

ОПТИМАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Р.И. КАНАФЕЕВ, А. Д. ЖИРНОВ, Т.Г. КЛИМОВА

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

В настоящее время в энергосистеме РФ происходит активная модернизация систем возбуждения генераторов. В связи с этим возникает задача выбора новых настроек регуляторов возбуждения различного типа, обеспечивающих эффективное демпфирование электромеханических колебаний.

Рассмотрены различные методы оптимизации необходимых целевых функций, составленных на основе корневых и частотных критериев оценки параметров процесса регулирования, для качественного функционирования автоматического регулятора возбуждения синхронного генератора (АРВ СГ), работающего в разных схемно-режимных ситуациях. Произведено практическое исследование полученных настроечных параметров АРВ СГ в программно-аппаратном комплексе RTDS (Real Time Digital Simulator) по программе сертификационных испытаний, определенных в Стандарте СО ЕЭС.

На основе проведенных измерений, получаемых при моделировании различных возмущений, определены оптимальные настройки. Рассмотрены наиболее точные и быстродействующие способы их получения на основе как прямых математических методов, так и более сложных.

Выявленные быстродействующие методы поиска оптимизационных параметров АРВ СГ позволяют при изменении параметров энергосистемы рассчитывать значения коэффициентов и постоянных времени и, тем самым, при возникновении электромеханических колебаний обеспечивать эффективное демпфирование.

Ключевые слова: статическая и динамическая устойчивость, АРВ, демпфирование электромеханических колебаний, быстродействие системы возбуждения, системный стабилизатор (PSS), алгоритмы оптимизации.

Введение

В настоящее время в энергосистеме РФ происходит активная модернизация систем возбуждения генераторов. Модернизация обусловлена как физическим износом, так и моральным старением оборудования систем возбуждения.

Для увеличения быстродействия систем возбуждения подвергаются модернизации регуляторы возбуждения предыдущих поколений, которые заменяются современными цифровыми регуляторами возбуждения на базе микропроцессорной техники. Так, к современным регуляторам относятся, например, цифровые регуляторы возбуждения АРВ-М и его модификации АРВ-2М и АРВ-3М (ОАО «Силовые машины» – филиал «Электросила»), АРВ-РЭМ (ЗАО «НЛП «НИИЭлектромаш»), «Русэлпром-Электромаш»), АРВ-НЛ (НПО «Элсиб» КОСУР-Ц ОАО), AVR2 (ОАО (ЗАО «Энергокомплект»), DECS-400 («Basler Electric», США), UNITROL-6000 («ABB», Швейцария), EX2100 («General Electric», США) и др.

В связи с этим ставится задача выбора новых настроек регуляторов возбуждения. Настройки АРВ должны обеспечивать демпфирование электромеханических

колебаний, возникающих при различных эксплуатационных режимах и аварийных возмущениях.

Таким образом, имеется тенденция усложнения моделей электроэнергетической системы и повышения порядка описывающих ее дифференциальных уравнений, что приводит к затруднению, а иногда и к невозможности использования стандартных средств оптимизации динамических систем.

В общем случае задача оптимизации настроечных параметров АРВ СГ является многопараметрической.

Возможности современной вычислительной техники существенно расширяют спектр методов оптимизации и имитационного моделирования элементов электроэнергетической системы. Так, например, программно-аппаратный комплекс *RTDS*, на котором произведено практическое исследование полученных настроечных параметров АРВ СГ, обоснованное в данной статье, производит расчет и опробование настроечных параметров АРВ СГ на различных стандартизованных схемах испытаний, описанных в стандарте [1].

До сих пор для настройки регуляторов использовались классические методы, в которых составлялась целевая функция для оптимизации качества функционирования АРВ СГ, работающего в разных схемно-режимных ситуациях. Данная методика состоит в последовательном выборе значений коэффициентов рабочего канала АРН, а также каналов внутренней и внешней стабилизации системного стабилизатора *PSS* по условию снижения электромеханических колебаний на каждом этапе выбора параметров.

К известным методам составления целевых функций относятся методы, основанные на корневых и частотных критериях оценки качества регулирования.

В данной статье рассматриваются как традиционные методики настройки АРВ СГ, так и методы многопараметрической оптимизации. Исследование основано на сравнении различных алгоритмов оптимизации, базирующихся как на классических методах (например, градиентных методах), так и на методе оптимизации, имитирующем эволюционные механизмы живой природы (генетический алгоритм).

Этапы настройки АРВ СГ

Под наилучшим качеством переходного процесса понимается минимум его длительности, минимум перерегулирования и максимум коэффициента демпфирования.

При объединении в единую функцию данных характеристик формируется числовая характеристика качества переходного процесса. Точка в плоскости параметров АРВ, соответствующая минимальному значению этой характеристики, определяет оптимальные настройки АРВ СГ.

Первый этап настройки включает в себя экспериментальное определение частотных характеристик сертификационной схемы [1] (смоделированной на программно-аппаратном комплексе *RTDS*), знание которых необходимо для настройки АРВ.

Второй этап – формирование функции оптимальной настройки АРВ, включающей все параметры переходного процесса и, соответственно, целевой функции, для последующего использования в различных алгоритмах оптимизации.

Для оценки качества регулирования в случае ступенчатого входного сигнала в данной работе используются интегральные критерии, учитывающие площадь на интервале времени t_p , ограниченную переходным процессом $y(t)$.

Рассмотрим координацию настроек регулятора возбуждения генераторов с помощью различных функций оптимизации, представленных в пакете прикладных программ *Matlab*.

Многомерные методы оптимизации

В данной работе анализируются многомерные методы оптимизации:

1. Симплексный алгоритм Нелдера–Мида (функция *fminsearch*).
2. Гладкая оптимизация (функция *fminunc*).
3. Условная оптимизация (функция *fmincon*).
4. Метод прямого поиска (функция *patternsearch*).
5. Генетический алгоритм (функция *GA*).

Для расчетов выбран генератор, работающий на шины станции, входящей в сертификационную схему. Генератор оснащен микропроцессорным автоматическим регулятором возбуждения типа АРВ-М. Данный регулятор возбуждения установлен на многих электростанциях в энергосистеме РФ.

К оптимизации принят следующий набор параметров:

- коэффициент K_{OU} и постоянная времени T_u рабочего канала;
- коэффициенты внутреннего канала стабилизации K_{IU} и K_{If} ;
- коэффициенты внешнего канала стабилизации K_{OF} и K_{IF} .

Функция минимизации (целевая функция) включает в себя три слагаемых. Это значения интегралов от модуля переходного процесса по частоте, по напряжению на шинах генератора и коэффициент, увеличивающий значение целевой функции если выбраны настроечные параметры, при которых АСР находится в области неустойчивости согласно критерию Найквиста.

В ходе исследований и проведенных экспериментальных испытаний на смоделированных с помощью *RTDS* сертификационных схем согласно [1] было выявлено, что коэффициенты рабочего канала АРН и коэффициенты *PSS* должны настраиваться раздельно. Это обусловлено качественными различиями между данными каналами.

Включение генератора в работу происходит без задействования внешнего и внутреннего каналов *PSS*, а только с включенным каналом АРН, что также говорит в пользу раздельной настройки.

Таким образом, первой определяется область устойчивости по коэффициенту усиления канала напряжения K_{OU} и постоянной интегрирования T_u , затем выбираются коэффициенты каналов стабилизации.

С помощью программных средств *Matlab* построены двумерные области устойчивости для двух пар коэффициентов:

- канал внутренней стабилизации K_{IU} и K_{If} (рис. 1);
- канал внешней стабилизации K_{OF} и K_{IF} (рис. 2).

Здесь тонкие линии отмечают одинаковые значения целевой функции, а красная сетка показывает область неустойчивости АСР. Цвета маркеров «типовой» и полученной настройки на рис. 1 и рис. 2 соответствуют цветам на осциллограмме.

Таким образом, опираясь на полученные контуры устойчивости и анализируя кривые графиков оптимизации, а также быстроту схождения к минимуму, можно сделать вывод, что лучшие настроечные параметры были получены с помощью функций *fmincon* и *GA*.

Функции оптимизации, такие как *fminunc* и *fminsearch*, в многопараметрической оптимизации показали себя не с лучшей стороны, хотя и с их помощью были получены минимальные значения целевой функции.

Это объясняется тем, что значения параметров оптимизации выходили за пределы допустимых значений, так как данные функции не имеют ограничений.

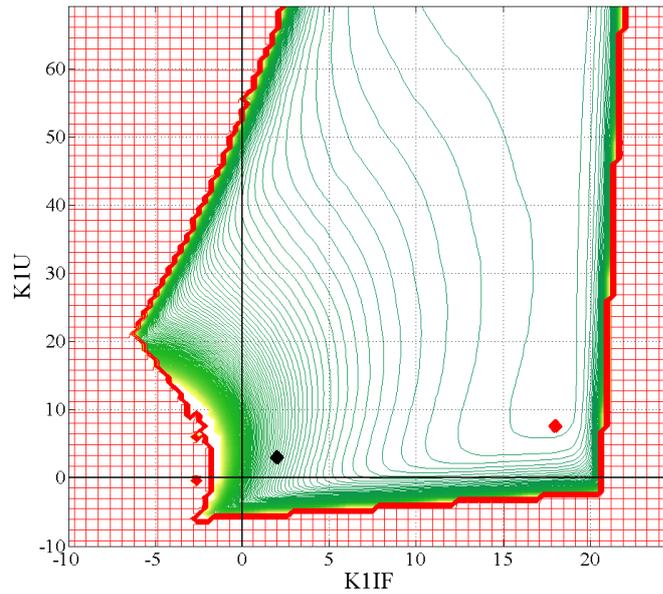


Рис. 1. Область устойчивости по коэффициентам внутреннего канала

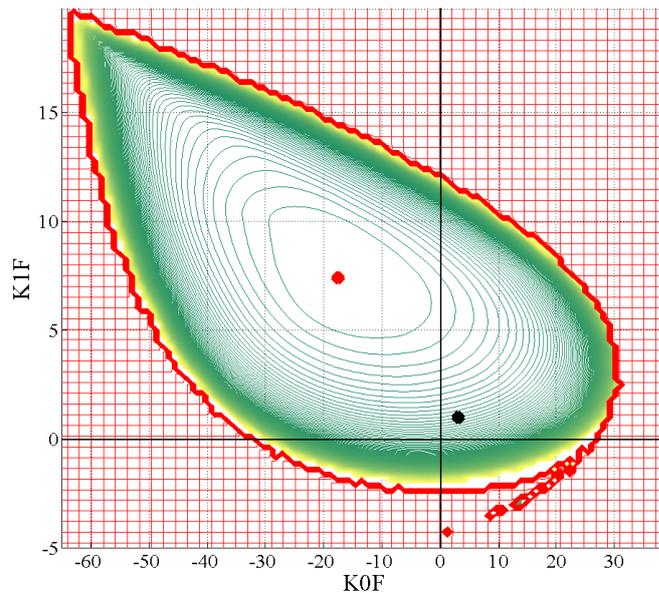


Рис. 2. Область устойчивости по коэффициентам внешнего канала

Напротив, при рассмотрении двухпараметрической оптимизации $fminunc$ и $fminsearch$ за счет быстрой сходимости показали достаточно конкурентноспособные результаты.

АРВ-М, с полученными в результате оптимизации на основе применения генетического алгоритма настройками, была опробована на смоделированной сертификационной схеме в программно-аппаратном комплексе *RTDS*.

В табл. 1 представлены значения оптимизированных параметров АРВ-М в сравнении с типовыми значениями.

Значения оптимизированных параметров регулятора АРВ-М

Параметр	Базовая настройка	Настройка после оптимизации
K_{0U}	15	15
T_S	1	2
K_{1U}	3	7,6
K_{0F}	3	-20
K_{1F}	1	7
K_{1f}	2	18

Снятые осциллограммы изменения напряжения и частоты на шинах генератора с типовыми и оптимизированными настройками АРВ-М показаны на рис. 3 и рис. 4.

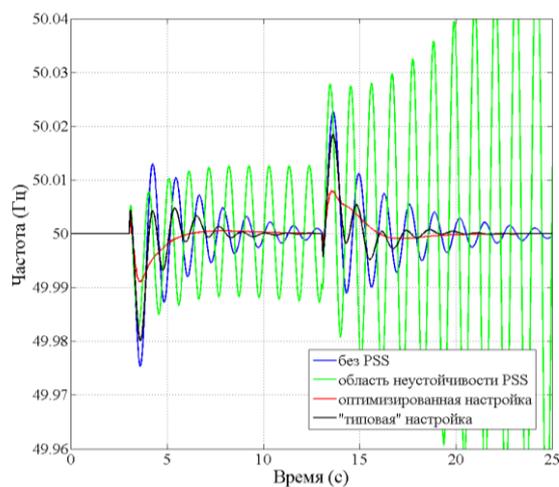


Рис. 3. Частота на шинах генератора при ступенчатом воздействии

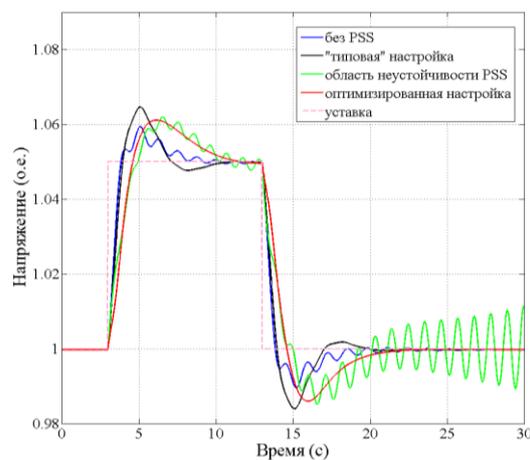


Рис. 4. Напряжение на шинах генератора при ступенчатом воздействии

Приведенные осциллограммы свидетельствуют о том, что при изменении уставки напряжения генератора на 5%, при задействованных каналах стабилизации *PSS* наблюдается повышение качества демпфирования электромеханических колебаний частоты в сравнении с переходным процессом без использования *PSS* и «типовой» настройкой.

При рассмотрении кривых напряжения на шинах генератора при этом же возмущении большее перерегулирование и время установки заданного значения имеет переходный процесс, снятый при включённых каналах *PSS*, что, в свою очередь, имеет отрицательный эффект.

Заключение

Выбор настроек АРВ методом оптимизации по интегральному критерию обеспечил повышение качества демпфирования электромеханических колебаний по сравнению с применением «типовой» настройки.

Таким образом, выбор настроек регулятора АРВ-М, выполненный данным методом, позволил значительно расширить область колебательной устойчивости. Расширение области колебательной устойчивости позволит обеспечить демпфирование электромеханических колебаний в большем диапазоне схемно-режимных условий.

Решение, получаемое в результате работы *GA*, максимально приближено к точному глобальному оптимуму, которое возможно получить за время, затраченное на работу оптимизационной процедуры. Однако для задачи выбора настроек АРВ генератора данный недостаток применения *GA* не является существенным, так как схемно-режимные условия работы энергосистем непостоянны и, соответственно, получение точного глобального оптимума, обеспечивающего наилучшее качество демпфирования электромеханических колебаний в конкретном режиме или ряде режимов, нецелесообразно.

Применение *GA* для решения оптимизационных задач имеет ряд преимуществ перед традиционными методами оптимизации, позволяющих эффективно применять *GA* для решения практических задач оптимизации.

Дальнейшая работа направлена на создание гибридных алгоритмов оптимизации для уменьшения времени расчета не только коэффициентов усиления каналов *PSS*, но и их постоянных времени.

На основании данных исследований возможна разработка адаптивно-настраиваемого АРВ в зависимости от параметров низкочастотных колебаний в энергосистеме.

Summary

Abstract - at present, the power system of the Russian Federation is an active modernization of generator excitation systems. In this connection, there is the problem of choosing the new settings excitation controllers of various types to ensure effective damping of electromechanical oscillations.

Various optimization techniques required objective functions, developed on the basis of the root and frequency criteria for evaluation of parameters of the regulatory process for the proper functioning of the automatic excitation controller for synchronous generator (AEC SG), working in different scheme-regime situations. Produced practical study received AEC SG setup parameters to software and hardware complex RTDS (Real Time Digital Simulator) for program certification tests defined in Standard of System Operator of the Unified Power System.

On the basis of performed measurements obtained after simulating different perturbations are determined optimal settings. It is considered the most sensitive and rapid methods for their production, based on a direct and more complex mathematical methods.

The identified high-speed methods of search of optimal AEC SG parameters allow at changing grid settings to calculate values for the coefficients and time constants and thus in case of electromechanical oscillations to provide effective damping.

Key words: static and dynamic stability, AEC, damping electromechanical oscillations, excitation system performance, system stabilizer (PSS), optimization of algorithms

Литература

1. СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Стандарт организации. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. М., 2012.
2. Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2006.
3. Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Жуков А.В., Сацук Е.И., Расцепляев А.И. Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Создание тестовых схем // Энергетик. 2013. №9.
4. Сорокин Д.В. Выбор настроек АРВ генераторов сложной энергосистемы на основе применения генетического алгоритма и методов модального анализа: дис... канд. техн. наук: 05.14.02 /Д.В. Сорокин; СПбГПУ; Науч.рук. С.В.Смоловик. Санкт-Петербург, 2009.
5. J. Xiao, J. Han, J. Wu, Dynamic Tracking of Low-frequency Oscillations with Improved Prony Method in Wide-Area Measurement System. IEEE Power Meeting 2004. Denver.
6. Task Force on Identification of Electromechanical Modes, Identification of Electromechanical Modes in Power Systems, IEEE Task Force Report, 2012.
7. 421.2-2014-IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems.
8. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.

Поступила в редакцию

16 ноября 2016 г.

Канафеев Руслан Исламович – магистрант 2-го года обучения института электроэнергетики (ИЭЭ) Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»). Тел.8(925)944-88-61. E-mail: kanafeev_ruslan@mail.ru.

Жирнов Алексей Дементьевич – магистрант 2-го года обучения института электроэнергетики (ИЭЭ) Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»). Тел.8(987)667-68-16. E-mail: zhirnovad@yandex.ru.

Климова Татьяна Георгиевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем» (РЗА) Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»). Тел.8(916)178-72-56. E-mail: tgklim@mail.ru.