

Силовая электроника

УДК 621.314

Д.І. Гомма, В.Я. Ромашко, д.-р. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Додаткові втрати енергії при послідовному з'єднанні суперконденсаторів

Проаналізовано особливості послідовного з'єднання суперконденсаторів. Показано, що несиметрія напруг на них, пов'язана з різною величиною їх опорів втрат, проявляється в кінці перехідного процесу, який може тривати десятки і сотні годин. Проаналізовано існуючі методи балансування напруг на конденсаторах та їх енергетичні характеристики. Запропоновано метод балансування напруг суперконденсаторів з покращеними характеристиками. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: послідовне з'єднання конденсаторів; балансування напруг; вирівнювальні резистори.

Вступ

Послідовне з'єднання конденсаторів використовують у випадках, коли допустима напруга наявних конденсаторів менша від напруги джерела живлення, а також в ємнісних подільниках напруги. При підключенні послідовно з'єднаних конденсаторів до джерела постійної напруги, напруга на них розподіляється обернено пропорційно їх ємності [1]. Реальні конденсатори мають певні втрати енергії, які враховують за допомогою опорів втрат, що підключені паралельно до ємностей. Внаслідок цього в усталеному режимі напруга на конденсаторах розподіляється пропорційно до цих опорів. Останніми роками все більш широке застосування мають суперконденсатори, основною перевагою яких є значна величина ємності (одиниці, десятки фарад). Однак їх недоліком є низька допустима напруга та підвищені струми саморозряду, які помітно зростають при наближенні робочої напруги до максимальної допустимої, а також при підвищенні температури [2].

Для вирівнювання напруг на послідовно з'єднаних конденсаторах паралельно до них підключають вирівнювальні резистори, опір яких має бути на порядок меншим від опорів втрат. Однак у цих резисторах мають місце додаткові втрати енергії, що є небажаним, особливо при

використанні автономних джерел живлення енергія яких обмежена.

Метою даної статті є аналіз енергетичних характеристик послідовно з'єднаних конденсаторів, оцінка додаткових втрат енергії у вирівнювальних резисторах та розробка способів їх зменшення на прикладі двох послідовно з'єднаних конденсаторів.

Перехідний процес

Розглянемо перехідний процес при підключенні послідовно з'єднаних конденсаторів до джерела постійної напруги E (рис. 1).

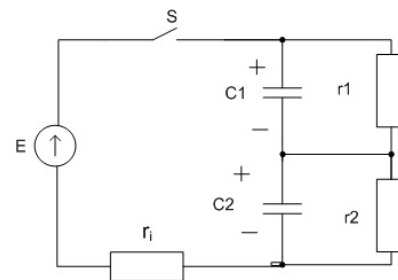


Рис. 1. Схема двох послідовно з'єднаних конденсаторів з внутрішніми опороми r_1 та r_2

Відповідно до методу функцій вільного режиму [3] напруга на конденсаторах після замикання ключа S змінюватиметься за законом:

$$u_1(t) = U_1 - U_1 \cdot f_{11}(t) + U_2 \cdot f_{12}(t); \quad (1)$$

$$u_2(t) = U_2 + U_1 \cdot f_{21}(t) - U_2 \cdot f_{22}(t). \quad (2)$$

Оскільки внутрішній опір джерела r_i набагато менший від опорів втрат конденсаторів r_2 та r_1 , вимушена напруга на конденсаторах:

$$U_1 \cong \frac{E \cdot r_1}{r_1 + r_2}; \quad U_2 \cong \frac{E \cdot r_2}{r_1 + r_2}. \quad (3)$$

Функції вільного режиму:

$$f_{11}(t) = f_{21}(t) \cong \frac{C_1}{C_1 + C_2} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (4)$$

$$f_{22}(t) = f_{12}(t) \cong \frac{C_2}{C_1 + C_2} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

де стала часу $\tau = (C_1 + C_2) \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$.

$$u_2(t) = U_2 + U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} e^{-\frac{t}{\tau}} - U_2 \frac{C_2}{C_1 + C_2} e^{-\frac{t}{\tau}} = U_2 + \left[(E - U_2) \frac{C_1}{C_1 + C_2} - U_2 \frac{C_2}{C_1 + C_2} \right] e^{-\frac{t}{\tau}} = U_2 + \left(E \frac{C_1}{C_1 + C_2} - U_2 \right) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6)$$

Характер перехідного процесу залежить від співвідношення параметрів конденсаторів C_1 та C_2 . На рис. 2 наведено графік перехідного процесу при підключенні до джерела напруги E двох послідовно з'єднаних суперконденсаторів з параметрами $C_1=0,6\text{Ф}$, $C_2=0,4\text{Ф}$ та $r_1=7\text{МОм}$, $r_2=3\text{МОм}$.

До комутації ($t < 0$) конденсатори були розряджені і напруга на них дорівнювало нулю. У момент комутації ($t=0$) конденсатори дуже швидко (майже миттєво) заряджається до напруги, величина якої обернено пропорційна їх ємності (швидка фаза перехідного процесу). Після цього ($t > 0$) починається повільна фаза перехідного процесу, після закінчення якої на конденсаторах встановлюється напруга, пропорційна до величини їх опору втрат. Тривалість повільної фази перехідного процесу, а отже і усього перехідного процесу:

$$t_{\text{пн}} \cong 3\tau = 3(C_1 + C_2) \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (7)$$

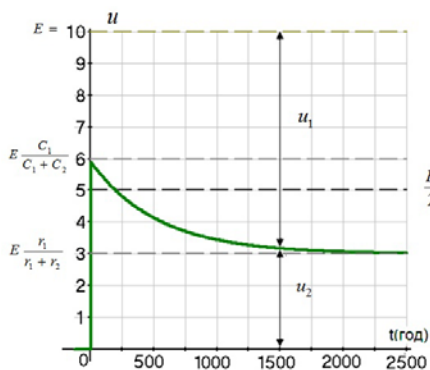


Рис. 2. Графік перехідного процесу двох послідовно з'єднаних суперконденсаторів

За таких умов можемо вважати, що $U_{C_1} + U_{C_2} = E$. Отже достатньо визначити напругу на одному з конденсаторів, наприклад C_2 .

Для розглянутого прикладу перехідний процес триватиме понад 1500 год. При цьому спочатку $U_{C_1} < U_{C_2}$, а потім напруга на ємності C_2 стає меншою, ніж на C_1 . Якщо допустима робоча напруга ємностей $U_{\text{сдоп}} = E/2$, то під час перехідного процесу обидві ємності будуть зазнавати перенапруження, що зменшує безпечність їх експлуатації та скорочує термін використання. Тому при експлуатації послідовно з'єднаних конденсаторів необхідно передбачати заходи, які б виключали можливість перенапруг на них.

Оскільки несиметрія напруг на конденсаторах, пов'язана з різними значеннями їх ємностей проявляється в кінці швидкої фази перехідного процесу реальна тривалість якої становить секунди, її виявити дуже легко. Для виключення перенапруг на цьому етапі необхідно підбирати конденсатори з приблизно однаковими величинами ємностей, тобто $C_1 \cong C_2$. Несиметрія напруг пов'язана з різними значеннями опорів втрат проявляється на кінцевій фазі перехідного процесу, який може тривати десятки і сотні годин. Тому виявлення цієї не симетрії та визначення величин опорів втрат r_1 та r_2 пов'язано із значними труднощами. Тому для виключення значної не симетрії напруг, пов'язаної з не ідентичністю опорів втрат r_1 та r_2 необхідно передбачити заходи по балансуванню цих напруг.

Способи балансування напруг на конденсаторах

Найпоширенішим методом балансування напруг на конденсаторах є підключення паралельно до них баластних вирівнювальних резисторів R (рис. 3) опір яких вибирають значно меншим від опорів втрат.

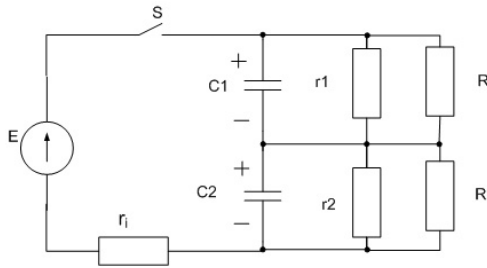


Рис. 3. Схема балансування напруг двох послідовно з'єднаних конденсаторів за допомогою баластних резисторів R

Існує два основні підходи до вибору опору баластних резисторів [4]:

- 1) $R = 0,1 \frac{r_1 + r_2}{2} = 0,1r_{cp}$;
- 2) $R = 0,1r_{min}$.

Основними вимогами до способу балансування є:

- забезпечення рівності напруг на конденсаторах;
- мінімальні додаткові втрати енергії у вирівнювальних резисторах.

Порівняємо за цими показниками два існуючих підходи. Для більш загального характеру отриманих результатів будемо користуватись відносною величиною опору $r^* = \frac{r}{r_1 + r_2}$.

Тоді $r_1^* = \frac{r_1}{r_1 + r_2}$; $r_2^* = \frac{r_2}{r_1 + r_2}$; Отже $r_1^* + r_2^* = 1$.

Будемо вважати, що $r_1 < r_2$. Тоді $r_1^* = r_{min}^*$; $r_2^* = 1 - r_1^* = 1 - r_{min}^*$.

Розглянемо три випадки:

- Вирівнювальні резистори R відсутні;
- Опір вирівнювальних резисторів $R = 0,1r_{cp}$;
- Опір вирівнювальних резисторів $R = 0,1r_{min}$.

1. Опори R відсутні

Розподіл напруг на конденсаторах визначається коефіцієнтом ділення резистивної частини схеми:

$$K = \frac{r_2}{r_2 + r_1} = r_2^* = 1 - r_1^* = 1 - r_{min}^* \quad (8)$$

Для забезпечення рівності напруг на конденсаторах необхідно, щоб $K \rightarrow 0,5$. Втрати потужності на опорах втрат конденсаторів:

$$P_1 = \frac{E^2}{r_1 + r_2} \quad (9)$$

При наявності вирівнювальних резисторів коефіцієнт ділення:

$$K = \frac{R_{2екв}}{R_{1екв} + R_{2екв}} \quad (10)$$

а втрати потужності

$$P = \frac{E^2}{R_{1екв} + R_{2екв}} \quad (11)$$

де $R_{1екв} = \frac{R \cdot r_1}{R + r_1}$; $R_{2екв} = \frac{R \cdot r_2}{R + r_2}$.

Розглянемо ці величини для двох способів балансування.

2. Опори $R = 0,1r_{cp}$.

Відносна величина цього опору

$$R^* = 0,1 \cdot \frac{r_2 + r_1}{2} \cdot \frac{1}{r_2 + r_1} = 0,05 \quad \text{Отже коефіцієнт}$$

ділення:

$$K_2 = \frac{R_{2екв}^*}{R_{1екв}^* + R_{2екв}^*} = \frac{(1 - r_{min}^*)(0,05 + r_{min}^*)}{0,05 + 2r_1^*(1 - r_{min}^*)} \quad (12)$$

Відносні втрати потужності у порівнянні з відсутністю вирівнювальних опорів:

$$\begin{aligned} P_2^* &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{r_1 + r_2}{R_{1екв} + R_{2екв}} = \frac{1}{R_{1екв}^* + R_{2екв}^*} = \\ &= \frac{(R^* + r_2^*)(R^* + r_{min}^*)(r_{min}^* + r_2^*)}{R^*(R^*(r_{min}^* + r_2^*) + 2r_{min}^*r_2^*)} = \\ &= \frac{(R^* + 1 - r_{min}^*)(R^* + r_{min}^*)}{R^*(R^* + 2r_{min}^*(1 - r_{min}^*))} = \\ &= \frac{(0,05 + 1 - r_{min}^*)(0,05 + r_{min}^*)}{0,05(0,05 + 2r_{min}^*(1 - r_{min}^*))} \quad (13) \end{aligned}$$

3. Опір $R = 0,1r_{min}$

Для цього випадку:

$$\begin{aligned} K_3 &= \frac{R_{2екв}^*}{R_{1екв}^* + R_{2екв}^*} = \\ &= \frac{(1 - r_{min}^*)(0,1r_{min}^* + r_{min}^*)}{0,1r_{min}^* + 2r_{min}^*(1 - r_{min}^*)} \quad (14) \end{aligned}$$

Відносні втрати потужності в резистивних елементах:

$$\begin{aligned}
 P_3^* &= \frac{P_3}{P_1} = \frac{r_1 + r_2}{R_{1екв} + R_{2екв}} = \frac{1}{R_{1екв}^* + R_{2екв}^*} = \\
 &= \frac{(r_{min}^* + r_2^*) \cdot (r_{min}^* + 10 \cdot r_2^*)}{0,09 \cdot r_{min}^* \cdot (r_{min}^* + 21 \cdot r_2^*)} = \\
 &= \frac{(r_{min}^* + 10 \cdot (1 - r_{min}^*))}{0,09 \cdot r_{min}^* \cdot (r_{min}^* + 21 \cdot (1 - r_{min}^*))} = \\
 &= \frac{(10 - 9r_{min}^*)}{0,09 \cdot r_{min}^* \cdot (21 - 20r_{min}^*)} = \\
 &= \frac{10 - 9r_{min}^*}{1,91 \cdot r_{min}^* - 1,82(r_{min}^*)^2}.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

На рис. 4 наведено графіки залежності $K = f(r_{min}^*)$, а на рис. 5 - $P^* = f(r_{min}^*)$ для трьох розглянутих випадків.

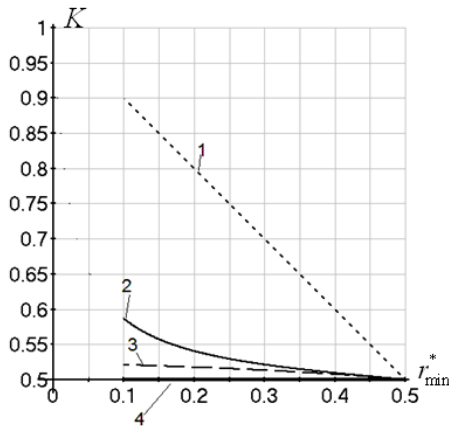


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта ділення від несиметрії опорів втрат

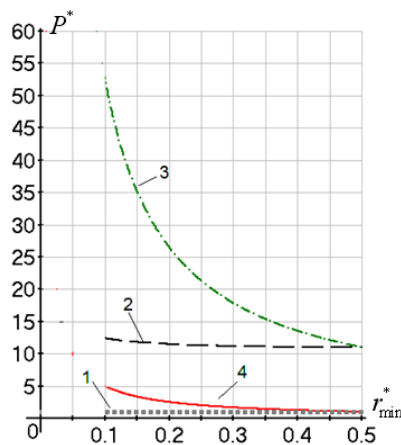


Рис. 5. Графік залежності зростання додаткових втрат енергії від несиметрії опорів втрат

Втрати потужності при відсутності вирівнювальних резисторів (випадок 1) приймаємо за одиницю. На графіках прийнято найменше можливе значення $r_{min}^* = 0,1$, оскільки при більшій не симетрії опорів r_1 та r_2 розглянуті способи балансування стають неефективними. З графіків випливає, що для випадку 3 найбільша несиметрія напруг на конденсаторах не перевищує 4%, однак втрати потужності при цьому зростають у ~52 рази. Для випадку 2 найбільша несиметрія напруг досягає 16%, однак при цьому втрати потужності зростають лише в ~13 разів.

4. Для зменшення додаткових втрат і забезпечення високої симетрії напруг на конденсаторах пропонується наступний підхід.

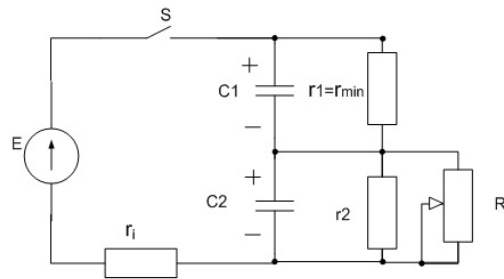


Рис. 6. Схема балансування напруг суперконденсаторів за допомогою змінного вирівнюючого резистора R

Оскільки ми можемо впливати на еквівалентні опори втрат лише в сторону їх зменшення, доцільно вирівнювальний резистор R паралельно підключати лише до більшого з опорів (r_2), і шляхом зміни величини цього опору забезпечувати рівність:

$$R_{2екв} = \frac{r_2 R}{r_2 + R} = r_1 = r_{min} .
 \tag{16}$$

У цьому випадку коефіцієнт ділення:

$$K_4 = \frac{R_{2екв}^*}{r_1^* + R_{2екв}^*} = \frac{r_{min}}{2r_{min}} = 0,5 ,
 \tag{17}$$

тобто забезпечується повна симетрія напруг на обох конденсаторах.

Повні втрати потужності у цьому випадку:

$$P_4^* = \frac{E^2}{2r_{min}} ,
 \tag{18}$$

а відносні:

$$P_4^* = \frac{P_4}{P_1} = \frac{r_1 + r_2}{2r_{min}} = \frac{1}{2r_{min}^*}. \quad (19)$$

На рис. 4 та 5 графіки, які відповідають запропонованому підходу наведено під номером 4. З них випливає, що в усьому діапазоні зміни r_{min}^* коефіцієнт ділення залишається незмінним і дорівнює $K_4=0,5$, а додаткові втрати у найгіршому випадку зростають лише у 5 разів.

Однак практична реалізація розглянутих підходів пов'язана із значними складнощами які, як зазначалося, пов'язані з неможливістю швидкого та ефективного визначення реальних величин опорів втрат r_1 та r_2 . Тому застосований метод балансування повинен забезпечувати автоматичне вирівнювання напруг на конденсаторах. Оскільки запропонований підхід теоретично є найбільш ефективним, йому слід віддати перевагу. При цьому у якості опорів R доцільно використовувати або нелінійний резистор з відповідною ВАХ, або змінний опір, побудований на базі керованих приладів.

Висновки

1. При використанні послідовно з'єднаних конденсаторів, для виключення можливості перенапруги на них під час швидкої фази перехідного процесу, доцільно підбирати конденсатори з близькими значеннями величини ємностей.

2. Для зменшення несиметрії напруг на конденсаторах в усталеному режимі доцільно використовувати вирівнювальні резистори, які підключаються паралельно до конденсаторів. Однак вибір величини опорів цих резисторів пов'язаний із складнощами, оскільки важко визначити реальні опори втрат конденсаторів.

3. У зв'язку з цим у якості вирівнювальних резисторів доцільно використовувати або нелінійні резистивні елементи з відповідною ВАХ, або активні подільні напруги.

Список використаних джерел

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для Вузов. 8-е изд. - М.: Высшая школа, 1984. - 559 с.
2. Беляков А.И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития / А.И. Беляков // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т. 6, № 3.
3. Перехідні процеси: навч. Посіб. / В. Я. Жуйков, В. Я. Ромашко. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 184с. – Бібліогр.: с.183-184.
4. В.В. Азупов, Ю.Ю. Разуваев, М.Ю. Чайка, О.Н. Чопоров. Особенности активной балансировки напряжений суперконденсаторов. Вестник воронежского государственного технического университета, 2012, Том 8, №7.2, с. 101-105.

Поступила в редакцию 14 мая 2015 г.

УДК 621.314

Д.И. Гомма, В.Я. Ромашко, д.-р. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Дополнительные потери энергии при последовательном соединении суперконденсаторов

Проанализированы особенности последовательно соединенных суперконденсаторов. Показано, что несимметрия напряжений на них, связанная с разной величиной их сопротивлений потерь, проявляется в конце переходного процесса, который может длиться десятки и сотни часов. Проанализированы существующие методы балансировки напряжений на конденсаторах и их энергетические характеристики. Предложен метод балансировки напряжений суперконденсаторов с улучшенными характеристиками. Библ. 4, рис. 6.

Ключевые слова: последовательное соединение конденсаторов; балансировка напряжений; выравнивающие резисторы.

UDC 621.314

D. Homma, V. Romashko, Dr.Sc.

National technical university of Ukraine «Kyiv politechnic institute»,
Polytechnichna st., 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine.

Additional energy loss in the series connection of supercapacitors

The features of series-connected supercapacitors . It is shown that the asymmetry of stress on them, associated with different velechynoyu their resistance loss appears at the end of the transition process , which can take hundreds of hours. Existing methods of balancing voltage on the capacitors and their energy performance. A method for balancing voltages of supercapacitors with improved characteristics. Bibl.4, fig. 6.

Keywords: *a serial connection of capacitors; voltage balancing; balancing resistors.*

References

1. *Bessonov, L. A. (1984). Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical circuits. Textbook for High Schools 8th ed. Higher School, P. 559. (Rus)*
2. *Belyakov, A. I. (2006). Electrochemical Supercapacitors: current state and development problems. Electrochemical Energy, Vol. 6, No 3, Pp. 146-149. (Rus)*
3. *Zhuikov, V. Y., & Romashko, V. Y. (2010). Perehidni Process: navch. posib. NTU "KPI", P.184. (Ukr)*
4. *Agupov, V. V. Razuvaev, Y. Y., Seagull, M. Y., & Choporov, H. E. (2012). Features active balancing voltage supercapacitors. Bulletin of the Voronezh State Technical University, Vol. 8, No7.2, Pp. 101-105. (Rus)*