

# A Reliability Prediction Method for HVDC Power Transmission Systems

Qing Shi<sup>1,2</sup>, Xiuchen Jiang<sup>1</sup>, Liyun Xie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Municipal Electric Power Company, Maintenance Company, State Grid Corporation of China, Shanghai

Email: [232375665@qq.com](mailto:232375665@qq.com)

Received: Aug. 21<sup>st</sup>, 2015; accepted: Sep. 7<sup>th</sup>, 2015; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

A mathematical model and engineering methods for the reliability prediction of HVDC power transmission systems are presented. The energy availability is used to evaluate HVDC power transmission system reliability, making use of the energy availability deducted scheduled outage hours from period hours and the maintenance factor to evaluate HVDC power transmission system inherent reliability, and a mathematical model for the maintenance factor is shown by the power function. Based on statistical historical reliability data of HVDC power transmission systems, statistical values of the maintenance factor and undetermined parameters of the power function are determined. According to scheduled outage days, the outage derating factor and a mathematical model of the maintenance factor of HVDC power transmission systems, the energy availability of HVDC power transmission systems can be predicted in the next two years. The reliability verification method for prediction results of HVDC power transmission systems is given, together with reliability prediction examples of three HVDC power transmission projects, such as Tianshengqiao to Guangzhou, Gaopo to Zhaoqing and Jiangling to Echeng HVDC power transmission projects. By using reliability the prediction method for HVDC power transmission systems, predictive values of the energy availability of HVDC power transmission systems can be determined in the next two years, which provide the basis for the reliability target management of HVDC power transmission systems.

## Keywords

HVDC Power Transmission System, Reliability, Reliability Prediction, Energy Availability

## 超高压直流输电系统可靠性预测方法

史清<sup>1,2</sup>, 江秀臣<sup>1</sup>, 谢励耘<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学, 上海

<sup>2</sup>国网上海市电力公司检修公司, 上海

Email: [232375665@qq.com](mailto:232375665@qq.com)

收稿日期: 2015年8月21日; 录用日期: 2015年9月7日; 发布日期: 2015年9月11日

## 摘要

本文提出了超高压直流输电系统可靠性预测的数学模型及工程方法。采用能量可用率评价超高压直流输电系统的可靠性, 使用从统计期间扣除计划停运小时的能量可用率与检修系数评价超高压直流输电系统的固有可靠性, 采用幂函数表示检修系数的数学模型。在统计超高压直流输电系统可靠性历史数据的基础上, 确定检修系数的统计值与幂函数的待定参数。根据超高压直流输电系统的计划检修天数、降额系数与检修系数的数学模型, 提前两年预测超高压直流输电系统的能量可用率。给出了超高压直流输电系统可靠性预测结果的验证方法以及天广、高肇与江城等三个超高压直流输电工程的可靠性预测实例。应用超高压直流输电系统的可靠性预测方法, 可以提前两年确定超高压直流输电系统能量可用率的预测值, 为超高压直流输电系统的可靠性目标管理提供了依据。

## 关键词

超高压直流输电系统, 可靠性, 可靠性预测, 能量可用率

## 1. 引言

中国电力行业标准 DL/T 989-2013《直流输电系统可靠性评价规程》[1]给出了超高压直流输电系统可靠性的统计方法, 通过对超高压直流输电系统的运行可靠性历史数据统计分析, 可以得出超高压直流输电系统的可靠性的评价指标的统计结果, 其特点是“事后”对超高压直流输电系统前一年或前几年的历史数据进行可靠性统计。沿用至今的超高压直流输电系统可靠性方法, 侧重于超高压直流输电系统运行可靠性数据的统计分析[2]-[11], 但该方法与超高压直流输电系统的未来检修计划关联较弱, 还给出不出今后两年超高压直流输电系统的能量可用率的预测值。因此, 研究超高压直流输电系统的可靠性预测方法, “事前”对超高压直流输电系统在今后两年进行可靠性预测, 应用于超高压直流输电系统可靠性目标管理, 对于保障超高压直流输电系统安全经济运行有积极作用。

## 2. 超高压直流输电系统的可靠性评价指标

### 2.1. 能量可用率与计划能量不可用率的计算公式

能量可用率  $E_A$  与计划能量不可用率  $S_{EU}$  是超高压直流输电系统可靠性的主要评价指标[1], 其计算公式分别为

$$E_A = \frac{t_{EAH}}{t_{PH}} \times 100\% = \frac{t_{EAH}}{t_{EAH} + t_{EOH}} \times 100\% = \frac{t_{EAH}}{t_{EAH} + t_{EFOH} + t_{ESOH}} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_{EU} = \frac{t_{ESOH}}{t_{PH}} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $t_{EAH}$ ——等效可用小时数;

$t_{EOH}$ ——等效停运小时数;

- $t_{PH}$ ——统计期间小时数；  
 $t_{EFOH}$ ——等效强迫停运小时数；  
 $t_{ESOH}$ ——等效计划停运小时数。

超高压直流输电系统的等效停运小时数 $t_{EOH}$ 由等效强迫停运小时数 $t_{EFOH}$ 和等效计划停运小时数 $t_{ESOH}$ 两部分组成， $t_{EFOH}$ 反映了设备故障引起的强迫停运事件对超高压直流输电系统可靠性的影响， $t_{ESOH}$ 反映了设备计划检修对超高压直流输电系统维修性的影响。传统的超高压直流输电系统能量可用率 $E_A$ 的计算公式(1)的分母中包括了等效计划停运小时数 $t_{ESOH}$ ， $E_A$ 与超高压直流输电系统的等效计划停运小时数 $t_{ESOH}$ 关联较强。

## 2.2. 扣除计划停运的能量可用率的计算公式

为了扣除等效计划停运小时数 $t_{ESOH}$ 的影响，提出扣除计划停运的能量可用率 $E_{AS}$ ，作为超高压直流输电系统的新的可靠性评价指标，应用于超高压直流输电系统的可靠性预测， $E_{AS}$ 的计算公式为

$$E_{AS} = \frac{t_{EAH}}{t_{EAH} + t_{EFOH}} \times 100\% = \frac{t_{EAH}}{t_{PH} - t_{ESOH}} \times 100\% = \frac{E_A}{1 - S_{EU}} \times 100\% \quad (3)$$

新提出的超高压直流输电系统的扣除计划停运的能量可用率 $E_{AS}$ 的计算公式(3)，在式(1)分母中扣除了等效计划停运小时数 $t_{ESOH}$ 的影响，反映了设备故障引起的强迫停运事件对超高压直流输电系统可靠性的影响，属于超高压直流输电系统固有可靠性的评价指标。工程实际中，超高压直流输电系统的固有可靠性有一定的变化规律。由于超高压直流输电系统的等效计划停运小时数 $t_{ESOH}$ 是提前安排的，超高压直流输电系统的计划能量不可用率 $S_{EU}$ 也是可以提前预测的。经过可靠性分析，若能确定超高压直流输电系统固有可靠性 $E_{AS}$ 的变化规律，就可以用来预测超高压直流输电系统的 $E_A$ 。根据式(3)，超高压直流输电系统的 $E_A$ 的计算公式

$$E_A = (1 - S_{EU}) \times E_{AS} \quad (4)$$

## 2.3. 检修系数的计算公式

提出采用检修系数 $\rho$ 来表示超高压直流输电系统扣除计划停运的能量可用率 $E_{AS}$ 的变化规律，其计算公式为

$$\rho = \frac{t_{EFOH}}{t_{EAH}} \quad (5)$$

$\rho$ 与 $E_{AS}$ 的关系如下

$$\rho = \frac{1 - E_{AS}}{E_{AS}} \quad (6)$$

$$E_{AS} = \frac{1}{1 + \rho} \quad (7)$$

把式(3)代入式(6)，有

$$\rho = \frac{1 - S_{EU} - E_A}{E_A} \quad (8)$$

由于超高压直流输电系统在不同年份的 $E_A$ 、 $E_{AS}$ 和 $S_{EU}$ 有不同的数值，是年份 $t_i$ 的函数，故检修系数 $\rho$ 也不是定值而是年份 $t_i$ 的函数，在第 $t_i$ 年的检修系数 $\rho(t_i)$ 可表示为

$$\rho(t_i) = \frac{1 - S_{\text{EU}}(t_i) - E_A(t_i)}{E_A(t_i)} \quad (9)$$

式中,  $E_A(t_i)$ ——第 $t_i$ 年能量可用率的统计值;

$S_{\text{EU}}(t_i)$ ——第 $t_i$ 年计划能量不可用率的统计值。

### 3. 超高压直流输电系统的可靠性数学模型

#### 3.1. 检修系数的数学模型

根据文献[12], 超高压直流输电系统检修系数变化规律  $\rho(t)$  的数学模型采用幂函数表示为

$$\rho(t) = \eta_i t^{-m_i} \quad (10)$$

式中,  $t$ ——超高压直流输电系统的运行年数;

$\rho(t)$ ——超高压直流输电系统的检修系数;

$\eta_i$ ——尺度参数;

$m_i$ ——增长系数。

#### 3.2. 扣除计划停运的能量可用率的数学模型

由式(10)知, 超高压直流输电系统的检修系数  $\rho(t)$  符合幂函数, 把式(10)代入式(7), 超高压直流输电系统的扣除计划停运的能量可用率  $E_{\text{AS}}(t)$  的数学模型表示为

$$E_{\text{AS}}(t) = \frac{1}{1 + \eta_i t^{-m_i}} \quad (11)$$

#### 3.3. 能量可用率的数学模型

已知超高压直流输电系统的扣除计划停运的能量可用率  $E_{\text{AS}}(t)$  的数学模型与计划能量不可用率  $S_{\text{EU}}(t)$  的变化规律, 把式(11)代入式(4), 能量可用率  $E_A(t)$  的数学模型表示为

$$E_A(t) = \frac{1 - S_{\text{EU}}(t)}{1 + \eta_i t^{-m_i}} \quad (12)$$

### 4. 超高压直流输电系统的可靠性预测方法

#### 4.1. 运行可靠性数据的统计分析

超高压直流输电系统投入使用后, 利用前 $n$ 年( $n \geq 3$ )的可靠性历史数据的统计值  $E_A(t_i)$ 、 $S_{\text{EU}}(t_i)$ , 按式(9)计算检修系数  $\rho(t_i)$ ; 采用最小二乘法[13]可以确定检修系数的数学模型式(10)的增长系数  $m_i$  和尺度参数  $\eta_i$ 。

#### 4.2. 预测扣除计划停运的能量可用率 $E_{\text{AS}}$

每年年初, 利用前 $n$ 年运行可靠性历史数据统计分析得出增长系数  $m_i$  和尺度参数  $\eta_i$  以及式(11)表示的扣除计划停运的能量可用率  $E_{\text{AS}}(t)$  的数学模型, 给定  $t = n + 1$  和  $t = n + 2$ , 预测超高压直流输电系统当年( $t = n + 1$ )与明年( $t = n + 2$ )的扣除计划停运的能量可用率  $E_{\text{AS}}$  的计算公式分别为

$$E_{\text{AS}}(n+1) = \frac{1}{1 + \eta_i (n+1)^{-m_i}} \quad (13)$$

$$E_{\text{AS}}(n+2) = \frac{1}{1 + \eta_i (n+2)^{-m_i}} \quad (14)$$

### 4.3. 预测计划能量不可用率 $S_{EU}$

对于超高压直流输电系统,每年年初可以确定当年( $t = n + 1$ )的计划检修天数  $M_1$ ,也可以估计明年( $t = n + 2$ )计划检修天数  $M_2$ 。根据历史数据,每年年初可以确定统计对象处于计划停用状态下的降额系数  $O_{DF}$ ,根据文献[1]和式(2),预测超高压直流输电系统当年( $t = n + 1$ )与明年( $t = n + 2$ )的计划能量不可用率  $S_{EU}$ 的计算公式分别为

$$S_{EU}(n+1) = \frac{24 \times O_{DF} \times M_1}{8760} \quad (15)$$

$$S_{EU}(n+2) = \frac{24 \times O_{DF} \times M_2}{8760} \quad (16)$$

### 4.4. 预测能量可用率 $E_A$

已知超高压直流输电系统的扣除计划停运的能量可用率  $E_{AS}(t)$ 和计划能量不可用率  $S_{EU}(t)$ 的预测值,根据式(4),今后两年超高压直流输电系统的能量可用率  $E_A$ 的预测公式为

$$E_A(t) = [1 - S_{EU}(t)] \times E_{AS}(t) \quad (17)$$

在确定超高压直流输电系统扣除计划停运的能量可用率  $E_{AS}(n+1)$ 与  $E_{AS}(n+2)$ 以及计划能量不可用率  $S_{EU}(n+1)$ 与  $S_{EU}(n+2)$ 的基础上,预测超高压直流输电系统当年( $t = n + 1$ )和明年( $t = n + 2$ )的能量可用率  $E_A$ 的计算公式分别为

$$\begin{aligned} E_A(n+1) &= [1 - S_{EU}(n+1)] \times E_{AS}(n+1) \\ &= \left(1 - \frac{24 \times O_{DF} \times M_1}{8760}\right) \times \frac{1}{1 + \eta_i(n+1)^{m_i}} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} E_A(n+2) &= [1 - S_{EU}(n+2)] \times E_{AS}(n+2) \\ &= \left(1 - \frac{24 \times O_{DF} \times M_2}{8760}\right) \times \frac{1}{1 + \eta_i(n+2)^{m_i}} \end{aligned} \quad (19)$$

## 5. 可靠性预测值的验证方法

### 5.1. 预测值的验证方法

每年对超高压直流输电系统的运行可靠性历史数据进行统计分析,可以确定某年超高压直流输电系统的能量可用率  $E_A(t_i)$ 和计划能量不可用率  $S_{EU}(t_i)$ 的统计值,考虑到实际超高压直流输电系统的统计值  $S_{EU}(t_i)$ 与按照式(15)与式(16)的预测值相比还有一定差异,不能直接将式(18)和式(19)计算得出的能量可用率的预测值  $E_A(t)$ 与能量可用率的统计值  $E_A(t_i)$ 比较来验证可靠性预测结果的准确性。然而,在使用阶段,根据式(13)与式(14)确定扣除计划停运的能量可用率的预测值  $E_{AS}(t)$ 以及实际超高压直流输电系统的计划能量不可用率  $S_{EU}(t_i)$ 的统计值,可以计算超高压直流输电系统的能量可用率的预测值  $E_{Ai}(t)$ 。在采用相同计划能量不可用率  $S_{EU}(t_i)$ 的前提下,通过超高压直流输电系统的能量可用率的预测值  $E_{Ai}(t)$ 与能量可用率的统计值  $E_A(t_i)$ 相比较,可以验证超高压直流输电系统可靠性预测方法的准确性。

### 5.2. 能量可用率的预测值

根据式(4),某年超高压直流输电系统的能量可用率的预测值  $E_{Ai}(t)$ 的计算公式为

$$E_{Ai}(t) = [1 - S_{EU}(t_i)] \times E_{AS}(t) \quad (20)$$

式中,  $E_{AS}(t)$ ——根据式(13)与式(14)确定的扣除计划停运的能量可用率的预测值;

$S_{EU}(t_i)$ ——超高压直流输电系统的计划能量不可用率的实际统计值。

第  $t_i$  年超高压直流输电系统的计划能量不可用率的统计值为  $S_{EU}(t_i)$ , 使用  $(t_i - 1)$  年的增长系数  $m_i$  和尺度参数  $\eta_i$  得出第  $t_i$  年超高压直流输电系统的能量可用率的预测值  $E_{Ai}(n + 1)$  的计算公式为

$$E_{Ai}(n + 1) = [1 - S_{EU}(t_i)] \times E_{AS}(n + 1) = \frac{1 - S_{EU}(t_i)}{1 + \eta_i(n + 1)^{-m_i}} \quad (21)$$

使用  $(t_i - 2)$  年的增长系数  $m_i$  和尺度参数  $\eta_i$  得出第  $t_i$  年超高压直流输电系统的能量可用率的预测值  $E_{Ai}(n + 2)$  的计算公式为

$$E_{Ai}(n + 2) = [1 - S_{EU}(t_i)] \times E_{AS}(n + 2) = \frac{1 - S_{EU}(t_i)}{1 + \eta_i(n + 2)^{-m_i}} \quad (22)$$

### 5.3. 可靠性预测值的相对误差

第  $t_i$  年的能量可用率预测值与实际统计值的绝对误差  $\Delta_1$  与  $\Delta_2$  的计算公式分别为

$$\Delta_1 = \max \{ [E_A(n + 1) - E_A(t_i)], [E_A(n + 2) - E_A(t_i)], [E_A(n + 3) - E_A(t_i)] \} \quad (23)$$

$$\Delta_2 = \min \{ [E_A(n + 1) - E_A(t_i)], [E_A(n + 2) - E_A(t_i)], [E_A(n + 3) - E_A(t_i)] \} \quad (24)$$

若  $\Delta_1 > 0$  且  $|\Delta_1| \geq |\Delta_2|$ , 则相对误差  $E_r$  为

$$E_r = \frac{\Delta_1}{E_A(t_i)} \times 100\% \quad (25)$$

若  $\Delta_2 < 0$  且  $|\Delta_1| < |\Delta_2|$ , 则相对误差  $E_r$  为

$$E_r = \frac{\Delta_2}{E_A(t_i)} \times 100\% \quad (26)$$

## 6. 超高压直流输电系统的可靠性预测及验证

### 6.1. 超高压直流输电系统可靠性统计结果

根据电力可靠性中心给出的超高压直流输电系统的可靠性统计数据[14], 从 2005 年至 2012 年天广、高肇与江城等三个超高压直流输电工程的  $E_A(t_i)$  和  $S_{EU}(t_i)$  统计结果列于表 1。

### 6.2. 天广超高压直流输电工程的可靠性预测及验证

令 2005 年  $t_i = 1$ , 2012 年  $t_i = 8$ 。利用前  $n$  年可靠性的统计数据, 经计算分析, 得出的增长系数  $m_i$ 、尺度参数  $\eta_i$  列于表 2。

使用  $n = 6$  的 2010 年的  $m_i$  和尺度参数  $\eta_i$ , 得出第  $t_i = n + 2 = 8$ , 即 2012 年天广超高压直流输电工程的能量可用率的预测值  $E_{AFi}(n + 2)$  的计算结果为

$$E_{AFi}(n + 2) = [1 - S_{EU}(t_i)] \times E_{AS}(n + 2) = \frac{1 - S_{EU}(t_i)}{1 + \eta_i(n + 2)^{-m_i}} = \frac{1 - 0.0291}{1 + 0.044559 \times 8^{-3.520780}} = 97.09\%$$

使用  $n = 7$  的 2011 年的  $m_i$  和尺度参数  $\eta_i$ , 得出第  $t_i = n + 1 = 8$ , 即 2012 年天广超高压直流输电工程的能量可用率的预测值  $E_{AFi}(n + 2)$  的计算结果为

$$E_{Ai}(n+1) = [1 - S_{EU}(t_i)] \times E_{AS}(n+1) = \frac{1 - S_{EU}(t_i)}{1 + \eta_i(n+1)^{-m_i}} = \frac{1 - 0.0291}{1 + 0.086536 \times 8^{-4.517787}} = 97.09\%$$

2012 年天广超高压直流输电工程的能量可用率的统计值为  $E_{AF}(t_i) = 97.08\%$ ,  $\Delta_1 = \Delta_2 = 97.09 - 97.08 = 0.01\%$ , 可靠性预测的相对误差为  $E_r = \frac{\Delta_1}{E_{AF}(t_i)} \times 100\% = \frac{0.01}{97.08} \times 100\% = 0.01\%$

从表 2 知, 从 2008 年起, 天广超高压直流输电工程的能量可用率的预测值的相对误差范围是  $-0.04\% \sim 0.01\%$ 。

### 6.3. 高肇超高压直流输电工程的可靠性预测及验证

令 2005 年  $t_i = 1$ , 2012 年  $t_i = 8$ 。利用前  $n$  年可靠性的统计数据, 经计算分析, 得出的增长系数  $m_i$ 、尺度参数  $\eta_i$  列于表 3。从表 3 知, 从 2008 年起, 高肇超高压直流输电工程的能量可用率的预测值的相对误差范围是  $-0.10\% \sim 0.16\%$ 。

### 6.4. 江城超高压直流输电工程的可靠性预测及验证

令 2005 年  $t_i = 1$ , 2012 年  $t_i = 8$ 。利用前  $n$  年可靠性的统计数据, 经计算分析, 得出的增长系数  $m_i$ 、尺度参数  $\eta_i$  列于表 4。从表 4 知, 从 2008 年起, 江城超高压直流输电工程的能量可用率的预测值的相对

**Table 1.** The statistical results of HVDC power transmission system reliability  
**表 1.** 超高压直流输电系统的可靠性统计结果

年份	$t_i$	天广超高压直流输电工程		高肇超高压直流输电工程		江城超高压直流输电工程	
		$E_A(t_i)$	$S_{EU}(t_i)$	$E_A(t_i)$	$S_{EU}(t_i)$	$E_A(t_i)$	$S_{EU}(t_i)$
2005	1	0.9177	0.0525	0.9253	0.0425	0.9379	0.0430
2006	2	0.9384	0.0568	0.9632	0.0358	0.9553	0.0377
2007	3	0.9378	0.0606	0.9667	0.0252	0.9432	0.0450
2008	4	0.9869	0.0127	0.7988	0.2002	0.7751	0.2095
2009	5	0.8990	0.10096	0.9632	0.0366	0.8938	0.1041
2010	6	0.7389	0.2610	0.9615	0.0381	0.9749	0.0247
2011	7	0.9514	0.0486	0.9746	0.02364	0.9625	0.03176
2012	8	0.9708	0.02907	0.9932	0.0068	0.9654	0.03453

**Table 2.**  $E_A$  predictions of Tianshengqiao to Guangzhou HVDC power transmission project  
**表 2.** 天广超高压直流输电工程的  $E_A$  的预测结果

年份	$t_i$	$E_A(t_i)$ (%)	$S_{EU}(t_i)$ (%)	$\rho(t_i)$	$m_i$	$\eta_i$	$E_{Ai}(n+1)$ (%)	$E_{Ai}(n+2)$ (%)	$E_r$ (%)
2005	1	91.77	5.25	0.03247					
2006	2	93.84	5.68	0.00512					
2007	3	93.78	6.06	0.00171	2.680115	0.032555			
2008	4	98.69	1.27	0.00041	3.046568	0.036828	98.65		-0.04
2009	5	89.90	10.10	0.00004	3.783684	0.051766	89.88	89.86	-0.04
2010	6	73.89	26.10	0.00014	3.520780	0.044559	73.90	73.89	0.01
2011	7	95.14	4.86	0.00000	4.517787	0.086536	95.14	95.14	0
2012	8	97.08	2.91	0.00013	3.881320	0.053644	97.09	97.09	0.01

**Table 3.**  $E_A$  predictions of Gaopo to Zhaoqing HVDC power transmission project  
**表 3.** 高肇超高压直流输电工程的  $E_A$  的预测结果

年份	$t_i$	$E_A(t_i)$ (%)	$S_{EU}(t_i)$ (%)	$\rho(t_i)$	$m_i$	$\eta_i$	$E_{A_i}(n+1)$ (%)	$E_{A_i}(n+2)$ (%)	$E_t$ (%)
2005	1	92.53	4.25	0.03480					
2006	2	96.32	3.58	0.00104					
2007	3	96.67	2.52	0.00838	1.702162	0.018557			
2008	4	79.88	20.02	0.00125	1.885773	0.019739	79.84		-0.05
2009	5	96.32	3.66	0.00021	2.498290	0.026194	96.25	96.22	-0.10
2010	6	96.15	3.81	0.00042	2.392614	0.024663	96.16	96.13	-0.02
2011	7	97.46	2.36	0.00181	1.864378	0.017350	97.61	97.62	0.16
2012	8	99.32	0.68	0.00000	3.145257	0.045420	99.28	99.30	-0.04

**Table 4.**  $E_A$  predictions of and Jiangling to Echeng HVDC power transmission project  
**表 4.** 江城超高压直流输电工程的  $E_A$  的预测结果

年份	$t_i$	$E_A(t_i)$ (%)	$S_{EU}(t_i)$ (%)	$\rho(t_i)$	$m_i$	$\eta_i$	$E_{A_i}(n+1)$ (%)	$E_{A_i}(n+2)$ (%)	$E_t$ (%)
2005	1	93.79	4.30	0.02037					
2006	2	95.53	3.77	0.00733					
2007	3	94.32	4.50	0.01251	0.554511	0.017148			
2008	4	77.51	20.95	0.01987	0.054577	0.014493	78.43		1.18
2009	5	89.38	10.41	0.00235	0.753301	0.020014	88.42	88.97	-1.08
2010	6	97.49	2.47	0.00041	1.557068	0.031650	97.03	96.26	-1.26
2011	7	96.25	3.18	0.00596	1.204955	0.025036	96.68	96.38	0.45
2012	8	96.54	3.45	0.00007	1.930226	0.043173	96.35	96.43	-0.20

误差范围是-1.26%~1.18%。

## 7. 结论

1) 文中提出的超高压直流输电系统可靠性的预测方法, 利用超高压直流输电系统前  $n$  年( $n \geq 3$ )的能量可用率  $E_A(t_i)$ 和计划能量不可用率  $S_{EU}(t_i)$ 的历史统计数据以及未来两年的计划检修天数与降额系数, 可以定量预测超高压直流输电系统未来两年的能量可用率。

2) 给出的天广、高肇与江城等三个超高压直流输电工程的能量可用率的预测值的相对误差的范围为-1.26%~1.18%, 表明文中给出的直流输电系统的可靠性预测方法的预测精度比较高, 工程上是实用的。

3) 应用文中给出的超高压直流输电系统的可靠性预测方法, 实现了“事前”超高压直流输电系统的能量可用率的定量预测, 为超高压直流输电系统的可靠性目标管理提供了新的技术手段。

## 参考文献 (References)

- [1] 国家能源局 (2013) DL/T 989-2013 直流输电系统可靠性评价规程. 中国电力出版社, 北京.
- [2] 梁志峰, 董昱, 张智刚 (2014) 2006-2012 年国家电网公司直流输电系统强迫停运统计分析. *电力系统自动化*, **6**, 1-5.
- [3] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 李琰, 鲁宗相 (2014) 未来高压直流电网发展形态分析. *中国电机工程学报*, **34**, 6007-6020.



- 
- [4] Chatthaworn, R. and Chaitusaney, S. (2014) Reliability evaluation of power systems with high short-circuit current reduction. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **3**, 241-250. <http://dx.doi.org/10.1002/tee.21962>
- [5] 段满银, 张国华 (2013) 国内外直流输电系统可靠性指标对比分析. *电网技术*, **9**, 2390-2395.
- [6] 汤广福, 罗湘, 魏晓光 (2013) 多端直流输电与直流电网技术. *中国电机工程学报*, **10**, 8-17.
- [7] Sun, Y.B., Zhang, J.H., Jing, K. and Bian, X.J. (2012) A novel evaluation method for the reliability of HVDC transmission system. 2012 *International Conference on Electronic Information and Electrical Engineering*, Changsha, 15-17 June 2012, 606-609.
- [8] CIGRE B4-52 Working Group (2011) HVDC grid feasibility study. International Council on Large Electric Systems, Melbourne.
- [9] Xu, L.L., Ye, T.L. and Zhang, Q.P. (2010) Statistics and analysis on reliability of HVDC transmission systems of SGCC. *Electricity*, **3**, 32-37.
- [10] 喻新强 (2009) 国家电网公司直流输电系统可靠性统计与分析. *电网技术*, **12**, 1-7.
- [11] Zhou, J.Q., Li, W.Y., Lu, J.P. and Yan, W. (2007) Incorporating aging failure mode and multiple capacity state model of HVDC system in power system reliability assessment. *Electric Power Systems Research*, **8**, 910-916.
- [12] 史进渊, 杨宇, 汪勇, 等 (2014) 大型发电机组可靠性预测与安全服役的理论及方法. 中国电力出版社, 北京.
- [13] 方开泰, 全辉, 陈庆云 (1988) 实用回归分析. 科学出版社, 北京.
- [14] 电力可靠性管理中心 (2013) 中国电力可靠性管理年报. 电力可靠性管理中心, 北京.