

Balancing Properties of the Booster Transformer with the Longitudinal-Transverse Regulation

Zaitsev D., Golub I., Tirsu M., Caloshin D.

Institute of Power Engineering,
Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. The current development of the power industry involves various kinds of FACTS, being element of the Smart Grid and controlled by power electronics used for increasing the flexibility of electrical networks. Thus, the development and research of such devices are relevant. The study object is a controller belonging to the "Sen" family of transformers, which provides regulation of voltage and power flows in networks. The aim of the work is to study the balancing properties of booster transformer, which has an extended range and higher control accuracy in various modes. The goal was achieved during research carried out on the basis of structural simulation models. The most significant result was statement that the device under study has a pronounced per-phase balancing effect, which is preserved in various modes, including reverse ones. The main result can be consider that the proposed device, in comparison with the currently existing transformers of the "Sen" family, due to the extended range and accuracy of voltage regulation, allows using it when working, both for symmetrical and asymmetric loads. It is shown that the proposed technical solution provides ample opportunities for longitudinal-transverse phase-by-phase voltage regulation. Moreover, the deviations of parameters characterizing the quality of electricity, such as modules and voltage angles, do not go beyond the limits regulated by the requirements of the standard. The results obtained allowed us to conclude that this device can be used to solve the problem of coordinating the operation of two asymmetric systems in different operating modes.

Keywords: balancing properties of control transformer, active and reactive power, voltage regulation.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.06>

UDC: 621.316.7

Proprietăți de echilibrare ale transformatorului cu rapel bazat pe reglare longitudinală-transversală

Zaițev D., Golub I., Tîrșu M., Caloșin D.

Institutul de Energetică, Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Dezvoltarea industriei energetice la etapa actuală presupune creșterea flexibilității rețelelor electrice prin utilizarea diferitelor tipuri de FACTS, controlate de electronica de putere și fiind un element al Smart Grid-ului. Dezvoltarea și cercetarea unor astfel de dispozitive sunt relevante. Obiectul cercetării îl constituie un controler aparținând familiei de transformatoare „Sen”, care asigură reglarea fluxurilor de tensiune și putere în rețele. Scopul lucrării este de a studia proprietățile de echilibrare ale transformatorului cu rapel, care are o gamă extinsă și o precizie de control mai mare în diferite moduri. Scopul a fost atins în procesul cercetărilor efectuate pe baza modelelor de simulare structurală. Cel mai semnificativ rezultat a fost stabilirea faptului, că dispozitivul studiat are un efect pronunțat de echilibrare pe fază, care se păstrează în diferite moduri, inclusiv în cele inverse. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul, că dispozitivul propus, în comparație cu transformatoarele existente în prezent din familia „Sen”, datorită intervalului extins și preciziei de reglare a tensiunii, permite utilizarea lui în timpul lucrului, atât pentru regimuri simetrice, cât și pentru cele asimetrice. Se arată, că soluția tehnică propusă oferă oportunități ample de reglare longitudinală-transversală pe fiecare fază a tensiunii. Mai mult, abaterile parametrilor care caracterizează calitatea energiei electrice, cum ar fi modulele și unghiurile de tensiune, nu depășesc limitele reglementate de cerințele standardului. Rezultatele obținute ne-au permis să concluzionăm, că acest dispozitiv poate fi folosit pentru a rezolva problema coordonării funcționării a două sisteme asimetrice în moduri de funcționare diferite.

Cuvinte-cheie: proprietăți de echilibrare ale unui transformator cu rapel, putere activă și reactivă, reglare a tensiunii.

Симметрирующие свойства вольтодобавочного трансформатора с продольно–поперечным регулированием

Зайцев Д.А., Голуб И.В., Тыршу М.С., Калошин Д.Н.

Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Развитие электроэнергетики на современном этапе предполагает повышение гибкости электрических сетей путем применения различного рода FACTS, управляемых средствами силовой электроники и являющихся элементом Smart Grid. Таким образом, разработка и исследование такого рода устройств являются актуальными. Объект исследования представляет собой контроллер, относящийся к семейству «Sen» трансформаторов, обеспечивающий регулирование напряжения и потоков мощности в сетях. Целью работы является исследование симметрирующих свойств вольтодобавочного трансформатора, обладающего расширенным диапазоном и более высокой точностью регулирования в различных режимах. Поставленная цель достигнута за счет решения следующих задач: проведение исследований, выполненных на базе структурно–имитационных моделей. Для демонстрации симметрирующего эффекта были проведены расчеты процессов при передаче мощности из несимметричной системы в симметричную, и наоборот (в режиме симметрирования и без регулирования). Наиболее существенным результатом стало установление того факта, что исследуемое устройство обладает выраженным пофазным симметрирующим эффектом, который сохраняется в различных режимах, включая реверсные. Значимость полученных результатов состоит в том, что предлагаемое устройство по сравнению с существующими на сегодняшний день трансформаторами семейства «Sen», благодаря расширенному диапазону и точности регулирования напряжения, позволяет использовать его при работе, как на симметричную, так и на асимметричную нагрузку. Показано, что предложенное техническое решение обеспечивает широкие возможности продольно–поперечного пофазного регулирования напряжения. Причем отклонения параметров, характеризующих качество электроэнергии, таких как модули и углы напряжения не выходят за рамки, регламентируемые требованиями стандарта. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что данное устройство может быть использовано для решения задачи согласования работы двух несимметричных систем в различных режимах работы.

Ключевые слова: симметрирующие свойства вольтодобавочного трансформатора, активная и реактивная мощность, регулирование напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития электроэнергетики характеризуется значительным возрастанием объемов производства энергии за счет использования возобновляемых источников, выработка которых существенным образом подвержена суточным и сезонным колебаниям. Указанное обстоятельство может отражаться на параметрах качества электроэнергии. В этих условиях проблема управляемости транспортных и распределительных сетей становится все более актуальной. Технические устройства, предназначенные для решения подобного рода задач (представляемые технологиями FACTS, Smart Grid) в значительной степени связаны с использованием двухступенчатого преобразования энергии – выпрямление и инвертирование.

Аналогичные управляющие эффекты могут также быть достигнуты на основе прямого (одноступенчатого преобразования энергии), что позволяет создавать более простые, надежные и менее дорогостоящие устройства. Одной из таких технологий

являются вольтодобавочные трансформаторы различной конфигурации и назначения, которые можно отнести к семейству «Sen» трансформаторов.

Задавая с помощью переключателя ответвлений требуемую комбинацию, «Sen» трансформатор может корректировать напряжение, управляя его величиной, и углом сдвига фаз. «Sen» трансформатор имеет возможность обеспечить контроль перетока активной и реактивной мощности в большинстве системообразующих и распределительных сетей.

К достоинствам «Sen» трансформаторов можно отнести:

- относительная простота конструкции
- относительно невысокая стоимость;

Недостатками можно считать:

- ограниченное количество рабочих состояний;
- невысокая точность регулирования в заданной области из-за ограничения количества рабочих состояний;

- невысокое быстродействие при использовании РПН. [7-9]

В процессе создания так называемых «умных» электросетей (Smart Grid), и их переходе в будущем к наиболее эффективным системам высшего уровня, именуемым сейчас Microgrid, к электросетям будут предъявляться определенные требования обеспечения оптимального коэффициента нагрузки и высокого коэффициента мощности. Эти функции могут быть реализованы регулировочными трансформаторами, управляемыми силовой электроникой, принадлежащими к семейству «Sen». Одно из таких устройств, обладающее расширенным диапазоном и более высокой точностью регулирования было разработано и исследовано авторами в [27].

В настоящее время при исследовании и разработке трансформаторов семейства «Sen» значительное внимание уделяется вопросам конкретизации области применения [20,22], моделирования таких устройств в различных режимах работы [1-6,12,14-19,21,24] разработке новых схемных решений [25,26], решению вопросов защиты [23], применению средств силовой электроники [10,11]. С точки зрения авторов, открытым остается вопрос работы таких устройств в условиях несимметрии напряжения питания или нагрузки. Настоящая работа посвящена исследованию симметрирующих свойств регулирующего трансформатора [27] в режимах обмена мощностью между симметричной и несимметричной системами.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальная электрическая схема объекта исследования представлена на рис. 1. Основными элементами устройства являются два силовых трехобмоточных трансформатора, один из которых выполняет функции параллельного (намагничивающего), (другой – функции последовательного (вольтодобавочного) элемента. Индексом «р» помечены обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора, индексом «q» – обмотки и электрические величины вольтодобавочного трансформатора.

Перечень обозначений элементов, представленных на рис.1:

A_1, B_1, C_1 – электрические вводы (входные клеммы) устройства;

A_2, B_2, C_2 – электрические выходы (выходные клеммы) устройства;

$W_{1pA}, W_{1pB}, W_{1pC}$ – первичные обмотки высокого напряжения фаз A, B, C намагничивающего трансформатора;

$W_{1qA}, W_{1qB}, W_{1qC}$ – обмотки высокого напряжения фаз A, B, C вольтодобавочного трансформатора;

$W_{2qA}, W_{2qB}, W_{2qC}$ – обмотки низкого напряжения фаз A, B, C вольтодобавочного трансформатора;

Как следует из схемы (рис.1), высоковольтные обмотки (W_{1pA}, W_{1pB} , и W_{1pC}) намагничивающего трансформатора получают питание от сети через электрические вводы A_1, B_1 , и C_1 . Концы этих обмоток заземлены. В свою очередь, питание вольтодобавочного трансформатора подается на его низковольтные обмотки (W_{2qA}, W_{2qB} и W_{2qC}) в виде дискретно регулируемых по величине и по фазе (с помощью средств силовой электроники) напряжений, которые формируются системой регулировочных обмоток ($W_{2pA}, W_{2pB}, W_{2pC}$ и $W_{3pA}, W_{3pB}, W_{3pC}$), располагаемых на стержнях магнитопровода намагничивающего трансформатора.

Сформированные таким образом напряжения, будучи приведенными к высоковольтной стороне путем трансформирования на обмотки (W_{1qA}, W_{1qB} и W_{1qC}), алгебраически суммируются с напряжениями соответствующих фаз питающей системы, осуществляя тем самым необходимое управляющее воздействие.

Благодаря применению секционирования обмоток управления область регулирования выходного напряжения устройства состоит из 225 точек, что значительно улучшает точность и качество регулирования выходного напряжения. Каждой позиции регулировочных модулей соответствует определенная комбинация силовых ключей [27]. В качестве силовых ключей могут быть применены GTO тиристоры, IGBT транзисторы и т. п.

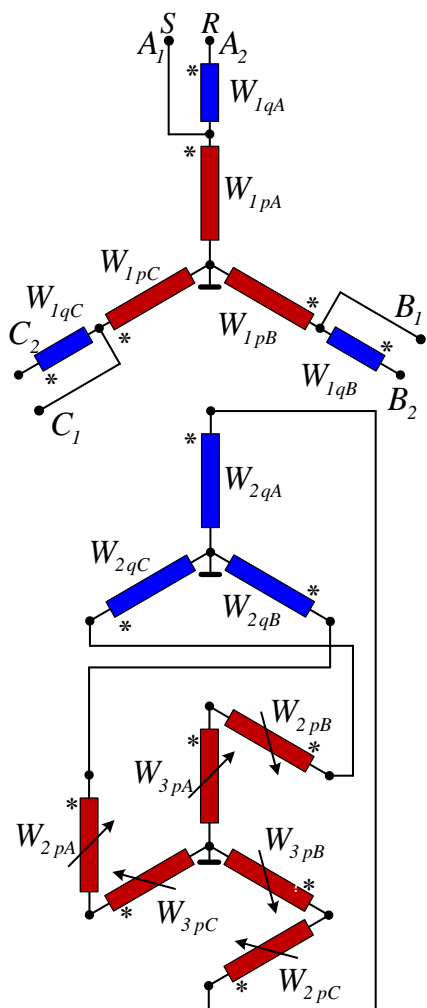


Рис.1 Принципиальная схема устройства.¹

Закон управления показан на рис.2а схема секционирования обмоток управления W_{2p}, W_{3p} представлена на рис.3, напряжения трансформаторных элементов устройства (Рисунок 1), принятые для имитационной модели приведены в табл. 1.

Схема для проведения расчетных экспериментов приведена на рис.4. Для исследования возможности пофазного регулирования модуля и угла выходного напряжения модель несимметричной системы строилась на основе однофазных источников напряжения, соединенных в звезду, а симметричная система с использованием трехфазного источника. Регулирующий трансформатор включался в ЛЭП, связывающую две системы, одна из которых несимметрична по модулю и фазе напряжения, а вторая симметрична (см. рис.4). Линия электропередачи была учтены в модели индуктивностью $L=0,0382H$.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
-7	●				●	●			●
-6			●		●	●			●
-5	●			●		●			●
-4			●	●		●			●
-3		●		●		●			●
-2	●				●		●		●
-1			●		●		●		●
0	●			●		●		●	
1			●	●		●		●	
2		●		●		●		●	
3	●				●		●	●	
4			●		●		●	●	
5		●			●		●	●	
6			●	●			●	●	
7		●		●			●	●	

Рис. 2 Закон управления регулировочным модулем.³

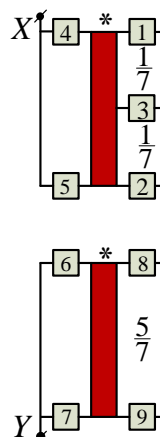


Рис. 3 Схема регулировочного модуля.²

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В процессе исследования применялись методы математического, структурного и имитационного моделирования на основе построенных в среде Simulink/Matlab SPS-моделей объекта.

На основе схемы рис.1 в среде Simulink (Matlab) была создана структурно-имитационная модель устройства, на базе которой были проведены исследования объекта в различных режимах работы.

Устройство моделировалось в виде группы однофазных трансформаторов. Параметры элементов каждого трансформатора были определены с учетом номинального напряжения $U = 230V$ и мощности

^{1,2,3} Appendix 1

устройства $\approx 2kVA$. Расчетные токи и напряжения трансформаторных элементов устройства (Рисунок 1), принятые для имитационной модели приведены в табл. 1.

Таблица 1⁴

Токи и напряжения обмоток.

	W_{1q}	W_{2q}	W_{1p}	W_{2p}	W_{3p}
U, B	103,18	51,59	230	29,785	29,785
I, A	9	18	9	18	18

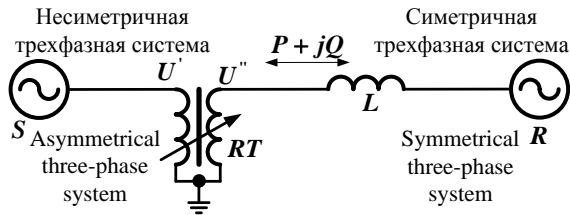


Рис.4 Схема проведения эксперимента.⁵

Напряжение передающей системы находится в точках 53, 36, 20 для фаз A, B, C соответственно (см. рис.5). Несимметричная система моделировалась посредством однофазных источников переменного напряжения, соединенных в звезду, параметры которых представлены в таблице 2.

Таблица 2⁶

Параметры несимметричной системы.

Фаза (Phase)	Амплитудное значение напряжения, В (Peak value of voltage, V)	Угол, град (Angle, degrees)
A	$269,94 \cdot \sqrt{2}$	$-6,26^\circ$
B	$219,02 \cdot \sqrt{2}$	$120^\circ + 17,61^\circ$
C	$206,77 \cdot \sqrt{2}$	$-120^\circ - 14,43^\circ$

Поясняющая векторная диаграмма напряжений приведена на рис.6.

На векторной диаграмме (рис.6.) а также в таблицах 3,4 приняты следующие обозначения:

$\alpha'_A, \alpha'_B, \alpha'_C$ – угол, отклонения напряжения фаз от номинальной величины на S системе;

$\alpha''_A, \alpha''_B, \alpha''_C$ – угол, отклонения напряжения фаз от номинальной величины на R системе;

U'_A, U'_B, U'_C – модули напряжения фаз на S системе;

U''_A, U''_B, U''_C – модули напряжения фаз на R системе;

S_{AS}, S_{BS}, S_{CS} – мощности по фазам S системы;

S_{AR}, S_{BR}, S_{CR} – мощности по фазам R системы;

I_{AS}, I_{BS}, I_{CS} – токи фаз S системы;

I_{AR}, I_{BR}, I_{CR} – токи фаз R системы.

% – отклонение соответствующих параметров от значений в симметричном режиме.

Для демонстрации симметрирующего эффекта было проведены следующие расчетные эксперименты:

1. передача мощности из несимметричной системы в симметричную:

- с регулированием (управление включено);
- без регулирования (управление отключено).

2. передача мощности из симметричной системы в несимметричную:

- с регулированием (управление включено);
- без регулирования (управление отключено).

Для каждого расчетного эксперимента фиксировались следующие режимные параметры:

1. модули и углы фазных напряжений на входе и выходе устройства,
2. модули фазных токов на входе и выходе устройства,
3. активные и реактивные мощности по фазам на передающей и приемной системах.

Процесс симметрирования строится исходя из схемы регулирования «зигзаг»:

1. Симметрирование в фазе «A» (точка 53, (рис.5); позиции (-7;-3, рис.3)) осуществляется переключением фазы «C» устройства в позицию «-7» и фазы «B» устройства в позицию «-3».

2. Симметрирование в фазе «B» (точка 20, (рис.5); позиции (+7;-2, рис.3)) осуществляется переключением фазы «B» устройства в позицию «+7» и фазы «A» устройства в позицию «-2».

3. Симметрирование в фазе «C» (точка 36, (рис.5); позиции (0;+7, рис.3)) осуществляется переключением фазы «A»

устройства в позицию «0» и фазы «B»
устройства в позицию «+7».

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты эксперимента для анализа симметрирующего эффекта устройства при передаче мощности из асимметричной системы S в симметричную R и наоборот представлены соответственно в таблице 3 и таблице 4.

Таблица 3⁷

Режимные параметры при передаче мощности из асимметричной системы S в симметричную R.

Асимметричная система S (Asymmetrical system S)		
	С регулируем (with control)	Без регулирования (without control)
U'_A, B	269,94	269,94
U'_B, B	219	219
U'_C, B	206,8	206,8
$\alpha'_A, град.$	-6,26	-6,26
$\alpha'_B, град.$	+17,61	+17,61
$\alpha'_C, град.$	-14,43	-14,43
S_{AS}, BA	2561+j27	2131+j1444
S_{BS}, BA	1657+j2054	3102+j1068
S_{CS}, BA	2312-j637	1049-j247
I_{AS}, A	9,49	9,57
I_{BS}, A	12,05	14,98
I_{CS}, A	11,6	5,21
Симметричная система R (Symmetrical system R)		
U''_A, B	220,4	264,7
U''_B, B	220,5	210,8
U''_C, B	221,4	204,5
$\alpha''_A, град.$	-0,972	-6,26
$\alpha''_B, град.$	-1,288	+17,61
$\alpha''_C, град.$	0,793	-14,43
S_{AR}, BA	2050-j714	2058+j229
S_{BR}, BA	2163-j777	2972-j1672
S_{CR}, BA	2038-j687	1019-j623
I_{AR}, A	9,44	9
I_{BR}, A	10	14,83
I_{CR}, A	9,35	5,19

Таблица 4⁸

Режимные параметры при передаче мощности из симметричной системы R в асимметричную S.

Асимметричная система S (Asymmetrical system S)		
	С регулируем (with control)	Без регулирования (without control)
U'_A, B	269,94	269,94
U'_B, B	219	219
U'_C, B	206,8	206,8
$\alpha'_A, град.$	-6,26	-6,26
$\alpha'_B, град.$	+17,61	+17,61
$\alpha'_C, град.$	-14,43	-14,43
S_{AS}, BA	-2203+j1173	-2862+j1084
S_{BS}, BA	-2401-j742	-865-j12
S_{CS}, BA	-1552+j1777	-2667+j876
I_{AS}, A	9,25	13,89
I_{BS}, A	11,47	3,95
I_{CS}, A	11,4	13,58
Симметричная система R (Symmetrical system R)		
U''_A, B	228,5	273,3
U''_B, B	234,2	221,0
U''_C, B	239,5	212,3
$\alpha''_A, град.$	+1,352	-4,81
$\alpha''_B, град.$	+2,172	+17,84
$\alpha''_C, град.$	+0,831	-13,05
S_{AR}, BA	-2099-j564	-2989-j107
S_{BR}, BA	-2236-j400	-892-j267
S_{CR}, BA	-2095-j437	-2777-j1433
I_{AR}, A	9,45	13,01
I_{BR}, A	9,88	4,05
I_{CR}, A	9,31	13,59

На основе данных таблицы 3 построены гистограммы, представленные на рис.7 для передающей S и принимающей R систем, иллюстрирующие симметрирующий эффект при передаче мощности из асимметричной системы в симметричную.

Из анализа режимных параметров на шинах приемной системы видно, что максимальное отклонение напряжения без регулирования составляет 17,8%, а в режиме симметрирования снижается до 1,8%.

^{7,8} Appendix 1

Максимальное отклонение углов напряжения достигает без регулирования 4,9%. Использование управления позволяет снизить эту величину до 0,3%. Максимальное отклонение мощности на приемной системе без регулирования составляет 46,6%. Регулирование позволяет снизить отклонение от номинального значения до 3,8%. Что касается токов, то максимальное отклонение

от номинального значения без регулирования может составлять 52,4% и 3,9% при регулировании. Следует отметить, что симметрирующий эффект ощущается по току и мощности и на стороне асимметричной системы S, но существенно в меньшей степени.

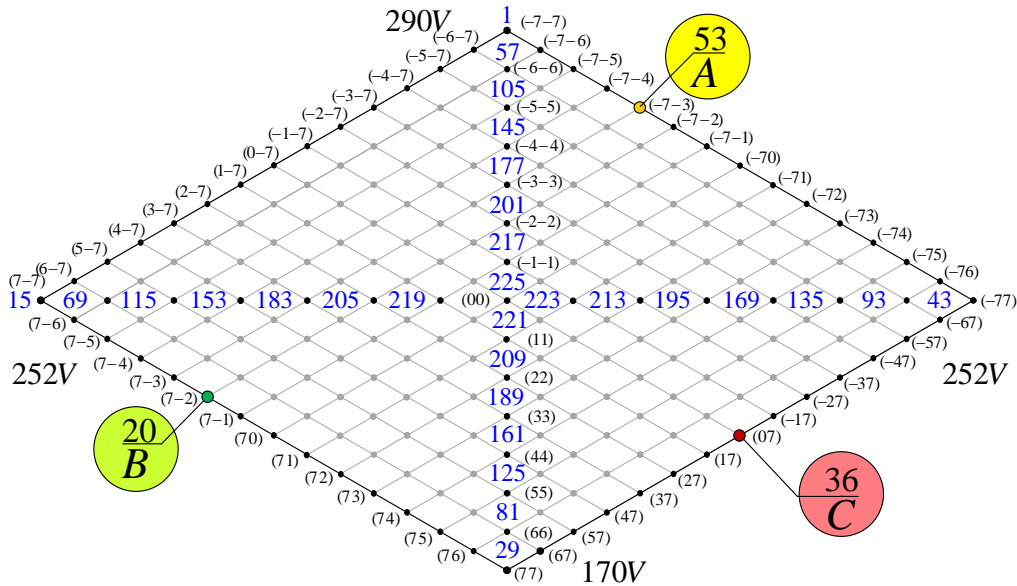


Рис.5 Координаты фаз асимметричной системы.⁹

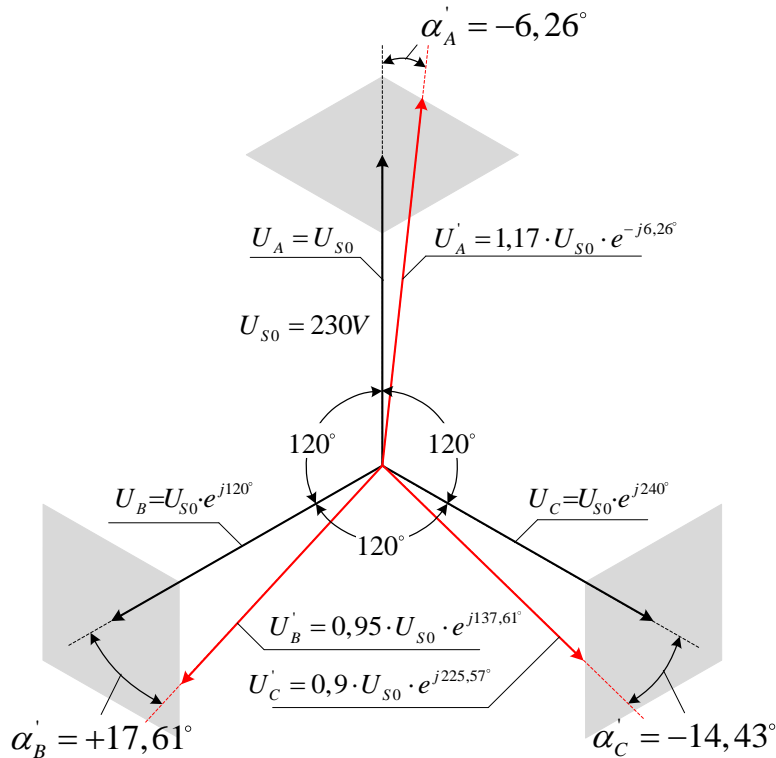


Рис.6 Векторная диаграмма напряжений асимметричной системы.¹⁰

^{9,10} Appendix 1

На основе данных таблицы 4 построены гистограммы, представленные на рис.8. для передающей R и принимающей S систем, иллюстрирующие симметрирующий эффект при передаче мощности из симметричной системы в асимметричную.

Из анализа параметров режима на шинах передающей системы видно, что максимальное отклонение напряжения без регулирования составляет 16,8%, а в режиме симметрирования снижается до 2,5%. Максимальное отклонение углов напряжения достигает без регулирования 4,9%. Использование управления позволяет

снизить эту величину до 0,6%. Максимальное отклонение мощности на приемной системе без регулирования составляет 58,3%. Регулирование позволяет снизить отклонение от номинального значения до 4,2%. Что касается токов, то максимальное отклонение от номинального значения без регулирования может составлять 58,3% и 4,1% при регулировании. Симметрирующий эффект ощущается по току и мощности также на стороне приемной асимметричной системы S , но, как и в предыдущем случае в меньшей степени.

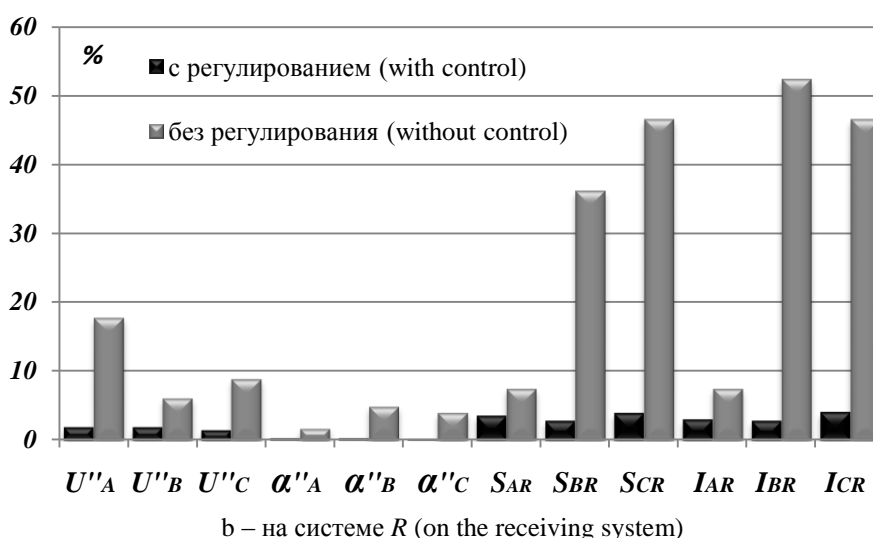
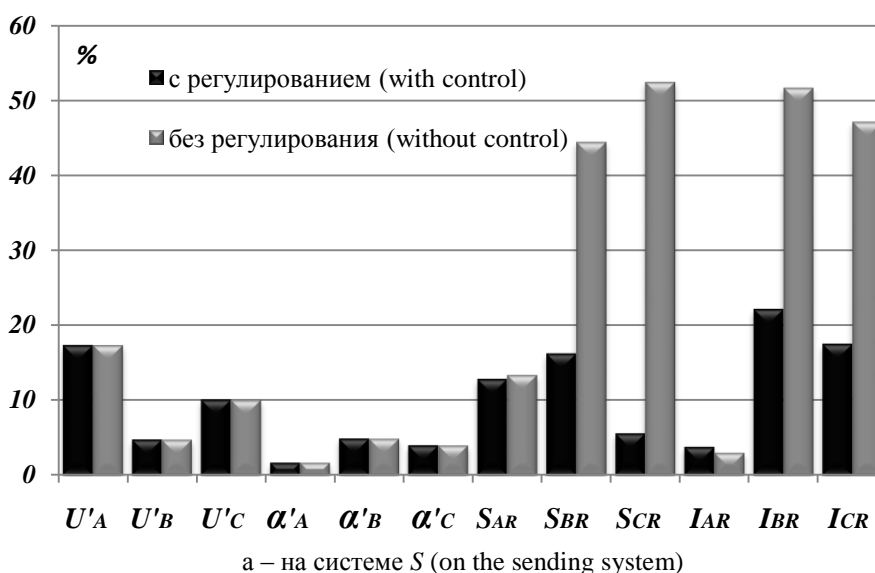


Рис.7 Симметрирующий эффект при передаче мощности от системы S к системе R .¹¹

¹¹Appendix 1

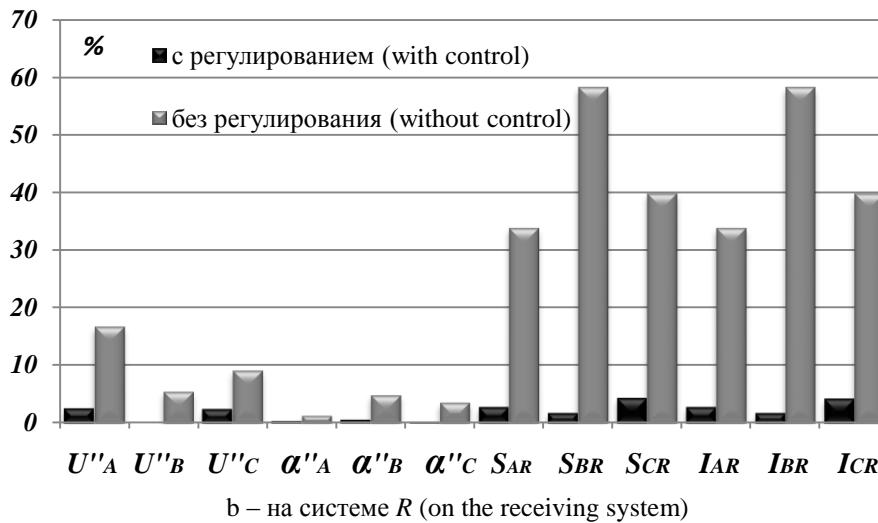
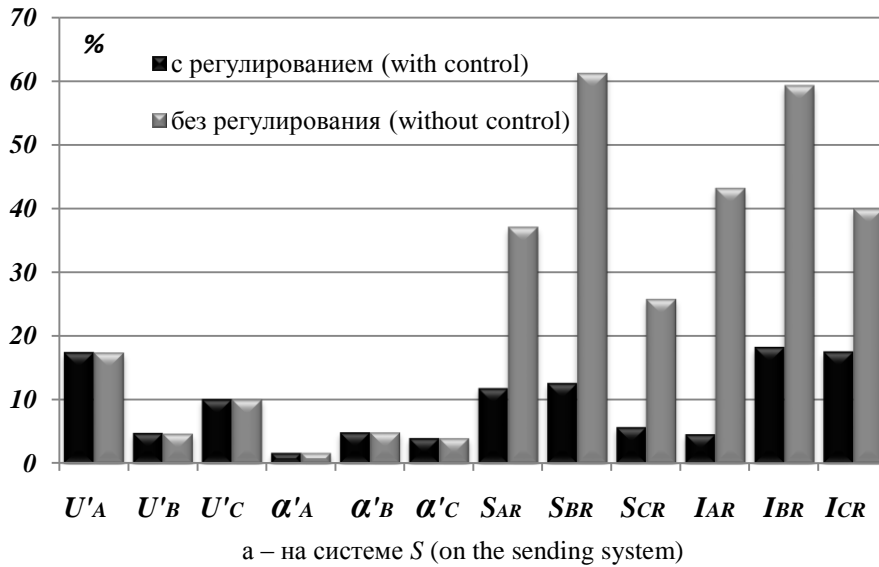


Рис.8 Симметрирующий эффект при передаче мощности от системы R к системе S.¹²

Выводы

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы:

- Предложенное устройство обладает выраженным пофазным симметрирующим эффектом, что позволяет согласовать совместную работу симметричной и асимметричной систем.

- Эффект симметрирования обеспечивается рассматриваемым устройством в реверсных режимах передачи мощности.

- Отклонения параметров, характеризующих качество электроэнергии, в

этих режимах не превышают требований стандарта.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Результаты были получены в рамках проекта Госпрограммы с номером 20.80009.7007.18: «Эко-инновационные технические решения по снижению энергопотребления зданий и разработка опций по развитию интеллектуальных сетей с высокой интеграцией ВИЭ в Молдове».

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Main diagram of the device

²Fig. 2. Control law of regulating module

³Fig. 3. Scheme of the control module.

⁴Table 1. Winding currents and voltages.

¹²Appendix 1

⁵Fig. 4. Scheme of the experiment.

⁶Table 2. Single-ended system parameters.

⁷Table 3. Regime parameters during power transmission from an asymmetric system S to a symmetrical system R

⁸Table 4. Regime parameters during power transfer from a symmetrical system R to an asymmetric S .

⁹Fig. 5. Phase coordinates of an asymmetric system.

¹⁰Fig. 6. Vector voltage diagram of asymmetric system.

¹¹Fig. 7. Balancing effect during power transfer from system S to system R .

¹²Fig. 8. Balancing effect during power transfer from system R to system S .

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] Sen K. K. and Sen M. L.. Introduction to FACTS Controllers: Theory, Modeling, and Applications, IEEE Press and John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Fentie, D.. Thesis M.S. Transient Modeling and Protection of “Sen” Transformer. University of Saskatchewan, 2010.
- [3] Fentie, D. Garcia J. C., R. Gokaraju and S. O. FARIED EMT Model of the “Sen” Transformer for Fault Analysis Studies” International Conference on Power Systems Transients (IPST 2015), Cavtat, Croatia, Jun. 2015
- [4] Faruque M.O., Dinavahi V. A tap-changing algorithm for the implementation of Sen transformer”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 22, no. 3, July 2007, pp. 1750-1757.
- [5] Kalyan K. Sen, Sen Mey Ling. Introducing the Family of “Sen” Transformers: A Set of Power Flow Controlling Transformers, IEEE Transactions on power delivery, vol. 18, No. 1, January 2003, pp. 149-157.
- [6] Asghari, B., Faruque M. O and V. Dinavahi.; Detailed real-time transient model of Sen transformer, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 23, no. 3, July 2008; pp. 1513-1521.
- [7] Kumar A. AND J. Kumar. Comparison of UPFC and “Sen” transformer for ATC enhancement in restructured electricity markets, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 41, no. 1, Oct. 2012, pp. 96–104.
- [8] Kumar A. and Sekhar C. Comparison of sen transformer and UPFC for congestion management in hybrid electricity markets, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 47, May 2013, pp. 295-304.
- [9] Se K. K.n and S Mey Ling.. Comparison of the “Sen” transformer with the unified power flow controller,” IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 4, Oct. 2003, pp. 1523–1533
- [10] Mohamed S. E. G. Power flow control capability of the power transistor assisted “Sen” transformer and the unified power flow controller: A close comparison, IET Gener., Transmiss. Distrib., vol. 14, no. 15, 2020, pp. 3033-3041.
- [11] Gasim S. E. Mohamed, J. Jasni, M. A. M. Radzi, and H. Hizam. Power transistor-assisted “Sen” transformer: A novel approach to power flow control, Electric Power Syst. Res., vol. 133, pp. 228_240, Apr. 2016.
- [12] Song H. and R. Na. Out-of-phase technique based few-step type extended “Sen” transformer and its practical tap selection algorithm, Chinese Patent CN5 262 079 A, Sep. 18, 2017.
- [13] Behera T. and D. De, “Enhanced operation of “Sen” transformer with improved operating point density/area for power flow control, IET Gener., Transmiss. Distrib., vol. 13, no. 14, pp. 3158_3168, 2019.
- [14] Feng, J. S. Han, Y. Pan, and X. Hu. Steady-state modelling of extended “Sen” transformer for unified iterative power flow solution, Electric Power Syst. Res., vol. 187, Oct. 2020, Art. No. 106492.
- [15] Faruque M. O. and V. Dinavahi, A tap-changing algorithm for the implementation of “Sen” transformer, IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 3, Jul. 2007, pp. 1750–1757.
- [16] Pan Y., Han S., Zhou C., and X. Guo, On switching transient modeling and analysis of electronic on-load tap-changers based “Sen” transformer, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 130, Sep. 2021, Art. No. 107024.
- [17] Pan Y. Han S, Feng J., and X. Hu. An analytical electromagnetic model of “Sen” transformer with multi-winding coupling, Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 120, Sep. 2020, Art. No. 106033.
- [18] Asghari B., Faruque M. O., and V. Dinavahi. Detailed real-time transient model of the “Sen” transformer, IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 3, Jul. 2008, pp. 1513-1521.
- [19] Liu J. and Dinavahi V., Nonlinear magnetic equivalent circuit-based real-time “Sen” transformer electromagnetic transient model on FPGA for HIL emulation, IEEE Trans. Power Del., vol. 31, no. 6, Dec. 2016, pp. 2483–2493.
- [20].Kalyan K Sen, Sen Mey Ling, Power Flow Control Solutions for a Modern Grid Using SMART Power Flow Controllers, Wiley-IEEE Press, Edition: 1 2022, pp. 375- 534.
- [21] Dhruva Patel, Anadita Chowdury, Dynamic Control and Performance of a Sen Transformer for Stabilizing an AC Transmission System and Improved Voltage Profile, 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS) 22-23 February 2018.
- [22] Xu Shunkai, Jiaxin Yuan, Shan Yin, Research on a Multi-line Electromagnetic Sen Transformer Suitable for Distribution Network, 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 11-15 October 2020.
- [23] Yuhang Pan, Wenying Yang, Research on Protection System of Electronic On-load Tap-

- changers Based Sen Transformer, 2021 3rd International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE), Harbin, China 26-28 November 2021.
- [24] Jieying Song, Peng Yang, Zengbo Dong, Kailong Chen; Xudong Li, Steady-State Equivalent Modeling and Equivalent Impedance Analysis of Sen Transformer, 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 04-07 November 2022.
- [25] Jiaxin Yuan; Lei Liu; Wenli Fei; Li Chen; Baichao Chen; Bo Chen, Hybrid Electromagnetic Unified Power Flow Controller: A Novel Flexible and Effective Approach to Control Power Flow, IEEE Transactions on Power Delivery, 5 October 2018, pp. 2061- 2069.
- [26] Song Jieying, Yu Zhiyong, Xie Wei, Hua Bin, Shi Zhixiong, Gao Xiaoqing, Lin Jun, Pan Zhengyu, Zhao Bin, Ding Chun, Chen Kailong, Zhang Yifan, Hybrid Unified Power Flow Controller Topology and Control Strategy Optimization, 2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), 22-24 November 2019.
- [27] Postoronca S., Zaitsev D., Tirsu M, Golub I., Kaloshin D., Modes of the booster transformer with regulation in zigzag, Journal of Engineering Science Vol. XXIX, no. 2 (2022), pp. 33 – 45.

Сведения об авторах.



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



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



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



Калошин Данила Николаевич, Институт Энергетики, кандидат технических наук. Область научных интересов: исследование современных средств управления режимами энергосистем.
danila-nik2005@yandex.ru