

Ю. О. Лебеденко, канд. техн. наук

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МАТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ В АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Розглянуто питання щодо застосування матричних перетворювачів в автономних енергетичних системах та вирішення проблеми підвищення ефективності процесів керування перетворенням електричної енергії за рахунок застосування методів оптимального керування.

Вступ

Особливістю автономних енергетичних систем (ЕС) є необхідність перетворення механічної енергії рушія в електричну енергію промислової частоти й напруги. Удосконалення процесів перетворення енергії є одним з напрямків підвищення ефективності генерації електричної енергії в автономних енергетичних системах [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найперспективнішими на теперішній час в Україні є автономні вітроенергетичні установки (ВЕУ), проте використання класичних ВЕУ для районів з малими швидкостями вітрів є проблематичним, що вимагає застосування нетрадиційних структур ВЕУ [2]. До питань, що потребують вирішення у ВЕУ, відносяться:

- синхронізація генераторів та узгодження їх параметрів із промисловою мережею;
- складність застосування традиційних синхронних машин через широкий діапазон зміни вітру.

Підвищення ефективності процесів керування перетворенням електричної енергії в таких автономних ЕС можливе за рахунок застосування сучасних структур силових перетворювачів з мікропроцесорним керуванням, які побудовані на новітній елементній базі. Це дає можливість узгодити автономні енергоустановки зі споживачами, підвищити ефективність процесу перетворення електричної енергії, поліпшити показники її якості і збільшити інтервал напрацювання на відмову електромеханічної системи автономної ЕС.

В останні роки у зв'язку зі значним прогресом у створенні швидкодійних силових напівпровідникових приладів стала можливою побудова потужних напівпровідникових перетворювачів із застосуванням сучасних топологій, зокрема матричних й гібридних структур. Особливістю застосування перетворювачів в автономних ЕС є те, що параметри вихідних кіл повинні залишатися постійними, у той же час параметри джерела первинної енергії можуть змінюватися в часі. Через те, що зв'язки між вхідними й вихідними фазами перетворювача розриваються й відновлюються залежно від алгоритму керування, матричний перетворювач (МП) можна розглядати як об'єкт керування зі змінною структурою. При цьому параметри споживаної та виробленої перетворювачем електроенергії залежать від алгоритму перемикання станів цієї системи.

Існуючі стратегії керування силовими ключами МП мають певні обмеження [3]. По-перше, керування є розімкненим і відстежити якісні показники генерованої електроенергії неможливо. По-друге, зміна параметрів вхідних кіл перетворювача, викликана, наприклад, реакцією генератора електричної енергії, також не враховується. Завдяки цим обмеженням матричні структури майже не використовуються на теперішній час для стабілізації параметрів електроенергії автономних ЕС. Виправити цю ситуацію можна шляхом розробки та впровадження замкнених систем керування матричними перетворювачами.

Метою досліджень є підвищення ефективності процесів керування перетворенням електричної енергії в автономних ЕС шляхом розробки та впровадження замкнених систем керування матричними перетворювачами.

Основний матеріал

Модель узагальненого МП, що припускає неідеальність комутаційних елементів та дозволяє аналізувати швидкі процеси в матричному комутаторі, показано на рис. 1. Ключі представлені аперіодичними ланками з коефіцієнтами передачі, рівними відносним тривалостям замкнутого стану ключа h_{ij} , та постійною часу T_C , яка визначається часом спрацювання ключа.

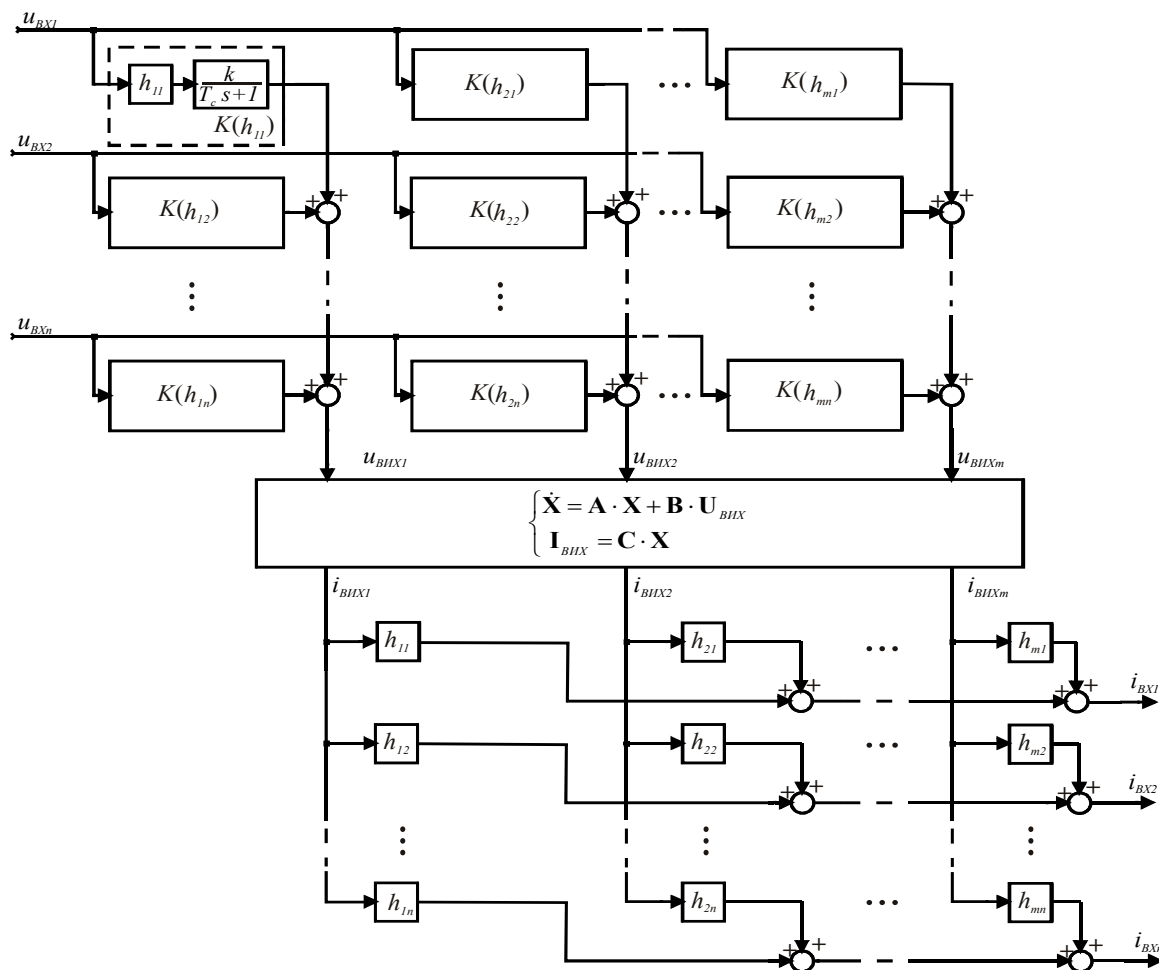


Рис. 1. Структурна схема МП

Для розрахунку повільних процесів у перетворювачі за умови забезпечення стійкості системи можна використовувати спрощену усереднену модель МП, в якій вектори вихідної напруги $u_{\text{вих}}(t)$ і вхідного струму $I_{\text{вх}}(t)$ визначаються як суми добутків відповідних векторів збуджувальних функцій ($u_{\text{вх}}(t)$, $I_{\text{вх}}(t)$) та комутаційної матриці $\mathbf{H}(t)$, компоненти якої h_{ij} описують дію силових ключів перетворювача:

$$u_{\text{вих}} = \mathbf{H}(t)u_{\text{вх}}(t); I_{\text{вх}}(t) = \mathbf{H}^T(t)I_{\text{вх}}(t). \tag{1}$$

Математична модель в просторі станів для трифазного МП, який працює в складі автономної ЕС, з урахуванням узагальнених моделей МП та лінійного навантаження, має вигляд [4]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_M(t) \cdot \mathbf{U}_{\text{вх}}(t); \\ \mathbf{I}_{\text{вх}}(t) = \mathbf{C}_M(t) \cdot \mathbf{X}(t). \end{cases} \tag{2}$$

Змінність структури проявляється у залежності матриць керування та виходу від комутаційних функцій: $\mathbf{B}_M(t) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}(t)$; $\mathbf{C}_M(t) = \mathbf{H}(t)^T \cdot \mathbf{C}$. Головна матриця системи \mathbf{A} обумовлюється лише параметрами навантаження.

Зменшення впливу перетворювача на живильну мережу під час забезпечення необхідних параметрів електричної енергії для навантаження можливе завдяки комплексному розв'язанню задач стабілізації напруги і частоти вихідної напруги та мінімізації спотворень струму мережі живлення, які можуть бути охарактеризовані коефіцієнтом спотворень вхідного струму:

$$\mu_{\text{ВХ}} = \sqrt{\frac{\int (i_{\text{ВХ}}(t) - i_{\text{ВХ}}^*(t))^2 dt}{\int (i_{\text{ВХ}}(t))^2 dt}}, \quad (3)$$

де $i_{\text{ВХ}}^*(t)$ — основна гармоніка фазного струму.

Таким чином, щоб забезпечити якісні показники як вихідної напруги, так і вхідного струму перетворювача необхідно здійснити керування, що доставляє мінімум функціоналу

$$\sum_{j=1}^3 \mu_{\text{ВХ}j}^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

за обмежень

$$\left| \int_0^t (u_{\text{ВІХ}i}^*(t) - u_{\text{ВІХ}i}(t)) dt \right| \leq \varepsilon, \quad (5)$$

де $u_{\text{ВІХ}i}(t)$ та $u_{\text{ВІХ}i}^*(t)$ — дійсна та задана бажана напруги i -ї вихідної фази; ε — допустиме інтегральне відхилення вихідної напруги від бажаної.

Функціонал (4) можна спростити, обмежившись аналізом сумарної інтегральної квадратичної оцінки спотворень вхідного струму:

$$J = \sum_{i=1}^3 \int (i_{\text{ВХ}j}(t) - i_{\text{ВХ}j}^*(t))^2 dt \rightarrow \min. \quad (61)$$

Визначення величини спотворень можливе за допомогою загороджувальних фільтрів із вузькою полосою придушення та відсутністю фазового зсуву на основній частоті, що вмикаються за кожною вхідною фазою. Якщо припустити, що вихідний струм протягом періоду комутації значно не змінюється, то алгоритм оптимального керування системою перетворення електричної енергії на базі МП має такий вигляд [5]:

1. Аналізуються миттєві значення амплітуди фазних напруг $u_{\text{ВХ}j}$, $j = \overline{1,3}$.
2. Напруги вхідних фаз порівнюються із миттєвим значенням бажаної вихідної напруги $u_{\text{ВІХ}i}^*$. Формується вектор, компоненти якого визначаються як $\delta_j = \text{sign}(u_{\text{ВХ}j} - u_{\text{ВІХ}i}^*)$.
3. Для кожного з трьох можливих варіантів перемикавання визначаються інтегральні оцінки спотворень вхідного струму $J(i_{\text{ВХ}j}, i_{\text{ВІХ}i}, h_{ij})$. Якщо навантаження має активно-індуктивний характер, то струм на виході перетворювача не може змінитися миттєво. Так само і оцінки спотворень з виходів фільтрів змінюються повільно, тому комутація не може різко змінити значення функціоналів $J(i_{\text{ВХ}j}, i_{\text{ВІХ}i}, h_{ij})$.
4. Для кожного можливого варіанту підключення j -ї вхідної фази визначаються допоміжні змінні $\Delta_j = J(h_{ij}) \cdot \delta_j$, які характеризують її відхилення від миттєвого значення бажаної напруги $U_{\text{ВІХ}i}^*$ та прогнозують спотворення вхідного струму при комутації до i -ї вихідної фази.
5. Здійснюється перевірка виконання обмежень за вихідною напругою.
6. За виконання обмежень з усіх варіантів обирається той, що забезпечує мінімальне абсолютне значення Δ_j . Якщо інтегральна оцінка помилки за напругою (5) більша допустимого рівня ε або менша $-\varepsilon$, обирається варіант, що відповідає максимальному негативному або мініимальному позитивному значенню Δ_j , відповідно.

Запропонований алгоритм дає можливість в реальному часі прогнозувати зміну величин

вхідних струмів на наступному інтервалі комутації для певних варіантів конфігурації матричного комутатора, базуючись на поточних значеннях струмів навантаження та стану ключів перетворювача.

Осцилограми вихідної напруги, вхідного та вихідного струмів МП, що працює у складі автономної ЕС, наведено на рис. 2.

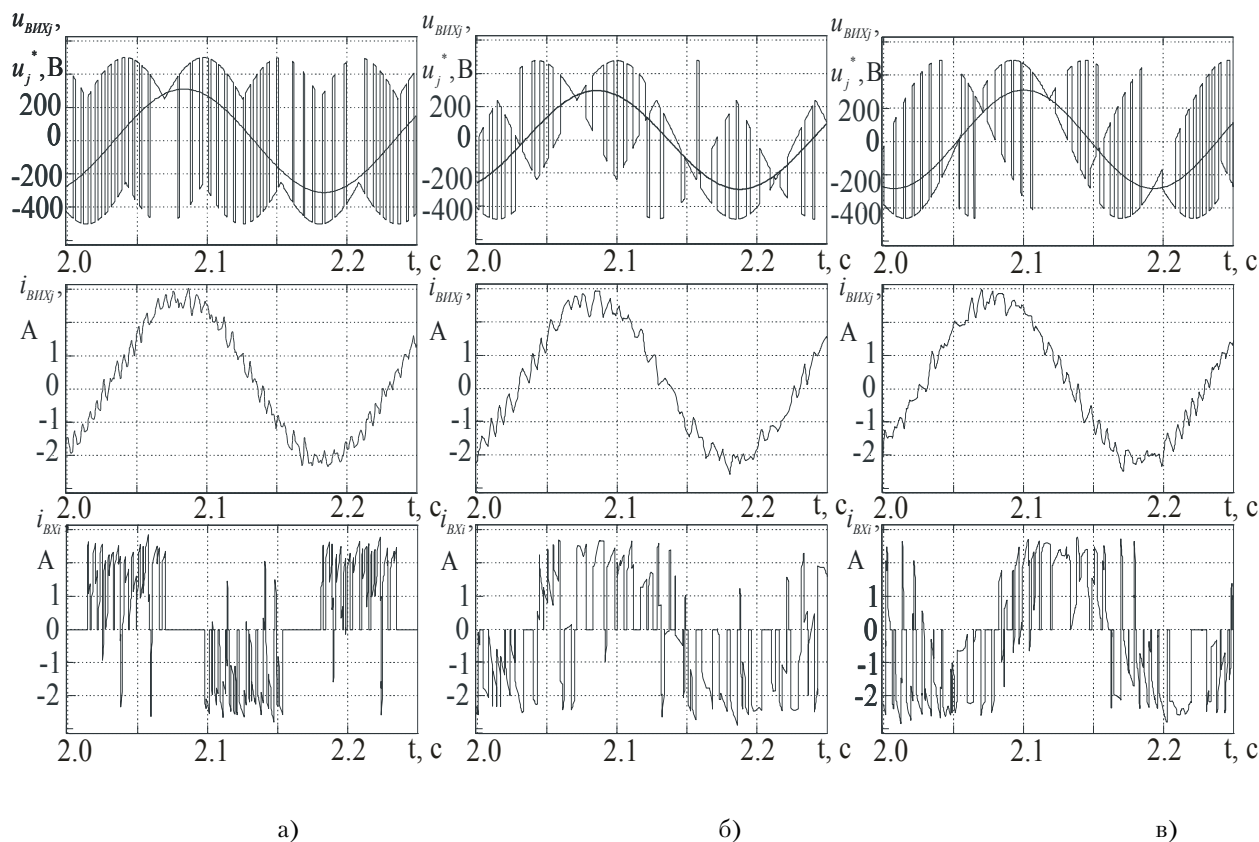


Рис. 2. Осцилограми вихідних напруг, вихідних та вхідних струмів МП для різних методів керування:

а) з комутацією найбільших значень; б) з комутацією найближчих значень; в) запропонований метод керування

Дослідження проводились для законів керування із зворотним зв'язком за напругою, а також для запропонованого методу, який припускає регулювання як вихідної напруги, так і вхідного струму. Відповідні спектри вхідного струму показані на рис. 3.

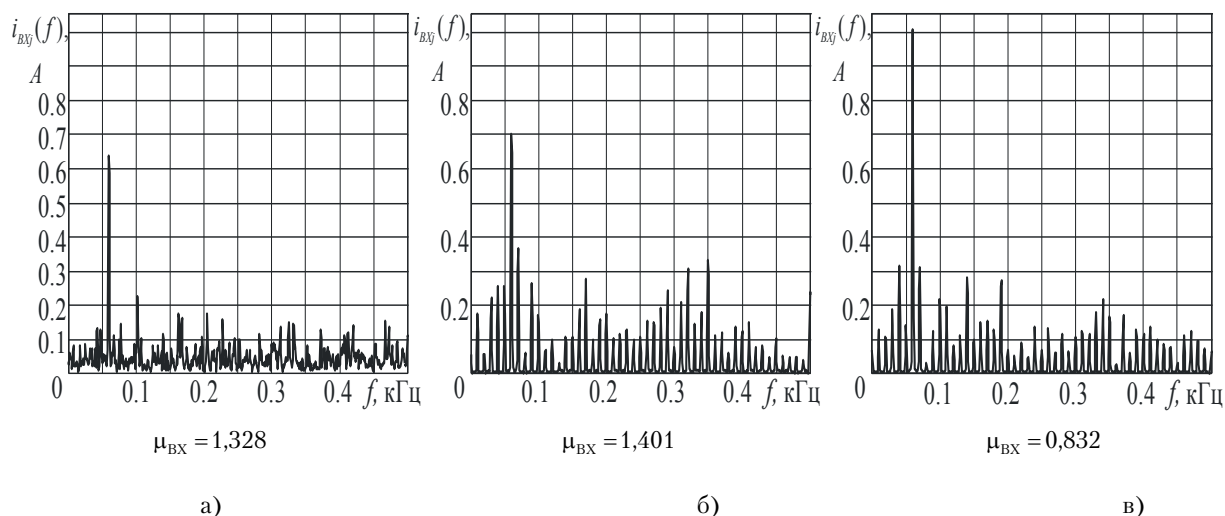


Рис. 3. Спектри вхідного струму МП для різних методів керування: а) з комутацією найбільших значень; б) з комутацією найближчих значень; в) запропонований метод керування

Висновок

Використання розробленого методу керування процесом перетворення електричної енергії в МП дозволяє значно зменшити амплітуди канонічних та неканонічних гармонік вхідного струму; підвищити якісні показники електричної енергії в автономних ЕС за рахунок зменшення коефіцієнта спотворень вхідного струму на 7...38 % в залежності від співвідношення вхідних та вихідних амплітуд та частот, а також забезпечити працездатність системи перетворення в аварійних ситуаціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергетичні ресурси та потоки / [А. К. Шидловський, Ю. О. Віхорев, В. О. Гінайло та ін.] — К. : Українські енциклопедичні знання, 2003. — 472 с.
2. Габринец В. А. Рассмотрение полных нагрузок на ветряную турбогенераторную энергоустановку, выполненную по горизонтально-пропеллерной схеме / В. А. Габринец, Н. С. Голубенко, А. С. Белогуров // *Екологія та ноосферологія*. — Дніпропетровськ, 2009. — Т. 20., № 1—2. — С. 49—53.
3. Григораш О. В. Непосредственные преобразователи частоты : моногр. / О. В. Григораш, Ю. И. Степура, Д. А. Нормов. — Краснодар : КубГАУ, 2006. — 306 с.
4. Лебеденко Ю. О. Математична модель матричного перетворювача як складової автономної енергетичної системи / Ю. О. Лебеденко, Г. В. Рудакова // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. — 2011. — № 1(40). — С. 145—150.
5. Лебеденко Ю. О. Адаптивна система управління безпосереднім перетворювачем частоти з нечітким регулятором / Ю. О. Лебеденко, Г. В. Рудакова // *Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту : матер. міжнар. наук. конфер.* — Євпаторія. — 2010. — Том 2. — С. 93—97.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 11.10.12
Рекомендована до друку 2.11.12

Лебеденко Юрій Олександрович — доцент.

Кафедра технічної кібернетики, Херсонський національний технічний університет, Херсон