

УДК 621.311:658.562

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЙ УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Дерендяева Л.В.

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

Замена электрической системы ее упрощенной моделью находит отражение в соответствующем преобразовании схемы замещения системы. Такие преобразования всегда направлены на получение более простой расчетной схемы. Это дает основание термином «эквивалентирование» характеризовать выполнение упрощенных преобразований схем замещения электрических систем. Предложены методика, алгоритм и программа для расчета частотных характеристик сопротивлений узлов электрической сети. Предложенный метод расчета частотных характеристик является достаточно точным, занимает сравнительно небольшое количество памяти компьютера и человеческого труда при подготовке исходных данных. Предложена эквивалентная схема замещения электрических сетей, которая выделяет три подсистемы, соответствующие трем уровням иерархии. Удовлетворение предложенных критериев эквивалентности обеспечивает неизменность рассматриваемого исходного режима не преобразуемой подсистемы. Это после замены преобразуемых подсистем упрощенной моделью. При расчете эквивалентируемой подсистемы учитываются комплексные коэффициенты трансформации при помощи матрицы, и распределенность параметров линий электропередачи учитывается при помощи поправочных коэффициентов.

Ключевые слова: эквивалентирование, несинусоидальность напряжения, системы электроснабжения, точка общего присоединения.

THE ALGORITHM AND THE PROGRAM OF THE CALCULATION OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RESISTANCE UNITS OF ELECTRIC NETWORK

Derendyaeva L.V.

Vyatka state University, Kirov region, Russia, 610000, Kirov, ul. Moscow, 36), e-mail:dlv.kirov@mail.ru

The replacement of the electrical system of the simplified model is reflected in the transformation of the equivalent circuit of the system. Such transformations are always focused on getting more simple design scheme. This gives grounds for the term «эквивалентирование» to characterize the performance of simple transformations of circuits of electric power systems. The offered techniques, algorithm and program for the calculation of the frequency characteristics of resistance units to the electrical outlet. The proposed method of calculation of the frequency response is accurate enough, occupies a relatively small number of computer memory and human labour in the preparation of the initial data. Offered the equivalent circuit of electric networks, which identifies three subsystems, corresponding to the three levels of the hierarchy. Satisfaction of the suggested criteria equivalence provides the immutability of the source mode subsystem TVET after the replacement of converted subsystems simplified model. When calculating the subsystem are considered the complex coefficients of transformation with the help of the matrix, and distribution of parameters of power transmission lines is taken into account by means of correction factors.

Keywords: equivalenting, nonsinusoidal voltage, power supply system, a common connection point.

Введение

При управлении режимами необходимо решать задачи весьма большого объема. На каждом уровне управления для расчета и анализа режимов используется эквивалентная модель энергосистемы; степень упрощения модели определяется целью исследования, содержанием и качеством исходной информации, особенностями используемых методов и средств решения, временем, располагаемым для решения, и характером использования результатов.

Задача эквивалентирования трактуется обычно как преобразование исходной математической модели в другую, более простую, но сохраняющую основные, существенные при решении поставленной задачи свойства системы. Упрощение при эквивалентировании может достигаться уменьшением количества элементов расчетной схемы и соответственно, уменьшением числа уравнений, описывающих их поведение, пренебрежением менее существенными факторами и снижением порядка уравнений, линеаризацией нелинейных уравнений в некоторой области измерений параметров режима, разделением общей системы на подсистемы с их взаимным согласованием и комбинацией этих и других методов.

Системам уравнений, справедливым для отдельных элементов электрической системы, могут соответствовать те или иные схемы замещения. Поэтому замена электрической системы ее упрощенной моделью находит отражение в соответствующем преобразовании схемы замещения системы. Такие преобразования всегда направлены на получение более простой расчетной схемы. Это дает основание термином «эквивалентирование» характеризовать выполнение упрощенных преобразований схем замещения электрических систем.

Рассмотрим электрические сети, условная схема которых показана на рис.1а. На этой схеме выделены три подсистемы П 1, П 2, П 3, соответствующие трем уровням иерархии. Подсистемы первого уровня включают в себя распределительные пункты 10 кВ, трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ, непосредственно электрические сети 0,4-220 кВ и присоединенные к ней электрические нагрузки. Подсистемы второго уровня иерархии включают в себя главные понизительные подстанции предприятий (ГПП), подстанции глубокого ввода (ПГВ) или главный распределительный пункт 10 кВ (ГРП), линии внешнего электроснабжения предприятий, а также непосредственно распределительные сети энергосистем 10,35,110, 220 кВ. Третий уровень иерархии включает в себя системообразующие сети энергосистем 220-750 кВ, понижающие трансформаторные подстанции 750/220 кВ, 750/110 кВ. Данная схема замещения в обобщенном виде делит всю систему на подсистемы и позволяет характеризовать связи между подсистемами. Связь между подсистемами электрической сети определяется узлами и ветвями примыкания ее схемы замещения. В подсистеме П2, соответствующей распределительным сетям энергосистем, выделен участок Птоп, режим которого и представляет интерес для решения практических задач. Режимы П 1, П 3 и остальной части подсистемы П 2 нас не интересуют.

Для рассматриваемых сетей можно выполнить упрощающие преобразования. Одним из них может явиться получение упрощенных моделей преобразуемых подсистем П 1, П 3 и части подсистемы П 2. При этом предлагается преобразуемые части электрической сети

представить группой эквивалентных схем $\Pi 1^{\mathcal{E}}, \Pi 2^{\mathcal{E}}, \Pi 3^{\mathcal{E}}$, подключенных к узлам примыкания, рис.1б. Такие преобразования небольших участков схемы замещения будем называть локальными. Локальные преобразования позволяют получить схему более удобную для последующих преобразований и расчетов.

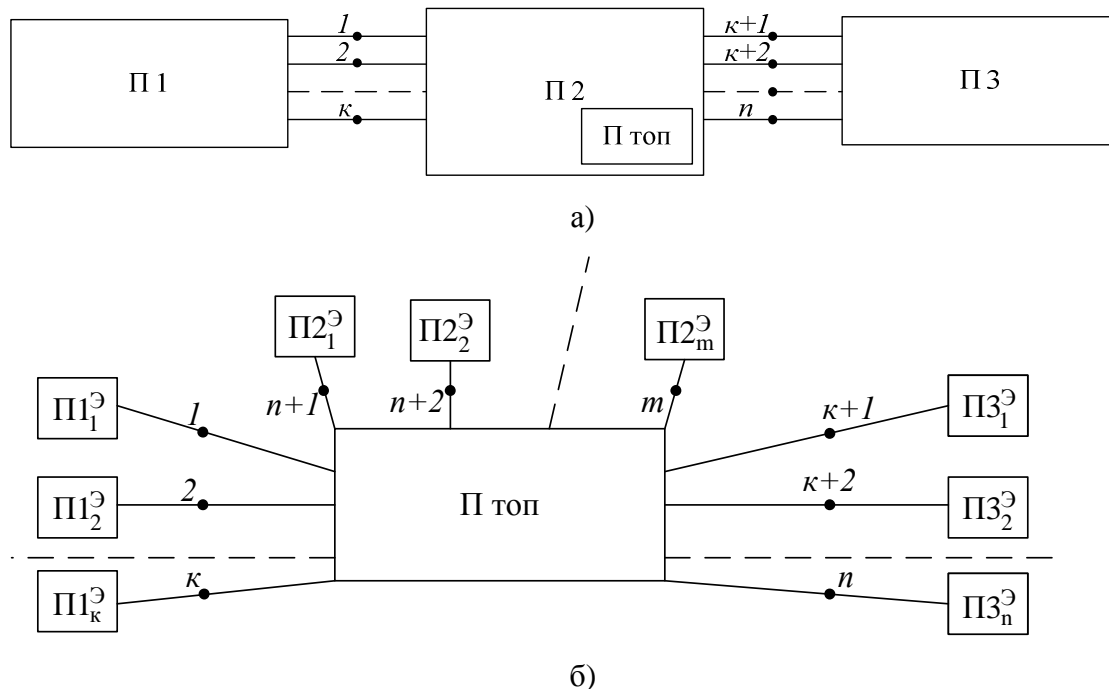


Рис. 1. Условные схемы замещения электрических сетей:

а – исходная схема;

б – преобразованная схема.

Упрощенная модель электрических сетей должна удовлетворять некоторым требованиям, которые называются критериями эквивалентности. Число таких критериев и их содержание зависят от задачи, применительно к которой выполняется эквивалентирование. В качестве критериев, принимаемых для расчета режимов высших гармоник, предлагается применить равенство исходного режима ветвей и узлов примыкания до преобразования схемы замещения и после его выполнения. Этот критерий может быть записан в следующей обобщенной матричной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{np} &= \dot{U}_{np}^{\mathcal{E}} \\ \dot{i}_{np} &= \dot{i}_{np}^{\mathcal{E}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_{np}, \dot{i}_{np}$ – комплексные значения напряжения в узлах примыкания и токов в ветвях примыкания.

Выполнение условия (1) зависит от точности моделирования сопротивления ветви примыкания, равному узловому сопротивлению эквивалентируемой подсистемы $Z_{kk}^{\mathcal{E}}$ и эквивалентного источника тока, подключенному к узлу примыкания.

Схема замещения электрической сети в точке примыкания представлена на рис. 2.

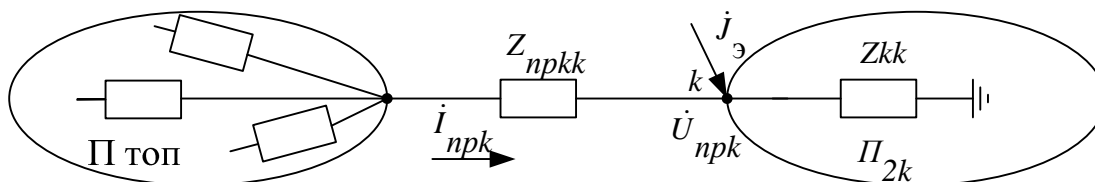


Рис.2. Схема замещения электрической сети в точке примыкания

Если в эквивалентируемой подсистеме есть источники высших гармоник, заданные узловыми токами $j_j^{\Pi 2}$, то эквивалентный источник в узле примыкания определяется следующим образом:

$$j_{npk}^{\mathcal{E}} = \frac{1}{Z_{kk}^{\prime\prime}} \cdot \sum_{j=1}^m Z_{lp} \cdot j_j^{\Pi 2}, \quad (3)$$

Здесь $Z_{kk}^{\prime\prime}$ – собственное узловое сопротивление подсистемы Птоп относительно узла примыкания; Z_{lp} – узловое сопротивление между узлами l и p подсистемы П2k до эквивалентирования.

Алгоритм эквивалентирования подсистем включает составление графа сети, расчет сопротивлений элементов для каждой гармоники, формирование матриц проводимостей узлов Y_{yn} , далее рассчитывается матрица узловых собственных и взаимных сопротивлений $Z_{kk}^{\mathcal{E}}$. В данной матрице особый интерес представляют диагональный элемент Z_{nkk} , который и является эквивалентным сопротивлением подсистем П2 \mathcal{E} относительно узла примыкания k .

Матрицу проводимости узлов эквивалентируемой электрической сети можно записать в виде [1]:

$$Y_{yn} = C^{-1}_1 \cdot C^{-1}_2 \dots C^{-1}_{r-1} \cdot C^{-1}_r \cdot Y_0 \cdot C^{-1}_{rt} \cdot C^{-1}_{r-1t} \dots C^{-1}_{2t} \cdot C^{-1}_{1t} \quad (4)$$

Так как матрица узловых собственных и взаимных сопротивлений сети $Z^{\mathcal{E}}_{kk}$ есть обратная матрица по отношению к матрице проводимостей узлов сети Y_{yn} , то получим:

$$Z^{\mathcal{E}}_{kk} = Y^{-1}_n = C_{1t} \cdot C_{2t} \dots C_{r-1t} \cdot C_{rt} \cdot Y_0^{-1} \cdot C_r \cdot C_{r-1} \dots C_2 \cdot C_1. \quad (5)$$

При расчете $Z^{\mathcal{E}}_{kk}$, т.е. собственного сопротивления узла замыкания после эквивалентирования, необходимо учесть комплексные коэффициенты трансформации и распределенность параметров линий электропередачи.

При расчете собственных узловых сопротивлений эквивалентируемой подсистемы необходимо учесть комплексные коэффициенты трансформации и распределенность параметров линий электропередачи. Учет комплексных коэффициентов трансформации выполнен введением в схему замещения дополнительных задающих фиктивных токов J_n^{Φ} [2]. Численные значения этих токов определяются через напряжения узлов, к которым они подключены. Т.е. на момент эквивалентирования численные значения этих токов неизвестны. Поэтому комплексные коэффициенты трансформации предлагается учитывать с помощью матрицы Y_n^{Φ} . При этом узловое уравнение примет вид:

$$Y_n \cdot \dot{U}_n = \dot{J}_n, \quad (6)$$

где $Y_n = Y_{yn} - Y_n^{\Phi}$ – матрица узловых проводимостей при наличии в ветвях схемы трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации;

Y_{yn} – матрица узловых проводимостей эквивалентируемой подсистемы без учета комплексных коэффициентов трансформации.

Таким образом, при эквивалентировании подсистем, содержащих трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации, сначала находится матрица Y_n^{Φ} , затем находится матрица Y_n и далее определяют $Z^{\mathcal{E}}_{kk}$ для эквивалентируемой подсистемы. Распределенность параметров линий электропередачи при эквивалентировании учитывается при определении параметров их схем замещения с помощью поправочных коэффициентов k_m, k_{xn}, k_{bn} , определяемым по известным формулам [3]:

$$k_{rn} = 1 - 0,38 \cdot 10^{-6} \cdot l^2 \cdot n^2; \quad (7)$$

$$k_{xn} = 0,5 \cdot (1 + k_{rn}); \quad (8)$$

$$k_{bn} = 0,5 \cdot \left(\frac{3 + k_{rn}}{1 + k_{rn}} \right). \quad (9)$$

Для проведения расчетов необходимо иметь следующие данные:

- однолинейную схему электрической распределительной сети 10-220кВ;
- данные об элементах электрической сети, необходимые для расчета параметров их

схем замещения. Трансформаторы, генераторы, реакторы и батареи конденсаторов задаются каталожными или паспортными данными, линии электропередачи – сведениями об их длине и погонных сопротивлениях и емкостных проводимостях, предприятия – расчетными нагрузками характерных групп приемников.

Расчет матрицы узловых и взаимных сопротивлений 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 1000 вольт. Для линий электропередачи составляется схема замещения с учетом распределенности параметров линий электропередачи. 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.
2. Вычисляются сопротивления элементов схемы замещения системы электроснабжения для токов обратной последовательности промышленной частоты.
3. Для рассматриваемой гармоники вычисляются параметры схем замещения элементов системы электроснабжения с учетом распределенности параметров линий электропередачи и комплексных коэффициентов трансформации. Вычисляются матрицы узловых проводимостей Y_n .
4. Производится расчет матрицы узловых собственных и взаимных сопротивлений сети Z_{kk}^{ω} по формуле, представленной выше.
5. Пункты 3,4 и 5 выполняются для каждой из рассматриваемых гармоник.
6. Результатом расчетов является диагональный элемент матрицы $Z_{kk}^{\omega} - Z_{nkk}$.

При написании программы «Дельта 1» использовалась среда визуального программирования Delphi 5, программы работают 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 для данного вида элементов программа рассчитывает автоматически. Максимальный размер схемы СЭС ограничивается только памятью используемой ЭВМ, что при современных объемах оперативной памяти ЭВМ делает размер схемы практически неограниченным. Программа «Дельта 1» позволяет представлять полученные значения сопротивлений 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.

Список литературы

1. Арриллага Д., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с., ил.
2. Гераскин О.Т, Коновалов С.Л., Черепанов В.В. Алгоритм и программа расчета несинусоидальных режимов в электрических сетях промышленных предприятий. В кн.: Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Материалы конференции, Таллин, 1986, ч. II. – С.29-31.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с., ил.
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.: Издат. дом МЭИ, 2006. – 320 с.: ил.

Рецензенты:

Черепанов В.В., д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение», ФГБОУ ВПО «ВятГУ», г. Киров.

Красных А.А., д.т.н., профессор кафедры «Электротехника и электробезопасность», ФГБОУ ВПО «ВятГУ», г. Киров.