

# 互联系统低频减载方案探讨

王新超<sup>1</sup>, 胡杰<sup>2</sup>

(1. 山东大学, 山东 济南 250061; 2. 山东酒精总厂, 山东 济南 250600)

**摘要:** 在大型互联系统中, 只有相当严重的功率缺额才可能导致频率下降, 频率的下降速度很快, 频率变化的分布极不均匀。目前的低频减载(UHS)装置已不能适应如此复杂的情况, 仍然是在全系统范围内切除预接负荷。文中设计一种新的减负荷方案, 它利用频率和电压的变化, 针对每一种事故情况, 特别是在承受较大扰动地区切负荷, 以求获得供需平衡。在互联系统的严重功率缺额的模拟研究表明了新的减负荷方案比现在的低频减载(UHS)方案有着明显的优越性。

**关键词:** 电力系统; 低频减载; 暂态稳定

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)02-0006-04

## 1 引言

电力系统频率的大幅度下降将导致发电厂的厂用机械出力下降, 往往造成发电厂有功和无功出力同时下降, 导致功率缺额加大和无功不足, 使得频率、电压进一步下降, 并形成恶性循环, 互为因果地迫使系统瓦解。出现电力系统的“频率崩溃”或“电压崩溃”。而自动低频减载方案是目前广泛采用的行之有效的反事故措施。

“逐次逼近”式的低频减载方案应用最普遍。它预先估计系统的功率缺额, 按照各轮的动作频率, 在遍布整个系统的各个结点上断开相应的用户负荷, 以达到稳定系统频率的目的。这种按频率自动减负荷的孤立系统的低频减载方法, 难以适应功率缺额因素增多而形态复杂的大型互联系统对抑制频率下降以及维持系统暂态稳定的要求。由于预先无法确定功率缺额值、事故波及范围、备用容量的动用特性及系统惯性时间常数、转动惯量等因素, “逐次逼近”式的低频减载方案采取了一种牺牲快速性, 按轮逐次逼近系统实际功率缺额的自动调整式的减负荷方法。运行经验表明, 在大部分的情况下, 它切除容量不足, 不能有效抑制频率的下降。

国外一些电力系统, 使用频率变化率  $df/dt$  启动减负荷装置, 以实现严重功率缺额时快速切除。它是依据频率变化率  $df/dt$  达到某一设定值而动作的, 在切除负荷的过程中, 系统转动惯量常数不断变化, 很难根据系统的实际情况决定  $df/dt$  与被切负荷在数量上的关系。另外, 在大系统中, 为了躲开频率下降过程中同一时间不同地点的  $df/dt$  值可能存在较大差异, 需要人为地增加延时, 这就显著地减弱

了它的优越性<sup>[1]</sup>。

有两点因素需要考虑, 这在中小型的孤立的电力系统中是不存在的。一, 在暂态稳定分析中表明“频率波”从互联系统的一端“传播”到另一端需要 1~3s 的时间。二, 只有相当数量的发电功率事故退出, 才有可能导致系统频率的下降, 而且是急剧的下降。自动减负荷装置只有在相当有限的时间内正确动作, 才能保证系统的安全运行。伴随电力系统的功率缺额事故, 由于低于额定转速致使励磁电压降低而往往并发无功功率的大量亏损, 最终导致系统电压降低。因而我们设计依据频率和电压的变化, 在受扰动地区大量地减去负荷, 以维持每一时刻系统的发供平衡, 保持系统稳定。我们用两地区互联系统的模型实现的这一减负荷方案与传统的“逐次逼近”式减负荷方案的比较, 有着不可比拟的优越性。下面将加以具体讨论。

## 2 频率的动态特性

当系统突然失去大量发电功率时, 系统频率将按指数规律下降, 如图 1 所示。大约 2s 时间系统频率到达一个最低点  $f_{\min}$ , 此时, 发电机调速系统动作, 调整各发电机出力, 释放备用容量, 使系统频率恢复至  $f_h$ , 此时, 系统将运行在一个低频率水平, 自动减负荷方案必须针对这两个频率值采取措施<sup>[2]</sup>。

### 2.1 最低频率 $f_{\min}$

最低频率虽然持续时间很短, 但危害极大。尤其是核电厂和高温高压电厂的厂用设备出力下降, 使系统频率更加降低, 起着趋向系统频率崩溃的推波助澜的作用。自动减负荷装置将严格限制系统频率的过度下降, 一般不低于 48Hz。

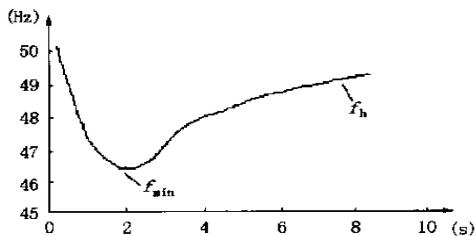


图1 频率的动态特性

### 2.2 恢复频率 $f_h$

虽然发电机调速系统能够使系统频率恢复至一定水平,但是一旦系统中又有发电机退出或热备用容量不足,将使系统频率维持在一个低于额定值的水平。若持续低于 49.5Hz 频率运行,将造成汽轮机叶片共振的渐进累计损伤,降低安全运行寿命极限。为了避免长期低频运行自动减负荷装置必须采取相应措施。

### 2.3 弹性因素

在大型互联系统中,受扰动地区和非扰动地区频率的变化有先有后,如图 2 所示,受扰动地区频率的变化为曲线 2 的动态过程,与之相比较非扰动地区频率的变化是滞后的,为曲线 1 的动态过程。目前的减负荷方案,两个地区的自动减负荷装置都有 1.5s 的延时,这将使得自动减负荷装置必须等到非扰动地区的频率有充分下降才能动作,发供不平衡的状态将持续很长的一段时间,从而加重系统的不稳定。理想的减负荷方案应该是在受到较大扰动地区先减掉相应负荷。这是本文减负荷方案的主要特点。

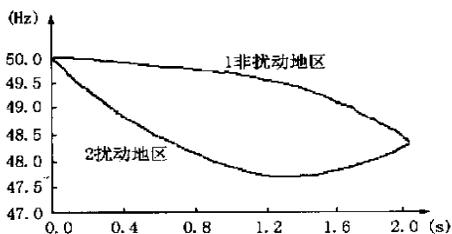


图2 两地区互联系统频率的动态特性

## 3 减负荷参数的确定

暂态稳定性研究表明,扰动后的频率波从系统的一端“传播”到另一端需要大约 1~3s 的时间。另外随着有功出力的大量退出,最初的频率下降很快,留给减负荷装置的时间很短。在这种严重频率事故情况下,我们可应用频率—电压两地区互联系统模型来计算减负荷功率。

### 3.1 频率下降

当互联系统的一个地区受到较大扰动,互联系统的各地区间发生系统振荡,各地区间频率的下降过程不尽相同,以简单的两地区互联系统为例,忽略发电机调速系统的作用,系统电压和负荷假定为常数,在地区 - 2 发电机事故退出功率为  $P$ ,那么地区 - 1 和地区 - 2 的系统频率为<sup>[3]</sup>:

$$f_1(t) = f_{ave}(t) + \frac{P_G \sin \omega_0 t}{2 M_2 (1 + m)} \quad (1)$$

$$f_2(t) = f_{ave}(t) - \frac{m P_G \sin \omega_0 t}{2 M_2 (1 + m)} \quad (2)$$

$$f_{ave}(t) = f_0 - \frac{P_G}{2 (M_1 + M_2)} t \quad (3)$$

其中  $f_{ave}(t)$  是系统平均频率,  $M_1$ 、 $M_2$  是地区 - 1、地区 - 2 的系统等值转动惯量,  $m = M_1/M_2$ ,  $\omega_0$  是系统振荡频率,  $f_0$  为系统标称频率。

### 3.2 频率下降率

方程 (1) - (3) 对时间求导,得到频率的变化率:

$$\frac{df_1(t)}{dt} = \frac{df_{ave}(t)}{dt} + \frac{P_G \cos \omega_0 t}{2 M_2 (1 + m)} \quad (4)$$

$$\frac{df_2(t)}{dt} = \frac{df_{ave}(t)}{dt} - \frac{m P_G \cos \omega_0 t}{2 M_2 (1 + m)} \quad (5)$$

$$\frac{df_{ave}(t)}{dt} = - \frac{P_G}{2 (M_1 + M_2)} \quad (6)$$

受扰动的地区 - 2 最初的频率变化率达到最大值,而非扰动地区 - 1 最初的频率变化率为零,一段时间以后,非扰动地区频率开始下降,可以这样假设,频率波是由受扰动地区发出,“传播”到系统的其他地区。整个系统内以频率或频率变化率为依据的减负荷装置在远方的动作将被延迟,这将延长事故持续时间。

### 3.3 电压的下降

电压的变化将提供有用的信息。系统中各结点电压都受到震荡的影响,为了确定受扰动地区,有必要测量电压的短时下降,暂态稳定性研究表明,伴随着电力系统大功率缺额事故,往往是并发无功功率的大量亏损,受系统频率和电压调节效应影响,系统的有功功率和无功功率供需平衡受到很大扰动,受扰动地区将出现电压的严重下降。

## 4 减负荷方案探讨

与目前自动减负荷装置的本质区别是,能够正确判断有功缺额地区,并大量减掉负荷。电压严重下降的结点都是减负荷位置所在。过去研究了为了

维持电压恒定,依据电压的变化,确定减负荷点和减负荷量<sup>[4]</sup>,类似的,为了维持频率的恒定,借助电压的变化确定减负荷的数量和位置。

#### 4.1 总减负荷功率

若系统具有充分的旋转备用容量( $SR$ ),减负荷总量为:

$$P_{LS} = P_G - K f_{ss} \quad (7)$$

其中,  $P_{LS}$ 是总减负荷功率,  $P_G$ 是事故退出的发电功率,  $K$ 是负荷调节效应系数。若系统不能具有充分的旋转备用容量( $SR$ ),减负荷总量增加为:

$$P_{LS} (P_G - SR) + (P_G - K f_{ss}) \quad (8)$$

#### 4.2 减负荷功率分配

第一是确定减负荷范围。虽然该地区电压下降维持很短的时间,但电压下降最低点可以被记录下来,结点  $i$  的减负荷功率可以表示为:

$$P_i = \frac{V_i \cdot \partial Q_i / \partial V_i}{\sum_{i=0}^N [V_i \cdot \partial Q_i / \partial V_i]} P_{LS} \quad (9)$$

其中,  $V_i$  是结点  $i$  的电压下降值,  $\partial Q_i / \partial V_i$  表明结点  $i$  的电压对无功功率变化的敏感性。  $N$  是有较大电压变化的所有结点。  $P_{LS}$  有(7)式给出。现代电力系统中分层控制的能量管理系统(EMS)可以很方便地提供(7)、(8)式中的数据。

#### 4.3 地区减负荷装置(LLS)

第二是根据频率和电压变化率确定在大扰动地区快速减负荷方案。由于发电功率的大量退出,频率急剧下降,EMS系统来不及提供确定的计算结果来确定较大扰动地区,分布各地的减负荷装置将及时动作,它依据:

- (1) 频率变化率
- (2) 频率下降水平
- (3) 电压的急剧下降

当被确定为严重扰动地区后继电器将立刻动作,从而有效地抑制频率的下降。

#### 4.4 系统减负荷装置

一旦 LLS 装置动作减轻频率下降,就有充分时间根据公式(7)、(8)由分层控制的 EMS 系统计算减负荷功率。当然,此时减负荷功率也可能出现在那些已经被 LLS 减去大量负荷的结点上,这就是说整个减负荷方案适用于最严重功率缺额和地区性功率缺额两种情况。最终使系统频率稳定在一个较好水平。

## 5 两地区互联系统的减负荷方案比较

在模拟两地区网络的暂态稳定仿真实验研究中,系统发电机模型有励磁控制系统和汽轮机调速系统,负荷模型不受电压变化影响。负荷的调节效应系数为 1.5。

### 5.1 频率变化过程比较

图 3 所示,每一地区有 3 台发电机。  $G1 = G11 = 900MVA$ ,  $G2 = G12 = 625MVA$ ,  $G3 = G13 = 275MVA$ , 地区 - 1 负荷为 950MW,地区 - 2 负荷为 1900MW,各发电机有 4MWs/MVA 的转动惯量,直流励磁系统和汽轮机调速系统模型。

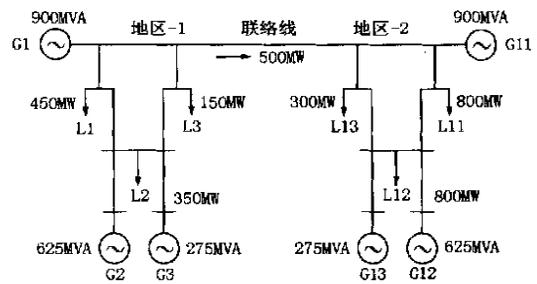


图 3 两地区互联系统接线图

当地区 - 2, 发电机  $G12$ 、 $G13$  (共 700MW) 同时事故退出,传统自动减负荷装置 ULFS 有三轮减负荷功率分别为 48.0Hz, 47.8Hz, 47.6Hz, 分布在整个系统的各结点上。图 4 所示,表明了新型减负荷方案(曲线 A)与传统减负荷方案(曲线 B)的比较结果。新型减负荷方案(曲线 A),在 4.2s 时间内将频率限制在 48.5Hz,而传统减负荷方案(曲线 B)在 6.2s 时频率下降至 47.8Hz,新型减负荷方案减去负荷 700MW,而传统减负荷方案减去负荷 500MW。

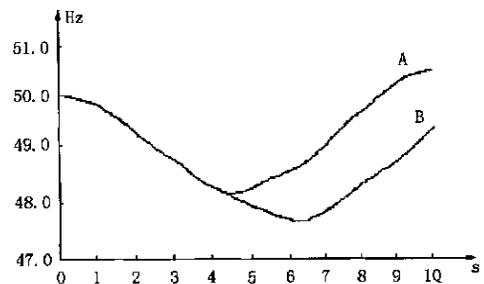


图 4 系统频率的变化过程

### 5.2 功角和电压变化过程的比较

新型减负荷方案的联络线两端电压的功角稳定在 30 左右,电压稳定在额定值附近。而传统减负荷方案联络线两端电压的功角稳定在 60 左右,电压稳定在 0.9 倍额定值附近。可以看到,在扰动地区大

幅度地减少负荷,减轻了联络线的负担,保持了良好的功角和电压水平,保证了系统的稳定性。

## 6 结论

新型减负荷方案的突出优点是:

- (1) 就地减负荷装置动作速度快;
- (2) 集中在事故退出的发电厂附近减负荷;
- (3) 改善联络线功角和电压水平;
- (4) 提高安全裕度,有利于运行人员事故处理。

## 参考文献:

- [1] 蔡彬. 电力系统频率[M]. 中国电力出版社,1998,5.
- [2] 韩英铎,王仲鸿. 电力系统动态频率的定义及“虚拟转

子法”频率测量研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1993,33(1).

- [3] Marconato R & Vergelli L. Problems Concerning the Design of Automatic Load - shedding Plans[C]. CIGRE Paper 32. 18. PARIS,1984.
- [4] Lachs W R. Dynamic Study of an Extrame System Reactive Power Deflcit [J]. IEEE Trans PAS,1985. PAS - 104(9) : 2420 - 2426.

收稿日期: 2001-07-30; 修回日期: 2001-10-08

作者简介: 王新超(1963 - ),男,硕士,从事电力系统继电保护和自动装置的研究工作; 胡杰(1968 - ),男,工程师,从事电力系统继电保护和自动装置的研究工作。

## A new load shedding scheme for limiting underfrequency

WANG Xin-chao , HU Jie

(Shandong University , Jinan ,250061 China)

**Abstract:** In large interconnected power systems , serious frequency falls now require a very heavy loss of generation and should such event occur , the rate of frequency decline would be greater than that had been developed. Obviously the character of the power systems have changed and yet no corresponding modification of ULFS has been made and there is still shedding of pre - selected loads throughout the entire power system. This paper proposes a new scheme utilizing frequency and voltage changes to shed loads specifically in the most affected localities while regaining the load - generation balance for each incident. Simulation studies on an extensive interconnected network , following very severe loss of generation , show the advantage of the proposed scheme to the actions of existing ULFS.

**Keywords:** power system; underfrequency load shedding; transient stability