

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ БЕЗПОСЕРЕДНІМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ЖИВИЛЬНУ МЕРЕЖУ

Лебеденко Ю.О.

Постановка проблеми

В наступний час зростає інтерес до регульованих електроприводів як найбільш перспективного напрямку енергозбереження. Впровадження асинхронних та вентильних двигунів, сучасних алгоритмів їх управління та систем, що реалізують такі алгоритми, дозволяє, крім збереження енергії, значно подовжити строк служби промислового обладнання та підвищити якість вироблюваної продукції.

Завдяки цьому збільшуються вимоги до електроприводів змінного струму з погляду швидкодії, забезпечення максимальних параметрів і складних режимів, так і до перетворювачів частоти з точки зору підвищення енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності перетворювача і з навантаженням, і з живильною мережею, збільшення надійності, та покращення масогабаритних показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найбільше поширення для живлення асинхронних та синхронних двигунів набули двокаскадні перетворювачі частоти (з ланкою постійного струму). Але існує інший клас перетворювачів – безпосередні перетворювачі частоти, які мають певні переваги порівняно з двокаскадними. Це, по-перше, високий ККД, по-друге, добрі масогабаритні показники завдяки відсутності необхідності у громіздких фільтрах, а також легкість організації рекуперації до мережі.

Безпосереднім перетворювачам частоти присвячені роботи [1, 2].

За допомогою безпосередніх перетворювачів частоти (БПЧ), побудованих на повністю керованих силових напівпровідникових ключах з імпульсно-модуляційними алгоритмами управління можна досягти майже синусоїдальної форми вихідного струму, а також, з'являється можливість за рахунок алгоритму перемикання вентилів зменшити вплив перетворювача на живильну мережу. В попередніх роботах [] було запропоновано різні варіанти стратегій перемикання ключів перетворювача та проаналізовано вихідні напруги та вхідні струми в частотному діапазоні.

Відомо, що у системах електропостачання у зв'язку зі збільшенням споживачів електроенергії, що працюють в імпульсному режимі, а також систем із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), частотних перетворювачів у системах електроприводів з асинхронними двигунами, нелінійних навантажень, тиристорних перетворювачів та ін. виникає високий рівень вищих гармонік.

Це приводить до:

- збільшення повного споживаного струму;
- збільшення втрат в живильних кабелях і трансформаторі;
- додаткового нагрівання трансформатора;
- відхилення параметрів живлячої напруги від державних стандартів, що

спричиняє можливі проблеми в роботі інших пристроїв, підключених до цієї ж мережі й штрафних санкцій з боку енергопостачальної організації

Крім того, комутаційна апаратура повинна бути розрахована на струм з урахуванням гармонійних перекручувань, щоб уникнути необґрунтованих спрацьовувань захистів, а у випадку використання автономних джерел живлення, їхня потужність (повний струм) повинні вибиратися з урахуванням гармонійних складових. Цей факт обмежує використання перетворювачів такого класу для живлення, наприклад, судового обладнання.

Одною з перспективних областей для безпосередніх перетворювачів частоти є не-традиційні джерела енергії, наприклад, вітроенергетичні установки. Тут перетворювач вирішує зворотню задачу: перетворення напруги змінної частоти та амплітуди генератора в фіксовану частоту та напругу мережі. В цьому випадку наявність гармонійних переключувань в струмі генератора буде викликати додаткове нагрівання його обмоток та зменшення строку служби.

У зв'язку із цим питання зменшення впливу безпосереднього перетворювача частоти на мережу залишається актуальним.

Постановка завдання

Ціллю статті є розробка алгоритму оптимального управління безпосереднім перетворювачем частоти, що забезпечував би мінімум переключень вхідного струму перетворювача при забезпеченні необхідного заданого струму навантаження.

Основний матеріал дослідження

Узагальнений перетворювач частоти описується матричним рівнянням, яке зв'язує вхідні та вихідні напруги:

$$\mathbf{U}_{ВИХ} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{U}_{ВХ}, \tag{1}$$

де $\mathbf{U}_{ВХ}$ - вектор вхідних напруг; $\mathbf{U}_{ВИХ}$ - вектор вихідних напруг перетворювача; \mathbf{H} - матриця перемикальних функцій.

Для безпосереднього перетворювача частоти вхідними є напруги живильної мережі, тобто, наприклад, для трифазної мережі

$$\mathbf{U}_{ВХ} = \begin{pmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{A \max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{ВХ} + \varphi_A) \\ u_{B \max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{ВХ} + \varphi_B) \\ u_{C \max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{ВХ} + \varphi_C) \end{pmatrix}, \tag{2}$$

Якщо система вхідних фаз симетрична, то $u_{A \max} = u_{B \max} = u_{C \max} = u_{ВХ \max}$ й $\varphi_A = 0, \varphi_B = 2 \cdot \pi / 3, \varphi_C = -2 \cdot \pi / 3$

Матриця перемикальних функцій для перетворювача з трьома вхідними та трьома вихідними фазами має вигляд:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}, \tag{3}$$

де h_{ij} - перемикальна функція, можливі значення якої залежать від обраної схеми перетворювача.

Для перетворювачів, основою яких є набір реверсивних керованих випрямлячів за схемою з нульовим виводом перемикальна функція може приймати значення {0, 1}. Для мостових схем можливі три значення: {-1, 0, 1}. Перемикальна функція показує, яка з вхідних фаз бере участь у формуванні вихідної фази. Тобто, якщо функція $h_{ij} = 0$ в певний момент часу, то j-а фаза в цей момент часу не підключена до i-ї вихідної фази перетворювача.

Для того, щоб покращити гармонійний склад вихідної напруги, використовують управління за інтегралом перетвореної напруги.

$$\int_0^t (\mathbf{U}^*(t) - \mathbf{U}_{ВИХ}(t)) \cdot dt \leq \varepsilon \tag{4}$$

При живленні інерційного навантаження форма струму в ньому при підвищенні частоти комутації силових вентилів буде майже синусоїдальною [3].

Вираз (4) можна розглядати як обмеження, що накладаються на управління перетворювачем.

При цьому вхідний струм можна визначити як

$$\mathbf{I}_{BX}(t) = \mathbf{H}^T(t) \cdot I_{BHX}(t), \quad (5)$$

Можна довести, що покращення гармонійного складу на виході перетворювача значно погіршує спектр вхідного струму. У вхідному струмі з'являються канонічні гармоніки з частотою, кратною частоті живильної мережі; неканонічні, які обумовлені частотою навантаження, та субгармоніки, частоти яких кратні вхідній та вихідній частотам.

Для зменшення рівня перешкод на вході перетворювача необхідно забезпечити таке управління, що доставляло б мінімум функціоналу $\mathbf{J} = \int F(\mathbf{I}_{BX}) \cdot dt$, де F - функція загороджувального фільтра ($f_o = f_{BX}$) при заданих обмеженнях (4). При цьому чутливість функціонала мети до управління

$$\lambda_i = \frac{d\mathbf{J}_i}{d\mathbf{I}_{BXi}}.$$

Управління буде оптимальним, якщо воно буде мінімізувати чутливість λ_i . Зменшення чутливості можливо лише шляхом комутації фази з максимальною λ_i до навантаження, тобто підвищенням споживаного струму.

В якості оцінки чутливості функціоналу мети можна використовувати коефіцієнт перекручувань, що визначає ступень впливу перетворювача на живильну мережу:

$$k_B = \sqrt{\frac{\int (I_{BHX}(t) - I_{BHX}^*(t))^2 dt}{\int (I_{BHX}(t))^2 dt}}, \quad (6)$$

де $I_{BHX}^*(t)$ - основна гармоніка фазного струму.

Перевагами даного критерію є те, що він враховує як канонічні, так і неканонічні гармоніки, а також субгармоніки.

На основі цих міркувань було розроблено алгоритм оптимального управління безпосереднім перетворювачем частоти з мінімізацією негативного впливу на мережу та проведено моделювання засобами програмного пакету MATLAB, суть якого полягає в наступному: Визначається коефіцієнт $\bar{k}_B = \sqrt{k_{BA}^2 + k_{BB}^2 + k_{BC}^2}$ для кожного з можливих варіантів перемикавання. Значення основної гармоніки визначається при цьому за допомогою вибіркового фільтра з частотою пропускання, рівній частоті живильної мережі. Завдяки тому, що струм навантаження при активно-індуктивному його характері та оцінки основних гармонік струму з виходів фільтрів змінюються повільно, можливо передбачити, який з варіантів забезпечить мінімум коефіцієнта \bar{k}_B .

Спектри вхідного струму перетворювача з комутацією фаз за розробленим алгоритмом та максимальної фази для вихідної частоти 40 Гц та напруги амплітудою 180 В наведені на рис. 1 б та а відповідно.

Як видно з рисунку, розроблений алгоритм збільшує рівень основної гармоніки вхідного струму. Застосування такого алгоритму значно зменшує коефіцієнт перекручувань. В даному випадку він складає 0.72, що значно менше, ніж при комутації максимальної та мінімальної напруги (в цьому випадку коефіцієнт $\bar{k}_B = 0.978$).

Виводи

В результаті проведених досліджень було розроблено алгоритм оптимального управління безпосереднім перетворювачем частоти з мінімізацією впливу на живильну мережу. Показано, що застосування такого алгоритму дозволяє значно підвищити рівень основної гармоніки у вхідному струмі перетворювача. Подальше удосконалення алгоритмів управління комутацією силових вентилів можливо в напрямку вибору фільтруючих елементів для визначення чутливості функціоналу мети.

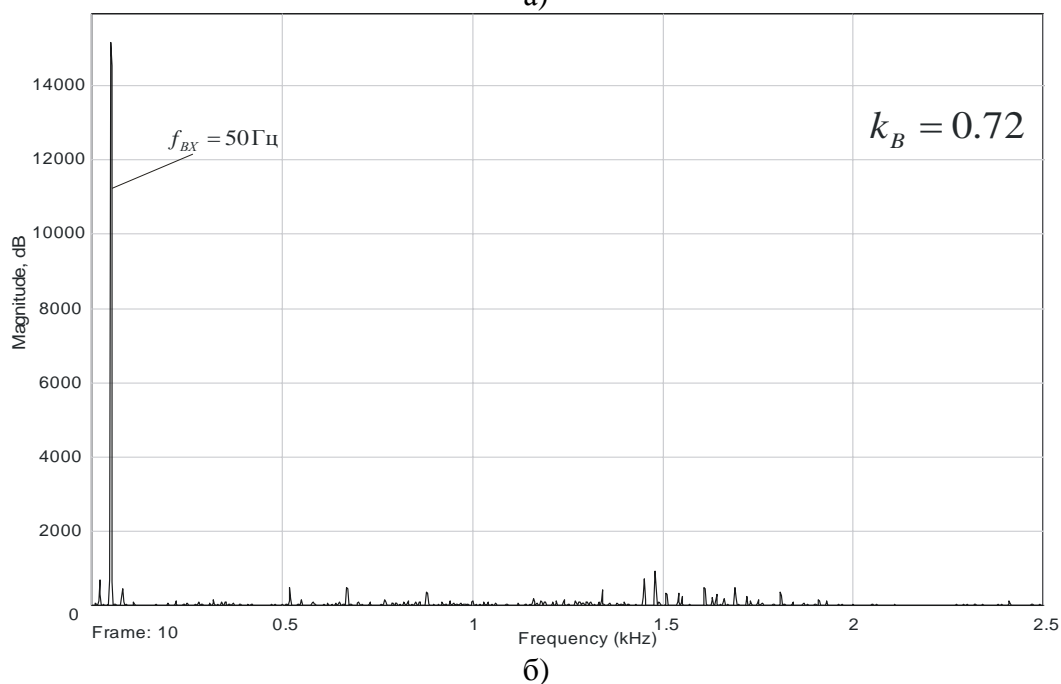
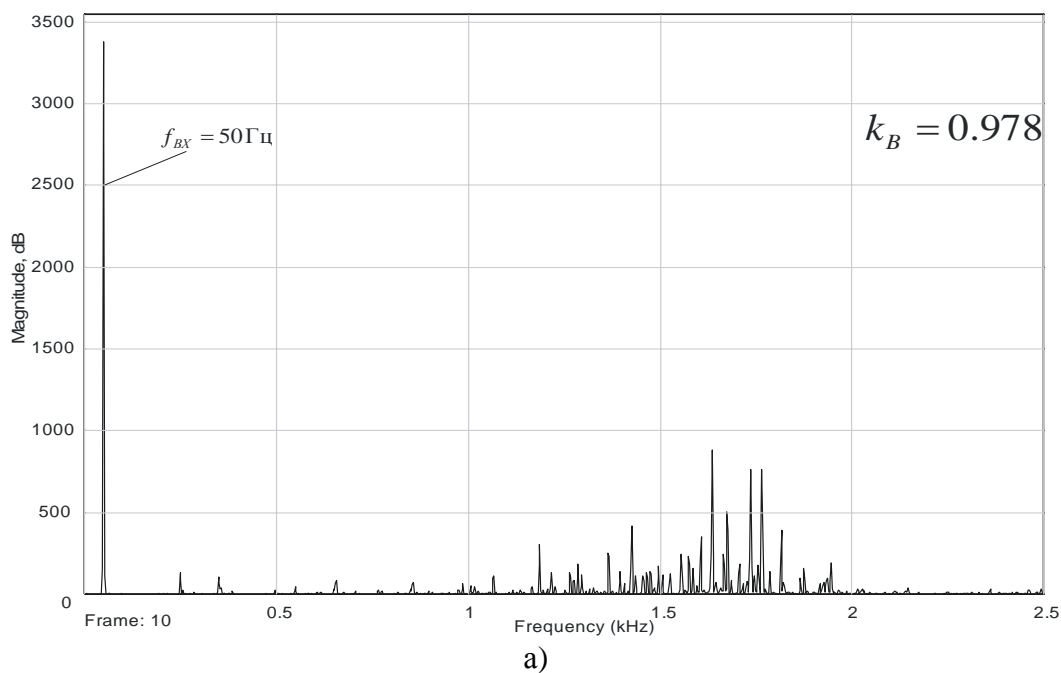


Рис. 1 Спектр вхідного струму перетворювача
 а – з комутацією максимальної фази;
 б – з комутацією фаз за розробленим алгоритмом.

Article is devoted to questions of reduction of negative influence of the converter of frequency on a nutritious network. The algorithm of optimum control is developed by the direct converter of frequency.

1. Непосредственные преобразователи частоты для электропривода / Чехет Э.М., Мордач В.В., Соболев В.Н. – К.: Наукова думка, 1988. – 222 с.
2. Джюджи Л., Пелли Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: Теория, характеристики, применение. Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 400 с.
3. Лебеденко Ю.А. Выбор стратегии управления непосредственными преобразователями частоты // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон, 2006. – №1(17) - С. 138-144.