

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.315.1

ЗАПОБІГАННЯ РЕЗОНАНСНИМ ПЕРЕНАПРУГАМ У НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ РЕЖИМАХ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В.В. Кучанський, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна
e-mail: kuvlad@yandex.ru

Резонансні перенапруги можуть спричинити пошкодження електричного силового обладнання. Виникнення такого роду перенапруг зумовлено властивостями мережі й може бути усунено шляхом зміни співвідношення між параметрами мережі та її режимом. На відміну від комутаційних перенапруг, які існують протягом декількох періодів промислової частоти, резонансні перенапруги виникають не тільки несподівано, але вони можуть тривати протягом тривалого часу, поки спрацювання пристроїв релейного захисту або дії персоналу не змінять електричну схему або режим. Резонансні перенапруги не враховують при виборі ізоляції або параметрів обладнання, бо сучасні захисні заходи розраховані для обмеження комутаційних перенапруг, а не для подавлення тривалих резонансних процесів. Таким чином, ймовірність і розвиток системних аварій через резонансні перенапруги є значними. Важливість розробки заходів попередження резонансних перенапруг зумовило напрямки досліджень, які представлені в статті. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: резонансні перенапруги, керована комутація, імітаційна модель, несинусоїдальні режими.

Тенденції розвитку сучасних магістральних електричних мереж вказують на зростання ролі ліній електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) як системоутворюючих та міжсистемних. Слід відзначити, що саме дослідження перенапруг для цього класу ліній номінальною напругою 750 кВ мають виконуватись особливо ретельно, зокрема, з врахуванням впливу джерел спотворень. Це пояснюється практичною відсутністю експлуатаційного запасу ізоляції, розрахованого на екстремальні значення параметрів, оскільки такий запас для надвисоких напруг має високу вартість [2, 8]. Таким чином, аналіз можливості виникнення перенапруг в ЛЕП НВН повинен виконуватись не лише для нормальних, але й для аномальних (несиметричних та несинусоїдних) режимів.

Однією з основних причин виходу з ладу обладнання в магістральній електричній мережі є перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги вище максимально допустимого значення, відповідно до технічного регламенту [8–10]. Це пояснюється тим, що передбачено порівняно малий резерв ізоляції для складових елементів магістральних електричних мереж через її високу вартість для такого класу напруги.

У магістральних електричних мережах відбулась заміна повітряних вимикачів на елегазові. Ця модернізація зумовлена тим, що сучасна електротехнічна промисловість не виготовляє повітряні вимикачі, і в разі пошкодження здійснити ремонт і поновити електропостачання буде неможливо. У порівнянні з повітряними вимикачами елегазові мають певні переваги, основними з яких є швидкодія та висока вимикаюча спроможність, а також можливість встановлення додаткового пристрою керованої комутації.

Такий пристрій дає змогу виконувати комутації елегазового вимикача у заздалегідь визначений момент з метою зменшення негативних наслідків перехідних процесів. Момент комутації повітряного вимикача є випадковою величиною і виконати розмикання чи замикання у необхідний момент неможливо. Такий недолік під час експлуатації призводив до аварійних ситуацій, у тому числі до виникнення резонансних перенапруг у несинусоїдних режимах [4, 6, 8].

Метою цієї роботи було застосування пристрою керованої комутації як заходу для запобігання резонансним перенапругам при ввімкненні лінії на ненавантажений автотрансформатор. Керована комутація має знизити величини перенапруг до рівня ефективної роботи таких традиційних заходів, як розрядники, обмежувачі нелінійних перенапруг та варистори. Така мета передбачає визначення діапазонів кутів вмикання вимикача, при яких спостерігаються максимальні та мінімальні величини перенапруг. Відповідно до визначених діапазонів були надані рекомендації магістральним електричним мережам, що пов'язані з необхідністю врахування моментів замикання полюсів елегазових вимикачів під час вмикання ненавантаженого автотрансформатора.

Аномальність несинусоїдних режимів характеризується появою вищих гармонік струму і напруги [4, 6, 9–11]. Спотворення форми кривої напруги і струмів у такому випадку обумовлені нелінійністю шунтів намагнічування. За останні роки велику увагу при дослідженнях режимів електричних мереж стали приділяти коливанням у колах зі сталлю. Приводом для цього слугує поява на ЛЕП НВН складних явищ, таких як резонанси на частотах, що відрізняються від основної [4, 6, 8].

Як одне з головних із джерел спотворення режиму електропередачі НВН у роботі розглядається нелінійність вольт-амперної характеристики шунта намагнічування при ввімкненні ненавантаженого автотрансформатора. Такий режим спричиняє умови для появи перенапруг парної кратності. Слід зазначити, що процес виникнення перенапруг на другій гармоніці загалом відомий, проте значення характеристик резонансних перенапруг залежить від багатьох факторів та чинників аномального режиму. Тому необхідно розробити методи визначення ключових факторів та чинників для перевірки наявності необхідних та достатніх умов аномальних перенапруг під час проектування та експлуатації мережі надвисокої напруги.

Фізична природа виникнення парних гармонік на ЛЕП НВН з приєднаним ненавантаженим автотрансформатором пояснюється періодичною зміною індуктивності магнітного шунта при протіканні через нього змінного струму. Ця індуктивність змінюється з подвійною частотою по відношенню до прикладеної напруги. За умови, що власна частота еквівалентної схеми дорівнює 100 Гц, можливе існування перенапруг на другій гармоніці. Для цього необхідно, щоб вхідний опір мав ємнісний характер і був приблизно рівний середньому значенню індуктивного опору магнітного шунта автотрансформатора на цій частоті. Процес виникнення гармонічних перенапруг представлено на рис. 1 зі спотвореною формою кривої напруги.

Як було зазначено, при моделюванні гармонічних перенапруг на другій гармоніці кожен окремо взятий чинник не може вважатись незалежним. Зміна одного параметра може призвести до зміни іншого, інакше кажучи в даному випадку існує кореляція як між параметрами режиму конкретної мережі, так і параметрами її устаткування [4]. Наявність цієї взаємозалежності не дає змоги отримати чіткі залежності, які могли б бути використані для аналізу перенапруг на другій гармоніці в магістральній електричній мережі, і в цьому випадку, як показує досвід наукових досліджень [9, 11], ефективним засобом для моде-

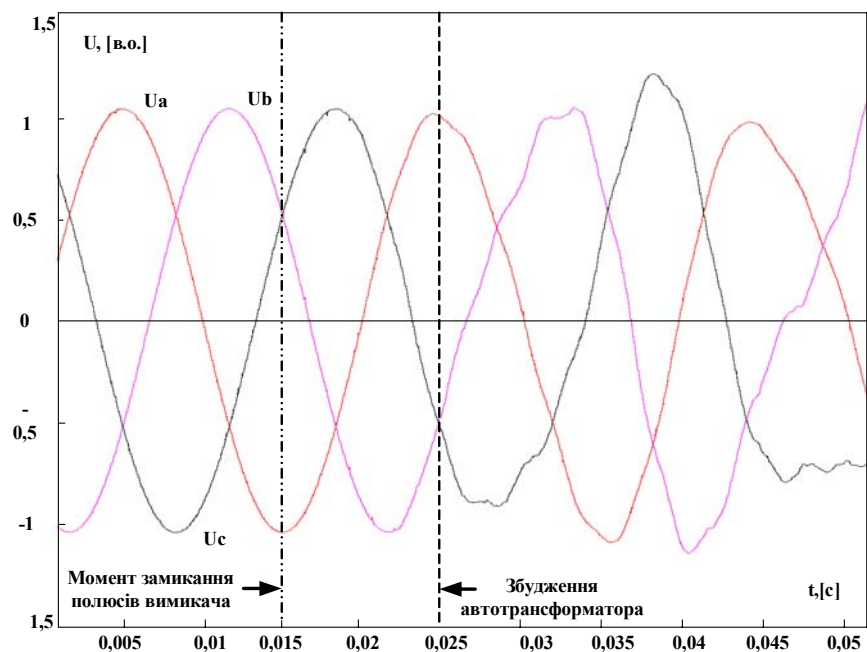


Рис. 1

лювання таких невизначених систем є імітаційне моделювання [4].

Головний напрямок попередніх досліджень був сконцентрований на розробці та застосуванні математичних моделей з метою отримання кількісних результатів для практичного використання. В них не виявлені точні причини виникнення резонансних перенапруг (РП) на вищих гармонічних складових, хоча випадки виникнення такого виду перенапруг відомі досить давно. З наведених результатів неясно та невідомо, які саме режими чи комутації призводять до РП на вищих гармонічних. Дослідження РП до цього часу виконувалось з великими спрощеннями, оскільки саме цей вид РП залежить від багатьох факторів, явищ та параметрів електричних мереж. Тому такі дослідження вважати за вичерпні неможливо.

Імітаційне моделювання застосовується в тих випадках, коли математична модель занадто складна, щоб можна було використати аналітичні методи, тобто виразити залежності між параметрами за допомогою обмеженої кількості математичних виразів. Імітаційну модель можна використати як для одного випробування, так і для заданої серії. Імітаційне моделювання – це метод дослідження, при якому досліджувана система замінюється моделлю ЛЕП НВН, що з достатньою точністю описує реальну систему і з якою проводяться експерименти з метою отримання інформації про умови виникнення РП. Експериментування з моделлю називають імітацією. У загальному випадку імітація – це усвідомлення суті явища, без експериментів на реальному об'єкті.

Імітаційне моделювання – це окремий випадок математичного моделювання. Існують класи об'єктів, для яких з різних причин не розроблені аналітичні моделі або не розроблені аналітичні методи вирішення отриманої моделі. У цьому випадку аналітична модель замінюється імітатором або імітаційною моделлю [1].

У роботі імітаційним моделюванням називається отримання чисельних результатів задачі аналізу РП на основі об'єднання аналітичних залежностей, чисельних методів та алгоритмів розвитку процесів в електропередачах НВН.

Через причини, вказані вище, було розроблено імітаційну модель електропередачі НВН для реалізації в середовищі MATLAB/Simulink [1] рис. 2. Особливість застосування цієї моделі полягає в обов'язковій наявності трьох груп ШР, оскільки з практики відомо [8], що гармонічні перенапруги виникають при довжинах ліній, які потребують для компенсації зарядної потужності саме таку кількість груп ШР [4, 6, 10]. Тобто однією з необхідних умов виникнення резонансних перенапруг в несинусоїдному режимі є довжина лінії.

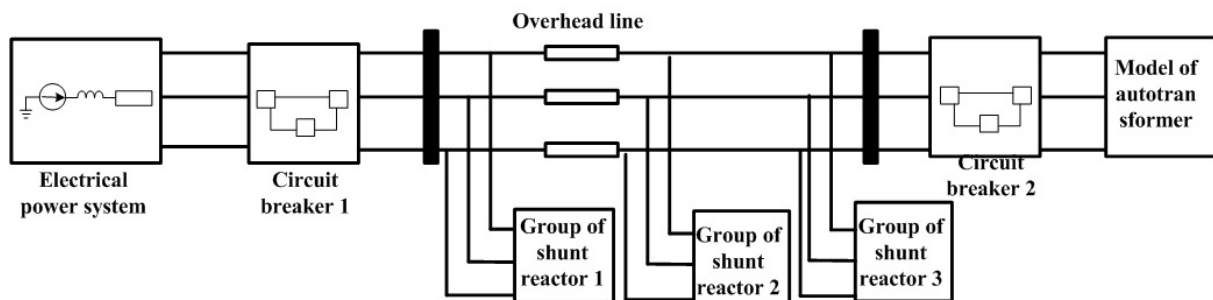


Рис. 2

Полюси вимикачів у моделі розглядаються окремо для кожної з фаз: кожний полюс моделюється ідеальним вимикачем. Це дає можливість незалежно змінювати моменти замикання кожного з полюсів під час моделювання. Повітряна лінія моделюється дільницею з розподіленими параметрами з довжиною, що відповідає довжині ЛЕП НВН. Електроенергетична система задається трифазним джерелом напруги з заданими величинами напруги та індуктивності.

Завдяки використанню імітаційної моделі (рис. 2) діапазони кутів, при яких досягаються значення перенапруг, такі: максимальні $\delta \in [0; 140] \cup [200; 240]$ ел. град; мінімальні $\delta \in [140; 215] \cup [275; 355]$ ел. град. Як видно з рис. 3, перенапруги досягають максимальних значень в зонах екстремумів синусоїди напруги (0; 140) та (200; 240). На рис. 3 напруга позначена

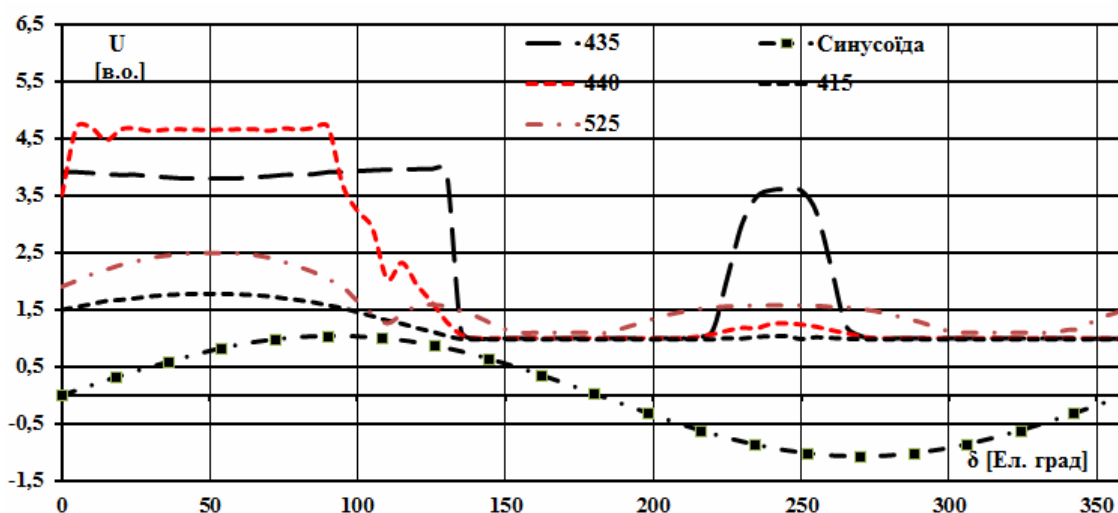


Рис. 3

у відносних одиницях. Одна відносна одиниця складає 643 кВ. Дослідження, що наведені на рис. 3, виконувались для чотирьох ліній з фіксованою довжиною 415, 435, 440, 525 км. Момент комутації лінії на ненавантажений АТ змінювався протягом повного періоду синусоїди $\delta \in [0; 360]$, що дало змогу виявити вирішальний фактор появи РП.

Як було встановлено, необхідною умовою виникнення перенапруг є збіг двох вирішальних факторів: довжина лінії і кут замикання полюсів вимикача. Змінити довжину лінії неможливо, оскільки це фіксований параметр лінії, який обрано на стадії проектування. Але довжина лінії передачі є визначальним фактором для перенапруг як в несинусоїдальних, так і несиметричних режимах [3, 5–7], хоча джерело спотворень і генерації відповідних резонансних контурів у цих випадках різні. Таким чином, для кожного виду перенапруг заходи щодо запобігання і припинення мають бути розроблені та реалізовані окремо. Захід, який буде ефективним для перенапруги в несинусоїдальному режимі, буде неефективним у несиметричному режимі й навпаки [3, 5, 6].

У сучасних магістральних електричних мережах використовуються перш за все структурні заходи зниження та подавлення РП, які пов'язані зі зміною робочої схеми та переходом від анормального режиму до нормального. Але при необхідності можуть бути використані спеціальні пристрої або налаштування за критерієм зменшення РП пристроїв, які були встановлені з іншою метою.

Як показали дослідження, перенапруги при комутації ненавантаженого АТ суттєво залежать від моменту його ввімкнення. Таким чином, РП можуть бути обмежені при використанні блока керованої комутації, налаштованого на замикання контактів поблизу від нульового значення струму холостого ходу АТ ("кероване включення"). На цей час точність керованої комутації складає ± 2 мс: це недостатньо для вимикання короткого замикання, але для ліквідації перенапруг такий розкид не є критичним. У загальному випадку керована комутація є засобом усунення шкідливих перехідних процесів за допомогою керованих в часі операцій комутації. Команди вмикання або відмикання, що подаються на вимикач, виконуються таким чином, щоб замикання контактів відбувалося в сприятливий момент часу по відношенню до фазового кута.

Слід зазначити, що компанія «АВВ» (Asea Brown Boveri Ltd.) розробила пристрій керованої комутації Switchsync F236, призначений для автоматичних елегазових вимикачів з полюсним керуванням. Призначення цього пристрою полягає в замиканні і/або розмиканні полюсів вимикача в необхідній точці синусоїди струму або напруги, яка є прийнятною для усунення небажаного впливу перехідних процесів при планових комутаціях конденсаторних батарей, шунтувальних реакторів, а також автотрансформаторів та силових трансформаторів. Слід зауважити, що робіт щодо з'ясування впливу саме керованої комутації на виникнення та розвиток резонансних перенапруг не проводилось.

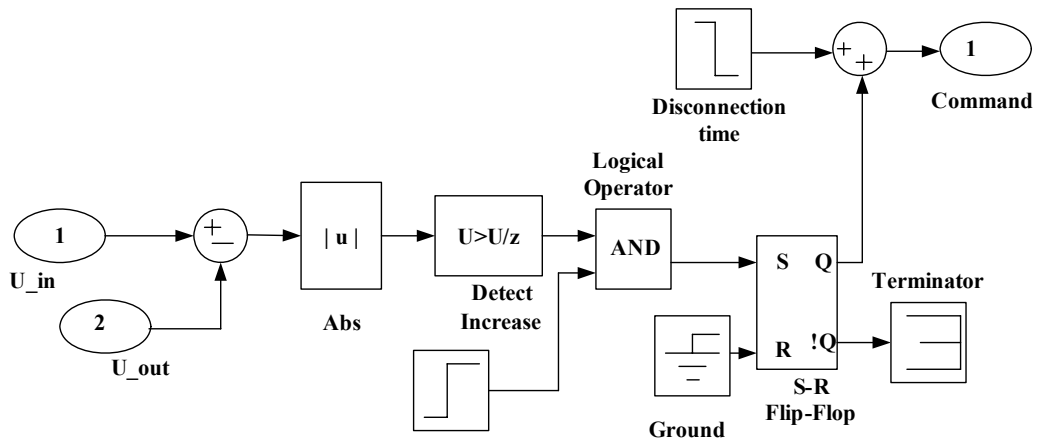


Рис. 4

З метою оцінки ефективності заходу застосування керованої комутації розглянемо дві лінії з однаковими параметрами та характеристиками. Кожна з цих двох ліній комутується своїм вимикачем. Перша лінія комутується вимикачем з некерованою комутацією, а друга –

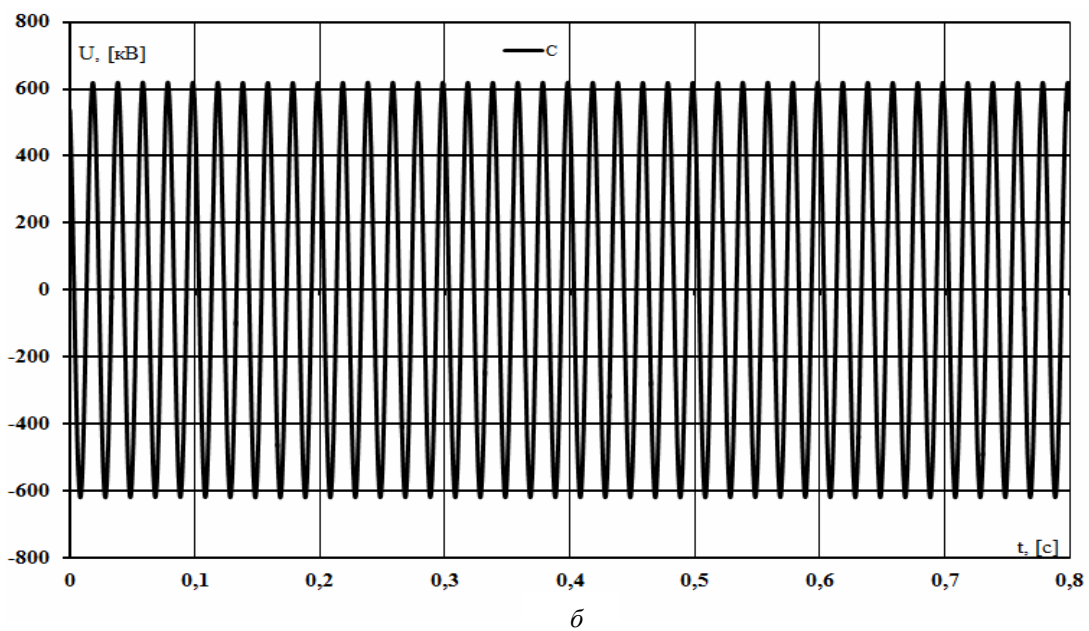
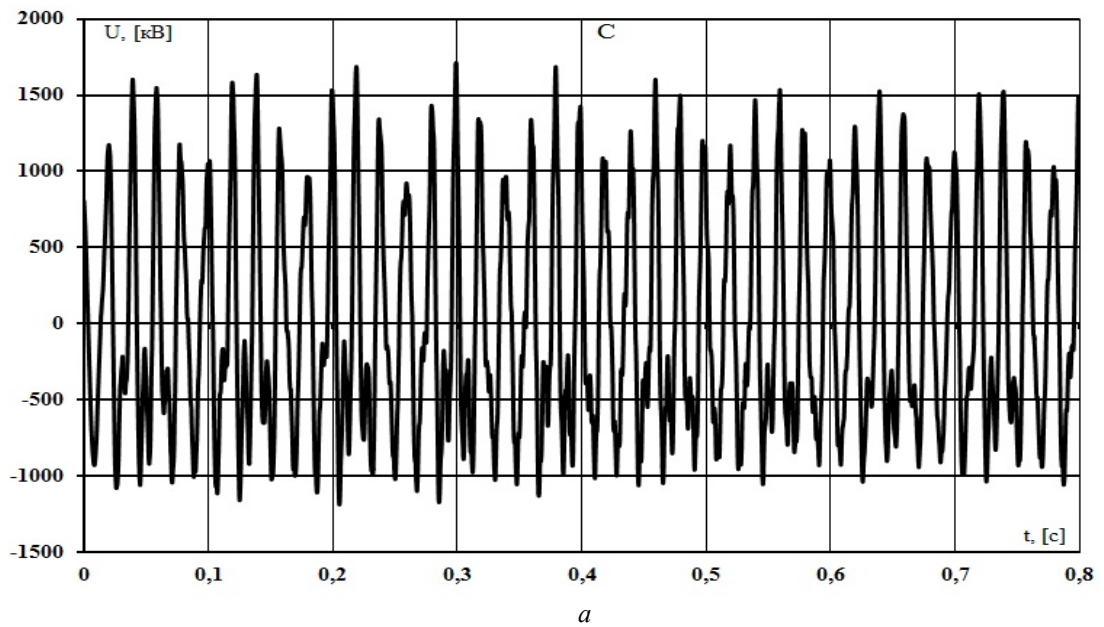


Рис. 5

вимикачем з керованою комутацією. Для обох ліній моментом подачі команди на замикання вимикача є момент переходу струму через нуль. Замикання полюсів вимикача з некерованою комутацією відбувається одразу в момент подачі команди. Для дослідження впливу керованої комутації на перенапруги необхідно попередньо розробити спеціальний блок для імітаційної моделі, що подає зовнішню команду на вимикач. Процес моделювання роботи керованого вимикача залежить від алгоритму комутації, який реалізований у розробленій моделі блока керування.

На рис. 4 наведено структуру запропонованої в роботі імітаційної моделі блока управління комутаціями вимикача, яка на відміну від розробленої [6] дає змогу досліджувати комутації як у нормальному, так і у аномальному режимах. На рис. 4 номінальна робоча напруга для ліній складає 643 кВ. Блок здійснює постійний контроль над модулем струму холостого ходу АТ. Як тільки крива струму холостого ходу досягає нульового значення (в блоці наявні модулі, де визначається тенденція зміни значення струму), підтверджується зовнішня команда та подається вихідний сигнал на вимикач, який, у свою чергу, миттєво замикає свої контакти. В самому блоці керованого вимикача можна задати момент замикання його полюсів. Зазвичай замикання контактів відбувається як тільки різниця між напругою джерела та напругою на кінці лінії досягне мінімального значення, після часу замикання, яке визначене в самому блоці.

Результати моделювання використані для порівняння роботи ЛЕП НВН зі звичайним вимикачем з моментом комутації, що потрапляє в діапазон $\delta \in [0; 140] \cup [200; 240]$, та з вимикачем з керованою комутацією, момент замикання якої потрапляє в діапазон $\delta \in [140; 215] \cup [275; 355]$. Це показано на рис. 5.

Висновки: 1. Керована комутація (рис. 5 б) суттєво знижує кратність перенапруг у порівнянні зі звичайним вимикачем (рис. 5 а), момент замикання якого може потрапити до діапазона існування перенапруг.

2. За допомогою імітаційного моделювання було визначено вирішальний фактор виникнення перенапруг розглянутого типу при дослідженні ліній електропередач надвисокої напруги різної довжини з фіксованою кількістю груп шунтувальних реакторів. Цим визначальним фактором є кут вмикання вимикача, що має потрапляти у відповідні діапазони, при яких спостерігаються максимальні величини резонансних перенапруг. Якщо кут вмикання вимикача потрапляє до діапазона, що відповідає мінімальним величинам перенапруг, то можливо як повністю запобігти виникненню перенапруг, так і знизити їх величини до рівнів ефективної роботи традиційних заходів обмеження перенапруг. У будь-якому разі застосування пристрою керованої комутації дає змогу якщо не попередити появу перенапруг, то забезпечити суттєве обмеження амплітудних значень.

1. Васильев А.Н. MATLAB. Самоучитель. Практический подход. – Санкт-Петербург: Наука и Техника, 2012. – 448 с.
2. Дудурич О.Б., Маврін О.І., Покровський К.Б. Високовольтна ізоляція у задачах і контрольних питаннях. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2013. – 188 с.
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. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В. Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних перенапруг // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 31 – С. 8–14.
5. 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.
6. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Шполянський О.Г. Дослідження резонансних перенапруг на ультрагармоніках парної кратності на ЛЕП 750 КВ // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012. – Вип. 29. – С. 20–26.
7. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В. Перенапруги в аномальних режимах ліній електропередачі надвисокої напруги // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 40–41.

8. 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.
9. L. M. N. de Mattos, A. M. P. Mendes, J. F. de Lima Filho, M. C. Tavares Enhanced Analysis of Oscillatory Undamped Overvoltages in Transformer Energization // Proceedings of International Conference on power systems Transients IPST 2013 in Vancouver. Canada, July 18-19. – 2013. – P. 55–61.
10. J. F. Piñeros, J. A. Vélez, J. M. Salas, O. Monroy, M. T. Gutiérrez, F. Montaño Undesired Trip of a 230 kV Transmission Line due to 500 kV/450 MVA Autotransformer Energization // Proceedings of International Conference on power systems Transients IPST 2013 in Vancouver. Canada, July 18-19. – 2013. – P. 45–50.
11. D. D. L. T. Barros, W. L. A. Neves, K. M. C. Dantas, D. Fernandes Jr., L. Fonseca Controlled Switching of Transmission Line with Series Compensation // Proceedings of International Conference on power systems Transients IPST 2013 in Vancouver. Canada, July 18-19. – 2013. – P. 5–8.

УДК 621.315.1

В.В. Кучанский, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Предотвращение резонансных перенапряжений в несинусоидальных режимах магистральных электрических сетей

Резонансные перенапряжения могут привести к повреждению электрического силового оборудования. Появление такого рода перенапряжений обусловлено свойствами сети и может быть устранено путем изменения соотношения между параметрами сети и ее режимом. В отличие от коммутационных перенапряжений, которые существуют на протяжении нескольких периодов промышленной частоты, резонансные перенапряжения возникают не только неожиданно, но они могут продолжаться в течение длительного времени до тех пор, пока срабатывание устройств релейной защиты и действия персонала не изменят электрическую схему или режим. Резонансные перенапряжения не учитывают при выборе изоляции или параметров оборудования. Современные защитные мероприятия рассчитаны для ограничения коммутационных перенапряжений, а не для подавления длительных резонансных процессов. Таким образом, вероятность развития системных аварий из-за резонансных перенапряжений является значительной. Важность разработки мер предупреждения резонансных перенапряжений обусловило направление исследований, которые представлены в статье. Библиограф. 11, рис. 5.

Ключевые слова: резонансные перенапряжения, управляемая коммутация, имитационная модель, несинусоидальные режимы.

V.V. Kuchanskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

The prevention overvoltage in resonant modes nonsinusoidality magisitralni electric network

Due to the rising role of overhead lines extra high voltage there is a need of application of modern electronic devices that allow controlling modes of bulk electricity system. The switching control unit Switchsync F236 is one of such devices which enables to connect and disconnect contacts of poles circuit breakers at required time. This function of Switchsync F236 can be used not only for interruption of short circuit. One of the objectives of application Switchsync F236 is prevention of resonance overvoltage occurrence at closing extra high voltage line on no-load autotransformer. Durable resonance overvoltages may cause damage of electrical power equipment. This kind of overvoltages is caused by properties of the network and can be eliminated by changing the ratio between the parameters of the network and its mode. Unlike switching overvoltages that exist centiseconds, resonance overvoltages not only occur unexpectedly, but they may go on for a long time until the automatic action or action of personnel will not change electrical schemes or mode. The resonant overvoltages are neglected when selecting insulation or parameters for high-voltage surge arrester as this protective measure is calculated to limit switching overvoltages, not to extinguish a long resonance process. Therefore, the probability and development of system accidents due to resonance overvoltages is significant. The importance of application and prevention of resonance overvoltages caused research area which is presented in article. Referenses 11, figures 5.

Key words: resonance overvoltages, control switching, simulation, nonsinusoidal mode.

Надійшла 25.01.2017
Received 25.01.2017