

(6) 33-37

一种新的负荷模型 在负荷频率控制中应用的研究

A Study of Application of
a New Non-Linear Load Model in LFC

朱继忠 徐国禹 张毅敏
Zhu Jizhong Xu Guoyu Zhang Yiming

(重庆大学电气工程系, 重庆, 630044)

TM 76

A

摘要 运用大系统理论中的交迭信息法进行了电力系统负荷频率分散控制的设计, 并讨论了非线性负荷模型对负荷频率控制动态响应的影响。

关键词 分散控制; 负荷频率控制; 交迭分解

中国图书资料分类法分类号 TM 761

负荷模型, 电力系统

ABSTRACT A decentralized load frequency control (LFC) of power system was designed with the help of the overlapping information method of the large-scale system theory. The effects of a non-linear load model to load frequency control were discussed. And got some valued reference conclusion.

KEYWORDS decentralized control; load frequency control; overlapping decomposition

0 引 言

负荷频率控制(LFC)是自动发电控制的一个基本问题。早在50年代, Kirchmayer 根据经典控制理论中的传递函数原理, 提出了互联系统 LFC 的数学模型, 研究了 PI 控制方式^[1]; 70年代初, Elgerd 等人把现代控制理论应用于互联系统 LFC 问题^[2], 但是由于采用集中控制, 使 LFC 在信息传递问题上遇到大系统“维数灾”问题。近年来, 许多学者采用分散控制方法进行 LFC 设计, 避免了实现集中 LFC 的困难^[3~5]。

目前的各种 LFC 设计方法各具特色, 但有一点是共同的, 即不论是集中控制, 还是各种分散控制, 所采用的负荷模型一般都采用频率一次函数的型式。实际上, 电力系统负荷对频率变化的敏感程度, 随用户性质不同而异。有一类用户吸取的有功功率与频率无关, 例如电热设备、照明负荷、整流装置等; 第二类用户取用的有功功率与频率成正比, 如卷扬机、磨煤机、切削机床等; 第三类用户消耗的功率是频率高于一次方的函数, 属于这一类的用户有给

* 收文日期, 1992-11-26

本研究得到重庆市科委资助

水泵,风机等。在这种情况下,所设计的控制器是否能保持良好的动态性能是关系到控制器能否实际应用的一个重要问题。因此必须对上述问题进行研究。

本文采用交迭信息法研究 LFC 分散控制问题,利用描述函数法将非线性负荷模型化成线性化的描述函数,并建立相应的 LFC 模型,通过数字仿真计算,分析讨论了非线性负荷模型对 LFC 动态响应的影响。

1 非线性负荷模型的建立

一般负荷的静态频率特性曲线如图 1 所示。如果把图 1 的坐标原点移至 (f_0, P_0) ,即改用任一增量函数 $\Delta P_L(\Delta f)$ 表示时,则该增量函数为奇函数。因此,计及频率高次方变化的负荷模型可表示为: $\Delta P_L = K' \Delta f^n \quad n = 1, 3, 5, \dots, \text{奇数}$ (1) 式中, $n = 1$ 就是通常 LFC 中考虑的线性负荷模型; $n \neq 1$ 时,非线性负荷模型(1)可用如图 2(a) 所示的曲线表示。

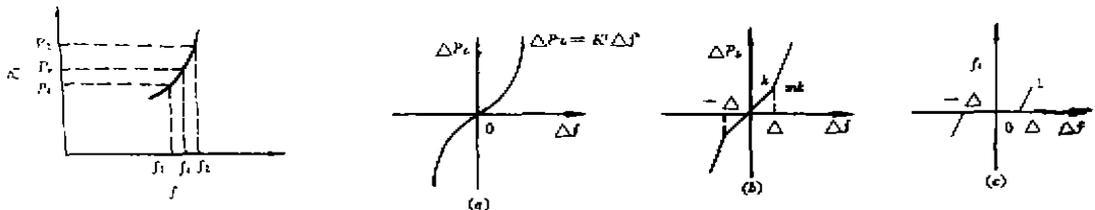


图 1 负荷静态频率特性

图 2 非线性负荷模型及其分段线性曲线

电力系统运行时对频率指标要求较严,其允许偏差一般为 ± 0.2 Hz,某些情况可允许在 ± 0.5 Hz 范围内变化。由于 Δf 取值范围不大,所以可将非线性负荷模型 $\Delta P_L = K' \Delta f^n$ 在额定频率点近似线性化,如图 2(b) 所示。

由图 2(a)、(b) 可看出,该函数为单值奇对称函数,经分段线性化后的函数又可表示为 $f_1(\Delta f)$ 函数的线性组合,即 $\Delta P_L = f(\Delta f) = (m-1)f_1(\Delta f) + k\Delta f$ (2) 其中 $f_1(\Delta f)$ 函数如图 2(c) 所示。

根据描述函数法原理^[6],对于一般的非线性特性 $f(X, \dot{X})$,当自变量 X 按谐波变化时,即 $X = a \sin \omega t$ 时,其谐波线性化表示为 $f(X, \dot{X}) = A(a, \omega)X + \frac{1}{\omega} B(a, \omega) \dot{X}$ (3) 上式为谐波线性化的微分方程形式,其中

$$A(a, \omega) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} f(a \sin \Phi, a \omega \cos \Phi) \sin \Phi d\Phi \quad (4)$$

$$B(a, \omega) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} f(a \sin \Phi, a \omega \cos \Phi) \cos \Phi d\Phi \quad (5)$$

其频率特性为 $N(a, \omega) = A(a, \omega) + jB(a, \omega)$ (6) 式(6)称为非线性元件的描述函数。

当一个非线性特性 $F(X)$ 分解为两个迭加的特性 $F_1(X), F_2(X)$,即 $F(X) = \alpha F_1(X) + \beta F_2(X)$ 时,由式(4)和(5)知, F_1, F_2 与 F 之间的描述函数有线性迭加关系。当把此关系应用于式(2)的分解式时可得: $N(a) = k + (m-1)N_1 a$ (7) 如图 3 所示。

式(7)中 $N_1(a)$ 可如下计算,当 $a > \Delta$ 时,由图 3 可知:

$$N_1(a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} f(a \sin \Phi) \sin \Phi d\Phi = \frac{2}{\pi a} \int_{\Phi_0}^{\pi - \Phi_0} k(a \sin \Phi - \Delta) \sin \Phi d\Phi = k - \frac{2k}{\pi} \left(\Phi_0 - \frac{\Delta}{a} \cos \Phi_0 \right) \quad (8)$$

由于 $a \sin \Phi_0 = \Delta$, 将其代入式(7), 便可得 $N_1(a)$ 的表达式为

$$N_1(a) = \begin{cases} k - \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{\Delta}{a} + \frac{\Delta}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{a} \right)^2} \right), & \text{当 } a > \Delta \\ 0, & \text{当 } a \leq \Delta \end{cases} \quad (9)$$

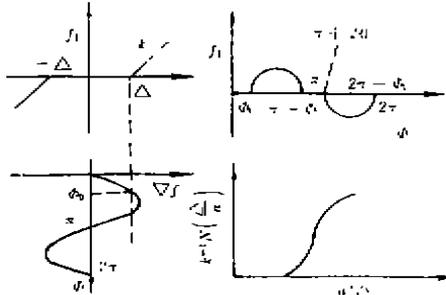


图 3 非线性特性的描述函数

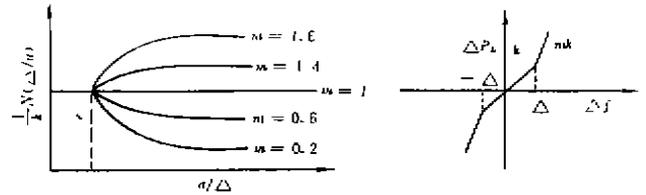


图 4 线性化的非线性负荷模型

从而可得非线性负荷模型的线性化描述函数为:

$$N(a) = \begin{cases} mk + (1 - m) \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{\Delta}{a} + \frac{\Delta}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{a} \right)^2} \right), & \text{当 } a > \Delta \\ k, & \text{当 } a < \Delta \end{cases} \quad (10)$$

其曲线如图 4 所示。

2 计及非线性负荷的 LFC 模型

前面推导了非线性负荷的线性化描述函数 $N(a)$, 令 $N(a) = Z$, 则可得计及非线性负荷影响的两区域互联电力系统 LFC 框图如图 5 所示(多区域系统, 包括水火互联系统情况类似)。

在上述 LFC 框图中, 调速器模型考虑了死区非线性的影响, 其细节详见文献[4]。根据上述框图, 可推导出计及非线性负荷影响的 LFC 数学模型为状态方程:

$$\Delta \dot{f} = -(D_1 + Z_1) \Delta f_1 / M_1 + \Delta P_{G1} / M_1 - \Delta P_{m1} / M_1 - \Delta P_{D1} / M_1 \quad (11)$$

$$\Delta \dot{P}_{G1} = -\Delta P_{G1} / T_{G1} + \Delta X_{G1} / T_{G1} + \beta_1 \Delta P_{C1} / T_{G1} T_{R1} - \beta_1 \Delta f_1 / T_{G1} T_{R1} R_1 \quad (12)$$

$$\Delta \dot{X}_{G1} = (\beta_1 / T_{G1} R_1 - \alpha_1 / T_{R1} R_1) \Delta f_1 - \Delta X_{G1} / T_{G1} + (\alpha_1 / T_{G1} - \beta_1 / T_{R1}) \Delta P_{C1} \quad (13)$$

$$\Delta \dot{P}_{m1} = T_{12} \Delta f_1 - T_{12} \Delta f_2 \quad (14)$$

$$\Delta \dot{f}_2 = -(D_2 + Z_2) \Delta f_2 / M_2 + \Delta P_{G2} / M_2 + \alpha_{12} \Delta P_{m1} / M_2 - \Delta P_{D2} / M_2 \quad (15)$$

$$\Delta \dot{P}_{G2} = -P_{G2} / T_{G2} + \Delta X_{G2} / T_{G2} + \beta_2 \Delta P_{C2} / T_{G2} T_{R2} - \beta_2 \Delta f_2 / T_{G2} T_{R2} R_2 \quad (16)$$

$$\Delta \dot{X}_{G2} = (\beta_2 / T_{G2} R_2 - \alpha_2 / T_{R2} R_2) \Delta f_2 - X_{G2} / T_{G2} + (\alpha_2 / T_{G2} - \beta_2 / T_{R2}) \Delta P_{C2} \quad (17)$$

输出方程:

$$Y_1 = ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{G1} \quad (18)$$

$$Y_2 = ACE_2 = B_2 \Delta f_2 - \alpha_{12} \Delta P_{m1} \quad (19)$$

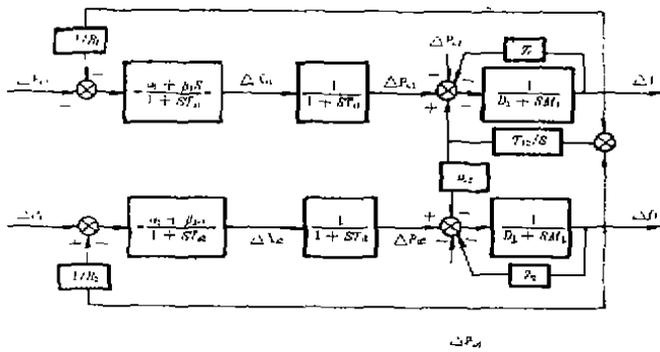


图 5 两区域系统 LFC 框图

按照文献[4]类似的方法考虑发电速率限制, 则可将描述 LFC 模型的(11)~(19)简化成标准的状态方程, 即

$$\dot{X} = AX + BU \quad (20)$$

$$Y = CX \quad (21)$$

于是, 可用大系统分散控制理论中的交迭信息法求解上述计及非线性负荷影响的 LFC 模型。交迭信息法原理及其求解细节详见文献[7]。

3 LFC 数字仿真计算

为了进行 LFC 数字仿真计算, 首先要确定非线性负荷模型有关的参数, 即 m, k, Δ, n 等。

设系统频率为 50 Hz, 基准负荷为 2000 MVA, 运行负荷为 1000 MW。为了研究非线性负荷对 LFC 影响, 所以假定系统负荷全为非线性, 则线性负荷为零, 即 $\Delta P_{L1} = K_1' \Delta f = 0$ 。取 $\Delta = 0.2 \text{ Hz}, 0.2 \text{ Hz} \leq a \leq 0.5 \text{ Hz}$, 如取 $a = 0.21 \text{ Hz}$ 时, 各种非线性负荷模型有关参量计算结果列于表 1 中。

表 1 非线性负荷模型参数及描述函数值

$\Delta P_L = K' \Delta f^n$	K'	k	mk	m	Z'
$n = 3$	0.01333	5.33×10^{-4}	5.187×10^{-5}	9.7500	0.8344×10^{-3}
$n = 5$	0.03200	5.12×10^{-6}	3.299×10^{-5}	64.3475	0.2662×10^{-3}
$n = 7$	0.0914	5.85×10^{-8}	2.376×10^{-5}	406.2340	0.1598×10^{-3}

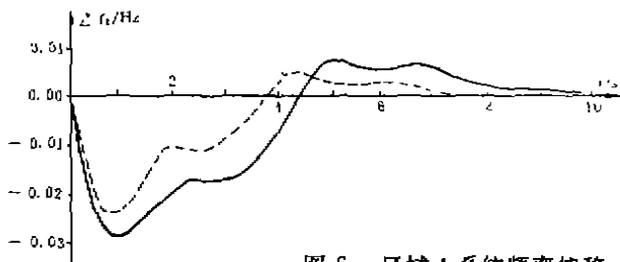


图 6 区域 I 系统频率偏移

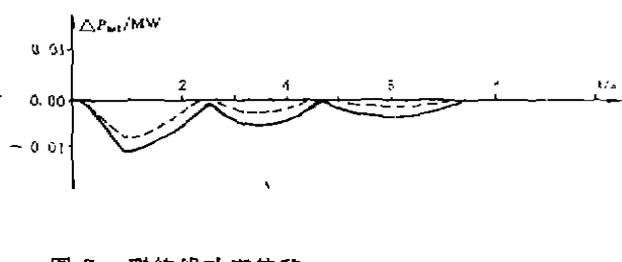


图 7 联络线功率偏移

从表 1 可看出, 随着指数 n 增加, 非线性负荷模型描述函数值 Z' 逐渐减小, 因而对 LFC 的影响也逐渐减小。所以, 可取影响最大的一种模型即频率三次方负荷模型进行分析研究。

当系统中既有线性负荷(此时 $\Delta P_{L1} = L_1 \Delta f \neq 0$)、又有非线性负荷时, 即 $\Delta P_L = \Delta P_{L1} + \Delta P_{L3} + \dots = K_1' \Delta f + K_3' \Delta f^3 + \dots$, 设非线性负荷占全系统负荷 60%, 则对于非线性负荷仅为三次方负荷模型时, 可计算出当 $a = 0.21 \text{ Hz}$ 时, 其描述函数值 $Z' = 0.5 \times 10^{-3}$ 。由式(11)和(15)可知, 忽略 Z' 而带来的误差为 $|[(D + Z') - D] / D| = 5\%$

所以,当非线性负荷占全系统负荷比例不大时(60%以下),非线性负荷模型对 LFC 动态响应影响不大,其忽略所产生的误差小于 5%。只有当系统中非线性负荷占总负荷 60% 以上时对 LFC 动态响应较大,此时应加以考虑。

取 $a = 0.21 \text{ Hz}$, LFC 控制系统中其它参数取自文献[2,4]。设区域系统 1 发生 1.2% 负荷扰动,系统中非线性负荷占 60%,发电机速度限制值取为 0.01,所计算的两区域系统 LFC 动态响应如图 6~8 中实线所示。为便于比较,当忽略非线性负荷时 LFC 动态响应如图 6~8 中虚线所示。在其它条件不变时,当 $a(0.2 \text{ Hz} \leq a \leq 0.5 \text{ Hz})$ 的取值增加和系统中非线性负荷所占比例增加时, LFC 动态响应振荡加大。

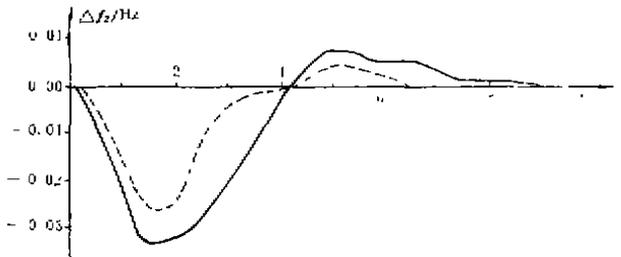


图 8 区域 2 系统频率偏移

4 结 论

本文根据描述函数法,推导并建立了考虑非线性负荷影响的负荷频率控制数学模型,通过数字仿真计算表明:1)随着非线性负荷模型阶数的增加,对 LFC 的影响也逐渐减小;2)当非线性负荷占全系统负荷 60% 以下时,在 LFC 中忽略非线性负荷所产生的误差小于 5%;3)当系统中非线性负荷占总负荷 60% 以上时,对 LFC 动态响应影响较大,必须在 LFC 中加以考虑。

参 考 文 献

- 1 Kirchmayer L K. Economic Control of Interconnected Systems. New York: Wiley, 1959, 1~20
- 2 Fosha C E, Elgerd O I. The Megawatt-Frequency Control Problem, A New Approach Via Optimal Control Theory. IEEE Trans, 1970, PAS-89(2), 563~571
- 3 Park Y M, Lee K L. Optimal Decentralized Load Frequency Control. Electric Power Systems Research, 1984, 7(1), 279~288
- 4 朱继忠,徐国禹. 负荷频率分散控制中调速器死区和速度限制的研究. 中国电机工程学报, 1991, 11(增刊): 15~22
- 5 Zhu Jizhong, Xu Guoyu. Application of Overlapping Information Sets to Load Frequency Control for Interconnected power Network. Proceedings Intern AMSE Conference, 1989, 5(1), 143~153
- 6 孙虎章. 自动控制原理. 北京:中央广播电视大学出版社, 1992. 228~256
- 7 Ikeda M, Siljak D D. Overlapping Decomposition, Expansions, and Contractions of Dynamic Systems. Large Scale Systems, 1980, 1(1): 29~38

附 录

符号说明 Δf 为频率偏移量; ΔP_G 为发电机调节量; ΔP_{tr} 为联络线功率偏移量; ΔP_L 为负荷扰动量; ΔX_s 为调速器输出位置变化量; ΔP_c 为控制变量; T_i 为汽轮机的时间常数; T_r 为调速器的时间常数; R 为调速器有差调节系数; B 为区域频率偏差系数; a_{12} 为两区域功率变换系数; M 为惯性常数; D 为机械阻尼系数; α, β 为调速器死区系数