

Лекція 16

РІВНІ СТРУМІВ ТА ПОТУЖНОСТІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

1. Якість електромагнітних перехідних процесів

Основне джерело в електропостачанні промислових підприємств – електроенергетична система (ЕЕС). Тенденції зростання кількості та потужності джерел електричної енергії в ЕЕС, наближення джерел живлення до споживачів, збільшення числа і потужності синхронних та асинхронних двигунів у вузлах навантаження означають одночасно підвищення рівня потужності і струмів КЗ на шинах знижувальних підстанцій та в розподільних електричних мережах СЕП. Це обумовлює підвищені вимоги відносно електродинамічної та термічної стійкості елементів СЕП, а також функціонування комутаційної апаратури, релейного захисту, системної автоматики.

При створенні СЕП слід узгоджувати поставлені вимоги до елементів з можливими перехідними процесами. Аналіз електромагнітних перехідних процесів з оцінкою їх якості необхідний для проектування і правильної експлуатації СЕП.

Перехідні процеси щодо узгодження з вимогами до СЕП з їх елементами характеризуються якісними та кількісними показниками. Останні звичайно є функціоналами залежності параметрів режиму від тривалості або їх граничними значеннями і містять певну інформацію. Показники якості електромагнітних перехідних процесів, що виникають при переході СЕП від нормального режиму роботи до аварійного, оцінюють за такими їх властивостями, характеристиками та наслідками.

Тривалість перехідного процесу. Це – інтервал часу, протягом якого СЕП переходить з одного стійкого стану до іншого. Тривалість процесів, близьких до аперіодичних, можна оцінити інтервалом часу $t_{\text{прив}} \leq 3T_a$, якщо скористатися значенням еквівалентної постійної часу електричної мережі T_a . При перехідних процесах, які виникають внаслідок раптових порушень нормального режиму, звичайно прагнуть скоротити час аварійного режиму. Оцінюючи розрахункову тривалість аварійного режиму (КЗ), цей інтервал часу

складають з мінімального часу дії засобів захисту $t_{3\min}$ та власного часу вимикання комутаційної апаратури $t_{3\text{вим}}$:

$$\tau = t_{3\min} + t_{3\text{вим}}.$$

Можливі порушення режиму (вмикання, вимикання, КЗ, пуск тощо) розраховують за тривалістю для кожного виду електроустаткування з метою порівняння з допустимим часом перебігу перехідного режиму, який може обмежуватися технічними чи технологічними умовами, вимогами безпеки, перегріванням і т. ін.

Характер перехідного процесу. Його оцінюють за зміною струму протягом певного часу. Характер електромагнітного перехідного процесу залежить від потужності джерел електричної енергії, параметрів електричних мереж, наявності на генераторах пристроїв АРЗ, встановлення в електричних мережах пристроїв АПВ.

Характер перехідного процесу (зміни параметрів режиму) може бути аперіодичним, коливальним з незмінною або аперіодично мінливою амплітудою чи монотонним. При розрахунку параметрів режиму КЗ використовують якісну оцінку характеру перехідного процесу за амплітудою. Щодо розмагнічувальної дії реакції статора генераторів при перебігу струму КЗ джерела живлення умовно розподіляють на джерела необмеженої та обмеженої потужності.

Кількісні оцінки у визначенні характеру перехідного процесу – коефіцієнт затухання періодичної складової струму КЗ

$$\gamma_{\text{пт}} = I_{\text{пт}} / I'' \quad (1)$$

і коефіцієнт затухання аперіодичної складової струму КЗ

$$\gamma_{\text{ат}} = i_{\text{ат}} / i_{\text{а0}}. \quad (2)$$

Небезпечні наслідки для обладнання СЕП. Останні оцінюють відповідно такими показниками перехідного процесу струму КЗ:

– електродинамічною стійкістю елементів СЕП (перевіряється за ударним струмом при трифазному КЗ);

– термічною стійкістю (оцінюється за найбільшим тепловим імпульсом струму при три- або двофазному КЗ)

$$B_{\kappa} = \int_0^t i_{\kappa}(t) dt. \quad (3)$$

Вплив параметрів аварійного перехідного процесу на нормальні режими роботи СЕП та її елементів. Для СЕП підприємств оцінку цього впливу відображають залежності показників якості електричної енергії у електроприймачів з складним режимом споживання енергії від рівня потужності КЗ:

– коефіцієнт спотворення кривої синусоїдальності напруги

$$K_{nc} = S_{na} / S_k \leq 0,05, \quad (4)$$

пропорційний сумарній потужності перетворювальних агрегатів S_{na} та обернено пропорційний потужності КЗ;

– коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю

$$K_{2U} \approx S_{no} / S_k \leq 0,02, \quad (5)$$

пропорційний потужності однофазного навантаження S_{no} та обернено пропорційний потужності КЗ;

– коливання напруги

$$\delta V = (\Delta P_{рез} / r_{рез} + \Delta Q) / S_k, \quad (6)$$

пропорційні накиду потужності реактивного навантаження та обернено пропорційні потужності КЗ;

– коливання частоти

$$\Delta f \approx (\Delta P / \Delta t) / (2\pi S_k), \quad (7)$$

пропорційні швидкості накиду активної потужності у електроприймачів з різкозмінним навантаженням та обернено пропорційні потужності КЗ.

Вартість додаткових заходів для поліпшення необхідних характеристик перехідного процесу в СЕП. Для СЕП великих підприємств струми КЗ досягають на приймальних пунктах електричної енергії таких значень, що без їх обмежень не обійтися. Вирішення цього завдання вимагає додаткових капітальних вкладень.

Як бачимо, показники якості електромагнітних перехідних процесів по-різному характеризують умови функціонування СЕП та електроприймачів. В основі якісної оцінки всіх показників лежать струми та потужності КЗ. Для СЕП характерне протиріччя в оцінці їх рівня. З погляду зниження вартості елементів СЕП та поліпшення умов їх роботи рівні струмів та потужності КЗ бажано зменшувати, а забезпечення якості електричної енергії у електроприймачів, навпаки – підвищувати. Звідси – пошук компромісного вибору показників якості електромагнітних перехідних процесів та рівнів струму і потужності КЗ.

2. Способи обмеження струмів короткого замикання

Рівні струмів та потужності КЗ характеризують очікувані умови роботи електрообладнання СЕП в аварійних ситуаціях. Вони визначають вибір перерізу шин, струмоводів, провідників та кабелів, вимикальну і комутаційну властивості апаратів, електродинамічну та термічну стійкість струмоведучих частин і конструкцій електрообладнання за чинниками аварійного режиму. Це не лише ставить жорсткіші вимоги до його технічних характеристик, а й свідчить про відповідне зростання вартісних показників.

При проектуванні СЕП вирішується техніко-економічне завдання щодо обмеження рівнів струмів та потужності КЗ до значень, допустимих параметрами економічно вигідного електрообладнання.

У процесі експлуатації СЕП має місце додавання нових джерел електричної енергії і постає питання обмеження рівнів струмів та потужності КЗ, якщо вони перевищують технічні параметри встановленого електрообладнання. Для цього використовують різні заходи, пов'язані з обмеженням струмів КЗ і спрямовані на збільшення значень електричного опору кола КЗ, локалізацію в аварійному режимі джерел його живлення та вимикання пошкодженої електричної мережі за час $t < 1/(4f)$ (для частоти струму $f = 50$ Гц складає $t < 5$ мс). До таких заходів також належать: вибір структури і схеми електричних з'єднань елементів СЕП; стаціонарний чи автоматичний поділ електричної мережі та вибір режиму її експлуатації; вибір схем комутації; застосування обладнання з підвищеним електричним опором; використання швидкодіючих комутаційних апаратів; зміна стану нейтралі елементів мережі та вмикання в мережу ділянок з електромагнітним перетворенням параметрів режиму системи.

Структуру та схеми електричних з'єднань елементів СЕП вибирають на стадії проектування або реконструкції. Під час прийняття рішень за основу слід брати такі принципи:

- поздовжній розподіл мереж однакового рівня напруги з розміщенням об'єкта електропостачання на територіально різних ділянках, де їх зв'язок відбувається через мережу більш високої напруги (рис. 1,а);
- поперечний розподіл мереж однакової напруги територіально сполучених, але зв'язаних мережею вищої напруги (рис. 1,б);
- роздільне живлення вузлів навантаження від джерел електричної енергії з їх паралельною роботою через зв'язки в електричній мережі з використанням блокових з'єднань "генератор – трансформатор – лінія";
- розукрупнення приймальних підстанцій і поетапний розвиток СЕП шляхом впровадження глибоких вводів високої напруги;
- застосування роздільної роботи основних елементів СЕП (ліній, трансформаторів) на всіх ступенях розподілу електричної енергії;
- використання розімкнених розподільних мереж з широким вживанням струмоводів, шинних і кабельних магістральних ліній, що дає змогу скористатися струмообмежувальною дією самої мережі.

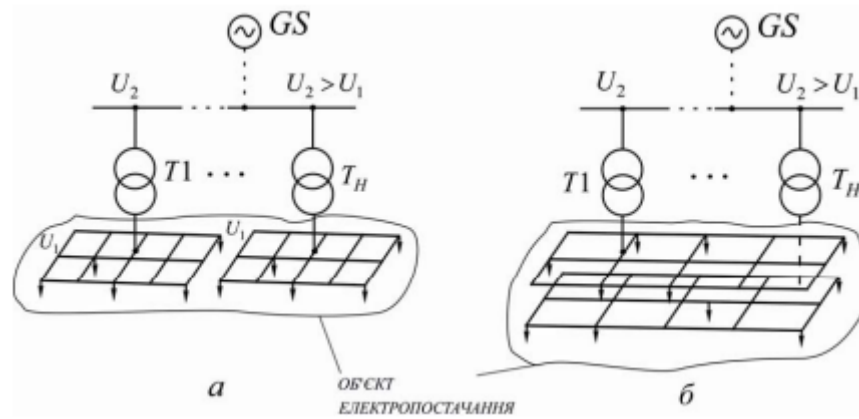


Рис. 1. Розподіл електричної мережі: а – поздовжній; б – поперечний

При складанні схем електропостачання необхідно брати до уваги важливі вимоги, що ставляться до СЕП.

Максимальне наближення джерел живлення до електроприймачів. У тривалих режимах використовується централізоване електропостачання від ЕЕС одним або кількома приймальними пунктами. Для СЕП промислових підприємств характерна наявність кількох джерел живлення місця КЗ: власні джерела електричної енергії у вигляді генераторів ТЕС, через підстанції зв'язку з районною енергетичною системою; синхронні компенсатори; синхронні та асинхронні двигуни, що перейшли на генераторний режим. Пайова участь кожного джерела в живленні місця КЗ залежить від його потужності та електричної віддаленості. Наближення основного джерела живлення свідчить про зменшення кількості проміжних трансформацій в СЕП, збільшення числа елементів мережі, розрахованих на вищу напругу, а відповідно – і на менші робочі струми та струми КЗ. Усі джерела живлення СЕП підприємства з метою резервування пов'язані між собою струмоводами, КЛ або ПЛ на живильній вторинній напрузі. Поряд з резервуванням елементів у цьому випадку переважають зв'язки на вторинній напрузі, оскільки дають можливість отримувати менший рівень струмів КЗ.

Секціювання всіх ступенів розподілу електричної енергії в СЕП. Ця вимога тісно пов'язана з вибором кількості та потужності трансформаторів головних понижувальних підстанцій (ГПП) і трансформаторних пунктів (ТП), кількості та пропускної потужності живильних ліній. Така побудова СЕП дозволяє збільшувати електричний опір мережі перебігу струму КЗ, запобігти чи локалізувати місце КЗ.

Побудова і вибір конфігурації електричної мережі (радіальної, магістральної, радіально-магістральної) повинні обґрунтовуватися разом з такими основними чинниками, як надійність, втрати потужності та енергії, витрати кольорового металу, ще й шкалою використання перерізу провідників, вибраних за рівнем струму КЗ.

Використання ступеневого струмообмеження в схемі електропостачання, при якому струмообмежувальні пристрої або елементи мережі з струмообмежувальною дією встановлюють на кількох послідовних ступенях розподілу електричної енергії. Щодо цього найбільш характерні схеми електропостачання вугільних шахт, в яких перший ступінь обмеження потужності КЗ – це її зниження на ГПП шахти, а другий – на лініях, що живлять навантаження підземних споживачів, де потужність КЗ обмежена Правилами безпеки на рівні 50...100 МВ·А.

Стаціонарний або автоматичний розподіл мереж здійснюється звичайно в системах зовнішнього електропостачання в зв'язку із збільшенням кількості та потужності джерел електричної енергії як в енергетичній системі, так і на власних ТЕС. Необхідність розподілу мережі виникає тоді, коли рівень струму КЗ у вузлах навантаження перевищує допустимий за параметрами експлуатованого електрообладнання. Зауважимо, що розподіл мережі суттєво впливає на експлуатаційні режими, стійкість та надійність роботи електричної системи, а також на втрати потужності та енергії в мережах.

Стаціонарного розподілу первинної схеми мережі (рис. 2,а) досягають за нормального режиму таким чином, щоб максимальний рівень струму КЗ у конкретному вузлі навантаження не перевищував допустимого за параметрами електрообладнання (рис. 2,б,в).

В аварійних ситуаціях мережу розподіляють автоматично послідовною локалізацією місця КЗ (рис. 2,г). При КЗ на відгалуженні А вимикають частину джерел живлення місця пошкодження вимикачем $QS2$ або $QS3$, після чого вимикачем $QS1$ вимикають пошкоджене відгалуження. У послідовному вимиканні джерел живлення місця КЗ можна використовувати розміщені раніше комутаційні апарати з меншою вимикальною властивістю порівняно з апаратами, які знадобляться відповідно до дійсного рівня струмів КЗ.

Вибір режиму експлуатації мережі тісно пов'язаний з схемними рішеннями. У СЕП в тривалому режимі рекомендується роздільна робота силових трансформаторів ГПП та ТП. Разом з роздільною роботою джерел електричної енергії розукрупнення підстанцій та секціювання всіх ступенів розподілу енергії дають можливість отримувати найбільший опір у колі перебігу струму КЗ. У нормальному режимі всі секції розподільних пристроїв працюють незалежно, а необхідна міра безперервності електропостачання забезпечується вмиканням в аварійних ситуаціях секційних вимикачів оперативним обслуговуючим персоналом або з використанням пристроїв АВР. Кільцеві схеми мереж електропостачання експлуатують з розімкненим секційним вимикачем на одній з підстанцій.

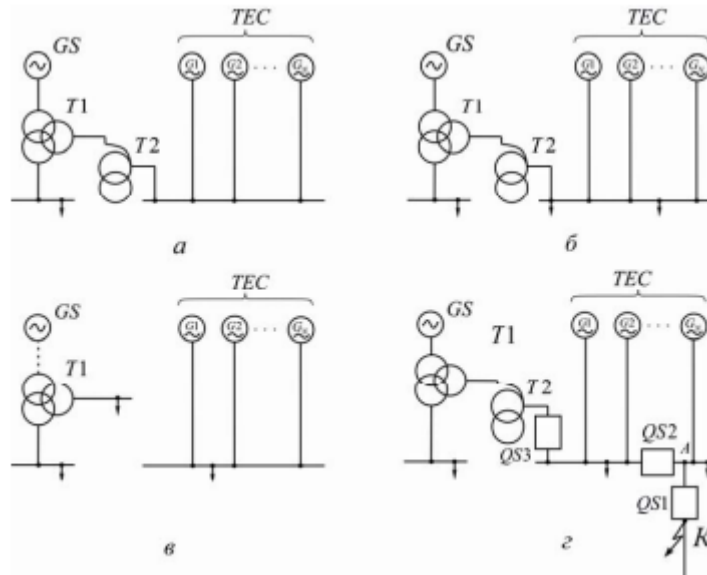


Рис. 2. Розподіл мереж системи електропостачання: а – первинна схема мережі; б, в – стаціонарний розподіл; г – автоматичний розподіл

Викладеними рекомендаціями щодо вибору режиму при наявності потужних електроприймачів з різкозмінним ударним навантаженням користуються не завжди. При обмеженій потужності джерела електричної енергії подібні електроприймачі обумовлюють накиди чи скиди активного і реактивного навантаження, що викликає коливання напруги. Для забезпечення допустимого мінімального рівня напруги в живильній мережі таких електроприймачів ефективні такі засоби: підвищення рівня струму КЗ, застосування вищої напруги, відокремлене електропостачання.

Схеми живлення СЕП при проектуванні зовнішнього електропостачання вибирають на основі фактичної потужності КЗ, що надходить від енергетичної системи, відповідної міри безперервності електропостачання, складу та територіального розміщення електроприймачів. Необхідно оцінювати і струми КЗ, що можуть генеруватися синхронними та асинхронними двигунами, а також можливості подальшого розвитку СЕП. Схеми електричних з'єднань елементів повинні відповідати вимогам надійності, простоти та економічності.

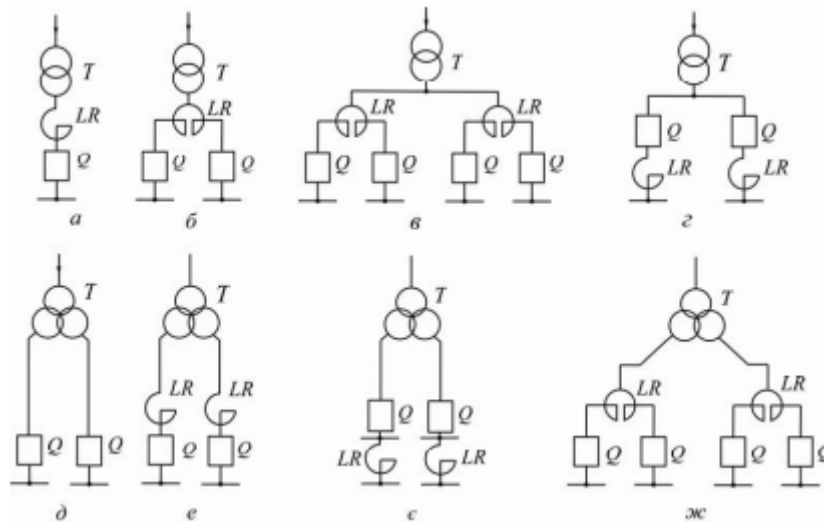


Рис. 3. Варіанти схем електричних з'єднань ГПП з обмеженням струмів КЗ на шинах вторинної напруги при різній одиничній потужності трансформаторів: а – 25–40 МВ·А; б – 32–63 МВ·А; в – 63–80 МВ·А; г – 63–100 МВ·А; д – 25–80 МВ·А; е – 40–80 МВ·А; є – 63–80 МВ·А; ж – 100 МВ·А

Визначальний для рівнів струму КЗ в СЕП – вибір схеми електричних з'єднань ГПП як вузла зв'язку між ЕЕС та розподільною мережею СЕП. Чим більша потужність знижувального трансформатора, тим більший струм КЗ на шинах ГПП. Для його зменшення слід розукрупнювати потужність трансформаторів цієї підстанції СЕП або застосовувати схеми електричних з'єднань, обмежуючих рівень струму КЗ на шинах вторинної напруги. На рис. 3 – варіанти схем електричних з'єднань, які рекомендується використовувати при підвищенні встановленої потужності трансформаторів.

Під час вибирання схем електричних з'єднань варто звертати увагу на побудову мереж, ввімкнених до шин вторинної напруги ГПП. Це місце КЗ живиться від асинхронних та синхронних двигунів через розподільну мережу. Секціювання на всіх ступенях розподілу електричної енергії зменшує значення струму КЗ, що генерується місцевими джерелами. Тут слід урахувати зміни схеми електричних з'єднань в експлуатаційних режимах (для найбільш важкого режиму), за яких допускається тривала робота з ввімкненими секційними апаратами.

У схемах електропостачання підприємств перспективне застосування блокових з'єднань: лінія живильної напруги – трансформатор ГПП; лінія живильної напруги – трансформатор ГПП – струмовід розподільної напруги; лінія розподільної напруги – трансформатор підстанції – магістральний шинопровід низької напруги та ін.

Застосування електрообладнання з підвищеним електричним опором передбачає встановлення як загальномережних, так і спеціальних елементів. При проектуванні СЕП можна спрямовано вибирати елементи мережі з

більшим реактивним чи активним опором, змінюючи кількість та потужність трансформаторів, застосовуючи їх з підвищеною відносною напругою КЗ, ПЛ та струмоводи із збільшеною відстанню між фазами, протяжні шинопроводи і т.п. До спеціального електрообладнання належать трансформатори та автотрансформатори з розщепленими обмотками, одноланцюгові та здвоєні реактори, струмообмежувальні пристрої резонансного, трансформаторного чи реакторного типів, призначення яких – нарощувати опір струму, який більший за значення струму робочого режиму.

Струмообмежувальна дія комутаційних апаратів, що виконують цю функцію за амплітудою та тривалістю вимикання струму КЗ, з'являється за час швидкодії, менший періоду зміни струму. Електродинамічний вплив струму КЗ зменшується при використанні апаратів, час дії яких до 5 мс (рис. 4). Як такі апарати можуть застосовуватись безінерційні запобіжники, тиристорні вимикачі з примусовою комутацією, обмежувачі ударного струму вибухової дії, а також деякі типи автоматичних вимикачів напругою до 1 кВ. При тривалості КЗ понад 5 мс виявляється тепловий вплив струму, який може бути зменшений прискореним вимиканням пошкодженого кола.

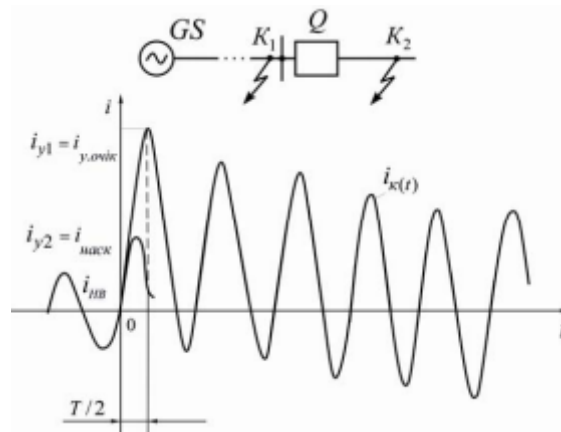


Рис. 4. Характер обмеження комутаційним апаратом Q електродинамічного впливу струму КЗ від значення i_{y1} до значення i_{y2}

Досить суттєвий чинник зменшення значень струмів КЗ, що перебігають у контурах "провідники–земля", – зміна стану нейтралі елементів електричної мережі. Заземлення нейтралей через додаткові опори призводить до зростання еквівалентного опору нульової послідовності. Цієї ж мети досягають заміною трансформаторів у вузлових точках мережі трансформаторами такої потужності із з'єднанням фазних обмоток за схемою "зірка–зірка". Заземлення нейтралі полегшує розв'язання інших важливих завдань проектування (рівнів ізоляції, вимог безпеки, рівнів перенапруг, надійності), але підвищує значення струму КЗ на землю. Тому вибір та зміна стану нейтралі мереж або її елементів повинні здійснюватися комплексно, з етапом технікоекономічного обґрунтування.

Електромагнітне перетворення параметрів режиму СЕП (режиму навантаження) означає передачу потужності споживачам з виконанням операцій випрямлення, інвертування та зміни частоти струму, а також перетворень трифазної системи напруг на однофазну, на систему струму тощо. В СЕП такі перетворення параметрів електричної енергії – однобічні й виконуються переважно для живлення спеціальних груп електроприймачів (прокатних станів, зварювальних машин, промислового та міського транспорту). Елементи електрообладнання, що реалізують ці операції, відіграють роль розв'язувальних пристроїв усунення живлення місця КЗ від увімкнених за ними вузлів навантаження та місцевих джерел (в аварійних ситуаціях усунена зворотна передача енергії в живильну мережу).

При перетворенні в мережі системи напруги на систему струму режим КЗ в останній – неаварійний, а нормальний режим роботи (мережі групових зварювальних постів, мережі живлення електродугових печей, вторинні кола релейного захисту). Таке ж перетворення електричних параметрів режиму використовують і для передачі та розподілу енергії в системі рудникового транспорту з безконтактними електровозами.

Таким чином, потужність та струми КЗ у СЕП обмежуються правильним проектуванням схем підстанцій та електричних мереж. Підбір способу обмеження рівня потужності та струмів КЗ – неоднозначний і практично являє собою сукупність заходів, що комплексно вирішують цілу низку питань вибору параметрів електрообладнання та режимів роботи на основі техніко-економічних розрахунків.

3. Технічні засоби обмеження струмів короткого замикання

Реалізація різних способів обмеження струмів КЗ, окрім прийняття при проектуванні та експлуатації рішень щодо структури, схем з'єднання елементів та режимів експлуатації СЕП, передбачає спеціальні технічні заходи. Останні являють собою застосування окремого електрообладнання, яке завдяки конструктивному виконанню безпосередньо обмежує значення чи тривалість дії струму КЗ або використовується в схемах з'єднання елементів, що виконують у сукупності саме цю функцію. До засобів належать:

- апарати і пристрої, що реалізують автоматичний розподіл мережі;
- силові трансформатори і автотрансформатори, у тому числі з особливими конструкцією та з'єднанням фазних обмоток;
- струмообмежувальні елементи та пристрої;
- струмообмежувальні комутаційні апарати;
- пристрої зміни стану нейтралі силових елементів

Автоматичний розподіл мережі можна використовувати в зовнішньому електропостачанні підприємств у мережах напругою 35 кВ та вище. Така операція здійснюється із застосуванням пристроїв протиаварійної автоматики і комутаційних апаратів, встановлених на потужних відгалуженнях, між секціями розподільних пристроїв та на вводах.

До складу засобів протиаварійної автоматики входять захист, що реагує на появу КЗ, пристрої системи автоматичного послідовного вимикання комутаційних апаратів (рис. 2,г), пристрої автоматичного частотного розвантаження, пристрої АПВ та АРЗ. Система послідовного вимикання струму КЗ повинна мати високу надійність та швидкодію (при вимиканні струму КЗ і при відновленні початкового режиму), а її комутаційні апарати – витримувати повний наскрізний струм КЗ та вмикання без пошкоджень на КЗ в аварійному приєднанні. Недоліки такої системи:

- зниження запасу статичної стійкості післяаварійного режиму внаслідок дисбалансу потужності джерел живлення та навантаження на ділянках електричної мережі, що розділилася, чи зміни з'єднань у схемі електропостачання;
- тривале відновлення початкового режиму живлення електроприймачів після вимикання відгалуження з КЗ.

Для автоматичного розподілу мережі необхідно:

- зробити аналіз розрахункової схеми для можливих КЗ;
- оцінити баланс потужності в зазначених для розподілу ділянках електричної мережі;
- урахувати можливі зміни конфігурації електричної мережі;
- обчислити час послідовного вимикання струму КЗ та час відновлення схеми з'єднань для нормального режиму;
- оцінити запас статичної стійкості післяаварійного режиму, узгодити рівні струмів КЗ та технічні параметри комутаційних апаратів.

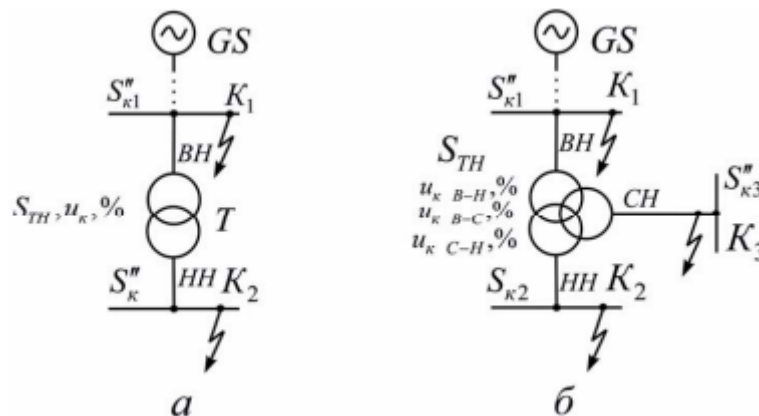


Рис. 5. До обмеження рівня потужності КЗ параметрами трансформаторів: а – двообмотковим; б – триобмотковим

Силові трансформатори і автотрансформатори можуть створюватися з урахуванням необхідності обмеження струмів та потужності КЗ. Для обмеження рівня потужності КЗ на шинах вторинної напруги використана конструктивна особливість трансформаторів. Відомо, що їх конструктивний параметр “напруга короткого замикання” визначається номінальною напругою та прохідною потужністю трансформатора, які обумовлюють геометричні розміри його обмоток. При концентричному розміщенні обмоток у двообмоткових трансформаторів обмотка НН розміщена зсередини, а ВН – зовні; у триобмоткових трансформаторів обмотка СН – між обмотками НН та ВН. Розташування обмоток, діаметр та розміри каналу між ними впливають на значення “напруги короткого замикання”. Так, канал між обмотками СН та ВН у триобмоткових трансформаторів менший, аніж між обмотками НН і ВН.

Зменшення рівня потужності КЗ знижувальними трансформаторами (рис. 5) визначається:

для двообмоткового

$$S_{к2}'' / S_{к2}'' = 1 / (1 + u_{к} S_{к1}'' / (100 S_{Тн})); \quad (8)$$

для триобмоткового

$$\left. \begin{aligned} S_{к2}'' / S_{к1}'' &= 1 / (1 + 2u_{кВ-Н} S_{к1}'' / (100 S_{Тн})) \\ S_{к3}'' / S_{к1}'' &= 1 / (1 + 2u_{кВ-С} S_{к1}'' / (100 S_{Тн})) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Як видно з (8) і (9), зниження потужності КЗ залежить від напруги КЗ між відповідними обмотками трансформаторів, їх одиничної потужності та потужності КЗ, що надходить від ЕЕС. Знижувальні дво- та триобмоткові трансформатори за напругою короткого замикання мають певний діапазон значень: наприклад, для двообмоткових напругою 35/6–10 кВ і потужністю 1–80 МВА – в межах 6,5...14,4 %; 110/6–10 кВ і 2,5–400 МВА – 10,5...13,5 %; 150/6–10 кВ і 2,5–250 МВА – 10,5...14,6 %; 220/6–10 кВ і 31,5–125 МВА – 10,6...14 %.

Для обмеження рівня потужності КЗ на шинах вторинної напруги згідно з (8) і (9) необхідно вибирати трансформатори з підвищеним для відповідних обмоток значенням напруги короткого замикання, розукрупнювати за потужністю знижувальні підстанції на зв'язках з потужною ЕЕС, використовувати роздільну роботу трансформаторів.

Трансформатори і автотрансформатори можна робити з розщепленою обмоткою НН. Частина такої обмотки розміщують симетрично відносно обмотки ВН, мають самостійні виводи і допускають виконання на довільний розподіл навантаження. Для обмеження значень несиметричних струмів КЗ істотну роль відіграє схема з'єднання фазних обмоток трансформаторів (автотрансформаторів). Оскільки в схему заміщення нульової послідовності вмикають лише ті вітки, якими циркулюють струми нульової послідовності, то

до неї не потрапляють ділянки електричної мережі за обмотками, з'єднаними на трикутник.

Струмообмежувальні реактори, що вмикають у різних точках електричної мережі напругою 6–220 кВ, становлять додаткові реактивні опори. Їх призначення – знижувати значення струмів КЗ за реактором і зберегти необхідний рівень залишкової напруги у вузлових точках мережі перед реактором.

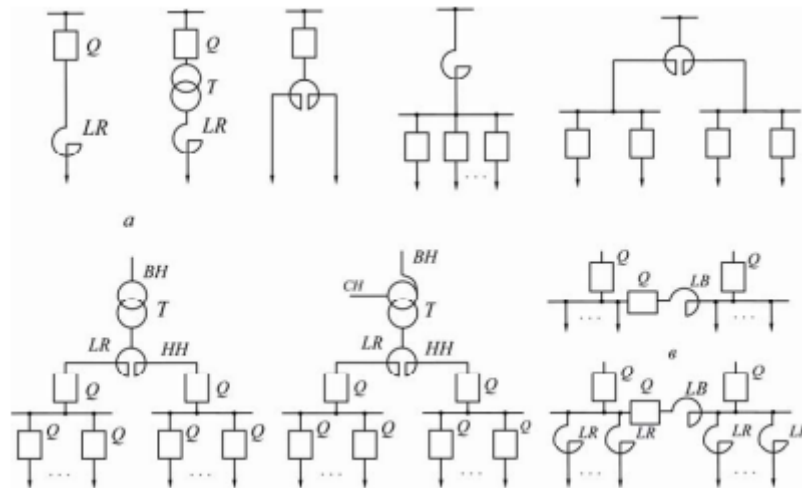


Рис. 6. Схеми реактування: а – відгалужень; б – введів; в – секцій; г – комбінована

Залежно від місця ввімкнення реактора розрізняють струмообмеження приєднань (рис. 6,а), введів (рис. 3 і 6,б), секцій (рис. 6,в) та їх сполучень (рис. 6,г). За схемою вмикання розрізняють реактори одноланцюгові чи здвоєні (розщеплені). Відмінність здвоєного реактора від одноланцюгового – у наявності середнього виводу обмотки, в зв'язку з чим можливі різні схеми вмикання та використання. Струмообмежувальна дія реактора характеризується індуктивним опором і номінальним струмом.

Для зменшення вартісних витрат необхідно використовувати групові реактори замість індивідуальних в приєднаннях, вводах та схемах комутації ГПП. Разом з тим у схемах, які мають групові реактори на значний номінальний струм і з великим реактивним опором, можливі коливання напруги через зміну їх навантаження. Цей недолік можна ліквідувати використанням здвоєних реакторів з рівномірним навантаженням їх віток. При різкозмінному навантаженні коливання напруги зменшуються частково.

За умови дотримання на виводах однієї вітки реактора нормованого значення коливання напруги на другу вітку можна ввімкнути потужність різко-змінного навантаження, що визначається за виразом

$$S_n = \delta V / (u_k / (100S_{T_n}) - 50x_n / U_n^2). \quad (10)$$

Ефективність використання одноланцюгового реактора залежить від параметрів електричної мережі та потужності КЗ, що надходить з джерела

живлення до точки вмикання (рис. 7,а). Відносне зниження значень потужності та струму КЗ розраховують за формулою

$$\Delta S_{*K} = (S_{K1} - S_{K2}) / S_{K1} \equiv \Delta I_{*K} = (I_{K1} - I_{K2}) / I_{K1},$$

яка після підстановки $I_{K1} = I_{\bar{0}} / x_c$; $I_{K2} = I_{\bar{0}} / (x_c + x_p)$ набуває вигляду

$$\Delta S_{*K} \equiv \Delta I_{*K} = (x_p / x_c) / (1 + x_p / x_c).$$

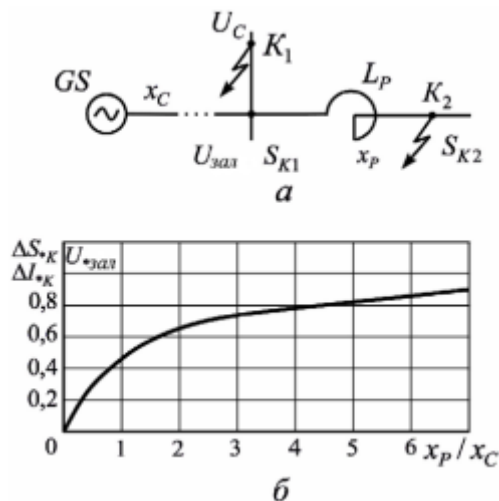


Рис. 7. До розгляду ефективності використання одноланцюгового реактора: а – схема вмикання; б – характеристики застосування

Відношення x_p/x_c має обмежений діапазон значень і залежить від параметрів, реактивність яких перебуває в межах 3...16 %, а також від параметрів зв'язку вузла мережі з джерелом живлення (%) $x_c = 100S_c / S_k$, де S_c – перепускна потужність елементів мережі районної енергетичної системи.

Струмообмежувальна дія реактора знижується із збільшенням потужності приймальних пунктів електричної енергії і підвищується з їх розукрупненням за кількістю та потужністю трансформаторів (рис. 8). Реактор вибирають за номінальними значеннями напруги та струму, індуктивним опором і перевіряють за динамічною та термічною стійкістю до струму КЗ, а при необхідності – за рівнем залишкової напруги в попередньому вузлі мережі.

Найперша дія при виборі реактора – визначення його індуктивного опору. Виходячи з потрібного рівня потужності КЗ за реактором $S_{K2} = S_{K \text{ необх}}$, необхідний індуктивний опір розраховують за формулами (у відносних або іменованих одиницях виміру)

$$x_{*p} = (S_{\bar{0}} / S_{K2} - x_{*(\bar{0})c}) I U_{\bar{0}} / (U_c I_{\bar{0}}); \quad (11)$$

$$x_p = x_{*p} U_c / (\sqrt{3} I), \quad (12)$$

де I , U_c – робочий струм та напруга мережі відповідно до тривалого режиму роботи реактора.

За струмом, напругою мережі та індуктивним опором вибирають реактор з ближчим (більшим) стандартним значенням x_p , який перевіряють (якщо треба) за значенням залишкової напруги

$$U_{\text{зал}} \geq 0,6 U_c.$$

(13)

Рівень залишкової напруги залежить від відношення опорів (рис. 7,б):

$$U_{*зал} = U_{зал} / U_c = \sqrt{3} I_{к2} x_{рн} / U_c = 1 / (x_c / x_{рн} + 1) \quad (14)$$

або (%)

$$U_{зал} = x_{рн} I_{к2} / I_{рн}, \quad (15)$$

де $x_{рн}$ (%), $I_{рн}$ – параметри вибраного реактора; $I_{к2}$ – уточнене значення струму, що відповідає стандартному індуктивному опоріві реактора та його номінальному струму.

Якщо умова (13) не виконується, то нове розрахункове значення (%) слід визначити, виходячи з необхідного рівня залишкової напруги $U_{*зал\ необх}$, за формулою

$$x_p = 100 U_{*зал\ необх} x_{*б\ c} I U_{б} / (U_c (1 - U_{*зал\ необх}) I_{б}). \quad (16)$$

За значенням x_p вибирають реактор з найближчим стандартним значенням опору, перераховують струм КЗ за вибраним реактором і перевіряють відповідність його параметрів умовам електродинамічної та термічної стійкостей.

Секційні реактори обмежують значення струму КЗ на збірних шинах і відгалуженнях. Порівняно з лінійними реакторами секційні мають меншу струмообмежувальну дію, оскільки розраховуються на більші номінальні струми (між секціями при порушенні нормального режиму їх роздільної роботи). Секційні реактори вибирають за номінальною напругою, найбільшим струмом з робочих струмів секцій та індуктивним опором. Спочатку задаються опором реактора і змінюють перевірними розрахунками до отримання значення струму КЗ, допустимого за параметрами встановленого електрообладнання. За значеннями електродинамічної і термічної стійкостей секційні реактори не перевіряють.

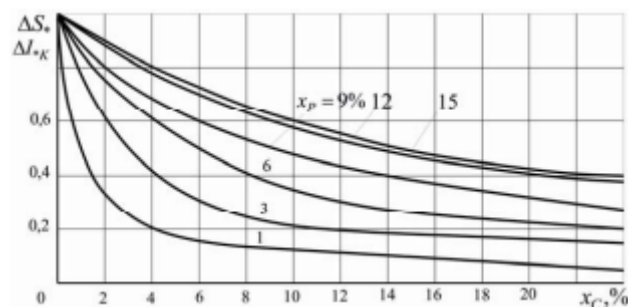


Рис. 8. Залежності струмообмежувальної дії одноланцюгового реактора від його реактивності та опорів електричної системи

Здвоєні реактори конструктивно характеризують індуктивністю віток $L = L_2 = L_B$ та коефіцієнтом зв'язку частин розщепленої обмотки

$$k_{зв} = M / \sqrt{L_1 L_2} = M / L_B = \omega M / x_n, \quad (17)$$

де M – взаємна індуктивність частин обмотки реактора.

Схема заміщення здвоєного реактора являє собою трипроменеву зірку (рис. 9,а) з опорами променів x_1 , x_2 , x_3 , однак залежно від схеми ввімкнення такий реактор працює в різних струмообмежувальних режимах та з неоднаковими результуючими опорами:

– в одноланцюговому режимі (рис. 9,б)

$$x_p = x_n (1 + \kappa_{3\phi}) - x_n \kappa_{3\phi} = x_n ; \quad (18)$$

– у поздовжньому режимі (рис. 9,в)

$$x_p = x_n (1 + \kappa_{3\phi}) + x_n (1 + \kappa_{3\phi}) = 2x_n (1 + \kappa_{3\phi}) ; \quad (19)$$

– у наскрізному режимі (рис. 9,г) при однакових струмах у вітках

$$x_p = x_n - x_n \kappa_{3\phi} = x_n (1 - \kappa_{3\phi}) . \quad (20)$$

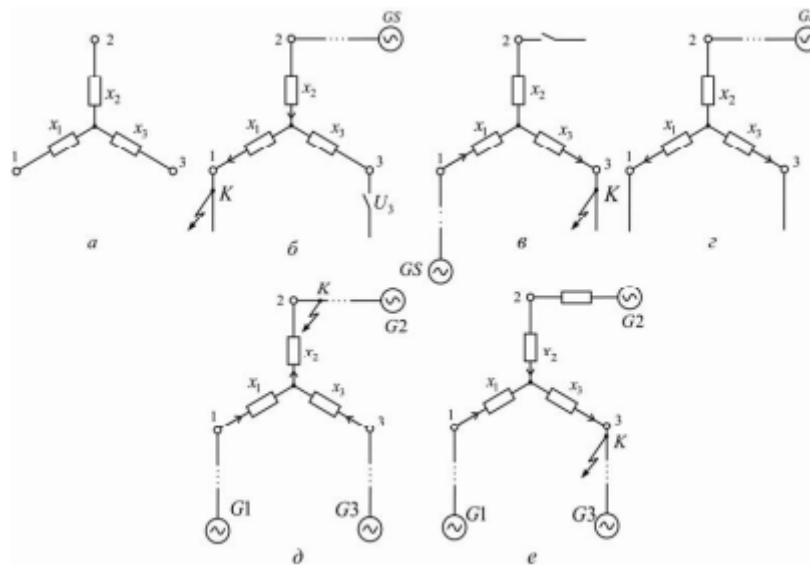


Рис. 9. Схеми заміщення здвоєного реактора для різних варіантів ввімкнення:

а – загальна первісна; б – в одноланцюговому режимі; в – у поздовжньому режимі; г – у наскрізному режимі; д,е – у комбінованих режимах

У комбінованому режимі джерела живлення розміщені з боку кожної вітки реактора. Якщо КЗ проходить з боку вітки 2 (рис. 9,д), то результуючий опір реактора

$$x_p = 0,5x_n (1 - \kappa_{3\phi}) , \quad (21)$$

якщо ж з боку вітки 1 або 3 (рис. 9,е), то при $x_{2\text{рез}} > \kappa_{3\phi} x_n$

$$x_p = x_n (1 + \kappa_{3\phi}) (x_{2\text{рез}} - \kappa_{3\phi} x_n) / [x_n (1 + \kappa_{3\phi}) + x_{2\text{рез}} - \kappa_{3\phi} x_n + x_n (1 + \kappa_{3\phi})] , \quad (22)$$

а при $x_{2\text{рез}} < \kappa_{3\phi} x_n$

$$x_p = x_n (1 + \kappa_{3\phi}) . \quad (23)$$

Вибір здвоєного реактора аналогічний вибору одноланцюгового реактора при $x_{p\text{н}} \equiv x_n$. Значення струму кожної вітки здвоєного реактора повинно бути не меншим 0,675 номінального струму обмотки трансформатора або сумарного

струму навантаження, передбачається рівномірний розподіл навантаження між вітками реактора.

Недолік здвоєних реакторів – у можливості підвищення напруги на слабо навантаженій вітці при роботі в одноланцюговому та наскрізному режимах (рис. 9,б,г). Напруга на такій вітці за рахунок магнітного зв'язку частин обмотки реактора містить складову – е.р.с., що індукується струмом КЗ навантаженої вітки. При КЗ на другій вимкненій вітці реактора з'явиться напруга

$$U_3 = \sqrt{3}x_n(1 + k_{3\phi})I_k. \quad (24)$$

Ця напруга залежить від реактивності вітки реактора, його номінального струму та коефіцієнта зв'язку, значення якого – у межах 0,4...0,63.

Наявність значного опору у струмообмежувальних реакторів призводить до додаткових втрат напруги, потужності та енергії. Ідеальною вважається нелінійна характеристика опору реактора, при якій в нормальних режимах роботи він найменший (в аварійних – найбільший).

Серед розробок – відомі конструкції керованих і насичуваних реакторів, струмообмежувальних пристроїв трансформаторного та резонансного типів.

У керованих реакторах опір змінюється підмагнічуванням магнітопроводу, магнітним потоком від керуючих обмоток. Результуючим опором реактора можна також керувати, використовуючи тиристорні вимикачі на частинах його обмотки.

У реакторах, які насичуються, опір зростає завдяки змінам ступеня насиченості магнітопроводу при збільшенні струму КЗ, що перебігає через реактор.

У струмообмежувальних пристроях трансформаторного типу застосовується послідовне вмикання опору в контур первинної обмотки трансформатора. Їх результуючий опір змінюється шляхом керування режимом роботи вторинної обмотки трансформатора за допомогою нелінійних опорів або тиристорних вимикачів.

Дія струмообмежувальних пристроїв резонансного типу базується на явищі резонансу напруг. Збільшення їх опору при появі КЗ – наслідок порушення умов резонансу напруги з причини зміни частоти струму в перехідному процесі. Розлад резонансу напруг відбувається з використанням порогових елементів, насичувальних дроселів, тиристорних вимикачів та обмежувачів ударного струму.

Дія струмообмежувальних пристроїв резонансного типу базується на явищі резонансу напруг. Збільшення їх опору при появі КЗ – наслідок порушення умов резонансу напруги з причини зміни частоти струму в перехідному процесі. Розлад резонансу напруг відбувається з використанням

порогових елементів, насичувальних дроселів, тиристорних вимикачів та обмежувачів ударного струму.

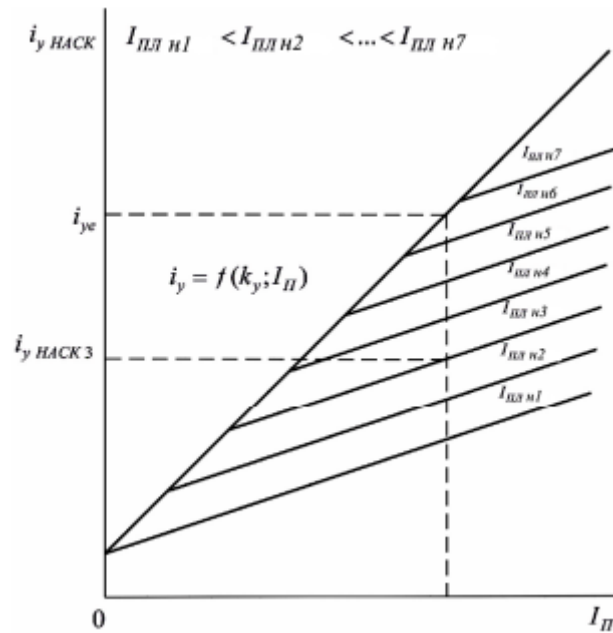


Рис. Характеристики струмообмеження запобіжника

Струмообмежувальні запобіжники забезпечують захист електроустановки за умови, що

$$i_{y,наск} < i_{y,очік} \quad (25)$$

де $i_{y,очік}$ – очікуваний струм КЗ, що міг би з'явитися в мережі при відсутності в ній запобіжника (рис. 4).

Струмообмежувальні запобіжники застосовують в мережах напругою до 35 кВ. Вони характеризуються показниками: номінальною напругою, струмом патрона та струмом плавкої вставки (не повинен перевищувати номінальний струм патрона запобіжника), а також найбільшим і найменшим струмами вимикання, залежностями часу плавлення вставки $t_{пл}$, часом вимикання $t_{вим}$, струмом обмеження $i_{y,наск}$ від періодичної складової $I_{п}$ очікуваного струму КЗ.

Струмообмежувальна дія запобіжника визначається номінальним струмом плавкої вставки $I_{пл н}$, а також значеннями періодичної складової та ударного струму КЗ при відсутності в мережі запобіжника (рис. 10). Якщо ступінь струмообмеження оцінювати за коефіцієнтом обмеження

$$k_{обм} = i_{y,наск} / i_{y,очік} \quad (26)$$

то значення останнього зменшується із збільшенням номінального струму плавкої вставки і стає найменшим при номінальному струмі патрона запобіжника.

Як засіб струмообмеження – запобіжники порівняно прості та дешеві, але з недоліками: одноразове використання плавкої вставки, обмежений вибір за шкалою плавких вставок та патронів, нестабільність струмочасових характеристик, незадовільна сумісність дії з пристроями захисту і системи

автоматики, а також низька експлуатаційна надійність. Тому сфера їх вживання обмежується схемами електропостачання неважливих електроприймачів.

Обмежувачі ударного струму, як і плавкі вставки запобіжників, – це одноразові комутаційні апарати з принципом вимикання струму шляхом руйнування вибухом піропатрона струмоведучої вставки обмежувача. Сигнал на спрацювання обмежувача надходить від зовнішніх пристроїв захисту, контролюючих струм КЗ та його першу похідну. Струм КЗ обмежується близько як за 0,5 мс при повному вимкненні мережі до 5 мс.

Обмежувачі ударного струму застосовують у мережах з великими струмами і напругою 0,66–35 кВ. У СЕП промислових підприємств вони можуть використовуватися з метою:

- шунтування реакторів у нормальних робочих режимах для зменшення втрат напруги та потужності (рис. 11,а–в);
- здійснення паралельної роботи в схемах комутації з електрообладнанням, яке недостатньо стійке за параметрами режиму КЗ (рис. 11,г);
- побудови схеми живлення важливих електроприймачів, що не допускають перерви в електропостачанні (рис. 11,д);
- автоматичного поділу мережі з двостороннім живленням (рис. 11,е);
- розземлення нейтралі силового трансформатора при великих струмах КЗ на землю.

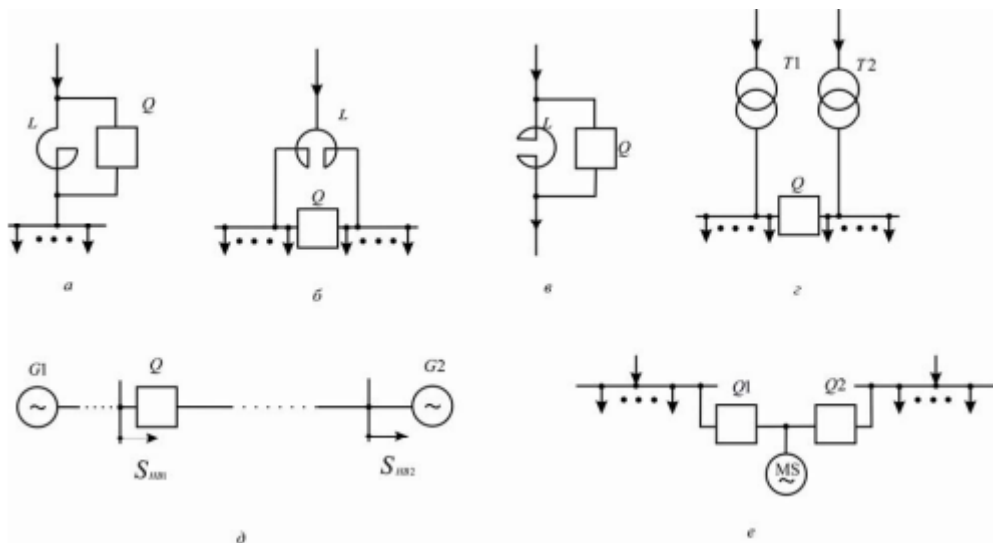


Рис. 11. Можливі схеми вимикання обмежувачів ударного струму

Серед недоліків обмежувачів ударного струму – значна вартість та складність керування.

Автоматичні вимикачі в мережах напругою до 1 кВ спрацьовують при вимиканні струмів КЗ за 0,2...0,6 с. Цього часу достатньо для захисту електрообладнання від теплового впливу струмів КЗ, завдяки чому електричні мережі, захищені такими вимикачами, на термічну стійкість не перевіряють.

Відомі конструкції спеціальних автоматичних вимикачів (струмообмежувальні вимикачі, вимикачі з обмежувачами) для зниження амплітуди струму КЗ протягом часу вимкнення. Обмеження їх надструмів досягається швидким введенням до електричного кола великих опорів. Для цього використовують опір електричної дуги, утвореної між розімкненими контактами вимикача або в спеціальних елементах (обмежувачах). Швидке зростання опору електричної дуги реалізується відкиданням контактів вимикача під впливом електродинамічних сил, викликаних струмом КЗ, або в результаті швидкодії електромагнітних елементів. В обмежувачах опором дуги рівень струму КЗ знижується до такого значення, за якого електричне коло може розімкнути вимикач, що спрацює водночас послідовно з обмежувачем.

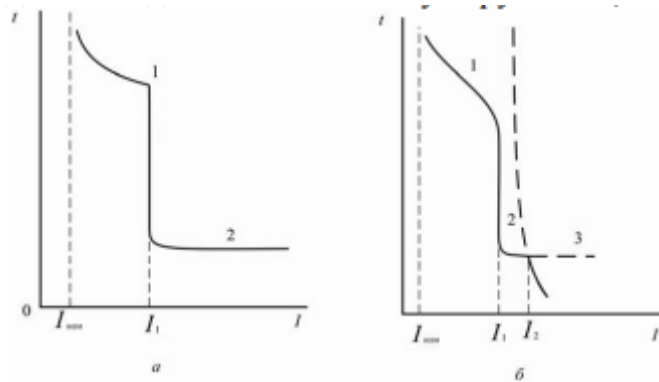


Рис. 12. Характеристики спрацювання вимикачів: а – обмежувальний вимикач; б – вимикач з обмежувачем

Властивість вимикачів знижувати рівень струмів КЗ оцінюють характеристиками дії та струмообмеження. Характеристика дії являє собою залежність часу дії від значення струму КЗ і визначається конструктивними параметрами вимикачів. Для вимикачів з струмообмеженням крива цієї залежності (рис. 12,а) містить ділянки, які відповідають дії теплового 1 та електромагнітного 2 розчіплювачів, а для вимикачів з обмежувачами – додатково і ділянку 3 дії обмежувача (рис. 12,б). Межа ділянок, відповідних тепловому та електромагнітному розчіплювачам, залежить від вибору уставки I_1 електромагнітного розчіплювача. Струмочасова характеристика обмежувача підбирається таким чином, щоб при струмах, менших за I_2 , вимикач самостійно вимикав струм. При струмах, більших I_2 , першим повинен спрацювати обмежувач, а вимикач вимикатиме струм, зменшений його дією.

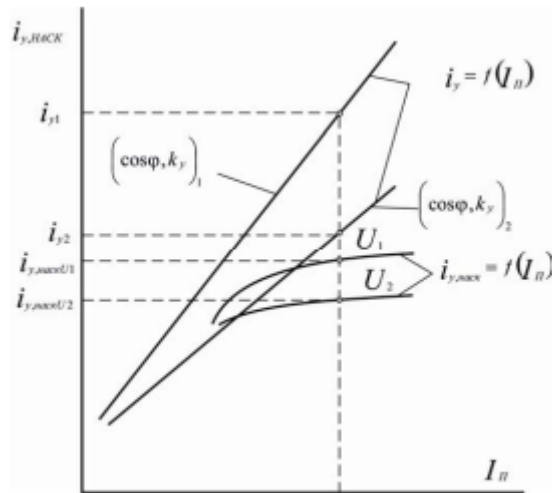


Рис. 13. Характеристики струмообмеження вимикача при
 $U_1 > U_2$, $k_{y1} > k_{y2}$, $\cos \varphi_1 < \cos \varphi_2$

Характеристика струмообмеження – це залежність обмеженого ударного струму КЗ від періодичної складової очікуваного струму КЗ. На цю залежність впливають напруга, коефіцієнт потужності, співвідношення складових повного опору кола струму КЗ (рис. 13). Слід зазначити, що із зниженням комутаційної напруги струмообмежувальна властивість вимикачів зростає.

Переваги струмообмежувальних вимикачів порівняно із звичайними автоматичними вимикачами:

- менші масо-габаритні показники;
- менша вартість за таким же номінальним струмом вимикання;
- зниження на 10...30 % електродинамічного та на 5...10 % теплового впливу струму КЗ;
- вищі показники надійності (зносостійкість, безвідмовність, безпечність).

Недоліки зазначених вимикачів – у складності забезпечення їх селективної роботи та одноразове використання обмежувачів струму.

Пристрої, що вмикають до ланцюга заземлення нейтралі силових елементів, мають різне цільове призначення. Стан нейтралі мережі впливає на вирішення багатьох питань електропостачання: поліпшення умов роботи захисту; вибір класу робочої ізоляції провідників; зниження рівня атмосферних та комутаційних перенапруг та ін. До них належать також завдання обмежити струми найбільш розповсюджених однофазних КЗ на землю. За даними досліджень, струм однофазних КЗ може перевищувати струм трифазного КЗ на 25 %, тому його необхідно розраховувати для обмеження впливу від однофазного КЗ.

Стан нейтралей мереж у СЕП визначається залежно від рівня напруги, значення ємнісних струмів КЗ на землю, умов безпеки та робочого середовища підприємств. З глухозаземленою нейтраллю працюють загальнопромислові

мережі напругою до 1 кВ. В умовах робочого середовища, де визначальний чинник – вимоги електро- та вибухобезпеки, мережі напругою до 1 кВ виконуються з ізольованою нейтраллю. З ізольованою або заземленою через дугогасильні реактори нейтраллю працюють мережі напругою 6–35 кВ. З ефективно заземленою нейтраллю експлуатують мережі напругою 110 кВ та вище із значними струмами КЗ на землю, коли коефіцієнт замикання на землю

$$K_3 = U_{\phi_3} / U_{\phi_n} \leq 1,4, \quad (27)$$

де U_{ϕ_3} – різниця потенціалів між непошкодженою фазою та землею в точці КЗ на землю іншої або двох інших фаз; U_{ϕ_n} – різниця потенціалів між фазою та землею в цій точці до КЗ.

Нерівність (27) виконується при співвідношенні параметрів мережі

$$z_{0pez} / z_{1pez} \leq 3...4 \text{ або } x_{0pez} / x_{1pez} \leq 5, \quad (28)$$

де z_{1pez} , x_{1pez} – результуючі повний та реактивний опори прямої послідовності; z_{0pez} , x_{0pez} – те ж нульової послідовності.

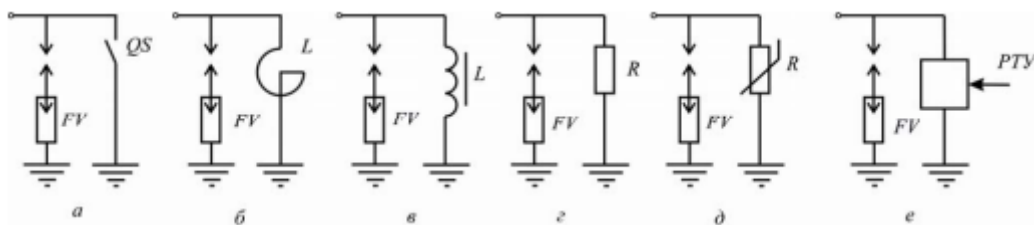


Рис. 4. Пояснювальні схеми виконання робочого заземлення нейтралі

Для обмеження струмів КЗ на землю розземлюють нейтралі силових трансформаторів (рис. 14,а); вмикають в ланцюг нейтралі елементів мережі реактори з лінійною характеристикою (рис. 14,б), насичувальні реактори (рис. 14,в), дугогасильні реактори і резистори (рис. 14,г), нелінійні резистори (рис. 14,д); гальванічно розділяють мережу встановленням трансформаторів або заміною автотрансформаторів такими трансформаторами, які розширюють можливості зміни стану нейтралі її ділянок (рис. 14,е).

Пристрої, що вводять у коло нейтралі, можуть: постійно вмикатися в нейтраль, вводитися в ланцюг її робочого заземлення при КЗ на землю за допомогою комутаційних апаратів або змінювати результуючий опір при появі КЗ на землю шляхом спрацювання порогових елементів (насичуваних реакторів; індуктивно-ємнісних контурів, настроєних у резонанс напруг).

Нейтралі заземлюють через дугогасильні реактори для компенсації ємнісної складової струму мережі при замиканні на землю. Дугогасильний реактор відрізняється від мережного одноланцюгового більшим індуктивним опором та нелінійною вольт-амперною характеристикою при напругах, які перевищують номінальну. В контурі, що складається з вітки реактора індуктивної провідності та еквівалентної вітки ємнісної провідності мережі на

землю, створюються умови резонансу струмів. Такий стан роботи нейтралі слід передбачати, якщо значення ємнісного струму замикання на землю буде понад:

- 10 А – у мережах ПЛ напругою 6–20 кВ на залізобетонних та металевих опорах і в усіх мережах напругою 35 кВ;
- 30 А – у мережах без зазначених опор напругою 3–6 кВ;
- 20 А – напругою 10 кВ та більше 15 А – при напрузі 15–20 кВ;
- 5 А – у схемах з'єднань "генератор–трансформатор" (на генераторній напрузі).

При значеннях струму замикання на землю понад 50 А рекомендується встановлювати не менше двох заземлюючих дугогасильних реакторів.

Найбільші струми КЗ на землю спостерігаються в мережах з глухозаземленою нейтраллю. При заземленні нейтралі елементів мережі через резистор або резистор з нелінійним активним опором періодична складова струму однофазного КЗ знижується на 20...30 %. При цьому різко зменшується час затухання його аперіодичної складової. Одночасно полегшуються умови роботи релейного захисту і з'являється можливість запобігти появі переміжних дугових КЗ на землю, хоча потенціали нейтралі та непошкоджених фаз при КЗ зростають.

При атмосферних та комутаційних перенапругах заземлення нейтралі через резистор рівнозначне її глухому заземленню. Заземлення нейтралі через реактори або резонансні струмообмежувальні пристрої мають метою ввести при КЗ в ланцюг заземлення нейтралі індуктивний опір. Останній обмежує струм КЗ більшою мірою, аніж при заземленні через пристрої з активним опором того ж значення, знижує напругу нейтралі, однак при атмосферних перенапругах менш ефективно.

У мережах напругою 110 кВ для обмеження струму КЗ ефективніше використовувати резистори, ніж реактори. Міра зниження струму обмежується допустимим підвищенням напруги на непошкоджених фазах (до $1,4U_{фн}$). У мережах напругою 220 кВ (залежно від параметрів мережі) ефективним може стати застосування як резисторів, так і реакторів. Заземлення нейтралі трансформаторів через резистор або реактор дає змогу знизити усталений струм КЗ до 50...80 % значення струму КЗ при глухозаземленій нейтралі без перевищення допустимих рівнів перенапруг на нейтралі та непошкоджених фазах.

У мережах з ізолюваною чи заземленою нейтраллю через дугогасильні реактори струм замикання на землю – найменший і обумовлений активною провідністю мережі на землю та мірою компенсації ємнісного струму реактором. Тому найпростіше обмежити струми неповнофазних замикань мережі на землю розземленням нейтралі її силових елементів.

Зниження струму КЗ за допомогою розглянутих засобів обмежується допустимим підвищенням напруги нейтралі та непошкоджених фаз у процесі КЗ, а також класом застосовуваної ізоляції. Оскільки трансформатори напругою 110 кВ і вище мають низький клас ізоляції нейтралі, то з підвищенням номінальної напруги мережі ступінь струмообмеження зменшується. Розземлення нейтралей трансформаторів напругою 330 кВ і вище не дозволяється.

Вибір схеми та пристроїв робочого заземлення нейтралей силових елементів для зниження струму неповнофазних КЗ на землю залежить від стану нейтралі всієї мережі, її параметрів і обмежень за рівнями перенапруг, які визначаються шкалою номінальних напруг. При цьому вагомі також такі чинники: зручність в експлуатації, вимоги надійності та безперервності електропостачання, прагнення знайти економічно вигідну межу між зниженням струмів КЗ на землю і допустимим підвищенням рівня різних видів перенапруг.

4. Оптимізація рівня струму короткого замикання

Система електропостачання – невелика частина ЕЕС, при проектуванні якої визначається рівень потужності КЗ. Якщо СЕП власних джерел електричної енергії не має, то найбільше значення потужності КЗ буде на межі до живильної енергетичної системи. З наявністю власних джерел найбільше значення потужності КЗ визначається їх потужністю та потужністю КЗ, що надходить від ЕЕС, а також електричною віддаленістю джерел електричної енергії і точки КЗ.

Рівень потужності КЗ у вузлах навантаження залежить від структури СЕП, параметрів її мереж та складу електроприймачів. Установлення оптимального рівня потужності КЗ кожного вузла СЕП передбачає аналіз ширшої низки показників, до яких належать: технічні та вартісні показники електрообладнання, провідників і струмообмежувальних пристроїв, категорія безперервності електропостачання та його надійність, стійкість навантаження, працездатність релейного захисту, якість напруги живлення споживачів, пуск і самозапуск потужних електродвигунів, втрати потужності та енергії в мережах чи від перерв в електропостачанні.

Урахування дії чинників, що визначають оптимальний рівень потужності КЗ, – суперечливі. З одного боку, зниження найбільших значень потужності КЗ у вузлах навантаження дозволяє встановлювати простіше та дешевше електрообладнання, зменшувати переріз провідників, застосовувати прості рішення за схемами розподілу електричної енергії з використанням пристроїв системної автоматики АРЗ, АПВ і зменшувати втрати від аварійного впливу струмів КЗ за рахунок їх локалізації. При цьому, однак, зростають витрати на

додатково встановлене спеціальне обладнання та струмообмежувальні пристрої, зниження різних видів перенапруг та втрат від можливих перерв в електропостачанні.

З другого боку, отримання достатнього рівня напруги для пуску та самозапуску електродвигунів, обмеження коливань і відхилень напруги у вузлах електропостачання з різкозмінним ударним навантаженням, обмеження рівня несинусоїдності напруги, зниження впливу несиметрії навантаження, забезпечення надійності роботи релейного захисту вимагають збереження більших значень потужності КЗ.

Під час самозапуску потужних електродвигунів залишкова напруга у вузлах навантаження залежить від потужності КЗ та реактивного опору мережі (рис. 15,а). У разі різкозмінного ударного навантаження рівень коливань напруги знижується з підвищенням потужності КЗ у вузлі (вираз (6)). Для виконання вимог (4) допустима потужність увімкнених вентильних перетворювачів залежить від рівня потужності КЗ у вузлі навантаження (рис. 15,б,в).

Таким чином, при проектуванні СЕП може визначитися технікоекономічне завдання зниження рівня потужності КЗ у конкретних вузлах до оптимальних. Її цільова функція – зведені витрати

$$Z(S_k) = \sum_{i=1}^n (K_i p_i + K_{\Delta i} p_{\Delta i}) + C_{\Sigma} + U_{\Sigma}, \quad (29)$$

де K_i – основні капітальні вкладення в електрообладнання СЕП (трансформатори, РП, електричні апарати, ЛЕП); $K_{\Delta i}$ – додаткові вкладення в електрообладнання (надбавки за спеціальне виготовлення трансформаторів та струмообмежувальних комутаційних апаратів); вартість струмообмежувальних і дугогасильних реакторів, різного виду струмообмежувальних пристроїв, а також тих з них, що забезпечують нормовані значення показників якості електричної енергії, пускових пристроїв та засобів АРЗ потужних електродвигунів); $p_i, p_{\Delta i}$ – сумарні коефіцієнти відрахувань від основних та додаткових капітальних вкладень в електрообладнання та будівельні роботи; C – сумарні експлуатаційні витрати з основного і спеціального електрообладнання та вартість втрат електричної енергії; U_{Σ} – сумарні втрати при зниженні рівня потужності КЗ від перерв в електропостачанні, порушень стійкості двигунів вузлів навантаження, зниження надійності електропостачання та погіршення якості електричної енергії у споживачів.

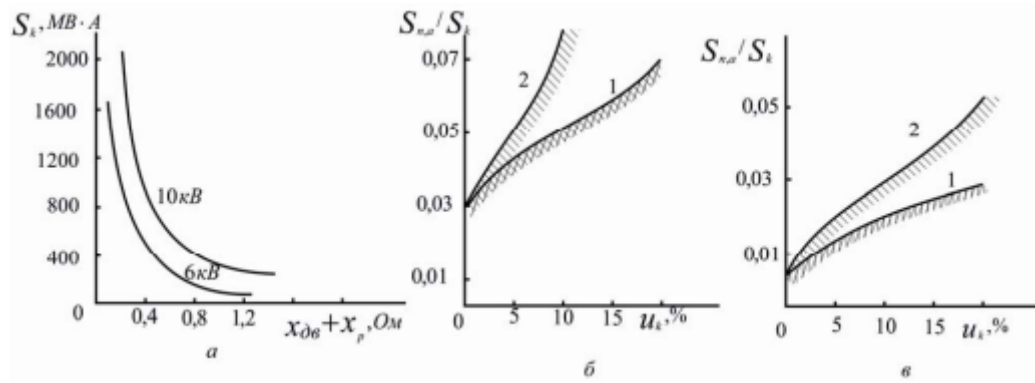


Рис. 15. Вплив потужності КЗ на умови забезпечення якості електроенергії: а – при збереженні залишкової напруги під час реакторного (x_p) пуску двигуна з опором ($x_{об}$); б – при вмиканні керованого вентиляного перетворювача (з коефіцієнтом розщеплення обмотки трансформатора, рівним 4 (крива 1) та 0 (крива 2)); в – те ж при некерованому вентиляльному перетворювачі

Критерій оптимального рівня потужності КЗ – мінімум зведених витрат (29). Для мінімізації цільової функції зведених витрат доцільно використовувати метод дискретної оптимізації. Останній дає змогу перейти від оптимізації функції багатьох дискретно змінюваних (29) до досліджень на екстремум функції $\sum S_k$ при врахуванні обмежень за різними параметрами (дискретної шкали потужностей електрообладнання, шкали номінальних напруг, нормованих показників якості електричної енергії, допустимих втрат потужності та енергії, рівнями перенапруг, максимальної потужності КЗ та ін).

Існування великої кількості змінних та обмежень значно звужують можливості пошуку глобального мінімуму функції (29). Тому на практиці частіше застосовують числові математичні моделі оптимізації рівнів потужності КЗ, які можуть бути розроблені для конкретних вузлів СЕП з виділенням групи найсуттєвіших змінних, залежних від параметрів режиму КЗ.

Оптимальні значення розрахункового струму КЗ у мережах промислових підприємств повинні здебільшого визначатися з урахуванням двох чинників:

- забезпечення можливості застосування електричних апаратів з більш легкими параметрами і провідників якомога менших перерізів;
- збереження значень показників якості електричної енергії в нормованих межах.

Для врахування інших чинників повинні бути встановлені функціональні залежності між їхніми кількісними показниками та параметрами режиму КЗ.