

6. Dhoble P., Bhandakkar A. Review of Active Reactive Power Flow Control Using Static Synchronous Series Compensator (SSSC) // International Journal for Research and Development in Engineering (IJRDE). – 2013. – Vol. 1. – Issue. 3. – P. 74–82.
7. Dubey R.K., Suman S.K. Control of Power System Stability through FACTS // International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS) – 2015. – Vol. 1. – Issue 8. – P. 352–359.
8. Hingorari N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York: IEEE Press. – 2000. – 432 p.
9. Padiyar K.R. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution. – Published by New Age International (P) Ltd., Publishers. – 2007. – 532 p.
10. Sambasivarao N., Amarnath J., Purnachandrarao V. Congestion management using FACTS devices in deregulated power system // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2. – Issue 11. – P. 90–95.

УДК 621.311

А.Ф. Буткевич^{1,2}, докт. техн. наук, **І.А. Костыря**²

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

2 – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Использование FACTS для повышения пропускной способности электрических сетей

Приведены некоторые результаты исследований влияния гибких систем передачи переменного тока, в частности фазоворотных трансформаторов и статических тиристорных компенсаторов, на пропускную способность электрических сетей. Представленные результаты получены с использованием тестовой модели энергосистемы (IEEE 14-bus system). Библиография 10, рис. 5, табл. 4.

Ключевые слова: режим энергетической системы, пропускная способность электрической сети, FACTS, модальный анализ.

O.F. Butkevych^{1,2}, **I.A. Kostyrya**²

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

2 – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
Peremohy, 37, Kyiv -56, 03056, Ukraine

Using FACTS to maximize available transfer capability of electric networks

Some study results of the impact of flexible alternating current transmission systems, in particular the phase-shifting transformers and static thyristor compensators, with regarding to an available transfer capability of electric networks are presented. These results were obtained using the power system's model (IEEE 14-bus system). References 10, figures 5, tables 4.

Key words: power system operational condition, available transfer capability of electric network, FACTS, modal analysis.

Надійшла 01.07.2016

Received 01.07.2016

УДК 621.315.1

ЕКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ У МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В.В. Кучанський, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна
e-mail: kuvlad@yandex.ru

Дослідження умов виникнення, характеру розвитку та можливих наслідків аномальних режимів електричних мереж з екстремальними значеннями параметрів режимів, таких як перенапруги, традиційно виконують за допомогою математичних моделей з лінійними і симетричними елементами. Це пояснюється великим досвідом розробки та використання моделей такого класу на практиці, оскільки основою прийняття рішень під час проектування та експлуатації мереж є результати моделювання перш за все нормальних режимів. Одночасно

більш детальний аналіз показує, що наявність у сучасних електромережах джерел спотворень, головним чином несиметрії, суттєво впливає на поточні значення параметрів режиму, в тому числі і на ймовірність переходу цих значень через граничні межі. Бібл. 5, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: резонансні перенапруги, аномальні режими, резонанс струму, шунтувальний реактор.

Протягом тривалого часу проводились наукові дослідження щодо вивчення умов виникнення та існування резонансних перенапруг (РП) [2-5]. Основною темою згаданих наукових праць був розгляд перенапруг як загального енергетичного процесу. Тобто перш за все цікавив наслідок дії перенапруг: характеристики аварій, які вони спричинили [4-5]. Одночасно були недостатньо проаналізовані причини та умови виникнення перенапруг, заходи їх попередження та гасіння. Для аналізу резонансних перенапруг використовувався підхід, при якому перенапруги розглядалися як суто внутрішні, без вивчення достатніх та необхідних умов їх існування [1, 4, 5]. Тому такий аналіз не відображав у повному обсязі теоретичні питання виникнення РП та режимів, що спричиняють тривале підвищення напруги та як саме швидко визначити потенційне небезпечне виникнення цих перенапруг.

Метою роботи є розробка методу для експрес-аналізу аномального несиметричного режиму, який виникає при експлуатації обладнання електропередачі з неповною кількістю фаз. Неповнофазні режими можуть виникати стихійно як аварійні або плануватися спеціально як захід, що підвищує надійність роботи електричної системи. До останньої категорії належать, наприклад, неповнофазні режими, що утворюються при застосуванні на лініях однофазного автоматичного повторного ввімкнення.

У магістральних електричних мережах потік відмов практично повністю визначається аваріями на повітряній лінії (ПЛ). При цьому, як уже зазначалося, у лініях напругою 750 кВ переважна частина відмікнень викликається однофазними короткими замиканнями (КЗ). З точки зору спотворюючих впливів на сусідні системи істотне значення мають заходи ліквідації КЗ на лінії. Нестійкі однофазні КЗ, що виникають на лінії, супроводжуються мінімальними збуреннями на сусідні системи, якщо вони ліквідуються в циклі однофазного автоматичного повторного ввімкнення [3]. У цьому випадку пошкоджену фазу лінії відмикають з двох сторін вимикачами (рис. 1), а потім через певний час – так звану безструмову паузу – вмикають автоматично повторно. За час безструмової паузи відкрита дуга змінного струму в місці перекриття має згаснути, якщо повітря деіонізується і майже повністю відновить свою електричну міцність. При експлуатації ліній надвисокої напруги (НВН) до 60...70 % однофазних КЗ мають нестійкий характер, тобто можуть бути усунені в циклі короточасної безструмової паузи з подальшим відновленням нормальної схеми.

На рис. 2 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, позначені на рисунку як L_M та L_3 . Також на рис. 2 позначено $L_{Л}$ – індуктивність повітряної лінії та L_C – індуктивність системи. Розглянемо вхідний опір кон-

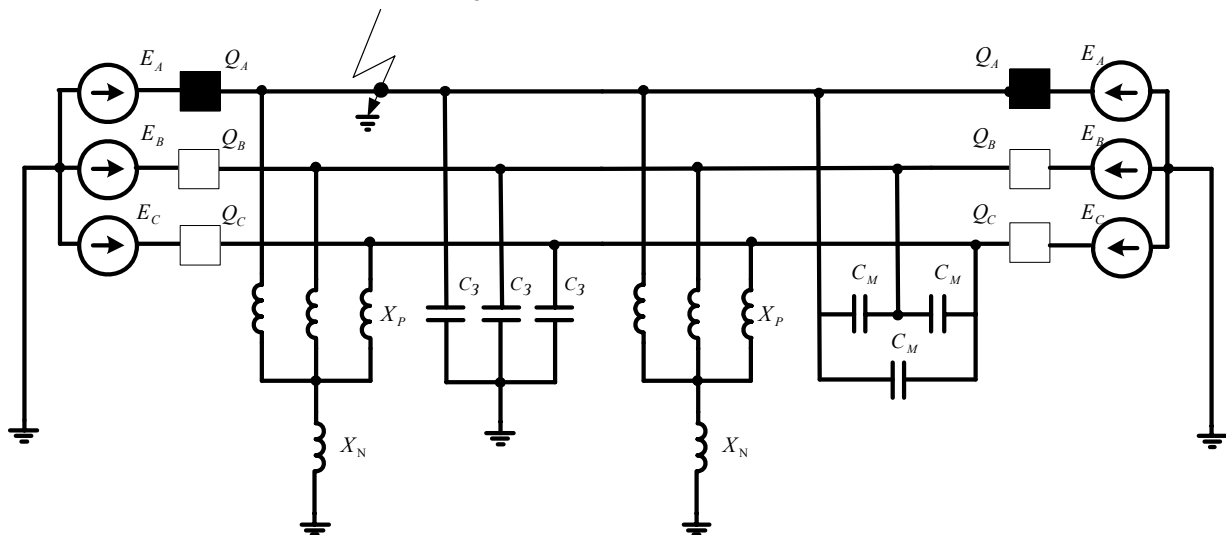


Рис. 1

тура (рис. 2) відносно фази, на якій відбулося відімкнення (точки 1 та 2):

$$X_{BX} = \frac{\omega \cdot ((2 \cdot C_M + C_3) \cdot (L_M \cdot l + L_{\text{Л}}) \cdot l \cdot L_3 \cdot \omega^2 - L_M \cdot (L_3 - L_C) - L_C \cdot L_3)}{\omega^2 \cdot l \cdot L_3 \cdot L_M \cdot (2 \cdot C_M + C_3) - n \cdot (L_M + L_3)} = \frac{P(\omega)}{Q(\omega)}$$

Коло, наведене на рис. 2, характеризується змішаним з'єднанням елементів. Для нього умовою виникнення резонансу є рівність нулю уявної частини вхідного опору. Тому, щоб знайти резонансні частоти для контура, наведеного на рис. 2, вхідний опір представимо у вигляді двох поліномів за ступенями $P(\omega)$ та $Q(\omega)$. Чисельник $P(\omega)$ відповідає резонансу напруг, а знаменник $Q(\omega)$ – резонансу струму. Тоді корені рівняння $P(\omega)$ дадуть значення частот, які відповідають резонансу напруг, а корені рівняння $Q(\omega)$ – значення частот, при яких виникає резонанс струмів.

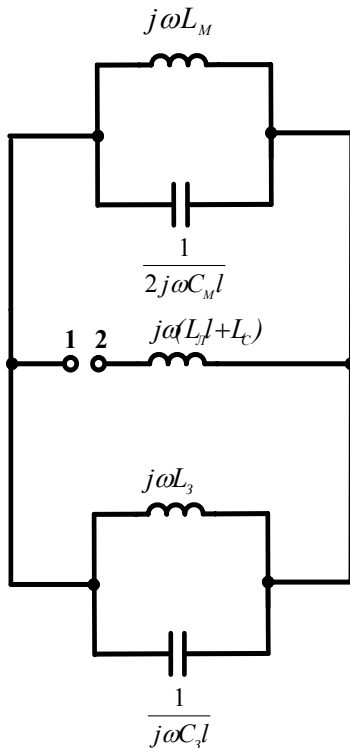


Рис. 2

У контурі (рис. 2) можливе існування і резонансу струмів, і резонансу напруги. Резонанс напруг, як небезпечне явище в електричних мережах, характеризується перш за все надструмами в зовнішньому колі, оскільки еквівалентний опір контура при резонансі напруг мінімальний. У той же час резонанс струмів характеризується суттєвими значеннями перенапруг у зовнішньому колі. Умови отримання резонансу струмів такі ж, як і для резонансу напруг. Однак за своїми властивостями резонанс струмів протилежний резонансу напруг. При резонансі струму опір контура між точками буде максимальним, струм – мінімальним, напруга – мінімальною. Умова резонансу струмів при неповнофазному режимі ПЛ:

$$\omega^2 \cdot l \cdot L_3 \cdot L_M \cdot (2 \cdot C_M + C_3) - n \cdot (L_M + L_3) = 0. \quad (1)$$

З умови резонансу струмів (1) для аналізу аномальних перенапруг автором була виведена формула визначення резонансної довжини лінії. Для виведення формули (2) було зроблено таке припущення: відомі усі описані вище складові умови (1) окрім довжини лінії l . Так, вираз для повнофазного режиму при будь-якій кількості груп шунтувальних реакторів (ШР) має вигляд

$$l_{\text{Рез}} = n \frac{L_M + L_3}{L_3 L_M \omega^2 \cdot (2C_M + C_3)}, \quad (2)$$

де n – кількість повнореакторних груп ШР.

У таблиці наведено результати розрахунку резонансних довжин лінії реальних ЛЕП НВН. Слід зауважити, що такий критерій виникнення перенапруг відповідає точній умові резонансу. Це свідчить, що перенапруги $U_{\text{пер}}$ можуть виникнути і хоч не досягти максимальних кратностей, бути небезпечними. Тому в сумнівних випадках необхідно виконати більш точні дослідження за допомогою імітаційного моделювання.

Отримана формула визначення резонансної довжини лінії (2) дає змогу отримати приблизний діапазон існування небезпечних перенапруг. Такий експрес-метод оцінки аналізу перенапруг дасть можливість при проектуванні застосувати емпіричну формулу без залучення імітаційних моделей або спеціально розробленого програмного забезпечення для аналізу електромагнітних перехідних процесів.

З рис. 2 та формули (2) видно, що для розладу резонансного контура необхідно змінити індуктивність ШР або ввести додатковий активний опір певної величини. Як видно з таблиці, довжини ліній дуже близькі до виконання умови резонансу струму. Це свідчить про необхідність розробки та застосування заходів унеможливлення резонансних перенапруг. Виходячи з отриманих результатів, перспективним напрямком запобігання або зменшення перенапруг є застосування керованих ШР та дослідження впливу коронного розряду.

Назва лінії	Довжина лінії l , км	Резонансна довжина на лінії $l_{рез}$, км	Кратність перенапруг, $U_{пер}$, в.о.
ПС Західноукраїнська – ПС Альбертирша	436	432	2,2
Запорізька АЕС – ПС Дніпровська	136	129	1,59
ПС Київська – ПС Вінницька	177	126	0,56

1. *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.
2. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В.* Дослідження впливу транспозиції лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні перенапруги // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 51–56.
3. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В.* Вибір опору компенсаційного реактора з врахуванням впливу несиметрії параметрів ЛЕП НВН // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 33. – С. 13–17.
4. *Cheng C.P., Shihe Chen* Simulation of resonance overvoltage during energization of high voltage power network / C.P. Cheng, // Proceedings of International Conference on power Systems transients IPST 2003 in New Orleans, USA, October 9–13. – 2010. – P. 71–75.
5. *Claus Leth Bak, Kim Sogaard* Switching overvoltage when disconnecting a combined 400 kV cable/overhead line with permanently connected shunt reactor // Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '08) WSEAS Press, 2008. – P. 109–117.

УДК 621.315.1

В.В. Кучанський, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

Экспресс-метод оценки и прогноза резонансных перенапряжений в магистральных электрических сетях

Длинные внутренние перенапряжения возникают из-за резонанса тока вследствие совпадения значений параметров элементов цепи. Этот вид перенапряжений, обусловленный свойствами сети, может быть устранен путем изменения соотношения между параметрами сети и ее режима. В отличие от коммутационных перенапряжений, которые имеют продолжительность сотые доли секунды, резонансные перенапряжения не только возникают непредсказуемо, но и могут существовать достаточно длительное время, пока действие защиты от повышения напряжения или вмешательства персонала не произведет изменения схемы или режима. Согласно нормативным документам, резонансные перенапряжения не берутся во внимание при выборе изоляции или параметров нелинейных ограничителей и разрядников, поскольку эти защитные меры рассчитываются для ограничения коммутационных перенапряжений, а не для подавления длительного процесса. Поэтому вероятность возникновения и развития системных аварий при резонансных перенапряжениях значительна. Проблема разработки метода оценки и прогноза перенапряжений данного класса и обусловила направление исследований. Библиограф. 5, рис. 2, таблица.

Ключевые слова: резонансные перенапряжения, аномальные режимы, резонанс тока, шунтирующий реактор.

V.V. Kuchanskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Express method of assessment and forecast for resonance overvoltage in the main power electrical grids

One of the main causes of equipment failure in the main electrical network is a overvoltage, that is, increase the value of the operating voltage above the maximum value according to the technical requirements. This is because the relatively small insulation reserve provides for the components of the electricity grid because of its high cost for a given voltage. Generally, cost of power systems insulation is a significant factor in capital expenditures.

Internal overvoltage appears through resonance, due to coincidence of the parameters of the circle. This type of overvoltage caused by the network properties can be removed by changing the ratio between the parameters of the network and its modes. Unlike of switching overvoltage that last few hundredths of a second resonance not only arise unexpectedly, but there may be a long time until the effect of increasing voltage protection, voltage regulators or intervention personnel will not change schemes or mode. According to regulations, the resonant surge not taken into account when selecting insulation or nonlinear parameter constraints as these protective measures calculated to limit switching over, not to extinguish a long process. Therefore, the likelihood of accidents and development system in the resonance surge is considerable. The importance of the problem of restrictions over the class and led a line of research thesis. References 5, figures 2, table.

Key words: resonance overvoltage, abnormal modes resonance current shunt reactor.

Надійшла 31.05.2016

Received 31.05.2016