## ВПЛИВ РЕЖИМУ РОБОТИ ВИПРЯМЛЯЧА НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

## <sup>1</sup>Перетятко Ю.В., к.т.н., доцент, <sup>1</sup>Святненко В.А., ст. викладач, <sup>2</sup>Гайко М.Р., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, <sup>1</sup>кафедра теоретичної електротехніки, <sup>2</sup>кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

Вступ. Сучасне побутове обладнання, офісна техніка, мобільні телефони, ряд дитячих іграшок, включаючи малопотужний електротранспорт, та інші низьковольтні пристрої характеризується наявністю у своїй конструкції вентильних перетворювачів та інших напівпровідникових елементів з нелінійною вольт-амперною характеристикою [1, 2]. Електроживлення вищезазначеного обладнання здійснюється від джерела напруги постійного струму. Синусоїдну напругу мережі змінного струму [3] можна перетворити на постійну за допомогою випрямлячів, що є основними складовими сучасних зарядних пристроїв.

Однак, робота керованих та напівкерованих вентильних випрямлячів супроводжується суттєвим спотворенням форми напруги та струму мережі, що пов'язано з процесами комутації струму вентилями при випрямленні змінної напруги [1, 2, 4]. Поряд з цим, однією з вимог до електроживлення обладнання, що містить керовані та напівкеровані випрямлячі, зібраних на тиристорах, є забезпечення якості напруги та струму на їх вході [1, 2, 4].

Вплив вентильних перетворювачів на мережу живлення можна оцінити через спотворення напруги і струму мережі. Вимоги до показників якості електроенергії регламентуються ДСТУ EN 50160: 2023 [5], який визначає, описує та уточнює характеристики напруги мережі, пов'язані з відхиленням частоти, ступенем граничного відхилення, обмежує величину коефіцієнта несинусоїдальності (THD) та окремих гармонічних складових мережі живлення залежно від класу напруги.

Гармонічні складові струму та напруги збільшують ймовірність виникнення резонансних явищ, порушують роботу мікропроцесорної техніки, пристроїв захисту та автоматики, збільшують втрати, викликають прискорене старіння ізоляції електроустаткування [1]. Питання впливу обладнання з нелінійними елементами на показники якості електроенергії вивчалось у ряді робіт [6, 7, 8], поряд з цим авторами [4, 9] проводились дослідження у пошуку підходів та рішень щодо корегування форми напруги мережі у разі живлення від неї керованого випрямляча.

Оскільки питання забезпечення якості вхідних напруги та струму при живленні керованих випрямлячів залишається актуальним, для подальшого розвитку та удосконалення схемотехнічних рішень цієї задачі пропонується встановлення закономірностей впливу кута керування тиристорами на спотворення форми напруги мережі та навантаження, на прикладі трифазного напівкерованого випрямляча складеного за схемою Ларіонова. **Мета роботи.** Встановлення закономірностей впливу кута керування тиристорами в трифазному мостовому несиметричному керованому випрямлячі на деякі з показників якості електроенергії та величину і форму випрямленої напруги.

Матеріали і результати досліджень. Для проведення дослідження обрано класичний трифазний мостовий несиметричний напівкерований випрямляч за схемою Ларіонова без нульового діода [1], схема якого представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Трифазний мостовий несиметричний керований випрямляч за схемою Ларіонова

Живлення на випрямляч подається від симетричного трифазного джерела, обмотки якого з'єднано у зірку, з прямою послідовністю чергування фаз, через під'єднаний трифазний понижувальний трансформатор напруги TV, де на виході зберігається підключення обмоток зіркою. У дослідження приймається, що початкова фаза синусоїдної напруги по фазі A дорівнює 0°. До мережі з боку вторинної обмотки трансформатора напруги під'єднано трифазний мостовий випрямляч з навантаженням у вигляді опору резистора  $R_d$ . Несиметричний трифазний міст без нульового діода та фільтра складається з трьох керованих вентилів (тиристори VS1, VS2, VS3), які створюють катодну групу вентилів, та трьох діодів VD1, VD2, VD3, які створюють анодну групу вентилів. У припущенні ідеального трансформатора за індуктивністю розсіяння, у відкритому стані знаходяться в кожний момент часу два вентилі: один в катодній групі (у разі подачі на них імпульсів керування) та один в анодній.

У катодній групі у відкритому стані знаходиться той вентиль, анод якого має найбільший позитивний потенціал відносно нульової точки вторинної обмотки трансформатора. В анодній групі відкритий той вентиль, катод якого має найбільш від'ємне значення потенціалу відносно нульової точки вторинної обмотки трансформатора. Таким чином, струм у вторинних обмотках трансформатора тече двічі за один період напруги мережі у різних напрямках.

Прийнято вважати, що  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  є миттєвими значеннями фазної напруги, а  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  є миттєвими значеннями і фазних струмів, і, відповідно, лінійних.

Для аналізу та дослідження процесів у перетворювачі за обраною схемою (рис. 1), створено аналогічну адаптовану для модель у середовищі MATLAB® та Simulink® [10], зображення якої наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Імітаційна модель випрямляча в середовищі MATLAB® та Simulink®

При розрахунках параметрів моделі прийнято наступні значення: амплітуда ЕРС ідеального трифазного джерела напруги  $E_m = 26,114 \cdot \sqrt{2}$  В, частота мережі  $f_M = 50$  Гц, опір резистивного навантаження  $R_d = 4$  Ом. Саме такі параметри дозволяють отримати величину випрямленої напруги  $U_d = 36$  В, що є необхідним для, наприклад, роботи колекторного електромотору MY1016 36V 300W, що знайшов місце в дитячих квадроциклах.

Розрахунки проводилися, починаючи від часу  $t_{\text{поч}} = 0$  с, коли на моделі (рис. 2) мережа приєднувалась до з'єднаних у симетричну зірку ЕРС  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$  та розпочинався перехідний процес, до часу  $t_{\text{кін}} = 0,06$  с, коли напруга мережі робила 3 повних коливання.

Всі розрахунки перехідних процесів відбувалися в моделі впродовж визначеного часу  $t_{\text{поч}} \leq t \leq t_{\text{кін}}$ . При цьому середньоквадратичні значення напруги  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  та  $U_d$  знімалися за допомогою вольтметрів, а середньоквадратичні значення  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  та  $I_d$  отримано, використовуючи амперметри.

Дослідження проводились при зміні кутів керування тиристорних ключів від 0° до 90° з інтервалом в 10°. Варто зауважити, що в момент, коли кут керування тиристорами  $\alpha = 0^{\circ}$  випрямляч є симетричним, можна розглядати тиристори як діоди, а отже частоту пульсацій випрямленої напруги  $f_{\Pi}$  можна вважати рівною  $f_{\Pi} = 6 \cdot f_M$ , при інших кутах –  $f_{\Pi} = 3 \cdot f_M$ . Дане уточнення набуває важливого значення при знятті даних гармонічного складу.

На осцилограмах (рис. 3) в координатах вхідної напруги (вторинної обмотки трансформатора) наведено сімейство кривих струму вторинної обмотки трансформатора для фази A, сімейство часових діаграм напруги навантаження та сімейство часових діаграм струму навантаження при зміні кута керування в межах від 0° до 90° з кроком 10°.



Рисунок 3 – Часові діаграми (від верхньої до нижньої): напруги мережі, струму мережі, напруги на навантаженні, струму навантаження

Отримані результати моделювання, зняті у середовищі MATLAB® та Simulink®, подано у вигляді графіків, як залежності від зміни кута керування, струму мережі (рис. 4), коефіцієнта несинусоїдності (THD) приведеного да нормованого значення [6] (рис. 5), активної та реактивної потужностей мережі (рис. 6), коефіцієнта потужності (PF) мережі (рис. 7), величин нульової та першої гармонічних складових випрямленого струму (рис. 8), та коефіцієнту пульсації випрямленого струму/напруги (рис. 9).



Рисунок 4 – Залежність величини фазного струму від кута керування тиристорами



Рисунок 5 – Залежність величини ТНD фазного струму від кута керування тиристорами







керування тиристорами



Рисунок 9 – Залежність величини коефіцієнту пульсації від кута керування тиристорами

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити, що із збільшенням кута керування середньоквадратичне значення фазного струму та величина випрямленого струму по нульовій гармоніці спадають, що відповідає

регульованій характеристиці. В граничних точках зменшення фазного струму становить в 1,6 рази, а випрямленого – в 2,02 рази:

$$\frac{I_A|_{\alpha=0^{\circ}}}{I_A|_{\alpha=90^{\circ}}} = 1.6 \text{ Ta} \frac{I_{d(0)}|_{\alpha=0^{\circ}}}{I_{d(0)}|_{\alpha=90^{\circ}}} = 2.02.$$

При цьому коефіцієнт несинусоїдності струму мережі (THD<sub>i</sub>) збільшується, перевищуючи допустиме значення в 3,85 рази при  $\alpha = 0^{\circ}$  та в 11,95 рази при  $\alpha = 90^{\circ}$ . Також має місце збільшення коефіцієнту пульсації випрямленого струму в 17,3 рази при порівнянні його величин при  $\alpha = 0^{\circ}$  та  $\alpha = 90^{\circ}$ , за виключення його просідання при  $\alpha = 10^{\circ}$ .

Аналіз гармонічного ряду фазного струму дозволив встановити, що збільшення кута керування призводить до збільшення кута зсуву фаз між фазними напругою та струмом мережі по основній гармонічній складовій в межах від  $\phi = 0^{\circ}$  до  $\phi = 32^{\circ}$ , що пояснює зменшення коефіцієнту потужності та збільшенню генерації реактивної потужності. Окремий аналіз амплітудночастотних характеристик фазних струмах проводився для кутів керування  $\alpha = 0^{\circ}; 20^{\circ}; 30^{\circ}; 60^{\circ}; 70^{\circ}; 90^{\circ}.$  Встановлено, що для всіх кутів керування гармонічні складові струму мережі проявляють себе по 19-ту гармоніку включно. На діаграмі (рис. 10) приведено гармоніки, амплітудні значення яких перевищують нормовані у відносних одиницях. З діаграми видно, що в гармонічний склад фазного струму входять парні гармоніки, при чому перевищення нормованого значення 16-ої гармоніки досягає 11,68 разів при  $\alpha = 30^{\circ}$ , 10,56 разів при  $\alpha = 70^{\circ}$  та 14,16 разів при  $\alpha = 90^{\circ}$ .



Рисунок 10 – Гармонічний ряд струму мережі в залежності від кута керування тиристорами

Висновки. Аналіз отриманих результатів дослідження трифазного мостового несиметричного випрямляча (також відомого під назвою схеми Ларіонова) показав, що кут зсуву 1-ої першої гармоніки струму мережі залежить від кута керування. Із збільшенням кута керування зростає кут зсуву фаз між напругою та 1-ою гармонічною складовою струму мережі, призводячи в результаті до зменшення коефіцієнта потужності та збільшення генерації реактивної потужності. Спотворення форми струму мережі призводить до генерації вищих гармонічних складових в мережу живлення, включно до 19-ої керування, послідовно приймав гармоніки. При куті ЩО значення  $\alpha = 20^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}, 70^{\circ}, 90^{\circ}$  найбільше себе проявили 2-га, 4-та, 8-ма 16-та та 17-та гармоніки. Найвищих значень гармонічні складові досягають при  $\alpha = 90^{\circ}$ .

## Перелік посилань

1. Островерхов М.Я., Сенько B.I. Промислова B.I., Чибеліс електроніка. Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги В постійну: навч. посібник/ М.Я.Островерхов, В.І.Сенько, В.І. Чибеліс. – КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Київ: вид-во ЛІРА, 2021. – 341 c.

2. Чиженко О.І., Блінов І.В., Трач І.В., Рибіна О.Б., Чибеліс В.І. Дослідження спотворень форми напруги мережі при живлені потужного трифазного мостового випрямляча: навч. посібник студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Чиженко О.І., Блінов І.В., Трач І.В., Рибіна О.Б., Чибеліс В.І.. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 80 с.

3. Бойко В. С. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 2: Перехідні процеси у лінійних електричних колах із зосередженими параметрами. Нелінійні та магнітні кола / В.С. Бойко, Ю.Ф. Видолоб, І.А. Курило та ін. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2008. – 224 с.

4. Чиженко О.І. Пристрій для коригування форми напруги мережі, яка живить потужний керований випрямляч. Праці ІЕД НАН України, 2024, Вип. 67, С. 54-59.

5. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристика напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.

6. Ahsan, S.M.; Khan, H.A.; Hussain, A.; Tariq, S.; Zaffar, N.A. Harmonic analysis of gridconnected solar PV systems with nonlinear household loads in low-voltage distribution networks. sustainability, 2021, 13, 3709.

7. S. Elphick, P. Ciufo and S. Perera, "Laboratory investigation of the input current characteristics of modern domestic appliances for varying supply voltage conditions," Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, Italy, 2010, pp. 1-7.

8. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, O. Protsenko, V. Chumack, and Y. Haran. "Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges". Technology Audit and Production Reserves, vol. 2, no. 1(40), Dec. 2017, pp. 37-44.

9. V. Boiko, O. Shkardun and I. Dzyhunenko, "Commutating processes in a three-phase combined compensation rectifier," 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1-4.

10. https://www.mathworks.com/