

РОЗРАХУНОК ІНДУКТИВНОСТІ ОБМЕЖУВАЛЬНОГО ДРОСЕЛЯ МЕТОДОМ МАЛОГО АКТИВНОГО ОПОРУ

Грудська В.П., доц., Чибеліс В.І., доц

НТУУ «КПІ», кафедра теоретичної електротехніки

Кожушко Г.О., студент

НТУУ «КПІ», кафедра машин та агрегатів поліграфічного виробництва

Вступ. У різних галузях електротехніки (електричних мережах, електрометрії, електроприводі, тощо) широко використовують трансформаторно-тиристорні регулятори напруги (ТТРН), в яких первинна обмотка трансформатора комутується тиристорами, з'єднаними зустрічно-паралельно (рис. 1).

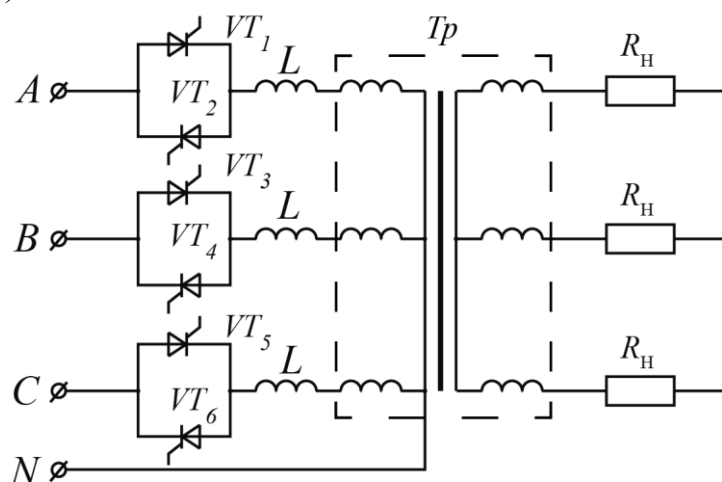


Рисунок 1 – Електрична схема досліджуваного ТТРН

Особливості роботи таких пристроїв обумовлені наявністю струму намагнічування, який може в десятки-сотні разів зростати під час перехідних процесів, а також в усталених режимах при порушенні симетрії імпульсів керування [1,3]. Різке збільшення струму намагнічування і відповідно струму на первинній стороні трансформатора може спричинити аварійне відключення установки, пошкодження тиристорів і навіть короточасний спад напруги мережі (у разі її обмеженої потужності), що негативно вплине на роботу інших споживачів. Радикальним способом обмеження струмів на первинній стороні трансформатора, у тому числі струмів намагнічування, є послідовне ввімкнення у первинну обмотку лінійного дроселя [2]. Обмежувальний дросель позитивно впливає також на процеси в усталених симетричних режимах, оскільки суттєво зменшує вміст вищих гармонік у струмі. Відповідно зменшується спотворення напруги мережі.

Мета роботи. Обґрунтування доцільності розрахунку індуктивності обмежувального дроселя методом малого активного опору.

Сутність запропонованого методу. Для висвітлення сутності методу були прийняті звичайні допущення: вентилі ідеальні, активні опори і потоки

розсіювання обмоток трансформатора нехтовно малі, втрати в осерді відсутні. Навантаження трансформатора вважалось активним, незмінним і симетричним. За вказаних умов достатньо розглянути процеси в схемі заміщення однієї фази ТТРН (рис. 2). На цій схемі обмежувальний дросель представлений ідеальною індуктивністю L , трансформатор – індуктивністю намагнічування L_0 .

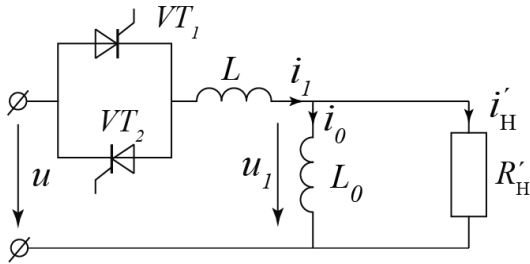


Рисунок 2 – Схема заміщення фази ТТРН

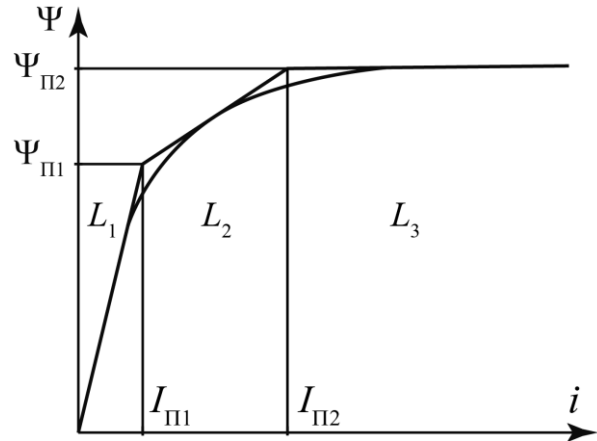


Рисунок 3 – Апроксимована вебер-амперна характеристика

У залежності від положення робочої точки на апроксимованій трьома відрізками прямих вебер-амперній характеристиці магнітопроводу (рис. 3) диференціальна індуктивність L_0 приймає значення:

$L_0 = L_1 = \Psi_{\pi 1} / I_{\pi 1}$, $L_0 = L_2 = (\Psi_{\pi 2} - \Psi_{\pi 1}) / (I_{\pi 2} - I_{\pi 1})$, де $\Psi_{\pi 1}$, $\Psi_{\pi 2}$, $I_{\pi 1}$, $I_{\pi 2}$ – поточкозчеплення та струми у точках перегину характеристики; $L_0 = L_3$ на ділянці насичення; R'_H , i'_H – опір і струм навантаження, приведені до первинної обмотки трансформатора ($R'_H = n^2 R_H$, $i'_H = i_H / n$, де n – коефіцієнт трансформації).

Індуктивний опір обмежувального дроселя розраховується, виходячи з найбільш небезпечного режиму – усталеного режиму за максимальної асиметрії кутів керування, коли один з тиристорів повністю закритий, а інший відкритий, тобто працює, як діод (рис 4,а). У такому режимі струм намагнічування i , відповідно, первинний струм досягають значень, що перевищують струми перехідного процесу.

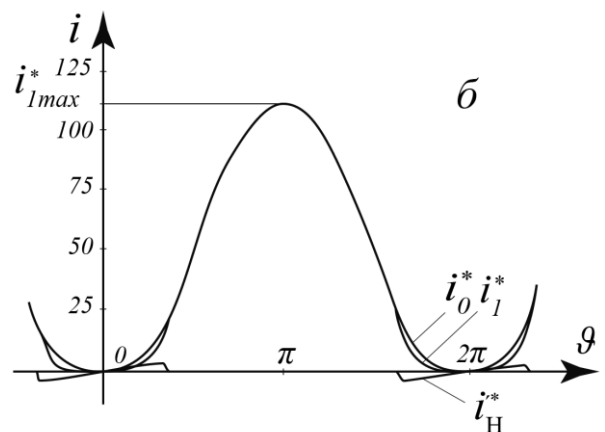
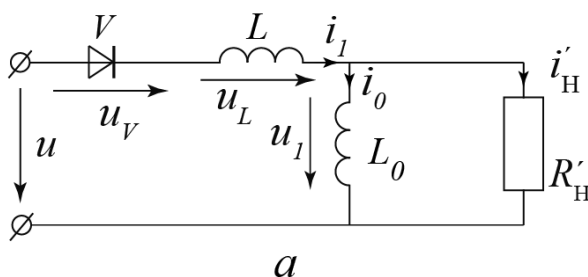


Рисунок 4 – Схема (4, а) та струми (4, б) у режимі максимальної асиметрії кутів керування

При певному значенні L_0 і певному стані діоду (відкритий-закритий) коло на рис. 4,а є лінійним, тому його можна аналізувати методами розрахунку лінійних кіл.

Навіть коли у колі має місце усталений режим, кожна зміна індуктивності L_0 , а також зміна стану діода призводить до появи вільних складових у струмах кола. При відкритому діоді можливе проходження вільного струму по контуру, утвореному L і L_0 , причому через відсутність у даному контурі активних опорів ця складова вільного струму з часом не згасає, що відповідає нульовому значенню кореня характеристичного рівняння. Далі паралельно з'єднанні у вільному режимі індуктивності L і L_0 можна замінити еквівалентною $L_e = LL_0 / (L + L_0)$. Отриманій схемі відповідає друге значення кореня характеристичного рівняння: $p = -R'_H / L_e$. Значення цих коренів можна також отримати з виразу:

$$\frac{R'_H p L_0}{R'_H + p L_0} + p L = 0.$$

Оскільки постійна складова вільних струмів замикається через індуктивність, то у виразах струмів i_1 , i_0 вона однакова, а у виразі струму i'_H відсутня. Отже, вирази струмів мають вигляд:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\vartheta + \Psi_1) + A + B e^{\frac{p}{\omega} \vartheta} \quad (1)$$

$$i_0 = I_{m0} \sin(\vartheta + \Psi_0) + A + C e^{\frac{p}{\omega} \vartheta} \quad (2)$$

$$i'_H = I'_{mH} \sin(\vartheta + \Psi_H) + D e^{\frac{p}{\omega} \vartheta} \quad (3)$$

У залежності від положення робочої точки на вебер-амперній характеристиці змінюється значення кореня p , амплітуд I_m та фаз Ψ струмів, а також сталі інтегрування A, B, C, D .

При визначенні сталих інтегрування враховувалися такі особливості процесів:

1. Струми i_1 , i_0 , i'_H стрибком змінюватись не можуть (для i_1 , i_0 діє перший закон комутації, а струм $i'_H = i_1 - i_0$).

2. Напряга $u_1 = L_0 \frac{di_0}{dt} = R'_H i'_H$ стрибком не змінюється. Отже, у момент стрибкоподібної зміни L_0 похідна $\frac{di_0}{dt}$ також змінюється стрибкоподібно – зворотно пропорційно L_0 .

3. Напряга на закритому діоді $u_v = u - u_1$ стрибком не змінюється; діод відкривається, коли його напряга, плавно змінюючись, стає рівною нулю.

4. Напруга на обмежувальному дроселі $u_L = u - u_v - u_1 = L \frac{di_1}{dt}$ стрибком не змінюється, тому у момент відкривання діода $\frac{di_1}{dt} = 0$.

Усталений режим з максимальною асиметрією настає після завершення перехідного процесу, який відбувається, наприклад, при ввімкненні системи під напругу. Оскільки перехідний процес триває декілька періодів вхідної напруги і протягом одного періоду робоча точка переміщується по двом-трьом ділянкам вебер-амперної характеристики, розрахунки є вельми трудомісткими. Значного спрощення і прискорення розрахунку можна досягти, якщо одразу розраховувати усталений режим. Для цього необхідно мати як вихідні дані значення струмів в обох індуктивностях у певний момент часу, тобто при певному фазному куті вхідної напруги. Визначення цих струмів є нелегкою задачею, вирішити яку вдається за допомогою методу малого активного опору. Сутність його така.

В усталеному режимі у напрузі u_1 трансформатора не повинно бути постійної складової. Вхідна напруга u і напруга u_L на дроселі L , активним опором якого нехтуємо, постійної складової не містять, отже у напрузі діода $u_v = u - u_1 - u_L$ також не може бути постійної складової. Беручи до уваги, що на ідеалізованому діоді додатних напруг не буває, доходимо висновку про відсутність на діоді від'ємних напруг. Це означає, що діод перебуває у провідному стані протягом усього періоду усталеного режиму.

З іншого боку, за однонапрявленого проходження струмів малі постійні складові на малих активних опорах первинної обмотки трансформатора, обмежувального дроселя, а також на самому діоді мають однаковий знак. Для їх урівноваження десь у контурі, що розглядається, має бути мала постійна складова з протилежним знаком. Така від'ємна напруга може бути лише на діоді, який на короткий час виходить з роботи.

Отже, якщо вважати зазначені активні опори нескінченно малими, але не рівними нулю, крива миттєвого значення первинного струму є дотичною до осі абсцис (рис. 4,б). У момент дотику струм i_1 та його перша похідна приймають нульове значення. Для визначення моменту дотику слід скористатися виразом (1), який описує зміну первинного струму, але при цьому необхідно знати сталі інтегрування A , B . Корисною для розрахунку виявляється така обставина. Індуктивний опір обмежувального дроселя має величину в декілька разів меншу, ніж R'_H , тому в робочому діапазоні вебер-амперної характеристики індуктивності намагнічування співвідношення $p/\omega = R'_H/\omega L_e$ реально складає величину порядку 10-15. Це означає, що після переходу робочої точки на нову ділянку вебер-амперної характеристики вільна складова струму згасає за час, відповідний декільком (6-10) електричним градусам.

Отже, у більшості випадків з достатньою точністю в рівнянні первинного струму можна відкинути експоненціальну складову, тоді умови дотику записуються так:

$$A = I_{m1}, \quad \vartheta_{\text{от}} + \Psi_1 = -\pi/2.$$

Якщо відомий фазний кут Ψ напруги мережі у момент дотику, легко визначити струм у контурі намагнічування:

$$i_0 = -i'_H = -U_m \sin \Psi_1 / R'_H$$

За викладеною методикою були розраховані струми у ТТРН для різних значень опорів навантаження R'_H та індуктивності L обмежувального дроселя.

На рис. 4,б показано миттєві значення струмів у випадку $R'_H / \omega L_2 = 2,07$ і $L / L_2 = 0,0925$. Графік залежності максимального значення первинного струму $i_{1\text{max}}$ від індуктивності L обмежувального дроселя, побудований у відносних одиницях, зображено на рис. 5, де $L^* = L / L_2$, $i_{1\text{max}}^* = i_{1\text{max}} / I_{0m}$, I_{0m} – амплітуда струму намагнічування у симетричному режимі.

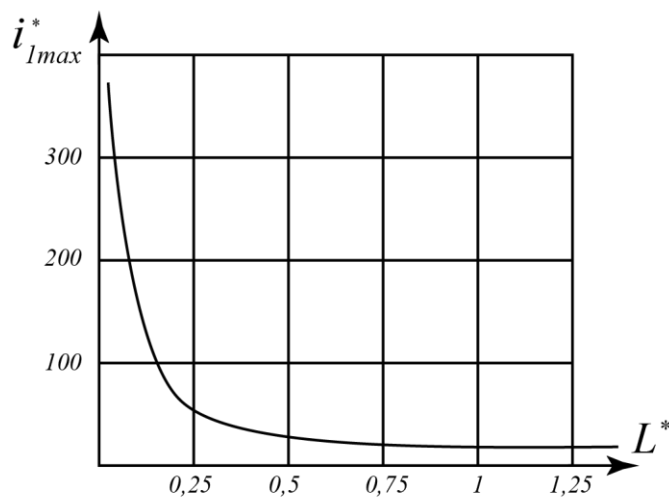


Рисунок 5 – Графік залежності первинного струму від індуктивності обмежувального дроселя

Висновок. Розроблена на кафедрі теоретичної електротехніки НТУУ «КПІ» методика розрахунку індуктивності лінійного дроселя для обмеження струмів ТТРН, яка базується на методі малого активного опору, порівняно з відомою методикою суттєво зменшує обсяг розрахунків і дозволяє забезпечити надійний захист тиристорів від надструмів у будь-яких перехідних і аварійних режимах.

Перелік посилань

1. Голубев В.В. Импульсивное преобразование переменного напряжения. – К.: Наукова думка, 2014. – 248 с.
2. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наукова думка, 1983. – 214 с.
3. Чиженко А.Н., Курило І.А., Управление вентильным регулятором переменного напряжения// Техн. Електродинаміка. – 2008. – №6. – С. 38-41.
4. Шидловский А.К., Новский В.А. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – Киев: Наук. думка, 2009. – 313 с.