

International Ukraine-Poland Seminar

Power quality in distribution networks with distributed generation

Kiev, July 4-5, 2019

DOI: 10.32073/iepl.2019.19

**ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ
ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ В НЕСИМЕТРИЧНИХ
РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

Владислав Кучанський¹, Валентина Мельничук¹, Юрій Лиховид²

¹Інститут електродинаміки НАН України

²ДП «Національна енергетична компанія «Укренерго»

Abstract: Internal resonant overvoltages in asymmetrical modes of electrical networks arise unexpectedly and can reach dangerous values. At the same time, the networks do not have special devices to protect the equipment from them. The aim of this work is to consider the use of controlled shunting reactors that control the flow of reactive power in electrical networks to detune resonant conditions and eliminate the causes of internal overvoltages. The research was carried out on a mathematical model of the extra high voltage transmission line. As an example of an asymmetrical mode, the incomplete mode of operation of the line is considered. It is concluded that it is expedient to take into account the probability of occurrence of internal resonant overvoltages in solving design and operational problems of optimization of flow distribution of reactive capacities in electric networks with the help of controlled shunt reactors.

1. ВСТУП

Однією з основних причин виходу з ладу основного обладнання в електричній мережі є перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги вище максимально допустимого значення, відповідно до технічного регламенту [1-8]. Джерелом тривалих внутрішніх перенапруг у мережах є резонансні коливання внаслідок відповідного збіг значень параметрів елементів кола [1,6-8,10]. Для внутрішніх перенапруг при несиметричному режимі головними факторами, що впливають на їх виникнення і протікання, є значення індуктивностей груп некерованих шунтувальних реакторів (ШР) та розосереджених ємностей повітряних ліній електропередачі..

Мета статті – визначення доцільності використання керованих шунтувальних реакторів для запобігання резонансним перенапругам в лініях електропередачі при

неповнофазних режимах. Успішне вирішення даної задачі може суттєво підвищити надійність роботи електричних мереж при несиметричних спотвореннях.

2. ЗАСТОСУВАННЯ КЕРОВАНИХ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПЕРЕНАПРУГАМ

Ступінь компенсації ШР, який обирається за умовами перенапруг нормального режиму зазвичай близький до 100%, що відповідає умовам резонансу в неповнофазному режимі [1,3,6-8]. Для запобігання пошкодження обладнання необхідно не допустити резонансного підвищення напруги шляхом розладнання резонансного контуру, що утворився. Ясно, що більш ефективно досягти цього можна зміною параметрів зосередженої індуктивності, а не розосередженої ємності. Зокрема, у [1,3] показана можливість використання ШР, підключених за чотирипроменевою схемою з некерованими компенсаційними реакторами (КР), шляхом відключення однойменної фази групи некерованих реакторів по відношенню до відімкненої фази повітряної лінії.

На сьогодні в Україні публічне акціонерне товариство «Запоріжтрансформатор» виготовляє КШР з тиристорним керуванням на максимальну номінальну напругу 500 кВ. В той же час у мережах об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України основною напругою залишається 750 кВ. Для того щоб дослідити доцільність використання КШР в цих мережах, у тому числі й з метою попередження резонансних перенапруг в несиметричних режимах, в роботі використані проектні показники КШР-150000/750 з робочим діапазоном зміни опору $0 \div 2000$ Ом [10].

У керованих шунтувальних реакторах (КШР) з підмагнічуванням для плавного регулювання споживаної реактивної потужності і напруги в точці підключення, використовується насичення стали магнітопроводу постійним потоком, створюваним випрямленим струмом в спеціальній обмотці управління. Фактично використовується принцип магнітного підсилювача, коли насичення стрижнів магнітопроводу знижує індуктивність розташованої на ній мережевої обмотки, і, відповідно, також пропорційно знижується її індуктивний опір. Таким чином, стрімкий перехід від ненасиченого стану до глибокого насичення, може спричинити генерування вищих гармонічних складових. Тобто в силу нелінійності регулювальних характеристик зміна споживаної потужності КШР супроводжується несинусоїдальними спотвореннями в струмі і в напругах обмоток.

В області мінімальних навантажень $0 \div 30\%$ від номінального навантаження КШР в струмі реактора спостерігаються спотворення 5 і 7 гармоніками, при цьому сумарний струм спотворення не перевищує 1,5% від номінального струму керованого шунтувального реактора (КШР), що не робить істотного впливу на синусоїдальність напруги в точці його підключення. Відповідно до [4,5,9] при $70 \div 80\%$ від потужності реактора спостерігається максимальний рівень спотворень $3 \div 5\%$ від 5 і 7 гармоніки. Однією з головних особливостей ліній електропередачі (ЛЕП) 750 кВ є необхідність врахування розподіленого характеру параметрів і хвильових властивостей лінії. Однак для аналізу режимів роботи ліній довжиною до 400 км можуть використовуватися розрахунки із зосередженими параметрами без врахування розподіленості параметрів, насамперед ємностей [7]. Слід зазначити, що найдовша ЛЕП 750 кВ в Україні має довжину 396 км.

За допомогою аналізу перехідного процесу резонансного контуру до складу якого входять C_M – ємність між фазами повітряної лінії пФ/км, C_M – ємність між фазою та землею пФ/км, $L_{КШР}$ – індуктивність керованого шунтувального реактора Гн, $L_{ККР}$ – індуктивність керованого компенсаційного реактора (ККР) Гн, R_Σ – сумарний активний опір відімкненої фази ЛЕП Ом. напруга між точками на відключеній фазі під час здійснення циклу ОАПВ:

$$U_B(t) = U_B \sin(\omega t + \Psi_B) + U_B^{Bin}(t) \quad (1)$$

де U_B , Ψ_{U_B} амплітуда та фаза стаціонарного значення напруги в точці КЗ; $U_B^{Bin}(t)$ – вільна складова напруги, ω – кутова швидкість.

В свою чергу вільна складова напруги виводиться з рівняння:

$$U_B^{Bin}(t) = L \frac{\partial i}{\partial t} + R_\Sigma i + \frac{1}{2C_M + C_3} \int_0^t i dt \quad (2)$$

Після рішення рівняння (2) маємо:

$$U_B^{Bin}(t) = U_B (\sin \Psi_{U_B} \frac{\omega}{\beta} \sin \beta t - \cos \Psi_{U_B} \cos \beta t) e^{-\frac{t}{T}} \quad (3)$$

В (3) β – власна частота коливань, що визначається за виразом:

$$\beta = (L_{КШР}(L_{КШР} + 3L_{ККР}) / (L_{КШР} + 2L_{ККР}) \cdot (2C_M + C_3) \cdot l)^{-0.5}, 1/c$$

де l – довжина лінії. T – постійна часу затухання коливань:

$$T = (L_{КШР} + 3L_{ККР}) / R_\Sigma, c.$$

Підставляючи (3) у (1), маємо:

$$U_B(t) = U_B \left[\sin(\omega t + \Psi_{U_B}) + (\sin \Psi_{U_B} \frac{\omega}{\beta} \sin \beta t - \cos \Psi_{U_B} \cos \beta t) e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad (4)$$

Діапазон зміни індуктивності КШР-150000/750: $L_{КШР} \in [0; 6.36]$, Гн. та ККР-16000/35 відповідно $L_{ККР} \in [0; 1.02]$, Гн. Слід зазначити, що керовані компенсаційні реактори (ККР) сконструйовані на напругу 35 кВ, але спроможні витримувати допустиму для ізоляції амплітуду комутаційної перенапруги 145 кВ протягом неповнофазного режиму, відповідно до вимог, що наведені у [8].

На основі виразу (4) було виконано аналіз ефективності використання КШР для ЛЕП з метою запобігання резонансних перенапруг в несиметричних режимах. Розглядався несиметричний режим, який виникає під час безструмової паузи однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) при ліквідації короткого замикання (КЗ) на одній з фаз ЛЕП. При відсутності можливості зміни індуктивності ШР спостерігався розвиток резонансного процесу зі значними перенапругами (рис.1) більш ніж 1000 кВ. Відстроювання від умов резонансу досягається за допомогою плавного налаштування індуктивності $L_{КШР}$, що дозволило знизити значення напруги до безпечного рівня 643 кВ (рис. 2).

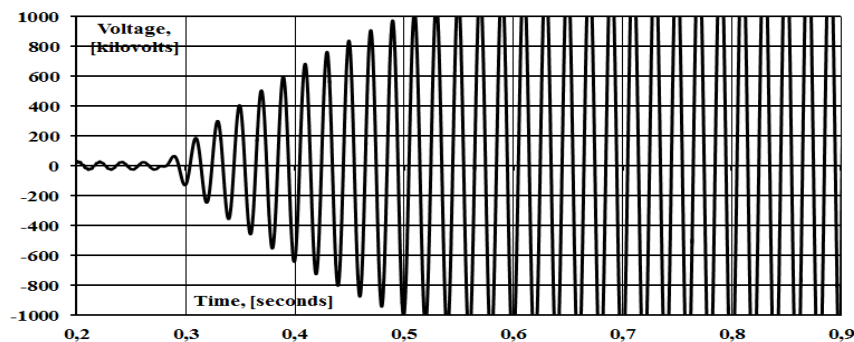


Рис. 1. Процес при встановленні нерегульованого ШПР

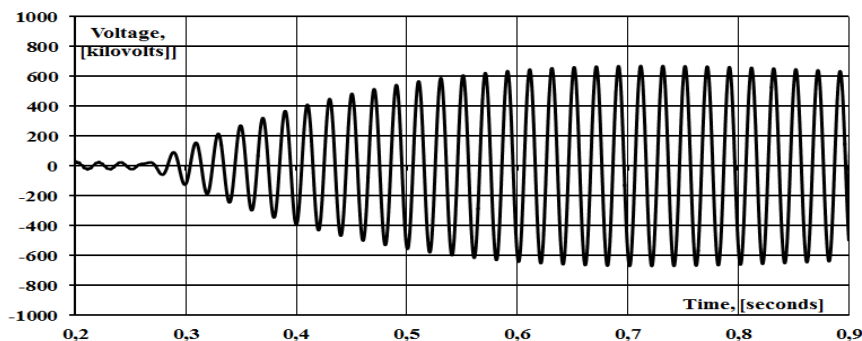


Рис. 2. Процес при встановленні КШПР

Запобігти виникненню резонансних перенапруг можна також за допомогою плавної зміни індуктивності КР, який встановлюється для заземлення спільної точки при чотирипроменевому підключенні групи ШПР. Таке підключення дозволяє підвищити ефективність гасіння дуги під час КЗ та відповідно скоротити безструмову паузу ОАПВ [1,2]. Очевидно, що зміна опору компенсаційного реактору приводить до зміни налаштування еквівалентного заступного кола. Тому на сьогодні КР стали практично стандартним устаткуванням підстанцій електричних мереж ОЕС України не тільки для забезпечення необхідної тривалості безструмової паузи ОАПВ, а також для запобігання резонансним перенапругам. Проте слід зазначити, що за умовами міцності ізоляції нейтрального виводу ШПР, КР не може мати індуктивний опір більший ніж 320 Ом, що може виявитися недостатнім для відходу від точки резонансу. Також слід зазначити, що при чотирипроменевому підключенні вплив КР на резонансі перенапруги є непрямим і тому менш ефективним, ніж безпосередня зміна індуктивності ШПР.

3. ВИСНОВКИ

1. Для попередження виникнення небезпечних внутрішніх перенапруг в електричних мережах необхідно забезпечити розладнання резонансних контурів, що виникають під час аномального неповнофазного режиму. Це можна реалізувати шляхом відповідного налаштування поперечних індуктивностей в мережі.

2. Порівняно з традиційним використанням чотирипроменевої схеми підключення ШПР через КР зі ступінчастим регулюванням для відстроювання від резонансних умов, плавна зміна індуктивності КШПР дозволяє досягти мети більш ефективно. Це пояснюється як безпосереднім впливом на еквівалентні параметри контуру, так і розширеним діапазоном зміни значення індуктивності.

3. При вирішенні проектної задачі оптимізації режимів неоднорідних електричних мереж шляхом використання КШПР доцільно враховувати також

можливість використання цих пристроїв для обмеження тривалих резонансних перенапруг під час неповнофазних режимів.

4. ЛІТЕРАТУРА

1. Atmuri S., Thallam R., Gerlach D., Lundquist T., Selin D.: Neutral reactors on shunt compensated EHV lines. Proc. of Conference of Transmission and Distribution. Chicago, 7-12 April 1994. Vol. 1. pp.15–21.
2. Hingorani N.G., Gyugyi L.: Understanding FACTS Concept and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York.: IEEE Press, 2000, 432 p.
3. Martinich T., Nagpal M., Manuel S.: Damaging open-phase overvoltage disturbance on a shunt-compensated 500-kV line. IEEE Transactions on Power Delivery 2015. №30, pp. 412 – 419.
4. Wass T., Hornfeldt S., Valdemarsson S.: Magnetic circuit for a controllable reactor. IEEE Transactions on Magnetics 2006. № 9, pp. 2196-2200.
5. Zhao S., Yinand Z. Liu H.: Physical Design and Control Method of Fast Response Magnetically Controlled Reactors, In Proceedings of the CSEE 2013, №.15, pp.149-155.
6. Александров Г.Н.: Ограничение коммутационных перенапряжений на линиях электропередачи с помощью управляемых шунтирующих реакторов. Электричество. 2001. № 1. С. 9–12.
7. Кадомская К.П.: Высоковольтные ВЛ. Эффективность и управляемость шунтирующих реакторов. Новости электротехники. 2008. № 3. С. 38–71.
8. Сапожников А. В.: Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения, М.: "Энергия", 1969. с.
9. Сулейманов В.Н.: Электрические сети и системы: Учеб. / В.Н. Сулейманов, Т.Л. Кацадзе.–К:НТУУ «КПИ», 2007.–504 с.
10. Управляемые шунтирующие реакторы. http://ztr.com.ua/files/ztr_d74-ztr_yshr_2014.pdf

Кандидат технічних наук Кучанський Владислав Володимирович

Інститут електродинаміки НАН України
03057, Київ-057, пр. Перемоги, 56
Контактний телефон:+38(050) 38-78-942
e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

Магістр Лиховід Юрій Григорович

Національна енергетична компанія «Укренерго»
01032, м. Київ, вул. Симона Петлюри 25
Контактний телефон:+38(050) 06-84-883
e-mail: re_nim_tor@ukr.net

Магістр Мельничук Валентина Анатоліївна

Інститут електродинаміки НАН України
03057, Київ-057, пр. Перемоги, 56
Контактний телефон:+38(050) 06-84-883
e-mail: yitied@gmail.com

