

DOI: 10.7667/PSPC201801

# 小规模电网安全稳定实时控制系统研制与应用

夏彦辉, 董宸, 孙丹, 欧阳逸风

(南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

**摘要:** 分析了稳定控制系统策略的三种实现方式的优缺点, 提出了在小规模电网开展在线实时稳定控制系统研究应用的需求。介绍了基于超实时仿真算法的在线实时稳定控制系统的实现方案, 包括硬件结构、软件结构和关键技术指标。阐述了系统涉及的关键技术问题, 包括超实时仿真算法、稳控决策、高速实时通信方案以及多种决策方式的协调方案。该系统在独立局域电网和企业自备电网的应用, 验证了其工程实用性。最后, 展望了在大规模电网推广在线实时稳定控制系统的研究方向。

**关键词:** 稳定控制系统; 在线实时稳定控制; 超实时仿真; 稳控决策; 高速实时通信

## Development and application of the real-time stability control system in small scale power grid

XIA Yanhui, DONG Chen, SUN Dan, OUYANG Yifeng

(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

**Abstract:** The advantages and disadvantages of three realization ways of stability control strategies are analyzed. The development and application demand about the online real-time stability control system in small scale grid is proposed. Firstly, the implementation including hardware structure, software structure and main technical specification of the online real-time stability control system based on ultra real-time simulation is introduced. Then the main technical problems involved in the system are elaborated, including the ultra real-time simulation algorithm, stability control decision, high speed real-time communication program and coordinate scheme with multi-decision ways. The engineering practicability is verified by the application of the online real-time stability control system in independent local power grid and enterprise owned power grid. Finally, the research direction of popularizing the online real-time stability control system in large power grid is expected.

This work is supported by Science and Technology Project of Jiangsu Province (No.BZ2015010).

**Key words:** stability control system; online real-time stability control; ultra real-time simulation; stability control decision; high speed real-time communication

## 0 引言

电力系统中的故障扰动如果处理不当或不及时, 则可能发展扩大为系统性事故, 甚至可能造成大面积停电。稳定控制技术是提高电网安全稳定运行水平的关键技术, 也是保障电网安全经济运行的重要手段。

安全稳定控制系统是指由两个及以上厂站的安全稳定控制装置通过通信设备联络构成的系统, 根据策略实现方式采取技术路线的不同, 稳定控制系统分为以下三类。

(1) 基于离线策略表的稳定控制系统: 技术人员采用离线仿真软件工具(如 BPA、PSASP 等)开展大量的仿真计算, 通过分析、归纳、总结, 形成包含运行方式、故障元件、故障类型、稳定控制措施、定值等关键字段的策略表, 交由稳控装置设备厂家开发人员编程(或配置)实现。实际运行时, 通过判断运行方式、故障元件和类型, 实时匹配离线策略表, 找到相应的控制措施, 并动作出口。这类稳定控制系统已得到了大量应用, 技术最成熟, 是目前的主流实现方式<sup>[1-3]</sup>。但这类稳定控制系统存在离线工作量大、控制措施的过量或欠量受策略制定技术人员的经验和性格影响等问题, 在实际运行中存在策略失配的风险。

(2) 基于在线预决策的稳定控制系统: 在线预决策系统定周期(典型时间取 5 min)从数据采集与监控系统(SCADA)获得电网运行状态数据, 基于预想故障集, 开展在当前运行方式下的稳定性评估, 对于失稳的情形, 搜索控制措施集, 形成稳控策略表, 刷新现场稳控装置中存储的策略表或定值。这类稳定控制系统可以明显提升稳控策略的精度, 降低策略失配的概率, 减少人工计算工作量。目前, 这类稳定控制系统多应用于对调度运行人员提示告警、辅助决策<sup>[4]</sup>, 也有少量工程项目实际刷新了现场稳控装置中存储的策略表<sup>[5]</sup>。但对于多重故障、连锁故障或其他电力系统运行状态持续快速变化的情形, 仍存在策略失配的风险。

(3) 基于在线实时决策的稳定控制系统: 在线实时决策系统定周期(典型时间取 5 s)从现场稳控装置、SCADA 获得电网运行状态数据, 开展状态估计, 形成当前运行方式。现场稳控装置实时判断故障信息, 立即上送在线实时决策系统, 触发超实时仿真计算和稳定性综合评估, 对于预测失稳的情形, 搜索控制措施, 下发至现场稳控装置执行出口。这类稳定控制系统不依赖于策略表, 理论上不存在失配风险, 但对计算和通信的实时性要求极高, 目前技术条件下, 实际应用于大电网存在一定的难度<sup>[6]</sup>。

对于一些电网规模小、地理分布范围小的区域电网, 如企业自备电网、微电网或其他一些与大电网弱联系(或无联系)的地区局域电网, 单机或单负荷占系统容量比重大, 系统运行稳定性差, 严重依赖稳控措施, 因离线策略失配造成的电网崩溃事故时有发生, 在此类电网中开展在线实时稳定控制系统的研究应用, 具有重要的现实意义<sup>[7-8]</sup>。

### 1 在线实时稳定控制系统

在线实时稳定控制系统利用稳控装置采集数据, 结合 SCADA 数据, 获得电网的实时运行状态和故障信息, 基于超实时仿真技术及优化算法在线进行稳控决策, 完成电网安全稳定的综合评估和控制策略的在线刷新, 实现精确的闭环自适应稳定控制。

#### 1.1 硬件结构

在线实时稳定控制系统的硬件构成如图 1 所示, 包括在线决策服务器、维护工作站、网络交换机、通信接口装置和稳控装置。稳控装置采集的电网运行状态信息通过以太网以秒级时间周期上送, 采集的故障信息通过光纤以毫秒级时间立即上送。

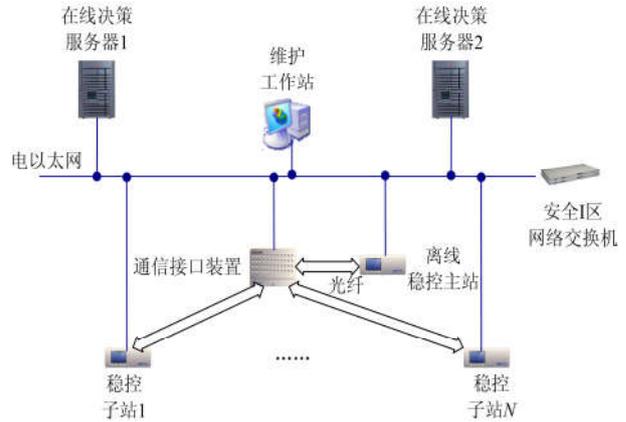


图 1 在线实时稳定控制系统硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure diagram of the online real-time stability control system

#### 1.2 软件结构

在线实时稳定控制系统的软件构成如图2所示, 包括以下几个方面。

- (1) 主线程: 负责图形界面、人机交互。
- (2) 数据读写线程: 负责读写在线数据库、离线数据库、配置文件、结果文件。
- (3) 计算线程: 负责实时结线分析、状态估计、暂态稳定仿真、稳控决策。
- (4) 通信线程: 负责接收、解析故障信息, 下发控制命令。

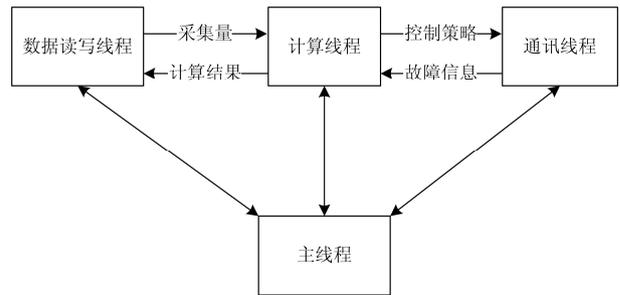


图 2 在线实时稳定控制系统软件结构图

Fig. 2 Software structure diagram of the online real-time stability control system

#### 1.3 技术指标

对于如下规模的电网: 节点数≤50、发电机数≤20、支路数≤100, 采用满足如下要求的计算服务器: 4 核心 3.30 GHz 及以上 CPU、16G 及以上内存, 本系统实现了如下关键技术指标:

- (1) 故障后稳定控制决策在 200 ms 内完成, 保证 300 ms 内将稳控措施执行完毕;
- (2) 故障信息上传和控制命令下发总延时少于 20 ms;

(3) 控制措施量与不受时间限制的计算结果偏差小于 1%。

## 2 关键技术问题

### 2.1 超实时仿真算法

为了减少数值积分暂态稳定仿真计算量、提高计算速度、达到超实时仿真的目的, 本文主要采取以下技术手段。

(1) 研究了高效、稳定、高精度的微分方程组数值积分算法, 本文采用隐式精细积分算法<sup>[9]</sup>。

(2) 研究了高效的基于稀疏矢量的代数方程解法, 本文采用改进稀疏技术, 包括较小出线度最小有源前趋节点编号<sup>[10]</sup>和多道路集稀疏矢量法<sup>[11]</sup>。

(3) 研究了较准确的每一积分步运行变量和状态变量初值的预测算法, 本文采用了一种用于电力系统暂态稳定仿真的发电机节点电压预测方法<sup>[12]</sup>。

(4) 研究了准确的基于状态轨迹的稳定性终止判据, 本文采用提前终止计算技术, 判定稳定性后立刻结束仿真<sup>[13-15]</sup>。

以 20 s 的暂态稳定仿真时长为例, 对采用上述(1)~(3)技术手段实现的超实时仿真算法和 PSASP 在多个算例上进行了计算速度和精度的对比测试, 在计算精度基本一致的情况下, 超实时仿真算法的计算速度明显优于 PSASP, 详见表 1。

表 1 超实时仿真算法与 PSASP 计算速度对比

Table 1 Comparison of speed between ultra real-time simulation algorithm and PSASP

算例	节点数	发电机数	负荷数	PSASP 仿真耗时间/ms	超实时仿真耗时间/ms
IEEE-39	39	10	19	103	52
WEPR1-36	36	8	10	93	48
CP	31	11	15	108	53
HLH	59	10	26	123	65
WQ	79	52	65	311	173

### 2.2 稳控决策

在线实时稳定控制系统主要实现了以下稳控决策功能。

(1) 基于功率缺额(或过剩)线性搜索的频率失稳紧急控制决策

小规模电网被动或主动孤网运行的概率较大, 频率稳定问题需要重点关注。联网断面跳闸故障导致被动转入孤网、主动孤网运行期间大机组或大负荷跳闸故障是导致频率失稳的主要原因。

对于因联网断面跳闸故障导致小规模电网被动转入孤网的情形, 若跳闸前联网断面潮流方向为由

小规模电网流向大电网, 则联网断面跳闸后小规模电网因有功过剩而存在高频风险, 任意时刻小规模电网频率越上限(典型值取 51 Hz), 则判定为频率失稳; 若跳闸前联网断面潮流方向为由大电网流向小规模电网, 则联网断面跳闸后小规模电网因有功缺额而存在低频风险, 任意时刻小规模电网频率越下限(典型值取 49 Hz), 则判定为频率失稳。联网断面跳闸后瞬间, 小规模电网的功率缺额(或过剩)为跳闸前联网断面潮流大小。

小规模电网孤网运行期间, 若发生大负荷跳闸, 则电网因有功过剩而存在高频风险, 任意时刻电网频率越上限, 则判定为频率失稳; 若发生大机组跳闸, 则电网因有功缺额而存在低频风险, 任意时刻电网频率越下限, 则判定为频率失稳。大机组(或大负荷)跳闸后瞬间, 电网的功率缺额(或过剩)为大机组(或大负荷)跳闸前功率大小。

一旦判定电网即将频率失稳, 将根据功率缺额(或过剩)的量搜索切负荷(或切机)措施, 将电网频率控制在下限到上限之间(即 49~51 Hz)。

小规模电网地理跨度小, 元件间电气距离近, 对于频率稳定问题, 在不同地点切机切负荷对系统频率的影响较小, 控制总量与频率近似呈线性关系。 $t$ 时刻的系统功率缺额  $P_D$  为全网发电机机械功率  $P_T$  与电磁功率  $P_E$  的差值, 如式(1)所示。

$$P_D(t) = \text{sum}[P_T(t) - P_E(t)] \quad (1)$$

从故障时刻到判出频率失稳时刻, 因发电机的调节作用和负荷的频率特性,  $P_D$  的绝对值在缩小, 因此以故障时刻  $P_D$  为上限, 失稳时刻  $P_D$  为下限, 线性搜索最优切机或切负荷量。

(2) 基于失稳能量的功角失稳紧急控制决策

主保护缺失导致短路故障切除时间过长以及低电压等级接入系统的小水电对电网失稳是小规模电网中功角失稳的主要情形。

按式(2)计算第  $i$  台发电机的失稳能量  $E_i$ 。

$$E_i = \frac{1}{2} T_{ji} (\omega_i - \omega_s)^2 \quad (2)$$

式中:  $T_{ji}$  为是第  $i$  台发电机的惯性时间常数;  $\omega_i$  为第  $i$  台发电机角频率;  $\omega_s$  为系统惯性中心角频率。失稳能量反映了发电机偏离系统惯性中心的趋势(加速趋势或减速趋势)。

每次选切偏离惯性中心趋势最大的发电机, 切机后需对系统的频率稳定进行校验, 若存在频率越限问题, 则根据功率平衡原理切除负荷。

(3) 基于综合灵敏度的支路过载控制决策

电磁环网中的支路因潮流转移而过载、并列运

行的支路因一回断开而过载是小规模电网中过载问题的主要情形。

支路电流  $I_B$  与节点注入电流  $I_N$  的关系为

$$I_B = C I_N \quad (3)$$

式中,  $C$  为灵敏度矩阵, 表示节点注入电流的单位变化量引起的支路电流变化量。

灵敏度矩阵  $C$  如式(4)所示。

$$C = Y_B A_B^T Y_N^{-1} \quad (4)$$

式中:  $Y_B$  为支路导纳矩阵;  $Y_N$  为节点导纳矩阵;  $A_B$  为支路-节点关联矩阵。

选择所有过载和重载的线路、变压器(例如负载电流大于 0.9 倍额定电流), 共计  $K$  个支路。

按式(5)计算切除第  $i$  个发电机(或负荷)对于降低上述  $K$  个过载和重载支路电流的综合灵敏度  $S_i$ 。

$$S_i = \sum_{k \in K} [(\alpha(k) - 0.9) C_{k,i}] \quad (5)$$

式中:  $\alpha(k)$  为第  $k$  个过载和重载支路的负载电流与额定电流的比值;  $C_{k,i}$  为灵敏度矩阵  $C$  第  $k$  行第  $i$  列元素。

按式(6)计算切除第  $i$  个发电机(或负荷)对于降低上述  $k$  个过载和重载支路电流的综合控制效果  $R_i$ 。

$$R_i = S_i I_i \quad (6)$$

式中,  $I_i$  为第  $i$  个发电机(或负荷)节点注入电流。

根据  $S_i$  与  $R_i$  选切发电机(或负荷)元件, 搜索最优切机(或切负荷)量。根据  $S_i$  进行选切, 可保证切机(或切负荷)总量最低; 根据  $R_i$  进行选切, 可保证切除对象个数最少。最后, 需对采取上述措施后系统的频率稳定进行校验, 若存在频率越限问题, 则根据功率平衡原理对应切除负荷或发电机。

该方法在多回支路同时过载或为消除某支路过载可能引起其他支路过载的情形下, 相对于离线策略具有明显的技术优势, 可显著降低切机(或切负荷)量。

#### (4) 多重故障的判别与处理

因短路故障造成几秒内多个大负荷低压脱扣以及系统频率、电压异常引起几秒内多个大机组跳闸是小规模电网中多重故障的主要情形。

第一次故障后至系统运行状态基本平复期间, 发生的多重故障以及采取的稳控措施将会相互影响, 都将纳入到稳定性综合评估计算中。通信线程具有最高优先级, 通信线程可打断计算线程当前任务, 并闭锁状态估计。待电网运行状态基本平复, 由通信线程解锁状态估计。

通信线程接收到第  $i+1$  次故障信息后, 若第  $i$  次故障的控制措施尚未计算出来, 则立即打断计算

线程针对第  $i$  次故障的计算任务, 将第  $i+1$  次故障合并计算, 统一制定控制措施; 若第  $i$  次故障的控制措施已经计算出来, 则对第  $i+1$  次故障重新计算, 并且纳入第  $i$  次控制措施的欠量或过量。

#### (5) 故障导致系统解列的判别与处理

小规模电网网架结构比较薄弱, 单一故障容易引起系统解列成几个片区分别孤岛运行。例如孤网运行的某企业自备电网片区 1 与片区 2 通过同杆并架的双回线路互联, 事故前潮流方向为由片区 1 送往片区 2, 当发生双回线路跳闸后, 将存在片区 1 频率越上限和片区 2 频率越下限的频率失稳问题, 需要分别在片区 1 采取切机措施、在片区 2 采取切负荷措施。如果仍把片区 1 和片区 2 当作一个系统处理, 将无法有效地进行稳控决策。

因此, 在电网发生故障后进行电网连通性判断, 形成电网—区域—子网三层拓扑结构, 若存在局部片区进入孤岛运行的情况, 则以子网为单位分别进行暂态稳定仿真、稳控决策。

### 2.3 高速实时通信方案

稳控装置通过 2 M 光纤实现点对点高速实时稳定通信, 采用自定义的高级数据链路控制(HDLC)通信协议。在线实时稳定控制系统软件运行于搭载指定环境的决策主机(一般为通用服务器), 通用服务器主要以电以太网进行通信。在线实时稳定控制系统中, 稳控装置需要检测故障并上送决策主机, 接收并执行决策主机下发的稳控命令, 没有现成的接口能够直接实现该类通信。

为实现决策主机与稳控装置的高速实时稳定通信, 本文提出了一种基于虚拟机的嵌入式通信复接方法, 基于该方法开发了通信接口装置, 实现了高速实时的光/电信号以及 HDLC 协议/以太通信协议的转换。

通信接口装置的主控模件通过电以太网连接到在线实时稳控系统决策主机; 通信控制(CC)模件的电口(E1 接口)复接到光通信设备(SDH 或 PDH)后通过电力数据网连接到远方稳控装置, 光口通过专用光纤连接到远方稳控装置。主控模件与 CC 模件通过内部高速总线进行数据交互。通信接口装置的硬件结构如图 3 所示。

基于虚拟机的嵌入式通信复接方法在软件层构造多个“虚拟机”。各虚拟机中有且仅有一个虚拟链路, 对应于一个物理网口, 采用以太网协议, 有唯一的目标地址与端口; 各虚拟机有多个虚端口, 每个虚端口对应于一个实际的物理光口, 采用 HDLC 协议。基于虚拟机的嵌入式通信复接方法具体流程如下:

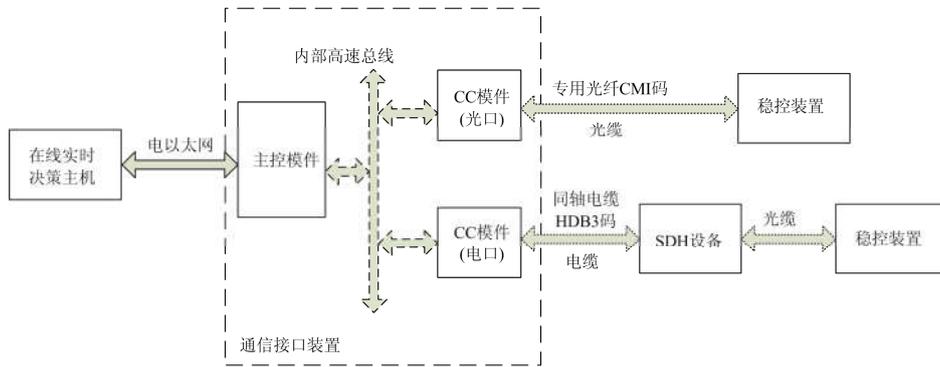


图 3 通信接口装置硬件结构框图

Fig. 3 Hardware structure block diagram of communication interface device

(1) 读取配置文件,按照虚拟链路与虚端口的配置,建立指定数量的虚拟机,对应各自的目标地址与端口。

(2) 等待决策主机“开始运行”命令,若未收到,保持等待状态;若收到,开始运行。

(3) 物理光口收到来自稳控装置的信号时,各虚拟机虚端口均缓存接收的光信号,经过所在虚拟机按照指定协议进行合并,送往虚拟链路,虚拟链路根据配置在指定时间将信号发送到电口,送向目标地址。

(4) 物理电口收到来自决策主机的信号时,根据信号源地址,确定虚拟机,虚拟机缓存收到的电信号,按照协议进行解析,分配到指定虚端口,虚端口在指定时间将信号发送到光口,送向物理光口所连稳控装置。

(5) 物理电口接收到来自决策主机的“结束信号”,则根据信号源地址,停止对应的虚拟机,若物理电口通信链路中断,则断开与该物理电口对应的所有虚拟机,返回步骤(2),等待开始命令。

软件内部框图如图 4 所示。

## 2.4 多种决策方式的协调方案

通过离线预决策、在线预决策、在线实时决策的协调配合,可进一步提高稳控系统的可靠性。

(1) 将离线预决策策略表作为稳控装置的初始策略表。

(2) 利用两次状态估计之间的空闲时间,进行在线预决策,丰富预想事故集,刷新策略表。

(3) 电网故障发生后,在开始在线实时决策的同时,查询装置本地策略表备用。

1) 若在指定时间内(典型时间取 200 ms)在线实时决策能够给出策略,在线实时决策服务器下发控制命令的同时,闭锁离线预决策主站主机功能。

2) 若在指定时间内在线实时决策无法给出策

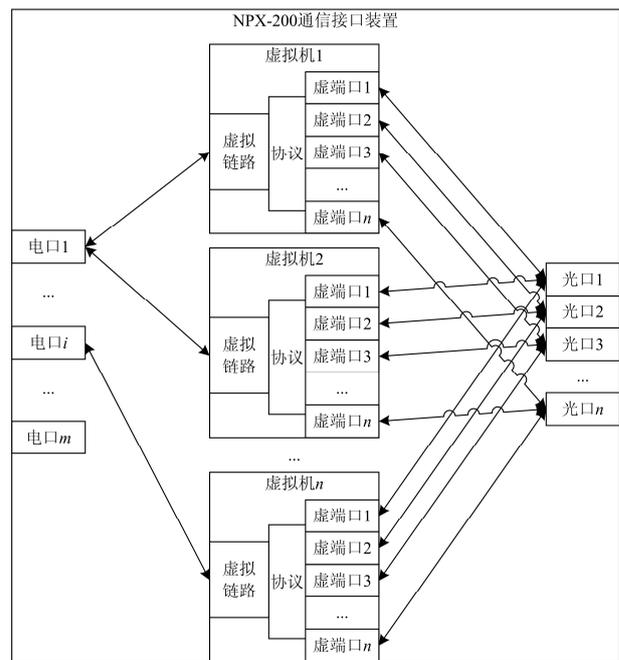


图 4 通信接口装置软件内部框图

Fig. 4 Software interior block diagram of communication interface device

略,则由离线预决策主站根据离线策略表执行稳控措施,同时将离线措施上报在线实时决策服务器;在线实时决策可对已执行的离线策略进行校正,如因控制对象开关拒动、离线策略不当造成的欠切,可由在线实时决策予以追加。离线策略的执行可延缓系统失稳过程,为在线实时决策争取时间。

## 3 应用案例

### 3.1 某独立局域网

某独立局域网通过 JJ 电厂接入大电网,正常运行时分成两个片区,如图 5 所示。通过选择不同

的分列点，可实现在两个片区间倒负荷。大电网调度会在 JJ 电厂 110 kV I 母和 II 母上倒出线。由于调度权限原因，稳控装置无法在 JJ 电厂安装，无法采集联网断面潮流和 110 kV 母联开关位置信息，又无法通过该独立局域电网内部元件潮流推导联网断面潮流信息。基于离线策略表，无法区分负荷在哪个片区，即无法判断切除哪些负荷有效，也就无法实现联网断面的热稳定控制。

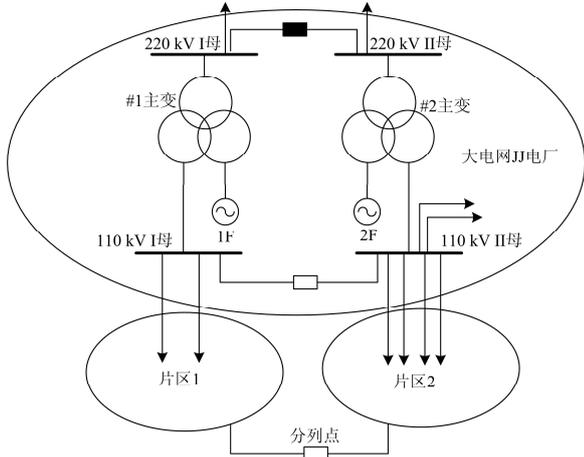


图 5 某独立局域电网示意图

Fig. 5 Schematic diagram of an independent local power grid

在线实时稳定控制系统从 SCADA 获取联网断面潮流信息和负荷所处片区信息，从现场稳控装置获取故障信息，在判出片区 1 内部 HY 电厂 1 号机组发生跳闸故障后，预测到 JJ 电厂 1 号主变 110 kV 侧存在潮流越限问题，越限 21 MW，并在 200 ms 内完成了控制策略和控制量的计算，通过切除片区 1 内 22 MW 负荷，将该片区与大电网联网断面潮流控制在允许范围内，避免被大电网解列，保证该片区的安全稳定运行。而基于离线策略表，容易错误地切除一些片区 2 内的负荷，对降低 JJ 电厂 1 号主变潮流不起作用。

### 3.2 某企业自备电网

某企业自备电网孤网运行，电网接线如图 6 所示，出线 1~18 每回所带额定负荷为 25 MW。

在线实时稳定控制系统从现场稳控装置获取电网运行状态和故障信息，在判出 8 号、9 号电炉(对应出线 8、9)同时故障停运后，100 ms 内完成了控制策略和控制量的计算，通过切除 51 MW 机组，将自备电网频率控制在允许范围内，保证自备电网的安全稳定运行。而基于离线策略表，把每个电炉跳闸当作独立的故障处理，如果按照最优欠切的原则选切机组，不会选切到任何机组，可能会造成机组过频保护无序动作，最终导致系统崩溃。

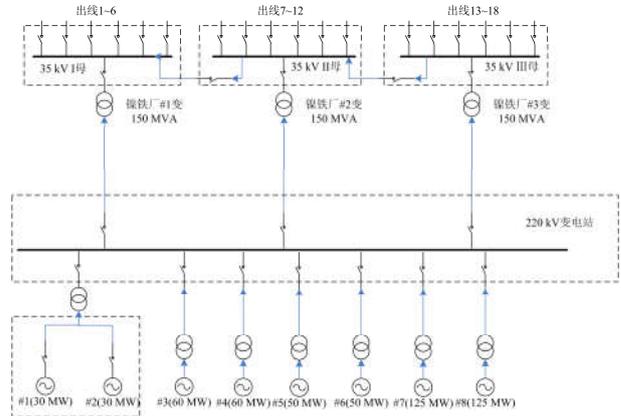


图 6 某企业自备电网示意图

Fig. 6 Schematic diagram of an enterprise owned power grid

## 4 结论与展望

本文研制的在线实时稳定控制系统基于超实时仿真技术实现了“在线决策，实时控制”；提出了一种基于虚拟机的嵌入式通信复接方法，开发了通信接口装置，实现了高速实时的光/电信号以及 HDLC 协议/以太网通信协议的转换；提出了“在线决策，实时控制”、“在线预决策，实时匹配”与“离线预决策，实时匹配”三种决策方式的协调配合方法，提高了稳控系统的适用性和可靠性。

在线实时稳定控制系统在独立局域电网、企业自备电网、微电网等小规模电网中的应用前景广阔。在线实时稳定控制系统的研制成果及其在小规模电网中的工程应用，为在大电网的推广应用奠定了基础，未来可在如下方面展开深入研究：动态等值技术<sup>[16]</sup>、并行计算技术、基于数值积分法灵敏度的快速紧急控制决策算法<sup>[17]</sup>、电力系统特性自学习、充分利用可控型设备丰富稳控措施<sup>[18-19]</sup>。

### 参考文献

[1] 罗剑波, 董希建, 崔晓丹, 等. 关于大型安全稳定控制系统可靠性研究的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 65-72.  
 LUO Jianbo, DONG Xijian, CUI Xiaodan, et al. Discussion on reliability of large scale security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 65-72.

[2] 董希建, 杨海, 刘平, 等. 电力系统事故过负荷的识别及紧急控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 165-169.  
 DONG Xijian, YANG Hai, LIU Ping, et al. Criterion of accident overload and emergency control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 165-169.

[3] 苗田, 郑超, 马世英, 等. 适应主导薄弱断面迁移的暂态稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 41-48.

- MIAO Tian, ZHENG Chao, MA Shiyang, et al. Transient stability control adapting to dominant weak section migration[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 41-48.
- [4] 毕兆东, 黄河, 王新宝, 等. 南方电网在线预决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 112-118.  
BI Zhaodong, HUANG He, WANG Xinbao, et al. On-line pre-decision system of China southern power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 112-118.
- [5] 苏毅, 俞秋阳, 毕兆东. 福建电网基于在线安全稳定控制与预警系统的稳控策略表设计方法与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 97-101.  
SU Yi, YU Qiuyang, BI Zhaodong. Design and implementation of stability control scheme list based on on-line security and stability control and warning system in Fujian Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 97-101.
- [6] ZHAO Jinqun, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 37-47. DOI: 10.1186/s41601-016-0013-1.
- [7] 夏彦辉, 董宸, 孙丹, 等. 独立局域电网三道防线建设方案分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 76-81.  
XIA Yanhui, DONG Chen, SUN Dan, et al. Analysis on construction scheme of three defense lines for independent local power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 76-81.
- [8] 姚莉娜, 杨东海, 段运鑫, 等. 微电网离网运行有功缺额计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 137-144.  
YAO Lina, YANG Donghai, DUAN Yunxin, et al. A calculation method of active power shortage in off-grid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 137-144.
- [9] 赵志奇, 王建全. 隐式精细积分算法在电力系统暂态稳定分析中的应用[J]. 机电工程, 2012, 29(5): 580-583.  
ZHAO Zhiqi, WANG Jianquan. Application of implicit precise time-integration method in power system transient stability analysis[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2012, 29(5): 580-583.
- [10] 肖谭南, 王建全, 高一凡, 等. 一种基于网络节点编号优化的电力系统暂态稳定仿真方法: 中国, CN104578055A[P]. 2015-01-12.
- [11] 王建全, 高一凡, 肖谭南, 等. 一种基于多稀疏矢量道路集的电力系统暂态稳定仿真方法: 中国, CN104578054A[P]. 2015-01-12.
- [12] 王建全, 赵志奇, 杨飞燕. 用于电力系统暂态稳定仿真的发电机节点电压预测方法: 中国, CN 102545216 A[P]. 2012-01-19.
- [13] 杨松浩, 王怀远, 苏福, 等. 基于相轨迹凹凸性的暂态不稳定性判别方法的分析比较[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 193-198.  
YANG Songhao, WANG Huaiyuan, SU Fu, et al. Analysis and comparison of transient instability detection methods based on convexity and concavity of phase trajectory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 193-198.
- [14] 黎萌. 电力系统暂态稳定时域仿真终止判据的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
LI Meng. Research on termination algorithm of time-domain simulation for power system transient stability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [15] 苏福, 杨松浩, 王怀远, 等. 电力系统暂态稳定时域仿真快速终止算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4372-4378.  
SU Fu, YANG Songhao, WANG Huaiyuan, et al. Study on fast termination algorithm of time-domain simulation for Power System transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4372-4378.
- [16] 王建全, 高一凡, 肖谭南, 等. 一种基于实时动态等值的电力系统快速暂态稳定仿真方法: 中国, CN105375475A[P]. 2015-11-26.
- [17] 胡伟, 张玮灵, 闵勇, 等. 基于支持向量机的电力系统紧急控制实时决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4567-4576.  
HU Wei, ZHANG Weiling, MIN Yong, et al. Real-time emergency control decision in power system based on support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4567-4576.
- [18] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [19] 潘伟, 李勇, 曹一家, 等. 用于大规模集中式风电并网的 VSC-HVDC 频率控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 94-99.  
PAN Wei, LI Yong, CAO Yijia, et al. Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 94-99.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

夏彦辉(1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 23297150@qq.com

董宸(1982—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制;

孙丹(1989—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 姜新丽)