

Топологія 3L NPC, TNPC та ANPC

Інго Рабл (Ingo Rabi), 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»

E-mail: sp.tsdrive@gmail.com

КОМУТАЦІЇ ТА ШЛЯХИ КОМУТАЦІЙ

Топології NPC, TNPC та ANPC

На рисунку 8 показано синусоїдальну напругу (синя лінія) та відповідний струм (червона лінія) при індуктивному навантаженні. Роботу інвертора можна розділити на чотири робочі області. Для $\cos \varphi = +1$ (зсуву фаз немає) криві напруги та струму знаходяться у фазі; активні лише робочі області 1 та 3. Для $\cos \varphi = -1$ (фазовий зсув 180°) активними є лише робочі області 2 та 4.

Для будь-якого значення $\cos \varphi$ між -1 та $+1$ фазовий зсув змінюється, як і часові інтервали чотирьох робочих зон. Активні ключі та відповідні комутації для цих чотирьох робочих зон перелічені нижче:

- Напруга і струм більше нуля ($V > 0, I > 0$):

2L:	$T_{TOP} \leftrightarrow D_{BOT}$
3L NPC:	$T1/T2 \leftrightarrow D5/T2$ (короткий шлях комутації);
3L TNPC:	$T1 \leftrightarrow T2/D3$;
3L ANPC (HF/LF):	$T1/T2 \leftrightarrow D5/T2$ (короткий шлях комутації);
3L ANPC (LF/HF):	$T1/T2 \leftrightarrow D3/T6$ (довгий шлях комутації).

 - Перехід від робочої області 1 до робочої області 2:

3L ANPC (HF/LF):	$T1/T2 \leftrightarrow T6/D3$ (довгий шлях комутації);
	$D6/T2 \leftrightarrow D3/D4$ (довгий шлях комутації);
3L ANPC (LF/HF):	$T1/T2 \leftrightarrow D3/T6$ (короткий шлях комутації);
	$T6/D3 \leftrightarrow D3/D4$ (короткий шлях комутації).
- Напруга менша, а струм більший за нуль ($V < 0, I > 0$):

2L:	$T_{TOP} \leftrightarrow D_{BOT}$
3L NPC:	$D5/T2 \leftrightarrow D3/D4$ (довгий шлях комутації);
3L TNPC:	$T2/D3 \leftrightarrow D4$;
3L ANPC (HF/LF):	$T6/D3 \leftrightarrow D3/D4$ (короткий шлях комутації);
3L ANPC (LF/HF):	$D5/T2 \leftrightarrow D3/D4$ (довгий шлях комутації).
- Напруга і струм менші за 0 ($V < 0, I < 0$):

2L:	$T_{TOP} \leftrightarrow D_{BOT}$
3L NPC:	$T3/T4 \leftrightarrow T3/D6$ (короткий шлях комутації);
3L TNPC:	$T4 \leftrightarrow T3/D2$;
3L ANPC (HF/LF):	$T3/T4 \leftrightarrow T3/D6$ (короткий шлях комутації);
3L ANPC (LF/HF):	$T5/D2 \leftrightarrow T3/T4$ (довгий шлях комутації).

 - Перехід з операційної зони 3 до операційної зони 4:

3L ANPC (HF/LF):	$T3/T4 \leftrightarrow T5/D2$ (довгий шлях комутації);
	$D1/D2 \leftrightarrow T3/D6$ (довгий шлях комутації);
3L ANPC (LF/HF):	$T3/T4 \leftrightarrow T3/D6$ (короткий шлях комутації);
	$D2/T5 \leftrightarrow D1/D2$ (короткий шлях комутації).
- Напруга більша за нуль, а струм менший за нуль ($V > 0, I < 0$):

2L:	$T_{TOP} \leftrightarrow D_{BOT}$
3L NPC:	$T3/D6 \leftrightarrow D1/D2$ (довгий шлях комутації);
3L TNPC:	$T3/D2 \leftrightarrow D1$;
3L ANPC (HF/LF):	$T5/D2 \leftrightarrow D1/D2$ (короткий шлях комутації);
3L ANPC (LF/HF):	$D1/D2 \leftrightarrow D6/T3$ (довгий шлях комутації).

В першій частині статті (CHIP NEWS, № 6, 2025 р.) на сторінці 27 у рисунку 7 була допущена помилка: у третьому стовпчику зліва повинна бути наступна комбінація «1, 0, 0, 0».

Для топологій ANPC HF/LF та ANPC LF/HF комутації відрізняються наступним чином:

- Топологія ANPC HF/LF використовує лише короткі комутаційні шляхи в межах чотирьох робочих областей, але має великі індуктивності розсіювання (тобто довгі комутаційні шляхи) між робочими областями 1 і 2 (а також, відповідно, між областями 3 і 4). Тому її можна зібрати зі стандартних 2L силових модулів з досить простими підключеннями шин.
- Топологія ANPC LF/HF, навпаки, має довгі комутаційні шляхи в робочих областях та короткі шляхи для переходів. Через більші індуктивності розсіювання для довгих комутаційних шляхів ця топологія не підходить для її монтажу з окремих модулів 2L; адже всі напівпровідники повинні знаходитися в одному корпусі з оптимізованими шляхами комутації. Переваги топології ANPC LF/HF полягають у зменшенні кількості (і, отже, у зменшенні вартості) високочастотних ключів у випадку використання швидкодіючих напівпровідників (SiC тощо).

Топологія NPC

У випадку короткого комутаційного шляху комутація відбувається лише в одному з двох активних ключів (наприклад, $T1 \leftrightarrow D5$), тоді як струм через інший активний ключ не змінюється (наприклад, T2). У довгому шляху комутації (наприклад, $D5/T2 \leftrightarrow D3/D4$) задіяні (використовуються) обидва напівпровідникові пристрої.

* Продовження. Початок див. CHIP NEWS, № 6, 2025.

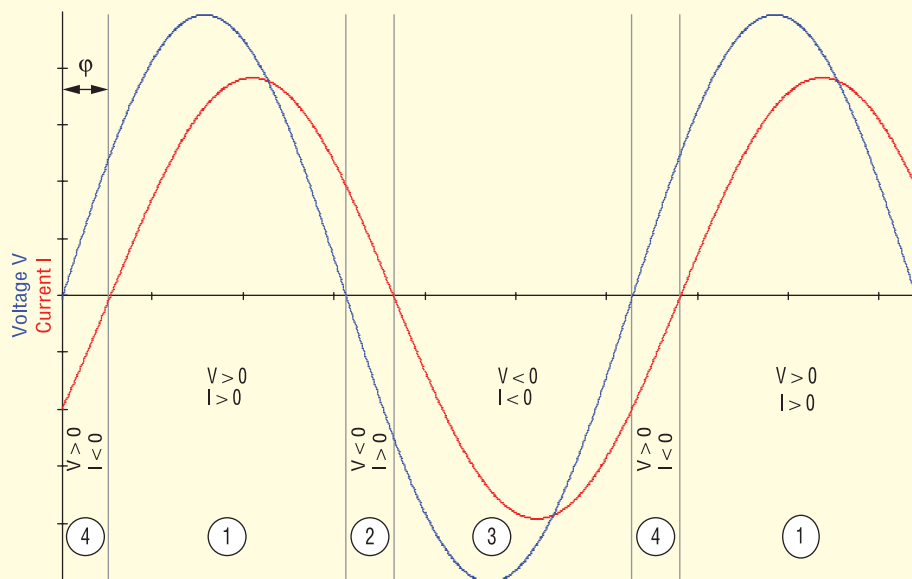


Рис. 8. Робочі області

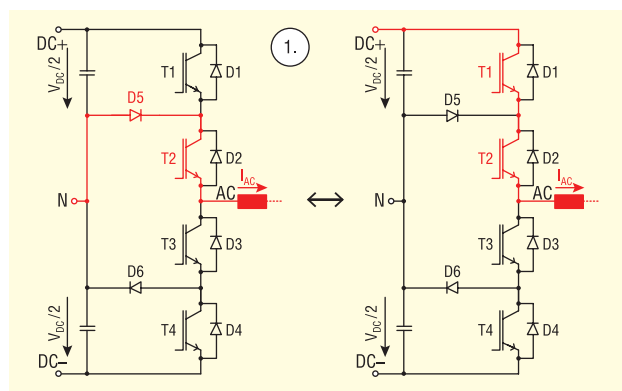


Рис. 9. Короткий шлях комутації для операційної зони NPC 1

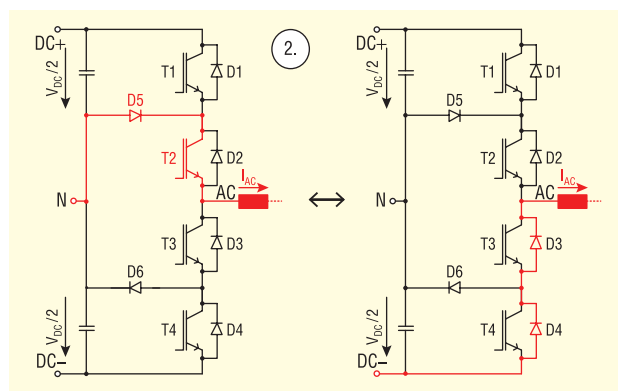


Рис. 11. Довгий комутаційний шлях у топології NPC для робочої області 2

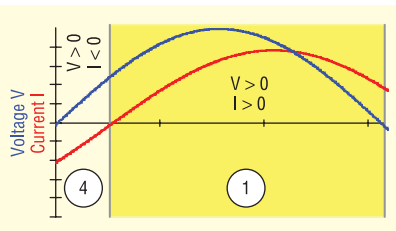


Рис. 10. Робоча область 1

Назва «короткий/довгий шлях комутації» також вказує на геометричну довжину комутацій; «коротка» комутація відбувається або у верхній, або в нижній половині модуля 3L, а при «довгий» комутації струм змінюється від верхньої до нижньої половини (або навпаки).

«Коротка» комутація (рис. 9) у верхній половині модуля (індекси пристроїв 1, 2 та 5) активна в робочій області 1 (рис. 10); напруга і струм мають позитивну полярність.

Комутація відбувається між T1 та D5; струм протікає від DC+ через T1 та T2 до

клемы «АС», поки T1 перебуває в увімкненому стані. Коли T1 вимикається, струм комутується до обмежувального діода D5; в цей час струм протікає від N через D5 та T2 до клемы «АС». Транзистор T2 залишається увімкненим весь час.

«Довга» комутація для вихідного струму позитивної полярності (рис. 11) відбувається в обох напрямках між D5/T2 у верхній половині модуля та між D3/D4 у нижній половині => по всьому пристрою.

Ця комутація по всьому пристрою зумовлена тим, що в робочій області 2 (рис. 12) струм має позитивну полярність (тече від ланки постійного струму до навантаження), тоді як полярність вихідної напруги негативна.

Інший короткий комутаційний шлях активний в робочій області 3 (рис. 13, 14), у нижній половині модуля. Вихідні струм і напруга мають негативну полярність.

Комутація відбувається між T4 та D6; струм протікає від клемы «АС» через T3 та T4 до клемы DC-, поки T4 пере-

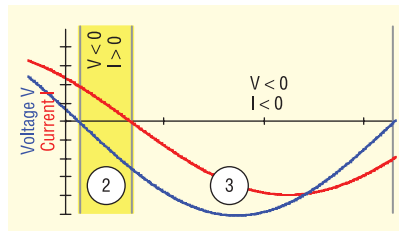


Рис. 12. Робоча область 2

буває в увімкненому стані. Як тільки T4 вимикається, струм комутується до обмежувального діода D6; новий шлях для струму проходить від клемы «АС» через T3 та D6 до N. Транзистор T3 залишається постійно увімкненим.

Довгий комутаційний шлях для струму негативної полярності (рис. 15) проходить в обох напрямках між D6/T3 у нижній половині модуля та між D1/D2 у верхній половині через увесь пристрій.

«Довга» комутація в робочій області 4 (рис. 16) супроводжується протіканням вихідного струму негативної полярності

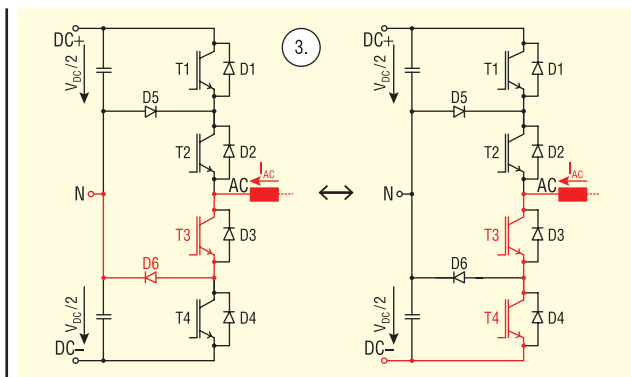


Рис. 13. Короткий комутаційний шлях у топології NPC для робочої області 3

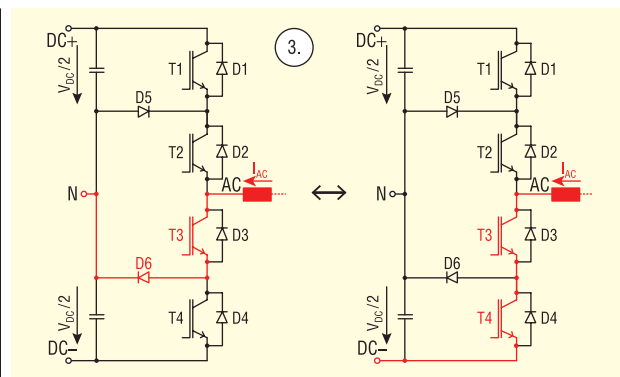


Рис. 15. Довгий комутаційний шлях у топології NPC для робочої області 4

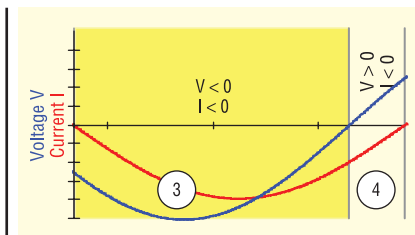


Рис. 14. Робоча область 1

(що протікає від клем «АС» до ланки постійного струму) та напругою позитивної полярності.

Топологія TNPC

У топології TNPC немає «коротких» або «довгих» шляхів комутації; усі шляхи мають однакову геометричну довжину з одним зовнішнім ключем (індекси 1 або 4; або IGBT, або діод) та два внутрішні ключі (або T2 та D3, або T3 та D2). У нормальному режимі роботи комутація завжди відбувається в одному зовнішньому та двох внутрішніх ключах; комутація між T1/D1 та T4/D4 відсутня.

У робочій області 1 (рис. 17, 10) вихідна напруга та струм мають позитивну полярність, а струм тече до клем «АС». Комутація відбувається між T1 та T2/D3; струм протікає від DC+ через T1 до клем «АС», поки транзистор T1 перебуває в увімкненому стані. Коли T1

вимикається, струм комутується до внутрішніх ключів T2/D3 і протікає від клем «N» через T2 та D3 до клем «АС». Транзистор T2 залишається увімкненим весь час; щойно T1 вмикається, діод D3 блокує напругу і тим запобігає короткому замиканню верхньої половини ланки постійного струму.

У робочій області 2 (рис. 18) полярність вихідного струму залишається позитивною, тоді як напруга має негативну полярність (рис. 12). Він комутується в обох напрямках між внутрішніми перемикачами T2/D3 та діодом D4.

На рисунку 19 показано шляхи протікання струмів у робочій області 3; струм комутується між T4 та внутрішніми ключами T3/D2. Струм протікає від клем «АС» до ланки постійного струму, а струм і напруга мають негативну полярність (рис. 14). Транзистор T3 залишається постійно увімкненим, поки транзистор T4 перебуває у ввімкненому стані, а діод D2 блокує напругу та запобігає короткому замиканню половини ланки постійного струму з негативною полярністю.

У робочій області 4 (рис. 20) вихідний струм має негативну полярність, тоді як полярність напруги є позитивною (рис. 16). Струм комутується в обох напрямках між внутрішніми ключами T3/D2 та діодом D1.

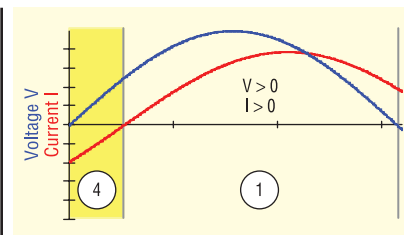


Рис. 16. Робоча область 2

Топологія ANPC HF/LF

В ANPC HF/LF напруга вхідного каскаду має високу частоту («HF», наприклад, 10 кГц), тоді як у вихідного каскаду частота напруги значно нижча («LF», наприклад, 50 Гц). Напруга вихідного каскаду по чергову набуває позитивну та негативну полярність.

У частині «HF» топології ANPC використовуються лише короткі комутаційні шляхи, оскільки потрібно комутувати струм тільки між сусідніми ключами. Під час кожної «короткої» комутації працюють лише два ключі. Коли вихідна напруга змінює полярність, тобто відбувається перехід з робочої області 1 до робочої області 2 (позитивна полярність → негативна полярність), або перехід з робочої області 3 до робочої області 4 (негативна полярність → позитивна полярність), тоді використовується довгий комутаційний шлях з чотирма ключами.

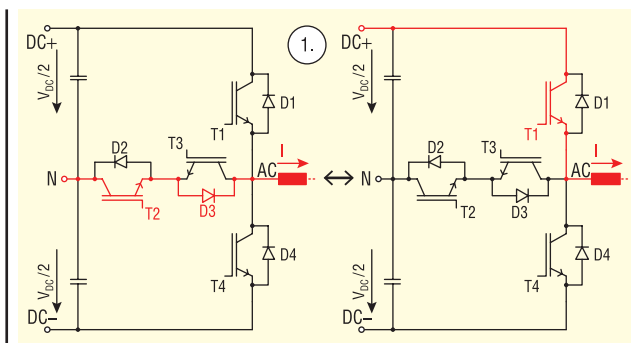


Рис. 17. Комутаційний шлях у топології TNPC для робочої області 1

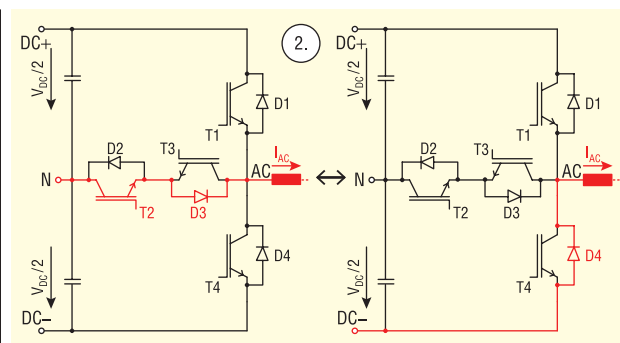


Рис. 18. Комутаційний шлях у топології TNPC для робочої області 2

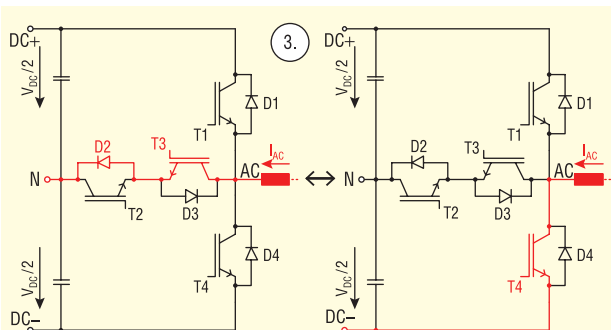


Рис. 19. Комутаційний шлях у топології TNPC для робочої області 3

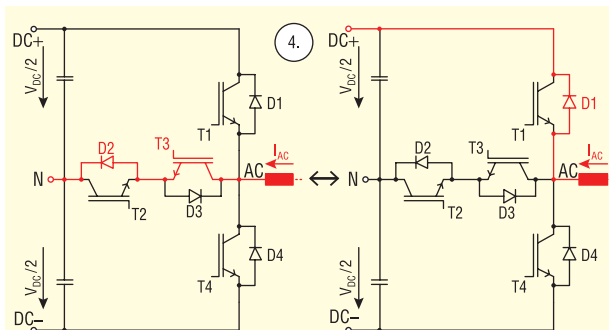


Рис. 20. Комутаційний шлях у топології TNPC для робочої області 4

У робочій області 1 (рис. 10, 21) вихідна напруга та струм мають позитивну полярність, а струм тече до клем «АС». Комутація відбувається між T1 та D5; струм протікає від DC+ через T1 та T2 до клем «АС», поки T2 перебуває в увімкненому стані. Коли T1 вимикається, струм комутується до D5; після цього струм протікає від N через D5 та T2 до клем «АС». Весь цей час транзистор T2 залишається постійно увімкненим.

У робочій області 2 (рис. 22) полярність вихідного струму залишається позитивною, тоді як полярність напруги стає негативною (рис. 12). Струм комутується в обох напрямках між T6 та D4.

На рисунку 23 показано шляхи протікання струму для робочої області 3; струм комутується між T4 та D6, і протікає від клем «АС» до ланки постійного струму, а полярність струму і напруги є негативною (рис. 14). Транзистор T3 залишається постійно увімкненим.

У робочій області 4 (рис. 24) вихідний струм має негативну полярність, тоді як полярність напруги є позитивною (рис. 16). Струм комутується в обох напрямках між T5 та D1. Перехід між позитивною та негативною полярністю вихідної напруги має довгу комутацію через чотири ключі; T2 вимкнений на половину періоду, а T3 перебуває в увімкненому стані (рис. 25).

Перехід в іншому напрямку, від негативною до позитивної полярності вихідної напруги, також має довгу комутацію через чотири ключі; T3 вимкнений на половину періоду, T2 увімкнений (рис. 26).

На додаток до двох показаних переходів між робочими областями 1 і 2 (рис. 25) та робочими областями 3 і 4 (рис. 26) можливий третій перехід безпосередньо від DC+ до DC-, з найбільшою індуктивністю розсіювання. Тому його ніколи не використовують. Четвертий перехід — це два шляхи, що ведуть від N до АС або навпаки. На практиці четвертий шлях не використовується.

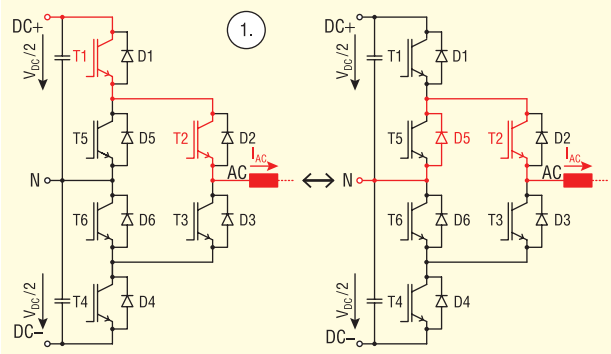


Рис. 21. Комутаційний шлях у топології ANPC HF/LF для робочої області 1

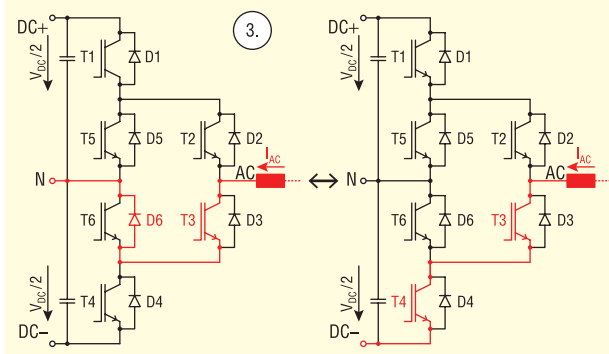


Рис. 23. Комутаційний шлях у топології ANPC HF/LF для робочої області 3

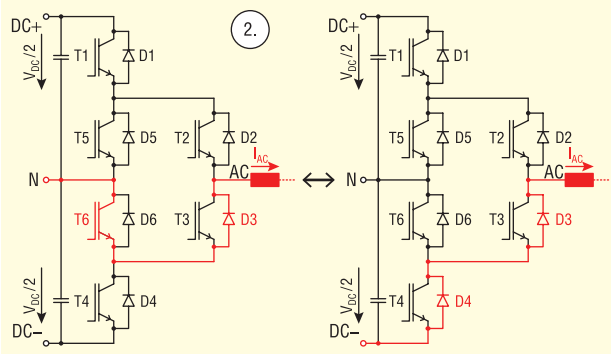


Рис. 22. Комутаційний шлях у топології ANPC HF/LF для робочої області 2

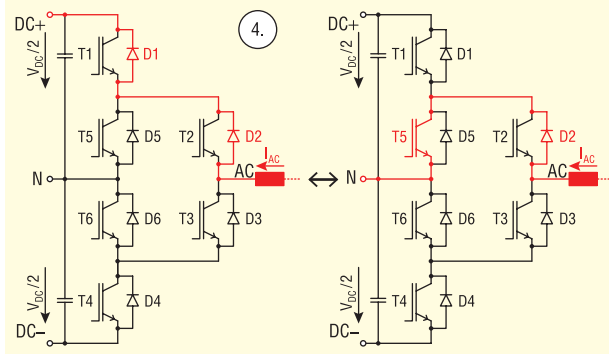


Рис. 24. Комутаційний шлях у топології ANPC HF/LF для робочої області 4

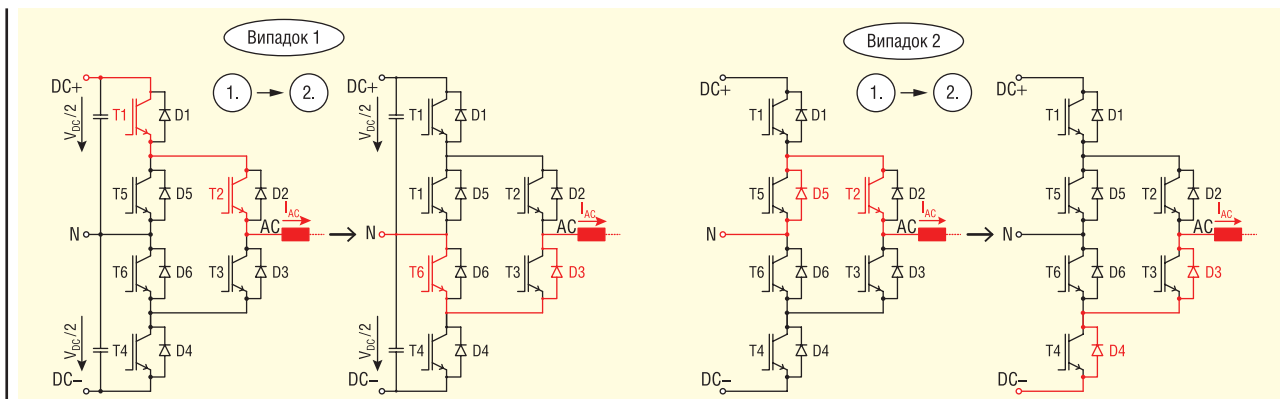


Рис. 25. Переходи між робочими областями 1 і 2 у топології ANPC HF/LF

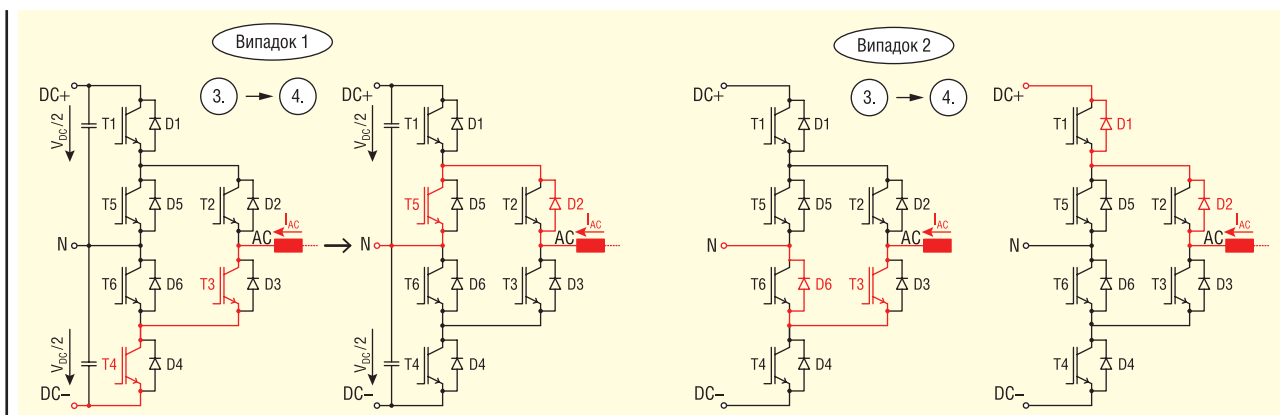


Рис. 26. Переходи між робочими областями 3 і 4 у топології ANPC HF/LF

Топологія ANPC LF/ HF

У топології ANPC LF/HF напруга вхідного каскаду має низьку частоту («LF», наприклад, 50 Гц), тоді як у вихідного каскаду частота напруги значно вища («HF», наприклад, 10 кГц). Напруга вхідного каскаду по чергову набуває позитивну та негативну полярність.

У частині «HF» топології ANPC LF/HF комутації потребують геометрично довгого шляху. Тому ця топологія найбільше підходить для невеликих універсальних корпусів силових модулів, де контури комутації можна оптимізувати з погляду індуктивності розсіювання.

Зміна полярності вихідної напруги супроводжується або переходом з робочої області 1 до робочої області 2 (позитивна → негативна), або переходом з робочої області 3 до робочої області 4 (негативна → позитивна), що потребує короткого контуру комутації.

У робочій області 1 (рис. 10, 27) полярності вихідної напруги та струму позитивні, а струм тече до клемі «АС». Комутація відбувається в обох напрямках між T1/T2 та T6/D3; струм протікає від DC+ через T1 та T2 до клемі «АС», поки транзистор T2 перебуває в увімкненому стані. Коли T2 вимикається,

струм комутується до T6; струм починає протікати від N через T6 та D3 до клемі «АС». Транзистори T1 та T6 залишаються увімкненими весь час.

У робочій області 2 (рис. 28) полярність вихідного струму залишається позитивною, коли полярність напруги негативна (рис. 12). Він комутується в обох напрямках між D5/T2 та D3/D4. T4 та T5 залишаються увімкненими весь час.

На рисунку 29 показано шляхи комутації для робочої області 3; струм комутується між T5/D2 та T3/T4. Струм протікає від клемі «АС» до ланки постійного струму, а полярності струму і напруги є

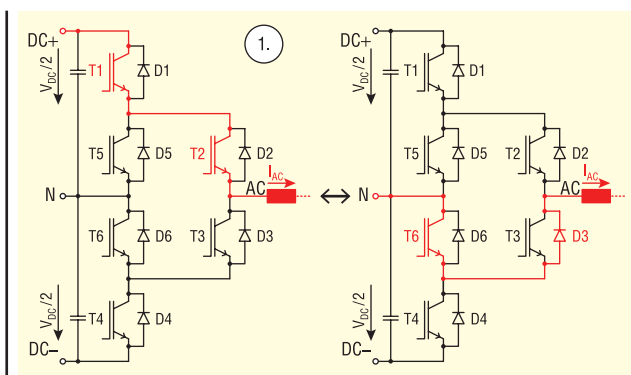


Рис. 27. Комутаційний шлях у топології ANPC LF/HF для робочої області 1

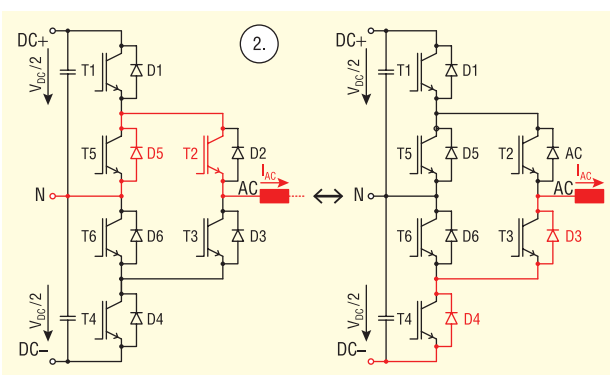


Рис. 28. Комутаційний шлях у топології ANPC LF/HF для робочої області 2

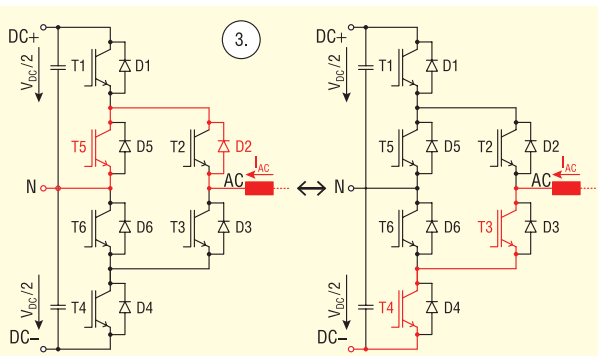


Рис. 29. Комутаційний шлях у топології ANPC LF/HF для робочої області 1

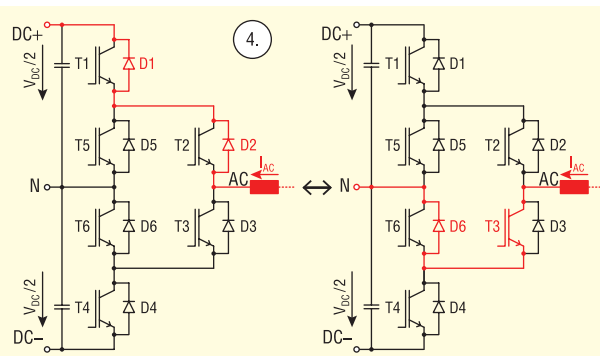


Рис. 30. Комутаційний шлях у топології ANPC LF/HF для робочої області 2

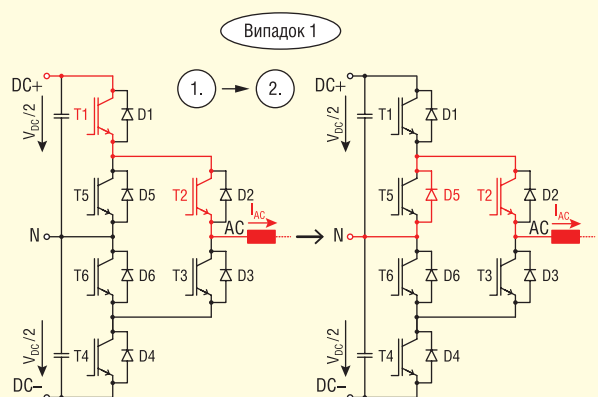


Рис. 31. Переходи між робочими областями 1 і 2 у топології ANPC LF/HF

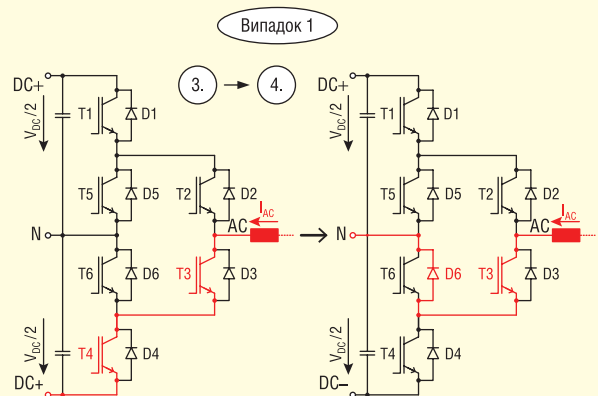


Рис. 32. Переходи між робочими областями 3 і 4 у топології ANPC LF/HF

негативними (рис. 14). Транзистори T4 та T5 залишаються постійно увімкненими.

У робочій області 4 (рис. 30) полярність вихідного струму негативна, тоді як полярність напруги позитивна (рис. 16). Струм комутується між D1/D2 та T3/D6. Транзистори T1 та T6 залишаються увімкненими весь час.

Перехід між позитивною та негативною полярностями вихідної напруги відбувається шляхом короткої комутації між двома ключами (рис. 31).

Перехід у протилежному напрямку, від негативною до позитивної полярності вихідної напруги, також відбувається

шляхом короткої комутації між двома ключами (рис. 32).

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,**

Далі буде

**e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,
semikron@ukr.net,
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. **СН**