

УДК 621.315.1

**В.В. Кучанський**, канд. техн. наук,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, м. Київ, 03680, Україна.

## Заходи запобігання резонансних перенапруг в магістральних електричних мережах

*В сучасних магістральних електричних мережах використовуються перш за все структурні заходи зниження та запобігання резонансних перенапруг, які пов'язані зі зміною робочої схеми та переходом від аномального режиму до нормального. Але при необхідності можуть бути використані спеціальні пристрої або налаштування за критерієм зменшення перенапруг, які були встановлені з іншою метою. В той же час, резонансні перенапруги в лінії електропередач надвисокої напруги під час однофазного автоматичного повторного включення зумовлені резонансом струмів, внаслідок чого вплив на цей вид перенапруг можливий завдяки зміні параметрів елементів, що підключені паралельно до повітряної лінії. До них, зокрема, належать індуктивності компенсаційного та однофазного шунтувального реактору. В даному випадку критерієм виникнення перенапруг є резонансна довжина лінії, при якій повністю виконується умова резонансу струму. Бібл. 5, рис. 1.*

**Ключові слова:** резонансні перенапруги; аномальні режими; компенсаційний реактор; шунтувальний реактор; однофазне автоматичне повторне включення.

### Вступ

Стратегічна ціль розвитку smart електроенергетичних мереж – створення інтелектуальних енергосистем з силовими елементами такими, як керовані шунтувальні та компенсаційні реактори. Світовий досвід експлуатації [2] таких споживачів реактивної енергії говорить про ефективне керування режимами ліній електропередач надвисокої напруги. Як такі керовані реактори були розроблені в другій половині двадцятого сторіччя [1] та застосовуються в багатьох країнах світу. В магістральних електричних мережах України такі системи FACTS не знайшли застосування. Мета приведених результатів – дослідити вплив зміни індуктивності керованих реакторів на резонансні перенапруги в паузі однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ).

### Основна частина

В несиметричних режимах для зниження рівнів перенапруг необхідно компенсувати параметри елементів, що під'єднані до ЛЕП паралельно. До таких елементів належать, наприклад, індуктивності ШР та КР, активна провідність корони та ін. Зрозуміло, що їх вплив на перенапруги проявляється по-різному. Зміни індуктивності ШР та КР можуть вивести лінію резонансної довжини з небезпечного діапазону. Тобто резонанс в реальній мережі не відбудеться.

Для налаштування індуктивності шунтувальних реакторів (ШР) з метою запобігання резонансних перенапруг (РП) в реальній електричній мережі з різними довжинами ліній електропередач надвисокої напруги (ЛЕП НВН) може бути рекомендоване застосування керованих шунтувальних реакторів (КШР) [3, 5]. Керований шунтувальний реактор – це змінний індуктивний опір, значення якого плавно регулюється підмагнічуванням феромагнітних елементів магнітного кола. Магнітна система однієї фази КШР містить два стрижня. На кожному стрижні розміщені обмотки управління і мережеві обмотки.

При підключенні до обмоток управління регульованого джерела постійного струму відбувається наростання потоку підмагнічування, який в сусідніх стрижнях направлений в різні боки і викликає насичення стрижнів КШР у відповідні напівперіоди напруги. Насичення стрижнів призводить до зростання струму в мережевій обмотці за рахунок зменшення індуктивного опору реактора. Цим самим забезпечується плавна зміна величини споживаної реактором реактивної потужності  $i$ , відповідно, рівнів напруги в точці підключення КШР.

Слід відзначити, що головною метою впровадження КШР є оптимальне керування усталеними режимами неоднорідних електричних мереж. Цільовими функціями керування, перш за все, являються: підвищення пропускної здатності міжсистемних зв'язків, зниження втрат електроенергії та забезпечення її якості. Саме оптимізація усталеного режиму вимагає плавної

зміни величини споживаної реактором реактивної потужності, оскільки для попередження РП в результаті виникнення резонансних коливань достатньо було б можливостей значно більш дешевого у виконанні дискретного ступінчатого регулювання. Тому ймовірність появи РП є обмежуючою умовою для процесу оптимізації режиму неоднорідної електричної мережі: певні значення індуктивності КШР мають бути заборонені за цим критерієм.

Для більш чіткого уявлення про взаємодію ШР з КР нижче наведені вирази складових для компенсації ємностей:  $L_M$  – міжфазної індуктивності ШР та  $L_3$  – індуктивності між фазою та землею:

$$L_M = \frac{L_P}{L_N} (L_P + 3L_N)$$

$$L_3 = (L_P + 3L_N)$$

де  $L_N$  – індуктивність компенсаційного реактора,  $L_P$  – індуктивність шунтувального реактора. Вплив еквівалентних складових чотирипроменевої схеми розглянуті далі, при визначенні резонансних довжин ліній.

В контурі, що наведено у [3] можливе існування резонансу струмів. В той же час резонанс струмів характеризується суттєвими значеннями перенапруг в зовнішньому колі.

Умова резонансу струмів при неповнофазному режимі ПЛ:

$$\omega^2 \cdot l \cdot L_3 \cdot L_M \cdot (2 \cdot C_M + C_3) - L_M - L_3 = 0 \quad (1)$$

де  $l$  – довжина лінії,  $\omega$  – кутова швидкість, міжфазна ємність –  $C_M$ , ємність між фазою і землею –  $C_3$ .

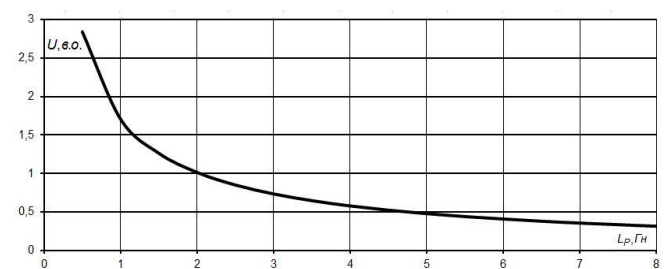
З умови резонансу струмів (1) для аналізу аномальних перенапруг автором була виведена формула визначення резонансної довжини лінії. Для виведення формули (2) було зроблене припущення: відомі усі складові умови (1), що описані вище, окрім довжини лінії  $l$ . Для аналізу аномальних перенапруг автором була виведена формула визначення резонансної довжини лінії. Так, вираз для будь-якої кількості груп шунтувальних реакторів (ШР) має вигляд:

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

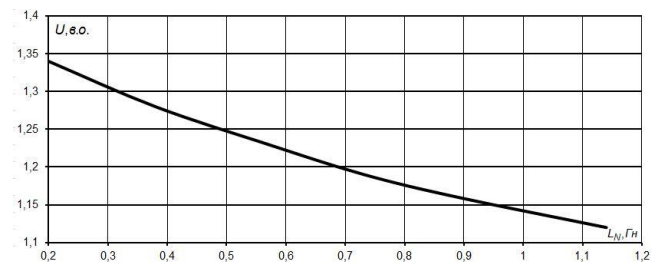
де  $n$  – кількість повнореакторних груп ШР,  $C_M$  та  $C_3$  відповідають ємності між фазами та ємності між фазою та землею, для компенсації цих ємностей застосовуються чотирипроменеві ШР,

які мають дві складові, що позначені, як  $L_M$  та  $L_3$ .

Розглянемо тепер, як впливає на налаштування еквівалентного заступного резонансного кола [3], тобто на кратності перенапруг зміна індуктивності КР. Для порівняння з КШР були проведені серії розрахунків для визначення впливу зміни  $L_P$  та  $L_N$  на кратності, які наведені на (рис. 1) для лінії з однією групою ШР. Як видно з результатів (рис. 1, б), зміна  $L_N$  менш суттєво впливає порівняно зі зміною  $L_P$  (рис. 1, а). Тому застосування керованого КР є менш радикальним заходом попередження РП, ніж КШР.



а)



б)

**Рис. 1. Вплив зміни індуктивності реакторів на кратності перенапруг: а) зміна індуктивності ШР; б) зміна індуктивності КР**

Керований КР може бути обладнано типовим пристроєм перемикачів [4, 5] без збудження, такої ж конструкції, як регулятор напруги у типового трансформатора, а не обмотками підмагнічування спеціальної конструкції та засобами тиристорного керування, що використовують в КШР.

Застосування КШР дозволяє плавно регулювати величину перенапруг і найменші значення досягаються при значенні індуктивності рівному нулю, що аналогічно відключенню одноїменної фази групи ШР. Очевидно, що відключення нерегульованого ШР економічно є більш ефективним заходом. Тому розробка, виготовлення та ефективність застосування КШР повинна бути економічно та технічно обґрунтована, перш за все, необхідністю оптимального

керування режимами неоднорідних електричних мереж.

Наявність умов для попередження РП залежить від багатьох факторів, в тому числі і від точності розрахунку індуктивного опору КР. Тому його, як правило, підбирають вже під час пускових випробувань. Очевидно, що для успішності виконання цієї задачі важливим є те, щоб бажане значення лежало в діапазоні регулювання конкретного КР. Відповідно до отриманих результатів з (рис. 1, а) величина індуктивності КШР для зменшення резонансних перенапруг повинна становити від 2 Гн та більше. Стосовно керованих КР величина індуктивності повинна становити від 1,1 Гн та більше, як видно з (рис. 1, б).

### Висновки

Застосування  $I_{P_{\text{рез}}}$  – резонансної довжини лінії (2) в ролі критерію виникнення резонансних перенапруг дозволило встановити, що дієвими засобами запобігання АП при наявності неповнофазних режимів є установка керованих ШР та КР, які дозволяють вивести лінію з резонансу струмів. Зміна індуктивності реакторів розлагоджує резонансне коло завдяки чому зменшується кратність перенапруг.

Формула (2) визначення резонансної довжини лінії дозволяє отримати приблизний діапазон існування перенапруг та дослідити вплив параметрів обладнання на умови їх виникнення без залучення імітаційних моделей ліній електропередач надвисокої напруги або спеціально розробленого програмного забезпечення для аналізу електромагнітних перехідних процесів.

УДК 621.315.1

**В.В. Кучанский**, канд. техн. наук,  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, г. Киев, 03680, Украина.

## Мероприятия для предотвращения резонансных перенапряжений в магистральных электрических сетях

*В современных магистральных электрических сетях используются, прежде всего, структурные меры снижения и подавления резонансных перенапряжений, связанные с изменением рабочей схемы и перехода от аномального режима к нормальному. Но при необходимости могут быть использованы специальные устройства или настройки режима по критерию уменьшения перенапряжений, которые были установлены для других целей. В то же время резонансные перенапряжения обусловлены резонансом токов, в результате чего влияние на вид перенапряжений возможно благодаря изменению параметров элементов, подключенных параллельно воз-*

### Список використаних джерел

1. *Дорожко Л.И.* Реакторы с поперечным подмагничиванием / Л. И. Дорожко, М. С. Либкинд. – М.: Энергия, 1977. – 177 с.
2. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы. Под общ. ред. акад. НАН Украины А.В. Кириленко / Институт электродинамики НАН Украины. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. 2014. – 408 с.
3. *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.
4. *Кузьмичева К.Н.* Звездообразный ограничитель перенапряжений для реакторных присоединений 500 кВ / К.Н. Кузьмичева, В.С. Рашкес [и др.]. – Электрические станции, 1985. – №9. – С. 15–18.
5. *Cheng C.P.* Simulation of resonance overvoltage during energization of high voltage power network / C.P. Cheng, Chen Shihe // Proceedings of International Conference on power Systems transients IPST 2003 in New Orleans, USA, October 9–13. – 2010. – P. 71–75.

*Поступила в редакцию 22 июля 2016 г.*

душной линии. К ним, в частности, относятся: индуктивность компенсационного и шунтирующего реактора. В данном случае критерием возникновения перенапряжений является резонансная длина линии, при которой полностью выполняется условие резонанса тока. Библ. 5, рис. 1.

**Ключевые слова:** резонансные перенапряжения; аномальные режимы; компенсационный реактор; шунтирующий реактор; однофазное автоматическое повторное включение.

UDC 621.315.1

**V. Kuchanskyi**, Ph.D.

Institute of Electrodynamics of Ukrainian National academy of science,  
pr. Peremogy, 56, c. Kyiv, 03680, Ukraine.

## The events for prevention of resonant overvoltages in main power electrical networks

*The study of the origin of conditions and possible consequences of abnormal modes power electrical networks with extreme values parameters, such as overvoltage, traditionally performed using mathematical models with linear and symmetrical elements. This is due to great experience in the development and use of this class of models on practice, since the basis for decision-making in the design and operation of electrical networks is simulation of results primarily in normal modes. At the same time, a more detailed analysis shows that the presence in modern electrical networks sources of distortion, mainly unbalance, influences the current values of the parameters modes, including the probability of transition of these values through thresholds.*

*Trends of modern electricity power grid point to the growing role of extra high voltage (EHV) transmission lines as those that constitute the system and interconnect systems. It should be noted that the study of overvoltage for this class lines must be done very carefully, particularly with regard to the impact of sources of distortion. This is due to the lack of practical operational reserve insulation, designed for extreme values, as a such reserve for EHV is expensive. Thus, analysis of the possibility of overvoltage in EHV lines should be done not only for normal, but also for abnormal asymmetrical modes.*

*In main electric power networks are used, above all, structural measures to reduce and suppress the resonant overvoltage associated with changes in workload schemes and the transition from an abnormal to normal mode. However, special devices or setting modes by the criterion of reducing the overvoltage can be used when needed, which have been established for other purposes. At the same time the resonant overvoltage caused by current resonance, resulting in influence on the kind of overvoltage is possible by changing the parameters of elements connected in parallel to overhead line. These include, in particular: the neutral inductance and shunt reactors. In this case, the criterion of the occurrence of resonance overvoltage is the length of the line at which the condition of complete current resonance is performed. Reference 5, figures 1.*

**Keywords:** resonance overvoltage; abnormal modes; compensation reactor; shunt reactor; single phase automatic re-close.

### References

1. Dorozhko, L. I., Libkind, M. S. (1977). Reactors with a transverse magnetization. *Energiya*. P. 177. (Rus)
2. (2014). Intelligent power systems: the elements and modes. Pod obsch. red. akad. NAN Ukrainyi A.V. Kirilenko. Institut elektrodinamiki NAN Ukrainyi. In-t elektrodinamiki Nan Ukrainyi. P. 408. (Rus)
3. Kuznetsov, V. H., Tuhaj, Iu. I., Kuchanskyi, V. V. (2013). Investigation of transposition EHV transmission lines on abnormal overvoltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. Vol. 6., Pp.51–56. (Ukr)
4. Kuzmicheva, K. N. (1985). The star overvoltage arresters for the reactor connections of 500 kV. *Elektricheskie stantsii*. Vol. 9. Pp.15–18. (Rus)
5. Cheng, C. P. (2010). Simulation of resonance overvoltage during energization of high voltage power network. Proceedings of International Conference on power Systems transients IPST 2003 in New Orleans. USA, October 9–13. Pp. 71–75.