

РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО БЛОКУ СХЕМИ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ КОНДЕНСАТОРА АКТИВНОГО ФІЛЬТРА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено регулятор напруги на конденсаторах для схеми керування паралельним активним фільтром на основі dq-теорії з блоком ковзного усереднення струму в колі керування струмом i_d . Він містить блок затримки, цифровий фільтр нижніх частот першого порядку FIR або IIR (в залежності від варіанту розглянутої схеми) та блок «sgn», що стабілізує вихідний сигнал.

Ключові слова: електрична мережа, вищі гармоніки, реактивна потужність, силовий активний фільтр, регулятор напруги, блок затримки, цифровий фільтр.

Abstract

A voltage regulator on capacitors has been developed for the control circuit of a parallel active filter based on dq-theory with a block of sliding averaging current in the current control circuit i_d . It contains a delay unit, a digital low-pass filter of the first order FIR or IIR (depending on the variant of the considered scheme) and the unit "sgn", which stabilizes the output signal.

Keywords: electric network, higher harmonics, reactive power, active power filter, voltage regulator, delay unit, digital filter.

Вступ

Для покращення показників якості електричної енергії, компенсації реактивної потужності та зменшення впливу вищих гармонік використовують силові активні фільтри (САФ) [1]. Зважаючи на керуваність перетворювача САФ можна припустити функціональну можливість – виконувати компенсацію реактивної потужності та вищих гармонік струму [2], за умов наявності відповідного алгоритму формування струму. В той же час ефективність роботи САФ значною частиною визначається автоматичним регулятором підтримання напруги на конденсаторах [3].

Метою роботи є: покращення якості електроенергії за рахунок підвищення швидкодії пристрою регулювання напруги на конденсаторах активного фільтра з використанням цифрової реалізації.

Результати дослідження

Для моделювання роботи САФ в режимі компенсації реактивної потужності використана модель з трифазним нелінійним навантаженням і додатковим трифазним навантаженням [4]. Характеристика елементів дослідної моделі: опір системи живлення $18.4+j17.1$ мОм, опір на стороні постійного струму нелінійного навантаження – $12+j1,256$ Ом, опір симетричного трифазного навантаження – $10+j10$ Ом, опір трифазного накиду навантаження – $5+j3$ Ом. Індуктивність, яка ввімкнена послідовно з фільтром $L = 2,2$ мГн. Два конденсатори, що ввімкненні послідовно та мають параметрами: ємність $C = 3300$ мкФ, напруга $u_{dc} = 300$ В, $u_{dcref} = 600$ В. Накид трифазного навантаження відбувається в момент часу 0,06 с, а скид – в момент часу 0,12 с.

Визначення складника пульсацій струму здійснюється за допомогою виразу [4]:

$$i_d(t) = i_d(t) - I_d(t), \quad (1)$$

де $I_d = \frac{6}{T} \int_{t-T/6}^t i_d(t) dt$ – усереднене значення струму $i_d(t)$.

Для реалізації регулятора напруги, було розглянуто два варіанти схеми керування на базі FIR та IIR фільтрів. Розроблену блок-схему в цифровій реалізації регулятора напруги можна побачити на рис. 1.

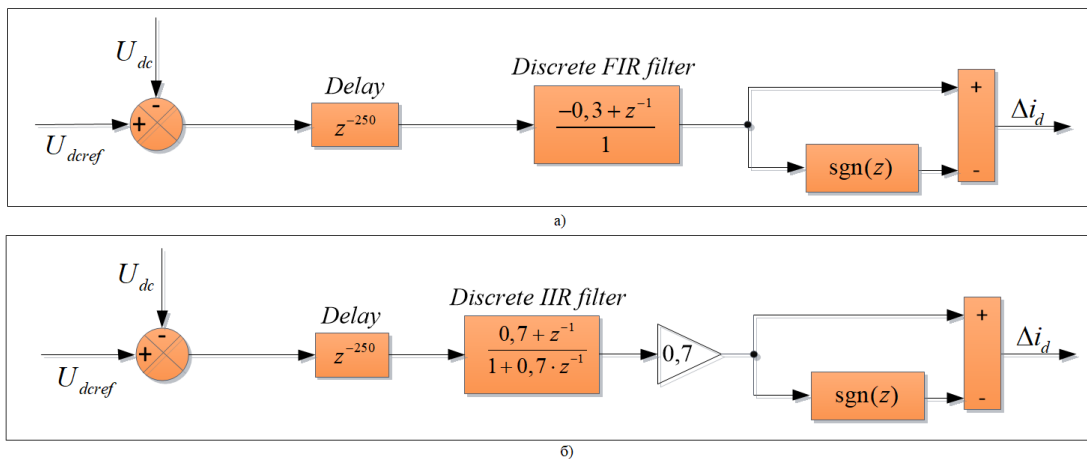


Рис. 1. Структурна схема цифрового блока регулятора напруги з використанням: а) FIR фільтра; б) ІІР фільтра

В першому варіанті використано елемент затримки, фільтр нижніх частот FIR та блок «sgn». Фільтр нижніх частот FIR (фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою) має транспоновану структуру та постійну затримку, яку при необхідності можна відрегулювати під навантаження. Додатковий блок «sgn» використовується для обмеження вихідного сигналу до одиничної амплітуди та покращення компенсації вищих гармонік. Ефективність роботи регулятора напруги на конденсаторах залежить від налаштувань FIR фільтра. В результаті підбору коефіцієнтів $b_0 = -0,3$ та $b_1 = 1$ z – перетворення передаточної функції якого можна подати у вигляді (2), буде підтримувати постійний коефіцієнт передачі 0,7:

$$\frac{\Delta i_{dFIR}}{U_{dcFIR}} = \frac{(z - |z|) \cdot (0,3 \cdot z - 1)}{z^{251} \cdot |z|} \quad (2)$$

В другому варіанті використано фільтр нижніх частот ІІР (фільтр із нескінченною імпульсною характеристикою). Відмінність цього регулятора від першого варіанта полягає в ІІР фільтрі, який швидше реалізується і запускається, наприклад, у вбудованій системі реального часу.

Для даного ІІР фільтра першого порядку була розроблена максимально ефективна структура в результаті підбору коефіцієнтів $b_1 = 0,7$, $b_0 = 0,7$ та $a_1 = 1$ для z – перетворення, яка підтримує одиничну амплітудну характеристику, але з неможливістю підтримувати потрібний коефіцієнт підсилення. Для вирішення цієї проблеми було вирішено ввести додатковий коефіцієнт 0,7 який буде забезпечувати максимальну ефективність його роботи.

$$\frac{\Delta i_{dIIR}}{U_{dcIIR}} = \frac{49 \cdot z + 70}{100 \cdot z^{251} + 70 \cdot z^{250}} - \frac{0,1 \cdot (49 \cdot z^2 + 70 \cdot z)}{z^{250} \cdot |z| \cdot (10 \cdot z + 7)} \quad (3)$$

Після дослідження першого та другого варіантів схеми керування регулятора напруги на конденсаторах експериментально встановлено можливість підтримання одиничної амплітудної характеристики ІІР фільтра з коефіцієнтами $b_1 = 0,7; 0,75$, $b_0 = 0,7; 0,75$ та постійний коефіцієнт передачі FIR фільтра в межах 0,7 та 0,75. Це дозволяє ефективно компенсувати вищі гармоніки та забезпечувати мінімальне перерегулювання навантаження під час перехідного процесу.

Активний фільтр працює в режимі компенсації реактивної потужності та вищих гармонік. При переведенні його в режим лише компенсації вищих гармонік відбувається значне зростання компенсаційної здатності в порівнянні з попереднім режимом.

Графік зміни напруги на конденсаторі на рис. 2 однаковий для двох варіантів. З рис. 2 можна зробити висновок про високу швидкість регулятора напруги з налаштованим блоком ковзного усереднення на період $1/300$ с. та мінімальних коливань напруги на конденсаторі. Глибина провалу напруги на конденсаторі визначається ємністю конденсатора та може бути зменшена збільшенням ємності конденсатора, але за рахунок зменшення швидкості та зростання похибки.

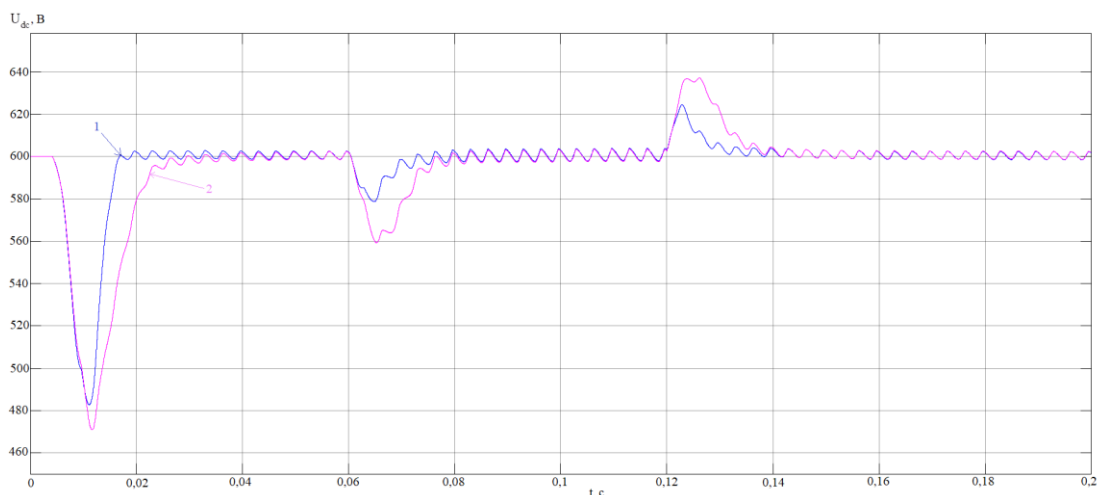


Рис. 2. Графік зміни напруги на конденсаторах з використанням блока усередненого значення струму: 1) з періодом усереднення 1/300 с.; 2) з періодом усереднення 1/100 с

Під час моделювання були використані IGBT транзистори, які набагато легші в керуванні та гірші в якісних характеристиках. В малопотужних САФ можна використати MOSFET транзистори, що пропонують кращі якісні показники.

Висновки

За допомогою цифрової реалізації кола керування напругою конденсаторів та використання блока усередненого значення струму з періодом усереднення 1/300 с., доведено можливість збільшення швидкодії активного фільтра в 2 рази, повної компенсації реактивної потужності та забезпечення ефективного зменшення вищих гармонік струму в розмірі 90% від номінального значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. H. Akagi, "Active harmonic filters", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, № 12, pp. 2128-2141, 2005.
2. Давидов О. Ю. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах / О. Ю. Давидов, О. В. Бялобржеський // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – 2010. – №3. – ч.1 – С. 132– 136.
3. К. І. Денисенко, І. С. Кутрань, В. О. Лесик, Т. В. Мисак, "Збільшення швидкодії контуру слідкування за напругою накопичувального конденсатора трифазного паралельного активного фільтра", *Праці ІЕД НАН України*. 2020. Вип. 55. ISSN 1727-9895.
4. М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, і Д. Ю. Лебедь, «Система прямого керування струмом активного фільтра», *Вісник ВПІ*, вип. 2, с. 69–75, Квіт 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-69-75>

Бурбело Михайло Йосипович – д.т.н., професор, завідувач кафедри ЕСЕЕМ, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Лебедь Денис Юрійович – аспірант кафедри ЕСЕЕМ: 4e15b.lebyd@gmail.com.

Burbelo Mykhailo Josephovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Lebed Denys Yuriiovych – graduate student of the department: 4e15b.lebyd@gmail.com