

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫБОРА И ПРОВЕРКИ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ СИСТЕМНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Гуриков Олег Викторович, старший научный сотрудник
Зеленин Александр Сергеевич, старший научный сотрудник
Кабанов Дмитрий Анатольевич, заведующий сектором
Прохоров Кирилл Владимирович, научный сотрудник

1. Введение

Синхронная зона единой электроэнергетической системы (ЕЭС), включающая ЕЭС России, представляет собой энергообъединение сложной структуры большой протяженности с множеством слабых связей. Это обуславливает наличие ЕЭС России значительного количества слабо демпфируемых низкочастотных составляющих переходного процесса (низкочастотные межсистемные колебания), а также существенное изменение их параметров при ремонтах сетевых элементов схем выдачи мощности электростанций и межсистемных связей или изменении режима работы самой энергосистемы.

Наиболее эффективным средством демпфирования низкочастотных межсистемных колебаний являются автоматические регуляторы возбуждения сильного действия синхронных генераторов (далее – АРВ), имеющие в своем составе каналы стабилизации, а также соответствующий выбор их параметров настройки.

В ЕЭС России в последние годы установлено значительное число систем возбуждения зарубежного производства [1], в составе которых применяются современные микропроцессорные АРВ с системными стабилизаторами, подавляющее большинство которых работают имеют тип *PSS2B* в соответствии со стандартом *IEEE 421.5* [2] и их количество составляет порядка 180 единиц.

Выбор параметров настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B*, как правило, осуществляется зарубежными компаниями или их уполномоченными представителями на территории России на основе зарубежных методик [3-6]. В отечественных компаниях на данный момент работа по созданию своих методик ведется, но ещё не далека до своего завершения. Опыт сертификационных испытаний на лабораторной базе АО «НТЦ ЕЭС» микропроцессорных АРВ зарубежного производства на соответствие требованиям стандарта АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.004-2019 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» (далее – Стандарт) [7] свидетельствует о том, что выбранные с использованием зарубежных методик параметры настройки в ходе испытаний корректируются разработчиками, так как не позволяют обеспечить эффективное демпфирование параметров электрического режима [1, 8]. Корректировка выбранных параметров настройки системных стабилизаторов зарубежного производства, как правило, производится и при проверке параметров настройки АРВ конкретных энергообъектов на цифро-аналого-физическом комплексе моделирования электромеханических переходных процессов в энергосистеме. А на ряде энергообъектов, для которых проверка и корректировка параметров настройки Стандартом [7] не предусматривается, установленные параметры настройки системных стабилизаторов типа *PSS2B* могут приводить к возникновению слабозатухающих колебаний, как, например, при пуско-наладочных работах на Северо-Западной ТЭЦ, либо – к нарушению устойчивости параллельной работы при технологических нарушениях, как, например, на Няганской ГРЭС, все три энергоблока которой суммарной установленной мощностью 2400 МВт

были отключены технологическими защитами из-за возникновения синхронных колебаний увеличивающейся амплитуды [9, 10].

Таким образом, отсутствие эффективной методики выбора параметров настройки АРВ с работающими на основе расчета интеграла ускоряющей мощности системными стабилизаторами для схемно-режимных условий ЕЭС России существенно снижает надёжность ее функционирования.

Целью работы является разработка технологии выбора и проверки параметров настройки системных стабилизаторов в составе автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов, обеспечивающей колебательную устойчивость в широком многообразии схемно-режимных условий работы ЕЭС России.

2 Общее описание технологии проверки параметров настройки системных стабилизаторов

Существующая практика показывает, что задачу выбора и задачу проверки параметров настройки системных стабилизаторов необходимо выполнять отдельно.

При этом технология проверки параметров настройки системных стабилизаторов, разработанная в АО «НТЦ ЕЭС», уже давно применяется и отражена в нормативно-технической документации начиная с 2012 года [11, 7].

В соответствии с указанными нормативными документами проверка и корректировка (при необходимости, выявленной в процессе проверки) выбранных параметров настройки АРВ сильного действия синхронных генераторов должны осуществляться на модели энергосистемы. При этом проверка параметров настройки осуществляется как для АРВ отечественного производства, так и для АРВ зарубежного производства, имеющих в своём составе системные стабилизаторы. В зависимости от типа и установленной мощности синхронного генератора проверка может осуществляться в:

- модели энергосистемы, реализованной в промышленном программно-вычислительном комплексе расчета переходных процессов в энергосистеме;
- математической модели энергосистемы, реализованной в программно-аппаратном комплексе, функционирующим в режиме реального времени, с подключением промышленного образца АРВ;
- физической модели энергосистемы с подключением промышленного образца АРВ.

Методики проверки по всем трем вариантам, включая процесс подготовки схемы энергосистемы и программы испытаний, изложены в этих же нормативных документах. Процесс проверки в модели энергосистемы, реализованной в промышленном программно-вычислительном комплексе расчета переходных процессов в энергосистеме, дополнительно изложен в более развернутом виде в нормативном документе [12]

Проверка параметров АРВ осуществляется в тестовой схеме энергосистемы с последующей выдачей Сертификата на соответствие требованиям Стандарта [7] в случае успешного прохождения всего объема программы испытаний (сертификационные испытания). Такая проверка выполняется для подтверждения принципиальной эффективности алгоритмов работы АРВ и возможности применения АРВ в условиях работы ЕЭС России. Всего на лабораторной базе АО «НТЦ ЕЭС» прошло сертификационные испытания 12 АРВ следующих наименований: EX2100e, EX2100e-BR, Unitrol 1020, DECS-400, ALSPA ControGen HX (V3), EX2100-BR, THYRIPOL, Unitrol 6800, EX2100, Оваця АРВ-1100, THYNE1, THYRIPOL 6RV80, а не прошёл один АРВ с наименованием RG3-T4SC.

Также проверка параметров АРВ в соответствии со Стандартом [7] осуществляется и в модели энергосистемы, максимально приближенной к реальным условиям эксплуатации. Такая проверка выполняется с целью подтверждения эффективности выбранных параметров АРВ в условиях работы конкретной электростанции.

3 Общее описание технологии выбора параметров настройки системных стабилизаторов

Технология выбора параметров настройки системных стабилизаторов [13] использует подход, заключающийся в:

- проведении натуральных экспериментов с промышленным образцом микропроцессорного АРВ с целью создания его достоверной цифровой модели и проверки эффективности выбранных параметров настройки;
- проведении расчетных экспериментов для выбора параметров настройки АРВ с использованием цифровой модели объекта регулирования и цифровой модели системы регулирования, созданной на основе экспериментальных данных.

Технология выбора параметров настройки системных стабилизаторов [13] в цифровой модели энергосистемы включает в себя:

- методику разработки достоверных математических моделей промышленных образцов АРВ;
- методику подготовки схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора, необходимых для анализа его колебательной устойчивости в цифровой модели энергосистемы;
- методику анализа колебательной устойчивости и порядок выбора параметров настройки.

3.1 Методика анализа колебательной устойчивости

В АО «НТЦ ЕЭС» разработана методика анализа колебательной устойчивости, основанная на частотных методах анализа, и реализующий ее ПВК «WinOblast». Общее обоснование основных теоретических предпосылок и программно-технических решений, принятых при его создании приведено в [14, 15]. Методика включает в себя:

- подачу тестового сигнала на дополнительный вход АРВ в цифровой модели энергосистемы;
- получение импульсной переходной функции по параметру частоты напряжения (отклик САР);
- расчет передаточной функции замкнутой САР (режимные частотные характеристики – РЧХ) по частоте напряжения;
- анализ полученных РЧХ, включающий построение границ областей устойчивости и оптимизацию параметров настройки АРВ.

Оценка качества регулирования выполняется по отображению передаточной функции замкнутой системы в частотной области с использованием функционала:

$$J = \Psi(K'_{0f}, K'_{1f}) \text{ или } J = \Psi(K'_{s1}, K'_{s2}). \quad (1)$$

В данной постановке задача выбора оптимальных параметров настройки регулятора возбуждения сводится к поиску минимума функции (1), который осуществляется ее прямым расчетом при заданном диапазоне и шаге изменения коэффициентов K'_{s1} и K'_{s2} . Преимущество данного метода состоит в том, что он дает полную картину поведения показателя качества в заданном диапазоне изменения коэффициентов K'_{s1} и K'_{s2} [15].

3.2 Методика создания достоверных математических моделей промышленных образцов АРВ

В соответствии с требованиями Стандарта [7] производители предоставляют на сертификацию частотные характеристики промышленных образцов АРВ и математические модели этих регуляторов, предназначенные для расчетов электромеханических переходных процессов в энергосистеме. Опыт сертификации

показывает, что в подавляющем большинстве случаев и предоставляемые производителем частотные характеристики (ЧХ) и ЧХ, получаемые с помощью этих моделей, значительно отличаются от экспериментальных ЧХ. Математические модели, полученные с помощью таких ЧХ, не соответствуют требованиям Стандарта [7] по точности и не могут использоваться для выбора параметров настройки АРВ.

В связи с этим была разработана методика создания достоверных математических моделей микропроцессорных АРВ. Методика основана на создании максимально подробной универсальной математической модели АРВ по его техническому описанию, которая упрощается путем точной аппроксимации ее отдельных элементов, проверяется и в случае необходимости корректируется по экспериментальным ЧХ промышленного образца АРВ, снятым по специально подготовленной программе испытаний.

3.3 Методика выбора параметров настройки АРВ

Методика выбора параметров настройки АРВ разработана на основе сложившегося в зарубежной практике метода, который имеет широкое распространение, хорошо себя зарекомендовал и подробно описан в ряде опубликованных работ [2, 16-18].

В соответствии с данным методом частота среза высокочастотного фильтра выбирается ниже наименьшей частоты среди всех наблюдаемых электромеханических колебаний вблизи рассматриваемого генератора. Параметры фильтра линейной составляющей принимаются в соответствии со стандартом *IEEE* 421.5 [2]. Значение коэффициента усиления K_{s2} рассчитывается через постоянную времени инерции ротора рассматриваемого генератора. Параметры фильтра компенсации фазы подбираются таким образом, чтобы в диапазоне частот наблюдаемых электромеханических колебаний ФЧХ данного фильтра была обратна к ФЧХ переходной функции разомкнутой системы, характеризующей отношение электромагнитного момента генератора к выходному значению сигнала АРВ. Значение коэффициента K_{s1} выбирается максимально возможным для конкретных условий эксплуатации генератора и определяется опытным путем на действующем объекте.

В настоящей работе метод доработан с учетом устранения недостатков, выявленных при его применении в ЕЭС России, путем использования частотных методов анализа колебательной устойчивости.

Работа генератора, для АРВ которого выбираются параметры настройки, может сопровождаться различными видами колебаний по их физической природе и характеристикам. При этом характеристики колебательного процесса в энергообъединении сложной структуры существенно зависят от множества факторов и могут варьироваться в широком диапазоне. По данной причине для анализа колебательной устойчивости с целью выбора параметров настройки АРВ генераторов, работающих в энергообъединении сложной структуры (ЕЭС России), необходимо рассматривать комплекс схемно-режимных условий, в которых бы наблюдался весь возможный набор резонансных частот, а также были бы созданы наихудшие условия их демпфирования.

В связи с этим в разработанной методике выбора параметров настройки АРВ уделено особое внимание формированию требований к подготовке цифровой модели энергосистемы и рассматриваемых в ней схемно-режимных условий работы генератора при выборе параметров настройки его АРВ. Авторами также разработаны общие рекомендации, которые позволяют формализовать подготовку характерных электрических режимов с учетом требования к уровню загрузки контролируемых сечений.

Затем производится расчет фактических ФЧХ интеграла ускоряющей мощности системного стабилизатора для всего набора характерных схемно-режимных условий работы рассматриваемого генератора. Из данного набора ФЧХ производится расчет вспомогательных кривых, ограничивающих максимальные, минимальные значения, а также среднеарифметические значения среди всех ФЧХ набора. Расчет вспомогательных

кривых существенно ограничивает количество данных для дальнейшего анализа, позволяя сохранить наиболее значимую информацию, существенно облегчить анализ колебательной устойчивости и ускорить работу алгоритмов оптимизации параметров настройки системного стабилизатора.

Далее осуществляется выбор параметров фильтра компенсации фазы компромиссным способом, обеспечивая максимизацию расстояния вспомогательных кривых ФЧХ от границ $\pm 90^\circ$ по направлению к величине 0° в диапазоне частот, в котором наблюдаются колебания режимных параметров.

Далее осуществляется оптимизация коэффициентов усиления K_{s1} и K_{s2} с использованием разработанных в разделе 1 алгоритмов, включающих: построение границ областей устойчивости для представительных электрических режимов, значений «минимаксного» критерия качества по параметру частоты напряжения генератора в тех же осях, и условной кривой, ограничивающей область эффективных значений K_{s1} и K_{s2} по демпфированию колебаний.

Разработанная методика применена на практике при выборе рабочих параметров настройки АРВ типа *THYRIPOL* генераторов газовых турбин ПГУ-1 и ПГУ-2 Северо-Западной ТЭЦ, и, начиная с 2016 года, обеспечивает устойчивую параллельную работу электростанции с энергосистемой. В 2019 году параметры настроек, выбранные по разработанной методике, установлены в качестве рабочих параметров настройки АРВ типа *THYRIPOL* ПГУ 1-3 Няганской ГРЭС.

4 Ожидаемые результаты

Ожидаемыми результатами реализации проекта являются:

- Повышение надежности работы электростанций и ЕЭС России в целом за счет снижения вероятности возникновения незатухающих синхронных колебаний параметров электрического режима, которые могут привести к возникновению или развитию аварийного процесса.
- Исключение существующей зависимости от зарубежных компаний при выполнении работ по выбору параметров настройки системных стабилизаторов в составе автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов (импортозамещение).
- Создание достоверных математических моделей промышленных образцов микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов, которые могут использоваться как для выбора их рабочих параметров настройки, так и для выполнения рутинных расчетов электромеханических переходных процессов в энергосистеме.

Литература:

1 Estimation of Efficiency of Modern Excitation Controllers of Synchronous Machines in the Conditions of Physical Model of a Complex Power System and Suggestion of Estimation Technique and Criteria as an Addition to the IEC Standard / Burmistrov A., Popov E., Urganov A., Gerasimov A., Esipovich A. – *International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France, 2012.*

2 *IEEE Std. 421.5-2016 Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Power Engineering Society, New York, 2016.*

3 *IEEE Tutorial Course Power System Stabilization via Excitation Control: publication 09TP250. – Excitation Systems Subcommittee, Energy Development and Power Generation Committee, Power and Energy Society, Tampa, 2009.*

4 *IEEE Std. 421.2-2014 - IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems. IEEE Power Engineering Society, New York, 2014.*

5 *Integral of accelerating power type PSS Part 1 – Theory design and tuning methodology / Murdoch S., Venkataraman S., Lawson R. A., Pearson W. R. IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 14, № 4, 1999, pp. 1658-1663.*

6 *WSCC Tutorial on Power System Stabilizers. – WSCC Control Work Group, 1999.*

7 СТО 59012820.29.160.20.004-2019 Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. – Москва. – 2019.

8 Герасимов А. С., Есипович А. Х., Кабанов Д. А. Сертификационные испытания АРВ сильного действия отечественных и зарубежных компаний на цифроаналогово-физическом комплексе ОАО «НТЦ ЕЭС» // Электрические станции. – 2015. – № 12. – С. 4-8.

9 Жуков А. В. Система мониторинга переходных электрических режимов [электронный ресурс] // Конференция по ознакомлению субъектов электроэнергетики с технологической деятельности АО «СО ЕЭС». – Москва. – 2018. – 18 с. – Режим доступа URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_5_231018_prez_03_smpr.pdf.

10 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. – СПб, 2009. – 166 с.

11 СТО 59012820.29.160.20.001-2012 Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. – Москва. – 2012 (с изм. от 14.07.2015).

12 Методические указания по осуществлению диспетчерскими центрами АО «СО ЕЭС» оценки параметров настройки автоматических регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов на цифровой модели энергосистемы. Приложение 1 к распоряжению АО «СО ЕЭС» от 19.08.2019 № 94р. Введены в действие с 19.08.2019 // – М.: АО «СО ЕЭС», 2019. – 29 с.

13 Гуриков О. В. Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения, работающих в энергообъединениях сложной структуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Москва, 2020. – 194 с.

14 Есипович А. Х., Штефка Й. Анализ колебательной устойчивости электроэнергетических систем (*WinOblast*) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618603, 13.09.2013.

15 Герасимов А. С., Есипович А. Х., Зеккель А. С., Штефка Й. Исследование устойчивости энергосистем и настройка системных стабилизаторов современных автоматических регуляторов возбуждения с использованием программы «Область» // Известия НИИ постоянного тока. – 2007. – № 62, С. 41-50.

16 *Gibbard M. J., Pourbeik P., Vowles D. J. Small-Signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems. University of Adelaide Press, Adelaide, 2015.*

17 *Bérubé G. R., Hajagos L. M. Accelerating-Power Based Power System Stabilizers.* [Электронный ресурс] http://www.kestrelpower.com/Docs/PSS_Tutorial_Chapter_Accelerating_Power_R2.pdf.

18 *Kundur. P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., 1993.*