

А. Я. Яцейко

Національний університет «Львівська політехніка»,
кафедра електроенергетики та систем управління,
andrii.y.yatseiko@lpnu.ua

З. М. Бахор

Національний університет «Львівська політехніка»,
кафедра електроенергетики та систем управління,
zinovii.m.bakhor@lpnu.ua

ДУГОВІ ПЕРЕНАПРУГИ У ЗМІШАНІЙ ПОВІТРЯНО-КАБЕЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ 35 кВ

<http://doi.org/10.23939/>

© Яцейко А.Я., Бахор З.М., 2023

Розподільні електричні мережі напругою 35 кВ здебільшого використовуються для живлення споживачів електроенергії, які розташовані у сільській місцевості. Ці мережі, які в основному мають повітряні лінії, нормально функціонують за радіальним принципом, хоча у більшості випадків вони виконані замкненими або з двостороннім живленням. За останні роки змінюється структура електричних мереж 35 кВ, вони перетворюються з повітряних у повітряно-кабельні за рахунок будівництва у сільській місцевості кабельних ліній напругою 35 кВ, які у більшості випадків виконують кабелями з ізоляцією із зшитого поліетилену. Це призводить до значного збільшення ємнісного струму замикання на землю. Електричні мережі 35 кВ працюють з ізолюваною нейтраллю або з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор, якщо ємнісний струм замикання на землю в мережі перевищує 10 А. На даний час, якщо електрична мережа 35 кВ обладнана пристроями селективного захисту від однофазного замикання на землю, що діють на вимикання пошкодженого приєднання, то компенсацію ємнісного струму не виконують. Зміна структури електричних мереж за рахунок нових кабельних ліній призводить до зміни параметрів мереж, а саме до збільшення їх ємнісного струму замикання на землю. Це впливає на характер дугових електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах та до зростання рівня перенапруг під час дугових замикань фази на землю.

Наведено результати дослідження комп'ютерного моделювання перехідних процесів у конкретній електричній мережі 35 кВ з ізолюваною нейтраллю під час дугових замикань фази на землю. Отримані при цьому максимальні кратності перенапруг перевищують теоретично очікувані за відомими теоріями виникнення та розвитку перенапруг. Показано розподіл перенапруг в мережі та вплив кабельної лінії на їх кратність.

Ключові слова: електрична мережа; дугова перенапряга; ізолювана нейтраль; однофазне замикання на землю, цифрова модель.

Постановка проблеми

Розвиток електричних мереж (ЕМ) 35 кВ за рахунок будівництва у них КЛ 35 кВ, здебільшого кабелями з ізоляцією із зшитого поліетилену (ЗПЕ), призводить до зростання ємнісного струму

Дугові перенапруги у змішаній повітряно-кабельній електричній мережі 35 кВ

замикання на землю мережі. Залежно від нормованої величини цього струму мережі працюють з ізольованою або компенсованою нейтраллю. Якщо ємнісний струм замикання на землю мережі перевищує 10 А, то у такій мережі необхідно встановлювати дугогасний реактор або резистор, або одночасно дугогасний реактор і резистор. На сьогодні компенсацію ємнісного струму замикання на землю в мережах з ємнісним струмом замикання на землю, який перевищує 10 А, можна не виконувати, якщо такі мережі обладнані пристроями селективного захисту від однофазного замикання на землю, що діють на вимикання пошкодженого приєднання [1].

Зростання ємнісного струму замикання на землю в діючій мережі за рахунок нових КЛ збільшує ймовірність виникнення в мережі ОЗЗ. Дугові ОЗЗ переривчастого характеру, які супроводжуються значними тривалими перенапругами, є небезпечними для ізоляції електрообладнання. Володіючи інформацією про рівні перенапруг, їх очікувані максимальні кратності в мережі, під час розроблення проекту розвитку мережі необхідно приймати оптимальні заходи по обмеженню небезпечних рівнів перенапруг та їх недопущенню. Для цього треба мати інформацію для мережі, яка розвивається за рахунок нових КЛ, про можливі максимальні перенапруги.

Мета та завдання дослідження

Будівництво нових кабельних ліній напругою 35 кВ призводить до зміни параметрів електричних мереж 35 кВ, що впливає на протікання у таких мережах дугових електромагнітних перехідних процесів. Метою дослідження було визначення очікуваного максимального рівня перенапруг у вузлах заданої ЕМ під час дугових ОЗЗ. Для цього необхідно було сформувати цифрову модель ЕМ, яка б адекватно відтворювала процеси у ній під час ОЗЗ, та дослідити перенапруги в мережі без та з кабельною лінією під час дугових замикань фази на землю. Оцінити вплив кабельної лінії на кратність перенапруг у вузлах мережі.

Аналіз останніх досліджень

Дослідженням перенапруг в розподільних мережах 6-35 кВ, які працюють з ізольованою чи компенсованою нейтраллю приділена значна увага. У роботах [2-11], наведено результати дослідження процесів виникнення та розвитку дугових перенапруг під час ОЗЗ в розподільних мережах 6-35 кВ, вказані ймовірні кратності перенапруг та фактори, які на них впливають.

Процес виникнення та розвитку перенапруг в ЕМ з ізольованою нейтраллю під час дугових ОЗЗ описують відомі теорії Петерсена, Петерса-Слепяна та Беякова-Джуварли, які є підтверджені результатами теоретичних і експериментальних досліджень [2-10]. Максимальні ймовірні перенапруги в мережах 35 кВ дозволяє отримати теорія Петерсена, що підтверджують результати комп'ютерного моделювання дугових ОЗЗ в мережі 35 кВ з ізольованою нейтраллю, які наведені у [4-7].

Поява програмних комплексів сприяла більш якісному дослідженню перехідних процесів в ЕМ. Це стосується і дослідження дугових перенапруг під час ОЗЗ в РЕМ 6-35 кВ. У роботах [4-10] викладено результати цифрового моделювання процесу виникнення та розвитку перенапруг, очікуваних рівнів перенапруг, впливу режиму нейтралі мережі на рівень перенапруг. Значна увага приділена моделюванню елементів ЕМ (силових трансформаторів, ТН, шин, ЛЕП, дугогасних котушок) [8-11].

Виклад основного матеріалу

Дослідження перенапруг під час дугових ОЗЗ було виконано для ділянки електричної мережі 35 кВ схема якої наведена на рис. 1. Повітряно-кабельна мережа живиться від секції шин 35 кВ ПС

«Богородчани» 110/35/10 кВ. ПС «Ватра» має зв'язок з електричною мережею 35 кВ кабельною лінією «Богородчани-Ватра» довжиною 8,4 км, яка виконана кабелем типу АПвЕгаПУ-1×120.

Загальна довжина повітряних ліній ЕМ 35 кВ становить 49,65 км та кабельної лінії – 8,4 км. Ємнісний струм замикання на землю в ЕМ 35 кВ без КЛ рівний 4,62 А. Ємнісний струм замикання на землю ЕМ 35 кВ з КЛ «Богородчани-Ватра» рівний 31,0 А.

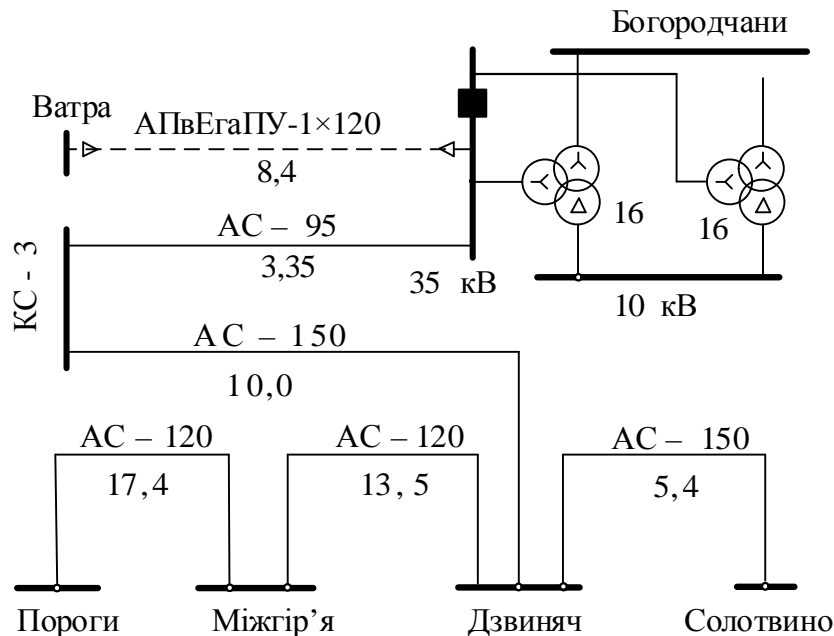


Рис 1. Схема досліджуваної електричної мережі

Дослідження дугових перенапруг під час ОЗЗ в електричній мережі 35 кВ виконане з використанням цифрового комплексу REC [12] у якому було сформовано трифазну модель мережі (рис. 2). Елементи електричної мережі: джерело живлення, силові трансформатори, шини розподільних установок підстанцій, трансформатори напруги (типу ЗНОМ-35), повітряні та кабельні лінії були представлені цифровими моделями, параметри яких обчислені відповідно до їх типу та конструктивного виконання. Для отримання адекватної картини перехідного процесу та рівня перенапруг в електричній мережі у моделі представлено активні опори струмопроводів з врахуванням поверхневого ефекту, ємності фаз і міжфазні ємності, провідності стоку та трансформатори напруги з параметрами їх магнітної системи [8–11].

Для отримання максимальних рівнів перенапруг у досліджуваній мережі під час комп'ютерного моделювання дугових ОЗЗ використана теорія Петерсена, так як за цією теорією найбільші значення перенапруг перевищують $4U_{фm}$ [2]. У роботах [4-7] наведені отримані під час комп'ютерного моделювання дугових ОЗЗ в мережах 35 кВ кратності перенапруг, величини яких перевищують $6U_{фm}$.

Дослідження дугових ОЗЗ в ЕМ 35 кВ виконано без КЛ «Богородчани-Ватра» та з КЛ за умови виникнення ОЗЗ на шинах 35 кВ ПС «Богородчани». У табл. 1 наведено результати отриманих значень максимальних перенапруг та їх кратності відносно номінальної фазної напруги $U_{тф ном}$ за ОЗЗ на шинах 35 кВ ПС «Богородчани». Характер розвитку дугової перенапруги на шинах 35 кВ найбільш віддаленої ПС «Пороги» для електромережі без та з КЛ «Богородчани-Ватра» наведено на рис. 3.

Дугові перенапруги у змішаній повітряно-кабельній електричній мережі 35 кВ

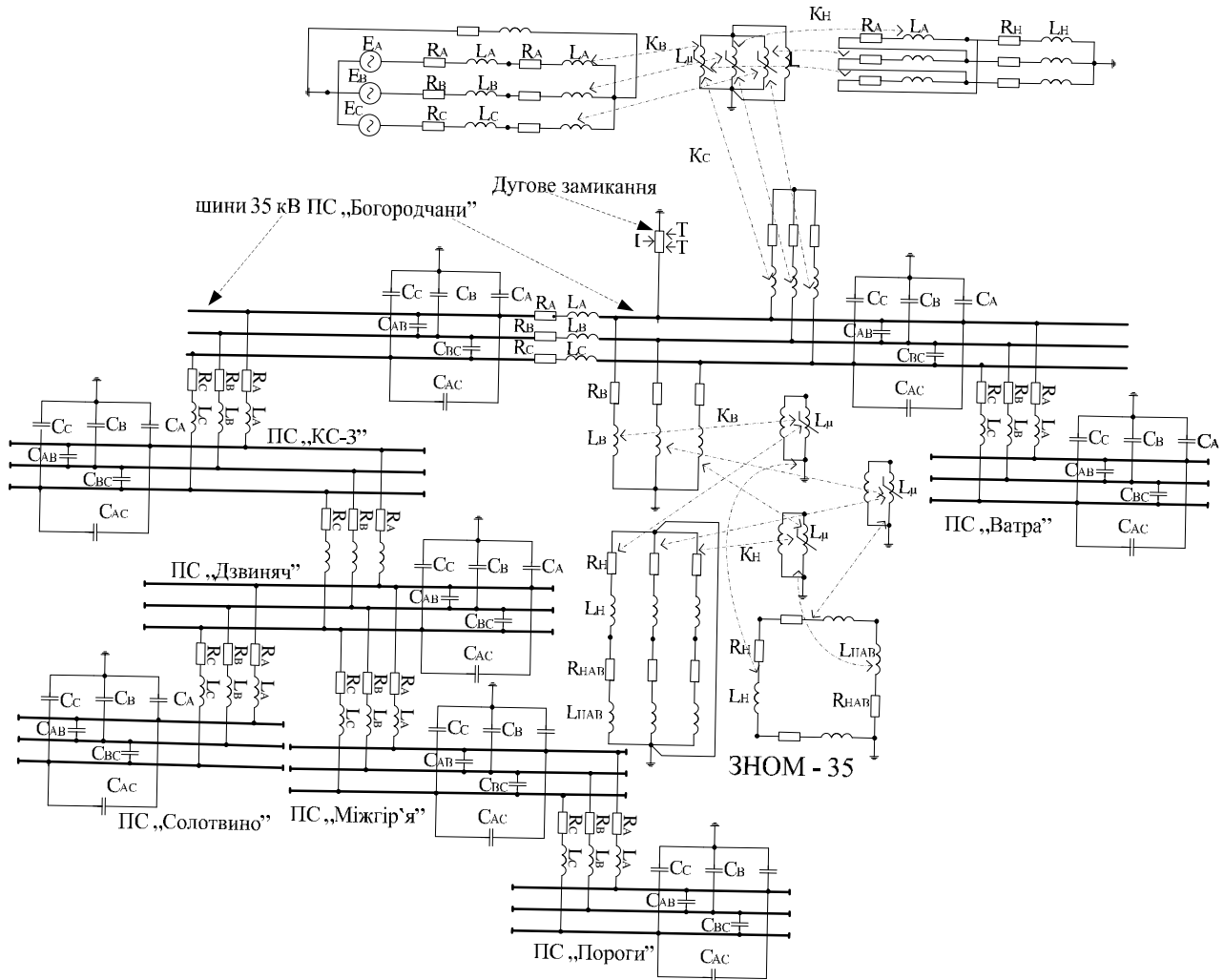


Рис. 2. Цифрова модель для дослідження дугових перенапруг в ЕМ 35 кВ

Таблиця 1

Результати досліджень величин перенапруг під час дугових ОЗЗ в ЕМ 35 кВ

ПС	без КЛ		з КЛ	
	$u(t)_{\max \text{ ф, кВ}}$	K_U	$u(t)_{\max \text{ ф, кВ}}$	K_U
Богородчани (місце ОЗЗ)	75,43	2,64	168,6	5,90
Солотвино	82,19	2,87	191,1	6,68
Пороги	85,97	3,0	208,0	7,28
КС-3	78,16	2,73	172,2	6,02
Міжгір'я	79,71	2,79	177,2	6,2
Дзвиняч	81,81	2,86	185,8	6,5
Ватра	-	-	196,7	6,88

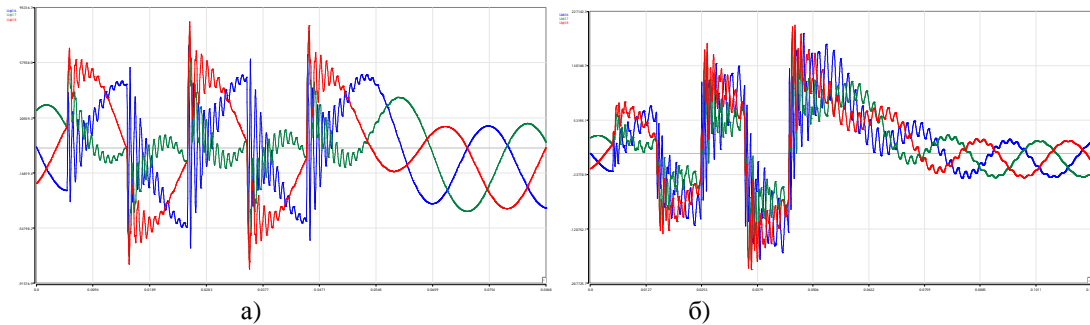


Рис. 3. Характер розвитку дугової перенапруги на шинах ПС «Пороги»: а) без КЛ, б) з КЛ «Богородчани-Ватра»

За результатами виконаних досліджень встановлено, що за дугового ОЗЗ у діючій електричній мережі 35 кВ перенапруги не перевищують $3U_{\text{тф ном}}$. У місці виникнення замикання на шинах 35 кВ ПС «Богородчани» кратність перенапруги становить $2,64U_{\text{тф ном}}$, а на віддалених від місця виникнення ОЗЗ підстанціях «Солотвино» та «Пороги» кратність перенапруг незначно зростає та, відповідно, становить на шинах 35 кВ ПС «Солотвино» - $2,87U_{\text{тф ном}}$ та на ПС «Пороги» - $3U_{\text{тф ном}}$.

У випадку повітряно-кабельної мережі, тобто з КЛ «Богородчани-Ватра» кратність перенапруг зростає і перевищує більше ніж у два рази рівень перенапруг на шинах підстанцій цієї мережі без КЛ. Максимальний рівень перенапруг буде на шинах найбільш віддалених підстанцій. Зокрема, отримані перенапруги на шинах 35 кВ ПС «Пороги» сягатимуть $7,28U_{\text{тф ном}}$.

Висновки

1. Під час дугових ОЗЗ переривчастого характеру в ЕМ 35 кВ з ізольованою нейтраллю можуть виникати перенапруги, які перевищують відомий теоретично обґрунтований рівень перенапруги за теорією Петерсена. Отримана під час дослідження на цифровій моделі кратність перенапруги перевищила 7.
2. Кабельні лінії в ЕМ 35 кВ з ізольованою нейтраллю, які призводять до зростання ємнісного струму замикання на землю понад нормоване значення стосовного його компенсації, зумовлюють в мережі небезпечні для електрообладнання рівні перенапруг під час дугового ОЗЗ.

Перспективи подальших досліджень

Передбачається виконання більш ґрунтовних досліджень щодо поширення перенапруг у змішаних повітряно-кабельних мережах, впливу параметрів мережі на кратність перенапруг, заходів з ефективного обмеження та недопущення високих кратностей перенапруг в електромережах.

Список літератури

- [1] Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Форт, 2017. – 760 с.
- [2] Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – №5. – С. 31-36.
- [3] Сабарно Л. Р., Кошман В. І., Севастюк І. М. Дослідження дугових перенапруг у випадку одно- і двофазних замикань на землю у розподільній мережі з ізольованою нейтраллю. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. 2017. № 1 (6). С. 17-21. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/6860>
- [4] Сегада М. С., Равлик О. М., Бахор З. М., Яцейко А. Я. Перенапруги під час дугових однофазних замикань на землю в електричних мережах 35 кВ // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2021. – Вип. 60. – С. 38–43. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.038>

[5] Z. Bakhor, A. Yatseiko, R. Ferensovych. Multiplicity of overvoltages during arc single phase earth faults in 35 kV electrical grids. *Energy Engineering and Control Systems*, 2021, Vol. 7, No. 2, pp. 111 – 116. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.02.111>

[6] Кротенок В.В. Расчет перенапряжений в распределительной сети при прерывистых дуговых замыканиях на землю с различными режимами заземления нейтрали [Электронный ресурс]. Web-сайт: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-perenapryazheniy-v-raspredelitelnoy-seti-pri-preryvistykh-dugovykh-zamykaniyah-na-zemlyu-s-razlichnymi-rezhimami-zazemleniya/viewer>.

[7] Яцейко А.Я. Дослідження впливу режиму роботи нейтралі електромережі 35 кВ на рівні дугових перенапруг / А.Я. Яцейко, К.В. Козак, О.Б. Горошко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 2(15). – С. 314-318. <http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/23497>

[8] Y. Varetsky. Overvoltages in MV industrial grid under ground faults. *Energy Engineering and Control Systems*, 2019, Vol. 5, No. 2, pp. 75-80. <https://doi.org/10.23939/jeecs2019.02.075>

[9] Сегада М.С., Бахор З.М., Равлик Н.О., Бакало Г.Ш. Внутрішні перенапруги в електричних мережах 6...10 кВ та захист від перенапруг // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць № 1(13). – Київ.- 2006.- С.23-30

[10] Varetsky Y., Bakhor Z., Ravlyk A. Transients in 10-35 kV electric networks with ungrounded neutrals under earth faults. *Proc. of VII Int. Symp. „Short Circuit Currents in Power Systems”*, Warsaw, 1996, pp. 1.20.1-1.20.4.

[11] Варецький Ю.О., Равлик О.М., Бахор З.М. Особливості моделювання процесів при замиканнях на землю у мережах з ізольованою нейтраллю. *Технічна електродинаміка*. – 1994. – №2. – С. 61-63.

[12] Равлик О.М., Равлик Н.О. Програмний комплекс «REC» для аналізу процесів в електричних мережах, системах їх захисту й автоматики. *Свідоцтво про реєстр. авт. права на твор.* – № 62351, 2015.

References

[1] Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok. – Vydannya ofitsiyne. Minenerhovuhillya Ukrayiny. – KH.: Fort, 2017. – 760 s.

[2] Belyakov N.N. Issledovaniye perenapryazheniy pri dugovykh zamykaniyakh na zemlyu v setyakh 6 i 10 kV s izolirovannoy neytral'yu // *Elektrichestvo*. – 1957. – №5. – S. 31-36.

[3] Sabarno L. R., Koshman V. I., Sevastyuk I. M. Doslidzhennya duhovyykh perenapruh u vypadku odno- i dvofaznykh zamykan' na zemlyu u rozpodil'niy merezhi z izol'ovanoyu neytrallyu. *Enerhetyka ta komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi v APK*. 2017. № 1 (6). S. 17-21. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/6860>

[4] Sehedo M. S., Ravlyk O. M., Bakhor Z. M., Yatseyko A. YA. Perenapruhy pid chas duhovyykh odnofaznykh zamykan' na zemlyu v elektrychnykh merezakh 35 kV // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny*. – 2021. – Vyp. 60. – S. 38–43. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.038>

[5] Z. Bakhor, A. Yatseiko, R. Ferensovych. Multiplicity of overvoltages during arc single phase earth faults in 35 kV electrical grids. *Energy Engineering and Control Systems*, 2021, Vol. 7, No. 2, pp. 111 – 116. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.02.111>

[6] Krotенок V.V. Raschet perenapryazheniy v raspredelitel'noy seti pri preryvistykh dugovykh zamykaniyakh na zemlyu s razlichnymi rezhimami zazemleniya neytrali [Yelektronniy resurs]. Web-sayt: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-perenapryazheniy-v-raspredelitelnoy-seti-pri-preryvistykh-dugovykh-zamykaniyah-na-zemlyu-s-razlichnymi-rezhimami-zazemleniya/viewer>.

[7] Yatseyko A.YA. Doslidzhennya vplyvu rezhymu roboty neytrali elektromerezh 35 kV na rivni duhovyykh perenapruh / A.YA. Yatseyko, K.V. Kozak, O.B. Horoshko // *Naukovi pratsi Donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*. Seriya: «Elektrotekhnika i enerhetyka». – 2013. – № 2(15). – S. 314-318. <http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/23497>

[8] Y. Varetsky. Overvoltages in MV industrial grid under ground faults. *Energy Engineering and Control Systems*, 2019, Vol. 5, No. 2, pp. 75-80. <https://doi.org/10.23939/jeecs2019.02.075>

[9] Sehedo M.S., Bakhor Z.M., Ravlyk N.O., Bakalo H.SH. Vnutrishni perenapruhy v elektrychnykh merezakh 6...10 kV ta zakhyst vid perenapruh // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny*. Zbirnyk naukovykh prats' № 1(13). – Kyiv.- 2006.- S.23-30

[10] Varetsky Y., Bakhor Z., Ravlyk A. Transients in 10-35 kV electric networks with ungrounded neutrals under earth faults. *Proc. of VII Int. Symp. „Short Circuit Currents in Power Systems”*, Warsaw, 1996, pp. 1.20.1-1.20.4.

[11] Vares'kyi YU.O., Ravlyk O.M., Bakhor Z.M. Osoblyvosti modelyuvannya protsesiv pry zamykanniyakh na zemlyu u merezakh z izol'ovanoyu neytrallyu. *Tekhnichna elektrodynamika*. – 1994. – №2. – S. 61-63.

[12] Ravlyk O.M., Ravlyk N.O. *Prohramnyy kompleks «REC» dlya analizu protsesiv v elektrychnykh merezhakh, systemakh yikh zakhystu y avtomatyky. Svidotstvo pro reyestr. avt. prava na tvir. – № 62351, 2015.*

A. Yatseiko,

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,
andrii.y.yatseiko@lpnu.ua

Z. Bakhor,

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,
zinovii.m.bakhor@lpnu.ua

ARC OVERVOLTAGES IN A 35 KV MIXED AIR-CABLE ELECTRICAL NETWORK

© Yatseiko A., Bakhor Z., 2023

Distribution networks with a voltage of 35 kV are mostly used to supply electricity consumers located in rural areas. These networks, which mainly have overhead lines, normally function according to the radial principle, although in most cases they are closed or with two-way power. In recent years, the structure of 35 kV electric network has been changing, they are being transformed from aerial to aerial-cable due to the construction of 35 kV cable lines in rural areas, which in most cases are performed with cables with cross-linked polyethylene insulation. This results in a significant increase in capacitive earth fault current. 35 kV electrical networks operate with an isolated neutral or with a neutral grounded through a reactor, if the capacitive earth fault current in the network exceeds 10 A. Currently, if the 35 kV electric network is equipped with devices for selective shutdown of a single-phase earth fault, then compensation of the capacitive current do not perform. A change in the structure of electrical networks due to new cable lines leads to a change in network parameters, namely to an increase in their capacitive ground fault current. This affects the nature of arcing electromagnetic transients in electrical networks and the increase in the level of overvoltages during arcing of a phase to the ground.

The results of the study of computer modeling of transient processes in a specific 35 kV electrical network with an isolated neutral during single-phase arcing to the ground are presented. The maximum values of overvoltages obtained in this case exceed theoretically expected according to known theories of occurrence and development of overvoltages. The distribution of overvoltages in the network and the influence of the cable line on their multiplicity are shown.

Keywords: electrical network; arc overvoltage; isolated neutral; single-phase earth fault, digital model