

УДК 621.314.222.8

М.В. Базилевич, І.О. Сабадаш
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних мереж та систем

БИТТЯ ФАЗНИХ НАПРУГ У МЕРЕЖІ З КОМПЕНСОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

© Базилевич М.В., Сабадаш І.О., 2003

Описано явище биття фазних напруг у мережі з компенсованою нейтраллю. Досліджено умови виникнення та існування биття. Визначено рівень перенапруг під час биття.

This paper is describe the phase voltages beating which is apper in inductive-grounded star-point network. The conditions of origin and existance were determined. The overvoltage level durig beating was determined.

Постановка проблеми

Мережі 6, 10 і 35 кВ в Україні експлуатуються з компенсованою нейтраллю у випадку, якщо струм замикання на землю перевищує 30 А, 20 А і 10 А відповідно. Під час перехідних процесів у мережі з компенсованою нейтраллю фазні напруги змінюються за законом, зумовленим накладанням на основну частоту 50 Гц менших частот в діапазоні 3–12 Гц.

Аналіз останніх досліджень

Такі коливання описані в літературі як биття [1]. Биття – це коливний процес, що є результатом накладання двох синусоїдальних коливань з однаковими амплітудами і близькими, але не рівними частотами. У літературі [2, 4] виникнення биття фазних напруг не описане.

Задачі дослідження

Враховуючи широке використання мереж з компенсованою нейтраллю і недостатність інформації про биття в електричній мережі 6, 10 і 35 кВ, заслуговують уваги дослідження умов виникнення, існування та згасання биття фазних напруг. Також бажано оцінити рівень перенапруг під час цього явища.

Виклад основного матеріалу.

Для досліджень використовувався програмний комплекс «RE» [3]. Змодельовано мережу 10 кВ з компенсованою нейтраллю (рис. 1).

Під час моделювання враховувались поздовжні та поперечні параметри ліній. Самі ж лінії моделювались ланцюгово сполученими П-коміроками. У трансформаторі 110/10 кВ і в трансформаторі напруги НТМИ-10 враховувались індуктивності розсіювання, активні опори первинної та вторинної обмоток, нелінійність характеристики намагнічення осердя. До виводу нейтралі вторинної обмотки трансформатора під'єднано котушку компенсації струмів замикання на землю. Досліджувались три режими роботи мережі: довгочасне глухе замикання на землю, нормальна робота і дугове замикання на землю з відновленням електричної міцності ізоляції. В цих режимах досліджувався вплив степеня компенсації ємнісного струму, місця встановлення компенсаційної котушки – нейтраль силового трансформатора чи нейтраль окремого трансформатора. У цих математичних експериментах також досліджувався вплив

параметрів окремих елементів на протікання перехідних процесів. Результати моделювання показані на рис. 2.

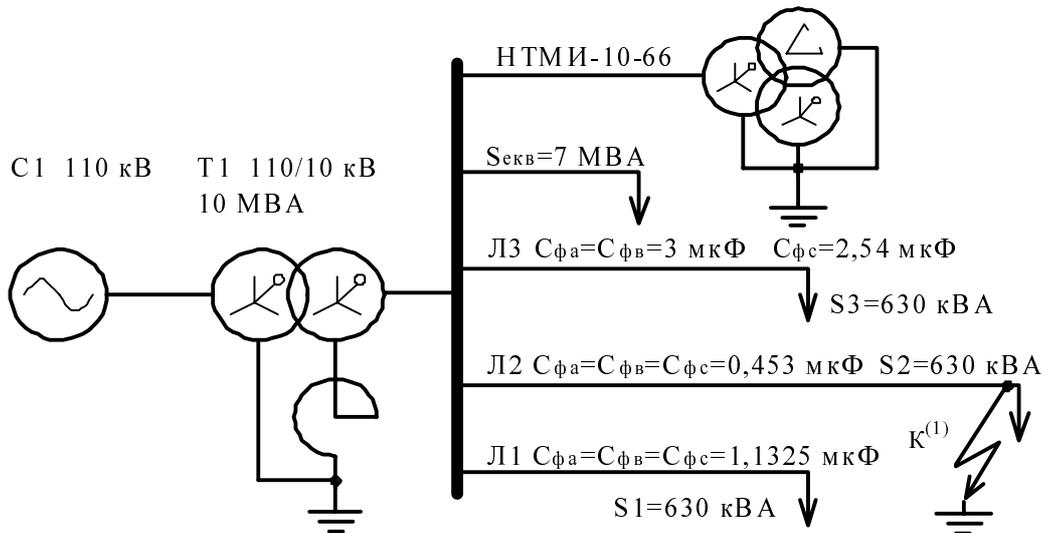


Рис.1. Схема мережі з компенсацією струмів замикання на землю

Було встановлено, що биття виникають в мережі з компенсованою нейтраллю. Биття виникають тільки після погасання дуги або відімкнення пошкодженої лінії. Для електричної мережі фізичний зміст биття фазних напруг – це процес накладання вільної складової напруги нульової послідовності U_0 на вимушені значення фазних ЕРС. Під час цього процесу фазні ємності ліній та котушка компенсації струмів замикання на землю утворюють для вільних складових напруги U_0 замкнутий контур

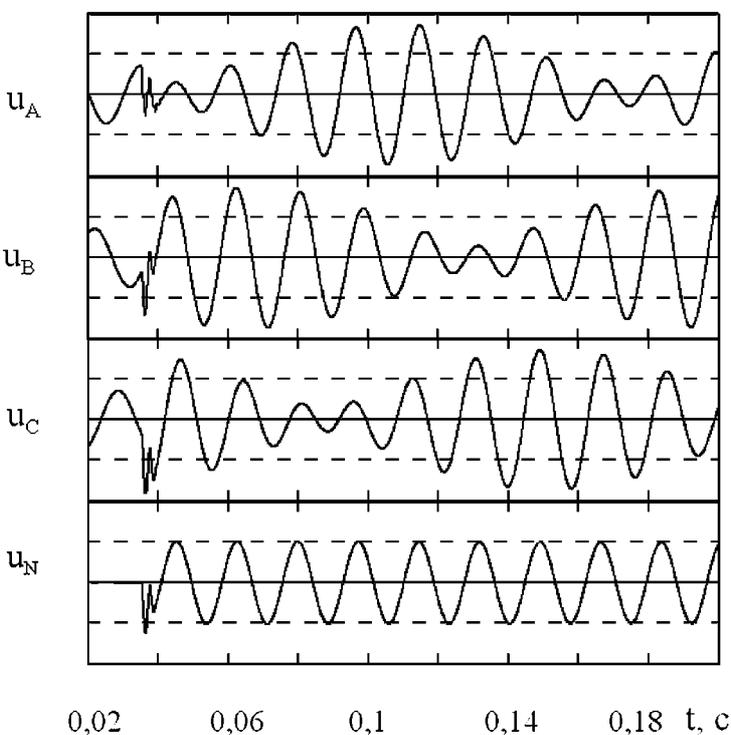


Рис. 2. Фазні напруги u_A , u_B , u_C та напруга зміщення нейтралі u_N під час ліквідації дугового замикання. Час – у с, лінії сітки проведені через 12500 В

(через обмотки трансформатора), в якому відбувається постійний обмін енергією між фазними ємностями мережі і котушкою. Втрати енергії в цьому контурі прямо пропорційно залежать від поздовжніх параметрів ліній, параметрів вторинної обмотки трансформатора, активного опору компенсуючої котушки і обернено пропорційно від опору ізоляції. Враховуючи малі втрати енергії в цьому контурі, биття можуть тривати досить довго.

Поздовжні параметри ліній та параметри вторинної обмотки трансформатора не впливають на процес виникнення биття. Вони впливають тільки на швидкість затухання процесу. Наявність чи відсутність трансформатора напруги не впливає на виникнення биття – великий опір його первинної обмотки зашунтовано

малим опором котушки компенсації. Навантаження трансформатора впливає на швидкість затухання коливань. Биття існують тоді, коли опір ізоляції більший від деякого критичного значення, інакше в замкнутому контурі є великі втрати енергії і перехідний процес буде швидкозатухаючим.

Моделювання показало, що фазні напруги фаз А, В, С складається з чотирьох складових, що накладаються:

$$\begin{aligned} u_{\phi A} &= e_A + u_{NC} + u_{NR} + u_{Nvil} \\ u_{\phi B} &= e_B + u_{NC} + u_{NR} + u_{Nvil} \\ u_{\phi C} &= e_C + u_{NC} + u_{NR} + u_{Nvil} \end{aligned} \quad (1)$$

де $u_{\phi A}$, $u_{\phi B}$, $u_{\phi C}$ – миттєві значення фазних напруг, В; e_A , e_B , e_C – миттєві значення фазних ЕРС, В; u_{NC} – миттєві значення вимушеної складової напруги нейтралі, зумовленої несиметрією фазних ємностей мережі, В; u_{NR} – миттєві значення вимушеної складової напруги нейтралі, спричиненої несиметрією опорів ізоляції відносно землі, В; u_{Nvil} – миттєві значення вільної складової напруги нульової послідовності, В.

Три складові – e_A , u_{NC} і u_{NR} змінюються за синусоїдним законом із частотою 50 Гц. Тому результатом їх накладання буде синусоїда із частотою 50 Гц, з амплітудою і початковою фазою, що визначаються амплітудами та початковими фазами всіх цих складових. Четверта складова – u_{Nvil} – змінюється по синусоїді із частотою, відмінною від 50 Гц. Тому не можна розрахувати результат накладання цих чотирьох складових символічним методом. Для спрощення завдання розділимо фазну напругу на дві складові – вимушену і вільну. Параметри вимушеної складової будемо знаходити символічним методом, параметри вільної складової знайдемо операторним методом, а результат знайдемо як суму миттєвих значень цих складових.

Вимушені складові фазних напруг зображені формулою

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{\phi A} &= \dot{E}_A + \dot{U}_{NC} + \dot{U}_{NR} \\ \dot{U}'_{\phi B} &= \dot{E}_B + \dot{U}_{NC} + \dot{U}_{NR} \\ \dot{U}'_{\phi C} &= \dot{E}_C + \dot{U}_{NC} + \dot{U}_{NR} \end{aligned} \quad (2)$$

де $\dot{U}'_{\phi A}$, $\dot{U}'_{\phi B}$, $\dot{U}'_{\phi C}$ – діючі значення вимушеної складової фазних напруг, В; \dot{E}_A , \dot{E}_B , \dot{E}_C – діючі значення фазних ЕРС, В; \dot{U}_{NC} – діюче значення вимушеної складової напруги нейтралі, зумовленої несиметрією фазних ємностей мережі, В; \dot{U}_{NR} – діюче значення вимушеної складової напруги нейтралі, спричиненої несиметрією опорів ізоляції відносно землі, В.

Діючі значення фазних ЕРС подамо у вигляді:

$$\dot{E}_A = \frac{E_0}{\sqrt{3}}; \quad \dot{E}_B = \frac{E_0}{\sqrt{3}} \cdot e^{j120^\circ}; \quad \dot{E}_C = \frac{E_0}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j120^\circ} \quad (3)$$

де E_0 – лінійна ЕРС, В.

Напруга нейтралі U_N визначається за формулою [4]:

$$U_N = \frac{\dot{E}_A \cdot (j \cdot \omega \cdot C_A + Y_A) + \dot{E}_B \cdot (j \cdot \omega \cdot C_B + Y_B) + \dot{E}_C \cdot (j \cdot \omega \cdot C_C + Y_C)}{j \cdot \omega \cdot C_A + Y_A + j \cdot \omega \cdot C_B + Y_B + j \cdot \omega \cdot C_C + Y_C + \frac{1}{R_K + j \cdot \omega \cdot L_K}} \quad (4)$$

де C_A, C_B, C_C – ємності фаз А, В, С відносно землі, Ф; Y_A, Y_B, Y_C – активна провідність ізоляції фаз А, В, С відносно землі, См; L_K – індуктивність компенсаційної котушки, Гн; R_K – активний опір обмотки компенсаційної котушки, Ом.

Цю формулу можна спростити, врахувавши (3), і розбити на дві частини. Одна частина залежить від несиметрії фазних ємностей, а інша – від несиметрії провідностей:

$$\dot{U}_{NC} = -\frac{E_{Л}}{\sqrt{3}} \frac{\left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \omega \cdot (C_B - C_C) + j \cdot \omega \cdot (C_A - 0,5 \cdot C_B - 0,5 \cdot C_C) \right] \cdot (R_K + j \cdot \omega \cdot L_K)}{j \cdot \omega \cdot (C_A + C_B + C_C) \cdot (R_K + j \cdot \omega \cdot L_K) + (Y_A + Y_B + Y_C) \cdot (R_K + j \cdot \omega \cdot L_K) + 1}; \quad (5)$$

$$\dot{U}_{NR} = -\frac{E_{Л}}{\sqrt{3}} \frac{\left[(Y_A - 0,5 \cdot Y_B - 0,5 \cdot Y_C) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (Y_C - Y_B) \right] \cdot (R_K + j \cdot \omega \cdot L_K)}{j \cdot \omega \cdot (C_A + C_B + C_C) \cdot (R_K + j \cdot \omega \cdot L_K) + (Y_A + Y_B + Y_C) \cdot (R_K + j \cdot \omega \cdot L_K) + 1}. \quad (6)$$

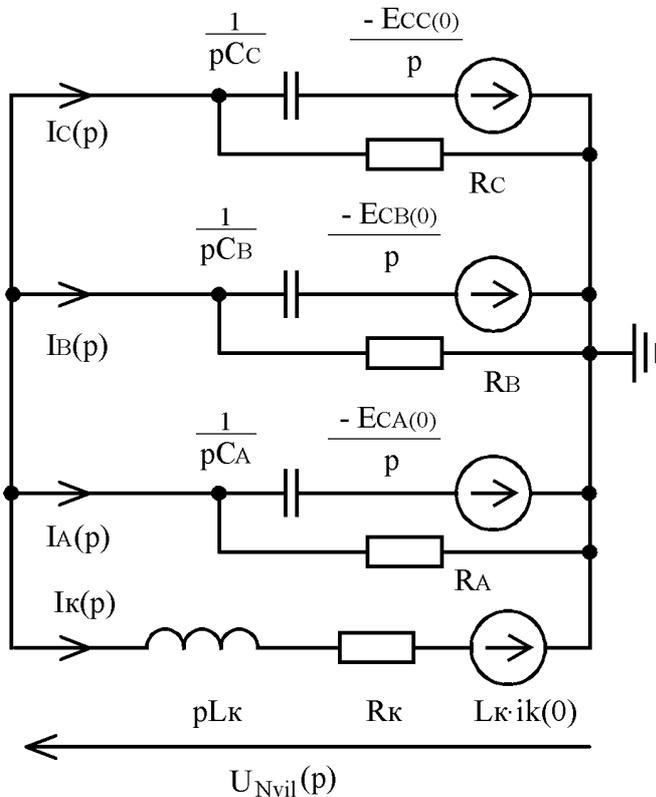


Рис. 3. Заступна схема мережі для вільних складових напруги U_{Nvtil} після погасання дуги

$$U_{Nvtil}(p) = -\frac{p \cdot C_A \cdot \frac{-E_{CA}(0)}{p} + p \cdot C_B \cdot \frac{-E_{CB}(0)}{p} + p \cdot C_C \cdot \frac{-E_{CC}(0)}{p} + \frac{L_K \cdot i_K(0)}{R_K + p \cdot L_K}}{p \cdot (C_A + C_B + C_C) + Y_A + Y_B + Y_C + \frac{1}{R_K + p \cdot L_K}} \quad (7)$$

де $E_{CA}(0), E_{CB}(0), E_{CC}(0)$ – напруги на фазних ємностях лінії в нульовий момент часу, В; $L_K \cdot i_K(0)$ – напруга на котушці в нульовий момент часу, В; Y_A, Y_B, Y_C – активні провідності ізоляції мережі, См. Тут нульовим моментом часу буде момент погасання дуги.

За формулами (2), (3), (5), (6) можна знайти вимушену складову фазної напруги. Ці формули справедливі як для доаварійного режиму, так і для аварійного і післяаварійних режимів. Але у формули слід підставляти параметри для кожного з цих режимів.

На основі аналізу впливу різних елементів на параметри биття, було складено заступну схему для вільних складових напруги зміщення нейтралі в післяаварійний період (рис. 3). Заступна схема складена для використання операторного методу розрахунку перехідного процесу. Операторний метод дозволяє простіше встановити залежність характеру перехідного процесу від параметрів елементів мережі.

Зображення вільної складової напруги зміщення нейтралі U_{Nvtil} описується формулою

Після спрощення, зведенням доданків при однакових степенях p і врахуванням того, що $R_K \cdot (Y_A + Y_B + Y_C) \ll 1$ отримаємо

$$U_{Nvil}(p) = \frac{(C_A \cdot E_{CA}(0) + C_B \cdot E_{CB}(0) + C_C \cdot E_{CC}(0)) \cdot (R_K + p \cdot L_K) + L_K \cdot i_K(0)}{p^2 \cdot (C_A + C_B + C_C) \cdot L_K + p \cdot [(Y_A + Y_B + Y_C) \cdot L_K + (C_A + C_B + C_C) \cdot R_K] + 1}. \quad (8)$$

Зображення вільної складової можна представити сумою двох доданків:

$$U_{Nkan} = \frac{Am}{\frac{1}{\omega_{sys}^2} \cdot p^2 + \frac{2 \cdot \beta}{\omega_{sys}} \cdot p + 1} + \frac{p \cdot Am_2}{\frac{1}{\omega_{sys}^2} \cdot p^2 + \frac{2 \cdot \beta}{\omega_{sys}} \cdot p + 1}, \quad (9)$$

де ω_{sys} – кутова частота власних коливань мережі (системи), рад^{-1} ; β – коефіцієнт згасання, безрозмірний; Am , Am_2 – початкові амплітуди коливань, які залежать тільки від початкових умов і від початкових умов та параметрів перехідного процесу відповідно, В; U_{Nkan} – зображення вихідного сигналу ланки другого порядку, приведене до канонічної форми, В.

Чисельники цих рівнянь формують амплітуди двох вільної складової, а знаменник визначає характер перехідного процесу. Ці рівняння є диференціальними рівняннями другого порядку в операторному вигляді. Порівнявши рівняння (8) і (9) за методом неозначених коефіцієнтів, можемо знайти параметри ω_{sys} і β , які визначають характер перехідного процесу. Частоту власних коливань системи ω_{sys} і коефіцієнт згасання β визначають за формулами:

$$\omega_{sys} = \frac{1}{\sqrt{L_K \cdot (C_A + C_B + C_C)}}; \quad (10)$$

$$\beta = \frac{R_K \cdot (C_A + C_B + C_C) + L_K \cdot (Y_A + Y_B + Y_C)}{2 \cdot \sqrt{L_K \cdot (C_A + C_B + C_C)}} \quad (11)$$

Оригіналом $u_{Nvil}(t)$ буде згасаюче синусоїдальне коливання

$$u_{Nvil}(t) = \exp(-\delta \cdot t) \cdot [(AMP1 \cdot kud1 - AMP2 \cdot kud2) \cdot \sin(\omega_{vil} \cdot t) + AMP2 \cdot kud3 \cdot \cos(\omega_{vil} \cdot t)], \quad (12)$$

де δ – постійна часу перехідного процесу, с^{-1} ; $AMP1$, $AMP2$ – початкові амплітуди двох вільних складових, В; ω_{vil} – частота вільних коливань перехідного процесу, рад^{-1} ; $kud1$, $kud2$ – ударні коефіцієнти для першої та другої складової, безрозмірні. Можемо визначити залежність параметрів перехідного процесу від параметрів мережі, використовуючи рівняння (9)–(12). Постійна часу δ показує, як довго триває перехідний процес в мережі (як швидко втрачається енергія вільних коливань). Чим постійна часу більша, тим довше триває перехідний процес (до $3 \cdot \delta$ с):

$$\delta = \beta \cdot \omega = \frac{R_K}{2 \cdot L_K} + \frac{Y_A + Y_B + Y_C}{2 \cdot (C_A + C_B + C_C)}; \quad (13)$$

(14)

вираз $\sqrt{1-\beta^2}$ можна назвати "коефіцієнтом вкорочення частоти" (по аналогії з коефіцієнтом вкорочення кабелю). Цей коефіцієнт показує, в скільки раз частота коливань перехідного процесу у системі із втратами менша від частоти власних коливань системи при умові, що перехідний процес має коливний характер ($\beta < 1$):

$$\sqrt{1-\beta^2} = \sqrt{1 - \frac{[R_K \cdot (C_A + C_B + C_C) + L_K \cdot (Y_A + Y_B + Y_C)]^2}{4 \cdot L_K \cdot (C_A + C_B + C_C)}} \quad (15)$$

Ударні коефіцієнти kud1 і kud2 показують як залежить амплітуда вільних складових від параметрів мережі (при тих самих початкових амплітудах):

$$\begin{aligned} \text{kud1} &= \frac{\omega_{\text{sys}}}{\sqrt{1-\beta^2}} = \\ &= \frac{2}{\sqrt{4 \cdot L_K \cdot (C_A + C_B + C_C) - [R_K \cdot (C_A + C_B + C_C) + L_K \cdot (Y_A + Y_B + Y_C)]^2}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{kud2} &= \omega_{\text{sys}}^2 \cdot \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1}{L_K \cdot (C_A + C_B + C_C)} \cdot \\ &\cdot \frac{R_K \cdot (C_A + C_B + C_C) + L_K \cdot (Y_A + Y_B + Y_C)}{\sqrt{4 \cdot L_K \cdot (C_A + C_B + C_C) - [R_K \cdot (C_A + C_B + C_C) + L_K \cdot (Y_A + Y_B + Y_C)]^2}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{kud3} = \omega_{\text{sys}}^2 = \frac{1}{L_K \cdot (C_A + C_B + C_C)} \quad (18)$$

Початкові амплітуди визначаєм з формули:

$$\text{AMP1} = R_K \cdot (C_A \cdot E_{CA}(0) + C_B \cdot E_{CB}(0) + C_C \cdot E_{CC}(0)) + L_K \cdot i_K(0) \quad (19)$$

$$\text{AMP2} = L_K \cdot (C_A \cdot E_{CA}(0) + C_B \cdot E_{CB}(0) + C_C \cdot E_{CC}(0))$$

Необхідно встановити умови виникнення биття та оцінити рівень перенапруг. В літературі [1] вказується що умовою виникнення биття є рівність амплітуд і приблизно однакові частоти двох синусоїдальних коливань. Було проведено дослідження які дозволили конкретизувати ці вимоги. Перша умова виникнення биття: необхідно, щоб відношення амплітуд вільної складової напруги нейтралі і вимушеної складової фазної напруги лежало в межах 300–30 %. Інакше в результуючому коливанні домінуючими будуть коливання однієї частоти – тієї в якій амплітуда більша, і явища биття не буде.

Частота биття завжди нижча за найменшу частоту своїх складових, тому щоб можна було спостерігати хоч би одне коливання частоти нижчої ніж 50 Гц необхідно, щоб частота биття була меншою 25 Гц. З літератури [1] частота биття

$$\omega_b = \frac{\omega_{\text{vil}} - \omega'}{2}, \quad (20)$$

де ω' – кутова частота вимушених коливань, 314 рад/с. Тому другою умовою виникнення биття є $\omega_{\text{vil}} \leq 628,3$ рад/с. Це відповідає експлуатації мережі з компенсованою нейтраллю в режимі перекомпенсації (з будь якою перекомпенсацією) або в режимі недокомпенсації при

умові, що недокомпенсація є невеликою. Точніше це необхідно обчислити для конкретної мережі з врахуванням втрат.

Щоб виникли коливання необхідно, щоб корені знаменника були комплексними, тобто, щоб β було менше 1. Це є необхідною умовою, але не достатньою. Биття виникає на значно меншій частоті (20). Щоб вони існували хоч би період необхідно, щоб амплітуда вільних коливань не зменшувалась нижче ніж 30 % за період биття. Це є третьою умовою. тому необхідне β визначаєм з формули:

$$\beta < -\frac{\ln(0,3) \cdot \omega_b}{\omega_{vil}} = 0,261 \cdot \left(1 - \frac{\omega'}{\omega_{vil}}\right). \quad (21)$$

Ці три умови є "математичні". Четверта умова є "фізичною": необхідно, щоб дуга погасла і не запалювалась повторно під час перехідного процесу, який супроводжується перенапругами. Це як правило можливе тільки під час швидкого відключення пошкодженого приєднання.

Оцінити рівень перенапруг досить важко, бо вони залежать не тільки від параметрів мережі, але й від початкових умов. Тому перенапруги необхідно розраховувати для конкретної мережі. Але чітко встановлено, що рівень вільної складової не залежить від ємнісної несиметрії мережі і від несиметрії опорів фазної ізоляції.

Спробуємо оцінити перенапруги для типового режиму роботи мережі 10 кВ. Струм замикання на землю 30 А ($C_A=C_B=C_C=16,52$ мкФ); Перекомпенсація 5% ($L_K=0.195$ Гн); $R_K=1$ Ом; $Y_A=Y_B=Y_C=0,1$ мкСм. Дуга виникає на фазі А при максимумі фазної напруги і погасає через 3 мС. Перенапруга досягає значення 2,73 фазної напруги. При цьому слід відзначити такий факт: початкові значення напруги U_{Nvil} невеликі і не перевищують 20 В, але ударні коефіцієнти досягають значень $10^4 \div 10^6$.

Висновки

Явище биття можливі в мережі з компенсованою нейтраллю під час погасання дуги або відключення пошкодженого приєднання.

Тривалість биття фазних напруг залежить від втрат в мережі і умов, при яких відбулося погасання дуги і є тривалим процесом (до декількох секунд).

Перенапруги під час биття досягають 2,73 фазної напруги. Враховуючи тривалість биття, можна стверджувати, що такі тривалі перенапруги шкідливо впливають на роботу ізоляції обладнання.

Тривалість та величину перенапруг можна зменшити за рахунок вибору оптимальних співвідношень між параметрами електричної мережі та компенсувальної котушки.

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи: Учеб. для вузов. – М., 1978. – 528 с.
2. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Ф.А. Гиндуллин, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – М., 1989. – 192 с.
3. Равлик О., Гречин Т., Ивановьків В. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1997. – № 340 – С. 96–101.
4. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. – М., 1986. – 128 с.