

УДК 621.3. 314.572; 621.313.33

Б.Т. Кононов, А.О. Нечаус, Н.М. Рябуха

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ЗАХИСТ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

В статті розглядається система захисту силового каналу частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Наводяться матеріали щодо вибору параметрів елементів силового каналу

Ключові слова: силовий канал, частотно-регульований електропривод, асинхронний двигун, випрямляч, фільтр, інвертор напруги.

Вступ

Постановка науково-технічної задачі. Силовий канал частотно-регульованого електроприводу, в якому використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, складається з випрямляча, фільтра, автономного інвертора напруги або автономного інвертора струму. В потужних електроприводах, наприклад, електроприводах антен радіолокаційних станцій, струми, що протікають в колах силового каналу, досягають дуже великих значень і стають неприпустимо великими при перевантаженнях й коротких замиканнях. Захист від надструмів і перенапруг потрібний для забезпечення унеможливлення аварій у колах мережі, випрямляча, інвертора і асинхронного двигуна.

Мета статті полягає в обґрунтуванні схеми захисту частотно-регульованого електроприводу.

Аналіз літератури. Робота частотно-регульованого електроприводу розглядається в [1 – 3]. Нажаль, в відомій літературі не наводяться матеріали, які б дозволяли обґрунтувати схему захисту електроприводу.

Основний матеріал

При обґрунтуванні схеми захисту електроприводу пропонується, перш за все, визначити вразливі місця, короткі замикання в яких є небезпечними. В

подальшому пропонується, обчислити струми в небезпечних режимах й запропонувати технічні засоби, реалізація яких дозволить обмежити надструми і перенапруги. У відповідності до викладеної методики на рис. 1 наведена схема силового каналу частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

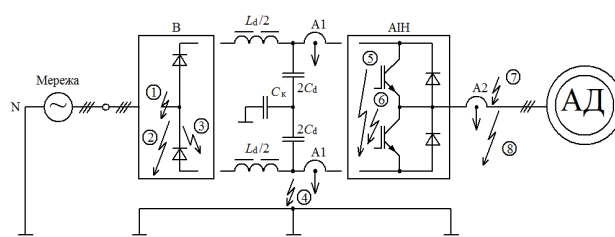


Рис. 1. Схема силового каналу

На схемі рис. 1 цифрами 1 – 8 позначені кола протікання аварійних струмів і відповідні їм аварійні режими. Поява аварійних струмів може бути викликана коротким замиканням кіл перетворювача і двигуна (1, 7), виходом з ладу силових напівпровідникових приладів перетворювача (3, 6), несанкціонованим включенням транзистора АИД (5), порушенням ізоляції і замиканням на корпус кіл перетворювача і двигуна (2, 4, 8) при живленні від мережі із заземленою нейтраллю. Наслідком вимикання аварійних струмів засобами захисту є виникнення

неприпустимих перенапруг, що вимагає застосування заходів щодо їх обмеження в колах вентилів випрямляча і, особливо, транзисторів АІН.

Аварійні режими 1 – 4 небезпечні для вентилів випрямляча. Завдяки великим кратностям ударних струмів значення інтегралів I^2t в цих вентилях (діодах, тиристорах) є дуже великими, й захист може бути забезпечено автоматичним вимикачем або швидкодіючими плавкими запобіжниками у вхідних колах перетворювача. Обмеження неповторюваних перенапруг у колах вентилів забезпечене захисними RC-колами або варисторами.

Найважливішими вузлами, що визначають працездатність і надійність транзисторного АІН, є ємнісний фільтр ланки постійного струму і головне коло розряду ємності фільтра на вихідні транзистори інвертора.

Сучасні напівпровідникові IGBT-вентилі допускають 8 – 10-кратне перевантаження відносно номінального струму у режимі короткого замикання тривалістю 10 – 20 мкс. Максимально припустимі напруги, прикладені до переходу IGBT, лежать у межах 1200 – 3500 В. Типовий час вимикання IGBT складає 1 мкс. Таким чином, при вмиканні інвертора з номінальною напругою в колі постійного струму 514 В з режиму короткого замикання сумарна індуктивність ємнісного фільтра й ошинковки головного кола (у мкГн) повинна знаходитися в межах від $75/I_n$ до $150/I_n$. Для приводу потужністю 100 кВт вона повинна бути 0,1 мкГн і мусить зменшуватися при збільшенні потужності.

Для отримання відповідних значень параметрів фільтра слід застосовувати плоскопаралельну ошинкувку головного кола і малоіндуктивні електричні конденсатори, власна індуктивність яких повинна бути на рівні 0,08 – 0,1 мкГн. У приводах більшої потужності слід застосовувати паралельне з'єднання вхідних інверторів, що підключаються до загальної трифазної вихідної шини через вирівнювальні реактори. При цьому коефіцієнт нерівномірності розподілу вихідних струмів окремих інверторів повинен не перевищувати 1,05 – 1,15 при кількості паралельних кіл від 2 до 12.

Елементи силового фільтра ланки постійної напруги – перетворювача займає до 50 % його об'єму і складає до 40 % його маси. Розрахункова ємність C_d фільтра у перетворювачів повинна дорівнювати приблизно 100 мкФ/кВ. Найпридатнішими для цього є електролітичні конденсатори, які мають велику питому ємність і призначені для роботи в колах постійної та пульсуючої напруги. Оскільки максимальні напруги таких конденсаторів дорівнюють 350 – 400 В, у схемі фільтра вони з'єднуються в паралельно-последовні групи.

Аварійні струми режимів 5 – 8 протікають у колах транзисторів АІН, істотно більш вразливих до

струмових перевантажень. Захистити IGBT силових кіл апаратними засобами практично неможливо. При коротких замиканнях в точках 5 – 7 ситуація погіршується завдяки наявності конденсатора C_d (1000 мкФ) фільтра ланки постійного струму. Тут можливе лише термінове (1 – 3 мкс) вимикання транзисторів по колах керування. Для цього у колах силового каналу електроприводу потрібно ввімкнути безінерційні датчики струму. Аварійне вимикання транзисторів здійснюється спеціальними формувачами керуючих сигналів – інтелектуальними драйверами з функціями захисту.

На схемі рис. 1 показані два варіанти вмикання датчиків струму: А1 у вихідних колах (постійного струму) або А2 у вихідних колах (змінного струму) АІН. Датчики А1 фіксують аварійні струми при коротких замиканнях в точках 5 – 8. Ввімкнення двох датчиків А1 обумовлено коротким замиканням в точці 8, при якому аварійний струм протікає лише по одному із двох вхідних кіл АІН. В інших випадках коротких замикань достатньо одного датчика А1. Датчики А2 фіксують струми коротких замикань в точках 6 – 8 (при короткому замиканні в точці 6 фіксується дисбаланс трьох фазних струмів АД). Коротке замикання в точці 5 при цьому вмикається системою керування, а також спеціальною схемою ввімкнення і властивостями драйверів. З позицій мінімізації паразитної індуктивності вхідних кіл АІН і відповідного зменшення комутаційних перенапруг на IGBT доцільніший варіант вмикання датчиків А2.

Відзначимо особливість короткого замикання в точці 8: швидкість di/dt наростання аварійного струму обмежена індуктивністю $L_d/2$ і мережі. Час досягнення цим струмом значення уставки спрацьовування захисту може виявитися достатнім для теплового пробою IGBT. Ця обставина актуальна при використанні датчиків А1, датчики А2 відразу ж фіксують дисбаланс трьох струмів. Для збільшення di/dt і форсування спрацьовування захисту у схемах з використанням датчиків А1 середня точка конденсаторів C_d фільтра через додатковий конденсатор C_k невеликої ємності (4 – 10 мкФ) з'єднана з заземленим корпусом. На час заряду конденсатора C_k індуктивність мережі $L_d/2$ виключається з контуру короткого замикання. При цьому необхідно враховувати зростання напруги на конденсаторі C_d у режимах неробочого ходу і переривчастого струму приблизно в 1,21 рази в порівнянні з напругою режиму безперервного струму випрямляча.

Для одержання необхідної індуктивності L_d відповідно до номінального струму фільтра також використовується групове паралельно-последовне з'єднання однотипних дроселів. Дросель, як правило, слід виконувати на витому розрізному осерді з немагнітним зазором.

В електроприводі необхідно захищати обмотки АД від перенапруг, обумовлених проблемою “довгого кабелю” властивою IGBT-інверторам. При цьому можливо застосовувати два варіанти блоків вихідного фільтру. Блок паралельного фільтру – встановлюється в безпосередній близькості від АД (1 – 2 м) та блока послідовного фільтру, що підключається до вихідних затискачів перетворювача в розріз “довгого кабелю”. Критична довжина кабелю і необхідність застосування фільтрів визначаються характеристиками і режимом роботи IGBT-модулів, типом і конструктивними особливостями приводних АД, типом самого кабелю.

Для реалізації режиму електродинамічного гальмування електроприводу передбачається можливість установки і вмикання до шин ланки постійної напруги гальмівного транзисторного ключа, що працює в режимі широтно-імпульсного регулятора. Гальмівний резистор встановлюється поза перетворювачем і підключається до його відповідних силових затискачів. Потужність гальмівного контуру складає від 0,2 до 0,5 номінальної потужності електроприводу, що виявляється достатнім для більшості загальнопромислових застосувань. МСУ електроприводу містить канал керування гальмівним регулятором з відповідним програмним забезпеченням. Електроприводи з рекуперативним гальмуванням виконуються на основі реверсивного діод-транзисторного випрямляча.

Мікроконтролер виконує основні функції керування вузлами системи й обробку даних. Вибір мікроконтролера визначається вимогами до системи керування і вартістю. У структуру системи керування, крім мікроконтролера входять датчики напруги і струму, блоки введення-виведення, пульт керування і тощо. Обмін даними між цими блоками і мікроконтролером ведеться по локальній гальванічно розв’язаній магістралі RS-485 за допомогою єдиного протоколу, що забезпечує високу уніфікацію окремих вузлів системи керування і можливість заміни будь-якого вузла, у тому числі і мікроконтролера, вузлом іншого типу виконання.

Керування ключами перетворювача здійснюється за допомогою драйверів. Драйвери забезпечують моніторинг спаду напруги на емітер-колекторному переході транзистора для виявлення його аварійного стану, плавне вимкання його з режиму КЗ із наступним блокуванням імпульсів керування, контроль напруги керування на затворі транзистора. Вихідний підсилювач потужності забезпечує струм, достатній для керування IGBT. Схема також забезпечує можливість настроювання часу вмикання і часу вимкання транзистора з режиму короткого замикання.

Несуча частота ШІМ визначає частоту перемикавання транзисторів. Вибір частоти обумовлений оптимізацією двох критеріїв синусоїдності струмів двигуна – з ростом частоти підвищується якість кривої струму і мінімізуються динамічні втрати, у

IGBT – з ростом частоти збільшуються втрати потужності перемикавання.

Одним з недоліків таких систем є значні комутаційні втрати в IGBT пов’язані з комутацією останніх при кінцевих (ненульових) миттєвих значеннях струму і напруги (так звана жорстка комутація). Це обмежує граничну частоту комутації 8 – 10 кГц для звичайних і 16 – 20 кГц для швидких IGBT. Крім того, при високих швидкостях комутації і довгих провідниках до двигуна в них виникають значні перенапруги, що, досягаючи подвійних значень, можуть порушити ізоляцію обмоток двигуна або призвести до скорочення терміну його служби.

Одним із способів зниження комутаційних втрат є використання принципів “м’якої” комутації силових ключів інвертора – в нулі струму або напруги. Одна з таких схем з осцилограмою напруги на навантаженні наведена на рис. 2.

На шині постійного струму формується послідовність однополярних дзвоноподібних імпульсів напруги. Інвертор замість ШІМ використовує принципи число-імпульсної модуляції для формування на виході необхідної форми вихідної напруги. Комутація імпульсів відбувається при нулі напруги на шині постійного струму.

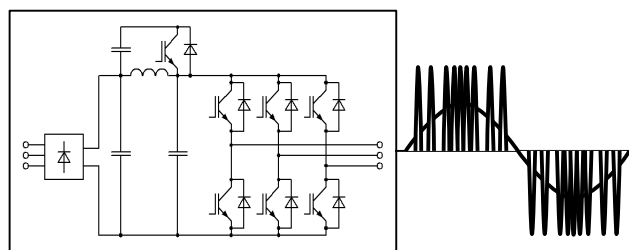


Рис. 2. Схема комутації силових ключів інвертора

При використанні в схемах захисту інтелектуальних силових модулів ІРМ, що поєднують в одному корпусі всю або значну частину схеми перетворювача частоти, а саме: системи керування, захисту, діагностики, режимної автоматики, джерел живлення власних потреб; досягається поєднання таких функцій:

- випрямлення напруги первинної мережі живлення змінного струму;
- перетворення високовольтної постійної напруги в змінну керуючу двигуном;
- гальванічну розв’язку силових і керуючих кіл;
- захист від коротких замикань, перенапруг і перевищення припустимої температури;
- формування 5- і 15-вольтової напруги постійного струму, що використовуються для живлення блоків системи, а також зовнішнього мікроконтролера або ШІМ-модулятора; підключення зовнішньої мережі, двигуна і керуючих впливів.

Керування модулем (рис. 3) здійснюється шляхом подачі на виходи драйвера послідовності сигналів, генерованих задаючим пристроєм користувача,

відповідно до алгоритму керування режимами роботи технологічної установки.

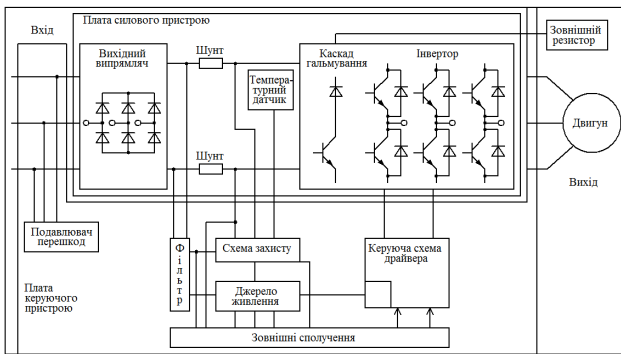


Рис. 3. Схема керуваного перетворювача частоти

Для оптимізації роботи пари перетворювач частоти – антенна РЛС електропривод повинен мати квадратичну характеристику U/f (напруга/частота). Квадратична форма характеристики дозволяє перетворювачу “підлаштуватися” під механізм і керувати ним по оптимальній характеристиці, зводячи до мінімуму втрати енергії. При зниженні навантаження на валу двигуна і, відповідно, зменшенні струму статора, перетворювач знижує напругу на статорі двигуна, зберігаючи частоту незмінною. Завдяки зниженню напруги зменшуються втрати енергії в статорі двигуна, а, значить, і загальні втрати енергії в приводній системі знижуються. При зростанні навантаження на валу двигуна процес протікає в зворотній послідовності і ПЧ повертається на номінальну характеристику.

З функцій корисних при керуванні слід також відмітити можливість “підхоплення” обертового двигуна і можливість автоматичного перезапуску при зниженні живлення.

В енергозберігаючому частотно-регульованому електроприводі підтримка потоку на оптимальному рівні і керування по мінімуму втрат можуть бути реалізовані без складного алгоритму за допомогою простих функціональних перетворювачів.

З умови визначення електромагнітних втрат АД впливає, що в сталому режимі втрати є функцією

трьох параметрів: моменту навантаження, потоку АД і частоти керування.

Умови, що характеризують режим мінімальних втрат отримують шляхом розв’язання рівнянь у часткових похідних сумарних і електромагнітних втрат двигуна.

Висновки

1. Запропоновані схеми захисту частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при вмиканні датчиків струму у вхідних і вихідних колах силового каналу електроприводу дозволяють забезпечити захист випрямляча, фільтра, інвертора і двигуна від коротких замикань.

2. Наведені рекомендації щодо вибору параметрів фільтра дозволяють обмежити надструми і перенапруги та підвищити оперативність спрацювання захисту.

3. Запропоновано для зниження комутаційних втрат у перетворювачі частоти здійснювати комутації силових ключів інвертора при нульових значеннях струму або напруги.

4. Розглянуті можливості використання інтелектуальних силових модулів для забезпечення захисту перетворювача частоти силового каналу електроприводу й визначені завдання, які повинні вирішувати ці модулі.

Список літератури

1. Системи управління електрообладнанням і електроприводом. Учебник / Б.Ф. Самойленко, Б.Т. Кононов, П.М. Пушков и др. – МО СССР, 1990. – 415 с.
2. Системи автономного електрообладнання. Учебник / Б.Ф. Самойленко, Б.Т. Кононов, Ю.А. Скворцов и др. – МО СССР, 1990. – 327 с.
3. Электрообладнання і електрообладнання військових об'єктів. Підр. Част. 1 / В.Б. Толубко, Б.Т. Кононов, Б.Ф. Самойленко, М.І. Григоров. – МО України, 1998. – 374 с.

Надійшла до редколегії 21.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більчук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ЗАЩИТА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Б.Т. Кононов, А.А. Нечаус, Н.М. Рябуха

В статье рассматривается система защиты силового канала частотно-регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Приводятся материалы для выбора параметров элементов силового канала

Ключевые слова: силовой канал, частотно-регулируемый электропривод, асинхронный двигатель, выпрямитель, фильтр, инвертор напряжения.

PROTECTION OF FREQUENCY-REGULATIONS ELECTRIC ACTUATOR BASED ON INDUCTION ENGINE WITH THE SQUIRREL-CAGE ROTOR

B.T. Kononov, A.A. Nechaus, N.M. Ryabukha

In the article the system of defense of power channel electro mechanic is examined on the base of asynchronous engine with the squirrel-cage rotor.

Keywords: power feed, variable frequency drives, induction motor, rectifier, filter, voltage inverter.