

Евгений В. Дмитриев, Ариф М. Гашимов, Айтек Р. Бабаева

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПОЛНОФАЗНОЙ РАБОТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ПРИВОДЯЩЕЙ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Институт Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

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 40 МВА с учетом ОПН и без него. Предложена математическая модель процесса коммутации линии с шунтирующим реактором.

Ключевые слова: феррорезонанс, математическое моделирование, шунтирующий реактор, переходный процесс.

В электрических сетях в неполнофазных режимах при взаимодействии нелинейных индуктивностей намагничивания магнитопроводов трансформаторов с емкостями электрооборудования электрических систем возникают феррорезонансные явления. Феррорезонансные процессы вызывают на шинах распределительных устройств (РУ) длительные перенапряжения, опасные для ограничителей перенапряжений (ОПН) и другого оборудования РУ.

Для подавления феррорезонансных перенапряжений при неполнофазном включении линии предложены различные средства защиты, каждое со своими достоинствами и недостатками.

Актуальность проблемы наиболее полного изучения феррорезонансных процессов при несимметричных коммутациях линии электропередачи (ЛЭП) с силовыми трансформаторами и предлагаемые различные мероприятия подавления этих перенапряжений определяют необходимость адекватности в применении достоверного описания процессов, протекающих в сложных электрических сетях при различных способах воздействия на них. Данная работа направлена на заполнение ряда известных пробелов в этой части компьютерного моделирования переходных волновых процессов, а именно: описание процесса феррорезонансных перенапряжений и токов в изучаемых цепях с учетом устройств ОПН и при организации подавления феррорезо-

нансных перенапряжений с помощью компьютерного моделирования. До настоящего времени вопросы изучения феррорезонансных токов для определения технических требований прибора для выявления и подавления феррорезонанса при исследовании феррорезонансных процессов не рассматривались, и прибор не был создан ни для определения напряжения, ни для определения тока. В связи с этим анализ феррорезонансных схем, основанный на математическом моделировании с численным экспериментом, представляется наиболее эффективным и целесообразным.

Точный анализ феррорезонансных явлений ввиду несинусоидальности формы кривых напряжения и тока представляет значительные трудности. Анализ феррорезонансных схем методами математического моделирования требует наличия соответствующей модели и алгоритма. При этом необходимо рассчитывать переходные и установившиеся процессы, протекающие в схеме, и определить токи и напряжения в цепи во времени.

При феррорезонансных явлениях процессы, происходящие в одной фазе, в значительной мере зависят от влияния других. Исходя из этого, следует признать, что практически единственный достоверный способ исследования феррорезонансных явлений в многопроводной линии - моделирование переходных процессов с помощью компьютерных программ, которые должны

иметь возможность моделирования многопроводной линии и узловых точек при совместном решении уравнений переходных процессов. Программа, разработанная Институтом Физики НАН Азербайджана, одна из них, она предназначена для расчета переходных процессов в произвольных схемах электрических цепей. С помощью разработанной компьютерной модели, алго-

ритма и программы исследованы феррорезонансные процессы в сети 110кВ при неполнофазном включении линии с силовыми трансформаторами мощностью 10МВА, 20МВА и 40 МВА с учетом ОПН и без него.

Исследования осуществлялись на базе выбранной схемы, которая представлена на рис. 1 [1,2].

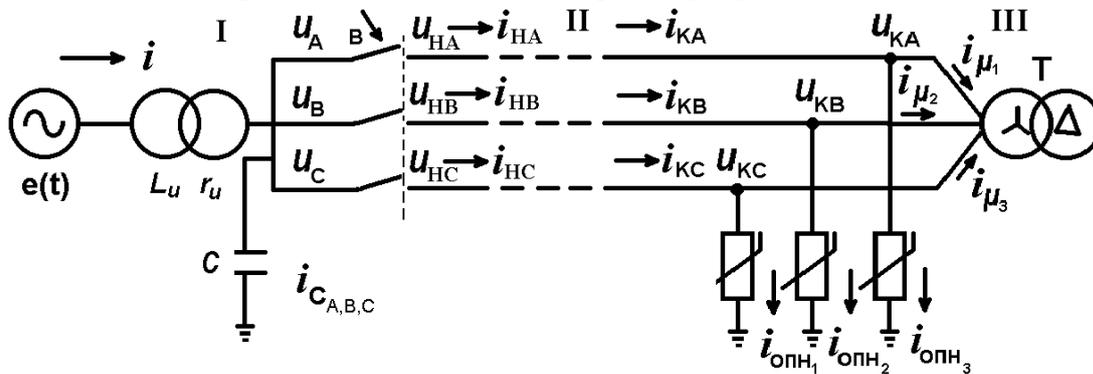


Рис.1 $e(t)$ – источник напряжения, L_u, r_u – индуктивность и сопротивление источника; u_A, u_B, u_C – мгновенные значения фазных напряжений на шинах источника; u_{HA}, u_{HB}, u_{HC} – мгновенные значения напряжений в начале ЛЭП, соединяющей источник с холостым трансформатором Т; $i_{HA}, i_{HB}, i_{HC}, i_{KA}, i_{KB}, i_{KC}$ – мгновенные значения токов в начале и конце ЛЭП; $i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, i_{\mu_3}$ – мгновенные значения токов намагничивания трансформатора Т; $i_{CA, CB, CC}$ – мгновенные значения токов, протекающих через суммарную емкость I узловой точки; $i_{ОПН_1}, i_{ОПН_2}, i_{ОПН_3}$ – мгновенные значения токов, протекающих через ОПН

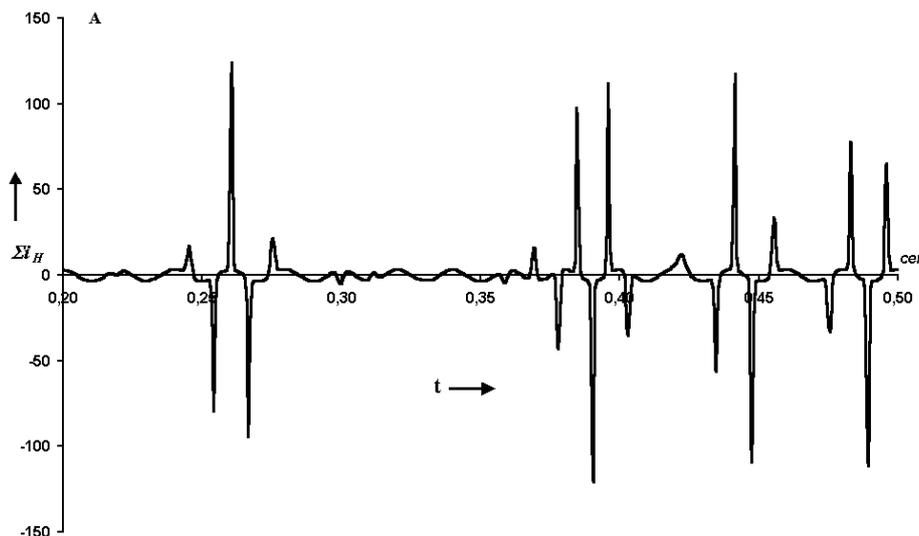


Рис.2. Сумма токов трех фаз в начале линии при феррорезонансном процессе и однофазном включении трансформатора мощностью 10МВА, длина ЛЭП 18 км

Суммарный ток в начале линии (рис.2) имеет сложную форму, которая сохраняется и при квазистационарном режи-

ме. Из кривой тока видно, что на каждом периоде (0,02сек) имеются минимум три пика. Эти пики сохраняются и при квазиу-

становившемся режиме. При компьютерном моделировании обнаружить феррорезонансное перенапряжение и использовать полученную кривую тока целесообразно с точки зрения организации защиты при отсутствии ОПН на шинах РУ.

Учитывая, что в энергосистемах для защиты от перенапряжений начато массовое внедрение ОПН, и его влияние при организации мероприятий по предотвращению неполнофазного режима ЛЭП становится существенным, естественно, возникает обратная задача – защита самого ОПН от длительного воздействия на него феррорезонансных перенапряжений при неполнофазном режиме ЛЭП, при котором через ОПН протекают недопустимые токи, приводящие к тепловому разрушению его варисторов. Полученные данные позволяют сформулировать следующие рекомендации:

- для проведения предварительных апробаций разработанных устройств обнаружения и предотвращения феррорезонансных процессов можно успешно использовать предложенный алгоритм;

ружения и предотвращения феррорезонансных процессов можно успешно использовать предложенный алгоритм;

- использование устройства отключения ЛЭП с трансформатором при феррорезонансе, основанного на сумме токов трех фаз, оказывается более надежным в случае применения ОПН;

- целесообразно совмещать защиту оборудования как сетей, так и ОПН, от феррорезонансных перенапряжений, используя характеристики ОПН в едином алгоритме при компьютерном моделировании.

В [3] приводится анализ причин серьезной аварии, которая произошла в 2002г. на линии ЛЭП 500кВ Мингечаур (АзГРЭС) - Апшерон (II Апшеронская линия). В результате произошло двухстороннее отключение линии. Исследования осуществлялись на основе расчетной схемы, приведенной на рис.3.

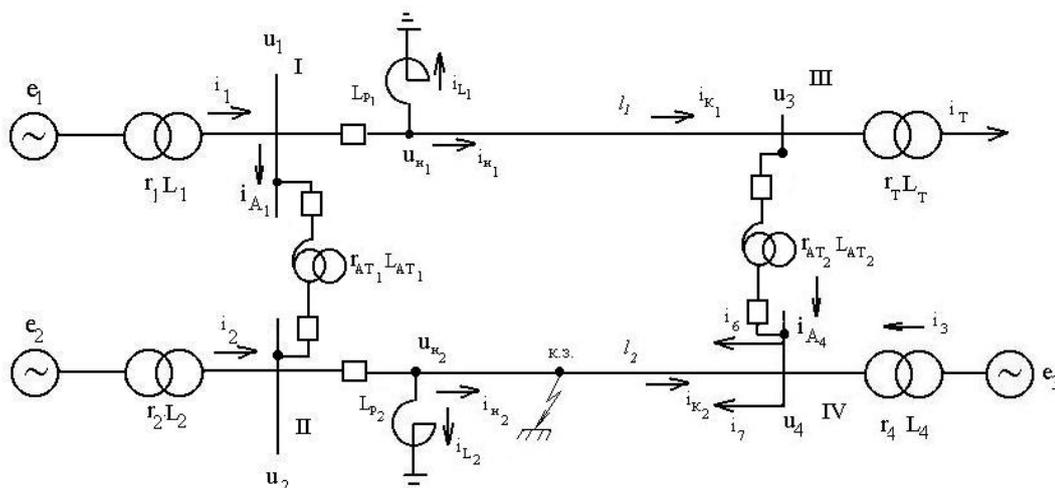


Рис.3. Расчетная схема

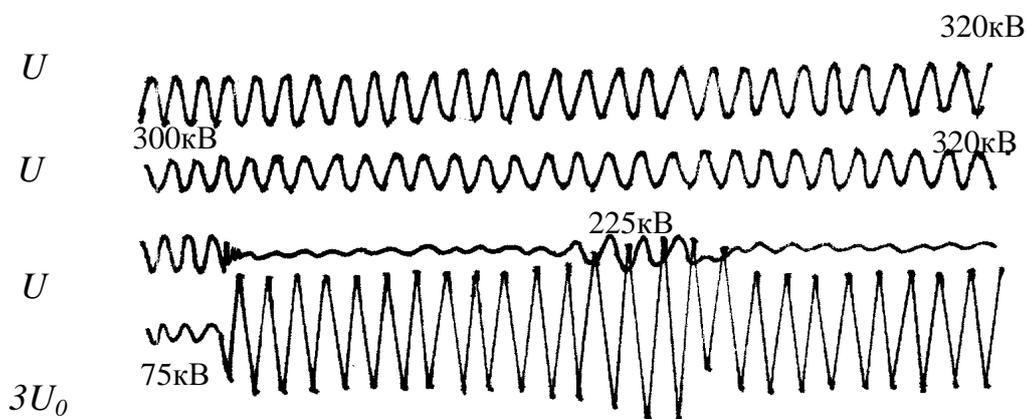


Рис.4. Осциллограммы однофазного короткого замыкания первого отключения и подключения реактора

Анализ осциллограмм на ЛЭП 500кВ, зафиксированных в момент происшествия приведен на рис.4.

Для анализа переходных процессов и перенапряжений, а также для выбора средств защиты необходимо с высокой точностью рассчитывать переходный процесс в коммутируемой цепи.

Предложена математическая модель процесса коммутации линии с шунтирующим реактором. Математическая модель состоит из расчетных уравнений линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта, транспозиции линии, уравнений начала и конца линии.

Сравнение результатов численного расчета и натурального эксперимента дали хорошие совпадения. После теоретического и экспериментального анализа были разработаны устройства предотвращения феррорезонансных перенапряжений в линии, возникающих при неполнофазной работе.

В настоящее время общего снижения нагрузки в энергосистемах при плановых и аварийных ремонтах шунтирующих реакторов напряжение на шинах 500кВ подстанций (ПС) из-за значительной генерации реактивных мощностей примыкающих линий может достигать недопустимых значений. Для его снижения применяются различные мероприятия, в том числе и включение реакторов неполным числом фаз. Очевидно, что в таких режимах нарушаются условия симметрии и строго говоря, их нельзя отнести к нормальным, однако их не следует рассматривать и как результат аварийных состояний сети, если существование таких режимов не только технически допустимо, но и экономически целесообразно. Поэтому,

такие режимы относятся к группе особых [4].

Ограничения возможности осуществления разного рода неполнофазных режимов (в частности, неполнофазного включения реакторов) обусловлены известными факторами. Они достаточно широко рассмотрены в литературе как с точки зрения оценки их допустимости [5], так и снижения их отрицательного воздействия.

Одно из наиболее опасных внутренних перенапряжений возникает из-за коммутации реакторов в линии электропередачи (ЛЭП). При коммутации шунтирующих реакторов выключатель обрывает ток реактора на нисходящей к нулю ветви синусоиды, неуспешный обрыв тока реактора и его окончательное гашение сопровождаются высокими перенапряжениями.

Предложена математическая модель шунтирующего реактора с выключателями для исследования перенапряжений при изменении прохождения тока в выключателе через нуль.

Предложенная математическая модель состоит из расчетных уравнений линий электропередачи с учетом поверхностного эффекта в земле и проводах, и коронирования проводов линии, а также уравнений узловых точек, где подключены шунтирующие реакторы через коммутирующие аппараты.

В качестве расчетных уравнений линий электропередачи были использованы уравнения, полученные для исследования высокочастотных коммутационных процессов при коммутации холостых систем шин разъединителями [6].

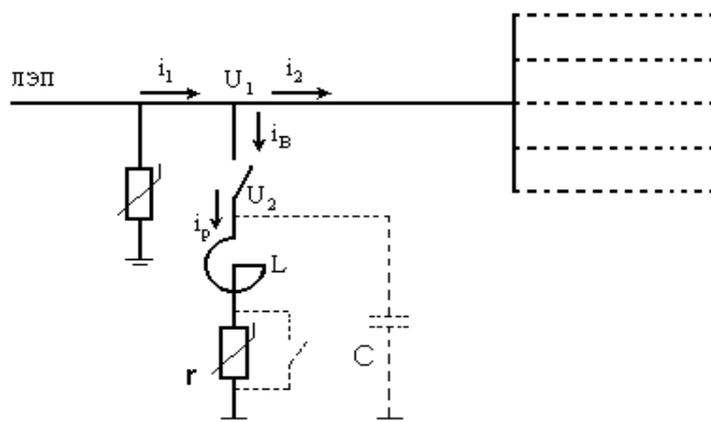


Рис. 5. Схема с подключенным шунтирующим реактором

Как показывают проведенные натурные исследования первый срез тока происходит в начале расхождения дугогосающих контактов и не сопровождается заметными перенапряжениями, второй и третий срезы тока приводят к значительным перенапряжениям.

Для увеличения вероятности среза тока при первом же подходе тока к нулевому значению можно использовать метод искусственной деформации тока отключения вблизи нуля, который в настоящее время считается эффективным мероприятием повышения отключающей способности выключателей [7]. Можно считать, что срез тока при искусственной деформации тока является окончательным, так как интервал между попытками гашения малых индуктивных токов велик и вероятность успешных попыток гашения тока незначительна, отключения не будут сопровождаться значительными перенапряжениями.

В качестве элемента в цепи, которой может осуществлять деформации тока отключения вблизи нуля можно рекомендовать использование вместо линейного активного сопротивления r , соединенного последовательно с шунтирующим реактором, нелинейным резистором, где $r=r_0 i^{\alpha-1}$, r_0 – начальное значение сопротивления резистора.

При использовании нелинейного резистора, согласно математической модели, добавляются уравнения нелинейного резистора и выражения для напряжения и токов во вводимых дополнительных точках расчетной сетки [8,9].

Результаты расчета деформации тока отключения перед отключением выключателей при разных значениях коэффициента нелинейности резистора представлена на рис.6. На рисунке 6 кривая 1 характеризует подход тока в цепи отключения без нелинейного резистора, кривые 2, 3, соответственно, при $\alpha=0,7; 0,8$.

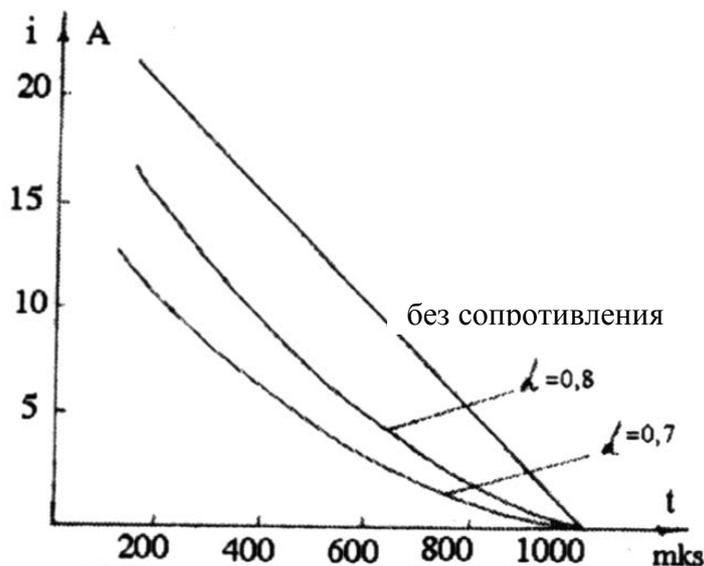


Рис.6. Изменение тока отключения перед отключением выключателей при разных значениях коэффициента нелинейности резистора

Также было рассмотрено математическое описание волнового процесса на одноцепной и двухцепной линии при наличии ШР. Полученные результаты позволяют дальнейшее проведение всестороннего исследования перенапряжений для шунтирующих реакторов, снабженных выключателями и другими необходимыми элементами при их коммутации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Пивчик И.Р., Бабаева А.Р. *Алгоритм реализации компьютерной модели феррорезонансных перенапряжений и их подавления при несимметричных режимах линии электропередачи*. Изв.высш.учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика, 2004, №4, с.16-27.

- [2] Hashimov A.M., Dmitriyev E.V., Ahmet Nayir, Babayeva A.R., Pivchik I.R. *Analysis of ferroresonance currents at noncompleted phase regimes on lines*. TPE-2004 Second International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering. Tabriz-Iran, 2004, p.18-21.
- [3] Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Бабаева А.Р. *Исследование перенапряжений на высоковольтных линиях при однофазном повторном включении*. Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния, Новосибирск, 2003, с.192-196.
- [4] Ефремов И.А. *Системы защиты электрических сетей от перенапряжений на основе схемно-режимных мер*: Авторф. дисс. докт. тех.наук, Новосибирск, 1997, 39с.
- [5] Беляков Н.Н., Лоханина Н.И., Рашкес В.С. *Эксплуатация линий 750кВ с уменьшенным числом шунтирующих реакторов*. Электрические станции, 1982, №8, с.41-44.
- [6] Марчук Г.И. *Методы вычислительной математики*. М.: Наука, 1989, 608с.
- [7] Бейбутов Р.А., Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М. *Насыщающийся реактор в цепи короткого замыкания*. Численные эксперименты при исследованиях переходных и квазиустановившихся процессов в электрических сетях, Баку, Элм, 1991, с.160-169.
- [8] Babayeva A., Hasanova S., Ahmet Nayir *Mathematical modeling of overvoltages at the shunting reactors switching*. NEU-CEE electrical, electronic & computer engineering Symposium. Cyprus, 2001, p.96.
- [9] Гашимов А.М. *Перенапряжения при коммутациях малых емкостных токов высоковольтными выключателями*. Электродинамика, №1(1), Киев, 2002, с.95-99



Ариф М. Гашимов родился в 1949 году в Азербайджане. В 1971 году закончил факультет Энергетики Института Нефти и Химии им. М. Азизбекова (Баку, Азербайджан). В 1979 г. защитил кандидатскую, 1993г. – докторскую диссертации в Институте Электродинамики НАН Украины. Он является директором Института Физики НАН Азербайджана. Его научная деятельность посвящена развитию теории нелинейных электрических цепей с распределенными параметрами, заземлению нейтрали, феррорезонансных процессов.



Евгений В. Дмитриев родился в 1937г. В г. Баку. Высшее образование получил в институте Нефти и Химии им. М. Азизбекова, который окончил в 1962г. по специальности электрические сети и системы. Его научная деятельность посвящена ограничению токов коротких замыканий, защите от перенапряжений, экологическим аспектам в электроэнергетике, защите окружающей среды, разработке композиционных электроэнергетических материалов, и на их основе созданию и внедрению различных электроэнергетических устройств с новыми уникальными свойствами.



Айтек Р. Бабаева родилась в 1977 году в Баку. Высшее образование получила в Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии, которую окончила 2000 году (степень магистра) по специальности физика и техника высоких напряжений. В 2004 году защитила кандидатскую диссертацию. Ее научная деятельность посвящена анализу переходных и феррорезонансных процессов. Она является научным сотрудником Института Физики НАН Азербайджана.

