

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Исаев Андрей Станиславович, доцент кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ
ВО НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева

Волков Илья Александрович, бакалавр кафедры «Электроснабжение»
ФГБОУ ВО НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева

Статья посвящена математическому моделированию системы возбуждения синхронной машины. Реализована в Matlab модель ПИД-регулятора, для которой проведена настройка параметров в автоматическом и ручном режиме. Проведен анализ качества переходного процесса при вариации параметров регулятора.

Ключевые слова: синхронный генератор, устойчивость, система возбуждения, АРВ, ПИД-регулятор, Matlab, Simulink.

SIMULATION OF THE AUTOMATIC EXCITATION SYSTEM OF A SYNCHRONOUS MACHINE

Andrew S. Isaev, Assoc. Prof. Novomoskovsk Institute (branch) «Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia»

Ilya A. Volkov, Bachelor Novomoskovsk Institute (branch) «Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia»

The article shows the mathematical modeling of the excitation system of a synchronous machine. A PID controller has been implemented in Matlab, for which the parameters have been adjusted in automatic and manual modes. The analysis of the quality of the transient process with the variation of the controller parameters is carried out.

Keywords: synchronous generator, stability, excitation system, AVR, PID controller, Matlab, Simulink.

Введение. Устойчивость – способность системы сохранять исходный режим. Для обеспечения динамической устойчивости (сохранение режима

или близкого к нему) основным техническим средством является форсировка возбуждения синхронной машины. Традиционно автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) синхронных генераторов делится на регулирование пропорционального и сильного действия [1]. В первом случае автоматика реагирует на изменение параметров режима, во втором также и на скорость их изменения. Расчет параметров АРВ как раздела электромеханических переходных процессов изучен достаточно полно, в необходимом объеме изложен в [3].

Практически действие АРВ при расчетах устойчивости системы сводится к уменьшению суммарного сопротивления вследствие изменения сопротивления генератора – до переходного по продольной оси x_d' при пропорциональном регулировании, до нуля – при сильном. Развитие информационных технологий (впервые ЭВМ для расчета режимов электрических цепей предложено использовать в середине прошлого века [4]) позволяет рассматривать не только генератор как объект регулирования, но и комплексно систему автоматического регулирования (САР), включающую в себя и регулятор. Эта модель является более полной и точной – учитывается именно стабилизация параметров режима.

Согласно международным стандартам [8] по конструктивному исполнению системы возбуждения генераторных станций делятся на три группы: DC – система возбуждения постоянным током (как источник возбуждения использован коллекторный генератор постоянного тока); AC – система возбуждения переменным током (использован генератор переменного тока и неподвижные или вращающиеся выпрямители для выработки постоянного тока); ST – статическая система возбуждения (мощность возбуждения обеспечена трансформаторами или обмотками дополнительного генератора и выпрямителями).

Методы и моделирование. Рассмотрим модель простейшей энергосистемы (генераторная станция, работающая на шины неизменного напряжения) в Matlab (SimPowerSystems). Функции системы и ПИД-

регулятора приняты согласно [7]. Модель (рис.1) включает в себя синхронный генератор (*Synchronous Machine PU Standard*), обобщенную нагрузку (*Three-Phase Series RLC Load*), для визуализации результатов используются электронный осциллограф (*Scope*) и преобразовательный блок (*Bus Creator*).

Особенностью модели является то, что на вход синхронного генератора в качестве сигнала напряжения (U_f – соответствует сигналу обмотки возбуждения) подается не константа, а внешнее управляющее воздействие через блок возбудителя DC (*Excitation System*), настройки которого задаются традиционно через контекстное меню. Система возбуждения включает в себя 4 составляющих: входной низкочастотный фильтр (*Low Pass Filter*) с передаточной функцией $1/(T_f+1)$; главный регулятор (*Main Regulation*) с передаточной функцией $K_a/(sT_a+1)$; демпфирующий контур (*Damping filter*) с передаточной функцией $K_f/(sT_f+1)$; усилитель форсировки возбуждения (*Transient gain reduction*) с передаточной функцией $(sT_c+1)(sT_{c1}+1)/[(sT_b+1)(sT_{b1}+1)]$.

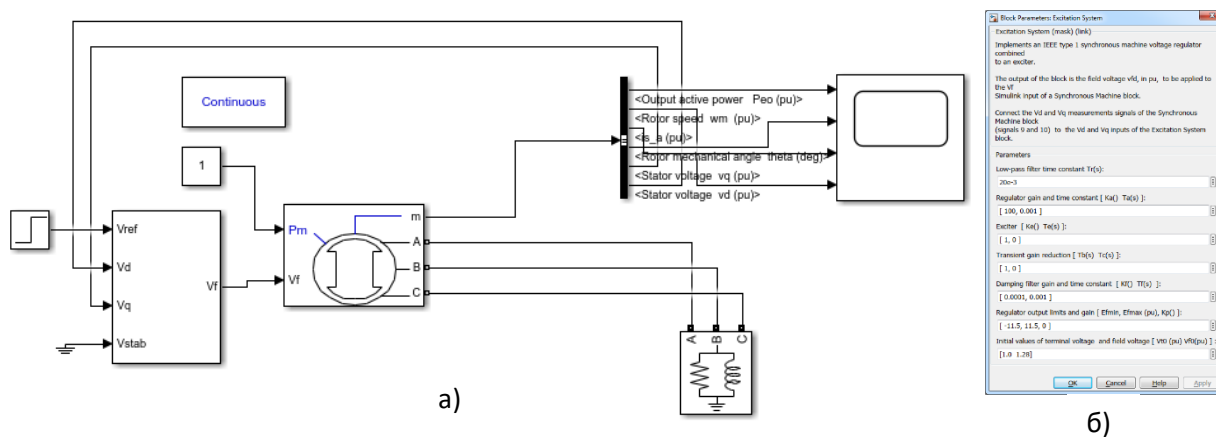


Рисунок 1 – Модель (Matlab SimPowerSystems);

а) простейшая система; б) параметры системы возбуждения

Регуляторы по закону регулирования (функциональная зависимость между выходным и входным параметрами) делятся на 4 основных класса: П (пропорциональный закон), И (интегральный), ПИ (пропорционально-интегральный), ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный).

Используем для моделирования ПИД-регулятор (действует пропорционально отклонению регулируемой величины, скорости и интегралу этого отклонения) ввиду его большего быстродействия и высокой устойчивости процесса регулирования. Меньшая погрешность и время переходного процесса привело к тому, что для реальных систем ПИД-регуляторы составляют не менее 90% от общего числа.

Структурная схема регулятора (рис.2-а) состоит из трех параллельных звеньев: пропорционального, интегрального, дифференциального. Пропорциональное звено препятствует отклонению текущей регулируемой величины от заданного значения; интегральное – интегрирует ошибку регулирования для последующего ее устранения; дифференциальное – противодействует отклонению величины от заданного значения в перспективе. В модели (рис.2-б) регулятор реализован с помощью блоков, выполняющих математические операции – три усилителя *Gain*, два сумматора *Sum*, интегратор *Integrator*, блок передаточной функции *Transfer Fcn*. При этом выделяются коэффициенты усиления K_p , K_i , K_d соответствующих отдельных звеньев – их изменение и представляет собой настройку регулятора.

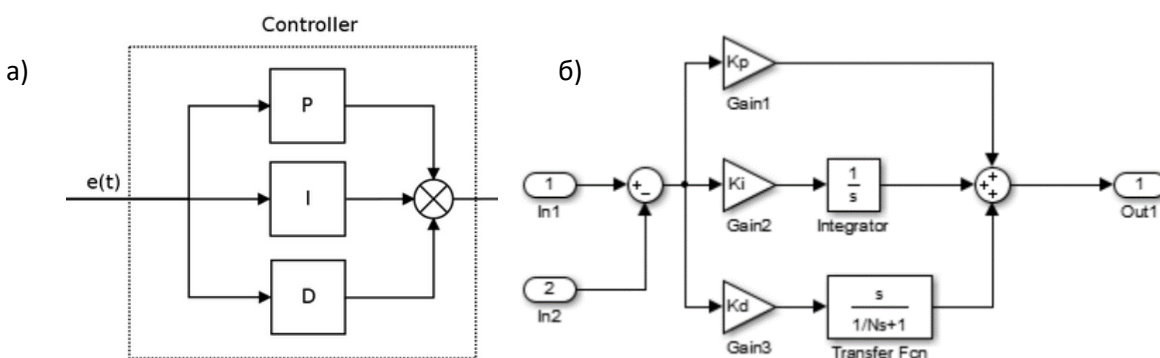


Рисунок 2 – Модель ПИД-регулятора;

а) структурная схема; б) модель (Matlab SimPowerSystems)

Результаты. Требования к регулятору основаны на робастном подходе, который обеспечивает прежде всего должный уровень надежности. При этом параметры делятся на две группы: необходимые (устойчивость режима, перерегулирование напряжения, длительность переходного

процесса) и факультативные (недорегулирование, длительность нарастания напряжения). Первые должны обеспечиваться САР, для вторых подбираются наиболее оптимальные возможные значения. Устойчивость режима обеспечивается по критериям Найквиста и Никольса – согласно [6] характеристическое уравнение представляет собой полином 5-й степени.

Для настройки в автоматическом режиме принят PID Tuner (рис.3). Это позволяет получить коэффициенты трех составляющих звеньев регулятора, время нарастания (*rise time*), время переходного процесса (*settling time*), перерегулирование по напряжению (*overshoot*), недорегулирование (*undershoot*).

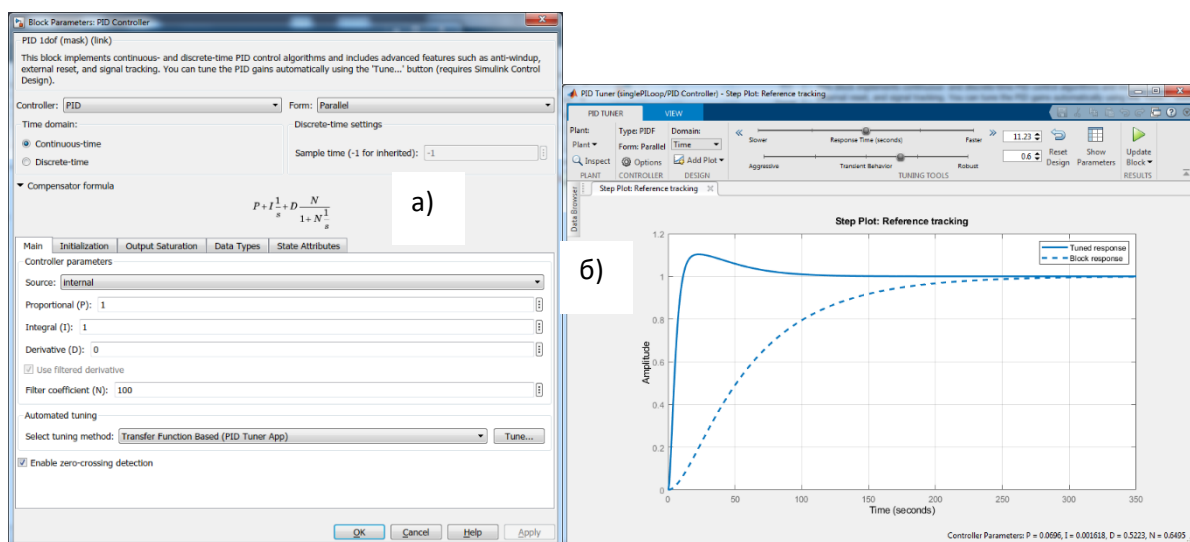


Рисунок 3 – Настройка ПИД-регулятора; а) интерфейс; б) подбор параметра

Алгоритм ручной настройки регулятора включает в себя три этапа. 1. Подбор коэффициентов пропорционального звена при отключенных других до момента начала автоколебаний. 2. Компенсация увеличением дифференциальной составляющей автоколебаний. 3. Устранение остаточной ошибки интегральной составляющей. Получены значения параметров переходного режима при изменении параметров регулятора (оптимальный режим соответствует $K_P = 0,780$, $K_i = 0,675$, $K_d = 0,214$). Их влияние на переходный процесс отражено в табл.1, 2.

Таблица 1 – Влияние коэффициентов усиления на переходный процесс

Параметр	Время переходного процесса	Время нарастания	Ошибка перерегулирования	Суммарная ошибка
K_P	нет влияния	уменьшение	увеличение	уменьшение
K_I	увеличение	уменьшение	увеличение	компенсация
K_D	уменьшение	нет влияния	уменьшение	

Таблица 2 – Влияние регулятора на параметры переходного процесса

Параметр	Время переходного процесса, с	Время нарастания напряжения, с	Перерегулирование напряжения, %	Недерегулирование напряжения, %
АРВ без регулятора	18,68	8,34	67	38
АРВ с регулятором	2,00	0,45	23	10

Обсуждение. Предложенный инструмент настройки регулятора PID Tuner не является оптимальным, с его помощью нельзя настраивать нелинейные уставки (в частности, Control System Tuner это делать позволяет). В [5] для этого использован интерфейс Signal Constraint. Выбор метода в нашем случае обусловлен наглядностью (процесс выполняется в диалоговом режиме) и доступностью (используется стандартный функциональный блок, а от пользователя не требуется высокой квалификации).

Нами решена прикладная задача – моделирование системы АРВ генератора. В работах (прежде всего – [2]), посвященных теории автоматического управления, выполнены различные модификации регулятора и рассмотрены ограничения, накладываемые реализацией для реального технического объекта. В этом направлении видится продолжение работы.

Заключение. На основе программной реализации отдельных элементов в среде Matlab/Simulink создана модель управления возбуждением синхронного генератора. Исследования показывают, что ручная настройка параметров регулятора предпочтительна. Анализ влияния этих параметров

выполнен на основе математических критериев устойчивости. Результаты могут быть использованы при разработке и настройке систем регулирования напряжения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Изд. 3-е. – М.: Высшая школа, 1978. – 415 с.
2. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. // Современные технологии автоматизации, №4, 2006, – с. 66-74. Современные технологии автоматизации, №1, 2007, – с.78-88.
3. Жданов П.С. Устойчивость электрических систем. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 399 с.
4. Конторович М.В. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. Изд. 4-е. – М.: Советское радио, 1964. – 320 с.
5. Марченко А.А., Наухацька Т.А. Оптимізація параметрів pid-контролера системи збудження генератора. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики» [Электронный ресурс] – 2017. – с.76-82. – URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/129888/125503>
6. Хрущев Ю.В. Методы расчета устойчивости энергосистем. Учебное пособие. – Томск: STT, 2005. – 176 с.
7. Центр компетенций Matlab. Mathworks Inc. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html> (дата обращения: 18.11.2022).
8. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies™. – 2005. doi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7553421>