

## ЗАСТОСУВАННЯ КЕРОВАНИХ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ ЗАРЯДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЛЕП НВН В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Ю.І. Тугай\*, докт.техн.наук В.В. Кучанський\*\*, канд.техн.наук, І.Ю.Тугай\*\*\*, канд.техн.наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [tugay@ukr.net](mailto:tugay@ukr.net)

*Застосування керованих шунтувальних реакторів перетворює лінії електропередачі надвисокої напруги в керовані лінії електропередачі класу FACTS і тим самим забезпечує виконання вимог сучасних енергетичних систем до оптимального керування поточкорозподілом в нормальному усталеному режимі. В даній роботі розглянуто додаткові фактори, які необхідно враховувати у разі використання керованих шунтувальних реакторів для FACTS. Показано, що порівняно з іншими засобами створення FACTS, встановлення керованих шунтувальних реакторів додатково знижує втрати активної потужності в лініях за рахунок поперечної компенсації. Підкреслено ефективність застосування керованих шунтувальних реакторів задля підвищення надійності виконання однофазного повторного включення. В той же час наявність феромагнітного осердя в керованих шунтувальних реакторах обумовлює загрозу виникнення перехідного резонансу, з появою якого необхідно рахуватися під час проектування таких FACTS. Також слід зважати на можливість появи значної аперіодичної складової в струмі при комутації, що може спричинити відмову лінійного вимикача. Бібл. 10, рис.1, табл.1.*

**Ключові слова:** керовані шунтувальні реактори, FACTS, ОАПВ, перехідний ферорезонанс

Виходячи з принципів системного підходу, електроенергетичну систему можна представити сукупністю мереж різного призначення та номінальної напруги, які утворюють певні ієрархічні рівні для потоків енергії. Розподіл потоків енергії між мережами пов'язаний із проявом фундаментального принципу найменшої дії, який в електротехніці реалізується через закони Кірхгофа [1]. Тому за природного розподілу потоків енергії між мережами її втрати будуть найменшими. Але у разі використання синусоїдного змінного струму цей висновок є справедливим для повної потужності. В той же час економічний режим з мінімальними втратами активної потужності, саме які нас цікавлять у процесі оцінки ефективності транспорту енергії, встановлюється тільки в умовній схемі з активних опорів. Дослідження показали, що природний режим значно (в 1,4–1,5 рази) поступається економічному за величиною втрат, і у цьому випадку виникає перевантаження мереж більш низької напруги неадекватними для них транспортними потоками енергії, чим зменшується пропускна здатність електроенергетичної системи в цілому [2].

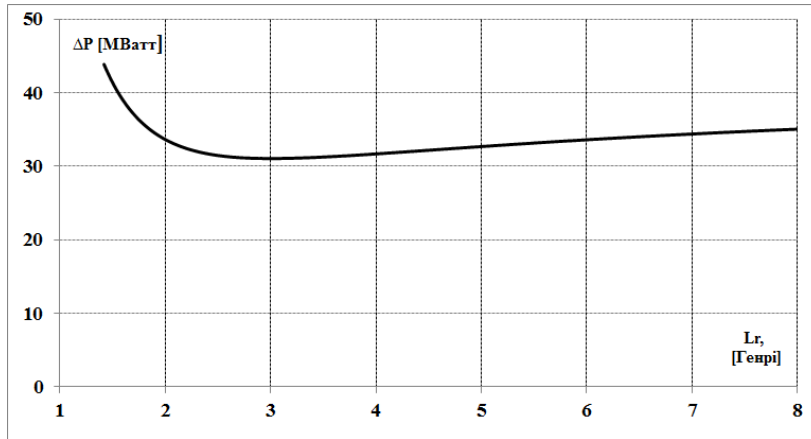
Тому однією із основних технічних проблем розвитку сучасних електроенергетичних систем є проблема ефективного примусового управління потоками енергії через окремі мережі. В даний час на основі сучасної схемотехніки та елементів силової електроніки розроблено ряд ефективних пристроїв FACTS (Flexible AC Transmission System), що призначені для реалізації такого управління [3]. Одним з пристроїв FACTS є керовані шунтувальні реактори (КШР), які в енергосистемах виконують широкий спектр завдань [4-6]. На відміну від традиційного шунтувального реактору (ШР), який є пасивним елементом мережі і призначений тільки для компенсації надлишкової зарядної потужності в лініях електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН), КШР – активний елемент, який дає змогу також керувати режимами енергосистеми. Проте слід зазначити, що КШР мають суттєво складнішу конструкцію ніж ШР і, відповідно, вимагають більших витрат на їхнє встановлення та експлуатацію.

**Метою роботи** є розгляд особливостей застосування КШР в енергосистемах як багатофункціонального пристрою, тобто показ додаткових до основної функції FACTS позитивних та негативних впливів на режими електромереж, що мають бути враховані під час проектування та експлуатації.

Задля ілюстрації додаткової зміни в системі втрат активної потужності  $\Delta P$  внаслідок поперечної компенсації ЛЕП НВН виконано числовий експеримент за таких характеристиках:  $l = 400$  км – довжина лінії,  $U = 750$  кВ – номінальна напруга лінії. У разі конструкції фази проводу 4хАС-400/93 усереднені погонні параметри ЛЕП-750:  $r_0 = 0.019$  Ом/км;  $x_0 = 0.289$  Ом/км;  $g_0 = 0.0325$  мкСм/км;

$b_0 = 4.13 \text{ мкСм/км}$ . Під час експерименту активна та реактивна потужності, що передаються по лінії, змінювалися в межах  $P = 300 \div 4600 \text{ МВт}$ ,  $Q = -500 \div 1000 \text{ МВАр}$ .

В залежності від ступеня компенсації значення втрат активної потужності варіюються в досить широких межах (рисунок). При цьому слід пам'ятати, що активні втрати у ЛЕП НВН складаються з втрат на нагрівання та на коронування проводів (моделюються активними опором та провідністю).



Задля оцінки ефективності застосування КШР в порівнянні із ШР було виконано розрахунки втрат активної потужності для трьох основних режимів роботи ЛЕП НВН: малих навантажень, максимальних навантажень, експлуатаційний. Напруга змінювалася відповідно до прийнятих в діючих мережах режимів роботи ЛЕП НВН значень. Індуктивність однієї некерованої групи з однофазних ШР складає  $L_p = [5.97] \text{ Гн}$ . Діапазон зміни індуктивності у КШР типу

РОДУ-330/750 складає  $L_p \in [0.3 \div 7] \text{ Гн}$ . Результати розрахунків для характерних режимів наведено у таблиці.

Режим ЛЕП 750 кВ	Без компенсації		Встановлено ШР		Встановлено КШР	
	$\Delta P$ , МВт	ККД, %	$\Delta P$ , МВт	ККД, %	$\Delta P$ , МВт	ККД, %
$P = 350 \text{ МВт}$ $Q = -100 \text{ МВАр}$ $U = 780 \text{ кВ}$	10.601	96.971	7.662	97.811	6.658	97.812
$P = 1500 \text{ МВт}$ $Q = -500 \text{ МВАр}$ $U = 750 \text{ кВ}$	38,669	97.42	33,59	97.76	31,057	97,93
$P = 2500 \text{ МВт}$ $Q = -500 \text{ МВАр}$ $U = 750 \text{ кВ}$	80.69	96.772	79.01	96.84	75.956	96.962

Можна бачити, що у разі застосування КШР відбувається додаткове зниження технологічних втрат за рахунок більш точної поперечної компенсації. Але, звичайно, вирішальне значення з точки зору економії електроенергії має можливість використання КШР з метою управління потокорозподілом в неоднорідних мережах системи задля отримання економічного нормального усталеного режиму.

Однофазне повторне включення (ОАПВ) забезпечує в більшості випадків ліквідацію найбільш розповсюдженого ушкодження ЛЕП НВН – дугового однофазного замикання. Але за наявності в ЛЕП ШР, індуктивність яких спричиняє ступінь компенсації зарядної потужності наближений до одиниці, під час безструмової паузи ОАПВ утворюється резонансне коло, і на відключеній фазі можуть виникнути значні резонансні перенапруги, амплітуда яких обмежується тільки втратами на корону (на практиці до рівня 1,3 – 1,4 від робочої напруги) [7]. Це є причиною спрацьовування захисту від підвищення напруги і, як наслідок, повного трифазного відключення ЛЕП. Традиційно для зміни еквівалентних параметрів резонансного кола використовують чотирипроменеве підключення ШР із заземленням нейтральної точки групи ШР через спеціальний компенсаційний реактор, індуктивність якого можна підстроювати ступінчастим регулятором. Але для КШР, які можуть плавно змінювати свою індуктивність в широких межах, установка такого реактору є зайвою. Більше того, заміна ступінчатого регулювання на плавне дає змогу точніше відлаштуватися від резонансних умов і, відповідно, зменшувати кратність можливих перенапруг.

В сучасних електричних мережах відбувається широке впровадження елегазової комутаційної апаратури. Але набутий досвід її експлуатації засвідчує, що слід враховувати особливі умови роботи

елегзових вимикачів на ЛЕП з шунтувальними реакторами, які пов'язані з гасінням струмів з великою аперіодичною складовою [8]. Підвищений вміст аперіодичної складової в струмові, що відключається, за порівняно невеликого значення повної його величини може призвести до тривалої відсутності нульових значень цього струму. Це є неприпустимим для розповсюджених елегзових вимикачів з автокомпресійним принципом гасіння, за якого інтенсивність впливу на дугу визначається ефективним значенням повного струму. Максимальний вміст аперіодичної складової в струмі лінійного реактора визначає так званий кидок струму під час його включення. В той же час у разі зміни КШР споживаної потужності змінюється і ступінь компенсації ЛЕП. Якщо включення ЛЕП з КШР буде виконуватися за умови налаштування на споживання мінімальної реактивної потужності, то аперіодична складова струму теж буде мінімальною. Таким чином проблему комутації для лінійного елегзового вимикача вдасться якщо не зняти повністю, то суттєво пом'якшити.

Також слід мати на увазі, що наявність феромагнітного осердя в КШР створює необхідні умови для появи в мережі перехідного ферорезонансу, якщо її вхідний опір на резонансній частоті носить ємнісний характер [9]. Достатньою умовою виникнення перехідного ферорезонансу буде виникнення режиму перенапруги, необхідного для початку процесу. Моделювання електромагнітних процесів показало, що перехідний ферорезонанс найбільш ймовірний на парних гармоніках, тобто перш за все на частоті 100 Гц [10]. Таким чином, можливим є виникнення небезпечного перехідного ферорезонансу якщо найменша власна частота коливань лінії електропередачі близька до частоти другої гармоніки напруги, причому визначальними є параметри лінії електропередачі. Параметри всієї мережі впливають в значно меншому ступені. Виявилось, що небезпечними довжинами лінії за типових параметрів ЛЕП і КШР є якраз рекомендований діапазон використання для ЛЕП-750 – 400-500 км.

**Висновок.** Зростання капітальних витрат через встановлення КШР замість традиційних ШР має бути компенсовано зменшенням втрат електроенергії за умови переходу від природнього усталеного нормального режиму енергосистеми до економічного, який реалізується за допомогою КШР. В роботі показано, що у такому випадку отримуємо додаткове зменшення втрат у ЛЕП НВН за рахунок більш точної компенсації зарядної потужності. Слід також відзначити, що КШР є багатofункціональним пристроєм і за відповідних налаштувань дає можливість коригувати не тільки усталені нормальні режими електричних мереж, а й їхні аномальні режими та перехідні процеси. Більш детальному висвітленню цих питань будуть присвячені інші роботи авторів.

1. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Нетребський В.В., Тептя В.В. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці. Вінниця: ВНТУ, 2014. 212 с.
2. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж в процесі оптимального керування їх режимами. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. 123 с.
3. Zhang X., Rehtanz C., Pal B. Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control. Springer, 2012. 546 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28241-6>
4. Kundul S., Ghosh T., Maitra K., Acharjee P., Thakur S. Optimal Location of SVC Considering Techno-Economic and Environmental Aspect. Proc. 2nd International Conference on Power, Energy and Environment. Shillong, India, June 1-2, 2018. Pp. 15-19. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPETSG.2018.8658729>
5. Gu S., Dang J., Tian M. Compensation degree of controllable shunt reactor in EHV/UHV transmission line with series capacitor compensation considered. Proc. International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Shenyang, China, August 29-31, 2014, Pp. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.2991/mce-14.2014.14>
6. Chandrasekhar R.; Chatterjee D.; Bhattacharya T.. A Hybrid FACTS Topology for Reactive Power Support in High Voltage Transmission Systems. Proc. 44th Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington DC, USA, October 21-23, 2018. Pp. 65-70. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591988>
7. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кошман В.І., Кучанський В.В., Сабарно Л.Р., Тугай І.Ю., Шполянський О.Г., Нікішин Д.А. Розробка методів і моделей аналізу аномальних режимів електричних мереж з метою їх оптимізації. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.019>
8. Кузнецов В.Г. Тугай Ю.І., Шполянський О.Г. Аналіз передумов пошкодження елегзових вимикачів у електричних мережах 750 кВ. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 47. С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.47.016>
9. Bruce A. Understanding and Dealing with Ferroresonance. Proc. Minnesota Power Systems Conference. St. Paul, USA, November 7-9, 2006. Pp. 6-1 – 6-10.
10. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі. *Електротехніка та електромеханіка*. 2018. № 2. С. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.12>

## ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ ЗАРЯДНОЙ МОЩНОСТИ ЛЭП СВН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Ю.И. Тугай, докт.техн.наук В.В. Кучанский, канд.техн.наук, И.Ю. Тугай, канд.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: [tugay@ukr.net](mailto:tugay@ukr.net)

*Применение управляемых шунтирующих реакторов превращает линии электропередачи сверхвысокого напряжения в управляемые линии электропередачи класса FACTS. В работе рассмотрены дополнительные факторы, которые необходимо при этом учитывать. Показано, что в сравнении с другими средствами FACTS установка управляемых шунтирующих реакторов дополнительно снижает потери активной мощности за счет поперечной компенсации. Отмечена эффективность применения управляемых шунтирующих реакторов для повышения надежности выполнения ОАПВ. Также рассмотрена угроза возможного появления переходного феррорезонанса и значительной аперидической составляющей в токе при коммутациях. Бібл. 10, рис. 1, табл. 1.*

**Ключевые слова:** управляемые шунтирующие реакторы, FACTS, ОАПВ, переходный феррорезонанс

## THE USING OF CONTROLLED DEVICES FOR THE COMPENSATION OF CHARGING POWER ON EHV POWER LINES IN ELECTRIC NETWORKS

Yu.I. Tuhay, V.V. Kuchansky, I.Yu. Tuhay  
Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,  
56 Peremohy, Kiev, 03057, Ukraine, e-mail: [tugay@ukr.net](mailto:tugay@ukr.net)

*It is shown that the use of controlled shunt reactors allows you to create FACTS-controlled power lines based on extra-high voltage power lines that meet the necessary requirements of modern energy systems to control normal conditions. The typical modes of operation of an ultra-high voltage power line with installed controlled shunt reactors are analyzed. The efficiency of using controlled shunt reactors to increase the reliability of single-phase auto-reclosing is shown. The issues of the appearance of an aperiodic component in the current when disconnecting the line of SF<sub>6</sub> circuit breakers are considered. It is shown that the presence of a ferromagnetic core in controlled shunt reactors causes the appearance of transition resonance, which must be taken into account when designing the FACTS. References 10, figures 1, tables 1.*

**Keywords:** controlled shunt reactors, FACTS, single-phase auto-reclosing, transient ferroresonance

1. Lezhnyuk P.D., Kulyk V.V, Netrebsky V.V, Teptya V.V. The principle of least action in electrical engineering and electric power. Vinnytsia: Vinnitskyi Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet, 2014. 212 p. (Ukr)
2. Lezhnyuk P.D., Kulik V.V., Burikin O.B. The interaction of electrical networks in the process of optimal control of their modes. Vinnytsia: UNIVERSUM, 2008. 123 p. (Ukr)
3. Zhang X., Rehtanz C., Pal B. Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control. Springer, 2012. 546p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28241-6>
4. Kundul S., Ghosh T., Maitra K., Acharjee P., Thakur S. Optimal Location of SVC Considering Techno-Economic and Environmental Aspect. 2nd International Conference on Power, Energy and Environment. Shillong, India, June 1-2, 2018. Pp. 15-19. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPETSG.2018.8658729>
5. Gu S., Dang J., Tian M. Compensation degree of controllable shunt reactor in EHV / UHV transmission line with series capacitor compensation considered. Proc. International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering. China, August 29-31, 2014, Pp. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.2991/mce-14.2014.14>
6. Chandrasekhar R., Chatterjee D., Bhattacharya T. A Hybrid FACTS Topology for Reactive Power Support in High Voltage Transmission Systems. Proc. 44th Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington DC, USA, October 21-23, 2018. Pp. 65-70. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591988>
7. Kuznetsov V.G., Tugay Y.I., Koshman V.I., Kuchansky V.V., Sabarno L.R., Tugay I.Y., Shpolyansky O.G., Nikishin D.A. Development of methods and models for the analysis of abnormal modes of electrical networks in order to optimize them. Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. 2019. No 54. Pp. 19 – 28. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.019>
8. Kuznetsov V.G. Tugay Y.I., Shpolyansky O.G. Analysis of preconditions for damage of SF<sub>6</sub> circuit breakers in 750 kV electrical networks. Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. 2017. No 47. Pp. 16–22. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.47.016>
9. Bruce A. Understanding and Dealing with Ferroresonance. Proc. Minnesota Power Systems Conference. St. Paul, USA, November 7-9, 2006. Pp. 6-1 - 6-10.
10. Kuznetsov V.G., Tugay Y.I., Kuchansky V.V., Likhovid Y.G., Melnichuk V.A. Resonant overvoltages in non-sinusoidal mode of the main electric network. Elektrotehnika ta Elektromehanika. 2018. No 2. Pp.69–73. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.12>

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 08.05.2020