

DOI: 10.7667/PSPC170636

## 基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析

马河涛<sup>1</sup>, 黄守道<sup>1</sup>, 饶宏<sup>2</sup>, 周保荣<sup>2</sup>, 荣飞<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 直流输电技术国家重点实验室, 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510620)

**摘要:** 概述柔性直流输电技术(Voltage Sourced Converters High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)的研究现状, 从模块化多电平换流器(Modular Multi-level Converter, MMC)的子模块(SM)冗余配置方法、系统拓扑结构、控制保护以及故障分析等方面进行阐述。根据实际情况说明该研究的必要性。介绍并推导马尔可夫过程, 结合马尔可夫过程针对某直流输电工程的主接线方式提出一种可靠性分析模型。最后, 通过在 Matlab 中编写程序实现了对所建模型的计算。所得结果和ABB公司的统计资料进行对比, 验证了所提出的方法适用于柔性直流输电系统可靠性分析。

**关键词:** 柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 马尔可夫过程; 备用策略; 可靠性

### Reliability analysis of VSC-HVDC system based on Markov process

MA Hetao<sup>1</sup>, HUANG Shoudao<sup>1</sup>, RAO Hong<sup>2</sup>, ZHOU Baorong<sup>2</sup>, RONG Fei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** This paper summarizes the status quo of studying VSC-HVDC, and discusses the redundant configuration methods of the Modular Multi-level Converter (MMC)'s Sub-Module (SM), and topological structure, control and protection, fault analysis, etc. The necessity of this study is justifiable on the grounds of realities. Moreover, this paper introduces and deduces the Markov process and applies it to propose a reliability analysis model for the main wiring diagram of a HVDC transmission project. Finally, the calculation of the model is carried out by the program written in Matlab. By comparing the results with the statistical data of ABB, it testifies that the method proposed is suitable for the reliability analysis of VSC-HVDC system.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901001).

**Key words:** VSC-HVDC; modular multi-level converter; Markov process; redundant strategies; reliability

## 0 引言

对可再生能源进行合理的开发利用能有效缓解能源短缺和环境污染, 近几年光伏发电和风力发电得到了快速开发与利用。截至2015年中旬, 中国并网风电装机容量累计达到129 GW, 居世界风电排名首位, 但由于风能资源分布偏远, 这些风力发电基地大都远离负荷中心, 所以大规模可再生能源远距离输送成为目前研究的热点问题<sup>[1-2]</sup>。

随着电力电子器件和控制技术的迅速发展, 使用IGBT等全控型电力电子器件的直流输电技术越

来越多地受到关注, 柔性直流输电是其中典型的代表。与传统的换相高压直流输电(Line-Commutated Converter High Voltage DC, LCC-HVDC)相比, 柔性直流输电是一种先进的输配电解决方案, 既可以实现有功功率和无功功率的独立、快速控制, 又能向无源网络系统供电。在潮流发生反转时, 直流电流方向反转而直流电压极性保持不变, 容易构建多端柔性直流输电(Multi-Terminal based on Voltage Source Converter, VSC-MTDC)系统。

由于柔性直流输电系统具有良好的特性, 此技术可广泛用于交流电网同步和非同步互联、风电等清洁能源的接入、向孤立无源负荷供电(如海上钻井平台)、电力交易、构筑大都市直流配电网以及改善

电能质量等场合, 具有广阔的应用前景。

德国学者 Marquardt R. 及其合作者提出了基于级联结构的模块组合多电平变换器的拓扑, 并分析了其基本工作原理<sup>[3-5]</sup>。2010年, 世界上第一条商业应用 MMC 的柔性直流输电线路 Trans Bay Cable 在 Pittsburg 和 San Francisco 之间实现了海底直流电缆联网, 目的在于缓解输电走廊紧张对电网扩建的限制, 消除输电瓶颈, 增强系统安全性和可靠性。随后世界上先后有多条应用 MMC 的柔性直流输电工程投入使用, 国内外学者对 MMC 的研究也越来越多。这些研究有的是考虑模块化多电平换流器子模块的冗余配置, 并给出了较为具体的配置方案<sup>[6-7]</sup>, 有的是分析整体的拓扑结构并提出改进措施<sup>[8-9]</sup>, 文献[10-12]对电力系统和微网的可靠性进行分析, 文献[13-14]对 MMC 多端柔性直流输电控制保护系统进行了研究, 文献[15-16]对基于 MMC 的柔性直流系统故障情况作出分析。

综上, 对于应用 MMC 的柔性直流输电系统的整体可靠性研究较少, 本文提出一种基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析方法。本文首先介绍了某柔性直流输电工程的主接线图及 MMC 结构, 其次推导了马尔可夫过程, 再次对系统中单个部件及整体系统建立可靠性模型。最后在 Matlab 中编写程序完成对所建模型的求解计算, 得出多个系统可靠性指标, 通过和 ABB 公司的资料对比验证本文所提出算法的有效性。

## 1 系统结构

某柔性直流输电工程的主接线图如图 1<sup>[17-18]</sup>, 主要的设备包括: 交流断路器、联结变压器、接地电抗器、MMC 换流器、直流输电线路、控制保护系统、冷却设备和极设备等。

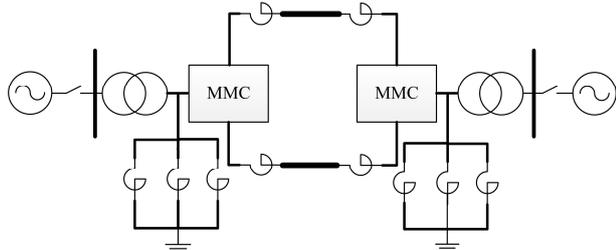


图 1 柔性直流输电工程主接线

Fig. 1 Main electrical connection of flexible HVDC project

MMC 的结构图如图 2, 每个桥臂由若干个子模块(SM)和一个电抗器组成, 子模块方便安装、利于控制, 非常适合大功率换流器。子模块的结构可以是半桥型、双箝位型或者全桥型。目前的工程中在

可靠性达到要求的情况下, 为提高经济性大都使用半桥结构, 使用全桥结构具有很强的故障穿越能力, 只是在同等级电压下, 器件投入要多一倍。

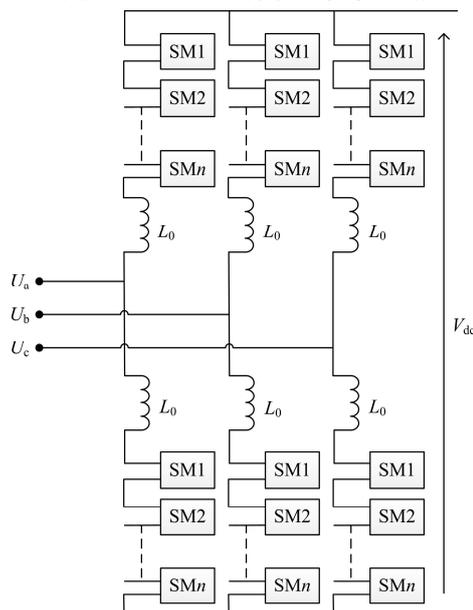


图 2 MMC 结构

Fig. 2 Configuration of MMC

## 2 马尔可夫过程

马尔可夫过程中, 在时间  $t_n$  时的随机变量概率与  $t_{n-1}$  时随机变量的取值有关, 而与  $t_{n-1}$  以前的过程的历史无关, 即“无记忆性”。并且马尔可夫过程的研究对象是可修复系统。分析工程系统可靠性的一个基本假设就是发生事件的时间服从指数分布, 在马尔可夫过程中表现为转移概率是常数, 即齐次马尔可夫过程。随机过程是连续时间和离散状态空间的齐次马尔可夫过程<sup>[19]</sup>:

$$P\{X(t+h) = j | X(t) = i\} = P\{X(h) = j | X(0) = i\} = p_{ij}(h) \quad (1)$$

且  $p_{ij}$  与  $t$  无关, 只与时间差值  $h$  有关。对于微小的  $h = \Delta t$  时

$$P\{X(t + \Delta t) = j | X(t) = i\} = p_{ij}(\Delta t) \approx q_{ij}\Delta t \quad (2)$$

$$P\{X(t + \Delta t) = i | X(t) = i\} = p_{ii}(\Delta t) \approx 1 - q_{ii}\Delta t \quad (3)$$

式中:  $p_{ij}(\Delta t)$  为已知过程在间隔开始处于状态  $i$  的条件下在  $\Delta t$  期间内转移到状态  $j$  的概率;  $p_{ii}(\Delta t)$  为已知过程在间隔开始处于状态  $i$  的条件下在  $\Delta t$  期间内状态不发生变化的概率;  $q_{ij}$  和  $q_{ii}$  为转移密度。显然:

$$p_{ii}(\Delta t) + \sum_{j \neq i} p_{ij}(\Delta t) = 1 \quad (4)$$

转移概率可形成矩阵, 记为

$$P(\Delta t) = \begin{bmatrix} p_{11}\Delta t & p_{12}\Delta t & \cdots & p_{1n}\Delta t \\ p_{21}\Delta t & p_{22}\Delta t & \cdots & p_{2n}\Delta t \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1}\Delta t & p_{n2}\Delta t & \cdots & p_{nn}\Delta t \end{bmatrix} \quad (5)$$

定义转移密度矩阵为

$$A = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\Delta t)}{\Delta t} = \begin{bmatrix} -q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & -q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & -q_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $n$  为状态总数； $I$  为单位矩阵。

在实际的工程应用中一般希望得到的是系统在平稳运行时处于各种状态的概率，只需求解以下方程：

$$\begin{cases} PA = 0 \\ \sum_{j=1}^n p_j = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中， $P$  是由各平稳状态概率  $p_j$  组成的矩阵。由此得到系统处于各种状态的概率，进而求出系统的其他可靠性指标。

电力系统一般是作为可修复系统来处理的，柔性直流输电系统亦可。输电系统的老化过程是随机的，一般是从运行状态到失效状态，对故障部件修复后恢复到运行状态，如此循环往复。马尔可夫过程研究的系统和柔性直流输电系统投入使用后达到平稳运行状态十分相似，此时系统中各个部件的故障率、修复率和安装率都为常数，且各部件的寿命和维修时间均服从指数分布，故能够应用马尔可夫过程对柔性直流输电系统的可靠性进行分析。

### 3 可靠性模型

在建立柔性直流输电系统基于马尔可夫过程的模型之前，首先做出如下假设：

- (1) 各种状态之间转移时间极短，因此可以忽略同一时间发生两次以上的状态转移；
- (2) 故障部件经过修复(更换)后和新部件性能完全相同；
- (3) 系统(部件)各种状态之间的转换无记忆性。

#### 3.1 部件的可靠性模型

柔性直流输电系统中各个重要部件由于结构复杂、维修难度大且一般需要返厂，因此在发生故障后都需要经过长时间的修理才能再次安装投入使用。如果各个重要部件都是按照运行标准单一配备，一旦发生故障，系统将不可避免地停运较长时间，会造成巨大的经济损失。本文根据实际应用中常用的备用策略结合马尔可夫过程提出以下三种可靠性模型。

间，会造成巨大的经济损失。本文根据实际应用中常用的备用策略结合马尔可夫过程提出以下三种可靠性模型。

##### 3.1.1 无备用部件的可靠性模型

当不考虑备用部件时，单个部件的运行、停运、安装的随机过程可用图 3 的状态转移来表示。 $\lambda$  为部件的故障率(次/a)， $\mu$  为部件的修复率(次/a)， $\gamma$  为部件的安装率(次/a)。

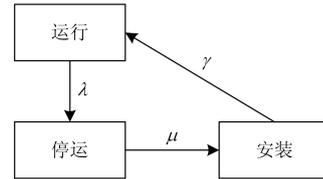


图 3 单个部件无备用状态转移图

Fig. 3 State transferring diagram of single component without standby

其中转移概率矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 \\ 0 & -\mu & \mu \\ \gamma & 0 & \gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

然后将  $A$  代入式(7)进行求解。

##### 3.1.2 考虑冷备用的可靠性模型

当施行冷备用的部件发生故障之后，可由现场维修人员通过一定的操作进行更换，然后将故障件返厂或就地进行维修，此过程明显缩短系统的停运时间，有效提高系统的可靠性。通过在图 3 的基础上添加与冷备用部件相关的状态可得到图 4，为只有 1 台冷备用部件时的状态转移图。其中状态 1 表示 1 台运行，1 台备用，无故障件。

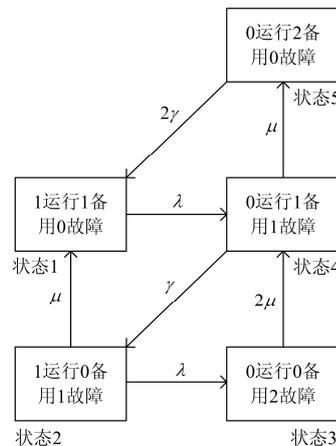


图 4 单个部件冷备用状态转移图

Fig. 4 State transferring diagram of single component cold standby

由图 4 可列写转移概率矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & 0 & \lambda & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\mu & 2\mu & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & -(\mu + \lambda) & \mu \\ 2\gamma & 0 & 0 & 0 & -2\gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

然后将  $A$  代入式(7)进行求解。

如果冷备用部件多于 1 台, 则可以在此基础上增加相应的状态, 重复求解过程。

### 3.1.3 考虑热备用的可靠性模型

当采用热备用策略时, 所有部件(包括备用件和原件)同时投入运行, 只有在运行部件数量小于能够维持系统工作所需的最小数量时, 系统才会停运。同样在图 3 的基础上添加与热备用部件的相关状态, 可得到图 5, 当只有 1 台热备用部件时的状态转移图。其中状态 6 表示 1 台运行, 1 台修好待安装, 无故障件。

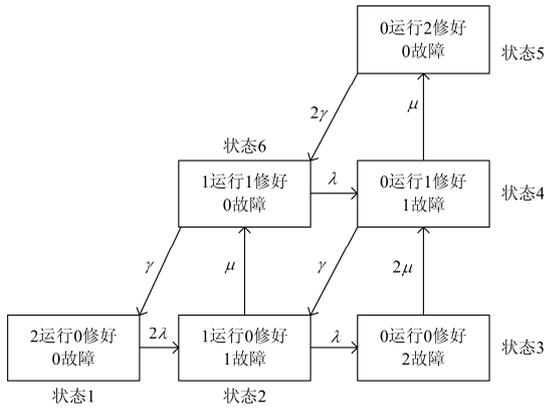


图 5 单个部件热备用状态转移图

Fig. 5 State transferring diagram of single component hot standby

由图 5 可列写转移概率矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -2\lambda & 2\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\lambda + \mu) & \lambda & 0 & 0 & \mu \\ 0 & 0 & -2\mu & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & -(\mu + \gamma) & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\gamma & 2\gamma \\ \gamma & 0 & 0 & \lambda & 0 & -(\lambda + \gamma) \end{bmatrix} \quad (10)$$

然后将  $A$  代入式(7)进行求解。

如果热备用部件多于 1 台, 则可以在此基础上增加相应的状态, 重复求解过程。

### 3.2 系统的整体可靠性模型

在实际运行过程中, 柔性直流输电系统中只要

有一个重要部件发生故障, 则系统整体将发生强迫停运, 即处于失效状态。综合考虑系统所有部件可将故障部位分为交流断路器、联结变压器、接地电抗、MMC、直流输电线路、冷却设备、控制保护系统和极设备等, 对于其他故障导致的系统停运因发生概率一般很低, 本文不作考虑。由前面的分析得到柔性直流输电系统的全态模型, 如图 6 所示。

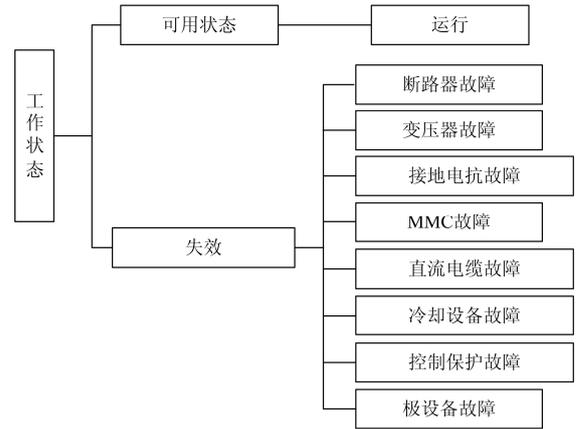


图 6 系统全态模型

Fig. 6 System full-state model

### 3.3 状态合并

为了方便系统整体的可靠性模型建立, 简化计算, 使各个变量的含义更加明确, 需要将图 3、图 4 和图 5 中的相关状态进行合并, 简化为运行和失效两种状态, 得到图 7。简化以后可使系统整体模型更加直观。

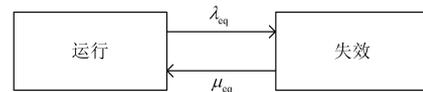


图 7 等效状态合并图

Fig. 7 Equivalent state merging graph

图中的  $\lambda_{eq}$  和  $\mu_{eq}$  分别为状态合并后部件的等效故障率和等效修复率, 它们可以分别按式(11)和式(12)进行计算。

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum_{i \in I} \left( p_i \sum_{j \in J} \lambda_{ij} \right)}{\sum_{i \in I} (p_i)} \quad (11)$$

$$\mu_{eq} = \frac{\sum_{j \in J} \left( p_j \sum_{i \in I} \gamma_{ji} \right)}{\sum_{j \in J} (p_j)} \quad (12)$$

式中:  $I$  为所有运行状态的集合;  $J$  为所有失效状态的集合。

根据全态模型,并结合单个部件状态合并后的故障率和修复率,可得到整个柔性直流输电系统转移概率矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^8 \lambda_i & \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_8 \\ \mu_1 & -\mu_1 & 0 & \cdots & \vdots \\ \mu_2 & 0 & -\mu_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \mu_8 & \cdots & \cdots & 0 & -\mu_8 \end{bmatrix} \quad (13)$$

矩阵中 $\lambda_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ )和 $\mu_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ )分别为各部件进行状态合并后的等效故障率和等效修复率。

然后将 $A$ 代入式(7)进行求解,可得出系统在稳定状态下处于运行状态的概率。进一步可以求解其他可靠性指标。

#### 4 算例分析

MMC型的柔性直流输电工程主接线和两电平、三电平的柔性直流输电工程主接线相似,主要的不同在换流阀,如果将换流阀作为一个子系统,则基于MMC的柔直和ABB柔直可靠性的计算方法类似,因此,在不考虑备用(冗余)情况下换流阀的可靠性相近,整体可靠性具有可比性。ABB公司的柔性直流输电工程投入运行时间比较长,表1列出了ABB公司在无备用情况下的统计数据资料<sup>[20]</sup>。本文的计算结果将与之进行对比。

表1 ABB 柔性直流输电工程统计指标

Table 1 Statistic indices of ABB VSC-HVDC transmission project

可用率	强迫停运率	强迫停运造成的不可用率
大于 99%	每年 1~2 次	0.3%~0.5%

表2列出了柔性直流输电中各部件的原始可靠性数据<sup>[21]</sup>。根据第2节建立的可靠性模型,在Matlab中编写求解程序,计算所需的可靠性指标。

表2 系统各部件可靠性参数

Table 2 System components reliability parameters

部件	故障率/(次/a)	修复率/(次/a)	安装率/(次/a)
交流断路器	0.045 0	175.2	8 760
变压器	0.130 8	146	2 190
接地电抗	0.316 6	350.4	4 380
MMC	0.081 3	36.5	2 920
输电线路	0.661 3	988.8	5 840
控制保护	1.309 5	1 095.0	8 760
冷却设备	0.435 2	175.2	2 920
极设备	0.425 6	461.1	4 380

#### 4.1 不考虑备用部件的可靠性分析

为了能够对考虑备用和不考虑备用情况下的可靠性进行相应指标对比,突出备用部件在柔性直流输电系统中的作用,本文首先计算了不考虑备用部件的可靠性指标,如表3所示。根据图1的结构,柔性直流输电系统的送端结构和受端结构完全相同,为简化计算,方便理解数据的含义,故只考虑单边的可靠性,在实际工程中可按照双边考虑。

表3 不考虑备用部件时的可靠性指标

Table 3 Reliability indices of system without redundant components

可用率	平均持续故障时间/a	平均无故障工作时间/a	故障率/(次/a)
0.989 8	0.003 0	0.296 6	3.405 3

#### 4.2 考虑部件冷备用下的可靠性分析

表4列出了只考虑部件的冷备用情况下的可靠性指标,仅仅对高压设备:交流断路器和变压器考虑冷备用的情况进行了计算。由表中数据可看出,系统可用率提高,平均持续故障时间降低,根据式(11)算出冷备用时故障率不变,故平均无故障时间几乎不变。

表4 考虑冷备用时的可靠性指标

Table 4 Reliability indices of system with cold redundant components

备用情况	可用率	平均持续故障时间/a	平均无故障工作时间/a	故障率/(次/a)
冷备用 1 台交流断路器	0.990 1	0.002 9	0.296 6	3.403 5
冷备用 1 台变压器	0.990 7	0.002 8	0.296 6	3.403 5

#### 4.3 考虑部件热备用下的可靠性分析

表5列出了只考虑部件的热备用情况下的可靠性指标,仅仅对低压设备:控制保护系统和冷却设备考虑热备用的情况进行了计算。由表中数据可看出,系统可用率和平均无故障工作时间提高,故障率和平均持续故障时间降低。元件可用率计算公式为: $\mu_{eq}/(\lambda_{eq}+\mu_{eq})$ ,热备用情况下,控制保护的 $\lambda_{eq}$ 大幅降低,但柔直系统的可靠性不仅与 $\lambda_{eq}$ 有关,还与 $\mu_{eq}$ 有关。由于热备用后,修复率大幅提高,因此在热备用以后可靠性提高不明显。但是,热备用后, $\lambda_{eq}$ 大幅度降低,会减少停电次数,可以大幅度降低因故障停电带来的经济损失。

通过比较表3和表1可以看出,本文的计算结果和实际情况较吻合。由于本文在有备用和无备用两种情况下都考虑了故障率、维修率和安装率对系统可靠性的影响,计算结果具有更高的精度。

表 5 考虑热备用时的可靠性指标  
Table 5 Reliability indices of system with hot  
redundant components

备用情况	可用率	平均持续故障 时间/a	平均无故障 工作时间/a	故障率/ (次/a)
热备用 1 台 控制保护	0.991 7	0.002 9	0.483 4	2.099 3
热备用 1 台 冷却设备	0.993 0	0.002 4	0.338 8	2.972 4

## 5 总结

本文结合马尔可夫过程提出一种柔性直流输电工程可靠性评估方法, 并根据实际工作情况分别考虑了冷备用和热备用对可靠性的影响。通过和 ABB 公司已经公布的统计数据比较, 验证了本文所提出方法的有效性。算例分析得出冷备用可明显降低系统平均持续故障时间, 热备用可明显降低系统故障率, 工程实际中可根据具体情况并综合经济性和可靠性合理选择备用策略。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 范心明, 管霖, 夏成军, 等. 多电平柔性直流输电在风电接入中的应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 497-504.  
FAN Xinming, GUAN Lin, XIA Chengjun, et al. Multilevel VSC-HVDC applied in wind power integration[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 497-504.
- [3] MARQUARDT R, LESNICAR A, HILDINGER J. Modulares Stromrichterkonzept für Netzkupplungsanwendung bei hohen Spannungen[C] // ETG-Fachtagung, 2002, Bad Nauheim, Germany: 1-7.
- [4] LESNICAR A, MARQUARDT R. A new modular voltage source inverter topology[C] // European Conference on Power Electronics and Applications, 2003, Toulouse, France: 1-10.
- [5] MARQUARDT R, LESNICAR A. New concept for high voltage-modular multilevel converter[C] // Power Electronics Specialists Conference, 2004, Aachen, Germany: 1-5.
- [6] 王秀丽, 郭静丽, 庞辉, 等. 模块化多电平换流器的结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1908-1914.  
WANG Xiuli, GUO Jingli, PANG Hui, et al. Structural reliability analysis of modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1908-1914.
- [7] 王朝亮, 赵成勇, 许建中. 模块化多电平换流器的子模块冗余配置计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 103-107.  
WANG Zhaoliang, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A method for calculating sub-module redundancy configurations in modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 103-107.
- [8] 张建坡, 赵成勇, 孙海峰, 等. 模块化多电平换流器改进拓扑结构及其应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 173-179.  
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Haifeng, et al. Improved topology of modular multilevel converter and application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 173-179.
- [9] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.  
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [10] 葛少云, 季时宇, 刘洪, 等. 基于多层次协同分析的高中压配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 172-181.  
GE Shaoyun, JI Shiyu, LIU Hong, et al. Reliability assessment of high-medium voltage level distribution networks based on cooperative analysis of multi-level networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 172-181.
- [11] 王杨, 谢开贵, 胡博, 等. 基于时序模拟的离网型微网可靠性分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 206-211.  
WANG Yang, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Reliability analysis of islanded microgrid based on sequential simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 206-211.
- [12] 刘晟, 廖志伟, 刘利平, 等. 计及可靠性理论的电力系统脆弱线路评估[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 16-21, 27.  
LIU Sheng, LIAO Zhiwei, LIU Liping, et al. Vulnerability assessment for lines in power system based on reliability theory[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 16-21, 27.
- [13] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.

- FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.
- [14] 钱甜甜, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于 PCHD 模型的 VSC-HVDC 的无源控制及滑模辅助改进控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 138-144.
- QIAN Tiantian, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Reliability analysis of islanded microgrid based on sequential simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 138-144.
- [15] 高强, 吴华华, 陈楚楚, 等. 舟山多端柔性直流系统环流抑制和交流故障穿越能力分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 62-67.
- GAO Qiang, WU Huahua, CHEN Chuchu, et al. Circulating current suppressing and ac faults ride-through capability analysis of Zhoushan MMC-MTDC system[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 62-67.
- [16] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.
- LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.
- [17] WESTERWELLER T, FRIEDRICH K, ARMONIES U, et al. Trans bay cable world's first HVDC system using multi-level voltage sourced converter[C] // Proceedings of CIGRE, 2010, Paris, France: 1-6.
- [18] Babcock, Brown. Trans Bay Cable Project[R]. Presentation, 2004.
- [19] 程林, 何剑. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [20] 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.
- [21] 孙宇斌, 刘文霞, 裘剑明, 等. 计及备用元件的柔性直流输电系统可靠性评估方法[J]. 现代电力, 2013, 30(1): 8-12.
- SUN Yubin, LIU Wenxia, QIU Jianming, et al. The reliability evaluation method for VSC-HVDC system by considering of standby components[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(1): 8-12.

收稿日期: 2017-04-30; 修回日期: 2017-07-04

作者简介:

马河涛(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术; E-mail: 568228567@qq.com

黄守道(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子传动装置及其控制、风力发电。

(编辑 魏小丽)