

УДК 621.313.322

Хоменко В. І., Нізімов В. Б.

РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ СИНХРОННОЇ МАШИНИ АВТОНОМНОЇ ГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

Розроблені математичні моделі і структурні схеми, теоретичні дослідження і порівняльний аналіз існуючих способів і засобів гасіння поля синхронної машини (СМ) при коротких замиканнях (КЗ) дозволили створити наукову основу для розробки пристроїв гасіння поля на базі ємнісних накопичувачів енергії, що володіють поліпшеними експлуатаційними показниками при високій надійності їх функціонування.

При наявності демпферної обмотки струми раптового короткого замикання збільшуються, сповільнюються перехідні процеси при форсуванні збудження і гасінні магнітного поля СМ, тому стало питання дослідження впливу КЗ на режим роботи машини.

Дослідженню пристроїв гасіння поля СМ в режимі двигуна присвячені наступні публікації [1, 2, 3]. У розроблених і досліджуваних пристроях примусове виключення тиристорів збуджувача забезпечується або зустрічною напругою [4], або зустрічним струмом [5] ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ).

Метою роботи є дослідження роботи синхронної машини автономної генеруючої установки в режимі короткого замикання з застосуванням ємнісного накопичувача енергії.

Не дивлячись на відносну нетривалість, короткі замикання призводять до порушення не лише нормального електропостачання, а також негативно відображаються на роботі суміжних, особливо завантажених електроприймачів і, крім того, можуть спричинити вихід із ладу СМ та системи збудження.

До найбільш негативних наслідків призводять трифазні короткі замикання. Однак, найбільш поширеним видом короткого замикання являється несиметричне коротке замикання – однофазне, двофазне на нейтраль. Відносна вірогідність коротких замикань по даним проф. С. А. Ульянова відображається наступними співвідношеннями:

- трифазне симетричне КЗ – 5 %,
- двофазне КЗ – 10 %,
- однофазне КЗ – 65 %,
- подвійне однофазне КЗ – 20 %.

Найбільший сталий струм КЗ в синхронній машині виникає при однофазному короткому замиканні, струм подвійного двофазного короткого замикання (двофазне замикання на нейтраль) більший струму симетричного короткого замикання.

Розглянемо вираз струму контуру збудження при різних системах збудження в режимі гасіння поля СМ. При вмиканні в обмотку збудження (ОЗ) розрядного резистора з кратністю K :

$$i_f = -\frac{1}{R_f (K+1)(T'_{\sigma f} p + 1)} p \Psi_{\delta d} \quad (1)$$

де $T'_{\sigma f} = \frac{T_{\sigma f}}{K+1}$ – постійна часу контуру збудження.

При переведенні збуджувача в режим інвертування з K -кратним форсуванням:

$$i_f = -\frac{1}{R_f (T_{\sigma f} p + 1)} \cdot (K U_f + p \Psi_{\delta d}) \quad (2)$$

При вмиканні електричної ємності НЕ в контур збудження:

$$i_f = -\frac{T_c p}{R_f (T_{\sigma f} \cdot T_c p^2 + T_c p + 1)} p \Psi_{\delta d} \quad (3)$$

При одночасному вмиканні в ОЗ електричної ємності і шунтуючого її резистора:

$$i_f = -\frac{T_c p}{R_f (T_{\sigma f} T_c p^2 + T_c p + 1)} \left(\mp \frac{1}{T_{Rc} p} u_c + p \Psi_{\delta d} \right). \quad (4)$$

Порівняльний аналіз одержаних виразів показує, що вмикання електричної ємності сприяє більш інтенсивній зміні струму ОЗ, оскільки в чисельнику знаходиться форсуючий член, а знаменник відповідає знаменнику коливальної ланки. При одночасному вмиканні електричної ємності і шунтуючого її резистора характер зміни струму ОЗ визначається ще і інтегральним значенням напруги на ємності і його знаком. При інвертуванні збуджувача або вмиканні розрядного резистора в ОЗ зміна струму носить аперіодичний характер, але з різними постійними часу контуру збудження.

Для введення в контур збудження СМ додаткових елементів в режимі гасіння поля необхідно застосовувати або силову контактну апаратуру, або цю операцію проводити за допомогою безконтактних силових елементів. Для статичних напівпровідникових систем збудження вживання контактної апаратури на великі струми є проблематичним, тому для переривання струму прийнято примусове вимикання тиристорів збуджувачів із застосуванням ємнісних накопичувачів енергії.

При дослідженні явнополюсних СМ в режимі короткого замикання насичення магнітного кола звичайно враховують тільки по поздовжній вісі. Для цього у виразах для потокозчеплень представляють індуктивний опір реакції якоря по поздовжній вісі у функції поздовжньої складової потокозчеплення в повітряному зазорі. Зокрема, при гасінні поля збудження СМ, що працює в режимі близькому до режиму холостого ходу, справедлива наступна система рівнянь для поздовжньої вісі СМ [6]:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= x_{\sigma} i_d + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma} i_d + \Psi_{\delta d} ; \\ \Psi_f &= x_{\sigma f} i_f + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma f} i_f + \Psi_{\delta d} ; \\ \Psi_{kd} &= x_{\sigma kd} i_{kd} + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma kd} i_{kd} + \Psi_{\delta d} ; \\ p\Psi_f &= u_f - R_f i_f ; \\ p\Psi_{kd} &= -r_{kd} i_{kd} ; \\ x_{ad} &= f(\Psi_{\delta d}) . \end{aligned} \quad (5)$$

Після необхідних перетворень, вказана система може бути представлена виразом:

$$\Psi_d = \left(1 + \frac{x_{\sigma} p}{x_{\sigma kd} p + r_{kd}} \right) (\Psi_f - x_{\sigma f} i_f) + \frac{x_{\sigma}}{x_{ad}} (\Psi_f - x_f i_f), \quad (6)$$

де Ψ_f – визначається по напрузі і струму четвертого рівняння системи (5) відповідно до режиму роботи збудника.

Оскільки демпферний контур в поперечній осі практично не робить впливу на процес гасіння поля при холостому ході СМ, то він в розрахунках не враховується.

Проведемо оцінку ефективності гасіння поля СМ з демпферними контурами для раніше розглянутих технічних рішень [7] шляхом розрахунку перехідних процесів в режимі гасіння магнітного поля.

Для дослідження впливу ЄНЕ на вихідні параметри генеруючої установки формуючого джерела електроживлення в режимі короткого замикання наведені розрахунки з використанням записаних вище виразів (рис. 1).

Результати математичних розрахунків показали, що в момент КЗ величина струму в контурі збудження збільшується майже до 6-кратного значення з 4,15 до 5,84. Час досягнення струмом в ОЗ нульового значення склало 30 е. с. Струм в обмотці статора збільшується майже до 10-кратного значення (9,6).

Для дослідження впливу режимів КЗ на перехідні процеси в СМ і обмотці збудження проведені випробування синхронної машини типу МСА 72/4А наступних параметрів: $P_H = 12$ кВт; $U_{1H} = 380$ В; $i_{1H} = 21,6$ А; $U_{fH} = 22$ В; $i_{fH} = 22$ А; $n_H = 1500$ об/хв.

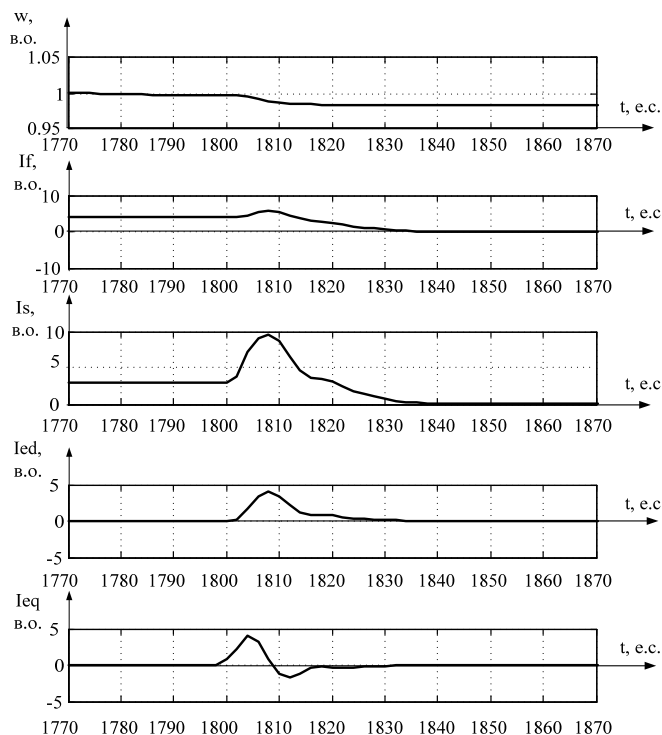


Рис. 1. Результати розрахунку режимів КЗ синхронної машини

Коефіцієнт приведення: за напругою $K_u = 0,2$; за струмом $K_i = 0,3$.

Щоб уникнути передчасного виходу з ладу двигуна, що випробовується короткі замикання проводилися в режимі холостого ходу шляхом відключення статора від мережі з подальшим замиканням на струмообмежуючі реактори. Осцилограми режимів КЗ збудженої синхронної машини приведені на рис. 2.

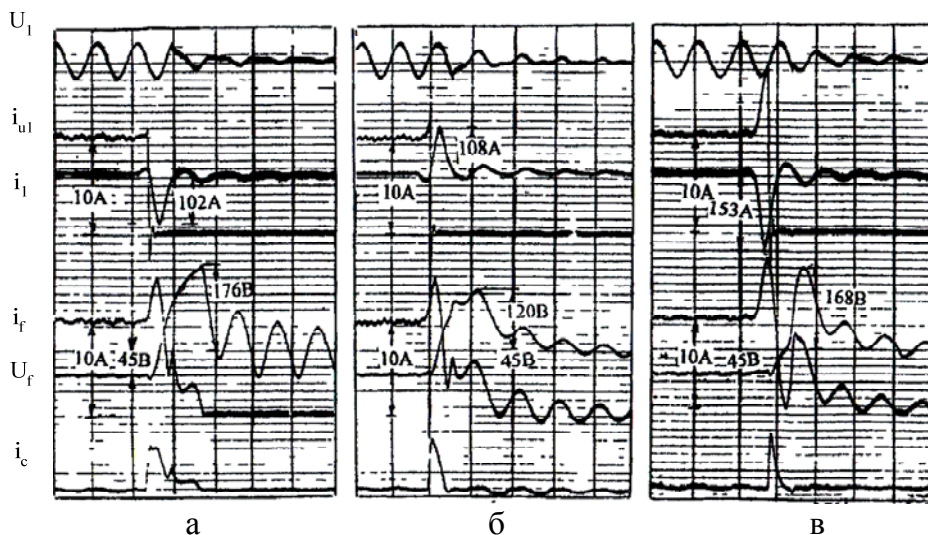


Рис. 2. Осцилограми процесу гасіння поля СМ в режимі замикання обмоток статора на струмообмежуючі реактори:

а – трифазне симетричне замикання; б – двофазне замикання з вимиканням тиристорів зустрічною напругою СНЕ; в – двофазне замикання з вимиканням тиристорів зустрічним струмом СНЕ

На рис. 2, а приведена осцилограма гасіння поля збудження в режимі симетричного трифазного короткого замикання статора через струмообмежуючі реактори.

Із аналізу осцилограми рис. 2, а впливає, що амплітуда струму фази статора перевищує в 4,72 рази значення номінального струму при збільшенні струму в контурі збудження в 1,4 рази. Перенапруження на обмотці збудження близькі до чотирикратного значення і досягли 176 В. Час досягнення струмом в ОЗ нульового значення склало 0,0286 с.

На рис. 2, б наведена осцилограма двофазного замикання обмоток статора в режимі гасіння поля синхронного двигуна (СД) з вимиканням тиристорів збуджувача зустрічною напругою ЄНЕ з подальшим переведенням струму збудження в контур розрядного резистора.

Аналіз осцилограми показав, що амплітудне значення струму фази статора при двофазному замиканні склало 108 А, що в 5,1 рази перевищує номінальне значення струму, а струм в контурі гасіння зріс в 1,5 рази. Перенапруження в ОЗ досягло 120 В, що складає 2,67 від початкового значення. Час першого досягнення струмом в ОЗ нульового значення склало 0,0476 с.

При виникненні двофазного КЗ в колі статора утворюються вільні магнітні потоки, один з яких фактично нерухомий відносно короткозамкненого ротора, а інший – відносно обмотки збудження. Нерухомий в просторі вільний потік статора індукує ЕРС основної частоти в обмотці ротора, що обертається з практично синхронною частотою. Оскільки ОЗ замкнена на пристрої гасіння поля, то в ній виникає струм основної частоти, що обумовлює створення пульсуючого поля. Цей струм накладається на спадаючий струм контуру збудження. Пульсуюче поле, що виникає спричиняє в свою чергу електромагнітний вплив на статор. Основні закономірності даного режиму підтверджуються наведеною осцилограмою.

На рис. 2, в наведена осцилограма двофазного замикання обмоток статора в режимі гасіння поля СД з вимиканням тиристорів збуджувача зустрічним струмом ЄНЕ з послідовним переведенням струму в контур розрядного резистора.

Із осцилограми впливає, що амплітудне значення струму фази статора перевищило номінальне значення в 7 раз при зростанні струму в контурі збудження в 1,48 рази з одночасним збільшенням струму при збільшенні струму збуджувача в 1,64 рази. Кратність перенапружень на ОЗ склала 3,73. Час досягнення струмом в ОЗ нульового значення склало 0,042 с.

Похибка між розрахунковими і експериментальними даними не перевищила 7 %.

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження режимів коротких замикань синхронної машини та його вплив на електромагнітні процеси в контурах машини. Наведені математичні розрахунки та осцилограми реальної машини в різних видах короткого замикання.

Розроблена методика розрахунків дозволяє зробити висновок, що результати наведеної математичної моделі в пакеті Matlab можна використовувати для дослідження різних видів коротких замикань при різних пристроях гасіння поля збудження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Низимов В. Б. Повышение эффективности гашения магнитного поля в режиме самозапуска синхронных двигателей / В. Б. Низимов, С. В. Колычев // Наука – производству : сб. ст. – К. : Вища школа, 1991. – С. 233–237.
2. Семенюк М. Б. Генераторна установка з фазовим компаундуванням / М. Б. Семенюк // Энергетика та системи керування ЕРЕКС-2010 : зб. мат. міжнар. наук.-техн. конф., 25-27 листопада 2010 р. – Л., 2010. – С. 36–37.
3. Хоменко В. І. Дослідження автономної генеруючої установки формуючого джерела електроенергії / В. І. Хоменко, В. Б. Нізімов // Энергетика та енергоресурсозбереження КДУ. – 2010. – № 3. – С. 117–119.
4. А. с. 1264297 СССР. МКИ Н 02 Р 9/12. Устройство для управления синхронным электроприводом / В. Б. Низимов, С. В. Колычев (СССР). – № 3780651/24-07 ; заяв. 06.08.84 ; опубл. 15.10.86, Бюл. № 38. – 10 с.
5. А. с. 1312715 СССР. МКИ Н 02 Р 9/12, 9/14. Устройство для управления возбуждением синхронной машины / В. Б. Низимов, С. В. Колычев (СССР). – № 3965507/24-07 ; заявл. 21.10.85 ; опубл. 23.05.87, Бюл. № 19. – 3 с.
6. Низимов В. Б. Эффективность гашения магнитного поля синхронных двигателей с тиристорным возбуждением / В. Б. Низимов, С. В. Колычев // Электричество. – 1988. – № 6. – С. 22–27.
7. Хоменко В. І. Розробка системи збудження синхронного генератора з компенсацією інерційності контуру збудження / В. І. Хоменко, В. Б. Нізімов, С. В. Колычев // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – 2011. – Випуск 1(16). – С. 106–111.