

На правах рукописи

Медов Роман Владимирович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические
системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2002

Работа выполнена на кафедре "Электрические станции" Вятского государственного университета

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Попов В.А.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Смолвик С.В.;
кандидат технических наук,
с.н.с. Кац П.Я.

Ведущая организация – ОАО “Ленэнерго”, г. С-Петербург

Защита состоится "17" мая 2002 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 при Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Автореферат разослан " " апреля 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 212.229.02
кандидат технических наук

Терешкин А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Анализ условий функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) при несимметричных, неполнофазных режимах работы, определение их допустимости в тех или иных конкретных случаях проявления несимметрии в сети является одной из центральных проблем исследований в электроэнергетике. Актуальность данного вопроса особенно возросла в последние годы в связи с участвовавшими случаями выхода из строя сетевого оборудования (в большинстве своем исчерпавшего свой ресурс). Причем нередко повреждается и выходит из строя одна фаза трехфазного элемента (например шунтирующего реактора, трехфазной группы однофазных автотрансформаторов и т.д.). В нормальных нагрузочных режимах также возникает несимметрия токов и напряжений из-за наличия в энергосистеме элементов с пофазно различными параметрами. Возможность учета несимметрии остается актуальной при некоторых специализированных расчетах нормальных и аварийных режимов, а также для повышения точности определения мест повреждений (ОМП).

Известны два подхода к моделированию ЭЭС – с помощью фазных координат и метода симметричных составляющих, получивших существенное развитие в работах С.А. Ульянова, Т.Б. Чернина, С.Б. Лосева, В.А. Крылова, Т.Б. Заславской, А.П. Бермана, А.М. Гусейнова. Метод фазных координат обладает возможностью простого моделирования пофазного различия параметров оборудования, в первую очередь воздушных линий электропередачи (ВЛ). Недостатком его является потребность в значительно большем объеме информации, требующейся для формирования схем замещения, а также необходимость работать с несимметричной матрицей узловых параметров. Метод симметричных составляющих более удобен для моделирования генераторов и нагрузок. В ходе развития методик расчета несимметричных режимов в большинстве случаев для моделирования применялся один из рассмотренных выше методов, что всегда влекло за собой неудобства представления отдельных элементов.

Важную роль играет разработка таких методов моделирования ЭЭС, которые отличались бы универсальностью, адекватностью математического описания ЭЭС при любых проявлениях несимметрии в сети. От того, насколько удачен используемый для моделирования математический аппарат формализации как в смысле его конструктивности, так и в смысле его адекватности зависит точность решения задач, объективность оценки допустимости функционирования ЭЭС при той или иной несимметрии. Чрезвычайно высокий уровень развития вычислительной техники и языков программирования позволяет существенно расширить область приложения этого аппарата исследования. В то же время ощущается отсутствие единой методологии как в вопросах построения моделей ЭЭС, так и в выборе метода решения.

Работа выполнялась в соответствии с грантом по фундаментальным исследованиям в области энергетики и электротехники (код темы по ГРНТИ: 44.29.29.44.29.31, номер гос. регистрации 01.9.80 009663).

Целью работы является обоснование расчетных моделей элементов ЭЭС, совершенствование методов, разработка алгоритмов и программного обеспечения для анализа установившихся несимметричных режимов ЭЭС.

Научная новизна.

1. Обоснованы модели элементов и метод формирования (с совместным использованием симметричных и фазных составляющих) общего математического описания ЭЭС при исследованиях несимметричных режимов.
2. Разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение применительно к решению задач установившихся несимметричных режимов.
3. Разработаны методики расчета наведенных напряжений на ВЛ, выведенных в ремонт, и определения места повреждения, учитывающие пространственное расположение, транспозицию, расщепление фаз и грозозащитных тросов при различных способах их заземления (заземление на каждой опоре, заземление на анкерных опорах с одной стороны и разрыве с другой стороны, заземление только по концам линии), наличие изолирующих распорок в расщепленных фазах, взаимовлияние между линиями.
4. Получены модели ВЛ с волоконно-оптическим кабелем (ВОК), встроенным в грозозащитный трос, заземленный на каждой опоре; показано, что заземление грозотроса на каждой опоре существенно снижает уровень наведенных напряжений.

Практическая ценность работы

Разработанные методы расчета несимметричных режимов ЭЭС с учетом многофазного представления ее элементов могут применяться при решении научно-исследовательских, эксплуатационных задач оценки допустимости несимметричных, неполнофазных режимов работы оборудования, разработке технических мероприятий по снижению несимметрии токов и напряжений в ЭЭС.

Разработанный программный комплекс внедрен в ОЭС Северо-Запада, Юга, Центра и был использован при расчетах наведенных напряжений на линиях электропередачи; уточненная методика определения места повреждения на ВЛ реализована в АО Ленэнерго.

Апробация работы и публикации

Материалы диссертационной работы докладывались на семинаре-совещании начальников служб релейной защиты и автоматики (РЗА) энергосистем, начальников электролабораторий электрических станций, ведущих специалистов РЗА ОЭС Северного Кавказа (г. Пятигорск, 1998 г.), на XIII научно-технической конференции по обмену опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики в энергосистемах Урала (г. Екатеринбург, 2001 г.), на Всероссийской научно-технической конференции "Наука – производство – технология - экология" (г. Киров, 2001, 2002 гг.), на научных семинарах кафедры "Электрические станции" Вятского государственного университета (2001-2002 г.г.), кафедры "Электрические системы и сети" СПбГТУ (2002 г.).

По теме диссертационной работы имеется 12 публикаций в центральных и региональных изданиях.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка использованной литературы из 58 наименований. Содержание работы изложено на 172 страницах, иллюстрировано 38 рисунками и 24 таблицами.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, очерчен круг вопросов, выполняемых в диссертации.

Первая глава посвящена вопросам математического моделирования ЭЭС при расчетах несимметричных режимов.

В рамках теории несимметричных режимов известны два подхода к моделированию ЭЭС с помощью фазных координат и метода симметричных составляющих.

В состав электрической сети входят различные элементы, каждый из которых имеет свои особенности при моделировании.

Воздушные линии электропередачи характеризуются различием параметров по фазам, взаимовлиянием ВЛ, расположенных в одном коридоре и др. Наличие грозозащитного троса приводит к появлению дополнительной электрически изолированной цепи и делает невозможным применение симметричных составляющих для моделирования ВЛ, предварительно не исключив тросы. Фазные координаты в общем случае позволяют создавать модели многофазных элементов (под фазой в данном случае понимается любая электрически изолированная цепь – фаза, трос, расщепленный провод, нейтраль трансформатора). Трансформаторы и реакторы в нормальном режиме работы не имеют пофазного различия параметров. Для трансформаторов такое различие может появиться только при работе с разными по фазам коэффициен-

тами трансформации (например, в целях симметрирования режима при наличии несимметрии во внешней сети), для реакторов – при работе неполным числом фаз. В некоторых случаях требуется явное представление нейтрали трансформатора. Для обеспечения универсальности моделирования трансформаторов и реакторов при любом виде несимметрии более целесообразно применять фазные координаты.

Генераторные узлы при расчетах установившихся несимметричных режимов, как правило, задаются активной мощностью и модулем напряжения (либо реактивной мощностью) прямой последовательности; нагрузочные узлы – активной и реактивной мощностью прямой последовательности. При их моделировании наиболее целесообразно использование симметричных составляющих (наряду с заданием указанных выше режимных параметров прямой последовательности вводить в схему замещения соответствующих узлов параметры обратной и нулевой последовательности).

При моделировании ЭЭС пассивные элементы (ВЛ, трансформаторы, реакторы) удобнее представлять в системе фазных координат, генераторные и нагрузочные узлы – в симметричных составляющих.

При переходе от фазных координат к симметричным составляющим всегда рассматривается только тройка векторов токов и напряжений (либо фаз А, В, С, либо составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей). Уравнения преобразования записываются для узлов, к которым с одной стороны подключаются генераторы (или нагрузка), а с другой стороны присоединяется внешняя сеть. При моделировании в фазных координатах таких элементов, как ВЛ с тросами или трансформатор с явно выделенной нейтралью, число фаз узла, к которому подключается данный элемент, становится больше трех, что приводит к невозможности прямого перехода от фазных величин к симметричным составляющим в этом узле. Можно выделить два подхода к устранению этого противоречия. Первый подход основан на расширении схемы включением внутренних сопротивлений прямой последовательности генераторов и нагрузок (рис. 1). Для генераторов добавленные к схеме сопротивления могут соответствовать синхронным сопротивлениям (при отсутствии регулирования) или другим реактивным сопротивлениям, отвечающим тем или иным условиям регулирования возбуждения генераторов. При высоких коэффициентах усиления по отклонению напряжения, свойственных регуляторам возбуждения сильного действия, эти сопротивления являются достаточно малыми величинами. При нулевом статизме добавляемые узлы становятся фиктивными, расположенными за пренебрежимо малыми (для снижения погрешности) реактивными сопротивлениями. Для нагрузок добавляемые узлы всегда будут являться фиктивными. При расчетах режимов заданными являются режимные параметры прямой последовательности в добавленных узлах. К внешней сети генераторные и нагрузочные узлы присоединяются уже с помощью пассивных узлов А, В, С, связанных с добавленным узлом через многополюсник перехода (рис. 1). Введение фиктивных сопротивлений

тивных сопротивлений прямой последовательности вносит в расчет погрешность, величина которой тем меньше, чем ближе к нулю сопротивления.

Второй подход основан на преобразовании многофазных узлов ЭЭС к трехфазному виду, путем исключения из модели узлов подключения тросов, нейтралей трансформаторов, контуров заземления подстанций (рис. 2). Исключение узлов производится по методу Гаусса. Так как данные узлы являются пассивными, то в оставшейся трехфазной сети меняются только собственные и взаимные узловые проводимости; выражения для задающих токов остаются неизменными. Генераторные и нагрузочные узлы представляются в симметричных составляющих и связываются с внешней сетью с помощью многополюсников перехода. В схеме рис. 2 не требуется дополнительного введения узлов и ветвей прямой последовательности, что не приводит к появлению дополнительной погрешности.

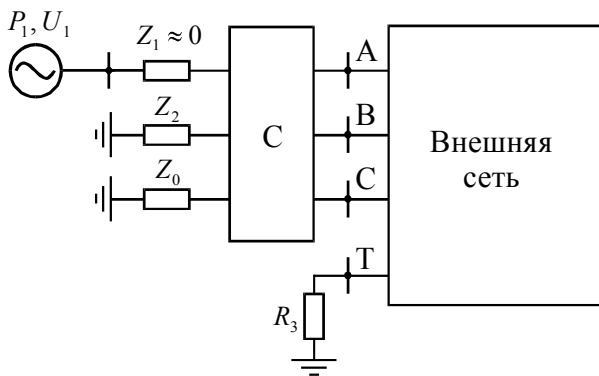


Рисунок 1 – Расширение схемы включением внутренних сопротивлений прямой последовательности генераторов и нагрузок

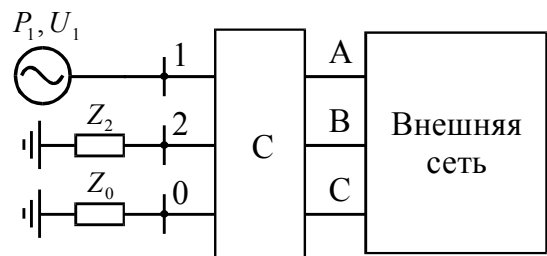


Рисунок 2- Преобразование многофазных узлов к трехфазному виду

Как правило, в ЭЭС количество нагрузочных узлов значительно превосходит количество генераторов. При необходимости применения первого подхода к моделированию ЭЭС в схеме замещения вводится значительное количество дополнительных фиктивных узлов. Избежать этого возможно путем задания нагрузочных узлов в фазных координатах (рис. 3). Так как внешняя сеть также моделируется в фазных координатах, то необходимость перехода к симметричным составляющим отпадает. При этом контроль исходных режимных параметров производится путем выделения из фазных величин напряжений и токов составляющей прямой последовательности.

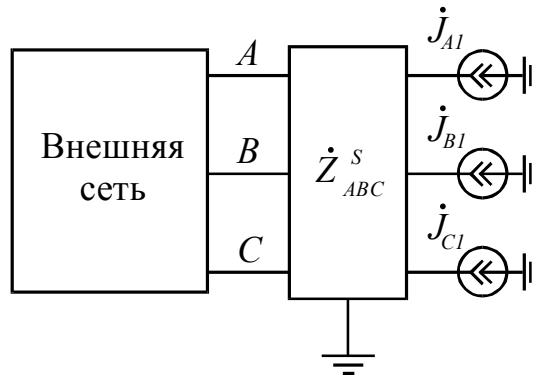


Рисунок 3 - Представление нагрузки в фазных координатах

Общая система уравнений узловых напряжений сети имеет следующий вид

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\operatorname{diag} \hat{\mathbf{U}}^G \cdot \dot{\mathbf{Y}}^G \cdot \dot{\mathbf{U}}) = \mathbf{P}^G, \\ \left| \mathbf{U}_{1\text{зад}}^G \right|^2 - (\dot{\mathbf{U}}_{1\text{Re}}^G)^2 - (\dot{\mathbf{U}}_{1\text{Im}}^G)^2 = 0, \\ \dot{\mathbf{Y}}^S \cdot \dot{\mathbf{U}} = \frac{\hat{\mathbf{S}}^S}{\hat{\mathbf{U}}^S}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{\mathbf{U}}$ - столбец узловых напряжений; $\operatorname{diag} \hat{\mathbf{U}}^G$ - диагональная матрица сопряженных комплексов напряжений прямой последовательности генераторных узлов; \mathbf{P}^G - столбец заданных активных мощностей прямой последовательности генераторных узлов; $\left| \mathbf{U}_{1\text{зад}}^G \right|^2$ - столбец квадратов заданных модулей напряжений прямой последовательности генераторных узлов; $(\dot{\mathbf{U}}_{1\text{Re}}^G)^2, (\dot{\mathbf{U}}_{1\text{Im}}^G)^2$ - столбцы квадратов вещественной и мнимой составляющих напряжений прямой последовательности генераторных узлов; $\frac{\hat{\mathbf{S}}^S}{\hat{\mathbf{U}}^S}$ - столбец задающих токов для нагрузочных узлов схемы; $\dot{\mathbf{Y}}_S^G, \dot{\mathbf{Y}}^S$ - прямоугольные матрицы собственных и взаимных узловых проводимостей, являющиеся составными частями общей матрицы узловых проводимостей сети $\dot{\mathbf{Y}}$:

$$\dot{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}^G \\ \dot{\mathbf{Y}}^S \end{bmatrix}. \quad (2)$$

С точки зрения реализации решения системы уравнений узловых напряжений на ПЭВМ преимущество имеет запись уравнений в форме баланса токов. При задании в узле активной мощности и модуля напряжения в случае использования уравнений в форме баланса токов возникают трудности в ли-

неаризации системы уравнений. Поэтому для генераторных узлов используются уравнения в форме баланса мощностей, а для остальных узлов схемы составляются уравнения в форме баланса токов.

При расширении схемы включением внутренних сопротивлений прямой последовательности генераторов и нагрузок удобна следующая компоновка матрицы узловых проводимостей. Все генераторные узлы выделяются в один блок, который размещается в верхней части матрицы. Далее размещаются нагрузочные узлы (прямая последовательность и фазы А, В, С), узлы внешней сети (фазы А, В, С, тросы, нейтрали трансформаторов) и балансирующий узел (фазы А, В, С). Самая нижняя строка матрицы узловых проводимостей отводится для параметров балансирующего узла по прямой последовательности. С учетом сказанного матрица узловых проводимостей всей сети имеет вид:

$$\dot{Y} = \dot{Y}^G = \begin{array}{c} \dot{Y}^G \\ \dot{Y}^S \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \dot{Y}_1^G & \dot{Y}_{1-ABC}^G & & & & & & \\ \hline \dot{Y}_{ABC-1}^G & \dot{Y}_{ABC}^G & & & \dot{Y}_{ABC}^{G-f} & & & \\ \hline & & \dot{Y}_1^S & \dot{Y}_{1-ABC}^S & & & & \\ \hline & & \dot{Y}_{ABC-1}^S & \dot{Y}_{ABC}^S & \dot{Y}_{ABC}^{S-f} & & & \\ \hline & \dot{Y}_{ABC}^{f-G} & & \dot{Y}_{ABC}^f & \dot{Y}_{ABC}^f & \dot{Y}_{ABC}^{f-B} & & \\ \hline & & & & \dot{Y}_{ABC}^{B-f} & \dot{Y}_{ABC}^B & \dot{Y}_{ABC-1}^B & \\ \hline & & & & \dot{Y}_{1-ABC}^B & \dot{Y}_1^B & & \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} \text{Прям. посл.} \\ \text{Фазные} \\ \text{Прям. посл.} \\ \text{Фазные} \\ \text{Фазные - Внеш. сеть} \\ \text{Фазные} \\ \text{Прям. посл.} \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Генерат.} \\ \text{Нагрузка} \\ \text{Бал. узел} \end{array} \quad (3)$$

При использовании метода преобразования многофазных узлов ЭЭС к трехфазному виду матрица узловых проводимостей (3) имеет другую структуру. Генераторные и нагрузочные узлы представляются только в симметричных составляющих. Все узлы внешней сети являются трехфазными. Компоновка матрицы узловых проводимостей сохраняется прежней:

$$\dot{Y} = \dot{Y}^G = \begin{array}{c} \dot{Y}^G \\ \dot{Y}^S \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \dot{Y}_1^G & \dot{Y}_{1-20}^G & & \dot{Y}_{1-ABC}^{G-f} & & & & \\ \hline \dot{Y}_{20-1}^G & \dot{Y}_{20}^G & & \dot{Y}_{20-ABC}^{G-f} & & & & \\ \hline & & \dot{Y}_{120}^S & \dot{Y}_{120-ABC}^{S-f} & & & & \\ \hline \dot{Y}_{ABC-1}^{f-G} & \dot{Y}_{ABC-20}^{f-G} & \dot{Y}_{ABC-120}^{f-S} & \dot{Y}_{ABC}^f & \dot{Y}_{ABC-20}^{f-B} & \dot{Y}_{ABC-1}^{f-B} & & \\ \hline & & & \dot{Y}_{20-ABC}^{B-f} & \dot{Y}_{20}^B & \dot{Y}_{20-1}^B & & \\ \hline & & & \dot{Y}_{1-ABC}^{B-f} & \dot{Y}_{1-20}^B & \dot{Y}_1^B & & \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} \text{Прям. посл.} \\ \text{Обр, нул. посл.} \\ \text{Симметричные - Нагрузка} \\ \text{Фазные - Внеш. сеть} \\ \text{Обр, нул. посл.} \\ \text{Прям. посл.} \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Генерат.} \\ \text{Нагрузка} \\ \text{Бал. узел} \end{array} \quad (4)$$

Выбор того или иного подхода зависит от характера решаемой задачи. При необходимости контроля параметров в таких элементах, как трос ВЛ, нейтраль трансформатора, контур заземления подстанции, следует применять первый способ, в остальных случаях – второй.

При моделировании нагрузок в фазных координатах структуру матрицы узловых проводимостей ЭЭС упрощается:

$$\dot{\mathbf{Y}} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \dot{\mathbf{Y}}_1^G & \dot{\mathbf{Y}}_{1-ABC}^G & & & & \\ \hline \dot{\mathbf{Y}}_{ABC-1}^G & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^G & & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^{G-f} & & \\ \hline & & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^S & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^{S-f} & & \\ \hline & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^{f-G} & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^{f-S} & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^f & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^{f-B} & \\ \hline & & & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^{B-f} & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC}^B & \dot{\mathbf{Y}}_{ABC-1}^B \\ \hline & & & & \dot{\mathbf{Y}}_{1-ABC}^B & \dot{\mathbf{Y}}_1^B \\ \hline \end{array} \left. \begin{array}{l} \text{Прям. посл.} \\ \text{Фазные} \\ \text{Фазные - Нагрузка} \\ \text{Фазные - Внеш. сеть} \\ \text{Фазные} \\ \text{Прям. посл.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Генерат.} \\ \\ \\ \\ \text{Бал. узел} \end{array} \quad (5)$$

Во второй главе приводится методика расчета установившегося несимметричного режима с применением метода Ньютона.

Исходными параметрами, определяющими конкретный режим, являются активная мощность и модуль напряжения прямой последовательности, задаваемые в генераторных узлах, и активная, реактивная мощности в нагрузочных узлах схемы. В качестве неизвестных параметров (в системе уравнений узловых напряжений) выступают векторы напряжений в узлах схемы.

При переходе от комплексных переменных к их проекциям общая система уравнений (1) приобретает вид:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_p = \mathbf{P}^G - \text{Re}(\text{diag} \hat{\mathbf{U}}^G \cdot \dot{\mathbf{Y}}^G \cdot \dot{\mathbf{U}}), \\ \mathbf{W}_{|U|} = |\mathbf{U}_{1\text{зад}}^G|^2 - (\dot{\mathbf{U}}_{1\text{Re}}^G)^2 - (\dot{\mathbf{U}}_{1\text{Im}}^G)^2, \\ \mathbf{W}_{J_{\text{Re}}} = \mathbf{J}_{\text{Re}} - \text{Re}(\dot{\mathbf{Y}}^S \cdot \dot{\mathbf{U}}), \\ \mathbf{W}_{J_{\text{Im}}} = \mathbf{J}_{\text{Im}} - \text{Im}(\dot{\mathbf{Y}}^S \cdot \dot{\mathbf{U}}), \end{cases} \quad (6)$$

где \mathbf{W}_p - столбец невязок по активной мощности прямой последовательности для генераторных узлов; $\mathbf{W}_{|U|}$ - столбец невязок по модулю напряжения прямой последовательности генераторных узлов; $\mathbf{W}_{J_{\text{Re}}}$ - столбец невязок по вещественной составляющей токов в узлах схемы кроме генераторных; $\mathbf{W}_{J_{\text{Im}}}$ - столбец невязок по мнимой составляющей токов в узлах схемы кроме генераторных; \mathbf{J}_{Re} - столбец вещественных составляющих задающих токов в узлах схемы кроме генераторных; \mathbf{J}_{Im} - столбец мнимых составляющих задающих токов в узлах схемы кроме генераторных.

Согласно методу Ньютона систему линеаризованных уравнений (6) для k -ой итерации можно представить в виде:

$$\mathbf{W}(\mathbf{U})^{k-1} + \mathbf{J}(\mathbf{U}^{k-1}) \cdot \Delta \mathbf{U}_\delta^k = 0, \quad (7)$$

где $\Delta \mathbf{U}_\delta^k = (\mathbf{U}_\delta^k - \mathbf{U}_\delta^{k-1})$ - столбец приращений узловых напряжений полу-

ченных на k -ой итерации; $\mathbf{J}(\mathbf{U}^{k-1})$ - матрица Якоби, полученная на $(k-1)$ -ой итерации, имеющая следующую общую структуру:

$$\mathbf{J}(\mathbf{U}^{k-1}) = \begin{array}{c} \boxed{\frac{\partial \mathbf{W}_P}{\partial \mathbf{U}_{\delta}}(\mathbf{U}^{k-1})} \\ \boxed{\frac{\partial \mathbf{W}_{|U|}}{\partial \mathbf{U}_{\delta}}(\mathbf{U}^{k-1})} \\ \boxed{\frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Re}}}{\partial \mathbf{U}_{\delta}}(\mathbf{U}^{k-1})} \\ \boxed{\frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Im}}}{\partial \mathbf{U}_{\delta}}(\mathbf{U}^{k-1})} \end{array} = \begin{array}{cccc} \frac{\partial \mathbf{W}_P}{\partial \mathbf{U}_{\text{Re}}^G} & \frac{\partial \mathbf{W}_P}{\partial \mathbf{U}_{\text{Re}}^S} & \frac{\partial \mathbf{W}_P}{\partial \mathbf{U}_{\text{Im}}^G} & \frac{\partial \mathbf{W}_P}{\partial \mathbf{U}_{\text{Im}}^S} \\ \frac{\partial \mathbf{W}_{|U|}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Re}}^G} & & \frac{\partial \mathbf{W}_{|U|}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Im}}^G} & \\ \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Re}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Re}}^G} & \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Re}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Re}}^S} & \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Re}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Im}}^G} & \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Re}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Im}}^S} \\ \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Im}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Re}}^G} & \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Im}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Re}}^S} & \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Im}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Im}}^G} & \frac{\partial \mathbf{W}_{J\text{Im}}}{\partial \mathbf{U}_{\text{Im}}^S} \end{array}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial \mathbf{W}_i}{\partial \mathbf{U}_j}$ матрицы частных производных \mathbf{W}_i по проекциям узловых напряжений \mathbf{U}_j .

В работе реализованы два способа моделирования нагрузочных узлов: в симметричных составляющих и в фазных координатах, для каждого из которых получен аналитический вид составляющих матрицы Якоби. При использовании фазных координат на каждом шаге итерационного процесса из рассчитанных фазных параметров происходит выделение составляющих прямой последовательности, по которым осуществляется контроль сходимости режима.

Столбец напряжений на k -ой итерации определяется по следующему выражению

$$\mathbf{U}_{\delta}^k = \mathbf{U}_{\delta}^{k-1} + \Delta \mathbf{U}_{\delta}^k = \mathbf{U}_{\delta}^{k-1} - \mathbf{J}(\mathbf{U}^{k-1})^{-1} \cdot \mathbf{W}(\mathbf{U})^{k-1}. \quad (9)$$

На каждой итерации вычисляются значения невязок по активной мощности и модулю напряжения для генераторных узлов и по проекциям задающих токов для остальных узлов. Расчет прекращается, когда значения всех невязок не превышают заданной точности.

В третьей главе приводится усовершенствованная многофазная модель ВЛ, используемая для расчетов наведенных напряжений на фазах и тросах выведенных в ремонт линий.

В настоящее время энергосистемам предписывается выявлять путем измерений ВЛ, на проводах которых при их отключении и заземлении по концам и на рабочих местах могут наводиться напряжения выше 25 В от проходящих вблизи действующих ВЛ. При этом оговаривается условие максимальных нагрузок на влияющих линиях, что не всегда возможно во время

измерений. Поэтому необходим пересчет значений измеренных наведенных напряжений к максимальному рабочему току влияющей ВЛ.

Линии электропередачи моделируются с учетом пофазного различия параметров, обусловленного расположением проводов и грозозащитных тросов на опорах. Разработанный алгоритм позволяет моделировать ВЛ различной конструкции с учетом реального геометрического расположения фазных проводов и грозозащитных тросов в поперечном сечении трассы, с произвольным количеством фаз и тросов, с возможностью учета транспозиции, расщепления фаз и тросов и различными режимами заземления тросов. Коридор из двух и более параллельно идущих ВЛ моделируется как одна линия с суммарным количеством фаз и тросов, геометрическое расположение которых отсчитывается в одной системе координат.

При моделировании воздушные линии разбиваются на однородные участки, на протяжении которых должно оставаться неизменным количество фаз и тросов ВЛ, геометрическое расположение и параметры фаз и тросов, а также характер заземления тросов. Границей между двумя однородными участками может являться транспозиция фаз или тросов, изменение геометрического расположения или параметров фаз или тросов (смена типа опор или проводов), изменение количества фаз или тросов (выход из коридора какой либо линии) и изменение характера заземления троса (переход от заземленного на каждой опоре троса к изолированному).

Моделирование однородного участка ВЛ зависит от характера заземления троса. Разработаны модели участка при следующих схемах заземления троса: заземление троса на каждой промежуточной опоре; заземление только с одной стороны анкерного пролета; заземление только по концам ВЛ.

В первых двух случаях участок разбивается на соответственно промежуточные и анкерные пролеты, для каждого из которых составляется матрица продольных и поперечных проводимостей фаз и тросов всех цепей участка, из которой в свою очередь формируется матрица узловых проводимостей. При наличии заземления троса на опоре для соответствующего узла добавляется проводимость, характеризующая контур заземления опоры. Далее формируется общая матрица узловых проводимостей участка путем последовательного исключения промежуточных узлов.

При заземлении троса только по концам линию можно промоделировать одним участком при условии, что на всем протяжении ВЛ не изменяется геометрическое расположение, порядок размещения, марка и количество проводов фаз и тросов, а также отсутствуют участки с взаимовлиянием с другими ВЛ. При наличии участка параллельного следования нескольких ВЛ с различными способами заземления троса моделирование выполняется, исходя из разбиения участка на минимально необходимые пролеты и последующего исключения промежуточных узлов.

Распределенная емкость длинной линии с достаточной точностью представлена цепочечной схемой замещения, где ВЛ или группа ВЛ разбивается на несколько достаточно коротких участков, каждый из которых моде-

лируется П-образной схемой замещения. Указанная длина не превышает протяженности транспозиционного участка линии, а при учете заземленного на каждой опоре троса – длины промежуточного пролета. При таком моделировании распределенная емкость линии с достаточной степенью точности будет учтена цепочечной схемой замещения.

Разработанная модель ВЛ позволяет при расчетах наведенных напряжений на отключенной ВЛ точно учитывать геометрические расстояния между фазами отключенной и влияющих линий, сопротивление контура заземления опоры в месте проведения работ, способ заземления грозотроса по длине линии. Обеспечение необходимых значений токов на всех влияющих линиях осуществляется путем расчета установившегося несимметричного режима для схемы, включающей все рассматриваемые ВЛ.

Апробация описанной выше методики моделирования ВЛ и расчета наведенных напряжений проводилась на примере ВЛ 330 кВ ВС АО "Ленэнерго". Сопоставление расчетов наведенных напряжений с данными измерений показала, что погрешность расчетов не превышает 10 %.

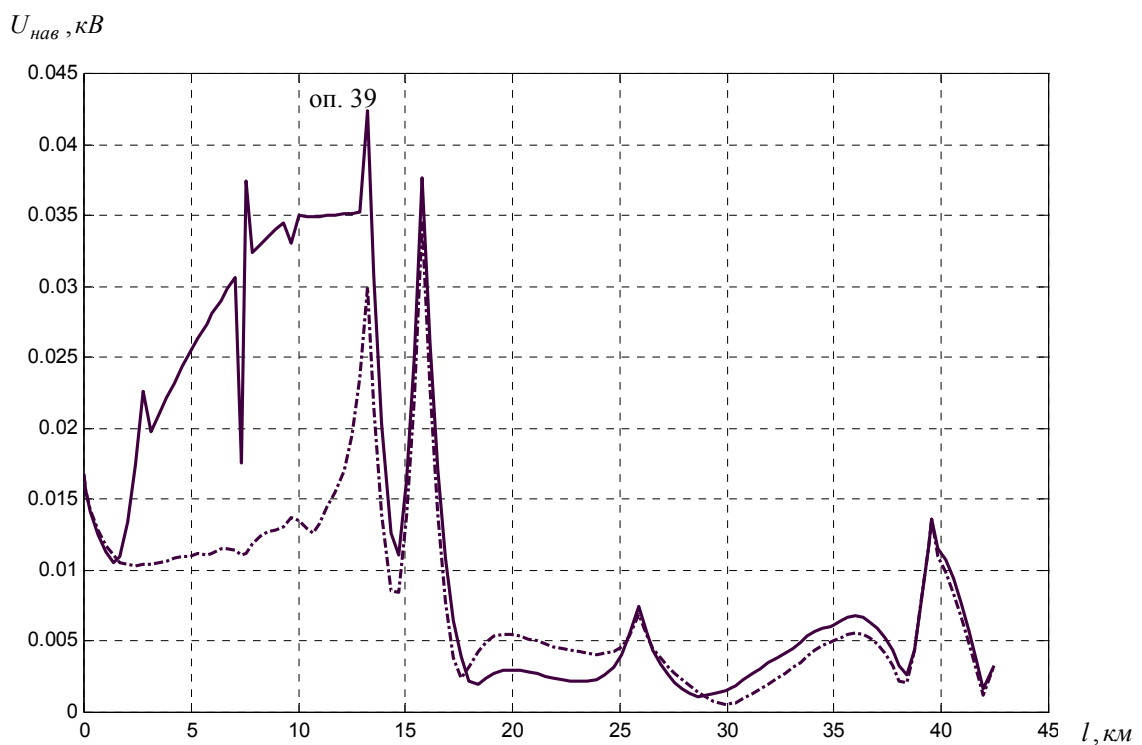


Рисунок 4 – Эпюры наведенных напряжений на ВЛ 330 кВ № 377
ПС Ленинградская – ПС Южная

В настоящее время на значительном количестве ВЛ прокладывается ВОК, встроенный в грозотрос. При этом в качестве грозотроса используется сталеалюминевый провод, который заземляется на каждой опоре. С помощью разработанной модели ВЛ было проведено исследование влияния заземления грозотроса на уровень наведенных напряжений. На рис. 4 приводятся эпюры наведенных напряжений на ВЛ 330 кВ № 377 ПС Ленинградская – ПС Юж-

ная, из которых видно, что наведенные напряжения на участке от опоры 39 до ПС Южная (где проложен ВОК, встроенный в грозотрос) существенно ниже.

В качестве одной из рекомендаций по снижению наведенных напряжений на участке до опоры 39 было предложено заземлять стальной грозозащитный трос на каждой опоре. Расчетные исследования подтвердили целесообразность данного мероприятия (достигнутый эффект выразался в снижении наведенного напряжения в 1,5 – 3 раза). Возникающий побочный негативный эффект, связанный с ростом потерь активной мощности, незначителен и не превышает 1 – 2 % от общего уровня потерь.

В четвертой главе рассматривается вопрос уточнения определения мест повреждений на ВЛ при использовании фазных составляющих.

В работе анализируются ОМП по данным одностороннего и двустороннего замеров фиксирующими приборами параметров аварийного режима.

Используемые на практике методики ОМП в подавляющем большинстве случаев не учитывают несимметрию параметров по фазам, транспозицию фаз, взаимовлияние с параллельными ВЛ, характер заземления грозозащитных тросов по длине линии, протекание токов по контурам заземления ПС и опор. В работе была проведена оценка методической погрешности, вызываемой неучетом этих факторов.

В диссертации разработана уточненная методика ОМП для одностороннего и двустороннего способов ОМП, которая заключается в следующем. На основе данных по элементам ЭЭС составляется ее математическая модель. При повреждении какой-либо ВЛ системы появляется определенное количество показаний фиксирующих приборов. Перемещая точку повреждения вдоль модели поврежденной линии, можно для каждой точки получить показания фиксирующих приборов. Из серии расчетных показаний выбираются те, которые наилучшим образом соответствуют показаниям фиксирующих приборов. Метод не привязан к конкретным формулам ОМП, следовательно, он применим к схемам ВЛ произвольной сложности, позволяет использовать общую схему замещения электрической системы в качестве модели, из которой извлекаются расчетные показания фиксирующих приборов.

При двустороннем замере параметров заданному месту повреждения может соответствовать множество токов и напряжений по концам ВЛ, но отношение одноименных величин будет неизменным для заданного места повреждения. Так как большинство фиксирующих приборов регистрируют параметры нулевой последовательности, то в качестве расчетного параметра выступает следующее отношение:

$$\frac{3I_{01}}{3I_{01} + 3I_{02}} \text{ и } \frac{3U_{01}}{3U_{01} + 3U_{02}}, \quad (10)$$

где $3I_{01}$, $3I_{02}$ - токи нулевой последовательности в начале и в конце ВЛ,

$3U_{01}, 3U_{02}$ - напряжение нулевой последовательности в начале и в конце ВЛ.

При анализе двустороннего способа ОМП выявлено, что наибольшая методическая погрешность возникает в местах установки транспозиционных опор.

При одностороннем измерении параметров фиксируются напряжение и ток поврежденной фазы, а также ток нулевой последовательности. Исследование одностороннего способа ОМП показало снижение методической погрешности при осуществлении транспозиции линий.

Результаты расчетов для отдельных ВЛ ОЭС Северо-Запада и Урала показали, что применение разработанной методики позволяет уменьшить погрешность ОМП (до 3,7 % от длины линии).

Для высокочастотной связи на некоторых ВЛ 330 и 500 кВ соответственно с двумя и тремя проводами на фазу устанавливаются изолирующие распорки вместо металлических. Разработанная методика ОМП позволяет находить сложные повреждения на таких ВЛ: КЗ одного из проводов расщепленной фазы; разрыв одного провода расщепленной фазы с одновременным его КЗ на землю.

Использование разработанной методики ОМП на основании двустороннего замера позволяет точно определить расстояние до места повреждения как при КЗ всей фазы, так и при КЗ одного провода расщепленной фазы. При этом необходим учет предшествующего повреждению нагрузочного режима.

При учете возможности КЗ с разрывом одного из проводов расщепленной фазы задача ОМП только по параметрам аварийного режима нулевой последовательности по концам линии не имеет однозначного решения, так как определение характера повреждения не представляется возможным. Чтобы оценить вид повреждения необходимо использовать какой-то дополнительный источник информации. Так, при обрыве одного из проводов в поврежденной фазе будет иметь место увеличенное затухание высокочастотного тракта, что при возможности фиксирования может указать вид повреждения. Если не имеется увеличенного затухания высокочастотного тракта поврежденной фазы, то сначала поиск места КЗ ведется в предположении наиболее вероятных повреждений, которыми являются КЗ одного или двух проводов расщепленной фазы без разрыва. Если в предполагаемом месте КЗ не обнаруживается, то поиск места повреждения осуществляется в предположении КЗ одного провода расщепленной фазы с разрывом его со стороны начала или конца ВЛ.

На ВЛ напряжением 110 - 220 кВ с одним проводом в фазе не исключено появление и такого сложного несимметричного повреждения, как разрыв фазы с одновременным КЗ одного из концов провода. Применение разработанного метода ОМП позволяет по показаниям фиксирующих приборов определить вид и рассчитать расстояние до места повреждения.

Заключение

1. Обоснованы модели элементов и метод формирования (с совместным использованием симметричных и фазных составляющих) общего математического описания ЭЭС при исследованиях несимметричных режимов.
2. Предложены и реализованы два подхода к моделированию ЭЭС с учетом многофазного представления ее элементов: расширение схемы включением внутренних сопротивлений прямой последовательности генераторов и нагрузок, преобразование многофазных узлов ЭЭС к трехфазному виду.
3. Разработан и реализован в виде программы для ПЭВМ алгоритм расчета установившегося и сверхпереходного несимметричного режима ЭЭС произвольной сложности, позволяющий учитывать любые виды несимметрии в элементах сети.
4. Усовершенствован и программно реализован метод расчета наведенных напряжений с учетом пространственного расположения, транспозиции, расщепления фаз и грозозащитных тросов при различных способах их заземления (заземлении на каждой опоре, заземлении на анкерных опорах с одной стороны и разрыве с другой стороны, заземлении только по концам ВЛ), изменения расстояния между осями отключенной и влияющих линий, заземления ВЛ, количества заземленных фаз и грозотросов, сопротивления контура заземления опоры в месте проведения работ, способа заземления грозотроса по длине линии. Достоверность предложенного метода подтверждена натурными измерениями.
5. Получены модели ВЛ с волоконно-оптическим кабелем, встроенным в грозозащитный трос, заземленный на каждой опоре; показано, что заземление грозотроса на каждой опоре существенно снижает уровень наведенных напряжений.
6. Разработана и программно реализована уточненная методика определения места повреждения на ВЛ по данным одностороннего и двустороннего замеров, учитывающая пофазную несимметрию параметров линий. Показано, что учет транспозиции фаз ВЛ, взаимовлияния с другими линиями, характера заземления грозотроса существенно повышает точность ОМП. Предложенный метод также позволяет определять места повреждения при сложных несимметричных аварийных режимах (повреждения проводов в расщепленной фазе с изолирующими распорками, КЗ с одновременным разрывом провода и др.).
7. Разработанный программный комплекс внедрен в ОЭС Северо-Запада, Юга, Центра и применяется при расчетах несимметричных режимов, наведенных напряжений и ОМП.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Попов В.А., Кушкова Е.И., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Защита электродвигателей потребителей от неполнофазного режима на стороне 110 - 220 кВ трансформаторов, работающих с незаземленной нейтралью. - Семинар-совещание начальников служб РЗА АО-энерго, начальников электролабораторий электрических станций, ведущих специалистов РЗА ОЭС Северного Кавказа. Пятигорск, 1998, с. 42 – 43.
2. Попов В.А., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Разработка программы расчета установившихся и сверхпереходных режимов электрических систем при неравенстве фазных параметров ее элементов. - Семинар-совещание начальников служб РЗА АО-энерго, начальников электролабораторий электрических станций, ведущих специалистов РЗА ОЭС Северного Кавказа. Пятигорск, 1998, с. 54 – 56.
3. Попов В.А., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Взаимное влияние двухцепных ВЛ в расчетах установившихся режимов работы электрических систем. (тезисы) Рег. научно-техн. конф. “Наука-производство-технология-экология”. Сб. материалов. ВятГТУ, Киров. 1999 г, 137 – 139.
4. Медов Р.В. Модернизированный метод симметричных составляющих. (тезисы) Рег. научно-техн. конф. “Наука-производство-технология-экология”. Сб. материалов. ВятГТУ, Киров. 2000 г, с. 40 – 42.
5. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. К расчету наведенного напряжения на ремонтируемых линиях электропередачи. Электрические станции, 2000. № 2, с. 30 – 37.
6. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Особенности определения места повреждения на ВЛ с изолирующими распорками в расщепленных фазах. Электрические станции, 2001. № 1, с. 28 – 33.
7. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на режим электрических систем. Электрические станции, 2001. № 2, с. 52 – 59.
8. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Уточнение определения мест повреждения на ВЛ при использовании фазных составляющих. Электрические станции, 2001. № 3, с. 36 – 41.
9. Медов Р.В. ОМП на ВЛ 330 и 500 кВ с изолирующими распорками в расщепленных фазах. Тезисы докладов XIII научно-технической конференции по обмену опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики в энергосистемах Урала. Екатеринбург, 2001, с. 71 – 74.
10. Медов Р.В. Расчет установившихся несимметричных режимов электроэнергетических систем в фазных координатах с применением метода Ньютона. Всероссийская научно-техническая конференция ВятГТУ. "Наука – производство – технология - экология". Сборник материалов. Киров, 2001, с. 41 – 42.

11. Попов В.А., Медов Р.В., Пантюхин М.А. Особенности моделирования ВЛ для расчета наведенных напряжений. Всероссийская научно-техническая конференция ВятГТУ. "Наука – производство – технология - экология". Сборник материалов. Киров, 2002.
12. Медов Р.В. Особенности моделирования ЭЭС при расчетах несимметричных режимов. Всероссийская научно-техническая конференция ВятГТУ. "Наука – производство – технология - экология". Сборник материалов. Киров, 2002.

