

УДК 621.314.5

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.016>

## СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ. ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ЛІНІЙНОЮ КОМУТАЦІЄЮ

**В.В. Павловський\***, докт. техн. наук, **А.В. Приходько**

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [loginlav90@gmail.com](mailto:loginlav90@gmail.com)

*Представлено короткий огляд, описано основні питання, що можуть бути вирішені в разі використання систем передачі постійного струму (HVDC). Виконано порівняння двох технологій систем HVDC – перетворювачі з лінійною комутацією на основі перетворювачів струму (Line Commutated Converter – LCC) та перетворювачі напруги (Voltage Source Converter – VSC). Проведено розрахунки ustalених режимів та перехідних процесів, що дали змогу оцінити поведінку моделі та провести аналіз головних параметрів системи передачі постійним струмом на основі перетворювача з лінійною комутацією в програмному забезпеченні DIGSILENT PowerFactory. Бібл. 11, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** передача електричної енергії, постійний струм, HVDC, LCC, VSC, PowerFactory.

**Вступ.** Останніми роками енергосистеми багатьох країн світу показали свою вразливість щодо поширення аварійних ситуацій. Так, майже в усіх міждержавних зв'язках в основі використовуються традиційні системи передачі змінним струмом. Тому дуже часто аварійне вимкнення однієї магістральної лінії електропередачі призводить до перевантаження інших ліній, що може викликати каскадне відключення електропостачання та масштабні системні аварії. Одним із прикладів такої ситуації є надзвичайна аварія, що сталася в 2019 році в Аргентині [1]. В 2003 році в енергосистемах США та Канади аварія призвела до знеструмлення споживачів сумарною потужністю більше 60 ГВт [2]. У 2003 році в Європі сталася ще одна аварія внаслідок перевантаження лінії, що з'єднує Італію з Швейцарією. Це найзначніший інцидент такого роду в світі за останні 70 років, у результаті якого 56 мільйонів мешканців Італії та Швейцарії залишалися знеструмленими протягом 12 годин [2].

ОЕС України має достатньо високу пропускну спроможність магістральних та міждержавних електричних мереж та з огляду на географічне розташування може стати не лише великим експортером електроенергії, але й надійним посередником між енергосистемами сусідніх держав. У свою чергу це потребує значного покращення керованості ОЕС України, адаптації чинних норм та стандартів до європейських вимог. Цього можна досягти за рахунок покращення технічного стану електростанцій та систем електропередачі і регулювання частоти та потужності відповідно до європейського рівня, що вимагає багато часу та коштів. Проте шляхом передачі електроенергії постійним струмом для міждержавних зв'язків (несинхронний зв'язок) можна уникнути вищевказаних проблем, які виникають при синхронному зв'язку ОЕС України із суміжними державами. Але, на жаль, сьогодні, на противагу іншим розвиненим країнам, ОЕС України не використовує технології передачі постійним струмом високої напруги (High Voltage Direct Current (HVDC)).

**Метою даної роботи** є аналіз існуючих систем HVDC у сусідніх енергосистемах та в світі в цілому; аналіз існуючих технологій виконання; проведення розрахунку ustalених режимів та перехідних процесів на тестовій моделі без прив'язки до електричної мережі для дослідження її поведінки з метою подальшого використання моделі для більш масштабного моделювання електричних режимів вже в моделі ОЕС України.

У світі все частіше постає питання посилення традиційних систем передач змінним струмом. Перше комерційне використання технології передачі постійного струму було здійснено в Швеції ще в 1954 році – була введена в експлуатацію уніполярна кабельна лінія потужністю 20 МВт, напругою 100 кВ та довжиною 98 км. Лінія з'єднувала острів Готланд з національною енергосистемою по дну Балтійського моря. Перша «Готландська лінія» успіш-

но пропрацювала 28 років. Замість неї в 1983 та 1987 роках на основі нових технологій було побудовано дві нові, більш потужні лінії. З цього моменту в усьому світі активно споруджуються та експлуатуються системи на основі передачі електричної енергії постійним струмом (більше 100 об'єктів). Бразилія, Китай, Індія та Європа (останні роки) найбільш активно розвиваються в цьому напрямку.

Під час використання системи HVDC електрична енергія з мережі змінного струму перетворюється в постійний струм через перетворювальну станцію (випрямляч). Далі передається повітряною або кабельною лінією (залежно від території проходження) на необхідну відстань, де знову перетворюється в змінний струм вже іншою перетворювальною станцією (інвертор) та передається в приймальну мережу змінного струму.

#### Використання системи HVDC спрямовано на вирішення таких питань:

- підвищення надійності в процесі використання систем HVDC паралельно сильно завантаженим лініям передачі змінного струму;
- забезпечення гнучкого контролю та управління потоками електричної енергії;
- передачі електроенергії на великі або дуже великі відстані (більше 600 км (рис. 1 [3]) – вони економічно більш вигідні порівняно зі звичайними лініями змінного струму);
- передачі електроенергії від потужних ГЕС та ТЕС до віддалених центрів електроспоживання. У такому разі втрати електроенергії під час її передавання будуть майже втричі менші порівняно з електропередачею змінного струму;
- запобігання поширенню аварійних ситуацій на великі території;
- забезпечення безперебійної роботи енергосистеми;
- відновлення нормального режиму роботи системи в разі його порушення;
- передачі електроенергії через водяні та інші перешкоди (наприклад, від офшорних вітрових електростанцій за допомогою підводних кабельних ліній протяжністю більше 50 км).
- об'єднання окремих енергосистем із різною частотою, зі збереженням можливості передачі потужності між ними та незалежного регулювання частоти.

#### Розрізняють такі технології систем HVDC:

- перетворювачі з лінійною комутацією на основі перетворювачів струму (Line Commutated Converter (LCC)), що є найбільш розповсюдженими нині. Для перетворення змінного струму в постійний використовуються тиристорні вентиля. Через споживання перетворювачами реактивної потужності зазвичай до складу станції входять джерела реактивної потужності – конденсатори, що суттєво підвищує вартість системи.
- перетворювачі напруги (Voltage Source Converter (VSC)) – це самокомутовані перетворювачі напруги на основі транзисторів (IGBT, GTO та ін.), що мають кращу керованість, але більшу вартість порівняно з попередніми. Останнім часом з розвитком технологій системи VSC HVDC набувають все більшої популярності. На відміну від тиристорних перетворювачів струму використання перетворювачів напруги дає змогу виконувати незалежне регулювання активної та реактивної потужності (без застосування додаткових джерел реактивної потужності). Перетворювачі напруги відрізняються високою швидкістю в динамічних режимах та в разі реверсу подачі потужності.

У таблиці представлено порівняння двох вищевказаних технологій [4–7]:

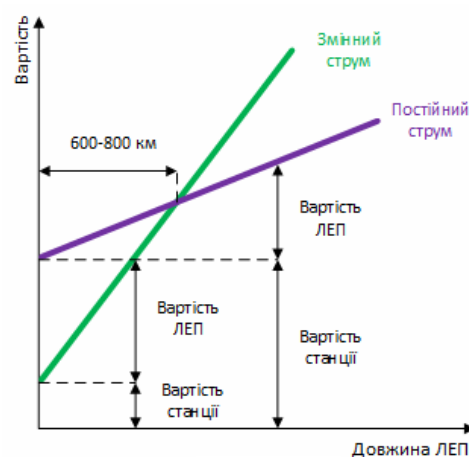


Рис. 1

<i>LCC HVDC</i>	<i>VSC HVDC</i>
Значні гармонічні спотворення напруги, необхідні фільтри компенсації гармонік	Незначні гармонічні спотворення напруги, фільтри гармонік не потрібні
Потребують в своєму складі засобів для компенсації реактивної потужності	Більш гнучке регулювання реактивної потужності

Через наявність фільтрів компенсації гармонік розміщуються на великій території	Складає 50–60 % від території, що необхідно для системи LCC HVDC
Менша вартість станції	Вартість на 10 – 15 % більша порівняно з вартістю станції LCC HVDC
Потік потужності змінюється за рахунок зміни полярності перетворювачів	Потік потужності змінюється за рахунок зміни напрямку струму
Регулювання активної потужності	Регулювання активної та реактивної потужностей
<b>Відмінність перетворювачів</b>	
Використовуються напівпровідники що дають змогу витримати напругу будь-якої полярності	Використовуються напівпровідники, які пропускають струм у будь-якому напрямку
Вихідна напруга може бути будь-якої полярності для зміни напрямку потоку потужності	Полярність вихідної напруги не змінюється
Напрямок струму не змінюється	Напрямок струму змінюється з метою зміни напрямку потоку потужності
Використовуються напівпровідники, що включаються під впливом керуючої дії	Використовуються напівпровідники, що включаються або виключаються під впливом керуючої дії
Виключення та “комутація” залежать від зовнішньої мережі	Виключення не залежить від зовнішньої мережі

**Модель перетворювача з лінійною комутацією.** Перша тестова модель системи LCC HVDC була запропонована ще в 1991 році [8]. Її застосовують для виконання досліджень з використанням різних програмних забезпечень [9, 10]. У рамках цієї роботи всі дослідження – розрахунки ustalених режимів та перехідних процесів – виконано в програмному забезпеченні PowerFactory, версія V2019 SP1 [3], яке дає змогу проводити розрахунки ustalених режимів, аналізу стійкості, гармонічного аналізу та іншого для мереж змінного струму, постійного та гібридних мереж (змінний та постійний струм). Тестова модель системи HVDC (рис. 2) – перетворювач з лінійною комутацією LCC HVDC створена компанією DiGSILENT, розробником програмного забезпечення PowerFactory.

Модель LCC HVDC напругою 500 кВ представлена уніполярною системою передачі постійного струму. у схемі один з виводів випрямляча заземлено, а інший з’єднано з повітряною лінією постійного струму протяжністю 500 км.

Перетворювальна станція представлена за допомогою дванадцятипульсного тиристорного перетворювача, утвореного двома шестимостовими тиристорними схеми (схема Ларіонова), виводи постійного струму яких з’єднані. Використання двох перетворювальних

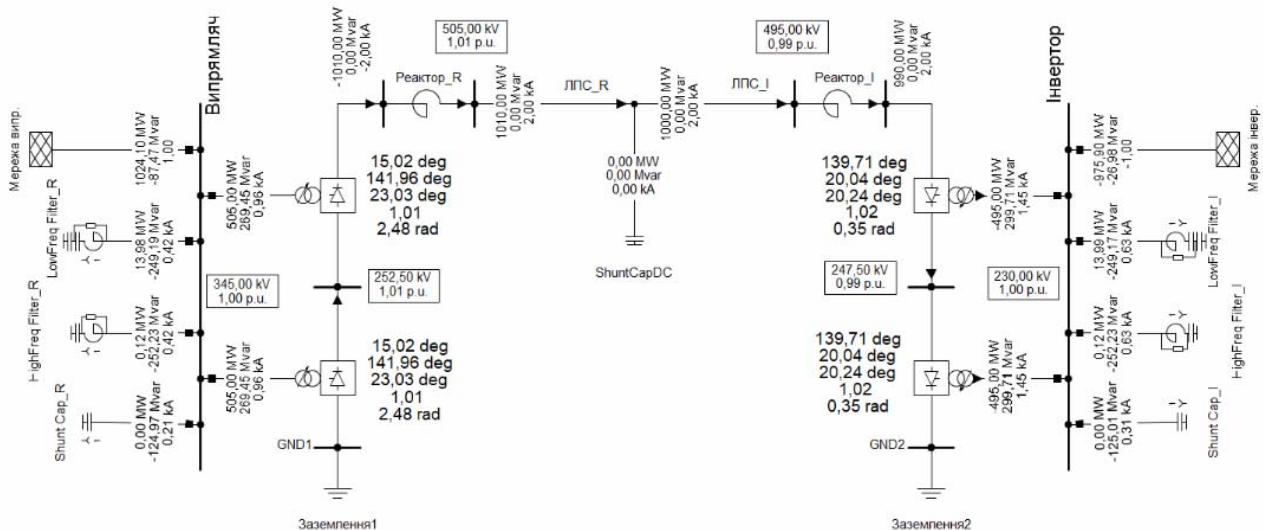


Рис. 2

трансформаторів з обох сторін забезпечує зсув фаз у 30 градусів між напругами змінного струму перетворювачів, тим самим покращуючи гармонічний склад напруги постійного струму.

У процесі перетворення змінного струму в постійний і навпаки перетворювач споживає реактивну потужність, тому з обох сторін (випрямної та інверторної станції) встановлюються джерела реактивної потужності. З метою покращення форми кривої струму в лінії постійного струму з обох сторін встановлено згладжувальні реактори. Вхідні умови налаштування випрямляча та інвертора зображено на рис. 3 а, б відповідно.

**Firing Angle (alpha-)Control**

Control-Characteristic: I

Current Setpoint: 2, kA

Automatic Firing Angle Control

Actual Firing-Angle: 15, deg

Minimum Firing Angle: 10, deg

Maximum Firing Angle: 180, deg

Minimum Extinction Angle: 15, deg

---

**Converter Transformer**

Tap-Changer: alpha-control

Actual tap position (p.u.): 0,95

Actual Firing-Angle: 15, deg

Commutation Reactance: 13,4445 Ohm

Phase Shift: 0, \*30deg

Relaxation Factor: 0,4

---

Setpoint for DC Load Flow

Power-Setpoint: 500, MW

**Firing Angle (alpha-)Control**

Control-Characteristic: Vdc

Voltage Setpoint: -0,99 p.u.

Automatic Firing Angle Control

Actual Firing-Angle: 15, deg

Minimum Firing Angle: 10, deg

Maximum Firing Angle: 180, deg

Minimum Extinction Angle: 10, deg

Consider minimum extinction angle (gammamin)

---

**Converter Transformer**

Tap-Changer: gamma-control

Actual tap position (p.u.): 0,95

Extinction Angle (gamma) Setpoint: 20, deg

Commutation Reactance: 13,4445 Ohm

Phase Shift: 0, \*30deg

Relaxation Factor: 0,4

---

Setpoint for DC Load Flow

Power-Setpoint: 1, MW

**а**
**б**

Рис. 3

**Розрахунок усталеного режиму.** Проведено розрахунки усталеного режиму на основі методу Ньютона-Рафсона. У моделі система управління випрямляча налаштована на керування постійним струмом з уставкою 2 кА (current setpoint, рис. 3 а), система управління інвертора – на керування постійної напруги, уставка в моделі становить 0,99 в.о. (рис. 3 б). Окрім того, для кожного перетворювального трансформатора встановлено уставки РПН (actual tap position) з регулюванням кута запалювання (альфа) [9] для випрямляча та кута запирання (гамма) [9] для інвертора.

У результаті розрахунку усталеного режиму (рис. 2) визначено кут запалювання –  $15,02^\circ$  з боку випрямляча та кут запирання –  $20,04^\circ$  з боку інвертора. Перетік потужності за повітряною лінією постійного струму склав 1010 МВт. Також виконується компенсація реактивної потужності, що спожита перетворювачами на випрямній та інверторних станціях. Відповідно до [11] тиристорні перетворювачі споживають 40–60 % реактивної потужності від переданої активної потужності. З результатів, відображених на рис. 2, видно, що генерація реактивної потужності з боку випрямляча складає близько 540 МВАр, що становить майже 54 % переданої активної потужності, а з боку інвертора реактивна потужність складає близько 600 МВАр – 59 %.

Таким чином, результати розрахунків усталених режимів показують, що постійний струм на випрямлячі та напруга на інверторі підтримуються відповідно до заданих уставок, компенсація реактивної потужності виконується відповідно до [11]. Такі розрахунки підтверджують адекватну поведінку моделі LCC HVDC, зважаючи на розрахунок усталеного режиму.

**Розрахунок перехідного процесу.** У рамках цього аналізу системи передачі постійного струму LCC HVDC проведено моделювання електромагнітних перехідних процесів (ЕМПП), а саме – дослідження зміни потужності, що передається лінією постійного струму

в разі зміни (зменшення) уставки струму ((current setpoint) – рис. 3) на випрямлячі з 2 до 1,6 кА в момент 0,1 с. Моделювання ЕМПП виконано з кроком інтегрування 0,00005 с протягом 1 с. Результати моделювання зображено на рис. 4, де *a* – моделювання зміни уставки струму, *b* – зміна активної потужності лінією постійного струму.

Згідно з результатами моделювання зменшення уставки струму на 0,4 кА випрямляча призводить до відповідного зменшення значення потужності, що передається лінією постійного струму, більш ніж на 200 МВт: від 1010 приблизно до 800 МВт.

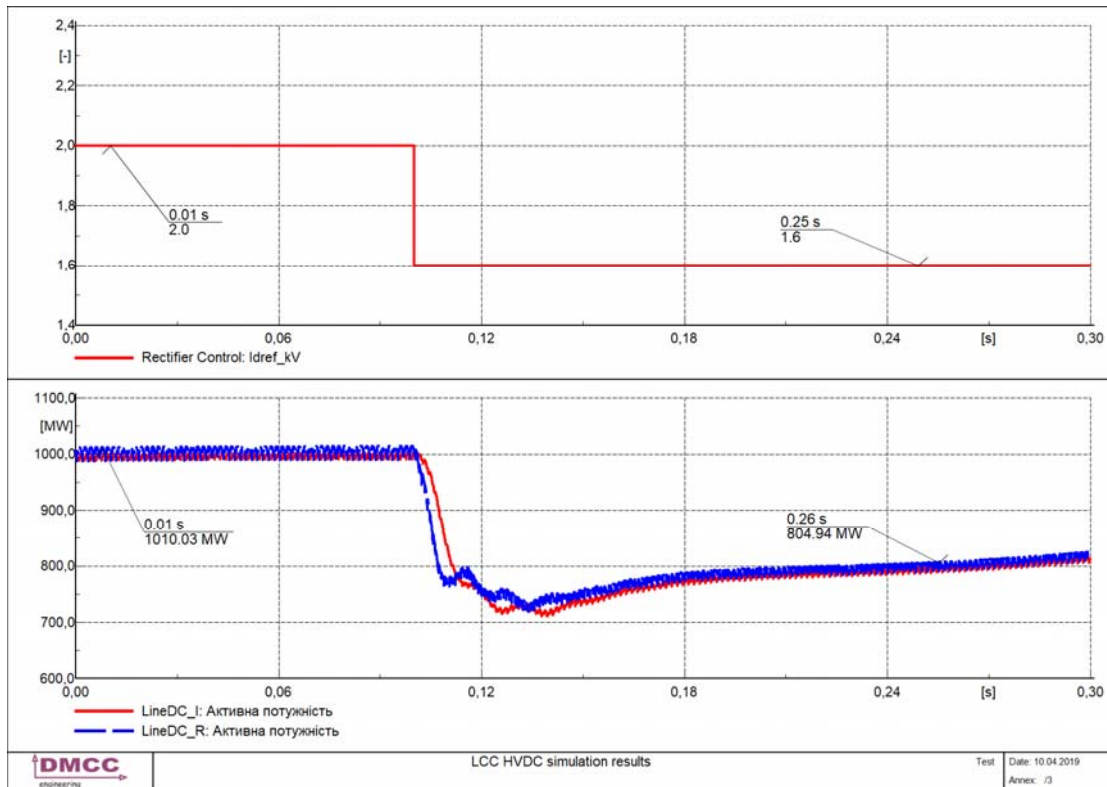


Рис. 4

**Висновки.** Використання систем передачі постійним струмом дає змогу підвищити надійність роботи електричної мережі, забезпечити гнучкий контроль та управління потоками електричної енергії, запобігає поширенню аварійних ситуацій та має багато інших переваг над системами передачі змінним струмом. У роботі розглянуто дві технології систем HVDC – перетворювачі з лінійною комутацією на основі перетворювачів струму (LCC HVDC) та перетворювачі напруги (VSC HVDC) – та проведено їхнє порівняння. Головними відмінностями між ними є відсутність фільтрів компенсації гармонік у системах VSC HVDC та більш гнучке регулювання реактивною потужністю. Так, у системах LCC HVDC потік потужності змінюється внаслідок зміни полярності перетворювачів, у системах VSC HVDC – внаслідок зміни напрямку струму.

Шляхом застосування програмного забезпечення PowerFactory для тестової моделі системи LCC HVDC проведено розрахунки ustalених режимів та перехідних процесів. Розрахунок ustalеного режиму показав, що постійний струм на випрямлячі та напруга на інверторі підтримуються відповідно до заданих уставок, виконується компенсація реактивної потужності, що підтверджує адекватну поведінку моделі. Дослідження електромагнітних перехідних процесів показали, що при зменшенні уставки струму випрямляча зменшується відповідно і потужність, що передається лінією постійного струму, що також свідчить про адекватність роботи моделі. Зазначені результати дають змогу перейти до більш масштабного моделювання електричних режимів енергосистеми з системами передачі електричної енергії постійним струмом.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр: «Інтехен 2»), що виконується відповідно до постанови Президії НАН України від 18.12.2019 № 339 «Про затвердження розподілу бюджетного фінансування НАН України на 2020 рік». Державний реєстраційний номер 0120U002125.

1. Crippling blackout hits tens of millions in South America. URL: [www.cbsnews.com](http://www.cbsnews.com) (accessed 20.06.2019)
2. Andersson G., Donalek P., Farmer R., Hatziaargyriou N., Kamwa I., Kundur P., Martins N., Paserba J., Pourbeik P., Sanchez-Gasca J., Schulz R., Stankovic A., Taylor C., Vittal V. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. *IEEE Transactions on power systems* 2005. Vol. 20. No 4. Pp. 1922–1928.
3. DiGSILENT PowerFactory 2018. User Manual. URL: <https://www.digsilent.de> (accessed 07.03.2019)
4. Dr Radnya A Mukhedkar. Introduction to HVDC, LCC & VSC – Comparison, Alstom. URL: [https://sarienergy.org/oldsite/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Training/Presentations/Day\\_7/LCC\\_vs\\_VSC\\_ALSTOM.pdf3](https://sarienergy.org/oldsite/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Presentations/Day_7/LCC_vs_VSC_ALSTOM.pdf3) (accessed 06.03.2019)
5. Dr RL Sellick, M Åkerberg. Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme. *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission* (ACDC 2012). Birmingham, UK, 4–5 Dec. 2012. Pp. 1–6. DOI: [10.1049/cp.2012.1945](https://doi.org/10.1049/cp.2012.1945)
6. Lennart Carlson. High Voltage DC Lines (HVDC), ABB Review 3. 2005. Pp. 42–46.
7. João Jesus, Rui Castro, J.M. Ferreira de Jesus. HVDC Connection of Offshore Wind Parks: VSC vs LCC with STATCOM. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. Lisbon, Portugal, 17–19 Oct. 2011. Pp. 1–6. DOI: [10.1109/EPQU.2011.6128916](https://doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128916)
8. Szechtman M., Wess T. and Thio C.V. A benchmark model for HVDC system studies. *International Conference on AC and DC Power Transmission*. London, 17–20 Sept. 1991. Pp. 374–378
9. Faruque M.O., Zhang Y., Dinavahi V. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volume 21. No 1. Jan. 2006. Pp. 378–387. DOI: [10.1109/TPWRD.2005.852376](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852376)
10. Do-Hoon Kwon, Hyeon-Jin Moon, Rae-Gyun Kim, Chan-Gi Kim, Seung-Ill Moon. Modeling of CIGRE Benchmark HVDC System Using PSS/E Compared with PSCAD. 2015. *5th International Youth Conference on Energy* (IYCE). Pisa, Italy, 27–30 May 2015. DOI: [10.1109/IYCE.2015.7180781](https://doi.org/10.1109/IYCE.2015.7180781)
11. Guo-Jie Li, Lie T.T., Yuan-Zhang Sun, Si-Ye Ruan, Ling Peng, Xiong Li. Applications of VSC-Based HVDC in Power System Stability Enhancement. Singapore, 29 Nov. 2 Dec. 2005. DOI: [10.1109/IPEC.2005.206937](https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.206937)

## СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЛИНЕЙНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

**В.В. Павловский**, докт. техн. наук, **А.В. Приходько**

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

В статье представлен краткий обзор, описаны основные вопросы, которые могут быть решены с помощью использования систем передачи постоянного тока (HVDC). Выполнено сравнение двух технологий систем HVDC – преобразователи с линейной коммутацией на основе преобразователей тока (Line Commutated Converter - LCC) и преобразователи напряжения (Voltage Source Converter - VSC). Выполнены расчеты установившихся режимов и переходных процессов, которые позволили оценить поведение модели и провести анализ основных характеристик системы передачи постоянным током на основе преобразователя с линейной коммутацией в программном обеспечении DiGSILENT PowerFactory. Библи. 11, рис. 4, таблица.

**Ключевые слова:** передача электрической энергии, постоянный ток, HVDC, LCC, VSC, PowerFactory.

## HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT SYSTEMS. DYNAMIC MODEL OF LINE COMMUTATED CONVERTER

**V.V. Pavlovskiy**, **A.V. Prykhodko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

A brief overview of HVDC transmission systems and the main issues that can be resolved with HVDC systems were described in this article. A comparison between two technologies HVDC systems - Line Commutated Converter (LCC) and Voltage Source Converter (VSC) was presented. Load flow and RMS simulation were calculated with the software DiGSILENT PowerFactory to evaluate the behavior of the model and to analyze the main characteristics of the HVDC system model with line commutated converter. References 11, figures 4, table.

**Key words:** electric power transmission, direct current, HVDC, LCC, VSC, PowerFactory.

Надійшла 03.01.2020

Received 03.01.2020