

АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И СТРУКТУРА

Зачена Ю. В., старш. преподаватель

Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина

E-mail: sauue@kdu.edu.ua

В статье рассмотрены принципы построения автономных систем электроснабжения и приведены основные требования, предъявляемые к таким системам. Проведен анализ этапов проектирования автономных систем и их основных функциональных узлов – источников механической и электрической энергии, а также устройств преобразования и согласования.

Ключевые слова: источник электроэнергии, асинхронный генератор, широтно-импульсная модуляция.

Введение. Современной тенденцией развития энергетики является стремление к сбалансированности энергорайонов, повышение надежности электроснабжения потребителей [1]. Важное место в стратегии развития электроэнергетики занимают автономные системы электроснабжения (АСЭ). В последнее время АСЭ получают все более широкое распространение в системе электроснабжения не только специального, но и общего применения. Указанные системы используются почти во всех областях народного хозяйства. Их самыми большими потребителями являются топливно-энергетический, агропромышленный и машиностроительный комплексы страны. Области применения таких систем охватывают различного рода электроагрегаты (стационарные, судовые, передвижные) и управляемые электромеханические системы (строительно-дорожные, транспортные, ветроэнергетические установки и малые ГЭС, генераторы, которые работают на статические преобразователи частоты и электромашинные агрегаты), системы бесперебойного питания ответственных потребителей, в том числе современных вычислительных комплексов [2].

Необходимость в АСЭ возникает там, где технически невозможно или экономически невыгодно использовать централизованное электроснабжение, например, на передвижных объектах. А это, в первую очередь, труднодоступные объекты, отдаленные от больших электрических систем, которые имеют собственные источники первичной энергии, например, газовые и нефтяные месторождения. АСЭ находят широкое применение в промышленности, строительстве, сельском и коммунальном хозяйствах. Они работают на предприятиях, в аэро-, морских и речных портах, в энергоблоках больниц, в фермерских хозяйствах, в

системах аварийного энергоснабжения, на объектах оборонительного комплекса - везде, где необходима электроэнергия, а сеть или отдалена, или работает с перебоями.

Исследованию теории и практики управления автономными энергетическими комплексами и энергосбережению посвящено довольно большое количество работ. Однако на уровне АСЭ эти исследования разрозненные и не в полной мере способствуют решению данной проблемы.

Цель работы. Определение рациональной структуры автономной системы энергоснабжения ограниченной мощности, анализ основных механических и электрических узлов АСЭ при подключении потребителей соизмеримой мощности.

Материалы и результаты исследований. АСЭ применяются в транспортных и стационарных энергосистемах, авиационно-космической и судовой технике. Важное место среди них принадлежит транспортным АСЭ, которые обеспечивают электроснабжение потребителей в труднодоступных районах и аварийных ситуациях.

Структуры транспортных АСЭ значительно многообразнее традиционных систем электроснабжения. Кроме того, вопросы проектирования транспортных систем имеют свою специфику, которая, прежде всего, учитывает критерии эффективности, параметры электроэнергии и электромагнитную совместимость оборудования (особенности совместной работы основных функциональных узлов источник – преобразователь, преобразователь – преобразователь) и в связи с этим их оптимизацию.

Как известно, структура АСЭ определяется потребителями электроэнергии, а критериями ее эффективности служат масса, коэффициент полезного действия, показатели надежности и качества электроэнергии, суммарные затраты, связанные со стоимостью и эксплуатацией. В большинстве случаев критерий массы для

транспортных АСЭ является приоритетным. Коэффициент полезного действия АСЭ определяет эффективность преобразования электроэнергии. При оптимизации источников подобного рода критерии массы и к.п.д. противоречивы. Например, с увеличением мощности источника электроэнергии, а значит, и массы повышается его к.п.д. Основные критерии надежности АСЭ – интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и наработка до первого отказа.

Требования к качеству электроэнергии определяются потребителями и непосредственно влияют на конструктивные и схемные особенности, массу и стоимость источников и преобразователей электроэнергии. Кроме того, развитие научно-технического прогресса потребовало разработки АСЭ, которые по техническим требованиям не должны допускать перерывов в электроснабжении. Поэтому современные АСЭ ответственных электроприемников должны выполняться повышенной надежности, т.е. источники и преобразователи электроэнергии следует резервировать, а это приводит соответственно к увеличению массы и стоимости систем [1].

При создании новых конструктивных решений АСЭ целесообразно использовать принцип модульного агрегирования, т.е. разрабатывать АСЭ на основе функционально и конструктивно законченных унифицированных модулей, в состав которых входят приводные двигатели, источники, преобразователи, коммутационные устройства, системы управления, контроля и защиты. Модульный принцип построения упростит решение важной задачи обеспечения высокой надежности электроснабжения ответственных потребителей за счет резервирования основных узлов и блоков, а при необходимости позволит наращивать мощность источников и преобразователей электроэнергии. Значительный технико-экономический эффект модульного построения АСЭ обеспечивается при ее эксплуатации благодаря сокращению времени технического обслуживания и устранения неисправностей.

При проектировании АСЭ необходимо учитывать условия работы (прежде всего – климатические) и особенности эксплуатации (повышенные динамические и вибрационные нагрузки), а также проблему электромагнитной совместимости устройств из-за компактного размещения оборудования.

Повышение автономности функционирования транспортных АСЭ, улучшение их массогабаритных показателей при жестких требованиях к ним по качеству электроэнергии и надежности

электроснабжения потребителей возможно на основе использования малогабаритных систем с рациональной структурой построения по сравнению с существующими, что во многом зависит от правильного выбора перспективных приводных двигателей, источников и преобразователей, коммутационной аппаратуры.

От параметров электроэнергии зависят характеристики АСЭ, поэтому при выборе вида тока и, соответственно, источника необходимо учитывать следующие факторы. Системы переменного тока имеют компактные электрические машины, преобразователи электроэнергии и коммутационные устройства. Основные их недостатки – относительная сложность параллельной работы и увеличенные площади сечения проводов. Системы постоянного тока характеризуются относительно малыми сечениями проводников, достаточно простым регулированием напряжения генераторов и простой параллельной их работой. Однако основными их недостатками являются усложненная коммутация цепей и необходимость в преобразовании электроэнергии в связи с чем коллекторные машины имеют пониженные показатели надежности.

Выбор номинального напряжения определяется рядом факторов. Низкие значения напряжения приводят к большим токам и потерям, сопровождаются трудностями регулирования и стабилизации параметров. При высоких значениях напряжения предъявляются повышенные требования к изоляции проводников. При этом необходимо учитывать, что значения номинального напряжения сильно влияют на массу распределительных устройств. Для постоянного тока типичные значения напряжения – 24-30 В, для переменного – 220 В (фазное).

При выборе частоты тока необходимо учитывать, что при повышенных ее значениях (400-1200 Гц) существенно улучшаются массогабаритные показатели источников и преобразователей электроэнергии, но возрастают потери в стальных сердечниках, активные сопротивления проводов и падения напряжения на реактивных элементах.

При выборе приводных двигателей для источников электроэнергии необходимо учитывать, что дизельные двигатели практически достигли своего совершенства. Можно ожидать лишь незначительного улучшения их характеристик. В настоящее время уделяется внимание совершенствованию адиабатных двигателей, экономичность работы которых может быть повышена до уровня, практически недостижимого для дизельных двигателей. Прогнозируемое

значение к.п.д. адиабатных двигателей - до 0,64, а расход топлива – не более 150 г/(кВтч).

Одно из перспективных направлений – применение высокоскоростных приводных двигателей, характеристики которых значительно улучшаются при использовании металлокерамических материалов. Здесь широкие перспективы открываются перед комбинированными свободно-поршневыми двигателями, к.п.д. которых может достигать 0,6, удельная масса не превышает 1,1 кг/кВт, а ресурс работы составляет 30 000 ч. Кроме того, значительно увеличить ресурс работы автономного источника питания можно с использованием высокоскоростных приводных двигателей и бесконтактных электрических машин при размещении турбины двигателя и ротора генератора на одном валу и применении магнитных подшипников вместо традиционных.

В аварийных режимах работы транспортных АСЭ в качестве источников питания целесообразно применять сверхемкостные накопители электроэнергии, температурный режим эксплуатации которых находится в пределах от -40 до +40⁰С. Они позволяют создавать достаточно мощные батареи из единичных элементов, способных накапливать большую энергию в малых объемах.

Применение в АСЭ высокоскоростных приводных двигателей дает возможность значительно улучшить массогабаритные характеристики генераторов и преобразователей, повысить быстродействие системы защиты и стабилизации параметров электроэнергии за счет повышенной частоты тока, генерируемого источником электроэнергии. Для электроснабжения потребителей током промышленной частоты необходимо предусматривать в АСЭ непосредственные преобразователи частоты.

Таким образом, АСЭ является сложным производственным комплексом, для эффективной реализации которого необходим научный подход, заключающийся в глобальной оптимизации. Последняя предполагает оптимизацию АСЭ с учетом критериев эффективности, электромагнитной совместимости и структурно -параметрического синтеза. Достижения подобного уровня глобальной оптимизации АСЭ для всех режимов работы – трудная задача. Поэтому проектирование перспективных АСЭ должно осуществляться поэтапно, с использованием вычислительной техники на базе САПР.

На первом этапе необходимо совершенствовать применяемые методы синтеза и анализа систем с

учетом имеющегося реального оборудования и возможностей современных САПР и оптимизированных алгоритмов.

На втором этапе должны создаваться математические модели элементов и основных узлов перспективных АСЭ, проводиться исследования их работы в основных и аварийных режимах.

На третьем этапе должны создаваться АСЭ для решения конкретных задач с учетом внешних условий и особенностей работы. Здесь определяющим фактором для создания структуры АСЭ являются требования потребителей. При этом, чем ниже их требования к качеству электроэнергии и непрерывности электроснабжения, тем проще схема АСЭ и лучше массогабаритные характеристики, выше к.п.д. и надежность, ниже стоимость системы электроснабжения в целом.

Передвижные автономные системы электроснабжения не только дополняют мощные стационарные источники, но и в большинстве случаев обеспечивают электроэнергией объекты, удаленные от энергосистем. Главный функциональный узел АСЭ – автономные источники электроэнергии (АИЭ) – содержит приводные двигатели и электромашинные генераторы электроэнергии. Эти источники в основном и определяют массогабаритные, энергетические и эксплуатационно-технические характеристики АСЭ. Поэтому рассмотрим современное состояние отечественных наземно-транспортных АИЭ и перспективы их развития.

В настоящее время в качестве приводных двигателей широко применяются АИЭ средней мощности (до 200 кВт), в которых в основном используются дизельные (ДД), бензиновые и газотурбинные (ГТД) двигатели.

Выбор ДД в качестве приводного двигателя автономного источника обусловлен высокой готовностью и быстротой пуска, простотой обслуживания, большим опытом эксплуатации, комплектностью и высокой степенью автоматизации. Эффективный к.п.д. ДД АИЭ мощностью до 200 кВт составляет 0,25-0,35, ресурс – 10-20 тысяч часов, удельная масса – 10-50 кг/кВт, а частота вращения в основном 1500 или 1000 об/мин.

Дизельные двигатели обладают и рядом недостатков (наличие кривошипно-шатунного механизма, усложняющего конструкцию и ограничивающего возможность повышения частоты вращения; сравнительно высокая стоимость и большой расход топлива; достаточно малый ресурс работы; наличие токсичных выбросов отработанных газов и высокий уровень шума), что несколько

ограничивает область их применения.

Другим типом приводного двигателя, получившего распространение в АИЭ, является ГТД, удельная масса которого для средних мощностей составляет 0,5-3 кг/кВт, к.п.д. не превышает 0,20, а частота вращения турбины может составлять более 6000 об/мин [2].

Газотурбинные двигатели по экономичности уступают ДД и, кроме того, отличаются большой теплонпряженностью лопаток рабочего колеса. Конкурентоспособность ГТД возрастает при повышенных значениях мощностей.

Важная роль АСЭ принадлежит источникам электроэнергии, определяющим параметры генерируемой энергии. Основными преобразователями механической энергии приводных двигателей в электрическую являются синхронные генераторы (СГ), асинхронные генераторы (АГ) и генераторы постоянного тока (ГПТ). Синхронные генераторы обеспечивают генерирование переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220-380 В. Удельные массы СГ мощностью до и выше 30 кВт составляют соответственно 11-20 и 7-12 кг/кВт, а к.п.д. – 0,80-0,88 и 0,88-0,92. Недостатки СГ – невысокие показатели качества переходных процессов и надежность работы, относительно большие масса и габариты, сложность включения на параллельную работу.

Генераторы постоянного тока мощностью 5–8 кВт, генерирующие постоянный ток напряжением 110-230 В, имеют к.п.д. 0,79-0,87 при удельной массе 11-19 кг/кВт [6]. Основное достоинство ГПТ – простота и гибкость регулирования напряжения, а главный недостаток – наличие щеточно-коллекторного узла, понижающего надежность работы генератора.

Анализ существующих вариантов построения АСЭ показал, что к.п.д. АИЭ, выполненного по схеме ДД-СГ, находится в пределах 0,25-0,34, а удельная масса с учетом блоков автоматического управления превышает 30 кг/кВт [7].

При разработке к АИЭ предъявляется ряд требований, основными из которых являются: повышение экономичности и увеличение ресурса работы, снижение массы и габаритов при одновременном увеличении установленной мощности; увеличение к.п.д. и повышение надежности; повышение стабильности и точности поддержания параметров электроэнергии в условиях действия таких дестабилизирующих факторов, как переменная частота вращения приводного двигателя, изменяющиеся значение и характер нагрузки, параллельная работа с другими источниками; обеспечение простоты и безопасности

эксплуатации.

В последние годы в автономной энергетике большое внимание уделяется весьма перспективным источникам электроэнергии – асинхронизированным СГ (АГС), представляющим собой синтез собственно электрической машины и силового преобразователя. Эти агрегаты устойчиво работают во всех требуемых по условиям эксплуатации режимах, обеспечивая тем самым экономичность приводного двигателя и увеличивая ресурс его работы. Основные недостатки АГС: большая удельная масса, сложная силовая часть и система управления, последнее снижает их надежность.

Одно из направлений качественного улучшения характеристик АИЭ – разработка и внедрение бесконтактных электрических машин, обладающих высокой надежностью, работающих с повышенными электромагнитными и механическими нагрузками и имеющих улучшенные массогабаритные и энергические показатели.

Перспективными бесконтактными источниками энергии являются СГ с вращающимися выпрямителями (СГВВ), СГ с постоянными магнитами (СГПМ), асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением (АГ) и вентильные генераторы (ВГ) [4]. Значение к.п.д. современных СГВВ достигает 0,90-0,94. Наиболее компактные разработаны и внедрены за рубежом для авиационных систем энергопитания. При мощностях 30-120 кВт и частотах вращения 6000-9000 об/мин они имеют удельную массу 0,72-1,26 кг/(кВт А).

Недостатки СГВВ связаны с относительно сложной силовой электрической схемой, наличием на роторе обмоток и полупроводниковых вентилей, что снижает надежность работы, ограничивает предельно доступные частоты вращения ротора.

Синхронные генераторы с постоянными магнитами обычного исполнения при интенсивном воздушном охлаждении, частотах вращения 8000-12000 об/мин и мощностях 20-60 кВт имеют к.п.д. 0,89-0,91 и удельную массу 1,2-1,6 кг/(кВт А). У разработанных же США компактных бортовых СГПМ с использованием редкоземельных материалов мощностью 110 кВт удельная масса составляет 0,15 кг/кВт [10].

Вентильные генераторы, являющиеся источниками напряжения постоянного тока, конструктивно выполняются на базе бесконтактных электрических машин. Наилучшие показатели имеют ВГ, выполненные на основе СГВВ. Удельная масса ВГ при мощности 20-30 кВт и частотах вращения 4500-9000 об/мин составляет 1,3-1,4 кг/кВт, а к.п.д. находится в пределах 0,83-0,8 [10].

Применение АГ долгое время сдерживалось в основном по двум причинам [3]: из-за отсутствия малогабаритных конденсаторов, обеспечивающих возбуждение генераторов, а также вследствие сложности стабилизации напряжения. Современные достижения в области создания конденсаторов и силовой полупроводниковой техники создали предпосылки для разработки эффективных АГ с системами возбуждения на основе вентильных преобразователей: АГ с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением. Вентильные преобразователи систем возбуждения имеют свойства, которые принципиально отличают АГ с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением от таких генераторов с емкостным возбуждением. Кроме того, вентильные преобразователи постоянно совершенствуются, улучшается их элементная база. Разработка и исследования АГ с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением – это перспективное научное направление в области создания новых типов электрических машин и автономных систем электроснабжения, которое постоянно развивается.

Сложность технической реализации регулируемого в широком диапазоне источника реактивной мощности сдерживает широкое использование асинхронных генераторов в народном хозяйстве. Известно несколько вариантов решения этой задачи.

1. Устройства, содержащие параллельно включенные конденсаторы и управляемые индуктивные элементы (рис.11). В качестве управляемых индуктивностей используют дроссели или трансформаторы с подмагничиванием. В этих устройствах возбуждение АГ осуществляется суммарным реактивным током емкостей и регулируемым током индуктивностей.

Такие устройства характеризуются простотой управления величиной индуктивности. Однако их применение достаточно ограничено, так как такие регуляторы имеют плохие массогабаритные показатели: во-первых, емкость конденсаторов должна компенсировать индуктивность не только генератора и нагрузки, но и управляемых индуктивных элементов; во-вторых, номинальная мощность, габариты и масса индуктивностей соизмеримы с этими показателями генератора.

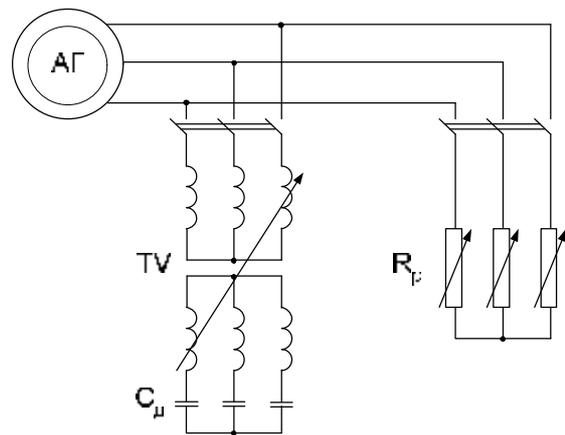


Рисунок 1 – АИЭ на базе АГ с автотрансформаторным устройством регулирования реактивной мощности

2. Схема с постоянными конденсаторами и подмагничиванием статора генератора [1]. В таких установках вместе с трехфазной обмоткой переменного тока в пазы статора генератора укладывается обмотка постоянного тока (рис. 2). При подмагничивании индуктивность генератора меняется, компенсируя изменение индуктивности нагрузки. К недостаткам такой системы регулирования можно отнести то, что, во-первых, для создания подобного устройства необходимо иметь специально сконструированную асинхронную машину; во-вторых, обмотка подмагничивания, как правило, заполняет 25...30 % площади сечения паза статора [1], что снижает номинальную мощность электрической машины.

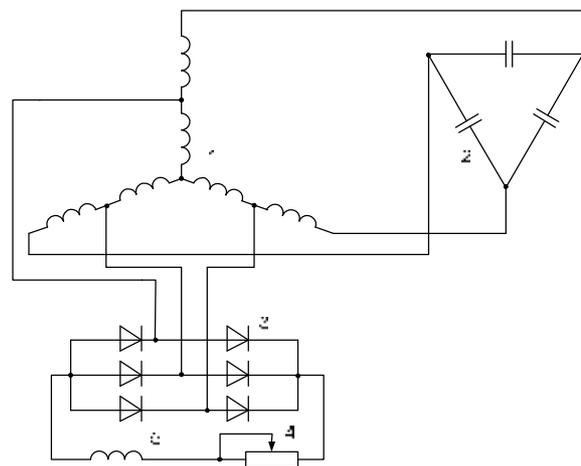


Рисунок 2 – АИЭ на базе АГ специального изготовления с обмоткой подмагничивания:
1 – обмотка статора, 2 – конденсаторы,
3 – выпрямитель, 4 – регулировочный реостат,
5 – обмотка подмагничивания

3. Система стабилизации напряжения с синхронным компенсатором [1, 2]. Как известно, при параллельной работе перевозбужденная синхронная машина является источником

емкостного тока, величина которого может регулироваться изменением тока возбуждения (УВ). Номинальная мощность синхронного компенсатора при активно-индуктивной нагрузке примерно равна мощности асинхронного генератора. Поэтому такой асинхронный генераторный комплекс уступает по массогабаритным показателям обычным синхронным генераторам. Целесообразно использовать возбуждение асинхронного генератора от синхронного при их параллельной работе в системах электроснабжения, содержащих несколько источников электроэнергии, например, в электростанциях морских и речных судов. Если автономная работа АГ в системе не предусматривается, то он может не иметь регулятора напряжения.

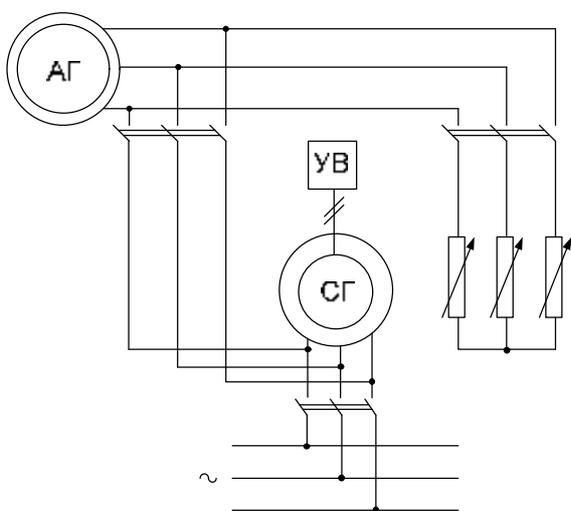


Рисунок 3 – АИЭ на базе АГ с синхронным компенсатором как источником реактивной энергии

4. Схемы с возбуждением АГ от тиристорного источника реактивной мощности (рис. 4). При работе генератора на трехфазный мостовой выпрямитель с управляемым углом включения тиристоров последний может быть источником реактивного тока возбуждения асинхронного генератора. Преимуществом тиристорного возбуждения АГ является широкий диапазон частоты вращения генератора, при котором возможно его возбуждение. Однако форма кривой генерируемого напряжения содержит большой процент высших гармоник, поэтому генераторный комплекс нуждается в фильтрах выходного напряжения.

Существует несколько технических вариантов исполнения тиристорного коммутатора емкостного тока. Однако наиболее рациональным является вариант, представленный на рис. 4. Такая схема характеризуется наиболее простыми процессами управления и коммутации, так как наличие нулевого провода обеспечивает независимость коммутации каждой из фаз АГ. Данный момент можно

использовать в автономных системах электроснабжения на базе асинхронного генератора при подключении резко-переменной нагрузки, в частности, асинхронных двигателей, для создания условий «благоприятной» коммутации.

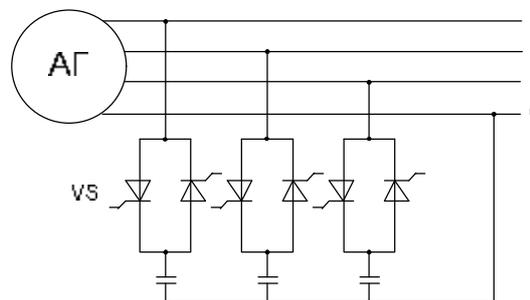


Рисунок 4 – АИЭ на базе АГ с тиристорным источником реактивной энергии

5. Устройства, изменяющие емкость конденсаторов возбуждения генератора. Устройства с управляемой емкостью можно разделить на два типа: с аналоговым и с дискретным изменением емкости конденсаторов возбуждения.

Для АГ наиболее подходящей является последняя группа регуляторов, поскольку они не требуют конструктивных изменений асинхронной машины, как способ с подмагничиванием статора генератора, и обладают значительно меньшими массогабаритными показателями по сравнению с дросельным способом регулирования, не требуют независимого источника энергии.

Благодаря развитию полупроводниковой техники, используемой в устройствах стабилизации напряжения АГ, и появлению высокоскоростных приводных двигателей ПСПД с увеличенными технико-экономическими показателями, в настоящее время создаются условия для применения АГ в качестве источника питания.

Согласно расчетно-конструктивным разработкам, при помощи 20-60 кВт и частотам вращения 18000-24000 об/мин асинхронные генераторы имеют к.п.д. 0,91-0,94 и удельную массу 0,5-1,0 кг/кВт. Кроме того, важное преимущество АГ в сравнении с СГ – относительно легкое включение на параллельную работу (не требует сложной аппаратуры), что является важным показателем в многоагрегатных системах при необходимости увеличения установленной мощности АИЭ.

Автономные электромеханические системы отличаются соизмеримостью мощности источников и потребителей электроэнергии, значительно более короткими кабельными линиями и, следовательно, значительно большей взаимосвязью всех элементов электрической системы. Например, при включении мощного потребителя, пуске асинхронного двигателя (АД) напряжение и частота в системе

электропитания заметно меняются, что в свою очередь отражается на характере работы всех остальных потребителей [5]. Поэтому при построении систем управления АСЭ основные требования выдвигаются со стороны потребителей [6].

По целому ряду указанных выше преимуществ асинхронный генератор является идеальным источником тока для устройств с активным характером нагрузки: электронагреватели, аппараты сваривания, лампы накаливания, электронные приборы, компьютерная техника и т.д.

Однако автономные энергетические системы должны быть универсальными как по исполнению и мощностному ряду, так и по характеру подключаемой нагрузки. В настоящее время наибольшего распространения в качестве приводов различных механизмов получили асинхронные электродвигатели. Поэтому к генераторному комплексу, обеспечивающему электропитание автономных систем, предъявляются требования по запуску асинхронных короткозамкнутых двигателей соизмеримой мощности.

В связи с этим одна из основных проблем при разработке автономных источников питания на базе АГ состоит в выборе рациональной системы возбуждения и стабилизации выходного напряжения.

К решениям поставленной задачи относятся регулирование емкости методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ), использование нелинейных конденсаторов, применение тиристорного регулятора индуктивного тока с фазовым управлением, стабилизация напряжения асинхронного генератора дискретным изменением емкости возбуждения.

1. Суть метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) емкости заключается в том, что часть конденсаторов периодически подключается и отключается от статорной обмотки генератора. Средняя (эффективная) емкость возбуждения определяется соотношением времени включенного состояния τ и периода коммутации T_k

$$C_n = C_n + n \cdot C_d,$$

где C_n, C_n, C_d – эффективная, постоянная и дополнительная емкости;

$n = \tau / T_k$ – скважность коммутации.

Известны две модификации схем с ШИМ емкости: 1) схемы с периодом коммутации, большим и кратным периоду генерируемого тока [9]; 2) схемы высокочастотной коммутации, то есть когда период включения меньше периода переменного напряжения [8].

Регуляторы напряжения АГ с низкочастотной коммутацией дополнительного блока конденсаторов наиболее просты по технической реализации, но не могут обеспечить высокого качества регулирования напряжения, так как переходные процессы в асинхронном генераторе, связанные с коммутацией дополнительного блока конденсаторов, заканчиваются в течение одного – двух периодов переменного тока. Это приводит к тому, что амплитуда напряжения генератора в течение периода коммутации будет значительно изменяться. Величина колебаний напряжения определяется жесткостью регулировочной характеристики и величиной коммутируемой емкости.

Коммутируемая емкость C_d во всех режимах (за исключением работы АГ на активную нагрузку при стабильной частоте вращения) больше емкости постоянно включенных конденсаторов. Подключение большей емкости на холостом ходу может привести к перенапряжению, а отклонение ее под нагрузкой — к потере возбуждения.

При проектировании регулятора напряжения АГ с высокочастотной коммутацией дополнительного блока конденсаторов основное внимание должно уделяться вопросам экономичности таких схем, так как токи перезаряда емкостей создают потери в коммутирующих элементах. Потери в более сложных схемах высокочастотной коммутации конденсаторов возбуждения составляют около 40 % от регулируемой реактивной мощности возбуждения.

Низкая экономичность устройств с ШИМ емкости возбуждения не позволяет использовать их в мощных генераторных комплексах. Такие схемы целесообразно применять для изменения емкости в небольшом диапазоне для точного аналогового регулирования напряжения асинхронного генератора.

2. Использование нелинейных конденсаторов — варикондов для стабилизации напряжения асинхронного генератора.

Применение варикондов для регулирования напряжения АГ основано на свойстве сегнетоэлектриков в изменении своей диэлектрической проницаемости в зависимости от напряженности электрического поля, поэтому емкость вариконда зависит от напряжения между обкладками. Управлять средним емкостным током вариконда, включенного в сеть переменного тока, можно, изменяя постоянную составляющую напряжения, приложенного к нему. Нелинейные конденсаторы подключаются на шины асинхронного генератора, а кроме этого — к источнику постоянного тока, обладающего большим сопротивлением R_p , развязывающим цепи постоянного и переменного тока.

Особенностью схем с варикондами является то, что емкость конденсатора изменяется в течение всего процесса перезаряда, в зависимости от мгновенного значения приложенного напряжения, которое является суммой переменного напряжения генератора и управляемого постоянного напряжения.

Существенным недостатком устройств стабилизации напряжения асинхронного генератора с варикондами, управляющее напряжение на которые подается от регулируемого источника постоянного тока, является их низкое быстродействие. Для развязки цепей переменного и постоянного тока вариконды подключены к источнику постоянного тока через большое сопротивление резистора, которое и определяет низкое быстродействие устройства.

Техническим препятствием на пути использования варикондов в регуляторе напряжения АГ является отсутствие варикондов с большими номиналами емкости. Для набора блока варикондов, суммарная емкость которых достаточна для возбуждения генератора средней мощности, необходимо соединить параллельно большое количество нелинейных конденсаторов (сотни и тысячи штук).

Другим недостатком устройства регулирования с варикондами является то, что при работе их на переменном токе возникают нелинейные искажения, вызванные несинусоидальным характером емкостного тока. Так, при регулировании напряжения АГ, имеющего чисто активную нагрузку, коэффициент нелинейных искажений фазного напряжения достигает 12 %. С этой точки зрения, в блоке конденсаторов возбуждения, содержащем линейные и нелинейные конденсаторы, количество варикондов должно быть сведено к минимуму.

Таким образом, вариконды целесообразно использовать для точного регулирования напряжения АГ, а грубое регулирование осуществлять коммутацией блоков линейных конденсаторов.

3. Тиристорный регулятор индуктивного тока с фазовым управлением.

Аналоговые регуляторы реактивного тока, состоящие из параллельно включенных конденсаторов и регулирующих устройств, плавно изменяющих индуктивный ток, являются более простыми.

Емкость конденсаторов выбирается так, чтобы обеспечить реактивным током генератор и полную нагрузку с максимальным индуктивным коэффициентом мощности. При изменении нагрузки регулятор вырабатывает индуктивный ток, компенсирующий часть емкостного тока конденсаторов.

Индуктивный характер тока можно обеспечить, шунтируя статорные обмотки генератора в конце каждого полупериода на резисторы. Возникающие импульсы тока размагничивают генератор, вызывая эффект подключения индуктивной нагрузки. Рабочий диапазон открытия тиристоров в такой схеме не должен превышать 60 градусов.

При выборе схемы регулирования индуктивного тока нужно учитывать сложность их реализации и содержание высших гармоник в кривой выходного тока, которые представляют значительную нагрузку для конденсаторов возбуждения. Искажение реактивного тока возбуждения приводит к искажениям синусоидальности формы кривой асинхронного генератора, что требует использования фильтров.

При стабилизации импульсным регулятором напряжения генератора в диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до номинальной неизбежны нелинейные искажения формы напряжения генератора. При этом на холостом ходу коэффициент искажений линейного напряжения равен приблизительно десяти процентам, при увеличении нагрузки он уменьшается и при номинальной нагрузке равен примерно одному проценту.

По сравнению с конденсаторным, тиристорное возбуждение асинхронного генератора обладает рядом преимуществ. Во-первых, массогабаритные показатели тиристорного возбудителя не зависят от частоты генерируемого напряжения; во-вторых, возбуждение возможно в широком диапазоне частот вращения генератора; в-третьих, возможна работа на линейном участке кривой намагничивания машины. Однако, техническое исполнение этой системы возбуждения сложнее, форма выходного напряжения содержит большой процент гармоник. Поэтому применение вентильных асинхронных генераторов целесообразно в системах с переменной частотой вращения их привода. В известных системах управления возбуждением вентильных генераторов регулирование напряжения осуществляется изменением частоты задающего генератора, управляющего коммутацией тиристоров. Такое техническое решение заимствовано из систем регулируемого тиристорного электропривода, что является естественным.

4. Стабилизация напряжения асинхронного генератора дискретным изменением емкости возбуждения.

С целью улучшения формы генерируемого напряжения и снижения потерь в регуляторе целесообразно использовать не один, а несколько блоков коммутируемых конденсаторов. Подключая к статорным обмоткам генератора эти блоки в различных сочетаниях, можно управлять реактивным током возбуждения. Коммутацию

блоков конденсаторов целесообразно осуществлять при помощи дискретного устройства, обеспечивающего необходимую емкость возбуждения.

Задача синтеза регуляторов для нелинейных систем, к которым относится АГ с учетом кривой намагничивания, значительно сложнее аналогичной задачи для линейных систем. Методологической основой решения этой задачи является описание систем функциональными рядами Вольтера. Их применение является обобщением интеграла свертки (интеграла Дюамеля), используемого для описания линейных систем.

Цифровая система стабилизации напряжения АГ существенно нелинейная. Кроме квантования во времени, свойственного импульсным системам, осуществляется также квантование по уровню управляющего воздействия. Шаг квантования по времени равен периоду тактовых импульсов T_0 , а шаг квантования по уровню — величине емкости, соответствующей младшему разряду регулятора.

Задача синтеза системы регулирования заключается в выборе алгоритма управления, а также следующих ее параметров: величины емкости, подключаемой младшим разрядом; числа разрядов счетчика N и ширины зоны нечувствительности дискретного устройства (регулятора емкостного тока). Требования к электрооборудованию в значительной степени зависят от условий его применения. Существенное значение имеют стоимость машин, устройств распределения электроэнергии, систем и устройств управления. Обычно требуются большой срок службы, ремонтпригодность, простота обслуживания.

Система защит АСЭ от аварийных режимов (коротких замыканий, перегрузки), недопустимых отклонений напряжения и частоты может органически сопрягаться с соответствующими датчиками, коммутационными бесконтактными устройствами, образуя единый компактный блок, выполняющий функции преобразования электроэнергии, защиты и коммутации силовых цепей.

В настоящее время системы управления источников и преобразователей электроэнергии способны не только обеспечивать простые функции управления, но и осуществлять оптимизацию режимов как нормальной, так и при аварийной работе, а также сохранять работоспособность АСЭ в ненормальных режимах путем адаптивного изменения структуры цепей и постепенного отключения групп потребителей согласно заданному приоритету нагрузок. Такое гибкое управление может реализоваться на основе цифровых систем и микропроцессоров. Кроме того,

цифровые системы могут обеспечить защиту АСЭ в аварийных режимах. Они также эффективны как системы контроля.

Выводы. Использование перспективных приводных двигателей, бесконтактных генераторов переменного тока, полупроводниковых преобразователей на базе силовых унифицированных интегральных схем, цифровых систем управления, контроля и защиты является основой реализации новых поколений автономных систем энергоснабжения.

Бесконтактное выполнение, простота включения на параллельную работу, высокое качество динамических процессов и безопасность короткого замыкания — все эти преимущества делают проблему разработки автономных систем электроснабжения на базе АГ перспективной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич Ю. Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков — М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005. — 408 с.: ил.
2. Атрощенко В. А., Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы. Промышленная энергетика. № 6. / В. А. Атрощенко., О. В. Григораш. — 1995. - С. 42-45.
3. Иванов А. А. Электростанции с асинхронным генератором / Иванов А. А., Пулатов В. Б., Тищенко А. А. — Киев; Техника, 1967. — 158 с.
4. Маркович И. И. Режимы энергетических систем / Маркович И. И. — М.: Энергия, 1969. - 350 с.
5. Тихомиров И. В. Повышение устойчивости работы передвижных электростанций при пуске электродвигателей соизмеримой мощности / Тихомиров И. В. Электричество, №7, 1952. - С. 26-30.
6. Каплун В. В. Перспективы применения и особенности эксплуатации автономных источников электропитания в сельском хозяйстве / В. В. Каплун., В. В. Козирский. — М.: Энергия, 1997. — 200 с. с ил.
7. Цыркин М. И. Дизельные агрегаты резервного питания / М. И. Цыркин., А. Я. Гольдингер. — С-Пб.: Чистое письмо, 2003. — 276 с.

8. Вишнеvский Л. В. Системы управления асинхронными генераторными комплексами / Л. В. Вишнеvский., А. Е. Пасс - К.: Лыбидь, 1990. – 168 с.

9. Бояр-Созонович С. П. Использование цифрового регулятора для стабилизации напряжения бесконтактного асинхронного генератора / Бояр-Созонович С. П., Кузнецов А. А.,

Гинтул Н. В. // Электромашиностроение и электрооборудование. – 1975. – Вып. 20. – С. 75-78.

10. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины / Бут Д. А. - М.: Высшая школа, изд. второе, доп. и перераб., 1990. – 414 с.

АВТОНОМНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ, ОСНОВНІ ВИМОГИ І СТРУКТУРА

Зачепа Ю. В., стари. викладач

Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна

E-mail: saue@kdu.edu.ua

У статті розглянуто принципи побудови автономних систем електропостачання та наведені основні вимоги, що пред'являються до таких систем. Проведено аналіз етапів проектування автономних систем та їх основних функціональних вузлів – джерел механічної та електричної енергії, а також пристроїв перетворення та узгодження.

Ключові слова: джерело електроенергії, асинхронний генератор, широтно-імпульсна модуляція.

AUTONOMOUS SYSTEMS OF THE ELEKTRICAL POWER SUPPLY ON THE BASIS OF ASYNCHRONOUS GENERATORS, THE BASIC DEMANDS AND STRUCTURE

Zachepa Y. V., Sen. Lect.

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi State University

Pershotravneva St., 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine

E-mail: saue@kdu.edu.ua

In papers principles of construction autonomous systems of an electrical power supply are observed and the basic demands which are shown to such systems are resulted. The analysis of design stages of off-line systems and their basic function boxes - sources mechanical and electric energy, and also transformation and coordination devices is carried out.

Key words: source of electrical power, asynchronous generator, pulse-duration modulation.

