

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації енергосистем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій Марченко

“10” червня 2025 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Управління, захист та автоматизація енергосистем»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: Автоматичне регулювання напруги на підстанції 110/35/10 кВ

Виконав:

Студент IV курсу, групи ЕК-11
Колесніков Ярослав Сергійович

Керівник:

к.т.н., доцент,
Хоменко Олег Володимирович

Рецензент:

к.т.н., доцент,

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
Кафедра автоматизації енергосистем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Управління, захист та автоматизація енергосистем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАРЧЕНКО

«10» червня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Колеснікову Ярославу Сергійовичу

1. **Тема проєкту** «Автоматичне регулювання напруги на підстанції 110/35/10 кВ», керівник проєкту Хоменко Олег Володимирович, доц., к.т.н., затверджені наказом по університету від 26.05.2025р. №1720-с
2. **Термін подання** студентом проєкту 10 червня 2025 р.
3. **Вихідні дані до роботи:** Схема підстанції напругою 110/35/10 кВ. Матеріали науково та проєктних організацій. Довідкова література. Каталоги виробників обладнання
4. **Перелік питань, які мають бути розроблені:** Аналіз схеми підстанції напругою 110/35/10 кВ та встановленого на ній обладнання. Розрахунки струмів короткого замикання на шинах підстанції. Модернізація обладнання РП 35 кВ. Релейний захист напругою РП 35 кВ. Вибір регуляторів напруги.
5. Перелік графічного матеріалу *1- схема електричних з'єднань ПС напругою 110/35/10 кВ; 2- регулювання напруги на ПС 110/35/10 кВ, 3- Регулятор напруги типу РЗЛ-05.РПН*
7. **Дата видачі завдання** 26.05.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Аналіз схеми та обладнання	27.05.2025	
2	Розрахунки струмів короткого замикання	29.05.2025	
3	Дослідження схеми електричних з'єднань ПС напругою 110/35/10 кВ	01.06.2025	
4	Розрахунок струмів КЗ на шинах ПС	04.06.2025	
5	Регулювання напруги на ПС 110/35/10 кВ	07.06.2025	
6	Графічна частина. Оформлення роботи	10.06.2025	

Студент

(підпис)

Ярослав КОЛЕСНИКОВ

Керівник

(підпис)

Олег ХОМЕНКО

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	1	
2	A4	141.ЕК1106.006.ДБ	Пояснювальна записка	58	
3	A1	141.ЕК1106.006.ТК1	Головна схема електричних з'єднань ПС 110/35/10 кВ	1	
4	A1	141.ЕК1106.006.ТК2	Регулювання напруги на ПС 110/35/10 кВ	1	
5	A1	141.ЕК1106.006.ТК3	Регулятор напруги типу РЗЛ-05.РПН	1	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	141.ЕК1106.006.ДБ			
Розроб.		Колесніков Я.С.			Відомість дипломного проекту	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевір.		Хоменко О.В.					4	1
Н. Контр.		Шполянський О.Г.			КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-11			
Затв.		Марченко А. А.						

Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Автоматичне регулювання напруги на підстанції
110/35/10 кВ»

Київ – 2025 року

РЕФЕРАТ

Дипломний проект виконаний на 58 аркушах, 18 рисунків, 13 таблиць, 3 листи графічної частини, 18 літературних посилань.

Актуальність теми – забезпечення стабільності напруги на підстанціях 110/35/10 кВ критична для надійності енергосистеми України. Зміни навантажень та розподіленої генерації створюють коливання, що збільшують втрати й погіршують якість живлення. Автоматичне регулювання дозволить підвищити ефективність та стійкість мережі в сучасних умовах.

Об'єкт дослідження – Електрична мережа та підстанція з напругою 110/35/10 кВ.

Предмет дослідження – Процеси, методи, засоби та алгоритми автоматичного регулювання напруги та компенсації реактивної потужності на підстанціях 110/35/10 кВ у складі розподільних електричних мереж.

Мета дослідження – Аналіз існуючих методів та засобів регулювання напруги та компенсації реактивної потужності на підстанціях 110/35/10 кВ; розробка та обґрунтування рекомендацій щодо підвищення ефективності автоматичного регулювання з урахуванням особливостей роботи розподільчої мережі, сучасних технічних рішень та вимог до надійності електропостачання.

Ключові слова: АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ, ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ І АВТОМАТИКА (РЗА), РПН, БАТАРЕЇ СТАТИЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ (БСК), ШУНТУЮЧІ РЕАКТОРИ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, АВР (АВТОМАТИЧНЕ ВВЕДЕННЯ РЕЗЕРВУ), КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		6

ABSTRACT

The diploma project is made on 58 sheets, 18 figures, 13 tables, 3 sheets of graphic part, 18 literary references.

The relevance of the topic - ensuring voltage stability at 110/35/10 kV substations is critical for the reliability of the power system of Ukraine. Changes in loads and distributed generation create fluctuations that increase losses and worsen the quality of power supply. Automatic regulation will allow to increase the efficiency and stability of the network in modern conditions.

The object of research - Electric network and substation with a voltage of 110/35/10 kV.

The subject of research - Processes, methods, means and algorithms of automatic voltage regulation and reactive power compensation at 110/35/10 kV substations as part of distribution electric networks.

The purpose of the study is to analyze existing methods and means of voltage regulation and reactive power compensation at 110/35/10 kV substations; develop and substantiate recommendations for increasing the efficiency of automatic regulation, taking into account the characteristics of the distribution network, modern technical solutions and requirements for the reliability of power supply.

Keywords: AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION, 110/35/10 kV SUBSTATION, REACTIVE POWER COMPENSATION, RELAY PROTECTION AND AUTOMATICS (RPA), ON-OFF SWITCH, STATIC CAPACITOR BATTERIES (BSC), SHUNT REACTORS, POWER QUALITY, AVR (AUTOMATIC RESERVE INTRODUCTION), SHORT CIRCUITS.

					141.EK1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НА ПІДСТАНЦІЯХ	13
1.1 Основні відомості щодо регулювання напруги в електричних мережах	13
1.2 Засоби регулювання напруги на підстанціях 110/35/10 кВ.....	16
1.3 Сучасні регулятори напруги трансформаторів.....	23
1.4 Експлуатація, обслуговування та діагностика регуляторів напруги.....	26
1.5 Взаємодія автоматичного регулювання напруги з іншими елементами мережі	20
Висновки до розділу 1.....	29
2 ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ ЯК ОСНОВНИЙ ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	31
2.1 Опис схеми електричних з'єднань ПС 110/35/10 кВ.....	31
2.2 Силові трансформатори підстанції.....	33
2.3 Збірні шини підстанції	34
2.4 Комутаційне обладнання на ПС	35
2.5 Захисне обладнання.....	36
2.6 Вимірювальні трансформатори струму та напруги.....	37
2.7 Вимірювальні прилади підстанції.....	39
2.8 Власні потреби підстанції.....	40
2.9 Засоби релейного захисту та автоматики підстанції.....	40
2.10 Розрахунок струмів короткого замикання на шинах підстанції.....	42
Висновки до розділу 2.....	46
3. АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НА ПС 110/35/10 кВ	48
3.1 Вибір автоматичного регулятора напруги трансформатора.....	48
3.2 Уставки для пристрою захисту.....	50
3.3 Координація АРН з іншими засобами регулювання.....	52
3.4 Перспективи розвитку та інтеграції.....	53
Висновки до розділу 3.....	54
ВИСНОВКИ.....	55

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						9
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АВР – автоматичний ввід резерву;
ВН – висока напруга;
ВТ – вимірювальний трансформатор;
ВРП – відкритий розподільчий пристрій;
ЗРП – розподільчий пристрій закритого типу;
КЗ – коротке замикання;
КМ – кабельна мережа;
КРУ – комплектна розподільча установка;
ЛЕП – лінії електропередачі;
МСЗ – максимальний струмовий захист;
НН – низька напруга;
ПЛ- повітряні лінії;
ПС – підстанція;
ПУЕ – правила улаштування електроустановок;
РЗ – релейний захист;
РЗА – релейний захист та автоматика;
СВ – струмова відсічка;
СК – синхронний компенсатор;
ТН – трансформатор напруги;
ТС – трансформатор струму.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

ВСТУП

Сучасні електричні мережі є складною системою, що постійно розвивається, з метою забезпечення надійного та якісного електропостачання споживачів. В умовах децентралізації генерації, інтеграції відновлюваних джерел енергії та динамічних змін навантажень, підтримка оптимальних параметрів електричної енергії стає першочерговим завданням. Одним із ключових показників якості електроенергії є рівень напруги, відхилення якого від норми призводить до зростання технологічних втрат, зниження ефективності роботи електроприймачів та, як наслідок, до погіршення надійності функціонування всієї енергосистеми.

Підстанції 110/35/10 кВ відіграють вузлову роль у розподільчій мережі, з'єднуючи магістральні лінії з регіональними та безпосередньо живлячи кінцевих споживачів. Саме на цих об'єктах найбільш відчутні коливання напруги, що виникають під впливом змін режимів роботи мережі. У зв'язку з цим, автоматичне регулювання напруги на підстанціях є не просто бажаним, а критично необхідним для забезпечення стабільного та безперебійного електропостачання.

Метою цього дипломного проекту є комплексне дослідження та розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності автоматичного регулювання напруги на підстанції 110/35/10 кВ. У роботі буде проаналізовано існуючі методи та засоби регулювання, розглянуто їхні переваги та недоліки. Особлива увага буде приділена можливостям оптимізації режимів роботи силових трансформаторів з пристроями РПН (регулювання під навантаженням) та інтеграції сучасних компенсуючих пристроїв (батареї статичних конденсаторів та шунтуючих реакторів).

Буде розглянуто роль та можливості мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики (РЗА) у створенні гнучкої та адаптивної системи управління напругою, що відповідає сучасним вимогам енергетичної галузі. Результати роботи сприятимуть підвищенню надійності, економічності та якості електропостачання споживачів, що є вагомим внеском у розвиток та модернізацію енергетичної інфраструктури України.

Реалізація ефективного автоматичного регулювання напруги є центральним елементом стратегії підвищення адаптивності та ефективності української

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

енергосистеми. Це особливо актуально з огляду на необхідність оперативного реагування на поточні виклики, пов'язані як із структурними змінами в мережі (наприклад, інтеграція розподілених джерел та нових споживачів), так і з потребою у підвищенні її стійкості до зовнішніх впливів. Сучасні підходи дозволяють не лише підтримувати напругу в допустимих межах, але й оптимізувати потоки реактивної потужності, що забезпечує мінімізацію втрат та збільшення пропускної здатності ліній, сприяючи таким чином створенню більш гнучкої та надійної енергетичної інфраструктури.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						12
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

1. АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НА ПІДСТАНЦІЯХ

1.1 Основні відомості щодо регулювання напруги в електричних мережах

Якість електричної енергії є фундаментальним показником ефективності функціонування будь-якої електроенергетичної системи, а також надійності та довговічності роботи електрообладнання споживачів. Серед усіх показників якості електроенергії, рівень напруги є одним із найважливіших. Його підтримка в допустимих межах є критично необхідною для забезпечення стабільного та ефективного електропостачання.

В Україні вимоги до якості електричної енергії регламентуються національними стандартами, які значною мірою гармонізовані з європейськими. Зокрема, ДСТУ EN 50160 "Характеристики напруги електроенергії, що постачається суспільними електричними мережами" встановлює основні показники та норми якості напруги. Цей стандарт визначає діапазони допустимих відхилень напруги, частоти, а також рівні спотворень форми кривої напруги.

Згідно з ДСТУ EN 50160, для нормального режиму роботи мережі середньої напруги (до 35 кВ включно), нормально допустимі відхилення напруги в точці передачі електричної енергії (на межі балансової належності) не повинні перевищувати $\pm 10\%$ від номінального значення напруги протягом 95% часу тижня. Це означає, що протягом більшої частини часу напруга повинна залишатися в межах $[0.9 U_{ном}; 1.1 U_{ном}]$. При цьому, у будь-який момент часу відхилення не має перевищувати $\pm 15\%$.

Дотримання цих норм є обов'язковим для енергопостачальних компаній та є запорукою нормальної роботи електроприладів споживачів.

Відхилення напруги від номінального значення, як у бік підвищення, так і в бік зниження, негативно впливають на функціонування різного електрообладнання:

					141.ЕК1106.006.ДБ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Колесніков Я.С.			АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НА ПІДСТАНЦІЯХ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Хоменко О.В.					13	34
<i>Н. Контр.</i>		Шполянський О.Г.				КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-11		
<i>Затв.</i>		Марченко А. А.						

Знижена напруга ($U < U_{ном}$):

Електродвигуни: Зменшення напруги призводить до пропорційного зниження пускового моменту двигунів, збільшення ковзання, а головне – до зростання струму статора при збереженні незмінної механічної потужності. Це викликає перегрів обмоток, що прискорює старіння ізоляції та значно скорочує термін служби двигуна. Наприклад, зниження напруги на 10% може скоротити термін служби двигуна на 30-50%.

Освітлювальні прилади: Для ламп розжарювання зниження напруги на 10% призводить до зменшення світлового потоку на 30-40%, а для люмінесцентних ламп – до нестабільної роботи або неможливості запуску.

Нагрівальні прилади: Потужність нагрівальних елементів (чайники, бойлери, електроплити) пропорційна квадрату напруги ($P = U^2/R$). Зниження напруги призводить до суттєвого падіння потужності та збільшення часу нагріву, що знижує комфорт та ефективність використання.

Побутова електроніка: Хоча більшість сучасної електроніки має імпульсні блоки живлення, які можуть працювати в широкому діапазоні напруг, постійна робота на низькій напрузі може викликати перевантаження компонентів блоку живлення та скорочення терміну служби.

Трансформатори: Зниження напруги на первинній обмотці трансформатора призводить до зниження напруги на вторинній, що негативно впливає на споживачів.

Підвищена напруга ($U > U_{ном}$):

Електродвигуни: Перевищення напруги призводить до зростання струму намагнічування та, відповідно, до збільшення втрат у магнітопроводі, що також спричиняє перегрів двигуна та його прискорений знос.

Освітлювальні прилади: Для ламп розжарювання підвищення напруги навіть на 5% може скоротити термін служби вдвічі, оскільки нитка розжарювання працює при вищій температурі. Для люмінесцентних та світлодіодних ламп це може призвести до пошкодження пускорегулювальної апаратури.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Побутова електроніка: Може викликати пробій ізоляції, пошкодження електронних компонентів та вихід з ладу обладнання.

Трансформатори: Підвищена напруга призводить до збільшення втрат холостого ходу та може викликати насичення магнітопроводу, що супроводжується зростанням струму холостого ходу та перегрівом. Це також скорочує термін служби ізоляції.

Обмежувачі перенапруг (ОПН): При значному перевищенні напруги ОПН можуть вийти з ладу, що залишить обладнання без захисту від перенапруг.

Вплив неоптимальної напруги на втрати електроенергії в мережі.

Неоптимальний рівень напруги безпосередньо впливає на величину втрат електроенергії в електричних мережах, що має значний економічний вплив.

Втрати потужності в лініях: Активні втрати потужності ($P_{втр}$) у лініях електропередачі пропорційні квадрату струму (I^2) та активному опору (R) лінії:
 $P_{втр} = I^2 \cdot R$.

При зниженій напрузі: Щоб передати необхідну активну потужність ($P_{спож}$), при зниженій напрузі (U) струм $I = P_{спож} / (U \cdot \cos\phi)$ зростає. Відповідно, зростають і втрати $P_{втр}$. Наприклад, якщо напруга знижується на 10%, струм зростає приблизно на 11%, а втрати – на $(1.11)^2 \approx 1.23$, тобто на 23%.

При підвищеній напрузі: Хоча підвищена напруга може дещо знизити активні втрати за рахунок зменшення струму, це може призвести до збільшення реактивних втрат та навантаження на ізоляцію.

Втрати в трансформаторах: Відхилення напруги від номінального значення також впливає на втрати холостого ходу (намагнічування) та втрати короткого замикання в трансформаторах. Підвищена напруга може викликати значне зростання втрат холостого ходу через насичення магнітопроводу.

Таким чином, автоматичне регулювання напруги на підстанціях, таких як 110/35/10 кВ, є життєво важливою функцією. Воно дозволяє не лише забезпечити надійне та якісне електропостачання споживачів у відповідності до стандартів, а й мінімізувати технічні втрати в електричних мережах, що сприяє підвищенню енергоефективності та економічності роботи всієї енергосистеми.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

Фактори, що впливають на рівень напруги в електричних мережах:

- Зміна навантаження споживачів (добові, сезонні графіки) та їх вплив на падіння напруги.

- Вплив реактивної потужності (її споживання та генерація).

- Зміна напруги на живильних центрах.

- Вплив розподіленої генерації (СЕС, ВЕС) та зворотних потоків потужності.

Існуючі методи та засоби регулювання напруги:

- Регулювання напруги в місцях генерації (генератори).

- Регулювання напруги за допомогою трансформаторів з РПН (регулюванням під навантаженням) та ПБВ (перемикання без збудження).

- Використання компенсуючих пристроїв (конденсаторних батарей, шунтуючих реакторів, статичних компенсаторів реактивної потужності).

- Лінійні регулятори напруги.

1.2 Засоби регулювання напруги на підстанціях 110/35/10 кВ

На підстанціях 110/35/10 кВ, що є ключовими вузлами в системі електропостачання, підтримання оптимального рівня напруги є складним завданням, яке вирішується за допомогою комплексу технічних засобів. Основну роль у цьому процесі відіграють силові трансформатори, обладнані пристроями регулювання напруги, доповнені іншими компенсуючими апаратами.

Силові трансформатори є найбільш ефективним і поширеним засобом регулювання напруги на підстанціях завдяки їхній здатності змінювати коефіцієнт трансформації. Для оперативного регулювання під навантаженням використовуються трансформатори, обладнані пристроями регулювання під навантаженням (РПН).

Принцип роботи РПН полягає у зміні кількості витків однієї з обмоток трансформатора (зазвичай високовольної) без розриву електричного кола та переривання електропостачання. Це досягається шляхом перемикання відгалужень обмотки.

Механізм РПН складається з трьох основних елементів:

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

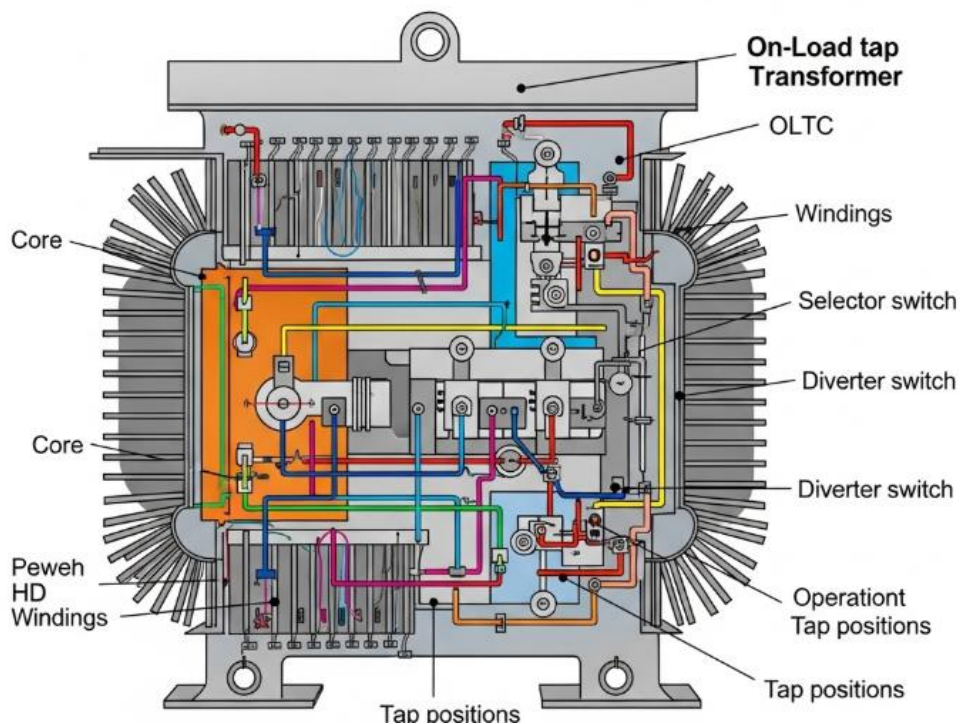


Рисунок 1.1 – Принципова схема силового трансформатора з пристроєм регулювання під навантаженням (РПН)

Пристрій вибору відпайок (Tap Selector): Це сукупність контактів, підключених до відгалужень обмотки трансформатора. Він попередньо обирає наступну необхідну відпайку, до якої буде здійснено перехід.

Перемикальний пристрій / Контактор (Diverter Switch): Це активний комутаційний елемент, який безпосередньо здійснює перемикання між відпайками під струмом. Він має спеціальну конструкцію, що дозволяє короткочасно підключати обидві відпайки (поточну та наступну) через струмообмежувальний реактор або резистор для уникнення розриву струму та виникнення дуги. Зазвичай перемикання відбувається через дві основні операції:

Відключення струму від поточної відпайки.

Включення струму на нову відпайку. Ці операції виконуються дуже швидко, з мінімальним часом витримки для забезпечення надійності.

Привід (Motor Drive Unit): Електродвигунний привід, який забезпечує механічне переміщення контактів вибору відпайок та перемикального пристрою. Він отримує команди від автоматичного регулятора напруги та переводить РПН на необхідний ступінь.

									Арк.
									17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	141.ЕК1106.006.ДБ				

Ступені регулювання: Кожен ступінь регулювання відповідає певній кількості витків обмотки. Діапазон регулювання РПН зазвичай становить $\pm 9\%$ або $\pm 16\%$ від номінальної напруги, з кроком 1.25% або 1.5% на кожен ступінь. Загальна кількість ступенів може бути від 17 до 35 (наприклад, 8 ступенів вгору, 8 вниз і номінальне положення).

Для трансформаторів, що працюють на таких відповідальних підстанціях, висуваються високі вимоги до надійності та функціональності РПН:

Надійність роботи: РПН повинен витримувати велику кількість циклів перемикачів (десятки та сотні тисяч) протягом усього терміну служби трансформатора, забезпечуючи безперебійне електропостачання.

Швидкодія: Час перемикачів одного ступеня має бути мінімальним (зазвичай до 3-5 секунд), щоб оперативно реагувати на зміни навантаження та напруги в мережі.

Відсутність перерви в живленні: При перемикачів відпайок не повинно бути перерви струму, що є ключовою відмінністю від пристроїв ПБВ (перемикачів без збудження), які вимагають відключення трансформатора.

Захист від дугоутворення: Конструкція РПН має ефективно гасити електричну дугу, що виникає при комутації, для мінімізації зносу контактів та забруднення трансформаторного масла.

Можливість інтеграції: Пристрій РПН має бути сумісним із сучасними автоматичними регуляторами напруги та системами SCADA для дистанційного керування та моніторингу.

Експлуатаційна придатність: Простота обслуговування, доступність компонентів для ремонту та діагностики.

Підстанція 110/35/10 кВ є складною багаторівневою електричною установкою, що виконує функції трансформації та розподілу електроенергії. Її схема з'єднань визначає місця встановлення РПН та стратегію регулювання напруги.

Підстанція 110/35/10 кВ має у складі:

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

Напруга 110 кВ: Представлена повітряними лініями, що живлять підстанцію, та відповідними розподільчими пристроями (ЗРП або ВРП 110 кВ).

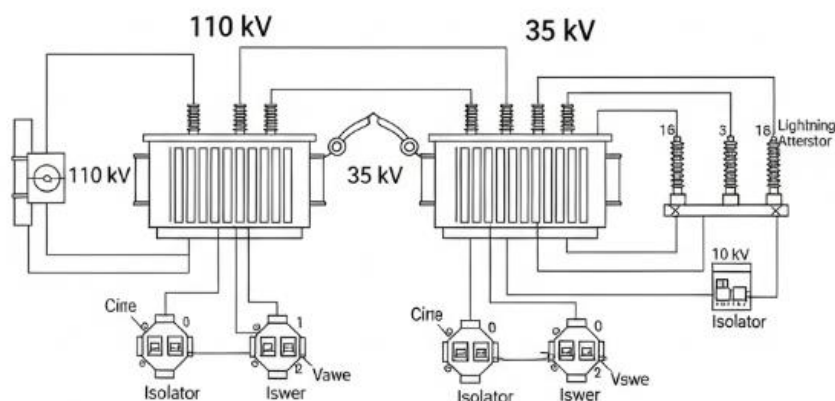
Силові трансформатори: Два або більше трансформаторів (наприклад, Т1, Т2) типу ТРДН (трифазний, з регулюванням під навантаженням, з природним масляним охолодженням та примусовим повітряним охолодженням) з трьома обмотками: 110 кВ, 35 кВ та 10 кВ.

Розподільчі пристрої 35 кВ та 10 кВ (ЗРП 35 кВ, ЗРП 10 кВ): Зазвичай виконані за схемами з однією або двома секціонованими системами шин, до яких підключаються відхідні лінії та/або споживачі.

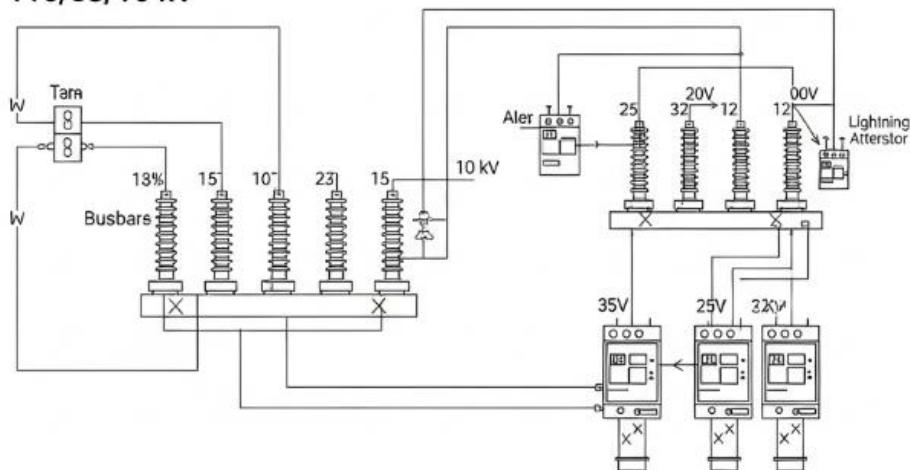
Відхідні лінії 35 кВ та 10 кВ: Живлять інші підстанції або безпосередніх споживачів.

Місця встановлення пристроїв РПН (як правило, на стороні 35 кВ або 10 кВ, залежно від конфігурації).

110/35/10 kV



110/35/10 kV



Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Рис.1.2 - Схема електричних з'єднань підстанції 110/35/10 кВ та точки регулювання напруги

На триобмоткових трансформаторах типу 110/35/10 кВ пристрій РПН може бути встановлений на одній з обмоток, залежно від конструкції трансформатора та оптимізації вартості. Найчастіше РПН розташовується на обмотці з середньою напругою (35 кВ) або на обмотці низької напруги (10 кВ). Рідше – на обмотці 110 кВ.

РПН на стороні 35 кВ: Це поширене рішення, оскільки воно дозволяє регулювати напругу для двох різних рівнів споживачів (через шини 35 кВ та шини 10 кВ). Зміни напруги на обмотці 35 кВ впливають на обидві сторони вторинного розподілу.

РПН на стороні 10 кВ: Також є ефективним, оскільки дозволяє безпосередньо впливати на рівень напруги для основних споживачів розподільчої мережі, які живляться від шин 10 кВ.

Обґрунтування вибору сторони регулювання для знижувальних трансформаторів 110/35/10 кВ.

Вибір сторони установки РПН залежить від декількох факторів:

Економічні показники: Установка РПН на обмотці з меншою напругою (наприклад, 35 кВ або 10 кВ) зазвичай є дешевшою з точки зору конструкції перемикального пристрою, оскільки вона вимагає меншої ізоляції та струмів.

Діапазон та крок регулювання: Вибір сторони РПН впливає на ефективний діапазон регулювання для всіх вихідних напруг. Регулювання напруги на одній обмотці впливає на напруги інших обмоток пропорційно коефіцієнту трансформації.

Вплив на реактивну потужність: Регулювання напруги на трьох обмоткових трансформаторах також впливає на розподіл реактивної потужності.

Складність схеми та керування: Залежно від того, яка сторона (35 кВ чи 10 кВ) потребує більш точного та оперативного регулювання, вибирається відповідна обмотка для РПН. Якщо основна мета – стабілізувати напругу для міських чи сільських розподільчих мереж (10 кВ), то РПН на стороні 10 кВ є

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

логічним вибором. Якщо шини 35 кВ також є важливим розподільчим вузлом для інших підстанцій, РПН на стороні 35 кВ може бути більш виправданим.

Загалом, конструктивне рішення про місце встановлення РПН приймається виробником трансформатора та проектувальником підстанції на етапі проектування, виходячи з техніко-економічного обґрунтування та вимог до якості напруги на кожному рівні напруги.

Окрім трансформаторів з РПН, для більш ефективного та комплексного регулювання напруги, а також для компенсації реактивної потужності, на підстанціях застосовуються додаткові засоби.

Призначення та розташування батарей статичних конденсаторів (БСК) або інших компенсуючих пристроїв на шинах 35 кВ та 10 кВ.

Батареї статичних конденсаторів (БСК) є найбільш поширеними засобами компенсації реактивної потужності. Їхнє призначення полягає в генерації реактивної потужності, що дозволяє:

Підвищити рівень напруги: Інжекція реактивної потужності в мережу компенсує її споживання індуктивними навантаженнями (двигуни, трансформатори, індуктивні опори ліній), тим самим зменшуючи падіння напруги і піднімаючи її рівень.

Зменшити втрати активної потужності: Зменшення реактивної потужності, що передається по лініях, призводить до зменшення струму та, відповідно, до зниження I^2R втрат.

Збільшити пропускну здатність ліній: Звільнення частини пропускну здатності ліній від передачі реактивної потужності дозволяє передавати більше активної потужності.

Розташування БСК: На підстанціях 110/35/10 кВ БСК зазвичай встановлюються на шинах 35 кВ та/або 10 кВ. Це обумовлено тим, що саме на цих рівнях напруги зосереджена більшість індуктивних споживачів, а також це дозволяє компенсувати реактивну потужність безпосередньо поблизу джерела її споживання, мінімізуючи її перетікання по мережі.

Окрім БСК, можуть застосовуватися й інші компенсуючі пристрої, такі як:

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

Шунтуючі реактори: Застосовуються для споживання реактивної потужності та зниження напруги, зазвичай на довгих лініях 110 кВ та вище.

Статичні компенсатори реактивної потужності (SVC/STATCOM): Більш сучасні та гнучкі пристрої, що дозволяють динамічно генерувати або споживати реактивну потужність, швидко реагуючи на зміни в мережі. Вони забезпечують більш точне регулювання напруги та покращення стабільності.

Координація роботи РПН та компенсуючих пристроїв.

Для досягнення максимального ефекту від регулювання напруги та оптимізації роботи мережі, необхідно забезпечити координацію роботи РПН трансформаторів та компенсуючих пристроїв.



Рисунок 1.3 - Встановлення статичного компенсатора реактивної потужності (SVC) на підстанції

Принцип координації: Зазвичай пріоритет віддається компенсуючим пристроям. Спочатку змінюється положення БСК (вмикаються/вимикаються секції) для компенсації реактивної потужності та грубого регулювання напруги. Якщо цього недостатньо або коливання напруги виходять за межі допустимого

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

діапазону, тоді вступає в дію РПН трансформатора для більш точного та планового регулювання.

Зменшення кількості перемикачів РПН: Координована робота дозволяє зменшити кількість перемикачів РПН, що подовжує термін його служби. Часті перемикачів РПН спричиняють знос контактів, забруднення масла та додаткові витрати на обслуговування. Компенсація реактивної потужності дозволяє згладити значні коливання напруги, зменшуючи потребу в частих перемикачів РПН.

Оптимізація втрат: Спільна дія БСК та РПН дозволяє підтримувати напругу в оптимальному діапазоні, одночасно мінімізуючи втрати активної потужності в мережі.

Ефективна взаємодія цих засобів забезпечує стабільність напруги на всіх рівнях підстанції та у відхідних мережах, що є критично важливим для надійності та якості електропостачання.

2.3 Сучасні регулятори напруги трансформаторів

Сучасні автоматичні регулятори напруги (АРН) трансформаторів є ключовими елементами систем регулювання напруги на підстанціях. Вони забезпечують стабільність напруги на вихідних шинах трансформаторів з РПН (регулюванням під навантаженням), автоматично змінюючи коефіцієнт трансформації залежно від навантаження та параметрів мережі. Впровадження інтелектуальних алгоритмів та можливостей комунікації робить їх незамінними для ефективної роботи сучасних енергосистем.

До сучасних АРН висувається ряд важливих технічних та експлуатаційних вимог:

Швидкодія: Регулятор повинен оперативно реагувати на зміни напруги в мережі та навантаження трансформатора, щоб підтримувати заданий рівень напруги без значних відхилень. Швидкість спрацювання визначається часом вимірювання параметрів, обробки сигналу та видачі команди на перемикачів РПН.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

Чутливість: АРН повинен бути здатним виявляти навіть незначні відхилення напруги від заданої уставки та своєчасно ініціювати процес регулювання. Чутливість визначається смугою нечутливості (deadband), в межах якої регулятор не реагує на зміни напруги для запобігання зайвим перемиканням.

Надійність: Безперебійна та точна робота АРН є критично важливою для надійності електропостачання. Регулятор повинен мати високу стійкість до зовнішніх впливів (температура, електромагнітні завади) та самодіагностику для виявлення потенційних несправностей.

Гнучкість налаштувань: Сучасні АРН повинні мати широкі можливості для параметризації та адаптації до специфічних умов роботи конкретної підстанції та мережі. Це включає налаштування уставок напруги, смуги нечутливості, часових затримок, параметрів компенсації тощо.

Можливості інтеграції в АСУ ТП та SCADA-системи: АРН повинні підтримувати стандартні протоколи зв'язку (наприклад, IEC 61850, Modbus, DNP3) для інтеграції в автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСУ ТП) та системи диспетчерського керування та збору даних (SCADA). Це забезпечує можливість дистанційного моніторингу стану регулятора, зміни уставок, перегляду подій та керування режимами роботи.



Рисунок 1.4 - Зовнішній вигляд сучасних автоматичних регуляторів напруги трансформаторів

Сучасні АРН реалізують різноманітні алгоритми регулювання напруги для забезпечення оптимальної роботи в різних режимах:

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

Пряме регулювання (за уставкою напруги): Це найпростіший алгоритм, при якому АРН підтримує заданий рівень напруги на контрольованій точці (зазвичай на вихідних шинах трансформатора). Якщо напруга виходить за встановлену смугу нечутливості, регулятор дає команду на перемикання РПН для повернення напруги до уставки.

Зворотне регулювання (за уставкою струму): У цьому режимі АРН намагається підтримувати заданий рівень струму навантаження трансформатора. Цей алгоритм може використовуватися для запобігання перевантаженню трансформатора. Зміна положення РПН відбувається таким чином, щоб обмежити струм до встановленої уставки.

Компенсація падіння напруги в лінії (Line Drop Compensation - LDC): Для забезпечення стабільної напруги у віддалених точках мережі, АРН може використовувати алгоритм компенсації падіння напруги в лінії. Для цього в налаштуваннях регулятора задаються параметри опору (R) та реактивного опору (X) лінії, що живиться від трансформатора. АРН, вимірюючи струм навантаження, розраховує падіння напруги в лінії та відповідно підвищує напругу на вихідних шинах трансформатора, щоб компенсувати ці втрати та підтримувати заданий рівень напруги у кінці лінії.

Адаптивні та інтелектуальні алгоритми: Сучасні АРН можуть використовувати більш складні адаптивні алгоритми, які автоматично змінюють параметри регулювання (наприклад, смугу нечутливості, часові затримки) залежно від поточного режиму роботи мережі та навантаження трансформатора. Інтелектуальні алгоритми можуть включати елементи машинного навчання для прогнозування змін навантаження та проактивного регулювання напруги, а також для мінімізації кількості перемикань РПН з метою подовження його терміну служби.

Для забезпечення надійної та безпечної роботи трансформаторів з РПН, АРН мають ряд вбудованих функцій блокування та захисту:

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

Блокування від частих перемикачів: Для запобігання надмірному зносу механізму РПН, АРН може блокувати подальші перемикачання, якщо кількість операцій за певний проміжок часу перевищує встановлене значення.

Блокування при перевантаженні трансформатора: У разі виявлення перевантаження трансформатора, АРН може блокувати перемикачання РПН, які можуть призвести до подальшого збільшення навантаження.

Блокування при виході за крайні положення РПН: АРН контролює положення перемикача РПН та блокує подальші команди на перемикачання, якщо досягнуто крайніх верхнього або нижнього положення.

Захист від заклинювання РПН: У разі виявлення несправності механізму РПН (наприклад, відсутності руху при подачі команди), АРН може видати аварійний сигнал та заблокувати подальшу роботу.

Інші функції захисту: Деякі АРН можуть мати додаткові функції захисту, пов'язані з роботою РПН, такі як контроль часу перемикачання ступенів.

2.4 Експлуатація, обслуговування та діагностика регуляторів напруги

Ефективна експлуатація, своєчасне обслуговування та якісна діагностика є запорукою надійної роботи АРН:

Режими роботи:

Ручний режим: Керування РПН здійснюється оператором вручну з локальної панелі або дистанційно.

Автоматичний режим: АРН самостійно приймає рішення про необхідність перемикачання РПН на основі заданих уставок та алгоритмів.

Дистанційний режим: Керування АРН здійснюється дистанційно через інтерфейси зв'язку (наприклад, SCADA).

Типові несправності та методи їх усунення: До типових несправностей АРН можуть відноситися збої в роботі програмного забезпечення, вихід з ладу датчиків, проблеми зі зв'язком, некоректне спрацювання алгоритмів. Діагностика часто включає перевірку параметрів налаштування, аналіз журналів подій, тестування входів та виходів, а іноді й заміну окремих компонентів.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

Профілактичне обслуговування та перевірка функціональності: Регулярне профілактичне обслуговування включає візуальний огляд регулятора, перевірку контактів, оновлення програмного забезпечення (за потреби), тестування основних функцій регулювання та захисту. Періодична перевірка функціональності АРН дозволяє вчасно виявити потенційні проблеми та запобігти їх розвитку.



Рисунок 1.6 - Внутрішнє обладнання шафи автоматичного регулятора напруги трансформатора

Впровадження та правильна експлуатація сучасних автоматичних регуляторів напруги є важливим фактором для забезпечення якісного та надійного електропостачання споживачів, а також для оптимізації роботи електроенергетичної системи в цілому.

2.5 Взаємодія автоматичного регулювання напруги з іншими елементами мережі

Автоматичне регулювання напруги (АРН) на підстанціях не працює ізольовано. Для забезпечення оптимальної та надійної роботи

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

електроенергетичної системи, АРН мусить ефективно взаємодіяти з релейним захистом та джерелами розподіленої генерації.

Розвиток розподіленої генерації (РГ) (сонячні та вітрові електростанції) суттєво змінює умови роботи АРН та створює нові виклики.

Виклики для регулювання напруги:

Зворотні потоки потужності: РГ може створювати зворотні потоки потужності до підстанції, що призводить до небажаного підвищення напруги, особливо при високій генерації та низькому споживанні.

Швидкі та непередбачувані коливання: Генерація від СЕС та ВЕС залежить від погоди, що викликає стрімкі коливання напруги. Традиційні АРН можуть не встигати за ними, що призводить до частих перемикань РПН або виходу напруги за допустимі межі.

Необхідність адаптації алгоритмів регулювання РПН:

Двонаправлені функції LDC (Line Drop Compensation): Потрібні для точного розрахунку падіння напруги при двонаправлених потоках потужності.

Управління за порогом генерації: АРН може адаптувати свої уставки, отримуючи інформацію про величину генерації.

Координація з інверторами РГ: Сучасні інвертори РГ мають власні функції регулювання реактивної потужності, і АРН мусить з ними координуватися для уникнення конфліктів.

Предиктивні алгоритми: Використання прогнозів генерації та споживання дозволяє АРН проактивно регулювати напругу.

Перспективи інтеграції РПН в системи керування Volt/Var Optimization (VVO) або Volt/Var Control (VVC) для розумних мереж:

VVO/VVC системи – це централізовані системи керування, що оптимізують профілі напруги та потоки реактивної потужності по всій мережі.

Роль РПН: АРН РПН стають частиною єдиного оптимізаційного контуру, отримуючи команди від VVO/VVC для глобальної оптимізації (мінімізація втрат, підвищення якості напруги).

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Переваги: Глобальна оптимізація, підвищення надійності та ефективна інтеграція РГ.

Таким чином, взаємодія автоматичного регулювання напруги з релейним захистом та розподіленою генерацією.

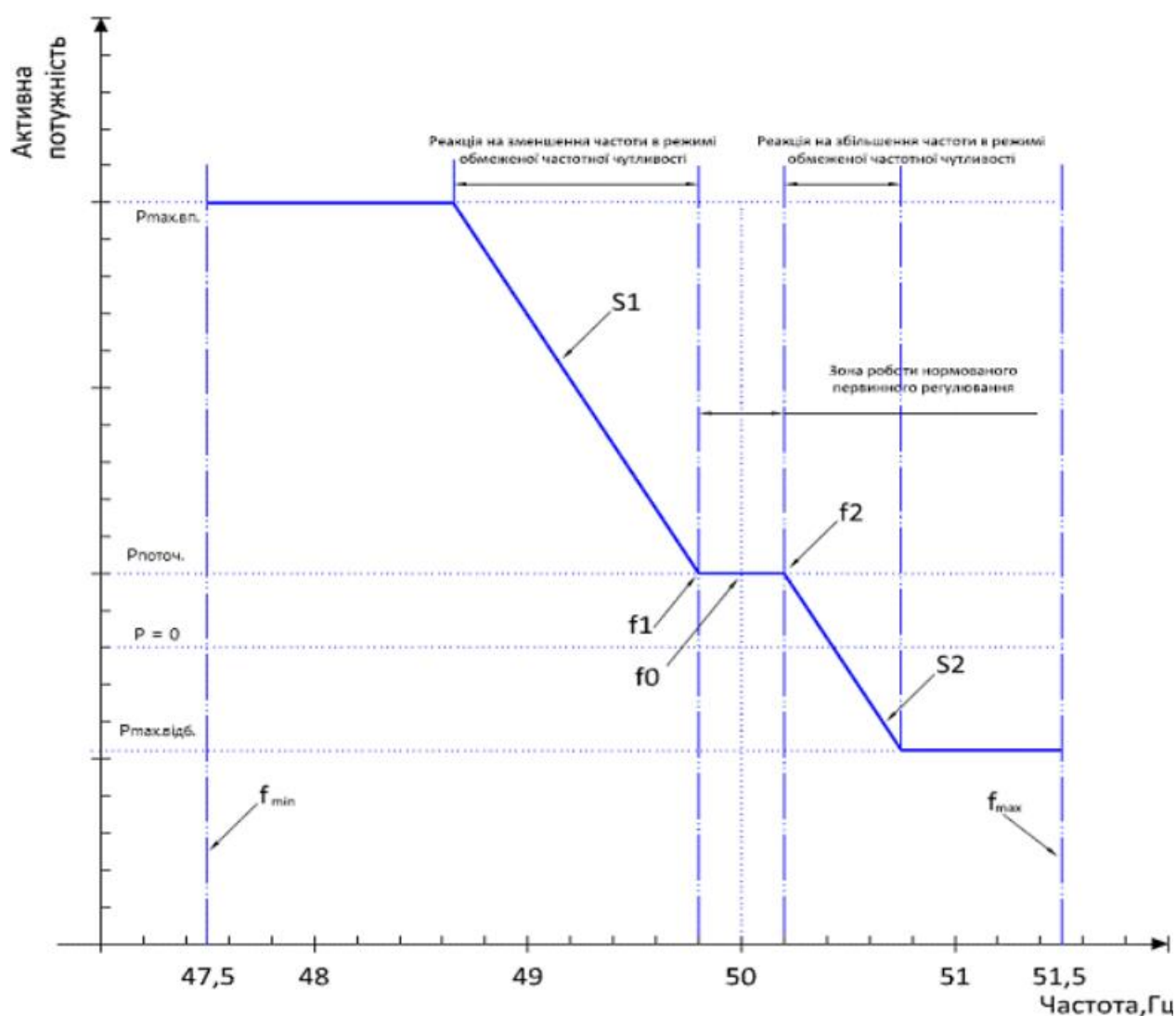


Рисунок 1.7 – Концепція інтеграції АРН РПН в систему Volt/Var Optimization (VVO)

Висновки до розділу 1

Підтримка стабільного рівня напруги є фундаментальною вимогою до якості електричної енергії, як це визначено у ДСТУ EN 50160. Відхилення напруги як у бік зниження, так і підвищення, призводять до значних негативних наслідків для

споживачів (побутових та промислових), електрообладнання (двигунів, трансформаторів, освітлення) та спричиняють збільшення втрат електроенергії в мережі.

Основним засобом регулювання напруги на підстанціях є силові трансформатори, обладнані пристроями РПН (регулювання під навантаженням). Ми розглянули принцип їхньої роботи, ключові компоненти (вибір відпайок, контактор, привід) та вимоги до них. Було показано, що розміщення РПН на стороні 35 кВ або 10 кВ знижувальних трансформаторів 110/35/10 кВ є оптимальним рішенням з урахуванням техніко-економічних показників та необхідності підтримки напруги для кінцевих споживачів. Допоміжними засобами регулювання є батареї статичних конденсаторів (БСК), що дозволяють компенсувати реактивну потужність та зменшувати втрати, а їхня робота має бути координована з РПН.

Сучасні автоматичні регулятори напруги (АРН) відрізняються високою швидкістю, чутливістю, надійністю та гнучкістю налаштувань. Вони використовують різноманітні алгоритми регулювання, включаючи пряме, зворотне, компенсацію падіння напруги в лінії (LDC), а також адаптивні та інтелектуальні алгоритми для мінімізації перемикачів РПН. Важливою особливістю є інтеграція АРН в АСУ ТП та SCADA-системи для дистанційного керування та моніторингу, а також наявність функцій блокування та захисту від частих перемикачів, перевантажень та відмови трансформатора.

Особливу увагу було приділено взаємодії АРН з іншими елементами мережі. Ми наголосили на важливості координації з релейним захистом, зокрема необхідності блокування регулятора при КЗ для забезпечення швидкого та безпечного відключення пошкоджень. Крім того, розглянуто вплив розподіленої генерації (СЕС, ВЕС), яка створює виклики у вигляді зворотних потоків потужності та швидких коливань напруги. У відповідь на це, алгоритми АРН потребують адаптації, а перспективним напрямком є їхня інтеграція в централізовані системи Volt/Var Optimization (VVO) або Volt/Var Control (VVC) в рамках концепції "розумних мереж", що дозволить оптимізувати параметри напруги та реактивної потужності в масштабах усієї мережі.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

Таким чином, ефективне автоматичне регулювання напруги на підстанціях 110/35/10 кВ є складним, але критично важливим завданням, що вимагає застосування сучасних технологій та глибокого розуміння взаємодії всіх елементів енергосистеми для забезпечення надійного, якісного та економічного електропостачання.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2 ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ ЯК ОСНОВНИЙ ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Опис схеми електричних з'єднань ПС 110/35/10 кВ

Для забезпечення надійного та ефективного електропостачання споживачів, важливо розуміти структуру та функціонування схеми електричних з'єднань підстанції (ПС) 110/35/10 кВ. Ця підстанція є ключовим вузлом, що знижує напругу від магістральних мереж до рівнів, придатних для розподілу.

ПС 110/35/10 кВ підключена до мережі живлення за тупиковою схемою, що передбачає живлення двома лініями напругою 110 кВ. Таке рішення забезпечує резервування, підвищуючи надійність електропостачання підстанції: у разі виходу з ладу однієї лінії живлення, підстанція може продовжувати отримувати живлення від іншої.

На підстанції реалізовано три основні рівні напруги: 110 кВ, 35 кВ та 10 кВ. Це дозволяє здійснювати послідовну трансформацію та розподіл електроенергії до різних груп споживачів, кожен з яких потребує певного номінального рівня напруги.

Розподільчі пристрої (РУ) та відхідні лінії:

Розподільчий пристрій (РУ) 10 кВ: Від цього рівня напруги відходять 18 ліній. Це свідчить про те, що РУ 10 кВ є основним вузлом розподілу для значної кількості споживачів або менших трансформаторних підстанцій, які живляться напругою 10 кВ.

Розподільчий пристрій (РУ) 35 кВ: Від РУ 35 кВ відходять 4 лінії. Цей рівень напруги, як правило, використовується для живлення більших промислових споживачів або віддалених населених пунктів через власні підстанції, а також для живлення інших підстанцій середньої напруги.

Схема виконання РУ 35 кВ, 10 кВ (та, можливо, 6 кВ, якщо це стосується вашої підстанції):

РУ 35 кВ, 10 кВ виконані за схемою «одна секціонована вимикачем система шин».

					141.ЕК1106.006.ДБ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Колесніков Я.С.			ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ ЯК ОСНОВНИЙ ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
<i>Перевір.</i>		Хоменко О.В.					31	18
<i>Н. Контр.</i>		Шполянський О.Г.				КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-11		
<i>Затв.</i>		Марченко А. А.						

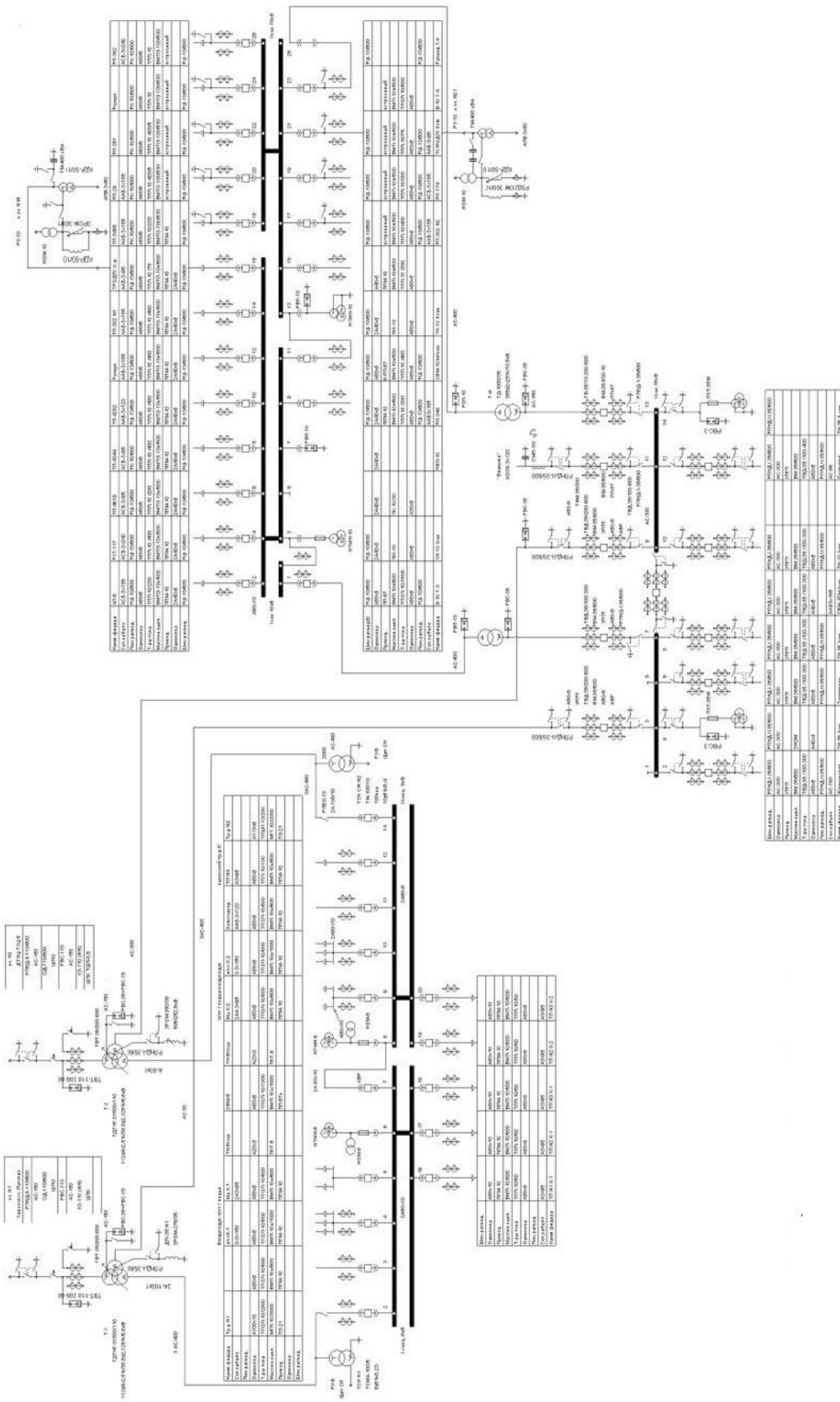


Рисунок 2.1 – Схема ПС напругою 10/35/10 кВ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

141.ЕК1106.006.ДБ

Арк.
32

Ця схема є поширеним і надійним рішенням для розподільчих пристроїв середньої напруги. Її ключові особливості:

Одна система шин: Всі приєднання (лінії, трансформатори) підключені до однієї головної збірної шини.

Секціонування вимикачем: Єдина система шин розділена на дві (або більше) секції за допомогою шинного секційного вимикача. Це забезпечує:

Високу надійність: У разі пошкодження на одній секції шин, її можна відключити, не знеструмлюючи інші секції, що мінімізує зону відключення.

Гнучкість в експлуатації: Дозволяє виводити одну секцію шин у ремонт або на профілактичне обслуговування, продовжуючи роботу іншої.

Покращення селективності захисту: Сприяє швидкій локалізації пошкоджень.

Кожне приєднання до РУ 35 кВ та 10 кВ (наприклад, відхідні лінії та трансформатори) підключається до відповідної секції шин через власний вимикач та роз'єднувачі, що дозволяє оперативно керувати цими приєднаннями та забезпечувати їхній захист.

Така конфігурація підстанції 110/35/10 кВ є типовим рішенням для забезпечення стабільного та резервованого електропостачання споживачів у сучасних розподільчих електричних мережах.

2.2 Силові трансформатори підстанції

На підстанції 110/35/10 кВ ключовими елементами, що забезпечують трансформацію та розподіл електроенергії між різними рівнями напруги, є силові трансформатори. Для даної підстанції вказані трансформатори типу ТДТНГ-31500/110 (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Характеристики електроустановки типу ТДТНГ-31500/110

Потужність, кВА	Номінальна напруга, кВ			Втрати, кВт		Напруга КЗ, %			Струм ХХ, %
	ВН	СН	НН	ХХ	КЗ	ВН- СН	ВН- НН	СН- НН	
31500	115	38,5	10,5	125	260	17,4	10,5	6,2	5

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

Трансформатор ТДТНГ-31500/110 – це трифазний, триобмотковий силовий трансформатор з регулюванням напруги під навантаженням, потужністю 31.5 МВА, призначений для роботи в мережах з номінальною напругою 110 кВ. Його охолодження здійснюється примусовою циркуляцією повітря та масла.

На підстанції 110/35/10 кВ, окрім основних триобмоткових трансформаторів, використовуються додаткові трансформатори для забезпечення живлення певних секцій або для інших потреб. Якщо на підстанції 110/35/10 кВ присутні трансформатори типу ТД-10000/35 (табл.2.2), вони, виконують функцію зниження напруги з шин 35 кВ до шин 10 кВ, або слугують для розподілу потужності між цими рівнями.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики ТД-10000/35

Потужність, кВА	Номінальна напруга, кВ		Втрати, кВт		Напруга КЗ, %	Струм ХХ, %
	ВН	НН	ХХ	КЗ		
10000	38,5	10,5	14,5	65	7,5	0,8

2.3 Збірні шини підстанції

Розподільчий пристрій РУ-110 кВ виконано за схемою «блок (лінія-трансформатор) із роз'єднувачем». Це означає, що кожен силовий трансформатор (наприклад, ТДТНГ-31500/110) об'єднаний у жорсткий блок з відповідною живильною лінією 110 кВ.

Між цим блоком та основною системою шин 110 кВ встановлюється роз'єднувач. Він дозволяє виводити блок у ремонт та змінювати конфігурацію живлення.

РУ-110 кВ підстанції з'єднано з енергосистемою двома лініями електропередавання 110 кВ. Це забезпечує:

Резервування живлення: У разі виходу з ладу однієї лінії, підстанція продовжує отримувати живлення від іншої, підвищуючи надійність електропостачання.

Розподіл навантаження: Дві лінії дозволяють розподілити струмове навантаження.

Шини 35 кВ підстанції: Застосування проводів марки АС-300.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

На підстанції 110/35/10 кВ збірні шини 35 кВ відіграють ключову роль у розподілі електроенергії. Вони виконані за допомогою проводів марки АС-300. Це типове рішення для розподільчих пристроїв відкритого типу (ВРП) або для з'єднувальних шин всередині закритих розподільчих пристроїв (ЗРП), де провідна частина є гнучкою.

Збірні шини, виконані з проводу АС-300, забезпечують надійний та ефективний розподіл електроенергії на рівні 35 кВ, що є критично важливим для функціонування підстанції як вузла енергосистеми.

Для рівня 35 кВ такий вибір є цілком доцільним і часто переважає жорсткі аналоги за сукупністю техніко-економічних показників.

2.4 Комутаційне обладнання на ПС

На підстанції 110/35/10 кВ, встановлені також вимикачі ВД-110 та роз'єднувачі іншого типу — РНДЗ-110/1000 (табл.2.3). Це ключові компоненти, що забезпечують як нормальне функціонування мережі, так і її захист під час аварій.

Вимикачі ВД-110 встановлюються на відгалуженнях ліній електропередачі та на сторонах силових трансформаторів 110 кВ.

Наявність як вимикачів ВД-110, так і роз'єднувачів та РНДЗ-110/1000 на підстанції 110 кВ забезпечує комплексне оснащення розподільчого пристрою, що забезпечує високий рівень надійності, безпеки та гнучкості в експлуатації енергооб'єкта.

Таблиця 2.3 – Параметри РНДЗ-110/1000

Номинальний струм, А	Наскрізний струм КЗ, кА	Струм термічної стійкості, кА, 3 с для полюсів та 1 с для заземлювальних ножів
1000	80	31,5

Розподільчий пристрій (РУ) 35 кВ підстанції є важливим проміжним вузлом, що з'єднує трансформатори 110/35/10 кВ з відхідними лініями 35 кВ та трансформаторами, що знижують напругу до 10 кВ. Для забезпечення надійного та безпечного функціонування цього рівня напруги він обладнаний як вимикачами, так і роз'єднувачами.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Комбінація масляних вимикачів ВМ-35/600 (табл. 2.4) та роз'єднувачів РНДЗ-35/1000 (табл. 2.5) забезпечує функціональність та безпеку роботи РУ 35 кВ підстанції, дозволяючи ефективно керувати потоками потужності та захищати мережу.

Таблиця 2.4 – Параметри вимикачів ВМ-35-25/600.

Номінальна напруга, кВ	35
Найбільша робоча напруга, кВ	40,5
Номінальний струм приєднання, А	600
Номінальний струм вимкнення, кА	25
Струм термічної стійкості (5 с), кА	10
Струм електродинамічної стійкості, кА	10
Час вимкнення, не більше, мс	40

Таблиця 2.5 – Параметри РНДЗ-35/1000

Номінальний струм, А	Наскрізний струм КЗ, кА	Струм термічної стійкості, кА, 3 с для полюсів та 1 с для заземлювальних ножів
1000	63	25

На РУ-10 кВ підстанції встановлені типові комірки комплектних розподільчих пристроїв (КРП), що є компактними, надійними та безпечними заводськими блоками. Кожна комірка містить весь необхідний комплект обладнання для приєднання: вимірювальні трансформатори (струму та напруги), вимикачі, роз'єднувачі та щитове вимірювальне устаткування.

Ключовим елементом цих комірок є вакуумні вимикачі типу ВВ-10/630. Вони забезпечують дугогасіння у глибокому вакуумі, вирізняючись високою надійністю, великим ресурсом, екологічністю, невибагливістю в обслуговуванні, пожежовибухобезпечністю та високою швидкістю дії. Таке рішення гарантує ефективне та безпечне керування численними відхідними лініями 10 кВ, що критично важливо для безперебійного електропостачання кінцевих споживачів. (табл. 2.6)

Таблиця 2.6 – Параметри вимикачів ВВ-10-20/630.

Номінальна напруга, кВ	10
Найбільша робоча напруга, кВ	12
Номінальний струм приєднання, А	630
Номінальний струм вимкнення, кА	20
Струм термічної стійкості (3 с), кА	20
Струм електродинамічної стійкості, кА	52

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

2.5 Захисне обладнання

На підстанції, для захисту силових трансформаторів від перенапруги, встановлено розрядники з боку кожної обмотки. Зокрема, ПС обладнана такими типами розрядників: РВС-110 (для обмотки 110 кВ), РВС-35 (для обмотки 35 кВ) та РВП-10 (для обмотки 10 кВ). Ці пристрої забезпечують відведення надлишкової напруги від обладнання, захищаючи його від пошкоджень, спричинених грозовими розрядами або комутаційними перенапругами (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Характеристики розрядників

Параметр	РВП-10	РВС-35	РВС-110
Номінальна напруга, кВ	10	35	110
Пробивна напруга, кВ	26-30,5	78-98	200-250
Імпульсна напруга (2-20 мкс), кВ	50	125	285

Для захисту трансформаторів власних потреб (ТВП) та трансформаторів напруги (ТН) на підстанції застосовують плавкі запобіжники. Зокрема, використовуються запобіжники типу ПКТ-35 для захисту в колах 35 кВ, ПКТ-10 для 10 кВ та ПКТ-6 для 6 кВ (якщо такий рівень напруги присутній на ТВП або ТН). Ці запобіжники забезпечують швидке відключення при коротких замиканнях або значних перевантаженнях, захищаючи трансформатори від пошкоджень.

2.6 Вимірювальні трансформатори струму та напруги

На стороні 110 кВ підстанції для вимірювання струму встановлені трансформатори струму (ТС) типу ТВТ-110-100/5. Ці пристрої є ключовими елементами для релейного захисту, комерційного обліку електроенергії та вимірювання електричних параметрів у високовольтних колах. Вони безпечно перетворюють високі струми первинного кола (100 А) на низькі стандартизовані значення (5 А) для підключення до вимірювальних приладів та реле (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Параметри ТС ТВТ-110-100/5

Первинний струм, А	Вторинний струм, А	Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$, ВА	Струм термічної стійкості (3 с), кА	Струм електродинамічної стійкості, кА
100	5	30	4	20

На стороні 35 кВ підстанції для вимірювання струму встановлені трансформатори струму (ТС) типу ТВД-35-300/5. Ці пристрої відіграють ключову роль у забезпеченні точних даних для релейного захисту, комерційного обліку та оперативного контролю електричних параметрів. Вони перетворюють високі первинні струми (до 300 А) на стандартизовані низькі значення (5 А), що дозволяє безпечно підключати вимірювальні прилади та реле захисту (табл. 2.9).

Таблиця 2.9 – Параметри ТС ТВД-35-300/5

Первинний струм, А	Вторинний струм, А	Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$, ВА	Струм термічної стійкості (3 с), кА	Струм електродинамічної стійкості, кА
300	5	20	10	51
600	5	20	49	102

На стороні 10 кВ підстанції для вимірювання струму встановлені трансформатори струму (ТС) типу ТОЛ-10. Ці ТС інтегровані в комірки КРП і забезпечують безпечне та точне перетворення високих значень струму на стандартні низькі, необхідні для підключення пристроїв релейного захисту, автоматики, вимірювальних приладів та систем обліку електроенергії на рівні 10 кВ (табл. 2.10).

Таблиця 2.10 – Параметри ТС ТОЛ-10

Тип	Первинний струм, А	Вторинний струм, А	Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$, ВА	Струм термічної стійкості (3 с), кА	Струм електродинамічної стійкості, кА
ТОЛ-10	300	5	15	16	100
	600	5	15	20	100

Зі сторони 35 кВ підстанція обладнана трансформаторами напруги (ТН) типу ЗНОМ-35. Ці пристрої необхідні для вимірювання напруги, обліку електроенергії та живлення кіл релейного захисту та автоматики на рівні 35 кВ, безпечно перетворюючи високу напругу на стандартизоване низьке значення (табл. 2.11).

Таблиця 2.11 – Параметри ЗНОМ-35

Номінальна напруга первинної обмотки, кВ	35
Номінальна напруга вторинної обмотки, В	100
Номінальна потужність вторинної обмотки, ВА	250

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		38

Зі сторони 10 кВ підстанція обладнана трансформаторами напруги (ТН) типу НТМИ-10. Ці ТН є критично важливими для вимірювання напруги, обліку електроенергії та забезпечення живлення кіл релейного захисту та автоматики на рівні 10 кВ, безпечно знижуючи високу напругу до стандартних значень (табл. 2.13).

Таблиця 2.13 – Параметри НТМИ-10

Номінальна напруга первинної обмотки, кВ	10
Номінальна напруга вторинної обмотки, В	100
Номінальна потужність вторинної обмотки, ВА	200

2.7 Вимірювальні прилади підстанції

На підстанції 110/35/10 кВ для постійного контролю електричних параметрів та забезпечення безпечної й ефективної експлуатації встановлено різноманітні вимірювальні прилади. Ці прилади отримують інформацію від вимірювальних трансформаторів струму (ТС) та трансформаторів напруги (ТН), які знижують високі значення струму та напруги до безпечних рівнів.

Основні вимірювальні прилади, що використовуються на цій підстанції, включають:

Амперметри: Вимірюють струм у колах 110 кВ, 35 кВ та 10 кВ. Вони встановлені на панелях керування кожного приєднання (ліній, трансформаторів, секцій шин) і дозволяють оперативному персоналу контролювати поточне навантаження обладнання.

Вольтметри: Вимірюють напругу на шинах 110 кВ, 35 кВ та 10 кВ, а також на окремих лініях. Це забезпечує контроль за якістю електроенергії та дозволяє оцінювати ефективність роботи автоматичних регуляторів напруги.

Ватметри та Варметри: Вимірюють активну (кВт) та реактивну (кВар) потужність, що протікає через трансформатори та відхідні лінії. Ці прилади важливі для моніторингу завантаження обладнання та ефективності використання мережі.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Лічильники електроенергії: Слугують для комерційного обліку спожитої або переданої електроенергії (кВт·год та кВар·год) на всіх рівнях напруги. Вони є ключовими для фінансових розрахунків та моніторингу втрат.

Частотоміри: Контролюють частоту змінного струму в мережі (50 Гц). Підтримання стабільної частоти є одним з основних показників якості електроенергії.

Ці вимірювальні прилади, разом із ТС (типу ТВТ-110-100/5 на 110 кВ, ТВД-35-300/5 на 35 кВ, ТОЛ-10 на 10 кВ) та ТН (типу ЗНОМ-35 на 35 кВ, НТМИ-10 на 10 кВ), формують інтегровану систему моніторингу, яка надає оперативному та диспетчерському персоналу повну інформацію про режим роботи підстанції. Це дозволяє своєчасно реагувати на зміни, підтримувати оптимальні параметри мережі та забезпечувати надійне електропостачання.

2.8 Власні потреби підстанції

Основними споживачами власних потреб є системи оперативного струму (для релейного захисту, автоматики, керування), освітлення, опалення, вентиляція, приводи комутаційних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів, РПН), а також системи охолодження потужних трансформаторів.

Живлення власних потреб здійснюється від трансформаторів власних потреб (ТВП). На цій ПС 110/35/10 кВ у якості ТВП використовуються два трансформатори типу ТМ-100/10 та два трансформатори типу ТМ-400/10. Ці ТВП підключаються до шин 10 кВ або 35 кВ підстанції. Для підвищення надійності зазвичай встановлюють два ТВП, що працюють у резерві або паралельно. Це забезпечує безперебійне живлення систем ВП навіть у разі виходу з ладу одного з трансформаторів або його живильної лінії.

Для захисту ТВП від коротких замикань та перевантажень на підстанції застосовуються плавкі запобіжники ПКТ-35 (для ТВП, підключених до шин 35 кВ) та ПКТ-10 (для ТВП, підключених до шин 10 кВ). Належне функціонування систем власних потреб є фундаментальним для надійності та безпеки експлуатації всієї підстанції.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.9 Засоби релейного захисту та автоматики підстанції

На підстанції 110/35/10 кВ система РЗА виконує критично важливі функції: виявлення пошкоджень, їх локалізацію та ліквідацію, а також автоматичне керування режимами роботи обладнання.

Система РЗА базується на даних, отриманих від вимірювальних трансформаторів струму (ТС) та трансформаторів напруги (ТН), які перетворюють високі первинні параметри до безпечних значень, придатних для обробки вторинним обладнанням.

Релейний захист забезпечує швидке та селективне відключення пошкоджених елементів мережі, мінімізуючи масштаби аварій. На підстанції 110/35/10 кВ реалізуються такі види захистів:

Захист силових трансформаторів:

Диференційний захист: Є основним високочутливим захистом від внутрішніх пошкоджень трансформатора (міжфазні та однофазні замикання, виткове замикання). Він порівнює струми на вході та виході трансформатора і спрацьовує при їх значній різниці.

Газовий захист: Захищає від пошкоджень, що супроводжуються виділенням газу всередині бака трансформатора (наприклад, перегріву, пробої ізоляції). Він спрацьовує від інтенсивності газоутворення або рівня масла.

Максимальні струмові захисти (МСЗ): Реагують на перевищення струмом певного значення, захищаючи від перевантажень та зовнішніх коротких замикань.

Захист від перевантажень: Контролює температуру обмоток та масла, відключаючи трансформатор при тривалому перевищенні допустимого навантаження.

Захист ліній 110 кВ, 35 кВ, 10 кВ:

Дистанційний захист: Основний вид захисту для ліній високої та надвисокої напруги, що реагує на співвідношення напруги та струму, що дозволяє визначити відстань до місця пошкодження.

Максимальні струмові захисти (МСЗ) з пуском по напрузі: Доповнюють дистанційний захист або є основними на лініях нижчих класів напруги.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

Спрямовані захисти: Визначають напрямок потоку струму короткого замикання, підвищуючи селективність.

Захист шин:

Диференційний захист шин: Високочутливий захист, що спрацьовує при короткому замиканні на шинах.

Резервні захисти: Захисти, які діють при відмові основних захистів або вимикачів.

Захист власних потреб: Забезпечується плавкими запобіжниками (ПКТ-35, ПКТ-10) та автоматичними вимикачами, що захищають ТВП та кола власних потреб.

Автоматика підстанції виконує функції контролю, регулювання та керування обладнанням для підтримання нормальних режимів роботи та швидкого відновлення після аварій.

Автоматичне повторне вмикання (АПВ): Забезпечує автоматичне повторне вмикання вимикачів ліній після їх відключення релейним захистом (наприклад, при короткочасних КЗ, що самоліквідуються). На підстанції може бути реалізовано одноразове або дворазове АПВ ліній 110 кВ, 35 кВ та 10 кВ.

Автоматичне включення резерву (АВР): У разі зникнення напруги на основному джерелі живлення або секції шин, АВР автоматично вмикає резервне джерело або резервну секцію, забезпечуючи безперебійне електропостачання споживачів. Це стосується живлення власних потреб, а також секціонування шин 35 кВ та 10 кВ.

Автоматичне регулювання напруги (АРН) трансформаторів: Контролює та підтримує заданий рівень напруги на шинах 35 кВ та 10 кВ шляхом керування пристроями РПН (регулювання під навантаженням) силових трансформаторів.

Автоматика керування компенсацією реактивної потужності: Керує роботою батарей статичних конденсаторів (БСК) для оптимізації реактивної потужності та підтримки напруги.

2.10 Розрахунок струмів короткого замикання на шинах підстанції

На рис. 2.2 зображено структурну схему ПС.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

Базисні умови для розрахунку:

$$S_6 = 1000 \text{ МВА};$$

$$U_{61} = 115 \text{ кВ}; \quad U_{62} = 37 \text{ кВ}; \quad U_{63} = 10,5 \text{ кВ}; \quad U_{64} = 6,3 \text{ кВ}.$$

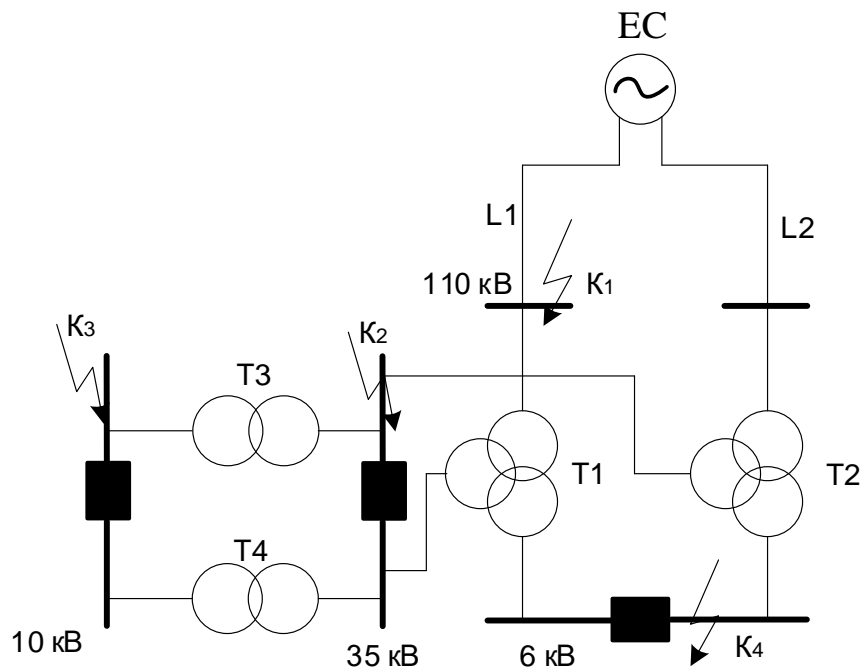


Рисунок 2.2 – Структурна схема ПС 110/35/10

Базисні струми:

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{61}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА};$$

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{62}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 15,6 \text{ кА};$$

$$I_{63} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{63}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,99 \text{ кА};$$

$$I_{64} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{64}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,64 \text{ кА}.$$

Визначимо опори, всі величини подані в відносних одиницях.

Опір енергосистеми:

$$X_c = 1 \text{ в.о.}$$

Дві лінії 110 кВ довжиною 10 км, індуктивний опір 0,4 Ом/км.

Опір ліній:

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$X_{Л1} = X_{Л2} = l \cdot x_0 \cdot \frac{S_6}{U_{CP}^2} = 10 \cdot 0,4 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,3 \text{ в.о.}$$

Розглянемо силові трансформатори Т-1 та Т-2.

Напруги КЗ 3-обмоткового трансформатора:

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (u_{K(B-C)} + u_{K(B-H)} - u_{K(C-H)}) = 0,5 \cdot (10,5 + 17,7 - 6,2) = 10,85\%;$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (u_{K(B-C)} + u_{K(C-H)} - u_{K(B-H)}) = 0,5 \cdot (10,5 + 6,2 - 17,4) = -0,35\% = 0;$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (u_{K(B-H)} + u_{K(C-H)} - u_{K(B-C)}) = 0,5 \cdot (17,4 + 6,2 - 10,5) = 6,55\%.$$

Опори обмоток:

$$X_{TB1} = X_{TB2} = \frac{u_{KB}}{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{10,85}{100} \frac{1000}{31,5} = 3,44 \text{ в.о.};$$

$$X_{TC1} = X_{TC2} = 0;$$

$$X_{TH1} = X_{TH2} = \frac{u_{KH}}{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{6,55}{100} \frac{1000}{31,5} = 2,08 \text{ в.о.}$$

Розглянемо силові трансформатори Т-3, Т-4.

Опір обмоток ТД-10000/35:

$$X_{T3} = X_{T4} = \frac{u_K}{100} \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{7,5}{100} \frac{1000}{10} = 7,5 \text{ в.о.}$$

На рис. 2.3 наведено схему заміщення ПС.

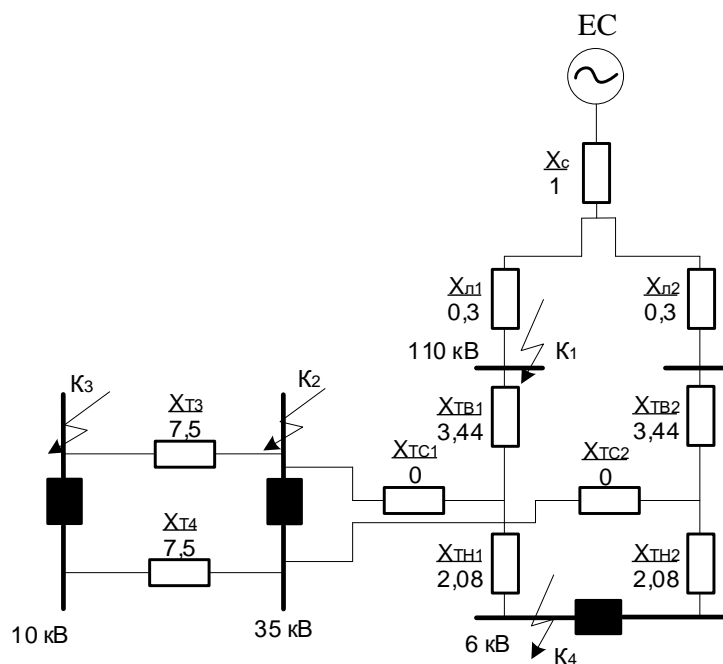


Рисунок 2.3 – Схема заміщення ПС

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

В нормальному режимі роботи СВ-35, 10 відключені.

Розрахуємо значення 3-фазного КЗ.

Проведемо спрощення до точок КЗ.

Для K_1 :

$$X_{E_K1} = X_c + X_{Л1} = 1 + 0,3 = 1,3 \text{ в.о.}$$

Для K_2 :

$$X_{E_K2} = X_c + X_{Л1} + X_{ТВ1} = 1 + 0,3 + 3,44 = 4,75 \text{ в.о.}$$

Для K_3 :

$$X_{E_K3} = X_c + X_{Л1} + X_{ТВ1} + X_{Т3} = 1 + 0,3 + 3,44 + 7,5 = 12,25 \text{ в.о.}$$

Для K_4 :

$$X_{E_K4} = X_c + X_{Л1} + X_{ТВ1} + X_{ТН1} = 1 + 0,3 + 3,44 + 2,08 = 6,83 \text{ в.о.}$$

Періодичні складові струмів КЗ:

$$I_{I0_K1} = \frac{E_c''}{X_{E_K1}} \cdot I_{61} = \frac{1}{1,3} \cdot 5,02 = 3,85 \text{ кА;}$$

$$I_{I0_K2} = \frac{E_c''}{X_{E_K2}} \cdot I_{62} = \frac{1}{4,75} \cdot 15,6 = 3,29 \text{ кА;}$$

$$I_{I0_K3} = \frac{E_c''}{X_{E_K3}} \cdot I_{63} = \frac{1}{12,25} \cdot 54,99 = 4,49 \text{ кА;}$$

$$I_{I0_K4} = \frac{E_c''}{X_{E_K4}} \cdot I_{64} = \frac{1}{6,83} \cdot 91,64 = 13,43 \text{ кА.}$$

Величини ударних струмів КЗ:

$$i_{y0_K1} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0_K1} = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot 3,85 = 8,78 \text{ кА;}$$

$$i_{y0_K2} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0_K2} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 3,29 = 8,46 \text{ кА;}$$

$$i_{y0_K3} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0_K3} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 4,49 = 11,56 \text{ кА;}$$

$$i_{y0_K4} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0_K4} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 13,43 = 34,55 \text{ кА.}$$

Величини повних струмів КЗ:

$$I_{I_K1} = I_{I0_K1} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 3,85 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2} = 5,09 \text{ кА;}$$

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

$$I_{II_K2} = I_{II0_K2} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 3,29 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,82 - 1)^2} = 5,03 \text{ кА};$$

$$I_{II_K3} = I_{II0_K3} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 4,49 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,82 - 1)^2} = 6,88 \text{ кА};$$

$$I_{II_K4} = I_{II0_K4} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 13,43 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,82 - 1)^2} = 20,56 \text{ кА}.$$

В табл. 2.14 зведено дані розрахунку струмів КЗ.

Таблиця 2.14 – Значення струмів КЗ на шинах підстанції

Місце КЗ	I_{n0} , кА	i_{y0} , кА	I_{II} , кА
К ₁	3,85	8,78	5,09
К ₂	3,29	8,46	5,03
К ₃	4,49	11,56	6,88
К ₄	13,43	34,55	20,56

Висновки по розділу 2

Виконано розгляд ключових аспектів підстанції 110/35/10 кВ, яка є центральним об'єктом нашого дослідження щодо автоматичного регулювання напруги.

Виконано опис схеми електричних з'єднань ПС 110/35/10 кВ, відзначивши її підключення до енергосистеми двома лініями 110 кВ за тупиковою схемою, що забезпечує необхідне резервування. Розглянуто три основні рівні напруги (110 кВ, 35 кВ, 10 кВ) та кількість відхідних ліній (18 на 10 кВ, 4 на 35 кВ), що підкреслює її роль як важливого розподільчого вузла. Схеми РУ 35 кВ та 10 кВ, виконані за принципом однієї секціонованої вимикачем системи шин, забезпечують високу надійність та гнучкість в експлуатації.

Наявність триобмоткових трансформаторів ТДТНГ-31500/110 свідчить про їхню ключову роль у зниженні напруги та розподілі значних потужностей. Також згадано трансформатори ТД-10000/35, які, слугують для додаткового зниження напруги 35/10 кВ або розвантаження основних трансформаторів.

Вибрано комутаційне обладнання на всіх рівнях напруги. На 110 кВ встановлені вимикачі ВД-110 та роз'єднувачі ОД-110/600 та РНДЗ-110/1000 із заземлюючими ножами, що забезпечує надійність керування та безпеку робіт. Для шин 35 кВ використовуються проводи АС-300, що гарантує необхідну струмову

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

пропускну здатність та механічну міцність. РУ 35 кВ обладнано масляними вимикачами ВМ-35/600 та роз'єднувачами РНДЗ-35/1000. На рівні 10 кВ застосовані сучасні комірки КРП з вакуумними вимикачами ВВ-10/630, що вирізняються компактністю, екологічністю та високим ресурсом.

Для захисту обладнання від перенапруги на всіх обмотках силових трансформаторів встановлені розрядники типів РВС-110, РВС-35 та РВП-10. Захист трансформаторів власних потреб (ТВП) та трансформаторів напруги (ТН) здійснюється за допомогою плавких запобіжників ПКТ-35, ПКТ-10.

Описані вимірювальні трансформатори (ТС типу ТВТ-110-100/5, ТВД-35-300/5, ТОЛ-10 та ТН типу ЗНОМ-35, НТМИ-10) є основою для вимірювальних приладів (амперметрів, вольтметрів, ватметрів, варметрів, лічильників електроенергії, частотомірів), що забезпечують постійний контроль параметрів мережі.

Розглянуто систему власних потреб підстанції, яка є критично важливою для живлення систем РЗА, освітлення, охолодження трансформаторів та іншого допоміжного обладнання. Живлення ВП забезпечується резервованими трансформаторами ТМ-100/10 та ТМ-400/10, що підключені до шин 10 кВ або 35 кВ та захищені запобіжниками.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

3 АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НА ПС 110/35/10 кВ

3.1. Вибір автоматичного регулятора напруги трансформатора

Для автоматичного регулювання напруги на трансформаторах з пристроями РПН (регулювання під навантаженням) на підстанції 110/35/10 кВ необхідно обрати сучасний мікропроцесорний регулятор. З огляду на вимоги до надійності, функціональності та можливостей інтеграції, пропонується використання регулятора РЗЛ-05.РПН виробництва компанії "РЕЛСІС" (Relsis), який є типовим представником сучасних пристроїв АРН.

РЗЛ-05.РПН — це мікропроцесорний пристрій, призначений для автоматичного керування приводом РПН силових трансформаторів. Він забезпечує підтримку заданого рівня напруги на контрольованих шинах шляхом зміни коефіцієнта трансформації.

Ключові функції та особливості РЗЛ-05.РПН:

Точне вимірювання напруги: Пристрій забезпечує високоточне вимірювання середньоквадратичного значення напруги на заданих шинах (через трансформатори напруги), що є основою для ефективного регулювання.

Реалізація алгоритмів регулювання:

Пряме регулювання: Підтримка заданої уставки напруги на контрольованих шинах (наприклад, 35 кВ або 10 кВ).

Компенсація падіння напруги в лінії (LDC): Це дозволяє компенсувати падіння напруги у живильній лінії, що відходить від підстанції, та підтримувати задану напругу безпосередньо у центрі навантаження або на кінці лінії. Регулятор враховує активний (R) та реактивний (X) опори лінії.

Адаптивні режими: Можливість використання різних наборів уставок (наприклад, для денного та нічного режимів, або залежно від сезону).

Системи блокування та захисти:

					141.ЕК1106.006.ДБ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Колесніков Я.С.			АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НА ПС 110/35/10 кВ	Лім.	Арк.	Аркуші
Перевір.		Хоменко О.В.					48	3
Н. Контр.		Шполянський О.Г.				КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-11		
Затв.		Марченко А. А.						

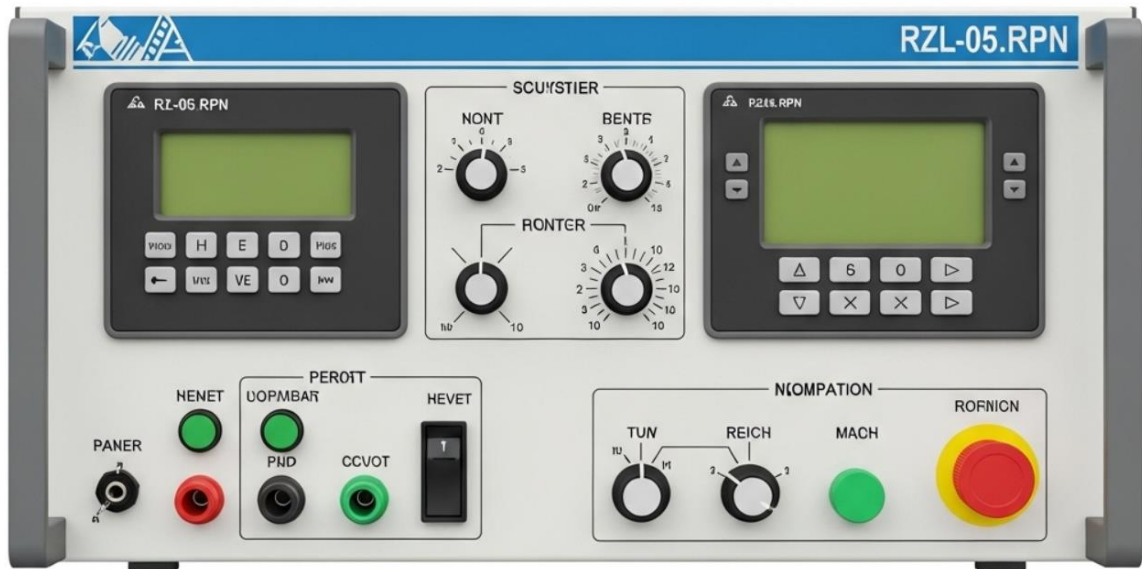


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд мікропроцесорного регулятора напруги РЗЛ-05.РПН

Блокування від частих перемикачів: Пристрій має налаштовувані затримки, що запобігають надмірному зносу механізму приводу РПН.

Блокування при короткому замиканні (КЗ): Забезпечується миттєве блокування операцій РПН за командою релейного захисту або при різкому зниженні напруги, що запобігає пошкодженню РПН під час аварійного режиму.

Блокування при виході РПН за граничні положення: Захищає механізм приводу від механічних пошкоджень.

Блокування при перевантаженні трансформатора.

Журналювання подій: Регулятор веде детальний журнал усіх операцій, спрацювань блокувань, аварійних подій та відхилень, що є цінним для аналізу роботи системи.

Самодіагностика: Постійний моніторинг власної працездатності.

Комунікаційні можливості: Підтримка стандартних протоколів зв'язку (наприклад, Modbus RTU через RS-485 або IEC 61850 через Ethernet) для легкої інтеграції в АСУ ТП та SCADA-системи для дистанційного моніторингу та керування.

Інтерфейс користувача: Наявність дисплея та кнопок для локального відображення параметрів та конфігурації.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

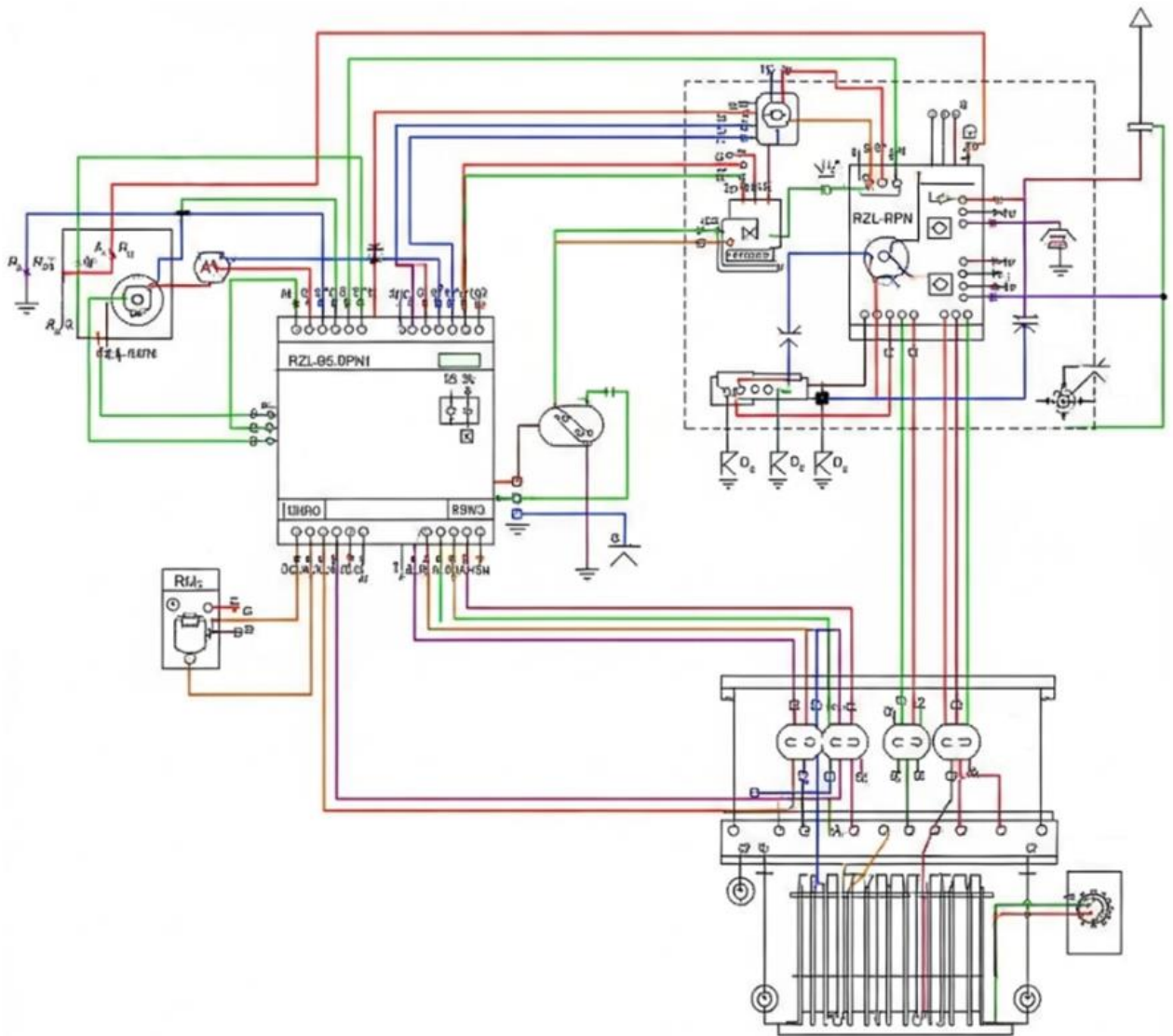


Рисунок 3.2 – Схема підключення РЗЛ-05.РПН до силового трансформатора з РПН

3.2 Уставки для пристрою захисту

Правильний вибір уставок для РЗЛ-05.РПН є ключовим для оптимізації роботи підстанції.

Уставка номінальної напруги ($U_{ном}$):

Визначається для шин, на яких відбувається регулювання. Зазвичай це шини 35 кВ або 10 кВ.

Для шин 35 кВ рекомендована уставка може бути 36,75 кВ (105% від 35 кВ), щоб забезпечити оптимальний профіль напруги для подальшої мережі.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Для шин 10 кВ уставка може бути встановлена на 10,5 кВ (105% від 10 кВ) або 10,8 кВ (108% від 10 кВ). Вибір залежить від розрахункового падіння напруги в розподільчій мережі 10 кВ, щоб забезпечити нормативну напругу в кінцевих споживачів.

Смуга нечутливості ($\Delta U_{нч}$):

Це діапазон напруги, в межах якого регулятор не активує перемикання РПН, що запобігає надмірним операціям.

Типові значення становлять 0,5% - 1,5% від номінальної напруги. Наприклад, для $U_{ном} = 10,5$ кВ, смуга нечутливості може бути встановлена $\pm 0,1$ кВ (приблизно 1%), тобто регулятор спрацює, якщо напруга вийде за межі 10,4 кВ або 10,6 кВ.

Часова затримка ($T_{затр}$):

Це витримка часу перед виконанням операції перемикання після того, як напруга вийшла за межі смуги нечутливості. Це необхідно для фільтрації короткочасних коливань напруги.

Типові значення коливаються від 30 до 120 секунд. Вибір залежить від динаміки навантажень та інерційності мережі.

Параметри компенсації падіння напруги в лінії (LDC):

При використанні функції LDC необхідно точно задати активний (R) та реактивний (X) опори лінії, що живиться від даного трансформатора (наприклад, для лінії 10 кВ). Ці значення отримуються з розрахунків лінії.

Також може задаватися коефіцієнт компенсації (зазвичай від 50% до 100%) для тонкого налаштування.

Алгоритм регулювання:

Для підстанції 110/35/10 кВ найоптимальнішим є пряме регулювання з активованою функцією LDC на стороні 10 кВ, що забезпечує якісну напругу безпосередньо у центрі споживання.

При паралельній роботі трансформаторів, РЗЛ-05.РПН підтримує функції координації роботи, такі як "Майстер-Ведений" (Master-Follower) або спільний LDC-режим для забезпечення рівномірного навантаження та уникнення конфліктів у регулюванні.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

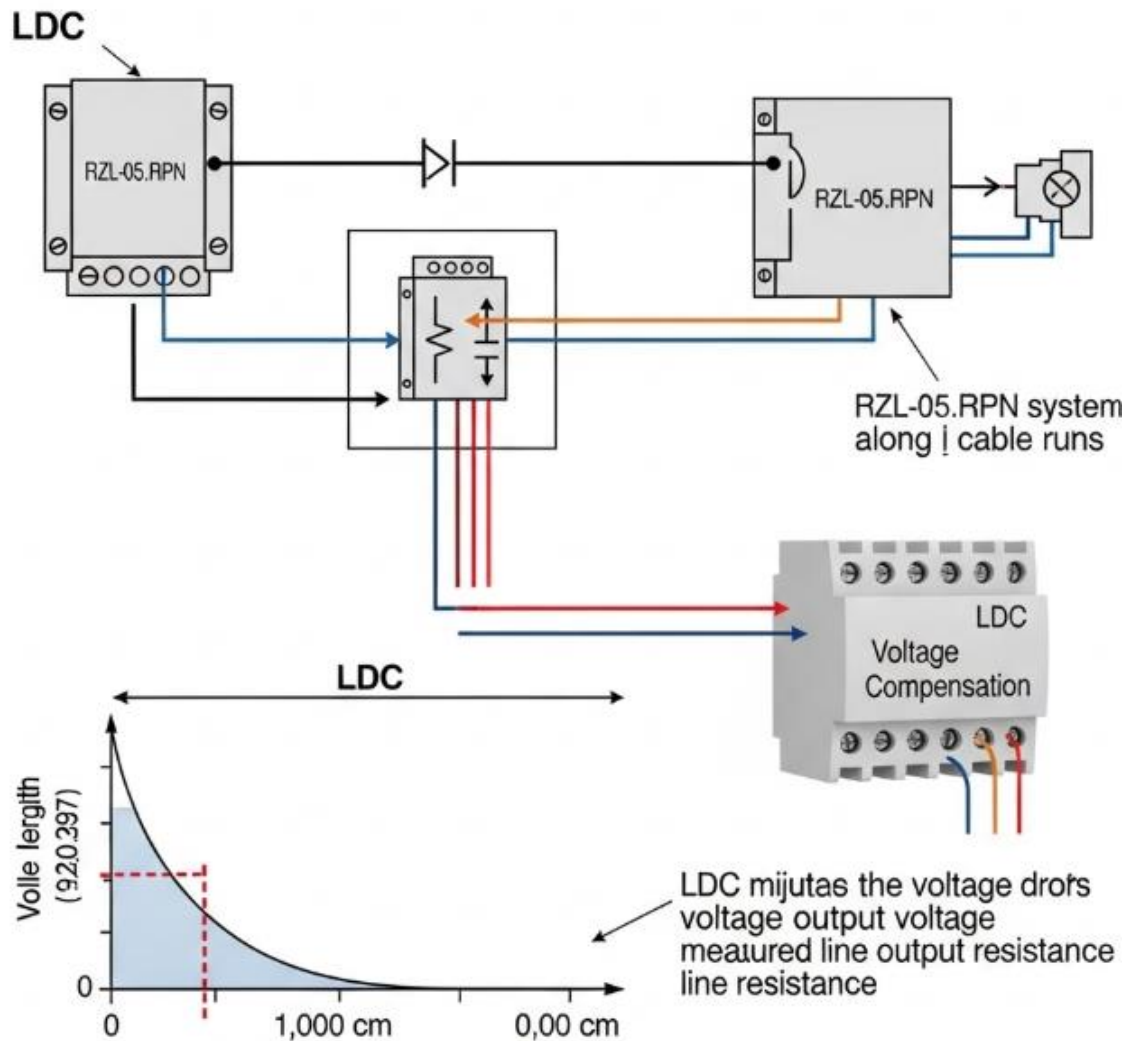


Рисунок 3.3 – Принцип реалізації компенсації падіння напруги в лінії (LDC)

3.3 Координація АРН з іншими засобами регулювання

Ефективне АРН на підстанції потребує тісної координації роботи РЗЛ-05.РПН з іншими елементами енергосистеми:

Батареї статичних конденсаторів (БСК): Автоматика керування БСК повинна бути узгоджена з АРН. Зазвичай БСК активуються першими для компенсації реактивної потужності та стабілізації напруги. АРН РПН втручається лише при недостатності можливостей БСК.

Інші трансформатори: Якщо на підстанції є декілька трансформаторів з РПН, що працюють паралельно, їхні регулятори РЗЛ-05.РПН мають бути налаштовані для спільної роботи (наприклад, у режимі "Майстер-Ведений") для уникнення коливань напруги та забезпечення оптимального розподілу навантаження.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

3.4 Перспективи розвитку та інтеграції

Інтеграція РЗЛ-05.РПН у ширші системи керування є ключовим напрямком розвитку "розумних мереж":

SCADA-системи: Повний дистанційний контроль, моніторинг усіх параметрів регулятора, збір статистичних даних та віддалене керування операціями АРН.

Системи Volt/Var Optimization (VVO) / Volt/Var Control (VVC): РЗЛ-05.РПН може стати керованим елементом у централізованих системах VVO/VVC, які оптимізують профілі напруги та потоки реактивної потужності по всій розподільчій мережі, отримуючи команди для досягнення глобальних цілей оптимізації (наприклад, мінімізація втрат, підвищення якості напруги).

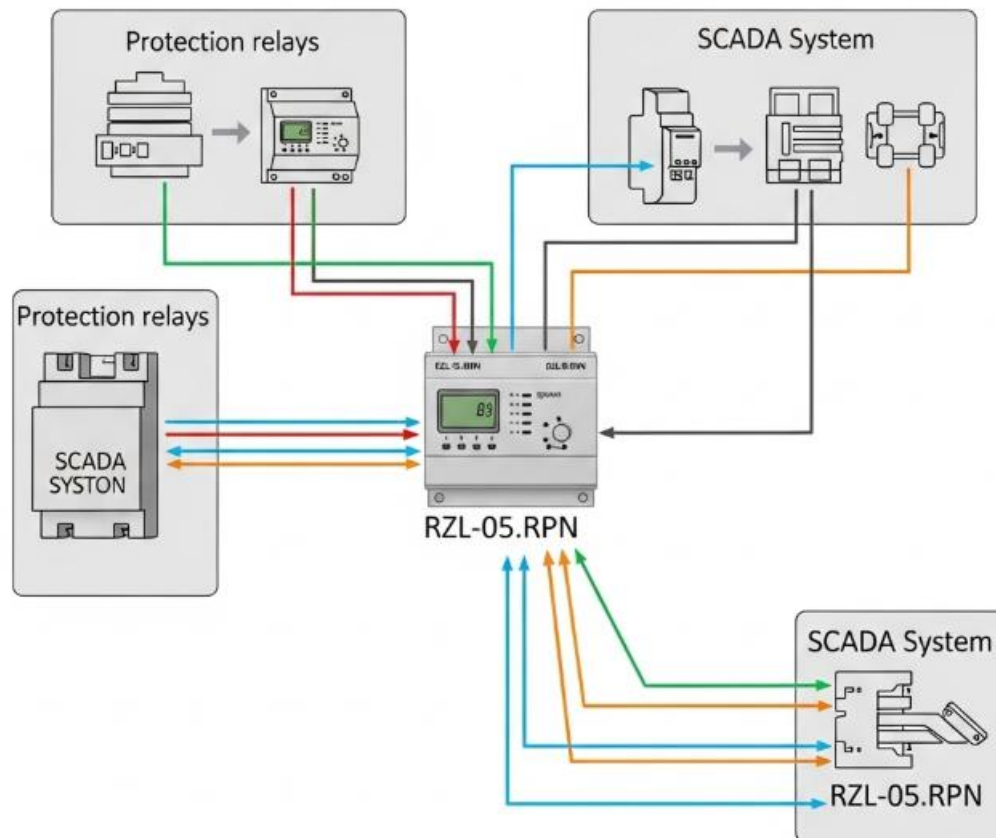


Рисунок 3.4 – Взаємодія АРН РЗЛ-05.РПН з іншими системами підстанції
(концептуальна схема)

Такий комплексний підхід до автоматичного регулювання напруги на підстанції 110/35/10 кВ забезпечить її стабільну, безпечну та економічну роботу, враховуючи динаміку сучасних енергетичних систем.

Висновки до розділу 3

Для ефективного автоматичного регулювання напруги (АРН) на підстанції 110/35/10 кВ доцільно використовувати сучасний мікропроцесорний регулятор РЗЛ-05.РПН.

Було детально розглянуто його ключові функції, включаючи точне вимірювання напруги та реалізацію алгоритмів прямого регулювання та компенсації падіння напруги в лінії (LDC). Описано інтегровані системи блокування та захисту від частих перемикань та під час коротких замикань.

Обґрунтовано вибір уставок регулювання (номінальна напруга, смуга нечутливості, часова затримка, параметри LDC), що є критичним для якості напруги та мінімізації зносу обладнання.

Також підкреслено важливість координації роботи АРН з іншими засобами, такими як батареї статичних конденсаторів (БСК), та узгодження роботи регуляторів при паралельній роботі трансформаторів.

Розглянуто перспективи інтеграції РЗЛ-05.РПН у SCADA-системи та майбутні системи Volt/Var Optimization (VVO), що забезпечить глобальну оптимізацію параметрів мережі.

Розділ обґрунтував вибір сучасного пристрою АРН, описав принципи його функціонування та налаштування, що є ключовим для забезпечення стабільного та якісного електропостачання від підстанції 110/35/10 кВ.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

Підтримка стабільного рівня напруги є фундаментальною вимогою до якості електричної енергії, як це визначено у ДСТУ EN 50160.

Основним засобом регулювання напруги на підстанціях є силові трансформатори, обладнані пристроями РПН (регулювання під навантаженням). Ми розглянули принцип їхньої роботи, ключові компоненти (вибір відпайок, контактор, привід) та вимоги до них.

Розміщення РПН на стороні 35 кВ або 10 кВ знижувальних трансформаторів 110/35/10 кВ є оптимальним рішенням з урахуванням техніко-економічних показників та необхідності підтримки напруги для кінцевих споживачів. Допоміжними засобами регулювання є батареї статичних конденсаторів (БСК), що дозволяють компенсувати реактивну потужність та зменшувати втрати, а їхня робота має бути координована з РПН.

Сучасні автоматичні регулятори напруги (АРН) відрізняються високою швидкістю, чутливістю, надійністю та гнучкістю налаштувань. Вони використовують різноманітні алгоритми регулювання, включаючи пряме, зворотне, компенсацію падіння напруги в лінії (LDC), а також адаптивні та інтелектуальні алгоритми для мінімізації перемикань РПН. Важливою особливістю є інтеграція АРН в АСУ ТП та SCADA-системи для дистанційного керування та моніторингу, а також наявність функцій блокування та захисту від частих перемикань, перевантажень та відмови трансформатора.

Особливу увагу було приділено взаємодії АРН з іншими елементами мережі. Ми наголосили на важливості координації з релейним захистом, зокрема необхідності блокування регулятора при КЗ для забезпечення швидкого та безпечного відключення пошкоджень. Крім того, розглянуто вплив розподіленої генерації (СЕС, ВЕС), яка створює виклики у вигляді зворотних потоків потужності та швидких коливань напруги.

Виконано розгляд ключових аспектів підстанції 110/35/10 кВ, яка є центральним об'єктом нашого дослідження щодо автоматичного регулювання напруги.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Виконано опис схеми електричних з'єднань ПС 110/35/10 кВ. Наявність триобмоткових трансформаторів ТДТНГ-31500/110 свідчить про їхню ключову роль у зниженні напруги та розподілі значних потужностей. Також згадано трансформатори ТД-10000/35, які, слугують для додаткового зниження напруги 35/10 кВ або розвантаження основних трансформаторів.

Вибрано комутаційне обладнання на всіх рівнях напруги. На 110 кВ встановлені вимикачі ВД-110 та роз'єднувачі ОД-110/600 та РНДЗ-110/1000 із заземлюючими ножами, що забезпечує надійність керування та безпеку робіт. Для шин 35 кВ використовуються проводи АС-300, що гарантує необхідну струмову пропускну здатність та механічну міцність. РУ 35 кВ обладнано масляними вимикачами ВМ-35/600 та роз'єднувачами РНДЗ-35/1000. На рівні 10 кВ застосовані сучасні коміртки КРП з вакуумними вимикачами ВВ-10/630, що вирізняються компактністю, екологічністю та високим ресурсом.

Для ефективного автоматичного регулювання напруги (АРН) на підстанції 110/35/10 кВ доцільно використовувати сучасний мікропроцесорний регулятор РЗЛ-05.РПН.

Було детально розглянуто його ключові функції, включаючи точне вимірювання напруги та реалізацію алгоритмів прямого регулювання та компенсації падіння напруги в лінії (LDC). Описано інтегровані системи блокування та захисту від частих перемикань та під час коротких замикань.

Обґрунтовано вибір уставок регулювання (номінальна напруга, смуга нечутливості, часова затримка, параметри LDC), що є критичним для якості напруги та мінімізації зносу обладнання.

Також підкреслено важливість координації роботи АРН з іншими засобами, такими як батареї статичних конденсаторів (БСК), та узгодження роботи регуляторів при паралельній роботі трансформаторів.

Розглянуто перспективи інтеграції РЗЛ-05.РПН у SCADA-системи та майбутні системи Volt/Var Optimization (VVO), що забезпечить глобальну оптимізацію параметрів мережі.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Васильєв Г. Г. Автоматизація та релейний захист в енергетиці: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 312 с.
2. Жуков В. А. Релейний захист і автоматика електричних систем : підручник. Харків : НТУ «ХП», 2018. 420 с.
3. Кісельов А. С., Муха А. М. Електричні мережі та системи : підручник. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2022. 510 с.
4. Малиновський В. Г. Експлуатація електричних підстанцій: навч. посіб. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 280 с.
5. Постанови НКРЕКП про затвердження Кодексу систем розподілу. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=14603> (дата звернення: 06.06.2025).
6. РЕЛСІС. Регулятор напруги для трансформаторів з РПН РЗЛ-05.РПН. URL: <https://reلسis.ua/products/rzl-05-rpn/> (дата звернення: 06.06.2025).
7. Чорний О. П. Автоматизація енергетичних систем: підручник. Київ : НАУ, 2021. 380 с.
8. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014. 58 с. (Національний стандарт України). Неклепаєв Б.М. Електрична частина електростанцій. - М.: "Енергія", 1976. - 552 с.
9. Б. Н. Неклепаєв та І. П. Крючков, Електрична частина електростанцій та підстанцій: Довідкові матеріали для курсового та дипломного проектування, "Енергоатоміздат", 1989.
10. Бардик Є. І., Безбереж'єв Ю. В. Перехідні електромагнітні процеси в електроенергетичних системах: Методичні вказівки. – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2013. – 33 с.
11. Рішення АББ для розподільчих мереж. URL: <https://new.abb.com/docs/librariesprovider25/catalogues/abb-build-ready-1.pdf?sfvrsn=2>
12. UniGear ZS3.2 metal-enclosed switchgear. URL: https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1_YHD000000A0993&Language-Code=en&DocumentPartId=&Action=Launch

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		57

13. Бердник В. А. Автоматичні регулятори напруги та їх застосування в електричних мережах : монографія. Одеса: ОНПУ, 2017. 250 с.
14. Високовольтне обладнання : довідник / за ред. І. С. Іванова. Київ : Техніка, 2015. 650 с.
15. Гаврилов О. М. Релейний захист і автоматика електричних станцій та підстанцій: підручник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 360 с.
16. Енергосистеми та мережі : підручник / за ред. В. А. Світличного. Київ: Вища школа, 2016. 480 с.
17. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Харків: Форт, 2020. 736 с.
18. Трансформатори силові. Загальні технічні умови : ДСТУ 3463-96. Київ: Держстандарт України, 1996. 72 с.

					141.ЕК1106.006.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58