

# 多端柔性直流配电网的可靠性和经济性评估

陆子凯<sup>1,✉</sup>, 简翔浩<sup>1</sup>, 张明瀚<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 南方电网国际有限责任公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 随着柔性直流技术发展及越来越多分布式电源和储能设备接入电网, 为更好地满足新能源并网和发展城市智能配电网, 对柔性直流配电网进行可靠性和经济性评估。[方法] 选择了珠海多端柔直配网示范工程拓扑作为研究对象, 用最小路法对柔性直流配电网系统网络架构进行可靠性计算, 并评估柔性直流配电网典型应用场景的经济性。[结果] 随着IGBT和IGCT等器件国产化和成熟化, 柔直配网的经济性和可靠性将逐渐优于交流配电网。[结论] 相关的研究结果将为后续的柔性直流配电网工程提供重要参考和应用依据。

**关键词:** 多端柔性直流配电网; 交流配电网; 可靠性; 经济性

中图分类号: TM7; TM727

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0067-08

开放科学(资源服务)识别码(OSID):



## Reliability and Economy Assessment of Multi-terminal Flexible DC Distribution Network

LU Zikai<sup>1,✉</sup>, JIAN Xianghao<sup>1</sup>, ZHANG Minghan<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. China Southern Power Grid International Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] With the development of flexible DC technology and more and more distributed generation and energy storage equipment connected to the grid, in order to better satisfy new energy access and development of urban smart distribution network, this paper assesses the reliability and economy of flexible DC distribution network. [Method] This paper calculated the reliability assessment of Flexible DC Distribution by Minimum Path Method and evaluated the economy, which selected the demonstration project in Zhuhai as the research object. [Result] With the localization and maturity of IGBT and IGCT devices, the economy and reliability of Flexible DC Distribution network will gradually be better than that of AC distribution network. [Conclusion] The relevant research results of this paper can provide important reference and foundation for the construction of flexible DC distribution Network projects in the future.

**Key words:** multi-terminal flexible DC distribution network; AC distribution network; reliability; economy

近年来, 由于化石能源供应模式不具持续性, 且存在环境污染等能源发展的痛点促使分布式能源发电、柔性直流输电等技术的不断发展, 目前国内城市中低压交流配电网面临着如何改善供电质量和系统可靠性等问题<sup>[1]</sup>。同时, 随着越来越多的光伏电源和储能设备等分布式能源并网, 我们需要对现有的配电网进行改造, 并在有条件的城市发展柔性直流配电网。

与目前的城市交流配电网相比, 柔性直流配用电技术具有以下优点: (1) 能缓解目前交流配电网线路走廊不足的问题; (2) 相同配送容量下, 输电供电损耗低; (3) 可控性好, 支持功率快速调控, 可提高系统的可靠性; (4) 供电质量高, 便于各类负载灵活接入<sup>[2]</sup>; (5) 目前直流负荷占比增加, 匹配程度好; (6) 与新能源储能配合好; (7) 为交流电网提供特殊功能支持, 比如背靠背等; (8) 供电可靠性高<sup>[3-5]</sup>。多端柔直配电网相较于两端的直流配电网, 能够实现多端供电, 能更好地满足新能源并网及城市智能电网的发展需求, 同时多端柔配网

收稿日期: 2020-05-14 修回日期: 2020-09-07

基金项目: 中国能建广东院科技项目“中低压柔性直流电网关键技术研究”(EV04421W)

的系统运行方式更具灵活性和更高的可靠性。因此,多端柔性直流配电网逐渐成为城市配电网发展的新方向<sup>[5]</sup>。

目前柔直配电网实际应用的工程项目不多,主要集中在直流配电网的功率控制与调度优化、控制保护策略和关键设备的研究等。目前对柔直配电网的可靠性和经济性的研究尚处于探索阶段<sup>[6]</sup>。随着未来越来越多的直流配电网示范工程建成并投入使用,不同的网络拓扑结构、大量直流关键设备接入系统,都会影响柔性直流配电网的可靠性的评价。为了更好地分析柔性直流配电网的供电可靠性,本文选取珠海唐家湾多端柔性直流配电网示范工程拓扑作为研究对象。对柔直配电网中的关键元件进行可靠性建模,采用最小路法对珠海唐家湾示范工程拓扑进行可靠性分析,评估示范工程中关键设备对柔直配电网可靠性的影响。最后,对柔直配电网的经济性进行定性分析。

## 1 柔直配电网应用场景分析

### 1.1 典型应用场景概述

近几年来,随着国内经济产业结构的调整和转型,高新技术产业的占比越来越大,不少工业城和科技园区用能需求不断增长,对可靠性的也有相对高的标准。目前对于有着较多的分布式电源规划,存在较多敏感负荷用户和直流负荷的一些新型科技园区,现有的配电网拓扑结构不能满足其运行要求。因此为适应新型科技园园区的规划发展,在珠海唐家湾建设了电压等级为 $\pm 10$  kV、换流容量为40 MW的多端柔性直流配电网,包括唐家(20 MW)、

鸡山I(10 MW)、鸡山II(10 MW)换流站与科技园降压换流站(2 MW)<sup>[7]</sup>。通过该多端柔性直流混合配网系统既可以将光伏等分布式能源就近消纳,也可以通过该柔直配电网将清洁能源送出并网。同时工业园区内也规划建设了光伏,电动汽车充电站及储能电站。电动汽车充电桩连接的双向DC/DC变换器,不仅可以在需要充电时从直流母线为电动汽车充电,也可以在两端电源故障后电动汽车接入充电站通过DC/DC换流器为区域内负荷供电。光伏电站在白天既可以将发出的能量通过直流变压器配送到直流母线为园区内负荷供电,也可将多余的电能存储到储能电站中。同时在系统不能为工业园区供电时,该工业园区通过光伏电站、储能电站及系统内负荷等形成一个直流微电网,为系统内的负荷供电,相当程度上可提高系统的供电可靠性。

### 1.2 多端柔性直流配电网典型网络架构

三端中低压柔性直流配电系统以110 kV鸡山变电站中两段10 kV母线和110 kV唐家变电站其中一段母线作为主电源,分别新建10 kVAC/VAC kVDC柔性换流站——鸡山换流站I、II和唐家换流站III,从而建立三端直流系统,其中鸡山换流站II至 $\pm 10$  kV科技园开关站的 $\pm 10$  kV线路T接一回 $\pm 10$  kV线路至 $\pm 10$  kV科技园降压站。在科技园降压站配置一台 $\pm 10$  kV/ $\pm 375$  V/ $\pm 110$  V三端口直流变压器, $\pm 375$  V直流微电网接入0.2 MW屋顶光伏、1 MW/1 MWh电化学储能、1 MW直流充电桩等灵活性资源。 $\pm 110$  V直流端口接入直流空调、直流照明形成多端柔直配电网典型网络,如图1所示。

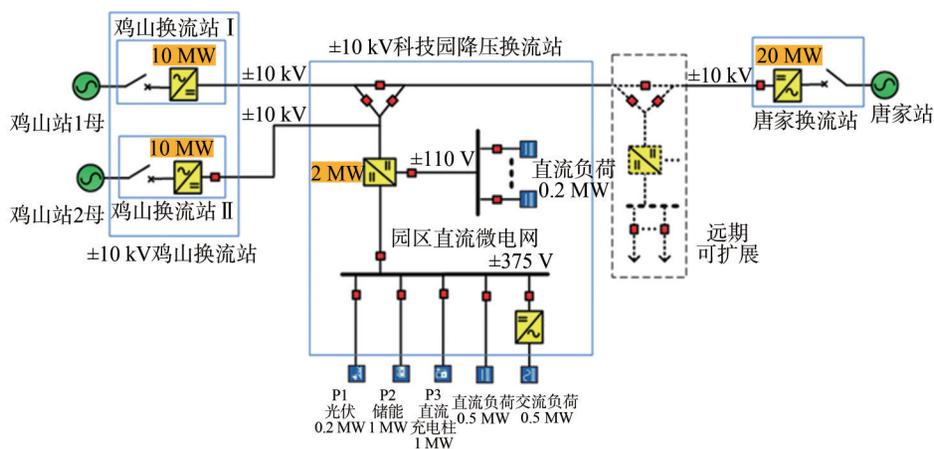


图1 柔直配电网典型网络图

Fig. 1 Diagram of flexible DC distribution network

## 2 多端柔直配网可靠性评估方法

### 2.1 多端柔直配网可靠性评估指标和建模

#### 2.1.1 可靠性分析指标

可靠性研究与网络架构设计是柔直配网技术研究的基础内容。具体研究内容包括如下两个方面:一方面,制定具有针对性的配网三层可靠性评价指标体系(元件—负荷点—系统),提出相应的可靠性评价方法并进行完善;另一方面,针对典型应用场景,提出合理的网络拓扑结构,采用上述可靠性评价指标体系和方法对拓扑结构进行分析比较,研究步骤如图2所示。

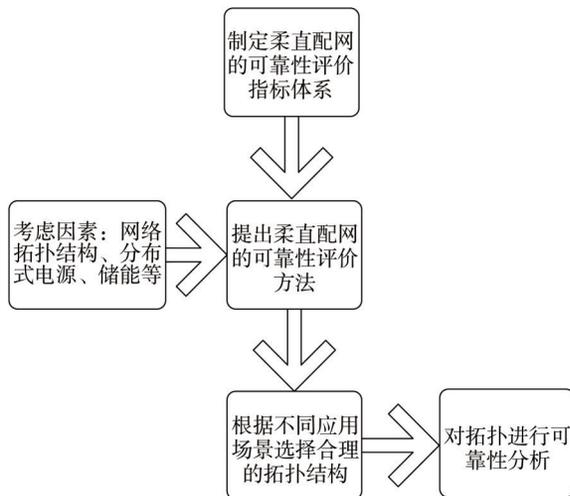


图2 柔性直流配电系统可靠性研究步骤

Fig. 2 Reliability research steps of flexible DC distribution system

由于柔性直流配网与传统交流配电网在可靠性评估上并无太大区别,因此多端柔直配网的可靠性评价指标体系可参照交流配网中的各项评价指标建立,通过供电的充裕度和安全性这两方面反映系统满足持续工作的能力。目前,交流配电系统可靠性指标主要依据的标准为IEEE Std 1366—2003及我国采用的DL/T 836—2003,可以分为系统侧指标和用户指标两类<sup>[8]</sup>。

系统侧指标能够反映系统的重要性和停运的严重程度;用户侧可靠性指标侧重描述不同负荷量受停电影响的大小。已有的研究主要用ASAI、SAIFI、SAIDI和CAIDI等指标来衡量配电网的可靠性。目前,影响直流配电系统可靠性的因素主要包括:网络的拓扑结构、敏感负荷的接入位置、主接线方式、关键设备的可靠性等<sup>[9]</sup>。对应的常用的

评价指标如下:

#### 1) 元件的可靠性指标

年故障率 $\lambda_a$ 、年检修率 $\lambda_b$ 、平均故障修复时间 $r_a$ 、平均检修持续时间 $r_b$ 等可作为柔直配网可靠性评估的初始数据。

#### 2) 负荷点可靠性指标

年平均停电率:

$$\lambda_c = \sum(\lambda_a + \lambda_b) \quad (1)$$

年平均停电时间:

$$U_c = \sum(\lambda_a \times r_a + \lambda_b \times r_b) \quad (2)$$

平均停电持续时间:

$$r_c = \frac{U_c}{\lambda_c} \quad (3)$$

上述式中研究对象为能造成负荷点 $c$ 停电的元件集合。

#### 3) 系统可靠性指标

$$ASAI = \frac{\sum N_c \times 8760 - \sum U_c N_c}{\sum N_c \times 8760} \quad (4)$$

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_c N_c}{\sum N_c} \quad (5)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_c N_c}{\sum N_c} \quad (6)$$

$$ENS = \sum U_c \times L_c \quad (7)$$

式中: $N_c$ 为用户数(户); $L_c$ 为系统中的平均负荷(MW)。

#### 2.1.2 关键元件可靠性建模

相比较于交流配网,柔直配网具有换流阀、直流断路器、直流变压器等新型设备。直流断路器与直流变压器虽然原理上完全不同于交流配网的对应设备(交流断路器和交流变压器),但在可靠性建模方面仍是一个简单的两状态模型(两个状态分别为运行和故障)。考虑到现中低压等级的直流断路器与直流变压器尚处于早期应用阶段,其可靠性参数有待更多实际工程的总结,可采用元件计数法(PCRP)对直流变压器和直流断路器的故障率进行预测<sup>[9]</sup>。换流阀作为柔性直流配电系统的核心单元,由于目前柔直配网的工程尚少,难以得到足够的柔直换流阀运行数据。因此可借鉴已投运的换流站统计数据,对柔直换流阀进行建模。交流器件的可靠性参数参考根据已有文献<sup>[2-4]</sup>,同时要考虑一些器件无修复时间,需选用其更换备用时间。

### 1) 直流变压器可靠性评价模型

在珠海柔直配网示范工程中, 直流变压器包括 $\pm 10$  kV、 $\pm 375$  V、 $\pm 110$  V三个端口。三端直流变压器基于模块化级联拓扑结构, 采用多个功率模块低压并联、高压串联的方式, 如图3所示。通过PCRP预测直流变压器的年故障率为0.320 6次/a<sup>[9]</sup>。

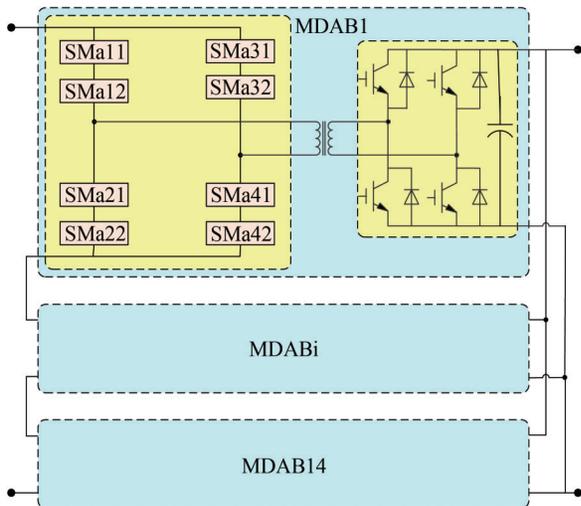


图3 DC变压器拓扑图

Fig. 3 Diagram of DC transformer

可靠性预测模型如图4所示:

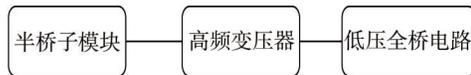


图4 DC变压器可靠性预测模型

Fig. 4 Reliability prediction model of DC transformer

### 2) VSC可靠性评价模型

柔直换流阀作为柔性直流配电系统的核心单元, 包括交流设备、换流阀、直流设备、控保系统和其他等多个部分组成, 如图5所示<sup>[10]</sup>。通过PCRP预测VSC的年故障率值为2.363 2次/a。

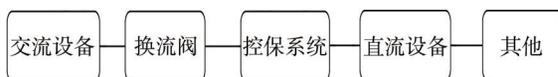


图5 VSC可靠性预测模型

Fig. 5 Reliability prediction model of VSC

### 3) 直流断路器可靠性评价模型

直流断路器拓扑结构如图6所示, 主要包括: 快速机械开关支路(A)、电力电子开关支路(B)、耦合负压电路(C)和系统能量吸收支路(D)。除此之外, 还包括控制保护系统(E)及外部电源高

压隔离供电电路(F)<sup>[10]</sup>。如图6所示。通过PCRP预测直流断路器的年故障率值为0.281 6次/a。

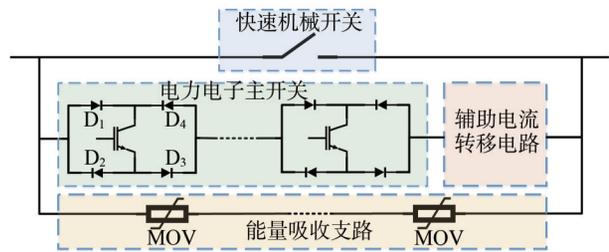


图6 DC断路器拓扑图

Fig. 6 The diagram of DC circuit breaker

可靠性模型如图7所示:

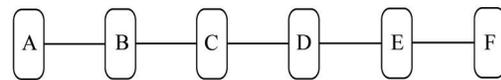


图7 DC断路器可靠性预测模型

Fig. 7 Reliability prediction model of DC circuit breaker

## 2.2 多端柔性直流配网可靠性评估方法

目前直流配电系统的电压等级和拓扑结构缺少统一的标准, 因此可以借鉴交流配电网的研究思路和方法对柔性直流配电网拓扑结构进行分析。交流配电网已经投运多年, 相应设备和线路的可靠性参数可以基于历史统计数据 and 运行经验来计算, 得到的结果相对可靠。而柔性直流配电网缺少运行实例, 已有的示范工程投运时间不长, 运行数据积累尚不充分。此外, 项目中使用的部分示范性电气设备也不一定具有工程推广价值, 因此缺少设备的可靠性数据。这个问题在短期内仍然难以解决, 但是计算时可以参考相应参数的大致范围, 从而得到系统各项指标, 并且计算结果一般具有统计规律, 可以为实际直流配电系统提供参考。

交流配网分析可靠性的方法有模拟法和解析法等<sup>[10]</sup>。解析法是通过枚举系统元件状态计算系统设备的整体可靠性, 结果取决于单一设备的可靠性和各个设备之间的连接方式, 该方法能够真实反映系统结构, 模型精确, 但计算量随着系统元件个数的增加呈现指数增长, 复杂网络的分析必须借助计算机才能实现, 因此适用于简单小系统; 为了减小计算难度在此基础上提出了若干改进算法, 如最短路法基本思路是对系统拓扑进行简化处理, 通过处理算例的系统 and 简单系统时验证了方法的可行性<sup>[9]</sup>。

根据 1.2 节中多端柔性直流配电典型网络架构的特点, 可采用解析法中计算较为精确的最小路法计算拓扑结构的可靠性。首先以网络拓扑中各个负荷点为研究对象, 找出负荷点至不同电源点的供电路径, 然后将柔直配网的关键元件的可靠性参数代入至通过简化后的串并联网络, 进而计算出负荷点的指标, 再通过串并联网络的计算公式可以迅速计算出系统的可靠性指标。其具体流程如图 8 所示:

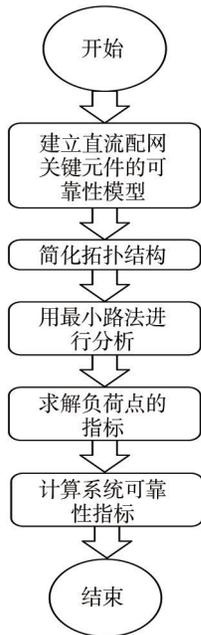


图 8 柔性直流配电系统可靠性评估流程

Fig. 8 Reliability evaluation process of flexible DC distribution system

### 3 典型应用场景可靠性评估

通过对典型应用场景拓扑结构图进行化简, 对同一支路的元件进行集合, 可直观地求解出负荷点

的所有供电线路。假设负荷点的用户数为 100, 鸡山换流站 I 和 II 到科技园开关站线路长度为 0.6 km, 唐家换流站到开关站线路长度为 5.15 km。通过最小路分析计算, 可得系统的可靠性参数如表 1。

表 1 多端柔性直流拓扑结构可靠性参数

Tab. 1 Reliability parameters of multi-terminal flexible DC distribution network

SAIFI/[次/(户·年) <sup>-1</sup> ]	SAIDI/[小时/(户·年) <sup>-1</sup> ]	CAIDI/[小时/(停电用户·年) <sup>-1</sup> ]	ASAI/%
0.4018	2.3838	5.9332	99.9323

典型应用场景拓扑图如图 9 所示。无直流断路器情况为只去除拓扑中与直流负载相连的直流断路器; 无 VSC 情况为去除拓扑中的换流站; 相同拓扑的交流情况为去除拓扑中的换流站, 同时将拓扑中的直流断路器换为相同电压等级的交流断路器。

系统无直流断路器情况、无换流站情况及相同拓扑的交流情况下得到系统的可靠性数据如表 2, 不同情况的可靠性参数对比如图 10~图 13 所示。

表 2 多端柔性直流拓扑结构不同情况可靠性参数

Tab. 2 Reliability parameters of multi-terminal flexible DC distribution network under different conditions

拓扑结构	SAIFI/[次/(户·年) <sup>-1</sup> ]	SAIDI/[小时/(户·年) <sup>-1</sup> ]	CAIDI/[小时/(停电用户·年) <sup>-1</sup> ]	ASAI/%
无直流断路器拓扑	0.2516	1.5952	6.3412	99.9276
无 VSC 直流拓扑	0.4006	2.3792	5.9383	99.9322
交流拓扑	0.2532	1.6027	6.3296	99.9277

通过图 10 可知, 无直流断路器拓扑去除与负荷直接相连的直流断路器后, 整个系统的故障率有

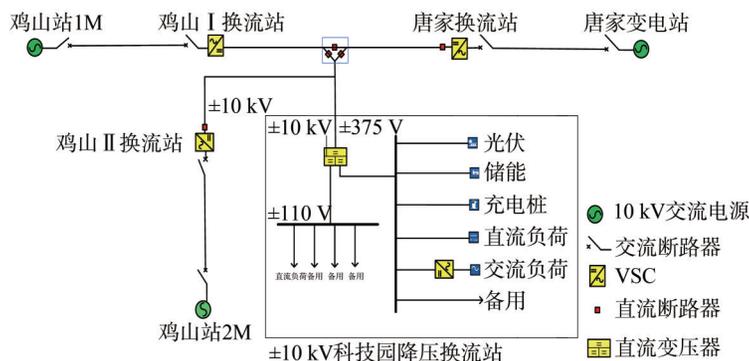


图 9 典型应用场景拓扑图

Fig. 9 Topology of typical project

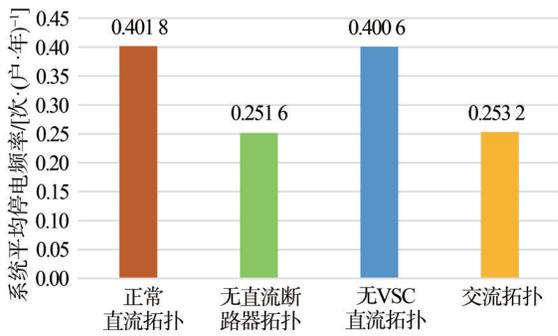


图 10 不同拓扑系统平均停电频率对比

Fig. 10 Comparison of SAIFI of different topology systems

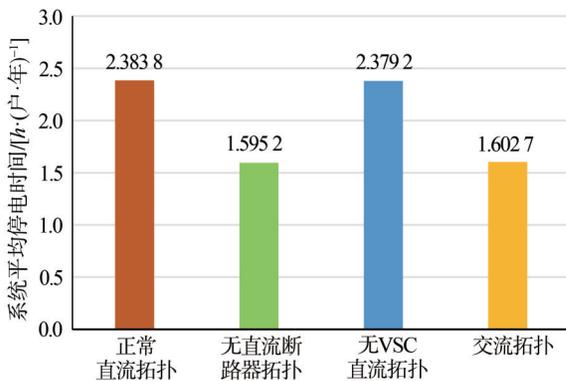


图 11 不同拓扑系统平均停电时间对比

Fig. 11 Comparison of SAIDI of different topology systems

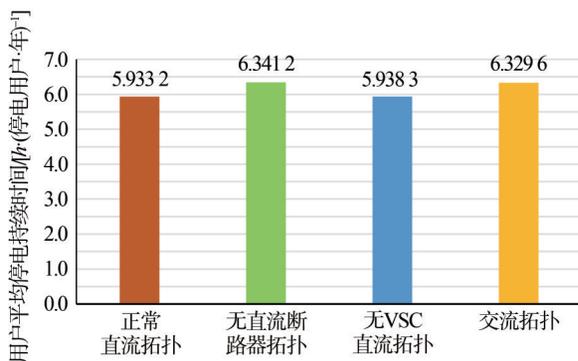


图 12 不同拓扑用户平均停电持续时间对比

Fig. 12 Comparison of CAIDI of different topology systems

明显的下降。其原因在于去除掉与负荷直接相连的直流断路器后会直接影响到用户侧负荷的故障率，而无VSC换流站拓扑，由于本项目的拓扑结构是多端供电，负荷的供电可靠性与其直接相连的器件故障率关联较大，故无VSC换流站拓扑下降较小。相同结构的交流拓扑中由于交流各元器件技术成熟，故障率较直流的各元件低，因此其平均停电频率较低。虽然无直流断路器的拓扑结构系统平均停电频

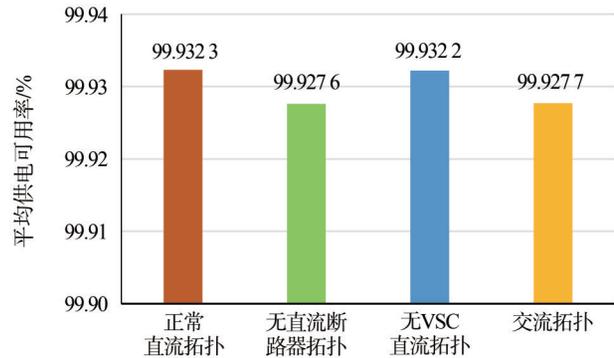


图 13 不同拓扑系统平均供电可用率对比

Fig. 13 Comparison of ASAI of different topology systems

率是最低，但其拓扑结构中去除直流断路器后不易于控制电路，发生故障时难以切除故障，会使事故扩大等。因此对正常直流拓扑而言，改善邻近负荷点的直流器件的可靠性参数或及时检修此处器件，可起到降低系统平均停电频率的作用。

通过图 11 可知，无直流断路器拓扑和交流拓扑结构的系统平均停电时间较低，且较为接近，无VSC换流站拓扑结构的时间和正常直流拓扑结构的系统平均停电时间较为接近。是因为该拓扑结构中有三个VSC的换流站，各个换流站一端连接电源，另一端通过直流断路器和直流电缆等器件连接至负载，换流站故障率虽然较高，但从多端柔直配网的拓扑结构来看，三个换流站同时发生故障的概率是较小的，因此无VSC直流拓扑结构和正常直流拓扑的系统平均停电时间几乎相等。而无直流断路器拓扑和交流拓扑结构是由于其系统平均停电频率较低，且其元器件修复时间相差不多，因此使得无直流断路器拓扑和交流拓扑结构的系统平均停电时间较低。

通过图 12 可知，正常直流拓扑和无VSC直流拓扑停电用户的平均停电持续时间较为接近，而无直流断路器拓扑和交流拓扑的停电用户的平均停电持续时间较高。是因为无直流断路器拓扑中去除了与负荷直接相连的直流断路器，而直流断路器的修复时间相较于其他元器件修复时间较短，因此会使停电时停电用户的停电时间增长。而交流拓扑中一些交流器件的元件修复时间较长，使用户的平均停电持续时间较长。

由图 13 可知，正常直流拓扑在不同情况下系统平均供电可用率供较为接近。是由于正常直流拓

扑在不同情况下系统的平均停电时间较为接近,因此使得拓扑在不同情况下平均供电可用率都较为接近。

综合以上分析可知,通过降低拓扑中直接与负荷相连器件的故障率可明显提升系统各项可靠性指标,因此,随着直流技术的不断进步,直流断路器、直流变压器等器件故障率将会下降,从而提升柔直配电网系统的可靠性。

#### 4 典型示范工程经济性评估

柔性直流配电网让潮流灵活可控,集合了故障切除速度快,电能质量更好,可靠性高,功率密度高,输送距离更远,节省输电走廊,方便新能源接入减少转换环节损耗等多种优点,其带来的经济技术价值是可观的<sup>[11]</sup>。由于网络拓扑和负载类型会影响经济性评估的结论。因此,现阶段对比柔性直流配电网的经济性需根据不同项目情况进行分析。本文将珠海唐家湾多端柔性直流典型网络为例,对典型应用场景的经济性进行评估,得出以下效果评估:

1) 利用柔性直流配电网的可控性,实现鸡山唐家站间20 MW的功率互济,解决交流系统的负载不平衡问题,将唐家站主变负载率由70%降低到47.7%,延缓唐家站扩建主变与相应的110 kV及10 kV线路建设,延缓投资500万元以上。同时可以提高鸡山站变压器容量利用率20%,降低变压器损耗比50%。

2) 柔性直流换流阀的发出无功能力高达±柔性直,可以大幅度提升区域电网的无功与电压控制能力,可减少对该区域系统的无功补偿设备的投资。

3) 柔性直流配电网方便新能源接入,通过对产品化的光伏、储能AC/DC PCS装置、AC/DC充电桩等进行较小改造,并接入直流空调和直流灯具等电器设备,实现了直流电源与用电设备直接接入直流微电网的功能,减少了交直流转换环节,减少损耗约3%以上。

到目前为止,柔性直流配电网的成套与工程设计技术尚处于示范验证阶段,部分的核心器件需要进口,国产器件需要自主研制开发,导致设备商研发的成本较高。但随着国内柔直配电网技术的进一步发展和同类工程项目量的增长,产业链将成熟与完

善,投资成本与整体传输损耗将不断降低。从这一角度来看,柔性直流配电网的经济性具有巨大的发展潜力。

#### 5 结论

本文以珠海唐家湾多端柔直配网示范工程拓扑为基础,采用最小路法对柔性直流配电系统网络架构进行可靠性评估计算,对比了不同拓扑的可靠性,并评估了柔直配网典型工程的经济性,得出如下结论:

1) 由于柔性直流配电网的关键设备直流断路器、直流变压器和VSC技术研究尚不成熟,故障率对直流配电网可靠性的影响比较大。

2) 在现有关键设备制造水平下,相对于传统的交流配网,柔直配网的可靠性仍然较低,但随着IGBT和IGCT等器件国产化和成熟化,柔直配网的可靠性将逐步提高。

3) 现阶段柔直配网投资成本仍高于交流配电网,但随着智能电网的建设,柔直配网建设将带动相关设备制增长,柔性直流配电网仍存在较大的降价空间。

随着城市配电网的不断发展的,柔性直流技术在提升配网互联互动、灵活可控,促进分布式能源建设发展等方面的独特优势,将成为配电网未来发展的新技术方向。对柔直配网的可靠性和经济性评估是推动直流配电发展的重要环节,是柔性直流配电网普遍化之前必须解决的问题。

#### 参考文献:

- [1] 盛万兴,李蕊,李跃,等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3391-3403+3358.  
SHENG W X, LI R, LI Y, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13):3391-3403+3358.
- [2] 李敬如,韩丰,姜世公,等. 能源互联网环境下交直流混合配电系统关键技术[J]. 中国电力,2018,51(8):56-63.  
LI J R, HAN F, JIANG S G, et al. Research on the key technologies of AC/DC hybrid distribution networks based on energy internet [J]. Electric Power, 2018, 51(8):56-63.
- [3] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801+7114.  
ZENG R, ZHAO Y M, ZHAO B, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801+

- 7114.
- [4] 周逢权,黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(22):62-67.  
ZHOU F Q, HUANG W. Study on the key technology of DC distribution power network [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22):62-67.
- [5] 邓帅荣. 基于元件和设备的中低压直流配电网可靠性评估[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2017.  
DENG S R. Reliability evaluation of medium and low voltage DC distribution network based on power electronic devices and equipments [D]. Chongqing: School of Electrical Engineering of Chongqing University, 2017.
- [6] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):98-104.  
JIANG D Z, ZHENG H. Research status and developing prospect of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8):98-104.
- [7] 张明瀚,简翔浩,陆子凯. 珠海“互联网+联柔性直流配电网换流站设计方案[J]. 南方能源建设,2020,7(1):95-100.  
ZHANG M H, JIAN X H, LU Z K. Design of converter stations of Zhuhai “internet+” flexible DC distribution network [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(1):95-100.
- [8] IEEE. IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems: IEEE Std 493—2007 [S]. New York:IEEE,2007.
- [9] 曾嘉思. 柔性直流配电网可靠性评价方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.  
ZENG J S. Reliability Evaluation of Flexiable DC Disribution System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015
- [10] 曾嘉思,徐习东,赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术,2014,38(9):2582-2589.  
ZENG J S, XU X D, ZHAO Y M. Reliability comparison of AC and DC distribution network [J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2582-2589.

- [11] 郑欢. 柔性直流配电网的若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.  
ZHENG H. Research on some problems of DC distribution network [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

#### 作者简介:



陆子凯

陆子凯(通信作者)

1992-, 男, 广东广州人, 工程师, 曼彻斯特大学电气工程专业硕士研究生, 主要从事变电站、换流站电气一次设计工作 (e-mail) luzikai@gedi.com.cn。

#### 项目简介:

**项目名称** 中低压柔性直流电网关键技术研究 (EV04421W)

**承担单位** 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

**项目概述** 项目通过对柔性直流配电技术进行专题研究, 全面掌握柔性直流配电系统的关键设备制造水平, 研究不同用户需求下直流配电网的拓扑结构, 以及相应的电气主接线、设备选型及控制保护技术等, 为后续工程的实施提供重要设计和应用依据。

**主要创新点** (1) 研发可靠性计算软件和网络拓扑结构评估准则, 提出未来5~10年适用的若干种柔性直流配电网的网络拓扑结构方案; (2) 研发基于PSCAD的多端柔直流配电网仿真模型和直流配电网工程通用的主回路参数计算软件, 可适用于未来5~10年的典型柔性直流配电网网络拓扑结构方案; (3) 在换流器、直流变压器的拓扑结构选择、接地方式选择、电气主接线选择、过电压和绝缘配合等方面进行创新。

(责任编辑 李辉)

