

团 体 标 准  
统一潮流控制器 (UPFC)  
第 13 部分：系统试验规范  
T / CSEE 0081.13 — 2020

\*

中国电力出版社出版、印刷、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

\*

2020 年 1 月第一版 2020 年 1 月北京第一次印刷  
880 毫米×1230 毫米 16 开本 1.75 印张 54 千字

\*

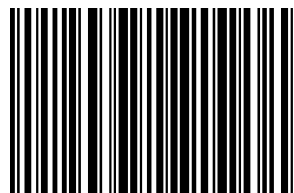
统一书号 155198 · 1877 定价 44.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电机工程学会官方微信



155198.1877

# 团 体 标 准

T / CSEE 0081.13 — 2020

---

## 统一潮流控制器 ( UPFC ) 第 13 部分：系统试验规范

Unified power flow controller (UPFC) —  
Part 13: System test standard



2020-01-15 发布

2020-03-15 实施

---

中国电机工程学会 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 缩略语	3
5 总则	3
6 试验条件	4
7 试验内容	5
8 试运行	19
附录 A（资料性附录） UPFC 典型接线	21
附录 B（资料性附录） UPFC 典型测点	22
附录 C（资料性附录） UPFC 稳态误差计算方法	23

## 前 言

T/CSEE 0081 为《统一潮流控制器（UPFC）》系列标准。

本部分为 T/CSEE 0081 的第 13 部分。

本部分按照《中国电机工程学会团体标准管理办法（暂行）》的要求，依据 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》的规则起草。

本部分的某些内容可能涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中国电机工程学会提出。

本部分由中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会技术归口并解释。

本标准起草单位：国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、江苏省电力试验研究院有限公司、南京南瑞继保电气有限公司、国网上海市电力公司电力科学研究院、国网江苏省电力有限公司、全球能源互联网研究院有限公司、中国电力科学研究院有限公司、国网福建省电力有限公司电力科学研究院、国网河北省电力科学研究院、许继电气直流输电分公司。

本标准主要起草人：李鹏、李群、孔祥平、林金娇、潘磊、高磊、张弛、黄浩声、李娟、王业、王晨清、吴丹岳、鲍伟、郑彬、陈实、齐贝贝、宋洁莹、胡文平、张群。

本部分为首次发布。

本部分在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条 1 号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：[cseebz@csee.org.cn](mailto:cseebz@csee.org.cn)）

# 统一潮流控制器（UPFC）

## 第 13 部分：系统试验规范

### 1 范围

本部分规定了统一潮流控制器（UPFC）系统试验的条件、内容及试运行要求。

本部分适用于 220 kV 和 500 kV 电压等级的 UPFC，其他电压等级的 UPFC 系统试验可参照执行。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 1094.1 电力变压器 第 1 部分：总则

GB/T 1094.10 电力变压器 第 10 部分：声级测定

GB/T 1094.101 电力变压器 第 10.1 部分：声级测定 应用导则

GB/T 7349 高压架空送电线、变电站无线电干扰测量方法

GB/T 13498 高压直流输电术语

GB/T 30425 高压直流输电换流阀水冷却设备

GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准

DL/T 664 带电设备红外诊断应用规范

DL/T 722 变压器油中溶解气体分析和判断导则

DL/T 988 高压交流架空送电线路、变电站工频电场和磁场测量方法

DL/T 1193—2012 柔性输电术语

DL/T 1513 柔性直流输电用电压源型换流阀电气试验

DL/T 1526 柔性直流输电工程系统试验规程

DL/T 1981.1—2019 统一潮流控制器 第 1 部分：功能规范

### 3 术语和定义

DL/T 1981.1—2019、DL/T 1193—2012 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**统一潮流控制器 unified power flow controller; UPFC**

将两个（或多个）共用直流母线的电压源换流器分别以并联和串联的方式接入输电系统中，通过调节线路等效阻抗、电压幅值和相角，实现潮流控制的装置。

[DL/T 1981.1—2019，定义 3.1]

#### 3.2

**静止同步补偿器 static synchronous compensator; STATCOM**

一种由并联接入系统的电压源换流器构成，其输出的容性或感性无功电流连续可调且在可运行系统电压范围内与系统电压无关的无功功率补偿装置。

注：改写 DL/T 1193—2012，定义 4.1.2。

#### 3.3

**静止同步串联补偿器 static synchronous series compensator; SSSC**

将电压源换流器串联于输电线路中，以连续快速控制线路等效阻抗的装置。

[DL/T 1193—2012, 定义 4.1.5]

### 3.4

#### 换流器 **converter**

能实现完整换流功能的电气装置。

[DL/T 1193—2012, 定义 3.3.4]

### 3.5

#### 模块化多电平换流器 **modular multilevel converter; MMC**

每个 VSC 阀由一定数量的独立单相电压源换流器串联组成的多电平换流器。

[GB/T 30553—2014, 定义 3.4.7]

### 3.6

#### 启动回路 **start circuit**

串联在交流系统与电压源换流器之间, 用于抑制换流器充电过程中暂态电流的回路。一般由电阻及其旁路装置组成, 在换流器充电过程结束后将电阻旁路。

[DL/T 1981.1—2019, 定义 3.16]

### 3.7

#### 晶闸管旁路开关 **thyristor bypass switch; TBS**

由正反向并联晶闸管、限流电抗器及其附属设备构成的电力电子开关。它与被保护设备并联, 用来旁路被保护设备, 具有快速触发导通、短时承受被保护设备故障电流的能力。

[DL/T 1981.1—2019, 定义 3.17]

### 3.8

#### 机械旁路开关(旁路断路器) **mechanical bypass switch (bypass breaker)**

一种专用的开关, 要求其具有快速合闸能力, 用来旁路串联型补偿设备, 是线路串联型补偿设备投入和退出运行的主要操作设备。

[DL/T 1981.1—2019, 定义 3.18]

### 3.9

#### 快速旁路系统 **fast bypass system**

由 TBS 和机械旁路开关配合组成的旁路系统, 旁路(触发)命令发出后, TBS 快速触发导通旁路被保护设备, 由 TBS 短时承受原流经被保护设备的电流, 随后机械旁路开关合闸持续承受被保护设备的电流, TBS 停止触发且电流过零关断。

[DL/T 1981.1—2019, 定义 3.19]

### 3.10

#### 分系统试验 **subsystem test**

在完成分系统中所有单体设备安装调试的基础上, 对分系统整组功能和性能进行现场检查的试验。

### 3.11

#### 系统试验 **system test**

在完成分系统试验后, 将成套设备或系统接入电网, 在运行电压下对其规定功能、性能进行现场考核的试验, 验证成套设备或系统是否达到设计及标准规定要求。

### 3.12

#### 试运行 **trial operation**

在完成系统试验后, 将成套设备或系统投入正常工作状态, 持续一段时间, 考核其运行稳定性和可靠性是否达到设计及标准规定要求。

### 3.13

#### 潮流跟随控制 **power flow following control**

串联换流器控制产生固定的阀侧电压或者注入线路电压, 线路功率会随电网运行状态变化而波

动，此时 UPFC 的串联侧处于线路潮流跟随状态。

[DL/T 1981.1—2019，定义 3.27]

### 3.14

#### 动态响应指标 **dynamic response index**

系统动态响应指标包括响应时间、稳定时间、超调量，如图 1 所示。

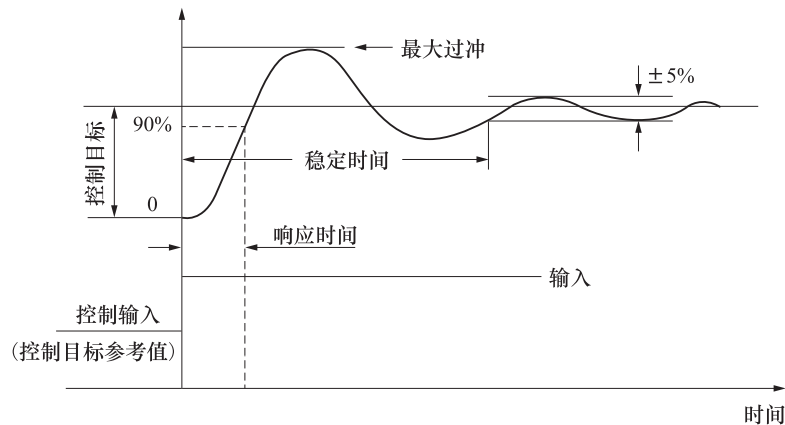


图 1 动态响应指标示意图

#### 3.14.1

##### 响应时间 **response time**

当输入阶跃控制信号后，输出电气量从 0 目标值达到 90% 目标值所用的时间，且期间未产生过冲。

注：改写 DL/T 1193—2012，定义 3.5.14。

#### 3.14.2

##### 稳定时间 **settling time**

当输入阶跃控制信号后，输出电气量达到目标值的  $\pm 5\%$  范围内所用的时间。

注：改写 DL/T 1193—2012，定义 3.5.15。

#### 3.14.3

##### 超调量 **overshoot**

当输入阶跃控制信号后，输出电气量超出稳态值的最大过冲（最大偏移量）与阶跃量之比。

## 4 缩略语

略语适用于本文件。

MMC：模块化多电平换流器（modular multilevel converter）

UPFC：统一潮流控制器（unified power flow controller）

VSC：电压源换流器（voltage source converter）

SSSC：静止同步串联补偿器（static synchronous series compensator）

STATCOM：静止同步补偿器（static synchronous compensator）

TBS：晶闸管旁路开关（thyristor bypass switch）

## 5 总则

5.1 UPFC 在投入运行之前应进行系统试验，系统试验应在 UPFC 的设备试验及分系统试验完成并验收合格后实施。

5.2 系统试验应参考工程技术规范、设计图纸、设备说明书，并执行相关法规和标准。

5.3 在系统试验过程中，应对反映 UPFC 设备性能及电网运行的稳态数据、动态数据和暂态数据等进

行跟踪监测。UPFC 设备功能和性能指标均应满足技术规范及设计的要求。UPFC 系统试验内容包括但不限于表 1 规定的试验项目，对于某些 UPFC 工程所要求的特殊功能/性能，可根据工程技术规范要求增加相应项目。

表 1 UPFC 系统试验项目

序号	试验项目	说明
1	抗干扰试验	√
2	并联变压器启动试验	√
3	串联变压器启动试验	√
4	换流器充电试验	√
5	STATCOM 运行方式试验	√
6	SSSC 运行方式试验	具备 SSSC 运行方式时进行本试验
7	UPFC 运行方式试验	√
8	动态性能试验	√
9	多回线路 UPFC 试验	多回线路 UPFC 进行本试验
10	控制系统监视与故障切换试验	√
11	保护带电跳闸试验	√
12	辅助系统试验	√
13	水冷系统切换试验	√
14	电网控制功能试验	根据工程实际要求进行本试验
15	控制保护主机负载率测试	√
16	大负荷试验	√
17	过负荷试验	根据工程实际要求进行本试验
18	人工接地短路试验	选做
注 表中“√”表示必做试验项目。		

5.4 系统试验完成后应开展 UPFC 试运行。

## 6 试验条件

### 6.1 基本条件

- 6.1.1 已完成 UPFC 系统试验对电网运行方式要求分析、影响校核及设备过电压、过电流水平计算。
- 6.1.2 调试期间的电网电压调节范围、线路功率调节范围及稳定限额已按电网运行要求制定，相关试验暂停条件已明确。
- 6.1.3 已编制完整的系统试验方案及相关测试方案，明确了系统试验项目、试验内容及安全措施要求。
- 6.1.4 已完成电网背景电能质量指标及 UPFC 站内背景电磁骚扰强度、噪声强度测量。

### 6.2 UPFC 系统应具备的条件

- 6.2.1 UPFC 系统已完成分系统试验，并全部验收合格，相关主设备（参见附录 A）应具备带电条件，换流阀水冷系统已具备投运条件，有关记录齐全完整。
- 6.2.2 待试验区域的接地线已全部拆除，箱柜已关好并上锁；不满足带电要求的施工临时设施已全部



拆除，待试验区域与其他区域之间已有明显隔离、安全标识。

6.2.3 调度通信自动化系统、安全自动装置等应安装齐全，正确整定。

6.2.4 UPFC 站内与相关电网调度部门之间的通信应畅通。

6.2.5 站内控制、保护（包括通道）、测量、监控、计量等装置应安装齐全，正确整定，设备已正确标识调度命名和编号。

6.2.6 UPFC 及相关设备的控制保护系统已按调度下达定值正确整定并投运。

6.2.7 监控系统运行正常，不应出现影响系统试验的告警信号。

6.2.8 站内消防设施齐全，并已通过验收。

6.2.9 站内辅助电源系统投入运行。

6.2.10 照明、暖通、防潮、视频等设施按设计要求安装试验完毕，已投入正常使用。

6.2.11 不带电保护跳闸试验已完成，所有跳闸回路正确。

### 6.3 电网侧应具备的条件

6.3.1 电网运行方式已经按照系统试验方案调整完毕。

6.3.2 UPFC 串联接入的线路及其相关的保护已经启动投运。

6.3.3 UPFC 并联侧接入系统已带电或具备带电条件。

6.3.4 相关继电保护、安全自动装置已按调度下达定值正确整定，并投入。

## 7 试验内容

### 7.1 抗干扰试验

7.1.1 在 UPFC 一次设备未带电、二次设备运行状态下，在盘柜前/后门正前方 20 cm 处，在开门和关门两种状态下，手持站内通信对讲机/手机通话，对讲机发射的功率在 3 W~5 W 范围内。任何二次设备不应出现误动和异常。

7.1.2 在 UPFC 一次设备未带电、二次设备运行状态下，可利用隔离开关切/合距离控制室最近的交流空母线，测量有关二次传导回路干扰电压或电流。任何二次设备不应出现误动和异常。

7.1.3 在 UPFC 一次设备带电、二次设备运行状态下，宜开展抗干扰试验，试验步骤同 7.1.1。

### 7.2 并联变压器启动试验

#### 7.2.1 充电试验

##### 7.2.1.1 试验条件

试验应具备如下条件：

- a) 并联变压器交接试验已完成，结果满足 GB 50150 的要求；
- b) 并联变压器分接头处于阀侧额定电压档位；
- c) 并联变压器冷却系统正常运行；
- d) 并联变压器阀侧断路器及其两侧隔离开关处于分闸位置。

##### 7.2.1.2 试验方法

并联变压器充电投切次数应不少于 5 次，其中第一次充电持续时间应不小于 30 min，前次断电到下次充电的时间间隔应不小于 15 min。试验中进行如下检查：

- a) 测量投、切空载并联变压器试验过程中励磁涌流和操作过电压，励磁涌流峰值和操作过电压应

在预期的限制值之内，并联变压器相关保护不应误动作；

- b) 充电试验后并联变压器油中溶解气体色谱分析测试按 GB 50150 和 DL/T 722 的规定进行，测试结果应满足要求；
- c) 并联变压器分接头挡位、冷却风扇起动应符合设计要求；
- d) 油箱表面温度分布及引线接头温度测量按 DL/T 664 进行，测量结果应满足 DL/T 664 中的要求；
- e) 噪声测量结果应满足 GB/T 1094.10 及 GB/T 1094.101 要求；
- f) 并联变压器电压相序应正确。

## 7.2.2 负载试验

利用并联换流器输出的无功功率进行并联变压器负载试验，并完成控制保护系统带负荷校验，检查并联变压器运行情况。试验可结合换流器 STATCOM 运行方式下的稳态控制试验进行。

## 7.2.3 分接头控制试验

在并联变压器带电状态下，进行如下分接头控制功能试验：

- a) 在分接头控制的手动模式和自动模式之间进行切换，检查控制模式切换结果应正确，运行人员界面返回命令事件、显示状态应正确；
- b) 在分接头手动控制模式下，手动调整分接头挡位，检查分接头位置应符合设计要求，运行人员界面返回命令事件、显示状态应正确。

## 7.3 串联变压器启动试验

### 7.3.1 带电试验

#### 7.3.1.1 试验条件

试验应具备如下条件：

- a) 串联变压器交接试验已完成，结果满足 GB 50150 要求；
- b) 串联变压器与换流器连接断开；
- c) 串联变压器网侧和阀侧旁路开关均处于合闸位置。

#### 7.3.1.2 试验方法

通过操作线路断路器、串联变压器连接隔离开关或断路器给串联变压器带电，带电次数应不少于 5 次，其中第一次带电持续时间应不小于 30 min，前次断电到下次带电的时间间隔应不小于 15 min。试验中进行如下检查：

- a) 测量操作过电压及电磁暂态过程，考核串联变压器绝缘，操作过电压应在限制值之内，串联变压器相关保护不应误动作；
- b) 串联变压器网侧电压相序应正确。

### 7.3.2 在线投切试验

#### 7.3.2.1 试验条件

试验应具备如下条件：

- a) 串联变压器带电试验已完成，且结果合格；

- b) 串联变压器网侧、阀侧旁路开关均处于合闸位置。

### 7.3.2.2 试验方法

若具备线路带电情况下投入或切除串联变压器的能力，应进行串联变压器在线投切试验，要求如下：

- a) 进行在线投切试验时，应按照设定顺序操作网侧连接隔离开关或断路器进行串联变压器在线投入和切除；
- b) 检查在线投切串联变压器的电磁暂态过程及连接隔离开关或断路器的分合能力；
- c) 试验时所有二次设备不应出现误动和异常。

### 7.3.3 阀侧旁路运行试验

#### 7.3.3.1 试验条件

试验应具备如下条件：

- a) 串联变压器带电试验已完成，且结果合格；
- b) 串联变压器网侧、阀侧旁路开关均处于合闸位置；
- c) 串联变压器网侧绕组与线路连接。

#### 7.3.3.2 试验方法

在线路合环运行状态下，拉开串联变压器网侧旁路开关，将串联变压器接入线路运行，持续时间应不小于 30 min。试验中进行如下检查：

- a) 测量网侧旁路开关分合过程电磁暂态分量，考核串联变压器绝缘；
- b) 串联变压器油中溶解气体色谱分析测试按 GB 50150 和 DL/T 722 进行，测试结果应满足要求；
- c) 油箱表面的温度分布及引线接头温度测量按 DL/T 664 进行，测量结果应满足要求；
- d) 利用线路负荷电流对相关控制保护在附录 B 所示的串联变压器区测点进行带负荷校验。

### 7.4 换流器充电试验

#### 7.4.1 并联换流器交流侧充电试验

##### 7.4.1.1 试验条件

试验应具备如下条件：

- a) 换流器及水冷系统交接试验已完成，结果满足 DL/T 1513、GB/T 30425 及相关标准要求；
- b) 水冷系统运行正常，内冷水电导率在合格范围内；
- c) 换流器启动电阻投入；
- d) 并联换流器交流侧连接、直流侧隔离。

##### 7.4.1.2 试验方法

可连接至并联侧交流系统的换流器，通过并联变压器阀侧断路器对换流器充电，充电次数应不少于 2 次，其中，换流器第一次带电持续时间应不小于 30 min，前次断电到下次充电的时间间隔宜不小于 15 min，或满足技术规范要求。试验中进行如下检查：

- a) 换流器充电连锁功能应满足设计要求；

- b) 换流器交流侧电压相序及幅值应正确；
- c) 换流器阀控系统应能正常工作，预检功能正确，回报子模块电压和状态信号应正确；
- d) 直流侧电压极性和采样正确，经预定充电时间，子模块电压、直流电压应达到设计或技术规范要求；
- e) 换流器控制系统应正常工作，换流器相关保护不应误动作，如有异常或故障应能正确报警，保护应正确动作；
- f) 换流器充电应无异常电磁暂态过程，换流器充电电流峰值、桥臂电流和操作过电压等应在预期限制值之内；
- g) 启动电阻应无过热，温升应符合设计要求。

## 7.4.2 串联换流器直流侧充电试验

### 7.4.2.1 试验条件

试验应具备如下条件：

- a) 换流器及水冷系统交接试验已完成，结果满足 DL/T 1513、GB/T 30425 及相关标准要求；
- b) 水冷系统运行正常，内冷水电导率在合格范围内；
- c) 换流器启动电阻投入；
- d) 并联换流器交流侧、直流侧均连接，且交流侧充电试验已完成，且结果正确；
- e) 串联换流器直流侧连接，交流侧与电网隔离。

### 7.4.2.2 试验方法

对于 UPFC 串联换流器，应由并联换流器通过直流侧进行充电试验，具体要求如下：

- a) 通过合上并联变压器阀侧断路器对并联换流器充电，串联换流器由并联换流器通过直流侧充电，充电次数应不少于 2 次。其中，换流器第一次带电持续时间应不小于 30 min，前次断电到下次带电的时间间隔宜不小于 15 min，或满足技术规范要求。
- b) 试验中进行如下检查：
  - 1) 换流器充电联锁功能应满足设计要求；
  - 2) 换流器阀控系统应能正常工作，预检功能正确，回报子模块电压和状态信号应正确；
  - 3) 直流侧电压极性和采样应正确，在预定充电时间后，子模块电压和直流电压应满足设计或技术规范要求；
  - 4) 换流器控制系统能正常工作，换流器相关保护不应误动作，如有异常或故障应能正确报警，保护正确动作；
  - 5) 串联换流器直流侧充电功能正常；
  - 6) 充电试验中应无异常的电磁暂态过程，换流器充电电流峰值、桥臂电流和操作过电压等应在预期的限制值之内；
  - 7) 启动电阻应无过热，温升应符合设计要求。
- c) 对于多个串联换流器共用一个并联换流器的多端 UPFC，应分别进行单个串联换流器直流侧充电的试验以及多个串联换流器直流侧同时充电的试验。

### 7.4.3 充电触发试验

换流器充电完成后，以给定电压参考波形作为调制波解锁换流器，使换流器进行空载输出。试验要求如下：

- a) 对于并联换流器，交流侧充电完成后，将并联换流器与交流系统隔离，解锁换流器，不少于 5

个周波后闭锁换流器。

- b) 对于串联换流器，在换流器交流侧隔离或者串联变压器网侧与交流系统隔离的情况下，直流侧充电完成后，解锁换流器，不少于 5 个周波后闭锁换流器。
- c) 试验中进行如下检查：
  - 1) 解锁过程中，换流器控制系统应能正常工作，所有控制保护设备不应出现误动和异常；如有异常或故障应能正确报警，保护正确动作；
  - 2) 换流器交流侧电压波形、相角差、相序及幅值应正确，无缺电平情况，空载输出电压波形应符合设计要求；
  - 3) 换流器阀组触发相序、控制保护系统锁相环节应正确；
  - 4) 换流器控制系统应能补偿数据处理延时，控制系统延时应符合设计要求，必要时补偿控制系统数据处理延时所引起的相角差。

## 7.5 STATCOM 运行方式试验

### 7.5.1 初始运行试验

#### 7.5.1.1 短时解锁试验

在 STATCOM 运行方式下，换流器采用无功功率控制模式，无功功率输出按零功率设定对换流器进行短时解锁，解锁次数不宜少于 3 次，最长解锁时间不宜大于 10 s，其中第一次解锁时间不宜大于 10 ms。试验中进行如下检查：

- a) 换流器解锁和闭锁时序正确，系统运行稳定；
- b) 换流器解锁进入稳态后直流电压、调制比等参数应满足技术规范要求；
- c) 换流器解锁期间应无异常电压、电流，监控后台应无告警信号及保护动作信号。

#### 7.5.1.2 启停试验

在 STATCOM 运行方式下，无功功率输出按零功率设定，手动解锁和闭锁换流器，试验要求如下：

- a) 手动解锁换流器，并持续运行 15 min，系统直流电压应平稳上升至额定值，子模块电压应符合设计要求。
- b) 手动闭锁该换流器，系统直流电压应平稳下降至不控整流水平，子模块电压符合设计要求。
- c) 试验中进行如下检查：
  - 1) 换流器解锁、闭锁时序应符合设计要求；
  - 2) 系统应无异常电压、电流，直流电压、子模块电压应平稳变化；
  - 3) 控制系统应无异常告警信号，相关控制保护不应误动作；如有异常或故障应能正确报警，保护应正确动作；
  - 4) 阀厅、直流场设备应无放电现象，换流阀避雷器及直流场避雷器应不动作。

#### 7.5.1.3 紧急停运试验

STATCOM 运行状态下，手动启动紧急停运，检查换流器闭锁时序是否正确，并联侧交流断路器跳闸。

#### 7.5.1.4 控制系统手动切换试验

STATCOM 运行状态下，手动切换控制系统主值状态与备用状态，两套控制系统切换功能应符合设计要求，切换过程中不对直流电压、功率产生影响，切换后系统应稳定运行。

## 7.5.2 稳态控制试验

### 7.5.2.1 无功功率控制试验

换流器控制模式设置为无功功率控制，依次设置感性无功和容性无功参考值为从零到额定值之间的数个典型值，以设定的升降速率进行无功功率升降，每阶段保持 15 min。试验中进行如下检查：

- a) 记录运行参数，包括交流电压、交流电流、无功功率、并联变压器分接头挡位、桥臂电流、直流电压、调制比等，运行参数应与设计值相符。
- b) 监测 UPFC 接入点的电能质量指标。
- c) 无功功率升/降过程应平稳，并达到参考值稳定运行，直流电压及子模块电压稳定。
- d) 并联侧无功功率与设定参考值间的稳态误差不宜超过 $\pm 1\%$ ，误差计算方法参见附录 C.2；平均升降速率与设定参考值间的误差不宜超过 $\pm 5\%$ ，误差计算方法见附录 C.3；或上述误差满足技术规范要求。
- e) 对相关控制保护在附录 B 所示并联变压器区及并联换流器区的测点进行带负荷校验。

### 7.5.2.2 电压控制试验

换流器控制模式设置为定交流电压控制，依次设置电压参考值低于或高于运行电压的数个典型值，以设定的升降速率进行电压升降，每阶段保持 15 min。试验中进行如下检查：

- a) 记录运行参数，包括交流电压、交流电流、无功功率、并联变压器分接头挡位、桥臂电流、直流电压、调制比等，运行参数应与设计值相符。
- b) 监测换流器接入点的电能质量指标。
- c) 电压按照设定速率平稳升/降，并达到参考值稳定运行，直流电压及子模块电压稳定。
- d) 并联侧交流电压与设定参考值间的稳态误差不宜超过 $\pm 1\%$ ，误差计算方法见附录 C.2；平均升降速率与设定参考值间的误差不宜超过 $\pm 5\%$ ，误差计算方法见附录 C.3；或上述误差满足技术规范要求。

### 7.5.2.3 控制模式切换试验

换流器 STATCOM 运行时，进行无功功率控制模式与电压控制模式手动切换，切换过程中换流器应保持稳定运行，换流器输出无功功率和交流电压无突变。

### 7.5.2.4 控制系统切换

在无功功率或电压升降过程中，手动切换控制系统主值状态与备用状态，检查切换过程不应影响系统运行产生不良影响，备用系统应正确跟踪原主值系统的运行状态。

### 7.5.2.5 并联变压器分接头控制试验

分接头控制在手动控制、自动控制模式下分别进行，试验要求如下：

- a) 试验中至少应包含一次正负挡位转换。
- b) 手动控制模式下，进行分接头挡位升降。当分接头进入最高或最低挡位时，控制系统发出告警信号；检查分接头动作、运行人员界面显示应正确；分接头每改变一档引起的调制比变化应在设计或技术规范要求范围内。
- c) 在手动控制模式下调节分接头挡位。将分接头控制切换为自动控制模式，检查分接头挡位应自动调整，并使得换流器调制比位于规定范围内。

## 7.6 SSSC 运行方式试验

### 7.6.1 初始运行试验

#### 7.6.1.1 短时解锁试验

在 SSSC 运行方式下，换流器充电完成后，对换流器进行短时解锁，解锁次数不宜少于 3 次，最长解锁时间不宜大于 10 s，其中第一次解锁时间不宜大于 10 ms。试验中进行如下检查：

- a) 换流器充电过程应正确；
- b) 换流器解锁和闭锁时序正确；
- c) 换流器直流电压、调制比等参数应符合设计要求；
- d) 换流器解锁期间应无异常电压电流，监控后台应无告警信号及保护动作信号。

#### 7.6.1.2 启停试验

换流器充电完成后，手动解锁换流器，并保持运行 15 min，随后手动闭锁换流器。试验中进行如下检查：

- a) 换流器解锁、闭锁时序应符合设计要求。
- b) 解锁后，直流电压应平稳上升至额定值，并稳定运行，子模块电压应符合设计要求。
- c) 系统应无异常电压、电流，控制系统应无异常告警信号，相关保护不应误动作；如有异常或故障应能正确报警，保护应正确动作。
- d) 阀厅、直流场设备应无放电现象，阀避雷器及直流场避雷器不应动作。

#### 7.6.1.3 紧急停运试验

SSSC 运行状态下，手动启动紧急停运，检查紧急停运过程执行应正确，网侧、阀侧旁路开关合闸，交/直流侧不应产生异常过电压、过电流。

#### 7.6.1.4 控制系统手动切换试验

SSSC 运行状态下，手动切换控制系统主值状态与备用状态，检查两套控制系统切换功能应符合设计要求，切换过程中不对直流电压、功率产生影响，切换后系统稳定运行。

### 7.6.2 稳态控制试验

#### 7.6.2.1 线路有功功率控制试验

SSSC 运行状态下，依次设置线路有功功率参考值为低于或高于线路初始有功功率的数个典型值，以设定升降速率进行线路有功功率升降，每阶段保持 15 min。试验中进行如下检查：

- a) 记录运行参数，包括线路交流电压、线路交流电流、线路功率、阀侧交流电压、阀侧交流电流、桥臂电流、直流电压、调制比等，运行参数应与设计值相符。
- b) 监测换流器接入点的电能质量指标。
- c) 线路有功功率升/降过程应平稳，并达到参考值稳定运行，直流电压及子模块电压稳定。
- d) 线路有功功率与设定参考值间的稳态误差不宜超过  $\pm 1\%$ ，误差计算方法见附录 C.2。平均升降速率与设定参考值间的误差不宜超过  $\pm 5\%$ ，误差计算方法见附录 C.3；或上述误差满足技术规范要求。

### 7.6.2.2 控制系统切换

在线路有功功率升降过程中，手动切换控制系统主值状态与备用状态，检查切换过程不应影响系统运行，备用系统应正确跟踪原主值系统的运行状态。

## 7.7 UPFC 运行方式试验

### 7.7.1 初始运行试验

#### 7.7.1.1 短时解锁试验

在 UPFC 运行方式下，换流器充电完成后，首先解锁并联换流器。检查正常后，对串联换流器进行短时解锁，解锁次数不宜少于 3 次，最长解锁时间不宜大于 10 s，其中第一次解锁时间不宜大于 10 ms。试验中进行如下检查：

- a) 并联换流器解锁后，直流电压应平稳上升至额定值，换流器子模块电压符合设计要求。
- b) 串联换流器解锁和闭锁时序正常，控制保护系统及 UPFC 运行稳定。
- c) 串联换流器解锁期间，应无异常电压、电流，监控后台应无异常告警信号，相关保护不应误动作；如有异常或故障应能正确报警，保护应正确动作。

#### 7.7.1.2 启停试验

在 UPFC 运行方式下，在监控后台操作进行启动和停运试验，要求如下：

- a) 试验主要步骤如下：
  - 1) 核实换流器充电完成，解锁并联换流器，直流电压应平稳上升至额定值；
  - 2) 核实串联换流器处于准备运行状态，解锁串联换流器，旁路开关应自动分闸；
  - 3) 串联侧控制模式设置为线路有功功率控制和线路无功功率控制，并保持运行 15 min；
  - 4) 闭锁串联换流器，检查换流器闭锁，旁路开关自动合闸；
  - 5) 闭锁并联换流器，检查换流器闭锁，直流电压应平稳下降至不控整流水平。
- b) 试验中进行如下检查：
  - 1) UPFC 解锁、闭锁时序应正确，换流器应平稳投入/退出运行，无异常报警信号，相关保护不应误动作；如有异常或故障应能正确报警，保护正确动作。
  - 2) 串联换流器解锁后，晶闸管旁路开关（TBS）运行正常，状态指示应正确。
  - 3) 换流器解锁后，相关电气量应按照预设速率升至设定值。
  - 4) 串联换流器闭锁指令后，线路功率先按预设速率降至自然功率，再执行换流器闭锁。
  - 5) 解锁期间，进行相关控制保护在附录 B 所示串联换流器区及直流区测点的带负荷校验；有关二次回路接线应正确，控制保护系统采集电压、电流等参量误差应满足设计要求，监控系统相关监视数据显示应正常。

#### 7.7.1.3 紧急停运试验

UPFC 运行状态下，手动启动紧急停运，检查紧急停运程序执行是否正确，检查换流器闭锁时序是否正确，并联侧交流断路器跳闸、串联侧旁路开关合闸、交/直流保护应无异常动作，交/直流侧不应产生异常电压、电流。

#### 7.7.1.4 控制系统切换试验

UPFC 解锁稳定运行后，手动切换控制系统主值状态与备用状态，检查控制系统切换功能是否符合



设计要求，切换过程中不对直流电压、功率产生影响，切换后系统稳定运行。

### 7.7.1.5 就地/远方控制试验

就地/远方控制试验包括：

#### a) 就地控制试验包括：

- 1) 控制位置转移试验。将控制位置由站控系统切换至就地后备控制面盘，检查站控系统失去操作控制功能，就地后备控制面盘应具备控制操作功能；将控制位置由就地后备控制面盘切换至站控系统，检查就地后备控制面盘失去操作控制功能，站控系统应具备控制操作功能。
- 2) 就地启停试验。在就地后备控制面盘对 UPFC 系统进行启动和停运操作，UPFC 系统应能平稳启停。
- 3) 就地功率升降试验。在就地后备控制面盘对 UPFC 系统进行功率升降操作，功率应能平稳升降。

#### b) 远方控制试验（如有）包括：

- 1) 控制位置转移试验。将控制位置由站控系统切换至远方调度中心，检查站控系统失去操作控制功能，远方调度中心应具备控制操作功能；将控制位置由远方调度中心切换至站控系统，检查远方调度中心失去操作控制功能，站控系统应具备控制操作功能。
- 2) 远方启停试验。在远方调度中心对 UPFC 系统进行启动和停运操作，UPFC 系统应能平稳启停。
- 3) 远方功率升降试验。在远方调度中心对 UPFC 系统进行功率升降操作，功率应能平稳升降。

## 7.7.2 稳态试验

### 7.7.2.1 控制模式切换试验

在 UPFC 解锁运行状态下，对并联侧和串联侧分别进行控制模式切换，要求如下：

- a) 并联侧控制模式切换。进行并联换流器电压控制模式和无功功率控制模式之间的切换，切换过程中 UPFC 应保持稳定运行，交直流系统无突变。

若并联侧具备手动控制和自动控制方式，应能进行并联侧手动控制和自动控制之间的切换，切换过程中 UPFC 应保持稳定运行，交直流系统无突变，切换完成后并联侧无功电压按照对应控制策略要求进行调节。

- b) 串联侧控制模式切换。进行串联换流器无功功率控制模式和功率因数控制模式切换（如有），检查控制模式是否正确切换，切换过程中 UPFC 应保持稳定运行，交直流系统应无突变；切换完成后控制功能应满足设计要求。

若串联侧具备潮流跟随控制功能，应进行串联侧功率控制和潮流跟随控制之间的切换，切换过程中 UPFC 应保持稳定运行，交直流系统应无突变，切换完成后线路潮流按照对应控制策略要求进行调节。

### 7.7.2.2 线路功率控制试验

在串联侧功率控制模式下，分别进行线路有功功率、无功功率的升降控制试验，要求如下：

- a) 有功功率升降。串联侧采用定有功功率控制和定无功功率控制，依次设置线路有功功率参考值为低于或高于线路初始有功功率的数个典型值，以设定升降速率进行线路有功功率升降，每阶段保持 15 min。试验中进行如下检查：

- 1) 线路有功功率升/降过程应平稳，并达到参考值稳定运行。

- 2) 线路有功功率的升降不影响线路无功功率, 线路有功功率与无功功率解耦控制。
  - 3) 监测 UPFC 接入系统的电能质量指标。
  - 4) 线路功率与设定参考值间的稳态误差不宜超过 $\pm 1\%$ , 误差计算方法参见附录 C.2。平均升降速率与设定参考值间的误差不宜超过 $\pm 5\%$ , 误差计算方法见附录 C.3; 或上述误差满足技术规范要求。
- b) 无功功率升降。串联侧采用定有功功率控制和定无功功率控制, 依次设置线路无功功率参考值为低于或高于线路初始有功功率的数个典型值, 以设定升降速率进行线路无功功率升降, 每阶段保持 15 min。试验中进行如下检查:
- 1) 线路无功功率功率升/降过程应平稳。
  - 2) 线路无功功率的升降不影响线路有功功率, 线路有功功率与无功功率解耦控制。
  - 3) 监测 UPFC 接入系统的电能质量指标。
  - 4) 线路功率与设定参考值间的稳态误差不宜超过 $\pm 1\%$ , 误差计算方法见附录 C.2。平均升降速率与设定参考值间的误差不宜超过 $\pm 5\%$ , 误差计算方法见附录 C.3; 或上述误差满足技术规范要求。
- c) 定功率因数控制 (如有)。串联侧采用定有功功率控制和定功率因数控制, 依次设置线路有功功率参考值为低于或高于线路初始有功功率的数个典型值, 以设定升降速率进行线路有功功率升降, 每阶段保持 15 min。试验中进行如下检查:
- 1) 线路有功功率升/降过程应平稳, 并达到参考值稳定运行。
  - 2) 线路有功功率的升降过程中, 线路功率因数基本保持不变。
  - 3) 监测 UPFC 接入系统的电能质量指标。
  - 4) 线路功率与设定参考值间的稳态误差不宜超过 $\pm 1\%$ , 误差计算方法见附录 C.2。平均升降速率与设定值间的误差不宜超过 $\pm 5\%$ , 误差计算方法见附录 C.3; 或上述误差满足技术规范要求。
- d) 暂停功能试验。在上述功率升/降过程中, 试验“暂停”功能, 检查执行“暂停”后功率保持是否在“暂停”时刻的数值。
- e) 功率升降过程中控制系统切换试验。在上述功率升降过程中, 手动切换控制系统主值状态与备用状态, 检查切换过程不应对系统运行产生影响, 备用系统应正确跟踪原主值系统的运行状态。

## 7.8 动态性能试验

### 7.8.1 一般要求

动态性能试验对 UPFC 控制器的动态性能进行检查, 一般要求如下:

- a) 动态性能应采用升高和降低两个方向的指令阶跃响应试验来进行考核;
- b) 阶跃响应包括线路有功阶跃响应、线路无功阶跃响应、并联侧无功阶跃响应及并联侧交流电压阶跃响应;
- c) 在 UPFC 运行方式下应对并联侧控制器和串联侧控制器分别进行动态性能试验;
- d) 应根据 UPFC 接入交流系统的要求及试验数据, 对控制器参数进行优化测试调整, 以满足动态响应及其他相关性能要求。

### 7.8.2 线路有功功率阶跃试验

UPFC 或 SSSC 运行方式下, 通过改变线路有功功率参考值进行线路有功功率阶跃试验, 要求如下:

- a) 阶跃量可采用线路功率基准值 (见附录 C) 的 5%~10%。

- b) 阶跃响应时间不宜超过 80 ms，超调量宜小于阶跃量的 30%，稳定时间宜小于 120 ms；特殊需求应由供需双方协商确定。

### 7.8.3 线路无功功率阶跃试验

UPFC 运行方式下，通过改变线路无功功率参考值进行线路无功功率阶跃试验，要求如下：

- a) 阶跃量可采用线路功率基准值（见附录 C）的 5%~10%。
- b) 阶跃响应时间不宜超过 80 ms，超调量宜小于阶跃量的 30%，稳定时间宜小于 120 ms；特殊需求应由供需双方协商确定。

### 7.8.4 并联侧交流电压阶跃试验

UPFC 或 STATCOM 运行方式下，并联侧采用电压控制模式，通过改变交流电压参考值进行交流电压阶跃试验，要求如下：

- a) 阶跃量可采用接入点额定电压的 0.2%~0.5%。
- b) 阶跃响应时间不宜超过 80 ms，超调量宜小于阶跃量的 30%，稳定时间宜小于 120 ms；特殊需求应由供需双方协商确定。

### 7.8.5 并联侧无功功率阶跃试验

UPFC 或 STATCOM 运行方式下，并联侧采用无功控制模式，通过改变并联侧无功功率参考值进行并联侧无功功率阶跃试验，要求如下：

- a) 阶跃量可采用并联换流器额定功率的 5%~20%。
- b) 阶跃响应时间不宜超过 50 ms，超调量宜小于阶跃量的 15%，稳定时间宜小于 90 ms；特殊需求应由供需双方协商确定。

## 7.9 多回线路 UPFC 试验

### 7.9.1 基本功能试验

基本功能试验要求如下：

- a) 对于多回线路 UPFC，分别在各单回线路 UPFC 运行方式下，参照 7.7 进行 UPFC 运行方式试验，参照 7.8 进行动态性能试验。
- b) 对于多回线路 UPFC，在多回线路 UPFC 运行方式下，参照 7.7 进行 UPFC 运行方式试验，参照 7.8 进行动态性能试验。

### 7.9.2 协调控制试验

#### 7.9.2.1 控制模式切换试验

进行多回线路功率协调控制模式与单回线路功率控制模式之间的切换，检查控制模式切换是否正确、切换过程中系统运行是否稳定、切换后控制功能是否满足设计要求或技术规范要求。

#### 7.9.2.2 协调控制功能试验

多回线路 UPFC 协调控制功能试验包括以下几点：

- a) UPFC 串联侧均处于多回线路功率协调控制模式下，检查线路功率总和是否达到多回线功率定值，各回线路功率分配应满足设计或技术规范要求；
- b) UPFC 串联侧均处于多回线路功率协调控制模式下，检查一回线路退出运行后剩余线路 UPFC

的运行控制功能是否满足设计或技术规范要求；

- c) UPFC 串联侧处于单回线路功率控制模式下，检查该线路功率是否可以单独调整，同时其余处于多回线路功率协调控制模式的线路应可按设计要求自动进行调整。

## 7.10 电网控制功能试验

### 7.10.1 一般要求

UPFC 电网控制功能试验应根据实际工程配置的控制功能开展，一般可包括但不限于交流电压控制试验、AVC 接口试验、紧急功率控制试验、输电断面功率控制试验。

### 7.10.2 交流电压控制试验

针对并联侧所有控制模式，模拟交流系统电压高于/低于异常电压动作预设值，检查 UPFC 在调节能力范围内是否自动将系统电压调节至设定的正常电压范围。

### 7.10.3 AVC 接口试验

若 UPFC 并联侧参与电网自动电压控制 (AVC)，应检验 AVC 功能是否可以由外部信号激活，并按设定要求执行。

### 7.10.4 紧急功率控制试验

针对串联侧所有控制模式，模拟线路电流/功率超过限制值。检查 UPFC 按照既定策略实现被控线路功率紧急调节，在调节能力范围内是否自动将线路电流/功率调节至限制值之内。

### 7.10.5 输电断面功率控制试验

若 UPFC 具备输电断面功率控制功能，应进行如下试验：

- a) 输电断面功率控制试验。检查输电断面功率调节、输电断面功率限制等基本控制功能是否满足设计及技术规范要求。
- b) 输电断面紧急控制功能试验。模拟被控输电断面过载，检查 UPFC 调节是否消除断面过载，且响应速率满足是否设计及技术规范要求。
- c) 输电断面功率测量装置通信故障试验。模拟输电断面功率测量装置与控制主机间通信故障，检查 UPFC 串联侧控制模式切换是否正确、告警信号及故障等级是否正确，系统运行是否平稳。
- d) 控制模式切换试验。手动进行线路功率控制模式与断面功率控制模式相互切换，检查切换功能是否正确，切换后控制功能是否满足设计要求，切换过程中系统运行是否稳定。

### 7.10.6 自动功率曲线控制试验

若 UPFC 具备自动功率曲线控制功能，整定线路功率曲线，将串联侧设定为自动功率曲线控制模式，线路功率应跟随功率曲线平稳变化。

## 7.11 控制系统监视与故障切换试验

### 7.11.1 一般要求

在 UPFC 运行状态下，通过模拟控制系统主机死机、控制系统电源故障、现场总线故障、控制总线故障、控制 LAN 网故障、电压二次回路断线、阀控通信故障等进行控制系统监视与故障切换试验。

### 7.11.2 控制主机死机

模拟主值控制系统死机，备用控制系统应自动切换为主值状态，检查试验过程中不应对系统功率传输、直流电压、交流无功电压产生扰动，告警信号及故障等级应正确。

### 7.11.3 控制系统电源故障

断开主值控制系统单路或双路直流电源，备用控制系统应自动切换为主值状态，检查试验过程中不应对系统功率传输、直流电压、交流无功电压产生扰动，告警信号及故障等级应正确。

### 7.11.4 现场总线故障

断开主值控制系统一条模拟量或开关量现场总线，备用控制系统应自动切换为主值状态，检查试验过程中不应对系统功率传输及直流电压产生扰动，不应对无功功率、交流电压产生扰动，告警信号及故障等级应正确。

### 7.11.5 控制总线故障

断开主值控制系统一条控制总线，备用控制系统应自动切换为主值状态，检查试验过程中不应对系统功率传输及直流电压产生扰动，不应对无功功率、交流电压产生扰动，告警信号及故障等级应正确。

### 7.11.6 控制 LAN 网故障

断开主值控制系统控制局域网（local area network, LAN）光纤，备用控制系统应切换为主值状态，检查试验过程中 UPFC 应保持正常运行、交流系统无扰动、告警信号及故障等级正确。

### 7.11.7 交流电压二次回路断线

分别模拟换流器同步电压或阀侧电压二次回路单相、三相断线，备用系统应切换为主值状态。试验过程中 UPFC 应保持正常运行、交流系统无扰动、告警信号及故障等级正确。

### 7.11.8 阀控系统通信故障

断开换流器控制主机与阀控系统间通信通道，分别模拟换流器控制主机下发的解锁信号、值班信号丢失或阀控系统上送的跳闸信号丢失等阀控系统通信故障，备用换流器控制系统应切换为主值状态。试验过程中 UPFC 应保持正常运行、交流系统无明显扰动、告警信号及故障等级正确。

## 7.12 保护带电跳闸试验

### 7.12.1 一般要求

在 STATCOM、SSSC（如有）或 UPFC 运行状态下，模拟保护动作检验控保系统闭锁跳闸时序应满足设计要求。

### 7.12.2 保护跳闸试验

试验选择若干项保护功能进行带电跳闸，应包括所有保护区域和不同保护动作方式，包括但不限于：

- a) 模拟换流器保护动作；
- b) 模拟阀控启动保护动作；

- c) 模拟变压器保护动作;
- d) 模拟水冷系统故障启动跳闸;
- e) 模拟线路故障保护动作跳闸;
- f) 模拟控制类保护跳闸;
- g) 可模拟串联侧保护动作联跳线路。

### 7.12.3 检修换流器跳闸试验

在部分换流器运行的情况下,模拟处于检修状态换流器的保护动作跳闸,检查检修换流器跳闸不会影响到运行换流器的工作状态。

## 7.13 辅助系统试验

### 7.13.1 站用交流电源切换试验

UPFC 稳态运行状态下,结合站用电源备自投功能进行电源切换试验。拉开一路站用交流电源进线开关,站用电系统应能进行自动切换,试验可对各路站用电进线分别进行。试验中,站用电电源自动切换功能应正常,换流器水冷系统应正常工作,UPFC 应正常运行。

### 7.13.2 直流辅助电源切换试验

UPFC 稳态运行工况下,依次手动断开、合上一路站用直流电源,模拟直流电源故障和恢复。试验中,UPFC 应正常运行。

## 7.14 水冷系统切换试验

### 7.14.1 手动切换试验

UPFC 稳态运行工况下,手动切换换流阀水冷系统水泵,检查水泵切换功能是否正常,核实切换过程平稳、无扰动、UPFC 运行正常。UPFC 稳态运行工况下,手动切换水冷控制保护系统,检查切换功能应正常,核实切换过程平稳、无扰动、UPFC 运行正常。

### 7.14.2 故障切换试验

UPFC 稳态运行工况下,模拟换流阀水冷系统主值水泵故障,检查水泵切换功能是否正常,核实切换过程平稳、无扰动、UPFC 运行正常。UPFC 稳态运行工况下,模拟主值水冷控制保护系统故障,检查切换功能应正常,核实切换过程平稳、无扰动、UPFC 运行正常。

## 7.15 控制保护主机负载率测试

在 UPFC 稳态运行、升/降功率、紧急停运、系统切换、故障试验等系统试验过程中,对 UPFC 控制保护主机处理器负载率进行监测,各主机处理器负载率应满足技术规范规定要求。

## 7.16 大负荷试验

### 7.16.1 试验方法

备用冷却不投入,在 UPFC 或 STATCOM 运行方式下,将换流器功率或电流升至额定值 70%~100%,持续运行至少 2 h。试验中进行如下检查:

- a) 记录 UPFC 运行参数,包括并联变压器分接头挡位、线路电压及电流、线路功率、交流母线电

- 压、阀侧电压及电流、换流器功率、直流电压及电流、调制比等，运行参数应与设计值相符；
- b) 换流阀外壳温升、串并联变压器（含套管）油温和线圈温度、阀电抗器温度、隔离开关主触头温度等均应在技术规范规定范围内；
  - c) 换流阀结温、换流阀冷却系统进出水温度应在技术规范规定范围内；
  - d) 交直流场和阀厅母线、接头线夹、导线等温度应在技术规范允许范围内；
  - e) 换流阀、阀冷系统、阀电抗器、联结变压器及控保系统工作无异常，电网运行正常；
  - f) 所有二次设备不应出现误动和异常。

## 7.16.2 大负荷运行专项测量

### 7.16.2.1 交流谐波测量

测量并联侧及串联线路电压电流中的 2 次~50 次谐波成分，计算各次谐波含量、总谐波畸变率、电话谐波波形系数应不大于技术规范规定的数值。

### 7.16.2.2 无线电干扰测量

按 GB/T 7349 进行无线电干扰测量，测量值应不大于技术规范规定数值。此项测试允许在系统投运 3 个月后再进行。

### 7.16.2.3 电磁场强测量

按 DL/T 988 对 UPFC 站内、外的电磁场强进行测量，测量值应符合环评的要求。

### 7.16.2.4 可听噪声测量

按照工程技术规范规定的条件进行测量。测得可听噪声数值应不大于技术规范规定数值。

### 7.16.2.5 换流器辅助设备损耗测量

分别在 UPFC 热备用状态及大负荷运行情况下，对各换流器 400 V 辅助电源功率负载在预定时段内进行测量（如每小时 5 次），取其平均值，计算换流器辅助设备的损耗。

## 7.17 过负荷试验

应根据 UPFC 过负荷能力设计进行过负荷试验，试验项目及检查要求可参考 7.16 大负荷试验。

## 7.18 人工接地短路试验

在电网具备条件的情况下，可在 UPFC 近区交流系统进行单相瞬时性人工接地短路试验，验证电网故障时 UPFC 的故障穿越及耐受冲击能力。试验中进行如下检查：

- a) 线路发生单相瞬时性短路后，UPFC 控制保护装置正确动作，UPFC 应按预定策略退出运行，TBS 触发时间、旁路开关合闸时间应满足设计或技术规范要求。
- b) 对 UPFC 控制保护装置功能、动作协调性及 UPFC 设备限定值进行校核。
- c) 故障后，UPFC 执行自动重启，并应在设计时间内恢复到故障前运行状态；恢复期间不应出现电压、电流持续振荡。
- d) 试验中，所有二次设备不应出现误动和异常。
- e) 试验后，检查换流阀外观及状态，进行串/并联变压器油色谱分析及绕组变形试验。

## 8 试运行

8.1 上述系统试验项目完成，结果合格，且试验中发现的缺陷和异常情况已处理完毕，可启动工程试

运行。

8.2 试运行方案中应明确试运行期间 UPFC 系统的控制模式、负荷水平、试运行时间以及运行期间需要开展的工作。

8.3 UPFC 工程的连续带电试运行时间应为 168 h。

8.4 若 UPFC 在试运行期间出现故障或异常而被迫退出运行，须待故障或异常处理后重新进行试运行。

8.5 试运行期间，应对各项运行数据和设备运行情况详细记录，应实时监测 UPFC 主设备各部分温度，巡视主设备无异味、无异响。

8.6 试运行开始前和结束后，应对串、并联变压器取油样进行色谱分析。

8.7 试运行完成后，应对设备进行全面检查，处理试运行期间出现的缺陷和异常情况。



附录 A  
(资料性附录)  
UPFC 典型接线

### A.1 UPFC 典型结构

UPFC 典型结构见图 A.1，主要由串联侧、并联侧及控制保护系统组成，其中：

- a) 串联侧主要包括：串联换流器（含阀电抗器）、串联变压器及快速旁路系统等；
- b) 并联侧主要包括：并联换流器（含阀电抗器）、并联变压器及启动回路等。

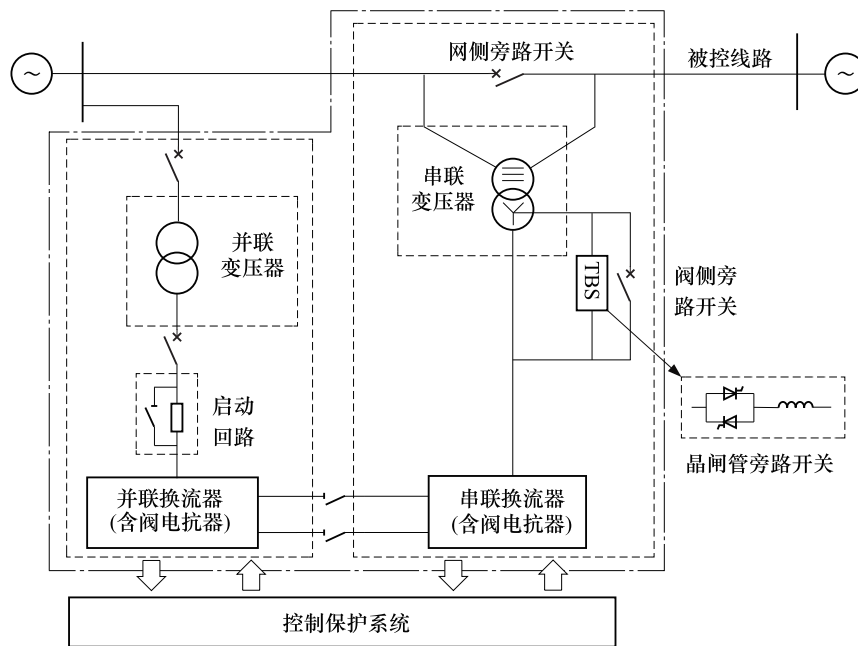


图 A.1 UPFC 典型结构

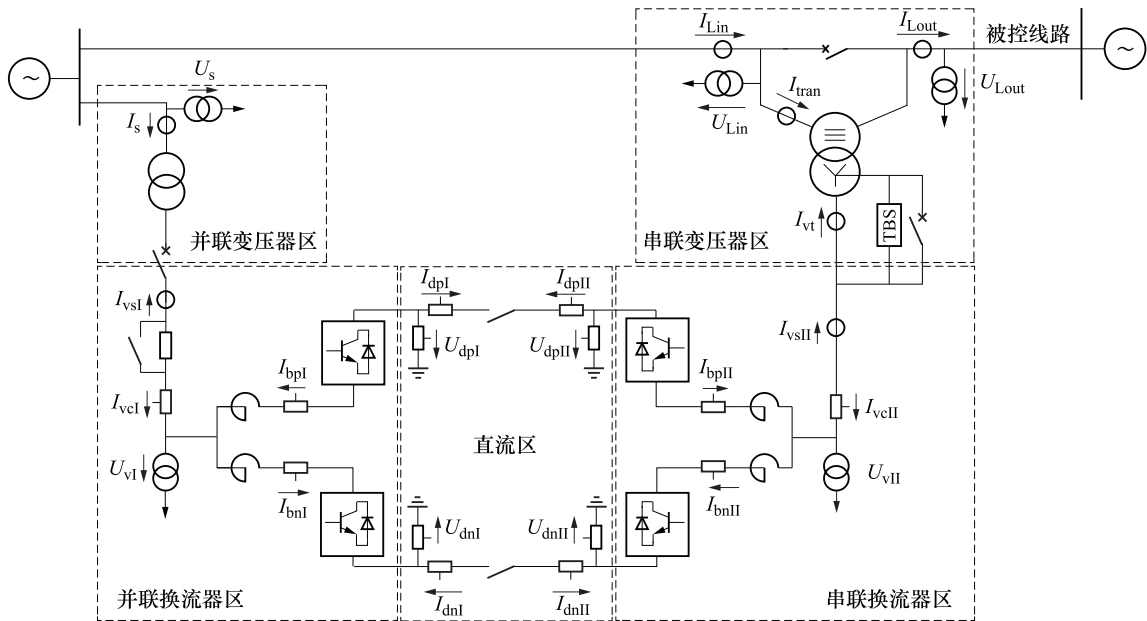
### A.2 主要设备

主要包括以下设备：

- a) 电压源换流器，包括并联换流器和串联换流器；
- b) 联结变压器，包括并联变压器和串联变压器；
- c) 快速旁路系统，包括晶闸管旁路开关（TBS）和机械旁路开关（含网侧旁路开关和阀侧旁路开关）；
- d) 断路器，主要包括并联变压器网侧断路器、并联变压器阀侧断路器等；
- e) 启动回路，主要包括启动电阻及其旁路装置；
- f) 控制保护系统及相关测量装置。

**附录 B**  
(资料性附录)  
**UPFC 典型测点**

UPFC 典型测点见表 B.1，配置图如图 B.1 所示。



**图 B.1 UPFC 典型测点配置**

**表 B.1 UPFC 典型测点**

区域	测点配置	
	电压测点	电流测点
并联变压器区	网侧电压: $U_s$	网侧电流: $I_s$
串联变压器区	线路电压: $U_{Lin}, U_{Lout}$	线路电流: $I_{Lin}, I_{Lout}$ 串联变压器电流: $I_{tran}, I_{vt}$
并联换流器区	阀侧电压: $U_{vl}$	阀侧交流电流: $I_{vsl}, I_{vcl}$ 换流器桥臂电流: $I_{bpl}, I_{bnl}$
串联换流器区	阀侧电压: $U_{vII}$	阀侧交流电流: $I_{vsII}, I_{vcII}$ 换流器桥臂电流: $I_{bpII}, I_{bnII}$
直流区	直流电压 (并联侧): $U_{dpI}, U_{dnI}$ 直流电压 (串联侧): $U_{dpII}, U_{dnII}$	直流电流 (并联侧): $I_{dpI}, I_{dnI}$ 直流电流 (串联侧): $I_{dpII}, I_{dnII}$

**附录 C**  
(资料性附录)  
**UPFC 稳态误差计算方法**

### C.1 稳态误差计算公式

系统设计应能确保 UPFC 在全部稳态运行范围内满足各控制目标的误差要求，稳态误差计算不考虑测量误差，计算稳态误差的量主要包括功率及电压。采用式 (C.1) 计算稳态误差量  $E$ ：

$$E = \frac{M_C - M_R}{M_N} \times 100\% \quad \text{..... (C.1)}$$

式中：

- $M_C$  ——对应量的测量值；
- $M_R$  ——对应量的设定参考值；
- $M_N$  ——对应量误差计算的基准值。

### C.2 稳态误差计算方法

#### C.2.1 功率稳态误差计算

功率稳态误差包括串联侧线路功率、输电断面功率及并联侧无功功率的误差。

功率稳态误差计算时，可通过一定宽度时间窗口的线路有功功率、线路无功功率、断面功率或并联侧无功功率测量数据  $M_i$  计算平均值  $M$ ，时间窗口可为 5 周波，且每个测量时间窗口与紧邻的测量时间窗口接近而不重叠。通过连续测量并计算  $M$  的平均值得到对应测量值  $M_C$ ，最终按式 (C.1) 计算获得稳态误差量  $E$ 。其中，基准值  $M_N$  按如下原则确定：

a) 线路功率的基准值  $M_N$  按式 (C.2) 计算：

$$M_N = \sqrt{3} \times U_{LN} \cdot \min(I_{L\lim}, k_T \cdot I_{SVN}) \quad \text{..... (C.2)}$$

式中：

- $U_{LN}$  ——UPFC 接入线路的额定电压；
  - $I_{L\lim}$  ——UPFC 接入线路的热稳定限额；
  - $I_{SVN}$  ——表示 UPFC 串联变压器阀侧额定电流；
  - $k_T$  ——表示串联变压器阀侧与网侧的电压变比。
- b) 对于输电断面功率，则基准值  $M_N$  取为被控输电断面功率限额。
- c) 对于并联侧无功功率，则基准值  $M_N$  取并联换流器额定功率。

#### C.2.2 电压稳态误差计算

电压稳态误差是 UPFC 并联侧接入点电压的稳态误差。

电压稳态误差计算时，可通过一定宽度时间窗口接入系统电压测量数据  $M_i$  计算基波有效值  $M$ ，时间窗口可为 5 周波，且每个测量时间窗口与紧邻的测量时间窗口接近而不重叠。通过连续测量并计算  $M$  的平均值得到对应测量值  $M_C$ ，最终按式 (C.1) 计算获得稳态误差量  $E$ 。其中，基准值  $M_N$  为并联侧接入点的额定电压。

### C.3 升降速率误差计算

升降速率误差是指功率或电压稳态升降时实际平均升降速率  $dM$  与设定参考值  $dM_R$  之间的误差，

可按式 (C.3) 进行计算

$$E = \frac{dM - dM_R}{dM_R} \times 100\% \dots\dots\dots (C.3)$$

平均升降速率  $dM$  按式 (C.4) 计算确定

$$dM = \frac{M_C(T_E) - M_C(T_S)}{T_E - T_S} \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

- $T_E$  ——升降结束时刻 (s);
  - $T_S$  ——升降开始时刻 (s);
  - $M_C(T)$  ——表示  $T$  时刻的测量值。
-