

МЕТОД ОПЕРАТИВНОЇ ОЦІНКИ ЗБІЛЬШЕННЯ НАПРУГИ ПРИ ВВІМКНЕННІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ХОЛОСТИЙ ХІД

В.В. Павловський, докт. техн. наук, **А.В. Литвин**, магістр

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Досліджено вплив схемно-режимних ситуацій у мережі на збільшення напруги при ввімкненні лінії електропередач на холостий хід. Запропоновано метод по визначенню зміни напруги на системі шин після ввімкнення ЛЕП на холостий хід, що використовує коефіцієнт чутливості напруги до зміни реактивної потужності. Бібл. 5, рис. 4, табл. 7.

Ключові слова: ефект Феранті, холостий хід, потужність короткого замикання, коефіцієнт чутливості, напруга, ЛЕП.

Існує багато чинників, які можуть викликати перенапруги в електричних мережах: несиметричні короткі замикання, раптова зміна величини навантаження, ефект Феранті, лінійний резонанс, ферорезонанс та інші.

У цій статті досліджуються перенапруги, пов'язані з ефектом Феранті (Ferranti Effect) [4]. Ефект Феранті – це збільшення напруги при ввімкненні лінії електропередач (ЛЕП) на холостий хід (ХХ). Цей ефект пояснюється протіканням зарядного струму по ЛЕП, у результаті чого збільшується напруга. Величина зарядного струму в режимі ХХ залежить від довжини ЛЕП та її реактивних параметрів, які визначаються геометрією опор.

Завдяки багаторічному досвіду керування режимами електричних мереж, на практиці відомо, що при ввімкненні на ХХ більшості ЛЕП (220...330 кВ) довжиною до 200 км, напруга на системі шин (СШ) підстанцій збільшується приблизно на 1...2 %. Проте ці твердження справедливі для нормальних схем електричної мережі. Результати ввімкнення ЛЕП на ХХ у ремонтній або ремонтно-аварійній схемі будуть іншими. Це можна пояснити залежністю напруги не тільки від довжини лінії та геометрії опор, а й від інших факторів.

Слід зазначити, що існує чимало режимних ситуацій, які потребують від диспетчера швидкого прийняття рішення (особливо це стосується аварійних умов). При цьому топологія мережі може значно відрізнятись від схеми нормального режиму. Тому проблема зростання напруги при ввімкненні ЛЕП на холостий хід у ремонтній або ремонтно-аварійній схемі є актуальною.

Метою статті є виявлення залежності зростання напруги при ввімкненні ЛЕП на ХХ від схемно-режимної ситуації в мережі. Схемно-режимна ситуація в мережі – це відповідна топологія електричної схеми, яка характеризується потужністю короткого замикання ($S_{кз}$) на шинах, до яких приєднана ЛЕП. У нормальній схемі, як правило, всі лінії ввімкнені, потужність короткого замикання завжди більша і відповідно опір системи (X_S) менший у порівнянні з ремонтно-аварійними схемами.

Об'єктами дослідження цієї роботи є типові ЛЕП 330 кВ, а предметом дослідження – режим ХХ таких ЛЕП.

Для проведення досліджень ввімкнення ЛЕП на ХХ у нормальній та аварійній схемах було використано моделі магістральних мереж об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України (надалі БД ОЕС України), яка створена в програмному забезпеченні DIgSILENT PowerFactory (Німеччина) [5]. БД ОЕС України призначена для виконання електротехнічних розрахунків поточних та перспективних режимів роботи ОЕС України. Фрагмент схеми мережі в БД ОЕС України представлено на рис. 1 [3].



Рис. 1

Розрахунки потужності короткого замикання на шинах, до яких приєднана ЛЕП, і напруги до та після ввімкнення ЛЕП проводилися для ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Побузька та ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Кварцит № 1. Параметри цих ЛЕП наведено в табл. 1, а заступну схему ЛЕП 330 кВ показано на рис. 2.

Таблиця 1

Назва лінії	r_L , Ом	x_L , Ом	b , мкСм	l , км
ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Побузька	2,98	25,79	287	81
ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Кварцит № 1	4,49	38,6	436	122

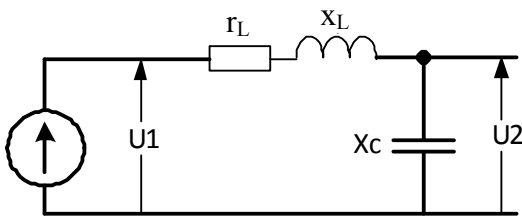


Рис. 2

Результати розрахунків зміни напруги в режимі ХХ для різних $S_{кз}$ наведено в табл. 2 (для ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Побузька), табл. 3 (для ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Кварцит № 1) та на рис. 2, 3, де $U1^-$ – напруга на СШ на початку лінії до ввімкнення ЛЕП на ХХ; $U1^+$ – напруга на СШ на початку лінії після ввімкнення ЛЕП на ХХ; $U2^+$ – напруга на СШ в кінці лінії після ввімкнення ЛЕП на ХХ.

Таблиця 2

Параметр	Ремонтно-аварійні схеми				Нормальна схема
	1151	1500	2000	2500	
$S_{кз}$, МВА	1151	1500	2000	2500	3109
$U1^-$, в.о.	1,020	1,020	1,020	1,020	1,02
$U1^+$, в.о.	1,049	1,039	1,033	1,030	1,03
$U2^+$, в.о.	1,050	1,045	1,039	1,036	1,034

Таблиця 3

Параметр	Ремонтно-аварійні схеми					Нормальна схема
	1145	1500	2000	2500	3000	
$S_{кз}$, МВА	1145	1500	2000	2500	3000	3830
$U1^-$, в.о.	1,036	1,036	1,036	1,036	1,036	1,036
$U1^+$, в.о.	1,085	1,074	1,065	1,061	1,057	1,052
$U2^+$, в.о.	1,094	1,083	1,075	1,070	1,066	1,061

Так, при ввімкненні ПЛІ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Кварцит № 1 на ХХ у нормальній схемі, напруга на СШ збільшилася менш ніж на 2 % (з 1,036 в.о., або 341,9 кВ, до 1,052 в.о., або 347,2 кВ). Проте ввімкнення цієї ж ЛЕП на ХХ у ремонтно-аварійній схемі (коли потужність короткого замикання зменшилась з 3830 до 1145 МВА) призводить до збільшення напруги на 5 % (з 1,036 в.о., або 341,2 кВ, до 1,085 в.о., або 358 кВ). Результати розрахунку для ПЛІ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Побузька аналогічні.

На рис. 3 та 4 представлено одержані залежності напруги на СШ на початку лінії до ввімкнення ЛЕП на ХХ ($U1^-$) та на СШ у кінці лінії після ввімкнення ЛЕП на ХХ ($U2^+$) від зміни потужності короткого замикання.

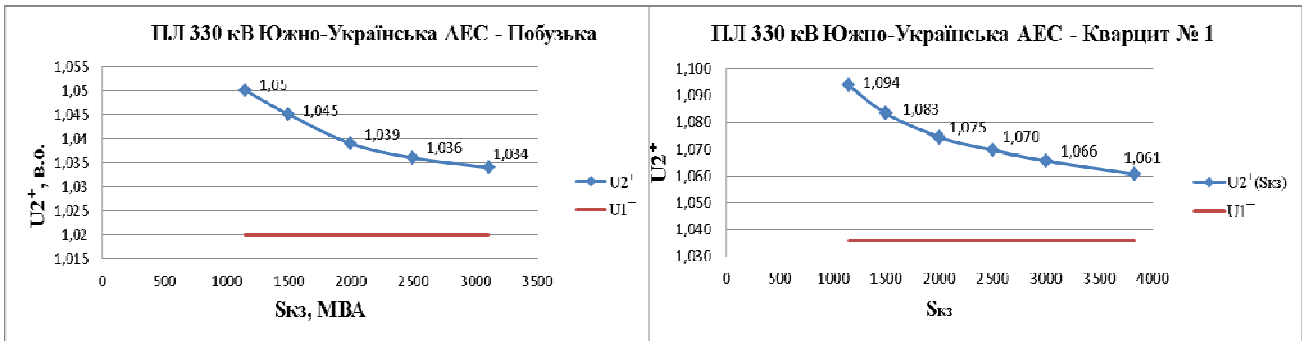


Рис. 3

Рис. 4

Відповідно до отриманих результатів спостерігається збільшення напруги в кінці холстої ЛЕП при зниженні потужності короткого замикання.

Для визначення впливу опору системи (X_s) на зарядний струм проведемо розрахунки зарядного струму ($I_{зар}$) для двох вказаних вище ЛЕП (в аварійній та нормальній схемах) відповідно до формули (1) та з використанням розрахунку усталеного режиму для БД ОЕС України в ПЗ PowerFactory (PF):

$$I_{зар} = U / (X_s + X_L - X_C), \quad (1)$$

де U – напруга, кВ; X_s – опір системи, Ом; X_L – індуктивний опір ЛЕП, Ом; X_C – ємнісний опір ЛЕП, Ом; $b = b_0 \cdot l$, де b_0 – питома ємнісна провідність, См/км; [4]; l – довжина ЛЕП, км.

Результати розрахунків та їх порівняння для ПЛІ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Побузька та ПЛІ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Кварцит № 1 представлено в табл. 4 та 5 відповідно.

Таблиця 4

Схема	R_L , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	U , кВ	X_s , Ом	$S_{кз}$, МВА	$I_{зар}$, А (за ф-ю (1))	$I_{зар}$, А (за PF)
Аварійна	2,98	25,79	3480	336	94,7	1151	0,0574	0,0573
Нормальна					35,06	3109	0,0564	0,0572

Таблиця 5

Схема	R_L , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	U , кВ	X_s , Ом	$S_{кз}$, МВА	$I_{зар}$, А (за ф-ю (1))	$I_{зар}$, А (за PF)
Аварійна	4,49	38,6	2293	342	95,23	1151	0,0932	0,0912
Нормальна					28,43	3830	0,0876	0,0881

На підставі отриманих результатів бачимо, що опір системи має певний вплив на зарядний струм лінії. При збільшенні індуктивного опору системи (що відбувається у разі переходу до аварійно-ремонтної схеми) ємнісний струм у лінії збільшується та відповідно зростає напруга при ввімкненні ЛЕП на ХХ. Порівняння результатів розрахунків за формулою

(1) з використанням заступної схеми ЛЕП (рис. 2) та за допомогою програмного забезпечення PowerFactory свідчать про коректність одержаних результатів. Виконавши аналіз попередніх розрахунків, можна зробити висновок, що напруга на СШ у аварійній схемі при ввімкненні ЛЕП на ХХ може збільшитися на 2...7 % на початку та в кінці лінії, а не на 1...2 %, як це відбувається в нормальній схемі.

Отримані результати досліджень показали необхідність мати певний інженерний метод, який би дав змогу оперативно оцінити збільшення напруги при ввімкненні ЛЕП на ХХ для різних поточних схемно-режимних ситуацій.

Маючи значення напруги на СШ у поточному режимі, довжину та параметри ЛЕП, можна визначити зростання напруги після ввімкнення ЛЕП на ХХ. Для цього використовуємо попередньо розраховані коефіцієнти чутливості:

$$K_u = dU/dQ, \text{ в.о./Мвар} . \quad (2)$$

Коефіцієнт чутливості K_u (2) дає змогу провести ранжирування СШ згідно із стабільністю напруги при варіаціях реактивної потужності. Чим більший коефіцієнт чутливості, тим менш стійка напруга на СШ (слабка зона) [1]. За допомогою наведеного співвідношення (2), прийнявши $dU = \Delta U1$ та $dQ = Q_{\text{зар}}$, отримуємо формулу для визначення зміни напруги $\Delta U1 = (U1^- - U1^+)$, в.о.:

$$\Delta U1 = (K_u \cdot Q_{\text{зар}}), \text{ в.о.} \quad (3)$$

Зарядна (ємнісна) потужність $Q_{\text{зар}}$ лінії залежить від класу напруги, геометричного розташування проводів, типу та довжини лінії електропередач і дорівнює

$$Q_{\text{зар}} = U^2 b, \text{ Мвар.} \quad (4)$$

Відповідно до формули (4) розрахунок зарядної потужності для двох ЛЕП 330 кВ дає наступні результати:

$Q_{\text{зар}} = U^2 \cdot b_L = 336^2 \cdot 287 \cdot 10^{-6} = 32,4$ Мвар – для ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Побузька;

$Q_{\text{зар}} = U^2 \cdot b_L = 342^2 \cdot 436 \cdot 10^{-6} = 50,99$ Мвар – для ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Кварцит № 1.

Коефіцієнт чутливості K_u розраховується на підставі розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь, які описують усталений режим в електроенергетичній системі з використанням програмного забезпечення PowerFactory (PF). Результати розрахунку зміни напруги на СШ відповідно до формули (3) та в програмному забезпеченні PF для нормальної та аварійної схем наведено в табл. 6 та 7.

1. ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Побузька:

Таблиця 6

Схема	K_u , в.о/Мвар	$Q_{\text{зар}}$, Мвар	$\Delta U1$, в.о. (за ф-ю (3))	$\Delta U1$, в.о. (за PF)
Аварійна	0,000849	32,40	0,027	0,027
Нормальна	0,000370		0,012	0,012

2. ПЛ 330 кВ Южно-Українська АЕС – Кварцит № 1:

Таблиця 7

Схема	K_u , в.о/Мвар	$Q_{\text{зар}}$, Мвар	$\Delta U1$, в.о. (за ф-ю (3))	$\Delta U1$, в.о. (за PF)
Аварійна	0,000932	50,50	0,047	0,052
Нормальна	0,000271		0,014	0,015

Порівняння результатів розрахунків за формулою (3) та з використанням програмного забезпечення PF свідчить про коректність висновків.

Висновки. Виявлено вплив схемно-режимних ситуацій у мережі на збільшення напруги при ввімкненні ЛЕП на ХХ. Зокрема, при ввімкненні типових ЛЕП 330 кВ на холостий хід напруга на СШ на початку лінії збільшується приблизно на 1...2 % у нормальній схемі та до 2...7 % у ремонтно-аварійних ситуаціях.

Запропоновано метод оперативного оцінювання зміни напруги на системі шин, який дає змогу диспетчеру виконати елементарний розрахунок значень напруги на системі шин після ввімкнення ЛЕП високого класу напруги на ХХ для різних ремонтно-аварійних схем електричної мережі.

1. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Оцінка резервів реактивної потужності в ОЕС України з урахуванням проблеми забезпечення стійкості за напругою // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – Ч. 3. – С. 59–66.
2. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учебное пособие для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М., Энергоатомиздат, 1989. – 604 с.
3. Свідоцтво 45024 Україна. База даних “Параметрів моделі магістральних мереж об’єднаної енергосистеми України для проведення розрахунків усталених режимів та статичної стійкості”/ Павловський В.В., Стелюк А.О., Макогончук В.С. та ін. Видано 06.08.2012 р.
4. Gagari Deb. Ferranti Effect in Transmission Line // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Tripura, 2012. – P. 447–451.
5. Power systems analysis software DIgSILENT PowerFactory. Режим доступу: http://www.digsilent.de/Software/DIGSILENT_PowerFactory/PFv14_Software.pdf.

УДК 621.3.015.38

В.В. Павловський, докт. техн. наук, **А.В. Литвин**, магістр

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Метод оперативной оценки увеличения напряжения при включении линии электропередачи на холостой ход
Исследовано влияние схемно-режимных ситуаций в сети на увеличение напряжения при включении линии электропередач на холостой ход. Предложен метод по определению изменения напряжения на системе шин после включения ЛЭП на холостой ход, использующий коэффициент чувствительности напряжения к изменению реактивной мощности. Библ. 5, рис. 4, табл. 7.

Ключевые слова: эффект Ферранти, холостой ход, мощность короткого замыкания, коэффициент чувствительности, напряжение, ЛЭП.

V.V. Pavlovskiy, A.V. Lytvyn

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Operational evaluation method of voltage increase after no-load transmission line switched on

The influence of the operational and topological conditions in the network to increase voltage after no-load transmission line switched on have been studied. Method to determine voltage change at busbar after no-load transmission line switched on using the voltage to reactive power sensitivity factor have been proposed. References 5, figures 4, tables 7.

Key words: Ferranti Effect, no-load operation, short-circuit power, sensitivity factor, voltage, power transmission line.

Надійшла 21.11.2013

Received 21.11.2013