

Characteristics of the Static Zigzag-Triangle Frequency Converter

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

Institute of Power Engineering
Chisinau, Republic of Moldova

Pogorletsky V.M., Kaloshin D.N.

Transnistrian State University named after Shevchenko
Tiraspol, Republic of Moldova

Abstract. The object of research is a static transformer frequency converter, which can be used to combine parallel-operating power systems having different operating frequencies. The aim of the work is to study operational characteristics and evaluate strategies and laws of the proposed device from the point of view of developing methods and means of power transmission improving quality via electrical communication, containing a frequency converter based on phase-shifting transformer made according to zigzag-triangle scheme and controlled by power keys. In order to achieve the above object, it is proposed to sectionalize control windings providing a 48-position with a discreteness of 2.5° , and a 24-position with a discreteness of 5° switching in each 120° sector of "coarse" regulation. Structural-simulation models were built and computational experiments were carried out for electrical communication combining two power systems with frequencies of 60 and 50 Hz and 50 and 49.6 Hz, respectively. The most significant results are: a new circuit version of the frequency converter, various strategies for controlling the conversion process. The two-channel frequency converter allows to reduce by 2 times the number of "coarse" control keys, which switch not after 60° , but after 120° . Also succeeded to reduce the switching step from 5 degrees to 2.5 degrees, which made it possible to improve the conversion quality. The significance of the obtained results is that during regulation the number of keys connected in series in operation remains equal to 4, which can significantly improve the reliability indicators of the control system.

Keywords: intersystem power connection, static frequency converter, phase-shifting transformer, active power deviation, current non-linear distortion coefficient.

DOI: 10.5281/zenodo.3713403

UDC: 621.3.072.9

Caracteristicile convertorului static de frecvență realizat conform schemei „triunghi - zig-zag”

Calinin L.P., Zaițev D.A., Tîrșu M.S., Golub I.V.,

Institutul de Energetică Chișinău,
Republica Moldova

Pogorletsky V.M., Kaloshin D.N.

Universitatea Transnistreană de Stat le. Shevchenko
Tiraspol, Republica Moldova

Rezumat. Obiectul studiat îl reprezintă convertorul de frecvență pe baza transformatoarelor, ce poate fi folosit pentru interconectarea sistemelor electroenergetice, care lucrează paralel, având frecvențe diferite sau standarde de frecvență diferite. Scopul lucrării este cercetarea caracteristicilor de regim și evaluarea strategiilor și legilor de comandă a dispozitivului din punct de vedere al dezvoltării metodelor și mijloacelor de îmbunătățire a calității transmiterii puterii prin legături electrice, care include convertorul de frecvență pe baza transformatorului de reglare a decalajului de fază, efectuat după schema zigzag-triunghi și dirijat de cheile de putere. Pentru atingerea obiectivului propus, se propune secționarea înfășurărilor de control, oferind 48 poziții cu discontinuitatea $2,5^\circ$ și 24-poziții cu discontinuitate 5° de comutare în fiecare sector de 120° de reglare "brută". S-au efectuat experimente pentru conexiuni electrice, combinând două sisteme electroenergetice cu frecvențe de 60 și 50 Hz respectiv și 50-49,6 Hz. În procesul studiului au fost controlați parametrii operaționali ce caracterizează calitatea conversiei: gradul de stabilitate a puterii active transmise pe sistemele de transmisie și cele de recepție, la fel și coeficientul de distorsiune armonică a curentului. Cele mai semnificative rezultate sau obținut pentru varianta nouă a schemei dispozitivului, ce permite micșorarea de 2 ori a numărului cheilor de reglare "brută", noua strategie și legile de comandă cu procesul de conversie, utilizarea căreia a dus la micșorarea discontinuității comutărilor și îmbunătățirea calității conversiei. În același timp, numărul cheilor de reglare "fină" conectate în serie rămâne permanent egal cu 4, indiferent de numărul de etape de reglare, ce poate crește fiabilitatea.

Cuvinte-cheie: interconexiune dintre sisteme electroenergetice, convertor static de frecvență, transformator de reglare a decalajului de fază, deviere de putere activă, coeficient de distorsiune neliniară.

Характеристики статического преобразователя частоты, выполненного по схеме «зигзаг-треугольник»

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

Институт энергетики

Кишинев, Республика Молдова

Погорлецкий В.М., Калошин Д.Н.

Приднестровский Государственный Университет им. Шевченко

Тирасполь, Республика Молдова

Аннотация. Объектом исследования является статический трансформаторный частотный преобразователь, который может быть использован для объединения параллельно работающих энергосистем, имеющих различные рабочие частоты, либо стандарты по поддержанию частоты. Целью работы является исследование режимных характеристик и оценка различных стратегий и законов управления предлагаемым устройством с точки зрения разработки методов и средств повышения качества передачи мощности по электрической связи, содержащей частотный преобразователь на основе ФРТ (фазорегулирующий трансформатор) с круговым вращением фазы выходного напряжения относительно входного, выполненного по схеме «зигзаг-треугольник» и управляемого силовыми ключами. Для достижения поставленной цели предложено секционирование обмоток управления, обеспечивающее 48-позиционное с дискретностью $2,5^\circ$, и 24-позиционное с дискретностью 5° переключения в каждом 120° -ом секторе «грубого» регулирования. Были построены структурно-имитационные модели и проведены расчетные эксперименты для электрической связи, объединяющей две энергосистемы с частотами 60 и 50 Гц и 50 и 49,6 Гц соответственно. Наиболее существенными результатами являются: новый схемный вариант частотного преобразователя, различных стратегий управления процессом преобразования. Двухканальный преобразователь частоты позволяет снизить в 2 раза количество ключей (переключений) «грубого» регулирования, которые переключаются не через 60° как в устройствах исследованных авторами работы ранее, а через 120 градусов. Секционирование обмотки и закон переключения на 48 позиций позволили уменьшить шаг переключения с 5 градусов (при переключении на 24 позиции) до $2,5$ градусов, что дало возможность улучшить качество преобразования. Значимость полученных результатов состоит в том, что при регулировании количество последовательно включенных ключей в работе всегда остается равным 4 вне зависимости от числа ступеней регулирования, что может существенно улучшить показатели надежности работы системы управления.

Ключевые слова: межсистемная связь, статический преобразователь частоты, фазорегулирующий трансформатор, девиация активной мощности, коэффициент нелинейного искажения по току.

ВВЕДЕНИЕ

Наметившийся в последнее время интерес к частотно регулируемым электрическим связям [1,2,3,4,5] приводит также к разработке новых технических решений, обеспечивающих реализацию соответствующих управляющих воздействий. Традиционно, при рассмотрении подобного рода задач, в качестве основных средств согласования частоты связываемых систем применяются электромеханические преобразователи типа VFT (Variable Frequency Transformers), [6,7,8] ASEFC или АСЭМПЧ – асинхронизированный синхронный электромеханический преобразователь частоты (asynchronous synchronous electromechanical frequency converter, [9,10,11] а также преобразователи типа HVDC (High Voltage Direct Current).

Каждое из указанных устройств имеет свои достоинства и недостатки [12-15].

Основное достоинство электромеханических преобразователей

частоты состоит в том, что при любой заданной частоте рабочее напряжение на его выходных клеммах всегда сохраняет синусоидальную форму. К недостаткам можно отнести: применение трущихся токосъемных контактов, что приводит к снижению надежности функционирования установки; необходимость дополнительного расхода энергии на управление связанное с необходимостью поддержания задаваемого уровня передаваемой мощности, за счет создания соответствующего вращающего момента сервомотора; наличие механической инерционности ротора, ведущее к появлению электромеханических переходных процессов; наличие воздушного зазора между обмотками статора и ротора, что сопровождается существенным повышением тока холостого хода устройства до величины соизмеримой с током нагрузки.

Следует также отметить, что использование VFT сопровождается значительным увеличением продольного индуктивного сопротивления

соответствующего тракта электропередачи и необходимостью применения дополнительных компенсирующих устройств. [16,17]

Основным достоинством преобразователя типа HVDC является его универсальность и быстродействие. [18-21]

При этом наиболее существенный недостаток данного технического решения состоит в том, что оно основывается на принципе двойного преобразования энергии (выпрямление и инвертирование) как на передающей, так и на приемной стороне.

При этом имеют место существенные искажения синусоидальной формы рабочих напряжений и токов, требующие применения различных методов устранения высших гармоник [22-26].

В данной работе предложен вариант устройства для реализации принципа прямого преобразования частоты, не связанного с двойным преобразованием энергии и не имеющего недостатков, свойственных HVDC и VFT. Такое устройство может быть условно названо «Вставкой Переменного Тока».

Принцип частотного преобразования предусматривает применение, в качестве основного функционального элемента устройства, именуемого Фазорегулирующим Трансформатором - ФРТ (Phase Shifting Transformer-PST).

Задача исследования состояла в оценке и анализе режимных характеристик, стратегий и законов управления статического двухканального частотного преобразователя на основе ФРТ с круговым вращением фазы, выполненного по схеме «зигзаг-треугольник» и управляемого силовыми ключами.

Также уделено внимание, разработке методов и средств повышения качества передачи мощности между энергосистемами с различными стандартами частоты при использовании предложенного технического решения.

Разработка альтернативных, относительно VFT и HVDC, технических средств преобразования частоты для электрических систем позволит повысить степень управляемости транспортных и распределительных сетей, что является характерной тенденцией современного этапа развития электроэнергетики.

I. ХАРАКТЕРИСТИКА И СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ

Схема исследуемого двухканального частотного преобразователя представлена на рис.1.

Каждый канал статического преобразователя частоты состоит из многообмоточных однофазных трансформаторных групп SN и SM на передающей стороне и RN и RM на приемной стороне, первичные обмотки, которых соединены по схеме «зигзаг».

Такое соединение применено с целью подавления третьей гармоники тока. Нерегулируемые вторичные обмотки трансформаторных устройств, соединены по схеме «треугольник», к вершинам которых подключены соответствующие обмотки управления, представляющие собой блок «тонкого» регулирования.

Двухканальный преобразователь частоты, выполненный на основе схемы «зигзаг» позволяет в 2 раза снизить количество ключей (переключений) «грубого» регулирования, которые переключаются не через 60 как в устройствах исследованных авторами работы ранее, а через 120 градусов.

Для согласования частот необходимо осуществлять круговое вращение фазы выходного напряжения относительно входного с частотой скольжения. Такой процесс можно осуществить на базе статических трансформаторных устройств с применением поперечных вольтодобавочных трансформаторов. Вектор напряжения вольтодобавки расположен под углом 90° относительно фазного вектора напряжения сети, и обеспечивает фазовый сдвиг по напряжению в диапазоне:

$$\pm\psi = \arctg\left(\frac{U_n}{3 \cdot U_\phi}\right) = \pm 30^\circ \quad (1)$$

где

U_n - линейное напряжение;

U_ϕ - фазное напряжение.

Для обеспечения кругового вращения фазы выходного напряжения через каждые 60° происходит переход на следующий сектор посредством работы 6 силовых ключей блока «грубого» управления.

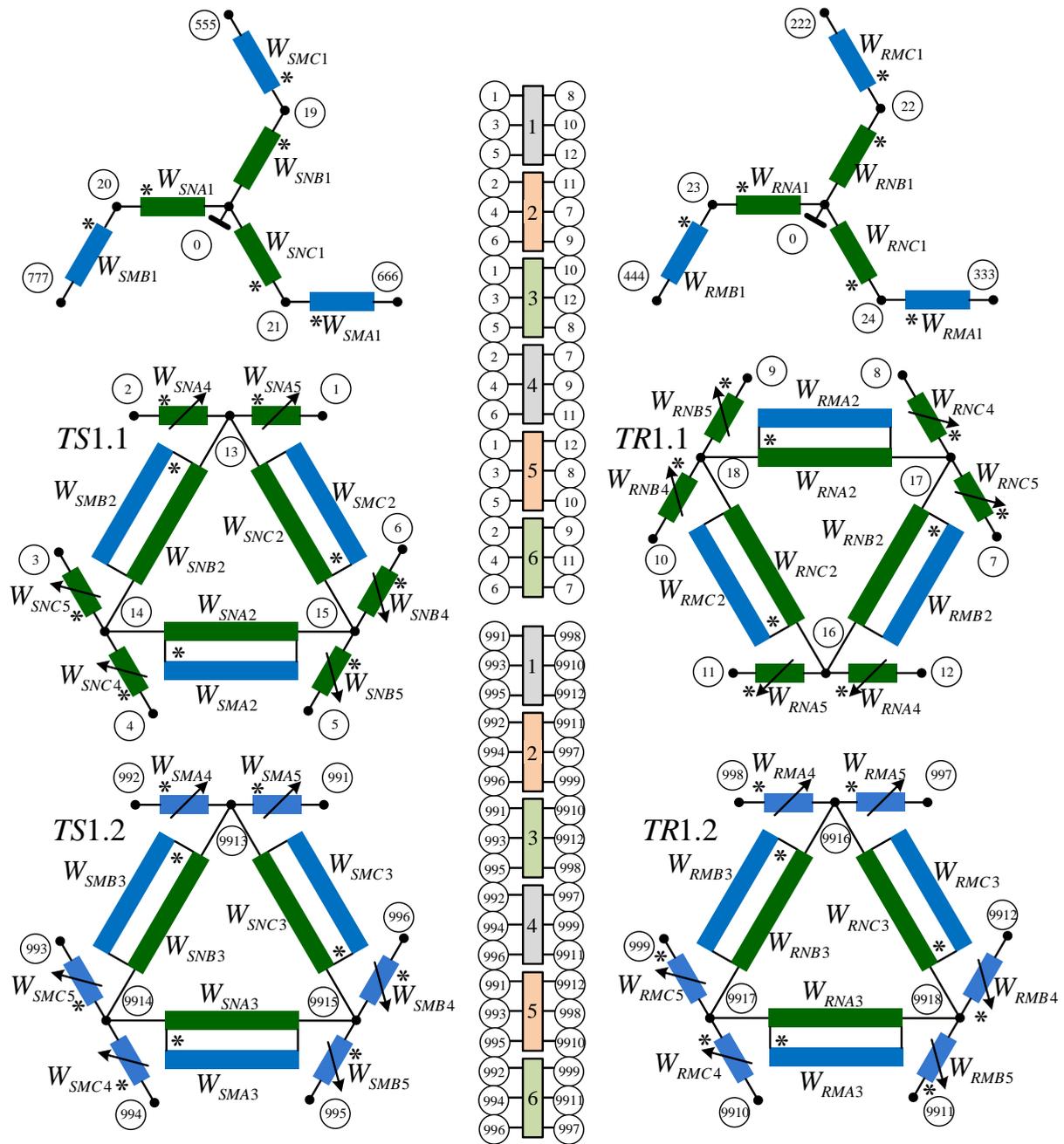


Рис.1. Схема статического двухканального преобразователя частоты.¹

Преобразователь, рис.1, состоит из четырех связанных между собой трансформаторных устройств, обозначенных для удобства описания протекающих в них процессов как: TS1.1, TS1.2, TR1.1, TR1.2. Сектора, в которых работают устройства, пронумерованы римскими цифрами. Циклоконвертор, условно, может быть разделен на два канала. На первый канал работают трансформаторные устройства TS1.1 и TR1.1, которые развернуты друг относительно друга на угол 60° , на второй - TS1.2, TR1.2, не сдвинутые друг

относительно друга. Векторная диаграмма напряжений на трансформаторных устройствах в момент начала работы представлена на рис.2.

В исходном состоянии входное напряжение U_{As} и выходное напряжение U_{Ar} сдвинуты по фазе на угол 30° , благодаря тому, что первичные обмотки устройства представляют собой схему зигзаг.

Обмотки «тонкого» управления со стороны входного и выходного напряжения полностью введены.

¹ Appendix 1

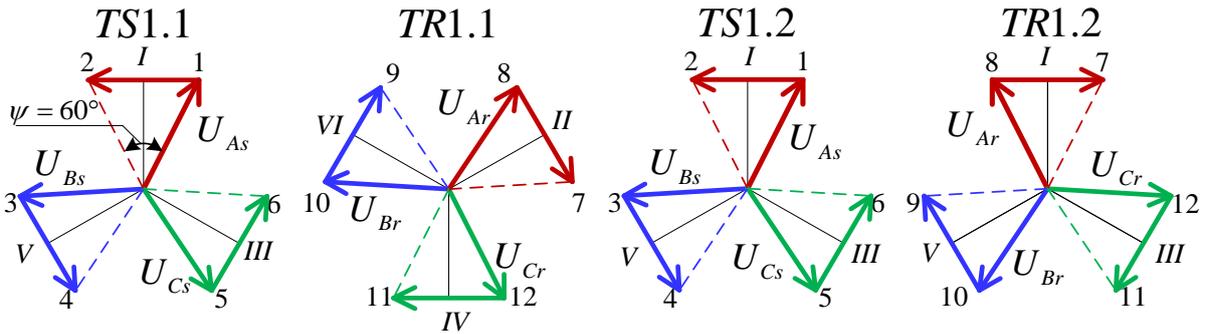


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений в момент начала работы преобразователя. ²

Процесс кругового вращения фазы выходного напряжения относительно входного рассмотрим на примере фазы «А». Изменение угла фазового сдвига между выходным и входным напряжением определяется способом секционирования и положением ключей обмоток «тонкого» управления. Во втором канале устройства обеспечивается 60°-й сдвиг по фазе между выходным и входным напряжением (сектор

$I - TR1.2$), а обмотки управления выводятся из работы. По окончании процесса «тонкого» регулирования во втором канале, срабатывают ключи «грубого» регулирования обоих каналов. Закон управления силовыми ключами, реализующий стратегию «грубого» регулирования представлен на рис.3.

S1	N_{ϕ}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
S2	N_{ϕ}	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25
S3	N_{ϕ}	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
S4	N_{ϕ}	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73
S5	N_{ϕ}	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
S6	N_{ϕ}	144	143	142	141	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126	125	124	123	122	121

Рис.3 Закон управления силовыми ключами «грубого» регулирования. ³

В результате второй канал отключается и в работу вводится первый канал (сектор $II - TR1.1$).

После ввода в работу первого канала отработывает «тонкое» регулирование, которое обеспечивает дальнейший сдвиг по фазе между выходным и входным напряжением на угол 60°. Результатом работы устройства в I и II секторах, является обеспечение 120° - го фазового сдвига между входным и выходным напряжением.

Дальнейшая поочередная работа каждого из каналов устройства, ключей «грубого» и «тонкого» управления обеспечивает поворот напряжения фазы «А» от сектора к сектору. Векторные диаграммы напряжений, иллюстрирующие работу устройства за один оборот, представлены на рис.4.а.

Из анализа векторных диаграмм представленных на рис.4.а видно, что в процессе одного периода согласования по частоте устройства $TR1.1$ и $TR1.2$ совершили один оборот относительно своего исходного состояния, а устройства $TS1.1$ и $TS1.2$ провернулись на угол 180° относительно исходного состояния.

Из вышеизложенного следует, что процесс согласования частоты на данном этапе нельзя считать завершенным, так как устройства со стороны питающей системы не выполнили полный оборот, следовательно, процесс вращения фазы выходного напряжения относительно входного напряжения на устройствах $TR1.1$ и $TR1.2$ следует повторить, обеспечив полный цикл согласования.

Соответствующие векторные диаграммы напряжений приведены на рис.4.б.

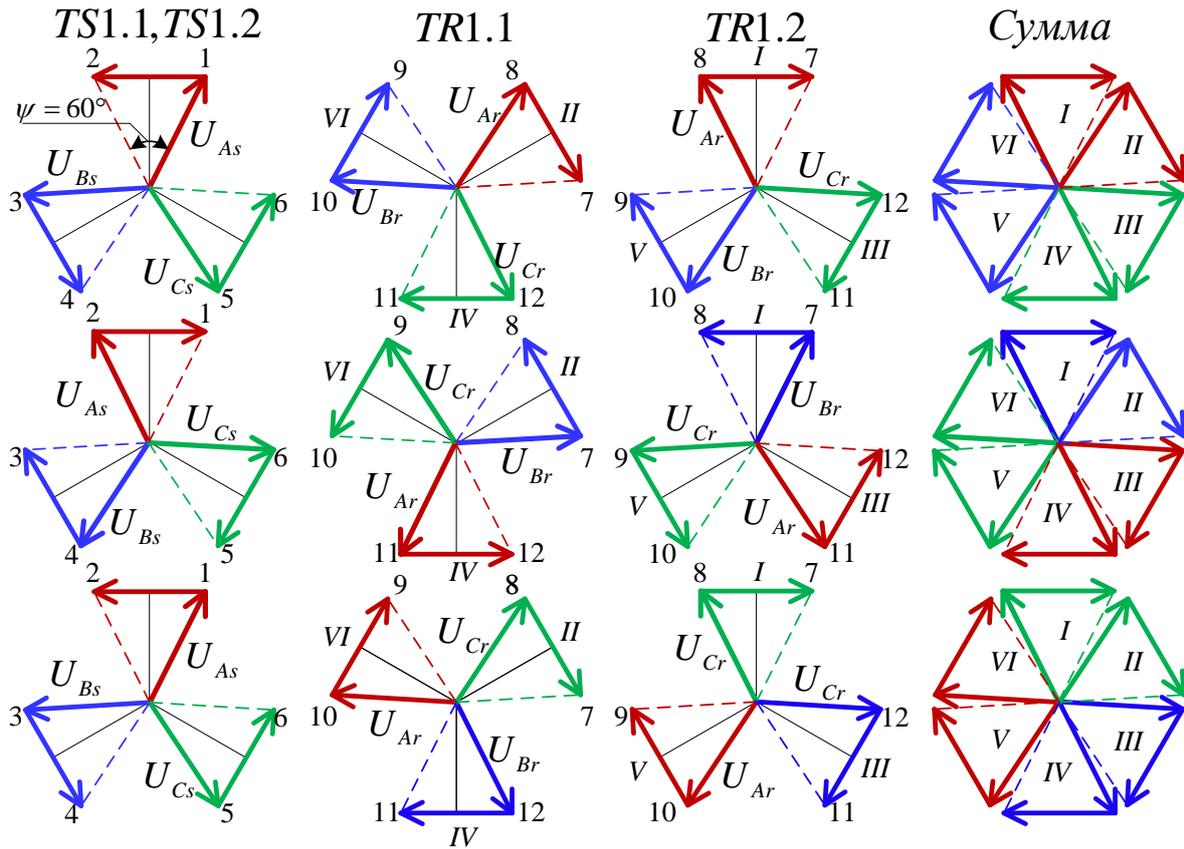


Рис.4.а. Векторная диаграмма поясняющая работу устройства за первый оборот. ⁴

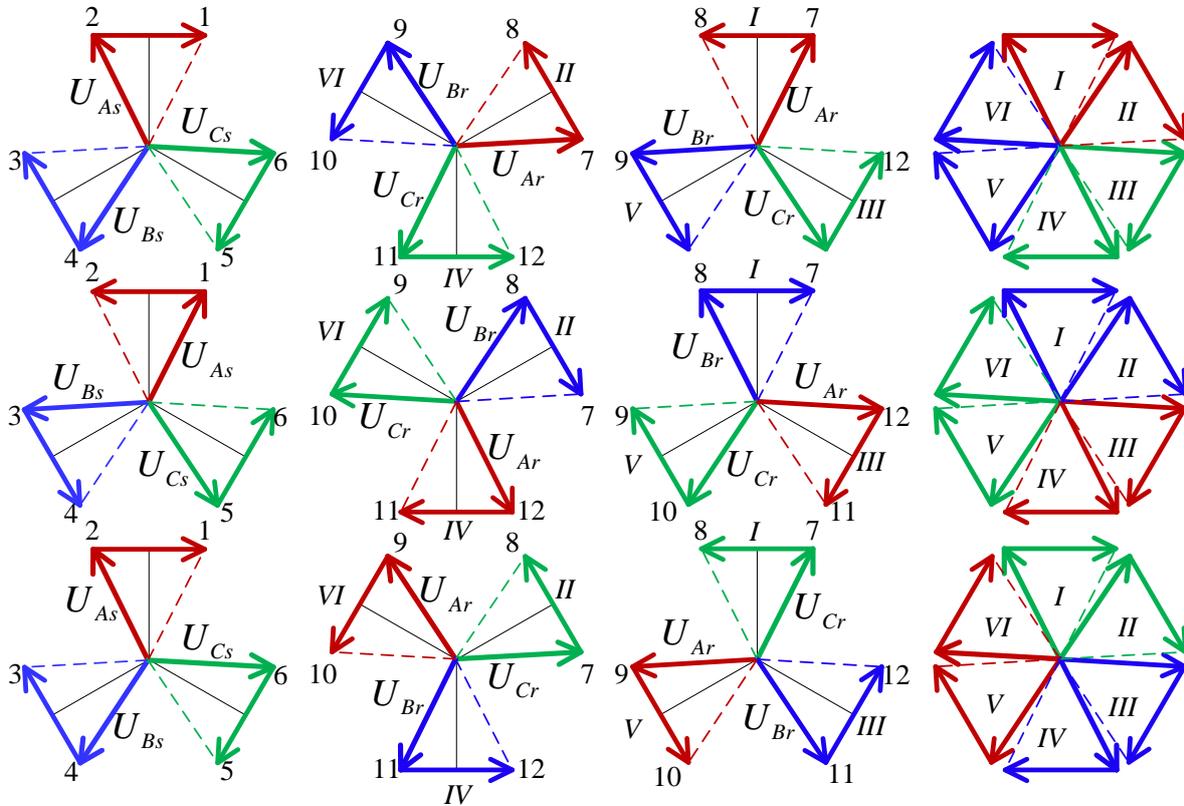


Рис.4.б. Векторная диаграмма поясняющая работу устройства, за второй оборот. ⁵

Обмотки управления статического преобразователя частоты, предназначенные для регулирования угла в 60-и градусных секторах, представляют собой блок «тонкого» регулирования, который состоит из секционированной соответствующим образом регулировочной обмотки с набором силовых ключей. Для исследования разработаны два варианта секционирования регулировочных обмоток и законов регулирования:

1. схема секционирования обмотки и закон управления, реализующие 24-х позиционную стратегию регулирования с дискретностью

переключения 5° , представлены на рис.5,6 соответственно;

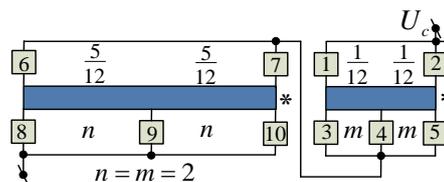


Рис.5 Обмотка управления преобразователя секционированная под 24 позиции переключения. ⁶

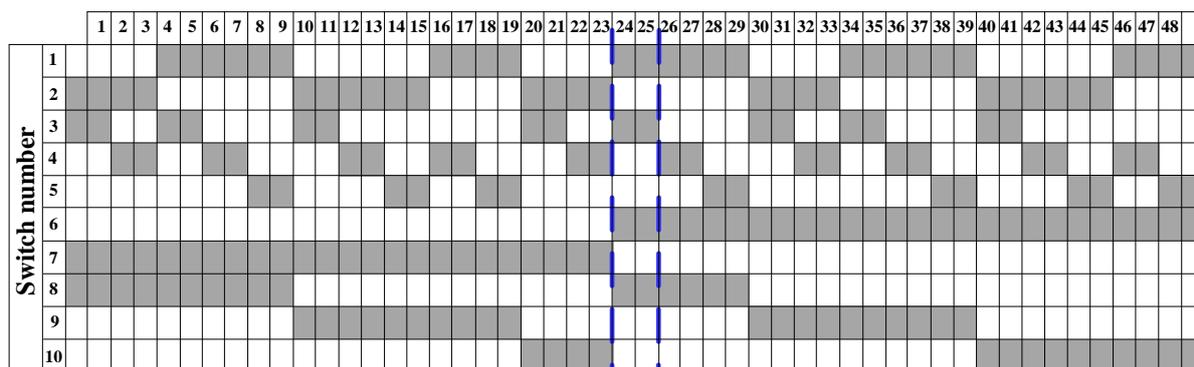


Рис.6 Стратегия управления преобразователем с дискретностью ступени 5° . ⁷

2. Схема секционирования обмотки и закон управления, реализующие 48-и позиционную стратегию регулирования, представлены на рис.7,8 соответственно. В этом случае шаг составляет $2,5^\circ$.

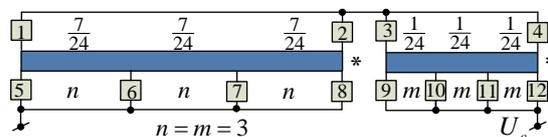


Рис.7 Обмотка управления преобразователя, на 48 позиции переключения. ⁸

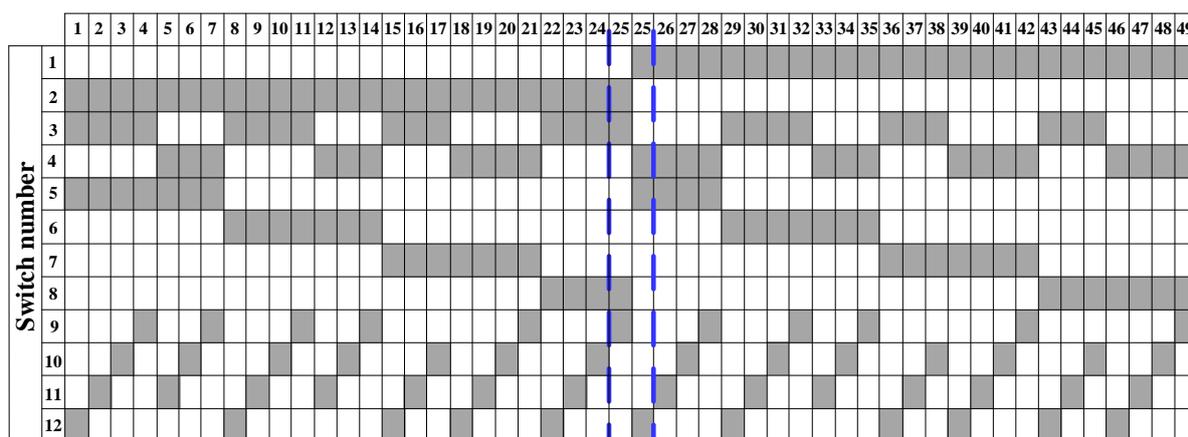


Рис.8 Стратегия управления преобразователем с дискретностью ступени $2,5^\circ$. ⁹

Для предложенных схем управления приняты следующие обозначения:

n - максимальная степень дискретности обмотки управления,

m - минимальная степень дискретности обмотки управления.

Тогда напряжение обмотки управления

$$U_c = mU_m + nU_n \quad (2)$$

Напряжение секции минимальной дискретности обмотки управления

$$U_m = \frac{U_c}{m+n(1+2m)} = \frac{U_c}{p} \quad (3)$$

Напряжение секции максимальной дискретности обмотки управления

$$U_n = (1+2m)U_m \quad (4)$$

Полное количество ступеней регулирования

$$q = 1 + 2[m + n(1+2m)]. \quad (5)$$

Секционирование обмотки и закон переключения на 48 позиций позволили уменьшить шаг переключения с 5 градусов (при переключении на 24 позиции) до 2,5 градусов и могут улучшить качество преобразования. Преимущество разработанного ключа по сравнению с традиционным, заключается в том, что при регулировании количество последовательно включенных ключей в работе всегда остается равным 4 вне зависимости от числа ступеней регулирования, что может существенно улучшить показатели надежности работы системы управления.

II. УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Структурно-имитационная SPS-модель объекта исследования была выполнена в среде Matlab. Режимные параметры обмоток статического преобразователя приняты с учетом возможности построения в дальнейшем лабораторного образца:

$$\begin{aligned} U_{SM1} &= U_{SN1} = U_{RM1} = U_{RN1} = 133V; \\ I_{SM1} &= I_{SN1} = I_{RM1} = I_{RN1} = 24A; \\ U_{SM2} &= U_{SN2} = U_{RM2} = U_{RN2} = 345V; \\ I_{SM2} &= I_{SN2} = I_{RM2} = I_{RN2} = 7A; \\ U_{SM3} &= U_{SN3} = U_{RM3} = U_{RN3} = 345V; \\ I_{SM3} &= I_{SN3} = I_{RM3} = I_{RN3} = 7A; \\ U_{SM4} &= U_{SN4} = U_{RM4} = U_{RN4} = 57,5V; \\ I_{SM4} &= I_{SN4} = I_{RM4} = I_{RN4} = 12A; \\ U_{SM5} &= U_{SN5} = U_{RM5} = U_{RN5} = 57,5V; \\ I_{SM5} &= I_{SN5} = I_{RM5} = I_{RN5} = 12A. \end{aligned}$$

Расчетные эксперименты проводились на основе апробированных моделей при соблюдении следующих условий:

- питание активной нагрузки осуществлялось в соответствии со схемами рис.9,10.

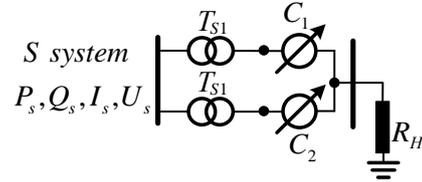


Рис.9 Схема проведения эксперимента при работе 2-х канального преобразователя на активную нагрузку. ¹⁰

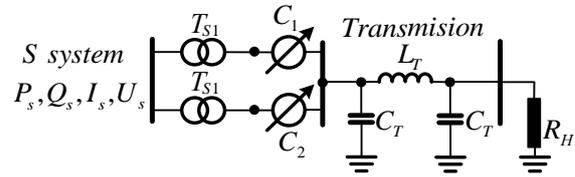


Рис.10 Схема проведения эксперимента при работе 2-х канального преобразователя на активную нагрузку через ЛЭП 30°. ¹¹

- время моделирования $t = 2$ секунды;
 - напряжение передающей системы и нагрузки $U_s = U_r = 230V$;
 - угол передающей системы $\delta_s = 0^\circ$;
 - величина передаваемой активной мощности составила $P_r = 5700W \pm 10\%$;
 - ток на выходе устройства для всех расчетных экспериментов поддерживался на уровне $I_r = 24A \pm 10\%$, что соответствует номинальному значению и сопротивлению нагрузки $R_H = 90\Omega$;
 - соотношения рабочих частот передающей системы и нагрузки приняты исходя из существующих стандартов (60/50Гц) и допустимому отклонению в послеаварийном режиме (50/49,6 Гц);
- Для оценки качества преобразования частоты и передачи мощности использовались следующие режимные параметры:
- степень стабильности (девиация) передаваемой активной мощности на передающей системе ($\partial P_s, \%$) и нагрузке ($\partial P_r, \%$);

- коэффициент гармонических искажений тока на передающей системе ($THD(I_s), \%$) и нагрузке ($THD(I_r), \%$).

III. РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА НА АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

На основе результатов экспериментов для сравнительного анализа на рис.11-12 приведены гистограммы при различных частотах скольжения и различной дискретности «тонкого регулирования». Режимные параметры с индексом «L»

соответствуют варианту питания нагрузки по схеме рис.10, без индекса – рис.9.

На рисунках, обозначенных буквами, приведены:

а - степень стабильности передаваемой активной мощности на передающей системе $\delta P_s, \%$ и шинах нагрузки $\delta P_r, \%$.

б - коэффициент нелинейного искажения тока на передающей системе $THD(I_s), \%$ и шинах нагрузки $THD(I_r), \%$.

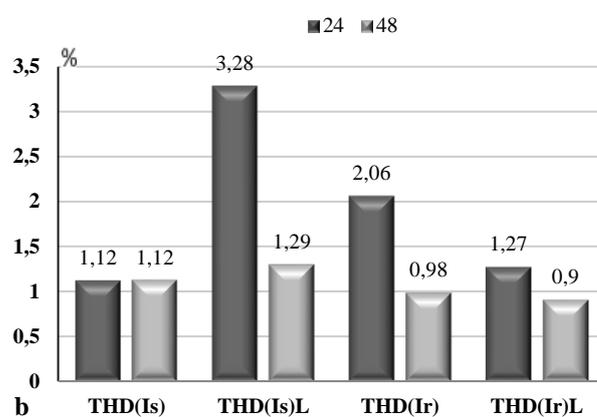
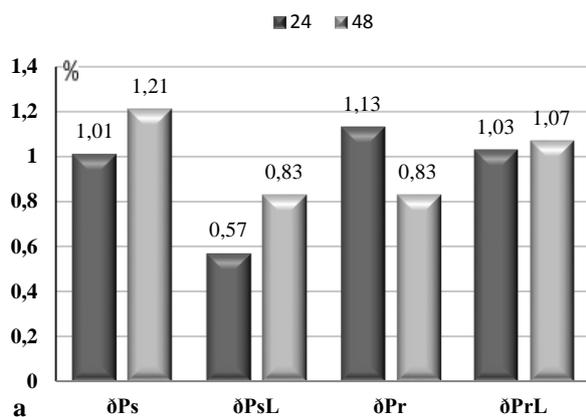


Рис.11 Диаграммы режимных параметров, при преобразовании с 60Гц на 50Гц. ¹²

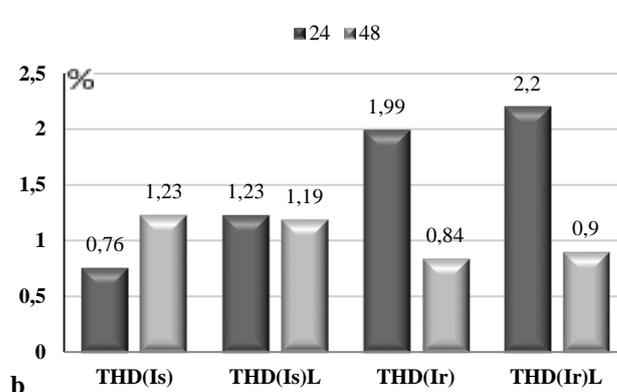
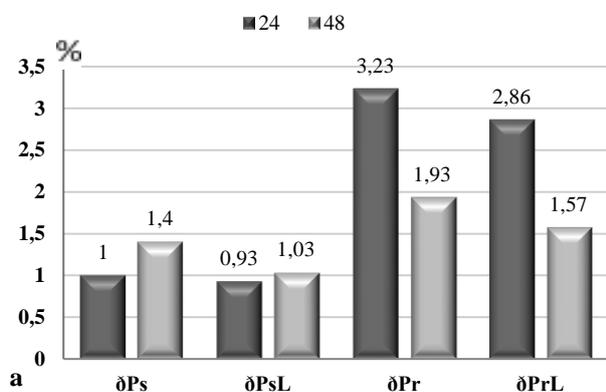


Рис.12 Диаграммы режимных параметров, при преобразовании с 50Гц на 49,6Гц. ¹³

Из анализа рис.11-16 видно, что:

- При работе на нагрузку величина колебания мощности на приемной системе при 48-и позиционном законе переключения выше, чем при 24-х позиционном при различных вариантах частотного преобразования. Причем, разница тем больше, чем меньше частота скольжения. Такой же характер колебательности

мощности наблюдается и при работе на активную нагрузку через ЛЭП с той лишь разницей, что абсолютное значение отклонения от среднего снижается примерно на 30-40%.

- Для приемной системы применение 48-и позиционного регулирования выглядит более эффективно, чем 24-х позиционное. Максимальный эффект наблюдается при

частоте скольжения 0,4. Однако следует отметить, что в этом случае величина отклонения существенно ниже, чем при преобразовании в 10Гц. При частоте скольжения 10Гц величины колебания мощности близки по значению как при питании нагрузки через ЛЭП, так и без нее.

- В целом при различных частотах скольжения между передающей и приемной системой степень колебательности:

- для передающей системы находится в диапазоне $0,69 \div 1,4\%$, а при работе через ЛЭП $-0,57 \div 1,03\%$,

- для приемной системы в диапазоне $0,83 \div 3,23\%$ и с ЛЭП $-0,85 \div 2,86\%$.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о достаточно высоком уровне стабильности передаваемой мощности в процессе преобразования частоты.

- При анализе $THD(I_s)$ токов на передающей системе можно сделать вывод о приблизительном равенстве вариантов 24-х и 48-и позиционного регулирования. Видно, что наименьшее значение коэффициента нелинейного искажения имеет место в случае частоты скольжения 0,4.

- Подключение нагрузки через ЛЭП приводит к существенному (более чем в два раза) увеличению коэффициентов нелинейного искажения токов на передающей системе для варианта 24-х позиционного регулирования, а на 48-и позициях существенного увеличения не происходит. Следует отметить, что при питании нагрузки через ЛЭП преобразование на 48-и позициях регулирования дает существенное снижение коэффициента гармонических искажений тока по сравнению с 24-х позиционным регулированием для всех режимов преобразования. Диапазон снижения THD может достигать $0,5 \div 2,0\%$.

- Для приемной системы преобразование на 48-и позициях переключения во всех режимах присоединения нагрузки и сочетаниях частот существенно эффективней 24-х позиционного регулирования. Уменьшение коэффициента нелинейного искажения токов THD может достигать $1,0 \div 1,3\%$;

- Максимальный эффект снижения коэффициента гармонических искажений тока для 48-и позиционного регулирования наблюдается на нагрузке при частоте скольжения 0,4.

IV ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложен схемный вариант двухканального преобразователя частоты на базе фазоворотного трансформатора с круговым вращением фазы выходного напряжения выполненного по схеме «зигзаг-треугольник»;

2. Разработаны способы секционирования обмоток управления, обеспечивающие 24 и 48 позиций «тонкого» регулирования, которые позволяют реализовать дискретность переключения соответственно 5° и $2,5^\circ$ в каждом 120° -ом секторе «грубого» регулирования.

3. Построены структурно-имитационные модели двухканальных конвертеров с 48-ю и 24-мя позициями переключения, на основе которых проведены расчетные эксперименты. Результаты экспериментов проиллюстрировали реализуемость идеи построения преобразователя частоты на основе предложенной схемы устройства.

4. Была проведена оценка качества преобразования при различных частотах скольжения между передающей и приемной системами при различных условиях подключения устройства. Показано, что параметры качества преобразования значительно отличаются для 48-и 24-х позиционного регулирования при различных частотах скольжения между передающей и приемной системами. Доказана эффективность 48-и позиционного регулирования, которая тем выше, чем меньше разница частот объединяемых систем.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1** Scheme of a static two-channel frequency converter.

²**Fig. 2** Vector voltages diagram at the moment the converter starts operation.

³**Fig. 3** The law of power keys management of “rough” regulation.

⁴**Fig. 4a** Vector diagram explaining the operation of the device behind the first rev.

⁵**Fig. 4b** Vector diagram explaining the operation of the device behind the second rev.

⁶**Fig. 5** Converter control winding sectioned to 24 switching positions.

⁷**Fig. 6** Strategy control of the device with 5° step resolution.

⁸**Fig. 7** Converter control winding sectioned to 48 switching positions.

⁹**Fig. 8** Strategy control of the device with 2,5° step resolution.

¹⁰**Fig.9** The scheme of the experiment when operating a 2-channel converter for active load

¹¹**Fig.10** The scheme of the experiment during the operation of a 2-channel converter on active load through a 30° power line

¹²**Fig.11** Diagram parameters of regime, when converting from frequency of 60Hz for 50 Hz.

¹³**Fig.12.** Diagram parameters of regime, when converting from frequency of 50Hz for 49,6 Hz.

БИБЛИОГРАФИЯ (References)

- [1] Grünbaum R., Petersson Å., and Thorvaldsson B., "FACTS, improving the performance of electrical grids," ABB Rev., pp. 11–18, Mar. 2003.
- [2] Fang Z. Peng, Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Resilient AC Distribution Systems (RACDS) in Smart Grid. Proceedings of the IEEE Year: 2017, Volume: 105, Issue: 11 Pages: 2099-2115.
- [3] Zhenhua Zhang, Multi-function Integrated FACTS Devices and its Application in the Development of Smart Grid 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering Year: 2010 Pages: 5349-5352.
- [4] Cardenas Hans; Zhang Lei; Noel Julien. Improvement on energy trade capacity for asynchronous power system by application of hybrid multi-infeed direct current transmission system *IEEE URUCON*, Montevideo, 2017, pp. 1-4, DOI: 10.1109/URUCON.2017.8171853.
- [5] Rajiv K. Varma. Introduction to FACTS Controllers. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. 15-18 March 2009
- [6] Khan Rizwan M.; Iqbal Atif; Farhad Ilahi. Digital simulation of variable frequency transformer. Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India. pp:1–6 doi:10.1109/PEDES.2010.5712376.
- [7] Merkhof A.; Upadhyay S; Doyon P. Variable frequency transformer-an overview. Conference: Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE doi: 10.1109/PES.2006.1709639.
- [8] Nadeau Denis. A 100-MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec TransÉnergie Network - The Behavior during Disturbance. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007, pp. 1-5. doi: 10.1109/PES.2007.385584.
- [9] Zelenohat N.I., Aristov I.S. Analiz staticheskoy ustojchivosti ehnergosistem pri nalichii gibkih mezhsystemnyh svyazej s preobrazovatelyami chastoty. [Analysis of static stability of power systems in the presence of flexible interconnections with frequency converters] *Ehnergetik* Izdatel'stvo: Nauchno-tehnicheskaya firma "EHnergoprogress" (Moskva) 2011, No:4 pp: 27-30. (In Russian).
- [10] Demidova M.V., Semina I.A., Babich N.A. Asinhronizirovannyj sinhronnyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronized synchronous electromechanical frequency converter]. Aktual'nye voprosy ehnergetiki materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2017 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 346-348 (In Russian).
- [11] Prokopenko S.A. Asinhronizirovannyj ehlektromekhanicheskij preobrazovatel' chastoty. [Asynchronized electromechanical frequency converter] Aktual'nye voprosy ehnergetiki. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov. 2016 Izdatel'stvo: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet pp: 168-172. (In Russian).
- [12] Zmaznov Eugeny; Lozinova Natalya; Suslova Olga; Andreev Mikhail; Ufa Ruslan. HVDC LCC technology and power quality issues in cross-border electrical power transmission Russia — Finland. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). 2018 doi 10.1109/ISGTEurope.2018.8571805.
- [13] Long W.F.; Litzenberger W. Fundamental concepts in High-Voltage Direct-Current power transmission. PES T&D 2012, Orlando, FL, 2012, pp. 1-2. doi: 10.1109/TDC.2012.6281596.
- [14] Khan Fida Muhammad; Abbasi Ayesha; Khan Muhammad Azam; Imran Muhammad. General overview of using High Voltage Direct Current (HVDC) transmission in Pakistan for maximum efficiency and. 2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET) pp.1–5 doi:10.1109/PGSRET.2015.7312221.
- [15] Cardenas Hans; Zhang Lei; Noel Julien Modeling, Simulation and Application of Modular Multilevel Converter in Hybrid High Voltage Direct Current Transmission System. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA), Lima, 2018, pp.1-5. doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511758.
- [16] Ilahi Bakhsh Farhad; Mohammad Irshad; Jamil Asghar M. S. Modeling and simulation of variable frequency transformer for power transfer in-between power system networks. India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010) pp: 1-7.
- [17] Rahul R.; Jain Amit Kumar; Bhide Ravindra. Analysis of variable frequency transformer used in power transfer between asynchronous grids. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) 2012 pp: 1 – 5.

- [18] Flourentzou Nikolas; Agelidis Vassilios G. Georgios; Demetriades D. VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview. IEEE Transactions on Power Electronics. (Volume: 24, Issue: 3, March 2009) pp: 592–602 doi: 10.1109/TPEL.2008.2008441.
- [19] Yousif Hakam Muayad; Vural Ahmet Mete Modeling of modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system. 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE) 2017 pp. 43–51 doi: 10.1109/ICEEE2.2017.7935790.
- [20] Kala Meah; Sadrul Ula. Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting pp: 1 – 5 doi:10.1109/PES.2007.385993.
- [21] Balyberdin L. L. i dr. Uvelichenie moshchnosti ehlektroperedachi 330/400 kV s vstavkoj postoyannogo toka mezhdru ehnergosistemami Rossii i Finlyandii. [Increasing the power of 330 / 400kV transmission with a back-to-back HVDC converter station between the power systems of Russia and Finland] EHlektricheskie stancii, 2004, № 10. pp. 50-54. (In Russian).
- [22] Janda Žarko S. Pregled standarda i preporuka za kontrolu viših harmonika u električnim mrežama Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" 2004, br. 16, str. 33-46.
- [23] Denboer1 N.; Karawital C.; Mohaddes M. Frequency scan based screening technique for harmonic interactions of HVDC systems. 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017) doi:10.1049/cp.2017.0035.
- [24] Seleznev A.S. Snizhenie urovnya vysshih garmonik v ehlektricheskikh setyah vysokogo napryazheniya. [Reducing the level of higher harmonics in electric networks of high voltage]. Vestnik IrGTU 2014, №4 (87), pp.143-146. (In Russian).
- [25] Osipov D.A. Sposoby podavleniya garmonik v sistemah ehlektrosnabzheniya. [Ways to suppress harmonics in power supply system's] Mezhdunarodnaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh Prospekt svobodnyj-2016, Krasnoyarsk, Si'irskij federal'nyj Universitet, 15-25 aprelya 2016. pp.49-52. (In Russian).
- [26] Amelin A.A. Upravlenie peretokom aktivnoj moshchnosti po neodnorodnoj mezhsistemnoj svyazi v ehnergosisteme. [Control the Active Power Flow on non-uniform intersystem communication in the power system]. Innovacii i investicii (Moskva) 2014, No:5 pp: 167-169 ISSN: 2307-180X. (In Russian).

Сведения об авторах.



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



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



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



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



Погорлецкий Вячеслав Михайлович, ПГУ им. Т.Г. Шевченко, кандидат физических наук. Научные интересы - разработка средств управления на основе силовой электроники.
departpe@gmail.com



Калошин Данила Николаевич,
ПГУ им. Т.Г. Шевченко, научный сотрудник. Научные интересы связаны с исследованием современных средств управления режимами энергосистем.
danila-nik2005@yandex.ru