

УДК 621.316.722

Кривда В. І., канд. техн. наук,
Рудницький В. Г., канд. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИСТРОЮ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА РЕАКТИВНОГО ОПОРУ НА БАЗІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРУ

Анотація. В роботі наведено аналіз результатів дослідження та моделювання пристрою на базі силового трансформатора. Його застосування дозволяє регулювати напругу та реактивний опір, а також обмежити струм короткого замикання, контролювати та поліпшити якість електроенергії в електричних мережах споживача. Використання пристрою можливе як на існуючих трансформаторах з ПБЗ так і на стадії проектування при напрузі 6(10)/0,4 кВ, особливо при наближенні до центру живлення.

Ключові слова: пристрій регулювання напруги та реактивного опору, якість електроенергії, силовий трансформатор.

Кривда В. И., канд. техн. наук,
Рудницкий В. Г., канд. техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА БАЗЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Аннотация. В работе приведен анализ результатов исследования и моделирования устройства на базе силового трансформатора. Его применение позволяет регулировать напряжение и реактивное сопротивление, а также ограничить ток короткого замыкания, контролировать и улучшить качество электроэнергии в электрических сетях потребителя. Использование устройства возможно как на существующих трансформаторах с ПБВ так и на стадии проектирования при напряжении 6(10)/0,4 кВ, особенно при приближении к центру питания.

Ключевые слова: устройство регулирования напряжения и реактивного сопротивления, качество электроэнергии, силовой трансформатор.

Kryvda V., PhD.,
Rudnickij V., PhD.

RESEARCH OF OPERATING MODES OF THE DEVICE REGULATION OF TENSION AND JET RESISTANCE ON THE BASIS OF THE POWER TRANSFORMER

Abstract. The analysis results of research and modeling of the device on the basis of the power transformer is provided in work. It will allow to regulate tension and jet resistance, to limit current of short circuit, to control and improve quality of the electric power in electric networks of the consumer. Use of the device is possible as on the existing transformers with switching without excitement and design stage at a voltage of 6(10)/0,4 kV, especially at approach to the center of power.

Keywords: device regulation of tension and jet resistance, quality of the electric power, power transformer.

Вступ. З роками технологічний прогрес і зростаючі вимоги до способу життя, посилили критерії до надійності і якості електропостачання. Сучасне електронне устаткування досить чутливе до змін і безладів в системі електропостачання, які раніше ігнорувалися. Проблеми в електричних мережах можуть викликати логічні помилки, втрату даних, і незаплановані відключення, котрі можуть спричинити небажані uszkodження. Тому контроль за якістю електроенергії [1,2] є невід'ємною частиною в процесі експлуатації електричних мереж. Крім того, переважна більшість виникаючих недоліків носить непередбачуваний характер [3] та залежить від

впливу різноманітних факторів та чинників. Існують різні варіанти, які дозволяють своєчасно виявити і відкоригувати відхилення напруги, частоти, потужності з метою їх збереження в допустимих нормативних межах [4,5,6].

У цьому дослідженні проводиться аналіз роботи пристрою по регулюванню напруги і реактивного опору в різних режимах роботи електричної системи.

Описання схеми та принципу роботи пристрою регулювання напруги і реактивного опору. Схема пристрою для регулювання напруги та реактивного опору наведена на рис. 1.

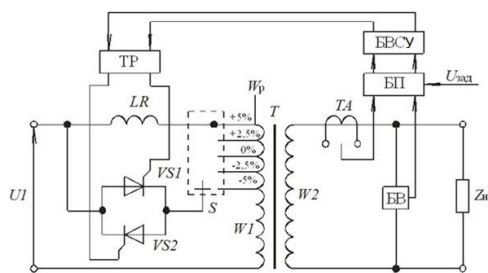


Рис. 1. Схема пристрою регулювання напруги та реактивного опору на трансформаторах з ПБЗ напругою 10/0,4 кВ

Пристрій виконаний на базі силового трансформатора T з переключенням без збудження (ПБЗ), має реактор, один вивід якого приєднано до електричної мережі змінного струму, а інший – до регульовальної обмотки W_p зі сторони протилежної їй приєднання до первинної обмотки $W1$, а також зустрічно паралельно включені тиристри, один кінець яких приєднаний до електричної мережі змінного струму, а інший – до регульовальної обмотки через блок для переключення відгалужень S .

Для приєднання реактора в трансформаторі T слід зробити три додаткових виводи, які можуть бути виконані в загальних прохідних ізоляторах високої напруги.

Зміна коефіцієнта трансформації трансформатора T , а так само перемикавання реактивного елемента LR в подовжнє, поперечне або в одно з проміжних положень здійснюється регулюванням кута відкриття тиристорів $VS1$, $VS2$. При зміні напруги на стороні НН трансформатора T блок виміру (БВ) визначає діюче значення напруги і подає сигнал у блок порівняння (БП), де вимірний сигнал порівнюється з еталонним ($U_{зад}$). У результаті порівняння подається сигнал розузгодження у блок вироблення сигналу управління (БВСУ), звідки сигнал управління через трансформатор роздільний (ТР) подається на електроди тиристорів, які управляють. Сигнал подається зрушеним на певний кут відкриття залежно від необхідної добавки напруги.

Особливістю схеми пристрою, який пропонується, є безперервна комутація кола, що істотно полегшує вибір тиристорів та режими їх роботи. Крім того, величина напруги на тиристорах та реактивних елементах істо-

тно нижче номінальної напруги електричної мережі.

Пристрій складається з ряду відомих елементів в порівняно простій конфігурації. Впровадження їх в експлуатацію не вимагає істотних конструктивних змін трансформаторів, але може спростити конструкцію існуючих трансформаторів з ПБЗ, оскільки потрібно тільки два виводи регульовальної обмотки W_p без проміжних відгалужень, що призводить до спрощення технології виробництва трансформаторів і, отже, до зменшення їх вартості.

Ця схема дозволяє здійснювати автоматичне швидкодіюче плавне (ступеневе) регулювання напруги під навантаженням, усувати коливання напруги, симетризувати напругу на вторинній обмотці трансформатора, зменшувати несинусоїдність напруги та струми короткого замикання.

До недоліку наведеної схеми пристрою слід віднести зменшення діапазону регулювання напруги за рахунок втрат напруги в реакторі при закритих тиристорах.

Пристрій для регулювання напруги і реактивного опору доцільно застосовувати на розподільних трансформаторах напругою 6(10)/0,4 кВ, які наближені до центру живлення, особливо у разі зустрічного регулювання напруги, коли на шинах центру живлення підтримується напруга на +5 % вище номінальної, а в деяких випадках і на +10 %.

Використання пристрою можливе як на діючих підстанціях, так і на тих, які вводяться в роботу і проектуються.

Пристрій швидкодіючого регулювання напруги і реактивного опору застосовано на двох дугових сталеплавильних печах ємкістю 6 тонн кожна, які мають у своїй комплектації електропічні трансформатори з ПБЗ і реактори, що дозволило отримати такі показники ефективності: зменшення розмаху коливань напруги в 1,4 разу, часу плавки на 13 %, рівнів шуму на 20 %, витрату електроенергії від 20 до 70 кВт·год на 1 т виплавленої сталі та підвищення продуктивності на 6–20 % [7].

За допомогою прикладної програми MATLAB Simulink [8] було виконано моделювання пристрою та проведено аналіз основних характеристик, параметрів режимів

роботи трансформатора з пристроєм та без нього.

Аналіз основних характеристик і параметрів режимів пристрою. 1) Робота трансформатора з ПБЗ без пристрою на відпайці «-5 %».

На рис. 2 показана загальна картина роботи трансформатора впродовж 0,2 с.

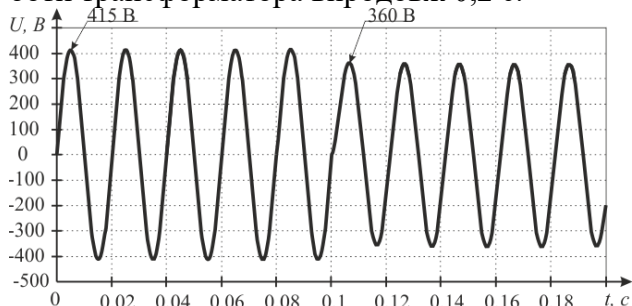


Рис. 2. Загальний вид напруги на шинах

НН трансформатора без пристрою на відпайці ПБЗ «-5 %» у разі зміни навантаження

У період часу 0–0,1 с трансформатор працює з мінімальним навантаженням. Напруга на шинах низької напруги (НН) трансформатора становить 415 В, що не є нормованою величиною нормально допустимих значень усталеного відхилення напруги.

В момент часу 0,1 с вмикається додаткове навантаження і напруга на шинах НН трансформатора знижується поступово до рівня 360 В, яка також не входить в нормований діапазон нормально допустимих величин усталеного відхилення напруги «-5 %» $U_{ном.л.НН}$.

Таким чином, у разі значної зміни навантаження в процесі експлуатації трансформатора з ПБЗ часто не можуть дотримувати нормований діапазон нормально допустимих величин усталеного відхилення напруги.

2) Робота системи з ПБЗ з пристроєм на відпайці «-5 %».

На рис. 3 показана загальна картина роботи трансформатора з пристроєм також на протязі часу 0,2 с. У період часу 0–0,1 с трансформатор працює з мінімальним навантаженням. Напруга на шинах НН трансформатора становить 378 В. У момент часу 0,1 с вмикається додаткове навантаження, напруга знижується. Напруга на шинах НН трансформатора у період часу 0,1–0,2 с становить 385 В (без пристрою 360 В), що входить в допустимий діапазон зміни напруги «+5 %».

Таким чином, в момент часу 0,1 с, коли вмикається навантаження, пристрій спрацьовує (тиристри відкриті) і дає добавку напруги 25 В у порівнянні з роботою без пристрою.

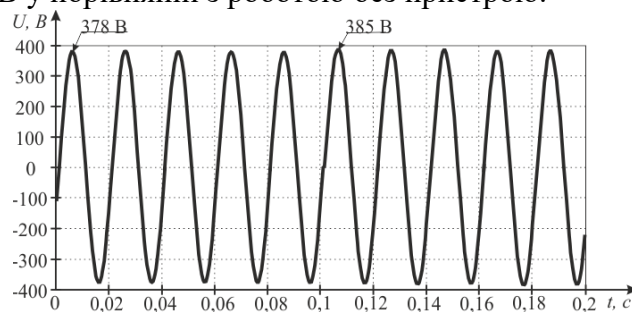


Рис. 3. Загальний вид напруги на шинах НН трансформатора з пристроєм на відпайці ПБЗ «-5 %» у разі зміни навантаження

3) Режим короткого замикання

На рис. 4 наведено графік струму в трансформаторі без пристрою в режимі КЗ. Величина струму досягає величини 2500 А.

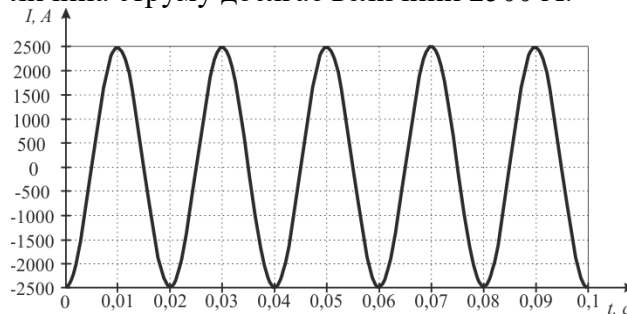


Рис. 4. Струм через трансформатор без пристрою у режимі короткого замикання

На рис. 5 наведено графік струму в трансформаторі з пристроєм в режимі короткого замикання. Величина цього струму дорівнює 2000 А. За рахунок введення реактора струм короткого замикання знижується на 500 А, що також є перевагою даного пристрою.

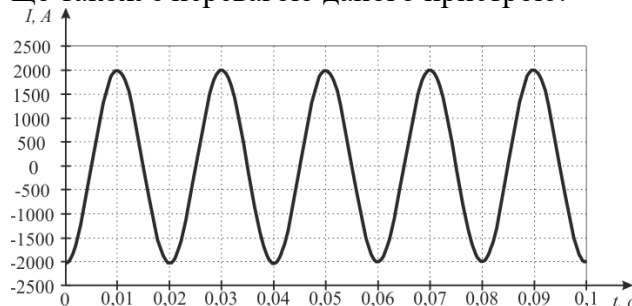


Рис. 5. Струм через трансформатор з пристроєм у режимі короткого замикання

Результати. Моделювання пристрою в системі MATLAB Simulink показало, що даний пристрій може бути застосованим як для

зниження, так і для підвищення напруги під навантаженням без відключення від електричної мережі на трансформаторі з ПБЗ [9,10,11]. Напруга на шинах НН трансформатора без пристрою в режимі мінімальних навантажень становить 410 В і в режимі максимальних навантажень – 360 В, а напруга на шинах НН трансформатора з пристроєм становить 378 В і 385 В відповідно, що не виходить за межі нормально допустимих величин усталеного відхилення напруги $\pm 5\%$ від $U_{\text{ном.л.НН}}$.

Графіки показали, що регулювання напруги має плавний характер. Крім того, даний пристрій дозволяє обмежувати струми короткого замикання за рахунок введення реактора при закритих тиристорах (струм короткого замикання знижується на 500 А).

Висновок. Проведений аналіз основних характеристик і параметрів режимів пристрою показав такі його переваги у порівнянні з існуючими трансформаторами з ПБЗ: можливість плавного регулювання напруги під навантаженням, обмеження струмів КЗ. Багатофункціональний пристрій регулювання напруги і реактивного опору може бути застосований в міських, промислових і сільських електричних мережах для поліпшення якості електроенергії як на існуючих трансформаторах з ПБЗ так і на проєктованих.

Список використаних джерел

1. Базюк Т. М. Порівняння стандартів якості електричної енергії [Текст] / Т. М. Базюк, Д. Ю. Ільченко, І. П. Радиш // Матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина». – К. : КПІ. – 2013. – С. 341 – 348. URL: <http://en.iee.kpi.ua/files/2013/konference2013.pdf>
2. Karandaev A. S. Improving Electric Power Quality within the Power Supply System of Wide-strip Hot-rolling Mill Stand // A. S. Karandaev, G. P. Kornilov, V. R. Khrumshin, T. R. Khrumshin / Procedia Engineering. – 2015. – vol. 129 – pp – 2 – 8. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.002
3. Vojin I. Kostic An alternative approach for touch and step voltages measurement in high-voltage substations // Vojin I. Kostic,

Nebojsa B. Electric Power Systems Research. – 2016 – vol. 130 – pp – 59–66. doi:10.1016/j.epr.2015.08.023

4. Vega A. M. Modeling for home electric energy management: A review / A.M. Vega, F. Santamaria, E. Rivas // Renewable and Sustainable Energy Reviews – Vol. 52, – 2015 – pp – 948–959. doi:10.1016/j.rser.2015.07.023

5. Ягуп Е. А. Моделирование системы электроснабжения с активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму / Е. А. Ягуп // Восточно-европейский журнал передовых технологий - Том 1, № 8(79), 2016, pp 52 – 58. doi:10.15587/1729-4061.2016.59538

6. Agrawal, A. Comparison of Various Configurations of Hybrid Active Filter With Three Different Control Strategies [Text] / A. Agrawal // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2014. – Vol. 3, Issue 5. – P. 1672–1678. Url:<http://www.ijert.org/view-pdf/9886/comparison-of-various-configurations-of-hybrid-active-filter-with-three-different-control-strategies>

7. Рудницький В. Г. Ефективність роботи дугової електропечі з пристроєм регулювання напруги і реактивного опору. // У зб. доповідей: Управління енерговикористанням. – К.: Альянс за збереження енергії, 2002. – С. 503-509.

8. Дьяконов, В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя [Текст] / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

9. Robbins B.A., Zhu H., and Dominguez-Garcia A.D., (2015), Optimal tap Setting of Voltage Regulation Transformers in Unbalanced Distribution Systems, Power Systems, IEEE Transactions, pp. 1 – 12. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2392693

10. Калинин Л. Применение Simulink (Matlab) для анализа энергетических характеристик классического фазорегулирующего трансформатора / Л. Калинин, Д. Зайцев, М. Тыршу, In: Problemele Energeticii Regionale. No. 2 (16) / 2011. Url: <http://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyj-zhurnal-n-216-2011>.

11. Szcześniak P. Power electronics converters without DC energy storage in the future electrical power network / Paweł Szcześniak, Jacek Kaniewski // *Electric Power Systems Research* – Vol. 129, - 2015 – pp - 194–207. doi:10.1016/j.epsr.2015.08.006

Получено 10.05.2016

References

1. Bazjuk T.M. Porivnjannja standartiv jakosti elektrychnoi' energii' [Comparison of electric power quality standards], (2013)// T.M. Bazjuk, D.Ju. Il'jenko, I.P. Radysh / *Energetyka. Ekologija. Ljudyna, KPY*, , – s. 341 – 348 (In Ukrainian)

2. Karandaev A. S. Improving Electric Power Quality within the Power Supply System of Wide-strip Hot-rolling Mill Stand // A. S. Karandaev, G. P. Kornilov, V. R. Khrumshin, T. R. Khrumshin / *Procedia Engineering*. – 2015. – vol. 129 – pp – 2 – 8. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.002

3. Vojin I. Kostic An alternative approach for touch and step voltages measurement in high-voltage substations // Vojin I. Kostic, Nebojsa B. *Electric Power Systems Research*. – 2016 – vol. 130 – pp – 59–66. doi:10.1016/j.epsr.2015.08.023

4. Vega A. M. Modeling for home electric energy management: A review / A.M. Vega, F. Santamaria, E. Rivas // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – Vol. 52, – 2015 – pp – 948–959. Doi:10.1016/j.rser.2015.07.023

5. Yagup E. A. Modelirovanie sistemy jelektrosnabzhenija s aktivnym fil'trom, upravljajemym po optimizacionnomu algoritmu [simulation of the power supply system with an active filter, controlled by the optimization algorithm], (2016), *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*; Kharkov, Ukraine, Vol 1, No 8(79) pp 52 – 58 (In Russian). doi:10.15587/1729-4061.2016.59538

6. Agrawal A. Comparison of Various Configurations of Hybrid Active Filter With Three Different Control Strategies [Text], (2014), *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 3, Issue 5. – P. 1672–1678. Url: <http://www.ijert.org/view-pdf/9886/comparison-of-various-configurations->

[of-hybrid-active-filter-with-three-different-control-strategies](#)

7. Rudnic'kij V. G. Efektivnist' robo-ti dugovoi' elektropechi z pristroem regulju-vannja naprugi i reaktivnogo oporu. [Efficiency of work of the arc electric furnace with the device regulation of tension and jet resistance], (2002), *Management of power use*, Kiev, pp. 503-509. (In Ukrainian)

8. Diakonov V. P. (2002). MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Osnovi prymenenija. Polnoe rukovodstvo polzovatelja. Moscow: SOLON-Press, 768. (In Russian)

9. Robbins B.A., Zhu H., and Dominguez-Garcia A.D., (2015), Optimal tap Setting of Voltage Regulation Transformers in Unbalanced Distribution Systems, *Power Systems, IEEE Transactions*, pp. 1 – 12. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2392693

10. Kalinin L., Primenenie SIMULINK(MATLAB) dlya analiza energeticheskikh kharakteristik klassicheskogo fazoreguliruyushchego transformatora / L. Kalinin, D. Zaitsev, M. Tyrshu // *În: Problemele energeticii regionale*. nr.2(16)/2011. www.ie.asm.md (In Russian)

11. Szcześniak P. Power electronics converters without DC energy storage in the future electrical power network / Paweł Szcześniak, Jacek Kaniewski // *Electric Power Systems Research* – Vol. 129, - 2015 – pp - 194–207. doi:10.1016/j.epsr.2015.08.006



Кривда Вікторія Ігорівна,
к. т. н., доцент каф. електропостачання та енергетичного менеджменту Одеськ. нац. політехн. ун-ту, м. Одеса, пр. Шевченко 1, 65044
Тел. (048) 705-85-48
E-mail: kryvda_v_i@ua.fm



Рудницький Вальдемар
Генрихович, к. т. н., доцент каф. електропостачання та енергетичного менеджменту Одеськ. нац. політехн. ун-ту, м. Одеса, пр. Шевченко 1, 65044
Тел. (068) 252-93-00
E-mail: r_v_g@ukr.net