

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ТОЧКЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ К РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СЕТЯМ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Дерендяева Л. В., Лохтина А. С., Сбоева В. С.

ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет» Киров, Россия (610000, Киров, ул. Московская, 36), e-mail: kaf_eps@vyatsu.ru

Решение задачи расчета установившихся режимов высших гармонических составляющих возможно лишь при автоматизации процесса, что обусловлено сложностью схем замещения электрической сети и необходимостью учета активных сопротивлений и емкостных проводимостей элементов систем электроснабжения, распределенности параметров кабельных и воздушных линий, влияния вытеснения тока в проводниках на активное и индуктивное сопротивление, а также учет комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. В статье предлагается математическая модель режима высших гармонических составляющих распределительных сетей энергосистем, реализованная в виде программы для ПЭВМ. Предложены схемы замещения линий электропередачи с учетом распределенности параметров, трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации.

Ключевые слова: математическая модель, распределительные сети, схемы замещения, режим высших гармоник, линии электропередачи, силовые трансформаторы, нагрузка.

THE METHOD OF CALCULATION OF HIGHER HARMONIC COMPONENTS IN THE POINT OF CONNECTION OF CONSUMERS TO DISTRIBUTION NETWORKS OF POWER SYSTEMS

Derendyaeva L. V., Lochtina A. S., Sboeva V. S.

Vyatka State University, Kirov, Russia (610000, Kirov, street Moscow, 36), e-mail: kaf_eps@vyatsu.ru

Solution of the problem of the calculation of steady-state regimes of higher harmonic components is possible only in the automation process, because of the complexity of the circuits of the electric network, and the need to account active resistance and capacitance conductivity of the elements of the systems of electricity, distribution of parameters of cable and aerial lines, the impact of displacement current in the conductors on the active and inductive resistance, as well as accounting of the complex coefficients of transformation. In this article we propose a mathematical model of the regime of higher harmonic components distribution-Operative power supply systems, implemented in the form of programs for the PC. Proposed scheme replaced the transmission lines with the consideration of the distribution of parameters, transformers with complex-mi transformation ratios.

Key words: mathematical model, distribution networks, schemes for-placement, mode of higher harmonics, power transmission lines, power transformers, the load.

Причиной возникновения несинусоидальных токов и напряжений в системах электроснабжения предприятий является нелинейность вольт или вебер-амперных характеристик элементов электрических сетей и приемников электроэнергии. К их числу, в первую очередь, относят различного рода преобразователи, главным образом, тиристорные, установки дуговой и контактной электросварки, электродуговые сталеплавильные печи и руднотермические печи, газоразрядные лампы, силовые магнитные усилители. Эти нагрузки потребляют из сети ток, кривая которого оказывается несинусоидальной.

В результате возникают искажения кривой напряжения и тока сети или, другими словами, несинусоидальные режимы. В электрических сетях источниками несинусоидальности могут быть генераторы и трансформаторы при работе их на нелинейной части кривой намагничивания, но, как правило, генераторы и трансформаторы работают при относительно не-

высоком насыщении стали, т.е. на линейной части кривой намагничивания, и создаваемые ими высшие гармонические составляющие малы.

В соответствии с действующими правилами, регулирующими взаимоотношения потребителя и поставщика электрической энергии, в точке коммерческого учета, должен производиться контроль показателей качества покупаемой электрической энергии. Контроль может быть выполнен измерительными приборами, например, Ресурс - UF. Но режим электрических сетей значительно изменяется в течение времени (суток, месяца, года), поэтому с помощью измерительных приборов нельзя получить полную информацию о режиме работы распределительных сетей энергосистем в точке общего присоединения с потребителями. В связи с этим требуется выполнять расчет несинусоидальных режимов с целью прогнозирования уровней высших гармонических составляющих.

Авторами создана методика расчета несинусоидальных режимов работы распределительных сетей энергосистем. Расчеты режимов современных электрических систем и сетей, отличающихся сложной конфигурацией и содержащих весьма большое количество элементов, практически возможны только при применении ЭВМ. Поэтому реализация любых алгоритмов, разработанных для определения тех или иных параметров режима системы, осуществляется методами вычислительной математики. В соответствии с этими методами выполняется расчет каждой конкретной задачи, описанной соответствующими системами уравнений.

Расчет режимов высших гармонических составляющих производится при следующих допущениях:

- система электроснабжения предполагается симметричной и линейной, т.е. все фазы сети обладают одинаковыми одноименными параметрами;
- сопротивления элементов тока высших гармонических составляющих прямой и обратной последовательностей одной частоты принимаются одинаковыми;
- источники гармонических составляющих представляются симметричными трехфазными нагрузками, генерирующими в сеть токи высших гармоник.

Данные допущения позволяют рассматривать режим каждой гармонической составляющей независимо от режима другой и использовать для расчета амплитудных спектров принцип наложения.

Для проведения расчетов необходимо иметь следующие исходные данные:

- однолинейную схему электрической распределительной сети 10–110 кВ;
- данные об элементах электрической сети, необходимые для расчета параметров их схем замещения;
- сведения о параметрах источников высших гармонических составляющих и режимах

их работы.

Расчет несинусоидального режима по предлагаемой методике включает в себя выполнение следующих этапов.

1. Составляется схема замещения системы электроснабжения для токов высших гармоник. Схема замещения составляется на одну фазу и имеет нейтраль, к которой присоединяются нулевые точки схем замещения генераторов, обобщенных нагрузок, батарей конденсаторов, и емкостные проводимости линий электропередачи напряжением выше 1 кВ. Искажающие нагрузки моделируются источниками токов бесконечной мощности, подключенными к соответствующим узлам схемы замещения электрической сети предприятия. Для линий электропередачи составляется схема замещения с учетом волнового характера линии. Схема замещения трансформаторов составляется с учетом комплексных коэффициентов трансформации. Топология схемы замещения описывается с помощью двух массивов, в которых указываются номера узлов начал и концов ветвей.

Схемы замещения элементов систем электроснабжения и распределительных сетей энергосистем приведены на рис. 1

2. Производится расчет параметров схем замещения элементов систем электроснабжения потребителей и распределительных сетей энергосистем для токов обратной последовательности промышленной частоты.

При этом активными сопротивлениями элементов систем электроснабжения пренебрегают, а коэффициенты, учитывающие влияние вытеснения тока в проводниках на индуктивное сопротивление элементов, считаются неизменными на рассматриваемом диапазоне частот.

3. Определяется спектральный состав токов источников высших гармонических составляющих. В связи с тем, что уровни напряжения существенно влияют на амплитудные и фазовые спектры токов преобразователей при их расчетах необходимо использовать значения фактических напряжений электрической сети, найденные из расчета режима прямой последовательности промышленной частоты.

4. Производится расчет режима высшей гармонической составляющей. Формируется матрица проводимостей узлов \mathbf{Y}_y , которая пересчитывается в специальную малозаполненную матрицу коэффициентов обращения \mathbf{G}_n .

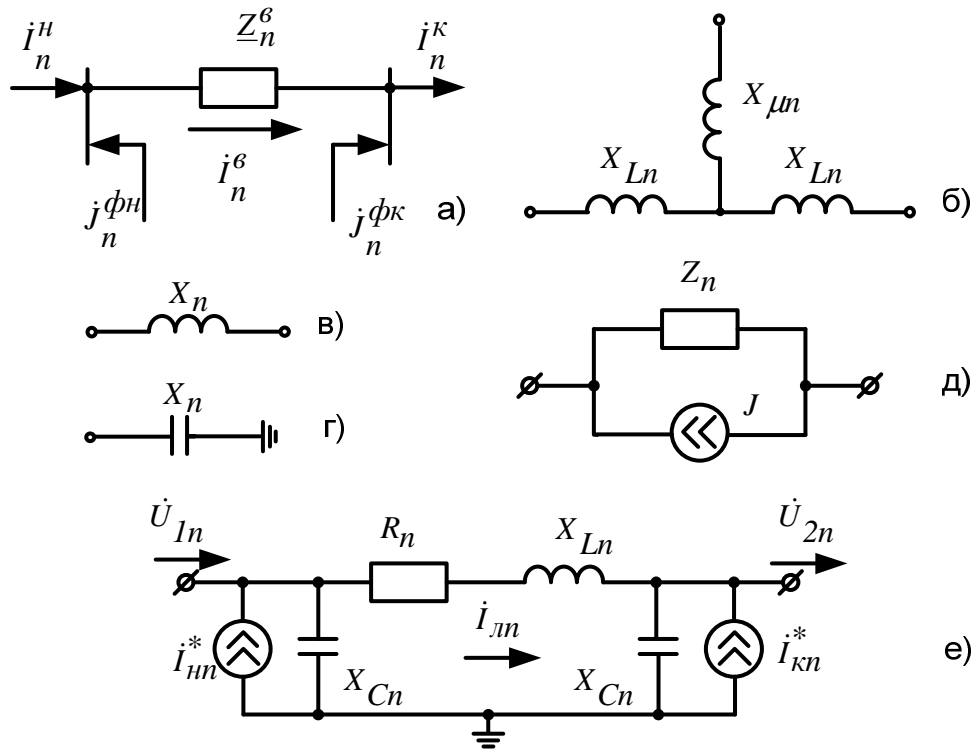


Рис. 1. Схемы замещения элементов системы электроснабжения и распределительных сетей энергосистем:

а) силовой трансформатор; б) двоянный реактор; в) реактор; г) одна или несколько кабельных линий, подключенных к одной секции подстанции, батарея конденсаторов; д) комплексная электрическая нагрузка; е) линия электропередачи.

5. Напряжения высшей гармонической составляющей в узлах схемы замещения и токи в ветвях определяются по формулам:

$$\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{n}} = \mathbf{G}_{\mathbf{n}} \otimes \mathbf{J}_{\mathbf{n}} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{n}} = \mathbf{Y}_{\mathbf{вн}} \cdot \mathbf{M}_{\mathbf{t}} \cdot \dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{n}}, \quad (2)$$

Здесь $\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{n}}, \dot{\mathbf{J}}_{\mathbf{n}}$ – столбцовые комплексные матрицы узловых напряжений и токов для n -ой гармоники; \otimes – знак операции специального умножения справа вектора токов $\mathbf{J}_{\mathbf{n}}$ на матрицу типа \mathbf{G} ; $\mathbf{M}_{\mathbf{t}}$ – транспонированная первая матрица инциденций; $\mathbf{Y}_{\mathbf{вн}}$ – матрица проводимостей для ветвей n -ой гармоники; $\mathbf{G}_{\mathbf{n}}$ – квадратная комплексная матрица коэффициентов обращения, формируемая на основе матрицы проводимостей узлов для токов n -ой гармоники $\mathbf{Y}_{\mathbf{yn}}$.

Поскольку на первом шаге итерационного процесса для линий электропередачи значения задающих токов принимаются, равными нулю, $\dot{I}_{nn}^* = 0, \dot{I}_{kn}^* = 0$, то найденные значения $\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{n}}$

и $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{n}}$ являются приближенными.

6. Используя найденные значения $\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{n}}$, $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{n}}$ и телеграфные уравнения, уточняются значения задающих токов, и вновь выполняется расчет по формулам (1) и (2).

7. Пункты 5 и 6 выполняются для каждой из рассматриваемых гармоник до тех пор, пока для напряжений во всех узлах не выполнится условие (3):

$$\delta U_{ni} = \frac{U_{ni} - U_{ni+1}}{U_{ni}} \leq \delta \quad (3)$$

Здесь U_{ni} и U_{ni+1} – значения напряжений для n -ой гармоники на i и $i+1$ шаге; δ – значение приращения напряжения.

8. По найденным значениям напряжения U_{ni} определяются коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения K_U в узлах, и действующее значение тока I_{ni} в ветвях схемы замещения.

Метод реализован в виде алгоритма и программы «Дельта». При написании программы «Дельта» использовалась среда визуального программирования Delphi 5, программа работает под управлением многозадачной операционной системы Windows на современных персональных ЭВМ. Все исходные данные и результаты расчетов помещаются в базы данных в формате Paradox, которые возможно использовать для дальнейших расчетов, производимых другими программами, что позволяет в перспективе включить программу в комплексы системы автоматического проектирования и управления. В программу вводятся параметры элементов системы электроснабжения, а параметры схемы замещения элементов рассчитываются автоматически. Максимальный размер схемы СЭС ограничивается только памятью используемой ЭВМ, что при современных объемах оперативной памяти ЭВМ делает размер схемы практически неограниченным. Программа «Дельта» позволяет представлять полученные напряжения высших гармоник в узлах в виде комплексных чисел и модулей. Результаты могут быть представлены на экране и выведены в текстовый файл для дальнейшего анализа с помощью других программ.

Таким образом, предложенная методика позволяет рассчитывать и анализировать режим высших гармонических составляющих в точке общего присоединения потребителей и распределительных сетей энергосистем любой сложности, а также позволяет решить следующие задачи:

- определение допустимого вклада потребителей и энергосистемы в качество электрической энергии в точке общего присоединения;
- определение потерь электрической энергии в сетях при протекании по ним токов высших

гармонических составляющих.

Список литературы

1. Арриллага Д., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с., ил.
2. Гераскин О. Т., Черепанов В. В., Дикснис О. К. Две формы математического описания режима высших гармоник систем электроснабжения промышленных предприятий и методы их решения // Изв. АН Латвийской ССР. Сер. Физических и технических наук. – 1989. – № 3. – С. 87–92.
3. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 4-е изд., перераб. и доп. – 331 с.
4. Жуков Л. А., Стратан И. П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. – М.: Энергия, 1979.
5. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др. / под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.: ил.

Рецензенты:

Красных А. А., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электротехника и электробезопасность», ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.

Черепанов В. В., д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение», ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.