

УДК 621.316.727

С.К. Поднебенна

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ «ДИНАМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ» ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Досліджено роботу «динамічних конденсаторів» для компенсації реактивної потужності. Запропоновано оригінальну систему управління «динамічним конденсатором», яка забезпечує споживання ним близького до синусоїдального вхідного струму. Це дозволяє зменшити вплив «динамічного конденсатора» на амплітудно-частотну характеристику мережі, підвищити надійність його роботи та покращити точність компенсації реактивної потужності. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, «динамічний конденсатор», система управління, безпосередній знижувальний АС/АС перетворювач, двонаправлений ключ.

Исследована работа «динамических конденсаторов» для компенсации реактивной мощности. Предложена оригинальная система управления «динамическим конденсатором», которая обеспечивает потребление им близкого к синусоидальному входного тока. Это позволяет уменьшить влияние «динамического конденсатора» на амплитудно-частотную характеристику сети, повысить надежность его работы и улучшить точность компенсации реактивной мощности. Библ. 4, рис. 6.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, «динамический конденсатор», система управления, непосредственный понижающий АС / АС преобразователь, двунаправленный ключ.

Вступ. Пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП) мають відповідати наступним критеріям: забезпечувати плавне регулювання реактивної потужності та при цьому мати відносно невелику вартість. Сучасним рішенням для компенсації реактивної потужності (РП) є використання ПКРП зі ступеневим перемиканням, СТАТКОМів, активних фільтрів [1]. Останнім часом все більше уваги приділяється проектуванню ПКРП на базі безпосередніх АС/АС перетворювачів, які отримали назву «динамічний конденсатор» (ДК) [2 – 4].

Постановка задачі. ДК представляє собою батарею конденсаторів, що підключається до мережі через напівпровідниковий безпосередній перетворювач змінної напруги із двома двонаправленими ключами. Спрощена схема підключення ДК до мережі наведена на рис. 1.

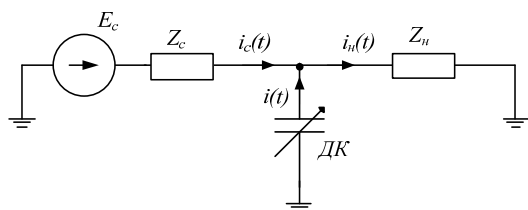


Рис. 1. Спрощена схема підключення ДК до мережі

Найчастіше в ДК використовується понижуючий перетворювач – buck-converter (рис. 2), проте можуть бути використані і підвищувальний (boost), і понижуючи-підвищувальний (buck-boost) [2 – 4].

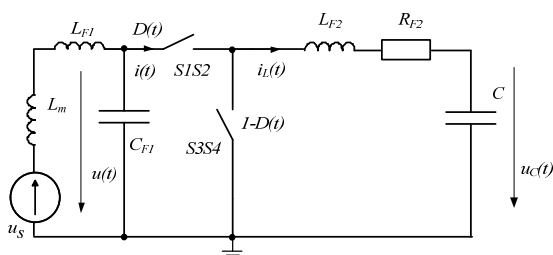


Рис. 2. Схема однофазного «динамічного конденсатора» на основі buck-перетворювача

Використання останніх передбачує підтримання підвищеної напруги на конденсаторі ДК, що накладає певні вимоги до пробивної напруги силових ключів та є економічно необґрунтованим.

В якості двонаправлених ключів можуть виступати з'єднані по схемі з загальним емітером IGBT транзистори (рис. 3).

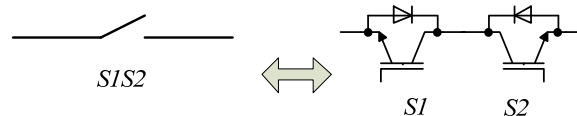


Рис. 3. Схема двонаправлених ключів

Регулювання реактивної потужності забезпечується зміною скважності перемикання двонаправлених ключів (S1S2 та S3S4).

Якщо скважність керуючих імпульсів двонаправленого ключа S1S2 $D(t) = D = \text{const}$ при достатньо високій частоті перемикання, то можна записати вирази для напруги на конденсаторі U_C та локального середнього (середнього за період ШІМ) струму через ключі S1S2 I_X :

$$u_C(t) = D \cdot u_s(t) = D \cdot U_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

де $u_s(t) = U_m \sin(\omega t)$ – миттєва фазна напруга мережі, В.

$$i_X(t) = D \cdot i_C(t) = D \cdot C \frac{du_C(t)}{dt} = D^2 \cdot \omega \cdot C \cdot U_m \cos(\omega t). \quad (2)$$

Реактивна потужність такого ПКРП дорівнює номінальній потужності батареї конденсаторів Q_C , помноженій на квадрат скважності керуючих імпульсів двонаправленого ключа S1S2:

$$S_{D-CAP} = U_{Srms} \cdot I_{Srms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{D^2 \cdot U_m}{\sqrt{2} \cdot X_C} = D^2 \cdot \frac{U_m^2}{2 \cdot X_C} = D^2 \cdot Q_C \quad (3)$$

Якщо ДК підключається до мережі з несинусоїдальною напругою, вхідний струм ДК також буде несинусоїдальним. Крім того, послідовно з'єднані індуктивність L_{F2} та конденсатор C утворюють резонансний контур, в якому виникає коливальний перехідний процес.

Перевагою такого способу управління ДК є його простота реалізації. До недоліків слід віднести те, що при підключенні такого ДК до мережі з несинусоїдальною напругою, батарея конденсаторів ДК буде зазнавати впливу вищих гармонік струму, що може призвести до перевантаження конденсаторів або до виникнення резонансів між ДК та еквівалентною індуктивністю мережі. Крім того, ДК в режимі роботи з постійною скважністю впливає на амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) мережі. Все це призводить до зниження надійності ДК та може підвищити ймовірність виходу його з ладу.

Описані недоліки позначають мету досліджень, яка полягає в удосконаленні системи управління ДК.

Результати досліджень. Струм завдання ДК знаходиться в залежності від необхідної реактивної потужності, яку має згенерувати ДК, наприклад, в результаті виділення реактивної компоненти першої гармоніки споживаного навантаженням струму (рис. 1). Для того, щоб ДК не впливав на АЧХ мережі, треба, щоб форма споживаного ним струму була синусоїдальною.

Позначимо скважність перемикання двонаправленого ключа $SIS2$ як $D(t)$. Локальна середня напруга на конденсаторі C буде визначатися за наступним виразом:

$$u_C(t) = D(t) \cdot u(t), \quad (4)$$

а струм, що протікає через конденсатор C :

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot \frac{d(D(t) \cdot u(t))}{dt}. \quad (5)$$

Тоді струм, що споживається ДК, можна визначити як:

$$\begin{aligned} i(t) &= i_C(t) \cdot D(t) = C \cdot D(t) \cdot \frac{d(D(t) \cdot u(t))}{dt} = \\ &= C \cdot (D(t))^2 \cdot \frac{d(u(t))}{dt} + C \cdot D(t) \cdot u(t) \cdot \frac{d(D(t))}{dt}. \end{aligned} \quad (6)$$

Знайдемо миттєву потужність ДК:

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t) \cdot i(t) = C \cdot u(t) \cdot (D(t))^2 \frac{d(u(t))}{dt} + \\ &+ C \cdot D(t) \cdot (u(t))^2 \cdot \frac{d(D(t))}{dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

В першому доданку отриманої суми внесемо під знак похідної $u(t)$, а у другому – $D(t)$:

$$p(t) = \frac{C}{2} \cdot (D(t))^2 \frac{d(u(t)^2)}{dt} + \frac{C}{2} \cdot (u(t))^2 \cdot \frac{d(D(t)^2)}{dt}. \quad (8)$$

В результаті отримали вираз похідної добутку, після згоргання якої та внесення постійного множника отримали остаточний вираз для миттєвої потужності ДК:

$$p(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{C \cdot u(t)^2}{2} \cdot D(t)^2 \right). \quad (9)$$

Проінтегруємо останній вираз та знайдемо залежність для скважності двонаправлених ключів:

$$D(t) = \sqrt{\frac{2 \int_0^t u(\tau) \cdot i_{ref}(\tau) d\tau}{C \cdot (u(t)^2)}}, \quad (10)$$

де $i_{ref}(t)$ – заданий струм ДК, А.

Останній вираз дозволяє обчислити скважність керуючих імпульсів силових ключів ДК в залежності від потрібної форми струму ДК.

На рис. 4 наведена система управління ДК, яка реалізує керування скважністю перемикання двонаправлених ключів згідно з останнім виразом.

Блок PLL (Phase Locked Loop) – фазового автопідростроювання частоти – формує сигнал одиничної амплітуди, зсунутий по фазі на 90 електричних градусів по відношенню до першої гармоніки напруги мережі $u(t)$. В результаті множення його на задану амплітуду реактивного струму $I_{ref m}$, отримуємо струм завдання $i_{ref}(t)$. Отримані сигнали використовуються для обчислення скважності $D(t)$.

Для запобігання накопиченню похибки при роботі інтегратора його вихід скидається в нуль при кожному переході миттєвої напруги мережі через нуль за допомогою сигналу RESET, який формується на виході ZC (Zero Crossing) блоку PLL.

Якщо квадрат напруги мережі менше заданого значення U_{min}^2 , то спрацьовує перекидний ключ, який встановлює скважність двонаправлених ключів, що дорівнює середній за попередній період мережі. Це викликано великою похибкою розрахунку скважності при малих абсолютних значеннях миттєвої напруги мережі.

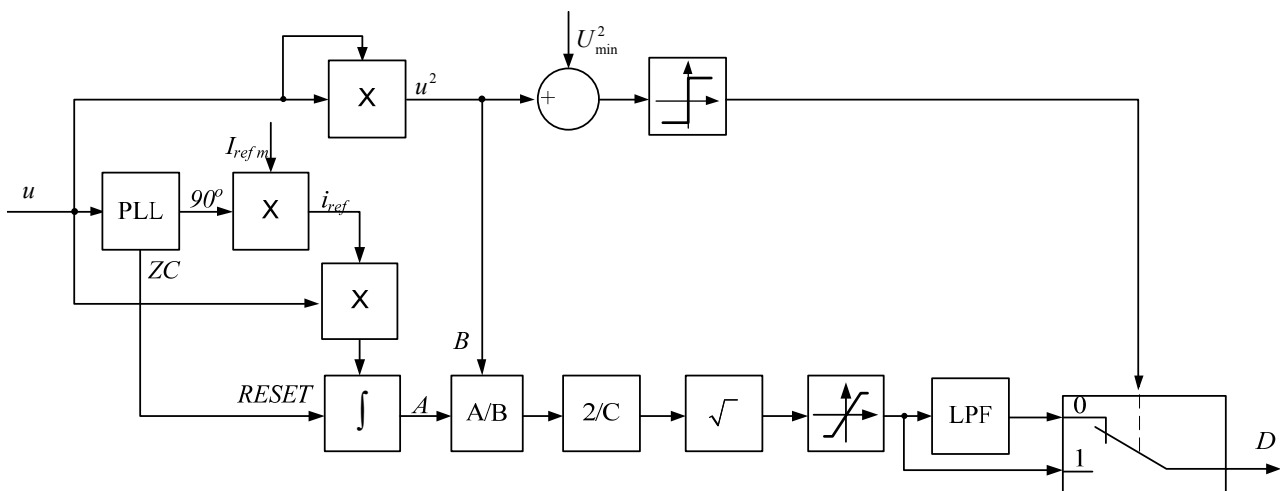


Рис. 4. Розроблена система управління ДК

До складу досліджуваного однофазного ДК входять:

- батарея конденсаторів (C , рис. 2) EPCOS MKD230-I-2.5 – 5 шт., напруга 230 В, ємність кожного конденсатора 151 мкФ, сукупна реактивна потужність батареї конденсаторів 12,5 кВАр;
- захисний реактор (R_{F2} , L_{F2} , рис. 2) індуктивністю 400 мкГн при струмі 100 А;
- мережевий фільтр (L_{F1} , C_{F1} , рис. 2) з індуктивністю $L_{F1} = 100$ мкГн і ємністю $C_{F1} = 94$ мкФ;
- 4 силових ключі IGBT APT100GF60JR (600 В, 100 А).

Схема управління транзисторами виконана з використанням спеціалізованих драйверів FOD3184. Частота перемикання ключів ДК складає 10 кГц. Формування керуючих сигналів здійснюється однокристальним 32-бітним мікроконтролером STM32F100C6T6В фірми ST Microelectronics, працюючим з тактовою частотою 24 МГц.

В результаті дослідження роботи ДК отримано діаграми напруги мережі та локального середнього вхідного струму ДК при роботі із постійною скважністю (рис. 5) та із удосконаленою системою управлін-

ня (рис. 6) зі спотвореною напругою мережі (вторинна напруга підстанції МТП-514 м. Маріуполя).

Видно, що при застосуванні запропонованого способу управління коефіцієнт гармонік вхідного струму ДК значно нижчий, ніж при управлінні з постійною скважністю. Таким чином, використання запропонованого способу управління ДК дозволяє забезпечити близький до синусоїдального споживаний ДК струм.

Висновки.

1. Використання системи управління ДК, яка реалізує постійну скважність перемикання двонаправлених ключів дозволяє досягти плавного регулювання реактивної потужності, проте такий ДК впливає на АЧХ мережі, що призводить до резонансів з реактивним опором мережі.

2. Використання удосконаленої системи управління ДК дозволяє досягти форми споживаного ДК струму близької до синусоїдальної, що значно зменшує вплив на АЧХ мережі, підвищує надійність ПКРП та якість електроенергії.

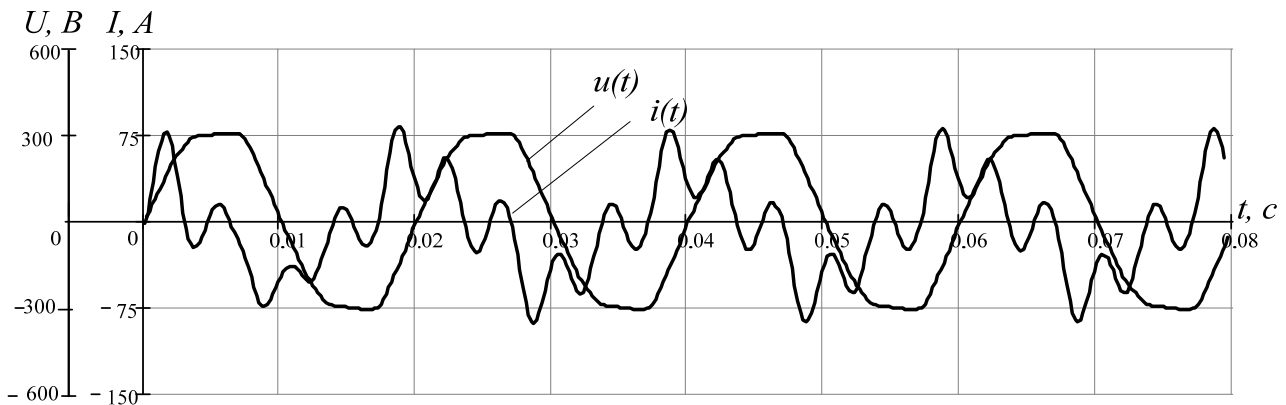


Рис. 5. Діаграми напруги мережі та локального середнього (середнього за період перемикання ключів) вхідного струму ДК при постійній скважності керуючих імпульсів силових ключів

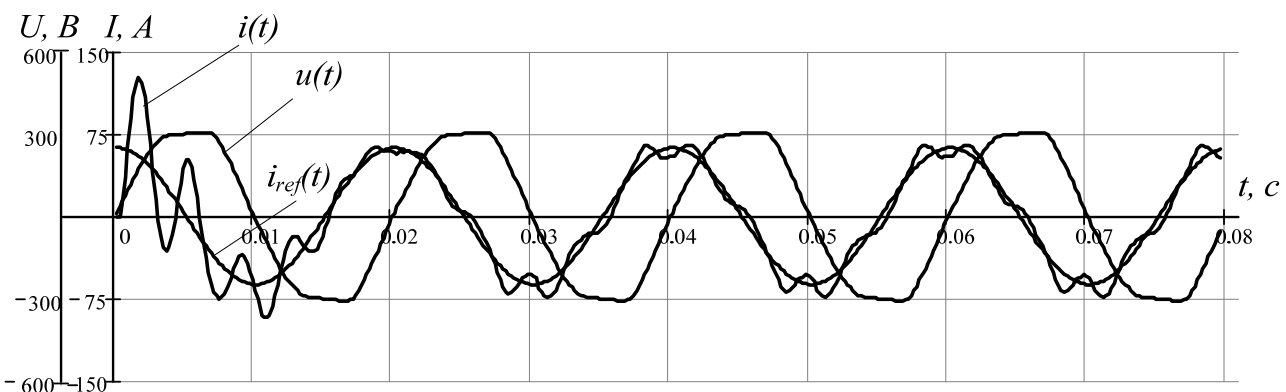


Рис. 6. Діаграми напруги мережі та локального середнього вхідного струму ДК при роботі удосконаленої системи управління

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Podnebennaya S.K., Savenko O.S. Hybrid VAR compensator with improved efficiency // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – № 29. – С. 174-180.
2. Anish Prasai, Deepak M. Divan. Control of dynamic capacitor // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2011. – vol.47. – no.1. – pp. 161-168.

3. Anish Prasai, Jyoti Sastry, Deepak M. Divan. Dynamic capacitor (D-CAP): An integrated approach to reactive and harmonic compensation // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2010. – vol.46. – no.6. – pp. 2518-2525.
4. Mudit Gupta, Singh N.K. Modelling of four switch buck boost dynamic capacitor // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2014. – vol.3. – iss.10. – pp. 964-970.

REFERENCES

1. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Podnebennaya S.K., Savenko O.S. Hybrid VAR compensator with improved efficiency. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu – Visnyk of Pryazovskyi State Technical University*, 2014, vol.29, pp. 174-180.
2. Anish Prasai, Deepak M. Divan. Control of dynamic capacitor. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2011, vol.47, no.1, pp. 161-168. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316203.
3. Anish Prasai, Jyoti Sastry, Deepak M. Divan. Dynamic capacitor (D-CAP): An integrated approach to reactive and harmonic compensation. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2010, vol.46, no.6, pp. 2518-2525. doi: 10.1109/tia.2010.2072974.
4. Mudit Gupta, Singh N.K. Modelling of four switch buck boost dynamic capacitor. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol.3, iss.10, pp. 964-970.

Надійшла (received) 21.07.2015

Поднебенна Світлана Костянтинівна, к.т.н., доц.,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»,
87500, Маріуполь, вул. Університетська, 7,
тел/phone +38 098 4831073, e-mail: podsvet@gmail.com

S.K. Podnebennaya
Pryazovskyi State Technical University,
7, Universitetska Str, Mariupol, 87500, Ukraine.

An improved control algorithm for «Dynamic Capacitor» VAR compensator.

Purpose. Modern approaches of VAR compensation are: using compensators with stepped regulation, STATCOMs, active power filters. Recently, more attention is paid to VAR compensator's

design based on the direct AC / AC converters, which are called dynamic capacitors. **Methodology.** The dynamic capacitor (D-CAP) is the capacitor bank, which is connected to the mains through direct AC / AC buck converter. By varying the duty cycle of bidirectional switches, smooth control of reactive power can be achieved. However, in case of distorted mains voltage, D-CAP mains current will have a high THD. This is due to the fact that the D-CAP affects the frequency response of electric grid thus leading to the appearance of resonances. With non-sinusoidal mains voltage, capacitors are affected by harmonics. This reduces the reliability of the D-CAP, increasing the probability of their failure. To eliminate these drawbacks it is suggested to improve the D-CAP control system so that the input current of the dynamic capacitor is forced to be close to sinusoidal. This can be achieved if the duty cycle of the switching bidirectional switches is changed according to the proposed expression. **Results.** The research is done on a single-phase D-CAP with the proposed control system, its input current diagrams are shown. In contrast to the D-CAP with a constant duty cycle control, the resulting THD of its input current is much lower. Thus, the control system provides a form of the input current that is close to a sine wave. This reduces the influence of mains voltage harmonics on the D-CAP operation, increases its reliability and improves power quality. **Originality.** The proposed D-CAP control system ensures reliable operation with non-sinusoidal mains voltage. **Practical value.** Application of D-CAPs with the proposed control system allows for improved energy efficiency of electrical mains by providing VAR compensation and improving power quality. References 4, figures 6.

Key words: VAR compensation, dynamic capacitor, control system, thin AC/AC converter, bidirectional switch.