

### **Информационно-программное обеспечение пофидерного анализа и оптимизации потерь электроэнергии в распределительных сетях с распределенным генерированием**

*Рассмотрены пути решения задачи пофидерного анализа потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях (РЭС) с использованием имеющегося информационного обеспечения. Показано, что несовершенство систем коммерческого и технического учета электроэнергии, изменения схем передачи электроэнергии, а также влияние распределенных источников электроэнергии (РИЭ) существенно затрудняют решение задачи. Предложены новый подход и программная реализация пофидерного анализа потерь электроэнергии для определения направлений повышения энергоэффективности РЭС, который заключается в параллельных расчетах и сопоставлении результатов пофидерного баланса электроэнергии и поэлементного определения потерь на основе единого информационного обеспечения. Библиограф. 3, рисунок, таблица.*

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети, распределенное генерирование, потери электроэнергии, пофидерный анализ, оптимизация, информационное обеспечение.

**V.V. Kulyk<sup>1</sup>, O.B. Burykin<sup>2</sup>, O.V. Globa<sup>3</sup>**

1, 2 – Vinnytsia National Technical University,

Khmelnitske shosse, 95, Vinnytsia, 21021, Ukraine

3 – Public Joint Stock Company "Vinnytsiaoblenergo",

Magistratska str., 2, Vinnytsia, 21000, Ukraine

### **Information software for the feeder-balance and optimization of electric power losses in distributive networks with local generation**

*The ways of solving the problem of the feeder-balance analysis of electric power losses in distribution electric networks (DEN) using the available information support are considered. Imperfection of the systems of commercial and technical metering of electric power, changes in the transmission patterns of electric power, as well as the effect of distributed electric power sources (DES) make it very difficult to solve the problem. A new approach and software implementation of the feeder analysis of electric power losses is proposed to determine the directions for increasing the energy efficiency of DEN. It consists in parallel calculations and comparison of the results of the feeder-balance electricity and the element-wise determination of losses on the basis of a single information support. References 3, figure, table.*

**Key words:** distribution electric networks, distributed generation, power losses, feeder-balance analysis, optimization, information support.

Надійшла 07.09.2017

Received 07.09.2017

УДК 621.315.1

## **КЕРОВАНА КОМУТАЦІЯ ЕЛЕГАЗОВИМИ ВИМИКАЧАМИ В МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

**В.В. Кучанський**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

*Представлено результати дослідження причин аварій лінійних елегазових вимикачів при комутаціях компенсованих ліній електропередач 750 кВ. Сформульовано рекомендації по запобіганню аваріям через тривале невідімкнення полюсом елегазового вимикача струму, що не переходить через нуль внаслідок наявності в ньому великої аперіодичної складової. Виконано аналіз аномальних режимів ліній електропередачі надвисокої напруги з різним ступенем компенсації зарядної потужності. Досліджено електромагнітні процеси в компенсованих лініях електропередачі залежно від моментів комутації. Виявлено моменти різкої зміни параметрів перехідних процесів під час комутації в лініях надвисокої напруги. Розглянуто заходи обмеження тривалості існування аперіодичної складової струму. Бібліограф. 5, рис. 2, табл. 3.*

**Ключові слова:** коротке замикання, трифазне автоматичне повторне ввімкнення, керована комутація, аперіодична складова струму.

**Загальна характеристика проблеми.** В 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. В порівнянні з повітряними

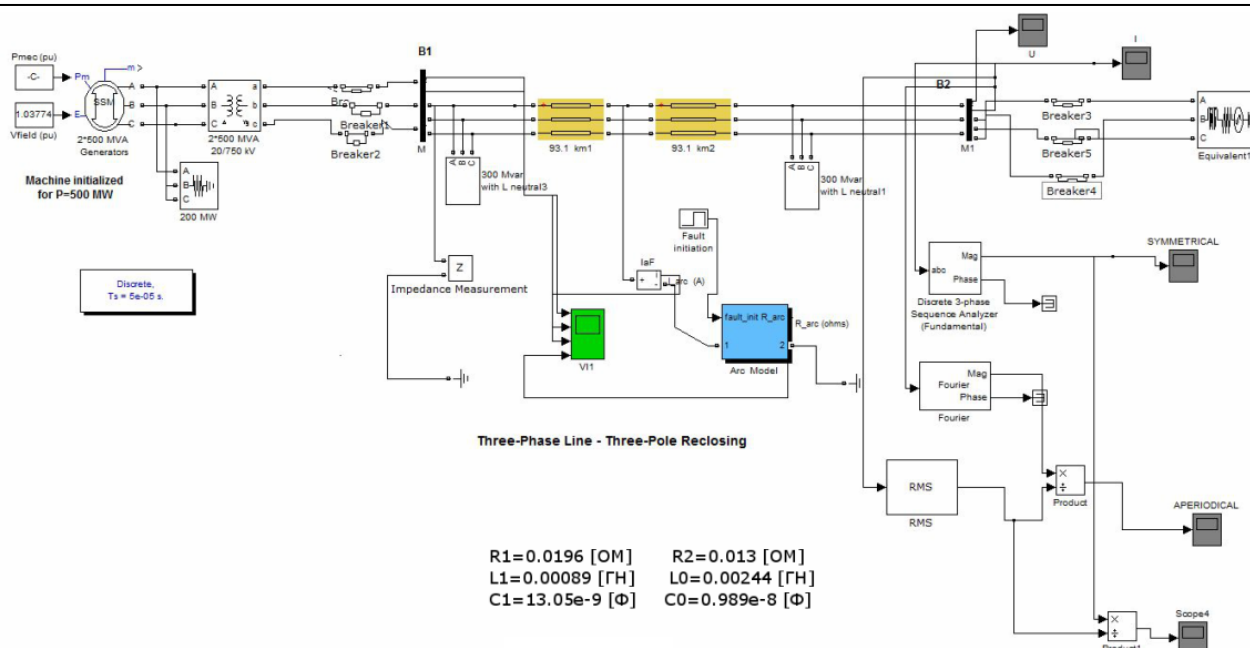


Рис. 1

вимикачами елегазові мають певні переваги, основними з яких є швидкодія та висока вимикаюча спроможність, а також можливість встановлення додаткового пристрою керованої комутації. Момент комутації елегазового вимикача є випадковою величиною і виконати розмикання чи замикання у необхідний момент неможливо без застосування керованої комутації. Такий недолік під час експлуатації призводив до аварійних ситуацій, у тому числі до появи аперіодичних складових у струмах електромагнітних перехідних процесів [2, 3]. Такий пристрій дає змогу виконувати комутації елегазового вимикача у заздалегідь визначений момент з метою зменшення негативних наслідків перехідних процесів.

Разом з позитивними якостями нових вимикачів енергосистеми з'явилися нові проблеми, в першу чергу аварії [3, 4]. Вирішальним фактором успішного відімкнення елегазових вимикачів на відміну від повітряних є перехід струму через нульове значення. Величина аперіодичної складової струму визначає момент переходу струму через нульове значення. Відповідно чим більша ця складова струму перехідного процесу, тим довше дуга горітиме у дугогасильній камері, що призведе до пошкодження полюса вимикача. Тривале горіння дуги в міжконтактному проміжку елегазового вимикача призводить до прогорання контактів, перегрівання дугогасного газу і екстремального підвищення тиску в камері. При відсутності клапана скидання тиску відбувається вибухове руйнування полюса вимикача з його пошкодженням.

Мета статті – дослідження умов появи неприпустимих величин та тривалості аперіодичної складової в струмі перехідного процесу для уникнення пошкодження полюсів елегазових вимикачів, а також виконання серії імітаційного моделювання для визначення ступеня впливу компенсації зарядної потужності, моментів комутації полюсів та опорів, що попередньо ввімкнені, на тривалість існування аперіодичної складової струму.

**Запропонований підхід до вирішення проблеми.** У статті розглядається цикл трифазного автоматичного повторного ввімкнення на лінії 750 кВ з встановленими двома групами шунтувальних реакторів та з величинами параметрів по прямій та зворотній послідовностях, що показані на рис. 1. Для дослідження електромагнітних комутаційних перехідних процесів була застосована імітаційна модель, яка розроблена в середовищі MATLAB/SIMULINK. Результати моделювання на моделі (рис. 1) були неодноразово верифіковані з осцилограмами інформаційно-діагностичного комплексу «РЕГНА» при дослідженні резонансних перенапруг у паузі одно- та трифазного автоматичного повторного ввімкнення [5].

До складу моделі входять підмоделі атомної електростанції, на якій встановлено два турбогенератори типу ТВГ-500-2, групи шунтувальних реакторів, повітряна лінія електропередачі, розбита на дві частини, для надання можливості моделювання короткого замикання в

будь-якій точці. Електроенергетична система моделюється трифазним джерелом живлення. До складу моделі також входить спеціальний блок визначення аперіодичної складової струму. На фазі А в моделі відбувається коротке замикання. 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.

На рис. 2 показано результати моделювання струму в фазі В під час трифазного автоматичного повторного ввімкнення. На рис. 2 а наведено струм в фазі В, а на рис. 2 б – графік зміни аперіодичної складової струму  $I_{ап}$ , пунктирною лінією позначено величину гранично допустимої аперіодичної складової струму, яка не повинна перевищувати 58 % відповідно до паспортних даних вимикача типу LTV 800E4. На момент часу 0,02 с відбувається коротке замикання, яке ліквідується за 0,08 с відповідно до технічного регламенту. Пауза трифазного повторного ввімкнення триває 0,53 с, після чого фази повітряної лінії вмикаються у момент часу 0,61 с. З рис. 2 б видно, що протягом часу від 0,61 до 0,7 с аперіодична складова струму перевищує граничну допустиму величину. Існування аперіодичної складової струму триває приблизно чотири з половиною періоди промислової частоти, і якщо в цей момент часу необхідно буде відімкнути фазу В, то відбудеться пошкодження полюсів вимикача з описаних вище причин.

Для зменшення тривалості існування аперіодичної складової може бути застосована керована комутація для комутації полюсів вимикача у необхідний момент синусоїди [3, 4]. Слід зазначити, що компанія ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) розробила пристрій керованої комутації Switchsync F236, призначений для автоматичних елегазових вимикачів з пополюсним 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 силового обладнання. Для випадку ввімкнення лінії у паспортних даних Switchsync F236 дає п'ять уставок, що наведені в табл. 1.

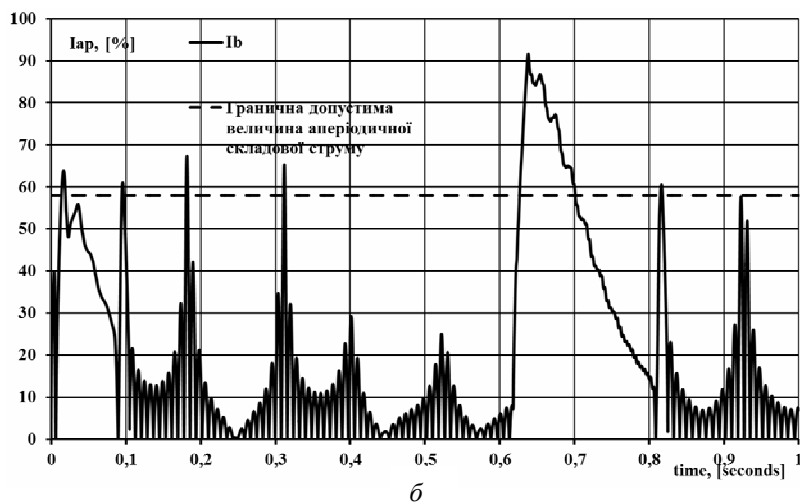
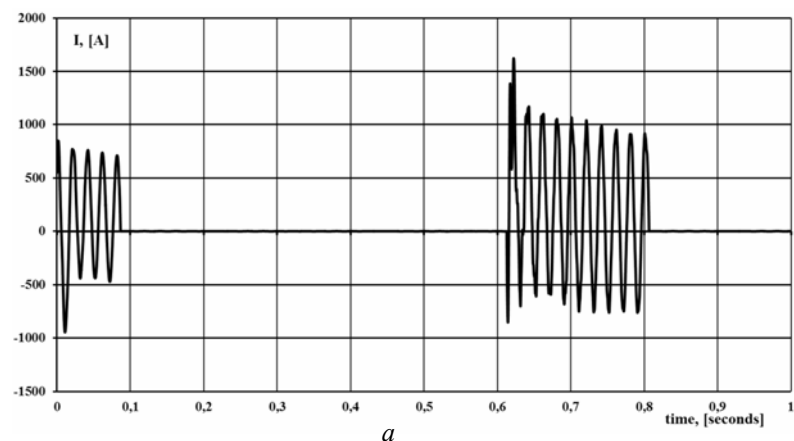


Рис. 2

Для більш чіткого сприйняття моменти комутації наведені в секундах та електричних градусах. Величини моменту комутації в електричних градусах дають змогу наочно побачити, наскільки момент близький до переходу через нульове значення. Результати моделювання (рис. 1) наведені у табл. 1 з вказаними уставками моментів комутації. Як видно з результатів моделювання, при вказаних уставках комутації аперіодична складова струму існує майже в кожній фазі протягом тривалого часу. Серії моделювання виконувались при короткому замиканні фази А, а відповідне позначення застосовувалось у всіх таблицях статті.

Одним із заходів зниження тривалості існування аперіодичної складової струму може бути зменшення ступеня компенсації зарядної потужності лінії шляхом відімкнення груп шунтувальних

реакторів. У табл. 2 розглянуто режими роботи з відімкненою групою шунтувальних реакторів на початку чи в кінці лінії.

**Таблиця 1.** Моменти ввімкнення вимикача при різних уставках пристрою керованої комутації та тривалість існування  $I_{ан}$  вище гранично допустимої величини 58 %

Уставки випадку	Моменти підключення фаз вимикача, ел. град.			Моменти підключення фаз вимикача, с			Тривалість існування $I_{ан}$ вище гранично допустимої величини 58 %, с		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	16,2	136,8	75,6	0,0009	0,0076	0,0042	0,0543	0,0733	0,0442
2	75,6	196,2	136,8	0,0042	0,0109	0,004766	0,0305	0,0744	0,0009
3	106,2	226,8	165,9	0,0059	0,0126	0,0092	0,00625	0,0489	0,0034

**Таблиця 2.** Тривалість існування  $I_{ан}$  вище гранично допустимої величини 58 % при різній кількості шунтувальних реакторів

Випадок	Тривалість існування $I_{ан}$ вище гранично допустимої величини 58 %, с					
	Відімкнення групи шунтувального реактора на початку лінії			Відімкнення групи шунтувального реактора в кінці лінії		
	А	В	С	А	В	С
1	0,0053	0,0311	0,047	0,0053	0,044	0,0467
2	0,0243	0	0,0066	0,0021	0,0264	0,0048
3	0,0449	0,0058	0	0,045	0	0,0044

Результати моделювання в табл. 2 показують, що відімкнення групи шунтувальних реакторів не призводить до зменшення тривалості існування аперіодичної складової, а в деяких випадках може навіть збільшити у порівнянні з нормальним режимом роботи, що наведені в табл. 1.

Одним з основних заходів зменшення негативного впливу комутаційних перехідних процесів поряд з керованою комутацією є активні опори, що попередньо вмикаються. Компанія АВВ (Asea Brown Boveri Ltd.) виготовляє активні опори, що попередньо вмикаються, з величинами від 100 до 400 Ом. Результати моделювання наведено у табл. 3. Як видно з результатів, наведених у табл. 3, не завжди активні опори, що попередньо вмикаються, знижують тривалість існування аперіодичної складової.

**Таблиця 3.** Тривалість існування  $I_{ан}$  вище гранично допустимої величини 58 % при застосуванні опору, що попередньо ввімкнено

Випадок	Тривалість існування $I_{ан}$ вище гранично допустимої величини 58 % при встановленні резистора, що попередньо ввімкнено, с											
	R, Ом											
	100			200			300			400		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	0	0,007	0,017	0	0,005	0,065	0	0,005	0,05	0	0,004	0,03
2	0	0	0	0	0	0,038	0	0	0,028	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

З наведених у табл. 3 результатів видно, що при моментах комутацій випадку 3 та при будь-якій величині активного опору, що попередньо ввімкнено, можливе зниження тривалості аперіодичної складової струму. Щоб рекомендувати ці уставки для пристрою керованої комутації та встановлення активного опору, що попередньо ввімкнено, з величиною від 100 до 400 Ом, зроблено додаткове моделювання режиму роботи лінії. Моделювання полягало в зміні величин параметрів лінії по прямій та зворотній послідовностях у широких межах з застосуванням моментів замикання випадку 3 та величинами активних опорів з табл. 3. Ре-

зультати моделювання тривалості існування аперіодичної складової, що перевищує гранично допустиму величину, були такі самі, як у випадку 3 з табл. 3.

**Висновки.** 1. При заміні на підстанціях 750 кВ повітряних вимикачів на нові елегазові виникають непередбачені аварійні ситуації невідімкнення перехідних струмів з великими аперіодичними складовими. В результаті проведених серій моделювань виявлено, що відімкнення однієї з двох груп шунтувальних реакторів не гарантує зменшення тривалості існування аперіодичної складової, а навпаки, призводить до збільшення. Таким чином, при зменшенні компенсації зарядної потужності ввімкнення будь-яким вимикачем ймовірність виникнення досить значної аперіодичної складової в перехідному струмі дуже велика.

2. З розглянутих трьох способів вирішити проблему невідімкнення перехідних струмів за наявності тривалої аперіодичної складової в фазах найкращим є спосіб з використанням вимикачів з резисторами, що попередньо ввімкнено, з відповідними уставками пристрою керованої комутації.

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. *Отключение токов в сетях высокого напряжения / Под ред. К. Рагаллера.* Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981.
3. *Kuznetsov V., Tugay Yu., Kuchansky V.* Investigation of transposition EHV transmission lines on abnormal overvoltages // Техн. електродинаміка. – 2013. – Vol. 6. – P. 51–56.
4. *Naumkin I., Balabin M., Lavrushenko N., Naumkin R.* Simulation of the 500 kV SF6 circuit breaker cutoff process during the unsuccessful three-phase autoreclosing // Proceedings of International Conference on power systems Transients, Kyoto, Japan, June 14-17, 2011. – P. 5–11.
5. *Naumkin I.* Crash when switching of gas insulated circuit breakers 500-1150 kV overhead line compensated // Electricity. – 2012. – Vol. 10. – P. 22–32.

УДК 621.315.1

**В.В. Кучанский**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

#### **Управляемая коммутация элегазовыми выключателями в магистральных электрических сетях**

*Представлены результаты исследования причин аварий линейных элегазовых выключателей при коммутации компенсированных воздушных линий 750 кВ. Сформулированы рекомендации по предотвращению аварий из-за длительного неотключения полюсом элегазового выключателя тока, который не переходит через нуль вследствие наличия в нем большой аперіодической составляющей. Выполнен анализ ненормальных режимов линий электропередачи сверхвысокого напряжения с разной степенью компенсации зарядной мощности. Исследованы электромагнитные процессы в компенсированных линиях электропередачи в зависимости от начальных условий в момент коммутации. Выявлены моменты резкого изменения параметров переходных процессов при коммутации в линиях сверхвысокого напряжения. Рассмотрены мероприятия для ограничения продолжительности существования аперіодической составляющей тока. Библ. 5, рис. 2, табл. 3.*

**Ключевые слова:** короткое замыкание, однофазное автоматическое повторное включение, управляемая коммутация, аперіодическая составляющая тока.

**V.V. Kuchanskyi**

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

#### **Controlled switching SF<sub>6</sub> breakers in the main power electrical grids**

*The results of research into the causes of accidents linear gas-insulated switches commutations in compensated 750 kV overhead lines. Recommendations for prevention accidents due to the ongoing unconnected pole of gas-insulated circuit breakers that do not pass through zero due to presence of a large aperiodic component are formulated. In the paper abnormal modes EHV transmission lines with varying degrees of compensation charging capacity are performed. Electromagnetic processes in compensated power lines, depending on the initial conditions at the time of switching are investigated. The points of abrupt change settings of transients while switching high voltage lines are identified. Measures for limiting the duration of the existence aperiodical component of current have been considered. References 5, figures 2, tables 3.*

**Key words:** resonance over-voltage, short circuit, single-phase automatic reclosing, managed switching, aperiodic component of current.

Надійшла 07.09.2017

Received 07.09.2017