

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОКОНВЕРТОРА НА БАЗЕ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА С КРУГОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ФАЗЫ

М.С.Тыршу, Л.П.Калинин, Д.А.Зайцев, И.В.Голуб

Институт Энергетики Академии Наук Молдовы,

ул. Академическая, 5, Кишинев, Республика Молдова, MD-2028,

e-mail: tirsu.mihai@gmail.com

Представлены результаты моделирования циклоконвертора, предназначенного для синхронизации двух систем, работающих асинхронно на той же частоте. Предложенная схема, а также стратегия управления устройством позволяет соединить две системы на переменном токе и поддерживать заданный уровень обмена мощностью с погрешностью не более 5%. При этом исключаются токи сверх номинального уровня, а общий коэффициент гармоник не превышает 0,2%, что в 10 раз меньше дозволённого ПТЭ. Предложенное устройство может быть достойной заменой вставки постоянного тока. Библ. 3, рис. 7.

Ключевые слова: фазорегулирующий трансформатор, обмен мощности, энергосистема, активная и реактивная мощности.

Введение. Энергетические рынки находятся в переходной стадии, и имеется множество предпосылок для реализации новых типов систем электроснабжения для будущего, благодаря множеству факторов и потребностям, которые служат основой для создания интеллектуальных энергетических систем [1]:

- распространение распределенной генерации, преимущественно основанной на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ);
- эффективное использование энергии на уровне потребителя и интеллектуальное реагирование на запрос стало существенной проблемой;
- требования к качеству электроэнергии (надежность поставок и качество напряжения) будут возрастать в результате регулирующих действий, и в то же время ожидается увеличение количества отказов из-за климатических изменений;
- исходя из экономических соображений, существует необходимость увеличить уровень использования существующих сетей;
- срок службы многих компонентов существующих сетей уже истекает и их нужно заменить или продолжать использовать в безопасном и контролируемом образе.

Существуют многие исследования, разные видения и концепции, как будут выглядеть будущие энергетические системы. Некоторые из них концентрируются на уровне передающих функций (например, интегрирование ветряных установок большой мощности или использование FACTS-устройств). Все концепции имеют много общего, но также и некоторые отличия. В обобщенном случае интеллектуальные энергосистемы должны привести к оптимизации всей электрической цепочки для эффективного проектирования и функционирования сети, управления пиковыми нагрузками путем привлечения потребителей, интегрирование вариантов возобновляемых источников генерации и хранения электроэнергии и др. [2].

Описание устройства. Дальнейший рост производства электроэнергии неизбежно связан с развитием и усложнением объединенных электроэнергетических систем, что существенно затрудняет управление потоками активной и реактивной мощности. Увеличивается число элементов с пониженной управляемостью, таких, как мощные конденсационные и атомные электростанции, предназначенные для работы в базисном режиме, появляются крупные энергопотребители с резкопеременным графиком нагрузки. Таким образом, часто уже недостаточно традиционных средств управления, основывающихся на регулировании режима генерирующих источников.

Одним из перспективных направлений в этой области является создание управляемых (гибких) межсистемных связей как элемента интеллектуальной сети, которые могут быть оснащены статическими преобразователями частоты, обеспечивающими обмен энергией между системами без ее промежуточного выпрямления и инвертирования [3]. В качестве последних могут быть использованы фазовые преобразователи трансформаторного типа (PST-Phase Shifting Transformer) с круговым преобразованием фазы выходного напряжения относительно входного.

Возможный вариант такого устройства, которое может быть условно принято в качестве рабочей модели для рассмотрения принципа прямого преобразования частоты, показан на рис. 1. Сочета-

ние кругового преобразователя фазы и устройства типа IPC (Interphase Power Controller) может привести к существенному упрощению схемы и способствовать практической реализации устройства, которое можно было бы назвать «**Вставкой Переменного Тока**».

Устройство представляет собой силовой трансформатор, рабочие обмотки которого секционированы и переключаются с помощью коммутатора, построенного на базе средств силовой электроники (рис. 1).

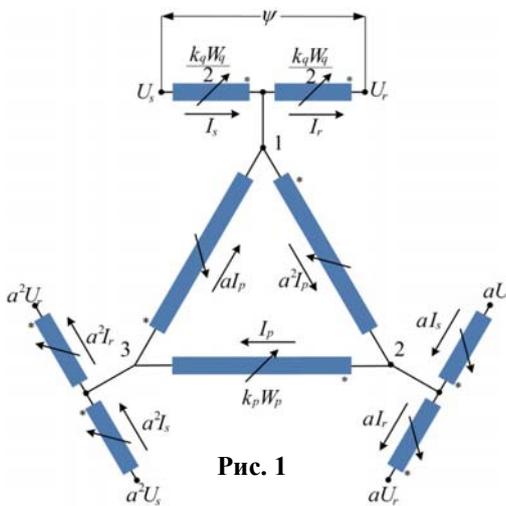


Рис. 1

Трехфазная система питающих напряжений подается на клеммы U_s , aU_s , a^2U_s , а система выходных напряжений снимается с клемм U_r , aU_r , a^2U_r . Обмотки трансформатора, отмеченные индексом q , выполняют функции продольного регулирования, а обмотки с индексом p , соединенные по схеме треугольника, – функции поперечного регулирования. Обмотки продольного регулирования разделены на две одинаковые части. Переключение секций рабочих обмоток обеспечивает ступенчатое изменение угла фазового сдвига Ψ напряжения на выходе по отношению к приложенному напряжению в пределах от 0 до 360 градусов. Состояние каждой обмотки характеризуется коэффициентами k_q и k_p , которые определяют количество задействованных секций в каждый момент времени при регулировании. Плавность регулирования зависит от количества секций рабочей обмотки. Как доказано в [3], комплексный коэффициент преобразования циклоконвертора по фазе при постоянстве фазного напряжения на выходе устройства и отсутствии токовой нагрузки определяется по формуле

коэффициентами k_q и k_p , которые определяют количество задействованных секций в каждый момент времени при регулировании. Плавность регулирования зависит от количества секций рабочей обмотки. Как доказано в [3], комплексный коэффициент преобразования циклоконвертора по фазе при постоянстве фазного напряжения на выходе устройства и отсутствии токовой нагрузки определяется по формуле

$$\dot{K} = j - k_q k_p^{-1} (j^{-1} + 1). \quad (1)$$

Таким образом, представленное устройство может служить заменой вставки постоянного тока.

Стратегия управления. Область существования режима преобразования фазы с помощью рассматриваемого устройства условно разделена на две части (рис. 2): первая часть охватывает пределы от 270^0 через 0^0 до 90^0 ; вторая – соответствует области от 90^0 через 180^0 до 270^0 .

Реализация режима в первой части обеспечивается при $k_p=1=\text{const}$ и $k_q=\text{var}(-1 \div 0 \div +1)$.

Закон преобразования фазы тока и напряжения при этом описывается вытекающим из (1) соотношением

$$\left. \begin{matrix} I_r \\ U_r \end{matrix} \right\} = \frac{1 + jk_q}{1 - jk_q} \cdot \left\{ \begin{matrix} I_s \\ U_s \end{matrix} \right. \quad (2)$$

Реализация режима во второй части обеспечивается при $k_q=1=\text{const}$ и $k_p=\text{var}(1 \div 0 \div -1)$. Закон преобразования фазы тока и напряжения при этом описывается вытекающим из (1) соотношением

$$\left. \begin{matrix} I_r \\ U_r \end{matrix} \right\} = \frac{k_p + j}{k_p - j} \cdot \left\{ \begin{matrix} I_s \\ U_s \end{matrix} \right. \quad (3)$$

Вся область регулирования фазы от 0^0 до 360^0 разделена на $n=60$ ступеней. При этом проблема управления режимом циклоконвертора осложняется тем фактом, что равномерное секционирование рабочих обмоток, вытекающее из технических требований к регулятору, приводит к нерав-

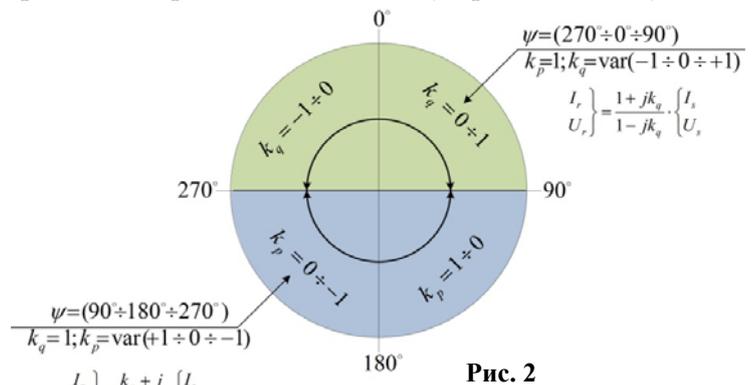


Рис. 2

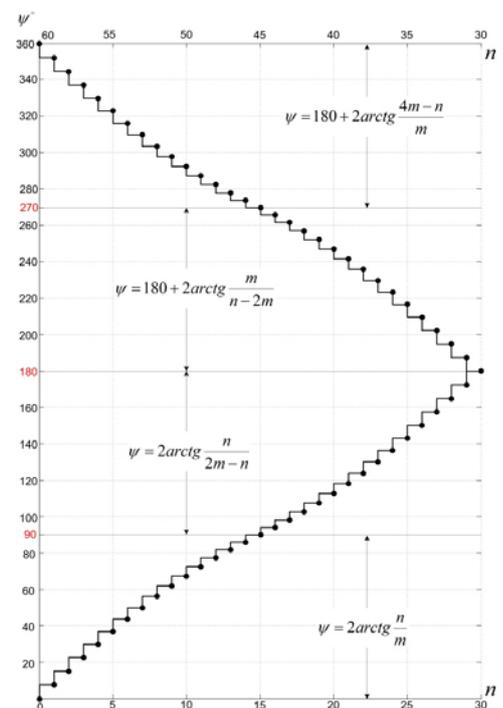


Рис. 3

номерному приращению угла фазового сдвига между входным и выходным напряжениями устройства. Эта особенность обусловлена нелинейностью изменения угла фазового сдвига Ψ от номера ступени $n=1\div 60$, что следует из рассмотрения рис. 3. Возникающие при этом искажения токов и напряжений могут быть достаточно эффективно ослаблены с помощью применения технологии ИРС.

Закон управления, реализующий последовательность операций перехода с одной ступени на другую, иллюстрируют диаграммы, показанные на рис. 4, а для $n=1\div 30$ и рис. 4, б – для $n=45\div 60$. При работе на любой ступени угла Ψ во включенном состоянии находятся только 4 ключа коммутаторов ответвлений обмоток q и p .

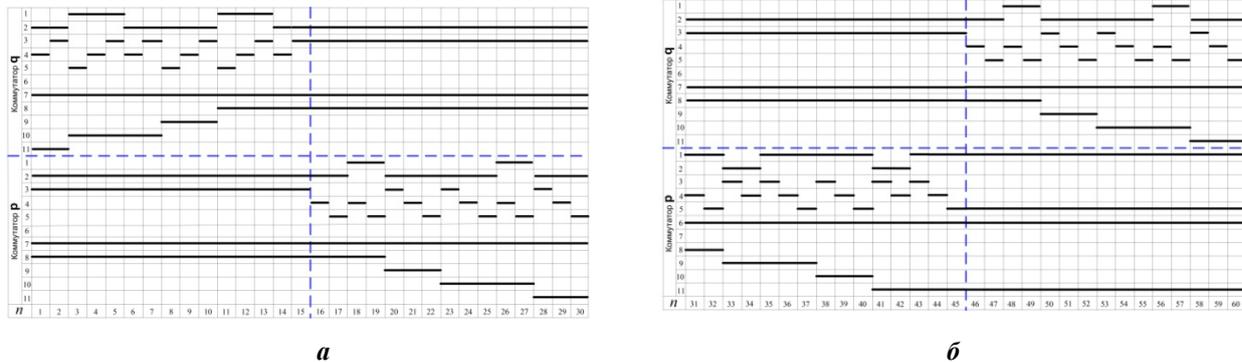


Рис. 4

Управление режимом преобразования частоты осуществляется устройством управления, которое измеряет разность частот с помощью детекторов и осуществляет вычисление периода частоты скольжения, а затем определяет интервалы коммутации и задает состояние каждого из коммутаторов в соответствии с последовательностью, представленной диаграммами переключения рис. 4. Устройство управления также имеет контроллеры переключения ступеней и при необходимости осуществляет коррекцию моментов переключения.

Результаты моделирования. Для исследования режимов обмена мощностью между асинхронно работающими энергосистемами в среде Матлаб-Симулинк создана модель циклоконвертора. Модель рассчитана на фазное напряжение 230 В и номинальный ток 24 А.

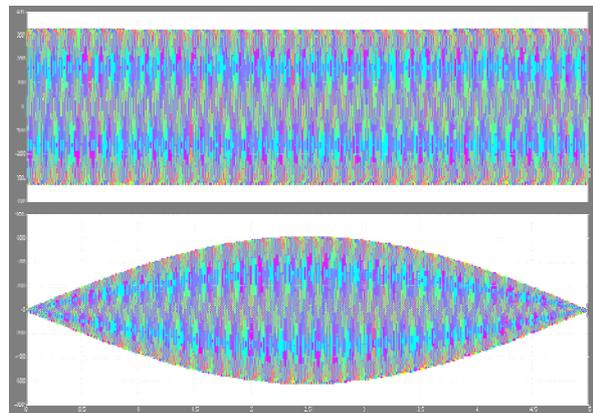


Рис. 5

в 20 раз превышает номинальное значение. Следует отметить, что фазорегулятор находится в положении $\Psi=0^0$ и ток ограничивается только Z_k трансформатора. При проведении эксперимента с использованием простейшей схемы ИРС, предложенной Карлом Штеймцем, где расчетный ток выбран равным номинальному току фазорегулирующего трансформатора, и без схемы управления, видно, что обменный ток ограничивается до номинального значения, а передаваемая мощность колеблется от нуля до максимального значения. При введении предложенной стратегии управления обмен мощностью обеспечивается при номинальных значениях параметров режима и имеет место незначительная модуляция токов нагрузки, обусловленная нелинейностью зависимости угла фазового сдвига Ψ от номера ступени переключения (рис. 3).

Для разработки принципов управления потоками мощности между асинхронно работающими энергосистемами необходимо иметь представление о существе процессов, имеющих место при отсутствии какого-либо управления.

Результаты моделирования процесса свободного обмена мощностью между асинхронно работающими при частоте 50 Гц и 50,2 Гц энергосистемами при отсутствии какого-либо управления показаны на рис. 5. Такая разница частот выбрана, исходя из требований ПТЭ, которые определяют величину $\Delta f=0,2$ Гц в качестве предельной для начала работы АЧР (автоматическая частотная разгрузка).

Из рис. 5 видно, что значение обменного тока, циркулирующего между системами при $\delta=180^0$

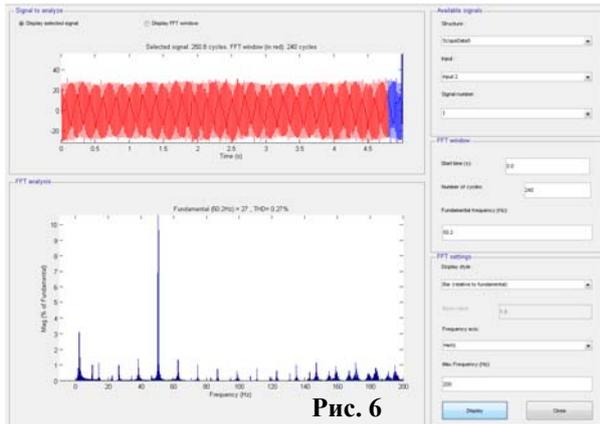


Рис. 6

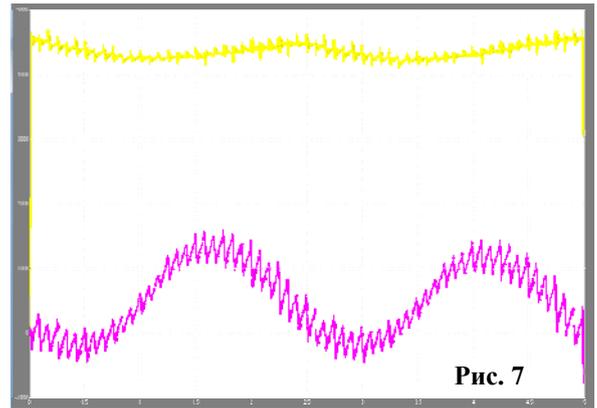


Рис. 7

Коэффициент нелинейного искажения токов нагрузки для предложенного циклоконвертора составляет 0,27% (рис. 6), что существенно ниже предельно допустимого по ПТЭ уровня в 2%.

Рис. 7 иллюстрирует характер изменения передаваемой мощности в условиях принудительного управления. Из анализа осциллограмм видно, что степень колебательности по активной мощности (верхняя кривая) составляет около 5%, что говорит о достаточно высокой стабильности при различной частоте на передающей и приемной системах.

Заключение. Рассмотренный циклоконвертор может обеспечить соединение двух энергетических систем на переменном токе, имея при этом более низкую себестоимость. Предложенная стратегия управления позволяет управлять потоками мощности при степени колебательности по активной мощности не более 5%. Во всем диапазоне регулирования угла сдвига коэффициент нелинейности токов не превышает 0,27%, что является существенно ниже уровня 2%, дозволенного ПТЭ.

УДК 621.311.001.57, 621.314.27, 621.314.252

МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛОКОНВЕРТОРА НА БАЗІ ФАЗОРЕГУЛЮЮЧОГО ТРАНСФОРМАТОРА З КРУГОВИМИ ПЕРЕТВОРЕННЯМИ

М.С. Тиршу, Л.П. Калінін, Д.А. Зайцев, І.В. Голуб

Інститут Енергетики Академії Наук Молдови, Республіка Молдова,

вул. Академічна, 5, Кишинів, MD-2028,

e-mail: tirsu.mihai@gmail.com

Представлено результати моделювання циклоконвертора, призначеного для синхронізації двох систем, що працюють асинхронно на тій самій частоті. Запропонована схема, а також стратегія управління пристроєм дозволяє з'єднати дві системи на змінному струмі і підтримувати заданий рівень обміну потужності з похибкою не більше 5%. При цьому виключаються струми вище номінального рівня, а загальний коефіцієнт гармонік не перевищує 0,2%, що в 10 разів менше дозволеного. Запропонований пристрій може бути гідною заміною вставки постійного струму. Бібл. 3, рис. 7.

Ключові слова: фазорегулюючий трансформатор, обмін потужності, енергосистема, активна і реактивна потужності.

MODELING OF CYCLOCONVERTER BASED ON PHASE SHIFT TRANSFORMER WITH CIRCULAR CONVERSION

M.S. Tirshu, L.P.Kalinin, D.A.Zaitsev, I.V.Golub

Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova,

5, Academy str., Kyshyniv, Moldova, MD2028.

e-mail: tirsu.mihai@gmail.com,

The paper present results of cycloconverter modeling, having destination for interconnection of two power systems working asynchronously at the same frequency. Proposed solution as well as installation controlling strategy allowing interconnection of two power systems directly in alternative current and keeping stated level of power flow exchange with error doesn't exceed 5%. Also, proposed solution excluding over nominal currents and THD doesn't exceed 0,27% that about 7 times less than allowed by TEE. The proposed solution can be very good opportunity for replacement of back-to-back installations having essentially less cost. References 3, figures 7.

Key words: Phase shift transformer, power flow exchange, power system, active and reactive power.

1. Pertti Järventausta, Sami Repo, Antti Rautiainen, Jarmo Partanen. Smart grid power system control in distributed generation environment. Available at:

http://www.researchgate.net/profile/Sami_Repo/publication/222566666_Smart_grid_power_system_control_in_distributed_generation_environment/links/0c96052a0714aaccf30000000.pdf (Accessed 02.04.2015).

2. Sanjeev Kumar. Smart Grid in Indian Power System. Available at:

<http://indiasmartgrid.org/en/Lists/Member/Attachments/10/ISGD%20Plenary%20I%20Sanjeev%20Kumar%20India.pdf> (Accessed 12.04.2015).

3. Kalinin L., Zaitsev D., Tirshu M. Application of the Phase Shift Transformer as Frequency Converter // International Conference on Modern Power Systems MPS2011, Cluj-Napoca, Romania. – 2011. – Pp. 99-102.

Надійшла 17.04.2015