

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, С. І. ДРИВЕЦЬКИЙ, А. Е. ПОТРИВАЙ, Р. О. ГАНУС

ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ БУДІВНИЦТВА ПІДЗЕМНИХ ПІДСТАНЦІЙ ТА ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Дана робота націлена на пошук світового досвіду у створенні підземних високовольтних підстанцій, виявлення їх особливостей організації та рішень для забезпечення максимально ефективних режимів роботи. Розглянуто позитивні та негативні сторони даного підходу. Визначено експлуатаційні характеристики, які здатні створити значний вплив на режими роботи підстанцій, ускладнити процес проектування та змінити правила вибору обладнання для об'єктів. Проаналізовано досвід західних та східних колег в даному питанні. Велику увагу приділено підземній підстанції Сюдун з номінальною напругою 220 кВ в енергосистемі Хубей, що є першою підземною підстанцією в центральній частині Китаю. На цьому ж прикладі виявлено особливості організації підземної підстанції в міських умовах. Розглянуто особливості організації підземних підстанцій поблизу річок, де наявність підземних вод ускладнює проектування. На базі розглянутих прикладів проаналізовано можливі заходи та зміни в конструкціях типових підстанцій для створення нових підземних конфігурацій. Виконано порівняння ефективності при зближенні фаз та встановлено залежності та умови, за яких відбувається значна зміна в ефективності передавання електричної енергії на території підстанцій. Визначено ефект використання зближення фаз на пропускну здатність та хвильовий опір провідників. Встановлено позитивний вплив підземних умов експлуатації на більшість елементів системи. Аналіз експлуатаційних умов та використання ефективних конфігурацій дозволили знайти потенційно найбільш перспективні способи реалізації підземних підстанцій. Запропоновано обґрунтований ряд заходів по впливу на окремі елементи підземної підстанції, виходячи з експлуатаційних умов, по забезпеченню найбільш ефективної конфігурації з точки зору пропускну здатності та теплового режиму обладнання.

Ключові слова: підземні підстанції, зближення фаз, пропускну здатність, підземна лінія, підземна електрична мережа, повітряна ізоляція.

S. YU. SHEVCHENKO, D. O. DANYLCHENKO, S. I. DRYVETSKYI, A. E. POTRYVAI, R. O. HANUS

JUSTIFICATION OF THE NEED TO BUILD UNDERGROUND SUBSTATIONS AND POWER LINES

This work is aimed at finding the world experience in the creation of underground high-voltage substations, identifying their organisational features and solutions to ensure the most efficient operation modes. The positive and negative aspects of this approach are considered. The article identifies operational characteristics that can have a significant impact on substation operations, complicate the design process, and change the rules for selecting equipment for facilities. The experience of Western and Eastern colleagues in this area is analysed. Much attention is paid to the Xudong underground substation with a rated voltage of 220 kV in the Hubei power system, which is the first underground substation in central China. The same example reveals the peculiarities of organising an underground substation in urban areas. The article considers the peculiarities of organising underground substations near rivers, where groundwater complicates the design. Based on the examples considered, possible measures and changes in the design of typical substations to create new underground configurations are analysed. A comparison of the efficiency of phase convergence is made and the dependencies and conditions under which a significant change in the efficiency of electricity transmission on the territory of substations are established. The effect of using phase convergence on the bandwidth and wave impedance of conductors is determined. The positive impact of underground operating conditions on most elements of the system is established. The analysis of operating conditions and the use of efficient configurations allowed us to find potentially the most promising ways to implement underground substations. A reasonable range of measures to influence individual elements of the underground substation, based on the operating conditions, to ensure the most efficient configuration in terms of capacity and thermal conditions of the equipment is proposed.

Keywords: underground substations, phase convergence, capacity, underground electric line, underground electric network, air insulation.

Вступ. У густонаселених районах сучасних міст важко знайти місце для нових підстанцій. Енергоспоживання рік від року зростає, кількість необхідної потужності збільшується, і потрібен простір для встановлення стандартних трансформаторних, розподільних і комплектних трансформаторних підстанцій. Але простір для будівництва обмежений настільки, що їх можна встановити лише поруч із житловими будинками або під землею [1].

Підземні трансформаторні підстанції – це спеціальні пристрої, які перетворюють високу напругу на низьку і розподіляють її по споживачах. Вони встановлюються під землею, щоб заощадити місце, забезпечити безпеку і захист від зовнішніх впливів.

Підземні трансформаторні підстанції складаються з одного або декількох бетонних контейнерів, у яких розміщуються трансформатори, вимикачі, реле, вимірювальні прилади та інше обладнання. Над землею розташовані вхідний люк і вентиляційний канал.

Вони розробляються спеціально для монтажу в умовах щільної забудови або суворих вимог щодо

архітектури та обмеження висот електромережових споруд. Можуть застосовуватися і комбіновані рішення, що мають заглиблені, підземні та надземні блоки.

Для підстанцій підземного типу проектна документація вирізняється необхідністю розроблення ще й додаткових рішень щодо встановлення, стикування, гідроізоляції блоків, рішення щодо захисту залізобетону від агресивної дії ґрунтів, щодо герметизації кабельних вводів, рішення щодо міжблочної та блокової герметизації, щодо аварійного відкачування води, рішення з вентиляції тощо. Влаштування підземної підстанції є вирішенням питання енергопостачання, без зміни вигляду міста [1].

Саме ці два факти є причиною актуальності та проблемою підземних підстанцій. Їх актуальність, у зв'язку з війною та щорічним збільшенням ціни квадратного метру землі, стає все більш очевидною. Однак в чинних правилах улаштування електроустановок (ПУЕ) [2] не наведено конкретних рекомендацій щодо правил організації підземної

© С. Ю. Шевченко, Д. О. Данильченко, С. І. Дривецький, А. Е. Потривай, Р. О. Ганус, 2023

підстанції: бетонних конструкцій, внутрішнього улаштування, вибору обладнання, оптимальних конфігурацій обладнання тощо.

Мета статті. Метою даної роботи є дослідження існуючого світового досвіду з проектування та будівництва підземних підстанцій, встановлення загальних рис проєктів, виявлення базових характеристик та рішень для формування основи для подальшого проектування. Розгляд переваг, які дають підземне розміщення та використання підземної підстанції. Розгляд потенціалу використання підземних повітряних ліній електропередачі. Перегляд дійсних норм по відношенню до організації внутрішнього простору підземної підстанції.

Результатом огляду є встановлення базових характеристик і параметрів для підземних підстанцій та повітряних ліній електропередачі і загальні рекомендації для подальшого впровадження наявних даних до проєктної практики.

Загальні переваги перед стандартним способом наземної передачі електроенергії. Підземні лінії електропередачі (ЛЕП) набувають все більшої популярності не дарма. Якщо метою системи є безпечна, надійна та економічно ефективна передача, яка при цьому має гарний вигляд та високу ступінь захищеності, варто звернути на неї увагу.

Даний підхід має свої переваги та недоліки. Наприклад, коли потрібен ремонт, швидше виконати його для повітряної лінії (ПЛ), чи замінити трансформатор на наземній підстанції. Але підземне розташування дає умови, в яких набагато рідше обладнання потребує ремонту, оскільки воно «поховане» під землею, далеко від стихійних явищ та людського втручання.

Таке приховане розташування має багато переваг. Для подальшого розгляду виділимо 5 з них.

1. Нижча вартість та спрощений процес вибору місця розташування в міській місцевості. Розміщення проєктів з передачі електроенергії в міських районах може бути складним завданням – ПЛ вимагають

придбання землі в смузі відведення для опорних конструкцій, таких як опори, стовпи та самі ЛЕП. Аналогічно і для трансформаторних підстанцій. Придбання землі пов'язане з невід'ємними проблемами, такими як демонтаж конструкцій для забезпечення електричного зазору на шляху проходження лінії, а також часто з великими витратами.

Підземні лінії можуть бути прокладені в спеціальних громадських магістралях з щільною забудовою і не потребують придбання права власності на смугу відведення. Оскільки придбання землі може бути основною статтею витрат для проєктів з передачі електроенергії, підземні лінії часто є більш економічними.

2. Мінімальний вплив на навколишнє візуальне середовище. Підземна передача електроенергії зберігає природну красу і цінність землі. Лінії приховані від очей, що вирішує одну з головних проблем, пов'язаних з ПЛ – естетичний вплив. Хоча вплив залежить від місця розташування, за своєю природою ПЛ назавжди змінюють вигляд житлових кварталів, мальовничих місцевостей та історичних пам'яток.

Хоча естетичний вплив не є єдиною проблемою, пов'язаною з ЛЕП – він очолює список довгострокових наслідків, які неможливо пом'якшити. Міжнародна рада з великих електричних систем (CIGRE) у технічній брошурі «Comparison of high voltage overhead lines and underground cables. Report and Guidelines» [3] порівняла вплив на навколишнє середовище повітряних і підземних кабельних ліній, що викликає найбільше занепокоєння (рис. 1).

3. Міцність і надійність системи. Кабельні системи, побудовані під землею, зазнають мінімального впливу атмосферних умов, за винятком кінцевих точок, де кабелі та закінчення виходять на опори, підстанції та з'єднання. У той час, коли надійність системи є першочерговим завданням для більшості комунальних підприємств, підземна передача електроенергії є надійним рішенням.

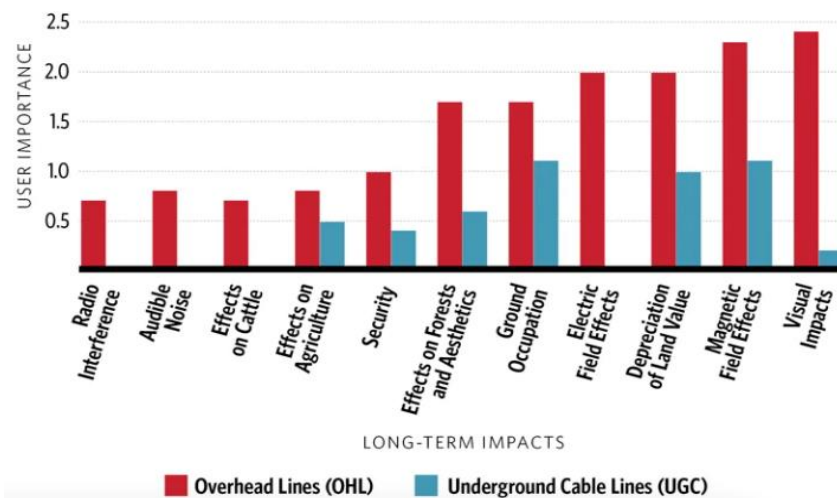


Рисунок 1 – Довготривалі коефіцієнти за недоліками для повітряних та кабельних ліній

Підземні лінії виживають навіть в екстремальних умовах:

- атмосферні умови, включаючи урагани, тайфуни, торнадо, вітер і крижані бурі;
- людська діяльність, така як вандалізм і тероризм;
- стихійні лиха, включаючи зсуви, повені, а в деяких випадках навіть сейсмічну активність.

4. Безпека. Заглиблення ЛЕП за своєю суттю є безпечним. Підземні кабелі ізольовані, електрично екрановані і знаходяться поза дорогою. За винятком обмежених місць, де кабельні аксесуари, такі як закінчення, відкриті на стовпах, кінцевих опорах і підстанціях, підземна передача електроенергії становить дуже незначний ризик:

- відсутність небезпеки ураження електричним струмом для людей або диких тварин;
- немає небезпеки зіткнення або заплутування для великих літаків або вертольотів;
- відсутність ризику пошкодження лінії внаслідок зіткнення транспортних засобів;
- відсутність ризику пожежі для людей, диких тварин, природи або будинків через вигини ліній під час вітру;
- підземна передача знаходиться в безпечній зоні досяжності.

5. Підтримка громадськості. Зацікавлені сторони громади, в тому числі мешканці, підприємства, землевласники та екологічні групи, підтримують підземні ЛЕП, оскільки вони мінімізують вплив на громаду, забезпечуючи при цьому надійне постачання електроенергії. У Чіно-Гіллс, штат Каліфорнія, компанія «Southern California Edison» будує підземну лінію напругою 500 кВ [4] за підтримки громади після того, як було висловлено протест проти ПЛ, що призвело до прийняття Каліфорнійською комісією з комунальних послуг [5] рішення про підземну передачу електроенергії.

Проект підземної підстанції Хубей [6, 7]. У 2023 році, в китайському місті Ухань, було реалізовано проект будівництва повністю підземної підстанції 220 кВ. Наразі у відкритих джерелах детальна інформація щодо цього проекту не наведена, однак деякі деталі можна визначити й з маркетингової інформації та китайських інтернет джерел.

Дана підстанція складає великий інтерес оскільки вона розташована в бізнес-центрі Учан Біньцзян поряд з великою річкою. Це означає, що механічна конструкція та ступінь вологозахисту приміщення організовано під спеціальні умови, що також викликає великий інтерес.

Підстанція передбачає місце під два трансформатори 220 кВ, вага кожного складає 243 т. Ця маса приблизно відповідає вітчизняному аналогу ТДЦ-250000/220, отже можна зробити висновки про потужність установки. Єдиним незрозумілим моментом є те, що інформація в джерелах відрізняється. У [6] вказано установку двох силових трансформаторів на 220 кВ (рис. 2).

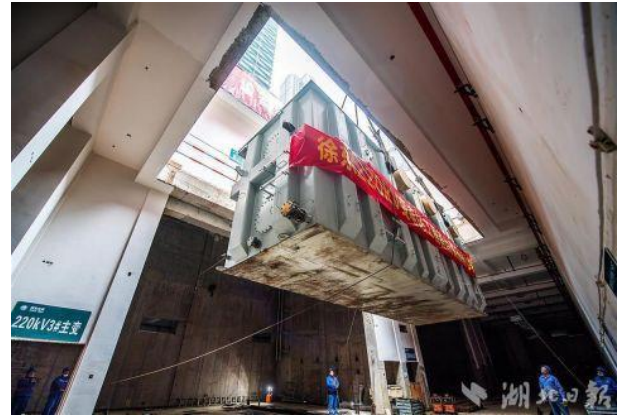


Рисунок 2 – Фото установки трансформатора в середину приміщення підземної трансформаторної підстанції

Однак у розрізі цифрового двійника проекту вказано наявність трьох силових трансформаторів (рис. 3) [7]. Це не дає можливості точно встановити тип підключення трансформаторів та режим їх роботи.



Рисунок 3 – Розріз цифрового двійника підземної підстанції, створеного в системі моделювання Bentley Systems

Також відома інформація про вихідні лінії: 8 ланцюгів вихідних ліній 110 кВ. Уся станція має внутрішню структуру з елегазовою ізоляцією, що значно зменшує площу, яку займає підстанція. Водночас підстанція також є новітньою інтелектуальною підстанцією з високим ступенем інтеграції, хорошою інтерактивністю і великою надійністю.

Іншим потенційно цікавим моментом є заглиблення підстанції. Розташування трансформатора на підземній підстанції в Ухані виконано на рівні мінус 13,50 м, що більш ніж достатньо для того, щоб захистити трансформатор від ураження ракетою.

Наприкінці 2022 р. та на початку 2023 р. відбувалися масовані ракетні атаки на енергетичні об'єкти України. Це визначає одну із головних переваг подібної конфігурації для нашої держави та енергосистеми.

Для атак на об'єкти енергетичної інфраструктури використовувалися крилаті ракети типу «Калібр» і Х-101. Конічна форма воронки характеризує заряд як нормальний металний заряд. Це дає можливість розрахувати глибину воронки за формулою:

$$W = \sqrt[3]{\frac{L}{1,83 \cdot P}} \quad (1)$$

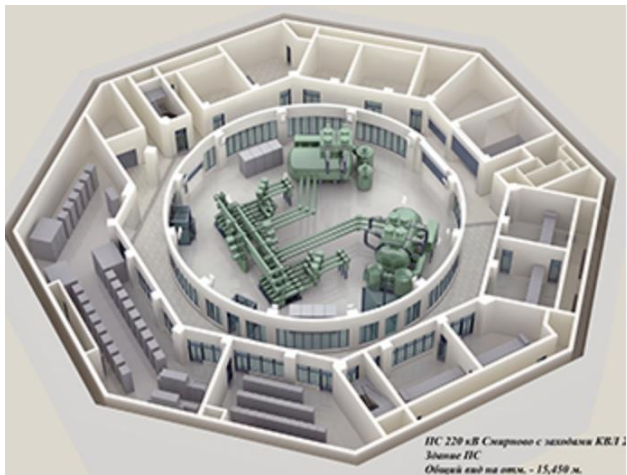
де L – вага боєголовки;

P – питома витрата вибухової речовини на м³ підірваної породи, що дорівнює 2,43.

Таким чином, було визначено, що необхідно розташувати підземну підстанцію на глибині нижче 6 метрів, адже саме такі воронки залишають після себе ракети, що найчастіше використовувалися для ударів по енергетичній інфраструктурі України.

Проект підземної підстанції «Смирново» [8]. Однак 10 роками раніше, у 2013 р., нашими співвітчизниками, Харківським проектно-конструкторським інститутом «ТЕПЛОЕЛЕКТРОПРОЕКТ-СОЮЗ», було створено проект підземної підстанції 220 кВ поблизу інноваційного центру «Сколково» у Москві.

Зображення цього унікального об'єкту наведені на рис. 4.



a



б

Рисунок 4 – Підстанція 220 кВ «Смирново»
a – ескіз із проектної документації;
б – фото з будівельного майданчику

Максимальна потужність підстанції складає 126 МВА.

Унікальність об'єкта полягає в підземному виконанні підстанції, що раніше не мала аналогів в країнах пострадянського простору. Підземна будівля виконана у вигляді восьмигранника, зовнішнім діаметром 60 метрів. Нижня позначка будівлі (приміщення кабельного поверху) розташована на відмітці мінус 18,950 м. Основне силове обладнання розподільчого пристрою 220 кВ і елегазові трансформатори встановлено на відмітці мінус 15,450.

Важливо відзначити, що для обох підстанцій заглиблення складає понад 13 м. Тобто це є базовою позначкою, від якої можна відштовхуватись при проектуванні підземних підстанцій 220 кВ, оскільки ця величина є базовою для розміщення трансформаторів та кабелів або проводів.

Але головним недоліком даних конструкцій є використання елегазового обладнання. Це створює додаткові клопоти для організації безпеки праці, потребує додаткового обладнання для безпеки та інші пов'язані із цим проблеми.

Потенційно, найбільш перспективним є звичайне виконання з використанням масляних трансформаторів та обладнання з повітряним охолодженням. Такий підхід потребує кращої системи повітряного охолодження, а значить і збільшення об'єму приміщення підстанції та колекторів для проведення, однак створює додатковий простір для пошуків найбільш ефективних конфігурацій, зменшує витрати на прилади для газової та інших типів безпеки, збільшує надійність елементів, а значить покращує показники амортизації об'єктів.

Підземні повітряні ЛЕП та їх оптимізація. Першим недоліком традиційного проектування високовольтних повітряних ЛЕП є їхні габарити. Це пов'язано з дотриманням рекомендованих відстаней між фазами та необхідністю створення захисної зони.

На відстань між фазами впливає багато параметрів, але ключовими з них є коливання, які виникають через вплив вітру, що може призвести до зчеплення проводів і пробою повітряного проміжку в разі критичного зближення проводів.

Найбільш поширеними типами коливань є:

- вібрація проводів (тросів) – періодичні коливання проводів або тросів в прогоні з частотою 3–150 Гц, які виникають у вертикальній площині під час вітру і утворюють стоячі хвилі з розмахом, що може перевищувати діаметр проводів (тросів);
- «пляска» проводів (тросів) – постійні періодичні низькочастотні (0,2–2 Гц) коливання проводів (тросів) на прогоні, які утворюють стоячі хвилі (іноді поєднуються з набігаючими) з числом напівхвиль від однієї до двадцяти і амплітудою 0,3–5 м;
- субосциляції (коливання проводів у підпрогонах) – це періодичні вітрові коливання горизонтально розміщеної пари розщеплених фазних проводів, що відбуваються з однаковими або кількома півхвилями на ділянках (так званих підпрогонах) між

суміжними міжфазними прокладками з вузловими точками в місцях встановлення прокладок.

Згідно з ПУЕ [2], захист ліній від перерахованих вище видів коливань зводиться до застосування відповідних пристроїв (демпферів) і дотримання норм довжини прогонів і міжфазних відстаней. Також в нормах «СОУ 45.2-00100227-24:2010 (Захист проводів і кабелів повторних ліній електропередачі від вітрових коливань (вібрації, галоупування, субколивань). Методичні вказівки» [9] в таблиці Б.2. вказані рекомендовані значення міжфазної відстані для ліній різних типів напруг (від 35 до 750 кВ). Виходячи з цієї таблиці, вибір міжфазної відстані виконується виходячи з довжини провисання і вертикальної відстані H . Дотримання цих рекомендацій дозволяє бути впевненим, що при більшості вітрових навантажень не виникне биття або обрив проводу.

Фрагмент цієї таблиці для напруги 110 кВ наведено в табл. 1. Значення відстані між проводами для ЛЕП різної напруги наведено в табл. 2.

Крім того, питання міжфазної відстані розглядається в ПУЕ. Тому, наприклад, відстань між фазами для ПЛ 110 кВ за формулою 2.5.22 [2] становитиме 3,3-3,6 м для стандартного одноланцюгового виконання.

Також, ця відстань суттєво залежить від кліматичних умов, таких як: вітер, ожеледі навантаження, вплив температури та районування за грозовою активністю. Варто зазначити, що ці стандарти не будуть актуальними для підземної підстанції, оскільки підземні кліматичні особливості не матимуть значного впливу, а це означає, що цими

вимогами можна знехтувати при пошуку оптимальної конструкції. Тоді пошук оптимальної конструкції зводиться до забезпечення найбільш сприятливих умов для пропускної здатності лінії, яка безпосередньо залежить від відстані між фазами [10]. Єдина умова, якої необхідно дотримуватися при компонованні, – забезпечити достатню відстань між фазами для запобігання пробою повітряного простору між провідниками.

Виходячи з цього, можна визначити мінімально допустимий повітряний проміжок між фазами [10] (рис. 5 та 6).

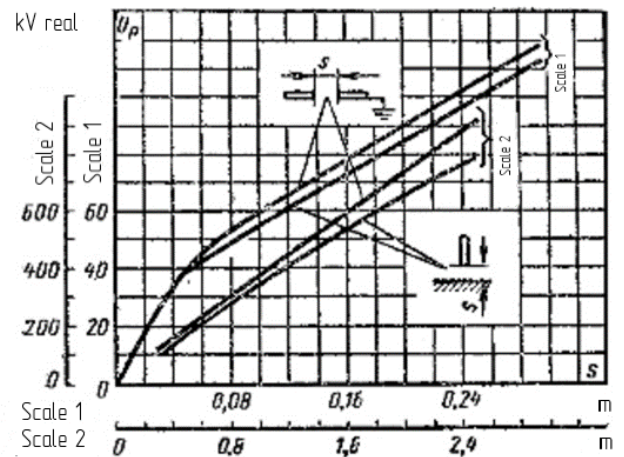


Рисунок 5 – Розрядні напруги для повітряних проміжків стрижень-стрижень і стрижень-площина при 50 Гц

Таблиця 1 – Найменші зміщення проводів сусідніх ярусів по горизонталі на проміжних опорах в районах з помірним галоупуванням (з частотою менше одного разу на 5 років) для 110 кВ [8]

Напруга ПЛ, кВ	Вертикальні відстані (H), м	Відстань по горизонталі, м, при стрілах провисання за 0 °С, м							
		4	5	6	8	12	16	20	30 і більше
110	3,0	—	—	1,15	1,70	2,40	2,80	3,50	4,15
	3,5	—	—	—	1,50	2,40	2,70	3,40	4,10
	4,0	—	—	—	1,20	2,20	2,65	3,40	4,10
	4,5	—	—	—	—	2,00	2,60	3,35	4,05
	5,0	—	—	—	—	1,80	2,50	3,25	4,00
	5,5	—	—	—	—	1,50	2,45	3,30	4,10
	6,0	—	—	—	—	1,20	2,30	3,20	4,00
	6,5	—	—	—	—	—	2,10	3,05	3,80
	7,0	—	—	—	—	—	2,00	2,90	3,70
	7,5	—	—	—	—	—	1,60	2,75	3,65
8,0	—	—	—	—	—	1,20	2,60	3,50	

Таблиця 2 – Відстань між проводами для ЛЕП в залежності від напруги

Номинальна напруга ПЛ, кВ	Найменша відстань між проводами при стрілі провисання, м							
	3	4	5	6	8	12	16	20
35	2,5	2,5	2,75	2,75	3,0	3,2	3,75	—
110	3,0	3,25	3,5	3,5	3,75	4,0	4,5	—
220	—	—	4,25	4,5	4,75	5,0	5,5	—
330	—	—	—	5,5	5,75	6,0	6,5	—
500	—	—	—	7,0	7,25	7,5	8,0	—
750	—	—	—	—	9,5	10,0	10,25	10,5

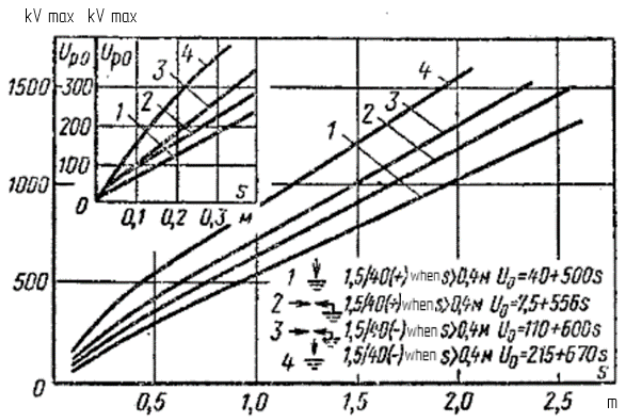


Рисунок 6 – Розряд 50 % – імпульсна напруга для повітряних зазорів стрижень-стрижень і стрижень-площина

Однак проблема з цими кривими полягає в тому, що вони розроблені для повітряних проміжків між шинами. Коли мова йде про значне зближення фаз, яке дозволяє виконати підземна лінія, похибка може мати суттєвий вплив, тому виникає необхідність створення кривих для повітряних проміжків провід-провід і провід-площина. Точні дані можна побудувати лише шляхом проведення експеримент.

Однак можна з упевненістю стверджувати, що підземне розташування ЛЕП відкриває нові простори у розробці компактних ЛЕП.

Характерною особливістю ПЛ до 220 кВ є застосування одиночних проводів [11] і, як зазначалося раніше, великими відстанями між фазами. У більшості випадків передана потужність значно перевищує натуральну. Це призводить до великих втрат напруги та потужності, зменшує дальність передачі енергії. Тільки в ідеальному випадку, коли передана потужність S дорівнює натуральній P_n , лінія не генерує і не споживає реактивну потужність, і не потребує джерела реактивної потужності або шунтувальних реакторів.

Поліпшити техніко-економічні показники можна переведенням ПЛ у режим натуральної потужності [12–14], для ПЛ традиційної конструкції це означає істотне обмеження переданої потужності. Найпростішим способом підвищення натуральної потужності є зближення сусідніх фаз. Відстань між фазами визначається не стільки електричною міцністю міжфазних проміжків, скільки умовами запобігання спілкуванню проводів. Тому встановлення міжфазних ізоляційних розпірок дає змогу унеможливити спілкування проводів і збільшити натуральну потужність лінії до 30%. Однак тільки зближення фаз не вирішує повністю проблему поліпшення режимів роботи електропередач високої напруги за одиночних відносно великих перетинів фазних проводів. Подальшим нарощуванням натуральної потужності лінії є перехід до розщеплених фаз, як це прийнято для ПЛ надвисокої напруги.

З погляду компактності виконання ЛЕП за трьох і більше складових доцільне застосування плоских фаз,

що також є оптимальною конфігурацією для використання в колекторі (рис. 7).

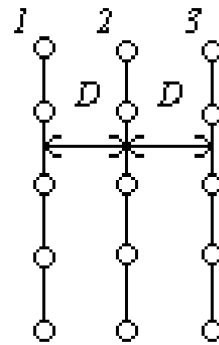


Рисунок 7 – Компактні лінії підвищеної натуральної потужності: вертикально-плоскі фази з довільним числом складових

Отже, у лініях, складених із розщеплених фаз, відстані між сусідніми складовими не залежать від числа складових у фазі, що дає змогу створювати лінії з найбільшою щільністю розміщення проводів у просторі та з найбільшою щільністю електромагнітної енергії. При цьому забезпечується збільшення натуральної потужності лінії пропорційно числу складових у фазі. Такі лінії прийнято називати компактними [15]. Порівняльну характеристику таких ліній наведено на рис. 8.

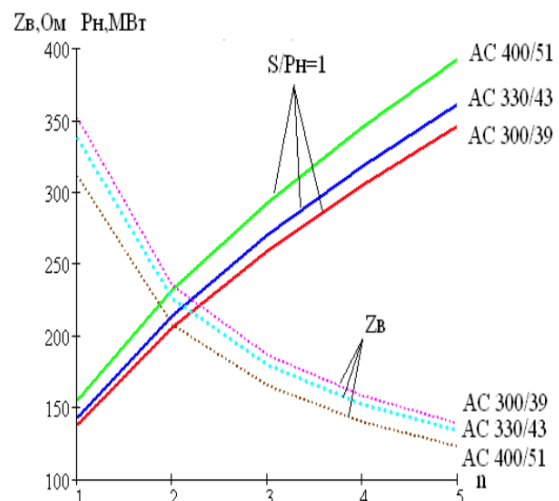


Рисунок 7 – Залежність хвильового опору Z_w та відношення переданої потужності S до натуральної P_n лінії від числа складових у фазі за різних перетинів проводів

У зв'язку з тим, що ПЛ підвищеної пропускної здатності мають збільшену кількість складових у фазі, відстань між складовими, зближення фаз до гранично допустимого за електричною міцністю, виникають нові вимоги до ізолюючої підвіски.

Найчастіше вони зводяться до:

- зменшенню будівельної довжини ізоляторів (гірлянда ізоляторів) шляхом підвищення вологорозрядної напруженості по будівельній висоті;

- усунення з міжфазового ізоляційного проміжку елементів кріпильної арматури ізоляторів;
- виключення взаємного переміщення проводів сусідніх фаз;
- полегшення кріпильної арматури при збільшених відстанях між складовими розщеплених проводів круглих фаз.

Допустимі ізоляційні розміри компактних ліній значно менші за довжину традиційних гірлянд ізоляторів. Кардинальне розв'язання проблеми пов'язане із застосуванням стрижневих полімерних ізоляторів на основі склопластиків, кремнеорганічної гуми і фторопласту. Крім того, мала маса полімерних ізоляторів визначає можливість їх використання як міжфазних ізоляційних розпірок у прольоті ПЛІ.

Висновки. В даній роботі розглянуто особливості організації сучасних підземних підстанцій на прикладі проектів «Хубей» та «Смирнове».

Серед загальних рис виявлено заглиблення станції, використання елегазового обладнання, високий рівень захищеності, складність проектувальних робіт та використання для них передових технологій моделювання.

Відмінність полягає в типах використовуваних силових трансформаторів, відмінність форми будівлі підстанції, відмінність кабельних систем та систем обміну повітря.

Кількість та наявність відмінностей у головних етапах проектування підстанцій вказує на відсутність норм та правил при проектуванні, що регламентували би найбільш оптимальні конфігурації для різних умов проектування підземних підстанцій.

Встановлено ряд переваг підземної організації передачі електроенергії. Виявлено, що підземне розташування ліній електропередачі має значні перспективи.

Запропоновано до перегляду можливість розташування ліній електропередачі під землею. Встановлено, що правила, наведені для ліній електропередачі в ПУЕ та СОУ створені для умов, що майже неможливо отримати при реальній експлуатації.

Запропоновано до перегляду використання компактних повітряних ліній електропередачі під землею. На основі розрахунків можна стверджувати, що використання компактних ліній призведе до значного збільшення пропускної здатності ліній електропередачі.

Всі наведені в роботі факти та розрахунки приводять до загального висновку про актуальність і необхідність використання підземних високовольтних підстанцій в українських умовах, необхідність встановлення норм проектування, необхідність пошуку більш оптимальних за існуючі конфігурації та вказують на можливість досягнення цих цілей.

Список літератури

1. Faria J. H. S., Santos I. N., Rosentino A. J. P., Antunes A. H. P., Silva F. M., de Paula H. Design of an underground, hermetic, pressurized, isolated and automated medium voltage substation. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2020. Vol. 1. P. 205–215. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojia.2020.3034764>.

2. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
3. CIGRE Joint Working Group 21/22.01. Comparison of high voltage overhead lines and underground cables. Report and Guidelines. CIGRE, 1996.
4. Southern California Edison. Chino Hills Underground Project Update. Chino Hills, 2015. 26 p. URL: <https://www.chinohills.org/DocumentCenter/View/11427/6-23-15-SCE-TRTP-Update?bidId=>.
5. GridLAB. Transmission in California. 2023. 40 p. URL: <https://gridlab.org/wp-content/uploads/2023/03/Transmission-in-California.pdf>.
6. 华中第一个全地下变电站首台变压器吊装. 荆楚网. 湖北日报网. 湖北新闻. 湖北门户. 权威发布. URL: http://m.cnhubei.com/content/2022-02/12/content_14493225.html. (китайською)
7. Prahladlao S. Wuhan's First Fully Underground 220-kilovolt Substation Supports World-class Power Grid. *ARC Advisory Group*. URL: <https://www.arcweb.com/blog/wuhans-first-fully-underground-220-kilovolt-substation-supports-world-class-power-grid>.
8. Будівництво унікальної підземної ПС 220 кВ «Смирнове». Харківський проектно-конструкторський інститут «Теплоелектропроект-Союз». URL: <https://tep-soyuz.com.ua/uk/projects/raspredelenie-elektroenergii/stroitelstvo-unikalnoj-podzemnoj-ps-220-kv-smirnov>.
9. СОУ 45.2-00100227-24:2010. Захист проводів і тросів повітряних ліній електропередавання від вітрових коливань (вібрації, галопування, субколиваний). Методичні вказівки. На заміну РД 34.20.182-90 ; чинний від 2010-03-24. Вид. офіц. Київ, 2010. 105 с.
10. Техніка і електрофізика високих напруг : навчальний посібник / ред.: В. О. Бржежицький, В. М. Михайлов. Харків, Київ : НТУ «ХПІ», Торнадо, НТУУ «КПІ», 2005. 930 с.
11. Xu H.-X., Wang G. M., Zhang C.-X., Yu Z.-W., Chen X. Composite right/left-handed transmission line based on complementary single-split ring resonator pair and compact power dividers application using fractal geometry. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2012. Vol. 6, no. 9. P. 1017–1025. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-map.2011.0427>.
12. Ordon T. J. F., Lindsey K. E. Considerations in the design of three phase compact transmission lines. *ESMO'95 - 1995 IEEE 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*, Columbus, OH, USA, 29 October – 3 November 1995. P. 108–114. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdeclm.1995.485044>.
13. Selga J., Coromina J., Vélez P. et al. Compact power splitter with harmonic suppression based on inductively loaded slow-wave transmission lines. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2018. Vol. 60, no. 6. P. 1464–1468. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.31181>.
14. Bumby S., Druzhinina E., Feraldi R., Werthmann D., Geyer R., Sahl J. Life Cycle Assessment of Overhead and Underground Primary Power Distribution. *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44, no. 14. P. 5587–5593. DOI: <https://doi.org/10.1021/es9037879>.
15. Шевченко С. Ю., Окунь А. А. Анализ методов расчета электрических полей установок высоких напряжений. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2010. № 4. С. 59–62.

References

1. J. H. S. Faria, I. N. Santos, A. J. P. Rosentino, A. H. P. Antunes, F. M. Silva, and H. de Paula, "Design of an underground, hermetic, pressurized, isolated and automated medium voltage substation", *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 1, pp. 205–215, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ojia.2020.3034764>
2. *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for electrical installations]*. Kyiv: Minist. Energy Coal Ind. Ukr., 2017. (in Ukrainian)
3. CIGRE Joint Working Group 21/22.01, *Comparison of High Voltage Overhead Lines and Underground Cables. Report and Guidelines*. CIGRE, 1996.

4. Southern California Edison, "Chino Hills Underground Project Update", Chino Hills, Jul. 23, 2015. [Online]. Available: <https://www.chinohills.org/DocumentCenter/View/11427/6-23-15-SCE-TRTP-Update?bidId=>
5. GridLAB, "Transmission in California", Mar. 2023. [Online]. Available: <https://gridlab.org/wp-content/uploads/2023/03/Transmission-in-California.pdf>
6. "华中第一个全地下变电站首台变压器吊装." 荆楚网-湖北日报网-湖北新闻-湖北门户 权威发布. [Online]. Available: http://m.cnhubei.com/content/2022-02/12/content_14493225.html (in Chinese)
7. S. Prahladao. "Wuhan's first fully underground 220-kilovolt substation supports world-class power grid." ARC Advisory Group. [Online]. Available: <https://www.arcweb.com/blog/wuhans-first-fully-underground-220-kilovolt-substation-supports-world-class-power-grid>
8. "Unique underground 220 kV «Smirnov» SS construction." Kharkiv Design Development Institute "ТЕПЛОЕЛЕКТРОПРОЕКТ-SOYUZ." [Online]. Available: <https://tep-soyuz.com.ua/en/projects/raspredelenie-elektroenergii/stroitelstvo-unikalnoj-podzemnoj-ps-220-kv-smirnov>
9. *Zakhyst provodiv i trosiv povitrianykh liniy elektroperedavannia vid vitrovyykh kolyvan (vibratsii, halopuvannia, subkolyvan). Metodychni vказivky [Protection of wires and cables of overhead power lines against wind fluctuations (vibration, galloping, sub-vibration). Methodological instructions]*, SOU 45.2-00100227-24:2010, Ukrainaska naukovo-tehnikna elektroenerhetychna asotsiatsiia «Aselenerho», Kyiv, 2010. (in Ukrainian)
10. V. O. Brzhezhytskyi and V. M. Mykhailov, Eds., *Tekhnika i elektrofizyka vysokyykh napruh [High voltage engineering and electrophysics]*. Kharkiv, Kyiv: NTU «KhPI», Tornado, NTUU «KPI», 2005. (in Ukrainian)
11. H.-X. Xu, G.-M. Wang, C.-X. Zhang, Z.-W. Yu, and X. Chen, "Composite handed right/left transmission line based on complementary single-split ring resonator pair and compact power dividers application using fractal geometry", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, no. 9, pp. 1017–1025, 2012, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-map.2011.0427>
12. T. J. F. Ordon and K. E. Lindsey, "Considerations in the design of three phase compact transmission lines", in *ESMO'95 - 1995 IEEE 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*, Columbus, OH, USA, Oct. 29–Nov. 3, 1995. pp. 108–114, doi: <https://doi.org/10.1109/tdcllm.1995.485044>
13. J. Selga *et al.*, "Compact power splitter with harmonic suppression based on inductively loaded slow-wave transmission lines", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 6, pp. 1464–1468, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.31181>
14. S. Bumby, E. Druzhinina, R. Feraldi, D. Werthmann, R. Geyer, and J. Sahl, "Life cycle assessment of overhead and underground primary power distribution", *Environmental Science & Technology*, vol. 44, no. 14, pp. 5587–5593, Jul. 2010, doi: <https://doi.org/10.1021/es9037879>
15. S. Yu. Shevchenko and A. A. Okun, "Analysis of computation methods of the electric fields of high voltage installations", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 4, pp. 59–62, 2010. (in Russian)

Надійшла (received) 15.12.2023

Відомості про автора (-іє) / About the Author (-s)

Шевченко Сергій Юрійович (Sergii Shevchenko) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: sergii.shevchenko@khpri.edu.ua.

Данильченко Дмитро Олексійович (Dmytro Danylchenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@khpri.edu.ua.

Дривецький Станіслав Ігоревич (Stanislav Dryvetskyi) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8181-8829>; e-mail: stanislav.dryvetskyi@khpri.edu.ua.

Потривай Андрій Едуардович (Andrii Potryvai) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1250-7525>; e-mail: Andrii.Potryvai@ieee.khpri.edu.ua.

Ганус Роман Олексійович (Roman Hanus) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: Roman.Hanus@ieee.khpri.edu.ua.