

Топологія 3L NPC, TNPC та ANPC

Інго Рабл (Ingo Rabl), Петер Бекедаль (Peter Beckedahl), Semikron Danfoss
Переклад: Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с., Інститут електродинаміки (ІЕД)
 НАН України
Редагування: Сергій Поліщук, к.т.н, с.н.с., ТОВ НВП «Техносервіспривід»
 sp.tsdrive@gmail.com

У даній статті наведено інформацію про дві тривірневі топології: тривірневу NPC (3L NPC; із фіксованою нейтральною точкою), тривірневу TNPC (3L TNPC; із фіксованою нейтральною точкою T-типу) та тривірневу ANPC (3L ANPC; з активною фіксованою нейтральною точкою). Читач отримає уявлення про основні принципи роботи цих пристроїв 3L, їхні переваги та недоліки. Також наведено деякі поради щодо компонування або налаштування 3L-модулів. Однак надана інформація не є вичерпною, і відповідальність за належне проектування залишається на користувачеві.

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Однією з переваг використання топології 3L NPC (*Neutral Point Clamped*), 3L TNPC (*T-type Neutral Point Clamped*) або 3L ANPC (*Active Neutral Point Clamped*) є менший коефіцієнт нелінійних спотворень струму, що зменшує вимоги до фільтрації (потрібно менше міді, менше внесене загасання фільтра).

Основною перевагою топологій 3L NPC та 3L ANPC є можливість використання IGBT та діодів з напругою пробою, нижчою за фактичну напругу

ланки постійного струму. Менша напруга блокувальних пристроїв створює менші втрати, тому ефективність може бути підвищена. Використовуючи таку ж блокувальну напругу, як у застосуваннях 2L, можна реалізувати вищі напруги для ланки постійного струму.

Порівняно з модулем для фазної стійки у топології 2L, одна фазна стійка модуля NPC 3L складається з 10 замість 4 напівпровідників (рис. 1): 4 IGBT (T1–T4), 4 антипаралельних діоди (FWD; D1–D4) та 2 діоди-обмежувачі напруги (CD; D5 та D6).

Чотири клеми живлення підключають модуль до змінного струму (виводи N (нейтраль) і AC), та до ланки постійного струму (DC+, DC–). Ланка постійного струму розділена на дві симетричні половини, з'єднані послідовно: верхня половина з'єднує DC+ та N, а нижня половина з'єднує N та DC–.

У цій топології шлях для протікання струму утворюють два послідовно з'єднані напівпровідники, і тому можливо або працювати при вищих напругах постійного струму, або блокувальну напругу ключів можна зменшити порівняно з топологією 2L.

Перевагою 3L TNPC є форма кривої вихідної напруги; при цьому немає обмежень на схему перемикання, як у 3L NPC (особливо при аварійному вимкненні).

Фазна стійка 3L TNPC (рис. 2) складається лише з 8 напівпровідників: 4 IGBT (T1–T4) та 4 антипаралельних діоди (FWD; D1–D4). Як у топології 3L NPC, TNPC підключений до ланки постійного струму, яка розділена на DC+, N та DC–. Четвертий вивід є виходом змінного струму.

У топології 3L TNPC використовуються напівпровідники з різними напругами пробою: T1 та T4 (які називають зовнішніми ключами) повинні витримувати повну напругу ланки постійного струму. Внутрішні ключі (індекси 2 та 3) підключають вивід змінного струму до нейтралі; вони повинні бути розраховані на блокування половини напруги ланки постійного струму.

У топології 3L TNPC шлях для протікання струму утворює або один вищий блокувальний напівпровідник (зовнішній ключ), або два нижчі блокувальні пристрої, з'єднані послідовно (внутрішні ключі).

Позначення напівпровідників на рисунках 1 та 2 означають, що одна і та сама схема перемикання може бути використана як для топології 3L NPC, так і для топології 3L TNPC.

Топологія 3L ANPC поєднує переваги топологій 3L NPC та 3L TNPC. Як і у топо-

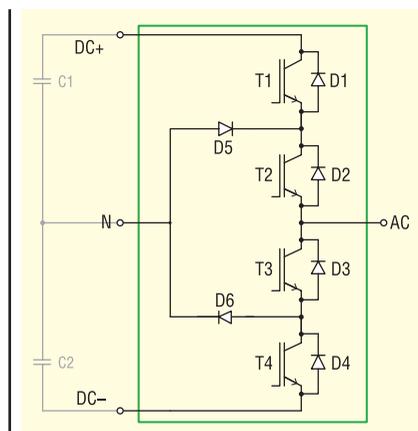


Рис. 1. Зелений квадрат: схема електрична фазної стійки 3L NPC

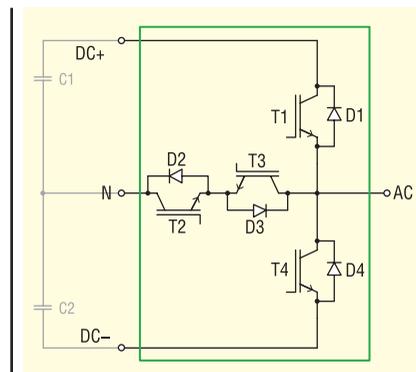


Рис. 2. Зелений квадрат: схема електрична фазної стійки 3L TNPC

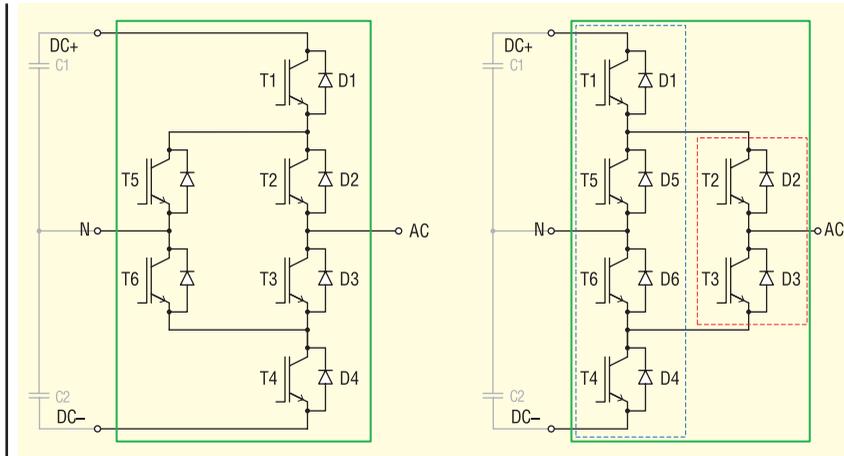


Рис. 3. Зелений квадрат: схема електрична фазної стійки 3L ANPC

логії TNPC, вона синтезує форму вихідної напруги 3L без обмежень щодо схеми комутації (особливо під час аварійного вимкнення). Водночас це дає можливість використовувати напівпровідникові прилади з напругою пробою, нижчою за фактичну напругу ланки постійного струму. Нижча напруга блокувальних пристроїв створює менші втрати, тому ефективність роботи може бути підвищена. Фазова стійка 3L ANPC (рис. 3) складається з 12 напівпровідників: 6 IGBT (T1–T6) та 6 антипаралельних діодів (FWD; D1–D6). ANPC підключено до розділеної ланки постійного струму через DC+, N та DC–. Четвертий клемний вивід забезпечує підключення змінного струму.

У топології 3L ANPC, як і в NPC, кожен шлях протікання струму утворюється з двох послідовно з'єднаних напівпровідників, і це дозволяє або застосовувати для роботи вищу напругу постійного струму, або блокувальна напруга ключів може бути зменшена порівняно з топологією 2L.

Топологія ANPC складається з вхідного каскаду (ключі T1, T5, T6 та T4) та вихідного каскаду (ключі T2 та T3). Через розподіл топології на вхідний та вихідний каскади, електрична принципова схема дещо змінена порівняно з топологією NPC. Нумерацію у вхідному каскаді ми залишили без змін, щоб забезпечити узгодженість з позначеннями у топологіях NPC та TNPC.

На відміну від топології NPC та ANPC, для топології 3L ANPC потрібна зовсім інша схема перемикачів.

ANPC можна додатково розділити на ANPC HF/LF та ANPC LF/HF, де LF означає «низьку частоту» (тобто частоту електромережі, наприклад, 50 Гц, 60 Гц), а HF означає «високу частоту» (тобто частоту комутації інвертора, наприклад, 10 кГц). У ANPC HF/LF вхідний каскад

(T1, T5, T6 та T4) працюють на частоті комутації («HF»), тоді як вихідний каскад працює на частоті електромережі («LF»).

ВІДМІННІСТЬ МІЖ ТОПОЛОГІЯМИ 2L І 3L

Різниця між топологіями 2L та 3L полягає не лише в кількості напівпровідникових приладів. Якщо типовий перетворювач 2L по чергово перемикає клему DC+ або DC– на клему змінного струму (рис. 4), то версії 3L по чергово підключають клему змінного струму до клем DC+, DC– та до N. Клема N (нейтраль) – це середня напруга між DC+ та DC–, яка утворює третій рівень напруги, звідки й походить назва «трирівнева топологія».

Введення третього рівня напруги дозволяє наблизити форму кривої вихідної напруги до бажаної синусоїдальної (рис. 5), що дозволяє зменшити коефіцієнт нелінійних спотворень струму. Таким чином, жорсткі вимоги щодо якості мережі електроживлення можна виконати простішими засобами.

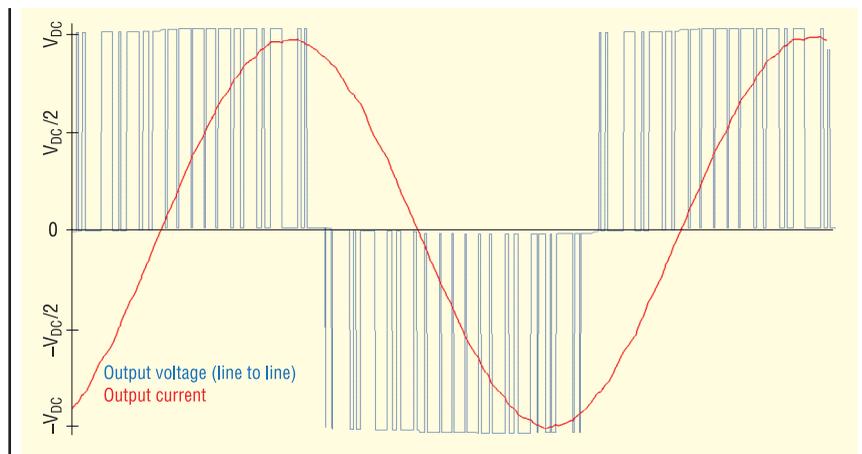


Рис. 4. Криві напруги та струму у топології 2L

Порівняння топологій 2L і 3L NPC/TNPC

Топології NPC, TNPC, ANPC

- Для досягнення того ж значення коефіцієнта нелінійних спотворень струму з топологією 3L можна зменшити частоту комутації, що призводить до зменшення відповідних втрат.
- При роботі в топології 3L на такій же частоті перемикачів, як і в топології 2L, коефіцієнт нелінійних спотворень струму може бути меншим.
- У застосуваннях топології 3L частоту комутації можна зменшити порівняно з застосуваннями топології 2L, зменшуючи при цьому коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) та зменшуючи вимоги до фільтрації.
- Зі збільшенням кількості IGBT збільшується також кількість драйверів для затворів. Це спричиняє ріст потужності службового електроживлення, а також ускладнює схеми керування.

Топологія NPC

- Кількість перемикачів в активному струмовому шляху в топології 3L NPC подвоюється; це збільшує втрати потужності у статичному режимі.
- У застосуваннях 3L NPC можна використовувати напівпровідники з нижчою напругою блокування; наприклад: напругу постійного струму 750 В можна подавати на модулі 1200 В 2L або 650 В 3L (кожен силовий ключ повинен блокувати лише 375 В). Менші втрати нижніх блокувальних пристроїв компенсують додаткові втрати, спричинені збільшеною кількістю пристроїв у контурі протікання силового струму.
- Максимальна напруга ланки постійного струму становить 800 В при використанні напівпровідників

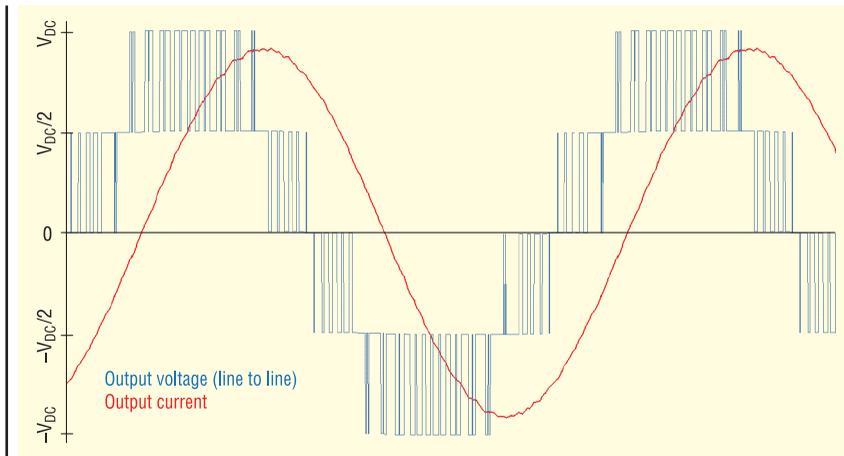


Рис. 5. Криві напруги та струму у топології 3L

на 650 В, 1500 В при використанні напівпровідників на 1200 В та 2400 В при використанні напівпровідників на 1700 В.

Топологія TNPC

Кількість силових ключів у колі протікання струму в топології 3L TNPC або аналогічна 2L (зовнішні ключі), що створює ті ж втрати, або подвоюється (з нижчою блокувальною напругою; внутрішні ключі), що призводить до більших втрат у статичному режимі, але менших втрат на комутацію.

Максимальні напруги ланки постійного струму такі ж, як для модуля 2L: 400 В постійного струму з використанням напівпровідників на 650 В, 800 В постійного струму з використанням напівпровідників на 1200 В та 1200 В постійного струму з використанням напівпровідників на 1700 В.

Топологія ANPC

Кількість силових ключів у колі протікання струму в топології 3L ANPC подвоюється; це збільшує втрати потужності у статичному режимі.

У застосуваннях 3L ANPC можуть використовуватися напівпровідники з нижчою напругою блокування; наприклад: напруга постійного струму 750 В може подаватися на модулі 1200 В 2L або 650 В 3L (для кожного ключа напруга блокування складає лише 375 В). Менші втрати нижніх блокувальних пристроїв компенсують додаткові втрати, спричинені збільшеною кількістю пристроїв у колі протікання силового струму.

Максимальна напруга ланки постійного струму становить 800 В при використанні напівпровідників на 650 В, 1500 В при використанні напівпровідників на 1200 В та 2400 В при використанні напівпровідників на 1700 В.

Додаткової оптимізації можна досягти, використовуючи різні напівпровідники для вхідного та вихідного каскадів, залежно від обраної схеми ШІМ (HF/LF або LF/HF; наприклад, напівпровідники SiC для ВЧ частини).

Топологію ANPC HF/LF можна зібрати з силових модулів 2L, тоді як ANPC LF/HF може проявити свої переваги за умови, коли всю топологію можна інтегрувати в один корпус з оптимізованою індуктивністю розсіювання.

АЛГОРИТМ ПЕРЕМИКАННЯ 3L-ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Алгоритм перемикання у топології 3L є складнішим, ніж у топології 2L. Хоча схема перемикання для топології 2L досить проста (верхні та нижні IGBT завжди перемикаються протифазно), вона стає складнішою у топології 3L, оскільки деякі ключі (а саме T2 та T3 в NPC, TNPC та ANPC HF/LF) вмикаються на досить тривалий час залежно від значення $\cos \varphi$ (до півперіоду для $\cos \varphi = 1$). Кількість можливих комбінацій перемикання збільшується з 4 у топології 2L (TOP/BOT: 0/0, 0/1, 1/0, 1/1) до 16 у топології NPC та TNPC і до 64 у топології ANPC.

Комбінації перемикання у топології NPC

У топології 3L NPC розрізняють дозволені, потенційно деструктивні та деструктивні стани (рис. 6).

Дозволені стани

- Усі IGBT знаходяться у вимкненому стані; перетворювач вимкнено.
- Можна вмикати або T2 або T3.
- Кожна комбінація, коли ввімкнено два сусідні IGBT (T1/T2, T2/T3, T3/T4).

Потенційно деструктивні стани

- T1 і T4 вмикаються або окремо, або разом.
- Вмикаються два не суміжні IGBT (T1/T3 або T2/T4).

Наслідки від застосування таких комбінацій залежать від схеми перемикання, що застосовується до модулів у стійках інших фаз.

Деструктивні стани

- Одночасно вмикаються три суміжні IGBT (T1/T2/T3 → замикання верхньої половини ланки постійного струму; T2/T3/T4 → замикання нижньої половини ланки постійного струму).
- Увімкнені три не суміжні IGBT (T1/T2/T4 → повна напруга ланки постійного кола прикладається до T3; T1/T3/T4 → повна напруга постійного кола прикладається до T2).
- Увімкнено чотири IGBT → виводи DC+, DC- та N закорочені.

Комбінації перемикання у топології TNPC

У топології 3L TNPC розрізняють лише дозволені та деструктивні стани (рис. 7).

Дозволені стани

- Усі IGBT знаходяться у вимкненому стані; перетворювач вимкнено.
- У будь-який момент часу з усіх IGBT може бути ввімкнений будь-який, але лише один.

T1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
T2	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
T3	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
T4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
state	дозволені						потенційно деструктивні				деструктивні					

Рис. 6. Комбінації перемикання у топології NPC

T1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1
T2	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
T3	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1
T4	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
state	дозволені								деструктивні							

Рис. 7. Комбінації перемикання у топології TNPC

- Кожен стан, коли ввімкнено два сусідні IGBT (T1/T2, T2/T3 або T3/T4).

Деструктивні стани

- Одночасно вмикаються два не суміжні IGBT (T1/T3 → замикання верхньої половини ланки постійного струму; T2/T4 → замикання нижньої половини ланки постійного струму; T1/T4 → замикання DC+ на DC-).
- Одночасно вмикаються три не суміжні IGBT (ті ж наслідки, що й вище: коротке замикання верхньої або нижньої половини, або всієї ланки постійного струму).
- Одночасно увімкнено чотири IGBT → DC+, DC- та N закорочені (TOP/BOT: 0/0, 0/1, 1/0, 1/1) на 16 в топологіях NPC та TNPC та 64 в топології ANPC.

Комбінації перемикання у топології ANPC

Дозволені стани

- Усі IGBT знаходяться у вимкненому стані; перетворювач вимкнено.
- Можна вмикати окремо транзистори T2, T3, T5 і T6, або T5/T6 разом.
- Будь-яка комбінація T1/T6 або T5/T4 разом (не сусідні ключі у вхідному каскаді), додатково або T2, або T3.

Потенційно деструктивні стани

- T1 або T4 вмикаються окремо або разом.
Наслідки залежать від схеми перемикання, що застосовується у силових модулях інших фазних стійок.
- T2 та T3 вмикаються разом.
Наслідки залежать від симетрії у розподілі напруги між T1 та T4.

Деструктивні стани

- Одночасно вмикаються два суміжні IGBT (T1/T5 → замикання верхньої половини ланки постійного струму; T6/T4 → замикання нижньої половини ланки постійного струму).
- Вмикаються три сусідні IGBT (T1/T2/T3 → замикання верхньої половини

ланки постійного струму та T4 під дією нульової напруги ланки постійного струму; T2/T3/T4 → замикання нижньої половини ланки постійного струму та T1 під дією повної напруги ланки постійного струму).

- Увімкнені три не суміжні IGBT (T1/T2/T4 → до T3 прикладається повна напруга ланки постійного кола; T1/T3/T4 → до T2 прикладається повна напруга ланки постійного кола).
- Увімкнені чотири IGBT (T1/T2/T3/T4) → коротке замикання між DC+ та DC-; якщо увімкнені T1/T5/T6/T4 → коротке замикання між DC+, DC- та N.
- Увімкнення одночасно п'яти або шести силових ключів призводить до кількох коротких замикань або подачі на один ключ повної напруги ланки постійного струму.

Далі буде

Більш детальну інформацію щодо продукції Semikron Danfoss можна отримати, звернувшись до офіційного дистриб'ютора в Україні – ТОВ НВП «Техносервіс-привід»:

**03057, м. Київ,
пр-т Берестейський, 56,
офіс 335,
тел. +38 (044) 458-47-66,
e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,
semikron@ukr.net,
www.tsdrive.com.ua,
www.semismart.com.ua**

Література:

1. www.semikron-danfoss.com
2. A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann. Application Manual Power Semiconductors. 2nd edition. ISLE Verlag 2015. ISBN 978-3-938843-83-3.
3. Переклад та редагування: В. Павловський. Вимірювання пікової напруги модулів IGBT і вимоги до демпферного конденсатора. CHIP NEWS. № 2. 2025 р. **CN**

ПРОСТЕ РІШЕННЯ ПІДВИЩУЄ РЕСУРС АКУМУЛЯТОРІВ У 10 РАЗІВ

Дослідники з Університету науки та технологій ім. короля Абдалли (King Abdullah University of Science and Technology, KAUST) у Саудівській Аравії виявили простий спосіб подовження терміну служби акумуляторів на основі води.

Виявилось, що вода непомітно знижувала продуктивність акумулятора, однак цинковий купорос $ZnSO_4$ стабілізував структуру води, зупинив шкідливі хімічні реакції та подовжив термін роботи водного акумулятора у 10 разів. Одним з ключових факторів, що впливає на термін служби акумуляторів, є анод, у якому проходять хімічні реакції з генерації та накопичення енергії.

Супутні негативні хімічні реакції можуть пошкодити анод і скоротити термін служби акумулятора. При цьому результати дослідження показали, що вільні молекули води відіграють важливу роль у виникненні цих негативних хімічних реакцій. Сульфат цинку допомагає обмежити наявність вільної води, зменшуючи її здатність пошкоджувати анод.

«Наші висновки підкреслюють важливість структури води в хімічному складі акумуляторів, ключового параметра, який раніше не брали до уваги», — зазначив професор KAUST Хусам Альшаріф (Husam Alshareef), який очолював це дослідження.

Вільна вода містить молекули, які не мають міцних зв'язків з іншими молекулами. Через це молекули води взаємодіють з більшою кількістю інших молекул, запускаючи небажані реакції, які споживають енергію та руйнують анод. У той же час сульфат цинку діє як клей, стабілізуючи вільні молекули води, змінюючи їхню динаміку та скорочуючи кількість негативних хімічних реакцій.

Водні батареї привертають все більшу увагу в усьому світі як стійке рішення для великомасштабного зберігання енергії, і за прогнозами, до 2030 року обсяг ринку перевищить 10 млрд доларів. На відміну від літєвих батарей, які часто використовуються в електромобілях, водні батареї пропонують безпечніший і стійкіший варіант для інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна енергія, в електричні мережі.

www.science.org