

# ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС У НУЛЬОВІЙ ШЕСТИПУЛЬСНІЙ ТИРИСТОРНІЙ КОМПЕНСАЦІЙНІЙ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

**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 є особливим класом пристроїв силової електроніки, які здатні забезпечити перетворення параметрів електричної енергії при високих техніко-економічних показниках. Пояснюється це наявністю у такій системі ланки комутації та компенсації реактивної потужності, пристрою, який має суттєвий вплив на характер електромагнітних процесів у перетворювальній системі і на її енергетичні характеристики.

До числа найбільш досліджених і відомих за науковими публікаціями відносяться компенсаційні перетворювальні системи, комутуюча ланка (компенсуючий модуль) яких складається з трифазної батареї конденсаторів і трифазного зрівноважувального реактора [1]. Останній, фактично являючись пасивним елементом комутуючої ланки, забезпечує перезаряд комутуючих конденсаторів. При цьому електромагнітні процеси у такій компенсаційній перетворювальній системі істотно ускладнюються за рахунок того, що комутація струму вентилями відбувається не лише під впливом напруги вентильних обмоток перетворювального трансформатора, а ще й за наявності додаткової напруги комутуючих конденсаторів. Силкові вентиля (в досліджуваній системі тиристри) можуть обмежувати випереджаючий кут регулювання, обумовлений напругою комутуючих конденсаторів, який у діодних компенсаційних перетворювальних системах встановлюється вільно.

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

**Результати досліджень.** Схема досліджуваної компенсаційної перетворювальної системи наведена на рис.1. Вона живиться від промислової мережі через перетворювальний трансформатор (ТМ) з однією трифазною первинною обмоткою (МО) і двома вторинними (ВО). ЕРС вторинних обмоток зсунені одна відносно одної на  $180^{\circ}$ . До складу перетворювальної системи також входять дві трифазні групи тиристорів, які складають вентильний блок (ВБ), компенсуючий модуль (КМ), який складається з трифазної батареї конденсаторів та трифазного зрівноважувального реактора і навантаження (Н).

При аналізі прийняті наступні припущення:

- система ЕРС мережі живлення симетрична і синусоїдна;
- вентиля схеми ідеальні;
- активний опір устаткування і ошиновки не враховується;

- струм намагнічування перетворювального трансформатора дорівнює нулю;
- струм у навантаженні ідеально згладжений.

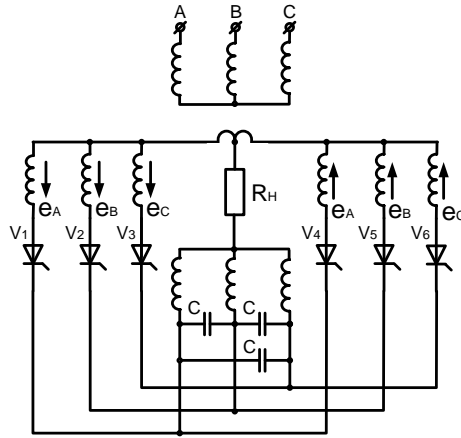


Рисунок 1 - Схема шестипульсної нульової компенсаційної перетворювальної системи

Система трифазних напруг живлення:

$$\begin{aligned}
 e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6 + \psi); \\
 e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2 + \psi); \\
 e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6 + \psi),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $E_m$  - амплітуда вторинної фазної напруги перетворювального трансформатора;  $\vartheta$  - поточна змінна,  $\psi$  - початкова фаза напруги при включенні вентиля.

До контуру комутації досліджуваної перетворювальної системи входять фази перетворювального трансформатора, до яких підключені комутуючі вентиля, самі вентиля і фаза конденсаторної батареї, розташована між вентилями, у яких відбувається комутаційний процес.

З огляду на викладене, для контуру комутації досліджуваної перетворювальної системи, запишемо:

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

де:  $x_\gamma$  - значення індуктивного опору контуру комутації;

$i_k$  - миттєве значення струму комутації.

Напруга фази конденсаторної батареї, з'єднаної трикутником  $u_c$ , розраховується за наступним співвідношенням:

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta i_c d\vartheta + u_c(0)
 \tag{3}$$

Ця крива є несинусоїдною за формою і має частоту, подвоєну [2, 3] порівняно з частотою мережі живлення.

При складанні балансу активних і реактивних потужностей компенсаційної перетворювальної системи застосовано метод гармонічного аналізу.

**Баланс активної потужності.** Дослідимо електромагнітний процес у шестипульсній нульовій тиристорній компенсаційній перетворювальній системі. Режим роботи системи (умовно назвемо його РЕЖИМ 2) характеризується затримкою комутації [4, 5]. і має наступну характеристику:  $x_{\gamma^*} = 0.2$ ,  $\omega_{0^*} = 3$ ,  $\alpha_0 = 10^0$ ,  $\gamma = 21.61^0$

Результати розрахунку активної потужності окремих елементів перетворювальної системи і потужності навантаження зведено у табл. 1.

Таблиця 1 - Баланс активних потужностей у режимі 2

Режим	Активна потужність			
	Трансформаторний блок (ТБ)		(ВБ)	(Н)
	(МО)	(ВО)		
1	0.3163*3	0.1582*6	0.1582*6	0.9489

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.

А дані, наведені у табл. 2 і табл. 3, свідчать про те, що активні потужності усіх елементів досліджуваної компенсаційної перетворювальної системи, є потужностями першої гармоніки.

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.

Баланс активних потужностей сходиться.

Для тиристорної (як і 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 досліджуваної компенсаційної перетворювальної системи по шляху КМ → ВБ → ТБ → МЕРЕЖА виглядає так.

РЕЖИМ 2. Його дані такі ж, як і при складанні балансу активної потужності. Величини реактивних потужностей окремих елементів КПС наведено у табл. 4.

Таблиця 2 - Дані для аналізу режиму 2

Первинна (мережева) обмотка перетворювального трансформатора (МО)						
К	Струм		Напруга		Потужність	
	A1	$\psi 1$	A2	$\psi 2$	P	Q
1	1.0968	17.7311	0.5773	19.9755	0.3163	0.0124
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	-0.1924	88.2928	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	-0.1197	-56.9777	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	-0.0481	9.3992	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-

Таблиця 3 - Дані для аналізу режиму 2

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	0.5484				0.1582	-0.0239			0.158	-
2	0.2698	17.7312	0.583	9.1523	-	-	0.5834	9.1462	2	0.0239
3	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-
4	0.1264	54.5547	-	-	-	-	0.2428	35.3785	-	0.0328
5	-0.0962	-	-	-	-	-0.0046	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	0.2265	70.2819	-	-
7	0.0599	19.2518	-	1.7057	-	-0.0025	-	-	-	0.0036
8	-0.0479		0.096	-	-	-	0.0566	70.8293	-	-
9	-	88.2932	3	32.999	-	-	-	-	-	0.0046
10	-0.0305	-	-	7	-	-	0.0963	1.6516	-	-
11	-0.0240	-	-	-	-	-0.0006	-	-	-	-
12	-	56.9772	0.083	-	-	-	0.0681	76.7052	-	0.0025
12			9	-			-	-	-	
		50.1210	-	-			0.0840	33.0493		0.0003
		-	-	80.718			-	-		-
		-	-	8			0.0111	40.4592		-
		83.4322	-	-			0.0213	4.2353		0.0001
		9.4000	0.052	-			0.0213	4.2353	-	-
		-	8	-			-	-		0.0006
			-	-			0.0054	9.6293		-
							-	-		
							0.0527	80.6982		
							-	-		
							0.0216	74.6904		

### **Баланс реактивної потужності.**

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

Таблиця 4 - Баланс реактивних потужностей у режимі 2

К	Реактивна потужність				
	КМ	ВБ	РПК	ТБ	
				ВО	МО
1	-	-0.0239	-0.0301	-0.0239	0.0124
2	-0.0654	0.0328	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-0.0072	0.0036	-	-	-
5	-	-0.0046	-0.0046	-0.0046	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-
8	-0.0005	0.0003	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-0.0002	0.0001	-	-	-
11	-	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-
12	-	-	-	-	-

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

Конденсаторна батарея генерує реактивну енергію, в основному, на другій гармоніці.

Потужності окремих гармонік конденсаторної батареї строго дорівнюють на тих же гармоніках потужності ВБ, але мають протилежний знак, що свідчить про те, що при тиристорній реалізації перетворювальної системи 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.

Разом з тим, дані табл.4 показують, що потужності конденсаторів компенсуючого модуля недостатньо для компенсації реактивної потужності комутації по першій гармоніці ( $Q_{ВБ*} = - 0.0239$ , а  $Q_{РПК*} = -0.0301$ ). Тож недостатня для зазначеного процесу енергія поступає із мережі живлення. Необхідна при цьому реактивна потужність на фазу, виражена кількісно у відносних одиницях, складає  $(Q_{ВБ*} - Q_{РПК*}) * 2 = 0.0124$ , тобто досліджувана тиристорна компенсаційна перетворювальна система є споживачем реактивної енергії із мережі живлення. За зазначеного режиму роботи генерувати у мережу живлення реактивну енергію перетворювальна система не здатна.

Низьким є і коефіцієнт використання конденсаторів компенсуючого модуля ( $K_{\text{вик}}$ ), який розраховується як відношення реактивної потужності, яка віддається ВБ, до реактивної потужності, що приймається, і дорівнює 0.858.

**Висновки.** 1. Якщо вентиляльний блок отримує реактивну енергію на більш високих частотах, ніж віддає, у компенсаційній перетворювальній системі з'являються умови для генерування додаткової реактивної енергії.

2. Тиристорна реалізація компенсаційної перетворювальної системи має дві сторони. З одного боку з'являється можливість регулювання технологічного процесу, який має місце у навантаженні. З іншого боку, якщо при регулюванні спостерігається обмеження росту випереджаючого кута регулювання вентилів перетворювальної системи, енергетичні показники її робочого режиму погіршуються і компенсаційна система може стати споживачем реактивної енергії із мережі живлення, а не її генератором.

3. Можливість генерації додаткової реактивної енергії не слід приписувати будь-якому одному елементу системи, наприклад, вентиляльному блоку чи конденсаторній батареї. Це - властивість перетворювальної системи в цілому. Конденсаторна батарея настільки ж суттєво впливає на роботу вентиляльного 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., Сотник Н.И., Шуляк А.А. Сложная коммутация в компенсационных преобразовательных системах // Техн. электродинамика. - 2001. - №2. - С. 30-35.

3. 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.

4. 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.

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.