

РЕАКТИВНИЙ СТРУМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТИРИСТОРНИМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ

Розроблена модель для виділення реактивної складової зі струму холостого ходу асинхронного двигуна при його живленні від тиристорного регулятора напруги в залежності від кута керування тиристорами. В результаті моделювання отримана залежність відносного значення реактивного струму, яка апроксимована формулою з метою практичного розрахунку діючого значення реактивної складової несинусоїдного струму.

Разработанная модель для выделения реактивной составляющей из тока холостого хода асинхронного двигателя при его питании от тиристорного регулятора напряжения в зависимости от угла управления тиристорами. В результате моделирования получена зависимость относительного значения реактивного тока, которая аппроксимирована формулой для расчета действующего значения реактивной составляющей несинусоидального тока.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Асинхронні електроприводи потужністю до 11 кВт з тиристорним регулятором напруги можуть використовуватись в житлово-комунальному господарстві в електроприводах насосів підкачки води на верхні поверхи висотних будинків.

При тиристорному регулюванні напруги асинхронні двигуни працюють в несинусоїдному режимі і споживають активну потужність, залежну від навантаження, і реактивну потужність, яка незначно на 2-3 % підвищується при навантаженні на валу за рахунок збільшення магнітних потоків розсіювання. Одним зі шляхів підвищення їх електроенергетичної ефективності є компенсація реактивної потужності. Компенсація реактивної потужності означає її неспоживання з електромережі, що зменшує втрати електроенергії в лініях електропередач та в трансформаторах, тобто зменшує кількість споживаного палива на електростанціях. Для розрахунку і вибору ємності компенсуючих батарей конденсаторів необхідно знати величину реактивної потужності асинхронного двигуна при його тиристорному керуванні, яка залежить від реактивної складової струму холостого ходу двигуна, отже, тема статті є актуальною.

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Теорія реактивної потужності в нелінійних колах при несинусоїдних режимах остаточно не сформована. Розглянемо основні з них. Теорія Будеану ґрунтується на розкладанні несинусоїдних напруги і струму на гармонічні складові, а реактивна потужність дорівнює сумі добутків їх діючих значень на синус кута зсуву між ними. Ця теорія отримала подальший розвиток в [1] і прийнята офіційним терміном Міжнародною електротехнічною комісією.

Згідно теорії Фризе реактивний струм є складова повного струму, після компенсації якої споживання струму від джерела зменшується. Формула для визначення реактивного струму ґрунтується на тепловій дії несинусоїдного струму, тобто, тепло, створене повним струмом дорівнює сумі тепла від його складових. Оскільки тепло пропорційно квадрату струму, то повний струм дорівнює $I_n^2 = I_a^2 + I_p^2$, де I_a , I_p – діючі значення активної і реактивної складових струму

холостого ходу. Теорія Фризе отримала подальший розвиток в [2].

В теорії перетворювальної техніки пропонуються інтегральні методи [3], згідно яких реактивна потужність визначається інтегруванням спеціальних функцій, які є добутком струму на похідну напруги або добутком напруги на похідну струму.

Теорія миттєвої реактивної потужності використовує поняття швидкості зміни електромагнітної енергії котушки індуктивності [4].

Крос-векторна теорія представляє реактивну потужність як вектор у в тривимірному просторі, який дорівнює модулю векторного добутку просторових векторів напруги і струмів [5].

Оскільки метою компенсації реактивної потужності асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги є зменшення втрат в лініях електропередач, то доцільно використовувати теорію Фризе, тобто, визначати діюче значення реактивного струму.

Відомо, що реактивний струм (в теорії електричних машин – струм намагнічування) при синусоїдному живленні асинхронного двигуна складає в середньому 94 % від струму холостого ходу і відносно підвищується на 2-3 % при номінальному навантаженні на валу. Звичайно, у першому наближенні можна допустити, що струм холостого ходу є чисто реактивним, але при цьому ємності компенсуючих конденсаторів будуть завищені і буде мати місце перекомпенсація, тобто, споживання реактивної потужності з електромережі ємнісного характеру.

Для синусоїдних режимів відносне значення реактивного струму до струму холостого ходу чисельно дорівнює синусу кута зсуву графіка струму від графіка напруги. Важливо зазначити, при регулюванні діючого значення синусоїдної напруги співвідношення реактивного струму до повного струму холостого ходу залишається постійним, тобто, незалежним від величини синусоїдної напруги.

Відома формула [6] для визначення діючого значення несинусоїдного струму холостого ходу асинхронного двигуна при його живленні від тиристорного регулятора напруги, яка має вигляд

$$I_X = \frac{U_m}{Z} \left(\frac{1}{2\pi} \left[\lambda - \frac{\sin 2(\alpha + \lambda - \varphi)}{2} + \frac{\sin 2(\alpha - \varphi)}{2} \right] + \frac{2 \sin(\alpha - \varphi)}{1 + \text{ctg}^2 \varphi_c} \cdot \left\{ e^{-\lambda \cdot \text{ctg} \varphi} [\text{ctg} \varphi \sin(\alpha + \lambda - \varphi) + \cos(\alpha + \lambda - \varphi)] - \text{ctg} \varphi \cdot \sin(\alpha - \varphi) - \cos(\alpha - \varphi) \right\} + \frac{\sin^2(\alpha - \varphi)}{2 \text{ctg} \varphi} (1 - e^{-2\lambda \cdot \text{ctg} \varphi}) \right)^{0,5}, \quad (1)$$

де α – кут керування тиристорами; Z – модуль повного опору фазної обмотки статора при синусоїдному живленні; φ – кут зсуву графіка струму від графіка напруги при синусоїдному живленні; λ – кут провідності тиристора, який становиться рівним $\lambda = \pi$, при $\alpha = \varphi$, коли струм становиться синусоїдним і діюче значення струму дорівнює його амплітуді поділеної на 1,41.

Для асинхронних двигунів потужністю до 11 кВт, які використовують для насосів підкачки води на верхні поверхи висотних будинків, залежність кута провідності тиристорів від кута керування була апроксимована формулою [7].

Формула кута провідності тиристорів має вигляд $\lambda = \pi - \alpha + \beta = 6,016 - 1,916 \cdot \alpha$,

де β – кут закривання тиристорів відносно заднього фронту синусоїди мережної напруги.

Для розрахунку діючого значення реактивної складової струму у загальному випадку зручно мати аналітичну формулу, нехай і отриману шляхом апроксимації розрахункових чисельних залежностей. Недолік емпіричних формул – наявність похибки розрахунку і з цим можна змиритися, якщо знати величину такої похибки.

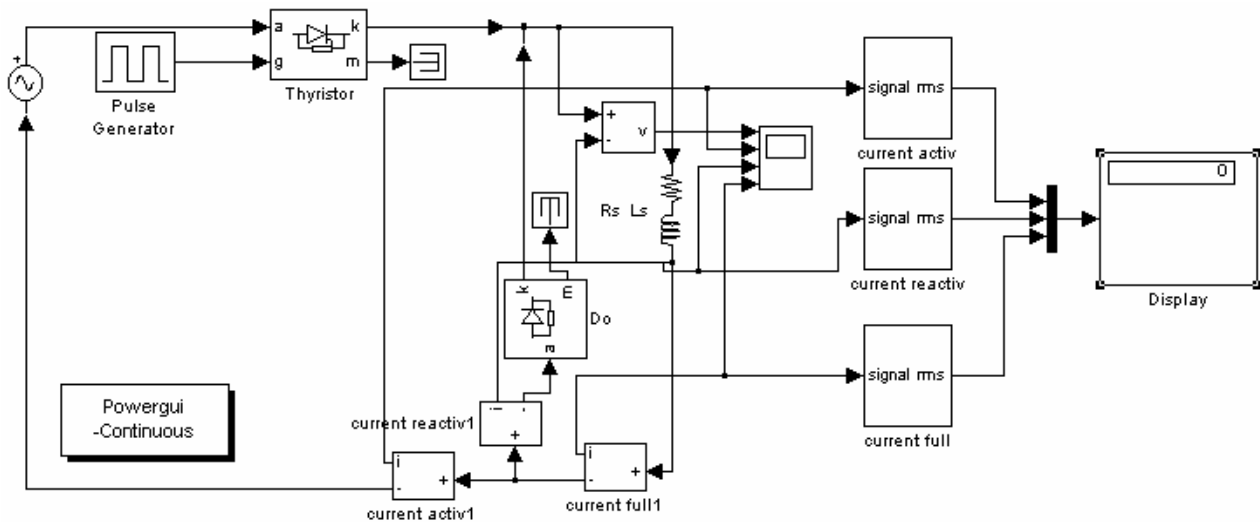


Рис. 1. Модель для розрахунку реактивної складової струму

Модель складається з наступних елементів: тиристор Thyristor з блоком завдання кута керування Pulse Generator, фазна обмотка статора двигуна $R_s L_s$, паралельно якій ввімкнений зворотній діод Do; амперметри для вимірювання миттєвих значень активного струму "current activ", реактивного "current reaktiv" і повного "current full" та блоки "signal rms" для розрахунку їх діючих значень.

Модель працює наступним чином. Коли позитивна напівхвиля напруги джерела досягає нуля, тиристор вимикається, тобто, відключає обмотку ста-

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Отримати формулу для розрахунку діючого значення реактивної складової струму асинхронного двигуна при живленні від тиристорного регулятора напруги, яка дозволить в подальшому розробити методику вибору ємності компенсуючих конденсаторів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для визначення залежності реактивного струму від кута керування тиристорами використовуємо математичну модель, оскільки обмотка статора асинхронного двигуна відноситься до класу детермінованих систем, які точно описуються диференціальними рівняннями. Сучасне математичне забезпечення дозволяє будувати моделі асинхронних електроприводів в комплекті з шістьма тиристорами та шестиканальною системою імпульсно-фазового керування. Така модель має сенс при розрахунках перехідних процесів струмів, крутного моменту, швидкості двигуна і таке інше. В нашому випадку мета моделювання – знайти реактивну складову струму холостого ходу і тому в якості математичної моделі асинхронного двигуна приймаємо T-подібну схему заміщення асинхронного двигуна з розімкненою обмоткою ротора, тобто, враховуємо активний опір фази статора та суму індуктивностей розсіювання і основної.

Використаємо відомий спосіб виділення реактивної складової струму за допомогою, так званого, зворотнього діода, який вмикається паралельно котушці в неспроможному напрямку відносно ЕРС живлення. Складемо відповідну модель в програмному пакеті Simulink, як показано на рис. 1.

тора від джерела. Оскільки на аноді діода появляється позитивний потенціал від ЕРС самоіндукції обмотки статора, зворотній діод вмикається і у колі протікає струм. Оскільки цей струм спричинений ЕРС самоіндукції і не повертається в мережу, то, згідно теорії Фризе, це реактивний струм. В мережі протікає активний струм, оскільки, згідно теорії Фризе співпадає за фазою з напругою, а у колі обмотки протікає повний струм, як сума активного та реактивного. Осцилограми струмів розрахованих на моделі показані на рис. 2.

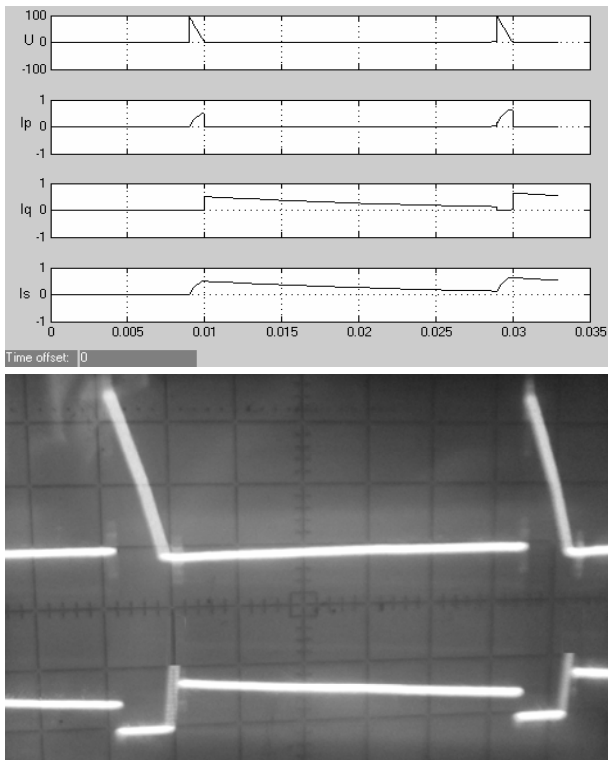


Рис. 2. Осцилограми напруги і струмів розраховані на моделі і отримані на реальному двигуні

Зверху вниз на розрахункових осцилограмах показані: осцилограми напруги та складові миттєвих струмів: активного, реактивного та повного отримані на моделі. Тут же показані осцилограми отримані на реальному двигуні МТ-12-6 з метою пересвідчитись та упевнитись в правильності роботи моделі, тобто для ілюстрації її достовірності, зверху вниз: напруга на фазній обмотці та струм зворотнього діода, тобто, реактивний струм. Реальних осцилограм лише дві, оскільки при натурних експериментах використовувався двопробеневий електронний аналоговий осцилограф. З осцилограм видно, що напруга на двигуні не має негативних ділянок.

Необхідно зазначити, що діючі значення струмів отримані для випадку схеми з одним тиристором. Для схеми з двома тиристорами діючі значення струмів пропорційно підвищуються, проте відношення реактивного струму до повного збережеться.

Результати розрахунку на моделі діючих значень струмів наведені в табл. 1, з якої впливає підтвердження теорії Фризе, тобто, виконання рівності квадрат повного струму дорівнює сумі квадратів активної та реактивної складових. Дійсно, згідно закону збереження енергії тепло від повного струму дорівнює сумі тепла від його складових.

Вводимо поняття коефіцієнта K_p реактивного струму як відношення реактивної складової до повного струму, який згідно табл. 1 залежить від кута α . Цю залежність апроксимуємо згідно методики [12] аналітичною формулою виду

$$K_p = f(\alpha) = a_0 + a_1 \cdot \alpha, \quad (2)$$

де a_0, a_1 – шукані коефіцієнти апроксимуючої формули.

Згідно методу найменших квадратів коефіцієнти формули (4) повинні задовольняти умову

$$\sum [K_i - (a_0 + a_1 \cdot \alpha_i)]^2 = \min, \quad (3)$$

де K_i – розрахункове значення за моделлю.

Взявши у виразі (5) похідні за параметрами " a_0 " та " a_1 " отримаємо систему рівнянь

$$a_0 \cdot N + a_1 \sum_{i=1}^N \alpha_i = \sum_{i=1}^N \beta_i; \quad a_0 \sum_{i=1}^N \alpha_i + a_1 \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 = \sum_{i=1}^N (\beta_i \cdot \alpha_i). \quad (4)$$

Після вирішення (4) отримаємо емпіричну формулу коефіцієнта реактивного струму для асинхронних двигунів потужністю до 11 кВт

$$K_p = 0,675 + 0,1 \cdot \alpha. \quad (5)$$

і формулу для розрахунку реактивної складової струму холостого ходу асинхронних двигунів

$$I_p = K_p \cdot I_x. \quad (6)$$

Таблиця 1

Результати розрахунку діючих значень струмів

Кут керування α , сек	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005
Кут керування α , рад	2,827	2,513	2,199	1,885	1,57
Діючий струм мережі (активний) I_a , А	0,08213	0,4564	1,197	2,284	3,629
Діючий струм зворотнього діода (реактивний) I_p , А	0,269	1,101	2,368	3,923	5,602
Діючий струм обмотки статора (повний) I_n , А	0,2795	1,192	2,657	4,552	6,7
Коефіцієнт реактивного струму $K_p = I_p / I_n$	0,9624	0,9237	0,8912	0,8618	0,8361

За формулою (6) для асинхронного двигуна МТ-12-6 (7,5 кВт) розрахована залежність діючого значення реактивної складової несинусоїдного струму холостого ходу від кута керування, яка побудована на рис. 3: суцільною – розрахована за моделлю, пунктирною – розрахована за емпіричною формулою (6).

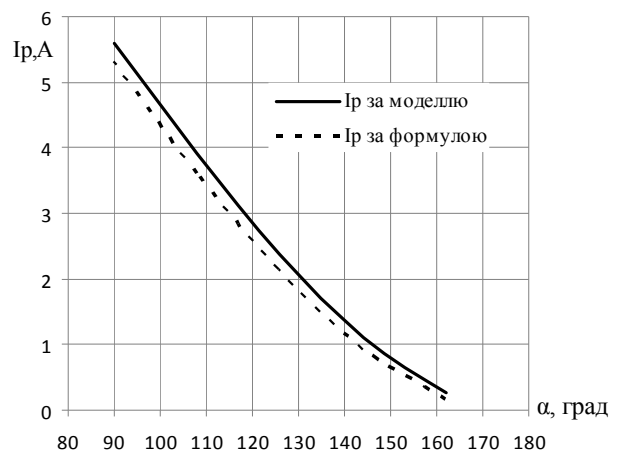


Рис. 3. Розраховані графіки залежності реактивного струму за моделлю та за формулою

ВИСНОВКИ

Отримана формула для розрахунку діючого значення реактивної складової струму холостого ходу асинхронного двигуна з тиристорним регулятором напруги з урахуванням кута керування тиристорами та параметрів обмотки статора, яка дозволяє розраховувати втрати електроенергії в лініях і трансформаторах від передачі реактивного струму з метою обґрунтування економічної доцільності компенсації реактивної потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2005. – №3(32). – С. 106-114.
2. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 63-65.
3. Архиреев И.П. Сопоставление методов определения реактивной мощности емкости и индуктивности при периодических несинусоидальных напряжениях // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". Ч.2. – 2008. – С. 11-16.
4. Сасенко Ю.Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук за спец-тю 05.09.05. – Львів, 2003. – 39 с.
5. Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p - q - r reference frames. *Int. Proc. IEEE PEDS'99 Conf.*, Hong Kong, July 1999. – pp. 422-427.
6. Ковальова Ю.В. Визначення струму холостого ходу асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги // Тези доповіді XXXVII наук.-техн. конф., Харків: ХНУМГ ім. Бекетова, 2014. – С. 85-87.
7. Методы исследований и организация экспериментов. Под ред. проф. К.П. Власова – Х.: Изд-во "Гуманитарный центр", 2002. – 256 с.

REFERENCES: 1. Rodkin D.I. Comment to the theory of energetical processes with harmonic signals different frequencies. *Visnyk Kremenchuc'kogo derzhavnogo politechnichnogo universytetu – Transactions of Kremenchug State Polytechnic University*, 2005, no.3(32), pp. 106-114. 2. Zhemerov G.G., Il'ina O.V. Fryze power theory and modern power theories. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 63-65. 3. Arkhireyev I.P. Comparison of methods of determination of reactive power of capacity and inductance at periodic nonsine voltage. *Tekhnichna elektrodynamika*.

Tem. vypusk "Silova elektronika i energoefektivnist" – Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency", 2008, Part 2, pp. 11-16. 4. Sayenko Y.L. *Reaktyvna potuzhnist' v systemah elektropostachannja z nelinejnymy navantazhennjamy*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Reactive power in power supply networks with nonlinear loads. Abstracts of doct. tech. sci. diss.]. Lviv, 2003. 39 p. 5. Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p - q - r reference frames. *Int. Proc. IEEE PEDS'99 Conf.*, Hong Kong, July 1999, pp. 422-427. 6. Kovalova J.V. Determination of current of idling of induction electric drive with the thyristor regulator of voltage. *Tezy dokladu XXXVII nauk.-tehn. konf.* [Theses XXXVII science conf.]. Kharkiv, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, 2014, pp. 85-87. 7. Vlasov K.P. *Metody issledovanii i organizatsiia eksperimentov* [Methods of investigations and organizations of experiments]. Kharkiv, Gumanitarnyi tsentr Publ., 2002. 256 p.

Надійшла (received) 30.06.2014

Ковальова Юлія Вікторівна, аспірантка,
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,
61002, Харків, вул. Революції, 12,
тел/phone: +38 066 2220558, e-mail: kvn.kharkov@mail.ru

J.V. Kovalova
O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Reactive current of an induction electric drives with thyristor voltage regulator.

A model for a separation of reactive constituent from current of idling of an induction motor at its feed from a thyristor voltage regulator in the dependences on the control angle of thyristors is developed. As a result of modeling, dependence of relative reactive current which is approximated by formula for calculation of effective current of reactive constituent of nonsinusoidal current is obtained.

Key words – thyristor regulator, induction motor, heating nonsinusoidal current.