

四川省电力行业协会文件

川电行协〔2025〕69号

四川省电力行业协会 关于公开征求团体标准《面向柔性直流电网 故障限流的网架结构规划方法导则》 意见的通知

各有关单位：

为加强四川省电力行业协会（以下简称“行协”）团体标准管理，确保标准制定具有广泛的代表性和科学性，行协已组织国网四川省电力公司眉山供电公司等单位开展行协团体标准《面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划方法导则》起草工作，形成标准征求意见稿（附件1）和编制说明（附件2）。

按照《四川省电力行业协会团体标准管理办法》，为保

证团体标准的科学性、适用性和可操作性，现面向行协各会员单位及社会各界公开征求意见。有关意见反馈，请填写《四川省电力行业协会团体标准征求意见反馈表》（附件3），并于2025年10月9日前以电子邮件的方式反馈至行协，逾期未复函，视为无异议。

四川省电力行业协会联系人：凌小寒

联系方式：18740837612

邮箱地址：scepta-hyb@163.com

- 附件：1. 《面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划方法导则》征求意见稿
2. 《面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划方法导则》征求意见稿编制说明
3. 四川省电力行业协会团体标准征求意见反馈表



四川省电力行业协会秘书处

2025年9月9日印发

附件1

ICS 点击此处添加 ICS 号

点击此处添加中国标准文献分类号

T/SCEPA

团 体 标 准

T/SCEPA XXXXX—XXXX

面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术导则

Guidelines for Network Topology Planning Method Aimed at Fault Current Limiting
in VSC-DC Grids

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

（征求意见稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

四川省电力行业协会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

 4.1 单条线路故障电流取值 2

 4.2 单条线路故障电流水平 2

 4.3 直流电网故障电流水平 2

5 计算方法及应用 3

 5.1 故障电流影响范围计算方法 3

 5.2 应用要求 3

6 规划原则 3

 6.1 直流电网网架规划要求 3

 6.2 典型直流网架推荐 3

前 言

本文件依据GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由四川省电力行业协会提出并归口。

本文件起草单位：国网四川省电力公司眉山供电公司、四川大学、国网四川省电力公司电力科学研究院、东北电力大学。

本文件主要起草人：陈亮、李保宏、王曦、江琴、冷敏瑞、伍盛、郑华、赵虹、蔡华、刘晶、易伟、范成围、陈保瑞、江守其、辛业春、王丽馨、黄波、熊伟、马坤、曾仕伦、李明翔，罗晨、周浩然、李建兵、朱礼鹏、况达、潘南西、蔡泓宇。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至四川省电力行业协会（四川省成都市成华区望平街135号，610056）。

面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划方法导则

1 范围

本文件规定了柔性直流电网故障电流水平指标计算与降低故障电流的规划原则等内容。
本文件适用于柔性直流电网,其他类型直流电网的电流水平评估、故障分析及网架规划可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款,其中注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 13498-2017 高压直流输电术语
GB/T 25843-2017 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电控制与保护设备技术要求
GB/T 30553-2023 基于电压源换流器的高压直流输电
GB/T 34118-2017 高压直流系统用电压源换流器术语
GB/T 35692-2017 高压直流输电工程系统规划导则
GB/T 38328-2019 柔性直流系统用高压直流断路器的共用技术要求
GB/T 40580-2021 高压直流输电系统机电暂态仿真建模技术导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

对称单极 symmetrical monopole

两端直流电压输出对称的单个电压源换流器。

[来源: GB/T 34118-2017]

3.2

不对称单极 asymmetrical monopole

两端直流电压输出不对称的单个电压源换流器,通常一端接地。

[来源: GB/T 34118-2017]

3.3

双极 bipole

两个或两个以上电压源换流器不对称单极构成一个双极直流电路。

[来源: GB/T 34118-2017]

3.4

对称单极高压直流系统 symmetrical monopolar HVDC system

每个换流站由单个换流器单元或并联连接的两个或两个以上换流器单元组成,且两个直流输出端的对地电压对称的高压直流系统。

[来源: GB/T 34118-2017]

3.5

双极高压直流系统 bipolar HVDC system

具有两个对地处于相反极性、可独立运行的极的高压直流系统。

[来源: GB/T 34118-2017]

3.6

单极接地故障 Pole-to-ground fault

直流系统中的一极(正极或负极)导体与大地之间形成非预期的电气连接,导致该极对地电压降低或电流异常流经接地路径的故障。

3.7

极间短路故障 Pole-to-pole fault

直流电网的正极与负极之间发生非预期的直接电气连接,导致两极之间形成通路,使得直流电压降低、直流电流异常增大的故障。

3.8

近端换流站 Near-end converter station

与故障直流线路直接相连的两端换流站。

3.9

次近端换流站 Sub-near-end converter station

与故障直流线路直接相连的两端换流站,以及与该两端换流站经直流线路直接相连的其他换流站。

3.10

近区网架 Near-grids

包括了故障直流线路的近端换流站与次近端换流站的直流电网网架结构。

4 基本规定

4.1 单条线路故障电流取值

直流电网中单条线路故障电流取值以故障后第6ms的数值为准。

4.2 单条线路故障电流水平

直流电网中单条线路故障电流取值以故障后第6ms的数值为准。

4.3 直流电网故障电流水平

各条线路故障电流水平最高值为直流电网的故障电流水平。

5 故障电流影响范围计算公式及方法

5.1 计算公式

故障电流影响范围指标 k 按公式(1)计算。

$$k=L_{ed}/L_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

k —— 故障电流影响范围指标；

L_{ed} —— 换流站等效高频电感值，取换流站100Hz处等效阻抗模型的幅值；

L_d —— 直流线路等效高频电感值，取直流线路100Hz处等效阻抗模型的幅值；

5.2 计算方法

直流电网故障电流分析计算，应采用表1所规定的计算方法。

表1 不同直流电网故障电流计算方法

数值范围	直流故障电流计算方法
$k < 0.1$	考虑近端换流站放电影响
$0.1 \leq k < 1$	考虑近端与次近端换流站放电影响
$k \geq 1$	考虑直流电网中全部换流站放电影响

6 规划原则

6.1 直流电网网架规划要求

直流电网故障后，其受直流电网网架影响不同，考虑各类故障电流特性的直流电网网架规划原则应遵循表2的要求。

表2 不同故障电流特性的网架规划表

故障类型	指标数值	故障电流特性	推荐网架规划
A+C+E	$k < 0.1$	不受网架影响	不考虑网架影响
A+C+F	$k < 0.1$	不受网架影响	不考虑网架影响
A+C+G	$k \geq 1$	受全网架影响	考虑全网架影响
B+D+E	$0.1 \leq k < 1$	受近区网架影响	考虑近区网架影响
B+D+F	$0.1 \leq k < 1$	受近区网架影响	考虑近区网架影响
B+C+F	$0.1 \leq k < 1$	受近区网架影响	考虑近区网架影响
B+C+E	$k \geq 1$	受全网架影响	考虑全网架影响
注：A：对称单极直流电网；B：双极直流电网；C：单极接地故障；D：极间短路故障；E：直流侧大地全端接地；F：直流侧金属回线接地；G：交流侧接地			

6.2 典型直流网架推荐

6.2.1 不受网架影响情况

此种情况包括A+C+E、A+C+F两类场景，网架规划时不需考虑直流故障电流水平限制的约束。

6.2.2 考虑近区网架影响

此种情况包括B+D+E、B+D+F、B+C+F三类场景，网架规划时可考虑在故障电流水平较高的局部电网增加环形拓扑，并避免辐射型拓扑。

6.2.3 考虑全网架影响

此种情况包括A+C+G、B+C+E两类场景，网架规划时可考虑环形拓扑，见图1（a）所示；并避免辐射型拓扑，如图1（b）所示。

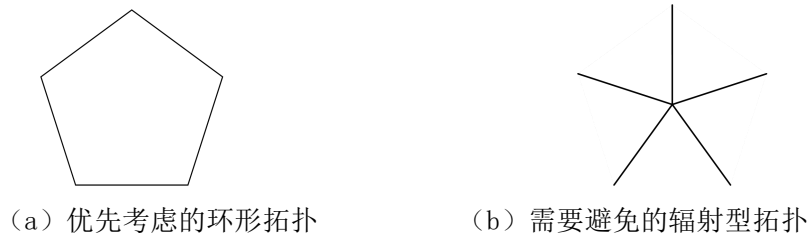


图 1 典型网架结构拓扑

附件 2

《面向柔性直流电网故障限流的网
架结构规划技术导则》（征求意见稿）
（编制说明）

2025 年 9 月

目 录

一、工作简况	1
（一）任务来源	1
（二）编制背景和目的意义	1
（三）编制过程	4
二、标准编制原则与主要技术依据和内容	5
（一）标准编制原则	5
（二）主要技术依据和内容	5
三、主要试验验证分析	8
（一）故障电流计算方法	8
（二）验证分析	13
四、与现行法律、法规和强制性国家标准的关系	16
五、采用国际标准或国外先进标准的情况	16
六、重大分歧意见的处理情况	17
七、作为强制性标准或推荐性标准的建议	17
八、贯彻标准的要求和建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等内容） ..	17
九、废止现行有关标准的建议	17
十、其他应予说明的事项	17

一、工作简况

（一）任务来源

面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术导则自 2024 年 5 月起，由国网四川省电力公司眉山供电公司、四川大学、国网四川省电力公司电力科学研究院、东北电力大学等单位共同预研、编制，并于 2024 年 12 月通过四川省电力行业协会立项批复。

（二）编制背景和意义

柔性直流输电技术因其制造难度低、损耗小、波形质量高等优点，在新能源并网、远距离输电、弱交流电网供电、交直流互联、城市配电等领域得到了快速发展和广泛应用。基于柔性直流输电构建多端系统形成直流电网已经成为国内外电网发展的重要目标。目前，国内外对多端直流输电及直流电网技术的研究日益深入。国际大电网会议成立了 6 个工作组，在直流电网可行性、规划、直流换流器模型、拓扑、潮流控制、控制保护以及可靠性等方面开展研究工作；欧洲提出了超级智能电网规划概念，利用直流电网技术接入北海、波罗的海海域风力发电和北非、中东的光伏发电；美国提出基于先进直流输电技术构建骨干网架，以满足新能源发展及智能电网互联建设的重大需求。

借势国家能源改革政策，我国也已建成南澳 ± 160 千伏三端柔性直流输电示范工程、舟山 ± 200 千伏五端柔性直流输电工程，张北 ± 500 千伏四端柔性直流电网示范工程、昆柳龙 ± 800 千伏三端混合直流输电示范工程。未来我国将形成大规模复杂交直流混联电网，为保证交直流电网的安全可靠运行，对其进一步的研究必不可少。随着直流电网的扩大，故障事件发生频率日益增加。然而，不同于交流系统，电

力电子器件构成的直流电网故障电流上升速度快、设备耐受过流能力差、需要快速切断，而直流无过零点、切除困难。当前，准确计算柔性直流电网故障电流并通过前期网架结构规范设计限制故障电流水平，已经成为半桥换流器+断路器直流电网最为敏感的重大问题之一。

总之，建立该领域的技术标准体系，降低柔性直流电网最大故障电流，将确保运行中的电力电子设备有更宽的安全裕度，保证电网安全运行。尤其是在电网规划建设工程中，利用柔性直流电网拓扑结构降低最大故障电流，将极大地降低相关电力电子设备的研造难度、降低建设成本，同时还可提高电网整体可靠性和安全性等。

表 1 国家标准全文公开系统查询标准对比

序号	标准号	标准名称	类别	状态	发布日期	实施日期
1	GB/T 35692-2017	高压直流输电工程 系统规划导则	推标	现行	2017-12-29	2018-07-01
2	GB/T 30553-2023	基于电压源换流器 的高压直流输电	推标	现行	2023-11-27	2024-06-01
3	GB/T 38328-2019	柔性直流系统用高 压直流断路器的共 用技术要求	推标	现行	2019-12-10	2020-07-01
4	GB/T 40580-2021	高压直流输电系统 机电暂态仿真建模 技术导则	推标	现行	2021-10-11	2022-05-01
5	GB/T 22390.3-2008	高压直流输电系统 控制与保护设备 第 3 部分：直流系统 极控设备	推标	现行	2008-09-24	2009-08-01
6	GB/T 22390.4-2008	高压直流输电系统 控制与保护设备 第 4 部分：直流系统	推标	现行	2008-09-24	2009-08-01

		保护设备				
7	GB/T 25843-2017	±800kV 特高压直流 输电控制与保护设 备技术要求	推标	现行	2017-12-29	2018-07-01

表 2 全国团体标准信息平台查询标准对比

序号	团体名称	标准编号	标准名称	公布日期	状态
1	中国电机工程 学会	T/CSEE 0066—2017	柔性直流输电用连 接变压器	2018-08-07	现行
2	中国电机工程 学会	T/CSEE /Z0065—2017	直流配电网用直流 控制与保护设备试 验规程	2018-08-07	现行
3	中国电机工程 学会	T/CSEE /Z0064—2017	直流配电网用直流 控制与保护设备技 术要求	2018-08-07	现行
4	中国电工技术 学会	T/CES 002—2018	高压直流保护试验 装置技术导则	2018-11-13	现行
5	中国电工技术 学会	T/CES 003—2018	直流微电网运行控 制技术规范	2018-11-13	现行

经过在国家标准全文公开系统及全国团体标准信息平台对所申请立项标准《面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术导则》相关关键词进行检索调研，表明目前还未公布有关面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术相关的国家标准，相关团体标准也较少且所申请立项标准与已有标准相比，均给出了更具体更全面的规范和要求。

本标准旨在为面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术提供技术支撑，推动“半桥+直流断路器”的直流电网发展。通过制定本标准，有助于填补面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划中具

体实施方案相关标准的空白，推动健全标准体系的建立。

（三）编制过程

2024 年 9 月，由国网四川省电力公司眉山供电公司联合四川大学召开项目研究工作会，初步成立了标准工作小组。

2024 年 10 月，标准工作组组织第一次线上会议，研究相关标准的推进工作和工作计划。

2024 年 11 月-12 月，标准工作组开展的标准的技術内容调研，并根据前期研究成果分析，运用标准化经典原理与科学方法，明确标准范围，针对直流电网故障电流的分析原则、技术要求、网架结构、限流方法及原则等关键问题进行深入研究，经广泛讨论、充分论证，形成工作组草案稿。

2024 年 12 月 5 日，通过立项论证，四川省电力行业协会发布了《面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术导则》团体标准立项批复的通知。

2025 年 3 月 5 日，标准起草组参与了四川省电力行业协会组织的标准立项论证会，汇报的标准编制的必要性、目的和意义，以及标准草案的框架和主要内容。

2025 年 4 月 5 日，根据立项论证专家的意见，编写工作组开展了第二次标准研制工作讨论会，开展了故障限流、指标计算等直流电网网架规划相关需求的补充调研。

2025 年 5 月 25 日，组织了标准草案的线上第三次工作讨论会，进一步针对标准框架和技术内容展开技术研讨，征求各相关方意见。

2025 年 6 月 5 日，召开编写工作组第四次会议，依据标准编制计划任务书，邀请了四川电科院、四川大学等相关单位技术专家对标

准进行审查，形成优化稿。2025 年 7 月 2 日，编写工作组根据研讨意见，开展面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术补充调研，并研制形成“面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划技术导则”团体标准草案及编制说明。

2025 年 9 月，工作组对标准进行标准初稿审查，并形成标准征求意见稿。

二、标准编制原则与主要技术依据和内容

（一）标准编制原则

适用性原则。本标准的编制充分考虑与我国现行法律法规、直流输电运行规范等相符合性，充分考虑可操作性，便于标准的实施。

规范性原则。本标准经过了科学的研究，进行了预先设计，在制定标准过程中遵守制定程序和编写规则。

（二）主要技术依据和内容

在研制过程中，本标准主要参考了 GB/T 13498-2017《高压直流输电术语》、GB/T 35692-2017《高压直流输电工程系统规划导则》、GB/T 34118-2017《高压直流系统用电压源换流器术语》、GB/T 30553-2023《基于电压源换流器的高压直流输电》等文件。

本标准主要技术内容框架包括以下部分：

表 3 本标准主要技术内容框架

章编号	章标题	节编号	节标题	主要技术
1	范围	/	/	本文件规定了柔性直流电网故障电流水平评估、不同直流故障分析原则以及降低故障电流的网架规划原则等内容。 本文件适用于对称单极柔性直流电网与

				双极柔性直流电网，其他类型直流电网可参照执行。
2	规范性引用文件	/	/	无。
3	术语和定义	3.1	对称单极	本标准术语参考 GB/T 34118-2017《高压直流系统用电压源换流器术语》对称单极的定义。
		3.2	不对称单极	本标准术语参考 GB/T 34118-2017《高压直流系统用电压源换流器术语》不对称单极的定义。
		3.3	双极	本标准术语参考 GB/T 34118-2017《高压直流系统用电压源换流器术语》双极的定义。
		3.4	对称单极高压直流系统	本标准术语参考 GB/T 34118-2017《高压直流系统用电压源换流器术语》对称单极的定义。
		3.5	双极高压直流系统	本标准术语参考 GB/T 34118-2017《高压直流系统用电压源换流器术语》双极高压直流系统的定义。
		3.6	单极接地故障	本标准术语对单极接地故障进行定义。
		3.7	极间短路故障	本标准术语对极间短路故障进行定义。
		3.8	近端换流站	本标准术语对近端换流站进行定义。
		3.9	次近端换流站	本标准术语对次近端换流站进行定义。
		3.10	近区网架	本标准术语对近区网架进行定义。
4	基本规定	4.1	单条线路故障电流取值	规定了直流电网中单条直流线路的故障电流取值方法。
		4.2	单条线路故	规定了直流电网中单条直流线路的故障电

			障电流水平	流水平计算方法。
		4.3	直流电网故障电流水平	规定了直流电网的故障电流水平计算方法。
5	故障电流影响范围计算公式及方法	5.1	计算公式	规定了故障电流影响范围指标计算公式。
		5.2	计算方法	规定了基于故障电流影响范围指标的不同直流电网故障电流计算方法。
6	规划原则	6.1	直流电网网架规划要求	明确了考虑各类故障电流特性的直流电网网架规划原则。
		6.2	典型直流网架推荐	规定了包括不受网架影响情况、考虑近区网架影响、考虑全网架影响等不同情况下的推荐网架。

主要技术指标说明如下：

1. 基本规定

直流电网故障电流计算以 3 检测及 3ms 断开的时间进行要求，基于相关要求，直流电网中单条线路故障电流取值以故障后第 6ms 的数值为准，直流电网中单条线路故障电流取值以故障后第 6ms 的数值为准，各条线路故障电流水平最高值为直流电网的故障电流水平。

2.故障电流计算

在不同直流电网中，故障电流受各换流站电气距离远近影响，基于此制定故障电流影响范围指标 k 。当 $k < 0.1$ 时，只需考虑近端换流站放电影响，当 $0.1 \leq k < 1$ 时，考虑近端与次近端换流站放电影响，当 $k \geq 1$ 时，考虑直流电网中全部换流站放电影响。

3.规划原则

直流电网故障后，其受直流电网网架影响不同，考虑各类故障电流特性的直流电网网架规划原则，根据故障电流影响范围指标不同，

可按照不受网架影响、受全网架影响、受近区网架影响三种情况。在受全网架影响、受近区网架影响情况下，网架规划时可考虑环形拓扑，并避免辐射型拓扑。

三、主要试验验证分析

（一）故障电流计算方法

在一个典型的双极直流系统换流站中，正极换流器和负极换流器分别通过换流变压器与交流电网相连，并在正负极连线中点引出专用金属回路 (dedicated metallic return, DMR) 导体用于承载正负极换流器的回路电流以及构造不对称运行条件，如图 1 (a)所示。图中 L_n 为中性线电抗， R_0 和 L_0 为直流线路电阻和电感， L_d 为平波电抗。双极直流系统的换流站等效模型如图 1 (b)所示，其中 R_{eq} 、 L_{eq} 和 C_{eq} 分别是换流站等效电阻、电感和电容， Z_0 是包含平波电抗的线路阻抗。

直流电抗和中性点电抗的电感都在百毫亨级，使得线路综合阻抗失去了在高频段的主导作用。因此在简化计算阻抗时，应该使简化的故障网络包含更多的线路和换流器。

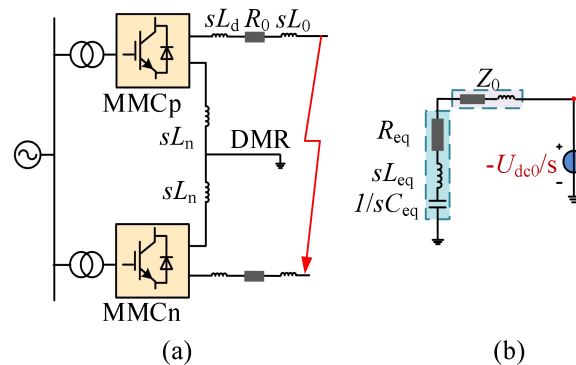
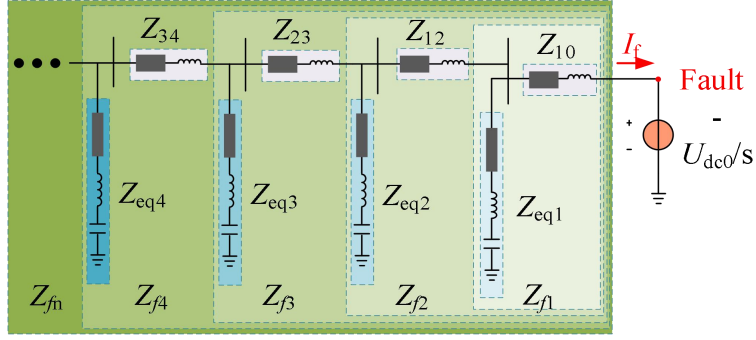


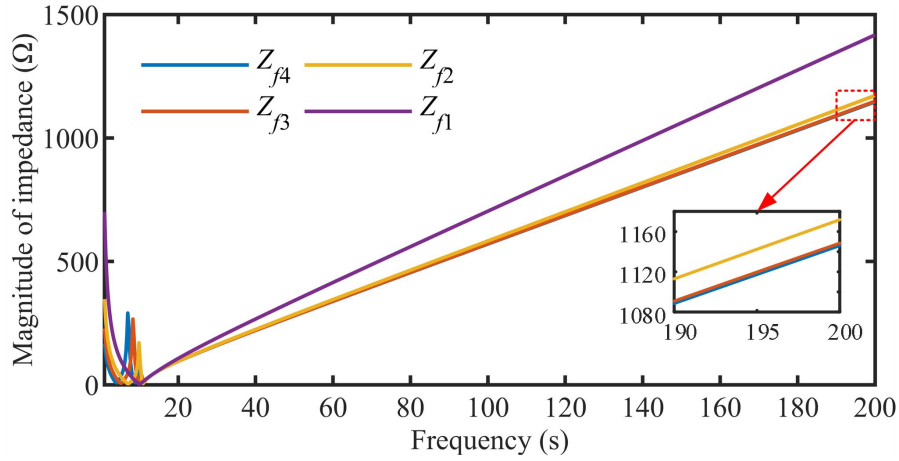
图 1 双极直流系统的换流站结构与等效模型

选取直流电网中与故障线路直接或间接相连的一部分，如图 2 (a)所示。由近及远依次保留与故障点直接或间接相连的换流器阻抗以及线路阻抗，得到一系列等效计算阻抗：

$$Z_{fn} = \left(\dots \left(\left(Z_{eqn} + Z_{n-1,n} \right) // Z_{eq(n-1)} + Z_{n-2,n-1} \right) // Z_{eq(n-2)} + \dots \right) \quad (1)$$



(a) 故障电路



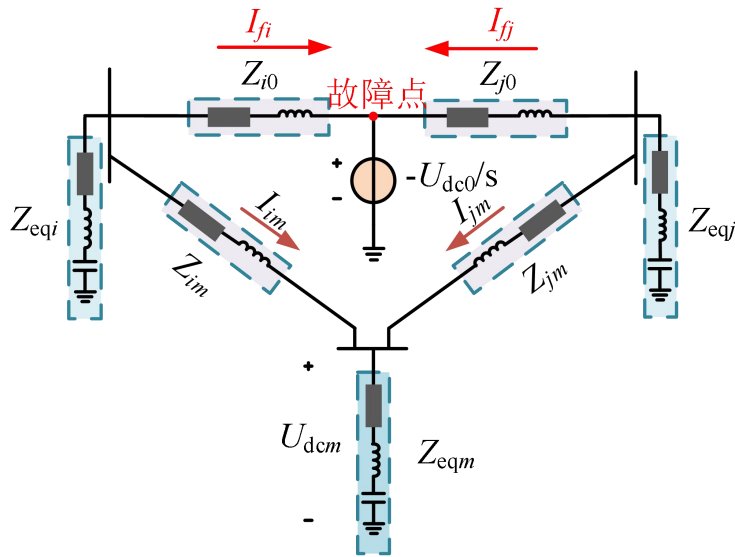
(b) 等效阻抗

图 2 故障电路与等效阻抗

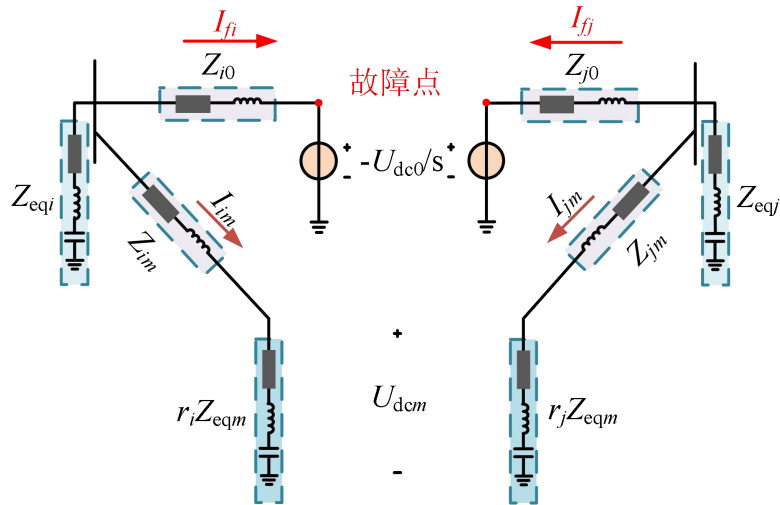
根据高频等效模型的原理,10ms 内的故障电流值主要受到阻抗频域中 100Hz 以上区域的影响。因此分别分析不同等效计算阻抗的频域幅值,重点关注 100Hz 以上的部分。分别画出 $Z_{f1} \sim Z_{f4}$ 在频域的阻抗幅值图 2 (b)所示,参考张北直流电网工程的参数,直流电抗取 0.15H,中性线电抗取 0.3H。从图 2 (b)可以清楚地看出,在高频部分,只考虑近端换流站的 Z_{f1} 与其他阻抗相差很大,表明对称单极直流电网故障阻抗的高频等效方法不能直接应用到双极直流电网中。随着计算阻抗计及的换流站增多,高频段阻抗趋于同一条阻抗曲线, Z_{f3} 和 Z_{f4} 的阻抗曲线基本重合,而 Z_{f2} 与 Z_{f3} 和 Z_{f4} 的相对误差很小,因此,可以

得出这样的结论：对于双极直流电网的极间故障电流计算，计算阻抗保留至次近端换流站可简化计算公式，并具有较高计算精度。

环网型直流电网中存在换流站通过不同路径向故障点馈入电流的情况，需要对环网进行解环并计算等效阻抗。以图 3(a)所示的三角环网为例，换流站 m 不仅是故障点左侧换流站的次近端换流站，而且也是右侧换流站的次近端换流站。为了分析这种情况下的故障电流，需要将三角形回路解耦为两个具有不同等效阻抗的辐射型网络，如 3(b)所示。



(a) 三角环网



(b) 将环网解开为两个辐射型网络

图 3 环网的解环示意图

定义两侧解环系数分别为 r_i 和 r_j ，通过将解环系数与换流站等效阻抗 Z_{eqm} 相乘得到解环后分别与故障点两侧相连的等效阻抗，其表达式为：

$$r_i Z_{eqm} = \frac{U_{dcm}}{I_{im}} = \frac{(I_{im} + I_{jm}) Z_{eqm}}{I_{im}} = (1 + \frac{I_{jm}}{I_{im}}) Z_{eqm} \quad (2)$$

$$r_j Z_{eqm} = \frac{U_{dcm}}{I_{jm}} = \frac{(I_{im} + I_{jm}) Z_{eqm}}{I_{jm}} = (1 + \frac{I_{im}}{I_{jm}}) Z_{eqm} \quad (3)$$

因此解环系数的表达式为：

$$\begin{cases} r_i = (1 + \frac{I_{jm}}{I_{im}}) \\ r_j = (1 + \frac{I_{im}}{I_{jm}}) \end{cases} \quad (4)$$

线路电流 I_{im} 和 I_{jm} 随着潮流分布的变化而变化，不利于构建通用的阻抗计算方法，因此需要根据电路特点求解解环系数的详细表达式。根据电路原理，可以得到 I_{im} 的表达式为：

$$I_{im} = \frac{U_{dc0} - (U_{dcm} + I_{im} Z_{im})}{Z_{i0}} = \frac{U_{dc0} - U_{dcm} - I_{im} Z_{im}}{Z_{i0}} \quad (5)$$

移项求解 I_{im} 得：

$$I_{im} = \frac{Z_{eqi} (U_{dc0} - U_{dcm}) - U_{dcm} Z_{i0}}{Z_{eqi} Z_{i0} + Z_{eqi} Z_{im} + Z_{i0} Z_{im}} \quad (6)$$

同理可得 I_{jm} 的表达式为：

$$I_{jm} = \frac{Z_{eqj} (U_{dc0} - U_{dcm}) - U_{dcm} Z_{j0}}{Z_{eqj} Z_{j0} + Z_{eqj} Z_{jm} + Z_{j0} Z_{jm}} \quad (7)$$

根据基尔霍夫电流定律，得 I_{im} 和 I_{jm} 之和为：

$$I_{im} + I_{jm} = \frac{U_{dcm}}{Z_{eqm}} \quad (8)$$

将式 (6) 和式 (7) 代入式 (8)，并用 a 和 b 分别代替

$Z_{eqi}Z_{i0}+Z_{eqi}Z_{im}+Z_{i0}Z_{im}$ 和 $Z_{eqj}Z_{j0}+Z_{eqj}Z_{jm}+Z_{j0}Z_{jm}$, 得 U_{dc0} 的表达式为:

$$U_{dc0} = \left(1 + \frac{\frac{ab}{Z_{eqm}} + bZ_{i0} + aZ_{j0}}{bZ_{eqi} + aZ_{eqj}} \right) U_{dcm} \quad (9)$$

结合式(6)、式(7)和式(9), 可以推导得出 I_{im} 和 I_{jm} 的比值为:

$$\frac{I_{jm}}{I_{im}} = \frac{a}{b} \cdot \frac{Z_{eqj}(U_{dc0} - U_{dcm}) - U_{dcm}Z_{j0}}{Z_{eqi}(U_{dc0} - U_{dcm}) - U_{dcm}Z_{i0}} = \frac{\frac{aZ_{eqj}}{Z_{eqm}} + Z_{eqj}Z_{i0} - Z_{eqi}Z_{j0}}{\frac{bZ_{eqi}}{Z_{eqm}} + Z_{eqi}Z_{j0} - Z_{eqj}Z_{i0}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2)和式(3)中即可得到只与电路参数有关的解环等效阻抗。

值得注意的是, 高频等效模型主要利用了电感在高频段起主导作用的特性, 因此改进后的模型精度受到换流站等效高频电感值和直流线路等效高频电感值(含平波电抗器)相对大小的影响。图 4 给出了等效高频电感值和直流线路等效高频电感值的比值 k 变化时 Z_{f2} 和 Z_{f4} 的误差范围。以 $k=3$ 为例, 橙色误差带的上边线是 Z_{f2} 的频域阻抗曲线, 下边线则是 Z_{f4} 的频域阻抗曲线, 两者之间形成了彩色误差区域。很显然, 比值 k 越小, 两者的误差越小。

不论对称单极还是双极柔性直流电网均满足此规律, 因此, 根据 k 值的范围不同, 可指定考虑不同故障电流影响下的需要考虑的换流站范围为: 当 $k < 0.1$ 时, 考虑近端换流站放电影响; 当 $0.1 \leq k < 1$, 考虑近端与次近端换流站放电影响; 当 $k \geq 1$ 时, 需要考虑直流电网中全部换流站放电影响。

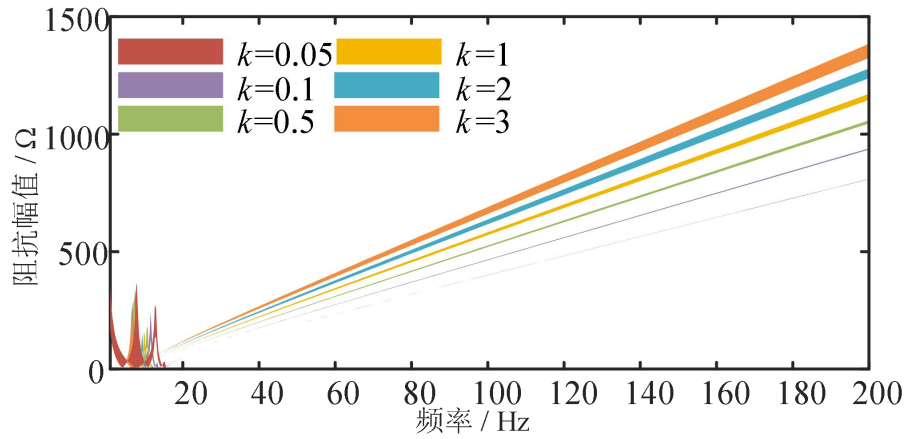


图 4 不同 L_n/L_d 比值下 $Z_{\rho 2}$ 和 $Z_{\rho 4}$ 的频域幅值图

(二) 验证分析

为验证双极直流电网中，极间短路故障电流只受近端和次近端换流站的影响，首先验证次近端换流站会影响故障电流大小，测试工作在 23 端直流电网中进行，其测试步骤为：

1、在 DSC-B $\pm$ 800 双极直流电网中连接 Bb-B4 与 Bb-B2 的直流线路靠近 B2 的线路首端处设置极间短路故障 F_test1，如图 5 所示，并记录 10ms 内故障电流 $i_{f_test1_a1}$ 和 $i_{f_test1_a2}$ ；

2、断开连接 Bb-B1 与 Bb-B2 的直流线路 (F_con1)，再次重复步骤 1，并记录 10ms 内故障电流 $i_{f_test1_b1}$ 和 $i_{f_test1_b2}$ ；

3、对比故障电流 $i_{f_test1_a2}$ 和 $i_{f_test1_b2}$ 的改变情况，若 $i_{f_test1_a2}$ 大于 $i_{f_test1_b2}$ ，则相应结论得到验证。

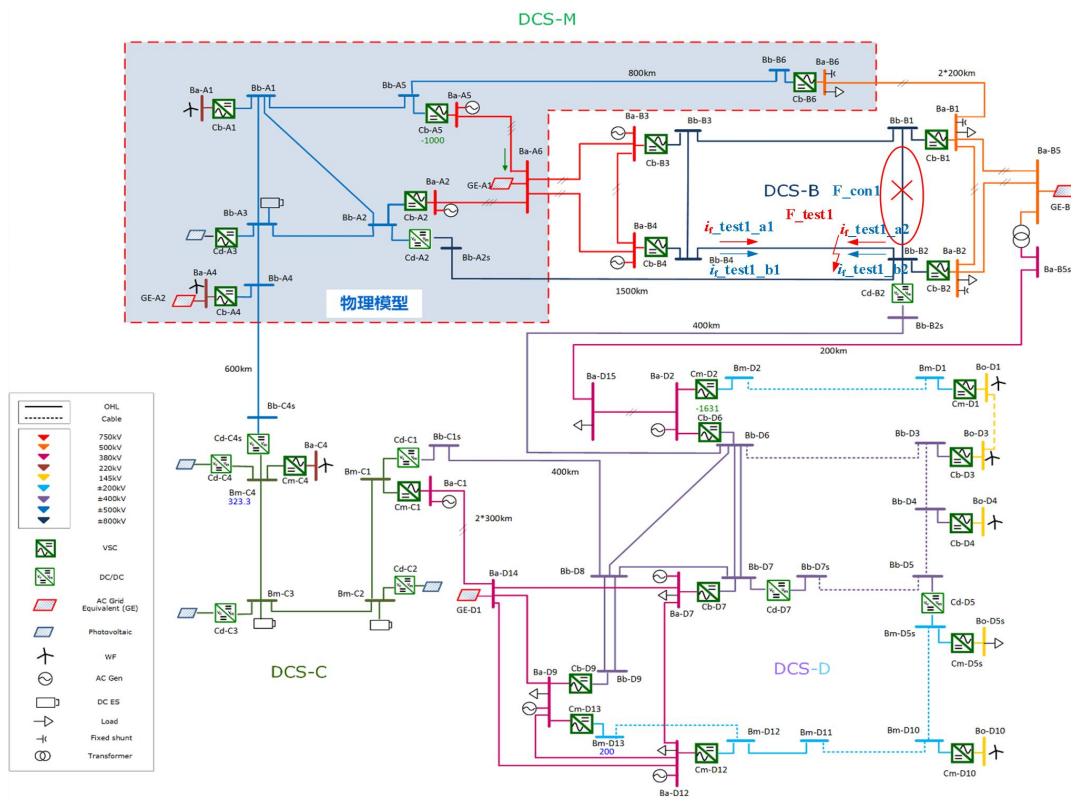


图 5 F_{test1} 故障示意图

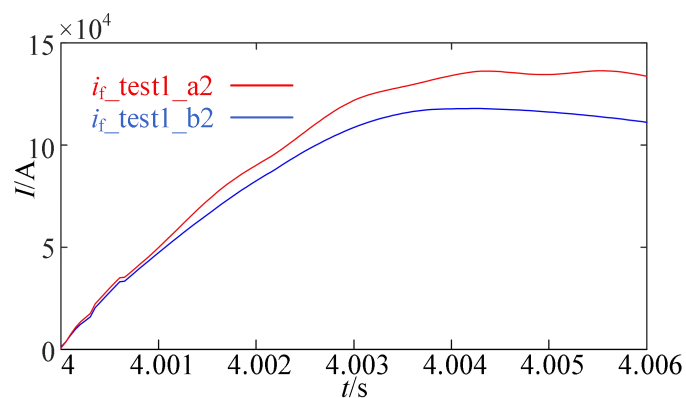


图 6 故障电流 $i_{f_test1_a1}$ 和 $i_{f_test1_b1}$ 对比图

由图 6 可以看出，故障电流 $i_{f_test1_a2}$ 大于 $i_{f_test1_b2}$ ，说明次近端换流站对故障电流有影响。

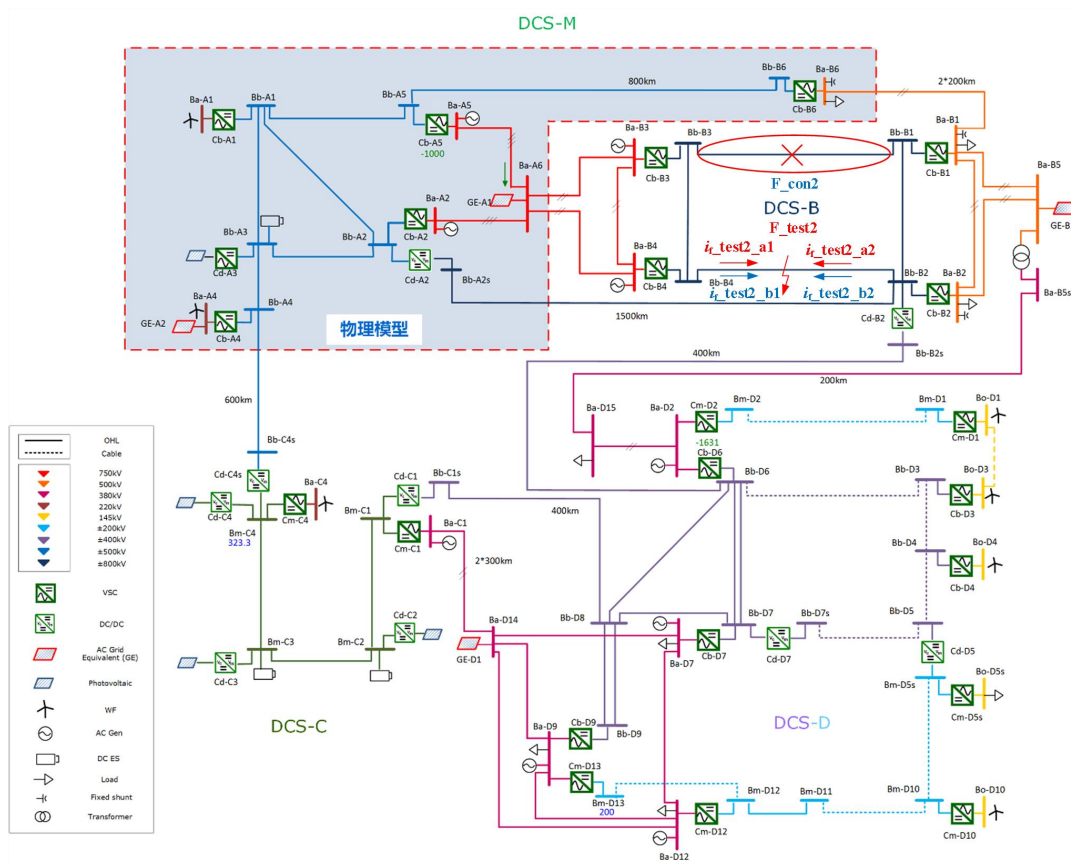


图 7 F_test1 故障示意图

为验证双极直流电网中，极间短路故障电流不受远端换流站的影响，测试工作 23 端直流电网中进行，其测试步骤为：

1、在 DSC-B±800 双极直流电网中连接 Bb-B4 与 Bb-B2 的直流线路中点处设置极间短路故障 F_{test2} ，如图 7 所示。并记录 10ms 内故障电流 $i_{f_test2_a1}$ 和 $i_{f_test2_a2}$ ；

2、断开连接 Bb-B3 与 Bb-B1 的直流线路 (F_{con2})，再次重复步骤 1，并记录 10ms 内故障电流 $i_{f_test2_b1}$ 和 $i_{f_test2_b2}$ ；

3、对比故障电流 $i_{f_test2_a1}$ 和 $i_{f_test2_b1}$ 、故障电流 $i_{f_test2_a2}$ 和 $i_{f_test2_b2}$ 的改变情况，若两者相差很小或几乎一致，则相应结论得到验证。

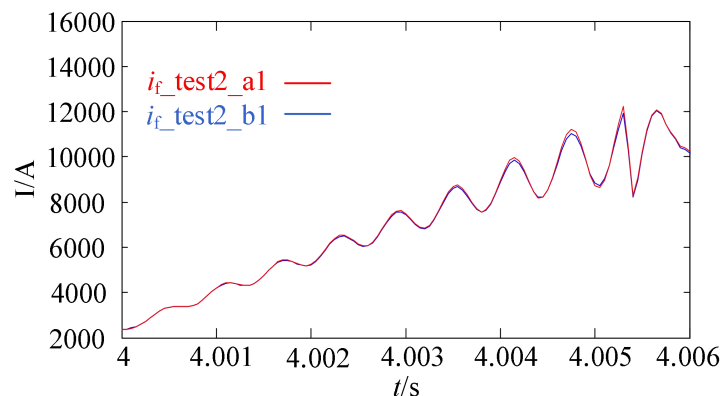


图 8 故障电流 $i_{f_test1_a1}$ 和 $i_{f_test1_b1}$ 对比图

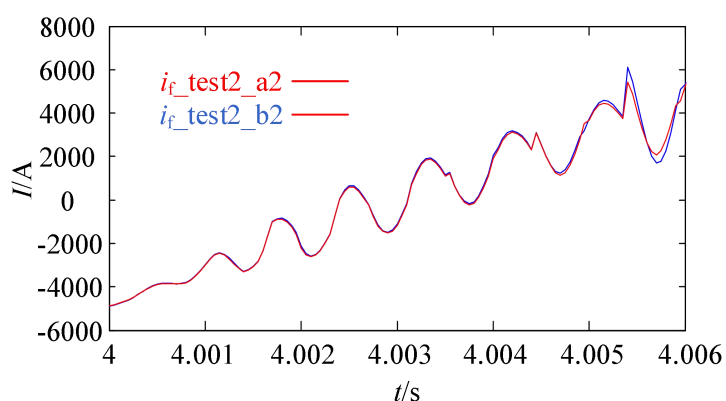


图 9 故障电流 $i_{f_test1_a2}$ 和 $i_{f_test1_b2}$ 对比图

由图 8 和图 9 可以看出，在换流站闭锁前，故障电流 $i_{f_test2_a1}$ 和 $i_{f_test2_b1}$ 、 $i_{f_test2_a2}$ 和 $i_{f_test2_b2}$ 均一致，表明对于左侧的故障电流 $i_{f_test2_a}$ ，远端换流站 Cb-B1 对其无影响，同样地，远端换流站 Cb-B3 对右侧故障电流 $i_{f_test2_b}$ 也无影响。因此，远端换流站对故障电流没有影响。

四、与现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准内容符合国家现行法律、法规要求。

五、采用国际标准或国外先进标准的情况

无。

六、重大分歧意见的处理情况

本标准的制定过程中未出现重大的分歧意见。

七、作为强制性标准或推荐性标准的建议

本标准建议为推荐性标准。

八、贯彻标准的要求和建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等内容）

标准起草组组织撰写标准宣贯材料，组织标准宣贯培训，促进标准顺利实施。

九、废止现行有关标准的建议

无。

十、其他应予说明的事项

无。

附件 3

四川省电力行业协会团体标准征求意见反馈表

标准名称：《面向柔性直流电网故障限流的网架结构规划方法导则》

意见提出单位或个人			
联系人		联系电话	
邮箱		工作单位	
标准意见反馈			
序号	章条号	修改建议	理由及依据
单位盖章或个人签字			
年 月 日			

注：表格篇幅不够可另加页；若意见提出人为单位，需加盖单位公章。