

РОЗДІЛ 8. ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ КОМУТУЮЧОЇ ЛАНКИ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Бойко В.С., д.т.н., проф., Шкардун О.В., PhD, асистент, Клочков І.О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Для того, щоб будь-який перетворювач електричної енергії перевести у компенсаційний режим роботи, потрібно здійснити його модернізацію таким чином, щоб при цьому змінився характер комутації струму силовими електричними вентилями. Це досягається застосуванням різних технічних рішень.

Наприклад, у компенсаційних перетворювачах попереднього покоління, розроблених у Київському політехнічному інституті, таким технічним рішенням було застосування комутуючої ланки, яка складалася з трифазної конденсаторної батареї і трифазного зрівноважувального реактора (ТЗР). Приклад такого технічного рішення наведено на рис. 1.

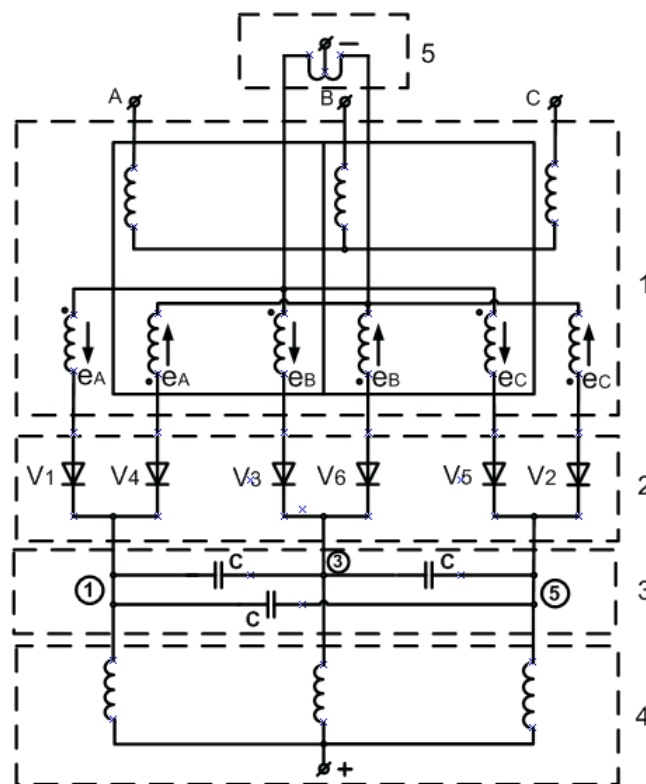


Рисунок 1 – Схема шестипульсного нульового компенсаційного випрямляча

Шестипульсний нульовий перетворювач складається з перетворювального трансформатора – 1, силових електричних вентилів – 2, батареї комутуючих

конденсаторів – 3, трифазного зрівноважувального реактора – 4, двофазного зрівноважувального реактора – 5.

Трифазний зрівноважувальний реактор виконував функцію поділу випрямленого струму на три однакові частини, забезпечуючи тим самим перезаряд конденсаторної батареї. Її напруга (комутуюча напруга), накладаючись на напругу силових електричних вентилів, створювала умови випереджаючої комутації струму цими вентилями.

Недоліком такого технічного рішення, яке застосовувалось і при переводі подібним чином інших схем у компенсаційний режим, була відсутність можливості регулювати величину і форму комутуючої напруги, оскільки ТЗР був пасивним елементом комутуючої ланки.

У компенсаційних перетворювачах нового покоління замість ТЗР застосовується трифазна група повністю керованих приладів [1, 2]. Приклад такого технічного рішення, стосовно трифазного мостового перетворювача за схемою Ларіонова, наведено на рис. 2.

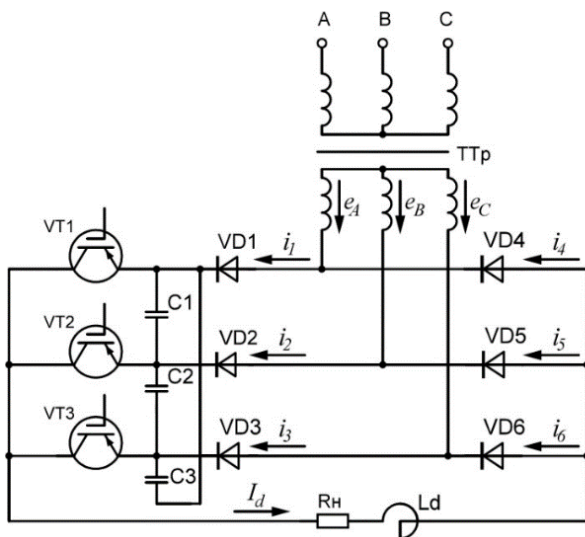


Рисунок 2 – Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою

У наведеній на рис. 2 схемі комутуюча ланка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи IGBT. Застосування останніх надає перетворювачу додаткових властивостей. А саме, з'являється можливість регулювати величину і форму комутуючої напруги, що, в свою чергу, дозволяє регулювати основні енергетичні характеристики, які залежать від кута комутації γ і випереджаючого кута регулювання α .

Але зміст поточної публікації присвячено не дослідженню процесу регулювання останніх, а тому процесу, який є супутнім. Застосування IGBT у комутуючій ланці створює можливість підвищення ефективності використання конденсаторів комутуючої ланки за рахунок вибору оптимального режиму керування транзисторами, відповідно до робочого режиму перетворювача.

Мета роботи. На прикладі трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою довести можливість підвищення

ефективності використання конденсаторів комутуючої ланки, застосовуючи результати схмотехнічного моделювання одного із робочих режимів досліджуваного перетворювача.

Результати досліджень. Вирішення завдання, сформульованого у меті роботи, здійснено із застосуванням схмотехнічної моделі трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою. Схема схмотехнічної моделі, побудованої у пакеті Мікро Сар, із зазначенням параметрів елементів моделі, зображена на рис. 3.

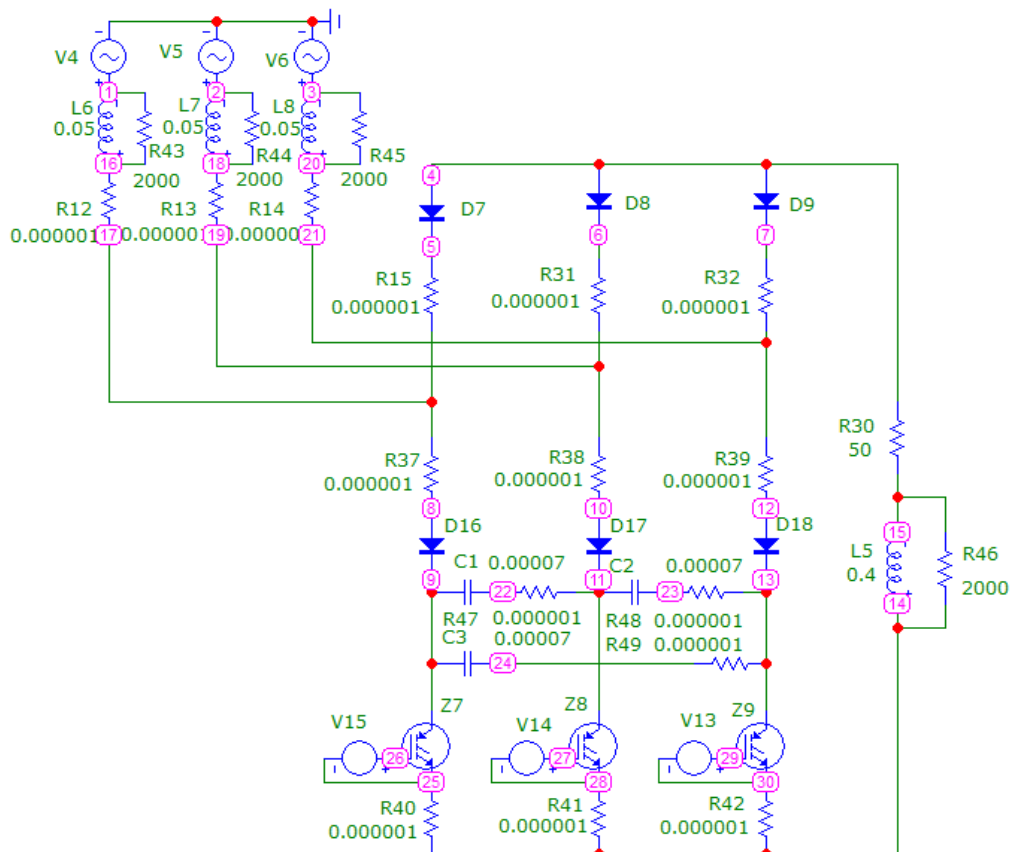


Рисунок 3 – Схмотехнічна модель трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою

Як і сам досліджуваний компенсаційний перетворювач, його схмотехнічна модель містить у своєму складі наступні елементи.

1. *Перетворювальний трифазний трансформатор.* Ним моделюється трифазна система ЕРС прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= 100\sin(\vartheta + 0.523); \\ e_B &= 100\sin(\vartheta - 1.57); \\ e_C &= 100\sin(\vartheta + 2.618). \end{aligned} \quad (1)$$

Як бачимо, амплітудне значення фазної ЕРС трансформатора дорівнює 100 В.

Приведене значення індуктивності кола змінного струму по фазам моделюється елементами L6, L7, L8, числове значення яких однакове і дорівнює 0.05 Гн.

2. *Дві трифазні групи силових електричних вентилів.* Елементи D7, D8 та D9 моделюють трифазну групу силових електричних вентилів анодної групи. Вони працюють у звичайному (некомпенсаційному) режимі.

Елементи D16, D17 та D18 моделюють трифазну групу силових електричних вентилів катодної групи, які працюють у компенсаційному режимі.

Усі вони є діодами типу MPN3700. Їх характеристика запозичена з бібліотеки компонентів.

3. *Трифазна конденсаторна батарея.* Ємність усіх фаз батареї (C) однакова. У базовому режимі роботи дорівнює 0.00007 Ф. Числові значення ємності у інших режимах залежить від необхідного значення власної частоти контуру комутації.

4. *Трифазна група транзисторів IGBT.* У моделі використана характеристика транзисторів IGBT з бібліотеки компонентів типу IXGT40N60C2.

5. *Джерела для формування імпульсів керування.* Ці джерела застосовуються для формування імпульсів керування IGBT комутуючої ланки. Вони реалізовані компонентом «PULSE SOURCE» і генерують імпульси практично прямокутної форми з амплітудою 8 В.

6. *Коло навантаження моделі.* Складається з активного опору R30 величиною 50 Ом і згладжуючого дроселя L5 індуктивністю 0.4 Гн.

7. *Опори R.* Опори R, які моделюють опір ошиновки реального перетворювача, мають величину 0.000001 Ом. Величина вибрана з умови, що при теоретичних дослідженнях опорами ошиновки взагалі нехтують. Опори R, підключені паралельно елементам моделі з метою усунення паразитних високочастотних коливань перехідного процесу, мають величину 2000 Ом.

Методика дослідження основного питання публікації полягає у наступному. Установлюються параметри елементів моделі, відповідно даних робочого режиму, що моделюється. Результати моделювання представляються у графічній формі і необхідні для аналізу дані роздруковуються. З аналізу даних моделювання робиться висновок щодо питання, яке досліджується.

Змоделюємо базовий режим. За зазначених числових даних цього режиму, наведених вище, власна частота контуру комутації згідно [3], для процесу регулювання транзисторами комутуючої ланки у межах своєї чи наступної фази, складає:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_\gamma C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.005 \cdot 0.00007}} = 975.9 \text{ рад}.$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 975.9 / 314 = 3.1$.

Комутуюча напруга є найважливішою характеристикою електромагнітного і енергетичного процесу компенсаційного перетворювача електричної енергії. Її величина і форма залежить від низки факторів: величини випрямленого струму перетворювача, ємності фази комутуючих конденсаторів

та моменту подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки. Точніше, від величини затримки Θ подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки. Чим більша величина Θ , тим більша комутуюча напруга.

На рис. 4 представлені результати моделювання електромагнітного процесу у базовому режимі за наступних характеристик зазначеного режиму: $\omega_{0*} = 3.1$, $\theta = 1.6$, $C = 0.000070$.

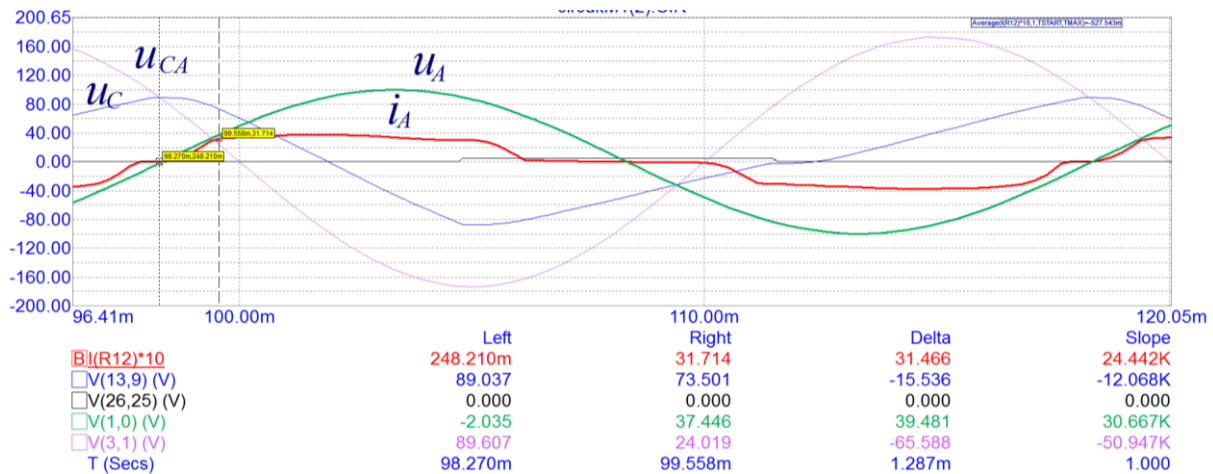


Рисунок 4 – Результати моделювання щодо кутів регулювання і комутації силових електричних вентилів катодної групи ($\theta = 1.6$, $C=0.000070$)

Як користуватись інформацією, яку містить рис. 4. На рисунку ліва сплюснена вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу, у який лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівняється з напругою конденсатора.

Числове значення цього моменту – нижній рядок T(Secs) колонки даних під Left. Інші числові дані:

- R(12)*10 – величина випрямленого струму (A), помножена на 10;
- V(13,9)(V) – величина комутуючої напруги конденсаторів u_C (B);
- V(26,25)(V) – імпульс керування транзисторами комутуючої ланки;
- V(1,0)(V) – фазна напруга u_A вторинної обмотки трансформатора (B);
- V(3,1)(V) – лінійна напруга u_{CA} вторинної обмотки трансформатора.

Виходячи з викладеного вище, проаналізуємо дані рис. 4. Комутаційний процес починається в момент переходу кривої лінійної напруги u_{CA} вторинної обмотки перетворювального трансформатора через нульове значення. По осі абсцис це момент часу Left – 98.270m (98.270 мс). Звернімо увагу, що через цю точку проведена сплюснена вертикальна лінія. Через кінцеву точку комутаційного процесу проведена пунктирна вертикальна лінія. По осі абсцис кінцю комутації відповідає момент часу Right – 99.558m (99.558 мс). Різниця часу Delta складає 1.287 мс. Урахувавши, що одній мілісекунді на рисунку відповідають 18° , розрахуємо кут комутації електричних вентилів катодної частини досліджуваного перетворювача: $\gamma = 1.287 \cdot 18 = 23.166^\circ$.

Випереджаючий кут регулювання розрахуємо, виходячи з наступних міркувань. Точкою природної комутації є момент переходу лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора через нульове значення. На рис. 4 – це момент 100.00 мс. Як зазначено вище, у компенсаційному перетворювачі комутація починається раніше, і це є момент часу Left – 98.270m (98.270 мс). Таким чином випереджаючий кут керування у часі дорівнює різниці між зазначеними моментами, тобто 1.73 мс. Урахувавши, що одній мілісекунді відповідають 18° , випереджаючий кут регулювання електричних вентилів катодної частини досліджуваного перетворювача: $\alpha = 1.73 \cdot 18 = 31.14^{\circ}$.

Результати аналізу режиму роботи досліджуваного перетворювача, представлені на рис. 4, занесені до першого рядку табл 1.

Проведені дослідження показали, що такий же результат (з тими ж значеннями кутів регулювання і комутації) можна отримати і при іншому значенні Θ та іншому значенні ємності C фази комутуючих конденсаторів. На рис. 5–7 наведені результати моделювання таких режимів та здійснено їх аналіз.

Результати моделювання, представлені на рис. 4, отримані при $\Theta = 1.6$, $C = 0.000070$ Ф. Зменшимо величину ємності до $C = 0.000052$ Ф. При цьому зміниться власна частота контуру комутації

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_{\gamma}C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.005 \cdot 0.000052}} = 1132.3 \text{ рад.}$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 1132.3 / 314 = 3.6$.

Змінюючи величину затримки подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, організуємо режим роботи з такими ж характеристиками, як і у попередньому базовому режимі. Результати моделювання представлені на рис. 5, а числові значення аналізу занесено до другого рядку табл. 1.

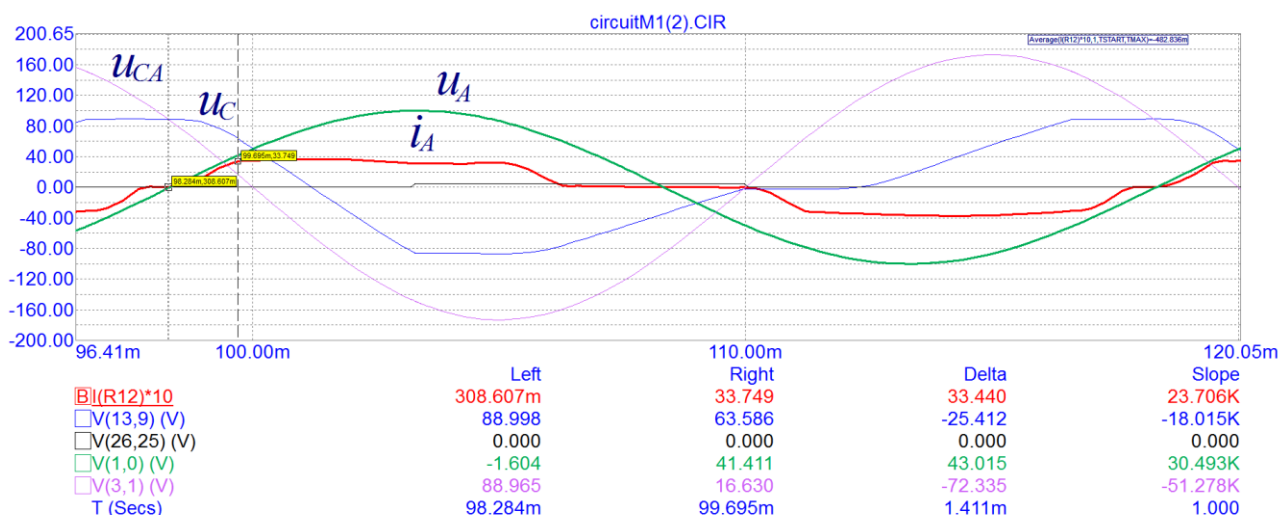


Рисунок 5 – Результати моделювання щодо кутів регулювання і комутації силових електричних вентилів катодної групи ($\Theta = 1.0$, $C=0.000052$ Ф)

Зменшимо ємність фази комутуючих конденсаторів до 0.0000364 Ф. При цьому власна частота контуру комутації набуде значення:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_\gamma C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.005 \cdot 0.0000364}} = 1353.3 \text{ рад}$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 1353.3 / 314 = 4.3$.

Змінюючи величину затримки подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, організуємо режим роботи з такими ж характеристиками, як і у двох попередніх режимах. Результати моделювання представлені на рис. 6, а числові значення аналізу занесено до третього рядку табл. 1.

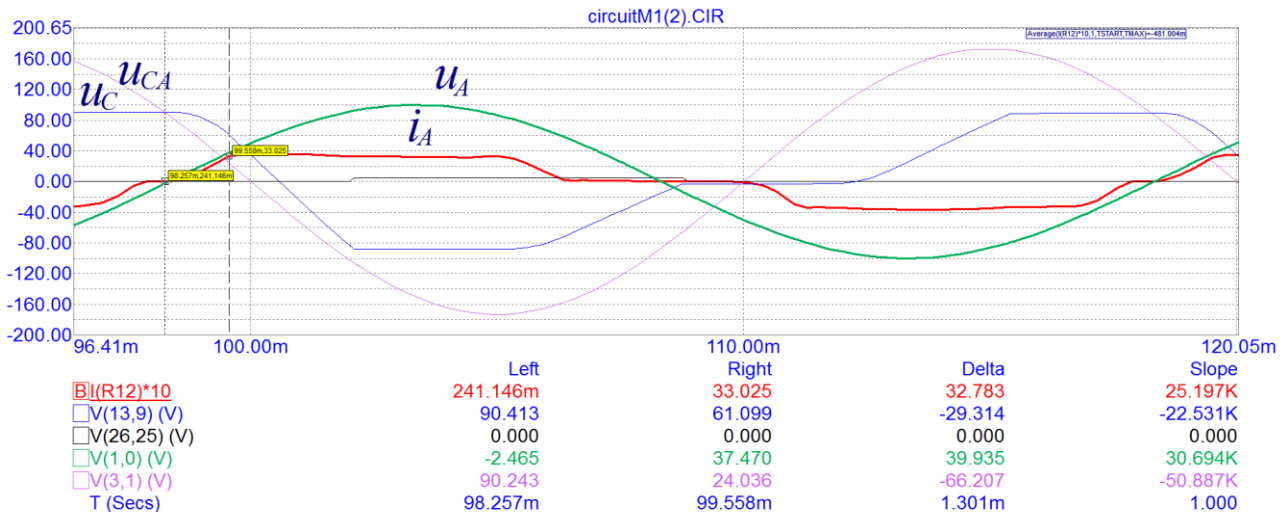


Рисунок 6 – Результати моделювання щодо кутів регулювання і комутації силових електричних вентилів катодної групи ($\Theta = 0.8$, $C = 0.0000364$ Ф)

На рис. 7 представлено результати моделювання режиму роботи перетворювача при ємності фази комутуючих конденсаторів 0.0000240 Ф.

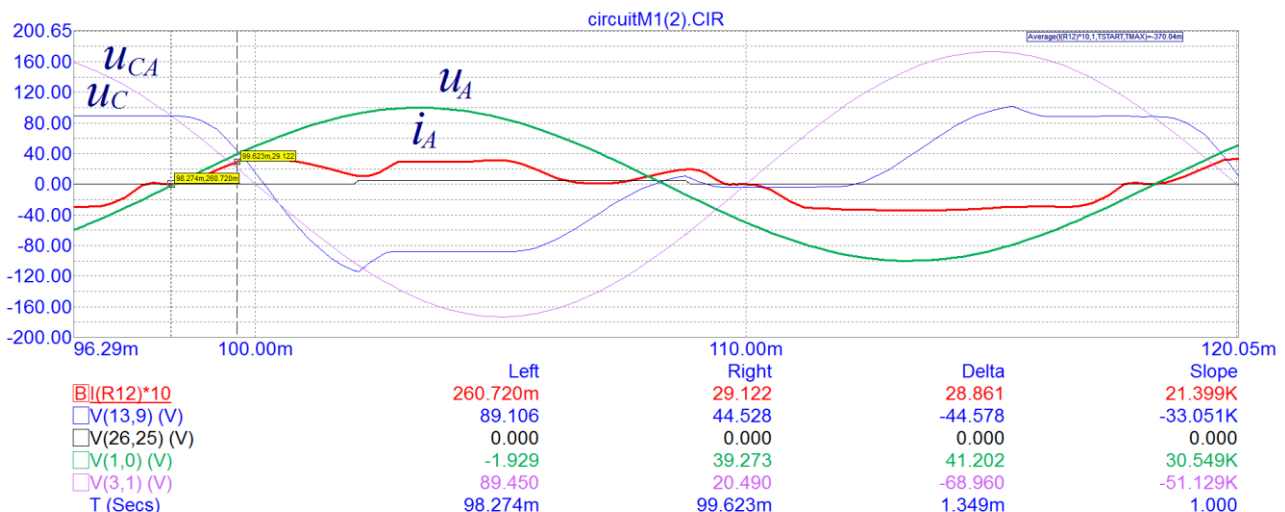


Рисунок 7 – Результати моделювання щодо кутів регулювання і комутації силових електричних вентилів катодної групи ($\Theta = 0.6$, $C = 0.000024$ Ф)

При цьому власна частота контуру комутації набуде значення:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_\gamma C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.005 \cdot 0.000024}} = 1666.6 \text{ рад.}$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 1666.6 / 314 = 5.3$.

Змінюючи величину затримки подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, організуємо режим роботи з такими характеристиками, як і у трьох попередніх режимах. Результати аналізу цього режиму занесені до четвертого рядку табл. 1.

Порівнюючи результати моделювання щодо кутів регулювання і комутації силових електричних вентилів катодної групи, представлені на рис. 4 і рис. 5–7, та числові дані табл. 1, доходимо висновку, що вони практично однакові. Випереджаючий кут регулювання має значення в межах близько 31° , а кут комутації змінюється в межах $23.17^\circ - 23.43^\circ$. Наведені дані є підставою стверджувати, що трифазний мостовий компенсаційний перетворювач в усіх чотирьох досліджуваних режимах здатний генерувати у мережу однакову величину реактивної енергії.

Таблиця 1 – Дані аналізу досліджуваних режимів

	ω_{0*}	C Ф	Θ радіани	α градуси	γ градуси	($K_{\text{эф}}$) відносна ефективність
1	3.1	0.0000700	1.6	31.14	23.17	1
2	3.6	0.0000520	1.0	30.84	23.45	1.346
3	4.3	0.0000364	0.8	31.19	23.43	1.923
4	5.3	0.0000240	0.6	31.07	24.28	–

При цьому максимальне значення напруги на фазах конденсаторної батареї також буде практично однаковим. Дані щодо величини цієї напруги (у вольтах) в чотирьох досліджуваних режимах містяться на рис. 4 – 7 у рядку $V(13,9)(V)$ колонки даних під Left: 89.037 – 88.098 – 90.413 – 89.106.

Урахуємо, що потужність фази конденсаторної батареї залежить від величини напруги та її ємності. Оскільки напруга в усіх чотирьох досліджуваних режимах однакова, потужність фази батареї пропорційна її ємності.

Приймемо потужність фази конденсаторної батареї у базовому режимі ($C = 0.0000700$ Ф) за одиницю. Тоді у режимі 2 ($C = 0.0000520$ Ф) відносне значення потужності складатиме 0.743. У режимі 3 ($C = 0.0000364$) – 0.520, у режимі 4 ($C = 0.0000240$) – 0.343.

Відносна ефективність використання конденсаторної батареї трифазного мостового компенсаційного перетворювача є величиною, оберненою до відносної потужності фази батареї. Числове значення цієї величини ($K_{\text{эф}}$) наведене у табл.

Звернімо увагу на результати дослідження режиму 4 (рис. 7). У цьому режимі, значення випереджаючого кута регулювання і кута комутації приблизно такі ж, як і у трьох попередніх. Але характер електромагнітних процесів – інший. Про це свідчить деформація форми кривих комутаційної напруги і струму силових електричних вентилів. Перетворювач електричної енергії переходить у

інший режим роботи, який у теорії компенсаційних перетворювачів має назву «режим повторної роботи силових електричних вентилів».

Явище повторної роботи напівпровідникових вентилів у компенсаційних перетворювачах відоме. Стосовно перетворювачів попереднього покоління його дослідження було складовою кандидатських дисертацій С.І. Недзельського, Є.А. Кудрі, В.В. Бойка. Ними було доведено, що робота перетворювача у такому режимі має недоліки відносно його енергетичних показників. При дослідженні режиму повторної роботи урахувалась лише величина комутуючої напруги. Про її форму не йшлося, оскільки у тих перетворювачах можливості змінювати форму комутуючої напруги за рахунок елементів комутуючої ланки, не було. Форма комутуючої напруги була відомою, а змінювалась лише її величина.

Дослідження явища повторної роботи не входить до мети поточної публікації. Але цим фактом підкреслюються два важливі положення теорії компенсаційних перетворювачів. По-перше те, що характер електромагнітних процесів у компенсаційному перетворювачі залежить від величини і форми комутуючої напруги. По-друге – підвищення ефективності використання конденсаторної батареї комутуючої ланки компенсаційного перетворювача електричної енергії має свої межі, тобто не може бути будь-яким великим. Як показують результати досліджень авторів публікації, реальною величиною коефіцієнта ефективності комутуючих конденсаторів є $K_{\text{ef}} = 2$.

Висновок. За рахунок застосування регулювання транзисторів комутуючої ланки з метою забезпечення відповідного режиму живлення споживача електричної енергії, є можливість зміни основних енергетичних характеристик компенсаційного перетворювача через зміну величини випереджаючого кута регулювання та кута комутації. Проведеними дослідженнями доведено, що однакові величини кутів регулювання і комутації, а, відповідно, і генерацію необхідних однакових обсягів реактивної енергії, можна отримати при різній потужності конденсаторної батареї комутуючої ланки. Іншими словами, при різній ефективності використання конденсаторної батареї комутуючої ланки. Наведені у публікації дані є підставою для твердження, що підвищення коефіцієнту ефективності використання комутуючих конденсаторів має обмеження, обумовлене зміною характеру електромагнітного процесу. Але реально, за умови правильної організації режиму електроживлення, ефективність використання комутуючих конденсаторів можна підвищити удвічі.

Перелік посилань

1. Патент України на корисну модель "Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач": Патент UA № 142864, МПК H02M 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - у 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.
2. Патент України на корисну модель "Трифазний двомостовий компенсаційний перетворювач паралельного типу": Патент UA № 147874, МПК H02M 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - у 2021 00622. Заявл. 15.02.2021. Опубл. 16.06.2021, Бюл. № 24.
3. Бойко, В. і Шкардун, О. 2023. Електромагнітні процеси у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі. Технічна електродинаміка. 4 (Чер 2023), 026. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>.