

发电机励磁系统及调速 系统的交迭分解分散控制

THE OVERLAPPING DECOMPOSITION DECENTRALIZED CONTROL FOR
GENERATOR'S EXCITER/GOVERNOR SYSTEMS

陈 于 平 秦 翼 鸿
Chen Ganping Qin Yihong

(电气工程系)

摘 要 本文利用交迭分解方法对发电机励磁系统及调速系统进行交迭分解, 设计了发电机励磁系统及调速系统的交迭分解分散控制系统。为了提高分散控制系统的动态品质, 引入二次反馈系统的概念, 在不改变原分散控制系统结构的前提下对一次反馈增益进行修正。通过具体的分散控制系统设计及其仿真结果表明, 该方法有效地改善了交迭分解分散控制系统的控制效果, 并保持了交迭分解分散控制的一切优点。同时本文的工作还表明将发电机励磁系统及调速系统进行分解控制是一种行之有效的简便方法。

关键词 电力系统稳定控制, 交迭分解, 分散控制

ABSTRACT In this paper the generator's exciter/governor system are decomposed by using the overlapping decomposition method, and an overlapping decomposition decentralized control (ODDC) system is designed for the exciter/governor systems. In order to enhance the dynamic qualities of the decentralized control system, the concept of the second feedback system is introduced to modify the first feedback gain matrix on the condition of the structure of the original decentralized control system maintaining unchanged. The practical decentralized control system design and its simulation results show that this method greatly improves the control effect of the ODDC system and also holds all the advantages of the ODDC system. Besides, this paper indicates that it is a simple and effective method to control exciter/governor system by overlapping decomposition decentralized control strategy.

KEY WORDS Power system stability control, overlapping decomposition, decentralized control.

本文于1988年5月3日收到

本文系国家自然科学基金资助项目

一、引言

为了提高电力系统的稳定性,采用附加控制系统是行之有效的方法。附加励磁控制系统和自动发电控制系统都从理论及实践上证明了其优越性。也有学者为了进一步提高系统的稳定性和抗干扰能力,采用了发电机综合控制〔1〕,即是用集中控制的方式对励磁机和调速器同时进行控制,无疑其控制效果要比单独用附加励磁控制系统或自动发电控制系统要显著得多。但是其缺点是状态变量多,系统阶数高,控制系统设计、调试复杂,而且信号的传输也较困难。要解决这些问题最好的方法是采用分散控制系统。

分散控制系统是将系统分成局部的子系统并进行局部的控制来完成对整个系统的控制作用。它避免了信号的传输、控制系统设计、调试的困难,但是以降低控制系统动态品质为代价的。Siliak等学者认为,采用公共信息集可以提高控制系统的可靠性和动态品质,因而提出了交迭分解分散控制的设计方法〔2〕。

发电机励磁系统和调速系统有着特征上的差别。励磁系统是电气回路,其时间常数小,动作速度快;调速系统是机械回路,其时间常数大,动作速度较缓慢。因此在设计发电机附加控制系统时应考虑到这些特点。事实上,励磁系统和调速系统之间的联系只是由角速度 ω 耦合起来的,这个状态变量 ω 就是励磁系统和调速系统的公共信息集,因而交迭分解分散控制结构就可以应用于此并可望收到好的效果。在研究中我们发现,目标函数中权矩阵 Q 的选择非常重要,否则就可能导致分散闭环系统不稳定。为了解决这个问题,一种办法就是找到合适的权矩阵〔3〕,另一种办法就是本文所提出的引入二次反馈系统的概念,对一次反馈增益进行修正以达到解决不稳定问题和提高控制系统动态品质的目的。文中推导了求取二次反馈增益的公式并以此设计了一发电机励磁系统/调速系统的交迭分解分散控制系统,收到良好的效果。

二、励磁系统与调速系统的交迭分解

对如下的待控系统及其二次性能指标

$$s_1: \dot{x} = Ax + Bu \quad x \in R^{n \times 1}, u \in R^r$$

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \\ A_{11} & A_{12} & A_{13} & n_1 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & n_2 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & n_3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_{32} \end{bmatrix}$$

(A, B) 可控

用变换矩阵 T 对原系统进行扩展,可得其扩展系统为〔4〕:

$$\begin{aligned} \tilde{s}: \quad \dot{\tilde{x}} &= \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}u \\ \tilde{J} &= \int_0^{\infty} (\tilde{x}^T \tilde{Q}\tilde{x} + u^T \tilde{R}u) dt \rightarrow \min \end{aligned} \quad (2)$$

扩展系统与原系统之间系统矩阵及权矩阵有如下的关系:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= TAT^T + M, \quad \tilde{B} = TB + N \\ \tilde{Q} &= (T^T)^T QT^T + M_Q, \quad \tilde{R} = R + N_R \end{aligned} \quad (3)$$

其中 T^T 表示 T 的广义逆。

通过选择适当的变换矩阵 T 及附加矩阵 M, N, M_Q, N_R , 扩展系统具有如下形式:

$$\begin{aligned} \tilde{s}: \quad \dot{\tilde{x}} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{23} \\ A_{22} & 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_{32} \end{bmatrix} u \\ \tilde{J} &= \int_0^{\infty} (\tilde{x}^T \tilde{Q}\tilde{x} + u^T \tilde{R}u) dt \rightarrow \min \end{aligned} \quad (4)$$

对扩展系统 \tilde{s} 直接进行解耦分解, 可得两个低阶系统 \tilde{s}_1, \tilde{s}_2 , 这两个子系统就是原系统的交迭分解子系统。

$$\begin{aligned} \tilde{s}_1: \quad \dot{\tilde{x}}_1 &= \tilde{A}_1 \tilde{x}_1 + \tilde{B}_1 u_1 \\ \tilde{J}_1 &= \int_0^{\infty} (\tilde{x}_1^T \tilde{Q}_1 \tilde{x}_1 + u_1^T \tilde{R}_1 u_1) dt \rightarrow \min \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{s}_2: \quad \dot{\tilde{x}}_2 &= \tilde{A}_2 \tilde{x}_2 + \tilde{B}_2 u_2 \\ \tilde{J}_2 &= \int_0^{\infty} (\tilde{x}_2^T \tilde{Q}_2 \tilde{x}_2 + u_2^T \tilde{R}_2 u_2) dt \rightarrow \min \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} & \tilde{B}_1 &= \begin{bmatrix} B_{11} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \tilde{A}_2 &= \begin{bmatrix} A_{22} & A_{23} \\ A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} & \tilde{B}_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ B_{32} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

我们用一八阶线性模型来描述所研究的发电机励磁系统和调速系统, 其状态方程如下:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \dot{v}_t \\ \dot{\delta} \\ \dot{\psi}_F \\ \dot{v}_F \\ \dot{\omega} \\ \dot{g} \\ \dot{h} \\ \dot{g}_I \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -0.274 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0832 & -0.0254 & 0.137 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.37 & 0.13 & -0.107 & -0.137 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.683 & -0.0816 & 0 & -0.0346 & 0.882 & 1.32 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0265 & -0.0616 & 0 & -1.37 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0531 & 0.123 & -0.171 & 2.74 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -13.7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_t \\ \delta \\ \psi_F \\ v_F \\ \omega \\ g \\ h \\ g_I \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} 1.0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_v \\ u_g \end{pmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

在所选用的状态变量中，角速度 ω 是联系励磁系统和调速系统的唯一状态变量，这一特点从状态方程(7)中可以清楚看出。很显然，如果要对该系统进行交迭分解，角速度 ω 就是交迭信息。利用前面所述的交迭分解原理，按(4)式进行扩展即可得原系统的扩展系统。通过计算可以知道，该扩展系统满足交迭分解分散控制的必要条件[5]，因此可望采用交迭分解分散控制来镇定。从而得到两个交迭分解子系统 S_{11} 、 S_{21} ：

$$\tilde{S}_{11} \begin{pmatrix} \dot{v}_t \\ \dot{\delta} \\ \dot{\psi}_F \\ \dot{v}_F \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.274 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & -0.0832 & -0.0254 & 0.137 & 0 \\ -1.37 & 0.13 & -0.107 & -0.137 & 0 \\ 0 & -0.683 & -0.0816 & 0 & -0.0346 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_t \\ \delta \\ \psi_F \\ v_F \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u_v \quad (8)$$

$$\tilde{s}_2: \begin{bmatrix} \omega \\ g \\ h \\ g_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0346 & 0.882 & 1.32 & 0 \\ -0.0265 & -0.0616 & 0 & -1.37 \\ 0.0531 & 0.123 & -0.171 & 2.74 \\ 0 & 0 & 0 & -13.7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ g \\ h \\ g_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.0 \end{bmatrix} u_2 \quad (9)$$

三、分散反馈增益的求取及其修正

将原系统 s 分解成两个系统 \tilde{s}_1, \tilde{s}_2 后, 对各子系统分别应用线性最优控制原理就可求得分散反馈增益[4]。研究中我们发现, 目标函数中权矩阵 Q 的选取对保证分散控制稳定具有重要的作用。

选择两组权矩阵:

$$Q_1 = \text{diag}(10 \ 10^2 \ 10 \ 5 \ 5 \times 10^2 \ 10^2 \ 10 \ 10), \quad R_1 = \text{diag}(1 \ 1)$$

$$Q_2 = \text{diag}(10^2 \ 10^2 \ 10^2 \ 10 \ 10^6 \ 10 \ 10^2 \ 10^2), \quad R_2 = \text{diag}(1 \ 1)$$

利用交迭分解分散控制原理, 可得分散反馈增益分别为:

$$K_1 = \begin{bmatrix} 3.838 & -8.437 & -3.717 & -2.494 & -6.739 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6.262 & -238.223 & -105.795 & 2.752 \\ 10.69 & -151.48 & -26.3 & -7.32 & -74.55 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -94.84 & -3315.5 & -1598.7 & 11.02 \end{bmatrix}$$

分析闭环系统的特征根的分布可以知道, 由 K_1 构成的反馈控制系统是不稳定的, 而由 K_2 构成的反馈控制系统是稳定的。分析 K_1 反馈系统不稳定的原因时我们发现, 主要是交迭信息状态变量所对应的模式没有得到改善, 如果我们在选择权矩阵时对交迭信息状态变量所对应的权重取得大一些, 结果将有所改观, Q_2 的选择说明了这一点。

交迭分解分散控制较之一般分散控制具有可靠性高, 动态品质有所改善的优点, 这些优点都是由于有共享信息集的存在。事实上, 交迭分解分散控制也没有充分地考虑原系统的耦合因素, 在一些情况下致使闭环系统动态品质很差甚至不稳定。由于交迭信息集在交迭分解分散控制中具有重要的作用, 可以设想在充分考虑原系统耦合情况下对交迭状态量对应的反馈增益进行修正, 就可以在不改变控制系统结构的前提下改善系统的动态品质, 同时还保持了交迭分解分散控制的一切优点。基于这样的思想, 本文引入了一次反馈系统和二次反馈系统的概念, 以二次反馈增益修正一次反馈增益, 达到改善控制效果的目的。

对线性系统

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (10)$$

设控制量由两部分组成:

$$u = u_1 + u_2 \quad (11)$$

且 u_1 是用交迭分解分散控制原理求得的, 称为一次反馈控制量, 构成的闭环系统称为一次反馈系统。

$$u_1 = -Kx \quad (12)$$

K 是交迭分解分散控制反馈增益，则有

$$\dot{x} = (\bar{A} - BK)x + Bu_2 = \bar{A}x + Bu_2 \quad (13)$$

其中 $\bar{A} = A - BK$ 称为一次反馈系统系数矩阵。

对于二次反馈控制量 u_2 的求取，由于需要修正的仅是交迭状态量，设交迭状态量为 y ，则 u_2 可描述为

$$u_2 = -Fy = -FCx \quad (14)$$

F 为二次反馈增益矩阵，要求得 F 建立如下目标函数：

$$\dot{x} = (\bar{A} - BFC)x = \bar{A}x + Bu_2 \quad (15)$$

$$\bar{J} = \int_0^{\infty} (x^T \bar{Q}x + u_2^T \bar{R}u_2) dt \rightarrow \min$$

设状态初值为 $x(0)$ ，并用 $\phi(t, 0)$ 表示系统转移函数，故有

$$\begin{aligned} \bar{J} &= x^T(0) \left[\int_0^{\infty} \phi^T(t, 0) (\bar{Q} + C^T F^T \bar{R} F C) \phi(t, 0) dt \right] x(0) \\ &= \text{tr} \left\{ \left[\int_0^{\infty} \phi^T(t, 0) (\bar{Q} + C^T F^T \bar{R} F C) \phi(t, 0) dt \right] x(0) x^T(0) \right\} \\ &= \text{tr} \left\{ P x(0) x^T(0) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

由于 $x(0)$ 的随机性，对 \bar{J} 的优化可以用其均值 \hat{J} 代替，并设 $E[x(0)x^T(0)] = \frac{1}{n}$ ，故有

$$\hat{J} = E(\bar{J}) = E\{\text{tr}[P x(0) x^T(0)]\} = \frac{1}{n} \text{tr}(P) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P &= \int_0^{\infty} \phi^T(t, 0) (\bar{Q} + C^T F^T \bar{R} F C) \phi(t, 0) dt \\ &= \int_0^{\infty} \text{EXP}[(\bar{A} - BFC)^T t] (\bar{Q} + C^T F^T \bar{R} F C) \text{EXP}[(\bar{A} - BFC)t] dt \end{aligned}$$

在式(17)中对 F 求导

$$\frac{\partial \hat{J}}{\partial F} = 2(\bar{R} F C L C^T - B^T P L C^T) \quad (18)$$

令 $\frac{\partial \hat{J}}{\partial F} = 0$ 即可求出二次反馈增益矩阵 F

$$F = \bar{R}^{-1} B^T P L C^T (C L C^T)^{-1} \quad (19)$$

且矩阵 P 、 L 满足下列李雅普诺夫方程：

$$P(\bar{A} - BFC) + (\bar{A} - BFC)^T P + \bar{Q} + C^T F^T \bar{R} F C = 0 \quad (20)$$

$$L(\bar{A} - BFC)^T + (\bar{A} - BFC)L + I = 0 \quad (21)$$

迭代解方程(20)，(21)就可以求得二次反馈增益矩阵 F ，因而二次反馈系统就为：

$$\dot{x} = \bar{A}x + Bu_2 = [A - B(K + FC)]x = (A - BK')x \quad (22)$$

$K' = K + FC$ 是修正后的反馈增益矩阵，它的结构与交迭分解分散控制反馈增益矩阵的结构

一样，不同之处在于交迭状态量所对应的反馈系数经过了修正。

对于前面 K_1, K_2 两种情况，一种是一次反馈系统不稳定情况(对应于反馈矩阵 K_1)，一种是一次反馈系统稳定情况(对应于反馈矩阵 K_2)，分别用上述方法进行修正，所得两种情况的二次反馈增益矩阵分别为：

$$F_1 = \begin{bmatrix} 2.467 \\ 20.579 \end{bmatrix}, \quad F_2 = \begin{bmatrix} 20.023 \\ 09.802 \end{bmatrix}$$

F_1, F_2 分别在权矩阵 $(\bar{Q}_1, \bar{R}_1), (\bar{Q}_2, \bar{R}_2)$ 下求得的。

$$\bar{Q}_1 = \text{diag}(10 \ 50 \ 5 \ 5 \ 200 \ 50 \ 5 \ 5), \quad \bar{R}_1 = \text{diag}(1 \ 1)$$

$$\bar{Q}_2 = \text{diag}(70 \ 70 \ 40 \ 49 \ 9000 \ 70 \ 40 \ 40), \quad \bar{R}_2 = \text{diag}(1 \ 1)$$

从而可得修正反馈增益矩阵为：

$$K'_1 = \begin{bmatrix} 3.838 & -8.437 & -3.717 & -2.494 & -4.272 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 14.317 & -238.223 & -105.795 & 2.752 \end{bmatrix}$$

$$K'_2 = \begin{bmatrix} 10.69 & -151.48 & -26.30 & -7.32 & -54.53 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 14.96 & -3315.5 & -1598.7 & 11.02 \end{bmatrix}$$

为了比较反馈增益修正前后的动态品质，我们对此进行了仿真试验。小扰动试验假设机端电压 v_i 和调速器增益 g_i 都受到 $0.1pu$ 大小的瞬时扰动，仿真时步长选取为 $0.5ms$ 。在下面的

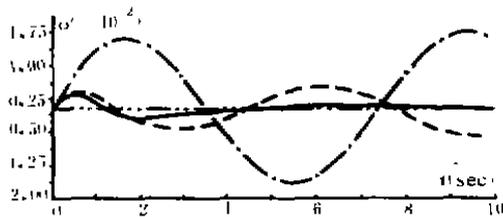


图 1

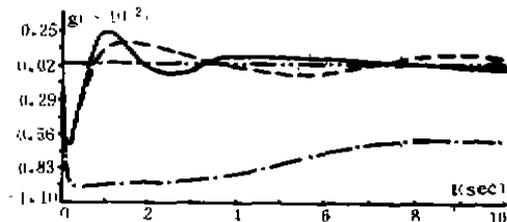


图 2

动态响应曲线中，点画线表示开环系统、虚线表示一次反馈系统、实线表示反馈增益修正后的闭环系统。

图 1—3 是交迭分散控制不稳定及其修正后的动态响应曲线。可以看出，尽管一次

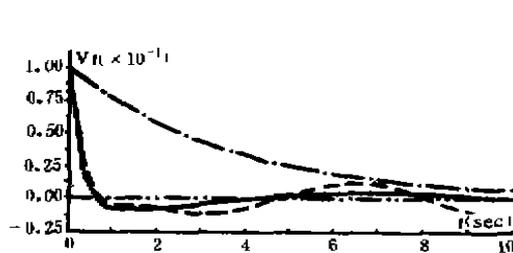


图 3

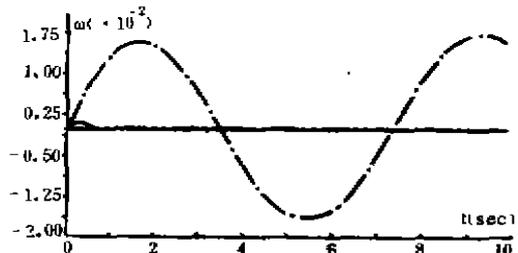


图 4

反馈系统不稳定，但经过修正后的二次反馈系统保证了系统稳定而且具有较优的动态品质，机端电压恢复很快，导水叶开度 g 以及角速度 ω 的动态品质都得到了显著改善。

图4是交迭分解分散控制稳定时角速度 ω 的动态响应曲线，显然在扰动过程中加入控制后角速度 ω 只受到了很小的影响。为了比较修正前后动态品质的改善，我们将角速度 ω 和功角 δ 的动态响应曲线放大绘于图5~6中。从 ω 、 δ 的放大响应曲线可以看出，加入修正后，动态响应要优良得多。

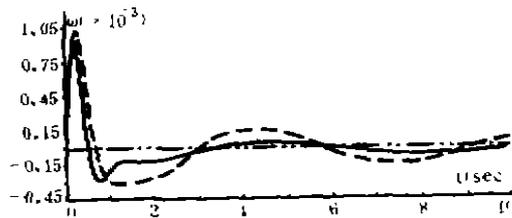


图5

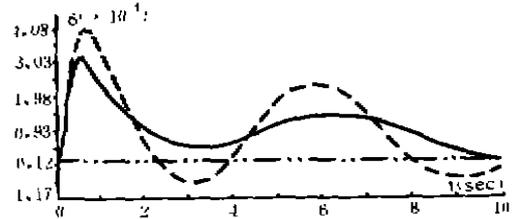


图6

因此，通过上面的实际例子的讨论，我们可以看到，本文提出的修正方法不但能使不稳定交迭分解分散控制系统成为稳定系统并具有满意的动态品质，而且能进一步提高稳定交迭分解分散控制系统的动态品质。

四、结 论

发电机励磁系统调速系统的附加控制是提高系统稳定性的有效措施。本文的研究表明，将励磁系统与调速系统进行交迭分解而设计的分散控制系统，在经过反馈增益矩阵修正以后可以达到很好的控制效果。该方法不改变交迭分解分散控制系统的结构，保持了其一切优点，且动态品质得到明显的提高，为交迭分解分散控制的实际应用起到了一定的推动作用。

参 考 文 献

- [1] Moussa A.M., Yao-nan Yu, Optimal Power System Stabilization Through Excitation and/or Governor Control, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, 1166-1174, May-June 1972
- [2] Ikeda M., Siljak D.D., Overlapping Decompositions, Expansions and Contractions of Dynamic Systems, Large Scale Systems, Vol.1, No.1, Feb 1980
- [3] 陈干平, 秦翼鸿: 一种线性最优控制权矩阵灵敏度选取法, 《重庆大学学报》, 第11卷, 第3期, 1988, 5
- [4] Ikeda M., Siljak D.D., White D.E., Decentralized Control with Overlapping

Information Sets, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 34, No. 2, June 1981

- [5] 陈干平, 秦翼鸿: 交迭分解分散控制适用性讨论, 《重庆大学学报》, 第11卷, 第6期, 1988.11
- [6] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎: 《输电系统最优控制》, 科学出版社, 1984