

ТИРИСТОРНІ ФІЛЬТРИ З ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ МЕРЕЖІ

Грудська В.П., к.т.н., доцент, Большаков Г.Г., аспірант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Стрімкий розвиток сучасних технологій промислових виробництв спричинив одночасне підключення до електричної мережі споживачів, які суттєво відрізняються своїми характеристиками і параметрами: нелінійних, несиметричних, нестаціонарних, зі швидкозмінними графіками споживання струму тощо. Розповсюджене застосування таких споживачів зумовлює їх негативний вплив на функціонування систем електропостачання, підвищення рівня кондуктивних завад та погіршує якість електроенергії. Це знижує ефективність використання обладнання, а в деяких випадках унеможливорює паралельне підключення інших споживачів. Поширеним способом підвищення якості електроенергії у багатофазних системах зі змінним та нелінійним навантаженням є використання у вузлах навантаження коригуючих пристроїв, які забезпечують електромагнітну сумісність споживачів, оптимізують режими роботи та дають змогу знизити втрати потужності як в споживачах, так і в електромережі. До таких пристроїв відносяться, насамперед, електричні фільтри, що покращують гармонічний склад вхідної напруги споживачів шляхом усунення або зменшення рівня гармонік неосновної частоти.

У зв'язку з великою різноманітністю розроблених принципів побудови і схемних рішень фільтрів фахівцями Інституту електродинаміки запропоновано систематизувати сучасні фільтри на основі наявності або відсутності в їх структурі частотного перетворювача(ЧП) електромагнітної енергії [1]. На даний час детально проаналізовано переваги та недоліки фільтрів без частотного перетворювача, побудованих на основі різних комбінацій реактивних елементів – реакторів і конденсаторів [2]. Встановлено, що можливості суттєвого поліпшення коефіцієнта фільтрацій і точності налаштування таких фільтрів практично вичерпані.

Більш перспективною є група фільтрів з частотним перетворенням енергії, причому в ній можуть бути використані різні типи перетворювачів частоти ω_1 мережі: інвертори струму і напруги; безпосередні перетворювачі (БПЧ) матричного типу, навантажені на конденсатор або на резистор в схемі послідовного R-L-C контуру та інш. На даний час найбільш перспективними вважаються фільтри з БПЧ, побудовані на повністю керованих вентилях.

Слід відзначити, що внаслідок підключення до мережі несиметричних споживачів, в ній створюється несиметрія напруг (струмів). Цей фактор негативно впливає на роботу усіх ланок енергетичного кола, призводить появи додаткових втрат в обладнанні і скороченню терміну його служби. Згідно з державним стандартом допустима несиметрія напруг електроспоживачів, підключених до електромереж загального призначення, обмежується 2% [3]. На даний час детально досліджені методи і засоби симетрування без частотного перетворювача, тому основна увага приділяється симетруючим пристроям,

побудованим на ПЧ, яким може бути: випрямляч ($\omega_2 = 0$); циклоконвертор ($\omega_2 \ll \omega_1$); безпосередній перетворювач частоти БПЧ ($\omega_2 = -\omega_1$).

Мета роботи: дослідження функціональних можливостей активних фільтрів, побудованих на тиристорних перетворювачах енергії і призначених: 1) для зниження рівня несиметрії напруг у трифазній мережі; 2) для усунення певної гармоніки у напрузі, що поступає на вхід споживача з мережі живлення.

Матеріал досліджень. У даній роботі проведено аналіз особливостей роботи вказаних вище фільтрів, принцип дії яких розроблений фахівцями Інституту електродинаміки НАН України [4].

Тиристорні фільтри напруги зворотної послідовності для зменшення несиметрії напруги мережі.

На рис. 1, а показано схему простішого фільтра напруги зворотної послідовності, структура якого складається з БПЧ матричного типу, побудованого на тиристорах зі штучною комутацією (ключах змінного струму з повним управлінням K1, K2, K3) та згладжувального реактора з індуктивністю L в якості низькоомного навантаження на постійному струмі.

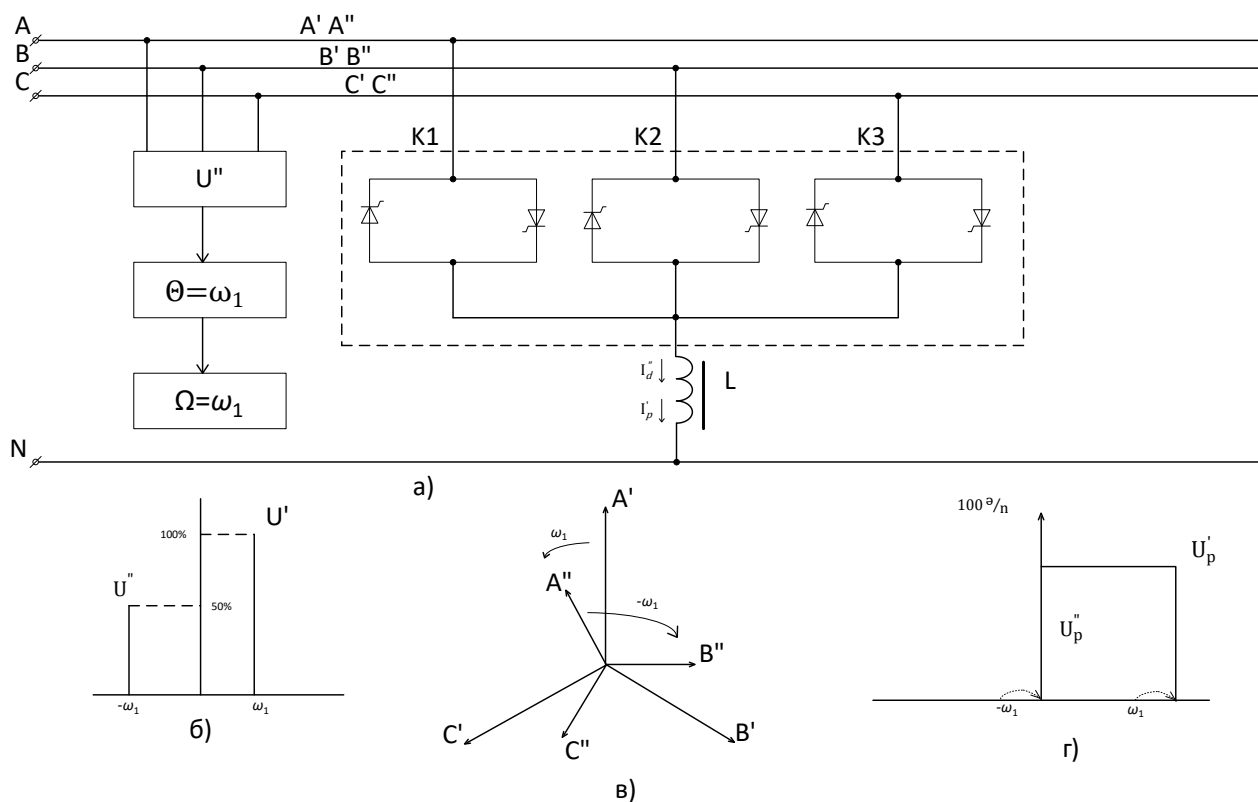


Рисунок 1 – Тиристорний фільтр напруги зворотної послідовності: а) схема; б) і г) – частотні спектри; в) – векторна діаграма напруг.

До системи управління фільтром входять датчик модуля і фази напруги зворотної послідовності U'' , формувач імпульсів управління тривалістю 120° (для трифазної системи напруг) і частотою $\Omega = \omega_1$ та фазозсувний пристрій, який здійснює зсув фаз імпульсів управління на кут θ . Процес фільтрації полягає у випрямленні напруги зворотної послідовності, яка присутня в

несиметричній багатофазній системі напруг ($m \geq 3$), з наступною подачею випрямленої напруги на згладжувальний реактор.

На рис 1, б для прикладу показано спектр однієї з фаз напруги мережі, в якій крім напруги прямої послідовності (ПП) $U' = 100\%$ присутня напруга зворотної послідовності (ЗП) $U'' = 50\% U'$. У загальному випадку коефіцієнт несиметрії $\varepsilon_U = U'' / U'$ і фазовий кут напруги U'' можуть мати довільне значення.

Якщо вибрати частоту імпульсів управління $U' = 100\%$ і переключати реактор на випереджаючу фазу напруги ПП ($A' \rightarrow C' \rightarrow B' \rightarrow A' \rightarrow \dots$), то отримаємо напругу реактора U'_p подвоєної частоти, оскільки $\omega_2^i = \omega_1 + \Omega = 2\omega_1$ (ілюструє рис. 1, в). За припущення $L = \infty$ струм подвоєної частоти ПП проходить через реактор не буде. Можна вважати, що відносно напруги ПП фільтр працює в режимі неробочого ходу. Одночасно з подвоєнням частоти ПП на виході перетворювач відбувається випрямлення напруги ЗП. При збереженні того самого закону управління тиристорами $\Omega = \omega_1$ через обертання векторів напруг U' та U'' у протилежний бік, реактор буде переключатися на відстаючу фазу напруги ЗП ($A'' \rightarrow C'' \rightarrow B'' \rightarrow A'' \rightarrow \dots$). Тому частота напруги на реакторі U''_p (від ЗП) буде дорівнювати нулю: $\omega_2'' = -\omega_1 + \Omega$. Таким чином для ЗП утворюється короткозамкнене коло на постійному струмі. Куткові частоти обох послідовностей зсуваються праворуч по осі частот на величину, рівну ω_1 (рис. 1, г).

Слід відзначити, що у звичайних випрямлячів відбувається випрямлення напруги ПП і подвоєння частоти ЗП, тобто зсув кутових частот по осі ліворуч. Принципово частоти обох послідовностей можна зсувати у будь яку область по осі ω , однак реалізувати короткозамкнене коло для ЗП на змінному струмі складніше, ніж на постійному, як у даному фільтрі.

Якщо синхронізовані з частотою мережі $\Omega = \omega_1$, імпульси управління подавати без фазового зсуву θ відносно системи напруг U'' , то напруга реактора U''_p буде являти собою пилкоподібну криву з частотою $3\omega_1$, в якій відсутня постійна складова (рис. 2) Відповідно за припущення $L = \infty$ струму в реакторі не буде.

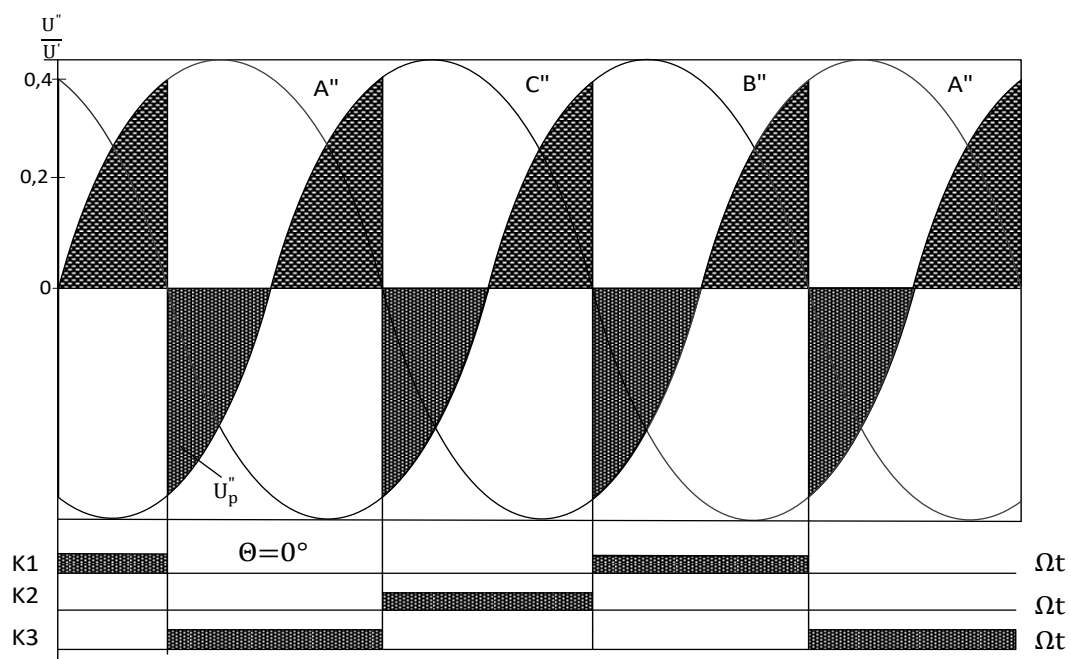


Рисунок 2 – Напруги у фільтрі за відсутності фазового зсуву імпульсів управління відносно напруг 3П

Якщо за допомогою фазозсувного пристрою імпульси управління зсунути на кут θ відносно напруг 3П, то в кривій напруги реактора з'явиться постійна складова U_d'' (рис. 3), а в реакторі – згладжений випрямлений струм, який обмежується незначними електричними опорами проводів, тиристорів та реактора.

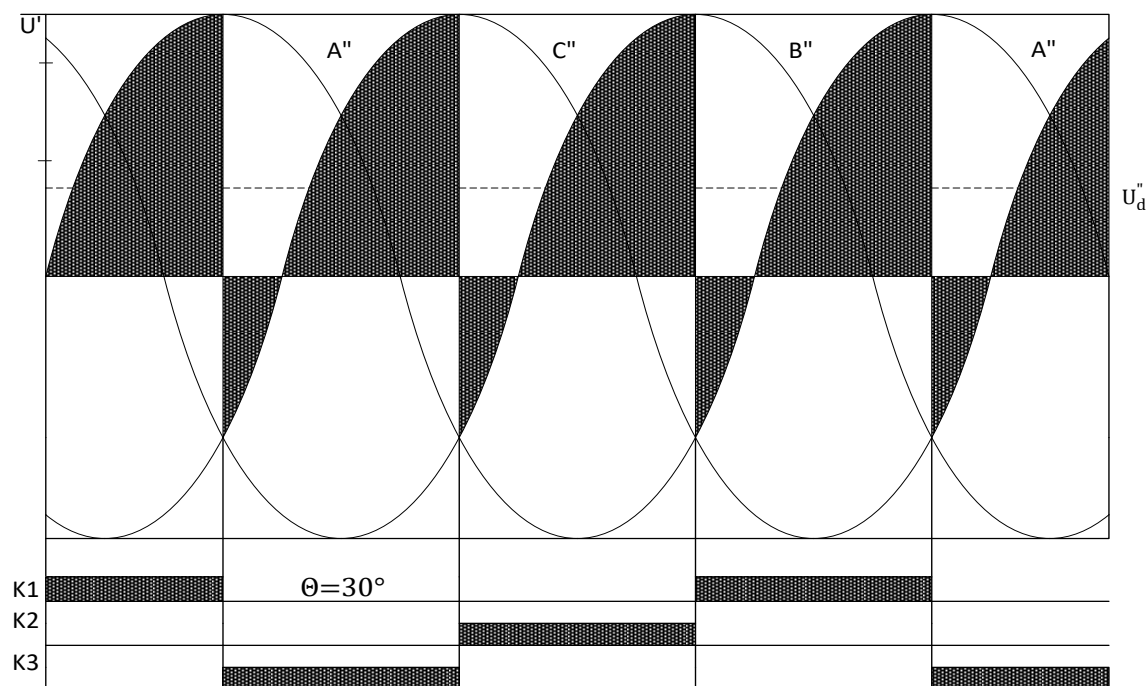


Рисунок 3 – Напруги у фільтрі за фазового зсуву імпульсів управління відносно напруг 3П

Регулюючи фазу θ імпульсів управління, можна замінювати рівень випрямленого струму в реакторі; відповідним чином буде змінюватися мережевий струм фільтра. За рахунок проходження струму ЗП на елементах електромережі (трансформаторах, лініях і т.п.) виникає спад напруги ЗП, завдяки чому рівень несиметрії у місці підключення фільтра може бути знижений до допустимого значення 2%.

Реальні згладжувальні реактори мають кінцеву індуктивність, тому в мережевому струмі таких фільтрів є змінна складова прямої послідовності. Її зменшення можливе за допомогою реакторів з великою індуктивністю або компенсуючих конденсаторів на вході фільтра. Таким чином, суть способу фільтрування напруги ЗП полягає в тому, що фільтр є низькоомним навантаженням, плавно регульованим імпульсами управління, у вигляді замкненого на реактор випрямляча з кутом управління $\pm 90^\circ$.

Моногармонічні фільтри неосновних гармонік напруги мережі.

Такі фільтри призначені для усунення або зниження рівня однієї певної гармоніки з частотою $v\omega_1$, причому у загальному випадку значення може бути рівними одиниці (це основна гармоніка з напругою $U_{(1)}$ і частотою ω_1), або більше одиниці (для вищих гармонік), або менше одиниці (для субгармонік).

На рис. 4. показано схему простішого фільтра v -тої гармоніки напруги, який містить БПЧ у вигляді мостової схеми на тиристорах зі штучною комутацією. Вхідні затискачі БПЧ підключені до межі живлення, вихідні — до згладжувального реактора з індуктивністю L . У систему управління фільтрами входять: датчик амплітуди і фази напруги v -тої гармоніки; формувач імпульсів управління тривалістю 180° і частотою $\Omega = v\omega_1$, а також фазозсувний пристрій. Частота і фаза θ імпульсів управління можуть змінюватися вручну або автоматично.

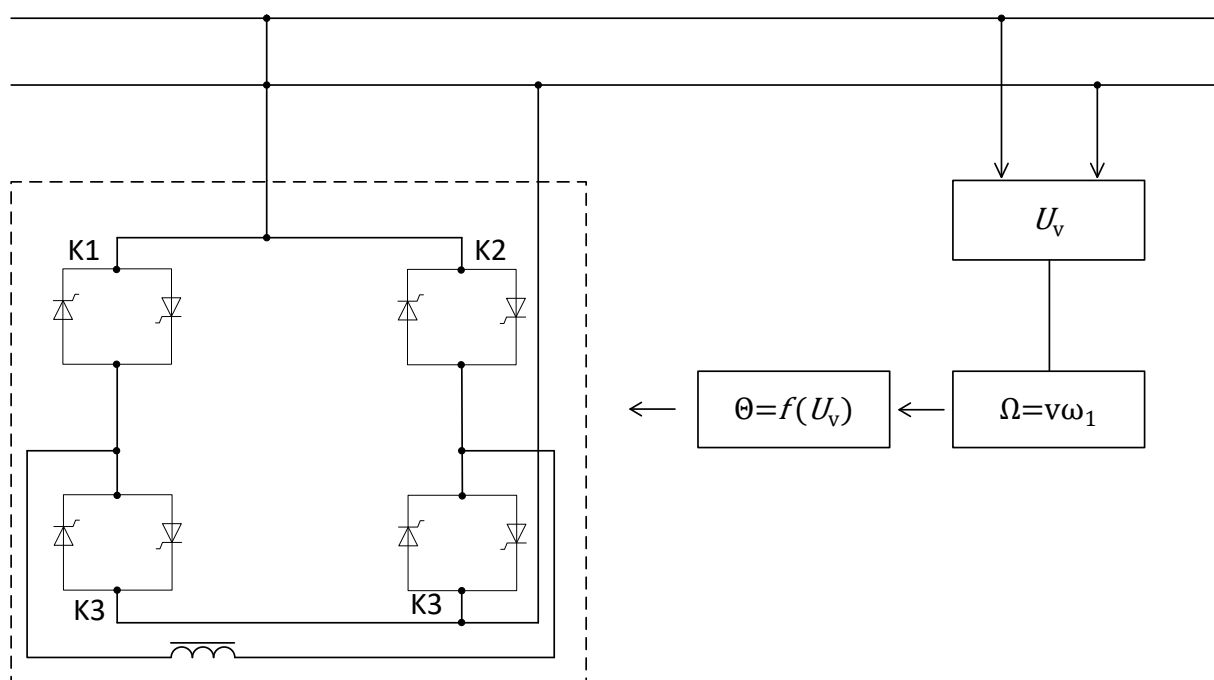


Рисунок 4 – Схема однофазного моногармонічного фільтра

Якщо з напруги мережі потрібно усунути гармоніку з частотою $\nu\omega_1$, і напругою U_ν , то на ключі К1-К4 подають управляючі імпульси з частотою $\Omega = \nu\omega_1$. Тоді на виході БПЧ, тобто на реакторі, отримаємо крім змінних напруг різних частот, криву випрямленої напруги ν -тої гармоніки з постійною складовою $U_{dv} = 2\sqrt{2} U_\nu / \pi$. Через реактор почне проходити постійний струм, значення якого обмежується лише малими активними опорами проводів $R_{пр.}$, ключів R_K , реактора R_L і т.п:

$$I_{dv} = \frac{2\sqrt{2} U_\nu \sin\theta}{\pi(R_{пр.} + R_K + R_L + \dots)} \quad (1)$$

Максимальне значення струму в реакторі відповідає куту $\theta = 90^\circ$, тобто коли середина імпульсу управління збігається з моментом переходу через нуль напруги гармоніки, що фільтрується. Оскільки сумарний активний спір дуже малий, то навіть за невеликого рівня ν -тої гармоніки в реакторі буде проходити значний постійний струм. Беручи до уваги, що індуктивність згладжувального реактора прийнята рівною нескінченності, крива випрямленого струму I_{dv} буде ідеально згладжена (рис. 5).

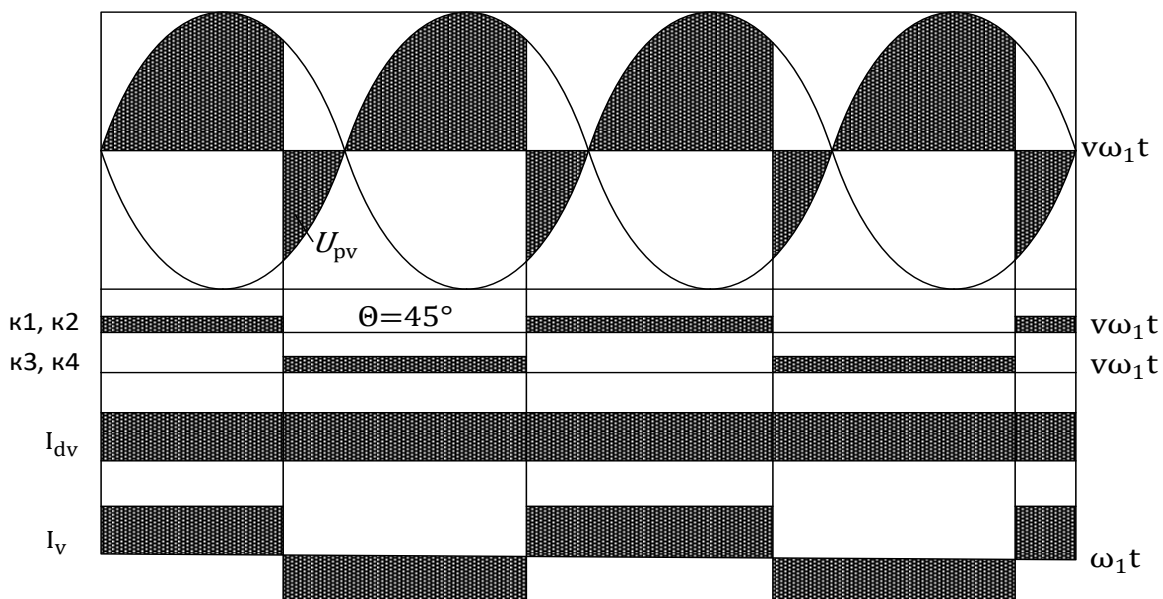


Рисунок 5 – Напруги і струми у моногармонічному фільтрі за фазового зсуву імпульсів управління $\theta = 45^\circ$

Як видно з виразу (1) за зміни фази θ імпульсів управління від $\theta = 90^\circ$, до $\theta = 0$, струм реактора I_{dv} буде зменшуватися до нуля, а при $\theta = 0 \dots -90^\circ$ змінить свій знак і буде зростати до максимального від'ємного значення. Однак цей фактор не впливає на роботу фільтра. У його входному струмі отримуємо прямокутну форму струму ν -тої гармоніки, рівень якої регулюється від

максимального значення до нуля за рахунок фазового зсуву θ імпульсів управління.

Одночасно з процесом випрямлення прямої гармоніки відбувається частотне перетворення напруги основної гармоніки $U_{(1)}$. Частота напруги, прикладеної до реактора, з урахуванням принципу роботи перетворювача $\omega_{2(1)} = \omega_1 - \Omega = \omega_1 - 3\omega_1 = -2\omega_1$, а її діюче значення $U_{p(1)} = 2 U_1 / \pi$.

За припущення $L = \infty$ струм подвоєної частоти в реакторі проходити не буде. Оскільки на практиці $L \neq \infty$ у випрямленому струмі U_{dv} і відповідно вхідному струмі фільтра з'являються пульсації. Крім того, в реакторі буде також проходити струм подвоєної частоти, діюче значення якого визначається індуктивним опором реактора на частоті $2\omega_1$.

Аналогічно відбувається фільтрація будь-якої іншої гармоніки у спектрі напруги мережі, для чого потрібне лише перелаштування частоти Ω формувача імпульсів. За зміни фази θ імпульсів управління діюче значення кривої напруги на реакторі залишається сталим, а змінюється лише її форма.

Розглянутий фільтр може бути використаний також для усунення субгармонік у напрузі мережі, однак у цьому випадку він буде споживати з мережі невелику реактивну потужність через те, що на практиці $L \neq \infty$.

Таким чином, в однофазних тиристорних фільтрах з частотним перетворенням відбувається одночасний зсув усього спектра несинусоїдної напруги мережі ліворуч по осі частот на величину, рівну частоті гармоніки, що фільтрується; при цьому випрямляється лише одна з неосновних гармонік, яка потім замикається накоротко через реактор.

Трифазні вентильні фільтри гармонік виконуються у двох варіантах: 1) у вигляді групи трьох розглянутих однофазних фільтрів (по одному на кожен фазу мережі); 2) у вигляді трифазної мостової схеми. Оскільки у загальному випадку рівні ν гармоніки у фазах можуть відрізнятися, то для повної фільтрації необхідно встановлювати два фільтри – один для усунення ν гармоніки прямої послідовності, який зсуває спектр напруги мережі ліворуч по осі частот, другий для зсуву цього спектру праворуч.

Таким чином, для фільтрації гармоніки довільного значення необхідно виконати такі опції: 1) встановити частоту імпульсів управління рівною частоті гармоніки, що фільтрується $\Omega = \nu \omega_1$; 2) встановити таке значення фази θ імпульсів управління (у межах $-90^\circ \dots 0 \dots 90^\circ$), поки рівень цієї гармоніки не знизиться до допустимого значення. За цих умов при $L \neq \infty$ в реакторі будуть проходити два струми: випрямлений струм ν -гармоніки, який не залежить від коливань частоти мережі; 2) змінний струм з частотою $\omega_{2(1)} = \omega_1 - \nu \omega_1 = (1 - \nu) \omega_1$, що залежить як від ω_1 , так і від ν .

Розглянутий спосіб фільтрування можна стисло подати так: даний фільтр відносно фільтрованої гармоніки являє собою регульований імпульсами управління випрямляч, що працює в режимі, близькому до короткого

замикання; відносно основної гармоніки напруги мережі являє собою помножувач частоти з коефіцієнтом, рівним $\nu - 1$.

Висновки. Внаслідок дослідження вказаних вище вентильних фільтрів слід окреслити наведені вище особливості їх функціонування.

Спільні особливості:

- коливання частоти електромережі, особливо в автономних системах електропостачання, практично не впливають на роботу таких фільтрів, оскільки у фільтрі напруги зворотної послідовності нескладно синхронізувати імпульси управління з напругою ЗП, а в моногармонічних фільтрах – з напругою гармоніки, що підлягає усуненню;

- технологічні відхилення індуктивності згладжувального реактора не впливають на роботу фільтрів;

- комутаційні процеси в них відбуваються без стрибків стуму;

- не порушують фільтрувальну спроможність інших пристроїв, підключених до мережі.

Оскільки розглянуті фільтри мають різне призначення, далі наведено їх специфічні особливості:

- фільтри напруги зворотної послідовності забезпечують плавне регулювання випрямлення, що дозволяє автоматично підтримувати допустиму несиметрію трифазних напруг для захисту споживачів як від “зовнішньої” несиметрії, так і від “власних” несиметричних навантажень у фазах.

- моногармонічні фільтри мають просте регулювання рівня фільтрованої гармоніки, можуть налаштовуватися на будь-яку неосновну гармоніку, частота якої обмежується лише частотними характеристиками вентилей; працювати паралельно з іншими фільтрами на ту ж гармоніку, безпечно комутуючись у будь-якому порядку, і незалежать від частотної характеристики мережі та її змін.

Перелік посилань

1. Шидловський А.К., Федій В.С. Класифікація методів і заходів зниження несинусоїдності напруг і струмів // Техн. Електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми електромагнітної сумісності силових напівпровідникових перетворювачів” – 2011. Ч.3. С. 3-9.

2. Намесник С.Г. Моногармонічні активні фільтри змінного струму: Навч. посібн. – К.: Вид. Ін-ту електродинаміки НАНУ України, 2009. – 41с.

3. Розанов Ю.К., Рябчицький М. В., Кваснук А.А. Силова електроніка і якість електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силова електроніка та енергоефективність” – 2020. – Ч. 3. С. 6-12.

4. Федій В.С. Трифазні моногармонічні активні фільтри на основі перетворювачів енергії. // Техн. електродинаміка. – 2015. – №1. – С. 17-21