

УДК 621.314.5

І.А. Курило, В.П. Грудська

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ СХЕМИ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ВИПРЯМЛЕНОЇ НАПРУГИ З ВОЛЬТОДОДАТКОВИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

The aim of the paper is to make the comparative analysis of the most promising rectified voltage control system layout modifications with booster transformers. We compare energy indices of various control systems and study the influence of zero sequence currents and voltages. We conclude that it is practically expedient to use the control system with the booster transformer whose secondary winding is connected to line wires of the main transformer delta-connected primary winding.

Вступ

Для регулювання постійної напруги для споживачів великої потужності широко використовуються випрямлячі: побудовані на керованих вентилях, що з'єднані у послідовно-паралельні групи [1, 2]; зібрані на діодах і керовані на боці змінного струму [3, 4]. Серед способів керування потужним випрямлячем слід виділити регулювання напруги первинної обмотки трансформатора випрямляча (далі – основного трансформатора) за допомогою вольтододаткових трансформаторів (ВДТ), первинна обмотка яких комутується керованими вентилями – тиристорами або симісторами [5–8]. Таке регулювання має низку переваг порівняно з іншими способами. Зокрема, на відміну від фазового безтрансформаторного регулювання тиристорного випрямляча, при фазовому регулюванні ВДТ зменшується встановлена потужність керованих вентилів; спрощується система керування і, відповідно, збільшується надійність; зростає коефіцієнт потужності. Останнє пояснюється збільшенням коефіцієнта зсуву першої гармоніки струму, оскільки зсув відбувається лише у невеликій частині вхідного струму. Порівняно з дросельним регулюванням коефіцієнт потужності також вищий, а габарити і маса менші, ніж у дроселів насичення. Спосіб керування випрямлячем на боці змінного струму за допомогою комутованих вентилями ВДТ дає змогу плавно і майже безінерційно змінювати випрямлену напругу в діапазоні, який визначається коефіцієнтом трансформації ВДТ. Наведені переваги особливо суттєві у разі відносно малого діапазону регулювання (до 15–20 %), який у більшості випадків цілком задовольняє практичні вимоги.

Постановка задачі

Досліджуваний спосіб регулювання випрямленої напруги за допомогою ВДТ є багатоваріантним: як регулювальні використовуються три однофазних або один трифазний ВДТ; первинні обмотки ВДТ з'єднуються трикутником або зіркою; вторинні обмотки ВДТ по-різному підключаються до основного трансформатора, первинна обмотка якого також може з'єднуватись трикутником чи зіркою. Кожний із цих варіантів має свої особливості функціонування як основного трансформатора, так і ВДТ.

Отже, метою дослідження є порівняльний аналіз процесів у різних схемних варіантах вказаної системи регулювання випрямленої напруги і вибір оптимального за енергетичними показниками варіанта.

Матеріал і результати досліджень

У системі регулювання випрямленої напруги (рис. 1) ВДТ може працювати в режимі додатного або від'ємного вольтододатка; режим визначається полярністю ввімкнення обмоток ВДТ і алгоритмом керування тиристорами.

У випадку від'ємного вольтододатка послідовні (непарні) тиристори у кожній фазі відкриваються у момент проходження через нуль лінійної напруги мережі u_M і підключають первинну обмотку ВДТ до мережі. В інтервалі провідності непарних тиристорів при закритих парних напруги на первинних і вторинних обмотках ВДТ становлять відповідно $u' = u_M$, $u'' = u_M/n$ (n – коефіцієнт трансформації ВДТ), напруги на первинних обмотках основного трансформатора – $u = \left(1 - \frac{1}{n}\right)u_M$. Через певний

проміжок часу, який відповідає куту регулювання α , подається керуючий імпульс на парний тиристор. Останній шунтує первинну обмотку ВДТ, і напруги набувають значень $u' = 0$, $u'' = 0$, $u = u_M$. Ці значення зберігаються, поки лінійна напруга мережі u_M не зменшиться до нуля. У момент, коли $u_M = 0$, відкривається другий непарний тиристор тієї ж фази і процес повторюється. Отже, змінюючи кути регулювання парних тиристорів від 0 до 180°, можна змінювати співвідношення між частиною періоду, коли напруга на первинній обмотці основного трансформатора $u = u_M$, і частиною періоду, коли $u = \left(1 - \frac{1}{n}\right)u_M$. У режимі додатного вольтододатка змінюються полярність увімкнення обмоток ВДТ і алгоритм керування тиристорами: парні відкриваються в момент проходження лінійних напруг мережі u_M через нуль, непарні — працюють з кутом регулювання α , який може змінюватися від 0 до 180°. При цьому змінюється співвідношення

між частиною періоду, коли напруга на первинній обмотці основного трансформатора $u = \left(1 + \frac{1}{n}\right)u_M$, і частиною періоду, коли $u = u_M$. Надалі розглядаються процеси в режимі від'ємного вольтододатка.

Регулювання випрямленої напруги трифазним ВДТ при послідовному увімкненні обмоток основного і вольтододаткового трансформаторів та з'єднанні їх первинних обмоток трикутником (див. рис. 1). У разі використання одного трифазного ВДТ в інтервалах часу, коли його дія проявляється в одній або у двох фазах, у первинній обмотці ВДТ напруги фаз утворюють несиметричну систему $u'_1 + u'_2 + u'_3 \neq 0$ і виникає напруга нульової послідовності u_0 , яка дорівнює 1/3 лінійної напруги мережі u_M . Оскільки опір нульової послідовності ВДТ малий, то напруга u_0 створює у фазах первинної обмотки ВДТ струм нульової послідовності i_0 значної амплітуди, який накладається на навантажувальні складові i'_H (рис. 2).

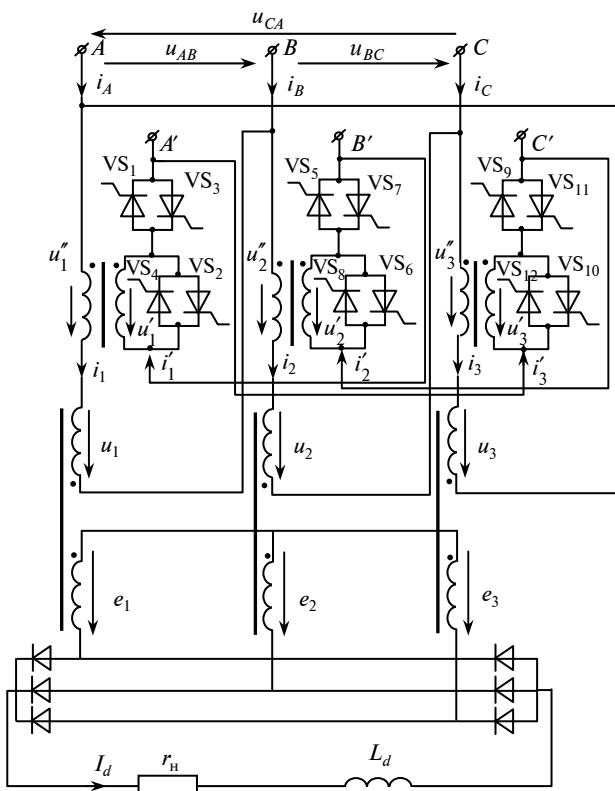


Рис. 1. Система регулювання випрямленої напруги з послідовним з'єднанням обмоток основного трансформатора і ВДТ

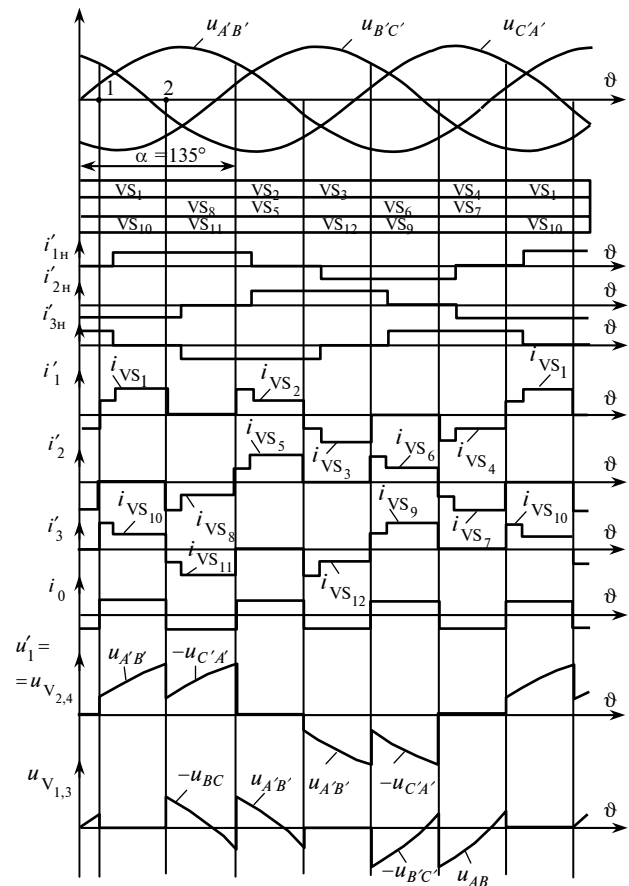


Рис. 2. Графіки миттєвих напруг і струмів при використанні у системі регулювання (рис. 1) трифазного ВДТ

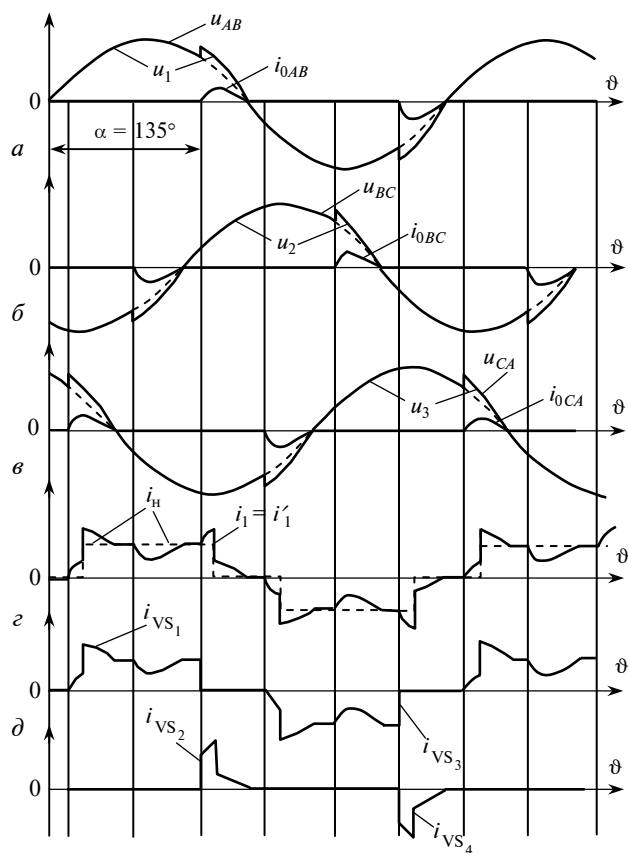


Рис. 3. Графіки миттєвих напруг і струмів при використанні у системі регулювання (рис. 1) трьох однофазних ВДТ

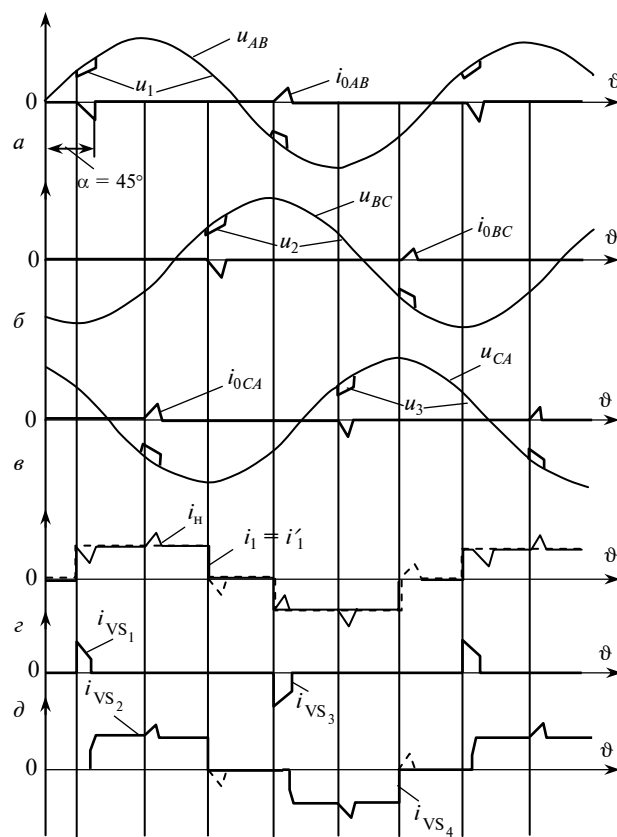


Рис. 4. Графіки миттєвих напруг і струмів у системі регулювання (рис. 1) при малих кутах керування тиристорами однофазних ВДТ

На рис. 2 і далі на рис. 3, 4 для спрощення припущено, що коефіцієнти обох трансформаторів дорівнюють одиниці. Шунтування однієї фази первинної обмотки ВДТ парним тиристором супроводжується майже одночасним розімкненням тієї фази, в якій струм спадає до нуля внаслідок виникнення у ній струму i_0 , спрямованого зустрічно навантажувальній складовій i'_H . Таким чином, у процесі роботи одна фаза первинної обмотки трифазного ВДТ закорочена, друга фаза розімкнена, а третя — підключена до лінійної напруги мережі, і умова $u'_1 + u'_2 + u'_3 = 0$ виконується.

Напруга на розімкненій фазі не створює загрози, оскільки дорівнює зі знаком “мінус” лінійній напрузі мережі, до якої підключена третя фаза первинної обмотки ВДТ. Лише протягом короткого проміжку часу, поки струм нульової послідовності i'_0 змінюється від $-I_d$ до $+I_d$ або від $+I_d$ до $-I_d$, $u'_1 + u'_2 + u'_3 \neq 0$ і напруга нульової послідовності відмінна від нуля.

Викладене проілюструємо на прикладі роботи системи регулювання в інтервалі 1–2 (рис. 2). У першій фазі проводить струм тиристор VS_1 , у третій — VS_{10} , а друга фаза розімкнена; відповідні напруги на фазах первинної обмотки ВДТ становлять $u'_1 = u_{A'B'}$, $u'_2 = -u_{A'B'}$, $u'_3 = 0$. Тиристор VS_{11} вже відкритий, але в роботу не вступає, оскільки через попередній тиристор VS_{10} продовжує проходити струм I_d . Подається відкриваючий імпульс на тиристор VS_8 . Після відкриття VS_8 напруга $u'_2 = 0$, тому $u'_1 + u'_2 + u'_3 = u_{A'B'}$. Виникає напруга нульової послідовності $u_0 = 1/3 u_{A'B'}$, яка спричиняє зміну струму нульової послідовності. У результаті струм третьої фази спадає до нуля, а потім змінює напрям (з роботи виходить тиристор VS_{10} і вступає в роботу VS_{11}). До третьої фази у цей момент часу прикладена напруга $u_{C'A'}$. Струм тиристора VS_1 , який у момент увімкнення тиристора VS_8 дорівнював $2I_d$, спадає. При вступі в роботу тиристора VS_{11} струм

$i_{VS_1} = I_d$, а напруги на фазах первинної обмотки ВДТ знову створюють несиметричну систему $u'_1 + u'_2 + u'_3 = u_{A'B'} + u_{C'A'} = -u_{B'C'}$. Під дією напруги нульової послідовності $u_0 = -1/3 u_{B'C'}$ струм i_{VS_1} продовжує спадати. У момент, коли $i_{VS_1} = 0$, перша фаза обмотки розмикається, до неї прикладена напруга $u'_1 = -u'_3 = -u_{C'A'}$, умова $u'_1 + u'_2 + u'_3 = 0$ виконується і зміна струму нульової послідовності припиняється. Таким чином, шунтування другої фази обмотки супроводжується майже одночасним розімкненням третьої фази. Через шосту частину періоду (інтервал повторюваності) подається відкриваючий імпульс на тиристор VS_2 , і струм нульової послідовності знову змінюється. У цілому струм i_0 має форму практично прямокутних імпульсів, полярність яких чергується з потрібною частотою. Струм нульової послідовності частково трансформується в основний трансформатор й істотно впливає на режим роботи системи регулювання.

Регулювання випрямленої напруги трьома однофазними ВДТ при послідовному ввімкненні обмоток основного і вольтододаткових трансформаторів (див. рис. 1). Якщо регулювання випрямленої напруги здійснюється трьома однофазними ВДТ, то струми нульової послідовності i_0 виникають в основному трансформаторі. В інтервалах часу, коли дія ВДТ проявляється в одній або у двох фазах, напруги фаз первинної обмотки основного трансформатора утворюють несиметричну систему $u_1 + u_2 + u_3 \neq 0$ і виникає напруга нульової послідовності u_0 , яка у даному випадку дорівнює $1/3$ напруги вольтододатка. Хоча напруга u_0 невелика, але й опір трансформатора для нульової послідовності малий, тому напруга u_0 створює значні струми нульової послідовності i_0 , які накладаються на навантажувальні складові i_n й істотно спотворюють форму струмів у обмотках трансформатора (рис. 3).

За малого струму навантаження I_d струм нульової послідовності i_0 в первинній обмотці одного з ВДТ у деякий момент часу може виявитись рівним і протилежним за напрямком навантажувальній складовій i'_n . Непарний тиристор, який підключає первинну обмотку даного ВДТ до лінійної напруги мережі, виходить

з роботи, і обмотка залишається розімкненою до моменту вступу в роботу чергового тиристора.

У разі малих кутів регулювання парних тиристорів відбувається чергування двох інтервалів роботи системи регулювання: 1) ВДТ не діє у жодній фазі; 2) ВДТ діє в одній фазі основного трансформатора. Роботу фази AB у зазначеному режимі ілюструє рис. 4.

Незважаючи на те, що відкриваючий імпульс на послідовний тиристор подається у момент проходження лінійної напруги u_{AB} через нуль, він у роботу не вступає, поки не почне проходити струм навантаження i_n в обмотках основного трансформатора і ВДТ, увімкненого у фазу AB . З моменту появи у первинній обмотці ВДТ струму навантаження вступає в роботу послідовний тиристор, і у фазі AB починає діяти від'ємний вольтододаток. Симетрія напруг на фазах первинної обмотки основного трансформатора порушується, і виникає напруга нульової послідовності u_0 , яка протилежна за фазою напрузі u_{AB} . Напруга u_0 створює струми нульової послідовності, які спотворюють форму струмів у обмотках AB трансформаторів (рис. 4, з, д). У момент, відповідний куту регулювання α , подається відкриваючий імпульс на паралельний тиристор, він вступає в роботу, симетрія напруг на основному трансформаторі відновлюється, струм нульової послідовності швидко спадає до нуля. Напруга нульової послідовності створює струми нульової послідовності тільки у двох фазах первинної обмотки основного трансформатора, а третя фаза виявляється розімкненою. Наприклад, при дії ВДТ у фазі BC струм через обмотку AB проходити не може, оскільки навантажувальна складова струму спала до нуля, а тиристори, що забезпечували б проходження струму в зворотному напрямку, закриті. На рис. 4, з, д пунктиром показано струм i_0 , який мав би проходити, але не може. Як наслідок, у контурах магнітопроводу, що охоплюють стрижень фази AB , виникає некомпенсована намагнічувальна сила. Вона збуджує значний магнітний потік, який у свою чергу спричиняє появу перенапруг у первинній обмотці основного трансформатора.

Регулювання випрямленої напруги трьома однофазними ВДТ при ввімкненні їхніх вторинних обмоток у лінійні проводи. Позбавитись від струмів нульової послідовності в обмотках основного трансформатора можливо, якщо вторинні обмотки ВДТ увімкнути в лінійні прово-

ди. Тоді у первинній обмотці основного трансформатора завжди буде виконуватись умова $u_1 + u_2 + u_3 = 0$. Первинні обмотки ВДТ доцільно з'єднати зіркою з нульовим проводом, що забезпечує незалежну роботу фаз (рис. 5).

Залежно від значення кутів регулювання α парних тиристорів (кут α відраховується від моменту проходження фазної напруги мережі через нуль до моменту відкривання парного тиристора) можливі такі режими роботи системи регулювання:

I режим – чергуються два інтервали часу: перший, коли ВДТ діє в одній із фаз, і другий, коли ВДТ не діють у жодній фазі;

II режим – чергуються два інтервали часу: перший, коли ВДТ діє тільки в одній фазі, і другий, коли ВДТ діють одночасно в двох фазах;

III режим – чергуються два інтервали часу: перший, коли ВДТ діють у двох фазах, і другий, коли ВДТ діють одночасно в усіх трьох фазах.

У кожному із зазначених режимів напруга на фазах основного трансформатора формується

з відрізків окремих синусоїд. Більша частина діапазону регулювання відповідає II-му режиму роботи. Напруги і струми цього режиму показано на рис. 6, де $u_1 = ke_1$, $u_2 = ke_2$, $u_3 = ke_3$ – напруги первинної і вторинної обмоток основного трансформатора (індуктивностями розсіювання та активними опорами трансформатора нехтуємо). Якщо від'ємний вольтодобуток у фазах *A* і *B* відсутній, то $u_1 = ke_1 = ku_{AB}$, де u_{AB} – лінійна напруга мережі, від якої живиться основний трансформатор. Якщо від'ємний вольтодобуток діє тільки у фазі *A* або тільки у фазі *B*, або одночасно у фазах *A* і *B*, то $u_1 = ke_1 = u_{AB} - u''_1 = u_{ab}$, або $u_1 = ke_1 = u_{AB} + u''_2 = u_{ab}$, або $u_1 = ke_1 = u_{AB} - u''_1 + u''_2 = u_{ab}$ відповідно. На рис. 6 зображено також результуючий струм i_{BX} для режиму, коли основний трансформатор і ВДТ живляться від однієї мережі. При побудові графіків, показаних на рис. 6, а також на всіх наступних рисунках коефіцієнт трансформації основного трансфор-

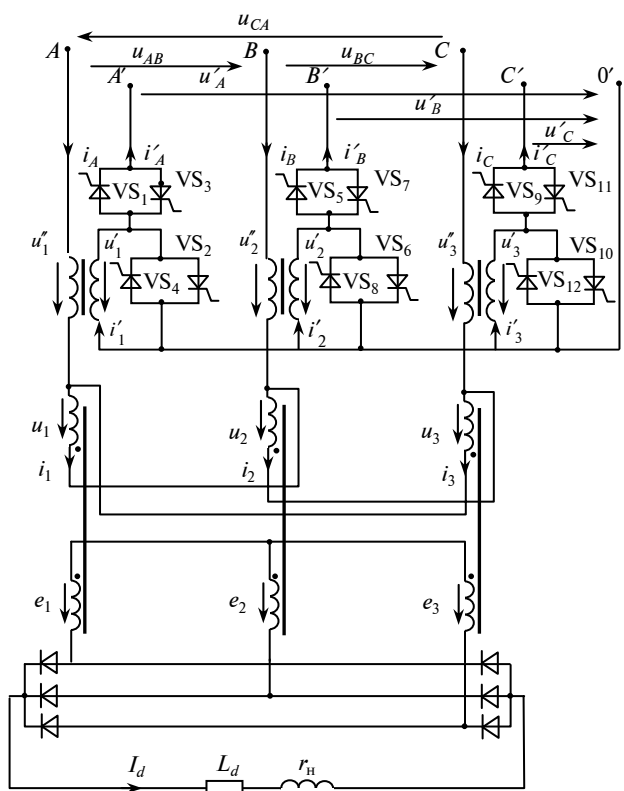


Рис. 5. Система регулювання випрямленої напруги однофазними ВДТ з увімкненням їхніх вторинних обмоток у лінійні проводи

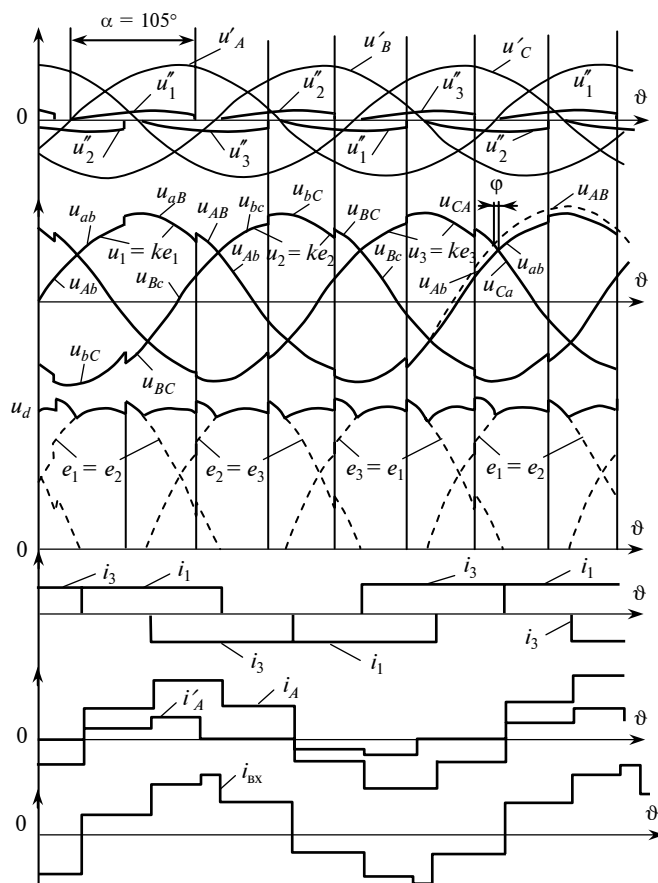


Рис. 6. Графіки миттєвих напруг і струмів у системі регулювання (рис. 5)

матора $k = 1$, коефіцієнт трансформації ВДТ $n = 6$.

Аналіз процесів показав, що у I і III-му режимах роботи комутація вентилів у мості відбувається у той же момент часу, що й за відсутності ВДТ, оскільки в обох комуючих фазах дія ВДТ або не проявляється (I режим), або проявляється одночасно (III режим). Режиму II притаманне певне запізнення моменту комутації, спричинене тим, що у черговій фазі діє від'ємний вольтодобуток, а у попередній його немає. Вказаному запізненню відповідає кут φ , значення якого залежить від коефіцієнта трансформації n ВДТ і впливає на енергетичні показники системи регулювання.

Трьом режимам роботи системи відповідають три аналітичні вирази регульовальної характеристики випрямляча:

$$\text{I режим: } U_d^* = \frac{3}{\pi} \left[3 + \frac{1}{n} (\cos \alpha - 1) \right];$$

$$\text{II режим: } U_d^* = \frac{3}{\pi} \left[3 \cos \varphi - \frac{1}{n} \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) + \frac{2}{n} \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{2}{n} \cos \alpha \right];$$

$$\text{III режим: } U_d^* = \frac{3}{\pi} \left[3 \left(1 - \frac{1}{n} \right) + \frac{1}{n} (1 + \cos \alpha) \right],$$

де U_d^* – відношення середнього значення випрямленої напруги до амплітуди фазної напруги мережі. Регульовальну характеристику показано на рис. 7.

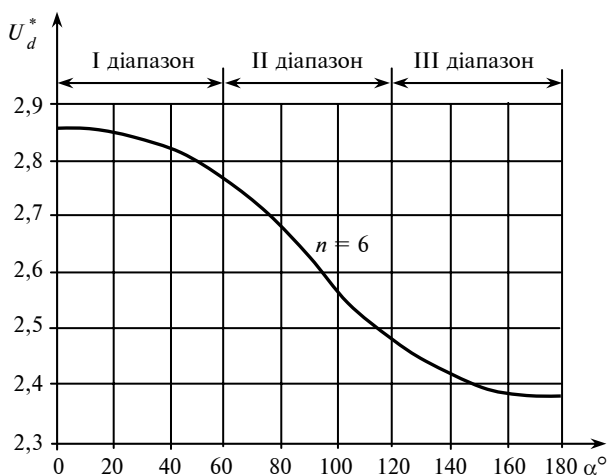


Рис. 7. Регульовальна характеристика системи (рис. 5)

Енергетичні характеристики системи (коефіцієнт зсуву $\cos \varphi$, коефіцієнт спотворення k_c , коефіцієнт потужності k_p) показано на рис. 8 у вигляді графіків їх залежності від відносної величини U_d^* випрямленої напруги. Для порівняння на рис. 8 зображено відповідні графіки у разі фазового регулювання тиристорного випрямляча.

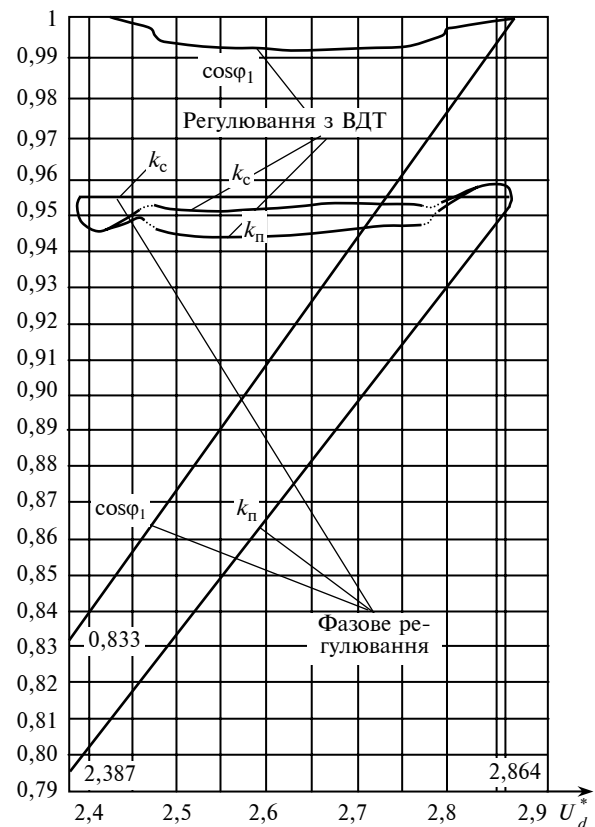


Рис. 8. Енергетичні характеристики системи регулювання (рис. 5)

Регулювання випрямленої напруги трьома однофазними ВДТ при з'єднанні первинної обмотки трансформатора зіркою. Аналіз процесів показав, що за наявності нульового проводу в основному трансформаторі виникають струми нульової послідовності, які спотворюють режим роботи.

За відсутності нульового проводу струми нульової послідовності проходити не будуть, а напруга нульової послідовності прикладена між нульовими точками мережі і первинної обмотки основного трансформатора. Така схема може бути рекомендована для практичного використання.

Висновки

Для відносно невеликого діапазону регулювання (до 20 %) використання ВДТ забезпечує коефіцієнти зсуву ($\cos \varphi$) і спотворення струму мережі (k_c), які відрізняються від аналогічних коефіцієнтів некерованого випрямляча не більше ніж на 1 %.

Використання трифазного ВДТ призводить до появи у ньому значних струмів нульової послідовності, які частково трансформуються в основний трансформатор і негативно впливають на режим роботи системи регулювання.

Використання трьох однофазних ВДТ, вторинні обмотки яких увімкнені послідовно зі

з'єднаною трикутником первинною обмоткою основного трансформатора, не запобігає появі струмів нульової послідовності в основному трансформаторі і тому також спотворює роботу системи регулювання.

Найбільш доцільним слід вважати ввімкнення вторинних обмоток ВДТ у лінійні проводи з'єднаної трикутником первинної обмотки основного трансформатора, що дає змогу позбавитись спотворювального впливу струмів нульової послідовності.

Перспективою досліджень систем регулювання випрямленої напруги з ВДТ є аналіз їхніх динамічних характеристик.

1. *Чиженко А.И., Курило И.А.* Управление вентиляльным регулятором переменного напряжения // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 36–41.
2. *Волков И.В., Чиженко А.И., Курило И.А.* Трёхфазный вентиляльно-дрессельный преобразователь переменного напряжения // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. – 2010. – Вип. 26. – С. 90–94.
3. *Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И.* Основы преобразовательной техники. – К.: Вища школа, 1983. – 432 с.
4. *Розанов Ю.К.* Силовая электроника. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 632 с.
5. *Липковский К. А.* Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наук. думка, 1985. – 214 с.
6. *Новський В.А., Капличний Н.Н., Голубев В.В.* Застосування трансформаторно-тиристорних перетворювачів багатофункціонального призначення у локальних системах електроспоживання // Силова електроніка та енергоефективність: Зб. наук. пр. – К.: Ін-тут електродинаміки НАНУ, 2011. – С. 33–38.
7. *Дослідження та розробка напівпровідниково-трансформаторних перетворювачів для живлення електротехнологічного обладнання / К.О. Липківський, В.В. Мартинов, Ю.В. Руденко и др.* // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. – 2009. – Вип. 23. – С. 72–82.
8. *Курило І.А., Грудська В.П.* Особливості системи регулювання напруги з вольтододатковим трансформатором, комутованим вентилями // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2011. – № 2. – С. 20–27.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
17 січня 2012 року