

# DSP-Based Low-Frequency Load Shedding Equipment Design and Application

Xiongfei Lv, Yunheng Wang, Chen Tian

College of Electrical and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin  
Email: lxf9365@163.com

Received: Mar. 16<sup>th</sup>, 2013; revised: Apr. 8<sup>th</sup>, 2013; accepted: Apr. 19<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Xiongfei Lv et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** This paper presents a load shedding program to cut off loads in the large disturbance areas. The mathematical model of the apparatus is established. The low-frequency load shedding function is implemented using DSP technology. The program meets the requirements of the load regional emergency control and system integrated scheduling to achieve the purpose of the stabilization system frequency.

**Keywords:** Disturbance; Low-Frequency Load Shedding; DSP Technology; Integrated Scheduling

## 一种基于 DSP 技术的低频减载装置的设计与应用

吕雄飞, 王蕴恒, 田 晨

黑龙江科技大学电信学院, 哈尔滨  
Email: lxf9365@163.com

收稿日期: 2013 年 3 月 16 日; 修回日期: 2013 年 4 月 8 日; 录用日期: 2013 年 4 月 19 日

**摘 要:** 本文提出了一种在扰动大的地区优先切除负荷的减负荷方案, 建立了装置的数学模型, 采用 DSP 技术实现了低频减负荷的功能, 在实际应用的过程中, 满足了负荷区域性紧急控制和系统综合调度两方面的要求, 达到了稳定系统频率的目的。

**关键词:** 扰动; 低频减负荷; DSP 技术; 综合调度

### 1. 引言

随着电力系统的规模不断扩大, 电力系统削弱了抗大扰动的能力。本文阐述了电力系统频率以及频率偏差的概念, 研究了电力系统频率偏差对电力系统各方面的影响, 提出了一种按扰动地区进行减负荷的减载方案。这个方案既适用于系统最严重的功率缺额的情况, 也适用于地区性功率缺额的情况。通过 PSS/E 软件仿真实验可以看出这种减载方案动作迅速, 能优先在扰动大的地区进行切负荷, 降低了联络线的负担, 频率恢复时间短, 最低频率值高等优点<sup>[1]</sup>。

### 2. 方案研究

调节系统的有功功率不平衡主要有两种措施: 增加功率的输入或者切负荷。总体思想就是在系统频率较低时, 切除相应的负载。

传统法又叫“逐次逼近”法, 它按照系统发生最严重事故的情况下出现的最大可能的功率缺额确定接至低频减载装置的总功率, 然后将其分配在不同启动频率值来分批切除。一般在设计低频减载方案时, 仍然主要是基于单机模型的假设进行, 具体设计过程可以采用反复试验的方法进行, 也可按照一定的公式

计算各级频率定值和切除容量<sup>[2]</sup>。

低频减载方案的结构目前主要有三种：第一种是仅考虑按频率启动的快速动作轮的方法，其目的是迅速制止频率下降，方案中不考虑频率恢复问题；第二种结构是按频率分为 48.8 Hz、48.5 Hz、48.2 Hz 及 47.9 Hz 四级，每级再按时间延迟分为 0.5 S、1.5 S、3.0 S 及 5.0 S 四级切除负荷的方法，这种结构及其对应的动作逻辑可在一定程度上做到按频率的下降率切除负荷，对不同的过负荷量具有较高的适应性并且能获得较好的频率动态过程，其主要不足是方案的设计和 implementation 比较困难，并且可能出现频率的悬停问题；第三种结构是在低频减载中按频率启动的快速动作轮(即基本级，又称一般级)上附加一至数级按时间动作的延时动作轮(即恢复级，又称特殊级)<sup>[3]</sup>。

### 3. 减载量的计算

考虑装置的动作时间误差和断路器跳闸的延时，各基本级动作频率应该保持一定的距离，称为级差。级差取的越小，则恢复效果越好，但级差增多也会使低频减载装置成本增高，一般取 0.2~0.5 Hz。设级差为  $\Delta f$ ，则基本级的级数为  $n = \frac{(f_1 - f_n)}{\Delta f}$ 。每一级都应该确定系统频率已达本级动作频率，所以要加一延时，一般取 0.2~0.5 秒。

基本级各级减载量的确定：

各级认为本级减载前，系统功率缺额正好使系统频率下降至本级频率  $f_i$ ，由此确定本级减载量。算式为：

$$\Delta P_{L(i-1)} = K_L (1 - f_i) P_{L(i-1)}$$

式中： $\Delta P_{L(i-1)}$ ——本级减载前功率缺额标么值； $f_i$ ——本级动作频率标么值； $K_L$ ——负荷调节效应系数； $P_{L(i-1)}$ ——本级减载前负荷的额定功率标么值。

各级认为本级减载  $\Delta P_i$  后，使系统频率恢复为  $f_n$ ，此时系统的剩余功率缺额为：

$$\Delta P_{L(i)} = (1 - f_n) K_L (P_{L(i-1)} - \Delta P_i)$$

按(各级减载量) = (减载前的功率缺额) - (减载后的功率缺额)得各级减载量应为：

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \Delta P_{L(i-1)} - \Delta P_{L(i)} \\ &= (1 - f_i) K_L P_{L(i-1)} - (1 - f_n) K_L (P_{L(i-1)} - \Delta P_i) \end{aligned}$$

整理得：

$$\Delta P_i = \frac{(f_n - f_i) K_L}{1 - (1 - f_n) K_L} P_{L(i-1)}$$

还有一种更为简单化的减载方式：确定系统的最大功率缺额和减载级数，各级减载量平均分配。

### 4. 复杂互联系统的动态频率特性数学模型建立

随着电力事业的发展，大型互联系统的建立，大量实测数据表明单机模型方法存在很多不足。通过建立数学模型，判别互联母线的末端电压值，快速切除该段母线上的负荷，以解决频率低的问题。

对于复杂互联系统的数学模型采用以下方法：

- 1) 线性化系统模型；
- 2) 系统有功潮流主要由网络中电压的相角决定，与其幅值关系不大；
- 3) 经典发电机模型，不考虑调压的作用。

于是得发电机转子运动方程：

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\delta_i}{dt} &= \omega_0 \Delta\omega_i \\ M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} &= \Delta P_i - \Delta P_G - D_i \Delta\omega_i \end{aligned} \quad (3-1)$$

网络方程为：

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{GG} & H_{GL} \\ H_{LG} & H_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

式中， $\Delta P_G$ 、 $\Delta\delta$  为 N 维列向量， $\Delta P_L$ 、 $\Delta\theta$  为 K 维列向量，H 阵满足下式：

$$\begin{aligned} H_{GG} I_N + H_{GL} I_K &= 0 \\ H_{LG} I_N + H_{LL} I_K &= 0 \end{aligned} \quad (3-3)$$

从式(3-3)消去  $\Delta\theta$  得：

$$\Delta P_G = J \Delta\delta + L \Delta P_L \quad (3-4)$$

式中， $J = H_{GG} - H_{GL} H_{LL}^{-1} H_{LG} \in R^{N \times N}$ ，J 阵各行元素之和为零， $L = H_{GL} H_{LL}^{-1} \in R^{N \times N}$ 。

综合(3-1)、(3-2)、(3-3)、(3-4)得：

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3-5)$$

式中： $X = \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{bmatrix}$ ， $U = \begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \end{bmatrix}$ ，

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 I_N \\ -M^{-1}J & -M^{-1}D \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1} & M^{-1}L \end{bmatrix},$$

$$M = \text{diag}[M_1 \quad K \quad M_N], \quad D = \text{diag}[D_1 \quad K \quad D_N].$$

设系统中发生原动机功率扰动  $\Delta P_G$  和负荷扰动  $\Delta P_L$ ，对式(3-4)进行拉氏变化并消去  $\Delta \delta$  得：

$$W(s) = S(MS^2 + DS + \omega_0 J)^{-1} (\Delta P_G(s) + L\Delta P_L(s)) \quad (3-6)$$

式(3-6)即为复杂互联系统频率动态过程及校合低频减载方案时采用的数学模型，以此判别各段母线的频率和相应母线电压。

通过比较，使装置快速切除相应母线上的负荷，确保系统的稳定性。

### 5. 低频减载装置的设计与结构

低频减载装置集保护、控制、测量、事件记录为一体，采用交流采样技术，采样频率为 1200 HZ。

单元内置精密电流互感器，电压互感器。单元中 DSP 完成装置的所有控制功能、A/D 功能、软硬件自检。硬件结构框图如图 1，保护逻辑框图如图 2<sup>[4]</sup>。

### 6. 软件编程

在软件系统的设计中，考虑到程序的可读性，系统的可扩展性，以及升级的需要，程序设计过程需要采用模块化的设计方法，每个模块实现一定的功能，模块与模块间功能相对独立，这样就使得程序结构清晰。另外，同一模块可以应用在不同的地方，这就增加了代码的使用效率。

由于装置是一个典型的要求实时控制、实时处理的系统，其实时性要求很高，故在程序设计时，着重考虑了程序的效率，以最简洁的目标程序，最少的运

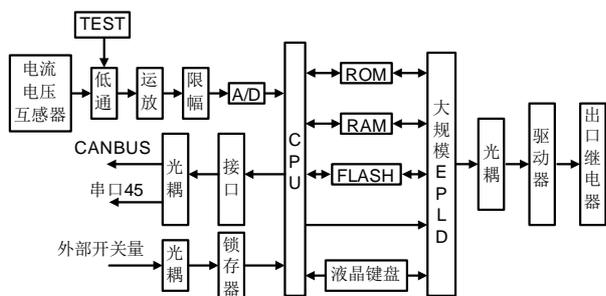


Figure 1. Hardware block diagram  
图 1. 硬件结构框图

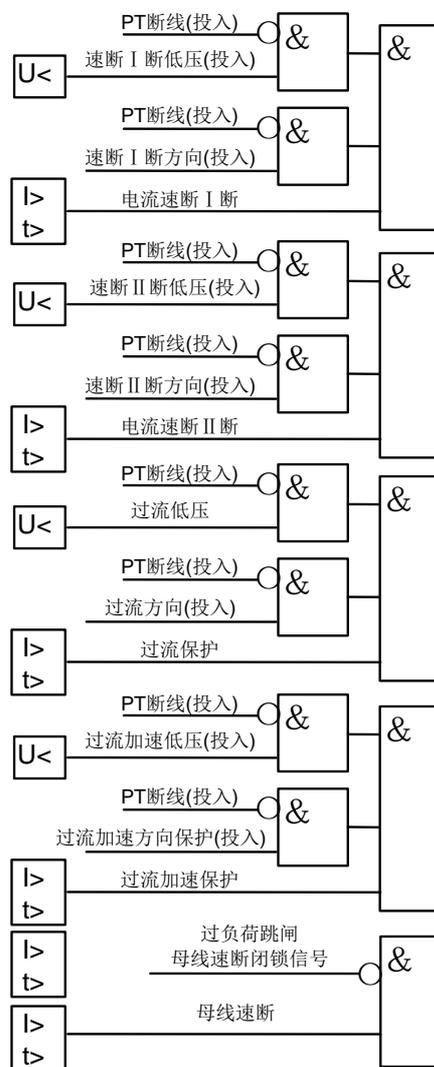


Figure 2. Logic diagram of protection function configuration  
图 2. 保护功能配置逻辑图

行时间达到设计目的。当然在考虑程序效率的同时也不能忽视软件的可靠性。软件可靠性是系统正常运行的基础<sup>[5,6]</sup>。

软件要完成的任务有：系统初始化、数据采集、数据处理、故障分析、远方通信、显示及报警等。

保护流程图如图3。

### 7. 仿真实验

以 PSS/E(电力系统仿真软件)仿真实验对互联系统进行仿真，互联系统如图 4 所示。

取参数：PG1 = 630 MW, PG21 = PG22 = 300 MW, PL2 = 800 MW, PL3 = 450 MW, PL4 = 290 MW。设定  $t = 0$  时刻，S 与系统断开连接，仿真得母线

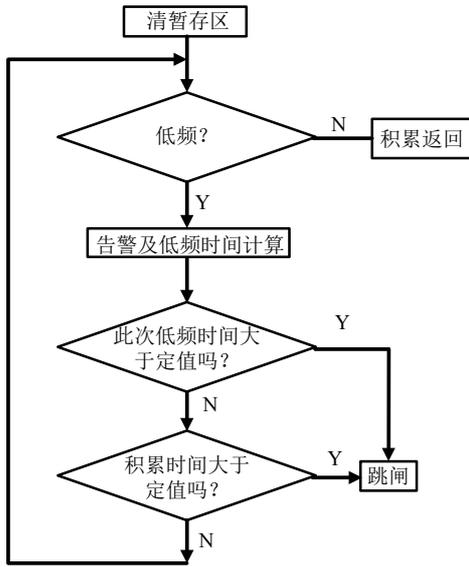


Figure 3. Protection program flow chart  
图 3. 保护程序流程图

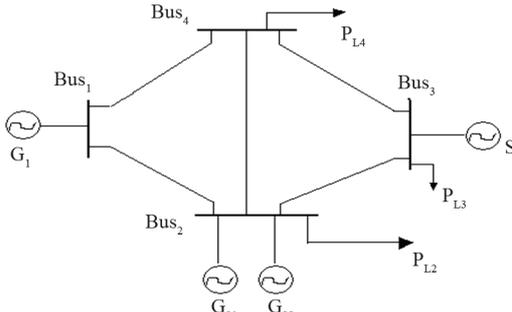


Figure 4. Complex interconnected system diagram  
图 4. 复杂互联系统示意图

Bus3、Bus2、Bus1 的频率—时间变化曲线分别由图 5、图 6、图 7 所示。

由 PSS/E 仿真结果可知：对于复杂互联系统，当系统出现功率缺额时候，频率动态过程具有空间分布性，并且频率变化曲线不再是光滑的指数曲线，而是不断振荡的非指数曲线，受扰动的地区频率振荡异常明显，在扰动初期频率下降迅速，各地地区频率变化率不尽相同。减载过程中频率变化曲线如图 8。

## 8. 应用

低频减载装置基于 32 位高性能 DSP(数字信号处理器)和高速通信技术设计，符合《电力系统自动低周减负荷技术规定》，主要用于 110 kV 及以下电压等级的变电站或电厂，具有 4 轮低周减载、一轮长延时低周减载(第 5 轮)、4 轮低压减载、一轮长延时低压减

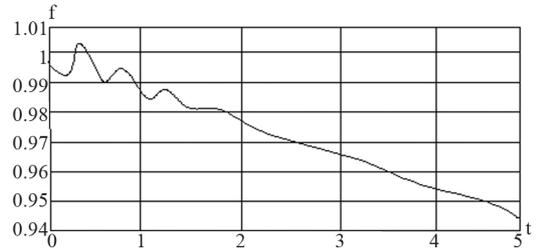


Figure 5. Bus3 frequency dynamic process  
图 5. 母线 Bus3 频率动态过程

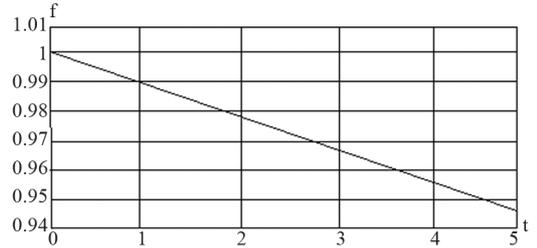


Figure 6. Bus2 frequency dynamic process  
图 6. 母线 Bus2 频率动态过程

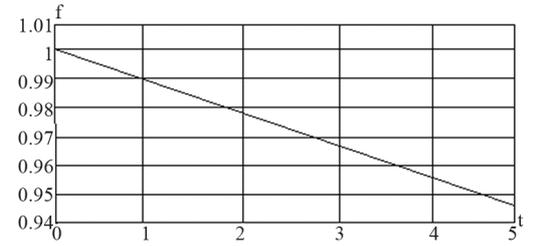


Figure 7. Bus1 frequency dynamic process  
图 7. 母线 Bus1 频率动态过程

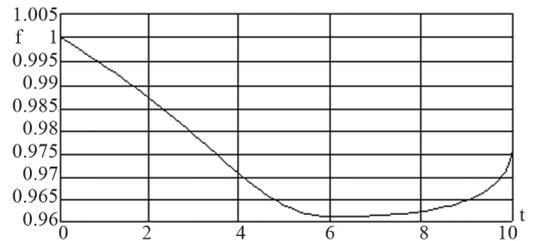


Figure 8. Frequency variation curve of conventional scheme  
图 8. 传统方案频率变化曲线

载(第 5 轮)功能。当应用于发电厂系统时，装置具有低周解列、低压解列的功能。该装置最多可控制 24 个负载。

1) 装置接入两段母线电压  $U_{ab}$  和  $U_{bc}$ ，测量母线电压、频率及其变化率。

2) 具有频率跟踪测量功能，频率跟踪范围为 45~55 Hz。

装置应用在文福 110 KV 变电站，由于变电站接

有水电厂，在电力系统中，因水轮机调整速度较慢，因此常取 48.5 Hz。所以频率跟踪范围为 48.5 Hz~55 Hz。

使用低频减载装置后切除负荷 300 MW，传统的低频减载方案切除负荷 280 MW，使用低频减载装置后频率下降最低值为 48.6 Hz，未使用时则为 48 Hz。接入装置后，系统频率变化曲线比较平和，如图 9 所示。

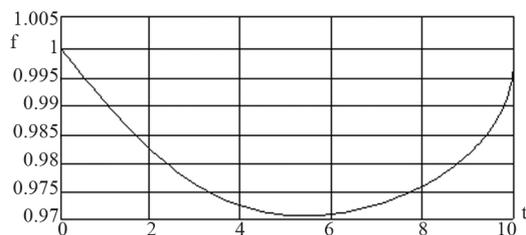


Figure 9. Frequency variation curve with low-frequency load shedding device  
图 9. 接入装置后频率变化曲线

## 9. 结论

通过 PSS/E 仿真实验及实际应用，本装置减载量准确，能使频率迅速恢复，有着显著的优势。且装置具有保护线路功能，对系统抗大扰动，恢复频率有了明显的改善。在变电站投入试运行后，效果良好，具有很好的应用前景。

## 参考文献 (References)

- [1] 李宇琦, 黄彦全, 何秋冷, 李亚楠. 考虑负荷频率调节效应系数的低频减载方案研究[J]. 电气开关, 2012, 5: 63-67.
- [2] 刘显枢. 低频低压自动减载装置的研究[D]. 山东大学, 2010.
- [3] 蒋铁铮. 大型同步发电机非线性最优预测综合控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 12: 63-69.
- [4] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] 张治俊. 基于单/双同步坐标系的软件锁相环模型和仿真[J]. 电力系统继电保护与控, 2011, 6(1): 41-43.
- [6] 陈俊山, 洪兰秀, 郑志远. 电力系统低频减载研究应用与发展[J]. 继电器, 2007, 7(16): 86-89.