**Практичне заняття 23**

**Вибір пристроїв для регулювання напруги**

**23.1 Теоретичні відомості**

При проектуванні електричних мереж необхідно передбачити заходи, що забезпечують високу якість переданої електроенергії, одним з основних показників якого є відхилення напруги на затискачах споживача електроенергії. Оскільки зміни навантаження протягом часу і режиму напруги в центрі живлення призводять до зміни втрат напруги в елементах електричних мереж і до відхилення напруги на затискачах всіх споживачів мережі, в мережах всіх ступенів потрібне регулювання напруги. Тому при проектуванні електричних мереж завжди виникає необхідність у виборі регулюючих пристроїв, місць з установки, діапазону і ступені регулювання. При цьому розглядаються питання як виконання технічних вимог у відповідності з діючими нормами, так і підвищення економічності режимів.

При проектуванні електричних мереж передбачається установка регулюючих пристроїв як в живильних, так і в розподільчих мережах, причому регулювання напруги в живильних мережах проводиться незалежно від його регулювання в розподільних мережах. Якщо основним завданням регулюючих пристроїв розподільних мереж є забезпечення допустимих відхилень напруг на затискачах споживачів, то завдання регулюючих пристроїв споживаючих мереж зводиться до поліпшення техніко-економічних показників роботи цих мереж насамперед шляхом зниження втрат потужності і енергії за рахунок зміни рівня напруги в мережі, підвищення економічності роботи і т. д.

В даний час завдяки розробленим типовими рішеннями, застосовуваним в більшості практичних випадків, завдання вибору регулюючих пристроїв при проектуванні мереж дещо спрощується. Певні труднощі виникають у зв'язку з необхідністю узгодження законів регулювання окремих пристроїв, проте більшою мірою це відноситься до умов подальшої експлуатації мережі.

Основними типовими рішеннями, реалізованими при проектуванні будь-яких електричних мереж, є:

1. Застосування трансформаторів з РПН на підстанціях, від яких живляться розподільні мережі. При проектуванні реконструкції мережі на існуючих підстанціях, де встановлені трансформатори без РПН, необхідна установка лінійних регуляторів, що включаються в коло трансформаторів.

2. Застосування додаткових лінійних регуляторів, що включаються в окремі лінії, при наявності неоднорідних навантажень, що різко змінюються в часі; розділення ліній на групи з приблизно однаковими графіками навантажень для здійснення диференційованого (за групами) централізованого регулювання за допомогою лінійних регуляторів.

3. Використання регульованих джерел реактивної потужності (синхронних компенсаторів, конденсаторних батарей) на районних підстанціях для регулювання напруги.

4. Використання в якості додаткових регулюючих пристроїв в розподільних мережах, керованих батарей конденсаторів.

5. Роздільне регулювання напруги силових і освітлювальних споживачів (допускають різні відхилення від номінальної напруги) за допомогою групових засобів регулювання у випадках, коли централізоване і місцеве регулювання напруг не забезпечують допустимих відхилень напруги на затискачах споживачів.

Таким чином, вибір засобів регулювання починається з вибору трансформатора з РПН, встановлених в центрі живлення розподільних мереж. Сучасні трансформатори з РПН випускаються з наступними діапазонами регулювання напруги:

* ± 9% при ступені регулювання 1,5% з шістьма відгалуженнями в бік збільшення і зниження коефіцієнта трансформації трансформатора, тобто ± 9 = ± 6 ×1,5% і ± 12 = ± 8 × 1,5% при ВН 35 кВ;
* ± 15% = ± 10 ×1,5% і ± 16 = ± 9 × 1,78% при ВН 110 кВ;
* ± 12% = ± 8 × 1,5% і ± 12 = ± 9 ×1,35% при ВН 154 кВ;
* ± 12% = ± 8 ×1,5% при ВН 220кВ.

Діапазон регулювання напруги та ступінь регулювання залежать від потужності трансформатора.

При виборі типу трансформатора із заданим діапазоном регулювання напруги необхідно враховувати не тільки напругу на стороні ВН трансформатора при максимальному і мінімальному навантаженнях  і , але і необхідність здійснювання зустрічного регулювання напруги на трансформаторі (на строні НН трансформатора при мінімальному навантаженні , а при максимальному навантаженні , де  - номінальна напруга лінії, що живиться від шин трансформатора).

Оскільки бажані напруги на стороні НН трансформатора відомі (), то можна записати:

 , (23.1)

при мінімальному навантаженні

 (23.2)

де  та  – втрати напруги в трансформаторі при максимальному і мінімальному навантаженнях відповідно;

 , – номінальні (каталогові) напруги на сторонах НН та ВН трансформатора відповідно;

 – ступінь регулювання напруги, %.

 (23.3)

 (23.4)

 (23.5)

де  – максимально можлива добавка напруги трансформатора (для вітчизняних трансформаторів;

 -– ступінь регулювання, %;

 – мінімальна віддаленість трансформатора, %.

 (23.6)

  (23.7)

де  - максимально допустиме відхилення напруги на зажимах електроспоживачів, що живляться від розподілюючого трансформатора.

 (23.8)

 (23.9)

де  - добавка напруги в центрі живлення, при .

 (23.10)

Визначаються необхідні добвки напруги на всіх розподільчих трансформаторах мережі і підбираються стандартні відгалуження.

У випадку, якщо електрична віддаленість будь-якого розподільчого трансформатора більше λМ необхідно передбачити місцеві способи регулювання напруги, в першу чергу автоматизовані джерела реактивної потужності.

В електричних мережах з метою зменшення втрат потужності та енергії штучно змінюють потоки реактивної потужності. Для цього поблизу споживачів установлюють джерела реактивної потужності; синхронні компенсатори, конденсаторні батареї і синхронні двигуни.

Основним завданням пристроїв компенсації є найбільш економічне виробництво реактивної потужності; при цьому знижуються також втрати напруги, підвищуються рівні напруги у споживачів і поліпшується якість електроенергії.

У мережах промислових підприємств поширений спосіб регулювання напруги шляхом зміни потужності конденсаторних батарей, включених паралельного навантаженню.

У мережах промислових підприємств, що живлять силові споживачі і джерела світла, пред'являються більш жорсткі вимоги до відхилень напруг(+5 і -2,5% у порівнянні з +10 і -5% для електродвигунів). При неможливості виконання цих вимог на затискачах всіх споживачів доцільно джерела світла живити від групових регулюючих пристроїв, що випускаються промисловістю. У цьому випадку закон регулювання напруги в центрі живлення і відгалуження на розподільному трансформаторі вибираються, виходячи з допустимих відхилень напруги на затискачах силових споживачів.

**23.2 Приклад розрахунку**

**Приклад 1**

**Вихідні дані:**

На районній підстанції встановлено трансформатор типу ТДН-16000/110. Напруга первинної обмотки трансформатора при максимальному навантаженні 103,8 кВ, а при мінімальному – 109,6 кВ. Втрати напруги в трансформаторі при максимальному навантаженні  (4,95 кВ), при мінімальному – (1,7 кВ).

**Знайти:**

Визначити діапазон регулювання напруги трансформатора, якщо на підстанції здійснюється зустрічне регулювання напруги, тобто при максимальному навантаженні на стороні НН трансформатора, а при мінімальному -.

**Рішення:**

По таблиці 14 додатка 1 вибираємо для трансформатора типу ТДН/16000/110 діапазон регулювання напруги  та 

Визначаемо номера відгалужень трансформатора, при яких може бути виконане зустрічне регулювання напруги:

* при максимальному навантаженні (за виразом 23.1)

 

(можна округлити до цілого числа  або );

* при мінімальному навантаженні (за виразом 23.1)



(округляємо до цілого числа ).

Оскільки стандартні відхилення  трансформатора типу ТДН-16000/110 більші тих, що вимагаються  та , то цим трансформатором можна забезпечити зустрічне регулювання напруги.

При обраних відгалуженнях напруги на стороні НН трансформатора будуть:

* при максимальному навантаженні



Якщо обрати відгалуження $n\_{ст}^{'}=-5$, то



тобто умова зустрічного регулювання напруги не виконується, так як бажано, щоб значення $U\_{тр2}^{'}$було більше, ніж 10,5 кВ; при мінімальному навантаженні



**Приклад 2**

**Вихідні дані:**

На районній підстанції встановлено трансформатор типу ТДН-10000/35. Напруга на стороні ВН трансформатора при максимальному навантаженні рівно 33,8 кВ, а при мінімальній - 34,2 кВ. Втрати напруги в трансформаторі при максимальному навантаженні $∆U\_{тр}^{'}$= 1,2 кВ, при мінімальній $∆U\_{тр}^{'}$= 0,4 кВ. На стороні НН трансформатора необхідно стабілізувати напругу на рівні 6 кВ.

**Знайти:**

Визначити, в якому діапазоні регулювання напруги буде працювати трансформатор і з якою точністю буде підтримуватись напруга на стороні НН трансформатора.

**Рішення:**

За табл. 12 дод. 1 знаходимо, що для трансформатора типу ТДН-10000/35 діапазон регулювання напруги ± $n\_{ст}\*E\_{ст}=\pm 8\*1,5\% і U\_{тр.ном1}=36,75 кВ, U\_{тр.ном2}=6,3$ кВ.

Визначимо номера відгалужень, при яких на стороні НН трансформатора підтримується напруга на рівні 6 кВ:

при максимальному навантаженні

 

(округляємо до більшого цілого );

при мінімальному навантаженні



(округляємо до цілого числа ).

Оскільки стандартні відгалуження $n\_{ст}$= ± 6 трансформатора типу ТДН-10000/35 більше необхідних $n\_{ст}^{'}$= -5 і $n\_{ст}^{"}$= -2, цим трансформатором можна забезпечити необхідний рівень напруги на стороні НН.

Напруги на стороні НН трансформатора при обраних відгалуженнях будуть:

в режимі максимального навантаження:



в режимі мінімального навантаження:



Напруга на стороні НН трансформатора при наступному вігалуженні в режимі максимального навантаження



Тобто різниця номерів відгалужень трансформатора в одну одиницю дає приріст напруги



а оскільки при розрахунку номер відгалуження округляється з точністю 0,5, то напруга на стороні НН трансформатора без урахування зони нечутливості буде підтримуватися на рівні 6 ± 0,05 кВ.

**Приклад 3**

**Вихідні дані, знайти:**

Визначити, за яких напруг на стороні ВН трансформатора типу ТДН-16000/150 можна здійснювати зустрічне регулювання напруги, якщо максимальна втрата напруги в трансформаторі $∆U\_{тр}^{'}$=8,7 кВ, а мінімальна$∆U\_{тр}^{'}$ = 2,4 кВ.

**Рішення:**

За табл. 16 дод. 1 встановлюємо, що для трансформатора типу ТДН-16000/150 діапазон регулювання напруги $\pm n\_{ст}\*E\_{ст}=\pm 8\*1,5\% і U\_{тр.ном1}=158 кВ,U\_{тр.ном2}=11 $кВ.

Визначимо, які напруги можуть бути на стороні ВН трансформатора при максимальній втраті напруги в ньому і здійсненні зустрічного регулювання напруги при крайніх відгалуженнях трансформатора:

при відгалуженні 



при відгалуженні 



При мінімальній втраті напруги в трансформаторі, напруга на стороні ВН може бути:

при відгалуженні 



при відгалуженні 



**Приклад 4**

**Вихідні дані, знайти:**

Для мережі, схема якої зображена на рис. 23, а, визначити, закон регулювання напруги в центрі живлення і вибрати розгалуження на розподільчих трансформаторах з ПБЗ так, щоб відхилення напруг у відсотках на затискачах споживачів: не виходили за допустимі межі. Передбачається, що всі трансформатори живлять джерело світла (), та силові споживачі () ,а їх графіки навантажень подібні і співпадають з графіком навантаження центра живлення.





Перевіряємо можливість забезпечення допустимих відхилень напруг на затискачах електроспоживачів (умова $λ\_{M}>λ\_{i}$), для чого визначаємо спочатку величину



де  - максимально можлива добавка напруги в сучасних трансформаторах; - ступінь регулювання напруги; - мінімальна електрична віддаленість РТ2.

Оскільки всі віддаленості $λ\_{i}<λ\_{M}=18,5\%$ електроспоживачів можна забезпечити допустимими відхиленнями напруги.

Встановлюємо закон регулювання напруги в центрі споживання. Для цього знаходимо величини





і вибираємо найближче стандартне відгалуження трансформатора . Визначивши величину



Закон регулювання напруги в центрі живлення запишимо у вигляді



Графічна інтерпретація цього закону представлена ​​на рис. 4.32, 6.

 За формулою (4.46) визначаємо відгалуження на всіх трансформаторах

 (вибираємо третє відгалуження);

 (вибираємо перше відгалуження);

 (вибираємо третє відгалуження);

 (вибираємо четверте відгалуження);

 (вибираємо перше відгалуження).

5. П'ять трансформаторних підстанцій підприємства живляться від шин головною понижувальної підстанції (рис. 4.33, а), де здійснюеться зустрічне регулювання напруги. Визначити закон регулювання напруги в центрі живлення і вибрати відгалуження на розподільчих трансформаторах з ПБВ для випадків, коли:

а) всі трансформатори живлять джерела світла і силові споживачі;

б) джерела світла отримують живлення від групових стабілізаторів напруги. Втрати напруги у відсотках в живильних лініях і розподільних трансформаторах вказані на малюнку.



Рішення. Знаходимо електричні віддаленості розподільчих трансформаторів за формулою (4.42):



Перевіряємо можливість забезпечення допустимих відхилень напруги на затискачах електроспоживачів (умова $λ\_{M}>λ\_{i}$ ), для чого визначаємо спочатку величину



де  - максимально можлива добавка напруги в сучасних трансформаторах з ПБВ; - ступінь регулювання напруги; - мінімальна електрична віддаленість РТ5.

Оскільки всі віддаленості $λ\_{i}<λ\_{M}=14,5\%$ , електроспоживачів можна забезпечити допустимими відхиленнями напруги.Встановимо закон регулювання напруги в центрі живлення для першого випадку. Оскільки максимально допустиме відхилення напруги для джерел світла ($V\_{доп}^{+}=5\%$ )менше, ніж для силових споживачів, розрахунок виконуємо за цією величиною:



і вибираємо найближче стандартне відгалуження трансформатора . Визначивши величину

$$E\_{н.л}=V\_{доп}^{'}-E\_{трМ}=5-2,5=2,5\%$$

Закон регулювання напруги в центры живлення запишемо у вигляді



Графічна інтерпретація цього закону представлена ​​на рис. 4.33, б (пряма I).

Коли джерела світла живляться від групових стабілізаторів напруги (другий випадок), відхилення напруги на їх затискачах не залежить від відхилень напруг на шинах головної понижувальної підстанції і тоді визначальним при виборі закону регулювання напруги в центрі живлення будуть допустимі відхилення напруги на затискачах силових електроспоживачів ($V\_{доп}^{+}=+10\%$)

Знаходимо величини



І обираемо найближче стандартне розгалуження трансформатора



Визначимо величину



Закон регулювання напруги в центрі живлення запишимо у вигляді



Графічна інтерпретація цього закону представлена ​​на рис. 4.33, б (пряма 2).

За формулою (4.46) визначаємо відгалуження на всіх трансформаторах

 (вибираємо друге відгалуження);

 (вибираємо друге відгалуження);

 (вибираємо друге відгалуження);

 (вибираємо друге відгалуження);

 (вибираємо перше відгалуження).

Для перевірки правильності розрахунку знайдемо відхилення напруг на стороні НН одного з трансформаторів, наприклад РТЗ, при різних значеннях коефіцієнта завантаження β.

По формулі  маємо:

при 





так що



при 



при $β=1$



6. В мережі, що складається з лінії , трансформатора типу ТМ-1000/10 () і навантаження , для зниження втрат потужності встановлена конденса-торна батарея потожністю . Визначити, як слід регулювати потужність такої батареї при зміні навантаження на протязі доби (), якщо відхилення напруги в центрі живлення  та на стороні НН трансформатора відхилення напруги не повинно виходити за межі .

Рішення, При включенні конденсаторної батареї втрати напруги в мережі (електрична віддаленість батареї від центру живлення $λ=∆U\_{2}$)



Визначаємо по моменту максимального навантаження мережі ($β\_{1}=1$) відгалуження, на якому повинен працювати трансформатор, щоб обес¬печіть допустимі відхилення напруги на затискачах навантаження, використовуючи формулу (3.44):



Вибираємо четверте відгалуження ($E\_{тр.ст}=7,5\%$); тоді при максимальному навантаженні відхилення напруги на стороні НН трансформатора



При коефіцієнті завантаження $β\_{3}=0,7$, якщо батарею конденсаторів не відключати, втрати напруги в мережі



І відключення напруги на стороні НН трансформатора



що більше допустимого на отже, частина конденсаторів батареї необхідно відключати. Потужність, яку необхідно відключити,



При відключенні батареї $Q\_{к1}=215$квар) втрати напруги в мережі



і відхилення напруги на стороні НН трансформатора



При $β\_{3}=0,5$ і тому ж значенні відключеною потужності батареї конденсаторів ($Q\_{к1}=215$квар ) втрати напруги в мережі



а відхилення напруги на стороні НН трансформатора



що більше допустимого на $∆U\_{2\*}=8,23-5=3,23\%$; отже, ще частина конденсаторів батареї необхідно відключати. ​​Потужність, яку необхідно відключити,



При відключенні двох частин конденсаторної батареї, потожністю , коли залишкова потужність батареї , втрати напруги в мережі



і відхилення напруги на стороні НН трансформатора



Якщо ж при $β\_{3}=0,5$потужність конденсаторної батареї не зменшувати , то втрати напруги в мережі



а відхилення напруги на стороні НН трансформатора



що набагато більше допустимого; отже, залишати повністю включеної конденсаторних батарей при мінімальному навантаженні мережі не можна.

При $β\_{4}=0,25$, якщо потужність конденсаторної батареї не зменшувати, втрати напруги в мережі



і відхилення напруги на стороні НН трансформатора



що істотно більше припустимого ($V\_{доп}^{+}=5\%$).

При $β\_{4}=0,25$ і відключення двох частин конденсаторної батареї втрати напруги в мережі



а відхилення напруги на стороні НН трансформатора



що більше допустимого на ; отже, ще частина конденсаторів батареї необхідно відключити.

Потужність, яку необхідно відключити,



Але, очевидно, можна відключити всю батарею конденсаторів, оскільки цей режим є мінімальним для даного трансформатора і не потрібно, щоб $V\_{2}=5\%$, та й по умові завдання $0\leq V\_{2}\leq 5\%$ , тобто $V\_{2}$може бути менше. При повністю відключеній батареї



і відхилення напруги на стороні НН трансформатора



Таким чином, залежно від навантаження та напруги на стороні ВН трансформатора потужність конденсаторної батареї повинна бути 600, 385 квар і нульовий відповідно.

7. Від трансформатора типу ТМ-630 / 10 з ПБЗ 2 х 2,5% живляться силова( $V\_{доп.с}^{+}=10\% ;V\_{доп.с}^{-}=-5\%$)і освітлювальна ($V\_{доп.с}^{+}=5\% ;V\_{доп.с}^{-}=-2,5\%$ ) навантаження. Відхилення напруги на стороні ВН трансформатора при максимальному навантаженні $V\_{1}^{'}=-2,5\%$, при мінімальному навантаженні $V\_{1}^{'}=3\%$,а втрати напруги в трансформаторі $∆U\_{тр}^{'}=4,2\% і ∆U\_{тр}^{'}=1,2\%$ відповідно. Вибрати розгалуження на трансформаторі з тим, щоб забезпечити на шинах НН трансформатора відхилення напруги в допустимих межах, вважаючи, що втрата напруги до найближчого електроспоживача мала і нею можна знехтувати.

Рішення. Оскільки діапазон допустимих відхилень напруг для джерел світла менше, ніж для силових електроспоживачів, відгалуження трансформатора підбираємо з умови того, щоб на шинах НН $V\_{2}\leq V\_{доп.осв}^{+}=5\%$, враховуючи, що найближчий електроспоживач знаходиться недалеко від шин.

З іншого боку, для забезпечення допустимої втрати напруги в лініях напругою 0,38 кВ, що живляться від шин НН трансформатора, необхідно, щоб$V\_{2}\geq 0$, так як $∆U\_{р}=V\_{2}=V\_{доп}^{-}$ ;якщо ж$V\_{2}<0$, то втрата напруги в цих лініях буде мала і для забезпечення допустимих відхилень напруги доведеться витрачати більше провідникового матеріалу за рахунок збільшення його перетину. Тому відгалуження трансформатора повинно бути встановлено таке, щоб виконувалася умова $0\leq V\_{2}\leq 5\%$

Використовуючи формулу (3.44), визначаємо необхідну добавку напруги трансформатора при максимальному навантаженні для виконання даної умови:



Вибираємо найближче стандартне четверте відгалуження $E\_{тр.ст4}=7,5\%$Тоді при максимальному навантаженні відхилення напруги на шинах НН трансформатора



Перевіримо здійснимість встановленого умови при обраному відгалуженні в режимі мінімального навантаження:



Отже, вибране за максимальним навантаженням відгалуження не забезпечує допустимі відхилення напруги на затискачах електроспоживачів при мінімальному навантаженні. У цьому випадку необхідно було б встановити відгалуження



якому відповідає друге відгалуження $E\_{тр.ст2}=2,5\%$, тоді



Але при цьому відгалуженні в режимі максимального навантаження



не задовольняється умова$V\_{2}>0$. Тому з метою забезпечення на затискачах всіх електроспоживачів допустимих відхилень напруг необхідно джерела світла, для яких потрібна більш стабільну напругу на їх затискачах, живити незалежно від ынших електроспоживачів. Для цього лінії, які живлять джерела світла, підключаються до регуляторів напруги (наприклад, типу ТОН-3). Тоді на шинах НН трансформатора можна допускати великі відхилення напруги:$ V\_{2}\leq V\_{доп.с}^{+}=10\%$ тобто вибір відгалужень вести по допустимим відхиленням напруги живлення силових електроспоживачів. У цьому випадку четверте відгалуження трансформатора забезпечує здійснимість встановленого умови, оскільки $V\_{2}^{'}=0,8>0 і V\_{2}^{"}=9,3<10\%$.



