

多机电力系统分散最优励磁控制器研究

陈准金 韩英铎 王仲鸿

(清华大学电机系, 北京)

摘 要

本文根据有控制结构约束的分散控制理论研究了电力系统分散最优励磁控制, 并采用系统的性能指标确定反馈信号以及控制器安装顺序。为了验证所提控制方案对于抑制系统振荡及提高系统稳定性的效益, 对一个三机系统做了动态物理模型实验及数字仿真。

关键词: 最优控制; 分散控制; 电力系统

一、引 言

电力系统是一个典型的大系统。要对这样一个大系统实现全状态量反馈最优控制, 由于信息传递、造价、可靠性等原因, 现阶段几乎是不可能实现的, 客观上要求实行分散控制, 即各发电厂的控制器只反馈本地可以测得的状态量或输出量。

本文以有控制结构约束的分散控制理论研究了多机电力系统励磁控制。首先给出了多机电力系统状态方程和一种可包含多种输出量的输出方程式, 然后研究了反馈量的选择、控制器的安装地点和顺序等问题。本文采用的系统性能指标可以系统地、定量地比较具有不同反馈量以及不同装设地点时方案的优劣。为验证所提控制方案对抑制系统振荡及对提高系统稳定性的效益, 对一个三机系统做了物理模型实验和数字仿真。

二、多机电力系统数学模型

在不考虑调速器作用的情况下, 多机电力系统的状态方程和一种包含多种输出量的输出方程(推导从略)为:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (1)$$

$$Y = CX \quad (2)$$

$$\text{其中 } X = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E'_{q1}, \Delta E_{fd1}, \dots, \Delta\delta_N, \Delta\omega_N, \Delta E'_{qN}, \Delta E_{fdN}]^T \quad (3)$$

$$u = [\Delta u_{e1}, \dots, \Delta u_{eN}]^T \quad (4)$$

$$Y = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E_{fd1}, \Delta P_{e1}, \Delta V_{t1}, \Delta I_{t1}, \dots, \Delta\delta_N, \Delta\omega_N, \Delta E_{fdN}, \Delta P_{eN}, \Delta V_{tN}, \Delta I_{tN}]^T \quad (5)$$

上面各式的符号说明见文献[1].

Y 的维数可根据需要改变, 既可包括(5)式中的所有输出量, 也可只包括其中部分输出量. 附录中给出了系统(如图1所示)的 A 、 B 、 C 矩阵的数值.

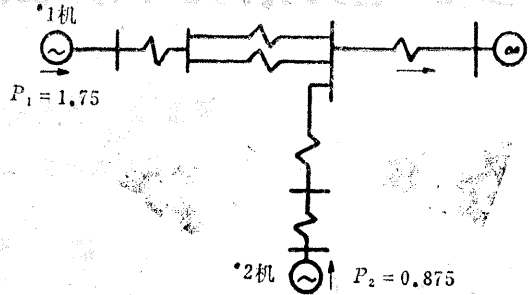


图1 两机对无穷大系统图

三、分散控制简述

对于系统方程(1)、(2)希望找到一个完全分散的输出反馈控制器:

$$u = K_d Y \quad (6)$$

$$K_d \in \Omega = \{K/K = \text{blockdiag}(K_1 \dots K_N), A + BK_d \text{ 稳定} \} \quad (7)$$

使
$$J = \int_0^\infty (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (8)$$

为极小. Ω 定义为可以给出完全分散控制的分块对角阵 K 的集合. 设初值 X_0 为一均匀分布随机向量, 则(8)式变为

$$J = T, V \quad (9)$$

根据最优性条件可得:

$$P(A + BK_d C)^T + (A + BK_d C)P + I = 0 \quad (10)$$

$$(A + BK_d C)^T V + V(A + BK_d C) + Q + C^T K_d^T R K_d C = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial J}{\partial K_d} = R K_d (C P C^T)_d + (B^T V P C^T)_d = 0 \quad (12)$$

(12) 式中, $(C P C^T)_d \triangleq \text{blockdiag}(C P C^T)$

$(B^T V P C^T)_d \triangleq \text{blockdiag}(B^T V P C^T)$

求解(10) — (12) 方程组即可求得分散控制反馈增益阵 K_d .

四、反馈量的选择

式(5)的输出量可包括: 转角、转速、励磁电压、机端电压、电功率、电流等量. 这些量测量的难易不同, 受干扰的影响严重程度不同, 同时对状态量变化的影响也不同. 为了确定选择哪些输出量组成反馈控制较为有效, 可按如下步骤进行:

1. 列出各种可能的反馈变量组合;
2. 解(10) — (12) 式的矩阵代数方程组求得相应的 K_d 和 V ;

- 3. 依 (9) 式计算不同组合的系统性能指标;
- 4. 经比较选出性能指标较好且又容易实现的组合;
- 5. 做数字仿真或物理模型实验进行检验.

表1给出了图1系统中具有不同输出量反馈组合的励磁控制时的指标 J 的数值。由表上可以看出一个基本趋势: 反 馈 量 越 多所达到的性能指标就越好。序号 4 的控制方案每机均反馈 6 个量, 在各种分散控制 (表中所列) 中性能指标最好, 但其中角度不易测量, 序号5的性能指标次之, 但与序号6的指标已相差不大。从装置简便考虑, 我们取序号6的方案。在反馈3个量的方案中, 序号10的性能较好, 我们也取之作为一个试验方案。与全状态反馈最优控制比较, 序号 6 与序号 10 的 性 能 指 标 与 之 仅 分 别 相 差 1.79% 和 4.76%。

表1的结果是取各机 $Q = \text{diag}[500, 500, 6000, 100]$ 以及 $R = I$ 的条件下得到的, 上述数值是根据经验使受控发电机既有较好的动态品质又有较高的静稳定功率极限而选取的。当 Q 的数值有较大变化时表1结果的影响尚须进一步研究。

表 1 不同反馈量组合时性能指标比较

序号	反 馈 量	J
1	全状态反馈最优控制	38552.7734
2	常规控制 $K_R=10$	173748.625
3	常规控制 $K_R=20$	296352.3125
4	$\delta \quad \omega \quad E_{fd} \quad P_e \quad V_t \quad I_t$	38697.0508
5	$\omega \quad E_{fd} \quad P_e \quad V_t \quad I_t$	39034.9414
6	$\omega \quad E_{fd} \quad P_e \quad V_t$	39244.8633
7	$\omega \quad E_{fd} \quad V_t \quad I_t$	39725.3086
8	$E_{fd} \quad P_e \quad V_t \quad I_t$	40150.6719
9	$E_{fd} \quad V_t \quad I_t$	40487.0273
10	$E_{fd} \quad P_e \quad V_t$	40390.9453
11	$\omega \quad E_{fd} \quad V_t$	75489.5
12	$P_e \quad V_t \quad I_t$	46966.9102
13	$\omega \quad V_t \quad I_t$	45389.7148
14	$\omega \quad V_t \quad P_e$	45388.7344
15	$E_{fd} \quad V_t$	128584.063
16	$V_t \quad I_t$	47361.6797
17	$V_t \quad P_e$	47282.7305
18	$V_t \quad \omega$	88150.9375

五、控制器装设地点的选择

电力系统是一个大系统, 其中每台机都是一个可控点。由于不可能同时在每台发电机上装设分散控制器, 所以有个先后问题, 即首先应在何处安装分散控制器, 以后的安

装顺序又如何?

本文提出的分散控制器定位方法仍采用上节提到的性能指标法。

具体方法如下:

1. 在上一节已选好反馈变量的基础上, 逐一在各台机上装设分散控制器并计算在不同机组上装设分散控制器时系统的性能指标, 选出其中使全系统性能指标较小者, 作为该系统中首先装设分散控制器的地点。

2. 第一台控制器装设机组选好以后, 在余下的 $n-1$ 台机组中逐一装设分散控制器, 并分别与第一台机组联合设计, 计算在两台控制器共同作用下所达到的全系统性能指标, 选其中较好者作为装设控制器的第二台机组。

3. 如需装设更多的控制器, 依此类推。当控制器数目增加到系统性能指标改善不明显时为止。

从以上过程及有控制结构约束的分散控制本身的特点可以看出, 本文提出的方法在选择控制器装设地点的同时也确定了控制器反馈参数的大小, 并且在选择以后的控制器装设地点时, 也给出了以前装设的控制器反馈参数的调整值, 从而消除了前后装设的控制器之间的不良影响问题, 使前后装设的控制器处于最优的配合状态。

表2列出了在不同机组装设分散控制器时系统的性能指标 J 。其中反馈四量是指表1中的序号6, 三量指序号10。

表 2 不同机组装控制器时系统的性能指标

方案	控制器装设地点	J
1	仅*1机装, 反馈四量	59439.03
2	仅*2机装, 反馈四量	65291.56
3	二机均装, 反馈四量	39244.86
4	仅*1机装, 反馈三量	59499.18
5	仅*2机装, 反馈三量	65895.5
6	二机均装, 反馈三量	40390.95

由表2可见, 无论是反馈四个量还是反馈三个量, 在*1机装控制器均优于在*2机装控制器。

六、动态模拟试验

为了验证本文所提控制方案对提高系统稳定性能的效益, 我们对图1所示系统分别做了各种控制方案的数字仿真和动态模拟试验。研究内容为各种控制方案下系统受到大小干扰时的响应以及各种控制方案的静稳极限研究。限于篇幅, 这里仅给出部分动模试验结果。

图2至图5示出了几种不同控制方案下系统遭受大干扰后各量的动态响应录波图。大于扰方式为：*1机高压母线出口处的一回线0秒三相短路，0.15秒此回线切除，单回线运行，0.75秒重合闸成功。

从各响应曲线可以看出，本文研究的各种控制方案对系统振荡能起很强的阻尼作用。

我们在动模试验室做静稳极限研究时，将*2机有功固定，增加*1机功率，研究正常运行方式以及运行方式发生变化时各种控制方案下的静稳极限。表3列出了动模试验结果。

由表3可见，各种分散控制方案均能明显提高系统的静态稳定极限，在两机均反馈四个量的情况下，静稳极限可比常规控制提高23.9%，另外，在运行方式发生变化时，各种控制方案的静稳极限仍比常规为高。这说明本文所提控制方案对运行方式的变化不敏感，亦即具有一定的鲁棒性。

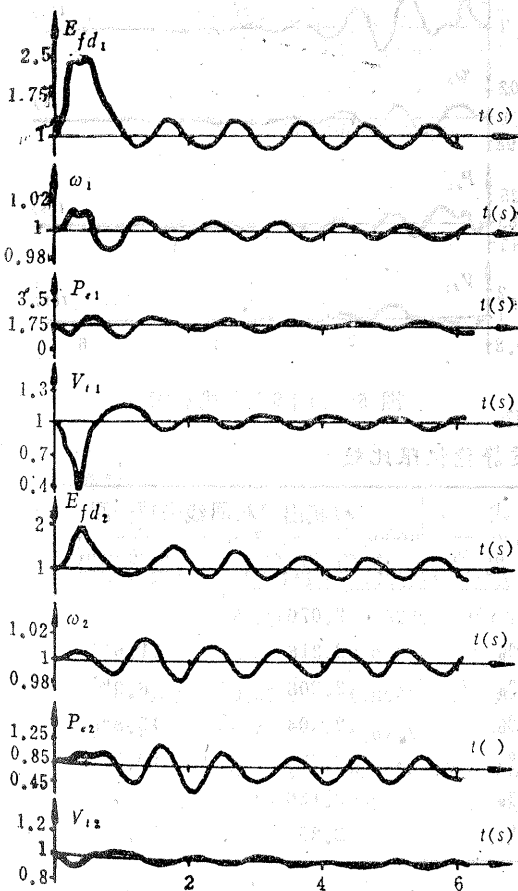


图 2 常规控制大干扰响应

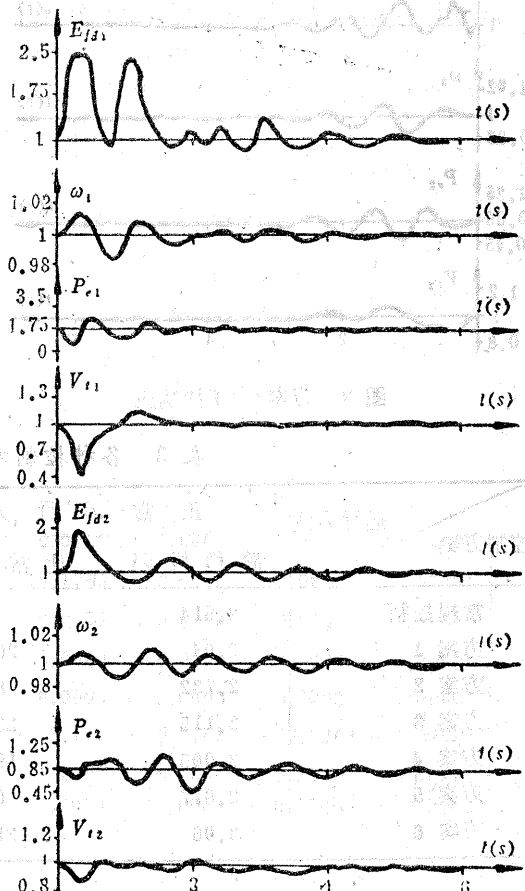


图 3 方案1大干扰响应

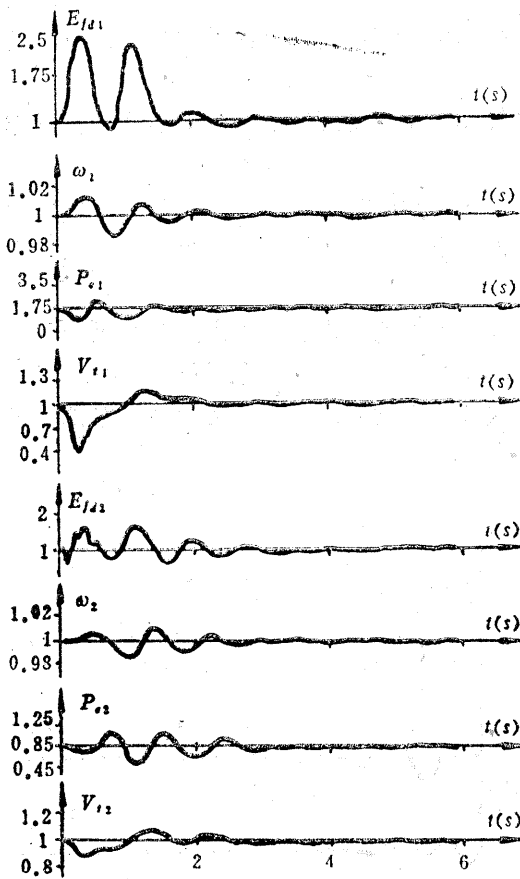


图 4 方案3大干扰响应

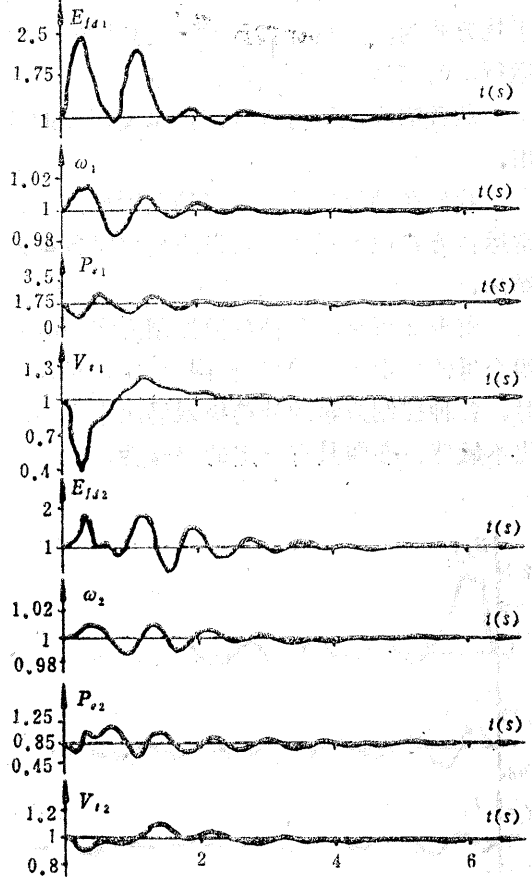


图 5 方案6大干扰响应

表 3 各种控制方案静稳极限比较

控制方案	正 常 运 行 方 式		*1机出口双回线去掉一回	
	静 稳 极 限	比 常 规 提 高	静 稳 极 限	比 常 规 提 高
常规控制	2.514		2.076	
方案 1	3.04	20.9%	2.316	11.6%
方案 2	2.732	8.7%	2.208	6.0%
方案 3	3.115	23.9%	2.404	15.8%
方案 4	3.005	19.5%	2.495	10.5%
方案 5	2.677	6.5%	2.186	5.3%
方案 6	3.06	21.7%	2.35	13.1%

七、结 论

本文以有信息结构约束的分散控制理论研究了多机电力系统励磁控制，给出了一种

可以包含多种输出量的输出方程式,并采用了用系统的性能指标来定量比较选择不同输出反馈信号时对系统性能的影响.此外,本文给出了一种选择分散最优控制器装设地点的方法.这种方法的特点是前后装设的控制器之间不会有不良影响,它们在全系统统一指标下能达到最佳的协调.动模试验结果表明,分散最优励磁控制对于阻尼系统振荡,提高系统的静稳极限均有很大的效益,并对不同运行方式有较好的适应性.

参 考 文 献

- [1] 熊正美、陈淮金, 大电力系统的解耦及关联测量控制法, 中国电机工程学报, 6, 6, (1986), 1—7.
- [2] Geromel, J.C., J. Bernussou, An Algorithm for Optimal Decentralized Regulation of Linear Quadratic Interconnected Systems, Automatica, 15, (1979), 489—491.
- [3] Mahalanabis, A.K., etc, On Decentralized Feed Back Stabilization of Large-scale Interconnected Systems, Int. J. Control 132, (1980), 115.
- [4] Geromel, J.C., etc, Optimal Decentralized Control of Dynamic Systems, Automatica, 18, (1982), 545.

附录

模型 A

[illegible]

模型B

[illegible]

模型C

1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.9059	0.0000	1.6780	0.0000	-0.5340	0.0000	-0.1671	0.0000
-0.1406	0.0000	0.5966	0.0000	-0.0066	0.0000	0.0890	0.0000
2.1020	0.0000	1.6730	0.0000	-0.4055	0.0000	-0.4903	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
-0.5340	0.0000	-0.1620	0.0000	1.3138	0.0000	1.2607	0.0000
-0.0665	0.0000	0.0740	0.0000	0.0324	0.0000	0.7422	0.0000
-0.3671	0.0000	0.4344	0.0000	1.3530	0.0000	1.3180	0.0000

Study on the Decentralized Optimal Excitation Controllers in Multimachine Power Systems

Chen Huaijin, Han Yingduo, Wang Zhonghong

(Department of Electrical Engineering Tsinghua University, Beijing)

Abstract

This paper presents a study on the decentralized optimal excitation control of electric power systems based on the theory of decentralized control with control structure constraints. The system performance index is used as a guidance to determine the feedback signals of machines and the sequence in which the controllers are installed. In order to verify the effectiveness of the control approach on the suppression of system oscillations and the enhancement of system stability, laboratory tests and digital simulations are made on a three-machine electric power system.

Key words:—Optimal control; Decentralized control; Power systems