基于改进 FD 法的柔性直流输电系统可靠性评估

郭静丽，王秀丽，侯雨伸，徐海超

（西安交通大学电气工程学院，陕西 西安 710049）

摘要：在直流系统可靠性评估中，传统 FD 法需要建立状态空间图，求解过程繁琐。提出一种基于参数矩阵化的 FD 法，即将所有子系统的相关参数矩阵化，包含容量矩阵、容量概率矩阵、状态转移率矩阵。通过矩阵运算实现子系统组合，从而避免建立状态空间图，在保证计算精度的同时，使子系统组合计算简明快速，克服了传统方法在元件众多结构复杂时计算困难的弊端。对一个双极两端柔性直流输电系统进行了可靠性建模与评估，并研究了元件故障率变化对柔性直流输电系统可靠性的影响。

关键词：柔性直流输电；可靠性评估；FD 法；矩阵化；灵敏度分析

Reliability assessment of the VSC-HVDC transmission system based on a modified FD method

GUO Jingli, WANG Xiuli, HOU Yushen, XU Haichao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The traditional FD method is based on state-space diagrams, which would be extremely complex if the number of system states increases. A modified FD method is proposed and applied to the reliability assessment of the VSC-HVDC transmission system. In the proposed method, parameter matrices, including capacity matrix, probability matrix and departure rate matrix, are introduced into the reliability evaluation procedure to replace the state-space diagrams. A case study is conducted on the basis of the proposed method. Results show that the matrix based method overweighs the traditional FD method on both the calculation speed and simplicity, thereby providing an efficient approach to assess the reliability of VSC-HVDC transmission system. Furthermore, the impact of parameter variance on the system reliability is analyzed in order to identify the weakest component in a VSC-HVDC transmission system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51261130471).

Key words: VSC-HVDC; reliability assessment; FD method; parameter matrix; sensitivity analysis

中图分类号： TM712 文章编号： 1674-3415(2015)23-0008-06

0 引言

随着电力电子器件、高压换流技术的不断进步，基于电压源型换流器(Voltage Source Converter，VSC)的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术近年来发展迅速，电压源型换流器的结构不断创新，由两电平结构发展为多电平结构、模块化多电平结构和级联两电平结构(Cascaded Two-level，CTL)[1]。与基于线路换相换流器的常规直流输电(Line Commuted Converter High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)技术相比，柔性直流输电技术具有以下优势：自换相、无功有功可独立控制、可向无源负荷供电、潮流翻转时电压极性不改变、易构成多端输电系统等，该技术可有效解决可再生能源并网、黑启动、非同步并网等问题[2]。

目前，柔性直流输电技术主要应用于海上风电场接入、向海上石油平台供电、孤岛供电以及系统间非同步联络等场合[3-6]。所有这些工程应用都对柔性直流输电系统的可靠性提出了很高的要求，而其可靠性的改善也将给整个电力系统的安全、可靠和经济运行带来巨大的效益。因此定量评估柔性直流输电系统的可靠性，分析各种影响因素，对实际工程及该技术本身的发展，都具有重要意义。

常规高压直流输电系统的可靠性研究已取得一定成果，频率和持续时间法(Frequency and Duration Method，FD method)、故障树法、卷积法、概率抽

基金项目：国家自然科学基金项目(51261130471)

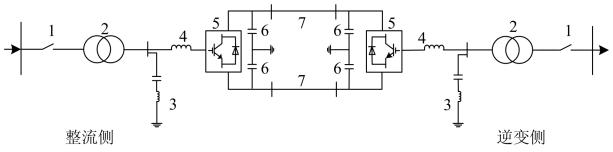
样法等方法已在常规系统可靠性评估中得到很好的应用[7-8]。关于柔性直流输电系统可靠性的研究，也已有一些成果[9-13]。文献[9]利用 FD 法与模型组合方法对柔性直流输电系统进行了可靠性建模与评估，考虑了 100%和 0%两个容量状态。文献[10]构建了柔性直流输电与常规直流输电系统组成的一种传输子网系统，利用卷积法对系统可靠性及各负荷点的可靠性进行了评估，并分析了元件备用对系统可靠性的影响。文献[11]将一个柔性直流输电站接入常规两端直流输电系统，建立了系统的可靠性模型，并分析了负荷点的可靠性指标以及负荷水平、柔性直流输电站位置对可靠性指标的影响。文献[12]利用解析法分析了一个五端柔性直流输电系统的可靠性，考虑了 100%、50%和 0%三个容量状态。文献[13]利用概率抽样法从可靠性和经济性两方面比较了端对端结构和网状结构的柔性直流输电系统，可靠性方面主要考虑了功率传输能力。文献[14]对电压源型换流器的拓扑结构进行分析，建立了多电平换流器的可靠性模型；本文作者在文献[15]中分析了模块化多电平结构换流器的可靠性。

综上，评估柔性直流输电系统可靠性的现有文献中，采用 FD 法时考虑的系统容量状态数较少，本文改进了传统 FD 法，对多容量状态的柔性直流输电系统进行了可靠性建模与评估。针对系统容量状态过多的情况，引入相关参数矩阵，避免了复杂状态空间图的构造，较传统 FD 法更简明快速。此外，本文进行了系统薄弱环节分析，为柔性直流输电系统的规划设计提供参考。

1　柔性直流输电系统构成及可靠性框图

柔性直流输电是基于电压源换流器的一种输电技术，而常规直流输电基于线路换相换流器。与常规直流相比，柔性直流用绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT)取代了晶闸管，换流器的结构有很大不同，且减少了提供无功补偿的交流侧电容器[3]。柔性直流输电系统通常由整流站、逆变站和直流输电线路三部分组成，主要设备有：断路器、变压器、相电抗器、换流器、交流滤波器、直流线路、直流电容、保护装置等。两端柔性直流输电系统的结构[1]如图 1 所示。

由于柔性直流输电系统的元件数目多且系统结构复杂，对其进行可靠性评估时，若直接对整个系统建立可靠性模型，过程将非常复杂。本文将系统划分为 7 个子系统，分别为：子系统 1，整流侧交流滤波器组；子系统 2，整流侧换流器、相电抗器、变压器、断路器；子系统 3，整流侧直流电容组；子系统 4，直流电缆；子系统 5，逆变侧直流电容组；子系统 6，逆变侧换流器、相电抗器、变压器、断路器；子系统 7，逆变侧交流滤波器组。图 2 为柔性直流输电系统的可靠性框图。



1-断路器；2-变压器；3-交流滤波器；4-相电抗器；

5-换流器；6-直流电容；7-直流线路/直流电缆

图 1 两端柔性直流输电系统结构示意图

Fig. 1 VSC-HVDC transmission system structure

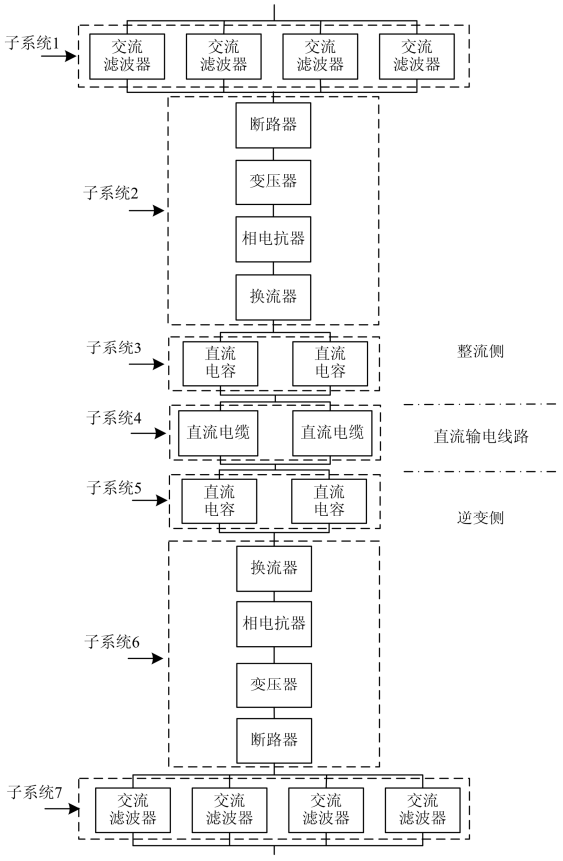


图 2 两端柔性直流输电系统的可靠性框图

Fig. 2 Reliability diagram of two-terminal VSC-HVDC system

2　改进频率及持续时间法

传统的 FD 法基于状态空间图，着眼于建立各子系统的状态空间图并获得相应的等效模型，通过组合各等效模型而建立整个高压直流输电系统的状态空间图。该方法求解精确，然而建立状态空间图的过程非常繁琐，为简化计算，考虑的系统容量状态数较少，通常用于简单直流输电系统的评估。当

系统状态数较多时，若沿用传统 FD 法对他们进行组合建模，要刻画多个状态间互相转移的情况，需构造繁杂的状态空间图。

针对多容量状态组合模型的求解，为避免构造状态图，本文引入系统参数矩阵，包括容量矩阵 $\boldsymbol{C}=[c_i]_{1\times m}$、容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}=[p_i]_{1\times m}$ 以及状态转移率矩阵 $\boldsymbol{R}=[\lambda_{ij}]_{m\times m}$，提出了基于参数矩阵化的 FD 法。

利用改进 FD 法进行系统组合时，首先构建原系统的容量矩阵、容量概率矩阵、状态转移率矩阵，按照组合系统的结构，将原系统等效模型进行组合，串联结构按照式(1)、式(3)、式(4)组合，并联结构按照式(2)~式(4)组合，便得到组合系统的可靠性模型。记原系统的容量矩阵分别为 $\boldsymbol{C_1}$、$\boldsymbol{C_2}$，容量概率矩阵分别为 $\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{P}_2$，状态转移率矩阵分别为 $\boldsymbol{R}_1$、$\boldsymbol{R}_2$；组合系统的容量矩阵、容量概率矩阵及状态转移率矩阵分别为 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$、$\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$、$\boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}$。

两系统串联合并后的传输容量由传输容量较小的系统确定，并联组合后容量为两系统容量之和。

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*}=\left\{c_{ij}\mid c_{ij}=\min\{a_i,b_j\}\right\};a_i\in\boldsymbol{C}_1,b_j\in\boldsymbol{C}_2 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*}=\left\{c_{ij}\mid c_{ij}=a_i+b_j\right\};a_i\in\boldsymbol{C}_1,b_j\in\boldsymbol{C}_2 \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{C_1}$、$\boldsymbol{C}_2$ 分别为子系统 1、子系统 2 的容量矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*}$ 为压缩前的系统容量矩阵；a_i 为矩阵 $\boldsymbol{C}_1$ 中的第 i 个元素；b_j 为矩阵 $\boldsymbol{C}_2$ 中的第 j 个元素。

若统计出矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*}$ 中的不同元素，并按照从大到小的顺序排列，可得到系统容量矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$。

根据各系统的容量概率矩阵可得到组合系统的容量概率矩阵，数学上，即为系统 1 的容量概率矩阵的转置与系统 2 的容量概率矩阵的乘积。

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}^{*}=\boldsymbol{P}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2 \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{P}_2$ 分别为子系统 1、子系统 2 的容量概率矩阵；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}^{*}$ 为压缩前系统容量概率矩阵，矩阵中的元素与压缩前系统容量矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*}$ 中的元素一一对应。

参照系统容量矩阵 $\boldsymbol{C_s}$，合并压缩前系统容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}^{*}$ 中处于相同容量状态的概率值，可得到系统容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$，维数与容量矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$ 相同，均为行向量，矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$ 中每一元素与矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$ 的元素具有概率-状态的一一对应关系。设 p_i 为矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 个元素，c_i 为矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$ 中对应位置的元素，则系统容量等于 c_i 的概率为 p_i。

若需要考虑共同模式故障，可在系统中串联一个虚拟元件来刻画两个元件同时故障的情况，问题退化为无共同模式故障时的系统组合，故此处只需讨论无共同模式故障发生的情况。

在不考虑共同模式故障的条件下，在同一时间内只可能有一个子系统的容量状态发生转移，则组合系统的状态转移率矩阵为

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}=\left\{\lambda_{ij}\mid\lambda_{ij}=\frac{\sum\limits_{c_{ms}=d_i,c_{ns}=d_j}\gamma_{mn}p_{ms}+\sum\limits_{c_{wr}=d_i,c_{wt}=d_j}\eta_{rt}p_{wr}}{\sum\limits_{c_{kl}=d_i}p_{kl}}\right\}; \tag{4}$$

$$p_{kl}、p_{ms}、p_{wr}\in\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}^{*},c_{kl}、c_{ms}、c_{ns}、c_{wr}、c_{wt}\in\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*},$$
$$d_i、d_j\in\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}},\gamma_{mn}\in\boldsymbol{R}_1,\eta_{rt}\in\boldsymbol{R}_2$$

式中：$\boldsymbol{R}_1$、$\boldsymbol{R}_2$、$\boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}$ 分别为子系统 1、子系统 2、组合系统的状态转移率矩阵；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}^{*}$ 为压缩前的组合系统容量概率矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*}$ 为压缩前的组合系统容量矩阵；$\boldsymbol{C_s}$ 为组合系统容量矩阵；p_{kl}、p_{ms}、p_{wr} 为矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}^{*}$ 中的元素，下标表示元素所在行与列；c_{kl}、c_{ms}、c_{ns}、c_{wr}、c_{wt} 为矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}^{*}$ 中的元素，下标表示元素所在行与列；d_i、d_j 分别为矩阵 $\boldsymbol{C_s}$ 中的第 i 个、第 j 个元素；γ_{mn} 为矩阵 $\boldsymbol{R}_1$ 中的第 m 行、第 n 列元素；η_{rt} 为矩阵 $\boldsymbol{R_2}$ 中的第 r 行、第 t 列元素。

3 基于改进 FD 法的柔性直流输电系统可靠性评估

结合柔性直流输电系统的可靠性框图，可利用改进 FD 法建立系统模型、评估系统可靠性。具体步骤为：首先构建各元件的参数矩阵，其次按照子系统中元件的连接方式，利用改进 FD 法将元件进行组合，得出各子系统的等效模型，最后再将子系统逐一进行组合，得到整个系统的等效模型，并计算系统的可靠性指标。图 3 为利用改进 FD 法评估柔性直流输电系统可靠性的流程图。

图 3 高压直流输电可靠性评估流程图

Fig. 3 Flowchart of reliability evaluation of VSC-HVDC transmission system

3.1 系统可靠性建模

利用改进 FD 法进行系统可靠性建模分析，首先需构建各元件的参数矩阵。元件容量矩阵 $\boldsymbol{C}$、状态转移率矩阵 $\boldsymbol{R}$ 可根据已知参数构造，元件的容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}$ 则通过求解如下方程得到[16]。

$$\begin{cases}\boldsymbol{PR}=\boldsymbol{0}\\ \sum\limits_{p_i\in\boldsymbol{P}}p_i=1\end{cases}\tag{5}$$

式中，p_i 为元件处在状态 i 的稳态概率，即元件容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}$ 中的第 i 个元素。

以断路器为例，已知断路器有运行及停运两种状态，且其故障率与修复率分别为 λ，μ。则断路器的容量矩阵 $\boldsymbol{C}$、状态转移率矩阵 $\boldsymbol{R}$ 及容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}$ 分别为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}&=[1\quad 0]\\ \boldsymbol{R}&=\begin{bmatrix}-\lambda & \lambda\\ \mu & -\mu\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{P}&=\left[\frac{\mu}{\lambda+\mu}\quad\frac{\lambda}{\lambda+\mu}\right]\end{aligned}\tag{6}$$

其次建立子系统的可靠性模型。按照各子系统的结构，将各元件等效模型一一进行组合，串联结构按照式(1)、式(3)、式(4)组合，并联结构按照式(2)~式(4)组合，得到各子系统的可靠性模型；再按照系统可靠性框图，将子系统等效模型进行串并联组合，分别建立整流侧和逆变侧的可靠性模型。

最后，将整流侧和逆变侧的可靠性模型按照式(1)、式(3)、式(4)进行串联组合，得到整个输电系统的可靠性模型，模型中的参数包括容量矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$、容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$、状态转移率矩阵 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}$，利用系统参数矩阵，按式(7)、式(8)分别求取系统各容量状态的频率 f_i 及持续时间 T_i。

$$f_i=p_i\sum_{j\neq i}\lambda_{ij}\tag{7}$$

$$T_i=\frac{p_i}{f_i}\tag{8}$$

式中：p_i 为系统处于状态 i 的稳态概率，即系统容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 个元素；λ_{ij} 为系统从状态 i 到 j 的转移率，即系统状态转移率矩阵 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 行第 j 列元素。

3.2 系统可靠性指标

利用直流输电系统各容量状态的概率、频率及持续时间，可计算得到系统可靠性指标。高压直流输电系统的可靠性指标[16]主要有：

(1) 总等值停运时间 *TEOT*

$$TEOT=E\left(\sum_i EOT_i\right)\tag{9}$$

式中，EOT_i 是一年中第 i 次停运的等值停运时间，它是实际停运时间 T_i 按停运容量在系统额定容量中所占比例进行折算后的数值，即

$$EOT_i=T_i\left(1-c_i\right)\tag{10}$$

式中：c_i 为系统处在状态 i 时的输送容量标幺值，即系统容量矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 个元素；T_i 为该状态下的持续时间，由式(8)计算得到。

(2) 能量可用率 *EA*

$$EA=\frac{E(\text{全年能输送的电能})}{8760\times\text{系统额定容量}}\times100\%=\sum_i c_i p_i\tag{11}$$

式中：c_i 为系统处在状态 i 时的输送容量标幺值，即系统容量矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 个元素；p_i 为系统处在状态 i 的稳态概率，即系统容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 个元素。

(3) 能量不可用率 *EU*

$$EU=100\%-EA\tag{12}$$

(4) 系统期望输送容量 *EC*

$$EC=C\times\sum_i c_i p_i=C\times EA\tag{13}$$

式中：c_i 为系统处在状态 i 时的输送容量标幺值，即系统容量矩阵 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 个元素；p_i 为系统处在状态 i 的稳态概率，即系统容量概率矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{s}}$ 中的第 i 个元素；C 为系统基准容量。

4 算例分析

本文研究一个两端柔性直流输电系统，直流侧接线方式为双极两端中性点接地方式，输电线路长 100 km，线路额定容量为 1 000 MW，换流站的额定容量为 1 000 MW，并设系统基准容量为 1 000 MW，系统各元件的参数[11]见表 1。其中，子系统 1(7)中有 4 组交流滤波器并联放置，其容量状态与元件的投入关系见表 2；子系统 3(5)由两组直流电容并联构成，其容量状态与元件的投入关系[11]见表 3。

4.1 基本情况计算

结合系统元件原始参数，利用上述方法评估柔性直流输电系统的可靠性，可计算得出系统处于不

表 1 柔性直流输电系统元件参数

Table 1 Data of the components of VSC-HVDC system

元件	故障率/(*f*/y)	修复时间/h
断路器	0.001	40
变压器	0.05	1 000
相电抗器	0.05	300
交流滤波器	0.54	6
直流电缆/km	0.000 03	5
直流电容	0.001 5	10
换流器	0.5	4

表 2 交流滤波器的等效容量

Table 2 Equivalent capacity of AC filters

交流滤波器工作方式	容量/p.u.
四组均正常运行	1
停运一组	0.9
停运两组	0.6
停运三组	0.3
其他	0

表 3 直流电容的等效容量

Table 3 Equivalent capacity of DC capacitors

直流滤波器工作方式	容量/p.u.
两组均正常运行	1
停运一组	0.75
其他	0

同容量状态的稳态概率，见表 4。还可以计算出系统的总等值停运时间、能量可用率、能量不可用率、系统期望输送容量等可靠性指标，见表 5。

表 4 柔性直流输电系统容量概率表

Table 4 Capacity-probability table of VSC-HVDC system

容量/p.u.	概率	
	改进 FD 法	传统 FD 法
1	0.981 594	0.981 672
0.9	0.002 907	0.002 907
0.75	6.743 e-06	6.744 e-06
0.6	1.614 e-06	1.614 e-06
0.5	0.000 337	0.000 337
0.3	3.981 e-10	3.981 e-10
0	0.015 154	0.015 075

表 5 系统可靠性指标

Table 5 Reliability indices of VSC-HVDC system

TEOT/(h/y)	*EA*/%	*EU*/%	*EC*/MW
136.789 831	0.984 385	0.015 615	984. 384 722

由表 4 可看出，系统处在额定容量状态的概率最高，达到 98.16%，其次为完全停运状态下，概率约为 1.52%，再次为运行在 90%容量状态及 50%容量状态下，其他容量状态的概率则非常小。

表 4 中同时示出利用传统 FD 法评估直流输电系统可靠性的计算结果，比较两种方法的结果可知，最大偏差为 0.04%，可见，改进 FD 法是一种有效继承传统 FD 方法的解析方法，保证了计算的精度。利用Matlab进行编程计算，改进FD法耗时0.029 209 s，传统 FD 法的计算时间为 0.043 436 s。此外，在运用传统 FD 法时，需要前期构造各组合系统的状态空间图来分析各状态间的转移情况，耗时很多。随着系统状态数的增加，所构造的状态空间图的规模会增大，构造过程非常复杂且易出错，本文所提出的改进 FD 法引入参数矩阵，通过矩阵运算实现元件组合、子系统组合，不需要构造状态空间图，可以适应于更复杂的结构，且易于编程实现，极大地减小了工作量，从而提高计算求解速度。

4.2 元件可靠性参数灵敏度分析

为分析各元件参数的变化对系统可靠性指标的影响强弱，可进行参数灵敏度分析。当变量间函数关系不明确时，常采用一种简化的方法：假定其他元件故障率不变，所研究的元件故障率增加 1%时，分析系统可靠性指标的相对变化量。本文采用该简化方法分别对变压器、换流器、直流开关等元件的故障率进行了灵敏度分析，计算结果见表 6。

表 6 柔性直流输电系统参数灵敏度

Table 6 Parameter sensitivity of VSC-HVDC system

元件	系统能量不可用率的相对变化量/%
断路器	0.000 572
变压器	0.715 485
相电抗器	0.215 466
交流滤波器	0.018 655
直流电缆	0.010 789
直流电容	0.000 108
换流器	0.028 729

分析表 6 数据可知，变压器故障对系统可靠性指标的影响最大。结合元件原始参数分析，变压器的故障率较大，且修复时间最长，因此该元件故障对系统可靠性影响较大。

若系统配置有备用变压器，则在原变压器故障时，可将备用元件接入，与变压器的修复时间相比，其安装时间很短，因此，变压器故障所引起的系统停运时间将大大缩短，从而提高系统的可靠性。在本例中，假设备用变压器安装时间为 48 h[11]，系统的能量不可利用率为 0.004 896，与原系统相比减小了 68.65%。可见，增设备用变压器可大幅提高柔性直流输电系统的可靠性。

5 结论

本文提出了基于参数矩阵化的改进 FD 法，并运用改进 FD 法对双极两端柔性直流输电系统进行了可靠性建模与评估。将相关参数矩阵化，构建容量矩阵、容量概率矩阵、状态转移率矩阵，与传统 FD 法相比，避免了建立状态空间图，从而使多容量状态系统的组合计算简明。计算结果表明，改进 FD 法克服了传统频率及持续时间法实施过程繁琐的弊端，提高了计算速度，并有效继承了传统方法的理论基础，保证了计算的精度。此外，通过参数灵敏度分析，研究了元件故障率变化对系统可靠性

的影响，分析知变压器故障率变化对柔性直流输电系统可靠性指标的影响最大，可通过配置备用变压器来提高系统的可靠性。

应用本文所提模型可以进一步研究多端柔性直流输电系统的可靠性，有关工作正在进行中。

参考文献

[1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1-71.

[2] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

[3] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[4] 鲍正杰, 李生虎. 基于 VSC-HVDC 有功支援和自适应低频减载的区域电网频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 32-37.
BAO Zhengjie, LI Shenghu. Frequency control for regional system based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 32-37.

[5] 饶成诚, 王海云, 王维庆, 等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 1-7.
RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 1-7.

[6] 刘亚磊, 李兴源, 曾琦, 等. 多端多电平柔性直流系统在海上风电场中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 9-14.
LIU Yalei, LI Xingyuan, ZENG Qi, et al. VSC-MTDC system based on MMC for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 9-14.

[7] 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.

[8] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.
XIE Shaoyu, WANG Xiuli, WANG Xifan. Reliability estimation of AC/DC hybrid power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 10-16.

[9] 丁明, 毕锐, 王京景. 基于 FD 法和模型组合的柔性直流输电可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 33-37.
DING Ming, BI Rui, WANG Jingjing. FD method and combined model for reliability assessment of HVDC flexible[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 33-37.

[10] 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): 571-577.

[11] ZADKHAST S, FOTUHI-FIRUZABAD M, AMINIFAR F, et al. Reliability evaluation of an HVDC transmission system tapped by a VSC station[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1962-1970.

[12] BEDDARD A, BARNES M. Availability analysis of VSC-HVDC schemes for offshore windfarms[C] // 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Bristol, United Kingdom, 2012: 1-6.

[13] WANG Sheng, FENG Chunmei, WEN An, et al. Cost and benefit analysis of VSC-HVDC schemes for offshore wind power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 36-43.

[14] 丁明, 王京景, 宋倩. 基于 k/n(G)模型的柔性直流输电系统换流阀可靠性建模与冗余性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 32-36.
DING Ming, WANG Jingjing, SONG Qian. Reliability modeling and redundancy analysis of converter valves for VSC-HVDC power transmission system based-on k-out-of-n: G model[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 32-36.

[15] GUO Jingli, WANG Xiuli, BIE Zhaohong, et al. Reliability modeling and evaluation of VSC-HVDC transmission systems[C] // PES General Meeting| Conference & Exposition, 2014 IEEE, Washington DC, USA, 2014: 1-5.

[16] 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.

收稿日期：2015-02-23；　修回日期：2015-06-06

作者简介：

郭静丽(1989-)，女，博士研究生，研究方向为柔性直流输电系统可靠性；E-mail: guojingli.xjtu@gmail.com

王秀丽(1961-)，女，博士，教授，博士生导师，研究方向为电力系统可靠性、电力系统规划和电力市场；

侯雨伸(1988-)，男，博士研究生，研究方向为电力系统可靠性。

(编辑　葛艳娜)