

УДК 621.316.9

## МОНОПОЛЯРНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ПЕРЕДАЧ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В СКЛАДІ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

**КИРИК В.В.** д-р техн. наук, професор, зав. каф. електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: vkyryk@ukr.net;

**БІЛИК А.В.** аспірант кафедри електричних мереж та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: abheatplus@gmail.com.

**Мета роботи.** Виконати аналіз умов роботи вставок постійного струму в монополярному режимі розміщених в межах підстанцій змінної напруги та провести дослідження виникнення постійного струму намагнічування в обмотках силових трансформаторів змінного струму, котрі попадають в зону дії наведеного потенціалу.

**Методи дослідження.** В основу роботи покладено теоретичні дослідження питань пов'язаних з роботою силового обладнання змінної напруги в зоні дії наведеного потенціалу у зарубіжних країнах. Обробка результатів дослідження виконувалася з використанням сучасного прикладного програмного забезпечення: MathCAD, Power Factory.

**Отримані результати.** В процесі виконання роботи було отримано результати, які свідчать про понаднормовані значення постійного струму намагнічування обмоток автотрансформаторів на підстанції Вінницька 750 кВ, при розташуванні перетворювальної підстанції в Західноукраїнській енергосистемі України, на підстанції Західноукраїнська 750 кВ. При роботі напівпровідникових перетворювачів в уніполярному режимі, постійний струм намагнічування перевищує допустимі норми на 13% для підстанцій 330 кВ і більше ніж в 7 разі для підстанцій 750 кВ.

**Наукова новизна.** Авторами проведено теоретичне дослідження, одного із можливих варіантів реалізації передачі постійного струму в Україні й визначено ризики пов'язані з монополярним режимом роботи передачі постійної напруги.

**Практична цінність.** Результати роботи можуть бути використанні при проектуванні нових передач постійного струму (вставок постійного струму) в енергосистемі України з метою збільшення її експортних можливостей, а також при дослідженні можливих режимів роботи передач постійного струму в складі систем змінної напруги.

**Ключові слова:** передачі постійного струму; монополярний режим; заземлюючий електрод; вставка постійного струму; силові трансформатори.

### I. ВСТУП

Зі зростанням рівнів потужності споживання в останні роки, перед електроенергетикою постають нові задачі. Недостатня пропускна здатність міжсистемних зв'язків (з малим запасом стійкості) в ситуаціях підвищення навантаження, короткого замикання, раптового відключення генеруючих і передавальних елементів системи може призвести до порушення статичної стійкості (при малих збуреннях) і динамічної стійкості (при різких і глибоких порушеннях нормального режиму). Внаслідок порушення стійкості відбувається випадання генераторів із синхронізму, що призводить до розпаду енергосистеми на несинхронні частини і як наслідок до економічних збитків [1].

### II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Одним із перспективних шляхів подолання даної проблеми є використання передач високої напруги постійного струму. Дане технічне рішення має широкий ряд переваг в порівнянні з системами змін-

ного струму [2]. Інтеграція ОЕС України в ENTSO-E шляхом спорудження комерційних передач постійного струму (ППС) є реальним шляхом для суттєвого збільшення експорту електроенергії до європейських країн. В той же час, як для забезпечення можливості паралельної роботи ОЕС України з енергетичним об'єднанням країн Європи на змінному струмі необхідно виконати значний обсяг організаційно-технічних заходів, спрямованих на модернізацію та впровадження сучасних технологій в енергосистемі.

По оцінкам експертів [16] України в даному разі можуть бути задіяні існуючі ПЛ 750 кВ Західноукраїнська - Альбертирша (Угорщина), Хмельницька АЕС - Жешув (Польща), і Південноукраїнська - Ісакча (Румунія). Пропускна здатність зазначених ПЛ 750 кВ дозволяє встановити від одного до трьох модулів паралельних модулів вставок постійного струму, потужністю по 600 МВт в кожній із ліній.

Реалізувати до трьох модулів вставок постійного струму (ВПС) по 600 МВт на кожній лінії.

Варто відзначити, що в Україні вже є досвід використання ППС високої напруги (HVDC) в російському напрямку. В 1962 році в дію була введена перша міждержавна лінія постійного струму 800 кВ Волгоград - Донбас [16], котра початково була споруджена з використанням ртутних вентильних перетворювачів, які на тому етапі стану техніки (до появи пристроїв силової електроніки) були єдиним можливим рішенням для перетворення великих струмів. Після 40 років експлуатації ППС її передавальна потужність знизилася до 200 МВт через зношеність ртутних вентилів. І у сукупності з іншими чинниками до 2000 року передача постійного струму втратила своє міжсистемне значення. На той час, глибокого дослідження і вивчення питань впливу режимів роботи ППС на сусідні системи змінного струму ніхто не проводив.

Більшість досліджень пов'язаних з питаннями підмагнічування магнітопроводів постійним струмом, що протікає через нейтраль заземлених силових трансформаторів, внаслідок роботи перетворювальних підстанцій в однополюсних монополярних режимах, проводяться за кордоном і присвячені вивченню китайської енергосистеми, так як на сьогодні вона є однією з найбільших розгалужених гібридних енергосистем в світі [4 - 13]. Варто відмітити, що процес намагнічування силових трансформаторів, які розташовані поблизу перетворювальних підстанцій, споріднений з явищем геомагнітних індукційних струмів при геомагнітних збуреннях в земній атмосфері, хоча останнє має іншу природу виникнення [3].

### III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження і аналіз процесів, пов'язаних з ефектом підмагнічування постійним струмом силових трансформаторів змінної напруги в гібридних електричних мережах зі вставками (передачами) постійного струму, які можуть мати місце в ОЕС України.

### IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В даній роботі розглядаються Західна і Південно-Західна енергосистеми України в умовах перспективного введення двох модулів ППС 2 x 600 МВт у напрямку Венгрії на підстанції 750 кВ Західноукраїнська. Відомо, що 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 проходить по землі, що безпосередньо впливає на сусідні системи змінного струму, зокрема на силові трансформатори, котрі працюють в режимі з заземленою нейтраллю. В [2] аналізується схема і шлях проходження постійного струму в петлі: земля - трансформатор - лінія електропередавання (ЛЕП) - транс-

форматор. Постійний струм через нейтраль трансформатора збуджується напругою внаслідок різниці потенціалів між місцем заземлення нейтралі трансформатора і розміщенням заземлення ППС. Він залежить від структури ґрунту та відстані до електроду заземлення ППС, а також від величини струму через нього.

Відомо, що в енергетичній системі України на високих напругах 110/220/330/750 кВ використовуються силові трансформатори та автотрансформатори котрі, працюють з глухо-заземленою нейтраллю на стороні високої напруги (ВН). Відповідно при складанні математичної розрахункової моделі дослідження, схеми заміщення для трансформаторів і автотрансформаторів будуть мати різне представлення, так як останні не мають гальванічної розв'язки між обмотками ВН та середньої напруги (СН), рис.1.

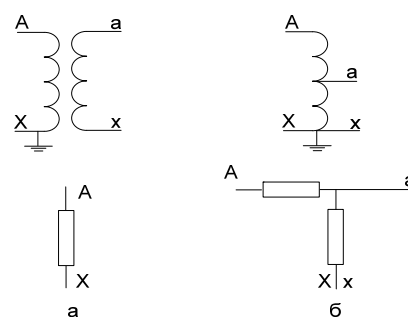


Рисунок 1. Схема заміщення по постійному струму: а - трансформатора, б - автотрансформатора

Топологію Західної і Південно-Західної енергосистеми України 220 - 750 кВ можна представити графом електричної мережі, який показано на рис.2.

На рис.2 точкою 1 позначено місце розташування підстанції 750/330 кВ Західноукраїнська, на котрій в перспективі може бути встановлено силове напівпровідникове обладнання перетворювальної підстанції (ПП). Необхідно відмітити, що в радіусі 50км від перетворювальної підстанції (ПП) розташовано 2 ПС напругою 330 кВ і 4 ПС напругою 220 кВ.

Для спрощення аналізу, виокремимо з даної області дві підстанції 330 кВ: ПС Львів Південна (точка 2) і ПС Львів Західна (точка 3). На даних підстанціях встановлені силові автотрансформатори типу АТДЦТН-200000/330. Однолінійна схема заміщення даної частини електричної мережі представлена на рис.3. Наявність в електричній мережі автотрансформаторів дещо ускладнює процес розрахунку струму намагнічування  $I_N$  в нейтралі автотрансформаторів (АТ), внаслідок того, що між обмотками ВН та СН немає гальванічної розв'язки. Виходячи з цього, при розгляді сегменту електричної мережі в склад якої входить більше двох автотрансформаторів одного класу напруги, для визначення постійного струму, що протікає по загальній обмотці необхідно виконувати еквівалентування методом "зірка-трикутник", при

умові, що величина струму намагнічування в обмотці НН співставна із величиною струму намагнічування обмотки ВН.

Доцільно припустити, що для точного розрахунку намагнічуючих струмів на ділянках мережі, що містять в своєму складі і автотрансформатори і силові

трансформатори, необхідно виконувати еквівалентування загальної схеми заміщення, однак постає питання, трансформатори якого класу напруги, крім базового, слід враховувати при перетворенні мережі?

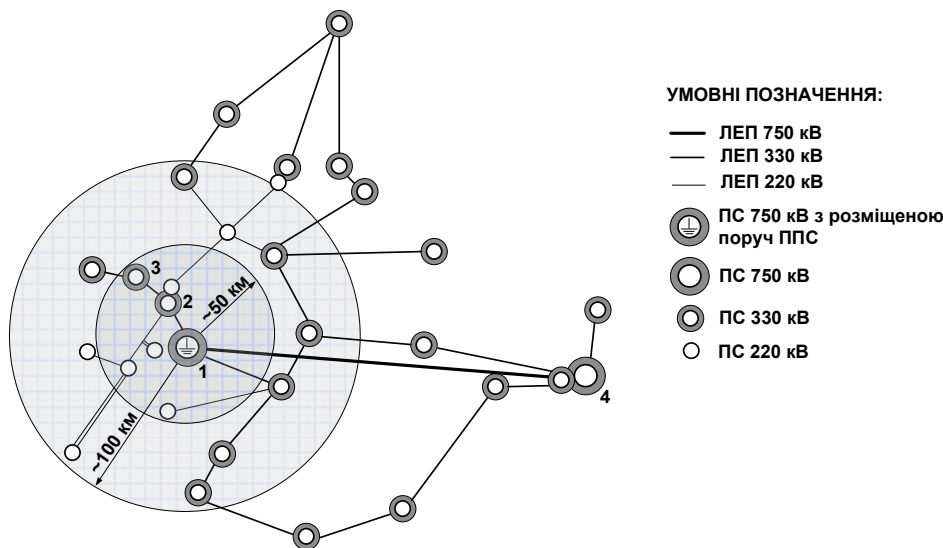


Рисунок 2. Граф електричної мережі 220 - 750 кВ України Західної і Південно-Західної енергосистем

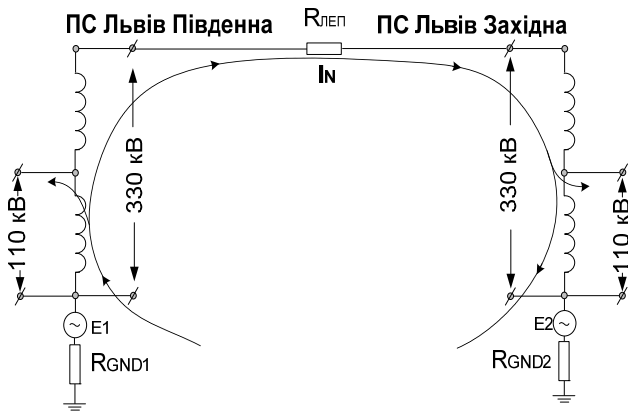


Рисунок 3. Однолінійна схема заміщення ділянки мережі 330

Для відповіді на вище поставлене запитання виконаємо спрощення розглядаємої ділянки мережі, шляхом обмеження радіуса зони, в котрій буде проводитись дослідження наведеного потенціалу, до 50 км на напрузі 330 кВ і до 300 км на напрузі 750 кВ.

Відповідно, при умові розміщення перетворювальної підстанції ППС на ПС 750 кВ Західноукраїнська, в радіус 50 км від неї попадають дві підстанції 330 кВ, а саме ПС Львів західна і Львів південна, а в радіус 300 км попадає одна підстанція 750 кВ – Вінницька.

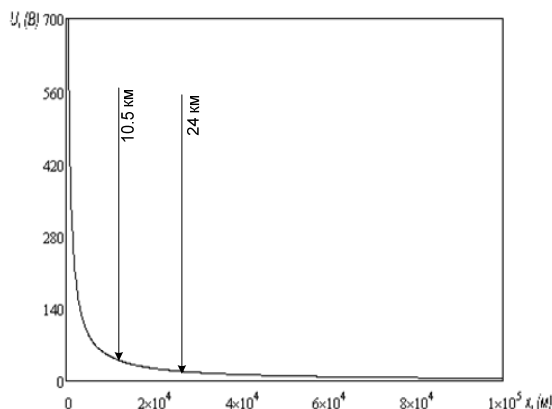
Значення потенціалу в точці заземлення нейтралі силового трансформатора, при роботі ППС в уніполярному режимі визначається відстанню від заземлюючого електроду і відповідно структурою ґрунту. Відповідно до аналізу, проведеного в [4] при розтікання струму в багатшарових структурах ґрунту, для попереднього розрахунку допустимо приймати: 100 Ом·м - для однорідних ґрунтів і 1000 Ом·м - для неоднорідних.

Базуючись на параметрах ґрунту, значення потенціалу напруги в нейтралі трансформаторів змінного струму визначається за наступним виразом [14]:

$$U(x) = \begin{cases} \frac{\rho \cdot I}{2\pi(x+R)}, & \text{якщо } x \geq R \\ \frac{\rho \cdot I}{4\pi^2 \cdot R} \cdot \ln \left[ \frac{128 \cdot R^2 \cdot h \cdot r}{(h^2 + z^2 + x^2)} \right], & \text{якщо } x < R \end{cases}, \quad (1)$$

де,  $U(x)$  – значення потенціалу напруги в точці віддаленій від електроду заземлення ППС на відстань  $x$ ;  $\rho$  – питомий опір ґрунту;  $I$  – значення струму електроду заземлення при роботі ППС в уніполярному режимі;  $R$  - радіус контуру заземлення, в випадку виконання його в вигляді кола;  $r$  - радіус заземлюючого електроду;  $h$  - глибина встановлення заземлюючих електродів,  $z$  - точка, на глибині якої визначається значення потенціалу.

Для моделювання процесу приймаємо початкові значення для вхідних величин, а саме: значення струму заземлюючого електроду двох модулів ВПС потужністю по 600 МВТ кожен, на напрузі  $\pm 400$  кВ величиною 3000А,  $R = 200$  м,  $r = 0,1$  м,  $h = 2$  м,  $z = 1$  м,  $\rho = 1000$  Ом·м. Відповідно до (1) епюра розподілу потенціалу на відстань 100 км від електроду заземлення матиме вигляд рис.4



**Рисунок 4.** Епюра розподілу потенціалу напруги навколо заземлюючого електроду ППС на відстань 100 км

В більшості випадків, контур заземлення ППС виносять за межі перетворювальної підстанції на деяку відстань. Для прикладу, на лінії Волгоград - Донбас контур заземлення було виведено приблизно на 30км від перетворювальної підстанції [15].

Визначивши значення потенціалу  $U(x)$  в точці заземлення силового трансформатора, постійний струм підмагнічування  $I_N$  розраховуємо за формулою:

$$I_{N(i-j)} = \frac{U_1 - U_2}{R_{GND1} + R_{GND2} + \frac{R_{T1} + R_{T2} + R_{ЛЕП}}{3}}, \quad (2)$$

де  $U_1, U_2$  - значення потенціалу напруги на підстанції (ПС) №1 і №2 відповідно;  $R_{GND1}, R_{GND2}$  - опір контуру заземлення ПС №1 і №2 відповідно;  $R_{T1}, R_{T2}$  - активний опір обмоток трансформаторів по котрим проходить постійний струм намагнічування;  $R_{ЛЕП}$  - активний опір ЛЕП між підстанціями 1 і 2. Коефіцієнт три в знаменнику враховує той факт, що постійний струм намагнічування проходить по трьом фазам і на виході підсумовується в нульовій точці.

Виконуємо розрахунок потенціалів напруги по фактичних даних трансформаторів і ліній електропередавання, а також усереднених даних параметрів ґрунту виконавши підстановку в вирази (1) та (2) для двох пар автотрансформаторів: ПС 330 кВ Львів південна і Львів західна; ПС 750 кВ Західноукраїнська - Вінницька (рис.2, точка 4). Результати розрахунку

показано в таблиці 1.

При розрахунку прийнято, що опір ґрунту дорівнює, як для неоднорідного типового; еквівалентування мережі виконувалось без врахування мереж сусіднього класу напруги; місце встановлення заземлюючого електроду прийнято на відстані 10км від підстанції.

У відповідності до чинних стандартів мереж з HVDC [15] граничний постійний струм кожної обмотки силового трансформатора повинен бути: для однофазних трансформаторів менше 0,3% від номінального струму; для трифазного трансформатора з сердечником з п'яти стержнів менше 0,5%; для трифазного трансформатора з трьохстержневим сердечником повинен бути менше 0,7%.

Аналіз даних представлених в таблиці 2, показує, що при заданих умовах, струм намагнічування на ПС 330 кВ перевищує допустимі норми на 13%, а на ПС 750 кВ - на 742%.

Очевидно, що величина струму намагнічування на віддалених від заземлюючого електроду підстанціях залежить від величини потенціалу напруги на поруч розташованих ПС.

Аналізуючи вхідні параметри для розрахунку при прийнятих припущеннях, відповідно до (1), суттєве зниження напруги  $U_1$  фактично можливе лише за рахунок зменшення сили струму заземлюючого електроду, що теоретично можливо за рахунок виконання силових перетворювачів на більш високих класах напруги. Також варто відзначити параметр  $R$  у виразі (2). Змінна відстані від заземлюючого електроду до точки заземлення силового автотрансформатора, також сильно впливає на величину наведеної напруги, в той час, як зміна параметрів контуру заземлення перетворювальної підстанції не призводить до значних змін значення наведеного потенціалу.

В країнах з специфічним кліматом і ландшафтом, проводять також дослідження впливу параметрів ґрунту на значення напруги розтікання від заземлюючого електроду перетворювальної підстанції. Наприклад в Фінляндії із-за наявності значної кількості фіордів, а також із-за відносно низьких температур, через що відбувається сильне промерзання ґрунту, внаслідок чого величина струму намагнічування змінюється майже в 2 рази, в залежності від пори року [6].

Перевищення нормативних значень постійного струму намагнічування в нейтралі силових трансформаторів змінного струму може призводити до таких порушень:

- насичення магнітної системи трансформатора і як наслідок появи додаткового напівперіодного струму збудження трансформатора;
- генерація значної кількості високочастотних гармонік, самим же трансформатором;
- збої в релейному захисті трансформатора;
- підвищення акустичного шуму, вібрації і локального перегріву обмоток трансформатора, що в свою чергу прискорює старіння ізоляції.

Таблиця 1. Результати оцінки струму намагнічування на ПС 330 і 750 кВ

Параметри	Ділянка мережі 330 кВ		Ділянка мережі 750 кВ	
	Львів західна	Львів південна	Західноукраїнська	Вінницька
Відстань до заземлюючого електроду ППС, км	38	53	10	323
Струм заземлюючого електроду в монополярному режимі ППС, А	3000			
$R_{T_1}$ , Ом	0.613	-	2.93	-
$R_{T_2}$ , Ом	-	0.613	-	2.93
$R_{GND_1}$ , Ом	0.25	-	0,25	-
$R_{GND_2}$ , Ом	-	0,25	-	0,25
$R_{ЛЕП}$ , Ом	2.31		6.41	
$U_i$ , В	12.499	8.975	23.637	1.477
$I_{N(i-j)}$ , А	2.099		9.874	
$I_{N(допустиме)}$	1.818		1.332	

## V. ВИСНОВКИ

Аналіз спрощеної моделі ділянки електричної мережі 330 кВ ПС Львів Південна - ПС Львів Західна і 750 кВ ПС Вінницька - ПС Західноукраїнська, при умові перспективного встановлення передачі постійного струму на останній, показав що при прийнятій конфігурації електричної мережі і потужності передачі постійного струму 2 x 600 МВт, при роботі напівпровідникових перетворювачів в уніполярному режимі, постійний струм намагнічування на ПС 330 кВ перевищує допустимі норми на 13%, а на ПС 750 кВ - більше ніж в 7 разів. Таке перевищення допустимих норм на напрузі 750 кВ пов'язане з низьким активним опором, а також з значною протяжністю таких ліній.

Встановлено, що суттєве зниження напруги  $U_i$  фактично можливе лише за рахунок зменшення сили струму заземлюючого електроду, що теоретично можливо за рахунок виконання силових перетворювачів на більш високих класах напруги. Змінна відстані від заземлюючого електроду до точки заземлення силового автотрансформатора, також сильно впливає на величину наведеної напруги, в той час, як змінна параметрів контуру заземлення перетворювальної підстанції не призводить до значних змін значення наведеного потенціалу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кирик В.В., Білик А.В. Передачі постійного струму як інструмент розвитку енергооб'єднань. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 29-30 вересня 2016 р., м. Київ, НТУУ КПІ. –С.145-148.
- [2] Білик А.В. Особливості інтеграції систем постійного в магістральні мережі змінної напруги - Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.-2017.-№46.-с.30-34
- [3] Винокурова Є.В., Ворона С.С., Кирик В.В., Дремов В.В. Оцінка наведеної напруги на лінії електропередавання напругою 10 кВ / Гідроенергетика України. – 2014. – №4. – с. 42-43.
- [4] Guihua Mei, Yuanzhang Sun, Yancun Liu Simulation on DC Current Distribution in AC Power Grid under HVDC Ground-Return-Mode – Scientific Research J. Electromagnetic Analysis & Applications, DOI: 10.4236/jemaa.2010.27054, vol. 2, ISSN 1727-9895, 2010, pp. 418-423.
- [5] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, 2011, pp. 2182-2186.
- [6] Yang Yongming, Liu Xingmou, Yang Fan Soil Structure Effect on Transformer DC Bias – IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), DOI: 10.1109/ICIT.2014.6894954, Feb. 26 - Mar. 1, 2014, Busan, Korea, pp. 535-540
- [7] Yan Li, Yanchao gao, Longnv Li, Di Zhang, Fangxu Han Effects of DC Magnetic Bias on the Magnetic and Sound Fields of Transformer – Energy and Power Engineering, doi:10.4236/epe.2013.54B209, 2013, 5, 1097-1100
- [8] Xuesong Zhou, Zhihao Zhou and Youjie Ma Research on DC magnetic Bias of Power Transformer – International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), 2012, pp. 452-455

- [9] Zhang Bo, Zhao Jie, Zeng Rong, et al. Estimation of DC Current Distribution in AC Power System Caused by HVDC Transmission System in Ground Return Status – Proceedings of the CSEE. 2006, pp.84-88.
- [10] Bo Zhang, Jie Zhao, Rong Zeng Numerical Analysis of DC Current Distribution in AC Power System Near HVDC System – IEEE Transactions on power delivery, DOI: 10.1109/TPWRD.2007.908748, vol. 23, no. 2, April 2008, pp. 960-965
- [11] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, October 2011, pp.2182-2186
- [12] Rong Zeng, Zhanqing Yu, Jinliang He Study on Restraining DC Neutral Current of Transformer During HVDC Monopolar Operation. – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2161345, VOL. 26, NO. 4, October 2011, pp.2785-2791
- [13] José Eduardo Telles Villas and Carlos Medeiros Portela Calculation of Electric Field and Potential Distributions Into Soil and Air Media for a Ground Electrode of a HVDC System – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2003.809741, VOL. 18, NO. 3, JULY 2003, pp.867-873
- [14] Зубов К.Н., Немировский А.Е. Метод расчета заземляющих устройств произвольной конфигурации в неоднородных грунтах – Технические науки, NovaiFo.ru, №2, 2010. –С.1-7
- [15] Лейф Энглунд, Матс Лагерквист, Ребати Дасс Магистраль HVDC в Китае – ABB Power Technologies, no. 4, 2003 С.14-20
- [16] НТЦЕ НЕК «Укрэнерго» Світовий досвід та економічна ефективність застосування електропередач і вставок постійного струму для забезпечення паралельної роботи несинхронізованих енергосистем Міністерство енергетики та вугільної промисловості України НЕК «Укрэнерго» Науково-технічний центр електроенергетики, Київ, 2012, – С.1-72

Стаття надійшла до редакції 11.10.2018

## МОНОПОЛЯРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОСТАВЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ УКРАИНЫ

КИРИК В.В.

*д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электрических сетей и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: vkyryk@ukr.net;*

БИЛЫК А.В.

*аспирант кафедры электрических сетей и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: abheatplus@gmail.com.*

**Цель работы.** Выполнить анализ условий работы передач постоянного тока в монополярном режиме расположенных в пределах подстанций переменного напряжения и провести исследования возникновения постоянного тока намагничивания в обмотках силовых трансформаторах переменного тока, которые попадают в зону действия приведенного потенциала.

**Методы исследования.** В основу работы положены теоретические исследования вопросов связанных с работой силового оборудования переменного напряжения в зоне действия наведенного потенциала в зарубежных странах. Обработка результатов исследования выполнялась с использованием современного прикладного программного обеспечения: MathCAD.

**Полученные результаты** В процессе выполнения работы были получены результаты, которые свидетельствуют о сверхнормированных значениях постоянного тока намагничивания обмоток автотрансформаторов на подстанции Винницкая 750 кВ, при расположении преобразовательной подстанции в Западноукраинской энергосистеме Украины, на подстанции Западно 750 кВ. При работе полупроводниковых преобразователей в униполярном режиме постоянный ток намагничивания превышает допустимые нормы на 13% для подстанций 330 кВ и более чем в 7 раз для подстанций 750 кВ.

**Научная новизна.** Авторами проведено теоретическое исследование, одного из возможных вариантов установки передачи постоянного тока в Украине и определены риски для оборудования переменного напряжения связанные с монополярным режимом работы передачи постоянного тока.

**Практическая ценность.** Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых передач постоянного тока (вставок постоянного тока) в энергосистеме Украины с целью увеличения ее экспортных возможностей, а также при исследовании возможных режимов работы передач постоянного тока в

составе систем переменного напряжения.

**Ключевые слова:** передачи постоянного тока; монополярный режим; заземляющий электрод; вставка постоянного тока; иловые трансформаторы.

## MONOPOLAR MODE OF OPERATION OF HVDC IN THE MAIN ELECTRIC NETWORKS OF UKRAINE

**KYRYK V.V.** *Sci.D, Professor, head of the department of electrical networks and systems of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: vkyryk@ukr.net;*

**BILYK A.V.** *Postgraduate student of the Department of Electrical Networks and Systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky, Kiev, Ukraine, e-mail: abheatplus@gmail.com.*

**Purpose.** Perform an analysis of the conditions of the direct-current transmission in a monopolar mode in the conditions near the alternating voltage substation located and to conduct a study of the occurrence of a direct current of dc bias in the windings of power transformers of an alternating current that fall into the zone of the induced potential.

**Methodology.** The basis of the work is based on theoretical studies of the problems related to the operation of power equipment of alternating voltage in the zone of action of the given potential in foreign countries. The results of the research were processed using modern software applications: MathCAD.

**Findings.** In the course of the work, overtime values of the direct current of magnetization of windings of autotransformers for the Vinnytsia 750 kV substations were obtained, with the location of a transformation substation in the Western Ukrainian Power System of Ukraine, at a 750 kV Western-Ukrainian substation. When operating semiconductor converters in unipolar mode, the direct magnetizing current exceeds the permissible norms by 13% for 330 kV substations and more than 7 times for 750 kV substations.

**Originality.** The authors carried out a theoretical study, one of the possible options for establishing the transmission of DC in Ukraine, and identified the risks associated with the monopolar mode of operation of the transducer of constant voltage.

**Practical value.** The results of the work can be used in the design of new DC transmissions (DC inserts) in the power grid of Ukraine in order to increase its export capabilities and also at research of possible operating modes of transfers of a direct current as a part of systems of alternating voltage.

**Keywords:** direct current transmission; monopolar mode; grounding electrode; dc link; power transformers.

### REFERENCES

- [1] Kyryk V.V., Bilyk A.V. Transmitters of DC as an instrument for the development of power interconnections. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century", September 29-30, 2016, Kyiv, NTUU KPI. -pp.145-148.
- [2] Bilyk AV Features of integration of systems of permanent-th in the main networks of alternating voltage - Proceedings of the Institute of electrodynamics of the National academy of sciences of Ukraine.-2017.-№46.-pp.30-34
- [3] Vinokurova Ye.V., Vorona S.S., Kyryk VV, Dremov V.V. Assessment of the induced voltage on the power transmission line with voltage of 10 kV / Hydroelectric power station of Ukraine. - 2014 - # 4. - pp. 42-43.
- [4] Guihua Mei, Yuanzhang Sun, Yancun Liu Simulation on DC Current Distribution in AC Power Grid under HVDC Ground-Return-Mode – Scientific Research J. Electromagnetic Analysis & Applications, DOI: 10.4236/jemaa.2010.27054, vol. 2, ISSN 1727-9895, 2010, pp. 418-423.
- [5] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, 2011, pp. 2182-2186.
- [6] Yang Yongming, Liu Xingmou, Yang Fan Soil Structure Effect on Transformer DC Bias – IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), DOI: 10.1109/ICIT.2014.6894954, Feb. 26 - Mar. 1, 2014, Busan, Korea, pp. 535-540
- [7] Yan Li, Yanchao gao, Longnv Li, Di Zhang, Fangxu Han Effects of DC Magnetic Bias on the Magnetic and Sound Fields of Transformer – Energy and Power Engineering, doi:10.4236/epe.2013.54B209, 2013, 5, 1097-1100
- [8] Xuesong Zhou, Zhihao Zhou and Youjie Ma Research on DC magnetic Bias of Power Transformer –

- International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), 2012, pp. 452-455
- [9] Zhang Bo, Zhao Jie, Zeng Rong, et al. Estimation of DC Current Distribution in AC Power System Caused by HVDC Transmission System in Ground Return Status – Proceedings of the CSEE. 2006, pp.84-88.
- [10] Bo Zhang, Jie Zhao, Rong Zeng Numerical Analysis of DC Current Distribution in AC Power System Near HVDC System – IEEE Transactions on power delivery, DOI: 10.1109/TPWRD.2007.908748, vol. 23, no. 2, April 2008, pp. 960-965
- [11] Jin Enshu, Yu Kuiying, Chai Fangsen Effects of DC magnetic bias on differential protection of transformer – The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, DOI: 10.1109/APAP.2011.6180789, October 2011, pp.2182-2186
- [12] Rong Zeng, Zhanqing Yu, Jinliang He Study on Restraining DC Neutral Current of Transformer During HVDC Monopolar Operation.– IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2161345, VOL. 26, NO. 4, October 2011, pp.2785-2791
- [13] José Eduardo Telles Villas and Carlos Medeiros Portela Calculation of Electric Field and Potential Distributions Into Soil and Air Media for a Ground Electrode of a HVDC System – IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, DOI: 10.1109/TPWRD.2003.809741, VOL. 18, NO. 3, JULY 2003, pp.867-873
- [14] Zubov K.N., Nemirovsky A.E. The method of calculating permalling devices of arbitrary configuration in non-sodic soils - Technical sciences, Novaifo.ru, №2, 2010. -pp.1-7
- [15] Leaf Englund, Mats Lagerquist, Rebati Dass Highways HVDC in China - ABB Power Technologies, no. 4, 2003 pp.14-20
- [16] STCU NEC "Ukrenergo" World experience and economic efficiency of the use of power converters and DC inserts for parallel operation of non-synchronized power systems Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine NEC "Ukrenergo" Scientific and Technical Center for Electricity, Kyiv, 2012, -pp.1-72