

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Диневич В.А., Емельянов А.П., Форандс Г.Ф. *Повышение эффективности и качества труда в пожарной охране.* – М.: Стройиздат, 1982. – с. 45-51.
2. Чередниченко Л.С., Гумен Н.С., Гумен В.С. *Геометрическое моделирование некоторых многопараметрических систем химической технологии.* – К.: Вища школа, 1977. – с. 31-54.
3. Ренкас А.Г. *Застосування геометричних засобів для підвищення ефективності діяльності пожежної охорони.* // V Міжнародна науково-практична конференція "Пожежна безпека – 2001" – Львів: Сполом, 2001. – с. 126-127.
4. Бицадзе А.В. *Основы теории аналитических функций комплексного переменного.* – М.: Наука, 1969. – с. 34-37.
5. Маркушевич А.И., Маркушевич Л.А. *Введение в теорию аналитических функций.* – М.: Просвещение, 1977. – с. 92-97.
6. Гумен Н.С., Мартин Є.В. *До графічного відображення фазового простору функцій комплексних змінних* // *Прикладна геометрія та інженерна графіка.* – К.: КДТУБА, 1998. – Вип. 63. – с. 41-43.

УДК 614. 841: 621. 3

*І.П. Кравець, канд. техн. наук*

### РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ З МЕТОЮ ПРОФІЛАКТИКИ ПОЖЕЖ

У статті висвітлено проблемні питання пожежної небезпеки короткого замикання і причини їх виникнення, показані методи розрахунку КЗ для вибору необхідного електрообладнання, електромереж та апаратів захисту з метою профілактики пожеж, спричинених цим явищем в електроустановках.

Рівень технічного розвитку будь-якої країни в наш час визначається, в основному, станом її енергетики, потужністю електростанцій і виробництвом енергії. Високий розвиток енергетики дає змогу переозброювати всі галузі народного господарства, широко впроваджувати електричну енергію в її провідні галузі. Найбільш поширеними є електричні мережі до 1000 В. Вони застосовуються на всіх промислових і сільськогосподарських підприємствах, електростанціях і підстанціях. Від цих мереж, в основному, залежить надійна робота підприємств.

Часто в електроустановках і лініях електропередач виникають короткі замикання, причиною яких є:

- порушення правил експлуатації електроустановок;
- неякісно виконані електромонтажні роботи;
- пошкодження ізоляції;
- перекриття струмопровідних відкритих ліній металевими предметами, тваринами, птахами;
- стихійні природні явища.

Струми короткого замикання, в свою чергу, стають причиною виникнення пожеж. За період з 1996 року по 2001 рік кількість пожеж від порушення правил експлуатації електрообладнання та електроустановок становила в середньому 25% від загальної кількості пожеж. Кожен день виникало, приблизно, 29 пожеж від електроустановок. Половина із цих пожеж – це пожежі в електромережах, причиною яких, в основному, є коротке замикання.

Пожежна небезпека коротких замикань полягає в тому, що внаслідок цього явища значно зростає електричний струм, який може досягати десятків або, навіть, сотень тисяч Ампер.

Такі струми в незначний проміжок часу виділяють велику кількість тепла в провідниках, що викликає різке підвищення температури і займання горючої ізоляції, розплавлення металу провідників з наступним потужним викидом в навколишнє середовище електричних іскор, здатних викликати займання і вибух горючих матеріалів та вибухонебезпечних речовин [1].

Крім теплової дії струми КЗ викликають між провідниками великі механічні зусилля, які приводять до руйнації провідників та їх кріплень.

Замикання фаз на металеві конструкції спричинює іскріння. При поєднанні металевих і горючих конструкцій виникає ймовірність виникнення пожежі.

Раптове зниження напруги внаслідок КЗ приводить до порушення технологічного процесу, викликаючи, при цьому, аварії та пожежі.

В наш час, внаслідок застосування понижуючих трансформаторів великої потужності, значно зросла величина струмів короткого замикання [2].

В результаті, з метою захисту, створені нові типи захисних апаратів, які здатні відмикати ці струми, обмежувати їх максимальні значення, а також зменшувати їх термічну та електродинамічну дію на електромережу і електроапаратуру. Тому необхідні розрахунки для вибору апаратів захисту.

Крім того, електрична дуга, яка виникає внаслідок короткого замикання, має суттєвий вплив струмообмежуючої дії на значення струмів цього ж короткого замикання. А це в свою чергу потребує проведення розрахунків для визначення струмів КЗ.

Отже, розрахунок струмів короткого замикання виконується з метою вибору комутаційної апаратури, шинопроводів, кабелів і іншого електрообладнання, а також перевірки чутливості захисту.

Особливість розрахунку струмів КЗ в мережах 0,4 кВ полягає в тому, що необхідно враховувати індуктивні і активні опори всіх елементів кола КЗ.

В залежності від мети розрахунку враховують різні розрахункові режими роботи електричної схеми [3]. При виборі апаратури розрахунковим рахується максимальний режим, при якому струми КЗ мають максимальні значення. Цей режим враховують при розрахунку струмів пуску і самозапуску електродвигунів з метою забезпечення неспрацювання захисту мережі. При перевірці чутливості розрахунковим є мінімальний режим, при якому струми КЗ мають мінімальне значення. Цей режим використовують також для перевірки можливості пуску і самозапуску електродвигунів.

Є багато методів розрахунку струмів КЗ.

У загальному випадку для складних схем періодичну складову струмів КЗ від електричних машин для довільного моменту часу слід розраховувати шляхом розв'язування відповідної системи диференціальних рівнянь електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів з використанням обчислювальної техніки [4]. Для наближеного визначення діючого значення періодичної складової струму КЗ в простих схемах для заданого моменту часу використовують метод типових кривих загасання і метод спрямлення характеристик.

Метод типових кривих використовують для визначення струмів і напруг у місці короткого замикання для моментів часу до 0,5 с за наявності в електромережі синхронних генераторів, компенсаторів, синхронних і асинхронних електродвигунів широкого діапазону потужностей.

Метод спрямлення характеристик дозволяє визначити величини струмів і напруг не тільки в місці короткого замикання, але й в інших гілках розгалуженої схеми із синхронними генераторами для моментів часу від 0 до 4 с.

Для аналітичного розрахунку координат процесу при несиметричних КЗ для заданого моменту часу використовують метод симетричних складових у сукупності з методами типових кривих чи спрямлення характеристик.

При аналітичному методі методика розрахунку струмів короткого замикання має такий алгоритм [2]:

1. Складають схему заміщення, в яку входять всі опори кола короткого замикання.
2. Розраховують опори окремих елементів схеми заміщення, а саме активні опори для мережі живлення, понижуючого трансформатора, кабелів, шин, шинопроводів, кабелів, а також апаратів захисту.
3. Потім опори всіх ліній, трансформаторів і генераторів до шин підстанцій, які живлять розподільну мережу, заміняють еквівалентним опором енергосистеми  $Z_m$ .
4. Опори ліній і трансформаторів розподільної мережі від шин підстанції живлення до місця короткого замикання сумуються і заміняються еквівалентним опором  $Z_{p.m.}$ .
5. Струм короткого замикання визначають за законом Ома:

$$I_{к.з.} = U / Z_m + Z_{p.m.} \quad (1)$$

6. Підставляючи в наведену формулу значення даних, розраховуємо струм короткого замикання ( міжфазний і однофазний ).

Переважає більшість КЗ у мережах 0,4 кВ відбувається через електричну дугу в місці пошкодження, опір якого дуже знижує значення струму КЗ [3]. За даними досліджень 85% КЗ виникають внаслідок контакту провідників, але електродинамічні сили, які пропорційні квадрату струму, розкидають металеві провідники, розривають замикання невеликого перетину і КЗ переходить в дугове. Лише в 2 % випадків КЗ залишається металевим .

При розрахунку металевого КЗ визначають наступні значення струму:

$I_{к. макс}^{(3)}$  — максимальний струм трифазного металевого КЗ;

$I_{к. мин}^{(2)}$  — мінімальний струм двофазного металевого КЗ;

$I_{к. мин}^{(1)}$  — мінімальний струм однофазного металевого КЗ.

Щоб врахувати струмообмежуючої дії електричної дуги в місці пошкодження, визначають наступні значення струмів і напруг:

$I_{к. ср}^{(3)}$  — середній найбільш ймовірний струм трифазного КЗ;

$I_{к. R}^{(2)}$  — мінімальний струм двофазного КЗ;

$I_{к. R}^{(1)}$  — мінімальний струм однофазного КЗ;

$I_{к. залиш}$  — залишкова напруга при КЗ через дугу.

Визначається також значення ударного струму КЗ і його тепловий імпульс. Їх використовують для вибору апаратури, шинопроводу і іншого електрообладнання.

При розрахунку струмів міжфазного КЗ при живленні від енергосистеми струм трифазного металевого КЗ визначається [5]

$$I_{к}^{(3)} = U_{ср. н} / 1,7(X_p^2 + R_p^2)^{1/2} = U_{ср. н} / 1,7 Z_p, \quad (2)$$

де  $U_{ср. н}$  — середня номінальна лінійна напруга мережі НН (для мережі 0,4 кВ дорівнює 400 В);  $R_p$ ,  $X_p$  — результуючі активні і індуктивні опори кола КЗ;  $Z_p$  — результуючий повний опір кола КЗ.

При визначенні  $I_{к. макс}^{(3)}$  в значення  $R_p$  і  $X_p$  входять опори енергосистеми живлення в максимальному режимі, а при визначенні  $I_{к. мин}^{(3)}$  — в мініальному.

Мінімальний струм металевого двофазного КЗ

$$I_{к.мін}^{(2)} = 0,867 I_{к.мін}^{(3)} \quad (3)$$

Мінімальний струм трифазного КЗ з врахуванням струмообмежуючої дії дуги визначається

$$I_{к. R}^{(3)} = U_{сер. н} / 1,7 [X_p^2 + (R_p + R_{пер})^2]^{1/2}, \quad (4)$$

де  $R_p, X_p$  — активні і індуктивні результуючі опори кола КЗ без врахування опорів рубильників, вимикачів, болтових з'єднань;  $R_{пер}$  — перехідні опори, які враховують опір електричної дуги в місці КЗ, а також опори рубильників, вимикачів, болтових з'єднань (рекомендується приймати рівним 15 мОм).

Струм двофазного КЗ

$$I_{к. R}^{(2)} = 0,867 I_{к. R}^{(3)} \quad (5)$$

Середнє значення струмів трифазного КЗ із врахуванням струму обмежуючої дії дуги в місці пошкодження для любого розрахункового випадку визначається

$$I_{к. сер}^{(3)} = k_n (I_{к. макс}^{(3)} + I_{к. R}^{(3)}) / 2, \quad (6)$$

де  $k_n$  — коефіцієнт надійності, який приймається рівним 1,05 – 1,1 при струмах металевого КЗ більше 40 кА і 1,0 – в інших випадках.

Для розрахунків струмів КЗ складають схему заміщення, в яку входять всі опори, мережі КЗ. Значення цих опорів виражають у міліОмах. Розглянемо, як визначаються опори окремих елементів схеми заміщення.

Активний і індуктивний опір енергосистеми живлення до затискачів високої напруги ВН понижуючого трансформатора знаходять з розрахунків струмів КЗ на стороні ВН і приводять до сторони низької напруги НН вирази:

$$X_c = 10^3 X_{c.ВН} (U_{н.т.НН} / U_{н.т.ВН})^2; \quad (7)$$

$$R_c = 10^3 R_{c.ВН} (U_{н.т.НН} / U_{н.т.ВН})^2, \quad (8)$$

де  $X_{c.ВН}, R_{c.ВН}$  — відповідно індуктивний і активний опори енергосистеми, приведені до сторони ВН;  $X_c, R_c$  — відповідно індуктивний і активний опори енергосистеми, приведені до сторони НН понижуючого трансформатора;  $U_{н.т.НН}, U_{н.т.ВН}$  — відповідно номінальні напруги обмоток НН і ВН понижуючого трансформатора.

Для практичного розрахунку струмів КЗ допустимо не враховувати активний опір енергосистеми, а індуктивний приймати рівним повному опору енергосистеми, визначаючи його значення за відомим струмом  $I_{к.ВН}^{(3)}$  або потужністю  $S_{к.ВН}^{(3)}$  трифазного КЗ на затискачах ВН понижуючого трансформатора:

$$X_{c.ВН} = U_{ен.ВН} / 1,7 I_{к.ВН}^{(3)} = U_{ен.ВН}^2 / S_{к.ВН}^{(3)}, \quad (9)$$

де  $U_{ен.ВН}$  — напруга енергосистеми зі сторони ВН трансформатора, при якому визначались струм і потужність КЗ системи.

Активний і індуктивний опори понижуючого трансформатора приведені до сторони НН:

$$Z_T = 10^4 U_K U_{H.T}^2 / S_{H.T}; \quad (10)$$

$$R_T = 10^6 P_K U_{H.T}^2 / S_{H.T}^2; \quad (11)$$

$$X_T = (Z_T^2 - R_T^2)^{1/2}, \quad (12)$$

де  $S_{H.T}$  — номінальна потужність трансформатора;  $U_{H.T}$  — номінальна лінійна напруга обмотки НН;  $P_K$  — потужність втрат КЗ в трансформаторі;  $U_K$  — напруга КЗ трансформатора (в %).

Активні і індуктивні опори кабелів визначаються

$$X_K = X_{пит} L; \quad (13)$$

$$R_K = R_{пит} L, \quad (14)$$

де  $X_{пит}$ ,  $R_{пит}$  — відповідно індуктивні і активні питомі опори кабелів (беруться з таблиці);  $L$  — довжина кабеля.

Опір шин і шинопроводів довжиною 5 м і менше можна не враховувати, так як їх вплив на струм невеликий. При більшій довжині їх опори знаходять аналогічно до опорів кабеля. Питомі опори знаходять в таблицях.

Активні і індуктивні опори лінії визначаються за тими ж формулами, що і кабелів. Для ліній 0,4 кВ з проводами з кольорових металів значення індуктивного опору наближено приймають рівним 0,3 мОм/м, а активного знаходять по таблиці. Лінії зі сталевими провадами застосовують рідко. Активні і реактивні опори залежать від конструкції проводу, значення струму і т.п.

При великій потужності енергосистеми живлення ( $X_c < 0,1X_T$ ), струм однофазного металевого к.з. при живленні від енергосистеми знаходять за виразом:

$$I_{к}^{(1)} = U_{ф} / Z_T^{(1)} / 3 + Z_{пт}, \quad (15)$$

де  $U_{ф}$  — фазна напруга мережі;  $Z_{пт}$  — повний опір петлі фаза – нуль від трансформатора до точки КЗ, який вимірюється при випробуваннях або знаходиться із розрахунку;  $Z_T^{(1)}$  — повний опір понижуючого трансформатора струмам однофазного КЗ (приймається за даними таблиці або знаходиться за виразом:

$$Z_T^{(1)} = [ (X_{1T} + X_{2T} + X_{0T})^2 + (R_{1T} + R_{2T} + R_{0T})^2 ]^{1/2}, \quad (16)$$

де  $X_{1T}$ ,  $R_{1T}$  — індуктивний і активний опори трансформатора струмам прямої послідовності;  $X_{2T}$ ,  $R_{2T}$  — те саме, але зворотної послідовності;  $R_{0T}$  — те ж, але нульової послідовності.

Якщо енергосистема живлення має обмежену потужність, то значення  $Z_T^{(1)}$  збільшується з врахуванням опору енергосистеми :

$$Z_T^{(1)} = [ (X_{1T} + X_{2T} + X_{0T} + 2X_c)^2 + (R_{1T} + R_{2T} + R_{0T} + 2R_c)^2 ]^{1/2}. \quad (17)$$

Наближено  $Z_T^{(1)}$  з врахуванням опору енергосистеми можна приймати по таблицях. Опір петлі фаза-нуль визначається

$$Z_{пт} = Z_{пт. пнт1} L_1 + Z_{пт. пнт2} L_2 + \dots, \quad (18)$$

де  $Z_{пт. пнт}$  — питомий опір петлі фаза-нуль кожного із послідовно ввімкнених ділянок кола від трансформатора до точки КЗ (приймається за даними таблиць);  $L$  — довжина цієї ділянки.

Опори контактів шин, апаратів, трансформаторів струму не враховуються, оскільки розрахунок для визначення  $I_{кR}^{(1)}$  із вищевказаної формули дає деякий запас по струму внаслідок арифметичного додавання опорів.

При розрахунках однофазних КЗ у вибухонебезпечних приміщеннях допоміжні провідники занулення (алюмінієві оболонки кабелю, сталеві стрічки) в розрахункову схему не входять. Свинцеві оболонки кабелю в розрахункову схему не входять в будь-якому випадку, тому що їх не дозволяється використовувати в якості заземлюючих провідників.

Струм однофазного КЗ при будь-якій потужності мережі живлення і з врахуванням струму обмежуючої дії дуги в місці пошкодження, а також перехідних опорів визначається за виразом:

$$I_{кR}^{(1)} = U_{ф} / Z_{п}^{(1)} / 3 + Z_{пт}, \quad (19)$$

де  $Z_{пт}$  — повний опір петлі фаза-нуль від трансформатора до точки КЗ, яке вимірюється при випробуваннях або знаходиться із розрахунку;  $Z_{п}^{(1)}$  — умовна величина, яка чисельно дорівнює геометричній сумі повних опорів струму однофазного КЗ енергосистеми живлення, трансформатора, а також перехідних опорів  $R_{п}$  і визначається за виразом:

$$Z_{п}^{(1)} = [ (X_{1т} + X_{2т} + X_{0т} + 2X_c)^2 + (R_{1т} + R_{2т} + R_{0т} + 2R_c + 3R_{п})^2 ]^{1/2}. \quad (20)$$

Значення  $Z_{п}^{(1)} / 3$  з врахуванням  $R_{п} = 15$  мОм в залежності від відношення опорів енергосистеми живлення  $X_c$  і трансформатора  $X_t$  (прямої послідовності) знаходять із таблиці.

Корисно запам'ятати, що для всіх трансформаторів з однаковими схемами з'єднань обмоток і напругою  $U_k$  використовують вираз:

$$S_{н.т}(Z_{т}^{(1)} / 3) = \beta = \text{const}. \quad (21)$$

Звідси можна знайти значення  $Z_{т}^{(1)} / 3$  для трансформаторів іншої потужності, в тому числі і старого типу.

Таким чином, розрахувавши струм короткого замикання і підібравши необхідне електрообладнання, електропроводку, кабелі та апарати захисту, зменшуємо ймовірність виникнення пожеж від електроустановок.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Семочко Г.Ю., Юзьків Т.Б. та ін. Комплексне дослідження пожеж // Навчально-методичний посібник. — Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2001. — 79 с.
2. Беляев А.В. Выбор аппаратуры защиты и кабелей в сетях 0,4 кВ. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 172 с.
3. Бойченко В.И. Особенности расчетов токов короткого замыкания в распределительных сетях. — Л.: Энергия, 1995. — 85 с.
4. Симоновский С.Ф. Защита сельских электрических сетей от коротких замыканий и перегрузок. — М.: Колос, 1983. — с. 3 – 18, 48 – 72.
5. Смелков Г.И., Фетисов П.А. Возникновение пожаров от коротких замыканий в электропроводах. — М.: Стройиздат, 1989. — с. 11 – 65.