

# ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС У НУЛЬОВІЙ ШЕСТИПУЛЬСНІЙ ДЮДНІЙ КОМПЕНСАЦІЙНІЙ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ У РЕЖИМІ ГЕНЕРУВАННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Бойко В.С., д.т.н., проф., Шуляк А.А., ст. викл.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки*

**Коломієць М.В., студентка**

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

**Вступ.** Компенсаційні перетворювальні системи відносяться до класу перетворювальних пристроїв силової електроніки, які поряд з функцією перетворення параметрів електричної енергії в режимі випрямлення або інвертування здатні компенсувати власну реактивну потужність, а у разі необхідності, генерувати реактивну потужність у мережу живлення. Залежно від рівня вихідної напруги такі перетворюючі пристрої можуть бути реалізовані на базі нульовий або каскадної схеми.

Усі компенсаційні перетворюючі системи працюють в режимі одноступінчатої ємнісної комутації. Тому в їх склад обов'язково входить комутуюча ланка. В перетворювальних системах нульового типу вона складається з трифазного зрівноважувального реактора і трифазної батареї комутуючих конденсаторів.

Залежно від технічних характеристик елементів комутуючої ланки та умов перезаряду комутуючих конденсаторів, залежить ефективність використання останніх.

**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.** Схема досліджуваної нульової шестипульсної компенсаційної перетворювальної системи наведена на рис. 1. Її основними складовими є:

- 1 - ТБ - трансформаторний блок з мережевою (МО) та вентиляними (ВО) обмотками;

- 2 - ВБ - вентиляний блок, який складається з двох трифазних вентиляних груп;

- 3 і 4 - КМ - компенсуючий модуль, або комутуюча ланка, що складається з трифазної батареї конденсаторів і трифазного зрівноважувального реактора;

- Н - навантаження, яке підключається до вихідних затискачів перетворювальної системи

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

$$2x_{\gamma} \frac{di_k}{d\vartheta} - u_c = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi) \quad (1)$$

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

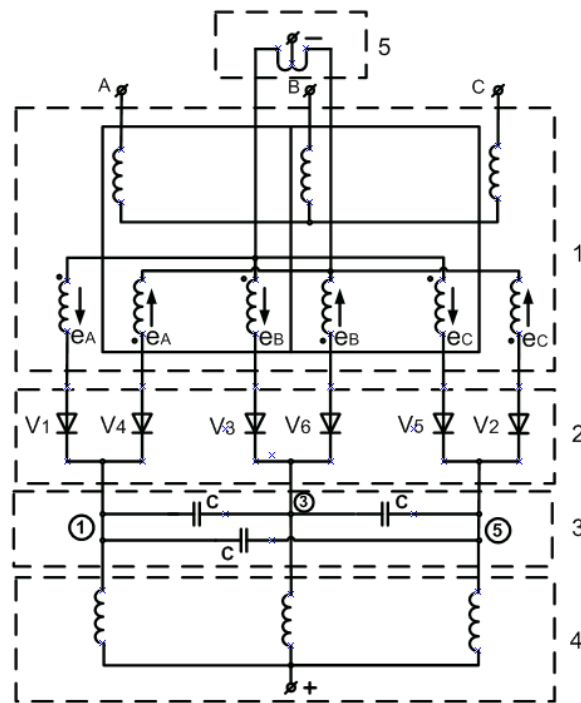


Рисунок 1 - Схема шестипульсової нульової компенсаційної перетворювальної системи

Розв'язок рівняння (1) відносно струму комутації наведено у [2] і після переведення у відносні одиниці має вигляд:

$$i_{k*} = 0.5 + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_0^2 - 1)} - \left(0.5 + \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_0^2 - 1)}\right) \cos \omega_0 \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_0 x_{\gamma*}(\omega_0^2 - 1)} \sin \omega_0 \vartheta, \quad (2)$$

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.

З урахуванням послідовності вступу вентилів у роботу і протяжності комутаційного процесу, струм фази конденсаторної батареї, з'єднаної трикутником, має на періоді шість характерних ділянок. Стільки ж ділянок буде і у кривій комутуючої напруги конденсаторів, яка розраховується за наступним співвідношенням:

$$u_{CA*} = 1.5 \omega_0 x_{\gamma*} \int_0^{\vartheta} i_{C*} d\vartheta + u_C(0)* \quad (3)$$

Форму кривої комутуючої напруги у досліджуваному режимі, отриману при моделюванні останнього у пакеті схемотехнічного моделювання Місто Сар, наведено на рис. 2.

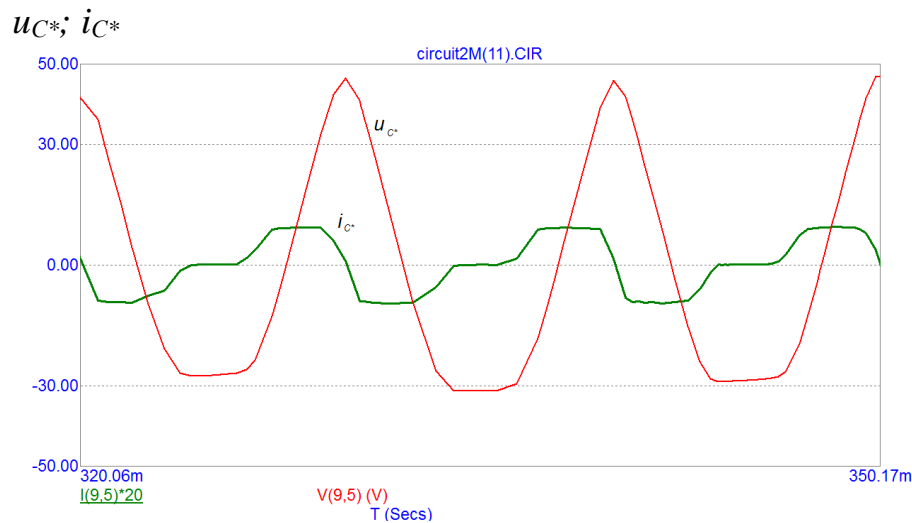


Рисунок 2 - Струм і напруга фази конденсаторів комутуючого модуля

**Баланс активної потужності.** Перетворювальна система живиться від промислової мережі енергопостачання з частотою 50 Гц.. Методика розрахунку активних і реактивних (чи неактивних) потужностей усіх елементів перетворювальної системи спирається на гармонічний аналіз кривих струмів і напруг.

Режим генерування максимальної реактивної енергії [3,4,5] (умовно назвемо його РЕЖИМ 3) у діодній перетворювальній системі за нульовою схемою має наступну характеристику:  $x_{\gamma^*} = 0.1$ ,  $\omega_{0^*} = 5$ ,  $\alpha = 36.59^\circ$ ,  $\gamma = 20.06^\circ$ . Його дослідження здійснено у пакеті схемотехнічного моделювання Micro Cap. На рис. 3 наведено криві струму і напруги фази перетворювального трансформатора, які підтверджують зсув кривої струму відносно напруги у бік випередження.

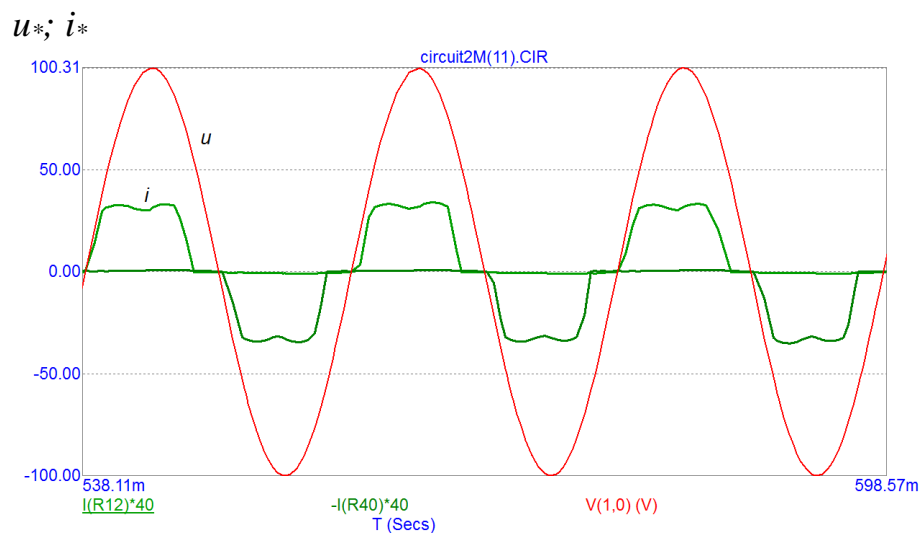


Рисунок 3 - Струм і напруга фази перетворювального трансформатора

Результати розрахунку активних потужностей окремих елементів перетворювальної системи і потужності навантаження у режимі генерування максимальної реактивної енергії зведено у табл. 1.

Таблиця 1 - Баланс активних потужностей

Режим	Активна потужність			
	Трансформаторний блок (ТБ)		(ВБ)	(Н)
	(МО)	(ВО)		
3	0.2899*3	0.1449*6	0.1449*6	0.8697

З наведених у табл. 1 даних випливає, баланс активних потужностей має місце. Активна потужність трьох мережевих обмоток перетворювального трансформатора дорівнює потужності шести його вентиляльних обмоток, потужність яких дорівнює активній потужності вентилів, а сумарна активна потужність останніх дорівнює потужності навантаження.

При складанні балансу активних потужностей перетворювальної системи використані дані табл. 2 і табл. 3.

Таблиця 2 - Дані для аналізу режиму 3

Первинна (мережева) обмотка перетворювального трансформатора (МО)						
К	Струм		Напруга		Потужність	
	A1	$\psi_1$	A2	$\psi_2$	P	Q
1	1.0988	17.3254	0.5773	-6.5884	0.2900	-0.1286
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-0.2018	86.3448	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	0.1320	-59.5450	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	-0.0638	6.8942	-	-	-	-
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.

Як випливає з даних табл. 3, активна потужність вентиляльної обмотки перетворювального трансформатора також є потужністю лише першої гармоніки. Для усіх інших гармонік, кут зсуву за фазою, розрахований як різниця між початковими фазами напруги вентиляльної обмотки і її струму, близький до  $\pm 90^\circ$ . Те ж саме стосується і розрахунку активної потужності вентиляльного блоку.

**Баланс реактивної потужності.** Як видно з рис. 2, струм і напруга конденсаторної батареї за формою відрізняється від синусоїди. Комутуюча

напруга конденсаторів має частоту удвічі більшу, ніж частота мережі живлення. Тому у досліджуваній діодній нульовій компенсаційній перетворювальній системі (рис. 1) компенсуючий модуль генерує реактивну енергію на гармоніках: 2-ій, 4-ій, 8-ій, 10-ій, 14-ій ... тощо. Враховуючи викладене, баланс реактивних потужностей компенсаційної перетворювальної системи по шляху від комутуючої ланки (КМ) через вентиляльний блок (ВБ) і перетворювальний трансформатор (ТБ) у мережу живлення у режимі генерування максимальної реактивної енергії представлено у табл. 4.

Таблиця 3 - Дані для аналізу режиму 3

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	0.5494	17.3255	0.6018	-11.3988	0.1450	-0.0794	0.6018	-11.4051	0.145	-0.0795
2	0.2718	-55.3625	-	-	-	-	0.3398	34.6422	0	0.0462
3	-	-	-	-	-	-	0.2734	76.5318	-	-
4	0.1302	-20.8371	-	-	-	-	0.0814	69.1788	-	0.0053
5	-0.1009	86.3452	-0.0507	-3.9328	-	-0.0026	-0.0507	-3.8264	-	-0.0026
6	-	-	-	-	-	-	0.0431	14.4532	-	-
7	0.0660	-59.5445	-0.0463	30.1135	-	-0.0015	-0.0464	30.2105	-	-0.0015
8	-0.0546	47.3371	-	-	-	-	0.0171	-42.6724	-	0.0005
9	-	-	-	-	-	-	0.0264	-63.6273	-	-
10	-0.0381	80.5992	-	-	-	-	0.0095	-9.3816	-	0.0002
11	-0.0319	6.8950	-0.0353	-83.5226	-	-0.0006	-0.0352	-83.4967	-	-0.0006
12	-	-	-	-	-	-	0.0164	-9.2267	-	-

Як бачимо, основна генерація реактивної енергії конденсаторною батареєю здійснюється на другій гармоніці. Уся реактивна енергія, яка генерується конденсаторною батареєю, потрапляє у вентиляльний блок. Це впливає з того, що реактивні потужності окремих гармонік конденсаторної батареї дорівнюють на тих же гармоніках потужності вентиляльного блоку, але мають протилежний знак.

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.

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.

Коефіцієнт використання конденсаторів компенсуючого модуля ( $K_{\text{вик}}$ ), розраховується як відношення реактивної потужності, яка віддається, до реактивної потужності, що приймається вентиляльним блоком. Для режиму

генерації максимальної реактивної потужності, який досліджується, він дорівнює 1.613, що свідчить про ефективне використання конденсаторної батареї.

Таблиця 4 - Баланс реактивних потужностей у режимі 3

К	Реактивна потужність				
	КМ	ВБ	РПК	ТБ	
				ВО	МО
1	-	-0.0795	-0.0152	-0.0794	-0.1286
2	-0.0922	0.0462	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-0.0106	0.0053	-	-	-
5	-	-0.0026	-0.0026	-0.0026	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-0.0015	-0.0015	-0.0015	-
8	-0.0009	0.0005	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-0.0004	0.0002	-	-	-
11	-	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-
12	-	-	-	-	-

**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 вентильного блоку.

2. Якщо вентильний 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, вентильному блоку чи конденсаторній батареї. Це - властивість перетворювальної системи в цілому. Конденсаторна батарея настільки ж суттєво впливає на роботу вентильного блоку, як і останній на роботу конденсаторної батареї.

#### Перелік посилань

1. 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.
2. 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.
3. Бойко В.С., Сотник Н.И., Шуляк А.А. Сложная коммутация в компенсационных преобразовательных системах // Техн. электродинамика. - 2001. - №2. - С. 30-35.
4. 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.
5. Лободзинський В. Ю., Мудрик В. І., Довгаль М. О. Дослідження кривих напруги та струму при розряді конденсатора на розімкнену лінію без втрат //Міжнародний науково-технічний журнал" Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики". - 2018. - С. 670-672.