



ASYNCHRONOUS FLEXIBLE INTERCONNECTION OF TWO POWER SYSTEMS OF AC BASED ON THE CONTROLLED L AND C ELEMENTS

Valery BOSHNYAGA, Victor SUSLOV

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract: A well known technical solutions for the accomplishment of controlled "flexible" interconnection of two asynchronous operating energy systems of alternating current AC has been reviewed in the paper. Were studied basic characteristics of the reactor-condenser device, developing the idea of creating of reactor control connection devices and assuring, unlike the prototype, the reactive power balance in the device and continuous module of the output voltage. The analytical expressions for determining the parameters of the device elements necessary for the implementation of the circular phase rotation at a given load and the conductivity value of the coefficient conversion mod voltage have been achieved. The mathematical models in Matlab package for research-driven active power transfer processes through the reactor-condenser unit have been elaborated. The received results using the model allow assessing the required range of conductivities change, needed to be assured by means of semiconductor switching devices for implementing transmission power control. The results of research can serve the basis for further development of AC energy systems flexible connection devices and their control systems, providing power systems to work together with the same nominal frequency of the alternating current.

Keywords: model, reactor-condenser unit controlled "flexible" connection AC transmitted active and reactive power

INTERCONECTAREA FLEXIBILĂ A DOUĂ SISTEME DE CURENT ALTERNATIV ÎN BAZA ELEMENTELOR DIRIJATE L ȘI C

Valerii BOȘNEAGA, Victor SUSLOV

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat: A fost efectuată o trecere în revistă a deciziilor tehnice cunoscute pentru implementarea conexiunii "flexibile" între sisteme energetice de curent alternativ asincron. Sunt investigate caracteristicile de bază ale dispozitivului tip reactor-condensator, care dezvoltă ideea creerii dispozitivelor de legatură flexibilă tip reactor și care asigură, în contrast cu prototip, balanța de putere reactivă în dispozitiv și stabilitatea modului a tensiunii de ieșire. Sunt obținute expresiile analitice pentru determinarea parametrilor elementelor dispozitivului, care sunt necesare pentru realizarea rotației circulare a fazei la conductivitatea dată a sarcinii și valoarea coeficientului de conversie a modului tensiunii. Sunt elaborate modelele matematice în pachetul MATLAB pentru cercetarea proceselor de transfer controlabil a puterii active prin dispozitiv tip reactor-condensator. Rezultate obținute cu ajutorul modelului permit estimarea intervalului necesar de schimbare a conductivităților, ce trebuie realizat prin intermediul comutatoarelor cu semiconductoare pentru a pune în aplicare reglarea puterii transmise. Rezultatele cercetării pot servi ca bază pentru dezvoltarea în continuare a dispozitivelor de legatură flexibilă a sistemelor energetice cu curent alternativ și sistemelor lor de control, care asigură lucrul comun a sistemelor de curent alternativ cu aceleași frecvențe nominale.

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

АСИНХРОННАЯ ГИБКАЯ СВЯЗЬ ДВУХ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ L И C ЭЛЕМЕНТОВ

В.А. Бошняга, В.М. Суслов

Институт Энергетики Академии наук Молдовы

Реферат: Проведен обзор известных технических решений по реализации управляемой «гибкой» связи на переменном токе для несинхронно работающих энергосистем. Исследованы основные характеристики реакторно-конденсаторного устройства, развивающего идею создания реакторных управляемых устройств связи и обеспечивающего, в отличие от прототипа, баланс реактивной мощности в устройстве и постоянство модуля выходного напряжения. Получены аналитические выражения для определения параметров элементов устройства, необходимых для реализации кругового вращения фазы при заданной проводимости нагрузки и величине коэффициента преобразования напряжения по модулю. Разработаны математические модели в пакете MATLAB для исследования процессов управляемой передачи активной мощности посредством реакторно-конденсаторного устройства. Полученные с помощью моделей результаты позволяют оценить необходимый диапазон изменения проводимостей, который необходимо обеспечить с помощью полупроводниковых переключающих устройств для реализации управления передаваемой мощностью. Результаты исследований могут быть положены в основу дальнейших разработок устройств гибкой связи энергосистем на

переменном токе и их систем регулирования, обеспечивающих совместную работу энергосистем с одинаковыми номинальными частотами переменного тока.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве управляемых межсистемных связей энергосистем, для которых величина передаваемой активной мощности может быть задана независимо от загрузки других ветвей электрической сети, применяются, как правило, так называемые вставки постоянного тока [1-3]. Они позволяют связать между собой энергосистемы, как с различными номинальными значениями частоты, так и с одинаковыми номинальными частотами, но работающие несинхронно. Однако вставка постоянного тока является сравнительно сложной и, соответственно, дорогой установкой, включающей силовые трансформаторы, выпрямительные и инверторные преобразователи, а также фильтры высших гармоник и устройства компенсации реактивной мощности. Двойное преобразование рода тока – из переменного в постоянный на передающем конце и обратное преобразование – на приемном конце управляемой связи приводит к появлению существенных гармонических искажений кривых токов и напряжений. В литературе описано также большое количество технических решений для реализации управляемой связи на базе асинхронных или асинхронизированных электрических машин переменного тока, связанных механически путем их расположения на одном валу. Однако, несмотря на проведенные масштабные исследования и разработки, они не нашли широкого практического применения в данной области (см., например, [4-5] и др.). В связи бурным развитием в последние десятилетия технологий «FACTS» (Flexible Alternating Current Transmission) появилось большое количество различных управляемых устройств на переменном токе с использованием полупроводниковых коммутирующих элементов, обеспечивающих регулирование режима электрической сети, в том числе величины и фазы напряжения, потоков активной и реактивной мощностей в сети [6-12]. Наиболее близко к решению задачи создания гибкой связи, по-видимому, находятся устройства типа UPFC (Unified Power Flow Controller, [9-11]), которые обладают универсальными характеристиками (они 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 связи с успешным развитием техники коммутации на базе различных полупроводниковых устройств (как традиционных тиристоров, так и устройств типа GTO и IGBT) обозначилось 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 (см. например, [13-16] и др.). Другим известным классом устройств для реализации гибкой связи являются устройства на базе ферромагнитных управляемых реакторов [17-18]. На рис 1 приведена одна из возможных схемных модификаций данного класса устройств, рассмотренная, например, в [17], и названная авторами ферромагнитной вставкой переменного тока (ФВПТ). Данная работа послужила толчком к поиску и исследованию схемных решений, дополнительно содержащих конденсаторы, что может обеспечить улучшение баланса реактивной мощности и постоянство модуля выходного напряжения. Отметим, что в результате проведенного поиска по доступным источникам научно-технической литературы были найдены публикации, посвященные описанию похожих устройств, которые, однако, предназначены для совершенно других целей и параметры которых определяются из условий симметрирования нагрузки в трехфазных системах электроснабжения на низком напряжении, см., например, [19]. В данной работе приведены результаты изучения вариантов реализации бестрансформаторных реакторно-конденсаторных устройств гибкой связи, которые в конечном счете, как оказалось, также могут обеспечить эффект регулирования фазового сдвига, за счет чего и достигается управление величиной передаваемой мощности.

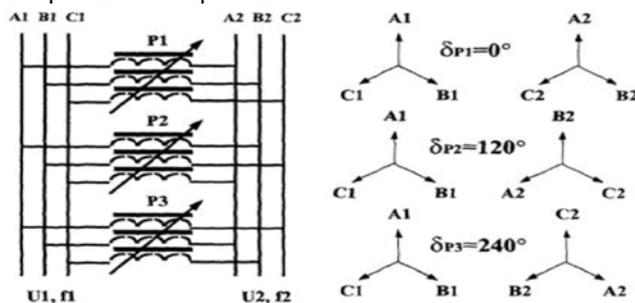


Рис. 1. Принципиальная схема реализации гибкой связи энергосистем на основе управляемых подмагничиванием ферромагнитных элементов.

**ДВУХЭЛЕМЕНТНОЕ УСТРОЙСТВО,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ
МОДУЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ
АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В МОЩНОСТИ НАГРУЗКЕ**

Обратимся теперь непосредственно к схеме на рис. 2. На ней показана реализация передачи активной мощности от двух фаз А и В передающей энергосистемы через реактивные элементы L и С на фазу А' второй энергосистемы, выступающей в качестве нагрузки R. Ставится задача подбора значений управляемых индуктивности L реактора и емкости конденсатора С таким образом, чтобы обеспечить на заданном сопротивлении нагрузки R фиксированные ток и напряжение, равное напряжению питающей системы при изменении фазового сдвига между векторами напряжений фаз А и А' в диапазоне 0-120°. Аналогичные схемы применяются и для других фаз, но не показаны на рис. чтобы не загромождать его. При увеличении угла сдвига между векторами связываемых систем

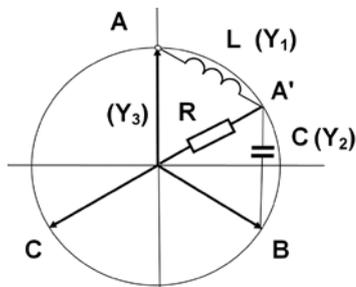


Рис.2. Схема одной фазы двухэлементного устройства гибкой связи на основе реактора и конденсатора.

свыше 120° с помощью полупроводниковых ключей производится переключение цепочки управляемых элементов L-С с нагрузкой фазы А' на следующую пару фаз питающей системы В-С. При дальнейшем нарастании угла свыше 240°, нагрузка через цепочку L-С подключается к фазам С-А, и т.д. при круговом вращении вектора А' относительно вектора А.

Запишем уравнение баланса токов для фазы А' приемной энергосистемы. Имеем:

$$\left(\dot{U}_A - \dot{U}_n\right) \cdot j b_A + \left(\dot{U}_B - \dot{U}_n\right) \cdot j b_B = (g_n + j b_n) \cdot \dot{U}_n \quad (1)$$

Здесь принято, что вектор напряжения на нагрузке U_n направлен вдоль вещественной оси, а вектор $\dot{U}_A = U_A \exp(j\delta)$. Рассмотрим общий случай неравенства модулей напряжения передающей и приемной энергосистем. Пусть модуль напряжения снабжающей энергосистемы будет в k раз больше модуля напряжения принимающей энергосистемы, т.е. $U_A = k U_n$. Разделив обе части уравнения (1) на величину $k U_n$ получим:

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

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

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

Разрешим последнюю систему относительно неизвестных b_A и b_B .

Получим, для b_A :

$$b_A = -\frac{1}{k} \cdot \frac{\left(\cos\left(\frac{2}{3}\pi - \delta\right) - \frac{1}{k}\right) \cdot g_n + \sin\left(\frac{2}{3}\pi - \delta\right) \cdot b_n}{\sin\left(\frac{2}{3}\pi - \delta\right) \cdot \left(\cos \delta - \frac{1}{k}\right) + \left(\cos\left(\frac{2}{3}\pi - \delta\right) - \frac{1}{k}\right) \cdot \sin \delta} \quad (4)$$

А для b_B :

$$b_B = \frac{1}{k} \cdot \frac{\left(\cos \delta - \frac{1}{k}\right) \cdot g_n + \sin \delta \cdot b_n}{\sin\left(\frac{2}{3}\pi - \delta\right) \cdot \left(\cos \delta - \frac{1}{k}\right) + \left(\cos\left(\frac{2}{3}\pi - \delta\right) - \frac{1}{k}\right) \cdot \sin \delta} \quad (5)$$

Таким образом, получены аналитические выражения для значений проводимостей реактора и конденсатора, позволяющие при заданных активной и реактивной проводимостях нагрузки получить на выходе устройства напряжение, меньшее в k раз приложенного во всем диапазоне изменения угла фазового сдвига δ . На последующих рисунках 3-11 приведены графики зависимостей проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ для различных значений проводимостей нагрузки (в том числе и реактивной) и величины коэффициента преобразования k по напряжению. На рис. 3,4 для сравнения приведены графики упомянутых зависимостей при чисто активной нагрузке ($g_n=1, b_n=0$) и разных коэффициентах по напряжению $k=1$ и $k=1,1$ (выходное напряжение меньше питающего на 10%). Маркеры треугольной и ромбической формы на кривых проставлены через 5°. График на рис. 3 при $k=1$ является базовым, при этом как видно из графика, проводимость b_A , подключаемая к фазе А питающей системы отрицательна, имеет индуктивный характер, и модуль ее постепенно уменьшается с увеличением угла, и при углах, близких к 120° приближается к нулю. Проводимость, подключаемая к фазе В питающей системы, положительна, имеет емкостной характер и растет с увеличением угла, достигая при углах, близких к 120°, тех же величин по модулю, какие имела проводимость b_A при малых углах, т.е., имеет место определенная симметрия.

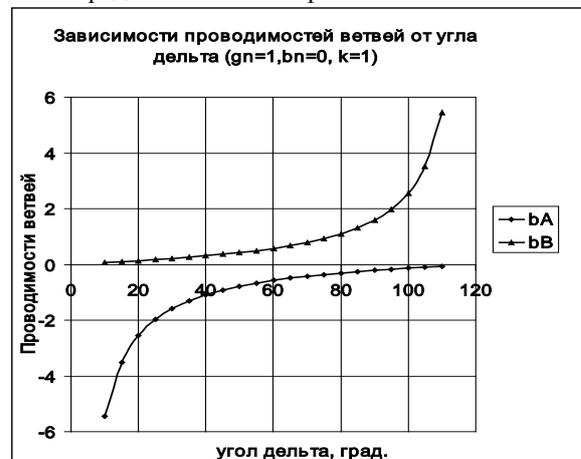


Рис.3. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ между системами при чисто активной нагрузке при коэффициенте $k=1$.

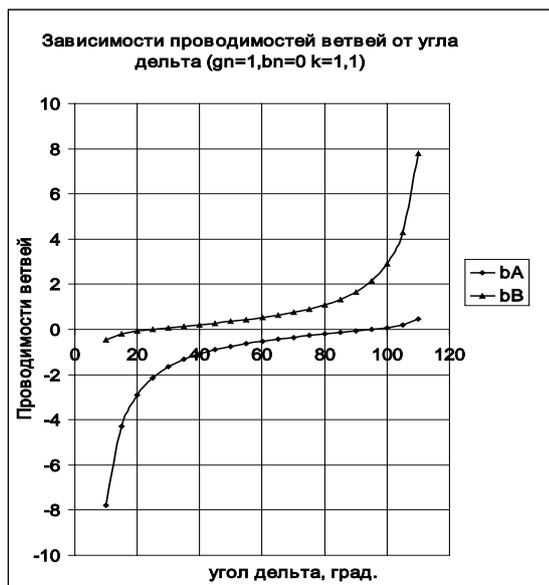


Рис.4. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=1,1$.

Следует отметить, что при промежуточном значении угла в 60° указанные проводимости имеют одинаковые модули при разных знаках. Из сравнения рис.3, 4 видно, что при уровне напряжения в приемной системе, пониженном на 10%, максимальные необходимые значения диапазона изменения проводимостей возрастают более чем на 30%. Кроме того, кривая индуктивной проводимости b_A при значениях угла порядка 100° переходит через ось абсцисс и меняет свой знак на положительный, а кривая емкостной проводимости b_B наоборот – становится отрицательной при углах менее 20° , т.е. при углах менее 20° и более 100° проводимости имеют одинаковый характер. Значения проводимостей b_A и b_B в средней точке при $\delta=60^\circ$ одинаковы по модулю и противоположны по знаку. Рассмотрим для полноты еще случай, когда напряжение приемной системы меньше на 20%, т.е. примем коэффициент преобразования $k=1,2$. На рис. 5 показаны графики зависимостей проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ для данного случая. Сравнивая с предыдущим рисунком, видим, что диапазон изменения проводимостей значительно увеличился, примерно вдвое, точки изменения знаков проводимостей сместились еще больше к центру рисунка по сравнению с предыдущим случаем. Однако в целом характер изменения проводимостей не изменился. Следует отметить, что по сравнению с вариантом $k=1$, при значении $k>1$ наметилась тенденция перехода кривых



Рис.5. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=1,2$

проводимостей через нуль и изменения знаков проводимостей, так что появляются диапазоны изменения угла δ , в которых проводимости имеют одинаковые знаки. Таким образом, соответствующим выбором значений проводимостей можно обеспечить режим передачи активной мощности и при меньшем по сравнению с питающей системой значении напряжения приемной системы.

Учитывая, что величина напряжения в электрических сетях может изменяться как в меньшую, так и в большую сторону от номинального значения, рассмотрим варианты устройства с увеличенным напряжением приемной системы при $k=0,9$. На рис. 6 показаны полученные зависимости проводимостей от угла δ между системами напряжений. Сравнивая результаты рис.6 и рис.3, можно отметить, что необходимый диапазон изменения проводимостей с увеличением напряжения приемной системы на 10% (при $k=0,9$) уменьшился почти на 20%. Как следует из рис. 7, где представлены кривые для коэффициента преобразования $k=0,8$ (что соответствует повышению уровню напряжения приемной системы уже в 1,25 раза), повышение напряжения сопровождается дальнейшим уменьшением необходимого диапазона изменения проводимостей реактивных элементов. Однако знаки проводимостей в рассмотренном диапазоне изменения угла δ все время противоположные.



Рис.6. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=0,9$.



Рис.7. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=0,8$.

С увеличением уровня выходного напряжения сверх номинального необходимый диапазон изменения проводимостей реактивных элементов уменьшается, и наоборот, с падением уровня выходного напряжения – увеличивается. Кроме того, при уменьшении напряжения появляются области изменения угла δ , в которых проводимости имеют одинаковый знак.

Рассмотрим далее влияние реактивной нагрузки на необходимые значения проводимостей, обеспечивающих режим «гибкой связи». На рис.8 представлены зависимости проводимостей для случая коэффициента преобразования $k=1,1$ при смешанной нагрузке емкостного характера. Из сравнения с рис. 4 следует, что подключение нагрузки емкостного характера приводит к смещению диапазона регулирования проводимостей в сторону отрицательных значений и нарушению его симметрии. При этом проводимости в точке $\delta=60^\circ$

оказываются разными. Кроме того, точки перехода кривых проводимостей через нуль смещаются вправо, причем значительно сильнее выражено смещение верхней кривой для проводимости b_B

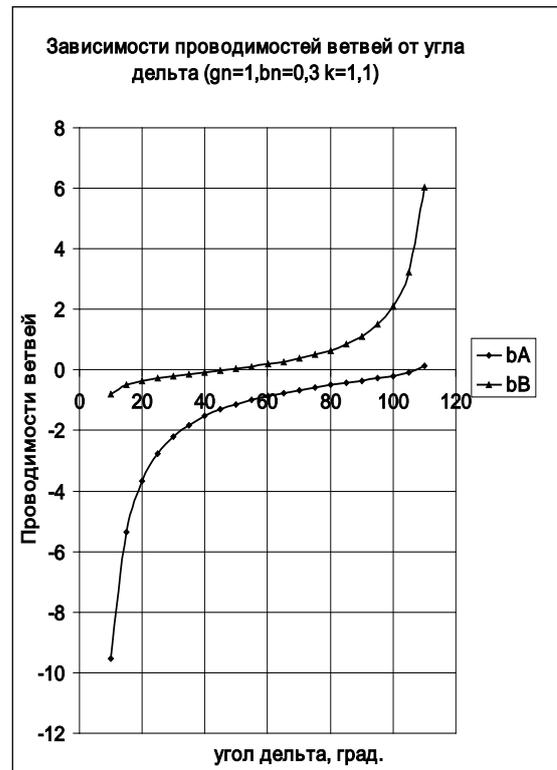


Рис.8. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке емкостного характера и коэффициенте преобразования $k=1,1$.

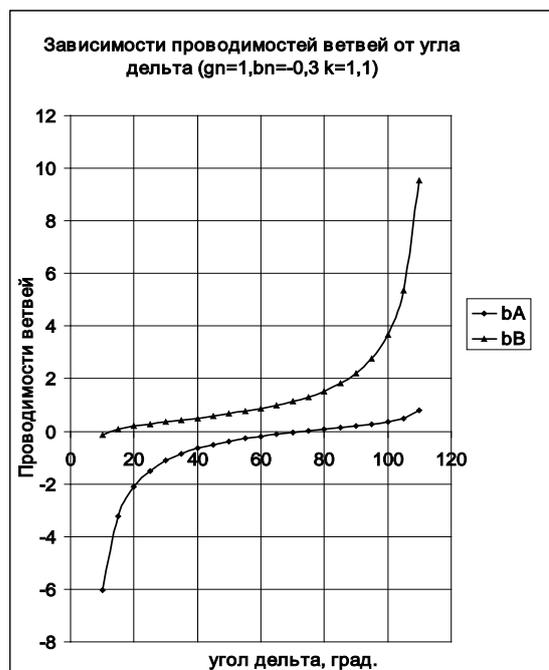


Рис.9. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке индуктивного и коэффициенте преобразования $k=1,1$. (обозначена треугольными маркерами). На рис.9 представлены зависимости

проводимостей для случая того же значения коэффициента преобразования $k=1,1$ однако при смешанной нагрузке индуктивного характера. Сравнение с кривыми того же рис.4 показывает, в данном случае происходят противоположные изменения. Подключение нагрузки индуктивного характера приводит к смещению диапазона регулирования проводимостей в сторону положительных значений проводимостей и нарушению его симметрии. При этом проводимости в точке $\delta=60^\circ$ опять оказываются разными, но как бы меняются местами. В данном случае значительно сильнее выражено смещение нижней кривой для проводимости b_A (кривая обозначена маркерами в виде ромба). На рис.10 представлены зависимости проводимостей для случая коэффициента

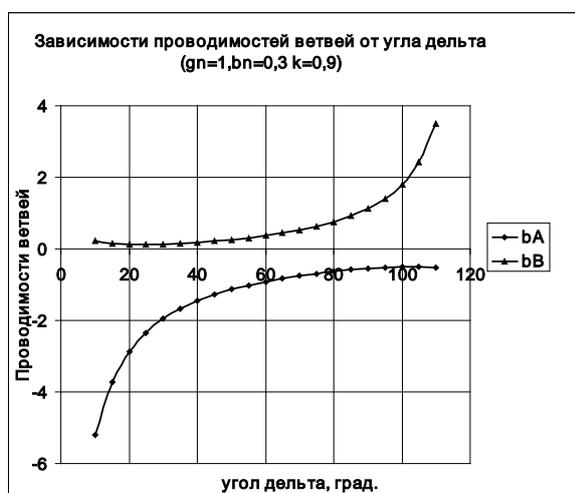


Рис.10. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке емкостного характера и коэффициенте преобразования $k=0,9$.



Рис.11. Зависимости проводимостей реактора и конденсатора от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке индуктивного и коэффициенте преобразования $k=0,9$ снова при случае смешанной нагрузки емкостного характера. Из сравнения с рис. 6 следует, что подключение нагрузки емкостного характера приводит к смещению диапазона

регулирования проводимостей в сторону отрицательных значений. При этом проводимости в точке $\delta=60^\circ$ снова оказываются разными. На рис.11 представлены зависимости проводимостей для того же значения коэффициента преобразования $k=0,9$, однако, при смешанной нагрузке индуктивного характера. Сравнение с кривыми того же рис.6 показывает, в данном случае происходят противоположные изменения. Подключение нагрузки индуктивного характера приводит к смещению диапазона регулирования проводимостей в сторону положительных значений проводимостей. При этом проводимости в точке $\delta=60^\circ$ опять оказываются разными, но как бы меняются местами по сравнению с предыдущим случаем.

Таким образом, подключение дополнительных реактивных нагрузок приводит к смещениям кривых проводимостей, зависящим от характера дополнительно подключаемой реактивной нагрузки.

ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЕ РЕАКТОРНО-КОНДЕНСАТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ГИБКОЙ СВЯЗИ ЭНЕРГОСИСТЕМ.

Рассмотренные ранее двухэлементные устройства для гибкой связи энергосистем принципиально позволяют обеспечить круговое вращение фазы напряжения на нагрузке, однако обладают тем недостатком, что для его реализации требуется изменение реактивных проводимостей в очень широком диапазоне, а при углах, близких к граничным в 0° и 120° , проводимости может даже стремиться к бесконечности. В связи с этим, было предложено устройство, содержащее три проводимости на каждую фазу выходного напряжения, изображенное на рис.12. Ко всем трем фазам питающей системы А,В,С подключены соответственно проводимости Y_A, Y_B, Y_C , соединенные в одну точку A' , к которой подключается проводимость нагрузки Y_n фазы A' приемной системы. Для остальных фаз схема имеет аналогичный вид и не показана для того, чтобы не загромождать рисунок.

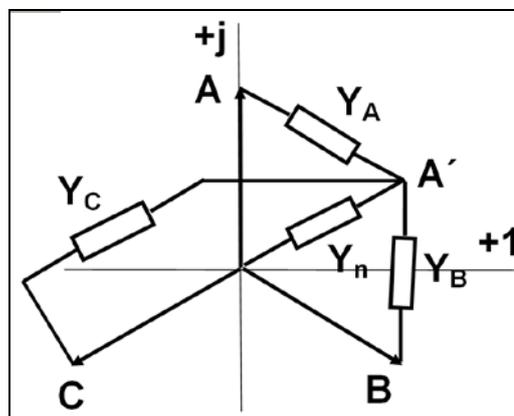


Рис.12. Схема подключения реактивных элементов для 3-х элементного устройства. Показаны элементы только для фазы A' приемной системы.

Рассмотрим аналогично предыдущему закономерности передачи активной мощности от всех

трех фаз первой энергосистемы через реактивные элементы на фазу А' второй энергосистемы. Для общности будем считать, что модуль напряжения принимающей энергосистемы в k раз меньше модуля

напряжения передающей энергосистемы, т.е. $\text{mod}(U_n) = \text{mod}(U_A/k)$. Тогда уравнение баланса токов с учетом наличия коэффициента преобразования k может быть представлено в следующем виде:

$$k \cdot (\exp(j\delta) - 1) \cdot j b_A + (k \cdot \exp(-j(\frac{2}{3}\pi - \delta)) - 1) \cdot j b_B + (k \cdot \exp(j(\frac{2}{3}\pi + \delta)) - 1) \cdot j b_C = g_n + j b_n \quad (6)$$

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

$$\text{Получим: } \left\{ \begin{array}{l} -k \cdot \sin \delta \cdot b_A + k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi - \delta) \cdot b_B - k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi + \delta) \cdot b_C = g_n \\ (k \cdot \cos \delta - 1) \cdot b_A + (k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi - \delta) - 1) \cdot b_B + (k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi + \delta) - 1) \cdot b_C = b_n \end{array} \right\} \quad (7)$$

Далее, аналогично предыдущему запишем эту систему уравнений в матричном виде.

$$[a] \cdot [b] = [y] \quad (8)$$

$$\text{Где } [b] = \begin{bmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \end{bmatrix}, \quad [y] = \begin{bmatrix} g_n \\ b_n \end{bmatrix},$$

$$[a] = \begin{bmatrix} -k \cdot \sin \delta & k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi - \delta) & -k \cdot \sin(\frac{2}{3}\pi + \delta) \\ k \cdot \cos \delta - 1 & k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi - \delta) - 1 & k \cdot \cos(\frac{2}{3}\pi + \delta) - 1 \end{bmatrix}.$$

Данная система имеет бесконечное множество решений для неизвестных [b]. Нас же интересует единственное решение, обладающее минимальной нормой. То есть при

$$\|[b]\| \rightarrow \min. \quad (9)$$

На языке МАТЛАБа эта процедура может быть записана в виде:

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

Для решения данной задачи аналогично предыдущему, использован пакет МАТЛАБ. Была разработана вспомогательная программа на m-языке, рассчитывающая искомые значения проводимостей для диапазона изменения угла δ в $0^\circ - 120^\circ$. По полученным значениям проводимостей для каждого набора значений активной и реактивной проводимости нагрузки и коэффициента преобразования k построим соответствующие графики.

Сначала рассмотрим случай k=1. На рис.13 показаны зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке, графики для проводимостей, подключенных к фазам А,В,С передающей системы, обозначены маркерами разной формы. Из рис.13 видно, что при значении угла δ , равном 60° , проводимость b_C , которая подключается к фазе С, равна нулю, а проводимости \

b_A и b_B , подключаемые соответственно к фазам А и В одинаковы по модулю и противоположны по знаку, что совпадает в данном частном случае с результатами для 2-х элементного устройства, приведенными на рис. 3. Кроме того, отметим, что в крайних точках, при углах $\delta=0^\circ$ и 120° одна

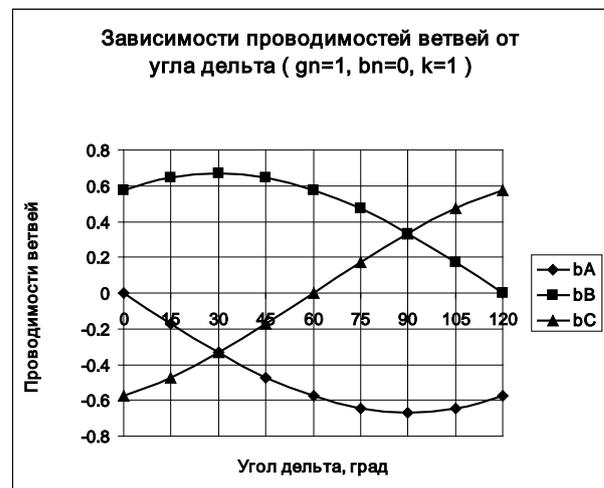


Рис.13. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке.

из проводимостей b_A или b_B обращается в нуль, т.е. в этих точках энергия, также как и при 60° , поступает только из 2-х фаз передающей системы. Сравнивая упомянутые рисунки, можно отметить, что величины проводимостей в случае 3-х элементного устройства значительно меньше, чем в 2-х элементном устройстве, что можно отнести к преимуществам данной схемы. Кроме того, преимуществом является тот факт, что в данном устройстве отсутствуют диапазоны изменения угла δ с неограниченно возрастающими проводимостями.

Рассмотрим далее зависимости проводимостей от угла δ при смешанной нагрузке, когда в нагрузке имеется реактивная составляющая. При этом зададим угол нагрузки



Рис.14. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке.



Рис.15. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке.

равным 30° , что соответствует активной составляющей проводимости нагрузки 0,866, а реактивной – 0,5 с соответствующим знаком. На рис. 14, 15 представлены соответствующие графики полученных проводимостей соответственно для емкостного и индуктивного характера нагрузки. Сравнивая рис. 13 для чисто активной нагрузки и рис.14 для смешанной нагрузки емкостного характера, можно заметить, что появление емкостной составляющей нагрузки при сохранении постоянства ее модуля приводит к смещению графиков всех проводимостей вниз в сторону отрицательных значений, за исключением крайних точек 0° и 120° . Аналогичный вывод можно сделать при сравнении рис.13 и рис.15, относящегося к случаю нагрузки индуктивного характера, только в данном случае смещение происходит вверх. Далее проанализируем зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства при чисто реактивной нагрузке, представленные на рис. 16, 17. При чисто емкостной нагрузке (см. рис. 16) все проводимости

отрицательны, т.е. имеют индуктивный характер, а при чисто индуктивной нагрузке (см. рис. 17) все наоборот, т.е. все проводимости имеют индуктивный характер.

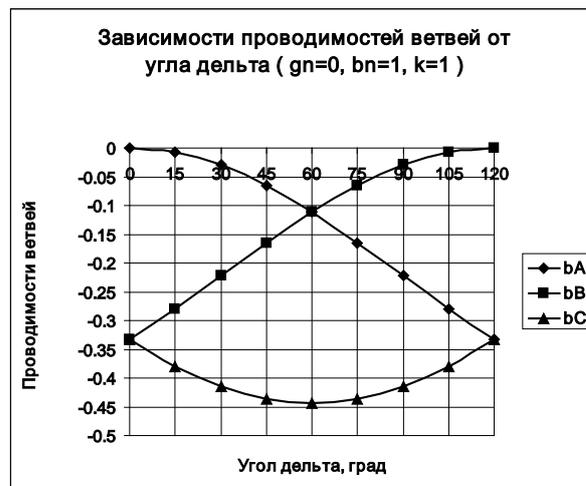


Рис.16. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при емкостной нагрузке.

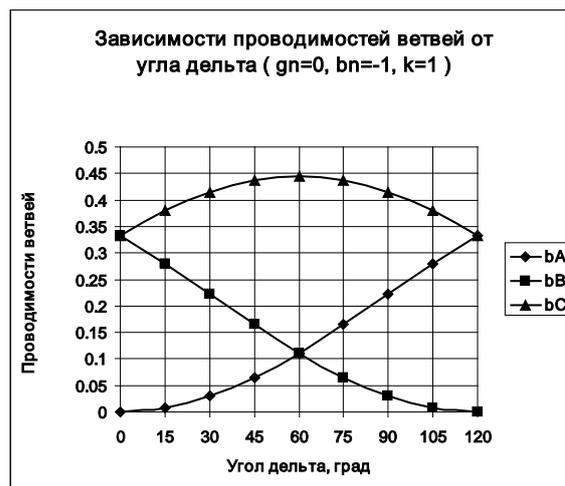


Рис.17. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при индуктивной нагрузке.

Кроме того, можно отметить, что точка 60° является особенной, в ней пересекаются кривые проводимостей, подключаемых к двум смежным фазам А, В питающей сети. Следует также отметить, что при чисто реактивной нагрузке (в отличие от чисто активной) все проводимости имеют одинаковые знаки и не меняют их во всем диапазоне изменения угла δ .

На рис. 18, 19 приведены графики зависимостей проводимостей при активной нагрузке для уменьшенного в 1,1 и 1,2 раза выходного напряжения. Сравнивая данные графики с рис. 13 (где приведены кривые для $k=1$), можно отметить, что снижение уровня выходного напряжения по отношению к питающему приводит к уменьшению диапазона изменения регулируемых проводимостей. Таким образом, подбором соответствующих проводимостей

можно обеспечить регулирование в сторону уменьшения уровня выходного напряжения.

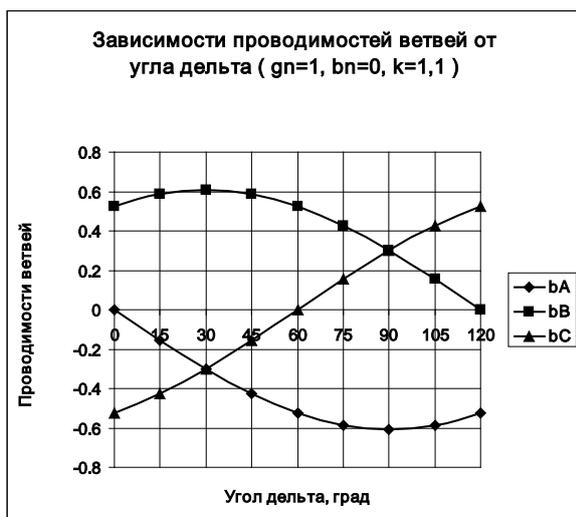


Рис.18. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=1,1$.



Рис.19. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=1,2$.

На рис. 20, 21 приведены графики зависимостей проводимостей при активной нагрузке для увеличенного по отношению к питающему уровня выходного напряжения (коэффициент преобразования $k=0,9$ и $0,8$). Сравнивая, аналогично предыдущему, данные графики с рис. 13 ($k=1$), можно отметить, что увеличение уровня выходного



Рис.20. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=0,9$.



Рис.21. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке и коэффициенте преобразования $k=0,8$. напряжения по отношению к питающему приводит к уменьшению диапазона изменения регулируемых проводимостей.

Таким образом, регулирование величин проводимостей в соответствии с полученными аналитическими выражениями (7-9) позволяет обеспечить подбор необходимого коэффициента преобразования напряжения по величине и для случае, если напряжения связываемых систем отличаются на величину $\pm 20\%$.

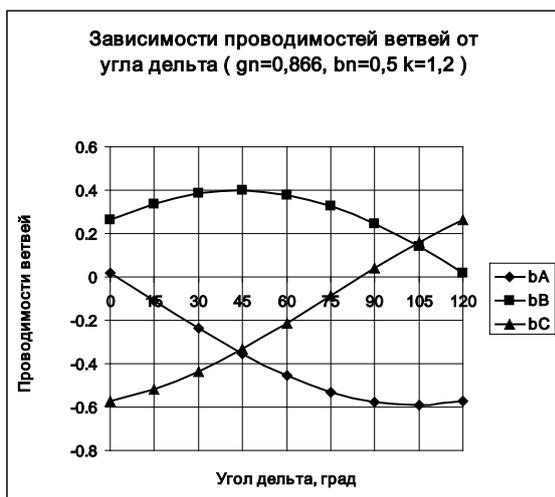


Рис.22. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке емкостного характера и коэффициенте преобразования $k=1,2$.



Рис.23. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при смешанной нагрузке индуктивного характера и коэффициенте преобразования $k=1,2$.

На рис. 22, 23 приведены графики зависимостей проводимостей при смешанной нагрузке, соответственно, емкостного и индуктивного характера для уменьшенного по отношению к питающему выходного напряжения (коэффициент преобразования $k=1,2$). Сравнивая данные графики с рис. 14, 15 (где приведены кривые для $k=1$), можно отметить, что в данном случае уменьшение уровня выходного напряжения по отношению к питающему приводит к уменьшению диапазона изменения регулируемых проводимостей.

На рис. 24, 25 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 рис. 16, 17 (где приведены кривые для $k=1$), 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 .

На рис. 26, 27 приведены графики зависимостей проводимостей при чисто реактивной нагрузке соответственно, емкостного и индуктивного характера для увеличенного значения выходного напряжения (коэффициент преобразования $k=0,8$). Сравнивая данные графики с рис. 16,17 (где приведены кривые для $k=1$), можно отметить, что в данном случае графики проводимостей, подключаемых к смежным фазам А и В питающей системы при емкостной нагрузке смещаются вниз, а при индуктивной нагрузке – вверх от аналогичных графиков рис. 16, 17.

Таким образом, показано, что выбирая проводимости в соответствии с предлагаемой методикой, можно реализовать гибкую связь между системами с одинаковыми номинальными значениями

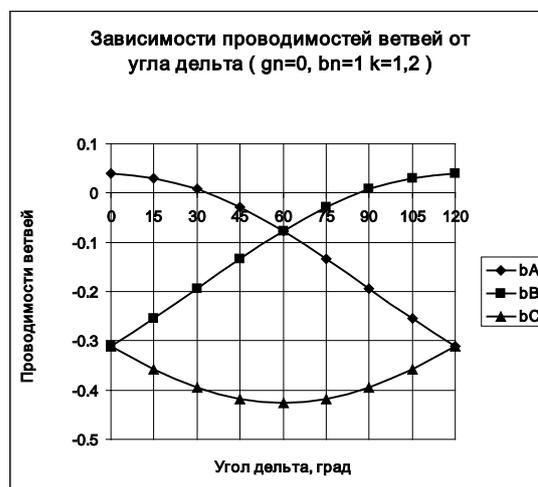


Рис.24. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при чисто емкостной нагрузке.

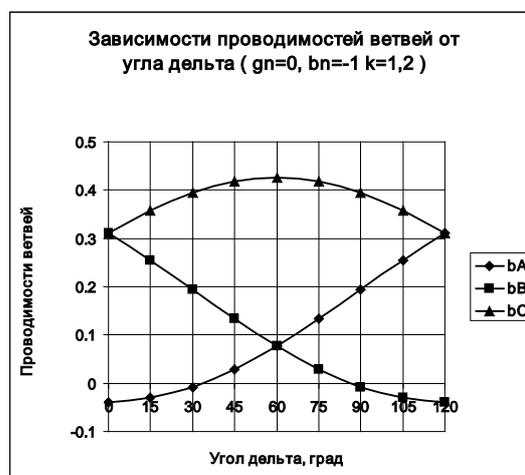


Рис.25. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при чисто индуктивной нагрузке.



Рис.26. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при емкостной нагрузке и увеличенном относительном значении выходного напряжения.

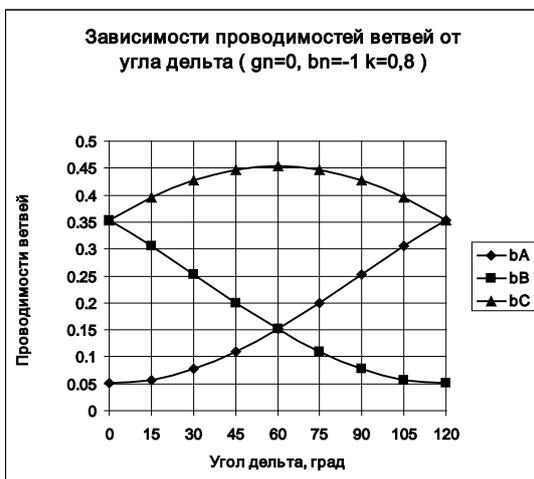


Рис.27. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при индуктивной нагрузке и увеличенном относительном значении выходного напряжения.

напряжений при колебаниях величин напряжений систем в допустимых нормами пределах в реальных эксплуатационных режимах.

Рассмотрим далее принципиальную возможность реализации гибкой связи в случае систем с различными номинальными значениями напряжений, которые могут отличаться значительно больше, чем в рассмотренном ранее диапазоне в $\pm 20\%$, скажем, в два раза. Построим по описанной методике кривые проводимостей при $k=2$ (выходное напряжение меньше входного) и при $k=0,5$ (выходное напряжение больше входного). На рис. 28, 29 представлены результаты расчета проводимостей ветвей устройства от величины коэффициента преобразования для его значений $k=1$, $k=2$ и $k=0,5$. При $k=2$ напряжение на входе устройства вдвое больше выходного напряжения, а при $k=0,5$ – наоборот. Полученные результаты приведены на рис. 28, 29. Для большей наглядности рис.28 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. 29 те же результаты изображены в черно-белом варианте сплошными, пунктирными и точечными линиями. Из представленных на рис. 28 результатов видно, что меньшему значению выходного напряжения по отношению к входному ($k=2$) соответствуют меньшие значения всех трех проводимостей, что понятно и с физической точки зрения – по-видимому, при больших приложенных напряжениях проводимости схемы должны быть меньше, чтобы «погасить» большее напряжение.

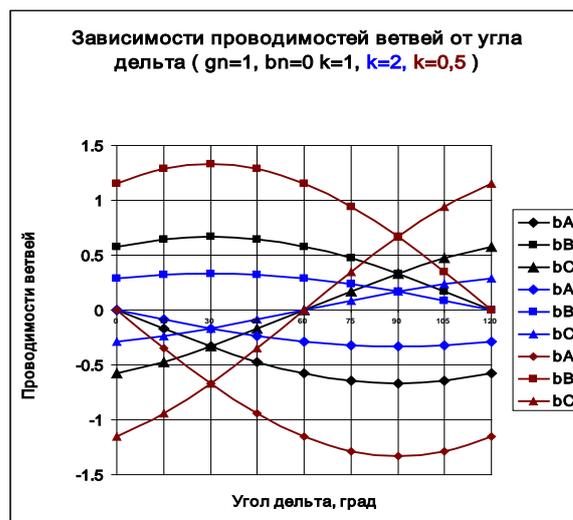


Рис.28. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и при уменьшенном ($k=2$) и увеличенном ($k=0,5$) относительно входного значении выходного напряжения.

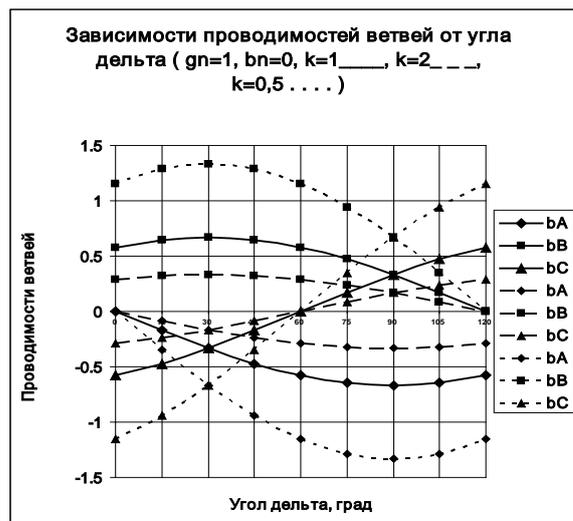


Рис.29. Зависимости проводимостей элементов реакторно-конденсаторного устройства от величины угла фазового сдвига δ при активной нагрузке и при уменьшенном ($k=2$) и увеличенном ($k=0,5$) относительно входного значении выходного напряжения.

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° и 90° .

Для дополнительной проверки полученных

значений проводимостей устройства, обеспечивающих заданный режим, а также для проверки соответствия мощностей, протекающих по ветвям реакторно-конденсаторного устройства, мощности нагрузки, а также для определения суммарной мощности ветвей, составлена вспомогательная модель в пакете МАТЛАБ, представленная на рис.30. С использованием данной модели

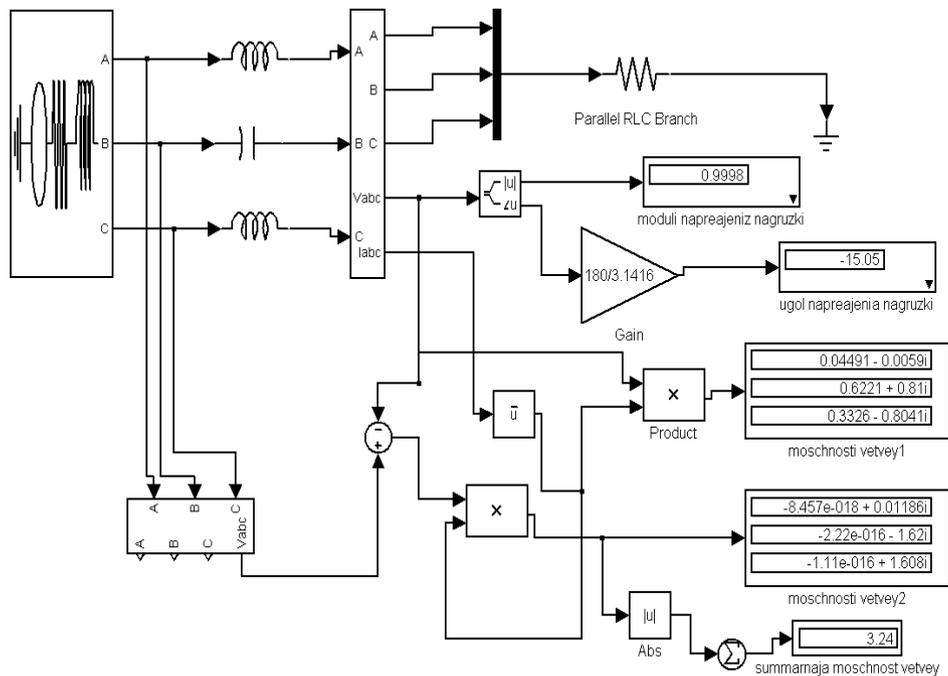


Рис.30. Модель реакторно-конденсаторного устройства в пакете МАТЛАБ, позволяющая провести расчет выходного напряжения и потоков мощностей по ветвям

были рассчитаны суммарные мощности ветвей для всего диапазона изменения угла δ и построены векторные диаграммы токов ветвей и нагрузки, наглядно отображающие соотношения между токами при различных значениях угла δ .

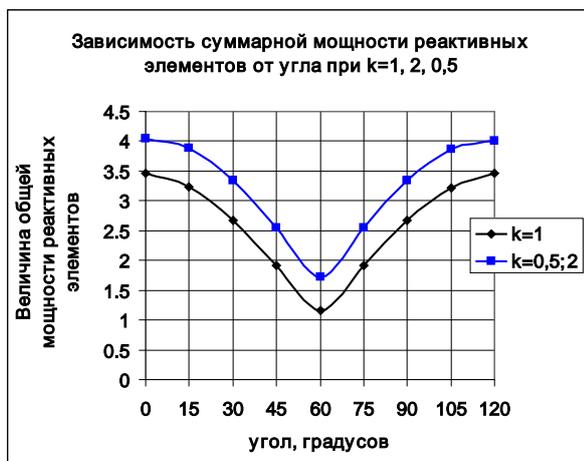


Рис.31. Зависимости суммарной мощности реактивных элементов от угла при разных значениях коэффициента преобразования k .

Как видно из рис.31, наименьшие значения суммарных мощностей реактивных элементов получаются при коэффициенте преобразования $k=1$ (нижняя кривая), что соответствует одинаковым уровням выходного напряжения (напряжения приемной системы) и напряжения питающей системы.

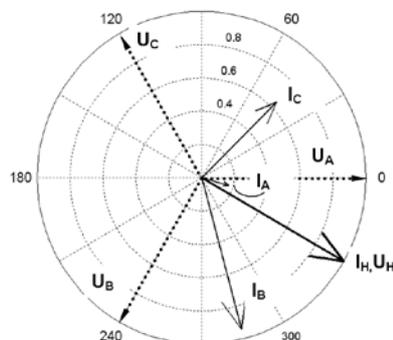


Рис.32. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при активной нагрузке и угле $\delta=-30^\circ$ (проводимость нагрузки $g=1$, $b=0$, $k=1$).

При питающем напряжении, отличающемся от напряжения нагрузки в меньшую ($k>1$), или в большую ($k<1$) сторону, кривая суммарной мощности элементов устройства смещается вверх. При этом для

расчетов, проведенных для $k=2$ 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, представленные для различных значениях угла $\delta = 30^\circ$, $\delta = 60^\circ$ и $\delta = 90^\circ$ соответственно на рис.32, 33, 34. Все диаграммы построены для случая единичной активной нагрузки ($g=1$) и величины коэффициента преобразования $k=1$. Из диаграммы рис. 32 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. 33 приведена аналогичная векторная диаграмма, построенная при тех же исходных условиях, но для угла фазового сдвига $\delta=60^\circ$. Видно, что ток от фазы С в данном режиме обратился в нуль, а токи I_A и I_B одинаковы по величине и по-прежнему в сумме обеспечивают ток нагрузки. При достижении углом δ величины 90° картина токов меняется в соответствии с рис. 34. Ток фазы В сравнительно небольшой (буквенное обозначение и сам вектор сопоставлены друг другу с помощью прерывистой кривой), ток нагрузки в основном определяется токами от фаз А и С, а в сумме токи трех элементов по-прежнему дают ток нагрузки. Рассмотрим далее влияние на вид векторной диаграммы величины коэффициента преобразования k .

На рис. 35 приведена векторная 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. 32 для того же угла $\delta=-30^\circ$, но при значении коэффициента преобразования $k=1$, исключение составляет вектор тока фазы А.

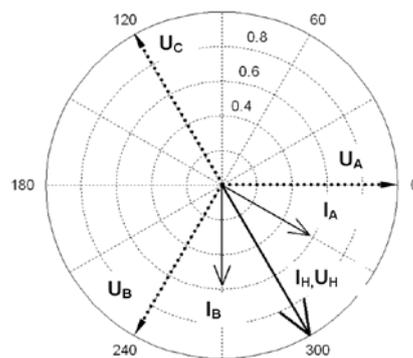


Рис. 33. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при активной нагрузке и угле $\delta=-60^\circ$ (проводимость нагрузки $g=1, b=0, k=1$).

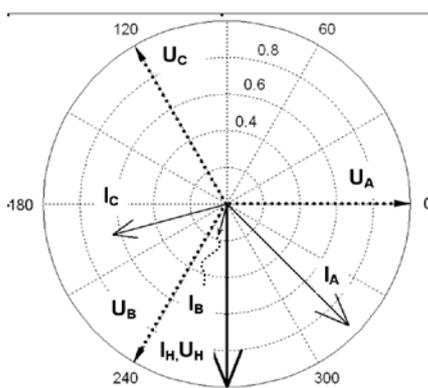


Рис.34. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при активной нагрузке и угле $\delta=-90^\circ$ (проводимость нагрузки $g=1, b=0, k=1$).

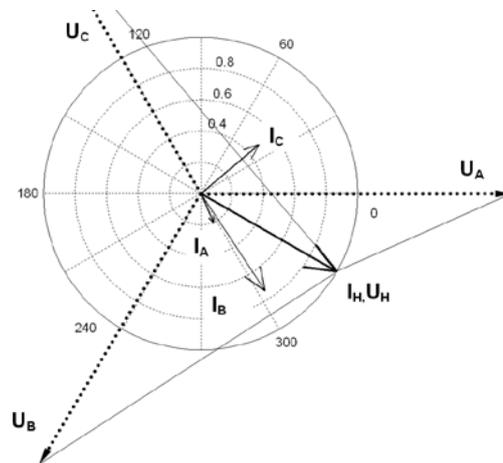


Рис.35. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при чисто активной нагрузке, угле $\delta=-30^\circ$ и коэффициенте преобразования $k=2$.

Соблюдается также угловое расположение векторов токов ветвей, которые перпендикулярны отрезкам прямых линий, соединяющих концы векторов питающих напряжений и вектора напряжения нагрузки, и которые представляют собой напряжения на реактивных элементах.

И по-прежнему сумма токов реактивных элементов равна току нагрузки. На рис.36 показана векторная диаграмма при аналогичных предыдущим условиям, однако величина коэффициента преобразования $k=0,5$, т.е. питающее напряжение вдвое меньше напряжения нагрузки. Как видно из

рис. 36, соблюдаются все ранее отмеченные закономерности по взаимному расположению токов и напряжений, отличие заключается в том, 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.

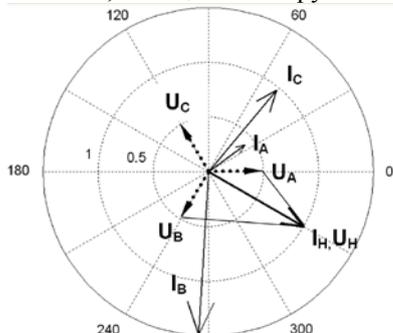


Рис.36. Векторная диаграмма напряжений и токов устройства при чисто активной нагрузке, угле $\delta = -30^\circ$ и коэффициенте преобразования $k = 0,5$.

ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель и получено аналитическое описание для исследования процессов управляемой передачи мощности между энергосистемами с помощью 2-х и 3-х элементных реакторно-конденсатор-ных устройств гибкой связи энергосистем на переменном токе. На ее основе разработана в пакете МАТЛАБ вспомогательная программа, позволяющая с использованием вычислительных средств пакета получить значения проводимостей, реализующих гибкую связь несинхронно работающих систем, в том числе при различных уровнях напряжений связываемых 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, позволяющие оценить затраты на реализацию устройства.
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. Продемонстрировано, что фактически данное устройство является своеобразным эквивалентом фазоповоротного трансформатора с круговым вращением фазы. Результаты исследований могут

быть положены в основу дальнейших разработок устройств гибкой связи несинхронно работающих энергосистем переменного тока.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Pan, R. Nuqui, K. Srivastava, T. Jonsson, P. Holmberg, Ying-Jiang Hafner. AC Grid with Embedded VSC-HVDC for Secure and Efficient Power Delivery. IEEE Energy2030, Atlanta, GA USA, 17-18 November, 2008.
- [2] Power Link, № 2, 1996 г. ABB Power Systems.[1]. Леннарт Карлсон. ABB Power Technologies. AB Power Systems, Людвика, Швеция. АББ ревью, №3, 2005 г. с. 42-46.
- [3] J.Artilaga, B.Smith. AC-DC Power System Analysis. IEE, London, 1998, 395 pp.
- [4]. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Перспективы применения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока // Электротехника. – 2004. – № 8. – С. 30–36.
- [5]. Зеленохат Н.И. Создание гибких межсистемных связей для объединения электроэнергетических систем. Известия высших учебных заведений, 1981, -№1, стр. 3-8.
- [6] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, 2000, 432 pp.
- [7]. R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems. JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION, 2002. 518 pages.
- [8]. Ketan G. Damor, Dipesh M. Patel, Vinesh Agrawal, Hirenkumar G. Patel. Comparison Of Different Fact Devices. IJSTE–International Journal of Science Technology & Engineering. Vol. 1, Issue 1, July 2014.
- [9]. 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.
- [10]. 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.
- [11]. 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
- [12]. Jacques Lemay, Jacques Brochu, Francois Beaugard. Interphase Power Controllers complementing the family of FACTS controllers. ABB Review 1/2000.
- [13]. Войтовский А.В, Калинин Л.П. Исследование режима работы фазорегулирующего трансформатора с круговым преобразованием фазы напряжения. Сб. Управляемые электропередачи, Кишинев, из-во «Штиинца», 1987 г.
- [14]. Бошняга В.А., Постолатий В.М., Войтовский А.В. Трансформаторное устройство связи энергосистем. Авторское свидетельство СССР №1288764. Выдано 8 октября 1986 г.
- [15]. Бошняга В.А., Войтовский А.В., Постолатий В.М. Трансформаторный фазорегулятор. Авторское свидетельство СССР № 1742958, опубл. В БИ №23 от 23.06.1992 г.
- [16]. Берлин Е.М. Разработка научно-технических предложений и подготовка вариантов для технико-экономического обоснования многофазных тиристорно-ключевых устройств для объединения энергосистем. Отчет о научно-исследовательской работе, НИИПТ, Ленинград, 1983 г.
- [17]. Александров Г.Н. (СПбГТУ, С-Петербург), Зайцев С.Г., Благодарев В.И. (ОАО «Ленэнерго», С-Петербург) Управляемые реакторы в качестве силовых элементов ФВПТ. Электроэнергетика: сегодня и завтра. - 2014. - № 3. - С.51-59:
- [18]. Макаров А.В., Таламанов О.В. Устройство для объединения трехфазных энергосистем на основе управляемых реакторов. Патент на полезную модель № 50726. 23.11.2006.
- [19]. В.А. Кулинич. Индуктивно-емкостные управляемые трансформирующие устройства. Москва, Энергоатомиздат, 1987, 177 стр.