

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИСТРОЮ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА РЕАКТИВНОГО ОПОРУ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 6 (10) кВ

В. Г. Рудницький, А. А. Савельєв

Одеський національний політехнічний університет

Анотація. В статті наведені схема пристрою регулювання напруги та реактивного опору з новою елементною базою, принцип її роботи. Виконаний приклад вибору параметрів основних елементів пристрою. Проведене техніко-економічне порівняння, яке підтверджує економічну ефективність використання пристрою. Наведені основні переваги застосування.

Ключові слова: пристрій регулювання напруги та реактивного опору, транзистор, реактор, коефіцієнт трансформації трансформатора, переключення без збудження, регулювання під навантаженням, розподільна електрична мережа.

Вступ

Одним з основних показників якості електроенергії є усталене відхилення напруги [1], яке регулюється за допомогою різних засобів та пристроїв.

Регулювання напруги на розподільних трансформаторах в електричних мережах напругою 6 (10) кВ здійснюється зміною коефіцієнта трансформації перемиканням відгалуження обмотки зі сторони високої напруги (ВН) або низької напруги (НН).

Найбільш поширеним варіантом регулювання напруги на розподільних трансформаторах є застосування пристрою для переключення відгалужень обмотки без збудження (ПБЗ) при відключеному трансформаторі.

Коли необхідне часте регулювання напруги, то використовується пристрій для переключення відгалужень під навантаженням (РПН) без відключення трансформатора. Експлуатація трансформаторів з РПН є зручною для регулювання напруги, але цей варіант коштує набагато дорожче ніж трансформатор з ПБЗ.

Актуальною є проблема розроблення та застосування пристроїв регулювання напруги, які поєднують переваги існуючих варіантів.

1 Пристрій регулювання напруги та реактивного опору з новою елементною базою

Пристрій для регулювання напруги та реактивного опору (далі пристрій) на основі силового трансформатора з ПБЗ в порівнянні з [2] (рис. 1) має нову елементну базу: замість зустрічно-паралельних тиристорів використовується IGBT-транзистори.

Основним недоліком тиристорів є неповна керованість і низька швидкодія ніж у транзисторів.

© Рудницький В. Г., Савельєв А. А. 2017

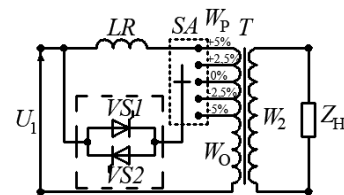


Рис.1 – Схема існуючого пристрою регулювання напруги та реактивного опору

Перевага використання IGBT-транзисторів полягає в високій робочій частоті, яка забезпечує безперервне управління вихідною напругою, та в способі керування за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Попередні дослідження пристрою на математичній моделі доказує його працездатність [3].

1.1 Схема та основні елементи пристрою

Схема пристрою (рис. 2) складається з силового трансформатора T з ПБЗ, який має первинні основну W_0 та регульовальну W_p обмотки, вторинну обмотку W_2 та перемикач SA ; струмообмежувального реактора LR , що приєднаний одним з кінців до регульовальної обмотки W_p трансформатора T , а іншим до електричної мережі; модулю IGBT-транзисторів, який підключений паралельно до регульовальної обмотки W_p трансформатора T через реактор LR .

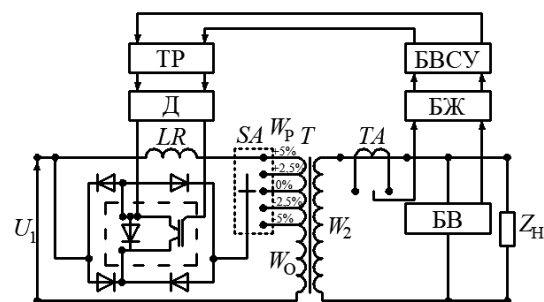


Рис.2 – Схема пристрою з новою елементною базою

Блок виміру (БВ) отримує інформацію про діюче значення напруги в електричній мережі на стороні НН трансформатора T та надсилає відповідний сигнал до блоку порівняння (БП). Якщо є зміна амплітуди напруги, то наступний сигнал надходить до блоку вироблення сигналу управління (БВСУ), звідки сигнал управління поступає до драйвера (Д) транзистора через роздільний трансформатор (ТР). Керування транзистором виконується в Д за принципом ШІМ (змінюючи коефіцієнт заповнення імпульсів γ , отримуються різні значення середньої напруги на транзисторі).

1.2 Принцип роботи пристрою

При зміні напруги на вторинній обмотці W_2 трансформатора T виконується керування коефіцієнту заповнення імпульсів γ модулів IGBT-транзисторів у діапазоні від 0 до 1 в Д за допомогою ШІМ, що дозволяє змінювати коефіцієнт трансформації на трансформаторі відповідно до вимог режиму напруги. Пристрій також може працювати в режимі повністю відкритих транзисторів (коефіцієнт заповнення імпульсів $\gamma = 1$), тоді добавка напруги на стороні НН трансформатора максимальна, а у разі повністю закритих транзисторів (коефіцієнт заповнення імпульсів $\gamma = 0$) – добавка напруги мінімальна. Залежно від положення перемикача SA змінюється діапазон регулювання напруги.

2 Вибір параметрів елементів пристрою

Вибір основних параметрів елементів пристрою виконується на прикладі трансформатору з номінальною потужністю 1600 кВА та номінальною первинною напругою 10 кВ і вторинною 0,4/0,23 кВ. Технічні дані трансформатору приймаються згідно з каталогом[4].

2.1 Вибір реакторів

Номінальна напруга реактора вибирається за формулою

$$U_{\text{ном.р}} \geq U_{\text{ном.рег.обм}}, \text{ кВ}, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{ном.рег.обм}}$ – номінальна напруга регулювальної обмотки трансформатора, кВ.

За формулою (2.1)

$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}.$$

Номінальний струм реактора вибирається як

$$I_{\text{ном.р}} \geq I_{\phi} = \frac{S_{\text{ном.т}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном.т.ВН}}}, \text{ А}, \quad (2.2)$$

де $I_{\text{ном.р}}$ – номінальний струм реактора, А;

I_{ϕ} – струм форсованого режиму, А;

$S_{\text{ном.т}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА;

$U_{\text{ном.т.ВН}}$ – номінальна напруга трансформатора сторони ВН, кВ.

За формулою (2.2)

$$250 \text{ А} > \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10} = 92,4 \text{ А}.$$

Загальний необхідний опір реактора визначається так:

$$x_{\text{р}}^{\text{необ}} = x_{\text{рез}}^{\text{необ}} - x_{\text{рез}}, \text{ Ом}, \quad (2.3)$$

де $x_{\text{рез}}$ – результуючий опір кола короткого замикання (КЗ) до установки реактора, Ом;

$x_{\text{рез}}^{\text{необ}}$ – необхідний опір кола для обмеження струму КЗ до величини $I_{\text{п0}}^{\text{необ}}$, Ом.

Результуючий опір кола КЗ до установки реактора визначається за формулою

$$x_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{ном.т.ВН}}}{\sqrt{3} I_{\text{п0}}}, \text{ Ом}, \quad (2.4)$$

де $I_{\text{п0}}$ – початкове значення періодичної складової струму КЗ, кА(приймається рівним $I_{\text{п0}} = 10 \text{ кА}$).

За формулою (2.4)

$$x_{\text{рез}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 10} = 0,58 \text{ Ом}.$$

Необхідний опір трансформатора визначається як

$$x_{\text{рез}}^{\text{необ}} = \frac{U_{\text{ном.рег.обм}}}{I_{\text{ном.т.ВН}}} - 0,1 \cdot x_{\text{т}}, \text{ Ом}, \quad (2.5)$$

де $I_{\text{ном.т.ВН}}$ – номінальний струм на стороні ВН трансформатора, А;

$x_{\text{т}}$ – індуктивний опір трансформатора, Ом.

Індуктивний опір трансформатора визначається так:

$$x_{\text{т}} = \frac{u_{\text{k}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном.т.ВН}}^2}{S_{\text{ном.т}}}, \text{ Ом}, \quad (2.6)$$

де u_{k} – напруга КЗ, %.

За формулами (2.6), (2.5) та (2.3) відповідно

$$x_r = \frac{6,0}{100} \cdot \frac{10^2}{1600} = 0,00375 \text{ Ом},$$

$$x_{рез}^{необ} = \frac{100}{92,4} - 0,1 \cdot 0,00375 = 1,08 \text{ Ом},$$

$$x_p^{необ} = 1,08 - 0,58 = 0,5 \text{ Ом}.$$

За каталогом [5] попередньо вибирається реактор типу РТСТ-10-250-0,87УЗ.

Вибраний реактор перевіряється на електродинамічну стійкість за формулою

$$i_{дин} \geq i_{уд} = k_{уд} \sqrt{2} I_{п0}, \quad (2.7)$$

де $i_{дин}$ – номінальний струм електродинамічної стійкості, кА;

$i_{уд}$ – розрахунковий ударний струм, кА;

$k_{уд}$ – ударний коефіцієнт;

$I_{п0}$ – фактичне значення періодичної складової струму КЗ за реактором, кА.

Фактичне значення періодичної складової струму визначається як

$$I_{п0} = \frac{U_{ном.т.ВН}}{\sqrt{3} x_{рез}'}, \text{ кА}, \quad (2.8)$$

де $x_{рез}'$ – результуючий опір кола КЗ з урахуванням реактора, Ом.

Результуючий опір кола КЗ з урахуванням реактора визначається так:

$$x_{рез}' = x_{рез} + x_p, \text{ Ом}. \quad (2.9)$$

За формулами (2.9), (2.8) та (2.7) відповідно

$$x_{рез}' = 0,58 + 0,4 = 0,96 \text{ Ом},$$

$$I_{п0} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,96} = 6 \text{ кА},$$

$$20,5 \text{ кА} > 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 6 = 15,3 \text{ кА}.$$

Вибраний реактор перевіряється на термічну стійкість за формулою

$$I_{тер.мін}^2 t_{тер.мін} \geq B_k = I_{п0}^2 t_{вимк}, \quad (2.10)$$

де $I_{тер.мін}^2$ – мінімальний струм термічної стійкості при КЗ, кА²;

$t_{тер.мін}$ – мінімальний час термічної стійкості при КЗ, с;

B_k – тепловий імпульс струму КЗ, кА²с;

$t_{вимк}$ – час вимкнення КЗ, с.

За формулою (2.10)

$$8^2 \cdot 3 = 192 \text{ кА}^2\text{с} > 6^2 \cdot 1,2 = 43,4 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Остаточо вибирається струмообмежувальний реактор типу РТСТ-10-250-0,87 УЗ, технічні дані якого наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні дані струмообмежувального реактора

Номінальна напруга, кВ	10
Номінальний струм, А	250
Індуктивний опір, Ом	0,87
Кліматичне виконання	УЗ
Наскрізний струм короткого замикання, кА	20,5
Струм термічної стійкості, кА	8
Час протікання струму термічної стійкості, с	3
Вартість за шт., грн	3900

2.2 Вибір транзисторів

Номінальна напруга на колекторі-емітері транзистора вибирається за формулою

$$U_{ном.ке} \geq U_{ном.тр}, \quad (2.11)$$

де $U_{ном.тр}$ – номінальна напруга транзистора, В.

За формулою (2.11)

$$1200 \text{ В} > 114 \text{ В}.$$

Номінальний струм на колекторі-емітері транзистора вибирається як

$$I_{ном.ке} \geq I_{ном.тр} = \frac{1}{K_{гр.тр}} \sqrt{2} K_{рез} I_{ном.т.ВН}, \quad (2.12)$$

де $I_{ном.тр}$ – номінальний струм транзистора, А;

$K_{гр.тр}$ – коефіцієнт граничного струму транзистора;

$K_{рез}$ – коефіцієнт резервування.

За формулою (2.12)

$$124 \text{ А} > 123 \text{ А}.$$

Остаточо за каталогом [6] вибирається транзистор типу APT75GN120JDQ3, технічні дані якого наведені в таблиці 2.

Таблиця 2
Технічні дані IGBT-транзисторів

Номинальна напруга на колекторі-емітері, В	1200
Номинальний струм, А	124
Вартість за шт., грн	900

3 Техніко-економічний порівняння

Техніко-економічне порівняння (ТЕП) виконано для двох варіантів: застосування пристрою на трансформаторі з ПБЗ та використання трансформатора з РПН.

Технічні дані реакторів та транзисторів наведені в таблицях 1 та 2. Сумарна вартість елементів пристрою наведена в таблиці 3.

Таблиця 3
Вартість елементів удосконаленого пристрою

№	Елемент	Кількість	Ціна	Вартість
		шт.	грн/шт.	грн
1	Корпус комірки КСО	1	5500	5500
2	Реактор	3	3900	11 700
3	IGBT-модуль	3	900	2700
4	Радіатор	3	600	1800
5	Опорний ізолятор	9	35	315
Сумарна вартість				22 015

Щорічні експлуатаційні витрати першого варіанту визначаються як

$$Z_1 = (E_a + E_o)(K_{T,1} + K_n), \text{ грн/рік}, \quad (3.1)$$

де K_n – сумарна вартість елементів для пристрою, грн;

$K_{T,1}$ – вартість трансформатора з ПБЗ приймається рівною відповідно до [4], грн;

E_a – норма амортизаційних відрахувань 0,063 в. о.;

E_o – норма відрахувань на обслуговування 0,04 в. о.

За формулою (3.1)

$$Z_1 = (0,063 + 0,04) \cdot (335\,000 + 22\,015) = 36\,773 \text{ грн/рік}.$$

Остаточо сумарні витрати на пристрій з урахуванням монтажу обладнання визначаються як

$$Z_{1\Sigma} = Z_1 + Z_{1M}, \text{ грн/рік}, \quad (3.2)$$

де Z_{1M} – витрати на монтаж обладнання, які приймаються рівними 20 % від Z_1 , грн/рік.

За формулою(3.2)

$$Z_{1\Sigma} = 36\,773 + 7354 = 44\,127 \text{ грн/рік}.$$

Вартість трансформатора з РПН з номінальною потужністю 1600 кВА приймається згідно з каталогом [7] рівною 601 425 грн.

Вартість регулятора для автоматичного регулювання коефіцієнта трансформації для трансформатора з РПН згідно з каталогом [8] становить 28 000 грн.

Щорічні експлуатаційні витрати при використанні трансформатора з РПН визначаються за формулою

$$Z_2 = (E_a + E_o)(K_{T,2} + K_{\text{рег}}), \text{ грн/рік}, \quad (3.3)$$

де $K_{\text{рег}}$ – вартість регулятора РПН, грн;

$K_{T,2}$ – вартість трансформатора з РПН, грн;

E_a – норма амортизаційних відрахувань 0,063 в. о.;

E_o – норма відрахувань на обслуговування 0,04 в. о.

За формулою (3.3)

$$Z_2 = (0,063 + 0,04) \cdot (601\,425 + 28\,000) = 64\,831 \text{ грн/рік}.$$

Остаточо сумарні витрати на трансформатор з РПН з урахуванням монтажу обладнання визначаються як

$$Z_{2\Sigma} = Z_2 + Z_{2M}, \text{ грн/рік}, \quad (3.4)$$

де Z_{2M} – витрати на монтаж обладнання, які приймаються рівними 20 % від Z_2 , грн/рік.

За формулою (3.4)

$$Z_{2\Sigma} = 64\,831 + 12\,966 = 77\,797 \text{ грн/рік}.$$

Таким чином, різниця між двома варіантами становить 33670 грн на користь першого варіанту.

Висновки

Пристрій на основі розподільного трансформатора з ПБЗ з новою елементною базою, який відрізняється від раніше розробленого пристрою

використанням IGBT-транзисторів замість зустрічно-паралельних тиристорів, дозволяє здійснювати автоматичне швидкодіюче, плавне (ступеневе) регулювання напруги під навантаженням залежно від змін напруги на стороні НН трансформатора, знизити установлену потужність трансформаторів за умовами пуску потужних електродвигунів, більш ефективно зменшувати струми КЗ.

Проведене ТЕП доказує економічну доцільність використання удосконаленого пристрою на трансформаторі з ПБЗ замість трансформатора з РПН в розподільних електричних мережах напругою 6 (10) кВ.

Список використаної літератури

1. ДСТУ ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення». [Текст] - 1997. - с. 4-9.
2. Пат. 2498390 Франція, МКИ Н 02 J 3/12; Н 02 Р 13/10, 13/30. Пристрій для регулювання напруги та реактивного опору в електричних мережах [Текст] / Л. В. Ярних, Ю. Л. Коротецький, В. Г. Рудницький, А. Ю. Бутрий (СРСР). – №2659851/24-07; Заявлений 30.06.80; 28.12.84; – 9 с, 1 л. іл.
3. В. І. Кривда, В. Г. Рудницький. Дослідження режимів роботи пристрою регулювання напруги та реактивного опору на базі силового трансформатора. [Текст] «Електротехнічні та комп'ютерні системи» - 2016 р. – № 22 (98). – с. 96-100.
4. Каталог трансформаторів [Електронний ресурс] URL: <http://atrans.in.ua/prais>
5. Каталог реакторів [Електронний ресурс] URL: <http://промкаталог.рф/PublicDocuments/01-0331-01.pdf>
6. Каталог транзисторів [Електронний ресурс] URL: <http://www.microsemi.com/existing-parts/parts/47274>.
7. Каталог трансформаторів з РПН [Електронний ресурс] URL: <http://russian.alibaba.com/product-detail-img/s9-sz9--60679319122.html>
8. Каталог регуляторів РПН [Електронний ресурс] URL: <https://www.avito.ru/moskva/oborudo>

[vanie dlya biznesa/ust-vo upr -
regulyator napryazheniya tapcon 260 novoe 115
4293188](http://www.avito.ru/moskva/oborudo/vanie_dlya_biznesa/ust-vo_upr_-_regulyator_napryazheniya_tapcon_260_novoe_115_4293188)

References

1. DSTU GOST 13109-97 «Norms of quality of electric energy in general-purpose power systems» [Normy yakosti elektrychnoyi enerhiyi v systemakh elektropostachannya zahal'noho pryznachennya] - 1997. pp. 4-9.
2. L.V. Yarnykh, J. L. Korotecki, V. G. Rudnitsky, A. Yu Butry (1984), Pat 2498390 France, MKI N 02 J 3/12; H 02 P 13/10, 13/30. Device for regulating voltage and reactive resistance in electric networks [Prystriy dlya rehulyuvannya napruhy ta reaktivnoho oporu v elektrychnykh merezhakh] no. 269851/24-07; Announced 30.06.80; Public 28.12.84; - 9 s, 1 liter. il.
3. V. I. Kryvda, V. G. Rudnitsky (2016), Research of operating modes of the device regulation of tension and jet resistance on the basis of the power transformer [Doslidzhennya rezhymiv roboty prystroyu rehulyuvannya napruhy ta reaktivnoho oporu na bazi sylovoho transformatoru], "Electrotechnical and Computer Systems", No. 22 (98), pp. 96-100.
4. Catalog of transformers [Kataloh transformatoriv] URL: <http://atrans.in.ua/prais>
5. Catalog of reactors [Kataloh reaktoriv] URL: <http://промкаталог.рф/PublicDocuments/01-0331-01.pdf>
6. Catalog of transistors [Kataloh tranzystoriv] URL: <http://www.microsemi.com/existing-parts/parts/47274>.
7. Catalog of transformers [Kataloh transformatoriv z RPN] URL: <http://russian.alibaba.com/product-detail-img/s9-sz9--60679319122.html>
8. Catalog of regulators [Kataloh rehulyatoriv RPN] URL: [https://www.avito.ru/moskva/oborudovanie_dlya_biznesa/ust-vo upr -
regulyator napryazheniya tapcon 260 novoe 115
4293188](https://www.avito.ru/moskva/oborudovanie_dlya_biznesa/ust-vo_upr_-_regulyator_napryazheniya_tapcon_260_novoe_115_4293188)

DEVELOPMENT THE DEVICE FOR REGULATION OF VOLTAGE AND REACTIVE RESISTANCE IN ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORKS WITH VOLTAGE 6 (10) kV

V. Rudnitsky, A. Savieliev

Odessa National Polytechnic University

Abstract. An actual problem in modern electricity supply is the development and application of new methods and devices for regulating voltage deviations. In this article is analyzed the improvement of device

for voltage and reactive resistance regulating for using in electrical distribution networks with nominal voltage 6 (10) kV. This improvement of device for voltage regulation is carried out by change counter-parallel thyristors to modules IGBT transistors. With the development of powerful electronic keys (modules based on Field-effect and bipolar transistors) with sufficient parameters for using in electrical distribution networks appeared new application possibilities in modern devices for parameters regulation of electricity quality indicators. The replacement of the main element improves the characteristics of the device at regulation of voltage deviations on distribution transformers with voltage 6 (10) kV. The scheme and functional principle devices for voltage and reactive resistance regulation with a new element base are presented. As an example was chosen the parameters elements of device for power transformer with nominal capacity of 1600 kVA and nominal primary voltage of 10 kV. The technical-economic comparison of transformer with device for regulation under load and transformer with device for voltage and reactive resistance regulation with a new element base confirms the economic feasibility of using the last one variant.

Keywords: device for voltage and reactive resistance regulation, transistor, reactor, transformation ratio of the transformer, switching without load, regulation under load, electric distribution network.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 (10) кВ

В. Г. Рудницкий, А. А. Савельев

Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. В статье приведены схема устройства регулирования напряжения и реактивного сопротивления с новой элементной базой, принцип её работы. Выполнен пример выбора параметров основных элементов устройства. Проведено технико-экономическое сравнение, которое подтверждает экономическую эффективность использования устройства. Приведены основные преимущества использования устройства.

Ключевые слова: устройство регулирования напряжения и реактивного сопротивления, транзистор, реактор, коэффициент трансформации трансформатора, переключение без возбуждения, регулирование под нагрузкой, распределительная электрическая сеть.

Отримано 24.10.2017



Рудницкий Вальдемар Генрихович, кандидат. технических наук, приват-профессор кафедры электропоставки та энергетичного менеджменту Одеського національного політехнічного університету, просп. Шевченка 1, Одеса, Україна, тел. +380682529300

Rudnitsky Valdemar, candidate of technical sciences, private professor of department of electricity and energy management Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave. 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-3157-2939



Савельев Артем Андрійович, бакалавр, студент кафедри електропоставки та енергетичного менеджменту Одеського національного політехнічного університету, просп. Шевченка 1, Одеса, Україна, E-mail: saveart458@gmail.com, тел. +380954167098

Artem Savieliev, bachelor, student of department of department of electricity and energy management, bachelor, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave. 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-6949-5959