

电网调度故障恢复操作票的研究

高阳¹, 张东英¹, 高曙¹, 张海春²

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 国家知识产权局专利局, 北京 100088)

摘要: 分析了当前电网开发故障恢复操作票的必要性与紧迫性,并结合在实际电网调度故障恢复操作票系统开发中所遇到的问题,对故障恢复操作票系统和正常操作票系统在研制与实现过程中的区别进行了详细的比较,同时指出了地调故障恢复操作票系统开发中所应当特别注意的难点。最后介绍了一种适合故障恢复操作票使用的基于网络拓扑搜索的新的误操作校验方法-接线分析。

关键词: 电网; 地调; 故障恢复; 操作票

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)15-0071-06

0 引言

电网中发生故障是不可避免的,故障发生后,需要由调度员指挥处理,根据各方面的信息判断故障设备,并迅速采取措施,防止事故扩大,逐步恢复送电。在电网故障恢复处理过程中,需要考虑的问题很多,而留给调度员反应的时间却很少,因此很容易下达错误的操作命令,从而使事故扩大,整个系统遭受不该有的损失。

通过对现场的事故分析^[1]可知,调度员在异常处理和故障恢复处理中出现的失误主要是由以下几方面原因造成的:

- 1) 调度员对现场接线方式不清楚。
- 2) 调度员对系统故障后的运行方式考虑不完全。
- 3) 调度员精神紧张,压力很大,结果在故障处理过程中异常慌乱,延误时间,造成了停电范围的扩大。
- 4) 调度员在故障后下达口令操作时未叙述清楚。

这些都将延误调度员处理系统故障的时间,因此,如果能由计算机自动收集故障信息,判断出故障设备,然后根据当前电网状态,自动生成最优恢复策略,最后为调度员提供可直接执行的调度操作票,将大大减轻调度员负担,使调度自动化水平由目前的分析型上升为智能型。

本文的研究背景是即将投入试运行的“兰州地区电网调度决策支持系统”的故障处理部分。这部分有 4 个功能:

- 1) 电网故障信息系统,主要用于自动收集电网

的故障信息。

- 2) 电网故障诊断系统,主要用于判断故障元件和故障性质。

- 3) 电网故障恢复决策系统,主要用于故障后的隔离、孤岛处理和过载处理,确定可靠且最优的恢复路径。

- 4) 电网故障恢复操作票系统,主要用于将恢复决策结果处理为调度员可直接执行的调度操作票。

本文研究的是地调故障恢复操作票系统,其它内容不在本文讨论范围内。

由于调度部门对正常操作票考核严格,目前国内在操作票方面的研究和应用只限于正常操作,而且存在“两头大,中间小”现象,即网、省调和变电站操作票的研究比较广泛,技术也比较成熟,但地调操作票的研究却不是很深入。

相比之下,国外对正常操作票的研究没有国内活跃,但对故障恢复操作的研究却比较多,但是其一般只牵涉到一次设备的操作^[2],给出的都只是开关、刀闸操作序列。这样的恢复结果具有两个缺点:

- 1) 可读性差

开关、刀闸操作序列只是一次设备的操作,并不符合调度的下令习惯,需要调度员将它转化为调度操作命令。

- 2) 逻辑性差

这些开关、刀闸操作序列之间的逻辑顺序是按照恢复路径的顺序给出的,不符合调度安全操作的规范,需要按照调度规程进行相应的调整。

由于故障恢复处理要求时间越短越好,在处理故障时直接下令,不写操作票,因此本文提出的调度故障恢复操作票必须具备以下两个前提条件:

1) 由计算机自动生成,不用人为干预。

2) 必须具有电网故障信息系统、故障诊断系统和恢复决策系统的支持。

现在第 2 个条件已经具备,采用人工智能技术可以满足第 1 个条件,在这两个前提条件下,研究调度故障恢复操作票才具有实际应用价值。

现在还没有文献对调度故障恢复操作票进行深入的研究,调度故障恢复操作票有哪些系统需求,它与正常操作票有哪些区别,研究中有哪些难点问题还不是很明确。本文将围绕上述问题展开讨论。

1 调度故障恢复操作命令形式的确定

由于故障恢复操作命令以前没有得到足够的研究,其命令形式也不像正常操作命令那样调度有严格的规定,因此需要对故障恢复命令采用哪种形式以及包括哪些相关内容进行明确规定。

调度正常操作命令一般分为逐项令与综合令。兰州调度规程规定:综合命令是指只涉及一个单位的操作,调度员只简明下达操作任务,受令单位逐项填写操作票;逐项命令是指调度员逐项下达操作项目,受令单位按照命令的顺序逐项执行。

除了以上两种操作命令之外,调度规程还规定有一种口头命令,是指在事故处理(包括限负荷),拉合并联补偿电容器开关、调整变压器有载分接开关及消弧线圈分接开关、投退重合闸的单一操作,调度员可不填写操作命令票,以口述下达命令,受令单位按命令执行,双方均做好记录和录音。

因此可知,故障恢复操作票应该属于口头命令,那么将它书面化后就将是故障恢复操作票的形式。

由口头命令的定义可知,故障恢复操作命令与平常操作命令的区别主要在于不写票,其形式也主要是综合令和逐项令,但有些操作要比正常的综合操作命令更具体。根据现场运行的要求以及调度员运行经验的总结现归纳如下:

正常调度操作命令中,逐项令操作主要是指线路的操作;综合令操作是指母线、变压器的停(送)电、开关的代路操作等。而在实际的操作中,一个较为复杂的操作往往是综合令和逐项令的并兼,例如电网的解、合环操作,并解列操作,新投运设备的启动操作。在故障恢复操作命令中,线路操作依然采用逐项令的形式,母线与主变的操作也将采用逐项令的方式进行逐项操作,考虑到开关代路操作的保护压板操作极其复杂,结合现场运行人员的要求,仍然采用综合令的形式。

故障恢复操作票的逐项令将比正常的操作票详细,并且牵涉到倒闸操作,那么是否它可以替代现场倒闸操作票呢?这在实际情况中也有出现,比如某些地方,调度员担心现场值班员操作水平低,逐项令操作票因此越写越细,试图用逐项令操作票代替现场的倒闸操作票,出现了“查某开关在断开位置”、“取下某开关合闸保险”等只有倒闸操作票才会涉及的“常识”操作语句,造成了安全责任的不清晰。实际上逐项令操作票永远不可能代替现场的倒闸操作票,这种部分的代替使现场值班员不动脑筋,可能只将调度令抄下来作为变电站操作票,而不按现场规程填票,结果出现问题^[3]。

必须指出的是,对于逐项令的定义,各个不同地方的调度的规定也有所差别。例如蒙西电网和华北电网对于涉及两个单位以上的操作,都采用逐项操作令(也称为单项命令)的形式,比如线路停(供)电操作;但对于湖南电网来说,其调度规程却规定只要涉及两个以上单位的操作,即使每个单位下达的命令形式属于综合指令,其依然属于逐项操作令。因为我们开发的是供兰州地调使用的操作票系统,考虑到兰州调度现场的操作习惯,以逐项令指的是对开关、刀闸等设备的具体操作为准,并不以受令单位的个数来区分。

因此故障恢复操作命令由如下几部分组成:

1) 一次操作

对于逐项令是指开关、刀闸、接地刀闸和临时接地线的操作,例如:拉开 112 开关。调度命令下达至变电站后,变电站操作票还要将其分解成几步具体操作:

a 退出线路重合闸。

b 拉开 112 开关。

c 检查开关确已拉开。

对于综合令是指母线、变压器、开关的操作。例如:主变由检修转运行。

2) 二次操作

主要包括以下 3 类操作:

a 特殊保护的投退,主要是一些有特殊要求的线路保护、主变的某些保护的投退。

b 重要压板的投退,例如失灵保护压板和主变特殊保护压板的投退。

c 重要的自动装置的投退,例如 BZT 的投退。而变电站操作票包含所有的保护、压板、自动装置。

3) 注意事项

一些需要现场操作人员特别关注的注意事项,如:若无影响主变差动回路的工作,差动保护不得退出。

综上所述,地调故障恢复操作票将采用如下格式,即一张故障恢复操作票对应一个恢复决策结果,它包含多个受令单位,其中对于每个单位来说有多条需要逐项执行的命令,命令的内容根据具体操作任务的不同,可以是综合指令,也可以是逐项(具体)的指令。

调度故障恢复操作票的输出样票如表 1 所示。

表 1 故障恢复操作票

Tab 1 Operation order for after-fault recovery

操作任务:

第 _____ 号 令

_____ 年 月 日

顺 序	受令单位	受令人	下令时间	交令人	回令时间
1	操作步骤				
	1				
	2				
	3				
	4				
	...				
	注意事项				
.....					
签字	主值	副值	发令电话		

2 故障恢复操作票与正常操作票的不同

2.1 操作任务种类的不同

根据操作对象不同,正常调度操作票主要包括四种操作:

- 1) 母线操作。
- 2) 主变操作。
- 3) 线路操作。
- 4) 设备的直接操作。

操作一般指的是“四态”之间的转换。

故障恢复操作票包括的范围比正常操作票要小,包括:

- 1) 线路的停(供)电。
- 2) 母线的停(供)电。
- 3) 变压器的停(供)电。
- 4) 开关的操作。

停(供)电主要是指目标状态是冷备用或者运行的操作。可能的话也包括热备用状态,但是一般不涉及到检修的状态。

对设备的直接操作只涉及开关的操作,不像正常的操作涉及到 PT 等设备。

2.2 操作票规则库的不同

由于故障恢复操作票采用逐项操作的命令形式,所以其命令之间就需要有一定的逻辑关系,并且需要具体涉及到开关和刀闸的操作。这与正常调度操作票在这类操作时只给一个综合命令以及无顺序关系的注意事项是不同的。

因此在建立规则库的时候,需要比正常操作票增加一些规则。例如线路供电或者停电时,在正常操作票中,将线路的接地刀闸的操作写在注意事项里,即正常操作时只强调此项操作的必要性,并不需要特别强调其操作的顺序,其操作的先后顺序由变电站运行人员开票时确定。但是在故障处理时,因为时间紧迫,直接将接地刀闸的操作命令下达给现场人员,必须保证调度命令按顺序执行,所以接地刀闸的操作规则应表达其操作的前后位置。

2.3 操作任务生成机制的不同

对于正常的操作票系统,不管是自动开票还是点图开票,一般都是由用户选择执行的操作任务,操作任务对于操作票软件来说是已知的。

但故障恢复操作票是在系统故障的情况下,分析故障恢复决策系统输出的恢复决策方案(为一系列开关操作序列),自动地将其分解为具体的操作任务。

因此需要故障恢复操作票系统能够自动识别出操作任务。

2.4 操作票系统的界面的要求不同

对于正常的操作票系统,一般是由用户指定操作任务,然后系统自动开票,因此需要功能强大而友好的界面,可能的话还配有图形开票的界面。

而故障恢复操作票不需人机界面指定操作任务,而是根据故障恢复决策方案自动识别出操作任务。因此只需要操作票显示界面,进行操作票的查阅、修改、检索和打印。另外还需要系统维护界面,进行数据库的更新。由于故障恢复的规则隐含在推理程序中,数据库的内容与正常操作票的数据库内容一致。因此,故障恢复操作票的界面要比正常操作票的简单。

2.5 操作票推理机制的不同

对于正常操作票软件系统,不论其具体实现方式怎样,其操作票生成的推理模式都是一定的。

调度员根据系统运行的要求选择相应的操作任务,系统校验现在状态是否满足开票要求,对目标态进行潮流计算,校验其安全性,出票。

简化为:从系统运行需要出发,指定操作任务,

再判断系统现在的运行状态能否满足操作票的要求,最后生成操作票,属于逆推理方式。

对于故障恢复操作票系统,操作票生成的推理模式是:系统发生故障 故障诊断系统诊断出故障类型 故障恢复决策系统判断出停电区域,生成恢复方案 操作票系统分解出操作任务 根据系统当前状态 出票。

简化为:从系统现在的运行状态出发,根据恢复方案,生成需要执行的操作票,属于正推理方式。

2.6 操作票安全计算的不同

对于一个完整的正常调度操作票系统来说,应该具有分析计算解、合环点的负荷潮流能力,自动判断能否开票的功能。但现今开发的许多操作票系统却并不具备这一功能,开出的操作票具有一定的安全隐患。

而故障恢复系统中的安全分析已经在故障恢复决策系统里进行了计算分析,算出了最优的恢复决策结果,所以其所开操作票的安全性是可以保证的。

2.7 操作票初始系统状态的不同

在正常的操作票中,操作任务一般是从一个初始状态到一个目的状态,系统初始状态和目的状态一般都是系统的正常运行状态,即四态“运行、热备、冷备、检修”。

对于故障恢复操作票来说,是在系统故障或异常的情况下,直接从系统的初始状态出发来进行开票的,也就是说设备的初始状态可能不是常规的“四态”。而这种初始状态在正常开票系统的安全校验中是无法通过的,也将无法开出正确的操作票。

2.8 处理设备异常情况的不同

故障恢复操作票是针对故障情况下所进行的操作,可以在一些设备异常的情况下进行操作,例如在开关类设备异常(拒合或拒分)的情况下,可以处理这些情况。其采用的是接线分析、进行等电位判断来进行安全校验,摆脱了“五防校验”规则的束缚。

而正常的操作票由于“五防校验”的缺陷,一般不能开出异常票。

3 研制地调故障恢复操作票的难度

由于电网调度命令涉及的运行状态和组件逻辑关系比具有严格逻辑关系的变电站倒闸操作要复杂得多,因此其难度要超过变电站操作票;对于地调操作来说,其操作元件的范围要比网、省调操作广泛,起到了“承上启下”的作用,其难度要超过网、省调操作;而在地调操作中故障恢复操作又比正常操作

在复杂性与难度上都增加。其特征主要表现在如下九点:

1) 正常操作票系统是由用户指定操作任务,而故障恢复操作票系统得到的是恢复决策给出的一系列开关操作序列,需要将它自动处理成针对各个受令单位的操作任务。

对于开关序列的任务自动分解,目前还没有进行过相关的研究,将是一个新的研究方向。

同时,恢复决策给出的开关操作顺序并不符合调度规程的要求,需要将它按照一定的规则重新组合起来,例如按照停电从负荷侧停起的规则。

2) 每一项调度操作经常涉及到不止一个变电站,例如对输电线路的停电和送电,就至少会涉及到两个与其连接的变电站的操作。而在故障恢复操作时,调度操作涉及的范围更广,涉及的变电站将不止两个,各个变电站的操作之间都需要有严格的逻辑关系。

3) 在调度操作中,变电站的元件的状态不是按分、合两种状态定义,而必须按照检修、冷备用、热备用、运行等 4 种状态定义。在故障恢复操作中涉及到的已经不止这 4 种状态,可能是另外的异常状态或者故障状态。

4) 在调度操作中,线路以及变电站的每一个元件状态的定义通常都与其自身以及多个相关的元件有关,必须考虑多重的逻辑关系。而故障操作票考虑的元件的范围更广,达到开关、刀闸的层次。

5) 调度命令操作规程一般由区域(或省)有关电力部门根据“五防”的要求自行制订,由于正常电网调度操作不直接涉及设备本身的实际切换操作,因而规程中许多条件并不是强制性的,不同于变电站中开关、刀闸的倒闸操作具有严格的逻辑关系与操作顺序^[4]。而故障恢复操作既要按照调度规程来进行校验,还要涉及到开关、刀闸倒闸操作逻辑顺序以及一次设备与二次保护、自动装置之间的顺序,其难度更大。

6) 地区电网的特点是“T”、“”接线比较多,拓扑结构复杂且运行方式多变,故障后的运行方式更带有很大的不确定性,给故障恢复操作系统的研制与开发带来了很大的难度^[4]。这个问题在网、省调操作中还不明显,但在地调操作票是一个需要着重考虑的难点。

7) 变电站操作票只限于本站操作,其设备、网络拓扑等都是单一的,而网、省调操作任务,只限于主变高压侧开关以上,不牵涉到主变操作,同时因为

高压侧线路稀少,其网络拓扑描述也相对比较简单,相应的二次操作也只包括线路保护。相比之下地调操作元件的范围要广的多,涵盖了主变及大多数线路的操作,同时还需要进行一些电源合环、设备归属等判断,二次的操作也比较多,涉及到压板,如失灵保护压板。

8) 变电站操作一般是单一操作任务,网、省调操作牵涉到两项的复合操作任务,而地调操作票牵涉的已经不止两个复合任务,例如:主变、母线、出线停电。

9) 通用性与可维护性是至今操作票系统尚未解决的问题,因此如何提高系统的通用性和用户可维护性,以及如何解决二次设备操作各地习惯不一带来的知识表示问题,是一个需要深入探讨的问题。对于调度操作来说,因为其牵涉的变电站众多,变电站的接线方式和运行方式也差别比较大,这个问题更是迫切需要解决。

4 新的误操作校验方法的实现

对于以往操作票的一次操作校验,一般采用的是“五防规则”来进行误操作校验,这种校验需要将设备操作的规则放在逻辑规则库里,这个规则库数据庞大、维护量大且极为不方便,很容易造成规则输入的纰漏,在这种情况下,因为是直接采用逻辑公式进行操作校验的,那么对于某些合理地异常操作也将不能进行下去,同时对于某些不能用逻辑表示的误操作,也不能启动。

在电力系统发生故障后,电网变为非正常运行方式,现场可能需要进行一些合理的异常的操作,而如果采用一般的误操作校验,这种操作票可能将无法生成,因而这种校验方式也就无法满足故障恢复操作票系统的要求。

因此需要增加基于拓扑搜索的误操作判断,从接线分析结果出发,进行等电位和系统带电判断,相当于一个最高优先级的判断,可以合理地防止误操作,同时也可以实现异常操作。

1) 开关操作条件

开关的“分”操作没有条件限制。

开关的“合”操作:

a 开关两端所属的子系统都没有电源,可以合。

b 如果开关两端所属的子系统有电源,且子系统中没有接地点,可以合。如果有接地点,且接地元件是接地刀闸,增加接地刀闸的操作任务,写入研究

态,再进行开关的判断操作。

2) 刀闸操作条件

刀闸分闸时,刀闸两端属于同一节点,为等电位状态,可以分或合。

刀闸不是等电位状态,且两端都是无源系统,可以分或合。

刀闸不是等电位状态,一端有源,一端无源,可以分。

刀闸不是等电位状态,一端有源,一端无源,且无源子系统中没有接地点,可以合。如果无源子系统中没有接地点,为带地刀或地线合闸,不能操作,增加接地刀闸操作任务。

刀闸不是等电位状态,两端都是有源系统,为带负荷拉合刀闸,不能操作,查询刀闸连接的开关设备,按一定的优先级进行开关的操作。

3) 接地刀闸操作校验

接地刀闸所在系统无源,可以合。至于接地刀闸的类型,误操作校验不作要求,可以是线路接地刀闸,也可以是开关的接地刀闸。

4) 举例

例如:如图 1 所示,对于主接线为双母线带旁路母线的变电站,出线 LK 开关正常运行在母线 I 上,出线开关 LK 拒分的情况,此时一般的操作原则是采用旁路开关旁代出线开关供电。

第一步:通过旁路开关 PK,用母线 给旁母充电。供电路径为:母线 I—刀闸 PBS1—开关 PK—刀闸 PBSP—旁路母线 P。

第二步:合上旁路刀闸 PLS,给出线供电。此时对于旁路刀闸 PLS 来说,其两端形成了一个环网,所以其两端的节点号是相等的,可以合闸,属于“等电位”的“合”操作。

第三步:拉开拒分开关的出线侧刀闸 LLS。此时对于出线侧刀闸 LLS 来说,其两端也形成了一个环网,所以其两端的节点号同样也是相等的,可以分闸,属于“等电位”的“分”操作。

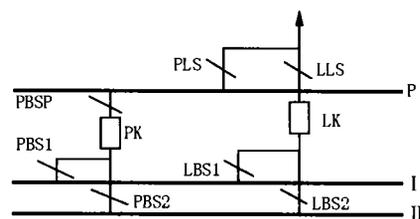


图 1 双母带旁路接线

Fig 1 Connection of double busbar with bypass circuit

第四步:再拉开母线侧刀闸 LBS,以隔离故障的出线开关 LK。此时母线侧刀闸 LBS1 的操作属于“一端有源,一端无源”的分操作,可以操作。

5 结论

本文的研究成果已经应用到“兰州地区电网决策支持系统”中故障恢复操作票系统的开发中,并将很快投入在线运行。该项目属于国家电网公司科技项目,是现代信息技术、通信技术、智能技术、电力系统计算分析技术等众多学科的综合协调应用,具备实用的调度自动化高层应用软件、完整的变电站保护信息的上传分析、标准的信息交换规约和良好的现场自动化基础等条件。

虽然本文所涉及的调度操作主要是指地调操作,但对于网、省调来说,无论是其操作元件涉及的范围(网、省调一次设备不包括主变,仅 220 kV 及以上线路,二次设备也主要指高压线路的保护和自动装置),还是操作任务的详细程度(网、省调主要是综合令)都要比地调简单,所以同样也是适用的。

如果需要应用于网、省调操作的话需要做如下改进:

- 1) 不用考虑主变操作。
- 2) 线路的二次操作将牵涉到高频、零序等多种保护,需要按照线路保护的配置定义不同的模板,生成操作任务时根据不同的线路,套用不同种类的模板,从而生成不同的保护操作。
- 3) 220 kV、330 kV 的一个半断路器接线形式增多,需要考虑更多种情况。
- 4) 一些向省调借用开关和向省调申请合环的常用操作将不用考虑。
- 5) 将会涉及到系统的并、解列操作,需要添加相应的操作规则。

参考文献:

- [1] 国家电力调度通信中心. 全国网省调度局(所)电网责任事故分析[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
State Electric Power Dispatching & Communication Center The Analysis of Accident Happened in Electric Power Network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 任建文. 操作票自动生成系统的通用化与实用化研究(博士学位论文)[D]. 保定:华北电力大学,1996.
REN Jian-wen A Study on University and Practicability of the Operating-orders-sheet Automatically Generated System, Doctoral Dissertation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 1996.
- [3] 刘志刚. 湖南电网调度指令操作票改革的设想[J]. 湖南电力,1998,(5):42-45.
L U Zhi-gang Thoughts on Reform of Dispatching Order Operating Ticket System in Hunan Power Grid[J]. Hunan Electric Power, 1998, (5): 42-45.
- [4] 靳希,管相忠,张磊,等. 华东电网智能调度命令操作票系统软件的研制[J]. 上海电力学院学报,2001,17(3):30-32.
J N Xi, GUAN Xiang-zhong, ZHANG Lei, et al Research and Development of an Intelligent Software for Dispatching Order Operating Ticket System [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2001, 17(3): 30-32.

收稿日期: 2004-11-15; 修回日期: 2005-01-19

作者简介:

高阳(1981-),男,硕士研究生,研究方向为人工智能在电力系统中的应用;E-mail: datum3000@163.com

张东英(1971-),女,副教授,研究方向为电力系统分析与控制;

高曙(1938-),女,教授,博士生导师,研究方向为人工智能在电力系统中的应用。

Research and development of operation order in the restoration of electric power network fault diagnosis

GAO Yang¹, ZHANG Dong-ying¹, GAO Shu¹, ZHANG Hai-chun²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Intellectual Property Office of P. R. China, Beijing 100088, China)

Abstract: It is necessary and urgent to develop a system for generating operation order tickets automatically in the restoration of power system fault diagnosis. This paper compares operation order of normal condition with that of fault condition. It also points out the difficulty that should especially pay attention. At last, it brings forward a new method to verify the correctness of operation based on network topology searching.

Key words: power system; local dispatching; fault restoration; operation order