

УДК 621.311.13

ПАРАМЕТРИ НАБЛИЖЕНИХ ЛІНІЙ 750 кВ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЇХ ВХІДНОГО ОПОРУ В ПАУЗИ ОДНОФАЗНОГО АВТОМАТИЧНОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕННЯ

О.Г. Шполянський, канд. техн. наук

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

Виконано аналіз погонних параметрів двох наближених ідеально транспонованих ЛЕП 750 кВ залежно від відстані між ними. Визначено резонансні довжини одиночної і наближених ЛЕП в паузі однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) за умов приєднання різної кількості груп шунтувальних реакторів. Зроблено аналіз частотних характеристик вхідного опору наближених ЛЕП в паузі ОАПВ залежно від відстані між ними. Бібл. 2, рис. 3, табл. 5.

Ключові слова: наближені лінії електропередачі, погонні параметри, вхідний опір у паузі ОАПВ.

Вступ. Одним з найбільш розповсюджених аномальних режимів роботи ліній електропередачі (ЛЕП) 750 кВ є робота у неповнофазному режимі. Цей режим виникає, зокрема, під час гасіння дуги однофазного замикання на землю. Неповнофазний режим дає змогу зберігати зв'язок між частинами системи і передавати по двох фазах лінії значну потужність. Після згасання дуги відбувається однофазне автоматичне повторне включення (ОАПВ) відключеної фази і лінія повертається в нормальний режим роботи. Однак після згасання дуги напруга на відключеній фазі може зрости до небезпечно високого рівня. Це явище виникає за умови близькості власної частоти коливачів резонансного контура, що утворюється відносно відключеної фази, і частоти струму в енергосистемі. Одним із методів розладнання резонансного контура є включення в нейтраль шунтувальних реакторів (ШР) компенсаційного реактора (КР) [2]. Окрім зменшення струму підживлення дуги, він дає змогу змістити власну частоту вхідного опору і, таким чином, запобігти появі резонансних перенапруг.

Протягом останнього десятиліття в Україні збільшилися обсяги реконструкції існуючих і будівництва нових підстанцій і ЛЕП 750 кВ. У ряді випадків технічні та економічні чинники спонукають прокладати лінії у безпосередній близькості одна до одної, що призводить до виникнення між ними електростатичних та електромагнітних зв'язків і зміни власних параметрів. Тому заходи по запобіганню перенапругам у паузі ОАПВ, які були прийняті без врахування наближених ліній, потребують уточнення. Метою роботи є дослідження впливу наближених ліній на характеристики резонансного контура ЛЕП 750 кВ у паузі ОАПВ за умови ідеальної транспозиції фаз.

Параметри наближених ЛЕП 750 кВ. Параметри ліній електропередачі залежать від просторового розміщення і конструкції фаз та грозозахисних тросів, характеристик ґрунту, близькості інших ЛЕП. Аналіз параметрів виконувався для двох наближених ліній 750 кВ однакової конструкції з ідеальною транспозицією фаз, що проходять паралельно. Було прийнято, що фази ліній виконано проводом АС-330/43, а грозозахисні троси – проводом АС-70/72. Фазні проводи і троси розташовані горизонтально. Відстань між фазами 18 м, відстань між тросами 24 м. Кількість проводів у фазі – п'ять, відстань між проводами у фазі – 0,4 м. Висота підвісу фазних проводів складає 27,8 м, мінімальна відстань від проводу до землі – 22 м. Висота підвісу тросів 41 м, мінімальна відстань від тросу до землі 35,5 м. Опір ґрунту 100 Ом/м. За допомогою програмного пакета Matlab були визначені погонні параметри одиночної і двох наближених ЛЕП. До них належать активні опори, індуктивності й ємності прямої та нульової послідовностей і відповідні взаємні значення між двома лініями. Відстань між крайніми фазами ЛЕП приймалася від 20 до 120 м. Активні опори прямої та нульової послідовностей одиночної лінії склали 0,01912 та 0,1951 Ом/км відповідно. Результати розрахунків активних опорів наближених ліній наведено в табл. 1. Як бачимо, активний опір прямої послідовності зі збільшенням відстані між ЛЕП незначно зменшується. Різниця між цими опо-

рами на відстанях 20 і 120 м складає близько 1,87 %. Опір нульової послідовності зростає. Темпи цього зростання вищі, а різниця на мінімальних і максимальних відстанях складає близько 5,59%. Зменшення взаємного опору найбільш значне. Воно досягає 23,42 %.

Таблиця 1

Відстань між ЛЕП, м	Активний опір наближених ЛЕП, Ом/км			Відхилення від опору одиночної ЛЕП, %	
	r_1	r_0	r_m	Δr_1	Δr_0
20	0,01952	0,16610	0,12992	2,098	-14,842
30	0,01939	0,16720	0,12567	1,445	-14,279
40	0,01932	0,16829	0,12175	1,044	-13,719
50	0,01927	0,16935	0,11817	0,781	-13,178
60	0,01923	0,17036	0,11487	0,605	-12,660
70	0,01921	0,17132	0,11185	0,473	-12,170
80	0,01919	0,17222	0,10905	0,383	-11,705
90	0,01918	0,17308	0,10643	0,313	-11,266
100	0,01917	0,17389	0,10396	0,260	-10,851
110	0,01916	0,17466	0,10168	0,223	-10,457
120	0,01915	0,17538	0,09949	0,190	-10,084

Індуктивність прямої послідовності одиночної лінії становить $9,1053e-4$ Гн/км, а нульової – $2,1237e-4$ Гн/км. Індуктивності наближених ліній прямої та нульової послідовностей із збільшенням відстані між ними зростають, а взаємна індуктивність зменшується (табл. 2). Зростання індуктивності прямої послідовності малопомітне і складає 0,23 %. Можна сказати, що воно залишається незмінним. Індуктивність нульової послідовності зростає на 7,24 %, а взаємна індуктивність зменшується майже вдвічі.

Таблиця 2

Відстань між ЛЕП, м	Індуктивність наближених ЛЕП, Гн/км			Відхилення від індуктивності одиночної ЛЕП, %	
	l_1	l_0	l_m	Δl_1	Δl_0
20	9,0816E-04	1,9102E-03	5,8550E-04	-0,260	-10,050
30	9,0884E-04	1,9381E-03	5,2601E-04	-0,185	-8,740
40	9,0927E-04	1,9603E-03	4,8125E-04	-0,138	-7,694
50	9,0956E-04	1,9783E-03	4,4532E-04	-0,107	-6,844
60	9,0976E-04	1,9934E-03	4,1516E-04	-0,085	-6,134
70	9,0991E-04	2,0060E-03	3,8944E-04	-0,069	-5,539
80	9,1001E-04	2,0170E-03	3,6678E-04	-0,057	-5,025
90	9,1009E-04	2,0264E-03	3,4704E-04	-0,048	-4,582
100	9,1016E-04	2,0347E-03	3,2949E-04	-0,041	-4,190
110	9,1020E-04	2,0420E-03	3,1296E-04	-0,036	-3,847
120	9,1024E-04	2,0485E-03	2,9830E-04	-0,031	-3,539

Ємності одиночної ЛЕП складають $1,2769e-8$ та $8,89e-9$ Ф/км для прямої та нульової послідовностей. Всі ємності наближених ліній зі зростанням відстані між ними зменшуються (табл. 3). Як і у випадку з індуктивністю, ємність прямої послідовності зменшується мало, лише на 0,54 %. Ємність нульової послідовності зменшується на 2,36 %, а взаємна – майже в десять разів (89,9 %).

Відхилення погонних параметрів наближених ліній по відношенню до параметрів одиночної лінії також мають різний характер. Найбільше змінюються значення активних опорів (табл. 1). Але вони впливають тільки на форму частотної характеристики вхідного опору і не впливають на його частоту. Як відомо, частота резонансного контура залежить від величин ємностей та індуктивностей, що його утворюють. Погонні індуктивності та ємності прямої послідовності наближених ліній незначно відрізняються від параметрів одиночної лінії (табл. 2, 3). Відмінність відповідних індуктивностей нульової послідовності при відстані

Таблиця 3

Відстань між ЛЕП, м	Ємність наближених ЛЕП, Ф/км			Відхилення від ємності одиночної ЛЕП, %	
	$c1$	$c0$	cm	$\Delta c1$	$\Delta c0$
20	1,2839E-08	9,1073E-09	-9,0817E-10	0,549	2,446
30	1,2796E-08	8,9969E-09	-6,1156E-10	0,217	1,204
40	1,2781E-08	8,9487E-09	-4,4118E-10	0,098	0,662
50	1,2775E-08	8,9249E-09	-3,3340E-10	0,049	0,393
60	1,2772E-08	8,9119E-09	-2,6086E-10	0,026	0,248
70	1,2771E-08	8,9045E-09	-2,0976E-10	0,014	0,164
80	1,2770E-08	8,8999E-09	-1,7242E-10	0,009	0,113
90	1,2769E-08	8,8970E-09	-1,4430E-10	0,005	0,080
100	1,2769E-08	8,8951E-09	-1,2260E-10	0,003	0,058
110	1,2769E-08	8,8938E-09	-1,0549E-10	0,002	0,044
120	1,2769E-08	8,8928E-09	-9,1762E-11	0,002	0,033

між наближеними лініями 20 м перевищує 10 %. І навіть при відстані 40 м, що близька до рекомендованої на ділянках траси, вільних від забудови [1], вона складає 7,694 %. У той же час різниця ємностей нульової послідовності при відстані між наближеними лініями 20 м дорівнює 2,446 %, але вже при відстані 40 м вона зменшується майже у 3,7 разу (рис. 1).

Послаблення електростатичних зв'язків між двома ЛЕП також відбувається значно швидше, ніж електромагнітних.

Визначення вхідного опору ЛЕП 750 кВ.

Частотна характеристика вхідного опору ЛЕП 750 кВ відносно відключеної фази характеризує можливість виникнення резонансних перенапруг при її роботі в паузі ОАПВ. ЛЕП 750 кВ мають велику зарядну потужність, яка призводить до підвищення рівнів напруги. Для компенсації зарядної потужності застосовують шунтувальні реактори (ШР), при підключенні яких до лінії й може утворюватися резонансний контур. В Україні для ЛЕП 750 кВ шунтувальні реактори виконуються з реактивним опором близько 1875 Ом. Тому, знаючи погонні параметри ЛЕП та кількість груп встановлених реакторів, можна визначити резонансну довжину та вхідний опір лінії. В табл. 4 наведено: кількість ШР, при якій визначались параметри, резонансна довжина одиночної ЛЕП D_0 та її резонансний опір Z_0 , резонансна довжина наближеної ЛЕП D_H , її резонансний опір Z_H , опір наближеної ЛЕП на частоті 50 Гц Z_{H50} , резонансна частота наближеної ЛЕП при резонансній довжині одиночної ЛЕП f_H . Результати отримані для відстані 20 м між крайніми фазами наближених ЛЕП. Як бачимо, вхідні опори при резонансі одиночної і наближеної ЛЕП мають однаковий порядок. Резонансна частота наближеної ЛЕП при резонансній довжині одиночної приблизно на 0,25 Гц менша, а опір при частоті 50 Гц зменшується в декілька разів. На рис. 2 представлено частотні характеристики вхідних опорів одиночної і наближених ЛЕП 750 кВ довжиною 292,84 км при двох групах ШР. Збільшення відстані між ЛЕП очікувано призводить до зміщення резонансної частоти наближеної ЛЕП до значення 50 Гц (табл. 5). Резонансний опір Z_H зменшується, а опір на частоті 50 Гц Z_{H50} зростає. Але, незважаючи на те, що резонансні частоти при відстані між крайніми фазами ЛЕП 80 м вже співпадають, резонансні опори одиночної та наближених ЛЕП мають суттєву різницю – $\Delta Z_H=10,62$ %. На рис. 3 показано, що ця різниця зменшується майже лінійно. Але навіть при відстані між крайніми фазами 120 м вона складає 8,47 %.

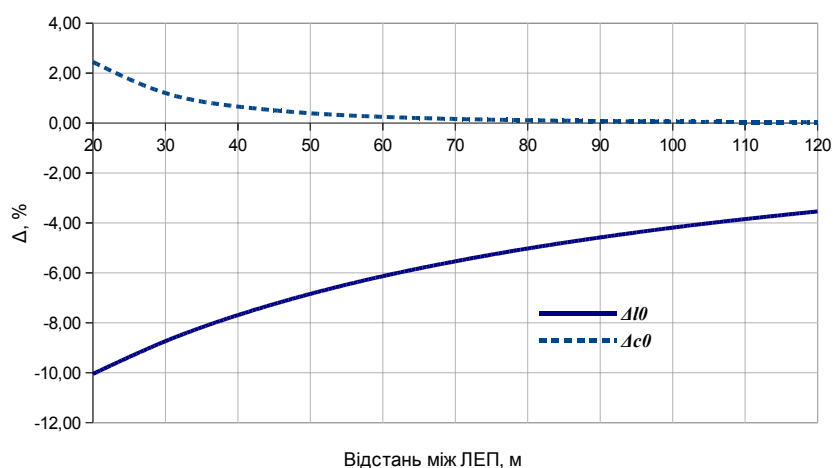


Рис. 1

Таблиця 4

Кількість ШР	D_0 , км	Z_0 , Ом	D_H , км	Z_H , Ом	Z_{H50} , Ом	f_H , Гц
1	146,40	5,47E+05	144,96	5,57E+05	1,76E+05	49,75
2	292,84	4,33E+05	289,94	5,18E+05	9,11E+04	49,75
3	431,24	1,03E+05	427,36	1,32E+05	5,70E+04	49,76

Таблиця 5

Відстань між ЛЕП, м	Z_H , Ом	Z_{H50} , Ом	f_H , Гц	ΔZ_H , %	ΔZ_{H50} , %
20	5,18E+05	9,11E+04	49,75	19,63	-78,96
30	5,07E+05	2,00E+05	49,89	17,09	-53,81
40	4,98E+05	3,34E+05	49,95	15,01	-22,86
50	4,91E+05	4,28E+05	49,97	13,49	-1,25
60	4,86E+05	4,68E+05	49,99	12,31	7,99
70	4,82E+05	4,77E+05	49,99	11,39	10,09
80	4,79E+05	4,78E+05	50,00	10,62	10,39
90	4,76E+05	4,76E+05	50,00	9,98	9,98
100	4,74E+05	4,74E+05	50,00	9,41	9,39
110	4,72E+05	4,71E+05	50,00	8,91	8,85
120	4,70E+05	4,69E+05	50,00	8,47	8,38

Опір наближених ЛЕП на частоті 50 Гц і відстанях 20-40 м між крайніми фазами значно менший резонансного опору одиночної ЛЕП.

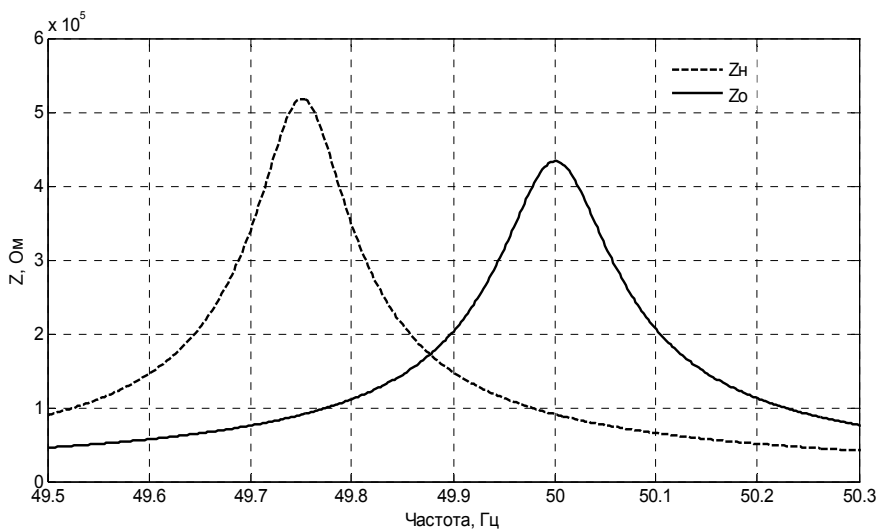


Рис. 2

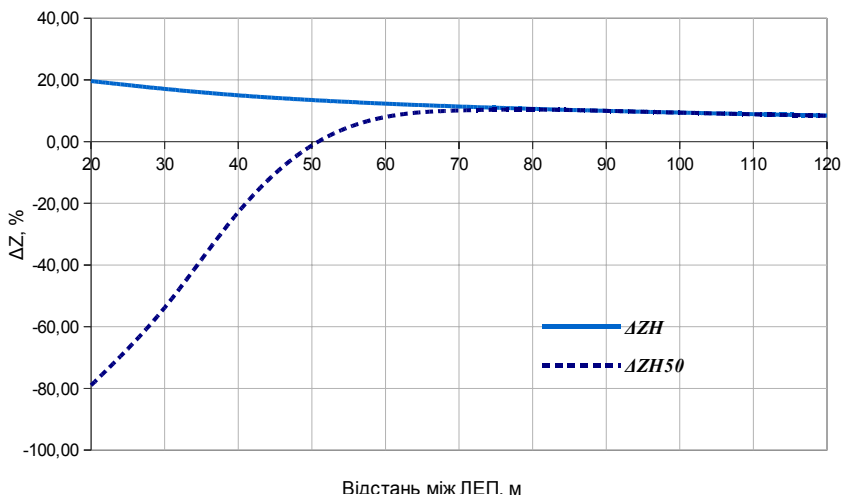


Рис. 3

Різниця ΔZ_{H50} складає приблизно від 20 до 80 %. І лише при відстані близько 50 м вони стають однаковими. Потім опір продовжує зростати і наближається до резонансного значення Z_H .

Висновки. Вплив наближених ліній на власні ємності та індуктивності є відчутним лише для нульових послідовностей. Ємності та індуктивності прямої послідовності за наявності наближеної ЛЕП майже не змінюються.

Наявність наближеної лінії призводить до зменшення частоти власних коливань резонансного кола відносно відключеної фази ЛЕП. Якщо зближення ЛЕП відбувається на всій їх довжині з мінімально припустимою відстанню між крайніми фазами, то зсув резонансної частоти складає

близько 0,25 % Гц. Це явище може бути корисним з огляду на попередження перенапруг у паузі ОАПВ, якщо резонансна частота відповідної одиночної лінії не перевищує 50 Гц. У іншому випадку може відбутися зближення частоти власних коливань контура і частоти вимушених коливань струму електричної мережі, що підвищить небезпеку виникнення резонансних перенапруг.

При відстанях між крайніми фазами наближених ЛЕП більше 80 м їх резонансні частоти збігаються з резонансною частотою одиночної ЛЕП. Однак навіть у цих випадках значення вхідних опорів їх резонансних контурів будуть мати різницю у 8...10 %, що за певних обставин може вплинути на вибір засобів для запобігання небезпечним резонансним перенапругам.

Наявність протяжних ділянок наближених ЛЕП навіть при ідеальній транспозиції фаз суттєво впливає на частотні характеристики їх вхідного опору в паузі ОАПВ. Цей факт необхідно обов'язково враховувати при виборі заходів щодо попередження виникнення резонансних перенапруг.

1. Правила улаштування електроустановок / Вид. 3-тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с.
2. *Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др.* Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

УДК 621.311.13

О.Г. Шполянський, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

Параметры сближенных линий 750 кВ и характеристики их входного сопротивления в паузе однофазного автоматического повторного включения

Выполнен анализ погонных параметров двух сближенных идеально транспонированных ЛЭП 750 кВ при изменении расстояния между ними от 20 до 120 м. Наличие сближенных линий приводит к изменению как собственных параметров прямой и нулевой последовательностей, так и к появлению взаимных сопротивлений, индуктивностей и емкостей. В наибольшей степени наличие сближенных линий оказывает влияние на параметры нулевой последовательности. Причем индуктивности и емкости прямой последовательности изменяются незначительно. Рассчитаны резонансные длины и значения входных сопротивлений одиночных и двух сближенных ЛЭП 750 кВ при наличии одной, двух и трех групп шунтирующих реакторов в паузе однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Выполнен анализ изменения частотных характеристик входного сопротивления сближенных линий при изменении расстояния между ними. Библ. 2, рис. 3, табл. 5.

Ключевые слова: сближенные линии электропередачи, погонные параметры, входное сопротивление в паузе ОАПВ.

O.G. Shpolianskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Parameters of 750 kV coupled overhead transmission lines and characteristics of their input impedance during the pause of one phase automated repeated switching

The paper devoted to the parameters analysis of two coupled ideally transposed overhead transmission lines with rated voltage of 750 kV. Coupled lines not only induce voltages and currents as a result of capacity and magnetic interference between two circuits but also change their own positive and zero sequence parameters. These parameters were studied under variation of distance between coupled lines from 20 to 120 meters. The input impedance during the pause of one phase automated repeated switching (OARS) and conditions of appearance of resonant overvoltage were obtained. Existence of large section of coupled lines leads to increasing of the input impedance value and decreasing of its resonant frequency. These circumstances should be taken into account when developing measures to prevent resonant overvoltage. References 2, figures 3, tables 5.

Key words: coupled overhead transmission lines, line parameters, input impedance during the pause of OARS.

Надійшла 12.01.2015

Received 12.01.2015