



CAPABILITIES FOR IMPROVING THE CONTROL STRATEGY OF DIRECT FREQUENCY CONVERSION BY USING THE PHASE-SHIFTING TRANSFORMER WITH POWER ELECTRONIC SWITCHING EQUIPMENT

Lev KALININ, Dmitry ZAITSEV, Mihai TIRSHU, Irina GOLUB
Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. *The article discusses the variant of the frequency converter which is based on the circular phase-shifting transformer that is controlled by the means of power electronic. In the article is represented the scheme of the technical realization of principle as well as the control strategy that ensures coordination of the operation elements forming the holistic system of converter. With the help of a simulation model were reproduced some of the technical characteristics illustrating the quality of the conversion process.*

Key words: *phase-shifting transformer, power electronic switching devices, total harmonic distortion factor (THD).*

PERSPECTIVE DE PERFECTIONARE A STRATEGIEI DE DIRIJARE CU PROCESUL DE CONVERSIE DIRECTĂ A FRECVENȚEI CURENTULUI ALTERNATIV ÎN BAZA TRANSFORMATORULUI DE REGLARE A DECALAJULUI DE FAZĂ

Lev CALININ, Dmitri ZAIȚEV, Mihai TÎRȘU, Irina GOLUB
Institutul de Energetică al AȘM

Rezumat. *În articol se examinează varianta convertorului de frecvență de curent alternativ, realizat pe baza transformării circulare de fază a tensiunii, gestionate prin intermediul electronicii de putere. Este prezentată schema realizării tehnice a conversiei frecvenței, este elaborată strategia de dirijare care asigură coordonarea cu funcționarea elementelor ce alcătuiesc un sistem complex, s-a creat un model de simulare a acestui convertor. Cu ajutorul modelului menționat s-au reprodus anumite caracteristici tehnice, care ilustrează calitatea procesului de conversie.*

Cuvinte cheie: *transformator de reglare a decalajului de fază, comutatoare electronice de putere, factorul distorsiunilor armonice.*

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ ФАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

Л.П. Калинин, Д.А. Зайцев, М.С. Тыршу, И.В. Голуб
Институт Энергетики Академии Наук Республики Молдова

Реферат. *В статье рассматривается вариант конвертора частоты переменного тока, выполненного на основе кругового фазового преобразования напряжений, управляемого средствами силовой электроники. Представлена схема технической реализации принципа частотного преобразования, разработана стратегия управления, обеспечивающая координацию функционирования элементов, образующих целостную систему, создана имитационная модель преобразователя. С помощью указанной модели воспроизведены некоторые технические характеристики, иллюстрирующие качество процесса преобразования.*

Ключевые слова: *фазорегулирующий трансформатор, силовые электронные коммутаторы, коэффициент гармонических искажений*

1. ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий интерес к разработке и применению частотно регулируемых электрических связей [1,2,3,4,5,6,7] определяет также и необходимость выработки новых технических решений,

обеспечивающих реализацию соответствующих управляющих воздействий в условиях соблюдения стандартных требований к качеству преобразуемой и поставляемой потребителям электроэнергии. Достаточно проблематичными остаются и вопросы согласования работы электрических систем с

различными стандартами частоты переменного тока (50 и 60 Hz), решение которых в практическом плане пока еще не может считаться безупречным.

В этом отношении определенный интерес для специалистов-энергетиков представляют, так называемые, поворотные трансформаторы (VFT-Variable Frequency Transformers), выполненные на базе асинхронных электрических машин с заторможенным фазным ротором и управляемые специальным серводвигателем. Основное достоинство поворотного трансформатора VFT состоит в том, что, независимо от разности преобразуемых частот, характеристики мгновенных значений рабочих токов и напряжений на его выходных клеммах четко сохраняет синусоидальную форму и ни в какой дополнительной корректировке не нуждаются.

Недостатками же поворотных трансформаторов следует считать:

– наличие механической инерционности вращающегося массивного ротора и обусловленных этим электромеханических переходных процессов;

– необходимость использования скользящих токосъемных контактов роторной обмотки, что приводит к снижению надежности функционирования установки в целом;

– дополнительное (помимо неизбежных электрических потерь) расходование энергии на управление, связанное с обеспечением заданного уровня передаваемой мощности путем создания соответствующего вращающего момента на валу регулирующего серводвигателя;

– наличие воздушного зазора между обмотками статора и ротора, что сопровождается существенным повышением тока холостого хода устройства до величины соизмеримой с током нагрузки.

Указанные недостатки не свойственны выпрямительно-инверторным преобразователям типа HVDC (High Voltage Direct Current). Главный же недостаток преобразователей данного типа обусловлен тем, что они действуют на принципе двойного преобразования энергии (выпрямление и инвертирование). При этом имеют место существенные искажения синусоидальной формы рабочих токов и напряжений, вынуждающие к применению специальных гармонических фильтров для подавления высших гармонических составляющих.

Разработка альтернативных, по отношению к VFT и HVDC, технических средств преобразования частоты в электрических системах позволит повысить степень управляемости транспортных и распределительных сетей, что является характерной тенденцией современного этапа развития электроэнергетики.

Предлагаемый к рассмотрению в статье вариант прямого преобразователя частоты, выполненный на основе фазорегулирующего трансформатора, может оказаться пригодным для решения возникающих при этом практических задач. Целью работы является обоснование возможностей повышения качества преобразованной электрической энергии за счет упорядочения некоторых операционных процессов, не связанного с дополнительными капитальными затратами

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Схема устройства реализации предлагаемого принципа преобразования частоты, представлена на Рис.1. Основным элементом преобразователя, определяющим его отличие от других технических решений, является фазорегулирующий трансформатор (PST), образованный соединенными в треугольник нерегулируемыми обмотками (W_p) и примыкающими к вершинам этого треугольника регулируемыми обмотками (W_q). При этом каждая присоединенная к конкретной вершине треугольника регулируемая обмотка принадлежит фазе соответствующей нерегулируемой обмотки, которая противолежит данной вершине. Все регулируемые обмотки выполнены по одному образцу, сущность которого выражает представленный на Рис.1 вспомогательный эскиз (*). Из рассмотрения данного эскиза следует, что каждая регулируемая обмотка разделена на две секции, имеющие промежуточные ответвления которые, также как и концевые выводы секций этих обмоток, присоединены к силовым электронным коммутаторам. Собственно коммутаторы условно изображены на эскизе в виде квадратов, пронумерованных цифрами от 1 до 11. Указанные на эскизе дробные арифметические соотношения характеризуют принцип секционирования регулируемых обмоток, обеспечивающий при данных условиях 15 дискретных значений снимаемого с них напряжения (как условно положительного, так и противоположного ему знака). Совокупность, представляемая фазорегулирующим трансформатором и силовыми электронными коммутаторами регулируемых обмоток, образует блок тонкого регулирования преобразовательного устройства.

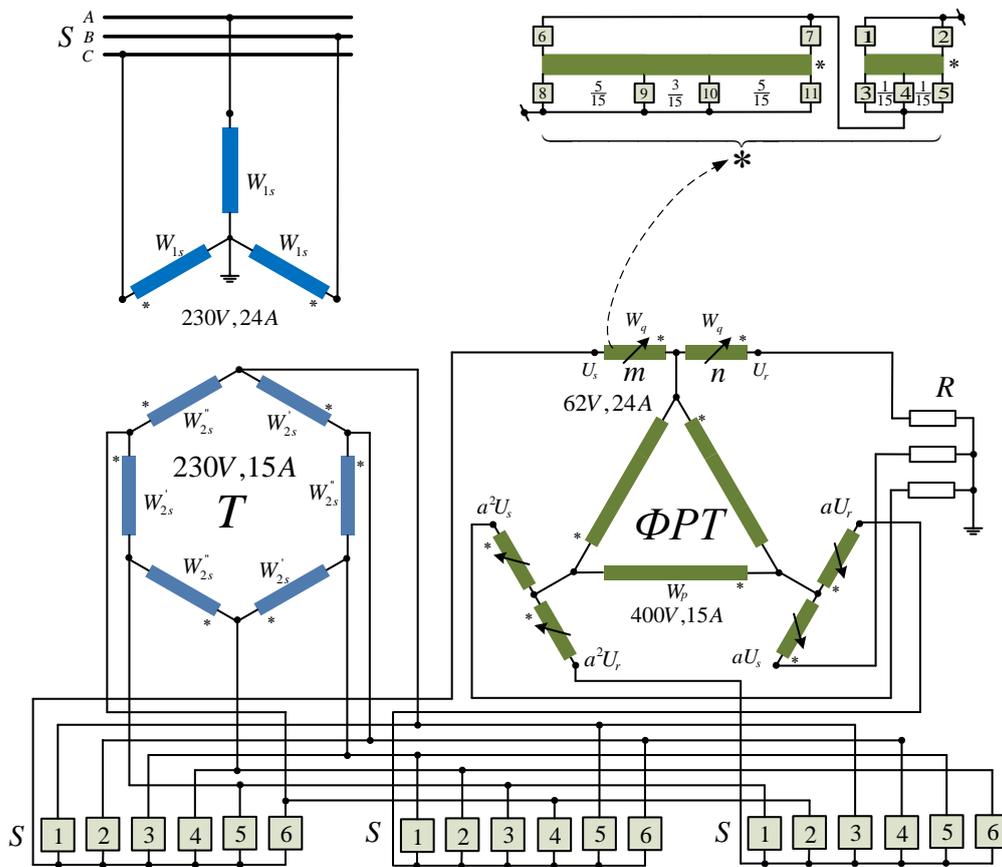


Рис. 1. Принципиальная схема преобразовательного устройства

Предъявляемые к фазорегулирующему трансформатору технические требования предусматривают возможность регулирования фазового сдвига выходного напряжения относительно приложенного в диапазоне $\pm 30^\circ$. Это обусловлено тем, что в пределах указанного сектора зависимость угла фазового сдвига от величины напряжения, задаваемого регулируемыми обмотками ФРТ, практически линейна, что имеет немаловажное значение с точки зрения качества преобразовательного процесса. Таким образом, полная окружность регулирования, как показано на Рис.2, может быть разделена на 6 отдельных секторов, по 60° каждый, в рамках которых осуществляется процедура тонкого регулирования.

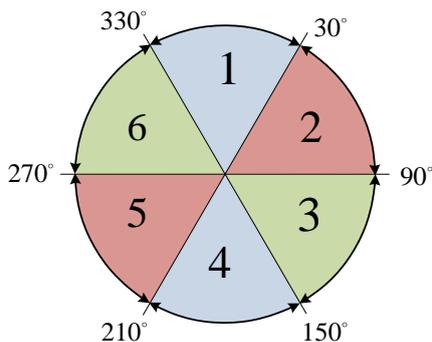


Рис.2. Принцип расположения секторов на окружности регулирования

Переключение секторов обеспечивается с помощью силовых полупроводниковых коммутаторов S, которые, совместно с силовым трансформатором Т, образуют блок грубого регулирования. Вторичная обмотка трансформатора Т выполнена по схеме правильного шестиугольника, вершины которого являются опорными точками соответствующих секторов. Первичная обмотка силового трансформатора Т подключена к питающей сети. К выходным клеммам фазорегулирующего трансформатора ФРТ подключена активная нагрузка R.

3. ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

Представленная на Рис.1 электрическая схема преобразовательного устройства позволяет обеспечить реализацию двух различных вариантов стратегии управления режимом преобразования частоты: симметричного и несимметричного. Вариант симметричного управления будет иметь место при одновременном переключении одинаковых по (функциональному назначению и присвоенному порядковому номеру) силовых коммутирующих устройств тонкого регулирования. Вариант несимметричного управления реализуется при поочередном переключении указанных коммутирующих устройств.

В условиях симметричного управления схема, представленная на Рис.1, обеспечивает 30 дискретных состояний фазорегулирующего трансформатора по величине фазового сдвига выходного напряжения относительно напряжения соответствующей опорной точки, принадлежащей какой-либо из вершин шестиугольника вторичных обмоток силового трансформатора Т. Каждый из шести одинаковых секторов, образующих полную окружность управления, обеспечивает ступенчатое регулирование фазового сдвига напряжения на выходных клеммах преобразователя с дискретностью, равной 2° . Это означает, что вариант симметричного управления

реализует практически равномерное размещение на окружности регулирования 180-ти рабочих точек. При относительно небольшой разности частот между входом и выходом устройства такое количество рабочих точек может считаться вполне приемлемым. На долю системы управления остается выполнение миссии по координации взаимодействия всех элементов схемы при выполнении задаваемой последовательности коммутационных операций. Сущность, а также последовательность этих операций, в условиях симметричного управления, характеризует диаграмма коммутации, изображенная на Рис.3.

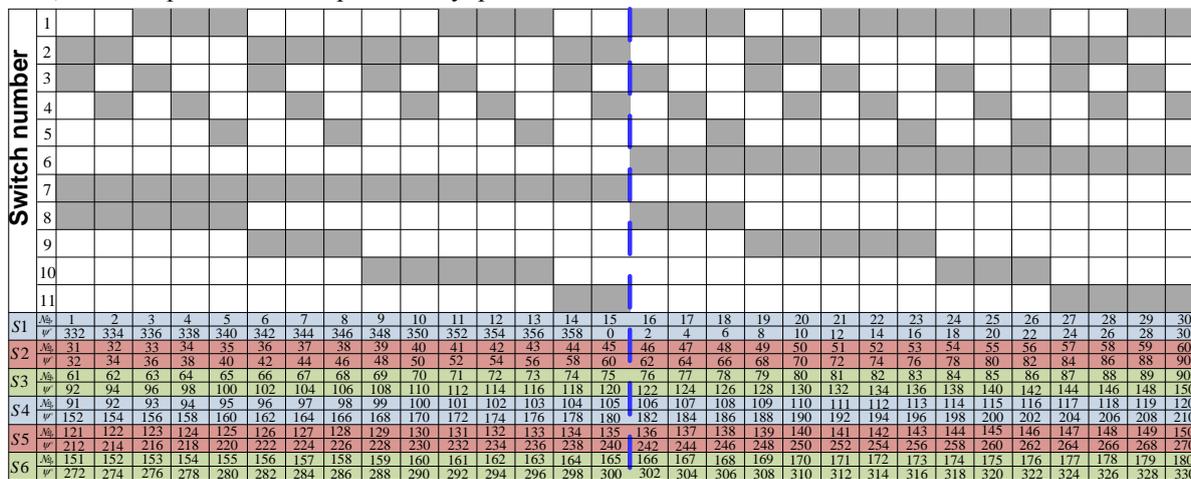


Рис.3. Диаграмма коммутации, реализующая стратегию симметричного управления

Первые 11 горизонтальных строк этой диаграммы указывают включенное (затемненные клетки) или выключенное (пустые клетки) состояние каждого из пронумерованных силовых электронных коммутаторов блока тонкого регулирования. Количество горизонтально размещенных клеток одной строки соответствует количеству дискретных позиций, заложенных в схему регулируемых обмоток ФРТ.

Следующие 6 горизонтальных строк характеризуют область ответственности каждого из шести секторов, устанавливаемых соответствующим переключателем грубого регулирования. При этом верхняя половина каждой значащей клетки этих строк характеризует номер позиции в их натуральной последовательности, а нижняя – угол фазового сдвига соответствующий этому номеру. Таким образом, изображенная на Рис.3 диаграмма коммутации, позволяет идентифицировать комбинацию включенного и выключенного состояния каждого из коммутирующих элементов электрической схемы преобразователя для установки любой фиксированной на окружности регулирования рабочей точки.

В свою очередь, последовательность операций, реализующих стратегию несимметричного

управления, характеризует диаграмма коммутации, изображенная на Рис.4.

Особенность принципа несимметричного управления состоит в том, что переключающие элементы двух обмоток тонкого регулирования, относящихся к одной и той же фазе регулирующего трансформатора, коммутируются не одновременно, а поочередно. Группа переключающих элементов, относящихся к обмоткам регулирования подключенным к входным клеммам ФРТ, на диаграмме коммутации помечена индексом “m”. Соответственно, группа элементов, относящихся к обмоткам регулирования, подключаемым к выходным клеммам – индексом “n”. В процессе регулирования частоты по принципу несимметричного управления, имеет место определенное отклонение величины выходного напряжения ФРТ от соответствующего значения напряжения на его входе. Однако, при заложенной в основу конфигурации обмоток регулирования базовой дискретности переключения (равной 2°), указанное отклонение настолько незначительно, что практически находится в пределах погрешности измерительных приборов и может быть проигнорировано.

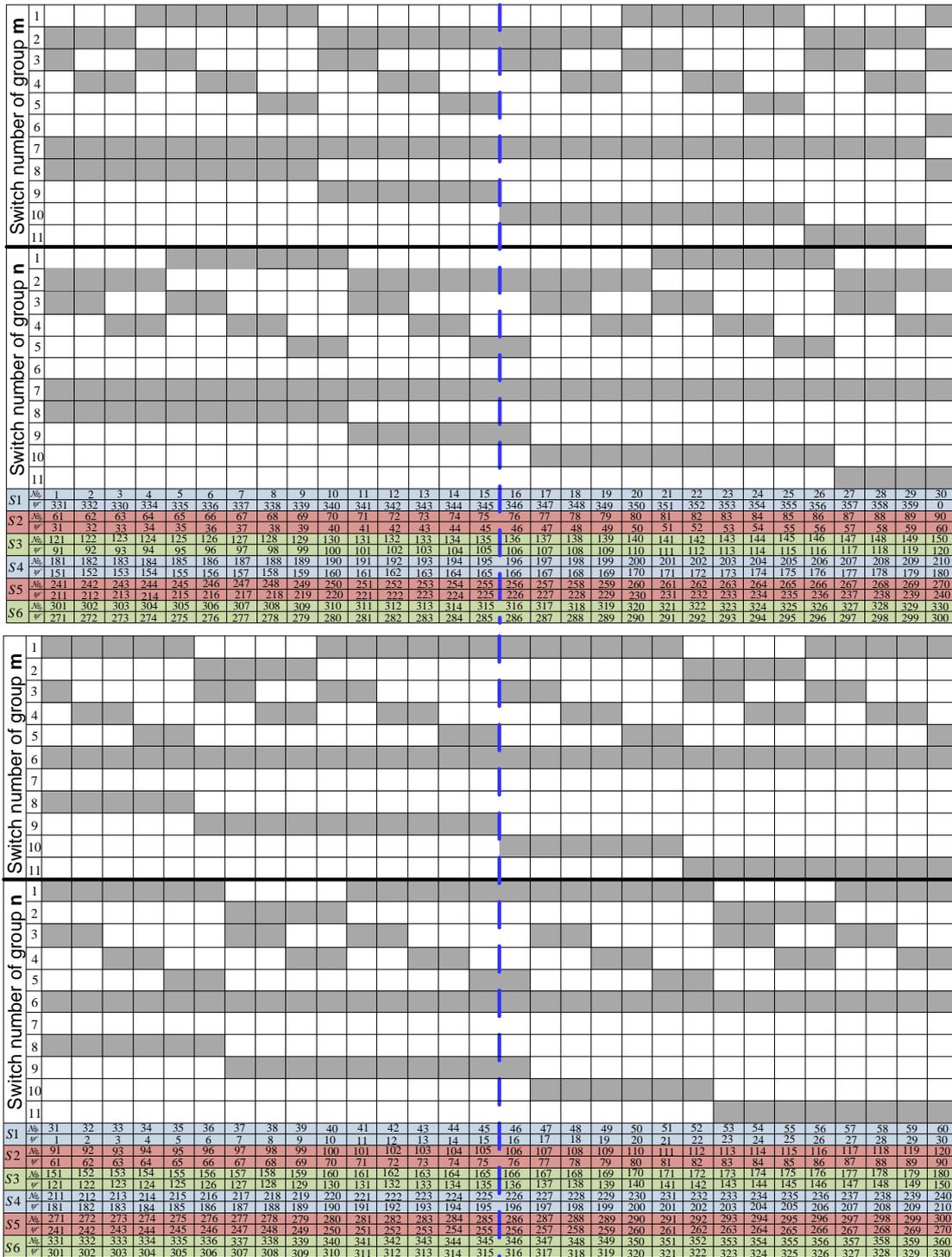


Рис.4. Диаграмма коммутации, реализующая стратегию несимметричного управления

Исходя из указанной аргументации, можно уменьшить степень дискретности переключения ФРТ до одного градуса, что позволит заметно повысить качество преобразуемой электрической энергии с точки зрения «сглаживания» колебаний уровня передаваемой активной и реактивной мощности, обусловленных действием коммутирующих аппаратов. При моделировании процессов преобразования частоты в соответствии с представленными вариантами стратегии управления требуется выполнить следующие подготовительные, операции:

- задать разность Δf между частотами на входе и выходе устройства;
 - определить период частоты скольжения
- $$T_d = \frac{1}{\Delta f};$$
- установить временные интервалы коммутации блока тонкого регулирования в зависимости от задаваемого варианта стратегии управления, определяющего количество дискретных состояний в одном секторе

$$\tau_1 = \frac{T_d}{6n},$$

где n - количество ступеней в секторе (при дискретности ступени 2° необходимо задавать $n=30$, при дискретности ступени 1° - задавать $n = 60$);

– исходя из того, что количество секторов грубого регулирования в том и другом вариантах стратегии управления одинаково, и определяется цифрой 6, временные интервалы коммутации переключателей указанного блока установить в соответствии с условием

$$\tau_2 = \frac{T_d}{6}.$$

Далее осуществляется последовательность операций переключения в соответствии с задаваемым значением скольжения, направлением преобразовательного процесса (повышение или понижение частоты), а также с принятой стратегией управления, характеризуемой одним из представленных вариантов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ВАРИАНТОВ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Оба представленных варианта управления были воспроизведены на имитационной модели преобразователя, принципиальная схема которого изображена на Рис.1. При этом объект моделирования был поставлен в условия, соответствующие подключению преобразователя к источнику стандартной частоты 60 Hz и обеспечивающие покрытие нагрузки потребителя чисто активной мощности, условно требующего стандартной частоты 50 Hz.

Результаты экспериментального тестирования, полученные с помощью имитационной модели, представлены на Рис.5 ÷ Рис.10 в виде осциллограмм. При этом с помощью системы контрольных измерений фиксировались электрические параметры, к которым предъявляются нормативные требования по соблюдению показателей стабильности преобразовательного процесса, а также нормативные требования по поддержанию уровня допустимых гармонических искажений в рамках действующих стандартов.

Полученные осциллограммы систематизированы по вариантам управления (симметричное и несимметричное), по контролируемым узлам измерения (входные и выходные клеммы ФРТ), а также по характеру измеряемых электрических величин (токи, напряжения и мощности).

В соответствии с данными пояснениями, группа рисунков под номерами 5 ÷ 7 характеризует вариант симметричного, а группа рисунков под номерами 8 ÷ 10 представляет вариант несимметричного управления. Взаимное расположение рисунков, детализирующих особенности того и другого варианта управления, принято с учетом необходимости их

сравнительного сопоставления.

При совместном рассмотрении осциллограмм, представленных на Рис. 5 и Рис. 8, видно, что напряжение питающей системы (60 Hz) в заданных условиях преобразования остается практически синусоидальным для каждого из рассматриваемых вариантов. В то же время токи, потребляемые от системы, подвержены определенным гармоническим искажениям. Указанные на рисунках обобщенные коэффициенты гармонических искажений (Total Harmonic Distortion - THD) тока определяются значениями: 2.48 % при симметричном управлении и 1.46% при несимметричном. Данный результат свидетельствует о том, что вариант несимметричного управления следует считать более предпочтительным. Наблюдаемые на осциллограммах характерные всплески токов обусловлены срабатыванием переключателей блока грубого регулирования, которые являются главной причиной появляющихся при этом искажений. Технические средства подавления подобного рода явлений хорошо известны. В качестве таковых широко применяются специальные активно-емкостные снабберы и нелинейные варисторы. Кроме того существует возможность применения чисто технологических мероприятий. Одним из эффективных мероприятий подобного рода может оказаться способ разделения потока передаваемой мощности на два параллельных канала и разделение моментов коммутации блоков грубого регулирования по времени за счет фиксированного фазового сдвига между напряжениями питающей системы.

Осциллограммы, представленные на Рис.6 и Рис.9, характеризуют сущность явлений, наблюдаемых на выходных клеммах ФРТ (сторона 50 Hz). Особенность этих осциллограмм состоит в том, что в данном случае в одинаковой степени подвергаются искажениям и токи и напряжения. При симметричном управлении значение THD определяется величиной 2.69%; при несимметричном – 2.57%. Указанные искажения обусловлены работой устройства на изолированную активную нагрузку, что исключает демпфирующее влияние приемной электрической системы.

Картину изменения активных и реактивных мощностей, потребляемых от питающей сети в процессе реализации рассматриваемых вариантов стратегии управления, иллюстрируют осциллограммы, изображенные на Рис.7 и Рис.10. Данные осциллограммы можно считать достаточно убедительным свидетельством возможности повышения качества преобразовательного процесса за счет дальнейшего совершенствования стратегии управления. Осциллограммы, представляющие на Рис 10 характеристики $P_s(t)$ и $Q_s(t)$, могут быть использованы в целях обоснования разработки и практического применения преобразователя частоты на базе ФРТ.

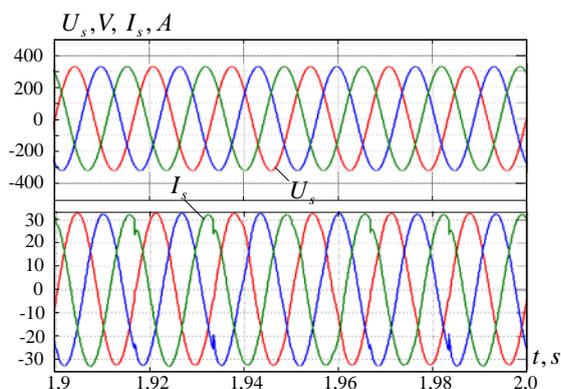


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока на входных клеммах PST, (60 Hz) при симметричном управлении (THD тока равно 2.48 %)

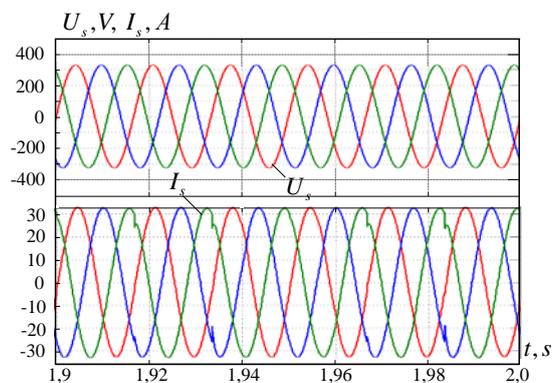


Рис.8.Осциллограммы напряжения и тока на входных клеммах PST (60 Hz) при несимметричном управлении (THD тока равен 1.46%)

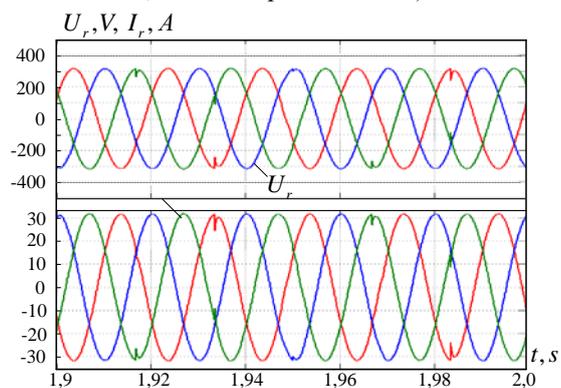


Рис.6 Осциллограммы напряжения и тока на выходных клеммах PST (50 Hz) при симметричном управлении (THD тока и напряжения составляет 2.69%)

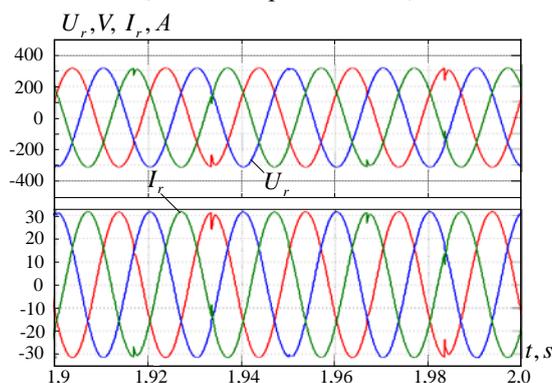


Рис.9 Осциллограммы напряжения и тока на выходных клеммах PST (50 Hz) при несимметричном управлении (THD тока и напряжения составляет 2.57%)

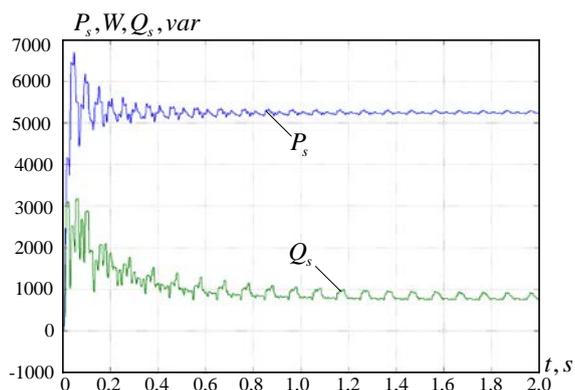


Рис.7. Осциллограммы изменения активной и реактивной мощности потребляемой от сети при симметричном управлении

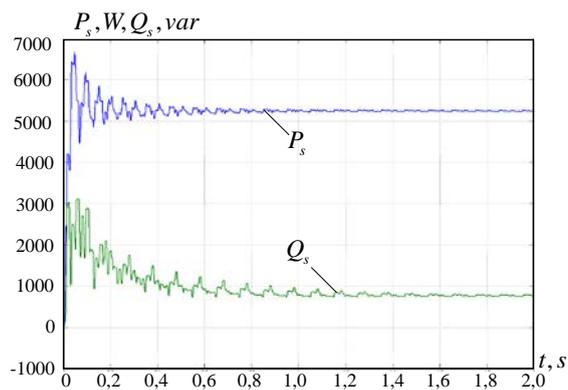


Рис.10. Осциллограммы изменения активной и реактивной мощности потребляемой от сети при несимметричном управлении

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработано два варианта стратегии управления режимом работы преобразователя частоты переменного тока на базе трансформаторного фазорегулирующего устройства с круговым регулированием фазового сдвига напряжений, управляемого средствами силовой электроники.
2. Создана имитационная модель преобразователя, обеспечивающая реализацию разработанных

вариантов управления.

3. С помощью модели получены и построены характеристики рабочих режимов каждого из указанных вариантов, позволяющие проводить их сравнительное сопоставление и определять область практического применения.

4. Представленная в статье технология управления может быть использована при рассмотрении вопросов создания и применения регулируемых электрических связей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dan Wang, Chengxiong Mao, Jiming Lu, Huibo Lou, *General Aspects and Fundament of Variable Frequency Electric Power Transmission Part I: Theory*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 8/2012
- [2] Dan Wang, Chengxiong Mao, Jiming Lu, Huibo Lou, *General Aspects and Fundament of Variable Frequency Electric Power Transmission Part II: Study Case*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 8/2012
- [3] A. Merkhouf, P. Doyon, S. Upadhyay, *Variable Frequency Transformer-Concept and Electromagnetic Design Evaluation*, *IEEE Trans Energy Conversion*, vol. 23 n. 4, April 2008, pp. 989-996.
- [4] X.F. Wang, C.J. Cao, Z.C. Zhou, *Experiment on fractional frequency transmission system*, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21 n. 1, January 2006, pp. 372-377.
- [5] T. Funaki, K. Matsuura, *Feasibility of the low frequency AC transmission*. Proc. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Singapore, Jan. 2000. pp. 2693-2698.
- [6] L.Calinin, D.Zaitsev, M.Tirşu, *Application of the Phase Shift Transformer as Frequency Converter*, International Conference on Modern Power Systems MPS2011, May, 2011, Cluj-Napoca, Romania, p.99-102.
- [7] Kalinin L., Zaitsev D., Tyrshu M. *Innovative variant of phase shifting transformer (PST)*, International World Energy System Conference, Iasi, Romania, 30 Iunie-2 July, 2008/ Session I – Transmission and distribution system analysis, planning and operation. -4 p.
- [8] Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V., *The model and characteristics of circular phase convertor*, SIEMEN 2015, 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems p.180-184.



Калинин Лев Павлович,
kalinin_lev@ie.asm.md
Институт Энергетики АНМ,
кандидат технических наук.
Область научных интересов
связана с разработкой и
применением FACTS
контроллеров в энергосистемах.



Тыршу Михаил Степанович,
tirsu.mihai@gmail.com
Институт Энергетики АНМ,
кандидат технических наук.
Научные интересы связаны с
диагностикой высоковольтного
оборудования и силовой
электроникой.



Зайцев Дмитрий Александрович,
zaiats@ie.asm.md
Институт Энергетики АНМ,
кандидат технических наук.
Научные интересы лежат в области
исследования режимов
энергосистем, содержащих гибкие
межсистемные связи.



Голуб Ирина Владимировна,
irina.golub@mail.ru
Институт Энергетики АНМ.
Область научных интересов:
режимы энергосистем,
управляемые линии
электропередачи переменного тока.