

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ З РОЗДІЛЕННЯМ ПРОЦЕСІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ ТА КОМПЕНСАЦІЇ СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ

Ніконенко Є. О., асп., Пересада С. М., д.т.н., проф., Зінченко О. Ю., магістр
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем
та електроприводу

Вступ. Підвищувальні DC-DC перетворювачі знаходять широке використання в сучасних промислових системах керування [1], в тому числі і в електричних транспортних засобах, де застосовуються для керування потоками потужності джерел живлення.

Питання керування напругою ланки постійного струму DC-DC перетворювачів не є вирішеним в повній мірі. Існуючі рішення ґрунтуються на суттєвих спрощуючих припущеннях, оскільки математична модель підвищувального DC-DC перетворювача є немінимально-фазовою [2]. Цей факт не дозволяє за допомогою стандартних підходів отримати високі динамічні показники регулювання вихідної напруги в ланці постійного струму [3].

Алгоритми керування, наведені в літературі, часто не мають доказу стійкості замкненої системи, та/або мають нетривіальне налаштування.

Мета роботи: а) розробка нового алгоритму керування підвищувальним DC-DC перетворювачем з підвищеними динамічними властивостями; б) порівняння синтезованого алгоритму з класичним на основі ПІ-регуляторів.

Матеріали дослідження. Математична модель DC-DC перетворювача і синтез класичного алгоритму керування напругою на основі двох ПІ-регуляторів представлено в [4]. Нелінійна модель перетворювача має вигляд

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C} \left(\frac{ui}{V_{dc}} - i_L \right), \dot{i} = -\frac{R}{L} i + \frac{E}{L} - \frac{1}{L} u, \quad (1)$$

де i – вхідний струм, L , R – індуктивність та внутрішній опір дроселя, E – ЕДС джерела живлення, C – вихідна ємність перетворювача, i_L – струм навантаження, $u = V_{dc}p/2$ – керуючий вплив, p – функція перемикачів ключів перетворювача.

Нехай виконуються наступні припущення (А):

А.1. Задана напруга додатна і стала $V_{dc}^* > 0$, $V_{dc} = \text{const}$.

А.2. Всі параметри перетворювача відомі і постійні, струм навантаження $i_L = \text{const}$.

А.3. Струм i , а також напруга V_{dc} доступні для вимірювання.

Необхідно синтезувати алгоритм керування, який гарантує досягнення наступних цілей керування (СО):

СО.1. Асимптотичне регулювання напруги, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{V}_{dc} = 0$, де $\tilde{V}_{dc} = V - V^*$ – похибка відпрацювання напруги; тоді похибка відпрацювання квадрату напруги $\tilde{z} = V_{dc}^2 - V_{dc}^{*2} = z - z^*$, $\dot{z}^* = 0$.

СО.2. Асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії струму $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i} = 0$, де

$\tilde{i} = i - i^*$ – похибка відпрацювання струму, i^* – заданий струм.

1. Класичний алгоритм з ІІ-регуляторами

Синтезований алгоритм [4] має у своєму складі:

– ІІ-регулятор струму:

$$\begin{aligned} u &= E - Ri^* + L(k_{ii}\tilde{i} - x_i) \\ \dot{x}_i &= -k_{ii}\tilde{i}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $k_{ii} > 0$, $k_{ii} > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора струму,

– ІІ-регулятор напруги:

$$\begin{aligned} i^* &= -(k_v\tilde{z} - x) \\ \dot{x} &= -k_{vi}\tilde{z}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $k_v > 0$, $k_{vi} > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора напруги.

За умови керування згідно (2) динаміка похибок регулювання має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{z}} &= \frac{2}{C} \left((E - Ri^* + L(k_{ii}\tilde{i} - x_i))i^* - Vi_L \right) \\ \dot{\tilde{i}} &= -k_{ii}\tilde{i} + x_i - i^* \\ \dot{x}_i &= -k_{ii}\tilde{i}. \end{aligned} \quad (4)$$

З урахуванням дії регулятора напруги (3) в (4) результуюча динаміка похибок регулювання буде

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{z}} &= -k_v\tilde{z} - x - \frac{1}{E} \left(\frac{RC}{2E} (k_v\tilde{z} - x) + L(k_{ii}\tilde{i} - x_i) \right) (k_v\tilde{z} - x) - \frac{2}{C} Vi_L \\ \dot{x} &= -k_{vi}\tilde{z}, \\ \dot{\tilde{i}} &= -k_{ii}\tilde{i} + x_i - i^* \\ \dot{x}_i &= -k_{ii}\tilde{i}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $k_i = k_{ii} + R/L$.

Зазвичай, (k_{ii}, k_{ii}) обирають «великими», тобто такими, щоб інтегральна компонента регулятора струму компенсувала дію похідної від заданого струму, тобто $x_i = i^*$. Це забезпечується розділенням в часі процесів регулювання напруги та струму на рівні $\omega_{oi} > (3 \div 4)\omega_{ov}$, де $\omega_{oi}^2 = k_{ii}$, $\omega_{ov}^2 = k_{vi}$ і дозволяє розглядати спрощену динаміку системи зниженого порядку, яка описується першими двома рівняннями в (5) при $\tilde{i} = 0$:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{z}} &= -k_v\tilde{z} - x - \frac{1}{E} \left(\frac{RC}{2E} (k_v\tilde{z} - x) + Li^* \right) (k_v\tilde{z} - x) - \frac{2}{C} Vi_L \\ \dot{x} &= -k_{vi}\tilde{z}. \end{aligned} \quad (6)$$

При врахуванні того, що в практиці часто можна прийняти $R \approx 0$, з (5) слідує, що стійкість динаміки похибки регулювання напруги завжди може бути досягнена, що налаштовується $(k_v, k_{vi}) > 0$. Інтегральна складова x компенсує

складову струму навантаження $2C^{-1}Vi_L$ та інші складові, які приймаються нехтувано малими.

Інтегральна складова x компенсує струм навантаження $2C^{-1}Vi_L$ та ненульові складові в правій частині (6). Нелінійна система другого порядку є локально асимптотично стійкою.

2. Синтез частково лінеаризуючого зворотнім зв'язком алгоритму керування з компенсацією навантаження

Для синтезу нового алгоритму розглянемо випадок, коли заданий струм складається з двох складових

$$i^* = i_1^* + i_2^*, \quad (7)$$

причому i_1^* відповідає за компенсацію струму навантаження, а i_2^* – за стабілізацію напруги в ланці постійного струму.

Динаміка похибок регулювання за умови використання ПІ-регулятора струму (2) має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{1}{C} \left((E - Ri_1^*)i_1^* + (E - 2Ri_1^*)i_2^* + L(k_{ii}\tilde{i} - x_i)(i_1^* + i_2^*) - R(i_2^*)^2 - V^*i_L - \tilde{V}i_L \right) \\ \dot{\tilde{i}} &= -k_i\tilde{i} + x_i - i^* \\ \dot{x}_i &= -k_{ii}\tilde{i}. \end{aligned} \quad (8)$$

З (8) встановлюємо, що рішення рівняння балансу потужностей в усталеному режимі буде забезпечуватися за умови

$$i_1^* = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RV^*i_L}}{2R}. \quad (9)$$

З (9) слідує, що $i_1^* = \text{const}$ для постійного струму навантаження, тобто $\dot{i}_1^* = 0$. Рівняння динаміки похибки регулювання напруги за цієї умови стає

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{2}{C} \left((E - 2Ri_1^*)i_2^* + L(k_{ii}\tilde{i} - x_i)(i_1^* + i_2^*) - R(i_2^*)^2 - \tilde{V}i_L \right) \\ \dot{\tilde{i}} &= -k_i\tilde{i} + x_i - i_2^* \\ \dot{x}_i &= -k_{ii}\tilde{i}. \end{aligned} \quad (10)$$

Визначимо з (10) вигляд стабілізуючої складової заданого струму як

$$\begin{aligned} i_2^* &= -\frac{C}{2(E - 2Ri_1^*)} (k_v\tilde{z} - x) \\ \dot{x} &= -k_{vi}\tilde{z}, \end{aligned} \quad (11)$$

тоді динаміка похибок регулювання (10) запишеться у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -k_v\tilde{z} + x + \frac{2}{C} \left(-a^2R(k_v\tilde{z} - x)^2 + L(k_{ii}\tilde{i} - x_i)i_1^* - aL(k_{ii}\tilde{i} - x_i)(k_v\tilde{z} - x) - \tilde{V}i_L \right) \\ \dot{x} &= -k_{vi}\tilde{z}, \\ \dot{\tilde{i}} &= -k_i\tilde{i} + x_i - i_2^* \\ \dot{x}_i &= -k_{ii}\tilde{i}, \end{aligned} \quad (12)$$

де параметричний коефіцієнт $a = C(E - 2Ri_1^*)^{-1}/2$, типовий діапазон значень якого для фізично обґрунтованих E, C, R лежить в межах $0 < a \ll 1$. За умови

розділення в часі процесів регулювання струму і напруги маємо $\dot{\tilde{i}} = 0$, $x_i = i^*$, тоді

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{z}} &= -k_v \tilde{z} + x + \frac{2}{C} \left(-a^2 R (k_v \tilde{z} - x)^2 - L i_2^* (i_1^* + a(k_v \tilde{z} - x)) - \tilde{V} i_L \right) \\ \dot{x} &= -k_{vi} \tilde{z}. \end{aligned} \quad (13)$$

Частково лінеаризована структура рівнянь (13) має наступну важливу властивість, яка полягає в тому, що лінійна система другого порядку має збурення у вигляді складових вищого порядку (в дужках), які є білінійними функціями, тому в околі початку координат система (13) є локально асимптотично стійкою.

Структурну схему системи керування з розробленим алгоритмом наведено на рис. 1. Відмітимо, що в такій конфігурації системи немає потреби у використанні інтегральних компонент як регулятора напруги, так і регулятора струму. Проте в технічних системах їх додавання є необхідним внаслідок наявності параметричних збурень.

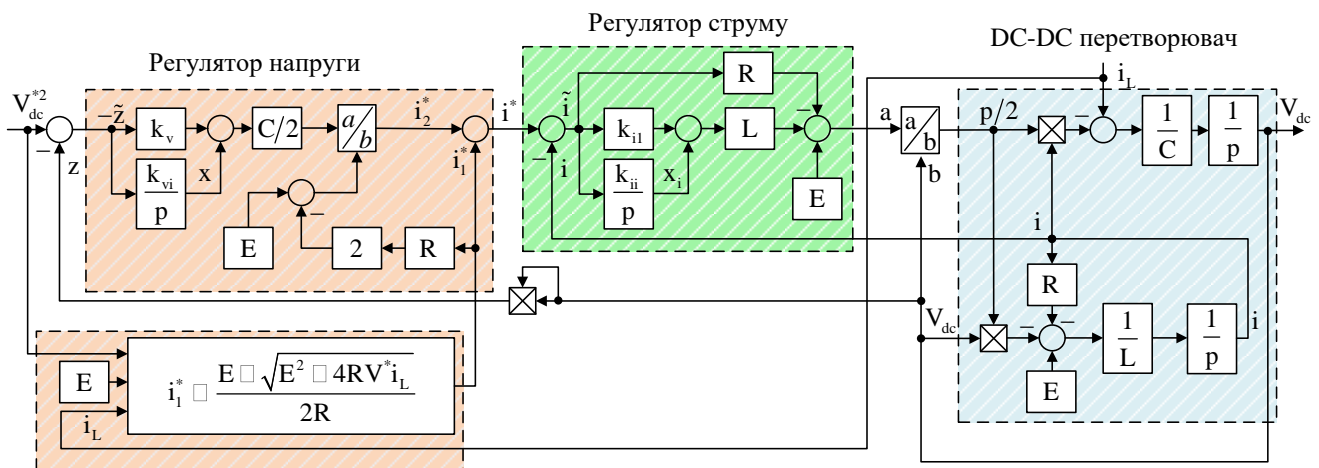


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування з розробленим алгоритмом з компенсацією навантаження

3. Тестування алгоритмів керування перетворювачем напруги

Експериментальні дослідження виконано на станції швидкого прототипного тестування [4] з параметрами: індуктивність дроселя $L = 0.011$ Гн, внутрішній опір $R = 0.5$ Ом, ємність конденсатора ланки постійного струму $C = 500$ мкФ. Частота ШІМ становить 10 кГц, такт квантування – 200 мкс.

Умовами тесту передбачено тестування DC-DC перетворювача для випадку підключення чотирьох АКБ з номінальною напругою кожної АКБ $U_n = 12$ В, тобто для величин вхідної напруги $U_{in} = 48$ В. При цьому завдання вихідної напруги усюди приймалось постійним і дорівнювало $V_{dc}^* = 100$ В. Для обох алгоритмів прийнято такі коефіцієнти регулятора напруги $k_v = 200$, $k_{vi} = k_v^2/2$, та регулятора струму $k_{ii} = 1000$, $k_{ii} = k_i^2/4$.

В початковий момент часу виконується формування вихідної напруги з початкового значення 48 В до заданого рівня 100 В, потім вмикається кероване джерело струму навантаження. Додатне значення струму прикладається в час 0.1 с, а в час 0.2 с – знімається, аналогічно прикладається від’ємне значення струму у 0.4 с, та скидається – у 0.5 с, як зображено на рис. 2.

Профіль навантаження i_L , А

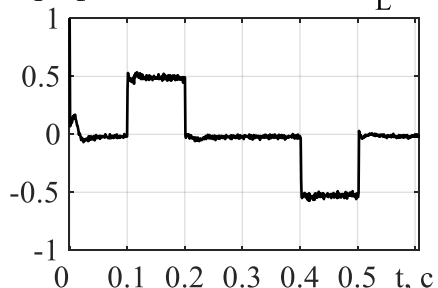
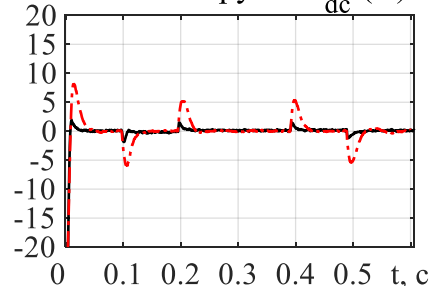


Рисунок 2 – Послідовність операції навантаження

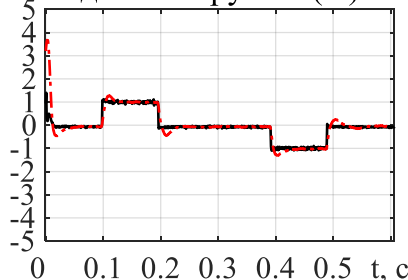
Експериментальні графіки перехідних процесів представлено на рис. 3. На всіх графіках червоними лініями зображено випадок класичного алгоритму керування (2), (3), а чорні лінії відповідають розробленому алгоритму (2), (9), (11).

Як слідує з рис. 3, розроблений алгоритм забезпечує асимптотичне регулювання напруги в ланці постійного струму при дії стрибкоподібного навантаження. Динаміка похибки регулювання напруги має кращі показники якості за часом перехідного процесу та відхилення від заданого значення.

Похибка напруги \tilde{V}_{dc} (В)



Заданий струм i^* (А)



Похибка струму \tilde{i} (А)

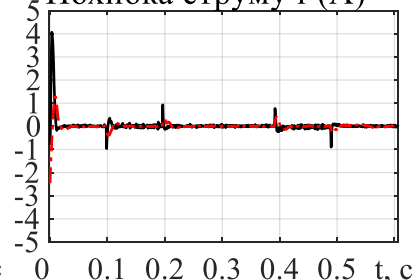


Рисунок 3 – Перехідні процеси при застосуванні класичного алгоритму керування (червоні лінії) і розробленого алгоритму (чорні лінії)

Висновки. Розроблений алгоритм керування напругою підвищувального DC-DC перетворювача з розділенням заданого струму на компенсуючу та стабілізуючу складові забезпечує кращі показники якості керування при однакових налаштуваннях ніж класичний.

Перелік посилань

1. A. Yazdani, R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
2. M. Forouzesh, Y. Pp. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg and B. Lehman, "Step-up DC-DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, dec. 2017.
3. K. L. Shenoy, C. G. Nayak and R. Mandi, "State space analysis of boost DC/DC converter with voltage mode control", *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, vol. 1859, no. 1, 2017, pp. 1-7.
4. S. Peresada, S. Kovbasa, D. Pristupa, D. Pushnitsyn, Y. Nikonenko, "Nonlinear control of voltage source AC-DC and DC-DC boost converters", *Bulletin of National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Problems of Automated Electrodrives. Theory and Practice. Power Electronics and Energy Efficiency*, Kharkiv, no. 27, pp. 84-88, 2017.