

## ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Проаналізовано умови роботи силових трансформаторів загального призначення з глухозаземленою нейтраллю в гібридних електричних мережах змінного і постійного струму. Виокремлено небезпечні фактори та умови їх виникнення пов'язані з експлуатацією трансформаторів змінного струму поблизу перетворювальних підстанцій.*

**Ключові слова:** передачі постійного струму високої напруги, силовий трансформатор.

### Вступ

Зі зростанням рівня потужності споживання в останні роки перед електроенергетикою постають нові задачі. Серед множини можливих рішень, одним з найбільш перспективних варто відмітити використання систем високої напруги постійного струму (ВНПС) в складі традиційних електричних мереж змінної напруги. Одним з ключових завдань в гібридних електричних мережах є дослідження гармонічного складу струму і напруги. Як показує світовий досвід використання систем ВНПС, недостатнє вивчення питань пов'язаних з гармоніками призводить до аварійних ситуацій і каскадного виходу обладнання з ладу. Незважаючи на це, ряд переваг систем ВНПС, в першу чергу сконструйованих на базі перетворювачів напруги, сприяє широкій їх інтеграції в склад систем змінного струму і тому вирішення питань пов'язаних з їх експлуатацією є актуальною задачею в електроенергетиці на сьогодні.

*Метою роботи є дослідження та аналіз умов роботи силових трансформаторів загального призначення в складі систем постійного струму високої напруги.*

### Результати досліджень

Аналізуючи досвід використання систем ВНПС Китаю, можна виокремити такі чотири основні топології, які сьогодні застосовуються: біполярні системи з регулюванням балансу активної потужності, біполярні нерегульовані системи, моно полярні з використанням металізованого з'єднання в якості зворотного зв'язку і монополярні з використанням землі в якості зворотного зв'язку.

Також, біполярні електропередачі постійного струму високої напруги (ППС ВН) можуть працювати в режимах уніполярної передачі, коли один з полюсів знаходиться в плановому ремонті або відключений в результаті аварії. Відтак, постійний струм тече в землю, що безпосередньо впливає на сусідні системи змінного струму, зокрема на силові трансформатори, які працюють в режимі з заземленою нейтраллю.

В [1] аналізується схема і шлях проходження постійного струму в петлі: силовий трансформатор загального призначення—земля—силовий перетворювач. Постійний струм, що породжує струм збудження в нейтралі заземленого трансформатора, визначається потенціалом землі, який залежить від структури ґрунту (рис. 1).

Базуючись на рівняннях Лапласа, потенціал землі в першому шарі структури ґрунту можна

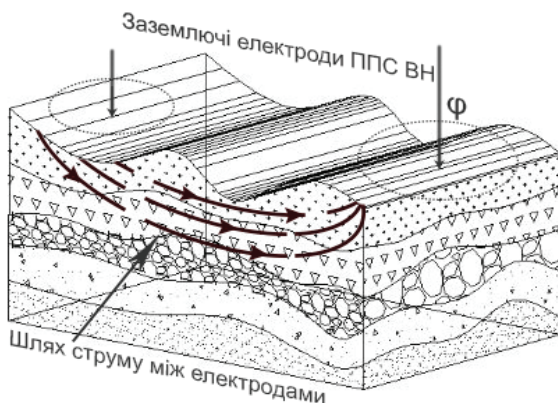


Рис. 1. Умовна структурна схема ґрунту

визначити за допомогою методу зображень функції Гріна

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty \alpha_1(\lambda) J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} d\lambda; \\ \alpha_1(\lambda) &= 1 + \frac{2K_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1}}, \quad K_1(\lambda) = \frac{\rho_2 \alpha_2 - \rho_1}{\rho_2 \alpha_2 + \rho_1}; \\ \alpha_2(\lambda) &= 1 + \frac{2K_2 e^{-2\lambda h_2}}{1 - K_2 e^{-2\lambda h_2}}, \quad K_2(\lambda) = \frac{\rho_3 \alpha_3 - \rho_2}{\rho_3 \alpha_3 + \rho_2}; \\ \alpha_{n-1}(\lambda) &= 1 + \frac{2K_{n-1} e^{-2\lambda h_{n-1}}}{1 - K_{n-1} e^{-2\lambda h_{n-1}}}, \quad K_{n-1}(\lambda) = \frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{\rho_n + \rho_{n-1}}, \end{aligned} \tag{1}$$

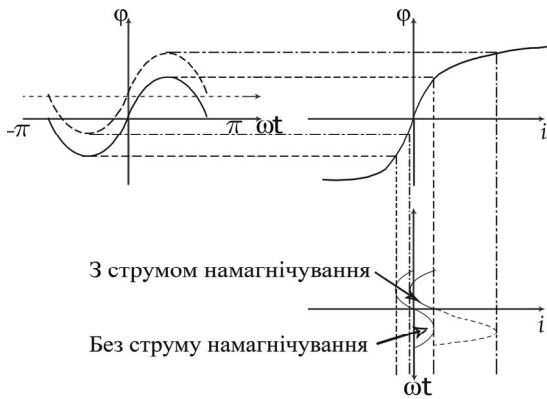


Рис. 2. Графіки насичення магнітної системи трансформатора постійним струмом

**Експериментальні параметри ґрунту в зоні дії розтікання потенціалів**

Шар ґрунту	Опір, Ом · м (глибина, м)
Верхній шар	398 (1,88)
Другий шар	172 (2,46)
Третій шар	1098 (7,72)
Четвертий шар	254 (16,68)
Нижній шар	3503

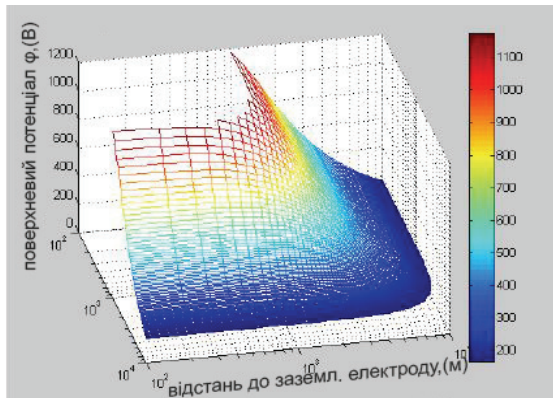


Рис. 3. Розподіл поверхневого потенціалу навколо заземлюючого електроду

різні пори року (літо/зима) параметри питомого опору різних шарів землі будуть дещо відрізнятися, однак для температурного режиму регіону України цією різницею можна знехтувати, враховуючи те, що промерзання ґрунту відбувається на глибину до 1,5 м.

де  $\varphi$  — поверхневий потенціал землі;  $\rho_n$  — питомий опір  $n$ -го шару землі;  $n$  — номер шару ґрунту;  $I$  — постійний струм заземлюючого електроду системи ВНПС;  $J_0$  — функція Бесселя першого роду;  $z$  — глибина заземлюючого електроду;  $h_n$  — товщина ґрунту  $n$ -го шару.

Під час роботи системи ППС ВН в вищеписаних режимах постійний струм тече через заземлюючі електроди в напрямку до протилежної перетворювальної підстанції, що зумовлює розповсюдження потенціалу напруги навколо перетворювальної підстанції. Якщо неподалік від перетворювальної підстанції розташовані силові трансформатори загального призначення із заземленою нейтраллю, формується петля з системою змінного струму [1]. Це приводить до появи додаткового струму збудження трансформатора, котрий накладається на основний.

Явище підмагнічування постійним струмом викликає додатковий постійний магнітний потік в осерді трансформатора, що в свою чергу призводить до асиметричного насичення додатного або від’ємного напівперіоду (рис. 2) і низки магнітних явищ. Основними причинами цього є великі струми заземлюючих електродів ППС ВН і геомагнітні бурі [2].

Використовуючи експериментальні дані параметрів ґрунту (табл.), виконано моделювання роботи ППС ВН в уніполярному режимі і проаналізовано поверхневий потенціал шару ґрунту, зі струмом на заземленому електроді 3 кА.

На рис. 3 показано результати моделювання. З отриманих результатів можна зробити висновок, що все обладнання змінного струму, яке буде розташовано в радіусі приблизно 3 км від перетворювальної підстанції (за заданих умов) буде потрапляти в зону дії наведеного потенціалу.

Очевидно, що радіус дії поверхневого потенціалу залежить від реальних параметрів ґрунту. Теоретично, в

**Висновки**

З аналізу рис. 3 випливає, що поверхневий потенціал постійної напруги розподіляється за експоненціальним законом, а тому можна зробити висновок, що значення напруги постійного струму,

яке приводить до виникнення струму намагнічування, залежить від відстані між силовими трансформаторами загального призначення, котрі знаходяться в зоні дії наводки, і відстані від заземлювального електроду ППС ВН. Тому на силових трансформаторах загального призначення, що працюють в складі гібридних електричних мереж і розташовані в радіусі дії наведеного потенціалу, необхідно вживати додаткових заходів щодо забезпечення їх безпечної і надійної роботи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Білик А. В. Особливості інтеграції систем постійного струму в магістральні мережі змінної напруги / А. В. Білик // Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. — Київ, 2017. — № 46.
2. Кирик В. В. Дослідження процесів у ненавантаженому силовому автотрансформаторі у разі геомагнітних збурень / В. В. Кирик, Р. В. Нагорний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 6. — С. 52—54.
3. Jiale Suonanl. The Challenge and Solution of Transformer Protection under AC-DC Hybrid Transmission Grid / Jiale Suonanl // International Conference on Power System Technology, 2010.

Рекомендована до друку кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.10.2017

**Білик Андрій Вікторович** — аспірант кафедри електричних мереж та систем; e-mail: abheatplus@gmail.com ;  
**Кирик Валерій Валентинович** — д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних мереж та систем.  
 Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ

**A. V. Bilyk<sup>1</sup>**  
**V. V. Kyryk<sup>1</sup>**

## Features of Operation of Power Transformers in Hybridelectrical Networks

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*The operating conditions of general purpose power transformers with the dead-earthed neutral have been analyzed in hybrid electric networks of alternating and direct current. Dangerous factors and conditions of their occurrence associated with the operation of AC transformers near the converter substations have been identified.*

**Keywords:** high-voltage direct current transmission, power transformer.

**Bilyk Andrii V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Networks and Systems, e-mail: abheatplus@gmail.com ;

**Kyryk Valerii V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electrical Networks and Systems

**A. V. Билык<sup>1</sup>**  
**В. В. Кирик<sup>1</sup>**

## Особенности эксплуатации силовых трансформаторов в гибридных электрических сетях

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Проанализированы условия работы силовых трансформаторов общего назначения с глухозаземленной нейтралью в гибридных электрических сетях переменного и постоянного тока. Выделены опасные факторы и условия их возникновения, связанные с эксплуатацией трансформаторов переменного тока вблизи преобразовательных подстанций.*

**Ключевые слова:** передачи постоянного тока высокого напряжения, силовой трансформатор.

**Билык Андрей Викторович** — аспирант кафедры электрических сетей и систем, e-mail: abheatplus@gmail.com ;

**Кирик Валерий Валентинович** — д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических сетей и систем