统一潮流控制器计算分析规范

1. 范围

本部分规定了统一潮流控制器（UPFC）在电力系统潮流、电磁暂态、机电暂态计算中的要求、基础条件、计算方法与内容、评价指标。

本部分适用于220 kV 和500 kV 电压等级UPFC 工程的规划、调试和运行中的计算分析，其他电压等级工程的计算分析可参照执行。

1. 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。

IEEE Std 2745.1-2019 IEEE Guide for Technology of Unified Power Flow Controller Using Modular Multilevel Converter - Part 1 Functions

GB/T 40867-2021 统一潮流控制器技术规范

GB/T 40581-2021 电力系统安全稳定计算规范

DL/T1981.1-2019 统一潮流控制器第1部分：功能规范

DL/T 1234-2013 电力系统安全稳定计算技术规范

T/CSEE 0081.1 统一潮流控制器（UPFC） 第1部分：术语

T/CSEE 0081.2 统一潮流控制器（UPFC） 第2部分：功能规范

T/CSEE 0081.3 统一潮流控制器（UPFC） 第3部分：仿真建模导则

1. 术语和定义

DL/T 1981.1—2019、T/CSEE 0081.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

**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。

［来源：T/CSEE 0081.1—2021，3.1.2］

**串联侧换流器 series converter**

在统一潮流控制器（3.1.1）中，交流端口以串联方式接入交流系统的换流器。

［来源：T/CSEE 0081.1—2021，3.3.1.7］

**并联侧换流器 shunt converter**

在统一潮流控制器（3.1.1）中，交流端口以并联方式接入交流系统的换流器。

［来源：T/CSEE 0081.1—2021，3.3.1.6］

* 1.

**串联变压器 series transformer**

具有一个与线路串联以改变线路电压值和（或）相位的串联绕组及一个励磁绕组的变压器。

［来源：GB/T 1094.1—2013，3.1.3］

**并联变压器 shunt transformer**

具有两个或两个以上绕组，并联接入交流电网运行的变压器。

［来源：DL/T 1981.1—2019，3.11］

**桥臂 converter arm**

换流电路的一个部分，连接在交、直流端子之间，具有单向或双向导电能力。

［来源：DL/T 1193—2012，3.3.5］

**阀侧绕组 valve side winding**

与换流器直接相连的绕组。

［来源：T/CSEE 0081.1—2021，3.3.2.4］

**串联单元 series unit**

主要由串联变压器和串联换流器组成，可实现静止同步串联补偿器(SSSC)功能的部分。

［来源： IEC TR 63262,2019,3.1.ll]

**并联单元 shunt unit**

主要由并联变压器和并联换流器组成，可实现静止同步补偿器（STATCOM）功能的部分。

［来源： IEC TR 63262:2019,3.l.10]

* 1.

**UPFC串联侧容量 UPFC series capacity**

UPFC串联侧最大注入相电压有效值和线路设计电流有效值乘积的3倍。

［来源：GB/T 40867-2021，3.9]

**UPFC并联侧容量 UPFC parallel capacity**

UPFC并联侧接入点注入电流有效值和母线额定线电压有效值乘积的$\sqrt{3}$倍。

［来源：GB/T 40867-2021，3.10］

**UPFC装置容量 UPFC device capacity**

UPFC装置串联侧容量和并联侧容量之和。

［来源：GB/T 40867-2021，3.11］

* 1.

**UPFC运行方式 UPFC operation mode**

UPFC串联侧、并联侧均接入系统运行，且并联换流器与串联换流器直流侧连接的运行方式，可同时控制并联侧接入点无功功率或电压及串联侧线路功率，参见附录A图Al。

［来源：DL/T 1981.1—2019，3.11］

* 1.

**STATCOM运行方式 STATCOM operation mode**

UPFC并联侧单独接入系统运行，串联侧旁路，且并联换流器与串联换流器直流侧隔离的运行方式，可用于控制并联侧无功功率或电压，参见附录A图A.2。

［来源：DL/T 1981.1—2019，3.11］

**SSSC运行方式 SSSC operation mode**

UPFC串联侧单独接入系统运行，且串联换流器与并联换流器直流侧隔离的运行方式，可用于控制线路有功功率，参见附录A图A.3。

［来源：DL/T 1981.1—2019，3.11］

**单位容量调节系数 power regulation coefficient**

UPFC接入后输电线路、输电通道的输送能力提高值与UPFC装置容量的比值。

［来源：GB/T 40867-2021，3.12］

1. 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

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

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）

1. UPFC计算分析的总体要求和任务
	1. 总体要求

应根据应用场景的具体情况和要求，开展含UPFC电力系统的潮流计算和暂态计算，检验UPFC的潮流控制作用和电压支撑作用，必要时检验UPFC的暂态控制支撑作用，优化电网的规划方案或运行策略。

* 1. 计算任务
		1. UPFC潮流控制计算分析

UPFC潮流控制计算分析用于在规定的运行方式或故障形态下，对UPFC串联单元所在的线路或断面的输送功率进行计算，并对UPFC潮流控制效果进行评价。

* + 1. UPFC电压支撑计算分析

UPFC电压支撑计算分析用于在规定的运行方式或故障形态下，对UPFC并联单元所在的节点的电压进行计算，并对UPFC电压支撑效果进行评价。

* + 1. UPFC暂态支撑计算分析

UPFC暂态支撑计算分析用于在规定的运行方式或故障形态下，采用对UPFC的紧急控制实现对UPFC所在线路功率的紧急调整，以实现对系统稳定特性的紧急支援，并对UPFC暂态支撑效果进行评价。

1. **计算条件**
	1. 基础数据

UPFC计算分析前应确定的基础条件包括：电力系统接线和运行方式、除UPFC外各元件及控制系统的模型和参数、负荷模型和参数、故障类型和故障切除时间、重合闸动作时间、继电保护和安全自动装置的模型和动作时间。

* + 1.

应通过建模研究和实测工作，建立UPFC模型，包括以下内容：

a） UPFC串联侧换流器和并联侧换流器的额定容量、额定直流电压、额定直流电流、桥臂电阻、桥臂电感；

b） UPFC 串联变压器和并联变压器的额定容量、网侧绕组额定电压、阀侧绕组额定电压、变压器电阻、变压器漏抗、分接头所在挡位电压；

c）UPFC 串联侧与并联侧的连接方式；

d）UPFC 串联侧控制方式、并联侧控制方式；

e）UPFC 控制参数、保护定值单；

f）其他相关模型和参数。

* + 1.

在规划设计阶段的计算分析中，宜根据UPFC装置预估容量采用制造厂家提供、并经主管部门或其委托的机构认可的出厂模型和参数，或参照经过实测的同类型设备，选用经主管部门或其委托的机构认可的模型和参数。

* 1. 运行方式
		1. UPFC应用场景

针对电网中电源或负荷分布不均匀、线路参数不协调及运行方式受限等因素所导致的输电线路或断面潮流分布不均、部分地区缺乏动态无功支撑等情况，在电网结构相对固定、潮流及无功电压等问题长期存在的地区，可采用UPFC提高系统输送能力和电压稳定性。

典型应用场景包括但不限于：

a）通道潮流分布不均匀，采用UPFC提高通道输电能力；

b）输电断面潮流分布不均匀，采用UPFC提高断面输电能力；

c）电网潮流复杂多变，采用UPFC优化区域潮流分布；

d）电网存在电压稳定风险，采用UPFC提供动态无功支撑，提高电压稳定性；

e)）多直流馈入受端电网换流站近区，采用UPFC提供动态无功支撑，降低多直流同时换相失败风险。

* + 1. 计算方式安排

应根据UPFC的应用场景，明确计算分析的目的，针对系统运行中实际可能出现的不利情况，设定系统接线和运行方式。

计算方式包括：

a）正常方式下电网中存在输电线路、输电断面潮流分布不均匀的运行方式；

b）正常方式下区域潮流分布不合理的运行方式；

c）故障后方式下电网中存在线路潮流过轻/过重的运行方式；

d）正常方式下电网中缺少动态无功支撑的运行方式；

e）故障后方式下电网中存在电压稳定风险的运行方式。

* + 1. UPFC设备运行方式选择

UPFC设备运行方式主要分为3种：UPFC运行方式、STATCOM运行方式和SSSC运行方式。应根据UPFC的应用场景选择UPFC设备的运行方式：

a）在电网中存在潮流分布问题的计算方式中，宜选择SSSC运行方式，也可选择UPFC运行方式；

b）在电网中存在无功电压风险的计算方式中，宜选择STATCOM运行方式，也可选择UPFC运行方式；

c）电网中同时存在潮流分布问题和无功电压风险的计算方式中，应选择UPFC运行方式。

1. **计算方法与内容**
	1. 一般要求

应根据计算任务，在工程的规划、调试和运行阶段中进行UPFC潮流计算、机电暂态计算、电磁暂态计算。

* 1. 潮流计算
		1. 串联单元

根据T/CSEE 0081.3的潮流控制模型，串联单元应根据线路/断面/区域潮流的运行需求，控制线路的有功功率和无功功率达到设定的目标值。

在表述计算结果时，串联单元应输出所在的线路/断面/区域的有功功率和无功功率，达成此控制目标的所需的UPFC串联侧容量。

* + 1. 并联单元

根据T/CSEE 0081.3的潮流控制模型：

a）并联单元采用定节点电压模式，应根据电网电压的运行需求，控制并联单元所在节点的电压，在表述计算结果时，应输出并联单元所在的节点的电压，达成此控制目标所需的UPFC并联侧容量；

b）并联单元采用定注入无功模式，应根据电网的无功需求，控制并联单元所在节点向并联单元注入的无功功率，在表述计算结果时，应输出并联单元所在的节点向并联端注入的无功功率，达成此控制目标所需的UPFC并联侧容量。

* 1. 机电暂态计算

根据T/CSEE 0081.3的机电暂态模型，应用于机电暂态仿真计算，应使用计及基波分量的准稳态模型，模型应由一次系统模型和控制保护系统模型组成。

应对UPFC接入的电网近区开展N-1故障校核，应能保持电力系统的稳定运行，且不致使其他元件超过规定的事故过负荷能力和电压、频率允许偏差的要求。

电网发生故障时：

a）应将UPFC串联单元旁路，并当故障恢复后，经过延时，重新投入UPFC串联单元；

b）UPFC并联单元不旁路，在未超过电压限制范围（即电网正常运行范围）时，UPFC并联单元应处于定注入无功控制状态；当超过电压限制范围后，UPFC并联单元转入定节点电压控制状态，提供电压支撑。

在表述计算结果时，应输出机组间相对角度、母线电压和相关元件潮流的变化情况等。

* 1. 电磁暂态计算

根据T/CSEE 0081.3的电磁暂态模型，应用于电磁暂态仿真计算，应使用计及三相瞬时值的详细模型，应由一次系统模型和控制保护系统模型组成。

根据UPFC投产年典型运行方式，对UPFC接入点近区交流系统进行等值。在等值交流系统基础上，在电磁暂态计算软件中搭建含UPFC本体及其控制系统的模型。

电磁暂态计算方法是：在基本的避雷器配置方案下，对关键设备区域发生故障或操作进行模拟，得到关键设备的过电压水平，必要时进行避雷器配置优化。

在表述计算结果时，结合晶闸管旁路开关的旁路保护，给出关键设备的最高过电压水平和约束故障类型。

1. **评价指标**
	1. UPFC潮流控制作用

在电网中存在潮流分布问题的应用场景中，应根据潮流控制需求选择UPFC串联单元和并联单元的控制模型和控制值，通过仿真计算所需的UPFC装置容量。

在电网规划阶段，宜根据单位容量调节系数选择技术方案。

在电网调试和运行阶段，若通过仿真计算输出的所需的UPFC串联侧容量大于实际UPFC串联侧容量，应调整UPFC串联单元的控制模型和控制值。

* 1. UPFC电压支撑作用

在电网中存在无功电压风险的应用场景中，应根据动态无功的提升需求选择UPFC串联单元和并联单元的控制模型和控制值，通过仿真计算所需的UPFC装置容量。

在电网规划阶段，宜通过母线电压提升值和实际所需的UPFC装置容量，选择技术方案。

在电网调试和运行阶段，若通过仿真计算输出的所需的UPFC并联侧容量大于实际UPFC并联侧容量，应调整UPFC并联单元的控制模型和控制值。

* 1. UPFC暂态支撑作用

在电网中存在暂态稳定风险的应用场景中，应根据线路功率的紧急调整需求选择UPFC串联单元和并联单元的控制模型和控制值，通过仿真计算所需的UPFC装置容量。

在电网规划阶段，宜通过对系统稳定特性的紧急支援效果和实际所需的UPFC装置容量，选择技术方案。

在电网调试和运行阶段，若通过仿真计算输出的所需的UPFC容量大于实际UPFC容量，应调整UPFC串联单元、并联单元的控制模型和控制值。

1. **计算分析报告**

UPFC计算分析报告应包括以下主要内容，专题研究时可选择部分内容。

* 1. 前言

包括计算分析的背景、要求和目的、仿真软件的名称及其版本号、计算内容提要等。

* 1. 计算条件

报告中的计算条件应包括：

a）基本运行方式说明：计算水平年、电网接线方式、开机方式、负荷水平、同杆并架线路说明、安全稳定装置投运情况。

b）计算模型：发电机（含励磁系统、调速系统模型说明）、负荷、线路、变压器、直流、无功补偿等模型，以及时域仿真中所采用的基本计算步长。

c）UPFC模型：UPFC串联侧容量、串联侧换流器参数、串联变压器参数、UPFC并联侧容量、并联侧换流器参数、并联变压器参数、UPFC控制参数。

* 1. 计算内容
		1. 潮流计算

潮流计算通常为正常方式（含检修方式），计算分析内容包括UPFC投运前的运行方式和UPFC投运后的运行方式。 潮流计算分析包括：

a）潮流图：图上标示或文字说明主要线路潮流、主要节点电压，UPFC投运后的应说明相对于UPFC投运前的运行方式的优化内容。

b）潮流分布分析：UPFC投运前的运行方式和UPFC投运后的运行方式下，电网中线路/断面/区域的潮流对比，说明UPFC对电网潮流的改善作用。

c）电压水平分析：UPFC投运前的运行方式和UPFC投运后的运行方式下，电网中节点/区域的电压对比，说明UPFC对无功电压的改善作用。

* + 1. 机电暂态计算

机电暂态计算通常为正常方式（含检修方式）， 计算分析内容包括UPFC投运前的运行方式和UPFC投运后的运行方式。机电暂态计算分析应包括：

a）仿真曲线（包括功角、电压、频率等变化曲线）。

b）系统稳定特性分析。

* + 1. 电磁暂态计算

电磁暂态计算通常基于UPFC投运后的正常方式（含检修方式），计算内容包括：

a）串、并联变压器网侧过电压，包括来自交流线路的雷电冲击过电压、断路器操作引起的过电压、交流线路或邻近线路发生短路接地故障后的过电压。

b）串、并联变压器阀侧过电压，包括阀侧发生短路接地故障后的过电压、网侧传入的雷电过电压和操作过电压等。

c）直流侧过电压，包括直流侧发生极间短路故障、极线接地故障后的过电压、交流侧传入和换流器故障引起的过电压。

d）换流阀过电压，包括发生桥臂短路故障等内部故障后的过电压、变压器网侧和阀侧故障传入的过电压。

* 1. 结论和建议

在电网规划阶段，应根据UPFC应用场景，提出优选技术方案。

在电网调试与运行阶段，应给出UPFC的总体评价，评价UPFC的潮流控制作用和电压支撑作用，并给出合理的潮流和电压控制方案。