



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**Кафедра електричних мереж та систем
Кафедра англійської мови технічного спрямування №1**

В.В. КИРИК, Т.Б. МАСЛОВА

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

РЕЖИМИ РОБОТИ РОЗІМКНЕНИХ МЕРЕЖ

**ELECTRICAL POWER NETWORKS AND
SYSTEMS**

OPERATION MODES OF OPEN NETWORKS

Навчальний посібник

для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців спеціальності

141 “Енергетика, електротехніка та електромеханіка”

Затверджено методичною радою НТУУ «КПІ»

**Київ
«Політехніка»**

2015

Електричні мережі та системи. Режими роботи розімкнених мереж. = Electrical power networks and systems. Operation modes of open networks: навч. Посіб./ В.В. Кирик, Т.Б. Маслова. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 256с.

ISBN 978-966-622-737-2

В посібнику українською та англійською мовами представлені основні відомості про електричні мережі та системи, конструкції ліній електропередавання, схеми заміщення ліній електропередавання повітряного і кабельного виконання та трансформаторів, втрати потужності та енергії в електричній системі, розрахунок режимів роботи розімкнених електричних мереж. Детально розглянуто поздовжні та поперечні параметри схем заміщення ліній електропередавання.

Для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців спеціальності 141 “Енергетика, електротехніка та електромеханіка”

В пособии на украинском и английском языках представлены основные сведения об электрических сетях и системах, конструкциях линий электропередачи, схемах замещения линий электропередачи воздушного и кабельного выполнения и трансформаторов, потерях мощности и энергии в электрической системе, расчете режимов работы разомкнутых электрических сетей. Детально рассмотрены продольные и поперечные параметры схем замещения линий электропередачи.

Для студентов всех форм обучения и студентов-иностранцев специальности 141 “Энергетика, электротехника та електромеханіка”

The textbook contains the general information on electrical networks and systems, design of power transmission lines, equivalent circuits of overhead and cable power transmission lines, transformer equivalent circuits, power losses and energy losses in the electric system, and calculation of operation modes of open electrical networks. Longitudinal and transversal parameters of power transmission line equivalent circuits are considered in detail. All the facts are presented both in Ukrainian and English.

The textbook is intended for full-time and part-time students as well as foreign students acquiring speciality 141 “Power Engineering, Electrical Engineering and Electrotechnology”.

Укладач: *В.В. Кирик, д-р техн. наук, професор*
Т.Б. Маслова, викладач

Відповідальний редактор: *В.М. Сулейманов, канд. техн. наук, професор*

Рецензенти: *О.В. Кириленко, академік НАН України, д-р техн. наук,
професор, директор Інституту
електродинаміки НАН України*
*В.В. Павловський, д-р техн. наук, ст. наук. співр., провідний
науковий співробітник відділу автоматизації
енергосистем ІЕД НАН України*
І.П. Волощук, канд. пед. наук, доцент

ISBN 978-966-622-737-2

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКЦІЇ, СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТА ПАРАМЕТРИ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ	11
Тема 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ	11
1.1 Основні задачі та поняття в області передавання електричної енергії.....	11
1.2 Номінальні напруги устаткування електричних систем.....	17
1.3 Призначення електричних мереж.....	23
1.4 Вимоги до електричних мереж.....	25
1.5 Класифікація електричних мереж.....	31
1.6 Режими роботи нейтралі.....	37
Тема 2 КОНСТРУКЦІЇ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ	49
1.7 Основні відомості про повітряні та кабельні лінії електропередавання.....	49
Тема 3 СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ПОВІТРЯНОГО І КАБЕЛЬНОГО ВИКОНАННЯ	67
1.8 Параметри схем заміщення ЛЕП.....	67
Тема 4 ПОЗДОВЖНІ ПАРАМЕТРИ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ ЛЕП	75
1.9 Активний опір лінії електропередавання.....	75
1.10 Індуктивний опір лінії електропередавання.....	79
Тема 5 ПОПЕРЕЧНІ ПАРАМЕТРИ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ ЛЕП	87
1.11 Активна поперечна провідність лінії електропередавання.....	87
1.12 Ємнісна провідність лінії електропередавання.....	93
Тема 6 СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	97
1.13 Параметри схем заміщення двообмоткових силових трансформаторів.....	97
1.14 Однолінійні схеми заміщення триобмоткових силових трансформаторів.....	111
1.15 Триобмоткові трансформатори із скороченими обмотками.....	117
1.16 Силові трансформатори з розщепленими обмотками.....	123
1.17 Силові автотрансформатори.....	127
РОЗДІЛ 2 РЕЖИМИ РОБОТИ РОЗІМКНЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПРИ ПЕРЕДАВАННІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	139
Тема 7 ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	139
2.1 Електричні станції.....	139

CONTENTS

INTRODUCTION	8
PART 1 DESIGNS, EQUIVALENT CIRCUITS AND PARAMETERS OF POWER TRANSMISSION LINES	12
Chapter 1 GENERAL INFORMATION ON ELECTRICAL POWER NETWORKS AND SYSTEMS.....	12
1.1 The basic tasks and concepts of electric power transmission.....	12
1.2 Rated voltages of electric system equipment.....	18
1.3 Application of electrical power networks.....	24
1.4 Requirements for electrical power networks.....	26
1.5 Classification of electrical power networks.....	32
1.6 Operation modes of neutral conductor.....	38
Chapter 2 DESIGNS OF POWER TRANSMISSION LINES.....	50
1.7 The basic facts of overhead and cable power transmission lines.....	50
Chapter 3 EQUIVALENT CIRCUITS OF OVERHEAD AND CABLE POWER TRANSMISSION LINES.....	68
1.8 Parameters of power transmission line equivalent circuits.....	68
Chapter 4 LONGITUDINAL PARAMETERS OF POWER TRANSMISSION LINE EQUIVALENT CIRCUITS.....	76
1.9 Pure resistance of power transmission lines	76
1.10 Inductive reactance of power transmission lines	80
Chapter 5 TRANSVERSAL PARAMETERS OF POWER TRANSMISSION LINE EQUIVALENT CIRCUITS.....	88
1.11 Active transversal conductance of power transmission lines.....	88
1.12 Capacitive susceptance of power transmission lines.....	94
Chapter 6 EQUIVALENT CIRCUITS OF POWER TRANSFORMERS.....	98
1.13 Parameters of two-winding power transformer equivalent circuits.....	98
1.14 Single-line equivalent circuits of three-winding power transformers.....	112
1.15 Three-winding transformers with reduced windings.....	118
1.16 Power transformers with split windings.....	124
1.17 Power autotransformers.....	128
PART 2 OPERATION MODES OF OPEN ELECTRICAL POWER NETWORKS IN THE TRANSMISSION OF ELECTRIC ENERGY.....	140
Chapter 7 SOURCES OF ELECTRIC ENERGY.....	140
2.1 Power plants.....	140

2.2 Джерела активної потужності.....	160
2.3 Джерела реактивної потужності.....	163
Тема 8 СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	171
2.4 Характеристики споживачів електроенергії.....	171
2.5 Визначення кількості енергії, що передається по електричній мережі протягом року.....	183
2.6 Участь електростанцій різних типів у покритті графіків навантаження.....	191
Тема 9 ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ.....	195
2.7 Загальна характеристика втрат потужності в електричних мережах.....	195
2.8 Визначення втрат потужності в лініях електропередавання.....	199
2.9 Визначення втрат потужності в силових трансформаторах та автотрансформаторах.....	203
2.10. Втрати енергії в електричних мережах.....	207
Тема 10 РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РОБОТИ РОЗІМКНЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	221
2.11 Розрахунок навантажень підстанції та електростанції на шинах високої напруги.....	221
2.12 Потужності початків, кінців та середньолінійна потужність ділянок електричної мережі.....	229
2.13 Розрахунок режиму напруги в електричній мережі.....	231
2.14 Визначення напруги на ділянках схеми мережі в електротехнічних розрахунках.....	237
2.15 Алгоритм розрахунку режиму роботи розімкненої схеми мережі.....	241
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	251

2.2 Sources of active power	160
2.3 Sources of reactive power	164
Chapter 8 ELECTRIC LOADS	172
2.4 Characteristics of electric loads.....	172
2.5 Determination of the quantity of power transmitted in the electrical network over a year.....	184
2.6 Contribution of power plants of different types into load-factoring.....	192
Chapter 9 POWER LOSSES AND ENERGY LOSSES IN THE ELECTRIC SYSTEM	196
2.7 General characteristics of power losses in electrical networks.....	196
2.8 Determination of power losses in power transmission lines	200
2.9 Determination of power losses in power transformers and autotransformers	204
2.10 Energy losses in electrical networks.....	208
Chapter 10 CALCULATION OF OPERATION MODES OF OPEN ELECTRICAL NETWORKS	222
2.11 Load calculation for substations, and high-voltage bus power plants.....	222
2.12 Power of the sending end, receiving end, and middle sections of electrical network.....	230
2.13 Calculation of voltage characteristics in the electrical network.....	232
2.14 Determination of voltage in network diagram sections by electrical engineering calculations.....	238
2.15 Algorithm of calculating the operation mode of open network diagram	242
REFERENCES	252

ВСТУП

Предмет навчальної дисципліни «Електричні мережі та системи» ґрунтується на прищепленні у студентів знань з проектування технічних об'єктів, виконання техніко-економічних обґрунтувань інженерних рішень; застосовуванні сучасних методів аналізу і розрахунку електричних мереж різних класів номінальних напруг, що об'єднують такі об'єкти на паралельну роботу; обґрунтованні вибору ефективних методів інженерних розрахунків та проведенню досліджень і аналізу отриманих результатів; ефективному використовуванню сучасних інтелектуальних, інформаційних комп'ютерно-інтегрованих технологій; виконанні проектно-конструкторської документації згідно з нормативними вимогами. Метою дисципліни є формування у студентів уявлень про процеси передавання, перетворення, розподіл та споживання електричної енергії, конструктивне виконання та технологічне устаткування електричних мереж, робочі режими, регулювання і планування режимів електричних систем, проектування електричних мереж тощо.

Вивчення дисципліни «Електричні мережі та системи» ґрунтується на знаннях, отриманих студентами під час вивчення основних дисциплін циклу професійної та практичної підготовки, таких як «Фізика», «Вища математика та математичний аналіз», «Теоретична електротехніка», «Основи метрології та електричних вимірювань», «Електричні машини», «Математичні задачі енергетики», «Економіка» та інші. Разом з тим дисципліна «Електричні мережі та системи» тісно пов'язана з іншими дисциплінами професійно-технічної підготовки, які опираються на неї та вивчаються паралельно або після вивчення даної дисципліни. Зокрема це такі дисципліни як «Регулювання режимів електричних систем», «Математичне моделювання електричних систем», «Перехідні процеси в електричних системах», «Релейний захист та автоматика електричних систем», «Електричні станції», «Спеціальні питання передавання електричної енергії», «Моделі оптимального розвитку електричних систем», «Питання надійності електричних систем», «Теорія автоматичного керування», «Основи проектування механічної частини ліній електропередавання», «Проектування електричних мереж» та інші.

Задачами вивчення дисципліни «Електричні мережі та системи» є глибоке оволодіння фізикою процесів передавання електричної енергії в електричних мережах та системах, вільне та переконливе володіння аналізом технологічного процесу виробництва, передавання, перетворення та розподілу електричної енергії.

Практичне спрямування дисципліни «Електричні мережі та системи» ґрунтується на реалізації вимог до підготовки кадрів, встановлених освітньо-кваліфікаційною характеристикою фахівця за спеціальністю «Електричні системи і мережі», націлених на розв'язання основних передпроектних, технологічних, експлуатаційних, економічних і конструкторських задач, які виникають під час проектування і експлуатації електричних мереж і систем різних класів номінальної напруги.

INTRODUCTION

The subject matter of the academic course «Electrical power networks and systems» is focused on enabling students to acquire knowledge and skills of designing technical installations, performing feasibility reports on engineering solutions, applying modern methods of analysis and calculation of electrical networks of different rated voltage levels, which combine the installations for parallel operation, justifying the selection of effective methods of engineering design, conducting research and analysis of the results obtained, making the best use of the modern intellectual, informational computer-integrated technologies, and preparing project and design documentation according to the standards. The objective of the course is for students to gain understanding of the processes of transmission, transformation, distribution, and consumption of electric energy, construction and processing equipment of electrical networks, operation modes, regulation and planning of operating conditions of electrical power systems, design of electrical networks, and so forth.

Doing the course «Electrical power networks and systems» requires the knowledge acquired by students during their studying the basic subjects of a cycle of professional and practical training, such as "Physics", «Higher mathematics and mathematical analysis», «Theoretical electrical engineering», «Fundamentals of metrology and electrical measurements», «Electric machines», «Mathematical tasks of power engineering», "Economics" and some others. At the same time the course «Electrical power networks and systems» is closely connected with other subjects of professional training, which rely upon it, and are studied simultaneously or afterwards. In particular, these are such subjects as «Modes regulation of electric systems», «Mathematical modelling of electric systems», «Transient processes in electric systems», «Relay protection and automation of electric systems», «Power plants», «Special problems of power transmission», «Models of optimum development of power systems», «Problems of power system reliability», «Automatic control theory», «Fundamentals of design of mechanical parts of power transmission lines», «Design of electrical networks» and others.

The tasks of studying the course «Electrical power networks and systems» involve mastering the essence of physical processes of power transmission in electrical networks and systems, and becoming able readily and with confidence to carry out the analysis of technological processes of generation, transmission, transformation and distribution of electricity.

The practical aspects of the course «Electrical power networks and systems» are determined by meeting the standards to professional training, adopted by the educational qualifying characteristics of the specialist in the area «Electric power nsystems and networks», which are aimed at the solution of preconstruction, technological, operational, economic and design problems, which arise in the design and maintenance of electrical networks, and power systems of different rated voltage levels.

Технологічне спрямування дисципліни «Електричні мережі та системи» повинне озброїти студента сучасними математичними засобами аналізу і синтезу структур і топології електричних мереж, моделювання усталених і після аварійних режимів, знаннями новітніх методів, засобів і способів формування керуючих впливів на режими роботи систем з метою вибору оптимальної стратегії управління режимами виробництва, передавання, перетворення і розподілу електричної енергії, можливістю розробки і впровадження в практику експлуатації засобів удосконалення цього процесу, дієвими засобами зниження технологічних втрат енергії в усіх ступенях ієрархії електричної системи, засобам постановки експерименту в області електричних мереж і систем, оцінювання похибки і вірогідності отриманих результатів, критичного їх осмислення і аналізу, прийняттю оптимальних рекомендацій.

Інженерне спрямування дисципліни «Електричні мережі і системи» покликане прищепити студенту уміння і навички інженера-технолога, експлуатаційника, проектувальника і конструктора, які відповідають в повному обсязі їхнім виробничим функціям, тобто інженера, спроможного приймати самостійні творчі рішення під час проектування, конструювання і налагодження устаткування електричних мереж. Ці навички і уміння дозволять молодому спеціалісту активно брати участь в рішенні проблем оптимального управління і регулювання режимів роботи електричних мереж і систем, в синтезі оптимальних схем побудови конфігурації електричної мережі, виборі оптимальних режимів роботи силового обладнання мережі та практичній роботі з ним тощо.

Посібник містить матеріали лекцій першого кредитного модуля «Розрахунки режимів роботи розімкнених електричних мереж» дисципліни «Електричні мережі та системи», який складається з двох розділів, що містять шість змістовних модулів: «Основні поняття про електричні мережі та системи», «Конструкції, характеристики, схеми заміщення найпростіших електричних мереж», «Параметри схем заміщення елементів електричних мереж і їх розрахунок», «Основні поняття про джерела активної та реактивної енергії», «Основні поняття про споживачів електричної енергії та їх характеристики», «Втрати потужності в електричній мережі та режими роботи розімкненої електричної мережі».

Під час підготовки посібника використано методичні розробки та матеріали по темі «Розрахунок режимів роботи розімкнених електричних мереж» професора кафедри електричних мереж та систем НТУУ «КПІ» Сулейманова В.М.

The technology-oriented course «Electrical power networks and systems» will familiarize students with modern mathematical techniques of analysis and synthesis of structures, and topology of electrical networks, of modelling of steady-state and post-emergency conditions, will give the knowledge of the newest methods, means and techniques of controlling the modes of system operation in order to select an optimal strategy of regulating generation, transmission, transformation and distribution of electricity, will enable them to develop and implement techniques of improving this process, effective means of reducing energy losses in all the links of electrical system hierarchy, facilities of carrying out experiments in the field of electrical networks and power systems, estimation of error and reliability, critical judgement and analysis of the results obtained, and adoption of optimum recommendations.

The engineering-oriented course «Electrical power networks and systems» is intended to develop skills of industrial engineer, maintenance engineer, and designer engineer, which would allow fulfilling production functions at full, that is being an engineer capable of finding independently some creative solutions when designing, constructing, and setting-up the equipment of electrical networks. These skills and abilities will allow the young specialist to take an active part in finding the solution to problems of optimum control and regulation of operation modes of electrical networks and power systems, in doing synthesis of optimum circuit designs of system configuration, in selecting the best behaviours of the network power equipment, in operating it in practice, and so forth.

The textbook contains materials of lectures of the first credit module «Calculation of operation modes of open electrical networks» of the «Electrical power networks and systems» course, consisting of two sections, which comprise six instructive modules: «The basic concepts of electrical networks and systems», «Designs, characteristics, and equivalent circuits of the most simple electrical networks», «Parameters of electrical network element equivalent circuits, and calculation of the equivalent circuits», «The basic concepts of the sources of active and reactive power», «The basic concepts of electric loads, and their characteristics», «Power losses in the electrical network, and operation modes of open electrical network».

In preparing the textbook the learner's guides and methodological materials on the subject «Calculation of operation modes of open electrical networks» by V. N. Sulejmanov, professor of the electrical networks and systems department of NTUU "KPI", were used.

РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКЦІЇ, СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТА ПАРАМЕТРИЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Тема 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

1.1 ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ТА ПОНЯТТЯ В ОБЛАСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Будь-яка електроенергетична система складається з електричних станцій для вироблення електричної енергії; мереж магістральних та районних ліній електропередавання для передавання електричної енергії на віддалену відстань; вузлових підстанцій для поєднання ліній електропередавання у складі електричної мережі та перетворення електричної енергії між різними ступенями номінальної напруги; розподільчих електричних мереж для розподілу електричної енергії між споживачами. З техніко-економічних міркувань всі електростанції, які розташовані в одному регіоні, з'єднуються між собою для паралельної роботи на загальне навантаження за допомогою ЛЕП різного класу напруги. Об'єднання відрізняється спільністю режиму та безперервністю процесу виробництва, розподілу і споживання теплової та електричної енергії.

Енергетичною системою (енергосистемою) називають сукупність електричних станцій, електричних та теплових мереж, сполучених між собою і пов'язаних спільністю режиму в безперервному процесі виробництва, перетворення і розподілу електричної енергії і теплоти при загальному управлінні цим режимом (рис.1.1).

Електроенергетичною (електричною) системою називають електричну частину енергосистеми, тобто сукупність електроустановок електричних станцій (без первинних двигунів) і електричних мереж енергосистеми, та приймачів електричної енергії, які живляться від неї, поєднані спільністю процесу виробництва, передавання, перетворення, розподілу і споживання електричної енергії(рис.1.2).

Приймачем електричної енергії (електроприймачем) називають апарат, агрегат, механізм, призначений для перетворення електричної енергії в інший вигляд енергії.

Споживачем електричної енергії називають електроприймач або групу електроприймачів, об'єднаних загальним технологічним процесом та розміщених на певній території.

PART 1
DESIGNS, EQUIVALENT CIRCUITS AND PARAMETERS
OF POWER TRANSMISSION LINES

Chapter 1 GENERAL INFORMATION ON ELECTRICAL
NETWORKS AND SYSTEMS

1.1 THE BASIC TASKS AND CONCEPTS OF ELECTRIC POWER
TRANSMISSION

An electrical power system consists of power plants, which generate electric energy; networks of backbone transmission and single-area subtransmission lines, designed for transmitting electric power over long distances; central substations, intended for connecting power transmission lines into part of the electrical network, and transforming electric power between different levels of rated voltage; and distribution electrical networks required for distribution of electricity between electric loads and power consumers. For technical and economic reasons all power plants located in the same area are interconnected for parallel operation at the common load by power lines of different voltage levels. The interconnected power plants are characterized by common operation conditions, and a continuous process of generation, distribution and consumption of thermal and electric energy.

The power system (power supply system) refers to a number of power plants, electrical and thermal networks which are coupled to one another, and interconnected by similar conditions of continuous generation, transformation, and distribution of electricity and heat under the common operational control (Fig. 1.1).

The electric power system (power grid) is an electric part of the power system, comprising a number of electrical installations of power plants (except for prime movers), electrical networks of the power system, and receivers of the electric energy supplied from it, interconnected by a common process of generation, transmission, transformation, distribution and consumption of electric energy (Fig. 1.2).

The electrical receiver (ER), or power-consuming unit, is an apparatus, machine, or mechanism intended for transformation of electric energy into other forms of energy.

The electric load is an electrical receiver or a group of *power-consuming units* connected by a common engineering process, and located in a certain area.

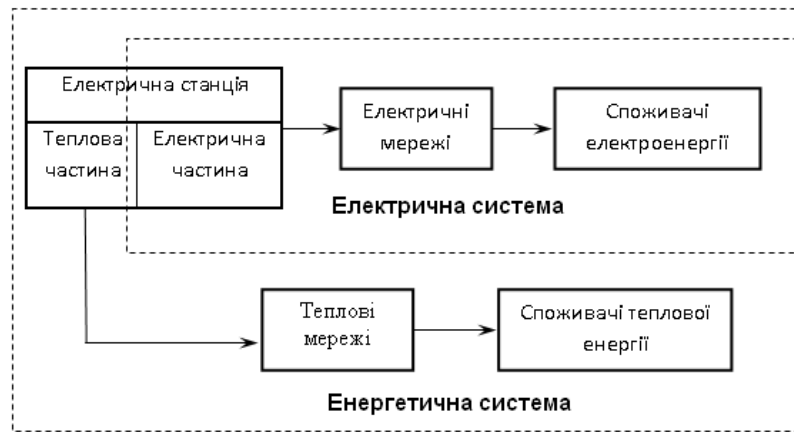


Рис.1.1. Структурна схема енергетичної системи

Електричною мережею (ЕМ) називають сукупність електроустановок для передавання і розподілу електричної енергії, що складається з підстанцій, розподільчих пристроїв, струмопроводів, повітряних і кабельних ліній електропередавання, які працюють на певній території.

Електричною підстанцією (ПС) називають електроустановку, призначену для приймання, перетворення та розподілу електричної енергії, яка складається із трансформаторів, розподільчих пристроїв, пристроїв управління та інших допоміжних пристроїв.

Розподільчим пристроєм називають електроустановку, призначену для приймання та розподілу електричної енергії на одному ступені номінальної напруги, яка містить комутаційні апарати, збірні шини, пристрої управління та захисту.

Лінією електропередавання (ЛЕП) називають електроустановку, призначену для передавання електричної енергії на віддалену відстань між двома пунктами електричної системи. Лінії електропередавання складаються із проводів та кабелів, ізолюючих елементів та несучих конструкцій.

Повітряна лінія електропередавання (ПЛ) – споруда для передавання електричної енергії проводами, розташованими просто неба і прикріпленими за допомогою ізолювальних конструкцій та арматури до опор або кронштейнів і стояків на інженерних спорудах (мостах, шляхопроводах тощо).

На рис. 1.2 представлено фрагмент схеми електричної мережі в електроенергетичній системі.

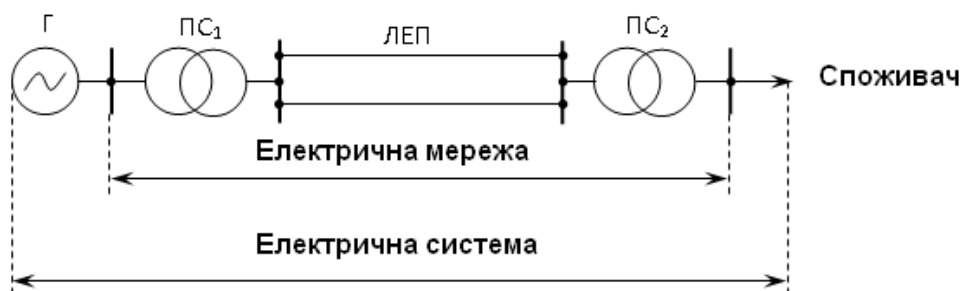


Рис.1.2. Розмежування електричної системи

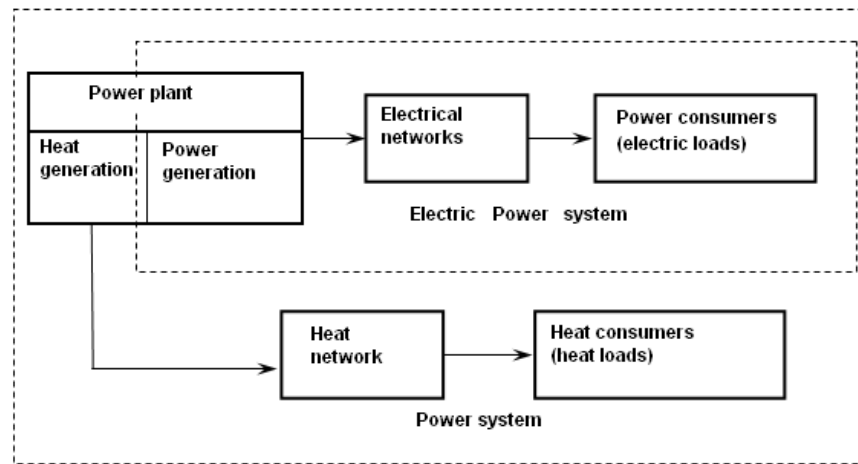


Fig. 1.1. Block diagram of electrical power system

The electrical power network (EN) is a number of electrical installations designed for power transmission and distribution, consisting of substations, switchgear, current-carrying wires, and overhead and cable transmission lines which are at operation in a certain area.

The electric power substation (EPS) is an electrical installation intended for receiving, transforming and distributing electricity, which consists of transformers, switchgear, control devices and other auxiliary equipment.

The switching centre is an electrical installation intended for receiving and distributing electricity at a certain level of the rated voltage, which contains the switchgear, collecting buses, control and protection devices.

The power transmission line (PTL) refers to an electrical installation intended for transmission of electrical energy over long distances between two points of the electric system. The power transmission line consists of wires and cables, insulation, and load-carrying structures.

The overhead power line (OPL) is a construction for transmission of electrical energy over wires located in the open air and fixed by means of insulating parts and accessories to the poles, or bearing supports, and posts of engineering structures (bridges, over-bridges etc.).

Fig. 1.2 shows a part of the electrical network diagram of the electric system.

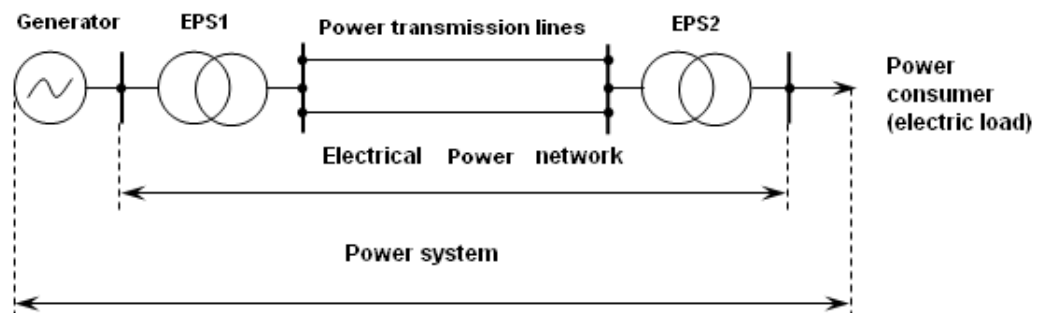
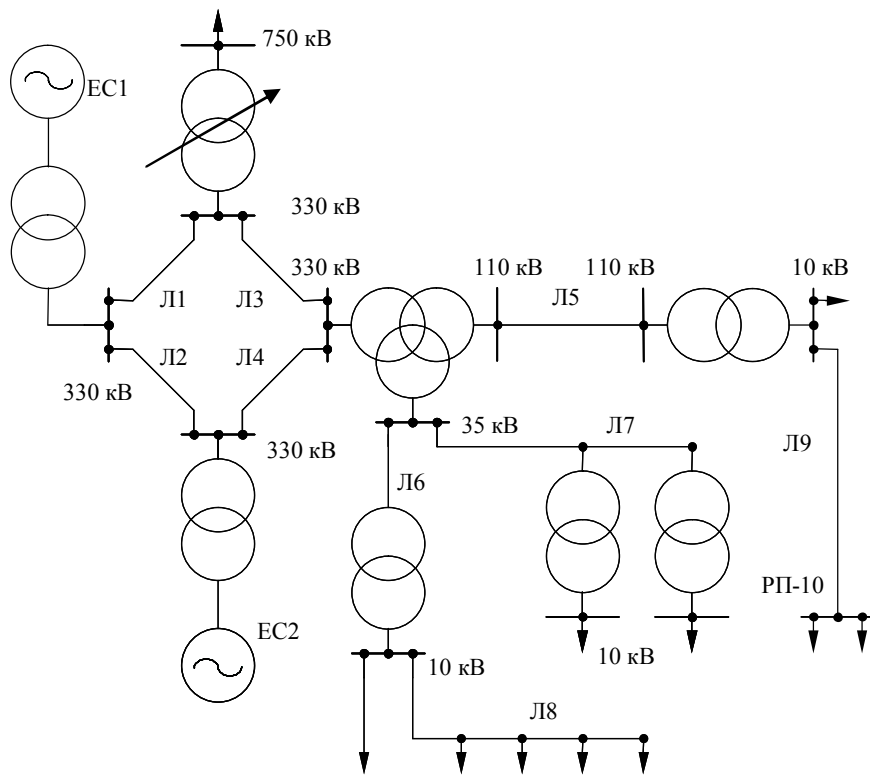
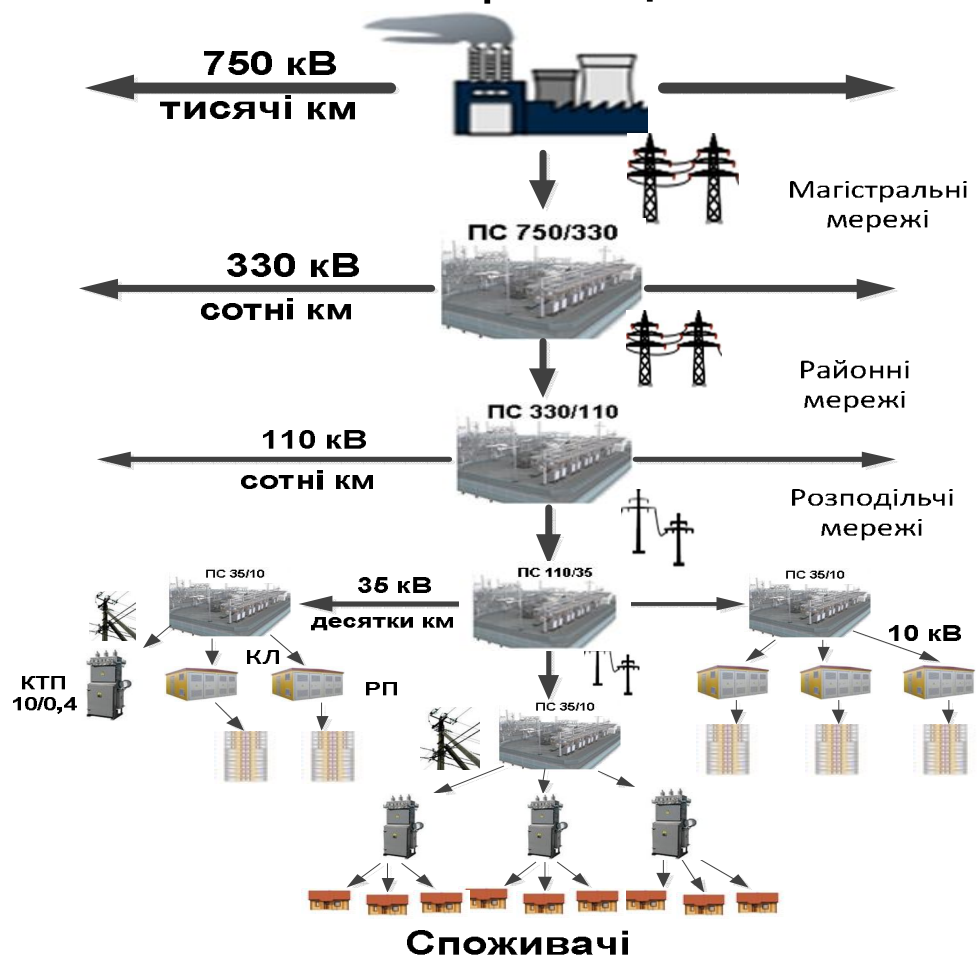


Fig. 1.2. Sections of the electric power system



Електростанція

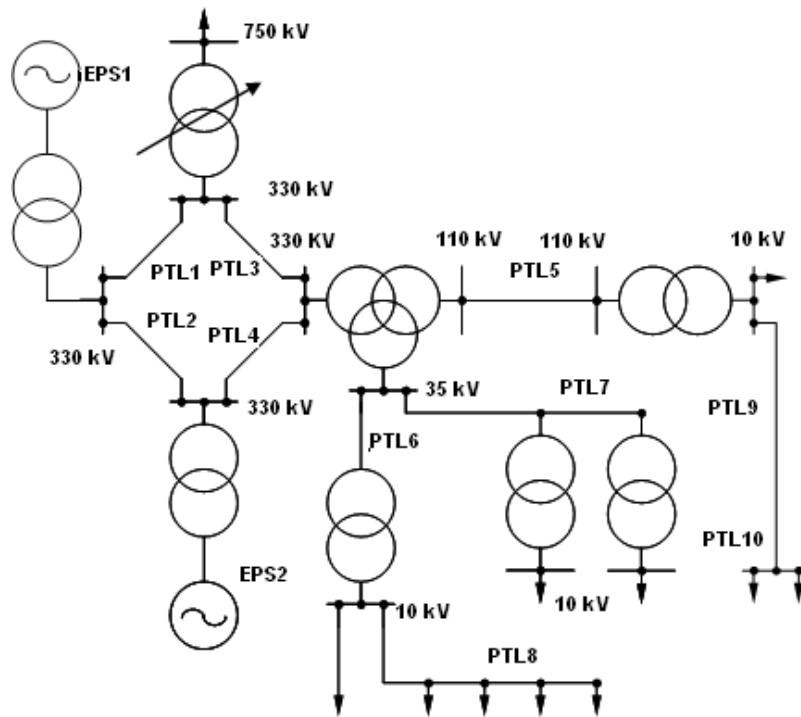
а



Споживачі

б

Рис. 1.3. Електрична система: а – схема електрична; б – загальна структура



a

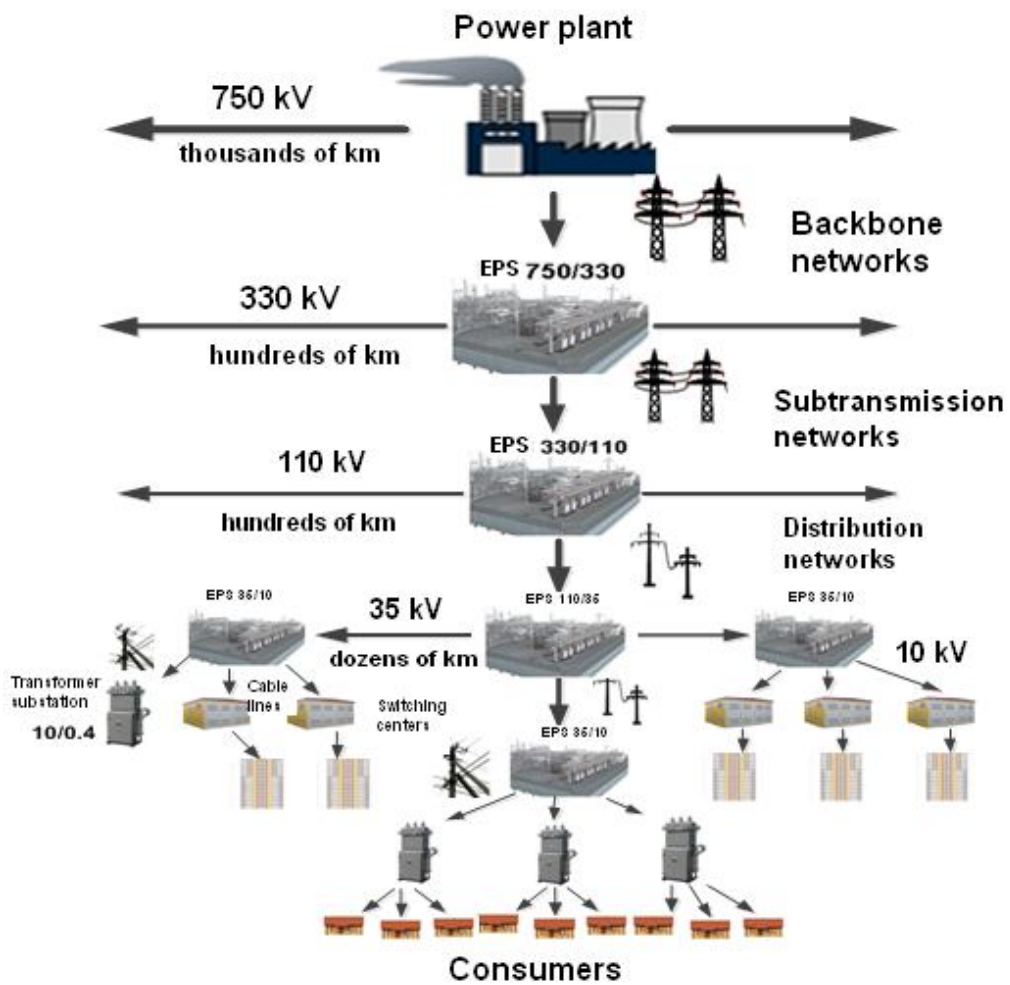


Fig. 1.3. The electric power system: a) electric circuit diagram; b) general arrangement

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Наведіть визначення енергетичної системи.
2. Наведіть визначення електроенергетичної системи.
3. Наведіть визначення електричної мережі.
4. Наведіть визначення електричної підстанції.
5. Наведіть визначення лінії електропередавання.

ЛІТЕРАТУРА

[3], стор. 10-12; [5], стор. 12-20; [7], стор. 7-9; [10], стор. 9-10; [14], стор. 5-6; [15], стор. 10-11; [16], стор. 6-10.

1.2 НОМІНАЛЬНІ НАПРУГИ УСТАТКУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Номинальною називають електричну напругу, на яку розрахована нормальна робота устаткування з найбільшим економічним ефектом.

Чинні нормативні документи (ГОСТ 21128-83 «Номинальные напряжения до 1000 В» та ГОСТ 721-77 «Номинальные напряжения свыше 1000 В») регламентують шкалу номінальних напруг електроустаткування. Для трифазних систем змінного струму нормуванню підлягають діючі значення лінійної напруги. Для низьковольтних електричних систем шкала номінальних напруг включає наступні значення: 220, 380 і 660 В. Для високовольтних електричних систем шкала номінальних напруг складається із такого ряду: 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, (400), 500, 750 кВ.

Наведена шкала містить номінальну напругу 400 кВ, яка не нормується чинним стандартом, але є прийнятою для енергосистем Євросоюзу, з якими енергооб'єднання України має електричні зв'язки по лініям електропередавання саме цієї напруги.

Для забезпечення номінальної напруги на затискачах споживачів електричної енергії із урахуванням падіння напруги в електричних мережах номінальна напруга генераторів нормується на 5% більше за номінальну напругу під'єднаної електричної мережі.

Те саме стосується також вторинних обмоток трансформаторів, які виступають джерелом живлення для підключеної мережі. Тут додатково слід враховувати падіння напруги в обмотках самих трансформаторів. Тому номінальні напруги вторинних обмоток трансформаторів нормуються на 10% більші за номінальні напруги відповідних електричних мереж. Виключення складають малопотужні трансформатори, потужністю до 5600 кВ·А, для котрих падіння напруги в обмотках та на ділянках електричних мереж несуттєві. Для таких трансформаторів номінальні напруги вторинних обмоток лише на 5% перевищують номінальні напруги під'єднаних мереж. Також винятку підлягають трансформатори надвисокої номінальної напруги (330 кВ та вище), для яких допускається підвищення напруги на 5% за умовами роботи лінійної ізоляції. Для таких трансформаторів номінальні напруги вторинних обмоток також лише на 5% перевищують номінальні напруги відповідних електричних мереж.

CONTROL QUESTIONS

1. Give the definition of a power supply system.
2. Give the definition of an electric system.
3. Give the definition of an electrical network.
4. Give the definition of an electric substation.
5. Give the definition of a power transmission line.

REFERENCES

[3], p. 10-12; [5], p. 12-20; [7], p. 7-9; [10], p. 9-10; [14], p. 5-6; [15], p. 10-11; [16], p. 6-10.

1.2 RATED VOLTAGES OF ELECTRIC SYSTEM EQUIPMENT

Rated voltage is an electric tension at which there is normal operation of the equipment, giving the greatest economic benefits.

The valid normative documents (state standard specifications GOST 21128-83 «Rated voltages of up to 1,000V» and GOST 721-77 «Rated voltages of over 1,000V») specify the range of rated voltage of electrical equipment. For three-phase a.c. systems the values of line voltage are subject to regulation. For low-voltage electric systems the range of rated voltage varies between 220V, 380V, and 660V. For high-voltage electric systems the range of rated voltage comprises the values of 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, (400) 500, and 750 kV.

The range mentioned above contains the rated voltage of 400 kV, which is not standardized by the valid standards, but is accepted for the European Union electric power systems with which the power grid of Ukraine has electrical links through the power transmission lines of this voltage.

To maintain the rated voltage at the consumer's terminals the voltage drop in the electrical networks is taken into account, and the rated voltage of generators is standardized 5% higher than the rated voltage of the connected electrical network.

The same concerns secondary windings of the transformers, which serve as the power supply for the connected electrical network. In this connection it is also necessary to consider the voltage drop in the windings of transformers. Therefore, the rated voltage of transformer secondary windings are standardized 10% higher than the rated voltage of the corresponding electrical networks. An exception is low-power transformers of up to 5,600 kVA, for which the voltage drop in windings and in sections of electrical networks is negligible. For such transformers the rated voltage of secondary windings is only 5% higher than the rated voltage of the connected networks. Another exception is transformers of ultrahigh rated voltage (330 kV and above), for which an increase in voltage by 5% is acceptable because of line insulation working conditions. For such transformers the rated voltage of secondary windings is also 5% higher than the rated voltage of the corresponding electrical networks.

Для первинних обмоток трансформаторів номінальні напруги співпадають із номінальними напругами мереж живлення або генераторів.

Значення номінальних напруг електричного устаткування наведені в табл.1.1.

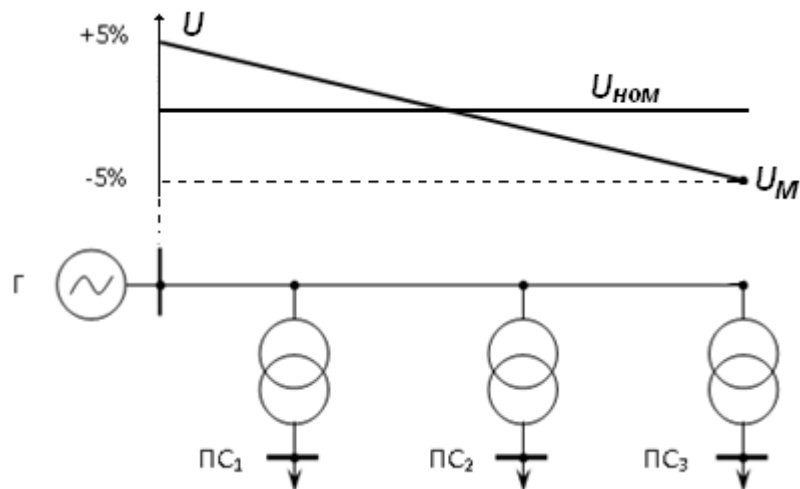


Рис.1.4. Розподіл напруги вдовж мережі, номінальна напруга

Таблиця 1.1. Номінальні напруги електричного устаткування

Електричні мережі	Генератори	Трансформатори	
		Первинні обмотки	Вторинні обмотки
Низьковольтні системи (напруга у вольтах)			
220	230	220	230
380	400	380	400
660	690	660	690
Високовольтні системи (напруга у кіловольтах)			
3	3,15	3 (3,15)	3,15 (3,3)
6	6,3	6 (6,3)	6,3 (6,6)
10	10,5	10 (10,5)	10,5 (11)
20	21	20 (21)	21 (22)
35	36,75	35 (36,75)	38,5
110	–	110	121
150	–	150	165
220	–	220	242
330	–	330	347
500	–	500	525
750	–	750	787

Збільшення номінальної напруги електричних мереж дозволяє обмежити втрати енергії під час передавання електричної енергії. Дійсно, одну й ту саму електричну потужність можна передати на більш високій номінальній напрузі меншим струмом. Це, відповідно до закону Джоуля-Ленца, призводить до

For primary windings of transformers the rated voltage coincides with the rated voltage of electrical networks or generators.

The values of rated voltage of the electrical equipment are presented in Table 1.1.

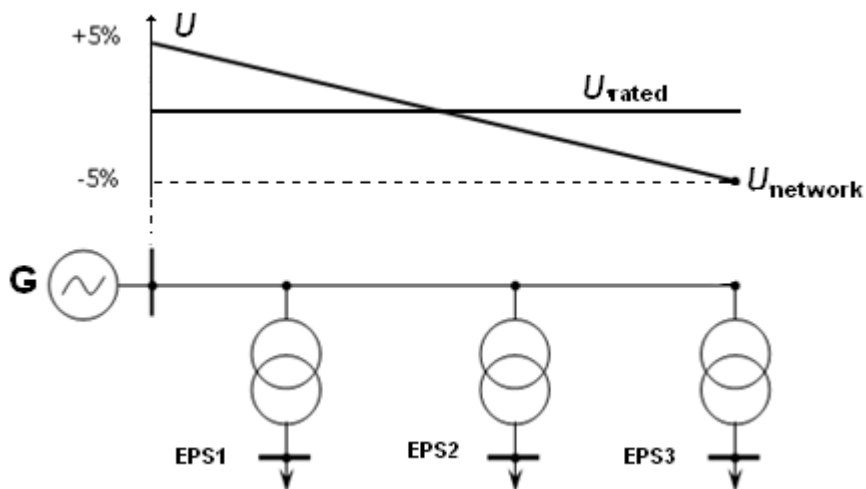


Fig. 1.4. Distribution of voltage across the network, rated voltage

Table 1.1. Rated voltage of the electrical equipment

Electrical networks	Generators	Transformers	
		Primary windings	Secondary windings
Low-voltage systems (voltage in volts)			
220	230	220	230
380	400	380	400
660	690	660	690
High-voltage systems (voltage in kilovolts)			
3	3.15	3 (3.15)	3.15 (3.3)
6	6,3	6 (6.3)	6.3 (6.6)
10	10.5	10 (10.5)	10.5 (11)
20	21	20 (21)	21 (22)
35	36.75	35 (36.75)	38.5
110	–	110	121
150	–	150	165
220	–	220	242
330	–	330	347
500	–	500	525
750	–	750	787

The increase in the rated voltage of electrical networks allows mitigating power losses in the transmission of electric energy. In fact, it is possible to transmit the same electric energy at a much higher rated voltage by a smaller current. According to Joule's law, it leads to

зменшення втрат потужності на передавання електричної енергії. Таким чином, збільшення номінальної напруги електричних мереж дозволяє знизити втрати енергії та підвищити пропускну здатність ліній електричних мереж. Разом з тим збільшення номінальної напруги пов'язано з суттєвим ускладненням, а, отже, і здороженням устаткування електричних мереж.

На сьогодні у складі Об'єднаної енергосистеми України паралельно функціонують електричні мережі різних класів номінальної напруги різного призначення.

Номінальні напруги 6 та 10 кВ використовують для створення промислових, міських та сільських розподільчих мереж. Тут найбільшого поширення набули мережі з номінальною напругою 10 кВ. Чинні нормативні документи не рекомендують використання номінальної напруги 6 кВ для створення нових розподільчих мереж. Останнім часом існуючі мережі напругою 6 кВ реконструюють та переводять на більш високу номінальну напругу 10 кВ.

Номінальну напругу 35 кВ широко використовують для створення центрів живлення сільських розподільчих мереж. Останнім часом з цією метою часто використовують також номінальну напругу 110 кВ.

Номінальні напруги 110, 150 та 220 кВ використовують для створення районних розподільчих електричних мереж загального використання, а також для зовнішнього енергопостачання потужних споживачів. Номінальну напругу 150 кВ використовують лише в Дніпровській енергосистемі для організації видачі потужності Дніпровської ГЕС. Останнім часом для створення районних електричних мереж використовують також номінальну напругу 330 кВ.

Номінальні напруги 330 кВ та вище використовують для створення системоутворюючих мереж магістральних ліній електропередавання для об'єднання на паралельну роботу регіональних енергосистем у складі енергооб'єднання.

Як свідчить досвід проектування та експлуатації електричних мереж вищих класів номінальної напруги, підвищення номінальної напруги електричної мережі з метою збільшення її пропускну здатності слід виконувати не на наступний рівень, а через один. Так, для Об'єднаної енергетичної системи України економічно обґрунтована шкала номінальних напруг електричних мереж складає 110-330-750 кВ.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. *Наведіть шкалу номінальних напруг устаткування електричних систем.*
2. *Поясніть збільшення на 5% номінальних напруг генераторів.*
3. *Поясніть збільшення на 5% номінальних напруг первинних обмоток трансформаторів напругою до 20 кВ.*
4. *Поясніть збільшення на 10% номінальних напруг вторинних обмоток трансформаторів. Які виключення є з цього положення?*
5. *Наведіть області використання номінальних напруг електричних мереж*

reduction of power losses in the transmission of electric energy. Thus, the increase in the rated voltage of electrical networks allows reducing power losses, and increasing the carrying capacity of the lines of electrical networks. At the same time, the rated voltage increase is results into a greater complexity, and, hence, a higher price of the equipment of electrical networks.

Today, in the Unified Power System of Ukraine there are electrical networks of different rated voltages, required for different purposes, functioning in parallel.

The rated voltage of 6 and 10 kV are used for the design of industrial, urban and agricultural distribution networks. The most common are electrical networks with the rated voltage of 10 kV. The valid standards do not recommend using the rated voltage of 6 kV for the design of new distribution networks. Recently, the existing 6 kV networks have been redesigned, and adapted to the higher rated voltage of 10 kV.

The rated voltage of 35 kV is widely used for the design of supply centres for agricultural distribution networks. Over the recent years the rated voltage of 110 kV has often been used for this purpose.

The rated voltages of 110 kV, 150 kV, and 220 kV are used for the design of single-area subtransmission networks of general use, and also for external power supply of large consumers. The rated voltage of 150 kV is used only in the Dniprovsk power supply system for the delivery of power from the Dniprovsk hydropower plant. Recently the rated voltage of 330 kV has also been used for the design of subtransmission electrical networks.

The rated voltage of 330 kV and above is used for the design of backbone transmission line networks for combining single-line power systems for parallel operation as part of the power grid.

From the experience in designing and maintaining electrical networks of higher rated voltages it can be seen that in order to increase the carrying capacity of an electrical network the rated voltage must be increased not to the very next level, but to the above nearest one. Thus, for the Unified Power System of Ukraine the economically sound range of rated voltage of electrical networks is 110-330-750 kV.

CONTROL QUESTIONS

- 1. What is the range of rated voltage of the equipment of electric systems?*
- 2. Explain why the rated voltage of generators is increased by 5%.*
- 3. Explain why the rated voltage of transformer primary windings of up to 20 kV is increased by 5%.*
- 4. Explain why the rated voltage of transformer secondary windings is increased by 10%. What are the exceptions to this rule?*
- 5. Specify the areas of application of rated voltages in the electrical networks.*

6. Наведіть економічно обґрунтовану шкалу номінальних напруг ОЕС України. Поясніть скорочення шкали номінальних напруг.

ЛІТЕРАТУРА

[2], стор 19-22; [3], стор. 12-15; [4], стор. 7-10; [8], стор 13-17; [9], стор. 20-25; [14], стор 6-10; [15], стор 54-56; [16], стор. 98-102.

1.3 ПРИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Головне призначення електричних мереж полягає в передаванні та розподілі електричної енергії від джерел живлення до споживачів.

Разом з цим електричні мережі призначені для передавання електричної енергії на віддалені відстані від центрів генерації в райони енергоспоживання (довжина ліній електропередавання напругою 220÷750 кВ НЕК «Укренерго» складає 21 285,406 км).

Також електричні мережі призначені для об'єднання на паралельну роботу різних електричних станцій та споживачів електричної енергії в єдиній електроенергетичній системі (кількість підстанцій НЕК «Укренерго» дорівнює 133, з них: 8 -750 кВ, 2 – 500 кВ, 2 – 400 кВ, 87 – 330 кВ, 34 – 220 кВ).

Об'єднання електричних систем на паралельну роботу призводить до підвищення надійності та економічності електропостачання, поліпшення якості електричної енергії. Загалом основні переваги об'єднання електричних систем на паралельну роботу полягає в наступному:

1. Підвищення надійності електропостачання за рахунок резервування шляхів передавання електричної енергії від джерел живлення до споживачів;

2. Зменшення сумарного максимуму навантаження електричної системи через незбіг максимумів навантажень різних споживачів. Тут особливої уваги заслуговують довготний та широтний ефекти:

– *Довготний ефект* полягає у зменшенні сумарного максимуму навантаження енергооб'єднання через незбіг у часі максимумів навантажень окремих електричних систем, віддалених по довготі. Тут характерні добові перетікання електричної енергії зі сходу на захід або із заходу на схід відповідно до часу доби.

– *Широтний ефект* полягає у зменшенні сумарного максимуму навантаження енергооб'єднання через незбіг тривалості максимумів навантажень окремих електричних систем, віддалених по широті. Тут характерні сезонні перетікання електричної енергії із півночі на південь із півдня на північ відповідно до пори року.

3. Зниження сумарного системного та необхідного аварійного резервів потужностей на електричних станціях за рахунок того, що резерв є загальним для всього енергооб'єднання;

6. Give the economically sound range of rated voltage of the Unified Power System of Ukraine. Explain why the range of rated voltage is reduced.

REFERENCES

- [2], p 19-22; [3], p. 12-15; [4], p. 7-10; [8], p 13-17; [9], p. 20-25; [14], p 6-10; [15], p 54-56; [16], p. 98-102.

1.2 APPLICATION OF ELECTRICAL POWER NETWORKS

The main application of electrical networks consists in transmitting and distributing electricity from the source of supply to the consumer.

In addition to this, electrical networks are designed for transmission of electrical energy over long distances from the generation centres to the areas of power consumption (the length of 220÷750 kV power lines of the National Power Company "Ukrenergo" is 21,285,406 km).

Electrical networks are also intended to combine different power plants and electric loads for parallel operation in a single electrical power system (the number of NPC "Ukrenergo" substations is 133, including 8 substations of 750 kV, 2 substations of 500 kV, 2 substations of 400 kV, 87 substations of 330 kV, and 34 substations of 220 kV).

Combining electric systems for parallel operation leads to the improvement of reliability and profitability of electric supply, and an increase in the quality of electrical energy. In general, the main advantages of combining electric systems for parallel operation are as follows:

1. improvement of reliability of electric supply due to redundancy of paths of transmitting electrical energy from the source of supply to the consumers;
2. a decrease of the total demand maximum of the electric system caused by mismatch of on-peak demand of different electric loads. A special attention is paid here to longitude and latitude effects:

- *The longitude effect* consists in decreasing the total demand maximum of a power supply system caused by mismatch in time of on-peak demand of individual electric systems separated in longitude. The daily flows of electrical energy from the east to the west, or from the west to the east, are characteristic of a certain time of the day.

- *The latitude effect* consists in decreasing the total demand maximum of a power supply system caused by mismatch of duration of on-peak demand of individual electric systems separated in latitude. Seasonal flows of electrical energy from the north to the south, and from the south to the north are characteristic to a certain season of the year.

3. a decrease of total system reserve margin and required emergency power reserves at power plants because the reserve is common for all the power supply system;

4. Зниження собівартості електричної енергії за рахунок концентрації потужностей з використанням на електричних станціях агрегатів більшої потужності з найменшими витратами палива на виробництво одиниці електричної енергії;

5. Сумісна робота електричних станцій різних типів дозволяє організувати ефективне використання джерел енергії з більш дешевим паливом;

6. Взаємодопомогою пов'язаних енергосистем при несинхронних сезонних коливаннях навантаження або генерації потужності електричних станцій;

7. Збільшення гнучкості та маневреності електричної системи за рахунок вибору різних джерел живлення, реконфігурації робочих схем тощо.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1. Сформулюйте головне та допоміжні призначення електричних мереж.*
- 2. Наведіть основні переваги об'єднання електричних систем на паралельну роботу.*
- 3. Поясніть положення про підвищення надійності об'єднання електричних систем.*
- 4. Поясніть положення про підвищення економічності об'єднання електричних систем.*
- 5. Поясніть положення про підвищення якості електричної енергії внаслідок об'єднання електричних систем.*
- 6. У чому полягає довготний ефект?*
- 7. У чому полягає широтний ефект?*

ЛІТЕРАТУРА

[7], стор 9-11; [8], стор 23-24; [11], стор 8-12; [15], стор 15-16;
[16], стор 13-17.

1.4 ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Конструктивне виконання електричних мереж має забезпечувати:

- 1) надійність та безперебійність електропостачання споживачів електричної енергії;
- 2) нормовану якість електроенергії;
- 3) зручність та безпеку експлуатації обладнання електричних мереж;
- 4) економічність електроенергетичних систем;
- 5) можливість подальшого розвитку без необхідності корінного переобладнання мережі.

4. a decrease of the cost price of electrical energy due to the concentration of power by using installations of a higher power capacity at the power plants, and lower waste of fuel in electrical energy generation;

5. compatible operation of power plants of different types, which allows achieving an effective utilisation of energy sources of more low-cost fuel.

6. the interconnected electric power systems supporting each other at nonsynchronous seasonal oscillations of the load, or power generation of power plants;

7. an increase in flexibility and manoeuvrability of electric systems due to the selection between different sources of supply, re-configuration of operating circuits and so on.

CONTROL QUESTIONS

1. *Define the main and additional areas of application of electrical networks.*
2. *Give the main advantages of combining electric systems for parallel operation.*
3. *Explain the principles of improving the reliability of interconnected electric systems.*
4. *Explain the principles of increasing the economic efficiency of interconnected electric systems.*
5. *Explain the principles of enhancing the quality of electric energy as a result of electric systems being combined.*
6. *What does the longitude effect consist in?*
7. *What does the latitude effect consist in?*

REFERENCES

[7], p 9-11; [8], p 23-24; [11], p 8-12; [15], p 15-16; [16], p 13-17.

1.4 REQUIREMENTS FOR ELECTRICAL POWER NETWORKS

The construction of electrical networks should provide:

- 1) reliable and uninterrupted power supply to the electric loads;
- 2) standardized quality of power;
- 3) convenience and safety of maintenance of the electrical network equipment;
- 4) profitability of electric power systems;
- 5) possibility of further development without radical re-equipment of the network.

Вимоги надійності електропостачання визначаються характером споживачів електроенергії. Відповідно до чинних нормативних документів споживачів електроенергії поділяють на три категорії.

До **першої категорії** відносять споживачів, переривання електропостачання яких пов'язане із загрозою життя людей, суттєвими економічними збитками, пошкодженням обладнання, масовим браком продукції, розладом складного технологічного процесу, порушенням особливо важливих елементів міського господарства.

Із складу електроприймачів першої категорії виділяють **особливу групу** електроприймачів, безперебійна робота яких необхідна для безаварійного припинення виробництва з метою запобігання загрозі життя людей, вибухів, пожеж і пошкодження коштовного основного устаткування.

Для надійного електропостачання споживачів першої категорії необхідно забезпечити їх живлення не менш, ніж від двох незалежних джерел. Відповідно до чинних норм переривання електропостачання споживачів першої категорії допустиме лише на час спрацювання автоматичного вмикання резервного живлення (АВР).

Для електропостачання особливої групи електроприймачів першої категорії слід передбачити додаткове живлення від третього незалежного джерела живлення.

До **другої категорії** відносять споживачів, перерва в електропостачанні яких пов'язана з масовим недовипуском продукції, простоюванням робітників, механізмів, транспорту, порушенням нормальної діяльності значної кількості міських жителів.

Електропостачання споживачів другої категорії рекомендовано забезпечувати від двох незалежних джерел живлення. Для електроприймачів другої категорії допустимі переривання в електропостачанні на час, необхідний для увімкнення резервного живлення діями чергового персоналу.

Третя категорія містить всі інші невідповідальні навантаження.

Для споживачів третьої категорії допустимі перерви електропостачання на час, необхідний для ремонту або заміни пошкодженого обладнання електричної мережі, але не більше однієї доби.

Якість електричної енергії регламентована в Україні чинним міждержавним стандартом ДСТУ 13109-97 «Норми качества электроснабжения общего назначения».

Відповідно до ДСТУ13109-97 якість електричної енергії визначається такими показниками:

- відхилення напруги;
- колювання напруги;
- несинусоїдальність кривої напруги;
- несиметрія напруг;
- відхилення частоти;
- провал напруги;

Reliability requirements of an electrical supply are determined by the type of electric loads. According to the valid normative documents there are three categories of electric loads.

The ***first category of vital electric loads*** is represented by the electric loads the interruption of which from the source of supply is associated with the threat to life of people, severe economic difficulties, damage to the equipment, mass defects of products, disarrangement of processing procedures, violation of extremely important branches of municipal services.

Among the electrical receivers of the first category there is a special group of electrical receivers whose continuous operation is necessary for trouble-free suspension of production in order to avoid threats to life of people, explosions, fires, and failures of costly capital equipment.

To provide a power supply to the electric loads of the first class it is necessary to have at least two independent sources of power. According to the valid standards the interruption of power supply to electric loads of the first class is permissible only during the time of automatic shutdown of standby power supply (automatic tripping).

For electrical supply of the special group of electrical receivers of the first category one should provide an additional source of supply from a third independent power supply.

The ***second category of essential electric loads*** includes the electric loads whose disconnection from the electrical supply is associated with mass shortfall in production, standstill of workers, mechanisms, and transport as well as breaks of normal activity of most urban population.

It is recommended to provide electrical supply for the electric loads of the second category from two independent power supplies. For electrical receivers of the second category interruptions of power supply is permissible during the time required for turning on a standby power supply by the personnel on duty.

The ***third category of non-essential electric loads*** comprises all the other negligible loads. For electric loads of the third category power cuts are permissible for the time required for repairing or replacing the damaged equipment of the electrical network, but not longer than for twenty-four hours.

In Ukraine the quality of electrical energy is standardized by the valid interstate standard DSTU 13109-97 "Standards of the quality of general-purpose power supply».

According to DSTU 13109-97 the quality of electrical energy is determined by the following parameters:

- voltage deviation;
- voltage oscillation;
- unsmoothness of voltage curve;
- voltage unbalance;
- frequency error;
- voltage dip;

- імпульсна напруга;
- тимчасова перенапруга.

Для визначення якості електроенергії встановлено два види норм якості: нормально допустимі та гранично допустимі.

Відхилення напруги – це зміна амплітудного (діючого) значення напруги тривалістю більше 1 хв.

Відхилення напруги характеризують показником усталеного відхилення напруги. Нормально допустимі відхилення $\pm 5\%$ від номінальної напруги та гранично допустимі відхилення $\pm 10\%$ від номінальної напруги.

Коливання напруги – це періодична (з певною частотою) або повторювана через довільні проміжки часу зміна амплітудного значення напруги тривалістю більше 1 хв.

Гранично допустимі характеристики коливання напруги визначають за спеціальними номограмами і методиками.

Несинусоїдальність напруги полягає у відхиленні форми кривої напруги від ідеальної синусоїди.

Несинусоїдальність напруги характеризують такими показниками:

- коефіцієнт викривлення синусоїдальності форми кривої напруги;
- коефіцієнтами гармонічних складових напруги.

Нормально та гранично допустимі значення коефіцієнту викривлення синусоїдальності кривої напруги складають:

- в мережах 0,4 кВ – 8,0% та 12% відповідно;
- в мережах 6-20 кВ – 5,0% та 8,0% відповідно;
- в мережах 35 кВ – 4,0% та 6,0% відповідно;
- в мережах 110-330 кВ – 2,0% та 3,0% відповідно.

Несиметрія напруг полягає у відмінності векторів фазних напруг по модулю, а також по фазі на кути, які відрізняються від $\pm 120^\circ$.

Несиметрію напруг характеризують такими показниками:

- коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю;
- коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю.

Нормально та гранично допустимі значення коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовностями дорівнюють 2% та 4% відповідно.

Відхилення частоти полягає у відхиленні частоти змінного струму від номінального значення промислової частоти.

Нормально та гранично допустимі значення відхилення частоти дорівнюють $\pm 0,2$ Гц та $\pm 0,4$ Гц відповідно.

Провал напруги – це раптове короткочасне (до 1 хв) зниження напруги у точці електричної мережі нижче 0,9 номінальної напруги з подальшим відновленням напруги до первинного або близького до нього значення.

Провал напруги характеризують тривалістю провалу напруги, для якого встановлено гранично допустиме значення 30 сек.

- impulse voltage;
- temporary overvoltage.

To determine the quality of power two types of quality standards are given: permissible and maximum permissible.

The **voltage deviation** is a change in the peak (effective) value of voltage, which lasts for more than 1 minute.

Voltage deviations are characterized by the parameter of the steady-state deviation of voltage. Deviations of $\pm 5\%$ from rated voltage are permissible, and maximum permissible deviations are $\pm 10\%$ from rated voltage.

Voltage oscillation is a periodic (of a certain frequency), or repeated over arbitrary time intervals, change in the crest value of voltage which lasts for more than 1 minute.

Maximum permissible characteristics of voltage oscillation are determined with special nomographic charts and techniques.

Unsinusoidality of voltage represents a deviation of the form of voltage curve from the ideal sinusoidal one.

Unsinusoidality of voltage is characterized by such parameters:

- distortion factor of sinusoidal form of voltage curve;
- factors of harmonic content of voltage.

Permissible and maximum permissible values of distortion factor of sinusoidal form of voltage curve are:

- 8.0% and 12% in the networks of 0.4 kV, respectively;
- 5.0% and 8.0% in the networks of 6-20 kV, respectively;
- 4.0% and 6.0% in the networks of 35 kV, respectively;
- 2.0% and 3.0% in networks the 110-330 kV, respectively.

Voltage unbalance is the difference of phase voltage vectors in the module, and also in the phase of angles, which differ in $\pm 120^\circ$.

Voltage unbalance is characterized by such parameters as:

- voltage unbalance factor by negative sequence;
- voltage unbalance factor by zero sequence.

Permissible and maximum permissible values of voltage unbalance factor by negative sequence and by zero sequence are equal to 2% and 4% respectively.

Frequency error is the deviation of alternating current frequency from the rated mains frequency value.

Permissible and maximum permissible values of frequency error are 0.2 Hz and 0.4 Hz respectively.

Voltage dip is a sudden short-term (up to 1 minute) decrease in voltage at the point of the electrical network to the value below 0.9 of the rated voltage, followed by a subsequent voltage recovery to the original value, or the one close to it.

A voltage dip is characterized by a voltage fall the maximum permissible duration of which is 30 seconds.

Імпульсна напруга – це різка короткочасна (декілька мілісекунд) зміна напруги в точці електричної мережі з подальшим відновленням напруги до первинного, або близького до нього значення.

Імпульс напруги характеризують показником імпульсної напруги. Значення імпульсних напруг для грозових та комутаційних імпульсів визначають за спеціальними методиками.

Тимчасова перенапруга – це збільшення напруги в точці електричної мережі більше, ніж на 10% від номінальної напруги тривалістю більше 10 мс, яке виникає в системах електропостачання внаслідок комутацій або коротких замкнень.

Тимчасову перенапругу характеризують показником коефіцієнта тимчасової перенапруги, значення якого визначають за спеціальною методикою.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. *Наведіть основні вимоги до мереж електричних систем.*
2. *У чому полягає забезпечення надійності електропостачання споживачів?*
3. *Яких споживачів відносять до першої категорії?*
4. *Яких споживачів відносять до особливої групи першої категорії?*
5. *Яких споживачів відносять до другої категорії?*
6. *Яких споживачів відносять до третьої категорії?*
7. *Наведіть основні характеристики якості електричної енергії.*
8. *Перерахуйте показники якості електричної енергії.*

ЛІТЕРАТУРА

[1], стор. 77-113; [2], стор. 56-60; [6], стор. 17-18; [7], стор. 13-15, 27-29; [8], стор. 17-23, 26-29; [10], стор. 295-302; [11], стор. 19-20; [15], стор. 53.

1.5 КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Сучасні електричні мережі представляють собою складні технічні системи. Складність таких систем не дозволяє визначити єдиний підхід до їх класифікації. На сьогодні найчастіше використовують класифікацію електричних мереж за наступними ознаками:

I. За родом електричного струму:

- 1) системи постійного струму;
- 2) системи змінного струму: промислової частоти (50 Гц, в деяких країнах – 60 Гц); інші (наприклад, бортові електричні системи кораблів та літаків працюють на частоті 400 Гц);
- 3) системи імпульсного струму.

Impulse voltage is a sharp short-term (of a few milliseconds) change in voltage at the point of the electrical network, followed by voltage recovery to the original value, or the one close to it.

Voltage impulse is characterized by the parameter of impulse voltage. The values of impulse voltage for lightning and switching impulses are determined with special techniques.

Temporary overvoltage is an increase in voltage at the point in the electrical network to the value 10% higher than the rated voltage, which lasts for more than 10ms, occurring in the electrical supply systems as a result of switching operations, or short circuits.

Temporary overvoltage is characterized by the factor of temporary overvoltage, whose value is determined with a special technique.

CONTROL QUESTIONS

1. *What are the main requirements for the networks of electric systems?*
2. *What does the maintenance of reliability of power supply involve?*
3. *What are the electrical loads of the first class?*
4. *What are the electrical loads of a special group of the first class?*
5. *What are the electrical loads of the second class?*
6. *What electrical loads belong to the third class?*
7. *What are the main characteristics of the quality of electrical energy?*
8. *Enlist the parameters of quality of electrical energy.*

REFERENCES

[1], p. 77-113; [2], p. 56-60; [6], p. 17-18; [7], p. 13-15, 27-29; [8], p. 17-23, 26-29; [10], p. 295-302; [11], p. 19-20; [15], p. 53.

1.5 CLASSIFICATION OF ELECTRICAL POWER NETWORKS

Modern electrical networks represent complex engineering systems. The complexity of such systems does not allow us to identify a single approach to their classification. At present the most common classification of electrical networks is done by following criteria:

I. By type of electric current:

- 1) dc systems;
- 2) ac systems: of mains frequency (50 Hz, in some countries – 60 Hz), and other frequencies (for example, on-board electric systems of ships and airplanes operate at frequency of 400 Hz);
- 3) pulsing current systems.

II. За способом організації живлення споживачів:

- 1) однофазні;
- 2) трифазні: трипровідні; чотирипровідні;
- 3) багатофазні.

III. За номінальною напругою:

- 1) низьковольтні (до 1 кВ);
- 2) високовольтні (більше 1 кВ): низької напруги (до 10 кВ); середньої напруги (35 кВ); високої напруги (110-220 кВ); надвисокої напруги (330 кВ - 1000 кВ); ультрависокої напруги (вище 1000 кВ).

IV. За режимом роботи нейтралі:

- 1) мережі із глухо заземленою нейтраллю;
- 2) мережі із компенсованою нейтраллю;
- 3) мережі з ефективно-заземленою нейтраллю;
- 4) мережі із ізольованою нейтраллю.

V. За призначенням:

- 1) місцеві електричні мережі (міські, промислових підприємств, сільські) обслуговують невеликі райони з відносно малою щільністю навантаження радіусом дії до 15-20 км з номінальною напругою до 35 кВ, інколи – до 110 кВ;
- 2) районні електричні мережі забезпечують живлення споживачів великих районів. Такі мережі працюють з номінальною напругою 110-220 кВ, інколи 330 кВ;
- 3) системоутворюючі електричні мережі для об'єднання районних електричних мереж на паралельну роботу в енергооб'єднання. Такі мережі містять лінії електропередавання з номінальною напругою 330 кВ та вище.

VI. За характером споживачів:

- 1) електричні мережі промислових підприємств;
- 2) міські електричні мережі;
- 3) сільські електричні мережі.

VII. За конфігурацією:

- 1) розімкнені (рис.1.5): магістральні; радіальні;
- 2) замкнені (рис.1.6).

VIII. За режимом роботи:

- 1) автономні;
- 2) об'єднанні.

IX. За конструктивним виконанням:

- 1) електричні мережі повітряних ліній електропередач;
- 2) електричні мережі кабельних ліній електропередач;
- 3) мережі внутрішніх електричних проводок.

II. By type of power supply:

- 1) single-phase;
- 2) three-phase: three-wire; four-wire;
- 3) polyphase.

III. By rated voltage:

- 1) low-voltage (up to 1 kV);
- 2) high-voltage (over 1 kV): of low voltage (up to 10 kV), medium voltage (35 kV); high voltage (110-220 kV), extra-high voltage (330 kV – 1000 kV), and ultrahigh voltage (above 1000 kV).

IV. By mode of operation of a neutral conductor:

- 1) networks with the solidly earthed neutral;
- 2) networks with the resonant earthed neutral;
- 3) networks with the effectively earthed neutral;
- 4) networks with the insulated neutral.

V. By purpose of application:

- 1) local distribution electrical networks (of urban, industrial, agricultural enterprises), which serve small areas with rather small load density, having the range of operation of up to 15-20 km, and the rated voltage of up to 35 kV, sometimes up to 110 kV;
- 2) single-area subtransmission electrical networks, which supply power to the consumers of large areas. Such networks operate at the rated voltage of 110-220 kV, sometimes 330 kV;
- 3) backbone electrical networks which are used for combining single-area electrical networks for parallel operation in the power grid. These networks are made up of power transmission lines of the rated voltage of 330 kV and above.

VI. By type of electric load (power consumers):

- 1) electrical networks of industrial plants;
- 2) urban electrical networks;
- 3) agricultural electrical networks.

VII. By configuration:

- 1) open (Fig. 1.5): backbone, radial;
- 2) closed (Fig. 1.6).

VIII. By mode of operation:

- 1) isolated;
- 2) integrated.

IX. By design:

- 1) electrical networks of overhead power transmission lines;
- 2) electrical networks of cable power transmission lines;
- 3) networks of interior (indoor) wiring.

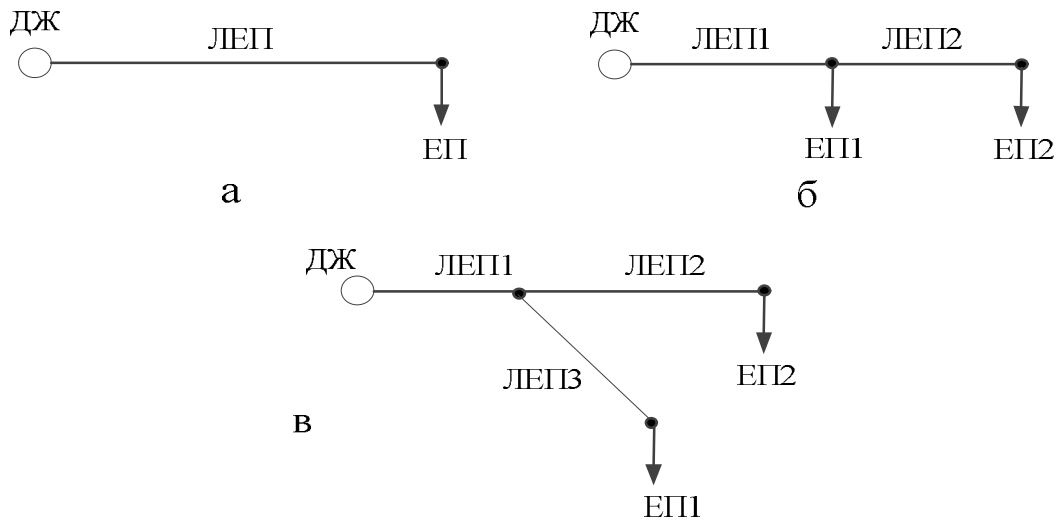


Рис.1.5. Розімкнені мережі: а) радіальна; б) магістральна; в) магістральна з відгалуженням

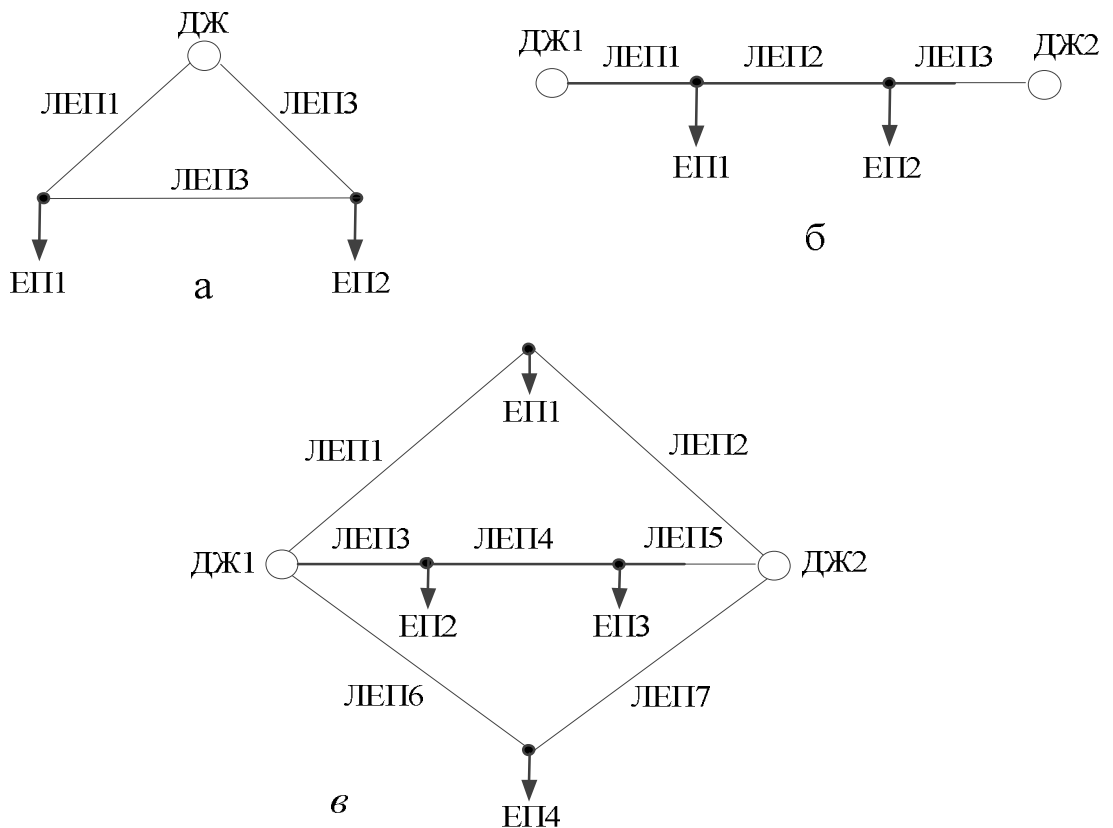


Рис.1.6.Замкнені мережі: а) кільцева; б) з двохстороннім живленням; в) складно замкнена

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Наведіть основні підходи до класифікації електричних мереж та систем.
2. Охарактеризуйте підходи до класифікації електричних мереж та систем.

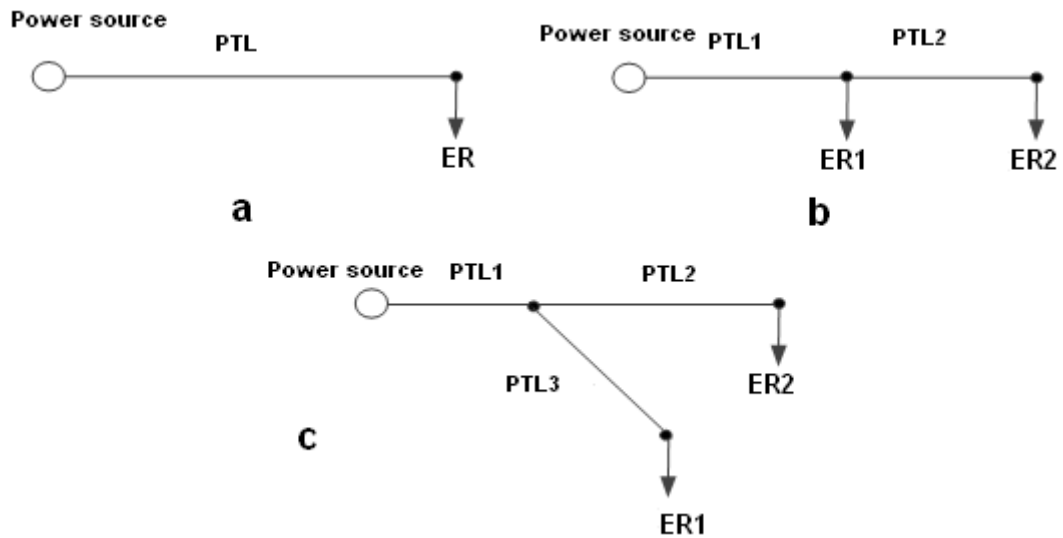


Fig. 1.5. Open networks: a) radial; b) backbone; c) backbone with subbranches

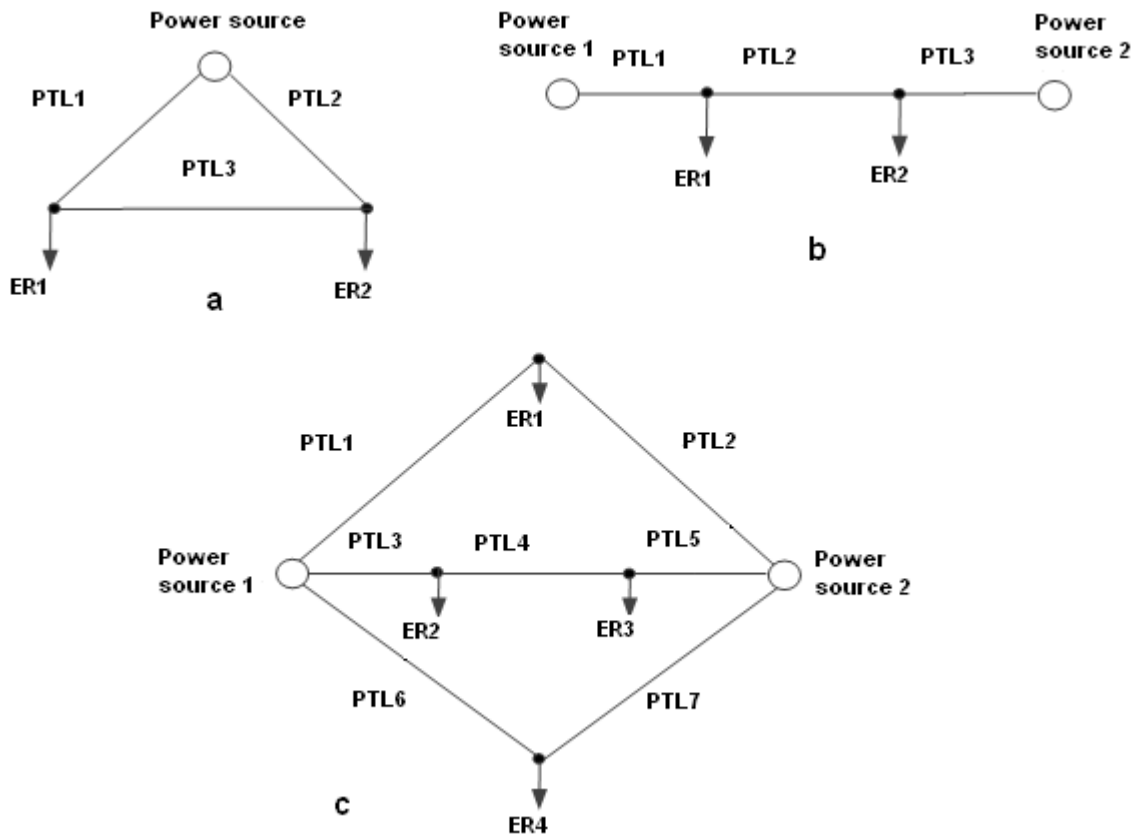


Fig. 1.6. Closed networks: a) loop (ring); b) double-end fed; c) meshed

CONTROL QUESTIONS

1. Name the basic approaches to classification of electrical networks and systems.
2. Describe the approaches to classification of electrical networks and systems.

ЛІТЕРАТУРА

[5], стор 15-20; [6], стор 18-21; [7], стор 15-18; [8], стор. 23-26;
[10], стор. 11-13; [11], стор14-17; [14], стор10-13; [15], стор53-65;
[16], стор17-19; [17], стор10-13.

1.6 РЕЖИМИ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ

Нейтралі трансформаторів та іншого устаткування трифазних електричних мереж можуть бути ізольованими від землі, глухо заземленими або заземленими через дугогасні реактори. Відповідно до способу з'єднання нейтралі трансформаторів та іншого устаткування з землею розрізняють три класи електричних мереж:

- мережі з ізольованою нейтраллю;
- мережі з глухо-заземленою нейтраллю;
- мережі з компенсованою нейтраллю;
- мережі з ефективно-заземленою нейтраллю.

У мережах з ізольованою нейтраллю електроустановки не мають зв'язку з землею. У мережах з компенсованою нейтраллю є зв'язок через дугогасну котушку. У мережах із глухо заземленою нейтраллю – безпосередній зв'язок із землею. У мережах з ефективно-заземленою нейтраллю – частина нейтралі трансформаторів заземлена, частина – незаземлена (у нейтраль включені роз'єднувач і розрядник).

В низьковольтних електричних мережах напругою до 1000 В режим роботи нейтралі обирають виходячи з міркувань безпеки експлуатації електротехнічного устаткування. Такі мережі експлуатують з глухо заземленою або ізольованою нейтраллю.

Серед низьковольтних електричних мереж найбільшого поширення набули чотирипровідні мережі з номінальною напругою 0,4 кВ (рис. 1.7). Нормативні документи регламентують експлуатацію таких мереж з глухо заземленою нейтраллю.

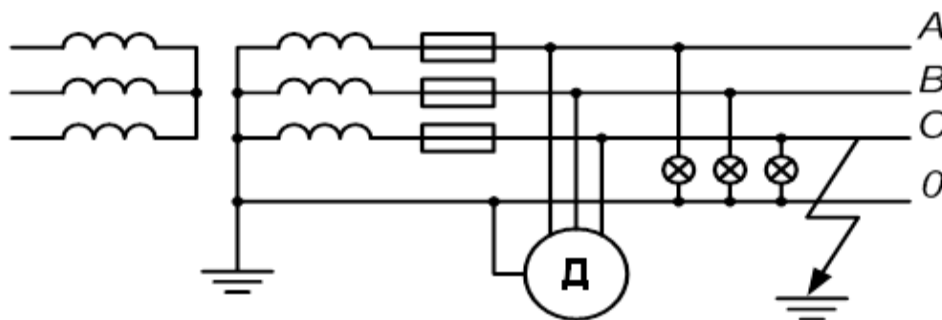


Рис. 1.7.Схема низьковольтної мережі з глухозаземленою нейтраллю

В таких мережах корпуси електроустаткування мають металевий зв'язок з заземленою нейтраллю. Це забезпечує безпеку експлуатації устаткування,

REFERENCES

[5], p 15-20; [6], p 18-21; [7], p 15-18; [8], p. 23-26; [10], p. 11-13; [11], p14-17; [14], p10-13; [15], p53-65; 16], p17-19; [17], p10-13.

1.6 OPERATION MODES OF NEUTRAL CONDUCTOR

Neutral conductors of transformers and other equipment of three-phase electrical networks can be insulated from the ground, solidly earthed, or earthed through a ground-fault neutralizer. Depending upon the type of connection of neutral conductor of transformers and other equipment to the earth, there are three types of electrical networks:

- networks with the insulated neutral;
- networks with the solidly earthed neutral;
- networks with the resonant earthed neutral;
- networks with the effectively earthed neutral.

In networks with the insulated neutral the electrical installation does not have any connection to the earth. In networks with the resonant earthed neutral there is a connection through the ground-fault neutralizer. In networks with solidly earthed neutral there is a direct connection to the earth. In networks with the effectively earthed neutral a part of the neutral conductor of transformers is earthed, and the other part is not earthed (the neutral conductor comprises the disconnector and the discharger).

In low-voltage electrical networks of up to 1,000 V the operation mode of of neutral conductor is selected considering the safety of electrical machinery. Such networks are operated with solidly earthed, or insulated neutral.

Among low-voltage electrical networks the most common ones are four-wire networks with the rated voltage of 0.4 kV (Fig. 1.7). Normative documents standardize the maintenance of the networks with the solidly earthed neutral.

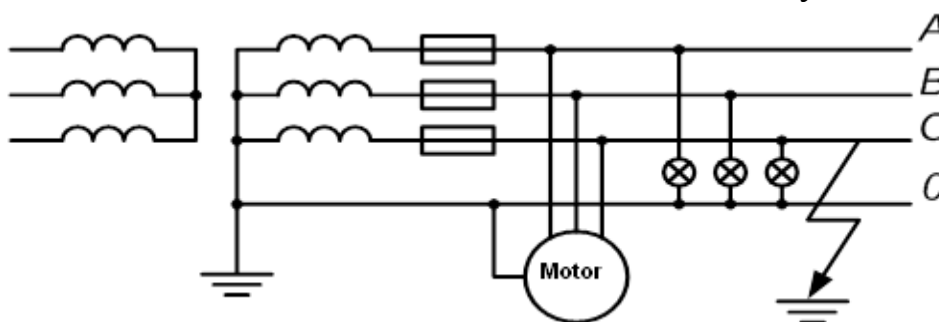


Fig. 1.7. Diagram of a low voltage network with the solidly earthed neutral

In these networks the frame of electrical equipment has metal connection to the earthed neutral. It provides safety of equipment maintenance,

оскільки у разі короткого замикання фази на корпус, потенціал корпуса, до якого може торкнутися людина, залишається близьким до нуля. Разом з цим струм пошкодженої фази різко збільшується і її вимикає запобіжник. Напруги непошкоджених фаз при цьому не перевищують фазної напруги.

В електричних мережах напругою 0,6 кВ, а також в мережах 0,4 кВ з підвищеними вимогами безпеки, де неприпустимі великі струми короткого замкнення (наприклад, в мережах вугільних шахт), електроустановки експлуатують з ізолюваною нейтраллю (рис. 1.8).

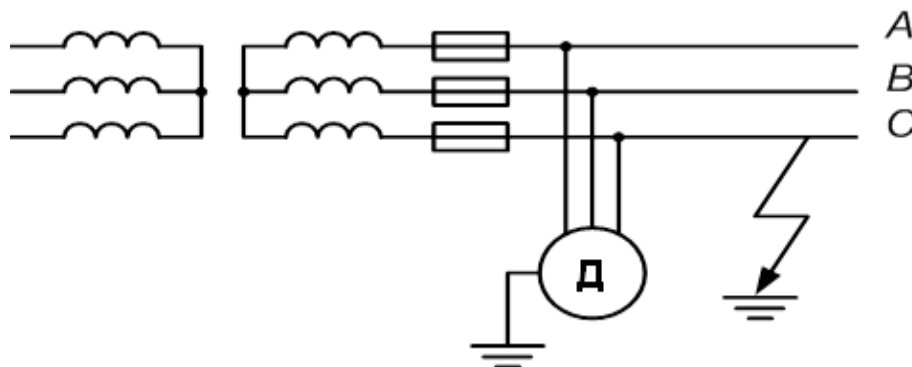


Рис. 1.8.Схема низьковольтної мережі з ізолюваною нейтраллю

В таких мережах замикання на землю не викликає короткого замкнення і не є аварійним режимом, оскільки електроприймачі будуть отримувати живлення по всім трьом фазам. Разом з цим потенціал пошкодженої фази стане нульовим, а напруги непошкоджених фаз збільшаться до лінійних значень, як показано на діаграмі рис. 1.9.

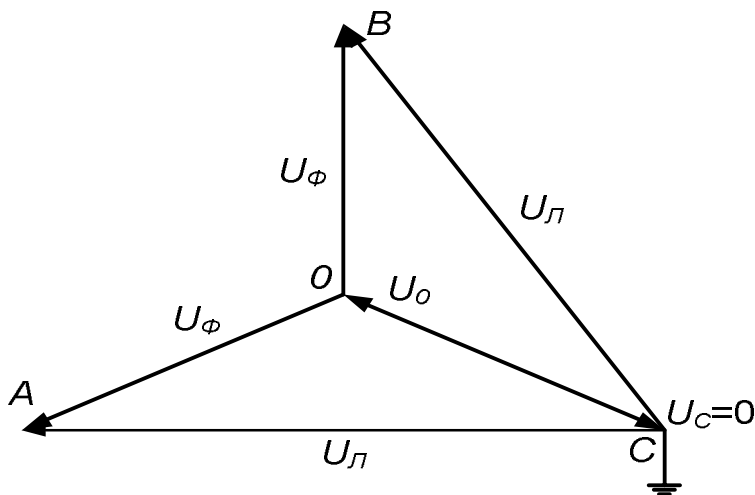


Рис. 1.9.Векторна діаграма напруг мережі з ізолюваною нейтраллю в нормальному режимі та в режимі замикання на землю

Оскільки підвищення напруги непошкоджених фаз утворює небезпеку для персоналу, то на всіх установках, які експлуатуються з ізолюваною нейтраллю, необхідно забезпечити контроль ізоляції та інші заходи, направлені на швидке визначення та ліквідацію замикань на землю.

as in case of short circuit, the potential of the frame, which man can touch, remains close to zero. Yet the faulty phase current sharply increases, and the safety device disconnects it, the voltages of faulty phase not exceeding the phase voltage.

In the electrical networks of 0.6 kV, and also in the networks of 0.4 kV with enhanced safety requirements, where high short-circuit currents (for example in the networks of coal mines) are intolerable, electrical installations are operated with the insulated neutral (Fig. 1.8).

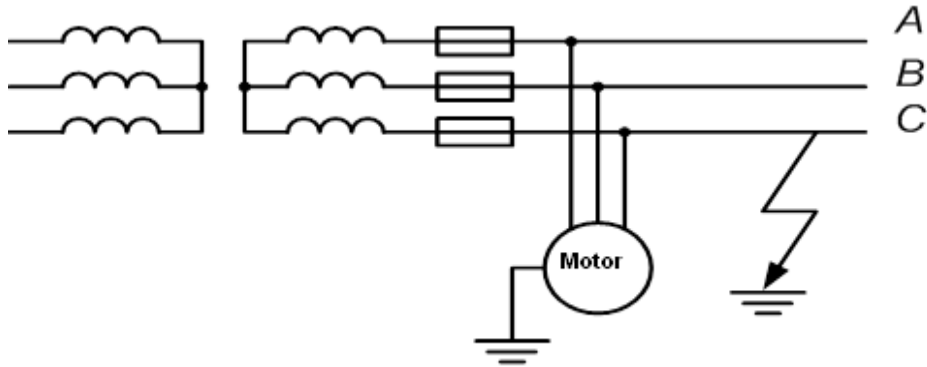


Fig. 1.8. Diagram of a low voltage network with the insulated neutral

In these networks the ground fault does not cause a short circuit, and it is not an emergency operation because electrical receivers will be supplied by all three phases. Yet the faulty phase potential becomes zero, and voltage of unfaulty phases will increase to linear values, as shown in Fig. 1.9.

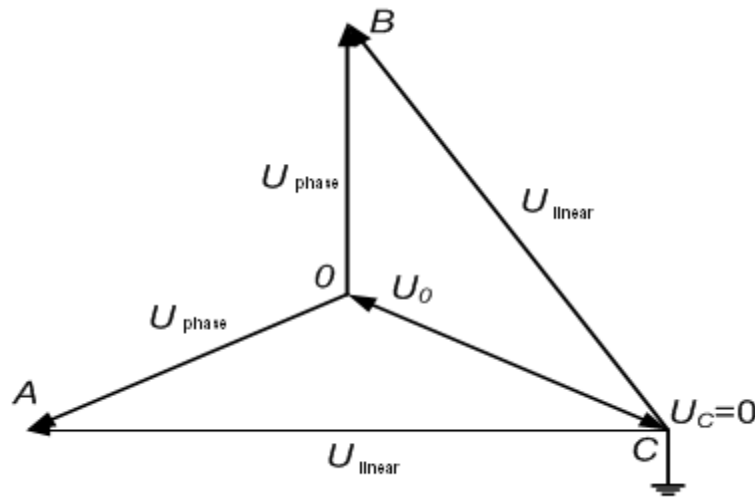


Fig. 1.9. Vector diagram of a network with the insulated neutral in normal, and in ground fault conditions

As the increase in voltage of unfaulty phases poses danger to the technical staff, all the installations with the insulated neutral must be provided with the control of insulation, and other protective measures to quickly locate and eliminate the ground fault.

У високовольтних електричних системах з номінальною напругою більше 1 кВ режим роботи нейтралі визначають виходячи з міркувань забезпечення безперебійності електропостачання, надійності роботи та економічності електроустановок. Цього можна досягти шляхом обмеження струмів замикання на землю, або обмеження часу протікання таких струмів.

Слід зазначити, що у високовольтних електричних мережах необхідно враховувати ємнісні зарядні струми ліній електропередавання, які протікають разом із струмами навантажень.

Електричні мережі напругою до 35 кВ характеризуються відносно невеликими струмами замикання на землю (до 500 А). Тому в таких мережах більш доцільним є обмеження струмів замикання на землю. Це дозволяє спростити конструкції електроустановок та забезпечити їх економічність. Тому електричні мережі напругою до 35 кВ експлуатуються в режимах з ізолюваною або компенсованою нейтраллю.

Розглянемо роботу електричної мережі з ізолюваною нейтраллю в режимі замикання на землю (рис. 1.10). Як зазначалося раніше, режим замикання на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю не є аварійним, оскільки споживачі продовжують отримувати живлення в повно фазному режимі. Це свідчить про забезпечення безперебійності електропостачання споживачів.

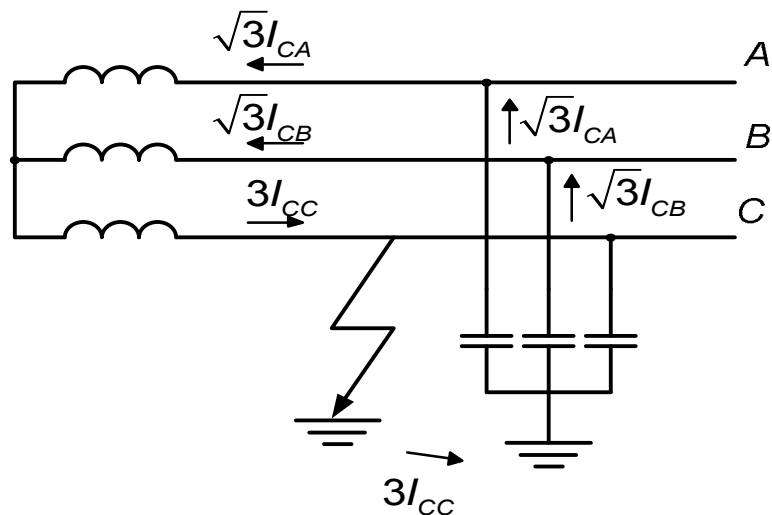


Рис. 1.10.Схема мережі з ізолюваною нейтраллю в режимі замикання на землю

Векторна діаграма напруг та ємнісних зарядних струмів в мережі з ізолюваною нейтраллю представлена на рис. 1.11. Потенціал пошкодженої фази в режимі замикання на землю дорівнює нулю, а напруга непошкоджених фаз збільшуються до своїх лінійних значень. Це призводить до збільшення у $\sqrt{3}$ разів ємнісних зарядних струмів непошкоджених фаз. У пошкодженій фазі протікає ємнісний струм, який дорівнює геометричній сумі зарядних струмів непошкоджених фаз, тобто потроєному значенню зарядного струму в нормальному режимі.

Перерозподіл зарядних струмів в режимі замикання на землю представлено на рис. 1.10 стрілками.

In high-voltage electric systems with the rated voltage of over 1 kV the operation mode of a neutral conductor is selected to ensure uninterrupted operation of electrical supply, reliability and economic efficiency of electrical installations. It can be achieved by restriction of ground fault currents, or by time limitation of ground fault current flow.

It is worth pointing out that in high-voltage electrical networks it is necessary to consider capacitive charging currents of power lines, which flow along with load currents.

Electrical networks of 35 kV are characterised by rather small ground fault currents (up to 500A). Therefore, in these networks it is more practicable to mitigate ground fault currents. It allows simplifying the design of electrical installations and providing the economic efficiency. Thus, electrical networks of up to 35 kV are operated in the modes of the insulated or resonant earthed neutral conductor.

Let us consider now the operation of the electrical network with the insulated neutral in ground fault conditions (Fig. 1.10). As was previously mentioned, the ground fault conditions in the networks with the insulated neutral is not viewed as an emergency operation since electric loads continue to be supplied in all phases. This ensures uninterrupted operation of electrical supply.

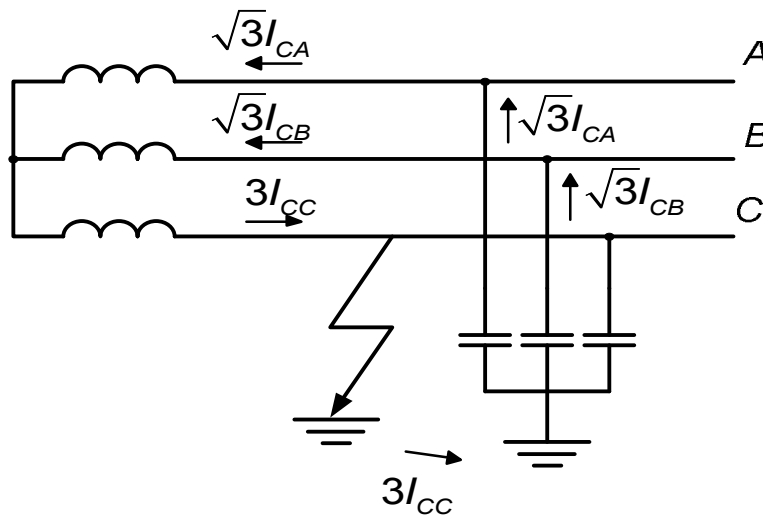


Fig. 1.10. Diagram of a network with the insulated neutral in ground fault conditions

The vector diagram of voltages and capacitive charging currents in the networks with the insulated neutral is given in Fig. 1.11. The faulty phase potential in ground fault conditions equals zero, and voltage of unfaulty phases increases to linear values. It leads to the $\sqrt{3}$ times increase in capacitive charging currents of unfaulty phases. In a faulty phase there flows the capacitive current which is equal to the vector sum of charging currents of unfaulty phases, that is to the threefold value of charging current in normal conditions.

Re-distribution of charging currents in ground fault conditions is shown with arrows in Fig. 1.10.

Ємнісні зарядні струми в мережах з номінальною напругою до 35 кВ незначні і їх збільшення та перерозподіл в режимі замикання на землю не призводить до суттєвої зміни фазних струмів в електричній мережі, що забезпечує економічність роботи електричної системи з ізолюваною нейтраллю.

В мережах з невеликими струмами замикання на землю доцільна компенсація ємнісних зарядних струмів ліній електропередавання в режимах замикання на землю. Для цього загальну нейтраль трансформаторів заземлюють через дугогасний реактор, як показано на рис. 1.12. Такий режим називають режимом з компенсованою нейтраллю.

В нормальному робочому режимі електричної системи ємнісний струм в загальній нейтралі трансформатора є геометричною сумою зарядних струмів трьох фаз і для симетричного режиму дорівнює нулю.

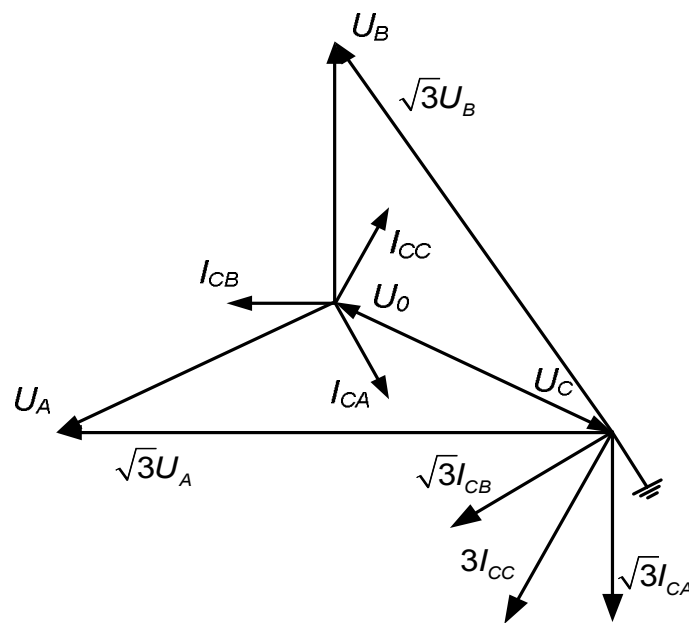


Рис. 1.11. Векторна діаграма напруг та ємнісних зарядних струмів в мережі з ізолюваною нейтраллю в нормальному режимі та в режимі замикання на землю

Режим замикання на землю для таких схем є аварійним режимом короткого замкнення. Тут внаслідок короткого замкнення до реактора в загальній нейтралі трансформатора прикладається фазна напруга пошкодженої фази. Це призводить до виникнення індуктивного струму від місця короткого замкнення, як показано на рис. 1.7. Разом з цим напруги непошкоджених фаз збільшуються до своїх лінійних значень. Це призводить до збільшення у $\sqrt{3}$ разів зарядних струмів непошкоджених фаз. Ємнісний струм пошкодженої фази дорівнює геометричній сумі зарядних струмів непошкоджених фаз, тобто потроєному значенню зарядного струму в доаварійному режимі.

Capacitive charging currents in the networks with the rated voltage of up to 35 kV are negligible, and their increase and re-distribution in ground fault conditions does not lead to considerable changes in phase currents in the electrical network, providing economic efficiency of the electric system with the isolated neutral.

In the networks with small ground fault currents it is practicable to compensate capacitive charging currents of power lines in ground fault conditions. For this purpose the general neutral conductor of transformers is earthed through the ground-fault neutralizer, as is shown in Fig. 1.12. Such conditions are called the resonant earthed neutral conditions.

In normal conditions of electric system the capacitive current in the general neutral conductor of the transformer is the vector sum of charging currents of three phases, and for balanced conditions it is equal to zero.

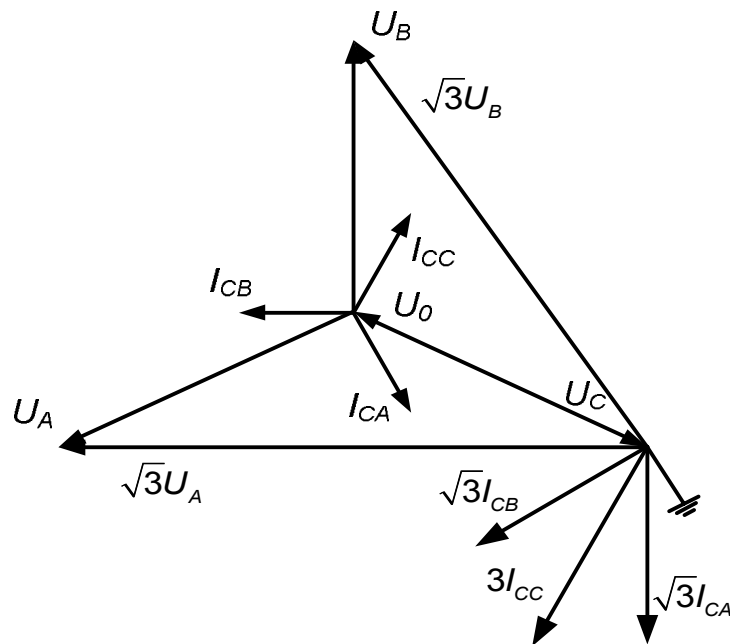


Fig. 1.11. The vector diagram of voltages and capacitive charging currents in the network with the insulated neutral in normal, and in ground fault conditions

Ground fault conditions in such designs represent short circuit emergency operation. As a result of short circuit the phase voltage of faulty phase is applied to the general neutral conductor of the transformer. It leads to generation of inductive current from the point of a short circuit, as shown in Fig. 1.7. Also, the voltage of unfaulted phases increases to the line values. It leads to a $\sqrt{3}$ times increase in charging currents of the unfaulted phases. The capacitive current of faulty phase equals the vector sum of charging currents of unfaulted phases, that is threefold value of charging current in prefault conditions.

Таким чином, струм дуги в місці короткого замкнення має дві складові – потроєний зарядний струм лінії та індуктивний струм дугогасної котушки. Такі струми знаходяться в протифазі та взаємно компенсують один одного. Це призводить до обмеження струмів короткого замкнення в мережах з компенсованою нейтраллю та до підвищення економічності устаткування через спрощення їх конструкцій.

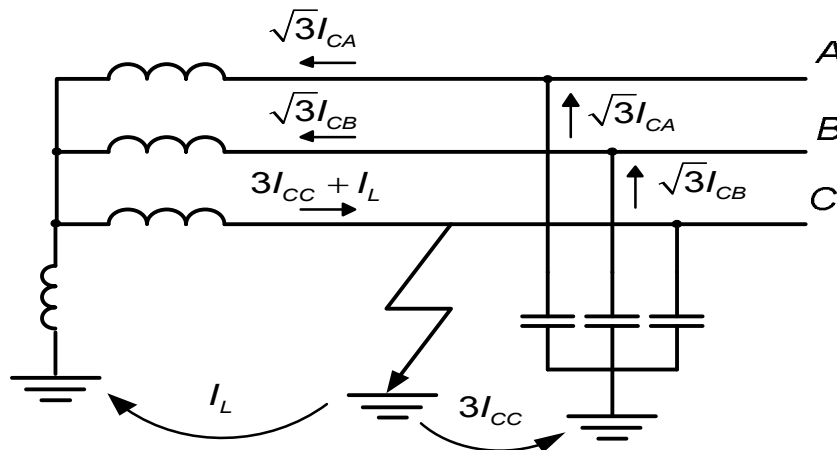


Рис. 1.12. Схема мережі з компенсованою нейтраллю в режимі замикання на землю

Електричні системи з номінальною напругою 110 кВ та вище характеризуються великими струмами замикання на землю (більше 500 А).

В таких мережах компенсація зарядних ємнісних струмів неефективна і такі мережі експлуатують в режимі з глухо заземленою нейтраллю, як показано на рис. 1.13.

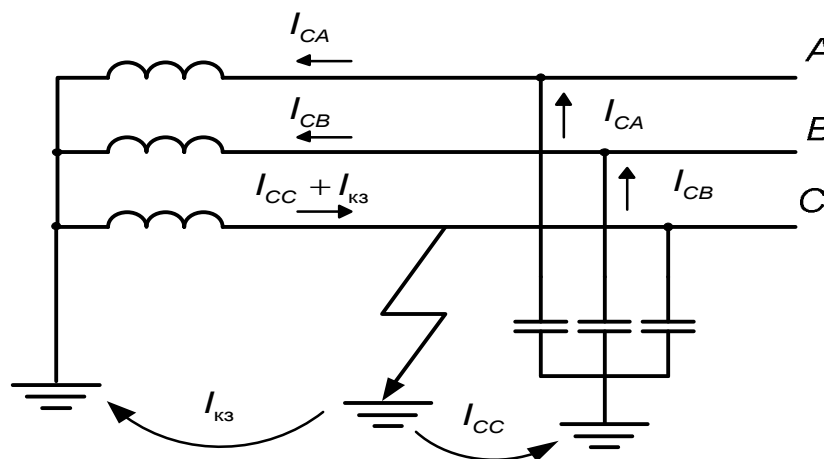


Рис. 1.13. Схема мережі з глухо заземленою нейтраллю в режимі замикання на землю

В нормальному робочому режимі електричної системи ємнісний струм в загальній нейтралі трансформатора є геометричною сумою зарядних струмів трьох фаз і для симетричного режиму дорівнює нулю.

Thus, the arc current in the point of short circuit has two components – threefold charging current of the line, and inductive current of a ground-fault neutralizer. Such currents are in opposite phase, and mutually compensate each other. It leads to restriction of short-circuit currents in the networks with the resonant earthed neutral, and to enhancement of economic efficiency of the equipment, and simplification of the design.

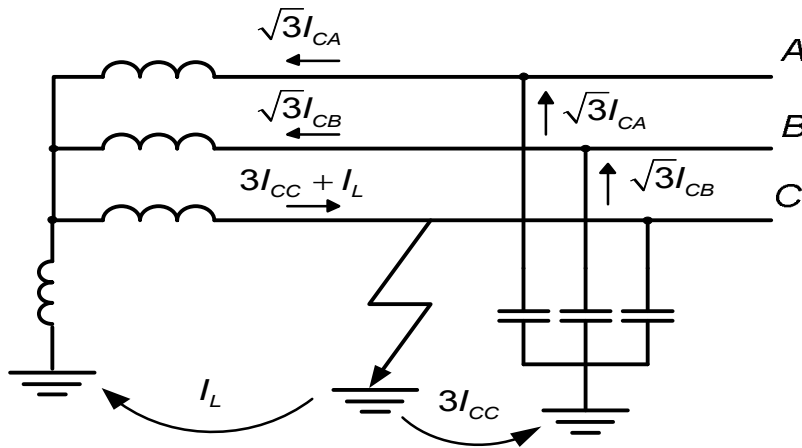


Fig. 1.12. Diagram of a network with the resonant earthed neutral in ground fault conditions

Electric systems with the rated voltage of 110 kV and above are characterised by high ground fault currents (over 500A). In such networks compensation of capacitive charging currents is inefficient, and the networks are operated in the solidly earthed neutral conditions, as shown in Fig. 1.13.

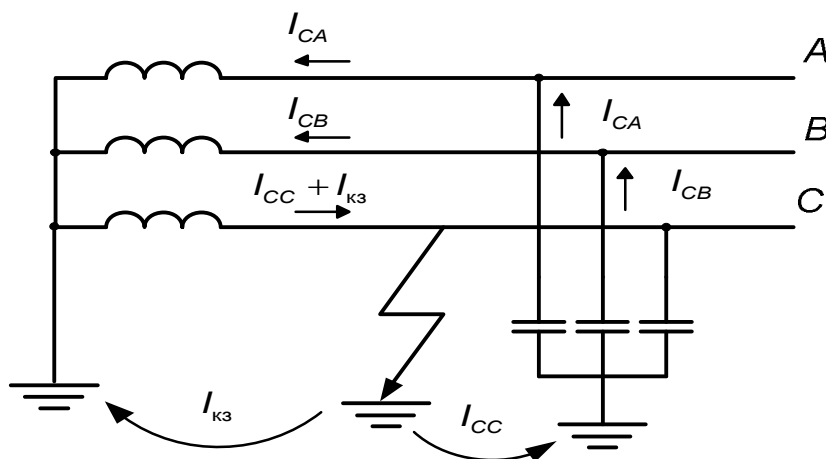


Fig. 1.13. Diagram of a network with the solidly earthed neutral in ground fault conditions

In normal conditions of electric system the capacitive current in the general neutral conductor of the transformer is the vector sum of charging currents of three phases, and for balanced conditions it is equal to zero.

Режим замикання на землю для таких схем є аварійним режимом короткого замкнення. Тут напруги непошкоджених фаз не змінюються. Так само не змінюються ємнісні зарядні струми непошкоджених фаз. Ємнісний струм пошкодженої фази є геометричною сумою зарядних струмів непошкоджених фаз і дорівнює ємнісному струму пошкодженої фази в доаварійному режимі, але має протилежний напрямок.

Таким чином, струм дуги в місці короткого замкнення має дві складові – струм короткого замкнення, який замикається через заземлену нейтраль трансформатора та зарядний струм лінії.

Мережі напругою 110 кВ не можуть працювати з ізольованою нейтраллю, тому що ізоляція в цьому випадку повинна розраховуватися на лінійну напругу, а це дорого. Тому такі мережі працюють із заземленою нейтраллю. При цьому струм однофазного короткого замикання може перевищувати струм трифазного КЗ. У цьому випадку комутаційна апаратура повинна вибиратися по більшому струму, тобто однофазному.

У місці пошкодження в таких мережах виникає електрична дуга з великим струмом. Дуга гаситься при відключенні пошкодження. Так як більшість КЗ самоусуваються, то для перевірки лінія включається знову під дією АПВ. Якщо КЗ самоусунулося, то ЛЕП залишається в роботі, якщо ні, то ушкодження відключається знову. У перехідному режимі й при комутаціях у мережі виникають внутрішні перенапруги. Величина перенапруги впливає на вибір ізоляції. Величину перенапруги намагаються обмежити. Для цього заземлюють нейтралі встаткування. Але чим більше заземлених нейтралей, тим менше величина перенапруги, але тим більше величина струму однофазного КЗ.

Для обмеження самих струмів короткого замкнення в мережах з номінальною напругою 110 кВ та вище обмежують кількість трансформаторів з глухо-заземленою нейтраллю. Частина нейтралей ізолюють, щоб величина струмів однофазного КЗ не перевищувала величину струмів трифазного КЗ. Заземлюють тільки нейтралі трансформаторів на електростанціях, вузлових підстанціях і на тупикових підстанціях споживачів. Напруга на неушкоджених фазах стосовно землі в усталеному режимі, не повинна бути більше $0,8 \cdot U_{ном}$ (лінійного). Такі мережі називаються мережами з ефективно-заземленою нейтраллю.

У мережах 220 кВ і вище застосовують глухо-заземлені нейтралі всіх трансформаторів. При цьому напруга на неушкоджених фазах стосовно землі в усталеному режимі, не перевищує фазне. Комутаційна апаратура вибирається по більшому струму КЗ.

В мережах з великими струмами короткого замкнення ємнісна складова дуги набагато менша складової короткого замкнення. Тому компенсація ємнісного струму дуги короткого замкнення є неефективною. Економічність устаткування електричних мереж вищих класів номінальної напруги досягається застосуванням швидкодіючих засобів релейного захисту, що призводить до обмеження часу протікання струмів короткого замкнення.

Ground fault conditions for such arrangements represent short circuit emergency operation. The voltages of unfaulted phases do not change. Capacitive charging currents of unfaulted phases do not change either. The capacitive current of faulty phase is the vector sum of charging currents of unfaulted phases, and is equal to the capacitive current of faulty phase in prefault conditions, but of opposite direction.

Thus, the arc current in the point of short circuit has two components, namely short-circuit current, which is grounded through the earthed neutral of the transformer, and charging current of the line.

The networks of 110 kV cannot operate with the insulated neutral as the insulation in this case must be designed for line voltage, which is rather expensive. Therefore, the networks are operated with the earthed neutral, and the current of single-phase short circuit can exceed the current of three-phase short circuit. In this case the switching equipment must be selected by the highest current, that is single phase current.

At the point of failure in the networks there is an electric arc of high current. The arc is blown out at fault clearing. As most short circuits are self-clearing, for the purpose of monitoring the line is switched on again under the influence of reclosure. If a short circuit is self-clearing, the power transmission line remains in operation; if not, the faulty line is disconnected again. In transient and switching operations, internal overvoltages occur in the network. The value of overvoltage influences the selection of insulation. The value of overvoltage should be restricted. For this purpose, neutral conductors of the equipment are earthed. However, the more earthed neutral conductors, the less is the value of overvoltage, and the more is the value of current of a single phase short circuit.

For restriction of short-circuit currents in the networks with the rated voltage of 110 kV and above the number of transformers with the solidly earthed neutral conductor is reduced. Part of neutral conductors are insulated so that the value of currents of a single phase short circuit should not exceed the value of currents of a three-phase short circuit, and only neutral conductors of transformers are earthed at power plants, central substations, and consumer's terminal substations. The voltage of unfaulted phases with reference to earth in steady-state conditions should not be more than $0.8 * U_{nom}$ (linear). These networks are called networks with the effectively earthed neutral conductor.

In the networks of 220 kV and above solidly earthed neutral conductors of all transformers are employed. The voltage of unfaulted phases with reference to earth in steady-state conditions does not exceed the phase voltage. The switching equipment is selected by the highest short circuit current.

In the networks with the high short-circuit currents the capacitive component of an arc is much less than the short circuit component. Therefore, compensation of the capacitive current of a short circuit arc is inefficient. The economic efficiency of electrical network equipment of higher rated voltage levels is achieved by application of high-speed relay protection devices, which leads to time limitation of short-circuit current flow.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що визначає режим роботи нейтралі у низьковольтних електричних мережах?
2. Що визначає режим роботи нейтралі у високовольтних електричних мережах?
3. Які режими нейтралі використовують в мережах до 1 кВ?
4. Які режими нейтралі використовують в мережах до 35 кВ?
5. Які режими нейтралі використовують в мережах 110 кВ та вище?
6. Назвіть переваги та недоліки мереж з глухо заземленою нейтраллю.
7. Назвіть переваги та недоліки мереж з ізольованою нейтраллю.

ЛІТЕРАТУРА

[2], стор. 46-51; [3], стор. 15-21; [6], стор. 54-58

Тема 2 КОНСТРУКЦІЇ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

1.7 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОВІТРЯНІ ТА КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Електричною повітряною лінією електропередавання називається обладнання для передавання електричної енергії по проводах, розташованих на відкритому повітрі і закріплених за допомогою ізоляторів і арматури до опор або кронштейнів інженерних споруджень. Головні елементи повітряної ЛЕП:

- провода, які служать для передавання електроенергії;
- грозозахисні троси для захисту від атмосферних перенапруг (грозових розрядів), які монтуються у верхній частині опор;
- опори, що підтримують провода і троси на певній висоті над поверхнею;
- ізолятори, що ізолюють провода від тіла опори;
- арматура, за допомогою якої провода закріплюються на ізоляторах, а ізолятори на опорі.

По конструктивному виконанню розрізняють одноланцюгові і дволанцюгові ЛЕП. Під ланцюгом розуміють три провода (трифазний ланцюг) однієї ЛЕП.

Конструктивна частина ПЛЕП характеризується типами опор, довжинами прольотів, габаритними розмірами, конструкцією фази й типами гірлянд ізоляторів.

По типу опори ПЛЕП діляться на проміжні й анкерні. Проміжні й анкерні відрізняються способом підвіски проводів. На проміжній опорі провода підвішуються за допомогою підтримуючих гірлянд ізоляторів. На анкерних опорах провода закріплені жорстко й натягнуті до заданого тяжіння за допомогою натяжної гірлянди ізоляторів (рис. 1.14).

CONTROL QUESTIONS

1. *What determines the mode of operation of neutral conductor in low-voltage electrical networks?*
2. *What determines the mode of operation of neutral conductor in high-voltage electrical networks?*
3. *What modes of operation of neutral conductor are used in the networks of up to 1 kV?*
4. *What modes of operation of neutral conductor are used in the networks of up to 35 kV?*
5. *What modes of operation of neutral conductor are used in the networks of 110 kV and above?*
6. *Name advantages and disadvantages of the networks with the solidly grounded neutral.*
7. *Name advantages and disadvantages of the networks with the insulated neutral.*

REFERENCES

[2], p. 46-51; [3], p. 15-21; [6], p. 54-58

Chapter 2 DESIGNS OF POWER TRANSMISSION LINES

1.7 THE BASIC FACTS OF OVERHEAD AND CABLE TRANSMISSION LINES

An *overhead power line* is a facility for transmission of electrical energy over the wires located outdoors and fixed by insulating parts and accessories to the poles, or bearing supports of the engineering structures. The main components of an overhead power line are:

- wires, which serve for electric power transmission;
- overhead ground-wire cables for protection against atmospheric overvoltages (lightning discharges), which are mounted at the top of the poles;
- poles, which carry wires and cables at a certain height above the surface;
- insulators, which insulate the wires from the body of a pole;
- overhead line accessories, which fix wires on the insulators, and insulators on the pole.

By design we can distinguish between single-circuit and double-circuit transmission lines, the circuit being made of three wires (three-phase circuit).

The structure of overhead power line is characterised by the types of pole, lengths of spans, overall dimensions, phase configuration, and types of insulator string.

By the type of the pole overhead power lines are divided into those with intermediate support, and anchor support. Intermediate and anchor supports differ in the manner of wire suspension. On the intermediate support wires are suspended by means of suspension insulator strings. On the anchor support wires are rigidly fixed, and tight at the tension required by means of dead-end insulator strings (Fig. 1.14).



Рис. 1.14. Кріплення провода в фазі на проміжній (а) та анкерній (б) опорах: 1 –траверса; 2– гірлянда ізоляторів; 3– зажим;4– провід

За призначенням розрізняють опори кутові, кінцеві, спеціального призначення.

По матеріалу опор розрізняють дерев'яні або дерев'яні композитні (до 220 кВ), залізобетонні – вібровані та центрифуговані (35 – 330 кВ) і металеві (35 кВ і вище).

На ПЛЕП застосовують не ізольовані провода і троси. Перебуваючи на відкритому повітрі, вони піддаються атмосферному впливу. Тому матеріал проводів, окрім високої провідності, повинен бути стійким до корозії, мати механічну міцність. Для проводів застосовують наступні матеріали: мідь; алюміній; сталь; сплави алюмінію й міді з іншими металами (залізом, магнієм, кремнієм).

Мідь має питому провідність $\approx 53 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{км} / \text{мм}^2$. Відрізняється механічною міцністю. Плівка окису захищає її від корозії й хімічних впливів. Має стійкість контакту.

Алюміній має питому провідність $\approx 31,7 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{км} / \text{мм}^2$. Механічна міцність нижча, ніж у міді. Отже, частіше слід ставити опори. Плівка окису захищає її від корозії. Погано протистоїть хімічним впливам. Не має стійкість контакту.

Сталеві провода мають погану провідність. Відрізняються великою механічною міцністю. Не мають стійкість до корозії. Активний опір залежить від струму, що протікає.

Виготовляють провода із двох металів – сталі та алюмінію. Сталь знаходиться у середині провода й служить для збільшення механічної міцності. Алюміній знаходиться зовні і є струмопровідною частиною.

У маркуванні проводів спочатку вказується матеріал, а потім перетин у мм^2 . Мідні провода маркують буквою **М**, алюмінієві провода – буквою **А**, сталеві провода – буквами **ПС** і **ПСО**, а сталюалюмінієві – буквами **АС**. У маркуванні сталюалюмінієвих проводів спочатку вказують перетин алюмінію, а потім сталі. Наприклад: АС-120/19. Провода марки **АС** випускаються з різним відношенням перетинів алюмінію й сталі при тому самому перетині алюмінію. Залежно від цього відношення розрізняють провода полегшеної конструкції, середньої, посиленої й особливо посиленої міцності.



Fig. 1.14. The wire fastened in phase on the intermediate (a) and anchor (b) support: 1 – crossarm; 2 – insulator string; 3 – terminal; 4 – wire

By the purpose of application, there are angle structures, dead-end structures, and special-purpose structures.

By the material used, there are wood, or wood composite (up to 220 kV), ferroconcrete – vibrated and span concrete – (35–330 kV), and metal (35 kV and above) poles.

On the overhead power lines uninsulated wires and cables are used. Being in the open air, they are exposed to weather impact. Therefore, the material of wires, in addition to high conductivity, should have corrosion resistance, and mechanical strength. In wires the following materials are used: copper, aluminium, steel, alloys of aluminium and copper with other metals (iron, magnesium, or silicon).

Copper has the specific conductance of $\approx 53 \cdot 10^{-3} \text{ Sm km/mm}^2$, and is notable for its mechanical strength. An oxide film protects it from corrosion and chemical effect. It also provides stability of contact.

Aluminium has the specific conductance of $\approx 31.7 \cdot 10^{-3} \text{ Sm km/mm}^2$, and its mechanical strength is lower than that of copper. Thus, it is necessary to install more poles. An oxide film protects it from corrosion, but it poorly resists to chemical effect. It does not provide stability of contact.

Steel wires have bad conductivity, but are notable for high mechanical strength. They do not have corrosion resistance, and the ohmic resistance depends on the flowing current.

Wires are made of two metals – steel and aluminium. The steel is at the middle of a wire and serves for increasing the mechanical strength. Aluminium is outside, and is a current-carrying part.

In wire codes the material is indicated first, then comes the cross-section in mm^2 . Copper conductors are marked with letter **C**, aluminium conductors – with letter **A**, steel wires – with letters **PS** and **PSO**, and steel aluminium – with letters **AS**. In coding steel-aluminium conductors the aluminium cross-section is indicated first, and then comes the steel cross-section. For example: AS-120/19. **AS** wires are made with different ratio of aluminium and steel cross-sections but with the same cross-section of aluminium. Depending on this ratio, there are wires of light-weight design, average, reinforced and specially reinforced strength.

Для захисту проводів марки АС від корозії й хімічних впливів використовують спеціальні захисні засоби.

Тип захисту відображається в маркуванні провода:

- марки **АСКС**, **АСКП** – провода сталевалюмінієве корозійностійкі із заповненням сталевого сердечника (С) або всього провода (П) змазкою;
- марка **АСК** – як і **АСКС**, сталевий сердечник ізольований поліетиленовою плівкою.

За кордоном застосовуються ізолюючі самонесучі проводи. Являють собою систему ізованих жил, скручених навколо несучого троса. Скрутка виконується таким чином, що все механічне навантаження сприймається тільки несучим тросом. Такі проводи прокладаються без ізоляторів. На опори можуть бути змонтовані декілька ЛЕП різних напруг.

По конструкції розрізняють проводи: **однодротові**, які складаються із одного дроту суцільного перетину; **багатодротові з одного металу**, які виготовляються в залежності від перетину з непарної кількості дротів (від 7 до 61); багатодротові із двох металів. Кількість проводів сталевого сердечника – непарна (1, 7 або 19). Кількість дротів струмопровідної частини – парна.

Провода ПЛЕП розташовують на опори різними способами (де які з них): на одноланцюгових опорах – трикутником або горизонтально (рис.1.15, а, б); на дволанцюгових опорах – зворотною ялинкою або шестикутником у вигляді “діжки” (рис.1.15, в, г).

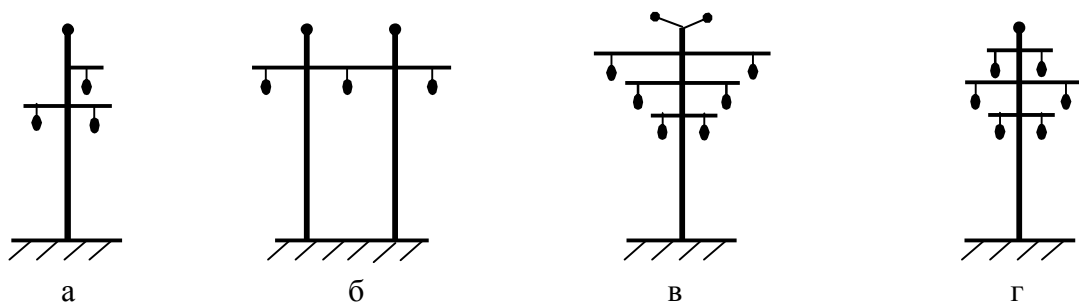


Рис.1.15. Розташування проводів на опорах: а) – трикутником; б) – горизонтально; в) – зворотною ялинкою; г) – діжкою

Горизонтальне розташування проводів – найкраще за умовами експлуатації, тому що дозволяє застосовувати більш низькі опори та виключає дотик проводів при скиданні ожеледі або галопуванні проводів (сталих періодичних низькочастотних (0,2-2 Гц) коливаннях проводів (тросів) у прогоні, які утворюють стоячі хвилі - іноді в сполученні з біжучими - з числом напівхвиль від однієї до двадцяти та амплітудою 0,3-5 м). («Пляска» проводів – це коливання проводів з малою частотою й великою амплітудою).

Special protective measures are taken to protect AS wires from corrosion and chemical effect.

The protection type is indicated in the wire code:

- ACSR and AACSR wires are corrosion-resistant steel aluminium wires, with the steel core (ACSR) or with the whole wire reinforced (AACSR);
- ACAR are similar to ACSR, but the steel core is insulated with polyethylene film.

In foreign countries self-carrying insulating wires are used. They represent a system of insulated conductors twisted round the suspension cable. A twist is made so that all mechanical load is on the suspension cable. These wires are laid without insulators. Several transmission lines of various voltages can be mounted on the same pole.

By design wires are divided into: solid conductors, consisting of one wire of continuous cross-section; multiwire conductors of one metal, which are made of odd number of wires (from 7 to 61), depending on the cross-section; and multiplexed conductors of two metals. The number of wires of a steel core is odd (1, 7, or 19), and the number of wires of a current-carrying part is even.

Overhead power line wires are located on the pole in a different manner, for example: delta, or horizontal configurations (Fig. 1.15, a, b) on single circuit poles; inverted delta, or barrel-like configurations (Fig. 1.15, c,d) on double circuit poles.

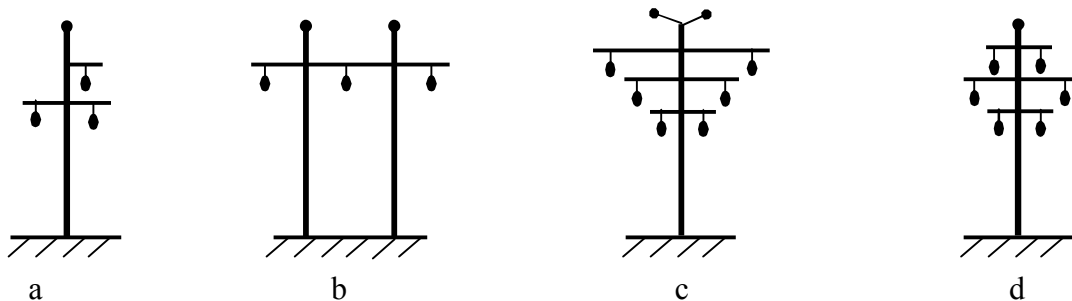


Fig. 1.15. Arrangement of wires on the pole: a – delta; b – horizontal; c – inverted delta; d – barrel-like

The horizontal configuration of wires is best for operating conditions as it allows applying lower poles and eliminates the contact of wires at de-icing, or overhead line galloping (constant periodic low-frequency (0.2-2 Hz) oscillations of wires (cables) in the span, which result in standing waves – sometimes in combination with running waves – with the number of half-wave from one to twenty, and amplitude of 0.3-5m). Conductor galloping is oscillations of wires of small frequency and large amplitude)

Так як у всіх варіантах має місце несиметричне розташування проводів стосовно один одного, то для вирівнювання реактивного опору і ємнісної провідності по фазах застосовують транспозицію, тобто міняють розташування проводів на опорах (рис.1.16).



Рис.1.16. Транспозиція на ПЛЕП

Для виконання грозозахисту ліній електропередавання використовують сталеві троси або сталеві алюмінієві проводи зі зменшеним перерізом алюмінієвої частини.

Останнім часом, для виконання струмоведучих проводів та грозозахисту повітряних ліній використовують спеціальні проводи та троси, суміщені зі оптоволоконним кабелем, розташованим всередині проводів та тросів (рис.1.17), що дозволяє крім передавання електричної енергії та грозозахисту повітряних ліній організувати високошвидкісних оптоволоконні канали зв'язку.

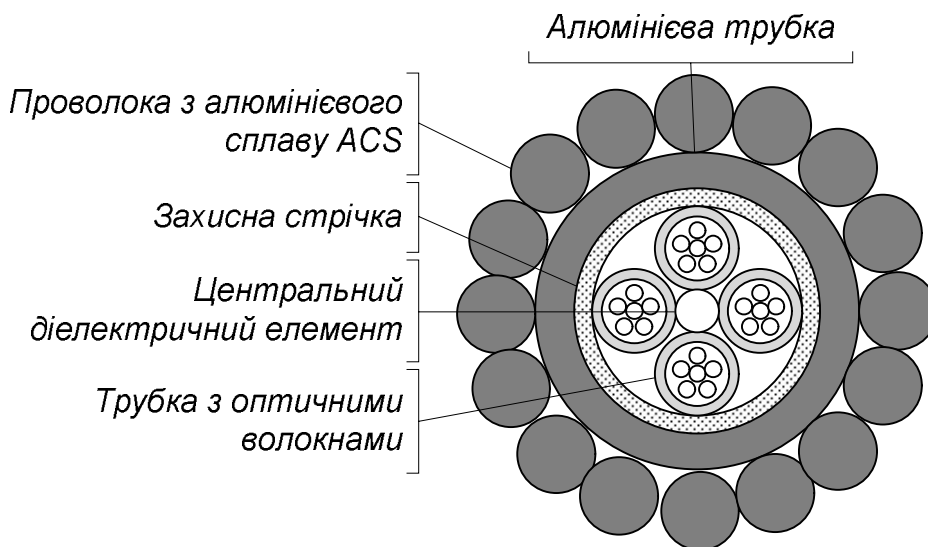


Рис. 1.17. Конструкція оптичного кабелю у грозозахисному тросі OPGW

Проводи повітряних ліній закріплюють на опорах за допомогою лінійних ізоляторів та арматури. *Ізолятори* призначені для ізоляції проводів повітряної лінії, які знаходяться під дією високої напруги, від металевих елементів конструкцій опор.

Основна особливість ізоляторів повітряних ліній полягає в тому, що вони випробують одночасну дію високої електричної напруги та великих механічних навантажень. Це визначає основні вимоги до конструктивного виконання

As in all the alternatives there is asymmetrical arrangement of wires against each other, balancing of reactance and capacitive susceptance in phases is done by applying a transposition, that is a change in the arrangement of wires on the pole (Fig. 1.16)

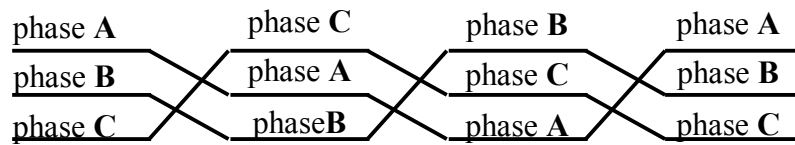


Fig.1.16. Transposition of overhead power wires

Steel cables or steel aluminium wires of smaller cross-section of an aluminium part are used for lightning protection of power lines.

Recently, for design of current-carrying wires and lightning protection of overhead lines there have been used special wires and cables, containing a fibre-optical cable located inside (Fig. 1.17), which in addition to transmission of electrical energy and lightning protection of overhead power lines allows arranging high-speed fibre-optical communication channels.

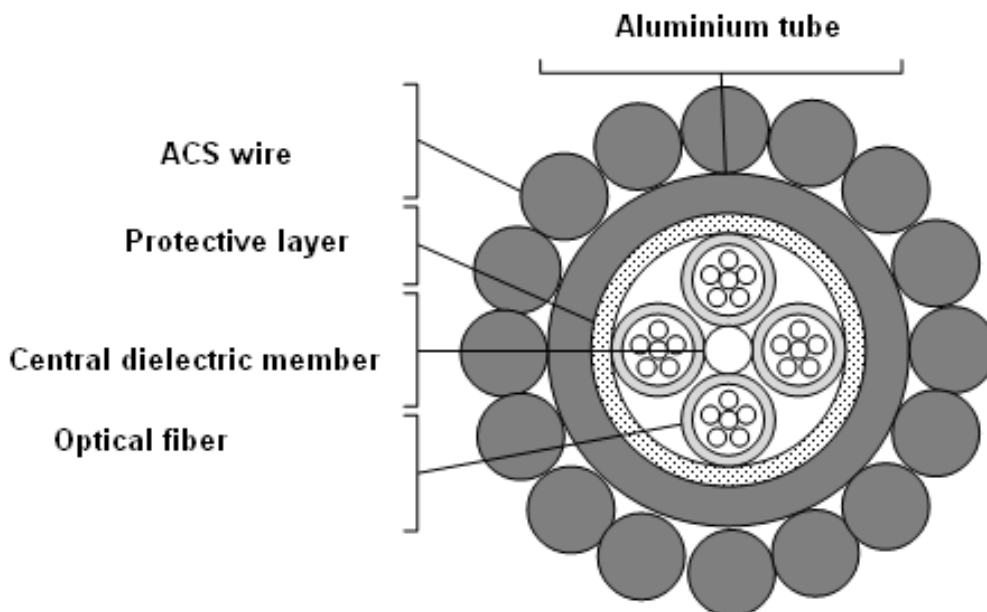


Fig. 1.17. Design of optical cable in overhead ground-wire OPGW cable

Wires of overhead power lines are fixed on the poles by linear insulators and accessories. *Insulators* are intended for insulation of wires of overhead power lines, which are at high voltage, from metal components of the pole structure.

The main feature of insulators of overhead power lines is that they undergo the effect of high voltage and high mechanical load at the same time. It affects the basic requirements for the design of

ізоляторів повітряних ліній. До таких вимог відносять високу електричну та механічну міцність, стійкість до впливів оточуючого середовища, зручність експлуатації та економічність.

Для виготовлення ізоляторів використовують електротехнічний фарфор, загартоване скло та синтетичні полімери.

За конструктивним виконанням розрізняють штирові та підвісні ізолятори.

Штирові ізолятори призначені для використання на лініях електропередавання розподільчих мереж напругою до 35 кВ. Такі ізолятори виготовляють з фарфору або з електротехнічного скла. Загальний вигляд штирових ізоляторів представлено на рис. 1.18.

Підвісні ізолятори використовують в лініях електропередавання напругою 35 кВ та вище. Такі ізолятори поділяють на гірлянди тарілчастих ізоляторів та на стрижневі ізолятори.

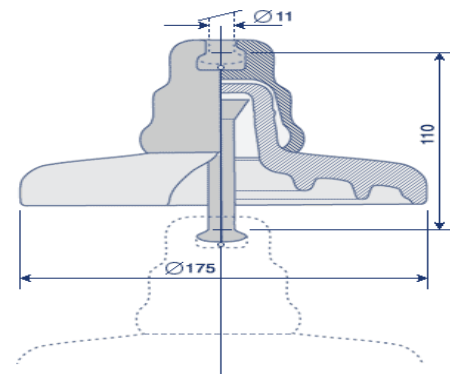
Гірлянди ізоляторів збирають з *тарілчастих ізоляторів*, виготовлених з фарфору або загартованого скла. Загальний вигляд тарілчастого ізолятора наведено на рис.1.19 а. На рис.1.19 б схематично показано спосіб поєднання тарілчастих ізоляторів в гірлянду.



Рис. 1.18. Штировий скляний ізолятор



а



б

Рис. 1.19. Тарілчастий ізолятор

Стрижневі ізолятори виготовляють з однонаправлених полімерів. Загальний вигляд стрижневого полімерного ізолятора наведено на рис. 1.20.

overhead line insulators. These requirements include high electric and mechanical strength, resistance to environmental impacts, usability, and economic efficiency.

Electrical porcelain, hardened glass and synthetic polymers are used for manufacturing insulators.

By design, one can distinguish between pin-type insulators, and suspension insulators.

Pin-type insulators are intended for application on power transmission lines of distribution networks of up to 35 kV. These insulators are made of porcelain, or electric glass. A general view of the post insulators is presented in Fig. 1.18.

Suspension insulators are used in power transmission lines of 35 kV and above. These insulators are divided into strings of disk insulators, and shackle insulators.

Insulator strings are constructed from *disk insulators* made of porcelain, or hardened glass. A general view of the disk insulators is given in Fig. 1.19 (a). Fig. 1.19 (b) shows how disk insulators are combined into a string.



Fig. 1.18. Glass pin-type insulator

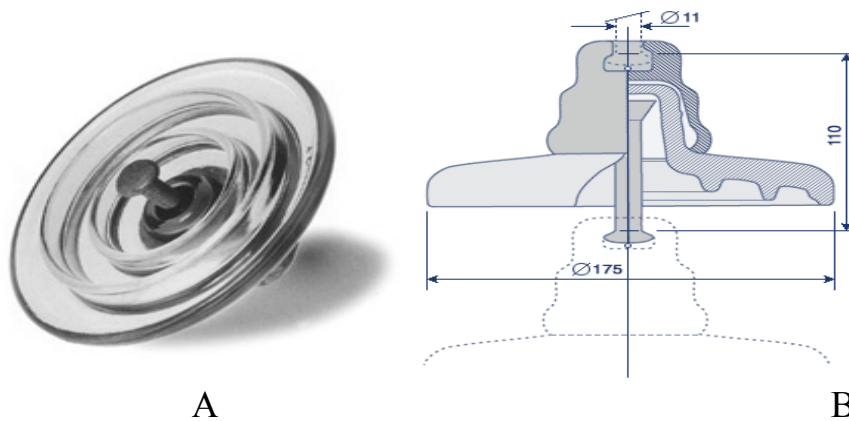


Fig. 1.19. Disk insulator

Shackle insulators are made of unidirectional polymers. A general view of polymer shackle insulators is given in Fig. 1.20.

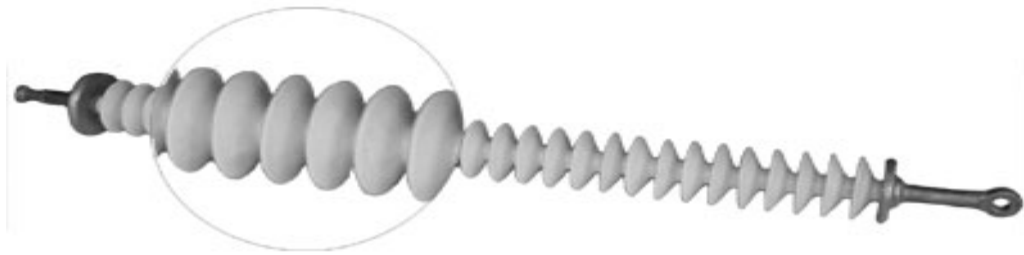


Рис. 1.20. Полімерний стрижневий ізолятор

Такі ізолятори дорожче за гірлянди тарілчастих ізоляторів. Проте вони характеризуються кращими електрофізичними властивостями та значно меншою вагою, що обумовлює широкі перспективи використання полімерних ізоляторів в конструкціях повітряних ліній електропередавання всіх класів номінальної напруги. Зокрема, чинні нормативні документи рекомендують використовувати полімерні ізолятори під час будівництва нових та реконструкції існуючих ліній електропередавання.

Кабельна лінія електропередавання – це лінія для передавання електроенергії, яка складається з одного або декількох кабелів.

Кабель – це ізольована по всій довжині металева жила (або декілька жил), поверх якої накладені захисні покриття.

Переваги КЛЕП стосовно ПЛЕП:

- несхильність атмосферним впливам;
- захищеність траси і недосяжність для сторонніх осіб.

Недоліки:

- дорожче ПЛЕП аналогічного класу напруги;
- більш трудомісткі в спорудженні;
- вимагають більшого терміну для ремонту й більш кваліфікованого обслуговуючого персоналу;
- передача однієї й тієї ж потужності потребує жили більшого перетину.

Кабельні ЛЕП широко використовуються в міських мережах, на територіях підприємств, при перетинанні великих водойм, у забрудненій атмосфері.

Головними елементами КЛЕП є:

- кабель для передавання електроенергії;
- сполучні муфти;
- кінцеві муфти (закладення);
- стопорні муфти. Застосовуються на крутих ділянках траси для попередження стікання кабельної маси;
- підживлюючі апарати й система сигналізації тиску масла для ліній виконаних масло наповненими кабелями;
- кабельні спорудження (кабельні колектори, тунелі, канали, шахти, колодязі), які застосовують на окремих ділянках траси.

До основних частинам кабелю будь-якої напруги відносяться:

- струмопровідні жили;

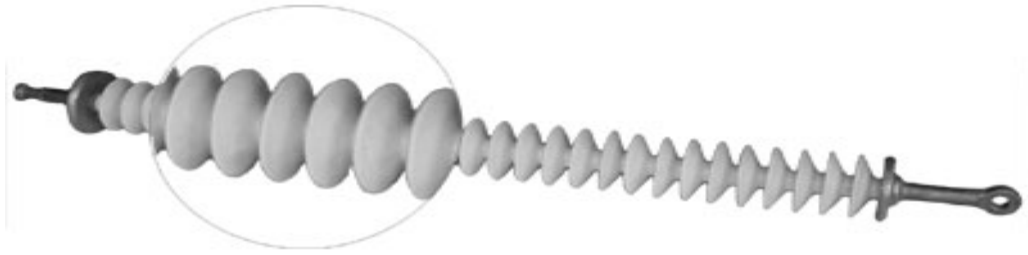


Fig. 1.20. Polymer shackle insulator

These insulators are more expensive than a string of disk insulators. However, they are characterised by the best electrophysical properties, and much lower weight, which leads to broad prospects of using polymer insulators in the design of overhead power transmission lines of rated voltage of all levels. In particular, the valid standards recommend using polymer insulators for building new power lines and redesigning the existing ones.

The cable power transmission line is a line for transmission of electric power, consisting of one or several cables.

The cable is the metal strand insulated along the full length (or a few strands), covered with protective coating.

The advantages of cable power transmission lines over overhead power transmission lines:

- resistance to weather impacts;
- proofness of the path and inaccessibility for unauthorized persons.

Disadvantages:

- being more expensive than overhead power lines of similar voltage level;
- being more labour-consuming in terms of construction;
- requiring more time for repair, and more qualified maintenance personnel;
- transmission of the same power requires strands of larger cross-section.

Cable power transmission lines are widely used in town and city networks, in the areas of plants and factories, at the junctions of large reservoirs, and in air-polluted territories.

The main components of cable power transmission line are:

- cable for electric power transmission;
- combined cable boxes;
- end cable sleeves;
- stop joints, which are used in steep areas of the path in order to prevent cables from sliding down;
- oil-feed units, and signaling system of oil pressure in the oil-filled cable lines;
- cable work (cable collecting channels, tunnels, channels, chamber, pit), used at certain areas of the path.

The principal parts of a cable of any voltage are:

- current-carrying cable cores;

- ізоляція або ізолюючі оболонки, що відокремлюють струмопровідні жили один від одного і від землі;
- захисна оболонка, що охороняє ізоляцію від шкідливої дії вологи, кислот, механічних пошкоджень.

Конструкція кабелю напругою 10 кВ наведена на рис.1.21.

Струмопровідна жила виконується з міді або алюмінію з однієї (до 16 мм²) або декількох дротів. По кількості жил розрізняють кабелі:

- одножильні. Застосовують на постійному струмі й на змінному струмі при напрузі 110 кВ і вище;
- двожильні. Застосовують на постійному струмі;
- трижильні. Застосовують на змінному струмі при напругах до 35 кВ;
- чотирижильні (три жили й нульовий провід). Застосовують на змінному струмі при напрузі до 1000В.

Фазна ізоляція призначена для ізоляції жил одна від одної. Виконують зі спеціального технічного паперу із грузлим просоченням, яке збільшує електричну міцність.

Поясна ізоляція забезпечує однакову електричну міцність між жилами й між будь-якою фазою й землею. Це важливо, тому що в мережі з ізолюваною нейтраллю при замиканні однієї з фаз на землю дві інші фази стосовно землі опиняються під лінійною напругою.

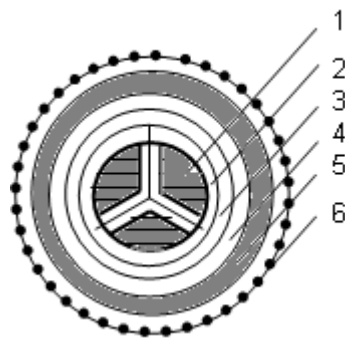


Рис.1.21. Конструкція кабелю 10 кВ: 1 – струмопровідна жила; 2 – фазна ізоляція; 3 – поясна ізоляція; 4 – оболонка; 5 – броня; 6 – захисне покриття

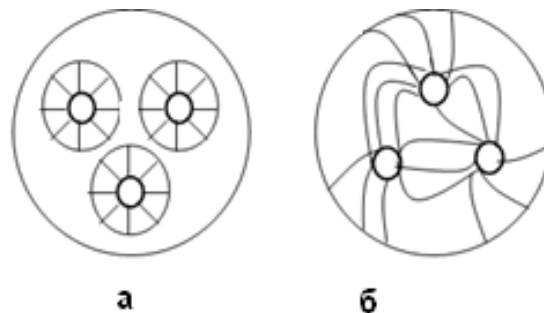


Рис.1.22. Електричне поле в кабелі: а – з екранованими жилами; б – з поясною ізоляцією

- insulation, or insulated enclosure, separating current-carrying cable cores from each other, and from the earth;
- cable shielding, which protects insulation from adverse effect of moisture, acids, and mechanical damage.

The design of 10 kV cable is given in Fig. 1.21.

The *current-carrying cable core* is made of copper or aluminium with one (to 16 mm²), or several wires. By the number of cable core there are:

- single-core cables, used on both direct and alternating current at the voltage of 110 kV and above;
- twin cables, used on direct current;
- triple (three-core) cables, used on alternating current at the voltage of up to 35kV;
- four-core cables (three cores, and the neutral lead), used on alternating current at the voltage of up to 1,000 V.

Phase insulation is intended for insulation of cable cores from each other. It is made of special technical paper with viscous impregnation, which increases electric strength.

Belt insulation provides equal electric strength between cable cores, and between any phase and the earth. It is important since in the network with the insulated neutral if there is a ground fault of one of the phases, the two other phases are at line voltage in respect of the earth.

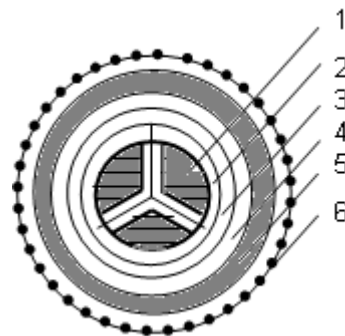


Fig. 1.21. Design of 10 kV cable: 1 – a current-carrying cable core; 2 – phase insulation; 3 – belt insulation; 4 – shielding; 5 – cable armoring; 6 – protective coating

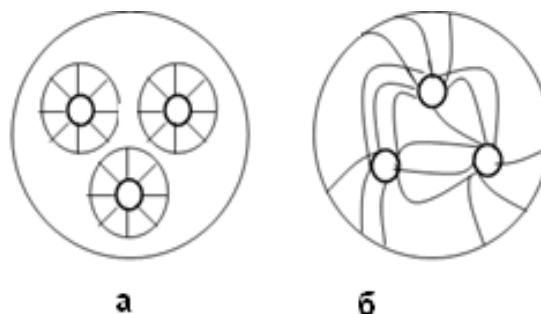


Fig. 1.22. Electric field in a cable: a – with shielded conductors; b- with belt insulation.

Поділ ізоляції на фазну й поясну дозволяє зменшити діаметр кабелю. Але при наявності поясної ізоляції електричне поле відрізняється від радіального (Рис.1.22.). У цьому випадку силові лінії мають різні кути нахилу стосовно шарів паперу, що обумовлює наявність у них тангенціальної складової поля. Електрична міцність уздовж шарів паперу в 8 – 10 раз менше, ніж поперек.

Вільний простір кабелю заповнюється паперовими джгутами. Вони ускладнюють переміщення просочувального складу, подовжуючи термін служби кабелю. Вони також надають округлу форму кабелю.

Оболонка служить для герметизації ізоляції й захисту її від проникнення вологи, повітря, хімічних продуктів, виключає старіння ізоляції під дією тепла й світла. Виконують із алюмінію, свинцю, поліетиленових матеріалів.

Броня служить для захисту оболонки від механічних пошкоджень при розкопках, сповзанні ґрунту. Виконують зі сталевих стрічок або дротів.

Зовнішнє покриття захищає броню від корозії. Являє собою джутове покриття, просочене бітумною масою.

При підвищенні напруги шар ізоляції потрібно збільшувати. Це економічно не доцільно. Тому при напрузі 35 кВ і вище кабелі виконуються з окремо освинцьованими або екранованими жилами. В таких кабелях електричне і теплове поля – радіальні.

Кабелі із грузлим просоченням мають істотний недолік: після зняття струмового навантаження, тобто при охолодженні в кабелі з'являються газові включення. Це пов'язане з тим, що коефіцієнт лінійного розширення кабельної маси значно більше коефіцієнта лінійного розширення ізолюючого паперу. Діелектрична міцність газових включень менше в кілька раз, ніж папера. При підвищенні напруженості електричного поля це може привести до пробую ізоляції.

Щоб уникнути цього при напругах 10 – 110 кВ застосовують газонаповнені кабелі. Це освинцьовані кабелі. Фазна ізоляція виконується з збіднено-просоченого паперу. Кабель перебуває під невеликим надлишковим тиском (0,1 – 0,3 МПа) інертного газу (азоту). Це підвищує ізолюючі властивості паперу. Сталість тиску забезпечується безперервним підживленням газу.

При напрузі 110 – 500 кВ використовуються маслонаповнені кабелі. Жили виконують порожніми й заповнюють їх малов'язким очищеним маслом під тиском до 1,6 МПа. Надлишковий тиск виключає можливість утворення порожнеч в ізоляції кабелю, що збільшує його електричну міцність. Залежно від величини тиску розрізняють масло наповнені кабелі високого й низького тиску. Маслонаповнений канал через спеціальні муфти на трасі з'єднується з баками під тиском.

Останнім часом в електричних мережах різних класів номінальної напруги широкого поширення набули *кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену*. Завдяки молекулярній структурі така ізоляція характеризується високими термомеханічними властивостями та стійкістю до агресивного середовища. Кращі термічні характеристики кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену

Separating insulation into phase insulation and belt insulation allows reducing the diameter of a cable but in the presence of belt insulation the electric field differs from the radial one (Fig. 1.22.). In this case the lines of flux have a different slope angle to paper layers, which causes the presence of a tangential component of the field. Electric strength along the paper layers is 8-10 times less than across them.

The free space of a cable is filled with jute paper. This complicates the movement of impregnation parts, extending the useful life of the cable. It also gives the cable a round shape.

The shielding serves for hermetization of insulation, and protection against penetration of moisture, air, and chemicals; it also eliminates the ageing of insulation because of heat and light impact. The shielding is made of aluminium, lead, and polyethylene materials.

Cable armor serves for protection of a shielding against mechanical damage at digging, or soil creeping. It is made of steel tapes, or wires.

The external covering protects the cable armoring from corrosion, and represents the jute-covering impregnated with bituminous material.

As the voltage rises, the insulating layer must be increased. It is not economically viable, however. Thus, at the voltage of 35 kV and above the cables are made separately from lead-covered or shielded cable cores. In these cables the electric and thermal fields are radial.

Cables with viscous impregnation have a serious disadvantage: after current load is removed, that is at cooling, there appear gas inclusions in the cable. It is associated with the fact that the coefficient of linear expansion of the cable compound is much more than the coefficient of linear expansion of insulating papers. Dielectric rigidity of gas inclusions is several times lower than that of the paper. With the increase in the magnetic field strength this can lead to insulation breakdown.

To avoid this problem, gas-filled cables are used at the voltages of 10-110 kV. These are lead-covered cables. Phase insulation is made of poorly impregnated paper. The cable is under small excess pressure (0.1-0.3 MPa) of inert gas (nitrogen). This enhances insulating properties of the paper. The pressure stability is provided with a continuous gas supply.

Oil-filled cables are used at the voltages of 110-500 kV. Cable cores are made empty, and filled with low-viscosity refined oil under pressure of up to 1.6MPa. The excess pressure eliminates the possibility of cavitation in the cable insulation, which increases its electric strength. Depending on the magnitude of pressure, there are oil-filled cables of high and low pressure. The oil-filled channel is connected by special cable boxes on the path to the tanks under pressure.

Recently, in electrical networks of rated voltage of different levels it has become common to use cables with cross-linked polyethylene insulation. Due to molecular structure this insulation is characterised by high thermomechanical properties, and resistance to hostile environment. The best thermal characteristics of cross-linked polyethylene cables

дозволяє суттєво підвищити гранично допустимі струми і, як наслідок, пропускну здатність кабельної лінії.

Такі кабелі на напруги до 10 кВ виготовляють трижильними або одножильними. На напруги 35 кВ та вище такі кабелі виготовляють одножильними.

На рис.1.23 наведено загальний вигляд одножильного кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Такі кабелі складаються з струмопровідної жили 1, екранованої напівпровідним зшитим поліетиленом 2. Далі знаходиться шар ізоляції зі зшитого поліетилену 3, екранований напівпровідною пластмасою 4. Екран з мідних проволочок 6 захищений подушками роздільних шарів 5 та 7. Зовнішній шар кабелю створює пластикова оболонка 8.

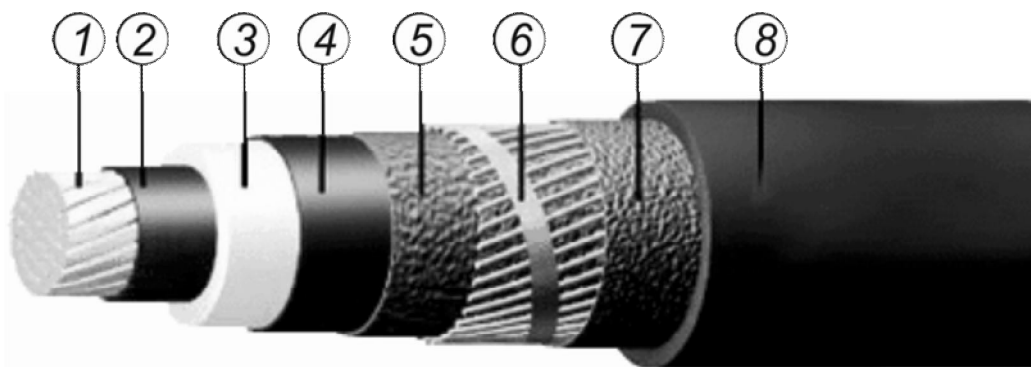


Рис. 1.23. Конструкція кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену

Маркуються кабелі по початкових буквах елементів, які характеризують їхню конструкцію:

- жила – буква **А** для алюмінію, без позначення для міді;
- оболонка – буква **А** для алюмінію, **З** – для свинцю, **В** – для полівінілхлориду, **Н** – для гуми, **П** – для поліетилену;
- броня – буква **Б** для сталевих стрічок, **П** – для плоских освинцьованих дротів, **ДО** – для круглих освинцьованих дротів, **Г** – для кабелів без броні й захисного шару.

Якщо кабелі виконуються з окремо освинцьованими жилами, то в маркуванні вказується буква **О**.

Для маслонаповнених кабелів низького тиску перед основною аббревіатурою вказують букви **МН**, а для кабелів високого тиску – **МВС**.

Після аббревіатури вказують кількість жил і перетин жил у мм².

Наприклад, ААБ-3х 120 – трижильний алюмінієвий кабель із алюмінієвою оболонкою і бронею зі свинцю з перетином жил 120 мм²; СБ-3х 95 трижильний мідний кабель зі свинцевими оболонкою й бронею перетином жил 95 мм².

allow increasing sufficiently the maximum permissible currents and, hence, the carrying capacity of the cable line.

These 10 kV cables are three-core, or single-core cables. For the voltage of 35 kV and above these cables are single-core cables.

In Fig. 1.23 a general view of the single-core cable with insulation with cross-linked polyethylene insulation is given. The cables consist of a current-carrying core (1), shielded with semiconducting cross-linked polyethylene (2). Further, there is an insulating layer of cross-linked polyethylene (3), shielded with semiconducting plastics (4). The shield of copper wires (6) is protected with cushions of separate layers (5) and (7). The external layer of the cable is a plastic shielding (8).

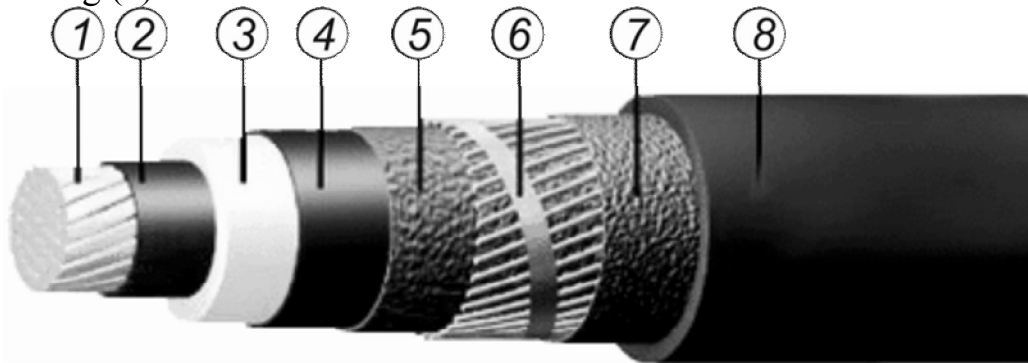


Fig. 1.23. Construciton of the cable with insulation of cross-linked polyethylene

Cables are marked with abbreviations standing for the elements characteristic for their construciton:

- the cable core is marked with letter **A** for aluminium, or without a letter for copper;
- the shielding is marked with letter **A** for aluminium, with **L** for lead, **Y** for polyvinylchloride, **K** for rubber, and **PE** for polyethylene;
- cable armour is marked with letter **B** for steel tapes, **F** for flat lead-covered wires, **R** for round shaped lead-covered wires, **X** for cables without protective shielding and cable armor.

If cables are made of separately lead-covered cores, there are letters **SL**.

Oli-filled cables of low-pressure are indicated with letters **LPOF**, and those of high pressure with letters **HPOF**.

The abbreviations are followed by indication of the number of cores, and the size of core cross-section in mm^2 . For example, *AAB-3x120* is a three-core aluminium cable with aluminium sheilding and cable armour of lead, the core cross-section being 120 mm^2 ; *CB-3x 95* is a three-core copper cable with lead shielding and cable armour, the core cross-section being 95 mm^2 .