

# 市场环境下后备保护配置方法的选择

谭伦农,张保会,刘海涛

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 在电力市场环境下,电网公司、发电公司和供电公司均转变为相互独立的经济实体,网络结构、运行潮流、违约赔偿价格、辅助服务价格、保护装置及断路器组的投资等等因素均将对后备保护方式的确定产生影响。文中对后备保护动作时相应公司所须承担的经济责任进行分析,对适合于市场环境的后备保护方式确定数学模型进行了初步的探讨。

**关键词:** 继电保护; 后备保护; 电力市场

**中图分类号:** TM772      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2003)07-0012-04

## 1 引言

继电保护是电力系统必不可少的组成部分,对保证系统安全运行、保证电能质量、防止故障的扩大和事故的发生都有着极其重要的作用。后备保护是主保护或断路器拒动时用以切除故障的保护。后备保护可分为远后备和近后备两种方式<sup>[1]</sup>。任何电力设备(电力线路、母线、变压器等)都不允许无保护运行。运行中的电力设备,一般应有分别作用于不同断路器,且整定值有规定的灵敏系数的两套独立的保护装置作为主保护和后备保护,以确保电力设备的安全。在传统电力系统中,后备保护的配置方式一般由相关规程确定。如:3~110 kV 电网继电保护一般采用远后备原则,即在临近故障点的断路器处装设的继电保护或该断路器本身拒动时,能由电源侧上一级断路器处的继电保护动作切除故障<sup>[2]</sup>;对于220 kV及以上电力系统的线路继电保护,一般采用近后备保护方式,即当故障元件的一套继电保护装置拒动时,由相互独立的另一套继电保护装置动作切除故障;而当断路器拒动时,起动断路器失灵保护,断开与故障元件所接入母线相连的所有其他连接电源的断路器。有条件时可采用远后备保护方式,即故障元件所对应的继电保护装置或断路器拒绝动作时,由电源侧最临近故障元件的上一级继电保护装置动作切除故障<sup>[3]</sup>。从上述相关规定可以看出,在传统电力系统中,继电保护的配置立足于整个电力系统的安全运行,换言之,电力系统是被作为一个整体来进行统一利益考虑的。而在电力市场环境下,作为独立的经济实体,电网公司、发电公司和供电公司在确定后备保护的配置时,其自身经济利益必将成为首要关注指标。针对这一变化,本文提出,

在电力市场环境下,经济性指标将成为后备保护配置方式确定的重要因素之一。

## 2 后备保护动作时相应公司所须承担的经济成本

在电力市场环境下,由于系统中的设备分属不同的、相互独立的公司,因此,故障设备和其相邻设备(即后备保护可能切除的设备)有可能分属不同的公司。基于后备保护是主保护的一种备份,由其动作而产生的成本仍应由主保护所属公司(即故障设备所属公司)承担的原则,并假定后备保护失灵或拒动概率为零,本文以下将针对故障设备和其相邻设备属于同一公司和不属于同一公司两种情况进行分析。

### 2.1 故障设备和其相邻设备属于同一公司

#### 2.1.1 电网公司所属设备发生故障

由于任一运行设备的切除都有可能对某些发电公司、供电公司的售、购电产生影响,并且可能导致电网公司不得不对某些辅助服务的重新调度,如:增(减)备用机组发电量、重新调度无功电源以维持合理的电压水平等等。因此,该经济成本可以表示为:

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i \in G} (k_{1it} - 1t) P_{1it} + \sum_{j \in L} (k_{2jt} + 2t) P_{2jt} + k_{3t} P_{3t} + F_t \right\} t_t \quad (1)$$

式中: $F_1$ 表示电网公司所应承担的由于后备保护动作导致相邻设备切除而产生的经济损失; $T$ 表示在一个交易周期内后备保护动作所影响的时段数; $G$ 、 $L$ 分别表示发电公司、供电公司的集合; $k_{1it}$ 表示 $t$ 时段电网公司因不履行购电合同而向发电公司 $i$ 所支付的赔偿价格(元/MW·h); $1_t$ 表示 $t$ 时段电网公

公司的购电价格;  $P_{1it}$ 表示电网公司向第  $i$  个发电公司购电量的减少值;  $k_{2jt}$ 表示  $t$  时段电网公司因不履行售电合同而向供电公司  $j$  所支付的赔偿价格( /MW ·h);  $2_t$ 表示  $t$  时段电网公司的售电价格;  $P_{2jt}$ 表示电网公司向第  $j$  个供电公司售电量的减少值;  $k_{3t}$ 表示  $t$  时段备用容量的电量成本( /MW ·h);

$P_{3t}$ 表示第  $t$  时段电网公司所调用备用容量的电量变化量;  $F_t$ 表示  $t$  时段由于后备保护动作而导致的其他辅助服务调用成本变化量;  $t_t$ 表示  $t$  时段的长度。

### 2.1.2 发电公司所属设备发生故障

若售电价格为其成本电价,则发电公司所应承担的经济损失包括因其向电网公司及双边交易用户售电量减少而导致的赔款,可表示为:

$$F_2 = \sum_{t=1}^T [k_{4t} P_{4t} + \sum_{l \in L} k_{5lt} P_{5lt}] t_t \quad (2)$$

式中:  $F_2$  表示故障所属发电公司所需承担的由于后备保护动作导致相邻设备切除而产生的经济损失;  $k_{4t}$ 表示  $t$  时段该发电公司因不履行售电合同而向电网公司所支付的赔偿价格( /MW ·h);  $P_{4t}$ 表示  $t$  时段该发电公司对电网公司售电量的减少值;  $L$  表示与该发电公司进行双边交易的电力用户的集合;  $k_{5lt}$ 表示  $t$  时段该发电公司因不履行售电合同而向双边交易用户  $l$  所支付的赔偿价格( /MW ·h);

$P_{5lt}$ 表示  $t$  时段该发电公司对双边交易用户  $l$  售电量的减少值。

### 2.1.3 供电公司所属设备发生故障

供电公司所属设备的故障及其后备保护的动作为可能影响到该供电公司向电网公司的购电量、向相关双边交易发电公司的购电量及其向相关电力用户的售电量。因此,当对电力用户的售电价格为其成本电价时,供电公司所应承担的经济损失可表示为:

$$F_3 = \sum_{t=1}^T [k_{6t} P_{6t} + \sum_{m \in G} k_{7mt} P_{7mt} + \sum_{n=1}^N k_{8nt} P_{8nt}] t_t \quad (3)$$

式中:  $F_3$ 表示故障所属供电公司所需承担的由于后备保护动作导致相邻设备切除而产生的经济损失;  $k_{6t}$ 表示  $t$  时段该供电公司因不履行购电合同而向电网公司所支付的赔偿价格( /MW ·h);  $P_{6t}$ 表示  $t$  时段该供电公司对电网公司购电量的减少值;  $G$  表示与该供电公司进行双边交易的发电公司的集合;  $k_{7mt}$ 表示  $t$  时段该供电公司因不履行购电合同而向

双边交易公司  $m$  所支付的赔偿价格( /MW ·h);

$P_{7mt}$ 表示  $t$  时段该供电公司对双边交易发电公司  $m$  购电量的减少值;  $N$  表示该供电公司按违约赔偿价格的不同而对其电力用户所进行的分类数;  $k_{8nt}$ 表示  $t$  时段该供电公司因不履行供电合同而须向其第  $n$  类用户支付的赔偿价格( /MW ·h);  $P_{8nt}$ 表示  $t$  时段该供电公司向其第  $n$  类用户供电量的减少值。

### 2.2 故障设备和其相邻设备不完全属于同一公司

在这种情况下,当后备保护动作时,甲公司设备的故障将导致乙公司切除设备,如果该设备只影响到乙公司与甲公司的交易,则仅需按照签署交易合同时所签署的违约赔偿执行即可;但如果还影响到乙公司与丙公司的交易,那么这一损失理应由甲公司承担。但这一损失到底是多大呢?由于乙、丙两公司之间的交易与甲公司无关,对甲公司而言,这一损失是未知数,甲公司无法控制这一赔偿的成本,因此,甲公司必须事先(在确定其采用何种后备保护方式之前)与乙公司就这一赔偿签订合同,以使这一赔偿成本为甲公司所能接受,否则,甲公司可能采用其他的后备保护方式以确保其自身利益。以下分析假设这一赔偿成本为边际成本,即认为甲公司所进行的赔偿等于乙公司的实际损失。

#### 2.2.1 电网公司所属设备发生故障,相邻设备包括发电公司设备

与 2.1.1 相比,此时电网公司除了因不能履行购、售电合同而对相应发电公司、供电公司进行违约赔偿、为相应的辅助服务重新调度进行支付以外,还应应对由于其后备保护将相邻发电公司设备切除,而使该发电公司不能履行其与相应双边交易电力用户所签合同带来的经济损失进行赔偿。因此,此种情况下电网公司所应承担的经济损失可表示为:

$$F_4 = F_1 + \sum_{t=1}^T [k_{5lt} P_{5lt}] t_t \quad (4)$$

式中:  $F_4$ 表示电网公司所应承担经济损失。

#### 2.2.2 电网公司所属设备发生故障,相邻设备包括供电公司设备

与 2.1.1 相比,此时电网公司除了因不能履行购、售电合同而对相应发电公司、供电公司进行违约赔偿、为相应的辅助服务重新调度进行支付以外,还应应对由于其后备保护将相邻供电公司设备切除,而使该供电公司不能履行其与相应双边交易发电公司所签署的购电合同、与相应电力用户所签署的供电合同带来的经济损失进行赔偿。因此,此种情况下电网公司所应承担的经济损失可表示为:

$$F_5 = F_1 + \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{m \in G} k_{7mt} P_{7mt} + \sum_{n=1}^N k_{8nt} P_{8nt} \right] t_t \quad (5)$$

式中： $F_5$ 表示电网公司所应承担经济损失。

### 2.2.3 发电公司所属设备发生故障,相邻设备包括电网公司设备

与2.1.2相比,此时故障设备所属发电公司除了因其向电网公司及双边交易用户售电量减少而导致的赔款以外,还应对由于其后备保护将电网公司设备切除,从而导致电网公司对其他发电公司及供电公司购、供电的变化,导致电网公司辅助服务费用的变化承担责任。故障设备所属发电公司须承担的经济损失可表示为:

$$F_6 = F_1 + F_2 \quad (6)$$

式中： $F_6$ 表示故障设备所属发电公司所应承担经济损失； $F_1$ 与 $F_1$ 形式相同,但不包括电网公司向故障设备所属发电公司的赔偿。

### 2.2.4 供电公司所属设备发生故障,相邻设备包括电网公司设备

与2.1.3相比,此时故障设备所属供电公司除了因其向电网公司及双边交易发电公司购电量减少、向相应电力用户供电量的减少而导致的赔款以外,还应对由于其后备保护将电网公司设备切除,从而导致电网公司对其他供电公司及发电公司供、购电的变化,导致电网公司辅助服务费用的变化承担责任。故障设备所属供电公司须承担的经济损失可表示为:

$$F_7 = F_1 + F_3 \quad (7)$$

式中： $F_7$ 表示故障设备所属供电公司所应承担经济损失； $F_1$ 与 $F_1$ 形式相同,但不包括电网公司向故障设备所属供电公司的赔偿。

## 3 市场环境下几种可能后备保护配置方式的经济性分析

在市场环境下,任何一项投资都是根据其预期的投资回报而确定的。因此,市场环境下后备保护配置方式的确定应在对各种技术上可行的后备保护配置方式的投资与收益进行详细分析的基础上进行。

### 3.1 几种可能的后备保护配置方式

后备保护的作用是在主保护拒动时切除故障设备,尽可能地降低故障所带来的损失。根据后备保护的这一作用,有如下几种可能的后备保护方式可供选择:(1)远后备保护方式;(2)将阶段式保护中的

后备段,例如第 $n$ 段,改变方向对背后相邻线故障起后备作用<sup>[4]</sup>;(3)配置两套全线速动保护加断路器失灵保护;(4)配置两套全线速动保护并串联两组断路器。在上述四种可能的方案中,除方案一为远后备保护方式外,其余均为近后备保护方式,但方案二中后备保护的动作为切除相邻线路,而方案四则立足于只切除故障设备,采用方案三时,若不出现断路器拒动的情况,则只切除故障设备,但当断路器拒动时切除相邻线路。与近后备保护方式相比,远后备保护因其与主保护不在同一变电所,其继电保护装置、断路器及直流操作电源等均与主保护分离,因此,其动作的可靠性要较近后备保护为高;但当相邻线带有分支线时,远后备保护的动作为导致分支线的停电,从而导致更大的停电损失。近后备保护由于和主保护处于同一变电所内,当变电所的直流操作电源故障时,其将不能起到后备作用;但当其相邻线带有分支线时,近后备保护的动作为不会导致分支线的停电。可见,不论采用何种后备保护方式,相应公司都须为后备保护承担一定的经济成本,只是该成本在不同后备保护配置方式下表现为不同的形式。

### 3.2 不同后备保护配置方式的经济性分析

除了考虑切除相邻设备而导致的经济成本外,各种后备保护配置方式投资成本的比较也是经济性分析所必须考虑的内容。

#### 3.2.1 方案一的经济性分析

方案一为远后备保护方式,与其他各种配置方式相比较,该方案没有额外的投资发生,因此,采用该方案的经济成本仅为后备保护动作切除相邻设备而导致的经济损失,可根据式(1)~(7)之一求取,具体视故障设备及相邻设备所属公司而定,表示为:

$$f_1 = \{ F_1, F_2, \dots, F_7 \} \quad (8)$$

式中： $f_1$ 表示方案一的经济成本； $\{ F_1, F_2, \dots, F_7 \}$ 表示在 $F_1, F_2, \dots, F_7$ 中取一。

#### 3.2.2 方案二的经济性分析

方案二也没有额外的投资发生,与方案一不同,由于属于近后备保护方式,此时后备保护动作而导致的经济损失可根据式(1)~(3)之一求取。

与远后备保护相比,近后备保护由于与主保护在同一变电所内,因此,本变电所直流操作电源的故障将会导致后备保护作用的丧失,从而使得故障无法被合理切除,甚至有可能导致系统安全稳定的破坏。可见,由可能的直流操作电源故障所导致的损失是所有类型近后备保护所必须支付的成本,该成

本与电网结构、潮流分布、赔偿价格等诸多因素相关。因此,由于后备保护不动作所导致的损失可表示为:

$$F_8 = p(p_1 F_{81} + p_2 F_{82} + \dots + p_n F_{8n}) \quad (9)$$

式中:  $F_8$ 表示后备保护不动作所导致的损失;  $p$ 表示本变电所直流操作电源故障的概率;  $p_n$ 表示系统处于第  $n$  种运行状态的概率;  $F_{8n}$ 表示处于第  $n$  种运行状态下,后备保护不动作所导致的损失。

因此,方案二的经济成本为上述两部分损失之和,即为切除相邻设备而导致的经济损失与后备保护不动作所导致的损失之和,可表示为:

$$f_2 = F_8 + (1 - p)\{F_1, F_2, F_3\} \quad (10)$$

式中:  $f_2$ 表示方案二的经济成本。

### 3.2.3 方案三的经济性分析

与方案二相比,本方案需另外增设一套继电保护装置,其投资可按下式计入本方案的经济成本中:

$$F_9 = [(1 + \lambda) C_1] / M \quad (11)$$

式中:  $F_9$ 表示后备保护装置每一次动作所需分摊的继电器投资成本;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为继电保护装置的折旧维修率和投资回收率;  $C_1$ 表示后备保护装置的总投资;  $M$ 表示后备保护装置每年可能的动作次数,由所保护设备的故障概率及主保护的動作可靠性决定。

断路器拒动时,断路器失灵保护将切除相邻设备以确保故障的隔离。方案三的经济成本为后备保护投资分摊成本、直流操作电源故障导致的成本(发生频率为  $p$ )、断路器失灵保护动作导致的成本(发生概率为  $p$ )及后备保护正常动作导致的成本(发生概率为  $1 - p - p$ )之和,可表示为:

$$f_3 = (1 + M) F_9 + F_8 + p\{F_1, F_2, \dots, F_7\} + (1 - p - p)\{F_1, F_2, F_3\} \quad (12)$$

式中:  $f_3$ 表示方案三的经济成本;  $M = (MT) / 8760$ ,表示一个交易周期内后备保护装置动作的期望值,其中,  $T$ 为一个交易周期的小时数。

由于本文所探讨的是在后备保护已经动作一次的前提下相应公司所须承担的成本,因此,考虑一个交易周期内后备保护可能再次动作的次数  $M$ 后,后备保护可能的动作总次数为  $(1 + M)$ 。

### 3.2.4 方案四的经济性分析

与方案三相比,此时增加了一组断路器,从而增加应分摊的断路器投资为:

$$F_{11} = [(2 + \lambda) C_2] / M \quad (13)$$

式中:  $F_{11}$ 表示后备保护装置每一次动作所需分摊的断路器投资成本;  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 分别为断路器组的折旧维修率和投资回收率;  $C_2$ 表示后备断路器组的总投资。

方案四的经济成本为后备保护投资分摊成本、后备断路器投资分摊成本、直流操作电源故障导致的成本(发生概率为  $p$ )及后备保护正常动作导致的成本(发生概率为  $1 - p$ )之和,可表示为:

$$f_4 = (1 + M) F_9 + F_8 + (1 + M) F_{11} + (1 - p)\{F_1, F_2, F_3\} \quad (14)$$

式中,  $f_4$ 表示方案四的经济成本。

## 4 市场环境下后备保护方式的确定

后备保护方式的确定首先要保证技术上可行,在此基础上,采用何种后备保护方式则由经济因素决定。例如,如果技术上采用任何一种后备保护方式均可行,后备保护方式由下式确定:

$$\text{Min}\{f_1, f_2, f_3, f_4\} \quad (15)$$

而当技术上只允许采用近后备保护方式时,后备保护方式由下式确定:

$$\text{Min}\{f_2, f_3, f_4\} \quad (16)$$

网络结构、运行潮流、违约赔偿价格、辅助服务价格、保护装置及断路器组的投资等等因素均将对市场环境下后备保护方式的确定产生影响。例如,当分支线负荷较大、或负荷较为重要(即违约赔偿较高)时,可能采用近后备保护方式更为合适;而当相邻设备较多或较重要时,采用方案四可能会较为有利一些;如果相邻设备包含其他公司的设备,在经济指标相差不大的情况下,可能方案三、四要较方案二更乐于为相关公司所采纳,因为方案二涉及对其他公司赔偿问题的概率较大,而赔偿价格的确定不能完全为本公司所掌控等。

## 5 结论

与传统电力系统相比,经济因素将在市场环境下的后备保护配置的确定中占据更为重要的地位。各公司在确定其所属设备的后备保护配置时将会对各种可能的后备保护配置进行综合的经济比较,根据经济分析结果而不是相关的保护配置规程来作出最终的选择。在后备保护配置选择中经济地位的提高并不意味着整个电力系统的安全性将被削弱,正如文中所探讨的,任一公司在(下转第72页)

主站尚待建设,大江电厂现微机稳定装置还需继电保护人员按华中网调的命令对控制策略表进行切换,以满足不同运行方式下对大江电厂稳定措施的不同要求。

(2) 大江电厂第三代微机交直流稳定装置设计有对葛—南、龙—政直流系统的直流相互调制功能(可依靠三峡电力系统光纤数据通讯网实现),但由于葛—南直流系统未进行过有关直流调制试验,故该装置的相关功能也未投入。随着龙—政直流系统、三峡左岸电厂的相继投产,葛—南直流与龙—政直流系统相互调制功能的投入日显重要,因该功能

的投入,在葛—南直流系统发生极关闭时,可大大减少大江电厂切机的机率或切机台数。当切除大江电厂机组台数较多时,若不联锁切除三峡电厂的机组或减负荷,则可能造成葛洲坝枢纽漫坝。

收稿日期: 2002-11-13; 修回日期: 2003-03-16

作者简介:

艾友忠(1959-),男,博士研究生,葛洲坝水力发电厂总工程师,长期从事技术管理工作;

郑学军(1964-),男,本科,葛洲坝水力发电厂高级工程师,从事继电保护检修等技术管理工作。

### Run and improvement of stability control equipment for Gezhouba hydraulic power plant

AI You-zhong<sup>1</sup>, ZHENG Xue-jun<sup>2</sup>

(1. Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. Gezhouba Hydraulic Power Plant, Yichang 443002, China)

**Abstract:** This paper simply introduces structures, functions, run conditions, improvement process and existent problems of stability control equipments in Gezhouba power plant. Some abnormalities of the stability control equipment during faults of GeNan direct current system are analyzed in detail. At last, improvement methods are introduced.

**Key words:** Gezhouba; hydroelectric power plant; stability control equipment

(上接第 15 页) 追求自身经济利益的同时不得损害他人的利益,否则,本公司将会为其他公司的损失承担责任。因此,市场环境下的电力系统是通过各个独立的公司对自身利益的追求及对他人利益损害的赔偿而联为体的,利益的联系使得由各个独立公司所组成电力系统的运行安全可靠得到保障。

参考文献:

- [1] GB14285-93,继电保护和安全自动装置技术规程[S].  
[2] 水利电力部. DL/T 584-1995, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京:水利电力出版社,1995.

- [3] 水利电力部. DL/T 559-94, 220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京:水利电力出版社,1994.  
[4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:水利电力出版社,1983:349-350.

收稿日期: 2002-09-20; 修回日期: 2002-12-06

作者简介:

谭伦农(1965-),男,博士研究生,主要研究方向为电力市场;

张保会(1953-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力通信、电力系统稳定控制、继电保护及配电网综合自动化。

### Study of back-up protection configuration schemes in power market environment

TAN Lun-nong, ZHANG Bao-hui, LIU Hai-tao

(Electrical Faculty, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In power market environment, grid companies, power companies and power supply companies belong to different economic entities, all the structure of the network, load flow, against-contract compensations, cost of ancillary services and the investment of relaying device and circuit breaker will affect the determination of the back-up protection configuration scheme. Based on the analysis of responsibility assumption caused by action of back-up protection, the mathematical model of back-up protection configuration scheme suitable for power market environment is proposed.

**Key words:** protective relaying; back-up protection; electric power market