

# ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС У НУЛЬОВІЙ ШЕСТИПУЛЬСНІЙ ДЮДНІЙ КОМПЕНСАЦІЙНІЙ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ У КОМПЕНСОВАНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

**Бойко В.С., д.т.н., проф., Чибеліс В.І., к.т.н., доц.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки*

**Коломієць М.В., студентка**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** Основними проблемами електричних мереж з потужними нелінійними споживачами електричної енергії у вигляді різного типу перетворювачів електричної енергії з виходом по постійному струму (випрямлячів) є компенсація реактивної та неактивної потужності, несиметрія трифазної напруги і спотворення форми струмів і напруг. Проблема якості електричної енергії завжди була і буде серед найбільш важливих. Причому, за наявності у електричній мережі нелінійних споживачів у вигляді перетворювачів електроенергії, підхід до аналізу енергетичного процесу системи суттєво відрізняється від аналізу суто синусоїдного симетричного процесу.

Основоположником теорії потужності систем електроживлення з нелінійними споживачами є S. Fryze (Фрізе), який опублікував одну з перших своїх робіт за зазначеною тематикою ще у 1931 році. Згідно цієї теорії будь-яке навантаження є активно-реактивним [1]. Активна складова навантаження свідчить про споживання енергії, яку називають активною. Реактивна енергія має дві складові. Одну – яка не споживається, і іншу – яка також не споживається, але відрізняється від попередньої тим, що здатна спочатку накопичуватись, а потім повертатись назад до джерела. Ця друга складова відповідає фізичним процесам у реактивних елементах електричного кола і, згідно теорії К. Будяну, може називатись реактивною. Першу ж складову краще називати неактивною. Основний недолік теорії потужності за Фрізе проявляється при аналізі перехідних процесів у мережах електропостачання [2]. Що ж стосується компенсаційних перетворювачів електричної енергії, то при аналізі енергетичних процесів у них можна застосовувати методи гармонічного аналізу, спираючись на теорію Фрізе [3], оскільки конденсатори комутуючої ланки є складовою перетворювальної системи і режим їх роботи визначається режимом роботи самої системи.

**Мета роботи.** Дослідити потоки активної і реактивної (неактивної) енергії у шестипульсній компенсаційній перетворювальній системі нульового типу та довести умови ефективного використання конденсаторів у зазначеній системі.

**Результати досліджень.** У дослідженні перетворювальна система, схема якої наведена на рис.1, розглядається як сукупність основних елементів: трансформаторного блоку (ТБ) з мережевою (МО) та вентильними (ВО) обмотками, вентильного блоку (ВБ), компенсуючого модуля (КМ) і навантаження (Н), яке підключається до вихідних затисків перетворювальної

системи. Досліджуючи величину і напрям потоків енергії у перетворювальній системі, вони виражаються через активну і реактивну (неактивну) потужності.

У досліджуваній нульовій компенсаційній перетворювальній системі (КПС) вентиля увімкнені у фази обмоток перетворювального трансформатора. Тож струм вентиля і є струмом його вторинної обмотки. Як показано в [4], струм комутації  $i_k$  такої компенсаційної системи за нульовою схемою при діодній реалізації останньої записується наступним рівнянням:

$$i_k = \frac{\sqrt{3}E_m}{2x_\gamma} (1 - \cos \vartheta) \quad (1)$$

де  $E_m$  - амплітудне значення фазної ЕРС вторинної обмотки перетворювального трансформатора,  $\vartheta$  - поточна змінна  $x_\gamma$  - значення індуктивного опору контуру комутації.

Запишемо рівняння для контуру комутації компенсаційної перетворювальної системи (рис. 1):

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta_\gamma} - u_c = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi) \quad (2)$$

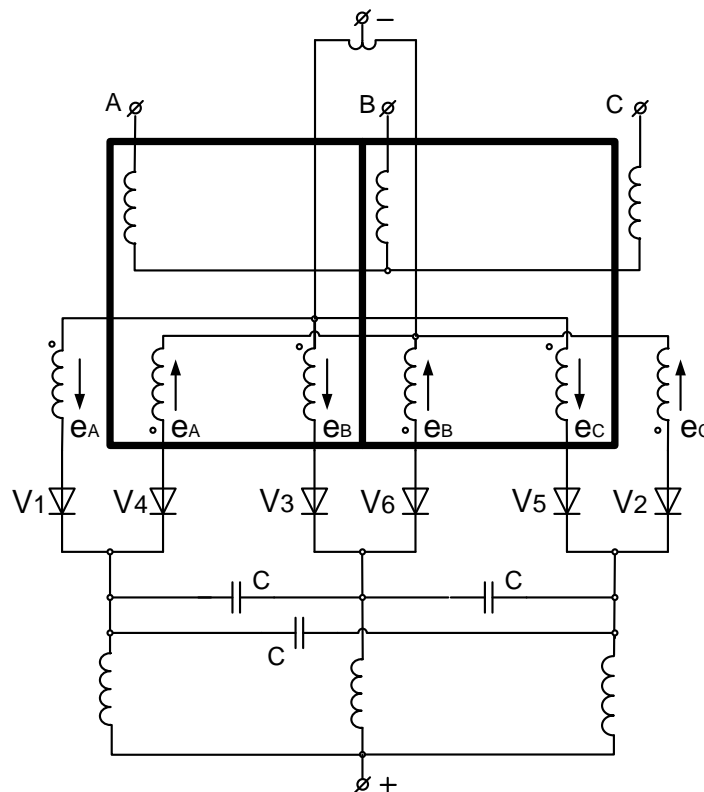


Рисунок 1 - Схема шестипульсової нульової компенсаційної перетворювальної системи

Напряга комутуючих конденсаторів  $u_c$  створюється сукупністю струмів навантаження та комутації і розраховується як різниця між третинною струму навантаження  $2I_d$  і двох третин струму комутації [5], [6]. Врахувавши це у рівнянні (2) та здійснивши низку алгебричних і тригонометричних

перетворень, отримаємо нормоване рівняння струму комутації компенсаційної перетворювальної системи:

$$i_{k*} = 0.5 + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} - \left(0.5 + \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0*} \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0*} x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} \sin \omega_{0*} \vartheta, \quad (3)$$

де  $\alpha$  - кут керування, що у діодному перетворювачі встановлюється вільно,  $\omega_{0*}$  - відносне значення власної частоти контуру комутації,  $x_{\gamma*}$  - відносне значення індуктивного опору контуру комутації.

**Баланс активної потужності.** Джерелом енергопостачання перетворювальної системи є мережа живлення промислової частоти. Розрахунок активних і реактивних (чи неактивних) потужностей усіх елементів перетворювальної системи здійснено через гармонічний аналіз кривих струмів і напруг окремих її елементів.

У статті наводяться результати дослідження компенсованого режиму роботи діодної нульової компенсаційної перетворювальної системи (рис. 1), тобто такого режиму, коли перетворювальна система працює з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці. Характеристика досліджуваного режиму (умовно назвемо його РЕЖИМ 1):  $x_{\gamma*} = 0.2$ ,  $\omega_{0*} = 3$ ,  $\alpha = 19.57^\circ$ ,  $\gamma = 29.18^\circ$ . Підтвердженням цьому є криві фазної напруги і фазного струму перетворювального трансформатора, отримані при моделюванні зазначеного режиму роботи у пакеті схемотехнічного моделювання Micro Cap (рис. 2).

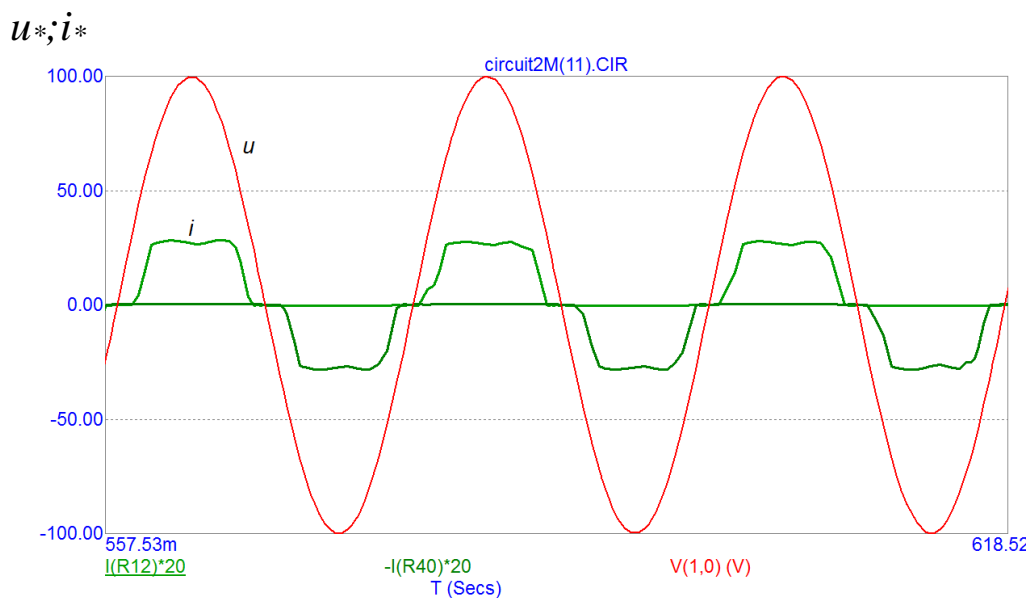


Рисунок 2 - Напряга і струм фази перетворювального трансформатора.

Результати розрахунку активних потужностей окремих елементів перетворювальної системи і потужності навантаження у зазначеному вище режимі представлено у табл. 1.

Таблиця 1 - Баланс активних потужностей

Режим	Активна потужність			
	Трансформаторний блок (ТБ)		(ВБ)	(Н)
	(МО)	(ВО)		
1	0.3159*3	0.1580*6	0.1580*6	0.9478

З наведених у табл. 1 даних випливає, що за умови нехтування утратами активної енергії у окремих елементах перетворювальної системи і ошиновці, баланс активних потужностей сходиться ідеально: сумарна потужність мережевих обмоток перетворювального трансформатора дорівнює сумарній потужності його вентильних обмоток, яка, в свою чергу, дорівнює сумарній активній потужності вентильного блоку, що дорівнює потужності навантаження.

Стосовно активної енергії перетворювальна система здійснює її транспорт на першій гармоніці по шляху МЕРЕЖА → ТБ → ВБ, а потім, перетворивши, у вигляді енергії постійного струму передає у навантаження, де вона і споживається.

Усі дані, необхідні для аналізу РЕЖИМУ 1 наведено у табл. 2 і табл. 3.

Таблиця 2 - Дані для аналізу режиму 1

Первинна (мережева) обмотка перетворювального трансформатора (МО)						
К	Струм		Напруга		Потужність	
	A1	$\psi_1$	A2	$\psi_2$	P	Q
1	1.0945	11.3225	0.5773	10.4111	0.3159	-0.0050
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-0.1824	55.6247	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	-0.1077	76.2326	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	-0.0369	-71.7760	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-

Як бачимо, струм первинної обмотки перетворювального трансформатора має стандартний гармонічний склад, який відповідає шестипульсному режиму перетворення енергії. Оскільки напруга мережі живлення вважається синусоїдною, то активна потужність фази МО перетворювального трансформатора є потужністю лише першої гармоніки.

Таблиця 3 - Дані для аналізу режиму 1

К	Струм		Вентильна обмотка (ВО)				Вентильний блок (ВБ)			
			Напруга		Потужність		Напруга		Потужність	
	A1	$\psi_1$	A2	$\psi_2$	P	Q	A3	$\psi_3$	P	Q
1	0.5473	1.322	0.5893	-0.2562	0.158	-0.0324	0.5893	-0.239	0.158	-0.0323
2	0.2676	-67.40	-	-	-	-	0.2406	22.606	-	0.0322
3	-	-	-	-	-	-	0.2084	86.423	-	-
4	0.1222	-45.18	-	-	-	-	0.0550	44.833	-	0.0034
5	-0.0912	55.62	-0.0909	-34.1217	-	-0.0041	-0.0910	-34.193	-	-0.0042
6	-	-	-	-	-	-	0.0583	28.595	-	-
7	-0.0538	76.23	-0.0752	-13.3991	-	-0.0020	-0.0753	-13.504	-	-0.0020
8	-0.0416	-4.237	-	-	-	-	-0.0094	85.734	-	0.0002
9	-	-	-	-	-	-	0.0228	-79.264	-	-
10	-0.0244	12.14	-	-	-	-	0.0044	-77.892	-	0.0001
11	-0.0184	-71.77	0.0406	18.5354	-	-0.0004	0.0406	18.732	-	-0.0004
12	-	-	-	-	-	-	-0.0247	-4.310	-	-

Як впливає з даних табл. 3, струм вторинної (вентильної) обмотки перетворювального трансформатора містить усі гармоніки, окрім кратних трьом. Напруга вентильної обмотки, окрім першої гармоніки, містить канонічні гармоніки шестипульсного режиму перетворення, які обумовлені наявністю індуктивності у контурі комутації і за своєю сутністю є комутаційною напругою. Разом з тим, активна потужність вентильної обмотки перетворювального трансформатора є потужністю лише першої гармоніки. Для усіх інших гармонік, кут зсуву за фазою, розрахований як різниця між початковими фазами напруги вентильної обмотки і її струму, близький до  $\pm 90^\circ$ .

Те ж саме стосується і розрахунку активної потужності вентильного блоку. Його активна потужність також є потужністю лише першої гармоніки. З даних табл. 3 видно, що крива напруги ВБ містить усі гармоніки, а його струм - гармоніки шестипульсного режиму перетворення енергії. Однак, для усіх гармонік, крім першої, кут зсуву за фазою, розрахований як різниця між початковими фазами напруги ВБ і його струму, близький до  $\pm 90^\circ$ .

**Баланс реактивної потужності.** Навантаження у явному вигляді в балансі реактивної потужності "участі" не приймає. Джерелом реактивної енергії є конденсаторна батарея компенсуючого модуля.

Як і при складанні балансу активної потужності, наведемо дані дослідження режиму роботи компенсаційної перетворювальної системи, застосовуючи метод гармонічного аналізу.

Дослідження показують, що струм і напруга конденсаторної батареї за формою відрізняється від синусоїди, тому компенсуючий модуль генерує реактивну енергію на різних гармоніках.

Для діодної нульової компенсаційної перетворювальної системи (рис. 1) такими гармоніками є 2-а, 4-а, 8-а, 10-а, 14-а ... тощо. Враховуючи викладене, баланс реактивних потужностей компенсаційних перетворювальних систем по

шляху КМ → ВБ → ТБ → МЕРЕЖА у досліджуваному режиму роботи виглядає так.

Таблиця 4 - Баланс реактивних потужностей

К	Реактивна потужність				
	КМ	ВБ	РПК	ТБ	
				ВО	МО
1	-	-0.0323	-0.0299	-0.0324	-0.0050
2	-0.0644	0.0322	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-0.0067	0.0034	-	-	-
5	-	-0.0042	-0.0042	-0.0042	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-0.0002	-0.0020	-0.0020	-
8	-0.0004	0.0002	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-0.0001	0.0001	-	-	-
11	-	-0.0004	-0.0004	-0.0004	-
12	-	-	-	-	-

Зіставивши величини реактивних потужностей елементів перетворювальної системи на окремих гармоніках доходимо наступних висновків.

Конденсаторна батарея генерує реактивну енергію, в основному, на другій гармоніці, оскільки вона має подвоєну, порівняно з мережею живлення, частоту.

Потужності окремих гармонік конденсаторної батареї строго дорівнюють на тих же гармоніках потужності ВБ, але мають протилежний знак, що свідчить про те, що уся реактивна енергія, яка генерується конденсаторною батареєю, потрапляє у вентильний блок.

Вентильний блок віддає реактивну енергію на основних гармоніках шестипульсного режиму перетворення, тобто не на тих, на яких її отримує.

Потужність вищих гармонік КМ через ВБ використовується для компенсації реактивної потужності комутації (РПК) на відповідних гармоніках і потужності зсуву.

Рівність між сумарною енергією, яка поступає від КМ у вентильний блок і віддається останнім, спостерігається не завжди. Тому для кількісної оцінки цього процесу введено коефіцієнт використання компенсуючого модуля ( $K_{\text{вик}}$ ), який за своїм фізичним змістом є режимним коефіцієнтом і розраховується як відношення реактивної потужності, яка віддається, до реактивної потужності, що приймається. Для РЕЖИМУ 1, який розглядається, цей коефіцієнт дорівнює 1.033, що свідчить про ефективне використання конденсаторної батареї КМ.

Якщо від реактивної потужності першої гармоніки ВО відняти потужність першої гармоніки комутаційної напруги, залишиться та потужність, яка

відповідає енергії, що генерується перетворювальною системою у мережу живлення.

**Висновки.** 1. Найбільш висока ефективність використання комутуючих конденсаторів компенсаційної перетворювальної системи досягається у тому випадку, коли вузол комутації є складовою перетворювальної системи і конструктивно максимально наближений до вентиляного блоку.

2. Якщо вентиляний блок отримує реактивну енергію на більш високих частотах, ніж віддає, у компенсаційній перетворювальній системі з'являються умови для генерування додаткової реактивної енергії.

3. Можливість генерації додаткової реактивної енергії не слід приписувати будь-якому одному елементу системи, наприклад, вентиляному блоку чи конденсаторній батареї. Це - властивість перетворювальної системи в цілому. Конденсаторна батарея настільки ж суттєво впливає на роботу вентиляного блоку, як і останній на роботу конденсаторної батареї.

#### Перелік посилань

1. Тонкаль В. Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. Баланс энергий в электрических цепях. – К.: Наук. Думка, 1992. – 312 с.

2. Домнин И. Ф., Жемеров Г. Г., Крылов Д. С., Сокол Е. И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники // Техн. электродинамика. Темат. выпуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч. 1. – С. 80–91

3. Бойко В.С. Преобразовательные системы с одноступенчатой емкостной коммутацией: Автореф. дис. д. т. н.:05.09.12 / Ин-т электродинамики АН Украины. – К., 1993. – 38 с.

4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 424 с., ил.

5. Бойко В.С., Сотник Н.И., Шуляк А.А. Сложная коммутация в компенсационных преобразовательных системах // Техн. электродинамика. - 2001. - №2. - С. 30-35.

6. Бойко В.С., Гладкий В.Н., Потяженко И.А., Сотник Н.И., Бойко В.В. Расчет углов регулирования и коммутации в сложных компенсационных преобразовательных системах // Техн. электродинамика. - 2001. - №3. - С. 33-38.