

# 单交多直混联网架运行特性分析与构建方法

黄莹<sup>1</sup>, 王国腾<sup>1</sup>, 蔡晖<sup>2</sup>, 晏铭新<sup>1</sup>, 徐政<sup>1</sup>, 韩杏宁<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 南京 210008)

**摘要:** 我国负荷中心地区电网交流线路密集, 存在潮流控制困难、短路电流超标等问题, 交流电网的规模效应趋于饱和, 亟需发展交直流混联新形态电网结构。为提高交直流混联电力系统的可控性、安全性和稳定性, 首先分析了 3 种典型交直流输电方式的技术特点, 包括全直流异步互联方式、全交流同步互联方式和常规交直流混联方式; 然后, 针对单交多直混联这一特殊网架结构, 从潮流控制能力、 $N-1$  过载、短路电流、频率稳定性、电压稳定性、同步稳定性等方面分析该网架的运行特性, 并给出单交多直混联网架的构建方法; 最后, 在一个单交多直典型算例中开展仿真分析, 结果表明单交多直混联网架可以兼顾交直流电力系统可控性、安全性和稳定性需求, 是一种极具应用前景的网架结构。

**关键词:** 单交多直; 交直流混联; 网架结构; 运行特性; 构建原则

## Operation Characteristics Analysis and Construction Principles of Single-AC Multiple-DC Transmission Sections

HUANG Ying<sup>1</sup>, WANG Guoteng<sup>1</sup>, CAI Hui<sup>2</sup>, YAN Mingxin<sup>1</sup>, XU Zheng<sup>1</sup>, HAN Xingning<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In regions with high electricity demands, the AC power grid is densely populated, leading to difficulties in controlling power flow and issues with excessive short-circuit currents. The scale effect of AC power grids trends to saturation, necessitating the development of new hybrid AC/DC grid structures. To improve the controllability, safety, and stability of AC/DC hybrid power systems, three typical AC/DC transmission methods are first analyzed in terms of their technical characteristics: full DC asynchronous interconnection, full AC synchronous interconnection, and conventional AC/DC hybrid interconnection. Next, in accordance with the unique transmission configuration of single-AC multiple-DC transmission sections, the operational characteristics of this configuration are analyzed in terms of its ability to control power flow,  $N-1$  overload, short-circuit currents, frequency stability, voltage stability and synchronous stability. Principles for constructing the single-AC multiple-DC transmission section are also provided. Finally, case studies are conducted in a modified IEEE 11-bus system. The results demonstrate that the single-AC multiple-DC transmission configuration can simultaneously compromise the controllability, safety, and stability requirements of hybrid AC/DC power systems, making it a highly promising grid structure with practical applications.

**Key words:** single-AC multiple-DC; AC/DC hybrid; grid structures; operational characteristics; construction principle

## 0 引言

我国东部发达省份负荷密集, 网架结构复杂<sup>[1]</sup>。随着直流馈入和新能源并网功率增加, 紧密联接的省域电网面临潮流控制困难、短路电流超标等问题, 交流网架发展的规模效应趋于饱和<sup>[2-3]</sup>。为提高省域主干网架的可控性和灵活性, 在主干网架中嵌入直流系统是一种极具应用前景的技术路线<sup>[4]</sup>。直流系

统输送功率完全可控, 且几乎不提供短路电流<sup>[5]</sup>, 借助直流系统构建交直流混联新形态电网结构有望解决负荷中心地区电网潮流控制困难、短路电流超标等问题。因此, 交直流混联网架结构近年来成为学者和工业界广泛关注的技术路线, 并在江苏和广东得到了率先应用<sup>[6-7]</sup>。然而, 现有交直流混联网架结构尚处在发展初期阶段, 随着经济水平提高, 负荷中心地区短路电流控制、潮流调节难度将进一步增大, 直流在主干网架中的占比和作用也将大幅提高, 亟需研究交直流混联的合理方式, 以解决负荷

中心面临的网架构建难题，并尽可能避免对系统造成负面影响。

直流系统替代交流线路会造成线路两端系统间的频率耦合程度降低。极端情况下，两端系统完全依赖于直流系统异步互联，两端系统频率解耦，互相不提供功率支撑，系统频率稳定性下降<sup>[8]</sup>。即使两端系统间依然保持有交流联系，也可能因为交流联系过弱导致两端系统间的同步稳定性较差<sup>[9]</sup>。因此，交直流混联方式对解决负荷中心电网潮流控制困难、短路电流超标是有利的，但同时可能会伴随着同步稳定性、频率稳定性恶化等问题。文献<sup>[10]</sup>指出，从稳定性的角度，决定同步电网合理规模有3个基本约束，分别是频率稳定约束、低频振荡最低频率约束和同步功率支援效应消失约束。在明确上述约束的基础上，文献<sup>[11]</sup>进一步提出了刻画交直流同步电网合理规模的指标，并提出交直流同步电网异步分隔的一般性原则。除了稳定性以外，交直流线路间的潮流分布关系也是决定交直流混联网架形态的重要因素之一。实际规划中，需要避免直流闭锁带来的潮流转移造成连锁故障发生<sup>[12]</sup>。

针对交直流混联网架可能带来的上述问题，学者们从控制入手，提出许多行之有效的改进型控制策略。文献<sup>[13-14]</sup>利用柔性直流系统的快速功率调节能力改善交直流混联电力系统的频率和同步特性；文献<sup>[15]</sup>通过优化分配交直流并联输电通道间的潮流关系，降低单一故障下交流线路过载的风险；文献<sup>[16]</sup>指出输电线路开断可以作为一种调控手段避免混联系统崩溃。虽然借助直流系统的调节能力能够提升交直流混联网架的安全稳定性，但却不能完全避免交直流混联带来的安全稳定风险，需要从网架结构规划、运行控制、仿真校核等多方面入手制定相应措施<sup>[17]</sup>。

目前，针对交直流混联网架结构规划方面的理论研究较少，现有发展较为成熟的交直流混联形态尚不能满足未来新型电力系统对网架结构可控性、安全性和稳定性的要求。为此，本文分析了典型交直流输电方式的技术特点，在此基础上提出单交多直混联网架结构，并给出构建原则。

### 1 交直流输电典型网架的技术特点

根据网架组成方式不同，交直流输电典型网架结构可以分为3类，分别是全交流同步互联网架、常规交直流混联网架和全直流异步互联网架，示意

图分别如图1—图3所示。在图1—图3中， $E_{rk}$ 和 $E_{ik}$ 分别表示第 $k$ 个送端和受端系统等值电动势， $\delta_{rk}$ 和 $\delta_{ik}$ 分别表示第 $k$ 个送端和受端系统等值相位， $P_{rk}$ 和 $P_{ik}$ 分别表示第 $k$ 个送端和受端系统输送功率， $jX_k$ 表示第 $k$ 个交流联络线电抗， $P_{Lk}$ 表示第 $k$ 个交流联络线输送功率， $P_{dck}$ 表示第 $k$ 个直流系统输送功率， $X_{r01}$ 、 $X_{r12}$ 、 $X_{i01}$ 和 $X_{i12}$ 分别表示联络电抗。下面分别从潮流控制能力、 $N-1$ 过载风险、短路电流水平、频率稳定性、同步稳定性等5个方面对比不同典型网架结构的技术优缺点。

#### (1)潮流控制能力

对于图1所示的全交流同步互联网架结构，送受两端系统可以通过调整电源出力或负荷大小，以

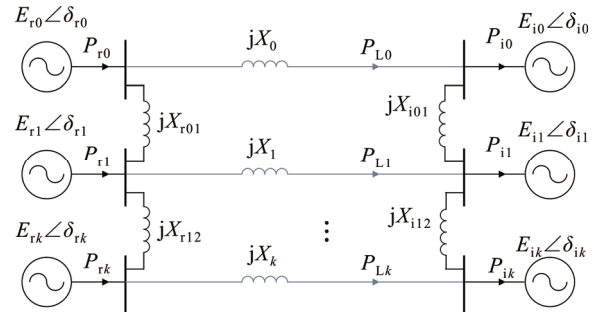


图1 全交流同步互联网架示意图

Fig.1 Diagram of full synchronous interconnected network

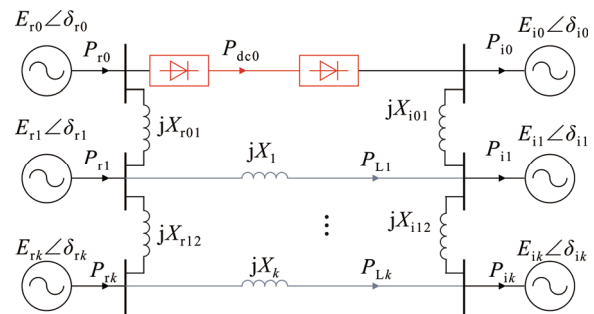


图2 常规交直流混联网架示意图

Fig.2 Diagram of conventional AC/DC hybrid interconnected network

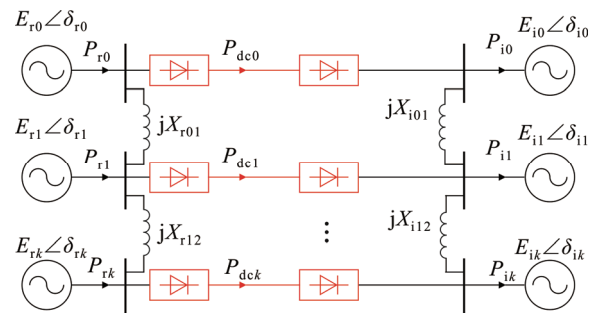


图3 全直流异步互联网架示意图

Fig.3 Diagram of asynchronous interconnected network

改变送受两端系统所需要交换的功率。因此, 交流输电断面的总功率是可控的。然而, 要想调整不同线路之间的功率分配是困难的, 需要改变送受端电源和负荷分布的位置。但电源和负荷分布通常由现实因素决定, 机组开机方式则取决于经济调度结果。因此, 对于拥有  $n$  条交流联络线的全交流同步互联网架结构来说, 不可控功率的维度可视作  $n-1$ 。对于图 2 所示的交直流混联网架结构, 假设  $n$  条线路中有  $m$  条为直流线路, 由于直流系统输送功率完全可控, 则交直流混联网架结构中不可控功率的维度为  $n-m-1$ 。对于图 3 所示的全直流异步互联网架结构, 断面中任意一条线路功率均可控, 不可控功率维度为 0。

### (2) $N-1$ 过载风险

对于图 1 所示全交流同步互联网架结构, 交流输电线路较为充裕的情况下,  $N-1$  过载风险通常是较低的。在图 2 所示的交直流混联网架结构下, 任意一回交流或直流线路故障, 潮流会转移至剩余交流线路上, 剩余直流线路的功率则保持不变。因此, 交直流混联网架在规划阶段通常需要着重校核  $N-1$  故障, 尤其要避免强直弱交现象的发生。而图 3 所示的全直流异步互联网架结构中, 直流系统输送功率由指令值决定, 在  $N-1$  故障后不会出现过载问题。

### (3) 短路电流超标风险

发达省份短路电流超标源于日益增长的负荷需求导致交流网架不断被加强, 且考虑  $N-1$  甚至  $N-2$  校核下交流网架备用裕度较高, 造成电源和负荷区间的电气距离太近。如果能用直流系统替代交流线路, 有利于增加电源和负荷节点间的电气距离, 降低短路电流。在相同输送容量下, 直流化程度越高, 系统短路电流超标风险越低, 因此全交流同步网架结构短路电流超标风险大于交直流混联网架结构, 且二者大于全直流异步互联网架结构。

### (4) 频率稳定性

高比例新能源的引入对电网的惯量和调频能力带来较大威胁。传统电网中发电机具有机电耦合特性, 可通过释放或吸收动能来阻碍频率的变化, 惯性较强。然而, 新能源并网采用的电力电子器件的开关频率远高于系统运行频率, 几乎不具备惯性。随着新能源渗透率的增加和相应的同步发电机的退出, 系统惯性水平逐渐降低。同时, 新能源由于不稳定性和间歇性, 不具备充足发电裕度, 不能参与一次调频, 电网的调频能力也大幅降低。因此, 随

着新能源并网比例的增加, 在同等强度的扰动下, 系统频率稳定性恶化, 全直流异步互联方案在新能源高占比背景下更难以满足系统频率稳定需求。

对于全交流同步网架结构和交直流混联网架结构而言, 在任意线路  $N-1$  故障下, 只要两端系统之间尚存在交流线路联系, 则整个系统中就不会存在功率不平衡, 系统不会面临频率失稳风险。对于全直流异步互联网架结构而言, 直流系统  $N-1$  故障会给送端系统带来功率盈余, 给受端系统带来功率缺额, 引起频率波动。

### (5) 同步稳定性

对于送受两端系统而言, 两者之间的电气距离越近, 频率耦合程度越高, 同步稳定性越好。因此, 在断面输电容量相同的情况下, 全交流同步互联网架结构的同步稳定性通常优于交直流混联网架结构。但是对于全直流异步互联网架, 送受端系统无需保持同步, 因此也不存在失步风险。

综上所述, 对全交流同步、交直流混联、全直流异步 3 种互联方式, 从潮流控制能力、 $N-1$  过载风险、短路电流超标风险、频率稳定性和同步稳定性 5 个维度的评价如表 1 所示。

## 2 单交多直混联网架构建

单交多直混联网架结构如图 4 所示, 送受端系统之间只存在一个交流通道, 其余通道皆为直流系统。交流通道中可以是单回线, 也可以是并联的对称双回线。单交多直是交直流混联网架结构的一种特殊形式, 下面分别从潮流控制能力、 $N-1$  过载风险、短路电流超标风险、频率稳定性、电压稳定性及同步稳定性 5 个维度分析单交多直混联网架的运行特性。

### 2.1 单交多直混联网架运行特性分析

#### (1) 潮流控制能力分析

单交多直混联网架中交流线路输送功率表达式如式(1)所示。送受两端系统间的交换总功率是可控的, 直流线路输送功率是可控的。因此, 根据式

表 1 3 种典型拓扑结构技术优势比较

Table 1 Comparison of advantages of three typical topological structures

拓扑结构	潮流控制能力	$N-1$ 过载风险	短路电流超标风险	$N-1$ 对频率冲击	$N-1$ 对同步冲击
全交流同步	弱	较小	较大	无	较小
交直流混联	较强	较大	较小	无	冲击大
全直流异步	完全可控	无风险	最小	冲击大	无

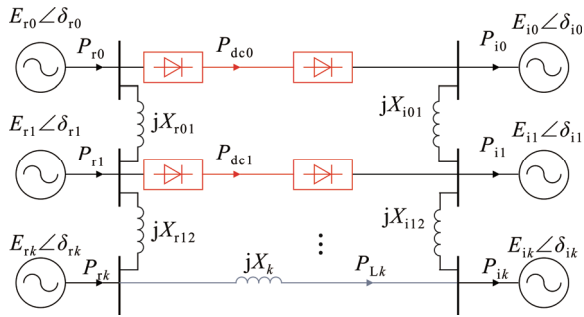


图4 单交多直混联网架示意图

Fig.4 Diagram of single AC multiple DC hybrid interconnected network

(1), 交流线路输送功率也是可控的, 断面潮流完全可控。

$$P_{acj} = \frac{P_{sum} - \sum_{i=1}^m P_{dci}}{n_{ac}} \quad (1)$$

式中:  $P_{acj}$  为交流通道中第  $j$  个交流线路的输送有功功率;  $P_{sum}$  为断面输送总功率;  $P_{dci}$  为第  $i$  个直流线路输送功率;  $n_{ac}$  为交流线路的数量;  $m$  代表直流线路的数量。

#### (2) $N-1$ 过载风险分析

对于单交多直混联网架而言, 交流线路  $N-1$  故障后, 潮流不会转移至直流系统。但是直流系统  $N-1$  故障后潮流会转移至交流线路。因此, 该网架结构下需要保证单一直流最大输送功率不得超过单一交流通道功率裕度, 如式(2)所示。例如, 对于 500 kV 交流线路而言, 最大电流约为 3 kA, 则单一直流最大输送功率不得超过 1 500 MW。如果单一交流通道处有并联双回线, 则单一直流最大输送功率不得超过 3 000 MW。

$$P_{dcmax} < n_{ac} P_{acmax} - P_{acsum} \quad (2)$$

式中:  $P_{dcmax}$  是指单一直流最大输送功率;  $P_{acmax}$  是指单一交流线路最大输送功率;  $P_{acsum}$  表示交流线路输送的总功率。

#### (3) 短路电流分析

对于单交多直网架结构而言, 送受端系统间的交流电气联系已经被大幅削弱, 短路电流问题能够得到较大程度缓解。同时, 可以根据断面各通道对送受端系统各节点短路电流的贡献度, 选择综合贡献度最低的交流线路保留下来, 其余通道采用直流系统。具体方式是遍历输电断面中各种单交多直的组合方式, 并根据式(3)评估不同方式下的短路电流裕度, 最终选取短路电流裕度最大的方式。

$$\mu_{ss} = \min \left( \frac{I_{maxh} - I_{ssh}}{I_{maxh}} \right) \quad (3)$$

式中:  $\mu_{ss}$  为系统中短路电流最小裕度;  $I_{maxh}$  为第  $h$  个节点的最大允许短路电流;  $I_{ssh}$  为第  $h$  个节点的实际短路电流;  $\min(\cdot)$  代表取所有节点中的最小值。

#### (4) 频率稳定性

在单交多直混联网架中, 直流系统发生任意  $N-1$  或  $N-2$  故障不会造成送受端系统出现功率缺额, 直流输送的功率会转移至交流线路。因此, 直流故障不会威胁到单交多直混联系统的频率稳定性。如果交流线路发生  $N-1$  或  $N-2$  故障导致送受端系统完全失去交流联系, 原交流线路输送的功率不会由直流系统承担, 从而造成送受端系统出现功率缺额。对于单交多直网架, 可能造成送受端出现的最大功率缺额为  $P_{acsum}$ , 表达式如式(4)所示。由于交流线路功率是完全可控的, 因此  $P_{acsum}$  可以被限制在很小的范围, 甚至为 0。

$$P_{acsum} = \sum_{j=1}^{n_{ac}} P_{acj} \quad (4)$$

式中:  $P_{acsum}$  表示送受端可能出现的最大功率缺额。

#### (5) 电压稳定性

针对单交多直网架结构, 由于直流化程度的提升, 减少了交流联络线, 各区域交流网络间的电气联系减弱, 对换流母线的电压支撑能力降低, 意味着交流系统相对强度降低, 系统换相失败风险也将大大增加。由此可见, 单交多直结构的电压稳定性是一个需要特别关注的问题, 电压稳定性的维持主要取决于交流系统强度, 交流系统需要为多个直流系统提供电压和功率支撑。电网工程中采用的柔性直流输电技术, 是提升系统电压支撑强度, 减小换相失败风险的一种有效手段。因此, 需要对单交多直网架结构下的系统强度做出判断, 由此选择合适的直流技术路线, 保障电压稳定性。考虑近年电网中高比例新能源的引入, 具体可采用适用于非同步机电源的电压刚度指标来判定系统强度, 如式(5)所示, 指标反映电网中任意点维持接入点电压模值接近于接入点空载电压的能力<sup>[18]</sup>。判定指标是否大于值  $K_{vtg}^{\min}$ , 满足约束时, 认为是接入点系统较强。

$$\begin{cases} K_{vtg} = \frac{U_{sys}}{U_{sys0}} = \frac{\lambda_{SCR}}{\sqrt{1 + \lambda_{SCR}^2}} \\ K_{vtg} \geq K_{vtg}^{\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_{SCR}$  为电网任意点对应入网设备的短路比;

$U_{sys}$  为网络端口上的电压模值;  $U_{sys0}$  为入网设备未接入电网时任意点上的空载电压;  $K_{vlg}^{min}$  在工程中一般取为 0.95。

(6)同步稳定性

在单交多直网架结构下, 送受端系统间的交流联系较弱。交流联络线输送功率相同的条件下, 相比于全交流或常规交直流混联方式, 单交多直网架的同步稳定性相对较差。但对于单交多直网架来说, 可以从两方面入手保证送受端系统的稳定性。一方面可以降低交流线路输送功率  $P_{acsum}$ , 甚至设置为 0, 此时送受端系统间的同步稳定性可以得到有效提升; 另一方面, 严重故障下, 交流联络线继保装置实时检测两端相位差, 相位差达到一定数值后(见式(6))交流线路主动跳开, 送受端系统异步运行, 无需再保持同步。

$$\Delta\theta_{ac} \geq \theta_{th} \quad (6)$$

式中:  $\Delta\theta_{ac}$  为交流联络线两端的相位差;  $\theta_{th}$  为相位差阈值。

2.2 以交流线路为备用的单交多直混联方式构建方法

根据上述分析, 可以总结出单交多直网架结构的构建原则如下所述。

1) 以短路电流裕度(见式(3))最大化为原则, 在输电断面中选择单一交流通道, 其余通道采用直流输电技术。

2) 利用交流线路(N-1)/(N-2)故障可能带来的送受端系统功率缺额(见式(4))校核系统频率稳定性, 确定交流线路最大允许输送功率。

3) 利用式(2)选取交直流输送功率的合理分配关系, 保证直流系统发生(N-1)/(N-2)故障下不会造成交流线路过载。

4) 确定直流技术路线, 依据式(5)计算判定交直流混联结构下系统强度, 当系统强度符合工程要求时, 采用常规直流技术路线, 否则, 可考虑选取具有电压支撑能力的柔性直流技术路线。

5) 设置交流联络线的主动解列策略, 当交流联络线两端相位差达到一定数值后, 主动跳开交流线路, 送受端系统异步运行。

从技术角度来看, 可以将单交多直网架中交流线路的功率控制为 0, 可以有效降低 N-1 过载风险, 提高系统频率稳定性和同步稳定性。在这种条件下的单交多直构建方法如图 5 所示。

利用图 5 所示方法构建出的单交多直网架结构

在 5 个技术维度下的特性总结如表 2 所示。从表 2 中可以得出结论: 通过合理规划和运行控制, 单交多直网架结构有望在 5 个维度下均保证系统的安全稳定性。

3 算例分析

利用 IEEE 两区四机系统构造出一个单交多直典型算例, 具体方式是将 2 个 IEEE 两区四机系统通过 3 个输电通道互联, 如图 6 所示。调整送受端系统的负荷大小, 使得两个系统间交换功率达到 4 000 MW。首先需要根据系统短路电流裕度确定交流通道所在位置, 在输电距离和交流线路电抗参数确定的情况下, 遍历各个输电通道分别采用交流联络线的方案, 得到不同方案下系统最小短路电流裕度如表 3 所示。

从表 3 中可以看到, 如果选择通道 2 作为交流通道, 则系统的短路电流裕度是最大的, 短路电流超标风险最小。因此, 选择通道 1 和通道 3 作为直

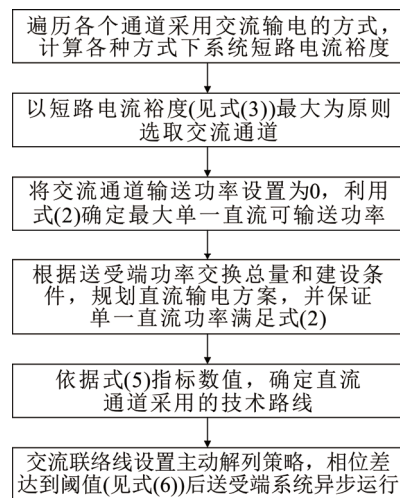


图 5 单交多直网架构建方法

Fig.5 Construction method of single AC multiple DC hybrid interconnected network

表 2 单交多直网架运行特性

Table 2 Operation characteristics of single-AC multiple-DC structure

技术路线	运行特性
潮流控制能力	完全可控
N-1 过载风险	利用式(2)保证无风险
短路电流超标风险	大幅降低
N-1 对频率冲击	交流线路 0 功率下无冲击
电压支撑能力	直流技术路线合理选择保证电压稳定
N-1 对同步冲击	主动解列保证不失稳

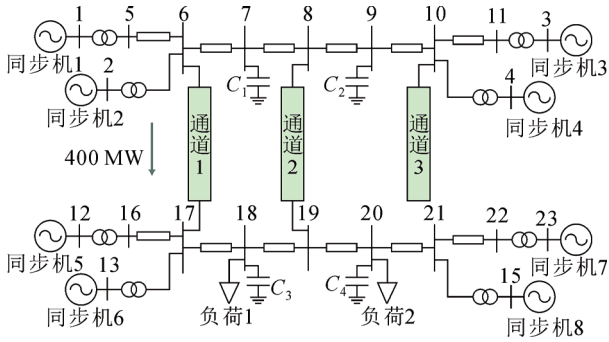


图6 三通道互联典型算例

Fig.6 Typical case of three channels interconnection

表3 不同方式下的最小短路电流裕度

Table 3 Minimum short-circuit current margin under different conditions	
采用交流输电的通道	短路电流裕度/%
通道1	18
通道2	26
通道3	16

流输电通道,选择通道2作为交流输电通道,构建单交多直网架结构,如图7所示。两个直流系统的主要参数如表4所示。

交流双回线 TL1 中,单一线路的额定功率为1 600 MW,因此在 HVDC2 发生闭锁后,2 000 MW 潮流转移至 TL1, TL1 不会发生过载。因此,从短路电流抑制、潮流控制和 N-1 过载风险等方面,图7所示的单交多直构建方案均具有良好的适应性。下面从稳定性的角度分析单交多直构建方案的技术可行性。

首先分析单交多直互联方案下,系统的频率稳定性。故障设置为0.5 s时 HVDC1 发生直流故障并闭锁,得到送受端机组的频率变化如图8所示,而交流线路潮流的变化如图9所示。从图8—图9中可以看到,当 HVDC1 发生直流闭锁后,本应由 HVDC1 输送的功率快速转移到交流联络线上,送受端机组频率偏移量很小,在一段时间小幅度波动后即可回到额定值。因此,在单交多直输电方案下,借助交流线路的互联作用,能够有效避免直流闭锁对送受端系统频率产生冲击。

为对比说明单交多直互联方案的优越性,下面在全直流异步互联方式下再次进行直流闭锁仿真计算。类似地,故障设置为0.5 s时 HVDC1 发生直流故障并闭锁,得到送受端机组的频率变化如图10所示。对比图8和图10可以看到,相比于完全异步

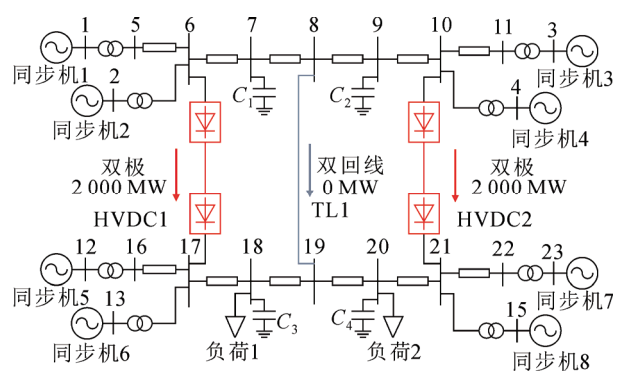


图7 单交多直典型算例

Fig.7 Typical case of single AC multiple DC

表4 直流系统主要参数

Table 4 Main parameters of the HVDC systems				
参数	额定功率/MW	极数	电压等级/kV	技术路线
HVDC 1	2 000	2	500	LCC
HVDC 2	2 000	2	500	LCC

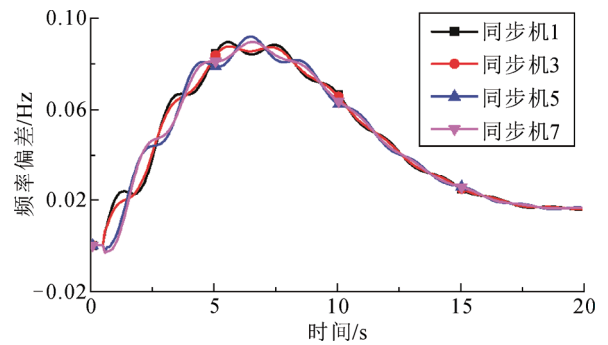


图8 HVDC1 闭锁下机组频率响应曲线

Fig.8 Frequency response curves under the HVDC1 blocking

互联方案,单交多直方案能够有效避免直流闭锁对送受端系统的功率冲击,大幅提高系统频率稳定性。

下面校验送受端系统之间的交流联络线故障对系统频率稳定性的影响。故障设置为0.5 s交流联络线发生三相金属性短路故障,持续0.1 s后交流联络线跳开,短路故障被清除。得到各个机组的频率变化如图11所示。从图11中可以看到,短路故障期间各个机组的频率快速上升,随着短路故障的切除,各机组的频率开始回落,逐渐恢复至额定值。值得说明的是,图11所示过程是短路故障造成的各个机组功率送出受阻,而长期非不平衡功率带来的一次调频变化。为说明这一点,在不设置短路故障的情况下,直接断开交流联络线,得到各个机组的频率变化如图12所示。从图12中可以看到,在没

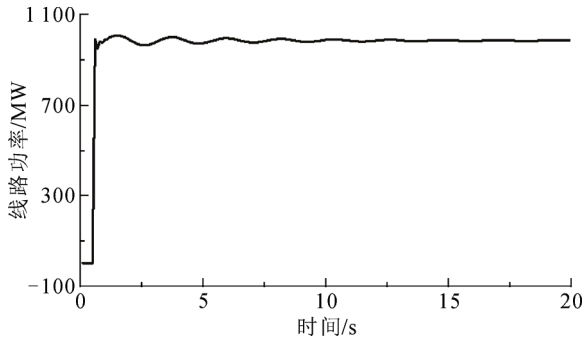


图9 HVDC1 闭锁下交流线路功率变化

Fig.9 Active power variation of the AC tie line under the HVDC1 blocking

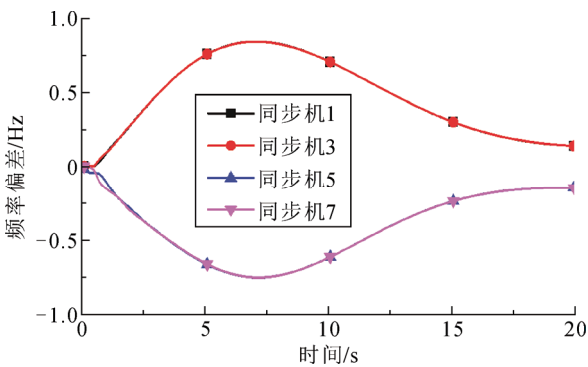


图10 异步互联方案 HVDC1 闭锁下机组频率响应曲线  
Fig.10 Frequency response curves under the HVDC1 blocking in asynchronous interconnected network

有短路故障影响的情况下, 交流联络线的开断对系统各个机组的频率几乎没有影响, 原因在于稳态下交流联络线并不承担功率输送任务。从上述分析可以得出结论, 在单交多直互联方案下, 交直流故障均不会造成系统中产生不平衡功率, 可以有效提高系统频率稳定性。

下面从同步稳定性的角度分析单交多直互联方案的可行性。相比于全交流同步互联方案, 单交多直互联方案下送受端系统间的交流联系被削弱, 在不采取任何措施的情况下系统同步稳定性会恶化。在送端系统母线 6—母线 7 之间的线路处施加短路故障, 故障持续 0.1 s 后清除, 得到系统中各个机组的响应特性如图 13 所示。从图 13 中可知, 在不采取任何措施的情况下, 短路故障会造成送受端机组间难以保持同频, 相位差持续增大, 最终送受端机组失步, 系统同步稳定性无法满足稳定运行要求。

虽然单交多直系统的固有结构对系统同步稳定性会产生负面影响, 但单交多直结构具备灵活转变至异步互联方式的优势。对于单交多直互联方案,

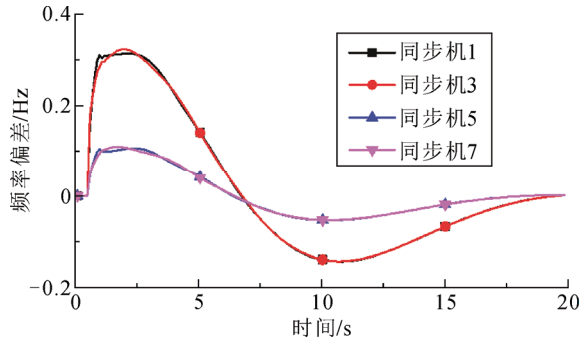


图11 交流短路故障和断线下机组频率响应曲线

Fig.11 Frequency response curves under the short-circuit fault and disconnection

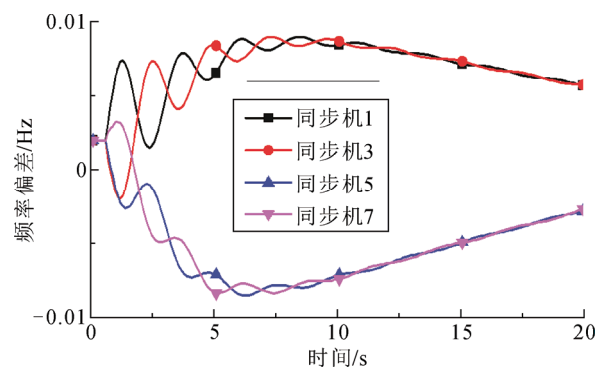
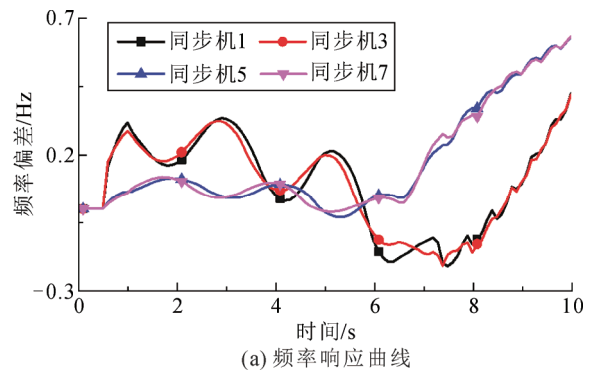
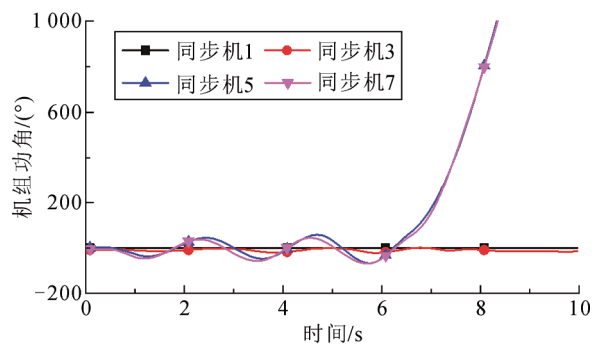


图12 交流断线下机组频率响应曲线

Fig.12 Frequency response curves under the disconnection



(a) 频率响应曲线



(b) 功角响应曲线

图13 送端短路故障下机组频率和功角响应曲线

Fig.13 Frequency and angle response curves under the short-circuit fault in the sending-end system

如果交流联络线主动解列,则送受端系统进入异步互联状态,系统同步稳定性问题也不复存在。为了验证交流联络线主动解列对系统稳定性的影响,对于图7所示的系统,令交流联络线在两端母线相位差达到 $40^\circ$ 时主动解列。再次在送端系统施加同样的短路故障,交流联络线两端母线相位在1.5 s处达到 $40^\circ$ ,交流联络线断开,得到仿真结果如图14所示。从图14中可以看到,当交流联络线主动解列后,送受端系统机组的频率逐渐恢复至额定值,系统趋于稳定。因此,借助交流线路的主动解列功能,单交多直互联方案能够有效避免送受端系统失步。

## 4 结论

1) 从潮流控制能力、 $N-1$  过载风险、短路电流超标风险、频率稳定性和同步稳定性5个维度对比了全交流同步互联、常规交直流混联、全直流异步互联和单交多直流混联等技术特点。结果表明,单交多直混联结构在上述5个技术维度均能够表现出优越性。

2) 在一个典型单交多直算例中开展仿真验证,结果表明单交多直系统借助交流线路主动解列功能,可有效补齐自身在同步稳定性方面的短板,从而大幅提高电网的可控性、灵活性和安全稳定性。

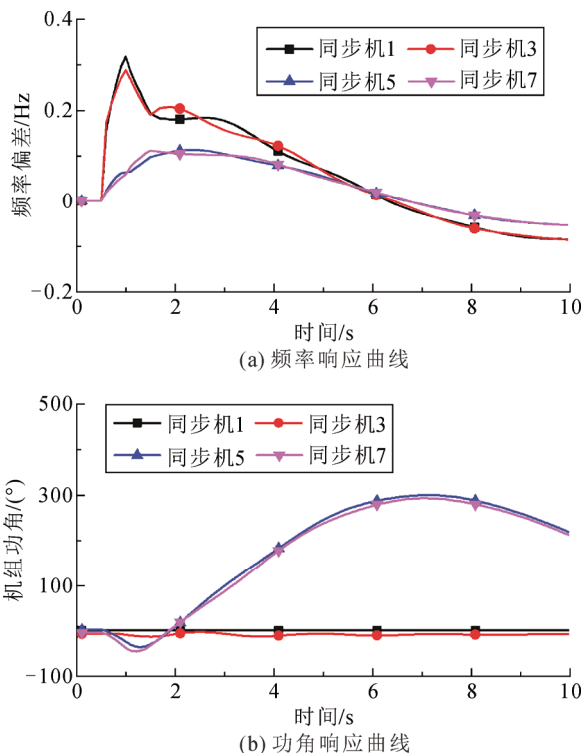


图14 交流线路主动解列下机组频率和功角响应曲线  
Fig.14 Frequency and angle response curves under the active disaggregation

## 参考文献 References

- [1] 司金冬, 吴熙, 郭其胜, 等. 面向高比例新能源消纳的地区电网柔性互联规划与运行技术综述[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2272-2286.  
SI Jindong, WU Xi, GUO Qisheng, et al. Review of flexible interconnection of regional grids interconnection planning and operation techniques for high percentage of renewable energy consumption[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2272-2286.
- [2] 刘柏良, 汪惟源, 张君黎, 等. 大规模风电并网后江苏电网柔直换流站与UPFC的有功功率协调控制方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 138-145.  
LIU Bailiang, WANG Weiyan, ZHANG Junli, et al. Active power coordination control method of converter stations of MMC-DC system and UPFC in Jiangsu power grid interconnected with the large-scale wind power[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 138-145.
- [3] 邓步青, 文云峰, 于琳琳, 等. 限流器配置与网架结构优化协同的受端电网短路电流抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 151-161.  
DENG Buqing, WEN Yunfeng, YU Linlin, et al. Short-circuit current suppression strategy for receiving-end power grid based on coordination of current limiter configuration and network structure optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 151-161.
- [4] 王之伟, 黄俊辉, 程亮, 等. “嵌入式”直流技术在省级电网中的规划及应用[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 65-74.  
WANG Zhiwei, HUANG Junhui, CHENG Liang, et al. Planning and application of embedded DC transmission technology in the provincial transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 65-74.
- [5] 刘昕宇, 王国腾, 徐政, 等. 含MMC的交直流输电系统短路电流统一求解方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 184-189.  
LIU Xinyu, WANG Guoteng, XU Zheng, et al. Unified solution method of short circuit current for AC/DC transmission system with MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 184-189.
- [6] 王之伟, 黄俊辉, 孙文涛, 等. 含嵌入式直流的受端电网动态响应智能分析方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 77-85, 99.  
WANG Zhiwei, HUANG Junhui, SUN Wentao, et al. Intelligent analysis method for dynamic response of receiving system with embedded HVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 77-85, 99.
- [7] 罗澍忻, 刘瑞宽, 金楚, 等. 广东电网背靠背直流高频谐振风险及应对措施[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 1-9, 21.  
LUO Shuxin, LIU Ruikuan, JIN Chu, et al. Risk and countermeasures of high-frequency resonance for back-to-back HVDC in Guangdong power grid[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 1-9, 21.
- [8] 王一振, 邱逢良, 雷鸣, 等. 含大容量新能源接入的柔性直流背靠背分区互联系统频率支撑策略研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 959-967.  
WANG Yizhen, QIU Fengliang, LEI Ming, et al. Frequency support strategy for VSC-BTB based DC segmented system with large capacity renewable energy integration[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 959-967.
- [9] 李雅晗, 夏世威, 马琳琳, 等. 交直流混联系统暂态功角稳定评估及特征量可解释性分析[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 1-9.  
LI Yahan, XIA Shiwei, MA Linlin, et al. Transient power angle stabil-

- ity evaluation and interpretability analysis of AC/DC hybrid power system[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 1-9.
- [10] 徐政, 董桓锋, 宋鹏程, 等. 同步电网合理规模的3个基本约束研究[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 77-84.  
XU Zheng, DONG Huanfeng, SONG Pengcheng, et al. Three basic constraints for reasonable size of synchronous grids[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 77-84.
- [11] 董桓锋, 徐政, 钱迎春, 等. 交直流同步电网异步分隔的一般性原则[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2167-2174.  
DONG Huanfeng, XU Zheng, QIAN Yingchun, et al. General principle of asynchronous segment for AC/DC synchronous power systems[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2167-2174.
- [12] 沈政委, 孙华东, 仲悟之, 等. 基于关键事件的高比例新能源电力系统故障连锁演化规律分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 57-65.  
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, ZHONG Wuzhi, et al. Key event based analysis of evolution law of cascading failures in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 57-65.
- [13] 彭发喜, 黄伟煌, 许树楷, 等. 柔性直流输电系统异步自动控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 20-26.  
PENG Faxi, HUANG Weihuang, XU Shukai, et al. Asynchronous automatic control strategy for MMC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 20-26.
- [14] 束洪春, 邵宗学, 赵伟, 等. 含柔性直流的交直流混联电力系统紧急频率控制研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5590-5604.  
SHU Hongchun, SHAO Zongxue, ZHAO Wei, et al. Research on emergency power control of AC-DC hybrid power system with flexible DC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5590-5604.
- [15] 何森, 刘洁, 王奇, 等. 交直流并联输电通道功率分配的分布鲁棒优化[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 225-236.  
HE Sen, LIU Jie, WANG Qi, et al. Distributionally robust optimization for the power allocation of AC/DC parallel transmission channels[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 225-236.
- [16] 于枋彤, 刘铖, 张宇驰. 输电线开断控制对交直流混联电力系统暂态稳定性影响研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 85-91.  
YU Fangtong, LIU Cheng, ZHANG Yuchi. Research on influence of transmission line breaking control on transient stability of AC/DC hybrid power system[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1): 85-91.
- [17] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 503-510.  
LÜ Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 503-510.
- [18] 徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805-3819.  
XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805-3819.



HUANG Ying  
Ph.D., Professor

黄莹

1977—, 女, 博士, 教授, 博导, IEEE PES WIP 会员

主要从事新型交直流输电技术、新能源发电并网技术方面的研究工作

E-mail: huangyingzju@zju.edu.cn



WANG Guoteng  
Ph.D.  
Corresponding author

王国腾(通信作者)

1996—, 男, 博士

主要研究方向为高比例可再生能源电力系统运行与控制、直流输电技术

E-mail: wgt339@zju.edu.cn

收稿日期 2024-08-28 修回日期 2025-02-18 编辑 曹昭君