

УДК 621.316.99

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.17

РОЗПОДІЛЕННЯ ВИСОКОГО ПОТЕНЦІАЛУ В СИСТЕМІ СЕС-ПІДСТАНЦІЯ ПРИ АВАРІЙНОМУ РЕЖИМІ

Д. Є. ВОЙТЕНКО¹, С. С. РУДЕНКО^{2*}, Д. Г. КОЛУШКО²

¹ кафедра інженерної електрофізики, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

² Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: serhij_rudenko@ukr.net

АНОТАЦІЯ Досліджено особливості виникнення та перенесення електричних потенціалів у системі територіально зближених електроустановок, гальванічно пов'язаних між собою силовими кабельними лініями, на прикладі підстанції класом напруги 150/10 кВ та сонячної електростанції. Актуальність роботи зумовлена широким впровадженням концепції Smart Grid та переходом України до гібридного типу енергосистеми, що поєднує в собі об'єднану енергетичну систему та розподілену генерацію з інтеграцією відновлюваних джерел енергії. Це в свою чергу призводить до утворення складних нееквіпотенціальних систем заземлення з можливим впливом аварійних електромагнітних завад на роботу чутливого мікропроцесорного обладнання та безпеку персоналу. В роботі виконано аналіз розподілу напруги дотику та потенціалу заземлювального пристрою при однофазному замиканні на землю та прямому ударі блискавки в умовах різної геоелектричної структури ґрунту. Розроблено симуляційну модель реального заземлювального пристрою підстанції з урахуванням його топології, параметрів тришарового ґрунту та гальванічних зв'язків із заземленням сонячної електростанції. Адекватність моделі підтверджено порівнянням результатів чисельного моделювання з експериментальними вимірюваннями. В процесі дослідження проаналізовано чотири типи тришарового ґрунту, що відрізняються співвідношенням питомих опорів шарів, та встановлено кореляцію між геоелектричною структурою ґрунту і рівнями небезпечних потенціалів. Показано, що при однофазному короткому замиканні перевищення допустимих значень напруги дотику на території підстанції можливе для ґрунтів типу H та Q, тоді як на стороні сонячної електростанції ці значення залишаються безпечними. При прямому ударі блискавки встановлено різку локалізацію екстремальних потенціалів у зоні безпосереднього протікання імпульсного струму та істотне зменшення їх рівнів на віддаленому об'єкті. Отримані результати мають практичне значення для оцінювання електромагнітної стійкості сучасних энергооб'єктів, вибору технічних рішень із заземлення та блискавкозахисту, а також для підвищення надійності вторинних і вимірювальних кіл у складних системах електропостачання.

Ключові слова: Smart Grid; електроустановки; розподілена генерація; підстанція; система заземлення; коротке замикання; удар блискавки.

DISTRIBUTION OF HIGH POTENTIALS IN A PV PLANT – SUBSTATION SYSTEM UNDER FAULT CONDITIONS

D. VOITENKO¹, S. RUDENKO², D. KOLIUSHKO²

¹ Department of Engineering Electrophysics National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Research and Design Institute "Molniya", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The research investigates the features of generation and transfer of electric potentials in a system of spatially adjacent electrical installations galvanically interconnected by power cable lines, using a 150/10 kV substation and a photovoltaic power plant as a case study. The relevance of the study is driven by the wide deployment of the Smart Grid concept and Ukraine's transition toward a hybrid power system combining the interconnected power system with distributed generation based on renewable energy sources. This transition results in the formation of complex non-equipotential grounding systems, which may be exposed to emergency electromagnetic disturbances affecting the operation of sensitive microprocessor-based equipment and personnel safety. The distribution of touch voltage and grounding system potential under single-phase-to-ground faults and direct lightning strikes is analyzed for different geo-electrical soil structures. A simulation model of a real substation grounding system is developed, considering its topology, the parameters of a three-layer soil, and galvanic connections with the grounding system of the PV plant. The adequacy of the proposed model is confirmed by comparing numerical simulation results with experimental measurements. Four types of three-layer soil differing in the relationship between layer resistivities are analyzed, and a correlation between the geo-electrical soil structure and the levels of hazardous potentials is established. It is shown that, under single-phase ground faults, exceedance of permissible touch voltage limits at the substation site is possible for soils of types H and Q, whereas the corresponding values at the PV plant remain within safe limits. In the case of a direct lightning strike, a pronounced localization of extreme potentials is observed in the immediate current injection area, accompanied by a significant reduction of potential levels at the remote installation. The obtained results are of practical importance for assessing the electromagnetic robustness of modern power

facilities, selecting technical solutions for grounding and lightning protection, and improving the reliability of secondary and measuring circuits in complex power supply systems.

Keywords: Smart Grid; electrical installations; distributed generation; substation; grounding system; short circuit; lightning strike

Вступ

Широке впровадження гібридної системи електропостачання, що поєднує в собі елементи локалізованої електричної мережі та об'єднаної енергетичної системи, ставить перед науково-технічних персоналом енергетичної галузі нові виклики. Сучасна концепція Smart Grid дозволяє їх реалізувати за допомогою об'єднання розподілених джерел генерації, систем накопичення енергії, автоматизованих засобів керування та цифрових каналів обміну даними в єдину електроенергетичну інфраструктуру [1]. До її складу входять інверторні джерела живлення, мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики, телемеханічні комплекси та інформаційно-керуючі системи. Така структура забезпечує адаптивне керування режимами роботи мережі, підвищення надійності електропостачання та ефективну інтеграцію відновлюваних джерел енергії в енергетичну систему.

У процесі експлуатації елементів Smart Grid між окремими об'єктами формується гальванічний зв'язок, зумовлений спільними системами комунікацій, екранами силових та контрольних кабелів, нульовими та захисними провідниками тощо [2–6]. Наявність таких електричних зв'язків призводить до утворення протяжних замкнутих контурів, а зазначені електроустановки можна розглядати як територіально зближені (див. рис. 1).

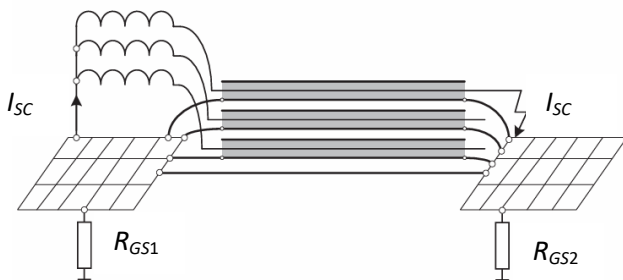


Рис. 1 – Ілюстративне представлення з'єднання заземлювальних пристроїв двох електроустановок через екрани трифазного силового кабеля [15];

R_{GS1} , R_{GS2} – опір заземлювальних пристроїв (ЗП) двох електроустановок; I_{SC} – струм однофазного замикання на землю

За наявності гальванічних зв'язків існує теоретична та практична можливість появи підвищених потенціалів та протікання струмів по екранах кабелів (див. рис. 1), нульових провідниках та комунікаційних лініях [7–15]. Такі явища можуть виникати внаслідок коротких замикань, комутаційних процесів або імпульсних електромагнітних впливів природного та техногенного походження. Перебіг

небажаних струмів у вторинних та інформаційних ланцюгах, екранах силових кабелів створює передумови для порушення електромагнітної сумісності [10], зниження надійності роботи мікропроцесорних пристроїв та підвищення ризику відмов у гібридних системах електропостачання, а також виникнення небезпечних потенціалів для живих істот.

У роботах [12,15] розроблено модель, яка слугує для розрахунку перехідних процесів. Проте вказані моделі не враховують реальний розподіл потенціалів на ЗП, імітуючи його виключно концентрованим опором. Експериментально-розрахунковий спосіб визначення напруги на вторинних колах вимірювальних трансформаторів розглянуто [13] та [16]. Проте зазначений спосіб не застосовувався для дослідження потенціалів, що виникають між зближеними електроустановками. Враховуючи, що струми однофазного замикання в Україні можуть сягати до 60 кА [17], а максимальним нормованим значенням струму прямого удару блискавки прийнято 200 кА [18], очікувані значення потенціалів можуть сягати десятків кіловольт. Тому дослідження потенціалів, що будуть виникати в системі, зображеній на рис. 1, при протіканні аварійних струмів є актуальною задачею.

Мета роботи

Мета роботи – дослідження потенціалів, що виникають на обладнанні у випадку однофазного замикання на землю або ударі блискавки в територіально зближених електроустановках.

Розробка симуляційної моделі

Як об'єкт дослідження обрано реальну схему ЗП діючої підстанції класом напруги 150/10 кВ, розташованої в центральній частині України (див. рис. 2). Конфігурація заземлювальної сітки та стан контактних з'єднань були визначені в ході електромагнітної діагностики ЗП, виконаного фахівцями НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» з використанням комплексу KNTR-1 [19]. ЗП підстанції виконано з прямокутної сталеві штаби 4×40 мм, глибина залягання є змінною й знаходиться в межах від 0,5 м до 1,4 м, також наявні провідники, що проходять поверхнею.

Затвердженням місцевою владою проектом передбачається будівництво СЕС та її безпосереднє приєднання до шин 10 кВ розглянутої підстанції за допомогою кабельних ліній. Об'єднання ЗП різних об'єктів через оболонки кабелів створює єдину складну систему, поведінка якої при аварійних режимах короткого замикання (КЗ) та атмосферних

перенапругах суттєво відрізняється від поведінки ізольованих об'єктів.

Для побудови адекватної розрахункової моделі необхідно детально проаналізувати топологію та електричні зв'язки досліджуваної системи. На рис. 3 наведено план взаємного розташування проєктованої СЕС (лівий нижній кут) та існуючої підстанції (правий верхній кут), червоною лінією позначена траса проходження силового кабелю. Об'єкти розташовані на відстані близько 3 км один від одного, що обумовлює ймовірність електромагнітного взаємовпливу через металеві комунікації та мінімізує "перетікання" струмів через ґрунт (див. рис. 3).

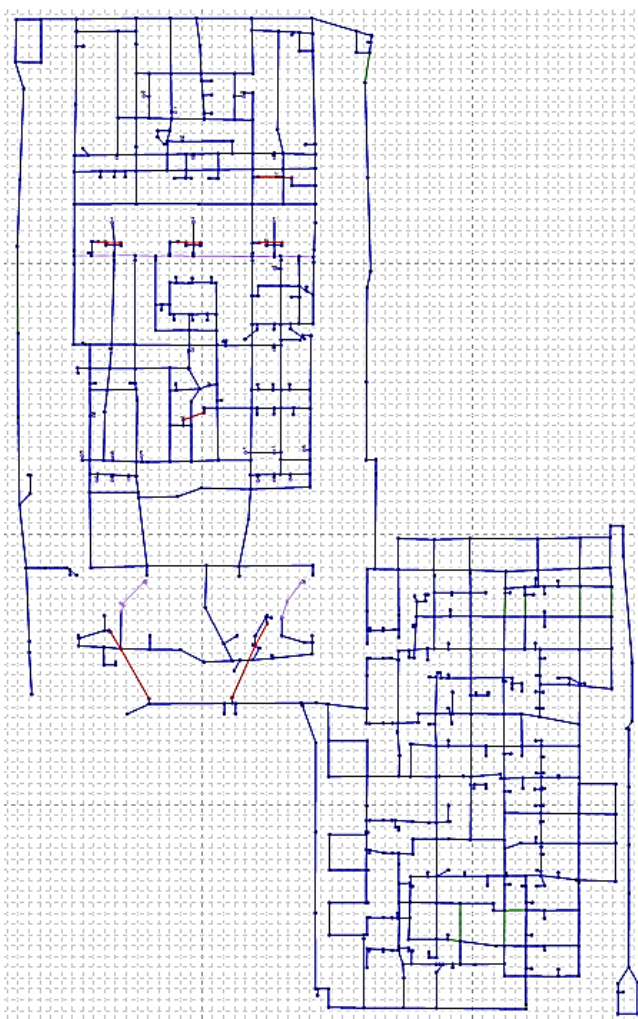


Рис. 2 – Схема ЗП досліджуваної підстанції 150/10 кВ

Схема проєктованої СЕС є типовою для об'єктів такого класу і включає масиви фотоелектричних модулів, згрупованих у стрінги, інверторні підстанції для перетворення постійного струму в змінний.

ЗП СЕС наведено на рис. 4, який представляє собою сітку з поздовжніми заземлювачами, що проходять вздовж лінії встановлення фотомодулів. Для аналізу обрано точки, що розташовані на

діаметральних кінцях (1 та 3) та по центру СЕС (2). Сам ЗП виконано також зі сталевий штаби 4×40 мм, а глибина залягання становить 0,5 м.



Рис. 3 – План розташування СЕС (1) та ПС (2), з'єднаних кабелем 10 кВ (3)

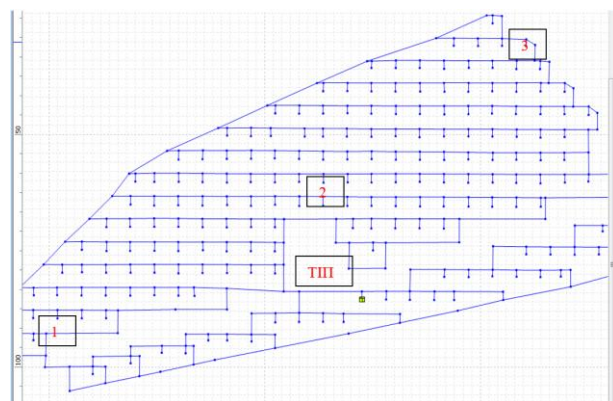


Рис. 4 – Схема гальванічних з'єднань заземлювачів для досліджуваної СЕС, що створена в комплексі LiGro

З'єднання між розподільчим пристроєм 10 кВ підстанції та вихідними комірками СЕС виконується силовим кабелем марки ААБл-10. Екран кабелю та сталеві броні заземлені з двох боків. Для коректного моделювання у програмному комплексі «LiGro» введено еквівалентний елемент – провідник-зв'язок. Його поперечний переріз прийнято рівним 120 мм^2 , що еквівалентно сумарній провідності оболонки та броні кабельної лінії. Цей елемент гальванічно з'єднує ЗП обох об'єктів у єдину нееквіпотенційну систему, дозволяючи розрахувати розподіл струмів та потенціалів.

Оцінка адекватності моделі

З використанням програмного комплексу «LiGro» [20], який базується на методі інтегродиференціальних рівнянь та використовує аналітичне рішення задачі про потенціал електричного поля в тришаровому середовищі, була розроблена математична модель ЗП вказаної підстанції. Для підтвердження адекватності розробленої моделі в

програмному комплексу «LiGro» використано результати експериментальних вимірювань, що виконані за методикою [21]. Значення вимірювального струму, для імітації однофазного замикання на землю складає $I_{mes} = 4,76$ А.

Розрахункова модель створювалася з урахуванням дійсних параметрів ґрунту на території об'єкта (див. рис. 5).

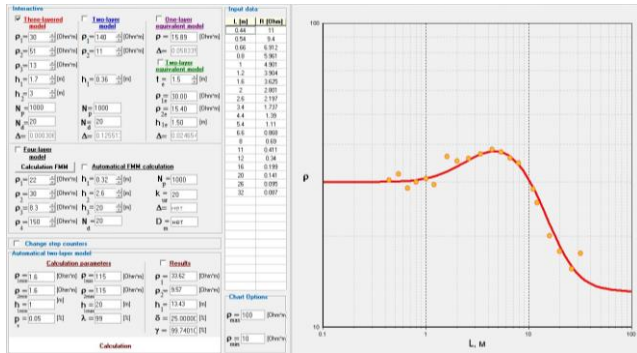


Рис. 5 – Результати зондування ґрунту на території досліджуваного об'єкта та результати його інтерпретації в програмі VEZ-4A: питомий опір 1-го шару $\rho_1 = 30$ Ом·м; 2-го шару $\rho_2 = 51$ Ом·м; 3-го шару $\rho_3 = 13$ Ом·м; товщина 1-го шару $h_1 = 1,7$ м, 2-го шару $h_2 = 3,0$ м

На першому етапі було проведено порівняння експериментальних даних напруги дотику U_{texp} з результатами комп'ютерного моделювання U_{tcal} у контрольних точках підстанції (табл. 1).

Таблиця 1 – Експериментальні та розрахункові значення напруги дотику (при $I_{mes} = 4,76$ А)

№	Найменування обладнання	Номер точки	U_{texp} , мВ	U_{tcal} , мВ	Похибка δ , %
1	С-1-2	875	25	25,0	0,0
2	Л-38-0	876	26	25,7	1,2
3	Л-38-1	882	17	13,4	21,2
4	РВ-2 ф. А	894	13	15,9	22,3
5	РВ-1 ф. В	898	8	7,7	3,8

Таким чином, отримана середня похибка становить 9,7 %, що доводить адекватність розробленої моделі.

Визначення розподілу потенціалів при КЗ

На основі статистичного аналізу для 523 підстанцій України класом напруги 110 (150) кВ, наведених у даних [17], встановлено, що значення струму однофазного замикання на землю знаходиться в діапазоні від 0,7 кА до 37 кА (див. рис. 6), а середнє значення складає 9,49 кА. В подальшому розрахунок режимів короткого замикання виконано саме для середнього значення струму.

Для врахування можливої варіативності характеристик ґрунту та їх впливу на нормовані значення ЗП, у дослідженні розглядаються чотири типи тришарового ґрунту, вибір яких пояснено в роботі [22] (табл. 2). Значення меж поділу шарів ґрунту, залишаються ті ж самі, що й у вихідній моделі підстанції.

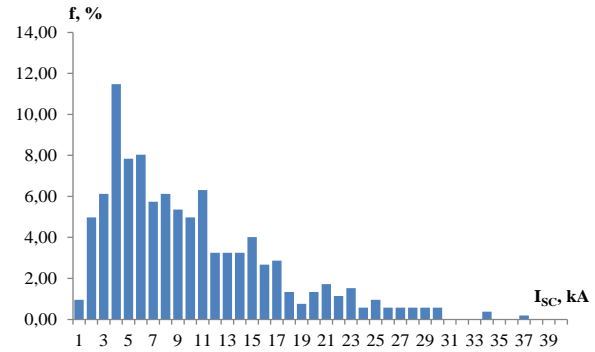


Рис. 6 – Відсотковий розподіл струмів ОЗЗ для вибірки підстанцій 110 (150) кВ України

Таблиця 2 – Питомий опір тришарового ґрунту, досліджуваного в роботі [22]

Тип ґрунту	ρ_1 , Ом×м	ρ_2 , Ом×м	ρ_3 , Ом×м
Q	100	50	10
A	10	50	100
H	100	50	100
K	10	100	10

Отримані результати моделювання однофазного КЗ на стороні 150 кВ були проаналізовані з урахуванням допустимих значень напруги дотику U_t і напруги на заземлювальному пристрої U_{GS} , регламентованих ПУЕ [23], які становлять відповідно 65 В і 5000 В (табл. 3). Додатково слід зауважити, що при протіканні аварійних струмів (КЗ або удару блискавки) до ізоляції контрольних кабелів, вторинні кола яких заземлені в залі релейних панелей, буде прикладатися різниця потенціалів між точкою заземлення вимірювальними пристроями (ТН або ТС) та залогом релейних панелей. Ця величина корелює зі значенням U_{GS} та еквіпотенційністю ЗП.

Порівняння розрахункових значень із нормованими показує, що при КЗ на ошиновці 150 кВ на території підстанції присутнє перевищення допустимого рівня напруги дотику для типів ґрунту Q та H ($U_t = 149,3$ В та $102,6$ В відповідно). Для ґрунтів типу А та К значення U_t не перевищують нормованого значення, що пояснюється вирівнюванням потенціалів у верхньому шарі ґрунту з більш високою провідністю.

Аналіз напруги на ЗП показує, що для всіх досліджених типів ґрунтів значення U_{GS} залишаються нижче допустимого значення 5000 В, проте істотно

відрізняються між собою. Максимальні значення U_{GS} характерні для ґрунтів типу Н і А, що корелюють з характером геоелектричної структури. Для типу Н, де виконується співвідношення ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), наявність більш провідного середнього шару сприяє інтенсивному горизонтальному розтіканню струму, але одночасно обмежує ефективне занурення струму в більш глибокі шари, що призводить до підвищення потенціалу заземлювального пристрою. Аналогічна тенденція, хоч і менш виражена, спостерігається для ґрунту типу А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$), де зростання питомого опору з глибиною зумовлює концентрацію струмів у верхніх шарах.

Таблиця 3 – Значення нормованих параметрів при однофазному КЗ на стороні 150 кВ

Тип ґрунту	Нормований параметр	Максимальне значення, В		Місце КЗ
		На ПС-150	На СЕС	
А	U_t	29,98	5,62	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	2634,7	189,26	ОД-2 ф.В
Н	U_t	102,6	24,71	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	3312,2	306,88	ОД-2 ф.В
К	U_t	33,61	0,56	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	710,5	7,65	ОД-2 ф.В
Q	U_t	149,3	2,14	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	898,3	13,8	ОД-2 ф.В

Для ґрунту типу Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) характерним є поступове зменшення питомого опору з глибиною, що забезпечує більш ефективне відведення струму в нижні шари ґрунту та обмежує зростання U_{GS} . Проте високий питомий опір верхнього шару призводить до значних градієнтів потенціалу на поверхні землі, що пояснює найбільше значення напруги дотику серед усіх випадків, що розглядаються. Для ґрунту типу К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$) наявність провідного верхнього шару та зниження питомого опору у більш глибоких шарах сприяють як ефективному розтіканню струму, так і вирівнюванню потенціалів на поверхні, що призводить до мінімальних значень U_t та U_{GS} .

При цьому виникнення КЗ на стороні 150 кВ не носить загрози персоналу СЕС й найімовірніше електрообладнанню. Проте потенціал до 300 В в точках заземлення вторинних кіл та низьковольтних елементів може бути небезпечним, що необхідно враховувати при проектуванні.

Варто зауважити, що у обох енергооб'єктів заземлювальні сітки є добре розвинутими, які дозволяють ефективно відводити струми в землю та вирівнювати потенціал. На діючому об'єкті подібний ЗП зустрічається досить рідко.

Визначення розподілу потенціалів при прямому ударі блискавки

Окрім КЗ, небезпеку для функціонування цифрових підстанцій, систем Smart Grid тощо несуть імпульсні перенапруги, що виникають при ударі блискавки.

У роботі виконано моделювання прямого удару блискавки з амплітудою струму 100 кА (з часовими параметрами імпульсу 10/350 мкс), що відповідає III рівню блискавкозахисту згідно з ІЕС 62305. У цьому режимі досліджувався розподіл імпульсних потенціалів у системі «ПС-СЕС». У табл. 4 наведено результати моделювання при прямому ударі в блискавковідвід поруч з обладнанням підстанції.

Таблиця 4 – Значення нормованих параметрів при прямому ударі блискавки на території ПС-150 кВ

Тип ґрунту	Нормований параметр	Максимальне значення, В		Місце удару блискавки
		На ПС-150	На СЕС	
А	U_t	3 593	111,8	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	53 171,8	889,0	ОД-2 ф.В
Н	U_t	5 742	24,7	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	58 839,02	306,9	ОД-2 ф.В
К	U_t	3 714	25,9	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	26 229,1	119,7	ОД-2 ф.В
Q	U_t	7 194	46,0	ОД-1 ф.В
	U_{GS}	27 517,3	161,4	ОД-2 ф.В

У табл. 5 наведено результати аналогічного моделювання при ударі блискавки на території СЕС.

Таблиця 5 – Значення нормованих параметрів при прямому ударі блискавки на території СЕС

Тип ґрунту	Нормований параметр	Максимальне значення, В		Місце удару блискавки
		На ПС-150	На СЕС	
А	U_t	9,4	6 778	В т. 1
	U_{GS}	851,7	47 929,2	В т. 1
Н	U_t	23,3	11060	В т. 1
	U_{GS}	1134,5	52 601,5	В т. 1
К	U_t	3,6	7 241	В т. 1
	U_{GS}	93,6	30 411,1	В т. 1
Q	U_t	15,9	12 840	В т. 1
	U_{GS}	131,4	32 528,19	В т. 1

У випадку прямого удару блискавки на території ПС-150 кВ максимальні значення нормованих параметрів формуються безпосередньо в межах заземлювального пристрою підстанції. Для

всіх типів ґрунту напруга дотику U_t на ПС сягає кількох кіловольт (3,6–7,2 кВ), а напруга заземлювального пристрою U_{GS} – десятків кіловольт (26–53 кВ). Слід зауважити, що згідно з ІЕС 61000-2-5-1995 напруга завад U_{EM} при ударі блискавки не повинна перевищувати допустимої напруги однополярних перехідних процесів у ланцюгах управління та сигналізації – 4000 В.

Водночас на території СЕС у цьому випадку U_t сягає 112 В, а U_{GS} – 889 В для ґрунту типу А, а для інших типів – значно нижче допустимого значення. Такий характер розподілу свідчить про те, що при ударі блискавки в ПС основна частина імпульсного струму локалізується в її ЗП, а кабельне з'єднання 10 кВ виконує роль імпедансного бар'єра, який істотно обмежує перенесення високих потенціалів у бік СЕС.

При ударі блискавки на території СЕС екстремальні значення U_t та U_{GS} фіксуються вже на стороні СЕС: напруга дотику досягає 6,8–12,8 кВ, а напруга на ЗП – 30–53 кВ залежно від типу ґрунту. При цьому на ПС-150 кВ відповідні значення залишаються низькими: U_t не перевищує 25 В, а U_{GS} – близько 1,1 кВ, що істотно нижче допустимих рівнів. Це підтверджує, що імпульсний струм блискавки ефективно замикається в локальному заземлювачі СЕС і лише незначна його частина індукуює потенціали на заземлювальному пристрої підстанції.

Таким чином, для обох випадків характерною є чітка локалізація небезпечних потенціалів у зоні безпосереднього протікання струму блискавки та різке зменшення рівнів U_t і U_{GS} на віддаленому об'єкті.

Висновки

У роботі розроблено симуляційну модель та виконано апробацію методики дослідження розподілу струмів та потенціалів в системі гальванічно пов'язаних територіально зближених електроустановок. Адекватність розробленої моделі була підтверджена експериментальним шляхом. Розбіжність розрахунку та експерименту не перевищує 9,7 %.

Було визначено, що при середньому струмі ОЗЗ у 9,5 кА на стороні 110 (150) кВ напруга дотику на розглянутій діючій підстанції буде перевищувати допустиму величину 65 В при типах ґрунту Н та Q (102,6 В та 149,3 В відповідно), при типах ґрунту К та А значення напруги дотику менше за допустиме значення (33,6 В та 30,0 В відповідно). Напруга на ЗП в усіх випадках не перевищувала допустиме значення 5 кВ, при цьому значення є близькими для ґрунтів типу К та Q (710,5 В та 898,3 В відповідно) і для ґрунтів типу Н та А (312,2 В та 2634,7 В відповідно). При цьому напруга дотику на обладнанні сонячної станції не перевищує 25 В, а напруга на ЗП сонячної електростанції 310 В.

Було визначено, що при ударі блискавки струмом 100 кА (відповідає 3 рівню

блискавкозахисту) в підстанцію напруга дотику на її обладнанні буде складати кілька тисяч вольт (3593 В, 3312 В, 5 742 і 7194 В для типу ґрунту А, К, Н і Q), а напруга на ЗП кілька десятків тисяч вольт (53,2 кВ, 26,2 кВ, 58,8 кВ і 26,2 кВ). При цьому напруга дотику на обладнанні сонячної електростанції буде знаходитися в межах від 25 В до 112 В, а напруга на ЗП від 120 В до 889 В.

Аналогічна картина, проте з дещо вищими абсолютними значеннями, спостерігається при ударі блискавки на території сонячної електростанції: напруга дотику на її обладнанні буде складати кілька тисяч вольт (6778 В 7241 В, 11060 В і 12840 В для типу ґрунту А, К, Н і Q), а напруга на ЗП кілька десятків тисяч вольт (47,9 кВ, 30,4 кВ, 52,6 кВ і 32,5 кВ відповідно). При цьому напруга дотику на обладнанні підстанції буде знаходитися в межах від 3,6 В до 23 В, а напруга на ЗП від 131 В до 852 В.

Таким чином, встановлено, що рознесення електроустановок та з'єднання їх кабелем на 2,5 км дозволяє мінімізувати взаємний вплив між електроустановками при однофазному замиканні на землю, проте залишається достатньо чутливим з точки зору потенціалів на ЗП при ударі блискавки. Напруга на ЗП в кілька десятків кіловольт може бути небезпечною для вторинних та вимірювальних кіл низковольтного обладнання, а тому потребує встановлення пристроїв захисту від сплесків.

Результати роботи показують, що потребують додаткового дослідження вплив відстані в ґрунті між двома електроустановками, а також параметрів кабельної лінії на взаємні електромагнітні процеси, що виникають в подібних системах. Пропонується на основі подальших подібних досліджень розробити критерій при якому дві (або більше) електроустановок можуть вважатися територіально зближеними і потребують додаткових заходів щодо вирівнювання потенціалів або зменшення їх абсолютних значень.

Список літератури

1. Kamran M. *Fundamentals of smart grid systems*. Elsevier, 2022. 482 p.
2. MIL-STD-461G:2015. Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. *Department of Defense USA*. 2015. 280 p.
3. IEC 61000-4-25:2001. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-25: *Testing and measurement techniques*. 2001. 98 p.
4. STANAG 4370 АЕСТР 500:2016. Electromagnetic Environmental Effects Test and Verification. NATO Standardization Agency, 2016. 1125 p.
5. Williams T., Armstrong K. *EMC for systems and installations*. Oxford, Newnes. 2000. 312 p.
6. Liu G., Zhao P., Qin Y., Zhao M., Yang Z., Chen H. Electromagnetic immunity performance of intelligent electronic equipment in smart substation's electromagnetic environment. *Energie*. 2020. № 13. art. no. 1130. doi:10.3390/en13051130.
7. Li S., Fu Y., Xie Y. Study on the calculation method of interference voltage of shielded cable under the condition of

- lightning strike in smart substation grounding grid. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2018. № 439. Art. no. 052035. doi:10.1088/1757-899X/439/5/052035.
8. Lu Y., Li H., Zhang Y., Hu J., Yin L., He W., Yan N., Li T., Zou J., Yan Y., Zhou L. The implementation of a cost-efficient damped AC testing methodology for transmission cables based on DC-AC conversion and distributed partial discharge detection. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2024. № 18, P. 3278–3288, doi:10.1049/gtd2.13272.
9. Musa B. U., Siew W. H., Judd M. D. Computation of transient electromagnetic fields due to switching in high-voltage substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. № 2 (25). P. 1154–1161. doi:10.1109/TPWRD.2009.2034008.
10. Croveti P. S. *Electromagnetic interference and compatibility*. MDPI. 2021. 206 p., doi:10.3390/books978-3-0365-0501-5.
11. Abdel-Baqi O. J., Onsager M. G., Miller P. J. The effect of available short-circuit capacity and trail cable length on substation voltage amplification in surface excavation industry. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. № 4 (52). P. 3518–3526, doi:10.1109/TIA.2016.2535162.
12. Lobodzinskiy V. Transient analysis in three-phase cable lines with the transposition phase cables conductive screens during short circuit fault. *Proc. IEEE 3rd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv. Ukraine, 2021. P. 413–416. doi:10.1109/UKRCON53503.2021.9575468.
13. Kangozhin B., Dautov S., Zhalgabayev S., Nurmakhanova A., Bakyt G. A computational and experimental method for determining the current in the braid of a control cable during a short circuit. *Applied Sciences*. 2025. № 19 (15). Art. no. 10379. doi:10.3390/app151910379.
14. Boutsika T. N., Papathanassiou S. A. Short-circuit calculations in networks with distributed generation. *Electric Power Systems Research*. 2008. № 7 (78). P. 1181–1191, doi:10.1016/j.eprsr.2007.10.003.
15. Angelov J., Vuletik J., Todorovski M., Ackovski R. Equivalent circuit of single-core cable line with groundreturn wire and variable earth resistivity along its path. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2014. № 90. P. 100–104. doi:10.12915/pe.2014.12.23.
16. Glebov O. Y., Koliushko D. G., Koliushko G. M., Ereemeeva E. P. On the issue of design of grounding systems of 330(220) kV substations to ensure the electromagnetic compatibility of secondary circuits. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. № 5. P. 72–79. doi:10.20998/2074-272X.2018.5.11.
17. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Saliba A. N. Determination of the scope of the experimental-calculation method for measuring the touch voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. № 1. P. 77–82. doi:10.20998/2074-272X.2023.1.11.
18. IEC 62035:2010. Protection against lightning – Part 1: General principles. 2010.
19. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Koliushko G. M., Plichko A. V. Testers for measuring the electrical characteristics of grounding systems by IEEE standards. *Proc. IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv. Ukraine. 2020. P. 216–220. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250116.
20. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Istomin O. Ye., Saliba A. N. Simulation of electromagnetic processes in the grounding system with a short circuit in the operating high-voltage substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. № 4. P. 75–80, doi:10.20998/2074-272X.2022.4.11.
21. Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Аналіз методів контролю стану заземлювальних пристроїв діючих энергооб'єктів на сучасному етапі. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 1. С. 67–72, doi:10.20998/2074-272X.2019.1.11.
22. Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Фактори впливу на напругу дотику з огляду розробки рекомендацій для реконструкції заземлювального пристрою *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 29–36. doi:10.15407/techned2019.03.29.
23. *Правила улаштування електроустановок*. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.

References (transliterated)

1. Kamran M. *Fundamentals of smart grid systems*. Elsevier, 2022, 482 p.
2. MIL-STD-461G:2015. Interface Standard – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. Department of Defense USA, 2015, 280 p.
3. IEC 61000-4-25:2001. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-25: Testing and measurement techniques, 2001, 98 p.
4. STANAG 4370 AECTP 500:2016. Electromagnetic Environmental Effects Test and Verification. NATO Standardization Agency, 2016, 1125 p.
5. Williams T., Armstrong K. *EMC for systems and installations*. Oxford, Newnes, 2000, 312 p.
6. Liu G., Zhao P., Qin Y., Zhao M., Yang Z., Chen H. Electromagnetic immunity performance of intelligent electronic equipment in smart substation's electromagnetic environment. *Energies*, 2020, vol. 13, art. no. 1130, doi:10.3390/en13051130.
7. Li S., Fu Y., Xie Y. Study on the calculation method of interference voltage of shielded cable under the condition of lightning strike in smart substation grounding grid. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 439, art. no. 052035, doi:10.1088/1757-899X/439/5/052035.
8. Lu Y., Li H., Zhang Y., Hu J., Yin L., He W., Yan N., Li T., Zou J., Yan Y., Zhou L. The implementation of a cost-efficient damped AC testing methodology for transmission cables based on DC-AC conversion and distributed partial discharge detection. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2024, vol. 18, pp. 3278–3288, doi:10.1049/gtd2.13272.
9. Musa B. U., Siew W. H., Judd M. D. Computation of transient electromagnetic fields due to switching in high-voltage substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 1154–1161, doi:10.1109/TPWRD.2009.2034008.
10. Croveti P. S. *Electromagnetic interference and compatibility*. MDPI, 2021, 206 p., doi:10.3390/books978-3-0365-0501-5.
11. Abdel-Baqi O. J., Onsager M. G., Miller P. J. The effect of available short-circuit capacity and trail cable length on substation voltage amplification in surface excavation industry. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 3518–3526, doi:10.1109/TIA.2016.2535162.
12. Lobodzinskiy V. Transient analysis in three-phase cable lines with the transposition phase cables conductive screens during short circuit fault. *Proc. IEEE 3rd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv,

- Ukraine, 2021, pp. 413–416, doi:10.1109/UKRCON53503.2021.9575468.
13. Kangozhin B., Dautov S., Zhalgabayev S., Nurmakhanova A., Bakyt G. A computational and experimental method for determining the current in the braid of a control cable during a short circuit. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, no. 19, art. no. 10379, doi:10.3390/app151910379.
 14. Boutsika T. N., Papathanassiou S. A. Short-circuit calculations in networks with distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 2008, vol. 78, no. 7, pp. 1181–1191, doi:10.1016/j.epsr.2007.10.003.
 15. Angelov J., Vuletik J., Todorovski M., Ackovski R. Equivalent circuit of single-core cable line with groundreturn wire and variable earth resistivity along its path. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, vol. 90, pp. 100–104, doi:10.12915/pe.2014.12.23.
 16. Glebov O. Y., Koliushko D. G., Koliushko G. M., Ereemeeva E. P. On the issue of design of grounding systems of 330(220) kV substations to ensure the electromagnetic compatibility of secondary circuits. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 72–79, doi:10.20998/2074-272X.2018.5.11.
 17. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Saliba A. N. Determination of the scope of the experimental-calculation method for measuring the touch voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 1, pp. 77–82, doi:10.20998/2074-272X.2023.1.11.
 18. IEC 62035:2010. Protection against lightning – Part 1: General principles, 2010.
 19. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Koliushko G. M., Plichko A. V. Testers for measuring the electrical characteristics of grounding systems by IEEE standards. *Proc. IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 216–220, doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250116.
 20. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Istomin O. Ye., Saliba A. N. Simulation of electromagnetic processes in the grounding system with a short circuit in the operating high-voltage substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 75–80, doi:10.20998/2074-272X.2022.4.11.
 21. Koliushko D. G., Rudenko S. S. Analysis of methods for monitoring of existing energy objects grounding devices state at the present stage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 1, pp. 67–72, doi:10.20998/2074-272X.2019.1.11.
 22. Koliushko D. G., Rudenko S. S. The factors of the influence on the touch voltage from the review of the development of recommendations for the reconstruction of the grounding device. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 3, pp. 29–36, doi:10.15407/techned2019.03.29.
 23. *Electrical installation regulations*. Kharkiv, Fort Publ., 2017, 760 p.

Відомості про авторів (About authors)

Войтенко Денис Євгенійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри інженерної електрофізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0007-2347-6334; e-mail: Denys.Voitenko@iee.khpi.edu.ua

Voitenko Denys – student of Department of Engineering Electrophysics National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0007-2347-6334, e-mail: Denys.Voitenko@iee.khpi.edu.ua

Руденко Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник Науково-дослідного та проєктно-конструкторського інституту «Молнія», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2544-1545; e-mail: serhij_rudenko@ukr.net

Serhii Rudenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher, Leading researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2544-1545; e-mail: serhij_rudenko@ukr.net

Коліушко Денис Георгійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проєктно-конструкторського інституту «Молнія», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3112-4260; e-mail: denny4791@gmail.com

Denis Koliushko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher, Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3112-4260; e-mail: denny4791@gmail.com

Войтенко Д. Є., Руденко С. С., Коліушко Д. Г. Розподілення високого потенціалу в системі СЕС–підстанція при аварійному режимі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 127–134. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.17.

Please cite this article as:

Voitenko D., Rudenko S., Koliushko D. Distribution of high potentials in a PV plant–substation system under fault conditions. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 127–134, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.17.

*Надійшла (received) 01.02.2026
Прийнята (accepted) 17.03.2026
Опублікована (published) 02.04.2026*