

文章编号: 1006-4729(2011)03-0275-05

同步发电机励磁系统的最优控制仿真

程启明, 胡晓青, 周卉云, 王映斐

(上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 在 Simulink 软件平台上,以单机-无穷大电力系统为模型,在系统发生阶跃干扰和短路故障两种情况下,分别采用最优控制和 PID + PSS 控制两种励磁控制方法进行仿真比较研究,仿真结果表明两种励磁控制方法均能提高电力系统暂态稳定性,但最优励磁控制效果更佳。

关键词: 同步发电机; 励磁系统; 最优励磁; 电力系统稳定器; 仿真

中图分类号: TM761; TP13

文献标志码: A

Simulation of Optimal Control on Excitation System of Synchronous Generator

CHENG Qi-ming, HU Xiao-qing, ZHOU Hui-yun, WANG Ying-fei

(School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai University of
Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The single infinite power system is used as a model; two excitation control methods of optimal control and PID + PSS control are simulated and compared in step disturbance and short-circuit fault on Simulink software platform. The simulation results show that two excitation control methods can improve transient stability of power system, but the optimal excitation control has better control effect.

Key words: synchronous generator; excitation system; optimal excitation; power system stabilizer; simulation

电力系统是具有强非线性、时变性、时延性、大维数、参数不确定性的典型动态大系统,它的有效控制很困难。电力系统存在着静态稳定、暂态稳定及欠阻尼低频振荡等一系列稳定问题,稳定控制是电力系统的重要课题之一。目前,电力系统稳定性的主要措施大致有同步发电机励磁控制、静态电压控制、电气制动控制、快速汽门控制,以及快速切机、切负荷控制等,其中同步发电机励磁控

制是改善电力系统稳定性的一项既有效又经济的重要措施^[1,2]。励磁控制的主要任务就是进行电压控制、合理分配无功,以提高同步发电机并列运行的稳定性。在正常运行或故障情况下,同步发电机都需要调节其励磁电流。

随着大容量机组、远距离输电以及快速静止励磁方式的广泛应用,致使整个电力系统的阻尼特性恶化。常规 PID 等传统励磁控制会使电力系

收稿日期: 2010-09-07

通讯作者简介: 程启明(1965-),男,教授,江苏盐城人。主要研究方向为电力系统自动化,发电过程控制,先进控制及应用等。E-mail: chengqiming@sina.com.

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目(J51301)。

统发生低频振荡^[3],目前励磁控制广泛采用 PID + PSS 控制方式^[4],它除保留 PID 调节外,还增加了电力系统稳定器(PSS)辅助励磁控制策略,PSS 可使原来 PID 控制系统传递函数的主导极点左移,对低频振荡具有很好的抑制作用,可改善电力系统阻尼特性和小干扰稳定性,但 PSS 的参数要通过实验方法整定,工作量大,且 PSS 的鲁棒性和适应性较差.最优励磁控制^[5-7]根据对象的实际要求,用解析方法得出最优控制规律,保证最优的性能指标,其动态性能好于 PID 或 PSS 控制,改善了系统的鲁棒性、适应性及阻尼特性,提高了系统的静稳定极限.

此外,还有其他一些先进控制方法^[8-11]被引入励磁控制中,并产生了良好的控制效果.

本文将通过最优励磁控制与 PID + PSS 励磁控制的仿真对比,说明最优励磁控制优于 PID + PSS 励磁控制,且有效、可行.

1 同步发电机励磁系统组成

励磁控制系统结构如图 1 所示.

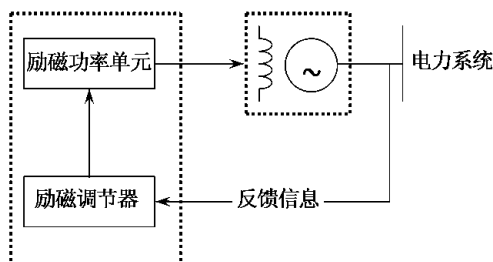


图 1 励磁控制系统结构

励磁系统是由励磁控制部分、同步发电机及检测信息共同组成的反馈控制系统.励磁控制部分包括励磁功率单元和励磁调节器,其中励磁功率单元负责向同步发电机的励磁绕组提供直流励磁电流,而励磁调节器根据发电机的运行状态,自动调节功率单元输出的励磁电流,以满足发电机的运行要求.

目前,励磁控制的研究重点主要在励磁功率单元(即励磁方式或主励磁系统)和励磁调节器的改进.按照整流方式的不同,励磁方式可以分成直流、交流、静态 3 类,其中静态自并励静止励磁方式目前被广泛采用.励磁调节器的发展包括硬件结构更新和控制方法优化,其中硬件结构发展与励磁方式发展有紧密联系,硬件结构可分为模拟式和微机式两类,目前都采用微机式;控制方法

优化更为关键,随着控制理论的发展,各种控制方法已被应用于励磁控制设计中,其中一些控制方法在实际电力系统中产生了很好的效益.

2 最优励磁控制器设计

同步发电机的内部具有定子绕组、转子绕组和阻尼绕组,绕组间都有磁耦合,且转子的位置在不断变化,绕组间的磁耦合必然和转子位置存在函数关系.此外,同步发电机的外部还需要描述负荷、励磁系统、机械力矩等动态过程.因此,整个励磁控制系统的数学模型非常复杂,但可简化为单机-无穷大母线输电系统的数学模型.

最优控制是由 BELLMAN R E 等人在 1957 年提出的,它是指在满足一定的约束条件下,寻求最优控制策略,使得系统的性能指标达到极值的一种控制方法.20 世纪 70 年代初,余耀南等人提出了线性最优励磁控制(LOEC)方法,20 世纪 80 年代卢强等人^[9]完善了 LOEC 的理论体系,并研制出了模拟式 LOEC 装置. LOEC 是将发电机的多个输出量偏差按最优反馈系数叠加而形成控制量,状态变量和反馈变量都选为机端电压偏差 ΔU_t ,转速偏差 $\Delta \omega$ 和电磁功率偏差 ΔP_e ,反馈增益系数可由发电机某运行点的线性化状态方程及二次型性能指标最小的目标函数解算得到,从而使状态偏差和控制量在设计运行点达到最优.

根据被控机组与电力系统的联系,可列出方程组,经线性化后可得到一般形式的系统状态方程为:

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

式中: X —— 状态向量, $X = [\Delta P_e, \Delta \omega, \Delta U_t]^T$;

U —— 输入向量, $U = \Delta E_t$;

ΔE_t —— 发电机的励磁绕组电势偏差;

A, B —— 系统矩阵和输入矩阵.

根据某励磁系统模型中的参数,可得到 A, B 分别为:

$$A = \begin{bmatrix} -0.037 & 1.281 & 0.298 \\ -78.461 & -0.51 & 0 \\ -0.035 & 0.134 & -0.271 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.068 \\ 0 \\ 0.059 \end{bmatrix} \quad (2)$$

采用二次型性能指标 J 为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \tag{3}$$

式中: Q, R —— 正定的加权矩阵和正的加权系数,
 $Q = \text{diag}(1, 100, 5\ 000)$, $R = 1$.

由于设计的线性最优励磁控制系统要求能在动态过程中保证 $\Delta P_e, \Delta \omega, \Delta U_t$ 的加权平方和对时间的积分为最小值, 且使所需要的输入控制 U 的能量适当. 因此可得 Riccati 方程为:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \tag{4}$$

由于可控性判定矩阵 $Q = [B \ AB \ A^2 B] \neq 0$, 励磁系统完全可控, 因此, 可判定系统的 Riccati 方程存在着唯一真解. 将矩阵 A 和 B 代入到 Riccati 方程中, 可得到对称正定矩阵 P 为:

$$P = 1.0e + 0.03 \begin{bmatrix} 1.075\ 9 & -0.025\ 9 & -0.169\ 1 \\ -0.025\ 9 & 0.022\ 2 & -0.057\ 3 \\ -0.169\ 1 & -0.057\ 3 & 1.317\ 4 \end{bmatrix} \tag{5}$$

从而能得到最优反馈增益矩阵为:

$$K = B^T P = [6.24 \quad -3.5 \quad 27.03] \tag{6}$$

由此可求出最优控制向量为:

$$U = -KX = -R^{-1} B^T R X = -66.24 \Delta P_e + 3.51 \Delta \omega - 27.03 \Delta U \tag{7}$$

3 仿真模型的建立

3.1 传统的 PID + PSS 控制系统的建立

(1) PSS 模块的建立 根据 PSS 的传递函数, 可构造 PSS 的 Simulink 仿真模型, 如图 2 所示, 可将其封装成子系统 PSS. 目前应用的 PSS, 常采

用 $\Delta \omega, \Delta P_e, \Delta f$ (频率偏差量) 3 种输入信号, 本文采用 ΔP_e . 图 2 中, T_e 为隔离稳态信号环节的时间常数, T_1 为滤波环节的时间常数, T_1 和 T_3 是 PSS 超前环节的参数, K 是放大倍数. PSS 的参数设置分别取为: $T_e = 10\ s, T_1 = 5\ s, T_2 = 0.181\ s, T_3 = 0.087\ s, K = 0.1$, 限幅 $\pm 5\%$.

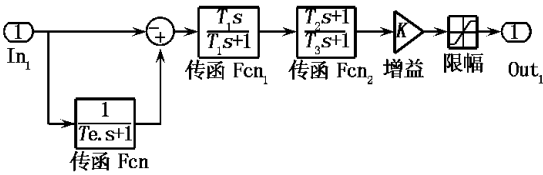


图 2 PSS 的 Simulink 仿真模型

(2) PID + PSS 励磁系统的建立 图 3 为基于 PID + PSS 的整个励磁控制系统 Simulink 仿真模型. 图中将测试模块 measurement 输出的 P_e 作为 PSS 的输入 In_1 , 而 PSS 将输出 Out_1 作为励磁系统 Excitation System 中 V_{std} 的输入, PSS 模块就被连到了励磁系统.

3.2 最优励磁控制器的建立

(1) 线性最优励磁控制器的建立 根据式 (7), 可构造出线性最优励磁控制器的 Simulink 仿真模型, 如图 4 所示, 它也可被封装成子系统 subsystem.

(2) 线性最优励磁控制系统的建立 将图 4 建立的线性最优励磁控制器的 Simulink 仿真模型取代图 3 的励磁系统 Excitation System 和 PSS 两模块, 就可得到基于最优励磁控制的整个励磁控制系统的 Simulink 仿真模型.

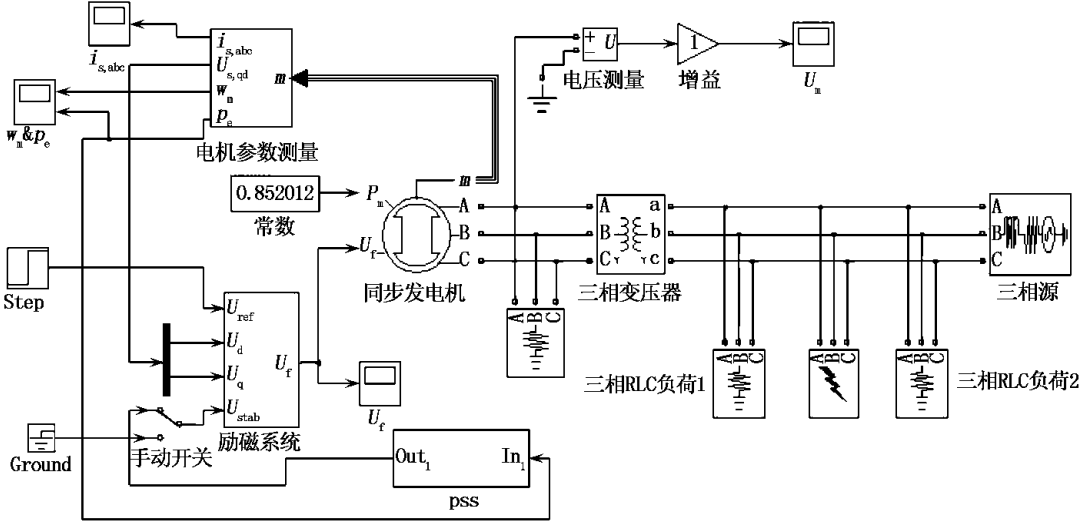


图 3 基于 PID + PSS 的整个励磁系统 Simulink 仿真模型

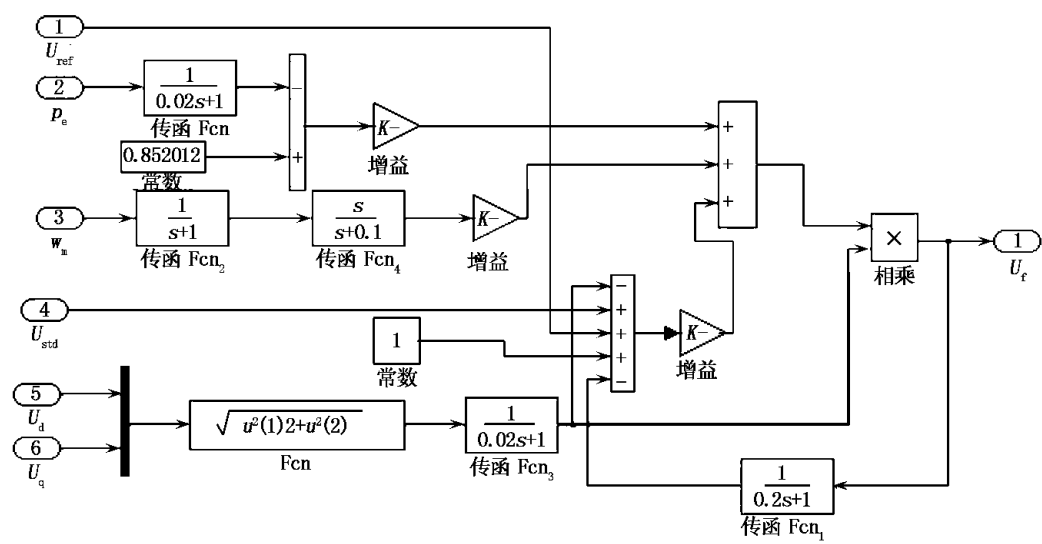


图 4 最优励磁控制器的 Simulink 仿真模型

4 励磁控制系统故障仿真

4.1 机端电压扰动仿真

在 $t = 10\text{ s}$ 时,在励磁控制器的端电压参考输

入端加上 50% 的阶跃扰动信号,进行扰动仿真实验.通过示波器输出的波形图,可以得出 PID + PSS,在最优励磁两种励磁调节方式下,发电机的电功率 P_e 和端电压 U_f 的仿真曲线,如图 5 和图 6 所示.

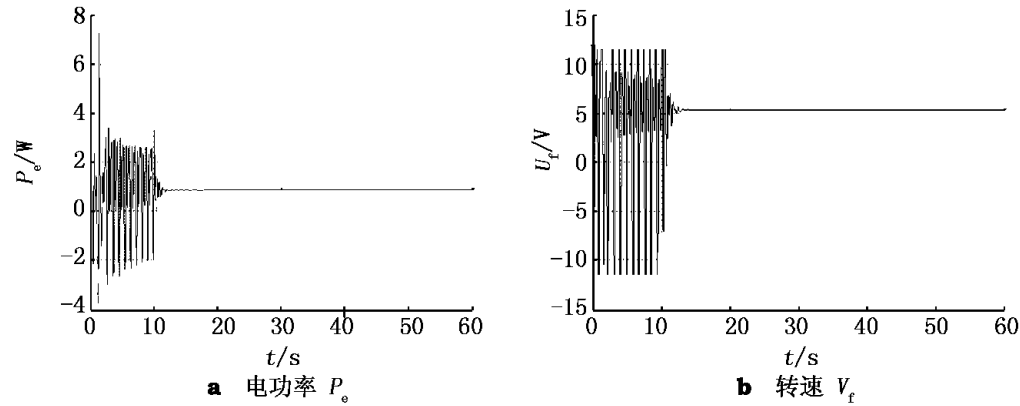


图 5 PID + PSS 小扰动时仿真曲线

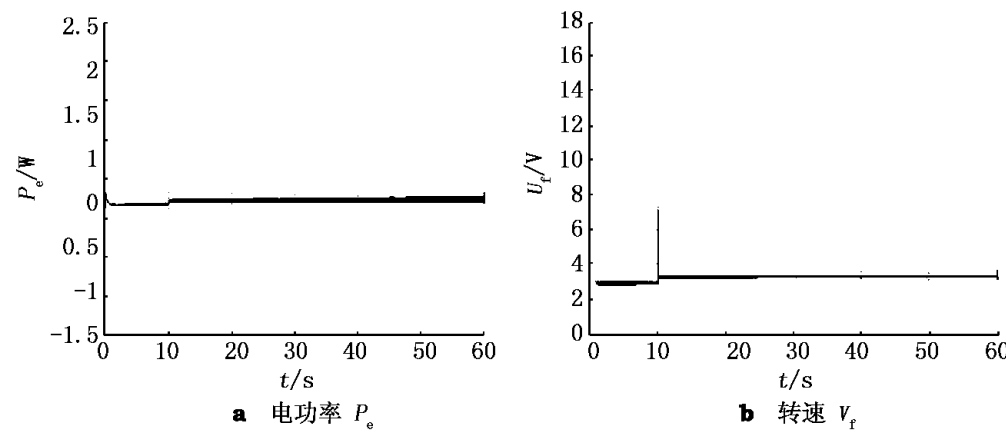


图 6 最优励磁小扰动时仿真曲线

4.2 短路故障仿真

在 $t = 10\text{ s}$ 时,通过三相故障元件设置三相短路故障, $t = 10.2\text{ s}$ 时故障被切除,据此进行三相短路故障的仿真实验. 两种励磁调节方式下电功率 P_e 的仿真曲线如图 7 所示.

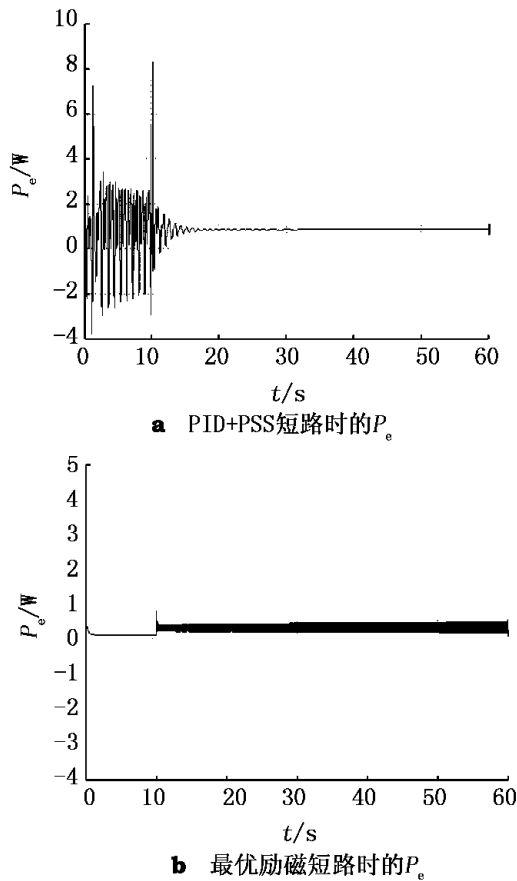


图 7 AVR + PSS 和最优励磁短路故障时仿真曲线

由图 7 可知,无论是在阶跃时还是短路时,最优励磁调节系统的抗扰动能力和快速稳定性远优于 AVR + PSS 调节器. 最优励磁调节系统在阶跃时,所需的恢复时间最短,基本为零;而在短路三相接地时,其稳定速度最快.

5 结 语

本文根据同步发电机数学模型, 选择了适合

PID + PSS 励磁控制、最优励磁控制的各项参数, 搭建了整个励磁系统的 Simulink 仿真模型, 分别仿真了在机端电压扰动、短路故障情况下两种励磁控制方法的控制情况, 说明了最优励磁控制在提高系统暂态稳定性上明显优于 PID + PSS 励磁控制. 最优励磁控制也有其不足, 它的鲁棒性和适应性较差, 只是针对单机无穷大系统, 在多机系统中不能保证最优和全局稳定, 没有确定电压调节通道的主导地位, 仅用权系数平衡考虑多因素, 虽能满足动态稳定要求, 但电压反馈增益不够高, 可能难以满足电压调节要求. 由于励磁控制系统实际上是一个强非线性、多变量和结构多变的复杂系统, 因此最好直接采用非线性控制、智能控制或多种控制结合的控制方法, 以取得更好的效果.

参考文献:

[1] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 30-49.

[2] 刘益青, 陈超英. 电力系统电压稳定性的动态分析方法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 11(1): 105-108.

[3] 黄小锋. PID 在发电机励磁控制系统中的应用 [J]. 电工技术, 2007(9): 79-80.

[4] RAY P S, DUTTAGUPTA P B, BHAKTA P. Coordinated multi-machine PSS design using both speed and electric power [J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1995(5): 503-510.

[5] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 102-115.

[6] 凌艳. 基于线性最优控制理论的励磁系统的设计及仿真 [J]. 变频器世界, 2007(7): 43-46.

[7] 韩英铎, 卢强, 冯庚烈, 等. 最优励磁控制用于远距离输电系统的稳定性 [J]. 清华大学学报, 1978, 18(2): 68-85.

[8] 赵新宽. 直接反馈线性化技术及其在励磁控制器中的应用 [J]. 长沙: 湖南大学, 2008.

[9] 张军. 励磁控制器的智能控制研究 [J]. 长沙: 湖南大学, 1999.

[10] 张秀珍. 小型同步发电机微机励磁控制研究 [J]. 长沙: 中南大学, 2008.

(编辑 苏 娟)