

DOI: 10.7667/PSPC161855

# 以断面控制为核心的电网调度运行控制体系及系统开发

甘德树<sup>1</sup>, 林桂辉<sup>1</sup>, 吴海雄<sup>1</sup>, 彭健<sup>1</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 廖兵兵<sup>2</sup>, 黄银才<sup>2</sup>, 郑全朝<sup>2</sup>, 张楠<sup>2</sup>

(1. 珠海供电局电力调度控制中心, 广东 珠海 100084; 2. 广东益泰达科技发展有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 输电断面是整个电网系统中的薄弱环节, 输电断面的识别和控制对系统的安全稳定性具有重要意义。针对当前电网调度断面控制因缺乏顶层设计而难以整合断面辨识和传输极限计算等问题, 研究了以断面控制为核心的电网调度运行控制体系及其系统开发。研究了基于二分法的数学模型, 计算输电断面的极限传输功率, 构建以断面控制为核心的运行体系。并重点讨论各支撑断面控制分析的关键技术。通过本系统在地区电网一年多来的应用证明了该方法的实际效果。

**关键词:** 安全稳定控制; 断面控制; 调度运行; 系统开发

## Research and development of power grid dispatching operation control system based on transmission section control

GAN Deshu<sup>1</sup>, LIN Guihui<sup>1</sup>, WU Haixiong<sup>1</sup>, PENG Jian<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, LIAO Bingbing<sup>2</sup>, HUANG Yincai<sup>2</sup>, ZHENG Quanchao<sup>2</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Power Supply Bureau Dispatch Control Center, Zhuhai 100084, China; 2. Guangdong Yi TEDA Science and Technology Development Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** Transmission section is the weakness on whole power system, so the identification and control of transmission section has great influence on system safety and stability. Due to the lack of top-level design, grid dispatching operation control has the integrated problems including transmission section identification and maximum power transfer computing, etc. This paper researches grid dispatching operation control system and its development based on transmission section control. It studies the mathematical model based on dichotomy, computes the maximum power transfer of the transmission section and develops the operation system by taking section control as a core. Mathematical model of dichotomy is introduced and the operation system based on transmission section control is constructed. Key technologies of supporting transmission section control are discussed. The significant effect of the proposed system is proved through applying it in a regional grid more than a year.

**Key words:** security and stability control; transmission section control; dispatching operation; system development

## 0 引言

确保电网安全稳定运行, 防止电力系统崩溃瓦解, 进而防止大面积停电事故的发生, 是电力系统运行部门最重要的职责之一。中国电网是多个地区之间的互联, 这些互联的输电通道对整个电网的安全稳定性具有重要意义, 因此电力系统安全分析过程中都将电网断面作为重要的关注目标进行研究分析, 断面的识别和控制是电力系统稳定控制的必要工作<sup>[1-3]</sup>。

电网断面是指基于静态安全分析, 在特定的运行方式下, 遍历电网支路, 进行  $N-1$ 、 $N-2$  开断模

拟以搜索过载元件, 并初步梳理和辨识出关键断面, 进而通过调整负荷或机组出力, 计算获得稳定断面极限值。

近年来, 世界范围内频发的电网运行安全事故大多与断面控制不到位有关。印度“7·30”大停电<sup>[4-5]</sup>、美加“8·14”大停电<sup>[6-7]</sup>等停电事故, 其原因均为安全稳定断面控制不到位。鉴于断面控制在电网运行安全稳定控制中的重要性, 当前围绕断面运行已开展了大量的研究。文献[8-10]介绍了电网安全稳定控制断面的辨识方法, 其中文献[8]从断面类型出发按照热稳定控制断面和  $N-1$  故障控制断面等介绍了不同类型断面的要求和辨识方法, 文献[9]

考虑了地理因素对断面控制的影响, 文献[10]考虑了网络拓扑变化过程中断面控制的差异。文献[11-13]介绍了热稳定断面和  $N-1$  故障断面的计算方法, 其中文献[12]介绍了基于直流潮流的计算方法, 该方法与文献[11,13]所介绍的方法相比, 牺牲了部分计算精度而提升了计算效率。文献[14-15]介绍了断面控制系统开发应用的有关情况, 所研发的系统分别用于断面辨识和调度评估。

上述研究从断面运行不同方式进行了深入探讨, 但由于断面控制涉及了多个调度运行业务流程, 包括基准方式下控制、检修方式下控制和事故异常下控制等诸多领域, 还缺乏顶层设计出发构建完整的断面控制体系, 导致系统开发没有很好地整合断面辨识和计算等方面的成果。

针对上述问题, 本文重点从断面控制顶层设计出发, 构建完整的断面控制为核心的安全控制管理体系。首先介绍和提出所用数学模型, 然后明确体系架构, 指明各业务环节对断面控制的责任和要求, 同时对支撑该体系的关键技术进行分析, 最后结合某地区电网系统开发应用的情况介绍本成果的应用效益。

### 1 数学模型

根据断面的定义, 断面可以由单回元件或多回支路组成; 也可以是由某多回支路与其他的多回支路构成的断面组合, 即开断某多回支路, 可能造成另外的多回支路过载(也有可能是变压器); 或者是开断 220 kV 或 550 kV 变电站的其中一台变压器, 从而引起另一台或多台变压器及周围线路过载。若支路开断后造成其他支路过载, 则需要根据受端机组出力安排, 调整负荷需求, 并再次进行潮流计算, 直至过载的线路达到极限输送功率。下一步, 则需要恢复开断的线路, 再次进行潮流计算, 则原来开断的线路和过载的线路两者有功功率之和即为稳定断面的极限值。

因此断面计算的关键在于根据网架结构选定受端机组调整负荷。实际上, 电网中负荷节点调整除了作为切负荷措施外, 还有一定的功率校正能力, 如将负荷转移到相邻站点可以在一定程度上达到均衡输电断面潮流并实现安全校正的目的<sup>[16]</sup>。

关于调整值得计算, 在当前有很多目标值查找算法, 其中在有限区间内查找目标元素的算法中二分法(dichotomie)操作简单, 值得在实际工程中应用。

二分法的基本思想是: 对于区间  $[a,b]$  上连续不

断且  $f(a)f(b) < 0$  的函数  $y = f(x)$ , 通过不断地把零点所在区间  $[a,b]$  一分为二, 使区间两个端点逐步逼近零点, 进而在有限次的计算过程中快速得到目标近似值。

值得注意的是, 若使用 BPA 进行潮流计算, pfo 格式的潮流计算结果文件显示的负载率数值只保留小数点后一位, 当计算得到元件实际负载率百分比在 (99.95,100.05) 区间时, 即为 100%, 尽管收敛判据的结果是在某个区间内, 但在本项目中可以直接取等于号。

#### 1.1 负荷调整迭代计算流程

图 1 为开断线路到逐步调整负荷以计算断面极限的流程。以开断线路为例, 负荷调整的具体步骤如下所述。

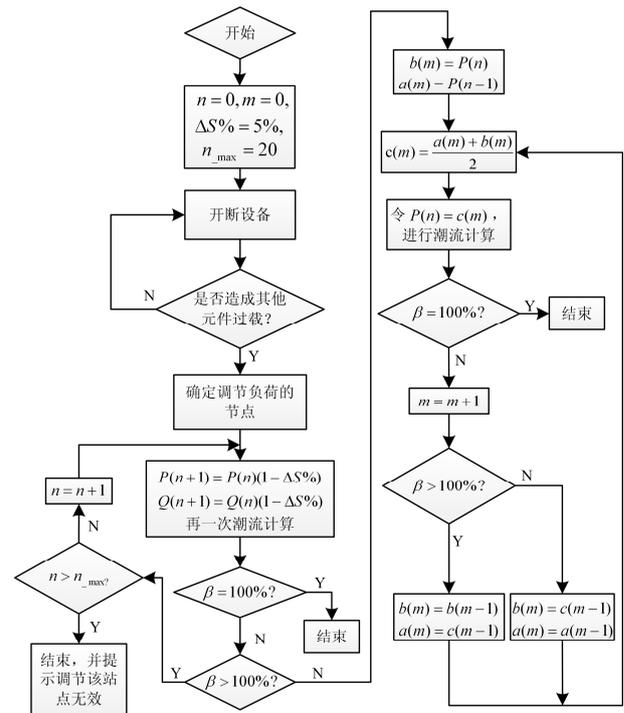


图 1 负荷调整迭代流程图

Fig. 1 Iterative flow chart of adjusting load

步骤 1: 选择仿真步长  $\Delta S\%$ , 以确定逐次调整比例, 即负荷逐次减少的百分比, 例如 1%、2.5%、5%、7.5%、10% 等, 初值设为 0; 选择迭代限制  $n_{max}$ , 即最大迭代次数。

步骤 2: 开断线路, 进行潮流计算。

步骤 3: 根据潮流计算结果, 查看是否造成线路过载, 若是, 则根据网架结构, 选定需要调节负荷的节点; 若否, 则返回步骤 2。

步骤 4: 根据式(1)分别调整节点的有功负荷和无功负荷, 并再一次进行潮流计算。

$$\begin{cases} P(n+1) = P(n)(1 - \Delta S\%) \\ Q(n+1) = Q(n)(1 - \Delta S\%) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P(n)$  为有功负荷;  $Q(n)$  为无功负荷;  $n$  为迭代累积次数;  $\Delta S\%$  为仿真步长。

步骤 5: 根据潮流计算结果, 查看步骤 3 检测出的过载线路其负载率  $\beta$  是否变为 100%, 若是则此时的  $P(n)$  和  $Q(n)$  即为需求的负荷值, 可结束循环计算, 否则进行下一步。

步骤 6: 比较线路负载率  $\beta$  是否大于 100%, 若是则  $n$  累计一次, 并返回步骤 5 继续调整负荷, 前提是未超过迭代限制, 若调整次数超过限值且仍未达到预期目标, 即说明调节该站点无效, 须结束循环计算; 若  $\beta$  小于 100%, 则进入二分法部分。

步骤 7: 令  $a(m) = P(n-1)$ 、 $b(m) = P(n)$ 。

步骤 8: 根据式(2)计算中值  $c(m)$ 。

$$c(m) = \frac{a(m) + b(m)}{2} \quad (2)$$

式中:  $a(m)$ 、 $b(m)$ 、 $c(m)$  为该次迭代功率值;  $m$  为迭代累积次数。

步骤 9: 令  $P(n) = c(m)$ , 即将中值代入, 进行潮流计算。

步骤 10: 根据潮流计算结果, 查看之前步骤 3 检测出的过载线路其负载率  $\beta$  是否变为 100%, 若是则此时的负荷值即为需求的数值, 可结束循环计算; 否则  $m$  累计一次, 并继续下一步。

步骤 11: 比较线路负载率  $\beta$

(1) 若  $\beta > 100\%$ , 则令  $b(m) = b(m-1)$ 、 $a(m) = c(m-1)$ , 并返回步骤八, 继续运算;

(2) 若  $\beta < 100\%$ , 则令  $b(m) = c(m-1)$ 、 $a(m) = a(m-1)$ , 并返回步骤 8, 继续运算。

通过以上循环计算, 可以得到相应负荷值, 从而逐步使过载线路的负载率调整为 100%。接着需要恢复原来开断的线路, 再次进行潮流计算, 计算该元件组合的传输的有功功率  $P_1$ , 然后交换开断元件与需管控的元件, 若造成线路过载, 则重复流程图所述步骤, 得到元件组合输送有功功率为  $P_2$ , 取最小值  $P = \min(P_1, P_2)$ , 即为该断面的极限功率。

## 1.2 算例分析

根据某地区电网 2016 年夏大运行方式的网架数据, 以开断 220 kV 的 A 站变压器为例, 通过负荷调整计算断面极限。

分别开断 1 号主变、2 号主变均不会造成其他设备过载, 但开断 3 号主变时, 造成站内 1 号、2 号主变过载, 根据此结果, 选定应调整 A 站 110 kV 母线的负荷。设置步长  $\Delta S\% = 5\%$  和迭代限制  $n_{\max} = 20$ , 表 1 为调整负荷直至主变负载率均低于 100% 的迭代过程中母线负荷和设备负载率等参数值。

表 1 负荷调整迭代计算结果

$n$	$S_{-110\text{kV}}\%$	$S_{-110\text{kV}}/\text{MW}$	$\beta_{-T1\text{号}}\%$	$\beta_{-T2\text{号}}\%$
0	100	247.3+j25.70	102.0	101.1
1	95	234.9+j24.42	97.5	96.7

注:  $S_{-110\text{kV}}$  为母线负荷值, 单位为 MW,  $S_{-110\text{kV}}\%$  为母线负荷对比初值的百分比,  $\beta_{-T1\text{号}}\%$  和  $\beta_{-T2\text{号}}\%$  分别为 1 号主变和 2 号主变的负载率

两台主变的负载率均小于 100% 时, 转入二分法调整负荷, 直至两台变压器负载率最大值为 100%, 表 2 为每次潮流计算的结果。

表 2 二分法负荷调整迭代计算结果

迭代次数	$S_{-110\text{kV}}/\text{MW}$	$\beta_{-T1\text{号}}\%$	$\beta_{-T2\text{号}}\%$	$\max(\beta_{-T1\text{号}}\%, \beta_{-T2\text{号}}\%)$	$a$	$b$
0	247.3+j25.70	102.0	101.1	102.0	—	—
0	234.9+j24.42	97.5	96.7	97.5	234.9+j24.42	247.3+j25.70
1	241.1+j25.06	99.7	98.9	99.7	241.1+j25.06	247.3+j25.70
2	244.2+j25.38	100.8	100.0	100.8	241.1+j25.06	244.2+j25.38
3	242.7+j25.22	100.3	99.5	100.3	241.1+j25.06	242.7+j25.22
4	241.9+j25.14	100	99.2	100	—	—

从表 2 可以看出, 调整母线负荷后, 将 1 号主变负载率调整为 100%, 2 号主变负载率调整为 99.2%。此时, 恢复 A 站 3 号主变运行, 再一次进行潮流计算, 读取 A 站 3 号主变与 1 号、2 号主变的功率, 表 3 为最终设备参数。

如表 3 所示, 根据 3 台主变的功率因数和有功功率的计算公式, A 站 3 台主变组成的断面极限功率为 316 MW。前面已经提及, 开断 1 号主变与 2 号主变不会引起过载, 不需要再一次轮换开断来计算负荷调整, 因此 A 站 1 号、2 号、3 号主变的断

面组合的极限功率为 316 MW。

表 3 主变参数

Table 3 Parameters of main transformer

设备	视在功率/MVA	负载率/%	功率因数
1 号主变	100	66.6	0.9902
2 号主变	101.2	67.5	0.9911
3 号主变	118.5	65.8	0.9895

## 2 以断面控制为核心的运行控制体系

### 2.1 技术框架

本文提出的以断面控制为核心的运行控制体系如图 2 所示。

根据图 2 可以看出，该技术框架的提出主要遵循如下三方面设计原则。

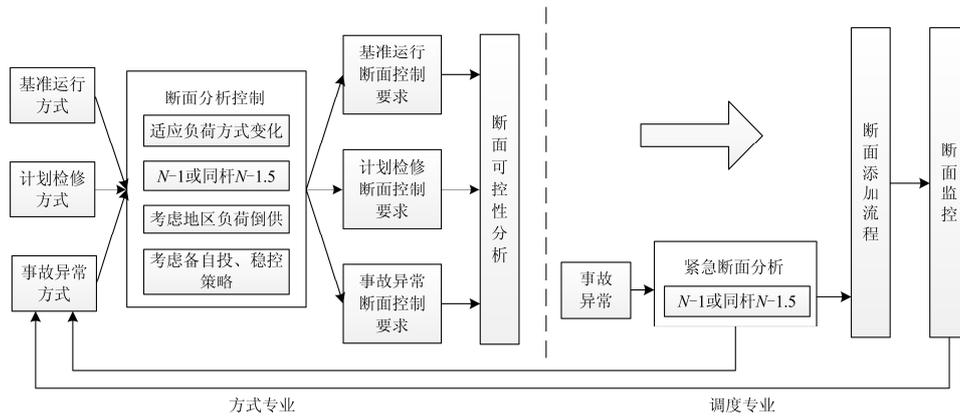


图 2 断面控制技术框架

Fig. 2 Technology framework of section control

1) 可用性原则。可用性原则要求技术框架能够覆盖热稳定控制和  $N-1$  故障控制等断面控制相关内容，保证所分析的结果能够满足调度运行的相关要求，确保分析正确且结果可用。

2) 易用性原则。易用性原则要求技术框架能从方式和调度等各专业业务划分出发明确业务界面，保证分析过程权责分明，清晰易用，避免对当前业务流程较大的改变，甚至颠覆。

3) 实用性原则。实用性原则要求结合各专业管理的相关要求从计算效率和计算精度两方面做好统筹，保证断面辨识和计算满足专业的实际要求，计算过程清晰，能切实提升专业技术水平。

按照上述原则，本文所提出的以断面控制为核心的运行控制体系可分为管理、主题和业务三个维度。

### 2.2 管理维度

管理维度，是从专业管理的角度出发理顺各专业在断面管理方面的业务管理界面。必须指出的是，当前我国各省专业管理略有差别，一般来说断面控制主要涉及方式和调度两个专业的工作。

方式专业主要负责断面辨识和限值计算，并同安稳、保护和发电等相关专业对断面可控性和动作为进行分析。

调度专业主要负责断面执行和监控，并在事故发生后辨识事故异常状态下的控制断面，按照  $N-1$  故障不过载的原则制定紧急控制要求，将具体情况反馈方式，由方式进一步分析。

### 2.3 主题维度

主题维度，是从断面的类型出发对断面控制要求再划分的过程。电网运行方式变化，电网薄弱点将发生改变，相应的断面控制要求也将不同。据此可从主题维度将断面分为基准运行方式下控制断面、计划检修方式下控制断面和事故异常方式下控制断面。

基准运行方式下控制断面，是在电网基准运行方式下辨识出电网薄弱点，并通过热稳定分析、 $N-1$  故障分析和暂态稳定分析等计算其控制要求。该控制要求必须满足季节和气候等影响电网负荷分布等因素可能造成运行方式改变的不同场景。

计划检修方式下控制断面，主要针对输变电一次设备计划检修停电前，根据停电周期范围内电网负荷等变化特征所制定的控制要求。

事故异常方式下控制断面，主要针对实时运行过程中，由于输变电一次设备事故跳闸或工况异常造成运行方式改变情况下的控制要求。

### 2.4 业务维度

业务维度，是从断面控制的业务流程出发将其划分为断面辨识、控制值计算、可控性分析和断面监控 4 个环节。其中辨识、计算和可控性分析主要由方式专业负责，监控则由调度专业负责。

需要特别说明的是：实时运行过程中事故异常发生后紧急情况下的断面辨识和计算则首先由调度员完成；后续再由方式专业分析。

### 3 支撑断面体系的关键技术

大区域互联电网之间的联络线断面需要承受各种扰动造成的其输电功率的冲击性振荡波动, 冲击功率与稳态功率的叠加可能在短时间内达到系统的静态稳定极限<sup>[16]</sup>。对于大电网来说, 断面暂态稳态具有重要意义。本文研究的断面控制当前应用于地市局稳定分析, 与大电网相比较而言, 暂态过程相对平缓。本文结合地市局电网的实际安全要求, 首先研究稳态断面, 下一步工作将在本文工作基础上, 同时考虑暂态和稳态的断面分析。

本文所提出的以稳态断面控制为核心的安全稳定控制体系, 覆盖了基准、检修和事故异常三种情况下安全稳定分析的全过程, 主要包括断面辨识与计算方法、可控性分析和预想故障集预设方法三个方面的关键内容。

#### 3.1 $N-1$ 故障断面辨识与计算方法

$N-1$  故障断面控制, 是电网系统热稳定分析的重要内容, 要求单一输变电设备跳闸后其他设备不会发生潮流超限。

传统的  $N-1$  故障断面控制计算方法流程如所示。其基本思想在于, 通过对预想故障发生后电网的潮流计算, 辨识出  $N-1$  故障发生后电网输变电设备的潮流变化情况。将跳闸设备和潮流变化最大的设备定义为断面, 通过试探法改变其潮流, 当其潮流分布使得潮流变化最大的设备在故障发生后恰好达到其热稳潮流时的断面功率即为断面控制值。

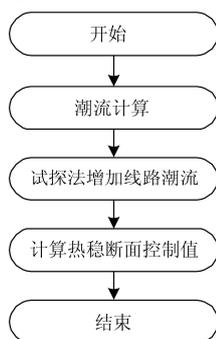


图3 基于潮流分析的热稳定断面计算流程

Fig. 3 Calculation flow of thermal stability section based on flow analysis

上述方法基于潮流计算能比较准确地计算  $N-1$  故障后断面的控制要求。但是受限于潮流计算程序计算效率, 该方法计算效率较低, 仅适用于基态和计划检修下的断面控制值计算。在实时运行过程中发生事故异常后, 上述方法由于计算速度相对较慢, 不利于实时运行过程中的事故异常处置。

为此本文建议在实时运行过程中调度员事故异常处置中采用基于支路开断因子的计算方法<sup>[17]</sup>, 其计算流程如图4所示。与传统计算方法相比, 基于线路开断因子的  $N-1$  故障断面控制值计算方法利用线路开断因子代替了潮流计算过程。支路开断因子能够反映输变电设备开断后其潮流的分布情况, 从而可以分析对其他设备潮流的影响, 在此基础上考虑输变电设备的热稳定容量, 可以类似传统方法采用试探的方式计算其控制值。由于线路开断因子是由网架连接关系和输变电设备参数确定的, 因此上述方法的基础数据可事先计算, 大大缩短了计算时间, 提高了计算效率。

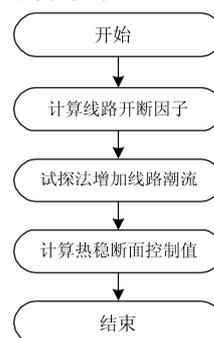


图4 基于线路开断因子的热稳定断面计算流程

Fig. 4 Calculation flow of thermal stability section based on line outage factor

#### 3.2 断面可控性分析

断面可控性分析, 是电网实际调度运行方式安排中必须考虑的问题。断面控制的手段主要包括调整发电机组出力、负荷转移和负荷控制三种手段。负荷控制可能会对用户的用电需求造成影响。因此在当前电网实际调度运行中主要采用调整发电机组出力和负荷转移两种方法进行断面控制。

调整发电机组出力, 控制效率较高, 在实际运行中采用的比较多。当断面控制值超过限值时, 通过增大受端系统发电机组出力和减少送端系统发电出力进行控制。当调整发电机组出力不能满足断面控制要求后, 则需要优先考虑负荷转移的方法, 即通过改变电网运行方式, 将断面控制范围的部分负荷倒出, 配合断面控制。若上述两种方法均不能满足调度运行的要求, 则需要通过负荷控制达到断面控制的效果。

因此在计划检修方式下的断面控制分析过程中, 辨识和计算出断面控制要求后, 还需要对断面的可控性进行分析。为了在检修工作开展后断面可控, 不会发生由于断面不可控造成负荷限制影响用户用电的情况, 必须首先判断采用调整发电机组出

力和负荷转移的方法是否能确保检修过程中电网断面在控制范围内，并进一步考虑检修方式下电网发生  $N-1$  故障后断面是否依然可控。

文献[18]介绍了断面可控性的分析方法，通过分析断面割集内电网的负荷变化和发电机组的调节范围来判断是否需要进行负荷转移，进而通过网络分析获得负荷转移量判断是否满足缺额要求。

### 3.3 预想故障集预设方法

$N-1$  故障断面控制计算中第一步就是预设预想故障集，以此划定故障防控范围。当前预想故障集往往采用两种方法设定，第一种方法人工设定，由检修计划编制人员凭借运行经验选定预想故障集；第二种方法  $N-1$  扫描法，该方法依靠检修方式下对全网其他设备  $N-1$  扫描从而分析得到对电网运行影响较大的设备，并将其作为预想故障集进行细致分析。

人工设定的方法用来人工经验，潜在安全隐患；而  $N-1$  扫描的方式计算量较大，导致计算效率较低。为此可采用停电设备开断因子影响分析法，根据停电设备开断后对其他设备潮流的影响，筛选出受计划检修工作影响比较大的设备集，将其作为预想故障集设备，则符合计划检修工作的要求。

## 4 实际地区电网示范应用情况

A 地区电网系统运行部承担了全地区电网运行方式的安排和管理的工作，是保障电网安全、优质和经济运行的重要部门，一直以来高度重视电网安全稳定运行控制工作。然而，一直以来，由于缺乏应用系统的支持，方式专业的大量日常工作仍需要依靠人员手工作业完成，容易由于数据时效性和人工操作误差而造成分析结果与实际情况间存在较大偏差，同时对方式人员的工作也造成较大负担。从 2014 年开始，A 地区电网开始以断面控制为核心的电网调度运行控制管理体系建设。

### 4.1 系统架构与功能设计

A 地区电网基于断面控制的电网调度运行控制管理系统总体架构如图 5 所示。

1) 业务架构，是从业务角度去理解和规划以断面控制为核心的安全控制系统建设的业务蓝图，并结合国内外平台的最佳实践和发展趋势，建立起平台模型。

2) 应用架构，是基于业务架构，从系统功能需求的角度去清晰准确定义应用范围、功能及模块等。

3) 技术架构，是基于应用架构和数据架构，根据信息技术发展趋势以及相应的实践经验，从系统技术实现角度提出系统总体的技术实现方案。



图 5 系统总体架构图

Fig. 5 Overall structure of the system

4) 物理架构，是基于应用架构和数据架构，从系统具体实现角度提出系统总体的软硬件物理部署方式，为系统运行提供充足的平台资源。

5) 应用集成，是基于一体化企业级信息集成平台，进行平台和企业其他业务应用的业务耦合分析。

6) 安全架构，是依据南方电网对平台的安全级别定义，从应用安全、数据安全、系统安全、网络安全、物理安全和安全运行及管理等方面对平台的安全进行了说明。

为保持系统的先进性，在系统的选型和分析过程中对各种主流的体系结构作了分析对比，建议采用 B/S 应用模式，J2EE 架构，全面的 JAVA 解决方案。这种体系所拥有的优点除了平台无关性、运算速度快和可升级性好等之外，更具有强大的生命力，因为此种体系已得到了 IT 业界的认可，被越来越广泛地应用，能有效地保护投资。在此基础上系统部署在电网安全 III 区，其部署架构如图 6 所示。

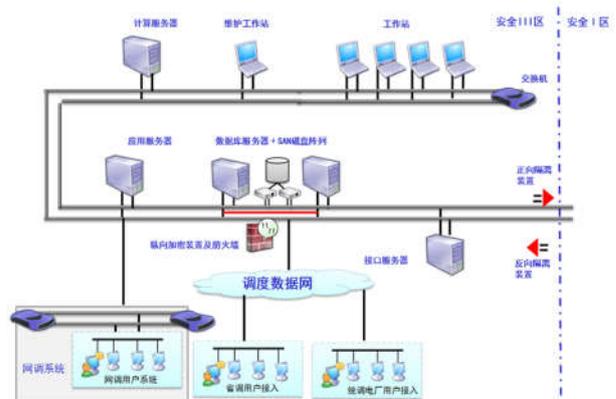


图 6 系统物理部署架构

Fig. 6 Physical deployment architecture of the system

## 4.2 示范应用效益

目前该系统已上线运行超过一年, 自本系统应用以来, A 地区电网圆满完成了十余次保电任务和应对解决多次台风侵袭等极端气候的影响, 供电安全性得到了验证, 效果显著, 主要体现在以下两个方面。

1) 提升了电网安全稳定分析能力, 从而保证了电网安全稳定运行。系统以断面控制为核心, 实现了  $N-1$  故障和暂态稳定等多项安全稳定自动分析与计算, 大大提升了该地区电网安全稳定分析能力。

2) 降低了人工分析计算的工作量, 提高了工作效率, 完成了 A 地区电网全年约 3000 项计划工作。该系统实现了断面控制的自动分析, 大大降低了计划检修人员分析计算的工作量。

## 5 结论

断面控制是电网安全稳定控制的抓手。本文提出了以断面控制为核心的运行控制体系, 该体系从管理、主题和业务三个维度将现有的断面管理全面整合, 打通了方式和调度等专业间的业务协同流程, 实现了基态、检修和事故异常三种情况的断面计算。实际地区电网的示范应用验证了本文提出方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 霍超, 崔晓丹, 牛栓保, 等. 一种与直流暂态稳定强相关的交流断面识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 83-89.  
HUO Chao, CUI Xiaodan, NIU Shuanbao, et al. A quantitative assessment method for degree of transient stability coupling of DC and AC transmission sections[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 83-89.
- [2] 侯俊贤, 韩民晓, 董毅峰, 等. 基于子网络收缩的输电断面搜索方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 92-97.  
HOU Junxian, HAN Minxiao, DONG Yifeng, et al. Transmission section searching method based on power system sub-network combination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 92-97.
- [3] BAI Feifei, LIU Yong, LIU Yilu, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0014-0
- [4] 曾鸣, 李红林, 薛松, 等. 系统安全背景下未来智能电网建设关键技术发展方向——印度大停电事故深层次原因分析及对中国电力工业的启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 175-181, 24.  
ZENG Ming, LI Honglin, XUE Song, et al. Key technologies of future smart grid construction based on power system security: a view of blackout in India and experience and enlightenment to power industry in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 175-181, 24.
- [5] 陈竟成, 黄瀚. 印度大停电事故分析与启示[J]. 中国电力, 2012, 45(10): 12-16.  
CHEN Jingcheng, HUANG Han. Analysis and revelation from blackout events in India[J]. Electric Power, 2012, 45(10): 12-16.
- [6] 韩英铎, 姜齐荣, 谢小荣, 等. 从美加大停电事故看我国电网安全稳定对策的研究[J]. 电力设备, 2004(3): 8-12.  
HAN Yingduo, JIANG Qirong, XIE Xiaorong, et al. August 14th blackout in the US and propose for Chinese power system to improving stability and security[J]. Electrical Equipment, 2004(3): 8-12.
- [7] 陈迅, 陈红军. 简述美加大停电及广东电网的问题与对策(一)——大停电前的电网态势及停电起因[J]. 广东输电与变电技术, 2005(5): 23-30.  
CHEN Xun, CHEN Hongjun. Briefly description and analysis on the power blackout of USA and Canada in Aug/14/2003, the problems of Guangdong power network and our countermeasure[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2005(5): 23-30.
- [8] 赵峰, 孙宏斌, 谭嫣, 等. 综合考虑多种电网安全主题的关键断面自动发现方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1169-1174.  
ZHAO Feng, SUN Hongbin, TAN Yan, et al. Automatic discovery method of power system critical flowgates considering multiple security themes in power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1169-1174.
- [9] 王涛, 李渝, 顾雪平, 等. 考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 220-228, 245.  
WANG Tao, LI Yu, GU Xueping, et al. Identification of the key transmission sections considering optimization of geographical partition boundary for power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 220-228, 245.
- [10] 侯俊贤, 韩民晓, 李柏青, 等. 考虑网络拓扑变化的薄弱断面快速评估方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 289-295.

HOU Junxian, HAN Minxiao, LI Baiqing, et al. Fast identification method of weak transmission section considering the influence of power network changes[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 289-295.

[11] 陈祎, 郭瑞鹏, 叶琳, 等. 电网断面热稳定限额计算模型及方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 20-24.  
CHEN Yi, GUO Ruipeng, YE Lin, et al. Calculation model and method for thermal stability control limit to transmission interfaces in a power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 20-24.

[12] 赵娟, 申旭辉, 吴丽华, 等. 结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 97-101.  
ZHAO Juan, SHEN Xuhui, WU Lihua, et al. Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid cross-section with DC power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 97-101.

[13] 赵金利, 张继楠, 贾宏杰, 等. 计及 N-1 约束的多维空间断面热稳定安全域边界快速计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 128-135.  
ZHAO Jinli, ZHANG Jinan, JIA Hongjie, et al. Rapid calculation of sectional thermal security region under constraint of N-1 in multi-dimension space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 128-135.

[14] 赵峰, 孙宏斌, 黄天恩, 等. 电网关键断面及安全运行规则自动发现系统设计与工程实现[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 117-123.  
ZHAO Feng, SUN Hongbin, HUANG Tianen, et al. Design and engineering application of automatic discovery system for critical flowgates and security operation rules power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 117-123.

[15] 刘嘉宁, 潮铸, 钟华赞, 等. 基于广义断面的电网调度操作风险评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 155-163.  
LIU Jianing, CHAO Zhu, ZHONG Huazan, et al. The risk assessment method for the dispatching operation based on generalized sections[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 155-163.

[16] 李岳. 暂态稳定约束的极限传输能力的快速求取方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.  
LI Yue. Research on the calculating method of transient stability constrained power transfer limits[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[17] 钟贵和, 王星华, 甘德树, 等. 输电断面的有功安全防护-校正负荷调整算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 15-20.  
ZHONG Guihe, WANG Xinghua, GAN Deshu, et al. Load adjusted algorithm on active power prevention-correction of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 15-20.

[18] 叶剑, 王伟红. 电网断面热稳定限额的计算[J]. 电力与能源, 2014(3): 302-304.  
YE Jian, WANG Weihong. Thermal stability limitation calculation of transmission interfaces in power network[J]. Power & Energy, 2014(3): 302-304.

收稿日期: 2016-11-07; 修回日期: 2017-01-25

作者简介:

甘德树(1970—), 男, 工程师, 长期从事系统运行分析、电网安全风险管控与调度应急处置等工作; E-mail: gandesu@126.com

林桂辉(1980—), 男, 工程师, 长期从事系统运行分析、电网安全风险管控与综合停电计划管理等工作; E-mail: double\_trees@163.com

吴海雄(1975—), 男, 高级技师, 长期从事系统电网运行分析、电网安全风险管控与调度应急处置等工作。E-mail: 984342476@qq.com

(编辑 葛艳娜)