

① 计及多种因素的水火系统负荷频率分散控制

62-69

DECENTRALIZED LOAD FREQUENCY CONTROL
OF HYDROTHERMAL POWER SYSTEM

朱继忠

Zhu Jizhong

徐国禹

Xu Guoyu

TM761

(重庆大学电气工程系)

摘要 用交迭信息法进行水火电互联系统负荷频率分散控制设计,协调了发电速率限制、发电机预热过程和调速器死区与 LFC 动态响应之间的矛盾。

关键词 分散控制; 负荷频率控制; 交迭分解; 水火电力系统

中国图书资料分类法分类号 TM761

ABSTRACT The decentralized load frequency control (LFC) of hydrothermal power system is designed with overlapping information set. The conflicts among the generation regulation constraint (GRC), the process of reheat steam turbines, the governor dead-band effects, and the dynamic response of LFC have been coordinated.

KEY WORDS decentralized control; load frequency control; overlapping decomposition; hydrothermal power system

0 引 言

负荷频率集中控制在信息传递问题上遇到很大的困难。因为互联电力系统通常在地理区域空间上分布广,在控制对象之间实现大量信息交换,无论从经济性还是从可靠性方面来说都是不适宜的。计算时的积累误差也可能不收敛,即存在所谓的大系统“维数灾”。

近年来,许多学者根据电力系统本身具有的地理分散结构,将互联电力系统分解为若干个较简单的子系统,就地设置局部控制器,这时各局部控制器之间无在线信息交换,只需取部分信,这就避免了实现集中负荷频率控制的困难^[1,2]。但是,迄今为止,在负荷频率控制模型中考虑发电机调整速度限制,发电机预热过程的影响和调速器死区非线性问题的研究甚少^[3]。

本文基于大系统分散控制理论中的交迭信息分解法,建立了一系列新的互联电力系统(包括水火系统)负荷频率分散控制数学模型。比较全面地分析了发电机调整速度限制,发电机预热过程以及调速器死区对 LFC 动态过程的影响。

* 收文日期 1990-07-02

重庆市科委资助项目

1 LFC 中调速器死区的研究

调速器死区一般是具有滞后型的非线性问题,可用描述函数法将其线性化^[4]。线性化后的调速器死区传递函数为:

$$G_i(S) = \frac{N_1 + (N_2/\omega)S}{1 + T_p S} = \frac{\alpha_i + \beta_i S}{1 + T_p S} \quad (1)$$

式中, N_1 、 N_2 为用傅里叶级数将调速器死区非线性函数展开式中系数; T_p 为调速器死区的时间常数。

于是,可得计及调速器死区非线性的两区域系统负荷频率控制框图如图 1 所示。

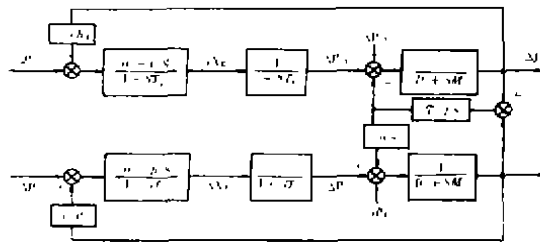


图 1 两区域互连系统 LFC 框图

对调速器部分,计及其死区的非线性问题后,则由框图1可得

$$\Delta X_{s1} = \frac{\alpha_1 + \beta_1 S}{1 + T_p S} \left(\Delta P_{c1} - \frac{\Delta f_1}{R_1} \right) \quad (2)$$

$$\Delta \dot{X}_{s1} - \frac{\beta_1}{T_p} \left(\Delta P_{c1} - \frac{\Delta f_1}{R_1} \right) = - \frac{\alpha_1}{T_p R_1} \Delta f_1 - \frac{\Delta X_{s1}}{T_p} + \frac{\alpha_1}{T_p} \Delta P_{c1} \quad (3)$$

令 $\Delta X_{s1} = \Delta X_{s1} - \beta_1 (\Delta P_{c1} - \Delta f_1 / R_1) / T_p$ (4)

则 $\Delta \dot{X}_{s1} = - \alpha_1 \Delta f_1 / T_p R_1 - \Delta X_{s1} / T_p + \alpha_1 \Delta P_{c1} / T_p$ (5)

取状态变量为 $X = [\Delta f_1, \Delta P_{c1}, \Delta X_{s1}, \Delta P_{u1}, \Delta f_2, \Delta P_{c2}, \Delta X_{s2}]^T$, 从而可推导得考虑调速器死区的 LFC 模型为:

$$\Delta \dot{f}_1 = - D_1 \Delta f_1 / M_1 + \Delta P_{c1} / M_1 - \Delta P_{u1} / M_1 - \Delta P_{d1} / M_1 \quad (6)$$

$$\Delta \dot{P}_{c1} = - \Delta P_{c1} / T_{11} + \Delta X_{s1} / T_{11} + B_1 \Delta P_{c1} / T_{11} T_{v1} - \beta_1 \Delta f_1 / T_{11} T_{v1} R_1 \quad (7)$$

$$\Delta \dot{X}_{s1} = (\beta_1 / T_{v1} R_1 - \alpha_1 / T_{v1} R_1) \Delta f_1 - \Delta X_{s1} / T_{s1} + (\alpha_1 / T_{v1} - \beta_1 / T_{v1}) \Delta P_{c1} \quad (8)$$

$$\Delta \dot{P}_{u1} = T_{12} \Delta f_1 - T_{12} \Delta f_2 \quad (9)$$

$$\Delta \dot{f}_2 = - D_2 \Delta f_2 / M_2 + \Delta P_{c2} / M_2 + \alpha_{12} \Delta P_{u1} / M_2 - \Delta P_{d2} / M_2 \quad (10)$$

$$\Delta \dot{P}_{c2} = - \Delta P_{c2} / T_{22} + \Delta X_{s2} / T_{22} + B_2 \Delta P_{c2} / T_{22} T_{v2} - \beta_2 \Delta f_2 / T_{22} T_{v2} R_2 \quad (11)$$

$$\Delta \dot{X}_{s2} = (\beta_2 / T_{v2} R_2 - \alpha_2 / T_{v2} R_2) \Delta f_2 - \Delta X_{s2} / T_{s2} + (\alpha_2 / T_{v2} - \beta_2 / T_{v2}) \Delta P_{c2} \quad (12)$$

$$Y_1 = ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{u1} \quad (13)$$

$$Y_2 = ACE_2 = B_2 \Delta f_2 - \alpha_{12} \Delta P_{u1} \quad (14)$$

1.1 发电机调整速度的考虑

将式(6)–(14)简写为

$$\dot{X} = AX + BU + DW \quad (15)$$

$$Y = CX \quad (16)$$

假设扰动为阶跃定常扰动,即 $W = 0$,对式(15)和(16)两边求导得

$$\dot{X} = A\dot{X} + B\dot{U} \quad (17)$$

$$\dot{Y} = C\dot{X} \quad (18)$$

通过引入变量 $X_7 = \dot{X} = [\Delta f_1 \Delta P_{01} \Delta X_{s01} \Delta P_{02} \Delta f_2 \Delta P_{02} \Delta X_{s02}]^T$, $Y_7 = \dot{Y} = [Y_1, Y_2]^T$, $U_7 = \dot{U} = [\Delta P_{c1}, \Delta P_{c2}]^T$, 则可将式(17)和(18)化为如下式:

$$\dot{X} = AX_7 + BU_7 \quad (19)$$

$$Y_7 = CX_7 \quad (20)$$

状态变量 X , 尤其是 $\Delta P_{01}, \Delta P_{02}, \Delta X_{s01}, \Delta X_{s02}$ 与发电速度关系密切, 上述通过对 X 进行求导惩罚, 从而间接地惩罚了发电速度, 其中 ΔP_{0i} 就是对应的发电速度。

对于以下各节的 LFC 控制模型, 均按此方法考虑了发电机调整速度, 不再重复。

1.2 交迭信息法用于负荷频率控制

为使负荷频率控制问题适于用交迭分解理论(其原理见文献[5]), 令 $Z^T = [X^T, Y^T]$, 即 $Z_1 = \Delta f_1, Z_2 = \Delta P_{01}, Z_3 = \Delta X_{s01}, Z_4 = ACE_1, Z_5 = \Delta P_{02}, Z_6 = ACE_2, Z_7 = \Delta f_2, Z_8 = \Delta P_{02}, Z_9 = \Delta X_{s02}$, 则可得状态方程:

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} \end{bmatrix} U_7 \quad (21)$$

其中,

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -D_1/M_1 & 1/M_1 & 0 & 0 \\ -K_{p1}/R_1 & -1/T_{d1} & 1/f_{01} & 0 \\ -K_{sp1}/R_1 & 0 & -1/f_{p1} & 0 \\ B_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_{33} = \begin{bmatrix} 0 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & -D_2/M_2 & 1/M_2 & 0 \\ 0 & -K_{p2}/R_2 & -1/T_{d2} & 1/T_{02} \\ 0 & -K_{sp2}/R_2 & 0 & -1/T_{02} \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = [-1/M_1 \ 0 \ 0 \ 1]^T, A_{32} = [-\alpha_{12} \ \alpha_{12}/M_2 \ 0 \ 0]^T, A_{21} = [T_{12} \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$A_{13} = 0_{4 \times 4}, A_{23} = [0 \ -T_{12} \ 0 \ 0]^T, A_{31} = 0_{4 \times 4}, A_{22} = 0, B_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$B_{11} = [0 \ K_{p1} \ K_{sp1} \ 0]^T, B_{31} = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$B_{22} = 0; K_{p2} = \beta_i/T_n T_p, K_{sp2} = \alpha_i/T_p - B_i/T_p$$

根据文献[5]知, 状态方程(21)可以进行解耦。由交迭分解理论可得扩展系统 \tilde{S}

$$\tilde{S}: \quad \dot{\tilde{Z}} = (\tilde{Z}_1, \tilde{Z}_2)^T = TZ \quad (22)$$

其中, $\tilde{Z}_1 = (Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ Z_4 \ Z_5 \ Z_6)^T, \tilde{Z}_2 = (Z_7 \ Z_8 \ Z_9)^T$, 显然 \tilde{Z} 的维数为 $n = n_1 + 2n_2 + n_3 = 10$ 。

按照交迭分解理论, 通过选矩阵 T, M, N , 可将扩展系统 S 分解为两个去耦的子系统, 因为状态与变量符号无关, 故将(21)式中 Z 换为 X , U_7 换为 U 则两个解耦的子系统为

$$\tilde{S}_1: \quad \dot{\tilde{X}}_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \tilde{X}_1 + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} U_1 \quad \tilde{S}_2: \quad \dot{\tilde{X}}_2 = \begin{bmatrix} A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \tilde{X}_2 + \begin{bmatrix} B_{22} \\ B_{32} \end{bmatrix} U_2$$

对于每个子系统, 用最优控制规律求解。这时, 二次型性能指标

$$J_i = 0.5 \int_0^{\infty} (\tilde{X}_i^T \tilde{Q}_i \tilde{X}_i + U_i^T R_i U_i) dt \quad (23)$$

$$\text{控制规律为} \quad U_i = -\tilde{K}_i \tilde{X}_i = -\tilde{R}_i^{-1} \tilde{B}_i^T \tilde{P}_i \tilde{X}_i \quad (24)$$

式中, \tilde{P}_i 满足 Ricatti 方程(25), 即

$$\tilde{P}_i \tilde{A}_i + \tilde{A}_i^T \tilde{P}_i - \tilde{P}_i \tilde{B}_i \tilde{R}_i^{-1} \tilde{B}_i^T \tilde{P}_i + \tilde{Q}_i = 0 \quad (25)$$

2 LFC 中发电机预热过程的研究

发电机预热过程的数学模型可表示为

$$\Delta P_{G_i} = \frac{1 + SK_{r_i} T_{r_i}}{(1 + ST_{r_i})(1 + ST_{r_i})} \Delta X_{r_i} \quad (26)$$

引入中间变量 ΔP_{r_i} , 可将式(26)化为如下两式:

$$\Delta \dot{P}_{r_i} = -\frac{1}{T_{r_i}} \Delta P_{r_i} + \frac{1}{T_{r_i}} \Delta X_{r_i} \quad i = 1, 2 \quad (27)$$

$$\Delta P_{G_i} = \frac{1 + SK_{r_i} T_{r_i}}{1 + ST_{r_i}} \Delta P_{r_i} \quad i = 1, 2 \quad (28)$$

不计预热过程的发电机模型即求式(27)。在一般的 LFC 模型中, 用式(27)和(28)代替原 LFC 模型中的发电机模型, 便可得计及发电机预热过程的 LFC 模型。

由式(28)得

$$\Delta P_{G_i} + T_{r_i} \Delta \dot{P}_{G_i} = \Delta P_{r_i} + K_{r_i} T_{r_i} \Delta \dot{P}_{r_i} \quad (29)$$

把式(27)代入式(29)得

$$T_{r_i} \Delta \dot{P}_{G_i} = \Delta P_{r_i} - \Delta P_{G_i} + K_{r_i} T_{r_i} \left(-\frac{1}{T_{r_i}} \Delta P_{r_i} + \frac{1}{T_{r_i}} \Delta X_{r_i} \right) \quad (30)$$

由式(30)得

$$\Delta \dot{P}_{G_i} = \frac{K_{r_i}}{T_{r_i}} \Delta X_{r_i} - \left(\frac{K_{r_i}}{T_{r_i}} - \frac{1}{T_{r_i}} \right) \Delta P_{r_i} - \frac{1}{T_{r_i}} \Delta P_{G_i} \quad (31)$$

根据计及发电机预热过程影响的 LFC 框图和上述推导, 可得其状态方程和输出方程为:

$$\Delta \dot{f}_1 = -D \Delta f_1 / M_1 + \Delta P_{G1} / M_1 - \Delta P_{w1} / M_1 - \Delta P_{G1} / M_1 \quad (32)$$

$$\Delta \dot{P}_{G1} = -\Delta P_{G1} / T_{r1} - \Delta P_{r1} (K_{r1} / T_{r1} - 1 / T_{r1}) + K_{r1} \Delta X_{r1} / T_{r1} \quad (33)$$

$$\Delta \dot{P}_{r1} = -\Delta P_{r1} / T_{r1} + \Delta X_{r1} / T_{r1} \quad (34)$$

$$\Delta \dot{X}_{r1} = -\Delta f_1 / T_{r1} R_1 - \Delta X_{r1} / T_{r1} + \Delta P_{G1} / T_{r1} \quad (35)$$

$$\Delta \dot{P}_{w1} = T_{12} \Delta f_1 - T_{12} \Delta f_2 \quad (36)$$

$$\Delta \dot{f}_2 = -D_2 \Delta f_2 / M_2 + \Delta P_{G2} / M_2 + a_{12} \Delta P_{w1} / M_2 - \Delta P_{G1} / M_2 \quad (37)$$

$$\Delta \dot{P}_{G2} = -\Delta P_{G2} / T_{r2} - \Delta P_{r2} (K_{r2} / T_{r2} - 1 / T_{r2}) + K_{r2} \Delta X_{r2} / T_{r2} \quad (38)$$

$$\Delta \dot{P}_{r2} = -\Delta P_{r2} / T_{r2} + \Delta X_{r2} / T_{r2} \quad (39)$$

$$\Delta \dot{X}_{r2} = -\Delta f_2 / T_{r2} R_2 - \Delta X_{r2} / T_{r2} + \Delta P_{G2} / T_{r2} \quad (40)$$

$$Y_1 = ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{w1} \quad (41)$$

$$Y_2 = ACE_2 = B_2 \Delta f_2 - a_{12} \Delta P_{w1} \quad (42)$$

方程(32)~(42)可化为(19), (20)形式, 并采用 2.2 节类似的方法求解。

3 LFC 中同时考虑调速器死区和发电机预热过程的影响

用式(26)取代图1中的原发电机模型,便可得同时考虑调速器死区和发电机预热过程影响的 LFC 框图(略)。

由式(4)可得

$$\Delta X_{sp} = \Delta X_{sp} + \beta_i \Delta P_{ci} / T_r - \beta_i \Delta f_i / T_{pi} R_i \quad (43)$$

把式(43)代入式(34)和(39)得

$$\Delta P_{pi} = -\frac{1}{T_u} \Delta P_{pi} + \frac{1}{T_u} \left(\Delta X_{sp} + \frac{\beta_i}{T_r} \Delta P_{ci} - \frac{\beta_i}{T_{pi} R_i} \Delta f_i \right) \quad (44)$$

$$\Delta P_{ri} = -\frac{\beta_i}{T_u T_{pi} R_i} \Delta f_i - \frac{1}{T_u} \Delta P_{pi} + \frac{1}{T_u} \Delta X_{sp} + \frac{\beta_i}{T_u T_r} \Delta P_{ci}$$

把式(43)代入式(33)和(38)得

$$\begin{aligned} \Delta P_{ci} = & -\frac{1}{T_{ri}} \Delta P_{ci} - \left(\frac{K_{ri}}{T_u} - \frac{1}{T_{ri}} \right) \Delta P_{pi} \\ & + \frac{K_{ri}}{T_u} \left(\Delta X_{sp} + \frac{\beta_i}{T_r} \Delta P_{ci} - \frac{\beta_i}{T_{pi} R_i} \Delta f_i \right) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{ci} = & -\frac{K_{ri} \beta_i}{T_u T_{pi} R_i} \Delta f_i - \frac{1}{T_{ri}} \Delta P_{ci} - \left(\frac{K_{ri}}{T_u} - \frac{1}{T_{ri}} \right) \Delta P_{pi} \\ & + \frac{K_{ri}}{T_u} \Delta X_{sp} + \frac{K_{ri} \beta_i}{T_u T_r} \Delta P_{ci} \end{aligned}$$

根据上述推导,可得计及调速器死区和发电机预热过程影响的 LFC 数学模型为:

状态方程

$$\Delta \dot{f}_1 = -D_1 \Delta f_1 / M_1 + \Delta P_{o1} / M_1 - \Delta P_{m1} / M_1 - \Delta P_{D1} / M_1 \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_{o1} = & -\Delta P_{o1} / T_{r1} + K_{r1} \Delta X_{sp1} / T_{r1} + (K_{r1} / T_{r1} - 1 / T_{r1}) \Delta P_{r1} \\ & + (K_{r1} \beta_1 / T_{u1} T_{p1}) \Delta P_{c1} - K_{r1} \beta_1 \Delta f_1 / T_{u1} T_{p1} R_1 \end{aligned} \quad (47)$$

$$\Delta \dot{P}_{r1} = -\beta_1 \Delta f_1 / T_{u1} T_{p1} R_1 - \Delta P_{r1} / T_{r1} + \Delta X_{sp1} / T_{r1} + \beta_1 \Delta P_{c1} / T_{r1} T_{p1} \quad (48)$$

$$\Delta \dot{X}_{sp1} = (\beta_1 / T_{p1}^2 R_1 - \alpha_1 / T_{p1} R_1) \Delta f_1 - \Delta X_{sp1} / T_{p1} + (\alpha_1 / T_{p1} - \beta_1 / T_{p1}^2) \Delta P_{c1} \quad (49)$$

$$\Delta \dot{P}_{m1} = T_{12} \Delta f_1 - T_{12} \Delta f_2 \quad (50)$$

$$\Delta \dot{f}_2 = -D_2 \Delta f_2 / M_2 + \Delta P_{o2} / M_2 + a_{12} \Delta P_{m1} / M_2 - \Delta P_{D2} / M_2 \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_{o2} = & -\Delta P_{o2} / T_{r2} + K_{r2} \Delta X_{sp2} / T_{r2} + (K_{r2} / T_{r2} - 1 / T_{r2}) \Delta P_{r2} + (K_{r2} \beta_2 / T_{u2} T_{p2}) \Delta P_{c2} \\ & - K_{r2} \beta_2 \Delta f_2 / T_{u2} T_{p2} R_2 \end{aligned} \quad (52)$$

$$\Delta \dot{P}_{r2} = -\beta_2 \Delta f_2 / T_{u2} T_{p2} R_2 - \Delta P_{r2} / T_{r2} + \Delta X_{sp2} / T_{r2} + \beta_2 \Delta P_{c2} / T_{r2} T_{p2} \quad (53)$$

$$\Delta \dot{X}_{sp2} = (\beta_2 / T_{p2}^2 R_2 - \alpha_2 / T_{p2} R_2) \Delta f_2 - \Delta X_{sp2} / T_{p2} + (\alpha_2 / T_{p2} - \beta_2 / T_{p2}^2) \Delta P_{c2} \quad (54)$$

输出方程

$$Y_1 = ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{m1} \quad (55)$$

$$Y_2 = ACE_2 = B_2 \Delta f_2 - a_{12} \Delta P_{m1} \quad (56)$$

方程(46)~(56)也可化成(19)、(20)形式,并用1.2节类似的方法求解。

4 水火电互联系统 LFC 研究

设区域 1 为火电系统(计及发电机预热过程),区域 2 为水电系统。按照前面类似地推导,可得水火电互联系统 LFC 数学模型为

$$\Delta f_1 = -D_1 \Delta f_1 / M_1 + \Delta P_{G1} / M_1 - \Delta P_{\omega 1} / M_1 - \Delta P_{D1} / M_1 \quad (57)$$

$$\Delta \dot{P}_{G1} = -(K_{r1} - 1/T_{r1}) \Delta P_{R1} - \Delta P_{D1} / T_{r1} + K_{r1} \Delta X_{R1} / T_{r1} \quad (58)$$

$$\Delta \dot{P}_{R1} = -\Delta P_{R1} / T_{r1} + \Delta X_{R1} / T_{r1} \quad (59)$$

$$\Delta \dot{X}_{R1} = -\Delta f_1 / T_{r1} R_1 - \Delta X_{R1} / T_{r1} + \Delta P_{G1} / T_{r1} \quad (60)$$

$$\Delta \dot{P}_{\omega 1} = T_{12} \Delta f_1 - T_{12} \Delta f_2 \quad (61)$$

$$\Delta f_2 = -D_2 \Delta f_2 / M_2 + \Delta P_{G2} / M_2 + \alpha_{12} \Delta P_{\omega 1} / M_2 - \Delta P_{D2} / M_2 \quad (62)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_{G2} = & 2T_R \Delta f_2 / T_1 T_2 R_2 - 2\Delta P_{G2} / T_W + 2(1/T_2 + 1/T_W) \Delta X_{R2} \\ & - 2(1/T_2 - T_R / T_1 T_2) \Delta P_{R2} - 2T_R \Delta P_{C2} / T_1 T_2 \end{aligned} \quad (63)$$

$$\Delta \dot{X}_{R2} = T_R \Delta f_2 / T_1 T_2 R_2 - \Delta X_{R2} / T_2 + (1/T_2 - T_R / T_1 T_2) \Delta P_{R2} + T_R \Delta P_{C2} / T_1 T_2 \quad (64)$$

$$\Delta \dot{P}_{R2} = -\Delta f_2 / T_1 R_2 - \Delta P_{R2} / T_1 + \Delta P_{C2} / T_1 \quad (65)$$

$$Y_1 = ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{\omega 1} \quad (66)$$

$$Y_2 = ACE_2 = B_2 \Delta f_2 - \alpha_{12} \Delta P_{\omega 1} \quad (67)$$

把方程(57)~(67)化成式(19)、(20)形式,并用 1.2 节类似的方法求解。

5 计算结果及其分析

为了考察调速器死区,发电机调整速度限制和发电机预热过程对 LFC 动态性能的影响,本文对两区域互联电力系统进行了 LFC 数字仿真计算,系统区域参数如下所示:

$$\begin{aligned} D_1 = D_2 = & 0.00833 \text{ p. u. MW. HZ}, & T_{r1} = T_{r2} = & 0.3 \text{ s}, & T_{r1} = T_{r2} = & 0.08 \text{ s}, \\ M_1 = M_2 = & 0.167 \text{ p. u. MW. s}^2, & T_{12} = & 0.545 \text{ p. u. MW}, & B_1 = B_2 = & 0.425, \\ R_1 = R_2 = & 2.4 \text{ hzp. u. MW}, & \alpha_{12} = & 1, & \alpha_1 = \alpha_2 = & 0.8, \\ \beta_1 = \beta_2 = & 0.2/\pi & T_{r1} = T_{r2} = & 10 \text{ s}, & K_{r1} = K_{r2} = & 0.5. \end{aligned}$$

设区域系统 1 发生 1% 负荷扰动,发电机调整速度限制值取为 0.01,所计算的两区域系统 LFC 动态响应如图 2~7 所示,共分为六种情况:

- (1) 集中控制,不计调速器死区、发电机速度限制和预热过程的影响;
- (2) 分散控制,考虑发电机速度限制的影响;
- (3) 分散控制,考虑调速器死区线性项和发电机速度限制的影响;
- (4) 分散控制,考虑调速器死区非线性和发电机速度限制的影响;
- (5) 分散控制,考虑发电机速度限制和预热过程的影响;
- (6) 分散控制,考虑调速器死区非线性、发电机速度限制和预热过程的影响。

其中,情况(1)的最大发电调速 $|\Delta \dot{P}_{G1}|_{\max} = 0.0227$,其余五种情况的最大调整发电速度 $|\Delta \dot{P}_{G1}|_{\max} \leq 0.01$ 。

从计算结果可知:

- (a) 情况(1)的动态响应是理想化的,波动幅度较小,但调节速度超过了限制值,难于实

现

(b) 情况(2)~(5)的动态响应波动幅度较大。其中(2)的波动幅度(4)的波动幅度小,比(3)的波动幅度大。说明了仅考虑调速器死区的线性项是难于真正反映调速器死区的特性,计算结果偏于乐观。

(c) 情况(5)的动态响应与(2)比较接近,说明单独考虑发电机预热过程对 LFC 动态响应几乎没有影响。

(d) 情况(6)的波动幅度最大,在10秒钟内不能达到稳定状态,说明同时考虑调速器死区、发电机调整速度限制和预热过程,对 LFC 动态响应的影响很大。

(e) 与采用比例加积分集中控制的文献[3](考虑了调速器死区)相比,本文结果明显更优。除情况(6)在20秒钟内能达到稳定状态外,本文其余情况的响应在10秒钟内均能达到稳定状态,而文献[3]的响应在40秒钟内不能达到稳定状态。

两区域水火电互联系统 LFC 动态响应如图8~10所示。

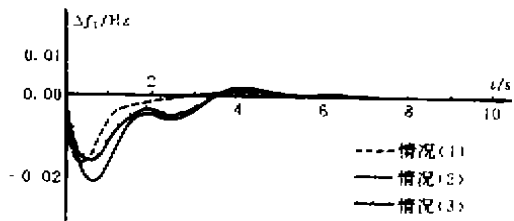


图 2 区域1系统频率偏移

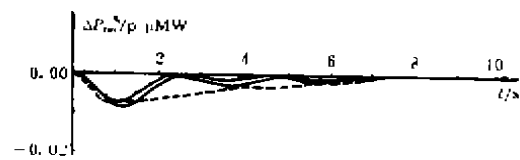


图 3 联络线功率偏移

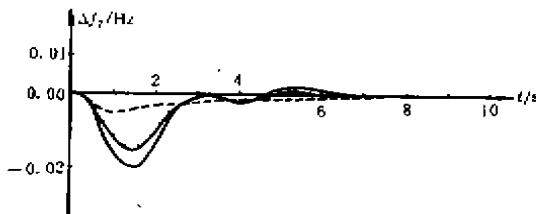


图 4 区域2系统频率偏移

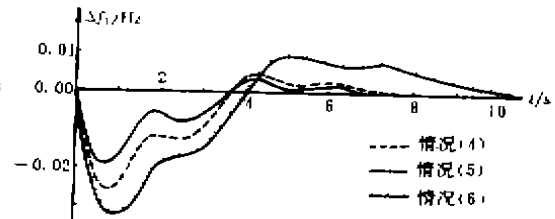


图 5 区域1系统频率偏移

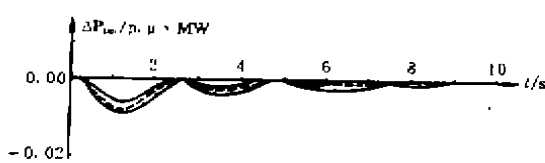


图 6 联络线功率偏移

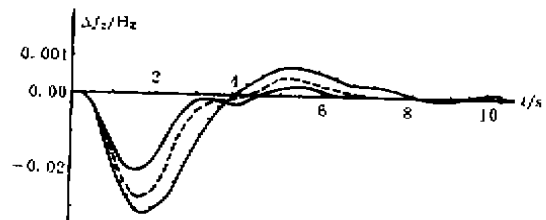


图 7 区域2系统频率偏移

图8~10中,实线为1%负荷扰动发生在火电区域;虚线为1%负荷扰动发生在水电区域。

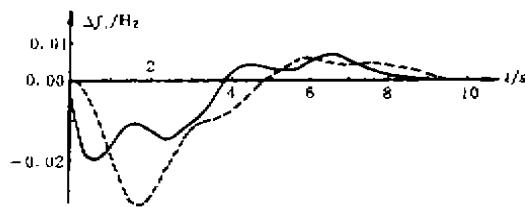


图 8 火电系统频率偏移

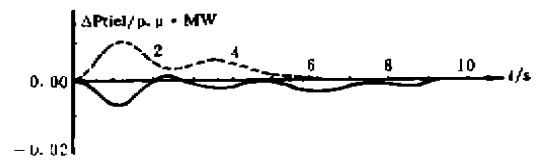


图 9 联络线功率偏移

6 结 论

本文基于大系统理论中的交迭信息法,建立了考虑发电机调整速率限制、发电机预热过程和调速器死区影响的负荷频率分散控制数学模型;并通过特征根灵敏度分析及权系数的选择^[4],协调了上述因素与 LFC 动态响应之间的矛盾。数字仿真算例仿真结果表明了本文方法和模型是很有效的。

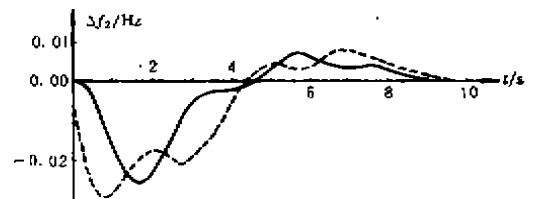


图 10 水电系统频率偏移

参 考 文 献

- 1 Davison E J, Tripathi N K. The Optimal Decentralized Control of a Large Power Systems, Load and Frequency Control. IEEE Trans AC, 1978, 23(1): 312~325
- 2 Park Y M, Lee K L. Optimal Decentralized Load Frequency Control. Electric Power Systems Research, 1984, 7(1): 279~288
- 3 Tripathi N K, et al. Sampled Data Automatic Generation Control Analysis with Reheat Steam Turbines and Governor Dead-band Effects. IEEE Trans, 1984, PAS-103(3): 1045~1051
- 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 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 为频率变化量; ΔP_G 为发电机调节量; ΔX_G 为调速器输出位置变化量; ΔP_{tie} 为联络线功率变化量; ΔP_D 为负荷扰动量; R 为调速器有差调节系数; T_1 为汽轮机的时间常数; T_1, T_2 为水电系统调速器时间常数; T_w 为水轮机的时间常数; a_{12} 为两区域系统功率变换系数; B 为频率偏差系数; M 为惯性常数; D 为阻尼系数; T_p 为汽机预热时间常数; K_p 为预热系数。