

УДК 62-83-52.003(082)

ВИЗНАЧЕННЯ ОЗНАК ОДНОФАЗНИХ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Закладний О.М. к.т.н., доцент НТУУ «КПІ», Закладний О.О. к.т.н., асистент НТУУ «КПІ», Броницький В.О., студент

Розглянуто різновидності однофазних коротких замикань асинхронних двигунів. Визначено їх основні ознаки та вплив на електропривод і мережу.

Ключові слова: асинхронний двигун, однофазне коротке замикання, аварійний режим.

Рассмотрены разновидности однофазных коротких замыканий асинхронных двигателей. Определены их основные признаки и влияние на электропривод и сеть.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, однофазное короткое замыкание, аварийный режим.

The varieties of one-phase short circuits of asynchronous engines are considered. Defined their main features and impact on electric and network.

Keywords: asynchronous motor, monophasе short circuit, emergency mode.

Автоматизована система діагностування рівня енергоефективності електромеханічних систем має визначати ознаки однофазних аварійних режимів електропривода з асинхронними двигунами (табл. 1).

Таблиця 1

Види струмових аварій асинхронного двигуна

Пошкодження	Різновидності	Електродвигун
Однофазні короткі замикання	Однофазне коротке замикання на землю	
	Однофазне коротке замикання на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
	Однофазне виткове коротке замикання	

Однофазні замикання на землю. Ушкодження ізоляції обмотки статора призводить до замикання фази на заземлений корпус асинхронного двигуна. Існує декілька причин, що викликають замикання на землю. Перша пов'язана з поступовим погіршенням ізоляції до пробою під дією напруги. Друга - пробій у результаті комутаційних перенапруг.

Однофазні замикання на землю залежно від способу заземлення нульової точки мережі протікають по-різному й для їх виявлення доцільне використання методу

симетричних складових.

Однофазні короткі замикання є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухозаземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Мережі із заземленою нейтраллю дозволяють, наприклад, при чотирипровідній системі, забезпечити живлення 380В для двигунів і 220В для освітлення. Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для асинхронного двигуна і є однофазним коротким замиканням, що характеризується протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних коротких замикань [6].

Векторні діаграми напруг і струмів мають наступні особливості: струми й напруги несиметричні й неврівноважені, що спричиняє появу складових прямої, зворотної і нульової послідовностей; ушкоджена фаза в місці короткого замикання набуває потенціалу землі. На рис. 1 наведено векторні діаграми струмів і напруг при однофазному короткому замиканню у мережах із глухозаземленою нейтраллю трансформатора [4].

Струм однофазних коротких замикань або замикань на корпус у мережах із заземленою нейтраллю можна визначити за спрощеною формулою:

$$I_{\text{к}}^{(1)} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \left(z_{\text{п}} + \frac{z_{\text{тр}}}{3} \right)},$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальна лінійна напруга мережі; $z_{\text{п}} = \sqrt{x_{\text{п}}^2 + r_{\text{п}}^2}$ – повний опір петлі фази й нульового проводу ($x_{\text{п}}$ приймається 0,6 Ом/км); $z_{\text{тр}}$ – повний опір силового трансформатора струму замикання на корпус.

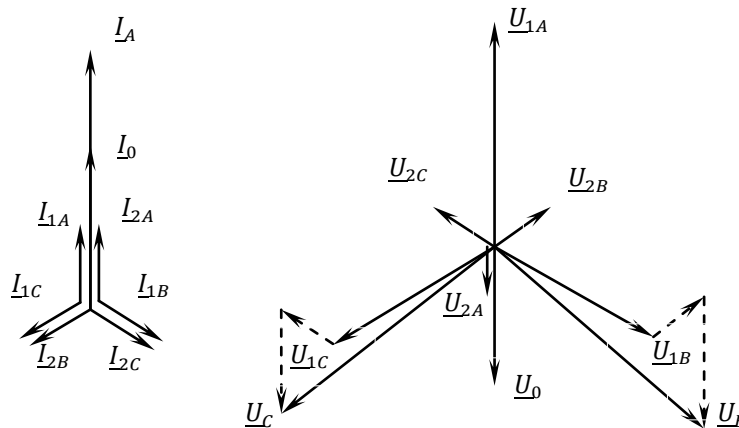


Рис. 1 Векторні діаграми струмів і напруг при однофазному КЗ у мережах із глухозаземленою нейтраллю трансформатора

Точне визначення струму $I_{\text{к}}$ можна зробити за методом симетричних складових. При однофазних КЗ $R_{\text{пА}} = 0$; $R_{\text{пВ}} = R_{\text{пС}} = \infty$. При цьому

$$\dot{U}_{\text{А}} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0; \dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0);$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \frac{z_{\text{С2}} z_{\text{Н2}}}{z_{\text{С2}} + z_{\text{Н2}}}; \dot{U}_0 = \dot{I}_2 z_{\text{С0}}.$$

При знаходженні повних струмів окремих фаз ураховується умова $R_{\text{пВ}} = R_{\text{пС}} = \infty$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = I_K; \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0.$$

У мережах з ізольованою нейтраллю однофазне замикання на землю безпосередньої небезпеки для АД й мережі не являють. Небезпека замикань полягає в тому, що вони можуть переходити в подвійні замикання на землю, а струми ушкодження можуть досягати значення струму двофазного короткого замикання [6].

Замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю не викликає короткого замикання, оскільки ЕРС ушкодженої фази не шунтується з'єднанням, що з'явилося, із землею й для струму ушкодження відсутнє замкнуте коло від місця ушкодження до нейтралі трансформатора. У цих мережах при замиканні однієї фази на землю через місце ушкодження будуть проходити лише ємнісні струми, обумовлені напругою мережі і ємністю її пошкоджених фаз. Виникаючий у місці ушкодження струм замикається через ємність проводів непошкоджених фаз мережі щодо землі й має невелике значення [4]. Напруга ушкодженої фази стосовно землі стане дорівнювати нулю, а напруги двох інших фаз збільшаться в $\sqrt{3}$ раз і стануть дорівнювати міжфазним напругам мережі, які лишаються незмінними [3]. Завдяки цьому однофазне замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю не порушує роботу споживачів, однак викликає перенапруги в мережі. Перенапруги, у свою чергу, викликають порушення ізоляції щодо землі двох неушкоджених фаз і перехід однофазного замикання на землю в міжфазне коротке замикання або подвійне замикання на землю.

На рис. 2 наведено векторні діаграми напруг і ємнісних струмів мереж із ізольованою нульовою точкою: а – у нормальному режимі; б – при однофазному короткому замиканні на землю.

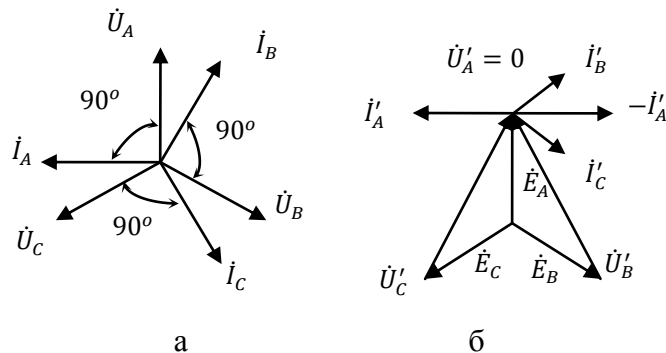


Рис. 2 Векторні діаграми напруг і ємнісних струмів мереж із ізольованою нульовою точкою: а – у нормальному режимі; б – при однофазному короткому замиканні на землю

У мережах з ізольованою нейтраллю за умови симетричності опорів навантаження й лінії симетричними та однаковими будуть і фазні напруги U_A , U_B та U_C . Для ємнісних струмів фаз одержимо $I_A = j\omega C U_A$; $I_B = j\omega C U_B$; $I_C = j\omega C U_C$.

Ці струми дорівнюють один одному за величиною і випереджають за фазою відповідні напруги на 90° . У нормальному режимі сума їх дорівнює нулю (рис. 2,а), внаслідок чого нулю дорівнює й струм на землю. Напруга між нульовою точкою мережі й землею (напруга нейтралі)

$$\dot{U}_{00} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = 0,$$

де $Y_A = Y_B = Y_C = j\omega C$ - ємнісні провідності окремих фаз у нормальному режимі.

Під час металічного замикання на землю в точці ушкодження аварійна фаза, наприклад A , одержує потенціал землі (рис. 2,б), внаслідок чого $\dot{U}_A = 0$, $Y_A = \infty$. Напряга нейтралі \dot{U}_{00} дорівнює $-E_A$. Напряги двох неушкоджених фаз відносно землі збільшуються в $\sqrt{3}$ раз і відповідно до діаграми (рис. Б.6,б)

$$U'_B = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{-j150^\circ}; U'_C = \sqrt{3}\dot{E}_A e^{j150^\circ}.$$

У $\sqrt{3}$ раз збільшуються і ємнісні струми цих фаз. Випереджаючи напруги U'_B і U'_C на 90° , ці струми, підсумовуючись у землі, повертаються через ушкоджену фазу, струм якої дорівнює струму замикання на землю \dot{I}_{3A}

$$\dot{I}_{3A} = 3\dot{I}_0 = \dot{I}_A = -(\dot{I}_B + \dot{I}_C) = 3j\omega C\dot{E}_A,$$

де I_0 – струм нульової послідовності при замиканні на землю.

Струми \dot{I}_{3A} і I_0 випереджають ЕРС E_A на 90° і визначаються ємностями фаз системи даної напруги й величиною E_A . Тому в розгалужених мережах, що мають велику ємність, струм замикання на землю буде вищим. Для обмеження струму замикання на землю загальна довжина кабелів, приєднаних до одного або паралельно працюючих трансформаторів, не повинна перевищувати 3 км (ємність щодо землі не повинна перевищувати 10^{-6} Ф на фазу).

Струм замикання на землю можна підрахувати також за емпіричною формулою

$$I_{3\Sigma} = \frac{95+2,84q}{2200+6q} l U_H,$$

де q – перетин кабелю, мм^2 ; U_H – номінальна лінійна напруга мережі, кВ; l – довжина ліній, км [1].

При однофазних замиканнях на землю лінійні напруги практично не змінюються, а струми ушкодження невеликі. Небезпечним для асинхронного двигуна є струм короткого замикання понад 5А. Тривале, понад 30хв протікання в місці короткого замикання струмів 5А викликає значне місцеве перевищення температури й руйнування ізоляції, що може привести однофазне замикання на землю до виткового замикання [2].

Таким чином, визначення однофазного замикання на землю може бути здійснено за напругою нульової послідовності U_0 , струмом нульової послідовності I_0 і за напругою й струмом нульової послідовності одночасно. Використання останнього методу доцільніше, оскільки його можна застосовувати для електродвигунів, які живляться протяжним кабелем зі значним ємнісним струмом замикання на землю.

Виткові замикання обмоток статора асинхронного двигуна є поширеним видом ушкоджень. Коротке замикання 3-5% витків однієї фази обмотки статора асинхронного двигуна призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.

Виткові замикання асинхронного двигуна можуть бути одно-, дво- і трифазні; симетричні й несиметричні, металічні й неметалічні тощо. Основною причиною виникнення виткових замикань є зниження електричної міцності ізоляції обмоток у результаті підвищення температури, старіння, потрапляння вологи й мастила на ізоляцію тощо. У витках, що замкнули, під впливом наведених у них струмів, які значно перевищують номінальний, відбувається різке підвищення температури, що супроводжується нагріванням сталі сердечника й неушкодженої частини обмотки. Це ще більше руйнує її ізоляцію і, якщо вчасно не відключити асинхронний двигун, виткові замикання можуть привести до більш важких видів аварій.

Виткові замикання є несиметричними ушкодженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг нормального режиму й супроводяться зниженням обертального моменту двигуна. Ступінь його зниження залежить від співвідношення потужностей ушкодженого двигуна й живильної мережі, відносного числа витків, що замкнули, наявності в місці короткого замикання перехідних опорів.

Зниження обертального моменту двигуна тим менше, чим більше співвідношення опорів самого двигуна й мережі, тобто чим потужніша живильна мережа. Чим менший опір мережі - тим менша потужність зворотної послідовності двигуна. У граничному випадку, при нескінченно великій потужності мережі ($Z_{C2}=0$), струми двигуна будуть містити тільки складові прямої і нульової послідовності (як видно з векторних діаграм на рис. 3), і гальмівний момент, обумовлений струмом зворотної послідовності, буде відсутній (струми нульової послідовності крутного моменту не створюють).

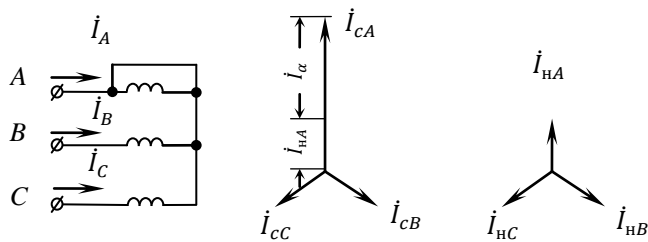


Рис. 3 Схема й векторні діаграми струмів при замиканні всіх витків фази А

Якщо потужності живильної мережі й споживачів сумірні, виткові замикання супроводжуються значним зниженням крутного моменту й призводять до перегрівання двигунів. Тому при виткових замиканнях двигуни підлягають негайному відключенню. Зниження крутного моменту двигунів при виткових замиканнях і спотворення лінійних струмів характеризуються коефіцієнтом асиметрії по струму $\epsilon_T = I_2/I_1$.

Незважаючи на різке зростання струму прямої послідовності при замиканні витків, струм зворотної послідовності залишається без зміни. У результаті цього коефіцієнт асиметрії за струмом ϵ_T залежно від кількості витків, що замкнули, коливається в широких межах. При тій самій кількості витків, що замкнули, у режимі холостого ходу коефіцієнт асиметрії по струму ϵ_T набагато більший ніж при нерухомому роторі (рис. 4) [1].

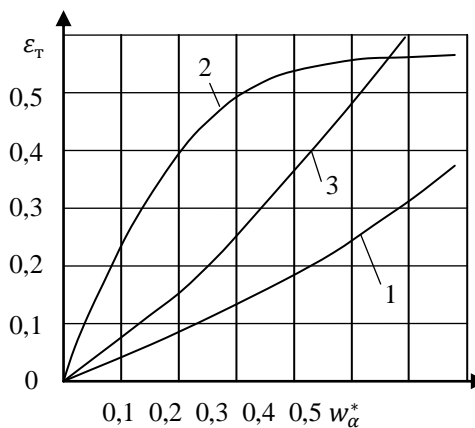


Рис. 4 Графіки залежності коефіцієнта асиметрії по струму ϵ_T від кількості витків, що замкнули w_α^* : 1 - нерухомий ротор; 2 - холостий хід; 3 - узагальнена залежність

При практичних розрахунках можна користуватися узагальненою залежністю коефіцієнта ε_T від відносної кількості витків, що замкнули. Вона отримана ДонВУГІ експериментальним шляхом для великої кількості рудничних двигунів при різних способах сполучення обмотки статора, напругах живлення, ушкодженнях різних фаз і режимах роботи. Результати експериментів показують, що якщо коефіцієнт асиметрії віднести до пускового струму

$$\varepsilon_{T.п} = \frac{I_2}{I_{п.ф}} = \frac{I_2}{k_{п.ф} I_H},$$

де $\varepsilon_{T.п}$ – розрахунковий коефіцієнт асиметрії струму при виткових замиканнях, віднесений до пускового струму; I_2 — струм зворотної послідовності двигуна; $I_{п.ф}$ – фактичний пусковий струм двигуна; $k_{п.ф}$ – кратність фактичного пускового струму даного двигуна; I_H – номінальний струм двигуна, то залежність $\varepsilon_{T.п} = f(\omega_\alpha)$ практично буде лінійною.

Пристрої захисту від виткових замикань засновані на контролі несиметрії фазних струмів: $0,2I_H \leq I_2 < I_H$ - наявність виткових коротких замикань; $I_2 < 0,2I_H$ - відсутність виткових коротких замикань.

За приведеними вище ознаками можливо визначити пошкодження та вплив на електропривод і мережу (табл. 2).

Таблиця 2

Ознаки однофазних аварійних режимів АД

Аварійний режим (пошкодження)	Ознаки аварійних режимів (зміна струмів і напруг)	Вплив на електропривод і мережу (характер змін у роботі двигуна й мережі)	Аварійний режим (пошкодження)
Однофазні короткі замикання на землю	в мережі з глухозаземленою нейтраллю	Характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ. Ушкоджена фаза в місці короткого замикання вимушено набуває потенціалу землі. Струми й напруги несиметричні і невірноважені, внаслідок чого з'являються складові прямих, зворотних і нульових послідовностей.	Однофазні КЗ є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухо заземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для двигуна й характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ.
	в мережі з ізольованою нейтраллю	Не викликають КЗ, оскільки ЕРС ушкодженої фази не шунтується з'єднанням, що з'явилося з землею, і для струму пошкодження відсутнє замкнуте коло від місця	Однофазне замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю не порушує роботу споживачів, однак викликає перенапругу в мережі. Перенапруги, у свою чергу, викликають

Продовження таблиці 2

		пошкодження до нейтралі трансформатора. Струм замикається через ємність проводів непошкоджених фаз мережі щодо землі й має невелике значення. Напруга пошкодженої фази стосовно землі дорівнюватиме нулю, а напруги двох інших фаз збільшаться в $\sqrt{3}$ раз і дорівнюватимуть міжфазним напругам мережі, які залишаються незмінними.	порушення ізоляції обмоток щодо землі двох неушкоджених фаз двигуна й переходу однофазного замикання на землю в міжфазне КЗ або подвійне замикання на землю.
Однофазні виткові замикання	Є несиметричними uszkodженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг. Різко зростає струм прямої послідовності, струм зворотної послідовності лишається практично без зміни. Коротке замикання всього 3-5% витків однієї фази обмотки статора АД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.	Знижується момент обертання двигуна, і він перегрівається. Ступінь зниження моменту залежить від співвідношення потужностей uszkodженого двигуна й живильної мережі, відносного числа витків, що замкнулися і т. ін. При виткових замиканнях двигун слід негайно вимкнути.	

Висновок:

Для однофазних коротких замикань асинхронних двигунів встановлено їх основні ознаки та вплив на електропривод і мережу. Ці ознаки однофазних коротких замикань можуть бути використані в системах діагностування енергетичної ефективності асинхронних двигунів.

Література

1. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – изд. 2, перераб. и доп. М.: «Недра», 1978, 349 с.
2. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 248 с.
3. Байтер И.И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд./ И.И. Байтер – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 104с.
4. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
5. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов./ А.М. Федосеев, М.А. Федосеев – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
6. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов. / В.А. Андреев – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Выс. шк., 2006. – 639 с.
7. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты / А.М. Мусин– М.: Колос, 1979. – 112 с.
8. Беркович М.А. Основы техники релейной защиты / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов, - 6-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоиздат, 1984. – 376 с.
9. Соловьев А.Л. Защита асинхронных электрических двигателей напряжением 0,4 кВ. Учебное пособие / А.Л. Соловьев – СПб, ПЭИПК, 2007. – 72 с.