

电力系统分散协调多目标优化励磁控制

郝正航¹,张书军²,龙凌¹,邱国跃¹

(1. 贵州工业大学电气工程学院,贵州 贵阳 550003; 2 开封电子科技学院,河南 开封 475100)

摘要:介绍了多机电力系统分散协调励磁控制的建模方法,利用相关特性法优化计算权矩阵,在希望的系统阻尼比和适当的机端电压反馈系数的共同约束下,求解 Levine - Ahlans方程组得到最优反馈系数。对一个典型复杂系统(EPR I-36系统)进行了分散控制结构约束下的全局励磁调节反馈系数优化计算。根据所得优化计算结果,使用电力系统分析综合程序(PSASP6.2)用户自定义功能对求取的励磁规律建模、仿真。给出了 Levine - Ahlans方程组的解和基于此解的仿真结果。

关键词:电力系统; 励磁调节; 参数优化; 协调控制; 权矩阵

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)02-0031-04

0 引言

实际电力系统是一个统一的、各动态元件、子系统间相互耦合的复杂大系统。而且越来越多的动态调控装置(如 FACTS)即将投入电力系统。因此就要求系统中控制器的设计不仅要解决分散问题,还必须重视协调问题。解决这一问题的方法之一是分散协调控制理论。在设计每个控制元件的控制规律时进行全盘考虑、综合设计,使得各局部控制器能够协调一致地工作,使全系统性能指标达到最优。

人们追求动力学系统的性能指标都是综合性的,各指标间又常常是矛盾的,电力系统也是如此。例如机电模式和电磁模式不可能同时向理想的方向发展。因此,必须在遵循电力系统实际行为要求的前提下,选择折中的、合理的动态指标意义下的权矩阵,进而得出最优解。因此,电力系统励磁调节的优化问题是多目标性质的,需要通过多次协调才可以达到符合实际的最优解。而且随着 FACTS技术的应用,今后的电力系统必定是多控制器电力系统,协调控制的思想将得到人们更高的重视。

理想的权矩阵应该能够使系统各机电振荡模式具有理想的阻尼比,过小的阻尼比是低频振荡的隐患,过大的机电模式阻尼需要以牺牲电磁阻尼为代价。权矩阵选择还应该保证各发电机具有适当较高的电压反馈放大倍数。本文采用相关特性法,在各机电振荡阻尼和电压反馈放大倍数两类指标的约束下首先优化权矩阵,然后在优化的权矩阵下求取最优反馈参数解,得到分散协调励磁调节器。通过算例仿真,证明收到了较好的效果。

1 分散协调最优控制问题的数学模型

多机电力系统励磁控制设计使用的线性化状态空间模型:

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

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

其中

$$X = [\dots, E_{q1}, E_{fd1}, \dots, E_{qN}, E_{fdN}]^T$$

$$Y = [\dots, E_{fd1}, P_{e1}, U_{t1}, I_{d1}, \dots, E_{fdN}, P_{eN}, U_{tN}, I_{dN}]^T$$

$$U = [U_{e1}, U_{e2}, \dots, U_{eN}]^T$$

输出反馈分散协调励磁控制所要解决的问题可以描述为:在式(1)、式(2)以及分散控制结构

$$U = K_d Y \quad (3)$$

的约束下,求分块对角反馈增益阵

$$K_d = \begin{bmatrix} K_{d1} & & & \\ & K_{d2} & & \\ & & \dots & \\ & & & K_{dN} \end{bmatrix}$$

使得全系统性能指标

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (4)$$

为极小。

这里的 K_d 为分块对角阵,意味着反馈量只取本地输出量,而式(1)、式(2)的约束意味着本地控制器可以兼顾到全局的状态变量,实现全系统协调最优控制。因此全部问题最后集中到一点,即如何求 K_d 的最优解。根据问题的性质, K_d 是 Levine - Ahlans方程组的解。即,

$$RK_d(CVC^T)_d + (B^T PVC^T)_d = 0 \quad (5)$$

$$P(A + BK_d C) + (A + BK_d C)^T P + Q + C^T K_d^T R K_d C = 0 \quad (6)$$

$$(A + BK_d C)V + V(A + BK_d C)^T + I = 0 \quad (7)$$

式中: A, B, C 分别是式 (1)、式 (2) 中的系统矩阵、控制矩阵和输出矩阵, 均为已知常数阵; Q, R 为设计者根据电力系统特点和要求事先设定的权矩阵。可见, K_d, P, V 为方程组的 3 个未知矩阵。求解该方程组即可得到对角反馈增益阵 K_d , 式 (3) 所要求的励磁规律相应随之确定。

虽然由多变量控制理论可知, 仅反馈本地输出量是不能保证全系统一定具有能镇定性的。但是, 由于反馈增益阵 K_d 是 Levine-Atlans 方程组的解, 受性能指标 J 为有限值的约束, 则闭环系统一定稳定。因为任何不稳定系统的性能指标 J 为无穷大。

2 权矩阵的优化选取

在选择权矩阵时, 首先考察孤立控制时闭环系统的特征值及阻尼比, 找出所有阻尼比小于 0.1 的弱阻尼机电振荡模式。由相关特性知, 这些弱阻尼机电振荡模式总是和某些机组对应相关的。确定每一个弱阻尼模式的相关机组, 通过赋给该机组状态变量 x_i, \dot{x}_i 合适的权系数, 可以使这些弱阻尼向理想阻尼移动。在多次迭代之后, 可达到符合要求的动态指标。

权矩阵优化的具体步骤如下:

1) 依次改变各机组的阻尼系数 D , 记录各机电振荡模式阻尼比的改变情况, 确定各机电振荡模式所分别对应的机组。

2) 给定各机电振荡模式希望的阻尼比 ζ_i 及容许误差 δ , 并给定各发电机电压反馈放大倍数的约束区间: $K_{U_i} P_i = (K_{U_{min}}, K_{U_{max}})$ 。

3) 设定分散协调控制器的权矩阵初值 Q , $Q = \text{diag}(q_1^{(0)}, q_1^{(0)}, qE_{q1}^{(0)}, qE_{fd1}, \dots, q_N^{(0)}, q_N^{(0)}, qE_{qN}^{(0)}, qE_{fdN})$ 。

4) 求解分散控制器各反馈参数, 并计算闭环控制系统各机电振荡模式的阻尼 $\zeta_i, i = 1, 2, \dots, N - 1$ 。

5) 分别计算

$$ER_i = \frac{\zeta_i - \zeta_i^*}{\zeta_i^*} \quad i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (8)$$

若满足 $|ER_i| \leq \delta, i = 1, 2, \dots, N - 1$ (9) 则置 $k = 1$, 转至下一步骤 6); 否则对不满足式 (9) 的 ER 修正相关之 q_i 和 $q_{\dot{x}_i}$:

$$q_i^{(m)} = q_i^{(m-1)} (1 - ER_i)$$

$$q_{\dot{x}_i}^{(m)} = q_{\dot{x}_i}^{(m-1)} (1 - ER_i)$$

其中: m 为迭代次数。

6) 检验各 K_{U_i} 是否满足 $K_{U_i} P_i$ 。若满足且 $k = 1$, 停止; 若均满足但 $k = 0$, 回到 4); 否则修正不满足的 K_{U_i} 所在机组的权系数 qE_{q_i} , 即令

$$qE_{q_i}^{(m)} = qE_{q_i}^{(m-1)} \left[1 - \frac{K_{U_i} - 0.5(K_{U_{min}} + K_{U_{max}})}{0.5(K_{U_{min}} + K_{U_{max}})} \right]$$

置 $k = 0$, 回到 4)。

3 实例分析

图 1 是 EPR I-36 节点多机电力系统测试算例。系统参数见文献 [7]。首先通过潮流计算得到运行点处的状态变量和非状态变量初值, 然后在运行点处完成偏差化、线性化得到线性化状态方程式 (1) 和式 (2); 然后利用 Matlab 语言程序, 求解最优权矩阵 Q 和相应的最优反馈对角阵 K_d 。3.1、3.2 节给出了 Q 和 K_d 的非零元素。根据 K_d 对应反馈系数, 使用电力系统分析综合程序 (PSASP6.2) 的用户自定义模型功能 (UD), 建立式 (3) 所表达的励磁控制模型, 并进行仿真计算。故障设置在 220 kV 枢纽变电站母线三相短路故障。3.3 节给出了暂态仿真结果。

3.1 权矩阵计算

利用上述方法迭代求取权矩阵如下:

$$Q = \text{diag}([525, 603, 36180, 8.8, \dots, 711, 805, 49560, 9.3, \dots, 697, 720, 32610, 8.5, \dots, 192, 186, 23000, 7.9, \dots, 1650, 4850, 58626, 6.6, \dots, 1060, 1150, 62211, 8.2, \dots, 788, 829, 88030, 9.5, \dots, 466, 89056, 8.5]);$$

3.2 反馈系数优化计算

表 1 Matlab 计算结果 (K_d 对应反馈系数)

Tab 1 Calculated results of Matlab (K_d s corresponding feedback coefficients)			
	转速差	有功差	端电压偏差
#1机	4.154 4	- 2.505 3	- 67.575 8
#2机	- 1.479 6	- 7.510 3	- 114.232 4
#3机	2.717 8	- 2.068 1	- 91.546 9
#4机	0.436 1	- 10.237 2	- 99.500 2
#5机	1.950 3	- 7.960 3	- 92.702 5
#6机	- 4.816 8	- 32.523 5	- 182.524 1
#7机	1.131 4	- 11.582 9	- 85.588 8
#8机	1.289 7	- 7.598 0	- 98.067 3

为了使分散协调励磁控制器和 PSS 具有可比性,反馈量取端电压偏差、输出有功偏差和转速偏差 3 个量,与常规励磁附加 PSS 的反馈通道结构相同。各机的反馈系数是分块对角阵 K_d 的非零元素,而 K_d 是 Levine - Athans 方程组的解,求解该方程组计算量是比较大的,本文采用 Matlab 语言编程实现了对 Levine - Athans 方程组的求解,详见表 1。

3.3 PSA SP 仿真结果

3.3.1 功角稳定性暂态仿真

设置 BUS19 三相短路,0.24 s 故障清除,各发电机的功角摇摆过程见图 2 和图 3。

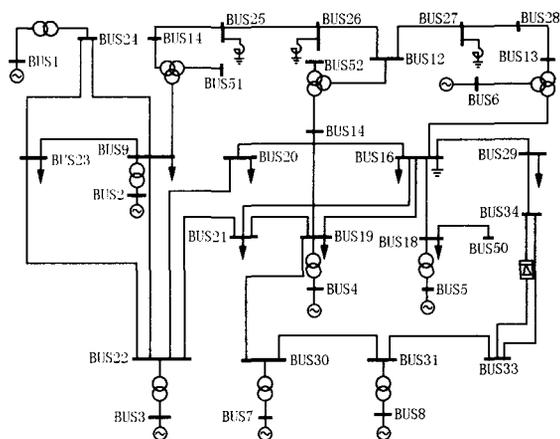


图 1 8机 36节点电力系统

Fig 1 Eightmachine 36-bus power system

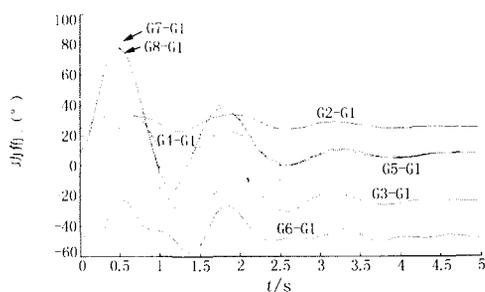


图 2 装常规 PSS 控制器功角暂态响应

Fig 2 Angles transient responses to common PSS controller

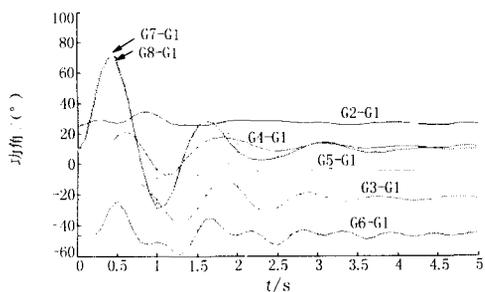


图 3 装分散协调控制器功角暂态响应

Fig 3 Angles transient responses to decentralized & coordinated controller

3.3.2 机端电压调节性能暂态仿真

设置 BUS19 三相短路,0.10 s 故障清除,各发电机的机端电压过渡过程见图 4 和图 5。

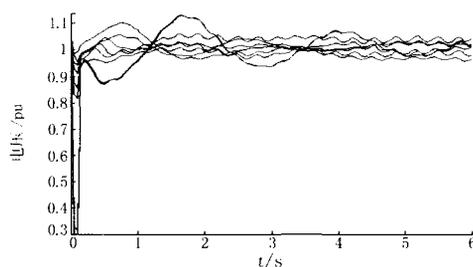


图 4 装常规 PSS 控制器各机端电压暂态响应

Fig 4 Generator voltage transient responses to common PSS controller

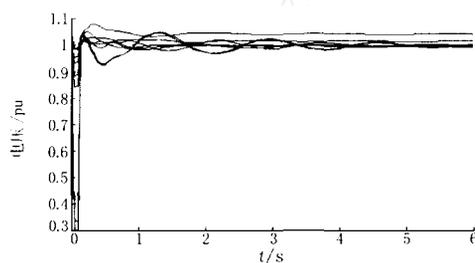


图 5 装分散协调控制器各机端电压暂态响应

Fig 5 Generator voltage transient responses to decentralized & coordinated controller

3.3.3 暂态稳定极限比较

设置 BUS19 三相短路,装设分散协调控制器时,最大故障清除时间为 0.245 s;装设常规 PSS 控制器时,最大故障清除时间为 0.195 s。

以上 3 项仿真使用了中国电科院开发的电力系统分析综合程序 (PSASP6.2) 的用户自定义功能,发电机采用了 5 阶模型。从两组仿真曲线和数据可以看出,装设分散协调控制器时,功角稳定性和电压调节精度均优于装设常规 PSS 控制器。

4 结论

对于存在强耦合作用的复杂电力系统采用传统分散孤立控制是无法给出满足全局性要求的控制规律的。在设计多机电力系统控制器时引入协调机制是必要的。分散协调控制规律的求取归结为 Levine-Athans 方程组的求解,但是在解算 Levine-Athans 方程组时,优化权矩阵是不可或缺的工作。权矩阵的选取应能够使闭环系统获得接近理想的阻尼比和适当的机端电压反馈系数。因此,多机系统分散协调励磁控制器设计需要二次优化才能完成。

通过 EPR I-36 多机电力系统分散协调控制器的设计与仿真,证实了装设分散协调励磁控制器较装设常规励磁控制器附加 PSS 系统的暂态稳定性有明显提高。在 BUS19 处发生三相短路故障,0.24 s 清除故障,若装设常规加 PSS 控制器,7 号机和 8 号机的首摆角度分别为 84.18 和 78.39°;若装设分散协调控制器 7 号机和 8 号机的首摆角度分别为 75.51 和 70.51°;三相短路故障极限切除时间由 0.195 s 延长至 0.245 s。装设分散协调控制器不但提高了功角稳定性,而且能保证较好的电压调节精度(如图 4 和图 5),其优越性已大大超过常规 PSS 控制器。

参考文献:

- [1] 韩英铎,王仲鸿,陈准金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, CHEN Huai-jin. Optimal Decentralized Coordinated Control of Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [2] Demello F P, Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 316-329.
- [3] 陈准金,韩英铎,王仲鸿. 多机电力系统分散输出反馈励磁控制器研究之二:权矩阵的协调选择[J]. 中国电机工程学报,1990,10(5):37-41.

CHEN Huai-jin, HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong. Study on the Decentralized Output Feedback Excitation Controllers in Multimachine Power Systems, Part Two: Coordinated Selection of Weighting Matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(5): 37-41.

- [4] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [5] Graham Rogers. Power System Oscillation[M]. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [6] Wang Y, Hin D J, Gao L, et al. Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 620-627.
- [7] 电科院计算所. 电力系统分析综合程序 6.2 版[Z]. 电力科学研究院, 2001.
Computer Group of EPR I Power System Analysis Software Package (Version 6.2) [Z]. EPR I China, 2001.

收稿日期: 2004-05-09; 修回日期: 2004-07-23

作者简介:

郝正航(1972-),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统分析与控制、FACTS 技术; E-mail: haozhenghang@163.com
张书军(1967-),男,教师,研究方向为电力电子技术,计算机应用,电子信息等;
龙凌(1975-),女,讲师,研究方向为电力系统运行与控制。

Decentralized and coordinated excitation control based on multi-objective optimization in power systems

HAO Zheng-hang¹, ZHANG Shu-jun², LONG Ling¹, Q U Guo-yue¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Guizhou University of Technology, Guizhou 550003, China;

2. Kaifeng Institute of Electronic Science & Technology, Kaifeng 475100, China)

Abstract: This paper introduces a method of modeling coordinated excitation system based on feedback from output variables. Optimized weight matrix is obtained with the method of relativity considering the expected damp and reasonable feedback parameters of generator voltage, and the optimized feedback coefficients are got from equations of Levine-Ahlans. A typical large power system and global optimal feedback parameters for excitation regulating are computed and obtained respectively, and those variables can be measured at local units. The designed excitation laws with the optimized results are modeled and simulated by power systems analysis soft package (PSASP). Answers of Levine-Ahlans equation groups and simulating results of a 8-machine 36-bus system are given.

Key words: power systems; excitation regulation; parameter optimization; coordinated control; weight matrix