

РОЗДІЛ 8. ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

ФОРМУВАННЯ НАПРУГИ НА КЛЮЧАХ КОМУТУЮЧОЇ ЛАНКИ ТРИФАЗНОГО МОСТОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Бойко В.С., д.т.н., проф., Шкардун О.В., аспірант, Линдюк Б.В., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Нове покоління компенсаційних перетворювачів, створення та дослідження яких ведеться у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», містить у своєму складі комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT). Керування цими приладами (ключами комутуючої ланки) виконує дві важливі функції: забезпечує перезаряд конденсаторів з метою створення необхідної величини і форми напруги та регулює технологічний процес енергозабезпечення технологічних споживачів, тобто навантаження перетворювача.

Напруга фази конденсаторної батареї (комутуюча напруга) є однією з найважливіших характеристик електромагнітного процесу будь-якого перетворювача компенсаційного типу. Вона забезпечує високі енергетичні характеристики перетворення електричної енергії і впливає на технічні характеристики його обладнання.

Дослідженню електромагнітних процесів у компенсаційних перетворювачах з IGBT у комутуючій ланці та процесу формування комутуючої напруги присвячено декілька наукових публікацій авторів, основними з яких є [1, 2].

Наукові публікації, наприклад [3, 4], свідчать про зацікавленість інших авторів у розробці перетворювачів з підвищеними енергетичними характеристиками. Мета цих розробок одна, а способи – різні. Технічне рішення, яке досліджується у даній публікації, захищене охоронним документом [5] і передбачає два варіанти реалізації (рис. 1): з однією комутуючою ланкою і з двома.

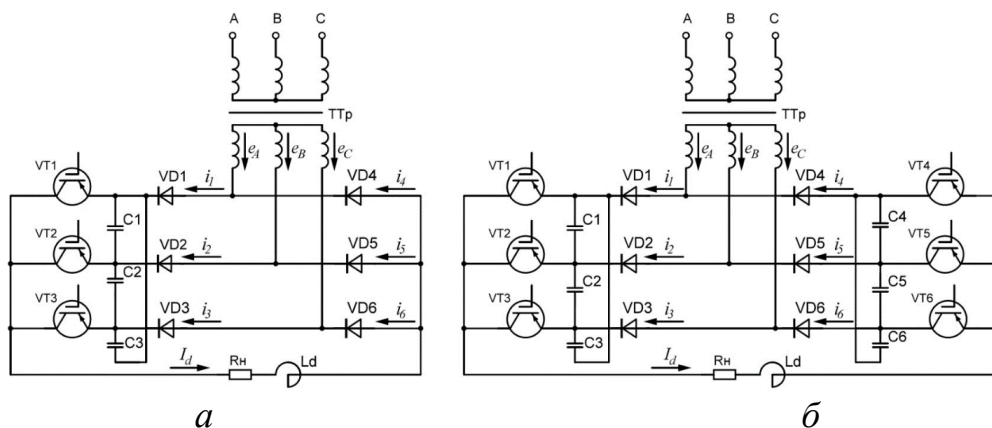


Рисунок 1 – Варіанти схеми трифазного мостового компенсаційного перетворювача

Мета роботи. Отримати дані щодо технічних характеристик транзисторів (IGBT) комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача, шляхом дослідження факторів, що впливають на величину струму і напруги та визначити їх максимальні значення.

Результати досліджень. Досліджуються варіанти трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою (рис. 1, а) і з двома (рис. 1, б).

Умови роботи обох груп силових електричних вентилів перетворювача з двома комутуючими ланками, такі ж, як і силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача з однією комутуючою ланкою. Напруга транзисторів комутуючої ланки створюється напругою комутуючих конденсаторів. Тож на величину і форму напруги транзисторів комутуючої ланки впливають ті ж фактори, що і на комутуючу напругу. Розглянемо їх докладно.

1. Регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюється у межах роботи силових електричних вентилів своєї фази при одинарній частоті (режим 1)

Ураховуючи, що кожний транзистор комутуючої ланки працює протягом третини періоду, їх напруга має 3 інтервали. Розрахуємо і побудуємо криву напруги транзистора VT1, прийнявши за момент початку відліку момент вступу в роботу силового електричного вентиля VD1.

Перша частина I інтервалу: $0 \leq \vartheta \leq \theta$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(I)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = -u_{C3}.$$

II інтервал: $\theta \leq \vartheta \leq (2\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(II)} = 0.$$

III інтервал: $(2\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq (4\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(III)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(III)} = u_{C1}.$$

Друга частина I інтервалу: $(4\pi/3 + \theta \leq \vartheta \leq 2\pi$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(I)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = -u_{C3}.$$

Побудова кривої напруги на транзисторі VT1 через її складові показана на рис. 2.

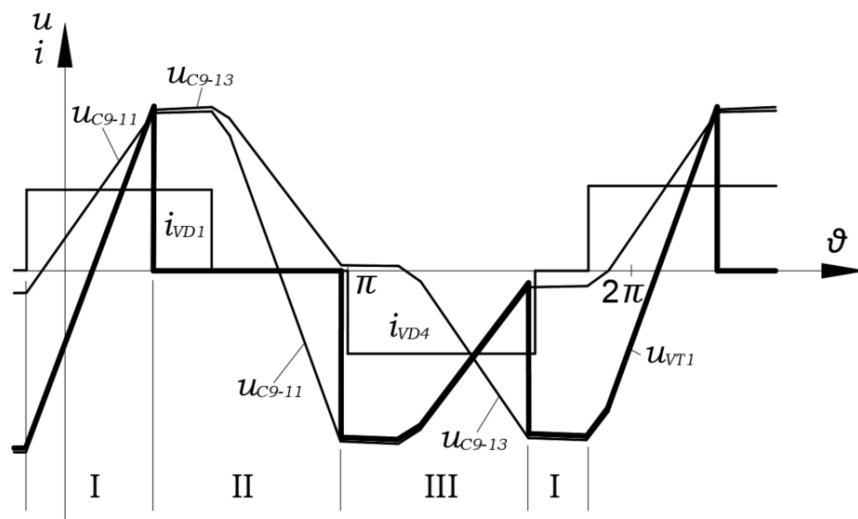


Рисунок 2 – Напруга на транзисторі VT1 і її складові (режим 1)

З розрахунку та кривих рис. 2 випливає, що найбільше значення напруги на транзисторах комутуючої ланки дорівнює напрузі на фазі конденсаторної батареї у момент комутації. Оскільки транзистор працює одну третину періоду і через нього проходить весь випрямлений струм перетворювача, то середнє значення струму транзистора складає третину випрямленого струму.

2. *Регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюється у межах роботи силових електричних вентилів наступної фази при одинарній частоті (режим 2).*

Як і у попередньому випадку розрахуємо і побудуємо криву напруги транзистора VT1, прийнявши за момент початку відліку момент вступу в роботу силового електричного вентиля VD1.

Перша частина I інтервалу: $0 \leq \vartheta \leq \theta$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(I)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = u_{C1}.$$

II інтервал: $\theta \leq \vartheta \leq (2\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(II)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(II)} = -u_{C3}.$$

III інтервал: $(2\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq (4\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(III)} = 0.$$

Друга частина I інтервалу: $(4\pi/3 + \theta \leq \vartheta \leq 2\pi$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(I)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = u_{C1}.$$

Побудова кривої напруги на транзисторі VT1 через її складові показана на рис. 3.

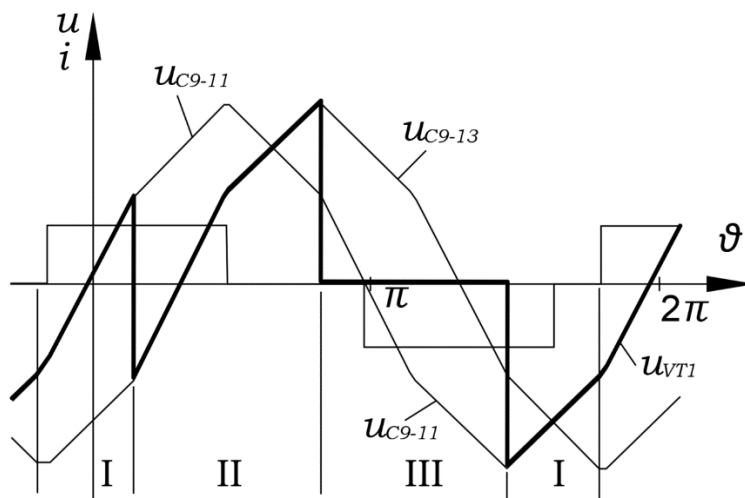


Рисунок 3 – Напруга на транзисторі VT1 і її складові (режим 2)

Проведене дослідження показує, що найбільше значення напруги на транзисторах комутуючої ланки дорівнює напрузі на фазі конденсаторної батареї у момент комутації.

3. *Регулювання транзисторів комутуючої ланки імпульсами подвоєної частоти (режим 3)*

Як і у попередньому випадку розрахуємо і побудуємо криву напруги транзистора VT1, прийнявши за момент початку відліку момент вступу в роботу силового електричного вентиля VD1.

Перша частина I інтервалу: $0 \leq \vartheta \leq \theta$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(I)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = u_{C1}.$$

II інтервал: $\theta \leq \vartheta \leq (\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(II)} = 0.$$

III інтервал: $(\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq (2\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(III)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(III)} = -u_{C3}.$$

IV інтервал: $(2\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq (\pi + \theta)$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(IV)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(IV)} = u_{C1}.$$

V інтервал: $(\pi + \theta) \leq \vartheta \leq (4\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(V)} = 0.$$

VI інтервал: $(4\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq (5\pi/3 + \theta)$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(VI)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(VI)} = -u_{C3}.$$

Друга частина I інтервалу: $(5\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq 2\pi$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(I)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = u_{C1}.$$

Побудова кривої напруги на транзисторі VT1 через її складові показана на рис. 4.

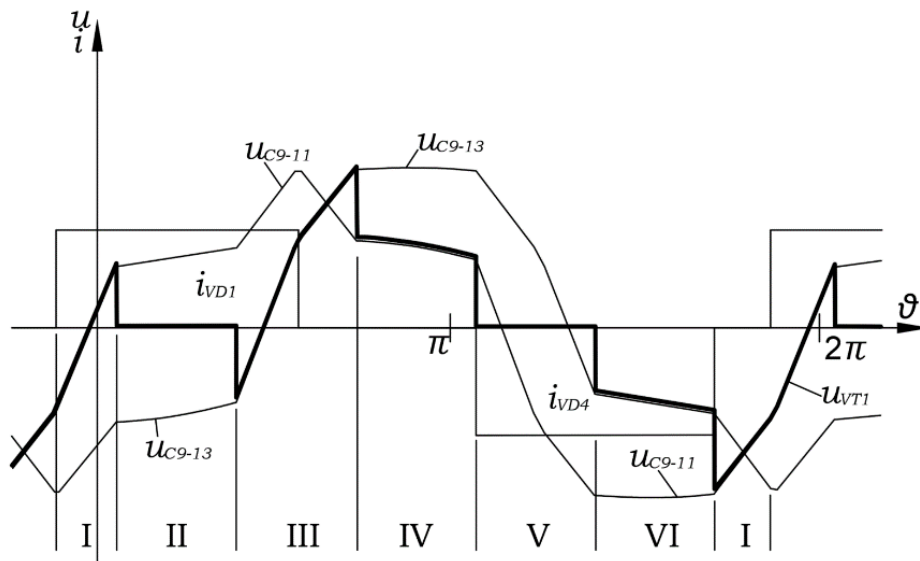


Рисунок 4 – Напруга на транзисторі VT1 і її складові (режим 3)

Знову отримуємо результат, який свідчить про те, що найбільше значення напруги на транзисторах комутуючої ланки дорівнює напрузі на фазі конденсаторної батареї у момент комутації.

4. *Регулювання транзисторів комутуючої ланки імпульсами чотирикратної частоти (режим 4)*

Знову розрахуємо і побудуємо криву напруги транзистора VT1, прийнявши за момент початку відліку момент вступу в роботу силового електричного вентиля VD1.

Перша частина I інтервалу: $0 \leq \vartheta \leq \theta$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(I)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = u_{C1}.$$

II інтервал: $\theta \leq \vartheta \leq (\pi / 6 + \theta)$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(II)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(II)} = -u_{C3}.$$

III інтервал: $(\pi / 6 + \theta) \leq \vartheta \leq (\pi / 3 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(III)} = 0.$$

IV інтервал: $(\pi / 3 + \theta) \leq \vartheta \leq (\pi / 2 + \theta)$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(IV)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(IV)} = u_{C1}.$$

V інтервал: $(\pi / 2 + \theta) \leq \vartheta \leq (2\pi / 3 + \theta)$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(V)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(V)} = -u_{C3}.$$

VI інтервал: $(2\pi / 3 + \theta) \leq \vartheta \leq (5\pi / 6 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(VI)} = 0.$$

VII інтервал: $(5\pi / 6 + \theta) \leq \vartheta \leq (\pi + \theta)$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(VII)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(VII)} = u_{C1}.$$

VIII інтервал: $(\pi + \theta) \leq \vartheta \leq (7\pi / 6 + \theta)$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(VIII)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(VIII)} = -u_{C3}.$$

IX інтервал: $(7\pi / 6 + \theta) \leq \vartheta \leq (4\pi / 3 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(IX)} = 0.$$

X інтервал: $(4\pi / 3 + \theta) \leq \vartheta \leq (3\pi / 2 + \theta)$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(X)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(X)} = u_{C1}.$$

XI інтервал: $(3\pi / 2 + \theta) \leq \vartheta \leq (5\pi / 3 + \theta)$; працює транзистор VT3.

$$u_{VT1(XI)} + u_{C3} = 0 \rightarrow u_{VT1(XI)} = -u_{C3}.$$

XII інтервал: $(5\pi / 3 + \theta) \leq \vartheta \leq (11\pi / 6 + \theta)$; працює транзистор VT1.

$$u_{VT1(XII)} = 0.$$

Друга частина I інтервалу: $(11\pi / 6 + \theta) \leq \vartheta \leq 2\pi$; працює транзистор VT2.

$$u_{VT1(I)} - u_{C1} = 0 \rightarrow u_{VT1(I)} = u_{C1}.$$

Побудова кривої напруги на транзисторі VT1 через її складові показана на рис. 5.

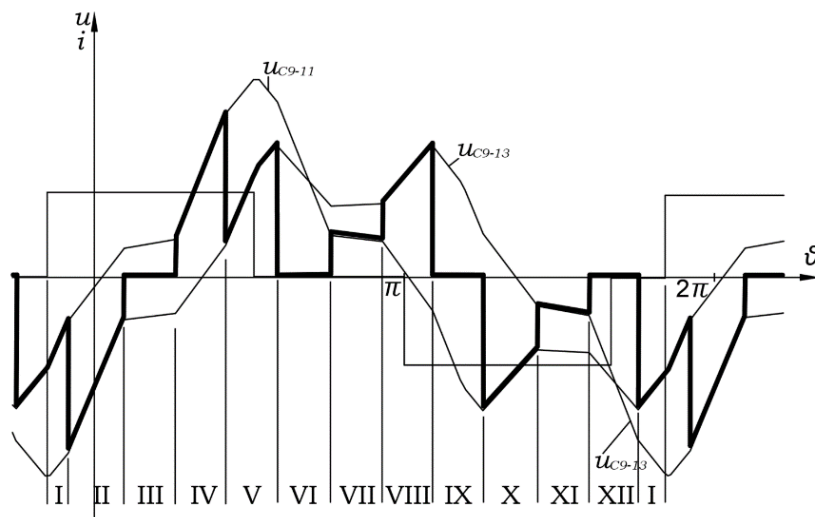


Рисунок 5 – Напруга на транзисторі VT1 і її складові (режим 4)

Знову отримуємо результат, який свідчить про те, що найбільше значення напруги на транзисторах комутуючої ланки дорівнює напрузі на фазі конденсаторної батареї у момент комутації.

Висновки. Проведені дослідження підтверджують факт залежності режиму роботи перетворювача від умов перезаряду конденсаторної батареї, які створюються сукупністю факторів, основними з них є зсув за фазою між моментом вступу в роботу діодів компенсаційної частини перетворювача і транзисторів та частота імпульсів керування останніми.

Наведені результати дослідження дозволяють розрахувати максимальне значення напруги на транзисторах комутуючої ланки і, відповідно, зробити однозначний висновок щодо технічних характеристик, за якими буде здійснюватися вибір цього обладнання, у разі практичної реалізації перетворювача за варіантами досліджуваних схем.

Перелік посилань

1. Бойко, В. і Шкардун, О. 2023. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача. Технічна електродинаміка.3(Квіт.2023),013. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>.
2. 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>.
3. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu, A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function// 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066073, Conference Location.
4. MULTILEVEL VOLTAGE SOURCE CONVERTER. Patent No.: US 8,879,291 B2: H02M 7/217, H02M 7/797// David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB), Prior Publication Data US 2012/006961.0 A1 Mar. 22, 2012, Date of Pat.: Nov. 4, 2014.
5. Патент України на корисну модель "Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач": Патент UA № 142864, МПК H02M 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - u 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.