

Теория сигналов и систем

УДК 621.316.1

В.Я. Жуйков, д-р.техн.наук, Е.С. Осипенко

Определение коэффициента передачи в Смарт Грид методом структурных чисел

В данной статье рассмотрен ускоренный расчет коэффициента передачи методом структурных чисел с учетом особенностей работы системы Смарт Грид.

In this article the expedited calculation of transmission coefficient with the structural numbers method taking into account operational features of the Smart Grid system is investigated.

Ключевые слова: *Смарт Грид, метод структурных чисел, коэффициент передачи.*

Введение

В настоящее время развитие современных энергосистем, таких как Смарт Грид, в отличие от централизованных систем генерации мощности, в которых производство электроэнергии осуществляется крупными электростанциями, основано на применении принципа децентрализации с широким использованием возобновляемых источников энергии [1], и прежде всего энергии ветра и солнца, что требует оптимизации совместной работы различных источников энергии для повышения энергоэффективности системы [2].

Последнее подтверждается и тем, что по прогнозам Международного энергетического агентства, к 2030 г. потребности человечества в электроэнергии возрастут до 30116 млрд. кВт·ч, при этом каждый выработанный кВт·ч электрической энергии должен быть максимально эффективно использован [3].

Так как Смарт Грид является динамической системой, изменяющейся как в пространстве (подключение и отключение генераторов и потребителей), так и во времени (изменяющиеся потоки энергии, суточные и сезонные графики нагрузок) [4], то актуальной является задача определения её оптимальной структуры в динамике.

Одним из этапов оптимизации структуры сети является выбор режима работы отдельного генератора, как источника напряжения или тока, и, соответственно, определение коэффициента передачи от различных узлов генерации энер-

гии к узлам её потребления, что позволяет выбрать режим с минимальными потерями энергии.

Так как определение коэффициента передачи должно проводиться непрерывно в связи с динамически изменяющимися параметрами генераторов и нагрузок, то суммарное время, затраченное на расчет, может составлять значительную долю в работе алгоритма.

Целью данной статьи является разработка способа определения коэффициента передачи, который минимизирует количество времени, необходимое на его расчет.

Структура сети

В общем случае Смарт Грид представляется в виде электрической схемы, содержащей N источников и M нагрузок (рис. 1).

На рис. 1: $E_1...E_n$ – источники энергии, каждый из которых может работать в нескольких режимах:

- 1) независимый (ведущий) источник напряжения;
- 2) зависимый (ведомый) источник тока;
- 3) источник энергии постоянной мощности;
- 4) источник энергии со специальной внешней характеристикой; $R_{v1}...R_{vn}$ – внутренние сопротивления источников; $R_{n1}...R_{nm}$ – сопротивления нагрузок; $R_{l1}...R_{ln}$ – внутренние сопротивления линий передач.

Для минимизации потерь энергии в системе осуществляется перевод режима работы источника энергии (от ведущего к ведомому) в зависимости от величины генерируемой энергии. Для этого необходимо определить, на каких интервалах времени какой из источников отдает больше энергии в нагрузки. Энергия, передаваемая в нагрузки, пропорционально зависит от коэффициента передачи между узлами. Для вычисления коэффициента передачи воспользуемся методом структурных чисел, который является инструментом для быстрого пересчета характеристических функций сети при изменении её конфигурации и позволяет проводить анализ сети на основе её графа [5].

Метод структурных чисел удобен в тех случаях, когда происходит подключение или отключение ветвей. В общем случае можно определить структурное число гипотетической сис-

темы, в которую включены все предполагаемые конфигурации сети, а затем легко осуществлять переход к частным структурным числам каждой из конфигураций.

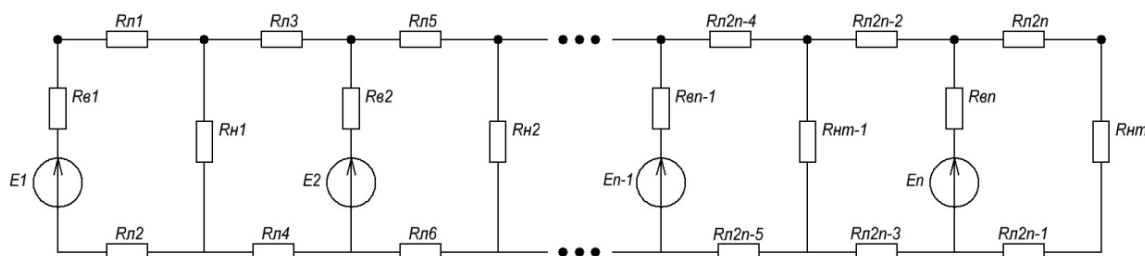


Рис. 1. Электрическая схема, соответствующая сети Смарт Грид

Проведем расчет коэффициента передачи от n -ой к m -ой ветви в сети в общем виде. Электрическая схема, изображенная на рис. 1 представляется в виде графа. Ветви графа нумеру-

ются натуральными числами, как показано на рис. 2. При этом вес каждой ветви определяется её сопротивлением.

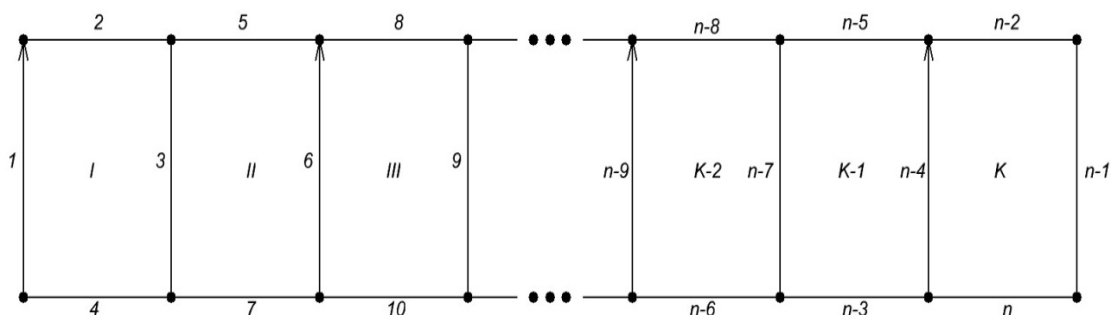


Рис. 2. Граф, соответствующий электрической схеме

Для упрощения расчёта все сопротивления линий передач объединяются в пределах одно-

го контура, и преобразованный граф (рис. 2) выглядит следующим образом (рис. 3).

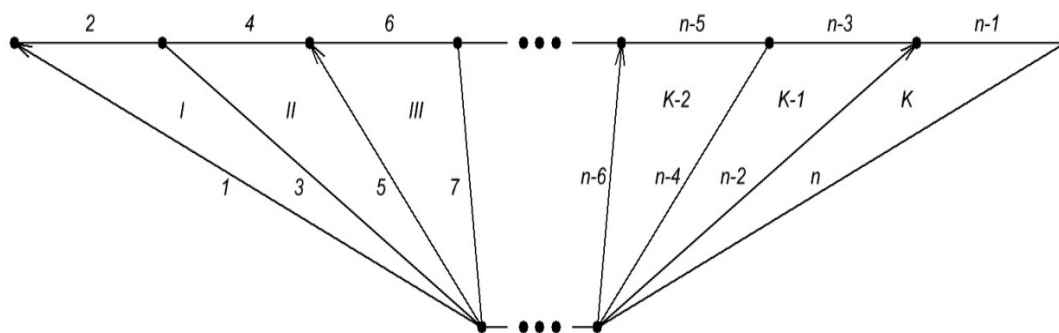


Рис. 3. Преобразованный граф

Общее структурное число для схемы запишется следующим образом: K независимых переменных определяются из $K+1$ контуров, которым соответствуют множества чисел, например,

контур III (рис. 3) соответствует множество [6 8 9 10]. Структурное число A определяется как декартово произведение K множеств и запишется в виде:

$$\begin{aligned}
 A &= [1234][3567][68910] \dots \\
 &\dots [n-9 \ n-8 \ n-7 \ n-6] \times \\
 &\times [n-7 \ n-5 \ n-4 \ n-3][n-4 \ n-2 \ n-1 \ n] = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & 9 & 10 \\ 3 & 3 & \dots & n-9 & n-6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n-7 & n-5 & \dots & n-7 & n-3 \\ n-4 & n-2 & \dots & n-4 & n \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Если в общей схеме (рис. 1) какой-либо из источников не генерирует энергию, либо отключен, это соответствует размыканию соответствующей ветви на графе (рис. 3). Например, при выключении источников E2 и E_{n-1} ветви 6 и n-9 разомкнуты и структурное число запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 A &= [1234][357][68910] \dots [n-8 \ n-7 \ n-6] \cdot \\
 &\cdot [n-7 \ n-5 \ n-4 \ n-3][n-4 \ n-2 \ n-1 \ n] = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & 9 & 10 \\ 3 & 3 & \dots & n-8 & n-6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n-7 & n-5 & \dots & n-7 & n-3 \\ n-4 & n-2 & \dots & n-4 & n \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

то есть из общего структурного числа будут исключены столбцы, содержащие элементы 6 и n-9.

Выражение для вычисления коэффициента передачи ведущего источника (коэффициент передачи по напряжению) методом структурных чисел имеет вид:

$$K_u = \frac{U_\delta}{E_\alpha} = \frac{\text{Sim}_Z \left(\frac{\partial A}{\partial \alpha}, \frac{\partial A}{\partial \delta} \right) - \sum_{i=1}^{N-1} W_i \cdot \text{Sim}_Z \left(\frac{\partial^2 A}{\partial \alpha \partial \gamma_i}, \frac{\partial^2 A}{\partial \beta_i \partial \delta} \right) + \sum_{i < j} W_i W_j \cdot \text{Sim}_Z \left(\frac{\partial^3 A}{\partial \alpha \partial \gamma_i \partial \gamma_j}, \frac{\partial^3 A}{\partial \delta \partial \beta_i \partial \beta_j} \right)}{\det_Z A + \sum_{i=1}^{N-1} W_i \cdot \text{Sim}_Z \left(\frac{\partial A}{\partial \beta_i}, \frac{\partial A}{\partial \gamma_i} \right) - \sum_{i < j} W_i W_j \cdot \text{Sim}_Z \left(\frac{\partial^2 A}{\partial \beta_i \partial \beta_j}, \frac{\partial^2 A}{\partial \gamma_i \partial \gamma_j} \right)} \cdot Z_\delta,$$

где $\partial A / \partial \alpha$ – алгебраическая производная; $\delta A / \delta \alpha$ – обратная производная структурного числа A по элементу α ; $W_i = K Z_i$ – передаточный активный импеданс зависимого источника; $\det_Z A$ – детерминантная функция структурного числа;

$\text{Sim}_Z \left(\frac{\partial A}{\partial \alpha}, \frac{\partial A}{\partial \beta} \right)$ – функция совпадения для графа, содержащего ориентированные рёбра α и β [5].

Зная коэффициент передачи ведущего источника, легко вычислить коэффициент передачи ведомого источника (коэффициент передачи по току), используя формулу: $K_i = K_u \frac{Z_\alpha}{Z_\beta}$.

Знание коэффициентов передачи K_u и K_i , позволяет приступить к расчету потерь энергии в схеме. Для обеспечения соответствующего уровня отбора энергии необходимо рассчитать все коэффициенты передачи от каждого источника во все нагрузки. Количество этих коэффициентов НК рассчитывается по формуле:

$$N_K = \sum_{i=1}^{i=k} C_k^i \cdot \sum_{l=1}^{l=n} \sum_{p=m}^{p=m} A_n^l \cdot A_m^p,$$

где n – количество генераторов в сети, m – количество нагрузок в сети, k – количество уровней генерируемой энергии для каждого источника.

Для иллюстрации расчета количества коэффициентов передачи рассмотрим два приме-

ра: рис. 4 и рис. 5. В сети, представленной на рис. 4, каждый источник генерирует один уровень энергии, и количество коэффициентов, которые необходимо рассчитать, равно 16.

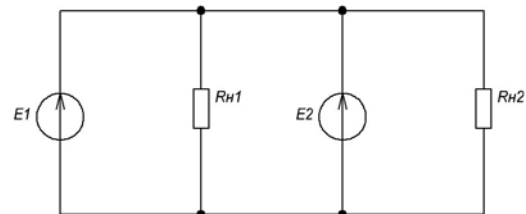


Рис. 4. Сеть с двумя источниками

В сети, представленной на рис. 5, предположим, что из трех источников каждый генерирует три уровня энергии, и количество коэффициентов, которые необходимо рассчитать, равно 336.

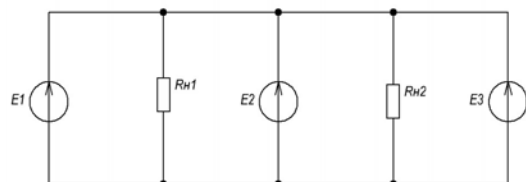


Рис. 5. Сеть с тремя источниками

Таким образом, при увеличении количества источников и нагрузок в сети, количество коэффициентов передачи, которые необходимо рассчитать, стремительно растет. Для сокращения

времени расчета необходимо этот процесс упростить и алгоритмизировать.

Алгоритмизация расчета коэффициента передачи

Граф, приведенный на рис. 3, представим в виде радиальной топологии сети (рис. 6), где направленные радиальные линии соответствуют ветвям, содержащим источники энергии, ненаправленные радиальные линии соответствуют нагрузкам, а линии, лежащие на дуге, соответствуют линиям передач.

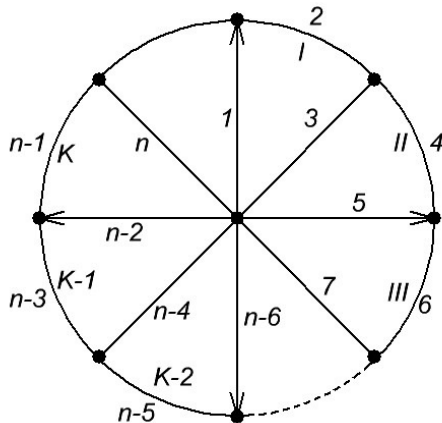


Рис. 6. Радиальная топология сети

При расчете коэффициента передачи в радиальной сети функция совпадения приобретает новый смысл – она включает в себя линейные комбинации весов ветвей, необходимых для образования замкнутых контуров с ветвями, между которыми осуществляется передача энергии. При этом знаки слагаемых указывают на взаимную направленность ветвей.

Если количество секторов в радиальной сети равно K, то количество ветвей, входящих в замкнутый контур равно K+1, количество ветвей, необходимое для образования замкнутых контуров равно K-1.

Для упрощения расчетов и уменьшения количества операций для расчета коэффициента передачи между ветвями схемы воспользуемся методом перестановки теории групп [6]: рассчитаем коэффициент передачи для первоначальной конфигурации сети с нечетным количеством секторов, а затем, при изменении конфигурации сети, в формулах для расчета коэффициента передачи заменим соответствующие индексы весов ветвей в слагаемых, в которых присутствует ветви, между которыми осуществляется передача, а в слагаемых, где эти ветви отсутствуют, заменим индексы на симметричные. Для определения симметричных индексов проведем ось симметрии через ветвь, содержащую источник энергии.

Например, для сети с тремя контурами (рис. 7), где ветвь 1 содержит источник энергии, ветви 2 и 3 – нагрузки, а ветви 4, 5, 6 – линии передач, ось симметрии проведена через ветвь 1, симметричными являются ветви 2 и 3, а также 4 и 5.

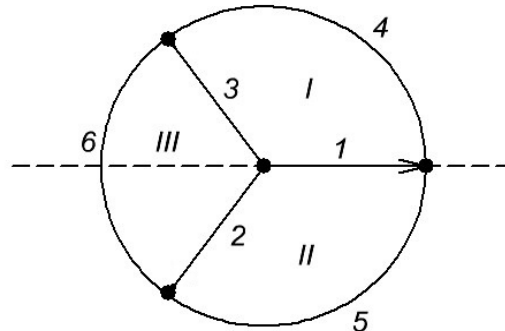


Рис. 7. Сеть с тремя контурами

В этом случае количество ветвей, входящих в замкнутый контур равно 4, количество ветвей, необходимое для образования замкнутых контуров равно 2, а количество слагаемых в функции совпадения равно 4.

В этом случае количество ветвей, входящих в замкнутый контур равно 4, количество ветвей, необходимое для образования замкнутых контуров равно 2, а количество слагаемых в функции совпадения равно 4.

Рассчитаем коэффициент передачи между ветвями 1 и 2, 1 и 3. В первом случае функция совпадения будет равна

$$Sim_z \left(\frac{\partial A}{\partial 1}, \frac{\partial A}{\partial 2} \right) = z_3 z_4 + z_3 z_5 + z_3 z_6 + z_4 z_6.$$

$$\text{А во втором} - Sim_z \left(\frac{\partial A}{\partial 1}, \frac{\partial A}{\partial 3} \right) = z_2 z_4 + z_2 z_5 + z_2 z_6 + z_5 z_6.$$

На рис. 8 а) и б) представлены варианты образования замкнутых контуров между ветвями 1 и 2, 1 и 3 для определения функций совпадения.

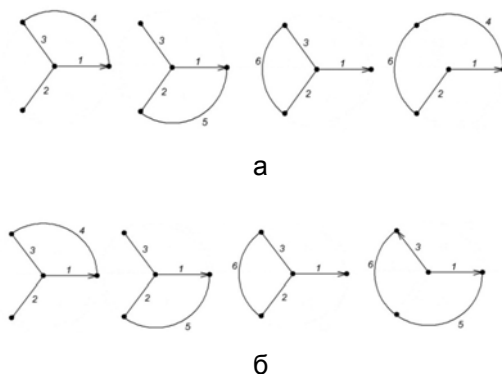


Рис. 8. Варианты образования замкнутых контуров между ветвями 1 и 2m (а), варианты образования замкнутых контуров между ветвями 1 и 3 (б)

Вывод

Уменьшение трудоёмкости и сокращение времени расчёта коэффициента передачи при вычислении функций совпадения достигаются за счет устранения операций составления структурного числа, взятия производных и определения конъюнкций, при этом расчет сводится к определению индексов ветвей, образующих замкнутые контура с ветвями, между которыми осуществляется передача энергии.

Литература

1. Кириленко О.В., Павловський В.В., Яндутьський О.С., Стелюк А.О. Керування режимом роботи електростанції з відновлювальними джерелами енергії в умовах зміни частоти в енергосистемі // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 4. – С. 52–57.
2. Калашников В.И. Перспективы развития интеллектуальных энергосистем / Калашников В.И., Левшов А.В., Сивокобыленко В.Ф. // Вестник национального технического универ-

ситета «Харьковский политехнический институт». – Вып. 28. – Харьков: 2010.

3. Верес О. М. Концептуальна модель інформаційної системи прийняття рішень з контролю електропостачання / О. М. Верес, А. Б. Полоцький // Інформаційні системи та мережі : збірник наукових праць / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Національний університет "Львівська політехніка" ; відповідальний редактор В. В. Пасічник. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 50-59.
4. Стогній Б.С., О.В.Кириленко, С.П.Денисюк. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.
5. Беллерт С., Вознячки Г. Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел. М.: Мир. 1972г. 332 с.
6. Ляховский В. Д., Болохов А. А. Группы симметрии и элементарные частицы, Изд-во ЛГУ, 1983.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Поступила в редакцію 16 октября 2012 г.