

安全稳定控制装置的控制策略分析

廖孟黎¹ 田开庆²

(1. 云南电网有限责任公司昆明供电局 2. 昆明铁道职业技术学院)

摘要：随着新型电力系统的大力发展，能源结构的愈发复杂，进一步对电力系统运行中的安全稳定控制装置提出更高的要求，同时也需要从业人员掌握该装置的运行逻辑，以便应对愈来愈复杂的电力系统结构。安稳装置控制策略为其核心，因此本文从离线决策、在线匹配，在线预决策、实时匹配，实时计算、实时匹配三个角度进行对比说明，通过分析不同控制策略的原理，确定实时计算、实时匹配是最匹配目前电网发展的安稳装置的控制策略，为未来电网发展中所需安全稳定控制装置的发展提供了参考。

关键词：安全稳定控制装置；控制策略；运行逻辑；新型电力系统

0 引言

为了确保电力系统在遇到重大扰动时的稳定性，通过在电源侧（火电厂、水电厂等发电厂）或者中间枢纽变电站或换流站处配置相应的安全稳定控制装置，以达到指定目的。这些装置可以实现切断发电机、切除负荷、快速减少输出功率以及紧急功率支援等功能，从而维持电力系统的安全稳定运行。因此，安全稳定控制装置通常作为保障电网稳定性和安全性的第二道防线和第三道防线^[1]。

因全球不可再生能源的逐渐枯竭，为重新调整能源结构，以风电、光伏为代表的新能源得到大力发展，直流输电已经成为现阶段电能的主要输电方式之一。同时随着直流输电技术的快速发展，新能源与储能系统（ESS）的广泛应用，现阶段的电力系统呈现出网络结构复杂、控制变量繁多、运行要求高的特点。图 1 为多能源互补的输电系统架构示意图。

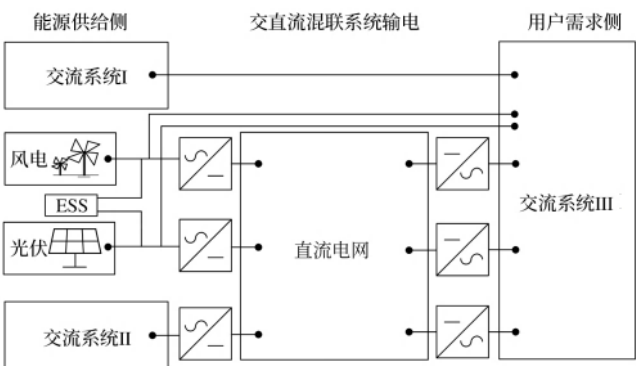


图 1 多能源互补的输电系统架构示意图

图 1 所示的多能源互补分别由交流部分、直流部分、风力发电、光伏发电及储能系统（ESS）共同构成。在该多能互补系统中，通过下列几种不同的传输方式实现电能的传输：

- 1) 传输方式 1：电能由交流系统 I 直接传递至交流系统 II 侧。

2) 传输方式 2：借助 VSC 换流站，完成交流系统 II 到交流系统 III 的电能传输。

3) 传输方式 3：风、光经上网后与相应的 ESS 通过交流形式传输到交流系统 III 侧。

4) 传输方式 4：风、光经上网后与相应的 ESS 借助 VSC 换流站将电能传输至交流系统 III 侧^[2]。

随着源荷双侧不确定性的加剧以及作为调节资源的 ESS 得到广泛应用，为了在新能源和 ESS 加入后，依旧能够实现对电网运行状态的调整，便需要在原运行方式下进行不确定性和储能系统的考虑，因此进一步对电力系统运行中的安全稳定控制装置提出了更高的要求，同时也需要从业人员掌握该装置的原理及相应的控制策略，以便应对愈来愈复杂的电力系统环境。

1 安全稳定控制装置的原理

在电力系统中，将一次事故定义为发生短路或发生其他异常情况，而二次事故则定义为导致系统发生解列的情况。为防止系统因失控、解列等造成的严重影响，便安装了安全稳定控制装置。这些装置监测电厂、变电站或换流站的关键设备运行状态，如出线、主变压器和换流变，同时考虑保护系统的跳闸信号和开关位置信号，以便快速判断故障类型。根据故障类型、电网运行状况及主要输电线路的负载情况，安稳装置根据其内置的策略，进行如切断发电机、卸载负荷等操作，以调整电网的运行状态，确保关键参数如电压、频率和功角稳定。

总之，当电网遭受重大干扰并处于紧急状态时，安全稳定控制装置能够快速响应并采取必要措施，使电网恢复正常运行状态。此外，这些装置还具备远程通信、故障记录、自动检测、异常报警、动作显示、整组检查试验、GPS 时间同步和打印功能，并能通过专用通道或调度数据网络与调度中心进行远程监控和通信。

安全稳定控制装置可以根据其运行方式分为集中式和分布式两种。在集中式运行中，适用于 500kV 以下电压等级的变电站，装置通过从同一保护小室内的继电保护装置和故障录波装置中收集数据，并根据设定的稳控策略执行控制命令。这种将关键设备集中安置在同一地点的方式，实现了投资成本与运维成本的平衡。相反，在分布式运行中，适用于 500kV 及以上电压等级的变电站，继电保护装置和故障录波装置被安置在不同的位置。这种布局有助于减少连接电缆的长度，并且能够在减少外部电磁干扰的同时节约成本。

安全稳定控制装置中主 - 从机的连接方式如图 2 所示。主机承担着对输电线路信息采集的任务，并对故障线路类别进行判断，并根据判断结果发送控制命令至对侧站。从机通过传输介质光纤将从站线路的模拟量输入、开关量输入、开关量开出及相应线路的故障类型等信息传递至主机端。

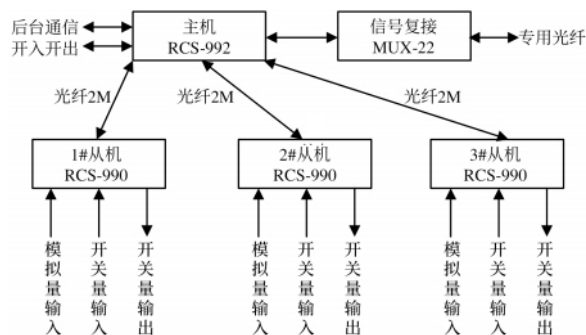


图 2 主机与从机之间的通信方式

值得一提的是，如果从机接收到由断路器保护跳闸的开入量信号传输，则通过传输介质将该信息传送至主端，由主机端向相应的换流站发送闭锁信号，最终完成由断路器所实现的保护功能。

2 安全稳定控制装置的控制策略

安全稳定控制装置的控制策略分为离线决策、实时匹配, 在线预决策、实时匹配及实时计算、实时匹配三种^[3-6]。其中, 离线决策、实时匹配策略指提前针对保护动作进行稳定性分析并制成策略表, 实际运行时根据具体运行工况选择策略^[7]。但是随着电网的发展, 尤其是交直流系统的引入, 电网的结构愈发复杂, 该策略难以适应大电网形态下的不同运行方式。在线预决策、实时匹配策略指通过事故预想的方式刻画出 $N-1$ 安全域, 再根据具体运行方式进行实时匹配, 对新型电力系统的迅速发展具有适应性。但是由于需要对整个联络网之间的安全域进行刻画, 状态估计运行周期太长; 同时易出现采用的控制策略仅保证系统的暂态稳定性, 无法解决新策略下系统过负荷运行的问题, 故该策略也不满足现阶段电网运行的安全稳定要求。实时计算、实时匹配策略是目前最为理想且稳定的控制策略, 通过对大电网形态进行实时计算, 根据具体的运行状态确定出所需要的控制策略^[8]。

2.1 离线决策、实时匹配

离线决策、实时匹配的控制策略是提前制定好控制策略表, 当系统发生故障时, 根据所采集的电气参数与预先确定的策略表比对, 确定该故障下所需要的控制手段^[9]。

离线决策是基于历史数据和预测模型进行的。在离线模式下, 系统分析大量的历史数据、电网拓扑和潮流情况, 以预测可能发生的电网异常或扰动。通过这些分析, 装置可以制定长远的控制策略和预案, 例如确定哪些设备在特定故障情况下需要切断或减负荷, 如何调整电网的功率分配以保持稳定性等。离线决策是为了在实际事件发生前做好准备, 以应对潜在的系统挑战。以一个城市供电网为例, 离线决策分析显示未来几天将会面临高温天气和高负荷需求, 预测到可能出现电网过载的风险。装置通过分析历史数据和天气预报, 制定出增加可再生能源发电量、临时激活备用发

电机组的策略, 以应对可能的电力需求峰值, 从而确保电力系统在不同时间段下均能够稳定运行。

实时匹配策略则是在事件发生时迅速响应和执行的决策过程。当电网出现异常或故障时, 安全稳定控制装置即刻根据实时监测到的电流、电压、频率等数据, 以及与其他站点的通信信息, 进行快速决策和动作。这包括实时判断电网中发生的具体故障类型, 并通过快速切断设备、调整负荷或提供紧急功率支持等措施来保持电网的稳定运行。实时匹配策略的关键在于迅速而准确地响应电网的动态变化, 能够最大程度地降低故障发生后所造成的后果。换言之, 当某一条输电线路发生短路或断线时, 实时匹配策略要求安全稳定控制装置立即切断受影响的线路段, 并通过重新配置电网负载和调整发电机输出来恢复电网的平衡。装置会快速调度周围发电机组的运行状态, 并向调度人员推荐最佳操作方案, 以尽快恢复电力供应并避免连锁故障的发生。

安全稳定控制装置通过离线决策和实时匹配策略的结合, 满足了电力系统运行的稳定性、安全性的要求, 确保在各种条件下都能快速、有效地应对电网的运行挑战和突发事件。

然而, 该种策略仅适用于故障类型较少的场景, 若故障类型较多且策略表无对应故障时, 安稳装置无法选择到对应的故障处理方法, 导致故障一直存在。

2.2 在线预决策、实时匹配

对电网状态进行实时采集, 将采集结果通过在线决策系统分析出预想事故集, 并对集合内的各个事故进行潮流计算, 根据其稳定性要求选择最佳的控制策略, 并形成该时刻下的控制策略集。在线预决策的具体流程如下。

(1) 状态估计

根据对应系统的初值进行潮流计算, 得到该状态下的稳定性结果。根据 SCADA 数据与稳定性结果进

行对比,判断所得稳定性结果的正确程度。对于偏差较大的结果,系统仅从中筛选出可靠的数据用于后续计算。

(2) 静态安全域

通过实时数据和对应的预设事故情形进行稳定性计算。在逐点法的基础上延伸得到电力系统静态安全域,从域的角度出发考虑问题,根据电力系统潮流方程及约束条件,得到系统的安全稳定运行区域。根据静态安全域下的基态安全约束条件、 $N-1$ 故障或检修时的修正安全约束条件,得到 $N-1$ 状态下安全稳定运行区域,如下式 Ω_{SR} 所示:

$$\Omega_{SR} = \begin{cases} F(x, y) = 0 \\ G(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为系统状态变量向量; y 为节点功率注入向量; $F(x, y)=0$ 为系统潮流方程; $G(x, y) \leq 0$ 为系统 $N-1$ 态的安全约束集合。进而得到 $N-1$ 状态下满足电力系统潮流方程、机组功率约束、线路传输功率限值及各节点电压幅值要求的全部点集。

(3) 动态 $N-1$ 故障扫描

在动态 $N-1$ 故障扫描时,自动对系统中各条线路及线路上每一个元件所涉及的各种故障自动扫描,并计算该 $N-1$ 发生后系统的功角稳定性、电压稳定性,对不满足电网运行的故障类型进行薄弱点预警,并自动与安全域进行匹配。

(4) 断面极限输送功率计算

根据第(3)步动态 $N-1$ 故障扫描后的结果,进一步计算出发生 $N-1$ 后的系统所能承载的最大功率,即断面极限功率,并同时输出故障类型及对应的详细报告分析。

(5) 静态电压安全性分析

可利用连续潮流计算、 $N-1$ 安全域分析以及厂站电压稳定分析三种方法,对电网的电压稳定性进行综合评估和优化。同时可借助分析结果,在线预决策系

统能够全面识别电网中存在的电压稳定性问题,并提出相应的无功优化策略。这些策略不仅保证了电网运行的稳定性和可靠性要求,还能对电网的运行实现最优潮流控制。

换言之,安稳装置控制策略采用通过事故预想进行确定其事故集的方式,保证整个系统出现 $N-1$ 状态时,匹配至对应 $N-1$ 状态下的预决策,使得电网可以安全、稳定与可靠的运行。然而由于目前确定事故集合的方法为蒙特卡罗法,其原理是通过抽样模拟随机出现的各种系统状态来体现系统 $N-1$,但若要达到极高的计算精度,必须要有庞大的抽样次数作为支撑^[10-11]。同时为保证精度需评估非常多的系统状态,容易出现维数灾的问题(进行省级电网风险辨识需要数十小时)。所以,该方法计算复杂度高、风险评估要素不全,无法满足电网风险快速、准确辨识的要求。

2.3 实时计算、实时匹配

基于实时计算和实时匹配的在线实时稳控系统与传统的预设策略表不同。该系统无需事先进行计算,而是直接从调度中心获取电力系统的实时运行数据,然后进行状态估计和控制决策。当电力系统发生故障时,系统能够立即进行实时计算和控制,并将相应的控制指令直接发送给稳控装置。

在线实时稳控系统的硬件包括稳控服务器、通信接口装置和稳控装置。软件系统由多个模块组成,包括在线数据库读写、离线数据库读取、高速通信、实时网络分析、建立基础计算数据、电力系统状态估计、超实时暂态稳定计算和在线实时稳控策略计算模块。

系统要求在电力系统发生故障后的极短时间内完成控制策略的实施:故障信息传送至稳控服务器需不超过20ms,服务器在200ms内完成控制策略和控制量的计算,控制指令在20ms内下发并开始执行。这些要求对控制策略的计算速度提出了极高的要求。

系统的计算速度主要受限于超实时暂态稳定计算模块和在线实时稳控策略计算模块。为提升仿真速度，系统采用节点编号优化和稀疏矢量算法，以减少网络代数方程的计算量；同时，利用隐式精细积分法提高微分方程求解的精度^[12]。超实时暂态稳定计算的流程如图3所示。

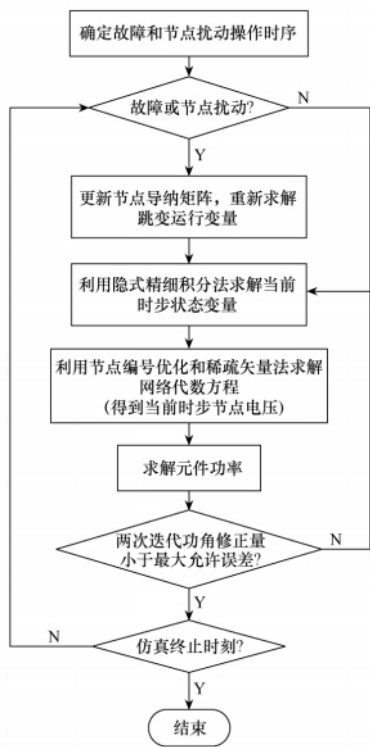


图3 超实时暂态稳定计算流程图

该系统首先进行系统稳定性判断，如果系统判断为稳定，则停止在线稳控策略计算；若系统判断为失稳，则根据具体失稳类型和算法确定相应的控制量。随后分析当前控制量对系统稳定性的影响，如果连续两次控制量的修正在可接受范围内并且控制后系统保持稳定，则输出最终的控制策略；否则，系统持续计算稳控策略，直至满足预设条件或达到时间限制。

为了提高仿真速度和效率，在系统稳定性判断阶段，一旦确定系统失稳模式，系统立即终止超实时暂

态稳定仿真计算，并转入在线实时稳控决策阶段，直接执行稳控策略。

实时计算和实时匹配模式的具体控制流程如下：

1) 系统初始化阶段，稳控服务器在接收到第一批数据后，根据采集的电网运行状态信息进行实时网络结构分析。

2) 服务器根据整个电网的拓扑结构、系统结线以及有效的测量数据进行状态估计，以获取系统运行的关键变量。

3) 基于状态估计得到的系统潮流情况，服务器读取网络动态元件的参数（如发电机、励磁系统、调速装置和动态负荷），开始进行暂态稳定初值的计算。实时计算、实时匹配模式在初始化完成后的系统控制流程如图4所示。

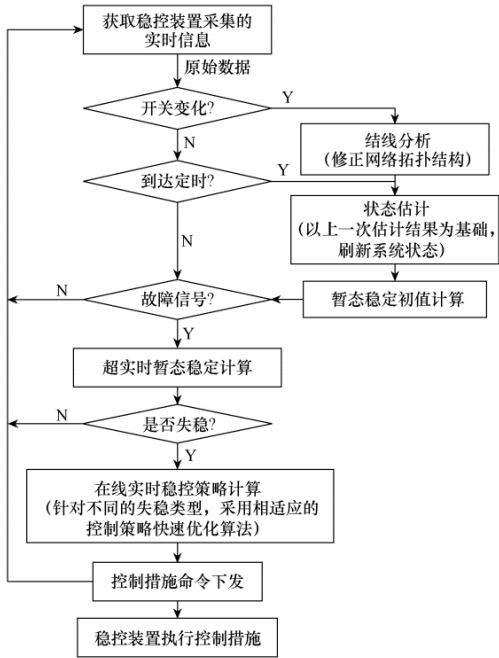


图4 实时计算、实时匹配模式控制流程图

4) 服务器按照设定的周期性接收稳控装置定时上送的信息，并通过实时结线分析模块进行变位触发。如果检测到开关变位，系统依据上一次的结线状

态对网络结线进行修正。

5) 服务器按照预设的定时触发状态估计, 每次完成状态估计后启动计时器。若计时器到达设定时间, 服务器读取当前时刻的量测数据, 基于上一次状态估计的结果进行新一轮的状态估计, 更新系统状态, 并进行暂态稳定初值计算。

6) 服务器根据从稳控装置通过通信接口上送的故障信号触发超实时暂态稳定计算。

7) 服务器评估电力系统的稳定性, 如果判断系统失稳, 则执行稳控策略计算。根据具体的失稳类型, 采用适当的快速优化算法生成优化的控制措施。

8) 稳控装置接收到服务器所下发的控制命令并执行。实时结线分析模块根据变位触发模式进行实时结线分析和超实时暂态稳定计算。一旦接收到开关或保护设备动作信号, 模块立即开始计算。状态估计按照预设的定时计划执行, 每次完成后系统潮流保持稳定。在实时结线分析完成后, 模块重新启动状态估计以刷新系统状态。若在状态估计过程中接收到故障信息, 且该次状态估计不是由结线变化触发的, 则系统利用上一次的估计结果进行超实时暂态稳定计算。

综上所述, 通过实时计算、实时匹配的控制策略能保证安稳装置在运行过程中对电网实时计算与评估, 解决了在线预决策、实时匹配策略计算复杂度高, 所需时间长的问题, 尽可能地满足了电网风险快速、准确辨识的需求。

3 结束语

随着新型电力系统的发展、源网荷储交直流混联大系统的出现, 作为第二、三道防线的安全稳定控制装置的重要性愈发明显, 因此本文对安稳装置的控制策略进行分析, 从离线决策、在线匹配, 在线预决策、实时匹配, 实时计算、实时匹配三个维度进行对比说明, 得到以下结论:

1) 离线决策、在线匹配策略仅适用于故障类型较少或遵循总配置原则的电网, 不适用于复杂的大电网网络。

2) 在线预决策、实时匹配存在计算复杂度高、风险评估要素不全的风险, 无法满足电网风险快速、准确辨识的要求。

3) 实时计算、实时匹配保证安稳装置在运行过程中对电网可实时采集与评估, 且当故障发生时第一时间便可直接给出控制措施, 下发给稳控装置, 极高地满足了电网运行的 $N-1$ 可靠运行要求。

4) 就目前的电力系统发展而言, 实时计算、实时匹配才是最符合电网稳定性要求的, 因此需要安全稳定控制装置朝着兼具智能化、网络化、快速化等特点的方向发展。

参考文献

- [1] NB/T 11195—2023 安全稳定控制系统专题研究报告内容深度规定 [S]. 2023.
- [2] 廖孟黎, 任浩, 肖笛, 等. 基于 SOC 特性的交直流系统源网荷储概率潮流优化 [J]. 云南电力, 2023 (11): 9-19.
- [3] 王胜明, 徐泰山, 陈刚, 等. 电网安全稳定控制系统当值策略可实施评估方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (24): 126-133.
- [4] 王优优, 朱维钧, 梁文武, 等. 湖南电网安全稳定控制系统现状分析 [J]. 湖南电力, 2020, 40 (5): 74-77.
- [5] 陶军, 雷轲, 慕腾, 等. 多区域机组协同配合的优化排序安全稳定控制策略 [J]. 山东电力技术, 2024, 51 (6): 12-19.

(下转第 83 页)

- [6] 张建新, 常东旭, 邱建, 等. 适应新型电力系统的安全稳定控制系统及装置设计方法 [J]. 电网与清洁能源, 2023, 39 (12): 10-19.
- [7] 金树伟. 探讨电网安全稳定控制装置测试技术研究 [J]. 电气技术与经济, 2023 (7): 173-175.
- [8] 夏玉裕, 陈海荣. 适用于标准化安全稳定控制装置的策略表设计与实现 [J]. 电工技术, 2023 (14): 144-148.
- [9] 龙雪梅, 许立强, 徐彪, 等. 标准化安全稳定控制系统的策略及分配研究 [J]. 湖南电力, 2022, 42 (6): 104-109.
- [10] 李辰龙, 徐妍, 徐海波, 等. 基于蒙特卡洛的安稳装置可靠性分析 [J]. 电气自动化, 2018, 40 (5): 83-85, 104.
- [11] 白晨, 吴山山. 基于电力系统安全稳定控制与运行管理的研究 [J]. 甘肃科技, 2018, 34 (13): 30-31, 52.
- [12] 孙丹. 基于实时决策与实时控制模式的稳控系统研究 [J]. 电气技术, 2022, 23 (11): 103-108.
- (收稿日期: 2024-09-20)**