

ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ШУНТУВАННЯ ФАЗ ДЛЯ ПОДАВЛЕННЯ ПОВТОРНОЇ ДУГИ В ПАУЗІ ОАПВ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

З метою збільшення надійності та ефективності роботи ліній електропередач надвисокої напруги застосовується однофазне автоматичне повторне включення при виникненні однофазного короткого замикання. Під час циклу спрацювання однофазного автоматичного повторного включення виникає повторна дуга, яка отримує підживлення від ємнісних зв'язків невідключених фаз лінії. В свою чергу, успішність спрацювання циклу однофазного повторного включення залежить від характеристик повторної дуги. Метою статті є розробка та застосування дієвого заходу подавлення повторної дуги у вигляді автоматичного шунтування відключеної фази. Для реалізації поставленої мети розроблено підхід визначення характеристик повторної дуги струму відключеної фази, що ґрунтується на матричному методі аналізу елементів лінії електропередач. Для оцінювання ступеня впливу автоматичного шунтування фази на аперіодичну складову струму дуги підживлення була зіставлена заступна схема відключеної пошкодженої фази. На основі розроблених підходів було доведено ефективність застосування автоматичного шунтування фази для підвищення ефективності експлуатації ліній електропередачі надвисокої напруги в неповнофазних режимах роботи.

Ключові слова: однофазне автоматичне повторне включення, автоматичне шунтування фаз, повторна дуга струму, шунтувальний реактор, компенсаційний реактор.

Вступ. Для успішного гасіння дуги підживлення в лініях електропередачі надвисокої напруги 750 кВ необхідне подавлення двох складових: електромагнітної та електростатичної. Електростатична складова дуги підживлення може бути потенційно знівельована компенсаційним реактором, який компенсує електростатичний зв'язок між відключеною фазою та фазами, які залишились в роботі. Застосування компенсаційного реактору є традиційним заходом подавлення дуги підживлення, що потребує розрахунків та підбору значень опору для конкретної ЛЕП НВН.

Для подавлення обох складових дуги підживлення розглядається в роботі автоматичне шунтування (АШФ) пошкодженої фази. Автоматичне шунтування фази в паузі однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) є заходом, що потребує застосування швидкодіючих вимикачів. Такий фактор обмежував застосування АШФ до теперішнього часу [2,6-8] в магістральних електричних мережах (МЕМ) через час виконання комутації повітряних вимикачів.

На сьогодні на підстанціях 750 кВ відбулась заміна повітряних вимикачів на елегазові [7]. Елегазові вимикачі в порівнянні з повітряними мають більшу швидкодію, що дозволить виконати АШФ з метою подавлення дуги підживлення змінного струму в паузі ОАПВ при виникненні однофазного дугового короткого замикання.

Тому проведення досліджень спрямованих на оцінювання впливу АШФ для успішного подавлення дуги підживлення в циклі спрацювання ОАПВ в сучасних умовах експлуатації МЕМ з встановленими елегазовими вимикачами є актуальною проблемою.

Метою статті є аналіз ефективності застосування автоматичного шунтування фаз для подавлення дуги підживлення в паузі ОАПВ.

Запропонований підхід до вирішення проблеми. Як показали дослідження, що наведені у [1,2,5-7], існують випадки коли КР не може подавити дугу підживлення в паузі ОАПВ. Дуга підживлення має дві складові:

$$I_{\text{дуги}} = I_{\text{дуги}}^C + I_{\text{дуги}}^L \quad (1)$$

Для гасіння вторинної дуги струму встановлюється КР з певним значенням опору, по методиці, що наведена в [8]. Ємнісний струм для ЛЕП НВН у випадку ідеальної схеми транспозиції проводів [1] визначається наступним виразом:

$$\begin{bmatrix} I_{Aa} \\ I_{Ab} \\ I_{Ac} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} 0 & C_M & C_M \\ C_M & 0 & C_M \\ C_M & C_M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

В роботі розглядається випадок, коли на фазі А відбулось КЗ, та, відповідно, вимикачі пошкоджені фази знаходяться у відімкненому стані. Використовуючи вираз (1), ми можемо розрахувати ємнісний струм фази А, який отримує підживлення від двох непошкоджених фаз:

$$I_{Ac} = j\omega |C_M| (V_B + V_C) \quad (3)$$

З виразу (2) видно, що значення струму залежить від міжфазної ємності C_M . Слід зазначити, що ЛЕП НВН мають велике значення міжфазної ємності, та, відповідно, цикл спрацювання ОАПВ не завжди буває успішним при таких умовах.

Головною метою КР є створення такого резонансного контуру, в якому міжфазний індуктивний струм, що генерується шунтувальними реакторами (ШР) з встановленим КР повинен мати таке саме значення, як і струм, що спричинений міжфазними ємностями. В такому випадку еквівалентний струм реактора:

$$\begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{I0}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & X_{II}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & X_{I2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

де $X_{II}^{-1} = X_{I2}^{-1}$ провідність шунтувального реактора прямої послідовності. $X_{I0}^{-1} = (X_{II} + 3X_n)^{-1}$ провідність шунтувального реактора (ШР) нульової послідовності.

Вирішуючи (2), ми отримаємо фазні індуктивні струми

$$\begin{bmatrix} I_{AL} \\ I_{BL} \\ I_{CL} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \alpha_s & \beta_m & \beta_m \\ \beta_m & \alpha_s & \beta_m \\ \beta_m & \beta_m & \alpha_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

де $\alpha_s = (X_{I0}^{-1} + 2X_{II}^{-1})/3$ діагональні елементи матриці ШР; $\beta_m = (X_{I0}^{-1} - X_{II}^{-1})/3$ недіагональні елементи.

У випадку виникнення КЗ індуктивний струм ШР визначається:

$$I_{AL} = -j\beta_m (V_B + V_C) \quad (6)$$

Для того, щоб сума векторів ємнісних та індуктивних струмів дорівнювала нулю $\overline{I_{AC}} + \overline{I_{AL}} = 0$ для ЛЕП НВН необхідно, щоб індуктивна провідність дорівнювала ємнісній міжфазній провідності: $(X_{I0}^{-1} - X_{II}^{-1})/3 = \omega C_M$ у випадку встановлення КР.

Струм підживлення дуги буде дорівнювати сумі електромагнітної та ємнісної складової:

$$I_{dugi} = j(V_B + V_C)(\omega |C_M| - \beta_m) \quad (7)$$

У той же час в процесі динамічного переходу режиму ЛЕП НВН в цикл спрацювання ОАПВ відбувається збільшення кута між ЕРС прилеглих систем, і, відповідно в струмі дуги підживлення визначальною стає електромагнітна складова. При кутах між ЕРС прилеглих систем в діапазоні $\delta_0 \div \delta_0 + 40^\circ$ (δ_0 - кут між ЕРС в нормальному режимі), повний струм підживлення досягає значень 70-90 А. Згідно дослідним даним [2] при таких струмах підживлення тривалість паузи ОАПВ повинна становити 1,8-3,0 с, а при струмах, що перевищують 90 А, успішне гасіння дуги стає малоімовірним.

При однофазному дуговому короткому замиканні в ЛЕП НВН вимикачі відключають струм короткого замикання з обох сторін пошкодженої фази. Після відключення струму короткого замикання вторинна дуга протікає в місці короткого замикання, що спричинена електростатичною складовою від невідключених фаз. У цьому випадку, якщо взаємозв'язок між фазами великий, вторинна дуга не буде гаситися протягом циклу спрацювання ОАПВ перед повторним включенням вимикачів.

Завданням АШФ (рис.1) є зниження електростатичної, а також електромагнітної складових струму підживлення з тим, щоб забезпечити успішне ОАПВ [3,4]. В результаті роботи АШФ відбувається відключення вимикачів Q_1^{III}, Q_2^{III} при якому забезпечується гасіння повторної дуги, оскільки опір заземлюючих елементів вимикачів менше, ніж у повторної дуги.

Використання високошвидкісних заземлюючих вимикачів (ВЗВ) забезпечує умову гасіння вторинної дуги шляхом заземлення відключеної фази з обох кінців. Після гасіння вторинної дуги після спрацювання АШФ відбувається пригасовування електромагнітної та електростатичної складової повторної дуги. Після операції відключення ВЗВ та успішного гасіння дуги відбувається відключення вимикачів Q_1^{III}, Q_2^{III} та включення вимикачів Q_A пошкодженої фази А фази.

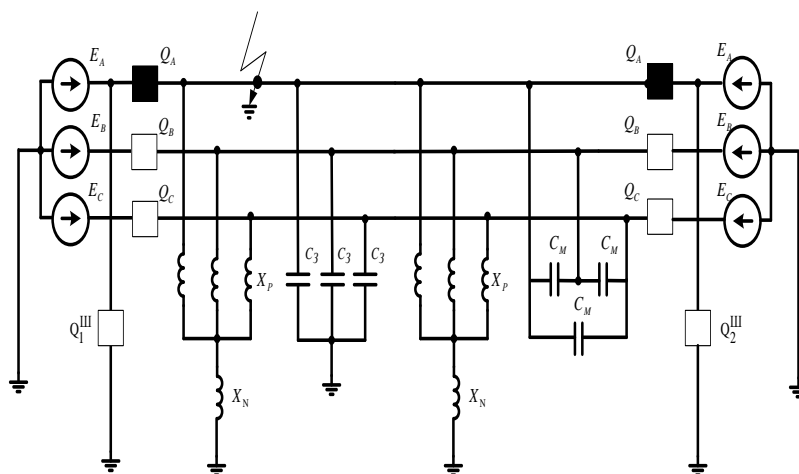


Рисунок 1 – Автоматичне шунтування фази в паузі ОАПВ

У роботі розглядається випадок неправильного вибору опору КР, який призводить до неуспішного циклу спрацювання ОАПВ внаслідок негасіння повторної дуги (Рис.2-4). На рис. 2 наведено струм дуги при дуговому короткому замиканні. На рис. 2 момент спрацювання ОАПВ відбувається в момент часу 0,075.

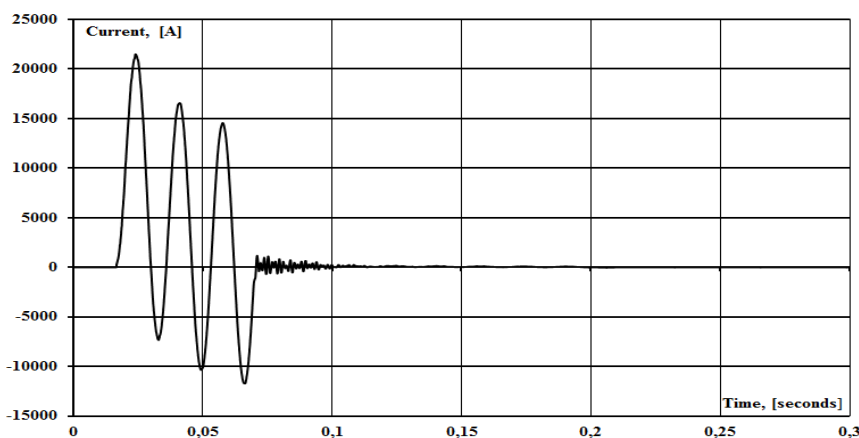


Рисунок 2 – Струм дуги при дуговому КЗ на ЛЕП НВН

Після того, як спрацює ОАПВ, струм повторної дуги буде отримувати підживлення від невідключених фаз, що наведена на рис.3. Значення струму повторної дуги перевищує гранично допустиме та призводить до неефективності застосування циклу спрацювання ОАПВ.

Опір повторної дуги в паузі ОАПВ наведено на рис.4 та описується наступним виразом:

$$R_{\text{дуги}} = R_0 e^{-k I_{\text{дуги}}} \quad (8)$$

Заступна схема заміщення під час здійснення ОАПВ наведена на рис. 5. На рис.5 $2C_M$ - міжфазна ємність невідключених фаз, C_E - ємність між фазою та землею відключеної фази. L_{SR} - індуктивність ШР, L_{CR} - індуктивність КР, R_Σ - сумарний активний опір відключеної фази.

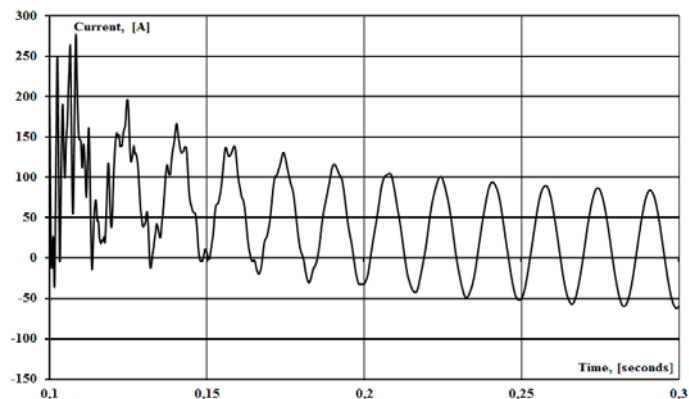


Рисунок 3 – Ефективність застосування АПФ для запобігання аномальних резонансних перенапруг

де $I_{\text{дуги}}$ діюче значення струму дуги (А), R_0, k параметри дуги.

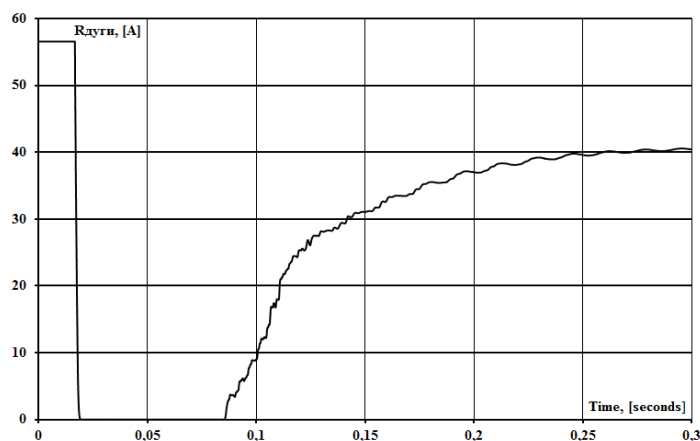


Рисунок 4 – Опір дуги при дуговому КЗ при невдалому циклі ОАПВ

Після вирішення диференціальних рівнянь [8] отримаємо вираз для миттєвого значення повторної дуги при здійсненні ОАПВ:

$$i_{\text{дуги}}(t) = \frac{U_{\text{дуги}}}{Z_{\text{дуги}}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{\text{дуги}}(0) e^{-t/T} \quad (9)$$

де $U_{\text{дуги}}$ - напруга дуги; $R_{\text{дуги}}$ - опір дуги, ω - кутова швидкість; T - постійна часу затухання схеми (рис.5), $i_{\text{дуги}}(0)$ - початкове значення струму дуги; α - кут між горизонталлю та вектором напруги $U_{\text{дуги}}$; φ_k - аргумент опору дуги.

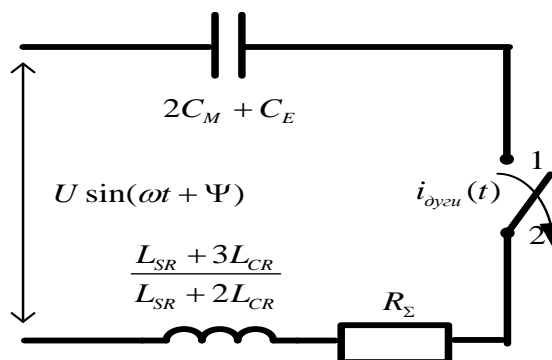


Рисунок 5 – Заступна схема заміщення відключеної фази при ОАПВ

При застосуванні АШФ виконується закорочування фази, при якому постійна часу стає рівною нулю $T = 0$. Підставляючи в аперіодичну складову дуги струму (5) $T = 0$ отримаємо $e^{-t/0} = e^{-\infty} = 0$. Тим самим аперіодична складова дуги струму, яка перешкоджає затуханню (6) стає рівною нулю. На рис. 6 та 7 наведено струм та опір дуги підживлення при здійсненні АШФ в момент часу 0.2. Як видно з рис. 6 та 7 при АШФ повторна дуга ефективно гаситься.

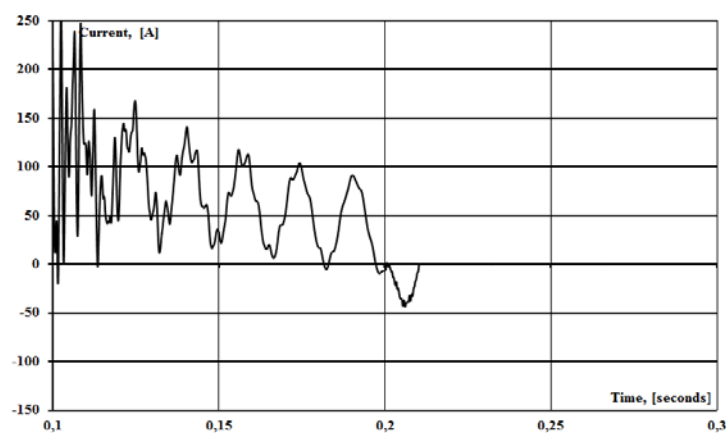


Рисунок 6 – Ефективність застосування АШФ для запобігання тривалому існуванню повторної дуги

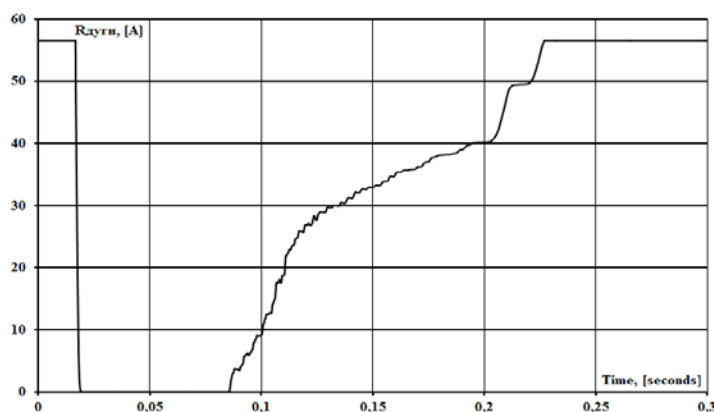


Рисунок 7 – Ефективність застосування АШФ для запобігання тривалого існування дуги підживлення зі значеннями, що перевищують гранично допустимі

При однофазному короткому замиканні в лініях надвисокої напруги після відключення фази з обох сторін вимикачами вторинна дуга, яка спричинена електростатичною та електромагнітною складовою невідключених фаз, може тривалий час існувати на місці короткого замикання.

Одним з можливих способів усунення вторинної дуги є використання автоматичного шунтування фаз, яке здатне під час здійснення циклу ОАПВ виконати подавлення аперіодичної та синусоїдальної компоненти повторної дуги струму.

Список використаної літератури

1. Т. Н. Krasyl'nykova Comparative Analysis of Ways of Transient Single Line to Ground Fault Removal on EHV and UHV Transmission Untransposed Lines / T. H. Krasyl'nykova, S. H. Dzhononaeв // *Elektrychestvo*. - 2017. - № 11. - P. 22-29
2. Y. Tugay.. The resonance overvoltages in EHV network. Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Poland, Lodz, September 15-17, 2009 – pp. 14–18.
3. R.M., Hasibar Legate A.C., Brunke J., Peterson W.G. - The Application of High-Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500 kV Power Systems IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.PAS-100, No.4, April 1981. - P.1512-1515.
4. C. H. Kim and S. P. Ahn, “The simulation of high speed grounding switches for the rapid secondary arc extinction on 765 kV transmission lines,” in Proc. of the Int’l Conf. on Power Systems Transients, Hungary, pp. 173–178, June 1999.
5. I. M. Dudurych, T.J. Gallagher, E. Rosolowski, “Arc Effect on Single-Phase Reclosing Time of a UHV Power Transmission Line”, IEEE Trans. Power Delivery, vol 19, no. 2, pp. 854-860, April 2004.
6. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchanskyy Investigation of transposition EHV transmission lines on abnormal overvoltages. Technical electrodynamics, 2013, Vol.6, pp.51–56.
7. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchanskyy Influence of corona discharge on the internal overvoltages in highway electrical networks. Technical electrodynamics, 2017, Vol.6, pp.55–60.
8. V.V. Kuchanskyy Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymetric Modes // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)– p.122-125.

References

1. T. H Krasyl'nykova.Comparative Analysis of Ways of Transient Single Line to Ground Fault Removal on EHV and UHV Transmission Untransposed Lines / T. H. Krasyl'nykova, S. H. Dzhononaeв // *Elektrychestvo*. - 2017. - № 11. - P. 22-29
2. Y. Tugay. The resonance overvoltages in EHV network. Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Poland, Lodz, September 15-17, 2009 – pp. 14–18.
3. R.M., Hasibar Legate A.C., Brunke J., Peterson W.G. - The Application of High-Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500 kV Power Systems IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.PAS-100, No.4, April 1981. - P.1512-1515.
4. C. H. Kim and S. P. Ahn, “The simulation of high speed grounding switches for the rapid secondary arc extinction on 765 kV transmission lines,” in Proc. of the Int’l Conf. on Power Systems Transients, Hungary, pp. 173–178, June 1999.
5. I. M. Dudurych, T.J. Gallagher, E. Rosolowski, “Arc Effect on Single-Phase Reclosing Time of a UHV Power Transmission Line”, IEEE Trans. Power Delivery, vol 19, no. 2, pp. 854-860, April 2004.
6. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchanskyy Investigation of transposition EHV transmission lines on abnormal overvoltages. Technical electrodynamics, 2013, Vol.6, pp.51–56.
7. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchanskyy Influence of corona discharge on the internal overvoltages in highway electrical networks. Technical electrodynamics, 2017, Vol.6, pp.55–60.
8. V.V Kuchanskyy. Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymetric Modes // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)– p.122-125.

УДК 621.315.1

В. В. Кучанский, с.н.с., к.т.н., ORCID 0000-0002-8648-7942
Институт электродинамики НАН Украины

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ШУНТИРОВАНИЯ ФАЗ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПОВТОРНОЙ ДУГИ В ПАУЗАХ ОАПВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

С целью увеличения надежности и эффективности работы линий электропередач сверхвысокого напряжения применяется однофазное автоматическое повторное включение при возникновении однофазного короткого замыкания. Во время цикла срабатывания однофазного автоматического повторного включения возникает повторная дуга, которая получает подпитку от емкостных связей неотключенных фаз линии. В свою очередь, успешность срабатывания цикла однофазного повторного включения зависит от характеристик повторной дуги. Целью статьи является разработка и применение эффективного мероприятия подавления повторной дуги в виде автоматического шунтирования отключенной фазы. Для реализации поставленной цели разработан подход определения характеристик повторной дуги тока отключенной фазы, основанный на матричном методе анализа элементов линии электропередач. Для оценки степени влияния автоматического шунтирования фазы на апериодическую составляющую тока дуги подпитки была сопоставлена схемы замещения отключенной поврежденной фазы. На основе разработанных подходов была доказана эффективность применения автоматического шунтирования фазы для повышения эффективности эксплуатации линий электропередачи сверхвысокого напряжения в неполнофазных режимах работы.

Ключевые слова: однофазное автоматическое повторное включение, автоматическое шунтирование фаз, повторная дуга, шунтирующий реактор, компенсационный реактор.

V. Kuchansky, SRF., Cand. Sc. (Eng.) ORCID 0000-0002-8648-7942
Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine

APPLICATION OF AUTOMATIC PHASE SHUNTING FOR SUPPRESSION OF THE SECONDARY ARC IN PAUSE PAIRS OF EXTRA HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES

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. In order to increase the reliability and efficiency of extra-high voltage power lines, a single-phase automatic reclose is applied when a single-phase short circuit occurs. During the operation cycle of a single-phase automatic reclose, a secondary arc arises, which receives supplying from the capacitive connections of the unconnected phases of the line. In turn, the success of a single-phase reclosing cycle depends on the characteristics of the secondary arc. The aim of the article is the development and application of an effective measure of suppressing a secondary arc in the form of automatic shunting of the disconnected phase. To achieve this goal, an approach has been developed to determine the characteristics of the repeated arc of the current of the disconnected phase, based on the matrix method of analysis of power line elements. To assess the degree of influence of automatic phase shunting on the aperiodic component of the charge arc current, the equivalent circuit of the disconnected damaged phase was compared. Based on the developed approaches, the effectiveness of the use of automatic phase shunting to increase the efficiency of operation of extra-high voltage power lines in o-phase operation modes was proved.

Key words: single-phase automatic reclose, automatic phase shunting, secondary arc, shunt reactor, compensation reactor.

Надійшла 15.05.2019
Received 15.05.2019