

регулювання збудження є перспективними для використання в системах генерування електроенергії синхронними генераторами порівняно невеликих потужностей (до 10 МВт).

1. Куцук А. С. *Об'єктно-орієнтований метод аналізу електромеханічних систем* // *Технічна електродинаміка*. – 2006. – № 2. – С. 57–63. 2. Куцук А. С. *Математичне моделювання елементів електромеханічних систем згідно з принципами об'єктно-орієнтованого підходу* / А. С. Куцук // *Електромашинобудування та електрообладнання: міжвідом. наук.-техн. зб. Одеський національний політехнічний інститут*. – 2005. – № 64, – С. 10–17. 3. Плахтына Е. Г. *Математическое моделирование электромашиноventильных систем* / Е.Г. Плахтына – Л.: Вища шк., 1986. – 161 с. 4. *Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: ГОСТ 21558-2000 – [Действующий от 2003-07-1]*. – Межгосударственный стандарт, 2003. – 24 с. 5. Юрганов А. А. *Регулирование синхронных генераторов* / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников – СПб.: Наука, 1996 – 138 с. 6. *Excitation systems solutions – Siemens AG Power Generation, 2003 15 p* http://www.siemens.com.tr/i/content/3882_1_ExcitationSystemsPortfolio.pdf. 7. M. Semeniuk and V. Tutka *Modeling and Analysis of Processes in Synchronous Generator with PWM Controlled Excitation System / Conference of Young Scientists Electric Power Engineering and Control Systems, EPECS-2015, Lviv, Ukraine, 2015, pp.186-188*. 8. R. C. Schaefer *Application of static excitation systems for rotating exciter replacement, in Proc. IEEE Pulp and Paper Industry Tech. Conf., 1997, pp. 199–208*.

УДК 621.315.1

В. В. Кучанський

Інститут електродинаміки НАН України
Відділ оптимізації систем електропостачання

ЕКСПРЕС-ОЦІНКА РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ В АНОРМАЛЬНИХ РЕЖИМАХ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

© Кучанський В. В., 2016

Отримано емпіричну формулу для експрес-оцінки резонансних перенапруг при неповнофазному режимі повітряної лінії та складено заступну схему резонансного контуру лінії електропередачі.

Ключові слова: резонансні перенапруги, аномальні режими, резонансна довжина.

The empirical formula for rapid assessment of resonance overvoltages was received over open-phase mode and equivalent resonant circuit was composed of transmission line.

Key words: resonant overvoltage, abnormal modes, resonance line.

Постановка проблеми і її зв'язок з важливими науковими завданнями

Магістральні лінії електропередачі напругою 330–750 кВ є основними системоутворюючими лініями в Об'єднаній енергосистемі України та забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій, а також необхідний обмін між окремими енергосистемами. Крім того, їх розвиток та ефективна експлуатація – важлива передумова майбутньої інтеграції Об'єднаної енергосистеми України в Європейську енергосистему. Саме тому пошкодження таких ліній чи обладнання, що забезпечує їх приєднання до енергосистеми, є важкою системною аварією, воно може викликати розпад об'єднаної системи на окремі частини, в яких буде наявний дефіцит чи

надлишок генеруючих потужностей, і, відповідно, спричиняти відімкнення споживачів у дефіцитних регіонах та зупинення блоків електростанцій у надлишкових регіонах. Отже, попередження виходу з ладу ліній електропередач надвисокої напруги (ЛЕП НВН) – важлива наукова та практична задача з погляду надійності електропостачання і забезпечення задовільних показників якості та ефективності функціонування магістральних електричних мереж.

Однією з основних причин виходу з ладу основного обладнання в магістральній електричній мережі є перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги вище від максимально допустимого значення, відповідно до технічного регламенту [2]. Це пояснюється тим, що передбачено порівняно малий резерв ізоляції для складових елементів магістральних електричних мереж через її високу вартість для даного класу напруги. Взагалі, зі збільшенням робочих напруг енергетичних систем вартість ізоляції стає істотним фактором капітальних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За тривалий час було виконано наукові дослідження, присвячені вивченню умов виникнення та існування резонансних перенапруг (РП) [1, 3, 4]. Основною темою згаданих наукових праць був розгляд перенапруг як загального енергетичного процесу. Тобто, передусім цікавив наслідок дії перенапруг: характеристики аварій, які вони спричинили [6, 7]. Водночас були недостатньо проаналізовані причини та умови виникнення перенапруг, заходи з їх попередження та гасіння. Для аналізу резонансних перенапруг використовували метафізичний підхід, а саме перенапруги розглядали як суто внутрішні, без вивчення достатніх та необхідних умов їх існування [1, 3, 4]. Тому такий аналіз не відображав у повному обсязі теоретичні питання виникнення РП та режимів, що спричиняють тривале підвищення напруги, і не вказував на джерело, що збуджує резонанс струму чи напруги та як саме швидко визначити потенційне небезпечне виникнення цих перенапруг.

Формування цілей статті

У роботі розглянуто крайній випадок аномального несиметричного режиму – робота обладнання електропередачі з неповною кількістю фаз. Неповнофазні режими можуть виникати стихійно як аварійні режими або плануватися спеціально як захід, що підвищує надійність роботи електричної системи. До останньої категорії належать, наприклад, неповнофазні режими, що утворюються при застосуванні на лініях пофазного ремонту, а також у разі відімкнення однієї або двох фаз лінії з метою плавлення ожеледі.

Актуальність використання тривалих неповнофазних режимів можна пояснити низкою причин. По-перше, сьогодні в Україні спостерігається швидке зростання споживання електроенергії з одночасним відставанням будівництва нових ЛЕП НВН. По-друге, це існування диспропорції в розподілі генеруючих потужностей на території країни, внаслідок чого доводиться передавати значні потужності на великі відстані. По-третє, з'явилась велика кількість порівняно малопотужних споживачів, що отримують електричну енергію по однофазових ЛЕП НВН довжиною до сотень кілометрів. Слід відзначити, що як показує практика, при зростанні довжини лінії ймовірність і планових, і раптових відімкнень збільшується.

На рис. 1 позначення C_M та C_3 відповідають ємності між фазами та ємності між фазою та землею. Для компенсації цих ємностей застосовуються чотирипроменеві ШР [1, 3, 4], які мають дві складові, що позначені на рис. 1, як L_M та L_3 .

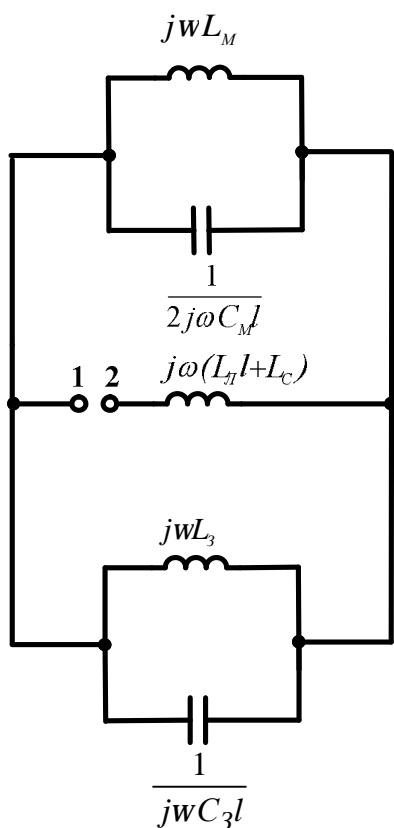


Рис. 1. Резонансний контур при ОАПВ

Також на (рис. 1) позначено $L_{\mathcal{L}}$ – індуктивність повітряної лінії та L_C – індуктивність системи. Розглянемо вхідний опір контуру (рис. 1) відносно фази, на якій відбулося відімкнення (точки 1 та 2):

Коло, що наведено на рис. 1, характеризується змішаним з'єднанням елементів. Для нього умовою виникнення резонансу є рівність нулю уявної частини вхідного опору. Тому, щоб знайти резонансні частоти для контуру, наведеного на рис. 1, вхідний опір подамо у вигляді двох поліномів по ступенях $P(w)$ та $Q(w)$. Чисельник $P(w)$ відповідає резонансу напруг, а знаменник $Q(w)$ – резонансу струму. Тоді корені рівняння $P(w)$ нададуть значення частот, які відповідають резонансу напруг, а корені рівняння $Q(w)$ – значення частот, при яких виникає резонанс струмів.

$$X_{BX} = \frac{w \cdot ((2 \cdot C_M + C_3) \cdot (L_M \cdot l + L_{\mathcal{L}}) \cdot l \cdot L_3 \cdot w^2 - L_M \cdot (L_3 - L_C) - L_C \cdot L_3)}{w^2 \cdot l \cdot L_3 \cdot L_M \cdot (2 \cdot C_M + C_3) - L_M - L_3} = \frac{P(w)}{Q(w)}$$

У контурі (рис. 1) можливе існування і резонансу струмів, і резонансу напруги. Резонанс напруг, як небезпечне явище в електричних мережах, характеризується передусім надструмами в зовнішньому колі, оскільки еквівалентний опір контуру при резонансі напруг мінімальний. Водночас резонанс струмів характеризується істотними значеннями перенапруг у зовнішньому колі.

Резонанс напруг при неповнофазному режимі повітряної лінії (ПЛ):

$$P(w) = w \cdot ((2 \cdot C_M + C_3) \cdot (L_M \cdot l + L_{\mathcal{L}}) \cdot l \cdot L_3 \cdot w^2 - L_M \cdot (L_3 - L_C) - L_C \cdot L_3).$$

Резонанс струмів при неповнофазному режимі ПЛ:

$$Q(w) = w^2 \cdot l \cdot L_3 \cdot L_M \cdot (2 \cdot C_M + C_3) - L_M - L_3.$$

Для аналізу аномальних перенапруг автор вивів формули визначення резонансних довжин лінії.

Так вираз для повнофазного режиму за будь-якої кількості груп шунтувальних реакторів (ШР) має вигляд:

$$l_{Pez} = n \frac{L_M + L_3}{L_3 L_M w^2 \cdot (2C_M + C_3)} \quad (1)$$

де n – кількість повнореакторних груп ШР.

З літератури відомий також інший вираз для наближеної оцінки [1]:

$$l_{Pez} = \frac{1}{x_{p\Sigma} (b_0 + 2b_{\phi\phi})} \frac{1 + 2 \frac{x_{Nk}}{x_{Pk}}}{1 + 3 \frac{x_{Nn}}{x_{Pn}}} \quad (2)$$

де b_0 та $2b_{\phi\phi}$ – питомі ємнісні провідності ПЛ між фазою та землею та між фазами; $x_{p\Sigma}$ – опір всіх увімкнених паралельно ШР на ПЛ; $\frac{x_{Nk}}{x_{Pk}}$ та $\frac{x_{Nn}}{x_{Pn}}$ – відносна індуктивність компенсаційних реакторів, встановлених на початку і наприкінці ПЛ.

Порівняння точності виразів (1)–(2) з результатами експерименту [5] та моделювання на імітаційній моделі, принцип дії якої описано в [4], наведені у таблиці.

Порівняння результатів оцінки резонансної довжини ЛЕП НВН

Об'єкт порівняння	Резонансна довжина лінії, l_{Pez} км	∂ , %
$l_{Pez} = \frac{1}{x_{p\Sigma} (b_0 + 2b_{\phi\phi})} \frac{1 + 2 \frac{x_{Nk}}{x_{Pk}}}{1 + 3 \frac{x_{Nn}}{x_{Pn}}}$	235	10.27
$l_{Pez} = n \frac{L_M + L_3}{L_3 L_M w^2 \cdot (2C_M + C_3)}$	241	7.7
Імітаційна модель електропередачі	253	2.7
Натурний експеримент	260	0

У таблиці δ [%] – це похибка між порівнювальними виразами (1)–(2), результатами моделювання з натурними експериментами. Як видно з результатів порівняння значень резонансної довжини лінії за допомогою аналітичних виразів різниця між ними на користь (1). Отриманий в роботі вираз крім вищої точності, вимагає підстановки доступніших в умовах практичного використання даних. Тобто його застосування є пріоритетним для наближеної експрес-оцінки неповнофазних режимів.

Резонансна довжина лінії $l_{P_{ez}}$ відповідає повному настроюванню резонансного контуру (рис. 1) резонансу струму, за якого спостерігається максимальне значення перенапруг. Результати моделювання на імітаційній моделі наведені на рис. 2 з параметрами ЛЕП НВН Хмельницька атомна електростанція (ХАЕС)-Жешув з двома групами ШР при зміні її довжини. Максимальне значення перенапруги відповідає резонансній довжині лінії з таблиці по натурному експерименту.

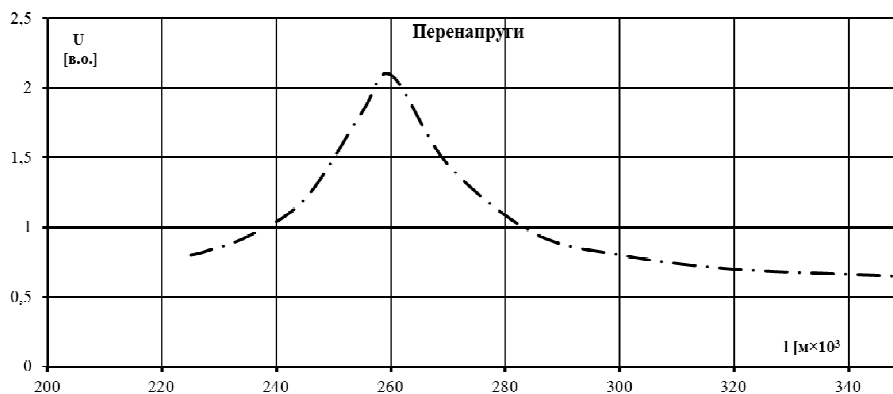


Рис. 2. Перенапруги на відімкненій фазі повітряної лінії

Завдяки отриманій емпіричній формулі (1) можна виконувати експрес-оцінку появи резонансних перенапруг на відімкненій фазі. Отримане значення резонансної довжини відповідає найбільш можливому максимальному значенню напруги, тобто повному настроюванню резонансу струму для контуру (рис. 1). Діапазон небезпечних перенапруг для наведеної лінії з конкретними параметрами становить від 240 до 280 км. Кожна ЛЕП НВН є унікальним об'єктом об'єднаної електроенергетичної системи, бо існує кореляція між параметрами та режимом роботи, тому такий діапазон довжин не відповідатиме іншій конкретній лінії.

Висновки

1. Отримана формула (1) визначення резонансної довжини лінії дає змогу одержати приблизний діапазон наявності небезпечних перенапруг. Така експрес-оцінка аналізу перенапруг дозволить під час проектування застосувати емпіричну формулу без залучення імітаційних моделей або спеціально розробленого програмного забезпечення для аналізу електромагнітних перехідних процесів.

2. Як видно з рис. 1 та формули (1) для розладу резонансного контуру необхідно змінити індуктивність ШР або ввести додатковий активний опір певної величини. Враховуючи отримані результати, перспективним напрямком запобігання або зменшення перенапруг є застосування керованих ШР та дослідження впливу коронного розряду.

1. Беляков Н. Н. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / Н. Н. Беляков, К. П. Кадомская, М. Л. Левинштейн [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с. 2. Дудурич О. Б. Високовольтна ізоляція у задачах і контрольних питаннях. / О. Б. Дудурич, О. І. Маврін, К. Б. Покровський. – Львів : Вид- Львівської політехніки, 2013. – 188 с. 3. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу транспозиції лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні перенапруги / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський // Технічна Електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 51–56. 4. Кузнецов В. Г. Модель ЛЕП для дослідження аномальних перенапруг / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський // ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2011. – Вип. 116. – С. 41–43. 5. Пусковые и системные испытания электропередачи 750 кВ Хмельницкая АЭС – Жешув: Отчет о НИР / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т электроэнергетики; рук.

Хоециан К. В.; исполн.: К. В. Хоециан, А. Г. Карякина, А. М. Печенкина, В. Г. Козлова. – 1985. – 92 с. – Дог. 4-527/95. 6. Cheng C. P. Simulation of resonance overvoltage during energization of high voltage power network / C. P. Cheng, Chen Shihe // Proceedings of International Conference on power Systems transients IPST 2003 in New Orleans, USA, October 9–13. – 2010. – P. 71–75. 7. Claus Leth Bak, Kim Sogaard Switching overvoltage when disconnecting a combined 400 kV cable/overhead line with permanently connected shunt reactor / Claus Leth Bak, Kim Sogaard // Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '08) WSEAS Press, 2008. – P. 109–117.

УДК 621.316.13

Г. М. Лисяк, І. І. Островка, І. О. Сабадаш
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних систем та мереж

КВАДРАТИЧНО-ІНТЕГРАЛЬНИЙ МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ

© Лисяк Г. М., Островка І. І., Сабадаш І. О., 2016

**Розглянуто квадратично-інтегральний метод розпізнавання режимів трифазного короткого замикання та пуску потужних електродвигунів номінальною напругою 10 кВ.
Ключові слова: розпізнавання, трифазне коротке замикання, пуск електродвигунів.**

**It is considered square-integrated method recognition regimes of three-phase short circuit and starting large motors rated voltage of 10 kV in the article.
Key words: recognize, three-phase short circuit, starting motors.**

Постановка проблеми

До пристроїв релейного захисту (РЗ) ліній електропересялення (ЛЕП) висунуто вимоги, основними з яких є надійність функціонування, селективність та швидкодія. Завдання селективності виконують різними способами, де не останнє значення має точність опрацювання інформації. Встановлюють факт аномального режиму способом порівняння поточних значень координат режиму з допустимими, що визначаються і задаються відповідними уставками. Крім того, для зменшення збитків від дії надструмів аварійних режимів необхідно якнайшвидше виявити пошкоджений елемент і відімкнути його від мережі пристроями РЗ[1].

У практиці експлуатації електричних мереж застосовуються складні алгоритми роботи пристроїв РЗ за наявності ліній значної довжини, коли важко відрізнити режим трифазного короткого замикання (КЗ) від нормального експлуатаційного режиму через те, що значення координат режиму бувають співмірними. Координати трифазного КЗ є подібними до накиду навантаження, багато спільного вони мають і у випадку пуску (самозапуску) потужних асинхронних електродвигунів.

Аналіз останніх досліджень

Традиційним способом захисту ЛЕП мереж 6–35 кВ є струмові відсічки, струмові захисти з залежною чи незалежною витримкою часу та максимальний струмовий захист [2]. Час спрацювання струмової відсічки без витримки часу становить 0,06–0,1 с, що необхідно для узгодження роботи захисту з дією розрядників, що спрацьовують під час атмосферних розрядів. До захистів з дещо іншим підходом визначання аварійних ситуацій можна зарахувати спосіб швидкодіючого струмового захисту [3]. Критерієм спрацювання у є перевищення величини струму однієї з фаз значення струму «уставки».