

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПОСТАНОВЦІ ЛЕП ЗМІННОГО СТРУМУ ПІД НАПРУГУ В ГІБРИДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

О.Г. Шполянський*, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: shpolyanskyv@ied.org.ua

Проведено аналіз перехідних процесів, що виникають під час постановки повітряної лінії електропереєсилання (ЛЕП) 750 кВ під напругу в гібридній енергосистемі (ГЕ). Показано, що подача живлення на ЛЕП з боку передачі постійного струму високої напруги (ПСВН) дає змогу застосувати засоби керування перетворювачем для обмеження величини комутаційної перенапруги і аперіодичної складової струмів. Це надає змогу розширити перелік традиційних для енергосистем змінного струму заходів підвищення режимної безпеки. Бібл. 8, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: перехідний процес, гібридна енергосистема, комутаційна перенапруга, аперіодичний струм, постановка під напругу, лінія електропереєсилання.

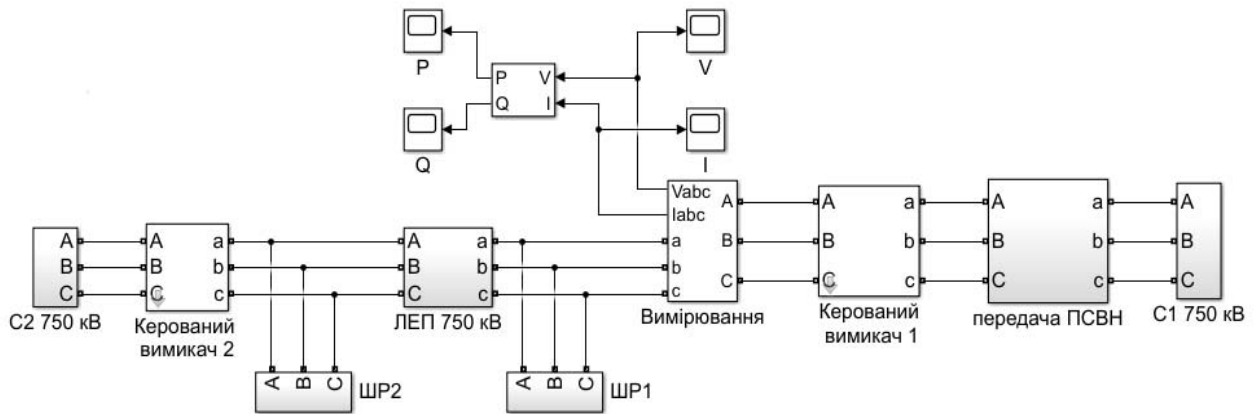
Вступ. Існує декілька причин виникнення перехідних процесів в енергосистемах. Серед найбільш розповсюджених: підключення або відключення елементів енергосистеми, поява коротких замикань, різка зміна величини навантаження і генерації. Перебіг перехідних процесів в енергосистемах залежить від багатьох факторів: параметрів лінії електропереєсилання, рівнів компенсації зарядної потужності, еквівалентних опорів систем, моментів здійснення комутацій та інших. Поява у складі традиційних енергосистем джерел генерації, перетворення та передачі електроенергії постійного струму призвела до утворення гібридних енергосистем. Один з основних елементів ГЕ – є передача постійного струму високої напруги. Вона була створена як конкурентоспроможна та приваблива альтернатива передачам змінного струму. Існують певні умови, за яких передача на постійному струмі буде більш ефективною з економічної точки зору, ніж на змінному. Також, вони використовуються для з'єднання енергосистем, які можуть мати різну частоту струму і діапазон її коливання. Завдяки легкості контролю передачі потужності, передачі ПСВН продемонстрували значний стабілізуючий вплив в системах живлення змінного струму. Швидкий відгук передач ПСВН за активною потужністю використовується задля підвищення гнучкості та стабільності роботи електричних мереж [1, 2]. Разом з цим розширився перелік чинників, що мають вплив на характер та параметри перехідних процесів. Зокрема, від параметрів налаштування контролера перетворювача, розташування лінії постійного струму та, в деяких випадках, реверсивності потоку потужності залежить здатність передач ПСВН впливати на стабільність системи [3]. Контролери перетворювальних підстанцій мають велике значення для забезпечення згасання перехідних процесів. За першого ж збурення за короткий час система може стати нестабільною.

Постановка лінії електропередачі ЛЕП під напругу в нормальних режимах роботи енергосистеми є одним з етапів зміни конфігурації електричної мережі задля перерозподілу протікання потоків активної і реактивної енергії. У післяаварійних режимах ця операція є етапом відновлення електропостачання. З огляду на це, дослідження перехідних процесів під час постановки ЛЕП під напругу має беззаперечну актуальність.

Мета роботи. Визначити та порівняти вплив налаштувань контролера керування перетворювачем передачі ПСВН зі сторони ЛЕП 750 кВ на параметри перехідного процесу під час постановки її під напругу.

Опис моделі. Для проведення досліджень перехідних процесів в гібридній енергосистемі було розроблено імітаційну модель, яку показано на рисунку. Вона включає в себе два вузли електричної мережі 750 кВ (С1 і С2), які з'єднані між собою ЛЕП 750 кВ з шунтувальними реакторами по її кінцям (ШР1 і ШР2), та передачею ПСВН напругою ± 400 кВ. До передачі ПСВН входить повітряна лінія довжиною 150 км та перетворювальні підстанції на її кінцях, до складу яких

входять перетворювачі електроенергії змінного струму на електроенергію постійного струму, та навпаки. Управління перетворювачами здійснюється таким чином, щоб підтримувати їхню вихідну напругу на певному рівні. За англійською термінологією це Voltage Source Converter (VSC), тобто перетворювач – джерело напруги (ПДН). За прототип моделі передачі ПСВН взято модель Matlab/Simulink [4].



Самокомутація з ПДН дає змогу підключати повністю знеструмлені мережі змінного струму, тобто перетворювач може бути використаний для синтезу трифазної напруги як віртуальний синхронний генератор. Динамічна підтримка змінної напруги на терміналах перетворювача покращує стабільність напруги [5, 6].

Контролер перетворювача з постійного на змінний струм працював в режимі регулювання напруги постійного струму і реактивної потужності. Це дає змогу регулювати напругу змінного струму і кут для управління потужністю [7]. Управління вихідною напругою здійснювалося регуляторами за величинами вхідної напруги і струму, що протікає через перетворювач. Ці регулятори діяли за пропорційно-інтегральним принципом.

Реактивні опори обох систем склали 38 Ом. Погонні параметри повітряної лінії постійного струму були такі: активний опір – 0.01173 Ом/км, індуктивність – 3.0988e-003 Гн/км, ємність – 1.0343e-008 Ф/км. Погонні параметри прямої та нульової послідовностей повітряної лінії змінного струму: активний опір – 0.014 і 0.1698 Ом/км, індуктивність – 0.9836e-3 і 2.0882e-3 Гн/км, ємність – 12.4e-9 і 8.89e-9 Ф/км. Довжина лінії змінного струму – 200 км. В моделі вона була представлена як лінія з розподіленими параметрами. Індуктивність шунтувального реактора – 5.9842 Гн. Обмежувачі перенапруги в моделі не застосовувалися.

По кінцях лінії змінного струму вимірювалися фазні напруги і струми. Під час моделювання вважалося, що передача постійного струму живиться від системи С1 і знаходиться під напругою. Вимикачі обладнано пристроями керованої комутації, що дає змогу вмикати та вимикати кожен фазу вимикача окремо у заданий момент часу.

Дослідження перехідних процесів. Під час постановки ЛЕП під напругу можуть виникати комутаційні перенапруги та довготривалі аперіодичні струми. Комутаційні перенапруги негативно впливають на ізоляцію електротехнічного обладнання і можуть стати причиною коротких замикань, а аперіодичні струми можуть суттєво ускладнити або навіть зробити неможливим відключення лінійних елегазових вимикачів (ЕВ) [8]. Задля визначення характеристик комутаційної перенапруги і аперіодичних струмів було здійснено серію моделювань перехідних процесів із різним ступенем компенсації зарядної потужності ЛЕП змінного струму та моменту комутації. Також, змінювалися деякі параметри контролера перетворювача з постійного струму на змінний: межі регулювання реактивної потужності ΔQ , коефіцієнти підсилення інтегральних ланок регулятора постійної напруги K_i^V і регулятора струму, що протікає через перетворювач, K_i^I . За замовчуванням ці параметри мали значення: $\Delta Q = \pm 0,5$; $K_i^V = 40$; $K_i^I = 6$ [4]. Перехідний процес моделювався протягом 4 секунд. Комутації лінійних вимикачів відбувалися окремо в кожній фазі після моменту часу 1,3 с від початку моделювання. Така досить довга витримка була обрана для того, щоб уникнути впливу на результати від перехідних процесів в передачі ПСВН після її включення в роботу. В таблицях з результатами досліджень перехідних процесів в ГЕ зазначено порядковий номер дослідження, місце приєднання ШР до

ЛЕП змінного струму (П – на початку, К – в кінці), максимальна амплітуда напруги у фазах на початку і в кінці ЛЕП змінного струму, максимальне значення аперіодичної складової струму у фазах.

Відомо, що в мережах змінного струму найменші рівні комутаційної перенапруги спостерігаються, коли комутації здійснюються при проходженні кривої напруги через нуль. Але в цьому випадку величини аперіодичних складових комутаційних струмів є найбільшими. Крім того, важливою є швидкість згасання аперіодичної складової струму. Результати моделювання перехідних процесів наведено у табл. 1.

Таблиця 1

№ досліджу	Місце ШР	U _{max} початку, кВ			U _{max} кінця, кВ			I _{dc} , %		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	П,К	642,8	643,6	638,9	641,7	646,3	628,9	1 049,0	1 093,0	1 021,0
2	П	627,1	635,7	630,3	640,6	647,7	645,0	1 042,0	939,1	1 079,0
3	К	624,7	637,7	628,2	622,0	638,9	624,9	436,1	371,4	362,0
4	П,К	643,3	662,6	649,9	641,5	672,6	674,4	756,5	803,8	823,5
5	П	711,3	663,9	698,2	736,6	670,5	724,7	844,0	1 069,0	871,9
6	К	710,2	685,8	697,9	728,7	678,9	678,2	317,0	287,3	255,3

В досліджах 1 – 3 параметри контролера перетворювача були налаштовані за замовчуванням [4]. Бачимо, що ні на початку, ні в кінці ЛЕП 750 кВ перенапруги не спостерігаються. Наявне лише незначне перевищення максимально припустимої величини фазної амплітуди напруги (643 кВ) в досліджах 1 і 2. В досліді 3 напруга під час перехідного процесу не виходить за припустимі межі. Ступень компенсації реактивної потужності в цьому режимі має незначний вплив на величини перенапруги. Максимальні аперіодичні струми у фазах у разі підключення ШР на початку і з обох кінців ЛЕП 750 кВ – співставні і складають приблизно 940–1090 %. Але характер їхнього згасання різний. В досліді 1 аперіодичні струми згасають швидше. У кінці періоду моделювання вони становлять 145–160 %. А в досліді 2 – 273–317 %. Під час підключення ШР тільки у кінці ЛЕП 750 кВ спостерігаються значно менші величини аперіодичних складових струму 362–436 %. Вони згасають швидше, ніж в досліді 1 і 2 та наприкінці періоду моделювання становлять приблизно 5–17,5 %.

Задля зменшення аперіодичної складової струму перехідного процесу було зменшено інтегральний коефіцієнт підсилення регулятора внутрішнього струму K_i^I з 6 до 4 (досліди 4 – 6). Результати моделювання показали, що найбільше зростання напруги у фазах при двох підключених групах ШР склало приблизно 7 %. У разі підключення на початку або у кінці ЛЕП 750 кВ однієї групи ШР максимальне зростання фазної напруги на початку ЛЕП досягло 14 %, а в кінці – 17 %. При цьому, лише в досліді 5 у фазі В максимальна величина аперіодичного струму зросла приблизно на 14 %. В усіх інших випадках дослідів 4 – 6 вона знизилась на 24–42 %. Аперіодичні струми в кінці періоду моделювання також зменшилися. Для досліді 4 вони склали 117–132 %, для досліді 5 – 237–249 %, для досліді 6 – 5–14 %.

Під час здійснення комутацій в мережах змінного струму під час проходження напруги через максимум спостерігаються найбільші величини комутаційної перенапруги і найменші величини аперіодичних складових струмів. В таблиці 2 наведено результати моделювання перехідних процесів в ГЕ за цих умов комутації.

Таблиця 2

№ досліджу	Місце ШР	U _{max} початку, кВ			U _{max} кінця, кВ			I _{dc} , %		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
7	П,К	916,4	944,4	855,9	979,9	1 075,0	949,0	37,8	35,4	46,1
8	П	1 045,0	941,1	961,4	1 056,0	1 036,0	1 065,0	37,3	38,5	37,8
9	К	1 019,0	967,9	951,8	1 030,0	1 061,0	1 044,0	36,5	38,3	41,3
10	П,К	683,0	641,2	762,3	733,3	731,6	843,2	1 252,0	1 117,0	1 078,0
11	П	756,0	720,7	872,4	817,6	841,1	1 025,0	1 315,0	1 576,0	1 746,0
12	К	748,9	711,3	865,3	786,9	782,7	960,7	504,1	478,9	416,1
13	П,К	723,5	675,1	668,0	768,9	711,6	677,0	1 135,0	1 202,0	1 276,0
14	П	765,9	735,9	723,2	908,7	786,1	820,6	1 050,0	1 295,0	1 510,0
15	К	766,9	739,9	703,1	869,3	750,2	761,3	237,7	216,9	234,1

В досліді 7 – 9 параметри контролера перетворювача були налаштовані за замовчуванням. Бачимо, що в цих дослідіх максимальні амплітуди фазної напруги на початку ЛЕП 750 кВ по

відношенню до дослідів 1 – 3 зросли приблизно на 217–418 кВ, а кратність перенапруги склала 1,33–1,6. Наприкінці ЛЕП 750 кВ напруги по відношенню до дослідів 1 – 3 зросли приблизно на 320–429 кВ. Кратність перенапруги склала 1,48–1,62.

Максимальні аперіодичні струми в дослідях 7 – 9 між собою відрізняються не дуже сильно. Вони знаходяться в межах 35,4–46,1 % і не перевищують граничного рівня для успішного згасання дуги під час розмикання контактів елегазових вимикачів 50–55 %. Це означає, що у разі потреби ЕВ може бути подана команда на відімкнення одразу після їх увімкнення без будь якої навмисної паузи. Найменші величини відносних аперіодичних струмів наприкінці періоду моделювання спостерігаються в досліді 7. Вони не перевищують 8,6 %. В досліді 8 відповідні величини не перевищують 23,6 %, в досліді 9 – 14,4 %.

В дослідях 10 – 12 для зменшення рівнів перенапруги було розширено діапазон регулювання реактивної потужності на перетворювачі з $\pm 0,5$ до $\pm 0,7$ в.о. В цих дослідях напруга на початку ЛЕП 750 кВ у фазі А зменшилася приблизно на 233–290 кВ, фазі В – на 220–303 кВ, фазі С – на 89–94 кВ відносно дослідів 7 – 9. Наприкінці ЛЕП 750 кВ ці показники склали відповідно 238–246 кВ, 195–343 кВ і 40–106 кВ. Як бачимо, у фазі С зменшення рівня перенапруги виявилось суттєво меншим. В той же час, відносні величини аперіодичних складових струму в дослідях 10 і 11 зросли в десятки разів, а їхня величина перевищила 1000 %. Наприкінці періоду моделювання аперіодичні струми становили приблизно 245–293%. В досліді 12 максимальні величини аперіодичних складових фазних струмів знаходяться в межах 416–505 %, що приблизно в 2,3–4,2 рази менше, ніж в дослідях 10 і 11. Наприкінці періоду моделювання вони становлять приблизно 13–33 %.

Також задля зменшення рівнів перенапруги під час перехідних процесів було застосовано зменшення інтегрального коефіцієнту підсилення регулятора постійної напруги K_i^V з 40 до 20. Величини інших параметрів регулювання перетворювача залишилися за замовчуванням. Досліди 13 – 15 відповідають результатам моделювання в цьому режимі. Можна відмітити, що на початку ЛЕП 750 кВ у фазах А і В перенапруги виявилися більшими приблизно на 10–40 кВ, ніж у відповідних дослідях з розширеним діапазоном регулювання реактивної потужності. Однак у фазі С напруги навпаки стали меншими приблизно на 94–162 кВ. В кінці ЛЕП 750 кВ напруги були більшими лише у фазі А – приблизно на 36–91 кВ. У фазі В напруги зменшилися на 20–55 кВ, а у фазі С – на 166–204 кВ. Максимальна амплітуда напруги в дослідях 10 – 12 на початку ЛЕП 750 кВ склала 872 кВ, а в кінці – 1025 кВ. Відповідні напруги в дослідях 13 – 15 склали 766,9 кВ і 908,7 кВ. Тобто вони стали меншими на 105,5 та 116,3 кВ. Максимальні величини аперіодичних складових струмів в дослідях 13 і 14 є порівняно близькими до струмів з дослідів 10 і 11. А в досліді 15 вони приблизно вдвічі менше і складають 217–234 %. Наприкінці періоду моделювання аперіодичні струми в досліді 13 складають приблизно 151–162 %, в досліді 14 – приблизно 311–330 %, в досліді 15 – приблизно 2–9 %. Це менше ніж в дослідях зі збільшеним діапазоном регулювання реактивної потужності. Таким чином, використання регулятора постійної напруги перетворювача передачі ПСВН задля зменшення перенапруги в ЛЕП 750 кВ є більш ефективним заходом, ніж збільшення діапазону регулювання реактивної потужності.

Висновки. Аналіз результатів моделювання перехідних процесів в описаній гібридній енергосистемі показав, що поряд з керованою комутацією і регулюванням ступеню компенсації реактивної потужності, які є традиційними заходами для енергосистем змінного струму, регулювання параметрів системи керування перетворювача має суттєвий вплив на величини перенапруги і аперіодичних складових струмів під час постановки під напругу ЛЕП 750 кВ, що живиться від передачі ПСВН. Зміна налаштувань системи керування перетворювача для зменшення величини перенапруги призводить до збільшення величини аперіодичних струмів і навпаки. Зменшення коефіцієнту підсилення блоку інтегрування регулятора струму, що протікає через перетворювач, є дієвим засобом обмеження аперіодичних складових струмів під час протікання комутаційних перехідних процесів. Розширення діапазону регулювання реактивної потужності і зменшення коефіцієнту підсилення блоку інтегрування регулятора постійної напруги перетворювача сприяють зменшенню рівнів перенапруги. Дослідження показали, що останній захід є більш ефективним засобом зменшення перенапруги і призводить до появи менших аперіодичних струмів.

Роботу виконано за бюджетною програмою «Розробка методів і моделей для аналізу електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах з метою запобігання появі небезпечних перенапруг («Безпека-4»)), КПКВК 6541030.

1. CIGRE JWG C4/B4/C1 – 604: Influence of Embedded HVDC transmission on system security and AC network performance. *CIGRE, Technical Brochure*. 2013. P. 153.
2. Huang G.A., Krishnaswamy V. HVDC controls for power system stability. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Chicago, IL, USA. July 21-25, 2002. Vol. 1. Pp. 597-602.
3. Arrillaga J., Elamin I.M. Transient Stability Performance of a 3-Machine System including an h.v. d.c. Link. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1976. Vol. 123. No 11. Pp. 1239-1244. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1976.0247>
4. VSC-Based HVDC Transmission System (Detailed Model). URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/vsc-based-hvdc-transmission-system-detailed-model.html;jsessionid=3b0fe7b63b98ce6b32dff8e63264> (дата звернення 26.05.2022).
5. Khazaei J., Idowu P., Asrari A., Shafaye A.B., Piyasinghe L. Review of HVDC control in weak AC grids. *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 162. Pp. 194-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.022>
6. Amin M., Molinas M., Lyu J., Cai X. Impact of power direction on the stability of VSC-HVDC seen from the impedance Nyquist plot. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32. No 10. Pp. 8204-8217.
7. Barnes M., Beddard A. Voltage Source Converter HVDC Links – The state of the Art and Issues Going Forward. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 24. Pp. 108-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.092>
8. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шполянський О.Г. Аналіз передумов пошкодження елегазових вимикачів у електричних мережах 750 кВ. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 47. С. 16-22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.47.016>

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES DURING ENERGISATION OF THE AC OVERHEAD TRANSMISSION LINE IN THE HYBRID POWER SYSTEMS

O.G. Shpolianskii

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: shpolyanskyy@ied.org.ua

The paper analyses the transients that occur during the energisation of overhead transmission line 750 kV in a hybrid power system. It is shown that the power supply of the AC transmission line from the high voltage direct current transmission allows using converter control system to limit the switching overvoltage and the aperiodic currents. This enriches the list of traditional measures to improve the safety of AC power systems. References 8, tables 2, figures 1.

Key words: transient process, hybrid power system, switching overvoltage, aperiodic current, energisation, transmission line.

1. CIGRE JWG C4/B4/C1 – 604: Influence of Embedded HVDC transmission on system security and AC network performance. *CIGRE, Technical Brochure*. 2013. P. 153.
2. Huang G.A., Krishnaswamy V. HVDC controls for power system stability. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Chicago, IL, USA. July 21-25, 2002. Vol. 1. Pp. 597-602.
3. Arrillaga J., Elamin I.M. Transient Stability Performance of a 3-Machine System including an h.v. d.c. Link. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1976. Vol. 123. No 11. Pp. 1239-1244. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1976.0247>
4. VSC-Based HVDC Transmission System (Detailed Model). URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/vsc-based-hvdc-transmission-system-detailed-model.html;jsessionid=3b0fe7b63b98ce6b32dff8e63264> (accessed at 26.05.2022).
5. Khazaei J., Idowu P., Asrari A., Shafaye A.B., Piyasinghe L. Review of HVDC control in weak AC grids. *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 162. Pp. 194-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.022>
6. Amin M., Molinas M., Lyu J., Cai X. Impact of power direction on the stability of VSC-HVDC seen from the impedance Nyquist plot. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32. No 10. Pp. 8204-8217.
7. Barnes M., Beddard A. Voltage Source Converter HVDC Links – The state of the Art and Issues Going Forward. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 24. Pp. 108-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.092>
8. Kuznetsov V.G., Tugai Yu.I., Shpolyansky O.G. Analysis of the preconditions of SF6 circuit breakers' damage in 750 kV electric networks. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy*. 2017. Vyp. 47. Pp. 16-22. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2017.47.016>

Надійшла 28.05.2022

Остаточний варіант 10.09.2022