

## 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;  $R_{v1}...R_{vp}$  – 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.

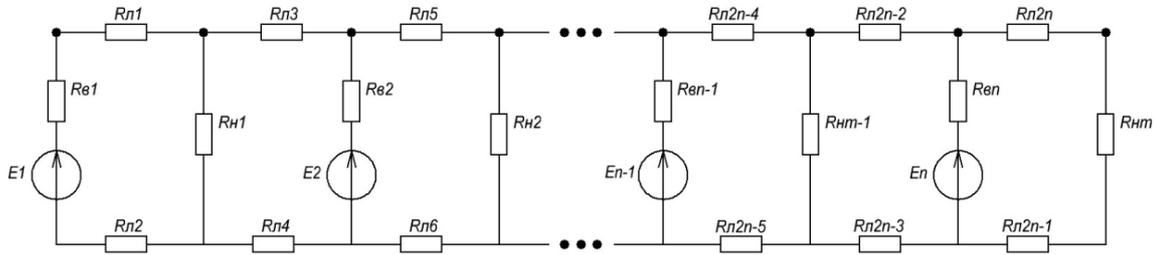


Рис. 1. Электрическая схема, соответствующая сети Смарт Грид

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.

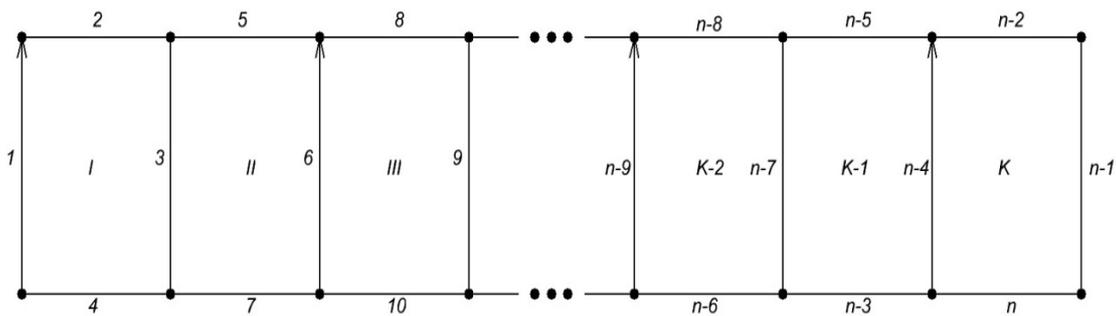


Рис. 2. Граф, соответствующий электрической схеме

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

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

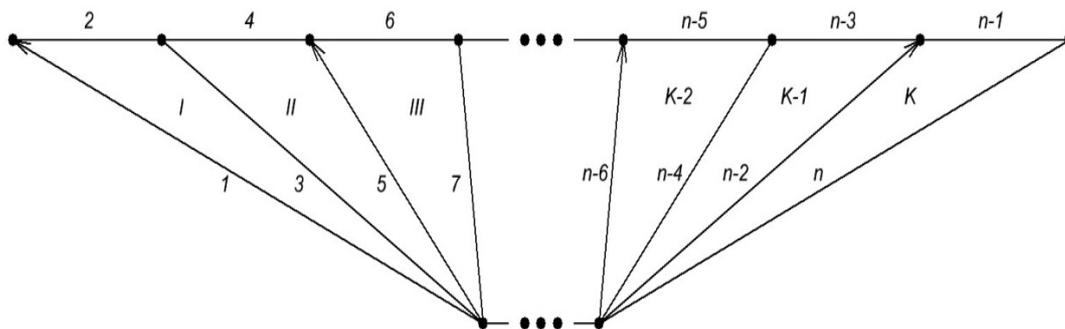


Рис. 3. Преобразованный граф

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:

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

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 En-1 ветви 6 и n-9 разомкнуты и структурное число запишется в следующем виде:

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

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:

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

где  $\partial A / \partial \alpha$  – алгебраическая производная;  $\delta A / \delta \alpha$  – обратная производная структурного числа A по элементу  $\alpha$ ;  $W_i = Kz_i$  – передаточный активный импеданс зависимого источника;  $\det_Z A$  – детер-

минантная 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  $\alpha$  и  $\beta$  [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:

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

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.

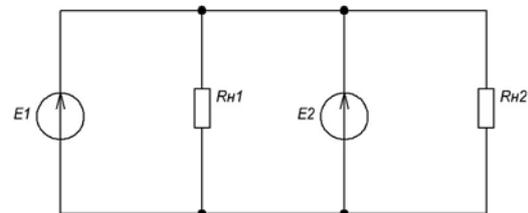


Рис. 4. Сеть с двумя источниками

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

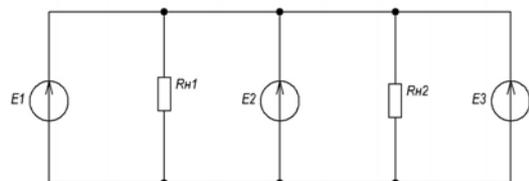


Рис. 5. Сеть с тремя источниками

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.

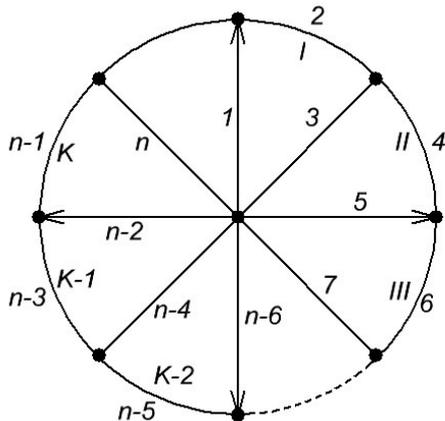


Рис. 6. Радиальная топология сети

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.

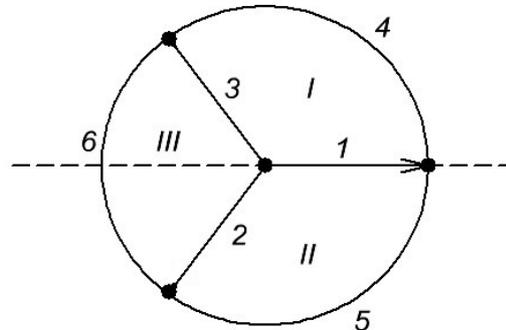


Рис. 7. Сеть с тремя контурами

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

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

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.

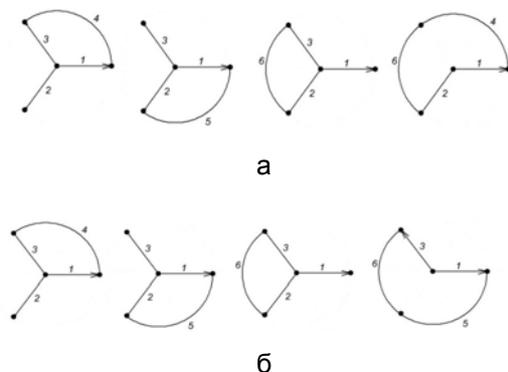


Рис. 8. Варианты образования замкнутых контуров между ветвями 1 и 2m (а), варианты образования замкнутых контуров между ветвями 1 и 3 (б)

## 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. // Весник 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.

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»

Поступила в редакцию 16 октября 2012 г.