

Miloš Milanković
Dragoslav Perić
Ivana Vlajić-Naumovska

OSNOVI ELEKTROENERGETIKE

Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Beograd, 2016.

Dr Miloš Milanković
Dr Dragoslav Perić
Dr Ivana Vlajić-Naumovska

OSNOVI ELEKTROENERGETIKE

Recenzenti:
Prof. Dr Dragan P. Popović
Prof. Dr Veran Vasić

Izdavač:
Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd

Za izdavača: Dr Vera Petrović

Lektor: Ljubica Urošević

Korice: Siniša Nikolić

Štampa: Sven d.o.o., Niš

Tiraž: 10

CIP - Каталогизација у публикацији -
Народна библиотека Србије, Београд

621.31(075.8)

МИЛАНКОВИЋ, Милош, 1959-

Osnovi elektroenergetike / Miloš
Milanković, Dragoslav Perić, Ivana
Vlajić-Naumovska. - Beograd : Visoka škola
elektrotehnike i računarstva strukovnih studija,
2016 (Niš : Sven). - 160 str. : ilustr. ; 25 cm

Tiraž 10. - Bibliografija : str 160.

ISBN 978-86-7982-240-6

1. Перић, Драгослав, 1958- [аутор] 2.
Влајић-Наумовска, Ивана, 1972- [аутор]

а) Електроенергетика

COBISS.SR-ID 221335564

SADRŽAJ

PREDGOVOR.....	8
1 IZVORI ENERGIJE.....	9
1.1 Energetika	9
1.2 Izvori energije	9
1.3 Transformacije oblika energije.....	11
1.4 Korisni oblici energije	15
1.5 Električna energija.....	15
2 ELEKTROENERGETSKI SISTEMI.....	18
2.1 Osnovni delovi elektroenergetskog sistema	18
2.2 Organizacija elektroprivrede i tržište električne energije.....	21
3 ELEKTRANE.....	24
3.1 Elektroenergetski deo elektrana	25
3.2 Osnovne karakteristike elektrana	25
3.3 Termoelektrane.....	25
3.3.1 Lokacija termoelektrane	26
3.3.2 Šematski prikaz i osnovni delovi termoelektrana.....	26
3.3.3 Transport goriva	27
3.3.4 Kotlovski deo	28
3.3.5 Napojni deo	30
3.3.6 Turbinski deo	30
3.3.7 Kondenzacioni deo	31
3.3.8 Elektroenergetski deo	32
3.3.9 Uticaj na prirodnu sredinu (ekologija)	32
3.3.10 Termoelektrana "Nikola Tesla" B 2x620MW	33
3.4 Nuklearne elektrane.....	37
3.4.1 Nuklearna fisija	38
3.4.2 Nuklearna fuzija	39
3.4.3 Osnovni delovi nuklearnih elektrana.....	39
3.4.4 Ciklus goriva	42
3.4.5 Uticaj na prirodnu sredinu (ekologija)	45
3.5 Hidroelektrane.....	45
3.5.1 Vrste hidroelektrana	45
3.5.2 Osnovni delovi hidroelektrana	48
3.5.3 Pumpno-akumulacione hidroelektrane	56
3.5.4 Osnovne osobine i vrste vodnih turbina	58
3.5.5 Izbor broja obrtaja i tipa turbine.....	61
3.5.6 Kavitacija	63
3.5.7 Uticaj na prirodnu sredinu.....	64
3.5.8 Prikaz hidroelektrana na Dunavu (Đerdap 1, Đerdap 2, Đerdap 3).....	64
4 PRENOS I DISTRIBUCIJA	68
4.1 Vodovi.....	68
4.1.1 Trofazne električne mreže	69
4.1.2 Struje kratkog spoja.....	70
4.1.3 Tokovi snaga i naponi u prenosnoj mreži.....	73
4.1.4 Vazdušni vodovi.....	74
4.1.5 Kablovski vodovi	77
4.2 Razvodna postojenja	78
4.2.1 Sabirnice.....	80
4.2.2 Izolatori	82
4.2.3 Rasklopni aparati.....	83

4.2.4	Osigurači	84
5	ELEKTRIČNE INSTALACIJE	85
5.1	Osnovni elementi instalacija	87
5.1.1	Vodovi.....	88
5.1.2	Priključak objekta na distributivnu mrežu.....	89
5.1.3	Elementi gromobranske instalacije	90
5.1.4	Razvodna tabla.....	93
5.1.5	Brojila električne energije	93
5.1.6	Instalacioni osigurači.....	94
5.1.7	Sklopni aparati	96
5.2	Električno osvetljenje.....	98
5.2.1	Svetlosni izvori.....	98
5.2.2	Principi projektovanja električnog osvetljenja	100
5.3	Opasnost od električne struje i zaštitne mere	101
6	ELEKTROENERGETSKI PRETVARAČI.....	105
6.1	Pretvarači električne energije	105
6.2	Elektromehaničko pretvaranje energije.....	106
6.3	Električne mašine	108
7	TRANSFORMATORI.....	110
7.1	Osnovni elementi konstrukcije transformatora	111
7.2	Princip rada, osnovne jednačine.....	112
7.3	Ekvivalentna šema transformatora	114
7.4	Gubici i stepen iskorišćenja transformatora	114
7.5	Trofazni transformatori	116
7.5.1	Glavne karakteristike pojedinih sprega trofaznih transformatora.....	117
7.5.2	Paralelni rad transformatora	118
7.6	Specijalni transformatori	119
8	ASINHRONE MAŠINE.....	122
8.1	Namotaji mašina za naizmeničnu struju.....	122
8.2	Trofazni motor sa namotanim rotorom	123
8.3	Trofazni motor sa kratkospojenim rotorom.....	124
8.4	Jednofazni asinhroni motor	124
8.5	Asinhroni generator.....	125
8.6	Osnovni princip rada	126
8.7	Ekvivalentna šema asinhrona mašine.....	128
8.8	Bilans aktivne snage.....	128
8.9	Karakteristika momenta asinhronog motora	129
8.10	Pokretanje asinhronih motora.....	130
8.11	Regulacija brzine obrtanja asinhronih motora.....	132
9	SINHRONE MAŠINE	134
9.1	Sinhroni generatori.....	134
9.2	Osnovni delovi	135
9.3	Princip rada	137
9.4	Pobuda sinhronih mašina	138
9.5	Karakteristike sinhronih mašina.....	138
9.5.1	Karakteristika praznog hoda.....	138
9.5.2	Karakteristika ustaljenog (trajnog) kratkog spoja	139
9.5.3	Fazorski dijagram sinhrona mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom ..	140
9.6	Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu mrežu	141

9.7	Veliki hidro i turbo sinhroni generatori.....	142
9.8	Sinhroni motor	143
10	MAŠINE JEDNOSMERNE STRUJE	145
10.1	Osnovni delovi	145
10.2	Princip rada	146
10.3	Namotaji indukta.....	147
10.4	Namotaji pobude	147
10.5	Osnovne jednačine	149
10.6	Reakcija indukta.....	149
10.7	Komutacija	152
10.8	Karakteristike momenta motora	156
10.9	Pokretanje motora jednosmerne struje	157
10.10	Regulisanje brzine obrtanja nezavisno pobuđenog motora	157
10.11	Univerzalni motor	159
	LITERATURA	160

Slike

Slika 1-1	Pretvaranje energije vetra u električnu energiju.....	12
Slika 1-2	"Farma" vetrogeneratora	12
Slika 1-3	Solarne elektrane.....	13
Slika 1-4	Primarni, transformisani i korisni oblici energije.....	14
Slika 1-5	Moguće transformacije različitih oblika energije u električnu energiju.....	17
Slika 2-1	Blok šema EES	18
Slika 2-2	Primer dela elektroenergetskog sistema	19
Slika 2-3	Prikaz toka energije u elektroenergetskom sistemu	20
Slika 2-4	Dnevni dijagram opterećenja	21
Slika 3-1	Šematski prikaz ulazno/izlaznih fluida i produkata za TE (TO)	27
Slika 3-2	Prevoz uglja pokretnim trakama (transporterima).....	28
Slika 3-3	Rashladni toranjevi	31
Slika 3-4	Turboagregat	32
Slika 3-5	Termoelektrana "Nikola Tesla" A.....	33
Slika 3-6	Termoelektrana "Nikola Tesla" B	34
Slika 3-7	Toplotna šema TE "Nikola Tesla" B	35
Slika 3-8	Šematski prikaz proizvodnje električne energije u TE "Nikola Tesla B"	36
Slika 3-9	Jednopolna šema TE "Nikola Tesla" B	37
Slika 3-10	Nuklearna elektrana	38
Slika 3-11	Osnovna šema nuklearne elektrane	40
Slika 3-12	Faze ciklusa goriva bez prerade	43
Slika 3-13	Derivaciona hidroelektrana	47
Slika 3-14	Pribranska hidroelektrana	48
Slika 3-15	Osnovni delovi elektrana	48
Slika 3-16	Brana HE "Bajina Bašta"	49
Slika 3-17	Gravitaciona brana.....	50
Slika 3-18	Lučna brana	50
Slika 3-19	Kontraforsna (olakšana) brana	50
Slika 3-20	Princip izgradnje vodostana	51
Slika 3-21	Vertikalni presek zatvorene mašinske zgrade hidroelektrane.....	53
Slika 3-22	Poluotvorena mašinska zgrada hidroelektrane.....	54
Slika 3-23	Otvorena hidroelektrana:.....	54

Slika 3-24 Kapsulni hidrogenerator.....	55
Slika 3-25 Šema pumpno-akumulacionog postrojenja.....	56
Slika 3-26 Prikaz rada pumpno-akumulacionog postrojenja u dnevnom dijagramu opterećenja	57
Slika 3-27 Hidraulična šema pumpno-akumulacione hidroelektrane	58
Slika 3-28 Presek i princip rada Fransisove turbine.....	59
Slika 3-29 Presek i princip rada Peltonove turbine	59
Slika 3-30 Presek i princip rada Kaplanove turbine.....	60
Slika 3-31 Poprečni presek lopatice rotora akcionih i reakcionih turbina.....	61
Slika 3-32 Zavisnost stepena iskorišćenja turbine od relativnog protoka (Q/Q_{max}).....	63
Slika 3-33 Hidroelektrana "Đerdap 1".....	65
Slika 3-34 Brodska prevodnica na Đerdapu 1	66
Slika 3-35 Hidroelektrana "Đerdap 2".....	67
Slika 3-36 Pumpno-akumulaciona hidroelektrana "Đerdap 3".....	67
Slika 4-1 Trofazni sistem spregnut u trougao i zvezdu	69
Slika 4-2 Primer direktnog, inverznog i nultog sistema simetričnih komponenti.....	70
Slika 4-3 Kratak spoj.....	71
Slika 4-4 Vremenski tok struje kratkog spoja.....	72
Slika 4-5 Ekvivalentna π šema	73
Slika 4-6 Dalekovodi u prenosnoj mreži	74
Slika 4-7 Ekranizovani kabl NPZO 13-A, 20/35 kV.....	77
Slika 4-8 Kablovske glave i spojnice	78
Slika 4-9 Transformatorska stanica na otvorenom prostoru	79
Slika 4-10 Primer uprošćene šeme razvodnog postrojenja.....	80
Slika 4-11 Šema veza u postrojenju elektrane.....	81
Slika 4-12 Uprošćen prikaz priključenja vodova na jednostruke i dvostruke sabirnice.....	82
Slika 4-13 Vakuumski prekidač	84
Slika 5-1 Niskonaponski instalacioni kablovi	88
Slika 5-2 Instalacioni osigurač tipa D.....	95
Slika 5-3 Motorne sklopke	97
Slika 5-4 Sijalice sa užarenim vlaknom	98
Slika 5-5 Halogene sijalice	99
Slika 5-6 Fluorescentne sijalice	99
Slika 5-7 Živina i natrijumova sijalica	100
Slika 5-8 Zaštita od indirektnog dodira IT sistemom	104
Slika 6-1 Elektromehaničko pretvaranje energije.....	106
Slika 6-2 Delovanje sile na provodnik sa strujom koji se nalazi u magnetskom polju..	107
Slika 6-3 Delovanje sile na feromagnetski materijal.....	107
Slika 7-1 Trofazni distributivni transformator.....	110
Slika 7-2 Osnovni delovi transformatora.....	112
Slika 7-3 Princip rada transformatora.....	113
Slika 7-4 Ekvivalentna šema transformatora.....	114
Slika 7-5 Trofazni suvi transformator	116
Slika 7-6 Primeri trofaznih namotaja.....	117
Slika 7-7 Paralelni rad dva transformatora	119
Slika 7-8 Autotransformator.....	120
Slika 8-1 a) niskonaponski motor b) visokonaponski motor	122
Slika 8-2 Jednofazni asinhroni motor sa zaletnim kondenzatorom	125
Slika 8-3 Asinhroni generator	126
Slika 8-4 Ekvivalentna šema asinhronne mašine.....	128

Slika 8-5 Bilans aktivne snage asinhronog motora.....	129
Slika 8-6 Statičke karakteristike momenta i struje statora motora sa kratkospojenim rotorom	130
Slika 9-1 Generatori u hidroelektrani – hidrogeneratori.....	135
Slika 9-2 Rotor sinhronog mašine	136
Slika 9-3 Princip rada sinhronih mašina.....	138
Slika 9-4 Karakteristika praznog hoda sinhronog generatora.....	139
Slika 9-5 Karakteristika kratkog spoja sinhronog generatora.....	140
Slika 9-6 Ekvivalentno kolo sinhronog turbo generatora	141
Slika 9-7 a) fazorski dijagram za turbo SG b) fazorski dijagram za turbo SM.....	141
Slika 9-8 Sinhroni motor: a) principijelna šema b) karakteristika momenta	143
Slika 10-1 Motor jednosmerne struje	145
Slika 10-2 Šematski presek pojednostavljene dvopolne mašine jednosmerne struje	146
Slika 10-3 Motor sa otočnom pobudom	148
Slika 10-4 Reakcija indukta.....	150
Slika 10-5 Reakcija indukta – oblik rezultatnog magnetskog polja.....	151
Slika 10-6 Namotaji mašine jednosmerne struje	152
Slika 10-7 Navojni deo u komutaciji.....	153
Slika 10-8 Vremenska promena struje u navojnom delu	153
Slika 10-9 Krive komutacije uz određene vrednosti uticajnih veličina	154
Slika 10-10 Krive komutacije.....	155
Slika 10-11 Karakteristike momenta motora jednosmerne struje.....	156
Slika 10-12 Princip regulacije brzine obrtanja	158
Slika 10-13 Vard-Leonardova grupa	158

Tabele

Tabela 3-1 Optimalni specifični broj obrtaja i padovi turbina modela	62
Tabela 4-1 Osnovne karakteristike stubova.....	76
Tabela 8-1 Namotaji mašina za naizmeničnu struju.....	123
Tabela 8-2 Oznake krajeva namotaja trofaznih naizmeničnih mašina	123
Tabela 9-1 Brzine obrtanja sinhronih mašina	137
Tabela 10-1 Oznake krajeva namotaja mašina jednosmerne struje	148

PREDGOVOR

Ova knjiga je prvenstveno udžbenik za studente, a može da posluži i svima koje zanimaju osnovni pojmovi iz oblasti elektroenergetike.

Materijal je obrađen na nivou u kome se izučava na Visokoj školi elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u okviru predmeta Osnovi elektroenergetike, na studijskim programima Nove energetske tehnologije, Elektronika i telekomunikacije i Automatika i sistemi upravljanja vozilima, a proširen je i dodatnim sadržajima vezanim za oblast Električnih instalacija.

Energetika predstavlja značajnu delatnost i privrednu granu svake zemlje. Danas su energija, ekologija i računarske tehnologije veoma povezane oblasti. U narednom periodu se očekuju značajna ulaganja u sanaciju, remonte i razvoj elektroenergetskog sistema, saobraćaja i industrije naše zemlje, kao i restruktuiranje elektroprivrede. U ove poslove biće pored inženjera elektroenergetike uključeni i inženjeri elektronike, automatike, računarske tehnike, ekonomisti, mašinski i rudarski inženjeri, menadžeri i drugi. Cilj ove knjige je da pripadnicima tih struka prezentuje osnove elektroenergetike, sa akcentom na fizičkoj predstavi pojava. Poznavanje osnova elektroenergetike je veoma značajno jer je Srbija energetski siromašna zemlja i energijom se mora racionalno gazdovati.

Prvo poglavlje bavi se opštim pitanjima energetike, oblicima i transformacijama energije. U drugom, trećem i četvrtom poglavlju opisuju se elektroenergetski sistemi, elektrane i prenos i distribucija električne energije. Peto poglavlje obrađuje električne instalacije i osvetljenje. Preostala poglavlja bave se uređajima za pretvaranje električne energije. U šestom poglavlju generalno su obrađeni elektroenergetski pretvarači, a naredna poglavlja pojedinačno opisuju transformatore, asinhronu i sinhronu mašine i mašine za jednosmernu struju.

Zahvaljujemo kolegama pokojnom prof. dr Draganu P. Popoviću i prof. dr. Veranu Vasiću na recenziji rukopisa prvog izdanja knjige.

U drugom izdanju su otklonjene štamparske greške uočene u prvom izdanju a proširen je i sadržaj vezan za opasnost od električne struje i zaštitne mere u poglavlju Električne instalacije.

U trećem izdanju dodat je sadržaj vezan za kvalitet električne energije u poglavlju Izvori energije i proširen je sadržaj vezan za organizaciju elektroprivrede i tržište električne energije u poglavlju Elektroenergetski sistemi.

Molimo čitaoce da predloge i sugestije, kao i sve uočene propuste i greške saopšte autorima.

Beograd, februar 2016.

Autori

1 IZVORI ENERGIJE

Energija je neophodna za industrijski razvoj savremenog društva, a energetska sistem obično predstavlja najskuplji sistem u razvijenim zemljama. Posebno mesto u energetska sistemu zauzima elektroenergetski sistem.

1.1 Energetika

Postoje razne definicije energetike, od kojih su neke date u sledećem pregledu:

- Naučno-stručna:

Energetika je nauka o energiji i o tehničkom korišćenju izvora energije.

- Ekonomska:

Energetika je skup privrednih aktivnosti pomoću kojih se istražuju i proizvode primarni izvori energije, zatim transformišu, prenose i distribuiraju do potrošača i, kao primarna ili sekundarna energija, racionalno koriste.

- Filozofska:

Energetika je pogled na svet koji sve što postoji i što se zbiva svodi na energiju, čak i materiju i duh, koji ustvari nisu ništa drugo do oblici ispoljavanja energije.

- U širem smislu:

Energetika je grana privrede koja omogućava snabdevanje potrošača neophodnom energijom.

1.2 Izvori energije

U osnovi energija je sposobnost vršenja rada dok se pod pojmom izvori energije podrazumevaju pojave ili materijali koji se mogu koristiti za proizvodnju energije. Često se pored izvora energije koriste izrazi oblici energije ili nosioci energije, mada se u suštini odnose na istu stvar.

Energija se pojavljuje u različitim oblicima, ali se u osnovi može svrstati u akumulisane (nagomilane) i prelazne oblike. Akumulisani oblici energije (potencijalna, kinetička i unutrašnja) se u svom obliku mogu održati po želji dugo, dok je za prelazne oblike karakteristična kratkotrajnost pojave. Prelazna energija (mehanička, električna i toplotna) se pojavljuje kada akumulisana energija menja svoj oblik i kada prelazi sa jednog tela na druga.

Prema pojavnom obliku, odnosno mogućnosti korišćenja, izvore energije svrstavamo u primarne (prirodne), sekundarne (transformisane) i korisne oblike energije.

Primarni oblici energije su oni oblici koji se nalaze u prirodi, ili se u njoj pojavljuju. Veliki deo primarnih oblika energije se ne može neposredno koristiti, već prethodno mora da se pretvori (transformiše) u pogodniji oblik za korišćenje, u tzv. *sekundarni* (transformisani) oblik energije. Oblik energije koji neposredno možemo da koristimo nazivamo *korisnim* oblikom energije.

Primarni oblici energije se mogu podeliti na:

- a) konvencionalne i nekonvencionalne izvore energije* (s obzirom na nivo korišćenja);
- b) neobnovljive i obnovljive izvore energije* (s obzirom na prirodnu obnovljivost).

U *konvencionalne* izvore energije (koji se danas najčešće koriste) se ubrajaju:

- drvo, ugalj, sirova nafta, prirodni gas (jednom rečju *goriva*);
- *vodne snage* (hidropotencijal);
- *nuklearna goriva* (uran i torijum).

U *nekonvencionalne* primarne izvore energije spadaju:

- energija zračenja Sunca;
- geotermalna energija;
- energija vetra;
- energija mora i morskih talasa, plime i oseke;
- energija fuzije lakih atoma.

Kao nekonvencionalni energetske izvori često se navode uljni škriljci i bitumenozni peskovi, mada se ponekad svrstavaju i u alternativne konvencionalne izvore.

Obnovljivi izvori energije su:

- zračenje Sunca;
- vodne snage;
- energija vetra;
- energija plime i oseke;
- energija talasa mora;

dok su neobnovljivi izvori:

- sva fosilna goriva (ugalj, nafta, uljni škriljci, bitumenozni peskovi);
- nuklearna goriva;
- geotermalna energija.

Obnovljivi izvori se ne mogu utrošiti, jer se Sunčevim zračenjem stalno obnavljaju (fotosinteza izaziva rast biomase, promena atmosferskih prilika izaziva vetar, isparavanje vode dovodi do stvaranja oblaka, a zatim padavina koje obnavljaju vodne snage, itd).

Primarni oblici energije mogu se podeliti na sledeći način:

- *nosioci hemijske energije* (drvo, treset, ugalj, sirova nafta, prirodni gas, uljni škriljci, bitumenozni peskovi, biomasa);
- *nosioci potencijalne energije* (vodne snage, plima i oseka);
- *nosioci nuklearne energije* (nuklearna goriva);
- *kinetička energija* (vetar, morski talasi);
- *toplotna energija* (geotermalna energija, toplota mora);
- *energija zračenja* (Sunčevo zračenje).

Vidi se da postoje znatne razlike između pojedinih primarnih goriva kako u pogledu njihovog korišćenja, obnovljivosti, raspoloživosti, tako i u pogledu tehnno-ekonomske opravdanosti korišćenja.

1.3 Transformacije oblika energije

Transformacije primarnih izvora energije u oblike pogodnije za korišćenje, vrše se kako iz tehničkih tako i iz ekonomskih razloga, jer je uglavnom ekonomski opravdanije koristiti transformisane (sekundarne) izvore energije (npr. jeftiniji transport usled manjih zapremina i masa transformisanog goriva).

Najčešći oblici transformacija (Slika 1-4) primarnih u transformisane oblike energije su:

Sagorevanje

- proces transformacije hemijske energije goriva u unutrašnju toplotnu energiju. Ona se kao toplotna energija može direktno koristiti za grejanje, pripremu tople vode, tehnološke procese i sl. Postrojenja i uređaji za neposrednu transformaciju hemijske u unutrašnju energiju su ložišta.

Pretvaranje unutrašnje toplotne energije u mehaničku energiju

- unutrašnja toplotna energija dobijena sagorevanjem dalje se može transformisati u mehaničku energiju (produkti sagorevanja u motorima SUS i gasnim turbinama, energija pare u parnim turbinama i mašinama).

Destilacija

- sirova nafta se ne koristi u prirodnom obliku, već u obliku svojih derivata dobijenih u postupku destilacije u rafinerijama. Transformacija sirove nafte omogućava višestruku i raznovrsnu upotrebu derivata za proizvodnju toplotne, mehaničke i hemijske energije.

Degazolinaža

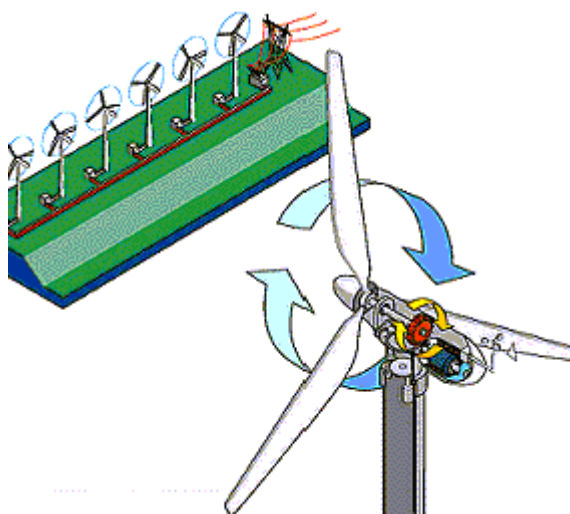
- transformacija u kojoj se vrši odvajanje lakih od teških ugljovodonika kod prirodnog gasa.

Nuklearne reakcije

- transformacija primarne nuklearne energije u unutrašnju energiju nosilaca energije (voda, vodena para), a zatim u mehaničku energiju pomoću parnih turbina.

Turbinske transformacije

- transformacije potencijalne energije (vodnih snaga, plime i oseke), kinetičke energije (vetar i morski talasi), geotermalne energije i toplotne energije mora u mehaničku energiju pomoću vodnih turbina, vetrenjača (Slika 1-1 i Slika 1-2) i toplotnih turbina.



Slika 1-1 Pretvaranje energije vetra u električnu energiju



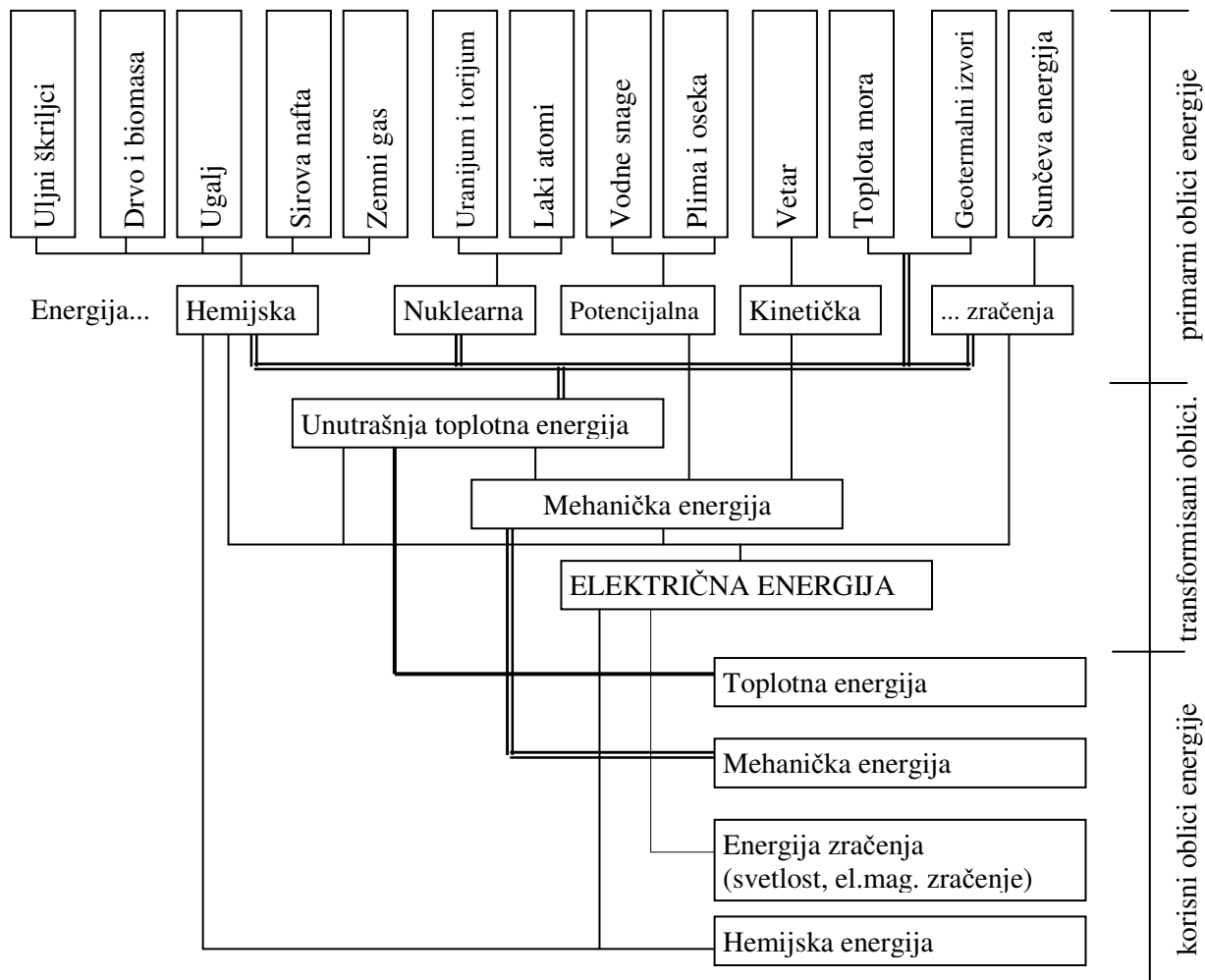
Slika 1-2 "Farma" vetrogeneratora

Energija zračenja

- može se transformisati u unutrašnju toplotnu energiju nosilaca energije (voda, para), a zatim u mehaničku, odnosno u električnu energiju direktno putem solarnih fotonaponskih ćelija (Slika 1-3).



Slika 1-3 Solarne elektrane



Slika 1-4 Primarni, transformisani i korisni oblici energije

1.4 Korisni oblici energije

Kao rezultat navedenih transformacija, koje mogu imati i svoje modifikacije, dobijaju se korisni oblici energije za potrošače. Potrošači koriste energiju u jednom od sledećih oblika: *toplotna, mehanička, hemijska i svetlosna energija*, pri čemu se korisnim oblicima energije može dodati i *električna energija*.

Toplotna energija se najčešće prenosi putem nosilaca toplotne energije (voda, para, produkti sagorevanja) ili električne energije. Ukoliko se kao nosilac toplote koristi fluid, potreban je razmenjivač toplote da bi se izvršila razmena toplote u prostoriji ili uređaju. Električna energija se u otpornim i indukcionim pećima i uređajima direktno pretvara u toplotnu energiju.

Mehaničku energiju ostvarujemo ili putem korišćenja električne energije (električni motori) ili sagorevanjem goriva u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, gasnim turbinama i motorima sa spoljnim sagorevanjem.

Za dobijanje *hemijske energije* služi koks, električna energija ili oboje zajedno, a koristi se u redukcionim pećima koje se baziraju na hemijskim procesima. U poslednje vreme za te potrebe se umesto koksa koriste prirodni gas i ulje za loženje.

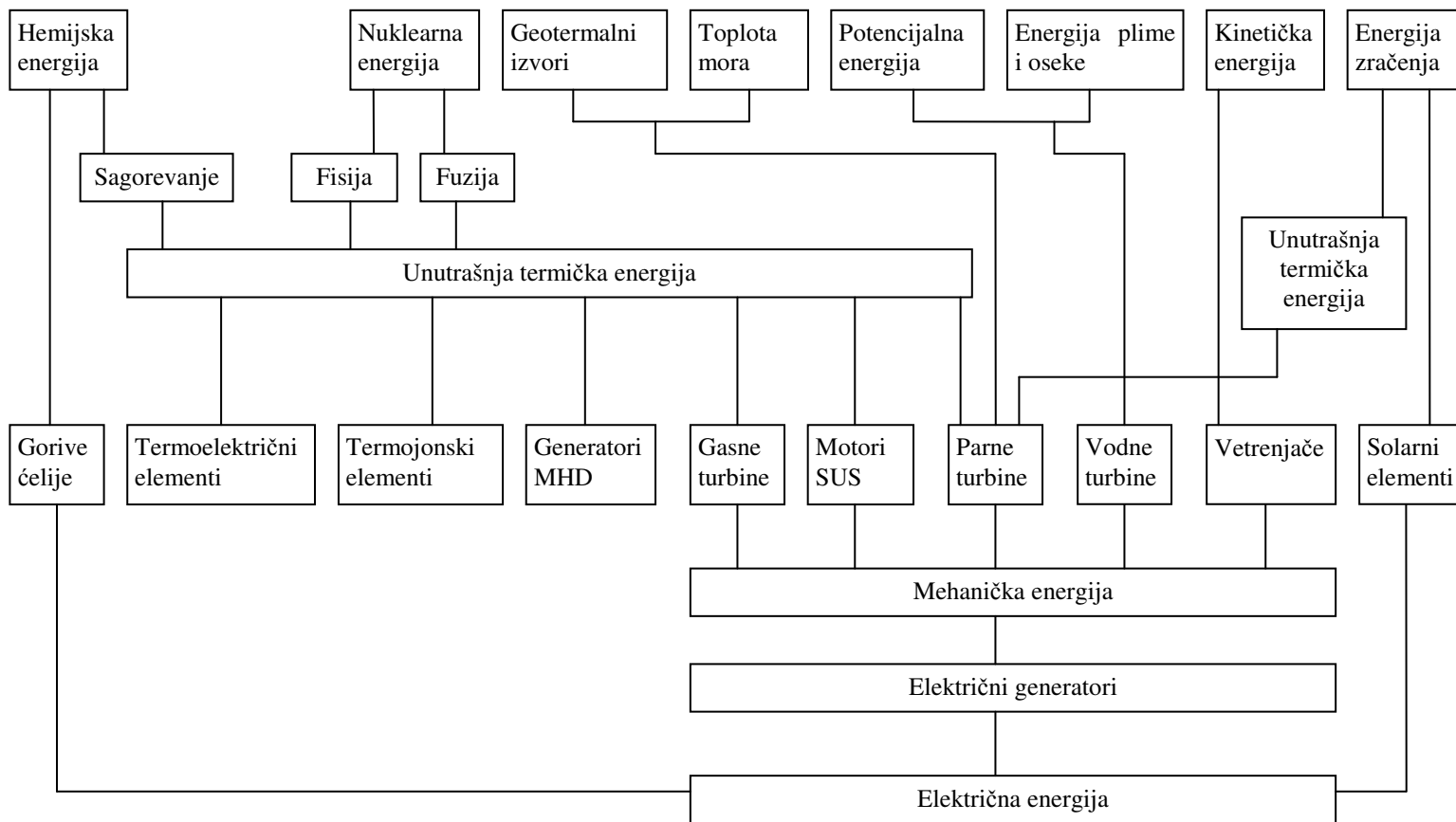
Za snabdevanje potrošača *svetlosnom energijom* danas se koristi samo električna energija, mada su istorijski gledano značaj imali i petrolej i gradski gas.

1.5 Električna energija

Električna energija predstavlja najkvalitetniji oblik energije. Vrlo retko se neposredno koristi, već se obično transformiše u toplotnu, mehaničku, hemijsku ili svetlosnu energiju. Prednosti električne energije su sigurnost u snabdevanju, lako transformisanje (Slika 1-5), ekonomičan prenos na velike razdaljine i distribucija do krajnjih potrošača, brza raspoloživost, ekološki čisto korišćenje, jednostavno merenje potrošnje, omogućavanje razvoja automatizacije, mehanizacije i kompjuterizacije itd. Osnovni nedostatak električne energije je što se ona ne može akumulirati u energetske značajnim količinama, pa se u svakom trenutku mora obezbediti jednakost ukupne proizvodnje i ukupne potrošnje. Značajni problem predstavlja i nepovoljni uticaj proizvodnje električne energije u elektranama na životnu sredinu.

Liberalizacijom tržišta električne energije nastale su velike promene u oblasti snabdevanja električnom energijom. Dok je ranije električna energija smatrana javnom uslugom, danas se smatra proizvodom kojim se trguje na otvorenom tržištu. Shodno tome, električna energija mora da zadovolji određene kriterijume kvaliteta, a koji su definisani međunarodnim i domaćim standardima i preporukama. U širem smislu može da se govori o tehničkom, komercijalnom, ekološkom, upotrebnom i drugim vidovima kvaliteta električne energije. Tehnički kvalitet električne energije obuhvata kvalitet isporuke i kvalitet isporučene električne energije (kvalitet napona). Kvalitet isporuke obuhvata

pouzdanost (neprekidnost), efikasnost i sigurnost isporuke električne energije. Pojam kvaliteta isporučene električne energije vezan je za sveukupnu stabilnost sistema, poremećaje u radu i međusobne uticaje sistem - korisnik. Kvalitet napona se ocenjuje na osnovu njegovih osnovnih karakteristika: frekvencije, amplitude, talasnog oblika i simetrije napona faza, čija odstupanja ne smeju da budu veća od propisanih. Komercijalni kvalitet električne energije se bavi odnosom između isporučilaca i snabdevača sa kupcima odnosno korisnicima sistema, u smislu obezbeđivanja efikasne komunikacije i kvaliteta usluga. U cilju postizanja optimalnih performansi elektroenergetskog sistema i efikasnog upravljanja elektroenergetskom mrežom, danas se razvijaju i koriste složeni sistemi za merenje i nadzor kvaliteta električne energije.



Slika 1-5 Moguće transformacije različitih oblika energije u električnu energiju

2 ELEKTROENERGETSKI SISTEMI

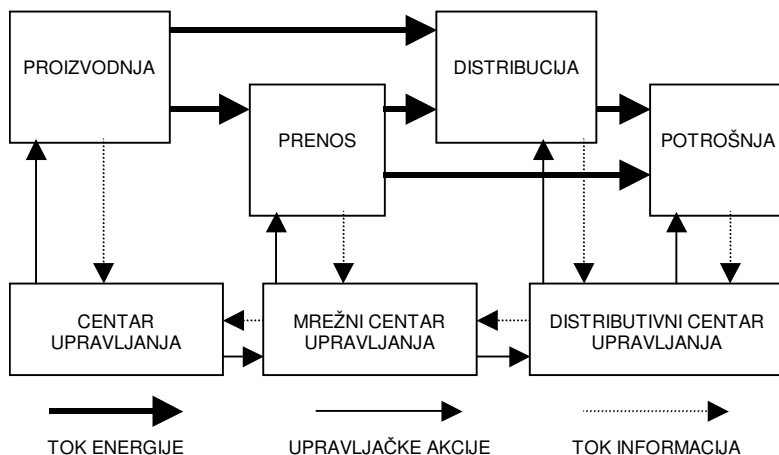
Elektroenergetski sistem (EES) je tehnički sistem čiji je osnovni zadatak da osigura kvalitetnu isporuku električne energije uz minimalne troškove u EES.

2.1 Osnovni delovi elektroenergetskog sistema

Tehnološki proces u EES sastoji se od sledećih faza:

- obezbeđivanje dovoljnih količina primarnih oblika energije,
- *proizvodnja* električne energije,
- *prenos i distribucija* (raspodela) električne energije do konačnih potrošača,
- *potrošnja* električne energije.

Elektroenergetski sistemi obuhvataju područja jedne ili više država pa se i upravljanje EES vrši iz više centara. Osnovne tehnološke celine, centre upravljanja i tokove energija, informacija i upravljačkih akcija u EES prikazuje Slika 2-1.



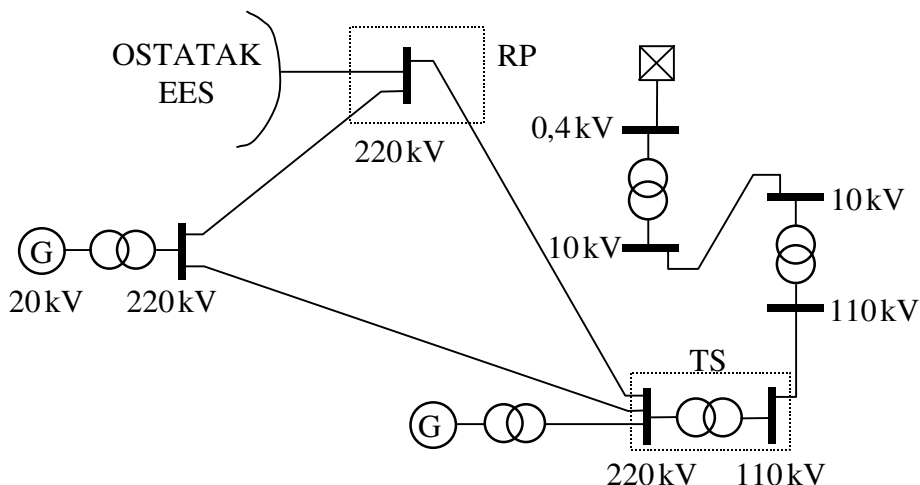
Slika 2-1 Blok šema EES

Proizvodnja električne energije se vrši u elektranama, koje često nazivamo i izvorima električne energije. Najveće količine električne energije se proizvode u termoelektranama (TE) i hidroelektranama (HE). Posebni vid termoelektrana predstavljaju nuklearne elektrane (NE). Uz električnu energiju, u elektranama se mogu proizvoditi i drugi vidovi energije, najčešće toplotna energija za tehnološke procese (industrijske energane) i grejanje (termoelektrane-toplane).

Distribucija obuhvata distributivne mreže i distributivne transformatore.

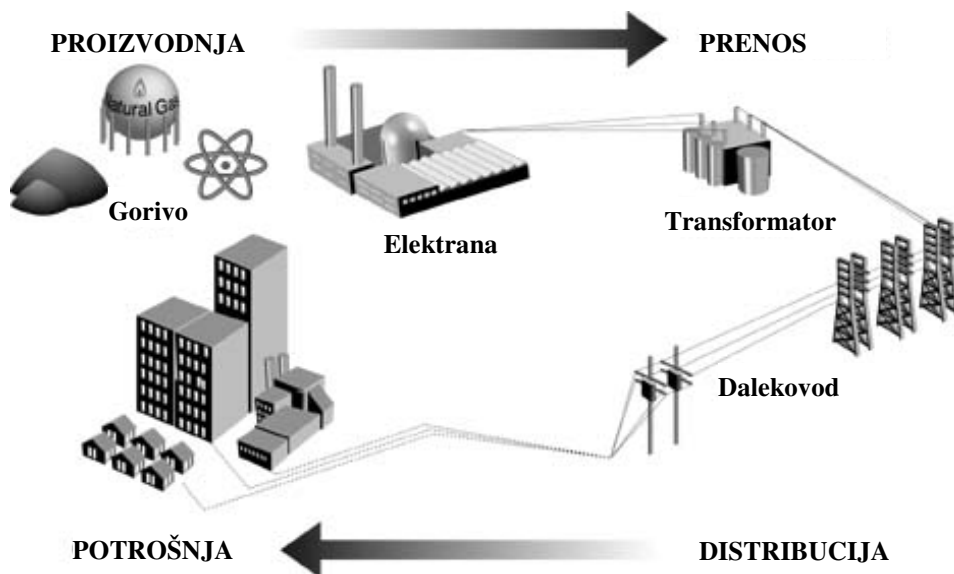
Za svaki EES postoji glavni *centar upravljanja* odakle se upravlja proizvodnjom električne energije. U *mrežnim centrima upravljanja* upravlja se prenosnom mrežom, a u *distributivnim centrima upravljanja* distributivnom mrežom i eventualno potrošnjom električne energije. Centri upravljanja nazivaju se i *dispečerski centri*.

Na primeru šeme dela jednog EES (Slika 2-2) prikazana je prenosna mreža koja se sastoji od tri voda 220kV. U dva čvora ove mreže nalaze se elektrane (generator 20kV i transformator koji podiže napon na 220kV) i jedno razvodno postrojenje (RP). U jednom od čvorova mreže 220kV nalazi se transformatorska stanica TS 220/110 kV/kV, u kojoj se napon transformiše na nivo mreže 110kV. U TS 110/10 kV/kV i TS 10/0,4 kV/kV napon se transformiše na nivoe pogodne za distribuciju i potrošnju električne energije.



Slika 2-2 Primer dela elektroenergetskog sistema

Prikaz toka energije u EES daje slika Slika 2-3.

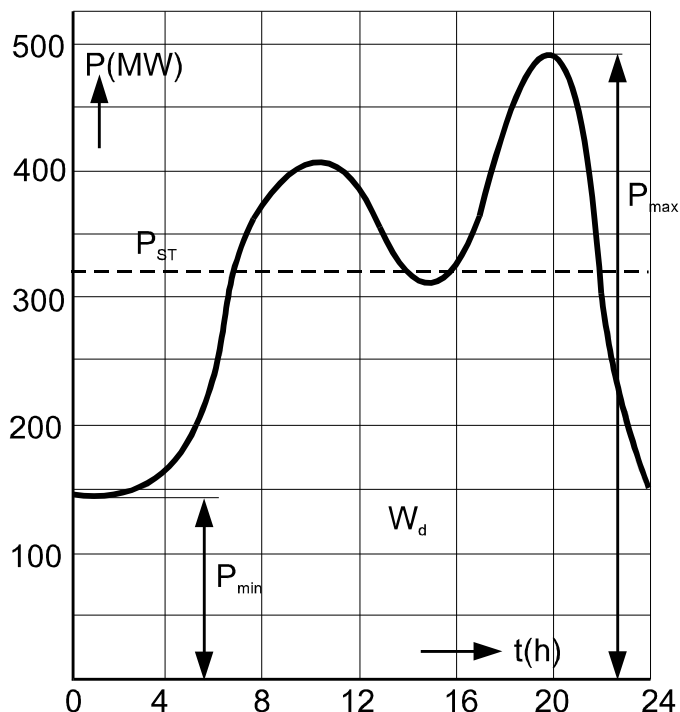


Slika 2-3 Prikaz toka energije u elektroenergetskom sistemu

Potrošnja električne energije učestvuje sa oko 1/3 u ukupnoj potrošnji primarnih oblika energije. Takođe, iz električne energije se dobija oko 1/3 korisnih oblika energije.

Velika primena električne energije ima za posledicu i veliku promenljivost potrošnje tokom dana, nedelje, meseca i godine. Pomenute varijacije u potrošnji su posledica uključenja ili isključenja postojećih potrošača, uključenja novih potrošača, promene temperature, vetra i sl. Zbog klimatskih i životnih prilika u kojima žive potrošači električne energije javljaju se sezonske varijacije u potrošnji. Na primer, potrošnja većine industrijskih potrošača nezavisna je od godišnjeg doba, dok je potrošnja za osvetljenje, grejanje i klimatizaciju veoma zavisna od godišnjeg doba.

Potrošnja električne energije varira i u zavisnosti od nivoa radne aktivnosti (neradnim danima potrošnja je manja, ponedeljkom raste a u petak opada). Primer dnevnog dijagrama opterećenja, koji predstavlja zavisnost snage opterećenja od vremena u toku dana, prikazuje Slika 2-4.



Slika 2-4 Dnevni dijagram opterećenja

2.2 Organizacija elektroprivrede i tržište električne energije

Organizacija elektroprivrede, grane privrede koja se bavi eksploatacijom elektroenergetskog sistema, zavisi od tržišta električne energije i s tim u vezi od vlasništva nad elektroenergetskim sistemom. Postoje četiri glavna modela tržišta električnom energijom:

- model monopola;
- model jedinog kupca;
- model konkurencije u prodaji na veliko;
- model konkurencije u prodaji na malo.

Do kraja osamdesetih godina prošlog veka model monopola bio je praktično jedini model koji se primenjivao svuda u svetu. Prema ovom modelu, elektroprivredne kompanije u svom sastavu sadrže sve tehnološke celine u elektroenergetskom sistemu: proizvodnju, prenos, distribuciju i isporuku električne energije. Kompanije su vlasništvo države ili privatno vlasništvo, a njihovo ponašanje na tržištu praktično u potpunosti regulisano odgovarajućim zakonima. Ne postoji konkurencija ni u proizvodnji ni u isporuci električne energije. Trgovina električnom energijom ograničena je na razmenu energije sa drugim elektroenergetskim sistemima. Razvoj elektroprivrede je centralno planiran kako bi se obezbedila elektrifikacija svih područja u zemlji. Država garantuje i ograničava profit koji se postiže investiranjem u elektroenergetski

sistem na nivo nešto veći od onoga koji se dobija plasmanom novca u banke. Kupci mogu da kupuju električnu energiju samo od jednog isporučioaca po ceni koja je pod kontrolom države. Prednosti ovog sistema se uglavnom svode na to da je omogućena elektrifikacija zemlje i u slabo naseljenim područjima, a nedostatak je previsoka cena električne energije usled nepostojanja konkurencije.

Ostali modeli tržišta u većoj ili manjoj meri omogućavaju konkurenciju u prodaji električne energije. Svi delovi elektroenergetskog sistema, osim prenosa, mogu biti privatizovani (privatizacija) i regulisani su u manjoj meri (deregulacija ili tačnije reregulacija pošto izvestan stepen regulacije ostaje radi očuvanja funkcionisanja elektroenergetskog sistema, pre svega stabilnost rada). U ovim modelima ostvaruje se otvoren pristup prenosnoj mreži, a u nekim modelima i distributivnoj mreži, za sve učesnike na tržištu električne energije (otvoren pristup). Pomenute promene nužno zahtevaju promenu organizacione strukture elektroprivrede (restruktuiranje – što je i najširi pojam kojim se opisuje proces promene modela monopola). Promena modela otvara veliki broj novih tehničkih i ekonomskih pitanja vezanih za funkcionisanje elektroenergetskih sistema i tržišta energije. Napuštanjem modela monopola postiže se sniženje cena električne energije i povećanje kvaliteta ponude.

Prema modelu jedinog kupca, privatizuje se proizvodnja električne energije, tako da između proizvođača postoji konkurencija. Svi proizvođači električnu energiju prodaju jednom jedinom kupcu, koji od najboljeg ponuđača kupuje električnu energiju za sve distributivne kompanije.

Prema modelu konkurencije na veliko kompanije za distribuciju i isporuku električne energije i veliki potrošači mogu da kupuju od bilo kog proizvođača, s tim da se prenosu plaćaju odgovarajući troškovi. Krajnji kupac i dalje može da kupuje samo od jednog, lokalnog, isporučioaca.

Prema modelu konkurencije na malo učesnici na tržištu električne energije imaju otvoren pristup i prenosnoj i distributivnoj mreži. Pored kompanija koje se bave distribucijom i isporukom električne energije, pojavljuju se i kompanije koje isključivo isporučuju (prodaju) električnu energiju krajnjim kupcima, koju na veliko kupuju od proizvođača, plaćajući pri tome prenosu i distribuciji odgovarajuće troškove. Između ovih kompanija dolazi do konkurencije, jer krajnji kupac može da bira od koje kompanije će kupiti električnu energiju. Kompanije koje isporučuju električnu energiju obično svojim kupcima nude i druge usluge (besprekidno napajanje električnom energijom, voda, gas itd.).

U skladu sa svetskim trendovima u oblasti organizovanja elektroprivredne delatnosti i otvaranjem tržišta električne energije u Srbiji, elektroprivreda Srbije je reorganizovana i sastoji se od dva preduzeća: Elektroprivrede Srbije (EPS) i Elektromreže Srbije (EMS). Osnovne delatnosti Elektroprivrede Srbije su proizvodnja, distribucija i snabdevanje električnom energijom. Osnovano je privredno društvo za snabdevanje električnom energijom EPS Snabdevanje, privredna društva za proizvodnju uglja i električne energije u termoelektranama i hidroelektranama integrisana su u preduzeće EPS a osnovano je i privredno

društvo EPS Distribucija koja obavlja funkciju operatora distributivnog sistema. Time umesto dosadašnjeg organizovanja od 14 pravnih subjekata, EPS funkcioniše sa tri pravna subjekta. Osnovne delatnosti Elektromreže Srbije su prenos električne energije i upravljanje prenosnim sistemom. EMS obavlja funkcije operatora prenosnog sistema i tržišta električne energije u Srbiji. EMS je jedan od osnivača preduzeća Berza električne energije, čija je delatnost trgovina električnom energijom.

3 ELEKTRANE

Elektrane su postrojenja u kojima se proizvodi veća količina električne energije. Njihov osnovni zadatak je da proizvedu potrebne količine električne energije u trenutku kada je potrošač traži. Danas su elektrane redovno deo nekog elektroenergetskog sistema, a veoma retko se javljaju kao izolovana postrojenja u kojima se električna energija proizvodi samo za određene potrošače. Elektrane koje pokrivaju potrošnju u gornjem delu dnevnog dijagrama opterećenja (u periodima većeg opterećenja) nazivaju se *vršnim elektranama*, a one koje imaju zadatak da rade za potrošnju u donjem delu dijagrama *osnovnim elektranama* (elektrane osnovnog opterećenja).

Uloga i režim rada pojedine elektrane u elektroenergetskom sistemu zavise, s jedne strane, od sposobnosti elektrane da se prilagodi brzim promenama opterećenja (najbolje se mogu iskoristiti akumulacione hidroelektrane i elektrane sa gasnim turbinama) i, s druge strane, od ispunjenja zahteva da se potrebna energija proizvede uz što niže troškove. U kišnom periodu godine, velika većina elektrana (osim onih sa velikom akumulacijom) rade kao osnovne elektrane, a termoelektrane se što je moguće više koriste kao vršne elektrane. U sušnom periodu godine uloge se zamenjuju. Kao vršne elektrane posebno su pogodne pumpno-akumulacione hidroelektrane (postrojenja) jer je kod njih praktično omogućeno akumuliranje električne energije, proizvodnja je jeftina i moguće je brzo prihvatanje opterećenja. S obzirom na cenu proizvodnje energije, potrebe za potrošnjom treba zadovoljavati prvo upotrebom protočnih hidroelektrana (ukoliko postoji potreban protok vode), zatim nuklearnih elektrana i termoelektrana.

Prema načinu proizvodnje, elektrane delimo na konvencionalne i nekonvencionalne.

U *konvencionalne elektrane* ubrajamo:

- termoelektrane na čvrsto gorivo (ugalj, nuklearno gorivo);
- termoelektrane na tečno gorivo (mazut);
- hidroelektrane.

U *nekonvencionalne elektrane* ubrajamo:

- termoelektrane na gas (zemni i bio);
- geotermalne elektrane;
- solarne elektrane;
- eolske elektrane (vetrenjače);
- elektrane na talase mora itd.

3.1 Elektroenergetski deo elektrana

Elektroenergetski deo elektrana sastoji se od generatora, transformatora, razvodnog postrojenja i električnih kola. Sinhroni generator dobijenu mehaničku energiju od turbine pretvara u električnu energiju. Električna energija se odvodi do transformatora, gde se podiže napon i energija se isporučuje u elektroenergetsku mrežu.

Osim glavnih električnih kola, koja vode od generatora, preko transformatora, do mreže, postoje i kola sopstvene potrošnje i pomoćna električna kola. Kola sopstvene potrošnje služe sa napajanje pomoćnih električnih uređaja elektrane, u koje se mogu ubrojati: uređaji na kotlu (mlinovi uglja, ventilatori, filteri dimnih gasova i napojne pumpe), uređaji na turbini (kondenzatne pumpe, pumpe za ulje), rasveta, dizalice, punjenje akumulatorskih baterija, upravljanje zapornim organima (zatvaračima) u hidroelektranama. Pomoćna električna kola služe za napajanje upravljanja i regulacije, te uređaja za zaštitu i signalizaciju.

3.2 Osnovne karakteristike elektrana

Osnovne karakteristike elektrana su: instalisana snaga, maksimalna snaga i raspoloživa snaga.

Instalisana snaga se definiše kao aritmetički zbir naznačenih snaga generatora (MVA), odnosno kao aritmetički zbir snaga turbina merenih na priključcima generatora (MW). Instalirana snaga je istovremeno i naznačena snaga elektrane.

Maksimalna snaga je najveća snaga koju elektrana kao celina može da proizvede, uz pretpostavku da su svi delovi elektrane sposobni za pogon. Za hidroelektranu se pri tome pretpostavlja da su protok i pad optimalni, a za termoelektranu da na raspolaganju stoji dovoljna količina goriva zadovoljavajućeg kvaliteta i dovoljna količina vode zadovoljavajućeg temperature i čistoće za hlađenje kondenzatora. Razlikuje se maksimalna snaga na priključcima generatora i maksimalna snaga na pragu elektrane (izlazu iz elektrane prema EES).

Raspoloživa snaga elektrane je najveća snaga koju elektrana može da proizvede u datom trenutku, uvažavajući stvarno stanje u elektrani (kvarovi, remont i sl.) i uz pretpostavku da nema ograničenja zbog proizvodnje reaktivne energije. Pri određivanju raspoložive snage, kod hidroelektrana treba uzeti u obzir protok i pad, a kod termoelektrana kvalitet goriva, količinu i temperaturu vode.

3.3 Termoelektrane

Termoelektrane (TE) su postrojenja u kojima se električna energija proizvodi iz toplotne energije sadržane u gorivu.

Glavne podele termoelektrana na fosilno gorivo su prema sledećim kategorijama:

1. *Vrsta proizvodnje energije*: Razlikuju se termoelektrane koje odaju samo električnu energiju (kondenzacione TE) i termoelektrane-toplane (TE-TO),

koje pored električne energije odaju i toplotnu energiju putem nosilaca toplote (pare, ili tople vode), koji se koriste za tehnološke procese i grejanje.

2. *Vrsta korišćenog goriva:* razlikuju se *TE* na čvrsto (ugalj), tečno (nafta i naftini derivati) i gasovito gorivo (prirodni gas) kao i na kombinaciju dva ili tri goriva.
3. *Tip osnovne turbine:* razlikuju se *TE* sa parnim ili gasnim turbinama, odnosno kombinovani proces kada su primenjena i parna i gasna turbina.
4. *Vrsta hlađenja:* Protočno i povratno hlađenje. Kod protočnog hlađenja voda za hlađenje kondenzora se uzima iz prirodnog izvora (reke, jezera), propušta kroz kondenzator i vraća natrag. Kad ne postoji prirodni izvor vode za hlađenje ista voda se propušta kroz kondenzator i stalno se hladi u posebnim hladnjacima (najefikasniji su rashladni tornjevi), što predstavlja povratno ili veštačko hlađenje. Izbor sistema hlađenja vezan je za osnovnu dilemu prilikom izbora lokacije *TE* na ugalj – blizu reke ili blizu rudnika uglja.

Termoelektrane se u elektroenergetskom sistemu najčešće koriste kao tzv. osnovne elektrane, koje pokrivaju nepromenljiv deo opterećenja. Sopstvena potrošnja termoelektrana iznosi 7-10% naznačene snage elektrane.

3.3.1 Lokacija termoelektrane

Na izbor lokacije gradnje termoelektrane utiču sledeći glavni faktori:

- težište opterećenja potrošnje (prvenstveno prostorni raspored transformatorskih stanica);
- cena zemljišta;
- količina raspoložive vode;
- lokacija ugljenokopa, radi što manjih transportnih troškova;
- troškovi građevinskih radova;
- blizina industrije;
- mogućnost proširenja kapaciteta;
- blizina važnih potrošačkih centara;
- ekologija;
- estetika;
- vojno-odbrambeni zahtevi.

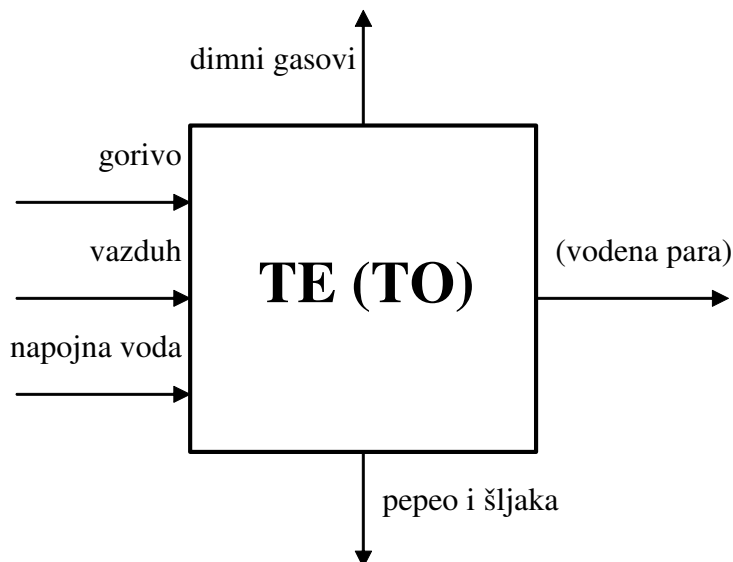
3.3.2 Šematski prikaz i osnovni delovi termoelektrana

Ulazni fluidi termoelektrana (Slika 3-1) su:

- gorivo;
- vazduh;
- napojna voda

dok izlaz čine:

- dimni gasovi;
- vodena para;
- pepeo i šljaka.



Slika 3-1 Šematski prikaz ulazno/izlaznih fluida i produkata za TE (TO)

Celokupna termoeenergetska oprema se po pojedinim tehnološkim celinama deli na: *kotlovski, napojni, turbinski, kondenzacioni, toplifikacioni (za toplane) i elektroenergetski deo* (Slika 3-8).

Ovde će biti dat kratak opis tehnoloških celina i proizvodnje električne energije u termoelektranama na ugalj, koje su kod nas najviše zastupljene.

3.3.3 Transport goriva

Ugalj koji se kod nas koristi u termoelektranama je obično lignit, koji ima relativno malu donju toplotnu moć (6-10 MJ/kg). Zavisno od blizine rudnika, ugalj se od rudnika do termoelektrane prevozi na pokretnim trakama (transporterima – Slika 3-2), kamionima, železnicom, obično sopstvenom prugom, ili brodovima. Kod železničkog transporta, da bi se smanjilo vreme istovara, obično se koriste specijalni vagoni kod kojih se u hodu otvara dno.



Slika 3-2 Prevoz uglja pokretnim trakama (transporterima)

U elektranama se uglj odlaže na skladištu odgovarajućeg kapaciteta kako bi se obezbedio pun rad elektrane u odgovarajućem periodu (npr. 15 dana) u slučaju problema u dostavi. Uglj se posle istovara pomoću transportera dovodi do kotlovskih bunkera. Kapacitet bunkera je obično dovoljan za desetak sati rada elektrane. Veći problemi u dostavi uglja mogu da izazovu prekid rada termoelektrane (prisetimo se namernog oštećivanja gumenih traka trasportera elektrana na Kosovu, oštećenja transportera u elektrani Obrenovac prilikom udara lokomotive u nosač transportera ili oktobarskih dešavanja 2000 vezanih za rudnik Kolubara).

Na putu od istovara do kotlovskih bunkera, vrši se selekcija i izdvajanje gvozdениh predmeta iz uglja, kao i uzimanje uzoraka i merenje protočne težine uglja. Punjenje kotlovskih bunkera ugljem vrši se prema radu kotla. Kao pomoćno gorivo je obično predviđen mazut, pa postoji i postrojenje za istovar, kao i rezervoari za skladištenje.

3.3.4 Kotlovski deo

Kotlovsko postrojenje – da bi se obavilo sagorevanje, gorivo treba pripremiti, dovesti do temperature paljenja i uz dovođenje kiseonika izvršiti njegovo sagorevanje. Priprema goriva ima za cilj povećanje površine goriva koja će doći u dodir sa vazduhom, šta se obično postiže raspršivanjem. Čvrsta goriva mogu da sagorevaju na rešetki (slojno) (kod kotlova do 100 t/h) ili u prostoru. Kod sagorevanja na rešetki, rukovanje ložištem obuhvata tri najvažnije operacije:

- dovod goriva na rešetku, odnosno ložište;
- raspodelu goriva po rešetci;

- uklanjanje pepela i šljake.

Pri sagorevanju u prostoru, čvrsto gorivo se prvo pomoću mlinova usitni na određenu finoću, a zatim dovodi u ložište pomoću struje zagrejanog vazduha, posredstvom gorionika. Mešavina samlevenog uglja i vazduha pali se u ložištu. Kod ugljeva male toplotne moći, često se koristi recirkulacija dimnih gasova, tako što se deo dimnih gasova iz ložišta vraća u mlinove. Na taj način se vrši sušenje ugljene prašine u mlinovima i postiže potrebna temperatura mešavine za sagorevanje.

Prednosti i nedostaci sagorevanja goriva u prostoru, u odnosu na sagorevanje na rešetki su:

1. *Prednosti:*

- mogu se izrađivati ložišta velikih snaga (jer nema glomaznih rešetki);
- istovremeno se mogu koristiti goriva različitih karakteristika;
- postiže se visok stepen iskorišćenja ložišta (nema propadanja goriva kroz rešetke, potrebno je manje vazduha itd.);
- vazduh se može zagrevati do viših temperatura (neće se ugroziti rešetka).

2. *Nedostaci:*

- velika potrošnja energije za mlevenje uglja i za rad ventilatora koji dovode svež vazduh;
- veliko trošenje obrtnih delova mlinova za ugalj;
- neophodna ugradnja filtera za dimne gasove radi uklanjanja čestica pepela i nesagorelih sastojaka goriva;
- teža mogućnost rada kotla sa manjim opterećenjem (najmanje 30-50% naznačene snage);
- opasnost samozapaljenja ugljene prašine.

Kod kotlova sa sagorevanjem u prostoru, za potpalu i eventualno održavanje vatre, kao pomoćno gorivo je obično predviđen mazut.

Kod tečnih i gasovitih goriva, priprema je znatno jednostavnija. Kod tečnih je potrebno izvršiti raspršivanje kako bi se stvorila mešavina pare tečnog goriva i vazduha, koja potom sagoreva. Da bi se ostvarilo potpuno sagorevanje, treba izvršiti pravilan izbor gorionika. Kod gasovitih goriva potrebno je stalno mešanje sa vazduhom. Sagorevanje se vrši pomoću gasnih gorionika (plamenika).

U termoelektranama, u parnim kotlovima se toplota dobijena sagorevanjem goriva dovodi i predaje vodi koja isparava. Dobijena vodena para na izlazu iz kotla treba da ima određeni pritisak i temperaturu, koje sa snagom kotla predstavljaju osnove karakteristike kotla. Snaga kotla se izražava u kilogramima ili tonama pare koje kotao može da proizvede za jedan sat. Kotlovi snage do

500 t/h smatraju se malim i srednjim kotlovima, a kotlovi veće snage od 500 t/h su kotlovi velike snage.

Parni kotlovi su prošli dug razvojni put od običnih cilindričnih kotlova, preko kotlova sa plamenim cevima, kotlova sa dimnim cevima, pa sve do kotlova sa horizontalnim vodogrejnim cevima, kotlova sa vertikalnim vodogrejnim cevima i protočnih kotlova. Prema cirkulaciji, parne kotlove delimo na kotlove s prirodnom cirkulacijom, kotlove sa prinudnom cirkulacijom i protočne kotlove. Protočni kotlovi se izrađuju bez cilindra i predstavljaju jednoceveni sistem, kod kojeg se voda napojnom pumpom potiskuje u isparivač na čijem se izlazu dobija vlažna para.

3.3.5 Napojni deo

Voda koja se koristi za napajanje parnih kotlova mora se prethodno pripremiti, jer sirova voda sadrži štetne primese. Rastvorene i nerastvorene štetne primese u sirovoj vodi moraju se odstraniti da ne bi došlo do njihovog taloženja na zidovima parnih kotlova i u cevima. Naročito je opasan kotlovski kamen jer sa jedne strane smanjuje stepen iskorišćenja pranih kotlova zbog male toplotne provodnosti, a sa druge strane dovodi do pregrevanja kotlovskog materijala, što može dovesti do deformacije i eksplozije parnog kotla. Sirova voda se priprema mehaničkim i hemijskim bistrenjem i filtriranjem, čime se dobija tzv. demineralizovana (demi) voda.

3.3.6 Turbinski deo

Para iz parnog kotla dospeva u pregrejač pare gde se pregрева, a odatle odvodi u parni vod visokog pritiska i dalje u turbinu. Turbine su toplotni motori sa posrednim pretvaranjem toplotne energije u mehanički rad, pri čemu je u parnim turbinama radni medij vodena para, a u gasnim dimni gasovi, odnosno produkti sagorevanja. Osnovni delovi svake turbine su radno kolo i sprovedni aparat. Radno kolo se sastoji od diska, radne lopatice i vratila.

Prema principu rada razlikujemo akcijske, reakcijske i kombinovane turbine. Kod akcijskih turbina, para, neposredno delujući na lopatice, izaziva silu akcijskog dejstva, a ona obrtni moment. Mehanički rad nastaje na račun smanjenja kinetičke energije pare. Kod reakcijskih turbina, prvo se, produženom ekspanzijom, u sprovednom aparatu i radnom kolu, potencijalna toplotna energija pare pretvara u kinetičku. Zbog ubrzanja mlaza pare, na lopaticama radnog kola nastaje sila reakcijskog dejstva. Komponenta reakcijske sile koja deluje tangencijalno na rotor turbine je korisna, a druga, koja deluje aksijalno, duž vratila turbine, štetna je jer negativno deluje na ležišta turbine i mora se nekako poništiti.

Prema broju stepena, turbine delimo na jednostepene i višestepene.

Prema pravcu strujanja mlaza radnog fluida, turbine se dele na aksijalne i radijalne.

3.3.7 Kondenzacioni deo

Kondezovanjem pare pomoću vode za hlađenje smanjuje se pritisak i temperatura izlazne pare, čime se termički i opšti stepen iskorišćenja parnog postrojenja povećava. Kondenzovana voda (kondenzat) je zapravo destilovana voda koja se kondenzatnim pumpama vraća u parni kotao.

Ako ne bi bilo kondenzatora, postrojenje za pripremu vode bi moralo da priprema celokupnu vodu za napajanje kotla, što bi povećalo troškove eksploatacije. Upotrebom parnog kondenzatora praktično se dobija jedan zatvoreni sistem cirkulacije, u kojem se nadoknađuje samo dopunska voda, tj. voda koja je iscurila ili isparila kroz slabije zaptivena mesta, što obično predstavlja 3-10 % vode i pare u kruženju.

Kondenzator je u osnovi metalni cilindrični sud sa velikim brojem mesinganih cevi u unutrašnjosti, kroz koje protiče rashladna voda. Na dnu cilindra se prikuplja kondenzat, koji se vodi pumpama u deareator. Količina rashladne vode je 50 do 70 puta veća od količine pare koja se kondenzuje. Kondenzator se postavlja neposredno ispod turbine da bi gubici usled isticanja bili što manji.

Za pravilno funkcionisanje termoelektrane potrebne su, dakle, velike količine rashladne vode koje se koriste za kondenzovanje pare. Ako se iz reke ne može dobiti dovoljna količina rashladne vode, upotrebljena voda se hladi u rashladnim tornjevima. Rashladni toranj (Slika 3-3) je visoka betonska kula, čija je unutrašnjost isprepletena mrežom na koju pada voda dovedena iz parnog kondenzatora. Voda se razbija na kapljice čime se povećava njena dodirna površina sa vazduhom. Vazduh, čiji je tok suprotan od vode, oduzima toplotu od vode i u vidu toplih isparenja izlazi iz rashladnog tornja. Rashladena voda pada u obliku kiše u bazen za skupljanje rashlađene vode, a odatle se odvodi pumpama u parni kondenzator. Za pravilno cirkulisanje vazduha u rashladnom tornju potrebna je promaja, koja je obično prirodna, mada se može ostvariti i veštačkim putem. Gubici vode usled isparavanja i curenja nisu veliki i iznose 4-6% ukupne vode za hlađenje, pa se ovaj gubitak mora nadoknaditi.



Slika 3-3 Rashladni toranji

3.3.8 Elektroenergetski deo

Elektroenergetski deo TE uglavnom se sastoji od turboagregata (turbina+generator, Slika 3-4), odnosno od blokova generator-transformator (na primer, Slika 3-9), koji se nezavisno povezuju na prenosnu mrežu. Transformatori služe za podizanje napona na nivo napona prenosne mreže.



Slika 3-4 Turboagregat

Potrebno je obezbediti pouzdano napajanje sopstvene potrošnje elektrane, pa se obično predviđa napajanje ove potrošnje iz dva nezavisna izvora, najčešće sam generator bloka, i elektroenergetski sistem kao drugi izvor.

3.3.9 Uticaj na prirodnu sredinu (ekologija)

Termoelektrane na ugalj i mazut, proizvodima sagorevanja (dimni gasovi, šljaka, pepeo) najviše zagađuju atmosferu, vodu, tlo i životnu sredinu uopšte. Potrebno je ugraditi odgovarajuće sisteme i preduzeti sve potrebne mere kako bi se nepovoljni uticaji ublažili, odnosno držali u zakonima dozvoljnim granicama.

Dimni gasovi u sebi sadrže dosta čađi, prašine i sumpora. Najopasnija je emisija sumpor dioksida (SO_2), jer ugalj i nafta sadrže nekoliko procenata sumpora. U jako industrijalizovanom evropskom području, tzv. kisela kiša kojom se na vegetaciju talože sumporni spojevi, postala je jedan od najkrupnijih ekoloških problema. Široka šumska prostranstva, zajedno sa faunom, nalaze se u ozbiljnoj opasnosti. U Nemačkoj se navodi postojanje oštećenja u jednoj trećini šumskih područja. Pomoću visokih dimnjaka i odgovarajućih ekofiltera, nastoji se da se ovaj problem učini što manjim.

Drugi, isto tako ozbiljan problem, predstavljaju velike količine pepela i šljake na odlagalištima (deponijama). Da ne bi došlo do zagađenja podzemnih voda proceđivanjem štetnih materija iz pepela, deponija se pravi na odgovarajućem zemljištu gde npr. postoji debeo sloj gline, a oko deponije se postavlja drenažni sistem. Deponije se drže potopljene vodom, a suvi delovi se prskaju veštačkom kišom čime se sprečava raznošenje pepela vetrom. Posle punjenja, deponija se rekultiviše, (npr. pošumljavanjem) ili konzervira. Pepeo iz elektrofiltera (tzv.

leteći pepeo) može da se koristi u građevinarstvu, npr. za opekarske proizvode ili kao podloga za autoputeve. Konačno, i samo zemljište površinskih kopova uglja se treba rekultivisati na kraju eksploatacije.

3.3.10 Termoelektrana "Nikola Tesla" B 2x620MW

Termoelektrane "Nikola Tesla" u Obrenovcu, neposredno pored Beograda, za proizvodnju električne energije koriste kolubarski lignit čiji su kopovi udaljeni 20 do 30 km od termoelektrana. Termoelektrane su locirane na reci Savi uzvodno 30-50km od Beograda i tako su se u beogradskom regionu spojile tri osnovne pogodnosti za izgradnju velikih TE: ugalj, voda i veliki potrošač električne energije.

U TE "Nikola Tesla" A (Slika 3-5) i B (Slika 3-6) nalazi se danas najveća koncentracija energetske kapaciteta u Srbiji sa instalisanih 2890MW. U pogonu B (TENT B) instalisane su i najveće energetske jedinice u Srbiji na ugalj i lignit od 620MW.



Slika 3-5 Termoelektrana "Nikola Tesla" A

Ugalj koji se koristi kao gorivo ima donju toplotnu moć 6-8MJ/kg, prosečnog sadržaja vlage 45-53% i pepela 10-23%. Dnevna potrošnja uglja (u TENT B) je 17000-19000 tona po svakom bloku. Od prijemnih mesta na rudniku do termoelektrana, ugalj se transportuje specijalnim železničkim kompozicijama

neto težine oko 1500t, sopstvenom industrijskom elektrificiranom prugom normalnog koloseka.

Ugalj se u TE istovara na skladište uglja (pozicija 16, Slika 3-8), koje za prva dva izgrađena bloka ima kapacitet od 420000t, odnosno za 12 dana rada oba bloka. Posle istovara, ugalj se sa dve linije transportera dovodi do kotlovskih bunkera. Ugalj se potom melje u mlinovima za ugalj (poz. 11, Slika 3-8) i ventilatorima doprema u ložište kotla.



Slika 3-6 Termoelektrana "Nikola Tesla" B

Dimni gasovi dobijeni sagorevanjem uglja po izlasku iz kotla se sprovode kroz zagrejač vazduha (poz 12, Slika 3-8) gde deo toplote predaju svežem vazduhu koji se uvodi u ložište, zatim kroz elektrofilter (poz. 13) gde se dimnim gasovima odstranjuje pepeo i najzad kroz dimnjak (poz. 14) visine 280m u spoljašnji prostor gde ne bi trebalo očekivati nedozvoljena zagađenja životne sredine. Pepeo iz kotla se u bazenu (poz. 17) meša sa vodom i pumpama otprema na deponiju pepela (poz. 18).

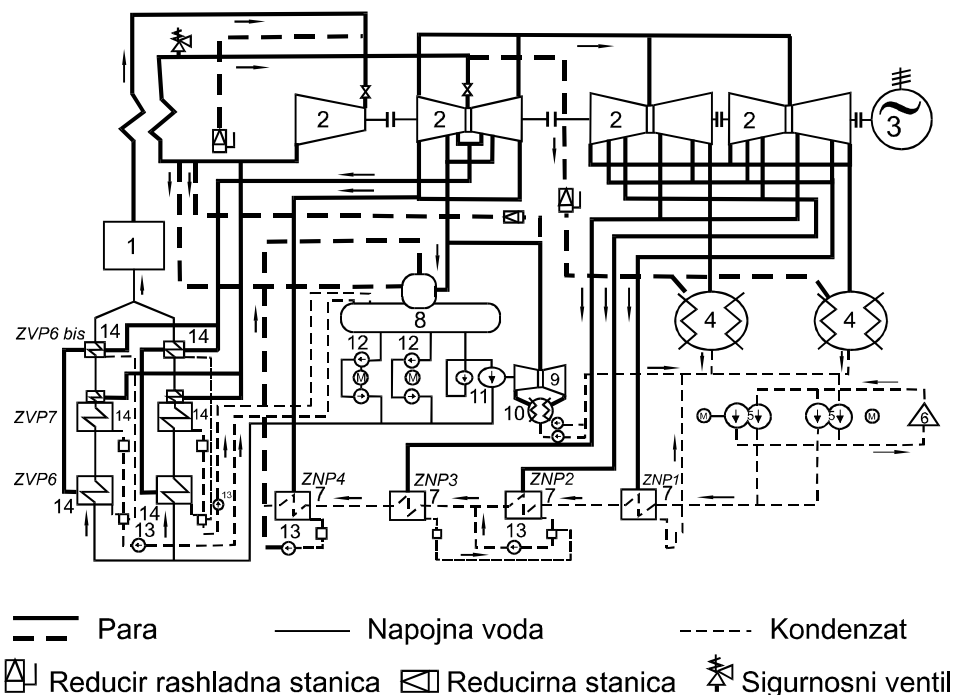
Voda za osnovni ciklus se obezbeđuje iz sistema bunara izbušenih na obali Save (poz. 20), a prečišćava se u postrojenju za hemijsku pripremu – potpunu demineralizaciju vode (poz. 21). Napajanje kotla vodom iz napojnog rezervoara (poz. 8) obezbeđuje jedna turbonapojna pumpa (poz. 9).

Za hlađenje kondenzatora, koristi se voda iz reke Save koja se mehanički prečišćava u pumpnoj stanici (poz. 19).

Toplotnu šemu sa osnovnim parametrima fluida prikazuje Slika 3-7. Turbina je jednoosovinska, četvorokučišna (1 x visoki pritisak , 2 x srednji pritisak i 1 x niski pritisak), a u radnom ciklusu se koriste postupci pregrevanja, međupregrevanja i regeneracije pare.

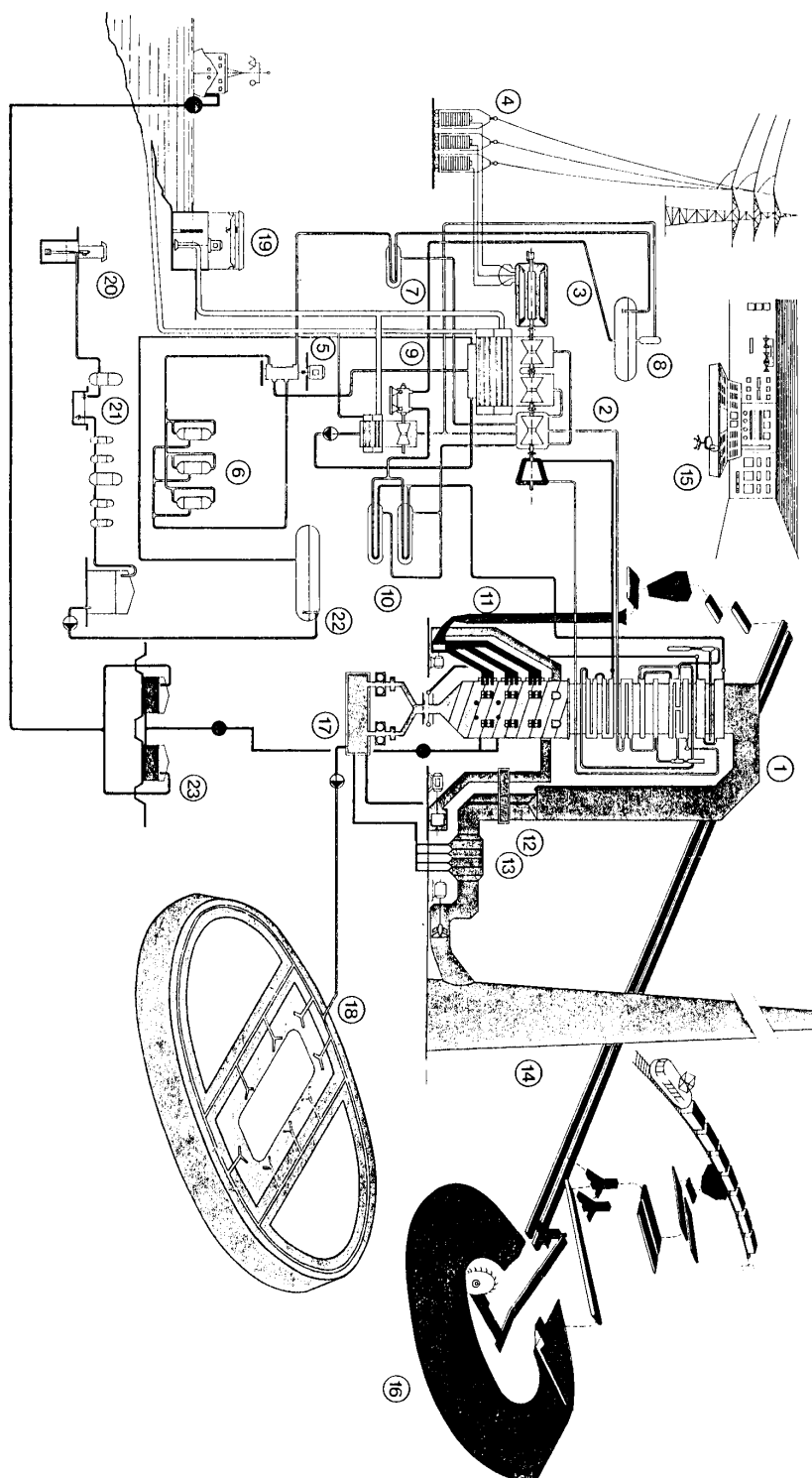
Generator za proizvodnju električne energije je trofazna sinhrona mašina direktno spojena za vratilo turbine. Naznačena snaga generatora je 630MW, prividna snaga 727,5MVA uz naznačeni napon od 21kV i naznačeni faktor snage 0,85. Hlađenje rotora generatora vrši se neposredno vodonikom pritiska 600 Pa, a hlađenje namotaja statora demi vodom – vodom koja se upotrebljava i za termodinamički radni ciklus.

Jednopolnu šemu TE prikazuje Slika 3-9. Generatori su za mrežu 400kV vezani blok transformatorima (poz. 2), a za sabirnice sopstvene potrošnje elektrane, blok transformatorima sopstvene potrošnje (poz. 3). Sopstvena potrošnja elektrane može se obezbediti i iz mreže od 220kV posredstvom posebnih transformatora (poz. 4), u slučaju da elektrana sama ne proizvodi električnu energiju.



Slika 3-7 Toplotna šema TE "Nikola Tesla" B

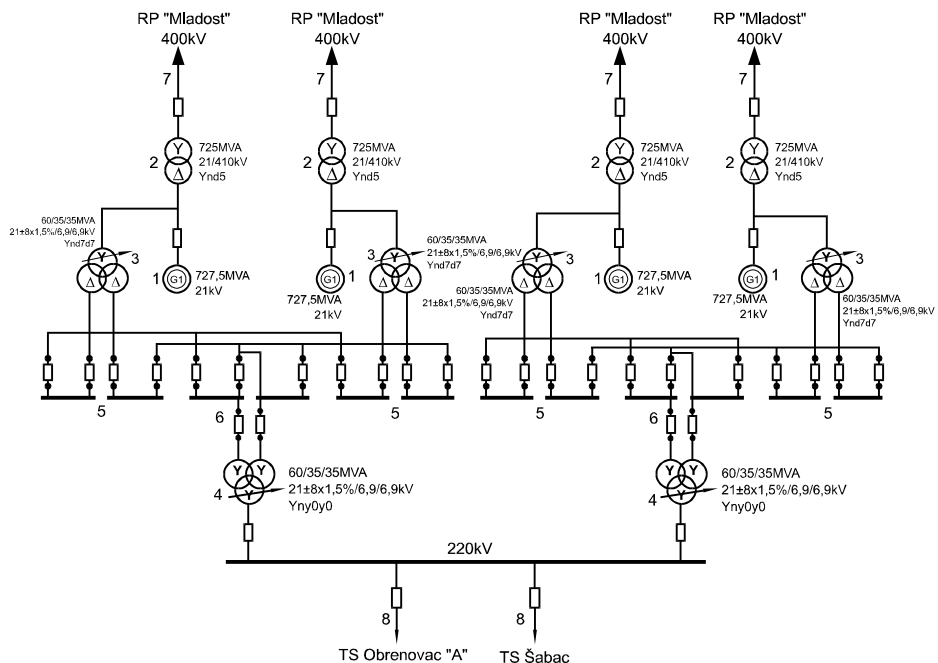
**1-kotao, 2-turbina, 3-generator,
4-kondenzator, 5-kondenzat pumpe, 6-regeneracija kondenzata, 7-zagrejači niskog pritiska, 8-napojni rezervoar, 9-turbina za pogon napojne pumpe, 10-kondenzator turbine napojne pumpe, 11-glavne napojne pumpe, 12-pomoćne napojne pumpe, 13-pumpe kondenzata iz zagrejača, 14-zagrejači visokog pritiska**



Slika 3-8 Šematski prikaz proizvodnje električne energije u TE "Nikola Tesla B"

(Slika 3-8 – nastavak opisa)

1-kotao, 2-turbina, 3-generator, 4-transformator, 5-kondenzat pumpa, 6-prečišćavanje kondenzata, 7-zagrejač niskog pritiska, 8-napojni rezervoar, 9-napojna pumpa, 10-zagrejač visokog pritiska, 11-mlin za uglj, 12-zagrejač vazduha, 13-elektro filter, 14-dimnjak, 15-blok komanda, 16-skladište uglja, 17-bazen bager stanice, 18-deponija pepela, 19-crpna stanica rashladne vode, 20-bunar, 21-hemijska priprema vode, 22-rezervoar dodatne demi vode, 23-rezervoar mazuta



Slika 3-9 Jednopolna šema TE "Nikola Tesla" B

1-generator, 2-blok transformator,
3-blok transformator sopstvene potrošnje, 4-transformator sopstvene grupe,
5-sopstvena potrošnja bloka 6,6kV, 6-sopstvena potrošnja opšte grupe,
7-dalekovod 400kV, 8-dalekovod 220kV

3.4 Nuklearne elektrane

Nuklearne termoelektrane (NE, Slika 3-10) su postrojenja u kojima se električna energija proizvodi iz toplotne energije koja se oslobađa u nuklearnim reaktorima prilikom raspadanja (fisije) atoma nuklearnih goriva (urana i plutonijuma). Razlika između TE i NE je u tome što se u TE generisanje toplote i proizvodnja pare vrši u kotlovskom postrojenju kroz hemijski proces sagorevanja goriva, dok se u NE toplota generiše u reaktoru kroz proces fisije nuklearnog goriva. Kod TE se gorivo skoro u potpunosti iskorištava, dok se kod NE iskorišćava samo mali deo energije nuklearnog goriva.

3.4.1 Nuklearna fisija

Fisija je nuklearna reakcija cepanja jezgara teških atoma usled udara neutrona koji nosi dovoljno energije. Broj oslobođenih neutrona može da bude jedan, dva ili više, što zavisi od načina provođenja fisije. Činjenica da se pri fisiji oslobađaju i neutroni omogućuje, pri određenim uslovima, postizanje kontinualnog procesa cepanja atoma koji se naziva *lančana reakcija* fisije, a time i praktično korišćenje nuklearne energije. Srednje teška jezgra nastala pri fisiji jednog teškog jezgra nazivaju se fisioni fragmenti i obično su radioaktivni. Najlakše dolazi do fisije teških jezgra sa neparnim brojem nukleona, kao što su izotopi urana U-233 i U-235 i plutonijuma Pu-239 i Pu-241. Fisiju ovih jezgara izaziva apsorpcija neutrona bilo kojih energija, pošto je sama energija vezivanja neutrona dovoljna za pobudu. Značajna količina energije oslobođene fisijom ravna je razlici energije vezivanja polaznog jezgra i stvorenih fisionih fragmenata (za veći broj teških jezgara iznosi oko 200MeV). Ova energija se javlja u obliku kinetičke energije fisionih fragmenata (što se manifestuje u obliku toplote) i energije alfa, beta i gama zračenja. Alfa čestice su identične jezgru helijuma i sastoje se od dva protona i dva neutrona, beta čestice su negativno naelektrisani elektroni, gama zračenje je elektromagnetsko zračenje.

Iz jednog kilograma U-235 može se dobiti 23000 MWh energije.



Slika 3-10 Nuklearna elektrana

3.4.2 Nuklearna fuzija

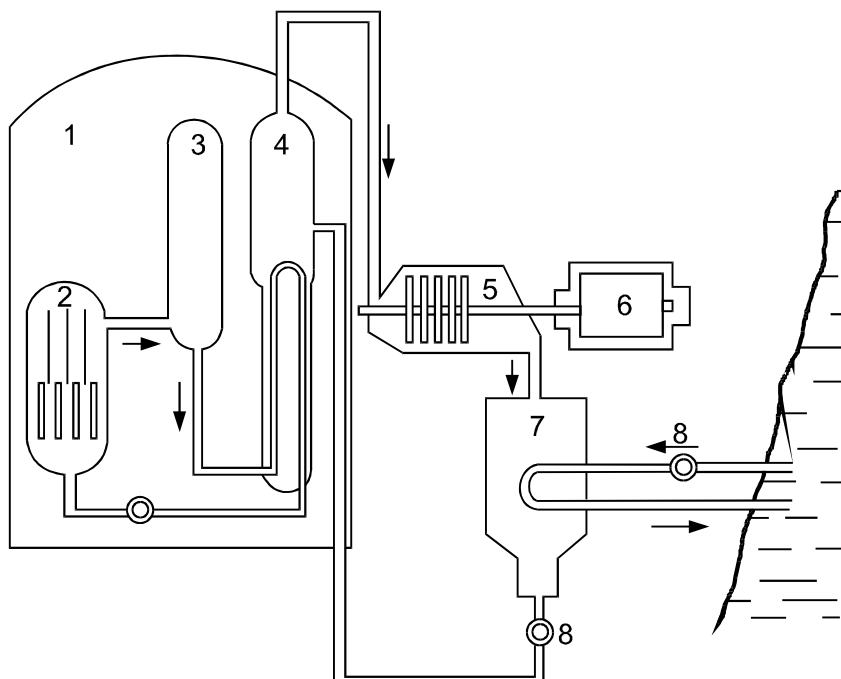
Fuzija je nuklearna reakcija spajanja lakih atomskih jezgara u jezgra nešto težih, ali takođe lakih elemenata, i može se uporediti sa sagorevanjem, tj. hemijskim spajanjem slabije vezanih atoma ili molekula u hemijski jače vezane.

Da bi započela reakcija fuzije, tj. spajanja, potrebno je jezgra atoma dovesti na dovoljno malo rastojanje, manje od prečnika atoma, pri čemu je potrebno savladati odbojne elektrostatske sile, jer su jezgra atoma pozitivno nalelektrisana. Te sile su veće u jezgara sa većim brojem protona, pa su otuda potrebne i veće energije, odnosno brzine jezgara koje ulaze u proces fuzije. Postoje u principu dva glavna načina za ostvarenje toga procesa. Jedan je ubrzavanje čestica pomoću akceleratora, a drugi ostvarenje veoma visokih temperatura (više od 10 miliona stepeni) na kojima jezgra poseduju veoma visoku energiju toplotnog kretanja, odnosno brzine. Međutim, kontrolisana reakcija fuzije, koja bi se kontinualno, jeftino i sa dobrim prinosom vršila u nekom uređaju (tzv. termonuklearni reaktor), za sada nije ostvarena. Fizičari su uvereni u to da će jednog dana energija fuzije, za čije dobijanje praktično postoje neiscrpne rezerve vodonika i deuterijuma u okeanima, postati stvarnost, tj. da će enegija fuzije u budućnosti zameniti klasične izvore energije. Naravno, postoje i uticajni lobiji kojima nije u interesu ovakvo rešenje energetske potrebe čovečanstva (petrolejski, proizvođači sadašnjih nuklearnih elektrana i drugi).

3.4.3 Osnovni delovi nuklearnih elektrana

Osnovni delovi nuklearne elektrane su (Slika 3-11):

- zaštitna zgrada (kontejment, biološki štit);
- nuklearni reaktor;
- generator pare;
- pumpe;
- sud za održavanje konstantnog pritiska;
- klasični sistemi.



Slika 3-11 Osnovna šema nuklearne elektrane

(1 - zaštitna zgrada; 2 - nuklearni reaktor; 3 - sud za izjednačenje pritiska; 4 - generator pare; 5 - turbina; 6 - generator; 7 - kondenzator; 8 - pumpe)

Svi tehnološki značajni objekti nuklearne elektrane su postavljeni na masivnoj betonskoj ploči. Ova ploča je čvrst temelj, siguran od zemljotresa (do 9 stepeni po Merkalijevoj skali).

Zaštitna zgrada (kontejnment) ima cilj da onemogući prodiranje flukseva neutrona, alfa, beta i gama zračenja i produkata sagorevanja u okolinu, kako u redovnom radu, tako i pri havarijama. Izrađuje se od unutrašnje čelčne ljuske i spoljašnje armiranobetonske zgrade, od specijalne vrste betona.

Nuklearni reaktori su uređaji u kojima se ostvaruje i kontrolisano održava lančana reakcija cepanja, tj. fisije teških atomskih jezgara, a različiti oblici energije fisije se pretvaraju u toplotu koja se odgovarajućim rashladnim fluidom izvodi iz reaktora. Osnovni delovi nuklearnog reaktora su:

- jezgro,
- reflektor,
- rashladni sistem,
- sistemi za regulaciju,
- sistem za merenje.

Jezgro čini nuklearno gorivo, a kod izvesnih nuklearnih reaktora i moderator. Kao gorivo se najčešće koristi prirodni uran U-238, koji sadrži 0,7% izotopa U-235 ili obogaćeni uran, koji sadrži 2% U-235. Za prirodni uran proces se vrši

neutronima visokih energija (brzi neutroni), dok se za obogaćeni uran vrši termičkim neutronima (brzine reda termičkog kretanja molekula).

Moderator je specijalni materijal koji neutrone usporava, a da ih ne apsorbuje. Može biti pomešan sa gorivom. Usporavanje neutrona se vrši njihovim elastičnim sudarom s atomskim jezgrama moderatora. Ko moderator se upotrebljavaju teška voda, grafit, obična voda, berilijum.

Reflektor – služi za vraćanje u jezgro onih neutrona koji nastoje da umaknu iz NE. Postavlja se oko samog jezgra, a obično je istog sastava kao moderator.

Sistem za regulaciju – brzina lančane reakcije, a time i oslobađanje energije, reguliše se povećanjem ili smanjenjem broja neutrona u sistemu. Obično se provodi menjanjem količine materijala koji apsorbuje neutrone u nuklearnom reaktoru (kontrola apsorbovanog broja neutrona), što se realizuje uvlačenjem i izvlačenjem šipki apsorbera neutrona (od kadmijuma ili čelika legiranog borom, kadmijumom) u jezgro ili reflektor.

Da bi se rad nuklearnog reaktora prekinuo, šipke se spuštaju u NR. Nedostatak ovog načina regulacije nuklearnog reaktora je gubitak neutrona koji se apsorbuju u materijalu kontrolnih šipki.

Sistem za merenje služi za kontrolu parametara nuklearnog reaktora u radu: snaga, neutronske tok, temperatura, pritisak, protok fluida za hlađenje.

Generator pare je izmenjivač toplote u kome rashladni fluid reaktora predaje toplotnu energiju vodi, odnosno pari u sekundarnom kolu nuklearne elektrane.

Za odvođenje toplote iz reaktora koriste se laka i teška voda, gasovi i rastopljeni metali. Medijum za odvođenje toplote iz reaktora mora da ima mali udarni presek apsorpcije, a ako se koristi i kao moderator, treba da ima i veću stabilnost pod udarima neutrona.

Odvođenje toplote proizvedene u reaktoru se može izvesti posredstvom radnog fluida turbine po jednokonturnoj, dvokonturnoj ili višekonturnoj šemi. Svaka kontura je zapravo zatvoren sistem. Višekonturna šema obezbeđuje radijacionu bezbednost i pogodnija je za opsluživanje postrojenja. Izbor broja kontura zavisi od tipa reaktora i osobina nosioca toplote, pogodnosti i karakteristike radnog fluida za korišćenje na turbini.

Klasični sistemi u nuklearnoj elektrani identični su sa sistemima u klasičnoj termoelektrani (turbina, generator, kondenzator, pumpe).

U svetu se danas uglavnom grade dva tipa nuklearnih elektrana:

- sa reaktorom tipa PWR (pressurized light water moderated and cooled reactor) – reaktor sa običnom vodom pod pritiskom. Rashladna voda primarnog kola koja odnosi toplotu iz nuklearnog reaktora u izmenjivač toplote nalazi pod takvim pritiskom da u reaktoru ne ključa. Para se proizvodi u izmenjivaču toplote izvan reaktora. Korišćenje obične vode značajno uprošćava tehnološku šemu. Ovaj tip reaktora se najviše gradi u Rusiji, SAD i Japanu;

- sa reaktorom tipa BWR (boiling water cooled and moderated reactor) reaktor sa ključalom vodom. Voda se pretvara u paru u samom nuklearnom reaktoru pa nije potreban izmenjivač toplote. Osnovna prednost ovih elektrana je niži pritisak u primarnom kolu, dok se proizvodnja pare odvija u aktivnoj zoni. Kod ovih generatora nema parnih generatora. Neželjena posledica ovakve konstrukcije je mogućnost prenosa radioaktivnosti do turbine. Uređaj je jednostavniji ali zahteva vrlo elastičnu regulaciju. Najveći proizvođači ovih elektrana su američka kompanija General Electric i švedska kompanija ASEA-ATOM.

3.4.4 Ciklus goriva

Ciklusom goriva (Slika 3-12) naziva se skup aktivnosti kojima se dobija sirovina za gorivo, izrađuje gorivo, upravlja njegovim korištenjem i brine o istrošenom gorivu, tj. o spremanju, preradi i odlaganju radioaktivnog otpada. Deo tih aktivnost se odvija u elektrani.

Faze ciklusa goriva pre ulaska u elektranu

Faze ciklusa goriva pre njegovog ulaska u elektranu su:

1. *dobijanje rude, prerada i izdvajanje urana,*
2. *konverzija i obogaćenje (nije potrebna za reaktore sa prirodnim uranom),*
3. *izrada goriva do oblika u kojem se stavlja u reaktor.*

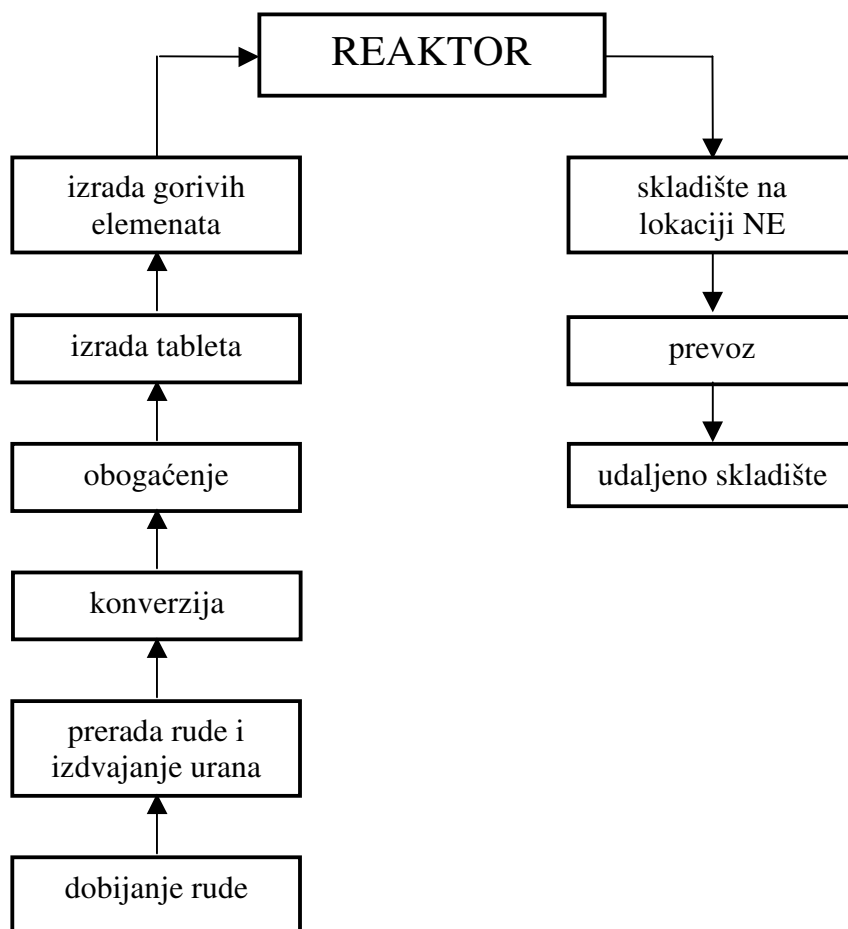
Uran nije redak element, međutim ima vrlo malo minerala, koji ga sadrže u većoj količini. Većina nalazišta urana sadrže rudu sa 0,1% do 0,5% urana, dakle potrebno je obraditi relativno velike količine rude. Nalazišta mogu da budu površinska ili podzemna. Tehnika iskopa se ne razlikuje značajno od onih u rudnicima uglja, osim što postoji i opasnost od radioaktivnosti za rudničko osoblje.

S obzirom na to da je uran u uranovoj rudi pomešan sa mnogim drugim mineralima, ruda se mehaničkim i hemijskim metodama obrađuje, a uranski koncentrat izdvaja kao oksid U_3O_8 (tzv. žuti kolač).

Konverzija žutog kolača U_3O_8 u uranov heksafluorid UF_6 predstavlja pripremu fazu za obogaćivanje. U procesu konverzije odstranjuju se i nečistoće do potrebnog stepena nuklearne čistoće urana. Zemlje izvoznice urana nastoje da obave konverziju kako bi povećale izvoznu cenu urana.

Obogaćivanje predstavlja povećanje sadržaja izotopa U-235 na kome se bazira održavanje lančane reakcije, sa 0,7%, koliko ga ima u prirodnom uranu, na 1,7% do 3,5%, koliko je potrebno za korišćenje u lakovodnim energetskim reaktorima. Komercijalno su najviše zastupljeni difuzioni i centrifugalni postupak za obogaćivanje. Difuzioni postupak se bazira na pojavi da prolaz gasa kroz poroznu membranu zavisi od brzine molekula gasa. Zbog razlike u prosečnim brzinama molekula, kroz membranu prolazi više molekula izotopa U-235. Zbog

male efikasnosti, potrebno je mnogo prolaza kroz komore s membranama vezanim u kaskade dok se ne postigne potreban stepen obogaćenja.



Slika 3-12 Faze ciklusa goriva bez prerade

Kod reaktora hlađenih vodom, gorivo je u obliku uranovog oksida UO_2 , koji se oblikuje u sitne tablete, koje se zatim slažu u veće celine, štap goriva i element goriva. Štap goriva je tanka cev od legure koja apsorbuje malo neutrona, ispunjena gorivom. Da bi se olakšalo postavljanje i promena goriva u reaktoru, štapovi goriva se skupljaju u čvrstu celinu koja se naziva element goriva. Element goriva reaktora tipa PWR je kvadratna matrica 15x15, 16x16 i 16x16 mesta za štapove goriva. Deo raspoloživih mesta upotrebljen je za kontrolne štapove. Npr. za elektranu Krško (američki proizvođač *Westinghouse*) prečnik tablete je 8,2mm, spoljni prečnik cevi 9,4mm, ukupni broj cevi približno 25000, Element goriva je matrica 16x16, sa 235 štapova, dimenzija 197x197x4056 mm. Jedan element sadrži 404 kg urana, a ukupna masa mu je 572 kg.

Faze ciklusa goriva u elektrani (unutrašnji ciklusi)

Aktivnosti u elektrani (tzv. unutrašnji ciklus) su:

4. *spremanje svežeg goriva, punjenje reaktora, razmeštanje goriva u reaktoru, vađenje istrošenog goriva i njegovo čuvanje u elektrani.*

Elementi goriva se u reaktoru raspoređuju i razmeštaju tako da se za vreme boravka u reaktoru iz goriva dobije maksimalna energija, uz zapreminski ravnomerni raspored snage u reaktorskoj posudi (jezgru).

Iz reaktora PWR (pri normalnim uslovima rada) godišnje se vadi 1/3 elemenata goriva i zamenjuje svežim; gorivo boravi u reaktoru 3 godine. Iskorišćeni gorivi elementi čuvaju se pod vodom u dubokim bazenima. Voda ima dvostruku funkciju: služi kao zaštita od radioaktivnog zračenja i kao sredstvo za hlađenje, budući da intenzivan radioaktivni raspad razvija i znatne količine toplote. U takvim bazenima gorivo može da leži i mnogo duže nego što je potrebno za hlađenje, ako još nije odlučeno kakav će biti dalji postupak s istrošenim gorivom.

Pri radu *NE* nastaju gasoviti, tečni i čvrsti radioaktivni otpaci. Kratkoživeći nestabilni gasoviti otpaci se zadržavaju u rezervoarima dok se ne raspadnu, a preostali gasovi odlaze u atmosferu pri povoljnim meteorološkim prilikama. Tečni se prečišćavaju u postrojenjima koja se sastoje od rezervoara, pumpi, filtera, komore za isparavanje i demineralizatora. Čvrsti radioaktivni otpaci se presuju i ukrućuju, a onda se njima puni burad od čeličnog lima. Na lokaciji *NE* obično postoji skladište za čuvanje nuklearnog otpada, gde se ova burad privremeno odlaže

Faze ciklusa goriva nakon izlaska iz reaktora

Faze ciklusa nakon izlaska iz reaktora su:

5. *prevoz do instalacije za preradu i prerada,*
6. *prerada (recikliranje) goriva*
7. *odlaganje radioaktivnog otpada.*

Pomoću posebno zaštićenih kontejnera mogu se istrošeni ohlađeni gorivi elementi odvesti iz elektrane u fabriku za preradu istrošenog goriva, i to železnicom ili drumskim vozilima.

Prerada (recikliranje) goriva se obavlja radi izdvajanja plutonijuma ili urana iz istrošenih gorivih elemenata. Istrošeno gorivo je snažno radioaktivno, zato prerada mora biti daljinski upravljana i automatizovana. Izdvojeni materijal, plutonijum i uran, moraju da se na kraju dobiju "nuklearno" čisti, kako bi mogli da se upotrebe za izradu goriva.

Dugoročno čuvanje, odnosno odlaganje radioaktivnog opada je poslednja faza ciklusa goriva, ali i jedno od najproblematičnijih pitanja u vezi sa korišćenjem fisione energije. Nužnost nadzora nad radioaktivnim otpadom kroz dugi

vremenski period, čak i vekovima, za neke je glavni argument protiv korišćenja atomske energije. Kao radioaktivni otpad, konačno se odlažu sastojci goriva koje je prerađeno. Za trajno odlaganje radioaktivnog otpada posmatrane su različite metode, od kojih su neke i realizovane:

- odlaganje u okeanima (u dubokim vodama ili u tektonskim rovovima);
- odlaganje u geološkim formacijama na kopnu (duboke, bušotine, ležišta soli);
- odlaganje u antartički led;
- odlaganje u kosmos.

Faze konverzije i obogaćenja izostaju kod reaktora sa prirodnim uranom

3.4.5 Uticaj na prirodnu sredinu (ekologija)

Da bi se što više smanjio nepovoljan uticaj nuklearnih elektrana na okolinu i čoveka, primenjuju se posebne mere bezbednosti od samog početka procesa, vađenja rude, pa do kraja, konzervisanja elektrane nakon završetka životnog veka i trajnog odlaganja nuklearnog otpada. Međutim, uz sve mere bezbednosti, dešavaju se havarije (akcidenti), sa manjim ili većim posledicama (prisetimo se velike katastrofe koje je izazvala havarija nuklearnog reaktora u Černobilu). Analize i studije o uticaju nuklearnih elektrana na okolinu i ljude svode se na sledeće glavne teme:

- uticaj elektrane na okolinu u normalnom pogonu,
- opasnost od kvarova i njihove posledice,
- opasnost od sabotaze, zemljotresa i vojnog napada,
- sigurnost prevoza, spremanja i odlaganja radioaktivnog otpada,
- odvajanje nuklearnog goriva za vojnu upotrebu.

3.5 Hidroelektrane

Hidroelektrane su postrojenja kod kojih se električna energija proizvodi iz potencijalne energije vode.

3.5.1 Vrste hidroelektrana

Pored navedenih karakteristika koje važe za sve elektrane (str. 25), za hidroelektrane je značajno navesti još i *instalirani protok* Q_{max} (ili veličina izgradnje) i *prosečnu godišnju proizvodnju* (GWh).

Prema tome da li postoji akumulacioni bazen i kolika je njegova veličina, postoje:

- protočne hidroelektrane;
- hidroelektrane sa dnevnom i nedeljnom akumulacijom;
- hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom.

S obzirom na način korišćenja akumulacionog bazena hidroelektrane delimo na:

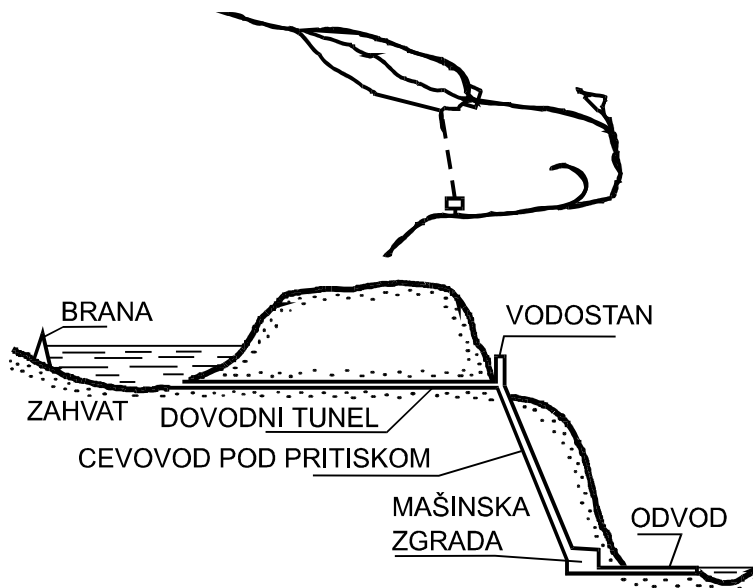
- akumulacione;
- pumpno-akumulacione.

Protočne hidroelektrane koriste prirodni protok vode. Raspoloživi protok se menja zavisno od količine padavina. Kada je protok veći od predviđenog onda se višak vode nekorisno preliva preko brane, a kada je protok manji od predviđenog, onda se smanjuje proizvodnja električne energije. Protok vode za koji se elektrana izgradi naziva se normalni protok. Da bi se odredio normalni protok za neku reku nije dovoljno da se mere dnevni protoci u toku jedne godine, jer postoje sušne i kišne godine. Obično se uzimaju podaci za period od 10, 20 ili više godina kao stvarni pokazatelji protoka vode.

Akumulacione hidroelektrane se grade ako teren omogućuje ekonomičnu izgradnju akumulacionog bazena ili veštačkog jezera u kome može da se akumulira suvišna voda u vreme velikih padavina. Za vreme suše, ova se voda koristi da za istu reku poveća broj dana normalnog protoka. Akumulacione hidroelektrane sa dnevnom i nedeljnom akumulacijom imaju još i veoma značajnu ulogu pokrivanja vrhova opterećenja.

Kod veličine akumulacionog bazena, treba razlikovati ukupnu i korisnu zapreminu akumulacionog bazena. *Ukupna zapremina* odgovara količini vode koja može da stane između dna i najvišeg nivoa vode u bazenu. *Korisna zapremina* se odnosi na zapreminu vode između najnižeg i najvišeg nivoa vode u bazenu u normalnom pogonu. *Energetska vrednost akumulacionog bazena* je količina električne energije koja bi se proizvela u sopstvenoj hidroelektrani i u svim nizvodnim hidroelektranama za slučaj pražnjenja korisne zapremine bazena bez dotoka i bez gubitaka vode.

Osnovni delovi hidroelektrana su (Slika 3-13): *brana, zahvat, dovod, vodostan, cevovod pod pritiskom, mašinska zgrada i odvod*. Koje od navedenih delova će neka hidroelektrana imati zavisi od konstrukcije hidroelektrane, topografskih uslova, geoloških uslova, od pogonskih zahteva hidroenergetskog iskorišćavanja celog vodotoka (potrebe navodnjavanja, vodosnabdevanja i zaštite od poplava) i od zaštite životne sredine.

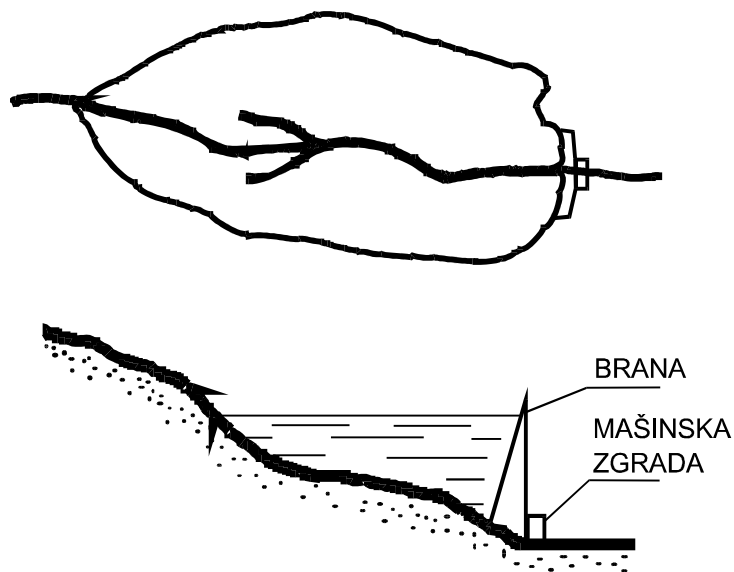


Slika 3-13 Derivaciona hidroelektrana

Prema konstrukciji, hidroelektrane se mogu podeliti u dve osnovne grupe: *pribranske* i *derivacione hidroelektrane*. *Pribranske hidroelektrane* (Slika 3-14) najčešće imaju mašinsku zgradu smeštenu uz branu, unutar brane ili je zgrada izvedena kao deo brane. Kod pribranskih hidroelektrana, nema potrebe za dovodom, vodostanom i odvodom, a zahvat i cevovod pod pritiskom predstavljaju deo brane, odnosno mašinske zgrade; obično se grade na većim rekama sa manjim padovima.

Derivacione hidroelektrane (Slika 3-13) imaju uglavnom manje vodotoke i veće padove i po pravilu sadrže sve nabrojane delove hidroelektrana. Dovod (dovodna derivacija) i odvod (odvodna derivacija) mogu biti otvoreni ili pod pritiskom, kod pojedinih tipova hidroelektrana, zavisno od konstrukcije, mogu i da ne postoje. Mašinska zgrada može da bude ukopana ili na otvorenom.

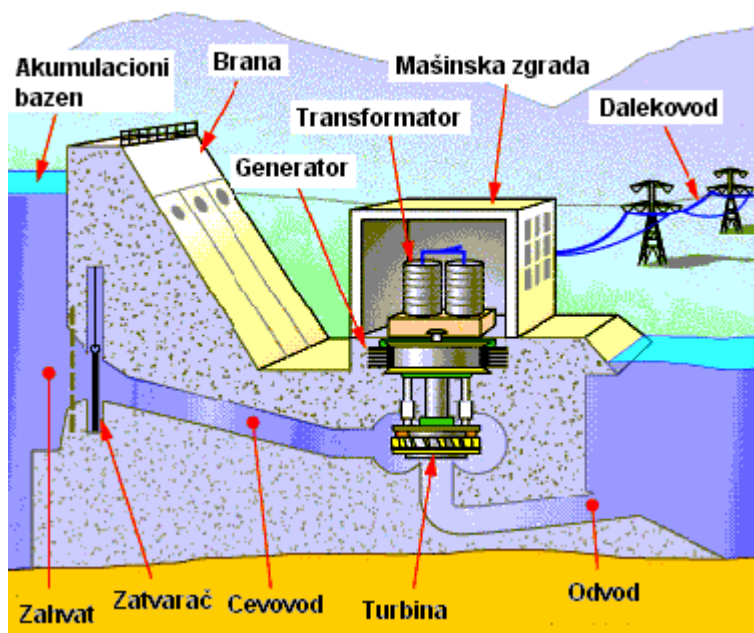
Pod *mini hidroelektranama* se podrazumevaju hidroelektrane snaga do 10 MW. Često se nazivaju i potočare. Prednost ovih elektrana se sastoji u relativno malom ulaganju, snabdevanju energijom teško pristupačnih, planinskih predela, čime imaju i veliku stratešku vrednost. Srbija je veoma bogata vodotocima, naročito u regionu Užica, Niša i Kragujevca, koji su slabo iskorišćeni. Procenjuje se da ima preko 600 potencijalnih lokacija za izgradnju mini hidroelektrana, čime bi se mogle dobiti značajne količine električne energije.



Slika 3-14 Pribranska hidroelektrana

3.5.2 Osnovni delovi hidroelektrana

Osnovni delovi hidroelektrana su *brana*, *zahvat*, *dovod*, *vodostan*, *cevovod pod pritiskom*, *mašinska zgrada* i *odvod* (Slika 3-15).



Slika 3-15 Osnovni delovi elektrana

Brana

Brana (Slika 3-16) služi da skrene vodu sa njenog prirodnog toka prema zahvatu hidroelektrane, da povisi nivo i uspori protok vode. Pored toga brane služe i za regulaciju vodotoka, regulaciju plovidbe rekom i slično.

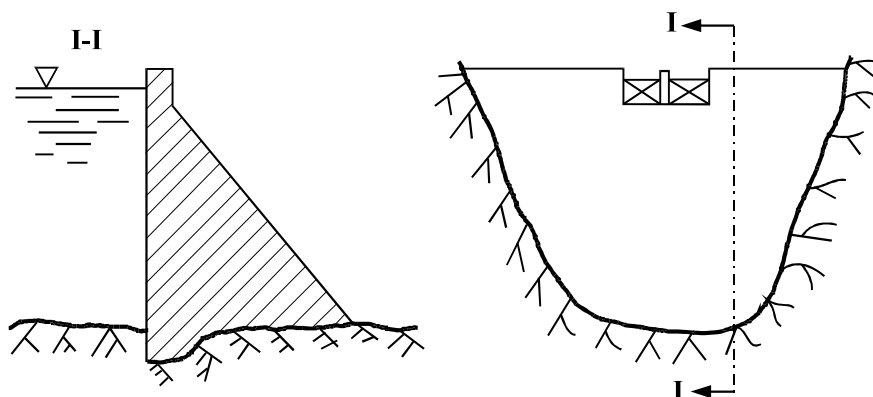


Slika 3-16 Brana HE "Bajina Bašta"

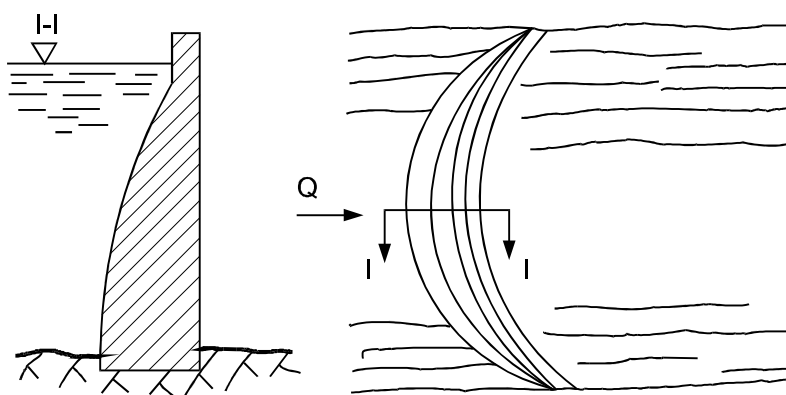
Brane se mogu podeliti prema sledećim kriterijumima:

- *prema materijalu na:*
 - a) *betonske brane;*
 - b) *brane od lokalnih materijala, uglavnom od različitih vrsta zemlje i kamena.*
- *prema konstruktivnim svojstvima na:*
 - a) *gravitacione brane* koje svojom velikom težinom stvaraju velike sile trenja koje deluju nasuprot hidrostatičkom pritisku vode (Slika 3-17);
 - b) *lučne brane*, koje svojim oblikom osiguravaju stabilnost (Slika 3-18);
 - c) *kontraforsne (olakšane) brane*, kod kojih pritisak primaju ploče i predaju ih potporama (Slika 3-19),
 - d) *stepenasto gravitacione i druge brane* koje predstavljaju kombinaciju prva tri osnovna tipa brana.
- *zavisno od mogućnosti odvoda: gluve brane (koje nemaju preliv vode) i vodopropusne brane.*

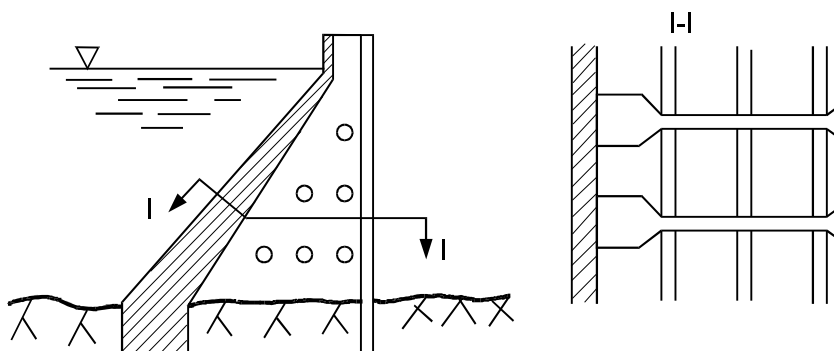
Betonske brane se grade kao gluve i kao vodopropusne. Vodopropusne se izvode sa površinskim i unutrašnjim otvorima za preliv vode. Brane protočnih elektrana se obično sastoje od gluvog i od vodopropusnog dela. Visoke brane u uskim kanjonima često se grade kao gluve brane. U ovom slučaju se preliv suvišne vode ostvaruje zaobilazno, površinski ili kroz tunel.



Slika 3-17 Gravitaciona brana



Slika 3-18 Lučna brana



Slika 3-19 Kontraforsna (olakšana) brana

Zahvat i dovod vode

Zahvat vode treba vodu koja je akumulirana u jezeru da odvede prema turbinama.

Primenjuju se dva osnovna tipa zahvata vode:

- zahvat na površini vode,
- zahvat ispod površine vode.

Zahvat na površini vode se izvodi kod niskih brana, jer je nivo vode u akumulaciji praktično stalan.

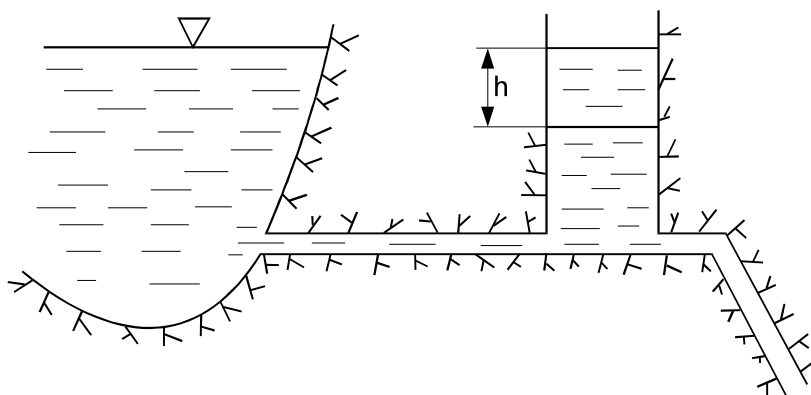
Zahvat ispod površine vode izvodi se uglavnom kod visokih brana, jer u takvim akumulacijama nivo vode nije stalan. Zahvat vode mora da bude na koti ispod koje se neće ni u najkritičnijim sušnim periodima spustiti nivo vode.

Dovod vode spaja zahvat vode sa vodostanom. Izvodi se kao kanal ili kao tunel, što zavisi od terena i pogonskih zahteva hidroelektrane. Dovodni tunel se izvodi kao gravitacioni ili pod pritiskom.

Hidroelektrane sa tunelom pod pritiskom znatno su elastičnije u pogonu od hidroelektrana sa gravitacionim tunelom.

Vodostan

Ako se na dugački dovodni tunel ili kanal, direktno nastavi cevovod pod pritiskom, onda kod naglog zatvaranja turbina dolazi do porasta pritiska u dovodnim organima, koji može da bude veoma opasan. Pri naglom zatvaranju turbina, kinetička energija vode u dovodnom tunelu i cevovodu pod pritiskom mora da se pretvori u potencijalnu energiju. Usled toga dolazi do elastične deformacije čeličnog cevovoda i betonske obloge dovodnog tunela. Vodostan ima ulogu da porast pritiska, koji nastaje naglim zatvaranjem turbine, ograniči na relativno nisku vrednost. Vodostan (Slika 3-20) se gradi na mestu gde tunel prelazi u cevovod pod pritiskom.



Slika 3-20 Princip izgradnje vodostana

Voda u vodostanu ima neposredan dodir sa atmosferskim vazduhom. Zatvaranjem turbina, voda u dovodnom tunelu teče još neko vreme i podiže nivo

vode u vodostanu. Na taj način, kinetička energija vode u dovodnom tunelu prelazi u potencijalnu energiju vodenog podignutog stuba u vodostanu.

Zapremina vodostana treba da bude dovoljno velika da pri normalnoj brzini otvaranja turbine (na primer, porast opterećenja turbine od 50% na 100% za vreme od 3s) ne dođe do potpunog pražnjenja vodostana, jer bi u tom slučaju ušao vazduh u cevovod pod pritiskom i izazvao opasne udare vode prilikom izlaska vazduha i ponovnog punjenja cevovoda vodom.

Ako za dovod služi kanal a ne cevovod pod pritiskom, onda se na kraju kanala predviđa vodostan u vidu otvorenog bazena.

Cevovod pod pritiskom

Cevovod pod pritiskom najčešće se izrađuje od zavarenih čeličnih limova. Pored toga, kao materijal za ove cevovode koristi se armirani beton, liveno gvožđe i liveni čelik.

Cevovodi pod pritiskom postavljaju se nepokriveni na površinu zemlje, slobodno u tunelu i ubetonirani ili ukopani. Kod slobodno položenog cevovoda mora da postoji mogućnost slobodnog istezanja usled promena temperature, što se postiže tako što se cevovod podeli u više sekcija, koje se među sobom spajaju dilatacionim komadima.

Na ulazu u cevovod uvek se postavlja zaporni organ (zatvarač), koji treba da spreči doticanje vode ako iz bilo kog razloga pukne cevovod. Kad cevovod pukne, brzina u njemu se povećá, što se koristi za stvaranje impulsa za zatvaranje zapornog organa.

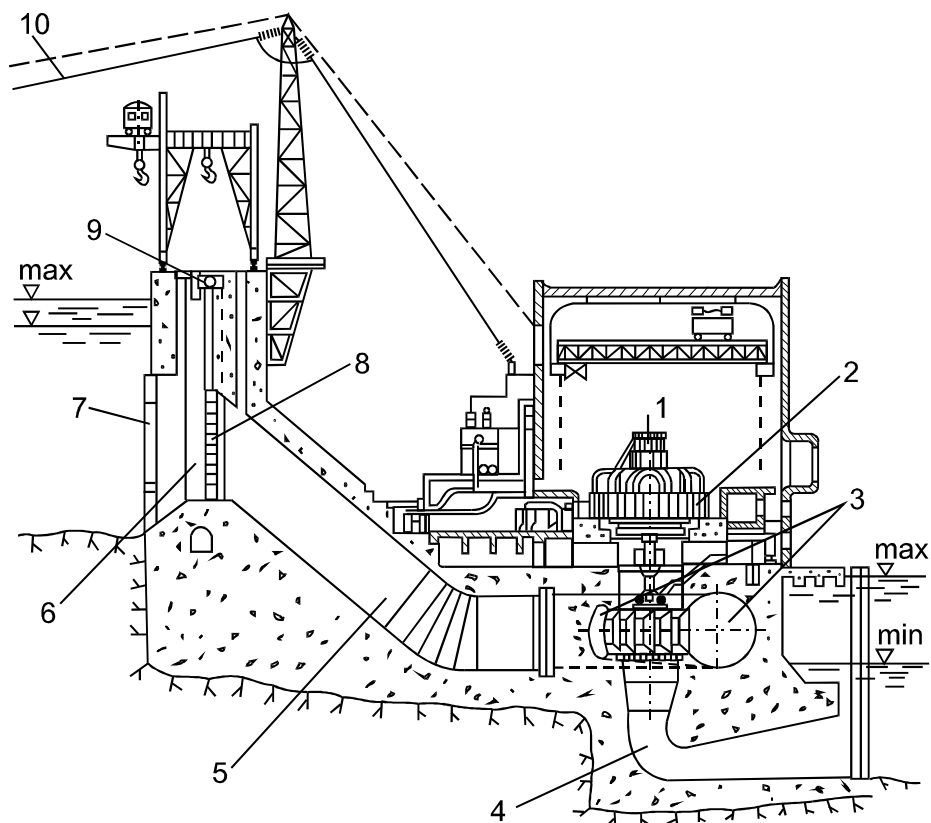
Mašinska zgrada i odvod

Mašinska zgrada je građevina u kojoj su smešteni agregati hidroelektrane (turbine i generatori) i pomoćna oprema. Mašinska zgrada treba da zadovolji često protivurečne uslove – pogodnosti za eksploataciju i ekonomičnost u izgradnji (na primer, postizanje povoljnih uslova za remontovanje može značajno da poskupi izgradnju).

Mašinske zgrade hidroelektrana mogu da se klasifikuju na više načina:

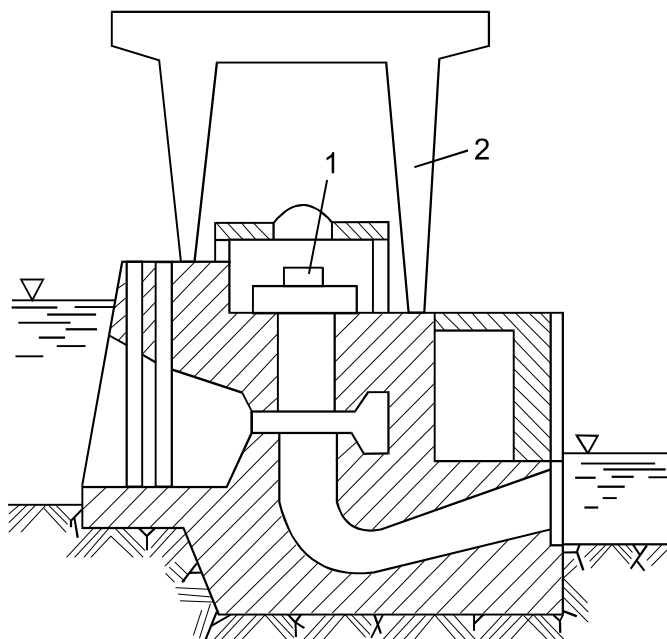
- *zavisno od toga da li zgrada prima pritisak vode:*
 - a) *zgrade koje primaju pritisak zajedno sa branom trpe pritisak vode,*
 - b) *zgrade koje ne primaju pritisak vode (kao kod derivacionih elektrana);*
- *prema uređajima za odvod vode sa višeg na niži nivo, zgrade protočnih elektrana mogu da budu:*
 - a) *razdvojene od preliva, gde se odvod suvišne vode sa gornjeg nivoa ostvaruje preko prelivnih otvora na brani i drugih uređaja koji nisu povezani sa zgradom hidroelektrane,*
 - b) *zajedno sa prelivima, koji su obično smešteni na masivnom (podvodnom) delu zgrade;*

- prema tipu konstrukcije uređaja za dizanje:
 - a) *zatvorena*, sa unutrašnjim smeštajem uređaja za dizanje – mosne dizalice (Slika 3-21),



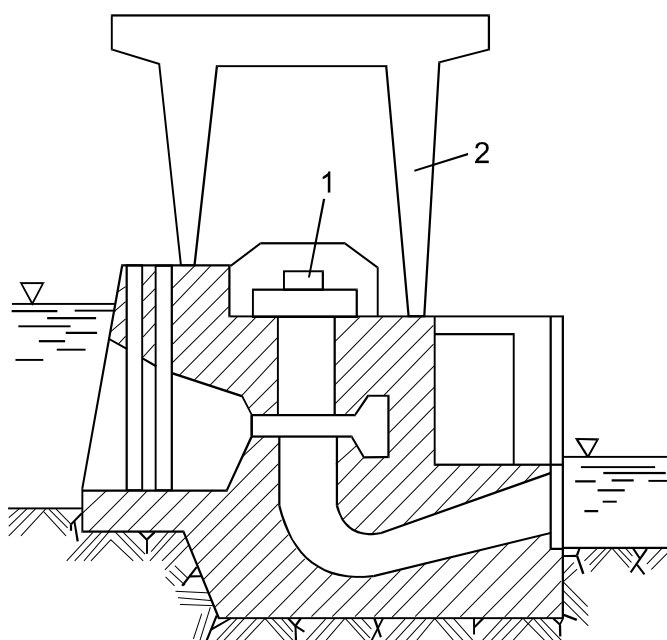
Slika 3-21 Vertikalni presek zatvorene mašinske zgrade hidroelektrane

- 1 - mašinska sala, 2 - generator,**
3 - spiralna komora, 4 - isisna cev, 5 - turbinski cevovod, 6 - ulaz vode, 7 - rešetka,
8 - zatvarač, 9 - mehanizam za dizanje zatvarača, 10 - dalekovod,
- b) *poluotvorena*, gde je osnovni uređaj za dizanje (portalna dizalica) smeštena iznad mašinske sale sa generatorom. Generatorska sala je nisko postavljena sa demontažnim poklopcima iznad generatora (Slika 3-22);
 - c) *otvorena*, gde mašinska zgrada ne postoji, a generatori su pokriveni poklopcima (Slika 3-23);



Slika 3-22 Poluotvorena mašinska zgrada hidroelektrane

1 - hidroagregat, 2 - portalna dizalica



Slika 3-23 Otvorena hidroelektrana:

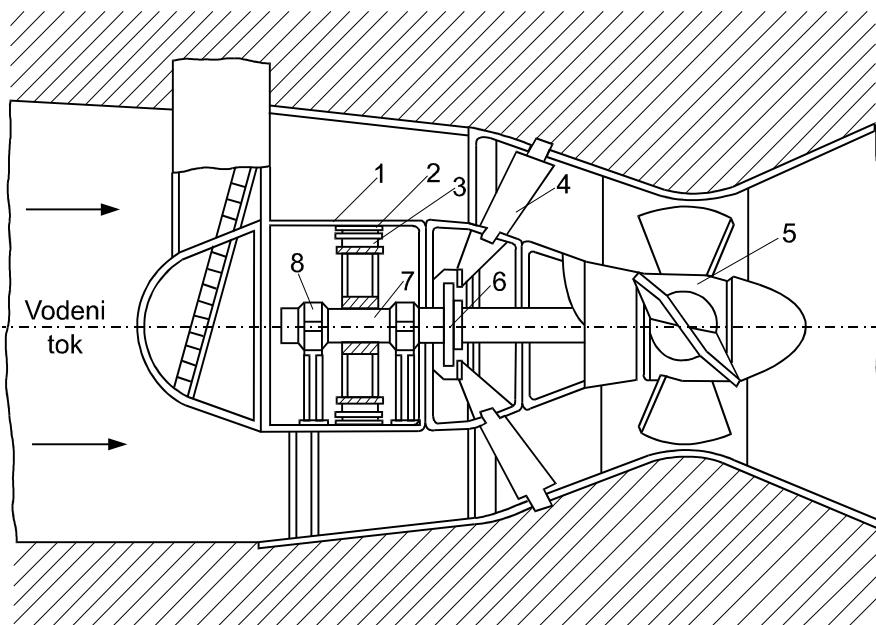
1 - hidroelektrna, 2 - portalna dizalica

- *prema smeštaju u odnosu na površinu zemlje:*
 - a) *nadzemna mašinska zgrada,*
 - b) *podzemna mašinska zgrada,* koja se nalazi ispod površine zemlje – grade se kod derivacionih hidroelektrana kada se derivacija izvodi u vidu tunela;
- *zavisno od položaja osa agregata (turbina i generator):*
 - c) *zgrade sa vertikalnim agregatima;*
 - d) *zgrade sa horizontalnim agregatima* – primenjuju se kod hidroelektrana sa padom od 10-15m, preglednost i pristupačnost je veća, ali se zahtevaju znatno veće površine za smeštaj nego kod agregata sa vertikalnom osovinom.

Deo mašinske zgrade hidroelektrane koji se sastoji od jednog agregata, naziva se turbinski ili agregatni blok. Dimenzije bloka zavise od snage agregata. Obično se u hidroelektranama instalise najmanje dva do tri bloka.

Posebnu vrstu hidrogeneratora sa horizontalnom osovinom čine takozvani kapsulni ili cevni generatori (Slika 3-24). Ovi generatori se zatvaraju u nepromočivi oklop ili kapsulu sa čije spoljašnje strane teče voda koja prolazi kroz turbinu. Ova konstrukcija se primenjuje za hidroelektrane niskog pritiska (malih padova) i omogućava da se odustane od izgradnje mašinske sale a postiže se i veća kompaktnost elektrane uz nižu cenu.

Razvodno postrojenje hidroelektrane se smešta što bliže mašinskoj zgradi.



Slika 3-24 Kapsulni hidrogenerator

1-kapsula, 2-stator generatora, 3-rotor generatora, 4-sprovodni aparat turbine, 5-rotor turbine, 6 i 8-ležajevi, 7-vratilo

Dimenzije mašinske zgrade određuju se uvek tako da se ne potope osetljivi delovi (pre svega generator) ako bi usled katastrofalnog vodostaja ili iz drugih razloga došlo do prodiranja vode u mašinsku zgradu. Predturbinski zatvarači se obično smeštaju u mašinsku zgradu, neposredno ispred same turbine; često je to posebna prostorija, tzv. galerija zatvarača.

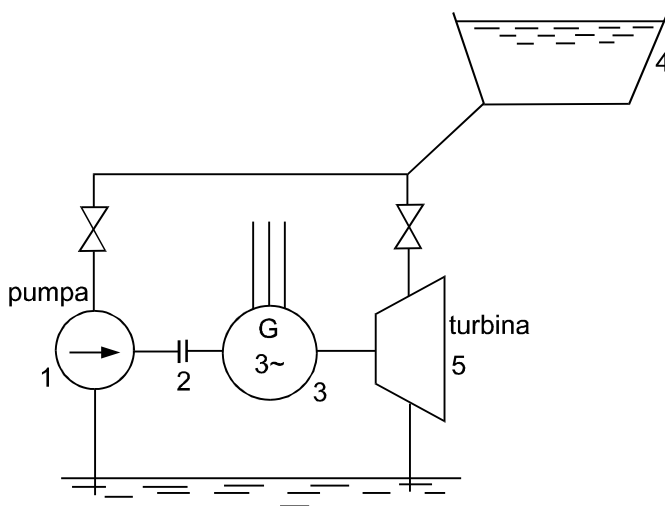
U opremu mašinske zgrade još spadaju glavni i kućni transformatori, razvodno postrojenje, komandna sala, akumulatorska baterija, kompresorsko postrojenje, pumpe za rashladnu vodu, uređaji za gašenje požara, ventilacioni uređaji, itd.

3.5.3 Pumpno-akumulacione hidroelektrane

Pumpno-akumulacione hidroelektrane imaju veoma značajnu ulogu u EES jer mogu brzo da promene svoju ulogu – da budu proizvođač ili potrošač električne energije i tako obezbede stabilnost EES.

Princip rada

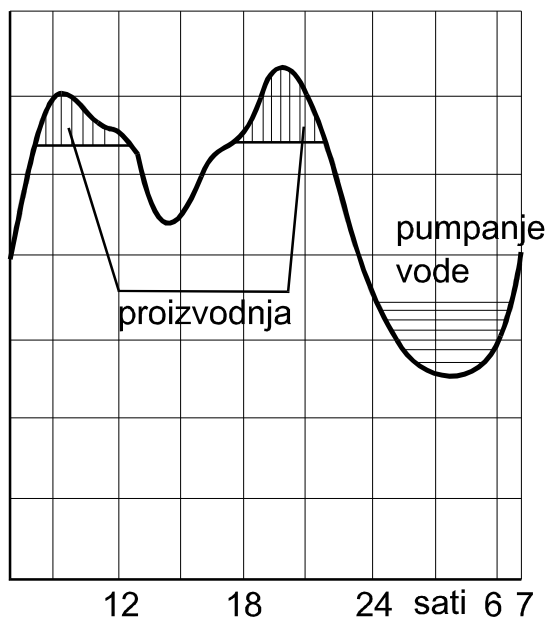
Pumpno-akumulaciono postrojenje može da radi kao hidroelektrana (turbinski rad) ili kao potrošač električne energije (pumpni rad). Kada radi kao hidroelektrana, voda iz akumulacionog bazena (Slika 3-25) se usmerava kroz turbinu i njena potencijalna energija se pretvara u mehaničku, a potom u generatoru i u električnu energiju. Kada pumpno-akumulaciono postrojenje radi u pumpnom režimu, generator se koristi kao motor koji pokreće pumpu, a pumpa crpe vodu iz vodotoka ili jezera i prebacuje je u akumulacioni bazen. Postoje i konstrukcije kod kojih su pumpa i turbina jedan uređaj koji može da radi i u režimu pumpe i u režimu turbine – takve hidroelektrane se nazivaju *reverzibilne hidroelektrane*.



Slika 3-25 Šema pumpno-akumulacionog postrojenja

1 - pumpa, 2 - spojnica, 3 - generator, 4 - akumulacioni bazen, 5 - turbina

Kada se raspolože dovoljnim količinama vode a opterećenje EES (potrošnja u EES) je nisko, postrojenje radi kao pumpa, pri čemu se električna energija iz EES skladišti kao potencijalna energija vode u akumulacionom bazenu. Kada opterećenje EES poraste, akumulirana voda iz bazena se propušta kroz turbinu, čime se potencijalna energija vode pretvara u električnu energiju. Periodi kada pumpno-akumulaciona hidroelektrana radi u pumpnom i turbinskom radu prikazani su na dnevnom dijagramu opterećenja, Slika 3-26.



Slika 3-26 Prikaz rada pumpno-akumulacionog postrojenja u dnevnom dijagramu opterećenja

S obzirom da razmatrane elektrane proizvode električnu energiju u periodima vršnih opterećenja, njihovo učešće u EES smanjuje potrebu za izgradnjom termoelektrana, što predstavlja osnovnu korist od pumpno-akumulacionih hidroelektrana, imajući u vidu da je električna energija iz hidroelektrana uvek jeftinija od električne energije iz termoelektrana.

Energetski bilans i stepen iskorišćenja

Energetski bilans pumpno-akumulacione hidroelektrane može se posmatrati na hidrauličnoj šemi, Slika 3-27.

Stepen iskorišćenja se može izraziti odnosom energija W_2 i W_1 :

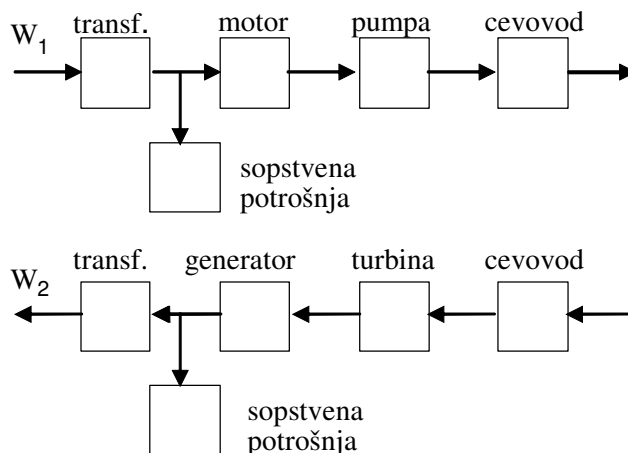
$$\eta_{PAHE} = \eta_{TR} \cdot \eta_M \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \eta_P \cdot \eta_C \cdot \eta_C \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \eta_{TR} \quad (3-1)$$

Ako se uvaži:

$$\begin{aligned} \eta_P &\approx \eta_T \\ \eta_M &\approx \eta_G \end{aligned} \quad (3-2)$$

stepen iskorišćenja pumpno-akumulacione hidroelektrane može se izraziti u obliku:

$$\eta_{PAHE} = [\eta_{TR} \cdot \eta_M \cdot (1 - \varepsilon) \eta_P \cdot \eta_C]^2 \approx 0,65 \div 0,75 \quad (3-3)$$



Slika 3-27 Hidraulična šema pumpno-akumulacione hidroelektrane

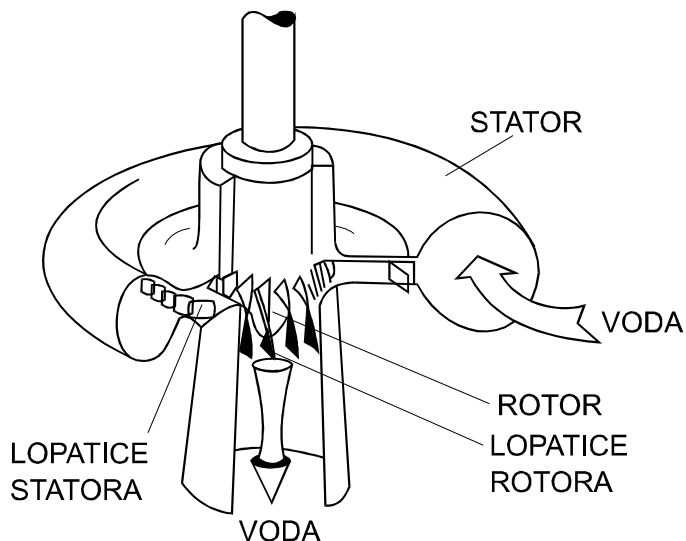
3.5.4 Osnovne osobine i vrste vodnih turbina

Pretvaranje potencijalne i kinetičke energije toka vode u električnu energiju se u hidroelektranama ostvaruje pomoću hidrauličnih turbina i generatora koje zajedno obrazuju hidroagregate.

Hidraulična turbina je mašina koja koristi energiju toka vode za okretanje rotora, odnosno radnog kola.

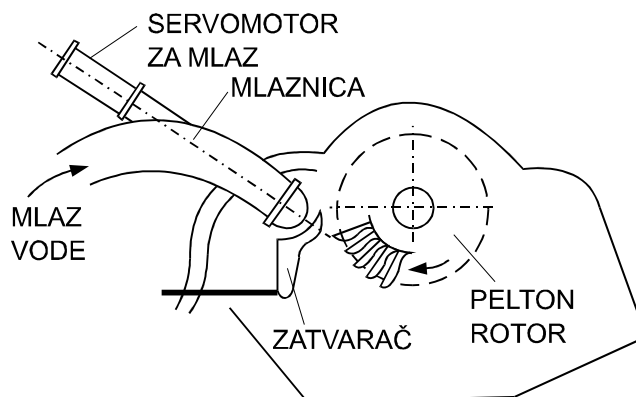
Postoje tri osnovna tipa turbina: Fransisova, Peltonova i Kaplanova turbina.

Fransisova turbina (Slika 3-28) upotrebljava se za padove do 500m i izvodi se sa vertikalnom i horizontalnom osovinom. Peltonova turbina radi na principu slobodnog mlaza (Slika 3-29), izvodi se sa jednom ili više mlaznica i upotrebljava za padove iznad 500m. Kaplanova turbina (Slika 3-30) je namenjena za manje padove i može da bude sa pomičnim (Kaplan) ili sa nepomičnim rotorskim lopaticama (propelerna turbina).

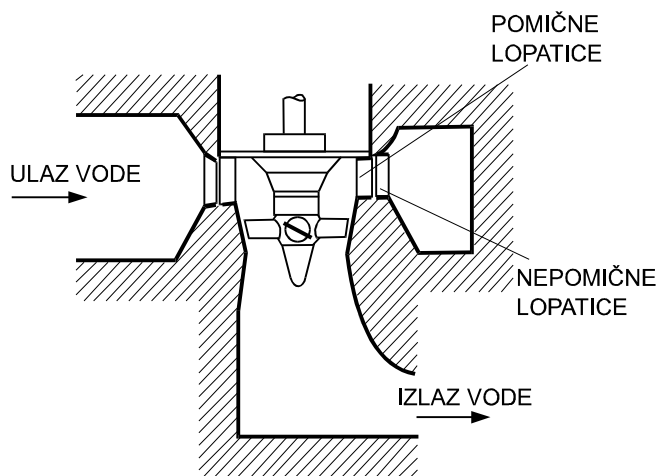


Slika 3-28 Presek i princip rada Fransisove turbine

Kaplanova i Fransisova turbina spadaju u reakcione ili turbine sa predpritiskom. Osnovna osobina reakcionih turbina je da im je pritisak na ulazu u rotor veći od pritiska na izlazu iz rotora. Kod reakcionih, turbina deo energije pritiska pretvara se u kinetičku energiju u statoru, a deo u rotoru. Kod Peltonove turbine – turbine slobodnog mlaza, pritisak na ulazu u rotor jednak je pritisku na izlazu iz rotora, jer se sva energija pritiska pretvara u kinetičku energiju vode u statoru. Peltonova turbina naziva se još i akciona turbina ili turbina jednakog pritiska.



Slika 3-29 Presek i princip rada Peltonove turbine



Slika 3-30 Presek i princip rada Kaplanove turbine

Specifična snaga vodenog toka u nekom preseku može se izraziti u obliku:

$$P_s = \frac{P}{\gamma Q} = \frac{v^2}{2g} + H + \frac{p}{\gamma} \quad (3-4)$$

gde oznake veličina imaju sledeće značenje:

- P - snaga vodenog toka,
- γ - specifična težina vode,
- Q - srednji protok vode
- v - brzina vode,
- g - ubrzanje zemljine teže,
- H - visina vodenog toka u posmatranom poprečnom preseku,
- p - pritisak vode u posmatranom poprečnom preseku.

U (3-4) prvi član potiče od kinetičke energije, drugi od potencijalne, a treći od energije pritiska.

Specifična mehanička snaga turbine P_{MS} jednaka je razlici odgovarajućih snaga na ulazu i na izlazu iz turbine:

$$P_{MS} = P_{S1} - P_{S2} = H_1 - H_2 + \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (3-5)$$

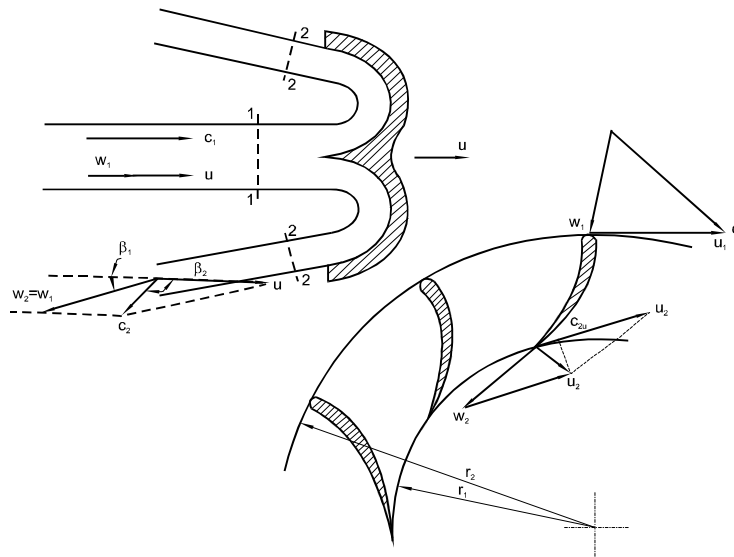
što se može napisati i u obliku:

$$P_{ST} = P_R + P_A$$

$$P_R = H_1 - H_2 + \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \quad (3-6)$$

$$P_A = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}$$

gde je sa P_A označena akciona, a sa P_R reakciona komponenta specifične mehaničke snage (na vratilu) turbine. Kod reakcionih turbina postoji i akciona i reakciona komponenta, a kod akcionih turbina samo akciona komponenta razmatrane snage. Postojanje pomenutih komponenti može se uočiti na prikazu poprečnog preseka lopatica kod akcione i reakcione turbine (Slika 3-31).



Slika 3-31 Poprečni presek lopatice rotora akcionih i reakcionih turbina

Kod reakcionih turbina, prilikom udara vode u lopaticu, lopatica se kreće i pod uticajem neposrednog udara vode (akciono dejstvo) i pod uticajem efekta odbijanja vode od lopatica (reakciono dejstvo). Kod akcionih turbina postoji samo efekat udara (guranja) vode u lopatice.

3.5.5 Izbor broja obrtaja i tipa turbine

Pošto je nemoguć tačan proračun protoka vode i gubitaka koji se pri tome javljaju, najčešće se pribegava konstruisanju modela kako bi se odredile najpovoljnije dimenzije i oblici turbine i pratećih uređaja. Modeli su znatno manjih dimenzija od realnih turbina, pri čemu je osnovni cilj da se u turbini modelu ostvare isti uslovi protoka kao kod realne turbine, tj. da se postigne geometrijska, kinematička i mehanička sličnost i istovetan stepen iskorišćenja.

Za turbine modele definiše se specifični broj obrtaja n_s (koeficijent brzohodnosti) kao broj obrtaja takvog modela koji ima neto pad $H_{NM}=1m$ i protok $Q_M=1m^3/s$. Za svaki tip turbine postoji opseg povoljnih vrednosti specifičnog broja obrtaja turbine sa zadovoljavajućim vrednostima stepena iskorišćenja (Tabela 3-1).

Tabela 3-1 Optimalni specifični broj obrtaja i padovi turbina modela

Tip turbine		n_s (ob/min)	Pad (m)
Peltonova	2 mlaznika	2-25	≥ 400
	4 mlaznika	25-70	
Fransisova	sporohodna	70-125	50-400
	normalna	125-200	
	brzohodna	200-300	
	ekspresna	300-450	
Propelema		300-400	300-1000

Povoljni broj obrtaja turbine sa neto padom H_N i protokom Q može se odrediti korišćenjem relacije:

$$n = n_s \frac{\sqrt[4]{H_N^3}}{\sqrt{Q}} \quad (3-7)$$

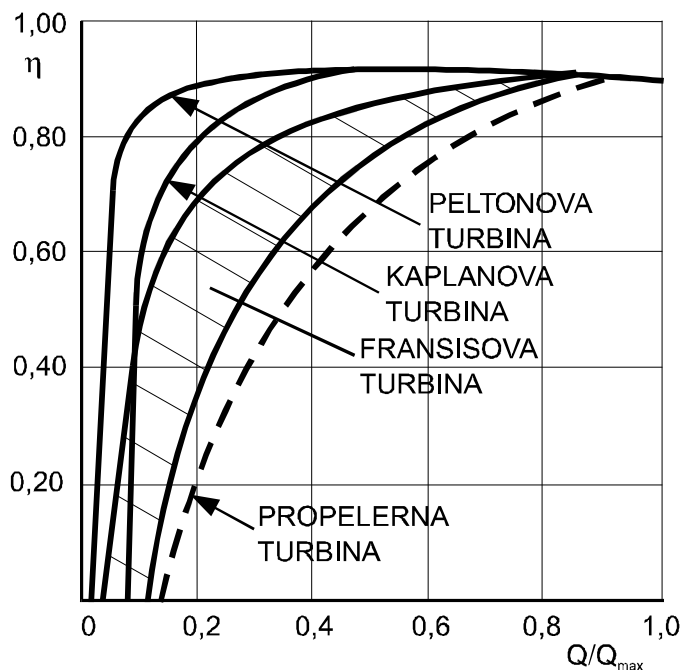
Stepen iskorišćenja pojedinih tipova turbina zavisi i od odnosa protoka i maksimalnog protoka kroz turbinu (Slika 3-32). Maksimalni protok kroz turbinu određuje se kao protok kod konstantnog pada i konstantnog broja obrtaja, pri maksimalnom otvorenom satoru.

Povoljni broj obrtaja generatora. Osovina turbine i osovina generatora obrću se istom brzinom, koja treba da bude povoljna i za turbinu i generator, tj. brzina turbine treba da bude usklađena i sa povoljnom brzinom generatora.

Dimenzije generatora mogu se proceniti na osnovu relacije:

$$D^2 l = \frac{C S_n}{n} \quad (3-8)$$

gde je D označen unutrašnji prečnik statora, l aktivna dužina statora, S_n naznačena snaga, n brzina obrtanja, a C je konstrukciona konstanta koja zavisi od gustine struje i karakteristika magnetnog kola.



Slika 3-32 Zavisnost stepena iskorišćenja turbine od relativnog protoka (Q/Q_{max})

Proizvod D^2l srazmeran je dimenzijama generatora, pa se može zaključiti da su dimenzije generatora manje što je brzina obrtanja veća. S obzirom da dimenzije generatora određuju količinu potrebnog materijala za izradu, a od količine materijala zavisi i cena generatora, može se takođe reći da su brzohodne mašine jeftinije, pa se ne izrađuju generatori sa manjim brojem obrtaja od 50 min^{-1} .

Gornja granica brzine obrtanja generatora određena je mehaničkim naprežanjem namotaja rotora usled centrifugalnih sila i iznosi 750 min^{-1} .

U okvirima navedenih granica brzine generatora mogu da zauzmu vrednosti određene izrazom:

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{p} \quad (3-9)$$

gde je p broj pari polova a $f=50\text{Hz}$ frekvencija.

Karakteristične vrednosti broja pari polova su 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 30, 34, 40, 50 i 60. Neparan broj pari polova se izbegava zbog teškoća koje nastaju sa višim harmonicima i vibracijama.

3.5.6 Kavitacija

Kavitacija je pojava isparavanja vode na pojedinim tačkama protoka kroz turbinu kod velikih brzina obrtanja turbine. Isparavanje nastaje usled pada pritiska i time izazvanog sniženja temperature isparavanja vode, a može da se javi samo kod reakcionih turbina kod kojih postoji razlika ulaznih i izlaznih brzina i pritisaka.

Kada je izlazni pritisak iz turbine manji od pritiska isparavanja, dolazi do isparavanja vode i stvaranja mehurića pare. Stvoreni mehurići prelaze u područje većeg pritiska gde nastaje nagla kondenzacija i para se ponovo pretvara u vodu. Pojava kavitacije smanjuje stepen iskorišćenja turbine i može da izazove oštećenje delova postrojenja.

Pojava kavitacije se sprečava izradom isisne cevi (sifon, difuzor) (pozicija 4, Slika 3-21) na izlazu iz turbine. Uloga isisne cevi je da smanji brzinu vode na izlazu iz turbine i obezbedi da na izlazu iz turbine pritisak uvek bude manji od pritiska isparavanja, što se ostvaruje pogodnim oblikovanjem (proširivanje kraja prema donjoj vodi) i podešavanjem visine isisne cevi.

3.5.7 Uticaj na prirodnu sredinu

Uticaj hidroelektrana na prirodnu sredinu se prvenstveno odnosi na uticaj brana. Uz sve prednosti, brane imaju i neke nedostatke. Naime, brane podižu nivo vode i time, kod izgradnje elektrane, poplavljaaju do određene kote sve objekte: prirodne lepote i turističke vrednosti – kanjone, spomenike kulture, naselja, privredne objekte, plodno zemljište i sl. Brane pregrađuju tok reke i time onemogućavaju nekim ribljim vrstama dolazak na prirodna mrestilišta (npr. losos). Od brane prete i neposredne opasnosti. Nesreće pri pucanju ili popuštanju brana nisu retkost. Više od 100 brana popustilo je u SAD od 1930. do danas.

Izgradnjom velike brane kod Asuana na Nilu spomenici drevne egipatske civilizacije su morali da budu izmešteni na višu kotu, a pojavili su se i uticaji ne samo na mikro, već i makro klimu. Naime, zbog stvorene ogromne akumulacije u suvom, tropskom podneblju, procenjuje se da s površine akumulacije isparava oko 1/4 ukupnog protoka reke Nil. Jedan deo odlazi u podzemlje i utiče na dizanje nivoa podzemnih voda nizvodno od brane. Pretpostavlja se da su i pojave velikih suša (a time i gladi) u Etiopiji povezane sa izgradnjom ove brane.

Izgradnjom brane kod Bajine Bašte na Drini nestalo je atraktivnog spuštanja niz reku splavovima i kajacima. Danas se vode ozbiljne polemike oko moguće izgradnje brane na reci Tari.

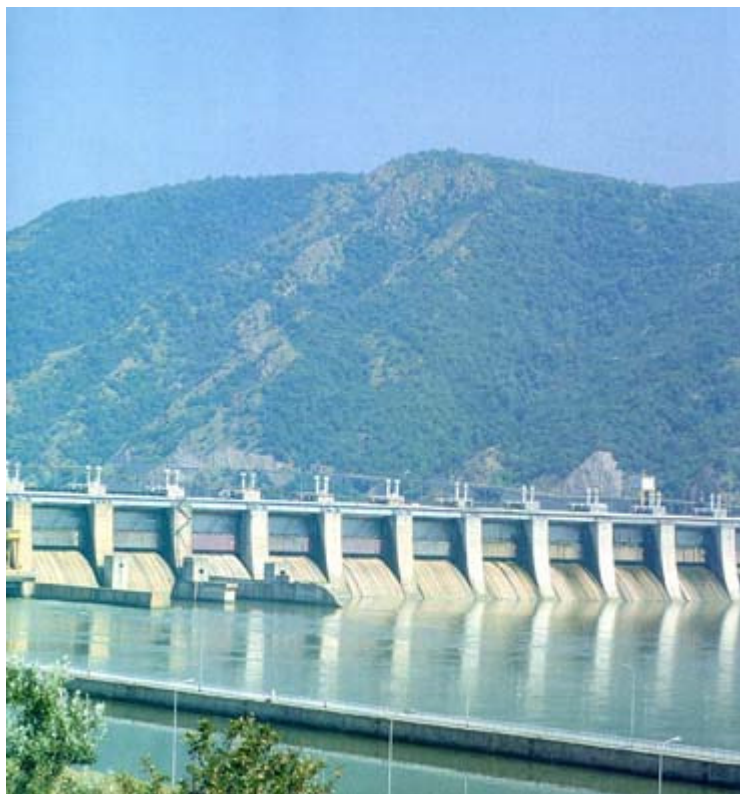
3.5.8 Prikaz hidroelektrana na Dunavu (Đerdap 1, Đerdap 2, Đerdap 3)

Đerdap 1

Sistem "Đerdap 1" (Slika 3-33) čine:

- *Glavni objekat:* 2 elektrane, 2 brodske prevodnice, prelivna i neprelivna brana i drugi objekti neposredno vezani za eksploataciju elektrana i prevodnica. Preko elektrane izgrađen je i put za automobilski saobraćaj;
- *Spoljne komunikacije:* izmeštanje i rekonstrukcija postojećih železničkih pruga, puteva, pristaništa, dalekovoda i telegrafsko-telefonskih linija;

- *Objekti i uređaji za zaštitu priobalnog područja od dejstva uspora: rekonstrukcija postojećih i izgradnja novih zaštitnih nasipa i drenažnih sistema;*
- *Objekti i uređaji za zaštitu akumulacionog bazena od nanosa i pritoka Dunava, u prvom redu iz sliva Velike Morave.*



Slika 3-33 Hidroelektrana "Đerdap 1"

Glavni objekat hidroenergetskog i plovidbenog sistema "Đerdap 1" nalazi se 10 km uzvodno od Kladova. Glavni objekat je simetričan, sa prelivnom branom u sredini korita i po jednom elektranom i prevodnicom sa svake strane. Između prevodnica i obala su neprelivne brane. Ukupna dužina brane je 1278m, od čega prelivni deo brane iznosi 441m.

Prelivna brana obezbeđuje regulisanje nivoa gornje vode, kao i evakuaciju velikih voda i leda. Brana je betonska, gravitaciona i ima 14 prelivnih polja širine 25m. Prelivna polja su opremljena dvodelnim kukastim zatvaračima sa hidrauličnim pogonom. Preko prelivne brane kroz turbine i druge evakuacione organe može se evakuisati protok Dunava od $22500\text{m}^3/\text{s}$, tj. onaj protok koji se po računu verovatnoće pojavljuje jednom u 1000 godina. Prosečni protok Dunava je $5520\text{m}^3/\text{s}$.

Elektrane se sastoje od po 6 hidroagregata, ukupne snage 1140MW. Kako postoje dve elektrane (na srpskoj i rumunskoj strani) ukupna instalisana snaga iznosi

2280MW. Hidroagregati se sastoje od vertikalnih Kaplanovih turbina sa prečnikom radnog kola od 9,5m i vertikalnih hidrogenatora snage 190MVA. Broj obrtaja hidroagregata je 71,50 u minutu.

Pad varira od minimalnih 21,90m do maksimalnih 32,5m, a računski pad iznosi 27,16m. Nivo gornje vode se kreće od 63,0 do 69,5m nadmorske visine. Instalirani protok je $9600\text{m}^3/\text{s}$, a prosečna godišnja proizvodnja oko 11500GWh godišnje.

Brodске преводнице (Slika 3-34) su dvostepene. Korisna dužina komora je 310m, a širina komora 34m. U komoru преводнице mogu istovremeno da stanu 1 brod i 9 šlepera. Prevođenje traje 70-90min.



Slika 3-34 Brodska преводница na Đerdapu 1

Uspor nastao izgradnjom đerdapske brane ima uticaj pri malim protocima na Dunavu do Novog Sada, na Savi do Šapca i na Tisi do Bečeja.

Đerdap 2

Glavni objekat Sistema Đerdap 2 (Slika 3-35) izgrađen je 80km uzvodno od HE. Sastoji se od 2 elektrane, 2 brodske преводнице, 2 prelivne brane, 2 neprelivne brane sa putem preko brane i mogućnošću izgradnje železničke pruge preko brane. Nivo gornje vode varira od 41 do 39,5m nadmorske visine. U obe elektrane ugrađeno je 20 cevnih (kapsulnih) hidroagregata, ukupne instalirane snage 540MW.

Brodске преводнице su jednostepene, a ostale karakteristike su kao na "Đerdapu 1".

Prosečna godišnja proizvodnja pri protočnom radu iznosi oko 2500GWh.

Pumpno-akumulaciona hidroelektrana "Đerdap 3"

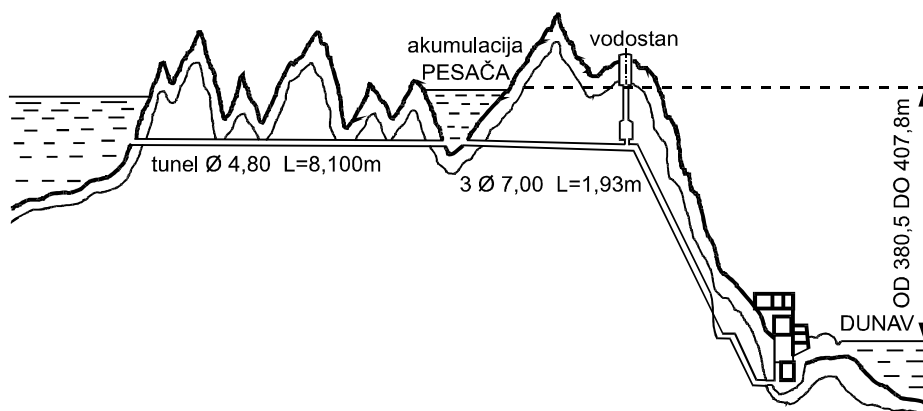
Hidroelektrana "Đerdap 3" biće izgrađena na desnoj obali Dunava, 160km nizvodno od Beograda. Elektrana će raditi noću, i u drugim prilikama kada ima viška električne energije, u pumpnom režimu i pumpati vodu iz Dunava u gornju akumulaciju. Danju, u vreme najvećih opterećenja, elektrana će raditi u

turbinskom režimu i proizvoditi električnu energiju kojom će se pokrivati vrhovi opterećenja.



Slika 3-35 Hidroelektrana "Đerdap 2"

Po konačnom završetku elektrane, očekuje se da će zapremina akumulacija iznositi 577,5 miliona m^3 , a prosečna godišnja proizvodnja biće 5646GWh. Slika 3-36 prikazuje poprečni presek elektrane sa akumulacijama.



Slika 3-36 Pumpno-akumulaciona hidroelektrana "Đerdap 3"

4 PRENOS I DISTRIBUCIJA

Osnovni elementi prenosa i distribucije su vodovi i razvodna postrojenja.

4.1 Vodovi

Električni vodovi služe za sprovođenje električne energije. Električna energija koju sprovodimo vodom može biti različitih vrsta i oblika napona, snage i frekvencije. Za prenos i distribuciju električne energije u svetu se koristi uglavnom trofazni, naizmenični sistem, mada neke zemlje primenjuju i jednosmerni sistem za prenos energije na velike razdaljine.

Električni vodovi sačinjavaju električne mreže, koje, prema ulozi i veličini naznačenog napona, delimo na:

- Prenosne, koje služe za prenošenje energije od elektrana do potrošačkih centara i za međusobno povezivanje pojedinih elektroenergetskih sistema u jedinstveni sistem. Kod nas se koriste prenosne mreže sledećih naznačenih napona: 110kV, 220kV i 380kV;
- Distributivne, koje služe za razvođenje (raspodelu) električne energije do potrošačkih centara i do samih potrošača. Kod nas se koriste distributivne mreže sledećih naznačenih napona: 35kV i 10kV. Ako je to izuzetno ekonomski opravdano koriste se i mreže naznačenih napona 60kV i 20kV. Interne mreže velikih industrijskih postrojenja i rudnika koriste i mreže naznačenih napona 6kV i 3kV.
- Niskonaponske, koje služe za snabdevanje potrošača u naseljenim mestima. Obično su kablovske, naznačenih napona 380/220V.

Pod vodom u širem smislu podrazumevamo, osim samog voda, i sav pribor i uređaje koji služe za njegovo trajno nošenje i polaganje.

Osnovni elementi voda su:

- provodnik,
- izolacija provodnika,
- slojevi za zaštitu provodnika i izolacije provodnika od vlage, mehaničkih uticaja (plašt), toplotnih i hemijskih uticaja (omotač),
- pribor za spajanje, završavanje, nošenje i mehaničku i električnu zaštitu voda.

Vodove najčešće delimo prema načinu izvođenja, i to na električne mreže, vazdušne (nadzemne) vodove i kablovske vodove.

4.1.1 Trofazne električne mreže

Električne mreže u elektroenergetici su dominantno trofazne, naizmenične. U normalnom pogonu, mreža se sastoji od jednakih elemenata u svim fazama, a opterećenja su praktično takođe simetrična. Ovakav sistem je simetričan trofazni sistem. U mrežama se mogu pojaviti i nesimetrične pojave, koje mogu biti izazvane nesimetrijama u elektromotornim silama i/ili impedansama u pojedinim fazama. Ekstremni slučajevi nesimetričnih opterećenja su kratki spojevi i prekid.

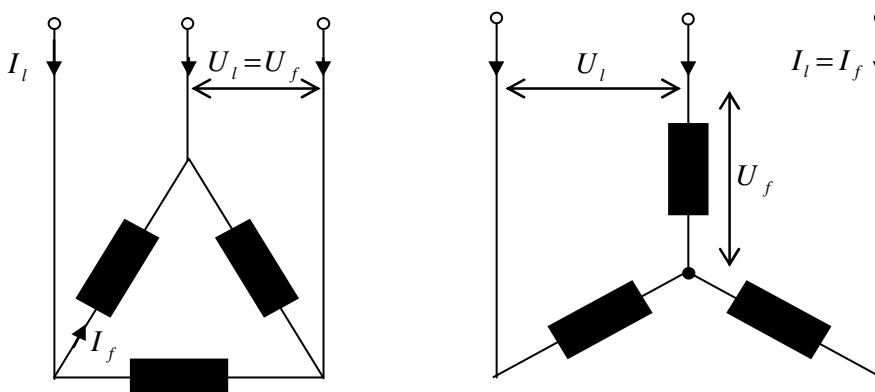
Trofazni izvori, transformatori i prijemnici su obično spregnuti u zvezdu ili trougao (Slika 4-1).

Kod spoja u zvezdu, linijski (međufazni) napon je $\sqrt{3}$ puta veći od faznog napona, a linijske struje su jednake faznim:

$$U_l = \sqrt{3} U_f, I_l = I_f \quad (4-1)$$

Kod spoja u trougao, linijski napon je jednak faznom naponu, a linijske struje su $\sqrt{3}$ puta veće od faznih:

$$U_l = U_f, I_l = \sqrt{3} I_f. \quad (4-2)$$



Slika 4-1 Trofazni sistem spregnut u trougao i zvezdu

Kada govorimo o naznačenim vrednostima napona i struja, mislimo na linijske (međufazne) vrednosti

Provodnici trofaznog sistema su *glavni ili fazni provodnik*, *neutralni provodnik*, *zaštitni provodnik* i *zaštitni neutralni provodnik*.

Glavni (ili fazni) provodnik se priključuje na izvor napajanja i u normalnom pogonu ima napon prema zemlji. Za naizmeničnu trofaznu struju nove oznake su L1, L2, L3, a stare oznake su R, S, T. Boje žila izolovanih vodova i kablova su crna i braon, a ako ne postoji neutralni provodnik može se primeniti i svetloplava.

Neutralni provodnik spojen je u trofaznom sistemu na neutralnu tačku (zvezdište trofaznog sistema). Nova oznaka je N, a stara Mp. Boja žile izolovanih vodova i kablova svetlo plava.

Zaštitni provodnik služi za spajanje provodnih delova uređaja radi zaštite od previsokog napona dodira. Nova oznaka je PE, a stara SL, boja zeleno-žuta

Zaštitni neutralni provodnik (nulprovodnik) je provodnik koji u sebi objedinjuje funkcije neutralnog i zaštitnog provodnika. Nova oznaka je PEN, a stara SL+MP, boja zeleno-žuta.

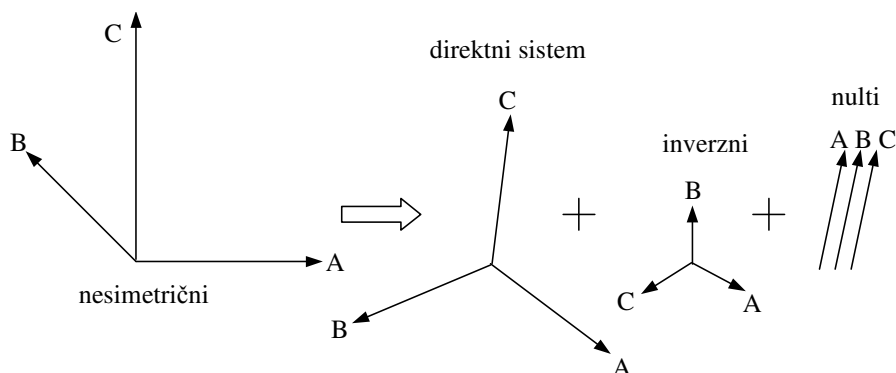
4.1.2 Struje kratkog spoja

Kratkim spojem se naziva spoj među provodnicima između kojih postoji napon i koji su normalno izolovani jedan od drugog. U trofaznim mrežama razlikuju se:

- trolpolni (ili trofazni) kratki spoj, kod koga su u kratkom spoju sve tri faze,
- dvopolni (ili dvofazni) kratki spoj, kod koga su u kratkom spoju samo dve faze,
- jednopolni (ili jednofazni) kratki spoj, kod kojeg je kratko spojen provodnik jedne faze sa nultim provodnikom ili zemljom.

Tropolni kratki spoj predstavlja simetričan kratki spoj, jer su u osnovi električne prilike u sve tri faze jednake, dok dvopolni i jednopolni kratki spoj predstavljaju nesimetrične slučajeve kratkog spoja. U slučaju trofaznog kratkog spoja, zbog prisutne simetrije, proračune i analize potrebno je raditi samo za jednu fazu, dok se za ostale kratke spojeve proračun mora provesti za svaku fazu posebno.

Za analizu nesimetričnih stanja trofaznih sistema, kako pogonskih, tako i kvarova, koristi se *Metoda simetričnih komponenti*. Osnov ove metode predstavlja rastavljanje polaznog nesimetričnog trofaznog sistema na tri simetrična trofazna sistema: direktni, inverzni i nulti (Slika 4-2). Direktni sistem ima isti redosled faza, a inverzni suprotni u odnosu na polazni nesimetrični sistem. Nulti sistem se sastoji od tri, po veličini i faznom stavu, jednaka vektora.

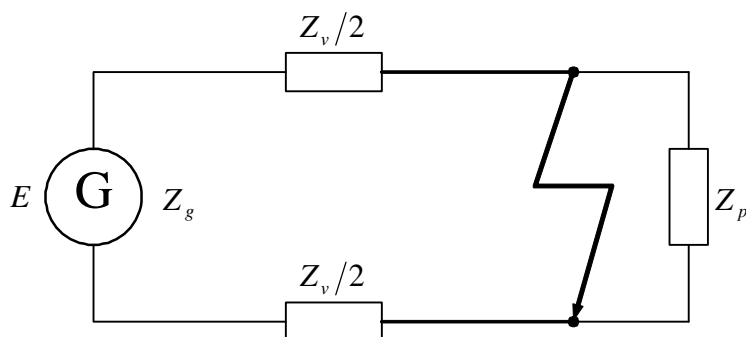


Slika 4-2 Primer direktnog, inverznog i nultog sistema simetričnih komponenti

Oprema u elektroenergetskom sistemu mora biti dimenzionisana tako da izdrži naprezanja koja se javljaju kako u normalnim radnim uslovima, tako i slučajevima mogućih kvarova.

Prilikom projektovanja električnih postrojenja i mreža, potrebno je definisati uticaj struja kratkog spoja radi pravilnog izbora aparata, te električnog, mehaničkog i termičkog dimenzionisanja pojedinih delova postrojenja i zaštite. Posebno je potrebno imati u vidu da mehanička i termička naprezanja rastu srazmerno sa kvadratom struje kratkog spoja.

Radi jednostavnosti, dimenzionisanje opreme na kratke spojeve ilustrovaćemo proračunom struja trolejnog kratkog spoja.



Slika 4-3 Kratak spoj

Slika 4-3 prikazuje generator impedanse Z_g , koji preko impedanse voda Z_v , napaja prijemnik impedanse Z_p .

U normalnom radu, struja u kolu je:

$$I = \frac{E}{Z_g + Z_v + Z_p} \quad (4-3)$$

Ako dođe do kratkog spoja prikazanog slikom, prijemnik je kratko spojen, tako da je struja kratkog spoja:

$$I_k = \frac{E}{Z_g + Z_v} \quad (4-4)$$

Pošto je $Z_p \gg Z_g + Z_v$, impedansa kola se značajno smanjuje, iz čega sledi da je struja kratkog spoja mnogo veća od struje u normalnom režimu rada $I_k \gg I$. Aparati u postrojenjima moraju da budu tako dimenzionisani da izvesno vreme izdrže ovu povećanu struju, dok zaštita ne isključi mesto kvara. Uopšteno, možemo za struju kratkog spoja da pišemo:

$$I_k = \frac{E}{\sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X)^2}}, \quad (4-5)$$

gde su ΣR i ΣX sume aktivnih, odnosno reaktivnih otpora kratkospojene konture (zamke, petlje).

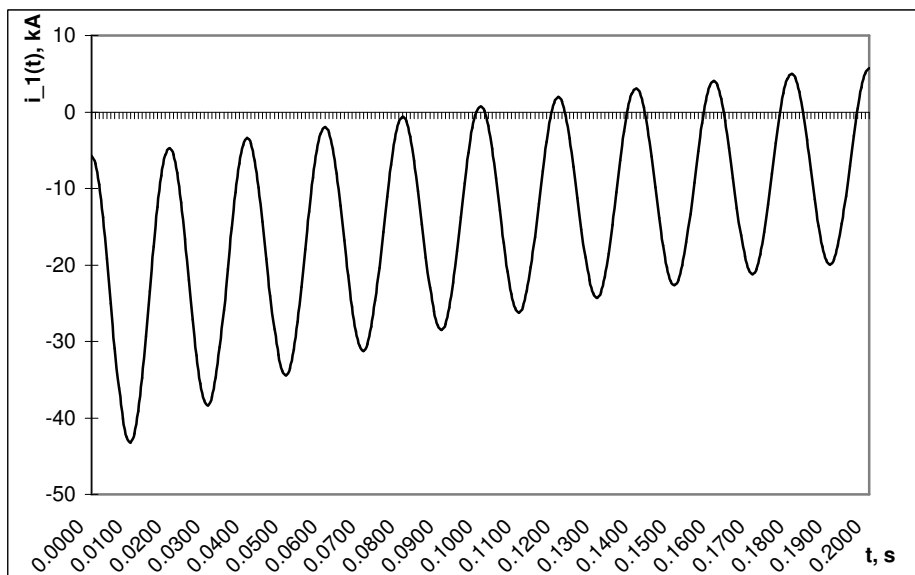
Određivanje struja kratkog spoja u visokonaponskim mrežama možemo provesti sa dovoljnom tačnošću ako umesto sa impedansama računamo sa reaktansama. Time se postupak proračuna znatno pojednostavljuje, jer se umesto kompleksnog računa problem svodi na račun realnim brojevima. Tako određene struje kratkog spoja su nešto veće od stvarnih struja. Smatra se da je potreban uslov za određivanje struja kratkog spoja uz zanemarenje radnog otpora:

$$\arctg \frac{\Sigma X}{\Sigma R} > 60^\circ, \text{ odnosno, } \Sigma X > \sqrt{3} \Sigma R, \quad (4-6)$$

Opšti oblik vremenskog toka struje kratkog spoja prikazuje Slika 4-4. Pored naizmenične komponente, javlja se i jednosmerna komponenta koja brzo padne na nulu. Efektivna vrednost struje kratkog spoja, I_k merodavna je za termička naprezanja. Računa se prema:

$$I_k = \frac{1,1 U_f}{\Sigma Z}, \quad (4-7)$$

gde je U_f fazni pogonski napon, ΣZ ukupna impedansa po fazi petlje kratkog spoja, 1,1 – faktor kojim se uzima u obzir povećanje elektromotorne sile generatora, tj. povećani naznačeni napon generatora.



Slika 4-4 Vremenski tok struje kratkog spoja

Prva amplituda struje kratkog spoja naziva se *udarna struja kratkog spoja*, I_{ud} , i ona je merodavna za mehanička (dinamička) naprezanja. Amplituda udarne struje kratkog spoja zavisi od trenutka nastanka kratkog spoja i odnosa ukupne otpornosti i reaktanse konture kratkog spoja,

$$I_{ud} = \chi \sqrt{2} I_k, \quad \chi = f\left(\frac{\Sigma R}{\Sigma X}\right), \quad (4-8)$$

Parametar χ se očitava iz odgovarajućih dijagrama – manji je od 2, a tipična vrednost mu je 1,8.

Struja isključenja ili *isklopna struja* je manja od početne vrednosti struje kratkog spoja, jer zaštitni uređaji nisu u stanju da kratki spoj isključe momentano. Računa se prema jednačini:

$$I_{is} = \mu I_k, \quad \mu = f\left(\frac{I_k}{I_n}\right), \quad (4-9)$$

Parametar μ se očitava iz odgovarajućih dijagrama – manji je od 1, a u najvećem broju slučajeva se može usvojiti da je jednak 1.

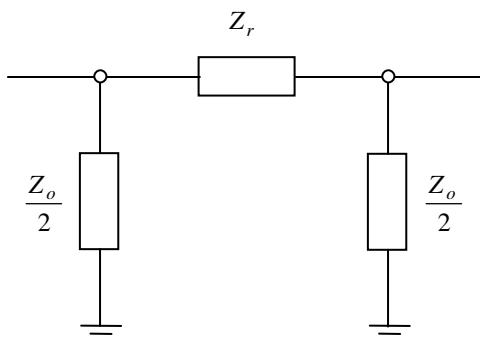
Isklopna snaga se računa prema:

$$P_{is} = \sqrt{3} U_n I_{is}, \quad (4-10)$$

4.1.3 Tokovi snaga i naponi u prenosnoj mreži

Proračun tokova snaga i napona u prenosnoj mreži potreban je radi analize pogona i planiranja mreže.

Vodovi i transformatori u ovim proračunima modeluju se π šemama (Slika 4-5) gde je Z_r redna impedansa elementa, koja se koristi i kod proračuna struja kratkog spoja, a Z_o otočna impedansa, kojom se obuhvata kapacitivnost i odvodnost elementa prema zemlji.



Slika 4-5 Ekvivalentna π šema

Izvori električne energije i potrošači modeluju se snagom $P+jQ$, injektiranom na mestima spojeva vodova (čvorovi), koja može biti pozitivna i negativna.

Pošto prenosna mreža obuhvata područje čitave države, postoje veliki broj čvorova mreže. Sa druge strane obično se traži brzo izračunavanje, tako da su proračuni veoma složeni. Razvijene su brojne numeričke metode koje između ostalog koriste i činjenicu da veliki broj čvorova u mreži nema vodove (grane) koje ih direktno povezuju, pa se u matricima koje opisuju veze u prenosnoj mreži pojavljuje veliki broj nula (retke matrice).

Za proračun tokova aktivnih snaga po granama mreže koristi se *linearni ili DC model tokova aktivnih snaga*. Za izračunavanje tokova reaktivnih snaga i napona u čvorovima koristi se *potpuni ili AC model tokova snaga*.

4.1.4 Vazdušni vodovi

Vazdušni vod je skup svih elemenata koji služe za vazdušno vođenje električne energije. Ovde ubrajamo vazdušne niskonaponske i visokonaponske mreže i dalekovode svih napona.

Dalekovodi (Slika 4-6) se koriste za prenos većih količina električne energije na velike razdaljine. Koriste se van naseljenih mesta, osim u Japanu, gde se zbog velike gustine naseljenosti dalekovodi velikih visina stubova sreću i u naseljima.



Slika 4-6 Dalekovodi u prenosnoj mreži

Osnovni elementi dalekovoda su:

- provodnik;
- izolatori;
- stub;
- zaštitno uže;
- sigurnosno uže.

Provodnik se obično izrađuje od bakra, aluminijuma ili legura na bazi bakra i aluminijuma. Visokonaponski vodovi se obično izrađuju od tzv. alučel provodnika, tj. od snopa provodnika u kojem oplatu (plašt), koja služi za vođenje energije, sačinjavaju provodnici od aluminijuma, a jezgro, koje daje mehaničku čvrstoću, provodnici od čelika. Alučel provodnici se označavaju na sledeći način: presek provodnika od aluminijuma/presek provodnika od čelika mm², na primer 185/32 mm².

Izolatori služe za odvajanje delova pod naponom od uzemljenih delova, kao i za nošenje i pričvršćivanje golih provodnika. Prave se od porcelana, stakla i veštačkih masa. Izolatore prema obliku i mestu primene delimo na potporne, lančaste i viseće.

Potporni izolatori služe za izolaciju od podnožja i kao potpora koja nosi goli provodnik. Podnožje je izvedeno od metala, telo od porcelana, a kapa i držač sabrinica takođe od metala. Osim električnih naprezanja usled napona koji se javljaju u pogonu, ovi izolatori moraju da izdrže i mehanička naprezanja usled tereta provodnika.

Lančasti izolatori se određuju prema naznačenom naponu mreže i prema mehaničkom opterećenju izolatorskog lanca. Broj članaka u lancu određuje napon mreže i način uzemljenja nulte tačke sistema. Pošto su izolatori izloženi delovanju pogonskog napona pod nepovoljnim uslovima (kiša, prašina) i udarnim atmosferskim naponima, propisima je određena visina napona, učestanosti 50 Hz u trajanju od 1 minuta, kao i udarni napon oblika 1,2/50 μs koju izolator treba da izdrži bez proboja.

Umesto izolatorskih lanaca sastavljenih od članaka, upotrebljavaju se i *viseći izolatori* sa masivnim porcelanskim jezgrom i određenim brojem rebara, tzv. štapni izolatori.

Stubovi su bilo koja konstrukcija koja služi za nošenje izolatora, provodnika i zaštitnih užeta. Sastoje se od temeljnog dela, ukopanog u zemlju, od trupa i glave stuba koja ima konzolu za vešanje izolatora, kao i vrha za postavljanje zaštitnog užeta.

Raspon stubova je horizontalni razmak između dva susedna stuba. Ugib je vertikalni razmak u rasponu voda od linije provodnika do prave koja spaja njegove tačke prihvatanja (tačke vešanja provodnika).

Tabela 4-1 daje osnovne karakteristike stubova, prema materijalu od kojih su izrađeni:

Tabela 4-1 Osnovne karakteristike stubova

Stub	Naznačeni napon U_n [kV]	Raspon [m]	Nedostaci
drveni	manji od 35	150	truli, pogotovo uz temelj i na vrhu
betonski	manji od 35	150	kruni se, težak
čelično-rešetkasti	35-380	200-360	koroziija

Prema nameni, stubove delimo na:

- *noseće* – koji služe za noseće prihvatanje provodnika, kod kojih su sile zatezanja u oba raspona jednake,
- *zatezne* – koji služe za zatezno prihvatanje provodnika, kod kojih se sile zatezanja direktno prenose na stub.

Stubovi mogu da se nalaze u pravolinijskoj trasi (*linijski* stubovi) ili na uglu trase (*ugaoni* stubovi). Noseći i zatezni stubovi mogu biti linijski ili ugaoni.

Zaštitno uže je uzemljeno uže koja spaja vrhove stubova i služi za zaštitu od atmosferskih prenapona. Zaštićena zona se nalazi u području od 30 stepeni levo i desno od stuba, mereno od vrha stuba. Svi provodnici treba da se nalaze u zaštićenoj zoni. Zaštitno uže je efikasno samo ako je dobro uzemljeno na svakom stubu.

Sigurnosno uže je uzemljeno uže koje služi za zaštitu od dodira sa drugim vodom.

Dimenzionisanje vazdušnih vodova

Radi pravilnog dimenzionisanja vazdušnih vodova, sprovode se odgovarajući električni i mehanički proračuni i provere. Cilj ovih proračuna je određivanje potrebnog preseka provodnika, odabiranje dovoljne izolacije i dimenzionisanje stubova da izdrže moguća mehanička naprezanja.

Električni proračun se sastoji od:

- određivanja preseka provodnika na osnovu dozvoljenog zagrevanja, dozvoljenog pada napona i gubitka snage i mehaničkog naprezanja provodnika;
- izračunavanja struje zemljospoja.

Mehanički proračun se sastoji od:

- kontrole naprezanja provodnika, usled sopstene težine i dodatnog tereta – snega, leda i inja, kao i sila zatezanja, vetra i slično;
- provere sigurnosne visine, tj. naznačenog dozvoljenog razmaka od provodnika do zemlje ili objekta na zemlji;
- provere dužine provodnika u rasponu (kritičan raspon i kritična temperatura);

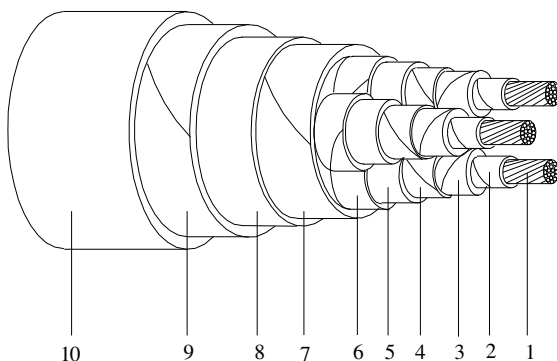
- provjere potrebnog rastojanja provodnika na stubu, međusobno i prema zaštitnom užetu;
- provjera stuba s obzirom na sile tereta (provodnik, dodatni teret), naprezanja na savijanje i izvijanje, te provjera stabilnosti stuba i provjera nosivosti tla;
- provjere izolatora.

4.1.5 Kablovski vodovi

Kabl je vrsta voda sa više međusobno izolovanih provodnika sa zaštitom od pogoršanja električne funkcije pri radu, kao i pri polaganju u kablovske vodove, kablovske kanale ili vodu. Energetske kablovske vodove razlikujemo prema naponu i snazi koju provode. Danas se u svetu kablovi izrađuju za naznačene napone i preko 500 kV.

Kablovski vodovi i mreže se upotrebljavaju na mestima gde je nemoguća ili nepodesna izvedba vazdušnih vodova. To su prvenstveno gradske mreže i industrijske mreže i instalacije. Napajanje ostrva električnom energijom može se izvesti samo pomoću podmorskog kabla. Prednost kablovskih vodova je u tome što su pogonski sigurniji i malo su izloženi kvarovima jer su ukopani u zemlju, tako da na njih ne utiču oluje, gromovi, led i dr. Nedostatak im je visoka cena, kao i teško pronalaženje i otklanjanje kvara.

Kao izolacija provodnika (na primer, Slika 4-7) najčešće se koristi papir, tekstili (pamuk, svila, platno juta), lakovi (silikonski), elastomeri ili gume (na bazi prirodnog ili veštačkog kaučuka), termoplastika (PVC, polietilen, najlon, teflon itd.



Slika 4-7 Ekranizovani kabl NPZO 13-A, 20/35 kV

- 1) Al-provodnik; 2) ekran žile; 3) izolacija žile; 4) ekran izolacije; 5) osnovni omotač; 6) impregnirani papir ili PVC-trake; 7) impregniran papir; 8) impregnirana juta; 9) čelične trake; 10) impregnirana juta**

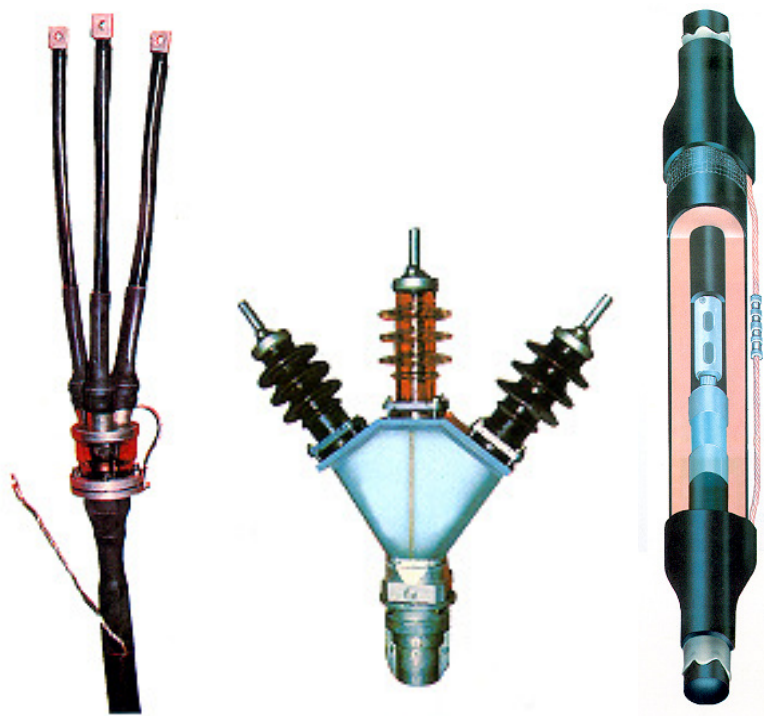
Slojevi za zaštitu provodnika i izolacije od vlage, mehaničkih, toplotnih i hemijskih uticaja, izrađuju se od metala, guma, termoplastika, impregniranih tekstila itd.

Da bi se sprečilo prodiranje vlage u kabl i curenje kablovske mase, krajevi kabla imaju specijalne završetke, tzv. kablovske glave (Slika 4-8). Montaža kablovskih glava je delikatan posao koji treba da obavlja stručno i izvežbano osoblje. Za spajanje kabla koriste se spojnice (Slika 4-8), koje su prave od olova ili livenog gvožđa. Kablovske spojnice su slaba mesta na kابلu, ako nisu izvedene kvalitetno, zbog čega ih treba izbegavati gde god je to moguće.

Izbor kabla se vrši na osnovu:

- naznačenog napona U_n ;
- zagrevanja usled trajnog delovanja naznačene struje I_n i kratkotrajnog delovanja struje kratkog spoja I_k .

Na zagrevanje, tj. na izbor preseka provodnika utiče broj žila, temperatura okoline, način polaganja (i pokrivanja) kabla u zemlju, ukrštanje sa drugim kablovima i podzemnim instalacijama, posebno toplovodima i slično.



Slika 4-8 Kablovske glave i spojnice

4.2 Razvodna postojenja

Razvodna postrojenja služe za razvođenje električne energije. Razvodna postrojenja u elektroenergetskom sistemu nalaze se na mestima spajanja vodova u prenosnoj i u distributivnoj mreži i u okviru elektrana. Ako razvodno postrojenje sadrži transformatore naziva se transformatorska stanica (TS – Slika 4-9).



Slika 4-9 Transformatorska stanica na otvorenom prostoru

Razvodna postrojenja se sastoje od provodnika električne struje, izolatora, uređaja za prekidanje i uspostavljanje strujnog kola, mernih, zaštitnih, upravljačkih, signalnih i drugih pomoćnih uređaja.

Provodnici služe za vođenje električne struje između ostalih elemenata postrojenja. Razlikuju se goli provodnici, u obliku golih metalnih užadi, pljosnatih ili okruglih profila, izolovani provodnici i kablovi. Posebna vrsta provodnika u razvodnim postrojenjima su *sabirnice*.

Izolatori služe za odvajanje delova pod naponom od uzemljenih delova postrojenja. Istovremeno služe i kao nosači golih provodnika. Prave se od porcelana, stakla i veštačkih masa.

Rasklopni aparati se upotrebljavaju za uključivanje i isključivanje generatora, transformatora i dalekovoda u normalnim prilikama i prilikom kvarova (prekidači), kao i za sigurno odvajanje delova pod naponom od ostalih delova postrojenja (rastavljači).

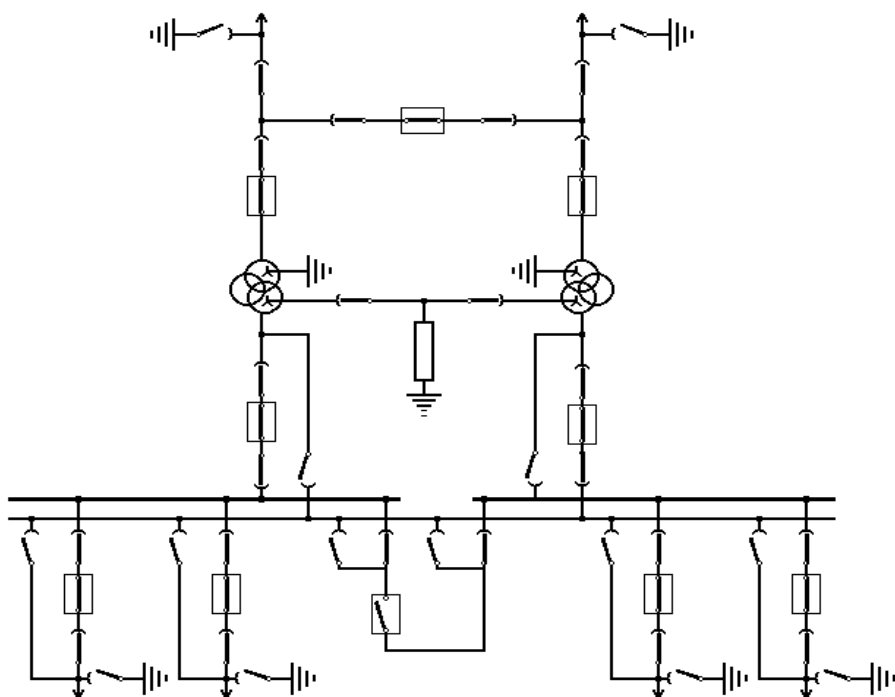
Osigurači se koriste za prekidanje struja kratkog spoja.

Merni transformatori služe za svođenje velikih struja i napona na manje, bezopasne iznose, u cilju omogućavanja merenja struje, napona, snage i energije, kao i priključka zaštitnih uređaja.

Odvodnici prenapona upotrebljavaju se za zaštitu postrojenja od opasnih atmosferskih prenapona do kojih dolazi usled udara groma u dalekovode ili u postrojenje.

Za *automatizaciju upravljanja* razvodnim postrojenjem u modernim uslovima se koriste odgovarajući SCADA sistemi, sa daljinskim upravljanjem preko RTU jedinica (remote terminal unit).

Na primeru uprošćene šeme razvodnog postrojenja – jedne TS sa dva transformatora (Slika 4-10), prikazani su samo energetske transformatori i rasklopna oprema).



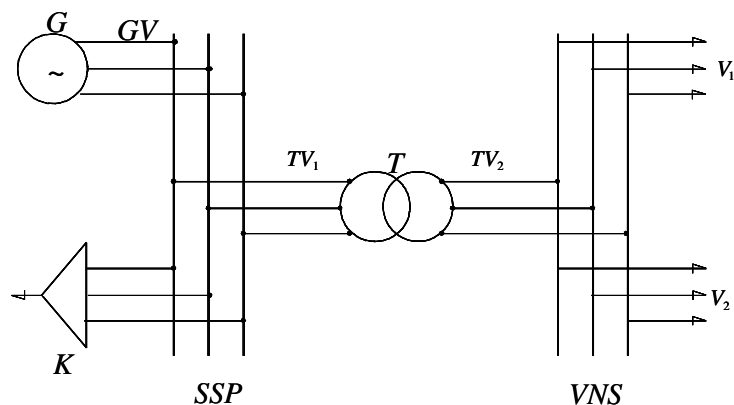
Slika 4-10 Primer uprošćene šeme razvodnog postrojenja
(TS sa dva transformatora)

4.2.1 Sabirnice

Sabirnice (Slika 4-11) povezuju vodove kojima se dovodi električna energija sa vodovima kojima se dalje odvodi, pa su, prema tome, od najveće važnosti za normalan pogon razvodnog postrojenja. Mogu biti napravljene od golog (neizolovanog) provodnika obliku užeta, pljosnate šine, ili okruglog oblika, a mogu biti i izolovane. Materijal provodnika je bakar ili aluminijum.

Kriterijumi za izbor poprečnog preseka sabirnice su:

- termička naprezanja s obzirom na maksimalnu struju u normalnom pogonu, kao i s obzirom na velike struje za vreme trajanja kratkog spoja;
- mehanička naprezanja zbog elektrodinamičkih sila. Naprezanje na savijanje mora biti manje od dozvoljenog.



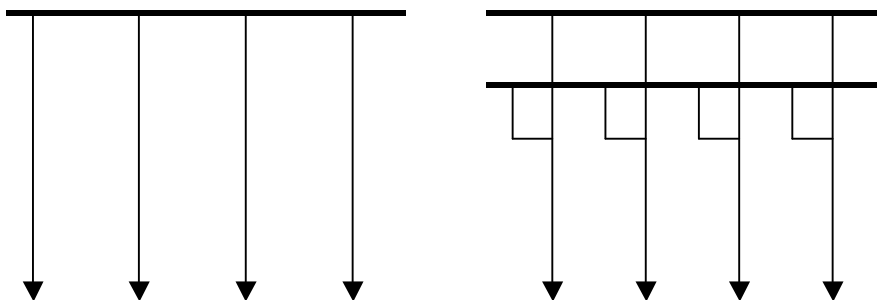
Slika 4-11 Šema veza u postrojenju elektrane

G - generator; T - transformator; K - kabl za napajanje sopstvene potrošnje; V₁, V₂ – nadzemni vodovi elektroenergetske mreže; SSP - sabirnice sopstvene potrošnje; VNS – višenaponske sabirnice; GV - generatorska veza ; TV₁, TV₂ - transformatorske veze.

Dodatna kontrola se vrši s obzirom na rezonansu sabirnica. Naime, potrebno je proveriti sopstveno vreme titranja ukleštenog provodnika, kako ne bi nastupila rezonansa sa poremećajnim elektromagnetskim silama, čija je učestanost 100 Hz.

U postrojenjima u kojima postoji potreba za sabirnicama, primenjuju se razni sistemi sabirnica, čiji izbor zavisi od broja odvoda i stepena elastičnosti i sigurnosti napajanja potrošača. Postoje odvodi prema potošačima i mernim poljima. Kod manipulacija u razvodnim postrojenjima, veoma je važno obratiti pažnju na redosled uključivanja rastavljača i prekidača u odvodu. Naime, kod uključivanja se prvo uključe rastavljači, dok se kod isključivanja prvo isključe prekidači.

Jednostruke sabirnice (Slika 4-12) se koriste u postrojenjima sa malo odvoda. U ovom slučaju, svaki rad (čišćenje, izmena sumljivih izolatora, pregled spojeva i sl.) i svaki kvar na sabirnicama zahteva obustavu rada celog razvodnog postrojenja, pa svi odvodi ostaju bez napona, a potrošači priključeni na razvodno postrojenje bez energije. Ni radovi (godišnja revizija traje nekoliko sati), a ni kvarovi na sabirnicama nisu tako česti da bi isključivali upotrebu jednostrukih sabirnica. To pogotovo вреди ako na sabirnice nisu priključeni vrlo osetljivi potrošači, kojima bi prekid isporuke električne energije značio veliku štetu ili bi to moglo izazvati nesreću.



Slika 4-12 Uprošćen prikaz priključenja vodova na jednostruke i dvostruke sabirnice

Kod sistema jednostrukih sabirnica vrijedi:

$$p=1 \text{ i } r=2, \quad (4-11)$$

gde je p broj prekidača po odvodu, a r broj rastavljača po odvodu.

Veća elastičnost u pogonu postiže se ugradnjom uzdužnih rastavljača, uzdužnih prekidača i slično.

Dvostruke sabirnice povećavaju elastičnost i sigurnost u pogonu i omogućuju čišćenje i popravku jednih sabirnica, a da potrošači ne ostanu bez energije. Svaki odvod se može priključiti bilo na jedne, bilo na druge sabirnice, pa su zato potrebna dva rastavljača. Mogu se primeniti i po dve sklopke po odvodu (američki sistem), što predstavlja skuplje ali sigurnije rešenje.

Kod sistema dvostrukih sabirnica važi:

$$p = \frac{n+1}{n} \text{ i } r = \frac{2n+2}{n}, \quad (4-12)$$

gde je n broj odvoda.

Izgradnjom *pomoćnih sabirnica* (Slika 4-10) u postrojenju s jednostrukim sabirnicama omogućeno je uključivanje rezervnog prekidača u bilo koji odvod jednostavnim uključivanjem odgovarajućeg rastavljača. U odnosu na jednostruke i dvostruke sabirnice, ovo je srednje rešenje po tehničkim i ekonomskim kriterijima.

4.2.2 Izolatori

Izolatore prema obliku i mestu primene delimo na potporne, provodne, lančaste i viseće.

O potpornim, lančastim i visećim izolatorima je već bilo reči.

Provodni izolatori služe za nošenje i izolaciju golih provodnika kod prolaza iz spoljašnjeg prostora u postrojenje, ili kod prolaza iz jedne prostorije u drugu. Na oba kraja ima stezaljke za priključak provodnika. Oko bakarnog provodnika koji spaja ove stezaljke nalazi se telo od porcelana. Na sredini izolatora nalazi se metalna prirubnica pomoću koje se izolator učvršćuje na pregradu. Osnovne karakteristike su im naznačeni napon, prelomna sila i naznačena struja.

4.2.3 Rasklopni aparati

U strujnim kolima razvodnog postrojenja, osim normalne struje (trajne struje opterećenja), može doći i do pojave prekomerenih struja: struje preopterećenja, struje uključjenja, ili struje kvara. U zavisnosti od prekidne moći, sklopne aparate delimo na:

- *Rastavljače* koji služe za vidljivo odvajanje pojedinih aparata ili delova postrojenja od delova pod naponom. Ovo je potrebno da bi se moglo vršiti čišćenje, ispitivanje ili popravka delova postrojenja bez opasnosti da ti delovi dođu pod napon. Rastavljači nisu u stanju da prekidaju strujno kolo pod opterećenjem. Za napone do 35kV, rastavljači se pokreću ručno preko izolovane poluge ili preko sistema poluga, dok se preko navedenog napona pokreću komprimovanim vazduhom ili elektromotorom. Osnovne karakteristike za izbor su im naznačeni napon i naznačena struja.
- *Prekidače* koji služe za uključivanje i isključivanje generatora, transformatora i vodova pod opterećenjem, kao i za prekidanje strujnog kola u slučaju pojave kratkog spoja. Zbog pojave luka kod prekidanja električne struje, kontakti prekidača su pri tome izloženi vrlo jakom termičkom naprezanju. Za istu vrednost struje, lakše je prekidati naizmeničnu struju, jer se, usled prolaska struje kroz nulu, luk u jednom momentu gasi. Sprečavanje ponovnog paljenja luka i na taj način brzo prekidanje struja kratkog spoja postiže se:
 1. povećanjem dužine puta električnog luka istovremenim prekidanjem na više mesta;
 2. intenzivnim veštačkim hlađenjem;
 3. oduvavanjem polarizovanih čestica između elektroda i dovođenjem svežeg medija;
 4. vrlo brzim razmicanjem kontakata.

Prema mediju u kojem se vrši gašanje luka, razlikuju se uljni, SF₆ i vakumski prekidači (Slika 4-13). Zavisno od veličine napona, uključjenje i isključenje se vrši ručno, motornim pogonom i komprimovanim vazduhom. Glavne karakteristike prekidača su: naznačeni napon, naznačena struja i naznačena rasklopna snaga, P_{ras} . Rasklopna snaga prekidača mora biti veća od iskladne snage kratkog spoja:

$$P_{ras} > P_{is} = \sqrt{3} U_n I_{is} \quad (4-13)$$



Slika 4-13 Vakuumski prekidač

- *Rastavne sklopke* predstavljaju prelazno rešenje između rastavljača i prekidača. Upotrebljavaju se na mestima gde je potrebno uključivati i isključivati naznačenu struju opterećenja, ili čak struje kvara, ako je snaga kratkog spoja na mestu ugradnje dovoljno mala. Obični rastavljači to nisu u stanju da urade, a ugradnja, normalno skupog prekidača, nije ekonomski opravdana.

4.2.4 Osigurači

Osigurači služe za prekidanje strujnog kola kod pojave velikih struja kratkog spoja u cilju zaštite vodova i aparata. Jeftini su i efikasniji su od prekidača. Slično instalacionom osiguraču sa topljivim uloškom, visokonaponski osigurač je izrađen u obliku porcelanske cevi u kojoj se nalazi topljiva žica pričvršćena za metalne kape. Žica je izvedena u obliku spirale kako bi se povećao put električnom luku. Unutrašnjost cevi je ispunjena kvarcnim peskom. Proizvode se za napone do 35 kV, jer tehnološki nije rešeno gašenje luka u pesku za veće napone. Prednost osigurača je u njihovom brzom delovanju – prekidaju struju kratkog spoja pri samoj njenoj pojavi tako da se ona ne može razviti do punog iznosa. Prema brzini delovanja, razlikuju se brzi i tromi osigurači. Kod velikih struja kratkog spoja tromi osigurač pregoreva znatno sporije. Ovakva karakteristika je potrebna kod zaštite potrošača kod kojih se kratkotrajno pojavljuju veće struje od naznačenih (npr. kod uključanja asinhronih motora), pri čemu je nepoželjno pregorevanje osigurača. Nedostatak osigurača je u tome što je nepraktičan jer se posle upotrebe mora zameniti.

5 ELEKTRIČNE INSTALACIJE

Električna instalacija je skup elemenata koji služi za povezivanje (priključivanje) električnih prijemnika na električnu mrežu. Električna instalacija mora biti projektovana i izvedena u skladu sa postojećim standardima i normama (pravilnicima, uputstvima i slično).

Osnovna pravila koja treba poštovati prilikom izbora i izvođenja električne instalacije:

- instalacija se mora izvesti tako da ne bude opasna za korisnike objekta;
- instalacija mora trajno da odoleva mehaničkim opterećenjima i oštećenjima, uticajima vlage, prašine, hemikalija itd;
- svim priključenim prijemnicima treba osigurati napajanje električnom energijom propisanog napona i frekvencije;
- izgradnja instalacije ne sme da ugrozi stabilnost građevine niti se smeju oštetiti druge instalacije u objektu;
- odabrana instalacija treba za određeni slučaj da bude najjeftinije rešenje, a da ujedno u budućnosti bez velikih troškova, a prvenstveno bez intervencija na građevinskom objektu, omogući povećanje broja priključenih prijemnika i povećanje priključne snage postojećih.

Prema jačini struje instalacije delimo na:

- *instalacije jake struje* – kod kojih se upotrebljavaju ili mogu nastati struje koje su pod izvesnim uslovima opasne za život ili imovinu. U ovu grupu spadaju i *instalacije niskog napona* do 1000V.
- *instalacije slabe struje* – kod kojih se upotrebljavaju struje koje nisu opasne po život ili imovinu. U ovu grupu spadaju sve instalacije čiji radni napon između bilo kojih provodnika ne prelazi 50V (*mali napon*) (telefonske i signalizacione instalacije u zgradama itd.).

Prema nameni, razlikujemo instalacije za:

- osvetljenje,
- elektromotorni pogon,
- termičke svrhe,
- mešovito opterećenje.

Prema vrsti objekta, razlikujemo instalacije za:

- stambene objekte,
- industrijske objekte,
- poslovne prostorije,
- poljoprivredne objekte (smatraju se vlažnim i ugroženim od požara),
- električne pogonske prostorije.

Prema uslovima okoline, razlikujemo instalacije za:

- suve prostorije,
- specifične uslove (vlažne, mokre i natopljene, vruće prostorije, prostorije u kojima postoji opasnost od požara, prostorije ugrožene eksplozivnim smešama),
- u prostorijama sa specifičnim uređajima.

Prema načinu izvođenja, imamo instalacije sa:

- vidno položenim golim provodnicima,
- vidno položenim izolovanim provodnicima (na odstojnicima, na nosećoj konstrukciji ..),
- vidno položenim cevima,
- cevima položenim u zidu (oklopljene instalacije),
- izolovanim provodnicima u zidanim kanalima ili betonskim blokovima, instalacije ispod poda, na plafonu...

Projektovanje električnih instalacija se u osnovi svodi na izbor odgovarajuće opreme, uređaja i tehničkih rešenja prema datoj nameni i uslovima instalacije uz sprovođenje odgovarajućih proračuna, određivanje smeštaja i rasporeda opreme i uređaja u datom prostoru i definisanje radnji i aktivnosti vezanih za postupak izvođenja instalacija, a vodeći računa o zadovoljenju tehničkih i ekonomskih uslova.

Osnovni elementi *Projekta električne instalacije* su:

- *Projektni zadatak* – opis zahtevanih karakteristika električne instalacije od strane naručioca ili odgovarajuće institucije;
- *Građevinsko – arhitektonska osnova objekta* – crtež dobijen od naručioca;
- *Izbor i raspoređivanje svetiljki i proračun osvetljenja* – na temelju Građevinsko-arhitektonske osnove i kataloških podataka proizvođača svetiljki projektant vrši izbor svetiljki dok ne dođe do rešenja koje zadovoljava tehničke uslove vezane za svetlosne veličine;
- *Izbor i raspoređivanje električnih uređaja i vodova i proračun električnih instalacija* – početno rešenje se koriguje dok se ne zadovolje tehnički uslovi vezani za električne instalacije (pad napona, strujna opterećenja itd.);
- *Izbor i raspoređivanje elemenata gromobranske instalacije i proračun gromobranske instalacije*;
- *Specifikacija materijala*;
- *Predmer i predračun radova* – početno rešenje se koriguje dok se ne zadovolje ekonomski uslovi;
- *Izrada dokumentacije* – kada se postigne tehnički i ekonomski zadovoljavajuće rešenje, pristupa se kompletiranju dokumentacije.

Dokumentaciju sačinjavaju tekstualni (tehnički opis, tehnički uslovi) i grafički dokumenti (jednopolne šeme itd.)

Danas se nastoji da se što veći deo projektovanja električnih instalacija automatizuje primenom računara i odgovarajućih programa opšte ili specijalizovane namene [16].

Električna instalacija stana sastoji se od sledećih elemenata:

- elektroenergetske instalacije (napajanje osvetljenja, stalnih prijemnika, pokretnih prijemnika (priključnice), instalacija voda za daljinsko upravljanje),
- instalacije slabe struje (priključak telefona, kućne signalizacije (interfon, ...), antene).

S obzirom na uslove okoline u pojedinim prostorijama instalacije u stanu delimo na:

- instalacije u suvim prostorijama,
- u kuhinjama,
- u kupatilima i toaletima.

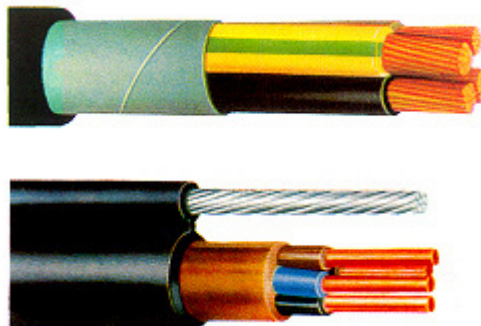
5.1 Osnovni elementi instalacija

Osnovni elementi električnih instalacija su:

- vodovi,
- elementi za priključak na gradsku mrežu,
- elementi gromobranske instalacije,
- razvodna tabla,
- električna brojila,
- osigurači,
- sklopke i prekidači,
- vodovi i kablovi,
- instalacione cevi i pribor za vodove i kablove,
- priključnice,
- utikači i
- sijalična grla.

5.1.1 Vodovi

O vodovima uopšte je već bilo reči, tako da će se ovde obratiti pažnja samo na niskonaponske vodove koji se koriste u električnim instalacijama (Slika 5-1).



Slika 5-1 Niskonaponski instalacioni kablovi

Nacionalni standardi utvrđuju oznake kablova, pa tako imamo i da je JUS odredio oznake za sve grupe i vrste vodova koje su "obavezne u poslovnom odnosu između proizvođača, isporučioaca i korisnika, kao i u projektnoj dokumentaciji".

Oznake izolovanih provodnika po JUS-u sastoje se od grupa slovnih simbola i brojeva. U jednoj oznaci može da bude do šest grupa, mada se praktično najčešće sreću dve ili tri grupe. Ako je provodnik višežilni, pa ima zaštitni ili nulti provodnik, tada ima jednu grupu oznaka više.

I grupa označava specifičnost voda, odnosno posebno područje primene voda, zatim vrstu materijala izolacije i vrstu materijala plašta.

II grupa označava specifičnost konstrukcije voda koja je značajna za neku određenu primenu. Ova grupa simbola odvaja se od prve grupe simbola kosom crtom.

III grupa sadrži podatak o zaštitnom provodniku. Ako je u energetske vod ugrađen zaštitni ili nulti provodnik, ali uvek zeleno-žute boje, u oznaci se stavlja slovo "Y", koje se odvaja crtom od prethodne grupe.

IV grupa označava vrstu materijala od kojeg je je provodnik izgrađen i oblik preseka provodnika. Kada je materijal bakar i kada je presek okrugao, tada se ne koristi nikakva oznaka. Ova grupa ima dve oznake:

- A – za aluminijumski provodnik,
- S – za sektorski presek provodnika, koji se praktično upotrebljava samo za kablove.

Ova grupa simbola se odvaja povlakom od treće.

V grupa daje podatke o broju žila (celina od provodnika i izolacije sa eventulanim omotačem za učvršćivanje izolacije na provodniku). Ova grupa se ispisuje iza prethodne samo sa jednim slovnim razmakom a bez drugog znaka.

VI grupa simbola označava visinu naznačenog napona za koji je vod izrađen. Ova oznaka se ne stavlja za vodove izrađene za male i niske napone, već isključivo za visoke napone. Ispisuje se u nastavku pete grupe u broju kilovolta u vrednosti linijskog (međufaznog) napona.

Kao najčešći oblik električne instalacije u stambenim objektima individualne izgradnje, te u većim objektima gde se upotrebljava klasičan građevinski materijal, zbog ekonomskih prednosti najčešće se u malter stavlja PP/R vod (PP vod sa izolacijom i plaštom od PVC mase, R – sa razmaknutim žilama).

Primer: SG/U-3x1,5 = skraćeno: za svetiljke sa gumenom izolacijom, trožilni, sa uporednim žilama, presek provodnika 1,5mm².

Na osnovu maksimalno dozvoljenog strujnog opterećenja provodnika, a u zavisnosti od broja žila, vrste polaganja i temperature okoline, određuje se presek provodnika. U zavisnosti od vrste opterećenja (trajno ili povremeno), određuje se naznačena struja topljivih umetaka osigurača i automatskih prekidača za zaštitu vodova.

Kontroliše se pad napona, koji mora biti manji od dozvoljenog.

5.1.2 Priključak objekta na distributivnu mrežu

Priključak na distributivnu mrežu je veza između električnog brojila potrošača i distributivne mreže i može se posmatrati kao konstruktivna celina sačinjena od spoljašnjeg i unutrašnjeg priključka. Uobičajena je praksa da spoljašnji deo priključka izrađuju elektrodistributivna preduzeća. Objekat može biti priključen na mrežu na jedan od sledećih načina:

- vazdušni priključak na nadzemnu niskonaponsku mrežu – ovo je priključak između nadzemnog voda mreže i izolatora na zgradi, uključivo tih izolatora. Može se izvesti preko krovnog nosača ili pomoću samonosivog kabla pričvršćenog na zid objekta. Potrebno je dimenzionisati vodove prema jednovremenom vršnom opterećenju, a mora se voditi računa o maksimalnom rasponu (za provodnike od bakra 20m), sigurnosnim visinama (visina najnižeg voda prema objektima na trasi (putevi, parkovi, dvorišta, telekomunikacioni vodovi, drveću, krovu, dimnjaku..), sigurnosnim razmacima (horizontalna udaljenost od najbližeg provodnika prema balkonu, terasi, gornje i donje ivice prozora, poda sobe...);
- kablovski priključak na nadzemnu mrežu. Ova vrsta priključka izvodi se mestima sa nadzemnom, vazdušnom mrežom kada ne želimo da potporni izolatori ili nosači ruže izgled zgrada. Na stubu mreže koji je najbliži objektu postavi se kablovska glava od koje ide kabl vertikalno niz stub, pa zatim u zemlju, ulazi pod zgradu i završava na sabirnicama

ormana za brojila ili priključnoj kutiji na fasadi zgrade. Na vertikalnoj trasi kabl mora biti mehanički zaštićen zaštitnim olukom ili cevi od visine 1,70m od zemlje i 0,30m u dubini zemlje;

- priključak podzemnim kablom na niskonaponsku mrežu. Svojestven je u velikim i urbanizovanim celinama u kojima je distributivna mreža izvedena podzemnim kablom;
- priključak podzemnim kablom na visokonaponsku mrežu. Ova vrsta priključka se izvodi ako se priključuju veliki objekti i kada se distributivna trafostanica smešta u unutrašnjosti stambenog objekta.

Unutrašnji kućni priključak je električni vod sa opremom koji spaja sabirnice razvodnog ormana električnih brojila sa spoljašnjim kućnim priključkom u pripada električnoj instalaciji zgrade. Zbog toga, ovaj priključak u celini treba da bude završen pre izrade spoljašnjeg kućnog priključka.

Način izrade unutrašnjeg kućnog priključka zavisi od vrste spoljašnjeg kućnog priključka i lokacije brojila; da li su koncentrisana na jednom mestu ili su u manjim skupinama po spratovima. Svaki način izrade ima jedan zajednički deo, a to je električni vod koji polazi od sabirnice razvodnog ormana i završava se vezom na provodnik spoljašnjeg kućnog priključka. Ovaj električni vod nazivamo i napojnim vodom.

5.1.3 Elementi gromobranske instalacije

Atmosfersko pražnjenje je u osnovi oslobađanje energije nagomilane u atmosferi, čiji je izvor delovanje Sunca. Posmatranjem i merenjem ustanovljeno je da se svako atmosfersko pražnjenje sastoji iz više uzastopnih električnih pražnjenja koje se vrše u malim vremenskim intervalima. Zbog te činjenice, struje koje se javljaju imaju sve osobine visokofrekventnih struja. Prosečna vrednost jačine struje kod atmosferskih pražnjenja, kako iskustvo pokazuje, iznosi oko 30 000 A. Struja groma ima udarni karakter, tj. veliku amplitudu i veoma kratko vreme trajanja. Broj grmljavinskih dana za Jugoslaviju se kreće od 11-50 dana godišnje.

Svaki udar groma u nezaštićeni objekat može ozbiljno ugroziti ljudske živote i izazvati znatnu štetu. Posebno teške posledice izaziva udar groma u eksplozivne i zapaljive objekte. Udari groma u nadzemne (vazdušne) vodove (električne, telefonske i dr.) prouzrokuju u njima visoke potencijale, koji preko provodnika prodiru u objekte i vrše pražnjenja prema zemlji ili uzemljenim elementima objekta. Veliki broj povreda ljudi je u vezi sa prodiranjem visokog potencijala unutar objekta preko nadzemnih vodova.

Na otvorenom prostoru treba izbegavati sklanjanje od kiše ispod usamljenog, visokog drveta.

Kao električna pojava, delovanje groma može biti slično delovanju električne struje. Grom se manifestuje sledećim pojavama:

- elektrohemijskim – zbog kratkog vremena delovanja nema praktično nikakve važnosti;
- akustičnim – kao posledica električnog pražnjenja u atmosferi nastaje prasak koji se na zemlji čuje kao grom;
- termičkim – prema Džulovom zakonu prolaz struje kroz neki otpor razvija energiju, što u slučaju velikih struja groma može dovesti do pojave požara ili eksplozija. Termičko delovanje nastaje posebno na mestima povećanog otpora. Odatle proizilazi osnovni zahtev u gromobranskim instalacijama da se metalni provodnici dovoljno dimenzionišu da ne dođe do opasnog zagrevanja i da se struja groma što kraćim putem odvede u zemlju;
- elektrodinamičkim – nastaje ako su dva voda gromobranske instalacije međusobno tako postavljena da se jedan nalazi u magnetskom polju drugoga. Te sile mogu biti reda veličine od nekoliko hiljada N po metru dužine voda, što zavisi od jačine struje, međusobnog razmaka i rasporeda vodova. Zbog elektrodinamičkog delovanja groma, propisima je određeno na kojem se najmanjem razmaku smeju postavljati gromovodi, a određen je i razmak gromobranske instalacije od električnih, gasnih, vodovodnih i drugih instalacija.
- indukcijom – na bazi elektrostatičke indukcije, na izolovanim metalnim delovima, koji se nalaze unutar objekta, mogu nastati visoki potencijali u odnosu na zemlju, a usled elektromagnetske indukcije u dugačkim metalnim elementima (cevovodima, električnim provodnicima) koji ne obrazuju zatvoreno kolo, mogu se indukovati naponi reda desetine kilovolta. Ovako visoki naponi mogu unutar objekta prouzrokovati luk dužine nekoliko santimetara koji može zapaliti zapaljive materijale, a ako je u prostoriji eksplozivna koncentracija para, gasova ili prašine zapaljivih materijala, može nastati i eksplozija.

Dobro izvedena gromobranska instalacija u značajnoj meri smanjuje opasnost od štetnih posledica groma. Da bi gromobranska instalacija bila dobra, nije je dovoljno samo dobro projektovati, već ju je važno dobro izvesti i kontrolisati.

Gromobranska instalacija treba da štiti ljude i materijalna dobra (objekte, postrojenja) od opasnosti i štetnih posledica groma a treba da zadovolji:

- električnu sigurnost,
- mehaničku sigurnost,
- otpornost prema koroziji,
- toplotnu sigurnost (dovoljan presek provodnika da ne dođe do preteranog zagrevanja),
- arhitektonske zahteve,
- ekonomske uslove.

Gromobranska instalacija se izvodi na principu Faradejevog štita a ranije je bio popularan i princip povećane jonizacije vazduha radioaktivnim izotopima, koji je danas propisima zabranjen.

Glavni elementi gromobranske instalacije su *hvataljka*, *odvod* i *uzemljivač*.

Hvataljke su provodnici (trake, žice, metalne površine ili tela) postavljeni na istaknutim mestima objekta, a služe sa prihvatanje atmosferskih pražnjenja. *Hvataljke* se postavljaju na ona mesta koja su po iskustvu najčešće izložena udarcima groma. To su tornjevi, dimnjaci, razne izbočine na krovu, strehe (posebno na ravnim krovovima). Kao *hvataljka* (prihvatni vod) može da posluži i krov od lima koji mora biti najmanje 0,5 mm debeo. Normalno se za *hvataljke* upotrebljava pocinkovana čelična traka koja se polaže najvišim delom krova. *Hvataljke* se polažu na čelične nosače, ako konstrukcija krova nije od drveta ili lako zapaljivog materijala. *Hvataljke* na lako zapaljivim krovovima moraju se postaviti tako da su udaljene najmanje 0,50 m od površine krova.

Metalne konstrukcije antena, telefona na krovovima, kao i metalne vodice liftova ne smeju se direktno povezati na gromobransku instalaciju.

Odvodi su provodnici koji spajaju *hvataljke* s uzemljenjem. U principu, ovo spajanje treba izvršiti najkraćim putem uz što manji broj nastavaka. U tu svrhu može da posluži pod određenim uslovima i metalna konstrukcija zgrade, oluci i slično. Vertikalne olučne cevi se koriste kao odvodi samo u kombinaciji sa odvodima od metalnih provodnika. U tom slučaju svaki drugi oluk se može smatrati odvodom.

Uzemljivači su provodnici položeni u zemlju koji služe kao veza između odvoda i zemlje. Delovanje gromobranskog uzemljenja karakteriše udarni otpor rasprostiranja R_u . Za specifični otpor zemlje manji od $250\Omega\text{m}$, udarni otpor uzemljivača može da iznosi najviše 20Ω , ako propisima za pojedine slučajeve nisu date druge vrednosti. Ako je specifični otpor zemlje veći od $250\Omega\text{m}$, vrednost udarnog otpora R_u može da iznosi najviše 8% od izmerenog specifičnog otpora zemlje izraženog u Ωm . Konstrukcija i smeštaj uzemljivača moraju biti odabrani tako da otpor rasprostiranja R_u , a time i udarni otpor R_u , budu što manji. Za uzemljivače se upotrebljavaju pocinkovane čelične trake i ploče, bakrene ploče, čelične cevi, komadi čeličnih konstrukcija kao čelične šine i slično. Uzemljenja se mogu izvesti kao prstenasta oko celog objekta ili kao pojedinačna uzemljenja, za svaki odvod posebno. Pojedinačna uzemljenja se mogu izvesti iz jednog uzemljivača ili iz više uzemljivača međusobno povezanih. Vodovodna mreža s metalnim cevima može da posluži kao dodatni uzemljivač, uz uslov da je otpor vodovodne mreže manji od 20Ω i da postoji glavni uzemljivač. Vodovodna mreža se ne sme upotrebiti kao gromobransko uzemljenje ako postoji mogućnost da dođe do preskoka sa vodovodne mreže u unutrašnjost zgrade na predmete ili postrojenja koja su ugrožena eksplozijom. Bez obzira na to da li vodovodnu mrežu upotrebljavamo kao uzemljenje ili ne, s obzirom na njenu razgranatost po objektu i mogućnost preskoka iskre na tu instalaciju, treba gromobranska uzemljenja barem na dva mesta spojiti s vodovodnom mrežom i

to najbolje na ulazu i izlazu iz objekta. Vodomere i eventualne spojnice od izolacionog materijala treba premostiti. Gasne instalacije se ne koriste za uzemljivače. Uzemljivač se može realizovati i postavljanjem pocinkovanih čeličnih traka u temelje objekta i njihovim spajanjem (zavarivanjem) za armaturu temelja – tzv. temeljni uzemljivač. Prednosti temeljnih uzemljivača su manji troškovi (ne kopaju se posebni rovovi) i dobra zaštita trake od korozije.

5.1.4 Razvodna tabla

Razvodna tabla je mesto električne instalacije sa koga polaze vodovi pojedinih strujnih kola. Materijal od kojeg se izrađuju je čelični lim ili ploče od plastične mase. Konstruktivno, razvodne table su u kućnim instalacijama pristupačne sa prednje strane. Razlikujemo glavne i sporedne razvodne table. *Glavna* razvodna tabla ima na sebi dovodni vod vezan za gradsku mrežu, dok *sporedne* (spratne, sekcione) imaju dovodni vod kao račvu, strujno kolo, koje dolazi od glavne razvodne table.

Razvodne table po sadržini mogu biti:

- *instalacione* – samo sa osiguračima i prekidačima, mogu biti otvorene i zatvorene izvedbe;
- *za električna brojila* – sa osiguračima i brojilima, sa ormanima, uz eventualno MTK, odnosno RTK prijemnike (vidi *Brojila*);
- *kasetirane (razvodne baterije)* – za grube pogone (prostorije sa prašinom, vlagom, kiselim isparenjima i za grub rad) razvodne table se smeštaju u odgovarajuće ormene koji pružaju potrebnu zaštitu.

5.1.5 Brojila električne energije

Brojila električne energije (rada) su instrumenti ili aparati za merenje električne energije. Osnovni tipovi brojila su:

- jednofazno brojilo,
- trofazno brojilo,
- trofazno dvotarifno brojilo,
- brojila za reaktivnu energiju.

Prema načinu rada, postoje indukciona i elektronska brojila. Trenutno se u našoj zemlji se preporučuje ugradnja brojila proizvođača "EI" Niš, odnosno "Čajavec", Banja Luka.

Za visokonaponska merenja upotrebljavaju se ista brojila, samo se priključuju preko mernih transformatora. Često se koriste merne grupe brojila – celine od dva ili više brojila sa pomoćnim uređajima, npr. dvotarifno brojilo sa pokazivačem maksimalnog opterećenja – maksigrafom (brojilo koje na traci ili brojčaniku upisuje visinu opterećenja), sa izdvojenim uklopnim satom (električni sat za prebacivanje tarife, koji može biti u samom brojilu ili montiran pored brojila a sa električnom vezom na brojilo) i brojilom za reaktivnu energiju.

Brojilo za reaktivnu energiju registruje reaktivnu električnu energiju sa svrhom da se naplatom reaktivne energije stimuliše potrošač da popravi svoj sačinilac snage.

Dvotarifno brojilo se koristi u distributivnim područjima gde postoji tzv. "jeftina" i "skupa" tarifa.

Savremeno prebacivanje sa jedne na drugu tarifu vrši se upotrebom tonfrekventnog relea i prijemnika za mrežnu telekomunikacionu komandu (tzv. MTK) (u onim mrežama koje imaju i izvor tonske učestanosti), odnosno preko odgovarajuće radioveze i prijemnika (RTK). Naime, u većim gradovima zbog velikih udaljenosti i broja pojedinih korisnika, nije praktično podešavanje uklopnih satova. Dalje, upravljanje "na daljinu" omogućuje da se sa jednog centralnog mesta (npr. dispečer) diriguje uključivanjem nekih prijemnika (npr. TA peč) i da se omogući blokada onih prijemnika koji se mogu uključiti samo u određeno vreme. Međutim, takav način upravljanja zadire u neka elementarna prava korisnika (potrošača električne energije), jer elektrodistribucija, a ne korisnik, odlučuje o tome koji će se uređaji koristiti (odnosno blokirati).

5.1.6 Instalacioni osigurači

Zaštita vodova od nedozvoljenog opterećenja, bilo namernog ili slučajnog ili od opterećenja kratkom vezom rešena je upotrebom osigurača koji se stavlja na početak voda u smeru dolaska struje. Ukoliko se u instalaciji, neposredno pored osigurača, postavlja i prekidač, savetuje se da se osigurač postavi iza prekidača, jer se tada osigurač menja pri otvorenom prekidaču i nije pod naponom. Pri upotrebi automatskih prekidača, osigurač se obavezno postavlja iza prekidača.

Osigurač vrši zaštitu voda prekidom strujnog kola u koji je montiran. Ovaj prekid može se vršiti topljenjem umetka u osiguraču, elektromagnetnim dejstvom ili termičkim dejstvom kojim se savija bimetalna traka. Osigurači treba da budu tako konstruisani da se prekid električnog kola vrši u zatvorenom vatrostalnom prostoru, da osigurač ima uočljiv pokazivač prekida i da je osigurana strujna nezamenljivost (konstruktivna osobina topljivih osigurača – ne može se ugraditi umetak za veću struju od one za koje je napravljen kalibarski prsten).

Naši tehnički propisi razvrstavaju osigurače u tri osnovne grupe:

- instalacioni osigurači sa navojem tipa D;
- nožasti osigurači tipa N,
- automatski osigurači ili jednopolni instalacioni automati.

Instalacioni osigurači sa navojem tipa D (Slika 5-2) sastoje se od osnove ili podnožja (porculanske podloge), kape, topljivog umetka ili patrone i kalibrisanog prstena (zamenljiv deo podnožja). Zaštita voda se načelno izvodi na taj način što se tanki provodnik u topljivom umetku istopi pre nego što se zaštićeni provodnik zagreje na dozvoljenu temperaturu.



Slika 5-2 Instalacioni osigurač tipa D

Propisi određuju boje topljivih umetaka za naznačene struje, a kalibrisani prsteni su u istoj boji kao i umetak. Upotrebljavaju se za mrežne napone i za struje do 100A.

Primeri osigurača:

- 10A – osnova do 25A, boja uloška crvena, dugotrajne struje – još ne prekida $1,5I_n$, mora da prekine $1,9I_n$ u trajanju 1h,
- 16A – osnova do 25A, boja uloška siva, dugotrajne struje – još ne prekida $1,4I_n$, mora da prekine $1,75I_n$ u trajanju 1h.

Kratkotrajne struje – za struje $7,0I_n$ vreme pregaranja žice je za normalne (brze) osigurače mora biti manje od 0,10s, a za tromi mora biti veće od 0,10s.

Prema brzini delovanja, topljivi umeci su *normalni (brzi)* i *tromi*. Tromi osigurači moraju biti označeni simbolom tromosti "puž". Tromi osigurači su pogodni za primenu kod vodova na koje su priključena veća sijalična opterećenja i elektromotori. Kod ovih prijemnika u prvom momentu nakon uključenja dolazi do pojave povećanih struja, koje ne bi trebalo prekidati. Dakle, tromi ulošci su manje osetljivi i pružaju mogućnost boljeg iskorišćenja preseka voda.

Nožasti osigurači tipa N sastoje se od osnove ili podnožja, topljivog umetka ili patrone (oblika cevi, obično pravougaonog oblika) i izolacione drške. Ovi osigurači imaju osobine velike prekidne moći, a namenjeni su prekidanju velikih struja pri preopterećenju ili kod kratkog spoja pa se često nazivaju *niskonaponski učinski osigurači* ili skraćeno *NV-osigurači*. Upotrebljavaju se najčešće u industrijskim i distributivnim mrežama, a za struje do 1250A.

Nikada ne treba umesto originalnog umetka koristiti krpljenje ("licnovanje") – stavljanje neodgovarajućeg provodnika umesto pregorele niti u umetak.

Automatski osigurači ili jednopolni instalacioni automati – uređaji koji prekidaju električno kolo pri određenom opterećenju, a da se ne vrši uništavanje materijala. Ovi osigurači isključuju električno kolo pomoću elektromagneta ili pomoću bimetalne trake, a često imaju ugrađena oba načina isključivanja. Elektromagnet isključuje pri kratkoj vezi i naglim velikim opterećenjima (brzo ili elektromagnetno isključivanje), dok bimetalna traka isključuje pri dugotrajnim manjim opterećenjima (tromo ili termičko isključivanje). Imaju dva osnovna oblika – sa podnožjem i na zavrtnanj. Automatski osigurači na zavrtnanj

namenjeni su da u postojećim instalacijama sa topljivim osiguračima ove zamene sa najmanjim izdacima. Automatski osigurači se ne upotrebljavaju kao glavni osigurači ispred motornih automatskih i ručnih prekidača. Na tim mestima se neizostavno postavljaju topljivi osigurači, po mogućstvu sa tromim umecima.

Osnovna prednost automatskih osigurača u odnosu na topljive osigurače je u tome što posle prekidanja strujnog kola ne treba menjati umetak (patronu), već se za to predviđenom polugom osigurač ponovo aktivira. Nov umetak, ne samo da košta, zahteva vreme za izmenu, a pored toga zahteva i držanje rezervnog umetka. Ima manje dimenzije. Nedostaci automatskih osigurača su manja prekidna moć i veća cena.

5.1.7 Sklopni aparati

Sklopni aparati (uređaji, naprave) služe za ostvarivanje veze (uključivanje, odnosno isključivanje) u strujnim kolima. U strujnim kolima, osim normalne struje (trajne struje opterećenja), može doći i do pojave prekomerenih struja: struje preopterećenja, struje uključenja, ili struje kvara. U zavisnosti od prekidne moći, sklopne aparate delimo na:

- *rastavljače*, koji nisu u stanju da isključuju niti uključuju opterećeno strujno kolo. Upotrebljavaju se u razvodnim ormanima i postrojenjima, a osnovna im je uloga vidno odvajanje pojedinih delova postrojenja u cilju zaštite pogonskog osoblja. Jednostavne su konstrukcije, kontakti se sastoje iz nepokretnog i pokretnog dela;
- *sklopke*, uklapaju i isklapaju normalne struje opterećenje i struje preopterećenja, *ne poseduju elektromagnet*. Delimo ih na:
 - a) *instalacione*, koje uključuju i isključuju strojno kolo, prekidaju struje do $2I_n$. Upotrebljavaju se u instalacijama stanova, poslovnih prostora itd. Izrađuju se za napone do 500V, a struje od 2 do 25A. Prema načinu ugradnje, mogu biti za ugradnju ispod i iznad maltera, za ugradnju u razne aparate ili za specijalne namene (npr. šinska vozila). Prema načinu rukovanja, mogu biti okretne, pregibne, mikro i potezne.
 - b) *motorne (zaštitne)* – Slika 5-3), koje prekidaju struje ($5-10I_n$) i imaju bimetalni okidač podesiv u nekom opsegu. Služe za zaštitu elektromotora od preopterećenja, grubog pokretanja, suviše velikog zagrevanja pri ukočenom rotoru, dvofaznog rada motora, pojave kratkog spoja, nedozvoljeno visokog napona;



Slika 5-3 Motorne sklopke

- c) *grebenaste sklopke*, mogu biti jednopolne ili dvopolne, uključenje i isključenje u sklopki vrši se pomoću grebena koji se nalaze na osovinu sklopke. Naznačene struje od 10 do 120A;
- *kontaktore*. Kontaktori su sklopke za daljinsko upravljanje i držanje u uključenom stanju pomoću elektromagneta. Osnovni delovi su im: elektromagnet (jezgro, kotva, namot, nosač kontakta), kontakti (glavni – uvek uklopni (radni)), pomoćni (mogu biti uklopni ili iskllopni), komora za gašenje luka (iznad 16A), kućište, priključci, opruge. Karakteristike su im: naznačena struja, naznačeni napon glavnih kontakata, napon i frekvencija kalema elektromagneta (220V, ponekad 380V, 50Hz), broj uključanja do 1000 na čas, ukupno reda 10^7 . Pomoćna oprema: tasteri i bimetalni releji.
- *prekidači* – prekidaju i normalne pogonske struje, kao i struje kratkog spoja. Osnovni delovi: podesivi bimetalni i podesivi elektromagnetski okidač, komora za gašenje luka, pomoćni i glavni kontakti, okidač za daljinsko isključenje. Izrađuju se za naznačene struje do nekoliko hiljada ampera.
- *releji, okidači, tasteri, signalne sijalice*. Releji imaju električni signal za isključenje, dok okidači imaju mehanički signal za isključenje. Na taster se deluje pritiskom (mogu biti otvoreni ili zatvoreni). Boje: crveni isključenje uređaja, zeleni ili crni – uključanje uređaja, žuti – proveravanje (testiranje). Taster u obliku pečurke crvene boje služi za urgentna (havarijska isključenja).

5.2 Električno osvetljenje

Svetlost je u suštini sredstvo koje omogućuje izvršavanje vidnih zadataka i normalno kretanje u prostoru, nezavisno od toga da li je domen prostora otvorenog ili zatvorenog tipa. Savremeno električno osvetljenje zahteva kvalitetnu svetlost po spektralnom sastavu i visoke nivoe osvetljenosti.

5.2.1 Svetlosni izvori

Tela koja su sposobna da emituju svetlosnu energiju nazivaju se svetlosnim izvorima. Izvori dnevne svetlosti su Sunce i sjajnost atmosferskog omotača – neba. Podela veštačkih električnih svetlosnih izvora izvedena je s obzirom na princip nastajanja svetlosti. Tako se imaju:

- izvori svetlosti u obliku *sijalice sa užarenom niti*,
- *sijalice na principu pražnjenja* kroz metalne pare ili gasove.

Izvori svetlosti u obliku *sijalice sa užarenom niti* (*metalnim usijanim vlaknom*) (Slika 5-4) koriste principe termičkog isijavanja. Prednosti: podnosi velike promene napona, nema dodatne opreme, $\cos\phi = 1$, neosetljive na temperaturu okoline, tehnologija je vrlo razvijena, iako se volfram teško obrađuje. Nedostaci: mali stepen iskorišćenja (2-3%), kratak vek trajanja (1500 sati), boja i količina svetlosti i vek trajanja zavise od napona, jak bljesak, velika struja uključenja.



Slika 5-4 Sijalice sa užarenim vlaknom

Prema nameni sijalice sa metalnim vlaknom dele se u:

- sijalice za *opštu upotrebu*: minjon E14, normal E27, golijat E40,
- *reflektorske* sijalice – balon sa unutrašnje strane metalizovan, tako da zrače u koncentrisnom snopu,
- *halogene* sijalice (Slika 5-5) – sijalice od volframovog vlakna smeštene u cevi od kvarcnog stakla u kojoj je takođe gas za punjenje i vrlo mala količina halogenog elementa (jod ili brom). Prisustvo halogenog elementa omogućuje da se sa vlakna ispareni volfram vrati nazad (volfram halogeni kružni proces), čime se povećava iskorišćenje i trajanje sijalice. Po pravilu su smeštene u optički sistem reflektora i primenjuju se za spoljašnje i unutrašnje osvetljenje.



Slika 5-5 Halogene sijalice

- *projekzione* sijalice – sijalice za filmske i TV studije, pozornice, operacione stolove,
- ostale vrste.

Sijalice na principu pražnjenja kroz metalne pare ili gasove (fluorescentne, natrijumske, živine, neonske). Ove sijalice koriste jonizaciju i luminiscenciju, naime usled električnog pražnjenja u gasu ili metalnoj pari ili u njihovim mešavinama deo energije se, zbog prelaska elementarnih čestica u atomu pare ili gasa na druge nivoe, pretvara u svetlost.

Prednosti sijalica na principu pražnjenja su: veći stepen iskorišćenja (20-30%), duži vek trajanja, manji bljesak, a nedostaci: potrebni dodatni uređaji (naprave), problemi sa paljenjem, nezamenljive po snazi, loš faktor snage, diskretan spektar, problem sa lavinskim efektom.

Osnovni tipovi *sijalica na principu pražnjenja* kroz metalne pare ili gasove su:

- *fluorescentne* (živine niskog pritiska) – vakumirana staklena cev sa malim sadržajem živom, sa unutrašnje strane prevučena slojem FC praha. Cev je na oba kraja zatvorena podnošcima na kojima se nalaze izvodi za priključak u odgovarajuće grlo svetiljke. Posедуje najmanji bljesak, primenjuje se samo u zatvorenim prostorijama. Radni napon je manji od 220V, dok je potreban napon paljenja 1kV, što se ostvaruje prigušnicom i starterom.



Slika 5-6 Fluorescentne sijalice

- *živine* visokog pritiska – pražnjenje se odvija samo u malom balonu, pomoćne elektrode zagrevaju živu da ispari, proces paljenja je dug (3 min), još više vremena je potrebno da proradi posle nestanka napajanja

(potreban je visok napon da se upali živa pod visokim pritiskom, pa se prvo živa mora kondenzovati). Potrebna je samo prigušnica.

- *natrijumove* – emituju prodorno žuto-narandžastu svetlost. Primenuju se za osvetljenje tunela i saobraćajnica. Poseduje visokonaponski upaljač (2÷5kV), pa nema problema posle nestanka napajanja.



Slika 5-7 Živina i natrijumova sijalica

S obzirom na fizičku prirodu konvekcione struje, koja pri priključenju ima tendenciju stalnog porasta, sijalice sa pražnjenjem moraju imati element koji stabilizuje, ograničav struju pražnjenja. Ti elementi se nazivaju predspojnim uređajima. Za realizaciju ovih uređaja koriste se: prigušnice, kondenzatori, otpori, transformatori sa rasipnim poljem, posebni tranzistorski uređaji.

Pored toga, izvori svetlosti sa pražnjenjem moraju na početku rada (pri paljenju) radi ostvarenja veće jačine polja, da imaju veći napon nego pri nominalnom pogonu. Za ovo se koriste elementi koji sami ili sa predspojnim uređajima obezbeđuju dovoljne naponske vrhove (pikove). U ove elemente spadaju starteri, zagrevni i štedni transformatori, transformatori sa rasipnim poljem, elektrode i elementi za paljenje.

5.2.2 Principi projektovanja električnog osvetljenja

Postupak projektovanja električnog osvetljenja određuju uglavnom uslovi dobrog osvetljenja koji obuhvataju:

- namenu,
- estetske zahteve,
- ekonomičnost,
- pouzdanost,
- dovoljan nivo srednje osvetljenosti i pravilan raspored svetiljki,
- ravnomernost osvetljenosti i ograničenje blještanja.

Pri izradi projekta unutrašnjeg osvetljenja po značaju se javljaju sledeće etape:

- izračunavanje potrebnog svetlosnog fluksa,
- izračunavanje broja izvora svetlosti,

- izračunavanje potrebnog broja svetiljki,
- određivanje rasporeda svetiljki,
- izračunavanje stvarne srednje osvetljenosti.

Za razne vrste delatnosti utvrđeni su faktori kvaliteta osvetljenja u zgradama koji se odnose na:

- naznačeni osvetljaj,
- boju svetlosti,
- stepen reprodukcije boja,
- razred blještanja.

5.3 Opasnost od električne struje i zaštitne mere

Električna energija je, uz sve prednosti koje ima njena široka primena, praćena i nizom pojava koji mogu da predstavljaju opasnost za čoveka, životnu sredinu, opremu i uređaje. Ove pojave se permanentno izučavaju i odgovarajućom međunarodnom i nacionalnom legislativom i standardima se uređuje oblast zaštite od električne struje.

Osnovna opasna dejstva električne struje su opasnost od direktnog dodira sa delovima električne instalacije i opreme, opasnost od indirektnog dodira, opasnost od toplotnog dejstva koju razvija električna oprema ili instalacije, opasnost usled udara groma i posledica atmosferskih pražnjenja, opasnost od štetnog uticaja elektrostatičkog naelektrisanja. Štetnosti koje nastaju ili se pojavljuju u procesu rada su štetnosti usled jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja.

Električna struja koja prolazi kroz čovečje telo može da izazove sledeća direktna delovanja:

- toplotna (opekotine),
- mehaničke (oštećenja tkiva),
- hemijsko (elektroliza),
- biološko – izaziva grčenje mišića, prekid disanja, haotičnu kontrakciju srčanog mišića, potpuni prestanak srčanog rada, oštećenje centralnog nervnog sistema i drugo.

Pored navedenih direktnih delovanja i opasnosti, postoje i druge, indirektno, opasnosti, kao na primer, opekotine i povrede očiju izazvane svetlosnim delovanjem električnog luka ili kapljica rastopljenog metala (kratki spoj).

Električna struja svojim dejstvom takođe može prouzrokovati požare i eksplozije, praćene ljudskim i materijalnim gubicima.

Najveći broj povreda u elektroenergetskim objektima i postrojenjima potiče od neodgovarajuće obuke i treninga, rada sa strujnim kolima pod naponom, lošeg uzemljenja, nedostatka informacija o lokaciji električne opreme i uređaja, nedostatka odgovarajućeg alata ili izbora pogrešnog pri električnim radovima,

greške pri ispitivanju električnih uređaja, greške u komunikaciji sa ostalim radnicima i upravom, kada se pojavi opasnost od električne struje [17].

Od četiri značajne komponente posla, oprema, ljudi, procesi i radna okolina, najčešće do povreda dolazi usled neodgovarajućeg stanja elektroopreme i usled lošeg upravljanja. Značajan broj nesreća se usled neopreznosti i nepažljivost dešava električarima, naročito monterima, koji navikli da rade u blizini visokog napona, vremenom postanu manje oprezni i počinju zanemarivati osnovne sigurnosne propise i uputstva.

Zbog stalne opasnosti koje proizlaze iz složenosti elektroenergetskih mašina, uređaja, opreme i pripadajućih sistema, procedura i metoda rada, kao i zahtevnih aktivnosti i procesa, nije moguće obezbediti apsolutnu zaštitu. Povrede na radu i profesionalne bolesti, osim humanitarnih posledica i izdataka za zaposlene i njihove porodice, predstavljaju i opterećenje zdravstvenog sistema i poslovne produktivnosti. Radi toga je potrebno uspostaviti sistem bezbednosti i zdravlja na radu, čiji je osnovni cilj sprečavanje povreda na radu, profesionalnih oboljenja i oboljenja u vezi sa radom i njihovo svođenje na najmanju moguću meru. Osim humanog i socijalnog značaja, sistem bezbednosti i zdravlja na radu utiče i na podizanje kvaliteta uslova rada i života.

Briga za zaposlene, ekonomičnost i obaveza poštovanja pomenute zakonske regulative i tehničkih propisa, standarda i preporuka nalažu niz preventivnih mera i uzimanje u obzir raznih i mnogobrojnih faktora koji mogu da budu u međusobnoj interakciji. Osnovni faktori koji određuju uslove rada su tehničko-tehnološki, ergonomski i organizacioni, medicinski i higijenski, sociološki i psihološki i ekonomski. Pri tome se polazi od načela izbegavanja rizika, procene rizika koji ne mogu da se izbegnu, otklanjanje rizika na njihovom izvoru primenom savremenih tehničkih rešenja, prilagođenja rada i radnog mesta radnika, u pogledu izbora opreme, metode rada i tehnološkog postupka i slično, zamene opasnih poslova ili tehnoloških postupaka manje opasnim, odgovarajućeg obrazovanja, vaspitanja, osposobljavanja i treninga radnika i izdavanjem uputstava u oblasti bezbednosti i zaštite na radu.

Da bi se sprečile povrede i nesreće u elektroenergetskim objektima, zaposleni moraju da imaju odgovarajuću obuku i trening pre izvođenja električnih radova, osiguraju da je električno kolo odspojeno, provere da li je električno kolo uzemljeno ako je zahtevano, dobro budu upoznati o lokaciji električne opreme i uređaja, uključujući kablove i napojne vodove, obaveštavaju ostale radnike i upravu o nesigurnim uslovima rada i opasnostima od električne struje, koriste odgovarajuća zaštitna sredstva, pribor i alat kada obavljaju radove sa električnom strujom, osiguraju da se električna ispitivanja sprovedu u skladu sa propisima i na odgovarajući način zabeleže.

Zaštitna sredstva koja se koriste u elektroenergetskim objektima i postrojenjima za zaštitu od električnog udara, djelovanja električnog luka, produkata gorenja i pada s visine su:

- zaštitna oprema- prema potrebi koriste se: izolacioni alat, detektor napona, izolacione motke, prenosne naprave za uzemljivanje i kratko spajanje, sredstva za ograđivanje i izolovanje od delova pod naponom (izolacioni tepisi, ploče, pregrade, prekrivači, kape, izolaciona postolja itd) i oznake upozorenja i zabrane,
- lična zaštitna sredstva- zaštitno radno odelo, šlem, štitnik za oči i lice (može da bude deo šlema) ili zaštitne naočare, zaštitne rukavice, zaštitna obuća, sigurnosni pojas.

Najznačajnije tehničke mere obezbeđuju se u postupku projektovanja, izgradnje, korišćenja i održavanja objekata za rad, tehnoloških procesa, opreme i sredstava za rad, proizvodnje, pakovanja, prevoza i skladištenja, upotrebe i uništavanja opasnih materija, te projektovanja, proizvodnje i korišćenja opreme za ličnu zaštitu na radu.

Dakle, opasnosti, pa prema tome i odgovarajuće zaštitne mere, od električne struje usmerene su u pravcu čoveka, materijalnih dobara i čoveka i materijalnih dobara istovremeno.

Opasnost od visokog napona je razumljivo veća i 20-35 procenata nesreća prouzrokovanih visokim naponom završava se smrću. Kod niskih napona od 250V prema zemlji ovaj procenat je znatno manji i iznosi 5%.

Stepen opasnosti pri izlaganju čovečjeg tela električnoj struji zavisi od četiri faktora:

- od puta kojim struja prolazi, odnosno od organa koji su zahvaćeni strujom,
- od oblika i frekvencije struje,
- od intenziteta struje i
- vremena delovanja struje.

Podnošljive jačine, bez opasnosti, veće su kod jednosmerne struje, nego kod naizmenične.

Prema propisima dozvoljeni *napon dodira* za čoveka je 50V, 50-60Hz. Napon je indirektno opasan za čoveka, jer on uspostavlja struju u čovečjem telu.

Napon dodira se određuje od slučaja do slučaja uzimajući u obzir karakteristike prostorije (suve, vlažne) i način dodira – slučajan dodir i puno obuhvatanje predmeta.

Čovek može doći u opasnost *direktnim* ili *indirektnim dodirom* delova pod naponom.

Razlikujemo sledeće načine zaštite od električnog udara:

a) *od direktnog dodira*:

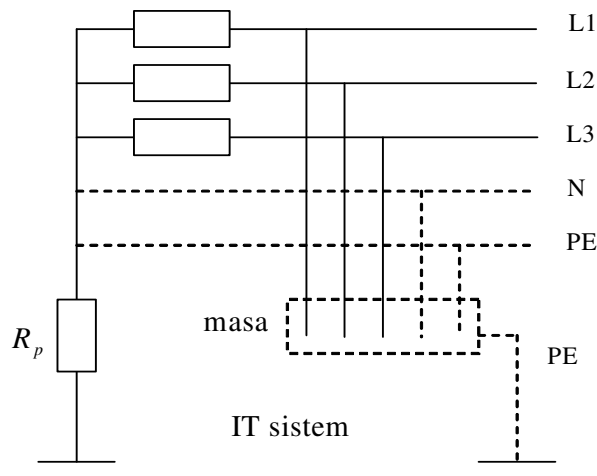
- kompletna zaštita – izolovanje, ograđivanje u kućišta,

- dodatna zaštita – zapreke, stavljanje van dohvata ruke, automatskim isključivanjem uređajima koji deluju na diferencijalnu struju,
- upotrebom sigurnosno malog napona,
- upotrebom malog radnog napona.

b) *od indirektnog dodira:*

- upotrebom sigurnosno malog napona,
- upotrebom malog radnog napona,
- automatskim isključivanjem napajanja,
- izjednačenjem potencijala (*TN* sistem – najviše odgovara staroj zaštiti "nulovanjem", *TT* sistem – najviše odgovara staroj zaštiti "zaštitno uzemljenje", *IT* sistem – najviše odgovara staroj zaštiti "sistem zaštitnog voda" – primenjuje se za mreže bez nultog voda koje su uzemljenje preko velike impedanse),
- dodatnim izjednačenjem potencijala,
- upotrebom aparata i uređaja klase II,
- postavljanjem u izolovane prostorije,
- lokalnim izjednačenjem potencijala,
- električnim odvajanjem (transformator 1:1).

Dobro izvedeno uzemljenje je od presudne važnosti za čitavu zaštitu, bilo da se radi o pogonskom uzemljenju, zaštitnom uzemljenju ili gromobranskom uzemljenju. Uzemljenjem uspostavljamo vezu između nadzemnih metalnih masa i uzemljivača položenih u zemlju, da struje zemljospoja, odnosno atmosferskog elektriciteta, odvedemo u zemlju radi izjednačenja potencijala.



Slika 5-8 Zaštita od indirektnog dodira IT sistemom

6 ELEKTROENERGETSKI PRETVARAČI

Električnu energiju veoma retko srećemo kao korisni oblik energije, tj. energiju u krajnjoj upotrebi, ali je zato veoma često srećemo kao transformisani vid energije, jer predstavlja izvanredno prilagodljivog posrednika.

Pod elektroenergetskim pretvaračima podrazumevamo naprave i uređaje kod kojih se energija jednog oblika pretvara u energiju drugog oblika, pri čemu je barem jedan od oblika električna energija. Elektroenergetske pretvarače delimo na:

1. *elektromehaničke pretvarače (električne mašine);*
2. *pretvarače električne energije:*
 - a) *obrtne,*
 - b) *statičke: transformatore i pretvarače energetske elektronike.*

6.1 Pretvarači električne energije

Obrtni pretvarači električne energije su, zapravo, elektro–mehaničko–elektro pretvarači, tj. električne mašine čija je funkcija pretvaranje jednosmerne u naizmeničnu struju i obrnuto (grupa električni motor-generator ili tzv. jednoarmaturni pretvarač). Danas su obrtni pretvarači gotovo potpuno potisnuti od odgovarajućih pretvarača energetske elektronike, tako da ih susrećemo samo kod starijih pogona velikih snaga.

Iako po definiciji ne spadaju u grupu električnih mašina, transformatori se, zbog sličnosti svoje konstrukcije (magnetnog kola i namotaja) i istog osnovnog principa rada (zakon elektromagnetske indukcije), često proučavaju zajedno sa električnim mašinama.

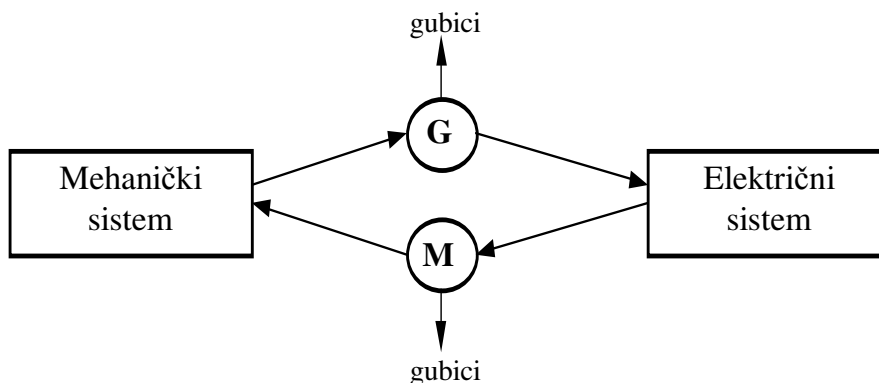
Pretvarače energetske elektronike karakteriše primena elektronskih elemenata (poluprovodničke komponente) za relativno velike snage (u odnosu na klasične elektronske sklopove). Zadatak ovih uređaja je unutrašnje pretvaranje električne energije jednog oblika (karakterisanog naponom, strujom, frekvencijom i brojem faza) u drugi oblik. Zbog svoje izuzetno široke primene, sve manje cene i brzog razvoja ovi uređaji danas zauzimaju značajno mesto u industriji, kao i u mnogim područjima ljudskog života.

6.2 Elektromehaničko pretvaranje energije

Pretvaranje mehaničke energije u električnu i električne u mehaničku nazivamo *elektromehaničkim pretvaranjem energije*. Pretvaranje mehaničke energije u električnu srećemo u fazi proizvodnje električne energije, dok obrnutu transformaciju realizujemo kada imamo potrebu za korisnom mehaničkom energijom. Elektromehaničko pretvaranje energije se ostvaruje preko sprežnog magnetskog i električnog polja koje povezuje jedan mehanički i jedan električni sistem (Slika 6-1).

Sprežno polje predstavlja spremnik (rezervoar) energije u kome se energija može nagomilavati i menjati. Nagomilana energija teži da se oslobodi i da izvrši rad, i to predstavlja osnovni pokretač elektromehaničkog pretvaranja energije. Proces je reverzibilan i nije savršen – praćen je izvesnim gubicima (energijom koja se javlja u obliku koji nije željen). Gubici se obično javljaju u obliku toplotne energije, koja se predaje okolini.

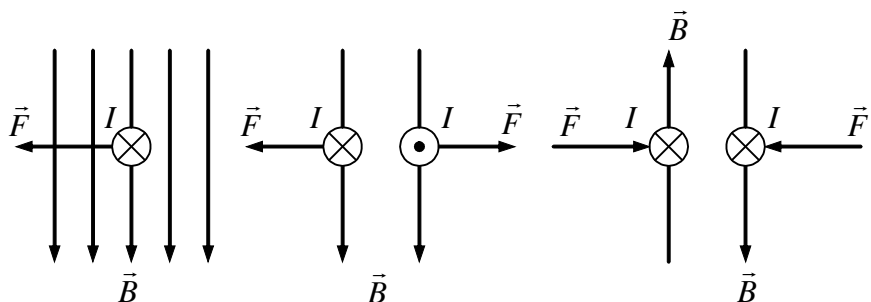
S obzirom na smer toka energije, električne mašine delimo na *električne generatore* (generatore, simbol G) u kojim se mehanička energija pretvara u električnu i *električne motore* (elektromotore, simbol M) u kojima se električna energija pretvara u mehaničku energiju. Danas srećemo elektromotore snaga i preko 50MW, odnosno električne generatore snaga preko 1000MW.



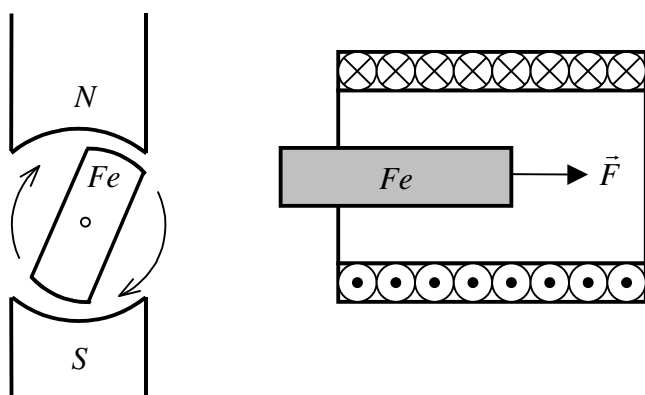
Slika 6-1 Elektromehaničko pretvaranje energije

Najvažnije pojave koje se koriste za elektromehaničko pretvaranje energije su:

- Delovanje sile $\vec{F}$, na provodnik sa strujom I , koji se nalazi u magnetskom polju indukcije $\vec{B}$ (Slika 6-2).
- Delovanje sile na feromagnetski materijal kojim teži da ga dovede u pravac magnetnog polja (Slika 6-3).



Slika 6-2 Delovanje sile na provodnik sa strujom koji se nalazi u magnetskom polju



Slika 6-3 Delovanje sile na feromagnetski materijal

- c) Delovanje sile na ploče opterećenog kondenzatora i na dielektrični materijal u električnom polju.
- d) *Piezoelektrični efekat*. Delovanjem električnih polja izvesni kristali se deformišu u određenim pravcima i obrnuto, kada se kristali deformišu, na njihovim krajevima se pojavljuje električno opterećenje.
- e) *Magnetostrikcija*. Delovanjem magnetnog polja većina feromagnetskih materijala podleže veoma malim deformacijama i obrnuto, ako se feromagnetski materijal podvrgne mehaničkom naprezanju (deformaciji) menjaju se magnetske osobine materijala (magnetostrikcija).

Naprave i uređaji u kojima se ostvaruje elektromehaničko pretvaranje energije posredstvom mehaničkog kretanja nazivamo *elektromehaničkim pretvaračima* ili *električnim mašinama*. Za pretvaranje većih količina energije najvažnija je primena *obrtnih električnih mašina* kod kojih je primenjeno obrtno kretanje i pojave a) i b).

U drugu vrstu naprava za elektromehaničko pretvaranje energije spadaju one koje proizvode linearna ili vibraciona kretanja. Dok se linearne naprave

zasnivaju na primeni bilo koje od pet navedenih pojava (npr. elektromagneti, relei i sl.), naprave koje koriste vibraciona kretanja zasnivaju se na poslednje dve navedene pojave (npr. uređaji za proizvodnju i detekciju mehaničkih i akustičnih vibracija: mikrofoni, sistemi za dobijanje ultrazvučnih vibracija i sl.).

Poslednje tri pojave nisu od praktičnog značaja za energetske pretvaranje. Kod pojave *c*) ograničavajući faktor predstavlja nemogućnosti ostvarivanja dozvoljene gustine energije u elektrostatičkom polju dok je kod pojave *d*) u pitanju je visoka cena kristala.

6.3 Električne mašine

Osnovno delovanje svih električnih mašina svodi se na vezu između mehaničkog kretanja i sila, s jedne strane, i električnih napona i struja, s druge strane.

Sa mehaničkog gledišta, osnovni delovi obrtnih mašina su mirujući deo - *stator* i obrtni (rotirajući) deo - *rotor*. Stator se nalazi u kućištu, koje je oslonjeno o podnožje i prenosi moment na čvrstu okolinu. Rotor je pričvršćen na vratilo (osovinu) koja su obrće u ležajevima.

Sa električnog gledišta osnovni delovi su *magnetno kolo*, *namotaji* i *izolacija*.

Magnetno kolo se sastoji od magnetnog kola statora i rotora, koji mogu biti cilindričnog oblika ili imati istaknute magnetne polove, a osnovna mu je uloga vođenje magnetnog fluksa. Magnetni fluks se zatvara kroz međugvožđe.

Osnovni element namotaja je *navojak*, koji se sastoji iz dva provodnika. Više navojaka čine *navojni deo* (sekciju). Više sekcija povezanih na određeni način da se struje ili *ems* u namotaju sabiraju čine namotaj *induktora* (*pobudni namotaj*) odnosno *indukta*. Primarna funkcija pobudnog namotaja je stvaranje magnetnog polja mašine. Namotaj indukta je onaj u kojem se indukuje elektromotorna sila ili kontra elektromotorna sila rotacije; struje u ovom namotaju tesno su povezane sa proizvedenim obrtnim momentom ili otpornim obrtnim momentom. Konstruktivni obziri (i potreba komutacije kod mašina za jednosmernu struju) određuju smeštaj (lokaciju) namotaja za pojedine vrste mašina.

Izolacija služi sa izolovanje delova pod naponom od uzemljenih delova kao i pojedinih namotaja i delova namotaja međusobno. Sa termičkog i mehaničkog stajališta, izolacija predstavlja najosetljiviji deo električne mašine.

Prema vrsti struje razlikujemo:

- jednosmerne i
- naizmjenične električne mašine.

Prema načinu napajanja *naizmjenične mašine* delimo na:

- jednofazne i
- višefazne,

a prema principu rada i pogonskom ponašanju na:

- *sinhrone*, kod kojih je brzina obrtanja rotora čvrsto vezana za učestanost napajanja (mreže),
- *asinhrona* kod kojih je, da bi funkcionisali, potrebno odstupanje brzine obrtanja rotora u odnosu na sinhronu brzinu obrtnog magnetnog polja i
- *kolektorske*, koji se ređe susreću zbog svoje komplikovanije izvedbe i veće osetljivosti.

Mašine jednosmerne struje delimo prema načinu pobuđivanja, koji određuje i osnovne karakteristike u pogonu, na:

- nezavisne,
- otočne (paralelne) i
- redne (serijske).

7 TRANSFORMATORI

Transformator je statički elektrotehnički aparat koji, pomoću elektromagnetne indukcije, pretvara jedan sistem naizmeničnih struja u jedan ili više sistema naizmeničnih struja iste učestanosti i obično različitih vrednosti struja i napona. Uloga transformatora u elektroenergetskom sistemu je veoma značajna jer on omogućuje ekonomičnu, pouzdanu i bezbednu proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije pri najprikladnijim naponskim nivoima. Dakle, njegovom primenom se, uz veoma male gubitke energije, rešavaju problemi raznih naponskih nivoa i međusobne izolovanosti kola koje se nalaze na različitim naponskim nivoima. Ovde će, pre svega, biti reči o *energetskim transformatorima* (Slika 7-1).



Slika 7-1 Trofazni distributivni transformator

Transformator treba da bude projektovan i izrađen tako da izdrži moguća naprezanja kojima je izložen tokom svog životnog veka. Naprezanja u osnovi možemo da svrstamo u tri glavne grupe: električna, mehanička i toplotna. Kod električnih naprezanja pre svega treba obratiti pažnju na prenapone koji se javljaju kao posledica prekidanja u kolu, atmosferskih pražnjenja, lukova prema zemlji, kratkih spojeva, kao i ispitnih napona. Pojave praćene velikim strujama u odnosu na naznačene (kratki spojevi u mreži, kao i uključenje transformatora u praznom hodu), opasne su sa stanovišta mehaničkih i toplotnih naprezanja (ova naprezanja su proporcionalna sa kvadratom struje). Do povećanih toplotnih naprezanja dolazi i kod preopterećenja transformatora. Takođe treba obratiti pažnju i na buku transformatora.

7.1 Osnovni elementi konstrukcije transformatora

U pogledu konstrukcije, transformator se sastoji iz sledećih osnovnih delova:

- magnetskog kola,
- namotaja,
- izolacije,
- transformatorskog suda,
- pomoćnih delova i pribora.

Magnetsko kolo se gradi od visokokvalitetnih hladnovaljanih orijentisanih transformatorskih limova. Da bi se smanjila struja magnećenja (pobudna struja) teži se uzimanju što kvalitetnijeg lima, sa velikom relativnom permeabilnošću, i primenjuju se odgovarajuća konstrukciona i tehnološka rešenja u izradi magnetskog kola. Radi smanjenja gubitaka usled vihornih (vrtložnih) struja, koriste se međusobno izolovani limovi male debljine (0,30, 0,27 i 0,23mm). Osnovni fizički elementi magnetskog kola su stubovi (jezgra), oko kojih su smešteni namotaji i jarmovi (donji i gornji). Stubovi imaju stepenasti oblik i popunjavaju se paketima limova odgovarajuće širine, kako bi ispuna prostora opisanog kruga bilo što bolja. Kod transformatora velikih snaga, u jezgra se stavljaju kanali (podužni, širine 6mm) i prema potrebi jedan poprečni (širine 10-15mm), kako bi kroz njih moglo da cirkuliše ulje i hladi magnetsko kolo. Magnetsko kolo se priteže odgovarajućim steznim sistemom kako bi se dobila što bolja mehanička kompaktnost.

Namotaji se prave od okruglog, profilnog ili trakastog provodnika od bakra ili aluminijuma, materijala koji imaju mali električni otpor. Namotaj koji se priključuje na napajanje se naziva *primar*, dok se namotaj koji je spojen na prijemnik naziva *sekundar*. Osnovni oblici namotaja prema načinu izrade su: spiralni, slojeviti i presloženi. Gustine struje za namotaje uljnih transformatora su 2-4,5 A/mm².

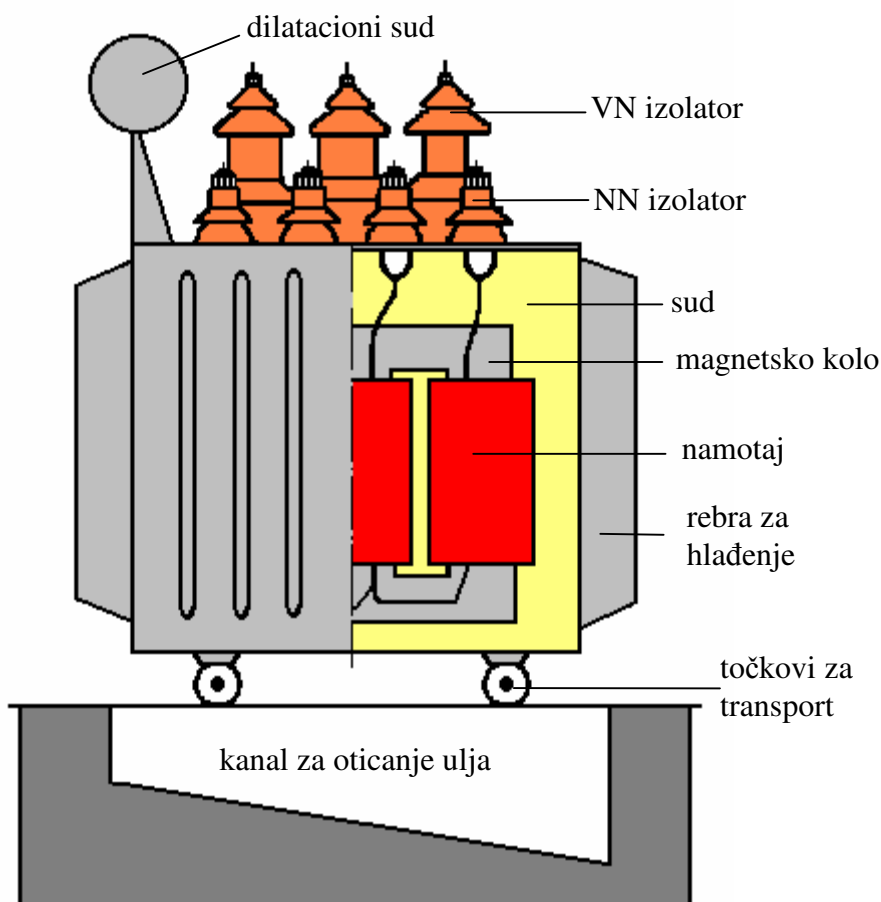
Izolacija predstavlja kombinaciju celuloze (papir, prešpan) i izolacionog ulja u slučaju *uljnih* transformatora, odnosno čvrste izolacije (staklene tkanine impregnirane epoksidnim, silikonskim ili drugim sintetičkim smolama) u kombinaciji sa vazduhom kod *suvih* transformatora (do 36kV). Izolaciono (transformatorsko) ulje, osim poboljšanja izolacionih svojstava, obezbeđuje i hlađenje transformatora, jer zbog svog velikog specifičnog toplotnog kapaciteta mnogo bolje odvodi toplotu sa magnetskog kola i namotaja na sud i rashladni sistem.

Međutim, treba imati u vidu da je ulje zapaljivo i da lako gori. Izolacija provodnika je najčešće lak ili papir.

Transformatorski sud postoji kod uljnih transformatora i izrađuje se od kvalitetnog čelika sa ojačanjima. Oblik suda zavisi od načina hlađenja, pa bočne strane mogu biti glatke, valovite ili sa cevima za hlađenje.

Pomoćni delovi i pribor transformatora: natpisna pločica, provodni izolatori za povezivanje sa mrežom, dilatacioni sud (konzervator), regulator napona,

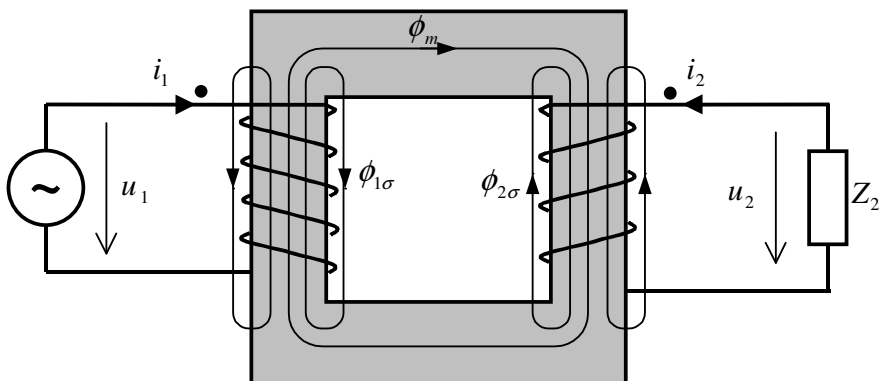
priključak za uzemljenje, džep termometra pokazivač nivoa ulja, slavina za ispuštanje ulja, itd.



Slika 7-2 Osnovni delovi transformatora

7.2 Princip rada, osnovne jednačine

Na primarni namotaj transformatora dovodi se električna energija u obliku naizmjeničnog napona, koja u magnetno spregnutom sekundarnom namotaju indukuje odgovarajuću naizmjeničnu elektromotornu silu, odnosno struju, koja se koristi za napajanje prijemnika, prikazanog impedansom Z_2 (Slika 7-3). Dakle, primarni namotaj se ponaša kao prijemnik, dok se sekundarni namotaj ponaša kao izvor električne energije.



Slika 7-3 Princip rada transformatora

Fluksni obuhvati (ukupni magnetni fluksevi) primarnog i sekundarnog namotaja, ψ_1 i ψ_2 , su:

$$\psi_1 = N_1 \phi_1 = N_1 \phi_{1\sigma} + N_1 \phi_m = L_{1\sigma} i_1 + N_1 \phi_m, \quad (7-1)$$

$$\psi_2 = N_2 \phi_2 = N_{2\sigma} + N_2 \phi_m = L_{2\sigma} i_2 + N_2 \phi_m, \quad (7-2)$$

gde je:

- N_1 i N_2 broj navojaka primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno,
- ϕ_1 i ϕ_2 ukupni magnetni fluks po navojku primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno,
- $\phi_{1\sigma}$ i $\phi_{2\sigma}$ rasuti magnetni fluks po navojku primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno.
- ϕ_m zajednički magnetni fluks po navojku,
- $L_{1\sigma}$ i $L_{2\sigma}$ rasute induktivnosti primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno.

Osnovne jednačine naponske ravnoteže:

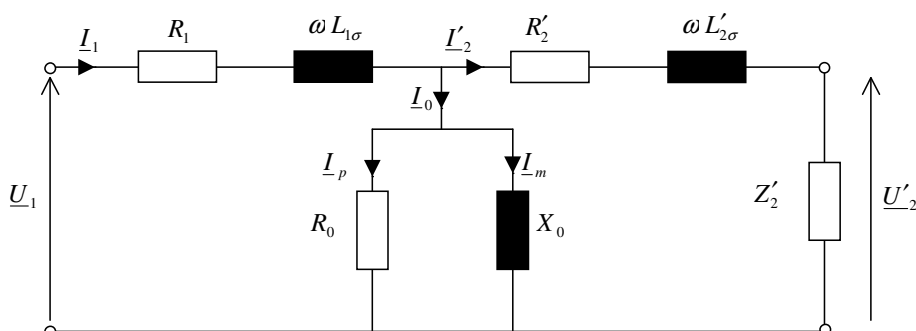
$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = R_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt}, \\ u_2 &= R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} = R_2 i_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt}, \end{aligned} \quad (7-3)$$

gde je:

- u_1 napon na koji je priključen primarni namotaj,
- u_2 napon na priključcima sekundarnog namotaja,
- R_1 i R_2 aktivne otpornosti primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno.

7.3 Ekvivalentna šema transformatora

Ekvivalentna šema transformatora predstavlja pojednostavljeni model pomoću kojeg možemo, na posredan način, bez stvarnog opterećenja, da predvidimo ponašanje transformatora u raznim uslovima rada. Parametre ekvivalentne šeme određujemo na jednostavan način iz standardnih ispitivanja transformatora u ogledu praznog hoda i kratkog spoja. Sve veličine i parametri ekvivalentne šeme su fazne vrednosti, a veličine i parametri sekundara svedeni su na primar (preračunati sa kvadratom odnosa broja navojaka na primar), tako da je npr. $R'_2 = (N_1/N_2)^2 R_2$.



Slika 7-4 Ekvivalentna šema transformatora

Veličine i parametri ekvivalente šeme su:

- I_0 struja praznog hoda,
- I_p aktivna komponenta struje praznog hoda,
- I_m reaktivna komponenta struje praznog hoda (struja magnećenja),
- R_0 ekvivalentna otpornost u praznom hodu (fiktivna otpornost pomoću koje uzimamo u obzir gubitke u praznom hodu),
- X_0 reaktansa magnećenja.

7.4 Gubici i stepen iskorišćenja transformatora

Pri procesu preobražaja električne energije u transformatoru jedan deo energije se pretvara u toplotu, što sa stanovišta korisnika predstavlja gubitke. U odnosu na gubitke usled magnećenja ("gubici u gvožđu"), gubici usled opterećenja ("gubici u bakru") su značajniji po veličini i posledicama, zato što izolacija provodnika namotaja predstavlja najosetljiviji deo transformatora s obzirom na toplotna naprezanja. Toplota proizvedena gubicima zagreva delove transformatora (magnetsko kolo, namotaje, izolaciju, sud) i izaziva porast njihove temperature u odnosu na okolnu sredinu (ambijent). Porast temperature, u opštem slučaju, zavisi od veličine i vremenske funkcije opterećenja (trajni rad, ciklični rad i rad u vanrednim uslovima) i načina i efikasnosti hlađenja. Sa porastom naznačene snage transformatora, problem zagrevanja postaje sve

izraženiji, jer su gubici približno srazmerni sa zapreminom, a odvođenje toplote sa površinom.

U cilju određivanja gubitaka i drugih parametara transformatora, sprovode se *ogled praznog hoda* i *ogled kratkog spoja*.

Ogled praznog hoda se prvenstveno sprovodi u cilju određivanja gubitaka u praznom hodu, P_0 , što približno odgovara *gubicima u "gvožđu"*, i *struje praznog hoda*. Relativna vrednost struje praznog hoda je oko 1-3% u odnosu na naznačenu struju (kod transformatora velikih snaga i manje od 1%). Budući da su parametri poprečne grane obično mnogo veći od parametara uzdužne grane ekvivalentne šeme, prilikom analize ovog ogleda zanemaruju se parametri uzdužne grane. Na osnovu rezultata ogleda, mogu se odrediti veličine i parametri poprečne grane ekvivalentne šeme (I_p , I_m , R_0 i X_0).

Sam ogled se provodi tako da na jedan od namotaja (obično nižeg napona) priključimo naznačeni napon, a priključke drugog namotaja ostavimo otvorenim.

Ogled kratkog spoja se prvenstveno sprovodi u cilju određivanja gubitaka usled opterećenja, P_k , što približno odgovara *gubicima u "bakru"*, i *napona kratkog spoja*. Na osnovu rezultata ogleda mogu se odrediti parametri uzdužne grane ekvivalentne šeme, pri čemu se zanemaruju parametri poprečne grane. Sam ogled se sprovodi tako da jedan od namotaja (obično višeg napona), kod kratko spojenih priključaka drugog namotaja, priključimo na napon koji postepeno povećavamo od nule do one vrednosti pri kojoj se uspostavlja naznačena vrednost struje u namotajima. Ovu vrednost napona nazivamo *naponom kratkog spoja*, i označavamo sa U_k . Napon kratkog spoja služi za određivanje *pada (promene) napona* u transformatoru usled opterećenja (pomoću tzv. *Kapovog trougla*), *veličine stvarne struje kratkog spoja*, kao i za ispitivanje mogućnosti *paralelnog rada* dvaju ili više transformatora. Pad napona predstavlja algebarsku razliku između napona primarnog namotaja U_1 i svedenog napona sekundarnog namotaja U_2' . Relativna vrednost napona kratkog spoja, $u_k = U_k/U_n$, kod distributivnih transformatora iznosi 4-6% u odnosu na naznačeni napon.

Na osnovu poznavanja gubitaka praznog hoda i gubitaka usled opterećenja određuje se stepen iskorišćenja transformatora:

$$\eta_n = \frac{\text{izlazna snaga}}{\text{ulazna snaga}} = \frac{P_{2n}}{P_{1n}} = \frac{P_{2n}}{P_{2n} + P_{gn}} = \frac{S_n \cos \varphi}{S_n \cos \varphi + P_{0n} + P_{Tn}}, \quad (7-4)$$

gde je S prividna snaga sekundara transformatora, indeks n označava naznačenu vrednost.

Kod proizvoljnog opterećenja, izraženog pomoću sačinioa β , gde je $\beta = I_2/I_{2n}$, stepen iskorišćenja iznosi:

$$\eta(\beta) = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + P_{0n} + \beta^2 P_{Tn}}. \quad (7-5)$$

7.5 Trofazni transformatori

Kod trofaznih transformatora moguća su, u osnovi, dva tehnička rešenja – grupa od tri jednofazna transformatora sa zasebnim magnetskim kolima ili jedan trofazni transformator sa zajedničkim magnetskim kolom. Grupa jednofaznih transformatora se obično primenjuje za velike jedinice u Americi (*američka transformacija*) i ima prednost vezanu za transport, održavanje i obezbeđenje rezerve, jer su kvarovi transformatora uobičajeno na jednoj fazi, ali je u osnovi skuplja (oko 15%) jer se ne koristi činjenica da je zbir trenutnih vrednosti uravnoteženih fluksova u sve tri faze jednak nuli i zahteva više prostora. Trofazni transformatori sa zajedničkim magnetskim kolom (na primer, Slika 7-5) se često primenjuju u Evropi (*evropska transformacija*).

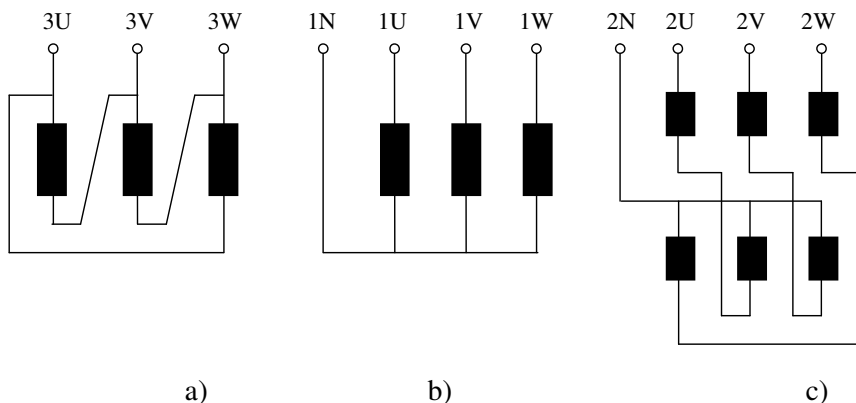


Slika 7-5 Trofazni suvi transformator

Namotaji trofaznih transformatora sprežu se u:

- trougao,
- zvezdu,
- slomljenu zvezdu (cik-cak sprega).

Prema važećim standardima priključne stezaljke, odnosno provodni izolatori označavaju se sa slovnim oznakama U, V, W, N (ranije A, B, C, N). Ispred slovne oznake za pojedinu fazu se stavljaju broježne oznake za označavanje visine napona namotaja: broj "1" za visokonaponski namotaj (VN), "2" za niskonaponski namotaj (NN) kod dvonamotajnih transformatora, odnosno srednjenaponski namotaj (SN) kod tronamotajnih transformatora i "3" za NN namotaj kod tronamotajnih transformatora. Krajevi namotaja označavaju se brojnim oznakama "1" za početak i "2" za kraj (svršetak), i to posle slovne oznake, npr. 1U2 za svršetak VN namotaja prve faze. Uz krajeve, potrebno je definisati i smer motanja namotaja oko stuba ("desni" ili "levi").



Slika 7-6 Primeri trofaznih namotaja

a) NN namotaj spojen u trougao, b) VN namotaj spojen u zvezdu i c) slomljenu zvezdu,

7.5.1 Glavne karakteristike pojedinih sprega trofaznih transformatora

Glavne karakteristike pojedinih sprega trofaznih transformatora su:

- a) *trougao* (oznaka D za VN, odnosno d za NN) – budući da su međufazni i fazni naponi jednaki, ova sprega, u odnosu na spregu zvezda, zahteva veći broj navojaka manjeg preseka (radi $\sqrt{3}$ puta manje struje), uz veće učešće izolacije. Ovo ima za posledicu veću količinu bakra kod visokonaponskih transformatora.
- b) *zvezda* (oznaka Y za VN, odnosno y za NN) – fazni napon je $\sqrt{3}$ puta manji od međufaznog (priključenog) napona. Ako je namotaj sekundarni, postoji mogućnost primene dva napona, međufaznog, između krajeva priključaka i faznog napona između jedne faze i neutralne tačke.
- c) *slomljena zvezda* (oznaka z) – ova sprega se isključivo primenjuje za NN namotaje. Namotaj pojedine faze sačinjavaju dva redno povezana polunamotaja koji nisu na istom stubu. U odnosu na spregu zvezda, ovaj namotaj zahteva 15,5% više bakra, međutim lako podnosi nesimetrično opterećenje, pa se, iako je skuplji, primenjuje kod distributivnih transformatora manjih snaga.

Kada je izveden i priključak na zvezdište ili neutralnu tačku, oznaci sprega dodaje se i slovo N, odnosno n.

Sprega Yyn primenjuje se kod distributivnih transformatora manje snage. Prednosti upotrebe ove sprega su manja potrošnja bakra i izolacije u odnosu na z-spregu (sa gledišta proizvođača), odnosno mogućnost raspolaganja sa dva naponska nivoa – linijski napon za elektromotore, a fazni za osvetljenje i jednofazne potrošače (sa gledišta korisnika). Nedostatak ove sprega je znatno odstupanje od normalnih vrednosti kada je opterećenje nesimetrično, što je

naročito izraženo kada se primenjuje grupa od tri jednofazna transformatora. Zato se ova sprega isključivo koristi kod trofaznog trostubnog transformatora.

Sprega Yd se takođe upotrebljava u distributivnim mrežama, kada su snage i naponi veći nego u prethodnom slučaju. Ovakvi transformatori se uglavnom koriste za napajanje trofaznih potrošača.

Sprega Dyn se koristi često, kod elektrana (za povišenje napona), odnosno kod prijemnika (za sniženje napona), u širokom dijapazonu snaga.

Sprega Yzn ima sve dobre osobine sprege Yyn u pogledu raspoloživosti linijskih i faznih napona, a uticaj nesimetrije je zanemarljivo mali. To je plaćeno oko 15% većim utroškom bakra za namotaje u odnosu na spregu zvezda. Ova sprega je posebno povoljna za napajanje tiristorskih i diodnih ispravljača, jer doprinosi redukciji viših harmonika koji se iz ispravljača prenose u mrežu na koju je priključen primar i koji izazivaju izobličenje napona.

Uz sprege, potrebno je definisati *grupu sprege (satni broj)* tj. *fazni stav (pomeraj)* između primarnih i sekundarnih napona istoimenih faza. Termin satni broj je uveden zbog analogije sa satom (fazori se obeležavaju kao kazaljke sata), dok fazni stav o kome je reč iznosi $n \cdot 30^\circ$, gde je n ceo broj od 0 do 11. Obično se fazor primarnog napona prve faze (U, stara oznaka A) stavlja u položaj 0 (12) sati, bez obzira na njegovu spregu i fizičko postojanje. Kod nas su standardizovane sledeće sprege: grupa "0" – primenjuju se sprege Yy0, grupa "5" – primenjuju se sprege Yd5, Dy5 i Yz5.

7.5.2 Paralelni rad transformatora

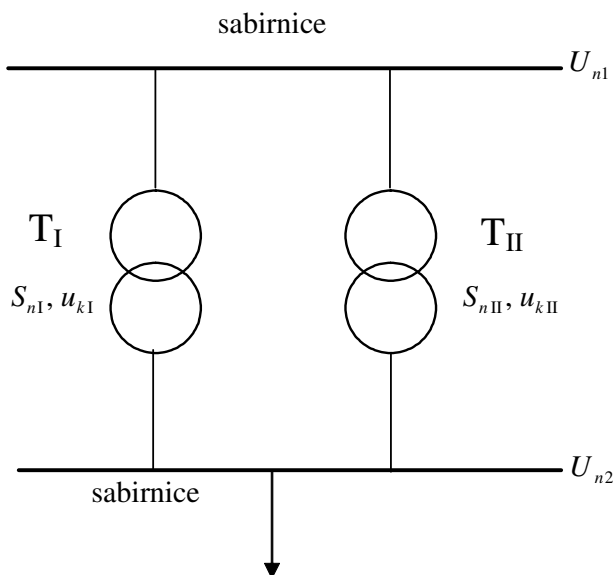
Paralelni rad dvaju ili više transformatora se ostvaruje spajanjem istoimenih priključaka visokonaponske strane svih transformatora na odgovarajuće faze visokonaponske mreže i spajanjem istoimenih priključaka niskonaponske strane svih transformatora na odgovarajuće faze niskonaponske mreže. Paralelni rad se može vršiti preko sabirnica ili preko mreže. Iako je u osnovi ovo rešenje skuplje nego izbor jednog transformatora veće snage, njemu se pribegava u slučajevima podmirivanja potrebe dodatnih prijemnika koji ranije nisu bili predviđeni, podmirjenja povremenih dodatnih opterećenja, etapne izgradnje trafostanice ili potrebe za većom pogonskom sigurnošću koja se ogleda u držanju rezervnog transformatora za slučaj kvara jednog od transformatora.

Uslovi koje transformatori moraju ispuniti, da bi radili u paralelnom radu, su sledeći:

- *primarni namotaji moraju da budu predviđeni za isti napon i odnosi transformacije moraju biti jednaki*, da bi sekundarni naponi u praznom hodu bili jednaki. Pod odnosom transformacije, prema standardu, podrazumevamo odnos naznačenih napona prikazan na natpisnoj pločici.
- *Da bi sekundarni naponi bili u fazi*, transformatori moraju pripadati *istoj grupi sprege*.

- Da bi izbegli struje izjednačenja (uravnoteženja), koje izazivaju preopterećenje jednog, odnosno podopterećenje drugog transformatora, *relativni naponi kratkog spoja moraju biti jednaki* – dozvoljava se tolerancija $\pm 10\%$ u odnosu na aritmetičku srednju vrednost relativnih napona kratkog spoja svih transformatora. S ovim u vezi je i *preporuka* da naznačene snage transformatora treba da budu približno jednake (nema smisla povezivati u paralelni rad transformatore koji imaju *odnose naznačenih snaga* veće od 1:3).

Osnovno pravilo vezano za paralelni rad je da *ne sme doći do trajnog preopterećenja* jednog od transformatora.



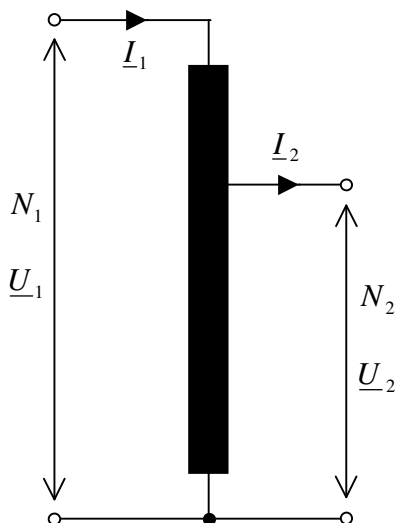
Slika 7-7 Paralelni rad dva transformatora

7.6 Specijalni transformatori

Pod *standardnim* (najznačajnijim i najčešćim) transformatorom do sada smo podrazumevali energetski, uljni, po broju faza trofazni ili jednofazni, po broju faznih namotaja dvonamotajni (i to razdvojeni), po vrsti napona sinusnog oblika učestanosti 50Hz. No, postoji veliki skup drugih *specijalnih* (nestandardnih) transformatora, koji se, barem po nekoj osobini, razlikuju od standardnih. Ovde ćemo nabrojati i ukratko opisati samo najznačajnije:

- *tronamotajni transformatori*. Ovi transformatori imaju, osim primara i sekundara, još jedan namotaj za prenos snage. Moguće kombinacije su sa jednim primarom i dva sekundara, odnosno dva primara i jednim sekundrom. Upotrebljavaju se u razvodnim postrojenjima sa tri različita naponska nivoa.
- *autotransformatori*. Oni imaju samo jedan namotaj – primar i sekundar su fizički (galvanski) sjedinjeni, ali postoji visokonaponska i

niskonaponska strana. Ovakva izvedba je, u odnosu na dvonamotajne iste snage, ekonomičnija jer ima manju masu aktivnog dela (magnetskog kola i namotaja), uz veći stepen iskorišćenja; međutim manje je pouzdana zbog postojanja galvanske veze između (delova) namotaja, a rektansa rasipanja je mnogo manja. Trofazni autotransformatori se često prave za velike snage.



Slika 7-8 Autotransformator

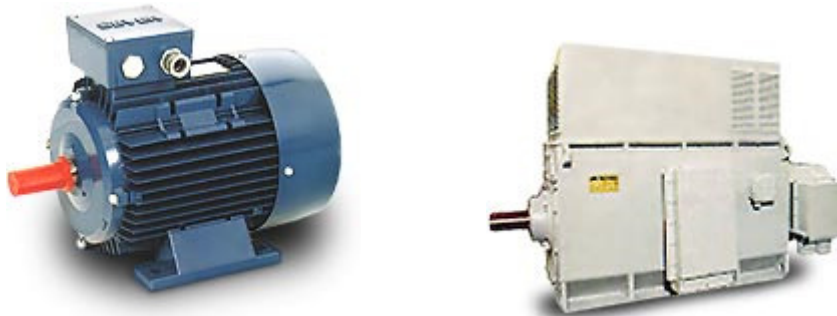
- *transformatori sa izvodima (regulacioni transformatori)* se koriste tamo gde je potrebno da se odnos preobražaja menja: u elektrolučnim pećima radi prilagođenja napona proizvodnom ciklusu, odnosno u elektroenergetskim sistemima radi održavanja napona u propisanim granicama jer se padovi napona znatno menjaju sa opterećenjem. To se tehnički sprovodi promenom "aktivnog" broja navojaka jednog namotaja. Biranje izvoda se vrši u beznaponskom stanju ili pod opterećenjem, što je složenije jer se struja ne sme prekidati, niti se dva susedna navojka ili grupe navojaka smeju direktno spojiti, jer bi u tom slučaju njima tekla struja kratkog spoja.
- *merni transformatori* su uređaji čije su osnovne funkcije svođenje velikih struja (*strujni*) i napona (*naponski*) na one struje i napone koji se mogu meriti standardnom mernom opremom i povećanje sigurnosti rada putem galvanskog odvajanja od kola sa velikim strujama i naponima. Oni moraju verno da prenose, sa što manjom greškom, amplitudu i fazni pomeraj primarnih struja, odnosno napona.
- pretvarači za pretvaranje broja faza (3 u 2, 6, 12),
- *transformatori za energetske pretvarače* – sa nesinusoidalnim naponima i strujama,

- *suvi transformatori* (Slika 7-5) – porast potrošnje električne energije i ograničavanje građevinskog prostora za smještaj trafo stanice, nametnuli su zahtev da se transformator umesto u posebnim i udaljenim trafo stanicama ugrađuje u samim centrima potrošnje, kao što su: veliki stambeni, poslovni, sportski, industrijski i drugi objekti. U ovakvim objektima postavljaju se veoma strogi zahtevi za nezapaljivost transformatora, smanjenje smještajnog prostora, nižu buku, jednostavnu i jeftinu montažu i održavanje i zaštitu prirodne sredine. Radikalan razvoj izolacionih materijala u visokim termičkim klasama (nomex, delmat, vitroplast, teflon...), kao i izolacionih lakova za impregnaciju namotaja, omogućio je postizanje viših temperatura namotaja nego kod uljnih (viša klasa izolacije). Međutim, uz iste parametre (snaga, naponi), obično su nekoliko puta skuplji nego uljni. Veliku pažnju treba posvetiti tehnologiji izrade namotaja.

Kao posebnu vrstu spomenućemo transformatore koji se upotrebljavaju u *uređajima za zavarivanje*. Njegova osnovna uloga je da smanji napon mreže (380V, 220V), na napon od 50V, koji je dovoljan za paljenje luka, a bezopasan za rukovaoca. Zbog neprestanih kratkih spojeva koje stvaraju kapljice istopljenog metala elektrode, aparati za zavarivanje mogu da imaju poseban izvor struje, obrtnu mašinu ili specijalni transformator. Dodatno, kako ne bi došlo do trenutnog topljenja elektrode, struja kratkog spoja aparata za zavarivanje mora biti ograničena na najviše dva puta veću vrednost od naznačene. Da bi se to postiglo, transformator mora imati veliko rasipanje (relativni napon kratkog spoja oko 80%), ili se transformator izrađuje sa normalnim rasipanjem, a na red sa njim se stavlja navoj velike induktivnosti ili, ponekad, otpornost velikog omskog otpora.

8 ASINHRONE MAŠINE

Asinhrona mašina se u primeni najčešće susreće kao motor, i to trofazni. Tipični je predstavnik električne mašine male snage koja se obično pravi u velikim serijama. Prednosti asinhronih mašina, u odnosu na ostale vrste električnih mašina, su prvenstveno manja cena, jednostavnost konstrukcije, manji momenat inercije, robusnost, pouzdanost i sigurnost u radu, lako održavanje, dok su nedostaci vezani uglavnom za uslove pokretanja i mogućnost regulisanja brzine obrtanja u širokim granicama. Primena mikroprocesora i energetske elektronike omogućila je ekonomično upravljanje motorima za naizmjeničnu struju i time konkurentnost i u području pogona sa promenljivom brzinom.



Slika 8-1 a) niskonaponski motor b) visokonaponski motor

Pre nego što se detaljnije upoznamo sa radom asinhronne mašine, biće dat osnovni opis namotaja mašina za naizmjeničnu struju.

8.1 Namotaji mašina za naizmjeničnu struju

Električne mašine za naizmjeničnu struju obično imaju dva namotaja, induktor i indukt (Tabela 8-1).

Induktor (pobuda, primar u analogiji sa transformatorom) – namotaj kroz koji prolazi električna struja i stvara magnetsko polje koje magneti čitavo magnetsko kolo mašine.

Indukt (sekundar u analogiji sa transformatorom) – namotaj u kome se pod uticajem promena magnetskog fluksa induktora indukuju elektromotorne sile (ems), a ako je električno kolo namotaja zatvoreno, i struje.

Namotaji mogu biti namotani na istaknute polove ili smešteni u žlebove koji su aksijalno postavljeni po obimu induktora ili indukta. Namotaji za naizmjeničnu struju su uvek raspoređeni u žlebove.

Tabela 8-1 Namotaji mašina za naizmjeničnu struju

Mašina	<i>Induktor</i> (smeštaj, oblik struje)	<i>Indukt</i> (smeštaj, oblik struje)
<i>asinhrona</i>	stator, naizmjenični	rotor, naizmjenični
<i>sinhrona</i>	rotor, jednosmerni	stator, naizmjenični

Za predstavljanje namotaja upotrebljavaju se razvijene i kružne šeme. Razvijena šema se dobija kada se cilindrična površina statora i rotora, gledano sa strane žlebova, preseče po jednoj izvodnici i razvije u jednu ravan. Kružne šeme prikazuju ili izgled namotaja statora ili rotora sa bočne strane, ili njihov radijalni presek.

Standardne oznake krajeva namotaja trofaznih naizmjeničnih mašina su:

Tabela 8-2 Oznake krajeva namotaja trofaznih naizmjeničnih mašina

namotaj	nova oznaka	stara oznaka
statorski	U1, U2	U, X
	V1, V2	V, Y
	W1, W2	W, Z
rotorski asinhrona mašina	K1, K2	u, x
	L1, L2	v, y
	M1, M2	w, z
rotorski (pobudni) sinhrona mašina	P1, P2	I, K

Namotaj pobude (induktora) je smešten u otvorene ili poluzatvorene žlebove statora. Namotaj indukta je smešten na rotoru. S obzirom na način izvođenja namotaja rotora (indukta), razlikujemo dva osnovna tipa asinhronih mašina:

- sa namotanim rotorom (klizno-kolutne) i
- kratkospojenim rotorom (kavezne).

Asinhrona mašina se u primeni najčešće sreće kao trofazni motor, pa će zato prvo biti reči o trofaznim motorima sa namotanim i kratkospojenim rotorom.

8.2 Trofazni motor sa namotanim rotorom

Namotaj statora je trofazan, kao kod sinhronih motora. Namotaj rotora je takođe trofazan (motani), kod mašina manjih snaga je spregnut u zvezdu, dok je kod mašina većih snaga, da bi se smanjio napon u stanju mirovanja, spegnut u

trougao, a slobodni krajevi su mu spojeni na tri metalna klizna koluta (prstena), izolovana međusobno i od vratila. Po tri klizna koluta (za svaku fazu po jedan) klize dirke (četkice) koje su fiksirane za stator i čiji su priključci izvedeni na stator. Na ovaj način je moguć električni pristup rotorskom namotaju, odnosno dovodenje i odvođenje električne energije. U svrhu boljeg pokretanja ili regulisanja brzine obrtanja, rotorskom kolu se dodaje odgovarajući trofazni rotorski otpornik. Uloga kao i dimenzionisanje rotorskih otpornika može biti dvojaka – oni mogu da služe za pokretanje (startovanje, puštanje u rad), odnosno regulisanje brzine obrtanja. Ako služe samo za pokretanje, da bi se smanjilo habanje dirki kao i gubici usled trenja dirki o klizne prstenove, većina motora je snabdevena naročitim uređajem koji po puštanju motora u rad podiže dirke i klizne prstenove dovodi u kratki spoj. Motor tada radi kao asinhrona mašina sa kratkospojenim rotorom.

Asinhrona mašine sa namotanim rotorom, u odnosu na one sa kratkospojenim rotorom, imaju komplikovaniju izvedbu, skuplje su, imaju manju pouzdanost u radu, podložnije su kvarovima a za pokretanje im je ponekad potreban dodatni uređaj u vidu otpornika za puštanje u rad. Osnovna prednost im je vezana za bolje karakteristike pri puštanju u rad, što je naročito važno kod pogona sa teškim uslovima pokretanja kada se zahtevaju veliki polazni momenti.

8.3 Trofazni motor sa kratkospojenim rotorom

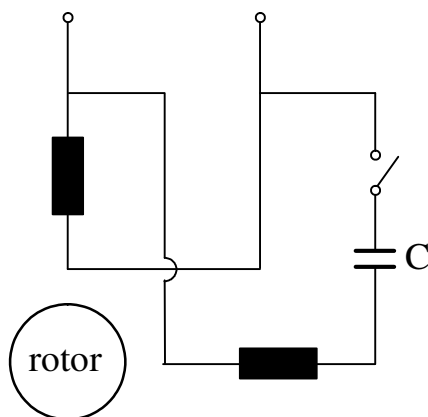
Namotaj statora se, u principu, ne razlikuje od namotaja statora trofaznih asinhronih mašina sa namotanim rotorom. Međutim, namotaj rotora je značajno različit – podseća na kavez; kod motora manjih i srednjih snaga izliven je od aluminijuma, a kod motora većih snaga izrađen je od neizolovanih bakrenih štapnih provodnika, koji se na bočnim stranama kratko spajaju sa po jednim prstenom. U oba slučaja kratkospojeni rotor nema mogućnost spoljnog električnog pristupa, vrlo je robustan i može da izdrži visoka mehanička i termička naprezanja. Ovako formiran namotaj u suštini predstavlja n -fazni namotaj, gde je n broj štapnih provodnika. U analizama se ovaj namotaj ekvivalentira trofaznim.

Osnovni problem vezan za primenu ove vrste asinhronih mašina su loše polazne karakteristike (karakteristike pri puštanju u rad).

8.4 Jednofazni asinhroni motor

Jednofazni asinhroni motori se primenjuju u jednofaznim mrežama, što je veoma značajno s obzirom na činjenicu da trofazna mreža, pogotovo u udaljenim područjima, ne mora biti na raspolaganju. Izrađuju se za male snage, obično do 0,5kW, jer je to ekonomičnije rešenje u odnosu na izgradnju trofaznih asinhronih motora iste snage. Osnovni nedostaci, u odnosu na trofazne motore, su nedostatak polaznog momenta, manja snaga za isto magnetno kolo, lošiji faktor snage i promenljiva snaga i momenat.

Namotaj rotora je kavezni. Namotaj statora se sastoji iz dva dela – glavne faze smeštene u 2/3 ukupnog broja žlebova i pomoćne faze smeštene u preostale 1/3 žlebova, koja je u odnosu na glavnu fazu prostorno pomerena za 90° . Pošto je za stvaranje obrtnog magnetskog polja, pored prostornog pomeraja, potreban i vremenski pomeraj struja, obično se na red sa pomoćnom fazom priključuje kondenzator (Slika 8-2). Pomoćna faza može da bude uključena samo za vreme zaletanja, kada motor radi kao dvofazni, ili trajno, pri čemu se u prvom slučaju primenjuje zaletni kondenzator, dok se u drugom slučaju primenjuje pogonski kondenzator, ili opciono odvojeni pogonski i zaletni kondenzator.



Slika 8-2 Jednofazni asinhroni motor sa zaletnim kondenzatorom

8.5 Asinhroni generator

Generatorski režim rada asinhronne mašine nastupa kada se rotor mašine obrće stranom pogonskom mašinom u smeru obrtanja magnetskog polja brzinom većom od sinhronne. U ovom režimu rada generator predaje aktivnu snagu mreži, međutim zbog potrebe za snabdevanjem reaktivnom snagom za stvaranje magnetskog polja pobude, asinhroni generator ne može da radi sam na sopstvenu mrežu, već samo paralelno bar sa jednim sinhronim generatorom. Naznačeno klizanje generatora je otprilike isto kao naznačeno klizanje motora, ali ima negativan predznak. U odnosu na sinhronne generatore, osnovni nedostatak asinhronih generatora je potreba za reaktivnom energijom, odnosno potreba za barem jednim sinhronim generatorom, dok su prednosti vezane za jeftiniju i jednostavniju opremu, što dolazi do izražaja kod manjih snaga. Naime, kod asinhronih generatora nije potrebna aparatura za sinhronizaciju, pogonska mašina ne zahteva skupi regulator brzine obrtanja, već samo uređaj za njeno ograničenje, a nije potreban ni automatski regulator napona. Asinhroni generatori nisu naišli na neku širu upotrebu, i danas ih susrećemo kao pomoćne generatore manjih snaga.



Slika 8-3 Asinhroni generator

8.6 Osnovni princip rada

Posmatrajmo asinhronu mašinu sa trofaznim namotajem na statoru i ekvivalentnim trofaznim kratkospojenim namotajem na rotoru. Neka je namotaj statora priključen na sistem naizmjeničnih trofaznih napona. U namotaju statora javlja se kontra elektromotorna sila $\underline{E}_1$ koja drži ravnotežu priključenom naponu statora $\underline{U}_1$ i čiji se modul razlikuje od napona za pad napona na omskoj otpornosti i reaktansi rasipanja (što iznosi nekoliko procenata). Kroz namotaj statora protiče naizmjenične trofazne struje koje stvaraju *Teslino obrtno magnetno polje*. Obrtno polje rotira u zazoru tzv. sinhronom brzinom, n_s :

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad (8-1)$$

gde je f učestanost (frekvencija) mreže, a p broj pari polova.

Pri tome obrtno polje preseca provodnike statora i rotora i u njima indukuje odgovarajuće *elektromotorne sile* (*ems*). Pošto je električno kolo rotora zatvoreno, usled ove ems se u provodnicima namotaja rotora stvara struja, I_2 , čija je aktivna komponenta istog smera kao i ems. Pošto se provodnik sa strujom nalazi u magnetnom polju indukcije $\vec{B}$ na njega će delovati elektromagnetna sila:

$$\vec{F} = I_2 (\vec{l} \times \vec{B}), \quad (8-2)$$

Ova sila obrće rotor u smeru obrtnog magnetog polja. To se dešava sa svim provodnicima po obimu rotora, a zbir svih proizvoda sile i poluprečnika predstavlja obrtni momenat elektromagnetnih sila motora. Obrtni momenat motora je proporcionalan proizvodu struje rotora, fluksa i ugla između njih, φ_2 :

$$M = k I_2 \Phi \cos \varphi_2 \quad (8-3)$$

Prema tome, kada se stator asinhronne mašine priključi na mrežu, obrtni momenat motora obrće rotor u smeru obrtanja obrtnog polja. Pri tome su struje u rotoru izazvane elektromagnetskom indukcijom. Prenos energije sa statora na rotor vrši

se isključivo elektromagnetskom indukcijom, pa ove mašine često nazivamo *indukcionim mašinama*.

Uslov za obrtanje rotora je različita brzina obrtnog magnetnog polja, n_s , i brzine obrtanja rotora, n , odnosno postojanje relativnog kretanja između obrtnog magnetnog polja i rotora, jer jedino tada se pri presecanju provodnika rotora od strane obrtnog magnetnog polja može indukovati ems u rotoru, odnosno stvoriti struju u namotaju rotora.

Relativnim klizanjem s , nazivamo veličinu koja je određena sledećim izrazom:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (8-4)$$

čija se vrednost pri naznačenom opterećenju kreće kod motora manjih snaga od 3 do 8%, a kod motora većih snaga od 1 do 3%. Učestanost električnih i magnetnih veličina rotora, f_2 , dobija se kada se primarna učestanost (učestanost mreže) pomnoži sa klizanjem s ($f_2 = sf_1$).

Samo u trenutku puštanja u rad ili kad rotor usled preopterećenja stane (kratki spoj), učestanost u rotoru je jednaka statorskoj učestanosti, odnosno klizanje je jednako jedinici. Označimo indukovanu elektromotornu silu rotora u mirovanju sa E_{20} . Induktivni otpor rotora se menja sa učetanošću:

$$X_{2\sigma,s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma} = s X_{2\sigma}, \quad (8-5)$$

gde je $X_{2\sigma}$ induktivni otpor rotora u mirovanju.

Za struju u rotoru imamo:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma,s}^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{2\sigma})^2}}. \quad (8-6)$$

Ako brojilac i imenilac podelimo sa klizanjem s dobijamo sledeći izraz za struju rotora:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2}}. \quad (8-7)$$

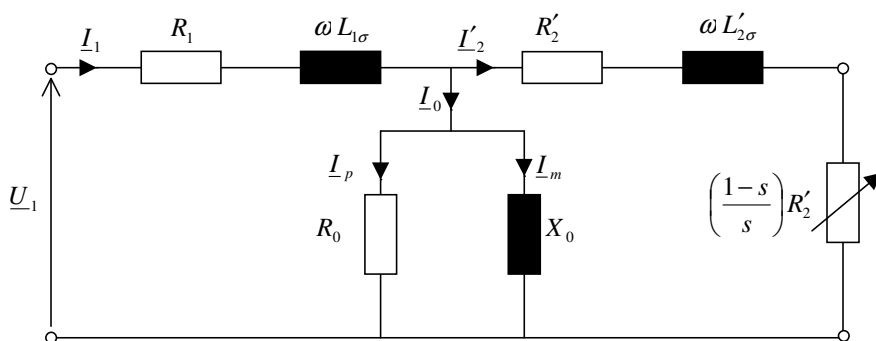
Prikažimo sada ekvivalentnu promeljivu otpornost rotora R_2/s u obliku zbira stvarnog otpora rotorskog namotaja R_2 i fiktivnog otpora R_{2d} :

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_{2d} = R_2 + R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right). \quad (8-8)$$

8.7 Ekvivalentna šema asinhronne mašine

Pošto je zakočena asinhrona mašina u biti transformator, analogno transformatoru i koristeći prethodne izraze za ekvivalentnu struju i ekvivalentni promenljivi rotorski otpor, imamo sledeću ekvivalentnu šemu (Slika 8-4). Fiktivni otpor $R_{2d}=R_2(I-s)/s$ je analogan prijemniku impedanse Z_2 koji je priključen na sekundar transformatora.

Analogno transformatoru, sve veličine rotora svedene su na statorsku stranu, što je označeno gornjim zarezom. Pri svođenju se, osim o broju navojaka mora voditi računa i o ukupnom navojnom sačiniocu.



Slika 8-4 Ekvivalentna šema asinhronne mašine

8.8 Bilans aktivne snage

Rad asinhronne mašine je praćen sledećim gubicima (izraženim preko snage gubitaka):

- gubicima u namotajima statora (gubici u bakru statora), P_{Cu1} ,
- gubicima zbog magnećenja magnetnog kola statora (gubici u gvožđu statora), P_{Fe} ,
- električnim gubicima u rotoru, P_{el2} , koji sadrže gubitke u bakru namotaja rotora, P_{Cu2} , i eventualno, kod mašina sa namotanim rotorom, gubitke u dodatnim električnim kolima, spojenim na kolo rotora i
- mehaničkim gubicima usled trenja (frikcije) i ventilacije, P_f .

Snaga obrtnog elektromagnetnog polja, P_{em} , koja se kroz međugvožđe prenosi sa statora na rotor, jednaka je razlici dovedene (utrošene) snage P_I , koju motor uzima iz mreže i ukupnih gubitaka u statoru, odnosno zbiru ukupne mehaničke snage rotora i električnih gubitaka u rotoru:

$$P_{em} = P_I - P_{Cu1} - P_{Fe} = P_{meh} + P_{el2} , \quad (8-9)$$

gde je P_{meh} ukupna mehanička snaga rotora.

Ukupna mehanička snaga jednaka je razlici dovedene snage P_I i snage ukupnih gubitaka u gvožđu statora i namotajima statora i rotora, koji su u ekvivalentnoj

šemi predstavljeni toplotom koja se razvija na otporima R_0 , R_1 i R_2 . Preostali, fiktivni otpor u ekvivalentnoj šemi $R_{2d}=R_2(1-s)/s$ upravo odgovara ukupnoj mehaničkoj snazi, iz čega sledi da je odnos ukupne mehaničke snage i električnih gubitaka u rotoru:

$$\frac{P_{meh}}{P_{el2}} = \frac{1-s}{s}. \quad (8-10)$$

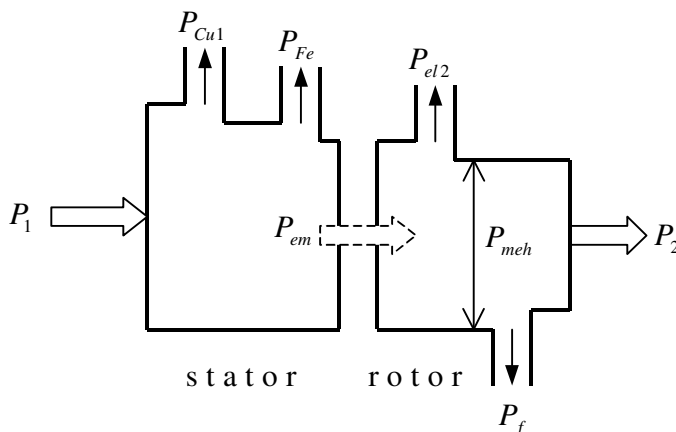
Korisna (mehanička) snaga na vratilu mašine jednaka je razlici ukupne mehaničke snage i mehaničkih gubitaka usled trenja i ventilacije:

$$P_2 = P_{meh} - P_f. \quad (8-11)$$

Važno je uočiti da, kada se govori o *snazi motora*, podrazumeva se *korisna mehanička snaga na vratilu motora*.

Korisni mehanički momenat se dobija iz jednačine:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_2}{n} = 9,55 \frac{P_2}{n}. \quad (8-12)$$



Slika 8-5 Bilans aktivne snage asinhronog motora

8.9 Karakteristika momenta asinhronog motora

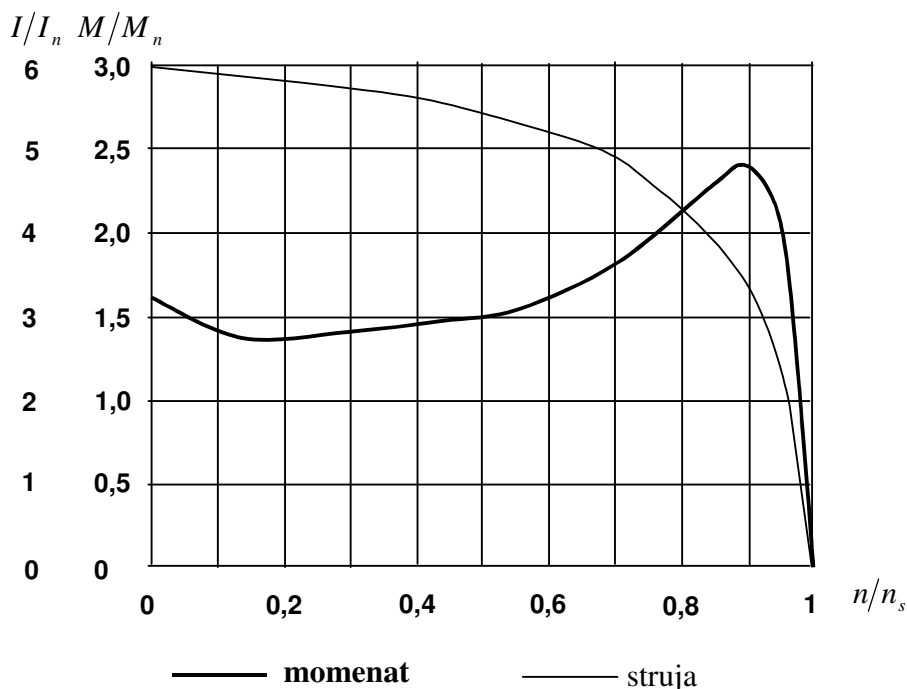
Kod motornih pogona karakteristika opterećenja je gotovo uvek data karakteristikom momenta opterećenja (kočionog momenta) u zavisnosti od brzine obrtanja:

$$M_K = f(n). \quad (8-13)$$

Za određivanje stacionarne radne tačke je vrlo važno da se i razvijeni momenat motora takođe prikaže u zavisnosti od brzine obrtanja, odnosno klizanja:

$$M = f(n) = g(s). \quad (8-14)$$

Ovu krivu nazivamo karakteristikom momenta asinhronog motora.



Slika 8-6 Statičke karakteristike momenta i struje statora motora sa kratkospojenim rotorom

Karakteristične tačke, gledano preko momenata, su:

- *polazni moment*, M_{pol} , koji motor razvija pri pokretanju ($n=0$, odnosno $s=1$), i koji, da bi se mašina mogla pokrenuti, mora biti veći od otpornog momenta radne mašine,
- *prevalni (maksimalni) moment*, M_{max} , je najveća vrednost momenta,
- *naznačeni (nominalni) moment*, M_n , odgovara naznačenom režimu rada,
- *moment praznog hoda*, M_{ph} , koji pokriva mehaničke gubitke u praznom hodu,
- *prazni hod (idealni) $M=0$* ($n=n_s$, odnosno $s=0$).

8.10 Pokretanje asinhronih motora

Pokretanje motora je proces koji započinje u trenutku u kojem je rotor u stanju mirovanja, a završava se onda kada se, pri odgovarajućoj brzini obrtanja, izjednače razvijeni moment motora i otporni moment radnog mehanizma. Polazne karakteristike određuju vrednosti polazne struje i momenta, sigurnost pokretanja, vreme trajanja puštanja kao i ekonomičnost, koja zavisi od cene potrebne opreme i gubitaka za vreme pokretanja.

Vrednost polaznog momenta i struje su osnovne veličine od interesa pri pokretanju asinhronne mašine. U trenutku kada se motor priključuje na mrežu, njegov rotor je mehanički nepokretan, a električno je u kratkom spoju (bez obzira na tip asinhronne mašine), a uz maksimalnu indukovanu elektromotornu silu u namotaju rotora (obrotno polje preseca provodnike sinhronom brzinom), to stanje je praćeno pojavom velikih struja.

Da bi rotor motora pri pokretanju mogao preći u obrtno kretanje, polazni momenat koji razvija motor mora biti veći od otpornog momenta koji na vratilu proizvodi radna mašina koju treba pokrenuti. Sa druge strane, vrednost struje pri pokretanju ne sme preći određene granice, jer bi to izazvalo velike padove napona i izazvalo negativne uticaje na druge prijemnike u mreži. Dakle, nastoji se da se poveća vrednost polaznog momenta i smanji vrednost polazne struje.

Asinhronne mašine sa *namotanim rotorom* imaju dobre karakteristike s obzirom na pokretanje. Pomoću dodatnog otpora (*otpornik za puštanje u rad*) priključenog u rotorsko kolo omogućeno je razvijanje velikih polaznih momenata pri maloj polaznoj struji. Sa povećanjem brzine otpornici se postepeno isključuju, da bi se nakon zaletanja potpuno isključili, a prstenovi kratko spojili.

Kod asinhronih mašina sa *kratkospojenim rotorom* nemamo neposrednu mogućnost uticaja na rotorsko strujno kolo, pa se kod pokretanja koriste sledeće metode:

- *direktno uključivanje u mrežu*, koje je povezano sa manjim ili većim stujnim udarima. U zavisnosti od kvaliteta i snage svoje mreže, elektrodistribucije propisuju najveće snage asinhronih mašina sa kratkospojenim rotorom koje se mogu na ovaj način puštati u rad.
- *primena dodatnih uređaja koji se priključuju u strujno kolo statora (na red između mreže i priključaka namotaja statora)*. Osnovna ideja ovde je ograničenje struje pokretanja putem sniženja primarnog napona. Međutim, mora se voditi računa o tome da je polazni momenat srazmeran sa kvadratom priključenog primarnog napona, tako da ovaj način pokretanja dolazi u obzir kada se ne zahteva veliki polazni momenat u samom početku radnog ciklusa. Uređaji koji se koriste su prigušnice, autotransformatori i prebacač zvezda-trougao (za motore čiji je stator spregnut u trougao – polazna struja je pri sprezi zvezda tri puta manja nego pri sprezi trougao, međutim i polazni momenat je tri puta manji) ili se, pak, napajanje vrši preko blok transformatora ili regulisanjem napona primenom uređaja energetske elektronike.
- *primena specijalne izvedbe rotora i njegovih namotaja*, koja se sastoji u konstrukciji rotora sa dubokim i dvostrukim žlebovima. Ovakvom konstrukcijom se poboljšavaju polazne karakteristike, jer se postiže povećanje omskog otpora i smanjenje faznog pomeraja između ems i struje prilikom pokretanja. Međutim, ovakva konstrukcija ima za posledicu izvesno pogoršanje radnih karakteristika u odnosu na standardne motore sa kratkospojenim rotorom.

8.11 Regulacija brzine obrtanja asinhronih motora

Mogućnost kontinualne promene brzine u širokim granicama i rad pri različitim brzinama je imperativ za savremene električne pogone. Zbog tvrde mehaničke karakteristike, regulisanje brzine obrtanja asinhronih motora nije ni lako ni efikasno, u odnosu na mašine jednosmerne struje. Međutim, usled razvoja i pada cene mikroprocesora i komponenti energetske elektronike, asinhroni motori se sve više sreću i u regulisanim pogonima sa promenljivom brzinom obrtanja.

Veličine pomoću kojih možemo da regulišemo brzinu obrtanja najlakše se vide iz osnovne jednačine koja opisuje brzinu obrtanja asinhronne mašine:

$$n = n_s (1 - s) = \frac{60 f}{p} \cdot (1 - s) . \quad (8-15)$$

Regulisanje brzine obrtanja se možemo izvršiti:

- *promenom frekvencije mreže (izvora),*
- *promenom broja pari polova i*
- *promenom klizanja, a klizanje promenom napona napajanja i promenom otpora u kolu rotora (za mašine sa namotanim rotorom),*
- *primenom kaskadnih spojeva,*
- *vektorskim upravljanjem.*

Regulisanje brzine *promenom napona* napajanja vrši se smanjenjem napona, najčešće pomoću regulacionog transformatora. Nedostaci vezani za ovaj način regulacije su povećani gubici i smanjenje maksimalnog momenta, pošto je on srazmeran sa kvadratom napona napajanja.

Regulisanje brzine *promenom otpora u kolu rotora* se može koristiti kod asinhronih mašina sa namotanim rotorom. Uključenjem rotorskog otpornika u strujno kolo rotora povećava se, pri nepromenjenom prevalnom momentu, prevalno klizanje i time smanjuje radna brzina motora, odnosno povećava područje stabilnog rada. Međutim, takva regulacija je vezana s gubicima energije i kao takva ne može biti osnova za trajni pogon, već samo za kratkotrajna prelazna stanja, npr. pokretanje ili zaustavljanje nekog pogona, ali ne velike snage.

Regulisanje brzine *promenom broja pari polova* ne može obezbediti kontinualnu promenu brzine, već diskretnu, i to dve, najviše tri različite brzine. Ostvaraju se na dva načina: stavljanjem nekoliko nezavisnih namotaja statora sa različitim brojem pari polova, ili postavljanjem jednog namotaja čiji se odvojci izvode do prebacača. Ovaj način regulisanja može da se primeni samo kod motora sa kratkospojenim rotorom, jer se kratkospojeni rotor prilagođava svakom broju polova namotaja statora. U slučaju namotanog rotora bilo bi neophodno, sa promenom pari polova na statoru, izvršiti istu operaciju na rotorskom namotaju, što usložnjava konstrukciju, a time i cenu izrade takvog namotaja. Dalje, treba imati u vidu da se promenom broja pari polova menjaju i sve karakteristike motora.

Regulacija brzine *promenom učestanosti* je, sa razvojem energetske elektronike, postala najznačajnija, pri čemu se, kako se ne bi promenilo magnetno zasićenje mašine, često izvodi sa istovremenom promenom napona napajanja (tzv. *U/f* regulacija, $U/f = \Phi = \text{const}$). Prednosti ovog načina regulisanja brzine sadržane su u veoma dobrim tehničkim osobinama: zadržava se vrednost maksimalnog momenta, promena brzine je kontinualna i u širokom opsegu, koristi se standardni motor sa kratkospojenim rotorom. Međutim, potreban je dodatni uređaj za obezbeđenje promenljive učestanosti i napona napajanja.

Osim ovih načina regulisanja brzine obrtanja, postoje i načini vezani za *kaskadne veze* asinhronog motora sa drugim uređajima (asinhronim motorom, uređajima energetske elektronike).

Vektorsko upravljanje ima veliki značaj u savremenim elektromotornim pogonima. Kod asinhronog motora ne postoje direktno pristupačne upravljačke veličine, kao kod mašina jednosmerne struje, već se normalno upravlja učestanošću i amplitudom (odnosno efektivnom vrednošću) višefaznih statorskih veličina (npr. strujom statora), od kojih svaka deluje i na magnetno stanje i na momenat mašine, pa je upravljanje spregnuto. Analizom se može pokazati da je i kod asinhronog motora moguće raspregnuto upravljanje kao kod jednosmernog motora preko odgovarajućih pristupačnih faznih veličina. Za direktno i nezavisno upravljanje momentnom asinhronne mašine potrebno je u svakom trenutku poznavati amplitudu i položaj polifazora rotorskog fluksa (tzv. orijentaciju polja) u odnosu na statorski koordinatni sistem.

Kod rešavanja problema određivanja orijentacije polja kod asinhronog motora se, u početku, primenjivalo tzv. *direktno vektorsko upravljanje* koje se baziralo na merenju fluksa u mašini (npr. Halove sonde). Kasnije je kod *indirektnog vektorskog upravljanja* problem rešavan merenjem položaja rotora pomoću inkrementalnog enkodera i obračunavanjem efekta klizanja.

9 SINHRONE MAŠINE

Rotor sinhronne mašine se u ustaljenom pogonu obrće jednakom (sinhronom) brzinom kao i obrtno magnetsko polje u međugvožđu, pa odatle potiče naziv ove vrste mašina.

Prema svojim karakteristikama, sinhronne mašine se mogu svrstati na više načina. Prema smeru (načinu) elektromehaničkog pretvaranja energije, delimo ih na *generatore* i *motore*, pri čemu se mnogo češće upotrebljavaju kao generatori.

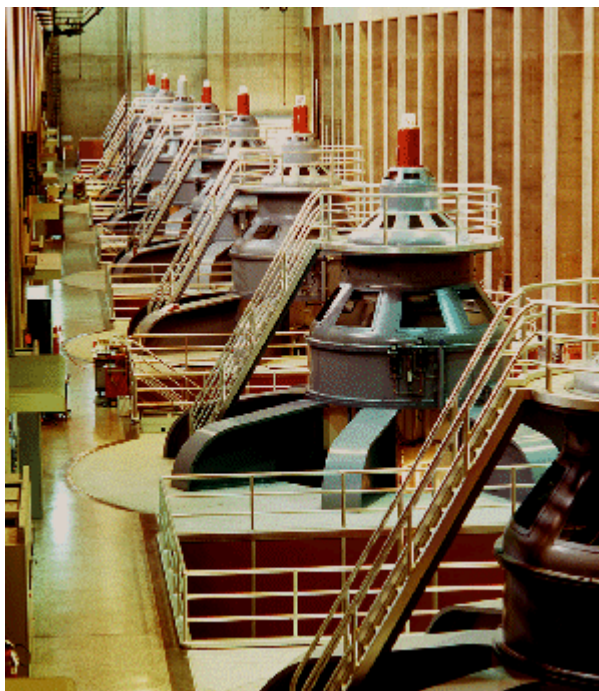
9.1 Sinhroni generatori

Sinhroni generator je tipični predstavnik električne mašine velike snage i niskoserijske proizvodnje. Činjenica da je stepen iskorišćenja većih jedinica bolji (veća je ekonomičnost), ima za posledicu izgradnju elektrana i agregata većih snaga. Jedinичne snage generatora prelaze i 1000MVA.

Prema pogonskoj mašini, generatore delimo na *turbogeneratore* (Slika 3-4),, gde je pogonska mašina parna ili gasna turbina, *hidrogeneratore* (Slika 9-1), gde je pogonska mašina vodna (hidro) turbina i *dizel generatore* gde je pogonska mašina dizel motor. Prema obliku rotora, delimo ih na mašine sa *cilindričnim rotorom* i *rotorom sa istaknutim polovima*, dok je stator cilindričnog oblika, trofazni. Prema brzini obrtanja (pri učestanosti od 50Hz), delimo ih na *brzohodne* (750 do 3000 ob/min, sa brojem pari polova $p=4$ do 1), *srednjih brzina* (300 do 600 ob/min, $p=10$ do 5) i *sporohodne* (manje od 300 ob/min, više od 10 pari polova).

Turbogeneratori se grade sa cilindričnim rotorom, za velike brzine obrtanja (obično $p = 1$, ređe $p=2$ (samo za manje snage), odnosno 3000 ili 1500 ob/min pri 50 Hz). Kod ove vrste generatora izraženi su mehanički problemi u pogledu konstrukcije rotora zbog velike periferne brzine, velike obrtne mase i zbog dužine između ležišta. To zahteva da se ide na relativno male prečnike rotora i da se namotaj rotora raspodeljuje što ravnomernije po obimu. Oni se uvek postavljaju horizontalno.

Hidrogeneratori se grade sa istaknutim polovima na rotoru, od sasvim sporohodnih do brzohodnih sa $p=2$. Što je manja brzina obrtanja dozvoljava se veći prečnik rotora, opet ograničen mehaničkim naprezanjima usled centrifugalnih sila. Ali ova mehanička naprezanja su tolika da se ne zahteva ravnomerna raspodela namotaja po obimu rotora, pa se zato onda prelazi na rotor sa istaknutim polovima. Kod ove vrste generatora izraženi su mehanički problemi u pogledu konstrukcije rotora zbog velike periferne brzine pri zaletanju, i nosećih ležišta grupe sa vertikalnim vratilom na kojima leži težina celog obrtnog dela i dr. Generatori većih snaga, čije su brzine obrtanja relativno manje, postavljaju se vertikalno, a hlađenje je kombinovano voda-vazduh.



Slika 9-1 Generatori u hidroelektrani – hidrogeneratori

U konstrukcionom, odnosno u pogledu mehaničkih dimenzija, turbo i hidro generatori se značajno razlikuju, tako da za snage od oko 100MVA odnos osne dužine l , i prečnika D , za turbogeneratore iznosi oko 5, dok za hidrogeneratore iznosi oko 0,15.

Dizelgeneratori se pokreću dizel motorima, a grade se za široki raspon brzina obrtanja, od $p=2$ naviše. Snaga dizel generatora ograničena je mogućnošću izrade motora, pa dostiže najviše desetak MVA.

9.2 Osnovni delovi

Magnetsko kolo sinhronog generatora sastoji se, kao i kod svih obrtnih mašina, iz dva osnovna dela: nepokretnog dela ili statora i obrtnog dela ili rotora, koji su međusobno razdvojeni međugvoždem. Rotor čini celinu sa vratilom mašine: on nosi na svojoj periferiji $2p$ polova koji mogu biti ili od masivnog gvožđa ili od limova. Stator ili indukat je šuplji valjak sastavljen od tankih magnetskih limova ravnomerno ožlebljenih na svojoj unutarnjoj periferiji i složenih u oklopu statora.

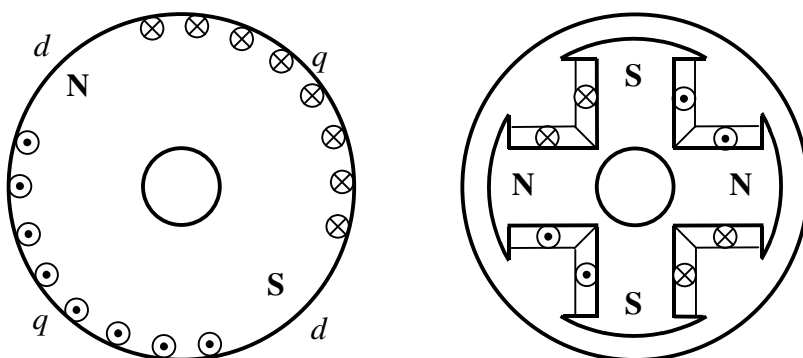
Pobudni namotaj (induktor) kod sinhronih mašina je smešten na rotoru i napajan je jednosmernom strujom.

Postoje dve izvedbe u pogledu oblika (vrste) rotora:

- Rotor je cilindričan: cilindar je od ožlebljenog gvožđa, obično masivnog, namotaj induktora je sastavljen iz sekcija smeštenih u žlebovima. Ova konstrukcija se skoro isključivo primenjuje kod velikih

dvopolnih ili četvoropolnih turbogenerators, iz mehaničkih razloga (Slika 9-2, a).

- Rotor je sa istaknutim polovima i sa međupolnim prostorom kod kojih je namotaj koncentrisan oko jezgra pola. Ova konstrukcija se upotrebljava kod mašina sa većim brojem polova – hidrogenerators (Slika 9-2, b).



Slika 9-2 Rotor sinhronne mašine

a) cilindrični rotor b) rotor sa istaknutim (izraženim) polovima

Na slici je sa $d - d$ je označena tzv. uzdužna osa, u kojoj se nalaze magnetski polovi, dok je sa $q - q$ označena poprečna osa, koja je upravna na osu polova.

Kod mašina sa istaknutim polovima namotaj je koncentrisan, dok je kod mašina sa cilindričnim rotorom raspodeljen u žlebovima i zauzima približno $2/3$ obima rotora. Preostali prostor obima, odnosno polnog koraka, nije ožlebljen i čini *zonu velikog zupca* kroz koji prolazi glavni deo magnetskog fluksa.

Osim pobudnog namotaja, na rotoru nekih sinhronih mašina postoji i dodatni, *prigušni (amortizacioni) namotaj*, koji ima osnovnu ulogu da prigušuje oscilovanje brzine obrtanja rotora oko sinhronne brzine u prelaznim procesima, pri čemu se tada ponaša kao kavezni rotor asinhronog motora. U ustaljenom stanju ovaj namotaj nema funkciju, jer se u njemu tada ne indukuje napon. On se ugrađuje, po pravilu, u polne papučice mašina sa lameliranim istaknutim polovima, a sastoji se od okruglih bakarnih štapova stavljenih u žlebove u polnom stopalu (nastavku, papučici). Ovi štapovi su međusobno povezani (kratko spojeni) pomoću dva provodna prstena sa obe bočne strane pola. U mašine sa cilindričnim rotorom ugrađuje se takođe prigušni namotaj kada se očekuju velika nesimetrična opterećenja.

Namotaj indukta je smešten u žlebovima statora, najčešće je trofazni. Raspodeljen je po celom obimu.

9.3 Princip rada

Kroz provodnike pobudnog namotaja prolazi jednosmerna struja usled koje nastaje stalno magnetsko polje. *Magnetopobudna sila (mps)* pobude miruje u odnosu na rotor, pa se naziva stojećom. Smer jednosmerne struje kroz provodnike rotora je takav da je jedan pol severni, sledeći južni itd. Obrtanjem rotora stvara se obrtno magnetsko polje. Ovo polje preseca provodnike statora i u njima indukuje *ems* čija je trenutna vrednost po provodniku:

$$e_{pr}(t) = l v b(t) \quad (9-1)$$

Pri stalnoj brzini obrtanja, *ems* ima isti oblik kao i magnetsko polje. Kod trofaznih namotaja statora, indukovane *ems* svake faze su jednake po vrednosti a vremenski su pomerene za jednu trećinu periode ili, ako su predstavljene vektorima, ovi su pomereni za ugao $2\pi/3$.

Ako rotor ima jedan par polova, onda će se, pri jednom obrtaju, imati jedna potpuna promena *ems*, odnosno za p pari polova imaćemo p promena *ems*. Pošto je $p = \text{const}$, a u elektroenergetskim sistemima se zahteva odgovarajuća stabilnost učestanosti (standard za Evropu je 50Hz, dok je za Ameriku 60Hz), onda i brzina obrtanja sinhronih mašina mora biti konstantna, i određena je izrazom:

$$n = \frac{60 f}{p} = \text{const.} \quad (9-2)$$

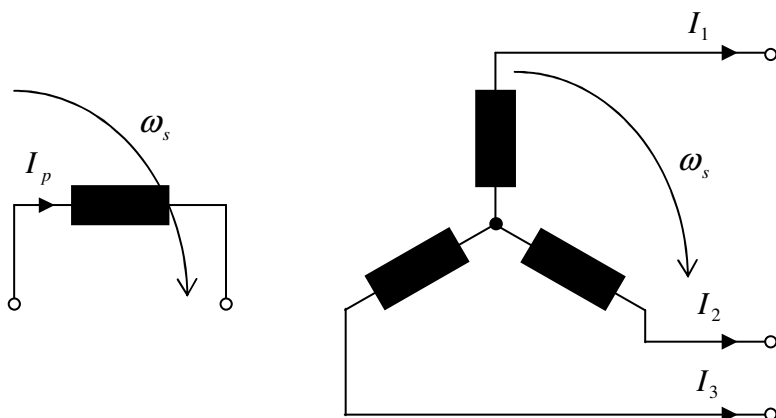
Dakle, u Evropi, imaćemo sledeće brzine obrtanja:

Tabela 9-1 Brzine obrtanja sinhronih mašina

p	1	2	3	4	5	6	itd
n [ob/min]	3000	1500	1000	750	600	500	

Ako se indukt (stator) optereti nekim trofaznim simetričnim opterećenjem, onda će se kroz namotaje statora uspostaviti struje efektivnih vrednosti I_1, I_2, I_3 koje su, u zavisnosti od opterećenja, vremenski pomerene u odnosu na svoje napone za neki ugao, a međusobno vremenski pomerene za jednu trećinu periode.

Ove vremenski pomerene trofazne struje, koje protiču kroz trofazne namotaje koji su prostorno pomereni tako da njihove ose međusobno zaklapaju ugao od električnih 120° , daju jednu ekvivalentnu obrtnu *mps* (Teslino obrtno polje), čija je amplituda 1,5 puta veća od amplitude pulsirajućih magnetopobudnih sila pojedinih faza. Ovo polje se obrće brzinom $n=60f/p$, dakle istom brzinom kao i rotor tj. sinhronom, i otuda potiče i naziv sinhrona mašine. Relativna brzina obrtnog polja statora u odnosu na obrtno polje rotora jednaka je nuli tj. ona su međusobno nepokretna, ili kažemo da su se polja "zakačila".



Slika 9-3 Princip rada sinhronih mašina

Magnetsko polje u međugvožđu nastaje zajedničkim delovanjem magnetopobudne sile pobude i statora. U ustaljenom stanju te dve magnetopobudne sile su, jedna u odnosu na drugu, nepomične i obrću se sinhronom brzinom obrtanja. Povratno delovanje polja statora (indukta) na polje polova rotora (induktora), naziva se magnetna reakcija indukta i zavisi od karaktera opterećenja. U zavisnosti od međusobnog položaja magnetskih polja rotora i statora, razvijaju se odgovarajuće sile i obrtni momenti.

9.4 Pobuda sinhronih mašina

Pobudni namotaj sinhronne mašine napaja se iz posebnog izvora jednosmerne struje. U osnovi, pobudni sistemi se dele na dve osnovne skupine:

- dinamičke (elektromehaničke) sisteme, gde se pobudni namotaj sinhronne mašine napaja pomoću generatora jednosmerne struje,
- statičke sisteme, gde je izvor jednosmerne struje statički pretvarač energetske elektronike.

Danas su dominantni statički pobudni sistemi.

9.5 Karakteristike sinhronih mašina

Najznačajnije karakteristike sinhronih mašina su karakteristika praznog hoda (karakteristika magnećenja) i karakteristika kratkog spoja. Iz ove dve karakteristike mogu se dobiti značajne informacije o ponašanju sinhronne mašine.

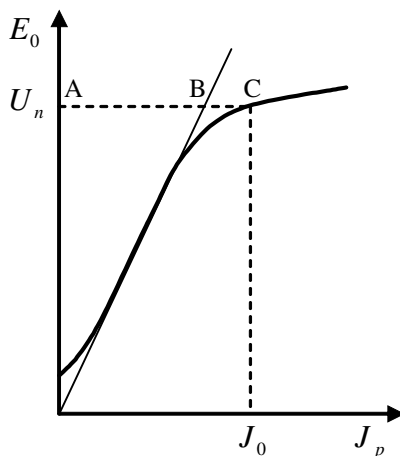
9.5.1 Karakteristika praznog hoda

Karakteristika praznog hoda je funkcionalna zavisnost naizmeničnog napona indukta na priključcima neopterećenog generatora E_0 , od jednosmerne pobudne struje, J_p , pri konstantnoj brzini i naznačenoj učestanosti tj.

$$E_0 = f(J_p) \quad \text{pri} \quad I = 0, \quad n = \text{const. i } f_n \quad (9-3)$$

Glavni deo pobudne struje, AB pripada *mps* međugvožđa, a deo BC *mps* magnetskog kola.

Značajan podatak karakteristike praznog hoda je vrednost pobudne struje, J_0 , pri kojoj se ima linijska *ems* po vrednosti jednaka naznačenom naponu $E_0=U_n$.



Slika 9-4 Karakteristika praznog hoda sinhronog generatora

9.5.2 Karakteristika ustaljenog (trajnog) kratkog spoja

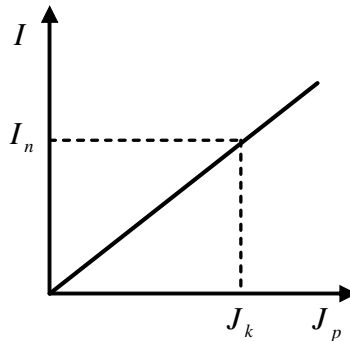
Karakteristika ustaljenog kratkog spoja prikazuje zavisnost naizmenične struje na kratkospojenim priključcima statora, I_k , od jednosmerne pobudne struje, J_p , pri kratkom spoju i kada je brzina obrtanja naznačena, tj.

$$I_k = f(J_p) \quad \text{pri } U=0 \text{ i } n=n_n. \quad (9-4)$$

Obično se ogled vrši pri tropskom kratkom spoju.

Merenje se vrši do vrednosti struje kratkog spoja koja je nešto veća od naznačene struje generatora. Na osnovu rezultata, nacrtava se karakteristika kratkog spoja (Slika 9-5), koja je prava linija.

Značajan podatak karakteristike ustaljenog kratkog spoja je vrednost struje kratkog spoja, J_k , pri kojoj se ima linijska struja kratkog spoja po vrednosti jednaka naznačenoj struji $I_k=I_n$.



Slika 9-5 Karakteristika kratkog spoja sinhronog generatora

Karakteristika kratkog spoja ne mora polaziti iz početka koordinatnog sistema već može biti pomerena malo naviše usled remanentnog magnetizma.

9.5.3 Fazorski dijagram sinhronne mašine sa cilindričnim (turbo) rotorom

Ovakav tip rotora, kao što je već rečeno, iz mehaničkih razloga se primenjuje kod sinhronih generatora gonjenih parnim turbinama na velikim brzinama. Kod ovog tipa rotora, reaktanse u $d-d$ osi i u $q-q$ osi su približno jednake.

Slika 9-6 prikazuje je ekvivalentno kolo sinhronog turbogeneratora, uz sledeće oznake:

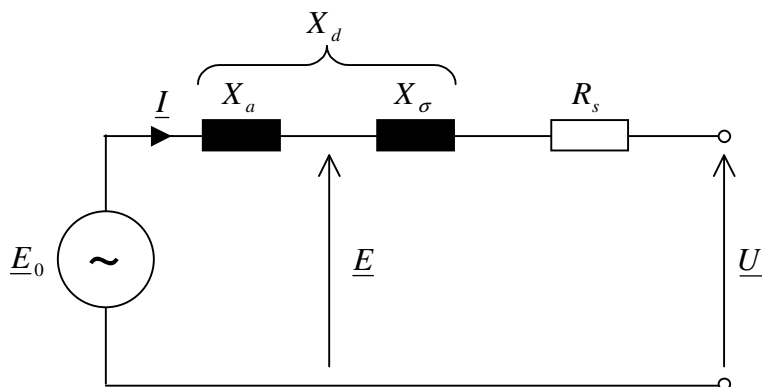
- E_0 - ems praznog hoda
- E - ems u opterećenom stanju
- U - napon na priključcima
- I - struja indukta
- X_a - reaktansa indukta
- X_σ - reaktansa rasipanja
- X_d - sinhrona reaktansa, $X_d = X_a + X_\sigma$
- R_s - otpor namotaja statora.

Jednačina naponske ravnoteže za sinhroni generator sa cilindričnim rotorom je:

$$\underline{E}_0 = \underline{E} + j X_a \underline{I} = \underline{U} + R_s \underline{I} + j X_\sigma \underline{I} + j X_a \underline{I} = \underline{U} + R_s \underline{I} + j X_d \underline{I} \quad (9-5)$$

gde je

$$\underline{E} = \underline{U} + R_s \underline{I} + j X_\sigma \underline{I} \quad (9-6)$$



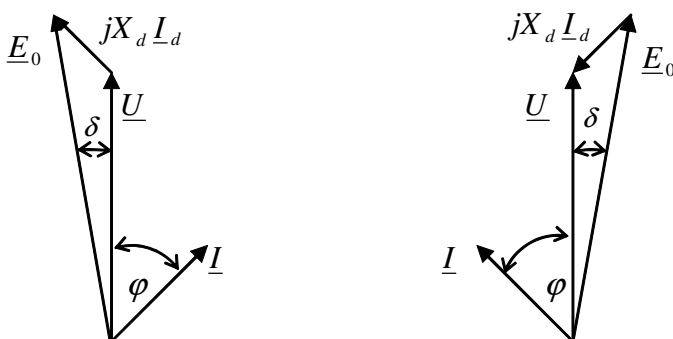
Slika 9-6 Ekvivalentno kolo sinhronog turbo generatora

Jednačina naponske ravnoteže za sinhroni motor sa cilindričnim rotorom je:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + R_s \underline{I} + j X_d \underline{I} \quad (9-7)$$

U nekim elektranama postoji mogućnost da se jedan turbogenerator, pomoću posebne spojnice, rastavi od turbine i radi kao natpobuđeni motor (tzv. fazni kompenzator).

Ako zanemarimo radni pad napona, pojednostavljeni fazorski dijagrami za sinhroni generator i sinhroni kompenzator su:



Slika 9-7 a) fazorski dijagram za turbo SG b) fazorski dijagram za turbo SM

9.6 Rad sinhronih generatora na sopstvenu i opštu mrežu

Sinhroni generator može da radi u različitim pogonskim prilikama, pri čemu su krajnja stanja rad na *sopstvenu* i *opštu mrežu*.

Pri radu na *sopstvenu mrežu* obično je reč o relativno malom sinhronom generatoru koji napaja malu mrežu koja nema mogućnost priključka na veću mrežu. Budući da sinhroni generator predstavlja jedini izvor, napon mreže zavisi

od pobude tog generatora, a učestanost od brzine obrtanja njegove pogonske mašine. U mašini deluje samo jedna nezavisna magnetopobudna sila koja pripada pobudnom namotaju. Pobuda, magnetski fluks u međugvožđu i napon na priključcima mašine su međusobno zavisne veličine.

Mnogo češći slučaj pogonskog stanja je rad sinhronog generatora na *opštu (čvrstu) mrežu*. Paralelnim radom generatora u pojedinim elektranama i paralelnim povezivanjem pojedinih elektrana i elektroenergetskih sistema, dobijaju se mreže većih snaga, na koje manje mogu da utiču pojedini generatori ili elektrane. Što je snaga mreže veća, njen napon možemo smatrati stalnijim (čvršćim) u pogledu veličine, faznog pomeraja i učestanosti. Kod priključenja generatora na opštu mrežu, mora se provesti poseban postupak, kojeg nazivamo *sinhronizacijom*. U osnovi ovog postupka radi se o svodjenju struje izjednačenja, koja se javlja prilikom priključenja generatora na mrežu, na najmanju moguću meru, što se postiže sledećim aktivnostima:

- kod prvog puštanja u pogon višefaznih generatora (gotovo uvek trofaznih) proverava se *redosled faza*;
- pogonskom mašinom generator treba približno dovesti do sinhronne brzine obrtanja koja je određena frekvencijom mreže i brojem pari polova generatora, dakle potrebno je *izjednačiti učestanost generatora i mreže*;
- generator treba pobuditi tako da *napon generatora bude približno jednak naponu mreže*;
- potrebno je postići *istofaznost istoimenih faza*, ili bolje rečeno, istofaznost napona na kontaktima sklopke;
- generator treba uključiti na mrežu u trenutku kada je *fazni pomeraj između istoimenih napona mašine i mreže sveden na najmanju moguću meru*.

Za generatore manjih snaga sinhronizacija se može vršiti ručno, pomoću npr. sinhronizacionih sijalica, dok se kod skupih generatora većih snaga vrši poluautomatski ili automatski pomoću odgovarajućih uređaja.

9.7 Veliki hidro i turbo sinhroni generatori

Hidro i turbo sinhroni generatori velikih snaga predstavljaju, uz transformatore velikih snaga, najveće električne uređaje. Jedno od bitnih ograničenja vezano za granične snage ovih uređaja jeste i mogućnost transporta (npr. "železnički profil"). Prema potrebi stator generatora se transportuje u segmentima.

Hidrogeneratori velikih snaga se obično postavljaju vertikalno, a hlađenje je kombinovano voda-vazduh.

Zbog velike brzine obrtanja i sledstveno velikih mehaničkih naprezanja, ograničen je prečnik rotora turbogeneratora. Maksimalna dužina mašine određena je elastičnim svojstvima rotora – kritičnim brzinama obrtanja i problemima u vezi sa mirnim hodom rotora. Kod jedinica najvećih snaga,

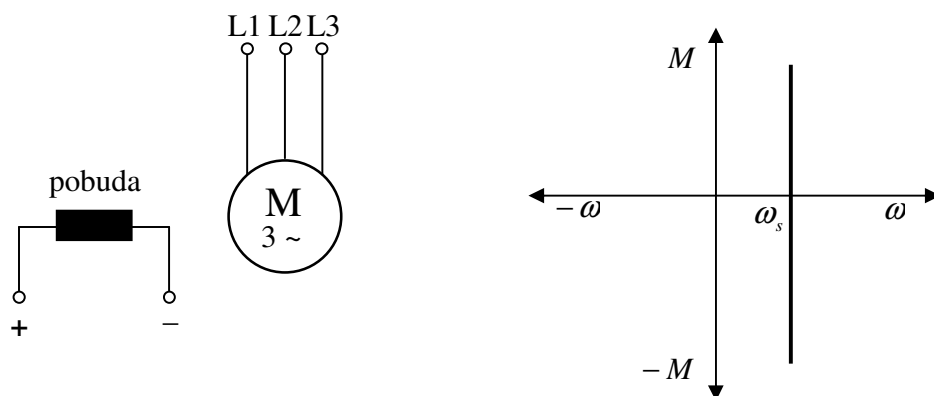
provodnici se direktno hlade bilo gasom (vodonikom) ili tečnošću (vodom). U svrhu provere izdržljivosti rotora na povišene brzine, koje se mogu pojaviti u radu, sprovodi se ogled s povišenom brzinom obrtanja, tzv. ogled "vitlanja". Pre ogleda vitlanja potrebno je statički i dinamički izbalansirati rotor.

Da bi se povećao naznačeni napon generatora i, s tim u vezi, generator direktno priključio na mrežu, bez upotrebe blok-transformatora, umesto klasično izolovanih namotaja neki proizvođači upotrebljavaju odgovarajuće kablove.

U svetu već duže vreme postoji tendencija gradnje električnih mašina sa relativno niskim električnim i mehaničkim gubicima, što u osnovi ima za posledicu povećanje gabarita i sledstveno tome, cene.

9.8 Sinhroni motor

Kod motora za naizmeničnu struju najviše je zastupljen, po značaju i masovnosti primene, asinhroni motor, a posle njega sledi *sinhroni motor* (Slika 9-8). U odnosu na asinhronne mašine velikih snaga, bitne prednosti sinhronih motora su bolji stepen iskorišćenja, i to što ne troše reaktivnu energiju (postoji mogućnost i proizvodnje reaktivne energije), dok su nedostaci vezani za postojanje pobude i relativno teško puštanje u rad.



Slika 9-8 Sinhroni motor: a) principijelna šema b) karakteristika momenta

U savremenoj praksi, najviše su zastupljeni standardni sinhroni motori sa pobudom, zatim sinhroni motori sa permanentnim magnetima i reluktantni sinhroni motori (bez pobude).

Sinhroni motor ima konstantnu brzinu obrtanja koja ne zavisi od mehaničkog momenta, već isključivo od učestanosti napajanja i broja pari polova. Zbog ove osobine, područje primene sinhronog motora je ograničeno samo na one pogone u kojima nije potrebna promena brzine obrtanja. Sinhroni motori se koriste za pogone sa konstantnom brzinom obrtanja, od najmanjih snaga reda jednog vata (časovnici, releji, hronografi), preko snaga od stotinjak vata (fonograf – pogon filmske trake), do desetak MW (pogon kompresora i ventilatora). Posebno je

interesantan slučaj kada motor radi u praznom hodu, bez elektromehaničke konverzije, kada se proizvodi reaktivna energija (kompenzator). U takvim pogonima rado se upotrebljava zbog njegove značajne prednosti u odnosu na ostale motore, sadržane u činjenici da može da proizvodi reaktivnu energiju i time da popravljaja faktor snage ($\cos \varphi$) celog postrojenja.

U novije vreme, u elektromotornim pogonima napajanim iz pretvarača energetske elektronike, primenjuju se sinhronne mašine sa permanentnim magnetima, umesto pobudnog namotaja (robotika, alatne mašine, servopogoni). Pobuda ovih mašina je konstantna i određena je konstrukcionom izvedbom. Za rad sa promenljivom brzinom potreban je izvor naizmenične struje promenljive frekvencije (pretvarač energetske elektronike).

Sa povećanjem mehaničkog momenta povećava se električni (pogonski) momenat sinhronog motora sve dok se oba momenta u ustaljenom stanju ne izjednače. Pri tome ne dolazi do promene brzine, već se jedino menjaju uglovni odnosi između pojedinih obrtnih magnetopobudnih sila i obrtnih flukseva. Međutim, kod suviše velikog opterećenja, ovi uglovi postaju toliki da se više ne može održati održati ravnoteža dvaju momenata i mašina ispada iz stabilnog rada ("ispada iz koraka").

10 MAŠINE JEDNOSMERNE STRUJE

Mašine jednosmerne struje (jednosmerne mašine) su zbog svojih veoma dobrih funkcionalnih karakteristika nekada predstavljale često rešenje u električnim postrojenjima i pogonima. Zbog veće cene, složenijeg i skupljeg održavanja, manje pouzdanosti i kraćeg veka trajanja, danas se motor jednosmerne struje sve više potiskuje od strane jeftinijih, jednostavnih i robustnih električnih motora za naizmeničnu struju upravljanih mikroprocesorima i napajanih energetsom elektronikom.



Slika 10-1 Motor jednosmerne struje

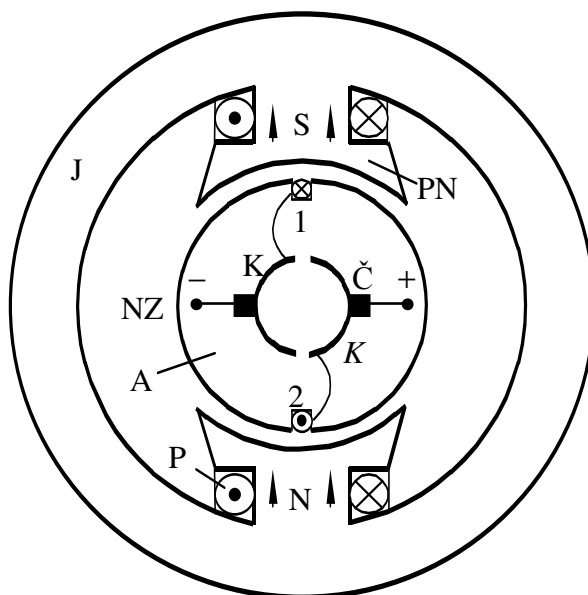
Generatori jednosmerne struje su praktično potisnuti poluprovodničkim ispravljačima. Međutim, generator jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom, zbog svojih veoma dobrih karakteristika se često koristi kao kočnica u laboratorijama za ispitivanje električnih mašina.

10.1 Osnovni delovi

Osnovni elementi mašine su mirujući deo (stator) i obrtni deo (rotor). Između mirujućeg i obrtnog dela nalazi se međugvožđe (vazdušni procep, zazor). Magnetsko kolo ima rotacionu simetriju. Stator je načinjen od jarma u obliku šupljeg valjka od masivnog gvožđa, na čijoj su unutrašnjoj periferiji pričvršćena $2p$ istaknuta pola složenih od feromagnetnih limova. Na polovima statora je smešten koncentrisan pobudni namotaj (induktor), povezan između polova na određeni način i izveden na dva priključna kraja. Rotor je cilindričnog oblika i sastavljen od tankih feromagnetnih limova i ravnomerno je ožlebljen po svom obimu. Paket limova rotora čvrsto je spojen sa vratilom mašine. Namotaj na rotoru (indukt, armatura) je raspodeljen, smešten u žlebovima i zatvoren sam sa sobom.

Komutator (kolektor) je sastavljen od bakarnih segmenata (kriški) koji su izolovani međusobno i u odnosu na masu. Postavljen je sa jedne strane rotora i obrće se zajedno sa njim. Na površinu komutatora naleže izvestan broj *dirki*

(četkica), koje su smeštene na simetrali među polovima, u "neutralnoj zoni" i nepomične (mehanički učvršćene za stator) i spojene na dva priključna kraja na statoru. Segmenti komutatora su u električnoj vezi sa namotajem indukta, svaki segment indukta spojen je sa istim tolikim brojem tačaka namotaja indukta.



Slika 10-2 Šematski presek pojednostavljene dvopolne mašine jednosmerne struje
(oznake odgovaraju generatorskom režimu rada) – J - jaram, S i N glavni polovi, P- pobudni namotaj, PN- polni nastavci, A- indukt, K- komutator (kolektor), Č- četkice, NZ- neutralna zona (osa), 1 i 2 - pojednostavljeni namotaj rotora

10.2 Princip rada

Princip rada mašine za jednosmernu struju pojednostavljeno ćemo objasniti na primeru generatora (Slika 10-2). Kada se kroz provodnike namotaja statora pusti jednosmerna struja, ona će stvoriti stalno magnetsko polje pobude, Φ , odgovarajućeg polariteta, vezanog za smer struje. Ovo polje je periodično, sa periodom jednakom dužini dvostrukog polnog koraka, i funkcija je samo prostorne koordinate (položaja na obimu mašine).

Kada se pomoću neke pogonske mašine rotor obrće konstantnom brzinom, n , u njegovim provodnicima će se usled presecanja magnetnog fluksa indukovati odgovarajuća elektromotorna sila, po zakonu $e = Blv$. Budući da je u prethodnoj jednačini samo magnetna indukcija promenljiva, oblik ems će biti isti kao i oblik magnetskog polja (indukcije B). U pojedinim provodnicima koje sačinjavaju navojak, ems će biti suprotne i sabiraće se, pošto su oni vezani na red. Kada je navojak u položaju da je kroz njega fluks maksimalan, prema jednačini $e = - d\Psi / dt$, u njemu će indukovana ems biti jednaka nuli, i taj položaj nazivamo neutralnom zonom (horizontalni položaj navojka na slici). Međutim,

zahvaljujući delovanju kolektora, polaritet *ems*, pa prema tome i struje, u odnosu na spoljašnje kolo, neće se menjati jer, uz nepromenjeni smisao obrtanja, dirke su uvek istog polariteta jer su preko kolektora povezane sa provodnicima koji prolaze ispod istog magnetnog pola. Prema tome, pomoću kolektora se naizmenične struje u provodnicima "ispravljaју", što ima za posledicu jednosmernu struju u spoljnjem električnom kolu.

10.3 Namotaji indukta

Namotaj indukta nalazi se na rotoru, a po tipu je obično valjkasti (dobošasti, bubnjasti, cilindrični). Nekada se namotaj izvodio u obliku prstena, ali ovo rešenje je napušteno jer je zbog potrebe za ručnim motanjem vreme izrade bilo veliko, a i potrošnja bakra je bila veća jer provodnici na unutrašnjem delu prstena nisu aktivni i ne učestvuju u stvaranju *ems*.

Spajanje provodnika u navojak se vrši tako da indukovana *ems* u navojku bude maksimalna, tj. tako da navojak obuhvata sav fluks po polu. Više navojaka vezanih na red postavljenih u dva žleba, i to u gornjem sloju jednog žleba i donjem sloju drugog žleba, naziva se navojni deo (sekcija).

Prema načinu vezivanja provodnika u navojne delove valjkasti namotaj možemo da podelimo uglavnom na četiri vrste: prost omčasti namotaj, složeni omčasti namotaj, prost valoviti namotaj i složen valoviti namotaj.

10.4 Namotaji pobude

Prema načinu spajanja namotaja pobude u odnosu na namotaj indukta, razlikujemo sledeće osnovne vrste pobude:

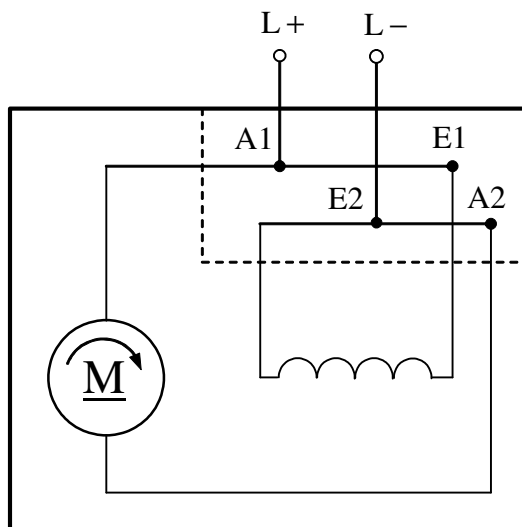
- *nezavisna pobuda*, kod koje je namotaj pobude spojen na poseban spoljni izvor napona, koji je potpuno nezavisan od prilika u mašini. Pobudni namotaj je dimenzionisan prema tom spoljnjem naponu. Vrednost pobudne struje može se podešavati, nezavisno od mašine, ako u strujnom kolu pobude postoji promenljivi otpornik. Ovo je danas najčešće rešenje, a jednosmerni pobudni napon se dobija iz naizmenične trofazne mreže, preko ispravljača.
- *otočna (paralelna) pobuda*, kod koje je pobudni namotaj spojen paralelno na namotaj indukta. Pobudna struja kreće se u granicama 1 do 5% struje indukta, pri čemu se manja vrednost odnosi na mašine većih snaga. Za postizanje potrebne magnetopobudne sile, pošto je struja magnećenja mala, potrebno je da paralelni namotaj ima veliki broj navojaka. Otpor paralelnog namota je velik.
- *redna (serijska) pobuda*, kod koje je pobudni namotaj spojen na red sa namotom indukta. Za dimenzionisanje namotaja merodavna je struja indukta. Za postizanje odgovarajuće magnetopobudne sile, pošto je struja velika, broj navojaka namotaja redne pobude ne mora biti velik. Teži se da otpor rednog namotaja bude što manji, kako bi pad napona na njemu bio što manji.

- *složena pobuda*, gde pored glavnog, nezavisnog ili paralelnog, postoji i pomoćni, redni pobudni namotaj. Učešće pojedine pobude u ukupnoj *mps* uslovljava *izlazna karakteristika mašine*, tj. zahtevana zavisnost napona na priključcima od struje opterećenja za generator, odnosno brzine obrtanja o razvijenom momentu (za motore). U zavisnosti od toga da li su glavni i pomoćni pobudni namotaj izvedeni tako da im se fluksevi potpomažu ili suprotstavljaju, razlikujemo aditivnu, odnosno diferencijalnu, složenu pobudu.

U upotrebi su sledeće oznake za krajeve pojedinih namotaja:

Tabela 10-1 Oznake krajeva namotaja mašina jednosmerne struje

namotaj	nova oznaka	stara oznaka
indukt	A1, A2	A, B
pomoćni polovi	B1, B2	G, H
kompensacija	C1, C2	G, H
redna pobuda	D1, D2	E, F
paralelna pobuda	E1, E2	C, D
nezavisna pobuda	F1, F2	I, K



Slika 10-3 Motor sa otočnom pobudom

10.5 Osnovne jednačine

Osnovne jednačine koje opisuju električne i mehaničke veličine kod električnih mašina jednosmerne struje su:

a) *indukovani napon u namotaju indukta*

$$E = k_E \Phi n, \quad (10-1)$$

b) *elektromagnetni momenat motora*

$$M = k_M \Phi I_a, \quad (10-2)$$

gde je I_a struja indukta,

c) *napon na priključcima jednosmerne mašine*

$$U = E \pm R_a I_a, \quad (10-3)$$

gde se predznak "+" odnosi na motore, a "-" na generatore, dok je R_a ukupni otpor indukta, koji obuhvata galvanski otpor svih namotaja koji su redno priključeni na indukt i prelazni otpor na komutatoru,

d) *brzina obrtanja, koja sledi iz gornjih jednačina:*

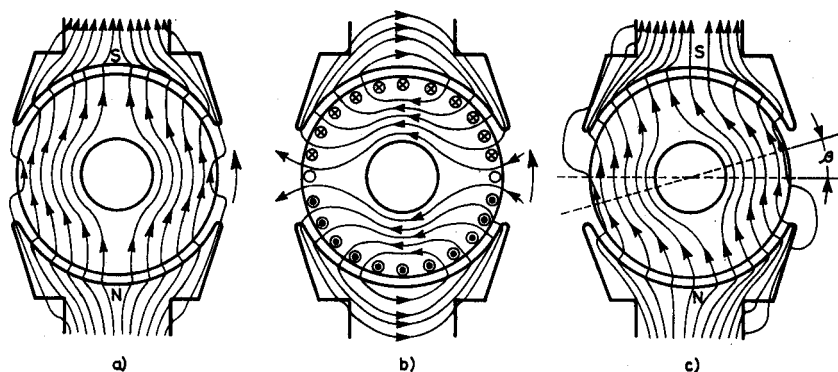
$$n = \frac{E}{k_E \Phi} = \frac{U \pm R_a I_a}{k_E \Phi}, \quad (10-4)$$

gde se predznak "-" odnosi na motore, a predznak "+" na generatore.

10.6 Reakcija indukta

U praznom hodu u mašini postoji samo magnetsko polje pobude, dok pri opterećenju, usled struje indukta ("reakcije indukta"), javlja se i magnetsko polje indukta. Mps indukta je poprečno postavljena u odnosu na mps induktora. Talas mps pobude ima oblik pravougaonika, dok je talas mps linearna funkcija obima indukta i ima oblik trougla. Reakcija indukta utiče kako na prostornu raspodelu fluksa u vazдушnom zazoru tako i na veličinu resultantog fluksa po polu.

Rezultanta raspodela fluksa je karakterisana povećanjem fluksa pod jednim krajem polnog nastavka i smanjenjem pod drugim krajem. Zbog zasićenja, ovo povećanje fluksa je manje od smanjenja, tako da se rezultatni fluks zbog reakcije indukta ipak smanjuje.

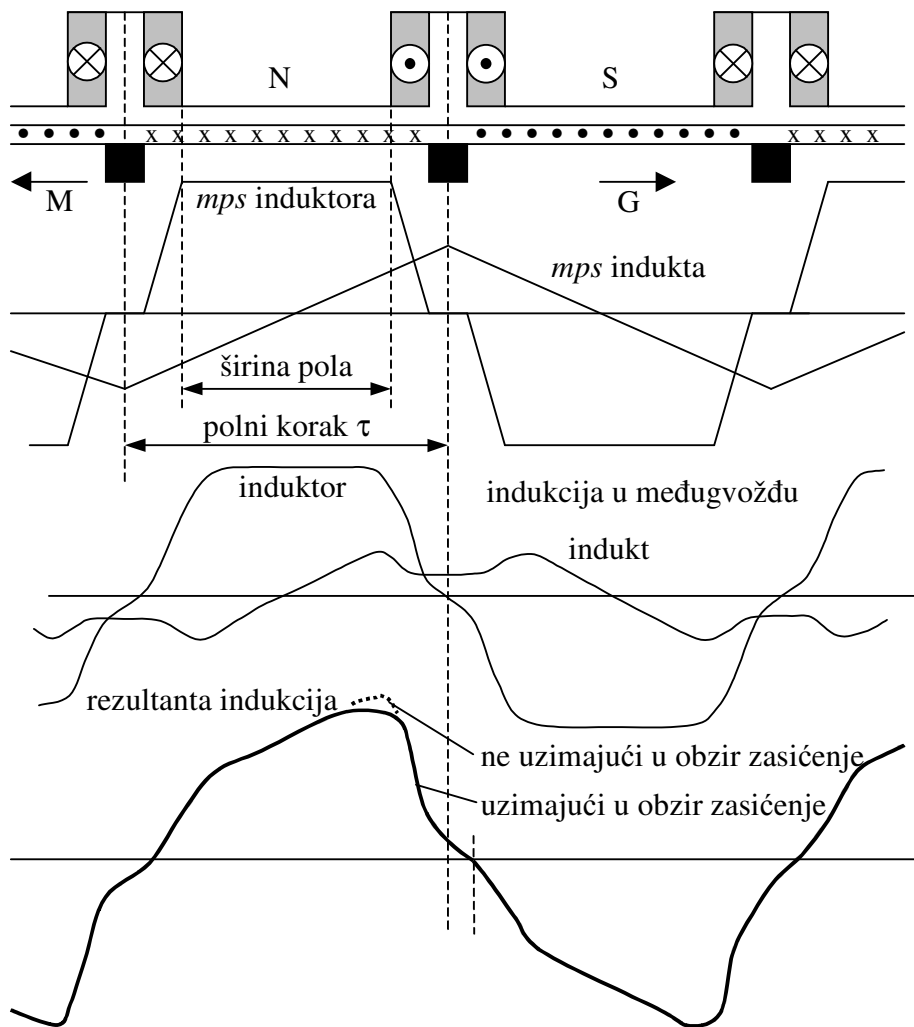


Slika 10-4 Reakcija indukta

a) polje pobude b) reakcija indukta c) resultantno polje

Nepovoljne posledice koje prate reakciju indukta, a vezane su za izobličenje resultantnog fluksa su:

- gubitak na elektromotornoj sili usled smanjenja resultantnog fluksa,
- lošija komutacija (funkcionisanje komutatora) usled pomeraja neutralne ose (zone). Navojni deo se prilikom komutacije još uvek nalazi u položaju u kojem ga zahvata jedan deo resultantnog, deformisanog, magnetskog polja. Do promene smera struje dolazi u nepovoljnom naponskom stanju navojnog dela, što za posledicu ima lošu komutaciju (varničenje).
- povećanje maksimalne indukcije izaziva veće gubitke u gvožđu i povećanje napona među susednim lamelama komutatora. U provodnicima indukta su naizmenične struje, a u gvožđu indukta se prostire naizmenično magnetsko polje. Gubici u gvožđu zavise, pored ostalog, i od kvadrata maksimalne indukcije (B^2). Indukovana *ems* između dve susedne lamele je linearno proporcionalna sa maksimalnom indukcijom. Dozvoljena maksimalna vrednost ove *ems* zavisi od otpora navojnog dela i kod mašina srednjih snaga iznosi oko 35V. Ako vrednost *ems* pređe dozvoljenu maksimalnu vrednost, može doći između dve susedne lamele do preskoka varnice, odnosno uspostavljanja malog luka zbog gorenja ugljene prašine. Pošto se mašina obrće, svi navojni delovi dolaze u položaj najveće indukcije, pa se mali lukovi između susednih lamela pretvaraju u veliki luk po čitavom obimu (tzv. kružna vatra). Pošto je otpor luka neznan, nosači četkica suprotnog polariteta dolaze u kratak spoj.

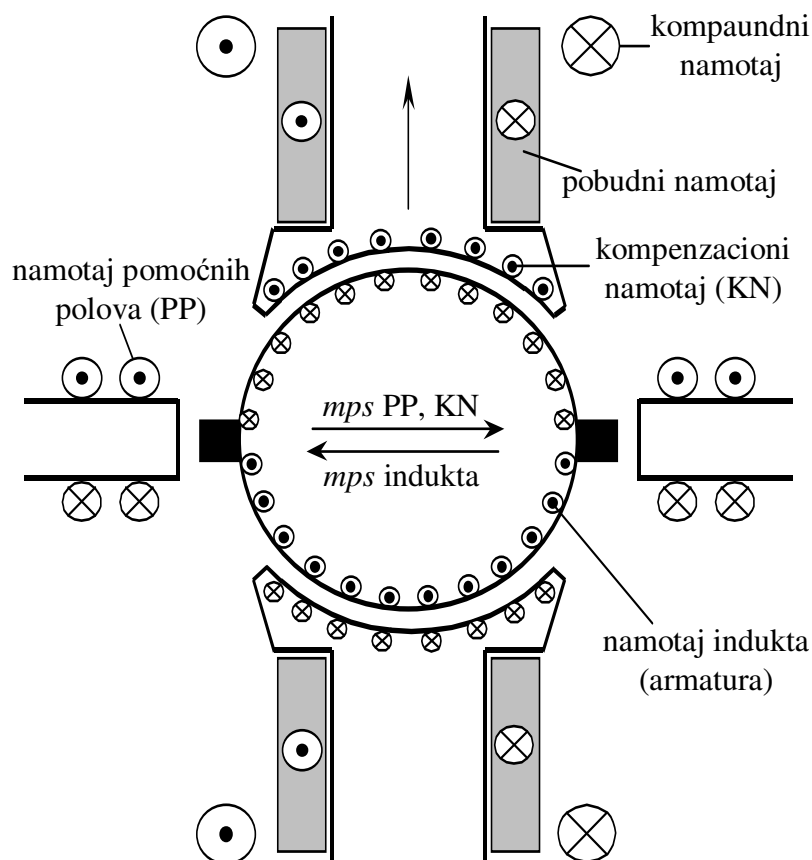


Slika 10-5 Reakcija indukta – oblik resultantnog magnetskog polja

Mere koje su preduzimaju u cilju suzbijanja ovih nepovoljnih posledica su:

- pomeranje dirki u stvarnu neutralnu zonu. Ovo je najstarija i praktično napuštena metoda. Pomoću posebne poluge se celi nosač dirki stavlja u stvarni položaj neutralne zone.
- uvođenje dodatnih namotaja čija *mps* ima zadatak da poništi delovanje reakcije indukta. Za poništenje reakcije indukta u prostoru ispod glavnog pola se upotrebljavaju *kompaundni* i *kompensacioni* namotaj. *Kompaundni namotaj* je najjednostavnije i najjeftinije rešenje, ali koje deluje samo na izbegavanje gubitaka u indukovanj *ems*. Sastoji se od nekoliko navojaka žice velikog preseka namotanih oko glavnih magnetskih polova. Kroz taj namotaj puštamo struju indukta u istom smeru kao i struju pobudnog namotaja. *Kompensacioni namotaj* je

najbolje, ali najskuplje rešenje. Smešten je u žlebove na polnim nastavcima statora, kroz provodnike se pušta struja indukta, ali tako da je smer struja suprotan. Za poništenje reakcije indukta u prostoru između glavnih polova upotrebljava se *namotaj pomoćnih polova*, koji je fizički smešten na simetrali između glavnih polova. Glavna funkcija namotaja pomoćnih polova je poboljšanje komutacije. M_{ps} kompenzacionog namotaja mora biti jednaka i suprotna m_{ps} indukta, dok kod namotaja pomoćnih polova m_{ps} mora biti takva da prvo poništi m_{ps} indukta, a zatim da stvori jedno suprotno polje radi poboljšanja komutacije.

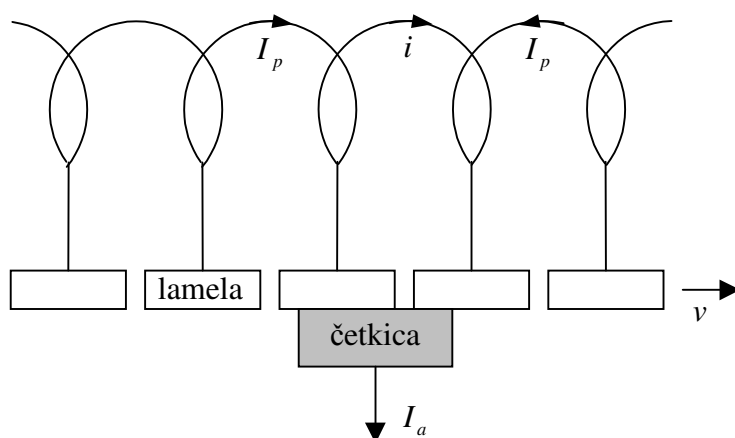


Slika 10-6 Namotaji mašine jednosmerne struje

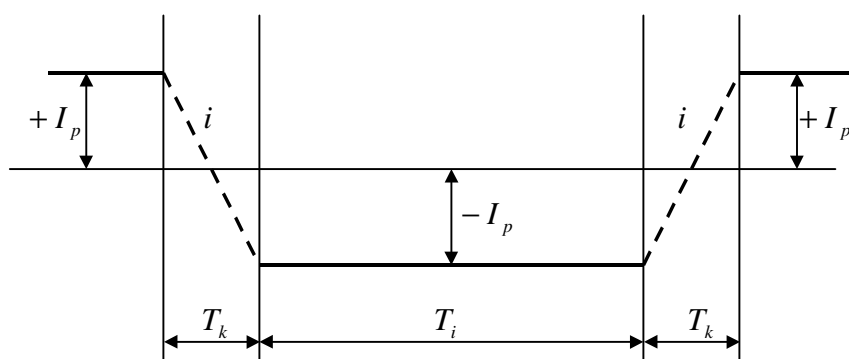
10.7 Komutacija

Pod komutacijom podrazumevamo proces promene smera e_{ms} , odnosno struje prilikom prolaska navojka ili navojnog dela kroz neutralnu osu. Za vreme trajanja komutacije, T_k , dirke kratko spajaju navojak ili navojni deo. Vreme za

koje je struja konstantna označimo sa T_i . Struja provodnika (grane) sa vrednosti $+I_p$ prvo pada na vrednost nula, a zatim raste u suprotnom smeru do vrednosti $-I_p$. Kvalitet komutacije ocenjuje se prema njenim posledicama, koje se manifestuju u pojavama varničenja između komutatora i dirki. Loša komutacija se ogleda u znatnom iskrenju kod naznačenog opterećenja ili kod manjih preopterećenja. Komutacija bez varničenja je neophodan uslov sigurnog i dugog rada mašine jednosmerne struje. Uzroci loše komutacije mogu biti mehanički (neokruglost i istrošenost komutatora, vibracije komutatora, površinsko oštećenje dirki i komutatora, loše vođenje četkica u držačima, neispavan pritisak ili smer pritiska na četkice itd.) i električki (uticaj otpora i *ems* usled samo i međuinuktivnosti). U električnom pogledu, na komutaciju najviše utiče otpor četkica, položaj četkica u odnosu na neutralnu osu i delovanje pomoćnih polova.



Slika 10-7 Navojni deo u komutaciji



Slika 10-8 Vremenska promena struje u navojnom delu

Promenu struje prilikom komutacije $i(t)$ označili smo, za početak, pravom, crtkanom linijom. Uz određena pojednostavljenja i pretpostavke, može se doći

do analitičkih izraza koji približno opisuju promenu struje prilikom komutacije. Budući da je ostvarenje dobre komutacije više rezultat iskustva nego naučne analize, ovde se nećemo baviti kvantitativnom analizom, već ćemo definisati uticajne veličine prilikom komutacije i navesti mere koje se preduzimaju u cilju poboljšanja komutacije.

Veličine koje utiču na oblik krive komutacije su sledeće:

a) otpori

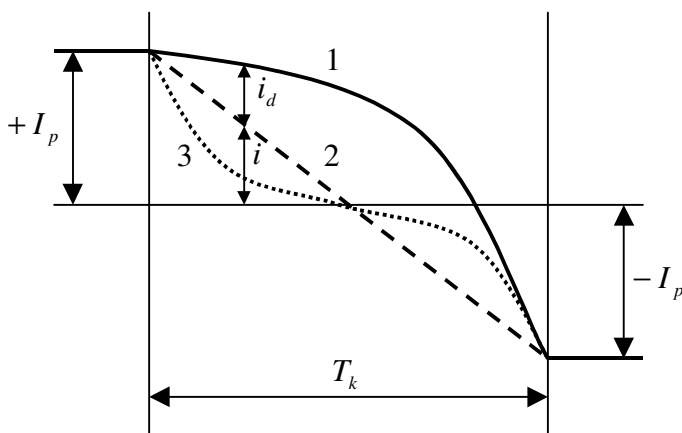
- prelazni otpor četkica,
- otpor kratkospojenog navojnog dela koji komutira,
- otpor spojnih vodova (veza) između navojnog dela i lamele komutatora.

b) *ems*

- spoljnjeg kola, e_k , koji se u navojnom delu indukuje kada četkica ne stoji strogo u liniji neutralne ose,
- usled samoinduktivnosti navojnog dela e_L i
- usled međuinuktivnosti, e_M , koja se javlja ako širina četkice premašuje širinu komutatorske lamele $b_c > b_l$ i ako se komutacija dešava u više navojnih delova.

Slika 10-9 prikazuje oblike krivih komutacije za sledeće slučajeve:

- crtkano – idealna otporna komutacija, uzet je u obzir samo prelazni otpor četkica, dok su ostale uticajne veličine zanemarene,
- tačka-tačka otporna komutacija kod koje su uzeti u obzir svi otpori, a zanemaren uticaj *ems*,
- puna linija – komutacija kod koje su uzeti u obzir i *ems* usled samoinduktivnosti e_L . Sa i_d je označena dodatna struja komutacije usled *ems*, koja se superponira na struju idealne otporne komutacije.

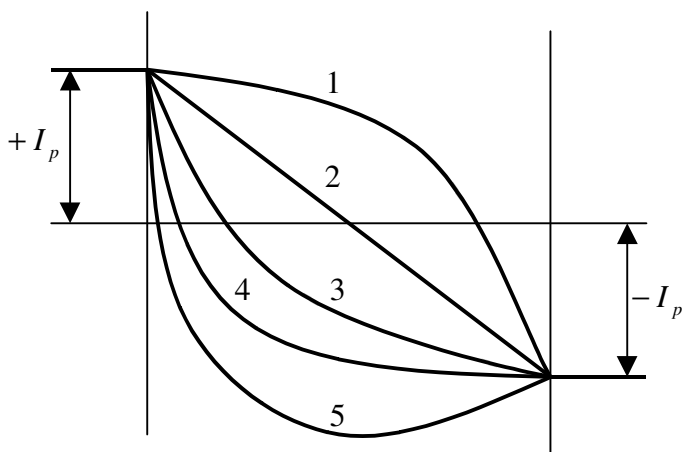


Slika 10-9 Krive komutacije uz određene vrednosti uticajnih veličina

E_{ms} usled samoinduktivnosti e_L sprečava promene struje u kolu (u analogiji mehaničkih i električnih kola induktivnost predstavlja inerciju), pa deluje u smislu usporavanja komutacije. E_{ms} usled međuinduktivnosti, e_M , je slična po svojoj prirodi e_L , dok e_{ms} spoljnog kola, e_K , može da ima različite predznake, tj. može da deluje u jednom ili drugom smeru, zavisno u kakvom se polju po polaritetu, severnom ili južnom, nalazi navojni deo koji komutira.

Nepovoljni slučaj, koji se izbegava, jeste pojava preterano velike gustine struje na jednom delu površine četkice, što može da izazove cepanje opne i varničenje u toj tački. Pogotovo je opasna velika gustina struje na zadnjim (izlaznim) krajevima četkica, kod usporene komutacije, jer varničenje na njima može da dovede do pojave kružne vatre, za razliku od varničenja na prednjim krajevima četkica kod ubrzane komutacije, koje je ipak manje opasno jer sama četkica predstavlja prepreku za prenošenje varnica po obimu komutatora. E_{ms} usled samoinduktivnosti, e_L , značajno pogoršava komutaciju, te bi kod mašina malo većih snaga čak i onemogućila rad, kada je ne bismo suzbili.

Sa "linearnom" komutacijom, (Slika 10-10, karakteristika 2), kod koje se kontaktna površina ravnomerno koristi za prolaz struje, odnosno kod koje je gustina struje po površini četkice konstantna tokom celog procesa komutacije, mogli bismo biti uglavnom zadovoljni. Idealna bi bila ona komutacija kod koje je na izlaznoj ivici četkice gustina struje što manja (karakteristika 3 i 4).



Slika 10-10 Krive komutacije

Prvi uslov za dobru komutaciju je relativno veliki prelazni otpor četkica, u odnosu na otpor veza (dovoda) i navojnih delova, što se postiže upotrebom četkica od ugljena odnosno grafita. Poboljšanje komutacije na ovaj način je moguće samo kod mašina malih snaga, do 1kW. Za mašine većih snaga se primenjuju dodatna sredstva, pre svega pomoćni polovi.

Pomoćni polova imaju zadatak da suzbiju e_{ms} usled samoinduktivnosti e_L . Magnetsko polje pomoćnih polova izaziva u navojnom delu suprotnu e_{ms} u odnosu na e_L , pa je na taj način neutrališe. Pomoćni polovi moraju da budu pravilno dimenzionisani kako bi se dobila odgovarajuća komutacija. Slika 10-10, kriva 5 prikazuje komutaciju uz prejako delovanje pomoćnih polova.

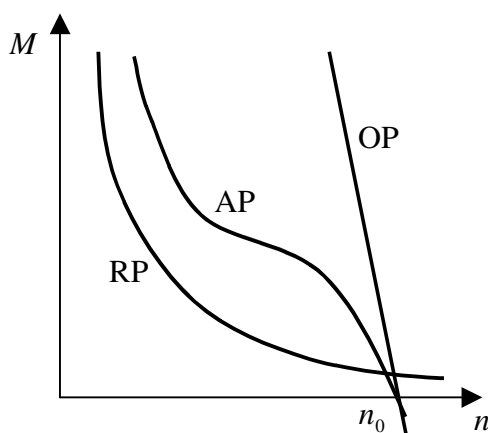
Jedna od mera za poboljšanje komutacije je i pomeranje dirki u stvarnu neutralnu osu.

Problem vezan za komutaciju, odnosno postojanje sistema komutatora i dirki, usložnjava održavanje mašina za jednosmernu struju i isključuje ih u područjima primene sa zapaljivom i eksplozivnom okolinom.

10.8 Karakteristike momenta motora

Karakteristike momenta (mehaničke karakteristike) predstavljaju zavisnost momenta od brzine obrtanja, $M=f(n)$. Kod motora jednosmerne struje njih prvenstveno određuje sistem pobude, i one mogu biti:

- "tvrde" kod kojih se brzina obrtanja vrlo malo menja sa promenom momenta opterećenja, koju srećemo kod otočno (paralelno) pobuđenih motora, oznaka na slici OP,
- "meke" kod kojih se značajno menja brzina obrtanja sa promenom momenta opterećenja, koju srećemo kod redno pobuđenih motora, oznaka na slici RP,
- celo područje između ove dve karakteristike može da se ostvari primenom jednosmernih motora sa složenom aditivnom pobudom, oznaka na slici AP.



Slika 10-11 Karakteristike momenta motora jednosmerne struje

10.9 Pokretanje motora jednosmerne struje

Da bi se smanjili udari struje i naprezanja u motoru pri pokretanju (startovanju), motor se priključuje na sniženi napon koji se može menjati otpornikom za pokretanje, upravljivim ispravljačima i neupravljivim ispravljačima sa regulacionim transformatorom. Otpornici za puštanje u pogon (zaštitni otpornici, pokretači) su višestepeni, kako bi se osigurala postepenost puštanja, odabrani tako da ograniče struju pokretanja npr. na dvostruku vrednost naznačene struje i dimenzionisani samo za kratkotrajni rad, ako nisu predviđeni i za regulaciju brzine obrtanja.

10.10 Regulisanje brzine obrtanja nezavisno pobuđenog motora

Motor jednosmerne struje je mogućnost kontinualnog regulisanja brzine obrtanja u širokim granicama održala u konkurenciji sa naizmeničnim motorima kod pogona sa promenljivom brzinom obrtanja. Prema ranije navedenom izrazu,

$$n = \frac{E}{k_E \Phi} = \frac{U - R_a I_a}{k_E \Phi}, \quad (10-5)$$

brzinu obrtanja motora jednosmerne struje možemo vršiti na tri osnovna načina:

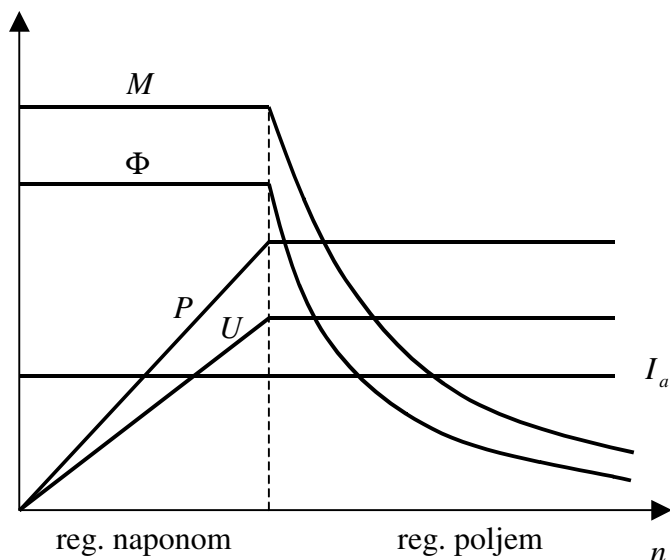
- promenom napona napajanja,
- promenom magnetnog fluksa pobude, tj. struje pobude i
- promenom otpora u kolu indukta.

Od ova tri navedena načina, praktično se primenjuju prva dva načina.

Regulacija naponom je efikasna počevši od brzine obrtanja jednakoj nuli, pa do brzine koja odgovara naznačenom naponu motora, uz neku konstantnu, obično naznačenu pobudu. To je veliki opseg regulacije, i kod mašina sa nezavisnim hlađenjem, u odnosu na brzinu obrtanja, motor se u celom ovom opsegu može opteretiti konstantnom strujom, odnosno konstantnim momentom (uz konstantnu pobudu), tako da je snaga motora proporcionalna brzini obrtanja, odnosno približno proporcionalna sa naponom. Kod motora hlađenih ventilatorom, kod manjih brzina se mora smanjiti struja, odnosno momenat, da ne bi došlo do pregrevanja.

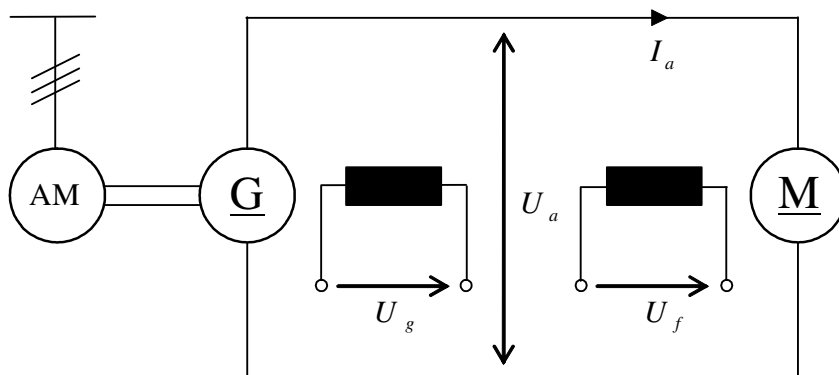
Regulacija poljem se sprovodi tako da se priključeni napon drži na konstantnoj vrednosti, a magnetsko polje se smanjuje smanjenjem struje pobude. Opseg regulacije je otprilike 2:1 za motore normalne izvedbe, tj. sa regulacijom brzine se može ići do dvostruke vrednosti u odnosu na brzinu kod punog magnetnog fluksa. Daljnje smanjenje fluksa se ne praktikuje, jer bi rad motora mogao da postane nestabilan, te može lako da pobegne (eksplozija kolektora), nastupaju poteškoće kod komutacije, jer se smanjuje vreme komutacije T_k , a mora se voditi računa i o mehaničkim naprezanjima usled centrifugalnih sila koja rastu sa kvadratom brzine obrtanja

Za regulaciju brzine motora jednosmerne struje prirodno je da se konstantni momenat postiže regulacijom napona, dok se konstantna snaga postiže regulacijom poljem. Konstantnu vrednost struje I_a možemo da obezbedimo samo nezavisnom ventilacijom.



Slika 10-12 Princip regulacije brzine obrtanja

Vard-Leonardova grupa predstavlja klasičan način upravljanja motorom jednosmerne struje (Slika 10-13). Grupu mašina sačinjavaju asinhroni motor, koji pokreće generator jednosmerne struje koji, pak, napaja motor jednosmerne struje čijom brzinom obrtanja upravljamo. Pobudom generatora reguliše se napon motora, dok se menjanjem pobude motora sprovodi regulacija poljem. Danas je Vard-Leonardova grupa uglavnom potisnuta pogonom sa *tiristorskim konvertorom* umesto generatora sa asinhronim motorom.



Slika 10-13 Vard-Leonardova grupa

Ako je za napajanje motora za jednosmernu struju na raspolaganju izvor jednosmerne struje (akumulatorska baterija ili neregulisani ispravljač) kontinualno podešavanje napona može se vršiti pretvaračem jednosmernog napona u jednosmerni (*čoper*).

10.11 Univerzalni motor

Univerzalni motor je kolektorski motor koji se može priključiti i na jednosmerni i na naizmjenični izvor napajanja. Zbog male cene, dobrih pogonskih karakteristika i jednostavnog održavanja, nalazi se u primeni u stotinama sitnih elektromotornih pogona, posebno u električnim aparatima u domaćinstvima.

Ovde se koristi činjenica da se sa promenom polariteta priključenog napona (i na pobudnom namotaju i na četkicama) ne menja se smer obrtanja motora jednosmerne struje. Dakle, u principu se motor jednosmerne struje može priključiti na naizmjeničnu (jednofaznu) mrežu i on će imati iste fizičke osobine kao i da je priključen na jednosmernu mrežu. Da bi tehnički iskoristili ovu mogućnost, potrebno je da celo magnetsko kolo (statora i rotora) bude napravljeno od tankih feromagnetskih limova.

Za sasvim male snage (ispod 0,5kW) izrađuju se, po pravilu dvopolni, redni motori bez pomoćnih polova (i bez kompenzacionog namotaja) za brzine obrtanja preko 10000 ob/min za ručne alate i druge ručne elektromotorne uređaje, oko 15000 ob/min i više za usisivače i mikse, te oko 30000 ob/min za mlinove za kafu. Važno je primeniti da su brzine obrtanja sa napajanjem jednosmernom strujom nešto veće nego sa napajanjem naizmjeničnom. Karakteristika momenta im je ograničeno meka, tako da obično mogu da izdrže prazni hod. Na svakom polu imaju po jednu četkicu, koje u radu varniče plavičasto. Zbog varničenja i široke opšte upotrebe, univerzalni motori izazivaju radio i televizijske smetnje, koje se ograničavaju dogradnjom kondenzatora ili prigušnica.

LITERATURA

- [1] J. Nahman, V. Mijailović, *Visokonaponska postrojenja*, Beopres, Beograd, 2000.
- [2] D. Perić, *Elektrane i razvodna postrojenja, Ideo, Proizvodnja električne energije*, Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1996.
- [3] D. Matić, S. Bjelić, *Elektroenergetska postrojenja*, Viša tehnička škola, Zvečan, 1996.
- [4] M. Đurić, *Elementi elektroenergetskih sistema*, Nauka, Beograd, 1995.
- [5] N. Nikolić, M. Petrović, *Opasnost i zaštita od električne struje*, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
- [6] M. Petrović, *Električne mašine i postrojenja*, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [7] Đ. Kalić, *Transformatori*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1991.
- [8] B. Mitraković, N. Lj. Nikolić: *Asinhrona mašine*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [9] B. Mitraković, *Sinhrona mašine*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [10] B. Mitraković, *Mašine jednosmerne struje*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [11] *Tehnička enciklopedija*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1980.
- [12] V. Knap, P. Kulišić, *Novi izvori energije*, Školska knjiga, Zagreb, 1985.
- [13] H. Požar, *Rasklopna postrojenja*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1978.
- [14] B. Jurković, Z. Smolčić, *Kolektorski strojevi*, Školska knjiga, Zagreb, 1986.
- [15] D. Keler, M. Maričević, V. Srb, *Elektromonterski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- [16] D. Perić, S. Vujošević, M. Milanković, V. Vasiljević, *Edukacija za projektovanje električnih instalacija pomoću računara*, simpozijum YUINFO, Kopaonik, 1999.
- [17] I. Vlajić-Naumovska, *Protection from Electric Currents in Mining-Power Complex*, međunarodni integrisani simpozijum TIORIR 11 – ISTI, ORRE i IRSE, Zlatibor, Srbija, 2011.
- [18] Web i CD prezentacije firmi: Minel-trafo, Mladenovac; Sever, Subotica; Beogradelektro, Beograd