

11. П. Рамдор “Рудные минералы и их сростания”. –М: изд. иностр. литературы, 1962. -С. 878-884.

УДК 621.314

Ю.Г. ОСАДЧУК, к.т.н., доц., І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викл., Р. В.СІЯНКО, студ.

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЙ БАГАТОРІВНЕВИХ ІНВЕРТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ «ПЛАВАЮЧИХ» КОНДЕНСАТОРІВ

Стаття присвячена аналізу багаторівневих інверторів з «плаваючими» конденсаторами. Запропоновано спосіб керування, що дозволяє виконувати підтримання величин напруг ланки постійного струму на заданому рівні без жодних змін у силовій схемі інвертора. Шляхом математичного моделювання доведено ефективність запропонованого рішення. Проаналізовано схему, що дозволяє покращити коефіцієнт використання напруги ланки постійного струму, що є невисоким для класичної топології.

Статья посвящена анализу многоуровневых инверторов с «плавающими» конденсаторами. Предложено способ управления, который позволяет выполнять поддержание величин напряжений звена постоянного тока на заданном уровне без каких-либо изменений в силовой схеме инвертора. Путем математического моделирования доказано эффективность предложенного решения. Проанализировано схему, которая позволяет улучшить коэффициент использования напряжения звена постоянного тока, который является невысоким для классической топологии.

This article analyzes the multilevel inverters with “flying” capacitors. A control method that allows maintaining the value of the DC bus voltage at a predetermined level without any changes in the power circuit of the inverter is proposed. By mathematical modeling proved the effectiveness of the proposed solution. The circuit that can improve the utilization of the DC bus voltage, which is low for classical scheme, is analyzed.

Проблема та її зв’язок з науковими та практичними завданнями. Суттєві досягнення світової науки у області напівпровідникової електроніки та мікропроцесорної техніки призвели до появи нового типу електротехнічних пристроїв – високовольтних перетворювачів частоти, що дозволяють вирішувати проблему раціонального використання енергоресурсів потужними електроприводами. Переваги використання багаторівневих інверторів, що полягають у формуванні кращої форми вихідної напруги, є важливими для високовольтних перетворювачів високої потужності. Се-

ред існуючих схем багаторівневих інверторів найбільш популярними є схеми на базі каскадно з'єднаних Н-мостів, схеми на базі модульної топології, схеми з фіксуєчими діодами та плаваючими конденсаторами (рис. 1). Найбільш суттєвою проблемою у широкому розповсюдженні високовольтних перетворювачів є баланс напруг на конденсаторах ланки постійного струму, що використовуються у якості подільника напруги.

У випадку використання трьохрівневого інвертора з «плаваючими» конденсаторами, керування напругами ланки постійного струму є відносно простим та може виконуватися окремо для кожної фази за рахунок вибору однієї з двох збиткових комбінацій включення ключів. Збитковими комбінаціями включення називаються такі, що формують один і той же вектор вихідної напруги, використовуючи набори включених ключів, що відрізняються між собою. Цей спосіб балансування можна розповсюдити і на схеми, що базуються на топології «плаваючих» конденсаторів, та мають більшу за три кількість рівнів.

У цьому випадку збільшується кількість збиткових комбінацій включення та кількість конденсаторів, напруга на яких повинна контролюватися. Кожна збиткова комбінація відрізняється від інших впливом на напругу ланки постійного струму. Тому питання раціонального керування багаторівневими інверторами з «плаваючими» конденсаторами з урахуванням необхідності підтримання балансу напруг є актуальним, а від його вирішення залежать перспективи широкого використання даної топології у високовольтних перетворювачах.

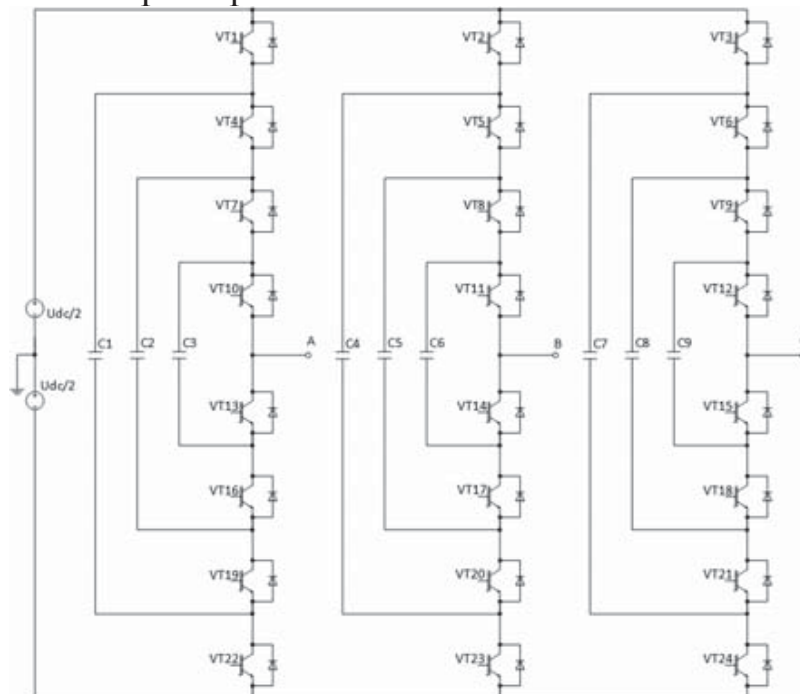


Рис. 1. Схема багаторівневого інвертора з «плаваючими» конденсаторами

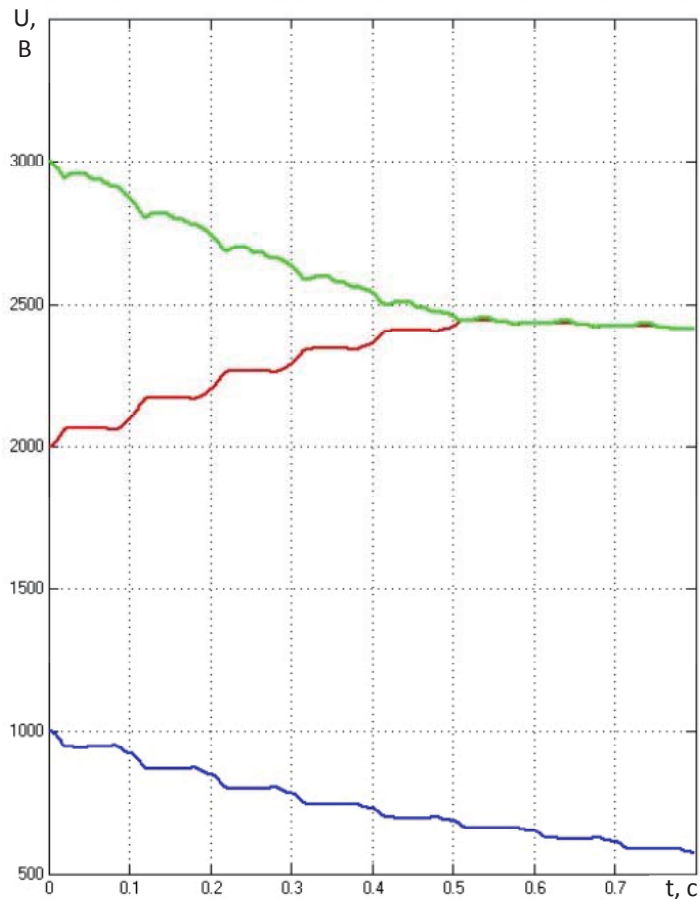


Рис. 2. Графік зміни величин напруг на конденсаторах плеча інвертора, що живить фазу А двигуна, при відсутності контуру балансування у системі керування

Аналіз досліджень та публікацій. Існує декілька відомих способів балансування напруг ланки постійного струму багаторівневих інверторів, що представлені у літературі. Ці способи можна класифікувати на пасивні та активні. Пасивні базуються на природних механізмах балансування енергії в перетворювачі. Найчастіше вони використовують розімкнені системи керування балансом напруг, а принцип їх роботи полягає у зміні форми або фазового зсуву опорного сигналу, що використовується алгоритмом широтно-імпульсної модуляції. Ці способи є простими в реалізації та повністю задовольняють вимоги до системи керування балансом напруг при роботі системи приводу у статичному режимі. До недоліків таких систем слід віднести погіршення якості балансування при роботі в динамічних режимах, а також чутливість до нелінійностей або несиметрій перетворювача або навантаження. В деяких випадках використання пасивних способів вимагає встановлення додаткових вирівнюючих ланцюгів, що складаються з пасивних LC-елементів. У [7] зазначено, що використання модуляції, що базується на фазовому розташуванні, дозволяє отримати більш високі динамічні показники, ніж використання модуляції, що базується на фазовому зсуві опорних сигналів. Використання додаткових вирівнюючих кіл не є бажаним, оскільки призводить до зниження надійності перетворювача, збільшення його габаритів та додатковим втратам

потужності у фільтрі та силових ключах через зростання пульсацій струму.

До активних способів балансування напруг ланки постійного струму відносяться, наприклад, такі, що базуються на модифікації алгоритму роботи системи прямого керування моментом двигуна або зміні сигналів завдання модуляції за допомогою введення додаткових сигналів. Це призводить до збільшення частоти перемикання ключів, що підвищує комутаційні втрати у інверторі.

Постановка завдання. Розглянути існуючі схеми побудови багаторівневих інверторів на базі топології з «плаваючими» конденсаторами, запропонувати раціональні рішення щодо забезпечення стійкої роботи у широкому діапазоні вихідних частот за рахунок балансування напруг ланки постійного струму засобами самого інвертора.

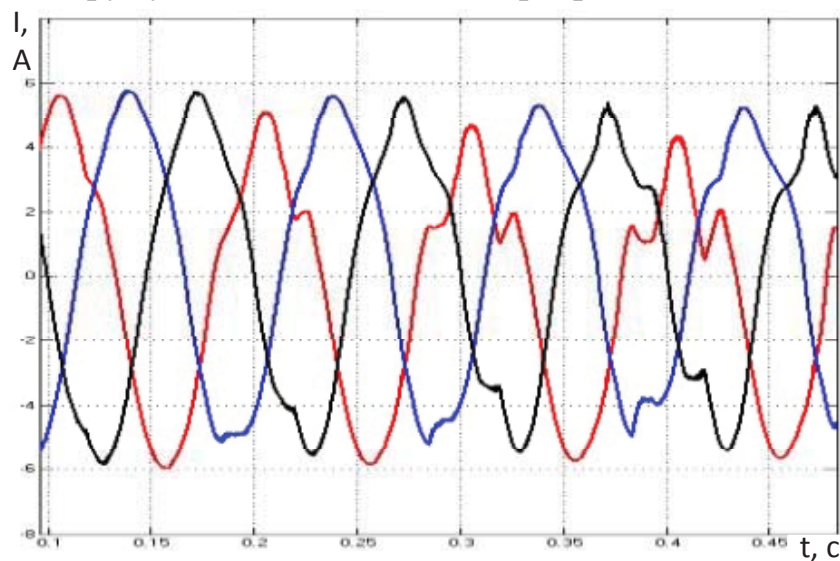


Рис. 3. Графік зміни вихідних струмів інвертора при відсутності контуру балансування у системі керування

Викладення матеріалу та результати. Схема багаторівневого інвертора на базі класичної топології з «плаваючими» конденсаторами представлена на рис. 1. Вихідна напруга формується на рахунок послідовного включення напруги ланки постійного струму, що в загальному випадку є незмінною за величиною, та напруг окремих конденсаторів.

Величини ємності «плаваючих» конденсаторів є однаковими, оскільки усі ключі перетворювача працюють з однією і тією ж частотою комутації і через них проходить струм однієї величини. При цьому номінальна напруга конденсаторів відрізняється і складає $\frac{U_{dc}}{n-1}$, $\frac{2U_{dc}}{n-1}$, $\frac{3U_{dc}}{n-1}$, ..., де n – кількість рівнів інвертора. За рахунок цього кожен з ключів схеми може бути розрахований на напругу $\frac{U_{dc}}{n-1}$, що суттєво менша за напругу ланки постійного струму.

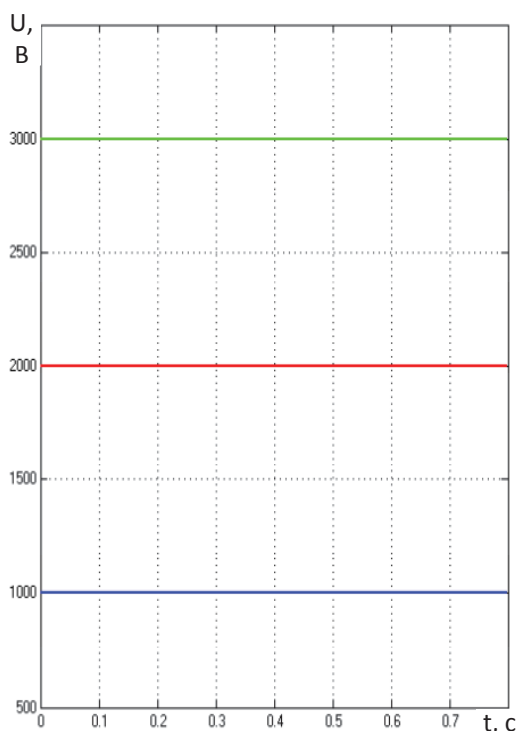


Рис. 4. Графік зміни величин напруг на конденсаторах плеча інвертора, що живить фазу А двигуна, при наявності контуру балансування у системі керування

До недоліків класичної схеми відноситься неможливість її побудови на однотипних модулях, що суттєво погіршує можливість створення резервних комірок, що можуть в автоматичному режимі включитися в роботу замість комірки, що вийшла з ладу. Тому все більшу увагу розробники звертають на схеми модульних багаторівневих інверторів. Проте, в даний момент відсутні готові технічні рішення щодо реалізації модульного перетворювача, що здатний працювати при змінній вихідній частоті, включаючи нульову.

Ще одним суттєвим недоліком інверторів з «плаваючими» конденсаторами є те, що амплітуда фазної напруги перетворювача не перевищує половини величини напруги.

При роботі багаторівневого інвертора, побудованого за даною топологією, струм навантаження повністю проходить через конденсатори схеми, викликаючи їх заряд або розряд (рис. 2). Надмірний заряд конденсаторної батареї може призвести до її виходу з ладу, а розряд нижче допустимого рівня – до суттєвого спотворення форми кривої вихідного струму (рис. 3) та небезпечного збільшення напруги на ключах. Тому при застосуванні схем з «плаваючими» конденсаторами необхідно застосовувати системи керування з контуром штучного вирівнювання напруг, що дозволяє за рахунок використання збиткових комбінацій включення підтримувати величини зарядів конденсаторів на приблизно постійному рівні.

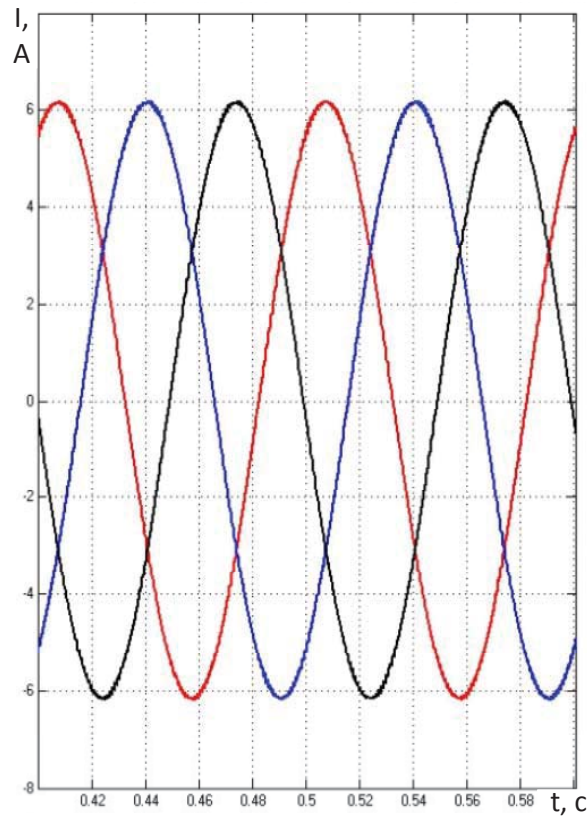


Рис. 5. Графік зміни вихідних струмів інвертора при наявності контуру балансування у системі керування

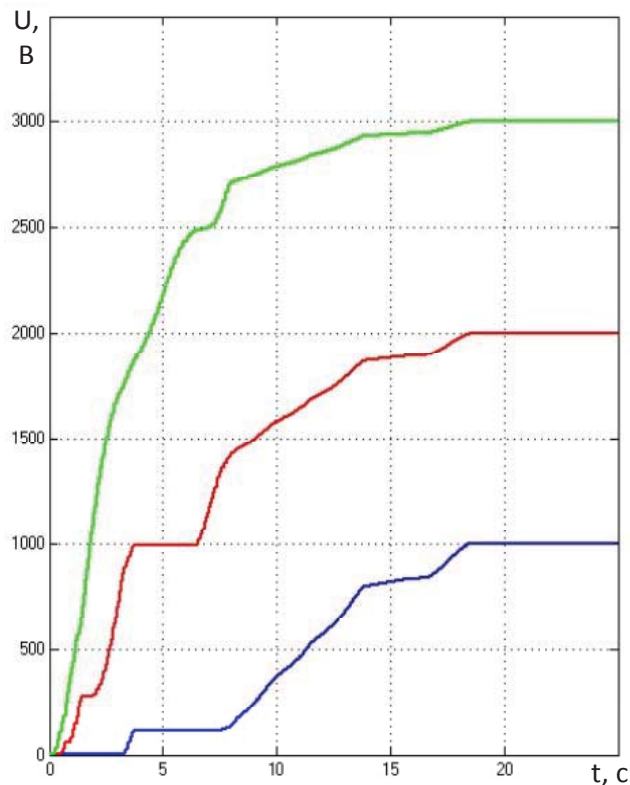


Рис. 6. Графік зміни величин напруг на конденсаторах плеча інвертора, що живить фазу А двигуна, при підключенні перетворювача до мережі

Для реалізації вирівнювання величин напруг була запропонована система, що базується на мінімізації функції, що має наступний вигляд:

$$Z_k = \text{sign}(i_{\text{вих}}) \sum_{i=1}^n \pm (u_{ci} - u_{ci\text{ном}}),$$

де u_{ci} – поточне значення величини напруги на i -му конденсаторі плеча інвертора; $u_{ci\text{ном}}$ – номінальне значення величини напруги на i -му конденсаторі плеча інвертора; $\text{sign}(i_{\text{вих}})$ – знакова функція; $i_{\text{вих}}$ – вихідний струм плеча інвертора.

Отже, для кожної стійкої величини вихідної напруги, що може формуватися інвертором з певним числом рівнем, є певний набір збиткових комбінацій включення ключів (за винятком максимальної та мінімальної напруги, формування яких не містить збиткових комбінацій), що формують одну й ту ж вихідну напругу. Для кожної з таких комбінацій розраховується значення функції Z_k . З усіх можливих комбінацій обирається саме та, що відповідає мінімальному значенню Z_k . Це дозволяє обрати ту комбінацію включення, яка найбільшою мірою здатна розрядити конденсатори, що мають надлишковий заряд, та зарядити конденсатори, що є частково розрядженими. Результати моделювання запропонованого способу підтримання балансу напруг представлено на рис. 4, 5.

Запропонований спосіб має же одну позитивну якість, що полягає в тому, що з його використанням є можливим реалізувати контрольованих заряд конденсаторів при підключенні перетворювача до мережі без використання жодних додаткових зовнішніх кіл, що не ускладнює структуру перетворювача та дозволяє знизити його собівартість у порівнянні зі способами, що вимагають модифікації силової схеми інвертора. Графік, що демонструє заряд «плаваючих» конденсаторів представлено на рис. 6.

Як вже було сказано, основним недоліком розглянутої схеми є поганий коефіцієнт використання напруги ланки постійного струму. З метою усунення даного недоліку доцільно розглянути схему, що представлена на рис. 7. Дана схема дозволяє отримати вдвічі більшу амплітуду вихідної напруги перетворювача. Моделювання роботи даної схеми з запропонованим способом балансування напруг доводить його придатність і для цієї модифікації схеми інвертора.

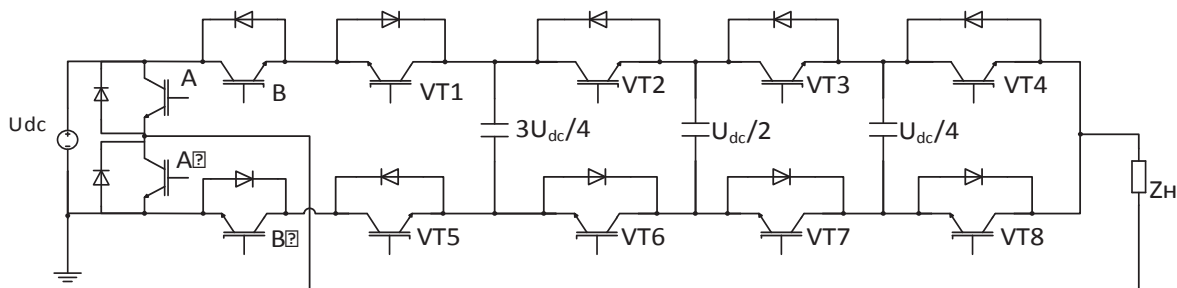


Рис. 7. Схема модифікованого плеча інвертора з «плаваючими» конденсаторами

Висновки та напрямок подальших досліджень. Проаналізувавши схеми багаторівневих інверторів з «плаваючими» конденсаторами, було запропоновано спосіб підтримання балансу напруг за рахунок викорис-

тання збиткових комбінацій включення. Шляхом математичного моделювання доведено, що спосіб є придатним у всьому діапазоні вихідних частот перетворювача і дозволяє вирішити поставлену задачу без жодних змін в силовій схемі перетворювача, а також схемі керування, за рахунок зміни алгоритму керування ключами.

Розглянуто модифіковану схему, що має кращий, ніж у класичної топології, коефіцієнт використання напруги ланки постійного струму. Доведено можливість застосування представленого способу для даної схеми. Основним її недоліком є необхідність окремих джерел живлення для кожного плеча інвертора, тому напрямком подальших досліджень є розробка схем, що здатні живитися від загальної ланки постійного струму та мають високий коефіцієнт використання напруги ланки постійного струму.

Список літератури

1. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. -№1. –2008. –С. 43-46.
2. Шавелкин А.А. Вариант схемы многоуровневого преобразователя частоты для электропривода среднего напряжения // Электротехника. – 2005. –№ 11.
3. Г.Г. Соколовский Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Учебник. Москва: Academia, 2006. –265 с.
4. С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов Электрические машины. Лабораторные работы на ПК. Санкт-Петербург: Корона принт, 2003. –256 с.
5. Malekjamshidi Z., Jafari M., Islam M.R., Zhu J. A comparative study on characteristics of major topologies of voltage source multilevel inverters // 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia, 2014, pp. 612-617.
6. Dargahi V., Sadigh A.K., Abarzadeh M., Eskandari S. A new family of modular multilevel converter based on modified flying-capacitor multicell converters // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, iss. 1, 2015, pp. 138-147.
7. Ghias A.M.Y.M., Pou J., Agelidis V.G., Ciobotaru M. Optimal switching transition-based voltage balancing method for flying capacitor multilevel converters // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, iss. 4, 2015, pp. 1804-1817.
8. Sneineh A.A., Wang M.-y. A novel hybrid flying-capacitor-half-bridge cascade 13-level inverter for high power applications // 2nd IEEE Conference on Industrial electronics and applications, 2007, pp. 2421-2426.
9. Baimel D., Tapuchi S., Rabinovici R., Notkovich D., Hai S., Horen Y., Bronshtein S. Hybrid flying capacitor cascaded multilevel inverter // International Symposium on Automation and Motion, 2014, pp. 631-636.
10. Santos E.C., Gulpinar F., Silva E.R. Flying capacitor four-level H-bridge converter // Power and Energy Conference at Illinois, 2014, pp. 1-6.