

ОБМЕЖУВАЧ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ З НАДПРОВІДНОЮ ОБМОТКОЮ

У статті розглянуто обмежувач струму короткого замикання з надпровідною обмоткою і запропоновано метод розрахунку його основних параметрів.

В статье рассмотрен ограничитель тока короткого замыкания со сверхпроводящей обмоткой и предложен метод расчета его основных параметров.

ВСТУП

Надпровідні матеріали знайшли застосування у електроенергетиці за рахунок своїх фізичних властивостей. За наявності надпровідного стану матеріал не має активного опору та виявляє діаманітні властивості. Проводи або струмонесучі елементи виготовлені з надпровідників мають практично нульовий опір і високу щільність струму. При досягненні критичного значення температури або магнітного поля надпровідність втрачається.

Надпровідники можна поділити на низькотемпературні (НТНП) і високотемпературні (ВТНП). До НТНП відносять чисті метали (наприклад, Hg, Pb, Va), сплави (Nb-Ti, Nb-Al) і інтерметалеві сполуки (Nb₃Sn, Nb₃Ge), які стійко працюють лише при температурі, близькій до температури рідкого гелію – 4,2 К. До ВТНП відносять різні керамічні сполуки, здатні працювати при температурі рідкого водню (LaBaCuO, LaSrCaCuO), або азоту – 77 К (YBaCuO, BiSrCaCuO) [1].

Для захисту від струмів короткого замикання існують різні традиційні пристрої захисту: плавкі запобіжники, вимикачі, реактори та різні пристрої обмеження струму. Одним з новітніх напрямів в електроенергетиці є надпровідні високотемпературні обмежувачі струму короткого замикання.

ТИПИ НАДПРОВІДНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Надпровідний обмежувач струму (НПОС) короткого замикання вмикається у частину мережі, яка передбачає захист від аварійних струмів. Його перевага полягає в надмірно низькому опорі у порівнянні із традиційними струмообмежувальними реакторами в нормальному режимі. Крім того, є можливість практично безінерційно збільшувати його опір до необхідної величини при короткому замиканні.

За конструктивними особливостями можна виділити та розглянути дві основні схеми НПОС: резистивну (рис. 1) та індуктивну (рис. 2). На них ґрунтується більшість інших пропонованих конструкцій, які повинні задовольняти тим же вимогам.

Резистивна конструкція НПОС заснована на нелінійності опору надпровідника. Струмообмежувач містить НП елемент, який послідовно з'єднаний з колом, що захищається. Конструктивно ці елементи можуть бути виготовлені як набір паралельно і послідовно з'єднаних тонких НП плівок, або масивних компонентів. В якості послідовного НПОС може використовуватися НП кабель.

У нормальному режимі функціонування захищеного кола амплітуда номінального струму нижче, ніж критичний струм НП елемента, і цей елемент знаходиться в надпровідному стані із нульовим опором. В аварійному режимі струм КЗ у колі зростає і викликає перехід НП елемента в резистивний стан, збільшуєть-

ся активний опір НП елемента, таким чином, результуючий опір обмежує струм КЗ. Принцип струмообмежувача шунтованого типу виконання аналогічний послідовному, але при цьому паралельно надпровіднику підключається резистор або обмотка.

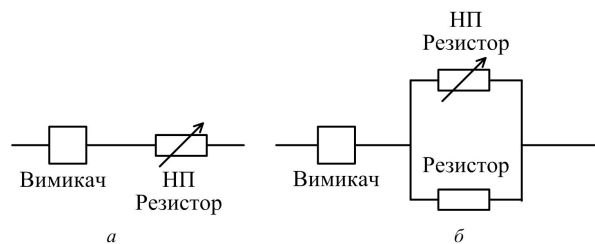


Рис. 1. Резистивний НПОС послідовного (а) та шунтованого (б) типів

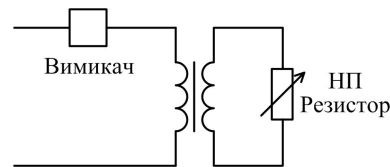


Рис. 2. Індуктивний НП струмообмежувач

Індуктивна конструкція НП струмообмежувача також використовує нелінійність вольт-амперної характеристики надпровідника. Цей тип конструкції можна уявити у вигляді трансформатора з НП нелінійним резистором в якості навантаження вторинної обмотки (рис. 2).

Принцип дії індуктивного обмежувача полягає у магнітному зв'язку між надпровідним елементом і захищеним колом. При нормальних умовах функціонування первинна обмотка умикається в електричне коло, яке захищається, вторинна обмотка короткозамкнена НП елементом. Магнітний потік, який генерується первинною обмоткою, компенсується потоком вторинної короткозамкненої обмотки. За умов виникнення короткого замикання НП елемент втрачає надпровідність і переходить у резистивний стан внаслідок зростання струму вище критичного значення. Активний опір вторинної обмотки стає значно більше, таким чином, наведений струм у вторинній обмотці різко зменшується. Магнітний потік первинної обмотки більше не компенсується, а отже зростає її індуктивний опір, що і обмежує струм короткого замикання у електричному колі [2].

Обмеження струму короткого замикання в НПОС індуктивного типу досягається за рахунок різкого зростання його опору, що можна здійснити різними методами: коли обмотка, що екранує, замкнена на надпровідний елемент, екрануванням осердя з електротехнічної сталі НП екраном, зміною ступеня насичення магнітопроводу НПОС, і т.д.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ОБМЕЖУВАЧ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ З НАДПРОВІДНОЮ ОБМОТКОЮ

Розглянемо особливості роботи електромагнітного високотемпературного надпровідного обмежувача струму короткого замикання (ВТНП ОСКЗ), визначення критеріїв вибору його основних параметрів.

До розгляду пропонується така конструктивна схема електромагнітного ВТНП ОСКЗ (рис. 3) [3]. Середній стержень феромагнітного осердя 1 і рухомий яркір 2, що утримується пружиною 3, охоплює кріостат 4 з ВТНП обмоткою 5. Струмовводи 6 з'єднують ВТНП обмотку з електричною мережею.

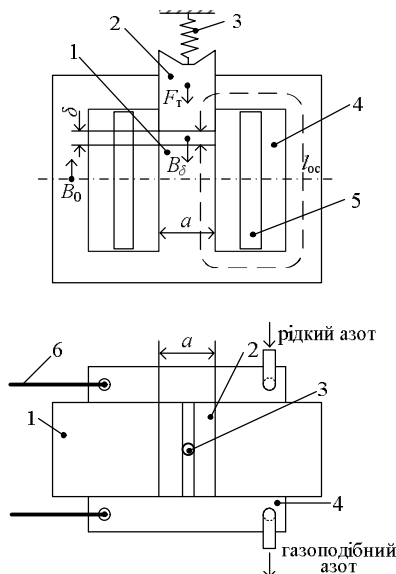


Рис. 3. Конструктивна схема ВТНП обмежувача струму з рухомих ярком

ВТНП обмотка охолоджується рідким азотом, який подається в кріостат. Там він випаровується і виходить назовні. Витрати рідкого азоту визначаються теплоприпливами в кріостат крізь його стінки, по струмоводах, а також (при роботі на змінному струмі) гістерезисними втратами в ВТНП обмотці.

При нормальній роботі ВТНП обмежувача струму з'єднаний послідовно з навантаженням z_n і крізь нього проходить струм I , що дорівнює струму навантаження I_n [4].

В залежності від характеру навантаження падіння напруги на ВТНП обмежувачі струму, яке визначається коефіцієнтом k_{oc} , можна закладати таким, щоб зменшення напруги на навантаженні по відношенню до напруги електричної мережі становило не більше 5%, що відповідає стандарту ДСТУ 3466-96, або ГОСТ 13109-97.

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ

Враховуючи те, що напруга, прикладена до ВТНП обмежувача струму, як в режимі нормальної роботи, так і при короткому замиканні зрівноважується ЕРС самоіндукції, можна записати

$$U_{oc} = k_{oc} U_n = 2\pi f w B_\delta k_p S_{oc}, \quad (1)$$

$$U_n = 2\pi f w B_\kappa S_{oc}, \quad (2)$$

де f – частота змінного струму; w – число витків ВТНП обмотки; B_δ – індукція в проміжку між ярком і осердям в режимі нормальної роботи (рис. 2,а); B_κ – індукція в осерді при з'єднанні ярка з осердям; k_p – коефіцієнт розширення магнітного потоку в проміжку між ярком і

осердям; S_{oc} – поперечний переріз осердя [5, 6].

Завдяки підстановки U_n в рівняння (1) отримуємо зв'язок між індукціями B_δ і B_κ : $B_\delta = k_{oc} \cdot B_\kappa / k_p$.

Це дає можливість визначити число витків ВТНП обмотки w , якщо заданий струм навантаження I_n :

$$w = \frac{k_{oc} B_\kappa}{\mu_0 k_p I_n} \delta, \quad (3)$$

де δ – повітряний проміжок між ярком і осердям; μ_0 – магнітна стала.

Значення індукції B_κ обирається на ділянці намагнічування для відповідного електротехнічного матеріалу, а коефіцієнт k_p визначається за допомогою спеціальних розрахунків [7].

Таким чином, є всі вихідні дані для визначення числа витків ВТНП обмотки за формулою (3). А це, в свою чергу, дає можливість визначити розмір поперечного перерізу середнього стержня осердя S_{oc} (з рівняння 2):

$$S_{oc} = \frac{U_n}{2\pi f w B_\kappa}, \quad (4)$$

тому що $U_n \approx U$.

Поперечний переріз двох крайніх стержнів удвоє менший, що забезпечує однакову індукцію у всіх стержнях.

Якщо у формулу (4) підставити значення числа витків відповідно до формули (3), то отримуємо залежність S_{oc} від повної потужності навантаження, основних магнітних і конструктивних параметрів ВТНП ОСКЗ:

$$S_{oc} = \frac{\mu_0 k_p U_n I_n}{2\pi f k_{oc} B_\kappa^2 \delta} = \frac{\mu_0 k_p}{2\pi f k_{oc}} \frac{S_n}{B_\kappa^2 \delta}, \quad (5)$$

де S_n – повна потужність навантаження.

Розмір поперечного перерізу осердя ВТНП обмежувача струму визначає його основні масогабаритні показники.

Вплив числа витків ВТНП обмотки на ці показники можна вважати другорядними, а товщина теплоізоляції кріостата дуже мало залежить від потужності навантаження S_n , якщо вважати, що питомий теплоприплив у кріостат залишається на одному, технологічно досяжному, рівні.

ВИБІР ПРУЖИНИ ДЛЯ РОБОТИ ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Розглянемо за яких умов вибирається пружина, що утримує яркір, а також – рух ярка під час короткого замикання в електричній мережі.

У вхідному стані пружина повинна утримати яркір від магнітного тяжіння, тобто при $y=0$ (рис. 4) початкова сила пружини урівноважує магнітне тяжіння

$$F_{пр0} = 0,4B_\delta^2 S_{oc} 10^6. \quad (6)$$

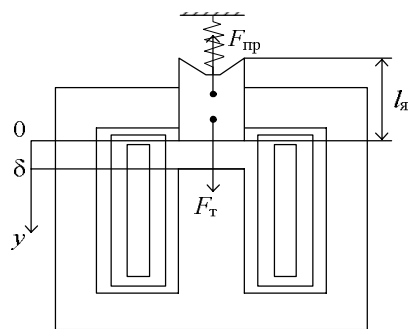


Рис. 4. Схема сил, прикладених до ярка

Як тільки в електричній мережі відбувається коротке замикання її напруга переходить на обмежувач струму, магнітне поле в повітряному проміжку δ зростає до B_k , а сила магнітного тяжіння зростає в $(B_k/B_\delta)^2$ разів і

$$F_T = 0,4B_k^2 S_{oc} 10^6. \quad (7)$$

Вона набагато більша за початкову силу пружини, і якір починає рухатись. Під час переміщення якоря сила пружини буде зростати, а її середнє значення дорівнюватиме

$$F_{пр ср} = F_{пр0} + K_{пр} \frac{\delta}{2}, \quad (8)$$

де $K_{пр}$ – коефіцієнт пружності пружини. Його величина повинна бути такою, щоб суттєво не заважати руху якоря під час короткого замикання і в той же час достатньою, щоб повернути якір в початковий стан після усунення короткого замикання.

Визначити коефіцієнт пружності $K_{пр}$ можна з таких міркувань: сила повністю розтягнутої пружини має бути на порядок меншою за силу магнітного тяжіння:

$$F_{пр0} + K_{пр} \delta = 0,4B_k^2 S_{oc} 10^5, \quad (9)$$

$$K_{пр} = \frac{0,4B_k^2 S_{oc} 10^5 - F_{пр0}}{\delta}. \quad (10)$$

Таким чином, звернувшись до середніх параметрів можна записати

$$\gamma_{oc} S_{oc} l_y a = F_T - F_{пр ср}, \quad (11)$$

де γ_{oc} – питома щільність матеріалу осердя, l_y – висота якоря (див. рис. 4), a – прискорення якоря.

З урахуванням того, що $B_\delta = k_{oc} B_k / k_p$, а також співвідношень (6) – (11), отримуємо

$$a = \frac{0,4B_k^2 \left(10^6 - \frac{1}{2} 10^5 - \frac{k_{oc}^2}{2k_p} 10^6 \right)}{\gamma_{oc} l_y}. \quad (12)$$

Якщо відкинути величини другого порядку малості, то

$$a = \frac{0,4B_k^2 10^6}{\gamma_{oc} l_y}, \quad (13)$$

а час спрацьовування ВТНП обмежувача струму (час руху якоря)

$$t = \sqrt{\frac{2\delta}{a}} = \frac{\sqrt{5\gamma_{oc} l_y \delta}}{B_k} 10^{-3}. \quad (14)$$

ВИСНОВКИ

Розглянуті можливі варіанти обмежувачів струму короткого замикання з надпровідною обмоткою, а також теоретичні засади електромагнітного обмежувача струму короткого замикання з якорем. Визначені критерії для вибору його основних параметрів, які є базовими для індуктивних ОСКЗ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні : монографія / В.Г. Данько, І.С. Полянська, Є.В. Гончаров; за ред. В.Г. Данько. – Х.: НТМТ, 2011. – 248 с.
2. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Аналіз роботи високотемпературного надпровідникового обмежувача струму короткого замикання // Східно-європейський журнал передових технологій. Енергозберігаючі технології і обладнання. – Харків: Технологічний центр, 2007. – № 6/5 (30). – С. 45-48.

3. Пат. 48214 Україна МКЗ H02H 9/00 Електромагнітний обмежувач струму короткого замикання з високотемпературною надпровідниковою обмоткою / Данько В.Г., Гончаров Є.В. – № у 200909564; заявл. 18.09.09; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5. – 4 с. : 1 іл.

4. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Електромагнітний надпровідний обмежувач струму короткого замикання // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2010), 12-14 травня: тези доп./ НТУ "ХПІ" – 2010. – С. 160.

5. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Надпровідний обмежувач струму короткого замикання з рухомим якорем // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XVIII міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2011), 01-03 червня: тези доп. / НТУ "ХПІ". – 2011. – С. 147.

6. Гончаров Є.В. Застосування електромагнітного надпровідного обмежувача струму // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 55. – С. 19-22.

7. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Теоретичні засади і вибір основних параметрів електромагнітного надпровідного обмежувача струму // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 48. – С. 30-36.

Bibliography (transliterated): 1. Viktorystannya visokotemperaturnoi nadprovidnosti v elektroenergetichnomu obladnanii : monografiya / V.G. Dan'ko, I.S. Polyans'ka, E.V. Goncharov; za red. V.G. Dan'ko. - H.: NTMT, 2011. - 248 s. 2. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Analiz roboti visokotemperaturnogo nadprovidnikovogo obmezhuвача strumu korotkogo zamikannya // Shidno-evropejs'kij zhurnal peredovih tehnologij. Energozberigayuchi tehnologii i obladnannya. - Harkiv: Tehnologichnij centr, 2007. - № 6/5 (30). - S. 45-48. 3. Pat. 48214 Ukraina MKZ H02H 9/00 Elektromagnitnij obmezhuвач strumu korotkogo zamikannya z visokotemperaturnoyu nadprovidnikovoyu obmotkoyu / Dan'ko V.G., Goncharov E.V. - № u 200909564; zayavl. 18.09.09; opubl. 10.03.10, Byul. № 5. - 4 s. : 1 il. 4. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Elektromagnitnij nadprovidnij obmezhuвач strumu korotkogo zamikannya // Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: XVIII mizhn. nauk.-praktichna konf. (microCAD-2010), 12-14 travnya: tezi dop./ NTU "HPI" - 2010. - S. 160. 5. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Nadprovidnij obmezhuвач strumu korotkogo zamikannya z ruhomim yakorem // Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: XVIII mizhn. nauk.-praktichna konf. (microCAD-2011), 01-03 chervnya: tezi dop. / NTU "HPI". - 2011. - S. 147. 6. Goncharov E.V. Zastosuvannya elektromagnitnogo nadprovidnogo obmezhuвача strumu // Visnik NTU "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Problemi udoskonalennya elektrichnih mashin i aparativ. Teoriya i praktika. - Harkiv: NTU "HPI". - 2010. - № 55. - S. 19-22. 7. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Teoretichni zasadi i vibir osnovnih parametrov elektromagnitnogo nadprovidnogo obmezhuвача strumu // Visnik NTU "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Problemi udoskonalennya elektrichnih mashin i aparativ. Teoriya i praktika. - Harkiv: NTU "HPI". - 2011. - № 48. - S. 30-36.

Надійшла 28.02.2012

Данько Володимир Григорович, д.т.н., проф.,

Гончаров Євген Вікторович

Національний технічний університет

"Харківський політехнічний інститут"

кафедра загальної електротехніки

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

тел.: (057) 7076427

Danko V.G., Goncharov E.V.

A fault current limiter with a superconducting winding.

In the article, a fault current limiter with a superconducting winding is considered, a method of its main parameters calculation offered.

Key words – superconducting coil, high-temperature superconductivity, ferromagnetic core.