

УДК 621.316

Ягуп В. Г., Ковальова Ю. В.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТИРИСТОРНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Тиристорні електроприводи постійного струму (ТЕП) представляють собою самостійний клас регульованих електроприводів, потужність яких сягає 2000 кВт для механізмів прокатних станів. На теперешній час можна вважати вирішеними теоретичні питання синтезу систем автоматичного регулювання, оптимізації перехідних процесів, питання коефіцієнта корисної дії, вибору потужності двигуна та інші. При цьому залишилися недостатньо дослідженими питання роботи тиристорних електроприводів як споживачів реактивної електроенергії та питання їх впливу на показники якості електроенергії.

ТЕП за приблизними підрахунками споживають біля 10 % виробленої електроенергії і їх доля в загальному обсязі перетворення електроенергії постійно зростає. Враховуючи те, що, з одного боку зростає їх кількість, а з іншого – зростає вартість електроенергії в собівартості продукції, то необхідне визначення шляхів підвищення їх енергетичної ефективності. Одним з таких шляхів є підвищення коефіцієнта потужності за рахунок компенсації реактивної потужності.

Виходячи з вищевикладеного задача кількісної оцінки реактивної потужності ТЕП є актуальною, оскільки її вирішення дозволить провести техніко-економічне обґрунтування та вибір методів і технічних засобів компенсації реактивної електроенергії.

ТЕП за принципом дії споживають з мережі несинусоїдний струм для його перетворення, з одного боку, в активну потужність як швидкість необерненого перетворення електроенергії в теплову та механічну роботу, а з іншого – в реактивну потужність, як швидкість оберненого перетворення енергії електричного поля в енергію магнітного і навпаки. Що є реактивна потужність при несинусоїдних режимах і як її розраховувати не існує єдиного вирішення і до теперішнього часу. Вирішенню питань розрахунку реактивної потужності при несинусоїдних режимах присвячені численні роботи іноземних та вітчизняних вчених, з яких можна виділити три методи.

В теорії електричних кіл [1] використовують спектральний метод, суть якого наступна. Оскільки активною потужністю при несинусоїдальному режимі вважається сума активних потужностей кожної з гармонік $P = U_i I_i \cos \varphi_i$, де U_i та I_i – діючі значення напруги і струму i -ї гармоніки, а φ_i – кут зсуву фаз між струмом та напругою i -ї гармоніки, то реактивну потужність можна визначати аналогічно, тобто, як суму реактивних потужностей, створених кожною гармонікою окремо $Q = \sum_i U_i I_i \sin \varphi_i$. Повна потужність визначається як добуток діючих значень несинусоїдних напруги і струму $S = U_\delta I_\delta$. При розрахунку за цим методом отримуємо нерівність $S^2 \neq P^2 + Q^2$. Для виходу з такої ситуації вводять поняття потужності спотворення $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$. Тоді повна потужність має не дві, як при синусоїдних режимах, а три складові $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$. При цьому не вказується, у яких одиницях вимірюється потужність спотворень і в яку роботу перетворюється чи не перетворюється з точки зору закону збереження енергії.

В теорії перетворювальної техніки пропонується інтегральний метод [2] оцінки реактивної потужності. При цьому пропонується поняття «приведеної реактивної потужності», величина якої розраховується за формулою $Q = U_m^2 \cdot \sin^2 \alpha / 4\pi \cdot R$, де U_m, α, R – відповідно амплітуда мережної напруги, кут керування тиристором і активний опір електричного кола.

Поява так званої приведеної реактивної потужності обґрунтовується тим, що при тиристорному керуванні струм з'являється з фазовим зсувом відносно напруги джерела. Явно відбувається підміна одного фізичного поняття іншим, присвоєння однакового терміну для явищ, які мають зовсім різну природу. Не проводиться аналіз причинно-наслідковий зв'язки між параметрами явища, тобто, що є причина (аргумент), а що є функція (наслідок).

Третій метод використовує поняття миттєвої реактивної потужності [3], як швидкості зміни електромагнітної енергії, що надає чіткого теоретичного визначення та фізичного змісту поняттю реактивної потужності в несинусоїдному режимі, тобто $q = \partial W / \partial t$. Тоді для нелінійного кола миттєва реактивна потужність визначається добутком миттєвих значень струму та напруги на реактивних елементах. Для RLC послідовного кола $q = i(u_C + u_L)$.

Мета роботи – аналіз та вибір методів розрахунку реактивної потужності ТЕП.

При аналізі енергетичних процесів в ТЕП поняття «реактивної потужності» повинно бути однозначним, тобто таким, що однозначно ототожнює процес обміну електроенергії. В любых міркуваннях поняття повинно вживатися лише в одному і тому ж змісті, недопустимо підміна одного поняття іншим. Реактивну потужність споживає котушка (конденсатор) і лише котушка (конденсатор) Оскільки енергія електромагнітного поля котушки має коливальний (не обов'язково синусоїдний) характер і не перетворюється в роботу, її і називають реактивною, тобто такою, що відновлюється (префікс «ре» у слові «реактивна» означає відновлена) і повертається до джерела електроенергії. Функціональний зв'язок між реактивною потужністю і кутом фазового зсуву струму від напруги існує і необхідно у цьому функціональному зв'язку розставити акценти: що є аргументом, а що є функція, тобто, причинно-наслідковий зв'язок. Однозначно, що фазовий зсув є функція (наслідок), а аргументом (причиною) є реактивна потужність. З точки зору закону збереження енергії реактивна потужність описує швидкість (частоту) процесів обміну енергій котушки з джерелом електроенергії. Тиристорні електроприводи за принципом дії споживають з мережі несинусоїдний струм, створюючи при цьому фазовий зсув переднього фронту графіка струму від графіка мережної напруги, який визначається кутом керування тиристорами. Осцилограма фазної напруги фазного струму мережі, що споживає обмотка якоря зі згладжувальним реактором показана на рис. 1.

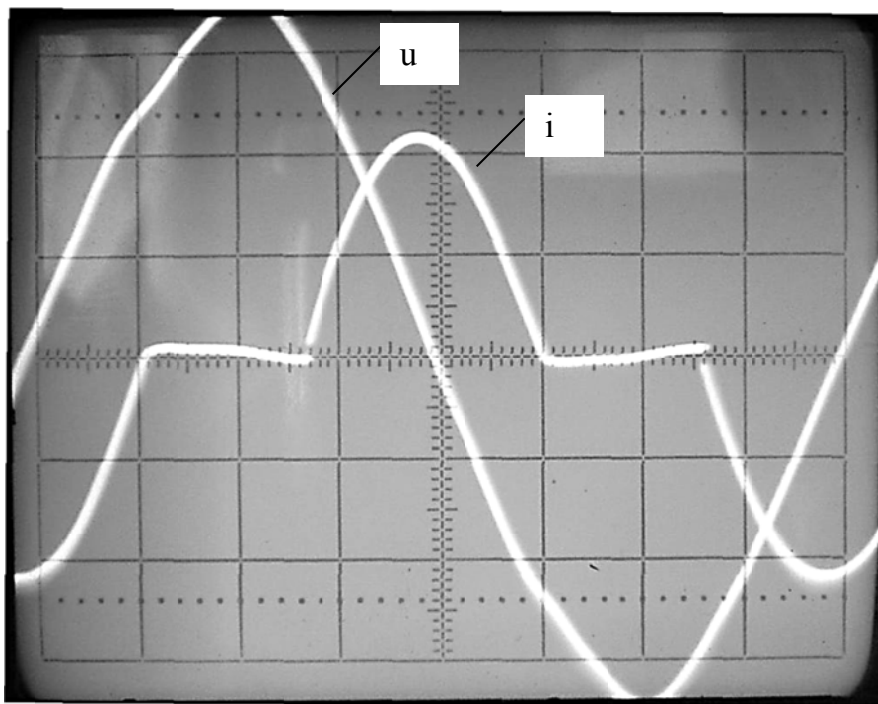


Рис. 1. Осцилограма мережних напруги і струму, споживаних колом якоря двигуна

Фазовий зсув φ заднього фронту графіка струму від графіка мережної напруги, спричинений індуктивністю обмоток двигуна є наслідком споживання реактивної потужності. Реактивна потужність є причиною відставання за часом графіка струму від графіка напруги, тобто кут φ зсуву фаз між струмом і напругою є функція реактивної потужності $\varphi = f(Q)$. В синусоїдальних колах за величиною функції, тобто кута φ , можна знайти аргумент, тобто реактивну потужність $Q = S \cdot \sin\varphi$.

Проведемо аналіз спектрального методу. Однозначно, що графік миттєвої активної потужності несинусоїдного струму має лише додатні значення і його інтеграл (теплова робота) в геометричній інтерпретації є площа фігури, окресленої цим графіком. Для розрахунку теплової роботи можна використати метод Фур'є, який є інтерпретація методу суперпозиції з теорії електричних кіл для окремо взятих гармонік напруги і струму. Площа фігури окресленої графіком несинусоїдного струму дорівнює площі гармонічних складових, тобто, формула $P = \sum U_i I_i \cos \varphi_i$ для активної потужності, що перетворюється в тепло в опорі резистора відповідає фізичним процесам. Іншими словами в резисторі в тепло перетворюється люба форма напруги і струму, тобто, всі без винятку гармоніки напруги і струму перетворюються в тепло. Проте реактивна потужність синусоїдного струму чисельно дорівнює амплітуді миттєвої реактивної потужності котушки і приведені аналогії $Q = S \cdot \sin\varphi$ для несинусоїдного струму хоча і мають фізичну сутність але не мають математичного доведення.

Проте спектральний метод може бути корисним для обґрунтування факту споживання реактивної потужності ТЕП. Покажемо це на прикладі. Для початку нагадаємо рівняння балансу потужності двигуна постійного струму при живленні від акумулятора. Для цього запишемо рівняння електричної рівноваги обмотки якоря згідно з другим законом Кірхгофа:

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + E = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + C\Phi\omega_{\text{я}}, \quad (1)$$

де $U_{\text{я}}$, $I_{\text{я}}$, $R_{\text{я}}$ $\omega_{\text{я}}$ – напруга, струм, електричний опір і кутова швидкість якоря.

Помножимо (1) на струм якоря і одержимо рівняння балансу потужності двигуна:

$$U_{\text{я}} I_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + C\Phi\omega_{\text{я}} I_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + M\omega_{\text{я}}. \quad (2)$$

Ліва частина (2) це потужність електроенергії підведеної до двигуна від зовнішнього джерела. Права частині вказує, що одна частина електроенергії перетворюється у тепло, інша – в механічну роботу обертального руху.

При живленні двигуна від тиристорного перетворювача напруга і струм якоря представляються рядом Фур'є:

$$u_{\text{я}} = U_0 + \sum_{v=1}^n U_{v\max} \sin(vm\omega t + \varphi_{vn}); \quad i_{\text{я}} = I_0 + \sum_{v=1}^n I_{v\max} \sin(vm\omega t + \varphi_{vi}), \quad (3)$$

де U_0 , I_0 , $U_{v\max}$, $I_{v\max}$ – постійні складові і амплітуди гармонік напруги і струму;

v – порядковий номер гармонік;

m – пульсність випрямляча як кількість пульсацій за період мережної напруги;

ω – колова частота мережної напруги;

φ_{vn} , φ_{vi} – кути зсуву гармонік напруги і струму.

Схема заміщення кола якоря при живленні від тиристорного випрямляча показана на рис. 2.

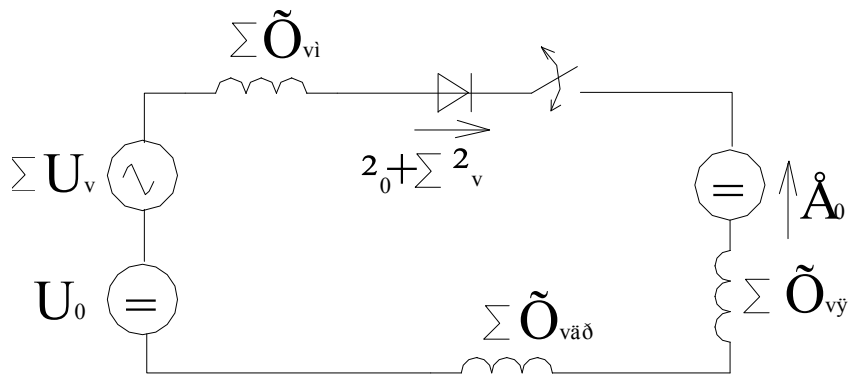


Рис. 2. Схема заміщення тиристорного електроприводу

Для гармонічних складових струму обмотка якоря створює індуктивний опір:

$$\sum_{v=1}^n X_v = \sum_{v=1}^n v m \omega L_{\text{я}}, \quad (4)$$

де $L_{\text{я}}$ – індуктивність кола якоря.

Діючі значення напруги і струму якоря:

$$U_{\text{я}} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{v=1}^n U_v^2}; \quad I_{\text{я}} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{v=1}^n I_v^2}. \quad (5)$$

Рівняння електричної рівноваги кола якоря для діючих значень:

$$\sqrt{U_{\text{я}}^2 + \sum_{v=1}^n U_v^2} = R_{\text{я}} \sqrt{I_0^2 + \sum_{v=1}^n I_v^2} + C \Phi \omega_{\text{я}} + \sum_{v=1}^n (I_v X_v). \quad (6)$$

У рівнянні (6) враховано, що постійна складова струму якоря не створює падіння напруги на індуктивності обмотки якоря. Помножимо (6) на діюче значення струму:

$$U_{\text{я}} I_{\text{я}} = R_{\text{я}} (I_0^2 + \sum I_v^2) + C \Phi \omega_{\text{я}} \sqrt{I_0^2 + \sum I_v^2} + \sum (I_v X_v) \sqrt{I_0^2 + \sum I_v^2}.$$

З урахуванням того, що лише постійна складова створює крутний момент двигуна ($C \Phi \omega_{\text{я}} \sum I_v^2 = 0$), лише гармоніки струму створюють спад напруги на індуктивності кола якоря ($I_0 \sum (I_v^2 X_v^2) = 0$), одержимо рівняння балансу потужності двигуна:

$$\sqrt{(U_0^2 + \sum U_v^2)(I_0^2 + \sum I_v^2)} = (I_0^2 + \sum I_v^2) R_{\text{я}} + M \omega_{\text{я}} + \sum (I_v^2 X_v). \quad (7)$$

Ліва частина рівняння (7) є повною потужністю S підведена до двигуна від тиристорного випрямляча. Перші два члени правої частини являють собою відповідно теплову і механічну потужність, а в сумі – активну потужність P . Третій член це є реактивна потужність Q .

Таким чином, двигун при живленні від акумулятора споживає лише активну потужність, а при живленні від тиристорного перетворювача ще й реактивну. Наслідком наявності реактивної електроенергії має місце відставання за часом заднього фронту мережного струму від напруги, тобто кут зсуву φ заднього фронту струму мережі від напруги, тобто, $\varphi = f(Q)$. В синусоїдних колах за величиною функції, тобто кута φ можна знайти аргумент тобто реактивну потужність $Q = S \cdot \sin\varphi$. В даному випадку реактивна потужність буде залежати не тільки від кута φ , а і від кута α керування та пульсності випрямляча.

Аналіз інтегрального методу. В теорії перетворювальної техніки при створенні теорій реактивної потужності при несинусоїдних режимах було зроблено сумнівні допущення, наприклад, випрямлений струм ідеально згладжений і з мережі споживається струм у формі прямокутних імпульсів, для цього у колі випрямленого струму прийнята індуктивність нескінченною. Згідно інтегрального методу ознакою реактивної потужності є наявність кута зсуву переднього фронту графіку струму від графіка напруги, який дорівнює α куту керування. Проте наявність фазового зсуву переднього фронту графіка струму від графіка напруги не може бути ознакою реактивної потужності, оскільки вона визвана роботою тиристорів а не енергією магнітного поля. У даному випадку присутність фазового зсуву задніх фронтів імпульсів струму і напруги є ознакою реактивної потужності. Таким чином, недолік методу полягає у порушенні причинно-наслідкових зв'язків при перетворенні електроенергії у котушці та невірному трактуванні понять аргументу і функції, оскільки кут зсуву є функція від реактивної потужності..

Аналіз методу миттєвої реактивної потужності. В багатьох роботах пропонується для розрахунку реактивної потужності використовувати поняття миттєвої реактивної потужності при несинусоїдному режимі, але без конкретних пропозицій як це робити тобто без пропозицій методик. На наш погляд поняття миттєвої реактивної потужності при несинусоїдному режимі можна використати по аналогії для миттєвої реактивної потужності при синусоїдному режимі. Активну і реактивну потужність можна також визначити з виразу для миттєвої повної потужності реальної котушки:

$$S(t) = U_m \sin \alpha I_m \sin(\alpha t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\alpha t - \varphi). \quad (8)$$

Графік миттєвої потужності реальної котушки показаний на рис. 3.

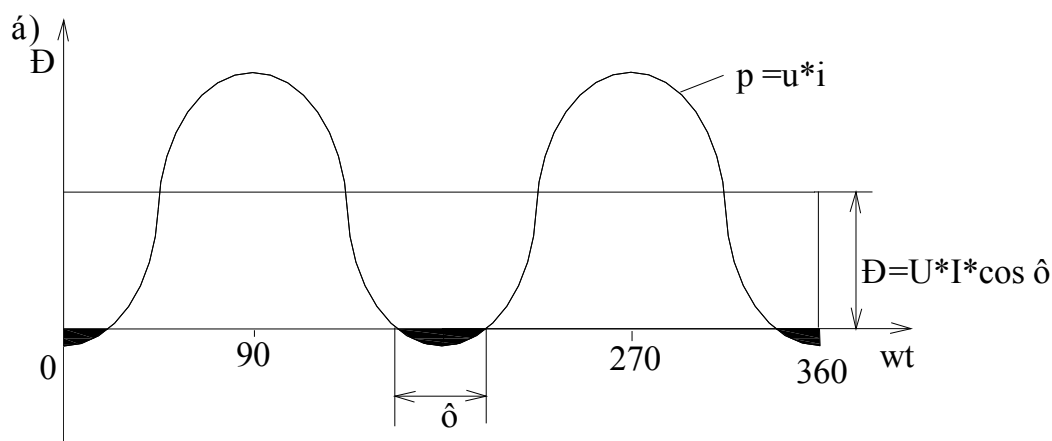


Рис. 3. Графік миттєвої потужності котушки при синусоїдному режимі

Графік кривої має позитивні ділянки, тобто одна частина споживаної потужності не обернено перетворюється у тепло – це активна потужність Для визначення величини активної потужності знайдемо середнє значення (8):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi . \quad (9)$$

Графік має від'ємні ділянки, тобто це є реактивна потужність котушки, яка чисельно дорівнює амплітуді від'ємних ділянок. Між амплітудою і кутом зсуву фаз існує функціональний аргумент, то можна знайти формулу для обчислення реактивної потужності:

$$Q = \frac{d[UI \cos(2\omega t - \varphi)]}{d\varphi} = UI \sin \varphi . \quad (10)$$

Сутність методу миттєвої потужності для несинусоїдного режиму пропонується наступна. Емпірично або аналітично встановлюється графік миттєвої потужності ТЕР з функціональним зв'язком між амплітудою та фазовим зсувом задніх фронтів струму і напруги. Виникає також задача вимірювання реактивної потужності. Стрілкові електровимірювальні прилади електродинамічної системи (ватметри, варметри, фазометри) створюють крутий момент пропорційний косинусу або синусу кута зсуву струму від напруги, причому цей кут однаковий для переднього і заднього фронтів синусоїди струму. При тиристорному керуванні кути переднього і заднього фронтів синусоїди струму нерівні між собою і що вимірюють прилади у цьому випадку невідомо.

З іншого боку реактивна потужність має функціональний зв'язок з кутом зсуву заднього фронту синусоїди струму, який можна виміряти цифровим фазометром (частотоміром). Необхідно встановити експериментальну залежність між величиною реактивної потужності та кутом зсуву заднього фронту синусоїди струму від напруги.

ВИСНОВКИ

Спектральний метод можна використовувати при однаковій формі графіків напруги і струму, тобто, при однаковому спектрі гармонік можна використати для розрахунку математично доведений метод Фур'є, що є інтерпретацією методу суперпозиції з теорії електричних кіл для окремо взятих гармонік напруги або струму. Проте метод накладування неприйнятний у випадку неоднакових графіків струму і напруги, тобто, для різних спектрів.

Інтегральний метод, заснований на сумнівних допущеннях (з мережі споживається струм у формі прямокутних імпульсів, зпринципенних нескінченною індуктивністю у колі яко-ря), не відповідає фізичній сутності реактивної потужності.

Метод миттєвої реактивної потужності не пропонує способів визначення реактивної потужності і технічної реалізації для її компенсації.

Жодний з методів не пройшов експериментальних перевірок і не пропонує конкретної методики їх використання.

Необхідно розробити методологію та технічні засоби вимірювання реактивної потужності. Для цього експериментально визначити функціональний зв'язок між такими параметрами: кут керування тиристорами, амплітуда струму, кут зсуву заднього фронту графіка струму від мережної напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Родькін Д. И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами / Д. И. Родькин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2005. – Вип. 3(32). – С. 106–114.
2. Архиреев И. П. Сопоставление методов определения реактивной мощности емкости и индуктивности при периодических несинусоидальных напряжениях / И. П. Архиреев // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2008. – Частина 2. – С. 11–16.
3. Саєнко Ю. Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.09.05 / Саєнко Ю. Л. – Львів, 2003. – 39 с.