

Ключевые слова: электрическая цепь с параметрической нагрузкой, электромагнитное поле пространственного контура с током, надежность электроэнергетического оборудования, советчик диспетчера.

N.A. Shydlovska, Yu.M. Vasetsky, M.V. Myslovich, V.V. Tverdiakov
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Investigation of electromagnetic processes in the parts of electric power equipment and its use for improving of the equipment reliability

Theoretical approaches of creation of modern mathematical models, methods, algorithms and hardware aimed at improving the safety and reliability of an electric power equipment are considered. To further improve the efficiency of the analysis and optimization of transient electromagnetic processes in parametric circuits, it was demonstrated that the exact solution exists for the differential equation which describes the transition process in a series RLC-circuit for the case when parametric dependence of the resistance is represented by a sum of exponentials. An exact analytical solution is received for the electromagnetic field calculation problem of the spatial current loop located above the flat surface of the conductive body with a strong skin effect. It is shown that in the general case for the initial contour of the spatial configuration the sources of electromagnetic fields, in addition to the loop current and surface current, are also electrical charges, the surface density of which is determined by the component of the vector potential which is normal to the boundary of the initial contour. The general structure of a multilevel system of technical diagnostics and status monitoring of electrical machines is described. The peculiarity of this system is its compliance to "smart grid" requirements. The system provides the measurement and transmission of diagnostic information without the need for the operator and provides detection, classification and localization of critical defects while accounting for the hierarchical structure of electric power facilities. The main functions of the system components are described, which are performed on different hierarchical levels of the system. The key features and software for prototype of dispatcher advisor system are described. The advisor system will help dispatcher in regulation of the voltage levels at the nodes of the interconnected power system with usage of adjustment elements. References 17, figures 3.

Key words: electrical circuit with a parametric load, electromagnetic field of a spatial current loop, reliability of electric power equipment, dispatcher advisor.

Надійшла 14.04.2015

Received 14.04.2015

№ 14. ВІДДІЛ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

УДК 621.311.13

ОБМЕЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ДО ЛІНІЇ НЕНАВАНТАЖЕНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА

В.Г. Кузнецов, чл.-кор. НАН України, **Ю.І. Тугай**, докт. техн. наук, **О.Г. Шполянський**, канд. техн. наук, **І.Ю. Тугай**, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський**, магістр, **В.А. Мельничук**, магістр
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна
e-mail: shpolyansky@ied.org.ua

Наведено нові наукові результати досліджень, спрямованих на удосконалення методів аналізу аномальних режимів у магістральних електричних мережах для обмеження резонансних перенапруг, що проводились у відділі оптимізації систем електропостачання ІЕД НАН України у 2014 році. Удосконалено імітаційну модель системи електропередачі, яка включає в себе повітряну лінію електропередачі 750 кВ з розподіленими параметрами, шунтувальні реактори, вимикачі з пристроями керованої комутації та автотрансформатор з нелінійною вольт-амперною характеристикою. Проведено серію розрахунків можливих перенапруг при підключенні ненавантаженого автотрансформатора для різних значень середньогометричних відстаней між фазами та проводами в фазі лінії. Виконано дослідження впливу кута включення вимикача на рівні резонансних перенапруг. Для ліній різної довжини вперше отримано значення кута включення вимикача, які дають змогу обмежити перенапруги такого класу або зовсім уникнути їх. Досліджено умови появи ферорезонансних процесів та розглянуто заходи по їх попередженню та обмеженню в сучасних електричних мережах. Бібл. 10, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: резонансні перенапруги, керована комутація, підключення ненавантаженого автотрансформатора, ферорезонансний процес.

Внутрішні перенапруги в електричних мережах (ЕМ) спричиняються коливаннями електромагнітної енергії між ємнісними та індуктивними елементами електричних кіл. Як відомо, причиною таких коливань є перехідні процеси, викликані зміною усталеного режиму ЕМ внаслідок варіацій схеми чи умов живлення. Слід зазначити, що наявність в ЕМ споживачів зумовлює дисипацію енергії коливань, тому особливо небезпечні перенапруги виникають під час комутацій у режимах з мінімальними навантаженнями. Навіть при затухаючому характері коливань комутаційні перенапруги у цьому випадку мають порівняно велику кратність та тривалість і можуть викликати ушкодження обладнання. Тому для захисту від них широко використовують технічні засоби, такі як розрядники та нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН).

Ситуація ускладнюється, коли частота власних коливань контура, що утворений ємнісними та індуктивними елементами ЕМ, виявляється наближеною до частоти живлення, тобто виникають умови резонансу – різкого збільшення амплітуди коливань, які стають незатухаючими. Резонансні перенапруги, що обумовлені несприятливими комбінаціями схеми з'єднань системи електропередачі та параметрів її режиму, на відміну від комутаційних перенапруг можуть існувати тривалий час, і тому ймовірність виникнення системних аварій навіть при невеликих кратностях перенапруг значна. Згідно з нормами Міжнародного стандарту ІЕС-60071 резонансні перенапруги не беруться до уваги при виборі рівня ізоляції обладнання надвисокої напруги через її високу вартість. Не допомагає і встановлення ОПН, оскільки ці захисні пристрої не розраховані для гасіння тривалого процесу. Якщо резонансні перенапруги досягають рівня спрацювання ОПН, то пристрої виходять з ладу через 10-15 хв. Тому внутрішні резонансні перенапруги для систем електропередачі надвисокої напруги мають бути обмежені із застосуванням спеціальних заходів.

Відомо, що одним з основних чинників, який обумовлює характер протікання перехідного процесу в електричному колі, є початкові умови. Стосовно проблеми, що розглядається в статті, початкові умови визначаються моментом часу на графіку струму або напруги живлення, за який відбувається комутація. За відсутності керування комутаційним апаратом вона здійснюється у випадковий момент, який може виявитися несприятливим. Тому вибір оптимального моменту включення або відключення вимикача є дієвим заходом по зменшенню амплітуди та тривалості перехідних процесів, пов'язаних з комутаціями [7], а при певних умовах і заходом по запобіганню виникненню резонансних кіл. Метою роботи є дослідження перенапруг в електричних мережах номінальної напруги 750 кВ під час підключення до лінії електропередачі (ЛЕП) ненавантажених автотрансформаторів (АТ) з можливим застосуванням керованої комутації.

За конструкцією АТ є котушкою індуктивності зі сталевим осердям, нелінійність характеристики намагнічування якого спричиняє загальну нелінійність вольт-амперної характеристики цього елемента системи електропередачі. Струм холостого ходу силового АТ складає декілька відсотків від його номінального струму, тому здавалося б, що підключення ненавантаженого АТ взагалі не повинно впливати на режим ЕМ. Але під час комутації в магнітному колі АТ виникає вільна загасаюча аперіодична складова потокозчеплення, що призводить до виникнення в струмі намагнічування гармонічних складових [3]. Останні, у свою чергу, викликають на елементах електричного кола падіння напруги, що еквівалентно введенню в ланцюг поздовжньої електрорушійної сили (ЕРС) відповідної частоти. Якщо частота власних коливань контура заступної схеми ЛЕП близька до частоти ЕРС, то виникають резонансні перенапруги на частоті гармонічної складової.

Для аналізу умов виникнення і характеристик резонансних перенапруг в ЕМ була розроблена та реалізована в середовищі MATLAB/Simulink імітаційна модель системи електропередачі (рис. 1), яка включає в себе:

- модель ЛЕП 750 кВ з розподіленими параметрами;
- еквівалент електроенергетичної системи з трифазним джерелом напруги та внутрішнім індуктивним опором;
- модель АТ, параметри обмоток якого та крива намагнічування були отримані від виробника;

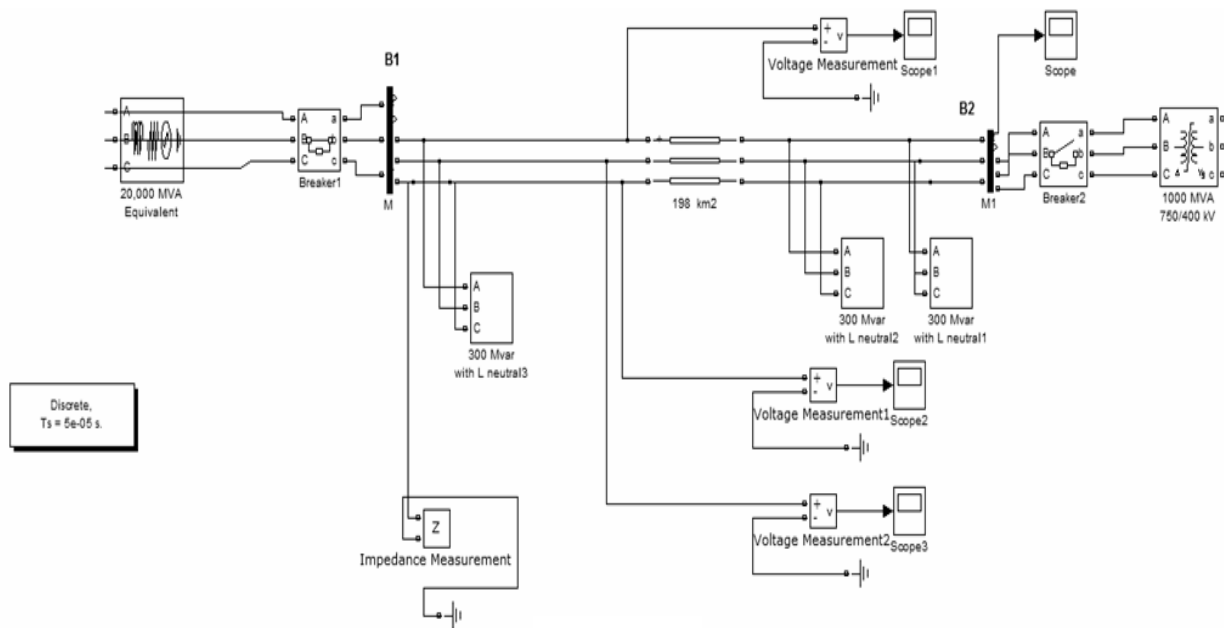


Рис. 1

- модель трьох груп шунтувальних реакторів (ШР);
- ідеальні моделі вимикачів, окремі для кожної фази.

Слід зазначити, що реалізувати абсолютно адекватну модель проблематично не тільки через труднощі виконання числового аналізу складних диференціальних рівнянь. Забезпечення точності вихідних даних та їх повнота є не менш важливими питаннями для достовірності отриманих результатів.

Залежність значення напруги від довжини лінії була визначена з використанням імітаційної моделі лінії. Для наочності результатів моделювання значення погонних параметрів ЛЕП НВН були обрані відповідно до заступних схем реальних ЕМ: $C_3 = 1,056 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_M = 1,125 \cdot 10^{-8}$ Ф, $L_S = 0,15$ Гн, $L_{\text{Л}} = 9,436 \cdot 10^{-4}$ Гн [8]. Як видно з рис. 2, діапазон нерезонансних довжин ЛЕП при цьому буде коливатись у межах 350...370 км.

Виявилось, що на значення параметрів лінії (погонні індуктивності й ємності по прямій та нульовій послідовностях L_1 , L_0 , C_1 , C_0 відповідно) найбільший вплив мають середньгеометричні відстані між розщепленими проводами в фазах a та між фазами ЛЕП $D_{\text{ср}}$ [1, 6]. Під час аналізу значення a та $D_{\text{ср}}$ варіювались на інтервалах $a \in [0,4; 0,7]$ та $D_{\text{ср}} \in [12; 25]$. При розрахунках параметрів було враховано заземлення грозозахисних тросів. З наведених у таблиці результатів видно, що погонні параметри лінії можуть змінюватися в широких межах. Так, при збільшенні середньгеометричної відстані між фазами з 12 до 25 м індуктивність і ємність прямої послідовності зросли приблизно на 15 %, індуктивність нульової послідовності майже не змінилась, а відповідна ємність збільшилась приблизно на 25 %. При збільшенні кроку розщеплення фази з 0,4 до 0,7 м індуктивність прямої послідовності зменшується, а ємність збільшується майже на 11 %. Індуктивність нульової послідовності збільшується майже на 7 %, фазова ємність – на 13 %.

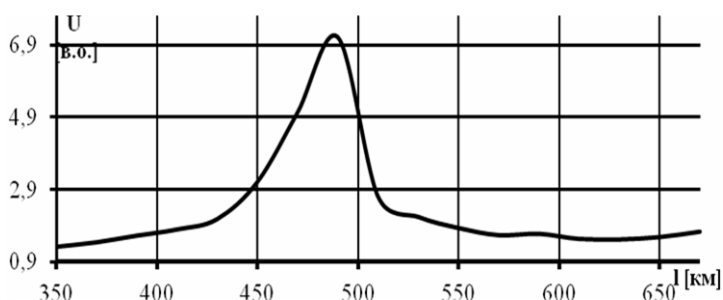


Рис. 2

Враховуючи можливі варіації параметрів лінії, було проведено дослідження їх впливу на перенапруги. Результати моделювання представлені на рис. 3. Вони отримані при фіксованих довжині лінії, що становила 420 км, та куті вмикання вимикача 73 ел. град. З цього рисунка видно, що незважаючи на зміну конструкції фази

ЛЕП, значення перенапруг залишаються небезпечними. Разом з цим для лінії певної довжини ще на стадії проектування можуть бути обрані оптимальні геометричні параметри фази за критерієм зменшення резонансних перенапруг.

На імітаційній моделі проведено серії розрахунків перенапруг залежно від кута вмикання вимикача при підключенні ненавантаженого АТ для ліній різної довжини. При моделюванні конструктивні параметри лінії приймалися незмінними. На рис. 4 наведено залежність кратності перенапруг від кута вмикання вимикача та довжини лінії.

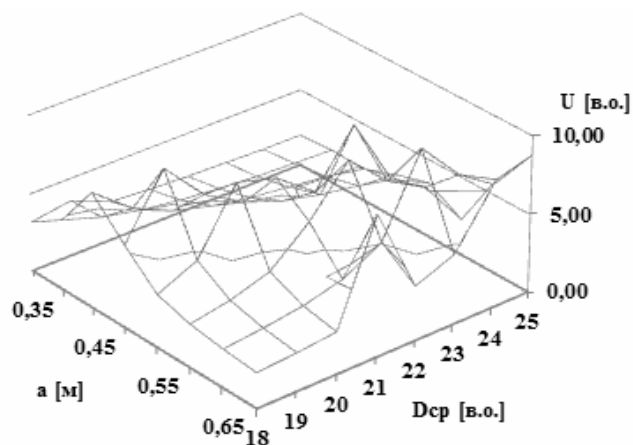


Рис. 3

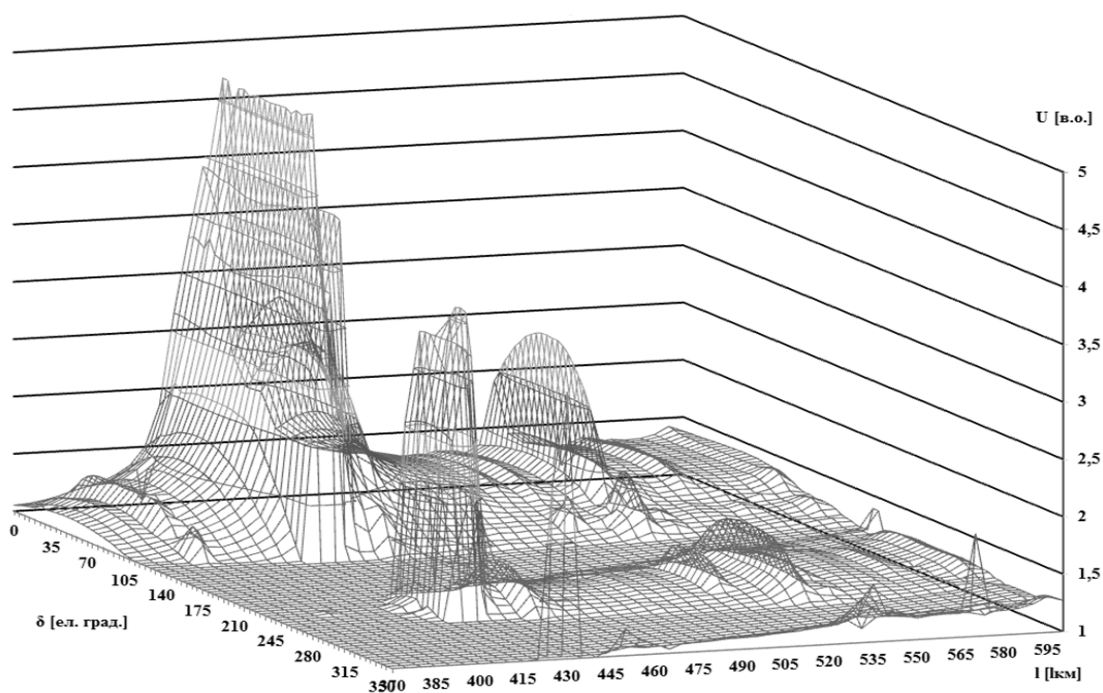


Рис. 4

Параметри лінії	Середньгеометрична відстань між фазами $D_{cp} \in [12; 25]$, м	Крок розщеплення фази $a \in [0,4; 0,7]$, м
L_1 , Гн	(0,00084; 0,000987)	(0,000882; 0,000792)
L_0 , Гн	(0,002557; 0,002576)	(0,00256; 0,00274)
C_1 , пФ	(11,23; 13,2)	(13,49; 15,14)
C_0 , пФ	(9,7; 13,05)	(15,55; 17,79)

З тривимірного графіка (рис. 4) видно, що існують діапазони кутів, при яких значення перенапруг є безпечними, і діапазони кутів, при яких значення перенапруг перевищують допустимі величини. Максимальні кратності перенапруг спостерігаються в діапазоні кутів вмикання $\delta \in [0; 140] \cup [200; 240]$ ел. град; мінімальні – $\delta \in [140; 215] \cup [275; 355]$ ел. град.

Зазначимо, що незважаючи на зміну довжини лінії, для компенсації зарядної потужності в усіх випадках було використано три групи ШР. Тому ступінь компенсації зарядної потужності зменшувалася зі зростанням довжини лінії. Це спричиняє звуження діапазонів кутів безпечного підключення ненавантаженого АТ (рис. 5).

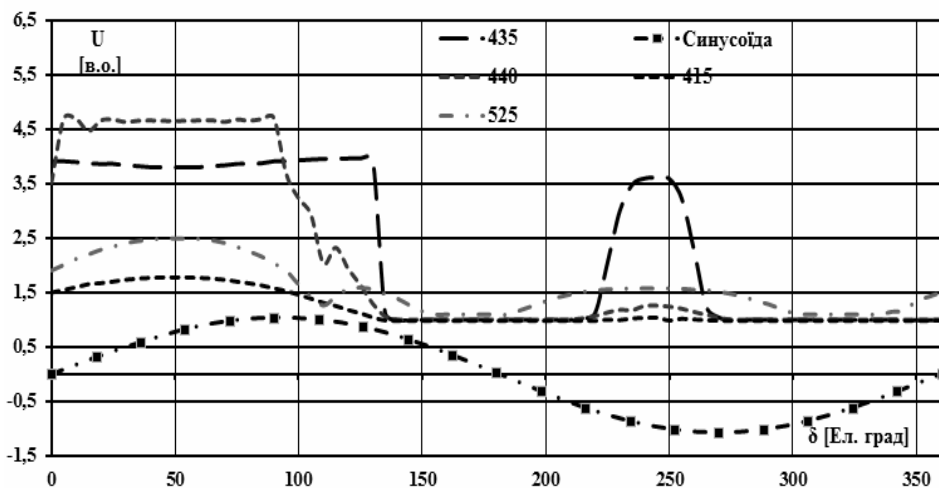


Рис. 5

ти хоча б обмеження амплітудних значень до рівня тривалої ефективної роботи ОПН. Також застосування ПКК передбачає корекцію обраних на стадії проектування кутів підключення АТ відповідно до реальних параметрів ЕМ і умов експлуатації [9].

Розглянуті вище резонансні перенапруги виникають у коливних електричних колах з лінійними елементами, що утворені ємністю ЛЕП та індуктивністю ШР. Нелінійний елемент – індуктивний шунт АТ – не бере участі в коливному обміні енергією, а тільки генерує ЕРС збудження гармонічної складової відповідної частоти. Це справедливо при нормальному виконанні комутацій в ЕМ. Але при неповнофазних комутаціях можливе утворення коливного кола, що складається з ємності ЛЕП та індуктивності АТ, тобто виникають передумови нелінійного резонансного процесу – ферорезонансу. Головними відмінностями ферорезонансу від резонансу в лінійному колі є такі:

- автопараметричне настроювання індуктивного елемента до умов резонансу, що обумовлює можливість виникнення резонансних коливань у широкому діапазоні варіації значень ємності [5, 10];
- спектр гармонічних складових коливань напруги та струму може мати складові, не кратні частоті синусоїдального джерела ЕРС [2];
- існування декількох можливих стабільних усталених режимів при однакових значеннях параметрів заступної схеми.

Слід відзначити, що при ферорезонансі початкові умови навіть у більшому ступені, ніж у випадку резонансу в лінійному колі, визначають кінцевий усталений режим. Тому на практиці програма роботи ПКК повинна враховувати можливість такого розвитку ситуації. Ферорезонансне коло утворюється, наприклад, при відмові вимикача однієї з фаз під час включення ненавантаженого АТ на лінію (рис. 6) [4, 10].

Як показали дослідження на імітаційній моделі, після перехідного процесу в робочих фазах встановлюється напруга амплітудою, близькою до номінальної, але зі значними спотвореннями форми. На розімкненій фазі спостерігаються перенапруги, характерні для періодичного ферорезонансу. Перенапруги при неповнофазній роботі АТ інколи називають перехідним ферорезонансом, тому що вони спричинені перехідним процесом у магнітній системі АТ. Але цей термін не є однозначним, оскільки всі типи ферорезонансу як явища нелінійної динаміки характеризуються перш за все траєкторіями перехідного процесу на фазовій площині між

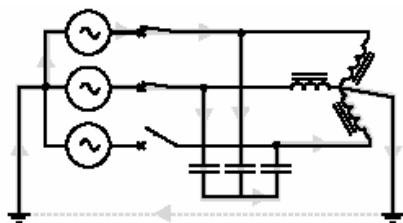


Рис. 6

різними станами. Необхідно враховувати вплив на процеси наявності обмотки низької напруги, яка з'єднана трикутником і має трансформаторний зв'язок з обмоткою високої напруги. Напруги на робочих фазах А та В первинної обмотки викликають появу у двох відповідних фазах вторинної обмотки ЕРС, векторна сума яких прикладена до фази С і визначає ЕРС живлення ферорезонансного процесу в коливному колі.

Залежність рівня перенапруг при комутації ненавантаженого АТ від моменту його включення дає змогу використовувати пристрої керуваної комутації (ПКК) для обмеження гармонічних резонансних перенапруг. Застосування ПКК дає змогу якщо не попередити появу цих видів перенапруг, то забезпечити

Якщо ПКК відсутній, то кут включення вимикача є випадковою величиною, що обумовлює невизначеність початкових умов, а значить, і можливих великих відхилень кратностей перенапруг. Це є наслідком хаотичного характеру процесів у ферорезонансному колі, що утворюється при неповнофазному включенні. Дослідження на імітаційній моделі показали, що мінімальні кратності перенапруги будуть, коли кути включення робочих фаз близькі за значеннями. Максимальні кратності перенапруг спостерігаються в тих випадках, коли різниця між кутами включення вимикачів робочих фаз близька до 180° , а значення напруги близькі до амплітудних. Ці результати можна пояснити особливостями протікання взаємопов'язаних процесів у обмотках високої та низької напруг АТ при неповнофазному включенні. Вони практично гарантують появу в ЕМ необхідних та достатніх умов розвитку ферорезонансу.

Розмикання обмотки, яка з'єднана трикутником, позбавляє живлення коливний контур, що утворюється при неповнофазному включенні АТ, і тому може застосовуватись як засіб запобігання ферорезонансним процесам. Але, як відомо, з'єднання обмотки трикутником забезпечує фільтрацію гармонічних складових, кратних трьом, що поширені в ЕМ. Крім того при короткому замиканні сили, які викликані струмами в трикутнику, зменшують динамічні навантаження на первинну обмотку АТ. Тому на практиці розмикання обмотки низької напруги використовується рідко. Більш доцільним є зниження добротності коливного контура шляхом підключення в обмотку низької напруги резистора. Як показав аналіз результатів моделювання, значення такого опору має становити від 0,2 до 0,7 Ом залежно від параметрів елементів заступної схеми електропередачі. Точне значення обирається за конкретними умовами експлуатації. Для демпфірування коливань можуть бути застосовані також резистори в елегазових вимикачах, які до виконання комутації підключаються у відповідне коло, але їх значення має бути узгоджено з умовами зменшення аперіодичної складової струму короткого замикання.

Висновки. 1. Резонансні перенапруги в системах електропередачі надвисокої напруги не можуть бути обмежені за допомогою використання універсальних засобів боротьби з комутаційними перенапругами, такими як розрядники та ОПН. Порівняно велика тривалість існування такого класу перенапруг вимагає дослідження та розробки спеціальних заходів, спрямованих на ліквідацію конкретної небезпеки. Зокрема, це стосується підключення до ЛЕП ненавантаженого АТ.

2. Під час проектування електропередачі надвисокої напруги при наявності небезпеки появи резонансних перенапруг у результаті підключення ненавантаженого АТ, їх кратність можна зменшити зміною геометричних параметрів фази лінії електропередачі. Але запобігання перенапругам за допомогою цього заходу залежить від конкретних умов і не завжди може бути реалізовано.

3. Доведено, що кут вмикання вимикача суттєво впливає на значення перенапруг при підключенні ненавантаженого АТ. Показано, що для діапазону довжин ліній 750 кВ, які є потенційно небезпечні з точки зору виникнення резонансних перенапруг, існують оптимальні діапазони кутів включення вимикача, що дають змогу не тільки знизити рівні резонансних перенапруг, а й запобігти їх виникненню. Тому застосування ПКК є дієвим засобом боротьби з перенапругами при нормальних комутаціях.

4. Неповнофазне підключення АТ до ЛЕП може призвести до розвитку ферорезонансного процесу, який на відміну від лінійного резонансу виникає в більш широкому діапазоні зміни параметрів ЛЕП та становить головним чином небезпеку термічного руйнування обмоток АТ.

5. Результати моделювання показують, що відповідними налагодженнями ПКК і в цьому випадку можна зменшити кратність перенапруг до безпечного рівня, але залишається небезпека надструмів у обмотках АТ.

6. Розглянуто заходи попередження ферорезонансних процесів шляхом розмикання трикутника обмотки низької напруги АТ або включення в розріз трикутника резистора. Хоча перший метод є більш ефективним, проте другий має пріоритет за умовами режиму системи електропередачі.

1. 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.
2. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю., Мельничук В.А. Вплив явища гістерезису на виникнення нетрадиційних ферорезонансних процесів у електричних мережах // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 40. – С. 34–38.
3. Либкінд М.С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. – М.: АН СССР, 1962. – 102 с.
4. Тугай І.Ю. Визначення наявності умов виникнення ферорезонансного процесу в електричних мережах високої напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 9–12.
5. Тугай Ю.І., Бесараб О.Б. Моделювання ферорезонансу в трансформаторах напруги з урахуванням ефекту старіння сталі // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 62–64.
6. Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Пляшко Р.В. Дослідження впливу параметрів ЛЕП НВН на аномальні перенапруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 37. – С. 17–21.
7. Тугай Ю.І., Мельничук В.А. Перехідні процеси в розподільчих пристроях електростанцій з елегазовими вимикачами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 5–8.
8. Шполянський О.Г. Параметри наближених ліній 750 кВ та характеристики їх вхідного опору в паузі однофазного автоматичного повторного включення // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 40. – С. 39–44.
9. *Controlled Switching, Buyer's & Application Guide*, Edition 4. – ABB AB. – 2013. – 54 p.
10. *Ferracci P. Ferroresonance // Cahier technique. Schneider Electric.* – Paris, 1998. – No. 190. – P. 1–28.

УДК 621.311.13

В.Г. Кузнецов, чл.- корр. НАН України, **Ю.І. Тугай**, докт. техн. наук, **О.Г. Шполянський**, канд. техн. наук, **І.Ю. Тугай**, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський**, магістр, **В.А. Мельничук**, магістр
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

Ограничение резонансных перенапряжений при подключении к линии ненагруженного автотрансформатора

Представлены основные результаты новых научных исследований, направленных на развитие методов анализа аномальных режимов в магистральных электрических сетях для ограничения резонансных перенапряжений, которые проводились в отделе оптимизации систем электроснабжения ИЭД НАН Украины в 2014 году. Проведены исследования по определению влияния геометрических характеристик линии электропередачи 750 кВ и угла включения выключателя на уровни резонансных перенапряжений при подключении ненагруженного автотрансформатора. Разработана имитационная модель электропередачи, которая учитывает распределенные параметры линии и нелинейные характеристики магнитопровода автотрансформатора. Проведена серия расчетов уровней перенапряжений для различных значений среднегеометрических расстояний между фазами и проводами одной фазы. Показано, что при проектировании электропередачи сверхвысокого напряжения кратность ожидаемых перенапряжений может быть уменьшена путем изменения расположения фаз линии в пространстве. Исследовано влияние на значение перенапряжений угла включения выключателя. Для линий 750 кВ различной длины получены значения углов включения выключателей, позволяющие предупредить появление опасных перенапряжений при подключении ненагруженных автотрансформаторов. Выполнены исследования условий возникновения феррорезонансных процессов при неполнофазном включении автотрансформатора, рассмотрены меры по их предупреждению и ограничению. Библи. 10, рис. 6, таблица.

Ключевые слова: резонансные перенапряжения, управляемая коммутация, подключение ненагруженного автотрансформатора, феррорезонансный процесс.

V.G. Kuznetsov, Y.I. Tugai, O.G. Shpolianskyi, I.Y. Tugai, V.V. Kuchanskyi, V.A. Melnychuk

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

The limitation of resonance overvoltage under unloaded autotransformer energising

The results of new scientific research that were obtained in the department of power supply systems optimization IED NAS of Ukraine in 2014 year are presented. The influence of geometrical parameters of EHV overhead transmission lines and phase angle of switch opening on resonance overvoltage level under unloaded autotransformer energizing was studied. Simulation model of EHV electric power transmission was developed. It includes the models of overhead transmission line with distributed parameters, shunt reactors, switchers, electrical power source and autotransformer with nonlinear characteristic of magnetic core. The calculations of overvoltage in autotransformers for the wide range of line length were performed. The results show overvoltage dependence on overhead line design and angle of switching. It can be reduced by changing geometric parameters of the line phase on EHV transmission lines design depending on the specific conditions. For reduction overvoltage the optimal switching angle can be chosen. The conditions for the ferroresonance processes occurrence under unloaded autotransformer energizing, measures for their prevention and control are described too. References 10, figures 6, table.

Key words: resonance overvoltage controlled switching, unloaded autotransformer energising, ferroresonance process.

Надійшла 18.05.2015

Received 18.05.2015