

РЕЖИМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ФРТ С КРУГОВЫМ ВРАЩЕНИЕМ ФАЗЫ, ВЫПОЛНЕННОГО ПО СХЕМЕ ТРЕУГОЛЬНИКА

Ирина ГОЛУБ

Institutul de Energetică, MECC

Аннотация: Работа посвящена исследованию характеристик преобразователя частоты на основе фазорегулирующего трансформатора (ФРТ) с круговым вращением фазы, управляемого средствами силовой электроники, с точки зрения совместимости предлагаемого технического решения с требованиями, предъявляемыми к преобразовательным устройствам подобного назначения. Результаты исследований будут способствовать определению, целесообразности и технической эффективности применения новых видов преобразователей для объединения, асинхронно работающих энергосистем.

Ключевые слова: фазоповоротный трансформатор, силовая электроника, регулирование мощности, преобразование частоты.

Введение. Наметившийся в последнее время интерес к разработке частотно регулируемых электрических связей [1,2,3,4,5] стимулирует также и появление новых технических решений, обеспечивающих реализацию соответствующих управляющих воздействий. Традиционно, при рассмотрении подобного рода задач, в качестве основных средств управления применяются поворотные трансформаторы типа VFT (Variable Frequency Transformers), а также преобразователи типа HVDC (High Voltage Direct Current). Каждое из указанных устройств имеет свои достоинства и недостатки.

Основное достоинство поворотного трансформатора VFT состоит в том, что при любой заданной частоте рабочее напряжение на его выходных клеммах всегда сохраняет синусоидальную форму.

Недостатками этого устройства являются:

- вынужденное применения трущихся токосъемных контактов, что приводит к снижению надежности функционирования установки;
- дополнительное (помимо собственных электрических потерь) расходование 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.

Основным достоинством преобразователя типа HVDC является его универсальность и быстроедействие. 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, требующих применения специальных гармонических фильтров.

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. В данной работе предложен вариант устройства, которое может быть принято в качестве рабочей модели для реализации принципа прямого преобразования частоты [6,7,8], не связанного с двойным преобразованием энергии и не имеющего недостатков, свойственных VFT

1. Принципиальная схема и закон управления одноканальным преобразователем Схема одноканального преобразователя приведена на рис.1. Основным элементом преобразователя, определяющим его отличие от других технических решений, является фазорегулирующий трансформатор (C_s), образованный соединенными в треугольник нерегулируемыми обмотками (W_p) и примыкающими к вершинам этого треугольника регулируемыми обмотками (W_q).

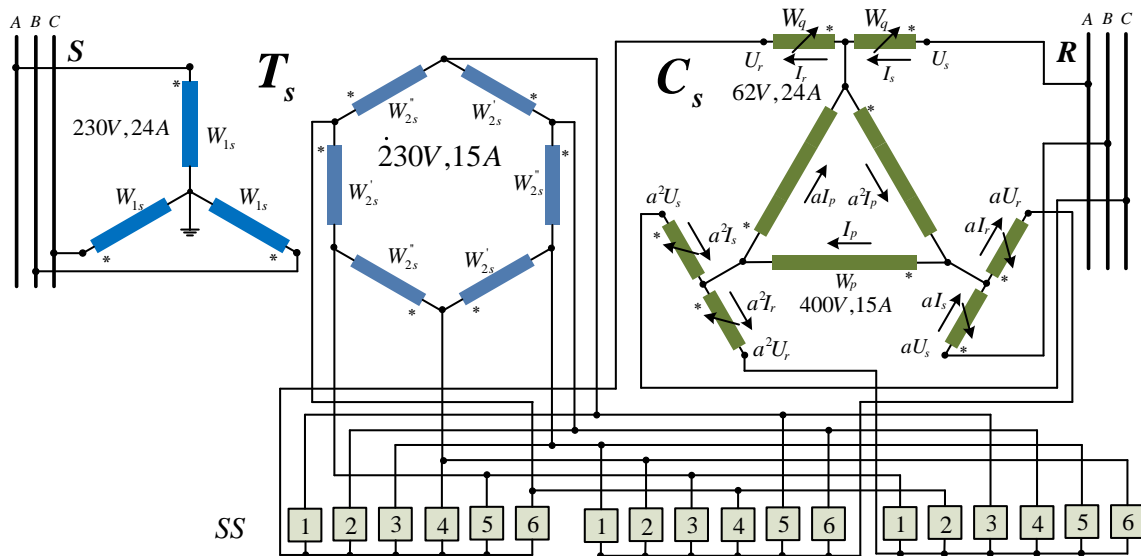


Рис.1 Схема одноканального преобразователя частоты

При этом каждая присоединенная к конкретной вершине треугольника регулируемая обмотка принадлежит фазе соответствующей нерегулируемой обмотки, которая противоположит данной вершине. Все регулируемые обмотки выполнены по схеме, представленной на рис.2.

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 в виде квадратов, пронумерованных цифрами от 1 до 10. Дробные арифметические соотношения характеризуют принцип секционирования регулируемых обмоток, обеспечивающий при данных условиях 12 дискретных значений снимаемого с них напряжения (как условно положительного, так и противоположного ему знака при реверсировании). Совокупность, представляемая фазорегулирующим трансформатором и силовыми электронными коммутаторами регулируемых обмоток, образует блок тонкого регулирования преобразовательного устройства и предусматривает возможность регулирования фазового сдвига выходного напряжения относительно приложенного в диапазоне $\pm 30^\circ$.

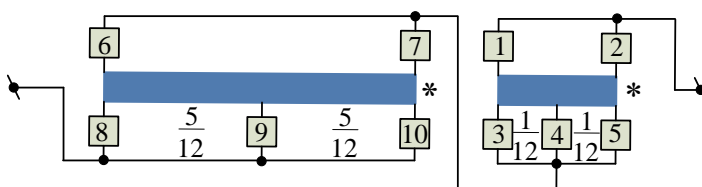


Рис.2 Обмотка управления преобразователя секционированная под 24 позиции переключения

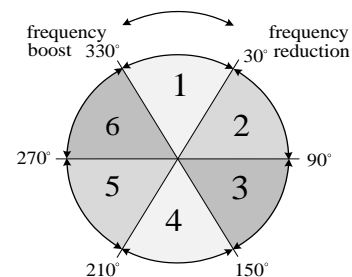


Рис.3 Сектора грубого регулирования устройства.

Полная окружность регулирования, как показано на рис.3, может быть разделена на 6 отдельных секторов, по 60° каждый, в рамках которых осуществляется процедура тонкого регулирования, обеспечиваемая секционированными обмотками управления рис.2. Переключение секторов обеспечивается с помощью силовых полупроводниковых коммутаторов SS , которые,

совместно с силовым трансформатором T_s , образуют блок грубого регулирования. Вторичная обмотка трансформатора T_s выполнена по схеме правильного шестиугольника, вершины которого являются опорными точками соответствующих секторов. Первичная обмотка силового трансформатора T_s подключена к питающей сети. К выходным клеммам фазорегулирующего трансформатора C_s подключена нагрузка.

При симметричном (одновременном) переключении обмоток управления степень дискретности одной ступени составляет - 2.5° . Таким образом, каждый сектор грубого регулирования содержит 24, а вся окружность содержит 150 фиксированных позиций значений угла фазового сдвига. Стратегию управления для данных условий отражает диаграмма переключения, представленная на рис.4.

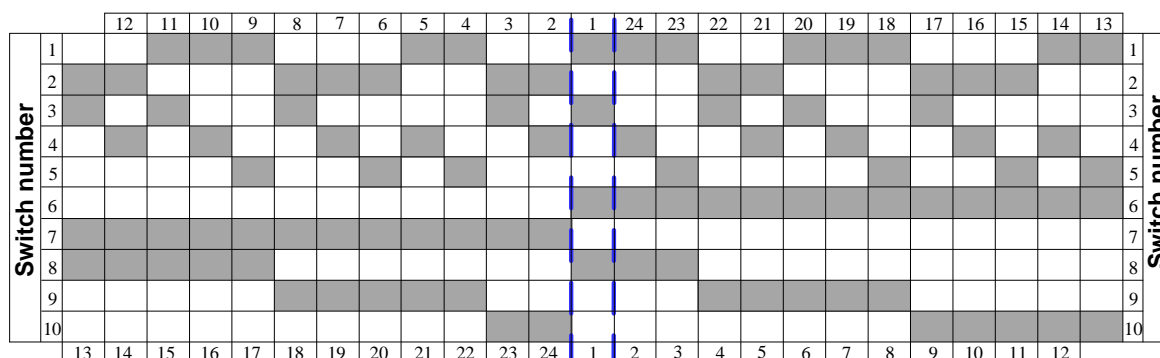


Рис.4 Стратегия управления преобразователем при симметричном переключении с дискретностью ступени 2.5°

2 Режимы работы одноканального преобразователя частоты. На основе структурно-имитационной модели по схеме рис.1 были проведены расчетные эксперименты для следующих ситуаций:

- работа преобразователя на активную нагрузку ;
- работа преобразователя на приемную систему;
- работа преобразователя на приемную систему через ЛЭП 15° ;
- работа преобразователя на приемную систему через ЛЭП 15° и реактор;

Режимные параметры преобразователя частоты анализировались при разнице частот 10 Гц, 5 Гц и 1 Гц. Результаты всех расчетных экспериментов приведены в табл.1.

Таблица № 1.

Характеристики работы преобразователя при различных частотах скольжения.

Режим работы	Частоты, Гц	$\partial P_s, \%$	$\partial P_r, \%$	$THD(I_s), \%$	$THD(I_r), \%$
На активную нагрузку	60/50	0.33	0.98	0.67	2.39
	60/55	0.47	0.99	0.51	2.54
	60/59	0.49	1.37	0.25	1.54
На систему	60/50	7.1	25.75	92.56	40
	60/55	14.64	31.25	18.82	13.2
	60/59	23.97	25.46	14.72	14.99
На систему через ЛЭП 15°	60/50	1.54	5.55	27.84	9.81
	60/55	2.91	3.93	9.23	11.35
	60/59	3.27	3.92	7.18	7.9
На систему через ЛЭП 15° и реактор	60/50	0.7	3.51	8.92	3.29
	60/55	1.77	2.49	2.72	5.25
	60/59	2.22	2.82	1.85	3.15

На рис. 5.а,б для сравнения приведены осциллограммы мощностей и токов, а также характеристики 24-позиционного преобразования для варианта передачи 60/50 Гц, включения устройства на систему и увеличении магнитной индукции в стержне.

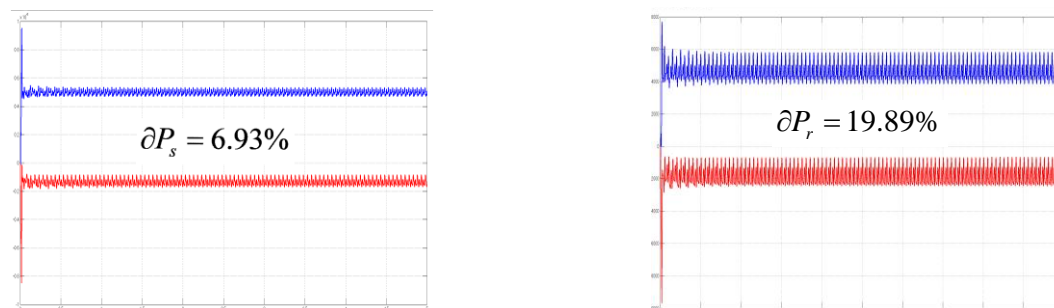


Рис. 5.а Активная и реактивная мощность на передающей P_s и приемной P_r системах при преобразовании 60/50 и работе на приемную систему.

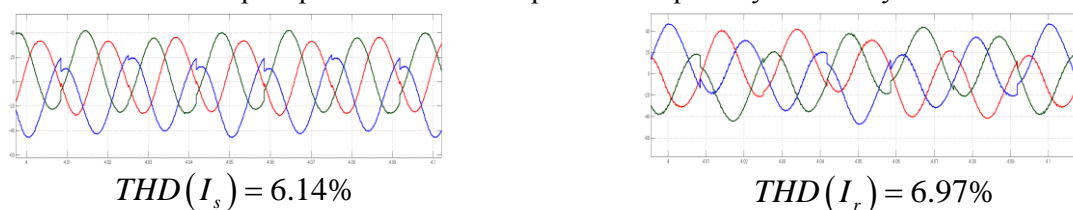


Рис. 5.б. Осциллограммы токов на передающей I_s и приемной I_r системах при преобразовании 60/50 и работе на приемную систему.

Заключение. В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

Предложен схемный вариант одноканального преобразователя частоты на базе фазоворотного трансформатора с круговым вращением фазы выходного напряжения. Разработана обмотка управления и стратегия регулирования, обеспечивающая 24 позиции переключения в каждом 60° -ом секторе грубого регулирования с дискретностью 2.5° . Построена структурно-иммитационная модель одноканального конвертора с 24-мя позициями переключения, на основе которой проведены расчетные эксперименты. Результаты проиллюстрировали реализуемость идеи построения преобразователя частоты на основе статического трансформатора с круговым вращением фазы. Была проведена оценка качества преобразования при различных частотах скольжения между передающей и приемной системами при различных условиях подключения устройства.

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, SIELMEN 2015, 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems p.180-184.