

# 2007 年 IEEE PES 学术会议 电网调度自动化部分综述与讨论

傅书邈

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Summary and Discussion on 2007 IEEE PES General Meeting (Power System Dispatch Automation Part)

FU Shu-ti

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** This paper is a summary of 2007 IEEE PES General Meeting, power system dispatch automation part. There are many interesting papers presented on this conference, however, we only selected 3 topics to summarize, i.e. large scale power system modeling, utility computer network cyber-security, and power system optimal islanding technique for preventing a blackout. These 3 topics are selected because it is more practical for the readers in China. In the end of this paper some discussions and comments are given.

**KEY WORDS:** power system; network modeling; cyber security; power system islanding; emergency control

**摘要:** 本文为 2007 IEEE PES 学术会议电网调度自动化部分的综述。此次会议上发表的论文很多,但本文只选择了其中 3 个重点课题进行综述,即大型电力系统网络模型、电力企业计算机网络的信息安全和防止大面积停电的系统解列技术。选择这 3 个课题是因为其论文对我国相关技术人员较有使用价值实用。文章最后对相关问题进行了讨论和评述。

**关键词:** 电力系统; 网络模型; 通信安全; 系统解列; 紧急控制

## 0 引言

本文主要是根据 2007 年 IEEE PES 年会的论文而编写的。在有关调度自动化方面的论文中,重点选取了对我国电力行业比较实用的三部分,即大型网络模型的管理、计算机网络的信息安全和防止大面积停电的措施等,以供读者参考。其他论文可登陆网址: <http://ieeepower.org> 查询。

## 1 大型网络模型的管理

在 2007 年 IEEE PES 年会上举办了一个“大型

市场网络模型的管理专题讨论会”,会上共发布了 6 篇有关网络模型的论文。其中 ARIVA T&D、ABB、Seimens T&D 等 3 家公司介绍了在能量管理系统 (energy management system, EMS) 与市场支持系统之间,区域输电组织/独立系统操作组织 (regional transmission organization/independent system operator, RTO/ISO) 与各控制区之间建立数据平台的经验与问题,以及 NYISO, CAISO, Ontario Hydro 等系统的使用经验。ABB 公司主要介绍了其开发的 CIM (common information module) DE Toolkit 专用工具包,该工具包既适用于 EMS,也适用于市场支持系统的网络模型,可在变电站单线图上观察和修改数据。由于该 Toolkit 属于专用工具包,本文对此不作详细介绍。以下将重点介绍其中的一篇文章<sup>[1]</sup>,该文描述了一个联合系统的模型如何由几个子系统的模型聚合而成,以及联合系统模型的维护和更新过程。

### 1.1 大型网络模型的维护与更新

一个大型联合系统(例如 RTO)的网络模型可以由几个子系统(如 ISO 或地方电网)的模型聚合而成。每个子系统要负责维护和更新本区域内的模型,以供大系统和其他子系统使用。为了实现上述目标,所有子系统和大系统的模型必须遵守各方同意的规则和一种系统性的过程,以保持这些模型同步。为此,系统模型的建立应按下列原则分工负责:

(1) 地方网应作为“模型管理人”(model authority),建立和维护本地区的模型。

(2) 地方网和区域网应作为“终端用户”(end

user), 根据模型管理人提供的源数据来建立和维护其业务所需要的模型。

(3) 区域网的成员可以指派一个称为“模型质量代理”(model quality broker)的实体, 负责将各地方网的模型合并, 测试和纠错以保证质量, 然后将合并后的结果提供给各终端用户使用。

为了得到所需要的结果, 还必须满足以下技术要求:

(1) 必须明确向每个目标模型提供数据的模型管理组(人)(model authority set)。因此, 对每个目标模型必须指定一个唯一的模型管理组(人)。

(2) 每个给定的模型必须有一个唯一的名字, 以避免同名。

(3) 每次模型的更新必须都有记录, 以便出问题查找记录。

(4) 对于需要对输入模型作等值的用户必须很容易知道是否数据已刷新且需要重新作等值。

(5) 当在线系统需要接收更新的数据时, 必须容易接收和测试。

## 1.2 新模型的初始化过程

一个新的模型可以投入使用之前, 满足 1.1 中技术要求 (1) (2) 的模型必须首先初始化。对不同的联合网络可以有不同的方法。没有一个统一的方法, 只要满足技术条件 (1) (2) 即可。作为例子, 先考虑把一个全新的大电网模型初始化, 可按下列步骤进行:

(1) 在联合电网内的各控制区都同意作为其控制区的模型管理人(model authority)。

(2) 每个模型管理人都把当前的 EMS 模型(CIM/XML 格式)提交给(本单位的)模型建立人(model builder)。

(3) 每个模型建立人抽取各自控制区的数据(直到测量点), 并将它们发送到源模型集合(source's model authority set)。在边界的连接节点要指定为“边界集”, 除非这个节点已经被指定(由于对方的控制区的节点已经被处理)。

(4) 模型建立人要人工检查在边界上的模型协议, 以便确认所有联络节点都对。如果没有成对, 就要与源模型的管理人协商以便配对。

(5) 所有的对象(数据)都要有全域的识别码。这些识别码不是名字, 也不会用于用户接口等其他方面, 只是用来识别标准接口内的对象(数据)。

(6) 对象的名字(供人使用)只是数据的一部分, 作为例子, 假设提供的名字就是控制区原来的

名字。当然, 联合电网的源模型也可以按全网取名的标准重新命名。

(7) 各模型建立人利用潮流或状态估计工具测试新的模型。

(8) 测试过的模型再送回到各终端用户, 让他们把其业务模型初始化。

以上过程可能有很多变化, 如可以产生一个与各 EMS 源模型完全一致的联合电网模型; 也可能已经有了一个好的完整的联合电网模型, 但希望逐步与 EMS 源模型相一致。为此, 只要在现有的联合电网模型上加一个目标识别码就可以进行下去。于是, 每个模型的管理单位就需要维护两个模型: 一个是自己的 EMS 模型, 另一个是在联合电网内自己控制区的模型。过一段时间, 这两个模型会成为一致。由于联合网模型的管理者只管理自己用的模型, 每个控制区模型的管理者可以按自己的速度使这两个模型成为一致。

## 1.3 不断发展的联网建模过程

一旦初始条件得到了满足(模型数据集合与识别码), 最新的 CIM 标准就可以允许模型的管理者非常可靠地更新其模型数据, 而且它可以被接收和处理成地方终端用户的模型, 只要这些地方终端用户具有满足技术条件 (3) (4) (5) 的接收系统。以下介绍每个实体(模型管理者、终端用户、模型质量代理)需要如何做以使整个过程正常工作。

模型管理者需要一种建模工具, 该工具能够产生或输出模型数据集合的全部或部分 CIM/XML (extensible markup language) 版本。这可以从任何支持 CIM/XML 标准的建模工具中得到, 但要加以修改, 以处理模型集合与该集合的识别码。

模型质量代理需要具备以下功能:

(1) 必须能接收授权模型集的全部或一部分, 以及取代或更新在总的模型集中接收到的现有版本的模型集。

(2) 必须有测试和校验模型的工具。

(3) 必须能输出全部或总模型集的一部分给终端用户。为提高效率, 希望建模工具能记录哪个终端用户需要哪个模型集及如何可靠地逐步更新。

终端用户承担了最大的负载以便达到最大的效果。从实用的角度考虑这样做是适当的, 因为并不是所有终端用户对于模型的一致性都有同样要求, 同时他们可以自由选择以下哪些要求需要满足。

(1) 终端用户必须能接收模型质量代理提供

的全部或部分授权模型集。

(2) 当一个终端用户收到一个模型时, 它的应用系统的命名规则可能与授权模型提供的名字不一样。此时终端用户应当使用 CIM 登记名称并建立一个与本地名字的对照表。

(3) 如果终端用户需要把收到的模型降阶, 他们必须能检测是否有部分数据的改变影响降阶, 并通过修改过的原稿再生成。

(4) 如果终端用户是一个 EMS, EMS 应当能动态修改部分数据。

以上要求需要传统 EMS 的模型工具增加许多新的功能, 不少 CIM 供应商正在开发这种新功能。

## 2 电力系统内计算机网络的信息安全

网络安全在电力公司内部受到了很大的重视。在现代电力系统的保护、控制等领域, 网络技术得到了越来越广泛的应用, 如通信、监视控制与数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)等。特别是开放电力市场以来, 用户可以从各个角落与交易中心联系。如此发达的计算机网络很容易受到网络黑客的攻击, 使电力系统的运行安全遭到破坏。最近国内外研究网络安全的论文比较多, 本文将摘要性地介绍加强网络安全运行技术的论文<sup>[2-3]</sup>, 供读者参考。

### 2.1 电力系统加强网络安全的必要性

通常电力公司利用加密和认证技术(encryption and authentication)来保护网络的信息安全。但这是不够的, 因为攻击者可以预计数据传输的速率和长度, 还可以根据加密数据的报头、帧的大小和速率精确地确定被传送数据的类型。正常情况下, 在被请求数据(solicited data)的传输时间内, 不大可能发生未请求的保护数据的传输, 而且通常控制数据的帧数比监视数据少。根据流量分析, 网络攻击者可能找到电力系统中若破坏将对电力系统造成较大影响的设备, 或者执行一个“拒绝服务”的攻击到某个设备, 例如拒绝执行一个“断路器合闸”的命令。此外, 攻击者还可以把密码分析的攻击与流量分析的攻击结合起来对传送的数据进行解码, 这样就可以直接操纵数据和设备, 例如可以改变一个数据以启动一个继电器来控制主设备的运行。因此, 如果对电力系统的数据传输没有适当的安全保护措施, 可能对系统运行造成严重后果。

### 2.2 建议的安全运行模式

建议增加一个新的伪网络安全层来加强密码

的安全, 提供防止流量分析和编码分析攻击的有效性, 而不是仅用加密保护的方法。建议安全层处于 DNP3(一种通信规约)的数据链路层的下面, 包括 3 种安全运行模式, 这些模式是从统计控制帧的传输率的方法派生出来的。这 3 种模式是填充模式(padding)、帧传输组模式(frame transmission group, FTG)、分裂帧传输组模式(split frame transmission group, SFTG), 它们能提供加强的密码保密性能和有限的防止攻击者进行流量分析的能力。

在安全运行模式中, 防止流量分析攻击的典型方法就是用填充的方法对用户数据的大小进行伪装, 以及用统计法来控制帧的传输率。此方法可保证所有传输数据长度都相同, 而且数据传输发生在特定的间隔, 当没有用户数据时就制造一批数据来传送。将这种方法与安全加密的方法结合起来就会使所有帧(包括报头的帧在内)对网络攻击者来说完全一样, 网络攻击者就难以区分传输数据的性质, 如是面向控制的数据传送还是面向保护的数据传送。

对电力公司来说, 采用填充模式比较有效。但是对统计法的控制帧的传输率来说, 不如采用本文建议的 FTG 和 SFTG 模式。原因如下:

(1) 由于被请求的数据传输的特定传输速率(即控制与监视数据), 它们的定时是高度一致的和可预计的。因此, 网络攻击者就可以用流量分析的方法精确地排除掉绝大多数无用的帧, 这些帧是当没有用户数据的间歇时按统计传输率填入的。其结果是, DNP3 设备不得不处理和传送大量无用的数据, 而没有提高安全度。

(2) 传送与保护有关的数据的时刻是不可预计的, 而且是不能延迟的。时间对于保证电力系统的安全运行至关重要。因此, 使用统计法传输率的帧的 DNP3 设备将不得不增加传输速率以产生一个完全一致的通信流量样式, 以免推迟保护数据的传送。但是, 这会使 DNP3 装置无必要的消耗更多资源, 来产生在正常数据传输率下被请求的控制与监视数据之间的帧, 这些数据很少可能包含保护数据。例如, 如果保护数据的允许延迟为 4 ms, 而正常的传输间隔为 2 s 时, DNP3 的 RTU 就不得不在 2 s 的间隔内产生 500 个无用帧, 因此, 对于时间要求较严格的保护数据的传输限制了统计法控制传输率在电力系统计算机网络中的应用。

本文提出的 FTG 和 SFTG 模式可以克服应用统计控制帧的传输率的缺点。FTG 安全模式包含填充模式, 并把用户数据链的帧放在一组制造出来的帧

中间, 迫使网络攻击者要消耗大量资源以确定那一帧含有用户数据。SFTG 安全模式包含 FTG 模式, 但把用户数据链的帧分裂成一组有意制造的数据链路层的帧, 迫使网络攻击者必须消耗资源, 把用户数据链路层的帧拼装起来, 才能进行攻击。

分析上述 3 种安全模式的性能可以看出: 填充模式适于在安全要求较低的情况下使用; FTG 安全模式比填充模式提供了更高的安全度, 但增加了处理的内耗; SFTG 安全模式提供了比 FTG 模式更高的安全度, 但也增加了处理内耗。因此推荐 FTG 和 SFTG 模式用于对可靠性要求高的数据传输。

### 2.3 3 种安全模式的构成

#### 2.3.1 填充法安全模式

填充法安全模式用来把所有 DNP3 数据链路层的帧填充到同样大小(最多 292 字节(octet)的数据链的帧的大小), 填充以后再由安全层在数据链路层的帧上加密和认证。这种模式可在正常情况下应用, 因为它不增加处理负担或带宽。因此, 这种模式可以做为变电站的 LAN 的低风险通道, 如接入设备的通道或是从未被攻击的通道。但是填充法不能用来保护信息的碎块, 这样就限制了填充法的应用, 因为网络攻击者可以计算传送应用信息碎块的数据链路的帧数, 以确定传送的是控制、监视还是保护数据。但是填充法还是可以使攻击者难以区分只有 10 字节的数据链路层信息与使用功能码的应用层(只需要应用报头, 可能只需要目标报头), 或是为了把传输层分成小于 249 字节的碎块的应用信息。

对于分成几个数据链路层的帧的应用层的信息来说, 填充法隐藏了信息序列中最后一个数据链路层的帧的大小。如果某种类型的数据总是在最后一个数据链路层的(用于应用层的碎块的)帧具有同样数目的字节, 隐藏最后一个碎块的大小可以防止受到网络黑客的攻击。

填充物要随机地放在数据链路层的帧里, 以便模糊帧内的数据边界, 使得网络攻击者不能假设帧内第 12 个字节是应用的报头。在图 1 中示出了在加密和认证以前的填充模式的工作状况, 在图中为

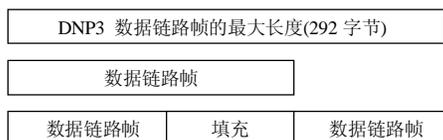


图 1 把 DNP3 数据链路的帧填充到最多 292 字节

Fig. 1 DNP3 data link frame padded to maximum 292 octets

DNP3 的数据链路层的帧制造了至多不超过 292 字节的填充物, 然后随机地放入数据链路层的帧的任何点。

#### 2.3.2 FTG 模式

FTG 安全模式是用来伪装在一组加密的假造的帧中的加密数据链路的帧。FTG 安全模式包含填充模式的运行, 所以在传输组中所有帧的长度相同。在 FTG 模式下, 包含用户数据的数据链路层的帧是随机地放在一组假造的帧内, 外表上好像统计控制数据传输的计时。因此, 有一组有限数量的帧将在预计的传输时间送出, 但是实际的帧就随机地隐藏在这些帧中。因此, 网络攻击者就不可能准确地确定哪一个数据链路层的帧包含用户数据, 而不得不消耗大量资源来检查在传输组内的每一个帧以确定用户数据的位置。图 2 示出了 FTG 安全模式的运行框图。在图 2 中, 用户数据链路层的帧被填充、加密, 可能加认证, 加密后的用户数据链路层的帧被随机地放在传输组的加密的假造的帧之中。

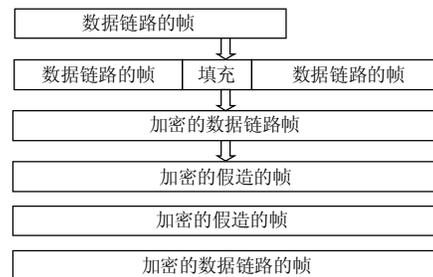


图 2 FTG 模式(用户数据随机地放在帧的传输组内)

Fig. 2 FTG security operation are shown randomly placing the user data within the frame transmission group

FTG 模式可提供比填充模式更高的可靠性, 因此可以用于较容易受到攻击的通道, 如接到表计的通道或重要的 DNP3 装置(例如变电站之间的通道)。但是, 由于 FTG 安全模式要制造很多的帧来伪装用户的数据, 因此该模式要求更大的处理能力和带宽, 这样就限制了它在低带宽设备间的应用。

#### 2.3.3 SFTG 模式

与 FTG 模式相比, SFTG 安全模式增加了安全层的总的处理时间, 其安全层要生成  $N$  个帧,  $N$  是帧的传输组数。此外, SFTG 模式在目的侧将需要更多的处理能力, 因为它必须从假造的帧中把用户的数据链路帧重新组装起来。因此, SFTG 安全模式需要增加  $N$  倍的带宽以提供同样的性能。

#### 2.3.4 安全报头

安全模式要求在数据链路层的帧上附加一个报头, 使得接收侧的 DNP3 设备可以确定该数据链

路层的帧要执行什么操作。图 3 示出了安全层的报头。报头内各栏内容解释如下：

(1)“模式”表示数据传输所采用的安全模式。在帧内有了该表示后，源设备和目的设备就可以直接和并立即转换到另一种模式，而无需再转换前通知另一个设备，这样就提高了改变安全模式时安全层的响应速度。

(2)“类型”表示该帧包含的是用户数据还是假造的数据。

(3)“序列号”提供 SFTG 模式的帧的序号号，使包含用户数据的帧能够从假造的帧中正确地提取和拼装起来。此栏在其他模式时没有关联。

(4)“序列长度”表示在 SFTG 传输组内的帧数。此栏使安全层可以灵活改变用于 SFTG 传输组的帧数而无需事先协商。这样就提高了改变安全要求时安全层的响应速率。

(5)“填充开始”。对于填充和 FTG 安全模式，此栏提供了在帧内的填充序列的八进制起始位置。对于 SFTG 模式，此栏表示在假造的帧内，被加密的用户数据链路层的帧的碎块在何处开始。

(6)“填充结束”。对于填充和 FTG 安全模式，此栏提供了在帧内的填充序列的八进制结束位置。对于 SFTG 模式，此栏表示在假造的帧内被加密的用户数据链路层的帧在何处结束。

(7)“CRC”提供一个安全报头的周期冗余检查。

模式	类型	序列号	序列长度	填充开始	填充结束	CRC (cyclic redundant check)
----	----	-----	------	------	------	---------------------------------

图 3 DNP3 数据链路在加密和认证前附加一个安全报头  
Fig. 3 Security header appended onto the DNP3 data-link layer frame before encryption and authentication

### 2.3.5 性能分析

表 1 示出了 3 种安全模式的总性能。表中  $T_T$  为传输时间的带宽。与填充模式一样，FTG 安全模式也受到以下限制，即网络攻击者可以计算用来传送应用信息碎块的数据链路的帧数，以确定输送的是控制、监视还是保护数据。

表 1 当传输组数为 3 时 3 种模式的性能比较

安全模式	总性能
填充	$0.3 \text{ ms} + T_T$
FTG	$1.6 \text{ ms} + T_T \leq \text{FTG} \leq 2.0 \text{ ms} + T_T$
SFTG	$2.4 \text{ ms} + T_T$

## 3 防止大面积停电的措施

由于在 2003 年 8 月 14 日北美大停电事故以来，

类似规模的事故仍不断发生，例如 2004 年美国西部大停电事故，2006 年 11 月 4 日西欧大停电事故等，所以防止大停电措施的研究非常活跃，仅在 2007 年 IEEE PES 会议上的文献就有 24 篇之多。内容涵盖故障诊断、警报处理、系统解列和恢复控制等，其中系统解列是防止事故扩大的重要措施。本文将重点介绍一种基于慢同调性和图论的系统解列方法<sup>[4-6]</sup>。

### 3.1 基于慢同调性的系统解列

很久以来，同调性曾广泛用于研究电力系统的动态行为，如系统等值的研究。同调性是指在系统发生扰动时，一组同步机基本上按同样的角度摇摆，因此可以把该机组等值成为一台等值机而不致影响计算精度。此法同样可以用来确定为了消除振荡而选择的解列方案，把系统解列成为几个孤岛(island)，系统稳定后再人工恢复并列运行。在计算等值时有两个基本假定：①同步机的同调行为与扰动的大小无关；②同步机的同调行为与模型的详细程度无关。于是，可以将系统的动态方程线性化。

电力系统的动态方程可以写成以下形式：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) \\ x(0) = V \end{cases} \quad (1)$$

式中  $x$  为  $n$  维向量。其通解为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \exp(L_i t) v_i (w_i^T V) \quad (2)$$

式中： $L_i$  为矩阵  $A$  的第  $i$  个特征值； $v_i$  和  $w_i$  各为其右向量和左向量。

模式的定义是：第  $i$  个模式为  $\exp(L_i t)v_i$ 。由式(2)可见，状态  $x$  的动态行为实际上是线性系统中所有模式的线性组合。但是其中高频模式将很快衰减，只需要选择其中最慢的  $r$  个模式来研究慢同调性。如果  $r$  模式的特征向量的两行具有相同的值，则对应的两台电机为同调。式(1)的动态方程组可用 QR 法或 AESOPS 法求解，详见文献[6]。

### 3.2 系统解列的图论方法

运用图论方法研究系统解列包括 3 个步骤：

(1) 图的简化。

当用图论方法表示电网接线图时，一个母线称为一个点(vertex)，流出功率为正，流入功率为负。一条支路成为一个边(edge)。支路潮流称为权重。连接到一个点的边数称为度。简化的规则为：①去掉一度的点，如图 4。此时点上的权重要移到与它相连的点。②缩小能量不变的二度的点，见图 5。

图中中间点输入与输出的潮流相等, 可以简化成减少一个点和一个边。③缩小搜索范围。在一个同调区域内, 并不需把一个同调区内的机组分在两个切块里, 只要搜索到另一同调区的发电节点即可, 因此可以大大缩小搜索范围, 见图 6。

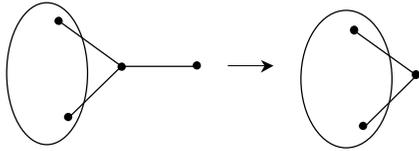


图 4 简化规则 1: 去掉一度的点

Fig. 4 Simplification rule 1: Eliminate one degree vertex

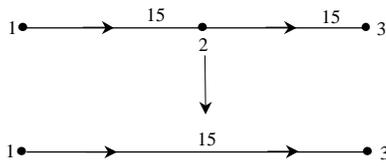


图 5 简化规则 2: 压缩能量不变的二度的点

Fig. 5 Simplification rule 2: Compress of two degree vertex with constant energy

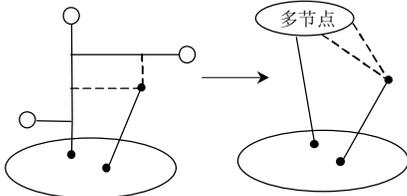


图 6 简化规则 3: 一个同调区可看成多个发电节点的树  
Fig. 6 Simplification rule 3: One coherence area can be regarded as a tree of many generator nodes

- (2) 按 3.1 的方法<sup>[4-5]</sup>求出几个最慢的同调区。
- (3) 求最佳解列方案。

在一个复杂电网中, 在几个同调区域间可能有多条线路。可用搜索方法选择几个切块的方案, 把两个相邻同调区域分成两个孤岛。如果有 3 个或更多同调区域时, 可以先切开两个同调区域, 然后再用相同方法搜索更多的孤岛。在几个切块(cutset)方案中, 比较每个岛的总发电出力与负荷的不平衡量, 不平衡量最小的方案为最佳解列方案。解列后负荷大于发电量的区域应当切负荷。

### 3.3 算例分析

论文曾以 2003 年 8 月 14 日北美大停电为例, 用上述方法校验如果当时系统解列能否减轻或防止故障。算例<sup>[7]</sup>有 30 000 条母线, 约 5 000 台发电机。采用 EPRI 的 DYNRED 程序来确定同调机组, 采用本文的最小切块法来确定解列边界。原始数据来自事故报告(最终版)。从求出的结果可见, 整个北美联合系统被分为 18 个同调区域。仿真计算由

Sammis-Star 线路跳闸开始。由自动求孤岛程序可以确定 Cleveland 附近为慢同调区(见图 7), 外环为慢同调区, 内环为解列区域, 需要断开 16 条线路以使 Cleveland 系统与北美系统解列。解列后 Cleveland 地区的总发电出力为 3 688.3 MW, 总负荷为 5 950.4 MW, 缺 2 262.1 MW。必须切负荷以保持频率稳定。

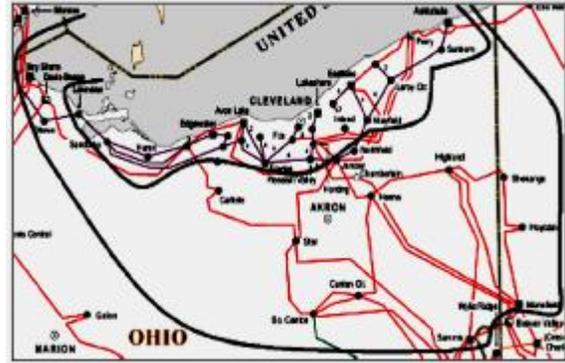


图 7 Cleveland 附近接线图

(外环为慢同调区边界, 内环为孤岛边界)

Fig. 7 One-line diagram of Cleveland and vicinity  
(Out loop indicates boundary of slow coherency, inner loop indicates boundary of island)

再看一下解列后是否会失去稳定。8.14 事故是由 Dale-West Canton 138 kV 向一颗树放电引起线路跳闸而引起的。2 s 后, 引起 Sammis-Star 345 kV 的距离保护第三段因过负荷而跳闸, 随后更多的线路和发电机相继跳闸, 导致大面积停电。图 8 为 Wayne-West Erie 345 kV 线路有功功率变化的情况。由仿真结果及图 8 可见, 如果及时解列, 解列后东部 Wayne-West Erie 345 kV 线路的功率由 700 MW 降到 300 MW 左右, 西部和南部的联络线也大体上相同。即故障不再扩大, 消除了大面积停电。

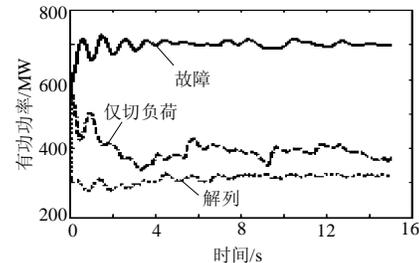


图 8 Wayne-West Erie 345 kV 线路的有功功率变化  
Fig. 8 Change of active power on Wayne-West-Erie 345 kV line

## 4 总结与讨论

(1) 为了在 EMS 与电力市场支持系统或其他平台之间交换数据, 我国早已有了开发和利用数据

平台的经验。国外无疑也有这种需要,所以在2007 IEEE PES年会上组织了有关大型网络模型的专题讨论会。系统愈大,网络模型的建立与维护也愈复杂,文献[1]主要介绍了大型网络模型的管理经验,特别是一个大型联合系统的网络模型如何由几个地区系统网络模型构成的经验,各级调度中心有严格的责任分工以避免出现差错。该文的经验可供我国大区以上电网参考。

(2) 信息安全在我国电力企业受到很大重视。我国电网的运行安全在很大程度上取决于计算机网络安全。如果有黑客进行袭击,将可能对电网安全造成很大损失。为了防止黑客袭击,文献[3]介绍了几种保护信息安全度的方法。这些方法简单易行,可供我国研究信息安全的人员参考。

(3) 电网大面积停电事故往往伴随着系统振荡,包括角度稳定和电压稳定的破坏,消除系统振荡的有效办法是在失稳的同调机组之间及时使系统解列。文献[4]提出了基于慢同调理论和图论的方法把系统分成几个同调机组,并解列成几个孤岛以消除振荡,并保证解列后各孤岛的功率不平衡量最小。文献[7]以北美8.14大停电事故为例应用此法进行了校验,结果证明如果及时在Cleveland系统附近解列,就可以避免事故扩大。文献[5]用求解矩阵特征值的方法从理论上解释了同调机群的物理意义,但缺点是计算速度太慢,在线应用有困难。另一方面,求出的孤岛数往往多于实际的同调集群数。根据经验和大量仿真计算可知,系统动态失稳的绝大多数模式是两机失稳模式,也就是一部分集群基本上按同样速度加速,另一部分集群基本按同样速度减速。在个别情况下可能有一小部分机组间有相互振荡。所以在线应用时可以利用常规暂态稳

定程序中各机组的角加速度来判别同调机组,即

$$\max_{t \in (0, T)} |\Delta d_i(t) - \Delta d_j(t)| \leq \epsilon$$

式中: $\Delta d_i$ 和 $\Delta d_j$ 为机组*i*和*j*的角加速度,即如果机组*i*与机组*j*的角加速度近似相等,则可以认为机组*i*与机组*j*同调;根据经验, $t$ 可取故障断开后第1~2时段。同调机组选定后,可以用最小切块法(minimum cutsets)求最佳解列界面。

## 参考文献

- [1] Britton J. Achieving uniformly accurate and up-to-date models in large interconnected power systems[C]. 2007 IEEE PES General Meeting, Tampa, Florida, USA, 2007.
- [2] Huang G, Lei J. A semantic based software architecture for power market information integration[C]. 2007 IEEE PES General Meeting, Tampa, Florida, USA, 2007.
- [3] Wang L, Mander T, Cheung H, et al. Security operation modes for enhancement of utility computer network cyber-security[C]. 2007 IEEE PES General Meeting, Tampa, Florida, USA, 2007.
- [4] Yang B, Vittal V, Heydt G. A novel slow coherency based graph theoretic islanding strategy[C]. 2007 IEEE PES General Meeting, Tampa, Florida, USA, 2007.
- [5] Wang Xiaoming. Slow coherency grouping based islanding using minimum cutsets and generator coherency index tracing using the continuation method[D]. Iowa: Iowa State University, 2005.
- [6] P. Kundur. 电力系统稳定与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [7] Yang B, Vittal V, Heydt G. Slow coherency based controlled islanding—a demonstration of the approach on the August 14, 2003 blackout scenario[J]. IEEE Trans On Power Systems, 2006, 21(4): 1840-1847.

收稿日期: 2007-12-18。

作者简介:

傅书邈(1924—),男,教授级高级工程师,长期从事EMS和电力市场的工作, E-mail: [fushuti@epri.ac.cn](mailto:fushuti@epri.ac.cn)。

(责任编辑 王金芝)

(上接第21页 continued from page 21)

- [12] 郑超,周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 7-12. Zheng Chao, Zhou Xiaoxin. Small signal dynamic modeling and damping controller designing for VSC based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 7-12(in Chinese).
- [13] Al Jowder F A R, Ooi B T. VSC-HVDC station with SSSC characteristics[J]. IEEE Trans on Power Electronic, 2004, 19(4): 1053-1059.
- [14] 余涛,沈善德,朱守真,等. HVDC及其控制系统动态稳定性的理论分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 40-44. Yu Tao, Shen Shande, Zhu Shouzhen, et al. Analysis of the dynamic stability of HVDC and its control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12): 40-44(in Chinese).
- [15] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:

清华大学出版社, 2002.

- [16] 韩英铎,王仲鸿,陈淮金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [17] 中国电力科学研究院. PSASP6.0用户自定义模型和程序接口用户手册[M]. 北京:中国电力科学研究院, 1999.

收稿日期: 2007-12-25。

作者简介:

宋瑞华(1972—),男,博士研究生,研究方向为电力系统分析、电力电子技术, E-mail: [songrh@epri.ac.cn](mailto:songrh@epri.ac.cn);

周孝信(1940—),男,博士生导师,中国科学院院士, IEEE fellow, 从事电力系统分析的研究工作。

(责任编辑 马晓华)