

## КРИТЕРІЙ ВИНИКНЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ В АНОРМАЛЬНИХ РЕЖИМАХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України, Київ

*Проведено аналіз та зроблено висновки про залежність величин резонансних перенапруг та резонансної довжини лінії від ступеня компенсації зарядної потужності.*

**Ключові слова:** резонансні перенапруги, аномальний режим, шунтувальні реактори.

### Вступ

В статті розглянуто крайній випадок аномального несиметричного режиму — робота обладнання електропередачі з неповною кількістю фаз. Неповнофазні режими можуть виникати стихійно як аварійні режими або плануватися спеціально як захід, що підвищує надійність роботи електричної системи. До останньої категорії належать, наприклад, неповнофазні режими, що утворюються уразі застосування на лініях однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ). В цьому випадку створюється короткотривалий аномальний режим при відключенні фази повітряної лінії (ПЛ) тривалістю в межах 0,3—0,5 секунди. При цьому на відімкненій фазі створюється резонансне коло, яке за наявності необхідних та достатніх умов призведе до появи резонансних перенапруг [6], величини яких перевищують гранично допустимі в декілька разів.

Шунтувальні реактори (ШР), якими оснащені електропередачі надвисокої напруги, окрім компенсації зарядної потужності (ЗП), виконують ще одну важливу функцію — обмеження перенапруг під час ліквідації найвірогідніших однофазних дугових коротких замикань (КЗ). В роботах [2—5] не виявлено, як компенсація зарядної потужності лінії впливає на величини резонансних перенапруг. Визначити, як саме впливає ступінь компенсації зарядної потужності на умови виникнення резонансних перенапруг в паузі ОАПВ, можна шляхом виведення аналітичної формули резонансного ступеня компенсації.

### Результати дослідження

Ступінь поперечної компенсації ЗП електропередачі за рахунок шунтувальних реакторів в лініях надвисокої напруги визначається як

$$K = \frac{nQ_{\text{ШР}}}{Q_{\text{Зар}}}, \quad (1)$$

де  $n$  — кількість груп ШР;  $Q_{\text{ШР}}$  — потужність ШР;  $Q_{\text{Зар}}$  — реактивна потужність, що генерується ЛЕП в режимі холостого ходу, за умови підтримки на лінії найбільшої робочої напруги.

Для чіткішого уявлення про взаємодію ШР з КР нижче наведені з [1] вирази складових  $X_M$  — міжфазного опору ШР та  $X_3$  — опору між фазою та землею:

$$X_M = \frac{X_P}{X_N}(X_P + 3X_N);$$

$$X_3 = X_P + 3X_N, \quad (2)$$

де  $X_N$  — опір компенсаційного реактора;  $X_P$  — опір шунтувального реактора.

Для аналізу аномальних перенапруг автором виведена формула визначення резонансних довжин лінії. Так вираз для повнофазного режиму за будь-якої кількості груп ШР має вигляд

$$l_{\text{Рез}} = n \frac{L_M + L_3}{L_3 L_M \omega^2 (2C_M + C_3)}, \quad (3)$$

де  $n$  — кількість повнореакторних груп ШР;  $\omega$  — кутова швидкість;  $C_3$  — еквівалентна зосереджена міжфазна ємність між фазою та землею;  $C_M$  — еквівалентна зосереджена міжфазна ємність ЛЕП;  $L_P$  — індуктивність одного ШР;  $L_N$  — індуктивність КР.

Параметри лінії НВН змінюються в широких межах. Наведемо мінімальну та максимальну величину  $B$  — ємнісної провідності фази на землю

$$B = 3,14 \cdot 10^{-7} \div 4,234 \cdot 10^{-6}, \text{ См.} \quad (4)$$

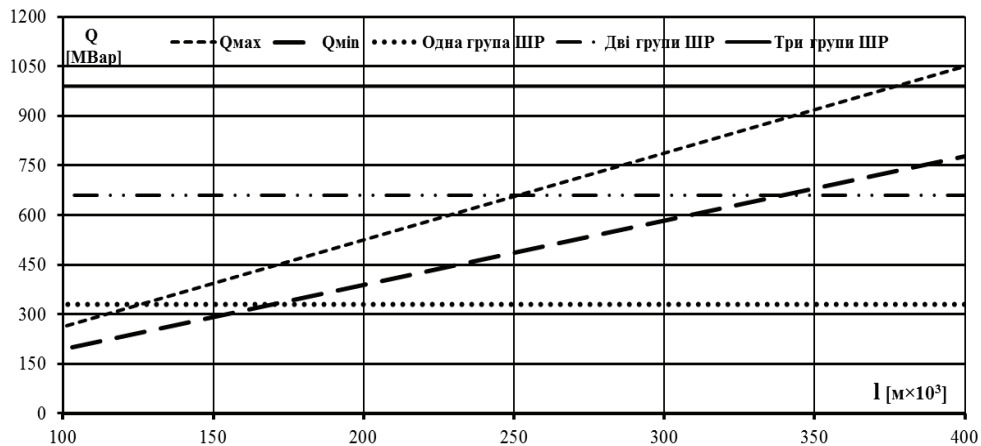


Рис. 1. Зміна ступеня компенсації

На (рис. 1) показано, як змінюється зарядна потужність лінії в залежності від кількості груп ШР та мінімальної і максимальної величини ємнісної провідності на землю. На рис. 1  $Q_{\text{max}}$  відповідає максимальному значенню ємнісної провідності на землю лінії, а  $Q_{\text{min}}$  — мінімальному значенню відповідно до діапазону (4). Завдяки цьому графіку можна визначити діапазони компенсації зарядної потужності для лінії з певною кількістю груп ШР.

Залежність  $l_{\text{комп}}$  — компенсувальної довжини лінії від кількості груп ШР та крайових умов (4) наведена в табл. 2

Таблиця 2

Довжини ліній, за яких настає повна компенсація зарядної потужності

Кількість груп ШР	1 ШР	2 ШР	3 ШР	$B$ , См
$l_{\text{комп}}$ , м · 10 <sup>3</sup>	125,66	251,321	376,981	мін
	169,682	339,363	509,045	мах

Досліджуючи ступінь впливу компенсації зарядної потужності на області існування перенапруг при ОАПВ, знайдені області компенсації зарядної потужності лінії за різних груп ШР. Для того, щоб визначити, при якому ступені компенсації спостерігаються аномальні перенапруги, наведемо суміщені графіки перенапруг та ступеня компенсації лінії (рис. 2). На рис. 2 суміщено дві залежності: ступеня компенсації ЗП від довжини лінії з підписами значень по осі ординат та графік залежності перенапруг від довжини лінії з підписами перенапруг у відносних одиницях на допоміжній осі, що розташована в правій частині рис. 2. Суміщення цих двох залежностей наведено для визначення двох факторів: діапазону компенсації зарядної потужності лінії при якому будуть спостерігатись максимальні значення перенапруг та критичного значенню ступеня компенсації зарядної потужності при якому точно виконується умова резонансу. На рис. 2 зображено криві залежності ступеня компенсації ЗП від довжини ЛЕП НВН у разі включення та нормального режиму у разі відключення КР, а також за відключення однієї з фаз групи ШР, так званий неповнореакторний режим.

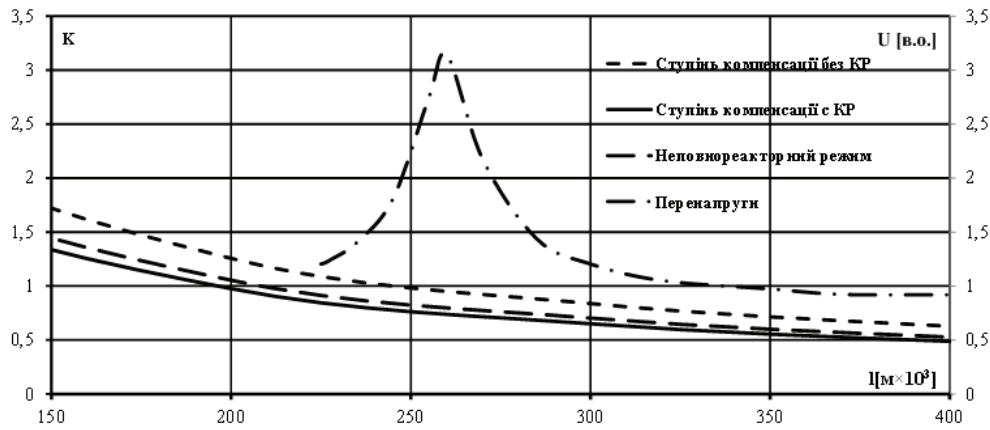


Рис. 2. Режими лінії та перенапруги

Як видно, застосування КР знижує ступінь компенсації, але повна компенсація все одно буде з тою самою довжиною лінії. У разі ввімкнення КР складова, що компенсує ємність фази на землю, обчислюється згідно з формулою (2). Після того, як була відключена однойменна фаза по відношенню до пошкодженої фази групи ШР, ступінь компенсації збільшилася ненабагато по відношенню до нормального повнореакторного режиму.

На суміщеному графіку видно, що максимальні величини напруги спостерігаються в такому діапазоні зміни ступеня компенсації ЗП:

$$K = 0,6 \div 1,2. \quad (5)$$

Графіки, показані на рис. 2, отримані завдяки використанню імітаційної моделі, принцип дії якої наведено у [3]. Це передбачає виконання серії моделювань. Для того, щоб знайти критичне значення ступеня компенсації ЗП аналітичним шляхом, запишемо вираз (1) таким чином:

$$K = \frac{n}{\omega^2 C_3 L_3 l}. \quad (6)$$

Вираз (5) можна назвати відповідно резонансним ступенем компенсації зарядної потужності лінії. Для отримання чисельного значення резонансного ступеня компенсації ЗП підставимо у вираз (6) замість  $l$  — довжини лінії, резонансну довжину  $l_{\text{рез}}$  за виразом (3). У виразі (6) застосовується складова компенсації ємності фази на землю  $L_3$ , а не  $L_p$ , бо вважаємо що в паузі ОАПВ групи ШР підключаються за чотирьохпроменевою зіркою. Остаточний вираз резонансного ступеня компенсації матиме вигляд

$$K_{\text{рез}} = \frac{L_3 L_M (\omega^2 C_3 + 2C_M)}{C_3 \omega^2 L_3 (L_3 + L_M)}. \quad (7)$$

Після підстановки числових значень параметрів типової ЛЕП 750 кВ отримуємо значення  $K_{\text{рез}} = 1,07$ . Аналізуючи графіки, показані на рис. 2, бачимо, що максимум перенапруг відповідає приблизно значенню  $K_{\text{рез}}$ . Значення  $K_{\text{рез}}$  потрапляє в обчислений діапазон значень (5). Як випливає з виразу (7),  $K_{\text{рез}}$  не залежить від кількості груп ШР та визначається параметрами лінії груп ШР та КР.

### Висновки

В результаті проведеного аналізу визначено ступінь компенсації  $K_{\text{рез}} = 1,07$ , що є критерієм виникнення АП та відповідає точній умові резонансу. Це свідчить, що навіть не досягнувши максимальних величин, можуть виникнути небезпечні перенапруги. Тому в сумнівних випадках необхідно виконати точніші дослідження за допомогою імітаційної моделі лінії. Визначення критичного значення ступеня компенсації зарядної потужності дозволить розробити заходи запобігання резонансних перенапруг, що базуються на зміні величини індуктивності шунтувального реактора.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / [Н. Н. Беляков, К. П. Кадомская, М. Л. Левинштейн и др.]. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 256 с.
2. Дмитриев, С. В. Требования к компенсации зарядной мощности линий 500—750 кВ / С. В. Дмитриев // Новости электротехники. — 2013. — № 5 (83). — С. 64—69.
3. Кузнецов В. Г. Модель ЛЕП для дослідження аномальних перенапруг / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський // ХНТУСГ ім. П. Василенка. — 2011. — Вип. 116. — С. 41—43.
4. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу транспозиції лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні перенапруги / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський // Технічна Електродинаміка. — 2013. — № 6. — С. 51—56.
5. Single-phase auto-reclosure studies some basic aspects on main elements Representation / S. B Camara Alessandra, M. J. C Portela Carlos, D. Tavares Maria Cristina // Proceedings of International Conference on High Voltage Engineering and application. — Chongqing, China, November 9—13. — 2008. — P. 482—485.
6. Tugay, Y. The resonance overvoltages in EHV network / Tugay, Y. // Proceedings of International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, 2009. EPQU 2009 : 10th International Conference on Lodz, 15—17 September — 2009. — P. 1—4.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.03.2016

**Кучанський Владислав Володимирович** — канд. техн. наук, молодший науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, e-mail: kuvlad@yandex.ru.

Інститут електродинаміки НАН України, Київ

V. V. Kuchanskyi<sup>1</sup>

## Criteria of Resonance Overvoltages Occurrence in Abnormal Conditions of Extra High Voltage Transmission Lines

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

*The analysis has been conducted and conclusions about the dependence of resonance overvoltage and resonant line length of compensation degree of charging power have been made in the paper.*

**Keywords:** resonance overvoltages, abnormal mode, shunt reactors.

**Kuchanskyi Vladyslav V.** — Cand. Sc. (Eng.), Junior Researcher of the Chair of Optimization of Power Electrical Systems, e-mail: kuvlad@yandex.ru

В. В. Кучанский<sup>1</sup>

## Критерий возникновения резонансных перенапряжений в аномальных режимах линий электропередач сверхвысокого напряжения

<sup>1</sup>Институт электродинамики НАН Украины, Киев

*Проведен анализ и сделаны выводы о зависимости величин резонансных перенапряжений и резонансной длины линии от степени компенсации зарядной мощности.*

**Ключевые слова:** резонансные перенапряжение, аномальный режим, шунтирующие реакторы.

**Кучанский Владислав Владимирович** — канд. техн. наук, младший научный сотрудник отдела оптимизации систем электроснабжения, e-mail: kuvlad@yandex.ru