

П. П. Говоров<sup>1</sup>  
В. П. Говоров<sup>1</sup>  
О. В. Король<sup>1</sup>

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ВОЛЬТОДОДАВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В ЯКОСТІ АКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ SMART GRID

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

*Досліджено режими роботи вольтододавальних трансформаторів з електронним керуванням. Визначені умови надійної і економічної роботи трансформаторів в квазіусталених режимах у складі Smart-Grid систем.*

**Ключові слова:** активний елемент, вольтододавальний трансформатор, Smart-Grid система, надійність, економічність.

### Вступ

Одним з найважливіших елементів інтелектуальних електроенергетичних систем (ЕЕС), що виконані на основі концепції Smart Grid, є силові активні елементи (АЕ). Їх досконалість значною мірою визначає ефективність функціонування Smart Grid [1] систем, в цілому. Тому, вибір конструкції та забезпечення умов надійної і економічної роботи активних елементів, є важливою задачею інтелектуалізації ЕЕС.

Важливе місце серед АЕ займають пристрої силової електроніки, виконані на базі вольтододавальних трансформаторів (ВДТ) з електронним управлінням. Їх застосування в електричних мережах середньої і низької напруги у поєднанні із плавним або плавно-ступінчастим способом управління в змозі значно розширити функціональні можливості Smart Grid систем, ефективність і якість функціонування електричних мереж і, підключених до них, споживачів. Проте, через особливості схеми приєднання ВДТ до мережі, існують особливості його роботи спільно з електронними елементами. Це відноситься до характеру зміни ЕРС і струмів в його обмотках і зумовлює зниження надійності і економічності роботи ВДТ, а також підключених до них споживачів. Означене робить необхідним дослідження особливостей роботи ВДТ з електронними елементами, з метою забезпечення умов їх надійної і економічної роботи.

Дослідженням роботи ВДТ з різними постановками завдання в різні роки займалися А. К. Шидловський, В. Г. Кузнецов, К. А. Липківський, В. А. Новський та ін. В їх роботах висвітлюються, в більшості своїй, дослідження статичних режимів ВДТ. Водночас робота ВДТ в квазіусталених режимах має низку особливостей, які суттєво впливають на надійність і якість їх роботи у складі Smart-Grid систем. Це вимагає проведення додаткових досліджень роботи ВДТ в квазіусталених режимах.

### Результати дослідження

Робота ВДТ з тиристорним ключем у поєднанні з часо-імпульсним способом керування характеризується наявністю низки особливостей, пов'язаних із зміною величини і тривалості протікання струмів в обмотках. Очевидним є той факт, якщо тривалість протікання струму  $I_1$  перевищує кут  $\pi$  (рис. 1), то при кутах регулювання вентилів  $\alpha < \pi - \beta$ , де  $\beta$  — кут включеного стану тиристора, подача сигналу керування напруги на тиристор, що включається, станеться в момент, коли напруга на тиристорі дорівнює нулю, або має зворотню полярність, тоді останній відключиться. В той же час, відсутність струму в попередній напівперіод, створює можливість для успішного включення іншого з групи зустрічно-паралельно включених тиристорів в наступний напівперіод, незалежно від співвідношення між  $\alpha$  і  $\beta$ . В результаті трансформатор переходить в режим одностороннього

підмагнічування, який характеризується включенням одного з групи зустрічно-паралельно включених тиристорів і значним збільшенням первинного струму  $I_1$ . При цьому, внаслідок насичення магнітної системи, збільшиться тривалість протікання струму  $I_1$  в первинній обмотці і повернення трансформатора в нормальний режим стане можливим вже при іншому куті  $\alpha' > \alpha$ .

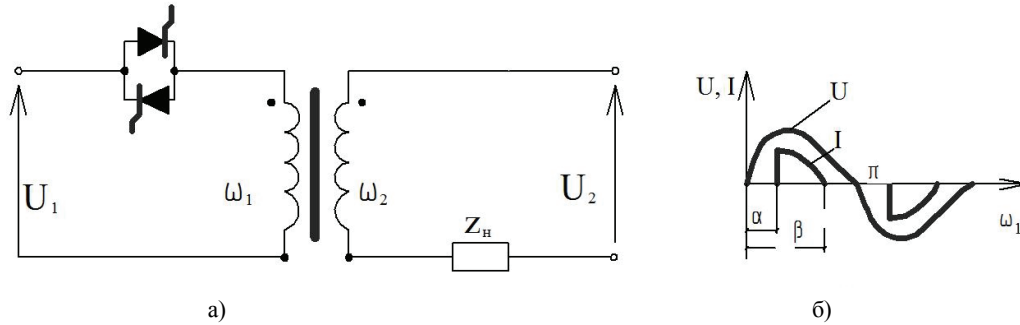


Рис. 1 : схема (а) і характер вимірювань струму  $I$  в ланцюзі первинної обмотки (б) ВДТ з тиристорним управлінням

Відповідно, при  $\alpha > \pi - \beta$  на ділянці напівперіоду, рівному  $\pi - \beta$ , тиристори знаходяться в стані малої провідності і трансформатор працює в режимі холостого ходу з живленням по вторинному ланцюгу. Робота ВДТ в цьому режимі визначається величиною напруги  $U_2$ , модулем і фазою опору вторинного ланцюга  $Z_{2П}$ , значним збільшенням напруги на тиристорах, при  $\alpha > \pi - \beta$ , або багатократним збільшенням струму  $I_1$ , при  $\alpha < \pi - \beta$ .

За цих обставин умови надійної роботи ВДТ з тиристорами в ланцюзі первинної обмотки можуть бути записані у вигляді:  $\alpha > \pi - \beta + \gamma$ , де  $\gamma$  — кут утримання вентилів. При цьому, кут включення вентилів  $\alpha = \pi - \beta + \gamma$  є критичним ( $\alpha_{кр}$ ). Зі зменшенням кута включення вентилів до величини  $\alpha < \alpha_{кр}$  або збільшенням тривалості протікання струму  $\beta$  в ланцюзі первинної обмотки до величини  $\beta > \pi + \alpha - \gamma$  трансформатор переходить в один з аварійних режимів: дросельний або одностороннього підмагнічування.

Основні кількісні співвідношення, що характеризують роботу ВДТ в цих режимах, отримані використанням схеми заміщення рис. 2а. Процеси в схемі заміщення описуються системою лінійних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} U_1 &= i_1 r_{1П} + L_{\sigma 1П} \frac{di_1}{dt} + L_M \frac{di_0}{dt}; \\ U_2' &= i_2' r_{2П}' + L_M \frac{di_0}{dt}; \\ i_0 &= i_1 + i_2'. \end{aligned} \tag{1}$$

Після еквівалентних перетворень схема рис. 2а набуває простішого вигляду, виходячи з таких допущень (рис. 2б):

$$U_{\mathcal{E}} = \frac{U_2' x_m^2}{R_H'^2 + x_m^2}; \quad Z_{\mathcal{E}} = \frac{R_H' x_m}{R_H' + x_m} = \frac{R_H' x_m^2 + R_H'^2 x_m}{R_H'^2 + x_m^2}.$$

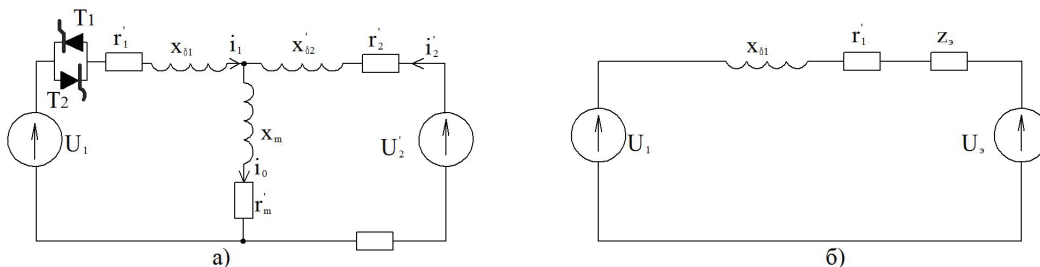


Рис. 2

Для оцінювання впливу режимів роботи і параметрів ВДТ на значення кута включення вентилів  $\alpha$  в квазістаціонарних режимах достатнім є розв'язок (1) у вигляді

$$I_1 = \frac{\left[ \pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2 + U_2' R_H' x_m \right]}{\left( R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}^2 \right) + \left( R_H'^2 x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1} \right)}. \quad (2)$$

Звідки

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{\left( R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}^2 \right) - \left[ \pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + \left( R_H'^2 x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1} \right) \right]}{\left[ \pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U_2' x_m^2 \right] \left( R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} \right) + U_2' R_H' x_m \left( R_H'^2 x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1} \right)}. \quad (3)$$

Як випливає з (3),  $\alpha_{кр}$  є знакозмінною функцією параметрів  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $R_H$ ,  $x_m$ ,  $r_{1\Pi}$ ,  $x_{\sigma 1}$  і змінюється зі зміною режимів роботи ВДТ, навантаження і стану магнітної системи. При цьому в режимі зустрічного включення при  $U_1(R_H'^2 + x_m^2) > U_2' x_m^2$  кут  $\alpha_{кр} > 0$ , що відповідає випереджаючому струму  $I_1$ . У режимі малих навантажень опір навантаження не впливає на характер струму  $I_1$  і значення  $\alpha_{кр}$  визначається значенням  $x_m$  (станом магнітної системи)

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{x_m}{r_{1\Pi}}. \quad (4)$$

За ненасиченої магнітної системи  $x_m \gg r_{1\Pi}$  і  $\alpha_{кр} \approx 0$ . За значного насичення  $\alpha_{кр} \gg 0$ . Відповідно, за великих навантажень, коли  $R_H' \rightarrow 0$ , вплив контуру, що намагнічує, на характер зміни струму  $I_1$  зменшується і  $\alpha_{кр}$  визначається головним чином параметрами первинного кола

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1\Pi}}. \quad (5)$$

За номінальних навантажень залежно від характеру співвідношення  $R_H' \ll r_{1\Pi}$  слід розглядати роботу ВДТ при насиченій і ненасиченій магнітній системі.

У першому випадку опір контуру  $x_m$ , що намагнічує, значно більше опору навантаження, його впливом в першому наближенні можна нехтувати і розглядати схему у вигляді послідовно включених  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $R_H$ ,  $x_m$ ,  $r_{1\Pi}$ ,  $x_{\sigma 1}$  (див. рис. 2б).

В цьому випадку

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1\Pi} + R_H'}. \quad (6)$$

У другому випадку, опір контуру, що намагнічує, сумірно з опором навантаження  $R_H'$  і чинить істотний вплив на характер струму  $I_1$ . Нехтуючи впливом параметрів первинного ланцюга ( $r_{1\Pi}$ ,  $x_{\sigma 1}$ ), схему заміщення можна розглядати у вигляді паралельно сполучених опорів  $x_m$  і  $R_H'$ . Кут включення, при цьому, визначиться, як

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{R_H'}{x_m}. \quad (7)$$

Таким чином, критичний кут включення тиристорів  $\alpha_{кр}$  не є постійним, а змінюється зі зміною режимів роботи і параметрів ВДТ. Значення  $\alpha_{кр}$  за різного поєднання режимів роботи і параметрів ВДТ можуть бути визначені по (3). При цьому, оскільки тиристор замкнутий,  $r_{1\Pi} \approx 0$  і значення критичного кута повернення визначається практично параметрами вторинного ланцюга

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{R_H'}{x_m}. \quad (8)$$

Відповідно до викладеного, у зв'язку зі значною зміною опору  $x_m$  контуру, що намагнічує, при короткочасній втраті імпульсів або збільшенні тривалості проходження струму  $I_1$  до  $\beta_{кр} = \pi - \alpha + \gamma$ , трансформатор переходить в режим одностороннього підмагнічування.

Графічні залежності  $\alpha_{кр} = f(R_H', x_m, r_{1\Pi}, x_{\sigma 1})$ , отримані в результаті розрахунку по (3), приведені на рис. 2. Крива  $\alpha_{кр} = f(x_m)$  характеризує залежність критичного кута від стану магнітної системи і може бути використана для визначення значень критичного кута повернення  $\alpha'_{кр}$ . Як випливає з рис. 3, значення критичного кута повернення збільшується зі збільшенням насичення магнітної системи і прагне в граничному випадку до  $+\pi$ , при узгодженому включенні ВДТ, і до  $-\pi$  — при

зустрічному. Відмінність в характері кривих  $\alpha = f(x_m)$  для різних режимів можна пояснити різним характером взаємодії струмів  $I_1$  і  $I_0$ . У режимі узгодженого включення струм  $I_0$  зсунутий відносно струму  $I_1$  на кут, близький до  $+\pi/2$ , що зумовлює зсув останнього на кут  $\phi_1$ , у бік відставання. Відповідно, в режимі зустрічного включення зсуву струму  $I_0$  складає кут, близький до  $-\pi/2$  і його вплив позначається на зрушенні струму  $I_1$  у бік випередження.

У режимі зустрічного включення, опір  $R_H$  включений послідовно з еквівалентним опором первинного ланцюга і його вплив виражається в зменшенні індуктивної складової результуючого струму, оскільки при послідовному з'єднанні  $\phi = \text{arctg} \frac{\omega L}{R}$ .

Аналогічно пояснюється характер кривих  $\alpha_{кр} = f(x_{\sigma 1})$  з тією лише різницею, що в режимі узгодженого включення  $x_{\sigma 1}$  опиняється включеним послідовно з еквівалентним опором вторинного ланцюга, збільшуючи реактивну складову струму  $I_1$ . З тієї ж причини, в режимі зустрічного включення, опір  $x_{\sigma 1}$  викликає зменшення критичного кута включення  $\alpha_{кр}$ , у зв'язку з підключенням його паралельно з опором контуру  $x_{\sigma 1}$ , що намагнічує. Наявність точки з  $\alpha_{кр} = 0$  і зміна знаку  $\alpha_{кр}$  пояснюється впливом опору  $r_{1П}$ . Точці  $\alpha_{кр} = 0$  відповідає значення  $x_{\sigma 1}$

$$x_{\sigma 1} = \sqrt{\frac{x_m^2 - r_{1П}}{\sin \phi_1}}, \quad (9)$$

при якому струм  $I_1$  знаходиться в протифазі зі струмом  $I_0$ . Подальше збільшення  $x_{\sigma 1}$  призводить до того, що струм  $I_1$  виявляється зміщеним на кут, більший  $\pi$  по відношенню до струму  $I_0$  і вплив  $I_0$  можна розглядати, як зсув струму  $I_1$  у бік відставання.

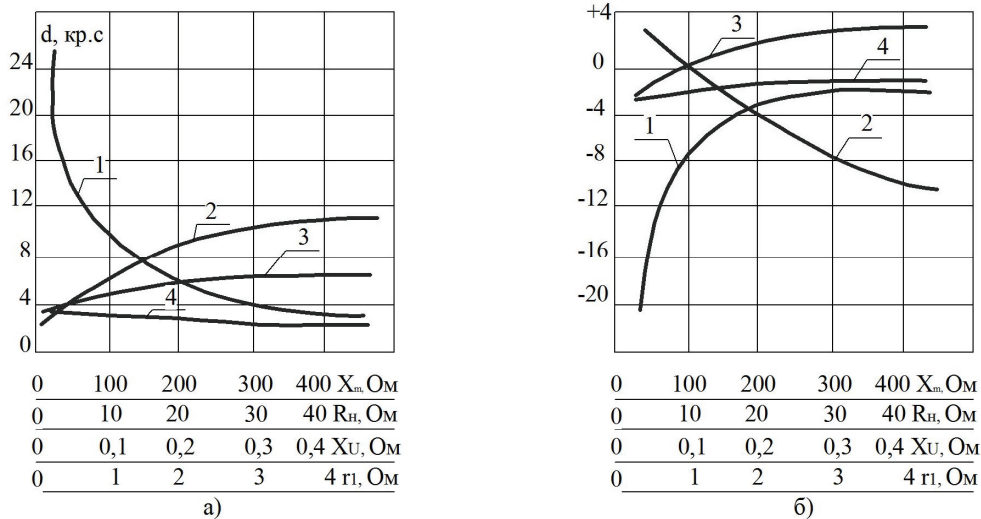


Рис. 3. Графічні залежності для режимів включення ВДТ: а — узгодженого; б — зустрічного, критичного кута включення тиристорів  $d_{кр}$  від: 1 — опору контуру  $x_m$ , що намагнічує; 2 — опору навантаження  $R_H$ ; 3 — опору розсіяння  $x_{\sigma 1}$ ; 4 — активного опору первинної обмотки  $r_1$

### Висновки

Проведені дослідження свідчать, що для забезпечення надійної і економічної роботи ВДТ у складі Smart-Grid системи в квазістаціонарних режимах потрібне врахування наявності і характеру зміни критичного кута відмикання тиристорів із зміною навантаження, режимів роботи і параметрів ВДТ. Останнє вимагає застосування спеціальних схем керування з синхронізацією напруги, керування, від струму і напруги тиристорів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаров В. В. Концепція Smart Grid і реальна енергетика / В. В. Назаров // Енергетика та електрифікація. — 2013. — № 6. — С. 12—15.
2. Шидловський А. К. Підвищення якості енергії в електричних мережах / А. К. Шидловський, В. Г. Кузнецов. — К. : Наукова Думка, 1985. — 268 с.
3. Швидкодіюче урівноваження трифазної чотирипровідної системи за допомогою трансформаторно-ключових перетворювачів / В. А. Новський, В. В. Голубев, А. В. Козлів, П. С. Бойка // Техн. електродинаміка. — Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». — 2007. — Ч. 3. — С. 7—12.

4. Липківський К. О. Оптимізація розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги / К. О. Липківський // Праці ІЕД НАНУ. — 2006. — № 2 (14). — С. 98—99.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.11.2015

**Говоров Пилип Парамонович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання міст, e-mail: govorov\_fp@mail.ru;

**Говоров Владлен Пилипович** — наук. співроб. наук.-дослідної частини;

**Король Ольга Вікторівна** — наук. співроб. наук.-дослідної частини.

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків

**P. P. Govorov<sup>1</sup>**

**V. P. Govorov<sup>1</sup>**

**O. V. Korol<sup>1</sup>**

## **The Features of Booster Transformers as an Active Element of Intelligent Systems On the Basis of Concepts Smart Grid**

<sup>1</sup>O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy

There have been investigated the modes of operation of electronically controlled booster transformers. The conditions for reliable and economic operation of transformers in the quasi-steady mode as part of Smart-Grid systems have been defined.

**Keywords:** active element, booster transformers, Smart-Grid system, reliability, economy.

**Govorov Pylyp P.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electric Power Supply of Cities, e-mail: govorov\_fp@mail.ru;

**Govorov Vladlen P.** — Research Assistant of the Scientific-Research Department;

**Korol Olga V.** — Research Assistant of the Scientific-Research Department

**Ф. П. Говоров<sup>1</sup>**

**В. Ф. Говоров<sup>1</sup>**

**О. В. Король<sup>1</sup>**

## **Особенности работы вольтодобавочных трансформаторов в качестве активного элемента интеллектуальных систем на основе концепции Smart Grid**

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

*Исследованы режимы работы вольтодобавочных трансформаторов с электронным управлением. Определены условия надежной и экономической работы трансформаторов в квазиустановившихся режимах в составе Smart-Grid систем.*

**Ключевые слова:** активный элемент, вольтодобавочный трансформатор, Smart-Grid система, надежность, экономичность.

**Говоров Филипп Парамонович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения городов, e-mail: govorov\_fp@mail.ru;

**Говоров Владлен Филиппович** — научн. сотр. научно-исследовательской части;

**Король Ольга Викторовна** — научн. сотруд. научно-исследовательской части