

УДК 621.316.925

**В.П. КОБАЗЄВ** (канд.техн.наук, доц.)

Донецький національний технічний університет

c12@elf.dgtu.donetsk.ua

**АМПЛІТУДНІ ТА ФАЗОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЕНСОВАНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ОДНОФАЗНОМУ ЗАМИКАННІ НА ЗЕМЛЮ**

The correlation for determination of phase angles of zero sequence voltage and current and their difference in dependence of arc-quenching reactor tooling are received in the article. The estimation of influence of the isolation losses and resistances in shorting place on value of these angles is executed. It is shown most expediently to determine an arc-quenching reactor tooling on angle between current and voltage of zero sequence.

**Постановка задачі.** Забезпечення надійної роботи електричної мережі напругою 6, 10, 35 кВ з нейтраллю заземленою через дугогасній реактор (ДР) пов'язано, як відомо, з підтримкою його у режимі резонансної настройки. Реактор може настроюватися в резонанс з ємністю мережі в нормальному режимі і підстроюватися при однофазному замиканні на землю або настроюватися тільки при замиканні на землю, що характерно для сучасних ДР з підмагнічуванням. Для визначення ступеня настройки ДР в основному використовується фазовий принцип як найбільш простий і надійний. Він базується на використанні фазових властивостей мережі. Застосування цього принципу для настройки ДР у нормальному режимі достатньо добре досліджено [1, 2], а для настройки ДР при однофазному замиканні на землю ще є проблеми.

**Аналіз останніх досягнень.** В [3] розглянуто фазовий метод настройки ДР при замиканні на землю, який заснований на вимірюванні кута між напругою зсуву нейтралі  $U_{30}$  і фазною напругою  $U$  джерела живлення пошкодженої фази і кута між напругою  $U_{30}$  і напругою пошкодженої фази відносно землі або струму замикання на землю. Однак незроблена порівняльна оцінка ефективності цих варіантів вимірювання кута, що затрудняє їх використання в конкретних умовах.

**Задача досліджень.** Отримати співвідношення для розрахунку амплітудних і фазових характеристик компенсованої електричної мережі при замиканні фази на землю. Виконати аналіз впливу параметрів мережі на ці характеристики.

**Виклад основного матеріалу.** Схема заміщення компенсованої мережі при замиканні на землю через перехідний опір наведена на рис. 1. Параметри схеми прийнято зосередженими.

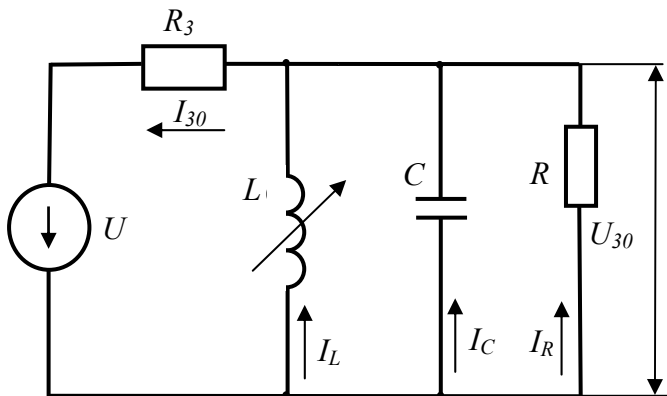


Рисунок 1 – Однофазна схема заміщення мережі при замиканні фази на землю

На рис. 1 прийнято наступні визначення:  $U$  – фазна напруга мережі,  $R_3$  – активний опір в місці пошкодження,  $L$  – індуктивність реактора,  $C$  – ємність мережі,  $R$  – активний опір мережі.

Для ділянки схеми з паралельно з'єднаними індуктивністю реактора  $L$  ємністю мережі  $C$  і активного опору  $R$ , маємо співвідношення для визначення опору контуру нульової послідовності:

$$\dot{Z}_{30} = \frac{RX_C X_L}{X_C X_L + j(X_L - X_C)R}, \quad (1)$$

де  $X_C$  – опір ємності мережі,  $X_L$  – опір реактора.

Для запису виразу (1) у відносних одиницях (в.о.) розглянемо вирази для знаходження ступеня настройки та добротності мережі. Відомо, що ступень  $\nu$  настроювання ДР і коефіцієнт  $d$  добротності мережі через опори  $X_L$ ,  $X_C$  і  $R$

визначається наступним чином:

$$\nu = \frac{I_C - I_L}{I_C} = \frac{X_L - X_C}{X_L}, \quad d = \frac{I_R}{I_C} = \frac{X_C}{R}. \quad (2)$$

Перетворимо вираз (1) для опору  $Z_{30}$  з врахуванням (2). Для цього спочатку чисельник і знаменник поділимо на  $X_L$  а потім на  $R$ :

$$\dot{Z}_{30} = \frac{RX_C}{X_C + j\nu R} = \frac{X_C}{d + j\nu}. \quad (3)$$

З врахуванням  $Z_{30}$  та опору  $R_3$  сумарний опір схеми на рис. 1 буде таким:

$$\dot{Z}_\Sigma = \frac{X_C}{d + jv} + R_3. \quad (4)$$

Для отримання остаточного співвідношення для  $Z_\Sigma$  проведемо наступний ряд проміжних перетворень.

Спочатку приведемо вираз (4) до загального знаменника. Потім винесемо в чисельнику  $X_C$  за скобки і замінимо відношення  $X_C/R_3$  на  $d_3$  (додатковий коефіцієнт добротності). В результаті отримаємо наступне:

$$\dot{Z}_\Sigma = \frac{X_C(d_3 + (d + jv))}{d_3(d + jv)}.$$

Якщо вектор фазної напруги  $U$  джерела живлення пошкодженої фази суміщено з віссю дійсних чисел, то струм замикання на землю, що тече крізь додатковий активний опір  $R_3$  буде наступний:

$$\dot{I}_{30} = \frac{U}{\dot{Z}_\Sigma} = \frac{U(d_3(d + jv))}{X_C(d_3 + d + jv)}.$$

Вираз  $\dot{U}/X_C$  визначає ємнісний струм мережі  $I_C$ . З врахуванням цього, вектор струму  $\dot{I}_{30}$  у відносних одиницях буде визначатися наступним співвідношенням:

$$\frac{\dot{I}_{30}}{I_C} = \frac{U(d_3(d + jv))}{X_C(d_3 + d + jv)} \frac{X_C}{U} = \frac{(d_3(d + jv))}{(d_3 + d + jv)}. \quad (5)$$

Позбавимося в (5) від комплексного числа в знаменнику шляхом помноження чисельника та знаменника на комплексно спряжене  $-(d_3 + d) - jv$  та проведемо ряд перетворень. Після виділення дійсної та мнимі частини маємо:

$$\frac{\dot{I}_{30}}{I_C} = \frac{d_3^2 d + d_3 d^2 + d_3 v^2}{(d_3 + d)^2 + v^2} + j \frac{v d_3^2}{(d_3 + d)^2 + v^2}. \quad (6)$$

Визначимо напругу зсуву нейтралі  $\dot{U}_{30}$  з врахуванням  $I_{30}$  та  $Z_{30}$ :

$$\dot{U}_{30} = \dot{I}_{30} Z_{30} = \frac{U(d_3(d + jv))}{X_C(d_3 + d + jv)} \frac{X_C}{d + jv}. \quad (7)$$

Після проведення ряду скорочень в (7) отримаємо наступний вираз для напруги зсуву нейтралі:

$$\dot{U}_{30} = \dot{I}_{30} \bar{Z}_{30} = \frac{U d_3}{(d_3 + d + jv)}.$$

Відношення напруги  $\dot{U}_{30}$  до  $U$  визначається наступним виразом:

$$\frac{\dot{U}_{30}}{U} = \frac{d_3}{(d_3 + d + jv)}. \quad (8)$$

Після виділення в (8) мнимі та дійсної частини маємо:

$$\frac{\dot{U}_{30}}{U} = \frac{d_3(d_3 + d)}{(d_3 + d)^2 + v^2} - j \frac{d_3 v}{(d_3 + d)^2 + v^2}. \quad (9)$$

З (6) та (9) отримаємо фазові характеристики відносного струму  $I_{30}$  та відносної напруги  $U_{30}$  від ступеня настройки компенсації  $\Delta v$ :

$$\varphi_I = \arctg \frac{v d_3^2}{d_3^2 d + d_3 d^2 + d_3 v^2} = \arctg \frac{v d_3}{d_3 d + d^2 + v^2}, \quad (10)$$

$$\varphi_U = \arctg - \frac{v d_3}{d_3(d_3 + d)} = \arctg - \frac{v}{d_3 + d}. \quad (11)$$

Визначимо кут між напругою  $\dot{U}_{30}$  та струмом  $\dot{I}_{30}$  враховуючи (10) та (12):

$$\varphi_3 = \varphi_I - \varphi_U = -\arctg \frac{v d_3}{d_3 d + d^2 + v^2} - \arctg \frac{v}{d_3 + d}.$$

Цей кут також можна отримати із співвідношення:

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \operatorname{tg}(\varphi_I - \varphi_U) = \frac{\operatorname{tg} \varphi_I - \operatorname{tg} \varphi_U}{1 + \operatorname{tg} \varphi_I \operatorname{tg} \varphi_U}. \quad (12)$$

Проведемо необхідні перетворення. Спочатку визначимо чисельник (в виразі для  $\operatorname{tg} \varphi_I$  прийнято  $d^2=0$ , тому що максимальне значення  $d=0,1$ ):

$$\operatorname{tg} \varphi_I - \operatorname{tg} \varphi_U = \frac{vd_3}{d(d_3+d)} + \frac{v}{d_3+d} = \frac{vd_3+vd}{d(d_3+d)}.$$

Після спрощення виразу у знаменнику маємо:

$$1 + \operatorname{tg} \varphi_I \cdot \operatorname{tg} \varphi_U = 1 + \frac{vd_3}{d(d_3+d)} \frac{-v}{d_3+d} = \frac{d(d_3+d)^2 - v^2 d_3}{d(d_3+d)^2}.$$

Поділимо чисельник на знаменник:

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{v(d_3+d)^2}{d(d_3+d)^2 - v^2 d_3}. \quad (13)$$

Для побудови амплітудної і фазових характеристик прийmemo, що до секції шин підстанції підключена кабельна мережа напругою 10 кВ з ємнісним струмом 30 А. Цьму струму відповідає ємнісний опір мережі 200 Ом. Значення коефіцієнтів добротності розраховується за співвідношеннями:

$$d = \frac{X_C}{R}, \quad d_3 = \frac{X_C}{R_3}$$

Значення коефіцієнтів добротності і відповідні значення активних опорів ізоляції та в місці замикання фази на землю наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів добротності

$I_C$ , А	$U_\phi$ , кВ	$X_C$ , Ом	$R_3$ , Ом	$d_3$ , в.о.	$R$ , кОм	$d$ , в.о.	$R$ , кОм
30	6	200	1	200	2	0.1	2
			2	100	2,5	0.08	2,5
			4	50	3	0.067	3
			5	40	3,5	0.057	3,5
			6	33.3	4	0.05	4

З табл. 2.1 витікає, що  $d$  на декілька порядків менше за  $d_3$ , отже не враховуючи в сумі  $d_3+d$  складову  $d$  вираз (13) можна спростити наступним чином:

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{vd_3^2}{dd_3^2 - v^2 d_3} = \operatorname{arctg} \frac{vd_3}{dd_3 - v^2} \quad (14)$$

В подальшому для побудови характеристики  $\varphi_3(v)$  використовується вираз (14).

На рис. 3 наведені амплітудні характеристики мережі в режимі замикання при різних значеннях коефіцієнтів  $d$  побудовані з використанням співвідношення (9).

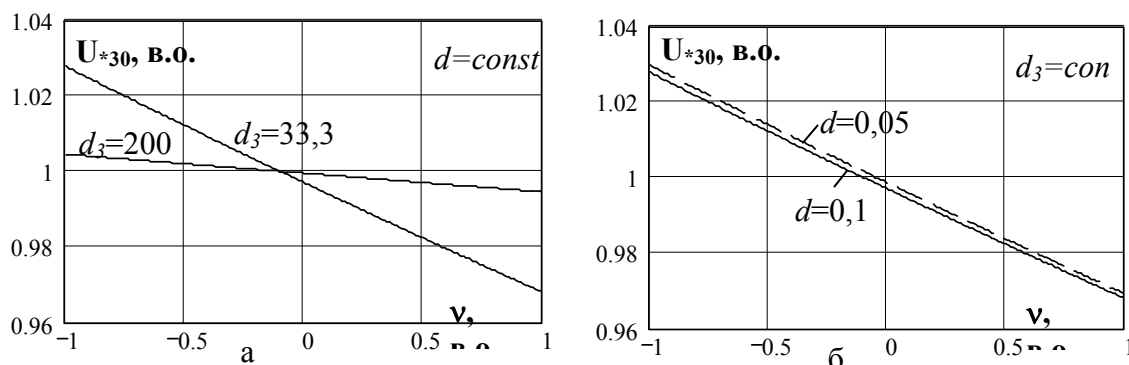


Рисунок 2 – Амплитудные характеристики: а –  $d = 0,1$  в.о. и б –  $d_3 = 33,3$  в.о.

Із рис. 2 витікає наступне. Відносна напруга зсуву нейтралі при зміні опорів у місці замикання на землю з 1 Ом до 6 Ом при зміні ступеня настроювання дугогасного реактора з -1 до +1 змінюється не більше ніж на  $\pm 3\%$  при  $d_3=33,3$  в.о. При  $d_3=200$  в.о. зміни напруги зсуву нейтралі мінімальні дорівнюють не більше ніж  $\pm 0,45\%$ . Крім того, слід зазначити, що зміна коефіцієнту добротності мережі  $d$  не впливає на амплітудну характеристику (рис. 2,б) і не має явно вираженого резонансу, як при нормальному режимі мережі. Таким чином, можна вважати, що напруга зсуву нейтралі при зміні настройки ДР практично не змінюється  $U_{30}=\text{const}$ .

На рис. 3 наведені фазові характеристики мережі при максимальних значеннях коефіцієнтів добротності  $d=0,1$  в.о. і  $d_3=200$  в.о. При побудові цих характеристик використовувалися аналітичні вирази (10), (11), і (12). Вираз (11) визначає кут між напругою зсуву нейтралі  $U_{30}$  і фазною напругою  $U$  джерела живлення пошкодженої фази від ступеня настройки ДР. Вираз (13) визначає кут між напругою  $U_{30}$  і напругою пошкодженої фази відносно землі або струму замикання на землю.

З рис.3 витікає, що при максимальних коефіцієнтах добротності при зміні ступеня  $\nu$  настроювання від -1 до +1 кут  $\varphi_U$  напруги зсуву нейтралі  $U_{30}$  змінюється у межах від  $0,29^\circ$  до  $+0,29^\circ$ , тобто цей кут практично не змінюється. Кут  $\varphi_I$  струму  $I_{30}$  або напруга пошкодженої фази відносно землі і кут  $\varphi_3$  між струмом  $I_{30}$  і напругою  $U_{30}$  змінюється суттєво. При зміні  $\nu$  від -1 до +1 відбувається такі зміни цих кутів  $-84^\circ \leq \varphi_I \leq +84^\circ$  і  $-84,4^\circ \leq \varphi_3 \leq +84,6^\circ$ .

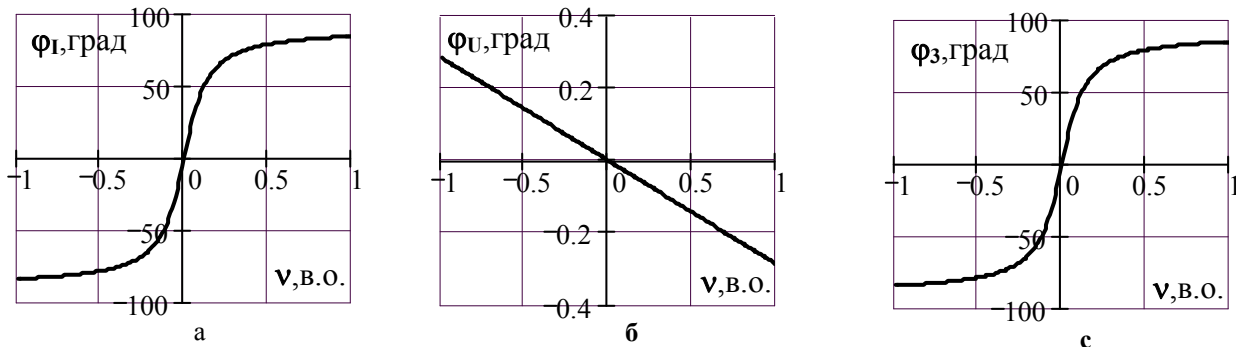


Рисунок 3- Фазові характеристики мережі при  $d=0,1$   $d_3=200$

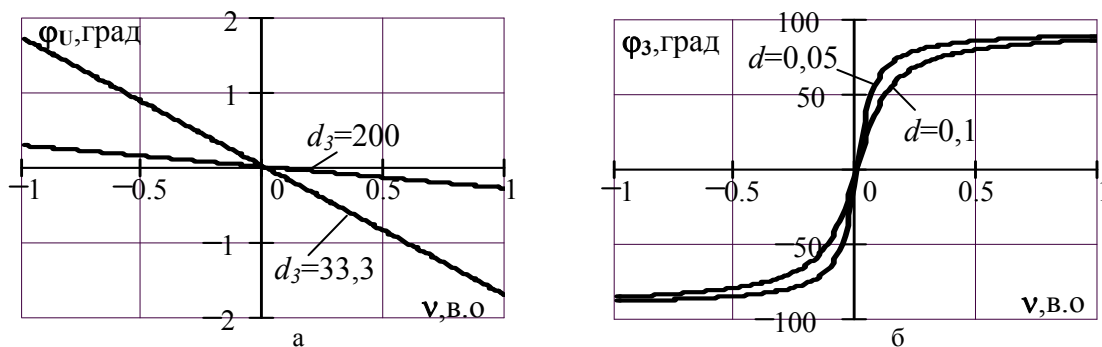


Рисунок 4- Фазові характеристики мережі: а – при зміні  $d_3$ , б – при зміні  $d$

На рис.4 наведено вплив на фазові характеристики  $\varphi_I(\nu)$  і  $\varphi_U(\nu)$  зміни коефіцієнтів добротності.

Був також проаналізований вплив коефіцієнтів добротності на фазову характеристику  $\varphi_I(\nu)$ . Зміна додаткового коефіцієнта добротності  $d_3$  з 33,3 до 200 не впливає на нахил характеристик  $\varphi_I(\nu)$  і  $\varphi_3(\nu)$ . Нахил цих характеристик залежить від коефіцієнта добротності мережі  $d$ . Зі зменшенням  $d$  з 0,1 до 0,05 при  $\nu=0,2$  відповідно маємо збільшення кута для  $\varphi_I(\nu)$  з  $63,09^\circ$  до  $75,68^\circ$  і для  $\varphi_3(\nu)$  (рис. 4,б) з  $63,71^\circ$  до  $76,29^\circ$ . Крутизна фазової характеристики  $\varphi_U$  (рис. 4,а) залежить від коефіцієнта  $d_3$ . При  $\nu=1$  зміна  $d_3$  з 200 до 33,3 викликає збільшення абсолютного значення цього кута з  $0,286^\circ$  до  $1,715^\circ$ .

Таким чином маємо, що на величину нахилу фазових характеристик впливають коефіцієнти добротності, але на кожну характеристику по-різному. Збільшення значення  $d$  незалежно від значення  $d_3$  приводить до зменшення нахилу фазових характеристик  $\varphi_I(\nu)$  і  $\varphi_U(\nu)$ , а збільшення коефіцієнту  $d_3$  незалежно від значення  $d$  викликає також зменшення нахилу характеристики  $\varphi_U$ .

#### Висновки.

Отримано співвідношення для розрахунку фазових компенсованої мережі в режимі однофазного замикання на землю.

На нахил фазових характеристик  $\varphi_I(\nu)$  і  $\varphi_U(\nu)$  впливає тільки коефіцієнт заспокоєння мережі.

Найбільш доцільно визначати ступень настроювання дугогасного реактора за кутом між напругою і струмом нульової послідовності.

## Список літератури

1 Обабков В.К. Синтез адаптивных систем управления резонансными объектами/Обабков В.К академия наук Украины. Институт прикладной математики и механики.-К.:Наукова думка, 1993.-254с.

2 Сирота И.М. Режимы нейтралы электрических сетей/ Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.-К.:Наукова думка, 1970.-172с.

3 Брызгин О.Р. Фазовый метод настройки компенсации в электрических сетях при замыкании фазы на землю/ Брызгин О.Р. В сб. "Проблемы технической электродинамики".-К.:Наукова думка,1970,-№26.-С. 19-23.

Надійшла до редколегії 16.04.2009

Рецензент: І.П. Заболотний

**В.П.КОБАЗЕВ**

Донецкий национальный технический университет

**Амплитудные и фазовые характеристики компенсированной сети при однофазном замыкании на землю.** В статье получены соотношения для определения фазовых углов напряжения и тока нулевой последовательности и их разности в зависимости от настройки дугогасящего реактора (ДР). Выполнена оценка влияния на величину этих углов потерь в изоляции сети и сопротивления в месте замыкания. Показано, что наиболее целесообразно определять настройку ДР по углу между током и напряжением нулевой последовательности.

**Фазовые углы, напряжение, ток, нулевая последовательность, однофазное замыкание**

**В.П.КОБАЗЕВ**

Донецкий национальный технический университет

**Амплитудні і фазові характеристики компенсованої мережі при однофазному замиканні на землю.** У статті отримані співвідношення для визначення фазових кутів напруги і струму нульової послідовності і їх різниці залежно від настройки дугогасного реактора (ДР). Виконана оцінка впливу на величину цих кутів втрат в ізоляції мережі і опору в місці замикання. Показано, що найдоцільніше визначати настройку ДР за кутом між струмом і напругою нульової послідовності.  
**Фазові кути, напруга, струм, нульова послідовність, однофазне замикання**