

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ СИСТЕМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСВІТИ
КИЇВСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

О. М. Сірий, В. Є. Шестеренко

**РОЗРАХУНКИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ
ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ
ПІДПРИЄМСТВ**

Київ 1993

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ СИСТЕМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСВІТИ
КИЇВСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

О.М.Сірий, В.Є.Шестеренко

РОЗРАХУНКИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Затверджено Радою Інституту
системних досліджень освіти України
як навчальний посібник
для студентів електроенергетичних спеціальностей

Київ 1993

Розрахунки при проектуванні та реконструкції систем електропостачання промислових підприємств: Навч. посібник / О.М.Сірий, В.Б.Шестеренко. - К.: ІСДО, 1993. - 592 с.

Розглянуті питання вибору обладнання систем електропостачання промислових підприємств - силових трансформаторів, автотрансформаторів, шинних конструкцій, комутаційних апаратів, вимірювальних трансформаторів, - методи обмеження струмів короткого замикання та вибору структурних схем електричних з'єднань підстанцій. Наведені методики розрахунку електричних мереж промислових підприємств; режиму напруг, вибору пристроїв регулювання напруги та компенсації реактивної потужності; релейного захисту систем електропостачання.

Розрахований на студентів електроенергетичних спеціальностей вузів та інженерно-технічних працівників, що займаються проектуванням і експлуатацією систем електропостачання промислових підприємств.

Іл. 140 . Табл. 124 . Вібліогр.: 23 назв.

Рецензенти: В.О.Матвієнко, ректор Інституту підвищення кваліфікації та перепідготовки працівників переробної промисловості Держархопрому України
В.В.Горошок, нач.виробничої служби київського правобережного підприємства електромереж "Київенерго"

ПЕРЕДМОВА

Проектування та реконструкція систем електропостачання промислових підприємств вимагає глибоких знань предмета, численних норм, інструктивних положень і правил, вміння користуватися довідковою літературою.

Предметом даного посібника і є систематизація матеріалу щодо вибору обладнання систем електропостачання, розгляд методик проектування та поглиблення практичних знань.

Практика викладання курсів "Електричні станції та підстанції систем електропостачання" і "Електропостачання промислових підприємств" на енергетичному факультеті Київського технологічного інституту харчової промисловості ще раз підтвердила, що в подальшому підвищенні якості підготовки студентів важливу роль відіграють практичні заняття. Через це у пропонованому посібнику значна частина матеріалу, необхідного для практичної підготовки студентів електроенергетичних спеціальностей вузів, підкріплена вправами і розрахунками. Вправи підібрані таким чином, що їх опрацювання полегшить самостійну роботу при освоєнні курсів, а також дозволить отримати досвід інженерних розрахунків на прикладах конкретних задач в електроенергетики.

Значний довідковий матеріал, типові схеми розподільних пристроїв напругою 6...750 кВ, сітка схем шаф КРУ, наведені в посібнику, полегшать роботу студентів над курсовими та дипломними проектами.

Автори приділяють увагу питанням якості електроенергії, які винесені в окремий розділ, де зібрані матеріали з проектних рішень, компенсації реактивної потужності згідно з новими вимогами Міненерго по цьому питанню, розрахунку реальних електричних навантажень, вибору пристроїв регулювання напруги та реактивної потужності, а також розглянуті основні етапи релейного захисту і методика їх розрахунку.

При підготовці рукопису використано нові розробки, виконані Інститутом електродинаміки АН України, Тяжпромелектропроект та ін.

Розділи 1-7 підготовлені канд.техн.наук О.М.Сірим, розділи 8-21 та додатки - канд.техн.наук В.Є.Шестеренко. Розділи 1-7 відповідають програмі курсу "Електричні станції та підстанції", а розділи 8-21 - програмам дисциплін "Електропостачання промислових підприємств" та "Релейний захист у системах електропостачання".

І. ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

Для вибору високовольтних комутаційних апаратів /вимикачів, роз'єднувачів, віддільників, короткозамикачів, високовольтних запобіжників, вимикачів навантаження тощо/ необхідно знати робочі струми необмежено довгих за часом режимів роботи, а також струми аварійного короткочасного режиму, а саме три- або профазного режиму короткого замикання у відповідних точках схеми систем електропостачання.

І.І. Визначення робочих струмів необмежено довгих за часом режимів роботи систем електропостачання електротехнічних установок

Необмежено довгий за часом режим роботи електротехнічної установки - це режим, що триває довше, ніж це необхідно для досягнення елементами електроустановки стабільної температури при незмінній температурі навколишнього середовища. Необмежено довга за часом робота обладнання електротехнічної установки характеризується двома режимами: нормальним і максимальним.

Нормальний - це такий режим, за якого всі елементи системи електропостачання електротехнічної установки знаходяться в роботі, а їх параметри не виходять за межі номінальних значень. Нормальний режим роботи електроустановки /генератора, трансформатора тощо/ характеризується струмом нормального режиму I_N . Окремим характерним випадком нормального режиму є номінальний.

Максимальний - це такий режим роботи електротехнічної установки, за якого частина елементів її системи електропостачання з різних причин /плановий, післяаварійний ремонт тощо/ вимкнена, внаслідок чого решта елементів системи електропостачання працює з підвищеним навантаженням. Максимальний режим роботи характеризується струмом максимального режиму $I_{\text{макс}}$.

Для елементів системи електропостачання в колі генератора /струмоводи, вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму/ струм нормального режиму визначається номінальним режимом його роботи, а максимальний режим - генеруванням у мережу номінальної потужності $P_{\text{ном}}$ при зменшенні напруги на виводах генератора на 5% відносно номінальної $U_{\text{ном}}$, тобто

$$I_H = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}} ;$$

$$I_{МАКС} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot 0,95 U_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}}$$

У приєднанні до розподільного пристрою двохобмоткового трансформатора номінальною потужністю $S_{НОМ}$, встановленого на двотрансформаторній підстанції, струм нормального та максимального режимів обчислюють з урахуванням перспективи монтажу та роботи на підстанції трансформаторів більшої номінальної потужності $S'_{НОМ}$ - наступної, за переважним стандартом відносно $S_{НОМ}$, а саме:

$$I_H = (0,65 \dots 0,7) \frac{S'_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} ; \quad /I.1/$$

$$I_{МАКС} = (1,3 \dots 1,4) \frac{S'_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} ; \quad /I.2/$$

коефіцієнти /0,65...0,7/ та /1,3...1,4/ враховують ступінь навантаження трансформатора відповідно в нормальному та максимальному режимі роботи.

За аналогічним /I.1/, /I.2/ рівнянням знаходять струми нормально-го та максимального режимів роботи трансформаторів власних потреб на станціях типу ТЕЦ /за розрахункову береться номінальна потужність встановлених трансформаторів/:

$$I_H = \frac{0,7 S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} ; \quad /I.3/$$

$$I_{МАКС} = \frac{1,4 S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} ; \quad /I.4/$$

У триобмотковому трансформаторі двотрансформаторної підстанції з боку мережі вищої напруги /ВН/ розрахункові струми обчислюють за /I.1/, /I.2/, а з боку мережі середньої напруги /СН/, якщо там відсутній зв'язок з електросистемою, та з боку мережі нижчої напруги /НН/ - за перспективним максимальним навантаженням на стороні СН $S_{МАКС СН}$ та НН $S_{МАКС НН}$ на кінець десятирічного періоду після пуску підстанції:

$$I_H = \frac{S_{\text{макс}}}{2\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} ; \quad /1.5/$$

$$I_{\text{макс}} = \frac{S_{\text{макс}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = 2I_H. \quad /1.6/$$

де $S_{\text{макс}}$ – навантаження з боку мережі СН або НН трансформатора.

Якщо на підстанції встановлено автотрансформатори, то з боку мережі ВН та СН, які використовуються для зв'язку двох електросистем, а отже, і для перетоку електроенергії як з мережі ВН у СН, так і з СН у ВН, струми обчислюють за /1.1/, /1.2/. На стороні НН автотрансформатора струми обчислюють за /1.5/, /1.6/ з урахуванням перспективного навантаження на кінець десятирічного періоду роботи.

У колах секційного, шиноз'єднувального вимикачів і збірних шин струм максимального режиму визначається з урахуванням струморозподілу по шинах за найбільш несприятливого експлуатаційного режиму /вимкнення частини генераторів або перемикання електроспоживачів на одну систему шин, а елементів живлення на пругу/. У цілому струм, що тече збірними шинами, секційними і шиноз'єднувальними вимикачами, як правило, не перевищує максимальний струм самого потужного генератора чи трансформатора, що приєднані до цих шин.

Для окремої лінії електропередачі струми нормального та максимального режимів однакові й визначаються найбільшим навантаженням лінії S_A , тобто

$$I_H = I_{\text{макс}} = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}$$

Якщо потужність S передається кількома лініями, то струм нормального та максимального режимів обчислюють за такими рівняннями:

$$I_H = \frac{S}{n\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} ;$$

$$I_{\text{макс}} = \frac{S}{\frac{n}{n-1} \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad /1.7/$$

Як видно з /1.7/, максимальний режим виникає при вимкненні однієї лінії з роботи.

Не маючи змоги розглянути більшу кількість випадків обчислення струмів нормального та максимального режимів, зауважимо, що для цього необхідно враховувати конкретні умови: схеми систем електропостачання, режими роботи електрообладнання, систему резервування тощо.

Задача 1.1. Обчислити струми нормального та максимального режимів роботи у таких з'єднаннях головного розподільного пристрою генераторної напруги /ГРП/ ТЕЦ /рис. 1.1/:

коло генератора G_1 номінальної потужністю 100 МВт, $U_{НОМ} = 10,5$ кВ, $\cos \varphi_{НОМ} = 0,85$;

коло трансформатора зв'язку з системою, $S_{НОМ} = 80000$ кВ·А;

коло кабельних ліній, що з'єднують ГРП ТЕЦ з розподільним пунктом $P_{л-1}$, якими передається енергія потужністю $P = 6000$ кВт при $\cos \varphi = 0,92$.

Розв'язання. Для кола генератора G_1

$$I_H = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,85} = 6468,9 \text{ А};$$

$$I_{МАКС} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot 0,95 U_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot 10,5 \cdot 0,85} = 6809,4 \text{ А}.$$

Для кола трансформатора зв'язку з системою

$$I_H = \frac{0,65 S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{0,65 \cdot 80 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 2859,3 \text{ А};$$

$$I_{МАКС} = \frac{1,3 S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{1,3 \cdot 80 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5718,5 \text{ А}.$$

Для кабельної лінії

$$I_H = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ} \cdot 2} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,92 \cdot 2} = 179,3 \text{ А};$$

$$I_{МАКС} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,92} = 358,6 \text{ А}.$$

Задача 1.2. Обчислити струми нормального та максимального режимів роботи у колі трансформатора власних потреб T_4 /див. рис. 1.1/

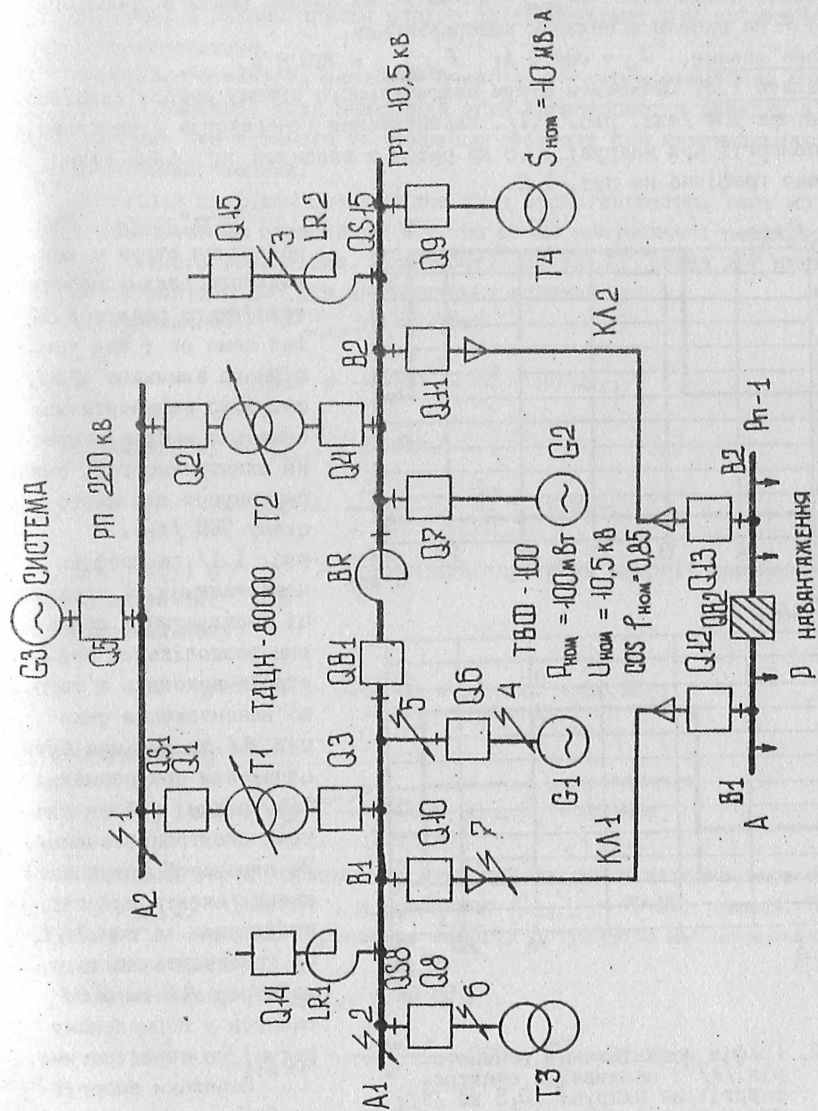


Рис. 1.1. Принципова електрична схема ТЕЦ

номінальною потужністю $S_{ном} = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, що працює разом з трансформатором $ТЗ$ за схемою з невідним резервуванням.

Розв'язання. $I_H = 384,9 \text{ А}$; $I_{макс} = 769,8 \text{ А}$.

Задача 1.3. Обчислити струм максимального режиму роботи секційного реактора BR /див. рис. 1.1/. Навантаження генераторів і споживачів електроенергії при напрузі $10,5 \text{ кВ}$ разом з власними потребами станції зображено графічно на рис. 1.2.

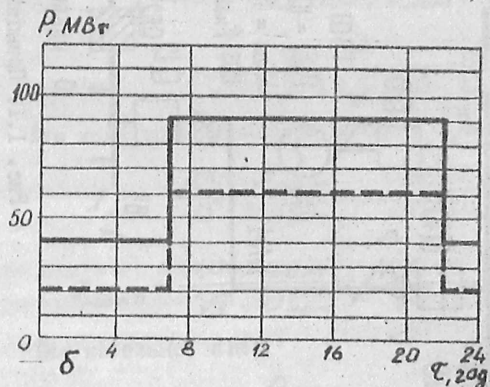
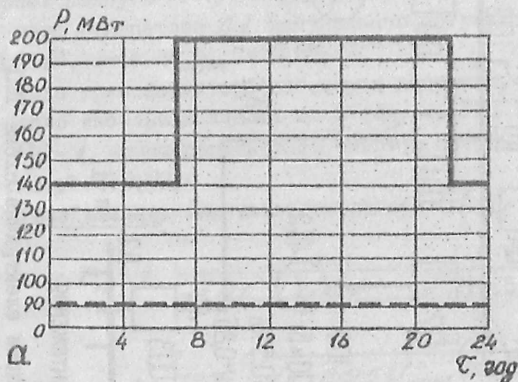


Рис. 1.2. Графік навантаження генераторів /а/ і споживачів електроенергії на напрузі $10,5 \text{ кВ}$ /б/:

для зимової (—); та літньої (---) доби

Розв'язання. Щоб обчислити струм максимального режиму роботи секційного реактора BR , так само як і для секційного вимикача $QB1$, потрібно визначити максимально можливі перетоки електроенергії, використовуючи для цього схему ТЕЦ /див.

рис. 1.1/ та графіки навантаження. У практиці експлуатації збірних шин розподільних пристроїв виходять з того, що навантаження секцій $B1$ та $B2$ має бути однаковим при нормальному режимі роботи системи електропостачання. За однакової потужності джерел електроенергії, приєднаних до шин $РП$, це призводить до того, що через BR та $QB1$ енергія у нормальному режимі не перетікатиме.

Перетоки енергії виникають за ненормальних режимів роботи системи електропостачання:

при вимкненні з різних причин одного із трансформаторів зв'язку з системою або генератора.

Знайдемо потужність перетоку енергії ΔP через семідійний реактор BR для випадку, коли вимкнений один трансформатор зв'язку з системою, окремо для літнього та зимового графіків при максимальних і мінімальних навантаженнях.

За літнім графіком працюватиме один турбогенератор, тому що максимальне навантаження станції 90 МВт, що менше номінальної потужності $P_{ном}$ одного генератора. При роботі $G1$ та $T1$ через BR проходить енергія потужністю ΔP при навантаженні споживачів:

максимальному / $P_{макс} = 60$ МВт/

$$\Delta P = \frac{P_{макс}}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ МВт};$$

мініальному / $P_{мін} = 20$ МВт/

$$\Delta P = \frac{P_{мін}}{2} = \frac{20}{2} = 10 \text{ МВт}.$$

При роботі $G1$ та $T2$ потужність перетоків енергії при навантаженні споживачів:

максимальному

$$\Delta P = P_r - \frac{P_{макс}}{2} = 90 - \frac{60}{2} = 60 \text{ МВт};$$

мініальному

$$\Delta P = P_r - \frac{P_{мін}}{2} = 90 - \frac{20}{2} = 80 \text{ МВт}.$$

У зимовий період працює два турбогенератори з максимальною потужністю $P_{гмакс} = 100$ МВт і мініальною $P_{гмін} = 70$ МВт кожний. При вимкненні $T2$ через BR проходить енергія потужністю ΔP при навантаженні споживачів:

максимальному / $P_{макс} = 90$ МВт/

$$\Delta P = P_{гмакс} - \frac{P_{макс}}{2} = 100 - \frac{90}{2} = 55 \text{ МВт};$$

мініальному / $P_{мін} = 40$ МВт/

$$\Delta P = P_{гмін} - \frac{P_{мін}}{2} = 70 - \frac{40}{2} = 50 \text{ МВт}.$$

Розглянемо другий випадок розподілу потужності між секціями $B1$ і $B2$ збірних шин $A1$, коли вимкнений один генератор.

У літній період /працює $T1$ і $T2$ / перетік потужності не спостерігатиметься, а при роботі одного трансформатора зв'язку

$$\Delta P = \frac{P_{\max}}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ МВт.}$$

Для зимового графіка при навантаженні споживачів: максимальному / $P_{\max} = 90$ МВт/

$$\Delta P = \frac{P_{\max}}{2} = \frac{90}{2} = 45 \text{ МВт;}$$

мінімальному / $P_{\min} = 40$ МВт/

$$\Delta P = \frac{P_{\min}}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ МВт.}$$

Отже, розглянувши різні випадки, дійдемо висновку, що максимальнов потужність перетоків електроенергії $\Delta P_{\max} = 80$ МВт буде при роботі станції та споживачів за літніми графіками навантаження, коли працюють $B1$ та $T2$ або $B2$ та $T1$ при мінімальному навантаженні споживачів. Струм максимального режиму роботи секційного реактора BR

$$I_{\max} = \frac{\Delta P_{\max}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{80 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,85} = 5175,1 \text{ А.}$$

Задача 1.4. На двотрансформаторній підстанції з номінальною потужністю трансформаторів $S_{\text{ном}} = 25$ МВ·А обчислити робочі струми нормального та максимального режимів роботи електрооблацнання в таких зв'язаннях розподільного пристрою 110 кВ /рис. 1.3/:

лінія електропередачі $ЛЕП1$;

трансформатор $T1$;

коло вимикача $Q3$.

Через підстанцію при напрузі 110 кВ проходить транзит електроенергії потужністю $S_{\text{ТРН}} = 50$ МВ·А. Максимальне навантаження підстанції $S_{\max} = 62$ МВ·А.

Розв'язання. Для одиничної лінії електропередачі $ЛЕП1$ струми нормального та максимального режимів роботи однакові й залежать від максимальної потужності енергії, яка передається споживачам. Для цього випадку

$$S = S_{\text{ТРН}} + S_{\max} = 50 + 62 = 112 \text{ МВ·А.}$$

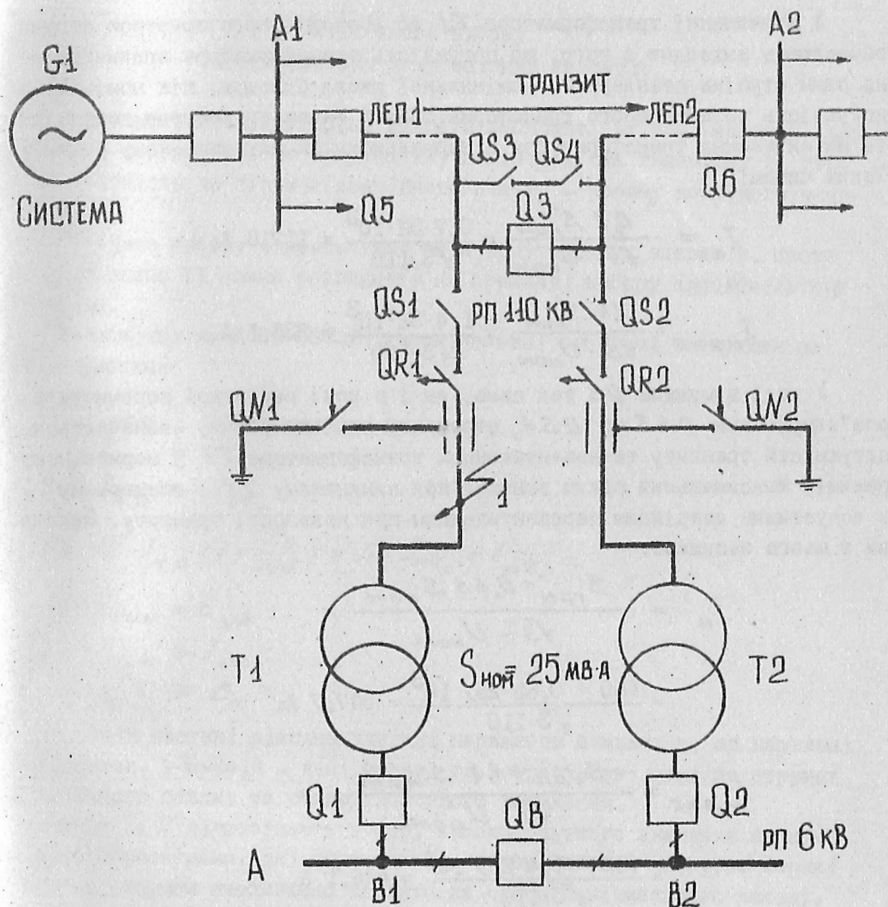


Рис. 1.3. Принципова електрична схема трансформаторної підстанції 110 кВ

Тоді

$$I_H = I_{\text{макс}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{112 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 587,8 \text{ А.}$$

У приєднанні трансформатора $T1$ до розподільного пристрою струми обчислюють виходячи з того, що потужність трансформатора приймається на один ступінь стандартної номінальної шкали більшою, ніж номінальна потужність встановленого трансформатора, а також враховуючи коефіцієнти навантаження трансформатора в нормальному та максимальному режимах. Таким чином:

$$I_H = \frac{0,7 S'_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{0,7 \cdot 32 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 117,6 \text{ А};$$

$$I_{макс} = \frac{1,4 S'_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{1,4 \cdot 32 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 235,1 \text{ А}.$$

У колі вимикача $Q3$ так само, як і в колі ремонтної перемички з роз'єднувачами $Q33$ та $Q34$, струм нормального режиму визначається потужністю транзиту та навантаженням трансформатора $T2$ у нормальному режимі. Максимальний режим виникає при вимкненому $T1$ і працюючому $T2$ з попустимим аварійним перевантаженням при наявності транзиту. Виходячи з цього запишемо:

$$I_H = \frac{S_{ТРН} + 0,65 S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} =$$

$$= \frac{(50 + 0,65 \cdot 25) 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 347,7 \text{ А};$$

$$I_{макс} = \frac{S_{ТРН} + 1,4 S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} =$$

$$= \frac{(50 + 1,4 \cdot 25) 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} = 446,1 \text{ А}.$$

Задача 1.5. Обчислити струми робочого та максимального режимів, що протікають через вимикачі $Q1, Q8$ та секції $B1$ збірних шин A розподільного пристрою 6 кВ / див. рис. 1.3/.

$$\text{Вішповіть: } I_H = 2052,8 \text{ А}; \quad I_{макс} = 4105,6 \text{ А};$$

$$I_H = 801,9 \text{ А}; \quad I_{макс} = 1603,8 \text{ А};$$

$$I_H = 1603,8 \text{ А}; \quad I_{макс} = 3207,5 \text{ А}.$$

1.2. Умови вибору високовольтних комутаційних апаратів

Високовольтні комутаційні апарати вибирають за номінальними параметрами і перевіряють на комутаційну здатність, на динамічну та термічну стійкість до струмів аварійного режиму – режиму короткого замикання.

Методика вибору однакова для всіх комутаційних апаратів, проте найбільш повно її можна розглянути на прикладі вибору високовольтних вимикачів.

Відповідно до ГОСТ 687-78 високовольтні вимикачі вибирають за такими умовами:

$$1/ U_{ном} \geq U_{ном. мережі};$$

$$2/ I_{ном} \geq I_{макс};$$

$$3/ I_{н.р} \geq I_{п\tau_p};$$

$$4/ \sqrt{2} \cdot I_{н.р} \left(1 + \frac{A_n}{100}\right) \geq \sqrt{2} \cdot I_{п\tau_p} + I_{a\tau_p};$$

$$5/ I_{дин} \geq I_{уд};$$

$$6/ I_{дин} \geq I_{по};$$

$$7/ I_{\epsilon}^2 \tau \geq B_k.$$

У лівій частині рівнянь указані параметри вимикачів, що наведені в повітниках, у правій – дані мережі та розрахункові дані по струмах максимального режиму та режиму короткого замикання.

Умови 1, 2 відповідають вибору високовольтного вимикача за номінальними параметрами, які порівнюються з номінальною напругою мережі й робочим струмом необмежено довгого за часом максимального режиму.

Правильний вибір вимикачів припускає урахування залежності їх номінального струму від температури навколишнього середовища. Нормована температура навколишнього середовища для комутаційних апаратів прийнята 35 °С. Допускається робота вимикача при температурі понад 35 °С, але до 60 °С за умови зменшення навантаження, що характеризується такими коефіцієнтами:

Температура навколишнього середовища, °С	35	40	45	50	55	60
Коефіцієнт зменшення навантаження	1,0	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61