



**“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция**

**7 - 9 İyun June 2005 №132 səhifə page 502-506
Июнь 2005 №132 стр. 502-506**



Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

О КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕПОЛНОФАЗНОЙ РАБОТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

ГАШИМОВ А.М., БАБАЕВА А.Р.

*Институт Физики НАН Азербайджана
AZ 1143, Баку, пр. Г.Джавида, 33
e-mail: arif@physics.ab.az*

Достоверный путь анализа неполнофазных режимов ЛЭП, приводящих к возникновению опасных перенапряжений в многофазных цепях - это моделирование волновых процессов с помощью компьютерных программ, которые должны иметь возможность моделирования ЛЭП с распределенными параметрами с учетом влияющих факторов, узловых точек с сосредоточенными параметрами и защитных устройств, а также адаптации разработанных вычислительных алгоритмов решения уравнений электромагнитных переходных процессов к компьютерному моделированию. В Институте Физики были разработаны численный метод, алгоритм и программы для расчета волновых процессов в сложных сетях.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА НЕПОЛНОФАЗНОЙ РАБОТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ.

Проведенные исследования по анализу отключений линии электропередачи в сложных энергосистемах, таких, как Азербайджанская, выявили возникновение для таких энергосистем сложного электромагнитного колебательного процесса, имеющего общесистемное значение с точки зрения количества и длительности аварийных отключений и ограничений.

Для повышения эффективности противоаварийного комплекса необходимо, чтобы разрабатываемые варианты мероприятий по защите от перенапряжений рассматривались совместно с вариантами развития компьютерной техники и методами математического моделирования.

Создание эффективной системы защиты от перенапряжений в электрических сетях высокого напряжения, обеспечивающие снижение аварийности при развитии энергетики, производства, транспорта и распределение электрической энергии, являются в настоящее время одной из основных задач повышения надежности энергосистемы. Выбор наиболее подходящего устройства для защиты от перенапряжений при неполнофазном режиме работы ЛЭП в значительной степени требует разработки новых компьютерных моделей этих режимов, т.к. здесь нецелесообразно простое копирование (повторение) имеющихся моделей в систему защиты, основанной на компьютерной обработке исходной информации и выработке команд для запуска защиты.

Важное значение для повышения эффективности функционирования и обеспечения устойчивого защитного мероприятия от перенапряжений при развитии электроэнергетики имеют совершенствование методических основ, математических моделей и программного обеспечения и объединение некоторых устройств в едином комплексе применительно к новым условиям.

Для решения этих задач в настоящее время продолжается разработка большого числа соответствующих математических моделей, алгоритмов и программ. Вместе с тем, актуальность разработки математических моделей для компьютерного моделирования режимов в сложных электрических сетях, приводящих к возникновению перенапряжений, и ее защиты не снижается, а, наоборот, повышается.

В частности, требуется развитие методов математического моделирования, алгоритмов и программных комплексов при компьютерном моделировании неполнофазной работы линии электропередачи с учетом средств, осуществляющих защиту от перенапряжений, возникающих от этих режимов, в том числе использование ОПН, а также с учетом необходимости адаптации существующего программного обеспечения к новым условиям. Для этого необходимо повысить эффективность разработанных моделей и алгоритмов, повысить устойчивость защитных устройств и воссоздать на новых принципах, основанных на компьютерном моделировании, более надежные устройства с постепенным замещением устаревших средств ограничения перенапряжений.

Для создания компьютерной модели неполнофазной работы линии на современном этапе были рассмотрены основные принципы построения указанной модели на основе существующего математического моделирования расчета волновых процессов в сложных электрических сетях, коммутации шунтирующего реактора на линии электропередачи и феррорезонансные перенапряжения при неполнофазном включении фазы линии. В процессе решения данной задачи и разработки новых эффективных защитных средств от перенапряжений будут рассматриваться некоторые варианты создания модели как для отдельных элементов сети, так и в сочетании отдельных элементов сети в совокупности. Волновые процессы, которые в этом случае могут возникать в исследуемой сети, должны учитываться в указанном процессе в едином компьютерном моделировании.

Решение задачи волновых переходных процессов при неполнофазной работе линии в многопроводных цепях представляет интерес для расчетов перенапряжений и режимов ограничения ее с помощью предложенного устройства. Однако, решение этих задач представляет определенные математические трудности и чаще всего требует использования численных методов.

Экспериментальное изучение указанных процессов имеет свои специфические сложности. Аналитическое решение задачи неполнофазной работы многопроводной линии с учетом защиты устройств носит достаточно сложный характер даже для случая без учета защитных устройств.

Используемые в последнее время численные методы для расчета электромагнитных волновых процессов привели к достоящему ожидаемым результатам, хотя и позволили создать новую модель и алгоритм при компьютерном моделировании неполнофазного режима работы линии с учетом защитных устройств.

Анализ поиска решения поставленной задачи разработки методик расчета неполнофазной работы линии на этапе проектирования и создания линии электропередачи с учетом новых перспективных устройств защиты от перенапряжений пока является развитие компьютерного моделирования, достоверность которых можно определить по экспертным оценкам в процессе сравнения с результатами известных опытов.

Если численные методы расчета волновых процессов при расчетах феррорезонансных процессов применяется довольно широко, то разработанные в Институте Физики указанные методы для расчета неполнофазных режимов линии и коммутации на нее шунтирующего реактора используются заметно реже. Однако, в последнее время появились работы по регулируемым шунтирующим реакторам, указывающие на возможные пути расширения его использования на линиях высокого напряжения, и поставили задачи расширения возможностей численных методов, алгоритмов и программ для компьютерного моделирования работы этих реакторов при неполнофазной работе линии.

Как известно, задача моделирования неполнофазной работы линии возникает в связи с необходи-

мостью координации изоляции оборудования от перенапряжений, связанных с переходным процессом в линии. Среди факторов, влияющих на кратности и длительности перенапряжений, отмечаются многофазность схемы, учет поверхностного эффекта и коронирования проводов линии, последовательность срабатывания фазы выключателей шунтирующего реактора, правильный учет характеристик намагничивания трансформатора и т.д. Поэтому предложенная модель должна фактически описывать электромагнитный процесс с учетом указанных факторов и защитных устройств.

Модель должна иметь более широкую возможность применения, чем известные, имеется ввиду разработанная в Институте Физики НАН Азербайджана. Прежде всего, она относится к случаю компьютерного моделирования с использованием уже имеющихся алгоритмов и программ расчета волновых процессов в сложных электрических цепях.

Расчеты переходных процессов на основе моделей электрических процессов при неполнофазных режимах должны сопровождаться проверкой необходимости подключаемых защитных устройств, где прибавляются уравнения этих устройств с выбранным начальным условием. Проверка условия подключения в середине расчета прибавляет еще дополнительную систему уравнений, связанную с громоздкими вычислениями.

Возможен упрощенный подход, основанный на разделении узловых точек в цепях с распределенными параметрами, т.е. линиями электропередачи, апробированными при решении некоторых практических задач с помощью численного метода и алгоритма, разработанного в Институте Физики НАН Азербайджана.

При этом обосновываются и уточняются не только известные алгоритмы расчета волновых процессов, которые возможно успешно применять при анализах неполнофазной работы линии, но приводятся и новые упрощенные модели, отличающиеся от известных.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМИРОВАНИЮ АДЕКВАТНОЙ МОДЕЛИ НЕПОЛНОФАЗНОЙ РАБОТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.

Электроэнергетика – одна из важнейших областей применения методов и средств математического и компьютерного моделирования, которые широко используются во всех отраслях электроэнергетического комплекса, в том числе линиях электропередачи (ЛЭП). Высокая степень сложности и многоплановость этой области человеческой деятельности приводит к тому, что ее исследования, основанные на моделировании, как правило, ограничиваются рамками конкретных задач, а систематизация, классификация, создание обобщенных подходов к исследованиям достаточно затруднительны. В то же время, создание обобщенного подхода к комплексному моделированию в электроэнергетике, в том числе передачах и распределении электроэнергии – весьма важная и актуальная задача, поскольку лишь на его основе возможно максимально полное и системное исследование переходных процессов с

учетом защитных устройств при неполнофазной работе линии. Развитие энергетики именно в последние годы привело к существенно более широкому пониманию моделирования.

Основной проблемой моделирования в электроэнергетике является построение обобщенной математической модели, обоснование ее адекватности и достоверности, создание алгоритмов и программ ее компьютерной реализации, а также методов использования модели для достижения нормального режима функционирования защитного устройства в целом, так и отдельных его составляющих.

Методические основы, математические модели и методы исследования и обеспечения надежности электрических сетей высокого напряжения постоянно развиваются.

Математическое моделирование является в настоящее время одним из основных средств как отдельных элементов, так и режимов работы электрических систем.

Как известно, математическая модель представляется системой дифференциальных уравнений, обычно упрощенных по сравнению с теми, которые входили или должны были бы входить в общую модель. Математическая модель содержит алгоритмы и программы для решения, а также набор начальных и граничных условий. В настоящее время математическое моделирование приобрело статус самостоятельной науки, которая имеет предмет, цели, задачи, богатый арсенал методов и средств исследования с учетом современной вычислительной техники. В [2,3] анализируются принципы построения и особенности полной и основных упрощенных моделей переходных и установившихся процессов в сложных электроэнергетических системах. Однако при анализе не в полной мере рассматриваются вопросы моделирования на основе современных информационных технологий. Анализ ряда комплексов программ по моделированию установившихся режимов работы показывает, что вопросам создания единой модели объекта моделирования уделяется недостаточно внимания. Переходные процессы, приводящие к возникновению перенапряжений, вообще не рассматриваются. Комплексы программ используют внешние логические модели согласно современным информационным технологиям, что приводит к определенным трудностям взаимодействия пользователя с персональным ЭВМ при проведении многовариантных исследований. Это обусловлено объективными факторами. Применение ПЭВМ развивалось, как известно, по двум направлениям использования.

Первое направление – применение вычислительной техники для выполнения численных расчетов, которые слишком долго или вообще невозможно производить вручную. Становление этого направления способствовало интенсификации методов численного решения сложных математических задач, развитию класса языков программирования, ориентированных на удобную запись численных алгоритмов.

Второе направление – это использование средств вычислительной техники в автоматизированных информационных системах. Второе направление возникло несколько позже первого. Это связано с тем,

что на заре вычислительной техники компьютеры обладали ограниченными возможностями в части памяти, что было не очень существенно для чисто численных расчетов. Даже если программа должна обработать большой объем информации, при программировании можно продумать расположение этой информации во внешней памяти, чтобы программа работала как можно быстрее [1].

Современные электронные вычислительные машины в настоящее время являются эффективным средством для математического моделирования сложных задач электроэнергетики. Они позволяют проводить расчеты при наиболее полном описании объектов. Однако, в этих случаях проведение расчетов становится весьма трудоемким, так как требует от исполнителей большой подготовительной работы.

Очень часто в электроэнергетике возникает необходимость получать решения задач в числовой форме. Метод математического моделирования, основанный на построении и исследовании математических моделей различных объектов; процессов и явлений и получении информации о них из решения связанных с этими моделями математических задач, стал одним из основных способов исследования в электроэнергетике.

Формой метода математического моделирования, основанной на мощной вычислительной базе в виде ЭВМ и программного обеспечения (MATLAB, MATCAD и др.), реализующего алгоритмы численного решения, является вычислительный эксперимент, рассматриваемый как новый теоретический метод исследования различных явлений и процессов. Этот теоретический метод включает существенные черты методологии экспериментального исследования, но эксперименты выполняются не над реальным объектом, а над его математической моделью, и экспериментальной установкой является ЭВМ [4].

Технологическая цепочка вычислительного эксперимента включает в себя следующие этапы [5]:

- построение математической модели исследуемого объекта (сюда же относится и анализ модели, выяснение корректности поставленной математической задачи);
- построение вычислительного алгоритма – метода приближенного решения поставленной задачи и его обоснование;
- программирование на основе разработанного алгоритма на ЭВМ и его тестирование;
- проведение серии расчетов с варьированием определяющих параметров исходной задачи и алгоритма;
- анализ полученных результатов.

Каждый из этих этапов допускает возврат к любому из предыдущих с целью его уточнения и корректировки [6].

Как правило, алгоритмы приближенного решения базируются на том, что исходная математическая задача заменяется (аппроксимируется) некоторой более простой, или чаще, последовательностью более простых задач. Решение этих более простых задач трактуется как приближенное решение задачи исходной. Т.е. фактически используется некоторая модель исходной задачи.

ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНОЙ РАБОТЕ ЛИНИИ И ЕЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Требования надежного электроснабжения потребителей определяют необходимость исследования неполнофазных режимов работы электрических сетей, приводящих к повреждению электрооборудования и недоотпуску электроэнергии и разработки мероприятий по их предотвращению и ликвидации.

Как известно, в электрических сетях при оперативных переключениях, неполнофазных включениях, перемежающихся дуговых замыканиях на землю, при взаимодействии нелинейных индуктивностей намагничивания магнитопроводов трансформаторов с емкостями электрооборудования электрических систем, возникают феррорезонансные явления. Феррорезонансные явления могут вызывать на шинах распределительных устройств длительные перенапряжения, опасные для ограничителей перенапряжений и других оборудования распределительных устройств (РУ). Феррорезонансные явления могут наносить большой материальный ущерб, то как отмечалось выше проведение натуральных экспериментов становится практически невозможным. В связи с этим анализ феррорезонансных схем, основанный на математическом моделировании и численном расчете, представляется наиболее эффективным и целесообразным.

Анализ феррорезонансных схем методами математического моделирования требует наличия соответствующей методики, использование которой позволяет получать как качественные, так и количественные характеристики исследуемого процесса [7].

Феррорезонансные схемы анализируются на основании расчета переходных и установившихся процессов участков сетей, описанных с помощью систем нелинейных дифференциальных уравнений состояния электрических цепей, с определением токов и напряжений в цепи во времени. Так как феррорезонансные схемы относятся к нелинейным электрическим цепям, то в отличие от линейных, где соблюдается принцип наложения, в данном случае не существует общих приемов аналитического решения нелинейных дифференциальных уравнений [8,9]. В нелинейных цепях всякое изменение формы и амплитуды действующего сигнала приводит к новой задаче с новым решением.

В работе [7] расчет феррорезонансных схем проводится путем составления уравнений цепи с использованием аналитической аппроксимации нелинейных характеристик намагничивания трансформаторов и их решения методами численного интегрирования [9].

При применении в расчетах методов численного интегрирования требуются средства вычислительной техники. Кроме того, при расчете «жестких» систем дифференциальных уравнений имеющих переменные, изменяющиеся со скоростями, отличающимися друг от друга на несколько порядков, к которым относятся уравнения состояния феррорезонансных схем, необходимо проанализировать численную устойчи-

вость и величину погрешности конкретного выбранного метода [10].

Если имеет место неполнофазная работа цепи, то нарушается симметрия проводимости фаз. Причинами этого являются отрывы проводов, нарушение контактов заградителей высокочастотной связи, неполнофазные операции выключателями, одновременное размыкание контактов выключателей и разъединителей. Феррорезонансные схемы сетей 110 кВ при неполнофазных режимах работы имеют участки воздушных линий электропередачи. На результаты расчетов в значительной степени оказывает влияние математическое описание процессов, протекающих в этих линиях.

При расчете систем нелинейных дифференциальных уравнений состояния феррорезонансных схем с помощью приближенных методов численного интегрирования [11,12] эффективность этих методов для расчета определенного класса задач может сильно отличаться. Эффективность конкретного метода зависит от достаточной точности численного решения и требуемого для расчета времени [13]. Эти два фактора тесно взаимосвязаны, так как увеличение точности влечет за собой увеличение времени расчета. Исходя из этого, определяются методы численного интегрирования, имеющие оптимальное состояние указанных факторов при расчете феррорезонансных схем.

Точность численного решения и расчетное время во многом зависят от выбора шага интегрирования, порядка локальной ошибки и численной устойчивости метода. Под численной устойчивостью метода понимается свойство уменьшения локальной ошибки при переходе к следующему шагу интегрирования [13]. Оптимальный порядок локальной ошибки для расчета рассматриваемого класса схем имеют методы четвертого порядка. Выбор шага интегрирования и численная устойчивость метода зависят от математического описания уравнений состояния.

Системы уравнений состояния феррорезонансных схем относятся к «жестким» нелинейным системам [14], так как они имеют производные, изменяющиеся с большой или малой скоростью, отличающейся на несколько порядков. Для численного решения подобных уравнений используются неявные методы численного интегрирования, позволяющие в широком диапазоне изменять шаг интегрирования при переходе к участкам с другой скоростью изменения решения, сохраняя при этом численную устойчивость. Неявные методы численного интегрирования с данной точки зрения по сравнению с явными являются более предпочтительными. При использовании неявных методов можно выбирать шаг интегрирования достаточно большим, и исходя только из условий получения необходимой точности. В этом случае на каждом шаге решается система нелинейных алгебраических уравнений.

К настоящему времени не существует общих методов решения «жестких» нелинейных систем дифференциальных уравнений [15]. Можно оценить численную устойчивость метода интегрирования и спрогнозировать его поведение только при расчете систем линейных дифференциальных уравнений.

Поэтому, круг выбора ограничивается методами расчета «жестких» систем линейных уравнений и на основании результатов вычислительных экспериментов определяются оптимальные из них.

Феррорезонансные явления проявляются в электрических сетях с различным номинальным напряжением и способом заземления нейтралей силовых трансформаторов. Возникновение и протекание феррорезонансных явлений определяется параметрами феррорезонансных схем: параметрами линий электропередачи, набором и характеристиками электрооборудования электрических станций и подстанций. Для исследования протекания процессов в феррорезонансных схемах актуальной является задача анализа влияния параметров расчетных феррорезонансных схем на характер переходных процессов и величин перенапряжений и токовых перегрузок.

Причинами неполнофазных режимов питания силовых трансформаторов и возникновения феррорезонанса могут быть: перегорание плавких вставок высоковольтных предохранителей в одной или двух фазах, неполнофазные коммутации разъединителями или выключателями, обрывы проводов воздушных линий.

Возникновение феррорезонанса в [16] известно как серийный (последовательный) феррорезонанс.

Такие системы обычно имеют низкие потери и, следовательно, колебания существуют в течение длительного периода времени. Последовательное перенапряжение насыщает ярмо трансформатора, что приводит к его повреждению. В зависимости от момента переключения (начальных условий), такие феррорезонансные колебания имеют гармоническую или субгармоническую частоту [17]. Возможное возникновение квазипериодических последовательных феррорезонансных колебаний показано в [18], хотя в практике об их возникновении не сообщалось. Для изучения условий возникновения квазипериодических колебаний не существует простых аналитических методов. В [19] эти условия получены путем решения системы уравнений с использованием метода гармонического баланса.

Анализу возникновения параллельного феррорезонанса посвящены ранние работы [20-21].

Таким образом, с помощью разработанной компьютерной модели, алгоритма и программы исследованы феррорезонансные процессы в сети 110кВ при неполнофазном включении линии с силовыми трансформаторами мощностью 10МВА, 20МВА и 40МВА с учетом ОПН и без него.

- [1]. Заболотный И.П., Павлюков В.А. Применение компьютерных технологий для управления электрическими системами // Технічна електродинаміка, спеціальний випуск, 1998, с.90-99.
- [2]. Баринов В.А., Севалов С.А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления. М.: Энергоатомиздат, 1990, 440с.
- [3]. Лысяк Г.Н., Стряпан В.Н., Данилюк А.В. Математическое моделирование установившихся режимов электрических систем переменного тока / К.: УМК ВО, 1990, 104с.
- [4]. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989, 608с.
- [5]. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. М.: Наука, 1981, 250с.
- [6]. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш. шк., 1985, 536 с.
- [7]. Антонов Н.А. Анализ феррорезонансных схем электрических сетей 110-500 кВ методами математического моделирования: Авторф.дис. ... канд. тех. наук. Иваново, 1998, 23 с.
- [8]. Heuck K., Rosenberger R., Deftman K., Kegel R. Ferroresonanz vor allem in Netzen mit Spannungswandlern. Etz Bd. 1988, N.17, s. 780-783.
- [9]. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. М.:Высшая школа, 1977, 272с.
- [10]. [10]. Ершевич В.В., Зейлигер А.Н., Илларионов Г.А. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1985, 352с.
- [11]. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1985, 544с.
- [12]. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.:Наука,1973, 832с.
- [13]. Чуа Л.О., Лин Пен – Мин. Магнитный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы. Перев с англ. М.: Энергия, 1980, 640с.
- [14]. Дружинин В.В. Магнитные свойства электро-технической стали. М.: Энергия, 1974, 240с.
- [15]. Мамедов Г.А. Переходные процессы в цепных схемах. Баку, Элм, 1997, 164 с.
- [16]. Bornard P., Collet B., Kieny C. Protection of EHV power systems against ferroresonance / CIGRE, 1990, p. 34-103.
- [17]. Germond A. Computation of ferroresonant over-voltages in actual power systems by Galerkin's method / PICA Conference. New Orleans, 1995, p. 142-148.
- [18]. Araujo A., Soudack A., Marti J. Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour // Proc. ПЕЕС, 1993, p. 237-240.
- [19]. Chakravarthy S., Nayar C. Quasiperiodic (QP) oscillations in electrical power systems // Electrical Power and Energy systems, 1996, No.8, p. 483-492.
- [20]. Rusck S. Ferroresonance in voltage transformers // ASEA Journal, 1957, No 1-2, p. 1-3.
- [21]. Hayashi C., Nonlinear oscillations in physical systems. New-Jersey: Princeton University Press, 1985, 356 p.