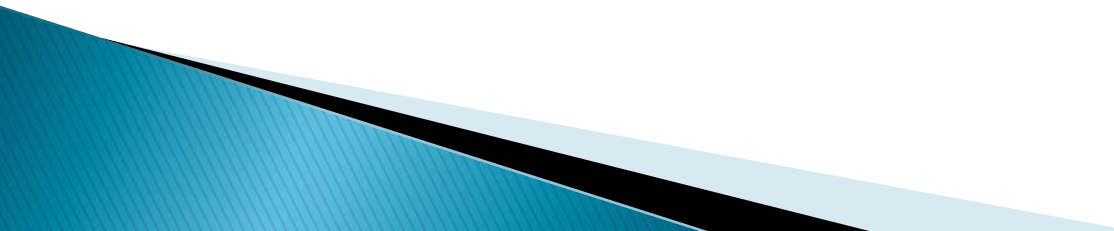


Тема 1.
Загальні відомості про
перехідні процеси

План

1. Вступ.
 2. Загальні положення. Розрахункові умови
 3. Точне і наближене приведення параметрів режиму й елементів системи.
 4. Системи одиниць, які застосовуються в розрахунках.
 5. Врахування індивідуальної зміни струмів короткого замикання окремих генерувальних віток.
 6. Врахування аперіодичної складової струму короткого замикання
- 

Вступ

Навчальний посібник призначений для студентів, які опановують техніку практичних розрахунків аварійних режимів при однократних поперечних пошкодженнях.

Розрахунки аварійних режимів завжди необхідні для прийняття рішень щодо підвищення надійності електричних систем і місцевих систем електропостачання.

Варто особливо підкреслити, що при проектуванні електричних систем ведеться одночасний розгляд режимів короткого замикання, умов стійкості і нормальних режимів. При цьому може виявитися необхідним врахування суперечливих вимог. Так, вимоги підвищення стійкості системи виявляються більш істотними, ніж задача обмеження величини струмів короткого замикання з метою забезпечення умов роботи електро-обладнання розподільних пристроїв.

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Однією з умов отримання правильних результатів розрахунку аварійних режимів, що дозволить, наприклад, вибрати необхідне електрообладнання, є правильне формулювання вихідних умов для розрахувань. Крім цього етапу розрахувань, є етапи складання схем заміщення, розрахування їх параметрів та перетворення до необхідного вигляду.

Розрахункові умови

Розрахунки аварійних режимів при коротких замиканнях необхідні для розв'язання конкретних інженерних задач. При цьому дуже важливим вихідним моментом є чітке визначення розрахункових умов.

Розрахункові умови – це сукупність умов, на основі яких здійснюється аналіз короткого замикання і які визначаються поставленою метою розрахунку. До них належать:

розрахункова схема – повинна включати всі елементи, які визначають параметри режиму короткого замикання;

розрахунковий режим, що передуює короткому замиканню, значною мірою впливає на величини струмів аварійного режиму.

Про точне і наближене приведення параметрів режиму й елементів системи

У практиці розрахунків струмів короткого замикання, в залежності від необхідної точності, використовуються два підходи при визначенні параметрів елементів і режиму.

Перший з них ґрунтується на використанні середніх напруг окремих ступенів трансформації вихідної схеми. Ряд середніх лінійних напруг, що діють у нас в країні, кВ: 750; 515; 330; 230; 154; 115; 37; 25; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,63; 0,525; 0,4.

При цьому зазвичай припускають, що номінальні напруги всіх елементів, які знаходяться на одному ступені, однакові і дорівнюють відповідним значенням за зазначеною шкалою. Останнє не відноситься до реакторів, які іноді використовуються в установках напругою меншою, ніж їх номінальна напруга. Використання середніх напруг вносить деяку похибку у розрахунок і тому часто іменується розрахунком за наближеним приведенням.

Другий підхід ґрунтується на дійсних напругах, що обумовлюються положенням РПН силових трансформаторів електричної мережі. Оцінка реактивностей елементів у цьому випадку виходить більш точною, у зв'язку з цим сам розрахунок називається розрахунком за точним приведенням.

Аналіз похибок наближеного приведення дозволяє зробити висновок про те, що в сучасних системах, насичених трансформаторами з глибоким регулюванням коефіцієнта трансформації, варто прагнути виконувати розрахунок за точним приведенням.

Рекомендується, виконуючи практичний розрахунок аварійного режиму, відразу обумовлювати прийнятий спосіб визначення параметрів схеми і режиму.

Системи одиниць, які застосовуються в розрахунках

Найбільшого поширення при практичному виконанні розрахунків короткого замикання набули система відносних одиниць і система іменованих одиниць. Кожна з них має свої безсумнівні переваги, тому студенту необхідно їх засвоїти.

Розрахунки в системі відносних (безрозмірних) одиниць дозволяють представити розв'язання в узагальненому вигляді, додати величинам, які розраховуються, наочності і порівнянності, а також одержати ряд додаткових спрощень обчислювального характеру.

Розрахунки в системі іменованих одиниць добре відображають фізичну сторону явищ та легше сприймаються

Врахування індивідуальної зміни струмів короткого замикання окремих генерувальних віток

У процесі розрахування струмів короткого замикання часто всі генератори можуть бути об'єднані в одне еквівалентне джерело живлення (у зв'язку з малим розходженням в дальності щодо місця ушкодження). Такий спосіб називають розрахунком за загальною зміною. При цьому властивості окремих генераторів, які з'єднуються в еквівалентне джерело, усереднюються. Встановлено, що умови роботи такого "усередненого" генератора завжди визначаються потужним генератором.

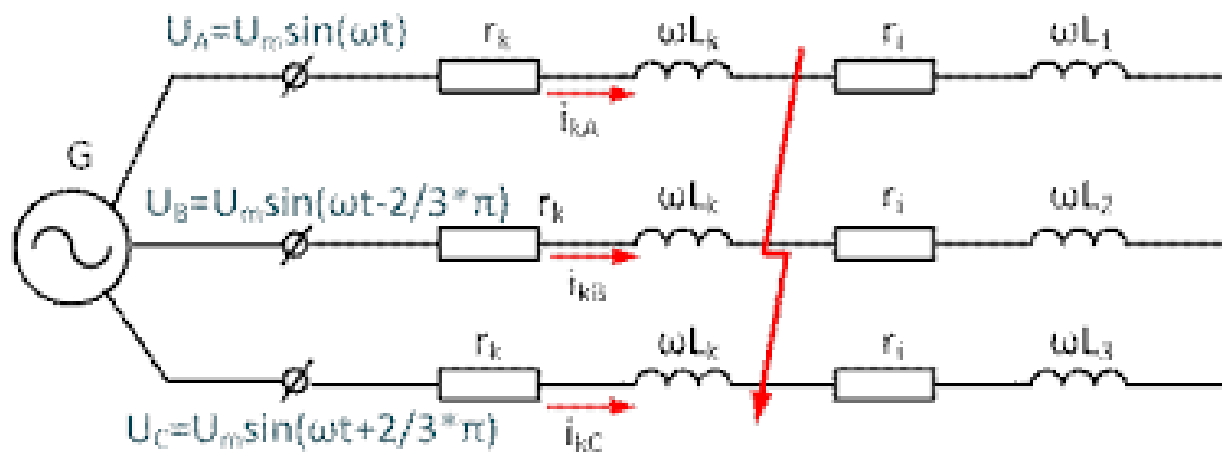
Якщо потужний генератор має велику електричну віддаленість від точки пошкодження, то його участь в створенні струму короткого замикання може бути значно меншою, ніж участь генератора, що знаходиться поблизу точки короткого замикання. Вказана обставина не має належного відображення в розрахунку по загальній зміні. Тому, у випадках, коли генерувальні джерела знаходяться в різних умовах щодо місця короткого замикання, розрахунок виконується з урахуванням індивідуальної зміни. Для цього всі джерела живлення поділяються на кілька груп. Доцільно виділити джерела живлення, безпосередньо зв'язані з місцем пошкодження, в одну групу. Іншу групу можуть скласти джерела, що знаходяться, приблизно, в однакових умовах щодо місця короткого замикання.

Джерело великої потужності (система незмінної напруги) завжди виділяється в самотійну групу. Надалі вважається, що струм від кожної зведеної групи джерел живлення до місця короткого замикання незалежний.

Взаємні опори виділених джерел живлення, щодо точки короткого замикання, вираховуються за допомогою коефіцієнтів розподілу C_i , що виражають частку участі кожної групи джерел живлення в загальному струмі короткого замикання, прийнятому за одиницю. Технічна процедура визначення взаємних опорів (незалежно від вибраної системи одиниць) може бути легко засвоєна з наступного прикладу.

Тема 2.

Розрахунок трифазного короткого замикання



План

1. Порядок розрахування режимів методом розрахункових кривих
2. Розрахування короткого замикання методом типових кривих .
3. Розрахування аварійного режиму аналітичним методом . .
4. Порядок розрахування короткого замикання методом спрямлених характеристик .
5. Врахування навантажень при трифазних пошкодженнях у мережі
6. Розрахування струму короткого замикання в розподільних мережах 0,4 кВ.

1. Порядок розрахування режимів методом розрахункових кривих

Розрахункові криві є залежністю відносного номінального періодичного струму короткого замикання для різних моментів часу перехідного процесу від розрахункового опору. При практичному користуванні розрахунковими кривими, рис. 2.1 та 2.2 варто мати на увазі особливості їхнього застосування для розрахувань за загальною та індивідуальною змінами. Розрахування за індивідуальною зміною рекомендується виконувати в такому порядку.

1. Складається схема заміщення надперехідного режиму.
2. Вибирається спосіб розрахування – за точним чи за наближеним приведенням.
3. Визначаються довільні базисні умови S_{ζ} (МВА) і U_{ζ} (кВ) і обчислюються приведені базисні напруги окремих ступенів трансформації відповідно до табл. 1.1.
4. Опори всіх елементів схеми заміщення розраховуються у відносних базисних одиницях відповідно до табл. 1.2.
5. Перетворенням схеми заміщення визначається її результуючий опір $X_{*(\zeta)\Sigma}$.
6. Вираховується розрахунковий (відносний номінальний) опір схеми заміщення за виразом: , ,

де $S_{H\Sigma}$ - сумарна номінальна потужність генераторів, які живлять точку пошкодження, МВА.

7. Для знайденого $X_{розр}$ і моменту часу, для якого необхідно виконати розрахунок, за розрахунковими кривими визначається відносне значення періодичної складової струму короткого замикання I_{*nt} .

8. Якщо $X_{розр} > 3$, то розрахунковими кривими не користуються, а відносний періодичний струм вважається незмінним у часі і визначається за виразом:

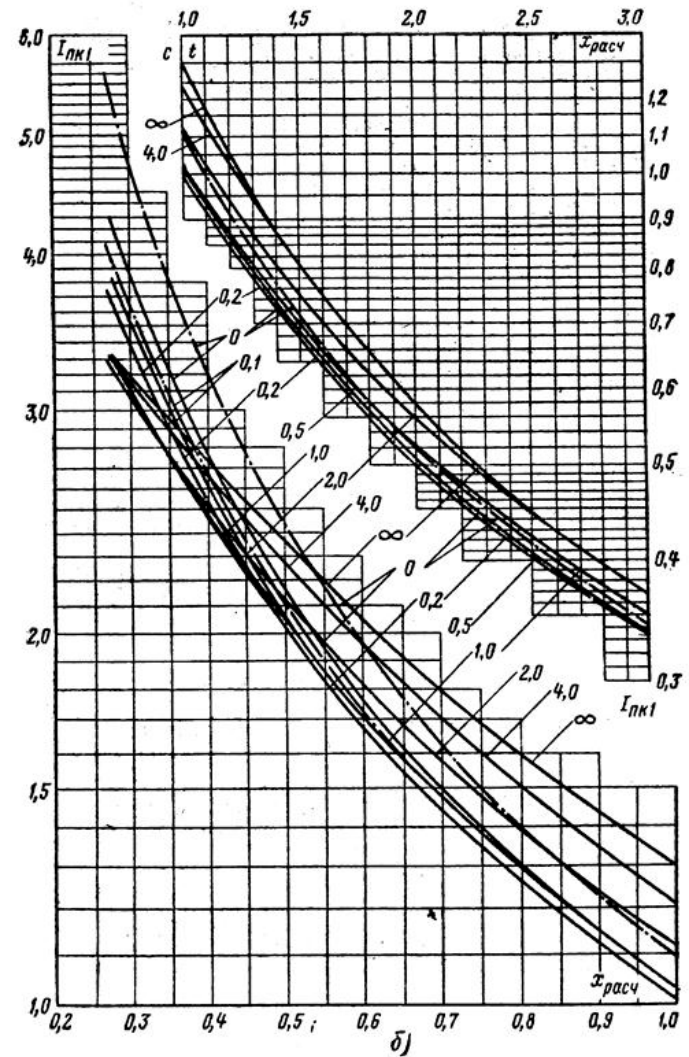
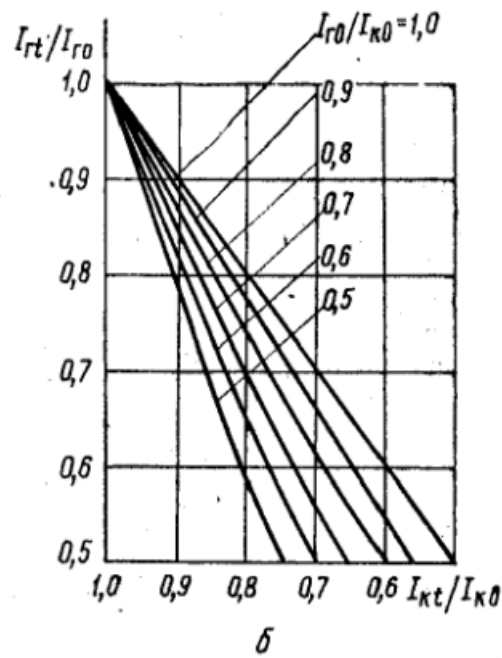
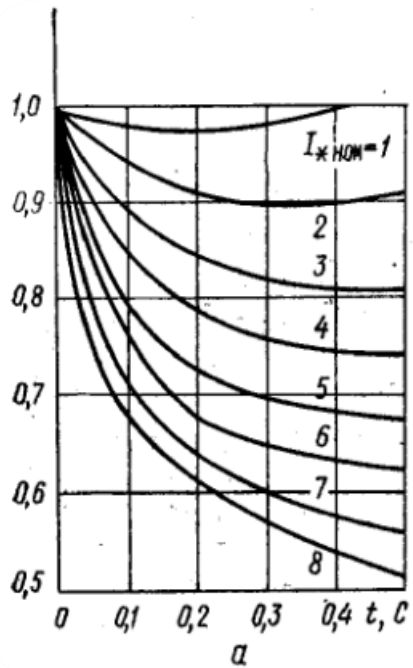
9. Значення періодичного струму короткого замикання в іменованих одиницях визначається з врахуванням сумарного номінального струму всіх джерел живлення $I_{H\Sigma}$:

$U_{ср.н}$ - середня номінальна (міжфазна) напруга того ступеня трансформації, на якому знаходиться точка короткого замикання.

10. При необхідності враховується аперіодична складова струму короткого замикання для відповідного моменту часу - I_{at} .

11. Повний струм короткого замикання для відповідного моменту часу визначається за виразом:

Метод розрахункових кривих



2. Розрахування короткого замикання методом типових кривих

Типові криві, рис. 2.3, використовуються для визначення діючого значення періодичної складової струму короткого замикання для моментів часу t , $t \leq 3s$, і є сімейством залежностей при β , а також додаткових залежностей при β , де $I_{\text{нп}}$ - надперехідний струм і періодична складова струму для моменту часу t генерувальної вітки; $I_{\text{н}}$ - номінальний струм джерела, приведений до напруги ступеня короткого замикання, β . Такими залежностями користуються при розрахуванні схем з двостороннім живленням короткого замикання (від генератора або групи генераторів, синхронного компенсатора або двигуна і електричної системи). Віддаленість точки короткого замикання від джерела оцінюється відношенням β (при β).

Рисунок 2.3 – Типові криві для потужних синхронних машин

Для генерувальної вітки незалежного живлення точки короткого замикання періодичну складову струму визначають в такій послідовності (для випадків, коли розрахування проводиться як в іменованих, так і відносних одиницях):

1. Складається схема заміщення короткозамкнутого кола.
2. Розраховується результуючий опір X_{Σ} або $X_{*\Sigma}$ до точки короткого замикання.
3. Визначається надперехідний струм в точці короткого замикання від синхронної машини:
4. Оцінюється електрична віддаленість точки короткого замикання,
5. За типовими кривими на основі відомого відношення β і моменту часу t визначається відношення $I_{\text{нп}}$.
6. Визначається періодична складова струму короткого замикання за формулою:

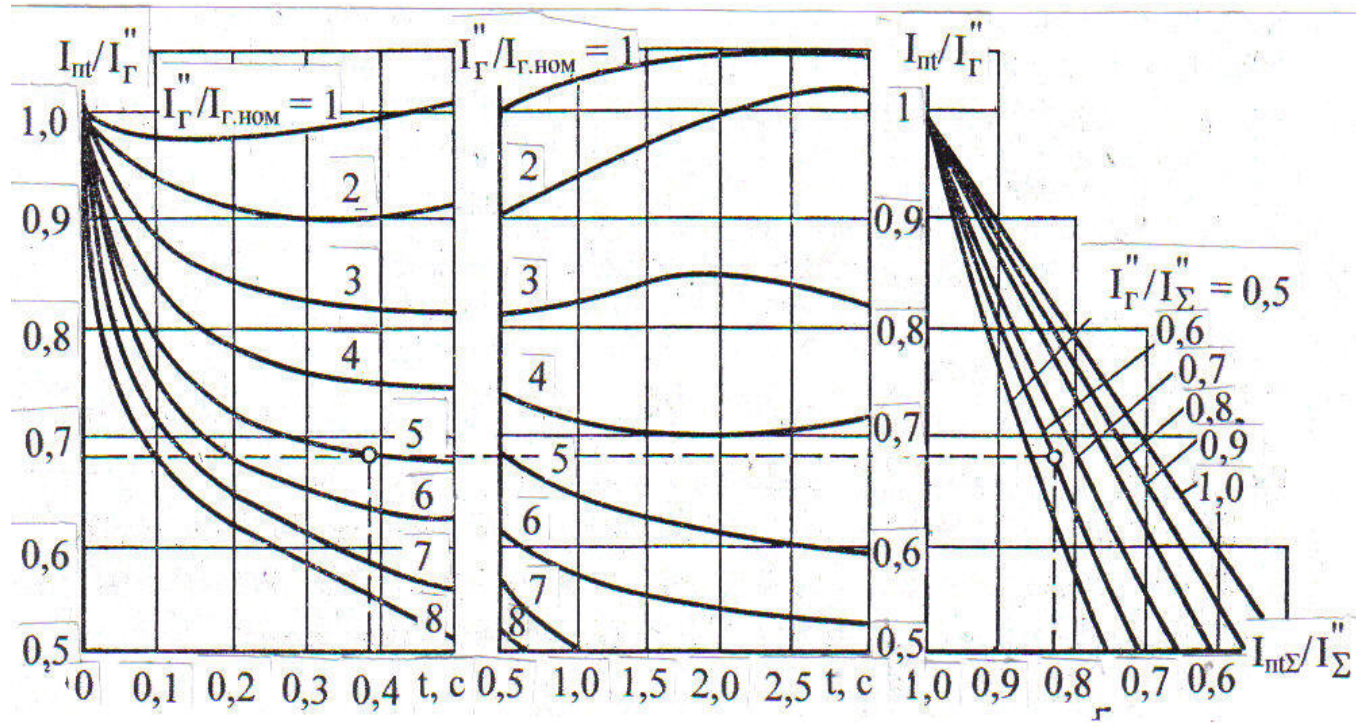


Рисунок 2.3 – Типові криві для потужних синхронних машин

3. Розрахунок аварійного режиму аналітичним методом

Розрахунки аналітичним методом можна проводити в будь-якій системі одиниць. Наприклад, при використанні системи іменованих одиниць корисно пам'ятати такий порядок розрахувань.

1. Складається схема заміщення короткозамкненого кола з урахуванням навантажень.
2. Вибирається спосіб розрахувань за точним чи за наближеним приведенням.
3. Вибирається основний (базисний) ступінь напруги.
4. Відповідно до табл. 1 обчислюються приведені до базисної напруги ЕРС окремих джерел живлення, причому вихідні значення відносних номінальних ЕРС джерел живлення (наприклад, для надперехідного режиму) можна розрахувати за виразом:

де $U_{*(H)}$; $I_{*(H)}$ - відповідно, відносна номінальна напруга і струм джерела живлення точки короткого замикання;

φ_H - кут між векторами струму і напруги в режимі, що передує короткому замиканню;

X''_d - надперехідний індуктивний опір синхронного генератора по поздовжній осі.

Іноді в практичних розрахунках ЕРС не розраховують, а користуються даними, з таблиці.

Аналітичне розрахування струмів короткого замикання в системі відносних одиниць зручно виконувати в такий спосіб:

1. Складається схема заміщення короткозамкнутого кола із врахуванням навантажень.
2. Вибирається спосіб розрахунку - за точним чи за наближеним приведенням.
3. Вибираються довільні базисні умови S_6 та U_6 , обчислюються приведені базисні напруги окремих ступенів схеми.
4. Обчислюються, відповідно до табл.1.1, ЕРС усіх джерел живлення, приведені до базисної напруги.
5. Визначаються відносні базисні опори елементів схеми заміщення.
6. Визначаються результуючі базисні ЕРС і опір схеми заміщення:
7. Визначається періодична складова струму короткого замикання у відносних одиницях:
8. Періодичний струм в іменованих одиницях обчислюється за виразом:
де I_6 - базисний струм на тому ступені трансформації, на якому розглядається коротке замикання, кА.
9. При необхідності враховується аперіодична складова струму короткого замикання.

4. Порядок розрахування короткого замикання методом спрямлених характеристик

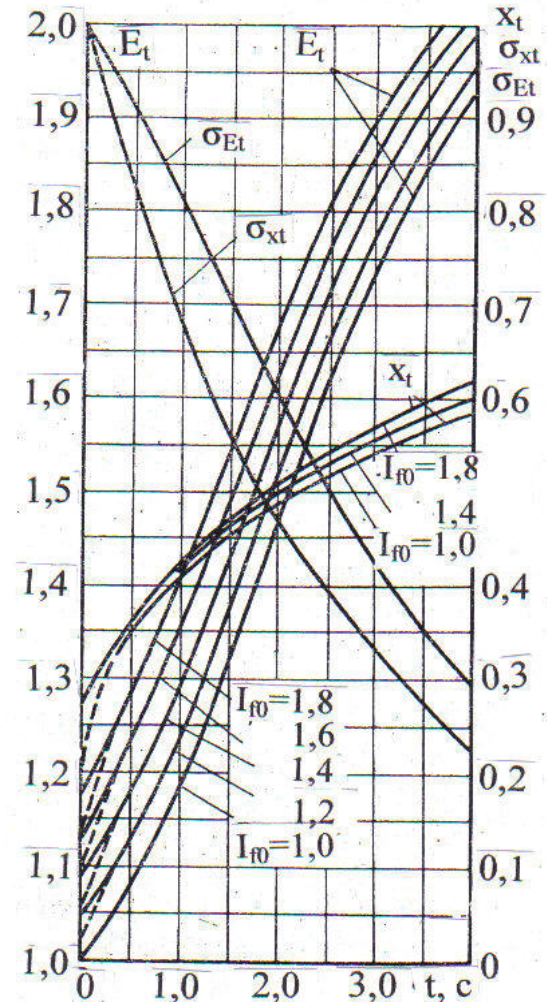
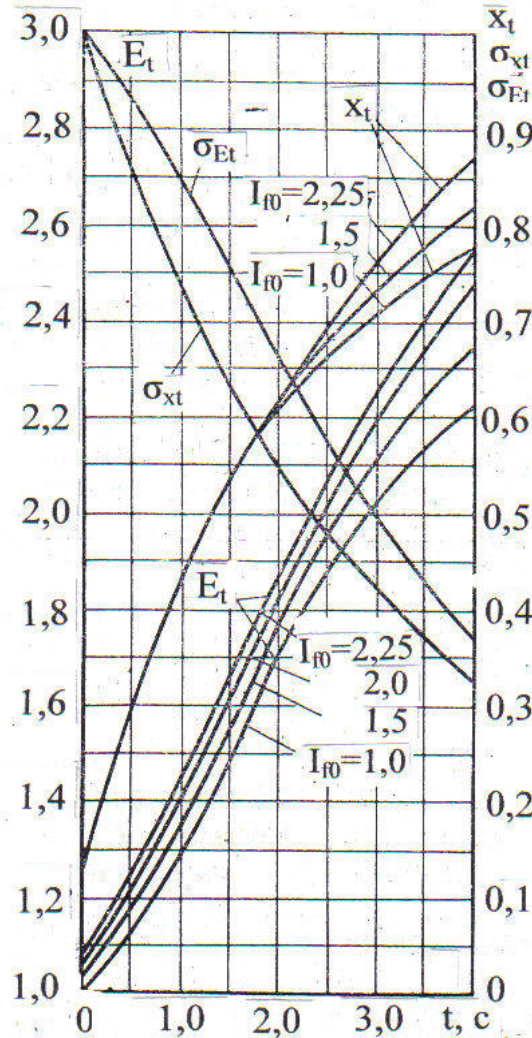
Метод спрямлених характеристик (метод Ю.К. Баскакова, С.А.Ульянова) заснований на використанні розрахункових параметрів генераторів E_t і X_t , що не залежать від зовнішньої реактивності і визначають періодичну складову струму короткого замикання для відповідного моменту часу t . Ці розрахункові величини визначаються за спеціальними кривими для типових генераторів, рис. 2.4.

Алгоритм обчислень за цим методом такий:

1. Визначаються E_t і X_t генераторів без АРЗ, які живлять точку короткого замикання.
2. На основі аналізу схеми попередньо намічаються можливі режими роботи генераторів з АРЗ: режим збільшення збудження або режим номінальної напруги.
3. Визначаються E_t і X_t генераторів з АРЗ, що беруть участь у схемі.
4. З врахуванням п.2 складається схема заміщення мережі, причому навантаження вводяться своїми параметрами для сталого режиму.
5. Вибираються базисні умови S_6 і U_6 .
6. Виражаються опори і ЕРС схеми заміщення у відносних одиницях при вибраних базисних умовах.
7. Спрощенням схеми знаходяться результуючі ЕРС і опір $X_{*(6)\Sigma}$ схеми заміщення.
8. Визначається відносний базисний струм короткого замикання для відповідного моменту часу.

9. Зворотним розгортанням схеми знаходяться відносні базисні струми у вітках генераторів з АРЗ і напруги у вузлах їх під'єднання.
10. Виявляється правильність прийнятих раніше режимів роботи генераторів з АРЗ за номінальною напругою чи за критичним струмом (для цього попередньо номінальна напруга і критичний струм приводять до базисних умов, або, визначені в п. 9, відносні базисні напруги і струми генераторів переводять у відносні номінальні величини).
11. Якщо намічені на початку розрахування режими генераторів з АРЗ виявилися неправильними, їх необхідно змінити і виконати розрахування заново.
12. Після завершення розрахунку здійснюється перехід від відносних базисних величин до іменованих величин.

Рисунок - Криві для визначення розрахункових E_t та X_t генераторів середньої потужності з АРЗ:



5. Врахування навантажень при трифазних пошкодженнях у мережі

Вплив навантаження при трифазному короткому замиканні може виявлятися по-різному, в залежності від електричної далекості точки пошкодження, від місця під'єднання навантаження і моменту часу перехідного процесу, для якого виконується розрахунок. За певних умов навантаження може не тільки підживлювати точку короткого замикання, але і розвантажувати її (тобто струм навантаження може входити в результуючий струм короткого замикання зі знаком мінус).

Встановлено, що в початковий момент перехідного процесу узагальнене навантаження можна приблизно характеризувати надперехідною реактивністю і ЕРС, величини яких при повній робочій потужності навантаження (МВА) і середній номінальній напрузі в місці її приєднання складають:

Окремі великі асинхронні двигуни варто враховувати відносним номінальним опором $X''=0,2$.

Величини відносної ЕРС окремих синхронних двигунів залежать від їх збудження і повинні визначатися кожного разу. У розрахуванні впливу навантаження варто пам'ятати про надзвичайно швидке згасання струму двигунів.

Вплив навантаження в сталому режимі враховують його параметрами $X_{\text{нав}}=1,2$; $E_{\text{нав}}=0$, причому опір віднесений до повної (МВА) робочої потужності навантаження і середньої номінальної напруги ступеня, де приєднане дане навантаження.

6. Розрахування струму короткого замикання в розподільних мережах 0,4 кВ

Розподільні мережі 0,4 кВ характеризуються значною віддаленістю від джерел живлення. При коротких замиканнях періодичну складову струму можна вважати незмінною. Розрахунки проводять виходячи з того, що напруга на шинах ВН понижувальних трансформаторів залишається незмінною.

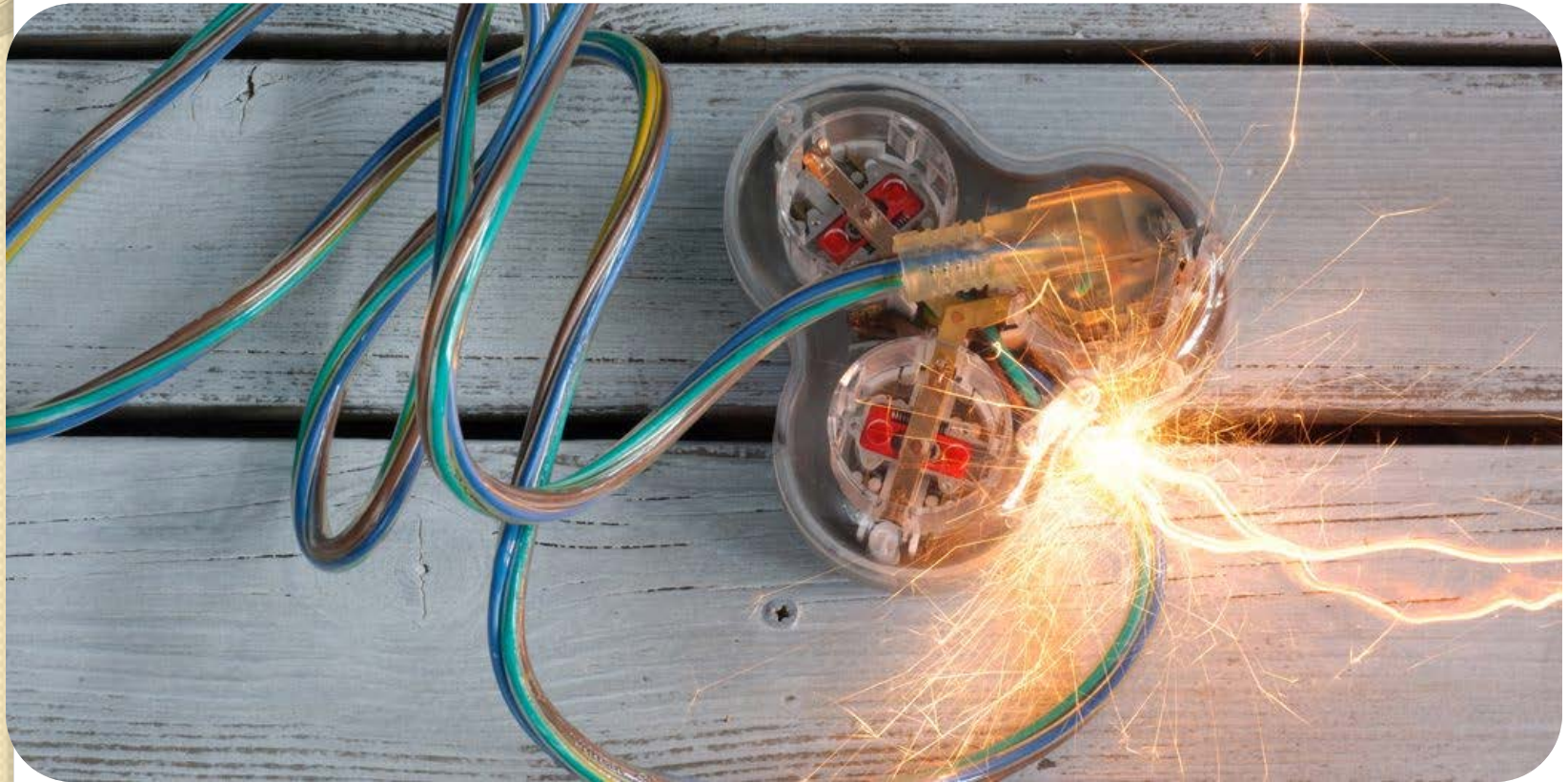
Розрахування струму короткого замикання в мережах 0,4 кВ прийнято проводити в іменованих одиницях. Параметри схеми і режиму приводяться до напруги 0,4 кВ.

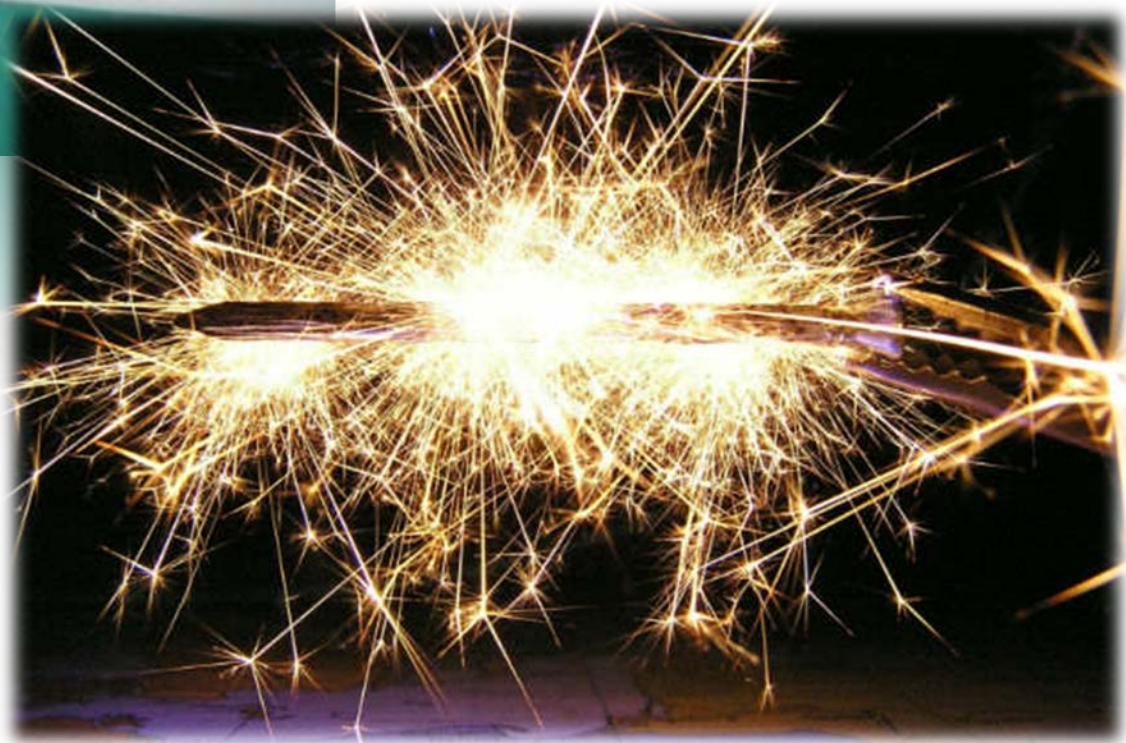
На величину струму трифазного короткого замикання впливають перехідні опори комутаційних апаратів, опори обмоток силових та вимірювальних трансформаторів, збірних шин, магістральних та розподільних шинопроводів. Розрахування струму короткого замикання в розподільчій мережі 0,4 кВ можна виконувати, дотримуючись такого алгоритму.

1. Складається схема заміщення, в яку вводять активні та індуктивні опори всіх елементів, що обмежують струм короткого замикання.
2. Розраховуються параметри схеми в іменованих одиницях, приведені до напруги 0,4 кВ.
3. Перетворюється схема заміщення та визначаються сумарні опори кола короткого замикання - R_{Σ} та X_{Σ} .
4. Визначається повне діюче значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання.
5. Оцінюється ударний струм короткого замикання.

Тема 3

Розрахунок несиметричних коротких замикань





План

1. Порядок розрахування несиметричного короткого замикання методом розрахункових кривих.
2. Порядок розрахування несиметричного аварійного режиму аналітичним методом.

Режими при несиметричних коротких замиканнях розраховуються тими ж методами (аналітичним, методами розрахункових або типових кривих) і в тих же системах одиниць, що і при трифазних коротких замиканнях. Принциповою відмінністю є те, що розрахування несиметричних аварійних режимів виконуються в координатах симетричних складових, у той час, як розрахунки при трифазних коротких замиканнях ведуться у фазних координатах. У зв'язку з цим, необхідно вільно володіти методом симетричних складових, уміти складати і перетворювати до найпростішого виду схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей.

При обчисленні реактивностей елементів енергосистем у схемах різних послідовностей необхідно пам'ятати, що опори для струмів усіх послідовностей тільки статичних елементів, що не мають значної індуктивності між фазами, можуть бути однакові. До таких елементів можна віднести реактори, групу з однофазних трансформаторів, у яких обмотка тієї напруги, де розглядається коротке замикання, з'єднана зіркою з заземленою нейтраллю, а інша – трикутником. Опори для струмів прямої і зворотної послідовностей однакові тільки в статичних елементах з рівними для усіх фаз власними і взаємними опорами (транспоновані лінії електропередач, трансформатори, автотрансформатори). В електричних машинах, де є частини, що обертаються, опори для струмів усіх послідовностей різні.

Практичне обчислення режимів при несиметричних коротких замиканнях здійснюється на основі правила еквівалентності прямої послідовності, яке полягає в наступному. *Струм прямої послідовності при будь-якому несиметричному замиканні може бути визначеном як струм трифазного пошкодження в точці, що віддалена від дійсної точки короткого замикання на додатковий опір, $X_{\text{дод}}$ який не залежить від параметрів схеми прямої послідовності, а визначається лише опорами струмам зворотної та нульової послідовностей.*

1. Порядок розрахування несиметричного короткого замикання методом розрахункових кривих

Якщо розрахування короткого замикання виконується за загальною зміною, то необхідно виконати таку послідовність дій.

1. Складаються схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей, причому схема прямої послідовності повинна відповідати надперехідному режиму.
2. Вибирається спосіб розрахування – за точним чи за наближеним приведенням.
3. Вибираються довільні базисні умови S_6 (МВА), U_6 (кВ) і обчислюються приведені базисні напруги окремих ступенів відповідно до табл. 1.1.
4. Опори елементів схем заміщення виражаються у відносних одиницях при обраних базисних умовах відповідно до табл. 1.2.
5. Перетворенням схем заміщення визначаються відносні базисні результуючі опори прямої $X_{*(6)I}$, зворотної $X_{*(6)II}$ і нульової $X_{*(6)0}$ послідовностей.
6. Визначається розрахунковий опір схеми заміщення прямої послідовності за виразом:
де $S_{\Sigma H}$ - сумарна номінальна потужність генераторів, які живлять точку короткого замикання, МВА.
7. Визначається розрахунковий опір несиметричного короткого замикання за виразом:
8. Для знайденого $X_{\text{розр}}^{(n)}$ і відповідного моменту часу, наприклад, за розрахунковими кривими, визначається відносне номінальне значення періодичного струму прямої послідовності $I_{*tl}^{(n)}$ заданого несиметричного короткого замикання (якщо $X_{\text{розр}} > 3$, то $I_{*tl}^{(n)} = 1 / X_{\text{розр}}^{(n)}$).
9. Визначається періодичний струм прямої послідовності для заданого часу $I_{tl}^{(n)}$ в іменованих одиницях за виразом:
10. Періодичний струм несиметричного короткого замикання пропорційний струму прямої послідовності і визначається за виразом:
де $m^{(n)}$ - коефіцієнт пропорційності, який визначається для різних видів короткого замикання за табл. 3.1.
11. При необхідності, аперіодичний струм визначається і враховується, як указано в розд. 1.5.

Розрахування за індивідуальною зміною пп.1-5 такі ж, як і за загальною зміною. Подальші обчислення виконуються в такій послідовності.

6. Розрахувавши коефіцієнти розподілу, визначаються відносні базисні взаємні опори окремих генерувальних віток схеми заміщення прямої послідовності $X'_{*(6)i}$.

7. Визначаються розрахункові опори окремих джерел живлення за виразом:

(для системи),

де $X'_{*(6)i}$ - взаємний відносний базисний опір i -ої вітки;

$X^{(n)}_{\text{дод}}$ - додатковий опір, визначений для даної групи джерел живлення за табл. 3.1;

$S_{\Sigma ni}$ - сумарна номінальна потужність генераторів i -ої генерувальної вітки, МВА.

8. За знайденими $X^{(n)}_{\text{розр } i}$ і для відповідних моментів часу за розрахунковими кривими визначаються відносні номінальні значення періодичного струму прямої послідовності окремих генерувальних віток $I^{(n)}_{*t ij}$. Для віток, у яких $X^{(n)}_{\text{розр } i} > 3$,

9. Знайдені відносні номінальні струми прямої послідовності окремих груп переводяться в систему іменованих одиниць за виразом:

де $I_{\Sigma ni}$ - сумарний номінальний струм i -го джерела, кА.

Для системи:

де I_6 - приведений до ступеня пошкодження базисний струм, кА.

10. Визначається сумарний струм прямої послідовності в місці короткого замикання від усіх джерел, $I^{(n)}_{\text{lt}}$.

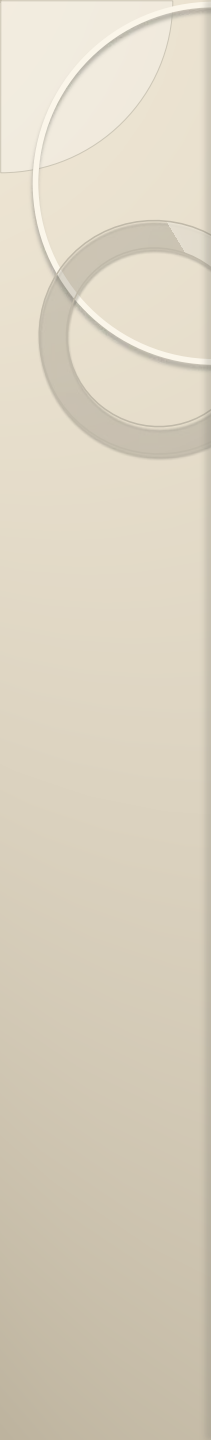
11. Визначається повний періодичний струм несиметричного короткого замикання за виразом:

2 Порядок розрахування несиметричного аварійного режиму аналітичним методом

Розрахування несиметричного короткого замикання аналітичним методом можна проводити в будь-якій системі одиниць. Приведемо порядок розрахування в системі іменованих одиниць.

1. Складаються схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей.
2. Вибирається спосіб розрахування - *за точним чи за наближеним приведенням*.
3. Приймається основний (базисний) ступінь напруги.
4. Відповідно до табл. 1.1 розраховуються приведені до базисної напруги ЕРС джерел живлення в схемі заміщення прямої послідовності (визначення дійсних ЕРС для початкового моменту часу див. табл. 2.1).
5. Відповідно до табл. 1.2 визначаються приведені до базисної напруги опори елементів схем заміщення окремих послідовностей.
6. Розраховуються приведені результуючі опори прямої $X_{1\Sigma}$, зворотної $X_{11\Sigma}$ і нульової $X_{0\Sigma}$ послідовностей.
7. Визначається приведена результуюча ЕРС схеми заміщення прямої послідовності E_{Σ} , кВ.
8. Періодичний струм прямої послідовності несиметричного короткого замикання визначається за виразом:
9. Періодичний струм несиметричного короткого замикання розраховується за виразом:

де $m^{(n)}$ - коефіцієнт пропорційності, який визначений в табл. 3.1; при цьому значення X_{11} і X_0 беруться також у системі іменованих одиниць.



Тема 3.
Розрахунок несимметричних
коротких замикань

План

1. Обчислення струмів короткого замикання в окремих вітках схеми.
2. Обчислення напруг у різних точках схеми

Обчислення струмів короткого замикання в окремих вітках схеми

Для визначення струму короткого замикання в будь-якій вітці схеми необхідно спочатку визначити струми прямої, зворотної і нульової послідовностей, що проходять по цій вітці, в еквівалентних схемах заміщення відповідних послідовностей, а потім їх підсумовувати графічно чи аналітично з урахуванням знаків, відомих з теорії несиметричних коротких замикань.

Струми прямої, зворотної і нульової послідовностей у вітках обчислюються шляхом розподілу струму, який протікає до місця короткого замикання, по відповідних елементах схеми заміщення кожної послідовності на основі коефіцієнтів розподілу. У схемі прямої послідовності розподіл струму прямої послідовності проводиться з врахуванням того, що напруга прямої послідовності U_{AI}^k у місці короткого замикання не дорівнює нулю.

Струм у вітці, яка містить ЕРС, визначається так:

де E_{AI}^n , I_{AI}^n - ЕРС і струм прямої послідовності для вітки n , опір якої X_1^n .

У схемах зворотної і нульової послідовностей розподіл струмів відповідних послідовностей у місці пошкодження можна зробити також за виразами:

де $I_{AII}^{(n)}$, $I_{AO}^{(n)}$ - струми зворотної і нульової послідовностей у вітках X_{II}^n і X_{O}^n ;

U_{AII}^k , U_{AO}^k - напруги зворотної і нульової послідовностей у місці короткого замикання.

Подальший розподіл струмів можна виконувати поступовим розгортанням відповідних схем заміщення, з використанням коефіцієнтів розподілу.

2. Обчислення напруг у різних точках схеми

Для визначення фазних напруг у будь-якій точці схеми необхідно спочатку визначити напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей для цієї точки в схемах заміщення відповідних послідовностей, а потім їх просумувати графічно з урахуванням знаків, відомих з теорії несиметричних коротких замикань.

Напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей у вузлі, для якого необхідно виконати розрахунок, обчислюються графічно чи аналітично за виразами:

Врахування навантажень при трифазних пошкодженнях у мережі

Вплив навантаження при трифазному короткому замиканні може виявлятися по-різному, в залежності від електричної відстані точки пошкодження, від місця під'єднання навантаження і моменту часу перехідного процесу, для якого виконується розрахунок. За певних умов навантаження може не тільки підживлювати точку короткого замикання, але і розвантажувати її (тобто струм навантаження може входити в результуючий струм короткого замикання зі знаком мінус).

Встановлено, що в початковий момент перехідного процесу узагальнене навантаження можна приблизно характеризувати надперехідною реактивністю і ЕРС, величини яких при повній робочій потужності навантаження (МВА) і середній номінальній напрузі в місці її приєднання складають:

Окремі великі асинхронні двигуни варто враховувати відносним номінальним опором $X''=0,2$.

Величини відносної ЕРС окремих синхронних двигунів залежать від їх збудження і повинні визначатися кожного разу. У розрахуванні впливу навантаження варто пам'ятати про надзвичайно швидке згасання струму двигунів.

Вплив навантаження в сталому режимі враховують його параметрами $X_{\text{наб}}=1,2$; $E_{\text{наб}}=0$, причому опір віднесений до повної (МВА) робочої потужності навантаження і середньої номінальної напруги ступеня, де приєднане дане навантаження.

Тема 4
Статична стійкість
електричної системи



План

1. Практичні критерій стійкості, ідеальна межа переданої потужності
2. Практичні критерії з енергетичної точки зору використання практичних критеріїв для аналізу статичної стійкості
3. Практичний критерій для схеми „еквівалентний генератор - леп - шини незмінної напруги
4. Практичний критерій для схеми „двостороннє живлення навантаження з постійним опором
5. Практичний критерій для схеми „еквівалентне джерело живлення - вузлова точка мережі
6. Практичний критерій для схеми „живлення асинхронного навантаження від шин потужної ЕЕС”

Практичні критерій стійкості, ідеальна межа переданої потужності

Практичні критерії виявляють лише можливість *текучості режиму* (самовільної зміни параметрів режиму при виникненні малих збурень), але не виявляють нестійкість, яка може виявитися у вигляді саморозгойдування (коливальної нестійкості).

Закріплюючи ті чи інші параметри режиму, можемо отримати практичні критерії стійкості, які відповідають граничному за умовами стійкості режиму. При постійній частоті в системі ($\Delta\omega = 0$), напруги у вузловій точці (ΔU) і потужності турбіни, критичний за умовою стійкості режим буде мати місце, коли:

$$dP_i/d\delta_i = 0$$

При закріпленні частоти ($\Delta\omega = 0$) і збереженні балансу у вузлі навантаження ($\Delta P_n = 0$) критичний за умовою стійкості режим буде мати місце, коли:

$$d(Q_n - Q_T)/dU = 0 \text{ або } d\Delta Q/dU = 0$$

Якщо врахувати, що $\Delta Q = \varphi(E_e)$, то можемо записати:

$$dE_e/dU = 0 \text{ чи } dU/dE_e = \infty,$$

де E_e - е. р. с. еквівалентного генератора системи

Критерій (5) називають критерієм стійкості навантаження.

Якщо врахувати, що еквівалентне асинхронне навантаження живиться від шин незмінної напруги, напруга на яких не залежить від режиму і єдиною змінною може бути змінна кутової швидкості двигунів навантаження, то критичний за умовою стійкості режим буде мати місце, коли:

$$dP/ds = 0$$

Ідеальна межа переданої потужності

Розглянемо найпростішу електричну схему передачі, в якій генератор через Т і Л працює на шини незмінної напруги (рис.1), тобто на шини приймальної системи, потужність якої настільки більша за потужність даної електропередачі, що напругу на її шинах можна вважати постійною по амплітуді і фазі за будь-яких режимів.

При дослідженні характеру перехідного процесу зручно користуватись кутовою характеристикою

$$P = f(\delta),$$

де P - електромагнітна потужність генератора; δ – кут між вектором синхронної е. р. с. генератора E_q і вектором напруги на шинах приймальної системи U_c .

Кутова характеристика потужності генератора:

$$P = E_q U_c \sin \delta / X_{dpez}$$

де X_{dpez} - результуючий опір схеми заміщення даної мережі; E_q – проекція синхронної ЕРС на повздовжню вісь:

З (6) випливає, що при $E_q = \text{const}$ і $U_c = \text{const}$ зміна потужності, що передається, залежить від зміни кута δ .

Так як $P = f(\delta)$ є синусоїда, то із зростанням δ потужність P спершу зростає, а потім спадає. При заданих значеннях ЕРС генератора E_q і напруги приймача, існує певний максимум потужності, що передається (при $\delta = 90^\circ$), який називається ідеальною межею потужності.

$$P_{\max id} = E_q U_c / X_{dpez}$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості за ідеальною межею переданої потужності:

$$K_z id = (P_{\max id} - P_o)$$

Практичні критерії з енергетичної точки зору

В усталеному режимі енергія W_T , яка надходить в систему ззовні, використовується в навантаженні W_n та йде на покриття втрат ΔW в мережі.

$$\Delta W_z = W_n + \Delta W$$

Припустимо, що енергії залежать лише від одного параметра режиму Π , який називається визначаючим параметром:

$$W_T = \varphi_1(\Pi); W = W_n + \Delta W = \varphi_2(\Pi)$$

Якщо властивості системи такі, що використання енергії після збурення (відхилення на $\Delta\Pi$) буде більш інтенсивним, ніж збільшення (генерація) енергії, яку може дати після збурення зовнішнє джерело ΔW_T , то новий режим не може бути забезпечений енергією і відновлюється попередній усталений режим, чи близький до нього. Тобто система стійка. Математично це виглядає так:

$$\Delta W / \Delta\Pi > \Delta W_T / \Delta\Pi$$

На основі (12) запишемо енергетичні співвідношення: 1) для найпростішої системи:

$$d(P - PT)d\delta > 0$$

Якщо потужність турбіни не залежить від зміни кута, то отримаємо практичний критерій стійкості найпростішої системи:

$$dP/d\delta > 0$$

2) для асинхронного двигуна:

$$d(P_{ел} - P_{мех})/ds > 0,$$

при $P_{мех} = P_0 = \text{const}$ критерій має вигляд:

$$dP/ds > 0$$

3) для вузлової точки системи:

$$d\Delta Q/dU > 0$$

$$\Delta Q = \sum Q_H - \sum Q_G$$

2 Використання практичних критеріїв для аналізу статичної стійкості

Оцінка статичної стійкості за практичними критеріями дозволяє встановити граничний режим і межу стійкості при вибраному способі дії на СЕП, який називається *методом утяження режиму* і може бути вибраним за умови, якщо задані схема електропостачання і склад електроприймачів. *Розрахункові схеми зводяться до п'яти видів:*

- 1) „Еквівалентний генератор - ЛЕП - шини незмінної напруги”;
- 2) „Двостороннє живлення навантаження з постійним опором”;
- 3) „Еквівалентне джерело живлення – вузлова точка мережі”;
- 4) „Живлення асинхронного навантаження від потужної СЕП”;
- 5) „Еквівалентне джерело, що живить комплексне навантаження співмірної потужності”.

3 Практичний критерій для схеми „еквівалентний генератор - леп - шини незмінної напруги”

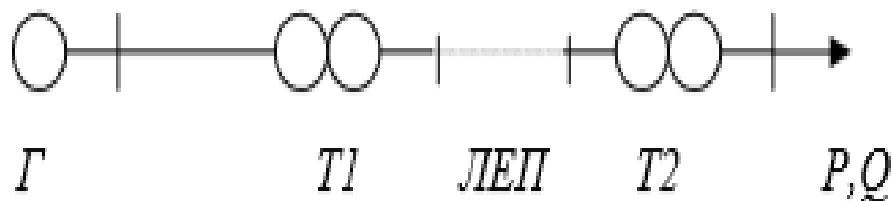


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема мережі Критерій записується у вигляді:

$$dP/d\delta > 0,$$

де P - кутова характеристика: $P = E_q U_c \sin \delta / X_{dрез}$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості:

$$K_3 = \frac{(P_{max} - P_0)}{P_0}$$

4 Практичний критерій для схеми „двостороннє живлення навантаження з постійним опором

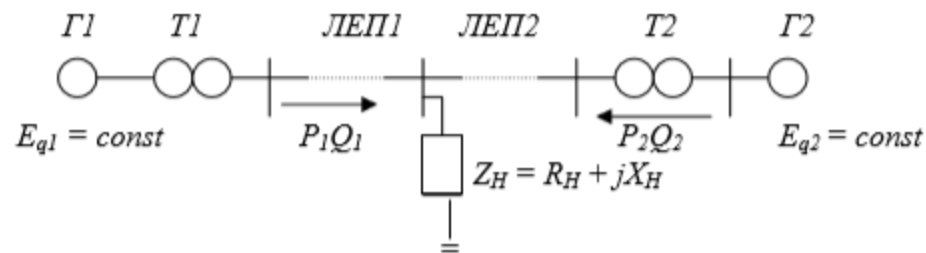


Рисунок 4.3 – Розрахункова схема мережі Практичний критерій записується у вигляді:

$$dP / d\delta_{12} > 0$$

де P - кутова характеристика потужності:

$$P = E^2 q_1 \sin \alpha_{11} / |Z_{11}| + E q_1 E q_2 \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) / |Z_{12}|$$

$$\text{де } Z_{11} = jX_1 + \frac{jX_2 \cdot Z_H}{jX_2 + Z_H} = |Z_{11}| \exp(90 - \alpha_{11}) = R_{11} + jX_{11}$$

$$Z_{12} = jX_1 + jX_2 + \frac{jX_1 \cdot jX_2}{Z_H} = |Z_{12}| \exp(90 - \alpha_{12}) = R_{12} + jX_{12}$$

$$\alpha_{11} = \arctg \frac{X_{11}}{R_{11}}; \quad \alpha_{12} = \arctg \frac{X_{12}}{R_{12}}$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості:

$$K_s = \frac{(P_{\max} - P_0)}{P_0}$$

5 Практичний критерій для схеми „еквівалентне джерело живлення - вузлова точка мережі”

Практичний критерій записується у вигляді:

$$d(QГ - Qн)/dUк < 0$$

$$\text{де } QГ = (-Uк^2 + \sqrt{Eg^2eк Uк^2 - Pн^2XГрез^2})/XГрез,$$

$$Qн = F2 (Uк)$$

$$Pн = F1 (Uк)$$

Коефіцієнт запасу:

$$K_{3U} = \frac{(U_K - U_{Kкр}) \cdot 100}{U_K}$$

6 Практичний критерій для схеми „живлення асинхронного навантаження від шин потужної еес”



Рисунок 4.4 – Розрахункова схема мережі

Практичний критерій записується у вигляді:

$$dP/ds > 0$$

Найбільше значення потужності, яку споживає навантаження, визначаємо таким чином:

$$P_{max} = U_c^2 / (2(X_s + X_{ек}))$$

Напруга, при якій перекидаючий момент стає рівним навантаженню двигуна, називається критичною.

$$U_{с кр} = \sqrt{2tP_{ном} (X_s + X_{ек})}$$

де t – коефіцієнт завантаження двигуна.

Коефіцієнт запасу:

$$K_z = \frac{(U_{с о} - U_{с кр}) \cdot 100}{U_{с о}}$$

Тема 4.

Статична стійкість електричної системи

План

1. Практичний критерій для схеми "еквівалентне джерело, що живить комплексне навантаження співмірної потужності"
2. Вплив АРЗ на статичну стійкість
3. Визначення статичної стійкості за внутрішньою межею переданої потужності
4. Визначення статичної стійкості за дійсною межею переданої потужності

1 Практичний критерій для схеми " еквівалентне джерело, що живить комплексне навантаження співмірної потужності"

Критерій стійкості запишем у вигляді:

$$dE_{ек}/dU > 0$$

де $E_{ек}$ еквівалентного джерела:

$$E_{ек} = \sqrt{(U^2 + P_{н} r_{ек} + Q_{н} X_{ек})^2 + (P_{н} X_{ек} - Q_{н} r_{ек})^2} / U,$$
$$P_{н} = F_1(U),$$
$$Q_{н} = F_2(U)$$

Критерій називається критерієм Жданова.

Коефіцієнт запасу статичної стійкості:

$$K_{3U} = \frac{(U_0 - U_{кр})}{U_0} \cdot 100$$

2 Вплив АРЗ на статичну стійкість

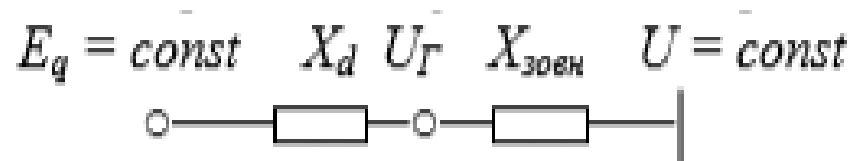
Якщо генератор має АРЗ, то зростання потужності, що передається і зв'язане з ним зростання кута δ приводить до зміни ЕРС генератора. Це відповідає переходу з кутової характеристики, побудованої при постійній ЕРС E_{q0} на характеристику, яка відповідає постійній е. р. с. $E_{q1} > E_{q0}$. Із збільшенням δ потужність, що передається в мережу (її межа) збільшується, характеризується зміщенням максимуму кутової характеристики в сторону значень кута δ більших за 90° .

При розрахунках стійкості важливе значення має врахування типу пристроїв АРЗ. Розрізняють: автоматичні регулятори пропорційної дії і автоматичні регулятори сильної дії.

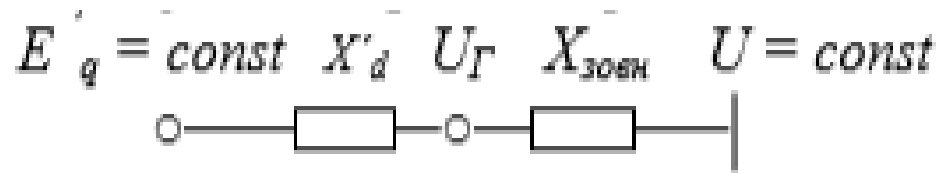
Автоматичні регулятори пропорційної дії реагують на відхилення одного чи декількох параметрів режиму від контрольованих значень; автоматичні регулятори сильної дії реагують додатково на швидкості і прискорення зміни параметрів режиму.

Наявність різних меж потужності, що передається в мережу при використанні того чи іншого пристрою АРЗ генератора дозволяє по-різному представляти генератор в схемі заміщення електричної системи:

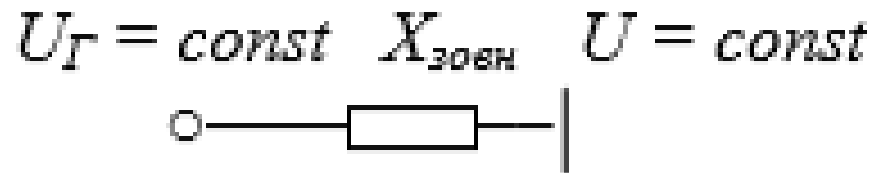
- генератор без АРЗ заміщують джерелом синхронної ЕРС за синхронним індуктивним опором X_d :



генератор з автоматичним регулятором пропорційної дії заміщують джерелом перехідної ЕРС за перехідним опором $X'd$:



генератор з автоматичним регулятором сильної дії, що забезпечує стабілізацію напруги на затискачах генератора, є джерелом незмінної напруги U_Γ , яку вважають незалежним параметром режиму.



3 Визначення статичної стійкості за внутрішньою межею переданої потужності

Кутова характеристика генератора з АРЗ пропорційного типу має вигляд:

$$P = \frac{E'_q \cdot U}{X'_{dpe3}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{(x_d - x'_d)}{X_{dpe3} \cdot X'_{dpe3}} \sin 2\delta,$$

Проекція ЕРС на позадвжню вісь:

$$E'_q = E' \cos(\delta - \delta'), \text{ де}$$

$$E' = \sqrt{(U + Q_0 X'_{dpe3} / U)^2 + (P_0 X'_{dpe3} / U)^2}$$

$$\delta' = \arctg P_0 X'_{dpe3} / (U^2 + Q_0 X'_{dpe3})$$

Кутова характеристика генератора з АРЗ сильної дії має вигляд:

$$P = \frac{U_{Гq} \cdot U}{X_c} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d}{X_{d\text{фез}} \cdot X_c} \sin 2\delta,$$

Проекція напруги генератора на повздовжню вісь:

$$U_{Гq} = U_{Г} \cos(\delta - \delta_c), \text{ де}$$

$$U_{Г} = \sqrt{(U + Q_c X_c / U)^2 + (P_c X_c / U)^2}$$

$$\delta_c = \arctg P_c X_c / (U^2 + Q_c X_c)$$

4 Визначення статичної стійкості за дійсною межею переданої потужності

Дійсну межу потужності визначають спрощеним методом. Для цього повну потужність навантаження системи представляють у вигляді постійного опору:

$$|Z_K| = U^2 / S_K$$

Отримана схема заміщення аналогічна схемі заміщення „Двостороннє живлення навантаження з постійним опором”. Тому оцінку статичної стійкості за дійсною межею переданої потужності проводиться за критерієм (16).

Врахування навантаження погіршує умови статичної стійкості, зокрема, зменшується коефіцієнт запасу стійкості за рахунок зменшення максимуму переданої потужності та зменшується діапазон значень кута δ , що задовольняють умову стійкості.

Тема 5

**Динамічна стійкість електричної
системи**

План

1. Дослідження динамічної стійкості методом площ
2. Дослідження динамічної стійкості методом послідовних інтервалів
3. Процеси в вузлах навантаження, їх види і особливості
4. Комплексне навантаження
5. Статичні і динамічні характеристики вузлів навантаження

Для дослідження динамічної стійкості розглянемо перехідний процес при КЗ одного з кіл ЛЕП з подальшим його вимкненням:

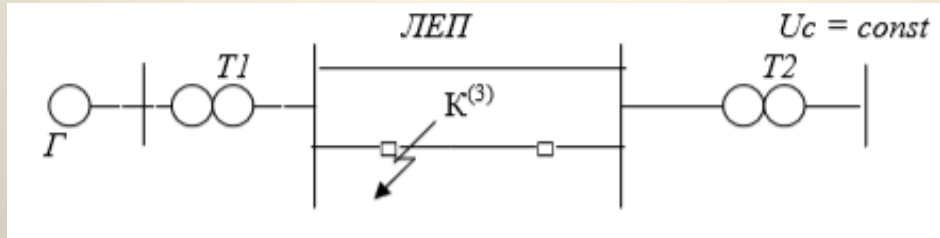


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема короткозамкненого кола

Кутова характеристика потужності генератора для нормального режиму:

$$P_I = E' U_c \sin \delta / X_I$$

$$X_I = X'_{дрез1} = X'_d + X_{TP1} + X_{л} / 2 + X_{TP2};$$

Кутова характеристика потужності генератора для після аварійного режиму:

$$P_{III} = E' U_c \sin \delta / X_{III}$$

$$X_{III} = X'_{дрез3} = X'_d + X_{TP1} + X_{л} + X_{TP2}$$

В схему заміщення аварійного режиму вносять деякий шунтуючий опір X_k , що вмикається в точку КЗ. Його значення залежить від виду КЗ.

$$X_k^{(2)} = X_{2рез}; \quad X_k^{(1)} = X_{2рез} + X_{0рез}; \quad X_k^{(3)} = 0;$$

$$X_k^{(1.1)} = \frac{X_{2рез} \cdot X_{0рез}}{X_{2рез} + X_{0рез}}$$

$X_{0рез}$, $X_{2рез}$ – результуючі опори відповідно схеми нульової і зворотної послідовності відносно точки КЗ.

1 Дослідження динамічної стійкості методом площ

Метод площ використовується для визначення граничних значень кута і часу вимкнення КЗ, при цьому не відтворюється характер перехідного процесу зміни режимів. Метод площ дозволяє оцінити співвідношення зміни енергії в різних фазах процесу зміни режимів роботи СЕП. Зміну станів системи представляють через кутові характеристики активної потужності.

При виникненні КЗ відбувається спадання потужності, в результаті з'являється надлишкова потужність:

$$\Delta P_{II}(\delta) = P_0 - P_{II}(\delta),$$

яка викликає прискорення ротора генератора.

Якщо вимкненню пошкодженого кола відповідає кут двимк, то ротор під час прискорення отримає кінетичну енергію:

$$A_{\text{приск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{двимк}}} \Delta P_{II}(\delta) d\delta \equiv F_{\text{приск}}$$

Вимкнення пошкодженого кола електропередачі призводить до зростання потужності, в результаті з'являється надлишкова потужність:

$$\Delta P_{III}(\delta) = P_{III}(\delta) - P_0,$$

яка викликає гальмування ротора генератора. Але кут δ буде зростати доти, доки не буде використана вся кінетична енергія ротора генератора, якої було набуто під час прискорення.

Під час гальмування може бути використана енергія:

$$A_{\text{гальм}} = \int_{\delta_{\text{двимк}}}^{\delta_{\text{кр}}} \Delta P_{III}(\delta) d\delta \equiv F_{\text{гальм}}$$

Збереженню динамічної стійкості відповідає умова:

$$A_{\text{приск}} \leq A_{\text{гальм}},$$

2 Дослідження динамічної стійкості методом послідовних інтервалів

Якісну оцінку перехідного процесу зміни режимів виконують по залежності $\delta = f(t)$, яку отримують з рівняння руху ротора (2) методом послідовних інтервалів. Перехідний процес розбивають на ряд рівних інтервалів часу Δt і розглядають його послідовно по всіх інтервалах.

В кожному інтервалі надлишок потужності вважають незмінним і при цьому визначають приріст кута $\Delta \delta$.

В момент КЗ виникає надлишок потужності ΔP_0 . Приріст кута протягом першого інтервалу часу Δt (при початкових умовах)

$$\Delta \delta_1 = \Delta t^2 \Delta P_0 / (2T_j)$$

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta \delta_1$$

На другому інтервалі ротор рухається під дією надлишку потужності:

$$\Delta P_1 = P_0 - P_{max} \sin \delta$$

$$\Delta \delta_2 = \Delta t^2 \Delta P_1 / (T_j) + \Delta \delta_1$$

Якщо постійну інерції T_j і час Δt виразити в секундах, кут – в градусах і ввести постійну

$$K = 18000 \Delta t^2 / T_j$$

то:

$$\Delta \delta_2 = \Delta \delta_1 + K \Delta P_1,$$

тоді:

$$\Delta \delta_{n-1} = \Delta \delta_{n-1} + K \Delta P_{n-1}$$

Якщо на деякому інтервалі відбуватиметься зміна режиму, що супроводжуватиметься переходом з однієї кутової характеристики на іншу, то:

$$\Delta \delta_i = \Delta \delta_{i-1} + 0,5 K (\Delta P'_{i-1} + \Delta P''_{i-1})$$

Розрахунок точок кривої $\delta = f(\Delta t)$ слід виконувати доти, доки кут δ не почне спадати, що відповідає стійкості, або доки не буде встановлено, що цей кут продовжує безмежно зростати, що відповідає порушенню стійкості.

Стійкість вузлів навантаження

3. Процеси в вузлах навантаження, їх види і особливості

Вузлом навантаження називаються точки СЕП, в яких відбувається відбор і розподіл потужності для живлення груп споживачів електричної енергії. На режим електропостачання і на стійкість вузлів навантаження мають вплив склад ЕП і їх параметри.

Перехідні процеси в СЕП розрізняють за видом збурень. У нормальному режимі при малих збуреннях перевіряють статичну стійкість СД, СК і груп АД, які мають потужність співмірну з потужністю живильних генераторів і можуть виявитися нестійкими. Вплив різких змін режиму проявляється в розподільчих щитках у вигляді коливання навантаження.

4. Комплексне навантаження.

В практиці дослідження електромеханічних перехідних процесів використовують комплексні розрахункові моделі навантаження, які дозволяють відтворити основні особливості перехідних процесів в ЕД і врахувати вплив інших приймачів. Комплексні розрахункові моделі містять в собі рівняння еквівалентного асинхронного і синхронного двигунів, а також статичного навантаження.

Під статичним навантаженням розуміють навантаження, в якому відсутнє обертове магнітне поле: електроосвітлення, електropечі, комутаційно-побутові пристрої, а також ємність повітряних та кабельних ліній, активні та реактивні опори елементів мережі, які створюють втрати, конденсаторні батареї тощо.

Двигунові навантаження математично описується по різному залежно від числа ЕД, що входять в вузол навантаження.

- 1) в вузлах навантаження з малим числом ЕД кожен двигун враховується своїми рівняннями і параметрами руху, та безпосередньо вводиться в розрахунок;
- 2) в вузлах навантаження, що містить групи різних ЕД, які відносяться до одного виробництва, групи замінюються певним числом еквівалентних ЕД з параметрами, які розраховуються за певними правилами на базі даних про реальні двигуни;
- 3) крупні вузли навантаження описуються з використанням ряду конкретних даних про склад навантаження і параметри живильної мережі, а також вихідної інформації, яка отримана в результаті ймовірно-статистичного аналізу. Більшість методик розрахунків електро-механічних перехідних процесів в СЕП базується на використанні статичних і динамічних характеристик навантаження.

5. Статичні і динамічні характеристики вузлів навантаження

Вид характеристик навантаження основних споживачів електричної енергії визначається параметрами електропостачання, а також впливом втрат на потужність і напругу в елементах розподільчої мережі.

Статичні характеристики представляють собою залежності між параметрами режиму при малих змінах процесів. Вузли навантаження характеризуються статичними характеристиками у вигляді залежностей P і Q від вільної змінної U .

Динамічні характеристики навантаження визначаються не лише параметрами навантаження, але і параметрами СЕП та відображають швидкість зміни цих параметрів.

Для асинхронного двигуна статичні та динамічні характеристики записуються у вигляді:

$$M_{ст} = f(U, s); M_{дин} = \varphi(U, dU/dt, s, ds/dt)$$

Тобто, статичні характеристики - залежність моменту M від ковзання ротора s , яке повільно змінюється;

динамічні характеристики - залежність ковзання, що швидко змінюється, напруги і швидкості їх зміни (прискорення) від струму. Аналогічно для синхронного двигуна:

$$M_{ст} = \psi(E, U, \delta); M_{дин} = \varphi(E, dE/dt, U, dU/dt, \delta, d\delta/dt).$$

Динамічна стійкість електричної системи

План

1. Основні положення дослідження стійкості
2. Розрахункові моделі вузла навантаження
3. Розрахунок стійкості асинхронного і синхронного двигунів
4. Вплив електричної мережі на стійкість вузла навантаження
5. Вплив компенсації реактивної потужності на стійкість вузла навантаження
6. Розміщення ДРП у вузлі асинхронного навантаження
7. Розміщення ДРП в вузлі комплексного навантаження, віддаленого від шин незмінної напруги. Лавина напруги
8. Регулювання частоти в енергосистемі
9. Лавина частоти

1 Основні положення дослідження стійкості

Слабкі збурення можуть виникати під дією живлячої енергетичної системи (зміна напруги і частоти), а також в результаті змін режимів роботи самої СЕП і її електроприймачів (пуски, перевантаження двигунів за умовами технологічного процесу, зміни кількості живлячих ліній, тощо). Якщо вузли навантаження по сумарній споживаній потужності співмірні з потужністю живлячої ЕЕС або електрично віддалені від джерела електроенергії, то режим їх роботи при слабких збуреннях може виявитися нестійким.

Стійкість вузла промислового навантаження розраховують в наступній послідовності:

- 1) заміщують вузол навантаження розрахунковою моделлю і визначають її параметри;
- 2) виділяють суттєві параметри і критерії стійкості для даної схеми електропостачання;
- 3) оцінюють граничний режим за критичним значенням суттєвих змінних і запасу стійкості.

Вузол навантаження з асинхронними двигунами замінюють еквівалентним асинхронним двигуном, рух якого описується тими ж рівняннями що і реальних двигунів.

Різноманітність синхронних двигунів в вузлах навантаження незначна, що дозволяє враховувати їх по фактичних параметрах нормального режиму. Заміщення великих і різноманітних по технологічному використанню груп синхронних двигунів виконують окремо по явнополюсних і неявнополюсних машинах.

Вузол навантаження, що містить СД і АД, заміщують комплексною розрахунковою моделлю.

2 Розрахункові моделі вузла навантаження

Стійкість вузла навантаження аналізують по схемі заміщення всієї СЕП та параметрах її режимів. В залежності від конкретних умов розрахункову схему зводять до одного з п'яти основних виглядів. Це дає можливість використовувати практичні критерії стійкості. В результаті заміщення отримують *чотири різні розрахункові моделі*.

1. Модель, де напруга у вузлі навантаження є незалежною змінною, що дозволяє розраховувати стійкість незалежно для кожної з характерних груп електроприймачів за її основним критерієм.
2. Модель, де характерні групи електроприймачів радіально зв'язані через власні зовнішні опори з шинами вузла навантаження, напруга на яких є незалежною змінною.
3. Модель, де характерні групи електроприймачів зв'язані з вузлом навантаження через спільний зовнішній опір, незалежною змінною режиму є ЕРС джерела живлення.
4. Модель, де вузол навантаження містить всі характерні групи електроприймачів, а також джерело реактивної потужності (ДРП).

3 Розрахунок стійкості асинхронного і синхронного двигунів

Оцінка стійкості вузла навантаження, яка проводиться незалежною по окремих групах АД і СД, виконується для розрахункових моделей вузла навантаження 1 і 2. Незалежною змінною є напруга на шинах вузла навантаження. Для оцінки статичної стійкості використовують основні критерії стійкості:

$$dP/ds > 0 \text{ і } dP/d\delta > 0$$

За безпосереднього ввімкнення асинхронного двигуна до шин вузла навантаження (модель 1), параметри, що відповідають критичному режиму, визначаються за формулами:

$$s_{кр} = r_2 / x_s;$$

$$P_{max} = U_2^2 c / 2x_s;$$

$$U_{с кр} = \sqrt{2 \cdot m \cdot P_{ном} \cdot x_s};$$

Якщо асинхронний двигун ввімкнено до вузла навантаження через власні зовнішні опори $Z_{зовн.1}$, $Z_{зовн.2}$, $Z_{зовн.3}$ (модель 2), розрахунок критичних параметрів виконують аналогічно, але враховуючи ці опори:

$$s'_{с кр} = s_{кр} / (1 + x_{зовн.}/x_s) = r_2 / (x_s + x_{зовн.});$$

$$P'_{max} = U_2^2 c / (2(x_s + x_{зовн.})) = P_{max} / (1 + x_{зовн.}/x_s); \quad (36)$$

$$U'_{с кр} = \sqrt{2 \cdot m \cdot P_{ном} \cdot (x_s + x_{зовн.})} = U_{с кр} \sqrt{1 + x_{зовн.}/x_s};$$

При дослідженні стійкості синхронних двигунів умова виникнення критичного режиму записується у вигляді:

$$dP / d\delta = 0$$

У випадку відсутності АРЗ двигунів критичні за умовами стійкості параметри режиму:

$$P_{max} = U_c E_q / (x_d + x_{зовн});$$

$$U_{с кр} = m P_{ном} / E_q (x_d + x_{зовн})$$

4 Вплив електричної мережі на стійкість вузла навантаження

Якщо характерні групи двигунів вузла навантаження приєднані до центра живлення з напругою $U_c = \text{const}$ через електричну мережу (модель 3), то умови стійкості вузла навантаження залежать від параметрів електричної мережі ($Z_{\text{зовн}}$) і режиму роботи всіх електроприймачів. В цьому випадку напруга в вузлі навантаження є величиною змінною. Стійкість вузла навантаження оцінюють на основі незалежної змінної, використовуючи непрямі критерії:

$$dU_c / dU > 0 ;$$

або

$$d \Delta Q / dU < 0 ;$$

Статичні характеристики вузла навантаження:

$$P_H = F_1(U); Q_H = F_2(U)$$

$$U_c = U$$

Дослідивши вираз з врахуванням знайдемо координати граничного режиму $U_{c \text{ min}}$ і $U_{c \text{ max}}$.

За критерієм (2) досліджують приріст реактивної потужності:

$$\Delta Q = Q_c - Q_H,$$

де Q_c – реактивна потужність системи:

$$Q_c = (-U^2 - P_H R_{\text{зовн}} + \sqrt{U^2 - P_H^2 X_{\text{зовн}}^2}) / X_{\text{зовн}},$$

де P_H , Q_H – статичні характеристики навантаження. Якщо статичні характеристики невідомі, то:

$$\Delta Q = Q_c - (Q_c \frac{dU}{U} + Q_H \frac{dU}{U})$$

Межу статичної стійкості встановлюють графоаналітичним способом, тобто визначають критичні за умовами стійкості параметри, які задовольняють умову:

$$d \Delta Q / dU = 0$$

5 Вплив компенсації реактивної потужності на стійкість вузла навантаження

У вузол навантаження реактивна потужність надходить з ЕЕС, але може вироблятися і місцевим джерелом реактивної потужності (модель 4) – конденсаторними батареями, синхронними компенсаторами, а також синхронними двигунами. Реактивна потужність КБ:

$$Q_{кб} = Q_{кб\ ном} (U / U_{ном})^2 = Q_{кб\ ном} U^2 ;*$$

$$Q_{кб\ ном} = \omega C U^2_{ном} ;$$

де C – результуюча ємність. Синхронний компенсатор може генерувати і споживати реактивну потужність залежно від значення ЕРС:

$$Q_{ск} = Q_{ск\ ном} (U * E * q - U^2) / *x * d ;$$

Якщо $E q < U$, то синхронний компенсатор споживає реактивну потужність; якщо $E q > U$, то синхронний компенсатор генерує реактивну потужність в мережу. При оцінці стійкості вузлів навантаження у випадку наявності компенсуючих пристроїв, істотним фактором є характер вузла навантаження, в якому розміщене джерело реактивної потужності.

6 Розміщення ДРП у вузлі асинхронного навантаження

При розміщенні джерела реактивної потужності у вузлі асинхронного навантаження напруга в електроприймачів, за рахунок зменшення її спаду в мережі, збільшується.

При ввімкненні синхронного двигуна чи синхронного компенсатора зміну параметрів зовнішньої мережі визначають за формулами:

$$U_{c \text{ екв}} = (U_c / x_{\text{зовн}} + E_{q0} / x_d) / (1 / x_{\text{зовн}} + 1 / x_d) = U_c (1 + E_{q0} / U_c) / (1 + x_{\text{зовн}} / x_d);$$

$$X_{\text{екв}} = 1 / (1 / x_{\text{зовн}} + 1 / x_d) = x_{\text{зовн}} (1 + x_{\text{зовн}} / x_d)$$

При ввімкненні КБ еквівалентні параметри зовнішньої мережі змінюються наступним чином:

$$U_{c \text{ екв}} = U_c / j x_{\text{зовн}} (1 / j x_{\text{зовн}} - 1 / j x_{\text{кб}}) = U_c (1 - x_{\text{зовн}} / x_{\text{кб}});$$

$$X_{\text{екв}} = 1 / (1 / j x_{\text{зовн}} - 1 / j x_{\text{кб}}) = x_{\text{зовн}} / (1 - x_{\text{зовн}} / x_{\text{кб}});$$

7 Розміщення ДРП в вузлі комплексного навантаження, віддаленого від шин незмінної напруги. Лавина напруги

Стійкість такого вузла слід аналізувати за критерієм:

$$\Delta Q = Q_c + Q_{\text{ДРП}} - Q_n ,$$

Дослідження на екстремум виразу (48) виконують графічно. Стійкість забезпечується в режимах, що відповідають точкам, в яких $\Delta Q = 0$ і виконується умова $d\Delta Q/dU > 0$

В точках, де виконується умова $d\Delta Q /dU > 0$ стійкість вузла не зберігатиметься, так як спадаючим значенням напруги будуть відповідати зростаючі значення споживаної потужності, яка зумовлює втрати напруги в елементах мережі між ДРП і вузлом навантаження. Таке зниження напруги через зростання дефіциту реактивної потужності є прогресуючим. Цей процес приводить до порушення стійкості всього вузла навантаження і називається *лавиною напруги*. Вузол навантаження з конденсаторною батареєю менш протистійкий даному явищу, ніж вузол з синхронним компенсатором.

8 Регулювання частоти в енергосистемі

Відхилення частоти відбувається при порушенні балансу споживаної і генерованої енергії при відсутності резерву. Існують регулятори частоти:

Первинний регулятор - АРЧО (автоматичний регулятор частоти обертання). На протязі декількох секунд усуває малі відхилення навантаження (від 1 до 4%) з періодом менше 1 хвилини.

Вторинний регулятор – АРЧ (автоматичний регулятор частоти). Вторинне регулювання на відміну від первинного, яке використовує лише обмежені акумулюючі здатності, є більш потужним і перекриває значні коливання навантаження. Досягається регулювання шляхом дії на паропроодуктивність агрегату і регулюючі клапани турбіни.

Третинний регулятор діє найбільш повільно, здійснює розподіл потужності між блоками чи станціями у відповідності з оптимальними економічними характеристиками.

9 Лавина частоти

Явище нестійкості (лавини) частоти виникає при невдалому гармонуванні характеристик агрегатів і допоміжних пристроїв з одного боку і споживання потужності навантаженням з іншого. За цих умов невелике відхилення частоти може далі підсилюватись і набувати лавиноподібного характеру. Причина цього – в пониженні потужності, генерованої генераторами, при пониженні частоти. Це відбувається через відсутність резерву в СЕП, оскільки механізми власних потреб понижують свою продуктивність із зниженням частоти. Зниження частоти викликає зменшення видачі реактивної потужності і в той же час збільшення споживання реактивної потужності навантаженням, що веде до зниження напруги в вузлах навантаження системи. Лавина частоти і лавина напруги викликають масове вимкнення споживачів від дії їх захисту і стимулює порушення паралельної роботи електростанцій.

Порушення частоти може бути попереджене у випадках:

- 1) якщо в системі є достатньо великий резерв;
- 2) якщо з пониженням частоти відключається частина навантаження, тобто відбувається автоматичне частотне розвантаження.

Тема 5. Динамічна стійкість електричної системи

План

1. Різкі зміни параметрів режиму у вузлах СЕП
2. Накид навантаження на електродвигуни
3. Перехідні процеси у вузлі навантаження при пуску асинхронного двигуна
4. Перехідні процеси у вузлі навантаження при пуску синхронного двигуна
5. Самозапуск асинхронних двигунів
6. Самозапуск синхронних двигунів
7. Самозбудження асинхронного двигуна під час пуску при послідовній ємнісній компенсації в мережі .
8. Підвищення стійкості СЕП

1 Різкі зміни параметрів режиму у вузлах СЕП

До різких змін режиму роботи СЕП, які можуть порушити її стійкість призводять різні причини:

- 1) аварії і перенавантаження в розподільчих чи живлячих мережах, коли в початковий момент часу t_0 напруга різко знижується від значення U_0 до U_1 , а потім через час t_1 знову збільшується;

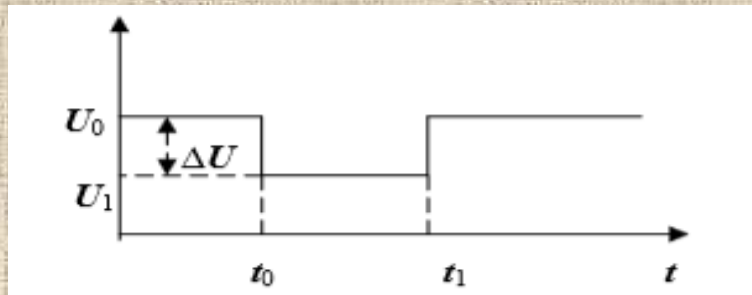


Рисунок 5.2 – Зміна режиму роботи під час зниження напруги

- 2) вимкнення вузла навантаження з подальшим його ввімкненням через час t_1 , коли упродовж часу від t_0 до t_1 наступає перерва в електропостачанні споживача;
- 3) зміна моменту опору при збільшенні навантаження на механізмі, що обертається двигуном ($M_{ст1} > M_{ст0}$) або при зменшенні його ($M_{ст1} < M_{ст0}$) з подальшим відновленням попереднього моменту $M_{ст0}$ через час t_1 .

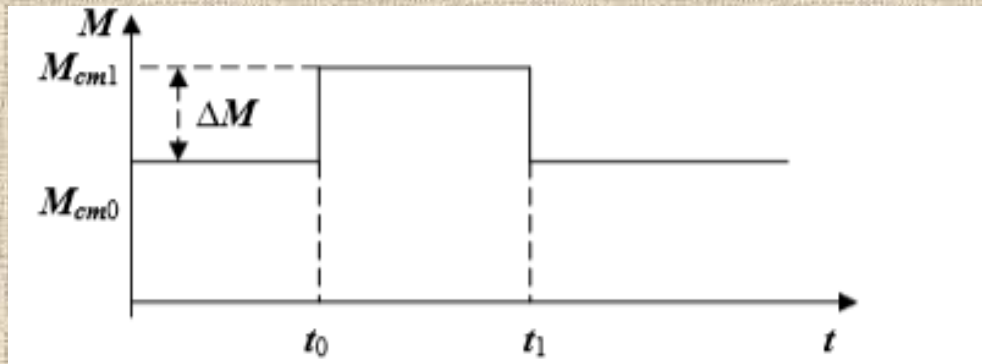


Рисунок 5.3 – Зміна режиму роботи під час збільшення моменту опору

Дослідження перехідних процесів в СЕП, що містить двигуни із змінними навантаженнями зводиться до розв'язку системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують рух роторів двигунів і генераторів, зміни струмів і напруг в системі.

Методика розрахунку перехідних процесів в СЕП базується на таких припущеннях:

1) навантаження на валу електродвигуна змінюється строго періодично, циклічно або випадковим чином (рисунок 10);

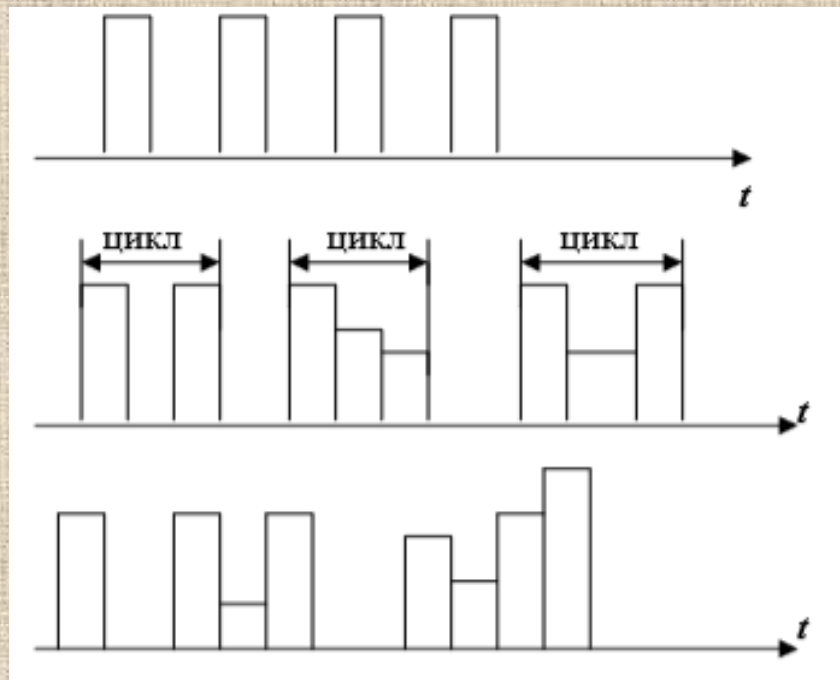


Рисунок 5.4 –Режим зміни навантаження

- 2) перехідний процес розглядається при постійності ЕРС генераторів $E'_{q} = E' = \text{const}$ за перехідним опором;
- 3) опір асинхронних двигунів та іншого навантаження в момент комутації постійний;
- 4) дія демферного моменту синхронного двигуна та регуляторів частоти обертання первинних двигунів не враховується.

2 Накид навантаження на електродвигуни

Накид навантаження на синхронний двигун характерний для двох режимів його роботи: зниження живлячої напруги та збільшення моменту опору. Нехай відбулось різке пониження напруги від U_0 до U_1 .

Граничний кут, при якому необхідно відновити напругу визначають згідно з правилом площ:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{вимкн}}} (M_{\text{ст } 0} - M^{(1)}_{\text{max}} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_{\text{кр}}}^{\delta_0} (M^{(0)}_{\text{max}} \sin \delta - M_{\text{ст } 0}) d\delta = 0$$

Звідки:

$$\delta_{\text{вимкн}} = \arccos \left[\frac{M_{\text{ст } 0} \delta_0 - M_{\text{ст } 0} \delta_{\text{кр}} - M^{(0)}_{\text{max}} (\cos \delta_{\text{кр}} - \cos \delta_0)}{(M_{\text{ст } 0} - M_{\text{ст } 0})} \right]$$

При збільшенні навантаження на валу двигуна від $M_{\text{ст } 0}$ до деякого значення $M_{\text{ст}}$, що призводить до порушення стійкості при незмінній нарузі живлення, граничний кут вимкнення двигуна визначимо з виразу:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{вимкн}}} (M_{\text{ст}} - M^{(0)}_{\text{max}} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_{\text{кр}}}^{\delta_0} (M^{(0)}_{\text{max}} \sin \delta - M_{\text{ст } 0}) d\delta = 0$$

Звідки

$$\delta_{\text{вимкн}} = \arccos \left[\frac{M_{\text{ст}} \delta_0 - M_{\text{ст } 0} \delta_{\text{кр}} - M^{(0)}_{\text{max}} (\cos \delta_{\text{кр}} - \cos \delta_0)}{(M_{\text{ст}} - M_{\text{ст } 0})} \right]$$

При дослідженні стійкості СД практичне значення має граничний час накиду навантаження на двигун, що працював в попередній момент в номінальному або іншому режимі. Це є час упродовж якого допустиме зниження напруги живлення або підвищення моменту опору. Його визначають з рівняння перехідного процесу:

$$Tj(d^2\delta/dt^2) = M_0 - M(1)_{\text{max}} \sin \delta$$

При цьому використовують апроксимацію синусоїди відповідним відрізком прямої, що дозволяє дуже спростити інтегрування.

Розглянемо вплив сильних збурень на роботу асинхронного навантаження. При КЗ ковзання асинхронного двигуна збільшується, в результаті чого після вимкнення КЗ напруга системи може не відновити своє нормальне значення.

Граничний час упродовж якого може відбуватися зниження напруги з значення U_0 до U_1 без зупинки двигуна з продовженням його роботи після відновлення напруги визначається за формулою:

$$t_{зр} = s_k T_j / M_{cm0} - \left\{ s_* + k (s_*^2 - 2 k s_* + 1) + \right. \\ \left. + (2r^2 / \sqrt{1 - k^2}) \operatorname{arctg} \left((s_* - k) / \sqrt{1 - k^2} \right) \right\} \Big|_{s_{*0}}^{s_{*1}}$$

де $k = M_{max} / M_0 (U_1 / U_0)^2$; $s_* = s / s_{кр}$;

$$s_{*0} = M_{max} / M_0 - \sqrt{(M_{max} / M_{cm0})^2 - 1};$$

$$s_{*1} = M_{max} / M_0 + \sqrt{(M_{max} / M_{cm0})^2 - 1}$$

3 Перехідні процеси у вузлі навантаження при пуску асинхронного двигуна

При пуску двигун споживає більшу кількість енергії, що відображається на збільшенні його пускового струму. Процес руху асинхронного двигуна описується рівнянням:

$$T_j(ds/dt) = M_{cm} - M = \Delta M,$$

де M_{cm} – момент опору робочого механізму; M – електромагнітний момент. Рівняння (53) досліджується при різних значеннях статичного моменту M_{cm} . При цьому дослідження проводиться шляхом розбиття кривої $\Delta M = f(s)$ на інтервали Δs , що дозволяє рівняння руху (53) представити у вигляді:

$$\Delta M_i = T_j(\Delta s_i / \Delta t_i),$$

де ΔM_i – середнє значення надлишкового моменту на інтервалі Δs_i .

Час від моменту пуску двигуна до кінця будь-якого n-го інтервалу:

$$t = T_j \sum_{i=1}^n (\Delta s_i / \Delta M_i)$$

Припустивши, що $M_{cm} = const$ упродовж всього процесу розгону двигуна і, що обертаючий момент M визначається виразом, що відповідає спрощеній схемі двигуна:

$$M = U^2 R_2 s / (x^2 s^2 + R_2^2)$$

Тоді, надлишковий момент:

$$\Delta M = M_{cm} - U^2 R_2 s / (x^2 s^2 + R_2^2)$$

Час розгону двигуна від s_1 до s_2 :

$$t = \int_{s_1}^{s_2} T_j(ds/dM) = T_j \int_{s_1}^{s_2} ((x^2 s^2 + R_2^2) / (M_{cm}(x^2 s^2 + R_2^2) - U^2 R_2 s)) ds$$

4 Перехідні процеси у вузлі навантаження при пуску синхронного двигуна

При пуску синхронний двигун вмикають в мережу незбудженням. Його обмотка збудження закорочена, або замкнена на опір:

$$\Delta R = (510)R_{зб}$$

де $R_{зб}$ – опір обмотки збудження двигуна.

Розганяючись як асинхронний, він досягає частоти обертання, що близька до синхронної і називається підсинхронною частотою обертання. При цьому рух двигуна задовільняє рівняння:

$$\Delta M = T_j(ds/dt),$$

де при синхронній частоті обертання:

$$s = (-1/\omega_0) d\delta/dt$$

Після цього подають напругу на обмотку збудження двигуна і він, набуваючи властивостей синхронного двигуна, входить в синхронізм. Процес пуску СД можна умовно розбити на два етапи:

- 1) розгін до підсинхронної частоти обертання ($s \approx 0.1$) під дією середнього асинхронного моменту;
- 2) входження в синхронізм під дією моментів, що створені збудженням і залежать від кута між віссю ротора і вектором поля статора. На першому етапі визначне значення мають початковий поштовх статора і тривалість розгону до підсинхронної частоти обертання. Початковий поштовх періодичної складової струму статора:

$$I = U/(x''_d + x_{зовн}),$$

де U – напруга в точці, де вона може вважатись незалежною від режиму роботи двигуна; $x_{зовн}$ – зовнішній опір кола статора між точкою з напругою U і записками статора; x''_d – надперехідний опір двигуна.

Тривалість розгону до підсинхронної частоти можна визначити аналогічно, як і для АД. На другому етапі пуску на несинхронно працюючий ротор синхронного двигуна, крім асинхронного моменту діє синхронний момент, що залежить від кута δ і зумовлений збудженням, а також момент опору механізму. Входження в синхронізм може відбуватися лише після подачі збудження, при якому у двигуні створюється додатковий знакозмінний момент

5 Самозапуск асинхронних двигунів

Самозапуск - процес відновлення нормальної роботи двигуна після короточасного вимкнення напруги живлення. Для того, щоб при самозапуску обертаючий момент електродвигуна був більшим від статичного моменту опору механізмів, в режимі самозапуску залишають ввімкненими тільки частину двигунів найбільш відповідальних механізмів. Електродвигуни, самозапуск яких неможливий за умовами техніки безпеки, обов'язково вимикаються пристроями захисту.

Для здійснення самозапуску визначають допустиму кількість і сумарну потужність двигунів, що не вимикаються, при роботі яких залишкова напруга забезпечує обертаючий момент, що перевищує статичний момент механізму. *Самозапуск вважають вдалим, якщо при пониженій напрузі живлення надлишковий момент електродвигуна достатній для доведення механізмів до номінальної частоти обертання і за час розгону нагрів обмоток не перевищує допустимого.* Розрахунок самозапуску асинхронних двигунів полягає в перевірці можливості їх самозапуску. Для цього необхідно перевірити чи достатній момент обертання при пониженій напрузі живлення та встановити допустимий нагрів при зростанні часу розгону двигуна.

При самозапуску двигуна між напругою на шинах системи U_1 та напругою на затискачах двигуна U повинно виконуватись співвідношення:

$$U > U_1 |Z_{дв}| / (Z_{дв} + x_{звн})$$

Потужність самозапуску визначають виходячи зі значення мінімально допустимої напруги або на основі номінальної потужності двигуна:

$$S_c = P_{ном} K_s / \eta_{ном} \cos \varphi_{ном} ,$$

де K_s – кратність струму двигуна при ковзанні s_c , що відповідає початку самозапуску:

$$K_s = K_1 / s^2$$

де K – кратність пускового струму.

Мінімально допустиме значення напруги на затискачах двигуна визначають виходячи з можливості здійснення само запуску:

- для механізмів з постійним опором:

$$U^2 M_{дв} \min \geq 1,1 M_{ст};$$

- для механізмів з вентиляторною характеристикою моменту опору:

$$U^2 M_{дв} \max \geq 1,1 M_{ст} ,$$

де $M_{дв} \min$ – мінімальний момент обертання електродвигуна; $M_{ст}$ – статичний момент приводного механізму.

6 Самозапуск синхронних двигунів

Після відновлення напруги після короткочасної перерви в електропостачанні само запуск синхронних двигунів є можливим, якщо СД не були вимкнені або не випали із синхронізму. При розрахунках самозапуску СД розв'язують задачі наступного типу:

- 1) перевіряють вплив самозапуску на нормальну роботу електроприймачів і елементів мережі;
- 2) визначають залишкову напругу на затискачах двигуна;
- 3) знаходять момент двигуна, необхідний для надійного входження його в синхронізм;
- 4) обчислюють час пуску і температуру перегріву двигуна.

Залежно від характеру навантаження у вузлі дозволяється зниження напруги на його шинах під час самозапуску:

- 1) при спільному живленні освітлювального і двигунового навантаження з частими і тривалими пусками $U \geq 0,9U_{ном}$, а при рідких і короткочасних пусках і самозапущах $U \geq (0,8 \div 0,85)U_{ном}$;
- 2) при окремому живленні двигунового і освітлювального навантаження незалежно від частоти і тривалості пусків та самозапущів $U \geq (0,75 \div 0,8)U_{ном}$;
- 3) при люмінісцентному освітлювальному навантаженні $U \geq 0,9U_{ном}$.

При живленні двигунів через блок-трансформатори напруга обмежується мінімальним значенням моменту, необхідного для розгону агрегату. Для перевірки можливості самозапуску необхідно співставити середній асинхронний момент з моментом опору механізму. Коли самозапуск неможливий, використовують автоматичну ресинхронізацію двигуна. Входження в синхронізм забезпечується дією форсування збудження, що підвищує максимальний синхронний момент. Для забезпечення синхронізації передбачають розвантаження приводу, що полегшує входження в синхронізм.

Час перерви електропостачання, на протязі якого двигун не випаде з синхронізму:

$$t_p \leq 0,06,$$

де T_j – електромеханічна постійна часу, що складається із електродвигуна і механізму; M_{max} – максимальний електромагнітний момент; $M_{ст о}$ – статичний момент опору. Середнє критичне ковзання, з якого після подачі напруги збудження під дією вхідного моменту забезпечується входження електродвигуна в синхронізм:

$$s_{кр} = 0,06,$$

де $Kзб$ – кратність струму збудження при ресинхронізації; у випадку відсутності форсування збудження $Kзб = 1$.

Критичним ковзанням синхронного двигуна називається максимальне ковзання, при якому після подачі напруги збудження забезпечується входження двигуна в синхронізм. Чим більше критичне ковзання, тим менший вхідний момент, потрібний для забезпечення самозапуску СД.

7.Самозбудження асинхронного двигуна під час пуску при послідовній ємнісній компенсації в мережі

- Конденсаторні батареї при послідовному їх ввімкненні в мережу, крім компенсації реактивної потужності, дозволяють автоматично змінювати напругу залежно від навантаження двигуна. Але при цьому можуть виникати деякі незвичайні, з точки зору нормальної експлуатації, явища:
 - - гойдання СМ;
 - - “застрягання” АД при частотах обертання менших від номінальної;
 - - самозбудження при асинхронному пуску синхронних двигунів;
 - - виникнення резонансних коливань на частотах, нижчих номінальних, що призводить до виникнення субгармонійних струмів та напруг.
- Умови самозбудження АД при пуску можна оцінити з допомогою тих же співвідношень, що і при аналізі режиму роботи синхронного двигуна.
- Вважають, що АД, як і генератор, можна характеризувати опорами $x'd$ і x_d . Якщо в мережу, що живить двигун ввімкнути конденсаторну батарею повздовжньої компенсації з ємнісним опором $x_c = 1/\omega C$, то залежно від кутової швидкості ω ємнісний опір при різних значеннях C змінюється, що визначає наявність або відсутність самозбудження асинхронного двигуна.
- Самозбудження двигунів не слід допускати через ряд причин:
 - 1) струм статора і потужність споживані двигуном з мережі можуть в декілька раз перевищувати їх номінальні значення, при цьому двигун перегрівається, напруга на його затискачах знижується, обертові моменти зменшуються;
 - 2) під час пуску двигун може „застрявати”, не досягнувши номінальної частоти обертання через зменшення обертового моменту в процесі розгону, при цьому виникають биття струму і моменту, що призводить до коливання ротора машини.
- Якщо після ввімкнення в мережу двигун розганяється настільки повільно, що процес самозбудження встигає завершитись за час проходження зон самозбудження, то двигун „застряє” на пониженій частоті обертання і виникають коливання.
- При малих значеннях моменту інерції двигуна і моменту опору механізмів, а також при високій напрузі живлення двигун може розігнатися так швидко, що самозбудження не встигає розвинути. Тоді двигун швидко проходить зону самозбудження і розганяється до номінальної частоти обертання.

8. Підвищення стійкості СЕП

Для підвищення стійкості СЕП промислових підприємств, транспорту, об'єктів міського господарства, підприємств агропрому передбачені економічно і технічно обгрунтовані заходи.

Розрізняють заходи на стадії проектування СЕП і ті, що вводяться додатково в процесі експлуатації.

Вважаючи, що деякі елементи мережі є основними (трансформатори, лінії електропередачі, синхронні компенсатори, генератори), а інші – допоміжними, заходи щодо підвищення стійкості систем електропостачання і якості перехідних процесів поділяють на дві групи:

- 1) основні заходи, які передбачають зміну параметрів СЕП за допомогою основних елементів;
- 2) додаткові заходи, які здійснюються шляхом встановлення додаткових пристроїв.

За впливом на показники системи електропостачання розрізняють заходи, які спрямовані на зміну параметрів режиму, і заходи, спрямовані на зміну параметрів СЕП, а за впливом на стійкість СЕП – заходи, спрямовані на підвищення статичної стійкості і заходи по забезпеченню динамічної стійкості.

Найбільш широко використовуються наступні заходи:

- електростанції впливають на стійкість СЕП своїми засобами автоматичне регулювання збудження, автоматичне частотне розвантаження і аварійного розвантаження турбін генераторів;
- засоби релейного захисту і автоматики дозволяють впливати на стійкість шляхом зміни режимів СЕП (зменшення часу вимкнення короткого замикання, автоматичне повторне ввімкнення, автоматичне регулювання напруги у вузлових точках).

Існує ряд заходів, які використовуються для підвищення стійкості на стадії проектування систем електропостачання. До них відносяться:

- 1) збільшення реактивного навантаження генераторів віддалених станцій (збільшення реактивної потужності, тобто зменшення $\cos\varphi$ призводить до підвищення ЕРС генератора, а значить і підвищення амплітуди кутової характеристики генератора);
- 2) забезпечення резервів активної і реактивної потужності електростанцій, які складаються з аварійного, навантажувального і ремонтного резервів;
- 3) зміна параметрів СЕП – зменшення реактивного опору генераторів, трансформаторів і ліній електропередачі;
- 4) конструктивні зміни ЛЕП – розщеплення кожної фази повітряної лінії на декілька проводів, що зменшує опір лінії;
- 5) збільшення електромеханічної постійної інерції агрегатів T_j . Щоб збільшити граничний час вимкнення короткого замикання в n раз, постійну інерції при тому ж критичному куті δ слід збільшити в n^2 раз;
- 6) заземлення нейтралей трансформаторів через невеликі опори забезпечує підвищення стійкості при несиметричних коротких замиканнях.