

直接串入式分布式潮流控制器接入电力系统技术导则

Technical guide for connecting direct-connected series distributed power
flow controller to power system

(与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

2024-01-01 发布

2024-06-01 实施

浙江省电力学会 发布

目 次

前 言 II

引 言 III

1 范围 2

2 规范性引用文件 2

3 术语和定义 2

4 系统构成及应用场景 4

 4.1 模块结构 4

 4.2 应用场景及系统结构 4

5 安装位置和容量选择 5

 5.1 安装位置选择 5

 5.2 容量选择 5

6 系统计算要求 5

 6.1 一般要求 5

 6.2 潮流计算要求 5

 6.3 稳定计算要求 5

 6.4 短路电流计算要求 5

 6.5 过电压分析与绝缘配合 5

 6.6 暂态电流计算要求 6

7 运行适应性 6

 7.1 电流范围 6

 7.2 电能质量 6

 7.3 噪声 6

 7.4 损耗 6

 7.5 设备可用率 6

8 接入系统评价经济性 6

 8.1 性能评价 6

 8.2 经济性评价 7

9 接入系统测试 7

 9.1 基本要求 7

 9.2 测试评价内容 7

附 录 A 8

附 录 B 9

前 言

本文件按照 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（或本部分或本指导性技术文件）由浙江省电力学会提出。

本文件（或本部分或本指导性技术文件）由浙江省电力学会××（全称）××专业委员会技术归口和解释。

本文件（或本部分或本指导性技术文件）起草单位（包括第一承担单位和参加起草单位，按对标准的贡献大小排列）：

本文件（或本部分或本指导性技术文件）主要起草人（按对标准的贡献大小排列）：

本文件（或本部分或本指导性技术文件）首次发布（或本文件×年×月首次发布，×年×月第一次修订，×年×月第二次修订）。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至浙江省电力学会标准工作委员会（地址：浙江省杭州市南复路 1 号，邮编：310008，网址：<http://www.zjsee.org/>，邮箱：zjseeorg_bz@163.com）。

直接串入式分布式潮流控制器接入电力系统技术导则

1 范围

本文件规定了 DS-DPFC 的应用场景、选址定容、系统计算要求、运行适应性、接入系统评价与测试等。本文件适用于 220kV 及以下电压等级 DS-DPFC 接入电力系统时的分析评估，其他电压等级可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的 e 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 3096-2008 声环境质量标准
GB/T 12326-2008 电能质量 电压波动和闪变
GB 12348-2008 工业企业厂界环境噪声排放标准
GB/T 14549-1993 电能质量 公用电网谐波
GB/T 15543-2008 电能质量 三相电压不平衡
GB/T 20989-2017 高压直流换流站损耗的确定
GB/T 22390.1-2008 高压直流输电系统控制与保护设备 第 1 部分：运行人员控制系统
GB/T 30553-2014 基于电压源换流器的高压直流输电
GB/T 35702.1-2017 高压直流系统用电压源换流器阀损耗 第 1 部分：一般要求
GB/T 35703-2017 柔性直流输电系统成套设计规范
GB/T 35745-2017 柔性直流输电控制与保护设备技术要求
GB 38755-2019 电力系统安全稳定导则
GB/T 40867 统一潮流控制器技术规范
IEC TR 63262 Performance of unified power flow controller (UPFC) in electric power systems
DL/T 1193-2012 柔性输电术语
DL 755-2001 电力系统安全稳定导则
DL/T 1172-2013 电力系统电压稳定评价导则
GB 18306-2015 中国地震动参数区划图
DL/T 1234-2013 电力系统安全稳定计算技术规范
Q/GDW 1404-2015 国家电网安全稳定计算技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

直接串入式分布式潮流控制器 Direct-connected series distributed power flow controller;
DS-DPFC

一种由可独立运行的换流子模块以串联方式接入交流电网，通过控制其输出感性或容性电压的大小，达到调节线路等效阻抗与线路潮流目的的装置。

3.2

DS-DPFC 子模块 DS-DPFC sub-module

由单相电压源换流器、换流器快速旁路开关、晶闸管旁路开关、金属氧化物避雷器、控制保护模块以及通信模块等组成的能独立实现潮流控制的 DS-DPFC 最小单元。

3.3

电压源换流器 voltage source converter; VSC

DS-DPFC 子模块内由可关断器件实现换流功能、直流侧储能元件为电容器的换流器。

[来源: DL/T 1193-2012, 定义 3.3.8]

3.4

换流器快速旁路开关 VSC fast bypass switch; FBS

DS-DPFC 子模块内与 VSC 并联的快速旁路开关, 可在 VSC 闭锁、故障、检修时将 VSC 旁路。

3.5

晶闸管旁路开关 thyristor bypass switch; TBS

一种采用晶闸管正反向并联构成的电力电子开关, 在 DS-DPFC 子模块内与 VSC 并联, 可在 VSC 闭锁、故障时将 VSC 短时旁路。具有快速触发导通、短时承受被保护设备故障电流的能力。

3.6

金属氧化物限压器 metal oxide varistor; MOV

由非线性金属氧化物电阻片组成的过电压保护设备, 并联在 DS-DPFC 子模块输出端, 从而限制因电力系统故障在 DS-DPFC 子模块输入输出端产生的过电压。

3.7

子模块旁路开关 sub-module bypass switch; BPS

与 DS-DPFC 子模块并联的旁路开关, 可在 DS-DPFC 子模块停运、故障、检修时将子模块从交流电网中旁路。

3.8

单回路 DS-DPFC 系统 single-circuit DS-DPFC system

调节单回路功率的直接串入式分布式潮流控制器系统。

3.9

多回路 DS-DPFC 系统 multi-circuit DS-DPFC system

调节双回或更多回路功率的直接串入式分布式潮流控制器系统。

3.10

闭锁 blocking

通过停发 DS-DPFC 子模块内电压源换流器的控制脉冲阻止其开通的操作。

[改写 DL/T 1193-2012, 定义 3.4.15]

3.11

解锁 deblocking

通过解除 DS-DPFC 子模块内电压源换流器的闭锁, 允许其开通的操作。

[改写 DL/T 1193-2012, 定义 3.4.16]

3.12

阻抗控制模式 impedance control mode

以注入阻抗为控制目标的 DS-DPFC 典型控制模式。

3.13

电压控制模式 voltage control mode

以注入电压为控制目标的 DS-DPFC 典型控制模式。

3.14

功率控制模式 power control mode

以线路有功功率为控制目标的 DS-DPFC 典型控制模式。

3.15

断面限额模式 Interface flow limits mode

以断面功率不超过指令值为控制目标的 DS-DPFC 典型控制模式。当断面功率超过指令值时, DS-DPFC 输出感性电压, 降低断面功率至指令值, 否则 DS-DPFC 不输出电压。

3.16

设备可用率 Equipment Availability

设备可用率表示设备在一定时间内能够正常运行的时间占总时间的比例。设备可用率是衡量设备可

靠性的重要指标。

4 系统构成及应用场景

4.1 模块结构

典型 DS-DPFC 的子模块结构如图 1 所示，主要部件包括：

- a) VSC 换流器及冷却系统；
- b) 晶闸管旁路开关（TBS）；
- c) 机械旁路开关（KM）；
- d) 直流电容器（Cdc）；
- e) 滤波支路（L）；
- f) 金属氧化物限压器（MOV）；
- g) 电压/电流测量装置；
- h) 电压/电流取能装置；
- i) 控制单元及通讯模块。

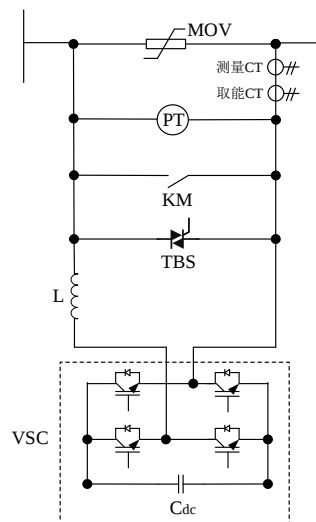


图 1 DS-DPFC子模块结构

4.2 应用场景及系统结构

典型应用场景包括：

- a) 电网潮流复杂多变，应用 DS-DPFC 优化区域电网潮流分布；
- b) 优化电网 N-1 条件下的潮流分布，提高静态安全性；
- c) 输电断面潮流分布不均匀，应用 DS-DPFC 提高断面输电能力；
- d) 输电线路潮流分布不均匀，应用 DS-DPFC 提高通道输电能力；
- e) 减少线路环流，降低电网损耗；
- f) 电网存在次同步谐振/振荡风险，应用 DS-DPFC 提供附加阻尼控制；
- g) 通过调节线路阻抗，等效缩减输电距离，提升线路输电能力。

典型系统结构包括：

- a) 换流模组，可根据容量需求，采用多个独立运行 DS-DPFC 子模块串接形式；
- b) 控制单元，接收调度管理系统下发的潮流调节指令并快速响应执行，向各子模块下发调节参考电压和调节性质（感性或容性），接收子模块的运行状态并实时上送调度管理系统；
- c) 集中式安装时，DS-DPFC 系统包含交流开关设备，其主回路典型接线可参照附录 B。

5 安装位置和容量选择

5.1 安装位置选择

DS-DPFC 站址选择原则如下：

- a) DS-DPFC 站址选择除应按常规交流变电站站址选择有关规定外，还应考虑环境污秽、水源、交通运输等多种因素选择适合的站址方案；
- b) DS-DPFC 站址选择应结合电力系统近、远期规划，综合考虑 DS-DPFC 的控制效果、控制运行的效益；
- c) DS-DPFC 站址应避开污染源，当不能完全避开此类污染源时，DS-DPFC 站应选在污染源主导风向的上风侧，并应对污染源的影响进行评估；
- d) 换流阀外冷方式可采用水冷却方式或风冷却方式。当采用水冷却时，站址附近应有可靠水源其水量、水质应满足换流阀冷却水、消防用水及生活用水要求；
- e) 站址选择应考虑 DS-DPFC 与邻近设施、周围环境的相互影响和协调，站址距飞机场、导航台、地面卫星站、军事设施、通信设施以及易燃易爆等设施的距离应符合国家规定(标准)；
- f) 站址应具备较好的交通运输条件，满足联结变压器的运输要求；
- g) 站址的地震基本烈度应按 GB 18306 确定。站址位于地震烈度区分界限附近不能判定时，应进行烈度复核。

5.2 容量选择

DS-DPFC 的容量由系统规划论证确定，包括 DS-DPFC 成套装置的功率调节范围、系统额定电压、子单元级数等。子单元额定容量一般应大于 1MVA。

6 系统计算要求

6.1 一般要求

针对主要因潮流分布不均匀限制断面现有输电能力的应用场景，应重点关注 DS-DPFC 的控制潮流效果。针对备选安装点，应开展潮流、稳定、短路电流计算，以确定 DS-DPFC 接入系统的运行控制方式及范围。

6.2 潮流计算要求

以电网规划方案为基础，选取典型运行方式，以及规划期内存在电源变化和网架调整的运行方式，分析 DS-DPFC 运行过程中电网的潮流转移特性及对安装地点以外电网潮流分布的影响，并校核特殊运行方式，应满足 GB 38755 和 DL/T 1172 的相关规定。

6.3 稳定计算要求

以电网规划方案为基础，选取典型运行方式，以及规划期内存在电源变化和网架调整的运行方式，分析系统故障状态下 DS-DPFC 的运行特性及对电网稳定水平的影响，应满足 GB 38755 和 DL/T 1234 的相关规定，DS-DPFC 安装点近区存在较多电力电子装置（如直流、新能源机组并网装置等）时，宜根据情况采用电磁暂态或电磁-机电混合仿真分析元件间的相互影响。

6.4 短路电流计算要求

选取电网正常方式全开机、全接线情况下，利用暂态稳定程序选择不同故障点位置计算电网短路电流水平（对于多回线路安装 DS-DPFC 时，还需要考虑不同线路交流开关拉开时间有先后的情况），分别考虑三相短路故障和单相接地故障，确保 DS-DPFC 设备短路电流耐受水平高于短路电流水平并留有一定裕度。

6.5 过电压分析与绝缘配合

选取典型工况下电磁暂态分析，计算不同故障点位置 DS-DPFC 子单元过电压水平，依据过电压水平和避雷器选型，分析避雷器位置和性能的影响，选取避雷器最佳配置方案。

6.6 暂态电流计算要求

在典型运行工况下，通过电磁暂态仿真，分析系统故障及操作过程中的暂态电流特性。选取不同故障点和操作条件下的暂态电流波形，计算各子单元承受的最大暂态电流值。确保 DS-DPFC 设备及相关连接点的暂态电流耐受能力满足实际运行要求，并留有适当裕度。

7 运行适应性

7.1 电流范围

DS-DPFC 的工作电流应在最小取能电流至所串入线路的额定运行电流之间。

7.2 电能质量

在正常运行工况下，DS-DPFC 接入电网后，对接入点的电能质量影响应满足以下要求：

- a) 串入线路两端母线的谐波电压应满足 GB/T 14549 及设计技术规范的要求；
- b) 串入线路两端母线电压波动应满足 GB/T 12326 的要求；
- c) 串入线路两端母线三相电压不平衡应满足 GB/T 15543 的要求；
- d) 特殊需求应根据具体工程的要求确定。

7.3 噪声

在额定负载和周围环境噪声不大于 40dB 的条件下，距离噪声源水平位置 1m 处，测得的装置噪声最大值不应大于表 1 所示。

表 1 装置的噪声最大值

冷却方式	自然冷却	强迫风冷	水冷
噪声最大值 dB	70	80	80

噪声对周围的影响需满足 GB 12348 和 GB 3096 的要求。

7.4 损耗

DS-DPFC 子模块的损耗采用损耗值与子模块额定容量的比值指标来评估。在额定输出情况下，子模块损耗不高于 0.8%，具体要求可根据工程实际需求确定。其中，子模块损耗计算应按照 GB/T 20989、GB/T 30553 和 GB/T 35702.1 的规定进行。辅助系统损耗包括风机、加热等系统的损耗，在标称电压下进行该部分损耗的估算。

7.5 设备可用率

DS-DPFC 设备可用率采用一段时间内（一般为一年）设备能够正常运行的时间与总运行时间的比值指标来评估，计算公式如下：

设备可用率=（总运行时间-故障停机时间）/总运行时间×100%

在设计使用年限内（根据工程实际需求确定，一般为 40 年），设备的可用率设计要求推荐值不低于 99.5%，故障强迫停运次数不多于 3 次/年。

8 接入系统评价

8.1 性能评价

性能评价包括但不限于以下内容：

- a) 潮流控制能力能满足区域电网运行需求，线路负载率不超过线路承载能力；
- b) DS-DPFC 的投退不影响电网系统稳定；
- c) DS-DPFC 接入系统不应影响系统保护整定；
- d) DS-DPFC 宜具备非自身故障后自动重合功能，提高运行可靠性；

- e) 电压波动需满足 GB/T 12326 要求;
- f) 注入的谐波电流及产生的谐波电压需满足 GB/T 14549 要求;

8.2 经济性评价

经济评价工作应执行国家和行业主管部门发布的有关文件和规定，并应满足以下要求：

- a) 经济评价包括但不限于以下内容：编制说明、财务分析报表、财务分析辅助报表、不确定性分析表及分析结论；
- b) 编制说明说明评价的原则及依据，说明计算所采用的原始数据及来源，明确本工程资金来源、资本金比例、币种、融资利率、还款方式及还款年限；
- c) 根据 DS-DPFC 工程的特点，按照所在地域全网销售电量计算单位电量承担费用；
- d) 当有多种投融资条件时，对投融资成本进行经济比较，选择条件优惠的融资方式；
- e) 分析结论包括下列内容：主要经济评价指标，含财务内部收益率(全部投资、资本金)、投资回收期、总投资收益率、资本金净利润率及单位电量承担费用；敏感性分析及说明；综合经济评价结论。

9 接入系统测试

9.1 基本要求

DS-DPFC 设备负责单位应向电力系统调度机构提供 DS-DPFC 接入电力系统测试与评价报告。当 DS-DPFC 改(扩)建后应重新提交测试与评价报告。

DS-DPFC 设备负责单位在申请接入电力系统测试前需向电力系统调度机构提供 DS-DPFC 的模型、参数和控制系统特性等资料。

DS-DPFC 接入电力系统测试由具备相应资质的机构进行,并在测试前 30 日将测试方案报所接入地区的电力系统调度机构备案。

DS-DPFC 设备负责单位应在 DS-DPFC 调试运行后 6 个月内向电力系统调度机构提供有关 DS-DPFC 运行特性的测试和评价报告。

9.2 测试评价内容

测试和评价内容如下：

表 2 试验项目

序号	分类	试验项目	型式试验	例行试验	现场试验
1	常规检查	外观检查	-	√	√
2		接线检查	-	√	√
3		IP 防护等级检验	√	-	-
4		电气间隙、爬电距离检查	-	√	√
5	运行试验	光通道试验	-	√	√
6		功率模块功能性测试	-	√	√
8		最小取能电流试验	-	√	√
9		最小取能电压试验	√	√	√
10		单模块温升试验	√	√	-
11		旁路保护功能验证	-	√	√
12		额定端电压与控制偏差	√	√	√
13		最大输出容量测试	√	√	-
14		动态性能测试	-	-	√

10	绝缘试验	阀支架对地交流电压试验	√	√	√
11		阀支架对地雷电冲击试验	√	-	-
12	电磁兼容性能 (EMC) 试验	辐射发射	√	-	-
13		传导发射	√	-	-
14		辐射电磁场抗扰度	√	-	-
15		电快速瞬变抗扰度	√	-	-
17		静电放电抗扰度	√	-	-
18		浪涌（冲击）抗扰度	√	-	-
19		射频场感应的传导骚扰抗扰度	√	-	-
21		工频磁场抗扰度	√	-	-
22		脉冲磁场抗扰度	√	-	-
23		阻尼振荡磁场抗扰度	√	-	-

附录 A

(资料性)

系统应用场景

A.1 系统应用一般原则

电网中电源、负荷自然分布不均匀、线路参数不协调及方式安排等因素会导致输电线路、断面潮流分布不均、区域内潮流复杂多变等情况，造成输电通道和断面能力未得到有效利用，不能满足电力输送需求。针对电网潮流分布不均、局部线路潮流超限的地区，在采用常规方案难以解决或代价较高时，可加装直接串入式分布式潮流控制器，采用多个模块级联形式分布式串接于输电线路中，通过控制线路等效阻抗来均衡输电断面的潮流分布，以消除输电瓶颈并提高电网的运行极限。

附录 B
(资料性)
集中式安装时的 DS-DPFC 主回路典型接线

B.1 集中式安装时的DS-DPFC主回路典型接线图

集中式安装时的 DS-DPFC 主回路典型接线见图 B.1，主要包括：

- a) 模块组合：可根据容量需求，采用多个独立运行的子模块级联型式，可采用绝缘支撑件部署方式集中布置于变电站内；
- b) 交流开关设备：包括旁路开关 BPS、旁路隔离开关 DS3、母线侧隔离开关 DS1、线路侧隔离开关 DS2、母线侧接地开关 DS11、线路侧接地开关 DS21，通过接收控制单元指令执行分合操作，实现模组的投入/退出状态的切换；
- c) 控制单元：接收调度管理系统下发的潮流调节指令并快速响应执行，向各子模块下发调节参考电压和调节性质（感性或容性），接收各子模块的运行状态并实时上送调度管理系统。

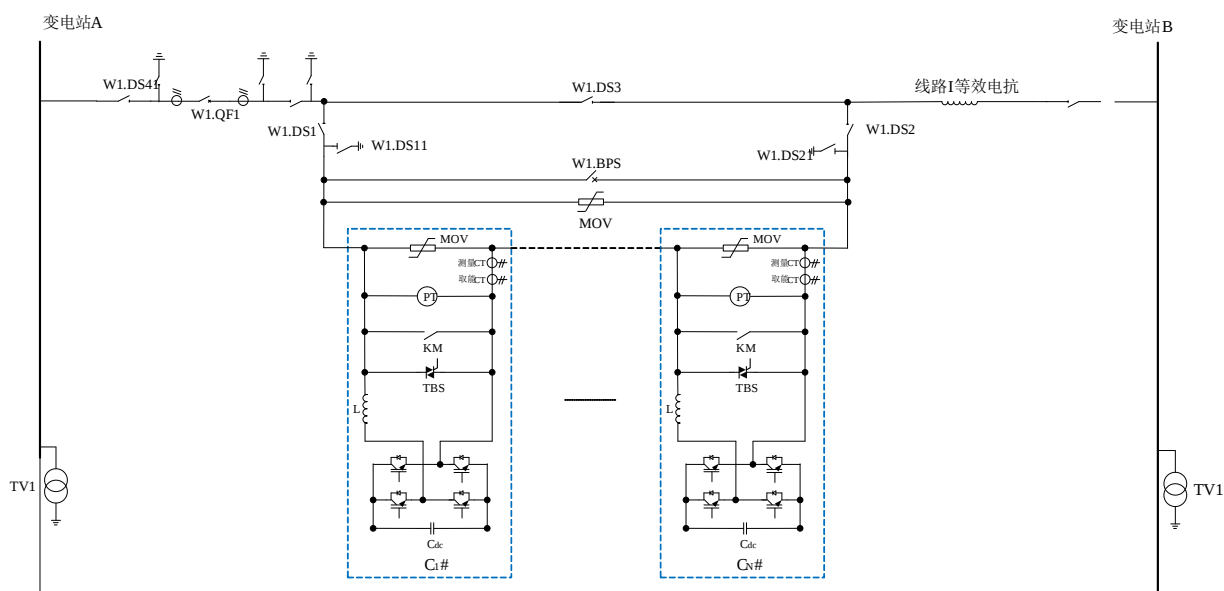


图 B.1 集中式安装时的DS-DPFC主回路典型接线