

Three-element Reactor-Capacitor Device for Flexible Link Between Non-Synchronous Power Systems

Bosneaga V.A., Suslov V.M.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova,
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. Short review of known variants of flexible controlled interconnections between asynchron power systems was fulfilled. The basic characteristics of three-element reactor-capacitor device, providing controlled power transmission and reactive power internal balance for connected power systems with different levels of voltages, were investigated. Mathematical model was elaborated for calculation of parameters of reactor-capacitor device elements, necessary for realization of circular rotation of output voltage phase angle at fixed load admittance. These results allow estimating the required range of the admittances changing, necessary to ensure control of transmitted power by means of semiconductor switching devices.

Keywords: controlled, flexible connection of AC power systems, combined reactor-capacitor device.

Dispozitiv tip reactor-condensator cu trei elemente pentru legatură flexibilă a sistemelor energetice asincrone

Boşneaga V.A., Suslov V.M.

Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei,
Chişinău, Republica Moldova

Rezumat. A fost efectuată o scurtă trecere în revistă a soluțiilor tehnice cunoscute pentru implementarea conexiunii flexibile între sisteme energetice de curent alternativ asincrone. Sunt investigate caracteristicile de bază ale dispozitivului tip reactor-condensator cu trei elemente, care asigură legatură flexibilă cu puterea transmisă reglabilă și balanța puterii reactive interne a dispozitivului la conectarea sistemelor cu diferite nivele de tensiune. Este elaborat modelul matematic, care permite determinarea parametrilor elementelor dispozitivului, necesare pentru realizarea rotației circulare a fazei tensiunii la admitanța dată a sarcinii. Rezultatele obținute permit estimarea intervalului necesar de schimbare a admitanțelor dispozitivului, realizarea carora cu ajutorul comutatoarelor cu semiconductoare asigură reglarea puterii transmise.

Cuvinte-cheie: dispozitiv tip reactor-condensator, legatură controlabilă flexibilă la curent alternativ, puterea transmisă activă și reactivă.

Трехэлементное реакторно-конденсаторное устройство для связи асинхронно работающих энергосистем переменного тока

Бошняга В.А., Суслов В.М.

Институт энергетики Академии Наук Молдовы,
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Приведен краткий обзор известных технических решений по реализации управляемой «гибкой» связи на переменном токе для асинхронно работающих энергосистем. Исследованы основные характеристики трехэлементного реакторно-конденсаторного устройства, обеспечивающего заданную передаваемую активную мощность и баланс реактивной мощности в устройстве при различных уровнях напряжений связываемых систем. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать параметры элементов реакторно-конденсаторного устройства, необходимых для реализации кругового вращения фазы при заданной комплексной проводимости нагрузки. Полученные результаты позволяют оценить необходимый диапазон изменения проводимостей, который надо обеспечить с помощью полупроводниковых переключающих устройств для поддержания передаваемой мощности.

Ключевые слова: реакторно-конденсаторное устройство, управляемая гибкая связь на переменном токе, передаваемая активная и реактивная мощность.

Введение

В настоящее время в качестве управляемых межсистемных связей, для которых величина передаваемой активной мощности задана независимо от загрузки других ветвей электрической сети, применяются, как правило, вставки постоянного тока, некоторые из использованных источников

приведены в предыдущей работе [1]. Известны также технические решения на базе асинхронных или асинхронизированных электрических машин переменного тока (см. [2]), которые, не нашли еще широкого практического применения. Другим примером устройств, которые приблизились к решению задачи создания гибкой связи, по-видимому,

являются устройства типа UPFC (Unified Power Flow Controller, [3-5]). Они обладают универсальными характеристиками (позволяют одновременно в реальном времени управлять потоками активной и реактивной мощностей в линии электропередачи), сравнимыми разве что с теми, которые обеспечивает вставка постоянного тока. Однако в доступной литературе не рассматривается их использование для обеспечения гибкой связи несинхронно работающих энергосистем. В [1] уже упомянуто еще одно потенциально возможное направление реализации такой связи на базе трансформаторных фазопреобразующих устройств с круговым вращением фазы выходного напряжения относительно входного, реализуемого с помощью полупроводниковых быстродействующих переключающих элементов, которое находится в стадии научно-исследовательских разработок. Другим классом известных устройств для реализации гибкой связи являются устройства на базе управляемых устройств реакторного типа, названных авторами [6] ферромагнитной вставкой переменного тока (ФВПТ), которая, как было показано в [1], также обладает некоторыми недостатками и требует проведения дополнительных исследований.

Данная работа является продолжением и развитием [1] и посвящена рассмотрению устройства, основным отличием которого является потенциальная возможность соединения энергосистем с разными уровнями

напряжения без промежуточных трансформаторов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОГО РЕАКТОРНО-КОНДЕНСАТОРНОГО УСТРОЙСТВА С РАЗНЫМИ УРОВНЯМИ НАПРЯЖЕНИЙ СВЯЗЫВАЕМЫХ СИСТЕМ.

Рассмотрим трехэлементное реакторно-конденсаторное устройство для общего случая разных уровней напряжений соединяемых энергосистем, см. рис.1.

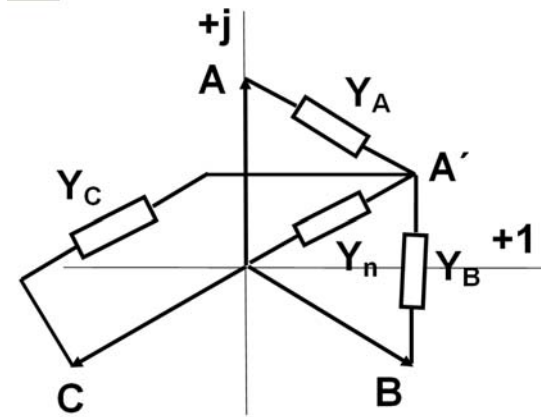


Рис.1. Схема подключения реактивных элементов для 3-х элементного устройства. Показаны элементы только для фазы A' приемной системы.

Пусть модуль напряжения принимающей энергосистемы будет в k раз меньше модуля напряжения передающей энергосистемы, т.е. $\text{mod}(U_n) = \text{mod}(U_A/k)$. Тогда уравнение баланса токов в узле A' с учетом наличия коэффициента преобразования $k \neq 1$ может быть представлено в следующем виде:

$$k \cdot (\exp(j\delta) - 1) \cdot j b_A + (k \cdot \exp(-j(\frac{2}{3}\pi - \delta)) - 1) \cdot j b_B + (k \cdot \exp(j(\frac{2}{3}\pi + \delta)) - 1) \cdot j b_C = g_n + j b_n \quad (1)$$

Преобразуем данное уравнение в систему 2-х уравнений отдельно для действительной и мнимой частей. Получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} -k \cdot \sin\delta \cdot b_A + k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi - \delta) \cdot b_B - k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi + \delta) \cdot b_C = g_n \\ (k \cdot \cos\delta - 1) \cdot b_A + (k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi - \delta) - 1) \cdot b_B + (k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi + \delta) - 1) \cdot b_C = b_n \end{array} \right\} \quad (2)$$

Далее запишем эту систему уравнений в матричном виде.

$$[a] \cdot [b] = [y] \quad (3)$$

$$\text{Где } [b] = \begin{bmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \end{bmatrix}, \quad [y] = \begin{bmatrix} g_n \\ b_n \end{bmatrix}, \quad [a] = \begin{bmatrix} -k \cdot \sin\delta & k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi - \delta) & -k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi + \delta) \\ k \cdot \cos\delta - 1 & k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi - \delta) - 1 & k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi + \delta) - 1 \end{bmatrix}$$

Данная система имеет бесконечное множество решений для неизвестных $[b]$. Нас же интересует единственное решение, поэтому наложим на множество решений дополнительное ограничение, будем искать значения проводимостей, обладающие минимальной нормой. То есть при

$$\| [b] \| \rightarrow \min. \quad (4)$$

На языке МАТЛАБа эта процедура может быть записана в виде:

$$[b] = \text{pinv}([a]) \cdot [y]$$

Для решения данной задачи были использованы вычислительные возможности пакета МАТЛАБ, в частности, была разработана вспомогательная программа на m-языке, рассчитывающая искомые значения проводимостей для диапазона изменения угла $\delta=0^\circ-120^\circ$. По полученным значениям проводимостей для каждого набора значений активной и реактивной проводимости нагрузки и коэффициента преобразования k построим соответствующие графики зависимостей проводимостей от угла δ .

На рис. 2,3 приведены графики

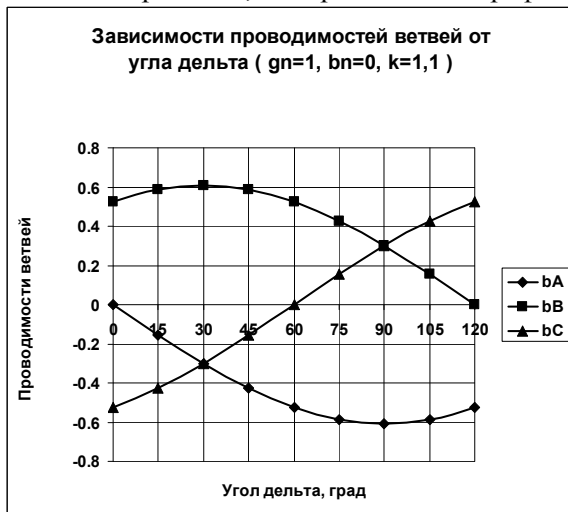


Рис.2. Зависимости проводимостей устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=1,1$.

зависимостей проводимостей при активной нагрузке для уменьшенного в 1,1 и 1,2 раза выходного напряжения. Сравнение приведенных графиков, а также их сопоставление с результатами работы [1], где рассмотрен вариант с $k=1$, показывает, что снижение уровня выходного напряжения по отношению к питающему приводит к уменьшению необходимого диапазона

изменения регулируемых проводимостей. Таким образом, показано, что и в данном случае уменьшенного уровня выходного напряжения подбором соответствующих проводимостей можно обеспечить поддержание заданной передаваемой мощности при изменении угла δ .

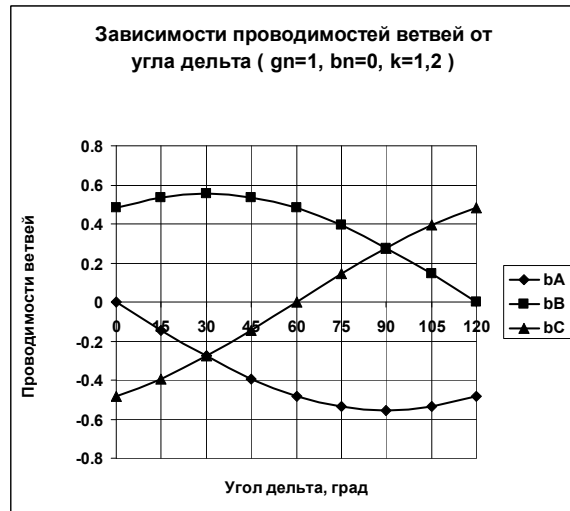


Рис.3. Зависимости проводимостей устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=1,2$.

На рис. 4, 5 приведены графики зависимостей проводимостей при активной нагрузке для увеличенного по отношению к питающему уровня выходного напряжения (коэффициент преобразования $k=0,9$ и $0,8$).



Рис.4. Зависимости проводимостей устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=0,9$.

Сравнивая данные графики, а также сопоставляя их с результатами работы [1] при

$k=1$ можно отметить, что увеличение уровня выходного



Рис.5. Зависимости проводимостей ветвей устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=0,8$.

напряжения по отношению к питающему приводит к увеличению необходимого диапазона изменения регулируемых проводимостей. Таким образом, из приведенных результатов следует, что регулирование величин проводимостей в соответствии с полученными аналитическими выражениями (2-4) позволяет обеспечить реализацию необходимого коэффициента преобразования напряжения по величине во

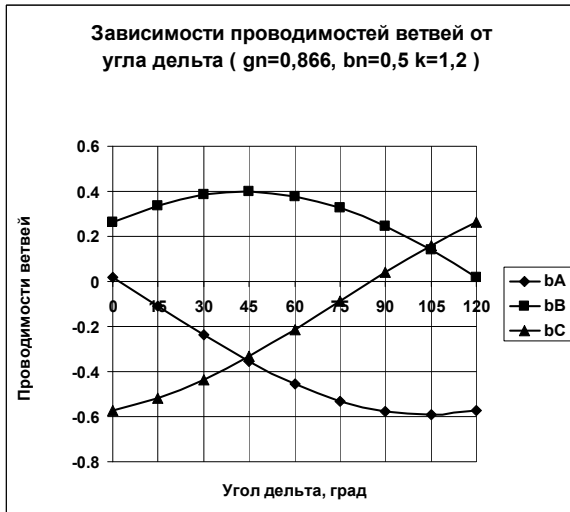


Рис.6. Зависимости проводимостей ветвей устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке емкостного характера и коэффициенте преобразования $k=1,2$.

всем диапазоне изменения угла δ в рассмотренных случаях, когда напряжения связываемых систем отличаются в обе стороны друг от друга на величину $\pm 20\%$.

На рис. 6, 7 приведены графики зависимостей проводимостей при смешанной

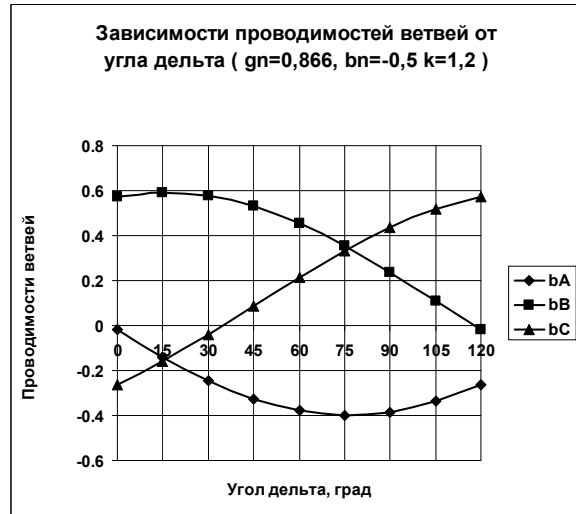


Рис.7. Зависимости проводимостей устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке индуктивного характера и коэффициенте преобразования $k=1,2$.

нагрузке, соответственно, емкостного и индуктивного характера для уменьшенного по отношению к питающему выходного напряжения (коэффициент преобразования $k=1,2$). Сравнение с вариантом $k=1$ (см.[1]), показывает, что и в данном случае уменьшение уровня выходного напряжения по отношению к питающему приводит к уменьшению необходимого диапазона изменения регулируемых проводимостей.

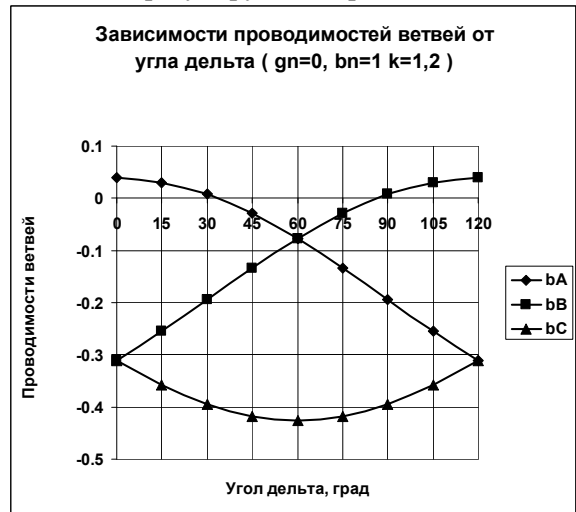


Рис.8. Зависимости проводимостей ветвей устройства от величины угла фазового сдвига δ при чисто емкостной нагрузке.

На рис. 8, 9 приведены графики зависимостей проводимостей при чисто реактивной нагрузке соответственно, емкостного и индуктивного характера для уменьшенного по отношению к питающему выходного напряжения (коэффициент преобразования

$k=1,2$). Сравнивая данные графики с результатами при $k=1$



Рис.9. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при чисто индуктивной нагрузке.

можно отметить, что в данном случае проводимости, подключаемые к смежным фазам А и В питающей системы при определенных значениях угла δ поочередно изменяют свой знак, а знак проводимости, подключаемой к фазе С остается неизменным во всем диапазоне изменения угла δ .



Рис.10. Зависимости проводимостей устройства от величины угла фазового сдвига δ при емкостной нагрузке и увеличенном относительном значении выходного напряжения.

На рис. 10, 11 приведены графики зависимостей проводимостей при чисто реактивной нагрузке соответственно, емкостного и индуктивного характера для увеличенного значения выходного

напряжения (коэффициент преобразования $k=0,8$).

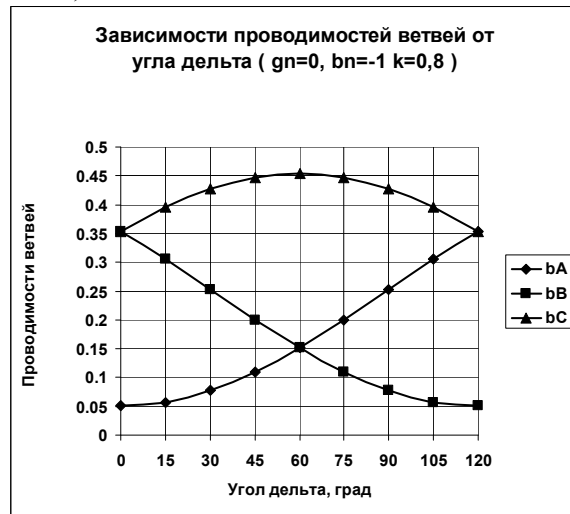


Рис.11. Зависимости проводимостей устройства от величины угла фазового сдвига δ при индуктивной нагрузке и увеличенном относительном значении выходного напряжения.

Сравнивая данные графики с аналогичным случаем при $k=1$, можно отметить, что графики проводимостей, подключаемых к смежным фазам А и В питающей системы, при емкостной нагрузке смещаются вниз, а при индуктивной нагрузке – вверх от аналогичных графиков при $k=1$.

Таким образом, показано, что выбирая проводимости в соответствии с предлагаемой методикой, можно реализовать гибкую связь между системами с разными уровнями напряжений при колебаниях величин напряжений систем в допусках нормами предела от номинального в реальных эксплуатационных режимах.

Рассмотрим далее принципиальную возможность реализации гибкой связи в случае систем с различными номинальными значениями напряжений, которые могут отличаться, скажем, в два раза, что значительно больше, чем при рассмотренном ранее диапазоне в $\pm 20\%$.

Построим по описанной методике кривые проводимостей при $k=2$ (выходное напряжение меньше входного в два раза) и при $k=0,5$ (выходное напряжение больше входного в два раза). На рис. 12, 13 представлены результаты расчета проводимостей ветвей устройства от величины коэффициента преобразования для его значений $k=1$, $k=2$ и $k=0,5$. Для большей наглядности рис.12 выполнен в цвете, разным

коэффициентам преобразования соответствуют разные цвета кривых проводимостей: черным цветом показаны проводимости при $k=1$, синим – при $k=2$, а коричневым – при $k=0,5$. На рис. 13 те же

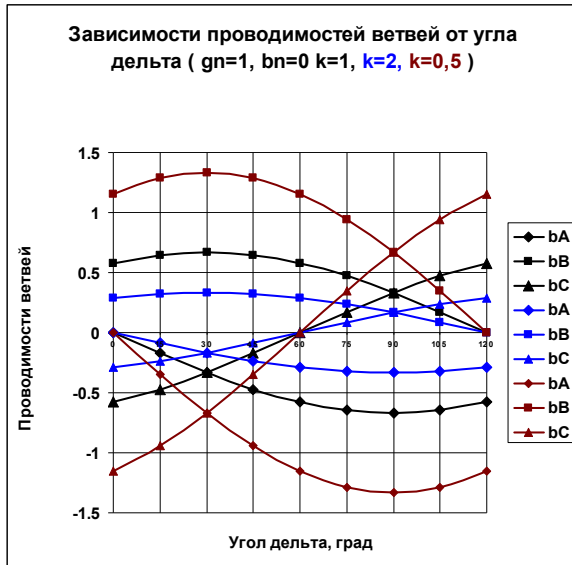


Рис.12. Зависимости проводимостей от сдвига δ при активной нагрузке и при уменьшенном ($k=2$) и увеличенном ($k=0,5$) относительно входного значения выходного напряжения.

результаты приведены в черно-белом варианте сплошными, пунктирными и точечными линиями. Из представленных на рис. 12 результатов видно, что при меньшем значении выходного напряжения по отношению к входному (при $k=2$)



Рис.13. Зависимости проводимостей устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и при уменьшенном ($k=2$) и увеличенном ($k=0,5$) относительно входного значения выходного напряжения.

соответствующие проводимости меньше. Это понятно и с физической точки зрения – для сохранения той же мощности и тока нагрузки, при вдвое большем питающем напряжении проводимости схемы должны быть меньше, чтобы «погасить» большее напряжение. Следует отметить, что точка, в которой все проводимости, подключаемые к фазе С, обращаются в нуль, соответствует углу $\delta=60^\circ$, независимо от значения коэффициента преобразования k . Кроме того, точки пересечения кривых проводимостей, подключаемых к фазам А и С, полученные для различных значений коэффициента преобразования k , наблюдаются при одних и тех же углах 30° , а точки пересечения кривых проводимостей, подключаемых к фазам В и С – при 90° .

Для дополнительной проверки полученных результатов при расчетах проводимостей устройства, обеспечивающих заданный режим, а также для проверки соответствия мощностей, протекающих по ветвям реакторно-конденсаторного устройства, и мощности нагрузки, а также определения суммарной мощности ветвей, составлена дополнительная модель в пакете МАТЛАБ, представленная на рис.14. С использованием данной модели были рассчитаны суммарные мощности ветвей для всего диапазона изменения угла δ

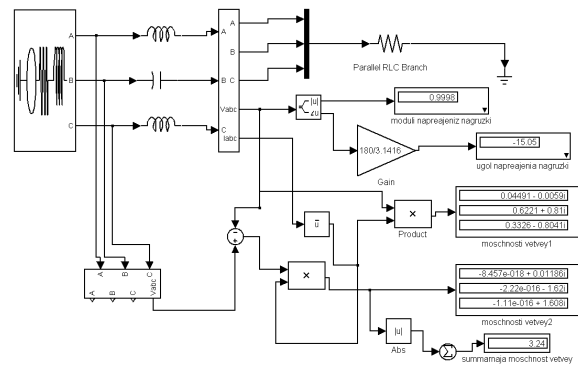


Рис.14. Модель реакторно-конденсаторного устройства в пакете МАТЛАБ для расчета выходного напряжения и потоков мощностей по ветвям.

и построены векторные диаграммы токов ветвей и нагрузки, наглядно отображающие соотношения между токами при различных значениях угла δ .

Как видно из рис.15, наименьшие значения суммарных мощностей реактивных элементов получаются при коэффициенте преобразования $k=1$ (нижняя кривая), что

соответствует одинаковым уровням напряжений приемной и питающей систем.

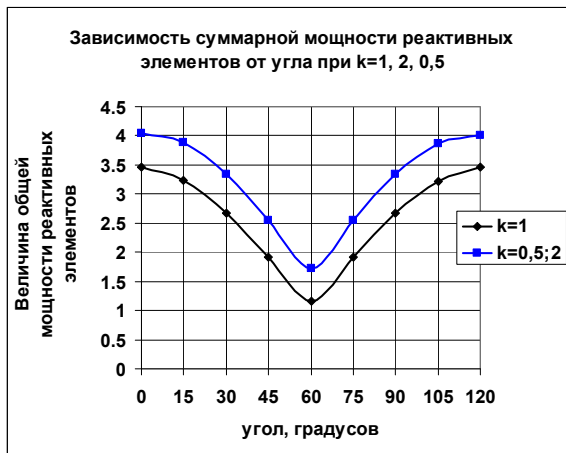


Рис.15. Зависимости суммарной мощности реактивных элементов от угла при разных значениях коэффициента преобразования k .

При питающем напряжении, отличающемся от напряжения нагрузки в меньшую ($k>1$), или в большую ($k<1$) сторону, кривая

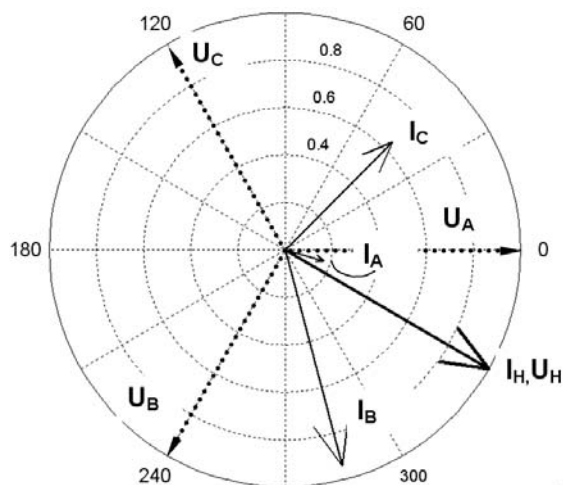


Рис.16. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при активной нагрузке и угле $\delta=-30^\circ$ (проводимость нагрузки $g=1$, $b=0$, $k=1$).

суммарной мощности элементов устройства смещается вверх. При этом для случаев $k=2$ и $k=0,5$, кривые практически совпали. Минимум суммарной мощности достигается при значении угла δ , равном 60° . Таким образом, с точки зрения суммарной мощности реактивных элементов (что связано с расходами материалов на их изготовление), неодинаковые уровни напряжений связываемых систем приводят к росту необходимой суммарной мощности

реактивных элементов тем большей, чем сильнее отличается k от 1.

По рассчитанным с помощью упомянутой модели МАТЛАБ значениям токов в элементах устройства были построены векторные диаграммы токов для различных значений коэффициента преобразования $k=1,2, 0,5$ при значении угла $\delta=30^\circ$, представленные на рис. 16, 17, 18. Из диаграммы рис. 16 наглядно видно, что вектора напряжения U_H и тока нагрузки I_H совпадают по модулю и фазе и сдвинуты относительно вектора фазы А питающей системы напряжения на 30° . Показаны также вектора токов в элементах, подключенных к фазам А, В, С питающей системы. Видно, что ввиду реактивного характера элементов, токи в них сдвинуты на 90° относительно соответствующих падений напряжений. Например, ток I_A элемента, подключенного к фазе А питающей системы, сдвинут на 90° относительно разности напряжений (U_A-U_H), аналогичное расположение соблюдается и для остальных токов. Наибольшие токи в этом режиме имеют место в фазах В и С, а ток, получаемый от фазы А – относительно небольшой. Кроме того, видно, что сумма всех трех токов дает ток нагрузки I_H .

На рис. 17 приведена векторная

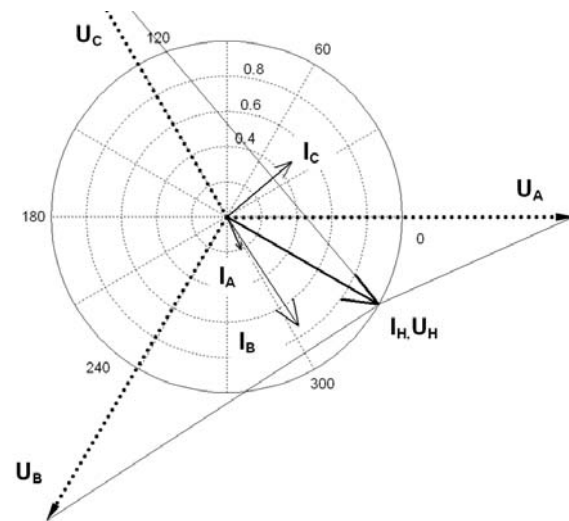


Рис.17. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при чисто активной нагрузке, угле $\delta=-30^\circ$ и коэффициенте преобразования $k=2$.

диаграмма для $k=2$, т.е. при питающем напряжении, вдвое превышающем напряжение на стороне нагрузки для угла фазового сдвига $\delta=-30^\circ$. Соответственно, вектора напряжений питающей системы U_A ,

U_B , U_C , показанные точечной линией, вдвое больше напряжения нагрузки U_H . Ввиду активного характера нагрузки вектора напряжения и тока нагрузки совпадают. Вектора токов реактивных элементов по расположению приблизительно аналогичны показанным на рис. 16 для того же угла $\delta = -30^\circ$ при значении коэффициента преобразования $k=1$. Исключение составляет вектор тока фазы А. Соблюдается также угловое расположение векторов токов ветвей, перпендикулярных отрезкам прямых линий, соединяющих концы векторов питающих напряжений, которые представляют собой напряжения на реактивных элементах. И по прежнему сумма токов реактивных элементов равна току нагрузки. На рис.18 показана векторная диаграмма при аналогичных предыдущему условиям, однако величина коэффициента преобразования $k=0,5$, т.е. питающее напряжение вдвое меньше напряжения нагрузки. Как видно из рис.18, соблюдаются все ранее отмеченные закономерности по взаимному расположению токов и напряжений, видно, что питающие напряжения U_A , U_B , U_C вдвое меньше, чем напряжение на нагрузке. Кроме того, как и следовало ожидать, величины токов могут превышать величину тока нагрузки вследствие того, что напряжение источника меньше, а мощность нагрузки неизменна.

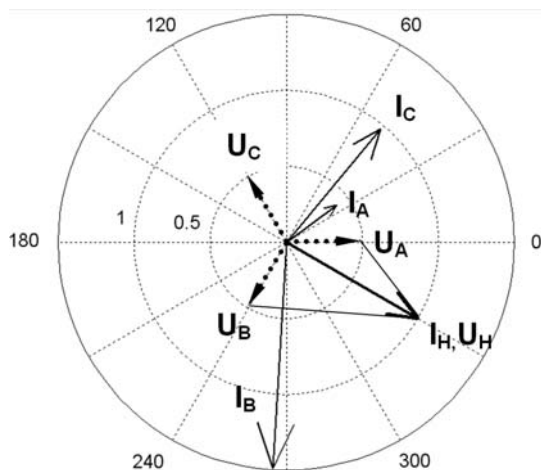


Рис.18. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при чисто активной нагрузке, угле $\delta = -30^\circ$ и коэффициенте преобразования $k=0,5$.

ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель на базе аналитического описания процессов

управляемой передачи мощности между энергосистемами с разными уровнями напряжений с помощью 3-х элементных реакторно-конденсаторных устройств гибкой связи энергосистем на переменном токе. На их основе разработана в пакете МАТЛАБ вспомогательная программа, позволяющая с использованием вычислительных средств пакета получить значения проводимостей, реализующих гибкую связь несинхронно работающих систем при различных уровнях напряжений соединяемых энергосистем и различном характере нагрузки.

2. На базе полученных моделей исследованы основные характеристики предложенного устройства для гибкой связи энергосистем, найдены зависимости необходимых реактивных проводимостей от угла, позволяющие реализовать передачу заданной активной и реактивной мощности при различных коэффициентах преобразования напряжения по модулю. Построены зависимости суммарной мощности реактивных элементов устройства от угла между векторами напряжений энергосистем при разных коэффициентах преобразования.

3. Для подтверждения работоспособности и правильности полученных результатов составлена структурная модель устройства в пакете МАТЛАБ, позволяющая наглядно продемонстрировать процесс управляемой передачи мощности посредством предложенного устройства, построены векторные диаграммы токов и напряжений ветвей, дающие наглядное представление о формировании сдвинутого по фазе выходного напряжения. Доказано, что фактически данное устройство является своеобразным эквивалентом фазоповоротного трансформатора. Результаты исследований могут быть положены в основу дальнейших разработок устройств гибкой связи несинхронно работающих энергосистем переменного тока.

Литература

- [1] Bosneaga V., Suslov V., Postolaty V. Reaktorno-kondensatornoie ustroistvo dlea sveazi asinhronno rabotaiuschih energosistem peremennogo toka.[Reactor-Capacitor Device for Link Between Non-Synchronous Power Systems]. *Problemi regionalnoi energetiki, elektronni resurs*, №1(30), 2016, URL

[http://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni_jurnal-no.1\(30\)-2016](http://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni_jurnal-no.1(30)-2016), (accessed on 03.08.2016, in Russian).

[2] Zelenohat N.I. Sozdanie gibkih mejsistemnih sveazei dlea obiedinenia elektroenergeticheskikh system. [Creation of flexible links for the connection of electrical power systems]. *Izvestia vishih ucebnykh zavedenii*, 1981, -№1, pp. 3-8. (In Russian).

[3] L.Gyugyi, C.D. Schauder, S.L. Williams, etc. The Unified Power Flow controller: a new approach to power transmission control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.2, April 1995. p.1085-1097.

[4] Gyugyi, L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. *Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings C_

(Volume:139 , Issue: 4) Jul 1992, pp. 323 – 331, ISSN:0143-7046.(accessed on 03.08.2016, in Russian).

[5] Biplab Bhattacharyya, Vikash Kumar Gupta, Sanjay Kumar. UPFC with series and shunt FACTS controllers for the economic operation of a power system. *Ain Shams Engineering Journal* (2014), vol. 5, issue 3, pp. 775–787.

[6] Alexandrov G.N., Zaitsev S.G., Blagodirev V.I. Upravleaemie reaktori v kachestve siloviyh elementov vstavki peremennogo toka. [Controlable reactors as elements of alternating current link] *Elektroenergetika: segodnea I zavtra*. 2014, no. 3, pp.51-59, (In Russian).

Сведения об авторах.



Бошняга В.А., окончил Кишиневский политехнический институт в 1971 г. Защитил диссертацию на степень кандидата технических наук в Институте Электродинамики Академии наук Украины в 1988 г. Ведущий научный сотрудник, область научных интересов связана с расчетами режимов электрических систем с использованием разрабатываемых моделей трансформаторных устройств

E-mail: valeriu.bosneaga@gmail.com



Суслов В.М., окончил Кишиневский политехнический институт в 1972 г. Научный сотрудник, область научных интересов связана с электропередачами переменного тока повышенной пропускной способности, их влиянием на окружающую среду, режимами энергетических систем, переходными электромеханическими процессами, моделированием в энергетических системах.

E-mail: svictorm46@gmail.com