

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН

Аброр Алиев

Ассистент, Термезский государственный университет инженерии и
агротехнологий, Термез, 190111, Узбекистан; aliyevabror19861008@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

Актуальность: Синхронные машины остаются неотъемлемой частью электрических станций, промышленных приводов и других объектов электроэнергетики. Надежность и эффективность их работы в значительной степени зависят от характеристик и качества функционирования системы возбуждения. В условиях роста требований к стабильности энергосистем, повышения доли возобновляемых источников энергии и распространения интеллектуальных сетей, управление возбуждением становится ключевым инструментом обеспечения устойчивости и качества электроснабжения.

За последние десятилетия наблюдается активное развитие и внедрение цифровых, адаптивных и интеллектуальных систем управления возбуждением. Применение микропроцессорных регуляторов, алгоритмов предиктивного, робастного и нелинейного управления, а также интеграция с автоматизированными системами управления (АСУ ТП и SCADA) открывает новые горизонты для повышения точности, скорости отклика и устойчивости генераторов. В данной ситуации особенно важно проведение систематического обзора современных систем управления возбуждением, включающего как традиционные, так и новейшие подходы, а также анализ направлений их развития. Такой обзор позволяет выявить актуальные научные и инженерные задачи, оценить эффективность применяемых решений и наметить перспективы дальнейшего совершенствования систем возбуждения в современных и перспективных условиях эксплуатации. Таким образом, обзор современных систем управления возбуждением синхронных машин и анализ тенденций их развития представляет значительный научный интерес и практическую ценность.

Цель: Целью настоящей статьи является анализ существующих систем управления возбуждением синхронных машин, выявление их преимуществ и ограничений, а также определение перспективных направлений развития и совершенствования методов управления возбуждением в условиях современных требований к энергетическим системам.

Методы: Анализ научно-технической литературы – изучение публикаций в отечественных и зарубежных научных журналах, диссертаций, монографий, патентов, стандартов и технической документации, посвящённых системам возбуждения синхронных машин.

Результаты: В ходе обзорного исследования были получены что, определены перспективные направления исследований и разработок, такие как создание самообучающихся регуляторов возбуждения, повышение устойчивости к возмущениям в сетях с высокой долей ВИЭ, а также разработка унифицированных платформ для цифрового управления возбуждением генераторов различного класса.

Ключевые слова: Системы возбуждения, Тиристорные системы самовозбуждения (СТС), Системы тиристорные независимые (СТН), Системы бесщёточные диодные (СБД), кремниевые управляемые выпрямители (SCR), гибридные машины возбуждения.

STAGES OF DEVELOPMENT OF EXCITATION CONTROL SYSTEMS FOR SYNCHRONOUS MACHINES

Abror Aliyev

*Assistant, Termez State University of Engineering and Agrotechnology, Termez,
190111, Uzbekistan; aliyevabrор19861008@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>*

Relevance: Synchronous machines remain an integral part of power plants, industrial drives and other power engineering facilities. The reliability and efficiency of their operation largely depend on the characteristics and quality of the excitation system. In the context of increasing demands on the stability of power systems, the increasing share of renewable energy sources and the spread of smart grids, excitation control is becoming a key tool for ensuring the stability and quality of power supply. Over the past decades, there has been an active development and implementation of digital, adaptive and intelligent excitation control systems. The use of microprocessor controllers, predictive, robust and nonlinear control algorithms, as well as integration with automated control systems (APCS and SCADA) opens up new horizons for increasing the accuracy, response speed and stability of generators. In this situation, it is especially important to conduct a systematic review of modern excitation control systems, including both traditional and new approaches, as well as an analysis of their development directions. This review allows us to identify current scientific and engineering challenges, evaluate the effectiveness of the solutions used, and outline prospects for further improvement of excitation systems in modern and future operating conditions. Thus, a review of modern excitation control

systems for synchronous machines and an analysis of their development trends is of significant scientific interest and practical value.

Aim: *The purpose of this article is a comprehensive analysis of existing excitation control systems for synchronous machines, identification of their advantages and limitations, and determination of promising areas for the development and improvement of excitation control methods in the context of modern requirements for power systems.*

Methods: *Analysis of scientific and technical literature – study of publications in domestic and foreign scientific journals, dissertations, monographs, patents, standards and technical documentation devoted to excitation systems of synchronous machines.*

Results: *The review study revealed that promising areas of research and development were identified, such as the creation of self-learning excitation regulators, increasing resistance to disturbances in networks with a high share of renewable energy sources, and the development of unified platforms for digital control of excitation of generators of various classes.*

Keywords: *Excitation systems, self-excited thyristor systems (STS), independent thyristor systems (ITS), brushless diode systems (BLDS), silicon controlled rectifiers (SCR), hybrid excitation machines.*

ВВЕДЕНИЕ (INTRODUCTION)

В данной статье проанализировано 8 русскоязычных и 9 англоязычных статей, посвященных анализу системы возбуждения генераторов.

Каждая из этих статей была подробно проанализирована.

По результатам анализа стало ясно, что в будущем существует необходимость более углубленного подхода к современным методам системы возбуждения синхронных генераторов.

Литература и методология

Ниже мы рассмотрим этапы развития системы возбуждения

1. Эволюция систем возбуждения

Исторически системы возбуждения прошли путь от электромеханических регуляторов до современных цифровых систем. В 1950-х годах появились кремниевые управляемые выпрямители (SCR), заменившие устаревшие электромеханические устройства. В 1980-х годах произошёл переход к цифровым технологиям управления, что значительно повысило точность и надёжность систем возбуждения.

2. Современные подходы к системам возбуждения

В последние годы наблюдается тенденция к использованию статических и бесщёточных систем возбуждения. Статические системы обеспечивают быстрое реагирование и высокую точность регулирования напряжения, что особенно важно для крупных генераторов. Бесщёточные системы, благодаря

отсутствию скользящих контактов, повышают надёжность и снижают требования к обслуживанию.

3. Инновации в управлении возбуждением

Современные системы управления внедряют интеллектуальные алгоритмы, такие как адаптивные нечеткие регуляторы, позволяющие улучшить динамическое поведение генераторов. Например, разработаны адаптивные нечеткие PI-регуляторы, которые автоматически настраивают параметры в реальном времени, обеспечивая оптимальную работу генератора в различных режимах.

4. Стандартизация и рекомендации

Для обеспечения совместимости и надёжности систем возбуждения разработаны стандарты, такие как IEEE 421, которые определяют требования к компонентам, методам тестирования и моделирования. Эти стандарты способствуют унификации подходов и повышению качества систем возбуждения.

5. Перспективы развития

Ожидается дальнейшее развитие систем возбуждения в направлении интеграции с системами мониторинга и диагностики, что позволит предсказывать и предотвращать возможные неисправности. Кроме того, внедрение технологий беспроводной связи и продвинутых алгоритмов управления откроет новые возможности для повышения эффективности и надёжности энергосистем.

Таким образом, современные системы управления возбуждением синхронных машин продолжают эволюционировать, внедряя новые технологии и подходы для обеспечения стабильной и эффективной работы энергосистем.

Мы обратимся к ранее вышедшим статьям по системе возбуждения генераторов.

При обсуждении эволюции системы возбуждения синхронных генераторов важно выделить работы ряда ученых, которые одними из первых начали проводить исследования в этой области.

Например, основные публикации ученых Всесоюзный научно-исследовательский институт электромашиностроения:

- Глебов И.А. «Научные проблемы турбогенераторостроения»/ издательство «НАУКА» Ленинградское отделение Ленинград 1974;
- Зеккель А.С., Муратаев А.А., Черкасский А.В. «Методика экспериментального определения областей колебательной устойчивости и кривых равного качества регулирования» / И.М. Гольдштейн и др. // Труды ЛПИ. 1984.;

- Юрганов А.А. «Методы и средства автоматического регулирования возбуждения турбо- и гидрогенераторов» // Творческое наследие академика М.П. Костенко и его значение для современного и перспективного электромашиностроения. СПб. : Наука, 1992.;

- Юрганов А.А., Кожевников В.А. «Регулирование возбуждения синхронных генераторов» СПб. : Наука, 1996.

Рассматривая современные подходы к системам возбуждения, обратимся к научным трудам, опубликованным рядом исследователей.

Например:

1. Современные системы возбуждения генераторов большой мощности (Автор Адамович М.А., Чернявский Д.В. Научный руководитель - канд. техн. наук, доцент Булат В.А. Материалы 64-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (апрель 2008 года), журнал Актуальные проблемы энергетики) Web сайт: <https://core.ac.uk/download/483933428.pdf>)

В этой статье дано понятие о системе возбуждения, требования к системе возбуждения и рассмотрены наиболее современные типы системы возбуждения, в том числе Тиристорные системы самовозбуждения (СТС), Системы тиристорные независимые (СТН) и Системы бесщеточные диодные (СБД).

Кроме того, приведены про цифровой автоматический регулятор напряжения систем АРВ. Все понятие объяснено по принципиальным схемам.

2. Анализ конструктивных схем систем возбуждения синхронных генераторов, работающих в составе единой энергосистемы (Автор В.М. Степанов, Д.А. Карпунин Web сайт: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktivnyh-shem-sistem-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov-rabotayushih-v-sostave-edinoy-energосистемы/viewer>)

В этой статье речь идёт о том, что обеспечивает система возбуждения, про зависимых и независимых системы возбуждения и анализируется по принципиальным схемам этих типов системы возбуждения, вывод получен, что для турбогенераторов мощностью 200 МВт наиболее подходит независимая система возбуждения, комбинированная с зависимой. То есть основное питание обмотки возбуждения синхронного генератора происходит от тиристорных преобразователей, получающих питание с машинного возбудителя переменного тока, скреплённого с валом турбины жёсткой механической связью.

3. Виды систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов (Автор: Овсянников Александр Максимович Опубликовано в: Молодой учёный №47 (337) ноябрь 2020 г. Дата публикации: 17.11.2020 Web сайт: <https://moluch.ru/archive/337/75258>.)

В статье рассматриваются особенности различных систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов, а также их основные параметры. В том числе составных частей системе возбуждения, различение системе возбуждение по принципиальным схемам, параметры режиме возбудителя и важными требованиями, предъявленными системой возбуждение при форсировке.

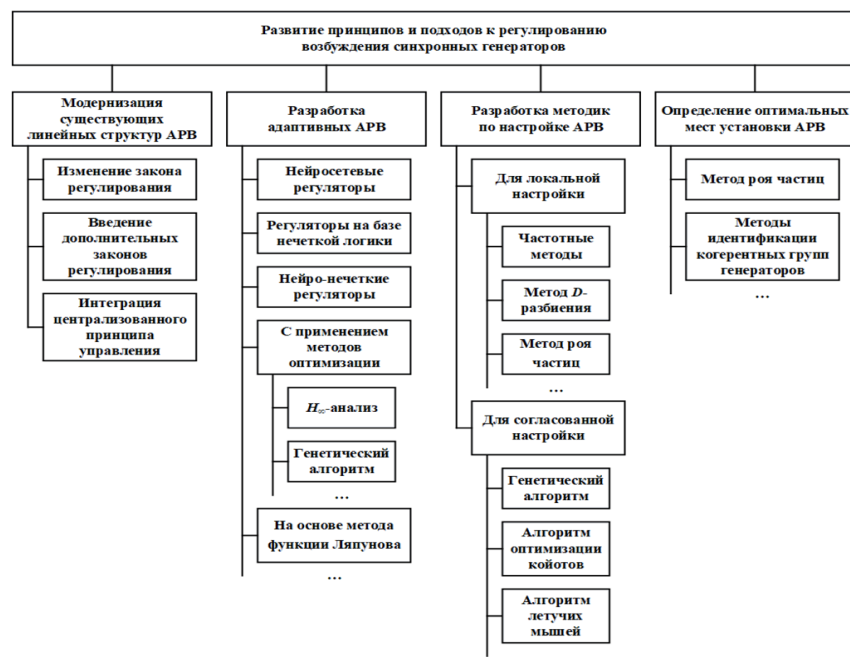
4. Системы возбуждения синхронных генераторов: разновидности, схемы, достоинства и недостатки (Авторы: Абрамян Евгений Павлович, Доц. кафедры электротехники СПбГПУ, Васильев Дмитрий Петрович, Проф. электротехники СПбГПУ, Орлов Анатолий Владимирович, Нач. сл. РЗиА Новгородских ЭС; Web сайт: <https://pue8.ru/silovaya-elektronika/198-sistemy-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov.html>)

Статье объяснено системы возбуждения синхронных генераторов: разновидности, в том числе Системы тиристорного независимого возбуждения (СТН), Система тиристорного самовозбуждения (СТС), Система тиристорного самовозбуждения резервная (СТСР), Системы бесщеточные диодные (СБД) и Системы возбуждения для дизель-генераторов, схемы, достоинства и недостатки, кроме того функциональности системы возбуждение, характеристики автоматы гашения поля (АГП).

5. Современные направления развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций (Авторы: А.Б. Аскаров¹, М.В. Андреев¹, Е.М. Чикишев², А.А. Суворов¹, В.Е. Рудник¹, ¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, ²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; Web сайт: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-napravleniya-razvitiya-sistem-avtomaticheskogo-regulirovaniya-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov-elektrostantsiy>, Вестник ПНИПУ 2021 Электротехника, информационные технологии, сис. управления № 39, УДК 621.311, 681.515, 621.313.322 DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.03)

Цель статьи заключалась в аналитическом обзоре современных направлений развития подобных систем, которые способствуют эффективному обеспечению необходимых запасов устойчивости в различных схемно-режимных состояниях современных электроэнергетических систем, а также качества протекания процессов, динамического перехода и демпфирования возникающих колебаний. Для этого был проведен анализ решений, используемых в каждом из существующих направлений. Результатом работы являются представленная информация о возможных вариантах развития систем регулирования возбуждения, а также некоторые выводы о достоинствах и недостатках каждого из них.

В последующих разделах статьи приведена информация о каждом из



представленных направлений.

Рис. 1. Основные направления развития в области регулирования возбуждения

Fig. 1. Main directions of development in the field of excitation regulation

6. Возбуждение синхронных генераторов (Web сайт: https://www.gigavat.com/generator_vozbughdenie.php)

Здесь приведено сведения по научному источнику, об возбуждение синхронных машин и система возбуждения синхронных машин. В том числе характеристика система возбуждения и дано понятия по принципиальные схемы независимого электромашинного возбуждения генератора, высокочастотного возбуждения турбогенератора, независимого тиристорного возбуждения генераторов, бесщеточного возбуждения генераторов, зависимого электромашинного возбуждения и полупроводникового самовозбуждения.

7. Общие сведения об электрических машинах - системы возбуждения синхронных генераторов (Web сайт: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/obschie-svedeniya-ob-elektricheskikh-mashinah-10.html>)

Это статья про общие сведения об электрических машинах - системы возбуждения синхронных генераторов, которые информации получено от научной литературы.

8. Разработка нетрадиционной системы возбуждения автономных синхронных машин (Авторы: Пирматов Нурали Бердиёрович, д-р техн. наук, профессор Ташкентского государственного технического университета, Муминов Махмуджон Умурзакович, ст. преподаватель, Ташкентского государственного технического университета, Web сайт:

<https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-netraditsionnoy-sistemy-vozbuzhdeniya-autonomnyh-sinhronnyh-mashin>)

Данная статья посвящена использованию ветрогенератора постоянного тока как возбудителя для синхронных машин. Как известно, по принципу работы синхронной машины обмотка возбуждения питается постоянным током. Компрессорные, насосные, дизельно-генераторные установки горной промышленности приводятся во вращении в основном синхронными двигателями, которые находятся в открытом пространстве, где можно использовать ветрогенератор, как источник для питания обмотки возбуждения синхронных машин.

Обзор по теме из английского языка.

1. Overview of Hybrid Excitation Synchronous Machines Technology (Авторы: Sami Hlioui, Yacine Amara, Emmanuel Hoang, Michel Lecrivain, Mohamed Gabsi.)

В данной статье описывается современное состояние синхронных машин с гибридным возбуждением. Описаны и проанализированы различные гибридные возбужденные синхронные структуры из научно-технической литературы. Обсуждаются преимущества и недостатки различных структур. Также будут обсуждаться различные методы классификации этих структур. Подробно описан вклад гибридного принципа возбуждения в двигательный и генераторный режимы, а также представлены различные модели проектирования этих структур.

В том числе, Гибридные машины возбуждения — это машины, в которых используются два источника потока возбуждения: постоянные магниты (ПМ). В качестве источника возбуждения катушки возбуждения. Целью объединения обоих источников является объединение преимуществ машин с постоянными магнитами и синхронных машин с возбужденным полем. Хорошие характеристики гибридных машин возбуждения, такие как улучшенная способность и эффективность ослабления магнитного потока, стимулируют повышенный интерес к их изучению. В режиме генерации гибридные машины возбуждения, подключенные к пассивному выпрямителю, представляют собой интересную альтернативу генераторам переменного тока с постоянными магнитами, связанным с преобразователем активной мощности. Принцип гибридного возбуждения также можно использовать для уменьшения объемов ПМ и экономии материальных затрат.

Можно найти в этой статье некоторые подробные обзоры по топологиям гибридного возбуждения и альтернативный и обновленный обзор.

Также, в этой статье представлен обзор технологии гибридных машин возбуждения. Сообщалось об обновленном состоянии различных

существующих структур и давалась классификация этих структур с учетом их 2D- или 3D-структуры. Были качественно обсуждены преимущества и недостатки этих различных топологий машин. Таким образом, интерес к гибридным машинам возбуждения был проявлен как для двигательного, так и для генераторного режима. Было показано, что такие электрические машины подходят для применений с регулируемой скоростью и особенно для гибридных электромобилей и электромобилей. Были представлены различные модели, используемые для проектирования этих структур. Обсуждались преимущества и ограничения каждой модели. Наконец, был представлен пример оптимальной конструкции и анализа производительности гибридной машины переключения возбуждения. В этой статье подчеркивается вклад гибридного принципа возбуждения в приложения с регулируемой скоростью. Дополнительная степень свободы, присущая гибридным структурам возбуждения, делает их хорошими кандидатами для многих приложений.

2. Excitation System Models of Synchronous Generator (Авторы: Jerkovic, Vedrana; Miklosevic, Kresimir; Spoljaric Zeljko, Факультет электротехники Осиек, Хорватия)

Целью данной статьи является дать краткий обзор моделей систем возбуждения синхронного генератора, которые были классифицированы до сих пор, а также различных возможностей регулирования этих систем. Сначала описываются модели систем возбуждения, обсуждаются их преимущества и недостатки. Более того, предоставляются различные возможности регулирования этих систем, при этом особое внимание уделяется недавно разработанному регулированию нелинейных систем. Наконец, объясняется, что методы регулирования нелинейных систем намного сложнее, чем обычно используемые методы регулирования линейных систем, но также имеют потенциал для улучшения регулирования систем возбуждения синхронных генераторов, если они будут доработаны.

Синхронный генератор является источником энергии в электроэнергетической системе, поэтому регулирование синхронного генератора влияет не только на сам генератор, но и на всю энергосистему. В синхронном генераторе механическая энергия ротора преобразуется в электрическую энергию в обмотке статора. Это преобразование энергии обеспечивается возбуждением синхронного генератора и регулируется системой возбуждения. Система возбуждения обычно состоит из автономного регулятора напряжения, возбудителя, измерительных элементов, стабилизатора энергосистемы и блока ограничения и защиты. Модели систем возбуждения по структуре и типу реализованного регулятора классифицированы и стандартизированы. Существует девятнадцать

различных типов возбуждения в трех основных группах: коллекторные возбудители постоянного тока (тип DC), системы возбуждения с выпрямителем, питаемым от генератора переменного тока (тип AC) и статические системы возбуждения (тип ST). Все эти модели включают в себя линейные регуляторы (П-, ПИ- или ПИД-регуляторы), поскольку они чаще всего используются на практике. Линейное регулирование хорошо для стационарного состояния, но в переходном состоянии качество регулирования меняется с изменением рабочей точки, поскольку синхронный генератор является нелинейной системой. Для решения этой проблемы вводится нелинейное регулирование. Нелинейное регулирование может быть реализовано в форме нейронных сетей, нечеткого управления или адаптивного управления. Эти структуры более сложны, чем структуры линейного регулирования, но имеют потенциал для улучшения регулирования системы возбуждения при дальнейшем развитии.

3. Types of excitation system (Источник: <https://www.brainkart.com/article/Types-of-Excitation-System12456/>)

Речь идёт в этой статье понятие о возбуждения и приведено блок-схема управления возбуждением, статическая система возбуждения, бесщеточная схема возбуждения, система возбуждения переменного тока, система возбуждения постоянного тока, моделирование системы возбуждения и т.д.

Также, производительность петли APH, целью контура APB является поддержание напряжения на клеммах генератора в пределах допустимых значений.

Для APB указан предел статической точности в процентах, чтобы напряжение на клеммах поддерживалось в пределах этого значения.

4. Hybrid Excited Synchronous Machine with Wireless Supply Control System (Авторы: Marcin Wardach, Michal Bonislawski, Ryszard Palka, Piotr Paplicki и Pawel Prajzenc)

В статье представлен нетрадиционный подход к управлению синхронным гибридным возбуждением, машина (УСГВ), которая может быть использована для приводов чисто электромобилей. Гибридное возбуждение дополнительная катушка управления, размещенная на роторе машины, реализована с помощью беспроводной энергии передаточная система, соединенная с валом ротора. Экспериментальные результаты характеристик противо ЭДС полученные на прототипе УСГВ сравнивались с 3D анализом методом конечных элементов.

5. Controlled Brushless De-Excitation Structure for Synchronous Generators (Авторы: Seif Eddine Chouaba и Abdallah Barakat)

Основной недостаток бесщеточной системы возбуждения в синхронном генераторе (СГ) происходит медленное выключение возбуждения реакция,

полученная при отклонении нагрузки. Вот почему напряжение на клеммах генератора могут наблюдаться выбросы. Это поведение в основном связано со временем реакции возбудителя и вращающийся диодный мост, не способный быстро снять возбуждение генератор отрицательными напряжениями возбуждения. В этом документе представлены новая бесщеточная конструкция девозбуждения, способная быстро выполнять снятие возбуждения генератора путем подачи управляемого отрицательного напряжения возбуждения основной обмотки возбуждения генератора.

Предлагаемая конструкция основана на новом бесщеточном девозбуждении.

Машина, называемая управляющей машиной и установленная на той же вал генератора и бесщеточный возбудитель. Бесщеточный управляющая машина является маломощной и используется для передачи команды от регулятора напряжения к системе разряда, расположенной на стороне ротора главного генератора. Динамика работоспособность предлагаемой системы снятия возбуждения оценивается с точки зрения стабильности системы, времени реакции на регулирование напряжения и выбросы напряжения во время различных испытаний на разгрузку.

6. Excitation System Technologies for Wound-Field Synchronous Machines: Survey of Solutions and Evolving Trends (Авторы: Jonas Kristiansen Nøland, Stefano Nuzzo, Alberto Tassarolo и Erick Fernando Alves)

Синхронные машины раневого поля (СВП) входят в состав большинства установок большой энергетики.

Генераторные установки и специальные мощные моторные приводы, благодаря их высокому КПД, гибкому возбуждению поля и собственной способности к ослаблению потока. Кроме того, они используются в широком спектре высококачественных решений в диапазоне мощности от низкой до средней. Этот вклад представляет собой всесторонний обзор классических и современных методов и технологий систем возбуждения (СВ) ВФСМ. Работа охватывает фундаментальную теорию, типичные методы снятия возбуждения и подробное описание всех современных топологий оборудования возбуждения. Он также включает в себя описание современного состояния и новейших тенденций в области ЭС синхронных двигателей с возбуждением и генераторы.

Цель статьи – предоставить полезную и актуальную справочную информацию для практиков и специалистов, исследователи в этой области.

В настоящее время этот документ охватывает все основные категории ЭУ. Реализованы или предложены для WFSM. Широкий ассортимент топологии для каждой категории были описаны, подчеркивая самые современные технологии, а также последние тенденции.

7. Analysis of the Synchronous Machine in its Operational Modes: Motor, Generator and Compensator (Авторы: Prathamesh M. Dusane, Minh-Quan Dang, Famous O. Igbinovia, Ghaeth Fandi.)

В данной статье дается краткая оценка Синхронная машина. Там описывается конструкция, принципы работы и их применение в различных режимы работы: Двигатель, Генератор и Компенсатор. Это подчеркивает необходимость использования синхронных машин в целях компенсации из-за его многочисленных преимуществ в связи с этим в сетях энергосистемы.

В этой статье мы рассмотрели теорию работы синхронной машины наряду с ее важными приложения в энергосистемах.

Несмотря на то, что эпоха Синхронные машины появились в середине 18 века; Синхронные машины до сих пор оказываются полезными во многих сферах приложения XXI века.

В будущем синхронный Машины и впредь будут приносить большую пользу как динамичные компенсационные машины для стабилизации и регулирования мощности поток систем электропередачи.

8. Excitation system of a synchronous machine (Источник: Web site: <https://www.linkedin.com/pulse/excitation-system-synchronous-machine-sultan-zafar>)

Слово «Возбуждение» означает создание магнитного потока путем прохождения тока в обмотке возбуждения. Устройство или система, используемая для возбуждения синхронной машины, известна как система возбуждения.

Возбудитель и пилотный возбудитель установлены на главном валу синхронного генератора или двигателя.

В машинах среднего размера вместо возбудителя постоянного тока используются возбудители переменного тока.

В настоящее время большие синхронные машины используют бесщеточную систему возбуждения.

Бесщеточная система возбуждения требует меньшего обслуживания из-за отсутствия щеток и контактных колец.

9. Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles (Авторы: Paolo Di Barba, Michal Bonislawski, Ryszard Palka, Piotr Paplicki и Marcin Wardach)

В статье рассматривается оптимальная конструкция нового синхронного двигателя, особенно подходящего для электромобилей. Уникальное преимущество, особенностью этого двигателя является его возможность реализовать ослабление поля на высоких скоростях, что является важнейшим требованием к таким приводам. Основной дизайн, цель состоит в том, чтобы определить размеры некоторых важных областей машины, чтобы

избежать насыщения железа и минимизировать массу к соотношению объема, одновременно максимизируя крутящий момент. Оригинальность вклада многообразна: формулирование дизайна проблема в многокритериальном плане, решение ее с помощью эволюционных вычислений, решение связанной прямой задачи на основе 3D модель месторождения, рассматривающая сокращенный набор проектных переменных с помощью метода поверхности отклика, ссылаясь на реальную проблему.

Заключения (Conclusion)

В данной статье проанализировано 8 русскоязычных и 9 англоязычных статей, посвященных анализу системы возбуждения генераторов.

Анализируя данные статьи, можно сделать вывод, что, учитывая современное развитие, в том числе необходимость обеспечения точности в системе управления, необходимость максимального энергосбережения, а также необходимость сделать основной упор на программное обеспечение в системе управления, математическое моделирование необходимо для модернизации системы привода синхронных генераторов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Современные системы возбуждения генераторов большой мощности

(Автор Адамович М.А., Чернявский Д.В. Научный руководитель - канд. техн. наук, доцент Булат В.А. Материалы 64-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (апрель 2008 года), журнал Актуальные проблемы энергетики) Web сайт: <https://core.ac.uk/download/483933428.pdf>)

2. Анализ конструктивных схем систем возбуждения синхронных генераторов, работающих в составе единой энергосистемы (Автор В.М. Степанов, Д.А. Карпунин Web сайт: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktivnyh-shem-sistem-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov-rabotayuschih-v-sostave-edinoj-energосистемы/viewer>)

3. Виды систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов (Автор: Овсянников Александр Максимович Опубликовано в: Молодой учёный №47 (337) ноябрь 2020 г. Дата публикации: 17.11.2020 Web сайт: <https://moluch.ru/archive/337/75258>.)

4. Системы возбуждения синхронных генераторов: разновидности, схемы, достоинства и недостатки (Авторы: Абрамян Евгений Павлович, Доц. кафедры электротехники СПбГПУ, Васильев Дмитрий Петрович, Проф. электротехники СПбГПУ, Орлов Анатолий Владимирович, Нач. сл. РЗиА

Новгородских ЭС; Web сайт: <https://pue8.ru/silovaya-elektronika/198-sistemy-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov.html>)

5. Современные направления развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций (Авторы: А.Б. Аскарлов, М.В. Андреев, Е.М. Чикишев, А.А. Суворов, В.Е. Рудник, Web сайт: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-napravleniya-razvitiya-sistem-avtomaticheskogo-regulirovaniya-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov-elektrostantsiy>).

6. Возбуждение синхронных генераторов (Web сайт: https://www.gigavat.com/generator_vozbughdenie.php)

7. Общие сведения об электрических машинах - системы возбуждения синхронных генераторов (Web сайт: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/obschie-svedeniya-ob-elektricheskikh-mashinah-10.html>)

8. Разработка нетрадиционной системы возбуждения автономных синхронных машин (Авторы: Пирматов Нурали Бердиёрович, д-р техн. наук, профессор Ташкентского государственного технического университета, Муминов Махмуджон Умурзакович, ст. преподаватель, Ташкентского государственного технического университета, Web сайт: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-netraditsionnoy-sistemy-vozbuzhdeniya-avtonomnyh-sinhronnyh-mashin>)

9. Overview of Hybrid Excitation Synchronous Machines Technology (Авторы: Sami Hlioui, Yacine Amara, Emmanuel Hoang, Michel Lecrivain, Mohamed Gabsi.)

10. Excitation System Models of Synchronous Generator (Авторы: Jerkovic, Vedrana; Miklosevic, Kresimir; Spoljaric Zeljko, Факультет электротехники Осиек, Хорватия)

11. Types of excitation system (Источник: <https://www.brainkart.com/article/Types-of-Excitation-System12456/>)

12. Hybrid Excited Synchronous Machine with Wireless Supply Control System (Авторы: Marcin Wardach, Michal Bonislowski, Ryszard Palka, Piotr Paplicki и Pawel Prajzencanc)

13. Controlled Brushless De-Excitation Structure for Synchronous Generators (Авторы: Seif Eddine Chouaba и Abdallah Barakat)

14. Excitation System Technologies for Wound-Field Synchronous Machines: Survey of Solutions and Evolving Trends (Авторы: Jonas Kristiansen Nøland, Stefano Nuzzo, Alberto Tassarolo и Erick Fernando Alves)

15. Analysis of the Synchronous Machine in its Operational Modes: Motor, Generator and Compensator (Авторы: Prathamesh M. Dusane, Minh-Quan Dang, Famous O. Igbinoia, Ghaeth Fandi.)

16. Excitation system of a synchronous machine (Источник: Web site: <https://www.linkedin.com/pulse/excitation-system-synchronous-machine-sultan-zafar>)
17. Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles (Авторы: Paolo Di Barba, Michal Bonislawski, Ryszard Palka, Piotr Paplicki и Marcin Wardach)