

УДК 621.315.1

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.015>

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ НА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМПЕНСАЦІЙНОГО РЕАКТОРА

В.В. Кучанський*, канд. техн. наук, **Д.О. Малахатка****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

У роботі показано вплив рівнів поздовжньої несиметрії на розрахунок опорів компенсаційних реакторів для зменшення значень перенапруг у паузі однофазного автоматичного включення. Розглянуто ступінь впливу схеми транспозиції проводів на вибір опору компенсаційного реактора та на значення резонансних перенапруг у циклі однофазного автоматичного повторного включення. У статті показано актуальність проблеми дослідження резонансних процесів у лініях електропередавання надвисокої напруги. Виконано дослідження процесів у лініях електропередавання надвисокої напруги задля розробки та запровадження заходів із запобігання перенапругам. Розглянуто резонансні перенапруги, що виникають внаслідок неповнофазних режимів роботи лінії електропередавання надвисокої напруги. Виконано оцінювання коефіцієнтів несиметрії для різних схем транспозиції. Для вибору опору компенсаційного реактора було взято дані наявних високовольтних ліній електропередавання 750 кВ. Наведено рекомендації щодо впровадження заходів попередження та обмеження резонансних перенапруг. Розглянуто актуальні теоретичні та практичні проблеми експлуатації ліній електропередавання надвисокої напруги та показано шляхи подальших досліджень. Бібл. 14, рис. 5., табл. 2.

Ключові слова: неповнофазний режим, резонансні перенапруги, компенсаційний реактор, транспозиція проводів, поздовжня несиметрія.

Загальна характеристика проблеми. Одним з найбільш ефективних заходів підвищення надійності ліній електропередавання надвисокої напруги (ЛЕП НВН) вважається однофазне автоматичне повторне включення (ОАПВ). Серед основних проблем, які виникають під час здійснення циклу ОАПВ, треба зазначити резонансні перенапруги (РП) на відімкненій фазі в разі утворення резонансного контуру групами однофазних шунтувальних реакторів та ємностей лінії. Нині для компенсації міжфазних ємностей задля зменшення значень перенапруг застосовується чотирипроменевий реактор, причому важливу роль за умови експлуатації відіграє правильний вибір значення компенсаційного реактора, що підключений до нейтралі групи однофазних шунтувальних реакторів. Дослідження впливу компенсаційних реакторів (КР) на процеси у разі неповнофазних режимів проводяться відтоді, як почалась експлуатація ліній електропередавання надвисокої напруги. Головним напрямом попередніх досліджень був пошук правильного вибору значення опору КР для обмеження РП та скорочення часу горіння дуги змінного струму під час ОАПВ без урахування впливу пофазної несиметрії [1–5].

Дотепер аналіз режимів у схемах з поперечною компенсацією та пофазною відмінністю поздовжніх параметрів здійснювався з певними спрощеннями, зокрема розглядалася не реальна, а ідеалізована транспозиція ЛЕП НВН [1–4]. Результати такого підходу дають тільки якісну оцінку процесів у паузі ОАПВ, оскільки рівні пофазної несиметрії можуть суттєво впливати на значення РП для реальних ЛЕП НВН [1, 5–9] через більш точне налаштування резонансного контуру. Водночас запропоноване в [5–9] представлення реальної транспонованої лінії співвідношеннями, отриманими з використанням заступних схем та статистичних моделей, які ґрунтуються на моделюванні методом Монте-Карло, є складним і громіздким, що на практиці ускладнює отримання результатів з подальшим аналізом.

Досвід експлуатації ліній електропередавання показав, що транспозиційні опори є конструктивним елементом траси, що знижує надійність роботи ліній і ускладнює проведення профілактичних випробувань і ремонтів. Складні схеми транспозиції зазвичай спричиняють ускладнення конструкцій опор і подорожчання ліній електропередавання внаслідок збільшення кількості гірлянд ізоляторів і загальної ваги опор. Тому подовження циклів транспозиції та зменшення їхньої кількості для ліній електропередавання виглядає дуже доцільним, оскільки призводить до скорочення числа транспозиційних опор.

Мета статті – обґрунтування схем транспозиції ЛЕП НВН, що забезпечують допустимий рівень несиметрії в нормальному режимі та врахування ступеня впливу пофазної несиметрії на вибір значення КР.

Запропонований підхід до розв'язання проблеми. Наслідки неповного та некоректного підходу до вибору індуктивного опору КР можна побачити, виконавши аналіз результатів попередніх досліджень [1,4,5-9]. У роботах не були враховані, зокрема, пофазна відмінність параметрів і реальна схема транспозиції лінії. Вибір індуктивного опору КР здійснювався без урахування геометричного розташування у просторі фаз лінії, з огляду на припущення про те, що лінія ідеально транспонована. Наскільки таке спрощення недопустиме через спотворення реальної фізичної картини процесів можна побачити в [6-9]. До того ж наведений підхід ґрунтується на гіпотезі повної компенсації міжфазної ємності, що на практиці не може бути принциповим та призводить до негативних наслідків, наприклад, некоректної роботи релейного захисту та обладнання [3]. Як наслідок, такий підхід має багато недоліків, і застосування в магістральній мережі розрахованих значень параметрів КР з вище наведеними допущеннями не гарантує запобігання РП.

Пофазна відмінність електричних параметрів повітряних ліній (ПЛ) електропередавання є одним з основних джерел несиметрії струмів і напруги промислової частоти в електричних мережах [1–4]. Несиметрія в ЛЕП НВН може досягати такого рівня, що стає неприпустимою за умовами роботи релейного захисту та генераторів через протікання струмів зворотної послідовності, що спричиняють їхнє підвищене нагрівання. Найпростіший, надійний та ефективний засіб зниження несиметрії струмів і напруги в лініях електропередавання надвисокої напруги – транспозиція фаз ліній.

Різниця між параметрами фаз на одному кроці транспозиції не компенсується повністю на всьому циклі, оскільки на кожному з кроків лінія є в різних умовах. Результируючі параметри фаз лінії для циклу загалом виходять різними. Тому навіть за точної симетрії систем струмів і напруг біля одного кінця повного циклу транспозиції ці системи виходять несиметричними біля іншого його кінця. Чим більша довжина лінії і вища її номінальна напруга, тим більша несиметрія, яка може вносити суттєві корективи в розрахунки опорів КР. Отже, схеми транспозиції ліній НВН мають обґрунтовуватися, зважаючи не тільки на забезпечення допустимого рівня несиметрії в нормальному режимі, але й на створення умов для успішного гасіння дуги підживлення та ліквідації резонансних перенапруг у процесі усунення однофазних дугових замикань циклом спрацювання ОАПВ [10, 11].

На рис.1 наведено схему традиційної класичної транспозиції проводів з реальними довжинами лінії.

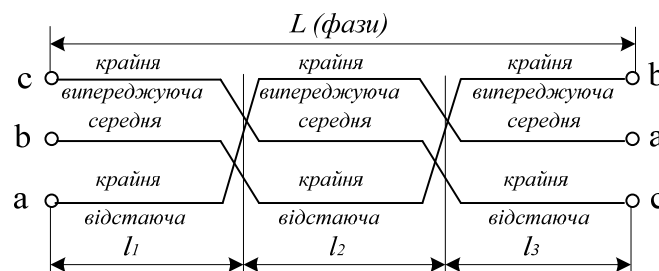


Рис. 1

На рис.2 наведено спрощену схему повної схеми транспозиції проводів.

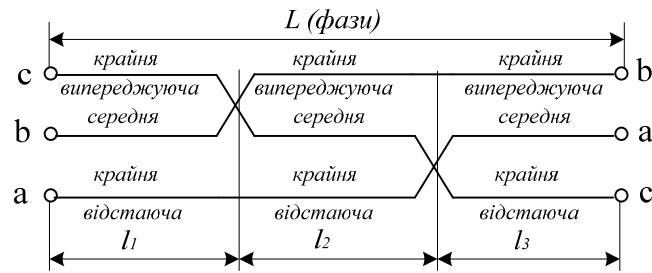


Рис. 2

На рис.3 наведено схему неповного циклу транспозиції.

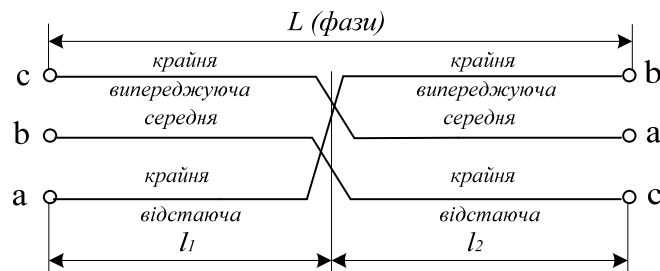


Рис. 3

Матриця середньої ділянки, транспонованої за схемою рис. 2, визначається добутком:

$$A_{cp} = A_{T1} A_{П.Л2} A_{T2}, \quad (1)$$

де A_{Ti} – матриця i -ої транспозиції

$$A_{Ti} = \begin{vmatrix} N_{Ti} & 0 \\ 0 & N_{Ti} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Для 1-ї та 2-ї ділянки з транспозицією на рис. 1:

$$N_{T1} = N_{T2} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Для 1-ої (лівої) та 2-ої ділянки з транспозицією на рис.2:

$$N_{T1} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad N_{T2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

$A_{П.Л2}$ – матриця 2-ї ділянки лінії.

$$A_{ПЛ2} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

A_{ik} – блоки матриці лінії.

$$A_{cp} = \begin{vmatrix} N_{T1}A_1N_{T2} & N_{T1}A_{12}N_{T2} \\ N_{T1}A_{21}N_{T2} & N_{T1}A_{22}N_{T2} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Кожний блок матриці лінії у виразі (5) має такий вигляд:

$$N_{ik} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{13} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Використовуючи відомі вирази для блоків матриці ділянки лінії та виразу для матриць власних векторів трифазної лінії, яка має наведену геометричну симетрію крайніх проводів, можна показати, що $a_{11} = a_{33}$, $a_{21} = a_{23}$, $a_{31} = a_{13}$, $a_{32} = a_{12}$. У такому випадку дістаємо матрицю

$$A_{ik} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{21} \\ a_{13} & a_{12} & a_{11} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

З виразів (3), (6) та (8) випливає, що блоки матриці A_{cp} для схем на рис. 1 і 2 визначаються виразом:

$$A_{cpik} = N_{T1}A_{ik}N_{T2} = \begin{vmatrix} a_{21} & a_{21} & a_{22} \\ a_{11} & a_{13} & a_{12} \\ a_{13} & a_{11} & a_{12} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Отже, матриці середньої ділянки лінії з транспозиціями на схемах рис. 1 та рис. 2 є рівними, що і визначає ідентичність матриць лінії в цих схемах. Оскільки крайні фази розташовані симетрично щодо середньої фази, то результати, як для класичної схеми транспозиції, так і для спрощеної схеми транспозиції рис. 2 будуть ідентичними, але в такому разі використовується менше транспозиційних опор. Із рівності матриць ПЛ у схемах на рис. 1 та рис. 2 випливає ідентичність багатополісників, що еквівалентують ПЛ у цих схемах. Застосування спрощеної схеми транспозиції фаз за рис. 2 порівнюючи з рис. 1 призведе до зниження витрат на спорудження та експлуатацію транспозиційних опор та підвищення їхньої надійності. Однак спрощена схема транспозиції поки що не знайшла широкого застосування на практиці, попри її очевидну перевагу.

Аналіз коефіцієнтів несиметрії для досліджуваних схем транспозиції ЛЕП НВН виконувався з такими параметрами: $U = 750$, кВ – номінальна напруга лінії. Конструкція фази проводу 4хАС-400/93 характеризується такими параметрами: $r_0 = 0.071$ Ом/км; $x_0 = 0.284$ ом/км; $g_0 = 22.35 \cdot 10^{-9}$ См/км; $b_0 = 4.10 \cdot 10^{-6}$ См/км; проміжні опори з відтяжками типу ПБ 750-1; анкерно-кутові опори УО 750-1.

Несиметрія в електричній мережі головним чином визначається зворотною послідовністю, що і відзначається в [12]. Тому надалі обмежимося аналізом коефіцієнтів несиметрії за напругою зворотної послідовності. Як вказується в [12], гранично допустима несиметрія за напругою зворотної послідовності становить 2 %. Наведені значення допустимої несиметрії рекомендується брати для конкретної ПЛ із запасом, з огляду на той факт, що повна несиметрія складається зі впливу всіх ліній, що приходять на підстанцію, а також інших можливих джерел несиметрії, зокрема несиметричного навантаження. Надалі будемо керуватися визначеною «Кодексом систем передачі» [13] нормою щодо значення коефіцієнту несиметрії напруги зворотної послідовності, де:

$$k_{U2} \leq 2, \% . \quad (10)$$

Для оцінювання ефективності застосування певної схеми транспозиції та впливу на визначення параметрів КР було розроблено та застосовано імітаційну модель лінії електропередачі 750 кВ, наведену на рис. 4.

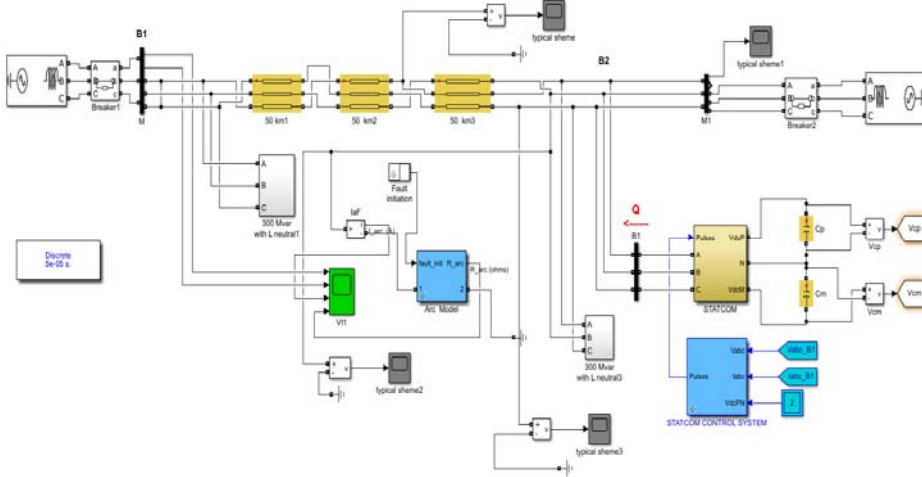


Рис. 4

Для визначення коефіцієнтів несиметрії напруг зворотної послідовності був застосований трифазний аналізатор послідовності, який дає змогу вимірювати пряму, зворотну та нульову послідовності. Наведено графіки, на яких показано зміну коефіцієнтів несиметрії напруг залежно від довжини лінії рис. 5

для схем транспозиції рис. 2 та рис. 3 та нетранспонованої лінії.

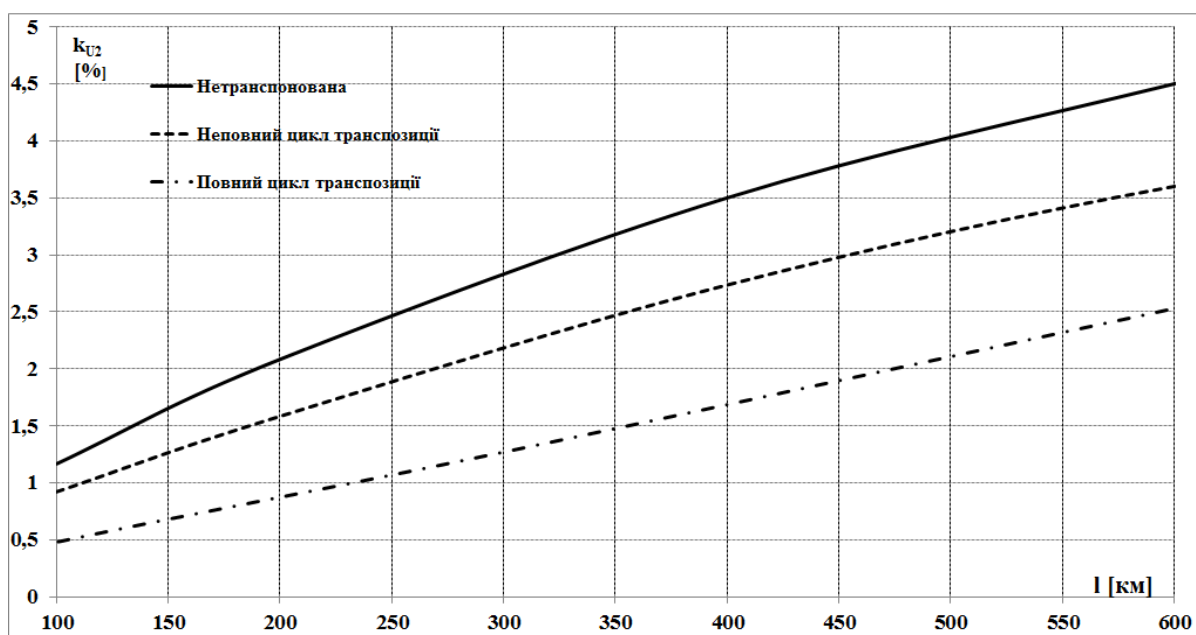


Рис. 5

Найгірший випадок з точки зору пофазної відмінності параметрів ПЛ – це нетранспонована лінія, але треба зазначити, що, як видно з рис. 5, значення пофазної несиметрії не перевищують гранично допустимі у випадку довжини лінії не більше ніж 180 км. Застосування неповного циклу транспозиції можливо за довжин ліній не більше ніж 280 км за умовою (10). Спрощену схему транспозиції можна застосовувати для лінії завдовжки не більше ніж 460 км за умови несиметрії (10).

Після розгляду схеми виконання транспозиції ЛЕП НВН рис. 1–3 із аналізом несиметрії необхідно розглянути ступінь впливу пофазної несиметрії на розрахунок значення КР для запобігання виникненню РП. Запишемо вираз струмів та напруги для трифазної ЛЕП НВН:

$$\begin{bmatrix} I_{Aa} \\ I_{Ab} \\ I_{Ac} \end{bmatrix} = j\omega l \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де I_{Aa}, I_{Ba}, I_{Ca} , струми фаз лінії, $C_{AB}, C_{AC}, C_{BA}, C_{BC}, C_{CA}, C_{CB}$ – міжфазні ємності, C_A, C_B, C_C – ємності між фазою та землею, V_A, V_B, V_C – фазні напруги лінії.

У роботі на фазі А відбулося КЗ і, відповідно, вимикачі пошкодженої фази були у відімкненому стані. Використовуючи вираз (11), ми можемо розрахувати ємнісний струм фази А, який дістає підживлення від двох непошкоджених фаз:

$$I_{Aa} = j\omega |C| (V_B + V_C), \quad (12)$$

де $|C|$ – детермінант матриці ємностей виразу (10).

З виразу (12) видно, що значення струму залежить від ємності. Головною метою компенсаційного реактора є розлагодження резонансного паралельного контуру, який утворюється ємностями лінії та індуктивностями групою або групами шунтувальних реакторів. Інакше кажучи, міжфазний індуктивний струм, що генерується шунтувальним реактором, підключеним за схемою чотирипроменевої зірки, мусить мати таке саме значення, як ємнісний струм для розлагодження резонансного контуру. Еквівалентний струм реактора можна дістати з виразу:

$$\begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{I0}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & X_{II}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & X_{I2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де $X_{II}^{-1} = X_{I2}^{-1}$ – провідність шунтувального реактора прямої послідовності, $X_{I0}^{-1} = (X_{II} + 3X_n)^{-1}$ – провідність шунтувального реактора нульової послідовності.

Вирішуючи (13), ми дістанемо індуктивні складові фазних струмів:

$$\begin{bmatrix} I_{AL} \\ I_{BL} \\ I_{CL} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \alpha_s & \beta_m & \beta_m \\ \beta_m & \alpha_s & \beta_m \\ \beta_m & \beta_m & \alpha_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad (14)$$

де $\alpha_s = (X_{I0}^{-1} + 2X_{I1}^{-1})/3$; $\beta_m = (X_{I0}^{-1} - X_{I1}^{-1})/3$.

Повний струм повторної дуги визначається з виразу (14):

$$I_D = j(V_B + V_C)(\omega |C_M| - \beta_M). \quad (15)$$

У випадку застосування реальної повної схеми транспозиції за рис. 1 або рис. 2 матриця міжфазних ємностей набуває вигляду:

$$C = l_1 N_{T1} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix} l_2 N_{T2} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix} l_3 N_{T1} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix} \quad (16)$$

l_1, l_2, l_3 – довжини реальних кроків транспозиції, $C_{AB}, C_{BA}, C_{BC}, C_{CB}, C_{AC}, C_{CA}$ – міжфазна ємність.

У випадку застосування реальної неповної схеми схем транспозиції за рис. 3 матриця ємностей

$$C = l_1 N_{T1} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix} l_2 N_{T2} \begin{bmatrix} C_A & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_B & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_C \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Для того, щоб сума векторів ємнісних та індуктивних струмів дорівнювала нулю для ЛЕП НВН $\overline{I_{AC}} + \overline{I_{AL}} = 0$, необхідно, щоб індуктивна провідність дорівнювала ємнісній провідності: $(X_{10}^{-1} - X_{11}^{-1})/3 = \omega C$. Із нерівності визначимо опір КР для ЛЕП НВН для ліквідації РП:

$$X_n = (\omega |C| + \frac{1}{X_{1L}})^{-1} - X_{1L}. \quad (18)$$

Для дослідження впливу несиметрії лінії на визначення параметрів компенсаційного реактора було застосовано імітаційну модель (рис. 4), до складу якої входять: «300 MVA_r with neutral» – блоки активного (індуктивно-резистивного) навантаження потужністю 300 МВА_r; «Arc Model» – блок, що імітує режим «виникнення однофазного дугового замикання на землю».

Окрім компенсації ємнісного струму, підживлення дуги повторного струму КР виконує ще одну функцію – запобігання появі резонансних перенапруг. Результати порівняння розрахунку значення КР за виразом (18) з урахуванням, без урахування транспозиції та для випадку ідеально транспонованої лінії наведено в таблиці 1. Ідеально транспонована лінія – це лінія, в якій є симетрія фазних і міжфазних параметрів, тобто фазні опори й провідності, а також міжфазні величини є ідентичними.

Таблиця 1

l , км	Ідеально-транспонована лінія	Повний цикл транспозиції Рис. 1	Спрощена схема повного циклу транспозиції Рис. 2	Неповний цикл транспозиції Рис. 3	Без транспозиції проводів
	X_n , Ом				
180	105	115	115	119	600
280	204	232	232	300	-
460	290	360	360	-	-

Розрахунок опору компенсаційного реактора у випадку застосування неповного циклу транспозиції за довжини лінії 460 км не виконувався, бо пофазна несиметрія досягає значень, за яких дуга підживлення не гасне та цикл спрацювання ОАПВ є невдалим. Аналогічно у випадку, коли немає транспозиції для лінії завдовжки понад 180 км. Результати розрахунку,

наведені в таблиці, узгоджуються з результатами, наведеними на рис. 4. Для лінії завдовжки менше ніж 180 км без транспозиції проводів необхідно встановлювати компенсаційний реактор з опором 600 Ом для успішної ліквідації резонансних перенапруг. Значення опору КР у неповнофазному режимі зумовлено впливом несиметрії. Застосування компенсаційних реакторів із таким опором на практиці можна здійснити у разі встановлення на лінії послідовно підключених КР із регламентованими значеннями [14].

Результати розрахунків (табл. 1) опору компенсаційного реактора для довжини лінії 180, 280 та 460 км вказують на те, що застосування схем транспозиції за рис. 1 та рис. 2 є ідентичними. Різниця значень опорів компенсаційних реакторів у разі застосування неповного циклу та схем транспозиції за рис. 1 та рис. 2 є незначною для лінії завдовжки 180 та 280 км через різницю в значенні несиметрії 0,4 %.

У випадку, коли немає транспозиції, необхідно обов'язково враховувати вплив пофазної несиметрії на розрахунок значення індуктивного опору компенсаційного реактора для лінії завдовжки 180 км. Для лінії завдовжки 460 км також у разі розрахунків індуктивного опору врахування несиметрії реальної схеми транспозиції є обов'язковою умовою для забезпечення успішного циклу спрацювання ОАПВ.

Після того, як було обґрунтовано схеми транспозиції ЛЕП НВН та проаналізовано ступінь впливу пофазної несиметрії на розрахунок значення КР, виконано розрахунки резонансних перенапруг у паузі ОАПВ з використанням імітаційної моделі, наведеної на рис. 4. Використовуючи отримані за (18) значення КР, наведені в таблиці 1, розраховано значення резонансних перенапруг за різних схем транспозиції проводів. Результати оцінювання впливу схеми транспозиції проводів на визначення резонансних перенапруг наведено в таблиці 2. Гранично допустиме значення робочої напруги для ЛЕП НВН 750 кВ становить 643 кВ.

Таблиця 2

l , км	Ідеально- транспонована лінія	Повний цикл транспозиції Рис. 1	Спрощена схема повного циклу транспозиції Рис. 2	Неповний цикл транспозиції Рис. 3	Без транспозиції проводів
	$U_{рез}$, кВ				
180	653	625	625	630	630
280	689	630	630	640	-
460	853	625	625	-	-

З таблиці 2 видно, що в разі застосування неповного циклу транспозиції спостерігаються більші значення резонансних перенапруг щодо реально транспонованої лінії. Це зумовлено більшим значенням ємності внаслідок меншого симетрування пофазної несиметрії неповного циклу транспозиції щодо повного циклу. Урахування несиметрії, яка спричинена пофазною відмінністю параметрів ЛЕП НВН, суттєво впливає на розрахунки значення опору КР і, як наслідок, призводить до появи резонансних перенапруг.

Висновки. Як видно з рис. 4, рівні несиметрії для неповного циклу транспозиції суттєво не перевищують гранично допустимих значень для довжин ліній, які трапляються на території України. Тобто, за такої схеми транспозиції забезпечуються необхідні рівні несиметрії напруг, і її можна запропонувати як порівняно недорогий захід симетрування за довжин ЛЕП НВН не більше ніж 280 км. Якщо довжина ПЛ перевищує 280 км, треба застосовувати повні цикли транспозиції за спрощеною схемою, яка наведена на рис. 2. Такі ЛЕП НВН можуть бути використані на практиці, бо, наприклад, на території України є

можливість проєктування ліній 750 кВ, довжини яких не перевищують 460 км, і для того, щоб зменшити витрати на капіталовкладення та спростити обслуговування таких ліній, є можливість застосувати спрощену схему транспозиції.

Розроблено підхід вибору опору компенсаційного реактора з урахуванням схеми транспозиції. Показано, що застосування наведеного підходу дає змогу точніше вибирати компенсаційний реактор, чим підвищити ефективність застосування циклу спрацьовування однофазного автоматичного повторного включення. Допущення під час дослідження резонансних перенапруг ідеалізованої схеми транспозиції, за якої приймається, що рівні повздовжньої несиметрії не перевищують гранично допустимі, є неприпустимим та неприйнятним. Застосування розробленого підходу вибору значення опору КР дасть змогу застосовувати неповний цикл транспозиції для ліній завдовжки до 280 км та відмовитися від транспозиції проводів для ліній завдовжки до 180 км.

Припущення про ідеально транспоновану лінію є неприпустимим через рівні несиметрії, які призводять до неправильного визначення опору компенсаційного реактора. За умовою (10) можливе застосування спрощеної схеми рис. 2, неповного циклу рис. 3 або відмови від транспозиції, але під час виконання розрахунків значень опорів КР урахування впливу несиметрії є обов'язковою умовою.

Фінансується за держбюджетною темою «Розробка заходів та технічних засобів компенсації неповнофазних режимів магістральних електричних мереж ОЕС України», що виконується відповідно до розпорядження Президії НАН України від 09.01.2020 №15. Державний реєстраційний номер роботи 0120U000148. КПКВК 6541230.

1. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2009. Вип. 23. С. 110–117.
2. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І. Тенденції розвитку систем електропостачання. *Електротехніка та електроенергетика*. 2000. № 2. С.73–76
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В. Дослідження впливу транспозиції лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні перенапруги. *Технічна електродинаміка*. 2013. №.6. С.51–56.
4. Wang J., Wang Y., Peng X., Xu X. Li, X. and Mao X.. Induced Voltage of Overhead Ground Wires in 50 0-kV Single-Circuit Transmission Lines in *IEEE Transactions on Power Delivery*. June 2014. Vol. 29. No. 3. Pp. 1054–1062. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2251371>.
5. Sang-Pil Ahn, Chul-Hwan Kim, Aggarwal R. K. and Johns A. T. An alternative approach to adaptive single pole auto-reclosing in high voltage transmission systems based on variable dead time control in *IEEE Transactions on Power Delivery*. Oct. 2001. Vol. 16. No. 4. Pp. 676–686. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.956756>.
6. Kuchanskyu V.V. Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymmetric Modes. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* Pp.122–125.
7. Kuchanskyu V. Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines. *Scientific works of Vinnitsa National Technical University*. 2016. Vol. 4. Pp. 51–54.
8. Gross E. T. B. and Weston A. H. Transposition of High-Voltage Overhead Lines and Elimination of Electrostatic Unbalance to Ground. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. July 1951. Vol. 70. No. 2, Pp. 1837–1844. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1951.5060639>.
9. Derek Humpage W., Wong K. P. and Nguyen T. T. Operating unbalance in long-distance transmission. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*. March 1985. Vol. 132. No. 2. Pp. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-c.1985.0013>.
10. Chen L., Liu H., Wu M., Wei D. and Niu M.. Study on Compensation for Secondary Arc Current on UHV Double-Circuit Lines. 2011. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, 2011. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5748939>.
11. Abbasi, H. Seyedi and Strunz K.. Simulation and analysis of the effect of single-pole auto-reclosing on HV transmission lines switching overvoltages, 2009 *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, AB, 2009. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275435>.
12. Вязьменский М.Б., Ишкин В.Х., Крюков К.П. и др. Справочник по проектированию линий электропередачи. М.: Энергия, 1980. 296 с.
13. Кодекс систем передачі. Затверджено постановою НКРЕКП № 309 від 14.03.2018.
14. Беляков Н.М., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений. М. : Энергоатомиздат, 1991. 257 с.

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСАЦИОННОГО РЕАКТОРА

В. В. Кучанський, канд. техн. наук, **Д.О. Малахатка**, канд. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
 e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

В статье показана актуальность проблемы исследования резонансных процессов в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения. Выполнены исследования неполнофазных режимов в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения с целью разработки и внедрения мероприятий по предотвращению резонансных перенапряжений. Рассмотрены резонансные перенапряжения, возникающие вследствие неполнофазных режимов работы линии электропередачи сверхвысокого напряжения. В работе показано влияние уровней продольной несимметрии на расчет сопротивлений компенсационных реакторов для уменьшения значений перенапряжений в паузе однофазного автоматического включения. Рассмотрена степень влияния схемы транспозиции проводов на выбор сопротивления компенсационного реактора и на значения резонансных перенапряжений в цикле однофазного автоматического повторного включения. Произведена оценка коэффициентов несимметрии для различных схем транспозиции. Для выбора сопротивления компенсационного реактора были взяты данные действующих высоковольтных линий электропередачи 750 кВ. Приведены рекомендации по внедрению мер предупреждения и ограничения резонансных перенапряжений. Рассмотрены актуальные теоретические и практические проблемы эксплуатации линии электропередачи сверхвысокого напряжения и показаны пути дальнейших исследований. Библ. 14, рис. 5., табл. 2.

Ключевые слова: неполнофазный режим, резонансные перенапряжения, компенсационный реактор, транспозиция проводов, продольная несимметрия.

INFLUENCE ESTIMATION OF ASYMMETRY EXTRA HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINE ON DETERMINATION OF COMPENSATING REACTOR PARAMETERS

Vladislav Kuchanskyu, Denys Malakhatka,
 Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
 pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
 e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

The article shows the urgency of the problem of studying resonant processes in extra high voltage power lines. The research of processes in extra high voltage power transmission lines is carried out to develop and implement measures to prevent overvoltages. Resonant overvoltages arising because of open phase modes of operation of the extra high voltage transmission line are considered. The paper shows the influence of the levels of longitudinal asymmetry on the calculation of the resistances of compensating reactors to reduce the values of overvoltages in the pause of single-phase automatic reclose. The degree of influence of the wire transposition scheme on the choice of the resistance of the compensation reactor and on the values of resonant overvoltages in the cycle of single-phase automatic reclose is considered. Estimation of asymmetry coefficients for different transposition schemes is performed. To select the resistance of the compensation reactor, the data of the existing high-voltage transmission lines of 750 kV were taken. Recommendations for the implementation of measures to prevent and limit resonant overvoltages are given. The current theoretical and practical problems of operation of the extra high voltage power line are considered and the ways of further research are shown. Ref. 14, fig. 5, tables 2.

Keywords: asymmetric mode, resonance overvoltages, compensation reactor, transposition of wires, longitudinal asymmetry.

1. Kuznetsov V.G., Tugai Yu.I. Improving reliability and efficiency of bulk electrical networks. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2009. No 23. Pp. 110–117. (Ukr)
2. Kuznetsov V.G., Tugay Yu.I. Trends in the development of power supply systems. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2000. No 2. Pp.73–76. (Ukr)
3. Kuznetsov V.G., Tugay Yu. I., Kuchansky V.V. Investigation of the effect of transposition of the extra high voltage transmission line on abnormal overvoltage. *Tekhnichna Electrodynamica*. 2013. Vol. 6. Pp.51–56. (Ukr)
4. Wang J., Wang Y., Peng X., Xu X. Li, X. and Mao X. Induced Voltage of Overhead Ground Wires in 50 0-kV Single-Circuit Transmission Lines in *IEEE Transactions on Power Delivery*. June 2014. Vol. 29. No. 3. Pp. 1054–1062. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2251371>.
5. Sang-Pil Ahn, Chul-Hwan Kim, Aggarwal R. K. and Johns A. T. An alternative approach to adaptive single pole auto-reclosing in high voltage transmission systems based on variable dead time control in *IEEE Transactions on Power Delivery*. Oct. 2001. Vol. 16. No. 4. Pp. 676–686. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.956756>.

6. Kuchansky V.V. Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymmetric Modes. 2019. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Pp.122–125.
7. Kuchansky V. Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines. Scientific works of Vinnitsa National Technical University. 2016. Vol. 4. Pp. 51–54.
8. Gross E. T. B. and Weston A. H. Transposition of High-Voltage Overhead Lines and Elimination of Electrostatic Unbalance to Ground, in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. July 1951. Vol. 70. No. 2. Pp. 1837–1844. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1951.5060639>.
9. Derek Humpage W., Wong K. P. and Nguyen T. T. Operating unbalance in long-distance transmission in *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*. March 1985. Vol. 132. No. 2. Pp. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5748939>.
10. Chen L., Liu H., Wu M., Wei D. and Niu M. Study on Compensation for Secondary Arc Current on UHV Double-Circuit Lines 2011 *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan. 2011. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5748939>.
11. Abbasi H. Seyedi and Strunz K.. Simulation and analysis of the effect of single-pole auto-reclosing on HV transmission lines switching overvoltages. 2009. *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB*. 2009. Pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275435>
12. Vyazmensky M.B., Ishkin V.Kh., Kryukov K.P. et al. Handbook on the design of power transmission lines. M.: Energiya, 1980. 296 p. (Rus)
13. The Code of Transmission Systems. Approved by the NCREMS resolution 309 on 14.03.2018.(Ukr)
14. N.M. Belyakov, K.P. Kadomskaya, M.L. Levinstein; M.L. Levinstein. Processes at single-phase automatic reclosing of high voltage lines. M.: Energoatomizdat, 1991. 257 p. (Rus)

Надійшла: 19.10.2020
Received: 19.10.2020