

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В ЦИКЛІ ОАПВ 750 кВ

Лінії електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) є основним системоутворюючим елементом в електроенергетичних системах, тому від надійності їхньої роботи залежить нормальна життєдіяльність великої кількості споживачів. Варто також врахувати, що часто вони забезпечують зв'язок потужних виробників електричної енергії, які працюють у базисній частині графіка навантажень (наприклад, атомних електростанцій). Тому навіть короткочасна перерва в роботі ЛЕП НВН призводить до загрози живучості системи, а також до небезпечних змін режимів електростанцій.

Досвід експлуатації ліній електропередачі НВН показує, що більшість перекриттів лінійної ізоляції носять скороминущий характер і тому вони можуть бути успішно ліквідовані автоматичним повторним включенням (АПВ) лінії, при якому пошкоджені фази або одну фазу лінії відключають з двох сторін, а потім, через певний час - так звану безструмову паузу, автоматично повторно включають. За час безструмової паузи залишкова дуга в місці перекриття повинна згаснути, а місце перекриття повинно деіонізуватися і майже повністю відновити свою електричну міцність [1].

За даними експлуатаційної статистики щорічна питома (на 100 км) кількість аварійних відключень ЛЕП, знижуючись із зростанням номінальної напруги, складає: для ЛЕП 330...500 кВ в сумі - близько 2,5, для ЛЕП 500 кВ - 1,0, для ЛЕП 750 кВ - 0,3. Частка однофазних к.з. у вказаній питомій кількості аварійних відключень зростає з номінальною напругою і складає: для ЛЕП 330 кВ - 70...80%, для ЛЕП 500 кВ - близько 90%, ЛЕП 750 кВ - більше 95%. Частка дугових замикань від загального числа к.з., тобто замикань, в яких АПВ потенційно може бути успішним, в ЛЕП 330...750 кВ оцінюється в 65...80% (частка дугових замикань фактично навіть вище, оскільки однофазне автоматичне повторне включення (ОАПВ) може виявитися неуспішним і при дуговому перекритті - через недостатність безструмової паузи або внаслідок повторного перекриття ізоляції).

Таким чином, застосування ОАПВ здатне запобігти перерві енергопостачання по ЛЕП НВН в більшій частині випадків коротких замикань (КЗ), особливо в ЛЕП найвищих напруг. Тому ОАПВ застосовується в мережах 750 кВ України як основний вид автоматичного повторного включення ЛЕП. Широкому застосуванню ОАПВ сприяє також те, що воно особливо доцільне з погляду стійкості енергосистеми, оскільки в безструмову паузу зберігається 50...60% потужності, що передається, а комутаційні перенапруги при повторному включенні впливають на ізоляцію тільки однієї фази з трьох. Крім того, в цьому випадку немає повного розриву передачі, оскільки зберігається передача потужності по непошкоджених фазах лінії, що підвищує динамічну стійкість електропередачі в порівнянні з трифазним відключенням лінії [1].

Головним завданням, що виникає при використанні ОАПВ, є встановлення необхідної для успішності його виконання тривалості безструмової паузи в кожній конкретній ЛЕП НВН, що проектується чи експлуатується [2].

При розрахунках струмів підживлення та напруг, що відновлюються, в паузі ОАПВ велике значення має врахування пофазної несиметрії ПЛ НВН, оскільки при розгляді останньої, як ідеально транспонованої, похибка у визначенні струму підживлення може сягати 20...30% [3].

Відмінність струмів підживлення у фазах реально транспонованої ПЛ збільшується із зростанням кута між напругами по її кінцях. Основну роль відіграє емнісна несиметрія, оскільки при різних напругах по кінцях ПЛ її окремі ділянки знаходяться в різних умовах. Реально транспонована ПЛ з приблизно рівними кроками транспозиції може бути наближено представлена П-подібною схемою заміщення (рис. 1,а), що враховує несиметрію емностей по фазах при симетрії індуктивностей. Ця схема після усунення індуктивних зв'язків зводиться до вигляду, показаного на рис. 1,б, де індуктивні опори визначаються, як і для симетричної ПЛ, виразами (1):

$$x_{11} = z_{11} \sin \beta_1 l; \quad x_{12} = \frac{z_{20} \sin \beta_0 l - z_{11} \sin \beta_1 l}{3}, \quad (1)$$

де z_{11} , z_{20} , β_1 , β_0 - хвилеві опори і постійні розповсюдження по прямій і нульовій послідовностях.

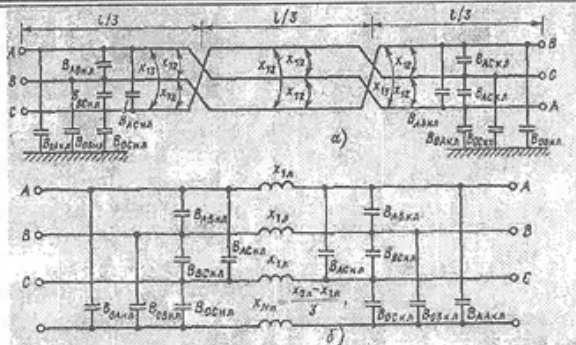


Рис.1. Схема заміщення транспонованої ПЛ:

а) з індуктивними зв'язками між фазами; б) без урахування індуктивних зв'язків між фазами

Ємнісні провідності різні по фазах і для схеми транспозиції (рис. 1, а) складають:

$$\begin{aligned}
 B_{AB\text{пл}} &= \frac{l}{2} b_{12} K_M; \\
 B_{AB\text{ск}} &= \frac{l}{2} \frac{b_{12} + 2b_{13}}{3} K_M; \\
 B_{0A\text{пл}} &= \frac{l}{2} \frac{2b_{01} + b_{02}}{3} K_0; \\
 B_{0A\text{ск}} &= \frac{l}{2} \frac{2b_{01} + b_{02}}{3} K_0; \\
 B_{BC\text{пл}} &= \frac{l}{2} \frac{2b_{12} + b_{13}}{3} K_M; \\
 B_{BC\text{ск}} &= \frac{l}{2} \frac{2b_{12} + b_{13}}{3} K_M; \\
 B_{0B\text{пл}} &= \frac{l}{2} \frac{b_{01} + 2b_{02}}{3} K_0; \\
 B_{0B\text{ск}} &= \frac{l}{2} b_{01} K_0; \\
 B_{AC\text{пл}} &= \frac{l}{2} \frac{b_{12} + 2b_{13}}{3} K_M; \\
 B_{AC\text{ск}} &= \frac{l}{2} b_{12} K_M; \\
 B_{0C\text{пл}} &= \frac{l}{2} b_{01} K_0; \\
 B_{0C\text{ск}} &= \frac{l}{2} \frac{b_{01} + 2b_{02}}{3} K_0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

де b_{12} , b_{13} , b_{01} , b_{02} – ємнісні провідності на одиницю довжини відповідно між крайньою і середньою фазами, крайніми фазами, крайньою фазою і землею, середньою фазою і землею, коефіцієнти K_0 , K_M – поправка на розподіленість параметрів ПЛ [3].

Для визначення струмів підживлення і напруг, що відносяться в цикл ОАПВ транспонованої ПЛ, розглянемо її схему заміщення (рис. 2) з відключеною однією фазою (фазою А). Показані на цій схемі ємнісні провідності на землю і між фазами є результатними після компенсації ємностей ПЛ шунтуючими чотирипроменевими реакторами, що встановлено на початку і в кінці ПЛ. Після згорання відносно фази А подовжня ЕРС:

$$E_{\text{повз}} = -(E_{A1} - E_{A2}) = \frac{x_{02} - x_{12}}{x_{12} + 2x_{02}} = -(E_{A1} - E_{A2})N = jE_{A1} e^{-j\frac{\delta}{2}} N \sin \frac{\delta}{2},$$

де $N = (x_{02} - x_{12}) / (x_{12} + 2x_{02})$.

Аналогічні перетворення схеми при іншій аварійній фазі.

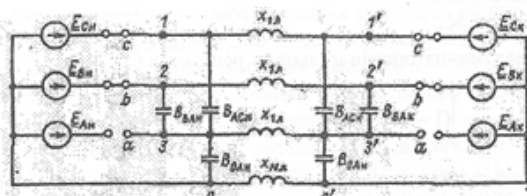


Рис.2. Схема заміщення лінії електропередачі

Після певних перетворень отримаємо вираз для визначення струму підживлення при КЗ на початку лінії, при однакових відносних значеннях реактивних опорів нульових реакторів ($\xi_a = \xi_b = \xi$):

$$I_{n.n.k.} = -E_{Ae.n} e^{-j\frac{\delta}{2}} \left\{ \left[S + \left(\frac{1}{x_{pk}} - \frac{1}{x_{pn}} \right) K \pm 2N \left(B_{0Ae.kn} + b_{MЛ} \mp S - \frac{1-K}{x_{pkn}} \right) \right] \sin \frac{\delta}{2} + \right. \\ \left. + j \left[b_{MЛ} - \left(\frac{1}{x_{pk}} - \frac{1}{x_{pn}} \right) K \right] \cos \frac{\delta}{2} + j3T \sin \frac{\delta}{2} \right\}, \quad (3)$$

де $S = B_{вип.лн} + B_{від.лн} - b_{мл}$ – відмінність міжфазних провідностей («випереджаючої» та «відстаючої» фази по відношенню до аварійної) на початку ПЛІ від міжфазних провідностей симетричної ПЛІ;

$T = B_{вип.лн} - B_{від.лн}$ – різниця міжфазних провідностей на початку ПЛІ;

$K = \xi / (1 + 3\xi)$;

$1 - K = (1 + 2\xi) / (1 + 3\xi)$.

Для симетричної по фазі ПЛІ $T = S = 0$, $B_{0Ae.kn} = b_{0Л} / 2$. Третій доданок в (3) відповідає електричній складовій струму підживлення симетричної ПЛІ. Залежно від того, яка фаза є аварійною, параметри S і T приймають різні значення (див. табл. 1). Крім того, значення цих параметрів залежать від ступеня несиметрії ПЛІ. Остання може характеризуватися відношенням найменшої ємнісної провідності до найбільшої $h_m = b_{13} / b_{12}$ для міжфазних ємностей і $h_0 = b_{02} / b_{01}$ для ємностей на землю. В таблиці враховані співвідношення (2), а також несиметрія фазних параметрів (h_m і h_0) та введено коефіцієнт $\mu = (1 - h_m) / (2 + h_m)$ [3].

Для інженерних розрахунків можна запропонувати подальше спрощення, практично таке, що не збільшує похибки. Воно засновано на тому, що несиметрія ємностей фаз на землю відносно невелика ($h_0 \approx 1$), а різниця струмів підживлення на різних фазах зумовлюється в основному останнім доданком в (3). При цьому співвідношення для струмів підживлення на різних фазах:

$$I_{П.н.к.} = -E_{Ae.n} e^{-j\frac{\delta}{2}} \left\{ \left[\left(\frac{1}{x_{pk}} - \frac{1}{x_{pn}} \right) K \mp 2N \left(\frac{b_{0Л}}{2} + b_{MЛ} - \frac{1-K}{x_{pkn}} \right) \right] \sin \frac{\delta}{2} + \right. \\ \left. + j \left[b_{MЛ} - \left(\frac{1}{x_{pk}} + \frac{1}{x_{pn}} \right) K \right] \cos \frac{\delta}{2} + j3T \sin \frac{\delta}{2} \right\}, \quad (4)$$

де $T = -2b_{MЛ}\mu$ для фази А;

$T = b_{MЛ}\mu$ для фаз В, С.

Від випадку для симетричної ПЛІ вираз (4) відрізняється тільки наявністю члена з T .

Напряга, що відновлюється при КЗ, на початку і в кінці ПЛІ легко знаходиться діленням струму підживлення на вхідну провідність схеми відносно місця КЗ:

$$\underline{U}_{В.л.к} = \underline{I}_{П.н.к.} / jB_{ВХ.л.к}. \quad (5)$$

При $x=0$ всі провідності як початку так і кінця ПЛІ, так і для різних фаз реально транспонованої ПЛІ однакові:

$$B_{ВХ} = B_{вип.лн} + B_{від.лн} + B_{0Ae.лн} + B_{вип.к} + B_{від.к} + B_{0Ae.к} = b_{0Л} + \\ + 2b_{MЛ} - \frac{1}{x_{pn}} \frac{1 + 2\xi_n}{1 + 3\xi_n} - \frac{1}{x_{pk}} \frac{1 + 2\xi_k}{1 + 3\xi_k}. \quad (6)$$

При однакових відносних значеннях реактивних опорів нульових реакторів ($\xi_a = \xi_b = \xi$)

$$B_{ВХ} = b_{0Л} + 2b_{MЛ} - \left(\frac{1}{x_{pn}} + \frac{1}{x_{pk}} \right) (1 - K). \quad (7)$$

Повна симетрія параметрів лінії по фазах досягається при нескінченно великому числі циклів транспозиції дротів (ідеально транспонована лінія). Проте навіть при одноразовому циклі транспозиції співвідношення, одержані в припущенні ідеальної транспозиції, можуть мати практичне застосування у цілому ряді випадків:

- для всіх ліній 330 кВ;
- для ліній 500...750 кВ завдовжки до 280 км;
- для ліній 500...750 кВ, що мають обхідні зв'язки на інших напругах;
- для ліній 500...750 кВ, завантажених менш 0,6P_{нп} [4].

Таблиця 1

Значення розрахункових параметрів при аварії на різних фазах мережі

Фаза з КЗ	S	T	$V_{0Л}^*$ для КЗ на початку ПЛ	$V_{0Л}^{**}$ для КЗ в кінці ПЛ
A	0	$-2b_{МЛ}$	$b_{0Л} / 2$	$b_{0Л} / 2$
B	$b_{МЛ} \mu$	$b_{МЛ} \mu$	$\frac{b_{0Л}}{2} \frac{3}{2+h_0}$	$\frac{b_{0Л}}{2} \frac{1+2h_0}{2+h_0}$
C	$-b_{МЛ} \mu$	$b_{МЛ} \mu$	$\frac{b_{0Л}}{2} \frac{1+2h_0}{2+h_0}$	$\frac{b_{0Л}}{2} \frac{3}{2+h_0}$

При неістотних припущеннях (нехтуванні втратами і опорами живлячих систем) електропередача по лінії, що має розподілені параметри, може бути на одній частоті (у нас 50 Гц) абсолютно точно еквівалентована П-подібною схемою заміщення, показаною на рис. 3. Параметри цієї схеми визначаються виразами (8):

$$\frac{b_{0Л}}{2} = \frac{1}{Z_{W_0}} \operatorname{tg} \frac{\lambda_0}{2}, \quad b_{МЛ} = \frac{1}{3} \left(\frac{b_{1Л}}{2} - \frac{b_{0Л}}{2} \right);$$

$$X_{1Л} = Z_{W_1} \sin \lambda_1; \quad X_{0Л} = Z_{W_0} \sin \lambda_0;$$

$$\frac{b_{1Л}}{2} = \frac{1}{Z_{W_1}} \operatorname{tg} \frac{\lambda_1}{2};$$

$$Z_{W_1} = \sqrt{\frac{X_1}{b_1}}; \quad Z_{W_0} = \sqrt{\frac{X_0}{b_0}};$$

$$\lambda_1 = l \sqrt{X_1 b_1}; \quad \lambda_0 = l \sqrt{X_0 b_0}.$$

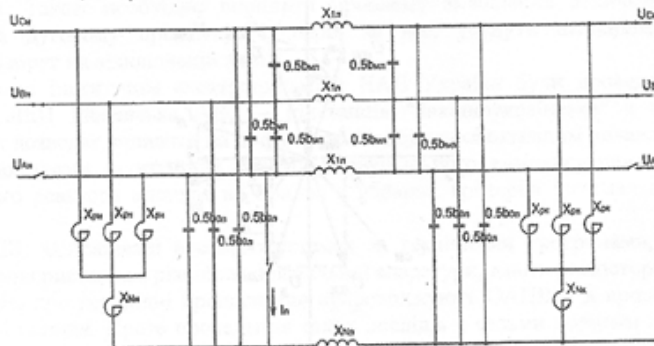


Рис. 3. Спрощена П-подібна схема заміщення лінії електропередачі

Для симетричного розташування реакторів відносяться наведені на рис. 4 криві для грубої оцінки впливу на напругу, що відновлюється, і струм підживлення різних чинників. При побудові кривих прийняті характерні для ліній НВН значення: $b_1/b_0=1,3$; $N=0,25$. Струм підживлення виражений у відносних одиницях [4]. До такого ж розташування реакторів відносять векторна діаграма струмів і напруг, наведена на рис.5.

За певних умов на відключеній в циклі ОАПВ фазі можуть виникати резонансні підвищення напруги. Напруга на відключеній фазі визначається відношенням струму підживлення до вхідної провідності схеми щодо місця КЗ. При установці по кінцях ПЛ нульових реакторів з однаковими відносними значеннями опорів ($x_{нл}/x_{рл} = x_{нл}/x_{рл} = \xi$), скориставшись формулами (5)-(7), одержимо співвідношення для напруги по кінцях

відключеної фази [3]:

$$U_{\theta_{п.к.}} = -\frac{E_{A_{a.n.}}}{B_{BK}} e^{-j\frac{\delta}{2}} \left\{ j \left[\left(\frac{1}{x_{pk}} - \frac{1}{x_{pn}} \right) K \pm N \left(\frac{b_{0Л}}{2} + b_{ML} - \frac{1-K}{x_{pkn}} \right) \right] \sin \frac{\delta}{2} + \left[b_{ML} - \left(\frac{1}{x_{pk}} + \frac{1}{x_{pn}} \right) K \right] \cos \frac{\delta}{2} + j3b_{ML} \nu \sin \frac{\delta}{2} \right\}, \quad (9)$$

де $B_{BK} = b_{0Л} + 2b_{ML} - \left(\frac{1}{x_{pn}} + \frac{1}{x_{pk}} \right) (1-K)$; $\nu = -(1-h_M)/(2+h_M)$ - для фази А; $\nu = (1-h_M)/2(2+h_M)$ - для фаз В і С.

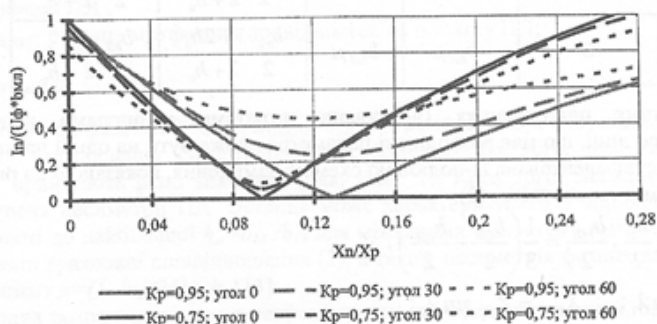


Рис. 4. Залежність струму підживлення на ПЛ з симетричним розташуванням реакторів від індуктивного опору нульового реактора при різних ступенях поперечної компенсації і різних кутах між векторами напруг на кінцях лінії

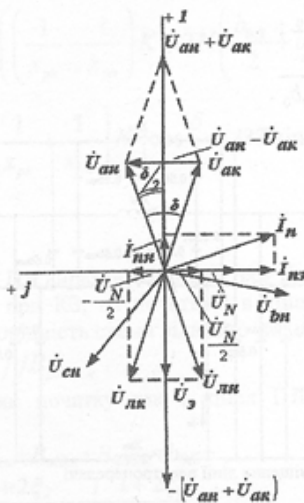


Рис. 5. Векторна діаграма при симетричному розташуванні реакторів: U_a і $U_a/2$ - електростатична і електромагнітна складові напруги відключеної фази "А"; I_a і $I_{a\omega}$ - те ж для струму.

В (9) член з множником N обумовлений електромагнітними наведеннями на відключену фазу, решта членів - електростатичними. Коефіцієнт ν характеризує пофазну ємнісну несиметрію ємності ПЛ; для ідеально транспонованої ПЛ $\nu = 0$. При трьохпроменевих, реакторах на ПЛ $K = 0$. При $B_{BK} = 0$ в (10) одержимо умови, за яких спостерігається резонанс на відключеній фазі. Резонансна довжина ПЛ (без урахування розподілу її параметрів):

$$l_{рез} = \frac{1}{(b_0 + 2b_M)x_{pk}} \frac{1+2\xi}{1+3\xi}, \quad (10)$$

де x_{pc} - опір всіх ввімкнених паралельно шунтуючих реакторів на ПЛІ;

b_0 і b_M - емнісні провідності на одиницю довжини ПЛІ по нульовій послідовності і між фазні [3].

Таблиця 2

Резонансні довжини ПЛІ			
Кількість шунтуючих реакторів	$X_N, \text{Ом}$	I_{PEZ} для ПЛІ, кВ	
		500	750
1	0	188	139
	120	176	132
	150	174	130
	180	170	129
2	0	376	279
	120	352	264
	150	347	261
	180	340	258
3	0	564	418
	120	528	396
	150	521	391
	180	511	387
4	0	752	558
	120	704	528
	150	695	522
	180	681	516

Ступінь компенсації робочої емності, що призводить до резонансу на відключеній фазі

$$K_{p,PEZ} = \frac{1}{(b_0 + 3b_M) I_{PEZ} x_{pc}} = \frac{b_0 + 2b_M}{b_0 + 3b_M} \frac{1 + 3\xi}{1 + 2\xi} \quad (11)$$

Для ПЛІ НВН $b_M \approx 0, b_0$, тому за наявності на них трипроменевих реакторів $K_{p,PEZ} = 0,925$.

Як зазначалось вище, однією з основних проблем реалізації ОАПВ є мінімізація тривалості безструмової паузи з одночасним гарантуванням успіху його виконання, тобто зниження струмів підживлення дуги. Також необхідно вирішити проблему зменшення величини напруги, що відновлюється, на дуговому проміжку, і, перш за все, усунути ймовірність виникнення резонансних перенапруг на відключеній фазі.

НТУУ «КПІ» та Інститутом електродинаміки НАН України були проведені математичні дослідження для ЛЕП Рівненська АЕС – підстанція "Західноукраїнська" з вибору заходів, використання яких дозволяє впливати на ці фактори. Найбільш ефективним виявилася установка в нейтраль трифазної групи шунтуючих реакторів спеціального компенсуючого реактора (КР), оскільки опір цього реактора впливає на обидва з обраних критеріїв оптимальності виконання ОАПВ [6].

Досліди ОАПВ, здійснювані в енергосистемах за технічними програмами, що спеціально розробляються, з використанням різної вимірювальної апаратури, дають різносторонню, важливу і надійну інформацію про перехідні процеси, що супроводжують ОАПВ, - в процесі гасіння дуги підживлення і часі гасіння. Проте проведення таких дослідів є вельми дорогим і небажаним для енергосистеми. Важливим завданням є створення математичної моделі, що дозволяє аналізувати процеси при ОАПВ, не проводячи натурних експериментів [5, 6].

Тому необхідно виконати моделювання на ЕОМ з метою дослідження рішень при зміні режимних параметрів у діапазоні існування нормального режиму електроенергетичної системи.

Ця стаття має на меті надати опис моделі, запропонованої авторами, для дослідження і виконання розрахунків (в подальшому) струму підживлення і напруги, що відновлюється в паузі ОАПВ.

Як середовище моделювання було запропоновано MATLAB.

Як вихідні дані моделювання були прийняті зведені еквівалентні параметри для ЛЕП Запорізька АЕС – підстанція «Південнодонбаська» (опір прямої послідовності – 0,286 мкФ/км, нульової послідовності – 0,669 мкФ/км, провідність прямої послідовності – $4,13 \cdot 10^{-6}$ См/м, провідність нульової послідовності – $2,784 \cdot 10^{-6}$ См/м), індуктивність шунтового реактора 2,994 Гн).

Та перш було виконано аналіз пошуку залежностей величини струму підживлення та напруги, що відновлюється, від опору компенсаційного реактора (встановленого на початку та в кінці ЛЕП) та від варіацій параметрів нормального режиму (рис. 6, 7) за допомогою програмних пакетів MATHCAD та MATLAB. За результатами даного аналізу встановлено оптимальну величину опору компенсаційного (нульового) реактора, при якій досягається мінімум вказаних залежностей. Цей опір склав 150 Ом, що також враховано при побудові комп'ютерної моделі.

Вимоги, що висуваються до моделі – адекватно представляти об'єкт моделювання та давати можливість експериментально перевіряти різні режими роботи ЛЕП 750 кВ, зокрема дослідження режиму ОАПВ. Для виконання цих вимог було вирішено розробити комп'ютерну модель. Середовищем моделювання вибрано комплекс програм наукових обчислень MATLAB [7] з використанням пакетів прикладних програм Simulink і Power System BlockSet, тому що, вони реалізують достатньо швидкодіючі алгоритми, що утворюють ефективні імітаційні моделі широкого класу складних електроенергетичних об'єктів, і мають на меті автоматизоване формування рівнянь перехідних процесів в будь-якому об'єкті цього класу, що необхідні для розв'язання більшості задач аналізу та найважливішої з них – задачі аналізу перехідних процесів, що надає перевагу в використанні саме цього середовища моделювання порівняно з іншими способами [7].

Вимоги до правильного завдання тривалості безструмової паузи ОАПВ обумовлені тим, що після відключення аварійної фази з двох сторін дуга в місці КЗ продовжує горіти, одержуючи підживлення від невідключених фаз лінії, що знаходяться на відносно невеликій відстані від аварійної фази (так звана дуга підживлення), і команда на повторне включення повинна бути вироблена після згасання дуги [5].

Розроблена модель ділянки мережі 750 кВ зображена на рис. 8. Серія попередніх дослідів показала задовільну відповідність результатів розрахунків струмів підживлення і напруги, що відновлюється, на даній моделі з результатами, отриманими попередніми дослідницькими групами [5], що показує достатню адекватність розробленої моделі.

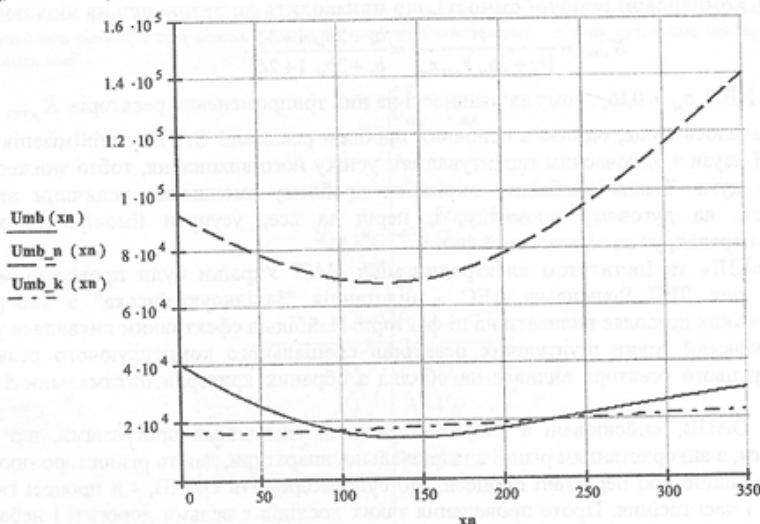


Рис.6. Залежність модуля напруги, що відновлюється, від опору нульового реактора (модуль напруги - у вольтах, опір - в омах):

- — — — — компенсуючі реактори по обох кінцях ПЛ;
- - - - - компенсуючий реактор на початку ПЛ;
- · - · - · компенсуючий реактор в кінці ПЛ

При співставленні результатів дослідів (рис.10, 11, 12, 13), одержаних з допомогою створеної авторами комп'ютерної моделі, з результатами інших авторів, можна зробити висновок про подібність тенденцій у розрахунках, про що свідчать осцилограми ОАПВ на ПЛ 750 кВ в роботі [5] (рис. 9).

Але, крім відповідності, створена комп'ютерна модель ЛЕП 750 кВ має додаткові переваги, що виходять з більш широких функціональних можливостей середовища MATLAB, в якій вона була побудована. А саме: наочність і легкість зміни вихідних даних та можливість імітування

пошкоджень в різних місцях об'єкта.

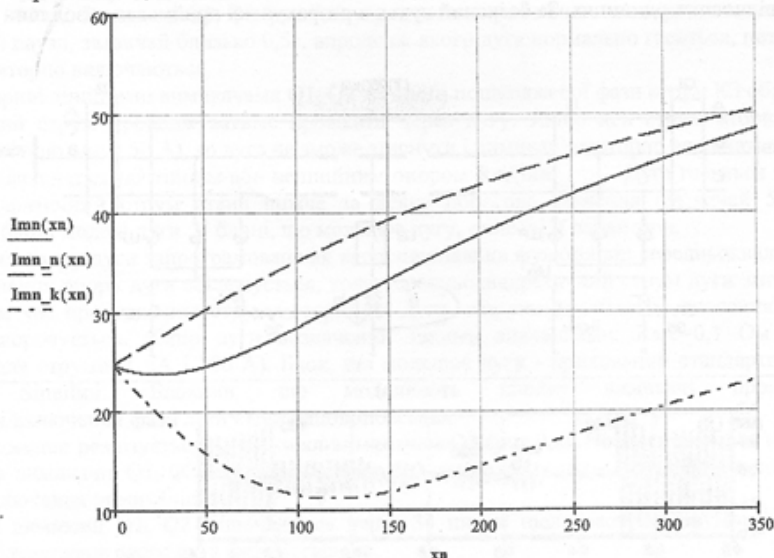


Рис.7. Залежність модуля струму підживлення від опору нульового реактора (модуль струму – в амперах, опір – в омах):

- компенсуючі реактори по обох кінцях ПЛ;
- - - компенсуючий реактор на початку ПЛ;
- · - · компенсуючий реактор в кінці ПЛ

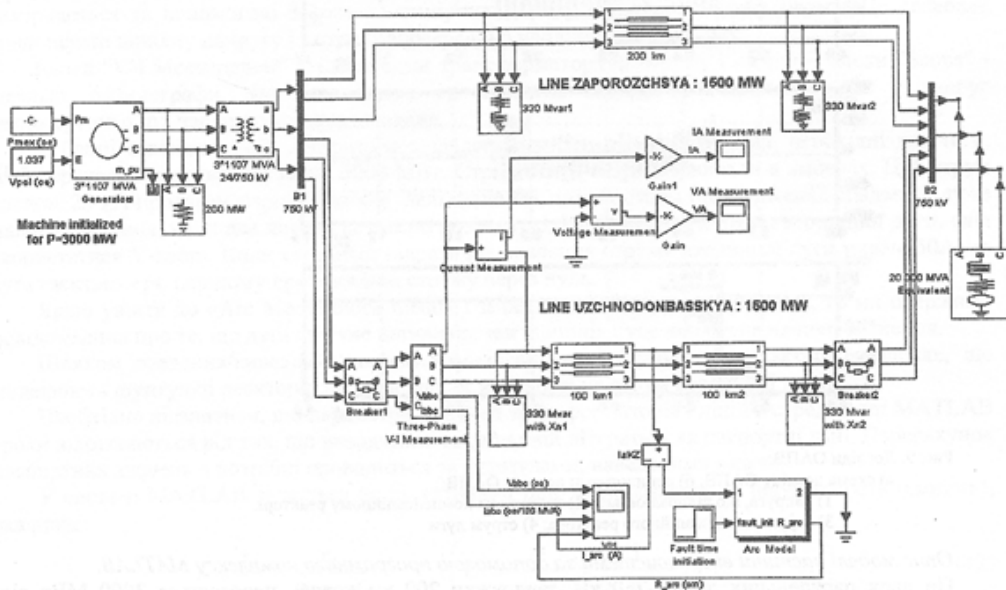


Рис. 8. Комп'ютерна модель частини енергосистеми 750 кВ для дослідження процесів в циклі ОАПВ

Дослідження проводилися для типової схеми електропередачі, представленої на рис.9.а. Розрахункова схема являє собою еквівалентний генератор, що працює паралельно з приймальною системою необмеженої потужності через протяжні лінії електропередачі змінного струму класу 750 кВ, які моделюються ланцюговою схемою. Кожна ділянка ланцюгової схеми представляється П-подібною схемою заміщення. В точках ділення ліній встановлені пристрої керованої поперечної компенсації параметрів електропередачі, що підтримують напругу у вузлах підключення в заданих межах і забезпечують баланс реактивної потужності у вузлі. Приймальна система була

еквівалентована пинами нескінченної потужності. Розрахунки трифазних напруги і струму ведуться у відносних одиницях. За базисний вузол в розрахунках приймався вузол шин відправної станції.

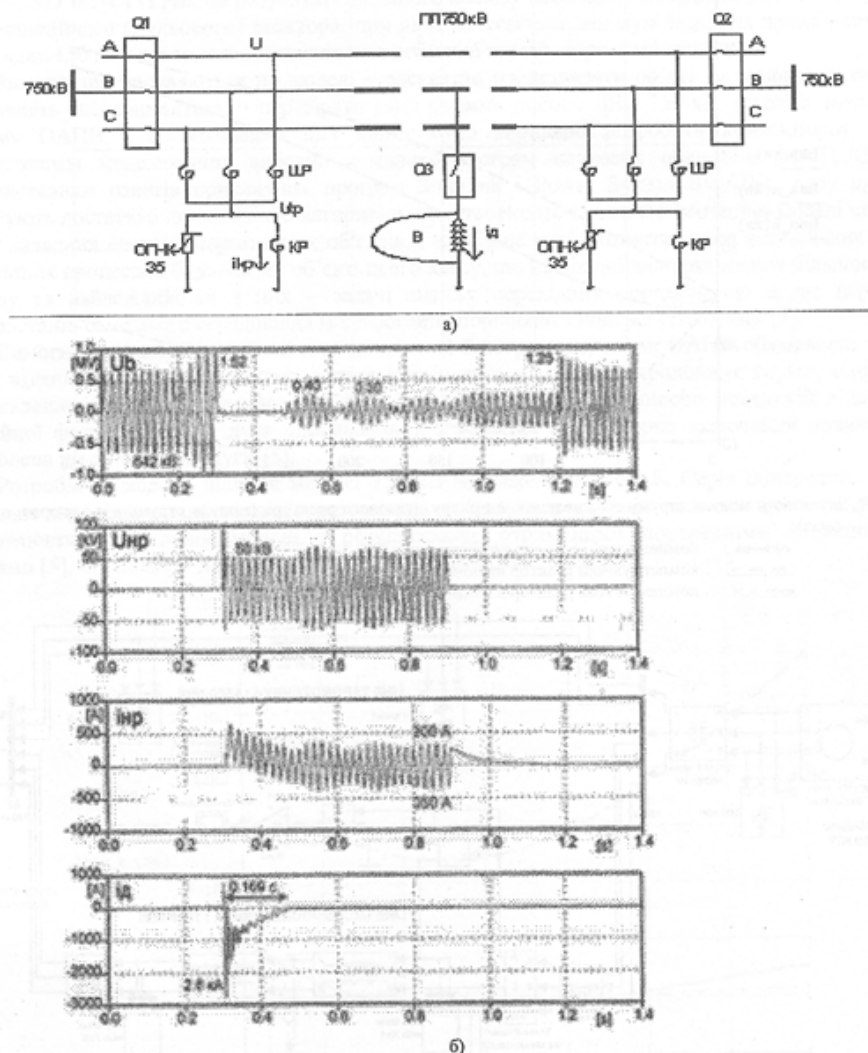


Рис. 9. Досліді ОАПВ:

а) схема досліді ОАПВ; б) осцилограми досліді ОАПВ:

- 1) напруга, що відновлюється; 2) напруга на компенсаційному реакторі;
- 3) струм компенсаційного реактора; 4) струм дуги

Опис моделі частини енергосистеми за допомогою програмного комплексу MATLAB.

По двох паралельних лініях 750 кВ, завдовжки 200 км кожна, передається 3000 МВт від Запорізької АЕС (еквівалентний генератор) в еквівалентну мережу, потужність короткого замикання якої складає 20 ГВА.

АЕС моделюється спрощеним синхронним генератором (типовий перехідний опір 0,22 в.о.) з підвищувальним трансформатором 24 кВ/750кВ.

Лінії прийняті транспонованими і їх параметри визначені прямою і зворотною послідовностями. Зарядна потужність кожної лінії компенсується двома групами шунтуючих (з компенсаційними) реакторів 330 Мвар, приєднаних по кінцях лінії.

Однофазне КЗ на землю (на фазі А) ініціюється по середині лінії «Південнодонбаська» для

рівномірного розподілу результатів пошкодження уздовж лінії, ця лінія моделюється двома секціями по 100 км. Вимикачі Q1, Q2 (рис.9,а) утримуються розімкненими впродовж деякого часу безструмової паузи, зазвичай близько 0,5с, впродовж якого дуга нормально гаситься, потім обидва вимикачі повторно включаються.

При розриві лінійними вимикачами Q1, Q2 ланцюга пошкодженої фази струм КЗ обривається, але невеликий струм продовжуватиме протікати через дугу. Якщо цей струм вторинної дуги великий (звичайно вище 50 А), то дуга не зможе згаснути і вимикачі повторно включаються на КЗ.

Дуга моделюється постійним або нелінійним опором $R=f(I_{arc_rms})$. Дуга гаситься тоді, коли середньоквадратичний струм стане нижче за деяке порогове значення (зазвичай 50 А [5]), визначене в блоці моделі дуги. У блоці, що моделює дугу, описані її параметри.

Значення опору дуги запрограмоване як експоненціальна функція від середньоквадратичного струму. Значення опору дуги збільшується, коли середньоквадратичний струм дуги зменшується, таким чином час проходження струму вторинної дуги, яка зменшується до значення нижче за порогове, скорочується. (Опір дуги визначений такими значеннями: $R_{arc}=0,1 \text{ Ом}$ і 30 Ом відповідно для струмів 1 кА і 100 А). Блок, що моделює дугу - прихований стандартний блок з бібліотеки Simulink. Блоками, що моделюють лінійні вимикачі програмується відключення/включення фази лінії «Південнодонбаська».

Пошкодження реалізується за $t=1$ цикл вимикачем Q3 (рис.9,а). Потім приходиться команда на відключення вимикачів Q1, Q2 по обох кінцях за $t=4$ цикли (3 цикли - визначення пошкодження, 1 цикл - відключення вимикачів).

Обидва вимикачі Q1, Q2 включаються через 34 цикли після часу безструмової паузи: 30 циклів - час, впродовж якого дуга буде погашена.

Для вивчення процесів, що відбуваються на ЛЕП «Південнодонбаська», по 4-вхідному осцилографу необхідно вибрати Simulation/Start і спостерігати напругу і струм трьох фаз. При цьому спостерігаються трифазні напруги і струми, що прийшли з кінця лінії «Південнодонбаська» і струм, що протікає через пошкодження. Напруги і струми ЛЕП «Південнодонбаська» вимірюються за допомогою 3-фазного вимірника шини з бібліотеки Extra library. Це дозволяє представити вихідну напругу і струм безпосередньо у відносних одиницях.

Блоки "V-I Measurement" є ідеальними трансформаторами струму і напруги, блоки "Scope" - ідеальні осцилографи, які дозволяють спостерігати миттєві значення струмів і напруг безпосередньо під час процесу моделювання.

У блоці еквівалентного генератора задалегідь задані початкові умови, необхідні для того, щоб передавати потужність рівну 3000 МВт. Струм КЗ (I_{arc}) вимірюється в амперах. Цей струм досягає 23 кА протягом першого циклу, далі після 3-х циклів струм пошкодження спадає до дуже малого значення, коли два лінійні вимикачі розімкнені. Щоб побачити струм вторинної дуги, слід скористатися Y-zoom. Коли середньоквадратичне значення струму вторинної дуги нижче 50А, то дуга гаситься при першому проходженні струму через нуль.

Якщо увійти до «Arc Model block menu» і змінити постійний опір (0,1 Ом), то ми одержимо повідомлення про те, що дуга не буде погашена, так що лінія буде включена на пошкодження.

Шляхом введення/виведення моделі компенсаційного (нульового) реактора в блоках, що моделюють шунтуючі реактори, видно вплив їх наявності на струм вторинної дуги.

Необхідно відзначити, що параметри моделей трансформаторів і ліній в середовищі MATLAB трохи відрізняються від тих, що наводяться в довідковій літературі як паспортні дані. Перерахунок паспортних значень в потрібні проводиться за формулами, наведеними нижче.

У системі MATLAB задається не індуктивний опір (опір ємності), а індуктивність (ємність), яка рівна:

$$L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{x_L}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad \left(C = \frac{1}{\omega \cdot x_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \right). \quad (12)$$

На рис. 10, 11, 12, 13 показані результати імітування (осцилограми) процесів в циклі ОАПВ: для розрахунку струму підживлення і напруги, що відновлюється, при ОАПВ на лінії 750 кВ при двох групах шунтуючих реакторів з застосуванням повних моделей та схем. Розрахунок проведено для чотирьох можливих випадків установки реакторів. Для кожного з цих випадків розраховано режими максимальних і мінімальних навантажень в системі.

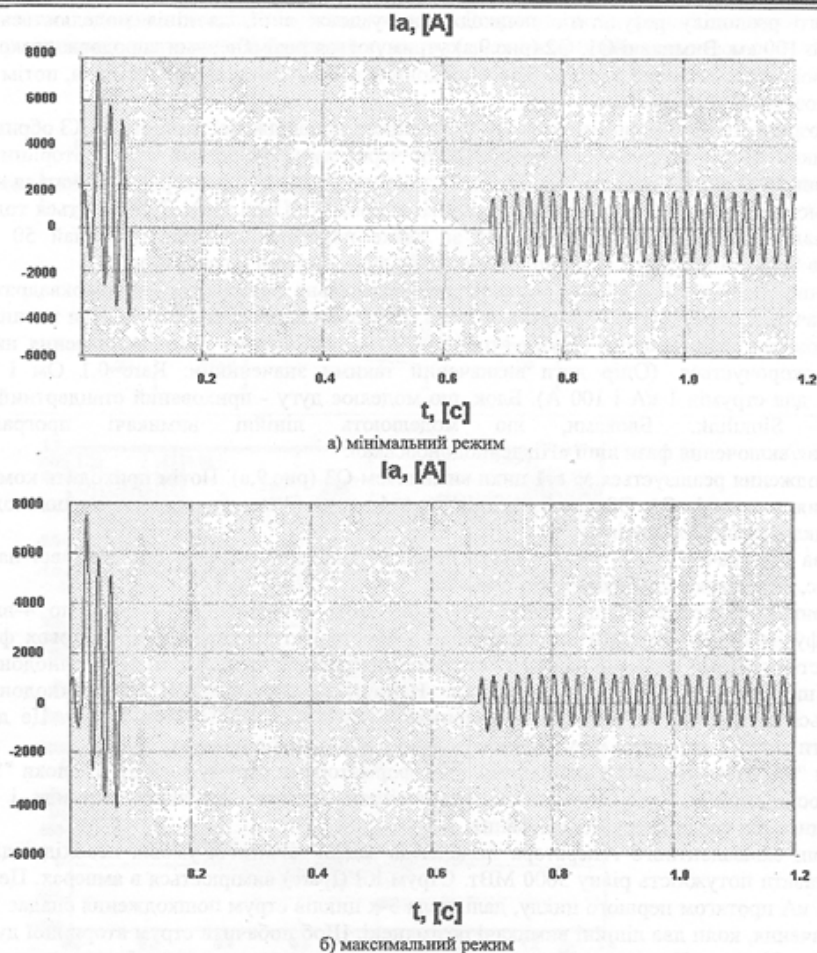


Рис.10. Групи шунтуючих реакторів і компенсаційних по обох кінцях ЛЕП (струм фази А)

З наведених осцилограм видно, що відключення КЗ супроводжується хвилевим процесом розряду частково зарядженої ПЛ на місце замикання. У дузі виникає достатньо швидко затухаюча перехідна складова струму підживлення з амплітудою в сотні ампер. Через короткочасність ця складова слабо впливає на процес гасіння дуги підживлення. Крім високочастотної складової в струмі підживлення присутня аперіодична складова. Загасання аперіодичної складової визначається відношенням активного опору дуги до індуктивного реактора і відбувається порівняно поволі. Наявність аперіодичної складової збільшує амплітуду повного струму підживлення, перешкоджає переходам струму через нуль, чим затримує гасіння дуги.

Від виникнення несиметричного КЗ до відключення лінійних вимикачів на компенсаційні реактори впливає напруга промислової частоти, величина якої визначається співвідношенням реактансів шунтуючого і компенсаційного реакторів, а також, меншою мірою, співвідношенням параметрів системи за прямою і нульовою послідовностями. Величина цих напруг при оптимальних значеннях опору КР в мережі 750 кВ не перевищує 65 кВ.

Нейтральний вивід стандартного шунтуючого реактора 750 кВ має клас ізоляції 35 кВ. Стала напруга не перевищує однохвилинної напруги випробувань виводу (85 кВ), впливає на ізоляцію протягом паузи ОАПВ, тобто протягом 1...2 с, а отже, небезпеки не представляє. На компенсаційний реактор впливають також комутаційні перенапруги, що виникають як при роботі вимикачів під час усього циклу ОАПВ, так і при інших комутаціях в мережі, а також внаслідок атмосферних явищ [6].

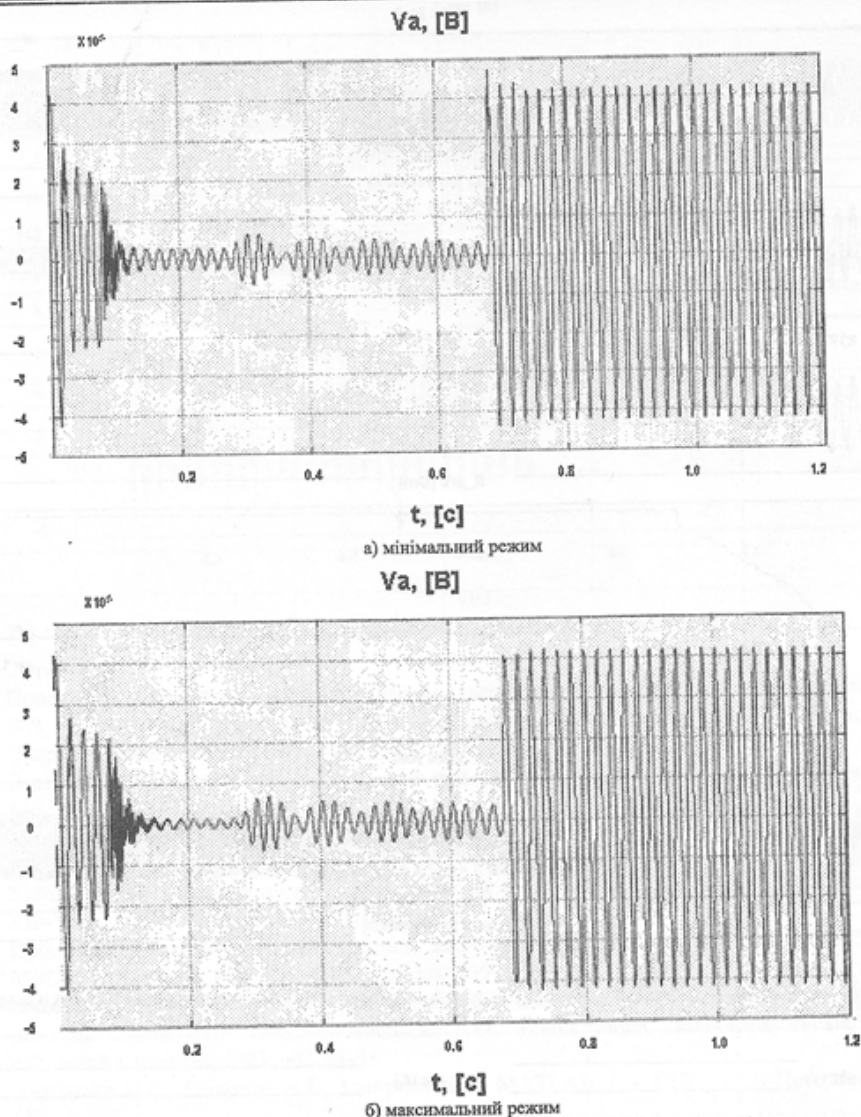


Рис.11. Групи шунтуючих реакторів і компенсаційних по обох кінцях ЛЕП (напряга фази А)

Висновки

За результатами аналізу проведених досліджень можливі наступні висновки:

- побудована комп'ютерна модель достатньо адекватно відображує поведінку реального об'єкта в плані отримання необхідних електричних параметрів – струмів підживлення і напруги, що відновлюється;
- отримана комп'ютерна модель надає можливість проведення дослідів по імітації пошкоджень в різних точках об'єкта, без необхідності побудови схем заміщення прямої, зворотної послідовностей;
- модель достатньо наочна та дозволяє доволі легко змінювати вихідні дані для моделювання об'єктів, обумовлених даним напрямком досліджень.

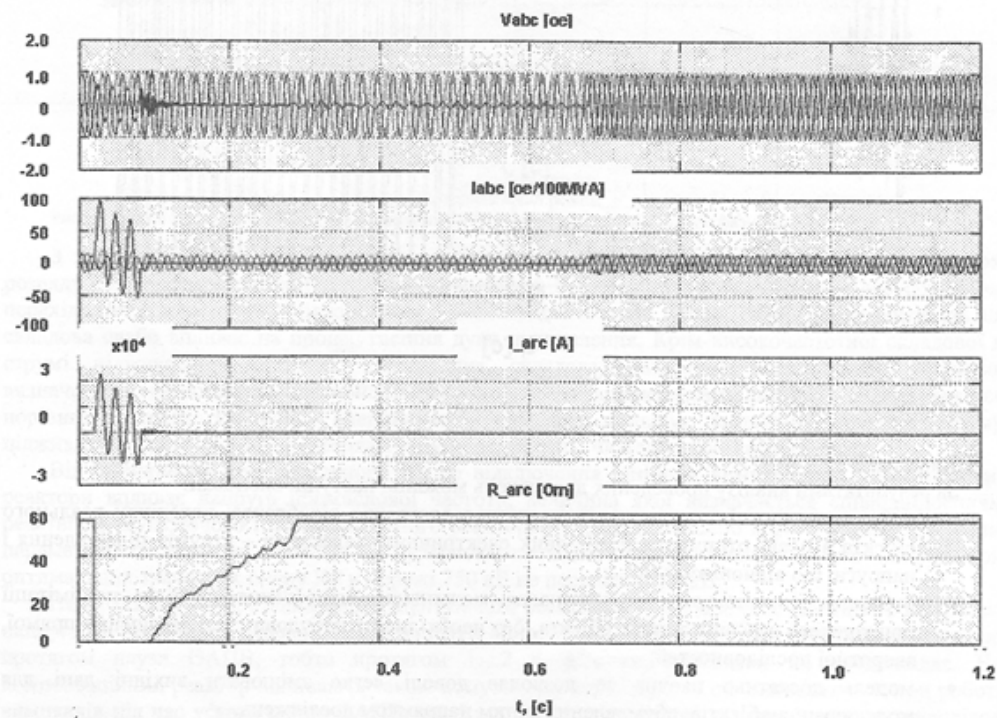
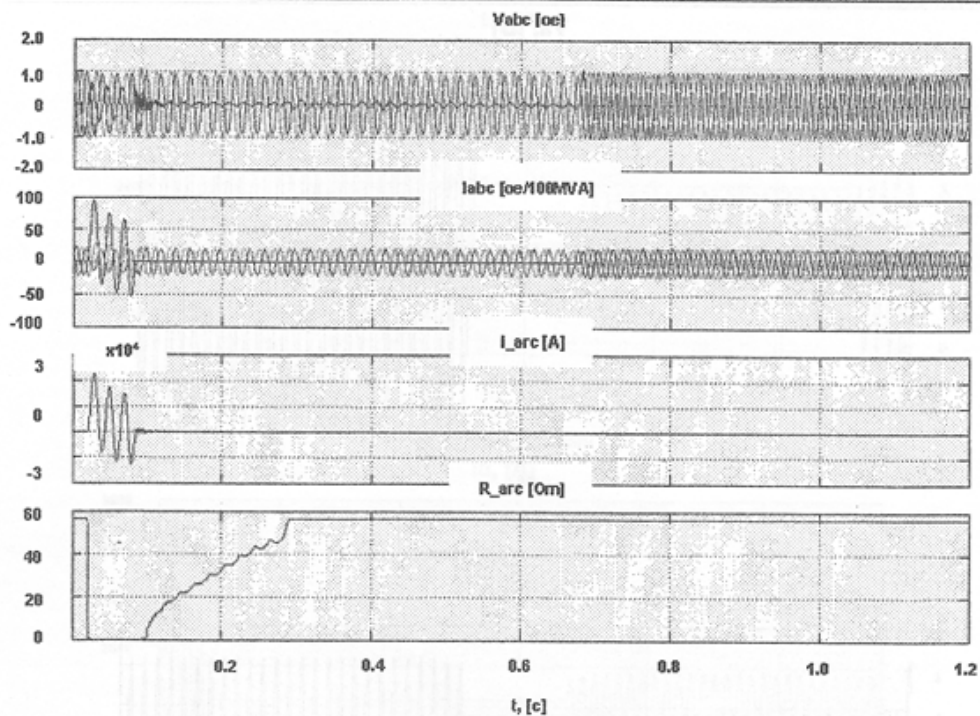


Рис.12. Групи шунтуючих реакторів і компенсаційних по обох кінцях ЛЕП (трифазні напруга і струм)

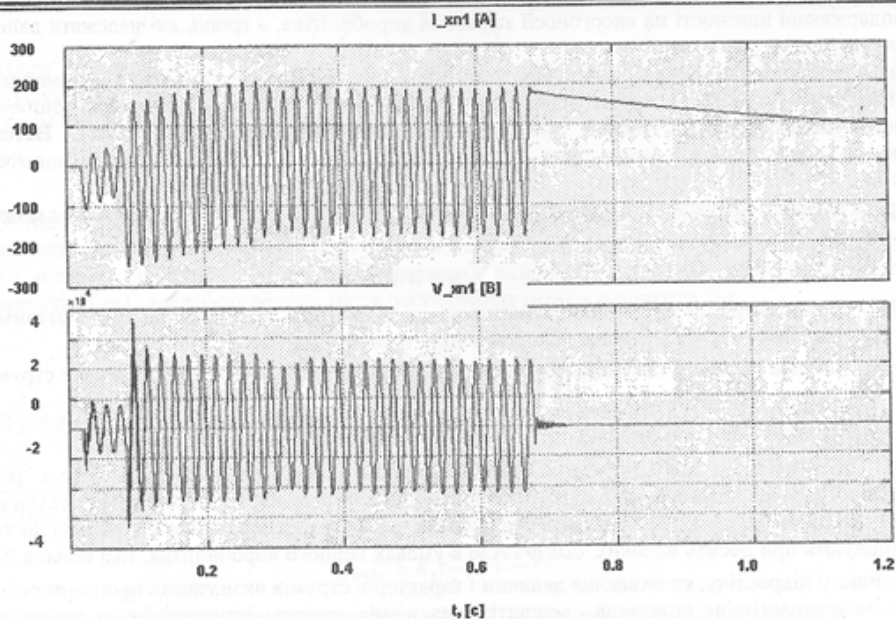


Рис.13. Струм та напруга на компенсаційному реакторі під час безструмової паузи ОАПВ

Література

1. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения/Г. Н. Александров, В.В. Ершевич, С.В. Крылов и др.; Под ред. Г.Н. Александрова и Л.Л. Петерсона. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 368с.,ил.
2. Барзам А.Б. Системная автоматика. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446с., ил.
3. Исследования и испытания в электропередачах 750 – 1150 кВ /ВНИИЭ, М.: Энергоатомиздат, 1991, 158с.
4. Методические указания по выбору бестоковых пауз ОАПВ и мер по их сокращению в сетях 330-750 кВ (первая редакция). – ВНИИЭ, 1988.
5. Процессы при однофазном повторном включении линий высоких напряжений. Под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Хмелевський П.М., Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Боровик Ю.М. Попередження резонансних режимів ОАПВ ЛЕП 750кВ „Рівненська АЕС – Підстанція „Західноукраїнська”// Новини енергетики, серпень 2003. – С. 51-56.
7. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнов Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с., ил.