

СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Шевченко Е.А.
Научный руководитель – Андрукевич А.П.

КОМПЛЕКСНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Фридрих В.В.
Научный руководитель – Артеменко К.И.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА

Лукашевич И.А.
Научный руководитель – Климентионок А.К.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС НА УСПЕШНОСТЬ САМОЗАПУСКА

Башаркевич Я.В., Баран А.Г.
Научный руководитель – Гавриелок Ю.В.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Атрашкевич С.Ю.
Научный руководитель – Климентионок А.К.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ИНФРАКРАСНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Бзей Аббас
Научный руководитель – Климович П.И.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Гончаров Ф.Н.
Научный руководитель – к.т.н., профессор Силюк С.М.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Тарнапович Д.С.
Научный руководитель – Бычков М.М.

УПРАВЛЯЕМЫЕ ШУНТИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ

Хоревко И.С.
Научный руководитель – Бычков М.М.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМОЙ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

Коршунова А.В.
Научный руководитель – к.т.н., доцент Мазуркевич В.Н.

НОВЫЕ МАГНИТОПРОВОДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Карницкий П.А.
Научный руководитель – Бычков М.М.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Ерёма В.В.
Научный руководитель – к.т.н., профессор Силюк С.М.

ВЛИЯНИЕ ДЕМПФЕРОВ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Матысюк В.А.
Научный руководитель – к.т.н., доцент ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

ВИДЫ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Куликова А.С.
Научный руководитель – ГАВРИЕЛОК Ю.В.

НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И АППАРАТАХ

Баран А.Г., Климкович И.П.
Научный руководитель – АНДРУКЕВИЧ А.П.

ЭЛЕГАЗОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Белько А.А.
Научный руководитель – ГАВРИЕЛОК Ю.В.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Буйко И.А.
Научный руководитель – к.т.н., доцент БУЛОЙЧИК Е.В.

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ЛИНИИ МЕГАПОЛИСОВ

Хасеневич А.Д.
Научный руководитель – к.т.н., профессор СИЛЮК С.М.

СПОСОБЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 КВ

Яновская Е.А.
Научный руководитель – к.т.н., доцент ГУБАНОВИЧ А.Г.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Витязев А.С.
Научный руководитель – доцент БОБКО Н.Н.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПУНКТЫ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–35 КВ

Михолап Е.Н.
Научный руководитель – КИСЛЯКОВ А.Ю.

БЕСЩЕТОЧНАЯ СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Курьян К.П.
Научный руководитель – к.т.н., доцент МАЗУРКЕВИЧ В.Н.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СТАТИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА

Счастливая П.С.
Научный руководитель – ПОТАЧИЦ Я.В.

АДАПТИВНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АРМАТУРА С ЭЛЕМЕНТАМИ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Целобанов В.А.
Научный руководитель – ПОТАЧИЦ Я.В.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Хлиманков А.В.
Научный руководитель – КИСЛЯКОВ А.Ю.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Баран А.Г.
Научный руководитель – д.т.н., профессор СЕРГЕЙ И.И.

ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОПРОВОДОВ С ЛИТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Лапко Д.А.
Научный руководитель – КЛИМКОВИЧ П.И.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Васильева А.А., Зарихта К.С., Кисляк В.В.
Научный руководитель – КЛИМКОВИЧ П.И.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП С РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗОЙ

Тукай П.А.
Научный руководитель – к.т.н., доцент ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

УДК 621.3

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Шевченко Е.А.

Научный руководитель – АНДРУКЕВИЧ А.П.

Жесткая ошиновка – ошиновка ОРУ и ЗРУ, выполненная жесткими шинами, как правило, из труб алюминиевых сплавов. ОРУ (ЗРУ) с жесткой ошиновкой – распределительное устройство (РУ), у которого сборные шины или шины внутриячейковых связей выполнены жесткими шинами.

В последние годы значительное количество ОРУ 110–500 кВ выполняется с жесткой ошиновкой, которая позволяет создать компактные и экономичные распределительные устройства, занимающие меньшую площадь, имеющие более низкое расположение шин, высоту порталов, чем в ОРУ с гибкой ошиновкой. Благодаря этому сокращается длина контрольных и силовых кабелей, дорог, облегчается очистка изоляторов, ремонт шинных конструкций, улучшается обзор шин и аппаратов. При использовании жесткой ошиновки снижается трудоемкость монтажных работ. На основе конструкций с жесткими шинами созданы конструкции высокой заводской готовности, в том числе, компактные модули и комплектные ПС. Все это позволяет сократить сроки сооружения РУ.

Жесткая ошиновка в нашей стране успешно применялась еще в 30-е годы прошлого века. Сборные шины изготавливались из медных труб, внутриячейковые связи из стальных (водопроводных) труб. В середине пятидесятых годов институт «Теплоэлектропроект» разработал проекты ОРУ 110 и 220 кВ с жесткими сборными шинами из алюминиевых сплавов и однорядной установкой выключателей. В 1957 году введено в эксплуатацию ЗРУ 150 кВ Каховской ГЭС, выполненное по схеме: одна рабочая секционированная и обходная системы шин, сборные шины которого изготовлены из медных труб.

Область применения жесткой ошиновки различная. Жесткая ошиновка может использоваться в ОРУ всех напряжений. Выбор вида ошиновки ОРУ и ЗРУ (жесткой или гибкой) определяется технико-экономическими требованиями и зависит от параметров электроустановки: напряжения, рабочего тока, тока короткого замыкания (КЗ), схемы электрических соединений, требований, предъявляемых к конструкциям ОРУ, а также ожидаемых климатических воздействий. В ОРУ и ЗРУ напряжением 110 кВ рекомендуется использовать экономичные конструктивные решения с жесткой трубчатой ошиновкой, прежде всего комплектных, блочных и других решений высокой заводской готовности. Конструктивно может быть оправдано сочетание гибких и жестких проводников, например, жестких сборных шин и гибких внутриячейковых связей.

Все элементы жесткой ошиновки должны отвечать:

- уровню номинального напряжения электроустановки;
- установленному уровню перенапряжений;
- наибольшему рабочему току;
- максимальным токам одно, двух и трехфазных коротких замыканий (КЗ);
- условиям окружающей среды;
- ожидаемому максимальному ветровому напору;
- ожидаемым наибольшим гололедным отложениям;
- максимальным и минимальным температурам воздуха;
- наибольшему (летнему) уровню солнечной радиации;
- степени загрязнения атмосферы.

В ОРУ или ЗРУ (далее РУ) напряжением 110–500 кВ рекомендуется использовать жесткие трубчатые шины (шины кольцевого сечения) наиболее оптимальные по условиям короны, радиопомех, материалоемкости, охлаждения, ветровой и электродинамической стойкости. Возможно применение плоских и пространственных шин-ферм (изготовленных

из труб относительно небольшого диаметра), прежде всего при создании длинно-пролетных конструкций. Применение таких конструкций требует отдельного технико-экономического обоснования.

В качестве материала жестких шин РУ 110 кВ и выше следует использовать алюминиевые сплавы, обладающие высокой прочностью при хорошей электрической проводимости. Этим требованиям отвечает прежде всего сплав 1915Т, а также АВТ1 (и их зарубежные аналоги).

Жесткими могут выполняться сборные шины, а также внутриячейковые связи нижнего яруса. Внутриячейковые связи верхнего яруса, как правило, выполняются гибкими (сталеалюминевыми) проводами. Отдельные участки сборных шин и внутриячейковых связей нижнего яруса также могут быть гибкими.

Для крепления жесткой ошиновки используются фарфоровые и полимерные опорные изоляторы, и изоляционные опоры. В качестве исключения допускается использовать крепления шин на подвесных гирляндах изоляторов к порталам. Такое решение позволяет сократить расстояния между фазами по сравнению с гибкими шинами (проводами). Однако, как правило, решение с жесткими шинами на 10 подвесных гирляндах изоляторов по технико-экономическим показателям уступает традиционным решениям с гибкими проводниками.

Шины должны отвечать условиям нагрева в рабочих режимах (нагрузочной способности), термической, электродинамической и ветровой стойкости, а также отвечать условиям проверки на корону, отстройки от устойчивых резонансных колебаний.

Плюсы жесткой ошиновки: компактность, высокая заводская готовность и минимальные затраты при эксплуатации. Применение жесткой ошиновки в открытых распределительных устройствах (ОРУ) – современное решение поставленных задач. ОРУ с жесткой ошиновкой занимает меньшую площадь по сравнению с решением на базе гибкой ошиновки. Кроме того, на ОРУ с жесткой ошиновкой отсутствуют шинные порталы, которые требуют дополнительных площадей под опоры и удорожают строительство объекта.

Литература

1 Денисенко, В. Г. Проектирование распределительных устройств 110 кВ / В. Г. Денисенко. – СПб.: Наука, 2001. – 132 с.

2 Марков, Е. Г. Установка жесткой ошиновки / Е. Г. Марков. – М. : Энергоатомиздат, 1999. – 174 с.

УДК 621.31

КОМПЛЕКСНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Фридрих В.В.

Научный руководитель – АРТЕМЕНКО К.И.

Современные быстродействующие устройства релейной защиты имеют время срабатывания 0,02–0,1 с. В течение такого короткого промежутка после возникновения возмущающего воздействия, находясь под влиянием интенсивных переходных процессов в цепи защищаемого объекта и целого ряда других факторов, устройство РЗ должно сработать, если КЗ находится в зоне его действия, и не должно, если КЗ – вне защищаемой зоны или возмущающим воздействием является не КЗ, а какое-либо другое явление.

При любых внезапных изменениях режима электрической системы в реальных условиях возникают переходные процессы как в ее элементах, измерительных трансформаторах тока и напряжения, так и в цепях РЗ. Это сопровождается переходом токов и напряжений в данных элементах, имеющих до возмущения, к их новым значениям. Указанное приводит к тому, что в переходном режиме контролируемая величина из-за наличия свободных составляющих переходных процессов в электрической системе и измерительных трансформаторах отличается от установившегося значения. При этом возможны замедления в срабатывании РЗ при внутренних КЗ и излишние действия, если КЗ внешние. К аналогичному эффекту могут привести и переходные процессы в цепях самого устройства РЗ при скачкообразных изменениях входных величин.

Одним из основных методов исследования поведения РЗ при возмущениях в электрической системе является математическое моделирование.

Исследования на физических моделях также носят экспериментальный характер и выполняются аналогично натуральному эксперименту на реальном объекте. Так, исследования режимов КЗ, устойчивости на электродинамической модели дают наглядные результаты, регистрируемые с помощью тех же приборов, что используются в натурном эксперименте, и представляемые в виде осциллограмм.

В связи с возрастающей оснащённостью проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных организаций ПЭВМ, повышением их быстродействия, объемов памяти, совершенствованием средств отображения результатов расчета все более широкое признание получают методы математического моделирования. Математические модели используются для решения всех видов перечисленных выше классов математических задач. Модели для воспроизведения алгебраических и дифференциальных уравнений, составляемых на основе физических законов, называют аналитическими. Для сложных объектов, аналитические модели которых получаются очень громоздкими или вообще не могут быть созданы из-за отсутствия строгого математического описания, используются имитационные математические модели. Они представляют собой описания результатов выполняемых функций элементами моделируемого объекта в виде математических и логических зависимостей при заданных вероятностно или детерминировано внешних воздействиях.

Современные ПЭВМ, оснащенные программными и техническими средствами вывода информации, дают результаты решения дифференциальных уравнений, представляемые в таком же виде, как и в натурном эксперименте, т. е. в виде осциллограмм. Благодаря высокому быстродействию и большому объему памяти ПЭВМ могут воспроизводить математические модели отдельных объектов.

Методы математического моделирования и вычислительного эксперимента предназначены для оценки качества выполняемых функций, т. е. селективности, быстродействия, чувствительности сложных, устройств РЗ при различного рода заданных возмущающих воздействиях. Структура математических моделей, предназначенных для

указанной цели, должна составляться с учетом всех факторов, влияющих на поведение исследуемого устройства РЗ и критериев оценки его поведения.

Комплексная математическая модель устройства РЗ, предназначенная для оценки его быстродействия, селективности, чувствительности, представляет собой совокупность математических и логических зависимостей, описывающих устройства защиты, измерительные трансформаторы тока и напряжения, защищаемый объект с достаточной полнотой, обеспечивающей необходимые достоверность и точность результатов.

В связи с существенным влиянием на поведение защиты переходных процессов математическое описание защищаемого объекта, измерительных трансформаторов, измерительных органов устройств защиты выполняется на основе физических законов, связывающих мгновенные значения электрических и магнитных величин, характеризующих режим объекта, с его конструктивными параметрами. Наличие нелинейных элементов в моделируемых объектах, исключающее возможность использования принципа наложения, делает нецелесообразным раздельный анализ и оценку свободных и вынужденных составляющих переходного процесса. Поэтому в рассматриваемых моделях используются физические законы, отражающие связь между мгновенными значениями полных токов, напряжений, магнитных величин и конструктивными параметрами моделируемого объекта. Математическим аппаратом таких моделей являются обыкновенные дифференциальные и алгебраические уравнения.

Вследствие несимметрии процессов математические модели даже симметричных объектов должны отражать их реальное трехфазное исполнение. В описании электрических цепей обязателен учет активных сопротивлений, поскольку именно они определяют длительность существования переходного режима. При моделировании необходимо учитывать такие факторы, степень влияния которых заранее оценить не представляется возможным. Это, например, несимметрия силовых трансформаторов, насыщение магнитных систем, проводимости для потоков нулевой последовательности в силовых трансформаторах, относительное движение роторов синхронных машин и др. Учет таких факторов при высокой точности воспроизведения результатов моделирования позволяет количественно оценить степень их влияния и повышает достоверность результатов.

Поскольку модели предназначены для решения конкретных задач с использованием полученных количественных результатов для оценки поведения реальных устройств РЗ, все математические зависимости составляются в именованных единицах международной системы единиц.

Вычислительный эксперимент на основе комплексных математических моделей РЗ может быть использован при разработке новых устройств защиты для их предварительной проверки вместо испытаний на электродинамических моделях и реальных объектах. При проектировании РЗ энергообъектов вычислительный эксперимент необходим для уточненной проверки их селективности, чувствительности, быстродействия, в эксплуатации – для оценки поведения РЗ в сложных условиях, например, при расследовании аварий.

Литература

1 Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 257 с.

2 Ефанов, В. И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем и релейной защите / В. И. Ефанов. – Томск : ДМК Пресс, 2012. – 224 с.

УДК 621.3.15

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА

Лукашевич И.А.

Научный руководитель – КЛИМЕНТИОНОК А.К.

Сверхпроводимость – свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура). Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние.

Сверхпроводимость – квантовое явление, оно характеризуется также эффектом Мейнсера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объёма сверхпроводника. Существование этого эффекта показывает, что сверхпроводимость не может быть описана просто как идеальная проводимость в классическом понимании.

Открытие в 1986–1993 годах, ряда высокотемпературных сверхпроводников далеко отодвинуло температурную границу сверхпроводимости и позволило практически использовать сверхпроводящие материалы не только при температуре жидкого гелия (4,2 К), но и при температуре кипения жидкого азота (77 К), гораздо более дешевой криогенной жидкости.

В настоящее время известны различные конструкции сверхпроводящих проводов. Низкотемпературные сверхпроводники выпускаются с очень большим разнообразием конфигураций, основой которых является единичный провод. Это, как правило, круглая проволока диаметром около 1 мм. Из нее делается, в основном, путем скрутки между собой этих единичных проволок большое многообразие конфигураций, которое называют сверхпроводящий провод или кабель. Известны сверхпроводящие провода с каналами для прокачки хладагента. Такие конструкции обеспечивают увеличение эффективного периметра теплопередачи провода к хладагенту, улучшение условий теплообмена, а также уменьшение заливного объема хладагента. Токопроводящие провода с каналами для прокачки хладагента могут работать в рефрижераторном режиме и замкнутом цикле.

Известна конструкция с несколькими каналами для циркуляции хладагента. Проводники выполнены в виде коаксиальных медных трубок, пространство между которыми заполнено стабилизированными медью сверхпроводящими поволоками из сплавов ниобия и титана, или ниобия, титана и тантала. Недостатком этих конструкций является большой расход хладагента на единицу плотности транспортируемого тока.

Указанный недостаток устранен в известном проводе типа «кабель-в-оболочке». Из него изготавливают магниты для токамаков (Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) – тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза):

- китайского (EAST);
- корейского (KSTAR);
- индийского (SST-1);
- международного термоядерного реактора по проекту ITER.

Этот провод содержит сверхпроводящий сердечник в виде нескольких (обычно шести) стренг. Каждая из стренг представляет собой скрутку из элементарных, стабилизированных медью сверхпроводящих проволок. Стренга может быть уплотнена, а также обвита тонкой узкой лентой предпочтительно с шагом не меньше ширины ленты, предохраняющей стренгу от разрыхления. Стренги скручены вокруг трубы или полого гибкого элемента, представляющего собой спираль, свитую из металлической ленты (нержавеющей стали). Сердечник может быть уплотнен и обмотан тонкой лентой. Во всех сверхпроводящих сердечниках соблюден принцип полной транспозиции, повторяемости рисунка скрутки с определенным периодом, что необходимо для снижения потерь и повышения стабильности магнитов. Этот сверхпроводящий сердечник размещен в несверхпроводящей трубе из нержавеющей стали или титана, являющейся оболочкой провода. Хотя эта конструкция

провода является работоспособной и обеспечивает требуемые электрофизические характеристики, сверхпроводящие свойства и параметры транспортировки тока для создания магнитного поля требуемой конфигурации и напряженности, однако у нее имеется существенный недостаток. Этот недостаток заключается в том, что при изготовлении длинномерного провода этой конструкции требуются специально разработанные режимы поперечной сварки оболочки для соединения между собой труб, каждая из которых длиной шесть метров. Кроме того, требуются специальные трудоемкие, ответственные и дорогие методы контроля каждого сварочного шва в отдельности и всей сваренной оболочки в целом, определяющие возможные места утечки гелия. Существенным недостатком этой конструкции является также то, что при ее изготовлении операция установки сверхпроводящего сердечника в оболочке вызывает необходимость использования производственного участка большой протяженности, необходимой для размещения на нем всей длиной исходной трубы.

Эффект сверхпроводимости известен уже почти 100 лет. Однако удивительная способность сверхпроводников проводить ток без сопротивления встречается с одним серьезным ограничением – она проявляется только при экстремально низких температурах, близких к абсолютному нулю. Если использование подобных силовых кабелей станет массовым, города смогут сэкономить на высоковольтных линиях – освободится занимаемое ими место, упростится силовая сеть, станут ненужными гигантские трансформаторные станции.

Литература

1 Калимов, А. Г. Физические основы сверхпроводимости / А. Г. Калимов. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 259 с.

2 Нейман, А. А. Оценка эффективности применения устройства сверхпроводимости в энергосистемах / А. А. Нейман. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 498 с.

УДК 621.316.925

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС НА УСПЕШНОСТЬ САМОЗАПУСКА

Башаркевич Я.В., Баран А.Г.

Научный руководитель – ГАВРИЕЛОК Ю.В.

Кратковременное снижение или полное исчезновение напряжения на шинах собственных нужд (СН), вызванное коротким замыканием или переключением на резервное питание из-за автоматического или ошибочного ручного отключения рабочего питания, ведет к снижению частоты вращения двигателей вплоть до полной остановки части из них. Для сохранения в работе основных агрегатов электростанции двигатели ответственных механизмов при этом не отключаются от шин. После устранения причины кратковременного нарушения электроснабжения они восстанавливают нормальную частоту вращения без вмешательства персонала. Такой процесс называется самозапуском.

При отключении питания напряжение на секции с неотключенными двигателями исчезает не сразу, а за счет электромагнитной и кинетической энергии, запасенной двигателями, затухает за время 1–1,5 с. Участвующие в групповом выбеге двигатели механизмов с большим моментом инерции (вентиляторы, дымососы) работают в этом случае в режиме генераторов, отдавая часть энергии двигателям механизмов с меньшим моментом инерции, работающим в двигательном режиме.

Частота затухающего напряжения при групповом выбеге по мере торможения двигателей уменьшается со скоростью примерно 4–7 Гц/с. Групповой выбег продолжается до снижения напряжения на секции до $(0,25–0,2)U_{ном}$, после чего все двигатели останавливаются. Из-за снижения частоты затухающего напряжения оно быстро отстает по фазе от напряжения сети. Уже через 0,3–0,4 с с момента отключения питания секции угол расхождения напряжения достигает 180° . При этом разность напряжений на секции и в сети может достигнуть $(1,6–1,8)U_{ном}$. При самопроизвольном или ошибочном отключении рабочего питания, а в некоторых случаях и при действии защит с малой выдержкой времени напряжение на секцию от АВР подается через 0,4–0,5 с, т. е. в момент противофазы. Несмотря на это, переходные токи в двигателях близки к нормальным пусковым токам. Это является следствием значительного падения напряжения в источнике резервного питания от одновременного самозапуска мощной группы двигателей. Поэтому повреждений двигателей при самозапуске от динамических усилий в обмотках не наблюдается.

Самозапуск двигателей до нормальной частоты вращения происходит каскадно. Первыми заканчивают разбег двигатели механизмов с легкими условиями пуска, например, циркуляционных (ЦЭН), конденсатных насосов. Благодаря снижению пусковых токов этих двигателей до номинальных напряжение на секции повышается, что облегчает разбег других двигателей: питательных насосов (ПЭН), дымососов (Д), дутьевых вентиляторов (ДВ) и т. д. Для облегчения самозапуска все неотчетственные двигатели при снижении напряжения на шинах СН до $(0,6–0,7)U_{ном}$ отключаются защитой минимального напряжения с выдержкой 0,5 с. Каскадный разбег двигателей позволяет обеспечить их самозапуск при начальном напряжении несколько ниже того, которое требуется для двигателей механизмов с тяжелыми условиями пуска.

Продолжительность самозапуска двигателей не должна превышать 9–10 с. Для некоторых механизмов время самозапуска электродвигателей ограничивается в еще большей степени по технологическим причинам. Чем более кратковременный перерыв питания, тем меньше двигатели успевают затормозиться, тем меньше их пусковые токи и больше начальное напряжение на шинах после включения резервного питания и, следовательно, тем быстрее самозапуск двигателей. Поэтому следует по возможности сокращать время действия

защит и АВР на собственных нуждах. Предельно допустимая продолжительность перерыва ограничивается также режимом работы котлоагрегата. Перерыв более 3 с вызывает такое снижение частоты вращения тягодутьевых механизмов, при котором факел в топке может погаснуть. Одновременное последующее восстановление работы тягодутьевых механизмов и питателей топлива может привести к взрыву в топке котла. При перерывах питания СН на 4 с и более работа котлоагрегата нарушается, и самозапуск двигателей не только не имеет смысла, но даже и недопустим.

Для успешности самозапуска начальное напряжение на шинах СН должно быть достаточным, чтобы создать избыточный момент для разбега всех основных двигателей, а продолжительность разбега двигателей, зависящая как от начального напряжения, так и скорости его восстановления, не должна превышать предельно допустимую.

Некоторые особенности имеет самозапуск ответственных механизмов (питательных или циркуляционных насосов) с синхронными двигателями. При перерыве питания менее 0,5 с вхождение двигателя в синхронизм происходит достаточно быстро, если вращающий асинхронный момент двигателя обеспечивает увеличение частоты вращения, необходимое для втягивания в синхронизм. Большую помощь в этом обеспечивает форсировка возбуждения. При недостаточном асинхронном моменте (слишком низкое восстанавливаемое напряжение, работа с обмоткой ротора, замкнутой на якорь возбуждателя), а также при перерывах в питании более 0,5 с втягивания в синхронизм может не произойти, и тогда потребуются ресинхронизация под нагрузкой или повторный пуск, если возможна кратковременная остановка механизма. Это осуществляется специальными схемами автоматики, которые воздействуют на отключение АГП и замыкание обмотки ротора на сопротивление, в 7–10 раз превышающее сопротивление этой обмотки, с одновременной форсировкой возбуждения (производится ресинхронизация). Или приводят в действие нормальную схему пуска после восстановления напряжения на СН. В случае необходимости схема ресинхронизации дополняется автоматикой разгрузки механизма.

Для успешности самозапуска начальное напряжение на шинах СН должно быть достаточным, чтобы создать избыточный момент для разбега всех основных двигателей, а продолжительность разбега двигателей, зависящая как от начального напряжения, так и скорости его восстановления, не должна превышать предельно допустимую.

С помощью программы SAMOSAPU, разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ, выполнено исследование влияния времени перерыва питания и влияния величины напряжения резервного источника питания на успешность самозапуска электродвигателей 6 кВ собственных нужд Светлогорской ТЭЦ.

В результате вычислительного эксперимента установлено, что наибольший скачок тока на секции наблюдается уже при перерыве питания на 0,11 с, что является следствием снижения частоты затухающего напряжения, которое быстро отстает по фазе от напряжения сети. За это время угол расхождения напряжения достигает 180° .

Предельное время отключения для исследуемых электродвигателей составило 1,21 с. При таком перерыве питания при КЗ на секции А самозапуск электродвигателей циркуляционных насосов ЦН-2 оказывается неуспешным.

Так же установлено, что при перерыве питания длительностью 1 с обеспечивается успешный самозапуск электродвигателей, подключенных к исследуемым секциям, при снижении напряжения резервного источника до величины 5,5 кВ.

УДК 621.3

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аtrashевич С.Ю.

Научный руководитель – КЛИМЕНТИОНОК А.К.

Высоковольтная линия электропередачи постоянного тока использует для передачи электроэнергии постоянный ток, в отличие от более распространенных линий электропередач (ЛЭП) переменного тока. Высоковольтные ЛЭП постоянного тока могут оказаться более экономичными при передаче больших объемов электроэнергии на большие расстояния. Использование постоянного тока для подводных ЛЭП позволяет избежать потерь реактивной мощности.

ЛЭП постоянного тока позволяет транспортировать электроэнергию между несинхронизированными энергосистемами переменного тока, а также помогает увеличить надёжность работы, предотвращая каскадные сбои из-за рассинхронизации фазы между отдельными частями крупной энергосистемы. ЛЭП постоянного тока также позволяет передавать электроэнергию между энергосистемами переменного тока, работающими на разной частоте.

В ряде случаев высоковольтная ЛЭП постоянного тока более эффективна, чем ЛЭП переменного тока:

- при передаче энергии по подводному кабелю, который имеет довольно высокую ёмкость, приводящую при использовании переменного тока к потерям на реактивную мощность;

- передача энергии в энергосистеме напрямую от электростанции к потребителю, без дополнительных отводов, например, в удаленные районы;

- увеличение пропускной способности существующей энергосистемы в случаях, когда установить дополнительные ЛЭП переменного тока сложно или слишком дорого;

- передача энергии и стабилизация между несинхронизированными энергосистемами переменного тока;

- присоединение удаленной электрической станции к энергосистеме;

- уменьшение стоимости линии за счет уменьшения количества проводников. Кроме того, могут использоваться более тонкие проводники, так как ЛЭП постоянного тока не подвержен поверхностному эффекту;

- упрощается передача энергии между энергосистемами, использующими разные стандарты напряжения и частоты переменного тока;

- синхронизация с сетью переменного тока энергии, производимой возобновляемыми источниками энергии.

Основным недостатком высоковольтной ЛЭП постоянного тока является необходимость преобразования типа тока из переменного в постоянный и обратно. Используемые для этого устройства требуют дорогостоящих запасных частей, так как, фактически, являются уникальными для каждой линии.

Преобразователи тока дороги и имеют ограниченную перегрузочную способность. На малых расстояниях потери в преобразователях могут быть больше чем в аналогичной по мощности ЛЭП переменного тока.

Ранее в линии постоянного тока использовали ртутные выпрямители, которые были ненадёжны. Тиристоры были впервые использованы в 1960-х. Также применяется биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT), который имеет лучшую управляемость и меньшую стоимость.

Поскольку напряжение ЛЭП постоянного тока в некоторых случаях достигает до 800 кВ, превышая напряжение пробоя полупроводникового прибора, преобразователи построены с

использованием большого количества последовательно соединённых полупроводниковых приборов.

Низковольтные управляющие цепи, используемые для включения и выключения тиристоров, должны быть гальванически развязаны от высоких напряжений линии электропередачи. Обычно такая развязка оптическая. Полный переключающий элемент обычно называется вентилем, независимо от его конструкции.

В выпрямлении и инверсии используются по существу одни и те же агрегаты. Многие подстанции настроены таким образом, чтобы они могли работать и как выпрямители, и как инверторы. В конце линии переменного тока ряд трансформаторов, часто трех однофазных трансформаторов, развязывают преобразовательную станцию от сети переменного тока, обеспечивая заземление и гарантируя корректное постоянное напряжение. Выходы этих трансформаторов подключены к выпрямителям по мостовой схеме, сформированной большим числом вентиляей.

В монополярной схеме, один из выводов выпрямителя заземляют. Другой вывод, с электрическим потенциалом выше или ниже заземленного, связан с линией электропередачи. Заземленный вывод может или не может быть связан с соответствующим выводом преобразовательной станции посредством второго проводника.

При отсутствии второго металлического проводника, токи протекают в земле между заземленными электродами двух электростанций. Поэтому это однопроводная схема с земным возвратом. Проблемы, которые создает ток, протекающий в земле, включают:

- электрохимическая коррозия длинных проложенных в грунте металлических объектов, таких как трубопроводы;

- при использовании воды в качестве второго проводника, ток, протекающий в морской воде может произвести хлор или как-либо иначе затронуть водный состав;

- несбалансированный ток может привести к возникновению магнитного поля, которое может повлиять на магнитные навигационные компасы судов, проходящих над подводным кабелем.

Эти воздействия могут быть устранены установкой металлического обратного проводника между двумя концами монополярной линии электропередачи. Так как один из выводов преобразователей заземлен, нет необходимости в установке изоляции обратного провода на полное напряжение передачи, что делает обратный провод менее дорогостоящим, чем проводник высокого напряжения. Решение об использовании металлического обратного провода основывается на экономических, технических и экологических факторах.

В биполярной передаче используется пара проводников, каждый под высоким напряжением относительно земли, противоположной полярности. Так как изоляция этих проводников должна выбираться по полному напряжению, стоимость линии электропередачи выше монополярной схемы с обратным проводом. Однако, преимущества биполярной передачи делают её более привлекательной по сравнению с монополярной. При нормальной нагрузке в земле протекают незначительные токи, как и в случае монополярной передачи с металлическим обратным проводом. Это уменьшает потери в земле и снижает экологическое воздействие. Когда короткое замыкание происходит на одной из линий биполярной системы, схема может продолжать работать на неповрежденной линии в монополярном режиме, передавая приблизительно половину номинальной мощности с использованием земли в роли обратного проводника.

Литература

1 Александров, А. Н. Электрические аппараты высокого напряжения / А. Н. Александров, А. И. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 503 с.

2 Жаворонков, М. А. Аппараты высокого напряжения: учебное пособие для вузов / М. А. Жаворонков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с

УДК 621.3

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ИНФРАКРАСНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Бзей Аббас

Научный руководитель – КЛИМКОВИЧ П.И.

За последнее десятилетие существенно изменился подход к методам диагностики электрооборудования и оценке его состояния. Наряду с традиционными методами диагностики, нашли применение современные высокоэффективные способы контроля, обеспечивающие выявление дефектов электрооборудования на ранней стадии их развития. Существенно расширилась область контроля маслонеполненного оборудования под рабочим напряжением, разработаны методы и браковочные нормативы при оценке состояния оборудования по составу газов, растворенных в масле, осуществляется углубленный анализ трансформаторного масла, что позволяет судить о состоянии бумажной изоляции обмоток силовых трансформаторов, получило широкое распространение термографическое обследование электроустановок.

К сожалению, до настоящего времени методологическая база тепловизионных измерений в электроэнергетике проработана очень слабо, обмен технической информацией в масштабах отрасли существенно ограничен, при выработке единых технических требований по проведению инфракрасной диагностики существенные трудности накладывает приборное обеспечение, наличие в энергетике большого количества приборов инфракрасной техники (ИКТ) разных модификаций.

При проведении инфракрасного обследования электрооборудования существенное значение имеет выявление и устранение систематических и случайных погрешностей, оказывающих влияние на результаты измерения.

Систематические погрешности заключены в конструкции измерительного прибора и зависят от его выбора в соответствии с требованиями к совершенству измерения (разрешающей способности, поля наблюдения).

Случайными погрешностями, возникающими при проведении ИК-контроля, могут являться: воздействие солнечной радиации, излучательная способность.

Инфракрасный контроль желательно проводить при отсутствии солнца (в облачную погоду или ночью), предпочтительно перед восходом солнца, при минимальном воздействии ветра в период максимальных токовых нагрузок, лучше весной, для уточнения объема ремонтных работ или осенью, в целях оценки состояния электрооборудования перед зимним максимумом нагрузки.

При проведении ИК-контроля должны учитываться следующие факторы:

- коэффициент излучения материала;
- солнечная радиация;
- скорость ветра;
- расстояние до объекта и угол наблюдения;
- значение токовой нагрузки;
- тепловое отражение.

При ИК-диагностике на открытом воздухе основным источником погрешности могут являться прямая и отраженная солнечная радиация, а также рассеянное излучение и излучение источников искусственного освещения.

В помещении такими источниками являются рассеянный и отраженный свет от окружающих объектов и светильников. Влияние отраженного света тем больше, чем меньше излучательная способность объекта.

Дождь, туман, мокрый снег в значительной степени охлаждают поверхность объекта, измеряемого с помощью ИК-прибора и в определенной мере рассеивают инфракрасное излучение каплями воды. Инфракрасный контроль допускается проводить при небольшом снегопаде с сухим снегом или легком морозящем дожде.

Магнитные поля. При работе с ИК-приборами вблизи шин генераторного напряжения, реакторов и вообще в электроустановках с большими рабочими токами приходится сталкиваться с проблемой защиты ИК-прибора от влияния магнитного поля. Последнее вызывает искажение картины теплового поля объекта на кинескопе тепловизора или нарушает работу радиационного пирометра.

При проведении ИК-диагностики в электроустановках приходится считаться с возможностью ложного восприятия нагрева в результате коронирования объекта. Особенно сильно это влияние сказывается при применении тепловизоров с нижним спектральным диапазоном 2 мкм, что обусловлено близостью нижнего уровня спектра волны тепловизора к спектру возникновения короны (около 1 мкм).

Возможности ИК-диагностики применительно к трансформаторам недостаточно изучены. Сложности заключаются в том, что, во-первых, тепловыделения при возникновении локальных дефектов в трансформаторе заглушаются естественными тепловыми потоками от обмоток и магнитопровода, а, во-вторых, работа охлаждающих устройств, способствующая ускоренной циркуляции масла как бы сглаживает температуры, возникающие в месте дефекта.

При анализе результатов ИК-диагностики необходимо учитывать конструкцию трансформаторов, способ охлаждения обмоток и магнитопровода, условия и продолжительность эксплуатации, технологию изготовления и ряд других факторов. Поскольку оценка внутреннего состояния трансформатора тепловизором осуществляется измерением значений температур на поверхности его бака, необходимо считаться с характером теплопередачи магнитопровода и обмоток.

Инфракрасная диагностика позволяет выявить дефекты в электрооборудовании на ранних стадиях, а также проводить диагностику оборудования, находящегося под напряжением. Данный вид диагностики в энергетике на данный момент используется мало. Это связано с дороговизной приборов инфракрасной техники (ИКТ) разных модификаций.

Литература

- 1 Миляев, А. В. Инфракрасная и традиционная диагностика и осмотр электрооборудования / А. В. Миляев. – СПб. : Наука, 1994. – 121 с.
- 2 Кравченко, В. Ю. Релейная защита и автоматика трансформаторов тока и напряжения / В. Ю. Кравченко. – М. : Энергоиздат, 1971. – 258 с.

УДК 621.316.7

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Гончаров Ф.Н.

Научный руководитель – к.т.н., профессор СИЛЮК С.М.

Впервые требования к обеспечению ЭМС при проектировании были сформулированы в действующем и в методическом указании по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех. Этот документ по ЭМС относится ко всем объектам электроэнергетики: электростанциям, подстанциям, переключательным пунктам всех собственников не только электростанций и предприятий электрических сетей, но и заводских, и тяговых подстанций напряжением 110 кВ и выше.

Нормирование показателей электромагнитной совместимости относится к числу главных вопросов проблемы электромагнитной совместимости. Электрическая энергия, кроме количественных показателей должна отвечать ряду качественных. Качество электрической энергии должно соответствовать требованиям ГОСТ 13109-97.

Рассматривая электромагнитную совместимость как показатель качества продукции, необходимо на различных этапах её создания соблюдать целый ряд рекомендаций и норм, охватывающих комплекс непрерывно совершенствующихся вопросов электромагнитной совместимости.

Ниже приведён список основных источников помех.

Вентильные преобразователи являются мощными концентрированными источниками гармонических помех – высших гармоник (ВГ).

Преобразователи частоты в последние годы находят всё более широкое применение в металлургии, машиностроении, на предприятиях легкой промышленности; ПЧ являются источниками гармонических ЭМП, не только ВГ, но и интергармоник (ИГ), иначе – межгармоник, частоты которых находятся между частотами канонических ВГ.

Дуговая сталеплавильная печь является значительным источником ЭМП: ВГ и ИГ, колебаний и несимметрии напряжений. В наибольшей мере генерирование ЭМП проявляется в период расплавления.

Электросварочные установки (ЭСУ) создают практически все ЭМП, характеризующие КЭ: ВГ, несимметрию, провалы и колебания напряжения.

Также источниками гармоник являются газоразрядные лампы, ветроэнергетические установки и сети электрического транспорта.

Снижение несимметрии напряжений, обусловленную несимметричными электроприёмниками, можно ограничить до значений $K_{2U} \leq 0,02$ как с помощью схемных решений, так и путём применения специальных симметрирующих устройств (СУ).

При соотношении мощностей короткого замыкания в узле сети S_K и однофазной нагрузки $S_{одн}$, $S_K \geq 50S_{одн}$ коэффициент обратной последовательности напряжений не превышает нормируемого ГОСТ 13109-97. Электроприёмники, вызывающие несимметрию, присоединяются узлами сети, где мощность короткого замыкания удовлетворяет приведенному выше соотношению.

Существующие СУ можно разделить на две большие группы: с электрическими и электромагнитными связями. В СУ с электрическими связями симметрирующие элементы и нагрузки включаются либо по схеме треугольника, либо трёхлучевой звезды. По конструкции СУ разделяют на одно-, двух- и трёхэлементные схемы.

Из двухэлементных СУ наибольшее распространение получила схема Штейнметца. Симметрирующее устройство Штейнметца наиболее эффективно при коэффициенте мощности нагрузки, равном единице. Поэтому при активно-индуктивной нагрузке параллельно ей включается батарея конденсаторов С2.

Симметрирующее устройство Штейнметца обеспечивает симметрирование и активно-индуктивной нагрузки (без конденсаторов С2). Однако в этом случае коэффициент мощности значительно снижается до значений, меньших коэффициента мощности нагрузки.

Управляемые СУ могут иметь как непрерывное (аналоговое), так и ступенчатое (дискретное) управление.

Конденсаторные батареи дискретных СУ набираются из нескольких групп, одна из которых подключена постоянно, а другие – переменнно. Переключения осуществляются с помощью тиристорных ключей. В настоящее время находит применение плавное регулирование ёмкостных элементов путём подключения параллельно к конденсаторам реакторов, управляемых тиристорами.

Трёхэлементные СУ являются наиболее универсальными и гибкими, к их недостаткам можно отнести достаточно низкий коэффициент использования.

Для симметрирования системы линейных напряжений при одно-, двух- и трёхфазных несимметричных нагрузках широко применяются батареи конденсаторов с неодинаковыми мощностями фаз, используемые для компенсации реактивной мощности в сети.

Симметрирующее устройство с электромагнитными связями делится на две группы: с делителями (автотрансформаторные) и трансформаторные. В схемах с делителями мощность СУ обычно выбирается равной мощности нагрузки. С помощью переключения автотрансформаторной отпайки можно симметрировать нелинейную нагрузку с изменяющимся коэффициентом мощности.

Симметрирование системы напряжений может быть осуществлено также путём введения в систему добавочных ЭДС: между источником и приёмником в разрыв линейных проводов включаются дополнительные источники ЭДС, образующие систему обратной последовательности. В результате суммирования ЭДС основного и добавочного источников их симметричные составляющие обратной последовательности компенсируются, напряжение на приёмнике становится симметричным. В качестве источника добавочной системы ЭДС могут быть использованы синхронный генератор, трансформаторы последовательного регулирования, трансформатор с пофазным регулированием коэффициента трансформации.

Находят применение также фильтросимметрирующие устройства (ФСУ), представляющие собой фильтры ВГ, собранные на базе БК симметрирующего устройства – так называемые несимметричные фильтры.

Литература

1 Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк. – М. : Машиностроение, 2012. – 351 с.

2 Ефанов, В. И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В. И. Ефанов – Томск : ДМК Пресс, 2012. – 224 с.

3 Савинов, В. И. Система идентификации источников электромагнитных влияний на объектах энергетики / В. И. Савинов, А. В. Струмяляк – М. : ДМК Пресс, 2013. – 40 с.

УДК 621.577

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Тарнапович Д.С.

Научный руководитель – БЫЧКОВ М.М.

В настоящее время более половины всего топлива, расходуемого в системах энергоснабжения, используется для теплоснабжения.

Тепловой насос, отбирая у внешнего теплоисточника (земля, грунтовые воды, воздух) низкопотенциальное тепло, передает его в систему отопления с необходимой температурой теплоносителя. Для повышения температуры до необходимого уровня расходуется дополнительная энергия. Эффективный тепловой насос отличается тем, что теплота, выработанная им, многократно превышает количество энергии, затраченной на привод самого насоса.

Оценка энергетической эффективности автономного теплоснабжения на базе тепловых насосов (на стадии проектирования) выполняется практически всегда. Однако каждый раз разработчик сталкивается со значительными трудностями. Дело в том, что тепловая эффективность теплонасосных установок напрямую зависит, как правило, только от коэффициента трансформации, то есть отношения выработанной тепловой энергии к затраченной энергии, как правило, электрической, на его привод. При этом коэффициент трансформации теплонасосной установки не является величиной постоянной, а в значительной степени зависит от параметров теплоносителя внешних контуров.

Вторым важным моментом, который следует отметить, является определение и расчет тепловых нагрузок. Методика расчета нагрузок для проектирования таких установок до настоящего времени не нашла отражения в нормативных материалах. Проектировщики либо рассчитывают тепловые нагрузки по утвержденным методикам для проектирования котельных установок, либо пользуются зарубежными нормативными материалами. Последние говорят о том, что к выбору нагрузок для теплонасосных установок нельзя подходить с теми же мерками, как для котельных. Существенное отличие подходов в том, что при проектировании котельных установок расчетная нагрузка – это, обычно, пиковая нагрузка потребителя тепловой энергии и, в некоторых особых случаях, установка аккумулирующих емкостей с целью снижения пиковой нагрузки источника. А в случае с тепловыми насосами проектируют на существенно меньшие нагрузки, вводя в схему либо пиковые источники, либо идут на заведомый и рассчитанный дискомфорт. Применение аккумулирующих емкостей в теплонасосных системах является нормой.

Для практического решения этих двух проблем предлагается использовать при проектировании подход, который основан на имитационном моделировании как самого теплоисточника, так и потребителей тепловой энергии. При этом имитационная модель должна позволить рассмотреть и оценить работу тепловой насосной установки в динамике.

В качестве инструмента, позволяющего строить имитационные модели, предлагается программа МОДЭН. Все приведенные в настоящей научной работе рисунки взяты из программы МОДЭН без какой-либо редакторской корректировки, за исключением некоторых комментариев на отдельных рисунках.

Программа МОДЭН позволяет моделировать как физическую природу окружающей действительности, так и технологические процессы оборудования, систем и предприятий в целом. Программа дает полное представление о работе моделируемой системы в динамике, приближенное к реальной действительности с задаваемой степенью точности. На выходе – расчет в динамике поведения энергетической системы с выводом всех необходимых параметров системы в графическом, табличном и текстовом виде.

Практические задачи, решаемые с помощью программы МОДЭН:

- моделирование в динамике различных энергетических и технологических систем и процессов;
- моделирование тепловлажностных процессов во ограждающих конструкциях и режимов в помещениях зданий;
- моделирование гидравлических тепловых процессов в системах теплоснабжения и отопления, с построением пьезометрических графиков;
- моделирование работы систем автоматизации;
- моделирование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;
- энергетический аудит, прогнозирование и контроль эффекта от внедрения энергосберегающих мероприятий;
- оценка показателей надежности систем отопления.

Расчет теплового насоса в динамических режимах сводится к пересчету его паспортных параметров под конкретные внешние условия работы, а именно фактические рабочие температуры в испарителе и конденсаторе. Паспортные параметры теплового насоса содержатся в базе данных оборудования и материалов МОДЭН. После связи структуры «Тепловой насос» с базой эти параметры переходят в проект. Паспортными параметрами тепловых насосов являются:

- тип (марка) теплового насоса (холодильной машины);
- температура входа теплоносителя в испаритель;
- температура выхода теплоносителя из испарителя;
- температура входа теплоносителя в конденсатор;
- температура выхода теплоносителя из конденсатора;
- мощность на отопление;
- мощность на охлаждение;
- мощность электрическая на привод.

Дополнительно в паспортные параметры входят:

- расчетный напор компрессора;
- температуру испарения паспортную;
- температуру конденсации паспортную.

Метод создания имитационной модели подобен монтажу из готовых блоков (модулей, шаблонов), соответствующих реальной структуре моделируемой системы. Каждый шаблон в программе – это элемент энергетической системы (трубопровод, вентиль, регулятор, насос, компрессор, испаритель, конденсатор и так далее).

Литература

- 1 Троицкий, А. А. Основные принципы и показатели энергосбережения и энергоаудита / А. А. Троицкий. – СПб. : Наука, 2005. – 158 с.
- 2 Маков, Е. Г. Тепловые насосы / Е. Г. Маков. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 474 с.

УДК 621.316.72

УПРАВЛЯЕМЫЕ ШУНТИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ

Хоревко И.С.

Научный руководитель – БЫЧКОВ М.М.

Для управления режимами по напряжению и реактивной мощности наряду с традиционным применением генераторов, синхронных и статических компенсаторов, коммутируемых реакторов и конденсаторных батарей в последнее десятилетие все более широко используются новые устройства – управляемые шунтирующие реакторы (УШР). Трансформаторное исполнение для открытой установки на любой класс напряжения с возможностью плавного регулирования потребляемой реактивной мощности позволяет установить УШР в любой части энергосистемы и обеспечить стабилизацию напряжения, оптимизацию перетоков реактивной мощности, повышение пропускной способности электропередач, снижение потерь. Сочетание УШР с параллельно установленной батареей статических конденсаторов (БСК) позволяет обеспечить не только плавно регулируемую компенсацию (потребление) реактивной мощности, но и ее выдачу в соответствии с мощностью БСК при разгрузке УШР до режима холостого хода.

За предшествующий к настоящему времени период в странах СНГ и ближнего зарубежья введено в эксплуатацию более шестидесяти управляемых реакторов напряжением от 6 до 500 кВ. По принципу действия трехфазные плавно регулируемые реакторы для компенсации реактивной мощности можно разделить на три класса – управляемые подмагничиванием магнитопровода, трансформаторного типа и реакторы с переключением отпаяк (аналогично РПН трансформаторов).

Управляемые шунтирующие реакторы предназначены для автоматического управления потоками реактивной мощности и стабилизации уровней напряжения, что позволяет:

- устранить суточные и сезонные колебания напряжения в электрической сети;
- повысить качество электрической энергии;
- оптимизировать и автоматизировать режимы работы электрической сети;
- снизить потери электроэнергии при её транспортировке и распределении;
- в десятки раз улучшить условия эксплуатации и повысить срок эксплуатации электротехнического оборудования за счёт резкого сокращения числа коммутаций нерегулируемых устройств компенсации реактивной мощности и ограничения использования менее надёжных в эксплуатации устройств РПН – трансформаторов и автотрансформаторов;

- увеличить пропускную способность линий электропередачи и обеспечить надёжное автоматическое управление уровнями напряжения при перетоках мощности, близких к предельным по статической устойчивости;

- обеспечить условия для работы генераторов электростанций в таком диапазоне генерации реактивной мощности, который способствует наиболее благоприятным эксплуатационным режимам.

Управляемый шунтирующий реактор представляет собой трансформаторное устройство, дополнительно выполняющее функции полупроводникового ключевого прибора, что достигается за счёт работы магнитной системы реактора в области глубокого насыщения. Заложенный принцип позволил оптимальным образом использовать существующие разработки как в области трансформаторостроения, так и в области силовой электроники. Магнитная система одной фазы УШР содержит два стержня с обмотками, вертикальные и горизонтальные ярма. На каждом стержне размещены обмотки управления, соединённые встречно, и сетевые (силовые) обмотки, соединённые согласно. В стержнях магнитной системы УШР отсутствуют немагнитные промежутки. При подключении реактора к сети он будет находиться в состоянии холостого хода. При этом величина потребляемой из сети реактивной мощности не будет превышать 3 % номинального значения. Для увеличения загрузки реактора по реактивной мощности его рабочая зона

должна быть смещена в нелинейную область гистерезисной характеристики, что достигается за счёт дополнительного подмагничивания магнитной системы. При подключении к обмоткам управления регулируемого источника постоянного напряжения происходит нарастание потока подмагничивания.

Так как на поток подмагничивания накладывается переменный поток сетевой обмотки, то результирующий поток смещается в область насыщения стержней магнитопровода. В свою очередь, насыщение стержней приводит к появлению тока в сетевой обмотке. При вводе или выводе энергии из контура управления возникает переходный процесс увеличения или уменьшения сетевого тока и соответственно потребляемой реактором реактивной мощности.

УШР характеризуются следующими основными техническими характеристиками:

- диапазон плавного регулирования более 100 % номинальной мощности;
- мощность управления 0,5–2 % номинальной мощности УШР;
- гарантированная скорость набора полной мощности;
- время набора полной мощности с предварительным подмагничиванием (не более 0,02 секунды);
- удельные потери холостого хода 0,5–1,0 Вт/кВАр, номинальные 4–6 Вт/кВАр;
- допустимая перегрузка по мощности 130 % (не более 30 минут);
- допустимая перегрузка по току 120 % (не более 30 минут);
- полностью автоматический режим эксплуатации;
- уровень надежности, условия эксплуатации и текущего обслуживания соответствуют обычным шунтирующим реакторам.

В различных точках энергосистемы управляемые реакторы или УШР совместно с конденсаторными батареями способны решать следующие основные задачи:

- повышение пропускной способности межсистемных связей;
- автоматическая стабилизация уровней напряжения;
- оптимизация режимов работы электрических сетей и снижение потерь электроэнергии;
- обеспечение требуемой загрузки генераторов электростанций по реактивной мощности;
- снижение числа коммутаций выключателей;
- снижение числа переключений устройств РПН трансформаторов и автотрансформаторов.

Преимущества УШР перед аналогичными устройствами:

- регулировочный диапазон составляет 100 % номинальной мощности УШР;
- плавное регулирование с неограниченным ресурсом возможных изменений;
- отсутствие устройств РПН;
- возможность нормированной перегрузки УШР до 130 % и кратковременной перегрузки до 200 %;
- регулирование напряжения и реактивной мощности непосредственно в точке подключения;
- использование маломощных вентильных устройств с меньшими потерями и отсутствием необходимости в водяном охлаждении;
- традиционные требования к квалификации обслуживающего персонала на подстанции;
- более низкий уровень потерь (в 1,5–3 раза);
- существенно более низкая стоимость.

Литература

- 1 Кондратенко, Д.В. Статический компенсатор реактивной мощности на базе УШР. – М. : Журнал Электро, 2010. – 35 с.
- 2 Евдокунин, Д.А. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы. – М. : Знак, 2004.

УДК 621.313.126

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМОЙ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

Коршунова А.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент МАЗУРКЕВИЧ В.Н.

Системы возбуждения относятся к числу наиболее ответственных элементов генератора. Несмотря на то, что относительная мощность возбудителей невелика и составляет всего 0,4–0,6 % мощности генераторов, их характеристики существенно влияют как на устойчивость работы генераторов, так и на устойчивость двигательной нагрузки собственных нужд электростанции. Последнее очень существенно для обеспечения устойчивости технологического режима мощных блочных станций. Системы возбуждения должны отвечать следующим общим требованиям:

- обеспечивать надежное питание обмотки возбуждения синхронного генератора в нормальных и аварийных режимах;
- допускать регулирование напряжения возбуждения в заданных пределах;
- обеспечивать быстродействующее автоматическое регулирование возбуждения с высокими кратностями форсирования в аварийных режимах;
- осуществлять быстрое развозбуждение и в случае необходимости производить гашение поля в аварийных режимах.

Быстродействие системы возбуждения определяется кратностью форсирования (отношение максимального напряжения возбуждения к его номинальному значению) и скоростью нарастания напряжения возбудителя при форсировании. Возбудители современных турбогенераторов имеют, не меньшее двукратного номинального напряжения в секунду. Допустимая длительность форсировочного режима с предельным током возбуждения зависит от системы охлаждения генератора и должна быть не меньше 50 с при косвенной системе охлаждения, 30 с при непосредственном охлаждении ротора и косвенном охлаждении статора, 20 с при непосредственном охлаждении ротора и статора.

Существенного повышения быстродействия системы возбуждения можно достигнуть с помощью управляемых вентилях, ионных или тиристорных, преобразующих переменный ток вспомогательного синхронного генератора частотой 50 Гц в постоянный. Вспомогательный генератор имеет электромашинную систему возбуждения и при независимой системе располагается на одном валу с главным. При высокой кратности форсирования возбуждения обычно применяют две группы управляемых вентилях: рабочую и форсировочную. Обе группы выполняют по шестифазной или трехфазной мостовой схеме, соединяют параллельно и подключают к обмотке возбуждения генератора. Рабочая группа вентилях работает с малыми углами регулирования и обеспечивает возбуждение генератора в нормальных режимах. Форсировочная группа в нормальном режиме работает с большими углами регулирования и дает не более 30 % тока возбуждения. При форсировке эта группа полностью открывается и дает весь ток форсировки, а при гашении поля переводится в инверторный режим. Каждая фаза вспомогательного генератора выполняется из двух частей: низковольтной, к которой присоединены вентилях рабочей группы, и высоковольтной – для питания вентилях форсировочной группы. Защита вентилях и вспомогательного генератора от токов при обратных зажиганиях (в случае ионных вентилях) осуществляется с помощью шестиполусных быстродействующих анодных выключателей. Управление вентиляхами осуществляется от автоматического регулятора возбуждения.

Бесщеточные тиристорные системы возбуждения устанавливают на мощных синхронных компенсаторах с водородным охлаждением 50, 100 и 160 МВт. В соответствии с назначением компенсаторов и диапазоном их регулирования, на компенсаторах серии КСВБ устанавливают системы только положительного возбуждения; на компенсаторах же серии

КСВБО, предназначенных для регулирования реактивной мощности в режимах генерирования и потребления ее, – системы с реверсивным возбуждением.

Преимущественные отличия тиристорных систем:

– в них применен специальный вспомогательный шестнадцатифазный генератор с трапецеидальной э. д. с., обладающий повышенным быстродействием в диодном исполнении;

– импульсы управления вращающимися тиристорами создаются

– формируются и смещаются по фазе при помощи бесконтактной системы управления, включающей в себя специальный многофазный генератор управляющих импульсов и синусно-косинусное устройство;

– комбинированный способ управления и регулирования в сочетании с высоким быстродействием возбудителя обеспечивает высокое быстродействие системы возбуждения во всех режимах;

– процесс гашения поля турбогенератора значительно убыстряется, так как в этой системе он осуществляется релейным переводом вращающегося выпрямителя в инверторный режим путем изменения угла регулирования от $38,9$ до 137° .

Бесщеточные возбудители подобного типа обладают высоким быстродействием при форсировке возбуждения (рисунок 1).

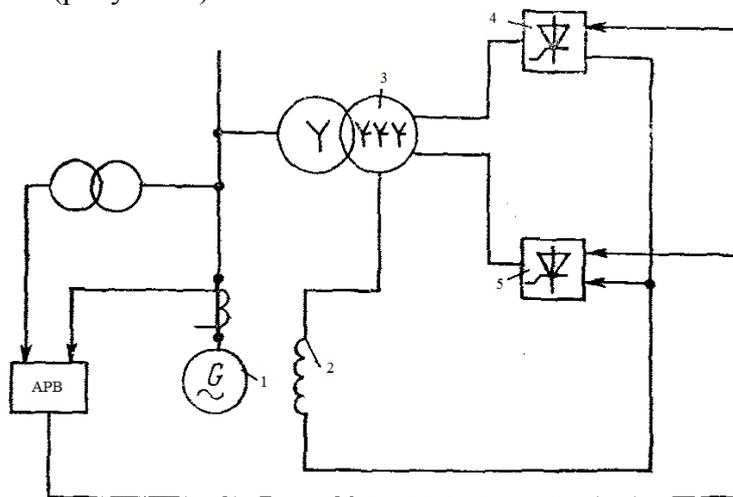


Рисунок 1 – Схема возбуждения с управляемыми тиристорными вентилями

1 – синхронный генератор; 2 – обмотка возбуждения;
3 – выпрямительный трансформатор; 4, 5 – рабочая и форсировочная группы управляемых вентилях

Недостатками тиристорных параллельных систем самовозбуждения являются: зависимость от режимов статорных цепей, опасность развозбуждения генератора при близких коротких замыканиях. Это можно избежать схемными решениями и соответствующим выбором параметров силового оборудования. Небольшое число мощных гидрогенераторов имеет ионную или тиристорную систему самовозбуждения. Тиристорное самовозбуждение наиболее рационально для капсульных гидрогенераторов, имеющих пока сравнительно небольшую мощность (до $46 \text{ МВ} \cdot \text{А}$).

Литература

1 Васильев, А.А. Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

2 Бувич В. В. Микропроцессорный регулятор возбуждения мощных турбогенераторов / В.В. Бувич. – Л.: ВНИИЭлектромаш, 1985. – 254 с.

3 Коган Ф. Л. Аномальные режимы мощных турбогенераторов / Ф.Л. Коган. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 188 с.

УДК 621.314.236

НОВЫЕ МАГНИТОПРОВОДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Карницкий П.А.

Научный руководитель – БЫЧКОВ М.М.

Одним из главных факторов, влияющих на параметры и свойства трансформатора, является материал и конструкция магнитопровода. В работе приведен анализ новых подходов при построении шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов, который заключается в одновременном применении в магнитопроводе различных типов электротехнических сталей.

На протяжении длительного времени одним из основных способов обеспечения низкого уровня потерь х. х. трансформаторов остается применение в магнитопроводах холоднокатаной анизотропной ЭТС. В которой домены направлены (структурированы) вдоль прокатки листов, что обеспечивает высокие магнитные свойства стали за счет уменьшения магнитного сопротивления прохождению магнитного потока в этом направлении. Металлургия постоянно совершенствует структуру ЭТС благодаря оптимизации химического состава стали и особенностям технологического процесса ее изготовления. Также наблюдается тенденция уменьшения толщины листа ЭТС. На североамериканском рынке трансформаторов широко применяются анизотропные ЭТС марок М6 и М4 соответственно с толщинами листов 0,35 и 0,28 мм. Также используются стали марок М3 и М2 с толщинами листов 0,23 и 0,18 мм соответственно.

Применение ЭТС высокой степени анизотропности позволяет получить отличные магнитные свойства при прохождении магнитного потока вдоль прокатки стального листа. Однако, при прохождении потока под другими углами к направлению прокатки, магнитные свойства стали резко ухудшаются, причем тем сильнее, чем больше степень анизотропности.

В последнее время усилия направлены на разработку новых изотропных (неструктурированных) сталей с высокими магнитными свойствами, например, марки М12. Подобные стали позволят избежать существенного увеличения потерь в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма.

Присутствие изотропной стали в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма, уменьшает количество пластин анизотропной стали стержней в этих зонах и длину пути прохождения магнитного потока в анизотропной стали под разными углами к направлению прокатки в данных зонах. Удельные потери в листе изотропной стали при прохождении магнитного потока под разными углами к направлению прокатки листа практически одинаковы, хотя и больше удельных потерь анизотропной стали при прохождении в ней магнитного потока вдоль прокатки листа. Но эти потери значительно ниже удельных потерь анизотропной стали при прохождении в ней магнитного потока поперек прокатки листа.

Изменяя количество рядов применяемых слоев можно изменять соотношение между изотропной и анизотропной сталью в стержнях магнитопровода. Подобная шихтовка магнитопроводов позволяет значительно уменьшить потери х. х. трансформатора, существенно уменьшить стоимость магнитопровода и повысить КПД трансформатора. Такие магнитопроводы позволяют создавать трансформаторы с так называемым повышенным КПД. При этом данные трансформаторы получаются значительно экономичнее трансформаторов, в которых применяется только анизотропная сталь.

Более высокие значения КПД имеет трансформатор Sandwich, особенно это проявляется в области больших нагрузок. Учитывая современные высокие требования к трансформаторам, это является большим достоинством. При этом технология сборки магнитопроводов с шихтовкой Sandwich подобна технологии сборки классического шихтованного магнитопровода и не требует особых дополнительных трудозатрат. Определим оптимальное соотношение анизотропной и изотропной стали в магнитопроводе с

шихтовкой Sandwich. На первый взгляд может показаться, что чем больше содержание анизотропной стали в стержнях, тем меньше потери х. х. и выше КПД трансформатора.

Эксперимент показал, что в результате увеличения количества анизотропной стали в стержнях магнитопровода с 50 % до 80 % не наблюдалось снижения потерь х. х., хотя, логично было бы ожидать их уменьшения.

Процессы, ведущие к увеличению потерь х. х. наблюдаются в магнитопроводе с классической шихтовкой (рисунок 1) при чередовании слоев с количеством рядов пластин более двух. С целью определения зависимости потерь в магнитопроводе от количества рядов пластин в слое были построены трансформаторы с классической конструкцией стержневого шихтованного магнитопровода с одним, двумя, тремя и четырьмя рядами пластин в слое. На рисунке 6 приведен график зависимости увеличения потерь в магнитопроводе с разным количеством рядов пластин в слое.

Построение магнитопроводов с содержанием в стержнях анизотропной стали 80 % и изотропной стали 20%, нецелесообразно, поскольку приводит к увеличению потерь х. х. трансформатора и его стоимости из-за применения большого количества анизотропной стали. Таким образом, магнитопроводы с содержанием в стержнях 50 % анизотропной стали М6 и 50 % изотропной стали М12 являются наиболее эффективными и имеют наиболее оптимальные технико-экономические показатели.

Литература

1 Пентегов, И. В. Конструкции магнитопроводов трансформаторов / И. В. Пентегов. – М. : Энергоатомиздат, 2015. – 298 с.

УДК 621.3.072.2

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Ерёма В.В.

Научный руководитель – к.т.н., профессор СИЛЮК С.М.

Напряжение в узлах сети постоянно меняется из-за изменения нагрузки, режима работы источников питания, схемы сети.

Режим напряжений в электрической сети должен быть таким, чтобы были выполнены требования ГОСТ в отношении допустимых отклонений напряжения для электроприёмников, которые питаются от этой сети.

Чтобы обеспечить необходимые отклонения напряжения на шинах электроприемников следует применять регулирование напряжения.

Регулированием напряжения называется процесс изменения уровней напряжения в характерных точках сети с помощью специальных технических средств.

Способы регулирования напряжения возникли с возникновением электрических сетей. Сначала использовалось регулирование напряжения в центрах питания распределительных сетей и непосредственно у потребителей и на энергоблоках электростанций. Сейчас эти методы регулирования напряжения называются локальными.

Локальное регулирование может быть централизованным и местным. Централизованное управление выполняется в центрах питания. Местное регулирование проводится непосредственно у потребителей. Регулирование напряжения в центрах питания приводит к изменению режима напряжения во всей сети, которая питается от него. Местное регулирование приводит к изменению режима напряжения в ограниченной части сети.

Регулирование напряжения на генераторах электростанций выполняется за счет изменения тока возбуждения с помощью устройства автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

Регулирование напряжения на шинах низшего напряжения понижающих подстанций производится с помощью:

- трансформаторов со встроенными устройствами для регулирования напряжения под нагрузкой (РПН);
- синхронных компенсаторов (СК);
- линейных регуляторов (ЛР).

При этом регулирование напряжения производится автоматически в пределах располагаемого диапазона регулирования. Регулирование напряжения происходит одновременно для всех линий электропередач сети, которые питаются от шин центра питания.

В зависимости от характера электроприемников можно выделить три подтипа регулирования напряжения:

- стабилизация напряжения;
- двухступенчатое регулирование напряжения;
- встречное регулирование.

Стабилизация напряжения применяется для потребителей с практически неизменной нагрузкой в течение суток (трехсменные предприятия).

Двухступенчатое регулирование выполняется для электроприемников с ярко выраженным двухступенчатым характером изменения нагрузки (односменные предприятия).

В случае переменной суточной нагрузки выполняется встречное регулирование. Этот подтип регулирования напряжения самый распространенный.

Суть метода встречного регулирования заключается в изменении напряжения в зависимости от изменения графика нагрузки электроприемника.

Согласно методу встречного регулирования, напряжение на шинах низшего напряжения районных подстанций в период максимальной нагрузки должно поддерживаться на 5 % выше номинального напряжения питаемой сети. Эта цифра приведена в ПУЭ. Опыт

эксплуатации показывает, что следует повышать напряжение на 10 %, если при этом отклонение напряжения у ближайших потребителей не превосходит допустимого значения.

Наибольшее отклонение напряжения наблюдается в аварийных режимах работы системы. В этом случае поддерживать напряжение у всех потребителей в заданных пределах для нормального режима работы без значительных затрат на специальные устройства регулирования напряжения невозможно. Поэтому в аварийных режимах допускается большее отклонение напряжения.

На электростанциях регулирование напряжения производится на генераторах и повышающих трансформаторах.

Изменение напряжения генераторов возможно за счет регулирования тока возбуждения. Не меняя активную мощность генератора напряжение можно изменять в пределах ± 5 %. Повышение напряжения на 5 % сверх номинального сопровождается увеличением потерь в стали и повышением ее нагрева. При снижении напряжения на 5 % номинальный ток статора возрастает на 5 % и соответственно увеличивается нагрев обмотки.

На каждой ступени трансформации теряется приблизительно 5–10 % напряжения. Поэтому регулировочного диапазона генераторов явно недостаточно, чтобы поддерживать необходимый уровень напряжения в сети. Кроме того, трудно согласовать требования к регулированию напряжения у близких и удаленных электроприемников. Поэтому генераторы электростанций являются вспомогательным средством регулирования напряжения. Как единственное средство регулирования генераторы применяются только для простейшей системы: электростанция – нераспределенная нагрузка. В этом случае на шинах электростанций осуществляется встречное регулирование напряжения.

Повышающие трансформаторы на электростанциях тоже являются вспомогательным средством регулирования напряжения. Трансформаторы мощностью до 250 МВА напряжением 110 и 220 кВ имеют устройство регулирования напряжения типа ПБВ (переключение без возбуждения, то есть с отключением от сети). Повышающие трансформаторы большей мощности выпускаются без устройств ПБВ.

Для регулирования напряжения трансформаторами подстанций предусмотрена возможность изменять коэффициент трансформации в пределах 10–20 %. По конструктивному исполнению различают два типа переключающих устройств:

- с регулированием без возбуждения (ПБВ), то есть для изменения коэффициента трансформации трансформатор отключают от сети;
- с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН).

Устройства РПН и управляющие ими системы автоматического регулирования характеризуются величиной напряжения ступени регулирования, зоной нечувствительности, выдержкой времени срабатывания и точностью регулирования.

Дальнейшее развитие системы регулирования напряжения и реактивной мощности должно основываться на широком применении современных средств регулирования под управлением централизованных систем автоматического управления.

Сегодня реализуется ряд мероприятий, направленных на повышение качества регулирования напряжения. К ним относятся: организационные мероприятия силами оперативного персонала подстанций и центров управления сетями, мероприятия по оснащению современными средствами регулирования напряжения и реактивной мощности, разработка пилотных централизованных автоматических систем регулирования напряжения и реактивной мощности в сети.

Литература

- 1 Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 360 с.
- 2 Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1979. – 832 с.
- 3 Васильев, А. А. Электрическая часть электрических станций и подстанций / А. А. Васильев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

УДК 621.316

ВЛИЯНИЕ ДЕМПФЕРОВ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Матысюк В.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

Гибкость проводов линий электропередач позволяет им принимать форму, обусловленную внешними нагрузками. При протекании по ним токов КЗ проводники соседних фаз начинают взаимодействовать: вначале они отталкиваются, затем сближаются. В результате может произойти их сближение на недопустимо малое расстояние по условию электрической прочности изоляционного промежутка. Наибольшее сближение соседних проводников наблюдается, как правило, при двухфазном КЗ. Таким образом, более вероятное КЗ на отходящих воздушных ЛЭП может сопровождаться вторичным КЗ на шинах РУ из-за их недопустимого сближения с последующим отключением всех присоединений.

Под электродинамической стойкостью гибких проводников понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов КЗ до и после автоматического отключения цепи КЗ без повреждений. ПУЭ указывает на ток КЗ в 20 кА, по достижении которого необходимо производить расчет гибких шин на электродинамическую стойкость. С возрастанием токов КЗ их электродинамическое действие становится ключевым фактором, определяющим габариты и механические характеристики токоведущих конструкций с гибкими проводами при проектировании.

На первом этапе исследований расчетным принят обособленный пролет ОРУ 110 кВ с натяжными гирляндами изоляторов без ответвлений в ячейку (рисунок 1). В работе дана оценка возможности учета упругой податливости опорных порталных конструкций в точках крепления гирлянд изоляторов к ним. Выбор расчетного вида КЗ производится с помощью сравнения импульсов электродинамических усилий. Предварительный расчет выполнен без учета влияния упругой податливости порталов на максимальные тяжения проводов. Полученные при этом результаты максимальных тяжений значительно отличались от опытных данных. Так второй максимум тяжения в пролете длиной 40 м при начальном тяжении 7,65 кН и токе 29,7 кА при продолжительности КЗ, равной 0,8 с составил 29 кН. Опытное значение составило 16,87 кН. После модификации алгоритма и компьютерной программы результаты расчета и опытные данные значительно сблизилась друг с другом. Расчеты показали, что влияние упругой податливости порталов неодинаково на разных стадиях движения проводов в процессе КЗ. Оно зависит от частоты собственных колебаний системы, геометрических размеров и массы порталов. С увеличением частоты собственных колебаний и массы порталов их демпфирующее действие уменьшается.

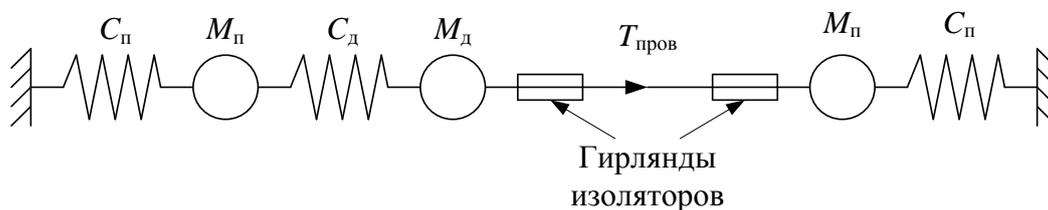


Рисунок 1 – Расчетная схема

$T_{\text{пров}}$ – динамическое тяжение провода, представленного гибкой нитью;

$C_{\text{п}}$ – упругая жесткость портала; $C_{\text{д}}$ – упругая жесткость демпфера;

$M_{\text{п}}$ – приведенная масса портала; $M_{\text{д}}$ – масса демпфера

В ходе работы было установлено что оптимальные значения параметров упругой податливости демпферов можно определить методом вычислительного эксперимента. При выборе демпфера необходимо учитывать его влияние как на срез тяжений так и на сближения проводников. Выбор демпфера с минимальной жесткостью не обеспечивает

автоматически электродинамическую стойкость пролета. С увеличением упругой податливости демпфера снижается второй максимум тяжения. Однако это ведет к увеличению размаха колебаний на стадии свободного движения проводов после отключения КЗ. Так же разработан численный метод расчета параметров электродинамической стойкости гибкой ошиновки открытых распределительных устройств напряжением 110–220 кВ, учитывающий наличие демпферов тяжения. Кроме этого выполнен анализ влияния демпферов тяжения на параметры электродинамической стойкости гибкой ошиновки при различных видах короткого замыкания, его продолжительности и в цикле неуспешного АПВ.

В результате вычислительный эксперимент подтвердил возможность уменьшения максимальных тяжений короткого замыкания. Однако он показал, что для конкретных исходных данных требуется отдельный самостоятельный расчет по выбору оптимальных параметров демпферов тяжения.

Литература

- 1 Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
- 2 Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 2001. – 117 с.
- 3 Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
- 4 Zarebski, N. Proposition of structure for testing and calculating the electromagnetic forces in flexible conductors / N. Zarebski. – Warszawa, 1979. – P. 6.

УДК 621.313.126

ВИДЫ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Куликова А.С.

Научный руководитель – ГАВРИЕЛОК Ю.В.

Системы возбуждения предназначены для питания обмотки ротора постоянным током, который соответствует току возбуждения. В настоящее время для регулирования тока возбуждения используют АРВ, которое реагирует на параметры генератора автоматически изменяя ток возбуждения в зависимости от режима его работы.

Электромашинные системы возбуждения, где источником энергии является генератор постоянного тока (возбудитель), использовались в течение длительного времени для большинства генераторов. Обычно возбудители находились на одном валу с генератором и приводились во вращение той же турбиной, что и сам генератор. Такая система называется прямой. В случае, если возбудитель приводится во вращение отдельным двигателем, систему принято называть косвенной. В генераторостроении применяют, как правило, прямую систему возбуждения, имеющую меньшую стоимость и большую надежность. Электромашинные системы возбуждения, выпускавшиеся заводами более 30 лет назад и находящиеся до сих пор в эксплуатации, могут быть заменены на современные полупроводниковые статические системы с любым набором заданных функций. Достоинством этой системы возбуждения является ее высокая надежность и независимость от внешней сети. Недостатком же является невозможность использования для возбуждения синхронных генераторов по условиям надежной коммутации и механической прочности коллектора.

При большой мощности СГ мощность возбуждения становится больше мощности ГПТ, в связи с этим для возбуждения крупных машин применяют выпрямитель с полупроводниковым выпрямлением. В зависимости от способа получения постоянного тока различают две разновидности выпрямительных систем:

- система независимого возбуждения (СТН);
- система самовозбуждения (СТС).

В СТН группа статических выпрямителей преобразует переменный ток возбудителя в постоянный. Возбудитель находится на одном валу с основным генератором. На статоре имеется трехфазная обмотка с отпайками к которой подключены две группы тиристоров. Обе группы соединяются по трехфазной мостовой схеме. Возбудитель имеет обмотку возбуждения, питаемую от трансформатора через выпрямители. Система управления тиристорами питается от трансформатора, связанного системой АРВ. В нормальном режиме работы возбуждение основного генератора обеспечивается рабочей группой тиристоров, а форсировочная группа почти закрыта. В режиме форсировки возбуждения тиристоры, питающиеся от полного напряжения трехфазной обмотки возбудителя, открываются полностью и дают весь ток форсировки, а рабочая группа при этом запирается более высоким напряжением форсировочной группы. Достоинством СТН является наибольшее быстроедействие. Недостатком является наличие контактных колец и щеток.

Основными элементами СТС являются две группы выпрямителей неуправляемые и управляемые, а также два трансформатора: последовательный и выпрямительный. Выпрямители получают питание от выпрямительного трансформатора подключенного к цепи возбуждаемого синхронного генератора.

Управляемые выпрямители получают питание от выпрямительного трансформатора, вторичное напряжение которого пропорционально напряжению генератора. В номинальном режиме неуправляемые выпрямители обеспечивают восемьдесят процентов тока возбуждения генератора. Важным недостатком СТС является зависимость от внешней сети, также наличие контактных колец и щеток.

Подвод тока к контактным кольцам с помощью щеток недостаточно надежен, особенно при токах более 3000 А. Для мощных машин перспективной является бесщеточная система

возбуждения. В этой системе в качестве возбудителя используется синхронный генератор особой конструкции, его обмотка возбуждения располагается на неподвижном статоре, а обмотка трехфазного переменного тока на вращающемся роторе. Недостаток этой системы – останов машины для подключения резервного питания и замены вышедших из строя диодов.

Для управления тиристорами выпрямителя используется система импульсно-фазового управления (СИФУ), выполняющая следующие функции:

– определение моментов времени, в которые должны открываться те или иные конкретные тиристоры; эти моменты времени задаются сигналом управления, который поступает с выхода САУ на вход СИФУ;

– формирование открывающих импульсов, передаваемых в нужные моменты времени на управляющие электроды тиристоров и имеющих требуемые амплитуду, мощность и длительность.

По способу получения сдвига открывающих импульсов относительно точки естественного открывания различают горизонтальный, вертикальный и интегрирующий принципы управления.

Литература

1 Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебник для вузов / Б. Ю. Липкин. – М. : Высшая школа, 1990. – 363 с.

2 Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций: учебное пособие для студентов вузов / Б. Н. Неклепаев. – М. : Высшая школа, 1998. – 586 с.

3 Самойлов, М. В. Основы энергосбережения: учебное пособие для студентов вузов / М. В. Самойлов. – 2-е изд., стер. – Минск : БГЭУ, 2002. – 198 с.

4 Интернет-портал: Сайт все о электроснабжении и электротехнике [Электронный ресурс] / Системы возбуждения синхронных генераторов. – Режим доступа : <http://pue8.ru/silovaya-elektronika/198-sistemy-vozbuzhdeniya-sinhronnyh-generatorov.html>. – Дата доступа : 14.04.2016.

5 Интернет-портал: Сайт энергоконсультант [Электронный ресурс] / Основы современной мировой электроэнергетики. – Режим доступа : <http://www.energocon.com/pages/id1152.html>. – Дата доступа : 14.04.2016.

6 Интернет-портал: Сайт союз свободных электриков [Электронный ресурс] / Мастерам: принципы управления тиристорами. – Режим доступа : <http://electromaster.ru/modules/myarticles/article.php?storyid=326>. – Дата доступа : 22.04.2016.

УДК 621.311.4

НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И АППАРАТАХ

Баран А.Г., Климкович И.П.

Научный руководитель – АНДРУКЕВИЧ А.П.

При нормальных эксплуатационных условиях электродинамические силы, как правило, малы и не вызывают каких-либо деформаций. Однако при коротких замыканиях эти силы достигают весьма больших значений и могут вызвать деформацию или разрушение не только отдельных деталей, но и всего аппарата. Это обстоятельство требует проведения расчета установки (или отдельных его узлов) на электродинамическую устойчивость, т. е. на способность выдержать без повреждений прохождение наибольшего возможного в эксплуатационных условиях (или заданного) тока короткого замыкания. Такой расчет тем более необходим ввиду того, что с целью получения минимальных габаритов в аппаратах стремятся располагать токоведущие части как можно ближе друг к другу.

Наибольшая величина электродинамических усилий (ЭДУ) определяется максимальным возможным током короткого замыкания, т. е. ударным током короткого замыкания i_y . Поэтому начальный момент короткого замыкания ($t = 0,01$ с) является наиболее опасным с точки зрения величины динамических усилий.

При прохождении через выключатель сквозного тока короткого замыкания или при включении на существующее в сети короткое замыкание отдельные его части – вводы, токоведущие стержни, траверсы, штанги и др., а также соответствующие шины и ошиновка – подвергаются внезапной механической нагрузке, носящей характер удара.

В современных мощных электрических системах при напряжениях 6–20 кВ ударные токи короткого замыкания могут достигать значений до 200–300 кА и более, а электродинамические усилия при этом достигают нескольких тонн на один пролет сборных шин (или шинопроводов) длиной 1–1,5 м.

В таких условиях недостаточная механическая прочность того или иного элемента электрического оборудования может послужить причиной дальнейшего развития аварии и вызвать серьезные разрушения в распределительном устройстве. Поэтому для надежной работы всякой электрической установки все ее элементы должны обладать электродинамической устойчивостью (надлежащей механической прочностью), т. е. противостоять воздействиям при коротких замыканиях.

При определении электродинамических усилий исходят из условия, что ток протекает по оси круглых проводников, диаметр которых не оказывает влияния на величину усилий. Следует заметить, что размеры и форма сечения проводников при больших расстояниях между ними не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на величину электродинамических усилий. Если же проводники имеют форму прямоугольных полос и расположены на небольшом расстоянии друг от друга, когда расстояние в свету меньше периметра полосы, то размеры их сечения могут оказать существенное влияние на электродинамические усилия. Это влияние поперечных размеров проводника при расчетах учитывается при помощи коэффициента формы.

Для расчета ЭДУ используется два способа.

– Первый заключается в рассмотрении силы как результата взаимодействия проводника с током и магнитного поля. Этот способ применяется, когда индукцию в любой точке проводника можно найти аналитически, используя закон Био – Савара – Лапласа.

– Второй основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током. Электростатическая энергия системы не учитывается. При этом принимается, что независимо от перемещения или деформации токоведущих контуров под действием сил ЭДУ токи в них неизменны.

УДК 621.314.224.81

ЭЛЕГАЗОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Белько А.А.

Научный руководитель – ГАВРИЕЛОК Ю.В.

Элегазовый трансформатор представляет собой герметичную конструкцию, где в качестве изоляции и охлаждения применяются не привычные синтетические смолы и трансформаторное масло, а специальное газовое наполнение – элегаз. Устройство не требует большой площади, что позволяет не только сократить объем используемого под трансформатор помещения, но и уменьшить общий размер подстанции. Это отличный вариант для городов, где высока стоимость аренды земли. Благодаря высокому уровню герметичности, элегазовый трансформатор тока более прост в эксплуатации, по сравнению с аналогами. Аппарат пожаробезопасен и имеет длительный период эксплуатации. По сравнению с традиционными трансформаторами, элегазовый производит очень мало шума.

Трансформаторы напряжения серии ЗНГА предназначены для передачи сигнала измерительной информации приборам учета, измерения, защиты и автоматики в сетях трехфазного переменного тока частотой 50 Гц с заземленной нейтралью классов напряжения 110–500 кВ.

Конструктивно трансформатор напряжения представляет собой герметичный бак из высокопрочного алюминиевого сплава с размещенной внутри него активной частью, которая осуществляет преобразование напряжения, и изоляционного ввода (фарфорового или полимерного), закрепленного на баке. Изоляционной средой является элегаз. Трансформатор снабжен газотехнологической системой, с помощью которой осуществляется закачка элегаза. Контроль состояния изоляционной среды обеспечивается при помощи установленного на корпусе трансформатора сигнализатора плотности с температурной компенсацией. Внутри корпуса трансформатора установлен фильтр-осушитель элегаза. Трансформатор имеет мембранное предохранительное устройство, предназначенное для аварийного сброса давления.

Трансформатор тока электромагнитного типа с элегазовой изоляцией (в дальнейшем трансформатор) предназначен для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам, устройствам «защиты и управления в открытых распределительных устройствах в сетях трехфазного переменного тока при номинальном напряжении 110 кВ и номинальной частоте 50 Гц, эксплуатируемых в умеренно холодном. Трансформатор предназначен для всех отраслей промышленности, где требуется передача сигнала измерительным приборам, устройствам защиты и управления в РУ, включая коммерческий учёт электроэнергии (намотка блоков вторичных обмоток выполнена биполярно, что приводит к самокомпенсации реактивной (паразитной) составляющей сопротивления).

Номинальные первичные токи: 600–1200 А, 750–1500 А, 1000–2000 А, 1500–3000 А. ТГФ-220 имеет два коэффициента трансформации по номинальному первичному току.

В последнее десятилетие появилась устойчивая тенденция применения в электроэнергетике для ОРУ трансформаторов тока (в дальнейшем ТТ) с элегазовой изоляцией.

Превосходство элегазовых трансформаторов тока над трансформаторами тока с бумажно-масляной изоляцией очевидно:

- отсутствие масла, являющегося причиной пожара;
- для разрушения и пожара при коротком замыкании внутри ТТ в конструкции предусмотрено мембранное предохранительное устройство, срабатывающее при определенном аварийном давлении, которое ниже давления, рассчитанного из условий механической прочности элементов конструкции ТТ;

- ТТ, заполненный элегазом, имеет меньшую массу;
- обслуживание ТТ в эксплуатации сводится к мониторингу давления элегаза в ТТ;
- контроль качества элегаза методом взятия проб не требуется;
- правильно выбранные и изготовленные уплотнения в конструкции ТТ обеспечивают его эксплуатацию без подпитки элегазом примерно 15–20 лет.

Некоторые особенности проектирования высоковольтных трансформаторов тока с элегазовой изоляцией.

При проектировании отдельно стоящих элегазовых измерительных трансформаторов тока необходимо учитывать ряд особенностей, в частности:

- при расчете электрических полей, выборе изоляционных промежутков и формы электродов должно быть обеспечено отсутствие частичных разрядов, вызывающих разложение элегаза с появлением химически активных составляющих;

- аппарат, заполненный элегазом, представляет собой сосуд, работающий под давлением. Поэтому элементы конструкции трансформатора тока должны удовлетворять требованиям;

- разъемные и неразъемные соединения должны обеспечивать газоплотность при заданных перепадах температуры окружающего воздуха.

Наибольшее количество трансформаторов с элегазовой изоляцией было внедрено в Европе, где их количество составляет 15–25 % от общего числа применяемых измерительных трансформаторов. С другой стороны, в США и Канаде за все это время их количество не превысило 5 %. Что касается постсоветского электротехнического рынка, то применение элегазовых измерительных трансформаторов здесь началось не так давно и интерес к ним повышенный. В свою очередь, спрос на трансформаторы с масляной изоляцией на мировом рынке, также стабильно растет. Это связано прежде всего со значительным повышением качества масляных трансформаторов тока и напряжения. Современные высоковольтные измерительные трансформаторы с масляной изоляцией стали взрывобезопасными. Большой положительный опыт их применения при низких температурах, а также сравнительно низкая цена, во многих, случаях сделала их незаменимыми. Так что сегодня можно с уверенностью сказать, что на рынке высоковольтных измерительных трансформаторов, главным образом, присутствуют два типа трансформаторов – один с масляной изоляцией, а другой с элегазовой, причем каждый из них имеет свою собственную нишу на рынке, определяемую его конструктивными и другими особенностями.

Современные, как масляные высоковольтные измерительные трансформаторы, так и элегазовые, можно с уверенностью утверждать, являются вполне надежными и имеют срок службы более 30–40 лет. Однако такую надежность можно достичь лишь за счет высокого качества изготовления трансформаторов, с применением новейших технологий. Тем более, это очень актуально стало сейчас, когда коэффициент запаса оборудования значительно понизился за счет уменьшения размеров трансформаторов, экономии материалов.

Литература

1 Смирнов, А. Д. Справочная книжка энергетика / А. Д. Смирнов, К. М. Литипов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 568 с.

2 Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 403 с.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Буйко И.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент БУЛОЙЧИК Е.В.

Работа реальной энергетической системы всегда сопровождается так называемыми переходными режимами. Переходной режим сопровождается колебаниями токов, напряжений, частоты и других параметров, при этом характер и длительность этих колебаний зависят не только от вида возмущения, но и от динамических параметров конкретной энергетической системы. Появление и развитие системы мониторинга переходных режимов (СМПР) было обусловлено усложнением топологии и структуры генерации и потребления электроэнергетических систем, ростом количества и увеличением тяжести крупных системных аварий, а также появлением и широким внедрением технологии глобального позиционирования (Global Positioning System, GPS). С созданием СМПР появилась возможность получать более детальную информацию о параметрах установившихся и главным образом переходных режимов, возникающих вследствие технологических нарушений или аварий. Измерения параметров переходных режимов производятся специализированными регистраторами переходных режимов (РПП), которые являются основным инструментом СМПР (рисунок 1).

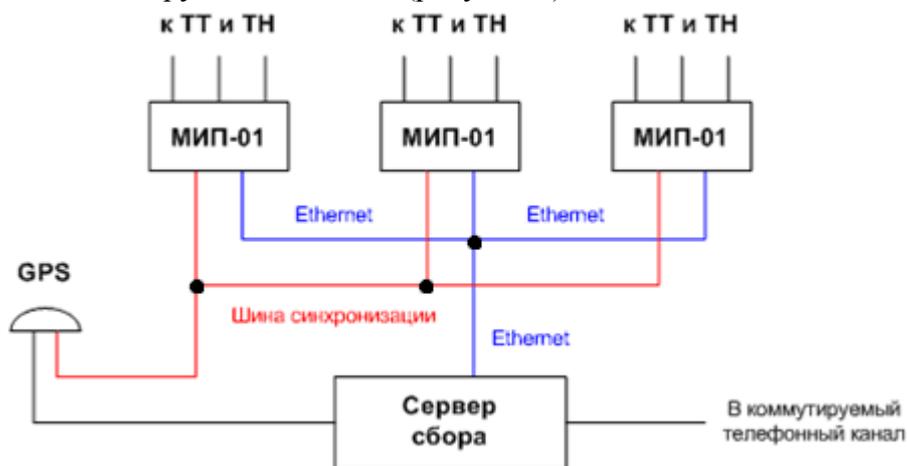


Рисунок 1 – Структурная схема регистратора переходных процессов
 ТН – трансформатор напряжения; ТТ – трансформатор тока;
 МИП-01 – измерительный преобразователь

Систему мониторинга переходных режимов можно разделить на три подсистемы: подсистема обработки данных, измерительная подсистема и транспортная подсистема. При помощи специализированного программного обеспечения центры обработки данных выполняют анализ текущих и ретроспективных нормальных и аварийных режимов и различные функции в процессах управления режимами энергообъединения. Измерительная подсистема представляет собой аппаратную реализацию регистраторов СМПР, алгоритмы вычисления основных параметров электрического режима на основании измерений мгновенных значений токов и напряжений и специализированное программное обеспечение, реализующее данные алгоритмы. Транспортная подсистема представляет собой специализированное программное обеспечение, средства вычислительной техники, активное сетевое оборудование, каналообразующее оборудование, физические каналы передачи данных. Автоматизированная система сбора информации СМПР представляется на каждом объекте автоматизации (диспетчерском центре, подстанции, станции) двумя подсистемами: система приема, обработки и хранения и система межуровневого обмена.

Технология синхронизированной векторной регистрации параметров предоставляет значительно больший объем информации по сравнению с существующими системами телеизмерений.

Технологии синхронизированной векторной регистрации параметров могут быть разделены на две основные категории, в зависимости от области применения:

- не требующие передачи информации в режиме реального времени (off-line задачи);
- для управления работой энергосистем в режиме реального времени (on-line задачи).

Показатели сравнения, контролируемые СМПР:

- максимальные отклонения частоты напряжения в точках установки цифровых регистраторов СМПР;
- установившееся значение частоты напряжения;
- максимальные амплитуды колебаний относительных углов напряжения;
- коэффициенты корреляции между измеренными и расчетными изменениями рассматриваемых параметров в точках установки цифровых регистраторов СМПР.

В случае значительного отклонения экспериментальных и расчетных показателей производится настройка модели, например, путем изменения настроечных коэффициентов регуляторов скорости вращения турбин и (или) характеристик нагрузки.

СМПР включает следующие виды мониторинга:

- **мониторинг уровней устойчивости, который** реализован в виде системы мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ) и позволяет определять опасные сечения в системообразующей сети и их пропускную способность в условиях реального времени;

- **мониторинг асинхронных режимов, который** может быть организован на базе измерения взаимных углов векторов напряжений, что дает возможность повысить уровень исследования длительных асинхронных режимов и разработать новые методы управления ими;

- **мониторинг функционирования автоматических регуляторов возбуждения генераторов электростанций, который** позволяет оценить правильность работы автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) в части демпфирования синхронных колебаний в системе и поддержания заданных уровней напряжения на шинах электростанций;

- **мониторинг правильности функционирования АРВ и систем возбуждения генераторов, который** позволит осуществлять контроль соответствия действительности заявляемых электростанциями характеристик установленных на генераторах систем и регуляторов возбуждения, а также правильности выбранных настроек системных стабилизаторов, что, в свою очередь, позволит повысить уровень системной надежности.

Системы мониторинга переходных процессов успешно развиваются во многих энергосистемах мира. Внедрение таких систем позволило выявить несколько направлений их практического применения, среди которых:

- верификация цифровых моделей ЭЭС и их отдельных элементов;
- мониторинг напряжений в узлах сети;
- анализ произошедших аварий;
- выявление и анализ низкочастотных колебаний;
- мониторинг фазовых углов напряжений в узлах сети.

Литература

1 Технологии управления режимами энергосистем XXI века : сб. научн. ст. / НГТУ ; под ред. А. Г. Фишова. – Новосибирск : НГТУ, 2006.

2 Система мониторинга переходных режимов. – Режим доступа: http://eepr.ru/article/Sistema_monitoringa_perehodnykh_rezhimov/. – Дата доступа: 13.11.2015.

3 Системы мониторинга переходных режимов (СМПР / WAMS-системы). – Режим доступа: http://parma.spb.ru/catalog/solutions/sistemy_monitoringa_perekhodnykh_rezhimov_smpr/wams_sistemy/. – Дата доступа: 15.11.2015.

4 Система мониторинга переходных режимов для объектов РАО «ЕЭС России». – Режим доступа: <http://www.rtsoft.ru/press/articles/detail.php?ID=1501/>. – Дата доступа: 16.11.2015.

УДК 621.315.211.4

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ЛИНИИ МЕГАПОЛИСОВ

Хасеневич А.Д.

Научный руководитель – к.т.н., профессор СИЛЮК С.М.

Основной трудностью, возникающей при электроснабжении мегаполисов (особенно центральной их части), является практическое отсутствие коридоров для воздушных линий электропередачи (ВЛ) и площадок для новых подстанций (ПС).

Перспективным решением проблемы глубокого ввода в центральных районах мегаполисов является применение газоизолированных (газонаполненных) линий электропередачи, где газообразный диэлектрик (элегаз) находится при избыточном давлении.

Преимущества ГИЛ по отношению к кабелям:

– существующие кабели с масляной, бумажной, синтетической изоляцией (в том числе на основе сшитого полиэтилена) предусматриваются на критические мощности примерно до 1700 МВт, эти кабели также плохо приспособлены для передачи энергии на расстояния свыше нескольких десятков километров из-за ограничений по термической стойкости и возможных резонансных явлений;

– диэлектрические потери в указанных кабелях также весьма велики;

– традиционные кабели не являются экологически чистыми – как правило, они пожароопасны, а электромагнитные поля не полностью локализованы в самих кабелях;

– есть значительные технологические проблемы при вертикальной прокладке кабелей традиционного исполнения.

Современная элегазовая ЛЭП (ГИЛ второго поколения) имеет коаксиальную (соосную) конструкцию, в которой проводник (токопровод) под высоким напряжением (от 121 до 1200 кВ) поддерживается неподвижными опорными изоляторами в центре заземлённой оболочки. Пространство между проводником и оболочкой заполнено под избыточным давлением элегазом. Для достижения высокой электропроводности проводник обычно выполняется в виде алюминиевой трубы, поддерживающая внутреннее давление газа оболочка – из алюминиевого сплава, стали или синтетических материалов (например, эпоксидной смолы, армированной стекловолокном). Металлическая оболочка ГИЛ обычно содержит защитное покрытие.

В газонаполненных кабелях увеличение электрической прочности изоляции кабелей реализуется за счет повышения давления в газовых включениях, находящихся в бумажной изоляции. Они устроены таким образом, что в кабель подводится чистый сухой газ под давлением. Величина давления определяется особенностями конструкции кабеля и условиями его прокладки и находится в пределах от 0.7 до 3.0 МПа.

Необходимо отметить, что электрическая прочность газонаполненных кабелей существенно ниже, чем маслonaполненных кабелей. Поэтому в нашей стране они практически не применяются. Однако за рубежом они получили довольно широкое распространение, т. к. газонаполненные кабели дешевле маслonaполненных кабелей (отсутствие дорогостоящего дегазированного масла, более простая подпитывающая аппаратура).

Наиболее распространенными являются одножильные газонаполненные кабели с каналом внутри токопроводящей жилы, элементы конструкции которых такие же, что и у маслonaполненных кабелей с центральным маслопроводящим каналом. В настоящее время в эксплуатации находятся газонаполненные кабели на максимальное номинальное напряжение 275 кВ (в Великобритании). Дальнейшее совершенствование конструкций этих кабелей связано с применением изоляции из полиэтиленовых лент.

Довольно широкое распространение наряду с маслonaполненными кабелями высокого давления в трубопроводе в ряде стран (США, ФРГ, Япония) получили газонаполненные

кабели в трубопроводе. При этом конструктивно различают газонаполненные кабели внешнего и внутреннего давления.

В газонаполненных кабелях внешнего давления каждая медная жила, изолированная пропитанной бумажной изоляцией, имеет свинцовую оболочку. Три сложенные вместе освинцованные жилы в общей броне из плоских стальных проволок протаскиваются в стальную трубу, наполняемую азотом под давлением 15 Бар.

В газонаполненных кабелях внутреннего давления в отличие от газонаполненных кабелей внешнего давления газ является частью изоляции. Так как изолированные жилы не имеют свинцовой оболочки, то газ под давлением непосредственно проникает в бумажную изоляцию и предотвращает развитие электрических разрядов.

Потери активной мощности в ГИЛ существенно ниже, чем в кабельных и воздушных линиях. При этом диэлектрические потери ничтожно малы. Кроме того, благодаря внешней оболочке, диаметр которой существенно больше, чем у кабеля, теплоотвод осуществляется более эффективно, следовательно, практически во всех случаях применения ГИЛ можно обойтись без системы охлаждения.

Электрические сети современных мегаполисов развиваются в условиях быстро увеличивающейся плотности передаваемой мощности, снижения управляемости и наблюдаемости сети, обострения социальных и экологических проблем. Поэтому техническое перевооружение электрических сетей должно осуществляться на основе новых инновационных технологий, приводящих к созданию адекватного по своим характеристикам к современным требованиям электрооборудования. Этим требованиям вполне удовлетворяют ГИЛ второго поколения.

Литература

1 Интернет-портал: Российское отраслевое средство массовых информации [Электронный ресурс] / Перспективы применения газоизолированных линий. – Режим доступа : <http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy-primene-niya-gazoizolirovannykh-linij-v>. – Дата доступа : 17.12.2015.

2 Интернет-портал: Статьи об электричестве, энергетике и электроснабжении [Электронный ресурс] / Силовые газонаполненные кабели. – Режим доступа : <http://pue8.ru/kabelnye-linii/131-silovye-gazonapolnennye-ka-beli.html>. – Дата доступа : 18.04.2016.

УДК 621.316.935.1

СПОСОБЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 КВ

Яновская Е.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент ГУБАНОВИЧ А.Г.

Короткими замыканиями (КЗ) называют замыкания между фазами, замыкания фаз на землю (нулевой провод) в сетях с глухо- и эффективно-заземленными нейтральными, а также витковые замыкания в электрических машинах.

Протекание токов КЗ приводит к увеличению потерь электроэнергии в проводниках и контактах, что вызывает их повышенный нагрев. Нагрев может ускорить старение и разрушение изоляции, вызывать сваривание и выгорание контактов, потерю механической прочности шин и проводов и т. п. проводники и аппараты должны без повреждений переносить в течение заданного расчетного времени нагрев токами КЗ, т. е. должны быть термически стойкими.

Протекание токов КЗ сопровождается также значительными электродинамическими усилиями между проводниками. Для защиты токоведущих частей и их изоляции от разрушения принимаются необходимые меры.

В настоящее время разработан комплекс мер, который позволяет регулировать уровни токов КЗ, ограничивать их при развитии электроустановок. Однако применение таких средств не является самоцелью и оправданно только после специального технико-экономического обоснования.

Наиболее распространенными и действенными способами ограничения токов КЗ являются секционирование электрических сетей, установка токоограничивающих реакторов, широкое использование трансформаторов с расщепленными обмотками низшего напряжения БТУ (безынерционные токоограничивающие устройства).

Первый способ является эффективным средством, которое позволяет уменьшить уровни токов КЗ в реальных электрических сетях до двух раз. В месте секционирования образуется так называемая точка деления сети. В мощной энергосистеме с большими токами КЗ таких точек может быть несколько.

Секционирование электрической сети обычно влечет за собой увеличение потерь электроэнергии в линиях электропередачи и трансформаторах в нормальном режиме работы, так как распределение потоков мощности при этом может быть неоптимальным. По этой причине решение о секционировании должно приниматься после специального технико-экономического обоснования.

В распределительных электрических сетях 10 кВ и ниже широко применяется раздельная работа секций шин, питающихся от различных трансформаторов подстанции. Основной причиной, определяющей такой режим работы, является требование снижения токов КЗ, хотя и в этом случае отказ от непосредственной параллельной работы трансформаторов имеет свои отрицательные последствия: разные уровни напряжения по секциям, неравномерная загрузка трансформаторов и некоторые другие. При мощности понижающего трансформатора 25 МВА и выше применяют расщепление обмотки низшего напряжения на две, что позволяет увеличить сопротивление такого трансформатора в режиме КЗ примерно в 2 раза по сравнению с трансформатором без расщепления обмотки.

К специальным техническим средствам ограничения токов КЗ в первую очередь относятся токоограничивающие реакторы.

Реактор представляет собой индуктивную катушку, не имеющую сердечника из магнитного материала. Благодаря этому он обладает постоянным индуктивным сопротивлением, не зависящим от протекающего тока.

В настоящее время наибольшее распространение получили бетонные реакторы с алюминиевой обмоткой марки РБ.

Алюминиевые проводники обмотки реакторов покрываются несколькими слоями кабельной бумаги и хлопчатобумажной оплеткой. Обмотка наматывается на специальный каркас, а затем в определенных местах заливается бетоном. Бетон образует колонны, которые закрепляют витки обмотки, предотвращая их смещение под действием собственной массы и электродинамических усилий при протекании токов КЗ. Изоляция реактора от заземленных конструкций, а при вертикальной установке и от соседних фаз осуществляется при помощи опорных фарфоровых изоляторов.

Бетонные реакторы выпускаются отечественной промышленностью на номинальные токи до 4000 А и изготавливаются для вертикальной, горизонтальной и ступенчатой установки.

Наряду с рассмотренными выше реакторами обычной конструкции в электроустановках находят применение сдвоенные реакторы. Конструктивно они подобны обычным реакторам, но от средней точки обмотки имеется дополнительный вывод.

Также используются реакторы сухого типа. Они стали появляться благодаря разработке новых изоляционных материалов, основанных на кремнийорганической структуре. Она позволяет создавать изделия, успешно работающие на электрооборудовании до 220 кВ включительно.

У масляных реакторов медная обмотка проводников изолируется пропитанной кабельной бумагой и монтируется на изоляционных цилиндрах, помещенных в емкость с маслом либо другим жидким диэлектриком, одновременно выполняющим функцию отвода тепла. Чтобы исключить нагрев металлического корпуса емкости от протекающего по виткам обмотки переменного поля промышленной частоты в подобную конструкцию включают магнитные шунты или электромагнитные экраны.

Реакторы с броней создаются с сердечником. Учитывая возможность насыщения магнитопровода, такие изделия требуют точного расчета и тщательного анализа условий эксплуатации. Броневые сердечники из электротехнических сортов стали позволяют снижать габариты и вес подобных конструкций реакторов, а заодно и стоимость. Но при их использовании требуется обязательно учитывать то обстоятельство, чтобы ударный ток не превышал максимального возможного значения для этого типа устройств.

Также используются безынерционные токоограничивающие устройства различного типа.

Токоограничивающие устройства резонансного типа (РТОУ) – основаны на использовании эффекта резонанса напряжения при рабочих режимах соответствующей цепи и расстройки резонанса при аварийных режимах (в основном эксплуатируются в сетях 6 кВ).

В ТОУ реакторно-вентильного типа используется комбинация реакторов и управляемых вентилялей.

Токоограничивающие устройства со сверхпроводниками – принцип действия основан на переходе (почти мгновенном) сверхпроводника их сверхпроводящего в резистивное состояние при изменении его температуры или напряженности магнитного поля на его поверхности.

Для обеспечения надежной работы энергосистем и предотвращения повреждений оборудования при КЗ необходимо быстро отключать поврежденный участок. К мерам, уменьшающим опасность развития аварий, относится также правильный выбор аппаратов по условиям КЗ, выбор рациональной схемы сети и некоторые другие.

Для осуществления указанных мероприятий необходимо уметь определять ток КЗ и характер его изменения во времени.

Литература

1 Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова – М. : Академия, 2007. – 448 с.

2 Маргулова, Т.Х. Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова – М. : МЭИ, 2002. – 358 с.

УДК 621.31

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Витязев А.С.

Научный руководитель – доцент БОБКО Н.Н.

Математическая модель электрической машины – это система уравнений, описывающих процессы электромеханического преобразования энергии с допущениями, обеспечивающими необходимую точность решения для рассматриваемой задачи.

Начальные условия – это значения интегрированных переменных в момент времени, равный нулю. Начальные значения интегрированных переменных могут быть получены из расчета нормального доаварийного установленного режима генератора. В установленном режиме токи статора симметричны, синусоидальные и определяется подключенной нагрузкой. Токи в смежных обмотках отсутствуют, а ток возбуждения является постоянным. Ротор вращается с синхронной частотой, и скольжение равно нулю.

Основные допущения при составлении математической модели синхронного генератора:

- не учитывается магнитное насыщение генератора;
- в воздушном зазоре машины действуют намагничивающие силы только первой гармоники;
- не учитываются потери на перемагничивание;
- считаем, что обмотки статора выполнены симметрично, а ротор генератора симметричен относительно осей d и q ;
- все демпферные обмотки по оси d заменены одной демпферной обмоткой аналогичной по оси q ;
- при исследовании электромагнитных переходных процессов не учитывают изменение вращения скорости генератора.

Система дифференциальных уравнений ненасыщенного синхронного генератора с учетом успокаивающего контура в физической системе координат имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_j}{dt} &= -u_j - R_j i_j, \\ \frac{d\Psi_f}{dt} &= u_f - R_f i_f, \\ \frac{d\Psi_{\text{эд}}}{dt} &= -R_{\text{эд}} i_{\text{эд}}, \\ \frac{d\Psi_{\text{эq}}}{dt} &= -R_{\text{эq}} i_{\text{эq}}, \\ J \frac{d^2\gamma}{dt^2} &= M_{\text{т}} - M_{\text{эм}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Все переменные величины в системе (1) выражены в именных единицах измерения. Положительные направления токов в обмотках статора и в системе выбраны от генератора к нагрузке, а в обмотке возбуждения – от источников питания к обмотке.

Первые три уравнения системы (1) записаны в неподвижных фазных координатах A, B, C , а уравнения ротора в координатах d, q , движущихся вместе с ротором. Такую систему координат называют непреобразованной, или исходной. Потокосцепление обмоток статора и ротора в этой системе являются периодическими функциями угла и имеют громоздкий вид. Поэтому при моделировании машин, имеющих несимметричный ротор, используют систему d, q координат.

При переходе к d, q координатам цепи ротора и уравнения этих цепей в системе (1) остаются без изменения.

Переход от трехфазной системы координат A, B, C к осям d, q для величины Z выполняется на основе формул линейных преобразований:

$$Z_d = \frac{2}{3} [Z_A \cos \gamma + Z_B \cos(\gamma - 120^\circ) + Z_C \cos(\gamma + 120^\circ)],$$

$$Z_q = \frac{2}{3} [Z_A \sin \gamma + Z_B \sin(\gamma - 120^\circ) + Z_C \sin(\gamma + 120^\circ)].$$

Формулы для обратных преобразований имеют следующий вид:

$$Z_A = Z_d \cos \gamma + Z_q \sin \gamma,$$

$$Z_B = Z_d \cos(\gamma - 120^\circ) + Z_q \sin(\gamma - 120^\circ),$$

$$Z_C = Z_d \cos(\gamma + 120^\circ) + Z_q \sin(\gamma + 120^\circ).$$

Математические модели электрических машин широко используются для исследования электромеханических систем благодаря применению аналоговых и цифровых вычислительных машин. В настоящее время созданы модели, позволяющие исследовать практически любые задачи, встречающиеся в электромашиностроении.

В режиме короткого замыкания генераторов сопротивление нагрузки равно нулю. В режиме короткого замыкания двигателей равна нулю частота вращения. Режим короткого замыкания характерен для начального момента пуска двигателя из неподвижного состояния. При включении обмотки статора на номинальное напряжение ток двигателя достигает больших значений, поэтому длительный режим короткого замыкания опасен для машин, не рассчитанных на работу при таких условиях. Короткое замыкание двигателей и генераторов, проводимое при пониженном напряжении, используется при испытаниях электрических машин для опытного определения ряда их параметров.

Литература

- 1 Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. – Л. : Энергия, 1980. – 296 с.
- 2 Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций / Б. Н. Неклепаев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

УДК 621.316.549

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПУНКТЫ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–35 кВ

Михолап Е.Н.

Научный руководитель – КИСЛЯКОВ А.Ю.

Реклоузер вакуумный РВА/TEL-10-12,5/630 – автоматический пункт секционирования воздушных (воздушно-кабельных) линий электропередачи трехфазного переменного тока частотой 50(60) Гц номинальным напряжением 10(6) кВ с любым режимом работы нейтрали; новое поколение коммутационного оборудования, объединившее в себе передовые технологии микропроцессорной релейной защиты и автоматики (РЗА) и коммутационной техники.

РВА/TEL предназначен для выполнения следующих функций:

- автоматическое отключение поврежденных участков;
- автоматическое повторное включение;
- автоматический ввод резервного питания;
- местная и дистанционная реконфигурация сети;
- самодиагностика;
- измерение параметров режимов работы сети;
- ведение журналов событий в линии;
- дистанционное управление.

РВА/TEL обладает следующими отличительными особенностями:

- отсутствие необходимости в обслуживании;
- интеграция в системы диспетчерского управления;
- многофункциональная релейная защита и автоматика;
- удобство и простота монтажа на опоры линий;
- встроенная система измерения токов и напряжений с обеих сторон коммутационного модуля;
- надежная система бесперебойного питания;
- малые массогабаритные показатели;
- вандалозащищенность.

Коммутационный модуль

Вакуумный выключатель, используемый в реклоузере РВА/TEL, отличается от традиционных исполнений выключателей ВВ/TEL наличием твердой изоляции и меньшим межполюсным расстоянием. Выключатель выполнен на класс напряжения 15,5 кВ, что обеспечивает значительный запас по электрической прочности изоляции реклоузера в целом.

Шкаф управления

Выполнен в виде модульной конструкции, основными элементами которой являются: панель управления, модуль микропроцессора, модуль управления и модуль бесперебойного питания, размещенные в защитном металлическом корпусе.

Модуль микропроцессора обеспечивает работу алгоритмов защит и автоматики, управление РВА/TEL, индикацию, ведение и хранение журналов оперативных и аварийных событий и другие функции.

Релейная защита и автоматика

Решения, реализованные при разработке релейной защиты и автоматики РВА/TEL, принципиально отличаются от традиционных микропроцессорных и электромеханических терминалов РЗА:

- токовая защита реклоузера имеет независимые уставки при различных направлениях потока мощности;
- степень селективности защит может составлять всего 0,1–0,2 с;
- для настройки защит существуют база стандартных времятоковых характеристик;

- возможность работы защит с разными характеристиками в циклах АПВ;
- наличие специальных функций, позволяющих согласовать неограниченное число аппаратов при ограничениях выдержки времени на головных участках.

Реклоузер вакуумный РВ-БЭМН-10/630 включает одинаковые функции реклоузера РВА/TEL-10-12,5/630 компании «Таврида Электрик» и имеет некоторые отличительные особенности

Коммутационный аппарат

Коммутационный аппарат РВВ/12.06.20-М64-D4 состоит из вакуумного выключателя, размещенного в стальном корпусе, и высоковольтных вводов со встроенными трансформаторами тока.

Трансформаторы собственных нужд

В качестве источника собственных нужд используется однофазный масляный трансформатор типа ОМ-1,25/10-У1(УХЛ1). Основное питание шкафа управления осуществляется от ТСН. Для применения на линиях с двусторонним питанием реклоузер может быть укомплектован двумя ТСН, при этом выполняется АВР между ТСН.

Шкаф управления

Шкаф управления реклоузером выполняет функции:

- местного и дистанционного управления коммутационным аппаратом;
- защиты и автоматики пунктов секционирования воздушных линий электропередачи с двухсторонним и односторонним питанием 10 кВ;
- контроль параметров сети;
- связи с верхним уровнем АСУ по GSM – каналу.

Шкаф управления реклоузером оснащён:

- терминалом микропроцессорной релейной защиты (MP750 или MP550), обеспечивающим реализацию функций АВР, АПВ и автоматического отключения повреждённой линии электропередачи в случае короткого замыкания линии или её обрыва;
- устройством Роутер ER75i (иное по заказу) выполняется функция дистанционного управления коммутационным аппаратом по GSM-каналу.

Варианты применения

1) Последовательное секционирование линий с односторонним питанием – используется в радиальных линиях, когда невозможно обеспечить сетевое резервирование от смежных источников.

2) Последовательное секционирование линий с сетевым резервом используется в радиальных линиях с двумя или несколькими смежными источниками питания.

3) Секционирование линий с применением плавких предохранителей – используется при наличии в сети протяженных отпаек совместно с алгоритмом секционирования линий с односторонним питанием или сетевым резервом.

4) Построение открытых распределительных устройств – одним из возможных вариантов применения РВ является его установка на открытых распределительных устройствах и распределительных пунктах.

5) Повышение надежности отдельных потребителей – используется когда требуется обеспечить надежное электроснабжение одного или группы отдельных потребителей.

Литература

1. Васильев, А. А. Электрическая часть станций и подстанций / И. П. Крючков, М. Н. Околович. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций / Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. – М. : Академия, 2004. – 467 с.
3. Руководство по эксплуатации. Реклоузер вакуумный РВ-БЭМН-10/630.
4. Руководство по эксплуатации. Реклоузер вакуумный РВА/TEL-10-12,5/630.

УДК 621.313.126

БЕСЩЕТОЧНАЯ СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Курьян К.П.

Научный руководитель – к.т.н., доцент МАЗУРКЕВИЧ В.Н.

Турбогенераторы, гидрогенераторы, дизель-генераторы, синхронные компенсаторы и двигатели, изготавливаемые в настоящее время, оснащаются современными полупроводниковыми системами возбуждения. В этих системах используется принцип выпрямления трехфазного переменного тока повышенной или промышленной частоты возбудителей или напряжения возбуждаемой машины.

Системы возбуждения обеспечивают следующие режимы работы синхронных машин:

- начальное возбуждение;
- холостой ход;
- включение в сеть точной синхронизации или самосинхронизации;
- работу в энергосистеме с допустимыми нагрузками и перегрузками;
- форсировку возбуждения по напряжению, а также по току с заданной кратностью;
- разгрузку по реактивной мощности, развозбуждение при нарушениях в энергосистемах;
- гашение поля генератора в аварийных режимах и при нормальной остановке;
- электрическое торможение агрегата.

По мере роста единичной мощности синхронных генераторов размеры щеточного аппарата ротора стали неприемлемо большими. Число токоподводящих щеток при допустимой плотности тока 8–10 А/мм выросло до 270 и более. Это потребовало увеличение размеров поверхности токосъемных колец и осложнило конструктивное выполнение самих щеток (их охлаждение и пр.). Диаметр и ширина токосъемных колец на роторе превысили предельно допустимые размеры. Для обеспечен необходимой площади контакта необходимо увеличение числа и ширины щеток, что влечет за собой удлинение консольного конца вала (со стороны возбудителя), повышение биения колец, возрастает количество накапливаемой под щетка медной и угольной пыли, что существенно затрудняет эксплуатацию и необходимость остановки генератора для чистки аппарата.

Поэтому были предприняты меры по созданию бесщеточных систем возбуждения. Для этого возбудитель выполняется как обращенный синхронный генератор: обмотки возбуждения генератора располагаются на статоре, а обмотки якоря (фазы переменного тока) – на роторе. Фазные обмотки подключаются к вращающимся выпрямителям, выпрямленный ток подается в обмотки возбуждения турбогенератора непосредственно – соединительные токопроводы располагаются внутри полого ротора.

Подвозбудители обычно представляют собой трехфазные синхронные генераторы. Вал подвозбудителя сочленяется с валом возбудителя торсионной связью, допускающей некоторое взаимное аксиальное смещение.

Силовые вращающиеся твердые выпрямители могут быть неуправляемый (диодными) и управляемыми (тиристорными).

Бесщеточное возбуждение с неуправляемыми диодными выпрямителями довольно просто, но имеют пониженное быстродействие из-за большой постоянной времени обмотки возбуждения возбудителя.

Бесщеточная диодная система возбуждения выполняется двухканальной. В основной канал входит тиристорный преобразователь на оптотиристорах с системой управления, регулятором напряжения и резервным регулятором. В резервный канал входит тиристорный преобразователь с системой управления и резервным регулятором. В АРН реализован ПИД-закон регулирования напряжения статора с компаундированием по реактивному току и со стабилизацией по первой производной тока ротора. Система АРН обеспечивает поддержание

заданного напряжения с точностью не более 1 % относительно установленной статической к характеристики.

Кроме того, в СВБД часть функций снята с регулятора и передана микропроцессорной системе управления возбуждением – максимальный ток ротора ограничен с учетом его теплового состояния, а перегрузка по токам статора и ротора ограничена в соответствии с заданными тепловыми характеристиками.

Бесщеточный возбудитель представляет собой синхронный генератор обращенного исполнения, якорь которого с обмоткой переменного тока и диодным выпрямителем жестко соединен с ротором возбужденного турбогенератора. Обмотка возбуждения возбудителя расположена на его статоре. Это позволяет обеспечить возбуждение сверхмощных машин, токи возбуждения которых превышают 5500 А, свойственных системе СТН. Выпрямленное номинальное напряжение составляет до 600 В, а выпрямленный номинальный ток до 7800 А. Система охлаждения вращающегося диодного выпрямителя – естественная воздушная.

По сравнению с обычными генераторами бесщёточный имеет ряд преимуществ:

- нет угольной пыли, являющейся причиной электрических пробоев;
- отсутствие изношенных щеток и проточке коллектора якоря;
- меньшее количество механических конструкций даёт более высокую надёжность при минимальных трудозатратах на обслуживание;
- на работу синхронного генератора не влияет климат;
- бесщёточные генераторы просты по конструкции и недороги.

К недостаткам можно отнести то, что данные генераторы могут быть только однофазными и имеют невысокий КПД, что устранимо путем применения системы независимого возбуждения с электронными регуляторами.

Бесщёточные синхронные генераторы в настоящее время активно используются в бензиновых электростанциях, в речных и морских судах – везде, где их применение оправдано требованиями повышенной надёжности и долгого срока эксплуатации.

Литература

1. Васильев, А. А. Электрическая часть станций и подстанций / И. П. Крючков, М. Н. Околович. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Юрганов, А. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А. А. Юрганов. – СПб. : Наука, 1996. – 138 с.
3. Кривенков, В. В. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. В. Кривенков. – М. : Энергоиздат, 1981. – 328 с.

УДК 621.3

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СТАТИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА

Счастливая П.С.

Научный руководитель – ПОТАЧИЦ Я.В.

При коротком замыкании в сети через токоведущую часть аппарата могут протекать токи, в десятки раз превышающие номинальный. При взаимодействии этих токов с магнитным полем других токоведущих частей создаются *электродинамические усилия*. Эти усилия стремятся деформировать как проводники токоведущих частей, так и изоляторы, на которых они крепятся.

Расчет токопроводов при статической нагрузке производят с целью проверки их устойчивой работы при коротких замыканиях (КЗ). Известно, что электрические токи взаимодействуют. Силы взаимодействия проводников с током называют электромагнитными или электродинамическими. Они пропорциональны квадрату тока и достигают наибольших значений при коротких замыканиях.

Действию электродинамических сил подвержены все элементы электрических систем, в том числе токопроводы и электрические аппараты. Электрические аппараты должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы противостоять действию электродинамических сил при КЗ. Под электрической стойкостью понимают способность аппаратов или проводников выдерживать механические усилия.

При проверке проводников и электрических аппаратов электроустановок на электродинамическую и термическую стойкость при КЗ предварительно должны быть выбраны расчетные условия КЗ.

В качестве расчетного вида КЗ следует принимать при проверке жестких проводников с относящимися к ним поддерживающими и опорными конструкциями на электродинамическую стойкость трехфазное КЗ.

Токопроводом (ТП) называется устройство, предназначенное для передачи и распределения электроэнергии, состоящее из неизолированных или изолированных проводников и относящихся к ним изоляторов, защитных оболочек, ответвительных устройств, поддерживающих и опорных конструкций. В качестве проводников используют трубы, а также проводники прямоугольного и корытного сечений.

Многопролетный токопровод с жесткими проводниками представляет собой упругую систему, которая при КЗ под действием электродинамических сил приходит в сложное колебательное движение. Проводники изгибаются и передают нагрузку на опоры, обладающие также некоторой упругостью. В материале проводников и изоляторов возникают значительные напряжения. Токопровод должен противостоять электродинамическим воздействиям, другими словами, он должен обладать электродинамической стойкостью, соответствующей току КЗ.

Анализ частотных характеристик, показывает, что важнейшим параметром ТП, определяющим его электродинамическую стойкость, является основная частота собственных колебаний проводника. Поэтому эта частота должна быть принята в качестве независимого (первого) параметра для упрощенного расчета. Для ТП с жесткими опорами основная частота может быть легко определена, тогда как для ТП с упругими опорами необходима сложная программа для ЭВМ. Однако в этом нет необходимости, поскольку обычно применяемые ТП могут рассматриваться как конструкции с жесткими опорами.

В токопроводах напряжением 110 кВ и выше основная частота f_1 проводников не превышает 10 Гц и опоры обладают некоторой упругостью, которая должна быть учтена при расчете.

Допустимая нагрузка на изоляторы при КЗ принимается согласно ПУЭ равной 60 % минимальной разрушающей нагрузки. А допустимое напряжение в материале проводников согласно ПУЭ принимается равным 70 % временного сопротивления или предела упругости материала.

Токопроводы с гибкими проводниками впервые были применены еще в СССР в 20-х годах при сооружении наружных РУ 110 кВ. Мощности станций в то время были невелики, и объединение их в системы только начиналось. Токи КЗ не превышали 5–10 кА и вопрос электродинамической стойкости ТП не возникал.

Токопроводы применяют для питания крупных потребителей, передачи электроэнергии от электростанции или главной понижающей подстанции при напряжении 6, 10 или 35 кВ к основным цехам предприятия, подсоединения генераторов и трансформаторов большой мощности к сборным шинам РУ, а также для соединения их между собой при работе по схеме блока генератор – трансформатор.

Преимущества токопроводов по сравнению с кабельными связями:

- замена дефицитных кабелей алюминиевыми шинами и неизолированными проводами;
- повышение надежности вследствие отсутствия больших потоков кабелей и большого числа кабельных муфт;
- улучшение условий эксплуатации;
- облегчение условий наблюдения за электроустановкой и устранения неисправностей;
- обеспечение высокого уровня монтажных работ;
- существенное снижение стоимости (жесткие токопроводы дешевле кабельных линий такой же пропускной способности более чем в 2 раза).

На электростанциях для соединения мощных генераторов с трансформаторами и трансформаторов с шинами РУ применяют экранированные токопроводы, отдельные для каждой фазы. Внутри производственных помещений токопроводы выше 1000 В применяют редко и только в закрытом или пыленепроницаемом исполнении, а в помещениях сырых и особо сырых – в брызгозащищенном исполнении. Прокладка открытых токопроводов выше 1000 В в производственных помещениях не допускается.

На мощных тепловых станциях для соединения генераторов с повышающими трансформаторами широко применяются комплекты пофазноэкранированные токопроводы.

К недостаткам токопроводов относят:

- большее индуктивное сопротивление, что приводит к дополнительным потерям напряжения;
- сопротивления фаз различны, что приводит к несимметрии напряжения фаз протяженных токопроводов при токах 2,5 кА и более;
- дополнительные потери электроэнергии в шинодержателях, арматуре и конструкциях при токах 1 кА и более от воздействия магнитного поля;
- следует считаться и с укрупнением единичной мощности токопровода по сравнению с несколькими кабельными линиями.

Для увеличения надежности токопроводы применяются, как правило, состоящими из двух линий с секционированием и автоматическим включением резерва.

Жесткие токопроводы более компактны, чем гибкие, имеют разнообразное крепление к поддерживающим конструкциям.

Литература

- 1 Васильев, А. А. Электрическая часть станций и подстанций / А. А. Васильев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
- 2 Бойченко, В. И. Монтаж токопроводов / В. И. Бойченко. – М. : Энергия, 1984. – 576 с.

УДК 621.315

АДАПТИВНАЯ ЛИНЕЙНАЯ АРМАТУРА С ЭЛЕМЕНТАМИ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Целобанов В.А.

Научный руководитель – ПОТАЧИЦ Я.В.

Линейная арматура – устройство, выполняющее одну или несколько функций: подвешивание и прикрепление проводов, молниезащитных тросов и подвесок к опорам воздушных линий электропередачи и распределительным устройствам; соединение, натяжение, поддерживание и фиксация проводов на заданном расстоянии; гашение колебаний проводов и тросов; составление подвесок; защита гирлянд изоляторов от действия электрической дуги и снижение радиопомех; установка штыревых изоляторов и крепление на них проводов; армирование подвесных изоляторов.

Линейную арматуру, применяемую при закреплении проводов в гирляндах подвесных изоляторов, можно подразделить по назначению на пять основных видов:

– зажимы, служащие для закрепления проводов и тросов, подразделяющиеся на поддерживающие, подвешиваемые на промежуточных опорах, и натяжные, применяемые на опорах анкерного типа;

– сцепная арматура (скобы, серьги, ушки, коромысла), служащая для соединения зажимов с изоляторами, для подвески гирлянд на опорах и для соединения многоцепных гирлянд друг с другом;

– защитная арматура, монтируемая на гирляндах линий напряжением 330 кВ и выше, предназначенная для более равномерного распределения напряжения между отдельными изоляторами гирлянды и для защиты их от повреждения дугой при перекрытиях;

– соединительная арматура, служащая для соединения проводов и тросов в пролете, а также для соединения проводов в шлейфах на опорах анкерного типа;

– распорки, применяемые для соединения друг с другом проводов расщепленной фазы.

Уникальное сочетание физико-механических свойств позволило использовать сплавы с памятью формы практически во всех областях, где могут использоваться металлические материалы, в том числе, в медицине, космосе, добывающей промышленности, производстве всевозможных температурных датчиков и приводов, робототехнике при создании тепломеханических устройств и отработке уникальных технологий.

Сплавы с эффектом памяти формы прежде всего использовались в качестве однонаправленных элементов памяти, первоначально их применили для соединительных муфт. Для муфт использовался сплав Ti-Ni-Fe, температура превращения которого значительно ниже комнатной (150 °С). Внутренний диаметр муфты изготавливался примерно на 4 % меньше, чем наружный диаметр соединяемых труб. При соединении муфта прежде всего погружалась в жидкий воздух и выдерживалась при низкой температуре. В таком состоянии в муфту вводился дорн с определенной конусностью и расширялся внутренний диаметр на 7–8 %.

Эффект памяти формы в сплавах, например, на основе Ni-Ti настолько четко выражен, что диапазон температур можно с большой точностью регулировать от нескольких до десятков градусов, вводя в сплав различные дополнительные легирующие элементы. Кроме того, сплавы на основе Ni-Ti, получившие принятое название во всем мире название нитинол, достаточно технологичны в обработке, устойчивы к коррозии и обладают отличными физико-механическими характеристиками: например, предел прочности нитинола колеблется в пределах 770–1100 МПа, что соответствует аналогичным характеристикам большинства сталей, а демпфирующая способность выше чем у чугуна, высокая пластичность и способность вспоминать форму до миллиона раз.

Эффект сверхупругости реализуется в изделии из сплава с памятью формы, находящемся в температурной зоне стабильного аустенитного состояния. Если при этом

деформировать изделия из сплава с памятью формы, стимулируя тем самым мартенситное превращение при постоянной температуре путем принудительного силового воздействия, то после устранения этого воздействия элемент, словно пружина, полностью вернет себе исходную форму. С той лишь разницей, что в отличие от пружин он будет иметь практически неисчерпаемый ресурс, и, имея форму прямолинейной струны, может быть сверхупруго деформирован на 7–8 % относительной длины, запасая в десятки раз большую, чем традиционная пружина энергию.

Особенностью исполнительных элементов из сплавов с памятью формы является их миниатюрность. Это обусловлено простотой механизма их действия, а также тем, что элемент состоит из одного сплава. На действие таких исполнительных механизмов не влияет среда или атмосфера, а влияет только температура. Следовательно, возможна установка этих элементов в таких средах, как вакуум или вода, при этом нет необходимости в герметизированном подвижном узле, как при установке двигателей или гидropневматических цилиндров.

Материалы с элементами памяти форм могут применяться в простых тепловых двигателях, использующих разность температур горячей и холодной воды или горячей воды и холодного окружающего воздуха. Такие двигатели работают за счет преобразования в механическую энергию низкотемпературной бросовой тепловой энергии, например, энергии горячей отходящей воды, геотермической или солнечной энергии.

Литература

1 Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций : учебное пособие для студентов вузов / Б. Н. Неклепаев. – М. : Высшая школа, 1998. – 586 с.

2 Васильев, А. А. Электрическая часть электростанций : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Васильев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

УДК 621.438

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Хлиманков А.В.

Научный руководитель – КИСЛЯКОВ А.Ю.

Когенерация – процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии.

Двигатель внутреннего сгорания – это тип двигателя, тепловая машина, в которой химическая энергия топлива, сгорающего в рабочей зоне, преобразуется в механическую работу.

Газотурбинная установка – это агрегат, состоящий из газотурбинного двигателя, редуктора, генератора и вспомогательных систем.

Технологическая себестоимость – затратами на сырье и материалы, комплектующие, возвратные отходы, заработную плату рабочим, налоги и отчисления от заработной платы, а также расходы на оборудование.

Цеховая себестоимость – затратами всех цехов и других производственных структур, которые непосредственно участвовали в процессе изготовления определенного набора товаров и услуг.

Производственная себестоимость – прибавления к цеховой себестоимости общезаводских и целевых расходов.

Полная себестоимость – затраты организации не только на выпуск продукции и организацию производственного процесса, но и на ее реализацию, то есть поставку на рынок конечных товаров и услуг.

Топливо – вещество способное выделять энергию в ходе определённых процессов, которую можно использовать для технических целей.

Генератор – устройство, производящее какие-либо продукты, вырабатывающие электроэнергию или преобразующее один вид энергии в другой.

К основным преимуществам когенерационных установок относятся:

- увеличение эффективности использования топлива благодаря более высокому коэффициенту полезного действия;
- снижение вредных выбросов в атмосферу по сравнению с отдельным производством тепла и электроэнергии;
- уменьшение затрат на передачу электроэнергии, так как когенерационные установки размещаются в местах потребления тепловой и электрической энергии, потери в сетях практически отсутствуют;
- возможность работы на биотопливе и на других альтернативных видах топлива;
- бесшумность и экологичность оборудования;
- обеспечение собственных потребностей котельной в электроэнергии.

Со временем выявились несомненные преимущества камер сгорания первого типа. Поэтому в современных газотурбинных установках топливо в большинстве случаев сжигают при постоянном давлении в камере сгорания.

Первые газотурбинные установки имели низкий коэффициент полезного действия, так как газовые турбины и компрессоры были несовершенны. По мере совершенствования этих агрегатов увеличивался коэффициент полезного действия газотурбинных установок, и они становились конкурентоспособными по отношению к другим видам тепловых двигателей.

В настоящее время газотурбинные установки являются основным видом двигателей, используемых в авиации, что обусловлено простотой их конструкции, способностью быстро набирать нагрузку, большой мощностью при малой массе, возможностью полной автоматизации управления. Самолет с газотурбинным двигателем впервые совершил полет в 1941 году.

В энергетике газотурбинные установки работают в основном в то время, когда резко увеличивается потребление электроэнергии, то есть во время пиков нагрузки. Хотя коэффициент полезного действия газотурбинных установок ниже коэффициента полезного действия паротурбинных установок использование их в пиковом режиме оказывается выгодным, так как пуск занимает гораздо меньше времени.

Литература

- 1 Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебник для вузов / Б. Ю. Липкин. – М. : Высшая школа, 1990. – 363 с.
- 2 Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций: учебное пособие для студентов вузов / Б. Н. Неклепаев. – М. : Высшая школа, 1998. – 586 с.
- 3 Самойлов, М. В. Основы энергосбережения: учебное пособие для студентов вузов / М. В. Самойлов. – 2-е изд., стер. – Минск : БГЭУ, 2002. – 198 с.

УДК 621.311.4

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Баран А.Г.

Научный руководитель – д.т.н., профессор СЕРГЕЙ И.И.

Динамика токоведущих конструкций с проводами представляет собой движение упругой многопролетной и многокомпонентной механической системы под воздействием электродинамических усилий (ЭДУ). Изменение взаимного положения проводов влияет на величину и закон распределения по ним ЭДУ. Движение проводов описывается на основе законов и теорем механики. ЭДУ определяются по законам электротехники. При выборе расчетной модели вводятся допущения, идеализирующие провод. Ему придаются свойства и качества, облегчающие решение задачи динамики. В зависимости от степени идеализации провода методы расчета его динамики при КЗ подразделяются на три группы:

- упрощенные, с несколькими степенями свободы провода;
- приближенные, учитывающие дискретное распределение его масс;
- численные методы, учитывающие непрерывное распределение масс.

Упрощенные методы базируются на представлении провода сосредоточенной массой с одной или несколькими степенями свободы и сводятся к решению обыкновенных дифференциальных уравнений. Наиболее простым из них и широко применяемым на практике является метод физического маятника. В нем провод представляется абсолютно твердым телом, все точки которого лежат в одной плоскости, а провода фаз расположены горизонтально. Для повышения точности расчета вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие упругое и температурное удлинение проводов, изменение формы проводов при КЗ, упругую податливость опорных конструкций. Влияние изменения кривой провисания провода на его максимальные отклонения при КЗ учитывается путем его преобразования в равнобедренный треугольник. Учет упругих удлинений провода базируется на законе Гука. Упругость опорных конструкций вводится невесомой пружиной между точкой подвеса и стержнем маятника. Температурное удлинение учитывается для адиабатического нагрева, исходя из действующего значения тока КЗ. При расчете наибольшего отклонения провода во время свободного движения предполагается, что после отключения КЗ провод движется в противоположную сторону и отклоняется на такое же расстояние, что и при вынужденном движении. По-существу, этот метод пригоден лишь для частных случаев расположения проводов при приближенной оценке максимальных отклонений и тяжений проводов без учета конструктивных элементов распределительных устройств (РУ) и воздушных ЛЭП.

Профессор Е.П. Кудрявцев применял расчетную модель провода с одной степенью свободы в виде абсолютно твердого и упругого стержня с осью, очерченной по цепной линии. Для описания динамики стержня использованы уравнения Лагранжа второго рода относительно угловой координаты провода. Е.П. Кудрявцевым составлены многочисленные номограммы, облегчающие определение критериев электродинамической стойкости гибких проводов электроустановок. Однако, представление провода сосредоточенной массой ограничивает возможности упрощенных методов в решении задач динамики проводов при КЗ. Они применимы лишь для частного случая расположения проводов и не могут достоверно учесть влияние различных конструктивных элементов РУ и воздушных ЛЭП.

К приближенным методам расчета относятся методы математического маятника и веревочного многоугольника. Несмотря на простоту и физическую наглядность, метод веревочного многоугольника не имеет строгого обоснования по количеству выбираемых узлов многоугольника, что может привести к искажению результата расчета.

Для упрощения расчетов динамики расщепленной фазы в качестве расчетной схемы большинство исследователей принимают подпролет между двумя соседними распорками.

Влиянием ЭДУ от соседних фаз и движением распорок на параметры динамики фазы пренебрегают и оценивают только влияние электродинамического внутрифазного взаимодействия на $T_{1\max}$ и силу сжатия распорок.

Другим приближенным методом расчета $T_{1\max}$ является энергетический метод, предложенный канадскими учеными Д.Б. Крэйгом и Ж.Л. Фордом. Энергия деформации проводов, а также потенциальная и кинетическая энергия поддерживающих конструкций во время предельного стягивания проводов фазы после схлестывания приравниваются к работе электромагнитных сил за время их схлестывания. При вычислении этой работы принимается, что ток за рассматриваемый промежуток времени не изменяется и остается равным среднеквадратичному току. Допускается, что провода после схлестывания неподвижны и лежат на оси расщепленной фазы.

В основу численных методов положены расчетные модели провода с непрерывным распределением масс. При этом наибольшее применение получила гибкая упругая нить. При таком подходе выполняется точный расчет сложных токоведущих конструкций с проводами, результаты которого совпадают с опытными данными, и вычисляются динамические характеристики любой точки провода. Поэтому численные методы и составленные на их основе компьютерные программы рекомендованы для решения проектных задач. При численном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей движение проводов, применяют методы конечных элементов либо конечных разностей. Решение полученных при этом конечно-разностных алгебраических уравнений производится на каждом шаге по времени итерационными методами.

Гибкие провода РУ и воздушных ЛЭП представляют собой пространственную систему криволинейных проводников, взаимное положение и форма которых под действием ЭДУ непрерывно изменяются. Расчет ЭДУ в такой системе проводников представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Существующие методы расчета ЭДУ в системе гибких проводов основаны на законе Био, Савара и Лапласа для бесконечно тонких прямолинейных проводников. Методы расчета ЭДУ в системе гибких проводов можно подразделить на две группы. К первой следует отнести более простые методы, основанные на допущении неизменности прямолинейной формы проводов в процессе КЗ. При этом может учитываться лишь изменение расстояния между взаимодействующими проводами. В основу этих методов положена формула для вычислений ЭДУ между бесконечно длинными параллельными проводниками. Ко второй группе относятся методы, которые приближенно учитывают криволинейность провода. Провод при этом заменяется ломаной линией. ЭДУ на отрезок определяется как результат действия всех отрезков противоположного провода. В качестве основного выражения для расчета ЭДУ используется закон Био, Савара и Лапласа для двух отрезков, лежащих в одной плоскости. Этот метод не учитывает пространственное положение провода и его изменение во времени.

УДК 621.316

ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОПРОВОДОВ С ЛИТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Лапко Д.А.

Научный руководитель – КЛИМКОВИЧ П.И.

Литые токопроводы разработаны как современные многоцелевые устройства для эффективной и безопасной передачи электроэнергии. Системы литых токопроводов соответствуют всем требованиям для устройств распределения тока в установках низкого и среднего напряжения. Благодаря особенностям конструкции, литые токопроводы имеют преимущества перед другими способами распределения и передачи электроэнергии. К ним можно отнести компактные размеры, простой монтаж, высокую пожаробезопасность, малое электрическое сопротивление, устойчивость к короткому замыканию, отличную химическую устойчивость и др.

Пофазноизолированный токопровод с литой изоляцией типа ТПЛ (SIS) предназначен для выполнения электрических соединений энергетического оборудования на электрических станциях и подстанциях и устанавливается в цепях трехфазного переменного тока частотой 50 и 60 Гц напряжением до 35 кВ, номинальным током до 12000 А и в цепях постоянного тока напряжением до 1,2 кВ, номинальным током до 6300 А. Токопровод состоит из секций различной конфигурации (прямых, с изгибами) длиной не более 10 метров, соединительных муфт, шин и компенсаторов для соединения с выводами генераторов, трансформаторов и шкафов комплектных распределительных устройств.

Секция токопровода (рисунок 1) состоит из алюминиевой или медной токоведущей шины (1) круглого сечения (труба или пруток), покрытой слоем твердой изоляции различной толщины в зависимости от уровня напряжения (3). Внутри этого слоя находятся полупроводящие слои (2) и заземляющий слой (4). Изоляционный слой токопровода напряжением до 1,2 кВ заземляющего и полупроводящих слоев не содержит. На концах секций расположены контакты (5), в которых предусмотрены отверстия для болтового соединения секций между собой и с электрическим оборудованием.

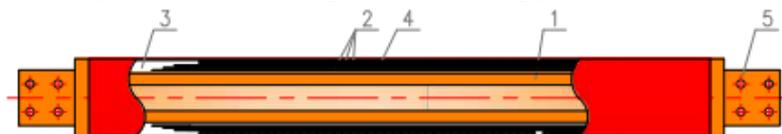


Рисунок 1. Конструкция секции токопровода

Малогабаритный литой токопровод типа ТКЛ предназначен для выполнения электрических соединений в цепях переменного тока напряжением от 0,4 до 24 кВ, номинальным током до 14500 А и частотой 50–60 Гц, а также в цепях постоянного тока напряжением до 33 кВ, номинальным током до 18000 А. ТКЛ предназначен для эксплуатации при температурах окружающей среды от -60° до $+55^{\circ}$ С. Назначенный срок службы составляет не менее 50 лет. Возможны внутреннее и наружное исполнения. Допускается применение литого токопровода во влажной и агрессивной средах. Особенно эффективным является использование литого токопровода в условиях ограниченного пространства.

Токопроводы открытые типа ТПО (номинальным напряжением до 35 кВ, номинальным током до 6300 А) предназначены для выполнения электрических соединений высоковольтного оборудования в открытых и закрытых распределительных устройствах электрических станций и подстанций в цепях трехфазного переменного тока частотой 50 и 60 Гц (рисунок 2).

Шинопровод с литой изоляцией типа POWERDUCT предназначен для выполнения электрических соединений в цепях переменного тока напряжением до 1 кВ, номинальным током до 6300 А, частотой 50–60 Гц, а также в цепях постоянного тока. Конструктивно шинопровод типа POWERDUCT представляет собой пакет медных или алюминиевых

изолированных шин, заключенный в кожух из экструдированного алюминия с ребрами охлаждения (рисунок 3).

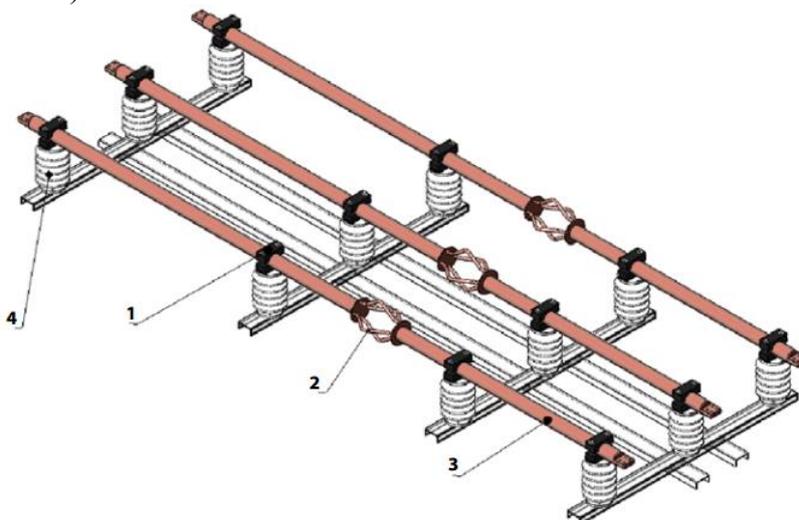


Рисунок 2. Конструкция открытого токопровода типа ТПО

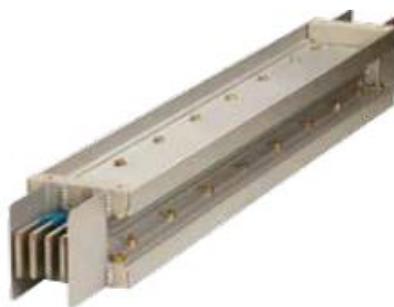


Рисунок 3. Шинопровод типа POWERDUCT

Токопроводы закрытые напряжением 6 и 10 кВ на номинальные токи до 4000 А применяются на электростанциях для электрического соединения трансформаторов со шкафами комплектных распределительных устройств, а также турбогенераторов с повышающими трансформаторами, устанавливаемых в цепях 3-фазного переменного тока частотой 50 и 60 Гц.

Шинопроводы закрытые ШЗК-РТК-0,4 переменного тока напряжением до 1 кВ на номинальный ток до 2500 А частотой 50 и 60 Гц с общей для трех фаз оболочкой предназначены для выполнения электрического соединения трансформаторов собственных нужд мощностью до 1000 кВА с панелями ПСН или шкафами КТПСН-0,5 на электростанциях.

Шинопроводы закрытые ШЗК-РТК-1,2 постоянного тока напряжением до 1,2 кВ на номинальные токи до 6300 А предназначены для выполнения электрического соединения возбuditелей с панелями щитов рабочего и резервного возбуждения генераторов мощностью до 1200 МВт на электрических станциях.

Шинные мосты используются при соединении камер сборных одностороннего обслуживания. Шинные мосты представляют собой сварную или сборную металлоконструкцию, состоящую из кожуха с установленными внутри на опорных изоляторах медными или алюминиевыми токоведущими шинами.

Токопроводы комплектные пофазно-экранированные генераторного напряжения 6, 10, 20, 24, 35 кВ с компенсированным электромагнитным полем типа ТЭНЕ предназначены для электрических соединений на электрических станциях, в цепях 3-фазного переменного тока частотой 50 и 60 Гц турбогенераторов мощностью до 1500 МВт с силовыми повышающими трансформаторами, трансформаторами собственных нужд, преобразовательными трансформаторами и трансформаторами тиристорного возбуждения генераторов.

Токопроводы изготавливаются закрытыми в пофазном исполнении. Это исключает возможность междуфазных коротких замыканий от попадания на шины посторонних предметов и предотвращает доступ персонала к токоведущим частям токопровода.

УДК 621.3

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Васильева А.А., Зарихта К.С., Кисляк В.В.

Научный руководитель – КЛИМКОВИЧ П.И.

Энергосбережение и энергоэффективность – важнейшие задачи по сохранению природных ресурсов.

Специфика повышения энергоэффективности в отдельных секторах экономики вызывает необходимость выделения следующих направлений:

- повышение энергоэффективности в электроэнергетике;
- повышение энергоэффективности в промышленности;
- повышение энергоэффективности в теплоснабжении и коммунальном хозяйстве;
- повышение энергоэффективности в жилищном секторе;
- повышение энергоэффективности в сельском хозяйстве;
- повышение энергоэффективности на транспорте;
- нормативно-законодательное, ресурсное, организационное и информационное обеспечение деятельности по повышению энергоэффективности.

Основные шесть обширных сфер:

- сценарии и стратегии использования альтернативных источников энергии;
- энергоэффективность зданий, бытовых электроприборов, транспортных средств и промышленных объектов;
- более экологически чистые технологии использования ископаемых топлив;
- возобновляемые источники энергии;
- усиление международного сотрудничества.

Политическая поддержка энергоэффективности имеет под собой солидную основу по двум веским причинам.

– Во-первых, повышение эффективности энергопотребления является самой рентабельной стратегией, дающей немедленный результат. В контексте изменения климата внедрение энергоэффективных технологий дает правительствам возможность выиграть время для подготовки экономик своих стран к будущему с низкими выбросами углерода.

– Во-вторых, политические меры по повышению энергоэффективности уже доказали возможность обеспечить значительную экономию энергии. Цель, к которой следует стремиться, – не просто иметь закон «Об энергоэффективности», а, прежде всего, добиться того, чтобы это законодательство создало среду и инструменты для решений, касающихся эффективного конечного потребления, которые должны быть приняты во всех секторах экономики.

Во всем мире профилирующей сейчас является тема так называемого зелёного роста, то есть роста экономик за счёт использования современных, экологически выверенных, энергоэффективных технологий, в том числе с использованием альтернативных источников энергии. Эта тема абсолютно актуальна для нашего государства: имеются нормативы, цели по энергоэффективности. Для того чтобы у предприятий появились экономическая мотивация, побудительные стимулы к тому, чтобы вкладываться в общее оздоровление экологической ситуации, с одной стороны, а с другой стороны – подтягивать уровень своих производств и очистные сооружения, технологические стандарты ведения собственного бизнеса под лучшие мировые образцы – необходимо взаимодействие экологического законодательства с вопросом энергоэффективности.

Энергетика вносит значительный вклад в формирование основных социальных и экономических параметров развития страны, в частности доходов и бюджета. Государственный бюджет, инвестиции, внешняя торговля испытывают сильную зависимость от конъюнктуры на мировых рынках энергоносителей.

Из потребляемой в быту энергии – 70 % – идет на отопление помещений, 15 % энергии расходуется на приготовление пищи, 10 % энергии потребляет бытовая техника и 5 % энергии расходуется на освещение.

С экономической точки зрения-меры по повышению энергоэффективности сосредоточены в трех секторах:

- недвижимост и строительство;
- топливно-энергетический комплекс;
- промышленность и транспорт.

Экономически привлекательны меры с низкими первоначальными инвестициями и относительно быстрой окупаемостью является применение энергосберегающих ламп. Однако это позволяет реализовать только 2 % общего потенциала энергосбережения.

Другая важная мера – установка термостатов и счетчиков тепла. Исследования показали, что наличие термостатов, регулирующих потребление тепла, и установка теплосчетчиков в жилых домах, в результате чего жильцы будут оплачивать только фактически потребляемый объем тепла, позволят сократить сумму счета за отопление на 20 %. Базовые меры по утеплению (например, герметизация плинтусов и других областей утечки воздуха, уплотнение окон и дверей ленточным утеплителем, теплоизоляция чердачных помещений и пустот в стенах) позволят сократить потребление тепла еще на 20 %.

Барьеры, сдерживающие развитие энергосбережения и энергоэффективности, можно разделить на четыре основные группы:

1. Недостаток информации.
2. Необходимость значительных объемов начальных инвестиций.
3. Отсутствие стимулов.
4. Слабая организация и координация действий.

Прежде был еще один барьер – недостаток технологий. Но на сегодня такого ограничения больше не существует. Рынок предлагает широкий выбор энергоэффективного оборудования, материалов, а также консультационных услуг по вопросам энергосбережения и энергоэффективности.

Недостаток информации. Информационное и мотивационное обеспечение подготовки и реализации решений по энергосбережению и энергоэффективности развито слабо. Стереотипы поведения («делай, как все»), то есть практически не делай ничего для экономии энергии, так широко распространены именно потому, что они избавляют как от поиска информации, так и от принятия самостоятельных решений.

Недостаток опыта финансирования проектов в сфере энергоэффективности со стороны инвестиционных банков. Требования к выделению финансовых средств на реализацию проектов по повышению энергоэффективности и снижению издержек, как правило, существенно более жесткие, чем к проектам, связанным с новым строительством. Больше всего это касается тех предприятий, которые находятся в тяжелом финансовом положении и в силу этого не располагают собственными средствами для решения проблем энергосбережения и энергоэффективности. Для них непреодолим тест на финансовую устойчивость и, следовательно, невозможно получение кредитных ресурсов на развитие.

Недостаток организации и координации имеет место на всех уровнях принятия решений. Проблема повышения энергетической эффективности не воспринимается как средство решения широкого комплекса экономических и экологических проблем. Реализация ключевого приоритета «Энергетической стратегии России до 2020 года» – увеличения энергоэффективности экономики не обеспечена в полной мере организационными и финансовыми ресурсами. Наблюдается отсутствие согласованности различных областей законодательства: градостроительное планирование не связано с развитием энергосистем; законодательство о госзакупках не содержит требований по энергоэффективности и т. д.

Важно организовать четкое взаимодействие с бизнес-сообществом, а также задействовать человеческий фактор, обеспечив информационную и образовательную поддержку мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности использования топливно-энергетических ресурсов на международном, региональном и муниципальном уровнях.

УДК 621.316

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП С РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗОЙ

Тукай П.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

Задачей проектирования компактных воздушных линий (ВЛ) с уменьшенными междуфазными расстояниями является предотвращение сближения проводов фаз при воздействии на них электродинамических усилий от токов короткого замыкания (КЗ). Для стабилизации воздушных промежутков ВЛ со сближенными расщепленными фазами разработаны междуфазные распорки на основе стеклопластиковых стержней.

Особенностью динамики токоведущих конструкций с гибкими проводами при КЗ является сближение и даже схлестывание соседних фаз. Второй неблагоприятный фактор электродинамического действия тока КЗ проявляется в виде динамических нагрузок в проводах, гирляндах и других элементах ВЛ, в два и более раз превышающих тяжения нормального режима. В общем случае электродинамическая стойкость расщепленной фазы ВЛ характеризуется тремя сдвинутыми во времени максимумами тяжения проводов. Стягивание проводов фазы при КЗ на большей части пролета обуславливает значительные силы сжатия, действующие на дистанционные распорки.

Расщепленная фаза ВЛ в пределах одного пролета рассматривается при КЗ как единая колебательная система, состоящая из гибких и жестких элементов. Провода фазы представляются однородной упругой нитью, не сопротивляющейся изгибу и кручению. Запись уравнений движения гибкой нити при КЗ производится в векторно-параметрической форме. Это позволяет выполнить расчет динамики схлестывания проводов ВЛ при различном расположении на опорах ВЛ.

Проведенные исследования показали, что междуфазные распорки препятствуют также образованию отложений гололеда на поверхности проводов и возникновению их пляски. Сохранение безопасных междуфазных расстояний достигается установкой распорок в критических точках длины пролета, которыми могут являться точки наибольшего провеса проводов или $1/4$, $1/3$, $2/3$, $3/4$ части длины пролета. В общем случае места установки изолирующих распорок зависят от длины пролета, схемы подвески и сечения проводов, междуфазных расстояний, величины тока КЗ, рельефа местности и климатических условий. Одним из основных параметров, определяющих работоспособность междуфазных изолирующих распорок на ВЛ, является их механическая прочность на продольное сжатие. Получение необходимой прочности на продольное сжатие распорок является сложной задачей. В эта задача решена использованием специальной конструкции распорки с поясами жесткости.

В энергосистеме широко применяются токоведущие части с гибкими проводниками, которые в пролётах увеличенной длины имеют ряд преимуществ по сравнению с жесткими проводниками. Для различных классов напряжения используются воздушные пролёты с расщепленными проводами. Они применяются для увеличения пропускной способности линий при использовании стандартных марок проводов и для уменьшения и исключения коронирования при напряжении 330 кВ и выше. Различают гибкие открытые токопроводы напряжением 6–10 кВ систем электроснабжения крупных промышленных предприятий с небольшой кратностью расщепления, а также генераторные токопроводы с большой кратностью расщепления.

Для предотвращения схлестывания они оснащаются как внутрифазными, так и междуфазными распорками. Наблюдается тенденция применения компактных воздушных линий с уменьшенными междуфазными расстояниями напряжением 110–220 кВ, надежность работы которых обеспечивается применением междуфазных распорок типа РМИ.

Изучая опыт зарубежного линейного строительства, можно отметить, что строительство воздушных линий в компактном исполнении становится все более востребованным. За рубежом это направление успешно развивается уже несколько десятилетий. Необходимо также отметить, что выбор конкретных материалов и конструктивных решений, применяемых для строительства компактных ВЛ, конечно же зависит от класса напряжения этих ВЛ. Для обеспечения их надежной работы в эксплуатации необходима проверка их работоспособности без опасного сближения и схлестывания при КЗ.

Основным параметром электродинамической стойкости электроустановки является ток электродинамической стойкости, который в ряде случаев указывается заводом изготовителем. Для гибких проводников этот ток может быть определен лишь путем анализа динамических характеристик проводов при различных видах короткого замыкания. Указанный анализ выполнен по разработанной в процессе выполнения НИР компьютерной программе LineM. В качестве исходных данных для анализа приняты физико-механические параметры и геометрические характеристики типовых компактных ВЛ 110–220 кВ. Варьируемыми параметрами являлись величина тока КЗ, стрелы провеса и тяжения проводов, а также количество междуфазных распорок в пролете. Также в расчетах учитывались внутрифазные распорки, которые представлялись жесткими стержнями. Таким образом расчетные параметры электродинамической стойкости получены с учетом влияния как междуфазных, так и внутрифазных распорок. Шаг расщепления фаз принят равным 0,4 м. Основным варьируемым параметром являлось расстояние между междуфазными распорками в пролете. Схема их расстановки на первом этапе исследования – равномерная.

Литература

1 Сергей, И.И. Расчет сил сжатия дистанционных распорок расщепленных фаз при коротком замыкании / И.И. Сергей, Я.В. Потачиц // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 3. – С. 5–12.

2 Потачиц, Я.В. Оценка сил сжатия дистанционных распорок расщепленной фазы при коротком замыкании / Я.В. Потачиц, И.И. Сергей // Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции: в 7 т. – Иваново : ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2014. – Т. 3. Ч. 2. – С. 137–141.

3 Сергей, И.И. Компьютерная программа для расчета электродинамической стойкости воздушных линий электропередачи / И.И. Сергей, Е.Г. Пономаренко, П.И. Климович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы двенадцатой международной научно-технической конференции: в 4 т. / БНТУ. – Минск : БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 8.