ②分析高压直流输电系统各元件或子系统间的可靠性联接关系,生成系统各运行容量等级的故障树;
- ③进行定性与定量分析,即输入故障树结构和底事件参数,计算系统可靠性指标。

高压直流输电系统特别是双12脉动系统传输容量大、元件多、结构复杂、故障率高且运算条件复杂^[15-16],建立故障树的工作量较大。然而,相对FD法,采用故障树法计算直流系统可靠性时,在编程上更具有通用性,避免因系统结构发生微小变化导致重新建立系统转移关系图,从而提高了可靠性评估的效率。

1.2 频率和持续时间法

故障树法要计及元件的备用,在编程实现上会比较繁琐,致使程序运行效率低下。在直流换流站中,一些重要的设备都有备用元件,如晶闸管元件通常有2%~3%的冗余,各类型的换流变压器可设有单备用,甚至双备用。为兼顾程序的执行效率及如实反映系统运行情况,采用状态空间法计算元件备用。通过马尔可夫过程绘制状态空间图,将FD法结合容量水平归并^[7],计算及备用元件的等效故障率,作为输入参数参与故障树计算。

2 元件灵敏度计算

2.1 概率灵敏度

故障树中各底事件对系统故障的影响大小不

同,可用底事件的灵敏度进行描述。由可靠性评估理论和微积分理论可知,系统可靠性的灵敏度实质是各系统可靠性指标对元件可靠性参数的偏微分。因此,灵敏度指标反映了元件可靠性参数的微小变化引起系统可靠性改变的程度及改变趋势。

假设某系统可靠性指标为 f_s ,元件原始参数为 a ,则灵敏度计算公式定义为 $\frac{df_s}{da}$ 。当故障树有 n 个底事件, f_s 为顶事件发生的概率 P_s , a 为故障树底事件发生概率 $P_{si}(1 \leq i \leq n)$,则有

$$P_s = P_s(P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sn}) \quad (1)$$

得到第 i 个底事件的概率灵敏度定义为

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_{si}} \text{ 或 } \frac{\partial R_s}{\partial R_{si}} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (2)$$

式中: R_s 为系统可靠度; R_{si} 为底事件可靠度。

2.2 关键灵敏度

概率灵敏度反映了元件故障发生的概率对系统故障发生概率的影响,但难以反映元件故障概率变化对系统故障概率变化的影响。因此引入关键灵敏度的定义,第 i 个底事件对顶事件的关键灵敏度定义为

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_{si}} \cdot \frac{P_{si}}{P_s} \text{ 或 } \frac{\partial R_s}{\partial R_{si}} \cdot \frac{1 - R_{si}}{1 - R_s} \quad (3)$$

关键灵敏度是元件 i 故障概率的相对变化率与它引起系统故障概率相对变化率之比,它比概率灵敏度反映的内容更全面。故障树底事件的变化将通过特定的故障树结构,从底层事件逐层向顶层事件传递,利用故障树的这一特点,可计算底事件对应元件引起的系统顶事件变化率,即该元件的灵敏度。

2.3 组合系统的灵敏度分析

高压直流输电系统故障树的可靠性分析中,常常需要用等效模型作为底事件参与计算,如平波电抗器的双极故障,换流变压器的双极故障等。本文将讨论组合系统的灵敏度模型。

对于等效模型采用FD法结合容量水平归并进行处理。首先建立组合系统的状态空间图和等效容量模型。由状态空间图写出转移率矩阵 A ,从而得到线性方程组

$$(P_0, P_1, \dots, P_N)A = 0, \quad \sum_{i=0}^N P_i = 1 \quad (4)$$

式中 P_i 为在稳态运行下组合系统处于状态 i 的概率。由式(5)(6)可计算出各状态或累积状态的频率及平均持续时间

$$f_{s_i} = \sum_{i \in s_i} \sum_{j \in s_i} f_{ij} = \sum_{i \in s_i} P_i \sum_{j \in s_i} a_{ij} \quad (5)$$

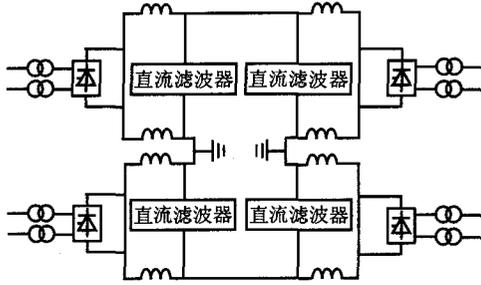


图 2 单 12 脉动直流系统主接线

Fig. 2 Main circuit of single 12-pulse valve groups HVDC converter station

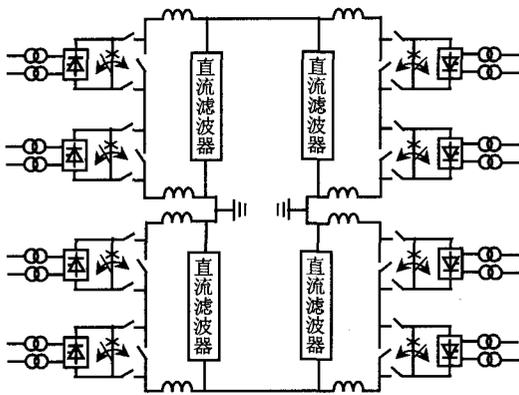


图 3 双 12 脉动直流系统主接线

Fig. 3 Main circuit of double 12-pulse valve groups HVDC converter station

3.2 直流系统可靠性计算

基于 Visual C++ 集成开发环境, 运用前述理论模型, 开发了基于故障树法和 FD 法组合的直流系统可靠性评估及其灵敏度分析程序, 对这 2 个系统进行了计算分析, 系统的部分可靠性指标见表 1。

表 1 高压直流换流站可靠性原始参数

Tab. 1 Reliability parameters of HVDC converter station

组合元件	故障率/(次/a)	修复率/(次/a)	安装时间/h
阀臂	0.137 4	1 460.000	6
换流变压器	0.012 6	290.500 8	48
极设备	0.005 6	761.068 7	—
控制保护	0.088(阀控), 0.010(站控)	1 158.12(阀控), 1 179.03(站控)	—
交流滤波器	0.200 0	876.000 0	—

表 2 列出的系统可靠性指标集中反映了整个系统供电可靠性的优劣程度, 但仅通过这些信息还难以找到制约系统可靠性的薄弱环节, 因此, 还需进行灵敏度和系统薄弱环节分析。

表 2 高压直流测试系统部分可靠性指标

Tab. 2 Reliability indices of test HVDC converter system

系统类型	强迫能量不可用率	单极强迫停运率/(次/a)	双极强迫停运率/(次/a)
单 12 脉动±500 kV	0.001 6 (0.001 6*)	3.295 8 (3.200 0*)	0.034 1 (0.034 0*)
双 12 脉动±800 kV	0.001 8	2.206 8	0.002 1

注: *表示该数据为西门子公司计算结果。

3.3 元件可靠性灵敏度分析

直流输电系统可降容量运行, 对于不同运行容量水平, 各元件对系统可靠性的灵敏度可能不同。以双极停运为例进行灵敏度分析。采用故障树计算直流系统可靠性时, 将不可靠度 σ_{UA} (或可靠度 σ_A) 和平均无故障运行时间 T_{MTBF} 作为顶事件的可靠性指标, 灵敏度分析主要针对直流系统不靠度 σ_{UA} 而言。表 3 和表 4 分别为单 12 脉动和双 12 脉动直流系统 σ_{UA} 对元件或子系统可靠性参数的关键灵敏度指标, 表中均按灵敏度指标降序排序。

表 3 单 12 脉动直流系统双极停运主要元件的关键灵敏度
Tab. 3 Main components' key sensitivity indices of bipolar failure for single 12-pulse HVDC system

子系统或元件	灵敏度指标
极 I 变压器故障	$2.722\ 79 \times 10^{-1}$
极 II 变压器故障	$2.727\ 92 \times 10^{-1}$
双极变压器故障	$1.509\ 17 \times 10^{-1}$
2 侧双极交流开关站	$3.241\ 45 \times 10^{-2}$
1 侧双极交流开关站	$2.760\ 07 \times 10^{-2}$
极控制系统	$2.484\ 94 \times 10^{-2}$
换流阀	$2.206\ 19 \times 10^{-2}$
站控	$9.897\ 51 \times 10^{-3}$
极 I 平波电抗器故障	$3.875\ 26 \times 10^{-3}$
极 II 平波电抗器故障	$3.875\ 26 \times 10^{-3}$
直流滤波器组	$1.517\ 10 \times 10^{-4}$
极 I 侧电极线路连接	$1.076\ 47 \times 10^{-4}$
极 II 侧电极线路连接	$1.076\ 47 \times 10^{-4}$
双极平波电抗器故障	$6.460\ 48 \times 10^{-5}$

表 4 双 12 脉动直流系统双极停运主要元件的关键灵敏度
Tab. 4 Main components' key sensitivity indices of bipolar failure for double 12-pulse HVDC system

子系统或元件	灵敏度指标
2 侧双极交流开关站	$1.271\ 65 \times 10^{-1}$
1 侧双极交流开关站	$1.082\ 80 \times 10^{-1}$
极控制系统	$5.008\ 81 \times 10^{-2}$
站控	$3.882\ 88 \times 10^{-2}$
极 I 平波电抗器故障	$7.408\ 75 \times 10^{-3}$
极 II 平波电抗器故障	$3.704\ 38 \times 10^{-3}$
极 I 变压器故障	$4.473\ 19 \times 10^{-4}$
极 II 变压器故障	$4.473\ 19 \times 10^{-4}$
1 侧电极线路连接	$4.224\ 46 \times 10^{-4}$
2 侧电极线路连接	$4.224\ 46 \times 10^{-4}$
双极平波电抗器故障	$1.267\ 25 \times 10^{-4}$
直流滤波器组	$2.900\ 22 \times 10^{-5}$
换流阀	$1.084\ 04 \times 10^{-5}$
双极变压器故障	$1.381\ 61 \times 10^{-7}$

由表 3 可以看出, 对于单 12 脉动直流输电系统, 换流变压器故障对系统可靠性指标的影响最大, 为最薄弱元件; 其次是交流开关站(包括交流滤波器设备)、极控、换流阀、站控以及平波电抗器单极的故障; 而直流滤波器、电极线路及平波电抗器的双极故障对可靠性指标的影响相对很小。

由表 4 可以看出, 对于双 12 脉动直流输电系统, 除变压器和换流阀元件以外, 其他元件的灵敏

度排序与单 12 脉动的排序结果一致，造成这 2 元件灵敏度与单 12 脉动相比大幅降低的原因为：在双 12 脉动系统中，每侧换流站每极的换流阀组(每个换流阀组包括 1 组变压器和 1 组换流阀)个数由单 12 脉动的 1 组变为 2 组串联运行。如运行中任一换流阀组故障，不会造成系统单极停运，只会使系统以降额容量运行，即必须 2 组同时故障才会造成单极停运，这就大量降低了换流变压器和换流阀对系统可靠性的影响程度，使灵敏度大幅减小。在整个系统中，换流变压器和交流滤波器设备的故障率和修复率比其他元件的可靠性参数大，因此对系统的可靠性影响也相对较大。以上理论分析和本文的计算结果一致，可进一步应用式(9)(11)求取系统 σ_{α} 对元件原始参数的灵敏度。

3.4 系统薄弱环节及备用影响分析

经济且有效的备用应设置在系统最薄弱的环节。通过薄弱环节计算，可分析各元件在系统可靠性中的相对影响，为增强性措施提供一定的参考。计算薄弱环节时，考虑双 12 脉动系统晶闸管元件 0 冗余、换流变 0 备用；晶闸管元件 1 冗余、换流变 1 备用和晶闸管元件 2 冗余、换流变 2 备用这 3 种情形。分别计算某一元件 100%可靠时的系统可靠性概率指标(计及系统 3 个容量状态的运行概率)。对应系统可靠性得以最大改善的元件就是系统的最弱环。计算结果如表 5~7 所示。

表 5~7 表明，系统的最薄弱环节为换流变压器，其次是换流阀组，再次为交流滤波器，这也从另一角度证实了敏感度指标的正确性和有效性。比较系

表 5 阀组 0 冗余、换流变 0 备用时的系统最弱环计算结果
Tab. 5 System's weakest link analysis in the case of 0 valve redundancy, 0 transformer backup

元件 100% 可靠	100% 容量概率	50% 容量概率/ 10^{-3}	0% 容量概率/ 10^{-3}
阀可靠	0.986 85	0.257 89	0.000 04
变压器可靠	0.998 41	0.197 27	0.000 04
极设备可靠	0.986 74	0.234 79	0.000 04
控制系统可靠	0.986 77	0.207 57	0.000 04
交流滤波可靠	0.986 82	0.160 45	0.000 04

表 6 阀组 1 冗余、换流变 1 备用时的系统最弱环计算结果

Tab. 6 System's weakest link analysis in the case of 1 valve redundancy, 1 transformer backup

元件 100% 可靠	100% 容量概率	50% 容量概率/ 10^{-3}	0% 容量概率/ 10^{-3}
阀可靠	0.993 31	0.212 41	0.000 04
变压器可靠	0.998 48	0.197 21	0.000 04
极设备可靠	0.993 27	0.188 21	0.000 04
控制系统可靠	0.993 29	0.160 79	0.000 04
交流滤波可靠	0.993 34	0.113 33	0.000 04

表 7 阀组 2 冗余、换流变 2 备用时的系统最弱环计算结果
Tab. 7 System's weakest link analysis in the case of 2 valve redundancy, 2 transformer backup

元件 100% 可靠	100% 容量概率	50% 容量概率/ 10^{-3}	0% 容量概率/ 10^{-3}
阀可靠	0.993 31	0.211 58	0.000 04
变压器可靠	0.998 50	0.197 19	0.000 04
极设备可靠	0.993 29	0.187 27	0.000 04
控制系统可靠	0.993 32	0.159 85	0.000 04
交流滤波可靠	0.993 37	0.112 39	0.000 04

统 100%容量时阀组及换流变压器备用不同情况下的薄弱环节，可以看出，阀组 1 冗余、换流变压器 1 备用的投入时，系统薄弱程度明显降低，表现为各元件 100%可靠时，系统无故障容量概率明显上升。阀组 2 冗余、换流变 2 备用时，系统薄弱程度和 1 备用相比没有明显改善，因此，2 备用投资效益不大，建议采用阀组 1 冗余、换流变 1 备用。

4 结论

(1) 建立高压直流输电系统可靠性灵敏度分析组合模型，反映元件或子系统对系统可靠性影响程度，弥补了单纯可靠性指标只能得到系统可靠性水平、难以反映可靠性薄弱环节的缺陷。

(2) 故障树法结合 FD 法对元件进行可靠性灵敏度分析，使程序通用性好、故障定位迅速，且便于处理元件备用，减少系统组合状态，显著降低算法复杂度，提高计算效率。

(3) 对常见单 12 脉动高压和双 12 脉动特高压直流输电系统进行可靠性计算及灵敏度分析以定位系统可靠性薄弱环节。分析结果表明，换流变压器为最薄弱元件；其次是交流开关站、极控、换流阀、站控以及平波电抗器的故障。对于一般直流输电系统，建议采用阀组 1 冗余、换流变 1 备用。理论分析和工程算例验证了本文方法的实用性，对确定影响系统可靠性的关键元件和提出增强措施具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 苏宏田, 齐旭, 吴云. 我国特高压直流输电市场需求[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 1-5.
Su Hongtian, Qi Xu, Wu Yun. Study on market demand of UHVDC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 1-5(in Chinese).

[2] 喻新强. 2003 年以来国家电网公司直流输电系统运行情况总结[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 41-46.
Yu Xinqiang. Summary on operation of SGCC's HVDC projects since 2003[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 41-46(in Chinese).

[3] Chen Weihua, Jiang Quanyuan, Cao Yijia. Risk based vulnerability

- assessment for HVDC transmission system[C]. The 7th International Power Engineering Conference, Singapore, 2005.
- [4] 齐旭, 曾德文, 史大军. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1-6.
Qi Xu, Zeng Dewen, Shi Dajun. Study on impacts of UHVDC transmission on power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 1-6(in Chinese).
- [5] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [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] 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).
- [8] Kuruganty S. HVDC transmission system models for power system reliability evaluation[C]. IEEE WESCANEX'95 Conference Proceedings, Wescanex, 1995.
- [9] Billinton R, Aboreshaid S. A hybrid deterministic/probabilistic technique for HVDC system reliability evaluation [C]. WESCANEXII Proceedings of 1997 Conference on Communications, Power and Computation, Winnipeg MB, 1997.
- [10] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M, Faried S O. Reliability evaluation of hybrid multi-terminal HVDC substation systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 571-577.
- [11] 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, 2005, 29(10): 9-13.
Chen Yongjin, Ren Zhen. Study on capacity model for reliability evaluation of HVDC system[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 9-13(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 刘海涛, 程林, 孙元章. 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. Reliability evaluation of hybrid AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 27-31(in Chinese).
- [14] 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 Zhensheng, Huang Wenying. Sensitivity analysis of AC/DC hybrid transmission system reliability indices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 33-40(in Chinese).
- [15] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎. ± 800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8(in Chinese).
- [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] Kindler. Availability and reliability(Guizhou-Guangdong ± 500 kV transmission project)[R]. SIEMENS, 2002.

收稿日期: 2007-03-16.

作者简介:

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, E-mail: zhoujiaqi610@sohu.com;

陈炜骏(1982—), 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: weijun.c@163.com;

谢开贵(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统规划和可靠性研究;

刘洋(1977—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统规划和可靠性;

金小明(1962—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析和直流输电。

(责任编辑 马晓华)

特高压试验研究再创两项世界纪录

2007年9月12日上午, 在国家电网公司特高压直流试验基地, 随着特高压交直流户外试验场一道亮光闪过, 2400 kV 操作冲击电压击穿了 ± 1000 kV 等级直流输电线路模拟杆塔塔头的空气间隙, 试验取得圆满成功。随后, 已经带电 ± 800 kV 运行的特高压双回直流试验线段成功升压至 ± 1200 kV, 设备和线段一切正常, 开始稳定运行。两项试验的成功, 标志着国家电网公司特高压直流试验基地冲击试验和升压试验再创两项世界纪录。国家电网公司党组书记、总经理刘振亚一行见证了这一时刻, 刘振亚总经理对试验取得成功表示祝贺。

特高压直流试验基地于今年2月23日全面开工建设, 5月26日特高压交直流户外试验场提前35天建成投运, 6月28日世界上第一个特高压双回直流试验线段建成投运, 并成功升压至 ± 1100 kV, 9月, 世界上最大的两厢式特高压交直流电晕笼建成投运。国内外专家对试验基地的建设速度、质量和功能等指标均给予了高度评价。目前, 特高压试验大厅、特高压避雷器和绝缘子试验室正紧张建设, 可模拟高海拔、污秽、覆冰、人工降雨(雾)等特殊环境条件的特高压污秽及环境试验室也已开工建设, 特高压试验变压器已经就位。特高压直流试验基地建成后 will 创造17项世界第一, 达到国际一流水平。在功能设计、设备研制、控制及试验技术和工程应用等方面将取得46项重大技术创新, 拟申请发明专利和实用新型专利50余项。