

ICS ××××

CCS ××××

T/××××(团体缩写)

团体标准

T/×××× ××××—2024

交直流混联系统潮流协调控制技术的要求

Technical Requirements for Coordinated Control of
AC/DC Hybrid System Currents

(草案)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

××××团体 发布

目 次

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 总体要求	4
5 协调控制关键要素	4
5.1 交流侧电压和功率控制关键要素	4
5.2 直流侧电压和功率控制关键要素	4
5.3 换流器控制关键要素	4
6 数据采集及处理	5
6.1 数据采集	5
6.2 数据处理	6
7 关键技术	错误! 未定义书签。
7.1 系统模型的构建	
7.2 多时间尺度潮流协调控制	6
7.3 数据驱动的决策优化	6
8 潮流协调控制结果评估	7
8.1 优化控制结果评估	6
8.2 稳定性控制结果评估	6
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。

本文件由××××协会/团体提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

交直流混联系统潮流智能协调控制技术要求

1 范围

本标准规定了交直流混联系统潮流协调控制技术的基本技术要求。

本标准适用于有电力系统潮流协调控制技术需求的调度机构、企事业单位，以及相应产品的设计、研发、检测及运行。

2 规范性引用文件

以下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 30149 电网通用模型描述规范

GB/T 31464 电网运行准则

GB/T 33590.1-2017 智能电网调度控制系统技术规范 第1部分：总体架构

GB/T 33590.2-2017 智能电网调度控制系统技术规范 第2部分：术语

GB/T 33602-2017 电力系统通用服务协议

DL/T 1170 电力调度工作流程描述规范

DL/T 5003 电力系统调度自动化设计规程

DL/T 516 电力调度自动化系统运行管理规程

CIGRE+一些国标+导则规范（分布式也可以用）

IEEE 1547: 该标准为分布式电源与电力系统的互联提供指导，包括电压和频率的稳态要求。

IEC 60038: 提供了电压标准，包括交流和直流电压的容许范围。

IEC 61000-3-7: 该标准规定了电网电压偏差和谐波要求，确保设备不会受到不良电压影响。

EN 50160: 该欧洲标准适用于公用电力网络，描述了电压质量特征及其容差要求。

IEEE 2030: 提供了智能电网系统的架构，包括潮流分配和控制的相关指南。

CIGRÉ TB 667: 提供了混合交直流输电系统的潮流控制方法和最佳实践。

IEC 60909: 该标准描述了短路电流的计算方法，为混联电网的保护设计提供参考。

IEEE C37 系列: 特别是 IEEE C37.010 提供了短路计算和保护要求，适用于混联电网的保护设计。

IEC 62559: 提供了复杂系统架构和运行条件下的稳定性分析和测试方法。

NERC PRC 系列: 北美电力可靠性委员会（NERC）发布的系列标准，包含了大规模电力系统稳定性和可靠性评估的要求。

IEC 61850: 作为智能电网自动化通信标准，IEC 61850 规范了设备之间的数据交换和通信协议，使 AI 系统能高效地收集和处理的电网数据。

IEEE 2030 系列: 提供智能电网的整体框架和互操作性指南, 特别是 IEEE 2030.5 中提出了数据交换协议, 支持 AI 算法在分布式电源、电网监控等方面的应用。

CIM (Common Information Model, IEC 61970/61968): 定义了电网模型的通用信息模型, 支持 AI 系统在交直流混联电网中进行数据分析、状态估计和故障预测等任务。

IEEE 1815 (DNP3): 提供了电力系统的数据采集和控制协议, 支持实时监控和远程数据采集。

IEEE P2784: 是关于智能电网中大数据和 AI 应用的指南, 涵盖了 AI 在故障检测、预测性维护和电网状态估计等方面的最佳实践。

ISO/IEC JTC 1/SC 42: 该标准系列专注于 AI 领域, 提供了 AI 系统的安全性、可靠性和风险管理的框架, 适用于交直流混联电网的 AI 辅助决策应用。

NIST SP 800 系列: 包括多个与电网网络安全相关的指南, 如 NIST SP 800-53 规定了信息系统和组织的安全与隐私控制, 为 AI 系统的数据安全管理提供指导。

IEC 62351: 关注智能电网的数据通信安全, 确保在 AI 辅助决策过程中, 数据传输的完整性和保密性。

NERC PRC 系列: 特别是 NERC PRC-002 和 PRC-023, 涵盖电力系统的事件监测和保护设备的可靠性要求, 可为 AI 应用中的风险评估和应急响应提供技术支持。

ISO 31000: 该风险管理标准提供了在电网中评估和管理 AI 系统潜在风险的框架, 有助于识别和控制 AI 辅助决策过程中的风险。

IEEE P7000 系列: 包括 AI 系统的伦理、透明性和模型解释性等方面的标准, 为 AI 模型的可解释性和公平性提供参考。

ISO/IEC 20546: 是关于大数据分析和 AI 应用的标准, 提出了模型的性能评估、数据质量监控等要求, 适用于交直流电网中的 AI 辅助决策。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

交直流混联系统 AC/DC hybrid system

由交直流输电系统互联形成的电力系统, 通过换流设备实现交直流电网的相互连接、协调运行。

3.2

稳态运行 steady-state operation

电力系统在负荷、发电量等主要参数维持相对稳定条件下的运行状态, 通常指频率、潮流和电压保持在正常范围内的运行状态。

3.3

电压稳定性 voltage stability

在特定负荷情况下, 电力系统维持电压稳定、避免因负荷波动或故障导致电压崩溃的能力。

3.4

潮流控制 power flow control

通过调节系统内换流器和调相机的工作方式, 实现交直流系统间功率传输的最优分配和方向控制。

3.5

系统响应时间 system response time

交直流系统在接收到控制信号后，达到稳定状态或目标设定所需的时间，用于衡量系统的响应速度。

3.6

交直流协同控制 AC/DC coordinated control

基于交直流系统的不同特性，实现统一优化的控制策略，以保障系统稳定性和运行效率的技术。

3.7

备用容量 reserve capacity

系统在正常或突发故障情况下，可调度的备用电力容量，通常包括热备用、冷备用等。

3.8

运行约束 operational constraints

交直流系统运行时需满足的电压、频率、潮流、稳定性等多方面限制条件。

3.9

自适应控制 adaptive control

根据实时运行状态自动调整控制参数的技术，确保系统在不确定性条件下维持稳定的运行状态。

3.10

能量管理系统 EMS, Energy Management System

用于调度和监控电力系统发电、负荷等资源分配的控制系统，在稳态控制和辅助决策中起重要作用。

3.11

分层控制 hierarchical control（张老师论文，以及其余几篇文章）

对电力系统中不同层级的控制器分工控制，实现局部与全局运行目标协调的控制方法。

3.12

负荷分配 load dispatching

在系统负荷需求下，根据最优分配原则，将负荷在交直流系统间合理分配，以保证运行稳定性和经济性。

3.13

辅助决策系统 DSS, Decision Support System（可添加 AI 相关术语）

基于数据分析和算法的决策支持工具，协助电力系统调度人员在负荷预测、潮流优化等方面的辅助决策。

3.14

频率控制 frequency control

通过自动调节发电量或负荷，维持系统频率在预定范围内的控制措施，确保电网稳定性。

3.15

紧急控制策略 emergency control strategy

当系统发生大扰动或异常情况时，快速恢复或避免系统失稳的预防与恢复控制措施。

3.16

电压裕度 voltage margin

系统正常运行下电压水平的安全裕度，用以衡量在负荷波动时保持电压稳定的能力。

3.17

功率分配因数 power allocation factor

在交直流混联系统中，不同线路、换流器等设备间功率传输的分配比例，用于优化负荷分配。

3.18

网损 network loss

电力系统在传输过程中因电阻、电抗等因素导致的功率损耗，包括传输线路和换流站损耗。

3.19

系统冗余 system redundancy

通过增加备用设备或通信链路，以增强系统在异常或故障情况下的恢复和稳定运行能力。

3.20

最优潮流 optimal power flow, OPF

通过优化计算确定系统在给定条件下的最佳潮流分布，以降低网损、提高效率的调度技术。

4 总体要求

4.1 交直流混联系统潮流智能协调控制的设计应针对不同控制对象和业务需求进行选择和优化，控制对象包括交流侧电压和功率、直流侧电压和功率、换流器参数等，业务需求可涵盖系统损耗最小化、电压畸变最小化以及稳定性提升等方面。

4.2 交直流混联系统潮流协调控制技术需涵盖关键环节，包括：交直流混联系统建模、稳定性分析、系统控制方法的具体设计与优化，决策算法设计、以及控制效果的评估。

5 协调控制关键要素

协同关键要素应明确交直流混联系统的运行要求，再明确该要求下的具体控制对象构成要素以及特性分析。交直流混合潮流特点包括：多类型电网并行、非线性特性、控制策略多样化

5.1 交流侧电压和功率控制关键要素

交流侧电压控制：交流电网的电压需要根据负载变化、发电机出力和电力流动来动态调节。关键是通过调节交流侧的换流器、变压器和调压装置来保持电压稳定。

功率控制：通过调整发电机出力、交流侧换流器的功率因数和无功调节来实现功率平衡。

5.2 直流侧电压和功率控制关键要素

直流电压控制：直流侧的电压需要保持在一个稳定范围内，以保证系统的电力输送和功率分配的稳定性。常用方法包括基于 PI 控制或模糊控制的电压控制策略。

功率控制：直流侧功率控制的关键是通过调整换流器的开关方式和工作模式，优化功率的分配。

5.3 换流器控制关键要素

换流器功率控制方法包括： P 、 V margin、 V - P droop（系统级和站级都要）。全局控制以及本地控制。

5.4 系统网损

网损类型：包括输电线路损耗、变压器损耗、无功损耗等。优化网损的控制策略能够提高系统效率，减少损耗。

输电线路损耗：与电流的大小成正比。

变压器损耗：与变压器的负载和工作频率相关。

无功损耗：与无功功率流动有关，尤其在长距离输电中较为显著。

5.5 稳定性分析（找文章）

交直流混联系统的稳态运行需确保系统在正常负荷水平和可预见扰动下能够保持稳定。控制应包括以下几个方面：潮流分布合理性、网损最小化、换流器功率平衡、系统电压稳定性等。

交直流混联系统的稳定性控制应确保系统在小扰动（如负荷波动、微小发电功率变化）下能够迅速恢复至稳定状态。控制策略应能有效抑制电压波动和频率偏移，保持系统运行的稳定性和响应速度。

6 技术支撑与场景限定

6.1 技术支撑

6.1.1 关键技术梳理

对交直流混联系统潮流控制的关键技术进行全面梳理和分析，是保障系统运行稳定性和高效性的基础。关键技术应包括但不限于以下方面：

（1）系统模型的构建：需要建立能够准确反映交直流混联系统各组成部分特性的模型，以确保控制策略的有效性。

（2）多时间尺度的控制方法：根据不同控制目标（如实时调节、短期稳定控制、长期调度），分层次构建适配不同时间尺度的控制策略，以提升系统运行的稳定性。

（3）智能预测与优化：基于大数据分析和机器学习等技术，对系统负荷、可再生能源出力、气象条件等进行精准预测，从而优化潮流控制策略，提高系统的效率与稳定性。利用调度自动化系统、智能终端数据采集等手段，实时监控系统状态，为控制决策提供及时、精准的数据支撑。

6.1.2 多层次控制支撑技术

（1）交直流混联系统的潮流控制需适应多层次的系统需求，包括交流互联与嵌入式直流的协同控制。具体支撑技术应涵盖以下几方面：

交流互联系统的分区控制：在交直流混联系统中，不同区域间的交流系统往往具有较强的关联性。通过分区控制技术，可以实现各区域的自主控制，并通过互联点协调，实现整个系统的稳定性。交流互联控制还应具备高抗扰性，能在系统发生小扰动和大扰动时保持稳定。

（2）嵌入式直流系统的双向潮流控制：嵌入式直流系统的控制需考虑其在双向潮流调节中的关键作用。控制策略应能够在直流系统中高效分配和调节功率，实现不同直流输电站和配电网之间的能量平衡。嵌入式直流系统的控制还需适应不同的运行模式，支持灵活的调度需求。

(3) 多层次协同控制架构：实现从变电站级、区县级到省级的多层次控制架构，以便在各级控制需求变化时实现快速响应。通过分层次控制架构，使得系统可以从局部控制拓展到全网协调，确保潮流分布优化、系统网损降低以及系统稳定性提升。

6.2 场景限定

应针对不同类型的电网应用场景，如微网、互联电网和嵌入式直流接入，确定协调控制的具体要求。时间尺度方面，主要考虑稳态控制，适当兼顾动态响应特性，定义控制时间尺度以适应不同负荷和电源变化。对于电网接入与结构调整，应考虑以下方面：

6.2.1 微网和嵌入式直流接入

微网及嵌入式直流系统应按照系统控制要求接入，优化潮流流向及功率分配。

6.2.2 网络拓扑调整与重组

针对故障后重组网络的潮流控制策略，保证直流系统与交流系统在恢复过程中的协调与稳定。探讨高效的拓扑调整方案，以提升系统的可靠性和故障恢复能力。

7 关键技术

7.1 系统模型的构建

构建交直流混合系统的模型是协调控制的基础。系统模型应包括以下几个方面：

潮流建模：针对交直流混联系统，构建适合系统的潮流计算模型。包括交流侧与直流侧的电压、功率、阻抗等参数的模型。

换流器模型：换流器在控制功率流、调节电压等方面起着重要作用。模型应涵盖换流器的电气特性、调节范围和响应特性。

电网拓扑：电网的拓扑结构应根据实际情况进行建模，确保潮流计算考虑到各种实际连接和配置。

多层次建模：对于多电压等级、多个区域的混合系统，需要多层次的建模方法来描述不同区域和层级之间的协调控制。

7.2 多时间尺度潮流协调控制

7.2.1 稳态潮流分布优化

控制范围：稳态运行控制和动态响应控制应覆盖整个系统，包括输电网和配电网的交直流混合部分。需要确保从高压到低压的系统都能适配潮流控制策略。

潮流分布优化：通过合理的潮流分配，使得负荷中心的潮流流向最优，降低网损，避免设备过载。优化策略应基于系统的实际运行数据进行调整。

经济性与安全性：稳态控制不仅要确保电网的安全性，还要兼顾系统的经济性。例如，在配电网中尽可能分配较少的潮流到低效的线路和设备。

7.2.2 功率分配与电压控制

功率分配：确保系统中每个节点的功率需求得到满足，并且各个区域之间的功率平衡得以维持。

电压控制：通过设计分区控制策略，调节不同电压等级下的换流器和电网设备工作状态，确

保系统整体电压稳定。对于高压、超高压等区域，电压调节尤为关键，防止出现电压过低或过高的情况。

7.3 数据驱动决策优化

数据驱动的决策优化通过结合实时数据和历史数据来动态优化系统运行，以提高决策精度和实时响应能力。

7.3.1 决策传输：系统的优化决策需要快速而准确地传输到控制单元（如换流器、调节装置等）。此过程涉及通信网络的可靠性和数据传输的实时性。

通信延迟：对于分布式控制系统，通信延迟可能影响决策的执行，优化决策传输方法，减少通信延迟是实现实时控制的关键

7.3.2 数据融合与优化算法

数据融合：将来自多个传感器和监控系统的数据融合，分析不同来源的信息，进行潮流预测、功率调节等。

优化算法：基于实时数据的优化决策，可以采用机器学习、深度学习等数据驱动的优化算法，以处理复杂的潮流和功率控制问题。

8 潮流协调控制结果评估

8.1 评估因素考虑

潮流智能控制结果评估应充分考虑各种客观条件的限制因素，包括优化控制的结果，比如网损和电压畸变量、系统稳定性控制的结果、控制算法的精确度、系统模型的适用性、设备性能变化（如设备老化）、实时数据传输的延迟等。此类因素可能影响潮流控制的实时性和准确性，应在评估中予以综合考量。

8.2 评估指标设定

评估指标应包括控制目标达成度、系统功率分配的准确率、网损控制水平、关键节点电压保持情况等。

附录 A

数据处理、分析和负荷预测方法

全时序负荷预测过程中，涉及数据处理、分析及负荷预测等环节，有关推荐方法见表 A.1。

表 A.1 数据处理、分析和负荷预测方法

序号	类别	方法
1	负荷历史数据处理	不良数据辨识法
		特征曲线法
		相似日曲线比对法
		线性插值法
		指数平滑法
2	气象与负荷关联性	皮尔逊相关系数法
3	气象与光伏关联性	皮尔逊相关系数法
		最小二乘法
		分段线性拟合
		相似日曲线比对
		人工神经网络法
4	负荷层级关系	最小二乘法
5	负荷预测	点对点法
		倍比平滑法
		重叠曲线法
		模式识别法
		频域分量法
		线性外推法
		相似度外推法
		相关因素匹配法
		人工神经网络法
		模糊聚类法
		专家系统法
逐点增长率法		

附录 B

(资料性)

预测结果评估指标计算方法

B.1 评估时刻负荷预测偏差率

评估时刻负荷预测偏差率 E_i 的计算方法见式 (1)。

$$E_i = \frac{L_{i,f} - L_i}{L_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

E_i ——时刻 i 的负荷预测偏差率，单位为百分比 (%)；

$L_{i,f}$ ——时刻 i 的负荷预测值，单位为兆瓦 (MW)；

L_i ——时刻 i 的负荷实际值，单位为兆瓦 (MW)。

B.2 日平均负荷预测准确率

日平均负荷预测准确率 A_d 的计算方法见式 (2) 和 (3)。

$$A_d = (1 - RMSE) \times 100\% \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (3)$$

式中：

A_d ——日平均负荷预测准确率，单位为百分比 (%)；

$RMSE$ ——日负荷预测偏差率均方根；

E_i ——时刻 i 的负荷预测偏差率，单位为百分比 (%)；

n ——日负荷实际考核点数。

B.3 月平均日负荷预测准确率

月平均日负荷预测准确率 A_m 的计算方法见式 (4)。

$$A_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_{d,i} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

A_m ——月平均日负荷预测准确率，单位为百分比 (%)；

$A_{d,i}$ ——该月某日 i 的日平均负荷预测准确率，单位为百分比（%）；

m ——月度天数。

B.4 日最大（小）负荷预测准确率

日最大、最小负荷预测准确率 A_h 、 A_l 的计算方法见式（5）和（6）。

$$A_h = \left(1 - \frac{|L_{h,f} - L_h|}{L_h}\right) \times 100\% \quad (7)$$

$$A_l = \left(1 - \frac{|L_{l,f} - L_l|}{L_l}\right) \times 100\% \quad (8)$$

A_h ——日最大负荷预测准确率，单位为百分比（%）；

$L_{h,f}$ ——日最大负荷预测值，单位为兆瓦（MW）；

L_h ——日最大负荷实际值，单位为兆瓦（MW）；

A_l ——日最小负荷预测准确率，单位为百分比（%）；

$L_{l,f}$ ——日最小负荷预测值，单位为兆瓦（MW）；

L_l ——日最小负荷实际值，单位为兆瓦（MW）；

B.5 月平均日最大（小）负荷预测准确率

月平均日最大（小）负荷预测准确率 $A_{m,h(l)}$ 的计算方法见式（9）。

$$A_{m,h(l)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_{h(l),i} \times 100\% \quad (9)$$

$A_{m,h(l)}$ ——月平均日最大（小）负荷预测准确率，单位为百分比（%）；

$A_{h(l),i}$ ——该月某日 i 的最大（小）平均负荷预测准确率，单位为百分比（%）；

m ——月度天数。

B.6 净负荷计算方法

净负荷为系统负荷减去风光等新能源出力后的值，计算方法见式（10）和（11）。

$$L_i = L_i - P_i \quad (10)$$

$$L_i = L_{i1} + L_{i2} + \cdots + L_{in} \quad (11)$$

L_i ——时刻 i 的净负荷值，单位为兆瓦（MW）；

L'_i ——时刻 i 的系统负荷值，单位为兆瓦（MW）；

P_i ——时刻 i 的新能源发电出力值，单位为兆瓦（MW）；

L_{in} ——时刻 i 的某一类型负荷值，单位为兆瓦（MW）；

B.7 电力平衡裕度最小时刻负荷预测准确率

日电力平衡裕度最小时刻负荷预测准确率 A_b 的计算方法见式（12）。

$$A_b = \left(1 - \left| \frac{L_{b,f} - L_b}{L_b} \right| \right) \times 100\% \quad (12)$$

A_b ——日电力平衡裕度最小时刻点负荷预测准确率，单位为百分比（%）；

$L_{b,f}$ ——日电力平衡裕度最小时刻点负荷预测值，单位为兆瓦（MW）；

L_b ——日电力平衡裕度最小时刻点负荷实际值，单位为兆瓦（MW）。

B.8 气象预报偏差对负荷预测结果的影响评估

气象变化较大时，在气象预报值较实测值偏差较大的情况下，宜基于实测气象数据重新预测负荷，计算量测负荷预测结果的偏差，评估气象预报偏差对负荷预测结果的影响。

评估时刻气象预报偏差导致的负荷预测偏差率 D_i 的计算方法见式（13）。

$$D_i = \frac{L'_{i,f} - L_{i,f}}{L_i} \times 100\% \quad (13)$$

D_i ——时刻 i 气象预报偏差导致的负荷预测偏差率，单位为百分比（%）；

$L'_{i,f}$ ——时刻 i 根据气象实测值得到的负荷预测值，单位为兆瓦（MW）；

$L_{i,f}$ ——时刻 i 根据气象预报值得到的负荷预测值，单位为兆瓦（MW）；

L_i ——时刻 i 的负荷实际值，单位为兆瓦（MW）。