

ВИЗНАЧЕННЯ ВХІДНОГО СТРУМУ ТИРИСТОРНИХ ЗБУДЖУВАЧІВ

Розглядається питання визначення діючого значення струму на вході тиристорного випрямляча, що живить обмотки збудження двигуна постійного струму або синхронного двигуна. Мета роботи - отримати аналітичну залежність діючого значення несинусоїдного струму, що споживається з електромережі. Метод дослідження – моделювання процесів регулювання на математичній моделі з подальшою апроксимацією отриманих залежностей. В результаті роботи отримана формула для визначення діючого значення струму в залежності від кута керування тиристорами.

Ключові слова: тиристорний збуджувач, кут керування, діюче значення струму

Постановка проблеми

Тиристорні збуджувачі знаходять широке використання в промисловості і призначені для живлення постійним струмом обмоток збудження двигунів постійного струму та синхронних двигунів [1]. Вихідний випрямлений струм тиристорних збуджувачів становить 5 - 1000 А при напрузі від 50 до 600 В. Для обмоток збудження характерне високе значення індуктивності до 100 мГн при невеликому значенні омичного опору до 2 Ом. При тиристорному регулюванні струму обмотки збудження споживають несинусоїдний струм, активну і реактивну потужність. Реактивна потужність пропорційна струму, який залежить у тому числі і від кута керування тиристорами. Окрім цього, для вибору перерізу живлячих кабелів для тиристорного збуджувача та типу тиристорів за струмом необхідно знати діюче значення вхідного несинусоїдного струму, отже, тема статті є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Схема заміщення обмотки збудження являє собою електричне коло з омичним опором та двома електрорушійними силами (ЕРС), а саме: ЕРС живлення та ЕРС самоіндукції. Струм в обмотці збудження перетворюється в тепло згідно закону Джоуля-Ленца (активна складова струму) і в магнітний потік згідно закону повного струму (реактивна складова). Змінний магнітний потік згідно закону Фарадея індукуює ЕРС самоіндукції, напрямок якої згідно закону Ленца завжди зустрічний причині її появи, тобто, ЕРС самоіндукції завжди зустрічна ЕРС джерела. Спочатку ЕРС самоіндукції створює опір наростанню струму, а потім створює опір його спаданню, зсуваючи тим самим графік струму від графіка напруги. Тому графіки струму обмотки збудження не повторюють графіка напруги. У літературі [2-4] індуктивність кола навантаження тиристорного випрямляча приймається нескінченною. Це

призводить до розрахунку значення кута λ провідності тиристорів з великою похибкою. Згідно з таким припущенням кут λ провідності тиристорів дорівнює: для двопульсних тиристорних випрямлячів $\lambda = \pi + \gamma$, для трипульсних та шестипульсних тиристорних випрямлячів дорівнює $\lambda = 2\pi/3 + \gamma$, де γ - кут комутації тиристорів. Кут комутації тиристорів враховує індуктивність розсіювання трансформатора. При цьому графік фазного струму, що споживається з мережі має форму трапеції. Очевидно, що таке припущення створює суттєву похибку при розрахунках та виборі перерізу живильних кабелів та тиристорів в сторону завищення їх параметрів і, отже, завищених витрат на виробництво та електромонтаж.

Миттєве значення струму що споживається з електромережі на інтервалі провідності тиристора приведене в [1] і отримане з диференційного рівняння

$$iR + L \frac{di}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

$$i = \frac{U_m}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-(\omega t - \alpha) \operatorname{ctg} \varphi}], \quad (2)$$

де α – кут керування тиристорами; r – активний опір та індуктивність обмотки збудження; Z – повний опір обмотки при синусоїдному живленні; φ – кут зсуву графіка струму від графіка напруги при куті керування, при якому з електромережі споживається синусоїдний струм.

Для розрахунку діючого значення фазного струму, що споживається з електромережі у загальному випадку зручно мати аналітичну формулу, у тому числі отриману шляхом апроксимації розрахункових залежностей. Недолік емпіричних формул – наявність похибки розрахунку і з цим можна миритися, якщо знати величину такої похибки.

Графік струму згідно (2) представлений на рис.1.

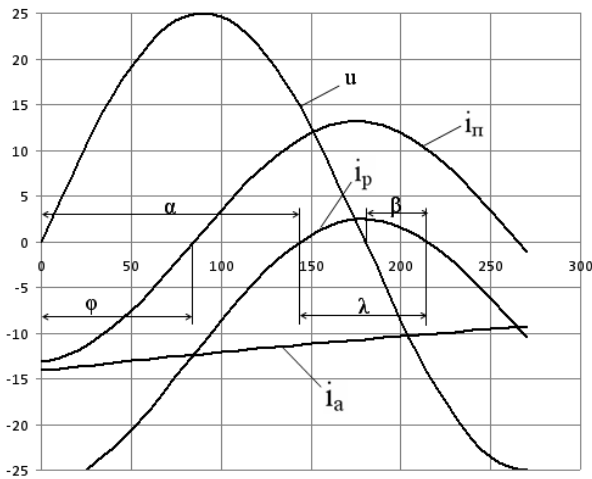


Рис.1. Графіки напруги і струму: u - миттєва напруга мережі, i_p - миттєвий струм обмотки, i_p – періодична складова струму, i_a – аперіодична складова струму, α - кут керування тиристорами, β - кут закривання тиристорів, λ - кут провідності тиристорів.

На графіку вказані: миттєва напруга u мережі, миттєвий струм i_p , періодична i_p та аперіодична i_a складові струму, кут керування тиристорами α , кут закривання тиристорів β і кут провідності λ .

Постановка завдання

Метою даної статті є визначення діючого значення фазного струму, що споживається з електромережі обмоткою збудження через тиристорний збуджувач з урахуванням реальних параметрів обмоток та кута керування тиристорами.

Виклад основного матеріалу

Формула (2) є безперервна функція, як результат вирішення рівняння (1) з початковою фазою α і складається з двох складових: вимушеної (періодичної) та вільної (аперіодичної). Відомо, що діюче значення несинусоїдного струму дорівнює квадрату суми діючих значень гармонічних складових. Це впливає з принципу суперпозиції (накладання) з теорії електричних кіл, тобто, діюче значення змінного струму будь-якої форми, як еквівалент його теплової дії, дорівнює сумі теплових дій його складових. Тоді шукаємо діюче значення струму (2) через інтеграл квадрату суми вимушеної і вільної складових. Оскільки графік має знеструмлені ділянки, то інтегрування проводимо на інтервалі кута провідності тиристора, тобто, від α до $\alpha+\lambda$. В результаті інтегрування отримана формула діючого значення фазного струму, що споживається тиристорним збуджувачем з електромережі

З формули (3) випливає, що при куті керування тиристорами $\alpha=\varphi$ кут провідності становиться рівним $\lambda=\pi$, а діюче значення фазного струму дорівнює його амплітуді поділеної на 1,41.

$$I = \frac{U_m}{Z} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\lambda - \frac{\sin 2(\alpha + \lambda - \varphi)}{2} + \frac{\sin 2(\alpha - \varphi)}{2} \right] + \frac{2 \sin(\alpha - \varphi)}{1 + \text{ctg}^2 \varphi} \left\{ e^{-\lambda \text{ctg} \varphi} [\text{ctg} \varphi \sin(\alpha + \lambda - \varphi) + \cos(\alpha + \lambda - \varphi)] - \text{ctg} \varphi \cdot \sin(\alpha - \varphi) - \cos(\alpha - \varphi) \right\} + \frac{\sin^2(\alpha - \varphi)}{2 \text{ctg} \varphi} (1 - e^{-2\lambda \text{ctg} \varphi})} \quad (3)$$

Кут провідності тиристорів, який згідно рис. 1 дорівнює $\lambda=\pi-\alpha+\beta$, можна визначити з графоаналітично з трансцендентного рівняння

$\text{Sin}(\lambda+\alpha-\varphi)-\text{Sin}(\alpha-\varphi) e^{-\lambda \text{ctg} \varphi} = 0$, що не є зручним.

Невідомий кут закривання тиристорів β залежить від параметрів обмотки збудження та кута керування тиристорами. Оскільки обмотка збудження відносяться до класу детермінованих систем, які точно описуються диференційними рівняннями, то таку залежність можна визначити розрахунками на математичній моделі.

Сучасне математичне забезпечення дозволяє будувати моделі в комплекті з тиристорами та системою імпульсно-фазового керування. Для розрахунку залежності кута β закривання тиристорів в програмному пакеті Simulink [5] розроблена схема моделі двопульсного тиристорного випрямляча для живлення обмотки збудження, яка показана на рис.2 а на рис. 3 результати моделювання, тобто, розрахунковий струм, що споживається з мережі та розрахункова напруга обмотки збудження.

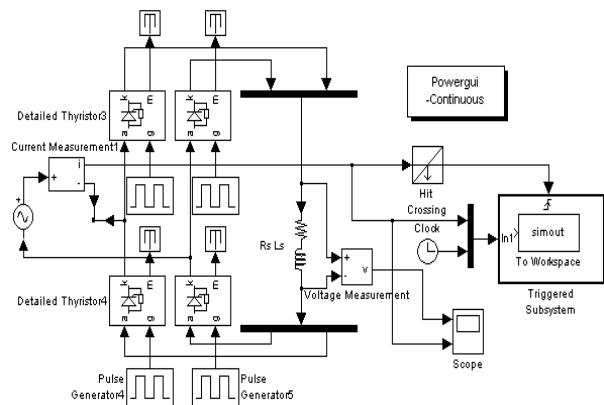


Рис. 2. Схема моделі для розрахунку кута β

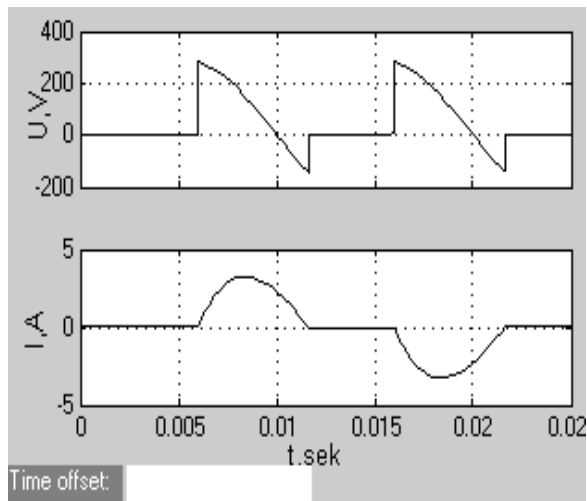


Рис.3. Осцилограми напруги і струму: U – напруга обмотки, I – струм обмотки

Модель працює наступним чином. Для вмикання тиристорів Detailed Thyristor необхідні керуючі імпульси, які формують блоки генераторів Pulse Generator з бібліотеки MATLAB. Необхідний кут керування тиристорів, зсунутий за фазою, задається у вікні параметрів блока задаванням тривалості Phase Delay фазової затримки генератора. Необхідне визначення кута відставання графіка струму від графіка мережної напруги, тобто, кута закривання тиристорів. Контроль досягнення заднім фронтом позитивної напівхвилі фазного струму нульового значення, тобто, кута закривання тиристорів виконує блок Hit Crossing, який в цей момент формує керуючий імпульс для запуску підпрограми блоку з бібліотеки MATLAB Triggered Subsystem з блоком Simout для передачі поточного часу у робочу область Workspace. Поточний час відраховує блок Clock. Розрахунок кута закривання відбуваються за формулою $\beta = t - 0,01$ сек. За результатами розрахунків побудована залежність, яка апроксимована методом найменших квадратів [6] формулою $\beta = 2,875 - 0,916 \cdot \alpha$ в радіанах. Після підстановки значення кута провідності з урахуванням β в формулу (3) діючого значення струму для обмотки збудження з індуктивністю 93 мГн та омичним опором 2,1 Ом двигуна 4ПФ250 розраховані діючі значення вхідного струму в залежності від кута керування і показані на рис.4 суцільною лінією, а точні значення, розраховані на моделі показані пунктирною.

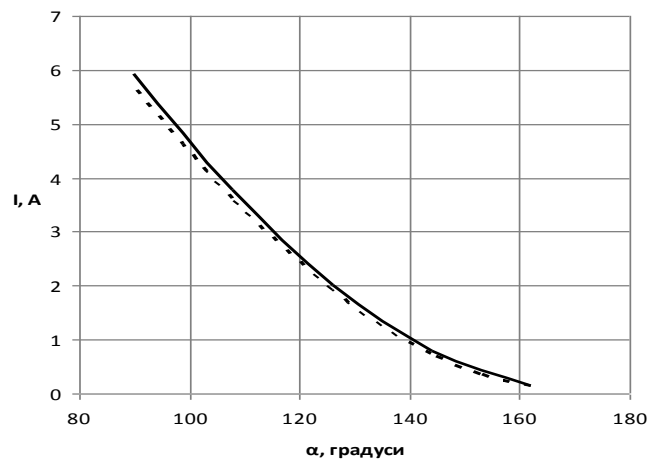


Рис.4. Графіки залежності струму

Висновки

Отримана формула діючого значення фазного струму тиристорного збуджувача з урахуванням кута керування тиристорами та параметрів обмотки збудження, яка дозволяє з підвищеною точністю вибрати тип тиристорів за струмом, розрахувати переріз живильних кабелів та втрати електроенергії при її передачі.

Література

1. Тиристорные возбудители серии ЭКТ-М. [Текст] / Харьков: ГП «НИИ "ХЭМЗ", 2005. – 43 с.
2. Справочник по преобразовательной технике [Текст] / под ред. И. М. Чиженко. — Киев: Техника, 1978. – 446 с.
3. Сенько В.І. Силовая электроника [Текст] / В.І. Сенько. – Київ: ІЗМН, 1999. – 214 с.
4. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники [Текст] / И.М. Чиженко, В.С. Руденко, В.И. Сенько. - М.: Высш. шк., 1989. – 429 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст] / С.Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2007. – 320 с.
6. Методы исследований и организация экспериментов / под ред. проф. К.П. Власова – Х.: Издательство "Гуманитарный центр", 2002. – 256 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Г. Ягуп, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків.

Автор: КОВАЛЬОВА Юлія Вікторівна
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків, аспірантка
E-mail – j.k.@scientist.com

DETERMINATION OF INPUT CURRENT OF THYRISTOR EXCITERS

J.V. Kovalova

The question of determination of virtual value of current is examined on the entrance of thyristor rectifier which feeds winding of excitation of motor of direct current or synchronous motor. Purpose of work - to get analytical dependence of virtual value of nonsine current which is consumed from the electric system. A research method is a design of adjusting processes on a mathematical model with subsequent approximation of the got dependences. As a result of work the got formula is for determination of virtual value of current depending on the angle of control with thyristor.

Keywords: thyristor exciter, management corner, virtual value of current.