

Оптимизационный подход к определению параметров пассивных фильтров

КОВЕРНИКОВА Л.И., НГУЕН ЧИ ТХАНЬ, ХАМИСОВ О.В.

Сформулирована оптимизационная задача определения параметров пассивных фильтров для централизованного снижения напряжений высших гармоник в сети с распределенными нелинейными нагрузками. Для ее решения разработан двухэтапный алгоритм на основе методов роя частиц и внутренних точек. Приведен пример применения предложенного алгоритма для определения параметров пассивного фильтра третьего порядка для реальной сети 220 кВ.

Ключевые слова: электрическая энергия, качество, высшие гармоники, пассивный фильтр, оптимизационная задача

Снижение значений напряжений высших гармоник (ВГ) в узлах сети общего назначения до требуемых [1] остается нерешенной проблемой обеспечения качества электрической энергии в течение многих лет. Огромное число нелинейных нагрузок, в том числе большой мощности, потребляют из сети несинусоидальный ток, загружающий элементы сети и искажающий синусоидальную форму кривой напряжения в узлах сети: в кривой напряжения появляются ВГ. Эти гармоники токов и напряжений вызывают значительный ущерб, что отмечается в различных публикациях [2–6]. Одним из технических средств снижения значений напряжений ВГ являются пассивные фильтры, которые несмотря на появление активных фильтров остаются востребованными [6–11], поскольку значительно дешевле активных. Пассивные фильтры могут устанавливаться непосредственно вблизи нелинейных нагрузок для компенсации токов ВГ, которые они генерируют, или для централизованного применения в сети с распределенными нелинейными нагрузками. Пассивные фильтры также используются в составе гибридных схем, где они позволяют сократить число ВГ.

В электроэнергетике применяются четыре типа пассивных фильтров: первого – третьего порядков и С-типа [3]. Пассивные фильтры снижают значения напряжений ВГ в узлах сети, изменяя ее частотные свойства. При этом они выполняют две функции: на основной частоте генерируют реактивную мощность, а настраиваемой гармонике для тока настраиваемой гармонике создают путь с наименьшим сопротивлением, не давая ему возможности растекаться по сети и вызывать искажения формы кривой напряжения. Пассивные фильтры

The optimization problem of determining the parameters of passive filters for reducing higher-harmonic voltages in a network with distributed nonlinear loads in a centralized manner is formulated. A two-stage algorithm based on the particle swarm method and on the method of internal points is developed for solving the problem. An example of using the proposed algorithm for determining the parameters of a third-order filter for a real 220 kV network is given.

Key words: electric energy, quality, higher harmonics, passive filter, optimization problem

состоят из реактора, одного или двух конденсаторов, резистора с активным сопротивлением, соединенных между собой. Определение параметров пассивных фильтров представляет собой сложную задачу.

В статье предлагается оптимизационный подход к определению параметров пассивных фильтров при централизованном сокращении напряжений ВГ в радиальной сети с распределенными нелинейными нагрузками. В формулируемой оптимизационной задаче в качестве целевой функции принят минимум потерь активной мощности в фильтре на настраиваемой гармонике. В задаче введено ограничение, которое обеспечивает индуктивный характер реактивного сопротивления пассивного фильтра на гармониках выше гармонике настройки, чтобы избежать возникновения резонансного контура в узле сети после подключения фильтра на этих гармониках. Для решения оптимизационной задачи разработан двухэтапный алгоритм на основе методов роя частиц и внутренних точек. Предложенный подход может быть использован для определения параметров элементов всех четырех типов фильтров. В данной статье в качестве иллюстрации применения разработанного алгоритма приведен пример определения параметров фильтра третьего порядка. Для авторов представляли интерес фильтры с малыми потерями активной мощности на основной частоте, поскольку рассматривалась проблема централизованного снижения напряжений ВГ в сети высокого напряжения путем установки фильтра в одном из ее узлов. Такими фильтрами с малыми потерями активной мощности на основной частоте являются фильтры С-типа и третьего порядка. В [12] уже было рассмотрено определение

параметров фильтра С-типа для централизованного применения. Преимуществом фильтра третьего порядка по сравнению с фильтром С-типа кроме меньшего значения потерь активной мощности на основной частоте является то, что он менее чувствителен к изменениям частоты сети и параметров элементов фильтра [13]. Проведенные ранее исследования показали, что пассивный фильтр третьего порядка может использоваться для централизованного снижения напряжений высших гармоник [14].

Пассивный фильтр третьего порядка. Такой фильтр – это устройство, которое присоединяется к узлу электрической сети, и его принципиальная схема приведена на рис. 1.

Фильтр состоит из двух конденсаторов X_{C1} , X_{C2} , реактора X_L и резистора с активным сопротивлением. Из [15] известно, что значение активного сопротивления реактора, применяемого в фильтрах, в 60–100 раз меньше значения индуктивного сопротивления. Расчеты показали, что при таких соотношениях активного и индуктивного сопротивлений реактора в задачах определения параметров элементов фильтра третьего порядка активным сопротивлением реактора можно пренебречь. Поэтому в дальнейшем для упрощения расчетов активное сопротивление реактора не учитывается. Значение X_{C2} должно быть много больше значения X_{C1} , на что указывается в [13]. Обозначим вектор искомых параметров фильтра на первой гармонике как $x = (R, X_L, X_{C1}, X_{C2})^T$.

Математическая постановка оптимизационной задачи определения параметров фильтра. В публикациях, где представлены оптимизационные задачи определения параметров пассивных фильтров, в качестве минимизируемых целевых функций рассматриваются значения токов и напряжений высших гармоник [16], значение действующего значения тока [17], стоимость фильтров [11, 18], потери активной мощности в фильтре [11, 19], сумма квадратов реактивных токов высших гармоник [9] и т.д. Ранее проведенные исследования показали [12, 14], что потери активной мощности в фильтрах С-типа и третьего порядка на первой гармонике и на высших гармониках, отличных от настраиваемой,

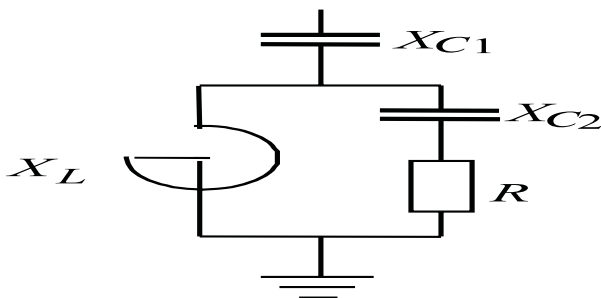


Рис. 1. Принципиальная схема фильтра третьего порядка

мой, незначительны по сравнению с потерями на настраиваемой гармонике. Основные потери активной мощности происходят на настраиваемой гармонике. Поэтому в задаче в качестве целевой функции принят минимум потерь активной мощности в фильтре на настраиваемой гармонике.

Целевая функция. Пусть пассивный фильтр устанавливается в узле p . Потери активной мощности в фильтре вычисляются как

$$P_n(x) = I_{nf}^2 R_{nf}, \quad (1)$$

где n – номер настраиваемой гармоники; I_{nf} – ток n -й гармоники, протекающий через фильтр; R_{nf} – активное сопротивление фильтра на n -й гармонике; индекс « f » указывает на присутствие фильтра.

Величина I_{nf} в соответствии с [20] определяется выражением

$$I_{nf} = \frac{U_{np}}{\sqrt{(R_{npp} + R_{nf})^2 + X_{npp}^2}}, \quad (2)$$

где U_{np} – напряжение n -й гармоники в узле p до установки фильтра; R_{npp} , X_{npp} – входные активное и реактивное сопротивления сети n -й гармоники относительно узла p до установки фильтра, которые могут быть определены с помощью матрицы узловых сопротивлений Z_n [21], вычисленной для n -й гармоники.

Выражение (2) показывает, что на величину тока n -й гармоники, протекающего через фильтр, оказывают влияние активное и реактивное сопротивления сети относительно узла, в котором установлен фильтр, и поэтому определять параметры пассивных фильтров без учета влияния сети нельзя. С учетом (2) выражение для активных потерь (1) принимает следующий вид:

$$P_n(x) = \frac{U_{np}^2 R_{nf}}{(R_{npp} + R_{nf})^2 + X_{npp}^2}. \quad (3)$$

Выражение (3) является минимизируемой целевой функцией.

Для фильтра третьего порядка входное активное сопротивление на n -й гармонике через параметры фильтра на первой гармонике может быть представлено как

$$R_{nf} = \frac{RX_L^2 n^4}{R^2 n^2 + (X_L n^2 - X_{C2})^2}. \quad (4)$$

Ограничения. 1. Пассивный фильтр на первой гармонике является источником реактивной мощности. Его реактивное сопротивление на этой гармонике должно быть емкостным. Значение сопротивления определяется значением реактивной мощности, генерируемой фильтром в сеть:

$$X_{1f} = -U_{1p}^2 / Q_1, \quad (5)$$

где U_{1p} – напряжение первой гармоники в узле p .

2. На настраиваемой гармонике пассивный фильтр должен иметь наименьшее сопротивление. Это может быть достигнуто, если реактивное сопротивление фильтра на n -й гармонике равно нулю

$$X_{nf} = 0. \quad (6)$$

Выражение для реактивного сопротивления фильтра третьего порядка на любой h -й гармонике через параметры фильтра на первой гармонике определяется так:

$$X_{hf} = \frac{R^2 X_L h^3 - X_L^2 X_{C2} h^3 + X_L X_{C2}^2 h}{R^2 h^2 + (X_L h^2 - X_{C2})^2} \textcircled{R} \\ \textcircled{R} \frac{-X_{C1}(R^2 h^2 + (X_L h^2 - X_{C2})^2)}{R^2 h^2 + (X_L h^2 - X_{C2})^2}. \quad (7)$$

3. Реактивное сопротивление фильтра на гармониках выше настраиваемой должно быть индуктивным:

$$X_{(n+j)f} > 0, \quad (8)$$

где $j=1, H-n$, H – номер наибольшей гармоники.

4. Значение коэффициента n -й гармонической составляющей в узлах ($K_{U(n)fi}$), в которых должны быть снижены напряжения высших гармоник, находится в диапазоне

$$K_{U(n)\min} \leq K_{U(n)fi} \leq K_{U(n)\max}, \quad (9)$$

где $i=1, K$; K – число узлов; $K_{U(n)\min}$, $K_{U(n)\max}$ – значения обеих величин принимаются меньше нормально допустимого значения $K_{U(n)}$, установленного в [1]; $K_{U(n)fi}$ в соответствии с [1] вычисляется как $K_{U(n)fi} = 100U_{nfi} / U_{ном}$; напряжение U_{nfi} определяется по выражению

$$U_{nfi} = U_{ni} - Z_{nip} I_{nfp}, \quad (10)$$

где U_{ni} – напряжение n -й гармоники в узле i до установки фильтра в узле p ; Z_{nip} – сопротивление n -й гармоники между узлами i и p , определенное с помощью матрицы узловых сопротивлений Z_n .

5. Все параметры пассивного фильтра являются положительными величинами. Для фильтра третьего порядка

$$R > 0, X_L > 0, X_{C1} > 0, X_{C2} > 0. \quad (11)$$

6. Для каждого типа пассивного фильтра могут быть заданы дополнительные ограничения, которые обуславливаются схемой фильтра и соотноше-

ниями параметров элементов фильтра. Для фильтра третьего порядка дополнительное ограничение заключается в том, что $X_{C2} > X_{C1}$, которое можно представить в виде

$$X_{C2} = mX_{C1},$$

где значение m должно заключаться в диапазоне

$$1 < m \leq m_{\max}. \quad (12)$$

В результате исследований [14] было получено, что значение m_{\max} может принимать значения до 30.

В общем виде рассматриваемая задача представляет собой задачу минимизации целевой функции (3) при ограничениях-равенствах (5), (6) и ограничениях-неравенствах (8), (9), (11), (12). Целевая функция и функции-ограничения являются существенно нелинейными и невыпуклыми. Поскольку большая часть ограничений состоит из строгих неравенств, допустимая область незамкнута. Поэтому решение данной задачи возможно с применением нестандартной методики.

Двухэтапный алгоритм решения оптимизационной задачи. Для решения сформулированной оптимизационной задачи предлагается двухэтапный алгоритм. На первом этапе используется метод роя частиц [22], на втором – метод внутренних точек [23]. Метод роя частиц – это эвристический стохастический метод поиска глобального оптимума функции. Метод позволяет быстро приблизиться к окрестностям точки глобального оптимума, но вблизи него скорость решения замедляется. Кроме того, вблизи точки глобального оптимума метод дает несколько очень близких решений. Для ускорения решения и получения однозначного решения на втором этапе используется метод внутренних точек. Решение, полученное на первом этапе, используется в качестве исходного приближения в методе внутренних точек.

Метод роя частиц. Метод нашел широкое применение для решения оптимизационных задач в электроэнергетике. С его помощью в [24] решается задача выбора мощности конденсаторных батарей и их размещения в радиальной сети, в [25] определяется оптимальная конфигурация схемы большой распределительной системы, в [26] находятся точки размещения устройств РМУ в электрической системе и т.д. Рой, состоящий из частиц, представляет собой поисковое пространство, каждая частица которого является возможным решением. Целевая функция преобразует каждое возможное решение в пространство значений функции, среди которых ищется оптимальное значение и определяется соответствующее ей возможное решение. Каждая частица характеризуется позицией, состоящей из возможного решения, значения целевой функции и

скорости. Каждая частица также запоминает лучшее по оптимуму значение целевой функции и соответствующее ей возможное решение, которое получило название лучшего индивидуального возможного решения. Наконец, алгоритм метода роя частиц запоминает лучшее значение целевой функции, полученное среди всех частиц роя, и соответствующее ей возможное решение, которое получило название лучшего глобального возможного решения. Сначала случайным образом генерируется множество возможных решений (поисковое пространство), которое используется для вычисления целевой функции. Алгоритм оценивает возможное решение с точки зрения оптимального значения функции. Затем на последующих итерациях каждое возможное решение обновляется в соответствии с выражением

$$x_{t+1}^i = x_t^i + v_{t+1}^i,$$

где t – номер итерации; i – номер частицы; v_{t+1}^i – скорость частицы.

Скорость частицы для каждой итерации вычисляется как

$$v_{t+1}^i = w_t v_t^i + c_1 r_1 (C_t^{ip} - x_t^i) + c_2 r_2 (C_t^g - x_t^i),$$

где w_t – коэффициент инерции; r_1 и r_2 – случайные величины ($0 \leq r_1 \leq 1$, $0 \leq r_2 \leq 1$), которые генерируются на каждой итерации; c_1 – коэффициент, определяющий размер шага частицы в направлении ее лучшего индивидуального возможного решения; c_2 – коэффициент, определяющий размер шага частицы по направлению лучшего глобального возможного решения; C_t^{ip} – лучшая позиция i -й частицы на t -й итерации с точки зрения глобального оптимума целевой функции; C_t^g – лучшая глобальная позиция частицы в рое на t -й итерации с точки зрения глобального оптимума целевой функции.

Выражение для скорости имеет три составляющих. Первая составляющая $w_t v_t^i$ в [22] называется инерционной компонентой. Она обеспечивает сохранение частицей движения в первоначальном направлении. Вторая составляющая $c_1 r_1 (C_t^{ip} - x_t^i)$ – индивидуальная компонента, учитывает персональное влияние самой i -й частицы. Третья составляющая $c_2 r_2 (C_t^g - x_t^i)$ – общественная компонента, отражает влияние соседних частиц. После вычисления скорости частицы для следующей итерации происходит обновление позиции частицы. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут удовлетворены условия окончания поиска решения, например количество итераций.

В результате численных экспериментов при определении параметров фильтра в приведенном ниже примере было получено, что метод дает хорошую сходимость при использовании в рое 50 частиц и задании максимального числа итераций 200. Было также получено, что наилучшее значение $c_1 = 2,5$, а $c_2 = 0,5$. Значение коэффициента w_t в ходе решения задачи изменялось от 0,9 до 0,4.

Для решения сформулированной оптимизационной задачи используются программные средства системы Matlab, в которой реализован алгоритм нахождения глобального оптимума функции методом роя частиц при задании ограничений в виде неравенств. Чтобы исключить из сформулированной задачи ограничения в виде равенств, применяется метод штрафных функций. Целевая функция (3) модифицируется и приводится к виду

$$P_n^1(x) = P_n(x) + 100(X_{1f})^2 + 100(X_{nf})^2. \quad (13)$$

Весовые коэффициенты при штрафных функциях (равные 100) получены в результате вычислительных экспериментов в приведенном ниже примере. Модифицированная целевая функция (13) с ограничениями в виде неравенств (8), (9), (11), (12) решается методом роя частиц. На этом первый этап заканчивается. Полученные значения параметров искомого вектора x используются в качестве исходных приближений для уточнения их значений методом внутренних точек на втором этапе.

Метод внутренних точек. Метод внутренних точек [23] применяется для поиска минимума модифицированной целевой функции (13) с ограничениями в виде неравенств (8), (9), (11), (12). В системе Matlab имеется программное средство, позволяющее решить подобную оптимизационную задачу методом внутренних точек при ограничениях в виде равенств. Для преобразования задачи с ограничениями в виде неравенств в задачу, где в качестве ограничений используются равенства, целевая функция модифицируется с помощью барьерного метода и приводится к виду

$$P_n^2(x) = P_n^1(x) - m \sum_{i=1}^G \ln(s_i). \quad (14)$$

В полученном выражении $m > 0$ – барьерный параметр; s_i – положительная переменная, преобразующая ограничения в виде неравенств в ограничения в виде равенств, т.е.

$$g_i(x) + s_i = 0, \quad (15)$$

где $i = 1, G$, G – общее число ограничений в виде неравенств (8), (9), (11), (12).

В результате численных экспериментов получено, что в данной задаче значение барьерного пара-

метра может быть принято равным 0,1. Методом внутренних точек решается задача поиска минимума функции (14) при ограничениях в виде равенств (15) и определяются параметры искомого вектора x .

Пример применения предложенного алгоритма для определения параметров пассивного фильтра третьего порядка. В качестве примера определены параметры фильтров третьего порядка для снижения напряжений третьей и пятой гармоник в узлах реальной протяженной сети 220 кВ, питающей тяговые подстанции в Восточной Сибири. Тяговые подстанции располагаются на расстоянии 40–60 км друг от друга. Как правило, на каждой подстанции установлено по два трехфазных трехобмоточных трансформатора мощностью 40 МВт. Обмотка трансформатора 27,5 кВ подсоединена к тяговой сети, от которой получают электрическую энергию электровозы, являющиеся нелинейной нагрузкой. В нормальном режиме в работе находится один трансформатор. Каждая тяговая подстанция имеет питание с двух сторон. По результатам измерений средняя мощность тяговой нагрузки одной подстанции составляет 4–8 МВт, максимальная мощность до 20 МВт. Измеренные значения показателей $K_{U(3)}$ и $K_{U(5)}$ в узлах присоединения некоторых тяговых подстанций к питающей сети приведены в [12].

Определение параметров фильтров. Фильтры выбираются для радиального участка сети 220 кВ, описанной выше, состоящего из 13 узлов, в которых присоединены тяговые подстанции. Длина этого участка около 600 км. Значения $K_{U(3)}$ и $K_{U(5)}$ в узлах без фильтров приведены на рис. 2. Значение $K_{U(3)}$ превышает нормально допустимое значение в семи узлах (с 3-го по 9-й), $K_{U(5)}$ – в двенадцати узлах (со 2-го по 13-й).

Для установки фильтров третьей и пятой гармоник выбран узел 7. Он определен с помощью «пробного фильтра», описанного в [12]. Фильтры выбираются для снижения значений $K_{U(3)}$ и $K_{U(5)}$ централизованно во всех узлах рассматриваемого участка, где превышена норма.

Выбор фильтров выполняется начиная с гармоники низшего порядка, т.е. третьей. Исходными данными для вычисления параметров фильтра в программе, реализующей предложенный алгоритм, являются: значение показателя $K_{U(3)}$ в узле установки фильтра (равно 1,78%); значение реактивной мощности Q_1 , генерируемое фильтром на первой гармонике (равное 5 МВАР); значения $K_{U(3)}$ в узлах после установки фильтра, находящиеся в диапазоне от 0,5 до 1,2 %; матрица узловых сопротивлений сети Z_n и матрица-столбец напряжений U_n для третьей гармоники в узлах сети без фильтра, вычисленные с помощью программно-вычисли-

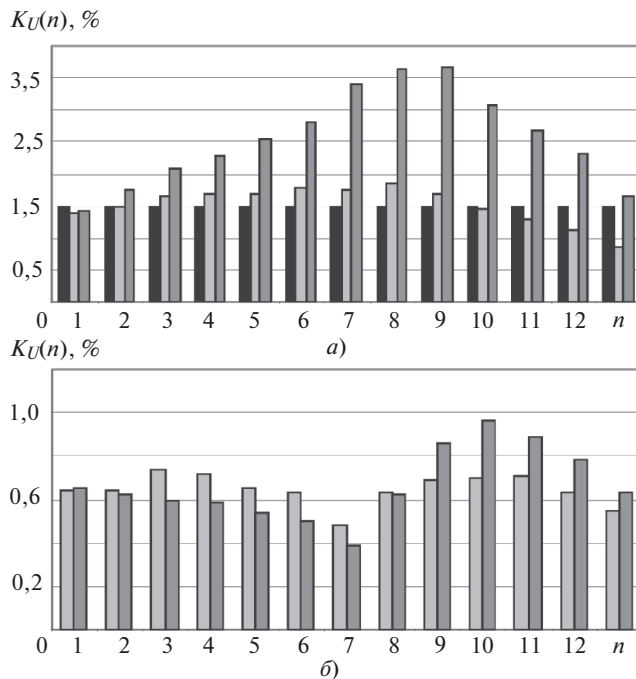


Рис. 2. Значения $K_{U(3)}$ и $K_{U(5)}$ в узлах сети: а – без фильтров и б – с фильтрами; ■ – норма; □ – $K_{U(3)}$; ▒ – $K_{U(5)}$

тельного комплекса ГАРМОНИКИ, которые используются для вычисления U_{nfi} в выражении (10).

Работу метода роя частиц в процессе решения оптимизационной задачи иллюстрирует кривая сходимости на рис. 3. Кривая показывает изменение значения целевой функции в ходе итерационного процесса. Из кривой видно, что метод имеет быструю сходимость в пределах 40 итераций. Целевая функция на этих итерациях быстро стремится к минимальному значению.

После завершения работы методом роя частиц активные потери в фильтре на третьей гармонике составили 27,7 кВт. После работы методом внутренних точек они уменьшились до 27,5 кВт, что подтверждает хорошую сходимость метода роя частиц. В результате работы двухэтапного алгоритма

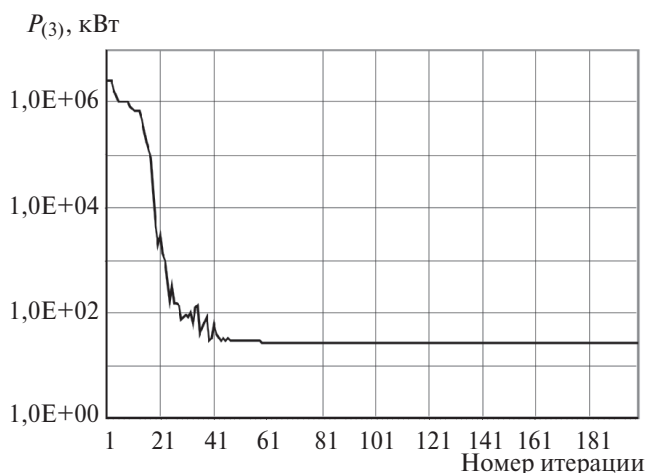


Рис. 3. Изменение $P_{(3)}$ в итерационном процессе

получены параметры фильтра третьей гармоники: $R=15722$ Ом, $X_L=1146,2$ Ом, $X_{C1}=10833$ Ом, $X_{C2}=204852$ Ом. Значения $K_{U(3)}$ в узлах сети с фильтром показаны на рис. 2,б. Они лежат в диапазоне, заданном при оптимизации. Затем аналогичным образом определяются параметры фильтра пятой гармоники. Исходным режимом сети является режим сети с фильтром третьей гармоники. Вычисленные параметры фильтра пятой гармоники следующие: $R=18026$ Ом, $X_L=644,8$ Ом, $X_{C1}=16799$ Ом, $X_{C2}=385917$ Ом. Значения $K_{U(5)}$ в узлах сети с фильтром пятой гармоники показаны на рис. 2,б. Они также заключены в диапазоне, заданном при оптимизации.

Анализ влияния фильтров на сеть. На рис. 4 приведены частотные характеристики фильтра пятой гармоники, устанавливаемого в узле 7. На пятой гармонике активное сопротивление фильтра равно 32,2 Ом. Реактивное сопротивление фильтра на гармониках выше пятой имеет индуктивный характер.

Проанализируем, что происходит с параметрами сети и режима на пятой гармонике после установки фильтров для третьей и пятой гармоник. Представим сеть относительно любого i -го узла в виде источника тока и полной проводимости. Тогда напряжение U_{ni} в любом i -м узле на n -й гармонике определится выражением

$$U_{ni} = I_{ni} / Y_{ni},$$

где I_{ni} – ток n -й гармоники источника тока в узле i ; Y_{ni} – полная проводимость сети относительно узла i на n -й гармонике.

На рис. 5,а приведены полные узловые проводимости для рассматриваемого участка из 13 узлов, в подписи обозначено: 0 – без фильтров; f_3 – установлен фильтр третьей гармоники; f_5 – установлен фильтр пятой гармоники.

После установки фильтра третьей гармоники произошло незначительное изменение узловых проводимостей: как уменьшение, так и увеличение по сравнению с режимом без фильтров. Благодаря

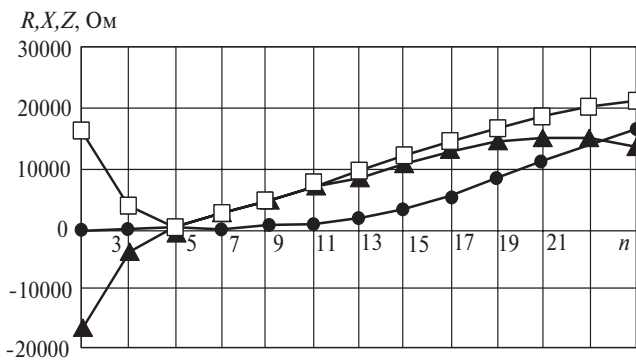


Рис. 4. Частотные характеристики фильтра пятой гармоники: ● – R; □ – X; △ – Z

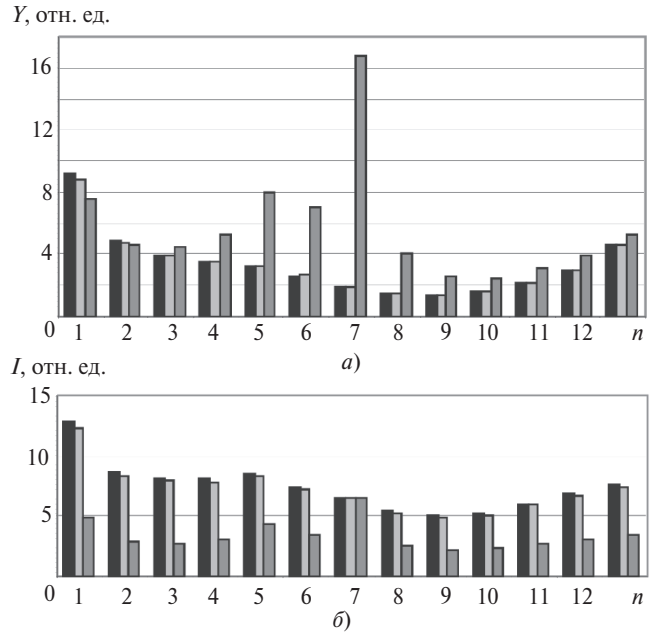


Рис. 5. Полные узловые проводимости на пятой гармонике (а) и значения узловых токов этой гармоники (б); ■ – 0; ■ – f_3 ; ■ – f_5

установке фильтра пятой гармоники полная проводимость увеличилась в узле 7 более чем в 8 раз. В различной степени произошло также увеличение полных проводимостей остальных узлов, в которых должно быть снижено значение $K_{U(5)}$ с помощью этого же фильтра. Только в двух наиболее удаленных узлах произошло уменьшение. Анализ активных и реактивных узловых проводимостей показывает, что изменение полных проводимостей произошло из-за реактивной составляющей с индуктивным характером. Активная составляющая проводимости изменилась весьма незначительно.

Из-за изменений полных проводимостей произошло перераспределение токов пятой гармоники в сети. Изменение узловых токов этой гармоники показано на рис. 5,б. После установки фильтра третьей гармоники произошло незначительное изменение токов пятой гармоники. В результате установки фильтра пятой гармоники во всех узлах, кроме узла 7, произошло значительное уменьшение токов пятой гармоники.

Анализ результатов расчета на других гармониках показал, что фильтр третьего порядка в рассмотренной сети изменяет свойства сети только на той гармонике, на которую настроен. Он практически не оказывает никакого влияния на параметры сети и режима на других гармониках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества элек-

трической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий, 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

3. **Ариллага Дж., Брэдли Д., Боджер П.** Гармоники в электрических системах/Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

4. **Effects of harmonics on equipment.** — IEEE Trans. on Power Delivery, 1993, vol. 8, № 2.

5. **Harungi R., Jiang L.** Investigation of power quality in health care facility. — Proc. of ICREPQ'10, Granada (Spain), 2010.

6. **Czarnecki L.S.** An overview of methods of harmonic suppression in distribution systems. — IEEE Power Eng. Soc., Summer Meeting. Seattle, Washington (USA), 2000.

7. **Ginn H.L., Czarnecki L.S.** An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters. — IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, vol. 21, № 3.

8. **Mau Teng Au, Milanovic J.V.** Planning approaches for the strategic placement of passive harmonic filters in radial distribution networks. — IEEE Trans. on Power Delivery, 2007, vol. 22, № 1.

9. **Maza J.M., Burgos M., Izquierdo C.** Optimal design of tuned passive filters. — Proc. of 14-th PSCC, Sevilla (Spain), 2002.

10. **Xiao Yao.** The method for designing the third order filter. — Proc. of the 8-th Inter. Conf. on Harmonics and Quality of Power, Athens (Greece), 1998.

11. **Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, Shou-Yung Chu.** A probabilistic approach for optimal passive harmonic filter planning. — IEEE Trans. on Power Delivery, 2007, vol. 22, № 3.

12. **Коверникова Л.И.** Централизованное снижение уровня напряжений высших гармоник в сети высокого напряжения с распределенными нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров. — Электричество, 2010, № 9.

13. **Arrillaga J., Watson N.R.** Power system harmonics. 2nd.ed. — Chichester: Wiley, 2003.

14. **Коверникова Л.И., Нгуен Чи Тхань.** Применение фильтров 3-го порядка для централизованного сокращения напряжений высших гармоник в узлах присоединения тяговых подстанций. — Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», Иркутск, 26–30 апреля 2010 г. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010.

15. **Wakileh G.J.** Power Systems Harmonics. — Springer-Verlag: Berlin, 2001.

16. **Czarnecki L.S., Ginn H.L.** Effectiveness of resonant harmonic filters and its improvement. — IEEE Power Eng. Soc., Summer Meeting. Seattle, Washington (USA), 2000.

17. **Mattavelli P.** Design of harmonic filters for high-power ac/dc converters. — IEEE Power Eng. Soc., Summer Meeting. Seattle, Washington (USA), 2000.

18. **Kawann C., Emanuel A.E.** Passive shunt harmonic filters for low and medium voltage: A cost comparison study. — IEEE Trans. on Power Systems, 1996, vol. 11, № 4.

19. **Добрусин Л.А., Джафаров З.Т.** Комплексный метод и его применение при проектировании фильтрокомпенсирующих структур. — Электричество, 1986, № 8.

20. **Grainger J.J., Stevenson W.D.-Jr.** Power system analysis. — International Editions, 1994.

21. **Жуков Л.А., Стратан И.П.** Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчетов. — М.: Энергия, 1979.

22. **Eberhart R.C., Shi Y.** Particle swarm optimization: developments, applications and resources. — Proc. of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, 2001, vol. 1.

23. **Byrd R.H., Hribar M.E., Nocedal J.** An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming. — SIAM Journal on Optimization, 1999, vol. 9, № 4.

24. **Sharaf A.M., El-Gammal Adel A.A.** A multi objective multi-stage particle swarm optimization MORSO Search scheme for power quality and loss reduction on radial distribution system. — Proc. of Inter. Conf. on Renewable Energies and Power Quality, Valencia (Spain), 2009.

25. **Batrinu F., Carpaneto E., Chicco G.** A novel particle swarm method for distribution system optimal reconfiguration. — Proc. of IEEE Power Tech., St. Petersburg (Russia), 2005.

26. **Peng Chunhua, Xu Xuesong.** A hybrid algorithm based on immune BPSO and $n-1$ principle for PMU multi-objective optimization placement. — Proc. of 3rd Inter. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing (China), 2008.

[26.05.11]

А в т о р ы: Коверникова Лидия Ивановна окончила электротехнический факультет Новосибирского электротехнического института в 1976 г. Защитила кандидатскую диссертацию «Разработка алгоритмов и программного комплекса для анализа высших гармоник в высоковольтных сетях электроэнергетических систем». в 1995 г. в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН) Старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Нгуен Чи Тхань окончил энергетический факультет Иркутского государственного технического университета (ИрГТУ) в 2009 г. Аспирант ИрГТУ.

Хамисов Олег Валерьевич окончил математический факультет Иркутского государственного университета (ИГУ) в 1985 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Глобальная минимизация функций с вогнутыми минорантами на компактном множестве» в 1993 г. в ИГУ. Заведующий отделом прикладной математики ИСЭМ СО РАН.