

基于智能分析的电网运行方式和安控策略智能编制方法和应用

随着电网特高压建设工作的推进，电力系统运行方式多变，控制规则和策略日趋复杂，安全运行的风险和压力明显增加。调度运行管理急需构建基于智能分析的，包含电网运行方式统一编制、流转、交换、解析和应用功能的国分省三级调度一体化电网运行方式管理体系。首先介绍了综合考虑国分省调度控制的电网运行方式和安控策略描述方法，其次介绍了对该方法的解析、校核技术及其对电网调度系统中各类高级应用的服务，最后介绍了该项技术在试点工程应用中发现的问题，并对这些问题提出了解决方案。

李 锋¹ 鄢发齐¹ 解 梅² 吴 昊¹ 金维刚¹ / 1. 国家电网华中分部 2. 中国电力科学研究院

0 引言

首先，随着特高压建设工作的推进，运行人员依靠人工理解和记忆开展调控业务，安全运行的风险和压力明显增加。其次，随着安控装置在电网运行中的大规模使用，其动作策略直接影响着电网的安全稳定运行，但是在线安全分析和计划安全校核的应用中均未建立完整的动作策略模型，不能真实反映电网运行实际。另外，电网的一体化运行要求方式统一管理，但目前上下级调度主要依靠稳定运行规定文件和人工协调方式实现管理，需要技术手段支撑方式的一体化管理。通过稳定管理系统的建设，制定统一的电网运行方式描述规范，开发稳定断面限额和安控策略描述、解析和应用的软件，为电网实时调度控制、在线安全分析、计划安全校核和运行方式管理提供技术支撑，实现如下预期目标。

1) 促进方式报告（方式计算结论）的规范化管理、结构化描述和电子化应

用，实现稳定断面限额和安控策略的全网共享。

2) 建立电网运行方式自动识别和稳定断面限额自动匹配的机制，实现适应运行方式灵活多变的电网实时监视与告警功能。

3) 建立电网运行方式自动识别、安控运行状态在线监视及自动匹配的机制，实现计及安控行为的在线安全分析和计划安全校核功能。

1 电网运行方式和安控策略描述方法

基于智能分析的电网运行方式和安控策略自动编制方法是针对电网运行控制方法和安全自动装置控制策略进行描述的一种新型高效的逻辑描述规范。规范基于CIM/E语言并参考C语言定义方式和C shell逻辑判断方式，从而描述了电网运行控制条件和手段内容及其之间的关联关系，以及安全自动装置动作条件和动作策略内容及其之间的关联关系。

方式规范是一种纯文本语言，具备以下功能：

1) 电网运行控制方法和安全自动装置控制策略的描述。

2) 电网运行方式、电网运行控制策略、安全自动装置动作条件和安全自动装置动作信息的描述方法。

3) 电网运行方式和电网运行控制策略之间的逻辑关系。

4) 安全自动装置动作条件和安全自动装置动作信息的逻辑关系。



李 锋/工程师

关键词/Keywords

智能分析 ·
运行方式 ·
自动解析 ·
一体化 ·

此方法主要由外部引用、宏定义、逻辑关系、运行方式约束和安全控制策略E格式表（以下简称E表）四部分组成。

1) 外部引用位于文件最顶端，引用对象为本文件，包括：描述运行方式约束和安全控制策略所需要的电力系统调度运行模型；描述运行方式约束和安全控制策略所需要的用户定义文件；运行方式约束和安全控制策略描述之间的相互引用；优先级定义，用整数定义本文件中约束和策略逻辑的优先级，一般整数越大，优先级别越高。

2) 宏定义位于外部引用之后，可与其他部分交叉排序，包括：命名空间定义，用于指定后续逻辑规定中的设备、宏的命名空间，有效范围至文件末尾或者下一个命名空间定义；对逻辑复杂的电网和变电站运行方式、变量等进行定义，用于形成简化描述；定义需要用到的枚举量；断面方向的定义。

3) 逻辑关系描述位于外部引用之后，可与E表混合使用，主要用于描述单独的运行方式约束

和安全控制策略逻辑关系。

4) E表^[1]描述位于外部引用之后，可与逻辑关系混合使用，主要用于描述批量同结构的运行方式约束和安全控制策略逻辑关系。

1.1 关键词

关键词是方式语言每行语句的起始符号，代表着该行语句描述的内容类型，未规定部分以C#语言规范为准，如表1所示。描述文件摘录如图1所示。

```
//天中直流闭锁
IF FAULTBI $(天中直流))
THEN
IF - 5000<=P $(鄂豫断面)) <2000
THEN
IF P (长南 I 线) >= - 700
THEN
IF P $(天中直流)) - 3000>=2000
THEN
cutdcline [$(林枫直流)] =600;
.....
IF P $(天中直流)) - 3000 - 2000>=1200
THEN
CUTLOAD [河南]=1200;
ENDIF
IF P $(天中直流)) - 3000 - 2000<1200
THEN
CUTLOAD [河南]=P $(天中直流)) - 3000 - 2000;
ENDIF
ENDIF
.....
```

图1 天中直流闭锁策略电子化描述文件摘录

表1 关键词表

关键词	定义	类别说明
#include	外部或用户自定义引用起始符	标示外部或用户自定义引用文件语句，文件名称不应携带路径，并用半角双引号“”包含
#model	CIM/E模型引用起始符	标示CIM/E模型引用的语句
#priority	文件优先级定义起始符	标示文件中规定的优先级，以文件为单位
#define	变量定义并赋值起始符	标示变量定义并赋值的语句
#direction	设备方向定义起始符	标示设备、断面和潮流方向的定义
#namespace	命名空间	用于后续逻辑描述的设备名称和宏的前缀
#functionpoint	自定义函数指针	用于用户实现自定义函数在策略逻辑中引用实现
enum	枚举量	定义枚举量
//	注释语句的起始符	标示注释语句
\	换行连接符	换行连接符号

1.2 逻辑关系词

逻辑关系词表如表2所示。

1.3 E语言描述规则

E表中表头、属性名、量纲和逻辑属性等描述规范如E表符号表所示，未规定部分以“电力系统数据标记语言—E语言规范”规定为准，如表3所示。

1.4 表达式

方式语言的表达式由变量、运算符、数值、

表2 逻辑关系词表

标识	定义	类别说明
IF	条件语句起始符	定义执行语句的前提条件
THEN	执行语句起始符	定义执行语句执行的具体内容
ELSE	条件语句起始符	定义运行方式执行的具体内容，与IF、THEN联用，表示IF条件不满足情况下的语句执行，可与IF嵌套使用
ENDIF	逻辑结束语句起始符	和IF成对使用，表示控制语句结束

设备名称和函数构成，设备名称一般作为函数的

表3 E表符号表

序号	内容	格式	定义
1	表头	<表名称附加函数表达式>	定义表名称和表类型
2	属性名	@正文	正文用于描述列的属性名称，数量与表的列数相同，必须为已定义的变量、枚举量、函数表达式、断面名称和设备名称，如果为断面名称或设备名称，表头应定义对应列的函数表达式
3	量纲	\$正文	正文用于描述列的量纲，数量与表的列数相同，无量纲应使用“-”
4	逻辑属性	@!正文	正文用于描述列的逻辑属性，只应填入“条件”和“约束”，如果出现多个条件和约束时需要在条件后面增加条件的序号，如条件1，条件2
5	动作属性		正文用于描述列进行批处理的函数

参数参加计算，未按规定部分以C#语言规范为准。

2 方式解析、匹配与校核技术

解析技术包括词法分析和语法分析^[2]。词法分析所做的是在输入中寻找字符模式。例如，在描述规范中，整型量字符模式是一个或多个数字的字符串，变量名称字符模式是一个字母后面跟着零个或者多个字母和数字，而各种各样的操作符字符模式则是一个或者成对的字符。一种简洁明了的模式描述方式就是正则表达式。词法解析程序主要由一系列带有指令的正则表达式组成，这些指令确定了正则表达式匹配后相应的动作。词法解析读取输入，匹配输入与所有正则表达式，并且执行每次匹配后适当的关联动作。词法分析会把所有的正则表达式翻译成一种高效的内部格式，这使它可以同时处理所有需要匹配的模式，正则表达式的解析速度较XML类表达式解析速度可以成百倍提高。

内部格式使用确定性有穷自动机，确定性有穷自动机计算速度非常快，处理速度与模式的个数和复杂程度无关。

语法分析的任务是找出输入记号之间的关联关系，一种常见的关系表达方式是语法树。为了编写一个语法分析器，需要一定的方法来描述语法分析器所使用的把一系列记号转化为语法分析树的规则。在计算机分析语言中最常用的就是上下文无关文法。有效的上下文无关文法是带有递归性的，规则会直接或间接地指向自身，这些简单的规则被递归地使用来匹配任何复杂的公式序列。

运行方式描述语言解析系统由结构解析、结

构语法树、表达式解析、表达式语法树以及执行单元五部分组成。各组成部分的关系和流程如图2所示。

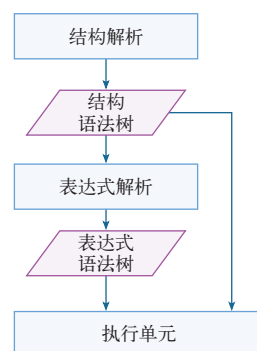


图2 稳定规定文件解析流程图

结构解析模块的输入是原始稳定规定或安控策略脚本文件，该文件必须存续遵循电网运行方式和安控策略描述方法中定义的规则。结构解析依据该方法对脚本文件进行分析解析，获取相关的语法结构：如条件执行结构、E表结构和定义结构等，最后形成结构语法树。词法解析对稳定规定或安控策略脚本文件进行初步分析，把文件分割为自定义的词素，称为词法单元。词法解析还可以实现对文件注释的过滤，以及对非法字符的检测。词法分析根据关键字定义匹配脚本中的关键字，每个关键字对应一个记号，记号是词法解析器输出给语法解析器的标识，语法解析器再根据标记匹配语法规则。

解析程序正确解析带有IF、THEN、ELSE和ENDIF语法的语句，如脚本无完整表达逻辑则进行报错。对IF语句要求支持嵌套执行功能，即IF语句的执行部分可以是E格式表，也可以是其他IF语

句。以此类推，可支持多重逻辑判断和执行，同时也可正确解析带有IF、THEN、ELSE和ENDIF语法包裹的E表逻辑。

结构语法树记录了结构解析模块的输出结果。为存储《方式描述规范》中定义的相关结构，结构语法树使用了自定义的数据结构，作为基础结构类，以及相关子类包括条件结构类、E表结构类和域结构类等。语法树以这些类为节点，形成树状结构，用于后续的解析与执行。语法解析对从词法解析器输入的词法单元进行规则匹配，最终生成结构语法树。语法解析的基本单位是词法单元，标识为记号，由词法解析器输入。若干词法单元组成一个语法类型，词法单元和语法类型又组成新的语法类型。全部输入内容按规则组成的语法类型输入，至此语法解析完成表达式解析模块，主要实现对结构语法树中需要执行的条件进行解析。该条件经过结构解析后，应该已经形成由基础函数组成的表达式。表达式解析模块则要对此条件表达式进行分析解析，最终生成以函数为基础的表达式语法树。

表达式语法树是以函数、数字和操作符为节点的树状数据结构。该结构存储了经表达式解析模块解析后生成的分析结果。结构语法树和表达式语法树在文件解析时生成，生成后可常驻于内

存，只要脚本文件不修改，这两种语法树就不需要重新生成，只是在执行时调用。

执行单元包括设备状态获取和逻辑执行两部分。设备状态获取是指在脚本解析之后和执行之前，要依据解析时得到的设备列表，获取相关设备的状态和工作值。这些值的获得是后续函数执行的基础。

运行方式描述校验技术主要利用词法语法分析、电网模型分析和电力系统分析三种手段进行校验。一是对稳定规定或安控策略电子化文件进行词法、语法分析，对输入括号不对称、逗号结尾等几十种语法错误进行报错告警；二是对稳定规定和安控策略电子化文件进行设备模型的校核，保证设备命名符合D5000统一命名规则，并在全数据模型中合理表达；三是将电子化文件与海量历史断面数据批处理匹配，并用电力系统分析的方法对其方式描述进行校验。

3 应用

3.1 在线稳定分析中安全控制策略辨识

在线稳定分析中安控策略辨识根据实际系统可能出现的运行方式，设定各种故障，通过离线计算得出各种组合方式为维持系统稳定所需的控制措施，进而形成控制策略描述文件，在运

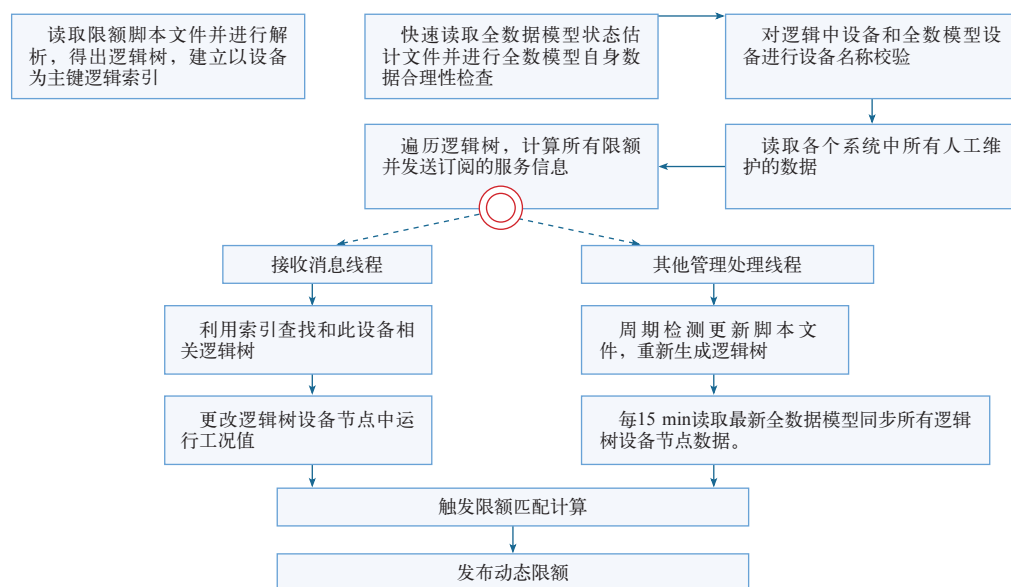


图3 动态限额服务流程示意图

行中与现有在线稳定分析软件和并行计算平台进行一体化集成,实现运行方式和故障类型的实时匹配。考虑安控策略的在线并行稳定分析计算方法,是将装置运行状态、故障集、潮流约束和方式约束作为输入信息,通过方式解析服务产生当值安控策略,作为稳定分析计算程序的输入信息,实现考虑安控策略的暂态稳定计算、考虑安控策略的静态稳定计算功能^[3]。

图4为与现有在线稳定分析软件和并行计算平台的一体化集成框架图。

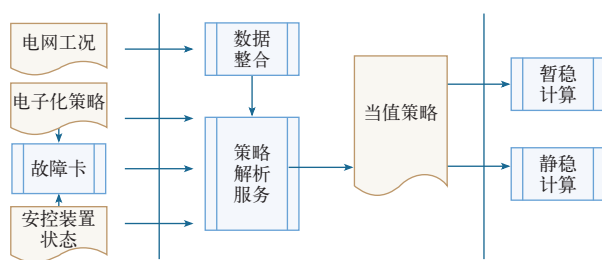


图4 与现有在线稳定分析软件和并行计算平台的一体化集成框架图

运行控制和安控策略逻辑脚本解析技术在连锁故障中还有一个重要的应用就是在电网连锁故障仿真下,如何定义电网薄弱断面,如何找出故障几率最高的重载的线路和变压器等设备,需要用到核心解析技术中自适应方式变化的安控策略和断面设备限额。安控策略描述脚本电子化服务的输入为电网基础数据和安控策略描述脚本,输出为符合该运行方式下的电网的一系列安控行为。

以往传统的方法是在数据库中建立若干关系库表来表达电力系统控制逻辑,其优点在于开发工作量小。而缺点较为突出,主要是应用软件扩展性较差,效率也比较低下。针对电力系统控制逻辑的共性,引入了电力系统控制逻辑语言的概念,即借鉴计算机逻辑语言将现有的电网运行方式稳定运行报告中安控、限额等逻辑控制约束以一种简单的方式表达出来,解析编译后在计算机中形成了以电网设备模型为节点的逻辑树。这种方法的优点在于软件的可扩展性强,规范化强,可作为大电网仿真分析控制逻辑模型合并的强有力的技术支撑。

图5为一个三层电网逻辑控制关系示意图,脚

本解析程序将逻辑关系解释成存储在内存中的逻辑树,它由判据和结论组成,判据的每一个节点由设备模型和逻辑判据组成,而结论由设备名称和控制行为组成。电网中涉及逻辑的每个设备都会拥有以该设备为索引的若干逻辑树,当电网运行工况或基础数据发生变化后,会触发变化设备的逻辑树进行逻辑计算。图5中实线部分为逻辑计算为真后进入下一迭代逻辑计算,虚线部分代表逻辑计算结果为假将不进行下一层逻辑计算或者没有任何结果输出。

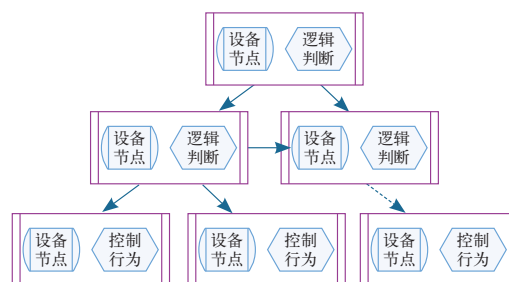


图5 逻辑树示意图

3.2 停电计划中系统设备关系描述

停电计划问题通常包括大量的约束条件,这些约束大致可以分为停电约束和运行约束两类。停电约束一般包括停电时间约束、停电资源约束、不允许停电时段、电厂约束和传输路径约束等。系统的运行约束通常包括功率平衡约束、机组容量约束、线路输送容量约束、网络约束、燃料约束、污染物排放约束和安全约束等。目前停电计划模型建立时对多约束条件的选择非常随意,都是从研究特例出发设定约束条件,没有标准可循。方式解析通过对电网运行方式很好地解决了上述问题。

1) 重叠停电分析辅助。针对设备停电对断面限额的影响,根据稳定规定判断停电设备与稳定断面的归属关系,搜索停电计划安排(申请),方式解析提供稳定断面组成,判断同一稳定断面中是否存在多个设备同时停电,给出重叠停电的提示。

2) 送受端耦合停电分析。根据稳定规定,提示设备停电对跨区交直流通道送电能力的影响,检索其他影响跨区交直流通道送电能力的设备停电计划(申请),给出整合提示,或向相关单位

发出停电许可提示。举例说明，直流断面1包括设备A与设备B，由于设备A的停电影响到直流断面2的限额，方式解析根据直流断面1和直流断面2的约束条件相关性和断面组成无关性联合判断给出送受端耦合停电设备。

3) 保护控制、安全控制关联分析。自动将一次停电设备与对应的保护/安全控制装置关联，检索正在进行和计划进行的一二次设备工作，检查保护/安控装置工作是否存在冲突，并给出辅助提示。

4) 安控运行方式的校验在电网运行调整影响分析中的应用。调用方式解析功能，进行电网限额、安控策略的自动匹配分析，校验当前安控方式及切机/切负荷量是否满足规定要求。

基于趋势方式分析所形成方式断面，调用停电计划分析辅助功能，进行关联停电分析、重叠停电分析和送受端耦合停电分析，当存在设备关联停电、重叠停电和送受端耦合停电时，给出相关设备提示信息。

3.3 自适应运行方式的限额服务

自适应运行方式的限额服务实现了在电网实时工况下和电网未来工况下的复杂运行方式和控制规则的解析及其应用，全面地为安全 I、II 区中 SCADA、DSA、计划校核和网络分析等各类应用提供跨专业的限额通用服务，改变了依靠稳定规定的人工理解和记忆开展调控业务的工作模式，提升了基于电网运行规定的调控智能化水平和协同工作能力。

自适应运行方式的限额服务由服务端功能和客户端功能构成。服务端负责推送发布各类限额信息，客户端负责调用相关订阅函数完成对服务端信息的订阅。客户端一直在轮询是否有服务端发送限额信息，一旦发现新的信息推送即进行接收和处理。动态限额服务端推送的信息有：断面限额信息、开机机组台数约束信息、电压电流功率限额信息和低容抵抗装置投运台数约束信息。

4 存在问题和展望

基于智能分析的电网运行方式和安控策略自

动编制方法和应用技术目前已在国家电网调控中心、国家电网华中分部调控中心、国家电网西南分部调控中心和河南电网省调等几个调控中心进行了试点应用，极大地减轻了调度员和各专业人员的工作压力。但是目前因每年的枯水丰水（冬季夏季）运行方式变化和临时性方式频繁变化与复杂的限额和安控控制逻辑等原因，导致在稳定规定和安控策略维护时，稳定规定和策略的电子化录入存在较大工作量。结合目前崛起的机器学习的专业化应用，借鉴深度神经网络^[3]中自然语言的表征方法和符号记忆，进行语义匹配、语义解析、考虑方式报告和安控策略的模糊性和特殊结构，对基于智能分析的电网运行方法和安控策略自动编制方法的效率将有较大提升。

5 结束语

本文首先介绍了电网运行方式和安控策略描述方法，是同时适用于电网稳定分析仿真应用和调度管理的电网稳定约束和控制数据的规范化、模块化和流程化技术。优点和创新点在于适用于各级电网设备模型和稳定规定，自动生成人、机共同识别的电子化稳定规定数据的方法。其次介绍了采用穷举电网潮流数据验证法、遍历逻辑结构验证法等校核方法以及稳定监控规则和安控策略智能化编制技术。该方法对运行方式安排辅助决策、电网实时调度控制、在线安全分析和计划安全校核提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 辛耀中，陶洪铸，李毅松，等．电力系统数据模型描述语言E [J]．电力系统自动化，2006，30（10）：48-52．
- [2] John Levine．flex & bison [M]．陆军，译．南京：东南大学出版社，2011．
- [3] 顾雪平，盛四清，张文勤，等．电力系统故障诊断神经网络专家系统的一种实现方式 [J]．电力系统自动化，1995，19（9）：26-29．

（收稿日期：2017-02-10） EA