

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»

E-mail: sp.tsdrive@gmail.com

3L ПЕРЕТВОРЮВАЧ

Аналіз конструкції модуля

Під час проектування спеціалізованого 3L-модуля особлива увага приділяється шляхам комутації: довгі комутаційні шляхи мають великі індуктивності розсіювання. Коли струм навантаження, який протікає по провіднику з великою індуктивністю розсіювання, вимикається, виникають великі стрибки напруги. Щоб уникнути виходу з ладу напівпровідника, стрибок напруги не повинен перевищувати напругу запирання транзистора. Цього можна досягти, або зменшивши максимально допустиму напругу ланки постійного струму та дозволивши більші перевищення напруги, або зменшивши індуктивності розсіювання, що зменшить згадані стрибки напруги.

Звичайно, кращим рішенням є зменшення індуктивності розсіювання та забезпечення вищих напруг постійного струму (що збільшує можливу вихідну напругу змінного струму, а отже, і потужність модуля).

Особливим випадком є модуль ANPC HF/LF, коли він зібраний з 2L-модулів. Більшу індуктивність розсіювання довгих комутаційних шляхів у тракці «НЧ» (*Low Frequency, LF*) можна нейтралізувати, використовуючи більші номінали резисторів у колі затвора для зменшення швидкодії конкретного напівпровідника і, таким чином, зменшення di/dt , що, своєю чергою, зменшує стрибок напруги. В результаті енергія перемикавання, яку необхідно розсіяти, стає прийнятною, оскільки комутаційний шлях «НЧ» перемикається дуже рідко (з лінійною частотою), і внесок у загальну енергію втрат на перемикавання є незначним.

Налаштування зі стандартними модулями 2L

Теоретично, 3L-топології можна налаштувати з стандартними 2L-модулями, що вже існують (рис. 33–34). Але тоді збірка вимагатиме з'єднання модулів шинами та буде дуже громіздкою.

Топологія NPC

На практиці налаштування топології NPC з модулів 2L (рис. 33) спричиняє дуже довгі шляхи комутації, особливо для комутацій між модулями.

Через наявність індуктивності розсіювання ці великі комутаційні шляхи спричиняють дуже великі стрибки напруги, тому показані на рисунку 33 схеми не мають переваг порівняно з топологією 2L.

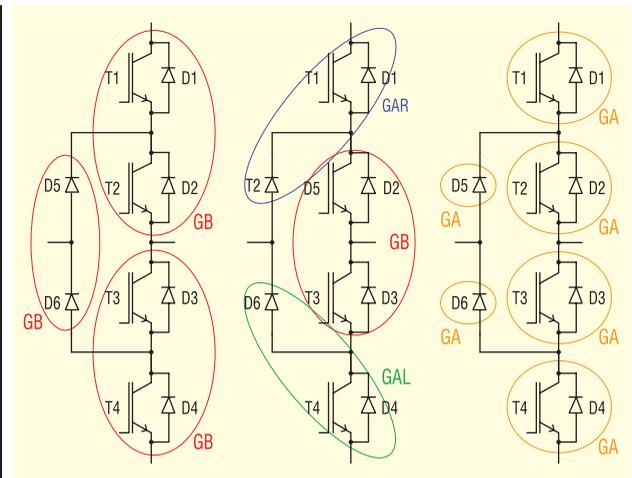


Рис. 33. Конфігурації для створення топології NPC 3L з модулів 2L

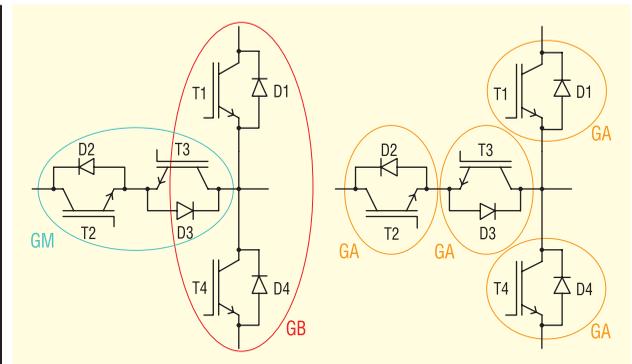


Рис. 34. Конфігурації для створення топології TNPC 3L з модулів 2L

Топологія TNPC

У конфігурації TNPC з модулів 2L (рис. 34) кожен шлях комутації проходить за межі модулів. Як і в випадку з конфігурацією NPC, індуктивності розсіювання призводять до перепаду напруг, що робить це рішення непривабливим.

Топологія ANPC

Топологію ANPC можна налаштувати з модулів 2L, як показано на рисунку 35.

При використанні ANPC HF/LF велика кількість комутацій відбувається в частині «HF», між ключами 1 та 5 (а також між ключами 6 та 4 відповідно), тобто в межах вже оптимізованих

* Закінчення. Початок див. CHIP NEWS, № 6–7, 2025.

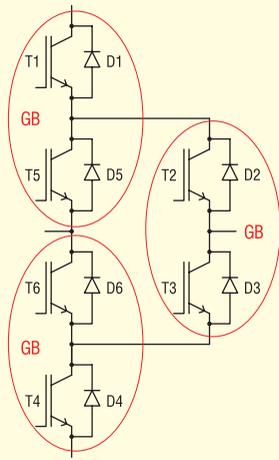


Рис. 35. Конфігурації для створення топології ANPC 3L з модулів 2L

2L-модулів. Лише зміна полярності вихідної напруги відбувається довгим шляхом комутації між усіма 2L-модулями. Оскільки таке перемикання відбувається з лінійною частотою, воно не має великого внеску в загальну енергію втрат на перемикання, якщо процес комутації в геометрично довгих комутаційних шляхах розтягнути в часі для зменшення перенапруг, використовуючи більші номінали для резисторів затвора (що збільшує енергію втрат на перемикання цих конкретних комутацій).

Для топології ANPC LF/HF схема з 2L модулів не є привабливою, оскільки велика кількість комутацій відбувається через усі 2L модулі. Зменшення швидкості перемикання матиме великий вплив на

зменшення енергії втрат на перемикання. Таким чином, ANPC LF/HF повинен бути спеціалізованим багатофункціональним силовим модулем з внутрішньо оптимізованими шляхами комутації.

Спеціалізовані модулі 3L

Оскільки налаштування топології 3L з модулів 2L видається не найкращим рішенням, потрібно розробляти нові конструкції модулів, що відповідають спеціальним вимогам технології 3L.

На самому початку необхідно вибрати розмір модуля та його відповідну потужність: чим більшим є розмір модуля, тим більше вихідної потужності він може забезпечити, оскільки можна збільшити площу чипа. На жаль, більший розмір модуля також означає більшу індуктивність розсіювання, що призводить до великих стрибків напруги під час комутації, обмежуючи таким чином максимальний струм.

Висока потужність може бути реалізована або одним великим модулем, або декількома меншими модулями, з'єднаними паралельно. Останнє з наведених вище рішень вимагає еквівалентної кількості драйверних блоків, які потребують паралельного увімкнення (з добре відомими проблемами: вартість, розмір, тригерний ефект окремих драйверів, струм компенсації при використанні паралельних драйверів тощо).

Модулі Semikron Danfoss 3L

Компанія Semikron Danfoss пропонує низку модулів 3L, спеціально роз-

роблених для мінімізації індуктивності розсіювання. Лінійка модулів починається з SEMITOP (номінальний струм від 10 до 150 A), далі йдуть MiniSKiiP (75–400 A) і закінчуються модулями SEMiX з номінальним струмом від 150 до 600 A. Модулі SEMITRANS пропонуються з розділеною топологією (два силові модулі утворюють одну 3L-фазну гілку) до 1400 A.

На рисунку 36 показано частину силових модулів, що пропонуються з топологією NPC, TNPC або ANPC у різних класах напруги. Додаткову та детальнішу інформацію містить наш веб-сайт [1].

КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ ТОПОЛОГІЇ 3L

Стандартні послідовності операцій

Коли всі пристрої вимкнено і перетворювач 3L NPC або TNPC починає роботу, першим має бути увімкненим один із внутрішніх IGBT. У випадку позитивної полярності вихідної напруги це буде транзистор T2. Через короткий час (коли T2 повністю увімкнено) може почати роботу транзистор T1. Для операцій вимкнення потрібно дотримуватися зворотного порядку: перед вимкненням транзистора T2 необхідно переконатися, що T1 повністю вимкнено. Цього можна досягти, вимкнувши T2 через короткий час (1..3 мкс) після появи сигналу вимкнення для T1; цей мертвий час добре відомий як час блокування між

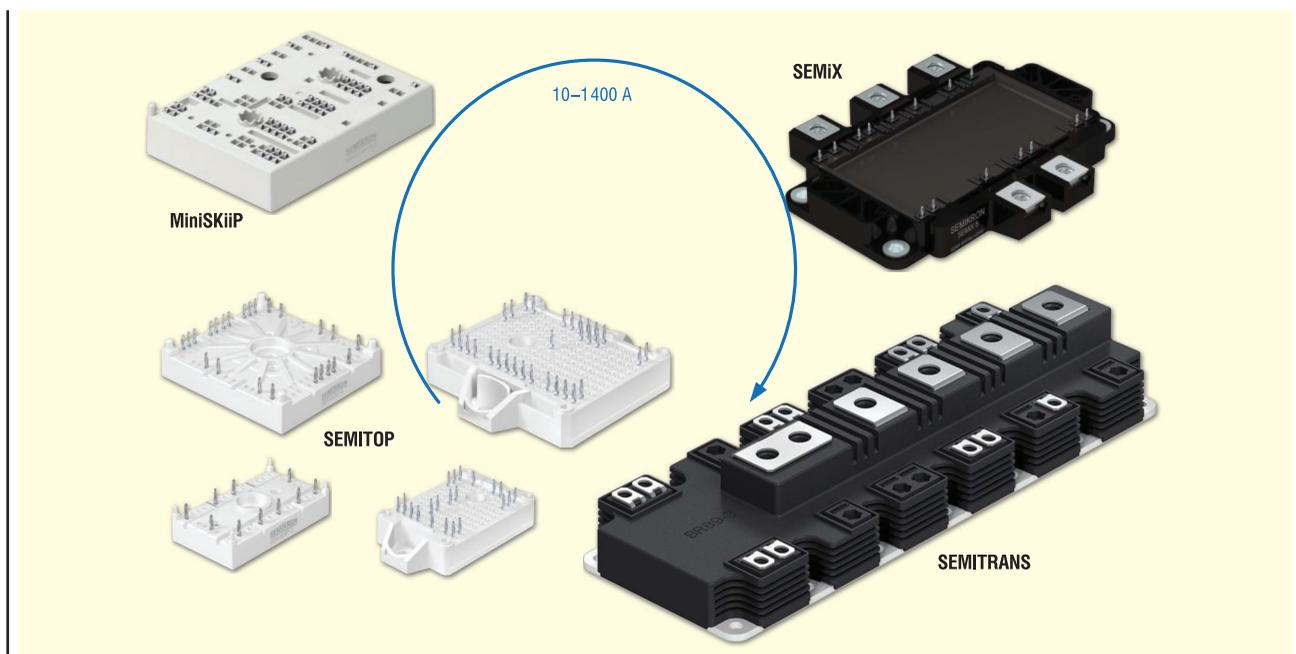


Рис. 36. Портфоліо модулів Semikron Danfoss 3L (вибірково)

верхніми та нижніми ключами у драйверах затворів Semikron Danfoss 2L.

NPC та TNPC

Сигнали затворів T1 та T3 (або, відповідно, T2 та T4) є інверсними. Тому необхідно переконатися, що один IGBT надійно вимкнено перед увімкненням іншого.

NPC

Коли внутрішній IGBT (T2 або T3) вимикається раніше за відповідний зовнішній IGBT (T1 або T4), до внутрішнього ключа прикладається повна напруга ланки постійного струму. Якщо ця напруга буде вищою за блокувальну напругу цього напівпровідника, він вийде з ладу.

Як показано на рисунку 6, існують заборонені послідовності перемикання, оскільки вони є деструктивними для напівпровідників.

TNPC

До перетворювачів з топологією TNPC застосовуються ті ж правила, що й для топології NPC. Коли внутрішній IGBT (T2 або T3) вимикається раніше за відповідний зовнішній (T1 або T4), струм навантаження комутується від зовнішнього IGBT (T1 або T4) до зовнішнього діода (D4 або D1). Такий довгий шлях комутації має велику індуктивність, і тому вимикання зовнішнього IGBT буде супроводжуватися більшим перевищенням напруги. Якщо це перевищення перевищить блокувальну напругу зовнішнього IGBT, він вийде з ладу.

Подальше вимкнення ключів у іншому порядку або вимкнення всіх IGBT одночасно можливе лише тоді, коли не перевищено їх напругу блокування.

Як показано на рисунку 7, існують заборонені шаблони перемикання, оскільки вони є деструктивними. Цих станів слід уникати, інакше пристрій буде виведено з ладу.

ANPC

Для топології ANPC зовнішні ключі T1 (що перемикаються одночасно з T6) та T4 (що перемикаються одночасно з T5) також повинні бути вимкнені раніше, ніж внутрішні ключі T2 та T3. Інакше до внутрішнього ключа може бути прикладена повна напруга постійного струму, яка зазвичай перевищує блокувальну напругу напівпровідника, що призводить до його руйнування.

Аварійне відключення

У застосуванні 2L може статися кілька подій, які призводять до негайного

вимикання ключів драйвером для захисту напівпровідників. Можливими подіями можуть бути:

- теплове перевантаження;
- перевантаження по струму;
- вихід з режиму насичення.

Будь-який із цих сценаріїв також має призвести до швидкого вимкнення 3L-застосування.

Топології NPC, TNPC та ANPC

Необхідно переконатися, що виконується правильна послідовність вимкнення: спочатку зовнішній IGBT (T1 або T4), потім внутрішній IGBT (T2 або T3), щоб уникнути руйнування транзистора через пробій напруги.

Якщо теплове перевантаження або струм, що повільно зростає, можна контролювати за допомогою датчиків NTC/PTC та струму, і дати контролеру певний час для реакції у відповідний момент, то подія «вихід з режиму насичення» залишає максимум 10 мкс для безпечного вимкнення ключів.

Коли зовнішній ключ (T1 або T4) починає знижувати рівень насичення, драйвер повинен негайно його вимкнути. Впродовж 1...3 мкс також має вимкнутися відповідний внутрішній IGBT.

Ситуація ускладнюється, коли вихід зі стану насичення відбувається на внутрішньому ключі (T2 або T3): під час контролю стану насичення драйвер повинен мати інформацію про те, ввімкнено чи ні також відповідний зовнішній ключ. Якщо він увімкнений, драйвер затвора повинен негайно вимкнути зовнішній IGBT, зачекати 1...3 мкс, а потім вимкнути й внутрішній IGBT. Якщо жоден зі зовнішніх IGBT не ввімкнено, драйвер повинен негайно вимкнути внутрішній IGBT. У будь-якому випадку драйвер генерує повідомлення про помилку, щоб контролер міг також вимкнути інші пристрої перетворювача та таким чином перевести перетворювач у безпечний стан.

ЗАХИСТ ПРИСТРОЇВ ТОПОЛОГІЇ 3L ВІД ПЕРЕВИЩЕННЯ НАПРУГИ

Як тільки шлях струму переривається (вимкненням IGBT або діода), напруга на вимкненому пристрої починає зростати. Це перевищення напруги спричинене енергією, що накопичується в магнітному полі навколо шляху струму. Енергія лінійно зростає зі зростанням індуктивності розсіювання L_s ($E = 0.5 \times L_s \times i^2$); наприклад, подвоєна паразитна індуктивність L_s спричиняє

подвоєну енергію E . Перевищення напруги ($V = L_s \times di/dt$) додається до напруги ланки постійного струму; сума не повинна перевищувати блокувальну напругу напівпровідника, інакше він може вийти з ладу.

Оскільки модуль 3L більший за модуль 2L, а шлях для протікання струму проходить через два ключі, шлях струму стає довшим, що збільшує індуктивність розсіювання. Особливо слід звертати увагу на довгі комутаційні шляхи (топологія NPC; T2/D5 \leftrightarrow D3/D4 або T3/D6 \leftrightarrow D1/D2) під час проектування модуля.

Хоча за допомогою грамотного проектування можна досягти низьких значень індуктивності розсіювання, побудувати низькоіндуктивну 3L-установку зі стандартними 2L-модулями дуже складно. Довгий комутаційний шлях проходить щонайменше через три модулі в топології NPC (рис. 33) або через два чи три модулі в топології TNPC (рис. 34), що призводить до індуктивності розсіювання, значно більшої, ніж у спеціалізованого модуля 3L. Якщо припустити, що di/dt однакове, така 3L-установка створює набагато більше перевищення напруги. З цієї причини Semikron Danfoss рекомендує використовувати спеціальні модулі 3L.

Якщо немає подальших можливостей зменшити перевищення напруги в його першопричині (тобто зробити ще коротші з'єднання між напівпровідниками, що в певний момент стає неможливим), перевищення напруги необхідно обробляти таким чином, щоб захистити напівпровідники.

Снабер

Демпферні конденсатори снабера можна під'єднати між шинами DC+ та N, а також між шинами N та DC-. Їх необхідно розташовувати якомога ближче до модуля, а також вибрати відповідно до порад, наведених в [3].

Активне обмеження амплітуди

Ще одним способом боротьби з небезпечною напругою є використання схеми активного обмеження амплітуди на модулях IGBT (рис. 37).

Ця схема складається з кількох послідовно з'єднаних супресорів (TVS), які мають напругу пробою, трохи нижчу за напругу пробою IGBT. Послідовно з'єднані супресори увімкнені між колектором та затвором пристрою, який потрібно захистити від перенапруги.

Коли ключ вимкнено і напруга на ньому зростає вище напруги пробою діодів TVS, вони починають проводити

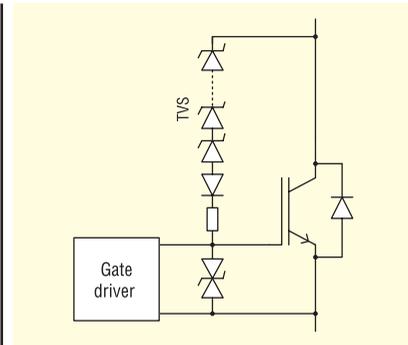


Рис. 37. Проста схема активного обмеження амплітуди

струм у затвор IGBT. Транзистор також починає проводити струм, і це призводить до пробоя напруги на діодах TVS, обмежуючи напругу на IGBT; як тільки енергія, накопичена в магнітному полі, вичерпується, діоди TVS знову переходять у режим блокування, і IGBT вимикається.

Більше інформації можна буде знайти в наступних номерах журналу «CHIP NEWS».

ОБЧИСЛЕННЯ ВТРАТ ДЛЯ ТОПОЛОГІЇ 3L

Для вибору 3L-модуля, який найкраще підходить для конкретного застосування, необхідно розрахувати втрати потужності, що виникають у різних напівпровідниках. Нижче показано рівняння для розрахунку втрат потужності в 3L NPC та 3L TNPC.

NPC

Втрати потужності десяти напівпровідників у топології 3L NPC можна розрахувати за формулами, наведеними на рисунку 38.

TNPC

Втрати потужності восьми напівпровідників у топології 3L TNPC відрізняються від втрат потужності 3L NPC і можуть бути розраховані за формулами, наведеними на рисунку 39.

ANPC

Див. нижче у розділі «SemiSel».

NPC, TNPC та ANPC

Рівняння справедливі для $M = 0 \dots 1$. Індекс модуляції M пов'язує напругу ланки постійного струму та середньоквадратичну напругу:

$$M = \frac{\sqrt{2}V_{RMS}}{\sqrt{3}\left(V_{DC}/2\right)}$$

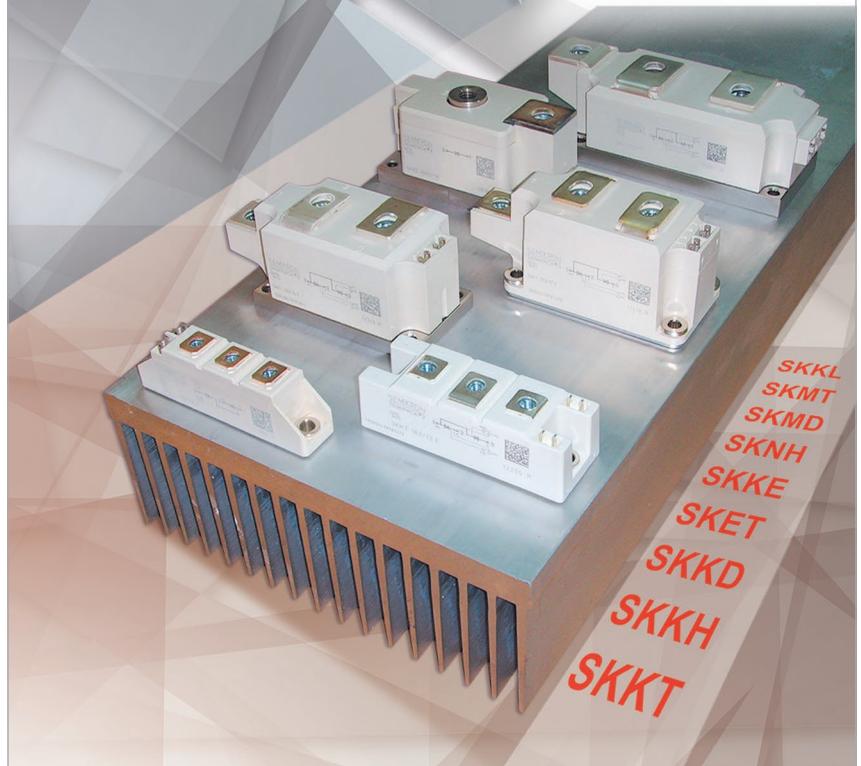
НВП "ТЕХНОСЕРВІСПРИВІД"

Офіційний представник Semikron Danfoss в Україні

www.tsdrive.com.ua



*Діодні, тиристорні
та діодно-тиристорні
модулі SEMİKRON
від офіційного
представника
в Україні*



03057, Київ-57, пр-т Берестейський, 56, оф. 335,
тел./факс: (044) 458 47 66

E-mail: sp.tsdrive@gmail.com, semikron@ukr.net
www.tsdrive.com.ua, www.semismart.com.ua

T1 та T4

$$P_{cond} = \frac{M\hat{I}}{12\pi} \left\{ 3V_{ce0} [(\pi - \varphi) \cos\varphi + \sin\varphi] + 2r_{ce}\hat{I}(1 + \cos\varphi)^2 \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 + \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

T2 та T3

$$P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \left\{ V_{ce0} [12 + 3M(\varphi \cos\varphi - \sin\varphi)] + r_{ce}\hat{I} [3\pi - 2M(1 - \cos\varphi)^2] \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 - \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

D5 та D6

$$P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \left\{ V_{r0} [12 + 3M[(2\varphi - \pi) \cos\varphi - 2\sin\varphi]] + r_r\hat{I} [3\pi - 4M(1 + \cos^2\varphi)] \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 + \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

D1 та D4

$$P_{cond} = \frac{M\hat{I}}{12\pi} \left\{ 3V_{r0} [(-\varphi) \cos\varphi + \sin\varphi] + 2r_r\hat{I}(1 - \cos\varphi)^2 \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 - \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

D2 та D3

$$P_{cond} = \frac{M\hat{I}}{12\pi} \left\{ 3V_{r0} [(-\varphi) \cos\varphi + \sin\varphi] + 2r_r\hat{I}(1 - \cos\varphi)^2 \right\}$$

$$P_{sw} = 0$$

Рис. 38. Формули для розрахунку втрат потужності десяти напівпровідників у топології 3L NPC

T1 та T4

$$P_{cond} = \frac{M\hat{I}}{12\pi} \left\{ 3V_{ce0} [(\pi - \varphi) \cos\varphi + \sin\varphi] + 2r_{ce}\hat{I}(1 + \cos\varphi)^2 \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 + \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

T2 та T3

$$P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \left\{ V_{ce0} [12 + 6M(\varphi \cos\varphi - \sin\varphi) - 3M\pi \cos\varphi] + r_{ce}\hat{I} [3\pi - 4M(1 + \cos^2\varphi)] \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 - \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

D1 та D4

$$P_{cond} = \frac{M\hat{I}}{12\pi} \left\{ 3V_{r0} [(-\varphi) \cos\varphi + \sin\varphi] + 2r_r\hat{I}(1 - \cos\varphi)^2 \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 - \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

D2 та D3

$$P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \left\{ V_{r0} [12 + 3M(2\varphi \cos\varphi - 2\sin\varphi) - 3M\pi \cos\varphi] + r_r\hat{I} [3\pi - 4M(1 + \cos^2\varphi)] \right\}$$

$$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_i} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left[\frac{1}{2\pi} (1 + \cos\varphi) \right] \cdot G_i$$

Рис. 39. Формули для розрахунку втрат потужності восьми напівпровідників у топології 3L TNPC

Таблиця 1. Типові значення коефіцієнтів K_v , K_i та G_i для модулів Semikron Danfoss

Коефіцієнт	Si		SiC	
	IGBT	Діод	MOSFET	Діод модуля
K_v	1.4	0.6	1...1.4	0.6
K_i	1	0.6	1	0.6
G_i	1	1.15	1	1.15

Типові значення коефіцієнтів K_v , K_i та G_i для модулів Semikron Danfoss наведено в таблиці 1.

SEMISEL

Програма SemiSel — це онлайн-інструмент моделювання від Semikron Danfoss для розрахунку втрат і температур силових напівпровідників у специфічних застосуваннях замовника. Виходячи з конкретних значень для охолодження (наприклад, типу та продуктивності радіатора, температури навколишнього середовища) та електричних параметрів (наприклад, вхідної/вихідної напруги, частоти перемикання, струму навантаження тощо), SemiSel впродовж кількох секунд розраховує втрати потужності та температури переходів усіх IGBT та діодів. Змінюючи певні параметри, можна легко знайти оптимальне налаштування (тип модуля, частоту комутації тощо).

Найновішу версію SemiSel було розширено для розрахунку всіх 3L-топологій, розглянутих вище, і таким же зручним способом, як і для проектів з 2L-топологіями.

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.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 демферного конденсатора. CHIP NEWS. № 2. 2025 р. **СН**