

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2010 В.Н. Цапенко, Е.В. Ежова

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 29.03.2010

Рассматривается компьютерная модель асинхронизированного турбогенератора, разработанная для определения и виртуального исследования рабочих характеристик нового вида энергетического оборудования. Представленная модель упраздняет составление и решение систем алгебраических и дифференциальных уравнений и обеспечивает визуальный контроль за параметрами турбогенератора.

Ключевые слова: *асинхронизированный турбогенератор, компьютерное моделирование*

В настоящее время в Единой энергетической системе России генерирующие компании решают одну из важнейших для современной энергетики задач – внедрение принципиально нового вида энергетического оборудования – асинхронизированных турбогенераторов. Необходимость в применении таких турбогенераторов особенно остро возникла в 90-х годах прошлого столетия, когда в результате резкого спада промышленного производства сильно снизилась мощность, передаваемая по линиям электропередач, что в свою очередь привело к увеличению напряжения и особенно в электрических сетях напряжением 220-500 кВ за счёт генерирования реактивной мощности указанными линиями. Так, например, напряжение в ряде узлов сети 500 кВ, особенно в ночные часы, может достигать величины 540 кВ при допустимом напряжении 525 кВ. Длительное повышение напряжения сверх допустимого приводит к преждевременному износу изоляции электрооборудования (трансформаторов, автотрансформаторов, выключателей, разъединителей и т.д.), сокращению его срока службы.

Чаще всего для снижения напряжения в электрических сетях применяются следующие мероприятия:

- отключение слабо загруженных линий электропередач, что существенно снижает надёжность работы энергосистем и энергоснабжения;

Цапенко Владимир Никитович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники». E-mail: vlad20107@rambler.ru

Ежова Елена Владимировна, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники». E-mail: a-ezhova@yandex.ru

- перевод синхронных турбогенераторов в режим потребления реактивной мощности, что снижает срок их работы;
- установка шунтирующих реакторов;
- использование в трансформаторах устройств регулирования напряжения под нагрузкой.

Как правило, при работе турбогенераторов в режимах глубокого потребления реактивной мощности резко возрастает количество ремонтов из-за «распухания» крайних пакетов сердечника статора. Предпринятые в 80-х годах прошлого столетия заводами меры конструктивного характера по модернизации торцевой зоны статора в полной мере не сняли остроты проблемы. Повреждения турбогенераторов, особенно имеющих длительный срок эксплуатации и выдающих мощность на напряжении 220, 500 кВ из-за работы в режимах недо возбуждения, происходят достаточно часто. Эффективным способом решения этой проблемы является применение для производства электроэнергии асинхронизированных синхронных турбогенераторов (АСТГ). От синхронных машин АСТГ отличаются тем, что магнитное поле перемещается относительно ротора, который его создает, от асинхронных машин АСТГ отличается тем, что это перемещение создается посторонним источником и является управляемым.

Асинхронизированные турбогенераторы (АСТГ) являются уникальной отечественной разработкой. Идея их создания принадлежит М.М. Ботвиннику, руководившему лабораторией устойчивости в институте ВНИИЭ в 60-70 годах прошлого столетия. Под его руководством были выполнены первые основные

работы по применению в энергетике принципиально новых типов генераторов. АСТГ относятся к классу машин двойного питания «синхронного» принципа действия. Они обладают устойчивостью по углу между синхронно вращающимися векторами полей статора и ротора [1]. Структурная схема АСТГ изображена на рис. 1.

Исследование АСТГ на физических моделях дорого, трудоемко и энергоемко. В настоящее время современные информационные

технологии предлагают системы компьютерного моделирования, позволяющие анализировать рабочие характеристики объекта без его материального воплощения. Одна из самых сложных проблем в этом случае – разработка модели объекта исследования. В нашем случае она удобно решается с помощью Matlab Simulink, благодаря наличию в этом программном пакете библиотеки компонентов в виде блоков.

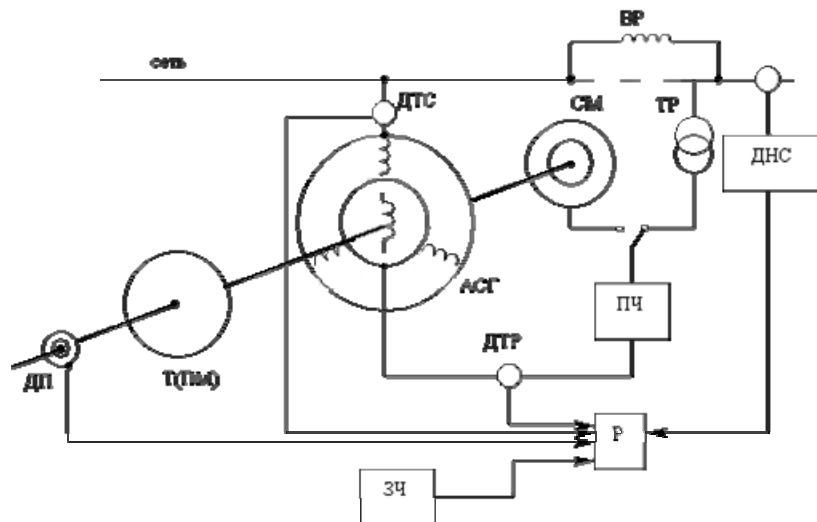


Рис. 1. Структурная схема АСТГ: ПЧ – преобразователь частоты; Р – регулятор; ЗЧ – задатчик частоты; ДНС – датчик напряжения сети; ДТС – датчик тока статора; ДТР – датчик тока ротора; Т(ПМ) – турбина (приводной механизм); СМ – синхронная машина; ТР – трансформатор; ВР – внешняя реактивность; ДП – датчик положения

Это обстоятельство упраздняет составление и решение систем алгебраических и дифференциальных уравнений и обеспечивает визуальный контроль «поведения» модели (рис. 2.). Кроме того, использование для анализа характеристик АСТГ Matlab Simulink позволяет:

- выполнить анализ потоков энергии в АСТГ при глубоком ($\pm 60\%$) регулировании частоты возбуждения, что дает возможность сделать вывод о целесообразности применения самовозбуждения для АСТГ;
- установить зависимость КПД от частоты возбуждения при глубоком ее регулировании, что дает возможность определить целесообразные области применения асинхронизированных синхронных турбогенераторов.

Виртуальная модель для определения характеристик турбогенератора содержит асинхронизированный синхронный генератор ASG, источник напряжения возбуждения, нагрузку. В качестве источника возбуждения – библиотечный источник трехфазного напряжения, нагрузка выполнена в виде резисторов.

Процесс моделирования осуществляется следующим образом. К ротору прикладывается момент, полученный как разность между заданным моментом и моментом, пропорциональным частоте вращения. Это дает возможность стабилизировать частоту вращения при варьировании электрической нагрузки генератора. К трехфазной обмотке ротора прикладывается напряжение от трехфазного источника, так что в роторе создается вращающийся относительно ротора магнитный поток, который индуцирует в статоре ЭДС. Значение и частота ЭДС пропорциональны алгебраической сумме частот вращения ротора и вращения магнитного потока относительно ротора. Под действием ЭДС через обмотки статора и сопротивления нагрузки проходит ток, которым энергия передается от генератора в нагрузку. Магнитный поток, созданный током нагрузки в обмотке статора, алгебраически складывается с магнитным потоком ротора, так что ЭДС в статоре создается потоком суммарным. Особенность АСТГ заключается в том, что ЭДС индуцируется и в роторе, вычитаясь из

напряжения возбуждения, так что ток возбуждения проходит под действием этой разности, а не только источника возбуждения, как в

синхронном генераторе. Эта особенность сообщает турбогенератору существенные отличия от генераторов синхронного и асинхронного [2].

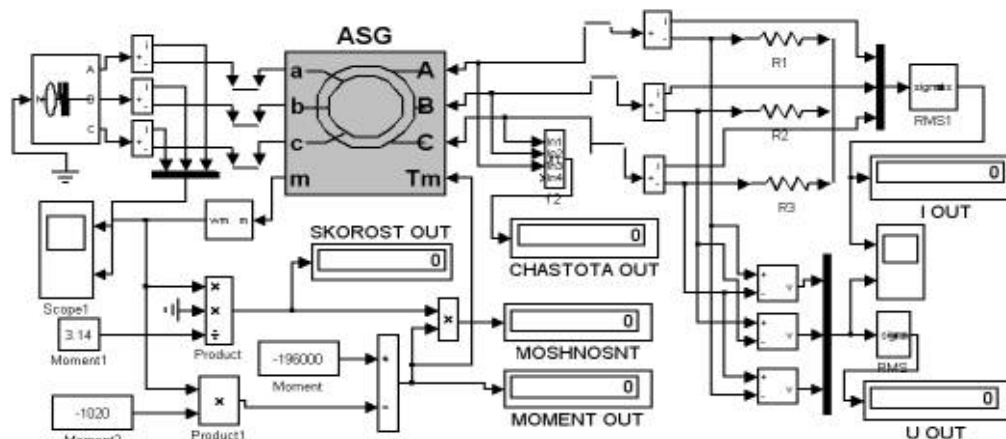


Рис. 2. Модель АСТГ из библиотечных элементов Simulink

В нашем случае в качестве прототипа для моделирования характеристик был взят турбогенератор мощностью 6 МВт номинальным напряжением 6,3 кВ. В процессе исследования варьировались напряжение и частота возбуждения, частота вращения, сопротивление резисторов нагрузки. Контролировались ток возбуждения, вращающий момент, напряжение и ток нагрузки. Характеристики холостого хода определялись при сопротивлении резисторов нагрузки на два порядка большем, чем номинальное сопротивление, так что ток нагрузки имел незначимые значения. Частота вращения варьировалась в диапазоне 20-80 Гц, частота возбуждения варьировалась в диапазоне ± 30 Гц. Напряжение возбуждения устанавливалось таким, чтобы при частоте вращения ротора 50 Гц в обмотке статора индуцировалась ЭДС 6,3 кВ частотой 50 Гц – при частоте возбуждения равной 0. В процессе исследования изменялась частота вращения при нулевой частоте возбуждения, затем частота возбуждения при частоте вращения 50 Гц. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Из графика видно, что напряжение генератора одинаково изменяется в зависимости от частот вращения и возбуждения с коэффициентом $dU/df = 50$ В/Гц. Из этого следует, что желаемая частота напряжения генератора может быть получена регулированием частоты вращения ротора, регулированием частоты вращения магнитного поля возбуждения относительно ротора или их совместным регулированием.

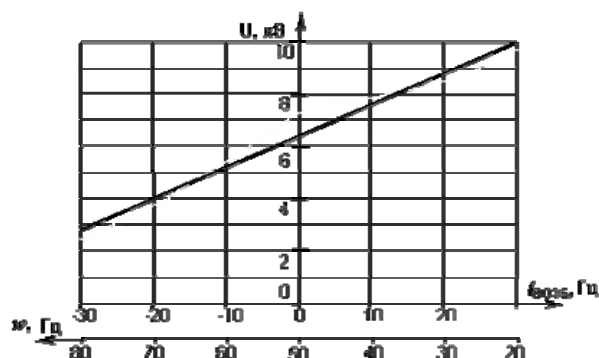


Рис. 3. Зависимость напряжения генератора от частот вращения и возбуждения при холостом ходе

Моделирование внешних характеристик осуществлялось для частоты генерируемого напряжения 50 Гц. Частота вращения изменялась в диапазоне 20-80 Гц, частота возбуждения устанавливалась в диапазоне ± 30 Гц так, чтобы частота генерируемого напряжения была 50 Гц. Напряжение возбуждения устанавливалось таким, чтобы при номинальном токе нагрузки и частоте генерируемого напряжения 50 Гц значение генерируемого напряжения было 6 кВ. Нагрузка изменялась изменением сопротивления резисторов нагрузки. Внешние характеристики представлены на рис. 4.

Выводы:

1. В асинхронизированном режиме характеристики существенно более жесткие, чем в режиме синхронного генератора.
2. При согласном направлении вращения поля возбуждения и ротора генерируемое напряжение уменьшается с увеличением тока нагрузки. Это объясняется тем, что ЭДС, индуцированная током нагрузки в роторе (реакция

якоря), меньше напряжения источника возбуждения, и разница между ними увеличивается с увеличением нагрузки. Следовательно, снижается результирующий поток возбуждения и индуцируемая им ЭДС якоря (статора).

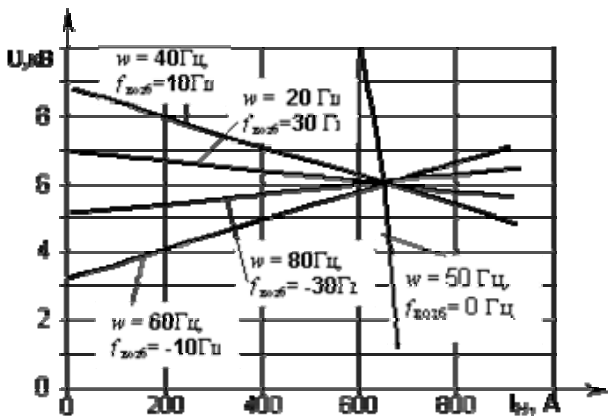


Рис. 4. Внешние характеристики АСГ при частоте выходного напряжения 50 Гц

3. При встречном направлении вращения поля и ротора напряжение увеличивается с ростом тока. Это объясняется тем, что реакция якоря больше напряжения источника возбуждения, и разница между ними увеличивается с увеличением нагрузки. Следовательно, увеличивается результирующий поток возбуждения и индуцируемая им ЭДС якоря.

4. Чем выше частота, тем жестче характеристики, меньше зависимость напряжения от нагрузки. Это объясняется тем, что с увеличением частоты меньше относительное значение падения напряжения в активном сопротивлении цепи возбуждения, ток возбуждения во все большей мере зависит от разности напряжения источника возбуждения и ЭДС реакции якоря, происходит все более полная компенсация реакции якоря.

Энергетические характеристики в процессе моделирования АСТГ определены как мощность, переданная в нагрузку, и КПД при различных частотах возбуждения. На рис. 5 представлены зависимости переданной мощности от тока нагрузки при различных частотах в диапазоне ± 30 Гц при постоянном напряжении возбуждения генератора. Как видно из рисунка, при токе нагрузки до полутора номинального у генератора с постоянным возбуждением происходит срыв (резкое снижение напряжения) генерации, а при переменном напряжении возбуждения этого не происходит. Это объясняется тем, что при переменном напряжении возбуждения размагничивающее действие тока нагрузки приводит к уменьшению противоЭДС в цепи возбуждения и, следовательно, к увеличению тока возбуждения,

происходит автоматическая компенсация реакции якоря.

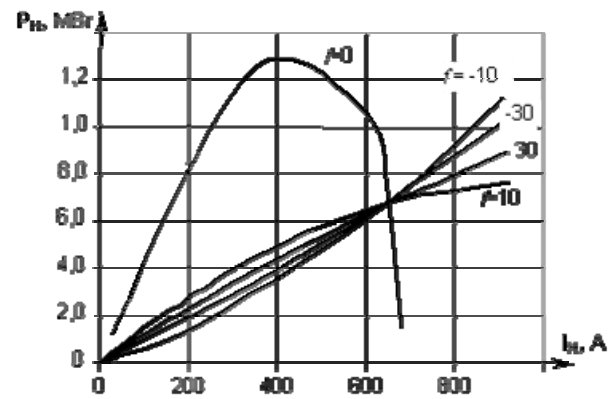


Рис. 5. Зависимость генерируемой мощности от тока нагрузки при различных частотах возбуждения

При постоянном напряжении возбуждения размагничивающая реакция якоря не компенсируется, так что результирующий магнитный поток снижается с увеличением тока нагрузки. Кроме того, при вращении поля возбуждения против вращения ротора имеет место перекомпенсация (кривые -10 и -30 Гц на рис. 5), а при вращении поля возбуждения согласно с ротором реакция якоря несколько недокомпенсирована (кривые 10 и 30 Гц на рис. 5). С увеличением частоты возбуждения качественное различие между характеристиками уменьшается (кривые -30 и 30 различаются меньше, чем -10 и 10 Гц). Также данная виртуальная модель АСТГ позволяет установить зависимость КПД от частоты возбуждения (рис. 6) при глубоком ее регулировании.

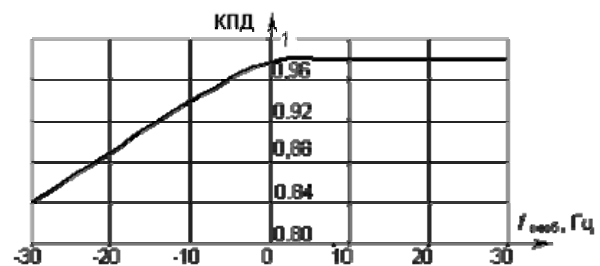


Рис. 6. КПД турбогенератора в зависимости от частоты возбуждения при частоте генерированного напряжения 50 Гц

Как видно из графика, при частоте возбуждения 0 и выше КПД близко к 1. В режимах, когда вращение поля возбуждения направлено против ротора, КПД снижается с увеличением частоты поля. Это объясняется тем, что часть механической энергии турбины передается источнику возбуждения, а не нагрузке [3].

Выводы: проведенное компьютерное моделирование рабочих характеристик АСТГ показало, что этот тип турбогенераторов обеспечивает более устойчивое преобразование механической энергии в электрическую, чем традиционные синхронные машины. С увеличением частоты поля увеличивается стабильность генерированного напряжения по отношению к току нагрузки. При работе с АСТГ также необходимо учитывать, что мощность возбуждения составляет существенную часть мощности нагрузки, требует разработки специальных схем питания цепи возбуждения, например, организации генерации энергии с самовозбуждением.

Следует отметить также, что асинхронизированные турбогенераторы являются одним из типов современных многофункциональных устройств, обеспечивающих реализацию так

называемой технологии FACTS – технологии гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока, позволяющей комплексно решать проблемы генерации и транспорта электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Ботвинник, М.М.* Управляемая машина переменного тока / М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян. – М., «Наука», 1969. – 352 с.
2. *Лоханин, Е.К.* Моделирование асинхронизированного генератора / Е.К. Лоханин, А.И. Скрыпник // *Электричество*. – 2000. - №6. – С. 32-36.
3. *Зархи, М.И.* Промышленные испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 МВА // *Электричество*. – 2006. - №4. – С. 52-54.

RESEARCH OF ASYNCHRONIZED TURBOGENERATORS WORKING PARAMETERS BY MEANS OF COMPUTER MODELLING SYSTEMS

© 2010 V.N. Tsapenko, E.V. Yezhova

Samara State Technical University

The computer model of asynchronousized turbogenerator, developed for the definition and virtual research of working parameters of a new kind of power equipment is considered. The presented model abolishes drawing up and decision the systems of algebraic and differential equations and provides the visual control over turbogenerator parameters.

Key words: *asynchronousized turbogenerator, computer modelling*

*Vladimir Tsapenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Theoretical Bases of Electrotechnics". E-mail: vlad20107@rambler.ru
Elena Ezhova, Candidate of Technical Sciences, Assistant at the Department "Theoretical Bases of Electrotechnics". E-mail: a-ezhova@yandex.ru*