

СТІЙКІСТЬ ДВОКОНТУРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»

Анотація

Доведено стійкість двоконтурних систем керування напругою підвищувального DC-DC перетворювача на основі теорії сингулярно-вироджених систем. Показано умови, за яких можливо розглядати динаміку системи зниженого порядку. Представлено результати тестування системи керування напругою DC-DC перетворювача при розділенні процесів регулювання напруги і струму в часі.

Ключові слова: підвищувальний DC-DC перетворювач, регулятор напруги, похибка регулювання, доведення стійкості, теорія сингулярно-вироджених систем.

Abstract

The stability of voltage control systems of DC-DC boost converters is proven based on the singular perturbation systems theory. The conditions which provide the reduced-order solution of initial nonlinear system dynamics are shown. Results of voltage control system of DC-DC boost converter are presented taking into account the time-scale separation between DC-link voltage and input current dynamics.

Keywords: DC-DC boost converter, voltage controller, regulation error, stability proof, singular perturbation systems theory.

Вступ

Підвищувальні DC-DC перетворювачі широко застосовуються для підвищення постійної напруги, наприклад, в електричних транспортних засобах для керування потоками потужності комбінованих джерел живлення [1].

Математична модель підвищувального DC-DC перетворювача (бустера) представляє собою модель другого порядку, в той же час вона є суттєво нелінійною і немініально-фазовою [2].

Типова двоконтурна структура з регуляторами струму і напруги відома [3], однак, внаслідок нелінійності моделі, в літературі відсутній доказ стійкості системи керування на основі моделі повного порядку DC-DC перетворювача, а також відсутні рекомендації щодо налаштування системи керування. В даній роботі наведено аналіз стійкості двоконтурних систем регулювання напруги підвищувальних DC-DC перетворювачів з пропорційним регулятором (П-регулятором) струму та пропорційним і пропорційно-інтегральним регулятором (ПІ-регулятором) напруги згідно теорії сингулярно-вироджених систем.

Метою роботи є доказ локальної стійкості системи керування напругою підвищувального DC-DC перетворювача, а також встановлення умов, за яких можна розглядати модель системи зниженого порядку і формулювання рекомендацій щодо налаштування регуляторів.

Результати досліджень

Математична модель підвищувального DC-DC перетворювача має вигляд [2]:

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

де V , i – вихідна напруга і струм індуктивності; C , L , R – вихідна ємність, індуктивність та опір вхідного кола; i_L – струм навантаження; E – вхідна напруга; u – керуючий вплив.

Нехай виконуються наступні припущення: параметри моделі (1) відомі та сталі; струм навантаження $i_L = \text{const}$, вхідна напруга $E = \text{const}$; задане значення вихідної напруги $V^* = \text{const}$, $V^* > 0$.

За умови цих припущень необхідно синтезувати алгоритм стабілізації напруги, який забезпечує локальну асимптотичну стійкість системи, так що похибка регулювання напруги $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{V} = 0$, де $\tilde{V} = V - V^*$.

Визначимо похибку регулювання струму як $\tilde{i} = i - i^*$, де i^* – заданий струм, тоді П-регулятора струму

$$u = E - Lk_i \tilde{i}, \quad (2)$$

де $k_i > 0$ – коефіцієнт регулятора струму.

ПІ-регулятор напруги сформуємо у вигляді:

$$\dot{i}^* = \left(\frac{E}{CV} \right)^{-1} (-k_v \tilde{V} + x_v), \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}, \quad (3)$$

де $(k_v, k_{vi}) > 0$ – пропорційний і інтегральний коефіцієнти регулятора напруги.

На основі математичного моделювання розглянутих систем повного та зниженого порядку показано, що за умови використання ПІ-регулятора напруги (3) та П-регулятора струму (2), рішення зниженого порядку системи керування може бути досягнуто за умови розділення процесів регулювання напруги і струму в часі. На Рис. 1 представлено результати з достатнім розділенням процесів регулювання струму і напруги.

Висновки

Доведено локальну стійкість двоконтурних систем керування напругою підвищувального DC-DC перетворювача з П-регулятором струму і П(ПІ)-регулятором напруги на основі теорії сингулярно-вироджених систем. Встановлено, що за умови розділення процесів керування струмом і напругою у часі, можливо розглядати систему зниженого порядку. Показано, що врахування опору індуктивності слабо впливає на стійкість системи і на умови розглядання системи зниженого порядку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Yazdani, R. Irvani, *Voltage-sourced converters in power systems*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] V. A. Caliskan, O. C. Verghese and A. M. Stankovic, "Multifrequency averaging of DC/DC converters", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no. 1, pp. 124-133, Jan. 1999, doi: 10.1109/63.737600.
- [3] 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, doi: 10.1109/TPEL.2017.2652318.

Ніконенко Євген Олексійович – аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

Пересада Сергій Михайлович – професор кафедри автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та електромобільності НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

Желінський Микола Миколайович – асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та електромобільності НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

Стаценко Алексей Владимирович – доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та електромобільності НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

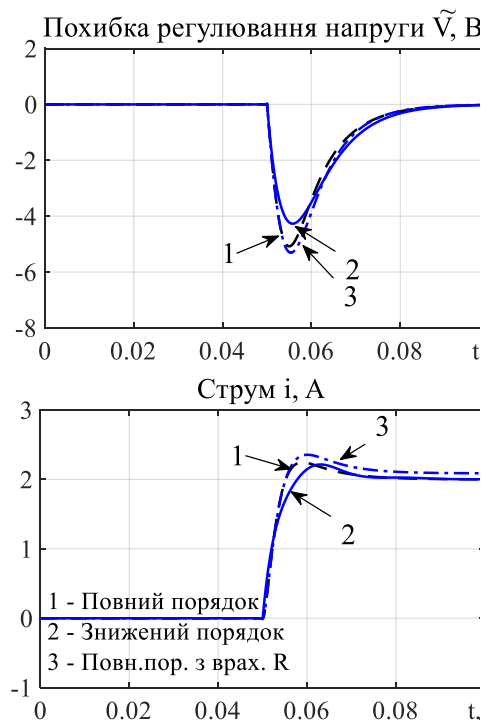


Рис. 1 – Графіки перехідних процесів похибки регулювання напруги і вхідного струму ($k_v/k_i = 0.2$)