

НАПРУГА НА СИЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕНТИЛЯХ ТРИФАЗНОГО МОСТОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ОДНІЄЮ КОМУТУЮЧОЮ ЛАНКОЮ

Досліджуються умови роботи силових електричних вентилів трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою, яка складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи повністю керованих приладів. Таке технічне рішення дозволяє забезпечити перезаряд конденсаторів комутуючої ланки та керування енергетичним процесом перетворювача. Разом з тим при цьому змінюються і умови роботи його силового обладнання. Основним змістом дослідження є аналіз складових зворотної напруги силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача та динаміки її зміни при регулюванні електромагнітного процесу транзисторами комутуючої ланки. Це потрібно при визначенні класу вентилів, у разі впровадження перетворювача за досліджуваною схемою у виробництво. Дослідження величини і форми зворотної напруги здійснено для двох режимів: транзистори комутуючої ланки керуються у межах роботи силових електричних вентилів своєї фази та наступної. Обсяг досліджень обмежений аналізом процесів при одинарній частоті імпульсів керування. В результаті доведено, що на силових електричних вентилях компенсаційної частини перетворювача зворотна напруга менша, ніж на інших вентилях. Причиною цього є комутуюча напруга конденсаторів, яка, накладаючись на лінійну напругу вторинної обмотки перетворювального трансформатора, зменшує максимальне значення кривої зворотної напруги силових електричних вентилів.

Ключові слова: конденсаторна батарея, комутатор, комутуюча напруга, електричний вентиль.

Вступ Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач з однією комутуючою ланкою (схема, рис. 1) має дві трифазні групи силових електричних вентилів. Одна група, яка на схемі є анодною, працює у звичайному (некомпенсаційному) режимі. Умови роботи цих вентилів нічим не відрізняються від умов роботи вентилів трифазного мостового перетворювача. Трифазна група силових електричних вентилів катодної частини перетворювача (рис. 1) працюють у компенсаційному режимі, забезпечуючи перетворювачу енергоефективний режим енергозабезпечення технологічних споживачів постійного струму. Зазначений енергетичний режим досягається за рахунок комплектації перетворювача комутуючою ланкою, яка складається з трифазної батареї конденсаторів і трифазної групи повністю керованих приладів. Таке технічне рішення захищене патентом України на корисну модель [1].

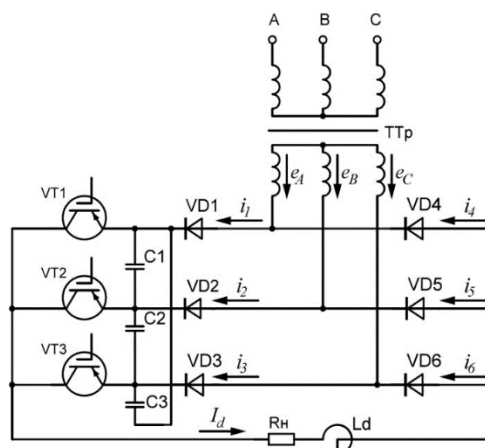


Рисунок 1 - Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача

Існує зацікавленість у розробці та дослідженні таких схем через їх підвищені енергетичні характеристики. Свідченням цього є інформація щодо подібних розробок, які ведуться як у далекому [2,3], так і у близькому зарубіжжі. Вітчизняні вчені також мають досягнення у розробці і дослідженні перетворювачів компенсаційного типу. Найбільш вагомими здобутками мають науковці Інституту електродинаміки НАН України. Так у публікаціях [4,5,6,7] наведені результати дослідження

електромагнітних процесів у схемі мостового перетворювача з двома комутуючими ланками, де у якості комутатора використовується трифазна група тиристорів.

Перші компенсаційні перетворювачі, створені у Київському політехнічному інституті під керівництвом відомого вченого Чиженка І.М., мали комутуючу ланку, яка складалася з трифазної конденсаторної батареї та трифазного зрівноважувального реактора. Вони добре зарекомендували себе при промисловому впровадженні у кольоровій промисловості, хімічних виробництвах та електротязі. Однак, серед недоліків, які мали такі перетворювачі, відмічалась підвищена величина зворотної напруги на силових електричних вентилях.

Мета роботи Отримати дані щодо умов експлуатації силових електричних вентилів трифазного мостового компенсаційного перетворювача та співвідношення для вибору класу вентилів відповідно до вимог технологічного процесу при його регулюванні керованими пристроями комутуючої ланки.

Результати досліджень Вхідним пристроєм досліджуваного трифазного мостового компенсаційного перетворювача є трифазний трансформатор (ТТр). Мережа живлення, до якої він підімкнений, у дослідженні вважається стандартною симетричною трифазною системою прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6 + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2 + \psi); \\ e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6 + \psi), \end{aligned} \quad (1)$$

де E_m - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора; ϑ – поточна змінна; ψ – початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Якщо знехтувати реактивним опором кола змінного струму і вважати комутаційний процес миттєвим, то кожний силовий електричний вентиль анодної частини перетворювача вступатиме в роботу один раз за період і буде працювати протягом третини періоду. Крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі анодної частини перетворювача відома [10]. Вона має два інтервали з найбільшим миттєвим значенням, яке дорівнює амплітуді лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

Якщо при дослідженні зворотної напруги на силовому електричному вентилі анодної частини перетворювача урахувати реактивний опір кола змінного струму, її величина і форма дещо відрізняться. Ця крива матиме вісім ділянок, чотири з яких є комутаційною напругою. При цьому найбільше значення зворотної напруги може дещо перевищувати амплітудне значення лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора, що також детально описано у технічній літературі.

Як впливає з мети роботи, основним завданням даної публікації є дослідження зворотної напруги на силових електричних вентилях катодної групи, які працюють у компенсаційному режимі. Величина і форма цієї напруги залежить від режиму роботи перетворювача, на який, у першу чергу, впливають умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки. Обмежимо обсяг досліджень регулюванням транзисторів комутуючої ланки імпульсами частоти, що відповідає частоті напруги мережі живлення.

У компенсаційних перетворювачах нового покоління, до яких відноситься і досліджуваний перетворювач, на величину і форму комутуючої напруги, а, відповідно і зворотної напруги вентилів, впливають такі фактори, як момент включення в роботу повністю керованих приладів комутуючої ланки та діапазон регулювання. Тому, у публікації [8], дослідження умов перезаряду конденсаторів комутуючої ланки перетворювача за схемою рис. 1 поділено на три режими:

- регулювання здійснюється у межах роботи силового електричного вентиля своєї фази;
- регулювання здійснюється у межах роботи силового електричного вентиля наступної фази;
- регулювання здійснюється у межах роботи силового електричного вентиля попередньої фази.

Там же зазначено, що робота перетворювача у третьому режимі є недоцільною. Тож, виходячи з викладеного, дослідження щодо величини і форми зворотної напруги на силових електричних вентилях компенсаційної частини перетворювача, здійснено для двох перших режимів.

Режим 1 *Регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюється у межах роботи силових електричних вентилів своєї фази при одинарній частоті.*

Спочатку розглянемо режим миттєвої комутації. У катодній частині перетворювача, як і у анодній, кожний силовий електричний вентиль також буде працювати протягом третини періоду. Нехай першим вступив в роботу вентиль VD1. Поки він працює, напруги на ньому немає. Після виходу цього вентиля з роботи, включається вентиль VD2. На вентилі VD1 з'являється напруга і рівняння контуру, що проходить через зазначені вентиля, буде таким:

$$e_A - e_B = u_{VD1(1)} + u_{C1}.$$

Відповідно напруга на силовому електричному вентилі VD1 в інтервалі провідності вентиля VD2:

$$u_{VD1(1)} = e_{AB} - u_{C1} \quad (2)$$

Після виходу з роботи силового електричного вентиля VD2 включається вентиль VD3 і напругу на силовому електричному вентилі VD1 в інтервалі провідності вентиля VD3 розрахуємо наступним чином:

$$e_A - e_C = u_{VD1(2)} - u_{C3} \rightarrow u_{VD1(2)} = e_{AC} + u_{C3} \quad (3)$$

Відповідно до наведених вище рівнянь, рис. 2 ілюструє динаміку зміни величини і форми комутуючої напруги при зміні моменту вступу в роботу транзистора VT1 в діапазоні $0 \leq \theta \leq 2\pi/3$. Докладне дослідження цього питання опубліковане авторами в [8].

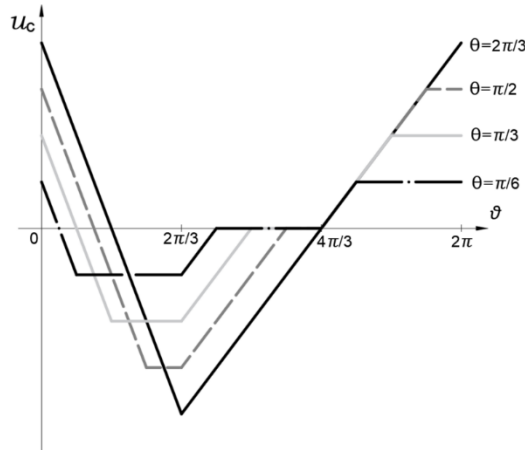


Рисунок 2 - динаміка зміни комутуючої напруги (регулювання в межах своєї фази)

При $\theta = 0$ струм через конденсатори не проходить і комутуюча напруга дорівнює нулю. По мірі зростання затримки θ , величина комутуючої напруги збільшується.

На рис. 3 відповідно до (2) і (3) побудована крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі VD1 в одному з режимів роботи перетворювача, та показані складові цієї напруги.

Як бачимо, побудована для режиму миттєвої комутації на рис. 3,а крива зворотної напруги має чотири інтервали з різною закономірністю зміни миттєвого значення. При зміні режиму роботи перетворювача величина і форма цієї кривої буде дещо змінюватися. Однак, як показує докладний аналіз динаміки зміни напруги u_{VD1} , її найбільше значення завжди приходить на ділянці III. Ця ділянка є найбільш важливою, оскільки за максимальним значенням зворотної напруги вибирається клас силового електричного вентиля.

З рис. 3,а випливає, що на ділянці III, межі якої від $(4\pi/3 - \alpha)$ до $(4\pi/3 + \theta)$, напруга u_{VD1} має дві складові (3): перша з них є лінійною напругою вторинної обмотки перетворювального трансформатора, а друга – ділянкою фазної напруги комутуючого конденсатора u_{C3} . На цій ділянці комутуюча напруга є прямою, що не проходить через початок координат. Запишемо її рівняння, виходячи з наступних умов:

$$\text{при } \vartheta = 4\pi/3 - \alpha, u_{C3} = 0;$$

$$\text{при } \vartheta = 4\pi/3 + \theta, u_{C3} = \sin \alpha.$$

Після необхідних математичних перетворень, отримаємо закономірність зміни комутуючої напруги на ділянці III кривої зворотної напруги

$$u_{C3(III)}(\vartheta) = \frac{\sin \alpha}{\theta + \alpha} \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} + \alpha \right),$$

і закономірність зміни самої зворотної напруги на цій ділянці

$$u_{VD1(III)}(\vartheta) = \sin \vartheta + \frac{\sin \alpha}{\theta + \alpha} \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} + \alpha \right) \quad (4)$$

Розрахуємо момент максимального значення кривої зворотної напруги силових електричних вентилів катодної частини перетворювача за досліджуваних у цій частині умов роботи перетворювача.

Дослідимо (4) на максимум: $\frac{u_{VD1(III)}(\vartheta)}{d\vartheta} = \cos \vartheta + \frac{\sin \alpha}{\theta + \alpha}$. Виходячи з останнього, крива зворотної напруги набуває максимального значення у момент:

$$\vartheta = \arccos\left(-\frac{\sin \alpha}{\theta + \alpha}\right) \quad (5)$$

Тож вибір класу силових електричних вентилів катодної частини перетворювача здійснюється за співвідношенням

$$u_{VD1max} = \sin \left[\arccos \left(-\frac{\sin \alpha}{\theta + \alpha} \right) \right] + \frac{\sin \alpha}{\theta + \alpha} \left[\arccos \left(-\frac{\sin \alpha}{\theta + \alpha} \right) - \frac{4\pi}{3} + \alpha \right] \quad (6)$$

Якщо урахувати у дослідженні реактивність кола змінного струму, коли комутація не буде миттєвою, форма кривої зворотної напруги зміниться. Її побудову з урахуванням складових, здійснено на рис. 3,б.

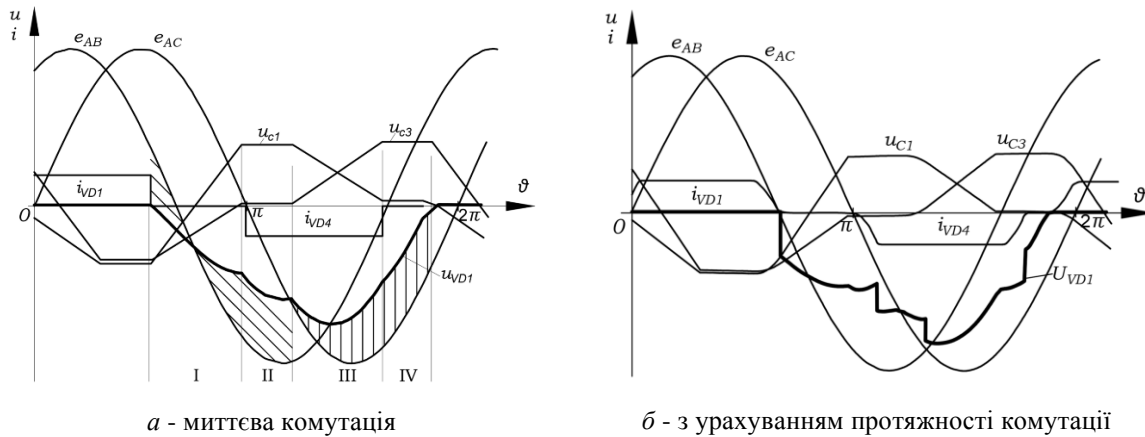


Рисунок 3 - зворотна напруга на силовому електричному вентилі катодної частини перетворювача

Дослідження динаміки зміни величини і форми цієї напруги у випадку, коли регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюється у межах роботи силових електричних вентилів своєї фази при одинарній частоті, показує, що максимальне значення зворотної напруги силових електричних вентилів катодної частини перетворювача можна розраховувати за співвідношенням (6).

Режим 2 Регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюється у межах роботи силових електричних вентилів наступної фази при одинарній частоті.

Як і у попередньому дослідженні спочатку розглянемо режим миттєвої комутації. Динаміка зміни величини і форми комутуючої напруги при миттєвій комутації струму силовими електричними вентилями представлено на рис. 4. Характерною особливістю сімейства кривих комутуючої напруги є те, що вони не мають ділянок з нульовим значенням, а числові значення додатної і від'ємної частини симетричні відносно осі абсцис.

На рис. 5 побудована крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі VD1 в одному з режимів роботи перетворювача, та показані складові цієї напруги. При побудові використані співвідношення (2), (3) і криві рис. 4.

Як бачимо побудова кривої зворотної напруги відповідає такому режиму роботи перетворювача, при якому крива комутуючої напруги симетрична відносно осі абсцис за формою. Тому крива зворотної напруги на силовому електричному вентилі має два однакових максимуму, значення яких дещо менше за амплітуду лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора. При інших режимах роботи перетворювача форма кривої зворотної напруги і величина змінюються, але її максимальне значення не перевищує амплітудного значення лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

Урахування протяжності комутаційного процесу змінює форму кривої зворотної напруги силових електричних вентилів. Дану обставину ілюструє рис. 7. Але і за цих умов найбільше значення кривої u_{VD1} не перевищує амплітудного значення лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

Висновки Наукові дослідження публікації, підтверджують, що при регулюванні режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача через транзистори комутуючої ланки, суттєвим є питання, у межах якої фази і з якою частотою формуються імпульси керування транзисторами. Дослідження двох режимів роботи при частоті імпульсів керування, що мають частоту напруги мережі живлення, дозволяють зробити наступні висновки.

При регулюванні транзисторів у межах роботи силових електричних вентилів своєї фази, змінюється величина і форма комутуючої напруги. Це, в свою чергу, призводить до зміни величини і форми зворотної напруги силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача. Але

при будь-якій затримці подачі на транзистор імпульсу керування, максимальне значення зворотної напруги буде меншим за амплітудне значення лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора. Що є перевагою нового покоління компенсаційного перетворювача, досліджуваного у публікації.

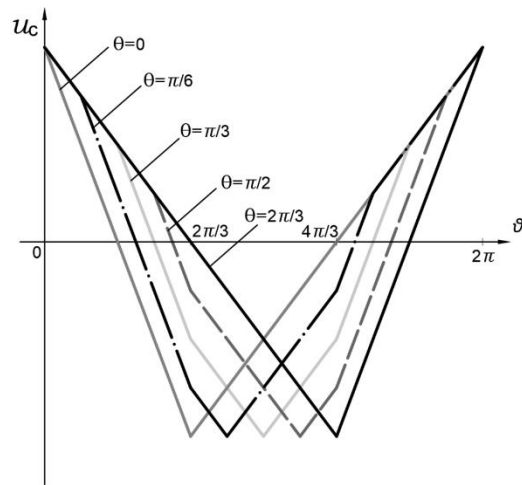
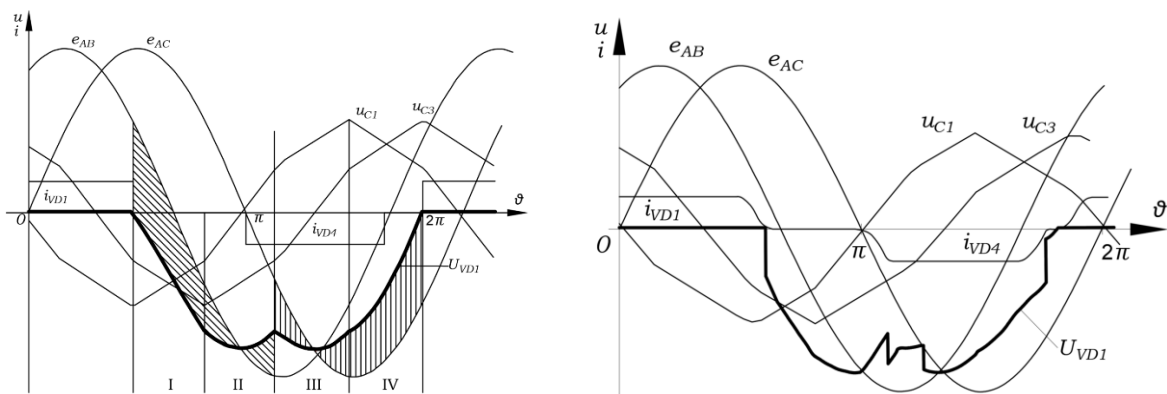


Рисунок 4 - динаміка зміни комутуючої напруги (регулювання в межах наступної фази)



а - миттєва комутація

б - з урахуванням протяжності комутації

Рисунок 5 - зворотна напруга на силовому електричному вентилі катодної частини перетворювача

Якщо транзистори комутуючої ланки регулюються у межах роботи силового електричного вентиля наступної фази, ефективність регулювання є меншою. Це пояснюється тим, що у такому режимі роботи перетворювача, змінюється лише форма комутуючої напруги, а її максимальне значення залишається незмінним. Але і у зазначеному режимі роботи, максимальне значення кривої зворотної напруги силових електричних вентилів компенсаційної частини, не перевищує амплітудного значення лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

Список використаної літератури.

1. Бойко В.С. Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач. Патент України на корисну модель № 142864, 2020.
2. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.
3. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.
4. Чиженко О.І. Аналіз електромагнітних дій у компенсаційному випрямлячі при обмежених значеннях індуктивності дроселя, що згладжує. Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. 2001. Енергоефективність. С. 17–27.

5. Butkevych O., Chyzhenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.

6. Chyzhenko O.I., Trach I.V. An impact of changes in the inductance of distributions network on the modes and parameters of equipment of thyristor compensator of reactive power. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.048>.

7. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В., Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. №6. С. 62-68.

8. Бойко, В. і Шкардун, О. 2023. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 3 (Квіт.2023),013. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>.

V. Boiko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642

O. Shkardun¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

VOLTAGE ON THE POWER ELECTRIC DIODES OF A THREE-PHASE BRIDGE COMPENSATION CONVERTER WITH ONE COMMUTATING LINK

The operating conditions of power electric diodes of a three-phase bridge compensation converter with one commutating link, which consists of a three-phase capacitor battery and a three-phase group of fully controlled devices, are investigated. This technical solution makes it possible to ensure the recharging of the capacitors of the commutating link and the control of the energy process of the converter. At the same time, the operating conditions of its power equipment also change. The main content of the study is the analysis of the components of the reverse voltage of the power electric diodes of the compensation part of the converter and the dynamics of its change during the regulation of the electromagnetic process by transistors of the commutating link. This is required when determining the class of diodes in the case of introducing a converter according to the scheme under study into production. The study of the magnitude and form of the reverse voltage was carried out for two modes: the transistors of the commutating link are controlled within the framework of the operation of the power electric diodes of their phase and the next one. The volume of research is limited to the analysis of processes at a single frequency of control pulses. As a result, it was proved that on the power electric diodes of the compensation part of the converter, the reverse voltage is less than on other valves. The reason for this is the commutating voltage of the capacitors, which, superimposed on the line voltage of the secondary winding of the converter transformer, reduces the maximum value of the reverse voltage curve of the electric diodes.

Keywords: capacitor battery, commutating, commutating voltage, electric diod.

1. Boiko V.S. Three-phase bridge compensation converter: Patent UA for utility model № 142864, 2020. (Ukr).

2. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.

3. Gan Wei; Ji Hongchao; Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

4. Chizhenko A.I. Analysis of electromagnetic processes in a compensation rectifier with limited values of the inductance of the smoothing choke. Publ. of the Institute of Electrodynamics. Energy efficiency: Zb. Sciences. pr. K.: IED NANU, 2001, pp. 17-27.

5. Butkevych O., Chyzhenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2019, p. p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>. (Ukr).

6. Chyzhenko O.I., Trach I.V. An impact of changes in the inductance of distributions network on the modes and parameters of equipment of thyristor compensator of reactive power. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.048>.

7. Butkevych O.F., Chizhenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V., Influence of FACTS on the electric network mode during direct start of a powerful asynchronous machine as part of a complex load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. pp. 62-68.

8. Boyko, V. and Shkardun, O. 2023. Conditions for recharging the capacitors of the commutating device of a three-phase bridge compensation converter. *Technical electrodynamics*. 3 (Apr.2023),013. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.03>

Надійшла: 27.09.2023

Reviewed: 27.09.2023